

민군겸용기술사업
응용 단계 보관용
최종 보고서

BSPN440-00-1456-2

체계운용을 위한 가상해양환경 분석기술

Development of Virtual Ocean Environment System
for Operational Use

한국해양연구원

과학기술부

주 의

1. 이 보고서는 과학기술부에서 시행한 특정연구사업의 연구결과 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술부에서 시행한 특정연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “체계운용을 위한 가상해양환경 분석기술”의 보고서로 제출합니다.

2002 . 9 . 30.

주관연구기관명 : 한국해양연구원

주관연구책임자 : 김 창 식

참 여 연 구 원 : 이종찬 변상경 석문식 장경일 김철호 정경태
오병철 심재설 김성대 장찬주 김선정 백원대
이수현 임학수 윤종주 김지웅 김진원 김덕자

위탁연구책임자 : 노영재(충남대) 노의근(연세대) 기재석(삼척대)

외부전문위원 : Peter Chu (미국해군대학원)

Tony Song (미국 CalTec/JPL)

참 여 기 업 : (주)서울일렉트론 (주)한국미디어테크 (주)KCEI

공동연구기관명 : 기상연구소

공동연구책임자 : 서장원

참 여 연 구 원 : 윤용훈 남재철 정효상 홍성길 조하만 조천호
김태희 이호만 황승언 나득균 봉종헌 배군일
박상욱 남효원 이정환 김회철 서은진 장유순
서태건 안병숙 이윤경 박효순 오희진 강윤정
김영동 박선화 이현정 임주연 한주영 김선희
변영호 김소원 김충기 남숙영 임효혁 엄향희
문선옥 이경선 박선주 전원선 이현정 구순모
강윤정

위탁연구책임자 : 안중배(부산대) 최효(강릉대)

참 여 기 업 : (주) 태민 메카트로닉스

요 약 문

I. 제 목 : 체계운용을 위한 가상해양환경 분석기술

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구 필요성

최근 환경의 중요성과 함께 발달되는 컴퓨터의 계산 속도와 처리 능력은, 지난 수년 전만 해도 감당할 수 없었던 수백 Tera급 자료를 처리한다. 특히, 해양이나 대기와 같은 큰 규모의 자연현상에 대한 장기적이고 상세한 공간 구조의 변화 분석을 위해서는 실시간에 가까운 수치 시뮬레이션을 요구하고 이로부터 엄청난 시뮬레이션 자료가 생산된다. 하지만 이렇게 생산된 방대한 양의 자료들은 거의 보지 못하고(아니 볼 수 없을 정도로 많고) 극히 제한된 양의 자료만이 보편화된 방법의 자료 검색엔진을 통해 사용된다. 즉 보다 정확한 현상 규명을 위해서는 복잡하고 수많은 격자에서 계산되는 수치 모형의 충분히 분석할 만한 자료 분석 틀이 결여된 현재 상황에서는 시뮬레이션 할 수 있는 방법이 없다는 뜻이다.

자연의 물체 또는 구조를 정확하게 인식하기 위해서는 사물의 원근감이 생명이다. 크기와 색상 그리고 배경에 대한 감각은 기존의 2차원적 컴퓨터 그래픽스로서는 구현하기 어렵다. 최근 컴퓨터그래픽스기술의 발달로 3차원적 그래픽을 제시하기 위해서 소위 'perspective plot' 모드를 많이 사용하지만, 이 방법에 의한 그래픽은 원근감이 포함된 입체감과 회전시 진정한 입체적 뒷면을 보는 것이 아닌 일종의 3차원 'trick'을 제공한다.

최근 개발된 몰입성 VR기술을 이용한 3차원 입체 영상으로부터 거리 원근감을 유지하면서 회전시키고 끌어당겨 보다 상세한 구조가 분석될 수 있다. 이러한 점을 이용하면 자연의 현상도 보다 정밀하고 상세하게 분석되고 규명될 수 있다. 예를 들면 렌더링된 해저 지형 위에 유속의 방향과 속도를 입체화시킴으로써, 해저지형의 형태에 의한 해수의 흐름장의 변화를 분석할 수 있다. 즉 해저환경을 VR 이미지화 하면, 단순한 contour plot으로 해석될 수 없는 현상을 재현하고 분석하는데 매우 유용하다.

최근 들어 세계 각 국의 해군 작전능력은 2차 세계대전 이후의 깊은 바다에 대한 해군력보다는, 보다 소형이고 소음이 적으며, 잠수기간이 길어진 잠수함의 개발로 인하여, 연안해양환경에 대한 지식의 중요성이 증가하고 있다.

해양에서의 해류의 흐름과 밀도의 변화를 일으키는 각종 현상은 정밀한 수치모형으로부터 예측될 수 있으며, 시간에 따라 변화하는 해양의 물성구조에 대한 특성 파악은 수중 수영작전, UUV 작전, MCM 작전, 천해 ASW와 잠수함 운영 등에 필수적이다. 미국과 같은 해군력 선진 외국에서는 정확하고 분해능이 매우 높으며 시간을 포함하는 4차원 해양환경의 변화구조를 해군의 연안작전에 활용한다. 이렇게 연안 해군 작전에 적합하게 활용될 수 있는 해수 흐름과 물성 특성은 수평적으로는 10m-1km의 분해능, 수직적으로는 수m간격, 그리고 시간적으로는 수 시간에서 수일의 시간 분해능을 필요로 한다. 이러한 중요성과 응용성을 고려하여, 본 연구에서는 가상현실 기법과 해양환경 시뮬레이션과의 접목기술을 활용하여 군사적으로 활용도가 높은 가상해양전장환경의 구축과 민간 해양환경분석에 널리 활용될 가상해양환경 시스템의 구축이 필요한 시점이다.



[연구과제의 목표 결과의 하나인 가상해양 전장환경의 개념도]

2. 연구개발 최종목표

해양환경(해저면부터 해수면 밖 해양기상권까지 포함)의 현재 그리고 미래의 상태를 가상현실기법을 응용하여 5차원 (공간 3차원, 회전, 애니메이션) 구조로 표출하는 가상해양환경 시스템(하드웨어와 소프트웨어 통합)을 개발하고, 이를 이용하여 각종 해군(해병 포함)작전 시뮬레이션, 해양환경 및 기후변화에 대응한 시뮬레이션과 분석에 활용할 수 있는 미들웨어 통합시스템을 구축한다.

【 가상현실의 특성: 현장 몰입성, 컴퓨터와 인간과의 상호 의사교환, 원격 사용자간의 동시 분석 등을 할 수 있는 5차원 컴퓨터 그래픽스 표출기술: 5차원 가시화(Visualization in 5D), 상호작용(Interaction), 협동성(Collaboration), 몰입성(Immersion) 】

3. 사업 단계별 목표

단계 구분	연구개발 목표
응용개발 단계(1999-2001) •해양물리 환경의 분석 및 예측기술 •해양기상 특성 분석 및 예측기술 •해저지형 특성 •가상해양환경의 구축 및 응용기술	•5km이내 격자의 해양예측 및 모니터링 시스템과 연계되어 5차원 전장환경으로 표출하는 기술을 개발하고, 몰입형 입체적 이미지가 운용자의 위치 변화 의지와 의사교환이 가능한 가상해양환경 시스템을 구축 •동굴식(CAVE) VR표출 영상막 국산화 저작 설치로 10억원 이상 외화 절감.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

구 분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위	비고
1차년도 (1999)	계절별/월별 해양 및 해상기상 요소의 10km 이내 격자망의 3차원 자료 가시화 및 해양 상태의 5차원 가상 환경화 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> -광역 해양모델 (수평격자 10 km급) 3차원 해수유동 모델의 수립 및 각종 외력에 대한 연안모델 수립 (5 km급 정밀성 유도) -해안 및 해저지형 자료 모델링 및 렌더링기술(38°N - 39°N, 동해안-독도해역) (100 m 급) -해군의 해양기상자료 3시간 간격 실시간 자료수집 시스템 구축 -중규모 기상모형 MM5에 의한 해상풍 및 해무 48시간 예측시스템 구축 -VRML을 이용한 인터넷 3차원 가시화 기반기술수립 -가상현실재현장치의 운용을 위한 영상실험실 부분 구축 (시스템 도입 및 시험운영) 	해양환경요소 (수온, 염분, 음속, 3차원 유속, 심해 및 천해 파랑, 연안류, 해저 및 해안지형)

구 분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위	비고
2차년도 (2000)	해양 및 해상기상 환경요소의 5km이내 격자망 규모의 원격 분산생산자료의 동영상 실시간 가시화 제시 및 통신망 연동에 의한 5차원 가상 해양환경 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> -표층혼합층 (수심 10 m 간격)의 변동 및 해수특성 변동자료 생산기술 -수평격자 5 km급 동해 3차원 해양모델 수립 및 월별/순별 해양자료 예측 및 기존자료와의 검증 -국지정밀 3차원 해수유동 모델의 수립 및 각종 외력에 대한 해양환경자료 생산, 국립해양조사원/ 국립수진원/ 한국해양연구원/ 해정단/ 미국해군과 기타 DB 등 관측 및 정밀관측자료 비교 검증 -국지지역 해상풍, 해무 예측: MM5 응용, 수평격자 5 km 연직 25층, 시정계 설치 / 해상풍 관측자료 비교 검증 -잠수함 탐지를 위한 해상풍과 파랑에 의한 수중소음 및 MLD 예측 시스템 구축 	해양환경요소 (수온, 염분, 음속, 3차원 유속, 심해 및 천해 파랑, 연안류, 해저 및 해안지형) + 해저지구물리 특성 (가상자료 D/B : 실제 자료 치환 기능)

구 분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위	비고
2차년도 (2000)	해양 및 해상기상 환경요소의 5km이내 격자망 규모의 원격 분산생산자료의 동영상 실시간 가시화 제시 및 통신망 연동에 의한 5차원 가상 해양환경 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> -기상외력의 실시간 입력 및 100m 이내 파랑예보의 nesting 모델 구축 및 위성관측 파랑 자료와 검증부이, AWS, CC카메라, 시정계, SST관측에 의한 실시간 초기관측치의 자료동화 기법 확립 -동해연안류 3차원 유속 및 해수특성 검증 (관측/기존자료) -해안 및 해저지형 자료 렌더링 및 자료 GUI 편집기술 (38°N - 39°N, 동해안-독도해역) (해양조사원 정밀수치해도 활용) -VRML을 이용한 인터넷 3차원 가시화 기술 -가상현실재현장치의 운용을 위한 연계 소프트웨어의 개발 -VR device를 이용한 가상해양환경 스튜디오 구축 및 해양과 기상자료의 실시간 영상표출 시험운용 	해양환경요소 (수온, 염분, 음속, 3차원 유속, 심해 및 천해 파랑, 연안류, 해저 및 해안지형) + 해저지구물리 특성 (가상자료 D/B : 실제 자료 치환 기능)

구 분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위	비고
3차년도 (2001)	해상기상 및 해양 환경 요소의 1km이내 격자망 예측모형에 의한 구조를 5차원 가상해양환경으로 표출하는 시스템 개발 및 이를 해군 작전 시험평가에 시범 활용	<ul style="list-style-type: none"> -원격지 제3자에 의한 3차원 해양 수리 역학 모형 결과 및 임의 D/B 자료를 수용하여 동영상 정보화 할 수 있는 기술 (수치모형, D/B 치환기술) -임의 해상에서의 계류 유속 관측 및 항해에 의한 유속 구조 관측 자료의 실시간 전송 및 활용기술 -기상수치모형의 기상 해양 환경 모듈과의 on-line 연계 기술 -해상종합부이 시스템 (해상 기상, 수질, 해류, 원격 전송)의 상용화 -가상현실 재현장치의 조기 국산화 착수 -가상현실 재현 장치의 운용을 위한 초고속 S/W 변환기 개발 -가상해양환경 5차원 (3차원 공간, 회전, 애니메이션) 종합 모듈 시험운용 -교육 및 작전 도상훈련을 위한 사전 시뮬레이션 시험평가 	해양환경요소 (수온, 염분, 음속, 3차원 유속, 심해 및 천해 파랑, 연안류, 해저 및 해안지형)

IV. 연구개발결과

1. 1차년 연구결과

연구 내용	연구 결과
<p>동해분지 예측모형 (해양(연) 연구사업)으로부터 시험해역 개방 경계조건 추정기술 수립</p>	<p>(가) 동해분지해역의 해양예보시스템(해양수산부/한국해양연구소)과 연계, 수평간격 10~18km, 수직층수 18층의 POM 모델 수립 및 계절별 동해순환 재현/ 동안난류 이안과 북한한류 변동성 규명 실험/ 결과물 : 동해의 계절별 순환예측 모형에 의한 층별 T, S, U, V 자료 및 도면(파일CD), 국지해양모델로의 경계조건 입력 자료제공</p> <p>(나) 동해순환의 Near-real time 예측모델개발 동해의 수평 약 10km, 10개의 수직층에 대한 준실시간 순환예측모형을 개발/ 동해전역의 T, S 월별 Database 구축/ T-S data로부터 P-vector 방법에 의한 유속장계산 및 수심별 유속장 분포도면 작성, DB구축 ⇒ T, S, U, V의 DB 검색을 위한 웹페이지 구축 (http://model.cnu.ac.kr → vrocean 참조)</p>
<p>3차원 수리역학모형의 수립 및 계절별/월별 모델결과의 요소별 동영상 정보화 기술 수립</p>	<p>대상해역의 정밀 해양수리역학 예측모형 개발/ POM 이용시 MOM 이용 모델보다 수송량이 훨씬 많음/ 따라서 POM 알고리즘에 MOM에서 채택한 수직 Z-level 가변격자 적용모델 개발/ 1/12도 수평간격, 32개 Z-level 가변격자 (10m×5, 25m×4, 50m×3, 100m×7, 200m×13) 사용/ 입력조건 (유입유출량, 바람, 밀도, 월평균바람, heat flux 등)의 조합에 따른 시나리오별 민감도 실험/ 모델의 수립에 의한 8경우의 민감도 실험결과: 수온, 염분, 유속의 층별 분포자료 및 도면 (file CD)</p>
<p>해안 및 해저지형 자료 렌더링 기술 수립</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 동해안 및 해저지형의 Virtual Modeling 및 Volume Rendering 기술개발/37. N 울진-삼척지역의 3차원 가상해안-해저환경을 MultiGen을 이용하여 모델링/해저지형자료를 MultiGen 파일로 변환하는 프로그램저작 및 활용/netCDF 자료를 MultiGen 파일로 변환하는 프로그램 저작 (가상해안-해저 지형의 모델링 결과 CD) • 인공위성자료로부터 지상지점 측정을 통한 30m급 지상고도자료 추출기술수립, 자료의 DEM 및 DTED 자료로 변환기술 (위성자료로부터 추출 변환된 자료 및 도면 CD)

<p>10km 이내 격자 해상풍 및 파랑, 해무자료 생산 및 분배 모형 수립</p>	<ul style="list-style-type: none"> •해상풍, 해무 및 심해 파랑생산체계 및 자료분배 ⇒ (공동연구기관 기상연구소와 연계) •기상청 (기상연구소) 현업에서 생산되는 해상풍과 심해파랑정보의 본 연구사업과 직접 연계활용/ 심해파 WAM 결과를 받아 국지파랑예보 모델 수립(SWAN)/ 현재 WAM에서 SWAN (100m 격자)으로의 nesting 실험 완료/ Nesting한 파랑예측 결과 (파일, 파랑장 자료 및 도면)
<p>과학정보 및 지형정보의 VRML 전환기술 수립-</p>	<p>netCDF 및 Ascii 자료화된 과학정보 및 지형정보의 VRML 변환코드 개발을 위한 자료형태 및 코드분석기술 수립</p>
<p>가상현실 재현장치의 운용을 위한 연계 그래픽 소프트웨어 개발 및 대규모 과학자료의 실시간 영상정보화 기술 수립</p> <p>※ 해양환경요소 : (수온, 염분, 음속, 3차원 유속, 심해 및 천해 파랑, 연안류, 해저 및 해안지형)</p>	<ul style="list-style-type: none"> •사업홍보 및 기술교류를 위한 홈페이지 구축 (http://vrocean.kordi.re.kr) •동해 T, S, P-vector 유속 등의 월별, 층별 DB 제시를 위한 홈페이지 구축 (http://model.cnu.ac.kr → vrocean) •장세 기상자료의 교환 및 기상상태의 예측을 위한 GUI 모듈 개발(DUT-METRI-2000/ 기상연 참조) •가상해양환경센터 (스튜디오)의 부분적 구축 → 비주얼워크스테이션 SGI의 Onyx2 도입설치 및 운영 •SGI의 Onyx2에 VR 저작 및 rendering 소프트웨어 설치 및 해양자료의 시험운용 (Vis5D, VisAD, IRIS Performer, MultiGen, C++, F컴파일러 등)

2. 2차 연구결과

연구 내용	연구 결과
동해해역에서의 표층 혼합층 예측의 정밀도 향상	<ul style="list-style-type: none"> •해양혼합층 모형의 개선 및 해양순환모델과의 접합 <ul style="list-style-type: none"> - 성층관련 변수조정으로 순환모델에서 재현하기 어려운 급격한 수온약층 재현 가능 (정밀도향상)
동해해역의 준실시간 해수순환 수치모형개발	<ul style="list-style-type: none"> •동해해역의 T S 장기자료 DB화 및 분석으로 유속장계산과 유속의 장기DB 구축 •SST 표면고도 등의 자료동화 기법 도입, 모델의 실시간 예측 기반기술 수립
3차원 수리역학모형의 수립 및 연간 모델 결과의 요소별 동영상 정보화 기술 수립	동해해역의 정밀 해양수리역학 예측모형 개발, 1/12도수평간격, 23개 수직층, 모델결과 수온, 염분, 유속의 층별 연간 5일간격 자료생산 및 VR영상변환기술 수립
해안 및 해저지형 VR 영상화 기술	<ul style="list-style-type: none"> •동해안 및 해저지형의 Virtual Modeling 및 Volume Rendering 기술개발(Texture Mapping & VRML변환) •인공위성자료 및 정밀고도자료로 texture mapping 기술 개발
5km 이내 격자 국지 해상풍 및 파랑, 해무 자료 생산 및 분배 모형 수립	<ul style="list-style-type: none"> •해상풍, 해무 및 심해 파랑생산체계 및 자료분배 <ul style="list-style-type: none"> ⇒ (공동연구기관 기상연구소와 연계) •기상청 (기상연구소) 현업에서 생산되는 해상풍과 심해 파랑정보의 본 연구사업과 직접 연계활용 •DUT-METRI 2001 개발, 현업 기상정보를 5Km 격자망의 정밀정보 생산 및 분배 기술 수립
과학정보 및 지형정보의 VRML 전환기술 수립	정규 및 비정규 해양자료의 netCDF 변환 및 VR자료로 변환, 과학정보 및 지형정보의 Web3D 언어인 VRML 변환 기술 수립 (그림 참조)
가상현실 재현장치의 운용을 위한 연계 그래픽 소프트웨어 개발 및 가상해양환경실험실 구축: 30평규모 (일부)	<ul style="list-style-type: none"> •가상해양환경센터 (스튜디오)의 부분적 구축 <ul style="list-style-type: none"> → 비주얼워크스테이션 SGI의 Onyx2 도입설치 및 운영 •SGI의 Onyx2에 VR 저작 및 rendering 소프트웨어 설치 및 해양자료의 시험운용 (Vis5D, VisAD, IRIS Performer, MultiGen, C++, F컴파일러 등) •VR 영상표출 장치인 Barco 의 VR Table 설치 및 인터페이스 (스테레오, 임의 위치추적장치, 몰입영상 등) •국내 제작 4면 CAVE 설치 및 인터페이싱 (1개면 운용) <ul style="list-style-type: none"> →3차년도 확장운영 계획 •VR장치, 비주얼워크스테이션, 해양 및 기상자료 VR변환 등의 통합VR시뮬레이션 기술수립 •가상해양환경의 가시화기술 수립 <ul style="list-style-type: none"> → 국내제작CAVE와 VR Table 설치된 VR실험실 완공 및 운영

3. 3차년 연구결과

□ 가상해양환경의 구축 및 응용 기술

연구 내용	연구 결과
과학정보 및 지형정보의 VRML 전환기술 수립	<ul style="list-style-type: none"> •정규 및 비정규 해양자료의 netCDF 변환 및 VR 자료로 변환, 과학정보 및 지형정보의 Web3D 언어인 VRML 변환 기술 수립
가상현실 재현 장치의 운용을 위한 그래픽 소프트웨어 개발 및 가상해양환경 실험실 구축: 30평 규모	<ul style="list-style-type: none"> •가상해양환경시스템 구축 → 비주얼워크스테이션, VR Table (대각선1.8m), 국내제작 K-CAVE (2.1m x 2.1m 4개면 설치) •방대한 해양 및 기상, 해저지형 등의 해양환경 변동자료를 VR 영상화하기 위한 자료변환 기술확보 •VR 영상표출 장치인 Barco 의 VR Table 설치 및 인터페이싱 (스테레오, 임의 위치추적장치, 몰입영상 등) •해양 및 해저환경을 Web3D 기본언어인 VRML로 변환 기술 확보 •VR장치, 비주얼워크스테이션, 해양 및 기상자료 VR 변환 등의 통합 VR 시뮬레이션 기술수립
가상해양환경 시뮬레이션 센터 건립	정부지원 79억원, 연구원내 해양환경 시뮬레이션 센터 건립, 민군사업 개발 내용의 적용성 기반시설 확보
민군 응용성 파급	<ul style="list-style-type: none"> •기상연구소 현업지원 타당성 분석 연구사업 수주 •연구원내 시뮬레이션센터 운용의 핵심 기술 제공

□ 해양물리환경 분석 및 예측기술

연구 내용	연구 결과
동해 해역에서의 표층 혼합층 예측의 정밀도향상	<ul style="list-style-type: none"> •동해 해역의 표층혼합층을 정밀예측하기 위한 혼합층 모형과 해수순환모델인 MOM 의 결합모델 개발 •모델의 연간 연속 운영으로 표층혼합층의 시공간적 변화 예측 기술
동해 해역의 준실시간 해수순환 수치모형개발	<ul style="list-style-type: none"> •월별 T S 자료의 DB 구축 및 수심별 단면도 •P-vector를 이용, 유속장 계산 후 유속의 월별 DB 구축 •실시간 예측을 위한 SST 등의 자료동화 기법 기반기술 도입
3차원 수리역학 모형의 수립 및 모델결과의 요소별 동영상 정보화 기술수립	<ul style="list-style-type: none"> •POM을 이용, 동해해역을 5-8km 수평간격, 수직 23개 층 격자 구성하여 실제 지형, 외력, 수송량 등을 사용하여 매 5일간 연간자료화 및 VR 영상화 •최신 첨단 수치모델 ROMS를 수립하여 연안 현상의 정밀 예측 기술 수립 (연안담수 유입, upwelling 현상 등)

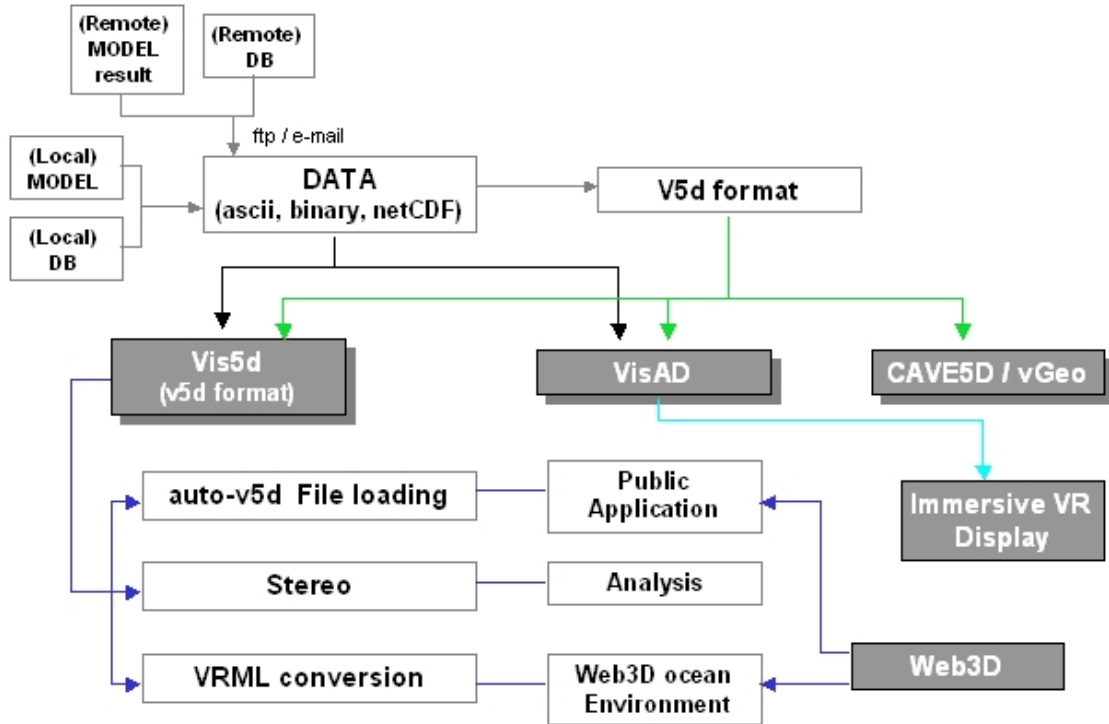
□ 해양기상 특성 분석 및 예측 기술

연구 내용	연구 결과
국지 해양기상 예측 모형개발 및 검증	<ul style="list-style-type: none"> • DUT-METRI-2000 개발 • DUT-METRI-2001 개발 • DUT-METRI-2002 VRML 개발 • 연차별 DUT-METRI 개발 및 입력 자료 및 해양기상 예측자료 DB화 구축
해무 자료 실시간 수집 및 모니터링 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 시정 모니터링 시스템 규격서 작성 및 조달 구매 • 해안감시 모니터링 시스템 구축 • 해무예측 및 검증시스템 구축
상세 국지 파랑예측시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 실시간 파랑예측 시스템 구축 • 해역별, 격자별 파랑예측시스템 구축
web 기반의 해양기상정보 제공시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 1일 2회 3시간 간격의 48h 해양기상예측 정보 제공 시스템 구축에 의한 실시간 자료 제공 (http://www.metri.re.kr/marweb)

□ 해저지형 특성

연구 내용	연구 결과
해안 및 해저 지형 자료 렌더링 기술 수립	<ul style="list-style-type: none"> • 북위 37도 울진-삼척간 VR 모델링 • 위성자료로부터 추출, 변환한 30m급 지형고도자료 렌더링 • 동서 남해 해저지형의 이미지 렌더링 및 VRML 변환

4. 민군사업 작업 현황



[VR 영상화를 위한 해양 및 기상, 해저환경자료의 변환과정 흐름도]



[반몰입형 입체 VR Table의 운영모습]
 대각선 1.8m의 영상테이블에 3차원 해양모델의 결과를 입체로 렌더링 하여 수중구조를 분석할 수 있다.

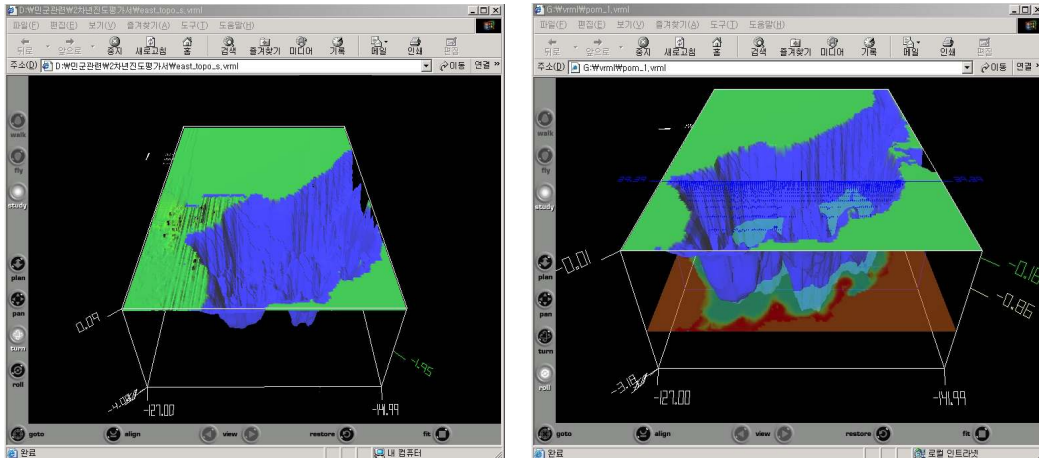


[가상해양환경 실험실의 일부인 K-CAVE가 설치되어 있는 모습]

한 면의 길이가 2.1m 인 정방형 스크린이 앞면, 오른쪽, 왼쪽, 바닥면에 설치된 4각 동굴형태의 K-CAVE. 바닷속 입체영상이 4개면에 표출되고 운영자가 이미지를 조정하여 현상을 분석하게 해준다.

[VRML 로 변환된 동해의 해저면]

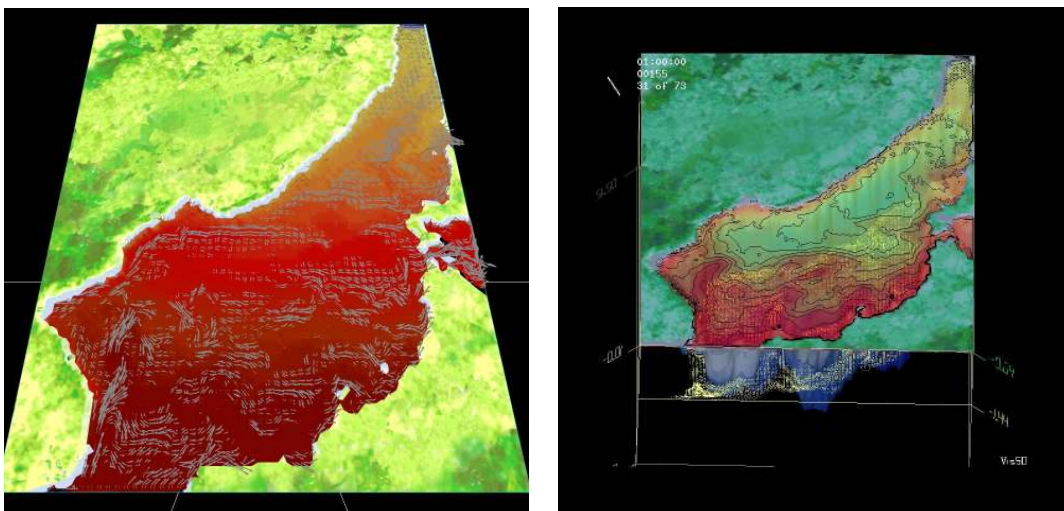
동해의 해저면 모양을 인터넷 3차원 언어인 VRML로 변환한 모습.
 마우스로 마음대로 회전, 이동하여 볼 수 있다.



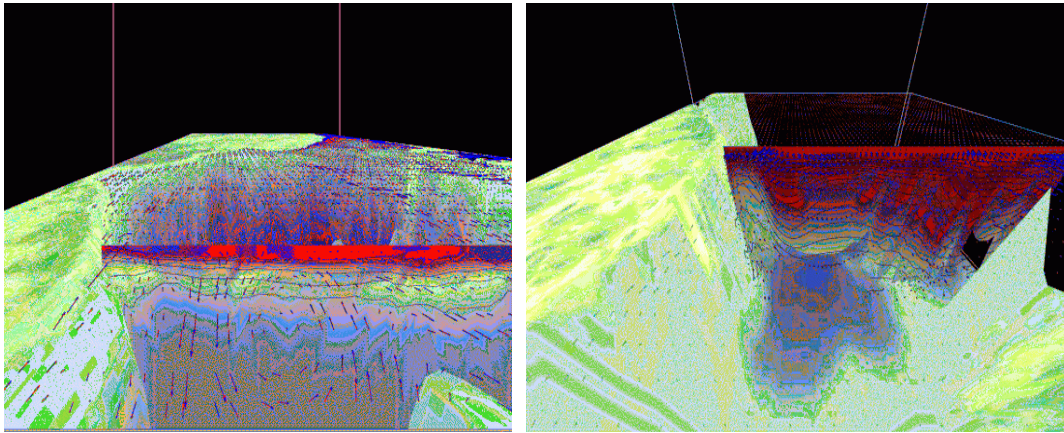
[POM을 이용하여 예측한 동해의 수중구조]

3차원 해양수치모델 POM을 이용하여 동해의 매일의 바닷속 상황을 재현하였다.
 수평격자는 1/12도, 수직으로는 23개의 층으로 나누었으며, 그 중 일부 수온과
 유속벡터 도면을 제시한다. 육지부분은 고도에 따라 텍스처 맵핑이 되어 있다.

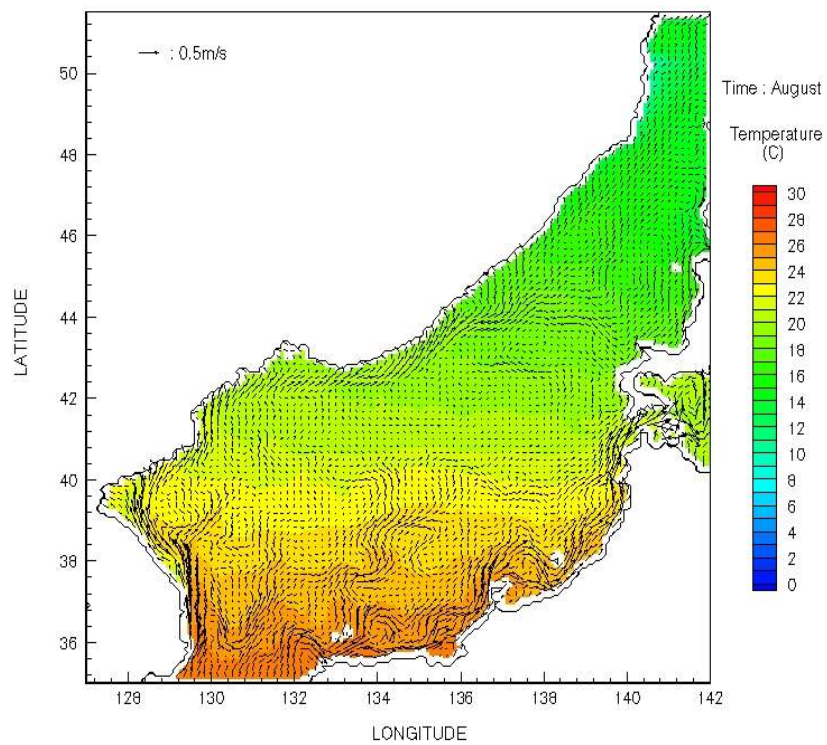
○ 8월의 표층수온과 유속 벡터도



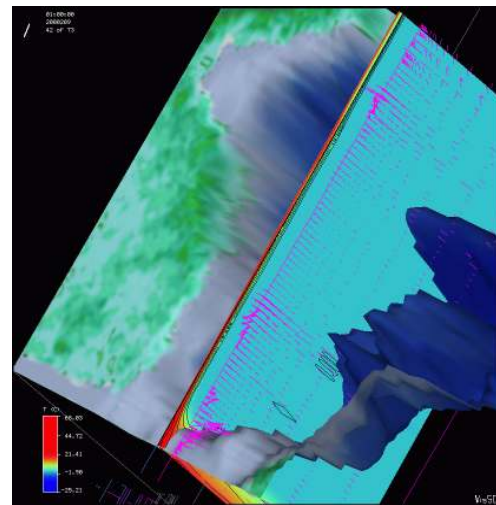
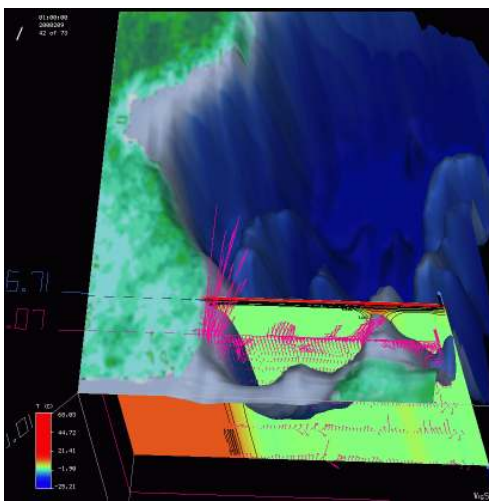
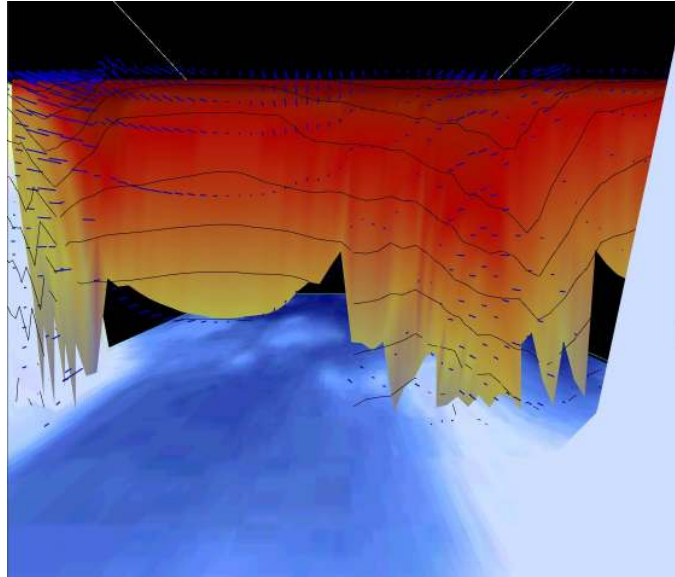
○ 유속과 수온의 수직 단면도



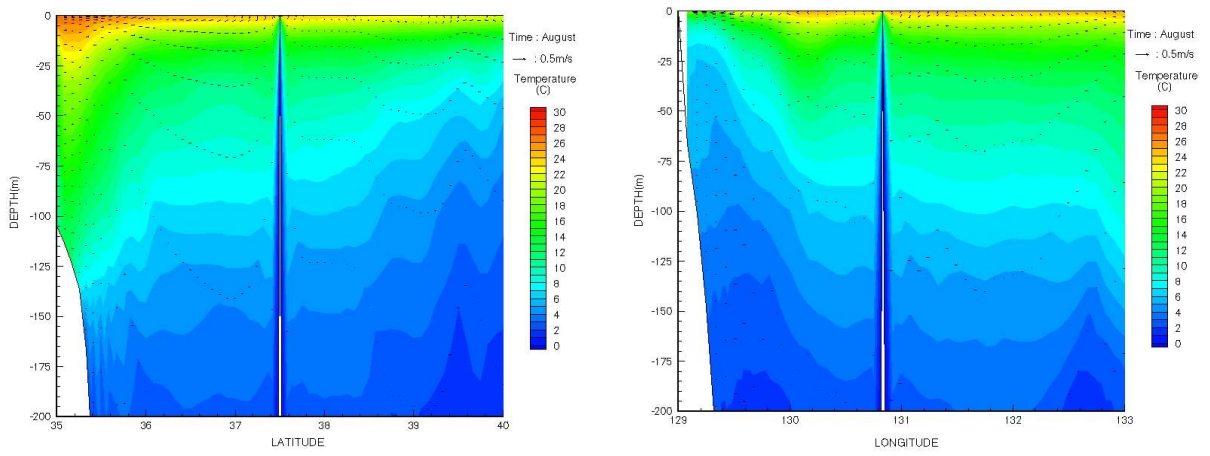
○ 8월의 동해 표층 수온 및 해류도(일반 그래픽)



○ VR 영상으로 변환된 동해안 - 울릉도간 단면상의 수온과 유속의 수직구조(상층 200m)

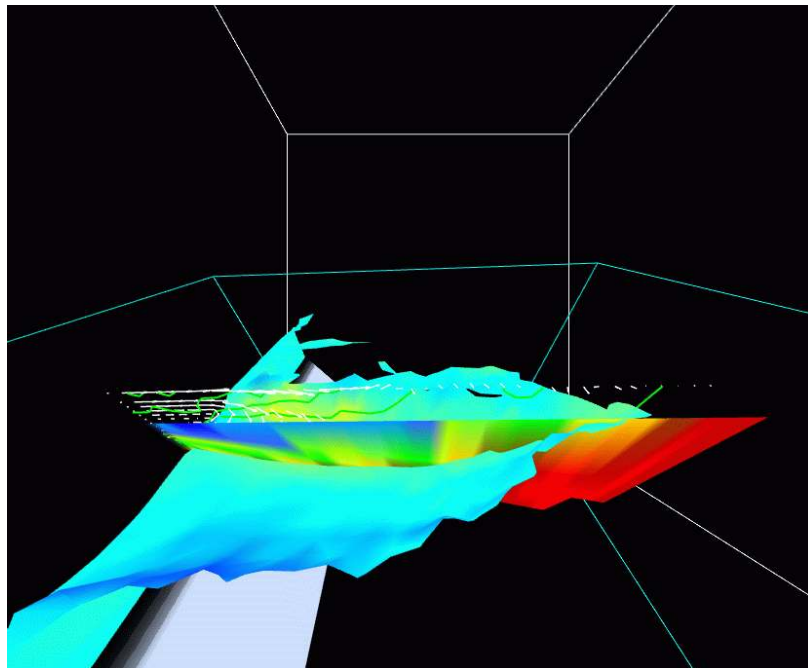


○ 일반 그래픽으로 제시한 동해안-울릉도 단면상의 8월 수온 및 유속 단면도

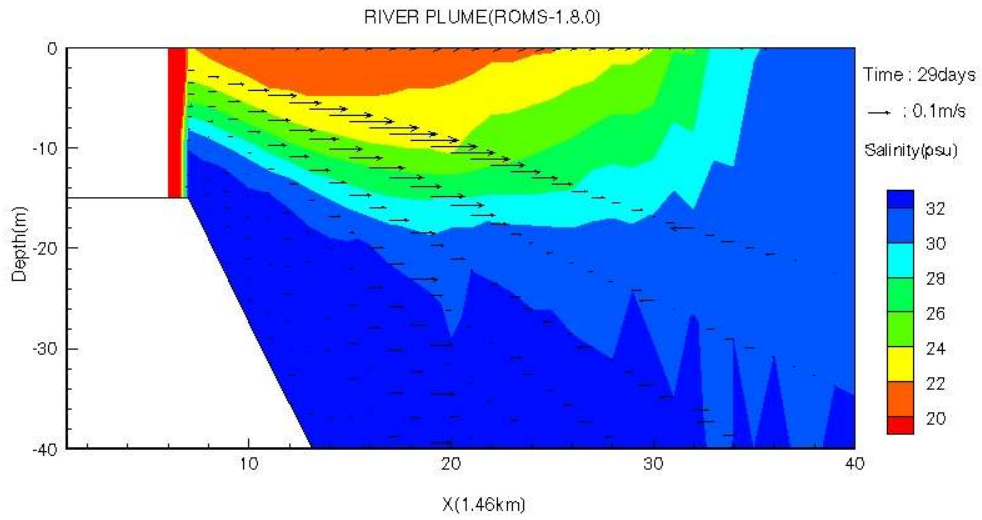


[ROMS를 이용한 연안담수유출 영향 예측]

○ VR 영상으로 변환된 염분과 유속의 구조

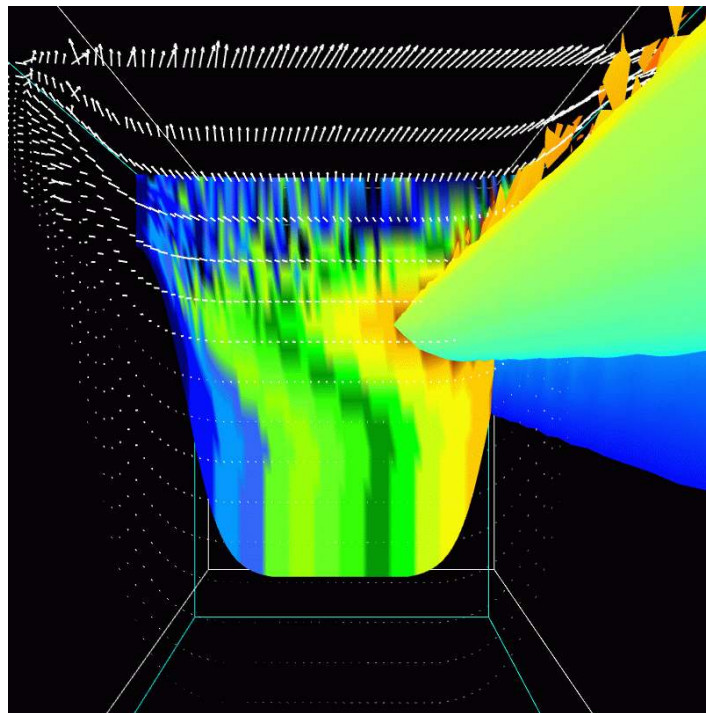


○ 일반 그래픽으로 제시된 염분과 유속의 단면도

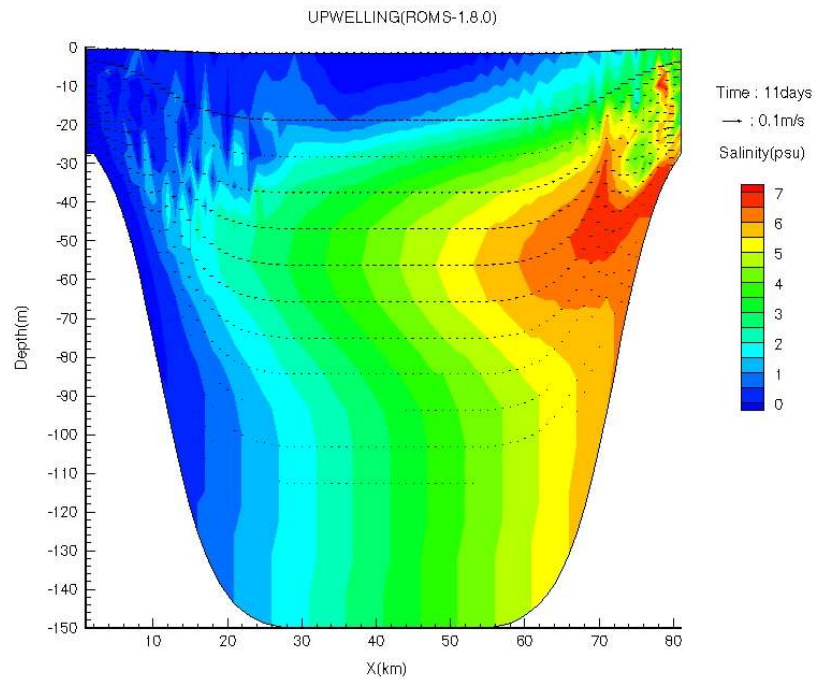


[ROMS를 이용한 동해안 -울릉도 간 용승실험]

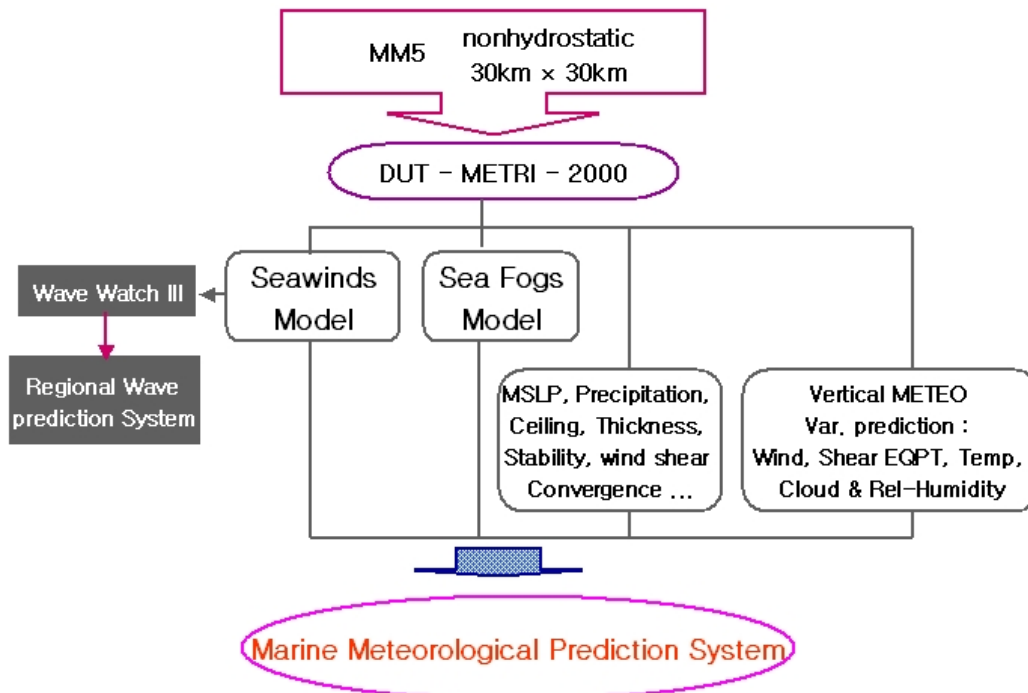
○ Upwelling - Downwelling 구조를 VR 이미지로 변환



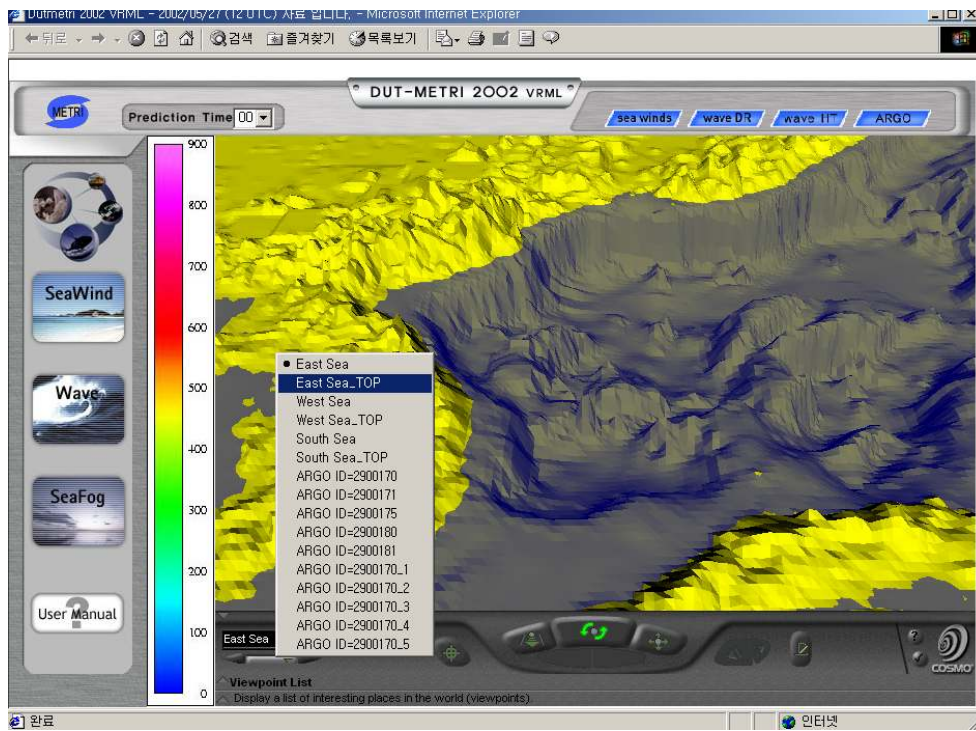
○ 일반 그래픽 단면도



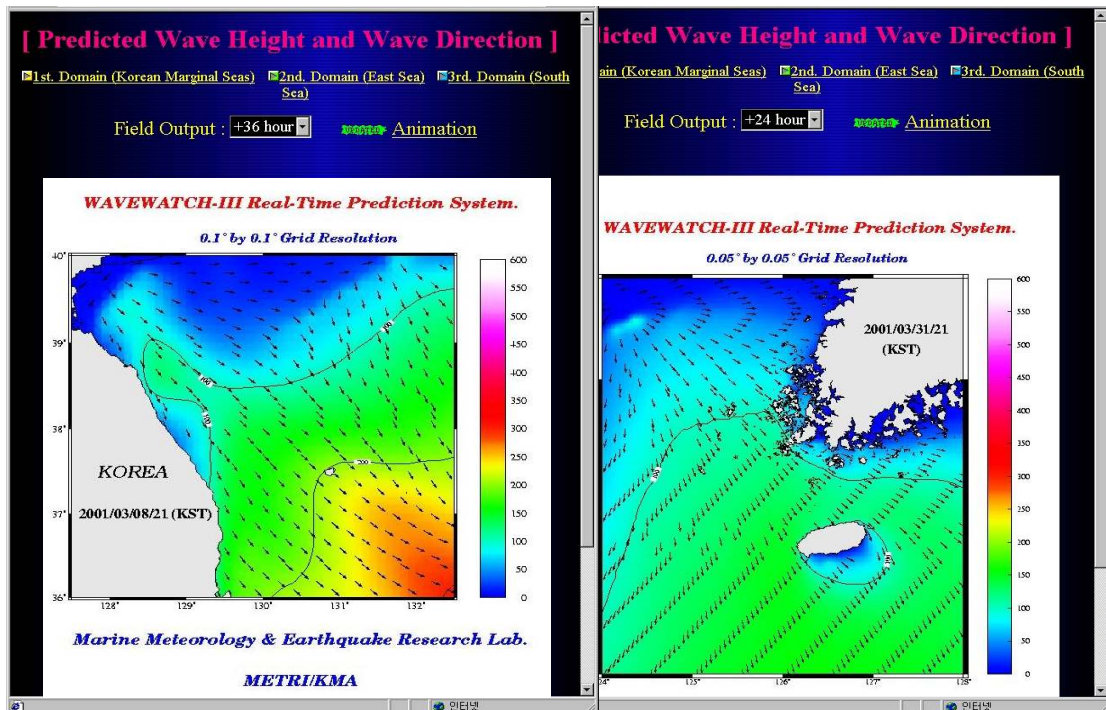
[정밀기상예측 시스템인 DUT-METRI 2001의 자료 생성 흐름도]



[정밀해상기상예보 시스템인 DUT-METRI 2002의 VRML 생성모드]



[WAVEWATCH-III를 이용한 우리나라 연안 파랑의 48시간 예보 시스템]



V. 연구개발결과의 활용계획

- 가상해양환경 시스템의 구축으로 해양환경 및 해상상태를 원격에서 정밀 분석 가능하며, 이를 활용하여 해군의 성분작전 시뮬레이션 및 작전교육의 효율성을 증대하고,
- 기상예보 적중률을 향상시키고,
- 해양환경의 입체적 분석으로 해양예측 기술의 획기적 진보를 가져올 것이며, 오염예방과 해양설계공사의 사전분석으로 막대한 오염복원비 및 공사비를 절감할 수 있고,
- 민수분야에서 다양하게 활용 전망되는 가상현실기법 및 재현장치의 발전으로 21세기 국제 정보융합산업의 선진화 조기달성

□ 파급효과

- 민수분야에서 다양하게 활용 전망되는 가상현실기법 및 재현장치의 발전으로 21세기 국제 정보산업의 선진화 조기달성
- 고품질의 해양기상관측 자료정보에 의한 기상예보의 적중률 향상
- 가상현실 기법의 현실적 응용분야는 무한대임.
- 실시간 해양기상자료의 확보 및 데이터 베이스화에 따른 보다 정확한 기상변동 및 악기상 예측 등으로 해양산업활동 지원

S U M M A R Y

Executive Summary

A virtual ocean environment system has been developed by Korea Ocean R&D Institute and associates as part of Dual-Use program sponsored by MOST Korea. The virtual ocean environment system visualizes the marine environmental parameters in 5 dimensions (3 in space, rotation, animation) as the operator navigates, walks or flies at any water depth in the ocean. The system consists of a module that predicts the ocean dynamic processes, image visualization module and a module for immersive virtual reality system. Coupling and interfacing three subjects into the Digital Ocean & Virtual Environment (DOVE) system are the key effort of the system development.

The oceanic process data, the objective data for VR visualization, are provided by 3 dimensional numerical modeling that is exclusively designed for Korean waters, and are verified through field observed and/or remotely sensed data using various data assimilation techniques. To produce more accurate oceanographic data, we are collaborating with the meteorological institute that predicts oceanographic forcing parameters.

The VR techniques go into two ways; One is the use of immersive VR devices such as Barco's VR Table and a 4-wall CAVE-like manufactured by a Korean company (KMT) to display the time-varying 3-dimensional ocean environment. The other VR visualization is conducted on the Internet to show the web 3D of the oceanic environment using the internet modeling language, the VRML.

Through the DOVE system development, we have achieved a few advanced technologies such as numerical modeling of various parameters, field data telemetry and data assimilation, nesting of grid system, 3-d modeling in internet, interactive visualization technique, real-time visualization of huge scientific data, and VR display system etc. We also discuss on the application of the DOVE system to operational use for the relevant coastal processes and shallow-water environment.

I. Introduction

Ocean simulations are important in helping us understand the major components of underwater environmental structure. The variables of the underwater structure vary continuously in time and space. Due to the extremely high variability of the ocean processes, we usually adopt the high

performance computing system to predict the ocean environment using the primitive three dimension equations of motion. The output of the numerical simulation for a day' s ocean structure of a basin scale produces data around several gigabytes. Continues prediction of the interesting area of the ocean for a year or more produces the multiple-variable data of hundreds to thousands of gigabytes.

By using any conventional graphic tools, it seems hardly to be displayed nor be properly investigated. As a cut-of-edge technology, the virtual reality is being widely applied to oceanography as well as meteorology.

Manipulating the variables within virtual reality environment gives additional insight into how the oceanic variables interact each other. As the technology in hardware and software advances, new tools for predicting the ocean processes more accurately and for realizing the visualization more immersively are being developed.

In this work, we present the Digital Ocean and Virtual Environment (DOVE) system that is being developed at Korea Ocean R&D Institute' s DOVE Center. The DOVE System consists of three main modules; numerical modeling module that simulates and predicts the ocean and atmospheric processes, image visualization module that converts the ocean/atmosphere data to VR images, and VR module that displays the 5-dimensional images onto the fully and semi-immersive virtual environment.

II. Benefits of using VR in oceanography

The VR environment allows users to visualize data in immersive, collaborative and interactive ways. The immersion into an environment comes with stereoscopic view of 5-dimensional perception.

Ocean modeling plays important note in understanding the current environmental and climatic conditions, and predicting the future environmental change. Three-dimensional time-dependent ocean models at fine resolution require a large amount of memory and processing time to be run for realistic simulations.

The visualization of scientific data is a major component of computational science and engineering, and is critical to understanding the result of large scale oceanographic simulation. Oceanic process visualization can have enormous benefits in economically quantifiable ways without constraints of scales, time, reproduction cost and risk operation.

III. Numerical modeling module

This study uses two different numerical models ; The one is the Princeton Ocean Model (POM ; <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom>), and the other is the Regional Ocean Modeling System (ROMS ; <http://marine.rutgers.edu/pol>). The models are three-dimensional hydrodynamic circulation models based on Blumberg and Mellor(1980, 1983) to calculate the circulation and thermodynamic fields. POM and ROMS solve the time-dependent, nonlinear governing equations for temperature and salinity. They both use a terrain-following coordinate system in the vertical. The ROMS uses the orthogonal curvilinear coordinate system in horizontal grid. A variety of turbulence closure schemes including embedded 2.5-level of Mellor and Yamada(1982) describe the vertical turbulent diffusion of momentum and thermodynamic quantities. Versions of these models have been used widely in a variety of ocean applications over a wide range of space and time scales (Blumberg and Mellor, 1987 ; Wheless and Valle-Levinson, 1995; Haidvogel et al., 2000).

We have applied the numerical models to the East Sea of Korea, where the physics and oceanic variability are representing a ‘small Pacific Ocean’ . The model domain extends from 35.0°N to 51.0°N, and from 127.0°E to 142.0°E, representing the whole East Sea of Korea. The model contains 181?199 horizontally fixed grid points, consequently yielding the horizontal spacing of 5? latitude and longitude (approximately 5.77km to 7.59km in the zonal direction, and 9.265km in the meridional direction). There are 23 sigma levels in the vertical coordinate. In the shallow water of the domain the vertical spacing is the order of meter. But in the deep basin part of water depth in 3,000~4,500m the vertical spacing of a computational cell is the order of 100m.

The models are forced by climatological winds, precipitation, heat flux and transport of flow through open boundaries. We have estimated the daily variation of temperature, salinity and currents at the horizontal cell and vertical nodes for a year. The output results were stored in the form of netCDF data format. The result data sets are ported to the image visualization module for rendering of 3-dimensional Ocean data sets.

IV. Image Visualization Module

We visualize the oceanographic model results on standard unix graphics workstation using the publicity available software product known as Vis5D,

Cave5D and a commercial software called vGeo of VRCO' s products.

The Vis5D program was developed at the University of Wisconsin Madison Space Science Engineering Center (Hibbard et al., 1994; Wheless, Valle-Levinson, and Sherman, 1995). The Vis5D program provides an interactive environment where users can view five-dimensional gridded data files. The dimensions consist of latitude, longitude, height, time and a index variable into a set of physical field.

The vGeo program is a commercial product of VRCO, that is a data fusion and visual analysis tool designed to support scientific data exploration, knowledge discovery and data display and presentation. The motivation of developing the vGeo comes from oceanographic complexity that makes its analysis very hard with any conventional analysis tool other than VR technique application. The Vis5D only accept the data format in its own form, otherwise one has to convert the generic data format into the format of Vis5D. The more advanced feature dealing with data format in vGeo is much flexible to accept any netCDF, ASCII and binary formats. During the work of interfacing any oceanographic data format with visualizing programs, we have developed a good technique to convert any data to visual formats (Figure i).

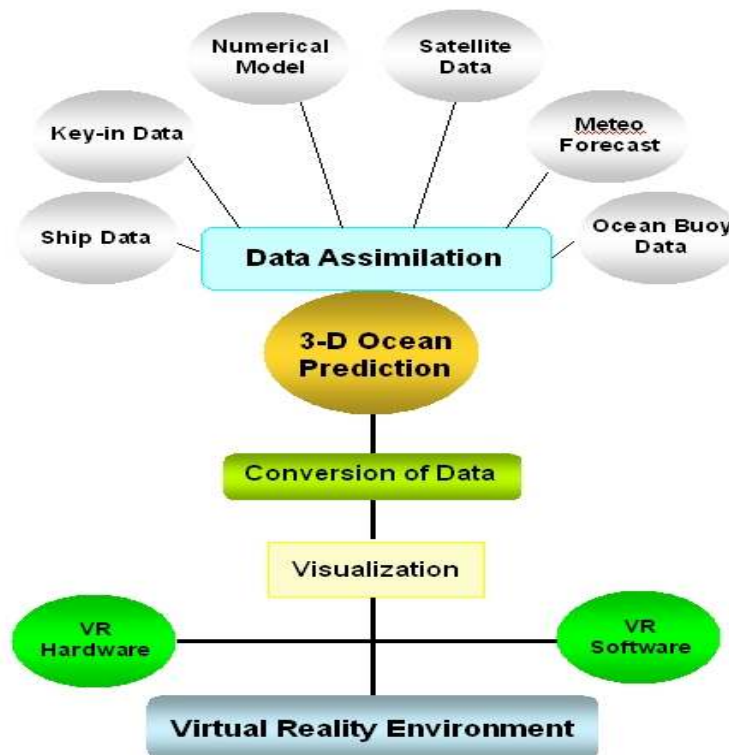


Figure i. Fusion data flow of oceanographic multi variables to VR environment.

Figure ii illustrates schematically the data conversion procedures for our VR System. Any form of oceanographic data can be made into the netCDF format which can be easily transferred and be read in any computing platform.

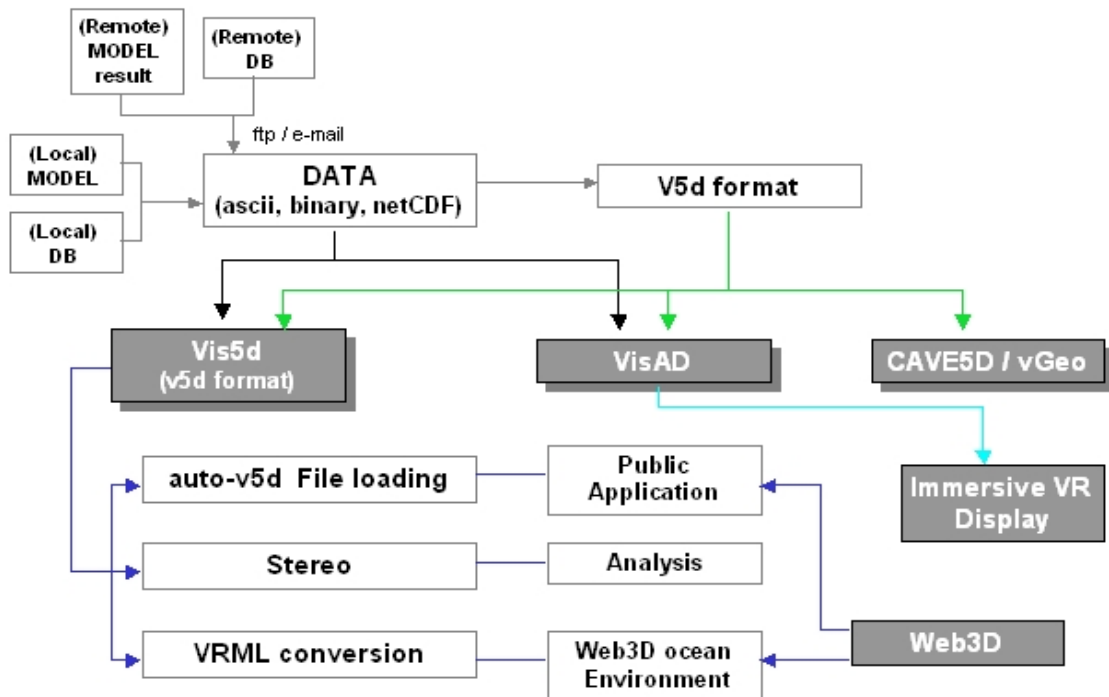


Figure ii. Data conversion processes in the DOVE System.

Vis5D allows users to visualize data in a strait forward GUI environment. The program gives us freedom to customize the visualization so every aspect of simulation can be explored. However the Vis5D has default limitation of data size up to 1.7-gigabytes.

The Cave5D is an alternative version to Vis5D, that is modified to use for virtual reality environments instead of a desktop PC as the Vis5D was written for. Due to the limitation of universal use of the Cave5D, it has been recoded to produce the vGeo in a commercial product at VRCO. Along with the library called onto the CAVE_like System, the vGeo gets its attention for one of solution of VR environment tool for oceanographic and atmospheric data sets.

In our System, the Vis5D, Cave5D, Cave lib. and vGeo are major programs and libraries to render multi-terabyte oceanographic data simulated by 3-D numerical ocean models.

V. VR module

Although we can display our complicated images on a workstation based flat display, it becomes totally functional through the use of an interactive, semi-or fully immersive virtual viewing device such as CAVE (Cruz-Neira et al., 1993) or Immersive Desk. These devices provide the graphical illusion of being in a three dimensional space by displaying stereoscopic visual output and by allowing navigations through the space. The Cave lib. has all the functions necessary to create a program to synchronize the CAVE devices, walls, calculation of stereo transformations.

The hardware system of DOVE VR System consists of one SGI Onyx2(IR) visual workstation, one Compaq ES40 computing workstation, one set of 4-wall Cave_like (K-CAVE), one VR Table of 1.8m diagonal, wanda and Flock of Birds tracking system.

Particularly the K-CAVE has 4-wall (front, right, left and bottom) of 2.1m×2.1m soft wall. Rear-projection based K-CAVE is equipped with FOB tracking and stereoscopic systems. The K-CAVE was designed and installed by a domestic VR company, the KMT a private sector in partnership. The oceanographic model results predicted on the Compaq ES40 are ported to the Onyx2 for image visualization, and eventually displayed on the VR environment. Any user operates the system in a fully interactive, immersive and stereoscopic visualization that can be collaborated with remote party who shares the VR environment.



Figure iii. A view of a semi-immersive display on the VR Table.

Figure iii shows a demonstration of stereoscopic view on a semi-immersive Barco' s VR Table. Although it gives a semi-immersive view, one can navigate the VR world in stereo view and in interactive way as the user wishes to analyze the data sets more accurately.

Figure iv shows the view of the K-CAVE of four 2.1m×2.1m walls equipped with FOB tracking and stereoscopic system. One can go inside the K-CAVE and interactively analyze the realistic images immersed in the virtual world.

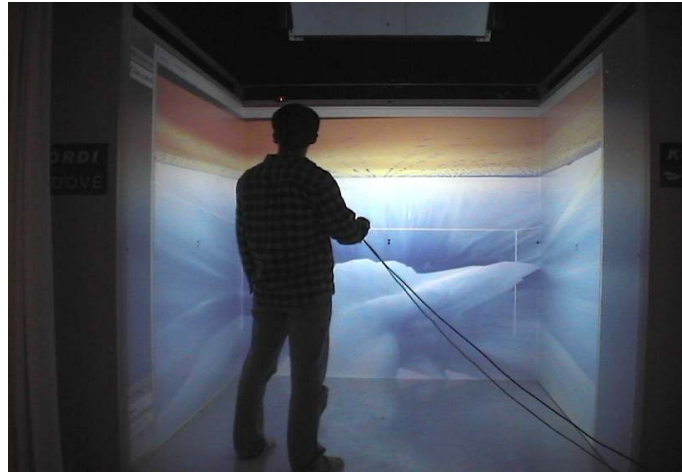


Figure iv. A sample view on a fully immersive Cave-like VR device.

VI. Results

We have demonstrated simulations of the daily variation of currents, temperature and salinity for a year in the East Sea. The output results were converted to netCDF and appropriate formats for visualization. A stereoscopic view of bathymetry of the East Sea with data spaced in $1/12^\circ$ was converted into the VRML mode (Figure v). We can put the VRML Image on the web pages, allowing any users can view the real 3-dimensional perspectives of the objects

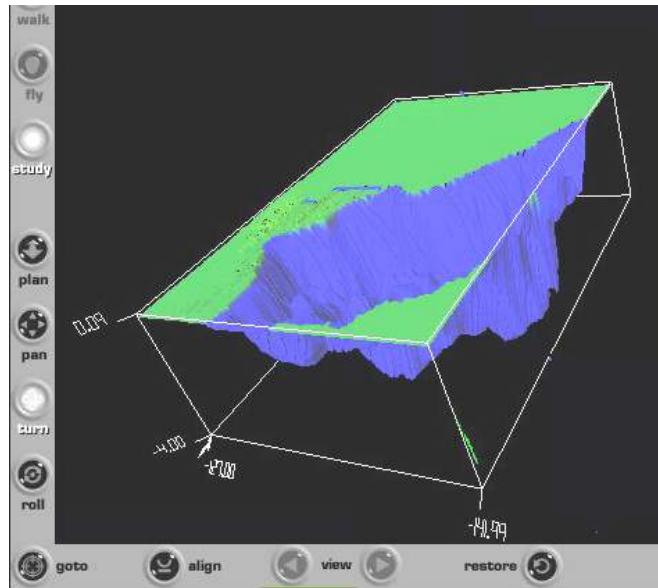


Figure v. VRML image of the bathymetry of the East Sea.

Figure vi illustrates the surface circulation and temperature distribution predicted by the numerical models. Getting closer to the shoreline to analyze the fine-scale variability of temperature, salinity and current system, criss-cross sections centered at an island (Ulleung Do) give more dynamic variability behavior of ocean phenomena. Figure vii shows the zonal and meridional cross-view of temperature and current profiles in August. The complicated data sets can be visualized in VR images as in Figure viii that is a still view of fully immersive stereoscopic 3-D perspectives. Clear visualization in multi-dimensional perspectives allows the users to improve understanding the basic physics and fundamental evolution mechanism of physical processes.

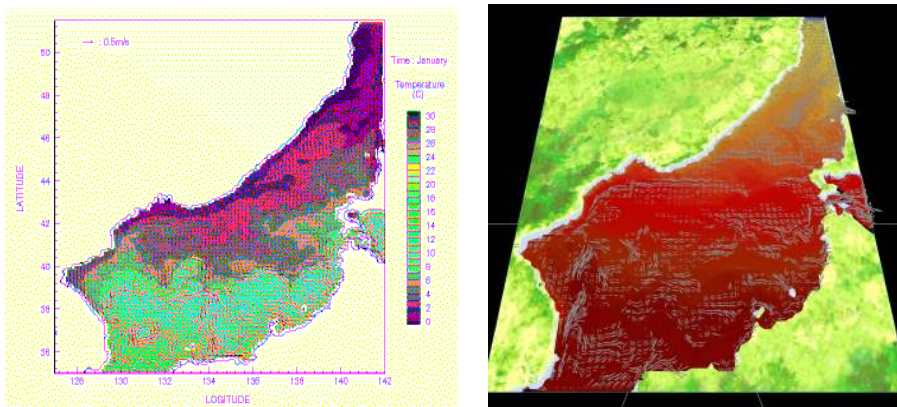


Figure vi. Surface temperature and current distribution in August in the East Sea, and its corresponding VR image in 3-dimension.

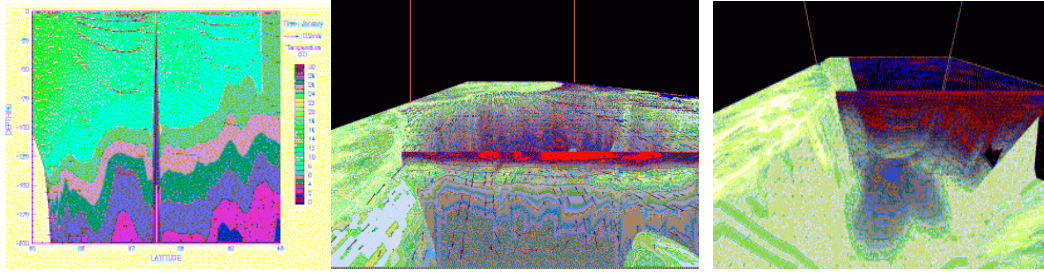


Figure vii. Closer view of temperature and current fields around Ulleung DO and its VR image.

As an example, we have demonstrated two simple cases. One is for the fresh water discharge into the coastal sloping water, and the other is the simple test case for wind-driven upwelling in northern hemisphere. Both test cases were simulated by using the ROMS ocean model.

Figure viii illustrates a process of dispersion of fresh water discharged from the river and mixed with coastal waters. To visualize the dynamic processes of mixing of the water masses, we have converted the output into VR image (bottom panel). In the VR environment, one can view and feel the more insight of environmental processes. Figure ix shows a snapshot of upwelling processes illustrating the vertically clock-wise turning of water forced by surface wind. Corresponding VR image is shown on the right panel.

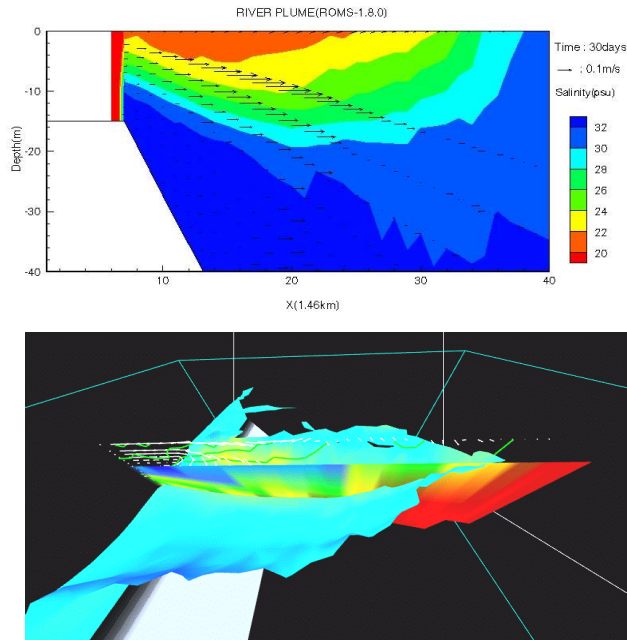


Figure viii. A vertical plot of fresh water plume in coastal water (up), and VR image of iso-surface of salinity (bottom).

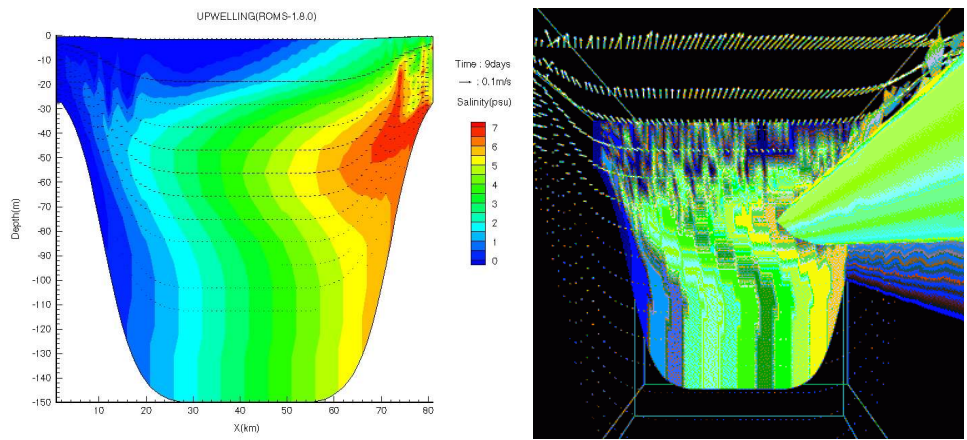


Figure ix. A plot of vertically mixing waters due to coastal upwelling and corresponding snapshot of VR image.

In summary, conventional tools analyzing the complicated natural data sets have the limits to carry the realistic view as well as understanding due to the flat view of fully perspective objects.

Alternatively recently growing up technique can provide an excellent tool to manage the terabyte data sets with realistically analyzing images.

PART I

C O N T E N T S

SUMMARY	3
CONTENTS	3 3
LIST OF TABLES	5 4
LIST OF FIGURES	6 4

CHAPTER 1. INTRODUCTION

Section 1. Needs for research	3
1. Overview	3
2. Needs for research	5
Section 2. Objectives and contents	5
1. Goals of the project	59
2. Annual research contents	6
3. Strategy and methods	6
4. Description of annual progress	62

CHAPTER 2. STATE OF THE ART (Ocean simulation and VR application)

Section 1. Survey on foreign research trends	5
1. State of the art	65
2. The required technique	8
Section 2. Survey on domestic research trends	07
1. State of the art	70
2. Weakness of the state of the techniques	7
3. Future direction	71
4. Objective techniques	72
5. Technique comparison	37
6. Expected impacts	4

CHAPTER 3. CONTENTS AND RESULTS

Section 1. Application of virtual reality	77
1. What is virtual reality?	77
2. Application fields of the VR	81
Section 2. Image rendering and standard data I/O	83
1. Preparation of bathymetry using digital navigation charts	83
2. Image rendering of underwater topography	58
3. Standard data I/O : netCDF	9
Section 3. Visualization of underwater dynamic structure	111
1. Visualization using Vis5D	111
2. Visualization using Cave5D	141
3. Visualization using vGeo	150
4. Conversion to VRML image	61
Section 4. The DOVE VR system	971
1. Equipment of DOVE system	971
2. Numerical ocean model	8
3. VR software	16
4. Application field	186
Section 5. Modeling of the East Sea circulation and thermal structure using the POM	9
1. Introduction	189
2. JES current system	12
3. Seasonal variation of atmospheric forcing	194
4. Numerical ocean model	0
5. Temperature	29
6. Salinity	218
7. Circulation	226
8. Results	237
Section 6. Near-realtime prediction of the East Sea circulation	240
1. The study of the East Sea surface current	24
2. Structures and variations of the polar frontal axis in the East Sea	257
3. Results	261

Section 7. Prediction of MLD micro-structure	270
1. Introduction	270
2. MLD Model	272
3. Results	280
4. Conclusions	289
Section 8. Simulation of oceanic dynamic using ROMS	292
1. Characteristic of ROMS model	292
2. Structure of ROMS	293
3. Running ROMS	294
4. Simulation of ocean dynamics using ROMS	298
Section 9. Summary and future works	303
1. Summary	303
2. Suggestions	309

CHAPTER 4. RESEARCH PROGRESS EVALUATION

Section 1. Performance evaluation	303
Section 2. Socio-econo impacts	311

CHAPTER 5. REFERENCES1..6..3

PART II

C O N T E N T S

SUMMARY	773
CONTENTS	783
LIST OF TABLES	393
LIST OF FIGURES	533
 CHAPTER 1. INTRODUCTION	 7-0-4
 CHAPTER 2. STATUS OF TECHNIQUES (Marine meteorology prediction)	
2.1 Domestic situation	411
2.2 Foreign situation	412
 CHAPTER 3. CONTENTS AND RESULTS	
Section 1. Characteristics of sea fog formation in the East sea	415
1.1 Introduction	415
1.2 Data	416
1.3 Analysis of frequency about sea fog formation	47
1.4 Analysis of time about sea fog formation, decaying and duration	43
1.5 Analysis of relative humidity at interannual time scale	428
1.6 Analysis of wind speed and direction during sea fog events	42
1.7 Conclusion	440
Section 2. Sea fog prediction model(DUT-METRI-2000) and Case study	4-4
2.1 Model outline	441
2.2 Case outline	442
2.3 Sea fog classification by the cause of formation	443
2.4 Synoptic status of stream fog case	444
2.5 Synoptic status of advection fog case	448
2.6 Synoptic status of front fog case	453

Section 3. Sea fog prediction model(MM5) and case study(Ⅱ)	3
3.1 Climatologic characteristics of sea fog	458
3.2 Diagnostic study of sea fog formation	469
3.3 Improvement of sea fog prediction model	4
3.4 Verification of sea fog prediction model	531
Section 4. Observation in Ulleung Do	53
4.1 Meteorology characteristics in Ulleung Do	53
4.2 Meteorology observation and analysis methods	4
4.3 Observation result	544
4.4 Comparison with model output	6
4.5 Conclusion	562
Section 5. Construction of visibility monitoring system	563
5.1 Introduction	563
5.2 Introduction about visibility monitoring system	563
5.3 Expectation effects	566
Section 6. Construction of wave prediction system	57
6.1 Introduction	567
6.2 Wave numerical modelling	5
6.3 Structure and results of wave prediction system	55
Section 7. Verification of sea surface wind and wave prediction system	58
7.1 Verification of prediction results	585
Section 8. Numerical experiments about sensitivity of wave model	6
8.1 Numerical experiment about bottom friction effect	62
8.2 Numerical experiment about spatial resolution	604
8.3 Analysis of wave modulation due to current and tide	6
Section 9. Monthly distribution of wave parameters	65
Section 10. Conclusion	645

CHAPTER 4. EVALUATION OF ACHIEVEMENT FOR OBJECTIVE AND CONTRIBUTION	
CHAPTER 5. UTILIZATION PLANS	
1. Utilization plan	649
2. Contributed application	652
CHAPTER 6. CONCLUSION AND DISCUSSION	7-5-6
CHAPTER 7. REFERENCES	1-6-6
Appendix. Manual for setting of WAVEWATCH-III ver.1.18	7-6-6

PART I

목 차

요약문	3
목 차	33
LIST OF TABLES	5· 4
LIST OF FIGURES	6· 4

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 필요성	53
1. 개요	53
2. 연구개발 필요성	55
제 2 절 연구개발목표 및 내용	59
1. 연구개발의 최종목표	59
2. 단계별 연구 내용	60
3. 추진전략 및 방법	60
4. 연도별 연구개발 진행체계	62

제 2 장 국내외 기술개발 현황 (해양 시뮬레이션과 VR 응용기술)

제 1 절 국외의 현황 분석	65
1. 기술현황	65
2. 소요기술 분석	68
제 2 절 국내의 현황 분석	70
1. 기술현황	70
2. 현 기술상태의 취약성	71
3. 앞으로의 전망	71
4. 주요확보 목표기술	72
5. 국내·외 기술수준 비교표	73
6. 연구개발 기대 성과 및 파급효과	74

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 가상현실의 응용	77
1. 가상현실이란?	77
2. 가상현실의 응용분야	81
제 2 절 해저환경의 VR 이미지 렌더링 및 자료 I/O 표준화	8
1. 수치해도로부터 임의수심도 작성	83
2. 해저환경의 VR 이미지 렌더링	8
3. 자료 I/O 표준화	92
제 3 절 해양수중구조의 가시화기술	111
1. Vis5D를 이용한 해양구조 가시화	111
2. Cave5D를 이용한 해양구조 가시화	11
3. vGeo를 이용한 해양구조 가시화	10
4. 해양구조 이미지의 VRML 변환	6
제 4 절 DOVE VR 시스템의 특성	91
1. DOVE 시스템 시설	9
2. 해양수치모델	185
3. VR 가시화 소프트웨어	186
4. 응용분야	186
제 5 절 동해의 해수순환과 물성 구조의 예측과 검증	189
1. 서론	189
2. 동해의 해류	192
3. 대기 강제력의 계절 변동	194
4. 대양 수치 모델	200
5. 수온	209
6. 염분	218
7. 순환	226
8. 결론	237
제 6 절 동해 해수순환의 준실시간 예측기법	240
1. 동해 표층순환 연구	240
2. 동해 극전선역의 구조와 변동성 연구	257
3. 종합결과	261
제 7 절 미세구조를 포함한 3차원 해수특성 구조 예측	270

1. 서론	270
2. 모형	270
3. 결과	280
4. 결론	289
제 8 절 ROMS를 이용한 해양역학 구조 시뮬레이션	290
1. 모델 특성	290
2. 모델 구성	291
3. 모델 실행	292
4. ROMS를 이용한 해양역학 구조 시뮬레이션	291
제 9 절 종합의견 및 제안	330
1. 연구의 요약	330
2. 제언	339
제 4 장 연구개발 목표달성도 및 대외기여도	
제 1 절 연구개발 목표의 달성도	343
1. 연구개발 목표 달성도	343
2. 연구개발 성과 및 제출된 산출물의 적절성	345
3. 시작품 성능시험 평가내용(자체시험 결과)	347
4. 군수 적응성	349
제 2 절 대외기여도	351
1. 기반기술 확보 및 기술자료 작성 현황	351
2. 예상효과	352
3. 기술자료 작성 현황	353
제 5 장 참고문헌	361

PART II

목 차

요 약 문	377
목 차	387
LIST OF TABLES	393
LIST OF FIGURES	538
제 1 장 서 론	407
제 2 장 국내외 기술개발 현황 (해양 기상 예측기술)	
1. 국내 기술 개발 현황	411
2. 국외 기술 개발 현황	412
제 3 장 연구개발의 내용 및 범위	
제 1 절 동해안의 해무발생 특성 분석	415
1.1 개요	415
1.2 자료	416
1.3 해무 발생 빈도 분석	417
1.4 해무 발생, 소멸 및 지속 시간 분석	423
1.5 경년별 상대습도 분석	428
1.6 해무 발생시 풍향 및 풍속 분석	432
1.7 소결론	440
제 2 절 해무예측모델(DUT-METRI-2000) 및 사례분석(I)	444
2.1 모델 개요	441
2.2. 사례개요	442
2.3 해무 발생 원인별 사례 분류	443
2.4 증기 해무 사례의 중관적 상태	444
2.5 이류 해무 사례의 중관적 상태	448

2.6 전선 해무 사례의 종관적 상태	453
제 3 절 해무예측모델(MM5) 및 사례분석(II)	48
3.1 해무의 기후학적 특성	458
3.2 해무 발생에 대한 진단적 연구	469
3.3 해무 예측 모형의 개발과 개선	496
3.4 해무 예측 모형의 검증	531
제 4 절 울릉도 관측	543
4.1 울릉도의 기상 특성	543
4.2 기상 관측 및 분석 방법	544
4.3 관측 결과	544
4.4 모델결과와 비교	560
4.5 결론	562
제 5 절 시정모니터링 시스템 구축	563
5.1 서론	563
5.2 시정모니터링시스템의 소개	563
5.3 기대효과	566
제 6 절 파랑예측 시스템 구축	567
6.1 서론	567
6.2 파랑 수치 모델링	567
6.3 파랑 예보 시스템 구성 및 결과	575
제 7 절 해상풍 및 파랑예측 시스템의 검증	585
7.1 예보결과의 검증	585
제 8 절 파랑모델의 민감도 수치 실험	602
8.1 해저마찰 민감도 실험	602
8.2 공간격자 민감도 실험	604
8.3 해류, 조류에 의한 파랑변조 효과 분석	608
제 9 절 월별 파랑 분포도	625
제 10 절 결론	645

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	647
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	
1. 활용 계획	649
2. 연구 개발 결과 활용 실적	652
제 6 장 결론 및 토의	657
제 7 장 참고문헌	661
Appendix. (WAVEWATCH-III ver. 1.18 셋팅 방법)	766

PART I

주관연구기관 : 한국해양연구원

LIST OF TABLES

Table 3-1 A program converting various data formats to v5d file.	3
Table 3-2 Script creating .topo file from Ascii data.	129
Table 3-3 Script converting ocean observed data in netCDF to .v5d format.	31
Table 3-4 Script creating .topo file from POM result in netCDF.	3
Table 3-5 Script creating .v5d file from POM results in netCDF.	1
Table 3-6 Filename specifications of Cave5D.	1
Table 3-7 View parameters of Cave5D.	241
Table 3-8 Lighting parameters of Cave5D.	21
Table 3-9 Variable assignments of Cave5D.	21
Table 3-10 Graphical object definitions.	143
Table 3-11 Configuration file of Sitka eddy using Cave5D.	4
Table 3-12 A script of vGeo configuration for netCDF data	5
Table 3-13 vGeo GRIDFILE structure	751
Table 3-14 vGeo MPS file structure.	8
Table 3-15 vGeo line segment file structure.	19
Table 3-16 A lookup color table.	10
Table 3-17 Variable setting for grid netCDF data.	15
Table 4-1 Specification of SGI Onyx2 (IR).	19
Table 4-2 Specification of Compaq Alpha 264.	8
Table 5-1 Monthly values of volume transport(S_v) through the lateral open boundaries.	207
Table 7-1 Velocity grid spacing and vertical distributions of initial temperature and salinity.	278
Table 7-2 Experimental case study.	0

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Fundamental principle of the CAVE System.	8·7
Fig. 1-2 Data I/O device Wanda	97
Fig. 1-3 Collaboration of the virtual worlds.	80
Fig. 2-1 A view of digital map editor.	83
Fig. 2-2 Implementation of digital map editing.	84
Fig. 2-3 Digital map of Korea and adjacent waters compiled in 10 seconds using digital navigation charts and DEM.	85
Fig. 2-4 File structure of raw data (kordi10s.grd).	87
Fig. 2-5 File structure of Multigen II ded file.	87
Fig. 2-6 Simulated monthly mean sea surface velocity vector and temperature (°C) field(December).	110
Fig. 2-7 Simulated monthly mean sea surface velocity vector and salinity(psu) field(December).	110
Fig. 3-1 Ocean fusion data flow for VR display.	12
Fig. 3-2 Data conversion processes to VR system.	31
Fig. 3-3 Map compiled in regularly gridded at 10 seconds using digital navigation charts and DEM.	17
Fig. 3-4 Map showing bi-monthly survey stations conducting by NFRDI.	821
Fig. 3-5 Conversion flow from irregular spaced data to v5d format.	8
Fig. 3-6 Different outcome due to dense data distribution (a) and sparse data distribution (b)	131
Fig. 3-7 Vis5D display of salinity data observed by NFRDI (a) and Vis5D image of salinity in Kyunggi Bay (b).	132
Fig. 3-8 Data conversion of POM model results to v5d format.	31
Fig. 3-9 Vis5D image of temperature and currents in August in East Sea. ...	61
Fig. 3-10 Cross-sectional display of current fields in zonal and meridional directions.	137
Fig. 3-11 Horizontal current distribution between the east coast and Ulleung Do. 17	17
Fig. 3-12 Vertical structure of temperature and currents along meridional cross-section.	138

Fig. 3-13 Vertical structure of temperature and currents along zonal cross-section.	138
Fig. 3-14 A Vis5D image of wind field predicted by Korea meteorological Agency.	139
Fig. 3-15 Vis5D image of horizontal distribution and vertical distribution of RNW variable.	140
Fig. 3-16 Master panel of Cave5D.	141
Fig. 3-17 A sample of Graphical objects panel.	146
Fig. 3-18 Cave5D snapshot of Sitka eddy simulation.	148
Fig. 3-19 Cave5D image of rain water mixing ratio (up) and cloud water mixing ratio (bottom).	149
Fig. 3-20 Data conversion flow to various application tools.	152
Fig. 3-21 Schematic view of regular geometry grid.	153
Fig. 3-22 Schematic view of irregular geometry grid.	154
Fig. 3-23 GUI menu bars of vGeo panel.	155
Fig. 3-24 Illustration of parallelogram points used in specification of placement of Simple Images.	156
Fig. 3-25 A sample of static model embedded in a VR image.	161
Fig. 3-26 A schematic GridDecimate	161
Fig. 3-27 A schematic GridSubRange	161
Fig. 3-28 VR image of the bathymetry of the East Sea in the vGeo world.	161
Fig. 3-29 vGeo image of surface temperature and current distribution in the East Sea	169
Fig. 3-30 vGeo image of surface currents and vertical structure of temperature along zonal cross-section.	170
Fig. 3-31 Closer view of temperature and current fields around Ulleung Do its vGeo image.	170
Fig. 3-32 vGeo image of a Moving Model graphical object.	171
Fig. 3-33 vGeo images showing temporal progress of iso-salinity due to fresh water plume discharged into coastal water.	172
Fig. 3-34 A progressive view of vGeo image showing development of upwelling processes, as described in Section 8.	173
Fig. 3-35 VR image display of bathymetry around Korea Peninsula, created by using vGeo tools.	174

Fig. 3-36 Closer view of Kyunggi Bay.	4
Fig. 3-37 Closer view of Namhae.	7
Fig. 3-38 Sample VRML images converted from VR images using process of Fig. 3-2.	176
Fig. 4-1 VR image displayed on K-CAVE that was manufactured through this study	81
Fig. 4-2 View of semi-immersive VR Tables.	481
Fig. 4-3 Motion tracking system (FOB)	8
Fig. 4-4 Ocean fusion data for 3 dimensional time-dependent ocean modeling.	81
Fig. 4-5 A view of GIS Map Service (http://vrocean.kordi.re.kr).	187
Fig. 4-6 A sample VRML image on web (http://vrocean.kordi.re.kr).	8
Fig. 5-1 The bottom topography (m) of the East Sea.	11
Fig. 5-2 Schematic map of surface current systems in the East Sea (after Tomczak and Godfrey, 1994).	3
Fig. 5-3 Climatological monthly mean wind stress for (a) January, (b) April, (c) July, and (d) October, using the COADS data.	16
Fig. 5-4 Climatological monthly mean net heat flux ($W\ m^{-2}$) for (a) January, (b) April, (c) July, and (d) October, using the COADS data.	198
Fig. 5-5 Climatological monthly mean precipitation minus evaporation for (a) January, (b) April, (c) July, and (d) October, using the COADS data.	199
Fig. 5-6a Initial fields from the climatological data (Levitus, 1982) at different depths: (a) temperature, and (b) salinity.	202
Fig. 5-6b Initial fields from the climatological data (Levitus, 1982) at different depths: (a) temperature, and (b) salinity.	203
Fig. 5-7a Vertical cross-sections of monthly mean (a) temperature and (b) salinity at the Tsushima/Korea Strait.	205
Fig. 5-7b Vertical cross-sections of monthly mean (a) temperature and (b) salinity at the Tsushima/Korea Strait.	206
Fig. 5-8 Temporal variation of total kinetic energy per unit volume ($kgm^{-1}s^{-2}$) during the model initialization.	208
Fig. 5-9 Simulated monthly mean sea surface temperature ($^{\circ}C$) field.	0
Fig. 5-10 Simulated zonal cross-section of the monthly mean temperature ($^{\circ}C$): (a) $37^{\circ}N$, (b) $43^{\circ}N$ and (c) $37.5^{\circ}N$	212
Fig. 5-11a Simulated meridional cross-section of the monthly mean temperature	

(°C) along 135°E.	216
Fig. 5-11b Simulated meridional cross-section of the monthly mean temperature	
(°C) along 130.9°E.	217
Fig. 5-12 Simulated monthly mean sea surface salinity (psu) field.	219
Fig. 5-13 Simulated zonal cross-section of the monthly mean salinity (psu):	
(a) 37°N, (b) 43°N and (c) 37.5°N.	220
Fig. 5-14a Simulated meridional cross-section of the monthly mean salinity	
(psu) along 135°E.	224
Fig. 5-14b Simulated meridional cross-section of the monthly mean salinity	
(psu) along 130.9°E.	225
Fig. 5-15 Simulated monthly mean surface velocity vector field.	27
Fig. 5-16 Simulated monthly mean meridional velocity(cms^{-1} , +ve northward) ..	822
Fig. 5-17 Simulated bi-weekly surface velocity vector field in the	
Ulleung/Tsushima Basin.	22
Fig. 5-18 Simulated monthly mean meridional velocity (cms^{-1}) along 40°N. ..	32
Fig. 5-19 Simulated monthly mean zonal velocity (cms^{-1} , +ve eastward) along	
135°E.	232
Fig. 5-20 Simulated monthly mean meridional velocity (cms^{-1}) along 36°N. ..	42
Fig. 5-21 Simulated monthly mean zonal velocity (cms^{-1} ; +ve eastward) in the	
upper layer around Ulleung Do(130.9°E).	2
Fig. 5-22 Simulated monthly mean meridional velocity (cms^{-1} ; +ve northward)	
in the upper layer around Ulleung Do(37.5°N).	26
Fig. 6-1 Surface Ekman velocity for Feb. & Aug. using wind data.	12
Fig. 6-2 Surface barotropic currents for Feb. & Aug. calculated from sea	
surface height anomaly.	242
Fig. 6-3 Surface barotropic currents for Feb. & Aug. calculated from GDEM	
data.	243
Fig. 6-4 New grid system for the POM-ES Model.	542
Fig. 6-5 Model domain and Bottom topography for the POM-ES.	542
Fig. 6-6 (a) Tracks of T/P satellite in the East Sea (b) Schematic diagram	
for generation of grid from SSA data.	247
Fig. 6-7 Interworking structure of the database.	249

Fig. 6-8 Weight factor used in interpolation between GDEM and Levitus data. ·	72
Fig. 6-9 Sea surface currents calculated using POM-ES a) Apr., b) July, c) Oct. d) Jan. ······	251
Fig. 6-10 Monthly trend of the main currents transport volume. ······	2
Fig. 6-11 Sea surface elevation calculated using POM-ES a) Apr., b) July, c) Oct. d) Jan. ······	253
Fig. 6-12 Sea surface temperature calculated using POM-ES a) Apr., b) July, c) Oct. d) Jan. ······	254
Fig. 6-13 Mid-depth(500m) currents calculated using POM-ES · a) Apr., b) July, c) Oct. d) Jan. ······	255
Fig. 6-14 Bottom(3000m) currents calculated using POM-ES a) Apr., b) July, c) Oct. d) Jan. ······	256
Fig. 6-15 SSA estimated from using Topex/ Poseidon and ERS-1/2 around polar front region (Mar. & Sept.). ······	258
Fig. 6-16 Eigenvector distribution using EOF analysis from sea surface height anomaly. ······	29
Fig. 6-17 The amplitude of 6 main mode and the spectrum analysis from EOF analysis of sea surface height anomaly. ······	29
Fig. 6-18 SSA estimated from EOF analysis around polar front region (Mar. & Sept.). ······	260
Fig. 6-19 Initial page of East Sea Circulation Study. ······	261
Fig. 6-20 DB page of East Sea Circulation Study. ······	2
Fig. 6-21 Wind DB page of East Sea Circulation Study. ······	3
Fig. 6-22 Geostropic current DB page of East Sea Circulation Study. ······	4
Fig. 6-23 Model description page of East Sea Circulation Study. ······	5
Fig. 6-24 Surface and 200m-depth currents calculated by P-vector method with GDEM data. ······	6
Fig. 6-25 Examples of model experiment (2 year continuous run). ······	72
Fig. 7-1 Depth-latitude section of the temperature along 134°E Exp A0(up), Exp A1(bottom). ······	21
Fig. 7-2 Depth-latitude section of the temperature along 134°E Exp B1(up), Exp C1(bottom). ······	22

Fig. 7-3 Seasonal variations of the SST averaged over (a) northern area, (b) southern area.	283
Fig. 7-4 Seasonal variations of the RMS error of the SST averaged over (a) northern area, (b) southern area.	286
Fig. 7-5 Horizontal distribution of the mixed layer depth(m) in Feb..	288
Fig. 7-6 Horizontal distribution of the mixed layer depth(m) calculated from the Levitus monthly temperature data.	29
Fig. 8-1 The bottom topography(m) of upwelling test.	3
Fig. 8-2 The initial condition of salinity for upwelling test.	304
Fig. 8-3 Simulated temporal variation of surface salinity and velocity in upwelling test.	305
Fig. 8-4 Simulated cross-sections of salinity and velocity in upwelling test.	309
Fig. 8-5 The bottom topography(m) of coastal plume test.	3
Fig. 8-6 The initial condition of salinity for coastal plume test.	314
Fig. 8-7 Simulated temporal variation of surface salinity and velocity in coastal plume test.	315
Fig. 8-8 Simulated cross-sections of salinity and velocity in coastal plume test.	317
Fig. 8-9 The bottom topography of the East Sea for ROMS application.	3
Fig. 8-10 Simulated mean surface velocity field.	322
Fig. 8-11 Simulated cross-section of mean velocity along 32°N.	323
Fig. 8-12 The bottom topography of the Yellow Sea for ROMS application.	3
Fig. 8-13 Simulated mean surface velocity field.	328
Fig. 8-14 Simulated cross-section of mean velocity along 32°N.	3
Fig. 9-1 A view of a semi-immersive display on the VR Table.	433
Fig. 9-2 A view of K-CAVE in DOVE system(4 screen, 2.1m×2.1m).	433
Fig. 9-3 VR image of the bathymetry of the East Sea(1/12°)	3
Fig. 9-4 VRML image of the bathymetry of the East Sea.	33
Fig. 9-5 Surface temperature and current distribution in August in the East Sea.	337
Fig. 9-6 VR image of surface currents and temperature and vertical structure	

of temperature along zonal cross-section. 337

Fig. 9-7 Closer view of temperature and current fields around Ulleung Do its
vGeo image. 338

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 필요성

1. 개요

최근 환경의 중요성과 함께 발달되는 컴퓨터의 계산 속도와 처리 능력은, 지난 수년 전만 해도 감당할 수 없었던 수백 Tera급 자료를 처리한다. 특히, 해양이나 대기과 같은 큰 규모의 자연현상에 대한 장기적이고 상세한 공간 구조의 변화 분석을 위해서는 실시간에 가까운 수치 시뮬레이션을 요구하고 이로부터 엄청난 시뮬레이션 자료가 생산된다. 하지만 이렇게 생산된 방대한 양의 자료들은 거의 보지 못하고(아니 볼 수 없을 정도로 많고) 극히 제한된 양의 자료만이 보편화된 방법의 자료 검색엔진을 통해 사용된다. 즉 보다 정확한 현상 규명을 위해서는 복잡하고 수많은 격자에서 계산되는 수치 모형의 결과를 필요로 하는 만큼의 자료 분석 틀이 결여된 현재 상황에서는 볼 수 있는 방법이 없다는 뜻이다.

자연의 물체 또는 구조를 정확하게 인식하기 위해서는 사물의 원근감이 생명이다. 크기와 색상 그리고 배경에 대한 감각은 기존의 2차원적 컴퓨터 그래픽스로서는 구현하기 어렵다. 최근 컴퓨터그래픽스기술의 발달로 3차원적 그래픽을 제시하기 위해서 소위 'perspective plot' 모드를 많이 사용하지만, 이 방법에 의한 그래픽은 원근감이 포함된 입체감과 회전시 진정한 입체적 뒷면을 보는 것이 아닌 일종의 3차원 'trick'을 제공한다.

최근 개발된 몰입성 VR기술을 이용한 3차원 입체 영상으로부터 거리 원근감을 유지하면서 회전시키고 끌어당겨 보다 상세한 구조가 분석될 수 있다. 이러한 점을 이용하면 자연의 현상도 보다 정밀하고 상세하게 분석되고 규명될 수 있다. 예를 들면 렌더링된 해저 지형 위에 유속의 방향과 속도를 입체화시킴으로써, 해저지형의 형태에 의한 해수의 흐름장의 변화를 분석할 수 있다. 즉 해저환경을 VR 이미지화 하면, 단순한 contour plot으로 해석될 수 없는 현상을 재현하고 분석하는데 매우 유용하다.

최근 들어 세계 각 국의 해군 작전능력은 2차 세계대전 이후의 깊은 바다에 대한 해군력보다는, 보다 소형이고 소음이 적으며, 잠수기간이 길어진 잠수함의 개발

로 인하여, 연안해양환경에 대한 지식의 중요성이 증가하고 있다.

해양에서의 해류의 흐름과 밀도의 변화를 일으키는 각종 현상은 정밀한 수치모형으로부터 예측될 수 있으며, 시간에 따라 변화하는 해양의 물성구조에 대한 특성 파악은 수중 수영작전, UUV 작전, MCM 작전, 천해 ASW와 잠수함 운영 등에 필수적이다. 미국과 같은 해군력 선진 외국에서는 정확하고 분해능이 매우 높으며 시간을 포함하는 4차원 해양환경의 변화구조를 해군의 연안작전에 활용한다. 이렇게 연안 해군 작전에 적합하게 활용될 수 있는 해수 흐름과 물성 특성은 수평적으로는 10m-1km의 분해능, 수직적으로는 수m간격, 그리고 시간적으로는 수 시간에서 수일의 시간 분해능을 필요로 한다. 이러한 중요성과 응용성을 고려하여, 본 연구에서는 응용단계에서 개발된 가상현실 기법의 해양환경 시뮬레이션과의 접목기술을 활용하여 군사적으로 활용도가 높은 가상해양전장환경의 구축과 민간 해양환경분석에 널리 활용될 가상해양환경 시스템의 활용을 추구하고자 한다.



[연구과제의 목표 결과의 하나인 가상해양 전장환경의 개념도]

2. 연구 개발 필요성

가. 기술적 측면

사실적 자연환경정보를 얻으려는 사용자들, 항해자, 군사작전 관련자, 해양과학자, 해양관련 산업 종사자, 어업종사자 그리고 해양환경감시자 등은 해양의 상황 판단에 필요한 해상 상태 예측 정확도를 높이기 원하며, 또한 해양수중에 있는 사용자들도 긴밀한 정보교환의 체계를 필요로 한다. 따라서 다양한 사용자들의 목적에 활용될 수 있고 용이하게 해양자료와 해상상태에 대한 접근을 가능하게 해주는 가상해양환경의 구현이 요구된다.

이러한 가상해양환경 시스템을 구현하기 위해서는 무엇보다도 현실적인 해양환경자료가 정밀하게 제시되어야 한다. 해양환경에서 제시되는 주요 요소로서는 수온, 염분,(밀도, 음속, 표층혼합층), 3차원 유속, 천해 및 심해파랑, 연안류, 해저지형 및 해안형태, 해상풍, 해무, 해저 지구물리특성 등이며, 각 요소의 특성은 각기 서로 다른 변동특성을 지니고 있다.

본 사업에서는 우리나라 주변해역의 해양상태를 보다 현실적이고 정확한 수준의 준 실시간으로 예측하는 모델링 시스템을 갖추고, 이들 예측자료의 빠른 가시화 및 현실감 있는 입체 정보의 전달을 위해 가상현실 재현장치를 이용하여 가상해양전장환경을 구축한다. 여기에 각종 해양전술정보와 기상자료, 원격운용자료 등을 제시함으로써 해양전술자료의 추출이 가능해지며, 이러한 기술을 가능하게 해주는 가상해양환경의 구축이 필요하다.

이러한 관점에서 제시된 목표기술의 달성을 위해 다음과 같은 기술이 요구된다.

1) 해양수중 환경의 정밀 예측기술

가상해양환경의 구현은 해양의 보다 현실적이고 사실적이며 정확한 자료를 필요로 한다. 그러나 바다의 물리적 환경은 끊임없이 변화하여 지구표면의 2/3 이상을 차지하는 바다의 현상을 직접 관측에만 의존하는 것은 불가능한 일이다. 관측자료가 부족한 문제점을 극복하기 위한 방안으로 각종 첨단장비에 의한 관측자료를 바탕으로 수치모형의 운용 및 수치모형 결과의 검증 등의 과정을 통하여 과학적인 자료의 생산이 가능하기도 하다.

본 사업의 수행은 과학적 자료의 생산이 동반되어야 하며, 이를 위해서는 응용 단계에서 개발된 3차원 해양수치모델을 보다 정밀도 높은 수준으로 끌어올릴 필요가 있다. 이러한 과정에서 우선 해양의 현상에 기본적 힘을 제공하는 해상기상상태의 정보를 준실시간으로 활용하는 기술이 필요하고, 고정 및 표류부이(ARGO 등), 원격탐사자료 등의 자료동화 과정이 연계된 표층과 저층의 분해능이 우수한 최첨단 모델(예, ROMS 등)을 활용하여 준실시간으로 연안 및 외양의 상태를 정밀하게 예측하는 기술이 필요하다.

2) 가상해양전장환경 구축기술

정보의 가시화 기술은 과학기술 분야에서 아주 중요한 부분이다. 실제로 간단한 형상의 경우에는 정보의 양도 그리 많지 않기 때문에 누구나 쉽게 가시화 기술을 가질 수 있지만 해양 환경이나 기상환경 등과 같은 복잡한 여러 형태가 한꺼번에 나타나거나 실제로 눈에 보이지 않는 정보를 가시화하는 경우, 그리고 그 정보의 양이 아주 방대한 경우는 간단하게 가시화하기에는 어려운 문제점을 가지고 있다.

이러한 가시화 기술은 기존의 2차원적인 접근 방법에서 탈피하여 3차원적인 접근방법을 도입함으로써 사용자가 3차원 정보로부터 보다 많은 정보를 정확하게 인식할 수 있도록 하여야 하며, 여기에 회전과 애니메이션 등을 추가하여 5차원적인 구조를 가짐으로써 보다 효과적인 정보 전달을 수행할 수 있게 할 필요가 있다.

또한 이와 같은 가시화 기술이 인간과의 상호작용을 포함하게 되면 훨씬 더 복잡한 형태를 가지게 되며, 여기에 컴퓨터 통신망을 이용하여 여러 사용자가 동시에 참여하게 되는 경우에는 더욱 복잡한 형태를 가지게 된다. 이와 같은 환경은 사용자 중심의 환경정보 운용 역량을 확충하기 위해서는 아주 중요한 요소로 작용하게 된다.

이들 가시화 및 가상해양전장환경의 구축과 더불어 해양 전술 정보를 수집하고 해석하여 이를 체계적으로 통합제시하여 원격지에서도 서로 자료와 VR 영상을 공유하는 연구도 반드시 필요하다. 이를 통하지 않고서는 많은 사용자들이 이들 정보를 이용하는데 한계점을 가지게 될 뿐만 아니라 수집된 정보를 사장시킬 수 있다.

종합적으로 가시화를 위한 해양정보의 설계, 이로부터의 가시화 및 사용자 상호작용, 그리고 마지막으로 필요한 정보를 가상 해양 환경 상에서 공유함으로써 해양 데이터를 보다 효과적으로 운용할 수 있는 기틀을 마련할 수 있게 된다.

5차원 해양환경 자료는 정밀현장관측 자료, 수리역학의 3차원 시뮬레이션 그리고 상황에 필요한 창조적 인공 그래픽스 등을 컴퓨터로 가시화한 것으로써, 실제 해양현상과 가상현실기법이 결합된 21세기 첨단기술의 개발이 요구된다.

가상현실 재현장치에 의한 가상해양환경 활용과 병행하여 인터넷 상의 3차원 동영상 처리기법인 VRML(Virtual Reality Modelling Language)에 의한 실시간 전환 기술과 같은 체계운용의 선진기술 개발이 요구된다.

나. 사회적/경제적 측면

가상해양환경의 구현은 현장감과 몰입감을 느끼며 실제 상황과 같은 모의 실험을 할 수 있는 가상적 현실환경이므로 해양관련 산업의 계획 및 분석시에 최적의 대안을 선택할 수 있도록 의사결정을 지원할 수 있으며, 사전에 문제점을 미리 찾아내어 사후 문제 발생에 대한 처리비용을 줄일 수 있다.

즉 실제 현상에 적용한 대상실험을 시간, 크기, 재현성, 위험도 등의 이유로 사전 모의하고 필요한 제원의 변화에 따른 반응 결과의 사전 예측으로 상당한 경비 절감효과를 가져다준다. 또한 해양 생태계 및 해양관련 보전을 위한 국민홍보 및 교육매체로도 이용할 수 있으며, 해양관광자원의 개발을 다양화 할 수 있는 계획에도 유용하게 활용될 수 있다. 현장관측을 바탕으로 한 수치모형을 이용한 가상해양환경의 구현은 21세기 첨단 정보제시기술과 결합되어 재난대비, 해양개발, 환경보전 및 수산자원관리등 각종 해양환경 분석의 측면에서 매우 중요하다.

본 연구사업을 통하여 구현되는 가상해양환경 모듈을 수많은 요소기술들의 복합체로 구성된다. 현재 경제/사회 각 분야에서 VR 관련기술의 활용이 확대되고 있으며, 자연환경의 사실적 자료의 변동값의 실시간 제시기술은 VR 분야에서 가장 난이도가 높은 분야이다. 따라서 동남아시아 및 세계시장을 겨냥한 VR 산업 (소프트웨어 및 VR 구현장치 : 이미 응용단계에서 개발한 VR 영상스크린 시스템은 수입대체 효과 약 10억원의 절감을 가져옴)의 활성을 육성할 필요가 있다.

다. 군사적 측면

○사용자 중심 운영의 해양전술환경정보를 운용역량 확충을 위해 쉽게 종합하고 제시할 수 있는 기술의 개발이 필요함.

- 해군작전과 해양 연구간의 주요 요소기술의 공유를 위한 기술협력 필요
- 해양환경의 이해를 필요로 하는 해군 및 상륙 작전에는 대상 바닷 속 및 주변 환경을 보고 느낌으로써 환경인지도가 훨씬 높아져 작전 수행능력이 증가됨.
- 인간은 3차원적 형상을 지니고 있어, 물체의 3차원적 모양으로부터 보다 많은 정보를 정확 하게 인식하는 기능이 있음. 따라서 해양의 환경요소를 공간 3차원과 시간, 그리고 환경요소를 포함하여 5차원으로 분석하고 제시하는 기술이 요구됨.
- 가상해양전장환경의 현황을 이용하여 각종 성분작전의 시뮬레이션할 수 있는 전장 제공이 필요.
- 일반적 해양환경자료의 원격 및 벽지 전달체계 효율화를 위하여 인터넷을 통한 3차원 가상 현실기법 (VRML)의 구현이 필요함.
- 대잠, 대함작전 등 해양방위를 위한 신뢰도 높은 3차원 수중환경과 해수순환의 재현 및 미래 예측 정보필요.
- 항공작전과 지상작전 및 해상작전에 필요한 해상풍, 파랑 및 해무발생을 예측하고 작전해역 현장에서 해상상태를 미리 파악할 수 있는 실시간 예보체계를 개발하여 작전수행을 위해 군 자체적으로 양질의 해양기상정보를 활용 할 수 있는 능력보유가 필수적.

제 2 절 연구개발목표 및 내용

1. 연구개발의 최종목표

해양환경(해저면부터 해수면 밖 해양기상권까지 포함)의 현재 그리고 미래의 상태를 가상현실기법을 응용하여 5차원 (공간 3차원, 회전, 애니메이션) 구조로 표출하는 가상해양환경 시스템(하드웨어와 소프트웨어 통합)을 개발하고, 이를 이용하여 각종 해군(해병 포함)작전 시뮬레이션, 해양환경 및 기후 변화에 대응한 시뮬레이션과 분석에 활용할 수 있는 미들웨어 통합시스템을 구축한다.

【 가상현실의 특성: 현장 몰입성, 컴퓨터와 인간과의 상호 의사교환, 원격 사용자간의 동시 분석 등을 할 수 있는 5차원 컴퓨터 그래픽스 표출기술: 5차원 가시화(Visualization in 5D), 상호작용(Interaction), 협동성(Collaboration), 몰입성(Immersion) 】

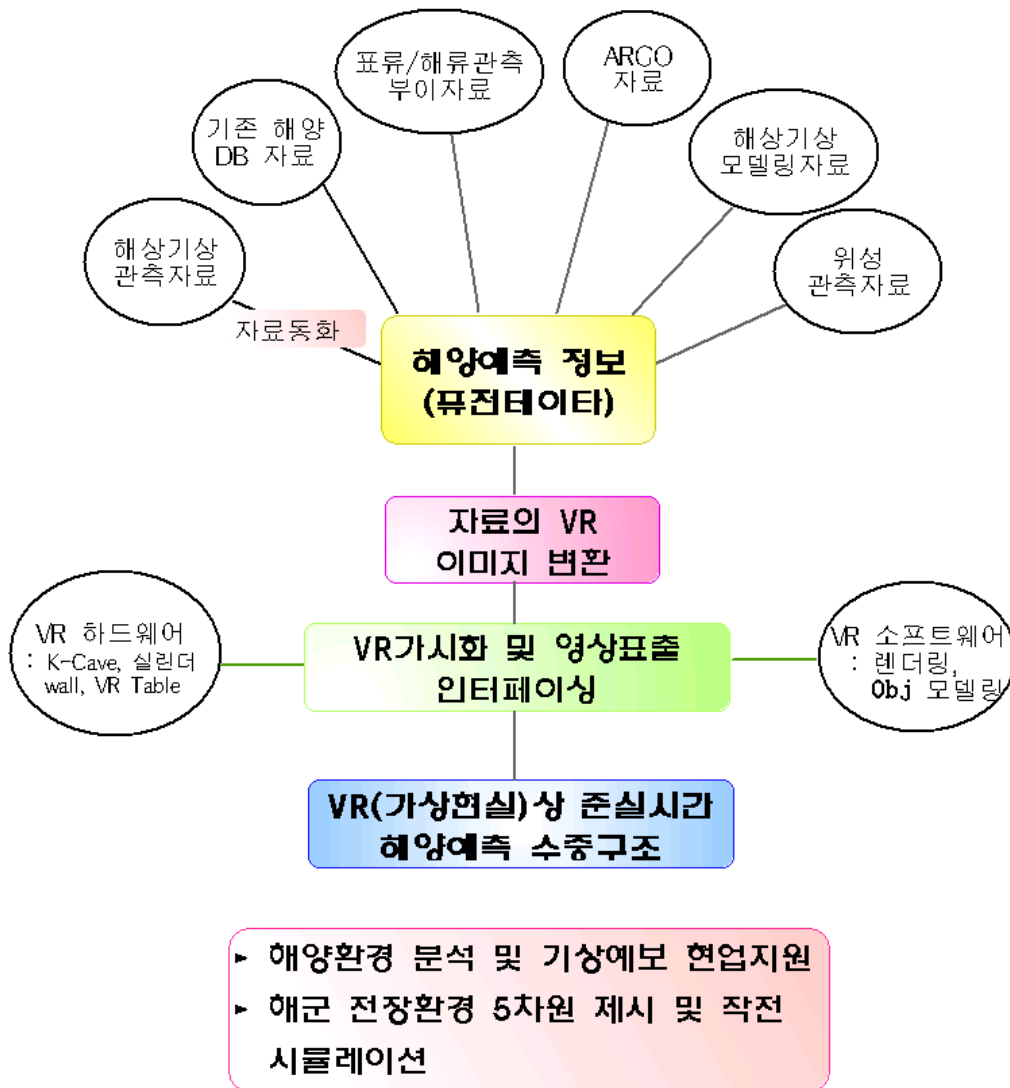
2. 단계별 연구 내용

단계 구분	연구개발 목표
<p style="text-align: center;">응용개발 단계 (기수행단계 1999-2001)</p> <ul style="list-style-type: none"> •해양물리 환경의 분석 및 예측기술 •해양기상 특성 분석 및 예측기술 •해저지형 특성 •가상해양환경의 구축 및 응용기술 	<ul style="list-style-type: none"> •5km이내 격자의 해양예측 및 모니터링 시스템과 연계되어 5차원 전장환경으로 표출하는 기술을 개발하고, 몰입형 입체적 이미지가 운용자의 위치 변화 의지와 의사교환이 가능한 가상해양환경 시스템을 구축 •동굴식(CAVE) VR표출 영상막 국산화 저작 설치로 10억원 이상 외화 절감.
<p style="text-align: center;">시험개발 단계 (계획단계 2002-2003)</p> <ul style="list-style-type: none"> •정밀 준실시간 해양 수중구조 예측 기술 •해양전장 환경 시뮬레이션 기술 •해양 푸전데이터 원격 활용 및 협동 VR 활용 	<ul style="list-style-type: none"> •2km이내의 해양환경 예측시스템과 연계하여, 가상해양환경시스템을 해군작전 시뮬레이터의 현장으로 활용하는 미들웨어 제작 <ul style="list-style-type: none"> - DIS(전장환경정보)조건 제시와 Object의 GPS, 해양 실시간 관측 자료 등이 동시에 동화되어 실제 상황을 바탕으로 한 작전 및 환경 시뮬레이션 가능 •VR 영상장치 및 미들웨어의 수출 증대 및 국내 활용 증대에 의한 외화 절감 효과 100억원 달성

3. 추진전략 및 방법

가. 추진체계

- 주관연구기관 : 한국해양연구원
- 공동연구기관 : 기상연구소



나. 추진방법

- 연구 사업팀 내에 사업운영위원회를 상설 운영하여, 사업의 상시 평가제도 도입. 운영위원의 구성은 민.군.관의 전문가로 구성하며, 사업 목표관리를 위한 기대 사용자 (ADD, 해군)와의 정기적 협의.

- 운영위원회의 기능: 본 연구사업의 진행현황 수시 평가, 방향 조정기능, 필요시 공동 및 위탁연구기관의 연구수행기능 평가, 연구내용 및 연차별 연구비의 조

정 기능. 민군 활용성 제고를 위한 시험평가 방법 도출.

- 기술적 접근방법

•시험평가 단계는 주관연구기관 중심으로 연구 사업을 진행, 분산적 연구 결과의 통합 활용 및 시험 평가 기술의 상품성 개발에 역점을 둔다.

•이를 위해서 수출 기대성이 큰 VR 영상막 제작기술업체를 협력업체로 하고, 작전/환경/기후 시나리오에 따른 미들웨어를 공동 저작할 수 있는 기업체 연구소와 위탁 연구를 수행한다.

•선진국에서 개발하고 있는 VR기술을 활용한 해양환경 시뮬레이션의 기술 교류를 위해 NASA 파트너들과 긴밀한 협조를 한다.

•우리나라 실질적 적용을 위한 기술교류를 활발히 추진하며, 해군 해양정보단과 국과연(해군)과도 정기적 협의를 수행한다.

•민수 부분의 기술활용 증대를 위해서 가상해양환경 시스템의 공개 시연회를 4개월마다 1회 개최한다.

4. 연도별 연구개발 진행체계

- 연도별 연구목표(시작년도부터 최종년도까지)

구 분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위	비고
1차년도 (1999)	계절별/월별 해양 및 해상기상 요소의 10km 이내 격자망의 3차원 자료 가시화 및 해양 상태의 5차원 가상환경화 기술개발	-광역 해양모델 (수평격자 10km급) 3차원 해수유동 모델의 수립 및 각종 외력에 대한 연안모델 수립 (5 km급 정밀성 유도) -해안 및 해저지형 자료 모델링 및 렌더링기술(38°N - 39°N, 동해안-독도해역) (100m 급) - 해군의 해양기상자료 3시간 간격 실시간 자료수집 시스템 구축 -중규모 기상모형MM5에 의한 해상풍 및 해무 48시간 예측시스템 구축 -VRML을 이용한 인터넷 3차원 가시화 기반기술수립 -가상현실재현장치의 운용을 위한 영상 실험실 부분 구축 (시스템 도입 및 시험운영)	해양환경요소 (수온, 염분, 음속, 3차원 유속, 심해 및 천해 파랑, 연안류, 해저 및 해안지형)

구 분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위	비고
2차년도 (2000)	해양 및 해상기상 환경요소의 5km이내 격자망 규모의 원격 분산생산자료의 동영상 실시간 가시화 제시 및 통신망 연동에 의한 5차원 가상 해양환경 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> -표층혼합층 (수심 10m 간격)의 변동 및 해수특성 변동자료 생산기술 -수평격자 5 km급 동해 3차원 해양모델 수립 및 월별/순별 해양자료 예측 및 기존자료와의 검증 -국지정밀 3차원 해수유동 모델의 수립 및 각종 외력에 대한 해양환경자료 생산, 국립해양조사원/ 국립수진원/ 한국해양연구원/ 해정단/ 미군해군과 기타 DB 등 관측 및 정밀관측자료 비교 검증 -국지지역 해상풍, 해무 예측: MM5응용,수평격자 5km 연직 25층, 시정계 설치/ 해상풍관측자료 비교 검증 -잠수함 탐지를 위한 해상풍과 파랑에 의한 수중소음 및 MLD 예측 시스템 구축 -기상외력의 실시간 입력 및 100m 이내 파랑예보의 nesting 모델 구축 및 위성관측 파랑 자료와 검증부이, AWS, CC카메라, 시정계, SST관측에 의한 실시간 초기관측치의 자료동화 기법 확립 -동해연안류 3차원 유속 및 해수특성 검증 (관측/기존자료) -해안 및 해저지형 자료 렌더링 및 자료 GUI 편집기술 (38°N - 39°N, 동해안-독도해역)(해양조사원 정밀수치해도 활용) -VRML을 이용한 인터넷 3차원 가시화 기술 -가상현실재현장치의 운용을 위한 연계 소프트웨어의 개발 -VR device를 이용한 가상해양환경 스튜디오 구축 및 해양과 기상자료의 실시간 영상표출 시험운용 	해양환경요소 (수온, 염분, 음속,3차원 유속,심해 및 천해 파랑, 연안류, 해저 및 해안지형) + 해저지구물리 특성 (가상자료 D/B: 실제 자료 치환 기능)

구 분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위	비고
3차년도 (2001)	해상기상 및 해양 환경요소의 1km이 내 격자망 예측모 형에 의한 구조를 5차원 가상해양환 경으로 표출하는 시스템 개발 및 이를 해군 작전 시험 평가에 시범 활용	<ul style="list-style-type: none"> -원격지 제3자에 의한 3차원 해양 수리 역학 모형 결과 및 임의 D/B 자료를 수용하여 동영상 정보화 할 수 있는 기술 (수치모형, D/B 치환기술) -임의 해상에서의 계류 유속 관측 및 항해에 의한 유속 구조 관측 자료의 실시간 전송 및 활용기술 -기상수치모형의 기상 해양 환경 모듈 과의on-line 연계 기술 -해상종합부이 시스템 (해상 기상, 수 질, 해류, 원격 전송)의 상용화 -가상현실 재현장치의 조기 국산화 착 수 -가상현실 재현 장치의 운용을 위한 초 고속 S/W 변환기 개발 -가상해양환경 5차원 (3차원 공간, 회 전, 애니메이션) 종합 모듈 시험운용 -교육 및 작전 도상훈련을 위한 사전 시뮬레이션 시험평가 	해양환경요소 (수온, 염분, 음속, 3차원 유속, 심해 및 천해 파랑, 연안류, 해저 및 해안지형)

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국외의 현황 분석

1. 기술현황

가상해양환경구현 기술

- 가상현실기법은 공학, 생산제조, 건축, 도시계획, 지구물리, 의학, 항공우주 그리고 기타 분야의 특성에 맞게 다양하게 진보되며 활용 시도되고 있음.

- 가상환경기법은 미국과 유럽에서 이미 활용시도 단계이며, 국제학술회의를 수 차례 개최한 적이 있음.

- 가상해양환경기법은 1990년대부터 미국해군연구소 (NRL)의 중점추진과제로 진행되어 왔음. 또한 미국해군대학원(NPS)과 ODU연구팀 (Wheless 박사팀)의 합작으로 체사피크만 해역에 대한 가상해양환경을 구축하여 운용함으로써, 해양환경 보전과 필요시 군사작전에 활용하고 있음.

- 가상해양환경 구축에 필요한 재현장치인 CAVE, BOOM, ImmersaDesk 등이 개발되어 활용되고 있으며, 정밀한 3차원 수치모형과 첨단 해양측정장비의 개발이 지속적으로 추진되고 있음.

- 특히 최근 미국해군관련기관(NRL, ONR, DARPA(해군), NASA 등) 및 유럽 해양선진국에서는 해군작전의 사전 시뮬레이션, 무기체계의 성능 시험평가, 교육 및 전장환경의 원격분석 등을 위해 가상해양전장환경을 구축하여 활발하게 운용중임(그러나 대부분의 내용은 confidential로 분류되어 있음).

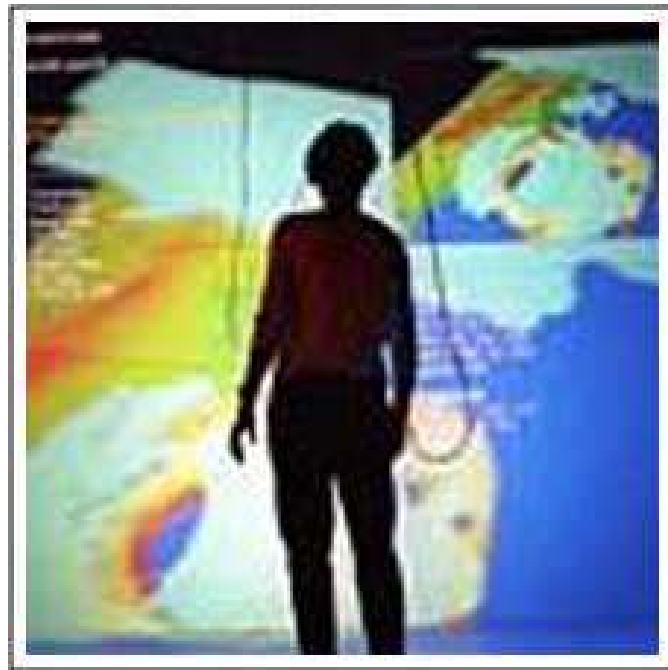
과학자료의 가시화 기술

- 지금까지의 연구개발 실적

외국의 경우 가상 해양 환경을 구축하는 연구는 많이 수행되어 왔다. 하지만 이 연구들의 대부분은 위성 사진으로부터 해안 환경을 만들거나 간단한 해저 환경

가시화 하는 연구에 수행하고 있다. 또한 이를 위하여 여러 기관들에서는 다양한 해양 정보를 수집하여 이들은 일반에게 공개하는 작업도 진행되고 있다.

반면 과학 정보 가시화의 경우에는 좋은 결과들이 많이 이루어지고 있다. 특히 University Corporation for Atmospheric Research에서는 netCDF와 같은 공통 파일 형식을 만들어 제공하고 있으며, 이를 이용하여 Swiss Federal Institute of Technology의 Institute for Atmospheric Science에서는 ARGOS라는 시스템을 개발하여 기상환경을 가시화하는데 사용하고 있다.



【 CAVE를 이용한 기상 환경 가시화 시스템 】

또한 NASA의 Numerical Aerospace Simulation Facility에서는 다양한 유동 해석 등에 관련된 정보 해석 및 가시화에 관련된 연구를 수행하여 정부, 산업계, 학계에 이러한 기술들을 지원하고 있다.

- 연구개발 또는 사업화 단계

선진 외국의 경우도 아직은 전체적으로 가상 해양 환경을 이용한 연구 내용을 사업화 하는 단계에는 이르지 못하고 있고 대부분이 독립적인 형태로 요소 기술들이 연구 개발되고 있는 실정임.

그러나 과학 가시화 분야의 경우에는 이미 특정 용도에서 사업화 과정이 이미 끝나고 성숙 단계에 이르고 있지만 아직은 3차원 가상 환경을 이용한 과학 가시화나 상호작용적인 가시화 및 대규모 데이터의 가시화의 경우에는 연구 개발이 아직 이루어지지 못하고 있는 실정임.

2. 소요기술 분석

【주요 구성품에 대한 소요기술 및 설명】

연구대상 분야	구성품	소요기술	내용	소요 시기
가상해양전장환경 구축 및 응용기술	환경 및 퓨전자료의 가시화 기술	<ul style="list-style-type: none"> •대규모자료 처리기술 •지형 모델 연동 기술 •VRML관련기술 •과학정보가시화기술 •네트워크 응용 기술 •VRML연동기술 •전송 여과 기술 	<ul style="list-style-type: none"> •대규모 과학 자료로부터 구성된 자료 구조를 실시간 처리하는 기술 •가상 환경에서 제시될 과학 정보 자료를 VRML 기법을 이용하여 가시화하는 기술 •분산 환경에서 가상환경을 효율적으로 공유 하기 위한 기술 	2002. 8-2004.8
가상해양전장환경 구축 및 응용기술	민군 활용을 위한 가상해양환경의 구축	<ul style="list-style-type: none"> •가상해양환경 5차원 종합 그래픽스 환경 구축기술 •가상현실 재현장치의 운용 및 연계 소프트웨어 개발 •시나리오에 의한 작전 시뮬레이션 기술 •대상해역의 해상 상태별 전술정보 통합시뮬레이션 •가상현실 제시 시스템의 조기 국산화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> •해안, 해저, 해수, 해류 및 기상현상의 종합 표출기술 •5차원 해양환경의 저작 및 VR-desk, K-CAVE에 연동될 인터페이스 개발 및 변환기술 •수상함, 잠수함 능동 및 수동 탐지거리, 각종 체계제원 산정, 탐지거리, 레이더 도달거리 등의 운용자 활용기술 •파랑, 바람, 해류, 수온, 해안선 형태 등에 따른 해안 상륙작전의 시뮬레이션 및 최적 방안제시, 표류물체의 추적 •VR-desk, K-CAVE 수준의 재현장치 국산제품개발 및 상용화 	2002. 8-2004.8
해양환경의 정밀 예측 기술	3차원 해양 순환 모델	<ul style="list-style-type: none"> •해양특성예측모델링 •준실시간 예측 3차원 해양수리역학 모델링 •외해-연안 연계 및 표층 저층 고분해능 기술 	<ul style="list-style-type: none"> •수괴특성, 밀도, 음속분포, 평균상태, 현재, 미래상태 등의 기반자료활용의 VR 변환 •수리역학과 연계, T, S의 외력에 대한 변동성 VR 변환 •3차원 연안 모델링 •광역모델로부터의 nesting 기법 •고정 및 표류부이에 의한 해류구조 관측, 모델 입력화 (관련사업과 연계) 	2002. 8-2004.8 2002. 8-2004.8
해양기상정보활용	해양기상 정보의 예보전달시스템	<ul style="list-style-type: none"> •자료의 표준화 생산 및 예측자료 연계구동 기술 	<ul style="list-style-type: none"> •실시간 및 48시간 예보(MM5) 및 예측(해상풍, 열속, 파랑 등)자료의 표준 netCDF에 의한 자료생산 및 분배 •각 예측모형의 실시간 연계구동을 위한 인터페이스 구축 	2002. 8-2004.8

【소요기술 확보현황】

연구대상 분야	확보 기술	미확보 기술	대책
가상해양 환경 구축 및 응용기술	<ul style="list-style-type: none"> 가상해양전장환경 5차원 종합 그래픽스 환경 구축기술 가상현실 재현장치의 운용 및 연계 소프트웨어 개발 시나리오에 의한 작전 시뮬레이션 기술 대상해역의 해상 상태별 상륙 작전 시뮬레이션 가상현실 제시 시스템의 조기 국산화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 해안, 해저, 해수, 해류 및 기상 현상의 통합 표출기술 5차원 해양환경의 저작 및 입체영상 표출기에 연동될 전술정보 인터페이스 개발 및 변환기술 수상함, 잠수함 능동 및 수동 탐지거리, 각종 체계제원 산정, 탐지거리, 레이더 도달거리 등의 운용자 활용기술 파랑, 바람, 해류, 수온, 해안선 형태 등에 따른 해안 상륙작전의 시뮬레이션 및 최적방안제시, 표류물체의 추적 VR-desk, K-CAVE 수준의 재현장치 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 연구개발, 전문가활용, 기업체(KCEI,서울일렉트론) 연구개발, 국제협력 (미국 JPL, NCAR,ODU, 시카고대학, NPS, 영국 Strathclyde, Imperial College) 연구개발, 협력연구 (해군,ADD, 해정단, 국립해양조사원) 3D 물체 모델링분야(KCEI) 연구개발, 전문가 활용 (해군,ADD, 해정단, 국립해양조사원) VR 영상시스템(KMT,SEL)
해양환경의 정밀 예측기술	<ul style="list-style-type: none"> 해양특성예측기술 해양특성예측모델링 표층혼합층 변동예측 모델링 외력에 대한 MLD의 변화과정 예측 3차원 해양수리역학 모델링 기술 너징 자료동화 	<ul style="list-style-type: none"> 해양전술정보의 VR환경 접목 기술 CTD, SeaSoar, APV 등에 의한 정밀특성 자료의 VR연계성 수리역학과 연계, T, S의 외력에 대한 변동성 예측 대양모델과의 접목응용 광역-협역 nesting기술 3차원 수평, 수직 가변격자 모델링 광역모델로부터의 nesting 기법 고정 및 표류부이 관측자료 실시간 동화 	<ul style="list-style-type: none"> 전문가 활용, 협력연구 (해군,ADD,해정단) 여타 연구사업으로부터 협력연구 연구개발 및 전문가 초청 활용 관련연구사업과 협력 연구개발 및 국제협력 자체 및 전문가 활용 응용개발 및 전문가 활용 여타연구사업과 연계 및 현장관측 미국JPL 연구소와 협력 연구로 기술습득
해양정보 활용	<ul style="list-style-type: none"> 기상청 자체적으로 실시간 및 예측자료의 자료생산 및 분배시스템 운용기술 	<ul style="list-style-type: none"> 자료의 표준화 생산 및 예측자료 연계구동 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 예측자료의 표준화를 위해 NetCDF에 의한 자료생산 및 분배의 자체 개발 가능 각 예측모형의 실시간 연계구동을 위한 인터페이스 자체 개발 가능

제 2 절 국내의 현황 분석

1. 기술현황

가상해양환경 구현기술

- 해양환경의 이해를 위해 대부분 2차원 또는 평면 3차원 그래픽으로 제시.
- 평면 자료 제시는 입체적 환경 정보가 필요한 경우의 지원 체계로서는 만족스럽지 못함.
- 가상현실기법은 건축 및 일반 정보통신 분야에서 초기적 단계로 응용되고 있으나, 평면 3차원 그래픽 제시를 벗어나지 못함 (실질적 가상현실의 세계는 3차원 형상이 실제 물체와 같이 전후좌우로 회전시켜도 그 모양의 본질을 유지함).
- 가상해양환경 구축은 본 연구사업의 응용단계에서 기반기술이 개발되어, 현재 4개면의 국산 K-CAVE 시스템과 비주얼 워크스테이션, VR Table 등으로 구성되어 하나의 가상환경시스템을 이루고 있음. 그러나 시스템의 응용 및 활용성을 높이기 위해 각종 요소기술과 통합된 응용기술의 개발이 필요함.

해양물리 환경의 예측기술

현재 국내, 국제적으로 활용되는 순환 모델은 다수의 종류(POM, ROMS, MOM, MICOM, Hamburg 등)가 존재하며 본 연구에서는 미국의 프린스턴 대학에서 개발하여 공개한 것으로 전세계적인 사용자와 사용 예가 가장 풍부한 것으로 정평이 나 있는 POM을 비롯하여 최근 Rutgers 대학에서 개발한 ROMS, 그리고 국내에서 많이 활용되고 있는 다수의 수치모델을 사용하여 공통의 해역에 공통의 조건으로 복잡한 현상의 재현을 위한 보완이 이루어지고 있다.

본 연구사업을 통하여 우리나라 동해에 시험 적용한 POM은 1/12도 격자상 23개의 수직층을 분할하여 기후적인 월별 평균 외력을 사용하여 평균적 상태의 매일의 해양환경구조를 예측하는데 성공하였다. 그러나 아직 위성, 고정 또는 표류부이(ARGO)등에 의한 자료의 준실시간 동화기술은 이번 시험개발단계에 완성하여 명실공히 준실시간 해양예보체제를 갖출 전망이다. 여기에는 그간 시험 운영이 성공적

으로 마쳐진 첨단 3차원 해양모델인 ROMS를 적극 활용할 예정이다. 하지만 POM 모델은 자료동화의 어려움, 수심변화로의 적응성등에 다소의 문제가 있는 것으로 나타났다. 본 연구팀은 최근 ROMS 모델의 장점인 병렬처리, 자료동화 모듈, 그리고 무엇보다도 해저 지형구배를 따르는 그리드 형태를 사용함으로써 표층과 저층의 정밀한 수직구조를 분해하는 등 우수한 점을 실험결과 얻어냈다. 준실시간 해양의 예측시스템의 구현은 ROMS를 바탕으로 진행하고 있다.

2. 현 기술상태의 취약성(문제점)

수치 모델에서 forcing function으로 사용한 수온, 염분 및 바람 자료는 climatological data set를 사용해 왔다. 이 자료들은 격자 간격이 위·경도 각각 1도와 2도로서 본 대상해역의 분해능에 비해 훨씬 크며 결과적으로 소규모 및 중규모 구조(예, 소용돌이) 현상을 forcing 할 수 없는 단점이 있다. 또한 누년 평균의 결과로서 공간적으로 시간적으로 변동의 폭이 완화되어 있다.

- 기존의 연안역 연구는 대부분 해수특성 분포의 mapping을 통해 특정한 해양현상을 기술하는 정성적인 연구에 머물러 있어 연안역 해양환경의 역학을 규명하기에 미흡하다.

- 정성적인 해수특성 관측도 관측의 시·공간규모가 연안역의 제 현상을 규명하기에는 미흡하였다.

- 연안역의 해수순환을 포함한 3차원 해양환경을 고해상도의 모델을 이용해 실제적으로 재현하려는 시도가 이루어진 바가 없으며, 외국에서와 같은 예측 능력 기술 개발이 시도된 바가 없다.

3. 앞으로의 전망

보다 사실적인 동해 해류 현상의 예측을 위하여 실시간 바람 자료의 사용이 필수불가결하며, 또한 위성 자료인 SST 및 SSH 자료 부과 및 동화기술이 절대적으로 필요하다. 실시간 바람자료는 현재 국내에서 생산되지 못하고 있지만 기상청 현업 예보자료를 활용하여 표층 바람과 열속(Heat Flux) 자료 (매 6시간 간격)를 본 연구에서 활용할 예정이다.

- 현재 선진국에서 해양환경 예측에 활용되는 수치모델 및 첨단 해양관측 장비의 일부가 확보되어 있으므로 민, 군의 공통 관심사가 되는 동해 연안역의 3차원

해양환경과 해수순환을 모델과 관측을 병행하여 정량적으로 재현하고 예측하는 기술의 개발이 가능하다.

○ 모델과 관측에 의해 계량화된 3차원 해양환경 및 해수순환 자료는 가상 해양환경 시스템 구축의 입력 자료화 된 후 오염물질 추적, 어군탐지 및 대잠작전, 대국민 홍보 등에 효율적으로 활용 될 수 있을 것이다.

4. 주요 확보 목표기술

- 정밀 준실시간 해양 수중구조 예측 기술
 - 첨단 해양3차원 수치모델링 (표층, 저층 분해능 30미터이내)
 - 준실시간 관측, 예측, 원격자료 등의 자료동화
 - 해양기상-외해-연안 연계 정밀 해양 예측 시스템 구축

- 해양전장 환경 시뮬레이션 기술
 - 5차원 해양수중구조를 몰입형 입체 가상환경으로 표출
 - 정밀 가상전장환경을 구축하고 해양의 환경구조를 분석하는 기술
 - 무기체계 Object 모델에 대한 가상전장 환경내에서 운동 분석
 - 방위해양정보(기상, 해양특성, 3D 물체모델, 지리정보 등)의 가상해양 환경에서의 통합운영

- 해양 퓨전데이터 원격 활용 및 협동 VR 활용기술
 - 해양예측, 모니터링, 고정 및 표류관측, 원격 관측 등의 퓨전데이터 통합 가시화
 - 원격 사용자간 자료 및 VR 영상 공유하면서 협동 분석

5. 국내·외 기술수준 비교표

구 분	국내	국외
5차원 해양 자료 생산 및 검증 기술	국내 다수의 연구팀에서 2차원/3차원 수치 모형과 첨단 장비를 이용한 현장 관측, 자료 동화 기술 등의 종합적인 시도가 추진 중 이며, 국내 여타 연구팀 및 연구사업 결과를 최대한 활용. 그러나 본 연구 사업에서 필요로 하는 기본적 요소에 대한 연계구동 시험 개발 및 평가를 위해 최소한 요소별 연구팀 구성 운영.	5차원 해양 자료 생산 시스템 및 준 실시간 자료 동화 기술을 이용하여 준 실시간 해양 환경 제시.
5차원 해양 환경 자료의 가시화 기술	평면 3차원 가시화 제시 시도 단계. 국제협력을 통한 기술전수 및 자체연구개발 가능.	5차원 이미지의 가시화 기술 정립, 3차원 수치 모형 결과의 on-line 제시 기술 응용.
가상 현실 구축 및 응용 기술	본 연구팀에 의해 민군사업 응용 단계의 연구목표인 가상해양환경 구축의 기반기술 확립, 국내제작 몰입형 K-CAVE 시스템 제작.	환경 자료 생산 및 5차원 가시화 기술이 접목된 가상 해양환경 기술을 정립하여 응용 시도 단계 가상현실 재현 장치 개발에 추진력 강화 (BOOM, I-desk, CAVE, I-Wall 등). 민군에 활용 진입 단계.
기술도입 가능성	국내의 해양 및 정보 산업 관련 산 학 연 정부기관과의 긴밀한 협력 체제 구축으로 대부분 기존 연구능력 활용. 그러나 과학자료의 시각화 기술과 원격분산 자료의 연동 동영상 가시화 기술은 자체 개발. 단 VR 저작도구, 운용시스템 H/W의 시험을 위해서는 시험제품의 도입은 필요. 가상해양센터의 구성 및 운용을 위한 외국 전문가로부터 기술지원 및 자문필요.	미국의 NCAR, ODU, 일리노이 대학, 미국 해군 대학원, NRL, H/W 제작 회사, 영국의 Strathclyde 대학의 가상 현실 실험실, 영국 해군 등 유럽 공동 가상 현실 학회와의 협력 연구 체제에 대해 적극 지원, 협약 받음.

6. 연구개발 기대 성과 및 파급효과

가. 연구개발 기대 성과

- 가상해양환경 시스템의 구축으로 해양환경 및 해상 상태를 원격에서 정밀 분석 가능하며, 이를 활용하여 해군의 성분작전 시뮬레이션 및 작전교육의 효율성을 증대하고,
- 기상예보 적중률을 향상시키고,
- 해양환경의 입체적 분석으로 해양 예측 기술의 획기적 진보를 가져올 것이며, 오염예방과 해양 설계 공사의 사전 분석으로 막대한 오염복원비 및 공사비를 절감할 수 있고,
- VR산업장비 및 소프트웨어 산업발전에 직접적 기여.
- 민수분야에서 다양하게 활용 전망되는 가상현실기법 및 재현장치의 발전으로 21세기 국제 정보산업의 선진화 조기달성
- 고품질의 해양기상관측 자료정보에 의한 기상예보의 적중률 향상
- 가상현실 기법의 현실적 응용분야는 무한대임.

나. 파급효과

1) 기술적 측면

- 동해 해수순환 모델링 및 예측 능력이 향상된다. 다양한 조건하의 예측 결과의 DB 구축으로 필요시 언제든지 Internet Web 상에서 가시화 할 수 있는 기술이 확보됨.
- 동해 연안역의 3차원 해양환경 및 해수순환 예측모델 구축으로 실시간 3차원 가상 해양환경 자료 제공 가능
- 대상해역의 수심 20m 이내의 연안역에서 발생 순환하는 천해파랑변형 및 파랑류 분포 자료의 실시간 제공
- 대상해역내 특정 소해역에 대한 3차원 파랑류 분포 자료 제공
- 대상해역의 해안선 변화에 대한 실시간 자료 제공
- 동해 북부 연안역에서 해류계 계류성파로 동한 난류와 북한한류의 변동성 파악 가능
- 과학 가시화 기술의 기반 구조를 개발함으로써 인하여 그동안 해외 의존적이던

가시화 분야에 국내 기술의 기틀을 마련할 수 있으며, 이를 통하여 전체 과학 기술 발전에 공헌을 할 수 있다.

2) 군사적 측면

- 군사, 외교, 안보 ; 해군작전에 해황 정보 제공, 해양 주권 강화
- 해상 활동(군 교육, 작전 등)의 효율성, 경제성 증대
- 유사시 북한연안에서 작전 및 통일을 대비한 북한의 항만, 연안 개발, 보존 계획 수립
- 대잠작전 차원에서 동해 연안역에 대한 정량적인 실시간 해양예측자료를 이용함으로써 북한 잠수정 및 잠수함의 침투 예상경로 파악이 가능하며, 과학적 대잠작전 가능
- 항공 및 해상작전 성분별 필요한 해양기상 요소를 군이 자체적으로 생산할 수 있는 능력 제공 (Synoptic Forecasting System)
- 작전해역에서의 실시간 예보를 할 수 있는 예보체계를 구축하여 작전해역의 독자적인 예보체계 운용 능력보유 (Real-Time Local Forecasting System)
- 실시간 해상풍 예보에 따른 대잠 작전환경(혼합층, 수중소음) 요소파악

3) 경제적 측면

- 수산업 ; 어황 예보에 주요 정보 제공 (수온 및 해류)
- 해운항만업 ; 항로 예보, 해무 발생 정보 제공
- 관광 ; 해수욕장 수질정보 제공
- 연안역에서의 인위적 개발에 따른 항만 및 항로매몰, 해안선 변화 등 연안역 해저지형 변화에 대한 해저퇴적물 공급원 또는 이동경로 및 대책 수립을 위한 기초자료 제공
- 고품질의 해양기상관측 자료정보에 의한 기상예보의 적중률 향상

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 가상현실의 응용

1. 가상현실이란?

현재 우리가 사용하고 있는 ‘가상현실’(Virtual Reality : VR)이란 용어는 1989년 설립된 VPL Research의 창시자인 Jaron Lanier에 의해 최초로 사용되었다. ‘가상현실’과 관련된 유사한 용어로서는 ‘인공적 현실’(Artificial Reality / 1970년대 Myron Krueger 사용), ‘사이버 공간’ (Cyber Space/ 1984년 William Gibson) 그리고 1990년대 최근에는 ‘가상 세계’(Virtual Worlds) 또는 ‘가상 환경’(Virtual Environment)라는 용어를 사용하고 있다. 더욱 최근인 2000년대에서는 ‘가상현실’에 대한 정의에서의 혼동과 혼돈으로부터 오는 ‘가상현실’의 부적절한 표현을 구분하기 위하여 ‘VICI’ (비키: Visualization, Interaction, Collaboration & Immersion) 라는 용어를 사용하여 ‘가상현실’의 필요 조건을 구체화하기도 한다.

오늘날, 가상현실(VR)이라는 기술은 여러 가지 방법으로 표현되며, 가끔 컴퓨터그래픽스 표현을 가상현실(VR)로 잘못 인식 또는 혼돈 되어 사용되고 있다. 원래 가상현실(VR) 이란 함축적으로 ‘몰입형 가상현실(Immersive Virtual Reality)’를 의미한다. 몰입형 가상현실에서는 사용자가 컴퓨터에 의해서 만들어진 인공적인 3차원 세계에 완전히 몰입된 상태를 느낄 수 있는 환경이다. 다시 말해서 컴퓨터 모니터상에 나타난 3차원 세계를 마우스로 조작하며 움직여 보는 것은 ‘몰입형’이라 할 수 없고, 사용자의 머리와 몸 또는 제어기를 3차원 세계안에서 움직여서 현실감을 느낄 수 있을 때 비로소 ‘몰입형 VR’이라 할 수 있다.

몰입형 VR 기능을 가져다 주는 가상현실장치로서는 HMD(Head-mounted Display), BOOM(Binocular Omni-Orientation Monitor), 1992년 UIC(University of Illinois at Chicago) 대학의 EVL(Electronic Visualization Laboratory)에서 개발한 CAVE 그리고 반몰입형(Semi-Immersive)모드로서는 고화질 대형화면의 VR Working Table(작업대 형식) 등이 있다.

가. CAVE (Cave Automatic Virtual Environment)

CAVE는 University of Illinois at Chicago 의 EVL에서 개발되었으며, CAVE는 방크기의 공간에 동굴처럼 세워진 전우좌 그리고 바닥 스크린의 4개 면에 프로젝터로부터 입체영상을 투시하여 몰입형 영상을 제공하는 VR 영상표출장치이다.

가벼운 스테레오 안경을 쓴 여러 명(2~5명)이 CAVE의 안 쪽(바닥 영상면)에 들어가 걸으며 움직일 수 있다. 스테레오 안경에는 모션트래킹 센서가 부착되어 있어, 거리를 움직임에 따라 CAVE안에 펼쳐진 가상 환경을 임의 각도로 움직이게 할 수 있으며, Wanda와 같은 입출력 장치에 모션트래킹 센서를 내장하면 가상현실을 임의 고도에서 날아가며 또는 걸어가며 내비게이션 할 수 있게 한다.

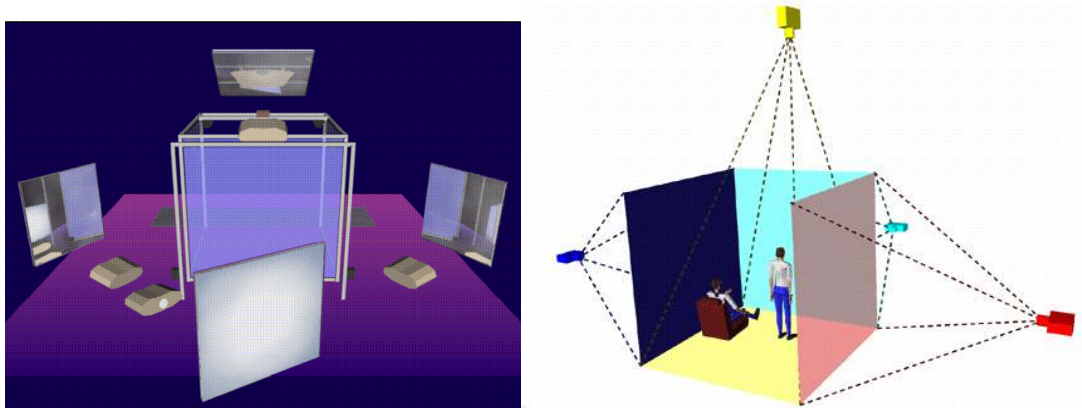


Fig. 1-1 Fundamental principle of the CAVE System.

나. 입력 장치

‘가상현실’의 구현을 위해서는 영상의 표출 외에 사용자가 영상생성 컴퓨터와 상호 대화하기 위한 입력 장치 및 모션트래킹 장치가 필요하다.

이러한 장치로 사용될 수 있는 것으로는 data glove(자료 입력 장갑), 조이스틱, 그리고 손으로 작동하는 wanda 등이 있다. 사용자는 이러한 입력장치를 이용하여 가상 환경 속을 내비게이션 할 수 있고 가상물체와 직접 상호 작용할 수 있다. 방향성 음향, 힘의 느낌을 전달하는 장치, 음성인식 등과 같은 기술도 함께 사용되어 몰입감을 더해주거나 더욱 민감하게 상호작용할 수 있다.

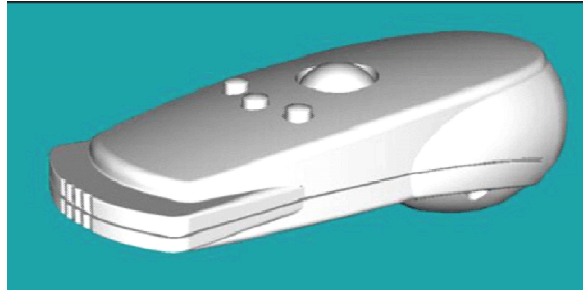


Fig. 1-2 Data I/O device Wanda

다. 모션트래킹 장치

가상환경에서 사용자는 실제 현상에서처럼 환경내부를 마음 대로 다닐 수 있으며, 또는 시험대상물체의 움직임에 대한 모든 정보를 컴퓨터가 인식한다. 이러한 사용자의 의도적 움직임 또는 대상물체로서의 움직임에 대한 정보를 컴퓨터와 주고 받는 장치가 모션트래킹 장치이다. 사용자가 모션트래킹 센서를 스테레오 안경에 부착하고 머리를 돌려, 보는 각도를 바꾸면 가상현실 이미지가 이에 따라 움직이고, 모션트래킹 센서를 Wanda에 부착하여 지시하는 방향을 바꿀 때도 가상현실의 이미지는 이에 따라 변화한다. 또는 인체공학적 운동을 측정하기 위하여 수 십개의 센서를 몸에 부착한 후 운동을 할 때 각 센서의 움직임 정보가 컴퓨터로 전달되기도 한다. 이러한 모션트래킹 시스템에는 크게 광학식, 자기식, 기계식 또는 음파식이 있다. 일반적으로 모션트래킹 시스템은 펄스를 방출하는 Transmitter와 신호를 수신/발신하는 센서들로 구성된다.

라. 몰입형 가상현실의 특징

몰입형 가상현실의 두드러진 특성은 다음과 같다.

- 머리를 중심으로 한 가시화 기능은 3차원 가상현실 공간에서 navigation 하는데 매우 자연스러운 느낌을 주게 하고, 사방을 돌아보든지, 걸으며 살펴 보든지, 또는 날아가며 내려다보는 기능을 가질 수 있다.
- 입체안경의 착용으로 물체의 심도와 공간 개념을 명확하게 할 수 있다.
- 가상세계는 대형 스케일규모로 제시되고, 실제 사람크기의 특성과 연계할 수 있다.

- Data Glove 또는 Wanda와 같은 입력장치를 이용하여 가상현실세계와 직접 현실감 있는 대화를 할 수 있어 대상 물체 또는 현상의 구현, 인식, 시험 그리고 제어 평가 등이 가능하다.
- 인공적 현실 세계안에서 완전히 몰입된 상태의 구현은 음향효과, 실제 상황의 기계적 조작 기능 또는 다른 기술과 함께 사용하여 효과를 높일 수 있다.
- 네트워킹을 이용하여 원격지의 다른 사용자와 구성된 가상현실세계를 공유하여 활용할 수 있다.

마. 공유된 가상현실 세계

한곳에 설치된 가상현실 시스템을 이용하여, 세계 어느 곳이던지 다른 곳에 있는 다른 사용자가 BOOM이나, CAVE 시스템, 머리 착용 표출시스템 등을 이용하여 서로 같은 가상현실세계를 공유하여 보고 대화하며 현상을 분석할 수 있다. 각각의 사용자들은 각 사용자를 나타내는 가상인간(avatar : 아바타)을 가상현실세계에 묘사하여 Avatar 입장에서 가상현실을 보게 해주고 상대방의 보는 위치 등을 알 수 있으므로써 하나의 가상 세계팀으로 의사 교환을 가능하게 해준다.

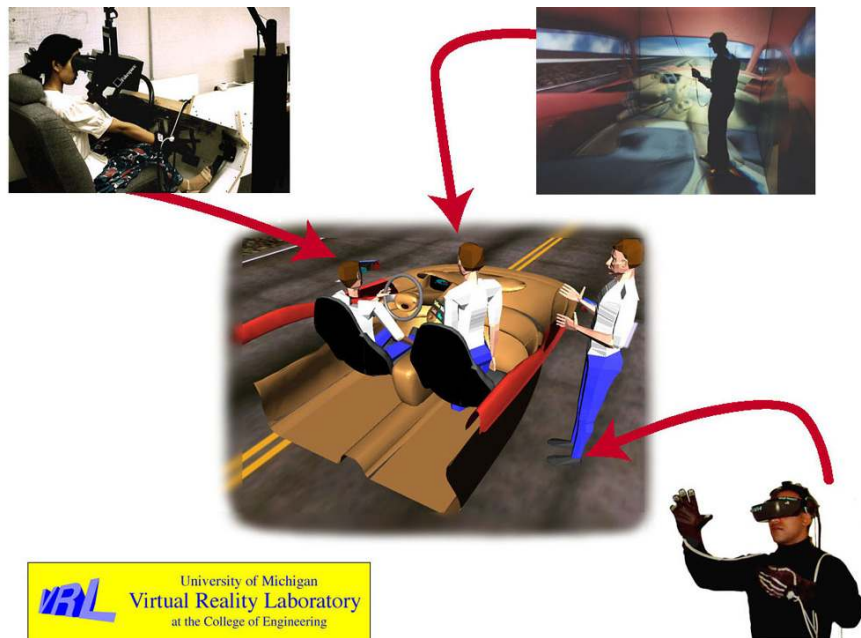


Fig. 1-3 Collaboration of the virtual worlds.

바. 비몰입형 가상현실세계

오늘날에는 ‘가상현실’이라는 용어가 완전한 몰입형이 아닌 응용분야에도 사용되고 있다. 몰입과 비몰입간의 관계는 매우 명확하기 않은 편이지만, 미래 VR의 변화양상 자체가 중요할 것으로 판단된다. 이러한 예로써, 그래픽 모니터 상에 표출된 3차원 영상을 마우스로 navigation하거나 스테레오 안경, 스테레오로 투시된 영상 등을 이용한 모니터에서의 입체감 구현 등이다. 예로서 Apple사의 Quick Time VR의 경우 사진을 이용하여 3차원 세계를 모델링하여 3차원 형상을 둘러보는 효과를 낼 수 있으며, 걸어가며 보는 영상의 움직임을 구현할 수도 있다.

2. 가상현실의 응용분야

가상현실(VR) 기술이 점차 진보됨에 따라, VR 응용분야도 무척 다양해지고 있다. VR 기술은 지금까지의 정보교환 방법, 공정에 대한 가시화 그리고 아이디어의 창조적 표현 방법등에 획기적인 바람을 불러 넣을 것으로 기대된다.

가상현실은 실제와 똑같은 아니면 보다 단순한 형태로 표현했던 간에 모든 현실을 3차원 세계로 나타낼 수 있다. 예를 들면 건물, 조경, 해수 수중 난파선, 우주선, 해저 유물 발굴 현장, 남극의 형태, 인간의 골격 구조, 조각품, 범죄현장 재현, 태양계 등 수없이 많다. 특히 흥미 있는 분야로서는 자장계, 난류구조, 분자모델, 수치모델, 강당의 음파구조, 주식시장 동태, 인구밀도, 정보의 흐름 등을 들 수 있으며, 우리가 현실세계에서 접하는 대부분의 현상을 단순화하여 현실감 있는 입체 3차원 세계로 몰입될 수 있다. 가상현실세계는 애니메이션이 가능하고, 상호작용이 가능하며, 공유되어 협동 운영이 가능하고, 특성의 기능이 잘 표출되는 장점이 있다.

VR 기술의 주요 응용분야로서는, 반복 훈련(군사작전 수행, 의료행위, 장비 운용 등), 교육, 디자인 및 설계 비교평가, 건축물 설계자료의 현실성 검토, 인간 기능, 현실적으로 재현 또는 실험하기 어려운 분야, 조립 및 유지를 위한 조립 시뮬레이션, 고공 공포증 환자의 치료, 지구환경변화의 시뮬레이션 및 구조 분석, 그리고 게임 등에 활용될 수 있다.

VRML(발음 : 버멀)은 Virtual Reality Modeling Language의 약자로서, 그 응용

성은 World Wide Web(www)상에서 3차원 모델링을 저작하고 구현하는 기능이다. 현재 웹에서의 홈페이지 작성을 위한 표준언어로 자리잡은 HTML의 기능 외에, VRML은 web상에 3차원 세계를 하이퍼링크 시켜준다. 다시 말해서 텍스트와 평면 그림을 제시하던 홈페이지로부터 홈스페이스(홈공간)로 변화시켜주는 기능을 갖고 있다. VRML로 저작된 모델은 VRML 브라우저로 그래픽스 모니터상에 열어 볼 수 있으며, 마우스로 이동과 회전등의 조작성을 함으로써, 완전한 몰입형 VR은 아니다. 하지만 VRML의 언어와 자료구조가 3차원 세계의 모델링과 상호작용을 가능하게 해 줌으로써, 대형 VR 표출 장치에 영상을 보내어 완전한 몰입형 VR 환경을 만들 수 있다. VRML97 국제 학술회의에서 선정하여 국제 IOC/IEC 표준언어로 채택된 VRML 버전 2.0이 사용되고 있다.

VRML의 3차원 모델 형태를 시험하기 위해서는 다음의 VRML 파일을 다운로드하고, VRML부어로 CosmoPlayer를 다운 설치하면 된다.

기타 VR 관련 기술은 실제 환경과 가상현실을 연계시켜 주는 기술을 의미한다. 모션트랙커(motion tracker)는 댄서나 운동가의 동작 분석을 위해 완전 몰입환경에서 신체 각 부분의 움직임을 측정하여 특성을 비교 연구할 수 있다. 소의 'Augmented Reality'라 불리는 현실세계의 환경을 가상 현실 물체와 병합하는 기술도 많이 개발되고 있다. 원격의료기술 또는 원격 로봇트 등을 이용하는 원격지 환경 구현 시스템 등은 비디오 카메라 등에 의해 촬영된 원격지 현실을 다른 곳에 보내어 원격지에서 각종 일을 구현할 수 있는 시스템의 기술도 포함된다.

제 2 절 해저환경의 VR이미지 렌더링 및 자료 I/O 표준화

1. 수치해도로부터 임의수심도 작성

수치해도로부터 임의의 격자 수심도(정방향 10초;약 300m)를 작성하기 위하여 한국 해양연구원에서 개발된 수치해도 프로그램으로 수치해도(dxf 파일)파일을 X, Y, Z의 아스키 값으로 출력하였다. 수치해도 프로그램으로 우리나라 근해에 대한 Layer들의 3차원 좌표계 값으로 저장하였다. X와 Y의 값은 UTM 좌표계로 저장되며 Z는 선택적으로 수심자료, 해안선 자료 및 모든 자료(Layers)들의 Data 값을 저장하였다. UTM 좌표계로 저장된 X와 Y의 값은 위경도 값으로 다시 환산하였다.

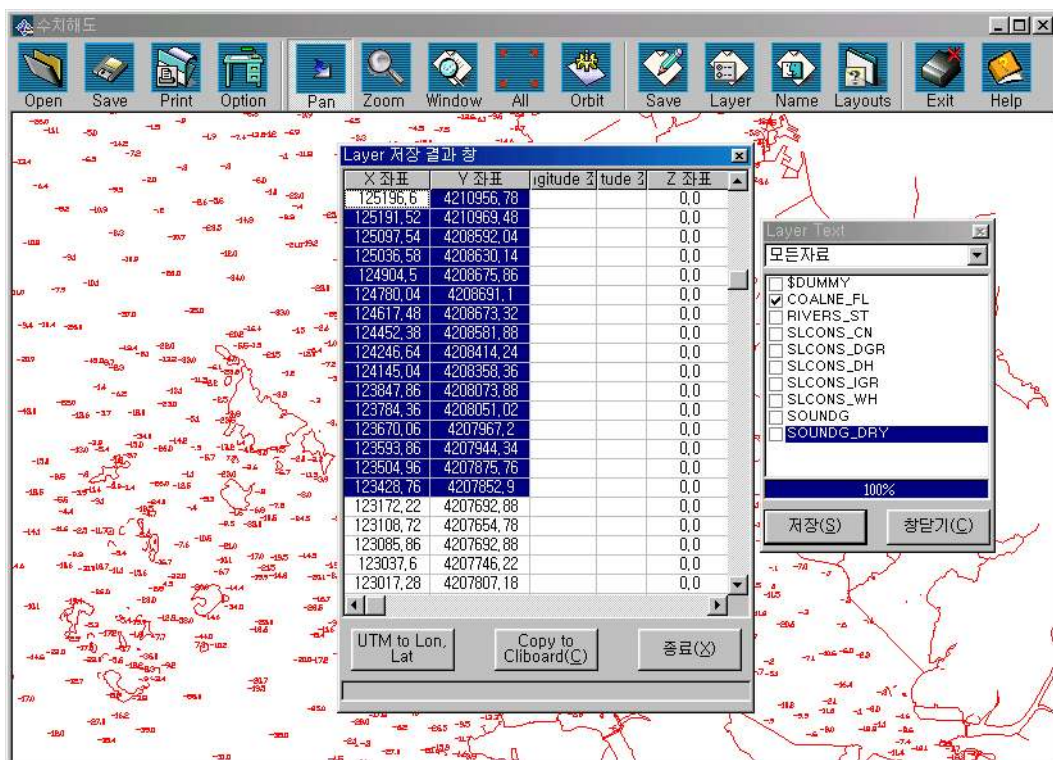


Fig. 2-1 A view of digital map editor.

수치해도에서 추출된 XYZ형식에 아스키 파일은 본 연구와 관련하여 개발된 수치지도편집기를 통해 상세한 정보로 제시된다. 사용자 편의를 위한 GUI를 구축하였고, 수치해도에 기본 자료로 사용되는 정보는 임의영역을 선택함으로써 영역에 대

한 정보를 수정할 수 있도록 하였다. 본 프로그램에서 제시되는 정보로는 위경도에 따른 Z값이며, 이 값은 수정 및 저장이 가능하도록 되어있다. 다음 Fig. 2-2는 1km 격자를 가지는 경기만 해역에 대한 프로그램 실행 모습이다.

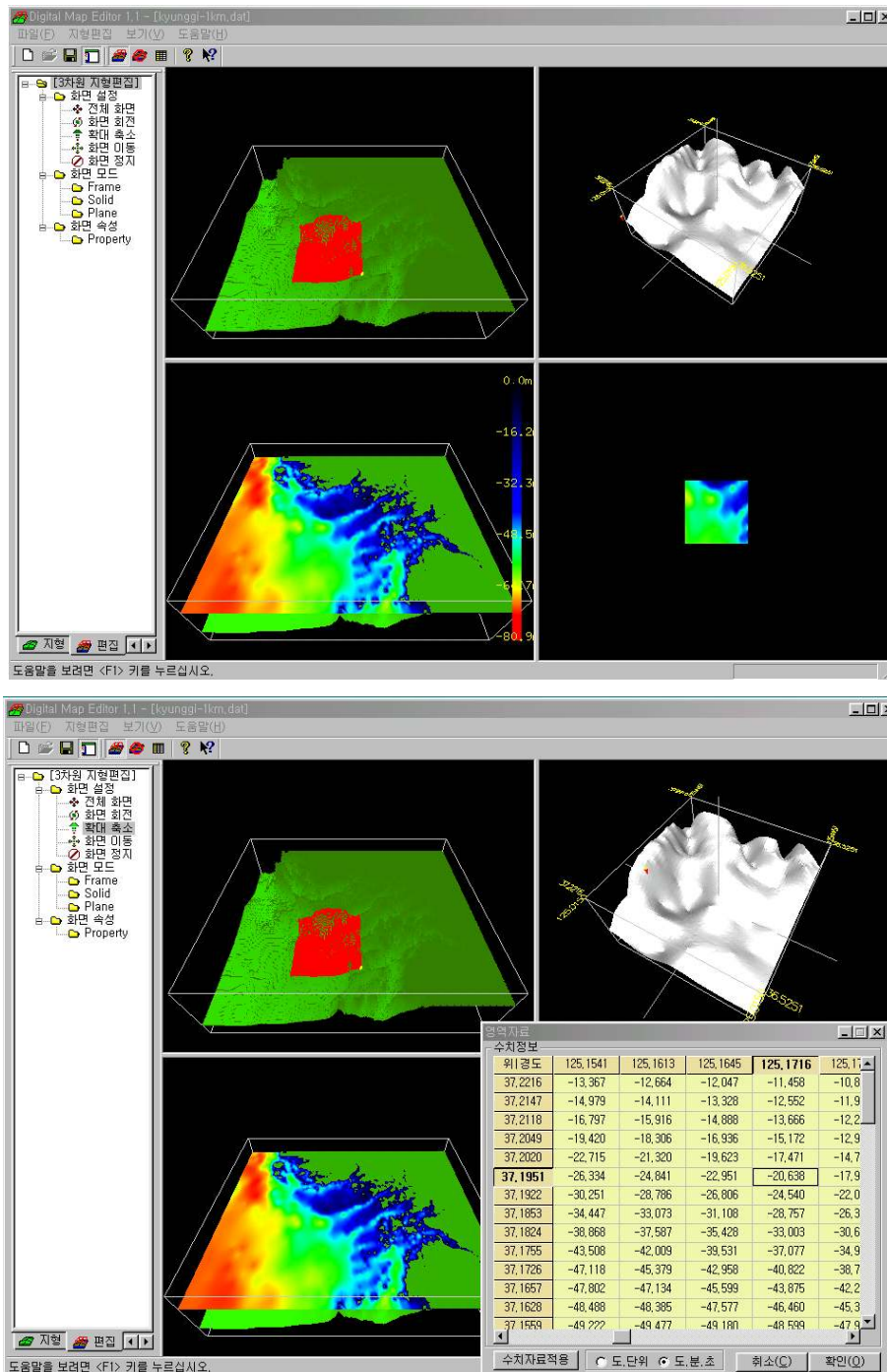


Fig. 2-2 Implementation of digital map editing.

수치해도로부터 생성되어진 우리나라 임의해역에 대한 임의격자크기의 수심도와 기상청의 15초 간격 등고자료를 합성하여, 동경 123°~134°, 북위 31°~40° 영역에 대한 지형자료를 작성함으로써, VR 프로그램 및 수치모델과 병행하여 사용되는 GIS의 기본 지형도로 사용하고자 한다. 현재 가용한 약 220개의 우리나라 해역에 대한 수치해도(국립해양조사원 발행)와 등고자료를 사용하여 우리나라 전체 영역에 대한 10초 간격의 지형자료를 Fig. 2-3에 나타내었다.

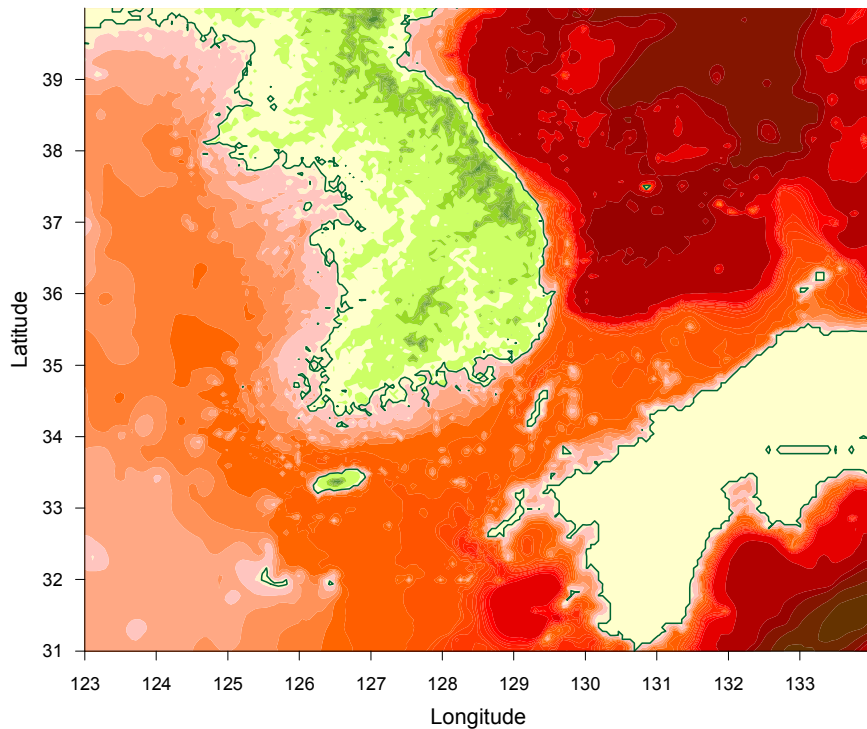


Fig. 2-3 Digital map of Korea and adjacent waters compiled in 10 seconds using digital navigation charts and DEM.

2. 해저환경의 VR 이미지 렌더링

가. 연구목표

울진(N 37°)에서 삼척항까지 가상 해안-해저 환경을 3차원으로 Modeling 하여 VR 응용프로그램을 위한 Static Model로써 활용하고자 한다.

나. 연구 수행방법

(1) Modeling 작업

- MultiGen II의 terrain tool을 이용하여 실제의 지형자료를 이용해 모델링
- 모델링된 지형자료에 주요 해안 Objects (항만시설과 주요 건물등)에 대하여는 실제감을 느낄 수 있도록 모델링한다.
- 현실감을 느낄 수 있도록 해안지형의 백사장 등 Image data를 수집하여 texture로 활용한다.

(2) Rendering 작업

MultiGen II를 이용하여 모델링된 flt format file에 특수효과(예, 구름, 물결, 안개 등)를 표현하여 보다 몰입감을 갖도록 하여 만든 가상 해양세계를 실시간으로 Navigating 할 수 있도록 Rendering 작업을 한다.

다. 해저지형 Modeling 내용 및 프로그램

(1) 해저지형 Modeling 내용

동해 전역에 대한 자료를 MultiGen II에서 읽을 수 있는 파일 포맷인 ded 파일로 변환한다. 기존 동해 전역에 대한 자료의 형식은 MultiGen II의 파일 포맷과는 상이하다. 파일의 구조를 Fig. 2-4에 나타내었다. 이러한 형식의 파일을 Table에서 제시된 프로그램을 이용하여 변환하면 Fig. 2-5의 구조를 가지는 ded 파일이 생성된다. ded 파일은 short type의 two byte 자료를 원하며 또한 자료를 좌 하단에서 부터 우 상단방향으로 읽어서 자료를 표현한다.

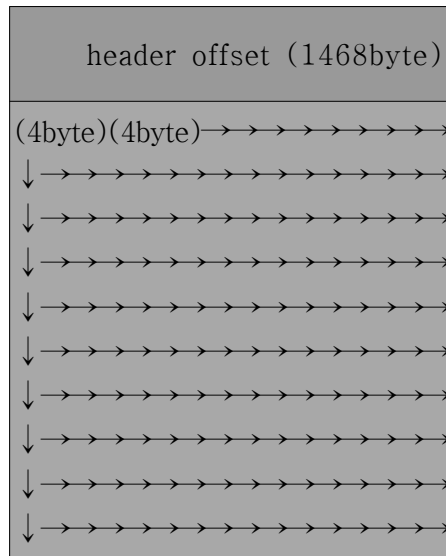


Fig. 2-4 File structure of raw data (kordi10s.grd).

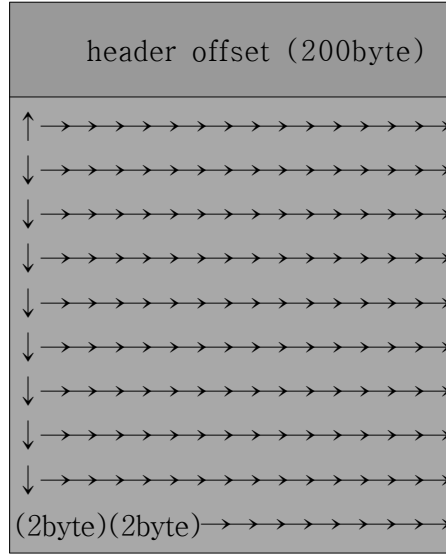


Fig. 2-5 File structure of Multigen II ded file.

(2) 프로그램 내용

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <sys/stat.h>
#include <sys/types.h>
#include "sys/times.h"
#include "sys/param.h"
#include <fcntl.h>
#include <stdio.h>
```

```

#include <stdlib.h>
#include <strings.h>

#define FALSE      0
#define TRUE       1

#define SS_STDID "SSYS"
#define PARTNO "DMA1"
#define REVNO "V1.0"

#define M_TO_FT 3.28084
#define MIN_TO_FT 6076.0/60.0 /* 1 minute = 6076 ft based on nautical def. */
#define DEG_TO_RAD 0.017453292

typedef struct ss_stdhdr { /* standard file header block (128) */
    long len; /* size of header block in byte */
    char id [ 4 ]; /* file identification code "SSYS" */
    char part [ 8 ]; /* software part no. */
    char rev [ 8 ]; /* software revision no. */
    char create [ 26 ]; /* creation date/time */
    char update [ 26 ]; /* last update date/time */
    char spare [ 52 ]; /* spare */
} ss_stdhdr;

typedef struct stats { /* statistics record (32) */
    long ncell; /* no. of cell in this file */
    short minz, maxz; /* min/max z of the entire file */
    char spare [ 24 ]; /* spare */
} stats;

typedef struct cell_hdr { /* for each DMA cell on disk (40) */
    float latstart, latend; /* lat start end */
    float longstart, longend; /* long start end */
    float deltalat, deltalong; /* post spacing in seconds * 10.0 */
    float nptlat, nptlong; /* no. of points in lat or long */
    float deltax, deltay; /* actual distance between points in feet */
} cell_hdr;

/*****

void main ( int argc, char **argv )
{

    int          i,j,a;
    int          fd;
    int          inputimageheight, inputimagewidth, inputimagedepth;
    float        *xptr;
    float        minx=1000000000, maxx=-1000000000;

```

```

unsigned char    *x;
unsigned char    tmp[4];
ss_stdhdr       header;
short           *x1, *x2 ;
short           min, max;
short           *tempshort, *tempshort1;
char            filename [ 120 ];
char            *ch;
stats           cellstats;
cell_hdr        cellheader;
time_t          tloc;
FILE            *file, *fp ;

if ( argc != 4 )
{
    printf ( "USAGE: float2ded inputimage width height\n" );
    exit ( 0 );
}

inputimageheight = inputimagewidth = inputimagedepth = 0;

inputimagewidth = atoi( argv[ 2 ] );
inputimageheight = atoi( argv[ 3 ] );

if ( !( fp = fopen ( argv[ 1 ], "r" ) ) ) {
    printf(" ERROR: Unable to open: %s\n", argv[1] );
    exit ( 0 );
}

x = malloc ( 1560 * 1680 * sizeof ( char ) * 4 );

for (i=0;i<1680;i++) {
    fread ((char *)x, sizeof (char), 1560*4, fp );
    for (j=0;j<1560;j++) {
        xptr = (float *) &x[j*4];
        if ( *xptr < minx )
            minx = *xptr;
        if ( *xptr > maxx )
            maxx = *xptr;
    }
}
printf("minx = %f maxx = %f\n", minx, maxx );

    fseek ( fp,+1468L, SEEK_SET);          /*헤더부분을 잘라내기위해서쓰였음*/
x1 = malloc ( 1560 * 1680 * sizeof ( short ) );
a = (1560*1680);

for (i=0;i<1680;i++) {                  /*데이터를 좌 하단부터 우 상단으로

```

```

        a=a-1560;
        fread ((char *)x, sizeof (char), 1560*4, fp );
        for (j=0;j<1560;j++) {
            xptr = (float *) &x[j*4];
            x1[a+j] = (short) (*xptr+0.5);
        }
    }

free ( x );

x2 = malloc ( 1680 * 1560 * sizeof ( short ) );
tempshort1 = x1;

    for(j=0;j<1680;j++) {
        tempshort = x2 + j;

        for(i=0;i<1560;i++) {
            *tempshort=*tempshort1;
            tempshort = tempshort + 1680;
            tempshort1++;
        }
    }

free ( x1 );

strcpy ( filename, argv [ 1 ] );
ch = strrchr ( filename, '.' );

if ( ch ) {
    ch++;
    strcpy ( ch, "ded" );
}
else
    strcat ( filename, ".ded" );

fd = open ( filename, O_CREAT | O_WRONLY, 0666 );
printf ( "\twriting %s \n", filename );

```

```

/* build the ded header */

```

```

header.len = sizeof ( ss_stdhdr );
strcpy ( header.id, SS_STDID );
strcpy ( header.part, PARTNO );
strcpy ( header.rev, REVNO );
tloc = time ( 0 );
strcpy ( header.create, ctime ( &tloc ) );
strcpy ( header.update, header.create );
write ( fd, &header, sizeof ( ss_stdhdr ) );

```

```

cellstats.ncell = 1;
cellstats.minz = ( short ) minx;
cellstats.maxz = ( short ) maxx;

cellheader.latstart =24;
cellheader.latend = 52;

cellheader.longstart = 117;
cellheader.longend = 143;

cellheader.deltalat = 3600*28/(float)1680*60;
cellheader.deltalong = 3600*26/(float)1560*60;

cellheader.nptlat = 1680 ;
cellheader.nptlong = 1560;
cellheader.deltax = 4800.14639078;
cellheader.deltay = 6067.49133695;

//=====
#
printf("Testing .... \n");
printf("latstart = %f latend = %f\n", cellheader.latstart, cellheader.latend );
printf("longstart = %f longend = %f\n", cellheader.longstart, cellheader.longend );

printf("deltalat = %f deltalong = %f\n", cellheader.deltalat, cellheader.deltalong );
printf ( "imagesizeX = %d imagesizeY = %d\n", inputimagewidth, inputimageheight );
printf ( "cellheader.deltalat = %f cellheader.deltalong = %f\n",
        cellheader.deltalat, cellheader.deltalong );
printf ( "min = %f, max = %f\n", minx, maxx );
write ( fd, &cellstats, sizeof ( stats ) );
write ( fd, &cellheader, sizeof ( cell_hdr ) );
write ( fd, x2, inputimagewidth * inputimageheight * sizeof ( short ) );

free ( x2 );

}

```

3. 자료 I/O 표준화

netCDF(network Common Data Form) 라이브러리는 배열지향 데이터 접근과 인터페이스의 구동을 가능하게 만드는 C나 FORTRAN, C++, PERL과 같은 소프트웨어 라이브러리들을 위한 인터페이스이다. 또한 netCDF 라이브러리는 과학적 자료를 표현하는데 Machine-independent 포맷을 정의할 수 있다. 인터페이스나 라이브러리 그리고 포맷은 과학적 자료의 생성과 접근, 공유를 지원한다. netCDF 라이브러리는 Colorado Boulder의 Unidata Program Center에서 개발되었으며, 소스들은 Unidata (<http://www.unidata.ucar.edu/packages/netcdf/>)나 다른 미러사이트들에서 Tar나 Zip으로 압축된 파일들로 자유롭게 구할 수 있다.

가. netCDF의 특성

netCDF의 특성을 요약하면 다음과 같다.

- Self-describing. netCDF 데이터셋은 자료가 가지고 있는 정보를 포함하고 있다.
- Portable. netCDF 데이터셋은 컴퓨터로 접근할 수 있는 정수나 문자, 실수와 같은 다양한 방식의 폼으로 재구성된다.
- Direct-access. 큰 데이터셋의 작은 부분을 효과적으로 접근할 수 있다.
- Appendent. 데이터는 새 데이터셋을 복사하거나 데이터의 구조를 새로 정의하지 않고 다양한 변수들을 차원에 따라 기존의 netCDF 데이터셋에 추가될 수 있다. 또한, netCDF 데이터셋의 구조는 변경될 수 있다.
- Sharable. 한 프로그램 작성자와 여러 사용자가 동시에 같은 netCDF 데이터셋을 접근할 수 있다.

나. netCDF Data의 구조

netCDF 데이터셋은 Dimensions과 Variables, Attributes 들을 포함하고 있으며, 이들은 고유한 이름과 ID를 가지고 있다. 이 요소들은 배열지향 데이터셋에 데이터의 의미나 데이터들 간의 관계들을 포함하기 위하여 사용된다. netCDF 라이브러리는 데이터셋 ID와 일반적인 파일명에 의해 구별된 다중의 netCDF 데이터셋에 동시접근을 허용한다.

netCDF 데이터셋은 변수의 이름과 데이터 타입, 순위(number of dimensions), Dimensions 그리고 시작 디스크주소들을 포함하는 변수들을 위한 심볼 테이블을 포

함하고 있다. 각 요소는 변수가 구별된 배열인덱스들(Subscripts)의 선형 함수인 디스크주소에 저장된다. 따라서 이 주소들은 개별적으로 저장되지 않는다. 이런 방식으로 데이터셋은 빠르고 효율적으로 저장된다.

netCDF 오브젝트를 설명하는데 사용되는 기호를 CDL(network Common Data form Language)이라 명하며, 이 기호는 데이터셋을 설명하는데 편리한 방법을 제공한다. netCDF 시스템은 바이너리 netCDF 데이터셋에서 CDF 텍스트 파일을 제공하기 위한 유틸리티들이나 반대의 기능의 가진 유틸리티들을 포함하고 있다.

netCDF 데이터셋을 위한 CDL 기호는 'ncdump'를 사용하여 자동으로 추출할 수 있으며, 다른 유틸리티인 'ncgen'은 CDL 입력자료를 netCDF 데이터셋으로 변환시킬 수 있다(http://www.unidata.ucar.edu/packages/netcdf/guide_toc.html).

*** netCDF 데이터셋을 위한 CDL 기호 예문 ***

```
netcdf example_1 { // example of CDL notation for a netCDF dataset
dimensions:      // dimension names and lengths are declared first
    lat = 5, lon = 10, level = 4, time = unlimited;
variables:       // variable types, names, shapes, attributes
    float    temp(time,level,lat,lon);
                temp:long_name    = "temperature";
                temp:units        = "celsius";
    float    rh(time,lat,lon);
                rh:long_name      = "relative humidity";
                rh:valid_range    = 0.0, 1.0;    // min and max
    int      lat(lat), lon(lon), level(level);
                lat:units         = "degrees_north";
                lon:units         = "degrees_east";
                level:units       = "millibars";
    short    time(time);
                time:units        = "hours since 1996-1-1";
// global attributes
                :source = "Fictional Model Output";
```

```

data:                // optional data assignments
  level  = 1000, 850, 700, 500;
  lat    = 20, 30, 40, 50, 60;
  lon    = -160,-140,-118,-96,-84,-52,-45,-35,-25,-15;
  time   = 12;
  rh     =.5,.2,.4,.2,.3,.2,.4,.5,.6,.7,
          .1,.3,.1,.1,.1,.1,.5,.7,.8,.8,
          .1,.2,.2,.2,.2,.5,.7,.8,.9,.9,
          .1,.2,.3,.3,.3,.3,.7,.8,.9,.9,
          0,.1,.2,.4,.4,.4,.4,.7,.9,.9;
}

```

CDL 기호는 간단하며 쉽게 구조를 파악할 수 있도록 구성되어있다. CDL 설명문은 세미콜론으로 끝나며 스페이스, 탭, 새라인들은 읽기 기능을 위하여 자유롭게 사용될 수 있다. CDL의 부가설명은 어떤 라인에서도 문자 ‘//’ 뒤에 놓인다. netCDF 데이터셋의 CDL 설명문은 다음과 같은 형식으로 표현된다.

```

netCDF name {
  dimensions: ...
  variables: ...
  data: ...
}

```

여기서 name은 ncgen에 의하여 파일명을 구성하는 기본 값으로 사용된다. CDL 설명은 Dimensions, Variables, data의 3가지 옵션부분으로 구성되어있다.

(1) Dimensions

Dimension은 시간과 위도, 경도 또는 고도와 같은 실제 물리적인 차원을 표현하는 데 사용될 수 있다. 또한 Dimension은 Station이나 모델 실행 숫자와 같은 다른 양들을 주소화하는데 사용되어질 수 있다.

netCDF Dimension은 변수명과 변수의 크기 정보를 가지고 있다. Dimension의

크기는 UNLIMITED 크기를 가질 수 있는 netCDF 데이터셋의 1차원인 경우를 제외하고는 모두 양의 정수이다. CDL 차원선언은 CDL 키워드 Dimensions 다음에 하나 또는 이상의 라인들에 나타낼 수 있으며, 같은 라인의 다중차원선언은 쉼표로 구분되어지고, 각 선언은 'name=length'의 형식을 취한다. 위의 예에서는 lat와 lon, level 그리고 time 4가지 차원이 있다. 첫 3가지는 고정된 길이로 할당되었고 time은 제한 없는 차원을 가진 UNLIMITED 길이로 할당되었다.

(2) Variables

Variables는 netCDF 데이터셋의 데이터 크기를 저장하기 위하여 사용된다. Variable은 동일한 타입에서 값의 배열을 나타낸다. 스칼라 값은 0 차원 배열로 적용된다. Variable은 변수가 생성될 때 정해진 차원의 리스트에 의해서 구체화되는 이름과 데이터 타입 그리고 모습을 가지고 있다. 또한 Variables는 관련된 Attributes를 가지고 있는데 이는 변수가 생성된 후 추가되거나 지워지거나 또는 수정할 수 있다.

Variable의 외적 데이터 타입은 FORTRAN 인터페이스에서 NF_BYTE, NF_CHAR, NF_SHORT, NF_INT, NF_FLOAT 그리고 NF_DOUBLE들로 정의 할 수 있다. CDL 기호에서는 데이터의 타입이 byte나 char, short, int, float, double, real과 같은 간단한 이름들로 표시된다. long은 int와 반대되는 의미를 가진다. 각 타입들의 더 정확한 의미는 netCDF 메뉴얼의 "netCDF external data types"를 참고할 수 있다.

CDL 변수선언은 CDL 단위에서 Variable 키워드 다음에 위치한다. 이들은 차원을 가진 변수들이나 스칼라 변수들을 위한 형식을 가지고 있다.

```
type variable_name ( dim_name_1, dim_name_2, ... );  
type variable_name;
```

위의 CDL의 예문에는 6가지의 변수를 정의하고 있다. 이들 중 네 개의 변수들은 좌표축에 관련된 것이고, 남은 변수들인 temp와 rh는 일반적인 데이터를 포함하는 변수들이다. 각각의 이런 변수들은 첫 차원에 Record variables이라 불리는 무차원의 time을 가지고 있다. Record variable이 아닌 변수들은 변수의 차원 길이의 결과에 의해 주어진 고정된 길이(데이터 값의 수가 적함)를 가지고 있다.

(3) Coordinate Variables

변수는 차원의 이름과 동일한 이름을 가질 수 있다. 이런 변수들은 netCDF 라이브러리에 아무 의미가 없다. 하지만 이런 변수들은 netCDF 라이브러리를 사용하는 소프트웨어에 의하여 특별한 방법으로 취급되는 약정이 있다.

차원과 동일한 이름의 변수는 Coordinate variable 이라 불리며, 변수의 차원에 물리적 좌표가 상응하게 정의한다. 위 CDL 예문에는 lat과 lon, level 그리고 time과 같은 Coordinate variable을 포함하고 있으며 다음과 같이 정의한다.

```
int    lat(lat), lon(lon), level(level);
short  time(time);
...
data:
level  = 1000, 850, 700, 500;
lat    = 20, 30, 40, 50, 60;
lon    = -160,-140,-118,-96,-84,-52,-45,-35,-25,-15;
time   = 12;
```

이들은 차원들에 따라 위치에 상응하는 위도와 경도, 기압, 시간들을 정의한다. 따라서 1000과 850, 700 그리고 500mb에 상응하는 표고와 북위 20, 30, 40, 50, 60도에 상응하는 위도에 데이터가 있다. 각각의 Coordinate variable은 벡터이며 동일한 이름을 갖는 차원으로 구성된 모습을 가지고 있다.

(4) Attributes

netCDF attributes는 부수적 데이터나 Meta 데이터를 저장하기 위하여 사용된다. 즉, 약정된 데이터베이스 시스템에서 Schema나 데이터 Dictionaries에 저장된 정보를 다양한 방법으로 저장하는 것과 같다. 대부분의 Attributes는 특정 변수에 대한 정보를 제공한다. 이들은 Attribute의 이름과 함께 변수의 이름(또는 ID)에 의하여 구별된다.

일부 Attributes는 전체로써 데이터셋에 대하여 정보를 제공하며 이들을 global attributes라고 부른다. 이들은 CDL안에서 Blank 변수이름 또는 특별한 Null "global variable" ID와 함께 Attribute 이름으로 구별된다.

Attributes는 변수나 차원들보다 더 유동적이므로 제거할 수 있고 새로이 생성된 후 타입이나 크기 그리고 값들을 변경시킬 수 있다. Attribute를 정의하는 방법은 variable attribute와 global attribute에 대하여 각각 다음과 같다.

```
variable_name:attribute_name = list_of_values ;  
:attribute_name = list_of_values ;
```

각각의 Attribute의 타입과 길이는 CDL에서 양해적으로 선언되지 않고 Attribute에 할당된 값으로 부터 얻을 수 있다. Attribute의 모든 값들은 동일한 타입을 가지고 있어야 한다.

netCDF 예제에서 units는 13개 문자배열 값으로 'degrees_north'를 갖는 lat 변수를 위한 Attribute이다. 그리고 valid_range는 길이 2와 값으로 '0.0', '1.0'을 갖는 rh 변수를 위한 Attribute이다.

다. 자료변환

(1) netCDF의 설치

netCDF는 윈도우 운영체제와 Unix 운영체제에서 모두 사용가능하며 Unidata의 홈페이지(<http://www.unidata.ucar.edu/packages/netcdf/>)에서 netCDF package 소스를 최신의 버전으로 tar파일이나 zip파일로 자유롭게 다운받을 수 있다. 여기서는 Unix 운영체제로 구축된 워크스테이션에 netCDF를 설치하는 방법을 제시한다. 압축된 소스파일을 워크스테이션의 /usr/local/ 디렉토리로 옮겨서 아래와 같은 방법으로 압축을 푼다.

```
gzip -d netcdf-3.5.0 tar.Z |tar xvf-
```

압축을 풀면 새로운 디렉토리(netcdf-3.5.0/src)가 현재 디렉토리에서 만들어지며, 여기에는 인스톨에 관련된 파일들과 설명문이 담긴 파일들이 생성된다. 인스톨 과정으로 Configuer와 make의 실행은 다음과 같이 순차적으로 실행한다.

```
usr/local/netcdf-3.5.0/src/./configure  
usr/local/netcdf-3.5.0/src/make  
usr/local/netcdf-3.5.0/src/make install
```

인스톨과정이 성공적으로 완료되면 bin과 include, lib, man 디렉토리가 /usr/local/netcdf-3.5.0 디렉토리 안에 생성된다.

(2) 자료변환 프로그램

해양관측이나 수치모델의 결과로 얻은 ascii나 binary 형식의 데이터를 netCDF 라이브러리를 이용하여 netCDF파일로 변환하는 프로그램은 다음과 같다. 우선 변환할 자료를 읽어들인 후, netCDF 파일로 변환하는 서브루틴을 호출하는 메인부분과 자료를 netCDF 라이브러리를 이용하여 netCDF 파일을 만드는 서브루틴으로 구분할 수 있다. 즉, 메인부분에서는 변수의 타입과 배열과 크기를 정의하고, 시간별로 입력 자료(ascii 또는 binary)를 읽어 자료를 변환시키는 서브루틴을 호출하며, 서브루틴에서는 메인부분에서 선언했던 변수의 타입을 재 선언하고 netCDF의 라이브러리를 이용하여 자료의 Variables와 Dimensions 그리고 Attributes를 netCDF 파일에 정의한다. 아래의 예문(pom2netcdf.f)은 3차원 해양수치 모델인 POM의 결과 파일(fort_1y73cy.80)을 netCDF 파일(fet_pom_1y73cy.nc)로 변환하는 포트란 프로그램의 일부이다.

```
Program pom2netcdf.f
Parameter (mx = 181, my = 199, mz = 23)
real U(mx,my,mz), V(mx,my,mz), W(mx,my,mz), UU(mx,my),
& VV(mx,my), TP(mx,my,mz), S(mx,my,mz), EL(mx,my),
& Q2(mx,my,mz), Q2L(mx,my,mz), Em(mx,my,mz), Eh(mx,my,mz),
& RHO(mx,my,mz)
open (80, file = 'fort_1y73cy.80', form = 'unformatted',
& status = 'old')
do nstep = 1, 73
read (80, end = 99) Time, U, V, W, UU, VV, TP, S, EL,
& q2, Q2L, Em, Eh, RHO
CALL Model_2_CDF (Time, U, V, W, UU, VV, TP, S, EL,
& Q2, Q2L, Em, Eh, RHO)
enddo
99 stop
```

```

end
SUBROUTINE Model_2_CDF (Day, U, V, W, UU, VV, TP, S, EL,
& Q2, Q2L, Em, Eh, RHO)
include 'netcdf.inc'
parameter (mx = 181, my = 199, mz = 23)
integer Axs_X, Axs_Y, Axs_Z, Axs_N, Axs_Xu, Axs_Yu, Axs_Xv, Axs_Yv
integer Len_X, Len_Y, Len_Z, Len_N, Len_Xu, Len_Yu, Len_Xv, Len_Yv
parameter (Len_X = mx, Len_Y = my, Len_Z = mz, Len_N =
& NF_UNLIMITED, Len_Xu = mx, Len_Yu = my, Len_Xv = mx, Len_Yv = my)
integer Id_X, Id_Y, Id_Z, Id_N, Id_Xu, Id_Yu, Id_Xv, Id_Yv,
& Id_HH, Id_EL, Id_UU, Id_VV, Id_U, Id_V, Id_W, Id_TP, Id_S,
& Id_Q2, Id_Q2L, Id_Em, Id_Eh, Id_RHO
integer Dim_X(1), Dim_Y(1), Dim_Z(1), Dim_N(1), Dim_Xu(1),
& Dim_Yu(1), Dim_Xv(1), Dim_Yv(1), Dim_HH(2),
& Dim_EL(3), Dim_UU(3), Dim_VV(3), ! Shape(Rank)
& Dim_U(4), Dim_V(4), Dim_W(4), Dim_TP(4), Dim_S(4),
& Dim_Q2(4), Dim_Q2L(4), Dim_Em(4), Dim_Eh(4), Dim_RHO(4)
real X(mx), Y(my), Z(mz), Xu(mx), Yu(my), Xv(mx), Yv(my)
c Starts and Counts for array sections of record variables
integer Ini_N(1), Ini_HH(2), ! Start
& Ini_EL(3), Ini_UU(3), Ini_VV(3),
& Ini_U(4), Ini_V(4), Ini_W(4), Ini_TP(4), Ini_S(4),
& Ini_Q2(4), Ini_Q2L(4), Ini_Em(4), Ini_Eh(4), Ini_RHO(4)
integer Cnt_N(1), Cnt_HH(2), ! Count
& Cnt_EL(3), Cnt_UU(3), Cnt_VV(3),
& Cnt_U(4), Cnt_V(4), Cnt_W(4), Cnt_TP(4), Cnt_S(4),
& Cnt_Q2(4), Cnt_Q2L(4), Cnt_Em(4), Cnt_Eh(4), Cnt_RHO(4)
c Data variables for Record Variables
integer TIME_nr
parameter (TIME_nr = 1)
real TIMES(TIME_nr)
real U(mx,my,mz),V(mx,my,mz),W(mx,my,mz),UU(mx,my),VV(mx,my),

```

```

&    TP(mx,my,mz),S(mx,my,mz),EL(mx,my),Q2(mx,my,mz),
&    Q2L(mx,my,mz), Em(mx,my,mz), Eh(mx,my,mz), RHO(mx,my,mz),
&    HH(mx,my)
real realval(1)  ! Attribute Vectors
integer iret, ncid  ! Error status return & netCDF id
data icdf / 0 /
SAVE
if (icdf .eq. 0) then
  iret = nf_create ('fet_pom_1y73cy.nc', NF_CLOBBER, ncid)  ! enter
define mode
  call check_err (iret, ICDF)
cc  Define dimensions
  iret = nf_def_dim (ncid, 'X', mx, Axs_X)
  call check_err (iret, ICDF)
  iret = nf_def_dim (ncid, 'Y', my, Axs_Y)
  call check_err (iret, ICDF)
  iret = nf_def_dim (ncid, 'Z', mz, Axs_Z)
  call check_err (iret, ICDF)
  iret = nf_def_dim (ncid, 'N', NF_UNLIMITED, Axs_N)
  call check_err (iret, ICDF)
cc  Define variables
c  1-D Array (Axis) :: X, Y, Z, Time(N), Xu, Xv, Yu, Yv
  Dim_X(1) = Axs_X
  iret = nf_def_var (ncid, 'X', NF_REAL, 1, Dim_X, Id_X)
  call check_err (iret, ICDF)
  Dim_Y(1) = Axs_Y
  iret = nf_def_var (ncid, 'Y', NF_REAL, 1, Dim_Y, Id_Y)
  call check_err (iret, ICDF)
  Dim_Z(1) = Axs_Z
  iret = nf_def_var (ncid, 'Z', NF_REAL, 1, Dim_Z, Id_Z)
  call check_err (iret, ICDF)
  Dim_N(1) = aXS_N

```

```

    iret = nf_def_var (ncid, 'N', NF_REAL, 1, Dim_N, Id_N)
    call check_err (iret, ICDF)
c    2-D Array HH(mx,my) :: Depth File (HH)
    Dim_HH(1) = Axs_X
    Dim_HH(2) = Axs_Y
    iret = nf_def_var (ncid, 'HH', NF_REAL, 2, Dim_HH, Id_HH)
    call check_err (iret, ICDF)
c    3-D Array EL(mx,my,Time) :: EL, UU, VV
    Dim_EL(1) = Axs_X
    Dim_EL(2) = Axs_Y
    Dim_EL(3) = Axs_N      ! == Axis_Time
    iret = nf_def_var (ncid, 'EL', NF_REAL, 3, Dim_EL, Id_EL)
    call check_err (iret, ICDF)
c    4-D Array EL(mx,my,mz,Time) :: U, V, T, S, Q2, Q2L, Em, Eh
    Dim_U(1) = Axs_Xu
    Dim_U(2) = Axs_Yu
    Dim_U(3) = Axs_Z
    Dim_U(4) = Axs_N
    iret = nf_def_var (ncid, 'U', NF_REAL, 4, Dim_U, Id_U)
    call check_err (iret, ICDF)
cc   Assign attributes
    iret = nf_put_att_text (ncid, Id_X, 'units', 12, 'degrees_east')
    call check_err (iret, ICDF)
    iret = nf_put_att_text (ncid, Id_X, 'point_spacing', 4, 'even')
    call check_err (iret, ICDF)
    iret = nf_put_att_text (ncid, Id_Y, 'units', 13, 'degrees_north')
    call check_err (iret, ICDF)
    iret = nf_put_att_text (ncid, Id_Y, 'point_spacing', 4, 'even')
    call check_err (iret, ICDF)
    iret = nf_put_att_text (ncid, Id_Z, 'units', 5, 'sigma')
    call check_err (iret, ICDF)
    iret = nf_put_att_text (ncid, Id_Z, 'positive', 4, 'down')

```

```

call check_err (iret, ICDF)
iret = nf_put_att_text (ncid, Id_Z, 'point_spacing', 6,
&      'uneven')
call check_err (iret, ICDF)
iret = nf_put_att_text (ncid, Id_N, 'units', 4, 'Days')
call check_err (iret, ICDF)
iret = nf_put_att_text (ncid, Id_N, 'time_origin', 11,
&      '01-JAN-2000')
c   Leave Define Mode
iret = nf_enddef (ncid)
call check_err (iret, ICDF)
cc  Define (or Read) Array Values
dlon = 1.0 / 12.0
do i = 1, mx
X(i) = 127.0 + (i-1) * dlon    ! dx = 5 minute == 1/12 Degree
enddo
iret = nf_put_var_real (ncid, Id_X, X)
call check_err (iret, ICDF)
dlat = 1.0 / 12.0
do j = 1, my
Y(j) = 35.0 + (j-1) * dlat    ! dy = 5 minute == 1/12 Degree
end do
iret = nf_put_var_real (ncid, Id_Y, Y)
call check_err (iret, ICDF)
open (1, file = 'zz_23.dat', status = 'old')
read (1, *) KBB
do I=1,mz
read (1, *) Z_READ      !
Z(I) = ABS(Z_READ)      ! refine
enddo
iret = nf_put_var_real (ncid, Id_Z, Z)
call check_err (iret, ICDF)

```



```

open (1, file = 'h.dat', status = 'old')
read (1, *) nx, ny
read (1, *) HH
close (1)
Ini_HH(1) = 1
Ini_HH(2) = 1
Cnt_HH(1) = Len_X
Cnt_HH(2) = Len_Y
iret = nf_put_var_real (ncid, Id_HH, HH)
call check_err (iret, ICDF)
endif      ! if (icdf == 0)
if (icdf .ne. 0) then
iret = nf_open ("fet_pom_1y73cy.nc", NF_WRITE, ncid)
call check_err (iret, ICDF)
endif
icdf = icdf + 1
c   Write Record variables
Ini_N(1) = icdf
Cnt_N(1) = 1
TIMES(1) = day
iret = nf_put_vara_real (ncid, Id_N, Ini_N, Cnt_N, TIMES)
call check_err (iret, icdf)
Ini_EL(1) = 1
Ini_EL(2) = 1
Ini_EL(3) = icdf
Cnt_EL(1) = Len_X
Cnt_EL(2) = Len_Y
Cnt_EL(3) = 1
c   End of data storing
iret = nf_close (ncid)
call check_err (iret, icdf)
END

```

```

subroutine check_err (iret, icdf)
include 'netcdf.inc'
integer iret
IF (iret .NE. NF_NOERR) THEN
PRINT *, NF_STRERROR(iret, icdf)
STOP
ENDIF
END

```

(3) 프로그램 실행

POM 모델의 결과 파일을 netCDF 파일로 변환하는 포트란 프로그램 (pom2netcdf.f)은 netCDF의 라이브러리를 이용하여 아래와 같은 프로그램의 컴파일과 링크 과정을 통해 실행파일이 생성된다.

```
f77 -c pom2netcdf.f -I/usr/local/netcdf-3.5.0/include
```

```
f77 -o run pom2netcdf.o -L/usr/local/netcdf-3.5.0/src/libsrc -lnetcdf
```

프로그램의 컴파일과 링크를 통해 만들어진 파일을 실행하면, netCDF 파일인 fet_pom.nc 파일이 만들어진다. netCDF 파일의 내용을 확인하기 위하여 ncdump 유틸리티를 이용하여 CDL 구문으로 변환하는 과정과 결과는 다음과 같다.

```
ncdump -c fet_pom_1y73cy.nc
```

*** CDL 구문으로 변환된 fet_pom_1y73cy.nc 파일 ***

```

netcdf fet_pom_1y73cy {
dimensions:
    X = 181 ;
    Y = 199 ;
    Z = 23 ;
    N = UNLIMITED ; // (73 currently)
    Xu = 181 ;
    Yu = 199 ;
    Xv = 181 ;

```

Yv = 199 ;

variables:

float X(X) ;

X:units = "degrees_east" ;

X:point_spacing = "even" ;

float Y(Y) ;

Y:units = "degrees_north" ;

Y:point_spacing = "even" ;

float Z(Z) ;

Z:units = "sigma" ;

Z:positive = "down" ;

Z:point_spacing = "uneven" ;

float N(N) ;

N:units = "Days" ;

N:time_origin = "01-JAN-2000" ;

float Xu(Xu) ;

float Yu(Yu) ;

float Xv(Xv) ;

float Yv(Yv) ;

float HH(Y, X) ;

HH:long_name = "WVater Dept" ;

HH:units = "meters" ;

HH:missing_value = 0.f ;

HH:_FillValue = -1.e+34f ;

float EL(N, Y, X) ;

EL:long_name = "Surface Elevation" ;

EL:units = "meters" ;

EL:missing_value = -99.9f ;

EL:_FillValue = -1.e+34f ;

float UU(N, Yu, Xu) ;

UU:long_name = "U-Current (2D)" ;

UU:units = "m/s" ;

```

UU:missing_value = -99.9f ;
UU:_FillValue = -1.e+34f ;
float VV(N, Yv, Xv) ;
VV:long_name = "V-Current (2D)" ;
VV:units = "m/s" ;
VV:missing_value = -99.9f ;
VV:_FillValue = -1.e+34f ;
float U(N, Z, Yu, Xu) ;
U:long_name = "U-Current (3D)" ;
U:units = "m/s" ;
U:missing_value = -99.9f ;
U:_FillValue = -1.e+34f ;
float V(N, Z, Yv, Xv) ;
V:long_name = "V-Current (3D)" ;
V:units = "m/s" ;
V:missing_value = -99.9f ;
V:_FillValue = -1.e+34f ;
float W(N, Z, Yv, Xv) ;
W:long_name = "W-Current (3D)" ;
W:units = "m/s" ;
W:missing_value = -99.9f ;
W:_FillValue = -1.e+34f ;
float TP(N, Z, Y, X) ;
TP:long_name = "Temperature" ;
TP:units = "C" ;
TP:missing_value = -99.9f ;
TP:_FillValue = -1.e+34f ;
float S(N, Z, Y, X) ;
S:long_name = "Salinity" ;
S:units = "psu" ;
S:missing_value = -99.9f ;
S:_FillValue = -1.e+34f ;

```

```

float KM(N, Z, Y, X) ;
    KM:long_name = "Vertical Viscosity" ;
    KM:units = "m^2/s" ;
    KM:missing_value = -99.9f ;
    KM:_FillValue = -1.e+34f ;
float RHO(N, Z, Y, X) ;
    RHO:long_name = "DENSITY" ;
    RHO:units = "non-dim." ;
    RHO:missing_value = -99.9f ;
    RHO:_FillValue = -1.e+34f ;
float ZD(N, Z, Y, X) ;
    ZD:long_name = "SIGMA-DEPTH" ;
    ZD:units = "m" ;
    ZD:missing_value = -99.9f ;
    ZD:_FillValue = -1.e+34f ;

```

data:

```

X = 127, 127.0833, 127.1667, 127.25, 127.3333, 127.4167, 127.5, 127.5833,
127.6667, 127.75, 127.8333, 127.9167, 128, 128.0833, 128.1667, 128.25,
128.3333, 128.4167, 128.5, 128.5833, 128.6667, 128.75, 128.8333,
128.9167, 129, 129.0833, 129.1667, 129.25, 129.3333, 129.4167, 129.5,
129.5833, 129.6667, 129.75, 129.8333, 129.9167, 130, 130.0833, 130.1667,
130.25, 130.3333, 130.4167, 130.5, 130.5833, 130.6667, 130.75, 130.8333,
130.9167, 131, 131.0833, 131.1667, 131.25, 131.3333, 131.4167, 131.5,
131.5833, 131.6667, 131.75, 131.8333, 131.9167, 132, 132.0833, 132.1667,
132.25, 132.3333, 132.4167, 132.5, 132.5833, 132.6667, 132.75, 132.8333,
132.9167, 133, 133.0833, 133.1667, 133.25, 133.3333, 133.4167, 133.5,
133.5833, 133.6667, 133.75, 133.8333, 133.9167, 134, 134.0833, 134.1667,
134.25, 134.3333, 134.4167, 134.5, 134.5833, 134.6667, 134.75, 134.8333,
134.9167, 135, 135.0833, 135.1667, 135.25, 135.3333, 135.4167, 135.5,
135.5833, 135.6667, 135.75, 135.8333, 135.9167, 136, 136.0833, 136.1667,
136.25, 136.3333, 136.4167, 136.5, 136.5833, 136.6667, 136.75, 136.8333,

```

136.9167, 137, 137.0833, 137.1667, 137.25, 137.3333, 137.4167, 137.5,
137.5833, 137.6667, 137.75, 137.8333, 137.9167, 138, 138.0833, 138.1667,
138.25, 138.3333, 138.4167, 138.5, 138.5833, 138.6667, 138.75, 138.8333,
138.9167, 139, 139.0833, 139.1667, 139.25, 139.3333, 139.4167, 139.5,
139.5833, 139.6667, 139.75, 139.8333, 139.9167, 140, 140.0833, 140.1667,
140.25, 140.3333, 140.4167, 140.5, 140.5833, 140.6667, 140.75, 140.8333,
140.9167, 141, 141.0833, 141.1667, 141.25, 141.3333, 141.4167, 141.5,
141.5833, 141.6667, 141.75, 141.8333, 141.9167, 142 ;

Y = 35, 35.08333, 35.16667, 35.25, 35.33333, 35.41667, 35.5, 35.58333,
35.66667, 35.75, 35.83333, 35.91667, 36, 36.08333, 36.16667, 36.25,
36.33333, 36.41667, 36.5, 36.58333, 36.66667, 36.75, 36.83333, 36.91667,
37, 37.08333, 37.16667, 37.25, 37.33333, 37.41667, 37.5, 37.58333,
37.66667, 37.75, 37.83333, 37.91667, 38, 38.08333, 38.16667, 38.25,
38.33333, 38.41667, 38.5, 38.58333, 38.66667, 38.75, 38.83333, 38.91667,
39, 39.08333, 39.16667, 39.25, 39.33333, 39.41667, 39.5, 39.58333,
39.66667, 39.75, 39.83333, 39.91667, 40, 40.08333, 40.16667, 40.25,
40.33333, 40.41667, 40.5, 40.58333, 40.66667, 40.75, 40.83333, 40.91667,
41, 41.08333, 41.16667, 41.25, 41.33333, 41.41667, 41.5, 41.58333,
41.66667, 41.75, 41.83333, 41.91667, 42, 42.08333, 42.16667, 42.25,
42.33333, 42.41667, 42.5, 42.58333, 42.66667, 42.75, 42.83333, 42.91667,
43, 43.08334, 43.16667, 43.25, 43.33334, 43.41667, 43.5, 43.58334,
43.66667, 43.75, 43.83334, 43.91667, 44, 44.08334, 44.16667, 44.25,
44.33334, 44.41667, 44.5, 44.58334, 44.66667, 44.75, 44.83334, 44.91667,
45, 45.08334, 45.16667, 45.25, 45.33334, 45.41667, 45.5, 45.58334,
45.66667, 45.75, 45.83334, 45.91667, 46, 46.08334, 46.16667, 46.25,
46.33334, 46.41667, 46.5, 46.58334, 46.66667, 46.75, 46.83334, 46.91667,
47, 47.08334, 47.16667, 47.25, 47.33334, 47.41667, 47.5, 47.58334,
47.66667, 47.75, 47.83334, 47.91667, 48, 48.08334, 48.16667, 48.25,
48.33334, 48.41667, 48.5, 48.58334, 48.66667, 48.75, 48.83334, 48.91667,
49, 49.08334, 49.16667, 49.25, 49.33334, 49.41667, 49.5, 49.58334,
49.66667, 49.75, 49.83334, 49.91667, 50, 50.08334, 50.16667, 50.25,

50.33334, 50.41667, 50.5, 50.58334, 50.66667, 50.75, 50.83334, 50.91667,
51, 51.08334, 51.16667, 51.25, 51.33334, 51.41667, 51.5 ;

Z = 0, 0.0009765638, 0.001953127, 0.003906254, 0.007812506, 0.01562501,
0.03125001, 0.06250001, 0.125, 0.1875, 0.25, 0.3125, 0.375, 0.4375, 0.5,
0.5625, 0.625, 0.6875, 0.75, 0.8125, 0.875, 0.9375, 1 ;

N = 370, 375, 380, 385, 390, 395, 400, 405, 410, 415, 420, 425, 430, 435,
440, 445, 450, 455, 460, 465, 470, 475, 480, 485, 490, 495, 500, 505,
510, 515, 520, 525, 530, 535, 540, 545, 550, 555, 560, 565, 570, 575,
580, 585, 590, 595, 600, 605, 610, 615, 620, 625, 630, 635, 640, 645,
650, 655, 660, 665, 670, 675, 680, 685, 690, 695, 700, 705, 710, 715,
720, 725, 730 ;

}

netCDF 파일은 Ferret(<http://ferret.wrc.noaa.gov/Ferret/>)을 이용하면 쉽게 자료를 그래픽으로 구현할 수 있다. Fig. 2-6과 Fig. 2-7에는 Ferret을 이용하여 fet_pom_1y73cy.nc 파일에서 12월의 표면유속과 수온 그리고 표면유속과 염분 그림을 도시하였다.

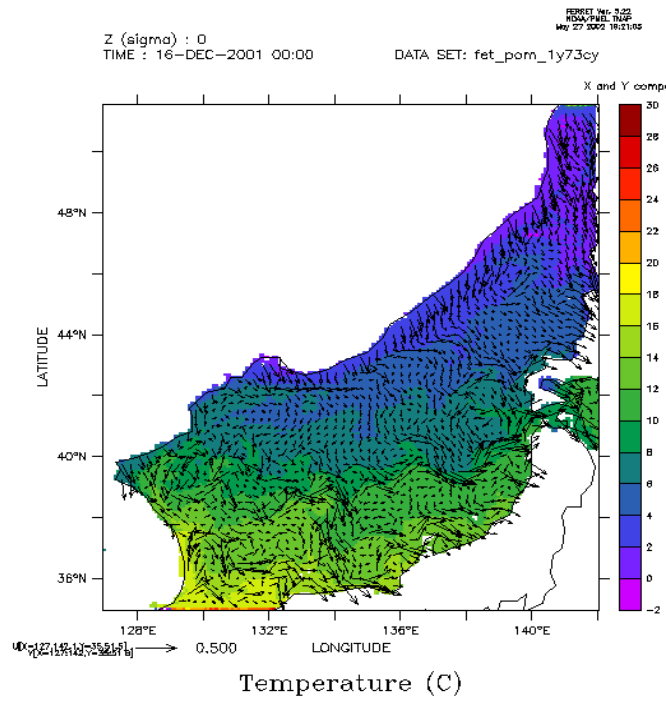


Fig. 2-6 Simulated monthly mean sea surface velocity vector and temperature($^{\circ}\text{C}$) field(December).

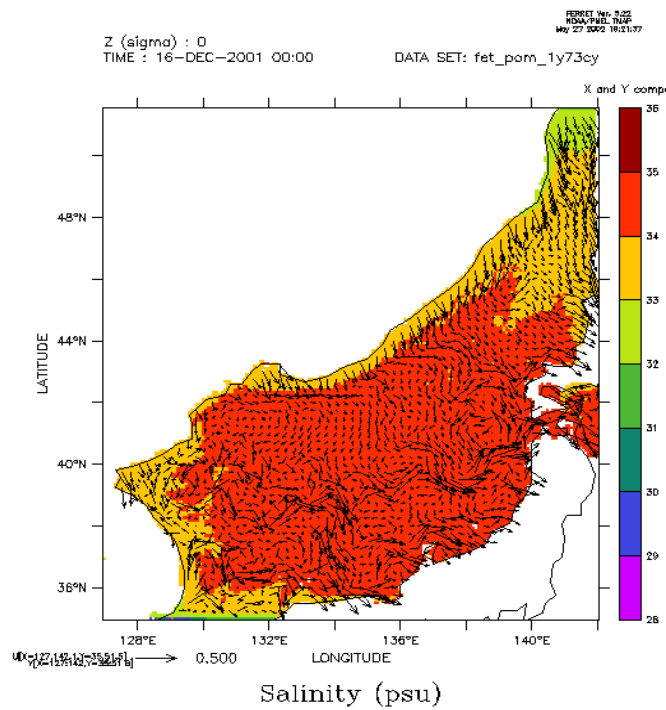


Fig. 2-7 Simulated monthly mean sea surface velocity vector and salinity(psu) field(December).

제 3 절 해양수중구조의 가시화기술

1. Vis5D를 이용한 해양구조 가시화

가. Vis5D란 무엇인가?

Vis5D는 5-D gridded data 즉 수치대기모델이나 해양 모델 등의 수행으로 얻어진 방대한 양의 자료의 능동적인 가시화를 위한 시스템이다. 이는 3-D grid 자료를 이용하여 isosurface, contour slice, colored slice 등으로 나타낸 이미지를 실시간으로 회전시키거나 애니메이션시킬 수 있다. 또한 wind, trajectory tracing 을 표현할 뿐 아니라 text annotations 등도 추가할 수도 있다.

Vis5d+ 는 Vis5d의 진보된 버전으로 Vis5d에서 개발작업을 위한 기본도구이다. 3차원 과학자료를 위한 가시화 프로그램으로써 OpenGL에 기반을 두고 있다. 기존의 Vis5d 개발자들의 요구에 의해 GNU autoconf와 automake를 사용하기 위한 Vis5d 셋팅 과정의 변환으로써 이 프로젝트가 시작되었다(여러 다른 시스템 기반에서 Vis5d 를 컴파일하는 어려움에서 시작). 이 새로운 버전에서 추가된 것이 stereo mode와 VRML로의 변환기능이다. 앞으로 설명할 프로그램은 Vis5d+ 버전으로 이후 작업된 결과물 역시 Vis5d+ 로 작업하였다.

Vis5D를 설치할 때 필요한 라이브러리 Mesa 라이브러리와 netCDF Lib이며, 이 두 라이브러리를 설치 한 후 Vis5d+ 를 컴파일 하면 Vis5D+ 를 사용할 수 있게 된다.

나. v5d 파일 형식으로의 변환

여러 경로를 통해 얻어진 해양예측정보 데이터들을 가시화 프로그램을 이용하여 5차원으로 나타내기 위해 여러 변환과정을 거치게 된다. 우선 네트워크 표준 데이터 포맷인 netCDF 형식으로 변환시킨다. 이 형식의 파일은 ASCII 혹은 binary 파일에 비해 용량면에서 가볍고 ncvview, ncdump, ncgen, FERRET 등 여러 프로그램들에 의해 원래 데이터의 손상 없이 쉽게 다루어 질 수 있다. 이러한 장점들을 바탕으로 하여 Vis5D, VisAD, vGeo 등 여러 가시화 프로그램에서는 netCDF 형식의 파일을 받아들이도록 프로그램들이 설정되어 있다.

본 연구에서 사용되어지는 전체적인 data의 흐름을 아래 그림에 나타내었다.

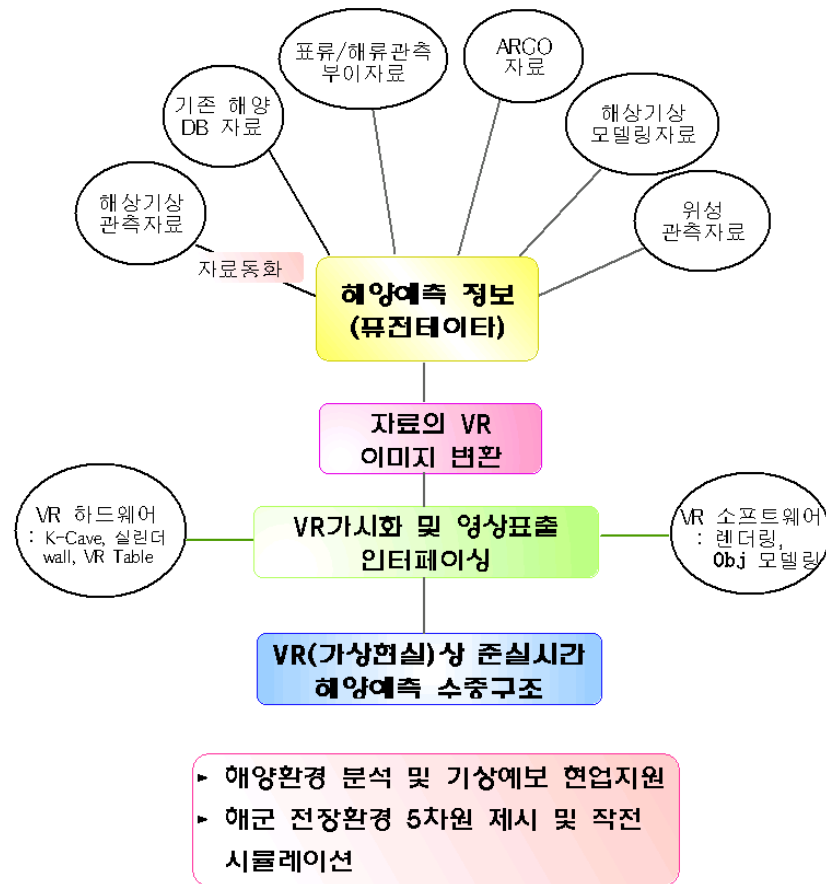


Fig. 3-1 Ocean fusion data flow for VR display.

netCDF 혹은 ASCII, binary 형식의 파일을 VR 이미지로 생성하기 위해 Vis5d에서는 v5d 라는 형식의 파일을 기본으로 하고 있다. v5d 포맷 파일들은 v5d 라이브러리로부터 함수를 이용하여 생성되어진다. 어떠한 경우에서든 변환 프로그램은 v5d 파일을 만들기 위해 3가지 함수 v5dCreate, v5dWrite, v5dClose를 사용한다. Table 3-1에 ascii 혹은 binary 형식의 자료를 v5d로 변환하는 프로그램 소스와 netCDF 형식의 자료를 v5d로 변환하는 프로그램의 일부를 나타내었다. Fig. 3-2 전체적인 데이터 전환의 과정을 플로우차트로 나타내었다.

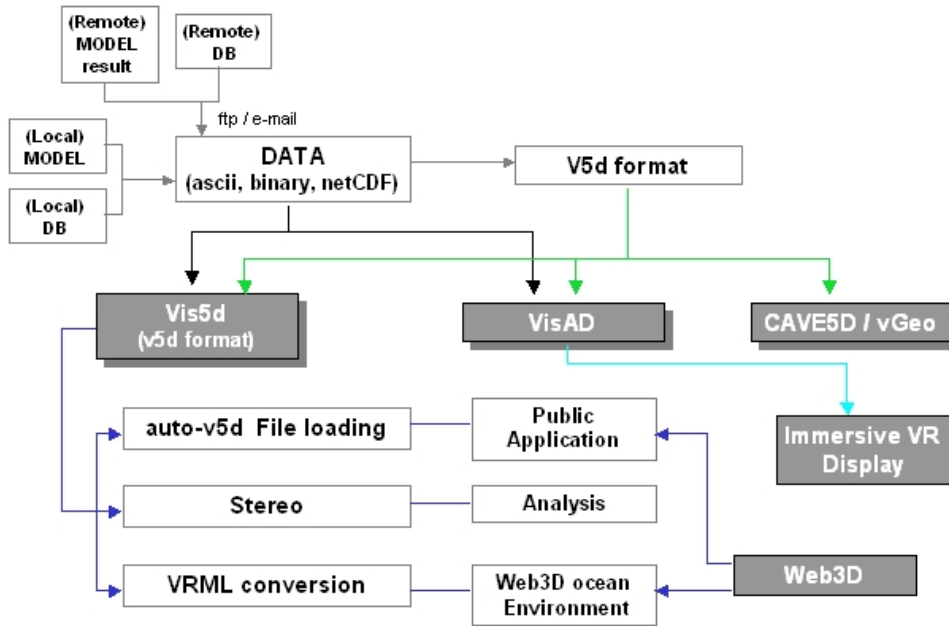


Fig. 3-2 Data conversion processes to VR system.

Table 3-1 A program converting various data formats to v5d file.

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include "binio.h"
#include "v5d.h"
#include <netcdf.hh>

Conversion 함수 Input: infile - name of input file in your format
                    outfile - name of output file in v5d format

static void convert( char *outfile ) {
    float *g;
    FILE *f;
    int it, iv, ir, ic, il;

    int NumTimes;
    int NumVars;
    int Nr, Nc, Ni[MAXVARS];
    char VarName[MAXVARS][10];
    int TimeStamp[MAXTIMES];
    int DateStamp[MAXTIMES];
    int CompressMode;
    int Projection;
    float ProjArgs[100];
    int Vertical;
    float VertArgs[MAXLEVELS];

    f = fopen( infile, "r" );
    if (!f) {
        printf("Error: couldn't open %s for reading\n", infile);
        exit(1);
    }
}

**** 필요한 변수들을 선언
이 변수들은 입력자료의 정보에 따라 전부 초기화

**** map Projection의 type
0 : linear, rectangular, generic units
1 : linear, rectangular, cylindrical-equidistant
2 : Lambert Conformal
3 : Stereographic
4 : Rotated

**** Vertical Coordinate system argument
0 : equally spaced levels in generic units
1 : equally spaced levels in km
2 : unequally spaced levels in km
3 : unequally spaced levels in mb
****

변수들의 초기화와 input 파일의 입력부분
파일의 타입에 따라 fscanf(), fread()등의 함수이용
  
```

```

if (!v5dCreateSimple( outfile, NumTimes, NumVars, Nr, Nc, Nl, VarName, TimeStamp, DateStamp,
                    NorthLat, LatInc, WestLon, LonInc, BottomHgt, HgtInc )) {
    printf("Error: couldn't create %s\n", outfile );
    exit(1);
}

**** v5dSetUnits(), v5dSetLowLev() 등의 함수를 써서 단위 등을 지정할 수 있다.

/* allocate space for grid data */
g = (float *) malloc( Nr * Nc * Nl * sizeof(float) );
if (!g) {
    printf("Error: out of memory\n");
    exit(1);
}
for (it=0;it<NumTimes;it++) {
    for (iv=0;iv<NumVars;iv++) {
        #define G(ROW, COLUMN, LEVEL) g[ (ROW) + ((COLUMN) + (LEVEL) * Nc) * Nr ]
**** 변화하고자 하는 변수들을 v5d 배열 안에 넣는 과정

        /* Write data to v5d file. */
        if (!v5dWrite( it+1, iv+1, g )) {
            printf("Error while writing grid. Disk full?\n");
            exit(1);
        }
    }
}
v5dClose();
fclose(f);
}

int main( int argc, char *argv[] )
{
    if (argc==1) {
        printf("Usage:\n");
        printf("  %s infile outfile\n", argv[0]);
    }
    else {
        printf("Input file: %s\n", argv[1] );
        printf("Output file: %s\n", argv[2] );
        convert( argv[1], argv[2] );
    }
    return 0;
}

```

다. Vis5D 시작하기

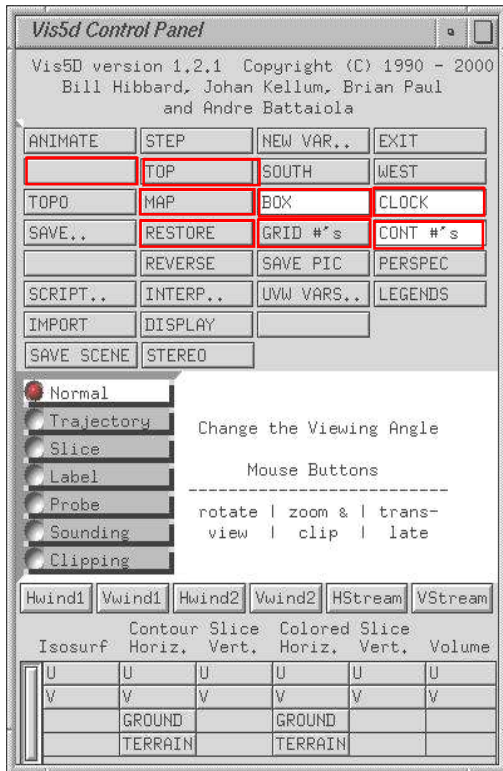
v5d 포맷의 파일을 생성한 후 하나 또는 몇 개의 파일을 가시화 하기 위해서 아래와 같은 명령어를 프롬프트 상에 타이핑한다.

```
%vis5d file1.v5d [option] file2.v5d [option] .....
```

(1) Controlling vis5d

자신의 v5d 파일을 vis5d로 구동하면 두 개의 window가 나타난다. 두 개의 window 중 오른쪽에 나타나는 window는 1개 또는 그 이상의 3-D display window를

나타내고, 또 다른 window는 아래의 그림과 같은 control panel이 나타나게 된다. 이 control panel은 3-D display 각각에 대해 제어할 수 있다. 이제 control panel에 나타나있는 메뉴들에 대한 설명과 예제를 제시하도록 하겠다. 아래 그림 중 비활성화 되어 나타나 있는 button 들에는 vis5d 구동 시 옵션에 따라 기능이 설정이 되고 사용 가능하게 된다.



- ANIMATE : 회전을 on, off시키는 버튼으로 left, middle 마우스 버튼은 전진방향이고 right 마우스 버튼은 반대이다. 회전의 속도는 S와 F 키로 조정할 수 있다.

- STEP : left 버튼은 한 스텝 씩 앞으로 나가도록 하며, middle 버튼은 제일 처음 step으로 right 버튼은 한 스텝 전으로 이동하게 한다.

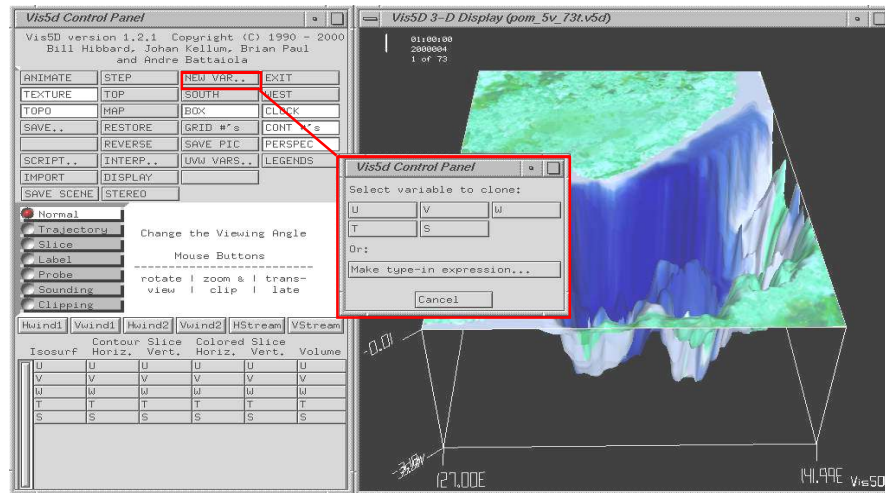
- TOP, SOUTH, WEST : display window의 viewing 방향을 나타냄.

- MAP : map lines의 display를 가능하게 한다. 오른쪽 마우스 버튼으로 map line의 색을 바꿀 수도 있다.

- BOX, CLOCK : display window에 box, clock를 나타내는 기능.

- NEW VAR.. : 원래 데이터가 지니고 있는 변수들을 복사하거나, 식을 이용하여 새로운 변수를 생성하는 기능. 아래의 그림은 NEW VAR..을 클릭 했을 때의 모습이다. display window에 나타난 모습은 TOPO와 TEXTURE를 활성화한 결과이다.

- TOPO : topography를 나타내는 기능. topography 파일이 없을 경우에는 나타나지 않는다. 오른쪽 마우스 버튼을 이용하여 topography의 색을 수정할 수 있다. topo 파일은 topo라는 형식의 파일로 vis5d에서 지정한 형식이다. 이 파일의 생성과정과 input 자료의 특성에 대해서는 응용 case에서 설명하기로 한다.



■ TEXTURE : 2차원 이미지를 3차원에서 surface를 display하는 수단으로서 texture mapping이 사용된다. Vis5d에서는 인공위성 사진이나 map 이미지 등을 topography위에 over하여 이미지를 나타낼 수 있다. Texture mapping은 오직 SGI system에서만 가능하며 Mesa 라이브러리를 사용한다. 처음 vis5d를 실행할 때 -texture 옵션을 써서 구동을 하게 되면 이 TEXTURE 버튼이 활성화되며, 또는 DISPLAY 버튼을 클릭해서 셋팅해줄 수 있다. 옵션 메뉴는 [-texture file] 의 형식이며 file의 포맷은 SGI RGB 포맷만 가능하다.

■ PERSPEC : perspective와 orthogonal viewing projection을 교대로 선택.

■ REGEND : 3-D window에 colorbar legend를 나타내는 기능.

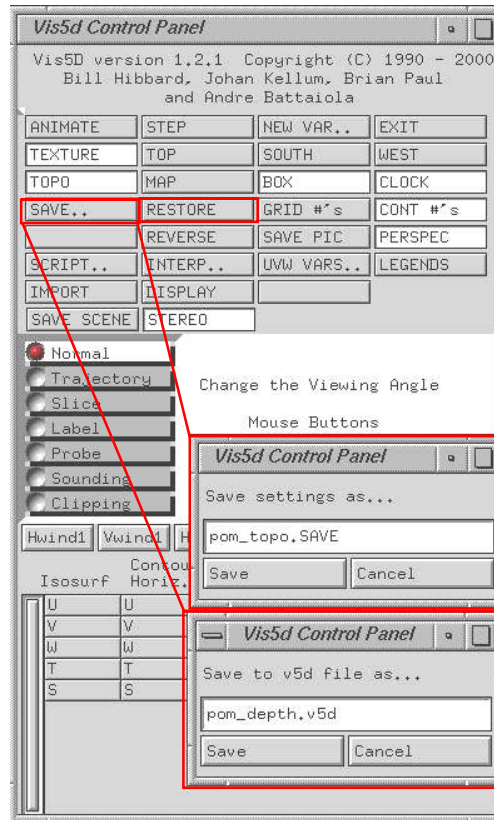
■ SCRIPT... : vis5D Tcl 스크립트를 수행하는 기능. SAVE나 RESTORE를 이용하면 지금까지 만들어진 그래픽 오브젝트들과 색상 등을 Tcl 스크립트 언어로 저장할 수 있다. 다음 번 Vis5D 수행 시 이전 작업한 것과 똑같은 scene을 호출하고 싶을 때 미리 만들어 놓은 Tcl 스크립트 파일을 로딩하여 같은 scene을 생성할 수 있다.

■ SAVE / RESTORE :

현재 display window에 보이는 그래픽 오브젝트와 색상을 저장하는 기능. 이 파일 포맷은 vis5d 4.2의 버전의 Tcl 스크립트이다. 오른쪽 마우스 버튼을 클릭하면 현재 나타나 있는 vis5d data set을 v5d 파일로써 저장할 수 있다.

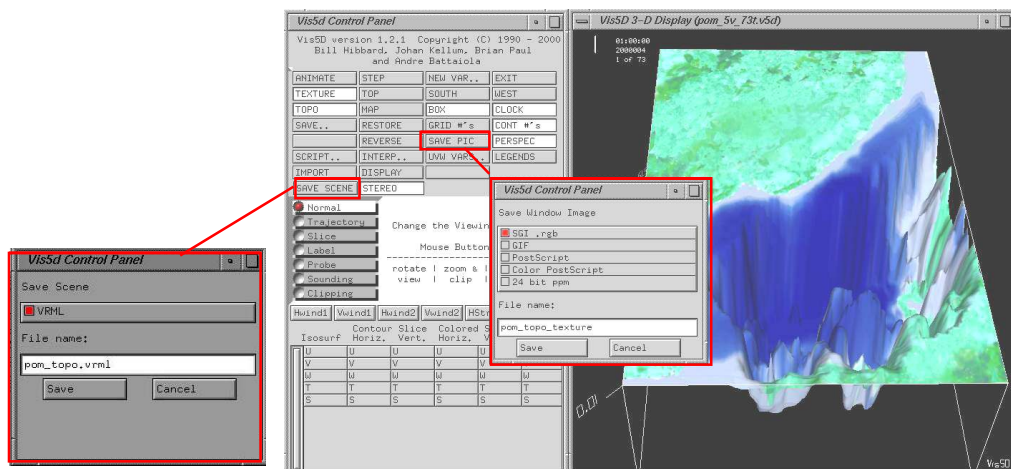
■ INTERP.. : Vis5D의 대화식 interpreter를 시작하는 기능. 자신의 shell에서 Tcl 명령어를 입력하여 Vis5D를 제어할 수 있다.

■ SAVE PIC : 3-D 또는 sounding window를 이미지 파일로 저장하는 기능. 'Sounding' viewing mode일 때는 sounding window가 저장되고 그 외에는 display window의 내용이 이미지로 저장된다. 가능한 이미지 포맷은 시스템과 라이브러리에 따라 달라진다. 기본적으로 SGI 시스템의 경우 RGB, GIF, PS, Color PS, PPM 등이다.

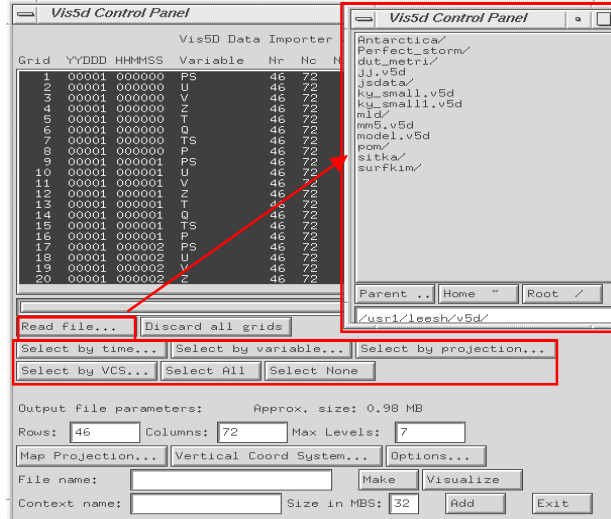


■ SAVE SCENE : display window에 나타나 있는 그래픽 오브젝트들을 web 3D 언어인 VRML로 전화 시켜주는 기능.

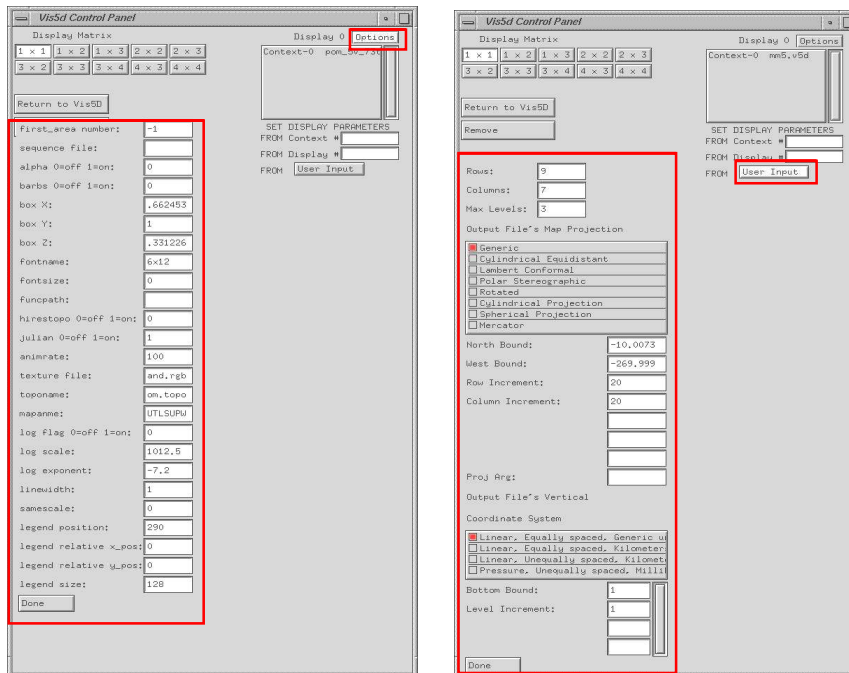
■ STEREO : stereo가 지원이 되는 장비에서만 활성화되는 것으로써 vis5d+ 버전에서만 기능구현을 할 수 있다.



- IMPORT : 현재의 Vis5d에 새로운 데이터 셋을 추가하는 기능. 시간, 프로젝션 타입 등에 따라 쿼리하여 선택된 변수만을 추가 할 수 있다.



- DISPLAY : 여러 자료들이 로딩되었을 때 제어하는 메뉴이다. main control panel에서 DISPLAY 버튼을 클릭하여 각각에 대하여 projection type, vertical, topo file 등 여러 옵션을 변경하거나 추가시킬 수 있다.

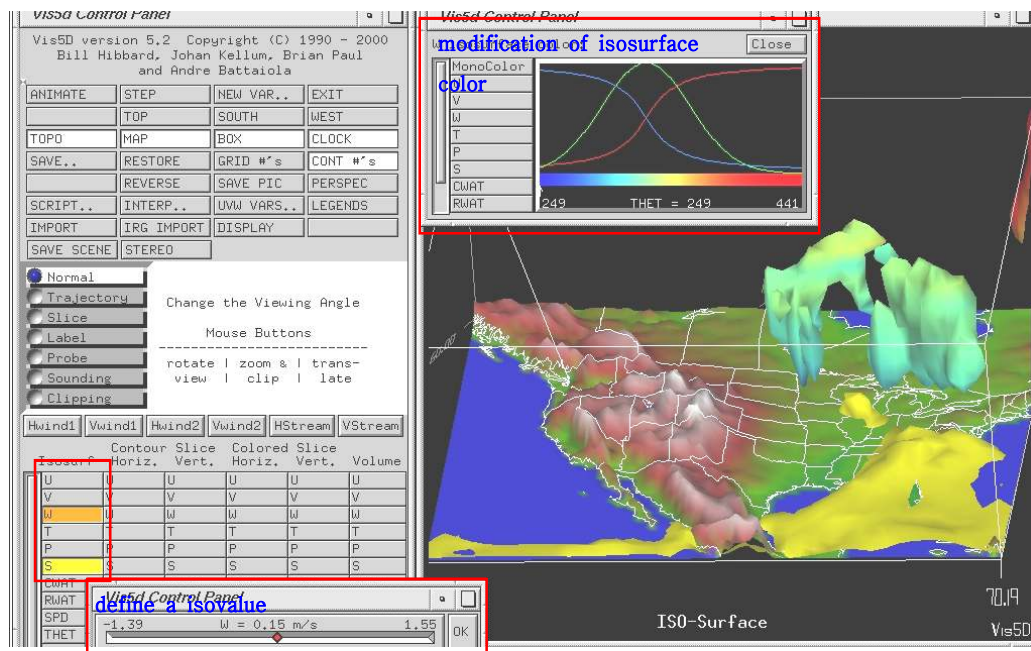


(2) Viewing Modes

Normal 모드에서 마우스 모드는 3-D window에서 자료를 보여주기 위해 사용된다. 즉 왼쪽 마우스 버튼을 클릭하여 움직이면 3-D 이미지가 회전을 하고, 가운데 버튼은 확대, 축소 그리고 오른쪽 버튼은 3-D 이미지의 이동을 제어한다. 이렇듯 viewing 모드에 따라 마우스의 각 버튼들은 서로 다른 역할을 하게 된다. 다른 5가지 viewing mode에 대해서는 내용에 따라 차례로 설명하겠다.

■ Isosurface

Isosurface는 변수의 특정 값을 3-D volume으로 보여준다. Isosurface는 구분된 iso-level을 갖으며, 내부의 volume에는 isovalue보다 큰 혹은 작은 값들로 이루어져 있다. 아래 그림은 여러 그래픽 오브젝트들이 혼합되어 있는데, 여기서는 우선 isosurface를 나타내기 위해 isovalue를 정하는 panel(㉑)과 isosurface의 색상을 정하는 panel(㉒)을 표출하였다. Isosurface의 색상은 monocolor와 각 변수들에 따라 변화하는 색상으로 나타낼 수 있다.



■ Slices

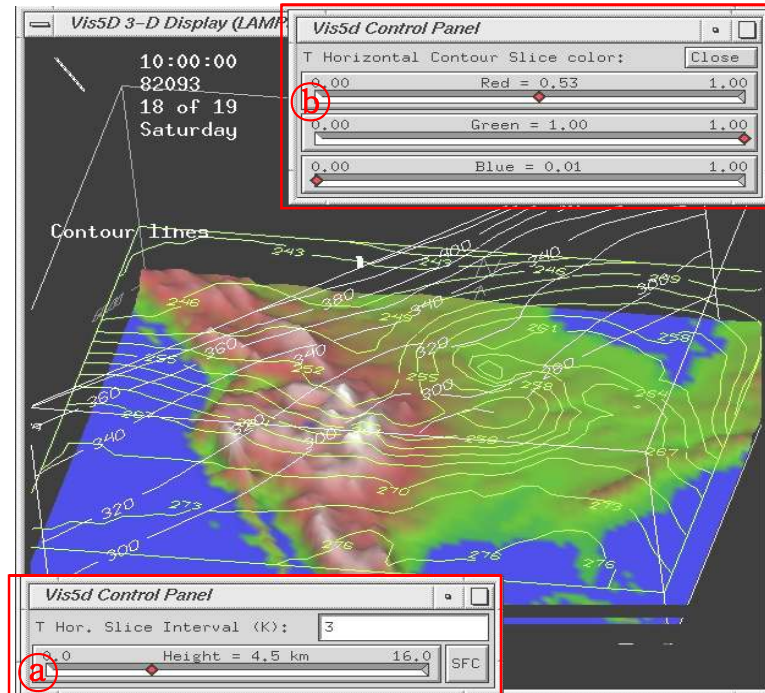
Slices는 3-D 박스에서 데이터를 평면 cross section을 보기 위한 것이다. 이는 수평적 혹은 수직적으로 contour line, colored slices, wind vectors, wind stream lines를 묘사할 수 있다. 나타내고자 하는 slices를 왼쪽 마우스로 클릭하면 초기 값을 입력하는 팝업창이 뜬다. 초기에는 slice의 위치가 3-D 박스의 중간에 위치한다. 위경도 혹은 고도로서 slice의 위치정보가 표기되기도 하고, control panel의 GRID#s 버튼을 이용해서 slice의 위치를 grid number로서도 나타낼 수 있다.

Slice의 위치는 마우스를 사용하여 사용자가 원하는 위치로 변형이 가능하다. Slice 라디오 버튼을 선택하면 SLICE 모드로 바뀌게 된다. 이때 slice를 선택해서 오른쪽 마우스 버튼을 누른 상태에서 마우스를 이동하면 slice의 위치가 바뀐다. 수평적 혹은 수직적으로 변형을 가할 수 있다.

이제 여러 종류의 slice를 나타내는 과정을 예제와 함께 제시하겠다.

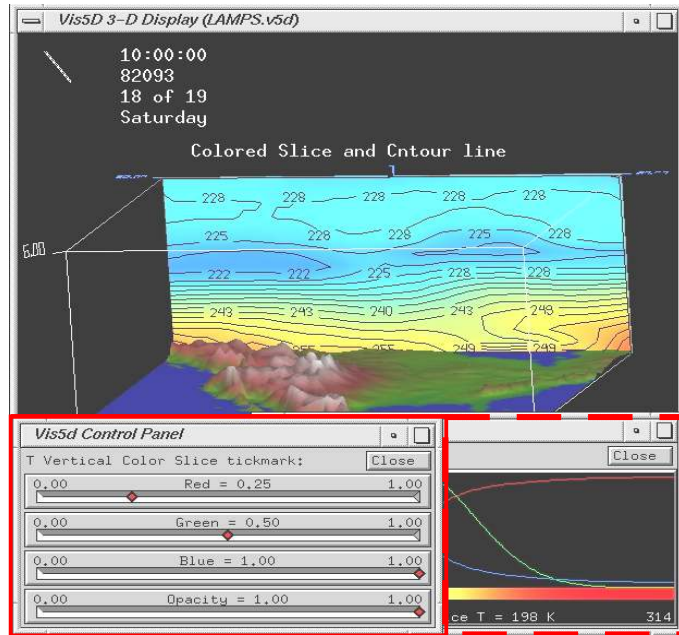
① Contour Line Slices

수평 혹은 연직 Contour line을 나타내고자 하는 변수를 왼쪽 마우스로 선택하면 아래의 그림의 ㉠ panel이 나타난다. 이 창은 contour line의 간격을 나타내는 것으로, 숫자가 적어질수록 밀집한 contour line이 생성된다. Contour line의 색상은 변수를 오른쪽 마우스로 선택(㉡ panel)해서 변화시킬 수 있다. Contour line에서는 RGB로 구성되는 mono color 만이 지원된다. 추가적으로 contour line의 간격을 데이터 전체 범위에서가 아니라 일정범위를 지정해서 나타낼 수도 있다 (예 : -10(-30,20) - 데이터 범위 -30에서 20까지를 10씩 감소하게 나타내고자 함). Control panel의 CONT#s 버튼을 클릭하여 contour line의 값을 표시할 수도 있다. 아래의 그림은 SLICE 모드에서 연직 contour slice의 위치를 변형시킨 것이다.



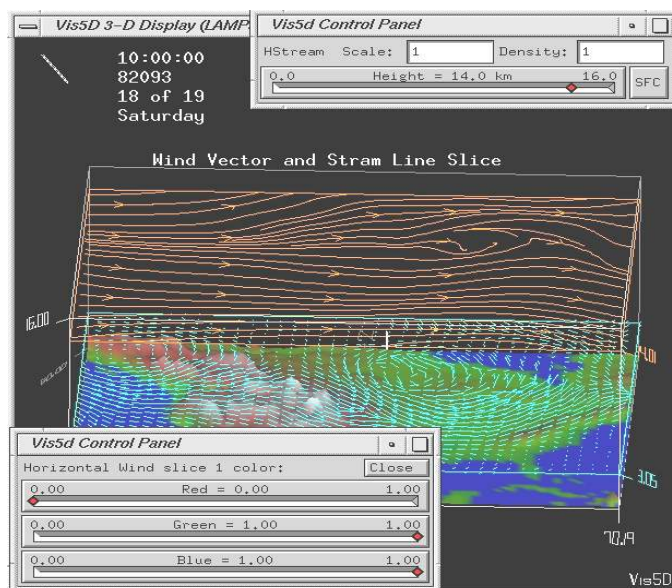
② Colored Slices

Colored slice를 클릭하면 contour line에서와는 달리 색상 panel만 나타난다. 이 색상 panel은 두 종류로 나타나는데, 하나는 RGB와 alpha(투명도) 값으로 설정하고, 또 다른 방법은 데이터의 범위에 대해 RGB 값을 그래프로 설정하는 방법이 있다. 마우스나 화살표 키로서 이 그래프를 변형할 수 있다.



③ Wind Vector Slices and Wind Stream lines

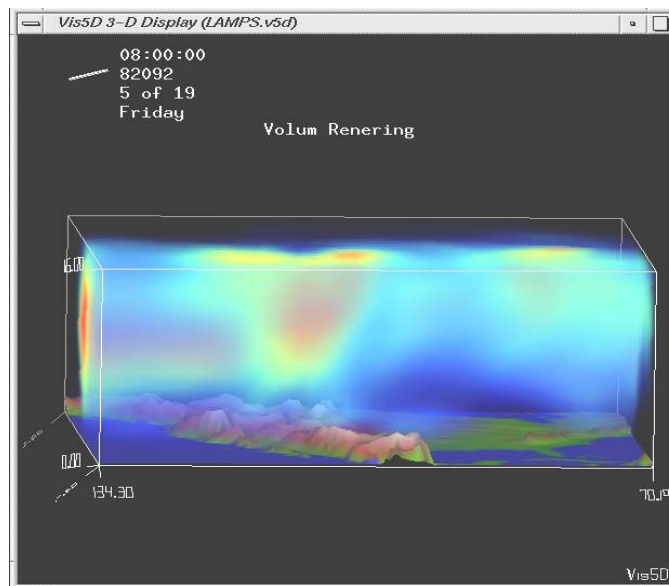
Wind vector slices는 HWIND, VWIND 등의 버튼으로 나타낼 수 있으며, 실행시 두 가지 값 즉 wind vector의 density와 scaling을 1을 기준으로 하여 설정해줄 수 있다. 수평 wind vector에서의 SFC 버튼은 slice를 topography를 따라 나타나게 한다.



Wind stream line은 line segment로서 바람의 경로를 나타내는 방법이다. Control panel에서 HStream, VStream을 클릭하여 wind vector와 마찬가지로 scale 과 density, 색상을 설정할 수 있다.

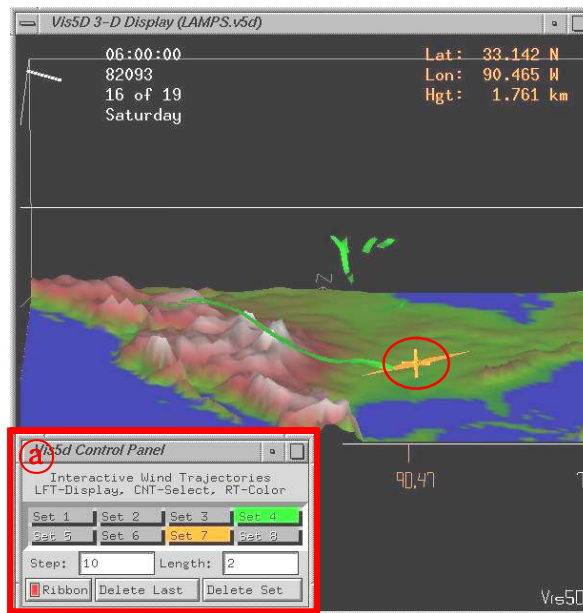
- Volume Rendering

Volume rendering 기법은 반투명색상으로 3차원적으로 표현하는 방법이다.



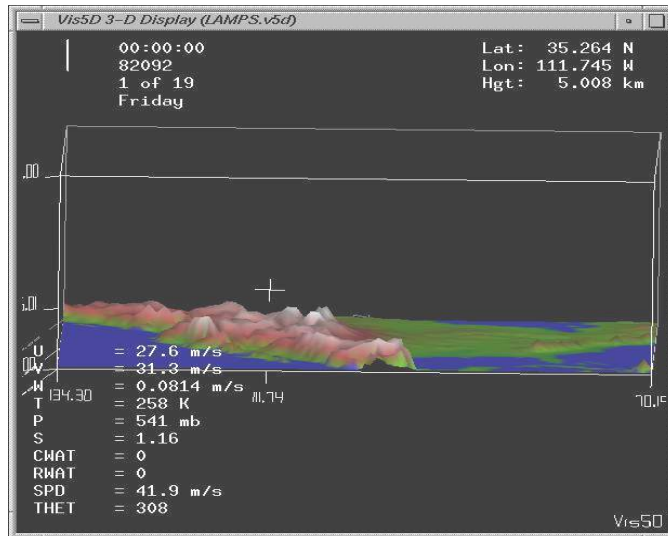
■ Wind Trajectories

Wind trajectories는 마치 풍동실험에서 연기의 흐름을 추적하듯 3D volume을 통해서 공기의 움직임을 추적한다. TRAJECTORY 라디오 버튼을 클릭하면 trajectory 모드가 된다. 이때 ① panel과 display window 안에 커서가 나타나는데, 이 커서가 위치한 곳에 가운데 마우스 버튼을 클릭하면 trajectory가 만들어지고, STEP 혹은 ANIMATE버튼을 실행하면 커서 위치의 trajectory가 나타나게 된다.



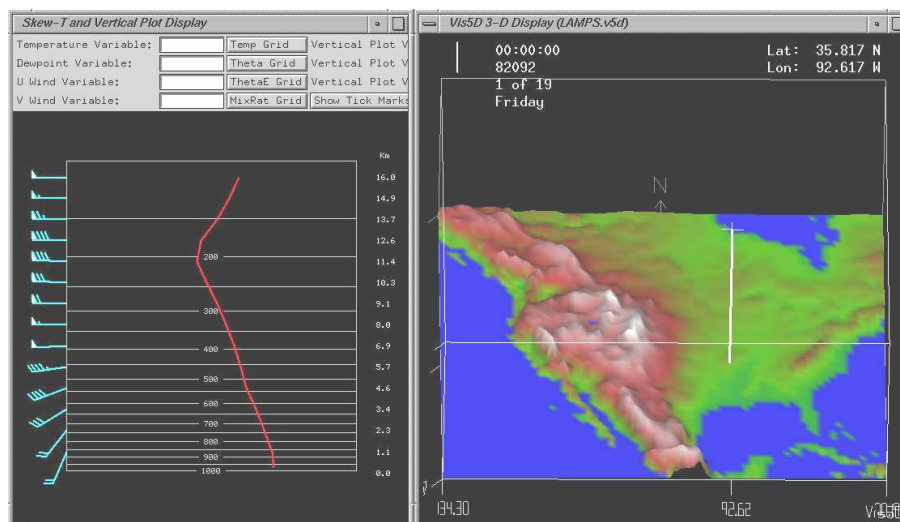
■ Data Probe

가끔 3D volume에서 여러 위치에서 개개의 데이터의 값들을 검사할 수 있게 하는 기능은 유용하다. Vis5D에서는 이런 기능을 가능하게 하는 것이 data probe이다. Control panel에서 PROBE 라디오 버튼을 클릭하면 아래와 같이 display window가 나타난다. PROBE는 display window안의 커서가 위치한 지점에 존재하는 데이터 셋의 모든 값들의 정보를 display window에 나타내준다. 커서는 오른쪽 마우스를 클릭 한 상태에서 이동시킬 수 있다.



■ Vertical Sounding and SkewT

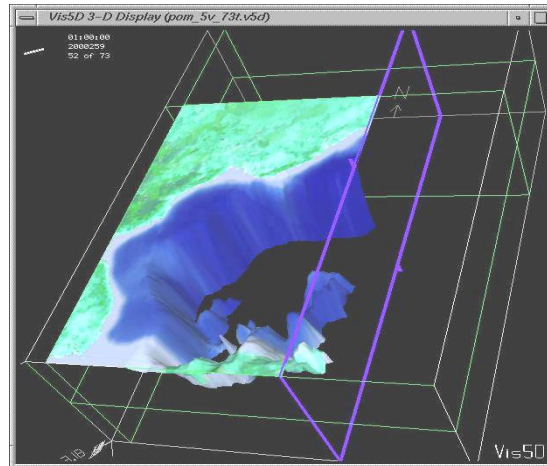
Sounding mode를 선택하면 Vis5D는 수직으로 라인커서가 3D 박스의 바닥에서 위층경계까지 나타난다. 라인커서를 따라 연직적인 프로파일을 새로운 window에서 나타내준다.



■ Clipping

Vis5D의 viewing mode 중 마지막으로 Clipping이 있다. 사용자가 더욱 자세히 보고자 하는 영역으로 3D 박스내의 내용을 잘라서 볼 수 있도록 하는 기능으로 마

우스 중간 버튼을 클릭 할 때마다 순차적으로 박스의 6면이 돌아가며 선택이 되고, 이때 선택된 면은 아래 그림과 같이 다른 색으로 나타난다. 왼쪽 마우스 버튼을 클릭 한 상태에서 드래그 하여 clipping을 할 수 있다.



라. 응용 Case

(1) 해저지형

① input 자료

파일명	type	특 성
digital_depth.dat	dxg/ascii	국립해양조사원(NORI)
korea.out	ascii(unix)	기상청에서 제공된 15' 간격 등고자료
정선자료	ASCII	한국해양자료센터(KODC) 제공 해양과학자료 netCDF로 변환
korea.topo	Vis5d	vis5d 구동 시 topography로써 활용
korea_land.rgb	RGB	Texture mapping

NORI와 기상청에서 제공된 데이터의 전체 domain은 우리나라 전해역과 북한까지 포함하는 자료이다. 이 데이터를 coarse domain 이라고 정한 31N ~ 40N, 123E ~ 134E의 영역에 대한 자료만을 추출하여 본 연구에 사용하였다. Coarse domain 내의 데이터는 x, y, value의 ASCII 데이터로 irregular data이다. Vis5d는 정규그리드 데이터를 기본 자료로 하며 topo 역시 정규그리드 데이터의 형태이어야 한다. 그래서 본 연구에서는 비정규그리드 데이터를 Surfer 프로그램을 이용하여

coarse domain에 해당하는 자료만을 10초 간격으로 내·외삽하여 자료를 생성하였다. 자료는 ASCII 형식으로 x, y, height의 3개 column으로 되어 있다. 이렇게 생성되어진 topography 파일은 Vis5d 구동 시 topo 파일로써 활용된다. Fig. 3-3은 coarse domain에 해당하는 topo 자료를 Surfer를 이용하여 나타낸 것이다. Surfer를 통해 map을 jpg나 gif 등의 포맷으로 저장한 후, 이를 RGB 파일 포맷으로 변환하여 Vis5d에서 texture mapping 하는데 이용하였다.

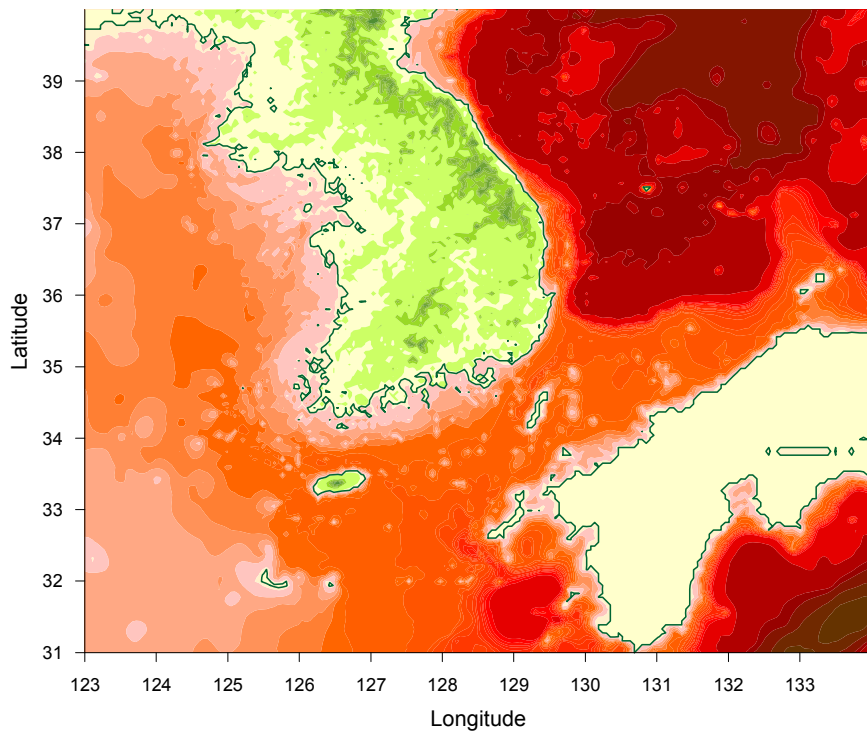


Fig. 3-3 Map compiled in regularly gridded at 10 seconds using digital navigation charts and DEM.

여기서 사용한 응용프로그램은 Surfer이나, 만약 topo 자료가 netCDF 등의 포맷으로 되어 있다면 FERRET 등의 다른 응용프로그램을 통해서도 RGB 파일을 생성시킬 수가 있다. 한가지 주의할 점은 보기엔 푸른색으로 보이는 RGB 파일이 실제 texture mapping을 해보면 붉은 색으로 나타나므로 RGB 파일로 변환하기 전에 색을 반전시켜야 한다.

Vis5d에서 가시화 하고자 하는 정선데이터는 1961년부터 한국근해의 22개 정선 175개 정점(동해 : 8개선, 남해 : 7개선, 서해 : 6개선, 한일선 ; 1개선)의 격월로

실시한 해양관측 자료 수온, 염분, 용존산소 및 기상요소들을 수록하였으며, 영양염 자료 역시 수록되었으나 매년 정기적으로 관측되지는 않았다. 관측점의 위치를 Fig. 3-4에 나타내었다. 정선데이터를 netCDF로 변환한 후 이를 v5d 포맷으로 변환하였다.

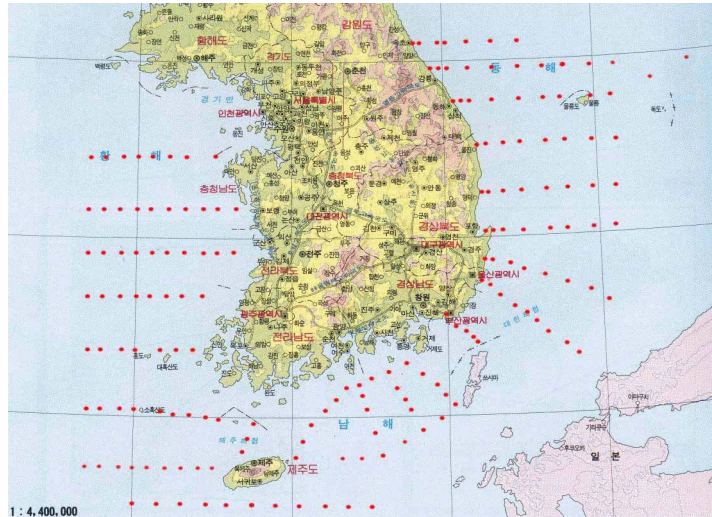


Fig. 3-4 Map showing bi-monthly survey stations conducting by NFRDI.

② 변환 프로그램 및 작업과정

위에서 설명된 input 자료들을 vis5d에서 사용하기 위한 데이터의 변환과정과 변환방법에 대해 알아보겠다. 전체적인 데이터의 I/O를 Fig. 3-5에 나타내었다.

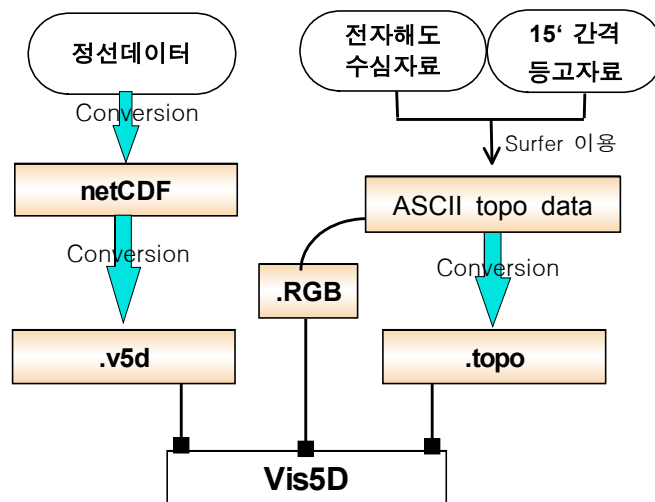


Fig. 3-5 Conversion flow from irregular spaced data to v5d format.

Table 3-2 Script creating .topo file from Ascii data.

```

#include <stdio.h> #include <stdlib.h> #include "binio.h"
    ***** 필요한 header 파일. 추가될 수도 있음.

/**/ Set these values: ***/

#define ROWS      125
#define COLUMNS  112
#define WEST      -126.0
#define EAST      -127.0
#define NORTH     38.0
#define SOUTH     37.0
    ***** Input 자료의 X, Y 축 boundary 설정
    Input 자료에 따라 그 내용이 바뀐다.

#define FILENAME "ascii_bathy.topo"    ***** 생성하고자 하는 Topo 파일의 이름 정의

int write_topo(char *);

float Topo[ROWS][COLUMNS];
char Water[ROWS][COLUMNS];

main() {

    int r, c; ....
    char filename[31];
    FILE *fp;

    sprintf(filename,"ascii.dat");

    for(r=0; r<ROWS; r++) {
        for(c=0; c<COLUMNS; c++) {
            fscanf(fp,"%f %f %f\n", &lon, &lat, &depth);
            ***** Input 파일
            형식에 따라 읽어 준다.

            Topo[r][c] = depth;
        }
    }
    fclose(fp);

    /**/ Optionally set water flags here: ***/
    for (r=0;r<ROWS;r++) {
        for (c=0;c<COLUMNS;c++) {
            if (Topo[r][c] < 0.0) {
                Water[r][c] = 1;
            }
            else {
                Water[r][c] = 0;
            }
        }
    }

    /**/ Now write the file ***/

    if (write_topo( FILENAME )) {
        printf("done\n");
    }
    else {
        printf("error writing topo\n");
    }
    exit(0);
}

```

Table 3-3 Script converting ocean observed data in netCDF to .v5d format.

```

#include <stdio.h> #include <stdlib.h> #include <math.h>
#include "binio.h" #include "v5d.h" #include <netcdf.hh>

***** 필요한 header 파일. 추가될 수도 있음.

static void convert( char *outfile ) {
    float *g;

    /** Vis5d variables **/

    int i;
    NcVar *um = 0;
    const int NX = 121;
    const int NY = 97;
    const int NZ = 19;
    const int NTIME = 120;
    const int NUMBERVARS = 8;
    char cdfVarName[NUMBERVARS][10];
    float varArray[NZ][NY][NX];
    char filename[31];

    ***** 정선데이터의 변수 초기화

    Projection = 1;
    ProjArgs[0] = 31.0;
    ProjArgs[1] = -123.0;
    ProjArgs[2] = 0.0833;
    ProjArgs[3] = 0.0833;

    ***** 정선데이터의 3D 박스의 boundary
    설정하는 부분

    Vertical = 1;
    VertArgs[0]=0.0;
    VertArgs[1]=0.05;

    TimeStamp[0] = 10000; //hhmmss
    DateStamp[0] = 0; // yyddd

    for(ir=0; ir<Nr; ir++) {
        for(ic=0; ic<Nc; ic++) {
            for(il=0; il<Nl[iv]-1; il++) {
                varArray[il][ir][ic] = -1.e+34;
            } } }

    NcError* ncErr = new NcError(NcError::silent_nonfatal);

    sprintf(filename, "/usr1/leesh/ncdata/jsdata_10y3.cdf");

    NcFile nc(filename, NcFile::ReadOnly);
    if (!nc.is_valid())
    {
        cerr << "Unable to open netcdf file\n";
        exit(-1);
    }

    strcpy(cdfVarName[0], "DEP");

    strcpy(VarName[0], "DEP");

    아래부분은 동일

```

③ 결과

정선데이터의 성격상 Fig. 3-6에서 보듯이 공간적인 분포가 어려운 자료이다. 즉 수평이나 연직 등 한 정선 혹은 한 포인트에서의 변화는 2 plot으로 분석이 가능하다. Fig. 3-6(a)와 같이 해수면의 경우 그나마 데이터의 분포가 이루어진다. 그러나 수심 125m의 경우(Fig. 3-6(b)) 데이터는 희박하다.

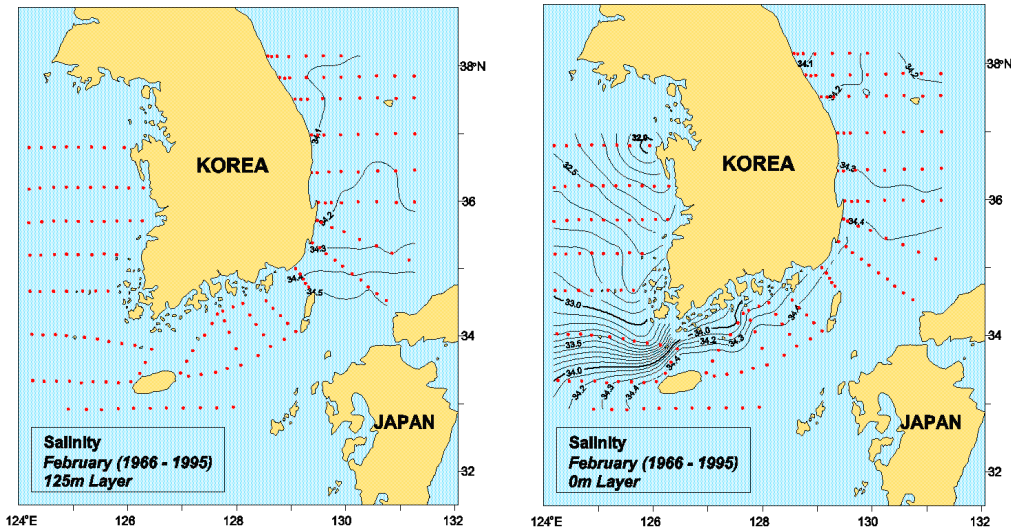


Fig. 3-6 Different outcome due to dense data distribution (a) and sparse data distribution (b)

Fig. 3-7은 우리나라 근해에서의 8월의 수온의 측정된 정선데이터를 Vis5D로 표현한 것과, 경기만에 대한 Topo를 나타낸 것이다. 적은 양의 자료로 우리나라 근해영역 모두를 포함하는 gridded data를 생성할 때, 내·외삽하여 모든 격자에 대한 값들을 생성해낸다. 이렇게 되면 육지부분은 실제 존재하는 데이터가 없으나, 이러한 일련의 과정을 거치면서 무의미한 값들을 생성해낸다. 이런 무의미한 값들을 제거하고 남은 데이터만을 나타내다 보니, 결과가 공간적인 분포가 아니라 점으로써 표현이 된다. 따라서, 정선데이터의 자료 분석보다는 우리나라 근해에 대한 topography를 살펴보는데 중점을 두기로 하겠다.

Fig. 3-7(a)는 우리나라 근해에 대해 topo 파일을 생성한 후 정선데이터의 염분도를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 염분도는 점으로써 표현이 된다. Fig.3-7(b)의 경우에는 경기만에 대한 수심자료를 이용하여 v5d를 생성하여 나타낸 그림이다.

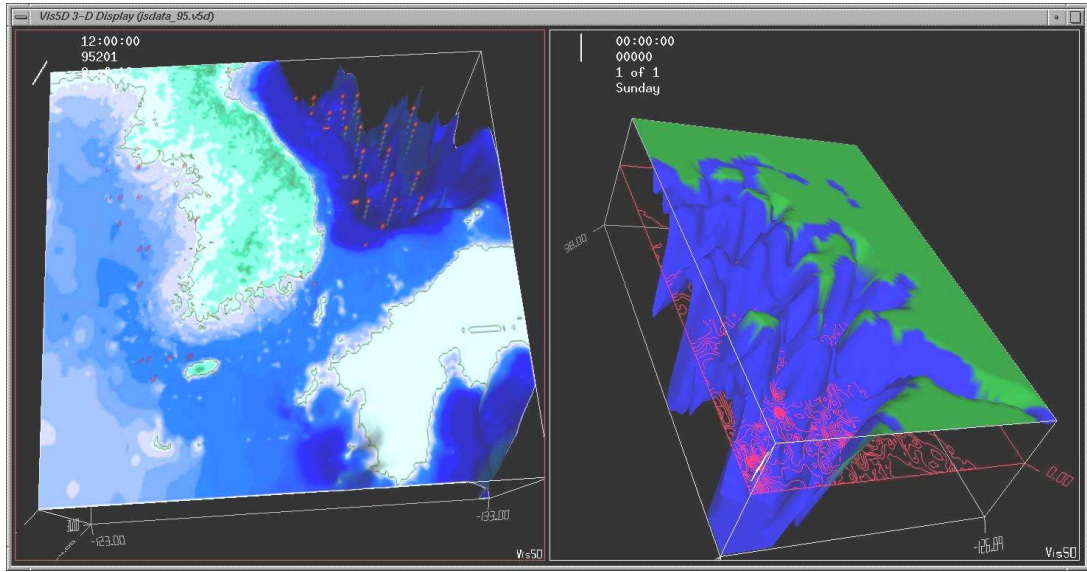


Fig. 3-7 Vis5D display of salinity data observed by NFRDI (a) and Vis5D image of salinity in Kyunggi Bay (b).

(2) POM (Princeton Ocean Model)

① input 자료

파일명	type	특 성
pom.cdf	netCDF	<ul style="list-style-type: none"> ■ 181×199×23×73 (I, J, K, Time) ■ U, V, W, Sal, Temp, HH(depth)
pom_land.topo	vis5d	
pom_land.rgb	RGB	<ul style="list-style-type: none"> ■ Texture mapping

연구에서 사용된 자료는 POM 모델을 이용하여 우리나라 동해영역에 대해 수평 분해능 1/12°, 연직 격자 분해능 23-sigma level로 1년 간 계산한 결과이다. 입력 자료로 유입, 유출량 및 바람, heat flux등의 COADS 제공자료를 사용하였다. 이 입력자료는 차후 우리나라 기상청에서 제공되는 자료를 사용할 예정이다. 모델 수행 결과 도출된 변수는 U, V, W, Temperature, Salinity등이다.

② 변환 프로그램 및 작업과정

POM 모델의 결과자료들을 Vis5D에서 사용하기 위한 데이터의 변환과정과 변환 방법에 대해 알아보기로 하자. 전체적인 데이터의 I/O를 Fig. 3-8에 나타내었다.

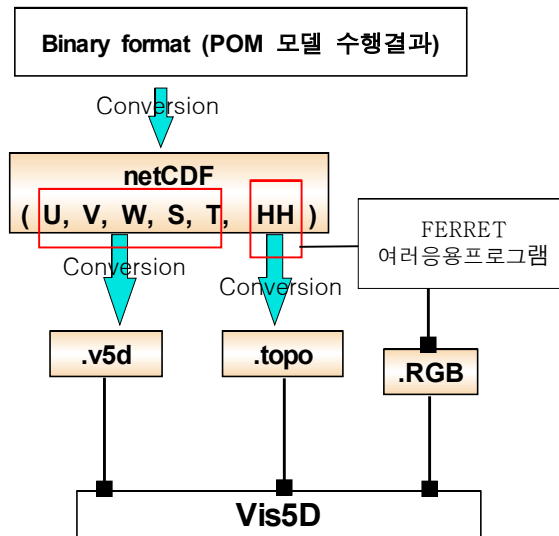


Fig. 3-8 Data conversion of POM model results to v5d format.

Table 3-2의 내용과 동일하나 단지 input으로 쓰인 파일이 netCDF이므로 그 부분만을 수록하였다.

Table 3-4 Script creating .topo file from POM result in netCDF.

```

추가되어야 하는 header 파일 : netCDF 파일이므로 netcdf.hh 가 추가되어야 한다.
..... #include "netcdf.hh"

메인에서 Input 파일을 위한 배열변수 등을 선언해준다.
main() {
    int r, c;
    char filename[31];
    FILE *fp;
    float Height[ROWS][COLUMNS];

    NcVar *um = 0 ;
    NcError* ncErr = new NcError(NcError::silent_nonfatal);

    NcFile nc("netCDF.cdf", NcFile::ReadOnly);
    um = nc.get_var("HH");

    if(!um) {
        cerr << "Unable to obtain variable DEPTH " << "\n";
        exit(-1); }

    if(!um->get(&Height[0][0], ROWS, COLUMNS))
        cout << "ncget failed ";
    for(r=0;r<ROWS;r++) {
        for(c=0;c<COLUMNS;c++) {
            if(Height[ROWS-r-1][c]< -1.e+30) {
                Topo[r][c]=2.0;
            }
            else {
                Topo[r][c] = -1.0 * Height[ROWS-r-1][c];
                printf(" %f\n ", Topo[r][c]);
            } } }
    nc.close();
  
```

Table 3-5 Script creating .v5d file from POM results in netCDF.

```

#include <stdio.h> #include <stdlib.h> #include <math.h> #include "binio.h" #include "v5d.h" #include
<netcdf.hh>
    ***** 필요한 header 파일. 추가될 수도 있음.

static void convert( char *outfile ) {
    float *g;

    /** Vis5d variables **/

    int i;
    NcVar *um = 0;
    const int NX = 181;
    const int NY = 199;
    const int NZ = 23;
    const int NTIME = 37;
    const int NUMBERVARS = 5;
    char cdfVarName[NUMBERVARS][10];
    float varArray[NZ][NY][NX];
    char filename[31];

    ***** POM 모델의 domain을 설정하는 변수 초기화

    Projection = 1;
    ProjArgs[0] = 51.5;
    ProjArgs[1] = -127.0;
    ProjArgs[2] = 0.0833;
    ProjArgs[3] = 0.0833;

    ***** POM model domain을
    3D 박스의 boundary로 설정하는 부분

    Vertical = 1;
    VertArgs[0]=-4.0;
    VertArgs[1]=0.186;

    TimeStamp[0] = 120000; //hhmmss
    DateStamp[0] = 20005; // yyddd

    for(ir=0; ir<Nr; ir++) {
        for(ic=0; ic<Nc; ic++) {
            for(il=0; il<NI[iv]-1; il++) {
                varArray[il][ir][ic] = -1.e+34;
            } } }

    NcError* ncErr = new NcError(NcError::silent_nonfatal);

    sprintf(filename, "/usr1/leesh/ncdata/pom/fet_pom_1y73cy_smt.cdf");

    NcFile nc(filename, NcFile::ReadOnly);
    if (!nc.is_valid())
    {
        cerr << "Unable to open netcdf file\n";
        exit(-1);
    }

    strcpy(cdfVarName[0], "U"); ***** Input 으로 받아들이려는 netCDF 파일의 변수와 변화하고자 하는
    변수들을 선언

    strcpy(VarName[0], "U");

```



```

/* use the v5dCreate call to create the v5d file and write the header */
if (!v5dCreate( outfile, NumTimes, NumVars, Nr, Nc, Nl,
               VarName, TimeStamp, DateStamp, CompressMode,
               Projection, ProjArgs, Vertical, VertArgs )) {
    exit(1);
}

v5dSetUnits(1, "m/s");

for (it=0;it<NumTimes;it++) {
    for (iv=0;iv<NumVars;iv++) {          **** Input netCDF파일을 읽어 들이는 부분

        #define G(ROW, COLUMN, LEVEL)  g[ (ROW) + ((COLUMN) + (LEVEL) * Nc) * Nr ]

        um = nc.get_var(cdfVarName[iv]);

        if (!um) {
            cerr << "Unable to obtain variable " << cdfVarName[iv] << "\n";
            exit(-1);
        }

        for(ir=0; ir<Nr; ir++) {
            for(ic=0; ic<Nc; ic++) {
                for(il=0; il<Nl[iv]; il++) {
                    if(varArray[Nl[iv]][Nr][ic] < -1.e+30) {
                        G(ir,ic,il) = MISSING;
                    }
                    else if(varArray[Nl[iv]][Nr][ic] >= 1.5e+20f) {
                        G(ir,ic,il) = MISSING;
                    }
                    else {
                        G(ir,ic,il) = varArray[Nl[iv]][Nr][ic];
                    }
                } // end level
            } // end column
        } // end row

        if (!v5dWrite( it+1, iv+1, g )) {
            printf("Error while writing grid. Disk full?\n");
            exit(1);
        }
    } // end
} // end

v5dClose();
}

int main( int argc, char *argv[] ){
    convert("./pom.v5d");
}

```

③ 결과

위에서 설명한 자료로 Fig. 3-8과 Table 3-4와 Table 3-5에서 제시된 방법으로 자료를 변환한 뒤, Vis5D를 이용하여 분석하였다. Vis5D를 이용하여 5차원 분석된 VR 이미지를 snapshot으로 캡처한 그림들을 제시하고자 한다.

Fig. 3-9는 POM 모델을 수행한 1년 중 8월의 수온분포와 벡터도를 나타낸 것이고, Fig. 3-10은 수평벡터도와 연직벡터, 수온의 연직 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이, 각기 다른 위치와 관점에서 과학자료를 분석하는 것이 가능하다. 그러나 일반 그래픽으로 과학자료를 그림에서 제시되는 방법과 같은 3차원으로 분석하기는 쉽지 않다. 하지만 Vis5D등 VR 분석을 위한 응용프로그램들은 간단한 방법으로 한 window에서 서로 다른 연직층에서의 변화와 시간에 따른 변화까지도 분석해낼 수 있는 장점이 있다. 그리고 여러 변수들의 분포 역시 분석이 가능하다.

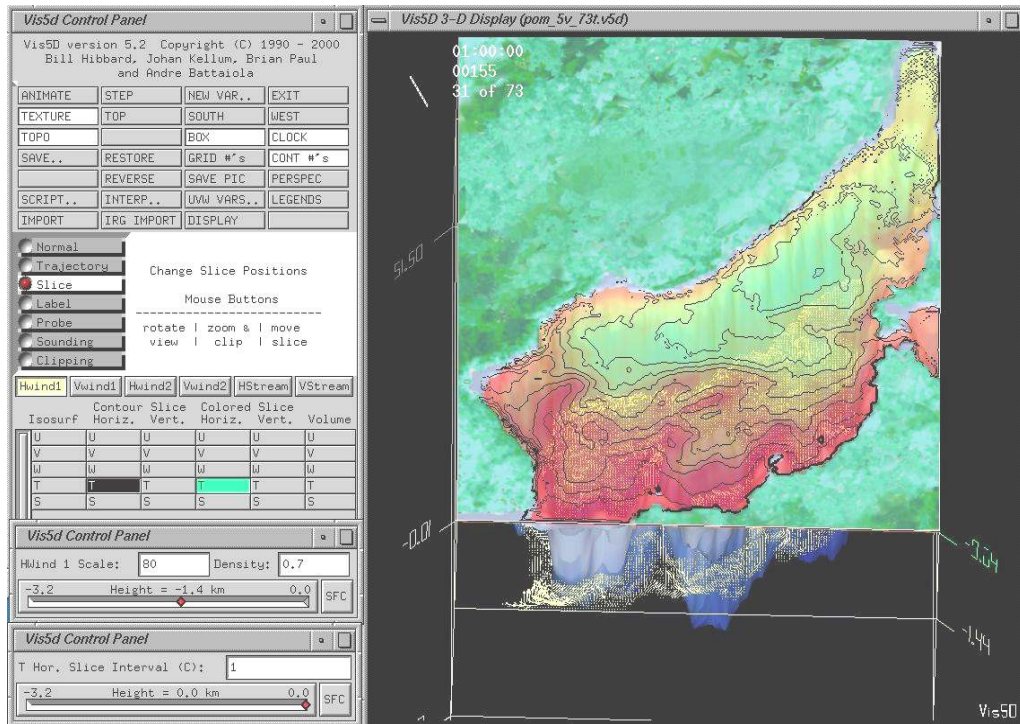


Fig. 3-9 Vis5D image of temperature and currents in August in East Sea.

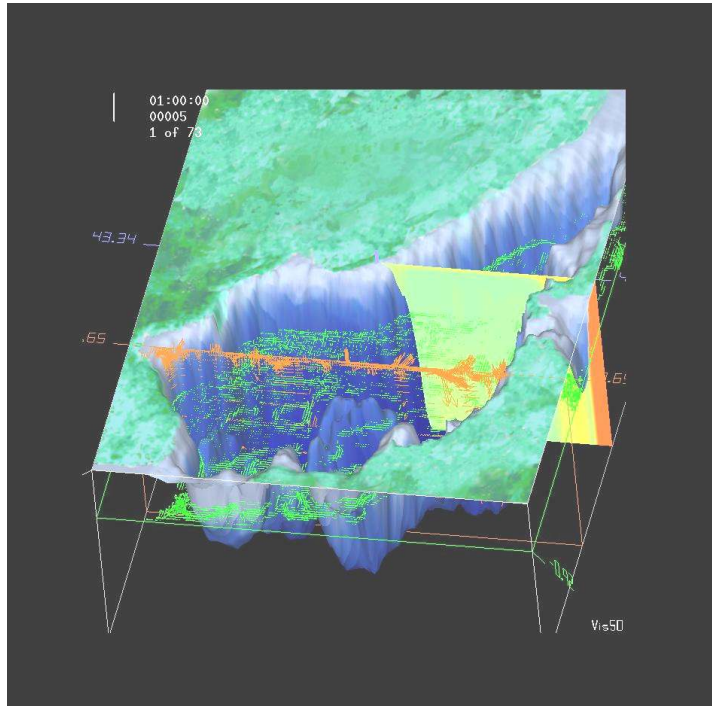


Fig. 3-10 Cross-sectional display of current fields in zonal and meridional directions.

Fig. 3-11은 동해안과 울릉도간의 수평벡터도를 클로즈업해서 나타낸 그림이다.

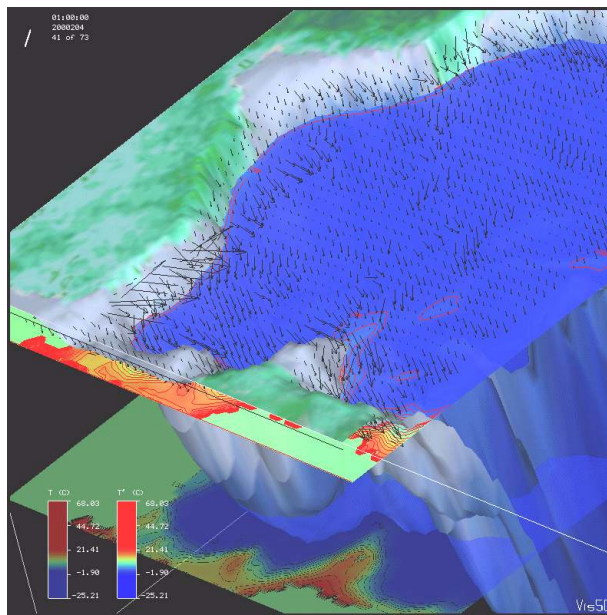


Fig. 3-11 Horizontal current distribution between the east coast and Ulleung Do.

Fig. 3-12와 Fig. 3-13은 동해안과 울릉도간의 수온의 연직분포와 벡터도를 동서방향과 남북방향으로 분석한 그림이다. Fig. 3-11에서 Fig. 3-13에서 제시된 POM 모델의 전체 영역과 관심지역인 동해안과 울릉도간의 해양자료의 수평, 연직 분석을 한 snapshot에서는, Vis5D등 5차원 VR 분석 프로그램들의 장점인 관심지역을 더욱 높은 해상도로써 분석할 수 있음을 잘 보여준다.

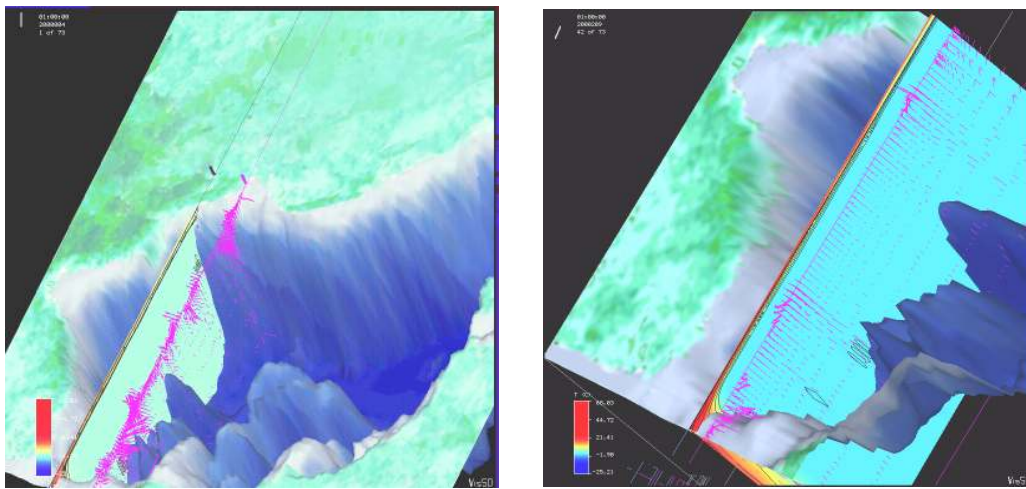


Fig. 3-12 Vertical structure of temperature and currents along meridional cross-section.

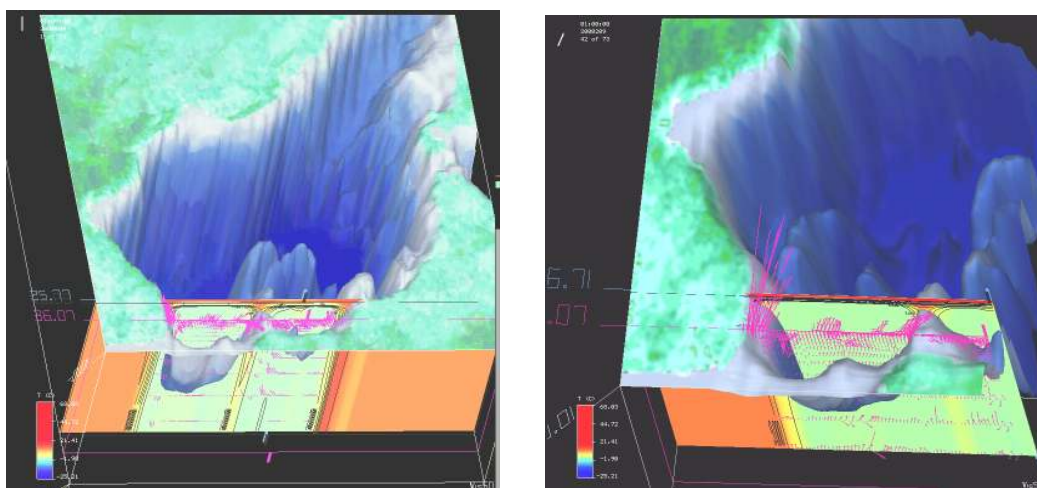


Fig. 3-13 Vertical structure of temperature and currents along zonal cross-section.

(3) DUT-METRI(기상연구소 제공자료)

① input 자료

공동연구기관인 기상연구소에서 수행한 MM5(Mesoscale Modeling v.5)를 이용하여 우리나라 주변의 중규모에 대한 바람장을 예측한 결과이다. MM5 결과는 다른 형식의 전환 없이 Vis5D에서 분석이 가능하다. 그러나 예제로 제시된 input 자료는 netCDF 형식의 자료이며, 61×61의 수평격자, 1개의 수직층에 대해 48시간 수행한 결과이다.

② 결과

연구에서 사용된 자료는 기상연구소에서 서비스 중인 DUT-METRI 자료로, 이를 DOVE 시스템에서 나타냄으로써 기상현상의 분석보다는 DOVE 시스템으로 들어오는 어떠한 종류의 자료라도 변환 등의 작업으로 시스템에서 응용되고, 분석될 수 있다는 것을 보여주고자 한다. MM5는 자료의 변환 없이 그 자체로 Vis5D에서 분석이 가능하지만, 시스템으로 들어온 input의 형태는 netCDF 형식이었다. 이 input 자료를 v5d로 변환하여 Vis5D에서 분석하였다. Fig. 3-14는 MM5수행으로 얻어진 바람장을 5차원으로 분석한 것이다.

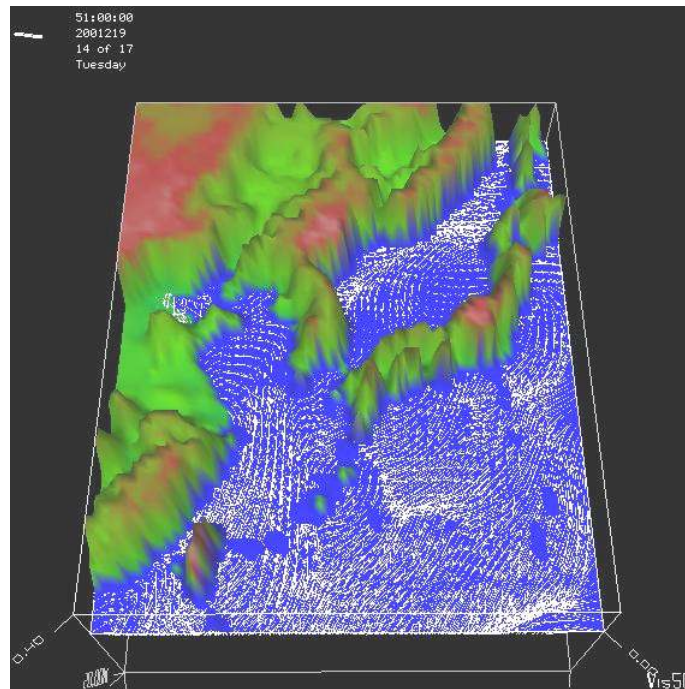


Fig. 3-14 A Vis5D image of wind field predicted by Korea meteorological Agency.

Fig. 3-15는 RNW(Rain water mixing ration : kg/kg)의 수평분포를 분석한 결과이다. 결과물에는 여러 변수들이 있었지만 1개의 층에 대해 수행한 결과물이어서 5차원 분석이 어렵다. 앞으로의 연구에서는 기상현업에서 사용되는 다양한 변수들의 값들을 실시간으로 전송 받아, 이를 분석하는데 주력하고자 한다.

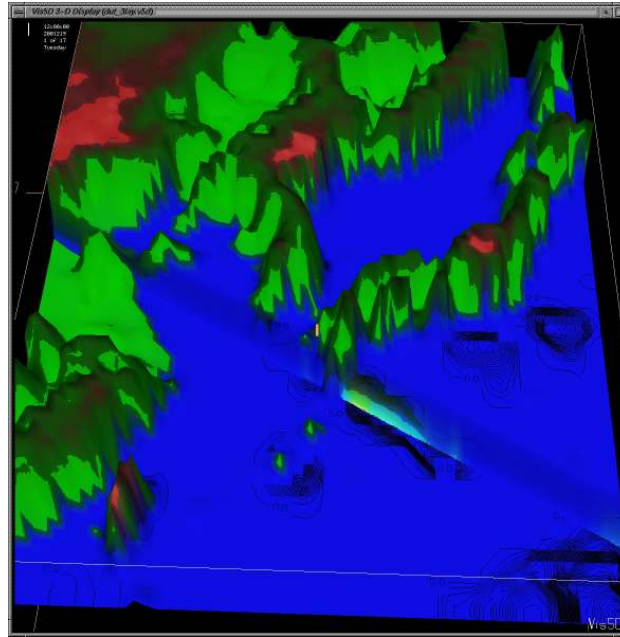


Fig. 3-15 Vis5D image of horizontal distribution and vertical distribution of RNW variable.

2. Cave5D를 이용한 해양구조 가시화

가. Cave5D란 무엇인가?

Cave5D는 vis5d 파일을 볼 수 있는 가상환경을 생성하기 위해 Vis5d5.2버전과 Cave 라이브러리가 조합된 것이다. Vis5D와 Cave5D는 둘 모두 v5d 파일을 가상세계에 표출하지만, 기본적인 차이는 Vis5D는 PC에서 수행하기 위해 만들어진 반면 Cave5D는 가상현실환경을 위해 만들어 졌다는 것이다. Cave5D 내에서 사용자는 모델 시뮬레이션으로 생성된 데이터를 더 좋은 해상도로 나타내는 것이 가능하다. 그리고 Cave5D에서 표현하는 3D 자료는 공간상에서 회전이 가능하며 영상의 크기도 x, y, z 축을 따라 변화시킬 수 있다. 이런 모든 것들은 과학자들이 기상이나 해양의 패턴을 분석하는데 많은 도움을 준다.

나. Configuration file

Configuration 파일에는 사용하는 데이터의 종류, topography, map파일 등에 대한 정보와 나타내고자 하는 objects, 가상환경에 대한 설정 등의 정보를 함유하고 있다. Configuration 파일에서 사용되는 Cave5D의 환경설정을 위한 Keywords를 아래 Table3-6에서 Table 3-9에 나타내었다.

Table 3-6 Filename specifications of Cave5D.

Keyword	Argument	Specifications
DATA_FILE	filename	가시화 하고자 하는 Vis5D data file의 full path name
TOPO_FILE	filename	Vis5D topography 파일의 full path name
MAP_FILE	filename	Vis5D map 파일의 full path name
SAVE_FILE	filename	Vis5D save "TCL" 파일의 full path name
MASTER_PANEL_CONFIG	filename	Master panel의 configuration 파일의 full path name
GOBJ_PANEL_CONFIG	filename	Graphical objs의 configuration 파일의 full path name

Table 3-7 View parameters of Cave5D.

Keyword	Argument	Specifications
INIT_POSITION	Xpos, Ypos, Zpos	Bounding box의 초기 X, Y, Z 위치
INIT_ROTATION	Xrot, Yrot, Zrot	Bounding box의 초기 상태에 대한 각 축
INIT_SCALE	Xscale, Yscale, Zscale	Bounding box의 크기
CHANGE_SCALE_FACTOR	scale factor	
CAVENEAR	Near	Cave coord.에서 사용자의 head에 대한 near clipping plane의 Z position.
CAVEFAR	Far	Cave coord.에서 사용자의 head에 대한 far clipping plane의 Z position.
CLOCK_MODE	Mode	Clock의 VIS5D mode와 DECIMAL mode
CLOCK_POSITION	x1, y1, z1, x2, y2, z2	Clock의 위치 top-left와 lower-right
BOX_DISPLAY	Off or On	Bounding box display
BOX_ASPECT_RATIO	x, y, z	Vis5D bounding box의 크기 비율

Table 3-8 Lighting parameters of Cave5D.

Keyword	Argument	Specifications
LIGHT0_POSITION	x, y, z	CAVE coord.에서 light의 위치
LIGHT0_AMBIENT	R, G, B	light 0에 대한 ambient lighting component의 RGB값
LIGHT0_DIFFUSE	R, G, B	light 0에 대한 diffuse lighting component의 RGB 값
LIGHT0_SPECULAR	R, G, B	light 0에 대한 specular lighting component RGB의 값
LIGHT_AMBIENT	R, G, B	Ambient scene lighting의 RGB 값

Table 3-9 Variable assignments of Cave5D.

Keyword	Argument	Specifications
VELOCITY_ONE_FIELDS	uFld, vFld, wFld	Wind Field의 요소
VELOCITY_TWO_FIELDS	uFld, vFld, wFld	Wind Field의 요소
TRAJECTORY_FIELDS	uFld, vFld, wFld	Trajectory 계산에 이용되는 요소 설정
VAR_CLONE	exit_var, var_name	기존의 변수 복사하여 사용하고자 할때

그밖에 ROTATION_STYLE, TARGET_RATE 등도 설정해줄 수 있다. Graphical object definitions를 위한 keyword를 알아보도록 하자. GOB에는 수평 혹은 연직에 대한 contour line slice, colored slice, wind vector가 있고, isosurface, trajectory가 있다. GOB를 설정하는 각 keyword에 대한 arguments를 아래 Table 3-10에 나타내었다.

Table 3-10 Graphical object definitions.

VIS5D_HSLICE	<u>varName</u>	<u>label</u>	<u>cInt</u>	<u>cMin</u>	<u>cMax</u>	<u>vLvl</u>	<u>red</u>	<u>green</u>	<u>blue</u>	<u>alpha</u>			
	나타내고자 하는 변수 생성될	object이	Contour 간격과 최소· 최대값			나타내고자 하는 Contour의 level	Contour의 색상						
VIS5D_CHSLICE	<u>varName</u>	<u>label</u>		<u>vLvl</u>		<u>ctCurve</u>	<u>ctBias</u>	<u>ctPower</u>	<u>ctAlpha</u>				
	나타내고자 하는 변수 생성될	object이		나타내고자 하는 colored slice의 level		Colored slice 색상 curve							
VIS5D_HWIND	<u>varName</u>	<u>label</u>	<u>density</u>	<u>scale</u>		<u>vLvl</u>	<u>red</u>	<u>green</u>	<u>blue</u>	<u>alpha</u>			
	나타내고자 하는 변수 생성될	object이	Vector의 밀도와 reference vector의 크기			wind vector의 level	Vector의 색상						
VIS5D_VSLICE	<u>varName</u>	<u>label</u>	<u>cInt</u>	<u>cMin</u>	<u>cMax</u>	<u>r0</u>	<u>c0</u>	<u>r1</u>	<u>c1</u>	<u>red</u>	<u>green</u>	<u>blue</u>	<u>alpha</u>
	나타내고자 하는 변수 생성될	object이	Contour 간격과 최소· 최대값			slice placement		Contour의 색상					
VIS5D_CVSLICE	<u>varName</u>	<u>label</u>		<u>r0</u>	<u>c0</u>	<u>r1</u>	<u>c1</u>	<u>ctCurve</u>	<u>ctBias</u>	<u>ctPower</u>	<u>ctAlpha</u>		
	나타내고자 하는 변수 생성될	object이		slice placement		Colored slice 색상 curve							
VIS5D_VWIND	<u>varName</u>	<u>label</u>	<u>density</u>	<u>scale</u>		<u>r0</u>	<u>c0</u>	<u>r1</u>	<u>c1</u>	<u>red</u>	<u>green</u>	<u>blue</u>	<u>alpha</u>
	나타내고자 하는 변수 생성될	object이	Vector의 밀도와 reference vector의 크기			slice placement		Vector의 색상					
VIS5D_ISOSURF	<u>varName</u>	<u>label</u>		<u>altName</u>		<u>varValue</u>	<u>red</u>	<u>green</u>	<u>blue</u>	<u>alpha</u>			
	나타내고자 하는 변수 생성될	object이		variable의 altname		등면으로 나타내고자 하는 변수의 값	등면의 색상						

VIS5D_ISOSURF	<u>varName</u>	<u>label</u>	<u>altName</u>	<u>varValue</u>	<u>c1</u>	<u>ctCurve</u>	<u>ctBias</u>	<u>ctPower</u>	<u>ctAlpha</u>				
	나타내고자 하는 변수 생성될 object이	color를 결정하는 variable 등면으로 나타내고자 하는 변수의 값				varName을 표현하는 색상 등면의 색상 curve			curve				
VIS5D_TRAJ	<u>label</u>	<u>Rmin</u>	<u>Rmax</u>	<u>Rint</u>	<u>Cmin</u>	<u>Cmax</u>	<u>Cint</u>	<u>Lmin</u>	<u>Lmax</u>	<u>Lint</u>	<u>Tmin</u>	<u>Tmax</u>	<u>Tint</u>
	생성될 object이	공간결정하는 인자들. x, y, z 그리고 시간에 대한 것들을 설정											
	<u>Length</u>	<u>Step</u>	<u>Set#</u>	<u>Rflag</u>	<u>red</u>	<u>green</u>	<u>blue</u>	<u>alpha</u>					

다. Cave5D 시작하기

비록 Cave5D가 Vis5D를 기본으로 할지라도 프로그램은 상당히 다르게 수행이 된다. Cave5D는 configuration 파일이 필요하고 이 파일은 텍스트에디터 등을 사용하여 수정할 수 있는 ASCII 문자로 되어 있다. 이 configuration 파일에 v5d 입력 파일의 정확한 위치를 지정하여야 한다. 다른 셋팅은 사용자의 기호에 따라 결정하면 된다. 예로 그래픽 오브젝트들이 사용자에게 따라 더 추가 될 수 있다. 원하는 형태로 그래픽 오브젝트를 형성하기 위해서 Cave5D 개발자들은 Vis5D에서 먼저 데이터를 수행을 한 후, 그때 가장 보기 좋은 셋팅 상태에서 .tcl 파일로 저장을 하여 텍스트 에디터로 분석한 후, 이 값들을 응용하여 Cave5D의 configuration 파일을 생성한다.

일단 Cave5D의 configuration 파일이 생성이 되면 Cave5D 프로그램의 수행이 가능해진다. Cave wanda의 왼쪽 버튼을 누르면 Fig. 3-16과 같은 제어판이 나타난다. 제어판은 크기, 자료의 생성, 움직임을 빠르게 하기도 느리게 하기도 할 수 있으며, 그래픽 오브젝트를 나타나게 하거나 움직이게 할 수 있다.

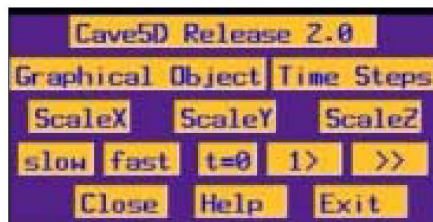


Fig. 3-16 Master panel of Cave5D.

라. Cave5D의 장점

Cave5D는 가상환경에서 기상이나 해양의 시뮬레이션자료를 쉽게 분석하도록 한다. 이러한 환경은 많은 잇점을 제공한다. Cave의 경우 자료의 영상을 크게 하거나 자료분석을 가장 잘 해석할 수 있는 관점으로 회전시킬 수 있다. 원근법으로 변화함으로써, 포함된 프로세스를 더 정교하게 보기 위해 멀리서 자료를 볼 수 있고 혹은 그곳에 멈추어서 볼 수도 있다.

Cave5D는 또한 다루기가 쉽다. Configuration 파일을 수정함으로써 사용자는 시뮬레이션 수행을 위한 많은 옵션들은 추가 할 수 있다. 장점은 사용자가 그들이 프로그램을 시작할 때 보고싶은 오브젝트들을 정의 할 수 있다는 것이고, 단점은 사용자는 프로그램이 수행되는 동안 이 값들을 변화시킬 수가 없다는 것이다. 이런 단점을 극복하고자 Argonne에서 Cave5D를 새버전으로 개발하였다.

새로운 버전의 Cave5D에서의 첫 번째 변화는 Cave5D가 많은 시간단계를 가진 큰 자료를 처리하도록 코드를 재생성한 것이다. 특히, 32bit 버전에서 64bit 버전으로의 변환하였고, 변수를 수정하고 편집 플래그를 변화시켰다. 이는 Cave5D 응용 프로그램을 가지고 몇 기가바이트 범위의 자료 수행을 가능하게 하였다. 또한 시간 단계의 최대 수도 증가시켰다.

또 다른 주요 변형은 Cave5D를 더 능동적으로 만드는 것을 추가시켰다는 것이다. Cave안에서 configuration 값을 변화시킬 수 있도록 하는 추가 메뉴판을 나타나게 하였다. 이전에는 사용자가 프로그램을 중단하고 configuration 파일을 수정하여 Cave5D를 재수행하였으나, 새 버전은 Cave5D를 중단하는 것 없이 추가 메뉴판을 이용하여 그 값들을 수정할 수 있다. Fig. 3-17과 같은 새로운 메뉴판은 메모리에 그려진다. 첫 번째 메뉴는 configuration 파일에 포함된 그래픽 오브젝트들의 리스트가 나타난다. 일단 사용자가 오브젝트를 변화시키기 위해 선택하면 어떤 변수를 변화할지 선택하는 메뉴가 나타난다. 변수가 변화가 되면 마지막 메뉴가 나타나는데 이 메뉴는 선택된 오브젝트와 변수이름과 현재의 값을 보여준다. 사용자가 값을 입력하고 "Enter" 버튼을 누르고 난 후, 전체 오브젝트는 재계산하기 위해 Vis5D로 돌아간다. 각각의 시간 단계는 행의 안쪽에 놓이게 되고 재계산된다.



Fig. 3-17 A sample of Graphical objects panel.

마지막 주요 변형은 Vis5D 버전의 추가에 있다. 이전에는 Vis5d 4.3버전이 사용되었으나 현재 버전은 그래픽 오브젝트의 필요한 계산과 메모리의 효율성을 다루기 위해 5.2버전이 사용된다.

라. 응용 Case

(1) Sitka eddy

알래스카의 Sitka의 Tabata 서쪽에서 관측되는 anticyclonic eddy를 모사하기 위해 NOAA PMEL에서는 SCRUM을 이용하여 북동태평양에 대해 수치모의 하였다. 모델의 수치적 계산과 Sitka eddy의 수송은 좋은 일치를 보였다.

북동태평양의 Sitka region을 51×31 의 수평해상도를 가지고, 21개 수직층에 대해 모델을 수행하였다. Sitka eddy의 모의 결과 파일은 v5d 형식의 파일이며, Sitka eddy를 Cave5D에서 5차원 분석하기 위해 Table 3-11과 같은 config 스크립트를 생성하였다.

Table 3-11 Configuration file of Sitka eddy using Cave5D.

```
# Cave5D config file
# Model output of region near Sitka, Alaska (Al Hermann - FOCI)
#

DATA_FILE /usr1/leesh/v5d/sitka/sitka.v5d
TOPO_FILE data/alaska.topo

INIT_POSITION 0 0 -2.0
INIT_SCALE 20.0 10.0 20.0
BOX_ASPECT_RATIO 1 1 1
TARGET_RATE 1

MASTER_PANEL_CONFIG panel.mini
ROTATION_STYLE AIRPLANE
VIS5D_MEM_SIZE 400
LIGHT0_POSITION 0 500 500
TRANS_SPEED 3

VAR_CLONE TEMPZD tempt

VIS5D_HWIND VEL1 Currents_Horz 1.0 1.0 10.5
VIS5D_VWIND VEL1 Currents_alongshore 1.0 1.0 0.0 15.5 51.0 15.5
VIS5D_VWIND VEL2 Currents_offshore 1.0 1.0 25.5 0.0 25.5 31.0

VIS5D_CHSLICE SALTZD CHsalt 15.5 27.0 1.948 2.0 255.000

VIS5D_ISOSURF DEP0D Bathymetry DEP0D -5.98
VIS5D_ISOSURF TEMPZD 7.9degTemp-Iso TEMPZD
VIS5D_ISOSURF tempt 6.5degTemp-Iso tempt 6.5
VIS5D_ISOSURF SALTZD 32.8pptSalt-Iso SALTZD 32.8
VIS5D_ISOSURF saltt 33.0pptSalt-Temp tempt2 33.0

VIS5D_TRAJ Tracers_1 23 25 0.5 20 20
VIS5D_TRAJ Tracers_2 19 19 1 20 20
```

Table 3-11에서처럼 Table 3-6~Table 3-10에서 설명되었던 명령어들이 사용됨을 알 수 있다. 제시된 config 스크립트를 이용하여 Cave5D에서 분석한 결과를 Fig. 3-18에 나타내었다. 수평적인 해양의 흐름과 eddy가 발생하는 지역의 trajectory등 여러 방법으로 Sitka eddy가 발생하는 지역의 해양환경을 분석할 수 있음을 알 수 있다.

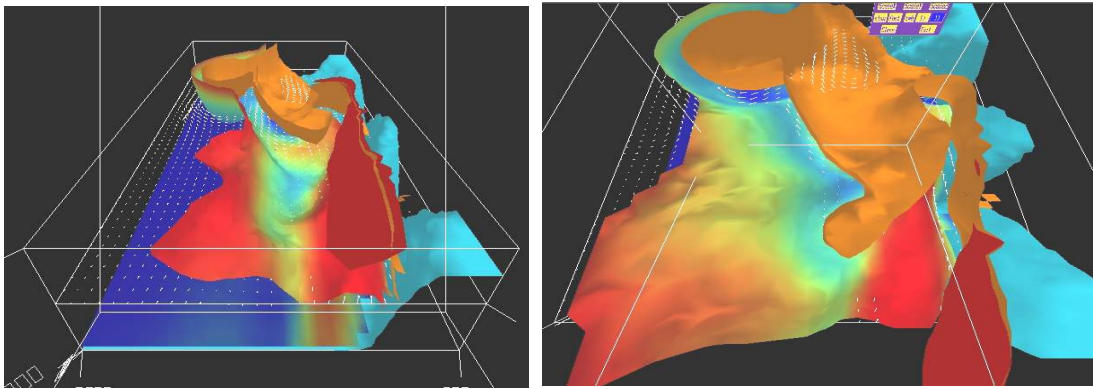
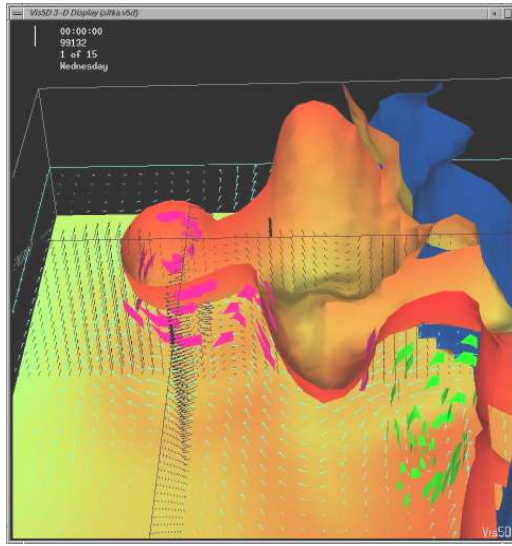


Fig. 3-18 Cave5D snapshot of Sitka eddy simulation.

(2) Perfect Storm

Perfect storm은 1991년 10월 30일에 나타난 동대서양 연안지역을 따라 큰 피해를 준 온대성 저기압이다. 폭풍의 발생과정을 99×124의 수평분해능과, 23개의 수직층으로 미국 남동지역을 대상으로 MM5를 이용하여 48시간 수치모의하였다. 그 결과를 Cave5D에서 5차원으로 분석하기 위하여 Table 3-11과 같은 형식의 configuration 파일을 생성한 후, 그 결과를 분석하는 모습은 Fig. 3-19에 나타내었다.

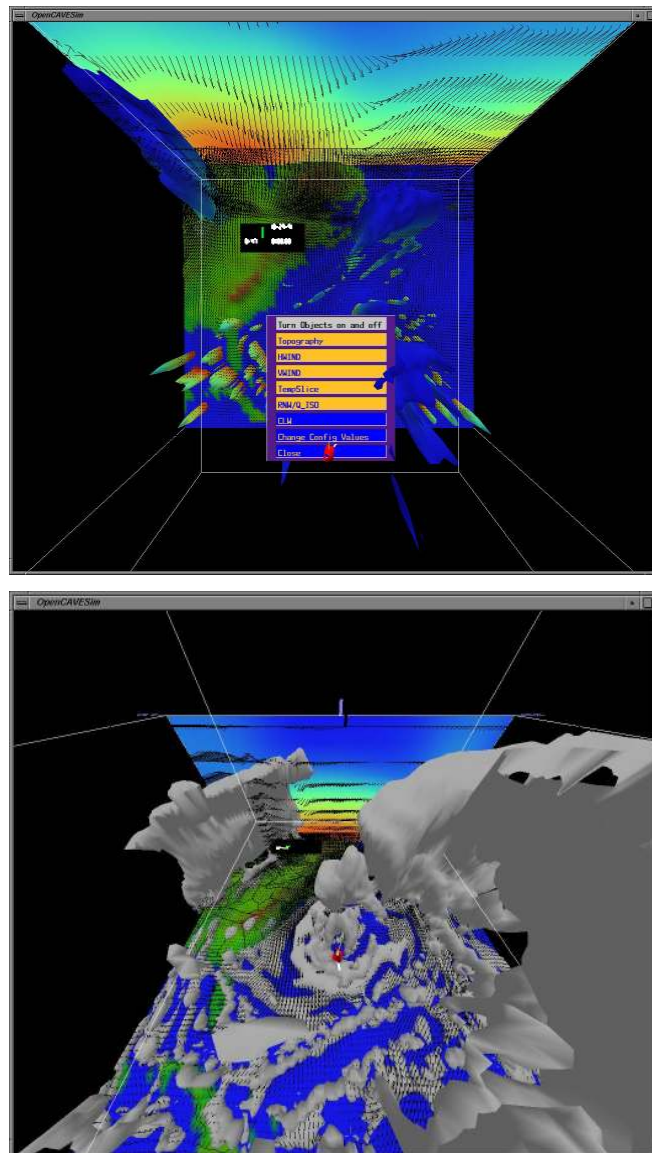


Fig. 3-19 Cave5D image of rain water mixing ratio (up) and cloud water mixing ratio (bottom).

3. vGeo를 이용한 해양구조 가시화

가. vGeo란 무엇인가?

VRCO사에서는 급속히 떠오르는 기술들이 통합된 기능적으로 협력적인 가상환경의 도구개발에 많은 관심을 쏟았다. 이러한 목표의 한 요소가 Virtual Global Explorer and Observatory(vGeo)이다. 데이터의 종합과 가시분석기술은 과학자료의 탐험, 지식발견 그리고 자료표출과 전시를 지원하기 위해 디자인되었다. 이 소프트웨어는 기본적으로 해양학자들이 바다 탐험과 통합, 시간에 독립적이며 3차원, 다변량 자료들 즉 서로 독립적인 것들의 표출을 가능하게 하는 기존 도구의 결여에서 시작하여 개발되었다.

vGeo는 몰입형 가상현실의 능력을 향상시켜서 많은 일반적인 가시화 패키지들보다 뛰어나다. VR의 본질은 3차원 환경에서 자료를 표출하는 능력이다. 특히 사용자가 보고, 네비게이트 하도록 하고, 디지털 자료와 상호작용 할 수 있도록 한다.

디스플레이 장치에 렌더링할 수 있는 geometric representations(기하학적 묘사)으로 초기 자료를 변환함으로써 이러한 과정이 시작된다. vGeo는 다양한 형태 (grids, unstructured point sets, moving sensor)와 다양한 포맷(ASCII, native binary, XDR, netCDF)의 자료를 수용한다.

(1) vGeo System Requirements

- Computer platform : SGI IRIX 6.2.9 이상, Octane2, Onyx, Onyx2
- Memory : 최소 512 megabytes 이상
- Graphics - Octane2 Family, V6, V8, V10 or V12
 - Onyx Family, RE, RE2 IR
 - Onyx2 Family, IR, IR2, IR3
- Raster memory : 최소 128 megabytes 이상
- Display - SGI monitor, keyboard
 - 1-, 2-, 3-, 4-, 5- or 6-flat-walled display systems
 - Single or multi-screen curved display systems
 - 대부분 head-mounted devices

(2) vGeo에서 "virtual world" 란 무엇인가?

우리의 물리적인 세상은 서있기 위한 장소, 보기 위한 것들과 시간 등의 관계가 암시적으로 정의된다. 그러나 가상세계에서는 이런 것들의 특징들을 명백히 정의해야한다. vGeo에서는 이런 명시적인 정의가 오브젝트정의라 불리우는 명명된 어떤 것을 통해서 다루어진다. 이런 특별한 오브젝트는 가상 세계 안의 다양한 아 이템들에 대한 정보를 저장하고 있다.

- spatial domains, or means of positional reference
- the passage of time
- light sources
- data sources

(3) 오브젝트 정의 방법

vGeo 가상세계의 특성을 정의하고 분류하는 definition objects는 두 가지 방법에 의해 생성되고 수정된다.

- vGeo configuration files
- vGeo User Interface menu options

나. The process of building vGeo worlds

- 자료 수집
- vGeo에 맞는 형식으로의 변환

일단 수집된 자료가 vGeo-compatible format이 되면, definition process가 시작된다. 이 과정은 ASCII text file 즉 configuration file의 형성에서 시작한다. 최소한으로 vGeo config file이 함유하고 있어야 하는 것은 space, time, lighting 이다. 자료의 성질(time-dependent, gridded등)에 기초해서 vGeo data definition의 다양한 형태가 정의될 수 있다.

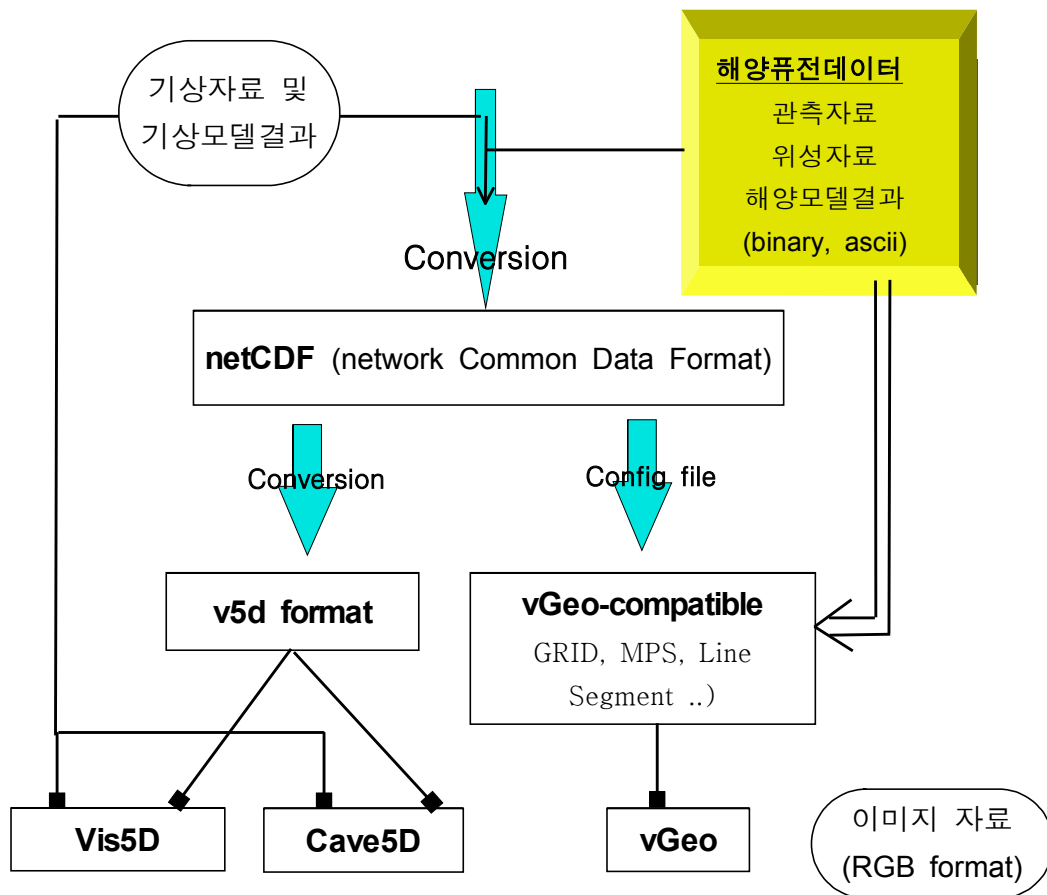


Fig. 3-20 Data conversion flow to various application tools.

다. Data Sources

vGeo가 지원하는 data sources에는 4가지 형태의 파일들이 있다.

- Grid : Row, column, level로 대표되는 공간 좌표를 가지는 시간에 대해 의존적인 자료를 사용한다. 실제적인 데이터는 netCDF 파일이나 vGeo-formatted file이다.
- Moving Point Set : 시간에 따라 변하는 좌표 데이터로 추가적인 자료를 가질 수 있다. vGeo-formatted file이다.
- Line Segment : 위치 좌표만을 갖는 자료로 사용된다. 즉 시간에 따른 변화가 없고 어떠한 추가적인 자료도 가지지 않는다.

- TimeSpaceMap : 실제 데이터와 연관이 없는 추상적인 자료이다. "Empty" 데이터의 목적은 선택된 graphical objects의 display를 위한 임시적이고 공간적인 전후관계를 제공하기 위한 것이다. TimeSpaceMap은 data-less gobs 즉 text, image 같은 gobs의 연결고리로써 제공된다.

(1) Grids

과학자료의 대부분은 시간과 공간 즉 4차원으로 이루어져 있다. Grid의 공간적인 크기는 column과 row, level의 수에 의해 결정된다. grid의 geometry는 regular(직각좌표계, strait grid lines) 또는 irregular(curved or unstructured)이다.

Regular geometry에서는 row, column, level이 좌표계에 평행하게 놓인다(Fig. 3-21). 반대로 irregular geometry는 grid의 x, y, z point가 3차원 행렬에 의해 각각 묘사되어진다(Fig. 3-22). 그러나 이런 형태의 자료도 I, j, k reference system을 사용하는 grid로 명명한다. 즉 각 column에 대한 row의 수는 같고, row에 대한 column의 수도 역시 같다. 일반적인 예로 수직적으로 시그마 좌표계를 사용하는 대기순환에 대한 것 또는 해안선을 따르는 해양모델이 irregular geometry의 좋은 예라 할 수 있다.

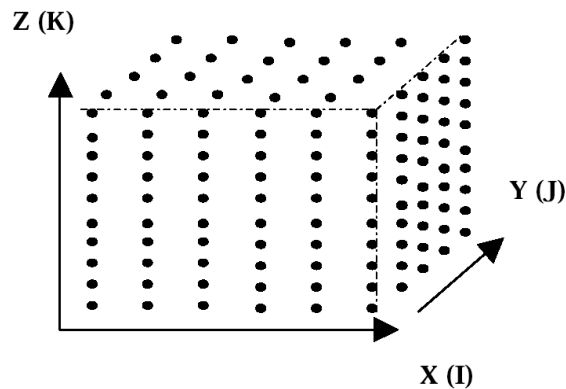


Fig. 3-21 Schematic view of regular geometry grid

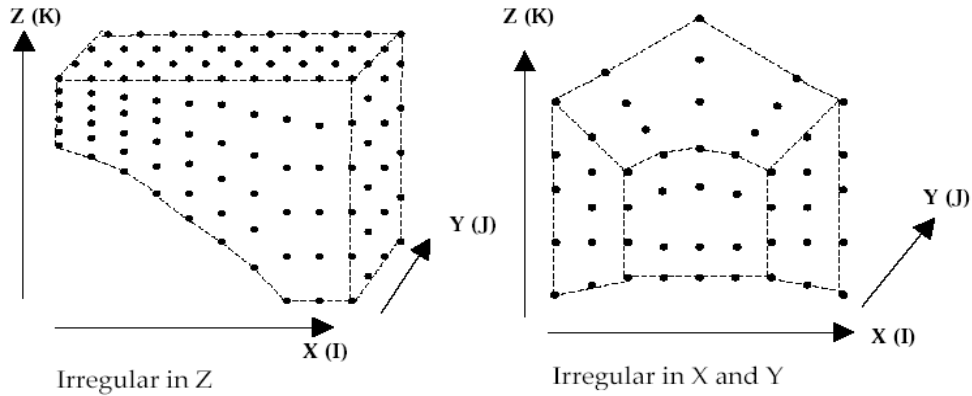


Fig. 3-22 Schematic view of irregular geometry grid

vGeo에 의해 묘사될 수 있는 grid data sources에는 vGeo Grid file과 netCDF file이 있다. 먼저 netCDF 파일의 경우 그 파일 자체만으로는 vGeo에서 불러들여 질 수 없고, netCDF 파일의 domain과 변수들을 정의해 놓은 configuration 파일로써 vGeo에서 사용될 수 있다. 이들 서로 다른 형태의 grid 파일은 gridTypeConvert 라는 유틸리티를 통해 서로 전환이 가능하다.

먼저 netCDF 파일의 configuration 파일부터 살펴보자(Table 3-12). netCDF configuration file에는 netCDF파일을 vGeo Grid objects로 설정하기 위해 사용되는 명령어들이 있다.

- DIM
- AXIS
- TIME
- DATA_VAR
- CALENDAR
- META_DATA

Table 3-12 A script of vGeo configuration for netCDF data.

```

Example of a netCDF configuration file: 3D, time-dependent data; sigma coordinates

DIM I Longitude J Latitude K Sigma # 3D data

AXIS X VAR Longitude data/bathymetry.nc # get X-axis data from .nc file
AXIS Y VAR Latitude data/bathymetry.nc # get Y-axis data from .nc file

# calculate Z-grid from sigma conversion and call it 'Depth'
AXIS Z SIGMA Depth Bathymetry data/bathymetry.nc Sigma data/S.01.2000.nc

DATA_VAR Salinity data/S.01.2000.nc # extract 'Salinity' from .nc file
DATA_VAR Temp data/T.01.2000.nc # extract 'Temp' from .nc file
DATA_VAR U-cmp data/U.01.2000.nc # extract 'U-cmp' from .nc file
DATA_VAR V-cmp data/V.01.2000.nc # extract 'V-cmp' from .nc file
DATA_VAR W-cmp data/W.01.2000.nc # extract 'W-cmp' from .nc file

TIME VAR Time data/S.01.2000.nc # get Time-axis data from .nc file

META_DATA Longitude UNIT lon # change units of this variable to 'lon'
META_DATA Latitude UNIT lat # change units of this variable to 'lat'

CALENDAR 2000 1 1 0 0 # Time-axis start = midnight, Jan 1 2000

```

㉑ DIM : vGeo grid objects의 공간차원을 설정하는 부분으로, configuration 파일의 첫부분에 설정해줘야 한다.

㉒ AXIS : AXIS config 부분은 축을 정의해주는 것으로 축으로 정의될 수 있는 것으로는 다음과 같다.

- VAR : netCDF 파일에 함유된 변수
- STATIC : 특정한 값
- SIGMA : netCDF 파일에 포함된 변수들로부터 sigma transformation으로 계산

각각의 netCDF 파일마다 DIM에서 설정한 개수의 축이 있어야만 하고, 그 축의 형태는 VAR, STATIC, SIGMA 이다.

㉓ TIME : Time 축 설정하는 부분이며, 타입에는 VAR, LIST가 있다. VAR은 파일에 함유된 변수를 Time 축으로 정하는 것이며, LIST는 사용자에게 의해 time step을 정하는 것이다.

㉔ DATA_VAR : 데이터 변수를 정의하기 위해 사용하는 명령어로 변수의 차원은

netCDF 파일에서의 차원과 동일해야만 한다. 데이터들은 한 개의 netCDF 파일에 있는 변수들로만 이루어 질 수도 있고, 여러개의 netCDF 파일에 함유되어 있는 변수를 사용할 수도 있다.

④ CALENDAR

⑤ META_DATA : 공간변수, 시간, 일반적인 변수의 이름, 단위, missing value의 처리 등을 지정할 때 사용되는 명령어이다. 기본값으로 netCDF에 있는 attribute 값을 가진다.

vGeo Grid 파일에는 ASCII, native binary, XDR binary이 있다. Binary 파일은 특성상 그 구조를 알 수 없으므로 ASCII파일의 구조를 Table 3-13에 제시하였고, 제시된 예제는 2차원의 정규 그리드 격자에 대한 vGeo Grid 파일의 구조를 나타낸 것이다.

Table 3–13 vGeo GRIDFILE structure.

Example of a vGeo Grid file: 2D grid of regular geometry

15	(file version tag)
0 0	(unused dummy variables)
1	(geomType, 1 = regular geometry)
2	(number of attribute variables)
5	(nI)
4	(nJ)
2	(nK)
2	(number of time intervals)
16	(nameLen)
SPD@T@X@Y@Z@TIME	(nameString)
21	(unitsLen)
m/s@K@LON@LAT@KM@days	(unitsString)
40	(titleLen)
SPEED@TEMPERATURE@LONG@LAT@ALTITUDE@TIME	(titleString)
1.1e+30 1.1e+30 1.1e+30 1.1e+30 1.1e+30 1.1e+30	(missing-value designators)
0 0 0 0 0	(dummy array)
0 0 0 0 0	(dummy array)
-134.3 -132.6 -131.1 -129.5 -127.9	(gridX)
17.5 18.5 20.0 21.2	(gridY)
0.0 1.1	(gridZ)
0.0 0.08 0.17	(gridT)
1982 4 3 0 0 0	(calTime0)

(spatial block of SPEED data for first time interval: 0 to 0.08 days)

1.0 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.9 1.9 1.9 1.9 2.2 2.2 2.2 2.8 2.5 2.5 2.5 2.8 2.8 2.5 2.5
2.5 2.5 3.1 2.8 2.8 2.8 2.8 2.2 1.9 2.2 2.2 2.4

(spatial block of TEMPERATURE data for first time interval)

294.5 294.5 294.5 294.9 294.9 294.5 294.0 294.0 294.5 294.0 294.0 294.0 294.0 293.6 293.6 293.6 293.6
293.6 293.2 293.2 290.6 290.6 291.0 291.0 291.4 290.2 290.2 290.2 290.6 290.6 289.7 1.1e+30 289.7
289.7 290.2 288.9 288.9 288.9 288.9 289.3

(spatial block of SPEED data for second time interval: 0.08 to 0.17 days)

1.0 1.0 0.7 0.7 0.7 1.0 0.4 1.0 1.2 1.2 1.2 0.7 1.2 1.5 1.5 1.2 0.7 1.8 2.4 2.4 3.0 3.0 3.0 3.0 2.7 3.0 3.3 3.0
3.0 2.7 3.0 3.0 2.7 2.7 2.4 2.7 2.7 2.1 1.8 1.5

(spatial block of TEMPERATURE data for second time interval)

294.0 294.4 294.4 294.8 294.8 294.0 294.4 294.8 294.4 294.4 293.6 294.4 294.4 294.4 294.4 293.1 294.0
294.0 294.0 294.0 290.4 290.4 290.8 290.8 291.5 290.0 290.0 290.0 290.6 290.4 289.6 1.1e+30 289.2
289.2 289.6 288.8 288.3 288.3 288.3 288.3

(2) Moving Point Set

시간에 따른 위치 자료로 사용된다. 이 형식의 자료는 위성의 궤적, Lagrangian 추적자, 비행기나 선박의 항로 등을 정의할 때 주로 사용된다. 또한 파일이 나타내는 위치에서 측정된 변수들의 값들도 추가할 수 있다.

Table 3-14 vGeo MPS file structure.

Example of a vGeo MPS file:

15	(file version tag)
1	(MPS type)
0	(dummy variable)
4	(number of variables)
7	(number of timesteps)
0	(dummy variable)
16	(nameLen)
X@Y@Z@COTOT@Time	(nameString)
27	(unitsLen)
LON@LAT@KILOMETERS@ppm@days	(unitsString)
19	(titleLen)
X@Y@Z@Total_CO@Time	(titleString)
3.40282e+38 3.40282e+38 3.40282e+38 1.1e+30 3.40282e+38	(missVal)
0 0 0 0	(dummy array)
0 0 0 0	(dummy array)
4 4.02083 4.0625 4.125 4.20833 4.33333 4.3375 4.34167	(timeData)
2001 3 20 0 0 0	(calTime0)
5	(xyzNamesLen)
X@Y@Z	(xyzNames)
140 36 1.2 0.112	(begin data array)
140 33 1.2 0.109	
150 32 1.2 0.051	
150 24 1.2 0.046	
130 25 1.2 0.037	
140 36 1.2 0.120	
142 35 1.2 0.135	

(3) Line Segment

Line segment data sources는 공간좌표만을 갖는 data sources로서, 시간이나 그 외의 attribute를 가지지 않는다. 예로는 정적인 해안선 혹은 경계선 등을 나타내기 위한 위치좌표를 함유한 자료이다.

Table 3-15 vGeo line segment file structure.

Example of a vGeo Line Segment Data File:

15	(file version tag)
0	(dummy variable, dummy1)
0	(dummy variable, dummy2)
0	(dummy variable, dummy3)
5	(nameLen)
X@Y@Z	(variable names)
14	(unitsLen)
USER@USER@USER	(variable units)
5	(titleLen)
LONGITUDE@LATITUDE@DEPTH	(variable titles)
-9999 -9999 -99999	(missing-value designators)
0. 0. 0.	(unused float array)
0. 0. 0.	(unused float array)
3	(number of segments in this file)
5	(number of points in this (first) segment)
0. 0. 0. 0. 50. 0. 100. 50. 0. 100. 0. 0. 0. 0. 0.	(pointData)
5	(number of points in this (second) segment)
0. 0. 12. 0. 50. 12. 100. 50. 12. 100. 0. 12. 0. 0. 12.	(pointData)
5	(number of points in this (third) segment)
0. 25. 6. 50. 50. 6. 100. 25. 6. 50. 0. 6. 0. 25. 6.	(pointData)

(4) Colt Table

Color table을 정의해 놓은 파일로 두 가지 형태가 있는데, 각각 Spectrum형식과 lookup형식이다.

Spectrum color-table방법은 변수의 범위에 상응해서 선형적으로 색을 시리즈로 정하는 방법이다. Lookup color-table은 변수의 영역을 구분하여 그 영역에 해당하는 색을 지정하는 방법이다. Spectrum방법에서는 Red, Green, Blue와 Alpha 이 4가지로만 구성이 되지만 lookup방법에서는 위의 4가지 외에 지정된 색이 사용될 실제 자료의 최소, 최대값까지 지정을 해준다. Surfer 프로그램을 이용하여 원하는

색을 조정하여 lookup파일을 직접 생성하였다.

Table 3-16은 lookup color-table 파일의 일부분을 나타낸 것이다.

Table 3-16 A lookup color table.

6					
Red			I		
Green			I		
Blue			I		
Alpha			I		
DMin			R		
Dmax			R		
0	51	153	150	-999.0	-28.0
23	66	168	150	-28.0	-25.0
46	81	183	150	-25.0	-22.0
69	97	199	150	-22.0	-19.0
92	112	214	150	-19.0	-16.0
115	128	230	150	-16.0	-13.0
138	143	245	150	-13.0	-10.0

라. The User Interface

vGeo의 강한 장점중의 하나는 가상세계에서 정의된 data sources와 graphical objects를 가지고 실시간으로 상호작용하는 것을 가능하게 한다는 것이다. vGeo의 UI(User Interface)는 graphical object 생성, system parameter 설정, memory usage 관리, display 제어 등의 작업들을 가능하도록 설계되었다.

vGeo를 실행해보자. 어떠한 메뉴 혹은 panel도 나타나지 않을 것이다. 단지 나타나는 것이라고는 wand pointer와 wand로부터 발산되는 선이 전부 일 것이다. Fig. 3-23과 같은 main menu의 UI를 가지고 모든 interaction이 시작된다. 각각의 main menu에는 sub menu 들이 있다.

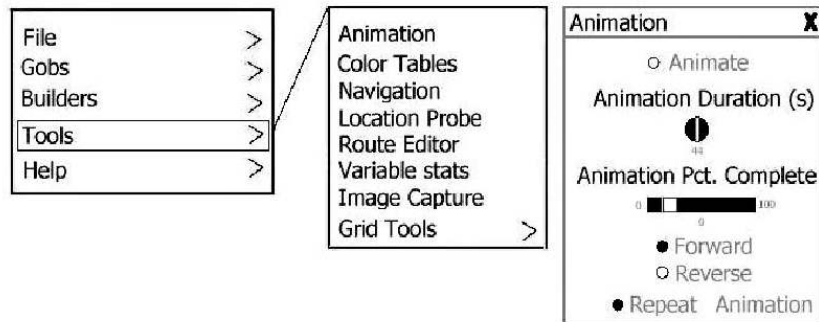


Fig. 3-23 GUI menu bars of vGeo panel.

Cave5D에서는 GOB를 생성하려 하거나, 색상을 바꾸려 할 때에도 수행하던 프로그램을 종료한 뒤, 에디터에서 config 파일을 수정한 후, 다시 프로그램을 수행해야만 하였다. 그러나 vGeo에서는 다양한 UI를 이용하여 기존의 config 파일에서 새로운 GOB, monocolor, data 등을 추가하는 등 사용자가 능동적으로 프로그램을 수행할 수 있다.

마. Graphical Objects

vGeo는 데이터를 가시화 하기 위해 여러 가지 다른 형태의 GOB를 사용자가 생성할 수 있다. 대부분의 GOB는 vGeo에서 불러진 기본적인 데이터 셋으로부터 만들어질 수 있다. vGeo 대부분의 GOB는 데이터의 범위, 색상과 색상테이블, 위치, 크기 정보 등의 특성을 결정하기 위해 object 개념의 보완을 요구한다.

GOB는 크기 두 가지가 있다. 하나는 데이터로부터 직접 vGeo에 의해 구성되는 것과 이미 다른 프로그램에서 생성되어진 것으로 vGeo에서 쉽게 불러질 수 있는 것 (예로 3D StudioMax)이 있는데, 이와 같은 경우에는 vGeo는 크기, 위치나 원점 등의 관계를 가지고 이미 정해진 geometry가 vGeo안에서 변형될 것이다.

이미 기술한 대로 모든 vGdo GOB는 geometry의 묘사를 위해서 시간과 공간정보를 가진 데이터와 연관이 있다. GOB는 4가지 형태의 vGeo supported data로부터 생성되어질 수 있다.

GOB에는 Vis5D나 Cave5D에서와 같이 이러한 것들을 구축할 수 있다.

- Color slice
- Contour slice

- Glyphs
- Isosurface
- Moving model
- Polylines
- Simple images
- Static Model
- Surface
- Text annotations
- Topography
- Topography contour
- Topography lines
- Vectors

기존의 다른 VR 응용프로그램에서는 볼 수 없었던 GOB로 Simple image와 Static Model이 있다. Simple image GOB는 이미지를 단순한 평행사변형 이미지와 연결되어 가상세계에 나타낼 수 있도록 하는 명령어이다(Fig. 3-24). 이 GOB는 늘려지거나 비스듬하게 될 수 있으며, SIMPLE_IMAGE 명령어로 구축된다. 이미지 파일은 SGI RGB 파일 포맷만이 가능하다.

Static Model GOB는 Fig. 3-25에서 보듯이 정적인 3D 모델객체를 마치 Simple Image나 Text annotation처럼 가상세계에 표출하는 명령어이다. Configuration 파일에서 STATIC_MODEL이란 명령어로 구축된다. 현재 vGeo에서 지원하는 model 객체의 형태는 Inventor 파일, SGI Performer binary 파일과 3D Studio Max 파일이 있다. Static Model 객체가 시간에 대해 독립적일 수도 있고, 시간에 따라 다른 행동을 취할 수 있다. 시간에 따라 변화할 경우 TimeSpaceMap 데이터객체와 연동되어야 한다.

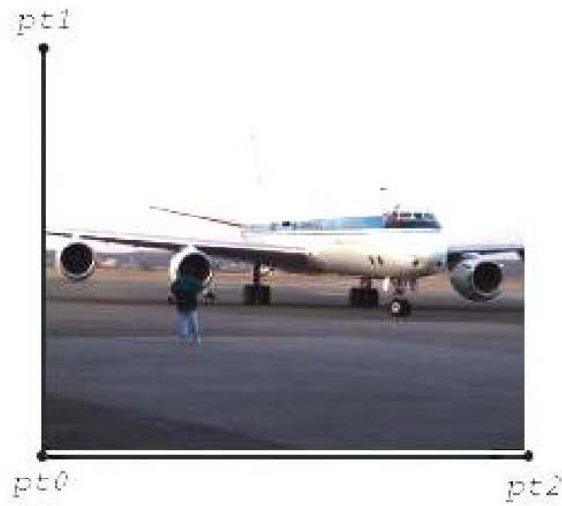


Fig. 3-24 Illustration of parallelogram points used in specification of placement of Simple Images.

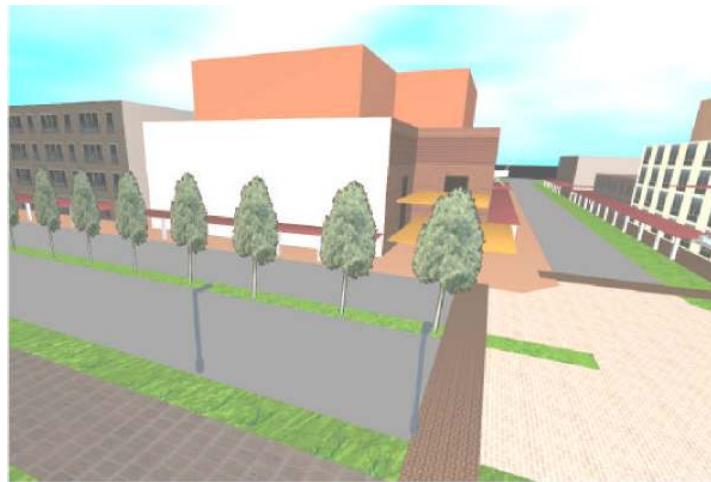


Fig. 3-25 A sample of static model embedded in a VR image.

바. 응용 Cases

(1) POM

① Input data

파일명	type	특 성
pom_uv.w.cdf pom_st.cdf pom_depth.cdf	netCDF	<ul style="list-style-type: none"> ■ POM(The Princeton Ocean Model)을 이용하여 365일 수행한 결과 ■ salt, temperature, U-vector, V-vector, W-vector
pom_UVW.nccfg pom_T&S.nccfg	config	<ul style="list-style-type: none"> ■ vGeo의 netCDF configuration
pomTempSalt.bin pomUVW.bin	vGeo	<ul style="list-style-type: none"> ■ nccfg에서 gridTypeConvert 유틸리티 이용하여 Native grid 파일 생성 ■ Domain X : 127, 142 LON (181) Y : 35 51.5 LAT (199) Z : -3762.94 0 meters(23)
eastPomSaltTemp.bin eastPomUVW.bin		<ul style="list-style-type: none"> ■ GRID 파일을 우리나라 동해 영역에 대해서 Subrange한 결과 X : 127, 136.167 LON (111) Y : 35 44.167 LAT (111) Z : -3711.94 0 meters (23)
ship.mps	ASCII	<ul style="list-style-type: none"> ■ MPS 파일, 배의 트랙 정보함유
ship.iv	inventor	<ul style="list-style-type: none"> ■ ship의 inventor 파일
korea_land.rgb	RGB	<ul style="list-style-type: none"> ■ Texture mapping

② 변환 프로그램 및 작업과정

a. Grid netCDF data

vGeo는 netCDF 자료를 configuration script를 통해서 자료의 변환 없이 표출이 가능하다. netCDF 자료를 변수별로 각각 생성하여 구동하였다. U, V, W 변수의 경우 원래의 x, y 격자에서 0.5 정도 시프트 되어 있었다. 즉 다른 해양의 변수들과는 그 축이 다르다. 서로 다른 축에 대해 나타내는 것이 불가능하여 U, V, W의 축을 다른 변수 T, S와 같은 축으로 변환하여 configuration script를 생성하였다.

Table 3-17의 예제는 U, V, W변수를 가지고 있는 netCDF자료에 대한 script파일이다.

Table 3-17 Variable setting for grid netCDF data.

```

DIM I X J Y K Z
AXIS X VAR X /usr1/leesh/ncdata/pom/pom_uvzw.cdf
AXIS Y VAR Y /usr1/leesh/ncdata/pom/pom_uvzw.cdf
AXIS Z SIGMA Z HH /usr1/leesh/ncdata/pom/pom_depth.cdf Z /usr1/leesh/ncdata/pom/pom_uvzw.cdf
DATA_VAR U /usr1/leesh/ncdata/pom/pom_uvzw.cdf
DATA_VAR V /usr1/leesh/ncdata/pom/pom_uvzw.cdf
DATA_VAR W /usr1/leesh/ncdata/pom/pom_uvzw.cdf
TIME VAR N /usr1/leesh/ncdata/pom/pom_uvzw.cdf
META_DATA X UNIT LON
META_DATA Y UNIT LAT
META_DATA Z UNIT meters
META_DATA U MISSVAL -99.9
META_DATA V MISSVAL -99.9
META_DATA W MISSVAL -99.9

```

b. Grid Binary data

Script파일로써 netCDF가 구동이 되지만 이 script파일을 이용하여 다른 형태의 grid 파일로 변환이 가능하다. Binary Grid 형태로 변된 자료는 여러 Grid tool을 이용하여 자료를 생성하거나 변형할 수 있다. Grid tool을 자유로이 사용하기 위해 netCDF형태를 grid binary file format으로 gridTypeConvert라는 tool을 이용하여 변형하였다.

현재 POM모델 전체 영역에 대한 자료는 그 크기가 방대하다. 컴퓨터의 메모리나 CPU의 성능을 향상하기 위해서 관심영역인 우리나라 동해에 대해 자료를 축소하거나, POM전체 영역에 대해 보여줘야 할 경우에는 decimate하여 그 크기를 줄여서 표출할 수 있다. 이는 꼭 tool을 사용하지 않아도 되며 config 파일에서 GRID_SUBRANGE나 GRID_DECIMATE의 키워드를 이용하여 나타낼 수도 있다.

이러한 과정에서 쓰인 tool들은 각각 gridTypeConvert, GridSubrange, GridDecimate이다. 그 외 기존의 grid파일에서 새로운 변수를 추가하거나 다른

grid파일에 있는 변수를 추가하거나 삭제할 수 있다.

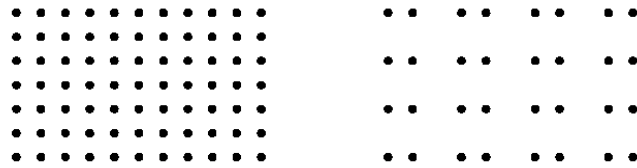


Fig. 3-26 A schematic GridDecimate

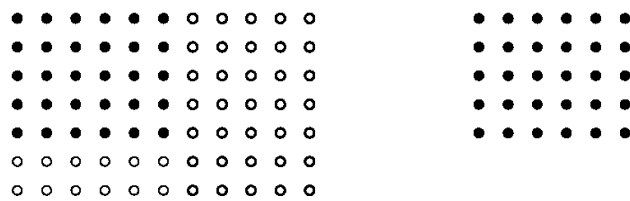


Fig. 3-27 A schematic GridSubRange

c. Configuration 파일

```
BACKGROUND_COLOR 0 0 0 0

# Define a PANEL scale
PANEL_SCALE 1.5 1.0 1.0 # Size definition of User Interface panels except main
menu
PANEL main_menu -5 5 8
PANEL CASCADE_OFFSET 0.2 -0.2 -0.2
PANEL gob_panel -3 5 10
PANEL animation_panel -5 5 10
PANEL navigation_panel -5 5 10

# Color Tables
COLT_FILE tempColt /usr1/leesh/vgeo/Colt/temp_test.colt
COLT_FILE topoColt /usr1/leesh/vgeo/Colt/pom_topo.colt
CONFIG_FILE /usr1/leesh/vgeo/Colt/sueColors.config
CONFIG_FILE config/pomFull.config

# Panel Properties
PANEL_SCALE 1.5 1 1
PANEL animation_panel -3 5 10
PANEL gob_panel -3 5 10
PANEL main_menu -5 5 8
#
```



```

# General object definitions

# Coordinate Definitions
COORD_DEF PomCoord 127 142 DEGS_EAST 35 51.5 DEGS_NORTH -4000 0 M
GENERIC ASPECT_RATIO
0.661933 1 0.3 TRANSFORM transPomCoord OUTLINE_ON

# Light Sources
SOURCE_LIGHT myLight 0.8 0.8 0.8 0.3 0.3 0.3 0.2 0.2 0.2

# Plane Definitions
PLANE_ORTHO x@131 X_AXIS 131 DATA_UNIT
PLANE_ORTHO y@40 Y_AXIS 40 DATA_UNIT
PLANE_ORTHO z@1 Z_AXIS 1 IJK_UNIT

# Time Definitions
TIME_DEF Pom_Time 0 1 DATA_RANGE 370 735 D
TIME_DEF topoTime 0 1 DATA_RANGE 0 1 D

# Transformations
CREATE_TRANSFORM transPomCoord
TRANSFORM transPomCoord SCALE 5 3 5
TRANSFORM transPomCoord POSITION 0 6 3

# Variable Definitions
VAR_DEF S S 20 40 0 0
VAR_DEF topoRange HH -4000 0 1 1

# Data source definitions
# Grid Data
DATA_DEF PomTempSal PomCoord Pom_Time GRIDFILE BINARY
data/pomSalTempDec.bin
DATA_DEF topoData PomCoord topoTime GRIDFILE BINARY
/usr1/leesh/vgeo/topo/pom_depth.bin
GRID_DECIMATE topoDataDec topoData 50 50 100 100

# Graphical object definitions
#
# Color Slices
COLOR_SLICE color_T_h_z2 PomTempSal T tempColt PLANE z@0.6km

# Contour Slices
CONTOUR_SLICE con_T_z2 PomTempSal T Black 1 PLANE z@1 NUM_LEVELS 30

# Iso Surfaces
ISOSURFACE Iso-S-30 PomTempSal S 30 MONOCOLOR Orange

# Surfaces
SURFACE Bathy topoDataDec topoRange -4000 0 PLANE Z_DEFAULT_Bathy

```

```

COLORBYVAR topoRange topoColt

# Texture Surfaces
SURFACE topoTexture topoDataDec topoRange -4000 0 TEXTURE
/usr1/leesh/texture/pom/vgeo_pom_topo.rgb DECAL Blue

# Vectors
VECTORS vec@1km PomUVW 0.5 SIMPLE_ARROW MONOCOLOR Blue PLANE
z@1km 3SCALE 0.01 0.01 0.01 LINEWIDTH 2 U_COMP U V_COMP V W_COMP W

GOBS_ON color_T_y37.5 con_T_y37.5 topoTexture vec@1km vec@37

```

③ 결과

3차원 해양수치모델 POM을 이용하여 동해의 바닷속을 5일 간격으로 재현하였다. 수평격자는 1/12도, 수직으로는 23개의 층으로 나누었으며, 그 중 일부 수온과 유속벡터 도면을 제시한다. 육지부분은 고도에 따라 텍스처 맵핑이 되어 있다.

다음에 제시되는 그림들은 POM 모델 결과를 Vis5D에서 나타낸 것과 같이 vGeo에서 5차원 분석한 결과이다. Fig. 3-28은 vGeo를 이용하여 POM 모델 영역의 topography를 나타낸 것으로, topography 위에 RGB 파일이 텍스처맵핑 되어 있다. vGeo를 이용하여 가상 현실 세계 안에서 동해의 topography를 네비게이션 할 수 있고, 다른 각도에서 이미지를 캡처할 수도 있다.

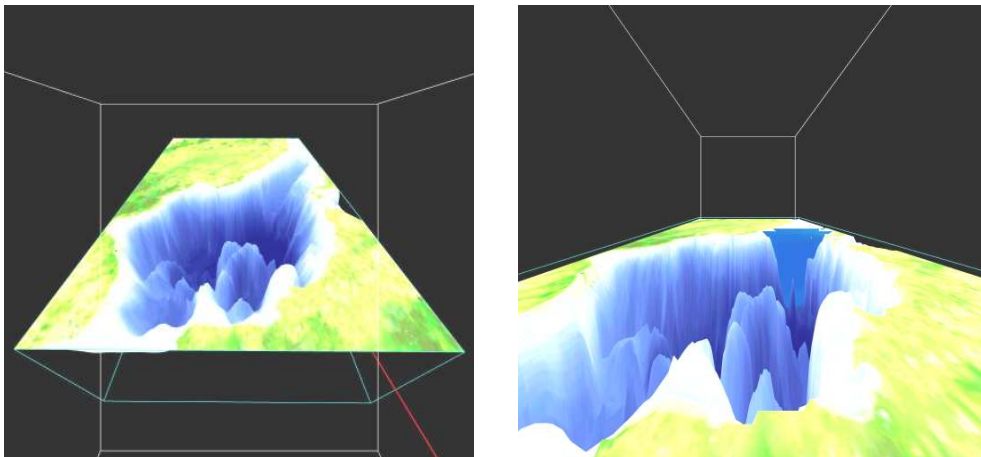


Fig. 3-28 VR image of the bathymetry of the East Sea in the vGeo world.

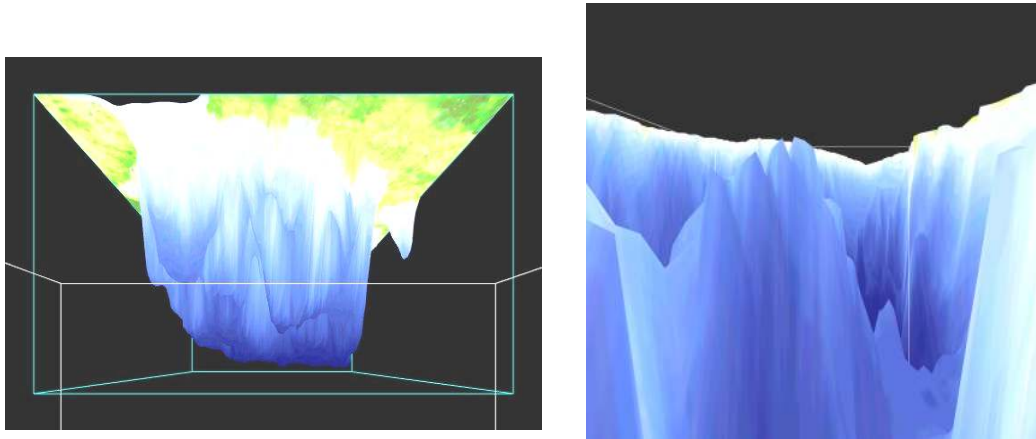


Fig. 3-28 Continued.

일반그래픽이나 Vis5D, Cave5D등에서는 네비게이션을 할 수 없거나, 그 기능이 제한적이었으나 Fig. 28부터 31에서 알 수 있듯이 vGeo에서는 조이스틱과 wand로써 사용자가 자유롭게 네비게이션 할 수 있는 장점이 있다. 자유로운 네비게이션이 가능해짐으로써 관심영역에 대해 정밀한 분석을 할 수 있다(Fig. 3-31).

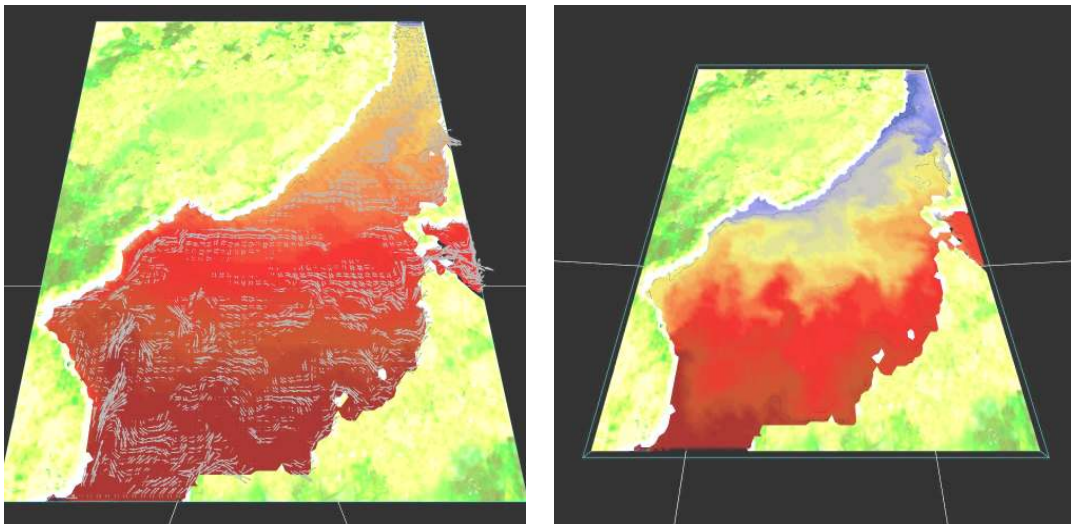


Fig. 3-29 vGeo image of surface temperature and current distribution in the East Sea.

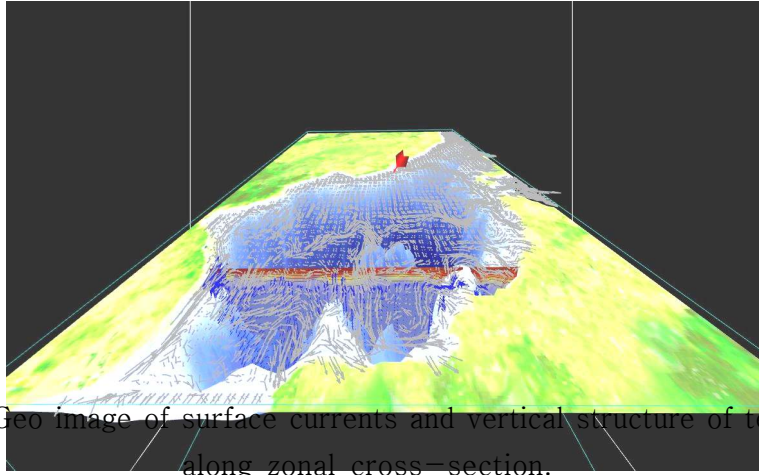


Fig. 3-30 vGeo image of surface currents and vertical structure of temperature along zonal cross-section.

Fig. 3-31이 vGeo의 장점을 잘 나타내주는 그림으로 동해안에서 울릉도 사이의 수중의 흐름과 수온의 분포를 정밀하게 분석하는 그림이다. 실제 육안으로 볼 수 없는 수중의 상황을 vGeo등의 5차원 VR 분석 tool로써 실제와 같이 재현함으로써 분석이 가능해진다. 그림은 각각 동서 방향과 남북방향으로의 수중구조를 나타내고 있다.

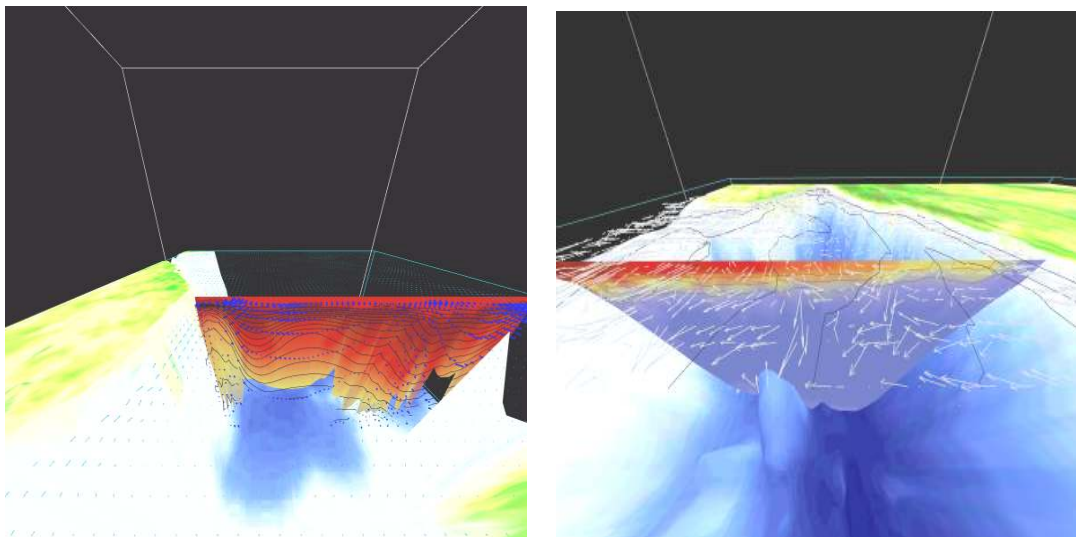


Fig. 3-31 Closer view of temperature and current fields around Ulleung Do its vGeo image.

Fig. 3-32는 동해에 가상의 배를 띄워 동해안을 순항하는 프로그램을 작성한 결과이다. 배의 이미지는 Inventor 파일이며 배의 항로는 Surfer 프로그램을 이용하여 임의로 디지털이저 하였다. 해수면에서 항해하는 것으로 프로그램하였으나, 깊이는 사용자에게 의해 수정이 가능하다. 항로의 파일은 Table 3-14와 같은 vGeo 포맷인 MPS 파일 포맷이다.

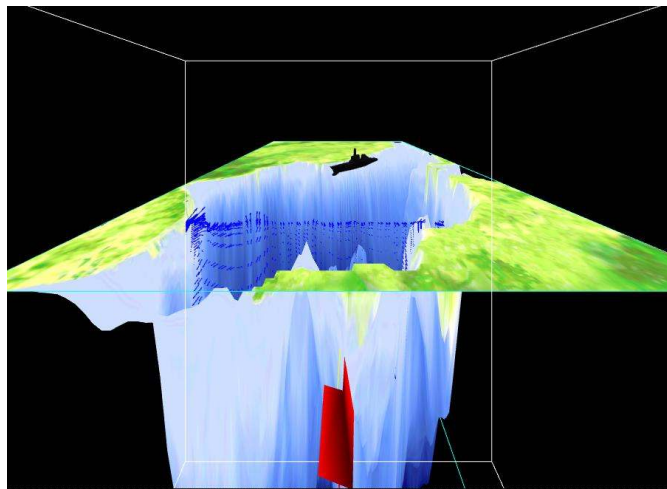


Fig. 3-32 vGeo image of a Moving Model graphical object.

(2) ROMS

본 연구에서 수행된 3차원 해양모델인 ROMS를 수립하여, 시험운영한 과정과 결과가 제 8절에 기술되어 있다. 여기에서는 ROMS 모델을 운영하여 얻은 결과를 VR 이미지로의 변환을 수행하여, 5차원 이미지의 snapshot을 제시하고자 한다.

① Input data

파일명	type	특 성
roms_plume.cdf	netCDF	■ 연안의 담수유출 영향에 대한 수치모의(ROMS)
plume.nccfg	ASCII	■ vGeo configuration 파일
roms_upwelling.cdf	netCDF	■ ROMS를 이용한 용승현상 수치모의
upwelling.nccfg	ASCII	■ vGeo configuration 파일

이상에서 제시된 input 자료를 이용하여 configuration 파일을 작성한 후, vGeo에서 분석한다.

② 결과

본 연구에서는 두 가지 경우에 대해서 ROMS 모델을 시험 운영하였다. 첫째가 연안에서 담수로의 유입에 관한 실험과 동해안 울릉도간처럼 해저지형이 웅덩이를 이루는 곳에서의 용승현상을 실험하였다. Fig. 3-33은 연안에서의 유입에 관한 실험의 결과를 3차원으로 분석한 그림이다. 시간에 따라 담수가 외해로 뺏어나가는 것을 볼 수 있다. Fig. 3-34는 용승현상에 대한 결과를 3차원으로 분석한 그림이다.

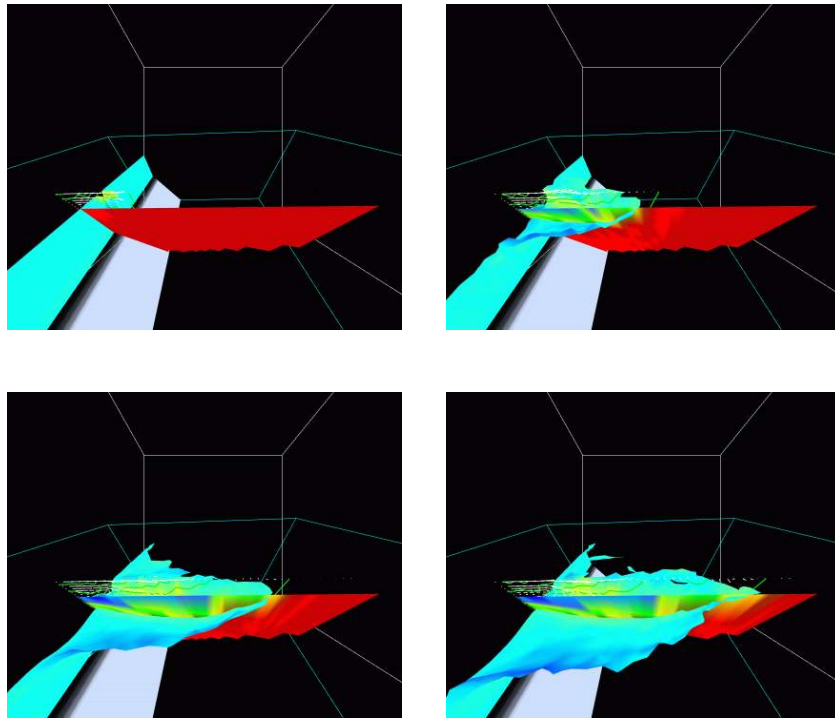


Fig. 3-33 vGeo images showing temporal progress of iso-salinity due to fresh water plume discharged into coastal water.

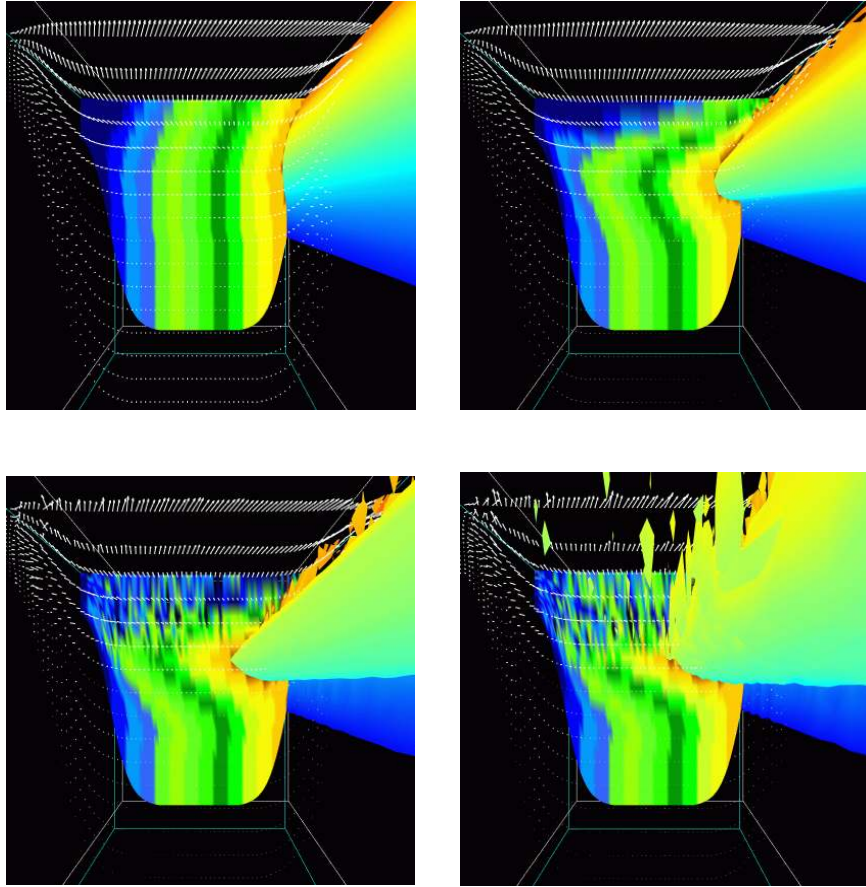


Fig. 3-34 A progressive view of vGeo image showing development of upwelling processes, as described in Section 8.

(3) 우리나라 근해의 해저지형

NORI와 기상청에서 제공된 수심과 등고자료를 Fig. 3-5에서와 같은 방법으로 생성된 Ascii 형식의 지형자료를 netCDF로 변환하여 vGeo에서 운용하였다. Fig. 3-35는 vGeo를 이용하여 우리나라 전체영역을 VR 가시화한 그림이며, Fig 3-36과 3-37은 각각 경기만과 남해지역을 정밀 분석하는 그림이다.

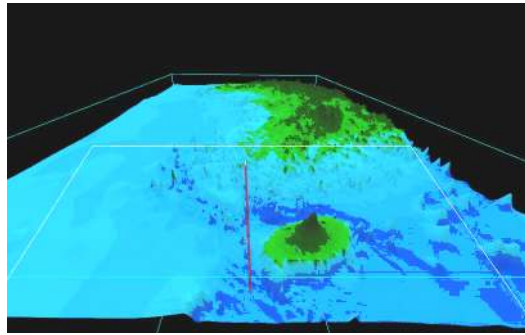
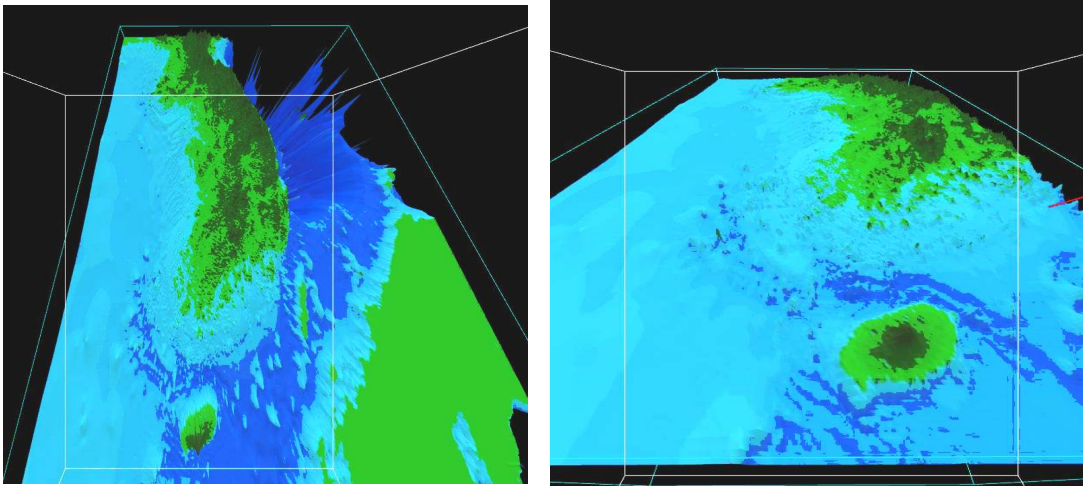


Fig. 3-35 VR image display of bathymetry around Korea Peninsula, created by using vGeo tools.

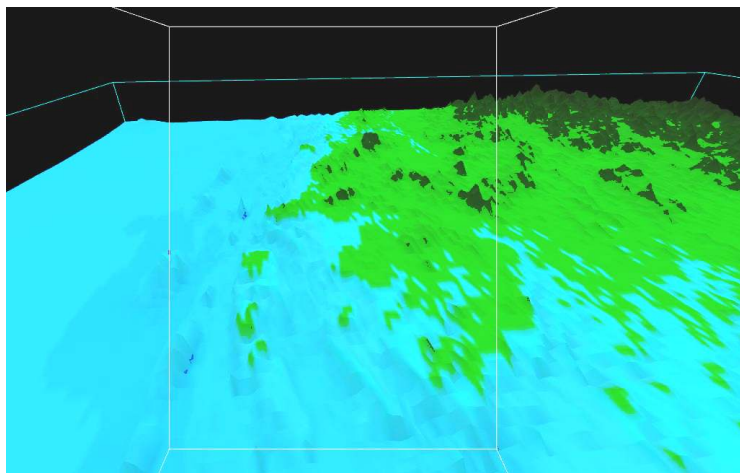


Fig. 3-36 Closer view of Kyunggi Bay.

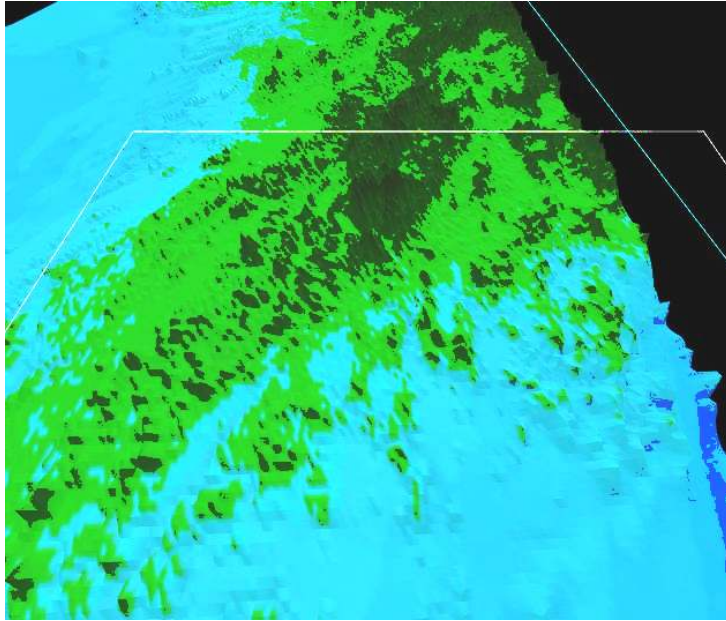
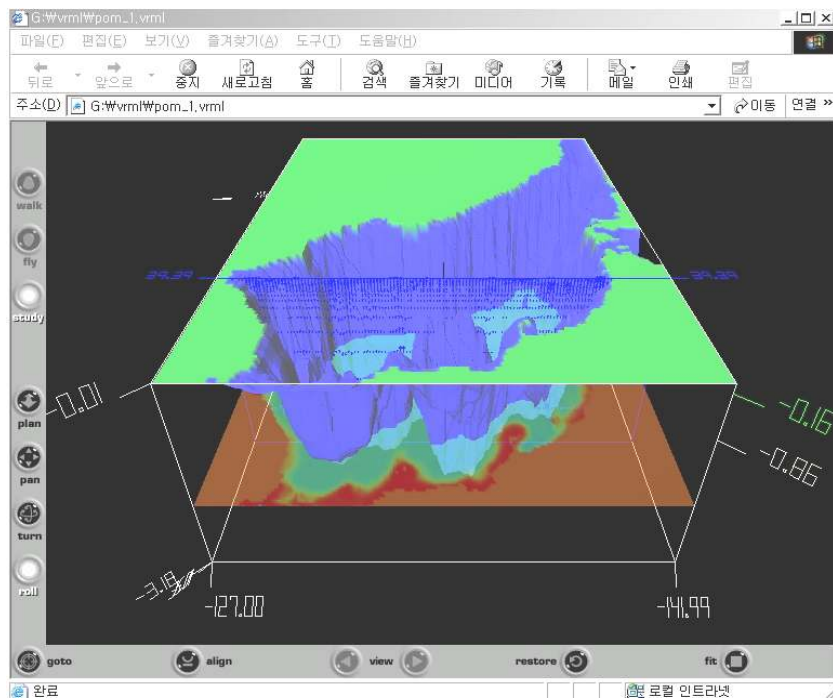


Fig. 3-37 Closer view of Namhae.

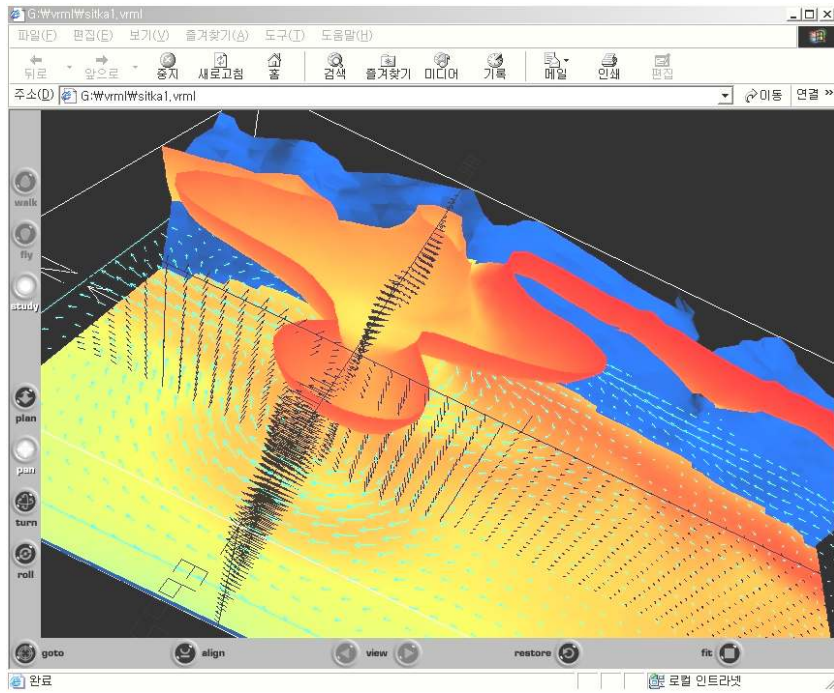
4. 해양구조 이미지의 VRML 변환

과학자료를 효과적으로 가시화하고 분석한 결과를 인터넷 3차원 모델링 언어인 VRML로 변환하여 바닷속 환경을 웹에 나타냄으로써 분산 가상환경, 원격지의 사용자와 협동연구를 가능하게 할 수 있다. 이러한 취지의 일환으로 이전 절들에서 제시된 응용 케이스들에 대한 결과를 VRML로 변환하여, 웹에 서비스하는 모습의 일부를 Fig. 3-38에 나타내었다.

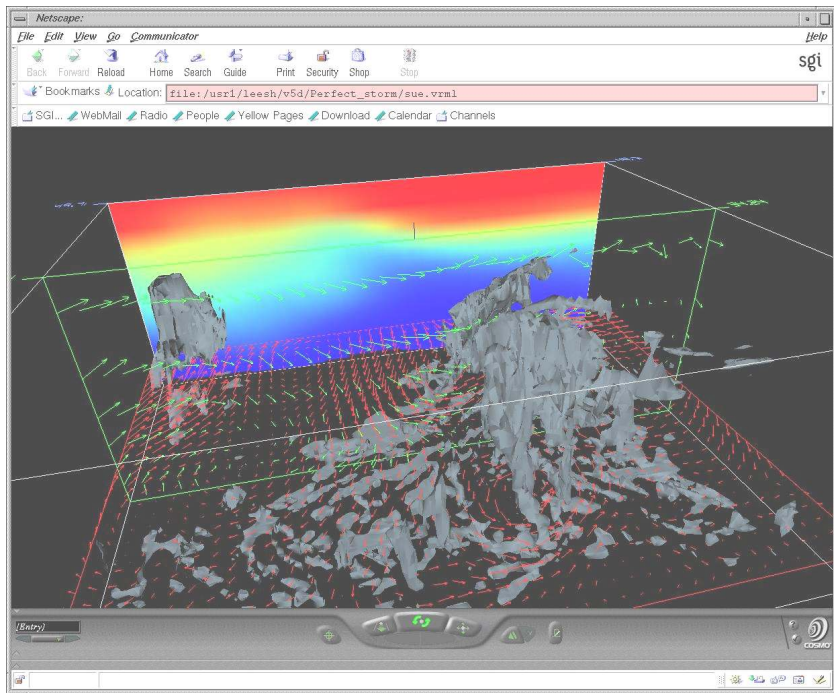


(a) POM

Fig. 3-38 Sample VRML images converted from VR images using the process of Fig. 3-2.

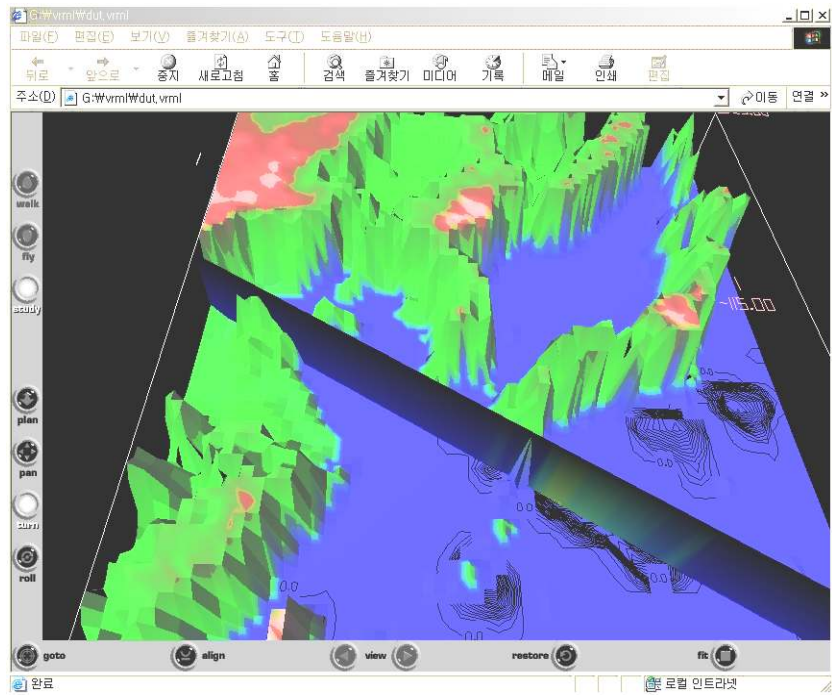


(b) Sitka



(c) Perfect Storm

Fig. 3-38 Continued



(d) DUT-METRI

Fig. 3-38 Continued.

제 4 절 DOVE VR 시스템의 특성

1. DOVE 시스템 시설

가. 컴퓨터 시설

DOVE 센터에는 크게 두 그룹이 전산시설이 있다. 디지털 해양자료의 생산과 수치 모델링 연산을 위한 연산용 워크스테이션과 방대한 자료를 디지털영상으로 변환하는 비주얼 워크스테이션으로 구분될 수 있다. 그 외 시험용 연산 워크스테이션, 웹서버와 전산주변 장치들이 있다.

▶ SGI 비주얼 워크스테이션 - 테라바이트급의 디지털 해양자료를 이미지 모델링하고 입체화하여 실시간으로 애니메이션 할 수 있는 SGI의 Onyx2가 첨단 영상표출 엔진으로 사용되고 있다. Onyx2의 재원에 대해 간략히 Table 4-1에 나타내었다.

Table 4-1 Specification of SGI Onyx2 (IR).

시스템	내용
4 CPU's	300MHz MIPS R12000 Processors
Main Memory	3GB
cache Memory	8MB
Disk Drive	72GB
Tape Drive	SCSI DAT
CDROM	
Graphics Board	Infinite Reality
RM Board	2×64MB texture Memory
	Raster Manager
Display	8 channel
소프트웨어	
SGI IRIX6.5.14m C/C++ Cosmoplayer F77/F90 Gimp OpenGL Inventor Jpython Multigen Creator 2.4 Java (Sun java2 SDK 1.2.2) Performer netCDF 3.4 CAVE Lib. 2.7 Vis5D+2.1/Vis5D 5.2/ Vi5D-ncar VisAD NCAR Graphics Mesa Lib. vGeo 1.6 Tcl/TK FERRET ncView	

▶ Compaq 연산워크스테이션 - 해양현상을 very fine resolution으로 수치모델링하고 관측, 원격탐사 또는 모니터링 자료를 동화하여 해양의 상태를 예측하기 위한 연산워크스테이션으로 Compaq ES40 기종이 사용되며, 시험적 수치모델의 연산을 위해서 Compaq Alpha 264 기종이 사용되고 있다.

Table 4-2 Specification of Compaq Alpha 264.

시스템	내용
4 CPU's	667MHz Alpha 2126a
Main Memory	2GB
cache Memory	8MB
Disk Drive	108GB
CDROM	600MB 32×IDE
10 slot PCI I.O backplane	
소프트웨어	
Tru64 6.0 C/C++ F77/F90 java 1.2.2 netCDF 3.5 Vis5D 5.2 FERRET 8.4 ncView 1.92C NCAR Graphics	

▶ 웹서버 - 펜티엄III 1.3GHz Dual CPU PC가 사용된다.

나. VR 가시화 시설

DOVE 센터의 DOVE 시스템 중 주요장치의 하나인 VR 가시화 시설은 국내제작품으로 구성된 K-CAVE를 포함하여 컴퓨터 그래픽 영상표출 프로젝터, 스테레오 영상 시스템, 모션캡처 시스템 등으로 구성되어 있다.

연구센터로서의 DOVE 센터는 디지털 해양으로의 VR 응용기술의 확대를 위하여 VR 그래픽스 장치개발과 소프트웨어의 개발에 노력을 하고 있다.

우리 DOVE 센터에 설치 운영되는 VR 가시화시설은 다음과 같다.

(1) K-CAVE(Korea-Cave Automatic Virtual Environment)

DOVE 센터의 협력업체인 (주)한국미디어테크(KMT)와 공동 개발한 특수 스크린을 활용하여 국내 제작한 4개면 동굴식 VR 영상장치로, K-CAVE안에서 여러명이 입체 안경을 쓰고 오른쪽, 앞, 좌 그리고 바닥면에 투사된 입체 영상을 머리의 움직임과 Wanda의 움직임으로 조정하여 현실에 몰입된 상태로 네비게이션하게 해준다. K-CAVE는 Fig. 1-1에 제시된 원리로서 제작되었으며, Fig. 4-1에 실제 DOVE 시스템의 K-CAVE에 영상이 뿌려진 상황을 나타내었다.

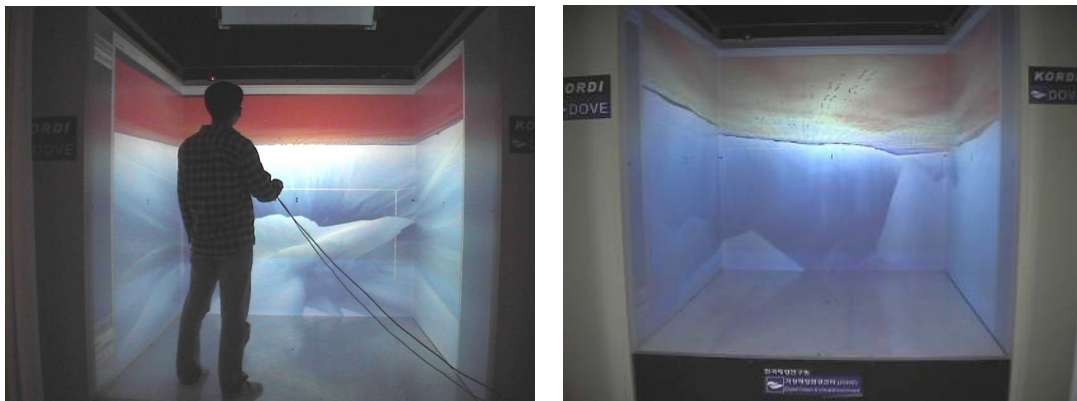


Fig. 4-1 VR image displayed on K-CAVE that was manufactured through this study.

K-CAVE는 여러 사람이 방크기의 공간에서 높은 해상도의 입체영상과 음향을 보고 들을 수 있는 시설이다. K-CAVE는 프로젝션 형식의 가상현실 표출시스템으로써 사용자의 오른쪽, 앞면, 왼쪽, 아래 면에 뿌려진 영상이미지에 의해 몰입환경을 만든다.

이러한 K-CAVE는 방대한 공간을 대표하는 엄청난 양의 3차원 해양상태를 5차원 (공간3차원, 회전, 애니메이션)으로 분석하는데 사용된다. 사용자가 직접 가상현실 내에서 의도하는 대로 환경을 바꿀 수 있기 때문에 실험 과정, 설계과정 그리고 복잡한 자연현상의 시뮬레이션 등의 분석을 위한 과학기술분야의 연구개발 수단으로 자리잡고 있다.

원래 CAVE라는 용어는 UIC의 EVL에서 고안된 Cave방식의 VR 장치였으나, 최근 Fakespace에 의해 상용화되어 모델이름을 그대로 CAVE로 사용한다. 따라서 최근에는 이 분야에서 일하는 사람들은 Cave-like 또는 나름대로 고유이름으로 시스템을 부른다. K-CAVE는 스크린부분의 장치를 국산제품으로 사용하고 장치의 설계 및 제

작을 협력업체인 KMT(한국미디어테크 주식회사)의 기술로 완성하여 K-CAVE로 명명하였다. K-CAVE를 이루고 있는 하드웨어의 요소에 대해 간략히 기술하였다.

▶ 스크린

- 2.3m×2.3m 특수 소프트 스크린(Gain 1.0유지)
4면(오른쪽, 앞면, 왼쪽, 바닥면)
- 1024×768 스테레오 또는 1280×1024모노
- 3개의 후면투사 프로젝터
- 1개의 바닥투사 프로젝터

▶ 4개의 Barco 영상 투사기

- 밝기 1250Lumens(10% peak white)
- 해상도 : 최대 1600×1200 lines
- 주파수 : 수평 - 15~110kHz (auto-lock)
수직 - 37~200Hz (auto-lock)
- 화면크기 : 최대 6.0m×4.5m
최소 1.4m×1.05m
- RGB 대역폭 120MHz
- CRT 크기 : 8"Electromagnetic Focus

▶ 그래픽 엔진 : SGI 비주얼워크스테이션 Onyx2 IR (Facilities 참조)

▶ 입체영상

- 각 스크린에 입체영상 투사
- 능동형 스테레오 영상이미지가 각 스크린마다 96Hz로 투사
- 능동형 스테레오 영상은 Stereographics의 Liquid crystal shutter glasses(CrystalEyes)로 볼 수 있음.

▶ 입출력 제어

- 3개의 버튼과 조이스틱 기능을 갖는 압력반응식 버튼을 지닌 Wanda로 구현

▶ 모션트래킹

- Ascension Technology의 Flock of Birds를 사용하며, 이는 전자기식,

6 자유도 트래킹 시스템임.

- 사용자의 머리와 Wanda 움직임을 탐지하여 실시간 반응
- FOB 센서를 스테레오 안경과 Wnada에 부착하여 동시 사용

K-CAVE에는 4개의 면에 영상을 투사하는 4개의 프로젝터가 있다. 각 프로젝터는 영상스크린 뒷면과 천정에서 바닥을 향하여 컴퓨터에서 만들어진 영상을 투사한다. 이때 CAVE관련 소프트웨어는 모든 장치를 동기화하여 작동하게 하고 각 스크린에 뿌려진 영상간 이음새와 원근 구도를 올바르게 조정한다. K-CAVE에서는 모든 이미지 생성과 관리는 SGI Onyx2에 의해 관리되고 모든 이미지 구도는 K-CAVE내의 사용자 중심 좌표계에서 구성된다. 이때 스테레오 안경에 부착된 모션 캡처(Flock of Birds)센서에 의해 사용자의 모든 각도를 마음대로 바꿀 수 있다.

입체영상을 보려면 왼쪽과 오른쪽 안경의 셔터를 교대로 켜다 켜다해 주는 능동식 입체안경(CrystalEyes)을 써야 한다. 현재 사용중인 상호 대화제어장치로서는 EVL에서 개발한 wanda를 사용하며, wanda에는 3D 마우스 기능 외에 네비게이션 조정용 조이스틱 기능 부분과 프로그래밍에 의해 제어기능을 부여할 수 있는 버튼으로 구성되어 있다.

K-CAVE를 연구한 자료의 VR 가시화를 위해서는 기본적으로 C/C++, OpenGL과 CaveLib에 대한 지식과 경험이 요구된다. 현재 DOVE센터에서 구축하여 운용중인 K-Cave는 OpenGL과 Multigen Creator로 모델링 된 내용과 해양/대기의 퓨전데이터(3차원 수치모델링 결과, 모니터링 원격탐사자료, 고종/이동 부이 자료 등)의 정규격자 또는 비정규격자상의 자료를 변환하여 렌더링 할 수 있다.

(2) VR Table

벨기에의 Barco사 baron 모델로써 대각선 길이 1.8m의 VR Table이다. 높은 해상도를 입체적으로 표출하며 영상의 입체적 분석과 모션트래킹으로 보다 심도 있는 현상 또는 구조의 분석에 활용된다.

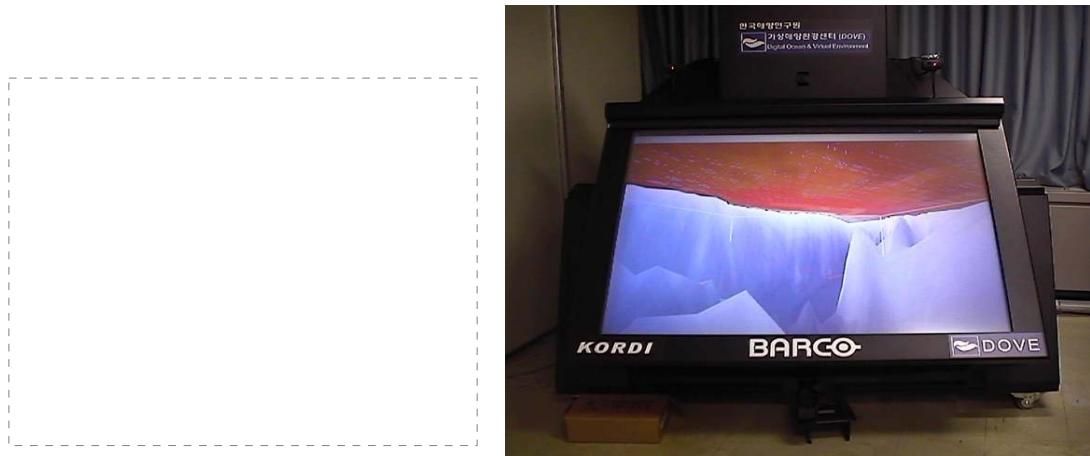


Fig. 4-2 View of semi-immersive VR Tables.

(3) 모션트래킹 시스템

K-CAVE 또는 VR Table을 운용할 때 구현되는 가상현실세계의 이미지에 몰입된 상태에서 운영자가 실제 현실에서와 같이 움직이거나 걸거나 날아가며 볼 수 있는 영상을 표현하도록 그래픽 컴퓨터와 동작을 대화할 수 있는 움직임 탐지 시스템이다. DOVE 시스템에 설치된 모션트래킹 시스템은 Ascension 사의 Flock of Birds이다.



Fig. 4-3 Motion tracking system (FOB).

(4) 스테레오 영상 감지 시스템

그래픽 컴퓨터에서 오른쪽 이미지와 왼쪽 이미지를 90번 이상으로 교대로 보내

어 영상에 표출시킨 후 주파수에 맞게 안경의 L과 R이 교대로 열렸다 닫혔다 하면 영상이 입체로 보인다.

Passive 입체영상은 컴퓨터에서 이미 오른쪽 이미지와 왼쪽이미지를 분리하여 보내어 서로다른 프로젝터가 같은 영상위에 이미지를 표출시킨 후, 서로다른 편광각을 갖는 오른쪽과 왼쪽의 안경이 각각의 이미지만 보게 되어 착용자로 하여금 입체영상을 보게 해주는 방식이다.

Active 방식은 입체영상탐지 시스템의 가격이 비싼 반면 안정된 입체영상을 구현할 수 있으며, Passive 방식은 입체안경이 매우 저렴하지만, 높은 감도의 정밀한 입체영상을 구현하는데 한계점이 있다. DOVE 시스템에서는 STEREO GRAPHICS의 CrystalEyes를 사용하고 있다.

2. 해양수치모델

DOVE 시스템에 표출되는 데이터들은 수치 모델링, 위성영상자료, 관측 자료 등 종류와 포맷이 다양한 퓨전자료이다. 이들 해양 퓨전자료를 DOVE 시스템에서 VR 가시화 하기 위해서는 여러 작업과정을 거치게 되며, 이에 따른 프로그램도 다양하다. 우선 해양을 수치모의하기 위해 현재 DOVE에서 설치 운영되고 있는 해양수치모델은 3차원 예측모델로서 응용분야 및 자료동화와 조간대 처리 그리고 생태계 모델링과의 연계성 등에 서로 다른 특색을 가진다. 일반적 해양의 예측모델의 운영을 위해서 필요한 자료와 각 모듈간의 연계성을 Fig. 4-4에 나타내었다.

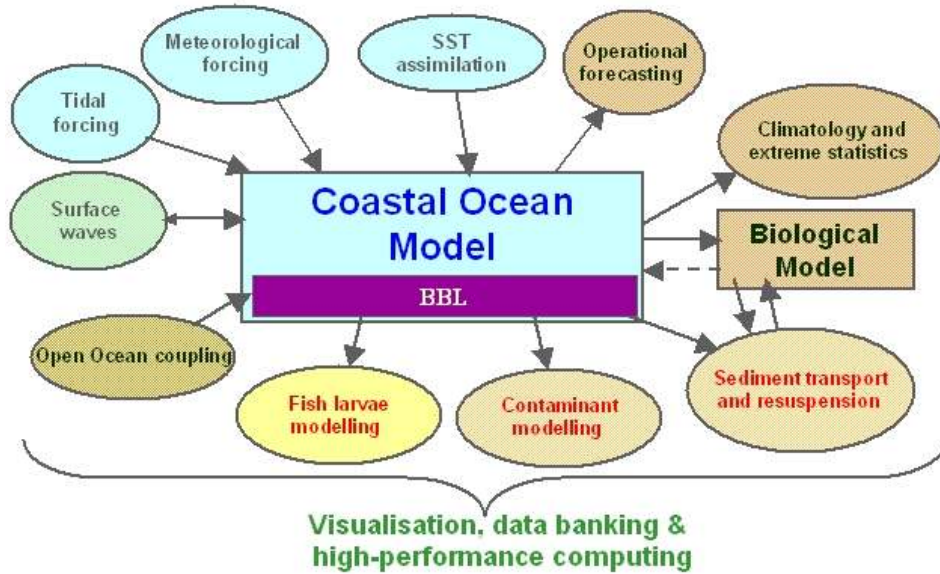


Fig. 4-4 Ocean fusion data for 3 dimensional time-dependent ocean modeling.

3. VR 가시화 소프트웨어

해양 퓨전자료의 VR 가시화를 위해 사용되는 VR 그래픽스 저작 프로그램과 운용 소프트웨어에는 Inventer, Performer, OpenGL, Cave lib., Multigen, Vega, Vis5D, VisAD, vGeo, VRML, CAVE5D 등이 사용되었다. VR을 이용하여 분석된 결과를 일반 사용자들에게 서비스하기 위한 전·후처리 프로그램으로는 Metlab, Tecplot, Surfer, FERRET, NACR Graphics 등을 사용하였으며, 이렇게 만들어진 결과들을 GIS와 수치모델의 연동, 웹서비스 하기 위해 ArcGIS, ArcIMS를 사용하였다.

4. 응용분야

DOVE 연구센터는 고도의 해양관련 수치모델 기법을 활용하여 생산한 퓨전데이터(정기 모니터링, 고정/이동식 부이 관측, 위성/항공 원격 탐사자료, 3차원 수치모델자료 등)를 가상현실(VR) 방법으로 분석하는 기술을 확보하고 있다.

가상현실 기법을 이용하면 관측 또는 수치 모델 자료를 현실과 같은 느낌의 3차원 이미지로 나타낼 수 있다. 방대한 양의 자료를 VR 환경으로 구현하여 현실과

같은 이미지를 분석함으로써 사용자는 시간, 경비 그리고 노력을 줄일 수 있다.

해양에서 일어나는 모든 현상 자료는 Geo-referenced 된 자료를 요구한다. 즉 모든 자료는 지구상 3차원 공간 변화와 분포 그리고 시간에 따른 변화의 양상으로 표현된다. 이러한 점에서 DOVE 센터의 장기 비전에는 공간자료의 효과적 분석 방법인 VR (가상현실)과 공간분포를 효과적으로 분석할 수 있는 방법인 GIS(Geographic Information System)의 연계활용을 위한 노력을 하고 있다. GIS를 이용하여 인터넷 상에서 공간자료 분석을 위하여 ArcIMS를 사용하고 있다(Fig. 4-5). 따라서 DOVE 센터의 주요 일부의 수행은 고도의 해양수치모델(MODEL), 지리정보시스템(GIS) 그리고 과학자료의 VR 가시화(VR Visualization)를 통합하여 새로운 개념의 해양환경 분석기술을 개발한다.

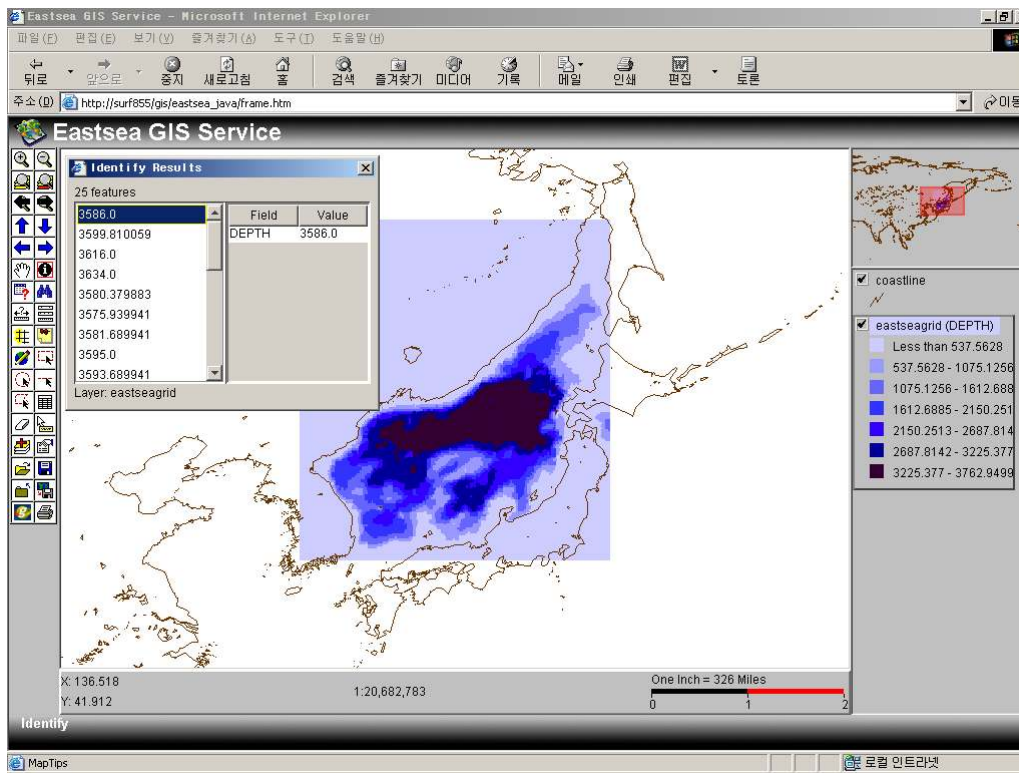


Fig. 4-5 A view of GIS Map Service (<http://vrocean.kordi.re.kr>).

DOVE 센터의 연구 중심 주제는 얼마나 현실적으로 해양 현상을 나타내는 자료를 예측하는가, 이러한 자료를 효과적으로 가시화 하여 가상현실로 구현하는 기술의 개발에 있다. 또한 웹(www)의 표준으로 자리잡은 인터넷 3차원 모델링 언어인

VRML(Virtual Reality Modeling Language)을 사용하여 바닷속 환경상태를 표출함으로써 분산 가상환경, 원격지의 사용자와 협동연구를 가능하게 해주는 기술의 개발도 또 다른 임무이다.

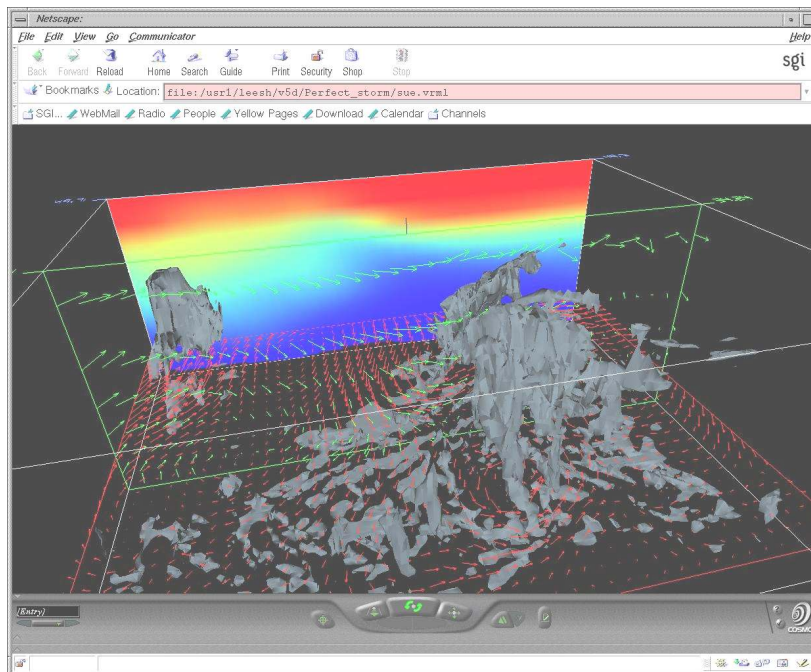
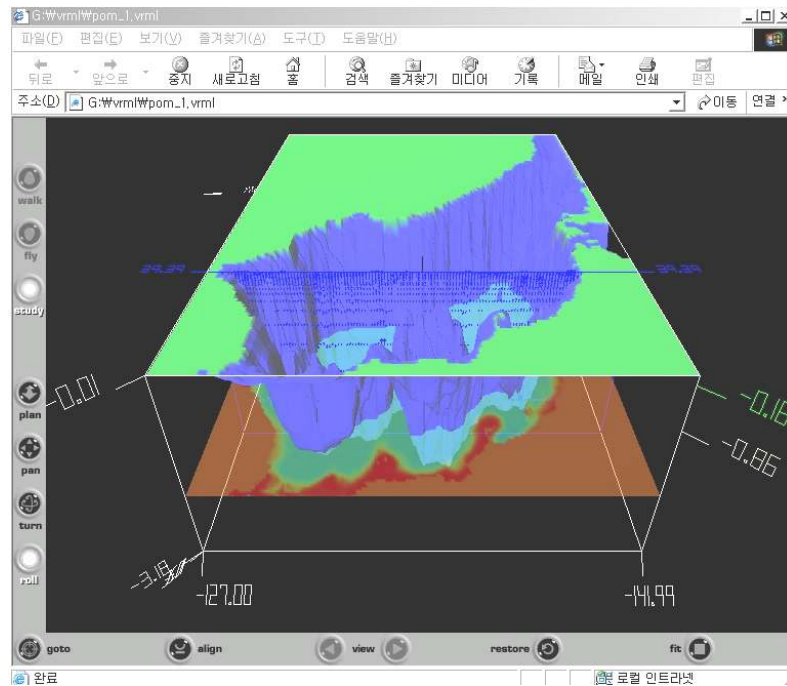


Fig. 4-6 A sample VRML image on web (<http://vrocean.kordi.re.kr>).

제 5 절 동해의 해수순환과 물성 구조의 예측과 검증

1. 서론

동해는 급격한 수심 경사를 갖고 있다 (Fig.5-1). 이러한 수심 경사와 함께 탁월한 계절풍은 동해를 유일한 폐쇄성 대양의 특성을 갖게 하였다. 동해는 약 10^6 km²의 표면적을 가지며, 가장 깊은 곳은 3,700m가 넘으며, 얕고 좁은 4개의 해협을 통해 대양과 연결되어 있다. 동해는 대한해협과 쓰가루(Tsugaru) 해협을 통해 북태평양과 연결되고, 소야 (Soya) 해협과 타타르 (Tatar) 해협을 통해 오흐츠크해 (Okhotsk Sea)와 연결되었다. 동해에는 일본 분지(Japan Basin, JB), 울릉 분지 (Ulleng/Tsushima Basin, UTB) 그리고 야마토 분지 (Yamato Basin, YB)가 있으며, 고원 형태의 야마토 해령 (Yamato Rise, YR)이 있다. 이러한 특성을 갖고 있는 동해는 대양의 작은 원형으로써 많은 과학적 관심의 대상이 되었다. 동해 상의 분지 규모에 대한 순환, 경계류, 극전선 (Subpolar Front, SPF), 중규모 와동 및 심층수의 형성 과정은 대양에서 발생하는 현상들과 유사하다.

동해 열염 구조의 계절 변동은 제한된 자료를 이용하여 많은 연구자에 의해 연구되어 왔다 (Gong and Park, 1969; Isoda and Saitoh, 1993; Isoda et al., 1991; Isoda, 1994; Kano, 1980; Maizuru Mar. Observ., 1997). 일례로, Isoda and Saitoh (1993)은 동해 서부의 인공위성 적외선 영상과 국립수산원의 1987년 겨울과 봄철 정선 관측 자료를 분석하여, 대한해협에서 기원한 한국 연안 근처의 열전선의 작은 사행(meander)이 점차로 성장하여 100km의 수평 규모를 갖는 난수 와동으로 발전하고, 이 난수 와동은 봄부터 여름까지 서서히 북쪽으로 이동하는 것을 밝혔다.

최근 Chu 등(1998a; 1999a)은 미국 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)의 1981년-1994년 월별 표층수온(SST)을 분석하여 동해 와동의 계절별 발생을 보고하였다. 예로, 그들은 늦은 봄철 한국 동쪽 연안에 나타나는 난수의 중심을 규명하였다. Chu 등 (2000)은 미해군의 GDEM (Generalized Digital Environmental Model) 열염 자료($0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 의 공간 분해능을 가짐)로부터 얻은 동해 순환과 열염 구조의 계절 변동을 보고하였다. 1930년부터 1997년에 이르는 136,509개의 수온과 52,572개의 염분 자료를 이용하여 동해에 대한 GDEM 자료를 구성하였다. 지형류의 절대 유속장을 GDEM 자료와 함께 P-vector 방법을 적용하여 3

차원적으로 추정하였으며, 열염 구조의 계절 변동과 기후 평균 상태, GDEM 자료로부터 구한 해류장 즉 극전선(SPF), 중층(50 to 200 m)에 있는 혀 모양의 염분 분포, 대마 난류 (Tsushima Warm Current, TWC)와 이의 분지 등을 규명하였다.

동해 순환에 대한 수치 모델 연구는 1980년대 초기부터 시작되었다. 여러 형태의 수치 모델이 사용되었는데, 사용된 모델과 이를 이용한 연구자를 살펴보면 다음과 같다.

- 다층 모델(multi-layer model) - Sekine, 1986, 1991; Kawabe, 1982a,b; Yoon, 1982a,b; Seung and Nam, 1992; Seung and Kim, 1995
- Modular Ocean Model(MOM) - Kim and Yoon, 1994; Holloway et al., 1995; Kim, and Yoon, 1999; Yoshikawa et al., 1999);
- rigid-lid z-level model - Yoshikawa et al., 1999
- Miami Isopycnal Coordinate Model(MICOM) - Seung and Kim, 1993; Kim and Yoon 1996);
- Princeton Ocean Model(POM) - Mooers and Kang, 1995; Chu et al., 1999b

대부분의 수치 모델 연구는 동해 분지 규모의 순환, 대마 난류의 분지, 동해 중층수의 형성 과정을 이상화된 표층 열교환 조건 또는 관측값을 복원(restoring)하여 사용하는 표층 열교환 조건을 사용하여 규명하는 것에 초점을 두었다. 열속(heat flux) (Kim and Yoon, 1999은 이를 고려함)과 담수속(fresh water flux) 및 거의 실제 수심과 지형을 사용하여, 동해의 순환과 열염 구조에 대한 계절 변동 연구는 매우 드물었다.

이 연구에서는 플럭스 형태의 열염 교환을 고려한 POM을 이용하여 동해 순환과 열염 구조의 계절 변동을 재현하고자 한다. 여기에는 극전선과 와동(eddy)의 사행, 대마 난류의 분지, 동한 난류(East Korea Warm Current, EKWC)의 반류 및 이안 현상, 리만 한류(Liman Cold Current, LCC)와 한국 연안을 따른 리만 한류의 남하 현상, 심층수 형성(deep convection) 및 극전선 근처의 염분 최소층 형성 등을 포함한다. 이러한 현상은 재현하기 위해 미해군의 GDEM 자료를 사용하였다.

전체적인 내용을 간략히 살펴보면 다음과 같다. 본론 2에서는 동해의 해류에 대해서 살펴보았으며, 본론 3에서는 해수면을 통한 열교환 및 바람장, 본론 4에서는 수치모델에 대하여 기술하였으며, 모델에 의해 재현된 수온, 염분 및 순환은 각각 본론 5, 6, 7에서 논의하였으며, 마지막으로 결론을 기술하였다.

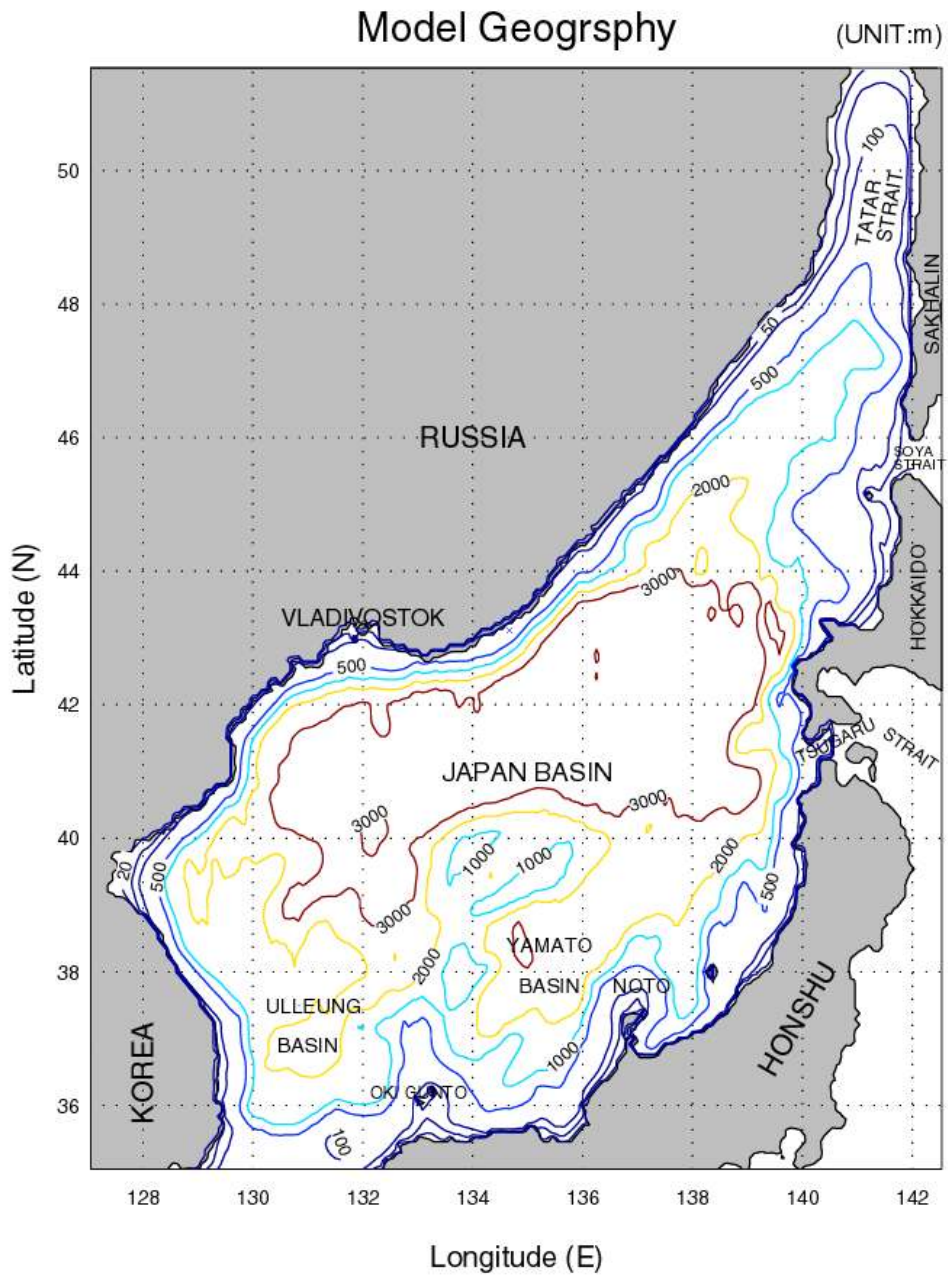


Fig. 5-1 The bottom topography (m) of the East Sea.

2. 동해의 해류

동해의 심층부에 있는 거의 균일한 특성의 해수를 동해 고유수 (Japan Sea Proper Water, Moriyasu, 1972)라 하며, 이들은 낮은 수온과 낮은 염분으로 특징 지을 수 있다. 이 고유수 위에 대마난류가 흐르는데, 대마 난류는 표층에서 우세하며, 동중국해로부터 대한해협을 통해 따뜻한 해수를 남쪽으로부터 북쪽으로 운반한다. 리만 한류는 북쪽과 북동쪽으로부터 차가운 표층 해수를 운반한다 (Seung and Kim, 1989; Holloway et al. 1995). 이 표층 해수의 특성은 겨울철의 강한 냉각 작용, 아무르 강(Amur River)의 담수 유입 및 타타르 해협을 빙산이 녹는 영향에 의해 결정되는 것으로 믿고 있다 (Martin and Kawase, 1998). 리만 한류는 러시아 연안을 따라 남쪽으로 흐르는데, 소야 해협의 위도보다 약간 북쪽에서 시작하여 블라디보스톡(Vladivostok)의 외해쪽에서 끝나며 (Fig.5-2), 북한 연안에 도달한 후 북한 한류(NKCC)가 된다 (Yoon, 1982).

대마 난류는 2개의 지류로 분리되는데, 대한 해협의 동수도와 서수도를 통해 흐른다 (Kawabe, 1982a,b; Hase et al., 1999). 동수도로 분리된 흐름은 일본 연안에 근접하여 흐르는데, 이를 일본 연안 분지(Nearshore Branch, NB) (Yoon, 1982c) 또는 대마 난류의 1 분지 (first branch of TWC, FBTWC) 라고 한다 (Hase et al., 1999). 서수도를 통한 흐름은 동한 난류(EKWC)라 불리는데, 동한 난류는 약 37°N에서 다시 두 개의 지류로 분리될 때까지 한국 동쪽 연안을 따라 북상한다. 동한 난류에서 분리된 서쪽 지류는 북상하며 울릉 분지에 걸쳐 반시계 방향의 와류를 형성한다. 한편 동한 난류에서 분리된 동쪽 지류는 호카이도 (Hokkaido) 섬의 서쪽 연안에 이르기까지 동쪽으로 흐르며, 대마난류의 2 분지 (second branch of the TWC, SBTWC)가 된다.

북한 한류는 약 38°N에서 동한 난류와 만나는데, 합류되는 위도는 계절에 따라 약간씩 변화한다. 북한 한류와 동한 난류는 연안에서 분리된 후 합류하며, 강한 전선을 형성한다. 이 전선은 동해를 가로질러 동서방향으로 뻗어 나간다. 북한 한류는 (동한 난류와 만난 후) 북쪽에서 시계방향으로 재순환하기도 하나, 대부분의 동한 난류는 쓰가루 해협과 소야 해협을 통해 동해를 빠져나간다 (Uda, 1934). 북한 한류의 형성 과정과 동한 난류의 분리 현상은 바람과 부력소(buoyancy flux)의 국지적인 외력에 의해 영향을 받는다 (Seung, 1992). 커다란 사형 흐름이 전선을 따라 발달하는데, 이는 따뜻한 와류(warm eddy)와 차가운 와류(cold eddy)와 연관되어 있다.

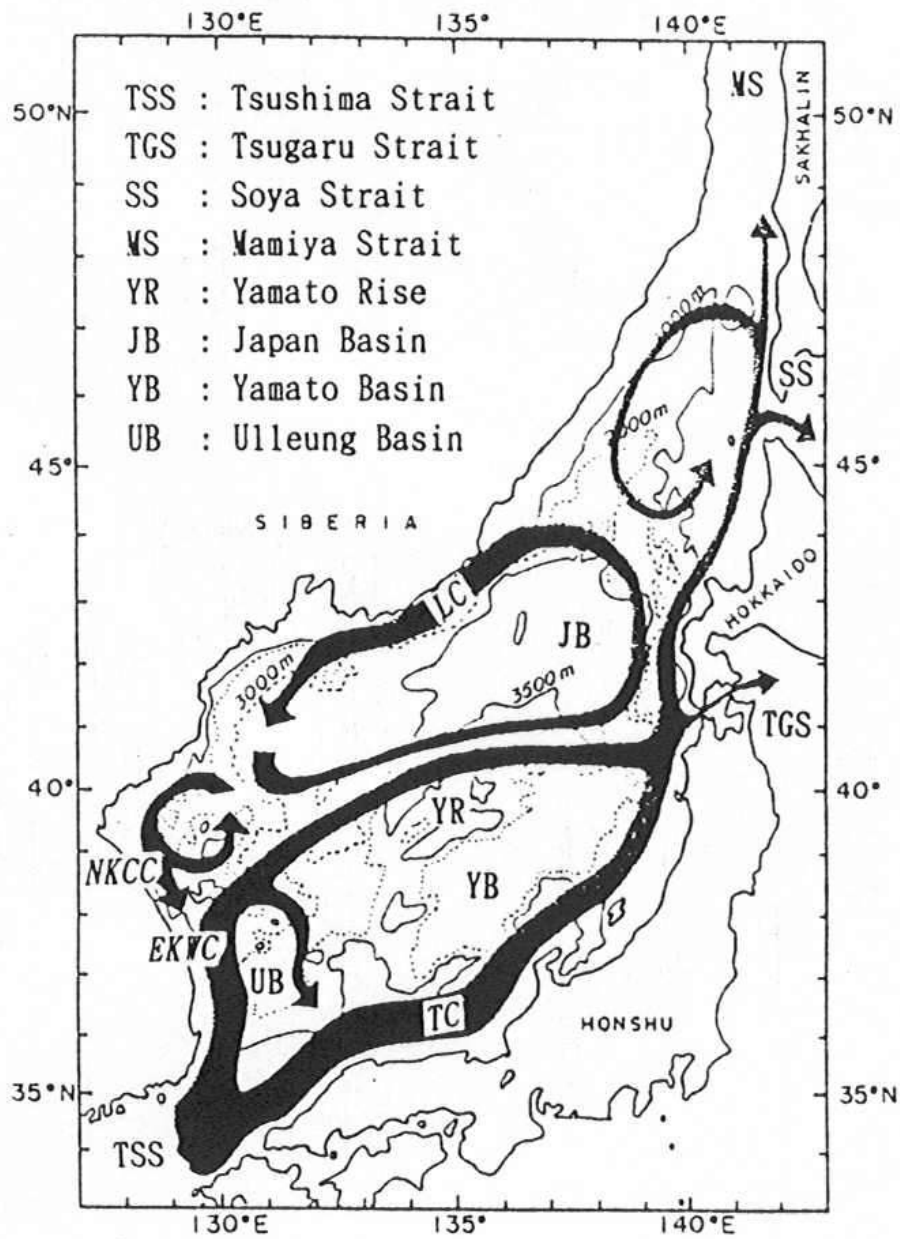


Fig. 5-2 Schematic map of surface current systems in the East Sea (after Tomczak and Godfrey, 1994).

최근 Shin 등 (1995)의 관측 결과는 3월부터 6월까지 38°N 근처의 한국 동쪽 연안에 시계 방향의 난수 와동(warm eddy)이 존재함을 보였다. 이 난수 와동은 동안 난류의 깊이와 거의 같은 200m 수심까지 존재하였으며, 표층에서의 와동 길이 규모는 약 150 km에 달하였다. 이 와동의 표층 흐름은 65cm/s에 달하였는데, 6월에 관측된 동안 난류의 최대 유속은 약 70cm/s로 보고되었다.

Seung (1992)은 초기 수치 모델 결과로부터 동해 용적 수송량의 주요 특성을 밝혔는데, 용적 수송량의 형태는 주로 상층 순환과 거대 규모의 반시계 방향 재순환 소용돌이(gyre)에 의해 결정된다. 이 반시계 방향 재순환에는 동안 난류와 일본 연안 분지(Nearshore Branch)가 유입-유출 시스템의 형태로 포함되어 있으며 또한 북한 한류도 포함되어 있다. 동안 난류는 분지된 수백 킬로미터 지점에서 시계방향 소용돌이를 형성하며, 이 소용돌이는 동안 난류가 발달함에 따라 강해진다. 한편, 북쪽의 시계방향 소용돌이는 바람과 부력소에 의해 강화되는 겨울철에 매우 깊어지며 가장 두드러지게 되는데, 이를 보통 일본 분지 소용돌이 (Japan Basin gyre)라고 한다. 이 소용돌이 또는 이와 관련된 남하하는 연안류 (즉, 북한 한류)는 거의 연중 동안 난류의 밑에까지 침입하여 남쪽으로 흐름 만큼 충분히 깊게 발달한다. Seung 은 또한 여름철에 일본 연안 분지(Nearshore Branch) 밑에 반류가 존재함을 확인하였다.

3. 대기 강제력의 계절 변동

가. 개요

아시아의 계절풍은 동해의 수온 구조에 상당히 많은 영향을 미친다. 겨울철에는 Siberian 고기압 체계의 결과로써 매우 차가운 북서풍이 동해 상에 불며, 평균 풍속은 10 m/s 내지 15 m/s 에 달한다 (Fig. 5-3a). 4월 하순부터 5월까지는 전선과 관련된 여러 개의 기상 현상이 발생하여 풍속과 운량(amount of cloud)은 상당한 변동을 보인다. 이 기간 동안 몽고에서 발생한 폭풍은 강하고 따뜻한 서풍으로 동해 상에 발달하기도 한다 (Fig. 5-3b). 5월 하순부터 6월 초순까지 아시아 전역에 걸쳐 여름철 저기압 체계가 형성되기 시작한다. 초기에는 황해의 북쪽에 중심을 둔 저기압에 의해 서풍이 분다. 6월 하순 이 저기압 체계는 서쪽으로 이동하여 남서 계절풍으로 변하며, 여름철 내내 남서 계절풍이 우세하게 된다. 풍향과 풍속은 6월부터 만주의 저기압 체계가 강화될 때까지 변한다. 이러한 기상 체계에도 불구하고

하고 동해 상의 여름철 평균 풍속은 3 m/s 내지 4 m/s 이며 (Fig.5-3c), 겨울철 풍속에 비해 상당히 작다. 7월에는 남쪽의 고기압과 만주 지방에 걸친 저기압에 의해 습기가 많고 따뜻한 남풍이 동중국해와 황해 상에 발달한다. 여름철에는 따뜻한 공기와 강한 하향 복사열로 인하여 동해의 상층이 안정된 구조를 이루게 하며 혼합층 깊이가 낮아지게 한다. 10월의 기상 상태는 겨울철 기상 상태로 변화하기 시작한다 (Fig.5-3d). 남풍은 약해지며 해면 경사는 겨울철 형태로 다시 형성된다.

동해상의 기후학적인 (장기적인) 표층 열속과 담수속을 간략히 살펴보면 다음과 같다. 여기에 사용된 자료들은 표층 해양 기후 자료 및 열속, 운동량과 담수의 이상치(anomalies)를 객관 분석한 것으로 COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set)의 개별적 관측 자료로부터 얻었다. 분석에 사용된 관측 자료는 1945년부터 1989년 자료가 사용되어 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 격자로 분석되었다 (da Silva et al., 1994).

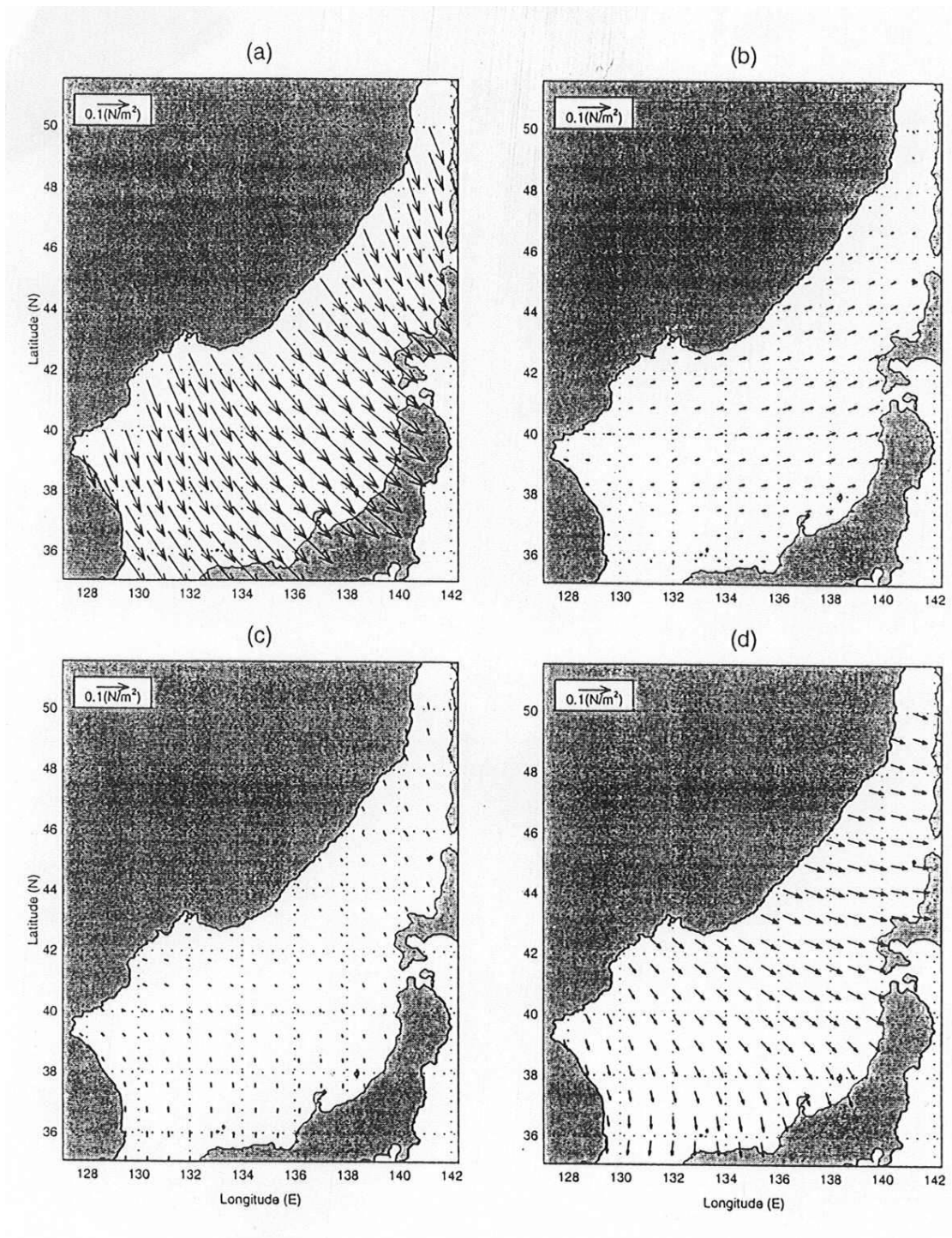


Fig. 5-3 Climatological monthly mean wind stress for (a) January, (b) April, (c) July, and (d) October, using the COADS data.

나. 순 표면 열속 (Net Surface Heat Flux)

순 표면 열속은 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{Net} = R_S - (R_L + Q_S + Q_L) \quad (5-1)$$

여기서 R_S 는 순 하향 단파 복사 (net downward shortwave radiation), R_L 는 순 상향 장파 복사 (net upward longwave radiation), Q_S 는 현열속(sensible heat flux), Q_L 은 잠열속 (latent heat flux)를 나타낸다. Q_{Net} 의 양수값(음수값)은 해양 표면에서 순 열의 증가(감소)를 나타낸다. 동해 상의 여름철 순열속은 상대적으로 공간적으로 일정하나 (140 to 160 W m^{-2}), 다른 계절에는 남동쪽 (일본 연안)에서 북서쪽 (러시아 연안)으로 증가하는 상당한 순열속의 수평 경사가 존재한다 (Fig.5-4). 대한해협 근처의 표층은 겨울철 최대 400 W m^{-2} 의 열속 감소를 가지며 봄철(4월) 최소 60 W m^{-2} 의 열속 증가를 갖는다. 이러한 열속 값은 기존 연구 결과 (Hirose, 1996; Seo, 1998)와 부합하는 범위에 있다. 이러한 장기간에 걸친 표층 순열속의 감소는 동중국해의 따뜻한 수괴가 이류 됨으로써 보상될 것이다.

다. 표층 담수속 (Surface Fresh Water Flux)

표층 담수속은 강수율(precipitation rate, P)과 증발율(evaporation rate, E)의 차이로 결정된다.

$$F = P - E \quad (5-2)$$

F 의 양수값은 표층에서 수량이 증가함을 나타낸다. 표층 담수속은 4계절에 따라 다음과 같은 뚜렷한 특성을 보인다. 겨울철 담수속은 공간에 따라 다른 분포를 보이는데, 동해의 북쪽 및 북동쪽에서는 담수 증가 (2 to 6 cm/mon)를, 동해의 남쪽과 남서쪽에서는 담수 손실 (2 to 10 cm/mon)이 일어난다. F 값의 강한 수평 경사는 북동쪽에서 남서쪽으로 갈수록 단순 감소한다. 봄철 (Fig.5-5b)과 여름철 (Fig.5-5c) 담수속 특성은 동해 전체에 걸친 담수 증가로 특징 지을 수 있는데, F 의 수평 경사율은 다르게 나타난다 : 봄철에는 동해 북동쪽에서 4 cm/mon 의 담수속을 보이나 동해 남서쪽에서는 담수속이 감소하여 2 cm/mon 의 값을 보이며, 여름철에는 동해 북동쪽에서 4 cm/mon 의 담수속을 동해 남서쪽에서는 증가하여 6 cm/mon

의 담수속을 보인다. 가을철 담수속 (Fig.5-5d)은 동해 전체에 걸친 담수 손실 (4 to 16 cm/mon)로 특징지을 수 있는데, 16 cm/mon의 최대 담수 손실은 대한해협 근처에서 일어난다.

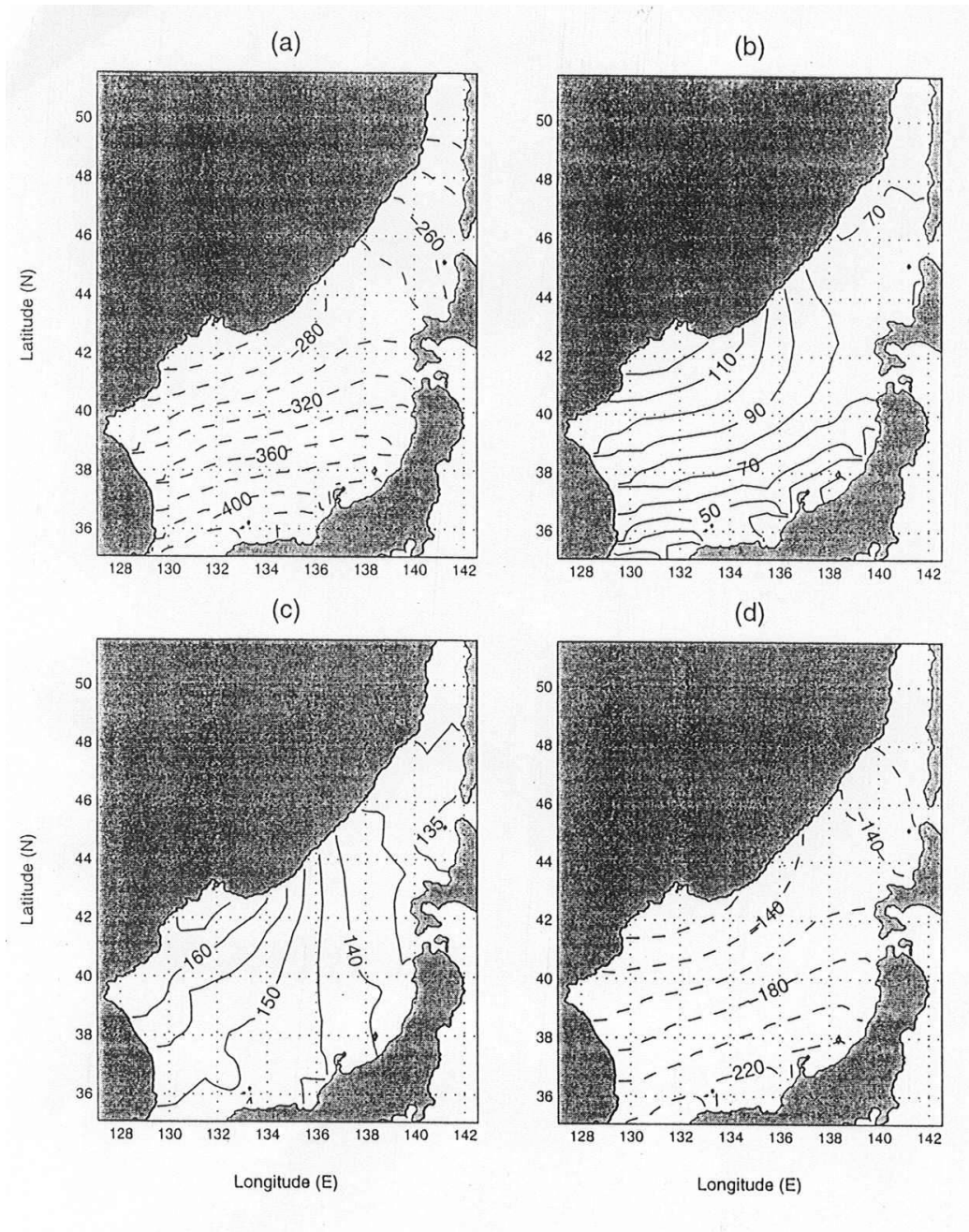


Fig. 5-4 Climatological monthly mean net heat flux ($W m^{-2}$) for (a) January, (b) April, (c) July, and (d) October, using the COADS data.

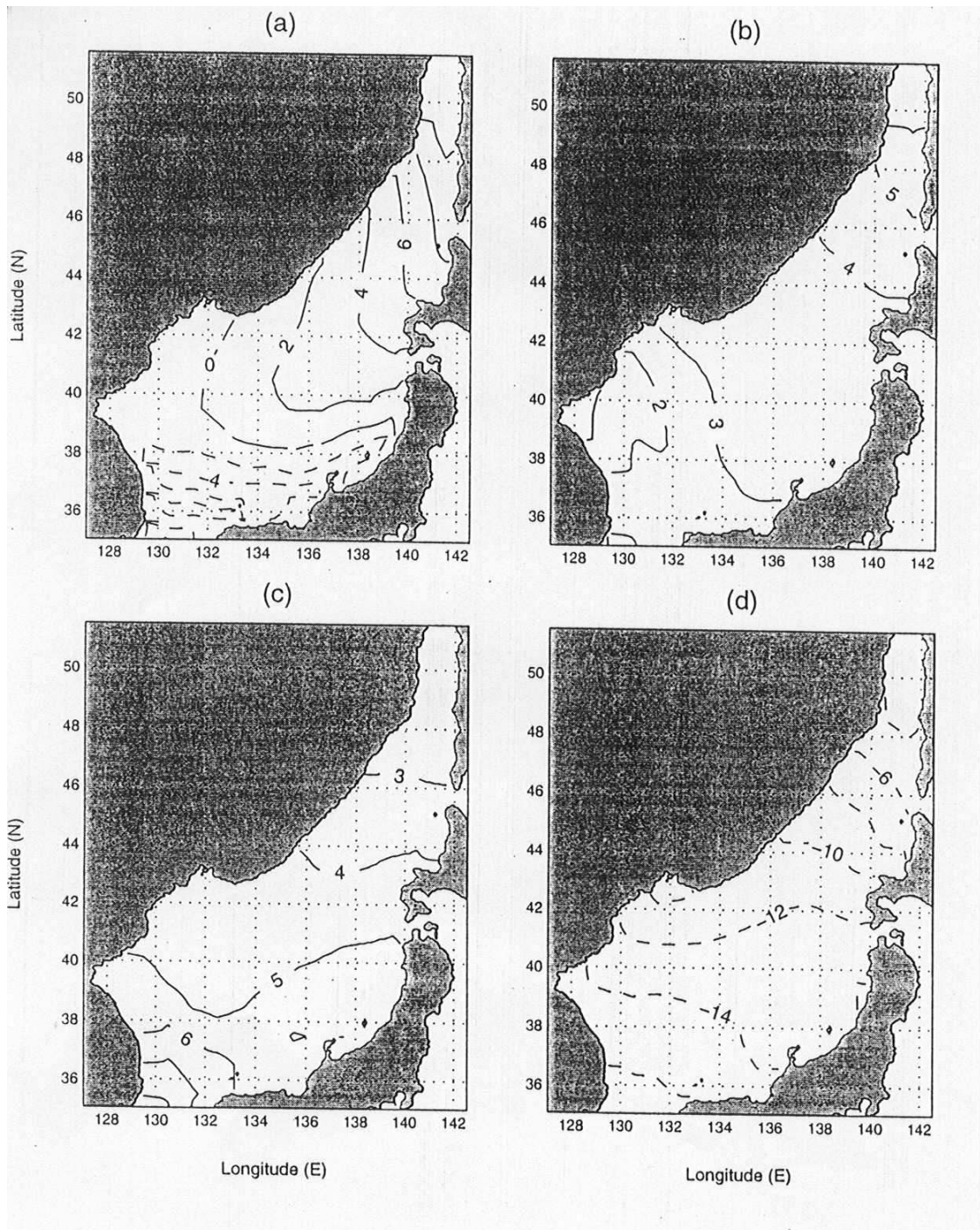


Fig. 5-5 Climatological monthly mean precipitation minus evaporation for (a) January, (b) April, (c) July, and (d) October, using the COADS data.

4. 대양 수치 모델

가. 모델 특성

연안역과 폐쇄성 해역은 예측할 변량(수온, 해류 등)이 굉장한 시·공간적 변동성을 보여 기존 수치 모델의 예측 능력을 평가하기 좋은 곳이다. POM은 시간 의존형 (time-dependent) 원시 방정식을 해석한 순환 모델로써 실제적인 지형과 수심 및 자유 수면을 포함하는 3차원 수치 모델이다 (Blumberg and Mellor, 1987). 이 연구에서는 순환의 단주기 변동을 고려하지 않았기 때문에 조석은 포함하지 않았다. 또한 강을 통한 담수 유출도 고려하지 않았다. 모델에서는 해수면, 수온, 염분, 순환 형태와 용적 수송량의 계절 변화를 재현하고자 한다. 여러 수치 실험을 통하여 방정식의 비선형 효과, 바람 외력 및 유입-유출량에 대한 정성적/정량적 영향을 분석하여, 외력의 영향을 파악하도록 하였다.

모델 영역은 고정된 181×199 의 수평 격자를 사용하였으며, 연직적으로는 23 개의 sigma levels을 사용하였다. 수평 격자의 크기는 경도·위도 방향 모두 5'의 격자를 사용하였다 (동서 방향의 격자 크기는 약 5.77 km에서 7.59 km 이며, 남북 방향의 격자 크기는 9.265 km이다). 모델 영역은 남북 방향으로 35.0°N 에서 51.0°N 까지이며 동서 방향으로는 127.0°E 에서 142.0°E 로 동해 전체를 포함한다. 수심은 $5' \times 5'$ 분해능의 DBDB5 (Digital Bathymetry Data Base 5 Minute)를 사용하였다 (Fig.5-1). 수평 확산 계수는 Smagorinsky (1963) 방법을 사용하여 구하였는데, 이 연구에서는 계수 값으로 0.2를 사용하였다. 해저면 마찰 (τ_b)은 다음과 같은 2차식을 따른다고 가정하였다.

$$\tau_b = \rho_0 C_D |V_b| V_b \quad (5-3)$$

여기서 ρ_0 ($= 1025 \text{ kg/m}^3$)는 해수의 밀도, V_b 는 해저면 수평 유속, C_D 는 저면 마찰 계수로 0.0025로 가정하였다 (Blumberg and Mellor, 1987).

나. 해표면 경계 조건

POM에 사용된 표면 강제력은 바람 응력과 열염속이다. 바람 응력은 다음과 같이 부여하였으며,

$$\rho_0 K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=0} = (\tau_{0x}, \tau_{0y}) \quad (5-4)$$

여기서 K_M 은 운동량의 연직 확산 계수, (u, v) 는 유속, (τ_{0x}, τ_{0y}) 는 바람응력을 나타낸다. 매 순간의 바람 응력은 기후학적으로 얻은 COADS (1945-1989)의 월평균 자료를 시간적으로 내삽하여 사용하였는데, $1^\circ \times 1^\circ$ 의 COADS 바람 응력은 $5' \times 5'$ 의 모델 격자에 공간적으로 내삽하였다.

표면 열염 경계 조건은 다음과 같이 설정하였다.

$$K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} = \alpha_1 \left(\frac{Q_H}{\rho C_p} \right) + \alpha_2 C (\theta_{OBS} - \theta) \quad (5-5)$$

$$K_S \frac{\partial S}{\partial z} = -\alpha_1 FS + \alpha_2 C (S_{OBS} - S) \quad (5-6)$$

여기서 K_H 와 K_S 는 열과 염에 대한 연직 확산 계수, (θ, S) 는 모델에서 예측될 잠재 수온(potential temperature)과 염분이며, (θ_{OBS}, S_{OBS}) 는 관측된 잠재 수온과 염분, c_p 는 해수의 비열(specific heat)이다. Relaxation 계수 C 의 차원은 [m/s]이다. 두 매개변수 (α_1, α_2) 는 어떤 형태의 경계 조건을 사용할지 결정하는 스위치의 역할을 한다 : $(\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0)$ 은 플럭스 형태의 경계 조건이 사용되며, $(\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1)$ 은 관측 값에 복원(restoring)시키는 경계 조건이 사용된다. 여기서는 C 의 값으로 0.7 m/day를 사용하였는데, 이 값은 상층 30m 두께의 해수가 43 days에 복원되는 것과 같은 물리적 의미이다 (Chu et al., 1999a,b). 그러나 Relaxation 계수를 사용하는 실제적인 이유는 해수 온도 및 염분이 기후값에 벗어나지 않도록 하려는 수치적인 목적이 더욱 크다.

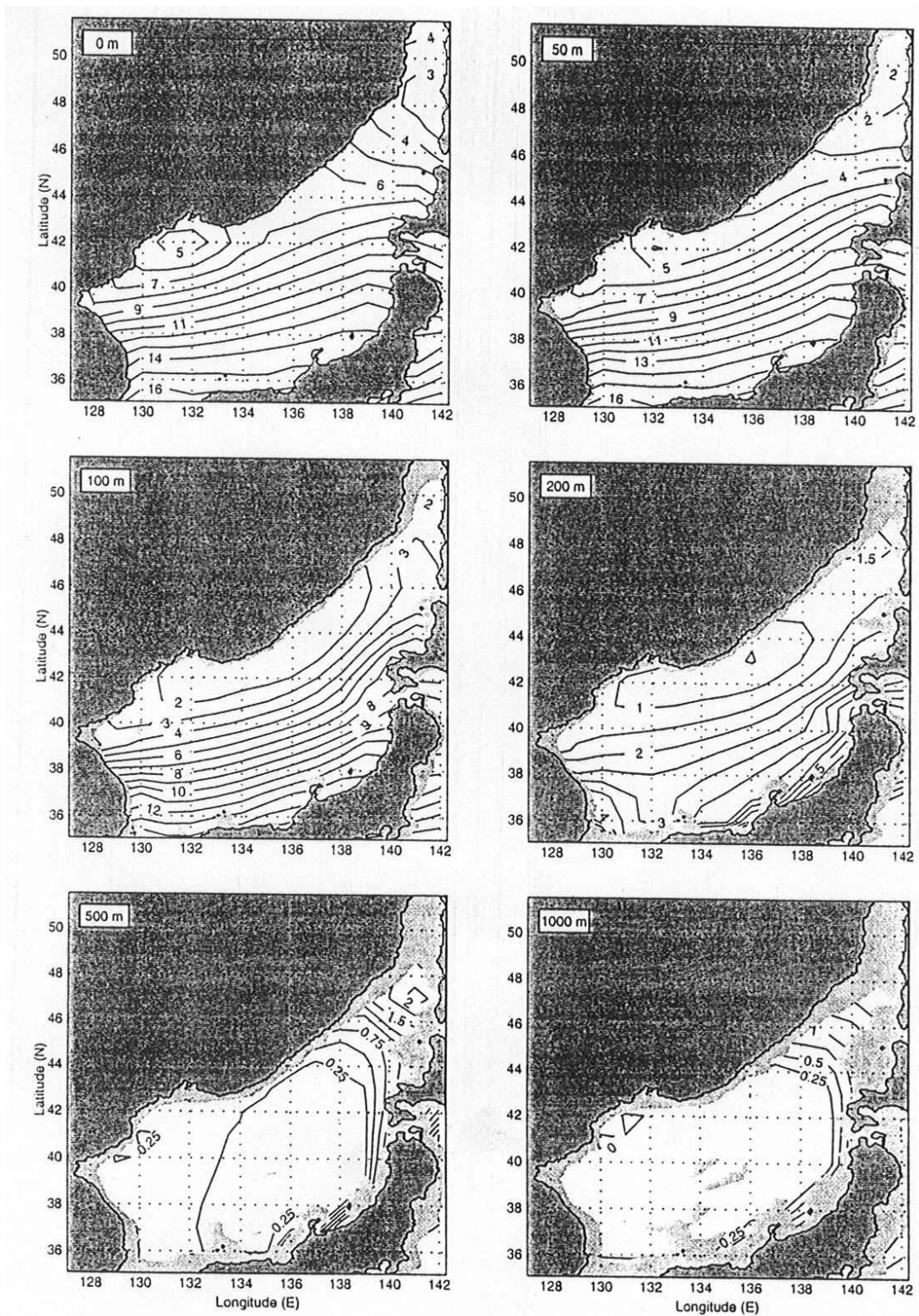


Fig. 5-6a Initial fields from the climatological data (Levitus, 1982) at different depths:
 (a) temperature, and (b) salinity.

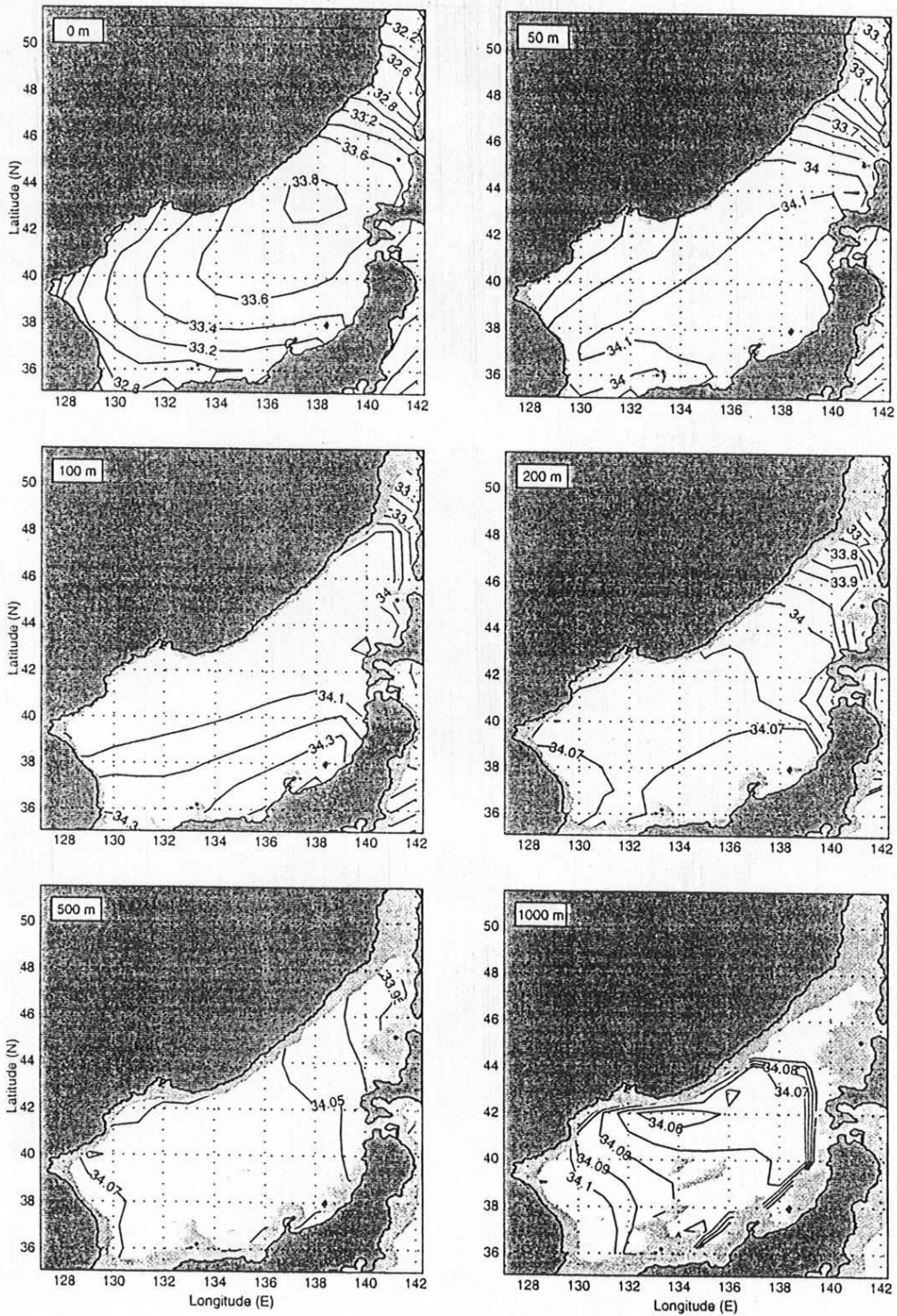


Fig. 5-6b Initial fields from the climatological data (Levitus, 1982) at different depths:
 (a) temperature, and (b) salinity.

다. 측면 경계 조건

폐쇄 측면 (즉, 모델 상의 해양과 육지 경계)에 대한 경계 조건은 다음과 같다. 유속에 대해서는 free-slip 조건을 사용하였고, 열과 염에 대해서는 법선 방향의 경사율을 0으로 하였다. 따라서 폐쇄 측면 경계에서는 열과 염의 이류 확산이 발생하지 않으며, 유속 플럭스도 발생하지 않는다.

개방 경계에서는 비록 수치 모델의 격자가 끝나지만 해수 유동은 제한되지 않는다. 이러한 개방 경계를 다루는데 대한 불확실성이 제한된 주변 해역의 수치 모델링을 어렵게 한다. 개방 경계 조건을 처리하기 위해 local-type, inverse-type, and nested-basin/coastal-modeling과 같은 3가지 방법이 사용되기도 한다. 여기서는 local-type, 즉 부여된 용적 수송량과 함께 방사 경계 조건을 사용하였다. 모델 영역 내로 들어오는 흐름의 경우에는 개방 경계의 수온과 염분을 관측 자료로부터 지정하였으며, 모델 영역 밖으로 나가는 흐름일 경우의 개방 경계의 수온과 염분은 다음과 같은 방사 경계 조건으로 구하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta, S) + U_n \frac{\partial}{\partial n}(\theta, S) = 0 \quad (5-7)$$

여기서 밀침자 n 은 경계의 법선 방향을 나타낸다.

개방 경계의 수온 및 염분 값은 미해군의 MOODS (Master Oceanographic Observational Data Set) 또는 GDEM (Generalized Digital Environmental Model) 같은 자료로부터 얻을 수 있다 (Chu et al. 2000). 여기서는 개방 경계의 T, S 값으로 GDEM 자료를 사용하였다. 대한해협 연직 단면에 대한 월평균 수온 (Fig.5-7a) 및 월평균 염분 (Fig.5-7b)을 보면 난수의 핵(warm-core)과 저염수 핵(salt-core)이 계절에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 겨울철(11월부터 3월)에는 난수의 핵이 대한해협의 대부분을 차지하나, 여름철(6월부터 8월)에는 난수의 핵이 약해지며 약해진다. 여름철 대한해협의 해수는 상당히 강하게 성층되어 있다 (Fig.5-7a,b).

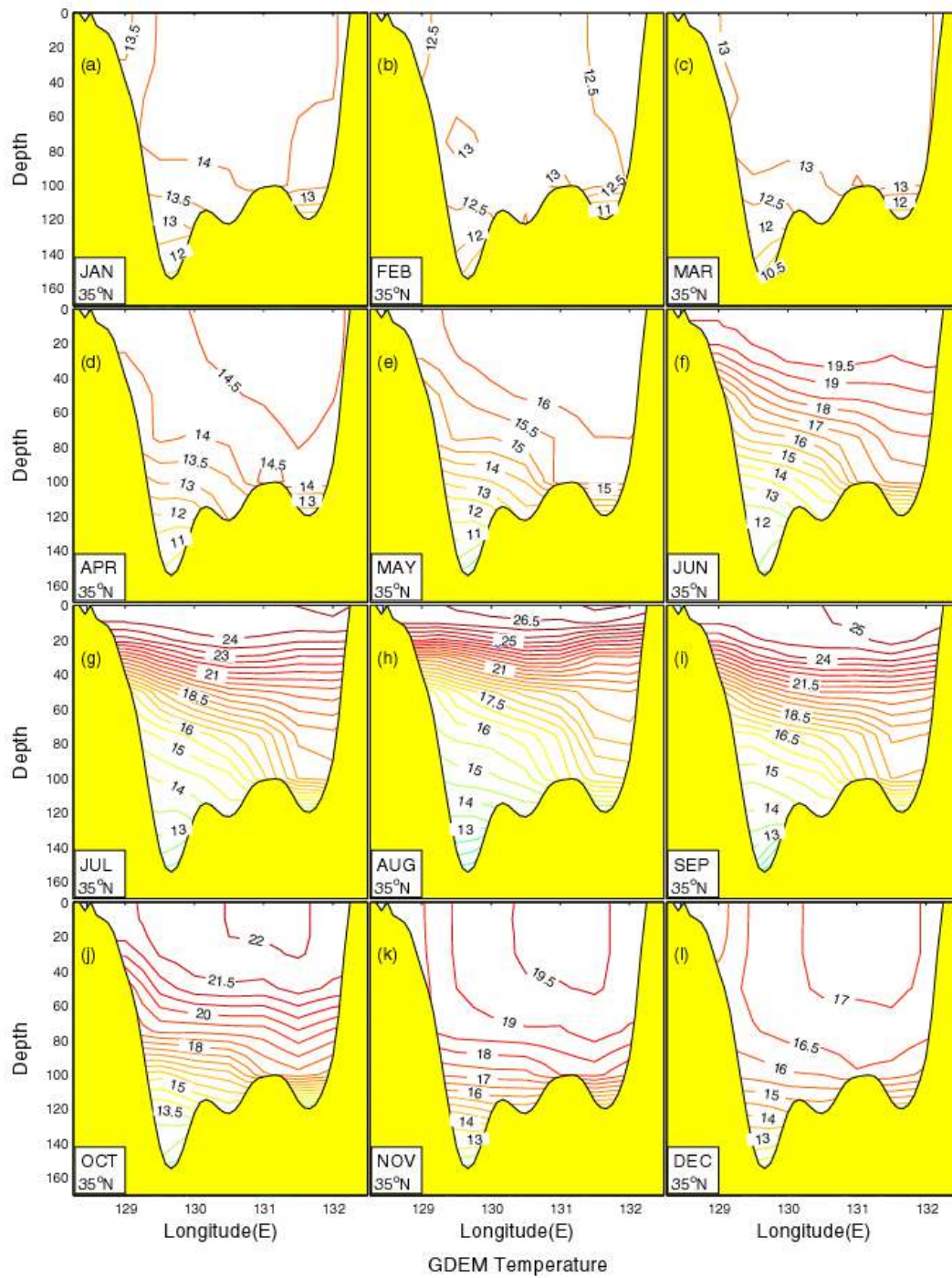


Fig. 5-7a Vertical cross-sections of monthly mean (a) temperature and (b) salinity at the Tsushima/Korea Strait.

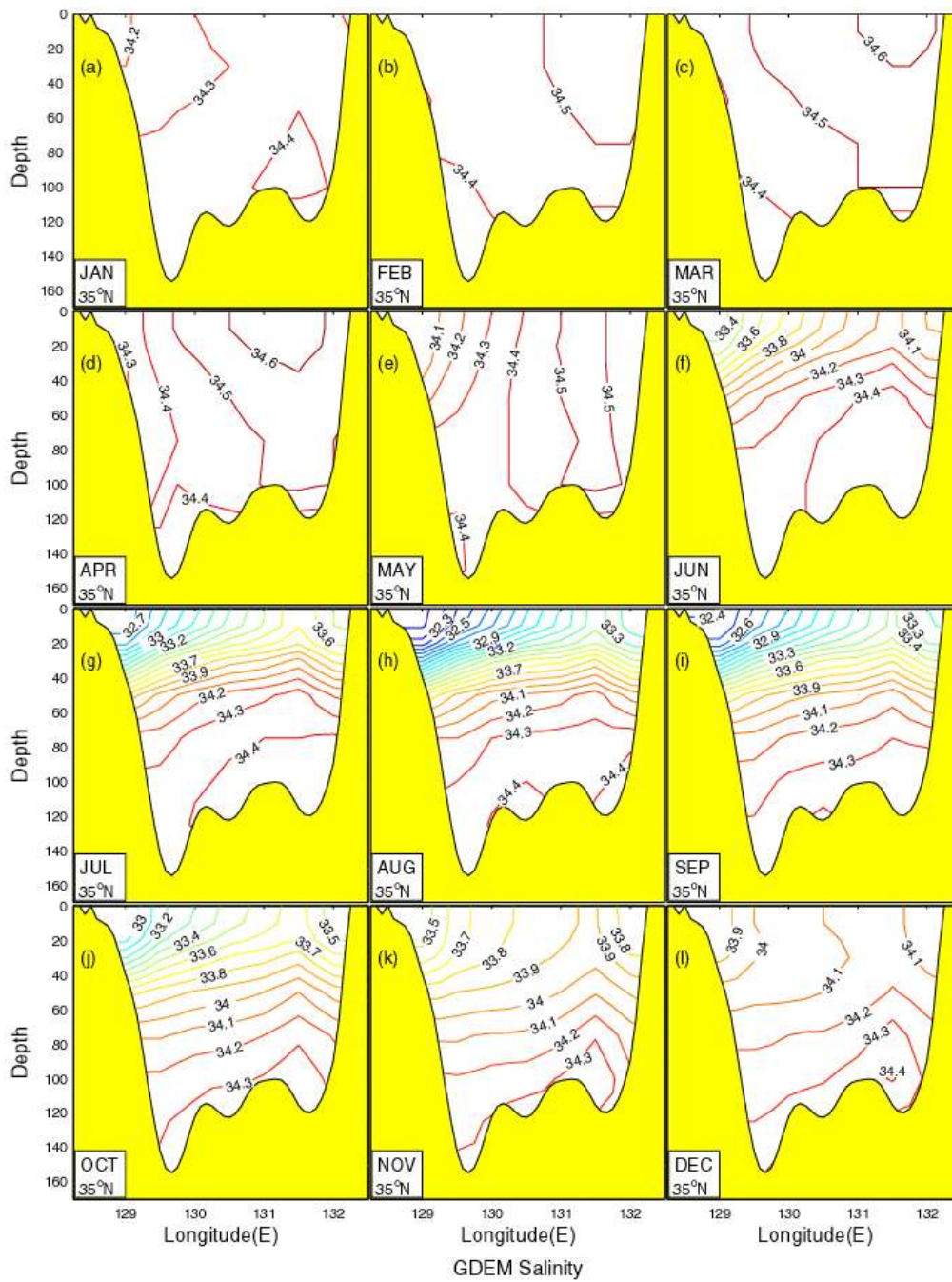


Fig. 5-7b Vertical cross-sections of monthly mean (a) temperature and (b) salinity at the Tsushima/Korea Strait.

따뜻한 물은 동중국에서 기원한 대마난류와 함께 대한해협을 통해 동해로 유입하고 쓰가루 해협과 소야 해협을 통해 동해에서 빠져나간다. 타타르 해협을 통한 용적 수송량은 뚜렷하지 않다 (Martin and Kawase, 1998). 따라서 여기서는 타타르 해협을 통한 용적 수송량은 고려하지 않았다. Yi (1966)에 따르면 월평균 용적 수송량 추정치는 대한해협을 통해 년평균 1.3 Sv, 10월에 최대 2.2 Sv, 2월에 최소 0.3 Sv으로 보고되었다. Bang 등 (1996)은 최대 3.5 Sv (8월), 최소 1.6 Sv (2월)을 유입 수송량으로 사용하였으며, Kim and Yoon (1999)은 평균 수송량으로 2.2 Sv, 최대 수송량(9월 중순)과 최소 수송량 (3월 중순)은 평균 수송량에 비해 각각 0.35 Sv 많거나 적은 값을 사용하였다. 대한해협을 통한 총유입량은 쓰가루 및 소야 해협을 통한 총 유출량과 같아야 한다. 여기서는 총 유입량의 75% (Bang 등 (1996)에서는 80%)가 쓰가루 해협을 통해 유출하고 나머지 25% (Bang 등(1996)에서는 20%)는 소야 해협을 통해 유출하는 것으로 가정하였다. 이러한 비율은 Toba 등 (1982)이 추정된 쓰가루 해협의 최대 수송량과 Preller and Hogan (1998)이 추정된 소야 해협의 최대 수송량을 적용하여 설정하였다. 개방 경계를 통한 월별 유입-유출 수송량은 Table 5-1과 같다.

Table 5-1. Monthly values of volume transport (Sv) through the lateral open boundaries.

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Soya	-0.2	-0.08	-0.08	-0.13	-0.23	-0.33	-0.43	-0.53	-0.55	-0.53	-0.48	-0.35
Tatar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tsugaru	-0.6	-0.22	-0.22	-0.37	-0.67	-0.97	-1.27	-1.57	-1.65	-1.57	-1.42	-1.05
Tsushima	0.8	0.3	0.3	0.5	0.9	1.3	1.7	2.1	2.2	2.1	1.9	1.4

The positive/negative values mean inflow/outflow.

라. 모드 분리 (Mode Splitting)

계산 효율을 위해 모드 분리 기법 (Blumberg and Mellor, 1987)을 적용하였다. 순압 계산 간격으로 CFL (Courant-Friederichs-Levy) 안정 조건에 부합하는 25초를 사용하였으며, 경압 계산 간격으로 900초를 사용하였다.

마. 두단계 초기화

POM을 초기화시키기 위해 두 단계 수치실험이 수행되었다. 첫 번째 단계 즉 복원 실험(restoring run)에서는 정지된 바다에 기후적인 수온과 염분장 (Levitus

1982), COADS의 기후학적인 월평균 바람응력, 표층 월평균 값에 접근시키는 복원 형태의 열염 경계조건 ($\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1$)을 사용하여 2년간 적분하였다. 모델의 운동 에너지는 위의 경계조건 하에서 약 90일 후에 준 정상 상태에 도달하는 것으로 나타났다 (Fig. 5-8). 첫 번째 단계의 최종 결과를 두 번째 단계, 즉 모사 실험 (simulation run)의 초기 조건으로 사용하였다. 두 번째 단계에서는 COADS 자료에 근거한 기후 월평균 바람 응력, 순열속과 담수속 ($\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0$)을 사용하여 다시 2년간 수치 적분하였다.

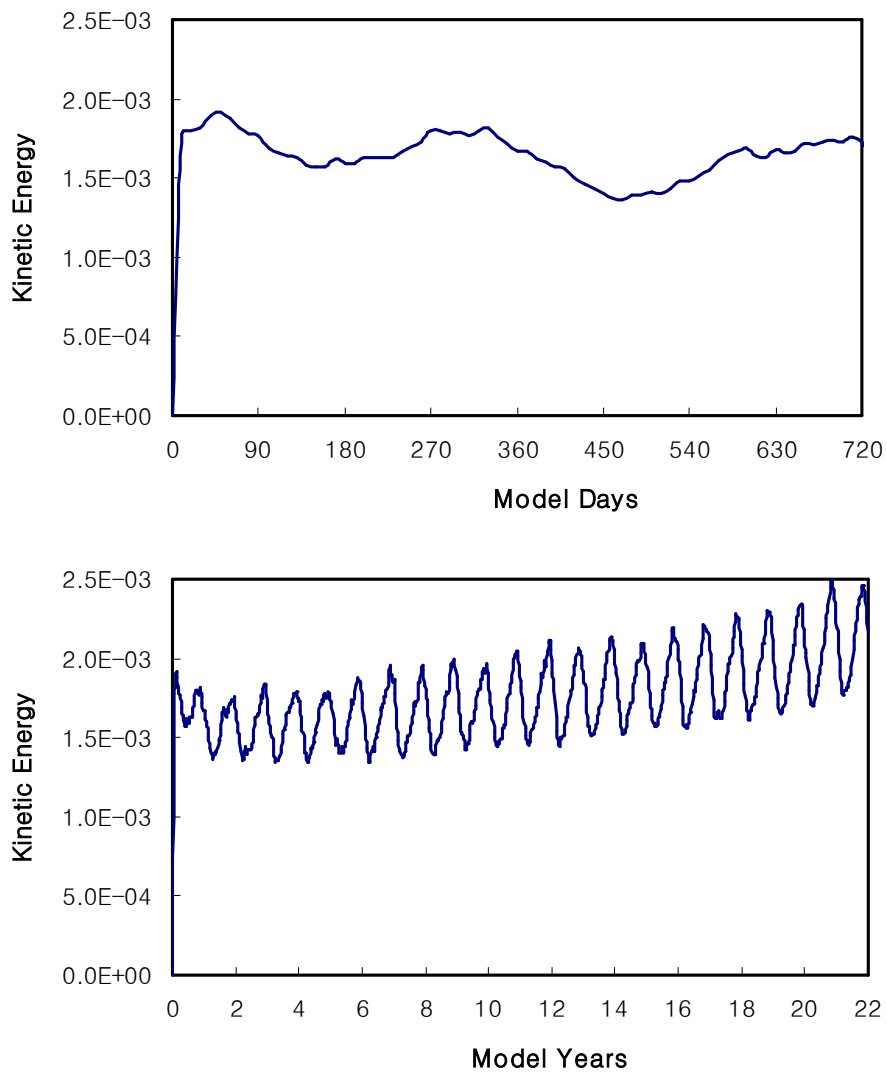


Fig. 5-8 Temporal variation of total kinetic energy per unit volume ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$) during the model initialization.

5. 수온

가. 표층 해수 온도 (SST)

모델에 의해 계산된 월별 표층 해수 온도 (SST)를 살펴보면 Fig. 8과 Fig. 9와 같다. 초기 수온장 (Fig.5-6a)과 비교해 보면, 모델 결과는 극전선(SPF)의 형성을 재현하고 있다. 비록 표층 온도장 (Fig. 5-9)에는 분명한 계절 변화가 나타나지만, 극전선은 41°N 근처에 일년 내내 존재하고 있다. 이 극전선은 상당히 일정한 위치에 있으나 전선의 세기는 겨울철에 강해지며 여름철에 약해진다. 이러한 전선의 형태는 기존의 설명 (Maizuru Mar. Observ. 1997; Chu et al. 2000)과 상당히 비슷하다. 봄철 극전선의 위치는 Isoda and Saitoh (1988)가 추정된 위치와 매우 유사한데, 그들은 1984년 봄철의 NOAA-8 위성에서 얻은 10개 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 영상 자료를 사용하여 극전선의 위치를 추정하였다.

Kim and Yoon (1999)의 모델 결과에 의한 극전선 위치는 관측된 수온장과 비교하여 북쪽으로 약 1° 정도 편향되었는데 (Fig. 5-2 in Kim and Yoon's paper), 극전선역의 수온은 관측값 보다 약 2-3°C 높게 나타났었다. 본 연구의 결과 즉, Fig.5-9를 Kim and Yoon (1999)의 Fig. 5-2을 비교해 보면, 특히 겨울철 수온뿐만 아니라 극전선의 위치 예측도 상당히 향상된 것을 알 수 있다.

울릉 분지의 SST가 야마토 분지의 SST보다 항상 높게 계산되었는데, 이러한 계산 결과는 Kim and Kim's (1999)의 관측 결과와 부합한다. 극전선을 가로지르는 SST의 경사율은 겨울철이 여름철에 비해 2배 크게 나타났다. 여름철에 극전선이 약해지는 것은 극전선의 북쪽 해수가 남쪽 해수에 비해 봄철에 빨리 더워지기 때문이다. 극전선의 북쪽에는 가을에서 겨울로 변하는 시기, 특히 11월과 12월에 다른 전선이 발생한다. 이 전선은 11월에 최대 4°C/100 km 의 SST 경사율을 갖고 있으며 러시아 연안과 평행하게 발달한다.

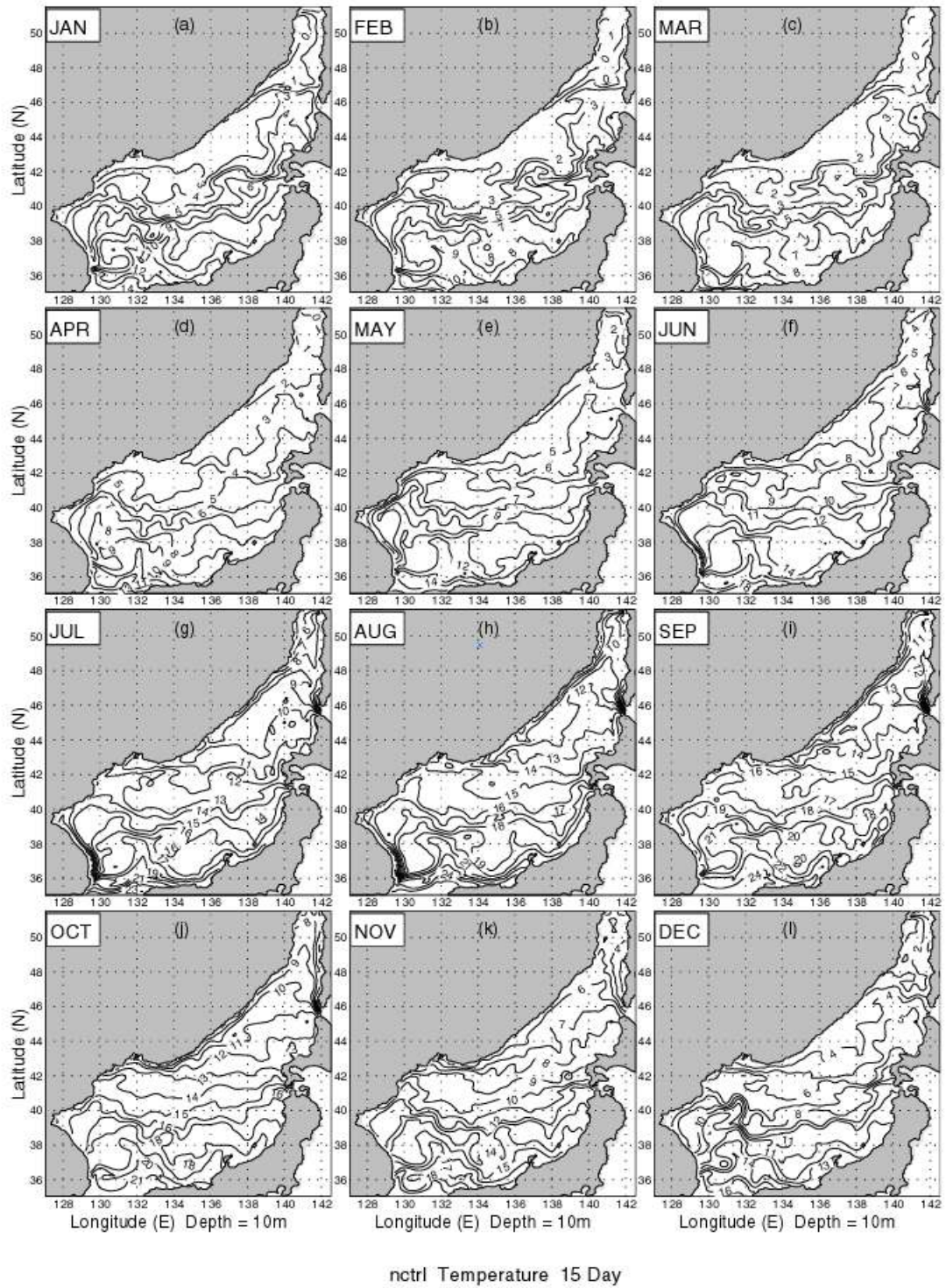


Fig. 5-9 Simulated monthly mean sea surface temperature (°C) field.

나. 동서 단면 (37°, 37.5° and 43°N)

동서 단면 (37°N, 37.5°N and 43°N)에 대한 계산된 월평균 수온 구조를 살펴보면 극전선의 남쪽에 위치한 37°N 동서 단면에서는 강한 계절 수온 약층과 강한 영구 수온 약층 구조가 나타나며 (Fig.5-10a), 극전선의 북쪽에 위치한 43°N 동서 단면에서는 강한 계절 수온 약층과 약한 영구 수온 약층 구조가 나타난다 (Fig.5-10b).

극전선의 남쪽에 위치한 37°N에 대한 동서 단면 결과를 살펴보면 다음과 같다 (Fig.5-10a). 영구 수온 약층은 80-250m에 위치하며 일년 내내 나타난다. 영구 수온 약층(thermocline)의 최대 강도는 ($0.08^{\circ}\text{C m}^{-1}$)로 8월에 나타난다. 영구 수온 약층 위에 계절 수온 약층이 나타나는데, 6월에는 해수면부터 50m 깊이에 이르기까지 ($0.15^{\circ}\text{C m}^{-1}$)의 크기로 나타나고, 여름철에 강화되어 8월에 최대 $0.36^{\circ}\text{C m}^{-1}$ 의 경사율을 보이고 9월에 계절 수온 약층은 약해진다. 10월에는 계절 수온 약층이 붕괴되어 해양 혼합층 (ocean mixed layer, OML)이 발달하기 시작한다. 11월에는 혼합층이 수심 75m (해수 온도 14°C)까지 잘 발달한다. 겨울철 계절풍이 우세한 시기 (12월부터 3월까지)에는 80-100 m까지 혼합층이 깊어진다. 이 때 서쪽의 혼합층 깊이가 더 깊다: 한국 연안 근처의 혼합층 깊이는 50m 정도이며 일본 연안 근처의 혼합층 깊이는 130m에 달한다. 혼합층은 3월에 더워지기 시작하며 혼합층 깊이는 급속히 낮아진다. 혼합층 깊이는 3월에 50-100m에서 감소하여 4월에 10m보다 낮아진다. 혼합층이 더워지고 얕아지는 이러한 과정은 여름철(6월-8월)까지 계속된다. 혼합층이 얕아지는 현상에 대한 모델 결과는 관측 자료에 비해 1달 앞서 나타난다.

극전선의 북쪽에 위치한 43°N에 대한 동서 단면 결과를 살펴보면, 영구 수온 약층은 상당히 약하다 (Fig.5-10b). 계절 수온 약층을 살펴보면, 5월에는 해수면부터 50m 수심에 이르기까지 계절 수온 약층이 발생하며($\sim 0.08^{\circ}\text{C m}^{-1}$), 여름철 동안 강화되어 8월과 9월에 약 ($0.5^{\circ}\text{C m}^{-1}$)의 최대값을 보이고, 10월에는 약해진다. 11월에는 계절 수온 약층이 붕괴되며 겨울철 계절풍이 우세할 시기에 약화되는 영구 수온 약층의 일부가 된다. 2월에는 영구 수온 약층이 매우 약해져 136°E 서쪽의 수괴는 균일한 차가운 해수 (1°C)가 되며, 136°E 동쪽의 수괴는 약하게 성층된다 ($=0.01^{\circ}\text{C m}^{-1}$).

그림 5-10c에는 극전선의 남쪽에 위치한 울릉도($37.5^{\circ}\text{N}, 130.9^{\circ}\text{E}$)를 경유한 동서 단면의 월평균 수온구조를 해수면으로부터 수심 200m에 이르기 까지 확대하여 나타내었다.

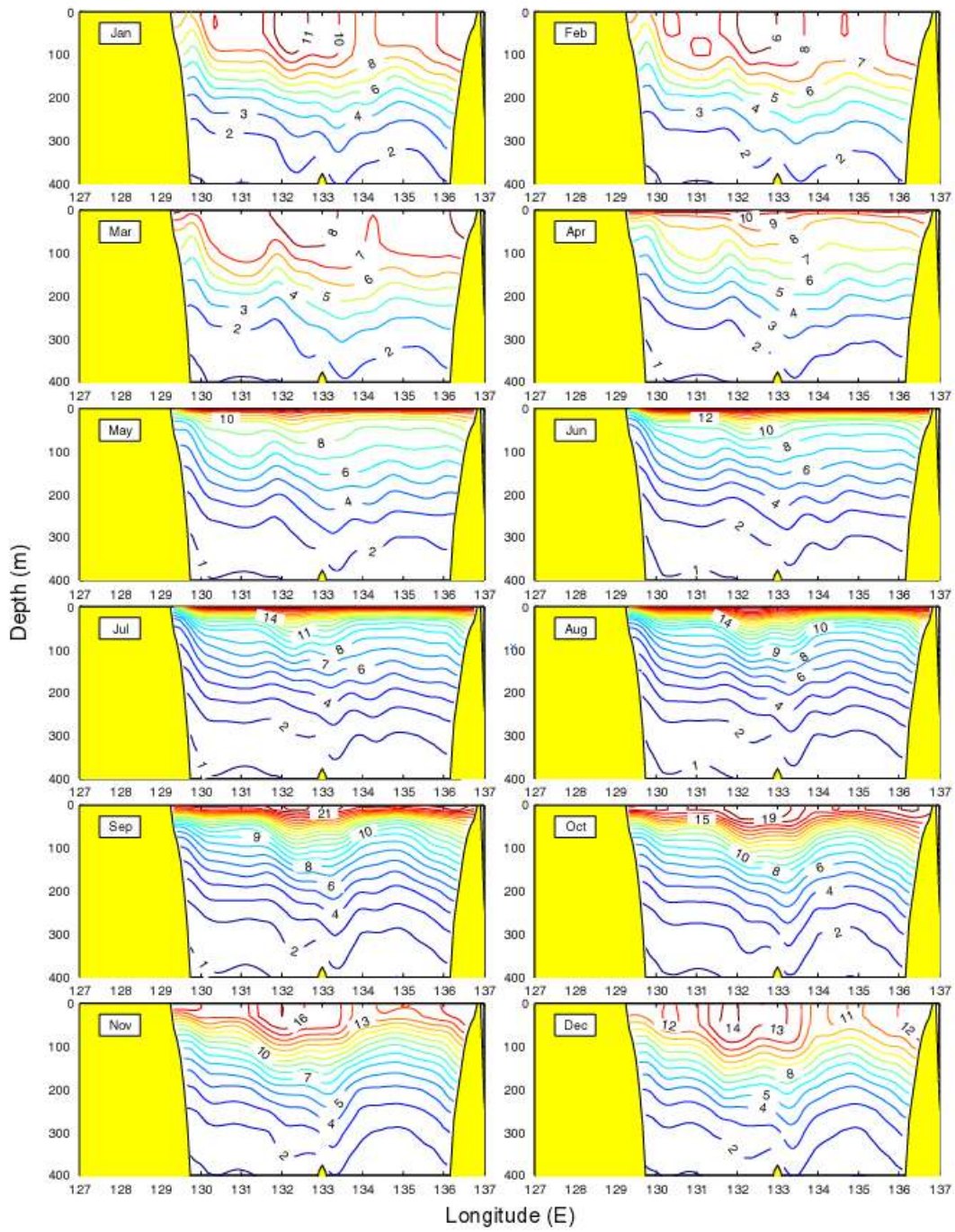


Fig. 5–10a Simulated zonal cross–section of the monthly mean temperature ($^{\circ}\text{C}$):
 (a) 37°N , (b) 43°N and (c) 37.5°N .

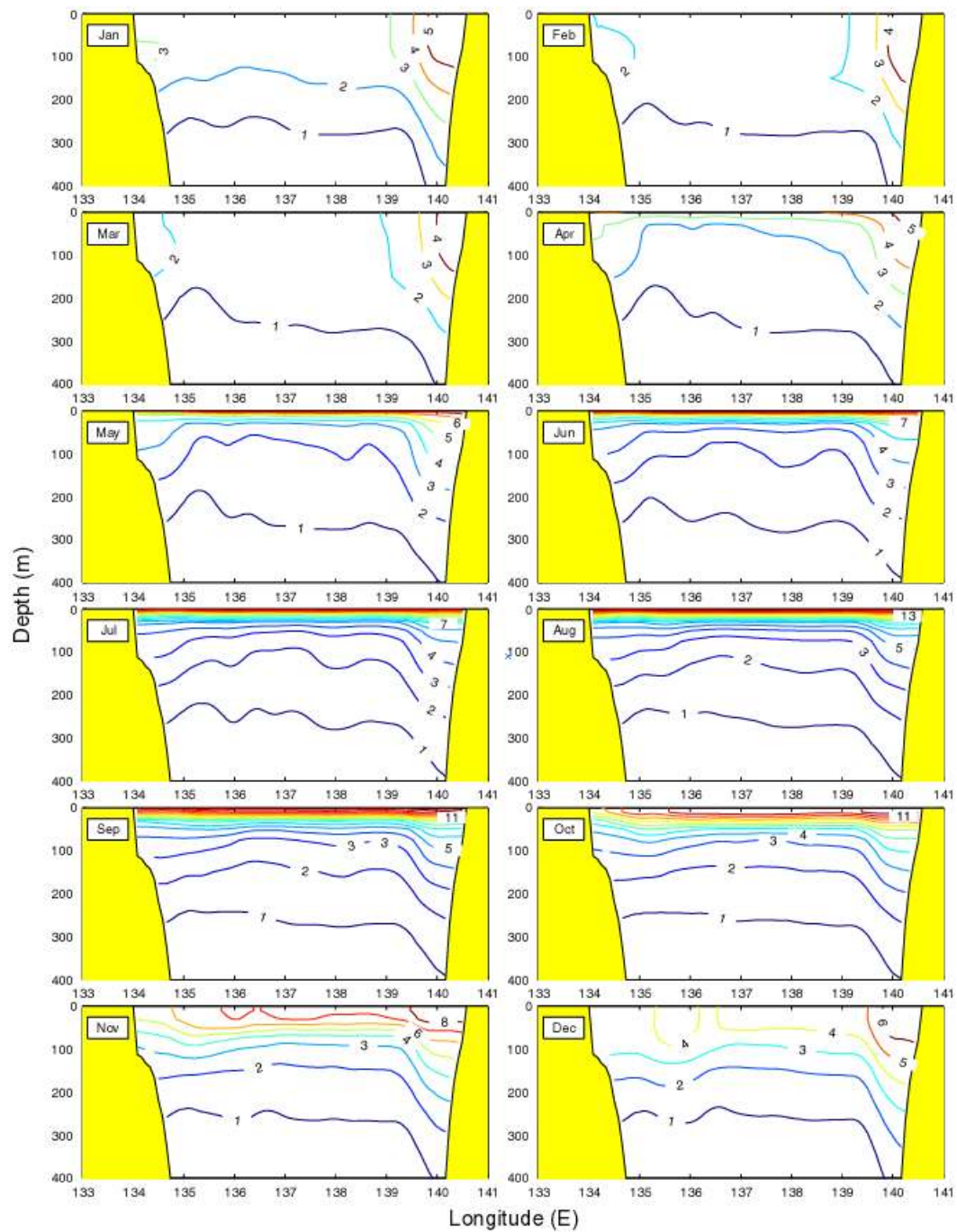


Fig. 5–10b Simulated zonal cross–section of the monthly mean temperature (°C):
 (a) 37°N, (b) 43°N and (c) 37.5°N.

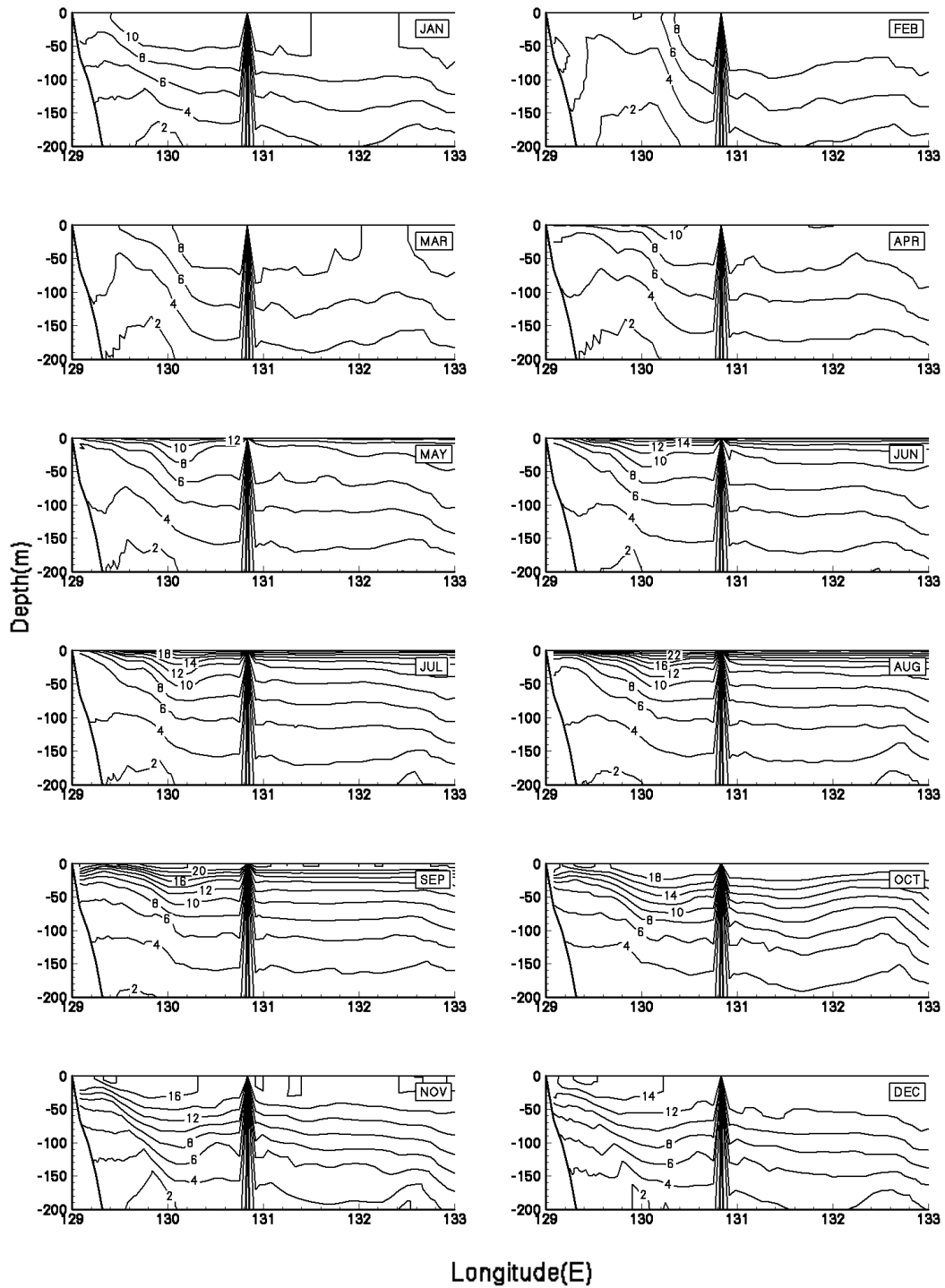


Fig. 5-10c Simulated zonal cross-section of the monthly mean temperature (°C):
 (a) 37°N, (b) 43°N and (c) 37.5°N.

다. 남북 단면 (Latitudinal Cross-Section at 135°E and 130.9°E)

극전선의 남북 방향 단면을 따라 수온의 비대칭성이 강하게 나타나는 현상은 135°E 남북 단면의 월평균 수온 구조에서도 볼 수 있다 (Fig.5-11a). 극전선의 북쪽에서는 계절 수온 약층이 4월과 5월에 표층에서 발생하며, 여름철에 급격히 강화되어 10월에 이르기까지 $0.12^{\circ}\text{C m}^{-1}$ 의 강한 연직 수온 경사를 보이고 있다. 그러나 11월에는 계절 수온 약층은 급격히 약화된다. 극전선의 남쪽에서는 계절 수온 약층이 여름철에 발달하나 초가을에 약화되고 11월에는 계절 수온 약층이 사라진다.

겨울 계절풍이 우세한 시기 동안(12월에서 3월까지), 계산된 영구 수온 약층은 극전선의 남쪽에서는 100-300 m 수심까지 분명하게 나타나나, 수온의 연직경사율은 12월에 약 ($0.05^{\circ}\text{C m}^{-1}$)에서 3월에는 약 ($0.025^{\circ}\text{C m}^{-1}$)로 약화된다. 그러나 극전선의 북쪽에 대한 영구 수온 약층은 남쪽에 비해 매우 약하게 계산되었는데, 1월부터 3월까지의 영구 수온 약층이 형성되는지 불분명하게 나타났다.

기후 관측 자료를 분석한 결과에 따르면 Seung and Yoon (1995)은 겨울철에 블라디보스톡 근처에서 1000m 수심에 이르기까지 겨울철 대류가 일어나는 것을 발견하였다. Kim and Yoon (1999)의 결과와 마찬가지로 본 연구에서도 겨울철에 40°N 이북에서는 겨울철 대류가 진행되는 것을 볼 수 있다 (Fig. 5-11a).

여름철(6월-8월)에는 계절 수온 약층이 상당히 얇아지며, 극전선 북쪽의 계절 수온 약층 강도가 극전선 남쪽의 강도보다 상당히 크다. 극전선 북쪽에서는 계절 수온 약층이 상대적으로 균질의 해수 위에 존재하며, 남쪽에서는 성층된 해수 (영구 수온 약층) 위에 계절 수온 약층이 존재한다. 극전선 북쪽의 계절 수온 약층은 표층 (50m 수심까지)에 나타나는데, 수온 연직 경사는 6월에 $0.25^{\circ}\text{C m}^{-1}$ 에서 8월에 $0.36^{\circ}\text{C m}^{-1}$ 로 강화된다. 이러한 (표층의) 강한 수온 연직 경사는 대기 강제력으로부터 수온 약층 밑에 있는 해수를 고립시키며, 이러한 과정은 극전선 북쪽의 수온 약층 밑에 있는 해수를 균일하게 만든다. 극전선 남쪽의 계절 수온 약층은 약간 깊게 분포하며 (25 - 100m 수심까지), 수온의 연직 경사는 약 $0.13^{\circ}\text{C m}^{-1}$ 로 약하다. 이러한 남북 단면에 대한 수온 약층의 비대칭성은 Kim and Kim (1999)과 Chu 등 (2000)에 의해 제시되었었는데, Kim and Kim은 주로 1995년 6월 CREAMS (Circulation Research of the East Asian Marginal Seas) 자료를 사용하였고, Chu 등은 GDEM 자료를 사용하였다.

Fig. 5-11b에는 울릉도(37.5°N, 130.9°E)를 경유한 남북 단면의 월평균 수온구조를 해수면으로부터 수심 200m에 이르기 까지 확대하여 나타내었다.

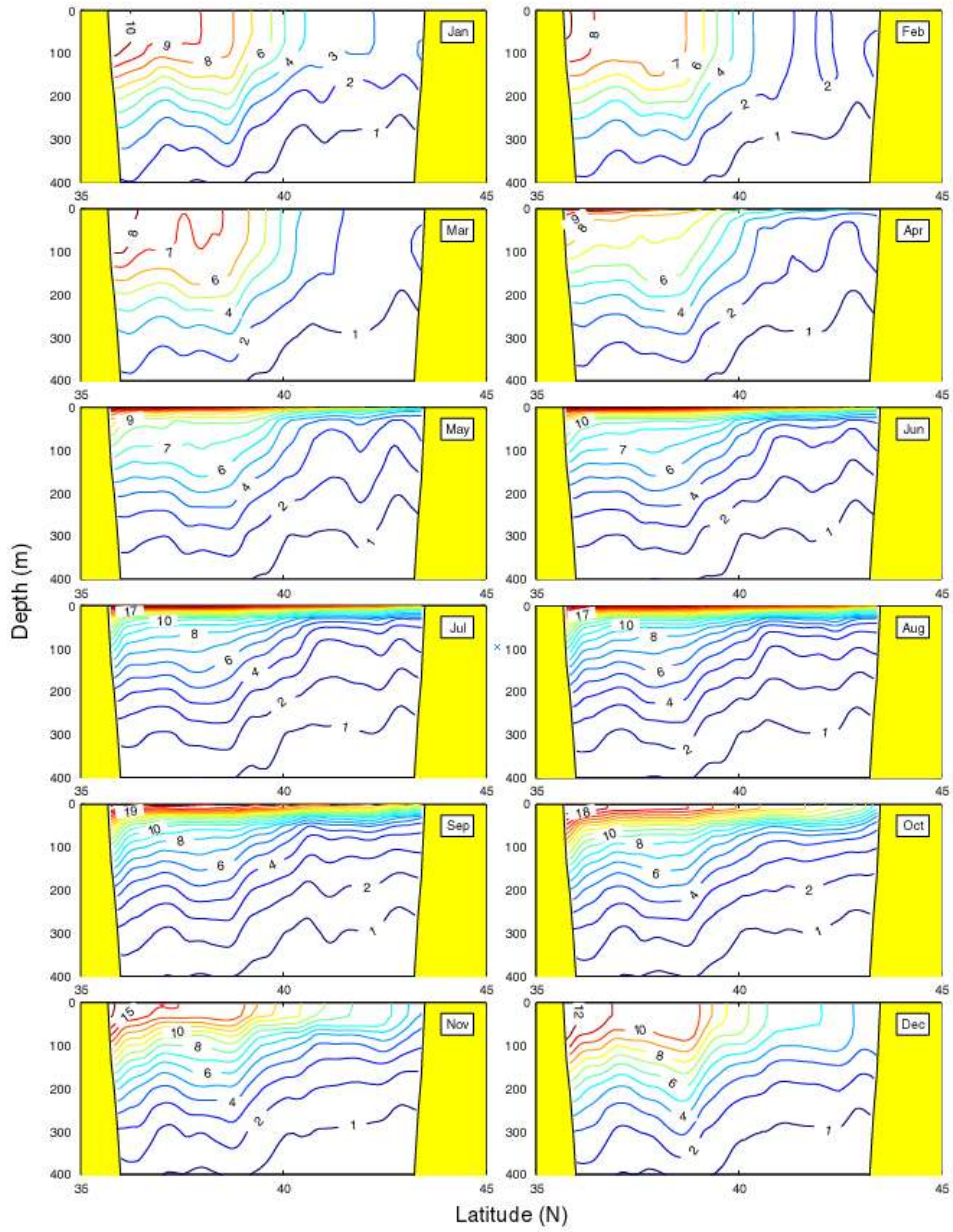


Fig. 5-11a Simulated meridional cross-section of the monthly mean temperature ($^{\circ}\text{C}$) along 135°E .

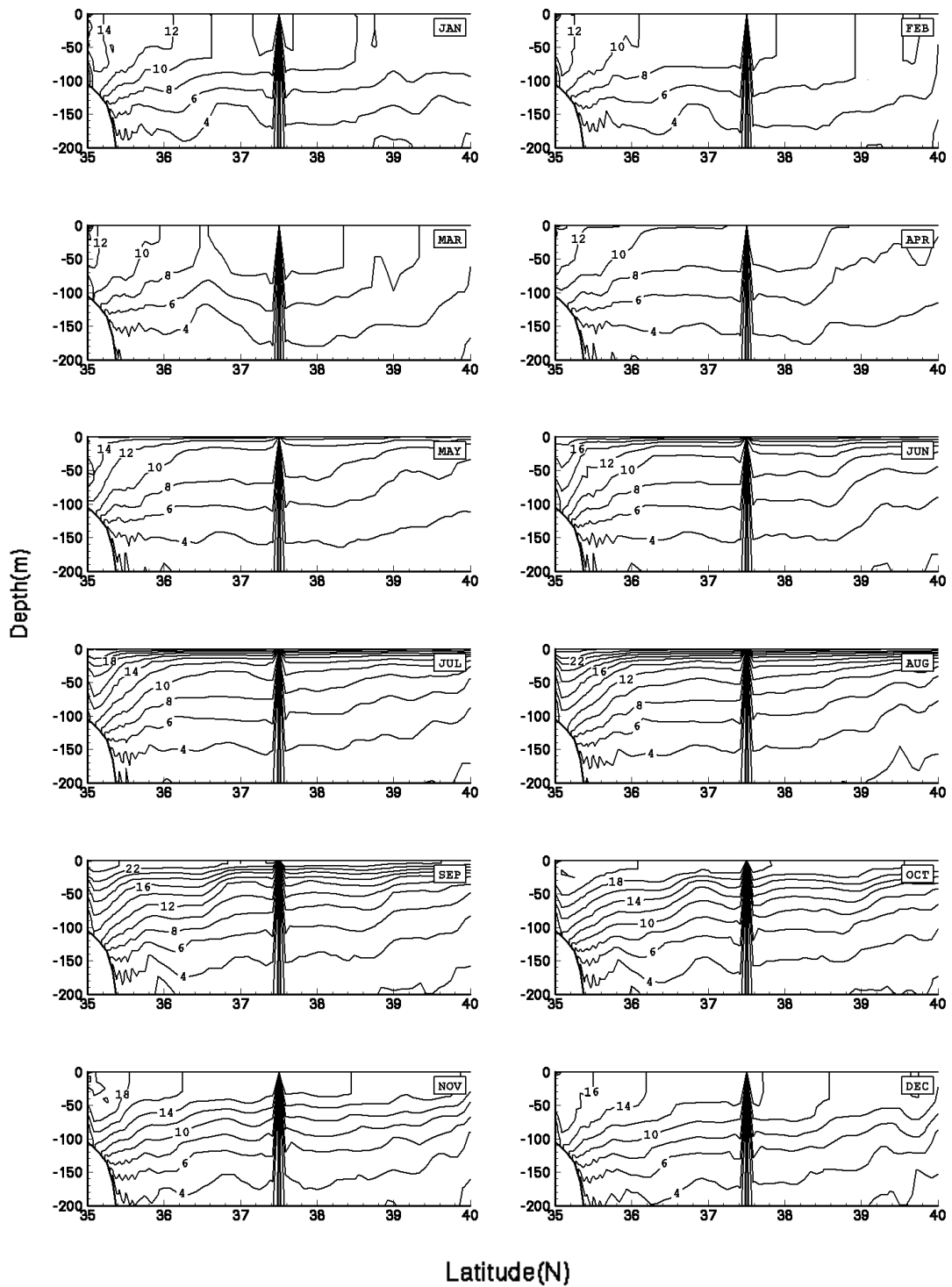


Fig. 5-11b Simulated meridional cross-section of the monthly mean temperature (°C) along 130.9°E.

6. 염분

가. 표층

계산된 월평균 표층 염분(sea surface salinity, SSS)을 살펴보면 Fig.5-12와 같다. 대륙붕 연안 지역을 따라 저염수가 나타나며, 강한 계절 변화를 보인다. 염분의 공간 변화는 겨울철에 작고 여름철에 크다. 고염의 쿠로시오가 대한해협을 통해 동해로 유입함에 따라 2개의 고염 중심이 영구적으로 형성된다. 하나는 일본 분지의 북쪽 (호카이도 섬 서쪽)에 위치하며 34.0 psu 이상의 염분을 보이고 있다. 다른 하나는 울릉 분지와 야마토 분지 사이에 있는 곳에 위치하며 최대 염분도는 8월과 9월에 나타나며 34.3 psu 이다. 일본 분지 북쪽의 고염 중심은 울릉분지/야마토분지의 고염 중심보다 계절에 따른 염분 변화가 작다. 계산된 겨울(12월) 염분장(Fig. 5-12)은 1930부터 1990년까지의 JODC (Japan Oceanographic Data Center) 자료를 사용한 Kim and Kim (1999, Fig. 5-9 in Kim and Kim's paper)의 결과와 부합한다.

나. 동서 단면 (37°, 37.5° and 43°N)

동서 단면 (37°N and 43°N)에 대한 계산된 월평균 표층 염분 구조를 살펴보면, 극전선 남쪽에 대한 단면(Fig.5-13a)에서는 염분 최소층 (37° and 43°N)이 분명하게 나타난 반면 극전선 북쪽에 대한 단면(Fig. 5-13b)에는 염분 최소층이 나타나지 않았다. 134°E 동쪽 수심 약 200m에는 약 34.08 psu 염분도를 갖는 해수가 있는데, 이 해수 위에는 대마난류의 특성을 갖는 보다 고염인 해수가 표층에 존재한다. 고위도에 위치한 전 수심에 걸친 저염수 (Fig. 5-13b)는 대마난류 밑으로 남하하는 전형적인 연안수로서 염분 최소층을 형성한다 (Kim and Kim, 1999; Kim and Yoon, 1999). 이러한 결과는 다음과 같은 기존의 연구 결과와 일치한다: Miyazaki (1952, 1953), Miyasaki and Abe (1960), Kim and Chung (1984), Senju (1999), and Chu et al. (2000).

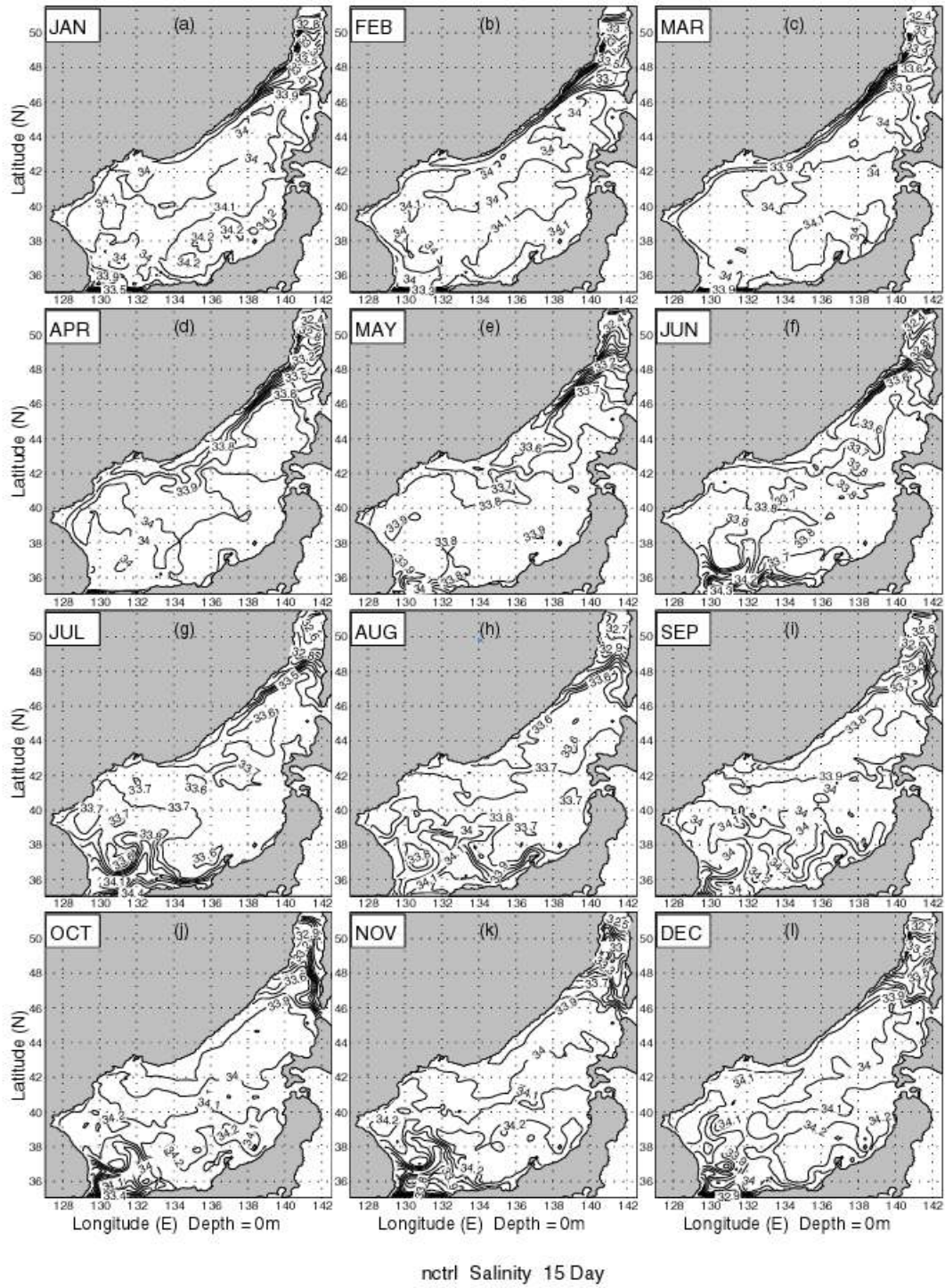


Fig. 5-12 Simulated monthly mean sea surface salinity (psu) field.

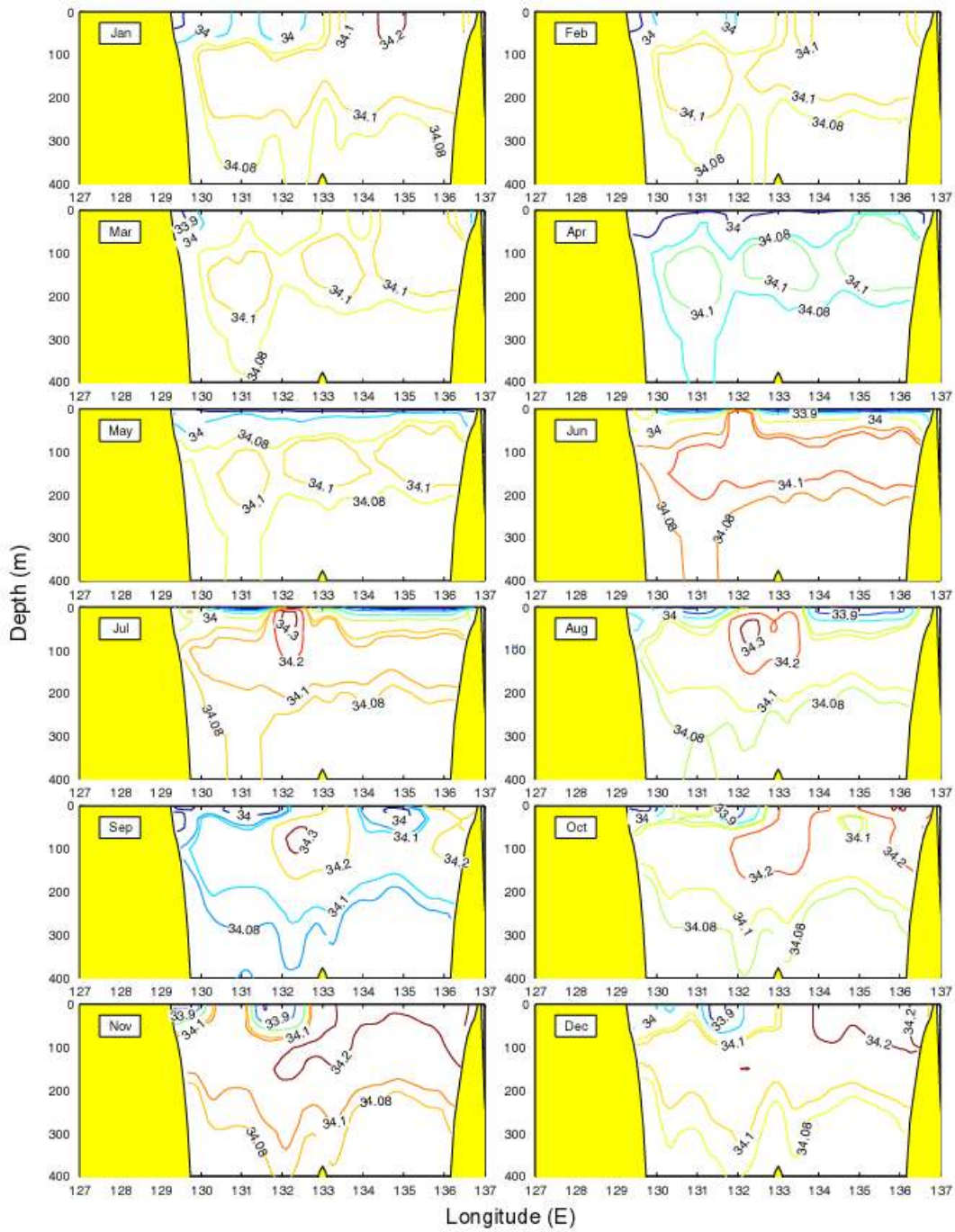


Fig. 5-13a Simulated zonal cross-section of the monthly mean salinity (psu): (a) 37°N, (b) 43°N and (c) 37.5°N.

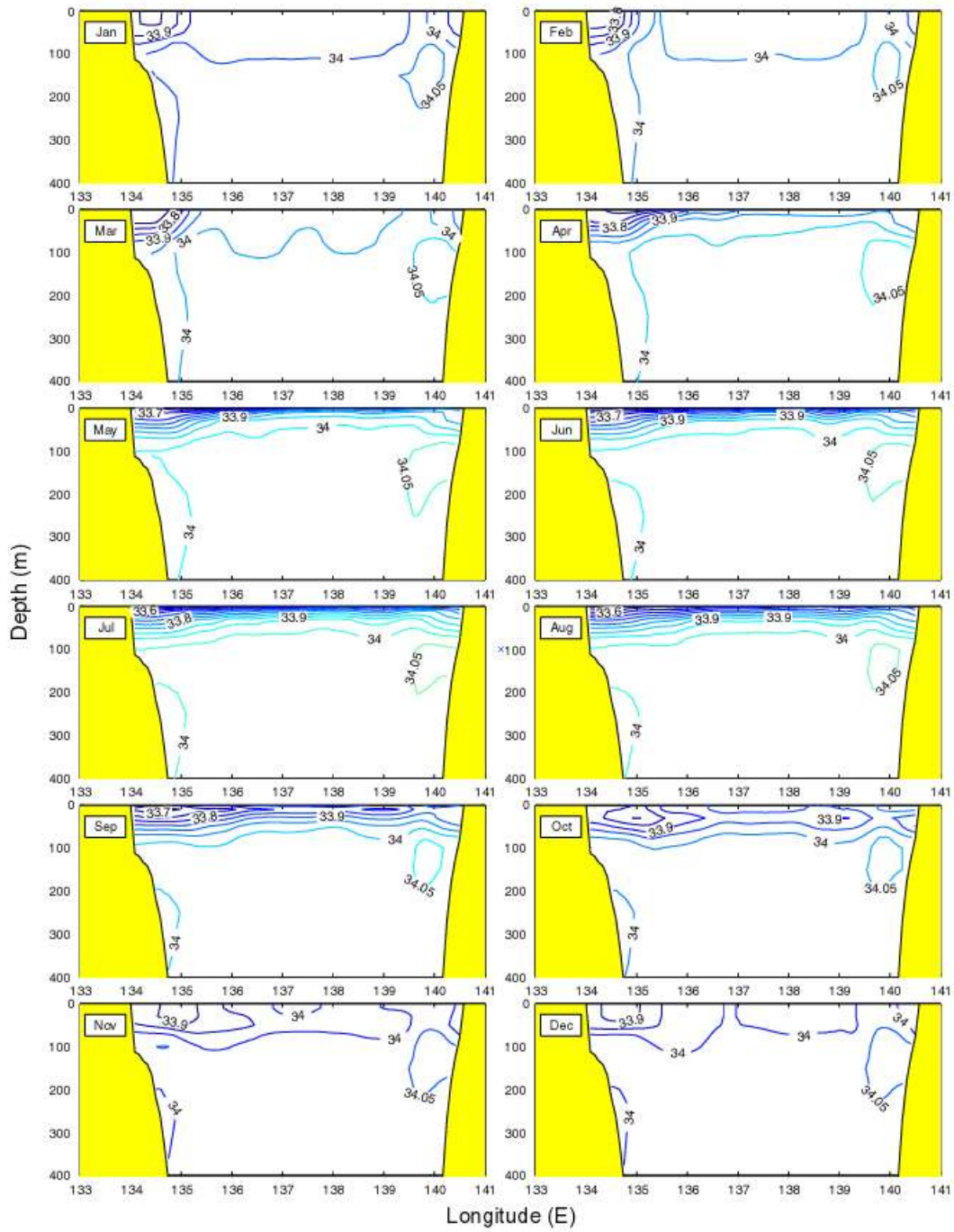


Fig. 5-13b Simulated zonal cross-section of the monthly mean salinity (psu): (a) 37°N, (b) 43°N and (c) 37.5°N.

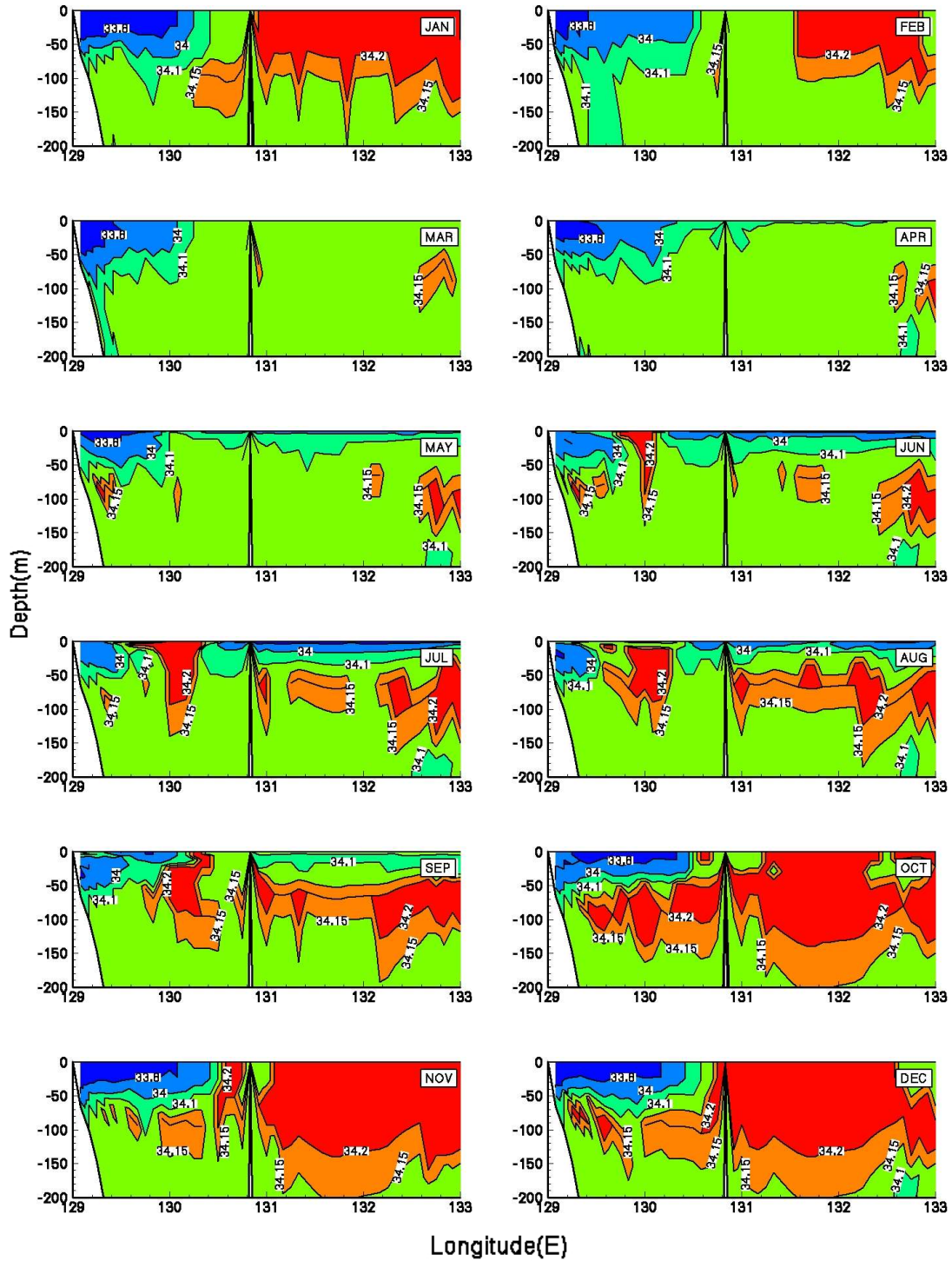


Fig. 5-13c Simulated zonal cross-section of the monthly mean salinity (psu): (a) 37°N, (b) 43°N and (c) 37.5°N.

극전선 남쪽에 위치한 37°N 동서 단면에 대한 월평균 염분 구조를 근거로 계절 염분 약층 (halocline)을 살펴보면 (Fig.5-13a), 6월에는 표층부터 30m 수심에 이르기까지 강한 계절 염분 약층이 나타나고, 여름철에 강화되어 8월에 약 0.02 psu m⁻¹의 최대값을 갖으며, 9월부터 12월까지는 약화되며, 1월에는 계절 염분 약층이 붕괴되어 사라진다. 수심 200-300m에 있는 염분 최소층 위에 수평적으로 염분 최대층 (S > 34.1 psu)이 나타나는데, 이 염분 최대 수괴는 주로 34.1 psu 등염선으로 둘러싸인 여러 고염수로 나뉜다.

극전선 북쪽에 위치한 43°N 동서 단면에 대한 월평균 염분 구조를 살펴보면 (Fig. 5-13b), 염분 최소층은 연중 일본분지 서쪽 (136°E 서쪽)의 상층(100m 이상)에 나타난다. 이러한 결과는 Kim and Kim's (1999)이 규명한 동해 중층수 (East Sea Intermediate Water, ESIW - 일본분지 서쪽에 있는 (S < 34.00)인 저염수)와 일치한다. 일본분지 동쪽(139°-140°E)에는 (S > 34.05 psu)인 고염 중층수 (High Salinity Intermediate Water, HSIW)가 나타난다. 일본 분지에는 봄철(3월-5월)을 제외하고 일년 내내 염분 최대가 나타난다.

그림 5-13c에는 울릉도(37.5°N, 130.9°E)를 경유한 동서 단면의 월평균 염분 구조를 해수면으로부터 수심 200m에 이르기 까지 확대하여 나타내었다.

다. 남북 단면 (Latitudinal Cross-Section at 135°E and 130.9°E)

극전선의 남북 방향 단면을 따라 염분의 비대칭성이 강하게 나타나는 현상은 135°E 남북 단면의 월평균 염분 구조에서도 볼 수 있다 : 극전선 남쪽 (북쪽)에 염분 최소층이 나타난다 (사라진다) (Fig.5-14a).

7월과 10월 사이 고위도의 저염수가 표층으로부터 200-300m 중층까지 침투하여 혀모양으로 분포한 고염의 대마 난류수 밑에 놓인다. (S = 34.3 psu)의 염분핵을 갖는 염분 최대는 일본 기상청 (Japan Meteorological Agency) 이 동해 전역에 대한 해양 조사를 하는 과정에서 1969년 10월에 관측된 바 있다 (Kim and Kim, 1999). 염분 최소층과 염분 최대층의 경계는 100~200 m 수심에 위치한다. 겨울철에는 염분 최소층이 뚜렷하게 보이지는 않는다.

그림 5-14b에는 울릉도(37.5°N, 130.9°E)를 경유한 남북 단면의 월평균 염분 구조를 해수면으로부터 수심 200m에 이르기 까지 확대하여 나타내었다.

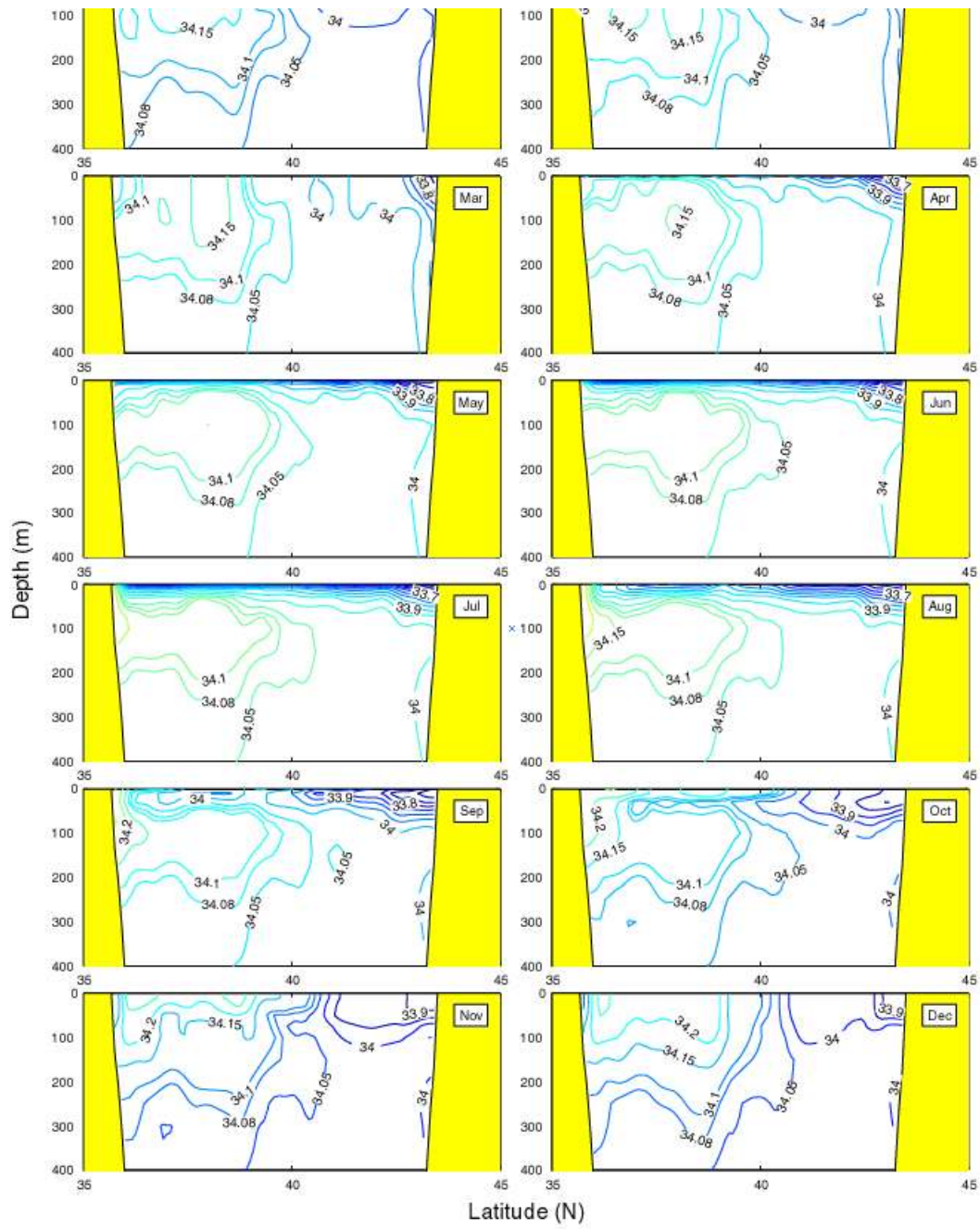


Fig. 5-14a Simulated meridional cross-section of the monthly mean salinity (psu) along 135°E.

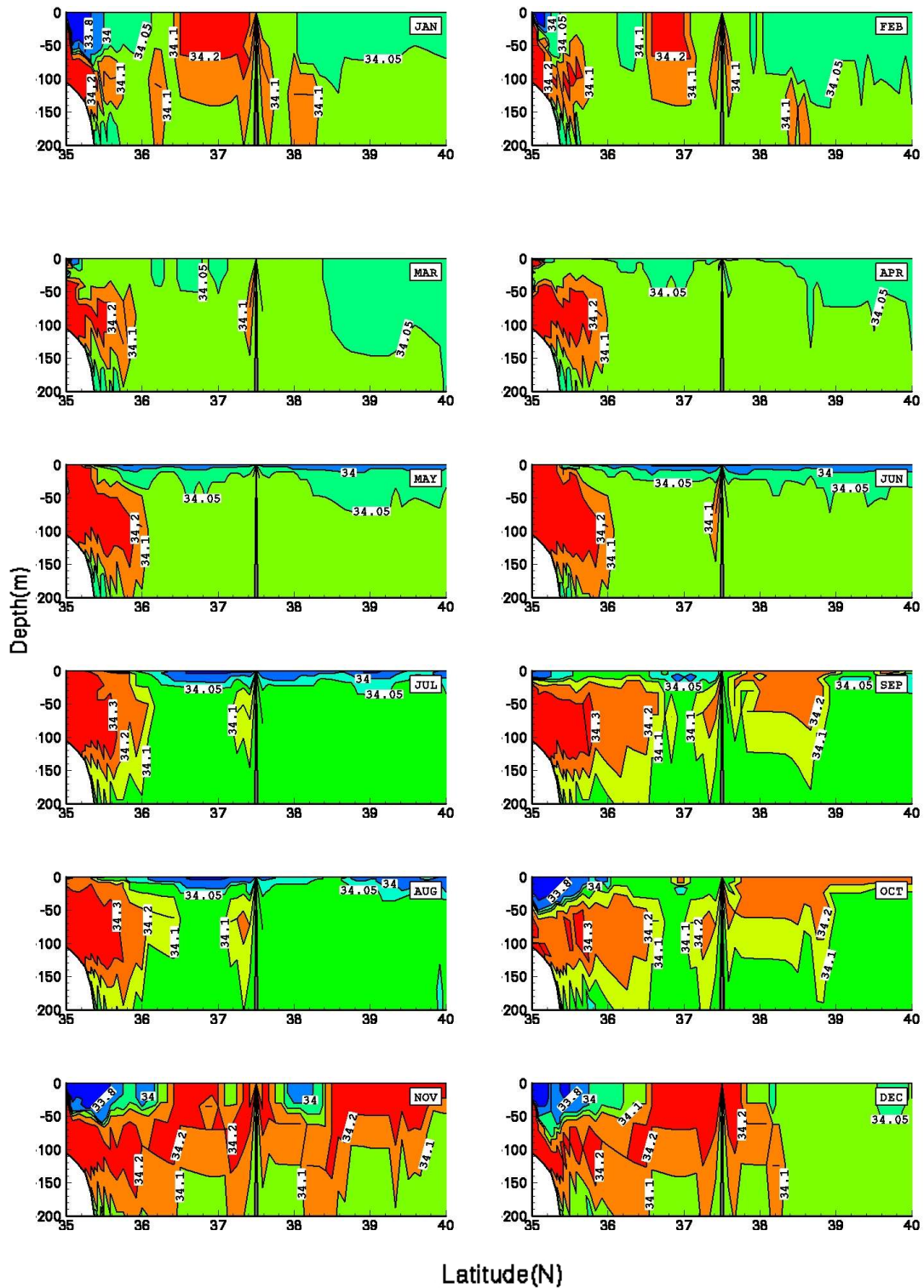


Fig. 5–14b Simulated meridional cross–section of the monthly mean salinity (psu) along 130.9°E.

7. 순환

가. 개요

계산된 표층해류 분포 (Fig.5-15)는 2 절에서 기술한 이전 연구 결과와 일치한다. 대마난류는 대한해협에서 동수도, 서수도로 2 분지 한다. 서수도를 따른 흐름 (동한 난류)은 한국연안을 따라 흐른 후 38°N 부근에서 2 분지 한다. 동쪽 분지는 극전선을 따라 일본 서안을 따라 흐르고, 서쪽 분지는 북쪽으로 흐른 후 울릉 분지 남쪽에서 반시계방향 와동을 형성한다. 리만 한류는 러시아 연안을 따라 저온 저염의 해수를 이동시키고 북한 연안에서 북한한류가 된다. 북한한류는 38°N 부근에서 동한 난류와 만난다. 북한 한류와 동한 난류는 이안한 후 합쳐져서 동해 전체를 가로지르는 동서방향의 강한 전선을 형성한다. 일본분지에 존재하는 대규모 반시계방향 재순환은 계절 변화가 크게 나타난다. 이 순환은 봄과 여름에 약화되어 북쪽으로 후퇴한다. 가을에는 이 순환이 사라지며 몇 주 후에 시계 방향 와동이 나타난다. 본 연구에서 계산한 표층해류 분포는 이전 연구 결과 (Seung and Yoon, 1995)와 잘 일치한다.

Shin 등 (1995)의 관측 결과에 의하면 38°N 부근 한국 연안에 160km 크기의 시계 방향 난수 와동이 지속적으로 존재한다.

나. 리만 한류

리만 한류는 러시아 연안을 따라 남서쪽으로 흐르는 해류이다. 리만 해류는 블라디보스톡 부근에서 2 분지 한다. 서쪽 분지는 러시아-한국 연안을 따라 흘러 북한한류가 된다. 동쪽 분지는 남동쪽으로 흐른 후 41.5°N에서 동진하여 일본 분지 소용돌이의 남쪽 부분을 이룬다. 이 해류는 계절 변화가 크며 그 세기가 겨울에 최대, 여름에 최소가 된다 (Fig.5-15).

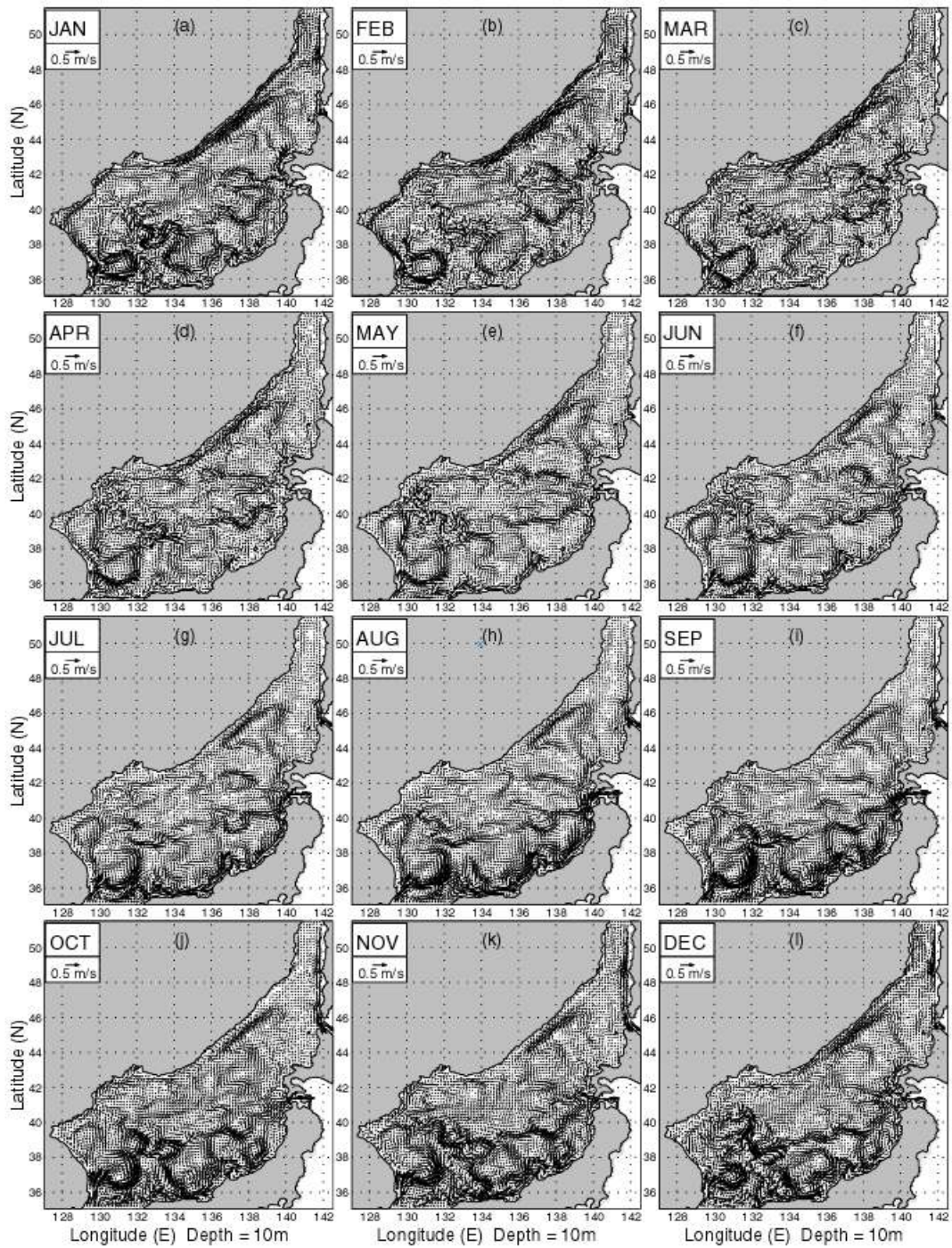


Fig. 5-15 Simulated monthly mean surface velocity vector field.

46°N 단면도 상의 남북 방향 유속은 리만 해류의 계절 및 공간 변화를 잘 보여 준다. 겨울철 표층 부근에서 남향 유속이 최대 (0.21 m/s)가 되고 (Fig. 5-16a) 폭은 100 km, 깊이는 1500 m이다. 리만 해류의 중심축은 연안과 표층에 가깝다. 유속은 봄에 0.18 m/s로 약해지지만 (Fig.5-16b), 폭과 깊이는 거의 변하지 않는다. 여름과 가을에 더 약하게 되어 최소 (0.08 m/s)가 된다 (Fig.5-16a, Fig.5-16d). 봄철 리만 해류는 (Fig.5-16b) CTD 자료를 이용해서 해저면을 기준으로 계산한 지형류 (Riser et al. 1999)와 정량적으로 일치한다. 또한 리만 해류 아래에 대륙붕에는 매우 약한 (0.01-0.04 m/s) 북향의 반류가 존재하며, 그 폭은 30 km이며 100에서 250m 사이에 분포한다.

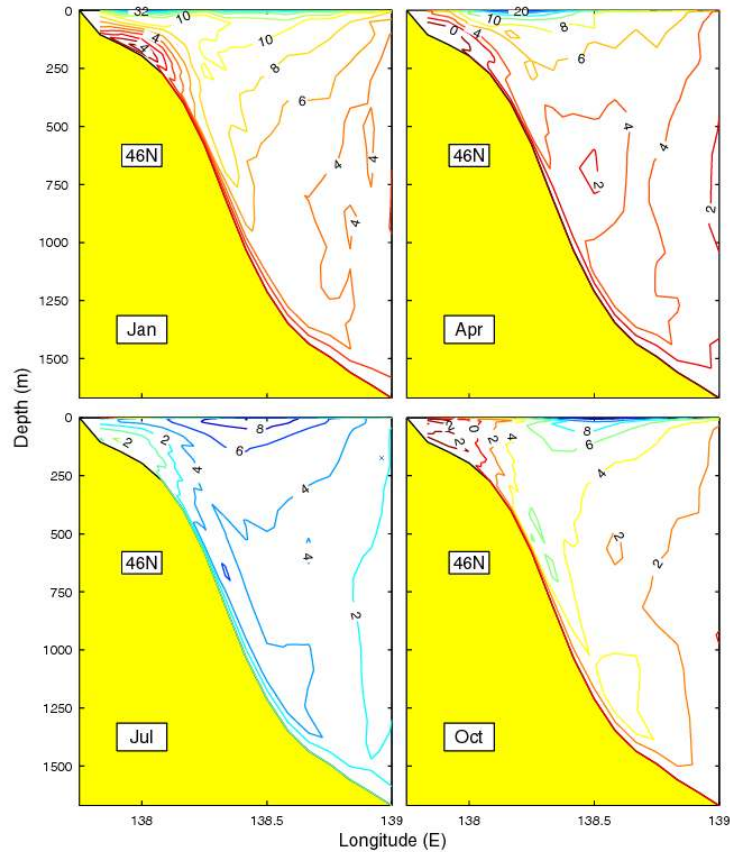


Fig. 5-16 Simulated monthly mean meridional velocity (cm s^{-1} , +ve northward) along 46°N.

다. 북한한류

북한 한류는 리만 한류와 연결되어 있으며 한국 연안을 따라 남쪽으로 흐른다. 계절 변화를 더 명확히 보이기 위해 동해 남서쪽 (127°- 133°E, 35°- 42°N)에서 매 2주마다 해류 벡터를 Fig. 5-17에 나타냈다. 북한 한류가 겨울에는 분명히 보이며 여름에는 약하다.

40°N에서 남북방향 유속의 동서 단면도는 북한한류의 계절 및 공간 변화를 잘 보여준다. 북한 한류는 대륙붕을 따라 흐르며 겨울과 봄에 최대 남향 유속 (0.1 m/s)를 나타낸다. 중심축은 대륙붕과(shelf break)에 가까우며 폭이 100km이고 깊이가 1500m이다 (Fig. 5-18a). 북한 한류는 여름과 가을에 약화된다 (Fig. 5-18c, Fig. 5-18d).

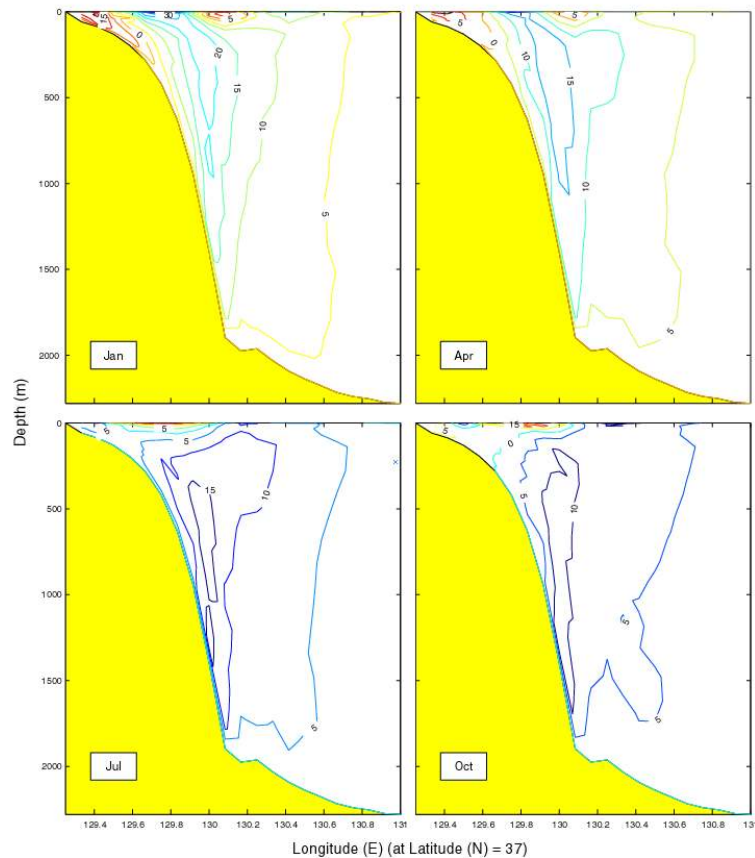


Fig. 5-17 Simulated bi-weekly surface velocity vector field in the Ulleung/Tsushima Basin.

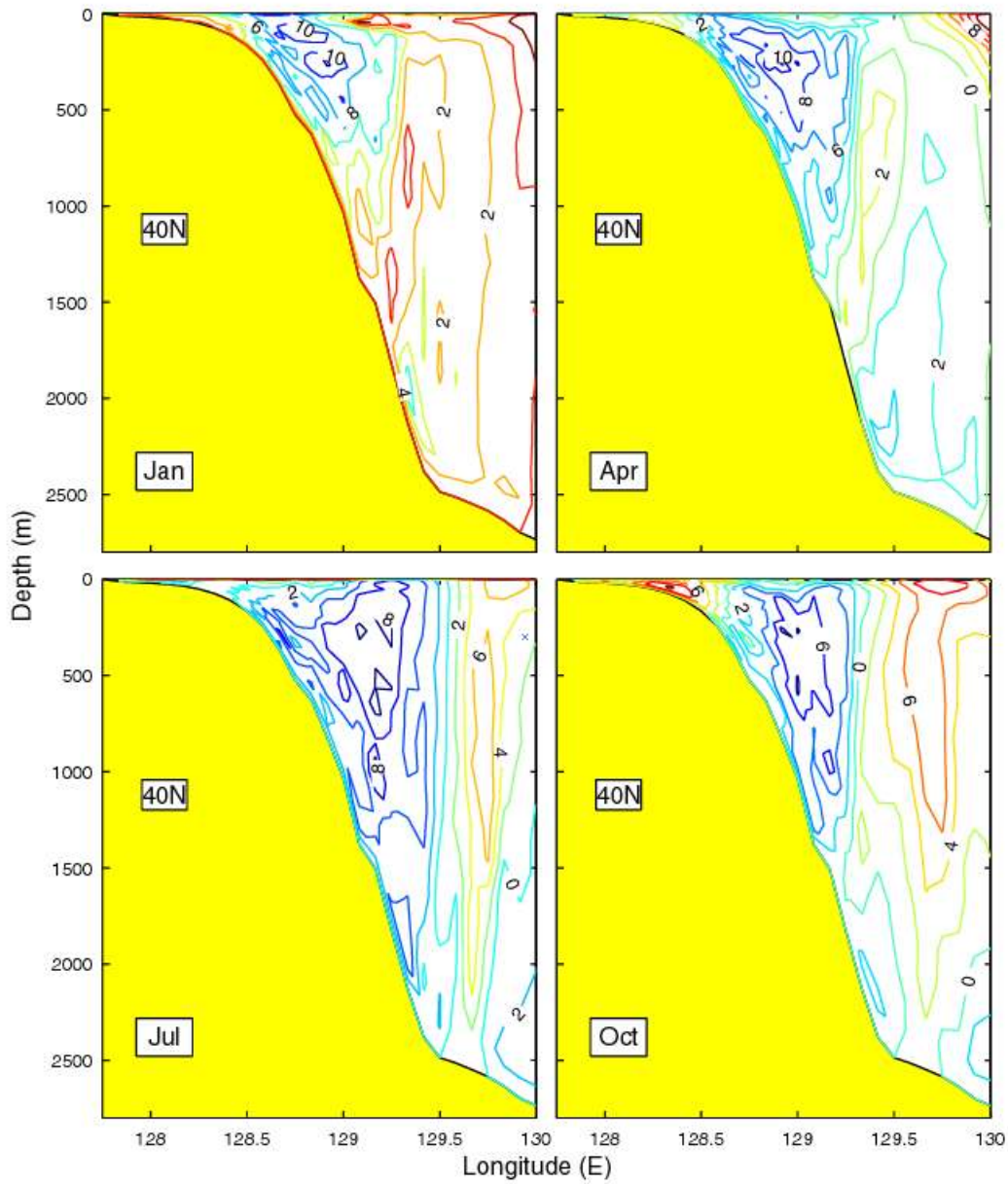


Fig. 5-18 Simulated monthly mean meridional velocity (cm s^{-1}) along 40°N .

라. 대마 난류의 분기

대마 난류는 대한해협을 동수도와 서수도를 통해 동해로 유입된다. 매 2주마다 나타낸 10 m 깊이의 해류 벡터 (Fig. 5-17)는 분기하는 분포를 보인다. 동수도를 통해 유입된 해수는 일본 연안을 따라 흘러 제 1분지를 이룬다. 서수도를 통과한

해류는 동한 난류가 되며 한국 연안을 따라 흘러 37°N에서 동쪽과 북쪽 분지로 분기한다 (제 1 분기). 첫 분기 후, 동쪽 분지는 동쪽으로 흘러 132°E에서 다시 동쪽 및 북쪽 분지로 분기한다 (제 2 분기). 두 번째 분기 후 동쪽 분지는 동쪽으로 흘러 제 2분지가 된다. 두 번째 분기 후 북쪽 분지는 북향하여 38°N 부근에서 36°N-38°N, 130°E-132°E에 존재하는 반시계 방향 와동의 북쪽 부분을 이룬다.

대한해협 북쪽의 계산된 4개 주요 해류 (동한 난류, 북한 한류, 제 1 분지, 제 2분지)를 따라 사행과 와동이 나타난다. 예를 들면, 울릉 분지 남쪽 (130°-132°E, 36°-38°N)에 명확한 반시계 방향 와동과 그 북쪽 및 북동쪽에 몇 개의 반시계 및 시계방향 와동이 존재한다. 울릉 분지 남쪽의 반시계 방향 와동은 겨울에 뚜렷한 특징을 보이는 반면에 서향하는 북서쪽 부분은 여름동안 약화되는데 이것은 동한 난류가 동해 내부쪽으로 강하게 흘러감을 나타낸다. 울릉 분지 남쪽의 반시계 방향 와동은 관측 결과 (Katoh 1994; Shin 등 1995)와도 잘 일치한다.

마. 일본 연안을 따른 2개의 분지

일본 연안을 따르는 대마난류는 많은 사행과 와동과 연관되어 변동이 크다 (Fig.5-15). Hase 등 (1999)은 1995년에서 1998년 사이에 매년 초여름에 관측한 ADCP, CTP 자료와 100 m 수온 분포와 표층 부이 궤적을 이용하여 일본연안을 따라 흐르는 2개의 주요 분지를 발견했다.

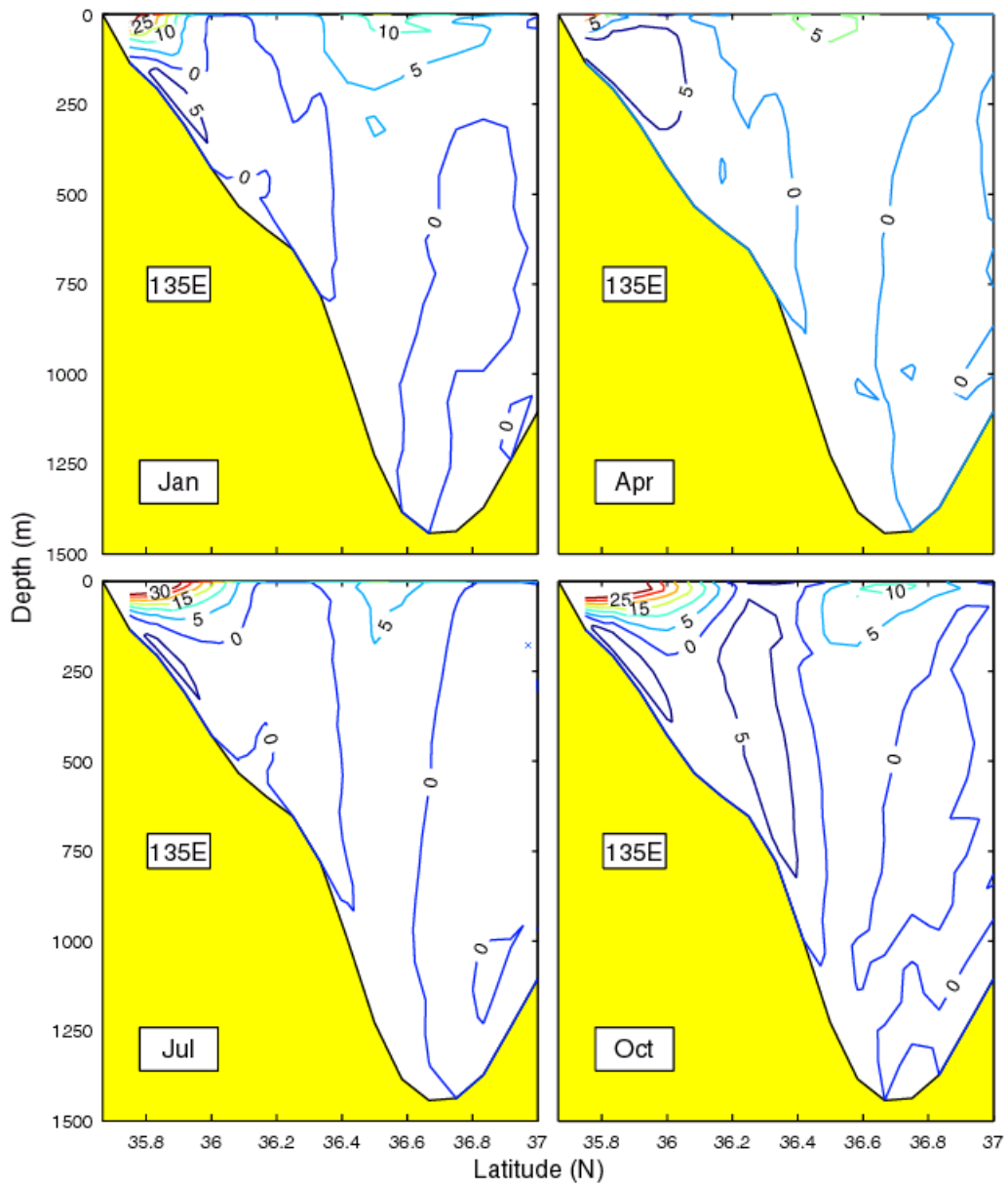


Fig. 5-19 Simulated monthly mean zonal velocity (cm s^{-1} , +ve eastward) along 135°E .

이 2개의 대마난류 분지도 모델에서 재현되었다 (Fig. 5-15). 135°E 를 따른 동서방향 유속 단면도에서 이 분지의 특징이 좀 더 명확히 보인다 (Fig. 5-19). 제 1 분지는 연중 존재한다. 대한해협 동수도에서 시작하여 일본연안을 따라 흐르고 쓰

가루 해협을 통해 빠져나간다. (Fig. 5-15). Fig. 5-19는 제 1분지가 연중 존재하며 200 m 보다 얕은 등수심선을 따라 흐르며, 여름과 가을에 최대 (0.3 m/s)의 유속과 공간 분포(깊이 0-200m, 폭 50 km)를 보이며, 봄에 최소 (0.1 m/s)의 유속과 공간 분포 (깊이 0-50 m, 폭 20 km)가 됨을 보여준다. 대한해협 서수도를 통과한 해류는 제 2 분지에 합쳐지며 오키 섬의 서쪽에 있는 제 1 분지보다 약하다 (Fig. 5-18). 계산된 제 1분지도 관측에서와 마찬가지로 연중 존재하며 대륙붕과를 따라 흐르고 가을과 겨울에 최대 (0.1 m/s), 봄과 여름에 최소가 된다 (0.05 m/s). 계산된 대마난류 분지는 최근의 관측 연구 (Hase 등 1999)와 정성적으로 일치한다. 또한 제 1분지 아래에 0.05 m/s 크기의 서향 반류도 재현되었으며, 이는 Seung (1995)의 관측 결과와도 일치한다 (Fig. 5-19).

바. 동한 난류

36°N를 따른 남북방향 흐름의 동서방향 단면도는 동한 난류의 계절 및 공간 변화를 잘 나타낸다. 여름에 표층 부근에서 북향성분이 최대 (0.65 m/s)를 보이는데 폭은 80 km이고 깊이는 200 m이다. 중심축은 연안과 표층에 가깝다. 겨울에는 약해져서 좁아지고 표층 가까이 존재하는데 그 세기는 약 0.3 m/s이다 (Fig.5-20). 이러한 특징은 한국 연안에서 관측한 결과와 일치한다 (Shin 등, 1995, Shin 등, 1996). 동한 난류의 계절 변화도 Chu 등 (2000)에서 서술한 관측 분석의 결과와도 일치하게 계산되었다.

Shin 등 (1995)이 보고한 3월과 4월 동안 38°N 주위에 한국 연안에서 존재하는 시계 방향 와동도 본 모델에서 재현하였다. 이 와동은 동한 난류와 북한 한류가 이루는 전선에서 발견되었으며, 이는 남향의 북한 한류와 북향하는 동한 난류의 일부가 혼입(entrainment)한 결과로 추측된다.

사. 울릉도 단면유속

울릉도(37.5°N, 130.9°E)를 경유한 남북 단면과 동서 단면의 월평균 동서방향의 흐름과 남북방향의 흐름을 해수면으로부터 수심 200m에 이르기까지 확대하여 나타내었다(Fig.5-21, Fig.5-22). 두 단면도는 내륙과 섬 사이의 난류의 계절 및 공간변화를 잘 나타낸다. 특히 남북방향 흐름의 동서단면도는 겨울에 동한 난류의 세기가 강해지는 현상을 잘 나타내고 있다.

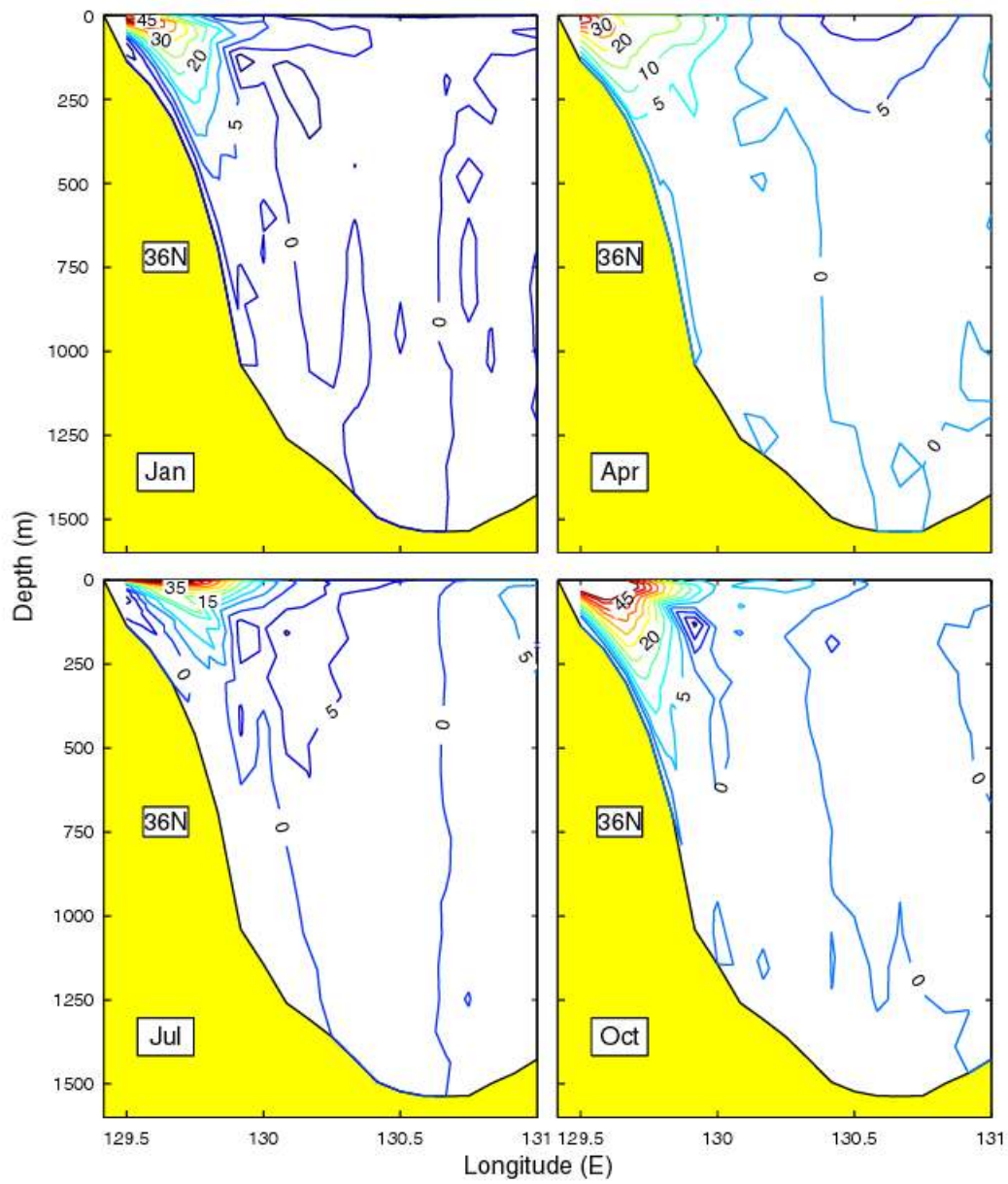


Fig. 5-20 Simulated monthly mean meridional velocity (cm s^{-1}) along 36°N .

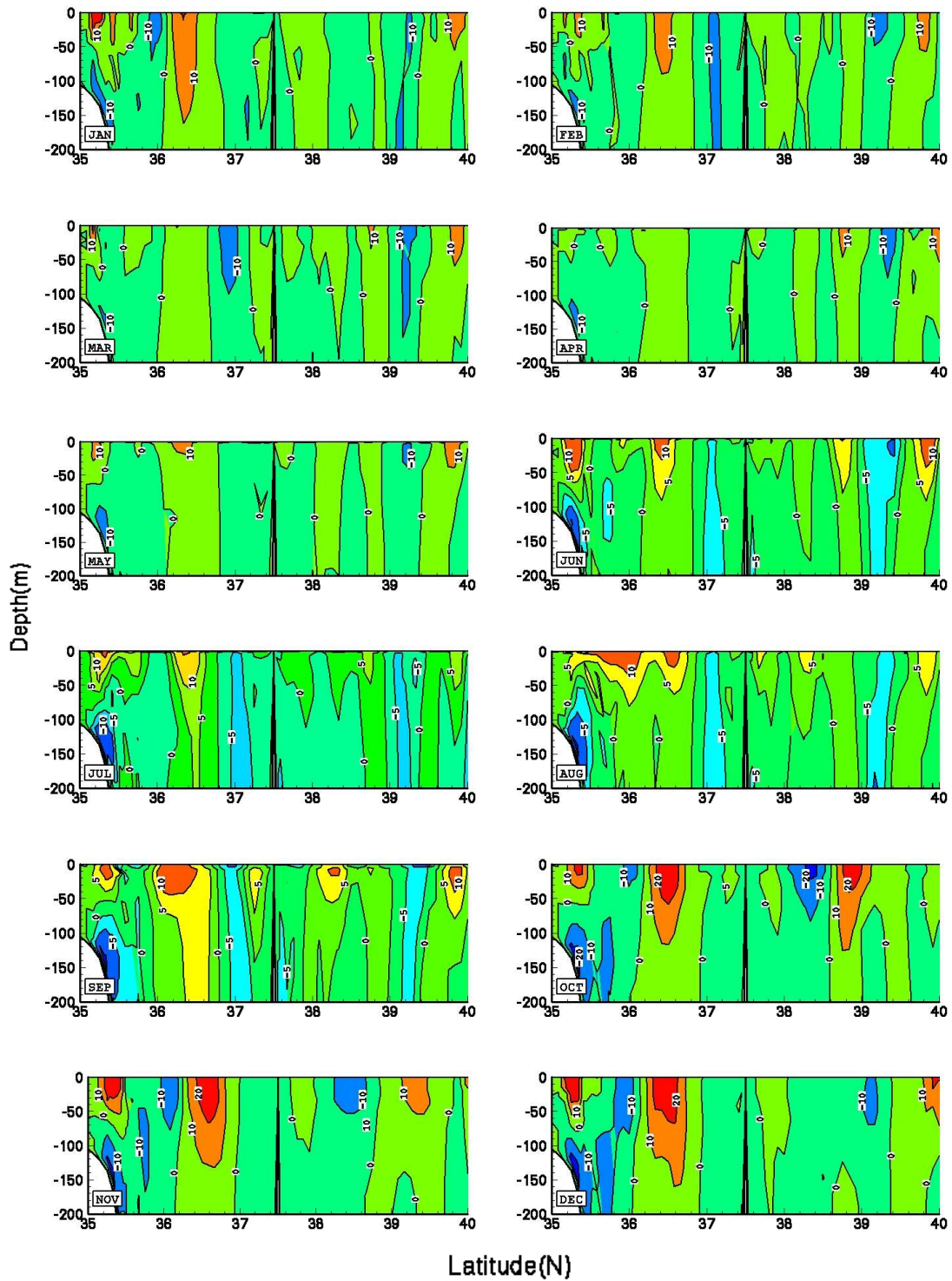


Fig. 5-21 Simulated monthly mean zonal velocity (cm s^{-1} ; +ve eastward) in the upper layer around Ulleung Do (130.9°E).

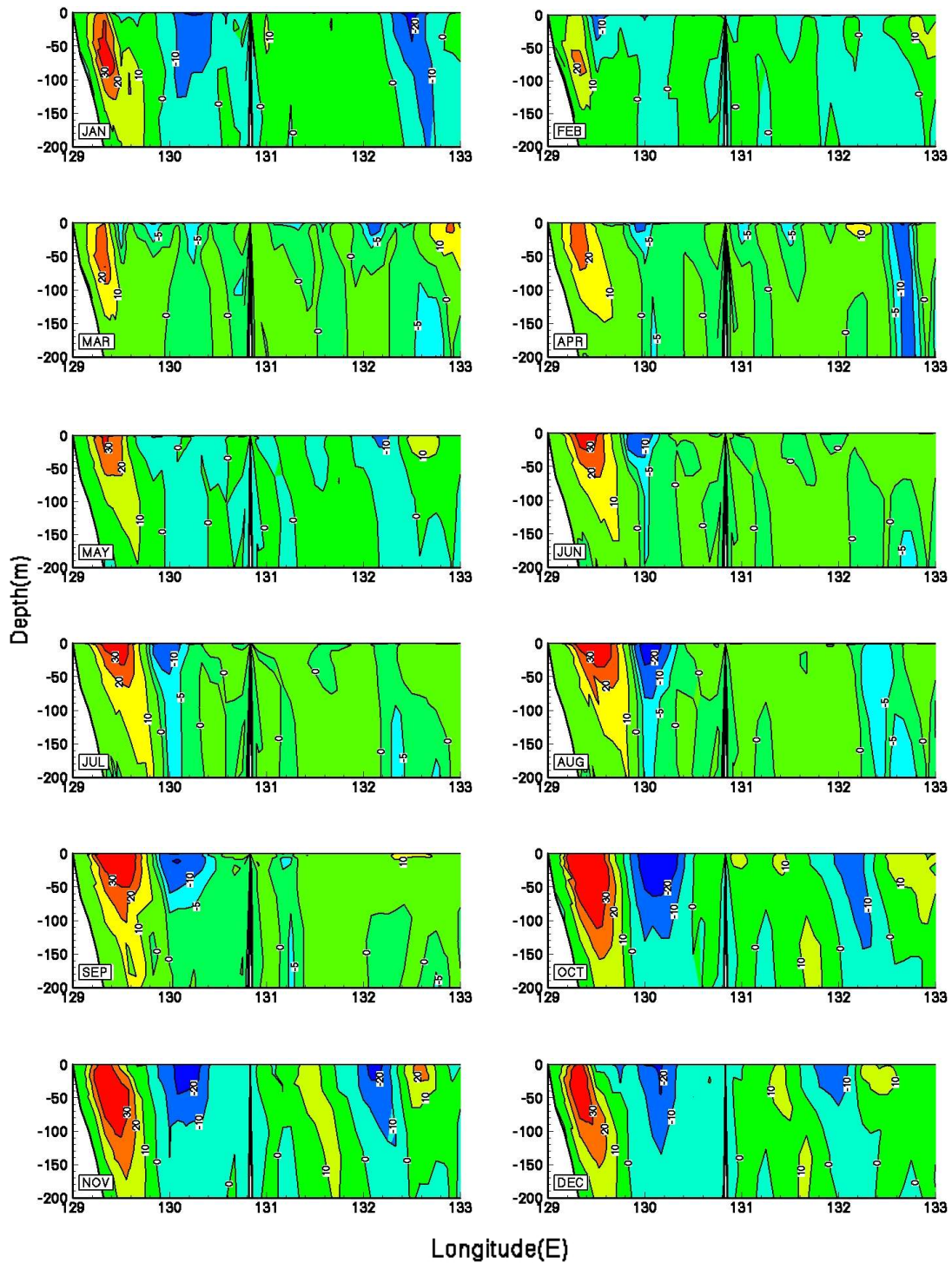


Fig. 5-22 Simulated monthly mean meridional velocity (cm s⁻¹; +ve northward) in the upper layer around Ulleung Do (37.5°N).

8. 결론

(1) 계절 변화하는 강제력을 POM모델에 적용하여 동해순환과 열염구조를 재현하였다. 2단계로 POM 모델을 초기화하였다. 첫 단계 (복원 실험)에서는, 운동이 없고 기후 평균 수온, 염분값으로 초기상태를 가정하여 기후 월평균 바람 응력을 POM 모델에 적용하여 2년 적분하였다. 복원 실험의 적분 마지막 상태를 2 번째 단계 (모사 실험)의 초기 조건으로 이용하였다. 모사 실험에서는 COADS 자료에서 계산한 기후 월평균 바람 응력, 순열속, 담수속을 POM모형에 적용하여 2년 더 적분하였다. 모사된 수온과 염분장은 Chu 등 (2000)에서 기술한 관측 분석 결과와 일치한다.

(2) POM 모델은 동해 극전선 형성과 극전선의 계절 변화를 모사하였다. 모사된 수온장에는 극전선을 가로질러 큰 수온 비대칭이 존재한다. 500 m보다 깊은 곳에서는 수온이 균일하게 낮다 ($1-2^{\circ}\text{C}$). 겨울에는 수온 약층이 동해 남쪽에서는 존재하는 반면에 북위 41도 북쪽에서는 사라진다. 수온 경사는 위도에 따라 감소하는데 일본 연안에서 $7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 이고 북위 40도에서는 $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 이하이다. 여름에는 영구 수온 약층 위에 표층 가열로 인하여 강하게 발달하는 계절 수온 약층이 모사되었다. 이 계절 수온 약층은 여름에서 가을까지 존재한다.

극전선의 남쪽에 영구 수온 약층이 80-250 m 깊이에 위치하며 연중 존재하는데, 8월에 수온의 연직경사율이 최대이다 ($0.08^{\circ}\text{C m}^{-1}$). 영구 수온 약층 위에 계절 수온 약층이 6월 ($0.15^{\circ}\text{C m}^{-1}$)에 표층에서 50 m 사이에 존재하며, 8월에 강화되어 최대 $0.36^{\circ}\text{C m}^{-1}$ 에 이르고, 9월에는 약화된다. 10월에는 계절 수온 약층이 얇아지고 혼합층이 나타나기 시작하여 80-100 m까지 깊어지는데, 동해 서쪽으로 갈수록 얇아진다, 즉 혼합층 깊이는 한국연안에서 50 m, 일본연안에서는 130 m이다. 혼합층은 $2^{\circ}\text{C}/\text{month}$ 율로 2월에서 4월까지 수온이 상승하며, 깊이도 얇아진다. 모델에서는 혼합층의 얇아짐이 관측 (Chu 등, 2000) 보다 1 개월 먼저 나타난다.

극전선 보다 북쪽 해역은 영구 수온 약층의 연직 구배가 상당히 약하다. 계절 수온 약층은 5월 ($\sim 0.08^{\circ}\text{C m}^{-1}$)에는 표층에서 50 m 깊이에 존재하고 여름에 강화되어 8, 9월에 최대 ($0.5^{\circ}\text{C m}^{-1}$)가 되며 10월에 약해진다. 11월에는 계절 수온 약층이 붕괴되어 영구 수온 약층과 합쳐지는데 계절 수온 약층은 겨울에 약화된다. 2월에는 영구 수온 약층이 매우 약해져 동경 136도 서쪽에서는 수층이 연직으로 균일하게 차지며 (1°C) 동쪽에서는 매우 약하게 ($0.01^{\circ}\text{C m}^{-1}$) 성층을 이룬다.

(3) POM 모델은 다음과 같은 특징을 보이는 염분장을 어느 정도 적절하게 모사한다. 즉 (a) 극전선 이남의 염분장 계절 변화가 이북 해역에 비해 크며, (b) 염분 변화가 활발한 해역 (salinity activity centers)이 타타르 해협과 대한 해협에 위치한다.

본 모델은 또한 극전선 이남에만 나타나는 혀모양의 고염 (34.1 psu) 분포와 극전선을 가로지르는 강한 남북 방향 비대칭성도 잘 모사하였다. 강한 수온 약층과 관련된 얇고 강한 염분 약층으로 인해 극전선 이북 해역의 표층 아래 수괴는 안정하다. 약하고 넓은 수온 약층과 연관된 혀모양의 중층 고염수는 극전선 이남 해역의 수괴를 정력학적으로 덜 안정하게 한다.

(4) POM 모델은 남북 방향의 비대칭성이 강한 계절 염분 약층과 극전선 이남에만 분명하게 보이는 염분 최소층을 모사하였다. 극전선 이남 해역에서 100 m 깊이의 고염층 ($S > 34.3$ psu)이 있는 수평 방향의 염분 최대층 아래에 염분 최소층 ($S < 34.08$ psu)이 여름 (7월-10월)에 형성된다. 염분 최대층과 염분 최소층의 경계는 100-200 m 깊이에 위치한다. 겨울에 염분 최소층은 뚜렷하지 않다. 극전선 이북에 고염 ($S > 34.05$ psu) 해수인 고염 중층수(HSIW)이 일본 분지의 동쪽 (40° - 43° N)에 나타난다.

(5) POM 모델은 동해 순환, 특히 대마난류와 대마난류의 분지를 어느 정도 잘 모사하였다. 대마난류는 대한해협 동/서수도에서 분기한다. 동수로를 통과한 분지는 일본연안을 따라 흘러 대마난류 제 1 분지를 형성한다. 서수도를 통과한 분지는 동한 난류가 되어 한국연안을 따라 흘러가며 북위 37도 부근에서 북쪽 분지와 동쪽 분지로 분기한다 (제 1 분기). 동쪽 분지는 제 1 분기 후 동진하여 동경 132도에 이르며 여기서 동쪽 분지와 북쪽 분지로 다시 분기한다 (제 2 분기). 제 2 분기 후 동쪽 분지는 동진하여 대마난류의 제 2 분지가 된다. 제 1 분지는 연중 존재하고 200 m 보다 얇은 등수심선을 따라 흐르며 7월과 8월에 최대 유속(0.3 m/s) 과 최대 공간분포 (깊이: 0-200m, 폭: 50km)를 보이고 4월에 최소(0.1 m/s, 깊이: 0-50m, 폭: 20km)가 된다. 모사된 대마난류 제 2분지도 연중 존재하고 대륙붕과를 따라 흐르며 유속은 10월과 1월에 최대 (0.1 m/s), 4월과 7월에 최소 (0.05 m/s)가 된다

(6) 동한 난류, 리만 한류, 북한 한류 등의 해류도 비교적 잘 모사되었다. 모사된 리만 해류는 남향 성분이 겨울철 표층 근처에서 최대 (0.21 m/s)가 되며 폭은 100 km, 깊이는 800 m에 이른다. 여름과 가을에 약해져 최소 (0.15 m/s)가 되며 크

기가 줄어 폭은 60 km, 깊이는 400m가 된다. 모사된 동한 난류는 0.65 m/s (여름)에서 0.30 m/s (겨울)로 그 크기가 변한다. 동한 난류는 연중 폭이 80-100 km, 깊이가 약 200 m이다. 북향하는 동한 난류는 한국 연안을 이안하여 북쪽으로 이동하고 남향하는 북한 한류와 만나고 극전선을 따라 동쪽으로 사행하는 해류를 형성한다. 북한 한류는 대륙사면을 따라 흐르면 겨울과 봄에 남향 성분이 최대 (0.1 m/s)에 이른다. 북한 한류의 축은 대륙붕과에 가깝고 폭은 100km, 깊이는 1500m 이다.

(7) POM 모델이 동해 순환과 열염 구조를 적절하게 재현하였지만 더 많은 연구가 필요하다. 수온, 염분, 유속의 3차원 관측 자료는 모델을 초기화하는데 좀 더 적절한 역학 및 열염학 구조를 제공할 것이다. 미국방대학원에서 개발중인 대기해양연안체계 (CAOCS) (Chu et al., 1999a)와 같은 해양/대기 결합 모델을 이용하면 좀 더 현실적인 대기 강제력을 얻을 수 있을 것이다. 또한 이와 같은 결합 모델은, 표층 마찰 효과를 포함하여 바람장을 개선하고, 해파 효과와 개선된 해양/대기 열 및 염분 교환을 포함함으로써, 좀 더 정확한 바람 응력을 제공할 것이다.

(8) 향후에는 보다 단순한 시나리오에 중점을 두어야 한다. 현실적인 수평 수송도 고려해야 하며 종관 규모 바람장도 포함하도록 외삽된 기후 바람장도 향상되어야 한다.

제 6 절 동해 해수순환의 준실시간 예측기법

1. 동해 표층순환 연구

가. 연구내용

(1) 연구자료

사용된 자료는 동해의 수온 염분자료와 바람자료 그리고 동해 해수면의 SSA (Sea Surface Anomaly)이다. 이 자료들에 대해 좀더 자세히 살펴보면 다음과 같다. 사용된 GDEM(Generalized Digital Environmental Model) 수온염분 자료set은 1930년에서 1997년까지의 관측된 불규칙적인 자료를 취합하여 만든 전 지구의 월별 평균자료로 표층수심 0m부터 4400m까지 총 23개 층으로 이루어져 있다. 이 자료는 격자구조로 되어 있으며, 격자의 크기는 위경도 1/6도 간격이다(Teague et al, 1990). 바람 자료는 나와 서(1998)에 의해 동중국해 및 한반도 연근 해역에서 1978년부터 1987년까지의 천기도 기초로 하여 북위 30°~ 50°N, 동경 120°~ 140°E의 해역에서 0.5도의 등격자 구조로 계산한 월별 바람장을 사용하였다. 동해 해수면 고도이상자료 (Sea Surface Anomaly : SSA)는 CLS (Collect and Location per Satellite)에서 TOPEX/POSEIDON(T/P), ERS-1, ERS-2 위성의 해수면고도자료를 결합하여 위경도 0.25의 등격자로 만든 AVISO (Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques) 자료이다. 사용된 AVISO 자료는 1992년 10월 22일부터 2000년 12월 29일까지 총 250 사이클이며, 이 기간 중 1993년 12월 06일부터 1995년 4월 10일까지는 자료가 누락되어 있다. 이 자료로부터 월별 평균 SSA자료를 만들었다.

(2) 연구방법

(가) 취송류 계산(Ekman Velocity : EV)

동해의 취송류를 계산하기 위하여 Na 바람장을 사용하였다. 취송류의 계산은 전통적인 Ekman 방정식의 일반해(Pond and Pickard, 1983)를 이용하여 표층에서의 취송류를 계산하였다(Fig. 6-1). 이 때 적용한 방정식은 다음과 같다.

$$u_E = V_0 \cos\left(\frac{\pi}{4}\right), \quad v_E = V_0 \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)$$

V_0 는 총 Ekman 표면해류로 $\sqrt{2}\pi\tau/D_E\rho|f|$ 로 표현이 되며, τ 는 해면에서의 바람 응력의 크기이고, D_E 는 Ekman 수심 $\pi\sqrt{2A_z/|f|}$ 이고, A_z 는 와도점성계수이다. 취송류를 계산하면서 연안지역에서의 마찰의 영향을 고려하지는 않았다.

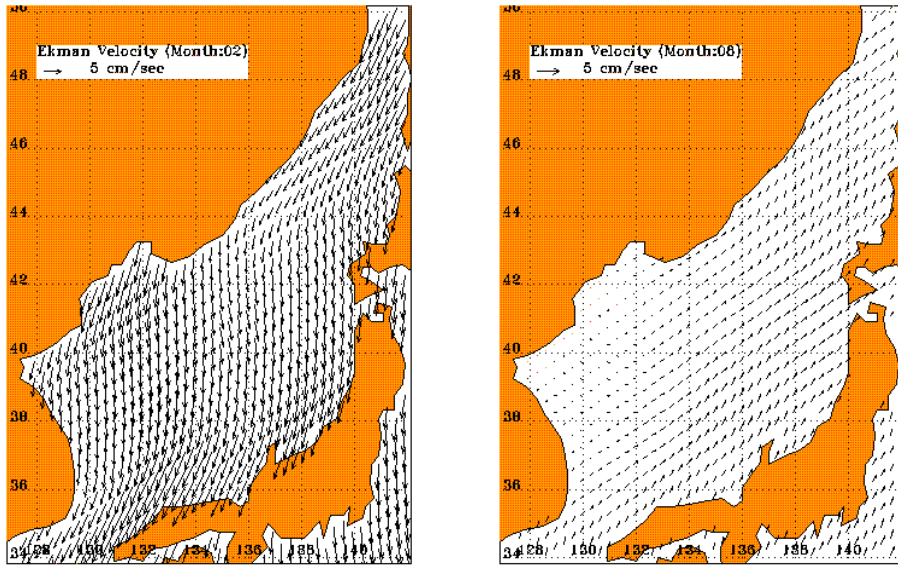


Fig. 6-1 Surface Ekman velocity for Feb. & Aug. using wind data.

(나) SSA를 이용한 지형류 계산(Surface Geostrophic Velocity :SGV)

일반적으로 해양에서 순환은 지형류와 정역학 균형의 평형에 의해 이루어지며, 이것의 x축 성분과 z축 성분을 표현을 하면 $fV = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$, $0 = -\frac{\partial p}{\partial z} - g\rho$ 이다. 이 식을 각각과 z와 x에 관해 미분을 한 후 두 식을 결합하면 $\rho V = -\frac{g}{f} \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + v_0$ 이다. 여기서 z_0 와 v_0 는 각각 기준면과 기준면의 유속이다. 일반적으로 기준면은 해류의 움직임이 없는 무류면으로 가정을 한다. 해양의 고저면은 해양표면에서 역학적 압력으로 표현이 되기 때문에 위 식을 위성 고도자료로부터 계산한 SSA (η)로 나타낼 수 있다(Fig. 6-2). 같은 방법으로 y성분도 계산이 가능하다(Fu and Cazenave, 2001).

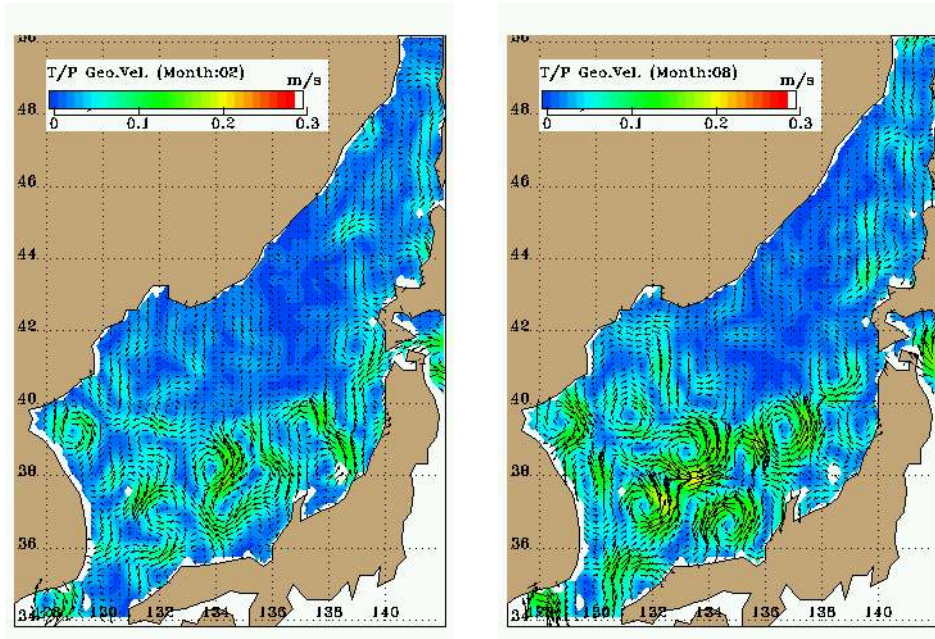


Fig. 6-2 Surface barotropic currents for Feb. & Aug. calculated from sea surface height anomaly.

(다) P-vector 방법(P-Vector :PV)

GDEM 물성자료를 이용하여 지형류를 계산하였으며(Fig. 6-3), 지형류를 계산하기 위하여 P-Vector 방법을 사용하였다(Chu, 1995; Chu et al, 1998a,b). P-vector 방법은 전통적인 지형류 계산법의 단점을 극복하고 절대유속을 계산하기 위하여 개발된 것이다. P-vector법을 간단한 수학적 식으로 표현할 때, 각 유체 성분의 포텐셜 밀도(ρ)와 포텐셜 와도(q)는 보존된다는 것이다.

$$V \cdot \nabla \rho = 0, \quad V \cdot \nabla q = 0,$$

$$q = f \frac{\partial \rho}{\partial z}, \quad \nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$$

여기에서 V 는 $V(u,v,w)$ 로 유속이고 (x,y,z) 는 좌표계 성분이며, f 는 코리올리 힘이다. 3차원 유속벡터는 퍼텐셜 와도면과 밀도면이 같지 않으면 ($\nabla \rho \times \nabla q \neq 0$) 이미 알고 있는 밀도로부터 결정할 수 있다(Pedlosky, 1986). 이 조건에 의해 $P = \frac{\nabla \rho \times \nabla q}{|\nabla \rho \times \nabla q|}$ 가 존재하고, 이것은 단지 밀도만으로 결정되어진다. 유속벡터 V 는 $\nabla \rho$ 와 ∇q 에 직각을 이루고, $V \sim \nabla \rho \times \nabla q$ 이다. 따라서 P-vector는 유속벡터 V 에 평행하기 때문에 $V = r(x,y,z)P$ 이다. 여기서 $r(x,y,z)$ 는 비례상수이다.

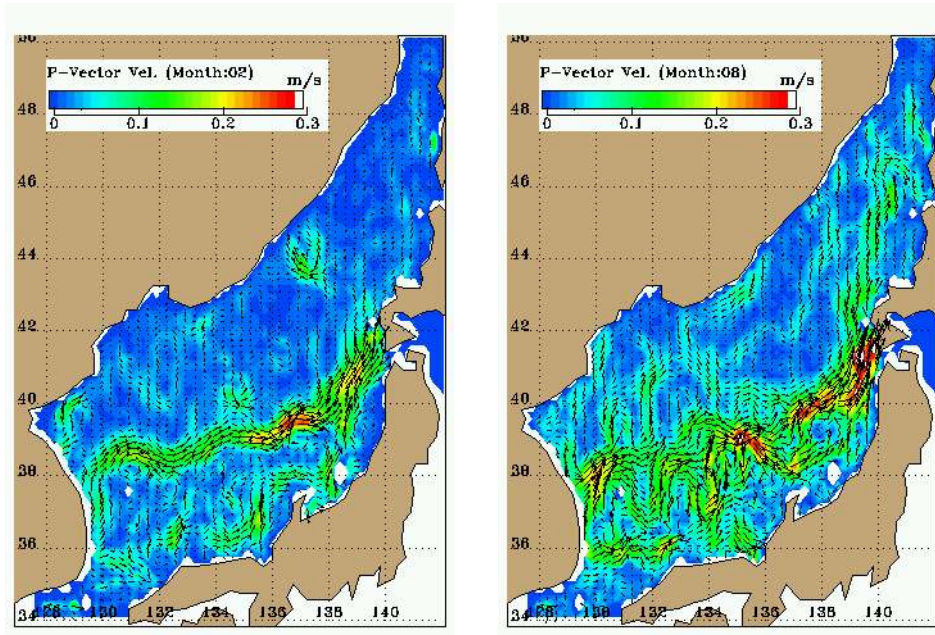


Fig. 6-3 Surface barotropic currents for Feb. & Aug. calculated from GDEM data.

(3) 추정 표층유속벡터간 상호비교

바람자료, 수온과 염분의 물성 자료 그리고 SSA 자료를 가지고 추정된 EV, PV, SGV의 절대값 유속벡터의 총합(Absolute Sum Velocity :ASV)에 대한 각각의 기여도를 조사하였다. 이 기여도는 유속벡터의 절대값의 총합에 대한 각 유속벡터의 비로 나타내었다.

바람에 의한 취송류의 기여도가 75% 이상인 곳은 공간적으로는 연구 해역의 위도 40°N 이상인 북쪽해역에서 나타났으며, 시간적으로는 10월부터 북쪽 해역에서 기여도 75%인 지역이 나타나기 시작하여 3월까지 존재하였다. 여름철을 중심으로 전 해역에서 바람에 의한 취송류가 순해류 흐름에 미치는 영향이 매우 작았다. 특히 모든 월에서 극전선(PFJ)의 ASV에 대한 EV의 기여가 낮게 나타났다. 이것은 상대적으로 PV의 영향이 매우 강하기 때문이다.

ASV에 대한 SGV의 기여도가 높은 지역은 동해의 주요 해류계가 존재하는 곳에 인접한 곳에서 계절적인 소용돌이의 발생이 높은 지역에서 높게 나타났다. 동한만의 속초소용돌이, 울릉분지의 울릉소용돌이, 오키섬의 소용돌이 지역이 연중 SGV의 기여도가 높은 지역이다. EV에서와 마찬가지로 PFJ 지역에서 기여도가 낮게 나타났

다.

PV의 기여도의 가장 뚜렷한 특징은 PFJ 지역에서 연중 75% 이상으로 높게 나타났다. 그리고 5월부터 10월까지는 동해 전 해역에서 ASV에 가장 큰 영향을 주는 성분으로 나타나고 있다.

위를 종합하여 보면 동해의 주요 해류는 경압 성분의 PV와 순압 성분인 SGV에 의해 구성이 되고 특히 주해류인 육지경계부근의 해류층에서는 경압성분이 주요 성분으로 작용하고 있으며, 해류의 흐름에 의해 이차적으로 발생하는 중규모 소용돌이 지역에서는 순압성분의 해류가 영향을 주고 있다. 그리고 겨울철 동해 북쪽해역에서 바람의 영향에 의한 취송순환이 강하게 형성된다.

나. 모델 개발

(1) 동해 해수순환 수치모델 구성

전년도 POM-ES (Ro,1999; 2001)를 동해의 지형, 수심분포를 가지고 모델의 목적에 맞추어 격자체계(Fig. 6-4)와 수심(Fig. 6-5) 및 개방경계를 재구성한 것이다. 이 모델의 도메인은 위도 34.2°- 50.2°N, 경도 127.8°- 142.3°E 로써 격자 간격은 위경도 모두 0.1°이며, 동서 격자 거리는 약 8 - 10 km, 남북격자 거리는 약 11 km 이다(Fig. 6-5). 이러한 격제 체계는 동서, 남북방향으로 격자를 25, 42개 증가한 것이다. 수직으로는 12개의 sigma 층을 가지고 있다. 따라서 중규모 소용돌이를 적절하게 재현할 수 있는 격자구조이다.

모델 수심은 미국 해군이 편집한 3분 간격 수심자료를 이용하여 모델 격자에 내삽 하였고, 급격한 수심변화를 억제하기 위하여 사전에 평활화하여 사용하였다. 이때 대륙붕단의 위치가 평활화 과정에서 달라지지 않도록 처리하였다. 사용한 적분 시간 간격은 외부 모드에서 10초, 내부 모드에서 300 초로서 CFL 안정도 조건을 만족하고 있다.

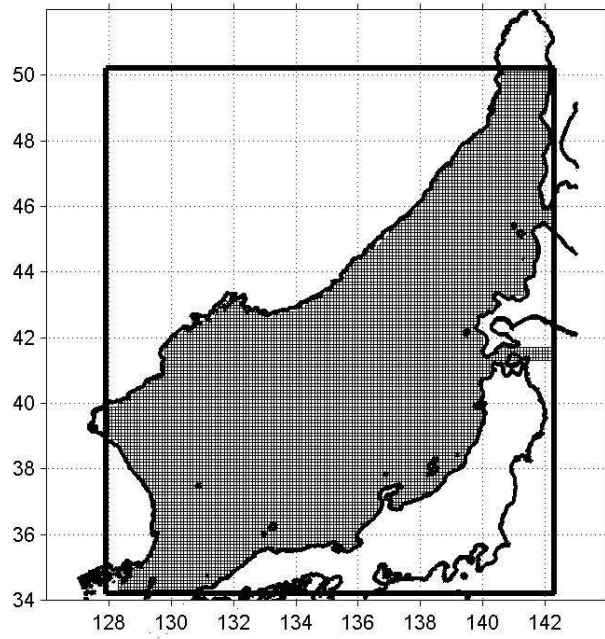


Fig. 6-4 New grid system for the POM-ES Model.

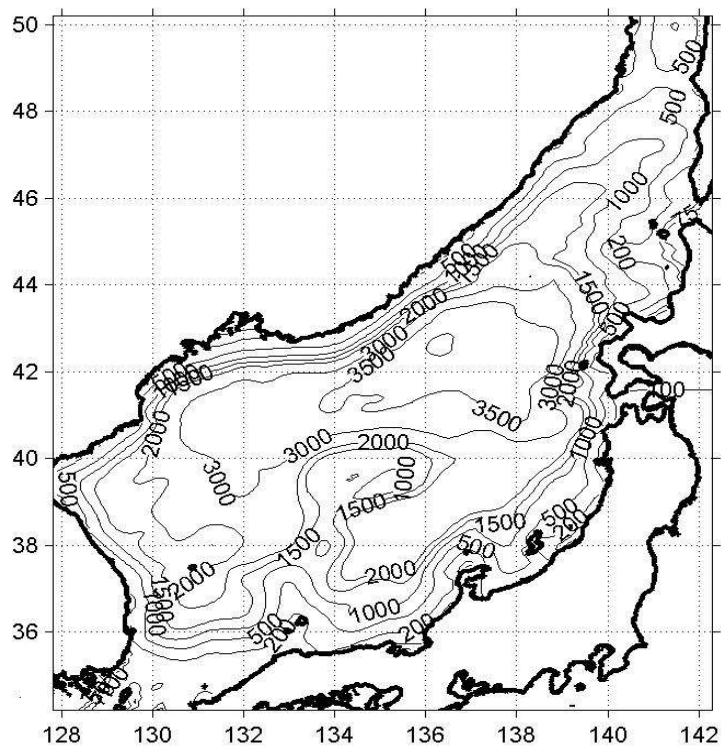


Fig. 6-5 Model domain and Bottom topography for the POM-ES.

남쪽 개방 경계는 평균 3 Sv에서 여름철(8월) 최대 4 Sv, 겨울철 최소 2 Sv. 계절적으로 변동하는 수송량을 부과하여 대마 난류수의 입력을 부과하였으며, 동측 개방경계에서는 쓰가루 해협을 통하여 입력 수송량의 75%, 소야 해협을 통하여 25% 수송량이 외해로 유출되도록 설계되었다. 표층 forcing으로는 Na et al.(1998)의 바람자료를 이용하여 월별 바람응력을 부과하였으며, 전 격자점에서의 초기 조건은 GDEM자료로부터 년평균 3차원 수온-염분값을 구하여 부과하였으며, 모델 Run 초기 2년동안은 diagnostic mode를 이용하여 년평균 유속장이 재현된 후 매월 3차원 수온-염분장을 Nudging 방법에 의한 자료동화를 하여 10년의 결과를 얻었다. 본 모델링의 연구 목표는 크게 세 가지로 대별할 수 있으며, 첫째 기후적 자료동화를 이용한 계절 해수순환 패턴과, 둘째, 주요 해류계 (대마난류, 동한난류, 북한한류, 리만/프리모리에 한류, 극전선 제트류)의 재현과 각 해류의 수송량, 유향, 유속 등의 특징을 규명하고, 셋째 경계역의 해류계와 중규모 소용돌이간의 상호작용, 분지간 수송량등과 관련된 물리적 과정을 이해하는 것이다 (Ro et al, 2001; Ro and Gennady, 2002).

(2) 모델 수행

- ① 동해 전역을 대상으로 한 T-S 월별 database 구축
(GDEM, WOA, KODC, JODC, JPL)
- ② 구축된 database 의 수심별 수평분포도 도면작성 및 DB 구축
- ③ 구축된 DB 이용 P-vector 방법에 의한 유속장 계산 및 그 결과의 DB 구축
- ④ 유속장 DB의 수심별 수평분포도 도면작성 및 도면의 DB 구축
- ⑤ 표층수온 자료 동화 기법 개발
- ⑥ 표층 해면고도 DB 구축 및 자료 동화 기법 개발

본 연구에서 이용한 T/P 위성의 주기는 약 9.9일이고, 한 개의 사이클(cycle) 자료에는 약 56분 크기의 패스(pass) 자료 254개로 이루어져 있다. T/P 고도계에 의한 해양모니터링은 1992년 9월 23일 처음 이루어졌다. 각 패스내의 SSA 관측 정점간의 거리는 약 6.2 km 이고, 궤도간 거리는 적도를 통과할 때 315km이고, 중위도를 통과할 때는 그 거리가 약 300km가 된다(Benada, 1997). 본 연구에서 이용한 자료는 JPL PO.DAAC에서 만들어진 T/P SSA 자료인 MGDRB (Merged Geophysical Data Record, generation B)를 사용하였다. 이 자료중의 SSA는 최적으로 추정된 해수면 고도(Sea Surface Height)와 평균해수면(Mean Sea Surface) 사이의 차이이다. 해수

면고도는 위성체의 영향, 대기영향, 해수면의 상태, 조석, 대기압효과 등에 대한 보정이 이루어진 자료이다(Berwin and Benada, 2000).

동해 연구 해역을 통과하는 T/P 위성의 궤도는 1 사이클에 12개의 패스가 존재하며(Fig. 6-6(a)), 1992년 9월 23일부터 2000년 6월 19일까지의 약 7.8년의 자료를 사용하였고, 연구지역의 범위는 위도 33°-50°N이고 경도 127°- 142°E 지역이다.

T/P 인공위성이 항상 일정한 지점을 관측하지는 못한다. 따라서 관측된 원자료를 자료분석을 위한 임의의 표준궤도로 전환하는 작업을 일차적으로 수행을 하였다. 이 표준궤도로 전환된 자료를 이용하여 시간 결측 자료를 보완한 후, 이 시계열 자료를 가지고 객관적 적합보간법 (Optimal interpolation; OI)을 사용하여 격자 구조의 자료를 만들었다 (Fig. 6-6(b)).

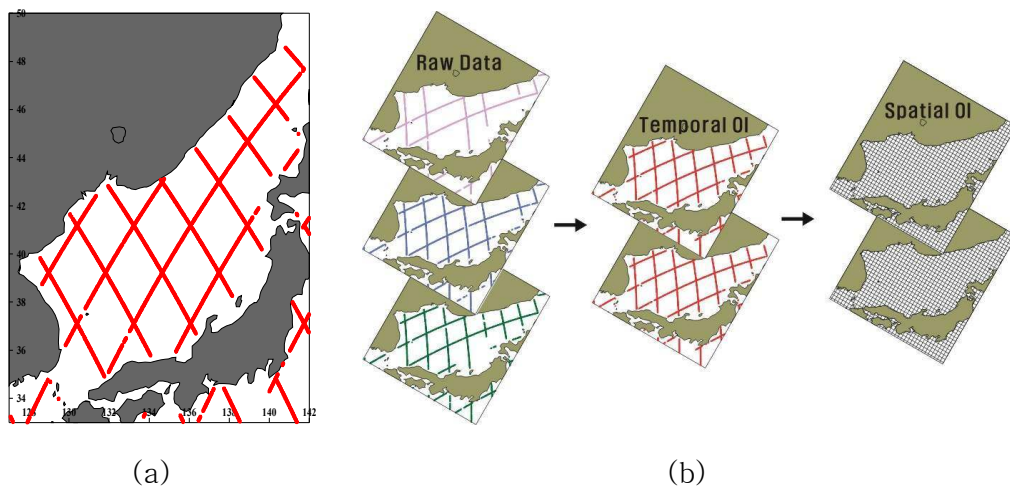


Fig. 6-6 (a) Tracks of T/P satellite in the East Sea (b) Schematic diagram for generation of grid from SSA data

원래 궤도상의 자료로부터 표준궤도의 거리를 결정하기 위하여 궤도간의 위경도 차이를 계산하였다. 원자료의 관측 정점간 평균 거리는 경도 0.04°, 위도 0.05°의 차이가 있는 것으로 확인되었다. 객관적 적합보간법을 실시할 때 작업수행의 시간효율을 높이기 위하여 위에서 추정된 평균 위경도 거리 차이에 세배를 하여 이 거리를 표준궤도내의 정점간의 거리로 설정하였다. 따라서 표준궤도의 경위도 거리

는 각각 0.12°와 0.15°로 결정을 하였다. 원계도 자료를 표준계도로 적합을 시키기 위하여 스피린(Spline) 방법을 이용한 최소자승법을 이용하였다.

원 자료가 표준계도로 자료가 전환이 된후에 시간 결락 자료의 보간을 위하여 상관길이(correlation length)을 전후 30일 (총 6개 자료) 자료를 가지고 OI를 실시하여 표준계도선상의 시계열 자료를 생성하였다.

격자구조의 자료를 생성하는데 객관적 적합보간법을 이차원 평면상에서 적용하였다. 격자구조의 공간크기는 경위도로 0.25°× 0.25°로 설정을 하였다. 중위도에서 계도간 거리가 약 300 km이기 때문에 상관길이를 150 km 설정을 하였다. 그리고 이 상관길이 안에 포함되는 자료 중에서 OI시 발생하는 평활화 효과를 줄이기 위하여 10개의 자료만을 가지고 격자상의 자료를 만들었다. 이때 사용한 OI의 행렬은 다음과 같다.

$$[R + (\text{var}/q)I]A = S$$

여기에서 R 은 자료사이의 상관행렬 $R = e^{-r^2/c^2}$ 이고, r은 자료사이의 거리, c는 상관길이, S는 임의의 자료와 특정 격자점 사이의 상관행렬, var는 관측된 자료의 오차사이의 분산(벡터량), Q는 관측된 값(스칼라량)의 분산, I는 단위행렬, A는 가중치 배열(alpha)로 (R-1)S 이다.

(3) 모델결과의 DB화

계절별, 월별 분포 자료를 플랫폼에 독립적으로 시각화하기 위해 PHP 및 JAVA 스크립트를 사용한 홈페이지를 구축하였다(Fig.6-7).

이에 사용된 기술로 PHP와 JAVA 스크립트가 있는데, ASP, JSP, PHP 중 Windows 기반의 ASP는 플랫폼에 의존적이다. 그러나 컴포넌트를 추가 할 수 있는 확장성 면에서는 우수하다. 그리고 플랫폼에 독립적이지만 자바 가상머신의 성능에 의존적인 JSP 또한 자바에서 제공하는 컴포넌트를 사용할 수 있어 확장성 면에서도 우수하지만 현 과제에서는 속도 면에서 가장 빠르고, 플랫폼에 독립적인 PHP를 선택하였다. 또한 대부분의 데이터베이스와의 연동이 이루어지기 때문이다.

데이터베이스에는 자료의 Index와 메타 정보가 들어가 있어, 이는 자료의 평가 및 예측모형을 작성하는데 이용된다. 실제 데이터는 각각의 디렉토리에 나누어 들어가 있다. 자료를 효율적으로 관리하기 위해 D/B를 구축하였다.

관련 사이트 <http://model.cnu.ac.kr/vrocean/>

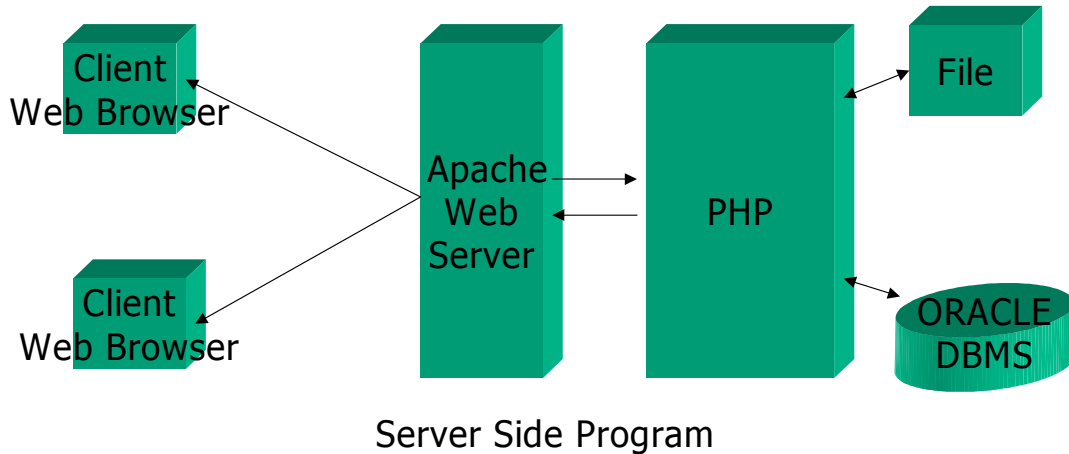


Fig. 6-7 Interworking structure of the database.

다. 자료동화를 위한 Nudging 기법 및 자료구성

일반적으로 nudging 자료동화 기법은 역학 방정식에 Newtonian relaxation 항을 부과하는 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{da}{dt} = F(a, t) + G(t) \sum_i^N w_i (a_i - a)$$

여기서 a 는 모델에 의해 계산되는 변수로서 유속 및 수온, 염분 등이 되고, $F(a, t)$ 는 모델에 의한 힘의 항이 되며, $G(t)$ 는 Nudging 함수이며, 모든 time-step에 작용하며, w_i 는 nudging 계수 a_i 는 관측된 동화 자료 값이다. 본 연구에서는 최적화된 Nudging 계수를 선정하기 위하여 민감도 실험을 거쳤으며, 그 결과 수심에 따라 변하는 nudging 계수를 사용하였으며, 상층 500m에는 30일 후의 모델 결과가 기후적 자료와 일치하도록 하였으며, 그 이심에서는 느린 속도로 변동한다고 가정하고 그 때의 시간자를 10년을 선정하였다.

자료동화를 위한 GDEM자료와 Levitus자료는 그 생산과정에서부터 상이할 뿐만 아니라 격자 간격이 1/6도 및 1/4도로 상이하다. 본 모델의 격자간격은 1/10로서 내삽의 과정이 필요하여 이 때 적합보간법을 사용하였다. 그런데 500m 상층부는

GDEM을 사용하고, 그 이심에서는 Levitus를 사용할 때 수직변동곡선에 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Fig. 6-8과 같이 500-1500 수심사이의 자료는 GDEM 자료와 Levitus 자료를 합성하였으며, 그 가중치가 500m에서 1에서 지수 함수적으로 감소하여 1500m에서는 0이 되도록 선정하였다.

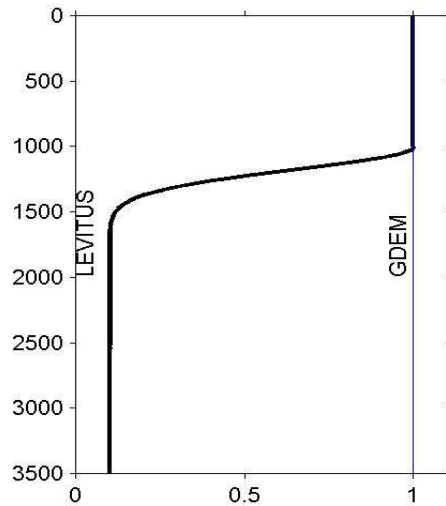


Fig. 6-8 Weight factor used in interpolation between GDEM and Levitus data.

라. 자료동화에 의한 동해 해수순환 양상

(1) 표층순환 양상과 계절변동

(가) 표층 유속 (Fig. 6-9)

동해의 표층순환 시스템은 북위 40 부근의 동서방향 극전선을 축으로 남부와 북부의 순환고리로 대별되며, 남부의 시계방향과 북부의 반시계방향으로 구성되어 있다. 남부의 순환 양상은 뚜렷한 계절변화를 보여주는데(Fig. 6-9), 겨울에서 여름으로 갈수록 대마난류의 세기가 강해지면서, 우리나라 동해남부연안을 따라 북상하는 동한난류의 세기 또한 증가한다. 이 때 동한난류의 북상한계는 겨울에서 여름철로 가면서 남하하게 되면 2월달 최북단 39.5에서 8월달 최남단 37.5도 사이에서 변동하고 이에 따른 동한난류의 이안현상은 극전선 축의 형태와 사행에 1차적인 힘으로 작용한다. 극전선역의 계절 변동에 따른 자세한 내용은 다음 절에서 상술하고

있다. 일본연안을 따라 북상하는 대만난류 또한 계절변동을 하며, 겨울철 최소 0.5 Sv에서 8월 최대 2.5 Sv의 수송량을 보인다. 한류계인 리만/프리모리에 한류와 북한한류는 동해 북부 해역의 주요 경계류를 형성하며 크기는 일본분지에서의 시계방향 순환고리(gyre)를 형성하고 있다. 이 해류의 월별 수송량의 크기는 Fig. 6-10에 제시되어 있으며 동계에 최강이고 하계에 최소가 된다.

주요 경계류와 결부되어 상호작용하는 중요한 흐름의 양상으로서 특정지역에 빈발하는 중규모 소용돌이를 생각할 수 있는데, 대표적으로는 울릉분지, 오키섬 밖, 블라디보스톡 남쪽 해역, 극전선 주변해역, 야마도 분지와 고원 등이 있다.

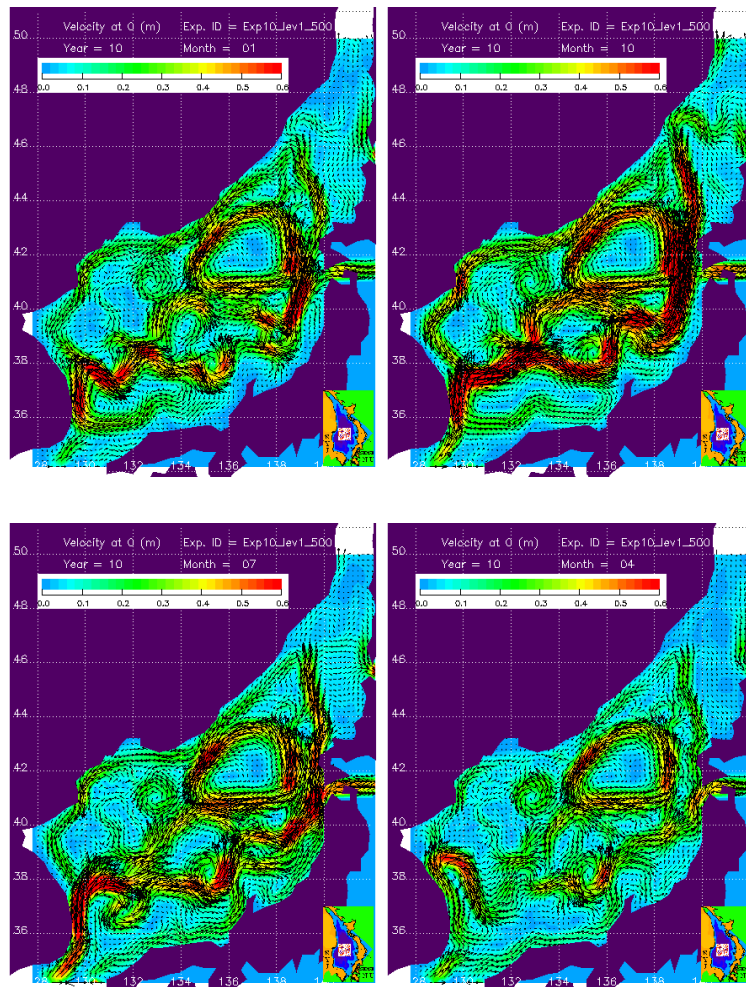


Fig. 6-9 Sea surface currents calculated using POM-ES
a) Apr., b) July, c) Oct. d) Jan.

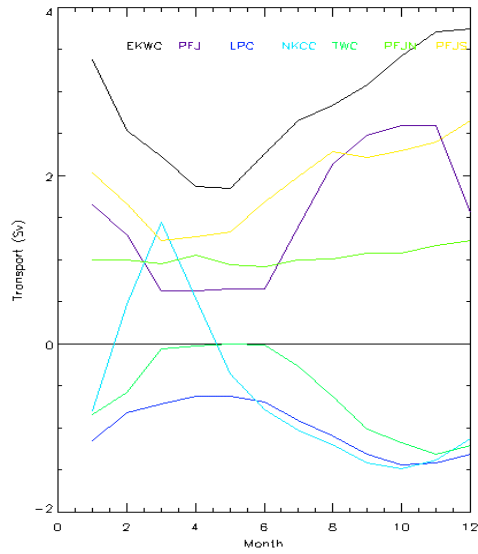


Fig. 6-10 Monthly trend of the main currents transport volume.

(나) 표면 해면고도 (Fig. 6-11)

Fig. 6-11은 모델에 의한 표면 해면고도의 계절 별 분포 양상을 보여 준다. 년 중 계절에 상관없이 극전선축의 남부 해역이 북부 해역에 비해 높게 나타나고 표층 순환 양상에서 보았듯이 남부는 시계방향의 순환과 북부의 반시계 방향의 순환 양상을 반영하고 있다. 북부 해역의 일본분지에서 강력한 반시계방향의 순환 시스템이 두드러진다. 계절에 따라 극전선축의 남북방향의 사행으로 인하여 그 모습이 변동하고 있으며, 우리나라 동해연안을 타고 북상하는 동안난류의 세력의 계절변동 양상에 따라 겨울철 북방 한계점이 39.5도, 여름철 37.5도 사이에서 왕복하고 있다.

중규모 소용돌이의 분포 양상에 따른 중규모의 해면고도 분포를 보이고 있으며, 울릉분지, 야마토분지에서 두드러지게 보인다.

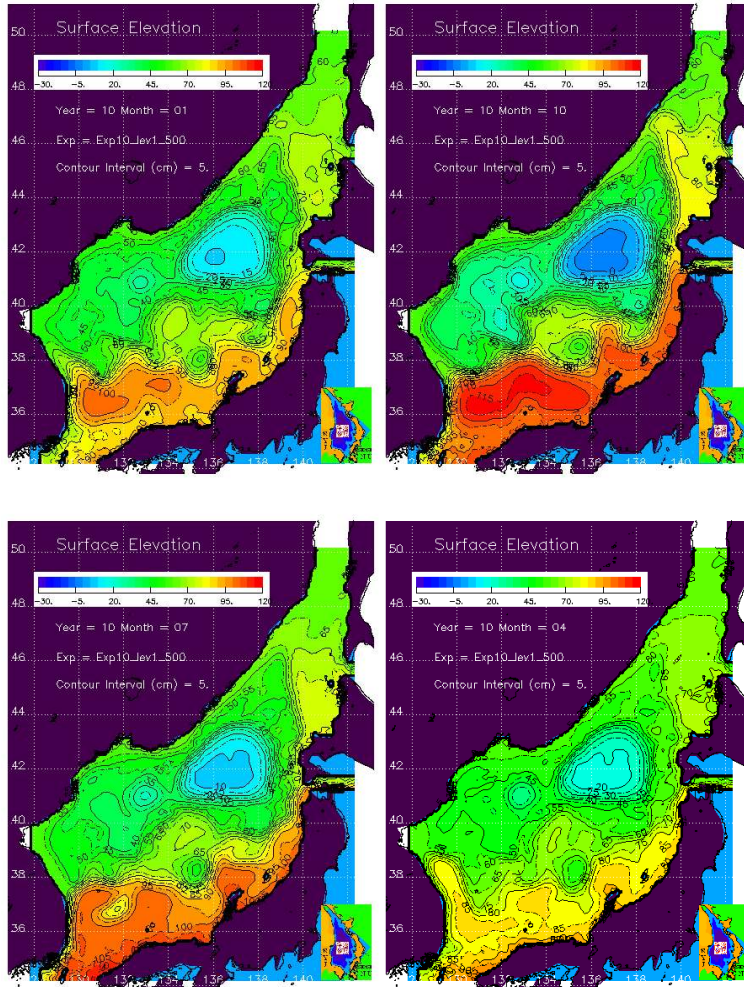


Fig. 6-11 Sea surface elevation calculated using POM-ES
a) Apr., b) July, c) Oct. d) Jan.

(다) 표층 수온 (Fig. 6-12)

모델의 표층수온은 GDEM의 수온자료를 자료동화 하여 생산하였기 때문에 원리적으로는 GDEM 자료와 동일하다. 다만 각 월별 수온 자료는 15일을 기준으로 하여 동화하였으며, 다음달 14일까지 서서히 모델 Forcing에 의하여 변화하게 된다.

GDEM 표층 수온자료는 타자료에 비해 몇가지 측면에서 두드러진 특성을 가지고 있는 바, 첫째, 격자간 해상도가 높아서(1/5도) 중규모-소규모의 구조적 특징을 잘 보존하고 있으며 모델 자료동화에 의한 결과 중규모의 소용돌이 재현에 어떤 자료와 비교하여도 탁월하게 우수하며, 둘째, 계절 변동특성이 뚜렷하고, 셋째, 경계역

부근의 주요 해류계의 특성을 잘 반영하고 있다.

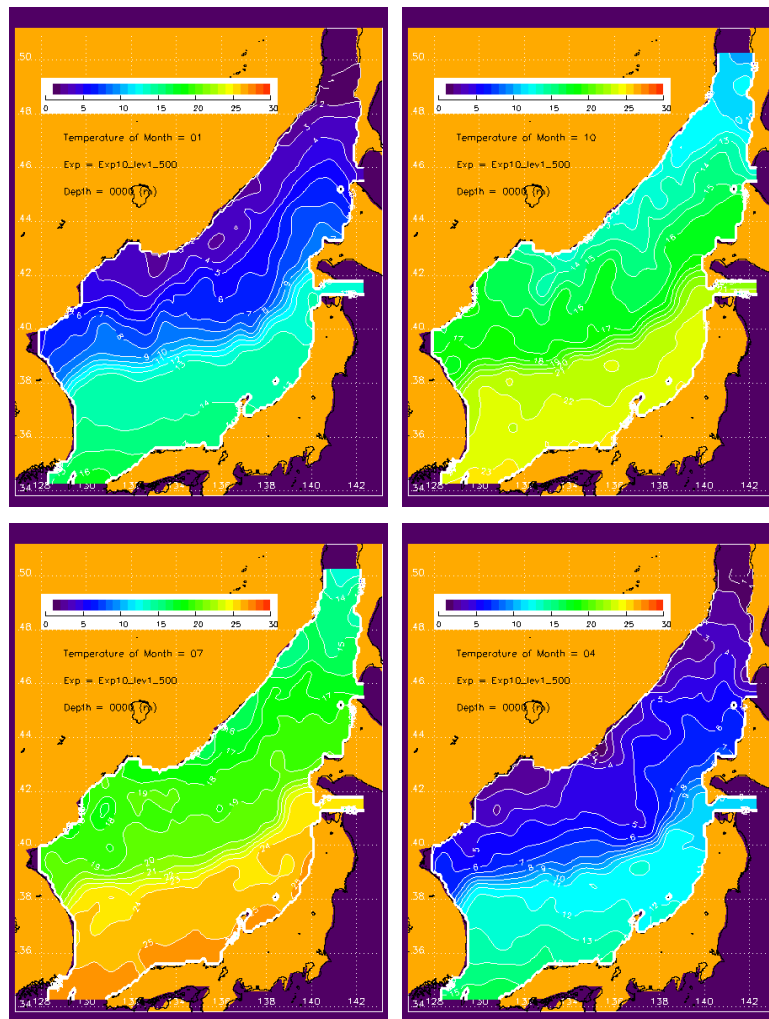


Fig. 6-12 Sea surface temperature calculated using POM-ES
a) Apr., b) July, c) Oct. d) Jan.

(2) 중-저층 순환 양상과 계절변동

(가) 중층 유속 (500m)

수심 500m를 기준으로 한 중층 순환 양상은 표층과는 판이한 양상을 보여준다 (Fig. 6-13). 표층에서 본 극전선역을 축으로 남부와 북부의 큰 순환고리는 보이지 않고 주요 경계류 중-저층에서 표층과는 반대 방향의 흐름이 존재하는데, 봄철 일 본열도를 따라 남하하는 중층해류는 우리나라 동해남부를 따라 다시 북상하고 있으며, 울릉 분지에서는 표층의 시계방향 순환과는 반대방향의 반시계방향의 순환을 보이며 극전선역에서 좁은 통로를 타고 울릉 분지로 유입되는 해류와 만나게 된다.

하계로 접어들면서 한류계인 리만한류와 북한한류가 강화되며, 남방 한계를 37도 까지 확장하게 되며, 그 세력은 10월까지 계속되다가 11월로 접어들면서 대마난류의 반류가 강화되면서 점차 소멸된다.

중규모의 소용돌이는 수심 500m 이심까지 여러 해역에서 강하게 발달되고 있으며, 특히 표층의 시계방향과는 반대방향의 소용돌이가 존재하는 것이 특기할 만하다. 특히 북위 42도 부근의 반시계방향의 소용돌이는 극전선역의 소용돌이, 그 이남의 울릉 분지에서의 소용돌이와 서로 연결되어 상호작용을 하고 있으며, 분지간 해수수송에 기여하고 있다. 북부의 일본분지에서의 반시계 순환고리는 실제보다 과장되어 나타나고 있는데, 이는 동화자료간 불일치에 의한 결과로 분석되었으며, 향후 개선이 필요한 부분이다.

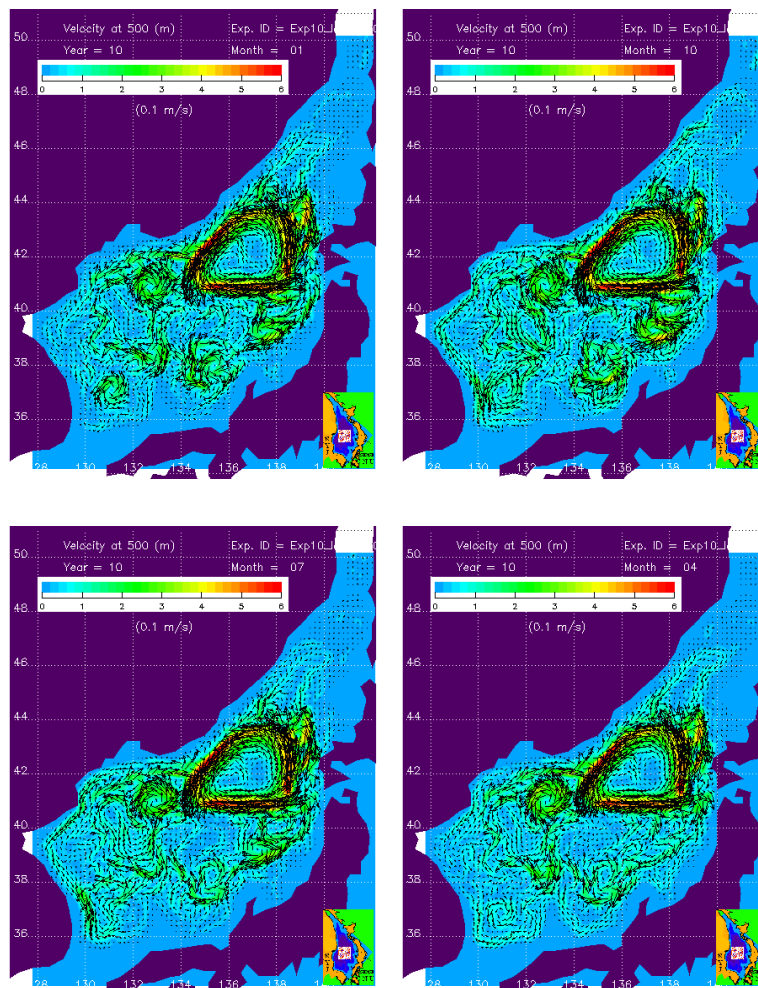


Fig. 6-13 Mid-depth(500m) currents calculated using POM-ES

a) Apr., b) July, c) Oct. d) Jan.

(나) 저층 유속 (3000 m)

수심 3000m에서의 저층 유속은 주로 북부해역의 일본분지에서 발생하고 있다 (Fig. 6-14). 반시계 방향의 순환고리를 보여주는 양상은 표층과 유사하다. 저층에서의 수온-염분 자료의 신빙도가 표층, 중층에 비해 떨어지고, 저층의 유속관측 결과가 많지 않기 때문에 그 결과를 검증하기에는 자료가 부족한 실정이다.

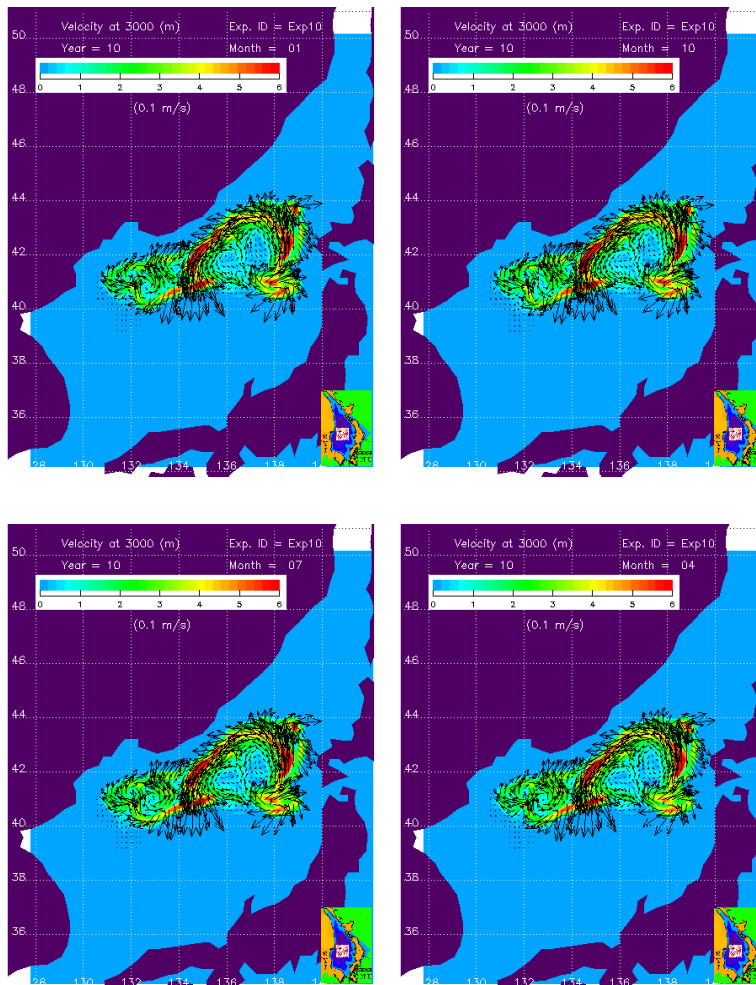


Fig. 6-14 Bottom(3000m) currents calculated using POM-ES

a) Apr., b) July, c) Oct. d) Jan.

2. 동해 극전선역의 구조와 변동성 연구

가. 자료 및 방법

동해 극전선축의 계절적인 변동성을 연구하기 위하여 동해 3차원 해수순환 수치모델링 결과와 동해 해수면 고도이상 자료 (Sea Surface Anomaly : SSA)를 사용하였다. 동해 3차원 해수순환 수치모델은 POM code를 기반으로 하여 Ro (1999, 2001)가 동해의 지형, 수심분포를 가지고 모델의 목적에 맞추어 격자체계와 수심 및 개방경계를 구성한 것이다. 이 모델은 격자 간격이 위경도 모두 0.1° 이고, 수직으로는 12 개의 sigma 층을 가지고 있어 비교적 상세하게 해양학적인 현상들을 재현하였다.

해수면 고도이상 자료는 CLS(Collect and Location per Satellite)에서 TOPEX/POSEIDON(T/P), ERS-1, ERS-2 위성의 해수면고도자료를 결합하여 위경도 0.25° 의 등격자로 만든 AVISO (Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques) 자료이다. 사용된 AVISO 자료는 1992년 10월 22일부터 2000년 12월 29일까지 총 250 사이클이며, 이 기간중 1993년 12월 06일부터 1995년 4월 10일까지는 자료가 누락되어 있다. SSH 자료는 위성궤도의 ground track 상에 존재하며, 모델링 내의 자료동화의 목적을 위하여 0.1° 도 간격의 일정격자 상의 자료로 내삽이 필요하다. 이 때 내삽법은 적합보간법 (Optimal Interpolation)을 사용하였다. 일정 격자상의 재구성된 1995년 4월 이후의 SSH 자료를 이용하여 경험직교함수(EOF) 분석을 하여 고유모드로 분리하고 모드 별 특성을 살펴보았다. 또한 SSA의 월별 분석을 위하여 전자료로부터 월평균 SSA자료를 재계산하였다.

나. 결과

동해 3차원 해수순환 수치모델 결과에서는 한국 동해안을 따라 북상하는 동안 난류의 동쪽으로의 이안점(separation point)는 계절 변동성을 가지고 있다. 2월과 3월에 최대 위도 39.5°N 까지 이안점이 북상을 하고, 봄에서 여름으로 가면서 점차 남하하기 시작하여 9월에는 위도 37°N 로 남하하여 동쪽으로 전향을 하였다. 가을에서 겨울로 되면서 동한난류의 전향하는 위도는 다시 북상을 하게 된다. 동한난류의 북상한계가 각각 남하와 북상하는 기간 동안에 동해극전선축의 사행하는 진폭

또한 같이 감소와 증가가 발생하게 된다(Fig. 6-9, Fig. 6-11). 사행의 진폭은 3월에 가장 크게 되고, 8월에 진폭이 가장 작다. 동해 극전선에서의 표층유속은 동한난류의 북상한계가 가장 북쪽에 위치한 시기에 평균유속이 0.3 m/sec로 가장 작고, 반대로 가장 남쪽에 위치하는 동안에는 평균유속이 0.8 m/sec로 가장 높았다. 위도 37°N에서 동한난류의 북향하는 유속성분(v)과 동한난류의 해류폭은 계절별로 변화를 하였다. 4월에는 표층유속(v)이 연안쪽에 인접하여 0.5 m/sec로 최대를 보이고 있으면, 이때의 해류의 폭은 약 62km정도이다. 10월에는 유속이 최대 1.5 m/sec 이상이고 동한난류의 폭은 약 125km이상이었다. 모델에서 추정된 동한난류의 유속을 이용한 수심 200m 이하에서 해수 수송량은 4월에 2.4 Sv으로 가장 낮게 나타났고, 10월과 11월에 3.5 Sv 이상으로 가장 높았다.

해수면 고도이상 자료의 변동은 크게 두 가지 변동성을 가지고 있다. 첫째는 동해 극전선 축을 경계로 하여 남쪽해역에서의 계절적인 변동이다. 동한난류의 북상한계가 가장 북상한 기간에 남쪽해역에서의 해수면이 낮아졌고, 가장 남쪽으로 남하한 기간에는 이 해역에서의 해수면 고도이상이 가장 높게 나타났다. 두 번째는 극전선의 사행에 의해 발생하는 소용돌이의 국지적인 출현과 변동에 기인한 해수면 고도이상의 변동이다(Fig. 6-15).

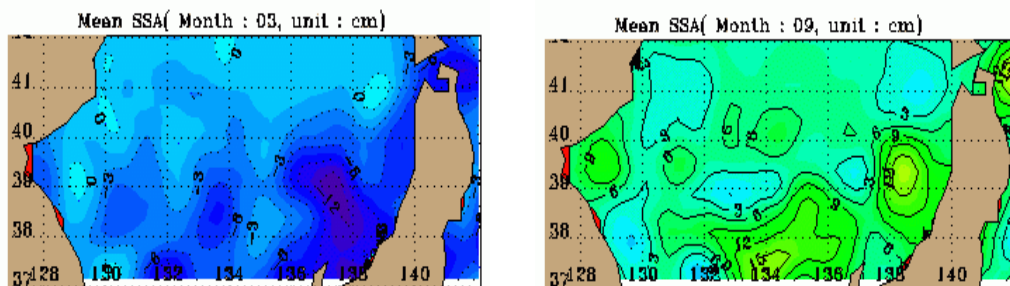


Fig. 6-15 SSA estimated from using Topex/ Poseidon and ERS-1/2 around polar front region (Mar. & Sept.).

이 SSA를 이용한 경험직교함수 분석 결과에서는 9개 모드로 총분산의 80 % 이상을 설명할 수 있었다. 그 중 연구해역의 전체에 영향을 주는 제 1모드는 전체의 58 %를 차지하였다. 그리고 나머지 모드는 동해극전선 지역에서의 해류의 사행과 소용돌이에 관련된 현상의 영향을 받는 것으로 보인다(Fig. 6-16). 경험직교함수분석에 의한 각 주요 모드별 진폭의 시계열 양상과 스펙트럼 분석 결과를 Fig. 6-17

에 도시하였다. 제 1모드는 년주기의 변동이 가장 강하게 나타났다. 이는 극전선 전역에 걸쳐서 영향을 주는 모드로 해역의 계절적인 변화와 연관이 있다. 제 2 모드에서는 2.5년 주기를 가지고 극전선축과 나머지 해역 사이에 위상차가 있는 성분 모드이다. 제 3 모드는 1년 주기가 우세하고 일본연안의 대마난류의 영향을 직접적으로 받는 해역과 나머지 해역으로 구분되며 동서 방향의 성분을 갖는 모드로 나타났다. 제 4 모드는 소용돌이와 관련된 성분이며, 1년과 약 2.5년 주기를 갖고 있다.

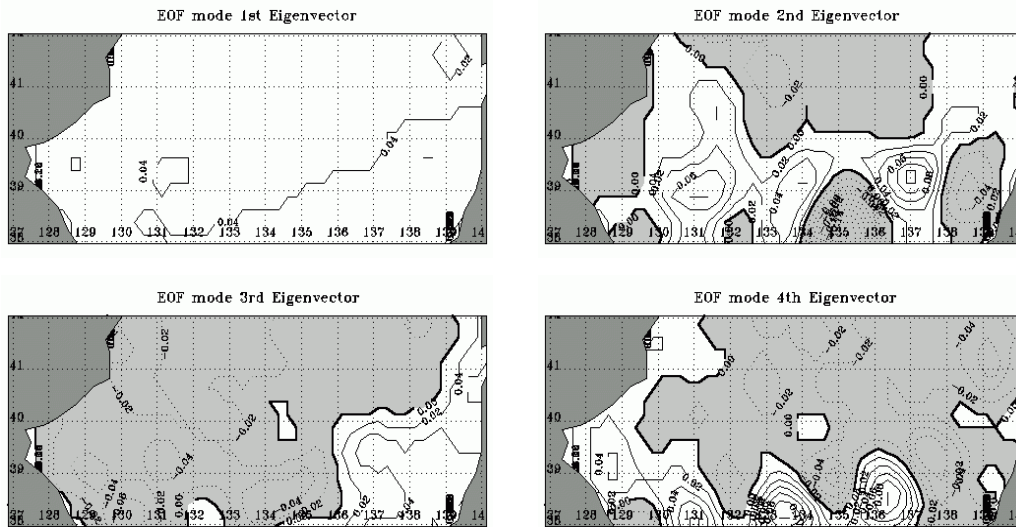


Fig. 6-16 Eigenvector distribution using EOF analysis from sea surface height anomaly.

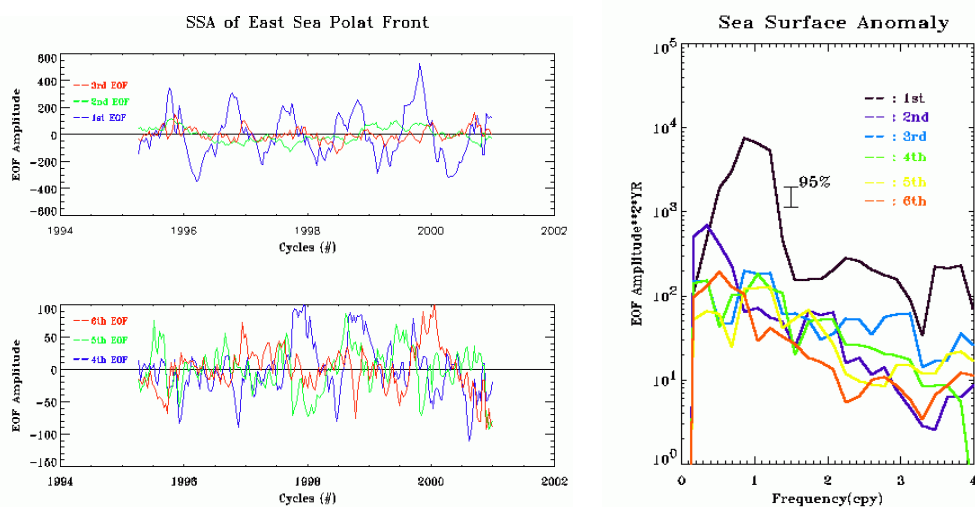


Fig. 6-17 The Amplitude of 6 main mode and the Spectrum analysis from EOF analysis of sea surface height anomaly.

동해의 표층수온과 해수면고도자료를 이용하여 Park(1996)은 극전선의 위치에 대하여 정의를 하였다. 이 결과 위도 40°N 지역에서 강한 수온전선이 형성이 되고, 동한난류의 영향을 받는 한국연안에서 위도 37-38°N 사이에서 연안 수온전선이 형성된다고 하였다. 이 결과는 본 연구의 SSA의 분포 양상에서도 한국연안에서는 약 위도 37-38°N에서, 그리고 일본 쪽으로 가면서 해수면고도이상 등치선이 상승하면서 위도 40°N에서 해수면 고도이상에 의한 전선이 형성되었다. EOF 분석에 의한 총 분산의 80%를 차지하는 상위 9개 모드로부터 재구성된 SSA 분포장을 Fig. 6-18에 도시하였다. 그 결과는 38-40°N 사이에 형성되는 극전선축을 명확히 정의할 수 있었다.

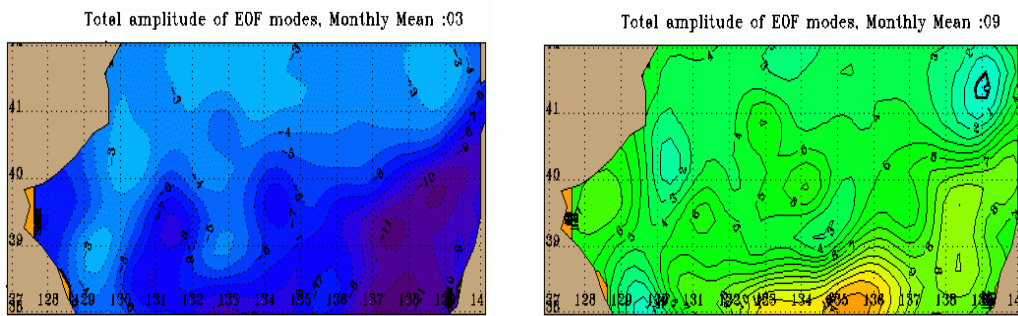


Fig. 6-18. SSA estimated from EOF analysis around polar front region (Mar. & Sept.).

3. 종합결과

가. 1차년도 연구 결과

1차년도에는 동해 해수순환 수치모델링을 위한 기초 자료 확보에 역점을 두고 동해 물성자료를 수집하여 자료의 데이터베이스를 구축하였다. 이때 수집된 자료는 동해 전체를 대상으로 하는 GDEM, WOA, KODC의 자료를 확보하였고, 이 DB를 이용하여 수심별 수온, 염분 등의 물성과 관련된 수평분포도를 작성하고 DB를 구축하였다. 수온과 염분의 DB를 가지고 P-vector 방법을 적용하여 동해의 경압성분의 유속장을 계산하고, DB를 구축하였다. 또한 유속장 DB의 수심별 수평분포도를 작성하여 손쉽게 웹을 사용하여 서치할 수 있는 도면의 DB를 구축하였다.

동해의 북위 34°- 46°, 동경 128°- 140°의 해역에서 격자 간격 1/10 °인 120x120의 수평격자망을 갖고, 수직적으로는 12개의 시그마 층을 가지는 동해 해수순환 수치모델을 개발하였다.

(1) 홈페이지 메뉴 형식



Fig. 6-19 Initial page of East Sea Circulation Study.

(가) 물성자료

- ① KODC
- ② GDEM
- ③ WOA

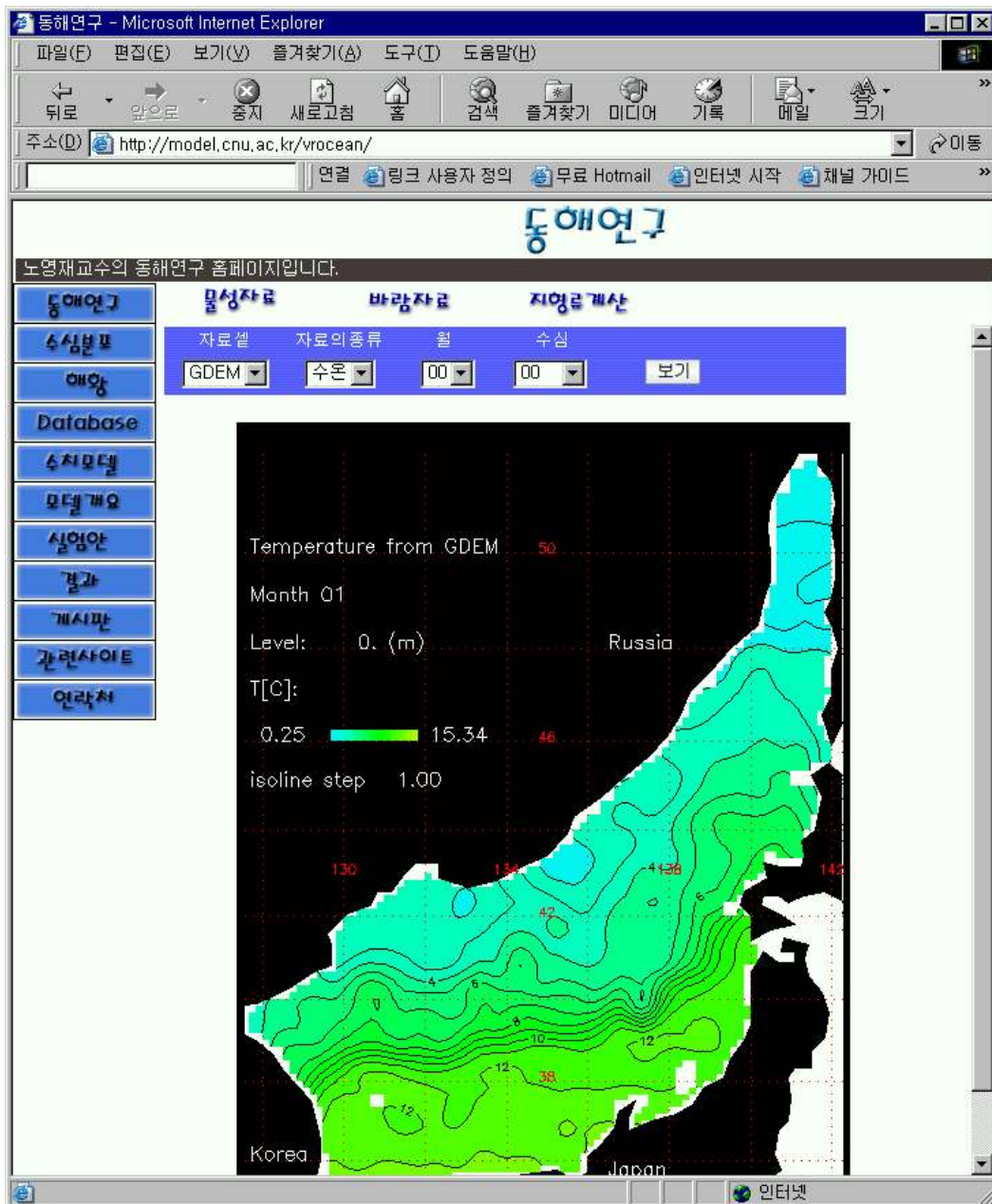


Fig. 6-20 DB page of East Sea Circulation Study.

(나) 바람자료

① H-R wind

② Na's wind

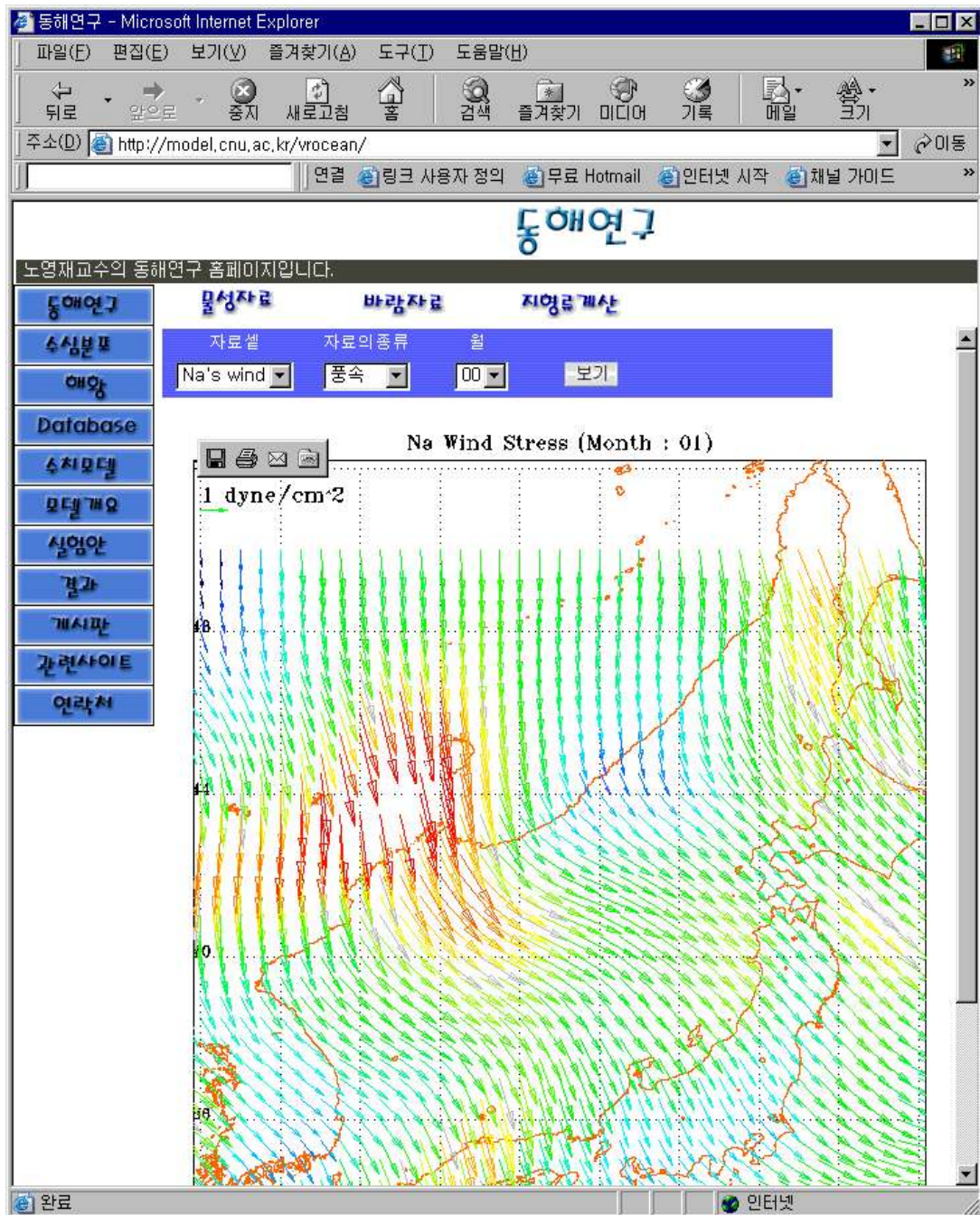


Fig. 6-21 Wind DB page of East Sea Circulation Study.

(다) P-vector 방법을 이용한 절대지형류 계산

- ① KODC
- ② GDEM
- ③ WOA

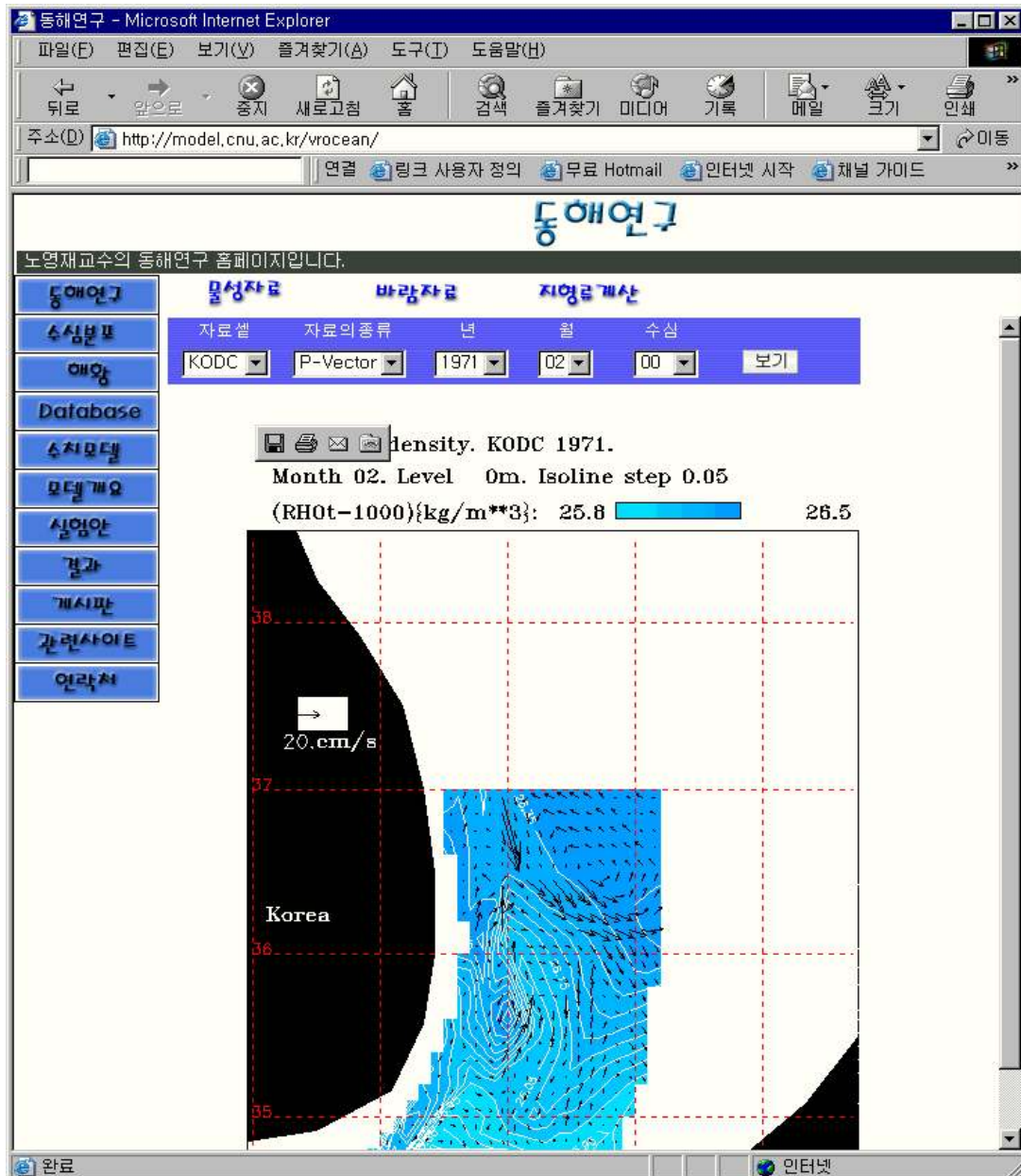


Fig. 6-22 Geostrophic current DB page of East Sea Circulation Study.

(라) 수치 모델링 실험결과

아래 그림에서 실험 결과의 메뉴를 볼 수 있으며, 총 18종류의 모델링 결과를 DB를 구축하여 제시하고 있다.

계절별/월별로 분포 자료의 가시화

- 해양 환경 변수로는 수온, 염분, 밀도, 수심.
- 시간대로는 월별, 월 평균, 연평균.

위의 조건에 따라서 각각의 환경을 웹 상에 시각화하고 있으며, 각 조건을 선택하여 특정 시간과 평균을 이용하여 차후에 일어날 수 있는 상황을 판단할 수 있도록 설계되었다.

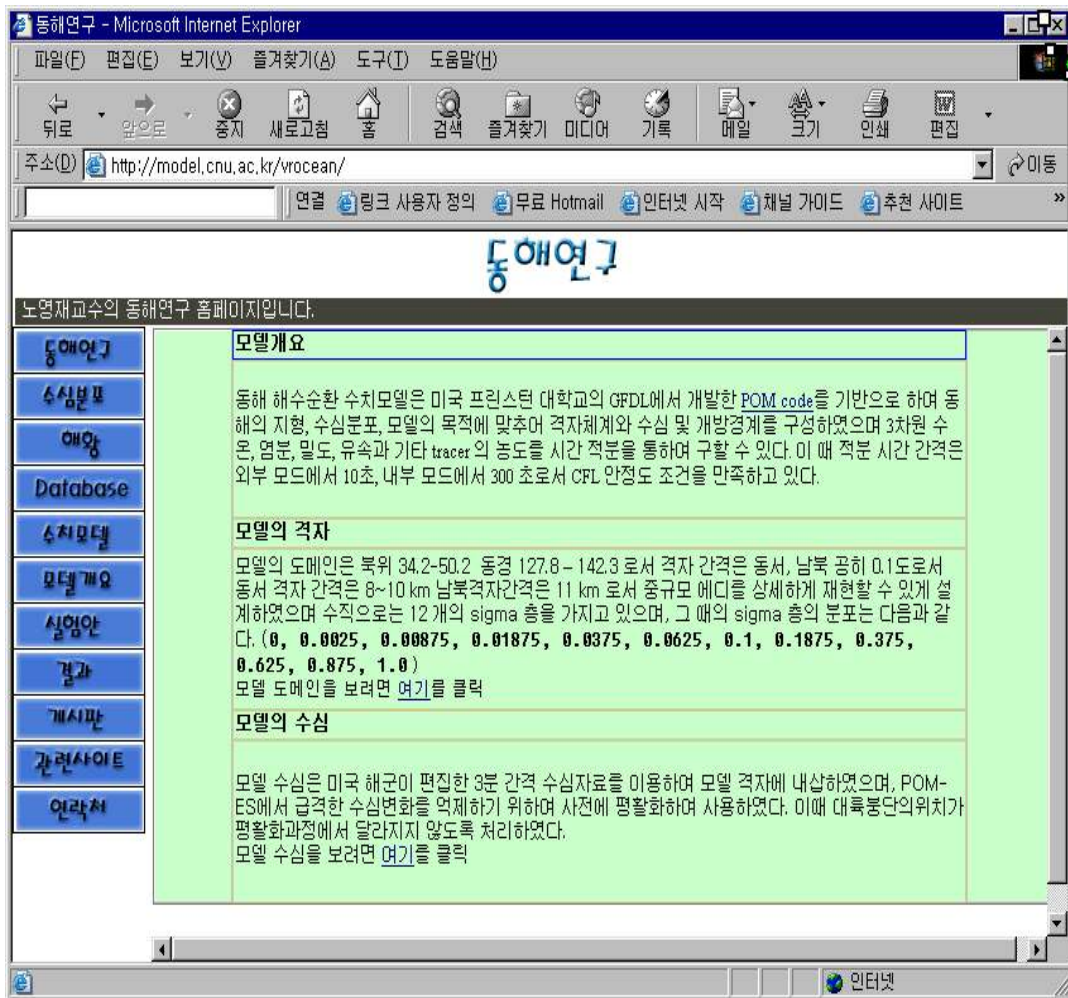


Fig. 6-23 Model description page of East Sea Circulation Study.

나. 2차년도 연구결과

2차년도에는 1차년도에 수집된 자료를 보강하기 위하여 장기간 자료의 확보와 1차년도 및 2차년도에 확보된 자료를 자료 동화 기법을 사용하여 동해 해수순환 수치모델링을 수행하는데 사업의 역점을 두었다. 이 결과 1990년대 이후의 JODC 자료와 1950년 이후의 JPL의 장기 수온 염분 자료가 확보되었으며, 1992년 이후의 표층 해면고도 자료를 확보하였다. 자료의 확보와 더불어 표층수온 자료를 모델 내에 동화하는 동화기법이 개발되었다.

Fig. 6-24는 동해에서 GDEM 자료를 이용하여 p-vector 방법에 의거 추정한 유속장의 표층 및 200m 수심에서의 분포도이다.

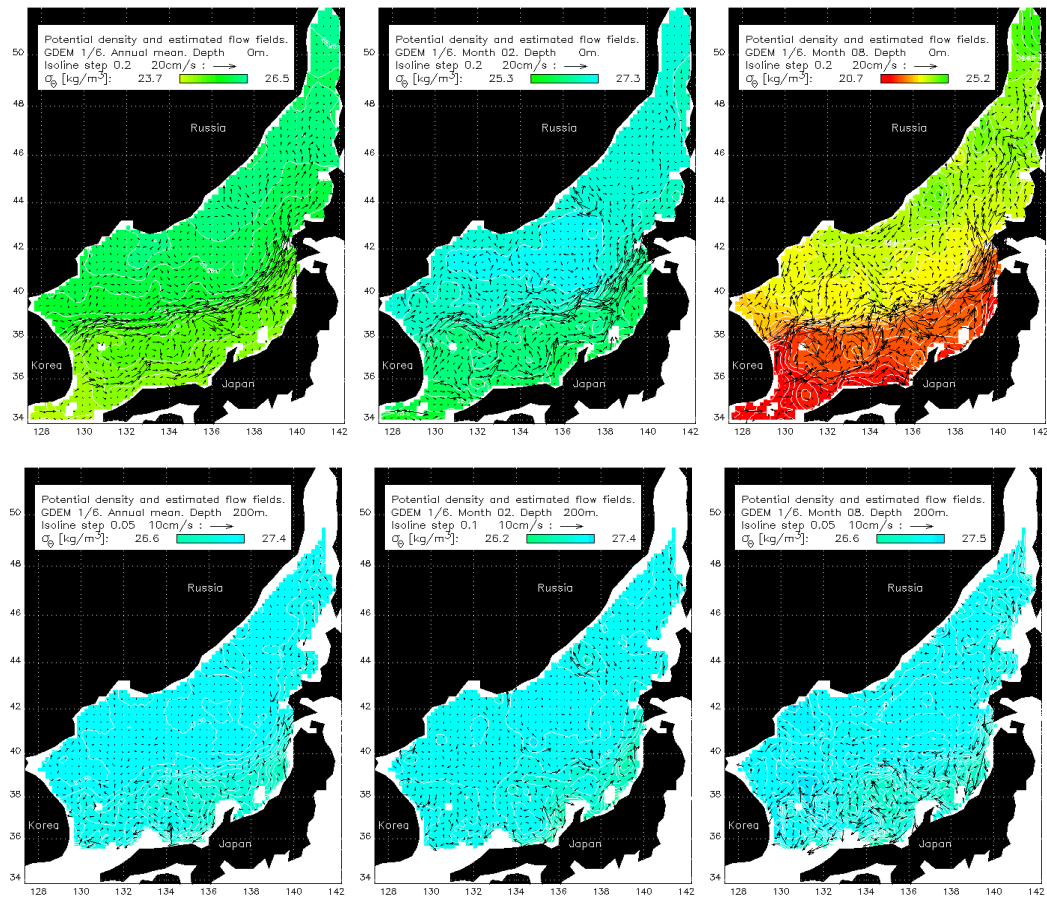


Fig. 6-24 Surface and 200m-depth currents calculated by P-vector method with GDEM data.

유속장의 특징은 1) 표층에서 전통적 순환 스킴(Uda, 1934)을 잘 표현하고 있으며, 계절에 따른 변동성이 큼을 알 수 있다. 겨울에 비해 여름은 유속의 세기가 크고, 특히 극전선의 남북 방향의 사행 진폭이 크다, 2) 200m 중층에서는 현저히 유속의 세기가 줄어들고 있으며, 가장 중요한 결과는 계절에 상관없이 주요해류 저층에 counter current가 존재하고 있다는 발견이다. 특히 동한난류 저층에서는 여름철에 빨라지는 북향류에 균형을 이루는 남향 저층류의 존재가 발견되었으며, 크기는 약 20 cm/sec 에 달하고 있다. 이는 최근 연구 결과와도 일치하고 있다. (장 등, 2000)

국지적인 중규모성 소용돌이들과 관련된 동해내의 해양학적인 현상들을 이해하기 위하여 기후학적인 자료의 수온 염분 자료에 P-vector를 적용하여 동해의 3차원 해류 벡터를 작성한 후에, 이 결과로부터 TWC, EKWC, NKCC and UWE와 관련된 해류 벡터를 연구하였다. 또한 POM-ES에 기초한 boundary current를 모델링하였다. 그리고 최종적으로 P-vector와 모델링에 의해 재현된 결과를 비교 검증하였다. 두 방법에 의해서 동해내의 EKWC, TWC, NKCC, LPC와 polar frontal jet 등과 관련된 주요 해류계가 비교적 자세히 재현이 되었으며, 특히 중규모성 소용돌이는 동해 전해역에 걸쳐서 분포하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 중규모성 소용돌이의 출현은 EKWC 와 TWC 등의 지역적인 boundary current 들과 관련되어 있었다. 이러한 현상의 한 예로서 TWC 축의 사행에 의하여 Oki Island 외역의 Ulleung Basin내에서 meso-scale eddy가 나타나게 된다.

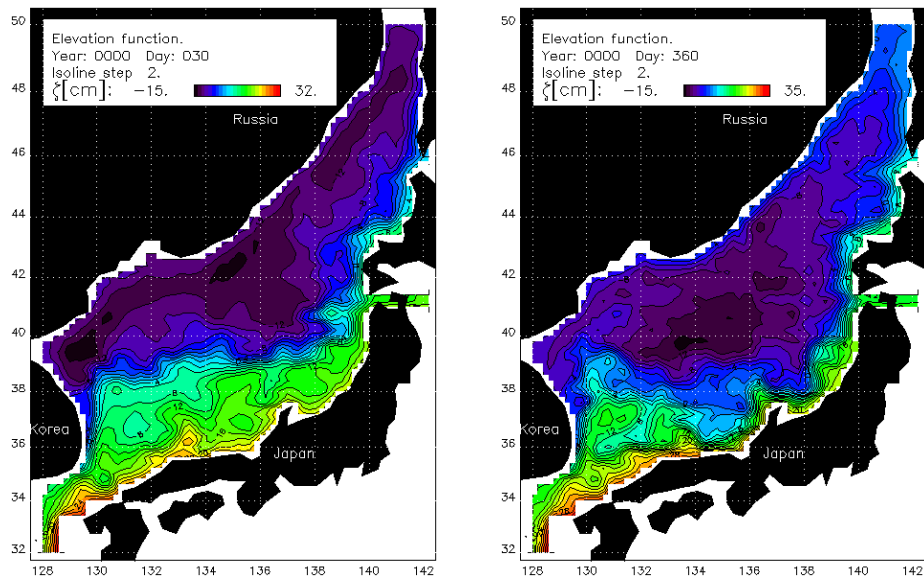


Fig. 6-25 Examples of model experiment (2 year continuous run).

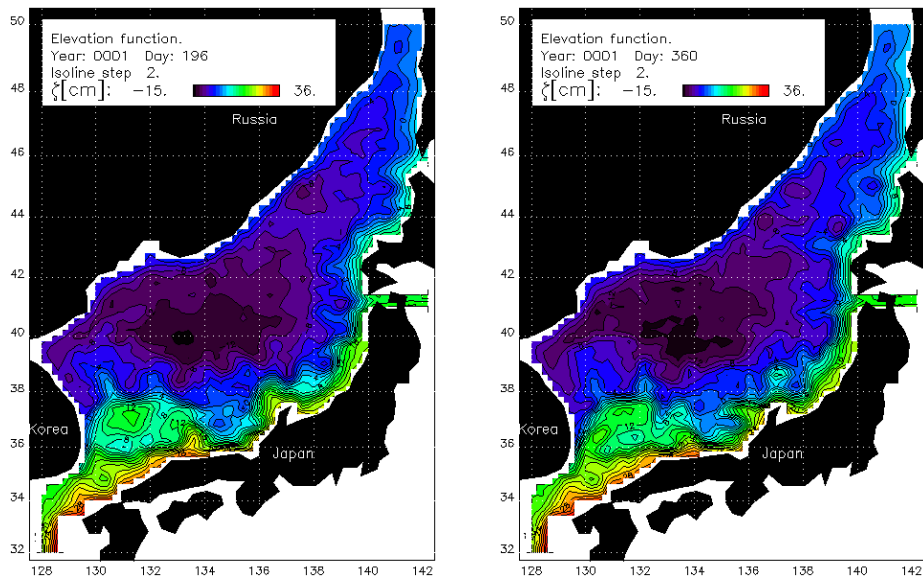


Fig. 6-25 Continued.

다. 3차년도 연구결과

3차년도에는 구성된 동해 해수순환 수치모델의 수행과 함께 모델 결과 수집된 자료의 분석을 통하여 동해의 각종 물리해양학적인 현상들을 규명하고자 하였다. 모델의 수행은 전 격자점에서의 초기 조건은 GDEM자료로부터 년평균 3차원 수온-염분 값을 구하여 부과하였으며, 모델 Run 초기 2년 동안은 diagnostic mode를 이용하여 년평균 유속장이 재현된 후 매월 3차원 수온-염분장을 Nudging 방법에 의한 자료동화를 하였다. 이 결과 동해에서 최대 적분 기간 10년의 모델 결과를 얻을 수 있었다.

동해의 해양현상을 이해하는 데에는 순환현상의 물리적 조건과 그 변동성을 이해하는 것이 가장 필수적이고 불가결하다. 그러나 현장 관측을 통하여 그러한 조건을 감시한다는 것은 기술적 문제나, 예산의 한계, 인력 등의 문제로 극히 제한되어 있다. 반면에 그러한 관측과 병행하여 모델링을 통한 접근이 점차 많이 요구되고 있다. 그 이유는 최근의 컴퓨터 기술의 발전 덕분에 결과의 사전, 사후 처리 능력이나, 그래픽 기술을 이용한 결과의 가시화 등을 손쉽게 빨리 할 수 있게 됨으로,

상세 격자를 채택한 모델의 수립과 운영이 점 점 용이해지고, 경제적으로도 가능하게 되고 있다.

3차년도 모델결과는 1,2차 연도의 연구결과와 비교하여 두 가지 측면에서 월등하게 그 결과가 향상되었다. 첫째, 자료동화를 이용한 모델결과로서 이 때 사용한 자료동화의 방식은 Nudging 방식으로서, 기존의 방식과는 보다 향상된 기법을 이용하였다. 둘째, 자료동화를 목적으로 기후적 3차원 수온-염분 자료를 재작성 하였으며 이 때 사용한 자료는 GDEM과 Levitus 자료로서 상층 500m 수심까지는 GDEM을 그 이심에서는 Levitus 자료를 사용하였다.

POM-ES의 결과는 동해의 주요해류와 소용돌이가 잘 나타나는 매우 상세한 순환 양상을 보여주었다(Fig. 6-9; Fig. 6-11). 특히 전 월에 걸쳐 유속이 0.2 m/sec 이상인 곳이 TWC, EKWC, NKCC, 리만한류(LPC), 동해극전선(PFJ) 등의 지역으로 정의가 되어지고, 이들의 계절변동이 뚜렷하게 보여지고 있다. 울릉 분지, 야마토고원, 일본분지 지역의 소용돌이는 모델을 통하여 명확하게 보여지고 있다. 그리고 PFJ의 계절적으로 사행하는 양상이 변화하는 진폭의 크기가 뚜렷하게 나타났다. 겨울과 봄에는 EKWC가 북위 38도 이상까지 북상을 한 후에 동쪽으로 전향하였고, EKWC의 유속이 0.7 m/sec 이하였다. 여름과 가을에는 북위 38도를 넘지 못하고 동쪽으로 전향을 한 후 사행을 하면서 동진 한다. 여름과 가을의 EKWC의 유속은 1.2 m/sec 이상으로 계산되었다. 따라서 PFJ의 사행하는 진폭의 크기가 여름과 가을에 비교하여 상대적으로 겨울과 봄에 매우 컸고, 사행하는 진폭의 차이로 인하여 출현하는 소용돌이의 수가 겨울과 봄에 증가하였다. 동해 전 해역에서 유속이 가장 강하게 나타나는 지역은 EKWC가 북상하다가 동쪽으로 전향하는 지역과 PV에서 유속이 가장 강하게 나타나는 쓰가루해협 근처였다.

동해 순환 수치 모델에 기후학적인 수온과 염분 자료를 동화하여 재현한 동해의 해류 패턴으로부터 계절적인 순환 양상을 이해하고, 모델로 재현된 해류의 유속, 수피 및 해류 수송량을 가지고 TWC, EKWC, LPC, NKCC 과 PFJ 등의 주요 해류계의 특성을 파악하는 연구를 진행하였다. 이 결과 일반적으로 알려진 동해내의 TWC, EKWC, NKCC, LPC 와 frontal jet의 다양한 형태를 연구할 수 있었으며, 동해내의 세계의 주요 분지 사이에서 해수의 교환과 관련된 해류 시스템을 이해할 수 있었다. 이러한 결과들은 해류의 시간적인 변화를 시각적으로 보여줄 수 있는 동화상 제작을 통하여 뚜렷하게 알 수 있었다.

제 7 절 미세구조를 포함한 3차원 해수특성 구조 예측

1. 서론

동해의 해수순환과 수온, 염분, 혼합층 깊이 등 미세구조의 정확한 예측은 해군 군사작전의 수행을 위해 중요한 부분이다. 즉 수온 등의 연직 구조를 정확히 파악하여 수중에서 음파의 경로를 파악할 수 있을 뿐만 아니라 이를 이용하여 수중에서의 물체를 추적하는데 적절히 이용할 수 있다. 이를 위해서는 현실적인 대기 강제력뿐만 아니라 해수의 미세구조 재현에 필수적인 해양 혼합층 모형을 해양 순환 모형에 적절히 접합해야 한다. 왜냐하면 해수의 미세구조를 제대로 나타내기 위해서는 난류의 연직 확산을 적절히 모수화해야 하는데 이를 위해서는 혼합층 모형이 필요하기 때문이다. 한편 이전의 동해 모형을 이용한 수치 실험에서는 대부분 상수의 확산 계수를 이용하였으므로 혼합층과 수온약층의 연직 경사가 적절히 모사되지 않았다. 또한 해양 혼합층 모형이 동해 순환에 미치는 영향에 이해도 부족한 실정이다.

따라서 이 연구에서는, 본 연구진이 개발하여 확보중인, 해양 혼합층 모형을 동해 순환 모형에 사용할 수 있도록 확장·개선하였고, 이를 동해 순환 모형에 접합하였다. 한편, 실제에 가까운 고주파의 대기 강제력을 적용하기 이전에 장기평균 기후 강제력을 동해에 적용하여 본 연구진이 개발한 동해 순환 모형의 3차원 해수 평균 구조의 재현능력을 평가하여 개선점을 파악하는 것이 필요하다. 따라서 본 단계에서는 장기 평균된 대기 강제력을 동해 모형에 적용하여 일련의 수치 실험을 하였고, 그 결과를 비교·분석하였다. 실험은 해양 혼합층 모형을 동해 순환 모형에 접합한 경우 이외에 비교를 위해 상수의 연직 난류 계수를 이용한 경우와 뮐러-야마다 모형을 이용한 경우에 대해서도 행하였다. 또한 열 경계 조건이 상층 해양의 구조에 미치는 영향을 파악하기 위하여 상수의 연직 난류 계수를 이용한 경우 관측 해면수온에 모사될 해면수온을 복원하는 단순 복원조건과 Haney 형태의 열속조건을 적용하여 그 영향을 파악하였다.

2. 모형

가. 지배 방정식

(1) 동해 순환모형

지구를 반경 a 의 각속도 Ω 로 회전하는 구 (sphere)로 가정하고, 구면 좌표계 (λ, ϕ, z 각각 경도, 위도, 고도)를 사용하였다. 해양은 해면에서 $z=0$ 이고, 해저에서 $z=-H(\lambda, \phi)$ 이며, 7개의 변수들, 즉 3개의 속도성분들 (u, v, w)과 압력 p , 수온 T , 염분 S 가 해양의 물리적 조건들을 명시한다. 해수는 비압축성 유체라고 가정하였다. 수평방향으로의 난류 점성 계수와 확산 계수는 A_M, A_H 으로, 연직 방향으로의 난류 점성 계수와 난류 확산 계수는 μ, κ 로 표시하였다.

지배방정식을 단순화하기 위해서 몇 가지의 어림들이 사용되었는데, 지구 반경에 비해서 해양은 더 얇기 때문에 천층 어림, 해양에서 밀도의 변화가 상대적으로 작기 때문에 부시네스크 어림, 그리고 정수 관계를 사용하였다. 규모 분석에 의거하여 수평 운동량 방정식에서 w 가 포함된 항들은 모두 무시된다.

위의 가정과 어림을 사용하면 지배 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + Lu - \frac{uv \tan \phi}{a} - fv = -\frac{1}{\rho_o a \cos \phi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ + A_m \left\{ \nabla^2 u + \frac{(1 - \tan^2 \phi) u}{a^2} - \frac{2 \sin \phi}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} \right\} \end{aligned} \quad (7.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + Lv - \frac{u^2 \tan \phi}{a} + fu = -\frac{1}{\rho_o a} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ + A_m \left\{ \nabla^2 v + \frac{(1 - \tan^2 \phi) v}{a^2} - \frac{2 \sin \phi}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} \right\} \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (7.3)$$

$$\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (v \cos \phi) + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7.4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + L(T) = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + A_H \nabla^2 T \quad (7.5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + L(S) = \kappa \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + A_H \nabla^2 S \quad (7.6)$$

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (7.7)$$

여기서,

$$L(\alpha) = \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (u\alpha) + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (v a \cos \phi) + \frac{\partial}{\partial z} (w a) \quad (7.8)$$

$$\nabla^2 \alpha = \frac{1}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \phi} \cos \phi \right) \quad (7.9)$$

$$f = 2\Omega \sin \phi \quad (7.10)$$

을 의미한다.

식 (7.7)은 비선형 상태방정식을 나타내며, 본 연구에서는 유네스코 공식 (UNESCO 1981)을 사용하였다.

해양 지형의 설정은 $H(\lambda, \phi)$ 을 명시함으로써 정의된다. 해저에서는 운동량 속, 열 속, 염 속은 0으로 가정한다. 즉, 해저에서는

$$\rho_o \mu \frac{\partial}{\partial z} (u, v) = 0, \text{ at } z = -H(\lambda, \phi) \quad (7.11)$$

$$\rho_o \mu \frac{\partial}{\partial z} (T, S) = 0$$

해면에서 바람 응력과 열과 염의 수송들은 관측값이나 대기 모형에서 지정된다.

$$\rho_o \mu \frac{\partial}{\partial z} (u, v) = (\tau^\lambda, \tau^\phi) \quad \text{at } z = 0 \quad (7.12)$$

$$\rho_o \kappa \frac{\partial}{\partial z} (T, S) = (F^T, F^S)$$

실제 해양에서 담수속 (P-E)은 해면에서 담수의 수송을 무시함으로써 해양 모형에서 상당 염분속 (equivalent salt flux)으로 대체할 수 있다.

측면에서는 no-slip 조건, 즉 $u = v = 0$ 과 열속과 염분속은 없는 것으로 가정한다. 해저에서 흐름은 해저 지형을 따라 흐른다고 가정한다.

$$w = -\frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial H}{\partial \lambda} - \frac{v}{a} \frac{\partial H}{\partial \phi} \text{ at } z = -H(\lambda, \phi) \quad (7.13)$$

대부분의 에너지를 포함하는 저주파의 운동들에 크게 영향을 끼치지 않고 고주파의 표면 중력파들을 제거하고, 더 큰 시간 간격이 가능하도록 하기 위해서 굳은 뚜껑 (rigid lid) 해면을 가정한다. 즉,

$$w=0, \quad \text{at } z=0. \quad z=-H(\lambda, \varphi) \quad (7.14)$$

이 가정을 사용함으로써 계산시간은 줄일 수 있지만, 예단 방정식의 해를 구하기가 오히려 복잡해진다. 정수 관계로부터 어떤 깊이 z 에서 압력은 해면에서 압력 p_s 과 정수 압력부분으로 구성된다.

$$p(z) = p_s + \int_z^0 g\rho(z') dz' \quad (7.15)$$

p_s 를 예단할 수 있는 간단한 방정식은 없지만, 다음과 같이 미분을 이용해서 p_s 를 방정식에서 제거할 수 있다. 즉, 식 (7.1), (7.2)에 $\frac{\partial}{\partial z}$ 를 적용하고, 정수관계를 적용하면 다음 식들을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) - f \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{g}{\rho_o a \cos \varphi} \frac{\partial \rho}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial z} (G^\lambda) \quad (7.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) + f \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{g}{\rho_o a} \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial z} (G^\varphi) \quad (7.17)$$

여기서 G^λ, G^φ 는 식 (7.1), (7.2)에서 비선형 항과 점성항의 합을 나타낸다. 위의 방정식들은 연직 속도 쉬어의 예단을 가능하게 하며, 연직방향으로 독립인 속도 성분들의 값이 요구된다. 연직 평균된 성분들 (\bar{u}, \bar{v})은 연직으로 적분된 흐름에 대하여 용적 수송 함수 (volume transport streamfunction), Ψ 의 식으로 쓸 수 있다.

$$\bar{u} = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 u dz = - \frac{1}{Ha} \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} \quad (7.18)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 v dz = \frac{1}{Ha \cos \varphi} \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda} \quad (7.19)$$

Ψ 의 존재는 연직 적분된 흐름의 비발산 성질 ($\nabla \cdot u = 0$)에 의해서 보장된다. 즉,

$$\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\int_{-H}^0 u dz \right) + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \int_{-H}^0 v dz \right) = 0 \quad (7.20)$$

이 관계는 연속 방정식인 식 (7.4)를 적분하고 해저에서의 경계 조건들인 식 (7.11)을 적용함으로써 증명된다.

미지의 p_s 을 포함하지 않는 ψ 의 예단 방정식은 식 (7.1), (7.2)을 연직 적분하고 컬 (curl)을 취하면 구할 수 있다. 먼저 연직 적분을 하고, ψ 의 정의를 이용하면,

$$-\frac{1}{Ha} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} \right) - \frac{f}{Ha \cos \phi} \frac{\partial \psi}{\partial \lambda} = -\frac{1}{a \rho_o \cos \phi} \frac{\partial p_s}{\partial \lambda} - \frac{g}{Ha \rho_o \cos \phi} \int_{-H}^0 \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial \lambda} dz' dz + \frac{1}{H} \int_{-H}^0 G^\lambda dz \quad (7.21)$$

$$\frac{1}{Ha \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} \right) - \frac{f}{Ha} \frac{\partial \psi}{\partial \lambda} = -\frac{1}{a \rho_o} \frac{\partial p_s}{\partial \phi} - \frac{g}{Ha \rho_o} \int_{-H}^0 \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial \phi} dz' dz + \frac{1}{H} \int_{-H}^0 G^\phi dz \quad (7.22)$$

그리고 다음과 같이 정의된 $curl_z$ 연산자를 적용하고,

$$curl_z(q_1, q_2) = \frac{1}{a \cos \phi} \left[\frac{\partial q_2}{\partial \lambda} - \frac{\partial}{\partial \phi} (q_1 \cos \phi) \right] \quad (7.23)$$

$1/(a^2 \cos \phi)$ 을 제거하여 단순화하면, 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{1}{H \cos \phi} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \lambda \partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\cos \phi}{H} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi \partial t} \right) \right] \\ & - \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{f}{H} \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \right) - \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{f}{H} \frac{\partial \psi}{\partial \lambda} \right) \right] \\ = & - \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{g}{\rho_o H} \int_{-H}^0 \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial \phi} dz' dz \right) \right. \\ & \left. - \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{g}{\rho_o H} \int_{-H}^0 \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial \lambda} dz' dz \right) \right] \\ & + \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{a}{H} \int_{-H}^0 G^\phi dz \right) - \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{a \cos \phi}{H} \int_{-H}^0 G^\lambda dz \right) \right] \end{aligned} \quad (7.24)$$

식 (7.24)는 이계 미분 연산자 (second order differential operator)의 역산 (inversion)을 필요로 한다. 이러한 inversion을 위해서 경계 조건이 필요하다. 일반적으로, ψ 의 영역 (domain)은 다중으로 연결된 지역 (multiply connected region)이며, 그것의 경계는 주요한 대륙과 몇 개의 섬들로 구성된다. 경계에 직교하는 속도 성분이 없기 때문에 ψ 의 값은 해안선을 따라서 공간적으로 일정해야 한다. 선택된 대륙에서 ψ 역시 시간에 있어서 상수로 취급된다. 그러나 섬 경계에서 ψ 는 변하는 순환에 대응하여 변한다. ψ 의 시간 변화를 예측하기 위해서 Takano (1974)의 구멍 완화법을 사용한다. 경계 주위에서 ∇p_s 의 선적분이 0 이어야 한다는 점에서 p_s 는 single-valued 함수이다. 각 섬 주위에서 식(7.21)와 (7.22)을 적분하고, 위와 같은 조건을 적용하면 섬에서 ψ 의 변화를 예측하기 위한 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$\oint \left(-\frac{\cos \phi}{H} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi \partial t} d\lambda + \frac{1}{H \cos \phi} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \lambda \partial t} d\phi \right)$$

$$= -\oint \frac{g}{\rho_0 H} \left[\left(\int_{-H}^0 \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial \lambda} dz' dz \right) d\lambda + \left(\int_{-H}^0 \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial \phi} dz' dz \right) d\phi \right] \quad (2.25)$$

$$+ \oint \left[\left(\frac{a \cos \phi}{H} \int_{-H}^0 G^x dz \right) d\lambda + \left(\frac{a}{H} \int_{-H}^0 G^y dz \right) d\phi \right]$$

(2) 해양 혼합층 모형

해양 혼합층을 나타내는 평균 수평 속도 U , 평균 부력 B 및 평균 난류 에너지 E 의 방정식은 수평 균질성 (horizontal homogeneity)를 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \overline{uw} \quad (7.26)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \overline{bw} \quad (7.27)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[\overline{w \left(\frac{P}{\rho_0} + \frac{u_i u_i}{2} \right)} \right] - \overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{bw} - \varepsilon \quad (7.28)$$

이 방정식들은 연직 난류 점성 계수 K_M , 수온과 염분에 대한 난류 확산 계수 K_H , 난류 운동 에너지 (Turbulent Kinetic Energy, TKE)에 대한 난류 확산 계수

K_E 를 도입, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (7.29)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial B}{\partial z} \right) \quad (7.30)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_E \frac{\partial E}{\partial z} \right) + K_M \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + K_H \frac{\partial B}{\partial z} - \varepsilon \quad (7.31)$$

여기서 난류 점성 계수와 난류 확산 계수는 난류의 속도 크기 $q (= (2E)^{1/2})$ 와 난류의 길이 크기 l 을 이용하여 다음과 같이 모수화할 수 있다.

$$K_M = S_M q l \quad (7.32)$$

$$K_H = S_H q l \quad (7.33)$$

$$K_E = S_E q l \quad (7.34)$$

여기서 소산율 ε (dissipation rate)도 다음과 같이 모수화할 수 있다.

$$\varepsilon = C_\varepsilon q^3 / l \quad (7.35)$$

그리고, 여기서 사용된 상수는 Mellor and Yamada (1982)에 따라 성층화되지 않은 상태의 경우 $S_M = 0.39 (= S_{M0})$, $S_M/S_H = 0.8$, $S_M/S_E = 1.95$, $C_\varepsilon = 0.06 (= C_{\varepsilon 0})$ 이 사용되었다.

모형의 기본적인 틀은 널리 사용되어 오고 있는 해양 혼합층 난류 모형인 Mellor and Yamada 모형 (MY 모형, 1982)과 유사하지만, 몇 가지 점에서 MY 모형과 매우 다른 특징을 가지고 있다. MY 모형은 해면으로부터의 난류 에너지 전달 (turbulent kinetic energy flux)을 무시한 상태에서 대기 경계층 (atmospheric boundary layer)과 유사하게 모수화한 결과, 계절 수온 약층의 형성을 포함한 특성을 가지고 있음이 밝혀졌다. 즉 MY 모형에서는 유체의 성층화에 의한 속 리차드슨 수 R_t 의 값이

$$S = a_1 \frac{1 - a_2 R_t}{1 - a_3 R_t} \quad (2.36)$$

로 나타나게 되는데, 이에 따르면 R_t 의 값이 특정한 값보다 커지게 되면

($R_t > a_2^{-1} (= 0.19)$), 난류의 에디 점성이 없어지게 된다. 이에 반해, 실제로는 R_t 가 커짐에 따라 에디 점성이 작아지긴 하지만, 항상 유한한 값을 갖는 것으로 밝혀져 있다. 즉 난류는 크고 작은 여러 크기의 에디로 이루어져 있는 바, 비록 큰 에디는 성층화에 의해 부서져 내부 중력과 (internal gravity wave)로 전환하지만, 작은 에디는 성층화의 영향을 받지 않고, 난류의 상태를 유지하므로, 에디 점성은 큰 R_t 에도 불구하고 유한한 값을 유지한다. 따라서 이와 같은 성층화가 난류에 미치는 영향을 보다 적절히 취급하기 위해 다음과 같이 난류를 모수화 하였다.

$$\frac{S_M}{S_{M0}} = (1 + \alpha R_t)^{-\frac{1}{2}} \quad (7.37)$$

$$\frac{C_\varepsilon}{C_{\varepsilon 0}} = (1 + \alpha R_t)^{\frac{1}{2}} \quad (7.38)$$

여기서 $R_t (= (Nl/q)^2)$ 는 속도, 부력의 평균장이 아닌 난류 에디 자체의 특성에 의한 Richardson 값이다. S_{M0} 는 성층화되지 않은 상태의 S_M 의 값을 의미하며, α 는 Noh et al. (2000)에 따라 $\alpha \approx 120$ 으로 두었다.

모형에 사용된 길이 크기는 다음과 같이 주어진다.

$$l = \frac{\kappa(z + z_0)}{1 + \kappa(z + z_0)/h} \quad (7.39)$$

여기서 h 는 혼합층 깊이, κ 는 von Karman constant (=0.4)이다.

해수 표면에서의 경계 조건은 다음과 같이 주어졌으며,

$$K_M \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\tau}{\rho_0} \quad (7.40)$$

$$K_H \frac{\partial B}{\partial z} = \frac{1}{\rho_0 C_p} Q_0 + S_R(E - P) \quad (7.41)$$

$$K_E \frac{\partial E}{\partial z} = m u_*^3 \quad (7.42)$$

여기서 u_* 은 바람 응력 (τ)에 의한 마찰 속도 (frictional velocity)이며, Q_0 는 열속이고, 해면으로부터의 쇄파 (wave breaking)에 의해 생성된 난류 에너지 전달을 나타내는 값인 m 은 해양 상층에서 최근 관측자료에 대한 Craig and Banner

(1994)의 분석에 기초하여, 식 (7.39)와 (7.42)에서 $m=100$, $z_0=1$ 이라고 가정하였다.

나. 모형 설정 및 실험

사용된 동해 모형은 Bryan-Cox-Semtner 모형에 근간을 둔 GFDL MOM (Modular Ocean Model) 1.1 (Pacanowski et al. 1993)이며 Kim and Yoon (1999)에 근거하여 동해 모형에 맞게 수정하였다.

모형 영역은 동서 방향으로 동경 126.5도 - 동경 142.5도, 남북 방향으로 북위 33도 - 북위 52도로 동해 전체를 포함하고 있다. 수평격자의 크기는 동서, 남북 방향 모두 1/6도이다. 연직층은 24층 (Table 7-1) 이며, 상층 100 m에 10개의 층을 두어 해양혼합층의 구조를 자세히 살펴볼 수 있도록 하였다.

Table 7-1 Velocity grid spacing and vertical distributions of initial temperature and salinity.

level	Midpoint level(m)	Level Thickness (m)	Initial temperature (deg. C)	Initial salinity(psu)
1	3.75	7.5	16.275	34.080
2	11.25	7.5	15.525	34.059
3	18.75	7.5	14.775	34.038
4	26.25	7.5	13.475	34.049
5	35.0	10.0	11.257	34.101
6	45.0	10.0	9.756	34.138
7	56.25	12.5	9.206	34.156
8	68.75	12.5	8.695	34.169
9	82.5	15.0	8.245	34.175
10	97.5	15.0	7.769	34.167
11	113.75	17.5	7.269	34.143
12	131.25	17.5	6.600	34.123
13	157.5	35.0	5.400	34.104
14	192.5	35.0	3.300	34.073
15	235.0	50.0	1.800	34.053
16	297.5	75.0	1.000	34.050
17	385.0	100.0	0.500	34.050
18	510.0	150.0	0.500	34.050
19	685.0	200.0	0.500	34.050
20	935.0	300.0	0.500	34.050
21	1310	450.0	0.500	34.050
22	1835	600.0	0.500	34.050
23	2435	600.0	0.500	34.050
24	3185	900.0	0.500	34.050

수평 난류 점성계수와 확산계수는 각각 $3 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$, $1.5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 를 사용하였다. 연직 방향으로는 상수의 난류 계수를 이용하는 경우 점성계수를 $1 \text{ cm}^2/\text{s}$, 확산계수를 $0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$ 로 두었다.

개방 경계는 남쪽 유입부와 쓰가루 해협, 소야 해협의 3개이다. 남쪽 유입부에서는 수온과 염분을 국립수산진흥원(1986)에서 관측한 값을 사용하였고, 이를 이용하여 지형류를 계산하여 유속의 경압 성분도 처방하였다. 용적 수송량은 남쪽 유입부의 경우 $2.2 + 0.35 \sin\left(\frac{2\pi(t-165)}{360}\right) \text{ Sv}$ (여기서 t 는 시간(일))을 주었으며 (9월 중순 최대, 5월 중순 최소) 쓰가루 해협을 통해서 1.4 Sv , 나머지는 소야 해협으로 빠져나가도록 하였다 (Kim, 1996).

표층경계조건은 월평균자료를 이용하였으며 매 모형시간에 대해 선형내삽을 하였다.

바람응력은 Na et al(1992)의 월평균 바람 응력을 사용하였다. 열속은 Haney 형태의 월평균 열속 (Hirose 1994)을 사용하였다. 열속 Q 는 다음과 같이 모형 층의 수온 T_1 과 관측 해면 기온 T_a 를 이용하여 Haney 형태로 주었다.

$$Q = Q_1 + Q_2(T_a - T_1)$$

여기서 Q_1 은 해면수온과 해면기온의 차이와 무관한 열속항이며, Q_2 는 해면수온과 관련된 항이다. 위 식은 해면수온과 해면기온의 차이가 작다고 가정하여 bulk 공식으로 주어지는 열속을 각 성분을 테일러 전개한 뒤 모형의 열속 경계 조건으로 이용하기 위하여 해면수온의 모형 첫째 층의 수온으로 대체한 것이다 (Haney 1971). 이 Haney 형태의 열속은 모사될 해면수온을 관측값에 가깝게 유지할 뿐만 아니라 Q_1 , Q_2 와 해면기온만 알면 되므로 모형의 경계조건으로 사용하기 쉽다는 장점이 있다. 따라서 모사될 해면수온의 진폭과 위상뒤집이 생기고 상층의 변동성을 제한한다는 단점이 있음에도 불구하고 여전히 해양순환모형에서는 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 Q_1, Q_2, T_a 를 시간과 위치의 함수로 처방된 월평균 값 (Hirose et al 1994)를 이용하였다. 표층염분에 대해서는 10일의 시간규모로 장기 평균 관측값 (Kim and Yoon 1999) 복원하였다

초기 해양은 정지하고 있다고 가정하였으며 수온과 염분은 수평방향으로는 일정하고 깊이에 따라 변하는 분포를 주었다 (Table 7-1 참조). 이러한 초기 해양을

월평균 강제력은 이용하여 각 실험에 대해 16동안 적분하였다. 이 적분기간은 본 연구에서 관심을 두는 상층 해양이 평형 상태에 도달하기에는 충분한 시간으로 생각된다.

실험은 새로 개발된 혼합층 모형을 이용한 경우 이외에 비교를 위해 상수의 연직 난류 계수, 멜러-야마다 모형($2 \frac{1}{2}$) (Mellor and Yamada 1982)를 이용한 경우에 대해서 행하였다. 상수의 연직 난류 계수를 사용한 경우는 관측 해면수온에 복원하는 형태 (복원 시간 규모는 10일)와 Haney 형태를 사용하는 두 가지 경우로 나누어 실험하였다 (Table 7-2).

Table 7-2 Experimental case

실험	연직 난류 계수	열속 형태
실험A0	상수	복원
실험A1	상수	Haney
실험B1	멜러-야마다모형	Haney
실험C1	새로 개발한 모형	Haney

3. 결과

본 연구에서는 주로 상층 수온의 연직 분포, 해면수온의 계절 변화, 그리고 혼합층 깊이 분포에 대해 살펴 볼 것이다. 분석에 이용한 모형 자료는 적분 마지막 해 (16년)의 2월과 8월의 중간 (15일)에서의 결과이다.

가. 수온의 연직 분포

동경 134를 따른 상층 수온 (3.75 - 235 m)의 연직 분포를 각 실험에 대해 그림1과 Fig. 7-1에 나타내었다. 겨울과 여름을 대표하는 달로서 2월과 8월을 택하였으며 그림의 왼쪽이 2월 달, 오른쪽이 8월 달 분포를 나타낸다. 네 실험에서 모두 계절적인 변화는 어느 정도 재현되었다. 즉, 여름에 표층에서 형성된 강한 성층이 겨울에는 활발한 연직 혼합으로 연직으로 균일하게 됨을 잘 나타내고 있다. 또한 겨울철에는 남쪽에서는 200 m 정도에서 여전히 수온약층이 존재하는 반면에 북쪽에

서는 더 깊이까지 잘 혼합되어 있음을 알 수 있다. 한편 상수의 연직 난류 계수를 이용한 경우는 단순 복원 형태의 열속을 준 경우 (실험A0) 보다 Haney 형태의 열속을 준 경우 (실험A1) 북쪽 해역의 수온이 낮고 더 깊이까지 균일하게 혼합되어 있다. 예를 들면 북위 42도의 경우 실험A0에서 7도이지만 실험A1의 경우 5도로 2도 정도 낮다. 이는 단순 복원 형태의 열속을 준 경우 대류가 제한된다는 사실과 연관이 있다. 즉, 관측 해면수온에 해면수온을 계속 복원함으로써 해면수온이 충분히 낮아지는 것을 방지하여 대류가 약하게 일어날 수 있다. 멜러-야마다 모형을 이용하였을 경우 새로운 혼합층 모형을 이용한 경우보다 북쪽 경계에서 수온이 낮아 대류가 좀더 잘 일어나는 것으로 생각되며 그 원인에 대해서는 좀 더 자세한 연구가 필요하다.

Vertical Temperature (along 134E)

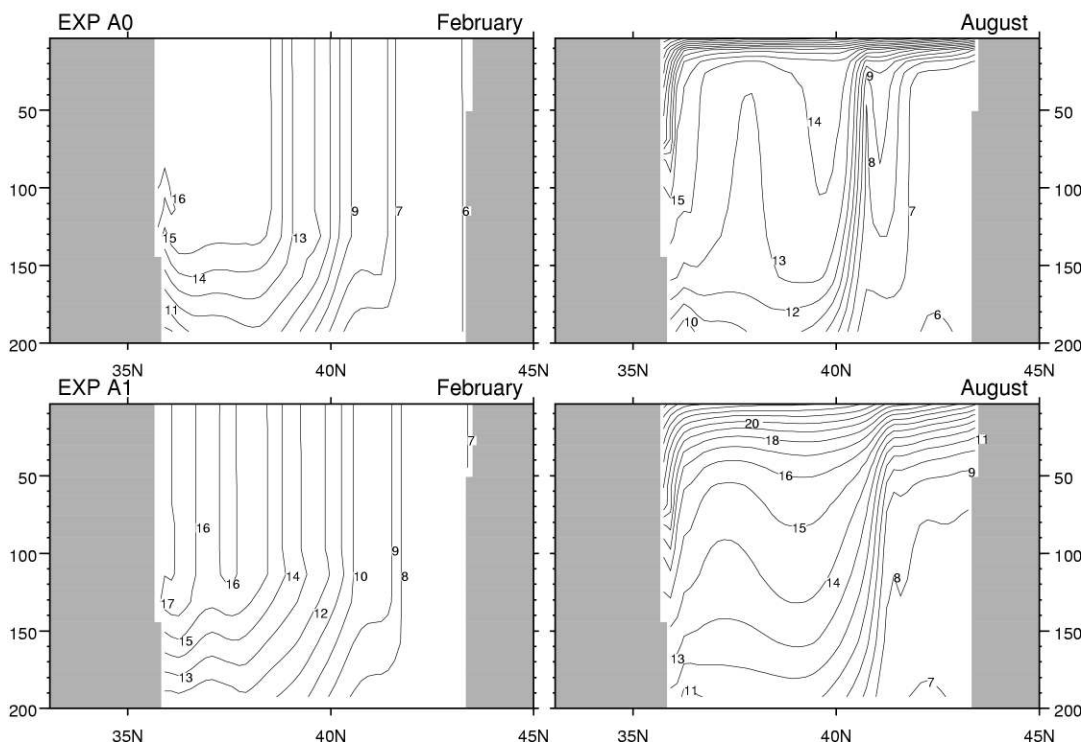


Fig. 7-1 Depth-latitude section of the temperature along 134°E
Exp A0(up), Exp A1(bottom).

Vertical Temperature (along 134E)

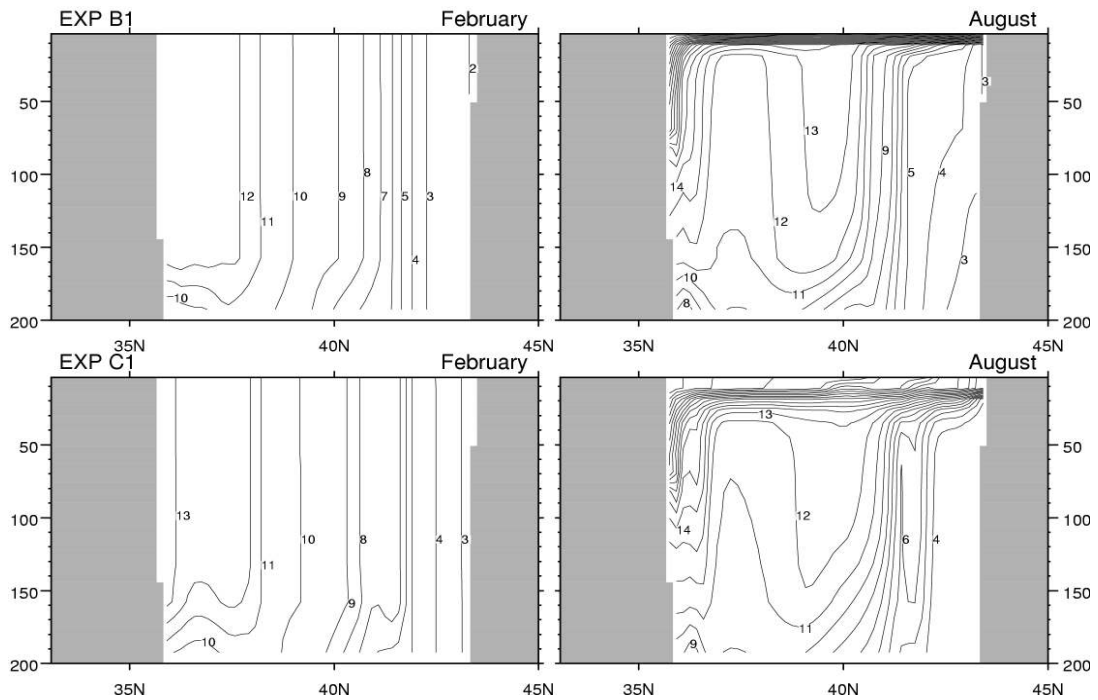


Fig. 7-2 Depth-latitude section of the temperature along 134°E
Exp B1(up), Exp C1(bottom).

한편, 겨울철에는 비교적 작은 차이가 존재하지만 여름철에는 각 실험마다 유의한 차이점이 존재한다. 즉, 상수의 연직 난류 계수를 이용하였을 경우는 표층의 혼합층이 형성되지 않고 상층에서 단순히 연직방향으로 확산되는 분포를 하고 있다. 이에 반하여 멜러-야마다 모형을 이용한 실험에서는 표층에 상당히 강한 성층이 존재한다. 이는 불충분한 혼합으로 인한 것으로 모형 동해 전체 영역에서 평균된 해면수온의 계절 변화(Fig. 7-3)에서 알 수 있듯이 여름철 해면수온이 과도하게 높게 모사되는 원인이다. 한편 새로운 혼합층 모형을 이용하였을 경우는 어느 약 10m 정도의 혼합층이 형성되어 있을 뿐만 아니라 그 밑의 수온 약층도 비교적 잘 재현되었다.

나. 해면수온의 계절 변화

해면수온은 해양과 대기간의 열교환 뿐만 아니라 태풍 발달과 같은 대기 현상에도 중요한 영향을 준다. 예를 들면 해면수온 1도 변화는 태풍의 기압을 10hPa 변화를 일으킨다. 따라서 해면수온의 적절한 모사가 매우 중요하다.

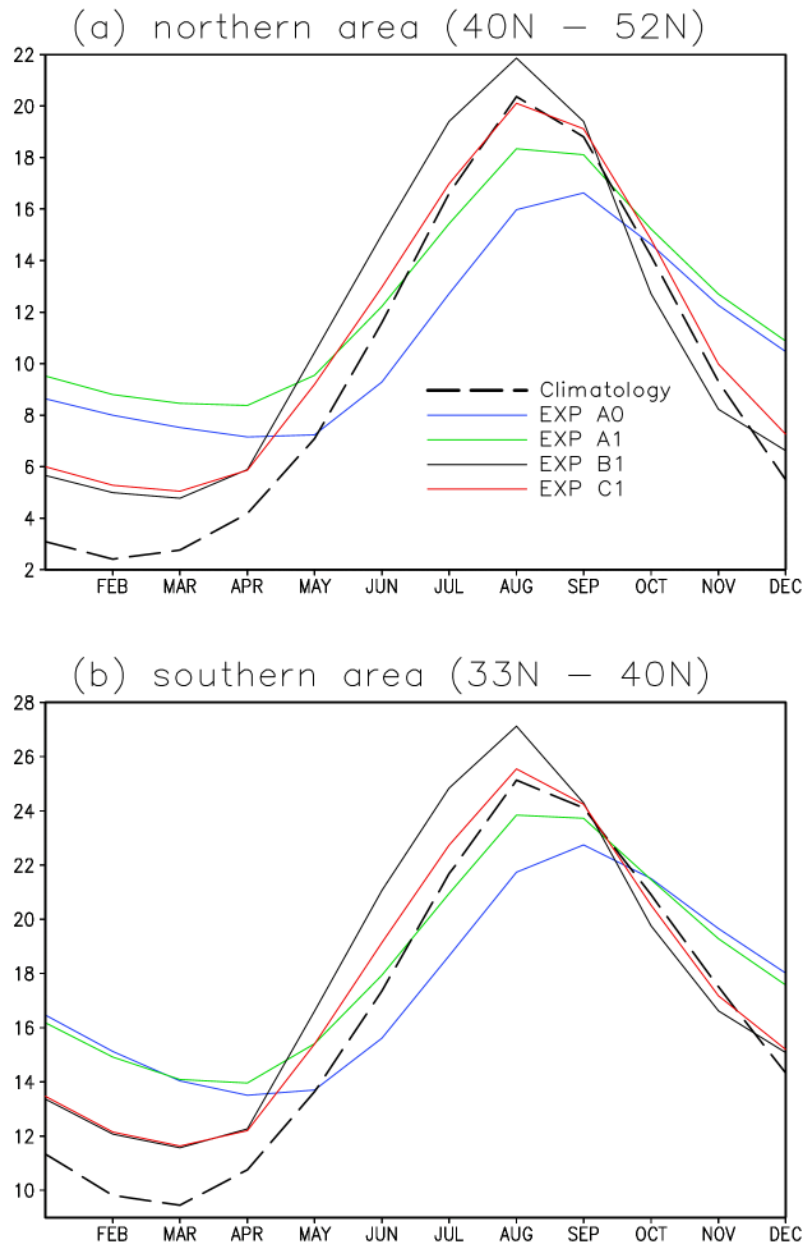


Fig. 7-3 Seasonal variations of the SST averaged over (a) northern area, (b) southern area.

각 실험에서 해면수온의 모사 정도를 평가하기 위하여 남쪽 해역 (북위 33도 - 북위 40도)과 북쪽 해역 (북위 40도 - 북위 52도)에서 영역 평균된 해면수온의 계절 변화 (Fig. 7-3)를 살펴보았다. 비교를 위해 장기 평균 기후값을 함께 도시하였다.

실험A0 경우 해양이 가열되는 시기인 5월과 10월 사이에 두 해역 모두에서 관측값에 비해 2-3도 정도 낮게 모사되었다. 이는 상수의 연직 난류 계수를 사용할 경우, 수온의 연직 단면도 (Fig. 7-1)에서 보았듯이, 수온약층 아래로의 열전달을 제한하는 수온약층이 제대로 형성되지 않았기 때문이다. 더 중요한 문제는 위상뒤짐이다. 즉, 관측 해면수온에 모사될 모형의 해면수온을 복원할 경우 필연적으로 위상뒤짐이 생긴다. 이는 관측 해면수온이 8월에 최대임에 반하여 실험A0에서는 9월에 최대를 보이고 있다는 것으로부터 확인할 수 있다. 한편, Haney 형태의 열속을 사용한 실험 (실험A1, 실험 B1, 실험C1)에서는 이러한 위상 뒤짐이 교정되었다. 이는 Haney 형태의 열속이 복원항 뿐만 아니라 이에 무관하게 해양을 가열/냉각하는 항(Q_1)이 있기 때문이다. 즉, 여름에 제때에 해양을 가열하고 겨울에 냉각시키기 때문이다.

실험A1에서는 Haney 형태의 열속을 사용함으로써 위상뒤짐은 교정되었지만 여전히 해양이 가열되는 시기에 관측 해면수온에 비해 낮다. 이는 실험A0에서와 마찬가지로 상수의 연직 난류계수를 사용하여 심층으로의 열전달을 제한하는 수온약층이 뚜렷하게 형성되지 않았기 때문이다.

실험B1의 경우 오히려 해양이 가열되는 시기에 관측값에 비해 약 1-2도 정도 높다. 이는 해양이 가열되는 경우 멜러-야마다 모형이 표층부근에서 충분한 혼합을 일으키지 못하여 수온의 연직 경사가 강하게 되고 (Fig, 7-2) 따라서 열이 표층에 누적되기 때문이다. Ezer (2000)는 고주파수의 강제력을 사용하게 되면 혼합정도가 커져서 과도한 해면수온 상승을 어느 정도 억제할 수 있다고 지적하였다. 그러나, 근본적으로는 멜러-야마다 모형이 바람 등에 의한 표층에서의 난류 운동 에너지속을 무시하고 또한 난류 길이규모를 표층에서 0으로 설정하기 때문이다. 따라서 단순히 고주파수의 강제력으로 혼합을 크게 하여서는 근본적인 해결을 꾀 할 수 없다.

실험C1에서는 가열시기에 관측값에 비해 약간 높긴 하지만 (1도 이내) 실험B1에서의 과도한 해면수온이 상당히 개선되었다. 이러한 개선의 중요한 원인은 멜러-야마다 모형과는 달리 표층에서의 난류 운동 에너지속과 난류 길이 규모를 적절히 하였기 때문이다.

새로운 혼합층 모형이 해양이 가열되는 시기에 다른 실험에 비해 유의한 개선을 가져왔음에 반하여 해양이 냉각되는 시기 (10월 - 2월)에는 관측값과 2-3도 정도의 큰 차이를 보인다. 상수의 연직 난류 계수를 이용한 경우는 차이가 2배 정도

로 더 크다. 정수 균형을 가정한 이 모형에서는 수층이 불안정할 경우는 연직 혼합을 모수화 해야 한다. 대부분의 다른 연구와 마찬가지로, 본 연구에서는 불안정한 두 수층의 수온과 염분이 보존되고 인접한 두 연직 격자의 밀도가 균일하도록 섞어주는 대류 방안을 사용하거나 두 수층 사이의 연직 난류 혼합 계수를 크게 ($10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$)하는 방법을 사용하고 있다. 하지만 이런 간단한 모수화로는 불안정 성층을 완전히 제거할 수 없다. 따라서 겨울철 해면수온이 모든 실험에서 높게 모사된다는 결과를 초래할 가능성이 있다. 또 한가지 가능성은 월평균 강제력을 사용에 있다. 월평균 강제력을 사용하면 예를 들어 일평균 값을 사용하였을 경우에 비해 최대 최소값이 작아지고 따라서 겨울철 바람 응력의 크기나 열속이 작게 평가되었을 가능성이 있다. 이렇게 작게 계산된 겨울철 바람응력과 열속에 의해 겨울철 수온이 관측값보다 높게 모사되었을 가능성이 있다. 이에 대해서는 앞으로 연구할 부분이다. 관측값과 모사된 해면수온의 정량적인 차이 분석을 위해 평방 제곱근 오차 (root mean square error)의 계절 변화를 구하였다 (Fig. 7-4). 해면수온의 계절 변화에서 살펴보았듯이 겨울철에 3도 이상의 큰 오차를 보이고 있다. 한 편 여름철에는 실험B1의 경우 최대 오차 (3.5도)가 6월에 나타나는데 비해 실험A0의 경우 최대오차 (4.3도)가 8월에 나타난다. 실험A1의 경우는 실험A0에 비해 여름철에는 오차가 작고 겨울철에는 크게 나타난다. 한편 새로운 혼합층 모형을 이용한 경우는 계절에 상관없이 다른 실험에 비해 오차가 작다 (3.2도 이내).

한편, 새로운 혼합층 모형을 적용하였을 경우 (실험C1) 여름철 해면수온이 상당히 개선되었으나 여전히 높다. 본 연구에서는 태양복사의 투과를 고려하지 않았다. 즉, 태양에너지가 모형의 첫 층에 모두 적용되고 첫 층 아래로는 전달되지 않는 것으로 가정하였다. 따라서 해양이 가열되는 시기에 과도하게 열이 표층에 주어진다. 또한 이 연구에서는 월평균 바람응력 자료를 사용하였는데 대신에 고주파수의 바람응력에 의한 혼합 증가 효과를 고려함으로써 혼합층 깊이가 증가하고 따라서 대기에서 오는 열이 더 깊은 수층에 분포할 것이다. 위의 두 효과를 적절히 고려함으로써 약간 높은 여름철 해면수온이 개선될 수 있을 것이다.

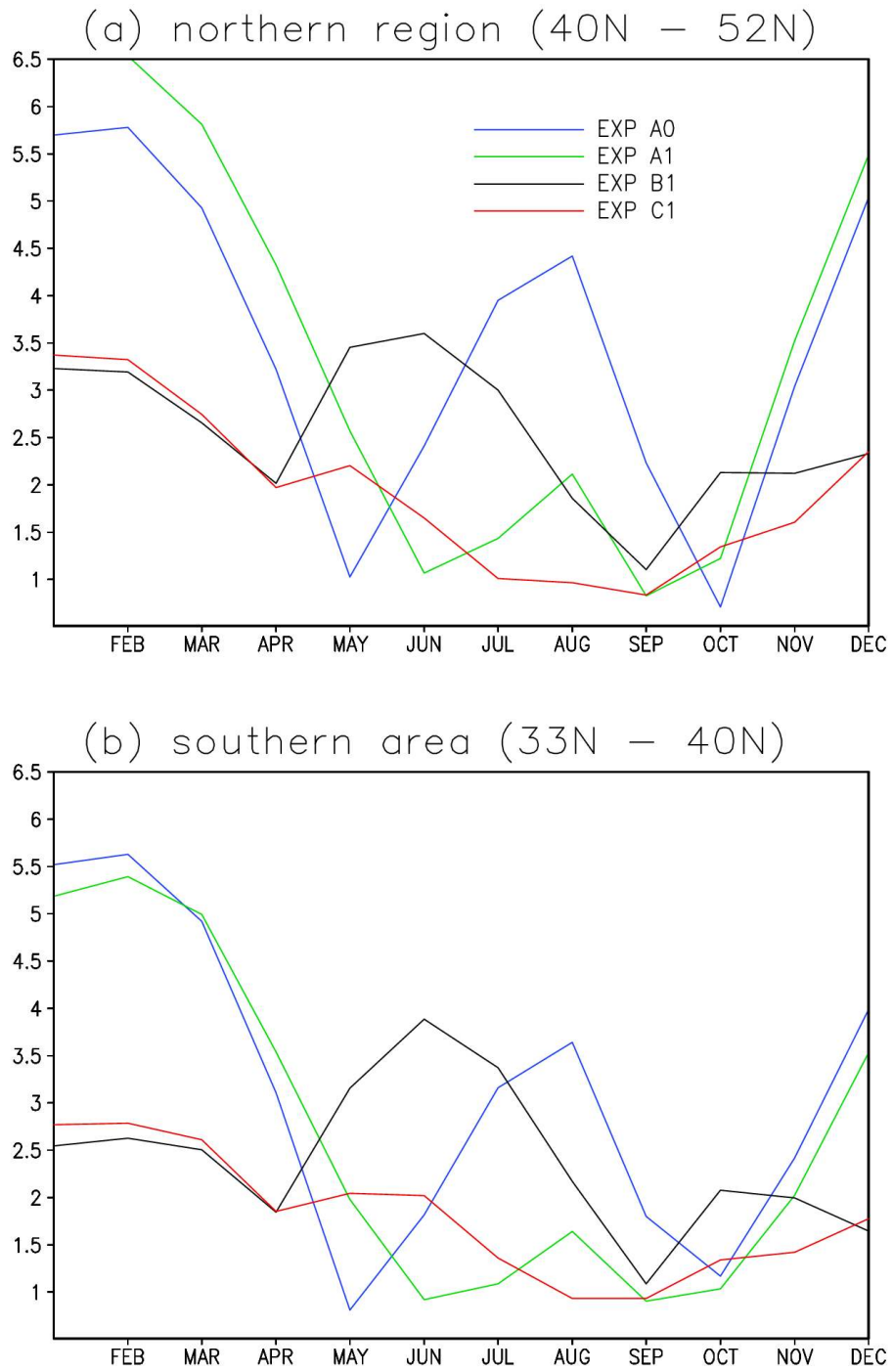


Fig. 7-4 Seasonal variations of the RMS error of the SST averaged over
 (a) northern area, (b) southern area.

다. 해양 혼합층

해양 혼합층은 대기와의 열과 운동량 교환에 중요할 뿐만 아니라 해양 내 열 및 운동량 분포 결정에도 중요하다. 뿐만 아니라 해양 혼합층의 예측은 어업, 수중 통신에도 중요하다.

수온, 염분과 이로부터 상태 방정식을 이용해서 계산한 밀도 등의 연직 분포를 이용하여 혼합층 깊이를 정의하는 방법은 크게 두 가지가 있다. 하나는 절대값의 차이를 이용하는 것으로 기준수심 (예를 들면 표층)의 값으로부터 일정한 차이가 나는 깊이를 혼합층으로 정의하는 것이다. 다른 하나는 연직 구배 (vertical gradient)를 이용하는 것으로 연직 구배가 어떤 값 (예를 들면 $0.125\sigma_t$)보다 크게 되는 깊이를 혼합층으로 정의하는 것이다.

연직구배를 정확하게 계산하기 위해서는 연직 수심 간격이 급격한 연직 변화를 분해할 정도로 비교적 촘촘해야 하므로 연직 수심 간격이 비교적 큰 Levitus기후 값이나 모형의 결과를 이용하는 경우에는 정확한 값을 얻기가 어렵다. 또한 절대값의 차이를 이용한 혼합층 깊이보다 연직 구배를 이용해서 구한 혼합층 깊이가 기준 값에 더 민감하다고 알려져 있다 (Brainerd and Gregg 1995, Ezer 2000).

따라서 본 연구에서는 절대값의 차이를 이용하여 혼합층 깊이를 계산하였다. 또한 본 연구에서는 수온의 연직 분포에 관심이 있으므로 수온의 연직 분포를 이용하였다. 즉, 표층 수온과 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 차이나는 깊이를 혼합층 깊이로 정의하였다. 모형에서는 첫 번째 층 (3.75 m)의 수온을 표층 수온으로 Levitus 기후 자료에서는 0 m의 수온을 표층 수온으로 정했다. 성층이 강한 경우를 제외하고는 0 m와 3.75m에서의 수온은 큰 차이가 없다고 생각되므로 표층수온의 수심을 모형과 Levitus기후 자료에서 다르게 정의한 것은 큰 무리가 없을 것으로 생각된다.

여름철 해양혼합층의 깊이는 50 m 이내로 얇을 뿐만 아니라 공간적인 변화도 크지 않으므로 본 연구에서는 겨울철을 대표해서 2월의 혼합층 깊이만을 Fig. 7-5에 나타내었다. 단위는 m이며 흰색으로 표시된 부분은 혼합층이 바닥까지 형성되어 있는 경우이다. 비교를 위하여 Fig. 7-6에 Levitus 수온 자료에서 구한 혼합층 깊이를 나타내었다.

각 수치실험에서 구한 혼합층 깊이는 공통적으로 동해 연안이 얇고(50-100m) 북동쪽으로 갈수록 증가하여 300m 이상이 되는 분포를 보여준다. 다른 점은 상수의

연직 난류 계수를 이용한 경우 (실험 A0와 실험 A1)는 혼합층 모형을 이용한 실험 (실험B1과 실험C1)에 비하여 400m 이상의 깊은 혼합층이 형성되지 않았다는 것이다. 이는 적절한 혼합층의 형성에 혼합층 모형이 중요함을 나타낸다. 한편 Levitus 자료에서는 블라디보스토크 부근에서 500 m이상의 혼합층이 형성되어 있는데 이는 이 해역이 깊은 대류가 발생하는 곳이라는 기존 연구 결과와 일치하는 부분이다. 하지만 모든 실험에서 이 해역의 깊은 혼합층을 모사하지 못하였다. 가능한 이유로는 본 연구에서 사용한 월평균 열속의 문제를 들 수 있다. 즉 블라디보스토크의 겨울철 열속이 충분히 해양을 냉각하지 못하기 때문으로 사료된다.

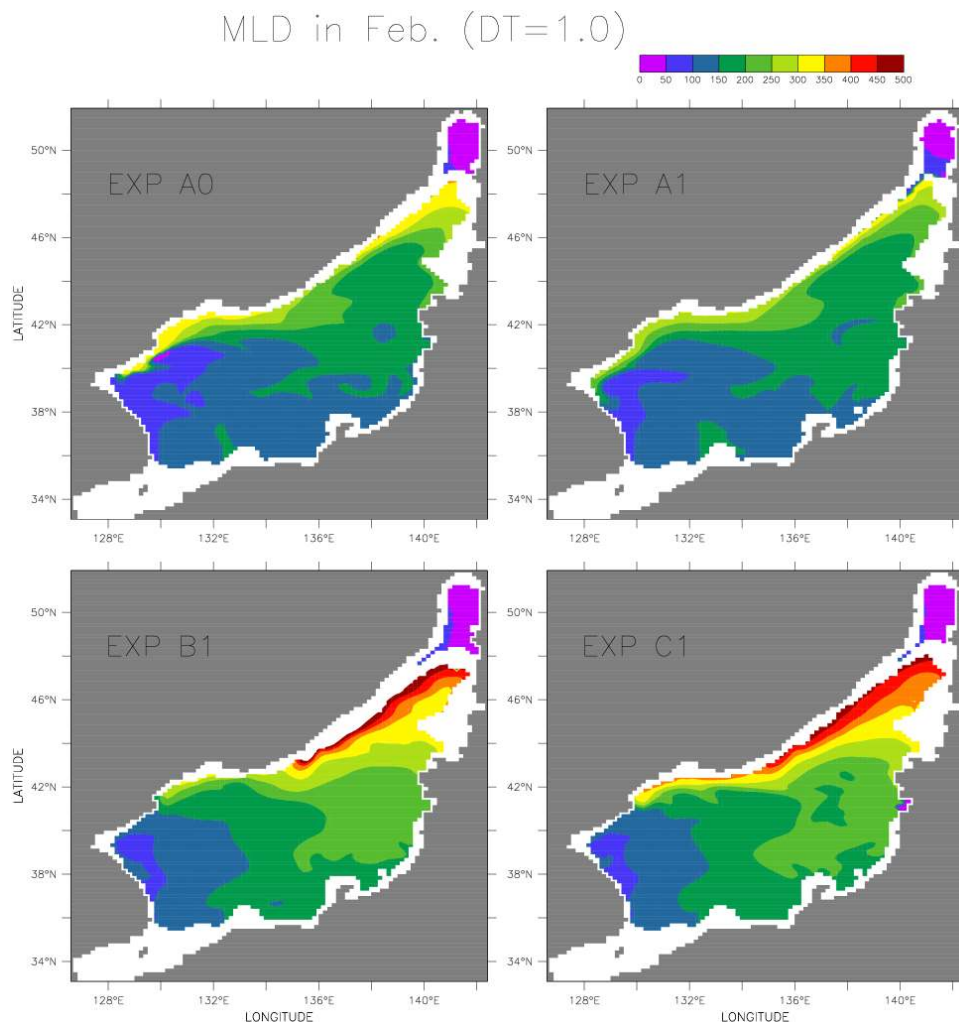


Fig. 7-5 Horizontal distribution of the mixed layer depth(m) in Feb.. White color means the mixed layer depth reaches the bottom. The mixed layer depth is defined as the depth at which the temperature is different by 1°C from the SST.

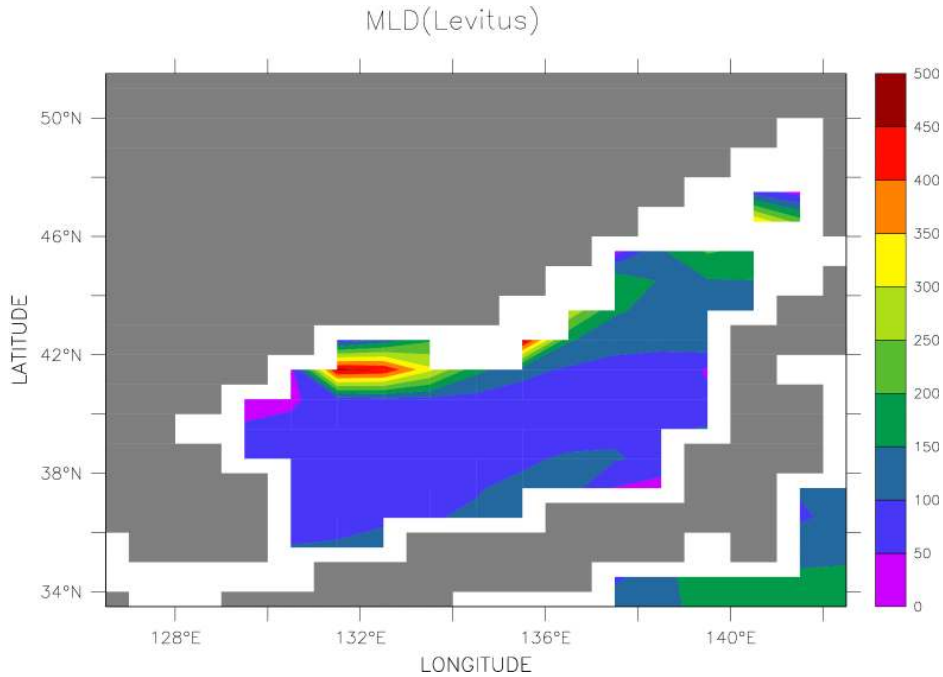


Fig. 7-6 Horizontal distribution of the mixed layer depth(m) calculated from the Levitus monthly temperature data.

4. 결 론

동해의 해수순환과 수온, 염분 등의 미세구조를 포함한 해수특성구조의 시간 변화를 현실적으로 예측하기 위하여 본 연구진이 개발한 해양 혼합층 모형을 접합한 동해 순환 모형을 개발하였다. 실제적인 고주파의 대기 강제력을 적용하기 전에 개발한 동해 순환 모형의 동해 해수 평균 구조의 재현 능력을 평가하기 위하여 장기 평균된 대기 강제력을 이용하여 동해순환 모사 실험을 하였다. 비교를 위해 상수의 연직 난류 계수를 사용한 경우와 벨러-야마다 모형을 사용한 경우에 대해서도 실험을 하였다. 그 결과 새로운 혼합층 모형이 접합된 동해 순환 모형이 상수의 확산계수나 벨러-야마다 모형을 이용한 경우에 비해 해면수온의 계절 변화를 현저히 잘 모사하였다. 또한 여름철 수온약층과 혼합층의 형성이 다른 경우에 비해 뚜렷하였다. 그러나, 몇 가지 문제는 여전히 남아있다. 예를 들면, 겨울철 해면수온이 지나치게 높게 묘사된다는지 블라디보스토크 인근 해역의 깊은 혼합층이 재현되지 않는다는 것이다. 가능한 원인으로서는 대류 모수화의 문제나 대기 강제력으로 월평균 자료를 이용하였다는 것과 연관이 있다. 차기 연도에는 이러한 단점을 개선하고 좀 더 현실적인 대기강제력을 이용하여 실제적인 해양순환 모사를 시도할 것이다.

제 8 절 ROMS를 이용한 해양역학 구조 시뮬레이션

1. 모델 특성

ROMS(Regional Ocean Model System)는 SPEM(Semi-spectral Primitive Equation Model, Haidvogel et al., 1991) 모델을 기본으로하고 SCRUM(S-coordinate Rutgers University Model, Song and Haidvogel, 1994) 모델을 따른 Terrain-following 모델구조를 기반으로한 가장 최근의 모델이다. 모델구조에 대한 자세한 설명은 Haidvogel 과 Beckmann(1999)의 논문에 제시되어 있다. ROMS는 단일 프로세서나 다중 프로세서를 장착한 컴퓨터에서 효율성을 높이기 위해 완전히 다시 작성되었고 고차의 이류항과 더욱 정확한 압력항을 포함하였으며 대기와 해양, 해저의 경계층을 하나로 묶는 등 새로운 기능을 추가하였다. 중요한 특성으로 SCRUM에 처음 도입되었던 해수면이나 해저면에서 향상된 분해능을 제공하기 위하여 형성할 수 있는 일반화된 비선형 Terrain-following 좌표계를 들 수 있다. Haidvogel 등(2000)은 이런 일반화된 좌표계에 대한 효과를 분석하였다.

ROMS 모델에서 정역학적 기본 방정식들은 역격자의 Arakawa C 그리드에서 경계면에 적합하고 직각의 Curvilinear인 좌표계를 사용하여 근사적으로 계산하였다. 수평면에서의 방정식들은 이차의 중앙차분법을 사용하였고 수직면에서는 해수면이나 해저면 등 특정 지역에서 분해능을 향상시킬 수 있는 Stretched terrain-following 좌표계(Song and Haidvogel, 1994)를 사용하여 변화하는 지형을 고려하였다.

POM에서와 같이 운동량에 대한 정역학적 기본방정식들은 계산시간을 차등하는 방법을 사용했다. 즉, 등압면이 밀도면과 평행한 상태에서는 빠르게 계산하고 등압면이 밀도면과 평행하지 않은 상태에서는 느리게 계산하였다. ROMS에서는 Tracer fields의 체적보존법칙(volume conservation)과 절대보존법칙(constancy preservation)을 정확하게 유지하기 위하여 계산시간을 분리하여 제약한다. 최종식들은 3차의 정확도를 가진 Predictor(Leap-Frog)와 Corrector(Adams-Moulton) 시간 단계 알고리즘을 사용하여 시간분해한다. 이런 기법들을 사용하여 안정성을 향상시키므로 계산 시간간격은 크게 증가된다.

2. 모델 구성

ROMS를 실행하기 위해서는 roms.in, cppdefs.h, analytical.F 파일을 실험에 맞게 변경해 주어야한다. 이 파일들은 각각 입력자료를 제공하고 원하는 옵션을 선택하며, 여러 변수들의 해석적 공식들을 제공한다. 실제의 자료들을 사용하기 위해서는 사용자는 그리드나 풍압 같은 입력파일들을 사용해야한다.

우선 모델을 구성하기 위해 사용자는 모델영역 그리드의 크기나 Tracer의 갯수에 대한 정보를 param.h 파일에 설정해야 한다. 서브루틴인 get_grid나 ana_grid는 initial 파일에서 불러들여 그리드 배열과 수심자료 그리고 Coriolis 자료를 설정한다. 간단한 수치실험들은 analytical.F 파일의 서브루틴인 ana_grid에 그리드 정보가 설정되어있다. 더 실제적인 실험을 수행하기 위해서는 Grid generation programs인 Gridpack이나 Seagrid를 이용하여 NetCDF 그리드 파일을 만들어 사용하며 변수들은 get_grid에서 불러들인다.

모델의 초기값들은 ana_initial이나 get_initial에서 제공된다. get_initial은 모델의 초기값 뿐만아니라 전에 실행한 결과로부터 모델을 재 실행하기 위한 초기 파일도 읽어들이 수 있다. 또한 initial에서는 rho_eos가 밀도값을 초기화하기 위하여 불러진다. rho_eos 역시 rhobar 배열을 초기화하기 위해 ana_meanRHO를 불러들인다. rhobar는 오직 z축에 대한 함수이며 어느정도 밀도의 수평으로 평균값이 되어야 한다.

모델의 수평 경계조건들은 서브루틴인 bcs3d와 bcs2d에서 제공된다. 이 서브루틴들은 매 시간단계마다 불러지며 $u, v, \bar{u}, \bar{v}, T, S$ 와 ζ 에 대한 경계조건값을 제공한다. 이들은 닫힌 영역이나 Periodic channel, Doubly periodic domain 또는 복사 조건들을 가진 개방된 영역에서 구성되어 사용된다.

모델의 외력으로는 바람이나 열에 의한 플럭스 또는 기후조건이 사용된다. 바람응력은 수직적 점성항에 표면의 운동량 플럭스나 상층의 물기둥에 대하여 Body force로 나누어 사용된다. 과거에는 수직 분해능이 약해 표면의 Ekman layer를 계산하기에 수직 점성이 비정상적으로 커지는 결과를 초래했지만 현재의 ROMS는 표면에 더 향상된 분해능과 수직 점성, 확산에 경계조건으로 플럭스를 적용하기 위하여 수직으로 S-좌표계를 도입하였다. 기후조건을 모델에 입력하는 방법으로 Tracer climatology들에 Nudging 기법을 사용하였다. 이 기법은 North Atlantic 모형실험

에서 북측과 남측 경계을 따라 스폰지 층들에서 처음 도입하였다. Climatology들은 ana_tclima에서 설정되거나 get_tclima에서 파일로 불러들이며 cppdefs.h에서 NUDGING 옵션을 설정하고 nudgcof 배열은 set_nudgcof.F에서 설정된다.

3. 모델 실행

ROMS 모델은 표준 입력으로 많은 변수들을 읽어들인다. ROMS를 실행하기 위하여 입력자료(roms.in)를 받는 형식은 다음과 같다.

```
roms < roms.in
```

입력자료는 들줄단위로 구성되며 첫 줄은 변수의 명이 표시되고 다음 줄에는 변수의 값으로 구성되어있다. 숫자 99는 이력줄의 마지막을 나타낸다. 입력변수들에 대한 구체적인 속성들은 다음과 같다.

```
*** roms.in ***
1  NTIMES,      DT (s),      NDTFAST
   17280      300.0d0      20
2  NRREC,      LCYCLE,      NRST,      NSTA,      NFLT,      NINFO
   0          T          8640      1          1          1
3  LDEFOUT,    NHIS,      NDEFHIS,    NTSAVG,    NAVG,      NDEFAVG
   T          288      0          1          288      0
4  TNU2[1:NT] (m2/s)
   0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0
5  TNU4[1:NT] (m4/s)
   0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0
6  Kdiff[1:NT] (m2/s)
   0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0      0.d0
7  VISC2 (m2/s), VISC4 (m4/s)
   0.d0          0.d0
8  AKT_BAK[1:NT] (m2/s)
   5.0d-6  5.0d-6  5.0d-6  5.0d-6  5.0d-6  5.0d-6  5.0d-6  5.0d-6  5.0d-6
9  AKV_BAK (m2/s)
   5.0d-6
```

```

10 AKQ_BAK (m2/s) Q2NU2 (m2/s), Q2NU4 (m4/s)
    5.0d-6          10.d0          1.0d+ 10
11 RDRG (m/s), RDRG2, Zo (m)
    2.5d-3          0.d0          0.d0
12 NMIX_EN, ADV_ORD, LEVSFRC, LEVBFRC
    1              1              15              1
13 THETA_S, THETA_B, TCLINE (m)
    3.0           0.4d0           50.d0
14 RHO0 (Kg/m3), DSTART (days)
    1025.d0        0.d0
15 TNUDG[1:NT] (days)
    0.d0  0.d0  0.d0  0.d0  0.d0  0.d0  0.d0  0.d0  0.d0
16 ZNUDG (days), M2NUDG (days), M3NUDG(days)
    0.d0          0.d0          0.d0
17 R0 (Kg/m3) T0 (deg C), S0 (PSU), TCOEF, SCOEF
    30.379472d0    0.d0          1.d0          -1.d0          0.d0
18 GAMMA2
    -1.d0
19 idUvel, idVvel, idWvel, idOvel, idUbar, idVbar, idFsur
    T      T      T      T      T      T      T
20 idTvar(1:NT) (temperature, salinity, etc.)
    T T T T T T T T T
21 idUsms, idVsms, idUbms, idVbms, idUbws, idVbws
    F      F      F      F      F      F
22 idAbed, idUbed, idVbed, idUbot, idVbot, idHrip, idHapp, idZnot, idZapp
    F      F      F      F      F      F      F      F      F
23 idTsur, idLhea, idShea, idLrad, idSrad
    F      F      F      F      F
24 idDano, idVvis, idTdif, idSdif, idHsbl, idHbbl, idMtke, idMtls
    T      T      T      T      T      T      T      T
25 NLEV, LEV(1:NLEV) in ascending order (if NLEV<0, all levels are saved)
    -1      1 3 5
26 NUSER USER(1:NUSER) generic user parameters
    0      0.0d0
27 TITLE (a80)
ROMS 1.0 - River Plume Test

```

28 RSTNAME (a80): output restart file name, if any.
roms_rst.nc

29 HISNAME (a80): output history file name, if any.
roms_his.nc

30 AVGNNAME (a80): output averages file name, if any.
roms_avg.nc

31 STANAME (a80): output stations file name, if any.
roms_sta.nc

32 FLTNAME (a80): output floats file name, if any.
romsflt.nc

33 GRDNAME (a80): input grid file name, if any.
roms_grid.nc

34 ININAME (a80): input initial conditions file name, if any.
roms_ini.nc

35 FRCNAME (a80): input forcing fields file name, if any.
roms_frc.nc

36 CLMNAME (a80): input climatology fields file name, if any.
roms_clm.nc

37 APARNAM (a80): input assimilation parameters file name, if any.
assimilation.in

38 SPOSNAM (a80): input station positions file name, if any.
stations.in

39 FPOSNAM (a80): input initial floats positions file name, if any.
floats.in

40 BPARNAM (a80): input biology parameters file name, if any.
bioFasham.in

41 USRNAME (a80): USER's input/output generic file name, if any.
/dev/null

99 END of input data

*** CARD 1: Time-Stepping parameters.

NTIMES Total number time-steps in current run. If 3D configuration,
NTIMES is the total of baroclinic time-steps. If only 2D
sonfiguration, NTIMES is the total of barotropic time-steps.

DT Time-Step size in seconds. If 3D configuration, DT is the
size of baroclinic time-step. If only 2D configuration, DT

is the size of the barotropic time-step.

NDTFAST Number of barotropic time-steps between each baroclinic time-step. If only 2D configuration, NDTFAST should be unity since there is not need to splitting time-stepping.

*** CARD 2: Input/Output parameters.

NRREC Switch to indicate re-start from a previous solution. Use NRREC=0 for new solutions. If a re-start solution, NRREC is the time index in the re-start NetCDF file. Notice, that it is also possible to re-start from a history or time-averaged NetCDF files. If a history file is used for re-start, it must contains all the necessary primitive variables at all levels.

LCYCLE Logical switch (T/F) used to recycle time records in output re-start file. If TRUE, only the latest two re-start time records are maintained. If FALSE, all re-start fields are saved every NRST time-steps without recycling. The re-start fields are written at all levels and in double precision.

NRST Number of time-steps between writing of re-start fields.

NSTA Number of time-steps between writing data into stations file. Station data is written at all levels.

NFLT Number of time-steps between writing data into floats file.

NINFO Number of time-steps between print of single line information to standard output. If also determines the interval between computation of global energy diagnostics.

*** CARD 3: Output history and average files parameters.

LDEFOUT Logical switch (T/F) used to create new output files when initializing from a re-start file, NRREC > 0. If TRUE and applicable, a new history, time-averaged, and station files are created during the initialization stage. If FALSE and applicable, data is appended to an existing history, time-averaged and station files. See also parameters NDEFHIS and NDEF AVG below.

NHIS Number of time-steps between writing fields into history file.

NDEFHIS Number of time-steps between the creation of new history files. If NDEFHIS=0, the model will only process one history file. This feature is useful for long simulations when history files

get too large; it creates a new file every NDEFHIS time-steps.

NTSAVG Starting time-step for the accumulation of output time-averaged data.

NAVG Number of time-steps between writing time-averaged data into averages file. Averaged data is written at all levels.

NDEF AVG Number of time-steps between the creation of new time-averaged files. If NDEF AVG=0, the model will only process one time-averaged file. This feature is useful for long simulations when time-averaged files get too large; it creates a new file every NDEFHIS time-steps.

*** CARD 4: Laplacian horizontal mixing of tracer.

TNU2 Lateral, Laplacian, constant, mixing coefficient (m^2/s) for each tracer type variable. NT values are expected. If variable horizontal diffusion is activated, TNU2 is the mixing coefficient for the largest grid-cell in the domain.

*** CARD 5: Biharmonic horizontal mixing of tracer.

TNU4 Lateral, biharmonic, constant, mixing coefficient (m^4/s) for each tracer type variable. NT values are expected. If variable horizontal diffusion is activated, TNU4 is the mixing coefficient for the largest grid-cell in the domain.

*** CARD 6: Isopycnal thicknesses.

KDIFF Isopycnal mixing thickness diffusivity (m^2/s) for each tracer variable. NT values are expected. These isopycnal thicknesses are used when the Gent/McWilliams isopycnic mixing is activated.

*** CARD 7: Horizontal viscosity coefficients.

VISC2 Lateral, Laplacian, constant, mixing coefficient (m^2/s) for momentum. If variable horizontal viscosity is activated, UVNU2 is the mixing coefficient for the largest grid-cell in the domain.

VISC4 Lateral, biharmonic, constant mixing coefficient (m^4/s) for momentum. If variable horizontal viscosity is activated, UVNU4 is the mixing coefficient for the largest grid-cell in the domain.

*** CARD 8: Vertical mixing coefficients for tracers.

AKT_BAK Background vertical mixing coefficient (m^2/s) for tracer

type variables. NT values are expected.

*** CARD 9: Vertical mixing coefficient for momentum.

AKV_BAK Background vertical mixing coefficient (m²/s) for momentum.

*** CARD 10: Mellor–Yamada Level 2.5 parameters.

AKQ_BAK Background vertical mixing coefficient (m²/s) for turbulent energy.

Q2NU2 Lateral, Laplacian, constant, mixing coefficient (m²/s) for turbulent energy.

Q2NU4 Lateral, biharmonic, constant mixing coefficient (m⁴/s) for turbulent energy.

*** CARD 11: Constants used in bottom stress computation. The bottom stress is computed using either the linear bottom drag coefficient, quadratic bottom drag coefficient, or logarithmic formulation via bottom roughness. Choose only one fomulation and set the other contants to zero. The model selects the formalation by checking which constant is not zero. The order of slection is: Zo, RDRG2, and RDRG. See "set_vbc" routine for details.

RDRG Linear bottom drag coefficient (m/s).

RDRG2 Quadratic bottom drag coefficient.

Zo Bottom roughness (m).

*** CARD 12: Various parameters.

WTYPE Jerlov water type: an integer value from 1 to 5.

ADV_ORD Order of advection scheme when using Smolarkiewicz advection. A value of ADV_ORD=2 is recommended to suppress the diffusive nature of the "upwind" scheme. ADV_ORD=1, will yield the standard "upwind" advection.

LEVSFRC Deepest level to apply surface momemtum stresses as a bodyforce. Used when C-preprocessing option BODYFORCE is activated.

LEVBFRC Shallowest level to apply bottom momemtum stresses as a bodyforce.

Used when C-preprocessing option BODYFORCE is activated.

*** CARD 13: Vertical S-coordinates parameters.

THETA_S S-coordinate surface control parameter, [0 < theta_s < 20].

THETA_B S-coordinate bottom control parameter, [0 < theta_b < 1].

TCLINE Width (m) of surface or bottom boundary layer in which higher vertical resolution is required during stretching.
 WARNING: Users need to experiment with these parameters. We have found out that the model goes unstable with high values of THETA_S. In steep and very tall topography, it is recommended to use THETA_S < 3.0.

*** CARD 14: Mean Density and time stamp.

RHO0 Mean density (Kg/m³) used when the Boussinesq approximation is inferred.

DSTART Time stamp assigned to model initialization (days). Usually a Calendar linear coordinate, like modified Julian Day. For Example:
 DSTART=10200 correspond to May 1, 1996
 It is called modified Julian day because an offset of 2440000 needs to be added.

*** CARD 15: Nudging/relaxation time scales for tracer type variables (inverse scales will be computed internally).

TNUDG Nudging time scale (days) for tracer-type variables.
 NT tracer values are expected.

*** CARD 16: Other Nudging/relaxation time scales (inverse scales will be computed internally).

ZNUDG Nudging time scale (days) for free-surface.
 M2NUDG Nudging time scale (days) for 2D momentum.
 M3NUDG Nudging time scale (days) for 3D momentum.

*** CARD 17: Linear equation of State parameters.

R0 Background density value (Kg/m³) used in Linear Equation of State.
 T0 Background potential temperature (Celsius) constant.
 S0 Background salinity (PSU) constant.
 TCOEF Thermal expansion coefficient in Linear Equation of State.
 SCOEF Saline contraction coefficient in Linear Equation of State.

*** CARD 18: Slipperiness parameter.

GAMMA2 Slipperiness variable, either 1.0 (free slip) or -1.0 (no slip).

*** CARD 19: Logical switches (TRUE/FALSE) to activate writing of fields associated with momentum equations into HISTORY NetCDF file:

Hout(idUvel) Write out 3D U-velocity component (T/F).

Hout(idVvel) Write out 3D V-velocity component (T/F).
Hout(idWvel) Write out 3D W-velocity component (T/F).
Hout(idOvel) Write out 3D omega vertical velocity (T/F).
Hout(idUbar) Write out 2D U-velocity component (T/F).
Hout(idVbar) Write out 2D V-velocity component (T/F).
Hout(idFsur) Write out free-surface (T/F).

*** CARD 20: Logical switches (TRUE/FALSE) to activate writing of fields associated with tracer equations into HISTORY NetCDF file, NT values are expected:

Hout(idTvar) Write out tracer type variables: potential temperature, salinity, etc. (T/F).

*** CARD 21: Logical switches (TRUE/FALSE) to activate writing of surface and bottom stresses into HISTORY NetCDF file:

Hout(idUsms) Write out surface U-momentum stress (T/F).
Hout(idVsms) Write out surface V-momentum stress (T/F).
Hout(idUbms) Write out bottom U-momentum stress (T/F).
Hout(idVbms) Write out bottom V-momentum stress (T/F).
Hout(idUbws) Write out wind-induced, bottom U-wave stress (T/F).
Hout(idVbws) Write out wind-induced, bottom V-wave stress (T/F).

*** CARD 22: Logical switches (TRUE/FALSE) to activate writing of bottom boundary fields into HISTORY NetCDF file:

Hout(idAbed) Write out wind-induced, bed wave excursion amplitude (T/F).
Hout(idUbed) Write out wind-induced, bed wave orbital U-velocity (T/F).
Hout(idVbed) Write out wind-induced, bed wave orbital V-velocity (T/F).
Hout(idUbot) Write out bottom U-momentum above bed (T/F).
Hout(idVbot) Write out bottom V-momentum above bed (T/F).
Hout(idHrip) Write out bed ripple height (T/F).
Hout(idLrip) Write out bed ripple length (T/F).
Hout(idZnot) Write out hydraulic bottom roughness (T/F).
Hout(idZapp) Write out apparent hydraulic bottom roughness (T/F).

*** CARD 23: Logical switches (TRUE/FALSE) to activate writing of surface heat flux components into HISTORY NetCDF file:

Hout(idTsur) Write out surface net heat flux (T/F).
Hout(idLhea) Write out latent heat flux (T/F).
Hout(idShea) Write out sensible heat flux (T/F).
Hout(idLrad) Write out longwave radiation flux (T/F).

Hout(idSrad) Write out shortwave radiation flux (T/F).

*** CARD 24: Logical switches (TRUE/FALSE) to activate writing of other fields into HISTORY NetCDF file:

Hout(idDano) Write out density anomaly (T/F).

Hout(idVvis) Write out vertical viscosity coefficient (T/F).

Hout(idTdif) Write out vertical diffusion coefficient of temperature (T/F).

Hout(idSdif) Write out vertical diffusion coefficient of salinity (T/F).

Hout(idHsbl) Write out depth of oceanic surface boundary layer (T/F).

Hout(idHbbl) Write out depth of oceanic bottom boundary layer (T/F).

Hout(idMtke) Write out turbulent kinetic energy (T/F).

Hout(idMtls) Write out turbulent kinetic energy times length scale (T/F).

*** CARD 25: Number and Levels to output:

NLEV Number of levels to write out in history file for each activated 3D field. If NLEV<0, all model level are written out. IF NLEV=0, the history file will no be created.

LEV If NLEV>0, levels to write out in history file. NLEV values are expected:

$$1 \leq \text{LEV}(1:\text{NLEV}) \leq N$$

Enter values in ascending numerical order.

*** CARD 26: Generic User parameters.

NUSER Number of User parameters to consider (integer).

USER Vector containing user parameters (real array).

*** CARD 27: String with a maximum of eighty characters.

TITLE Title of model Run.

*** CARD 28: String with a maximum of eighty characters.

RSTNAME Output re-start file name (NetCDF).

*** CARD 29: String with a maximum of eighty characters.

HISNAME Output history file name (NetCDF).

*** CARD 30: String with a maximum of eighty characters.

AVGNAME Output averages file name (NetCDF).

*** CARD 31: String with a maximum of eighty characters.

STANAME Output stations file name (NetCDF).

*** CARD 32: String with a maximum of eighty characters.

FLTNAME Output floats file name (NetCDF).

*** CARD 33: String with a maximum of eighty characters.

GRDNAME Input grid file name (NetCDF).

*** CARD 34: String with a maximum of eighty characters.
 ININAME Input initial conditions file name. It can be a
 re-start file (NetCDF).

*** CARD 35: String with a maximum of eighty characters.
 FRCNAME Input forcing fields file name (NetCDF).

*** CARD 36: String with a maximum of eighty characters.
 CLMNAME Input climatology fields file name (NetCDF).

*** CARD 37: String with a maximum of eighty characters.
 APARNAM Input assimilation parameters file name (ASCII).

*** CARD 38: String with a maximum of eighty characters.
 SPOSNAM Input stations positions file name (ASCII).

*** CARD 39: String with a maximum of eighty characters.
 FPOSNAM Input initial drifter's positions file name (ASCII).

*** CARD 40: String with a maximum of eighty characters.
 BPARNAM Input biological parameters file name (ASCII).

*** CARD 41: String with a maximum of eighty characters.
 USRNAME USER's input generic file name.

4. ROMS를 이용한 해양역학 구조 시물레이션

ROMS를 이용하여 해양역학 구조 시물레이션 실험을 실시하였다. 동해안-울릉도 간 용승실험과 연안담수유출 영향예측실험을 통하여 ROMS의 3차원 해양역학 구조 시물레이션 실험을 모의하였고 동해와 서해의 해수순환실험을 통하여 실제 해역에서 ROMS의 시물레이션 실험을 실시하였다.

가. ROMS를 이용한 동해안-울릉도간 용승실험

동해안-울릉도간 용승실험구간의 서쪽과 동쪽은 벽으로 막혀있으며 북쪽과 남쪽은 Periodic Channel을 형성하고 있다. 우리나라의 겨울철을 고려하여 북서풍을 발생시켜 내륙인 서쪽에서는 Upwelling이 발생하고 울릉도와 인접한 동쪽에서는 Downwelling이 발생하는 현상을 확인할 수 있다.

(1) cppdefs.h

모델에서 C 프리프로세서가 UPWELLING 변수들을 구성하기 위해 cppdefs.h 파일

안에 #define UPWELLING을 다음과 같이 설정한다.

```
#ifndef UPWELLING
#define UV_ADV
#define UV_COR
#define UV_VIS2
#define UV_VIS4
#define MIX_GEO_UV
#define WJ_GRADP
#define TS_DIF2
#define TS_DIF4
#define MIX_GEO_TS
#define SALINITY
#define NS_PERIODIC
#define EW_PERIODIC
#define SOLVE3D
#define SPLINES
#define AVERAGES
#define ANA_GRID
#define ANA_INITIAL
#define ANA_MEANRHO
#define ANA_SMFLUX
#define ANA_STFLUX
#define ANA_SSFLUX
#define ANA_BTFLUX
#define ANA_BSFLUX
#define ANA_VMIX
# elif defined USWEST
```

(2) 영역

흐름은 y축으로 변하지 않기 때문에 M은 작을 수 있다. param.h 파일에서 L, M, N, N에 대한 값은 다음과 같다.

$$L = 80$$

M = 41
 N = 16
 NT = 2

(3) 그리드

ROMS는 모델의 그리드를 생성하기 위해 그리드 생성프로그램인 Gridpack 이나 Seagrid를 사용할 수 있으며 ana_grid를 사용하면 그리드를 해석적으로 만들 수 있다. Analytical.F 파일의 서브루틴 ana_grid는 UPWELLING을 정의할때 채널의 양쪽을 육지로 하는 수심을 만들기 위해 수정되었다. 수심의 범위는 채널의 육지쪽에서 27m이며 채널의 중심부에서는 150m로 만들었다. 수평 그리드의 간격은 1km로 동일하며 Coriolis 변수 f는 우리나라 동해를 기준으로 다음과 같이 산정하였다.

$$f = 2\omega \sin(\varphi) = 2 * 7.29 * 10^{-5} * \sin 38 = 8.97 * 10^{-5} \text{ (1/s)}$$

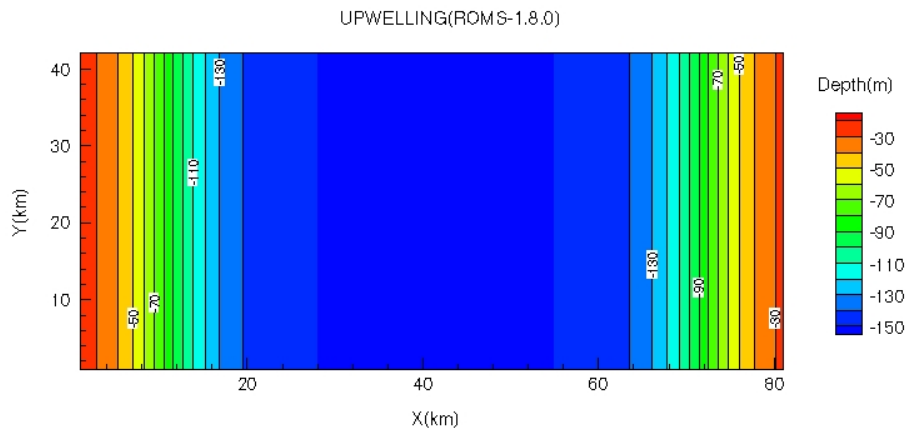


Fig. 8-1 The bottom topography(m) of upwelling test.

(4) 초기조건

모델의 초기조건은 지수적 성층을 가진 정지상태의 유체상태로 설정하였다. 수온과 염분, 밀도의 초기 성층을 다음과 같다.

The Salinity is set to $1.0d-4*x(i,j) - 1$ (psu).

The Temperature is set to $14+8e^{z/50}$ (deg).

The Density is set to $26.46 - 2.24 \cdot \exp(z_r/50)$ (kg/m³).

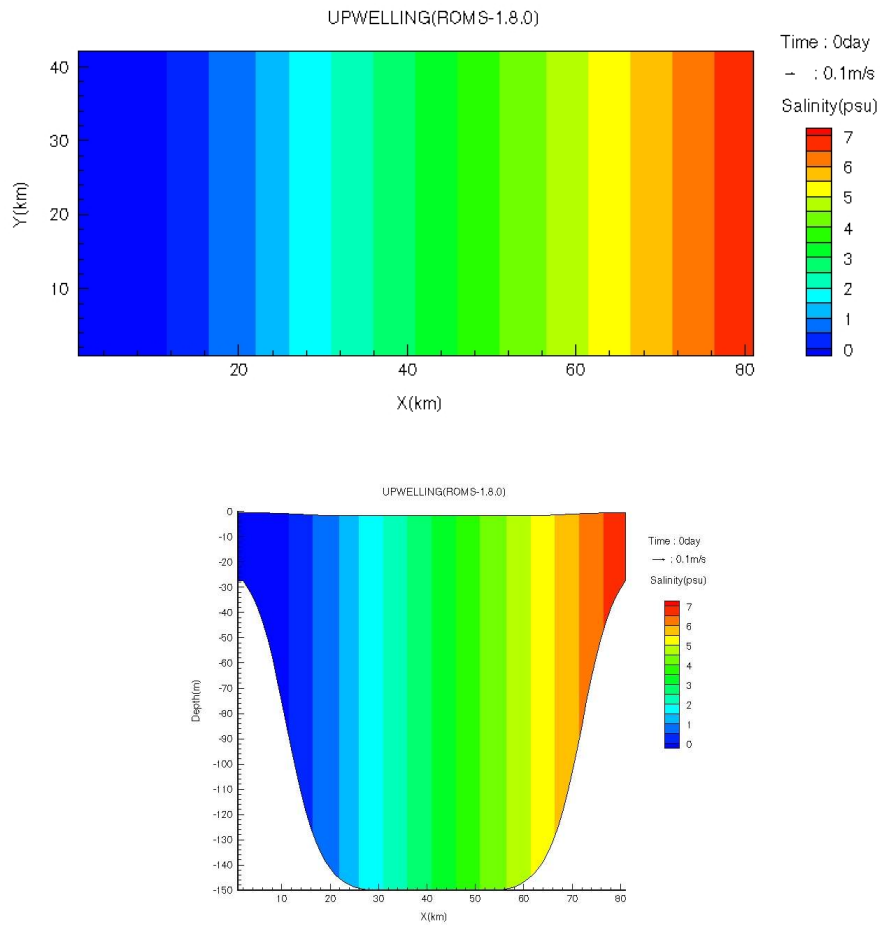


Fig. 8-2 The initial condition of salinity for upwelling test.

(5) 경계조건

Periodic 채널에 대한 값은 cppdefs.h 파일에 이미 설정되어있어 그대로 사용하였다.

(6) 외력조건

Upwelling 은 표면의 Ekman 층을 분해하고 표면의 바람응력에 의한 영향을 알아보기 위한 실험이다. 바람의 응력은 겨울철 북서풍을 고려하여 표면에 $0.1 \text{ Pascals} / \rho_o$ ($10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$)를 적용하였다. 두꺼운 Ekman 층을 생성하기 위해 서브루

턴 Ana_vmix의 수직점성계수 A_{kv} 를 $10^{-2}m^2/s$ 으로 적용하였으며 수심에 따라 감소하도록 산정했다.

(7) 실행

모델은 50일간 수행되었으며 내부 시간간격(3-D)은 300초, 외부 시간간격(2-D)은 20초로 구성하였다. 모델의 결과는 12시간 간격으로 저장하였다.

(8) 결과

50일간 수행된 모델의 결과로부터 수평면과 수직면에서의 염분의 변화를 5일 간격으로 도시하였다.

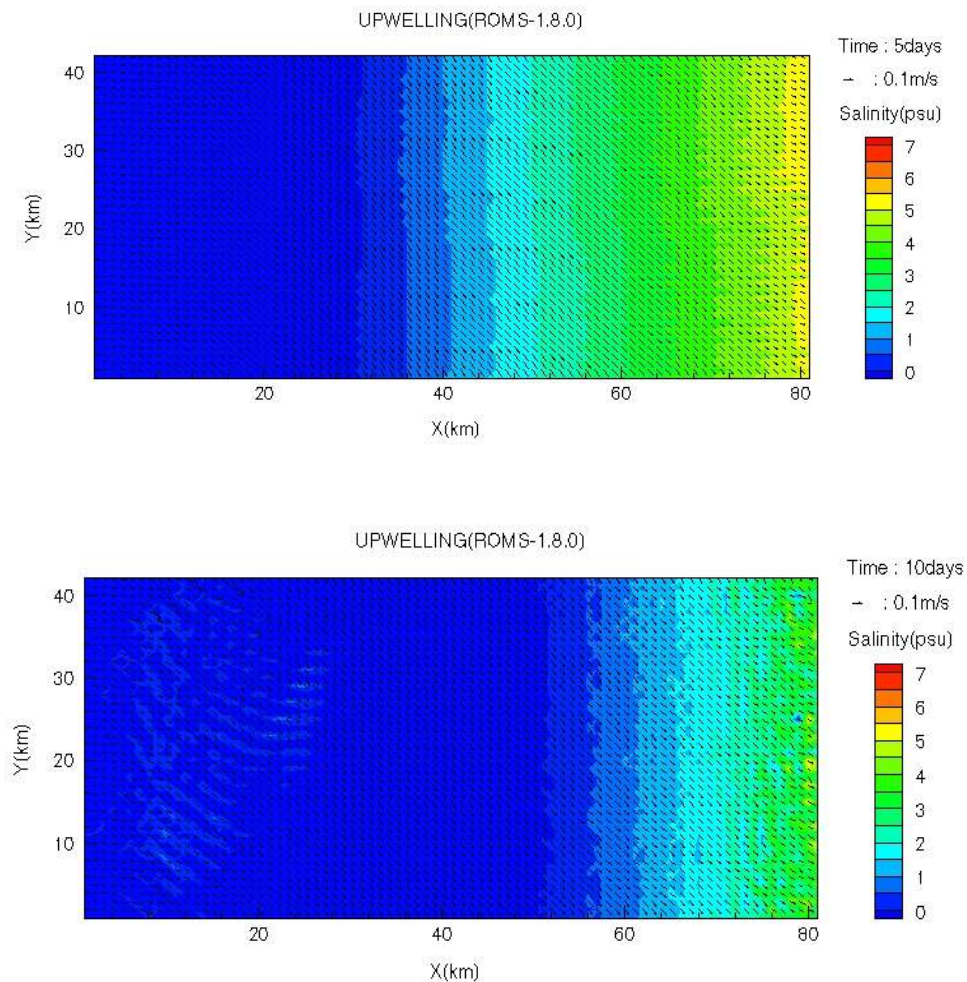


Fig. 8-3 Simulated temporal variation of surface salinity and velocity in upwelling test.

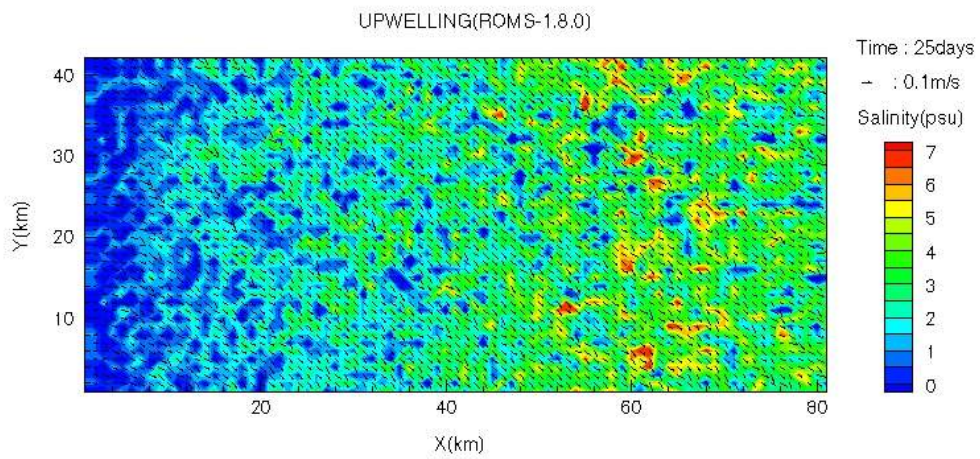
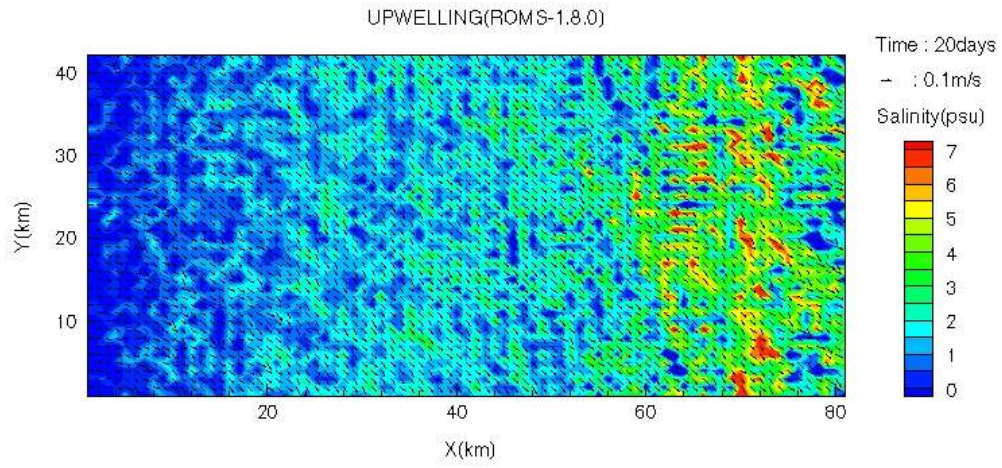
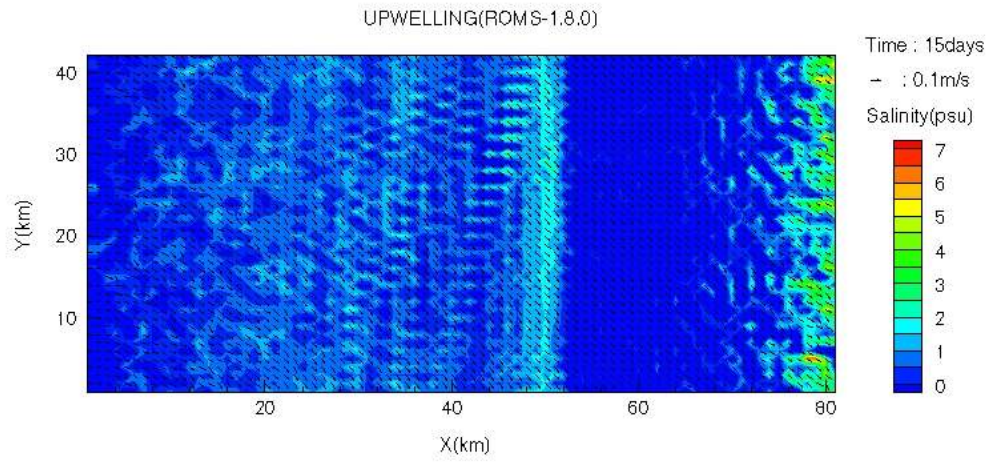


Fig. 8-3 Continued.

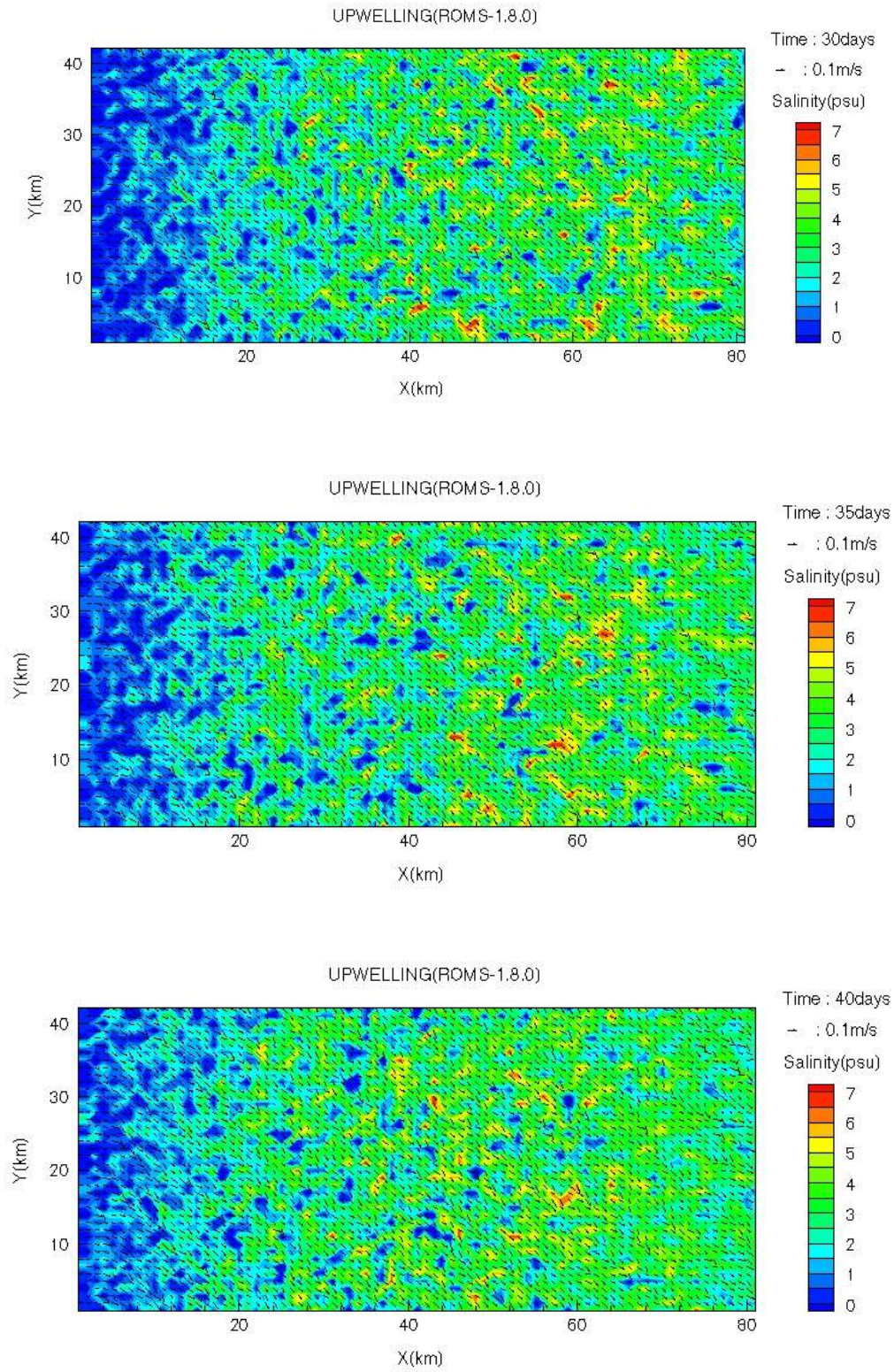


Fig. 8-3 Continued.

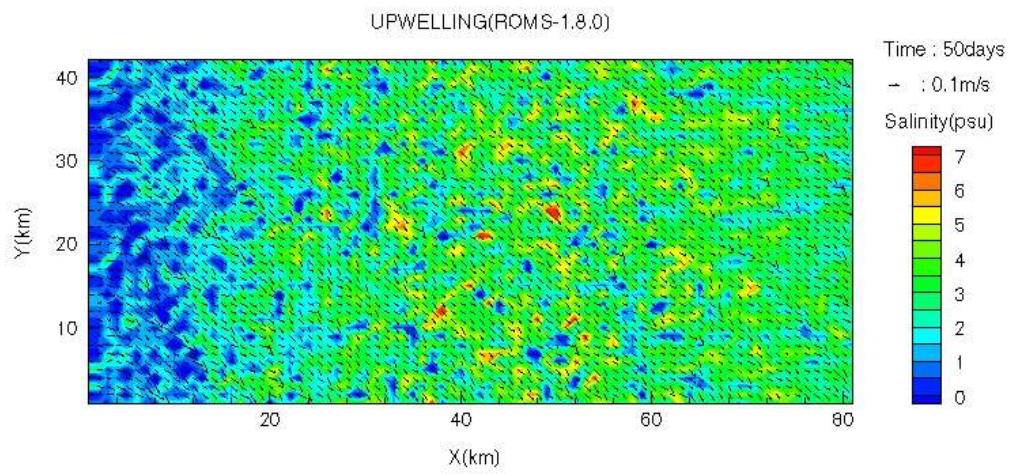
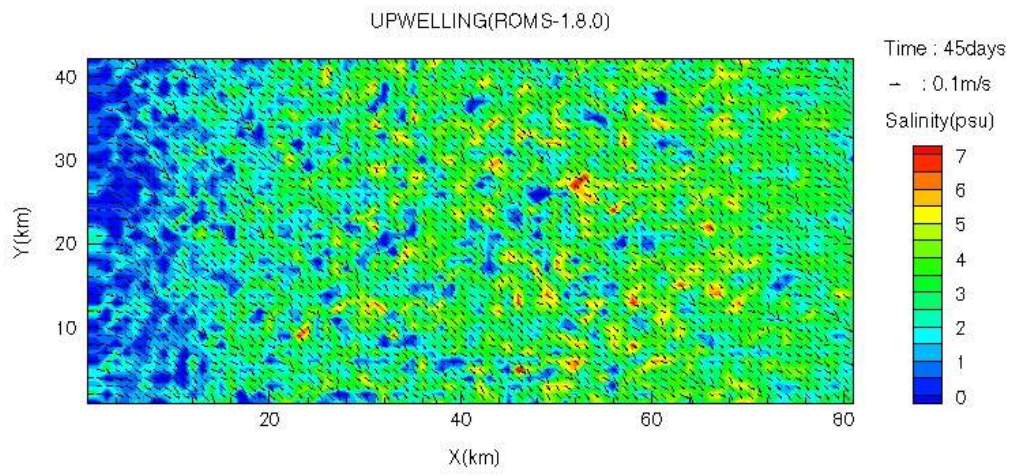


Fig. 8-3 Continued.

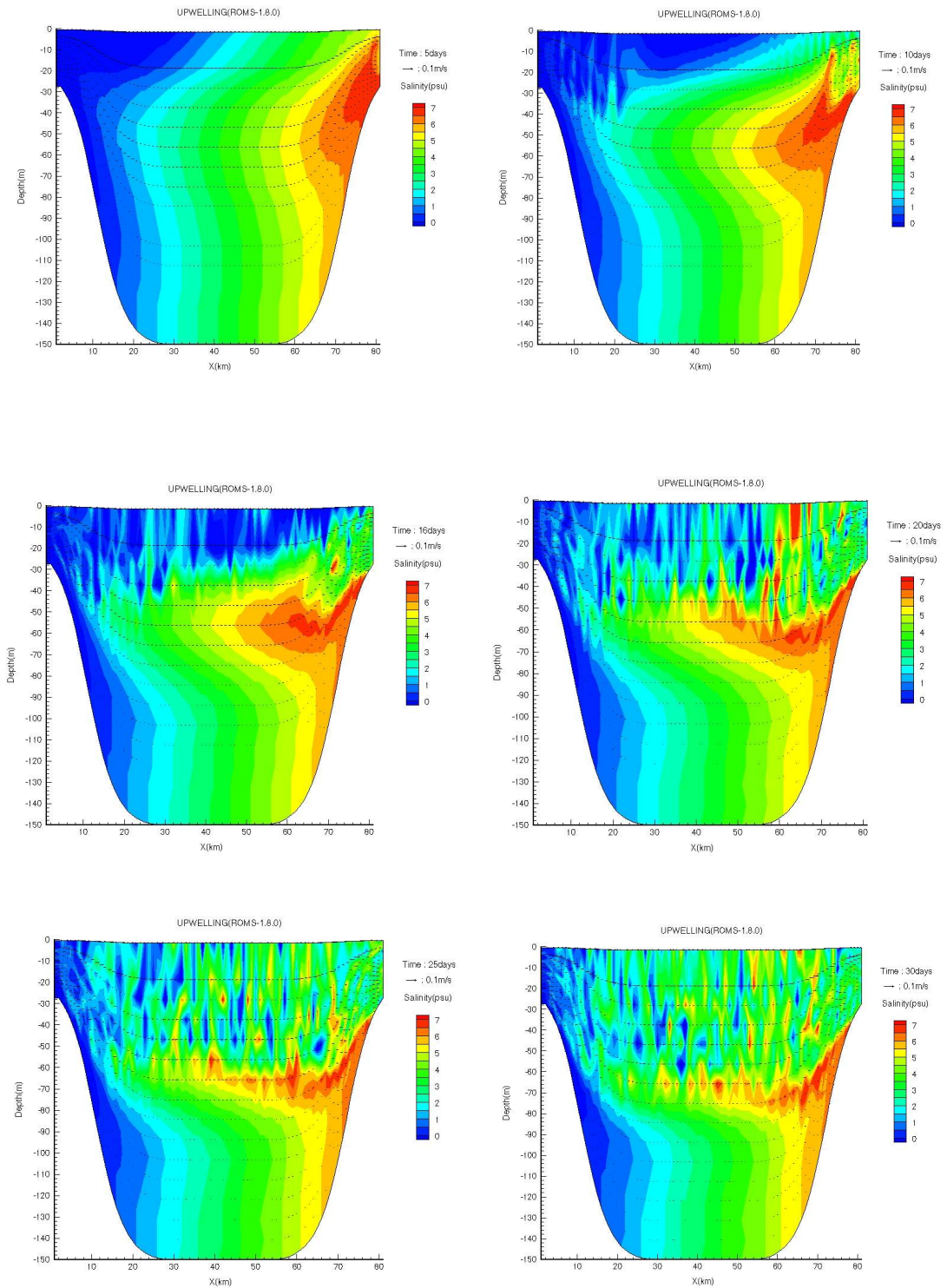


Fig. 8-4 Simulated cross-sections of salinity and velocity in upwelling test.

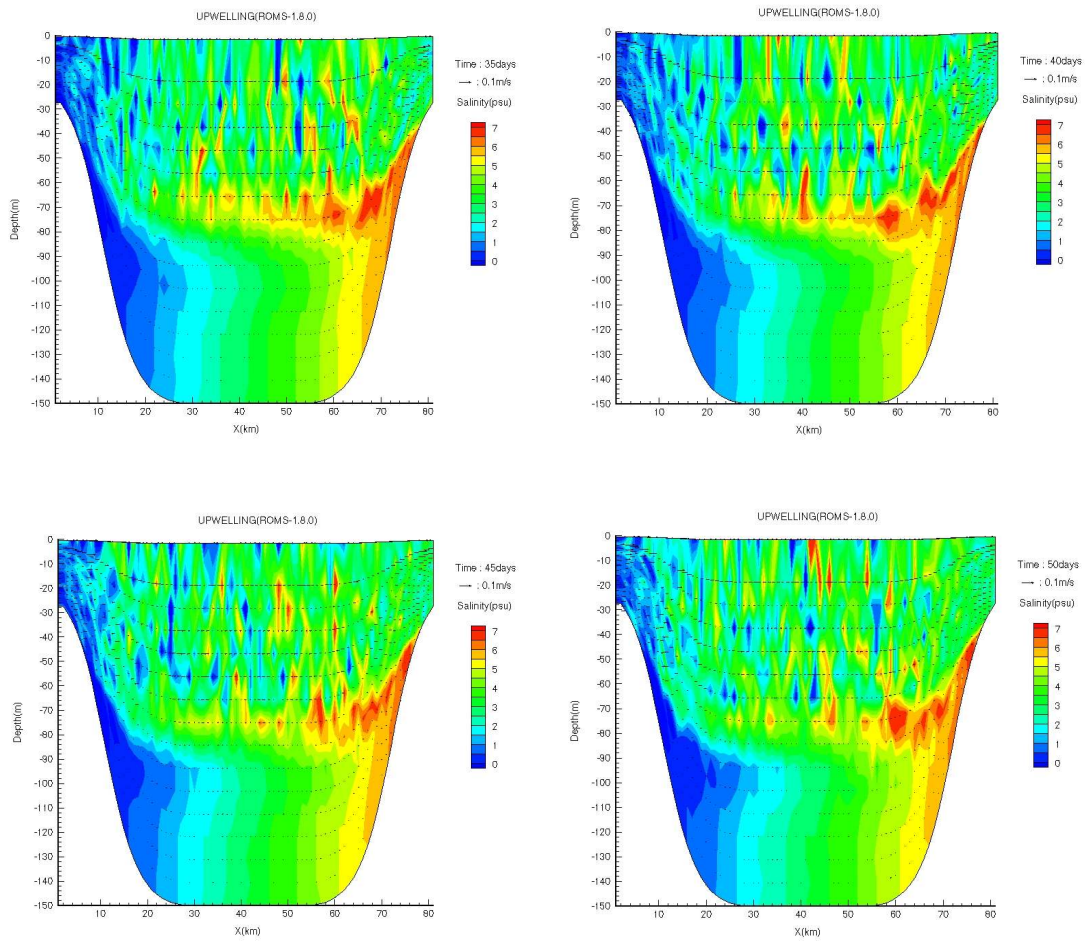


Fig. 8-4 Continued.

나. ROMS를 이용한 연안담수유출 영향예측

ROMS를 이용하여 연안담수유출 영향예측 실험구간의 서쪽은 벽으로 막혀있으며 북쪽과 남쪽은 Periodic Channel을 형성하고 있다. 우리나라 동해안의 내륙으로부터 유입되는 담수를 고려하여 담수에 의한 영향을 예측하는 실험을 실시하였다.

(1) cppdefs.h

모델에서 C 프리프로세서가 RIVERPLUME 변수들을 구성하기 위해 cppdefs.h 파일안에 #define REVERPLUME을 다음과 같이 설정한다.

```
#ifndef RIVERPLUME
```



```
#define UV_ADV
#define UV_COR
#define WJ_GRADP
#undef UV_VIS2
#undef MIX_S_UV
#define UV_PSOURCE
#undef TS_DIF2
#undef MIX_GEO_TS
#define TS_PSOURCE
#define NONLIN_EOS
#define SALINITY
#define MASKING
#define SOLVE3D
#define SPLINES
#define AVERAGES
#define AVERAGES_AKV
#define AVERAGES_AKT
#define AVERAGES_AKS
#undef STATIONS
#define NS_PERIODIC
#define WESTERN_WALL
#define EASTERN_WALL
#undef MY25_MIXING
#undef Q_C2ADVECTION
#undef Q_C4ADVECTION
#define LMD_MIXING
#ifdef LMD_MIXING
# define LMD_RIMIX
# define LMD_CONVEC
# define LMD_SKPP
# define LMD_BKPP
# define LMD_NONLOCAL
#endif
#define ANA_GRID
#define ANA_MASK
#define ANA_INITIAL
```

```
#define ANA_PSOURCE
#define ANA_SMFLUX
#define ANA_SRFLUX
#define ANA_SSFLUX
#define ANA_STFLUX
#define ANA_BSFLUX
#define ANA_BTFLUX
# elif defined SEAMOUNT
```

(2) 영역

param.h 파일에서 L, M, N, N에 대한 값은 다음과 같다.

```
L = 39
M = 67
N = 13
NT =2
```

(3) 그리드

Analytical.F 파일의 서브루틴 ana_grid는 RIVERPLUME을 정의할 때 채널의 한 쪽을 육지로 하고 수심이 선형으로 증가하도록 수정하였다. 수심의 범위는 채널의 육지쪽에서 15m이며 육지로부터 멀어지는 방향으로 선형으로 증가하며 최고 수심을 150m로 만들었다. 수평 그리드의 간격은 동서방향으로 1.46km이며 남북방향으로 2.96km 로 설정하였다. Coriolis 변수 f는 우리나라 동해를 기준으로 다음과 같이 산정하였다.

$$f = 2\omega \sin(\phi) = 2 * 7.29 * 10^{-5} * \sin 38 = 8.97 * 10^{-5} \text{ (1/s)}$$

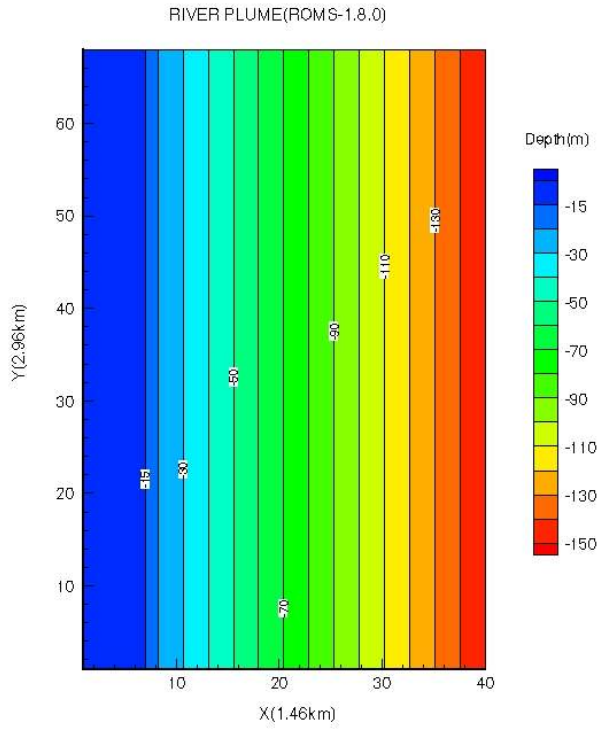


Fig. 8-5 The bottom topography(m) of coastal plume test.

(4) 초기조건

모델의 초기조건은 정지상태의 유체상태로 설정하였다. 수온과 염분, 밀도의 초기값은 다음과 같다.

The Salinity is set to 32.0 (psu).

The Temperature is set to 4.13 (deg).

The Density is set to 0.0 (kg/m³).

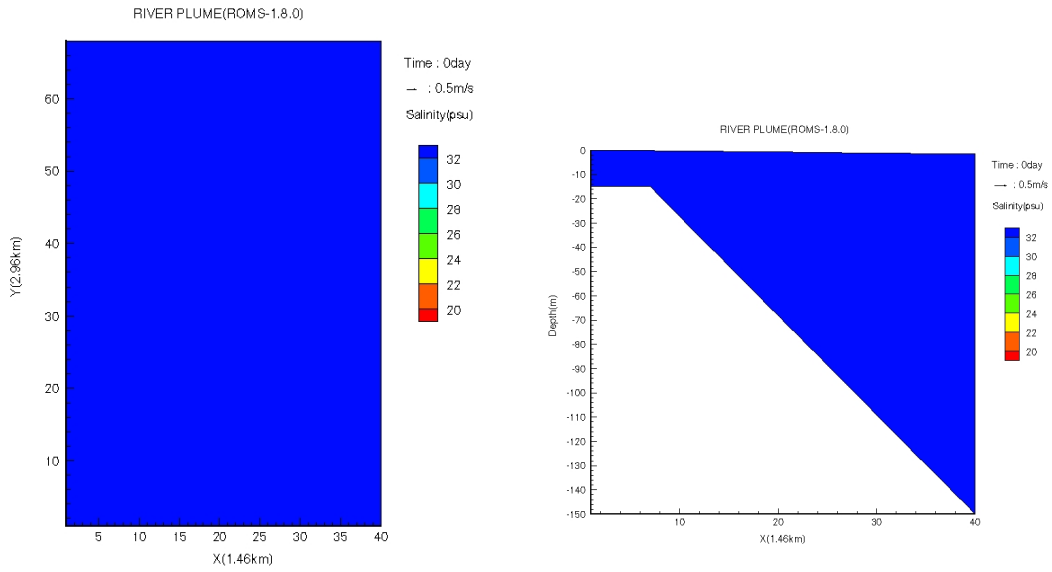


Fig. 8-6 The initial condition of salinity for coastal plume test.

(5) 경계조건

Periodic 채널에 대한 값은 cppdefs.h 파일에 이미 설정되어있어 그대로 사용하였다.

(6) 외력조건

바람의 응력은 없으며 연안의 담수를 포인트 소스원으로 115.4m³/s를 입력하였다.

(7) 실행

모델은 50일간 수행되었으며 내부 시간간격(3-D)은 120초, 외부 시간간격(2-D)은 20초로 구성하였다. 모델의 결과는 12시간 간격으로 저장하였다.

(8) 결과

50일간 수행된 모델의 결과로부터 수평면과 수직면에서의 염분의 변화를 5일 간격으로 도시하였다.

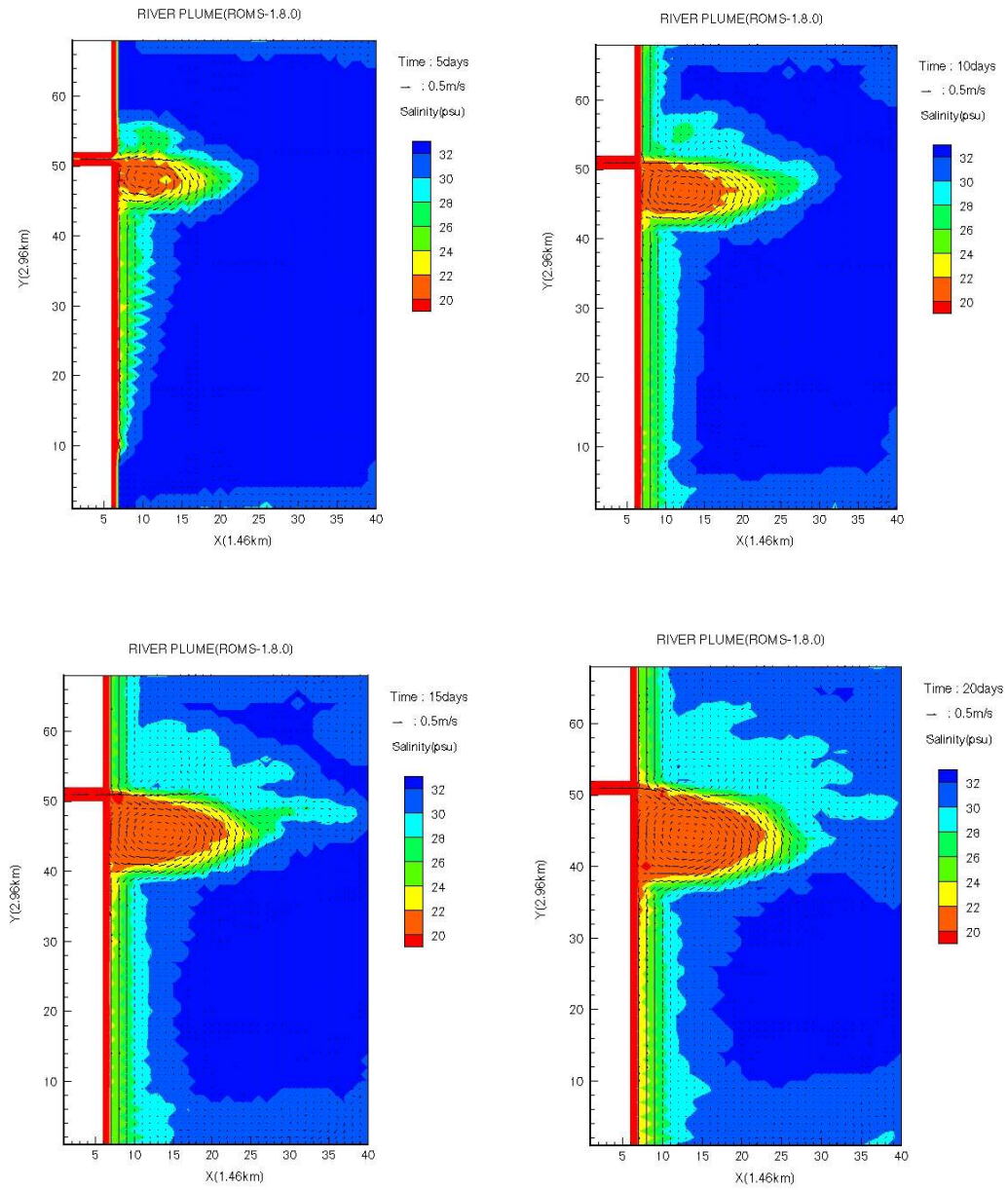


Fig. 8-7 Simulated temporal variation of surface salinity and velocity in coastal plume test.

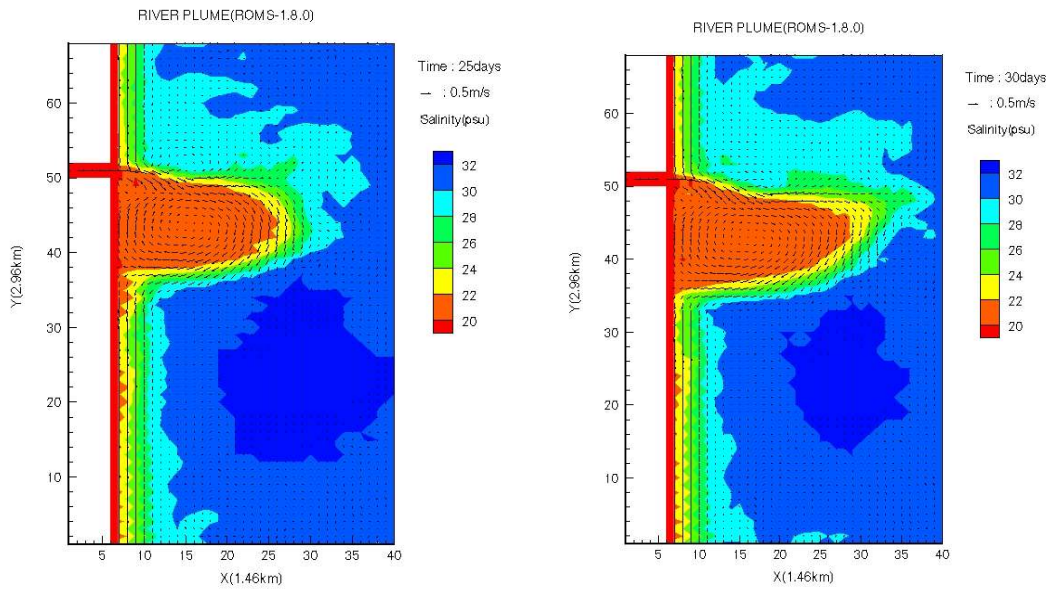


Fig. 8-7 Continued.

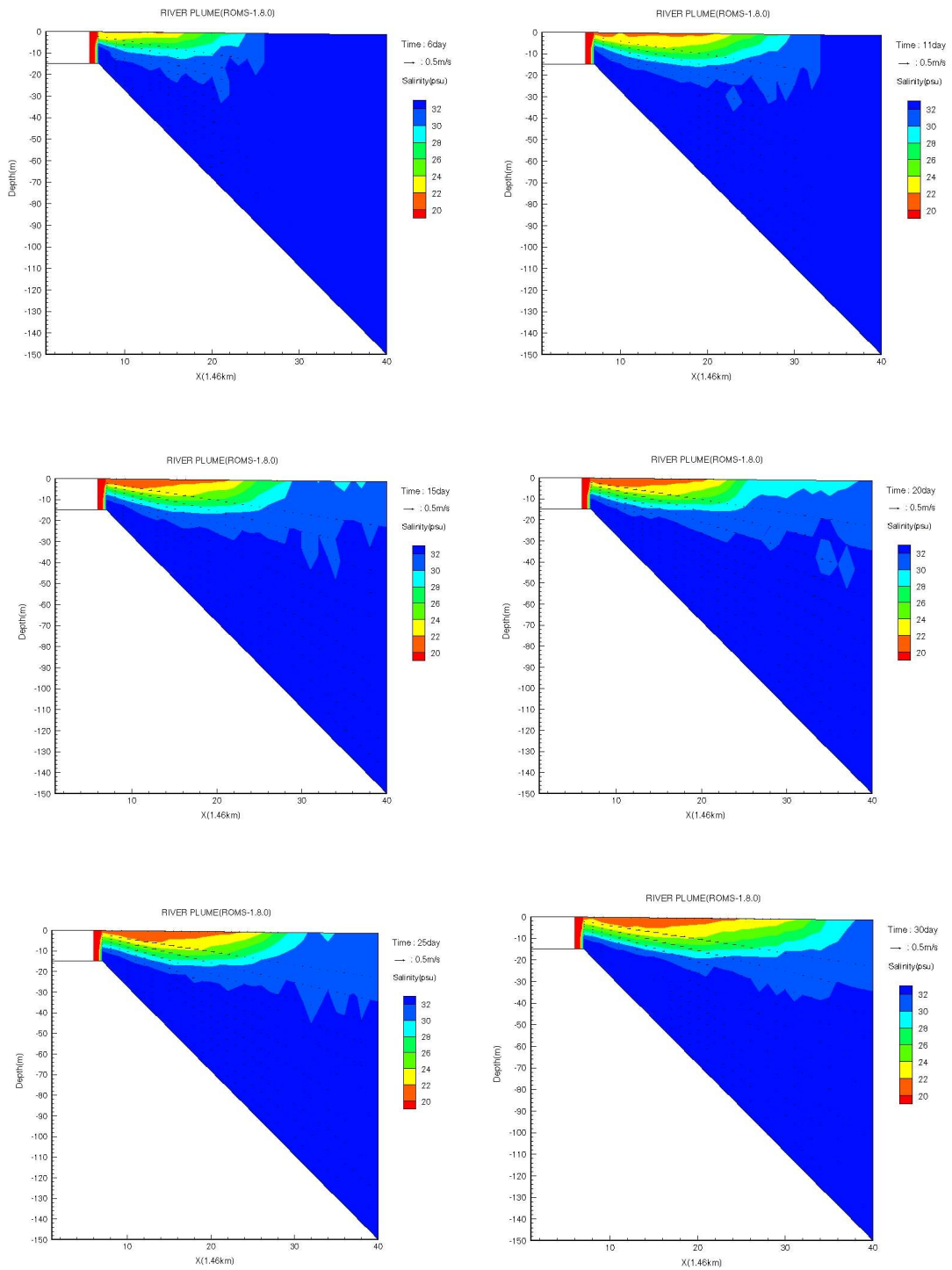


Fig. 8-8 Simulated cross-sections of salinity and velocity in coastal plume test.

다. ROMS를 이용한 동해의 해수순환

ROMS를 이용하여 동해의 해수순환 실험을 모의하였다. POM 모델에서는 동해의 해수순환을 월별 초기조건과 경계조건 및 외력을 모두 적용하였으나 현재의 ROMS 모델은 아직 테스트 단계에 있어 초기조건을 일정하게 유지하고 외력으로 겨울철 동해의 바람응력과 대한해협에서 유입되는 유량을 고려하여 실험하였다.

(1) cppdefs.h

모델에서 C 프리프로세서가 EASTSEA 변수들을 구성하기 위해 cppdefs.h 파일안에 #define EASTSEA을 다음과 같이 설정한다.

```
#ifndef EASTSEA
#define UV_ADV
#define WJ_GRADP
#define UV_VIS2
#define UV_COR
#define TS_DIF2
#define TS_U3HADVECTION
#define TS_C4VADVECTION
#define SALINITY
#define NONLIN_EOS
#define SERIAL
#define SOLVE3D
#define BODYFORCE
#define ANA_INITIAL
#define ANA_MEANRHO
#define ANA_SMFLUX
#define ANA_STFLUX
#define ANA_SSFLUX
#define ANA_BTFLUX
#define ANA_BSFLUX
#define MIX_GEO_UV
#define MIX_GEO_TS
#define LMD_MIXING
#define LMD_RIMIX
#define LMD_CONVEC
#undef NS_PERIODIC
```



```

#define M2CLIMATOLOGY
#define ZCLIMATOLOGY
#define ANA_SSH
#define ANA_M2CLIMA
#undef WEST_M2NUDGING
#undef EAST_M2NUDGING
#define SOUTH_M2NUDGING
#undef WEST_M2RADIATION
#define SOUTH_M2FLATHER
#define SOUTH_M3RADIATION
#define SOUTH_FSRADIATION
#define SOUTH_TRADIATION
#define NOUTH_M2RADIATION
#define NOUTH_M3RADIATION
#define NOUTH_FSRADIATION
#define NOUTH_TRADIATION
#define EAST_M2RADIATION
#define EAST_M3RADIATION
#define EAST_FSRADIATION
#define EAST_TRADIATION
#define OBC_VOLCONS
#undef SPONGE
#define SPLINES
#undef EASTERN_WALL
#undef SOUTHERN_WALL
#undef NORTHERN_WALL
#define WESTERN_WALL
#define MASKING
#define WRITE_GRID
# endif

```

(2) 영역

param.h 파일에서 L, M, N, N에 대한 값은 다음과 같다.

$$L = 100$$

M = 130
N = 16
NT = 2

(3) 그리드

동해의 그리드를 생성하기 위해 그리드 생성프로그램인 Seagrid를 사용하여 Curvilinear 그리드를 만들었으며 get_grid를 사용하여 그리드를 읽어 들였다. 그리드의 수심자료는 POM에서 사용했던 자료를 Matlab에서 불러들여 Seagrid로 영역에 맞게 재 작성하였다. Seagrid를 이용하여 그리드를 생성하면 그리드의 수평 간격은 Orthogonal Curvilinear 그리드에 맞게 각 격자점의 위경도 정보가 입력되며 Coriolis 변수 f 값 또한 변수자료로 자동으로 산정되었다.

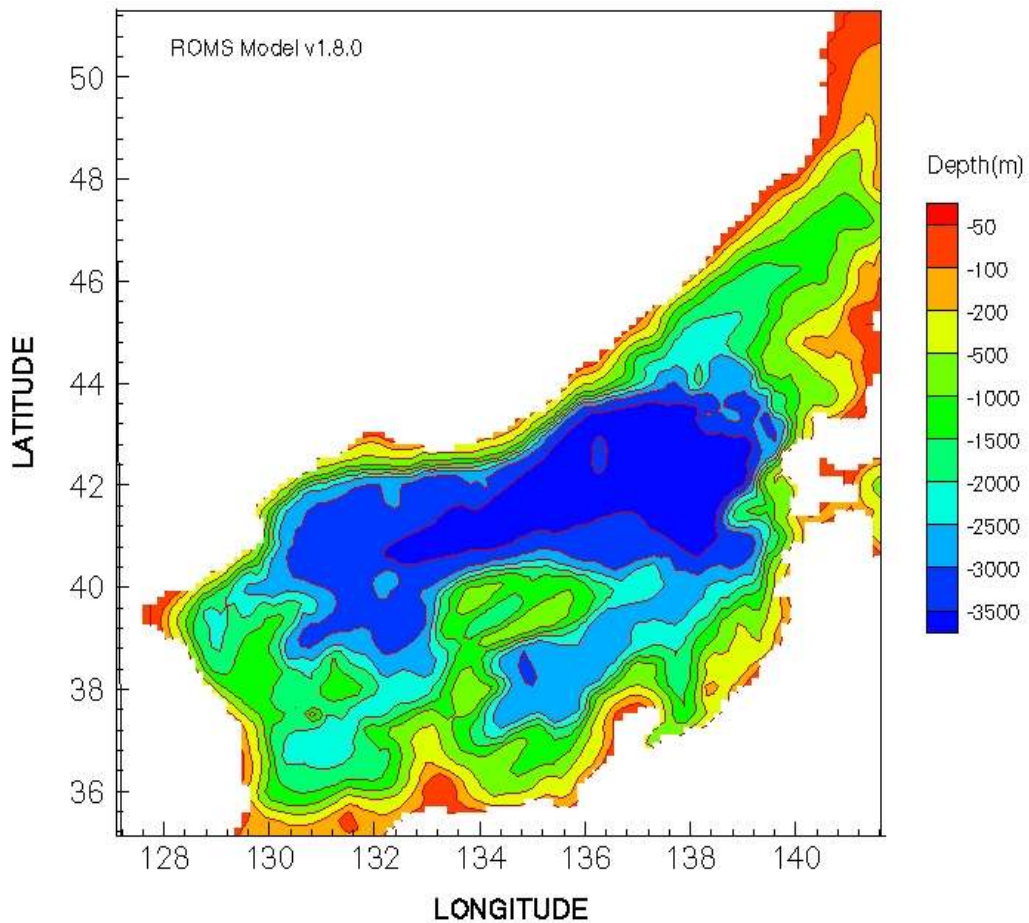


Fig. 8-9 The bottom topography of the East Sea for ROMS application.

(4) 초기조건

모델의 초기조건은 정지상태의 유체상태로 설정하였다. 수온과 염분, 밀도의 초기값은 다음과 같다.

The Salinity is set to 30.0 (psu).

The Temperature is set to 15.0 (deg).

The Density is set to 1025.0 (kg/m³).

(5) 경계조건

모델의 경계조건은 cppdefs.h 파일안에 설정하였다.

(6) 외력조건

바람의 응력은 겨울철 동해의 북서풍을 고려하여 0.07 Pascals / ρ_o ($0.7 \times 10^{-4} \text{m}^4/\text{s}^2$)을 적용하였고 대한해협에서 유입되는 Barotropic flow를 0.05m/s로 입력하였다.

(7) 실행

모델은 10일간 수행되었으며 내부 시간간격(3-D)은 600초, 외부 시간간격(2-D)은 24초로 구성하였다. 모델의 결과는 1일 간격으로 저장하였다.

(8) 결과

10일간 수행된 모델의 결과로부터 수평면과 경도 방향 수직면에서의 유속 벡터를 도시하였다.

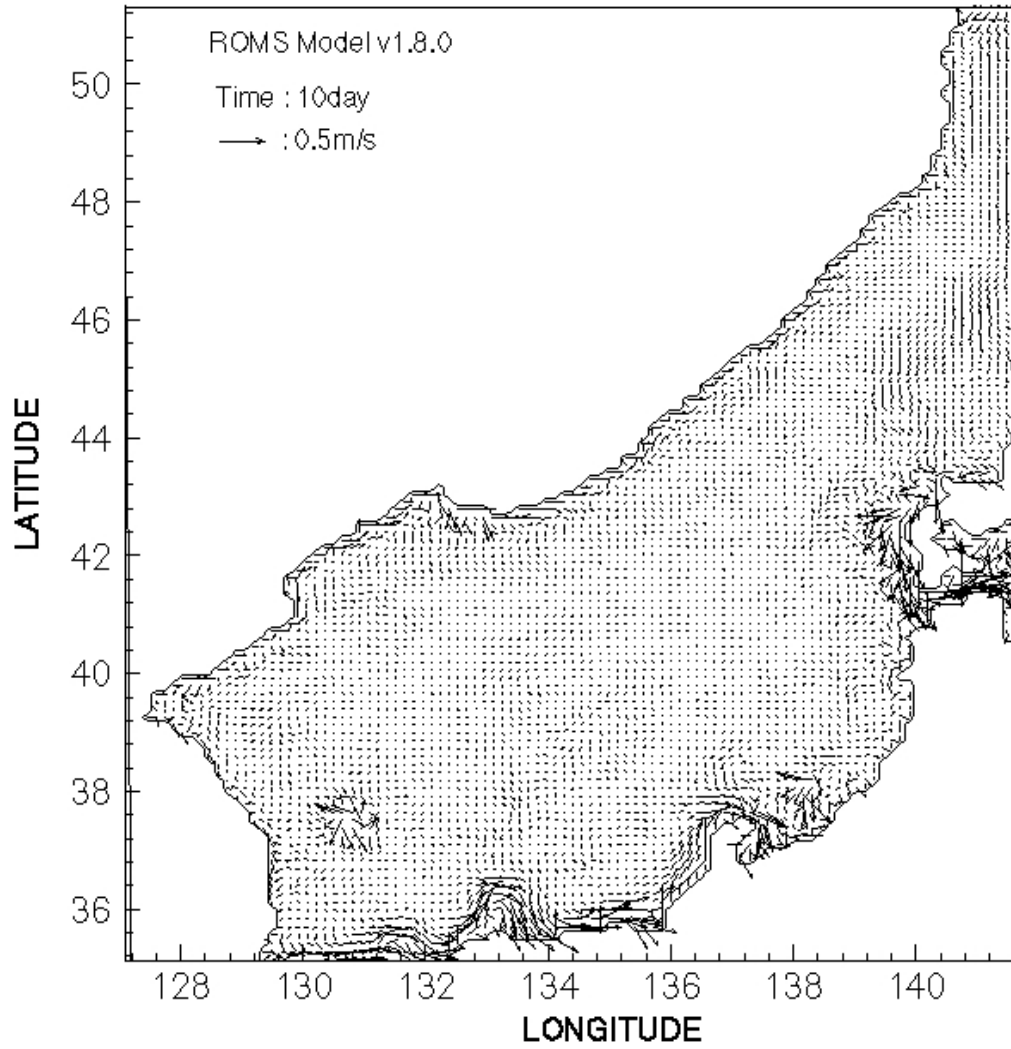


Fig. 8-10 Simulated mean surface velocity field.

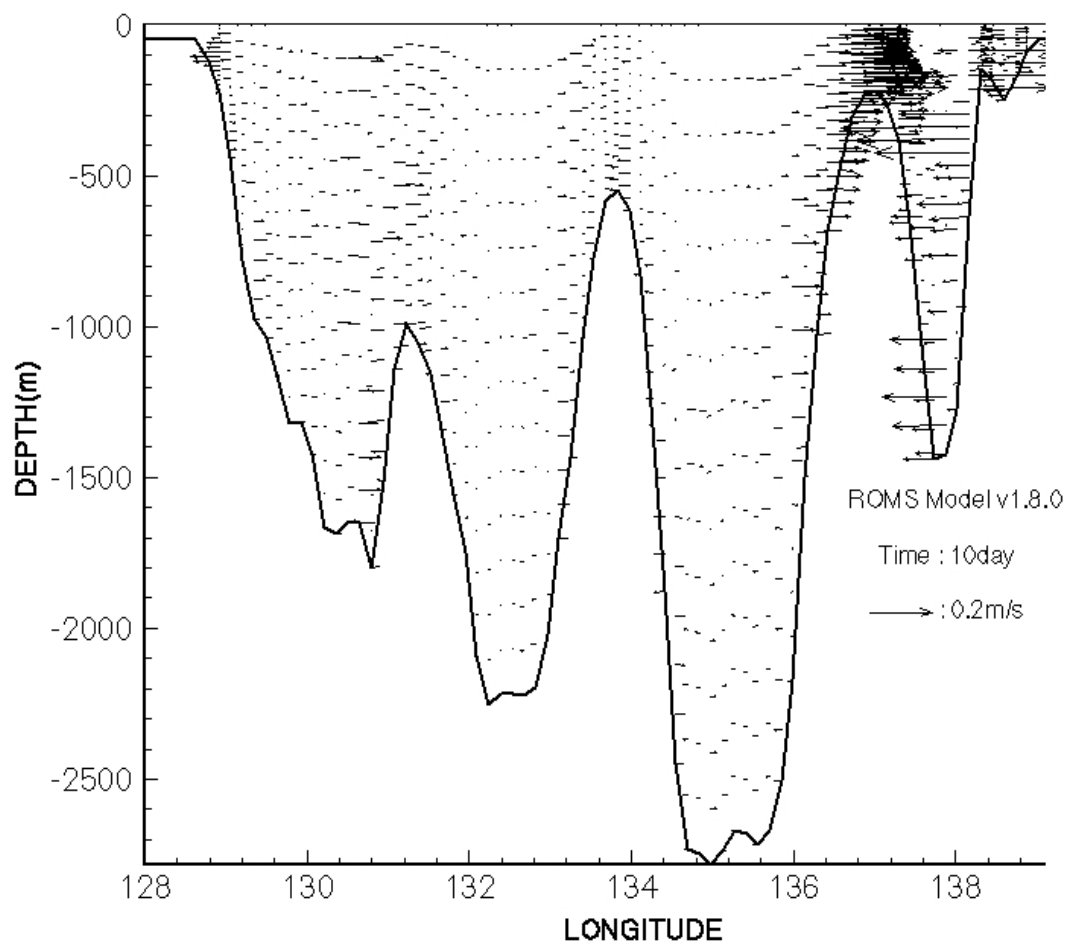


Fig. 8-11 Simulated cross-section of mean velocity along 32.0°N.

라. ROMS를 이용한 서해의 해수순환

ROMS를 이용하여 서해의 해수순환 실험을 모의하였다. 동중국해 일부를 포함한 서해의 해수순환을 3차원으로 구현하는 수치모델 연구는 아직 초기단계에 있다. 본 연구에서는 ROMS 모델을 이용하여 초기조건을 일정하게 유지하고 외력으로 겨울철 서해의 바람응력과 대만 동쪽에서 유입되는 Kuroshio 난류를 고려하여 실험하였다.

(1) cppdefs.h

모델에서 C 프리프로세서가 WESTSEA 변수들을 구성하기 위해 cppdefs.h 파일안에 #define WESTSEA을 다음과 같이 설정한다.

```
#ifndef WESTSEA
#define UV_ADV
#define WJ_GRADP
#define UV_VIS2
#define UV_COR
#define TS_DIF2
#define TS_U3HADVECTION
#define TS_C4VADVECTION
#define SALINITY
#define NONLIN_EOS
#define SERIAL
#define SOLVE3D
#define BODYFORCE
#define ANA_INITIAL
#define ANA_MEANRHO
#define ANA_SMFLUX
#define ANA_STFLUX
#define ANA_SSFLUX
#define ANA_BTFLUX
#define ANA_BSFLUX
#define MIX_GEO_UV
#define MIX_GEO_TS
#define LMD_MIXING
#define LMD_RIMIX
```

```

#define LMD_CONVEC
#undef NS_PERIODIC
#define M2CLIMATOLOGY
#define ZCLIMATOLOGY
#define ANA_SSH
#define ANA_M2CLIMA
#define WEST_M2NUDGING
#undef EAST_M2NUDGING
#undef SOUTH_M2NUDGING
#undef WEST_M2RADIATION
#define WEST_M2FLATHER
#define WEST_M3RADIATION
#define WEST_FSRADIATION
#define WEST_TRADIATION
#define EAST_M2RADIATION
#define EAST_M3RADIATION
#define EAST_FSRADIATION
#define EAST_TRADIATION
#define SOUTH_M2RADIATION
#define SOUTH_M3RADIATION
#define SOUTH_FSRADIATION
#define SOUTH_TRADIATION
#define OBC_VOLCONS
#undef SPONGE
#define SPLINES
#undef EASTERN_WALL
#undef SOUTHERN_WALL
#define NORTHERN_WALL
#undef WESTERN_WALL
#define MASKING
#define WRITE_GRID
# endif

```

(2) 영역

param.h 파일에서 L, M, N, N에 대한 값은 다음과 같다.

L = 100
M = 130
N = 16
NT = 2

(3) 그리드

서해의 그리드를 생성하기 위해 그리드 생성프로그램인 Seagrid를 사용하여 Curvilinear 그리드를 만들었으며 get_grid를 사용하여 그리드를 읽어들이었다. 그리드의 수심자료는 Etopo5.nc 파일에서 수심자료를 추출하고 Matlab에서 불러들여 Seagrid로 영역에 맞게 재 작성하였다. Seagrid를 이용하여 그리드를 생성하여 그리드의 수평 간격의 위치정보와 각 격자점의 Coriolis 변수 f값이 변수자료로 자동으로 산정되었다.

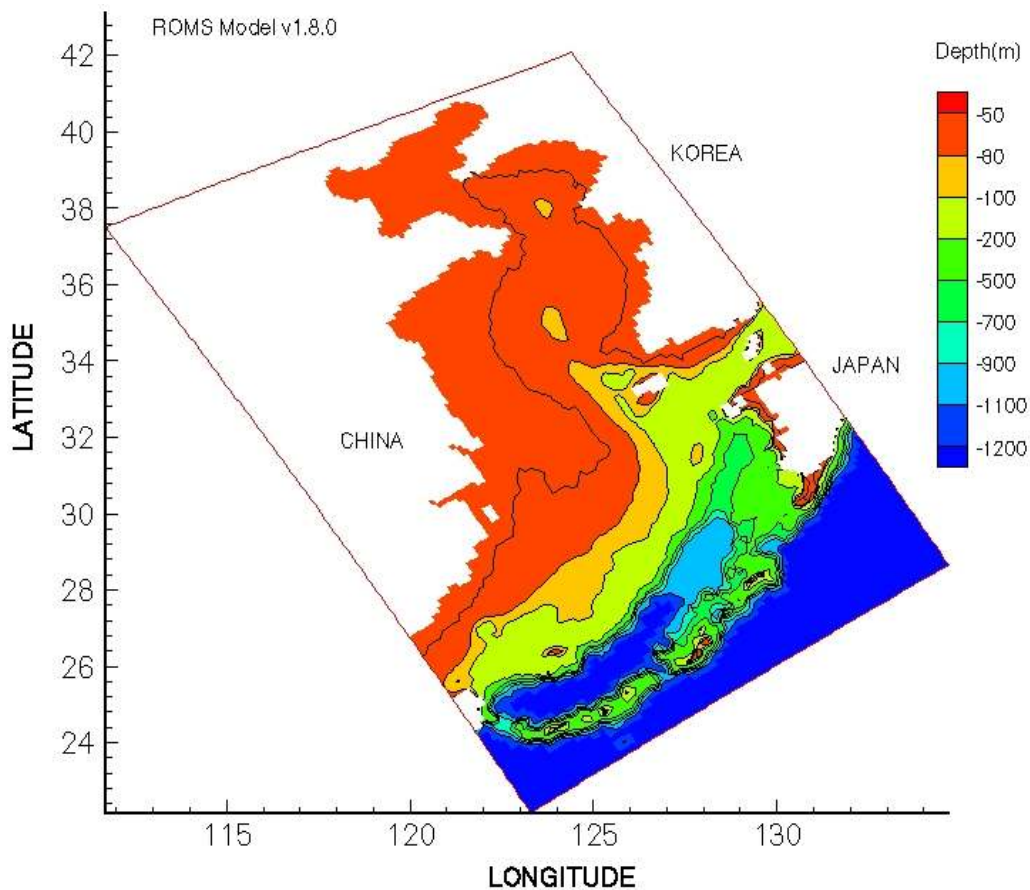


Fig. 8-12 The bottom topography of the Yellow Sea for ROMS application.

(4) 초기조건

모델의 초기조건은 정지상태의 유체상태로 설정하였다. 수온과 염분, 밀도의 초기값은 다음과 같다.

The Salinity is set to 30.0 (psu).

The Temperature is set to 15.0 (deg).

The Density is set to 1025.0 (kg/m³).

(5) 경계조건

모델의 경계조건은 cppdefs.h 파일안에 설정하였다.

(6) 외력조건

바람의 응력은 겨울철 동해의 북서풍을 고려하여 0.07 Pascals / ρ_o ($0.7 \times 10^{-4} \text{m}^4/\text{s}^2$)을 적용하였고 대만 우측의 Kuroshio 난류를 고려하여 Barotropic flow를 0.05m/s로 입력하였다.

(7) 실행

모델은 10일간 수행되었으며 내부 시간간격(3-D)은 600초, 외부 시간간격(2-D)은 24초로 구성하였다. 모델의 결과는 1일 간격으로 저장하였다.

(8) 결과

10일간 수행된 모델의 결과로부터 수평면과 경도 방향 수직면에서의 유속 벡터를 도시하였다.

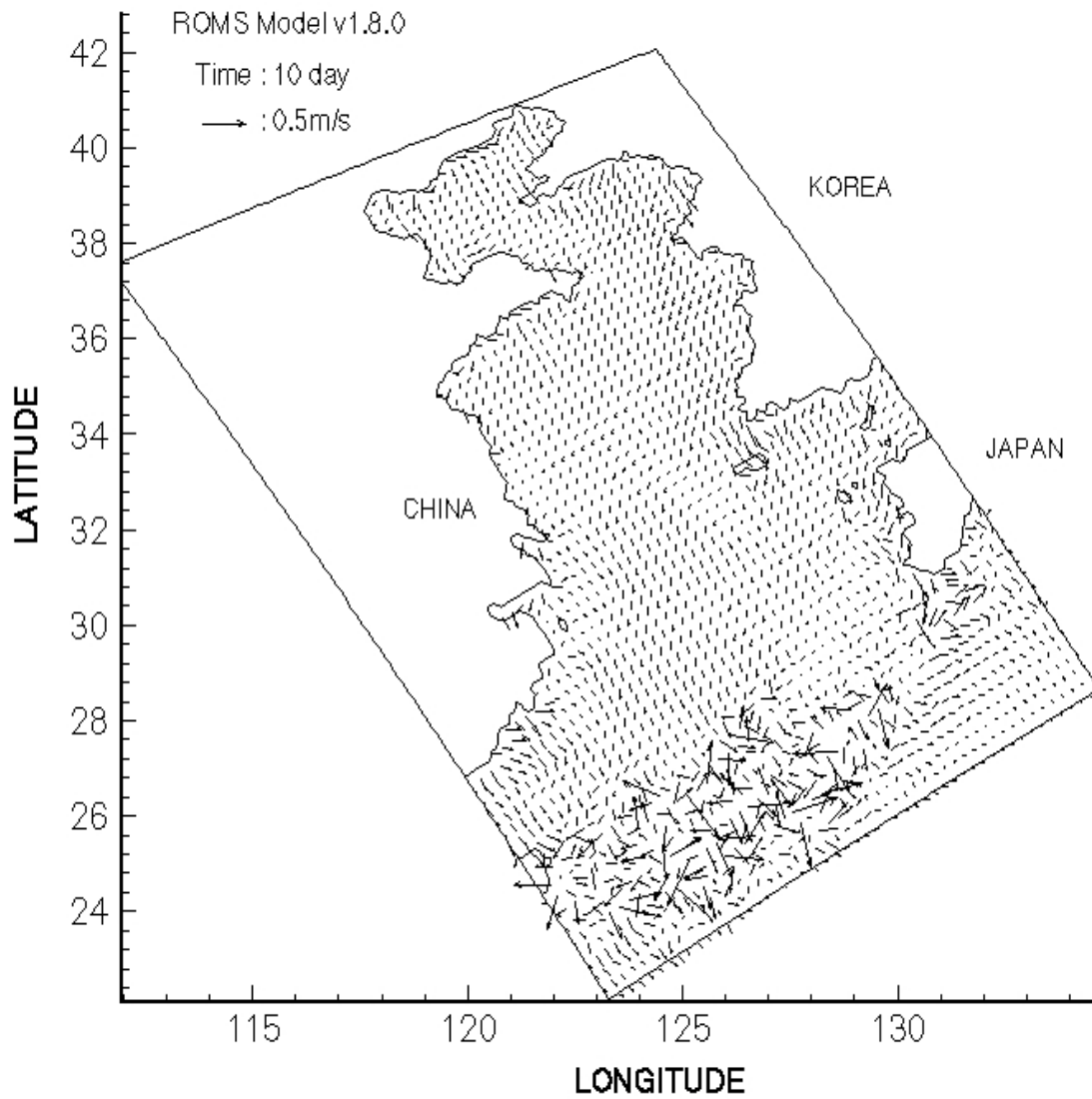


Fig. 8-13 Simulated mean surface velocity field.

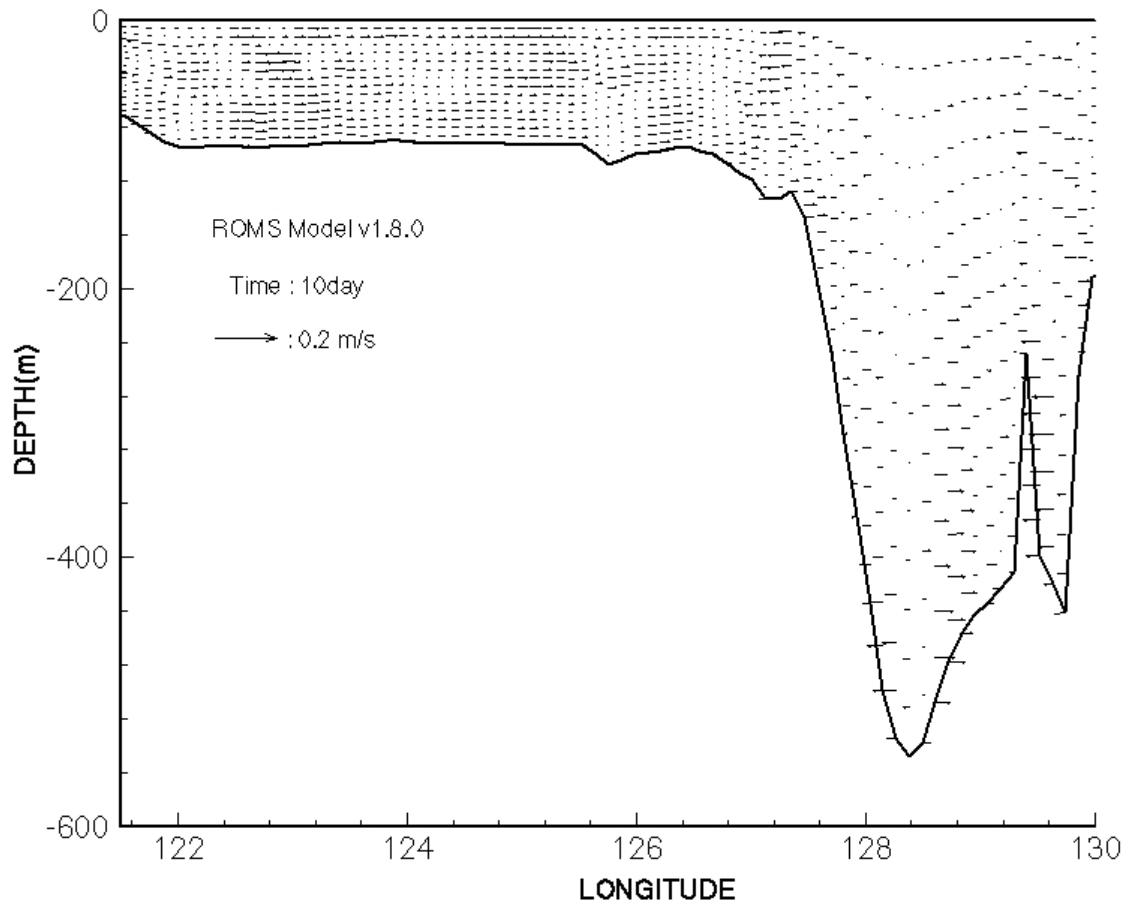


Fig. 8-14 Simulated cross-section of mean velocity along 32°N.

제 9 절 종합의견 및 제안

1. 연구의 요약

인간은 3차원 형태를 지니고 있기 때문에, 3차원 형상에 대해 가장 자연스러운 패턴인식능력을 가진다. 최근 선진 각국에서는 방대한 양의 과학적 자료 분석을 위해서 가상현실기법을 이용하는 기술에 많은 연구를 수행하고 있다. 본 연구에서는 가상현실 기법을 이용하여 바다환경을 5차원 입체적으로 가시화하고 바닷 속 환경을 정밀하게 분석할 수 있는 시스템을 개발하고 있다. 본 연구에서 개발된 시스템은 해양과 기상 관련 정밀 수치모델 결과와 해저지형 자료 등을 VR 영상으로 표현한다. 국내 기술진에 의해 제작 설치된 K-CAVE 시스템은 가로와 세로 각각 2.1m의 면을 가진 정육면체의 내부 공간으로써, 운용자가 K-CAVE 안 중앙에 서서 앞 면, 오른쪽 면, 왼쪽 면, 그리고 바닥 면에 표출된 해양의 수중 영상을 분석할 수 있다. 이 시스템을 이용하면 스테레오와 3차원으로 표출된 방대한 해양수중 자료를 가상현실 안에서 분석이 가능하며, 일반적인 방법으로는 재현이나 접근이 불가능한 특수한 전장환경의 시뮬레이션과 해양 구조를 입체적으로 찾거나 이용하는데 큰 도움을 줄 수 있다. 본 연구에서는 이러한 가상해양환경 시스템의 구성 및 개발 현황과 이를 이용한 해양시뮬레이션의 VR 응용기술을 개발하였다.

가. 서론

인간은 3차원 형태를 지니고 있기 때문에, 3차원 형상에 대해 가장 자연스러운 패턴인식능력을 가진다. 최근 선진 각 국에서는 방대한 양의 과학적 자료 분석을 위해서 가상현실기법을 이용하는 기술에 많은 연구를 수행하고 있다. 본 연구에서는 가상현실 기법을 이용하여 바다환경을 5차원 입체적으로 가시화하고 바닷 속 환경을 정밀하게 분석할 수 있는 시스템을 개발하고 있다. 가상해양환경(Digital Ocean & Virtual Environment : DOVE) 시스템은 과학기술부, 국방부, 정보통신부 그리고 산업자원부가 공동 주관하는 민군겸용기술개발 사업의 하나인 ‘체계운용을 위한 가상해양환경 분석기술’(한국해양연구원 주관기관)을 통하여 구축되고 있는 시스템이다. DOVE 시스템은 해양과 기상상태의 정밀한 예측을 위한 수치모델과 이들의 시뮬레이션을 수행하는 컴퓨터, 시뮬레이션 결과를 영상자료로 변환하여 5차원(공간 3차원, 회전, 애니메이션)으로 표출하는 VR 영상표출 장치 등으로 구성된

다.

본 연구에서 개발된 시스템은 해양과 기상 관련 정밀 수치모델 결과와 해저지형 자료 등을 VR 영상으로 표현한다. SGI의 Onyx2 비주얼 워크스테이션을 그래픽 컴퓨터로 사용하며, 가상현실 재현장치로는 Barco의 Baron Table과 국내 제작된 K-CAVE 시스템을 사용한다. 입체 안경과, 6 자유도(DOF)의 공간 마우스 그리고 움직임 추적 장치 등을 이용하여 운영자가 VR 환경에 직접 몰입되어 해양환경을 보고 느끼고 분석하게 해 주는 특징이 있다.

몰입형 VR Table인 Baron은 벨기에의 Barco사가 만든 대각선 180cm의 투사방식 가상현실 장치이다. 이 장치는 입체 안경과 움직임 추적장치를 동시에 탑재하여 운영되는 반몰입형(semi-immersive) 가상현실 구현장치이다. 이에 반해 국내 기술진에 의해 제작 설치된 K-CAVE 시스템은 가로와 세로 각각 2.1m의 면을 가진 정육면체의 내부 공간으로써, 운용자가 K-CAVE에 표출된 해양의 단면 영상 분석이 가능하다. 이로써 운영자는 헤드트래킹 센서와 Wanda의 조작으로 해양의 내부 한가운데서 마음대로 항진하며(실제는 이미지의 항진) 해양의 입체 내부구조를 분석할 수 있다. 이로써 CAVE시스템은 fully-immersive한 가상현실 구현장치로 불리어진다. 이러한 장치들을 이용하여 스테레오와 3차원으로 표출된 방대한 자료를 가상현실에서 분석이 가능하며, 3차원으로 영상 표출된 이미지의 전후좌우 및 회전 등 어떤 형태의 동작도 가능하며 특수한 환경현상 또는 구조를 입체적으로 찾거나 이용하는데 큰 도움을 줄 수 있다.

해양과 기상현상을 정밀하게 예측한 자료는 각종 수치모델을 이용하여 생산되며, 이러한 시뮬레이션자료와 각종 데이터베이스화된 자료는 자료교환의 표준 형태의 하나인 netCDF 형태로 변환된다. netCDF로 변환된 자료는 VR 영상처리를 위한 여러 형태의 자료로 변환되어 이미지로 표출된다.

현재 DOVE 시스템의 시험 운용을 위해 수립된 모델은 동해의 해양역학구조를 예측하기 위한 1/12도 간격과 23개 수직층을 사용하는 POM(Princeton Ocean Model)과 해양표층 혼합층을 정밀 분해하는 MLD모델이 구축되어 있다. 또한 최근 들어 준실시간 예측기능의 확보를 위해 자료동화(Data Assimilation)기능이 보장되고 대양으로부터 연안까지 nesting이 용이한 ROMS (Regional Ocean Modeling System)모델을 도입하여 시험개발중이다. 이러한 해양역학적 모델과 기존의 해양관련 데이터베이스 그리고 각종 해양환경 관련 시뮬레이션 결과 등이 쉽게 VR 영상표출 될 수 있도록 각종 인터페이싱 및 그래픽 응용프로그램들을 개발하고 있다.

나. 가상해양환경시스템의 필요성

최근 환경의 중요성과 함께 발달되는 컴퓨터의 계산 속도와 처리 능력은, 지난 수년 전만 해도 감당할 수 없었던 수백 Tera 바이트급 자료를 처리한다. 특히, 해양이나 대기와 같은 큰 규모의 자연현상에 대한 장기적이고 상세한 공간 구조의 변화 분석을 위해서는 실시간에 가까운 수치 시뮬레이션을 요구하고 이로부터 엄청난 시뮬레이션 자료가 생산된다. 하지만 이렇게 생산된 방대한 양의 자료들은 거의 보지 못하고(아니 볼 수 없을 정도로 많고) 극히 제한된 양의 자료만이 보편화된 방법의 자료 검색엔진을 통해 사용된다. 즉 보다 정확한 현상 규명을 위해서는 복잡하고 수많은 격자에서 계산되는 수치 모형의 결과를 필요로 하는 만큼의 자료 분석틀이 결여된 현재 상황에서는 볼 수 있는 방법이 없다는 뜻이다.

지난 1998년 미국의 에너지성(DOE)과 국립과학재단(NSF) 주최로 열린 과학과 공학분야의 방대한 자료의 활용과 가시화를 위한 전문가 워크숍에서 다음과 같이 과학자료의 가시화 기술에 대한 제안을 하였다.

1) 인간은 3차원 형태를 지니고 있기 때문에, 3차원 형상에 대해 가장 자연스러운 패턴인식능력을 가지며, 이를 위한 과학적 자료의 시각화가 이루어져야 한다.

2) 현재의 그래픽스와 가시화 기술은 최근의 과학적 자료의 양이나 복잡성을 소화해 내지 못한다. 이러한 문제는 모든 분야에서, 계산되어 나오는 자료의 생산성과 이러한 자료를 활용할 수 있는 능력은 점점 멀어지고 있다.

3) 이러한 점을 감안할 때 지금까지 일반적으로 사용해 왔던 키보드와 마우스와 같이 비효율적인 상호작용을 벗어나 보다 효과적으로 인간이 3차원 환경에 몰입되어 상호 작용할 기술의 개발이 필요하다.

4) 이렇게 급변하는 고도의 컴퓨팅시대에 보다 현상규명에 치우치는 큰 규모의 과학자료의 가시화 기술개발을 산업체에서 개발하기에는 많은 제한점이 따르고 오히려 범부처적 국가개발 프로그램으로 추진하는 것이 바람직하다.

자연의 물체 또는 구조를 정확하게 인식하기 위해서는 사물의 원근감이 생명이다. 크기와 색상 그리고 배경에 대한 감각은 기존의 2차원적 컴퓨터 그래픽스로서는 구현하기 어렵다. 최근 컴퓨터그래픽스기술의 발달로 3차원적 그래픽을 제시하기 위해서 소위 'perspective plot' 모드를 많이 사용하지만, 이 방법에 의한 그래픽은 원근감이 포함된 입체감과 회전시 진정한 입체적 뒷면을 보는 것이 아닌 일중

의 3차원 'trick'을 제공한다.

최근 개발된 몰입성 VR기술을 이용한 3차원 입체 영상으로부터 거리 원근감을 유지하면서 회전시키고 끌어당겨 보다 상세한 구조가 분석될 수 있다. 이러한 점을 이용하면 자연의 현상도 보다 정밀하고 상세하게 분석되고 규명될 수 있다. 예를 들면 렌더링 된 해저 지형 위에 유속의 방향과 속도를 입체화시킴으로써, 해저지형의 형태에 의한 해수의 흐름장의 변화를 분석할 수 있다. 즉 해저환경을 VR 이미지화하면, 단순한 contour plot으로 해석될 수 없는 현상을 재현하고 분석하는데 매우 유용하다.

다. 가상해양환경시스템의 구성요소

가상환경(Virtual Environment)은 가상적 대상물체를 3차원으로 표출한 뒤 인간과 컴퓨터간 직접적 상호작용이 가능하게 해주는 공간으로써, 연산을 위한 컴퓨터, 자료의 이미지 영상화 모듈, 그리고 이들 영상을 표출시키는 가상현실 구현장치들로 구성된다.

전통적인 가상환경에서는 사용자가 위치/방향을 나타내는 센서들을 부착하고 컴퓨터가 구현하는 가상세계를 머리에 쓴 Head Mounted Display(HMD) 표출 장치에 나타냄으로써 몰입할 수 있었다. 최근에는 tracking sensor와 I/O device 그리고 스테레오 프로젝터의 발전으로 많은 경우에 projection-based 가상환경을 구현함으로써, 사용자의 몸체가 가상환경 안에 실제 존재함으로써 몰입성과 현실감을 더욱 높이는 효과를 준다. 이러한 가상환경의 해양 흐름구조를 분석하는 예로써, 체사피크만의 해양환경을 가상환경과 인터넷 표준언어인 VRML로 변환한 경우도 있다. VRML로 변환된 입체 이미지는 인터넷 웹에서 진정한 3차원 모양으로 해양환경을 제시함으로써, 인터넷 접속자가 3차원 해양환경을 분석할 수도 있게 해준다.

그리고 서로 다른 환경변수에 대한 3차원적 렌더링 이미지로부터 각 변수간 상관관계를 알 수 있다. 선진 외국의 경우 해양과 대기에 관련하여 시간과 공간적으로 끊임없이 변화하는 시뮬레이션 자료는 대부분 이러한 몰입형 3차원 입체영상을 사용하여 분석되고 있다.

본 연구에서 개발된 시스템은 해양과 기상 관련 정밀 수치모델과 해저지형, 이들 자료의 VR영상 렌더링 모듈, SGI의 Onyx2 비주얼 워크스테이션, Barco의 Baron Table, Electromagnetic Tracking 시스템, 스테레오 투시 시스템, 6 DOF Wanda, 그

리고 국내 제작된 K-CAVE 시스템 등으로 구성되어 있다.

몰입형 VR Table인 Baron은 벨기에의 Barco사가 만든 대각선 180cm의 투사방식 가상현실 장치이다. 이 장치는 입체 안경과 운동위치추적장치를 동시에 탑재하여 운영되는 semi-immersive한 가상현실 구현장치이다. 이에 반해 설치된 K-CAVE시스템은 가로와 세로 각각 2.1m의 면을 가진 정육면체의 내부 공간으로써, 운용자가 K-CAVE안 중앙에 서서 앞 면, 오른쪽 면, 왼쪽 면, 그리고 바닥 면에 표출된 해양의 단면 영상을 분석할 수 있다.



Fig. 9-1 A view of a semi-immersive display on the VR Table.



Fig. 9-2 A view of K-CAVE in DOVE system(4 screen, 2.1m×2.1m).

운영자는 헤드트래킹 센서와 Wanda의 조작으로 해양의 내부 한가운데서 마음대로 향진하며(실제는 이미지의 향진) 해양의 입체 내부구조 분석이 가능하므로 CAVE 시스템은 fully-immersive한 가상현실 구현장치로 불리어진다. 이러한 장치들을 이용하여 스테레오와 3차원으로 표출된 방대한 자료를 가상현실 그 안에서 분석이 가능하며, 3차원으로 영상 표출된 이미지의 전후좌우 및 회전등 어떤 형태의 동작도 가능하며 특수한 환경현상 또는 구조를 입체적으로 찾거나 이용하는데 큰 도움을 줄 수 있다. 이미지 데이터 처리를 위해서는 SGI의 비주얼 워크스테이션인 Onyx2(IR)가 사용된다.

라. 가상해양환경시스템의 응용

해양과 기상현상을 정밀하게 예측한 자료는 각종 수치모델을 이용하여 생산되며, 이러한 시뮬레이션자료와 각종 데이터베이스화된 자료는 자료교환의 표준형태의 하나인 netCDF형태로 변환된다. netCDF로 변환된 자료는 VR영상처리를 위한 여러 형태의 자료로 변환되어 이미지로 표출된다.

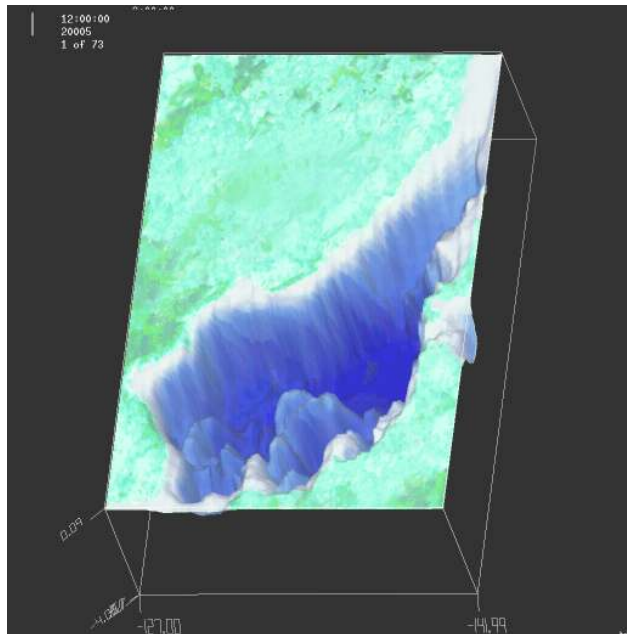


Fig. 9-3 VR image of the bathymetry of the East Sea(1/12°).

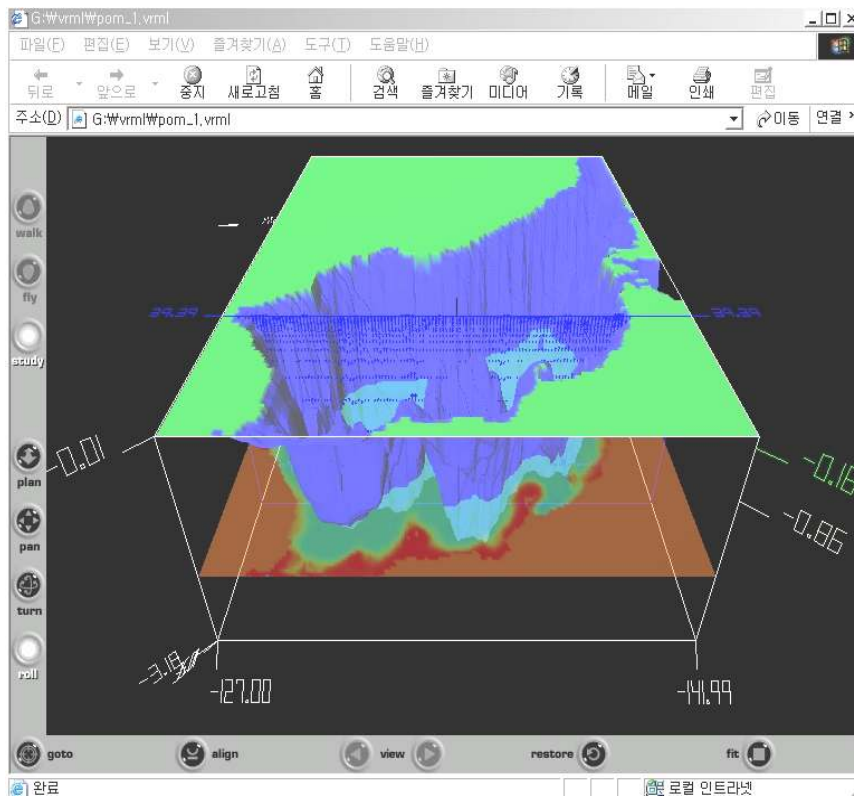


Fig. 9-4 VRML image of the bathymetry of the East Sea.

최근 들어 세계 각 국의 해군 작전능력은 2차 세계대전 이후의 깊은 바다에 대한 해군력보다는, 보다 소형이고 소음이 적으며, 잠수기간이 길어진 잠수함의 개발로 인하여, 연안해양환경에 대한 지식의 중요성이 증가하고 있다.

해양에서 해류의 흐름과 밀도의 변화를 일으키는 각종 현상은 정밀한 수치모형으로부터 예측될 수 있으며, 시간에 따라 변화하는 해양의 물성구조에 대한 특성 파악은 수중 수영작전, 수중무인잠수정 (UUV) 작전, 어뢰제거 (MCM) 작전, 천해 대 잠작전 (ASW)과 잠수함 운영 등에 필수적이다. 미국과 같은 해군력 선진 외국에서는 정확하고 분해능이 매우 높으며 시간을 포함하는 4차원 해양환경의 변화구조를 해군의 연안작전에 활용한다. 이렇게 연안해군 작전에 적합하게 활용될 수 있는 해수 흐름과 물성 특성은 수평적으로는 10m-1km의 분해능, 수직적으로는 수m간격, 그리고 시간적으로는 수 시간에서 수일의 시간 분해능을 필요로 한다. 이러한 중요성과 응용성을 고려하여, 본 연구에서 개발되고 시험 운영되는 동해의 해양 구조 분석과정이 그림으로 제시되어있다.

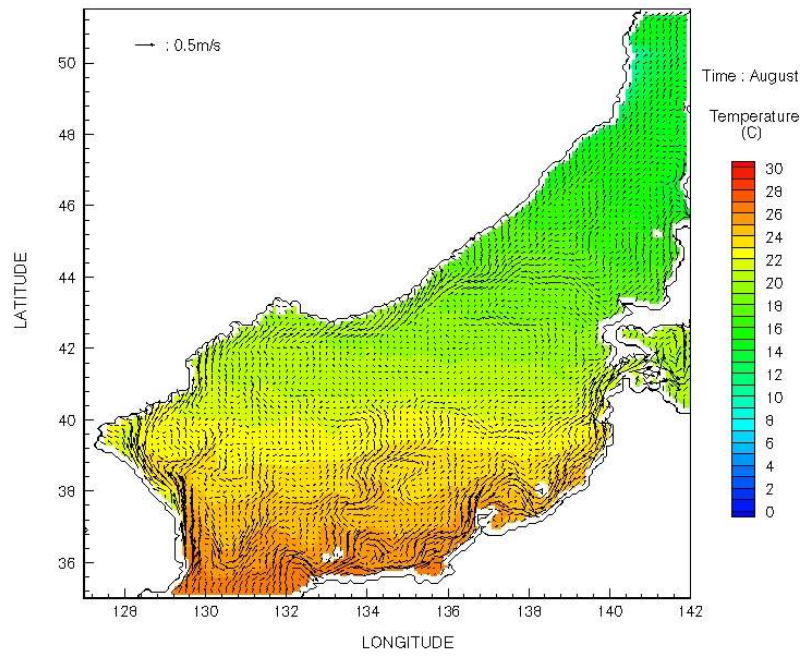


Fig. 9–5 Surface temperature and current distribution in August in the East Sea.

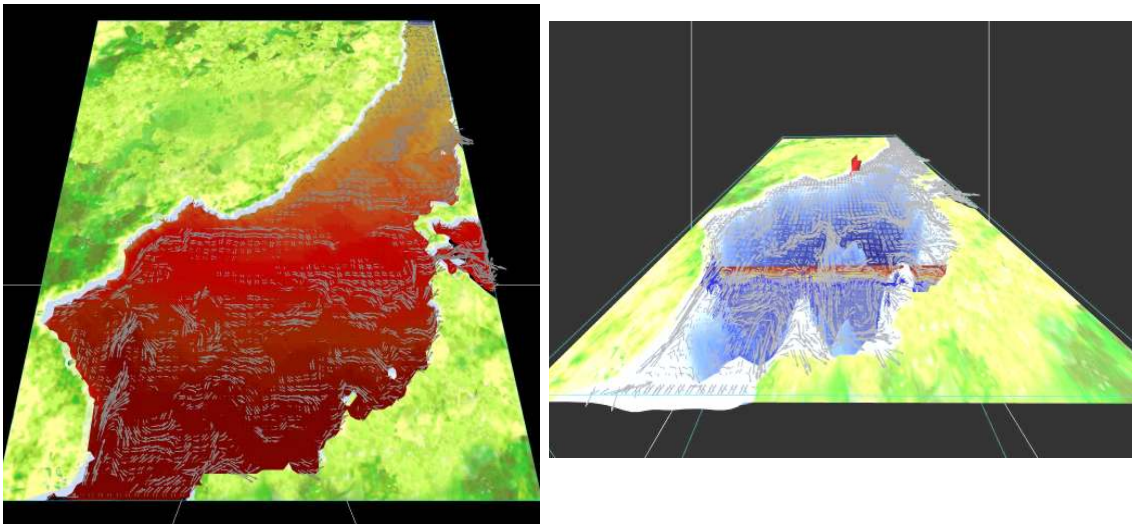


Fig. 9–6 VR image of surface currents and temperature and vertical structure of temperature along zonal cross-section.

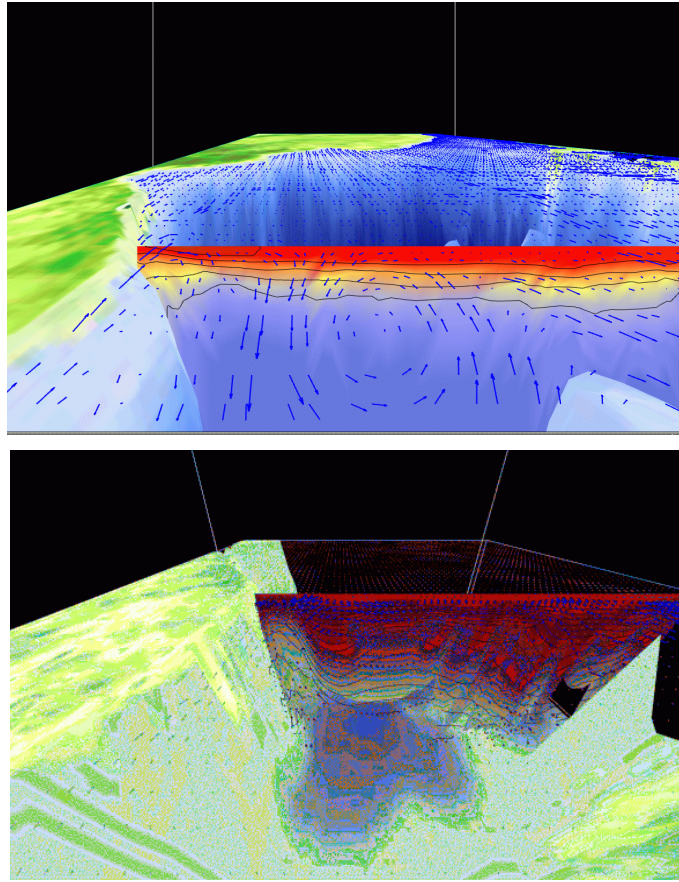


Fig. 9-7 Closer view of temperature and current fields around Ulleung Do
its vGeo image.

현재 DOVE 시스템의 시험 운용을 위해 수립된 모델은 동해의 해양역학구조를 예측하기 위한 1/12도 간격과 23개 수직층을 사용하는 POM (Princeton Ocean Model)과 해양표층 혼합층을 정밀 분해하는 MLD모델이 구축되어 있다. 또한 최근 들어 준실시간 예측기능의 확보를 위해 자료동화(Data Assimilation)기능이 보장되고 대양으로부터 연안까지 nesting이 용이한 ROMS (Regional Ocean Modeling System)모델을 도입하여 시험개발중이다. 이러한 해양역학적 모델과 기존의 해양관련 데이터베이스 그리고 각종 해양환경 관련 시뮬레이션 결과 등이 쉽게 VR영상표출 될 수 있도록 각종 인터페이싱 및 그래픽 응용프로그램들을 개발하고 있다. 이렇게 개발되는 가상해양환경 시스템은 해양환경 관련 공간 정보를 입체적으로 가시화하여 현상 몰입함으로써 해양환경변화를 보다 정밀하고 현실적으로 분석하게 해주며, 해군 작전과 교육에 필요한 해양의 환경요소들의 변화과정과 이로 인한 전투능력을 최대화할 수 있는 수단이 될 수 있다.

2. 제언

가. 다음단계 목표

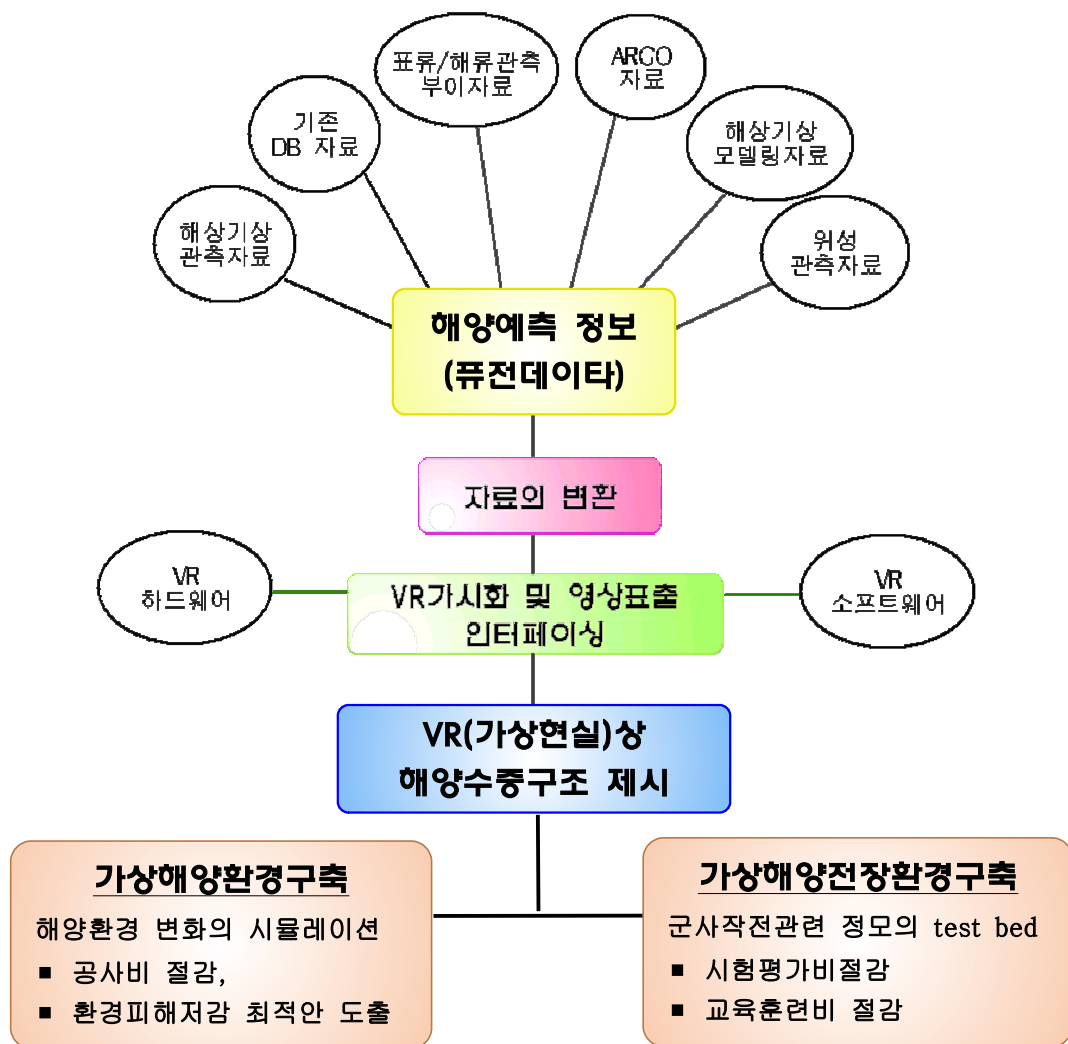
단계 구분	연구개발 목표
<p>시험개발 단계 (계획단계 2002-2003)</p> <ul style="list-style-type: none"> •정밀 준실시간 해양 수중 구조 예측 기술 •해양전장 환경 시뮬레이션 기술 •해양 퓨전데이터 원격 활용 및 협동 VR 활용 	<ul style="list-style-type: none"> •2km이내의 해양환경 예측시스템과 연계하여, 가상해양환경시스템을 해군작전 시뮬레이터의 현장으로 활용하는 미들웨어 제작 <ul style="list-style-type: none"> - DIS(전장환경정보)조건 제시와 Object의 GPS, 해양 실시간 관측 자료 등이 동시에 동화되어 실제 상황을 바탕으로 한 작전 및 환경 시뮬레이션 가능 •VR 영상장치 및 미들웨어의 수출 증대 및 국내 활용 증대에 의한 외화 절감 효과 100억원 달성

나. 다음 단계 주요확보 목표기술

- 정밀 준실시간 해양 수중구조 예측 기술
 - 첨단 해양3차원 수치모델링 (표층, 저층 분해능 30미터이내)
 - 준실시간 관측, 예측, 원격자료 등의 자료동화
 - 해양기상-외해-연안 연계 정밀 해양 예측 시스템 구축
- 해양전장 환경 시뮬레이션 기술
 - 5차원 해양수중구조를 몰입형 입체 가상환경으로 표출
 - 정밀 가상전장환경을 구축하고 해양의 환경구조를 분석하는 기술
 - 무기체계 Object 모델에 대한 가상전장 환경내에서 운동 분석
 - 방위해양정보(기상, 해양특성, 3D 물체모델, 지리정보 등)의 가상해양환경에서의 통합운영
- 해양 퓨전데이터 원격 활용 및 협동 VR 활용기술

- 해양예측, 모니터링, 고정 및 표류관측, 원격 관측 등의 퓨전데이터 통합 가시화
- 원격 사용자간 자료 및 VR 영상 공유하면서 협동 분석
- 해양기상예보정보, ARGO 자료, 해상풍, 열속 등 해상기상정보의 원격활용

다. 연구개발 개념도



라. 현 기술상태의 취약성(문제점)

수치 모델에서 forcing function으로 사용한 수온, 염분 및 바람 자료는 climatological data set를 사용해 왔다. 이 자료들은 격자 간격이 위·경도 각각 1도와 2도로서 본 대상해역의 분해능에 비해 훨씬 크며 결과적으로 소규모 및 중규모 구조(예, 소용돌이) 현상을 forcing 할 수 없는 단점이 있다. 또한 누년 평균의 결과로서 공간적으로 시간적으로 변동의 폭이 완화되어 있다.

- 기존의 연안역 연구는 대부분 해수특성 분포의 mapping을 통해 특정한 해양 현상을 기술하는 정성적인 연구에 머물러 있어 연안역 해양환경의 역학을 규명하기에 미흡하다.
- 정성적인 해수특성 관측도 관측의 시·공간규모가 연안역의 제 현상을 규명하기에는 미흡하였다.
- 연안역의 해수순환을 포함한 3차원 해양환경을 고해상도의 모델을 이용해 실제적으로 재현하려는 시도가 이루어진 바가 없으며, 외국에서와 같은 예측 능력 기술 개발이 시도된 바가 없다.

마. 앞으로의 전망

보다 사실적인 동해 해류 현상의 예측을 위하여 실시간 바람 자료의 사용이 필수불가결하며, 또한 위성 자료인 SST 및 SSH 자료 부과 및 동화기술이 절대적으로 필요하다. 실시간 바람자료는 현재 국내에서 생산되지 못하고 있지만 기상청 현업 예보자료를 활용하여 표층 바람과 열속(Heat Flux) 자료 (매 6시간 간격)를 본 연구에서 활용할 예정이다.

- 현재 선진국에서 해양환경 예측에 활용되는 수치모델 및 첨단 해양관측 장비의 일부가 확보되어 있으므로 민,군의 공통 관심사가 되는 동해 연안역의 3차원 해양환경과 해수순환을 모델과 관측을 병행하여 정량적으로 재현하고 예측하는 기술의 개발이 가능하다.
- 모델과 관측에 의해 계량화된 3차원 해양환경 및 해수순환 자료는 가상 해양환경 시스템 구축의 입력 자료화 된 후 오염물질 추적, 어군탐지 및 대잠작전, 대국민 홍보등에 효율적으로 활용 될 수 있을 것이다.

제 4 장 연구개발 목표달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 목표의 달성도

1. 연구개발 목표 달성도

□ 가상해양환경의 구축 및 응용 기술

목 표	달 성 도	내 용
과학정보 및 지형정보의 VRML 전환기술 수립	100	<ul style="list-style-type: none"> •정규 및 비정규 해양자료의 netCDF 변환 및 VR 자료로 변환, 과학정보 및 지형정보의 Web3D 언어인 VRML 변환 기술 수립
가상현실 재현 장치의 운용을 위한 그래픽 소프트웨어 개발 및 가상 해양환경 실험실 구축: 30평 규모	100	<ul style="list-style-type: none"> •가상해양환경시스템 구축 → 비주얼워크스테이션 , VR Table (대각선1.8m), 국내제작 K-CAVE (2.1m x 2.1m 4개면 설치) •방대한 해양 및 기상, 해저지형 등의 해양환경 변동 자료를 VR 영상화하기 위한 자료변환 기술확보 •VR 영상표출 장치인 Barco 의 VR Table 설치 및 인터페이스 (스테레오, 임의 위치추적장치, 몰입영상 등) •해양 및 해저환경을 Web3D 기본언어인 VRML로 변환기술 확보 •VR장치, 비주얼워크스테이션, 해양 및 기상자료 VR 변환 등의 통합 VR 시뮬레이션 기술수립
가상해양환경 시뮬레이션 센터 건립	100	<ul style="list-style-type: none"> •정부지원 79억원, 연구원내 해양환경 시뮬레이션 센터 건립, 민군사업 개발 내용의 적용성 기반시설 확보
민군 응용성 파급	100	<ul style="list-style-type: none"> •기상연구소 현업지원 타당성 분석 연구사업 수주 •연구원내 시뮬레이션센터 운용의 핵심 기술 제공

□ 해양물리환경 분석 및 예측기술

목 표	달성도	내 용
동해 해역에서의 표층 혼합층 예측의 정밀도향상	100	<ul style="list-style-type: none"> • 동해 해역의 표층혼합층을 정밀예측하기 위한 혼합층 모형과 해수순환모델인 MOM 의 결합모델 개발 • 모델의 연간 연속 운영으로 표층혼합층의 시공간적 변화 예측 기술
동해 해역의 준실시간 해수순환 수치모형개발	100	<ul style="list-style-type: none"> • 월별 T S 자료의 DB 구축 및 수심별 단면도 • P-vector를 이용, 유속장 계산 후 유속의 월별 DB 구축 • 실시간 예측을 위한 SST 등의 자료동화 기법 기반기술 도입
3차원 수리역학 모형의 수립 및 모델결과의 요소별 동영상 정보화 기술수립	100	<ul style="list-style-type: none"> • POM을 이용, 동해해역을 5-8km 수평간격, 수직 23개 층 격자 구성하여 실제 지형, 외력, 수송량 등을 사용하여 매 5일간 연간자료화 및 VR 영상화 • 최신 첨단 수치모델 ROMS를 수립하여 연안 현상의 정밀 예측 기술 수립 (연안담수 유입, upwelling 현상 등)

□ 해양기상 특성 분석 및 예측 기술

목 표	달성도	내 용
국지 해양기상 예측 모형개발 및 검증	100	<ul style="list-style-type: none"> • DUT-METRI-2000 개발 • DUT-METRI-2001 개발 • DUT-METRI-2002 VRML 개발 • 연차별 DUT-METRI 개발 및 입력 자료 및 해양기상 예측자료 DB화 구축
해무 자료 실시간 수집 및 모니터링 시스템 구축	100	<ul style="list-style-type: none"> • 시정 모니터링 시스템 규격서 작성 및 조달 구매 • 해안감시 모니터링 시스템 구축 • 해무예측 및 검증시스템 구축
상세 국지 파랑예측 시스템 구축	100	<ul style="list-style-type: none"> • 실시간 파랑예측 시스템 구축 • 해역별, 격자별 파랑예측시스템 구축
web 기반의 해양기상정보 제공시스템 구축	100	<ul style="list-style-type: none"> • 1일 2회 3시간 간격의 48h 해양기상예측 정보 제공시스템 구축에 의한 실시간 자료 제공 (http://www.metri.re.kr/marweb)

□ 해저지형 특성

목 표	달성도	내 용
해안 및 해저 지형 자료 렌더링 기술 수립	90	<ul style="list-style-type: none"> • 북위 37도 울진-삼척간 VR 모델링 • 위성자료로부터 추출, 변환한 30m급 지형고도자료 렌더링 • 동서 남해 해저지형의 이미지 렌더링 및 VRML 변환

2. 연구개발 성과 및 제출된 산출물의 적절성

가. 한국해양연구원

연구개발성과	산출물의 적절성
□ 가상해양환경 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3차원 해양모델 결과의 가시화 변환기술 수립 ■ 비주얼 워크스테이션을 이용, 테라 바이트급 자료의 실시간 이미지 렌더링 기술 수립 ■ 몰입형 입체 영상 표출 기술 수립 ■ 국산제작 스크린 사용, K-Cave의 성공적 구축 및 시연 ■ 수입대체 10억 원 이상 절감 효과
□ 임의 과학자료의 VRML변환 기술	<ul style="list-style-type: none"> ■ 해양자료 및 해저지형을 인터넷 3차원 이미지로 변환
□ 해양 푸진데이터의 VR 이미지화 기술	<ul style="list-style-type: none"> ■ 관측, 모델, DB, 위성자료 등의 혼합사용으로 예측 정밀도 향상
□ 동해해역의 혼합층 예측 모형	<ul style="list-style-type: none"> ■ 동해의 표층 혼합층을 초정밀 예측함으로써 해군 작전 환경자료의 정확도 향상
□ 동해해역의 열수지, 유속, 해상풍 DB구축	<ul style="list-style-type: none"> ■ 해군 및 해양환경의 미래 환경에 대한 과거 평균적 자료제시, 비교 가치
□ 동해 해역의 POM 3차원 해양 수치 모델	<ul style="list-style-type: none"> ■ 임의 해역의 $1/12$도 이하의 공간규모 변화를 예측할 수 있는 기술 수립 ■ 예측에 의한 작전 시뮬레이션 환경자료 제공
□ 최첨단 3차원 수치 모형 ROMS의 수립	<ul style="list-style-type: none"> ■ 해저층 및 표층 분해능 탁월 ■ 자료동화 가능 ■ 세밀한 연안 해양 변화 ■ 준실시간 예측 정보 생산

나. 기상연구소

연구 개발 성과	산출물의 적절성
<ul style="list-style-type: none"> □ 국지 해양기상 예측 모형 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 대기모형(MM5)에 연계된 해상풍, 해무 및 파랑 예측모형개발로 현업운영체제 구축 ■ 해양기상 종합 분석 시스템 구축을 위한 연차 별 DUT-METRI 개발로 해군작전에 직접 활용 가능체제 구축 ■ 민군겸용기술과제 기간의 해양기상 산출자료 DB 구축
<ul style="list-style-type: none"> □ 해무자료 실시간 수집 및 모니터링 시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 해상 기상상태를 실시간으로 모니터링 하기 위한 새로운 형식의 시스템으로 시정계의 단점을 보완하고 동시에 다수의 사용자가 접근 가능한 시스템 개발 ■ 통신비 절감 및 원격 웹 상에서의 기상장비 제어 기술 축적 ■ 해군의 해안 및 항만 감시가 가능한 시스템 구축
<ul style="list-style-type: none"> □ 상세 국지 파랑예측시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> ■ WAVEWATCH III를 이용한 상세 파랑정보 예측 및 제공 시스템 구축 ■ 프라피룬과 사오마이 태풍 등과 같은 폭풍시의 파랑 예측시스템의 안정성 검증 ■ 기상청 부이(덕적도, 칠발도, 거문도, 거제도)에 의한 해상풍 및 파랑예측 성능 검증 및 다수의 연구발표 및 논문화 ■ 동해에서의 난류성 소용돌이에 의한 파향 및 파고 변화 특성 분석 ■ 서해, 남해에서의 조류 및 쿠로시오의 영향에 따른 wave modulation 특성 분석 ■ 전지구 10일 예측 파랑예측시스템 시험 운영체제 구축
<ul style="list-style-type: none"> □ web 기반의 해양기상정보 제공시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 실시간 Web을 이용한 3시간 간격의 1일 2회 48h 상세 해양기상예측 정보 제공시스템 구축 ■ 국지 해역별 해상풍 및 파랑예측제공 ■ 전지구 파랑예측정보 제공 ■ web 기반의 시정, 감시카메라, AWS 제어 및 모니터링 시스템 구축 ■ DUT-METRI VRML 개발에 따른 3차원 해양기상자료 정보 제공

3. 시제품 성능시험 평가내용(자체시험 결과)

가. 한국해양연구원

성능시험 시제품	평가내용	성능시험장소
□ 가상해양환경시스템	<ul style="list-style-type: none"> ■ 비주월 워크스테이션의 VR 가시화 능력 ■ 몰입성, 입체성 재현 여부 ■ 분해능의 현실성 ■ 통합 VR 이미지 활용성 및 확장성 	2000 민군기술 발표회 2001 민군기술 발표회 2001 군사과학회 2002 J. Phy. OCN 기고 2002 해상무기체계 세미나 2000, 2001, 2002 한국해양학회 발표 2002 UDT Korea
□ 국내제작 K-Cave 스크린 시스템	<ul style="list-style-type: none"> ■ 국내제작품의 질적 우수성 	가상해양환경시스템의 일부로써 평가 완료 2002 UDT Korea
□ 퓨전해양데이터의 netCDF / VRML 변환	<ul style="list-style-type: none"> ■ ASCII, Binary, 관측, DB자료 등을 표준 I/O 포맷으로 변환 가능 ■ VRML 이미지로의 변환성 	인터넷상 시범 운용 2002 UDT Korea
□ POM 3차원 해양수치 모델	<ul style="list-style-type: none"> ■ 동해를 대상으로 $1/12$도(약 5-8 km) 격자 모델링 ■ 바람, 열수지, 담수유입 등 외력에 대한 일별 3차원 해양역학구조 예측의 안정성, 정밀성 등 	2000 민군기술 발표회 2001 민군기술 발표회 2001 군사과학회 2002 J. Phy. OCN 기고 2002 해상무기체계 세미나 2000, 2001, 2002 한국해양학회 발표
□ 동해의 해양자료 DB 구축	<ul style="list-style-type: none"> ■ 동해의 유속구조, 수온, 염분, 해상풍, 열속 등의 월별 DB의 적용성 ■ 인터넷상 DB 활용성 	2001 한국해양학회 2002 Ocean Science 학회
□ 준실시간 해양모델링	<ul style="list-style-type: none"> ■ 준실시간 자료동화 기법의 적용성 ■ 동해의 $1/10$도 간격 예측정밀도 	2001 ECOM 학회발표 2002 한국해양학회
□ 3차원 해양모델 ROMS 수립	<ul style="list-style-type: none"> ■ 국지연안현상 고해상 분해 여부 ■ 표층, 저층 수직구조의 분해 여부 ■ 자료동화, 실시간 예측 가능성 	인터넷상 담수유입 및 용승류 현상 재현 시범 운용 제4회 해상무기체계세미나

나. 기상연구소

성능시험시작품	평가내용	성능시험장소
□ DUT-METRI-2000	<ul style="list-style-type: none"> ■ 대기모형(MM5)에 연계된 해상풍, 해무 및 파랑 예측모형개발 	부산 선상평가회 20 기상학회 발표
□ DUT-METRI-2001	<ul style="list-style-type: none"> ■ 해양기상 종합 분석 시스템 ■ 30km, 10km, 5km격자 별 국지 상세 해상풍, 해무, 파랑 자료생산 - 대전 해군본부 제 1회 “해군 해양정보 워크샵”에서 발표에서 호응도 및 관심도가 높았음 	해군 해양정보 워크샵
□ DUT-METRI-2002	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3차원 해양기상예측자료 VRML 구축 ■ 48시간 예측 해상풍, 파고 및 파향 자료 3차원 표출자료 Web에 실시간 게시 ■ ARGO 플로트 위치 및 관측 자료 표출 진해 작전사령부 해정단 및 해군본부 수로과에서 기상청 방문시 성능 평가 실시 결과 호응도가 높았음 	기상청
□ 실시간 해무 모니터링 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> ■ 해상 기상상태를 실시간으로 모니터링 하기 위한 새로운 형식의 시스템으로 동시에 다수의 사용자가 접근 가능한 시스템이며, 통신비 절감 및 원격 웹 상에서의 기상장비 제어 가능 동시에 해군의 해안 및 항만 감시가 가능한 시스템 구축 - 2001년 8월 기상청에서 해군 장교 및 관련 기관 및 대학 전문가를 모시고 시연회를 개최 - 2002 춘계 한국해양학회에서 발표 	2002 한국해양학회

4. 군수 적응성

- 가상해양환경 시스템은 각종 해양관련 푸전데이터를 몰입형 입체로 VR 영상화 함으로써, 해군작전과 무기 체계시험을 위한 가상해양전장 환경을 구축하며, 실제와 같이 시뮬레이션 할 수 있도록 시험단계를 추진함.



- 변화되는 시나리오의 재현으로 수백 억 원 이상의 고가 무기성능 평가 실험 가능.
- 3차원 해양예측 모델은 해군이 필요로 하는 해양전술 환경정보를 예측하기 위한 정밀 정보 생산 엔진으로 활용. (수직 분해능 10m 이내, 수평분해 2km 이내)
- 준실시간 해양예측 시스템은 앞으로의 작전 설계를 위해서 현재 이후의 환경을 예측하는데 활용
- 항공 및 해상작전 성분별 필요한 해양기상 요소를 군이 자체적으로 생산할 수 있는 능력제공 (Synoptic Forecasting System: DUT-METRI-2000 활용)
- 작전해역에서의 실시간 예보를 할 수 있는 예보체계를 구축하여 작전해역의 독자적인 예보체계 운용 능력보유 (Real-Time Local Forecasting System: DUT-METRI-2001 활용)

- 실시간 해상풍 예보에 따른 대잠 작전환경(혼합층, 수중소음) 요소파악
- 보다 이해하기 쉽고 정확한 기상예측자료의 3차원 영상표출로 작전능력 향상 (DUT-METRI-2002 VRML 활용)
- 작전해역에 대한 해상풍, 안개, 파랑 예측능력 확보
(DUT-METRI 및 www.metri.re.kr/marweb web을 활용한 실시간 분배 시스템)

제 2 절 대외기여도

1. 기반기술 확보 및 기술자료 작성 현황

가. 한국해양연구원

기반기술	소요기술	기술확보내용
가상현실기법 응용기술	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3차원자료의 가시화 기술 ■ 해저 및 해양자료의 렌더링 및 텍스처 맵핑 기술 ■ 방대한 과학자료의 입체 영상 표출 기술 ■ 몰입형 입체 VR 시스템 구성 및 인터페이싱 기술 ■ H/W와 S/W 혼합 VR 운영 기술 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3차원 해양모델결과를 가시화하는 기술확보 ■ 테라바이트 자료의 실시간 렌더링 기술확보 ■ 몰입형 입체 영상표출기술 수립 ■ 몰입형 동굴식 영상스크린의 국산제작 성공 ■ 해양 및 해저지형의 인터넷 3차원 VRML 이미지 변환기술 수립 ■ 퓨전데이터의 혼합표출기술 확보 ■ VR 기술의 군사응용기술 확보
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 임의 과학자료의 VRML 변환 기술 ■ 해양퓨전데이터의 VR이미지 화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 자료교환의 표준형 정착, 이미지의 VRML 변환후 인터넷 활용기술 ■ 원격 퓨전 자료의 통합 이미지 구성 기술
해양수중구조 정밀 예측 기술	<ul style="list-style-type: none"> ■ 해양 표층 혼합층 변동 예측 기술 ■ 3차원 정밀 해양 모델링 기술 ■ 준실시간 해양예측 기술 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 동해의 표층혼합층을 정밀하게 예측하는 MLD모델 개발 ■ POM을 이용, 임의 해역의 1/2 도 공간 격자내 해양수중변화 예측 기술확보 ■ ROMS를 이용하여 국지연안현상 예측하는 기술확보 ■ 관측, 기상자료, 위성자료 등을 연계 사용하여 준실시간 해양을 예측하는 기술

나. 기상연구소

기반기술	소요기술	기술확보내용
해상풍예측모델	중규모 대기모형에 의한 수치모델 개발	- 중규모대기모형(MM5)의 결과를 이용한 해상풍(nesting 기법에 의한 수평 10km격자간격) 진단 모델 개발
해무예측모델	해무탐지 및 예측기술	- 해무예측(48시간 예측) 수치모델 및 예측시스템 개발 - 시정계 설치 및 실시간 자료수집기술에 의한 수치모형에의 초기 입력자료 확보 - 원격제어 시정모니터링 시스템 구축에 의한 실시간 해무감시
파랑예측모델	제 3세대 파랑모델(WAVEWATCH-III)을 활용한 파랑예측시스템 구축	- 연안이나 천해에서 일어날 수 있는 파의 굴절, 반사, 회절현상과 조류와의 상호작용 등이 적절히 포함되고 지형이나 수심 등이 상세히 입력된 조밀한 격자(nesting 기법에 의한 수평 10km격자간격)의 모델구축 - 3시간 간격의 48시간 국지파랑예측시스템 구축 - 10일 예측 전지구 파랑예측시스템 구축 - 약 2년간의 해상풍 및 파랑산출 자료 DB 구축
예보전달시스템	자료의 표준화 생산 및 예측자료 연계구동 기술	- 실시간 및 48시간 예측자료의 표준화된 자료생산 및 분배 - 각 예측모형의 실시간 연계구동을 위한 인터페이스 구축
3차원 영상표출 시스템	VRML을 이용한 3차원 가시화기술	- 인터넷을 이용한 3차원 동영상 기술 및 원격 제어기술 구축

2. 예상효과

가. 연구개발 기대 성과

- 가상해양환경 시스템의 구축으로 해양환경 및 해상상태를 원격에서 정밀 분석 가능하며, 이를 활용하여 해군의 성분작전 시뮬레이션 및 작전교육의 효율성을 증대하고,
- 기상예보 적중률을 향상시키고,
- 해양환경의 입체적 분석으로 해양예측 기술의 획기적 진보를 가져올 것이

며, 오염예방과 해양설계공사의 사전분석으로 막대한 오염복원비 및 공사비를 절감할 수 있고,

- 민수분야에서 다양하게 활용 전망되는 가상현실기법 및 재현장치의 발전으로 21세기 국제정보운용산업의 선진화 조기달성

나. 파급효과

- 민수분야에서 다양하게 활용 전망되는 가상현실기법 및 재현장치의 발전으로 21세기 국제 정보산업의 선진화 조기달성
- 고품질의 해양기상관측 자료정보에 의한 기상예보의 적중률 향상
- 가상현실 기법의 현실적 응용분야는 무한대임.
- 실시간 해양기상자료의 확보 및 데이터 베이스화에 따른 보다 정확한 기상 변동 및 악기상 예측 등으로 해양산업활동 지원

3. 기술자료 작성 현황

국외논문(SCI)	국내논문	국제 Proceeding	국내학술발표	특허등록
2	10	20	48	등록준비 2건

가. 한국해양연구원

(1) 국외논문

- 1) Comparison of bottom friction formulation for single-constituent tidal simulation in Kynggi Bay. J.C.Lee, C.S.Kim anf KT..Jung. 2001. J. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 5., 701-715.
- 2) Japan/East Sea(JES) Thermohaline Structure and Circulation:Part2. A Numerical Simulation. P.Chu,S.Lu,C.Fan, C.S.Kim (J. Phys. Ocenogr. Revising) (SCI)

(2) 국내논문

- 1) 한국동해 기상예측 및 표출시스템. 서장원,민기철,김창식; 한국해양학회 춘계 학술지, 2000. 5. p11-14
- 2) 연안퇴적환경 및 해안지형변화 예측기술. 김창식, 김태림, 우한준, 오재경; 서해연안환경센터논문집, 2000. 9. p169-180
- 3) 새만금 사업단계에 따른 해양물리 환경의 변화. 김창식, 박일흠; 한국해양학회 추계학술지 2000. 10 p7-11.
- 4) 2000년 여름철 태풍시 Wave Watch III 모형에 의한 파랑예측 및 검증. 서장원, 김창식, 남재철; 한국해양학회 추계학술지, 2000. 10.p
- 5) TOPEX/POSEIDON 고도계 자료를 이용한 북동아시아 해역의 조석산정, 이종찬, 김창식 ; 한국해양학회지 '바다' (2001계재)
- 6) Numerical simulation of monthly circulation and thermohaline structure in the East Sea. P.Chu ,S.Lu, C.S.Kim; 한국해양학회 추계학술지 , 2000. 10. p29-33
- 7) Numerical prediction on sea surfsce drift induced by windstrom in the coastal complex Terrain. H.Choi, J.W.Seo and C.S. Kim. 2001. Kor. J. Atm. Sci. 3, pp67-pp82.
- 8) The prediction and verification of the Sea Surface Winds in the East Asian Marginal Seas. J.W.Seo,C.S.Kim; 한국해양학회 추계학술지 , 2000. 10. p39-43

(3) 국제 proceeding

- 1) Application of VIMSHEM-3D to a macro-idal Environment. S.C.Kim, J.Shen, C.S.Kim, A.Kuo; Proc. 6th Int'l Conf. Estuarine and Coastal Modelling/ASCE, 2000.9. p238-249.
- 2) Tidal variation of spectral waves in a tidal bay. D.H.Yoo, J.Kim, C.S.Kim; Proc. Int'l Conf. Hydro-Science and Engr. ICHE2000, 2000. 9. (in CD)
- 3) Comparison of bottom friction formulations for single-constituent tidal

- simulation in macro-tidal water of Korea. J.C.Lee, C.S.Kim, K.T.Jung;
Proc. Int'l Conf. Tide, Sea Level., 2000. 10. p42-45.
- 4) Prediction system of sea surface winds and wind waves. J.W.Seo, C.S.Kim;
Proc. Int'l Conf. Operational Ocean Prediction ., 2000. 10. p101-108
 - 5) DEM from SPOT unages for applying to coastal area. S.Kim, H.Lee, W.Park,
S.K.Kang, C.S.Kim; Proc. Int'l Conf. Tide, Sea Level., 2000. 10.
p9-10
 - 6) The system of fine-mesh wind wave prediction in the East Sea. Proceeding
of the 11th PAM/JECSS Workshop. April 11-13, 2001, Cheju Korea. (Full
Paper in CD Proceeding)
 - 7) Towards modelling the marine environmental processes in regional seas.
C.S.Kim and J.C.Lee. 2001. Proc. 5th IOC/WESTPAC Int'l Sci.
Symposium. 27-31 August, 2001, Seoul Korea (full paper in CD
Proceeding)
 - 8) Improvement of upper ocean process in the East Sea with a new vertical
mixing scheme. C.J.Jang, Y.G.Noh, C.S.Kim, PAMS/JECSS. 11차 2000.
 - 9) Interactions of Coastal Boundary Currents with Mesoscale Eddies in the
East Sea, to be published in Recent Advances in Marine Science and
Technology 2000. Ro, Young Jae, 2000.
 - 10) Interactions of EKWC, NKCC with Ulleung Warm Eddy in the East (Japan)
Sea, Ro, Young Jae, Sergey V. Smirnov, Yang Ho Choi; Proc. of IX
PICES annual meeting. 8 pp. 2000.

(4) 국내 학술발표

- 1) 가상현실기법을 이용한 해양환경 분석기술. 김창식, 이종찬 외. 2001. 2001군
사과학 종합학술대회 논문집.pp317-pp320.(한국군사과학회)
- 2) 가상현실기법을 이용한 해양환경 시뮬레이션. 김창식, 이종찬, 장찬주 외.
Proc. of Annual Korean Soc. of Oceanogr. pp 4-5. Nov. 2-3, Ansan
Korea. 2001

- 3) 국가해양과학조사자료 통합관리를 위한 세미나 2001. 11. 23. 국립수산진흥원 한국해양자료센터 ‘가상해양공간정보와 그 산업화’ 김창식 발표
- 4) 체계운용을 위한 가상해양환경 분석기술. 제2회 김창식. 민군겸용기술사업 종합학술발표회 논문집 p215-219. , 2001년 12월5-6일. 서울. 민군겸용기술센터.
- 5) Modeling of the Instability of the EKWC and TWC in the East Sea based on the POM-ES, to be printed in J. Korean Oceanogr. Soc. Y.J.Ro,2001.

나. 기상연구소

(1) 국내논문

1. Hyo Choi, Jang Won Seo and Chang Shik Kim, 2000: Numerical Prediction on Sea Surface Drift Induced by Windstorm in the Coastal Complex Terrain. Korean Journal of the Atmospheric Sciences. Vol 3, 2, pp.67-82.
2. 안중배, 남재철, 서장원, 이해진, 2002: 해무 예측 모듈 개발과 울릉도 해무 사례 적용 연구. 제38권 제2호, pp. 155-164. 한국기상학회지

(2) 국제 proceeding

Jang-Won Seo, You-Soon Jang, Jae-Cheol Nam, 2002: Introduction of Marine Meteorology Prediction System operated in METRI/KMA, Muju, METRI/IAP, p66-71.

Jang-Won Seo, You-Soon Jang, Jae-Cheol Nam, 2001: The verification of wind waves prediction system using the buoy data, USA, 10-14, AGU

Seung-On Hwang, Tae Hee Kim, Jang-Won Seo, 2001: Introduction of Argo in Korea and preliminary investigation on temperature data from floats, USA, 10~14, AGU

Seung-On Hwang, Yong-Sang Kim, and Jang-Won Seo, 2001(7): The effect of using LAPS in the mesoscale numerical prediction for heavy rainfall, 18th Conference Weather Analysis and Forecasting, p116-117, Florida,

USA.

Jang-Won Seo, You-Soon Jang, Jae-Cheol Nam, Chang-Shik Kim, 2001: The System of Fine-Mesh Wind Wave Prediction in the East Sea, PAMS & JECSS, April, 11-13, Cheju KAL Hotel

Jae-Cheol Nam, Jang-Won Seo, You-Soon Chang, 2001: A study on the Sensitivity of wave parameter using numerical model. Proceedings of Fifth IOC/WESTPAC International Scientific Symposium. Seoul, Korea.

Jang-Won Seo, Chang-Shik Kim, Jae-Cheol Nam, 2000: Prediction System of Sea Surface Winds and Wind Waves, International Workshop on Development of Operational Ocean Prediction System around Korean Waters, October 6-7, 2000, Pusan, Korea

Jang-Won Seo, Chang-Shik Kim, Jae-Cheol Nam, 2000: Prediction System of Sea Surface Winds and Fogs using Mesoscale Model(MM5), Nov. 16, 2000, GSA Annual meeting, Reno, USA

Haman Cho¹, Jangwon Seo¹, Yonghee Lee¹, 2000: A Variability of Net Heat Flux in the East Asian Marginal Seas and Its Impacts on the Precipitation Change Associated with the El-Niño Event, ISAM2, pp. 152-158.

Jang-Won Seo, 2000: Numerical Simulation of Seawinds and Fogs using Mesoscale Model(MM5), China-Korea international symposium. pp. 20-24.

(3) 국내 학술발표

1. 서장원, 한주영, 안중배, 1999: 중규모 기상모형을 이용한 해양악기상 예측시스템 구축연구. 한국해양학회 추계학술발표회, 목포대학교, 목포
2. 안중배, 이해진, 서장원, 1999: 중규모 기상모형을 이용한 동해상 안개발생 및 소산 탐지 연구. 한국해양학회 추계학술발표회, 목포대학교, 목포
3. 안중배, 이해진, 서장원, 1999: 동해상 해무의 열적 연직구조 특성에 관한 모형연구. 한국기상학회 추계학술발표회, 기상청 기상연구소, 서울
4. 윤용훈, 서장원, 김충기, 이현정 1999: 한반도 주변연안의 조석예보. 한국기상

학회 추계학술발표회, 기상청 기상연구소, 서울

5. 안중배, 이해진, 서장원, 1999: 모형을 이용한 동해 해무의 발생학적 특성연구. 한국환경과학회, 부산신라대학교, 부산
6. 서장원, 1999: 중규모 기상모형을 이용한 여름철 동해안의 안개발생 및 소산예측. 한국해양연구소 초청 세미나.
7. 서장원, 김희철, 조하만, 엄향희, 1999: 여름철 동해 해역의 해무 예측 시스템 구축연구, 한국해양환경공학회, 목포해양대학교, 목포
8. 서장원, 조하만, 김희철, 민기철, 2000: 중규모 기상모형을 이용한 국지 해양 기상예측 시스템 구축연구, 한국기상학회, 공군전대
9. 안중배, 이해진, 서장원, 2000: 1999년도에 발생한 울릉도 해무특성에 대한 수치적 실험, 한국기상학회, 공군전대
10. 서장원, 민기철, 김창식, 2000: 한국동해에서의 해양기상 예측 및 포출 시스템 구축연구, 한국해양학회, 인하대학교
11. 안중배, 이해진, 조하만, 윤용훈, 서장원, 2000: 우리나라 주변해역 해무발생 예측을 위한 모형실험, 한국해양학회, 인하대학교
12. 서장원, 장유순, 2000: Wave Watch III 모형을 이용한 파랑예측 및 검증, 추계 한국기상학회, Oct. 17, 2000, 기상청
13. 서장원, 이현정, 2000: 울릉도 주변해역의 해무 특성 및 예측 연구, 추계 한국기상학회, Oct. 17, 2000, 기상청
14. 안중배, 이해진, 남재철, 서장원, 윤용훈, 2000: 해무예측을 위한 수치모형연구, 추계 한국기상학회, Oct. 17, 2000, 기상청
15. 강윤정, 서장원, 황승언, 김태희, 남재철, 2000: BUOY 자료를 이용한 서해해역의 해양-대기 열교환량 산출, 추계 한국기상학회, Oct. 17, 2000, 기상청
16. 서장원, 김창식, 남재철, 2000: 2000년 여름철 태풍시 Wave Watch III 모형에 의한 파랑예측 및 검증, 추계 한국해양학회, Oct. 18, 2000, 서울대
17. Jang-Won Seo, Chang S. Kim, 2000: The prediction and Verification of the Sea Surface Winds in the East Asian Marginal Seas. 추계 한국해양학회,

Oct. 18, 2000, 서울대

18. 서장원, 김태희, 서은진, 남재철, 민기철, 2000: 동해해역의 해무특성 및 예측시스템 연구, 추계 한국해양학회, Oct. 18, 2000, 서울대
19. 안중배, 이해진, 남재철, 서장원, 윤용훈, 2000: 안개모듈개발을 통한 해무의 수치적 예보연구, Nov. 16, 한국환경과학회, 전남대학교
20. 서장원, 2000: “해군작전을 위한 해양기상정보 지원 체계 구축방안”, Nov. 24, 2000, 초청세미나, 계룡대 해군본부
21. 서장원, 2001: “동해해역의 해무예측 시스템 연구”, Mar. 9, 2001, Ocean Informatics 초청세미나, 대전 충남대
22. 서장원, 2001: 해양악기상 감시 및 예측기술개발, Mar. 10, 2001, 성균관대학교 토목공학과 초청세미나
23. 서장원, 2001: 태풍사례기간의 파랑예측 및 폭풍해일 예측, April, 4, 2001, 한국해양연구원 초청세미나
24. 서장원, 2001: 상세 국지해역 파랑예측시스템 구축, April, 19, 2001, 부산 기상2000호 선상세미나
25. 이호만, 서장원, 남재철, 2001: 2000년 여름 한반도 연안 폭풍해일 연구, April 26-27, 춘계 한국기상학회, 조선대학교, 광주
26. 서장원, 남재철, 김유철, 2001: 영종도 주변지역 안개발생사례에 대한 특성분석, April 26-27, 춘계 한국기상학회, 조선대학교, 광주
27. 서장원, 장유순, 남재철, 2001: 제주해역의 국지파랑 예측시스템, April 26-27, 춘계 한국기상학회, 조선대학교, 광주
28. 이윤경, 서장원, 남재철, 나정열, 2001: 서해 갯벌에서의 미세 열교환량 관측 및 분석, April 26-27, 춘계 한국기상학회, 조선대학교, 광주
29. 안중배1, 이해진1, 남재철2, 서장원, 2001: 안개 모듈 개발을 통한 해무 예측 연구, April 26-27, 춘계 한국기상학회, 조선대학교, 광주
30. 서장원, 장유순, 김창식, 2001: 수치모델을 이용한 파랑인자 민감도 특성연구, May 11-12, 춘계한국해양학회, 국립수산진흥원, 부산

31. 이윤경, 나정열, 서장원, 남재철, 2001: 갯벌에서의 미세규모 열속변화, May 11-12, 춘계한국해양학회, 국립수산진흥원, 부산
32. 서장원, 오희진, 남재철, 2001: 해륙풍에 의한 국지규모의 해양기상특성 고찰, 10월 25-26, 추계한국기상학회, 연세대학교
33. 안중배, 서장원, 이해진, 2001: 해무특성별 발생 메카니즘 모사 연구, 10월 25-26, 추계한국기상학회, 연세대학교
34. 서장원, 이윤경, 서은진, 나정열*, 2001: 국지적 열교환 차이에 의한 바람 특성 고찰, 11월 5-6, 춘계한국해양학회, 한국해양연구원
35. 서장원, 오희진, 남재철, 2001: 해륙풍에 의한 국지규모의 해양기상특성 고찰, 10월 25-26, 추계한국기상학회, 연세대학교
36. 안중배, 서장원, 이해진, 2001: 해무특성별 발생 메카니즘 모사 연구, 10월 25-26, 추계한국기상학회, 연세대학교
37. 서장원, 이윤경, 서은진, 나정열*, 2001: 국지적 열교환 차이에 의한 바람 특성 고찰, 11월 5-6, 춘계한국해양학회, 한국해양연구원
38. 서장원, 장유순, 남재철, 2002: 48시간 파랑 예측 모델 성능 평가, 4월 p46-50, 춘계기상학회, 경북대학교.
39. 안중배, 남재철, 서장원, 이해진, 2002: 한반도 안개 특성 연구, 4월 p616-618, 춘계기상학회, 경북대학교.
40. 장유순, 서장원, 김태희, 남재철, 2002: The Analysis of Wave Parameters using Wave Modeling and Observation Buoy data, 5월, 전남대학교, 춘계 한국해양학회.
41. 서은진, 서장원, 남재철, 정해순, 2002: 실시간 시정변화 감시를 위한 시정모니터링 시스템, 5월, 전남대학교 춘계한국해양학회.
42. 이윤경, 서장원, 나정열, 남재철, 2002: 서해연안의 갯벌과 해빈에서의 열속 변화분석, 5월, 전남대학교 춘계한국해양학회.
43. 서장원, 남재철, 장유순, 2002: 한반도 주변해역의 월평균 파랑 분포도, 5월, 전남대학교 춘계한국해양학회.

제 5 장 참고문헌

- 김창식. 1990. 취송순환에 대한 파랑-흐름의 영향. 한국해양연구소 보고서. BSPE00156-282-2. pp.67.
 - 김창식 등. 1993. 폭풍시 연안류 변동에 따른 연안재해요소 연구. 한국해양연구소 보고서. BSPN00189-617-2. pp. 190
 - 김창식. 1997. 내대륙붕에서의 파랑과 흐름이 복합된 해저 Ekman 경계층의 유속 분포. 해양연구 19(1), pp. 21-34.
 - 김창식. 1998. 3차원 수리역학 및 수질모형의 경기만 시험적용. 1998년도 세계 해양의 해 기념 해양수산 공동 학술발표회 요지집. pp. 465-466.
 - 이종찬, 김창식, 정경태 .1998. Application of a 3D hydrodynamic model to macro-tidal water of Korea in the Yellow Sea. Hydroinformatics '98. Babovic & Larsen (eds), Balkema, Rotterdam, 1391-1398.
 - 이종찬, 정경태, 최병호 (1996) 황해·동중국해의 M2 조석 잔차위 및 M4 조석 생성에 대한 비선형항의 영향, 한국 해안·해양공학회, 8, pp. 137-145.
 - 이종찬, 정경태. 1996. 자료합성법을 이용한 황해 및 동중국해의 M2 조석 산정. 해양연구 : 13-24.
 - 최병호, 고진석 1994. 동아시아 해역의 조석 모형, 한국해안·해양공학회지, 94-108
 - 한국 해양연구소 (1996) 한반도 주변 조석 조화상수 자료집, pp. 282.
 - 환경부 1996 ‘연안수질 평가 및 예측기술 (I)’ 한국해양연구소 (김창식 연구책임자). pp. 356.
 - 환경부 1997 ‘연안수질 평가 및 예측기술(II)’ 한국해양연구소 (김창식 연구책임자). pp. 342.
 - 환경부 1997 ‘해저퇴적물 이동 관측 및 예측기술(I)’ 한국해양연구소 (김창식 세부연구책임자). pp.259.
 - 환경부 1997 ‘해저퇴적물 이동 관측 및 예측기술(II)’ 한국해양연구소 (김창식 세부책임자). pp.307.
- Accad, Y. and C. L. Pekeris. 1978. Solution of the tidal equations for the M2 and S2 tides in the world oceans from a knowledge of the tidal potential alone, Philos. Trans. R. Soc. London A : 235-266.
- Andersen, O. B., P. L. Woodworth and R. A. Flather. 1995. Intercomparison

- of recent tide models, *J. Geophysical Research* : 25,261–25,282.
- Bang, I., J-K Choi, L. Kantha, C. Horton, M. Clifford, M-S. Suk, K-I Chang, S.Y. Nam, and H-J Lie, 1996: A hindcast experiment in the East Sea (Sea of Japan), *La mer*, 34, 108–130.
- Bazin. H.E., 1865. Etude d'Une Nouvelle Formule pour Calauler le Debit des Canaux De'couverts. *Memorie No.41, Annales des Ponts et Chaussées*, 14, pp. 20–70.
- Berkhoff, J.C.M., 1972. Computation of combined refraction–diffraction. *Proc. Conf. Coastal Eng.*, 13th, Chapter 24.
- Blain, C. A. 1997. Development of a data sampling strategy for semienclosed seas using a shallow–water model, *J .of atmospheric and oceanic technology* : 1157–1173
- Blain, C.A. 1997 Development of a data sampling strategy for semi enclosed seas using a shallow–water model. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 14, 1157–1173.
- Blumberg, A. F., and Mellor, G. L. 1980. A coastal ocean numerical model. In *Lecture notes of coastal and estuarine studies*, edited by J. Sundermann and K. P. Holz. New York: Springer–Verlag.
- Blumberg, A. F., and Mellor, G. L. 1983. Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight. *J. Geophys. Res.* 88:4579–4592
- Blumberg, A., and G. Mellor, 1987: A description of a three dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, edited by N.S. Heaps, American Geophysics Union, Washington D.C., 1–16.
- Bowers, D.G., T.P. Rippeth and J.H. Simpson 1991 Tidal friction in a sea with two equal semidiurnal tidal constituents. *Continental Shelf*

- Research, 11, 203-209.
- Bowers, D.G., T.P. Rippeth and J.H. Simpson 1991 Tidal friction in a sea with two equal semidiurnal tidal constituents. *Continental Shelf Research*, 11, 203-209.
- Brainerd, K. E. and M. C. Gregg, 1995: Surface mixed and mixing layer depths, *Deep Sea Res., Part A*, 9, 1521-1543.
- Brownlie, W. R., 1981, Re-examination of Nikuradse Roughness Data, ASCE, Vol. 107, NO. HY1, pp. 115-119.
- Choi, B.C. and J.S. Ko 1994 Modelling of tides in the East Asian Marginal Seas. *Journal of Korean Society and Ocean Engineers*, 6, 94-108.
- Choi, B.H. 1980. A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, Korea Ocean Research and Development Institute Report 80-02.
- Choi, B.H. and Fang, G. 1993. A review of tidal models for the East China and Yellow Seas. *J. Korean Soc. of Coastal and Ocean Engineers* 5(2) : 151-171.
- Chu P. C., Y. Chen, and S. Lu, 1999a: Japan/East Sea (JES) Subpolar Front meandering and eddy shedding in May 1995, p 11-13, Proceedings of the CREAMS'99 International Symposium, Fukuoka, Japan, Jan. 26-28, 1999.
- Chu, P.C., 1995: P-vector method for determining absolute velocity from hydrographic data. *Marine Tech. Soc. J.*, 29(3), 3-14.
- Chu, P.C., C.W. Fan, and W.J. Cai, 1998b: P-vector inverse method evaluated using the Modular Ocean Model (MOM). *J. Oceanogr.*, 54, 185-198.
- Chu, P.C., J. Lan, and C.W. Fan, 2000: Japan/East Sea (JES) seasonal circulation and thermohaline variabilities, Part 1, *Climatology. J. Phys. Oceanogr.*, in press.
- Chu, P.C., S.H. Lu, and Y.C. Chen, 1999b: Circulation and thermohaline structures of the Japan/East Sea (JES) and adjacent seas simulated by a nested basin/coastal model, p.108-111, Proceedings of the CREAMS'99

- International Symposium, Fukuoka, Japan, Jan. 26-28, 1999.
- Chu, P.C., Y.C. Chen, and S.H. Lu, 1998a: Temporal and spatial variabilities of Japan Sea surface temperature and atmospheric forcings. *J. Oceanogr.*, 54, 273-284.
- Copeland, G.J.M., 1985. A Practical Alternative to the "Mild-Slope" Wave Equation. *Coastal Eng.*, pp. 125-149.
- Cruz-Neira, C., Leigh, J., Oapka, M., Narnes, C., Cohen, S., Das, S., Engelmann, R., Hudson, R., Roy, T., Siegel, L., Vasilakis, C., DeFanti, T. A., and Sandin, D. 1993. Scientists in wonderland: A report on visualization applications in the CAVE virtual reality environment. *IEEE 1993 Symposium in Research Frontiers in Virtual Reality* Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, pp. 59-66 and CP-3.
- da Silva, A.M., C.C. Young, and S. Levitus, 1994: Atlas of Surface Marine Data 1994. Tech. Rep. Geosci., 94, University of Wisconsin-Milwaukee, 83pp.
- Dronkers, J.J. 1964 Tidal Computation in Rivers and Coastal Waters. North-Holland Publishing Company, 277-275.
- Egbert, G.D., A.F. Bennette and M.G.G. Foreman 1994 TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. *Journal of Geophysical Research*, 99, 24,821-24,852.
- Einstein, H.A., 1942, Formulars for the transporation of bed load, *Trans. Am. Soc. Civil Eng.*, pp.107.
- Elder, J.W., 1959, The dispersion of market fluid in turbulence shear flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 5(Part 4), pp.544~560.
- Engelund and Hansen, E., 1967, A Monograph on sediment Transport in Alluvial Stream, *Technisk Vorlag*, Copenhagen, pp. 62.
- Ezer, T., 2000: On the seasonal mixed layer simulation by a basin-scale

- ocean model and the Mellor–Yamada turbulence scheme. *J. Geophys. Res.*, 105, 16843–16855.
- Falconer, R.A. and P.H. Owens, 1987, Numerical simulation of flooding and drying and wind stress effects in a two-dimensional tidal numerical model, *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, 83(Part 2), March, pp.161~180.
- Falconer, R.A., 1976, Mathematical modelling of jet-forced circulation in reservoirs and harbours, Thesis submitted to University of London in partial fulfillment of degree of Doctor of Philosophy, November, pp.237.
- Falconer, R.A., 1991, Review of modelling flow and pollutant transport processes in hydraulic basins, *Proceedings of 1st International Conference on Water Pollution : Modelling, Measuring and Prediction*, Southampton, Computational Mechanics Publications, September, pp. 161~180.
- Falconer, R.A., 1994, An Introduction to nearly horizontal flows, in *The Coastal, Estuarial and Harbour Engineers Reference Book* (Ed. M.B. Abbott and W.A. Price), E & F N Spon Ltd., London, Chapter 2, pp.2~36.
- Fang, G. 1987 Nonlinear effects of tidal friction, *ACTA Oceanologica Sinica*, 6, 105–122.
- Fischer, H.B., 1974, Numerical modelling of dispersion in estuaries, *International Symposium on Discharge Sewage from Outfalls*, London, Paper No.37, pp.1~8 (reprinted in "Discharge of Sewage from Sea Outfalls", Pergamon, Oxford, 1975).
- Fischer, H.B., 1976, Mixing and dispersion in estuaries, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 8, pp.107~133.
- Fischer, H.B., J.E. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger and N.H. Brooks, 1979, *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, Inc., San Diego,

pp.483.

- Gong, Y. and C.G. Park, 1969: On the oceanographical character of the low temperature region in the eastern sea of Korea. Bull. Fish. Res. Dev. Agency, Korea., 4, 69-91.
- Guo, X. and T. Yanagi 1998 Three-dimensional structure of tidal current in the East China Sea and the Yellow Sea, Journal of Oceanography, 54, 651-668.
- Haidvogel, D.B., Wilkin, J.L., Young, R.E., 1991. A semi-spectral primitive equation ocean model using vertical sigma and orthogonal curvilinear horizontal coordinates. J. Comput. Phys. 94. 151-185.
- Haidvogel, D.B., Arango, H.G., Hedstrom, K.S., Beckmann, A., Malanotte-Rizzoli, P., Shchepkin, A.F., 2000. : Model evaluation experiments in the North Atlantic basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates, Dyn. Atmos. Oceans 32, 239-281.
- Haney, R. L., 1971: Surface thermal boundary condition for ocean general circulation models, J. Phys. Oceanogr., 1, 241-248.
- Hase, H., J.-H. Yoon, and W. Koterayama, 1999: The Branching of the Tsushima Warm Current along the Japanese coast., p 19-22, Proceedings of the CREAMS'99 International Symposium, Fukuoka, Japan, Jan. 26-28, 1999.
- Hibbardm, W. L., Anderson, J., Foster, I., Paul, B., Jacob, R., Schafer, C., and Tyree, M. 1996. Exploring coupled atmosphere-ocean models using Vis5D. International Journal of Supercomputer Applications and High Performance Computing 10(2/3):211-222.
- Hirose, N., C. H. Kim and J. H. Yoon, 1996: Heat budget in the Japan Sea, J. Oceanogr., 52, 553-574.
- Hirose, N., C.H. Kim, and J.H. Yoon, 1996: Heat budget in the Japan Sea. J. Oceanogr., Soc. Jpn., 52, 553-574.

- Holloway, G.T. Sou, and M. Eby, 1995: Dynamics of circulation of the Japan Sea. *J. Mar. Res.*, 53, 539-569.
- HR Wallingford, 1997. Saemankeum Sea Dykes: Wave Climate and Engineering Review.
- Hunter, J.R. 1975. A note on quadratic friction in the presence of tides. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 3, 473-475.
- Hunter, J.R. 1979. On the interaction of M2 and M2n tidal velocities in relation to quadratic and higher power laws. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 32, 146-153.
- IHO, 1979 Tidal constituent bank station catalogue
- Ippen, A.T., 1966, Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, pp.744.
- Isobe, A., 1994: Seasonal variability of the barotropic and varoclinic motion in the Tsushima-Korea Strait. *J. Oceanogr. Soc. Japan.*, 50, 223-238.
- Isoda, Y., and S. Saitoh, 1993: The northward intruding eddy along the east coast of Korea. *J. Oceanogr.*, 17, 265-276.
- Isoda, Y., S. Saitoh, and M. Mihara, 1991: SST structure of the Polar Front in the Japan Sea. *Oceanography of Asian Marginal Seas*, ed. by K. Yakano, Elsevire. 103-112.
- Kang, S.K., Lee, S.R. and Yum, K.D. 1991. Tidal computation of the East China Sea, the Yellow Sea and the East Sea. in K. Takano ed., *Oceanography of Asian Marginal Seas*. Elsevier : 25-48.
- Kantha, L. H. 1995. Barotropic tides in the global oceans from a nonlinear tidal model assimilating altimetric tides 1. Model description and results. *J. Geophysical Research* : 25,283-25,308.
- Katoh, O., 1994: Structure of the Tsushima Current in the Southwestern Japan Sea. *J. Oceanogr.*, 50, 317-338.

- Kawabe, M., 1982a: Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea, Part I: Data analysis. *J. Oceanogr. Soc.*, 38, 95 - 107.
- Kawabe, M., 1982b: Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea, Part II: Numerical experiment. *J. Oceanogr. Soc.*, 38, 183 - 192.
- Kim, C.-H., and J.-H. Yoon, 1994: A numerical study on the seasonal variation of the Tsushima Warm Current along the coast of Japan. *Proceedings of the CREAMS Third Workshop*. Seoul, Korea, pp. 73-79.
- Kim, C. H. and J. H. Yoon, 1994: A numerical modelling of the upper and the intermediate layer circulation in the East Sea. *J. Oceanogr.*, 55, 327-345.
- Kim, C. H., 1996: A numerical experiment study on the circulation of the Japan Sea (East Sea), Ph.D. thesis, Kyushu University, 151pp.
- Kim, K., and J.Y. Chung, 1984: On the salinity-minimum layer and dissolved oxygen-maximum layer in the East Sea (Japan Sea). In : *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Sea*, T. Ichiye (Editor), Elsevier, Amsterdam., 55-65.
- Kim, Y.G., and K.K. Kim, 1999: Intermediate Waters in the East/Japan Sea, *Journal of Oceanography.*, 55, 123-231.
- Kim. C.-H., and J.-H. Yoon, 1996: Modeling of the wind-driven circulation in the Japan Sea using a reduced gravity model. *J. Oceanogr.*, 52, 359-373.
- Kitaigorodskii, S.A., Krasitskii, V.P. and Zaslavskii, M.M., 1975, On Phillips'equilibrium range in the spectra of wind generated gravity waves, *J. Phys. Oceanogr.*, 5: 410-420.
- KORDI 1996 Harmonic Constants of Tide around the Korea Peninsula, 282 p. (in Korean).
- Kowalik, Z. and I. Polyakov. 1998. Tides in the Sea of Okhotsk, *J. Phys. Oceanogr.* : 1389-1409

- Le Provost C. 1973 Decomposition spectrale due terme quadratique de frottement dans les equations des marees littorales. Methode d'analyse. Compte rendu hebdomadaire des seances de l'Academie des sciences, 276, 571-574.
- Lee, J.C, K.T. Jung and B.H. Choi 1996 Effect of Nonlinear Terms on the Generation of M2 Tide Residual Elevation and M4 Tide in the Yellow Sea and the East China Sea. Journal of Korean Society and Ocean Engineers, 8, 137-145 (in Korean).
- Lee, J.C. and A.M. Davies 1999 Open Boundary and Frictional Influences in 3D Tidal Models, Journal of Hydraulic Engineering, 125(10) : 1,084-1,096.
- Lee, M.O., J.S. Lee and I.H. Park, 1994, The impact of reclamation on physical environment for culture ground in a small bay, Proceedinds of International Conference on Hydrodynamics '94, China., pp.567~573.
- Levitus, S., 1982: Climatological atlas of the World Ocean. NOAA Prof. Paper 13, Washington D.C.
- Maizuru Mar. Observ., 1997: Bulletin of the Maizuru Marine Observatory.
- Martin, S., and M. Kawase, 1998: The southern flux of sea ice in the Tatarskiy Strait, Japan Sea and the generation of the Liman Current. J. Marine Res., 56, 141-155.
- Matsumoto, K., M. Ooe and T. Sato. 1995. Ocean tide model obtained from TOPEX/ POSEIDON altmetry data. J. Geophysical Research : 25,319-25,330.
- Matsumoto, K., M. Ooe, T. Sato and J. Segawa 1995 Ocean tide model obtained from TOPEX/POSEIDON altmetry data. Journal of Geophysical Research, 100, 25,319-25,330.
- Meller, G. L. and T. Yamada, 1982 : Development of a turbulent closure model for geophysical fluid problems. Rev. Geophys., 20, 851-875.

- Mellor, G., and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851-875.
- Miyazaki, M., 1952: The heat budget of the Japan Sea. *Bull. Hokkaido Reg. Fisher. Res. Lab.*, 4, 1-54.
- Miyazaki, M., 1953: On the water masses of the Japan Sea. *Bull. Hokkaido Reg. Fisher. Res. Lab.*, 7, 1-65.
- Miyazaki, M., and S. Abe, 1960: On the water masses in the Tsushima Current area. *Jour. Oceanogr. Soc. Japan.*, 16, 59-68.
- Mooers, C. N.K., and H.-S. Kang (1995). Initial spin-up of a Sea of Japan numerical circulation model. In: (Eds. A.S. Alekseev and N.S. Bakhvalov) *Advanced Mathematics: Computations and Applications*, NCC Publisher, Novosibirsk; pp. 350-357.
- Moriyasu, S., 1972: The Tsushima Current. In *Kuroshio-Its Physical Aspects*, ed. by H. Stommel and K. Yoshida, Univ. of Tokyo Press, Tokyo., 353-369.
- Na, J.Y., J. W. Seo and S. K. Han 1992: Monthly-mean sea surface winds over the adjacent seas of the Korean Peninsula, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 24, 1-10.
- Naganuma, K, 1973: On discussions on the existence of the third branch of the Tsushima Current. *Newsl. Japan Sea Reg. Fish. Res. Lab.*, 266, 1-3 (in Japanese).
- Nishida, H. 1980. Improved tidal charts for the western part of the north Pacific Ocean. *Report of Hydrographic Researches* 15 : 55-70.
- Noh, Y., C. J. Jang, T. Yamagata, P. C. Chu, and C. -H. Kim, 2000 : Simulation of more realistic upper ocean process from OGCM with a new ocean mixed layer model. *J. Phys. Oceanogr.* (submitted).
- Odamaki, M. 1989. Co-Oscillating and independent tides of the Japan Sea. *J.*

- Oceanogr. Soc. Japan 45 : 217-232.
- Pacanowski, R., K. Dixon, and A. Rosati, 1993: The GFDL Modular Ocean Model User's Guide Version 1.1, GFDL Ocean Group Tech. Report No. 2, GFDL/NOAA, Princeton University.
- Pingree, R.D. 1983 Spring tides and quadratic friction. *Deep Sea Research*, 30, 929-944.
- Pingree, R.D. and D.K. Griffiths 1981 S2 tidal simulations on the North-West European Shelf. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 61, 609-616.
- Pingree, R.D. and D.K. Griffiths 1982 Tidal friction and diurnal tides on the North-West European Shelf. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 62, 577-593.
- Pingree, R.D. and D.K. Griffiths 1987 Tidal friction for semidiurnal tides. *Continental Shelf Research*, 7, 1181-1209.
- Preller, R.H., and P.J. Hogan, 1998: Oceanography of the Sea of Okhotsk and the Japan/East Seas. In *The Sea*, ed. by A.R. Robinson and K.K. Brink, John Wiley and Sons, Inc., 11, 429-481.
- Ray, R. D. and B. V. Sanchez, 1989. Radial deformation of the earth by oceanic tide loading. NASA Tech. Memo. 51pp
- Riser, S.C., and M.J. Warner, 1999: Long-term variations in the deep ventilation of the Japan/East Sea. *J. Phys. Oceanogr.* (Submitted)
- Rodi, W., 1984, Turbulence model and their application in hydraulics, International Association for Hydraulic Research, Delft, Second Edition, pp.104.
- Schlichting, H., 1979, Boundary layer theory, MacGraw-Hill Book Co., New York, Sixth Edition, pp.742.
- Schwiderski, E. W. 1980. On charting global ocean tides. *Reviews of geophysics and space physics*, 18, 243-268.

- Sekine, Y. , 1991: A numerical experiment on the seasonal variation of the oceanic circulation in the Japan Sea. In: Oceanography of Asian Marginal Seas (Ed., K. Takano) Elsevier Oceanography Series, 54: 113-128.
- Sekine, Y., 1991: Wind-driven circulation in the Japan Sea and its influence on the branching of the Tsushima Current. Prog. Oceanogr., 17, 297-312.
- Seo, J. W., 1998: Research on the sea surface winds and heat flux in the East Asian Marginal Seas. Ph.D Thesis, Hanyang University.
- Seung, Y.H., 1992: A simple model for separation of East Korean Warm Current and formation of the North Korean Cold Current. J. Oceanol. Soc. Korea, 27, 189-196.
- Seung, Y.H., and J.-H. Yoon, 1995 : Some features of winter convection in the Japan Sea. J. Oceanogr., 51, 61-73
- Seung, Y.H., and K. Kim, 1989: On the possible role of local thermal forcing on the Japan Sea circulation. J. Oceanol. Soc. Korea, 24: 1-14.
- Seung, Y.H., and K. Kim, 1993: A numerical modeling of the East Sea circulation. J. Oceanol. Soc. Korea, 28, 292-304.
- Seung, Y.H., and K.J. Kim, 1995: A multilayer model for dynamics of upper and intermediate layer circulation of the East Sea. J. Oceanol. Soc. Korea, 30, 227-236.
- Seung, Y.H., and S.-Y. Nam, 1991: Effect of winter cooling of subsurface hydrographic conditions off Korean Coast in the East (Japan) Sea. In: Oceanography of Asian Marginal Seas (Ed., K. Takano) Elsevier Oceanography Series, pp. 163-178.
- Seung, Y.H., and S.Y. Nam, 1992: A numerical study on the barotropic transport of the Tsushima Warm Current. La mer, 30, 139-147.

- Seung, Y.H., S.Y. Nam, and S.R. Lee, 1990: A combined effect of differential cooling and topography on the formation of Ulleung Warm Eddy. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 22, 375-384.
- Shin, C.W., S.K. Byun, and C.S. Kim, 1996: Comparison between Geostrophic Currents in the southwestern Part of the East Sea, *Kor. Soc. gr.*, 31(2), 89-96.
- Shin, H.-R., S.-K. Byun, and C. Kim, 1995: The characteristics of structure of warm eddy observed to the northwest of Ulleungdo in 1992. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 30, 39-56 (in Korean with English abstract).
- Smagorinsky, J., 1963: General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. *Mon. Weather Rev.*, 91, 99-164.
- Song, Y., Haidvogel, D.B., 1994. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinates. *J. Comput. Phys.* 115, 228-244.
- Takano, K., 1974: A general circulation model for the world ocean. Numerical simulation of weather and climate, Tech. Rep. 8, Dept. Meteo. UCLA, 46pp.
- Taylor, G.I. 1919 Tidal friction in the Irish Sea. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A220, 1-93.
- Toba, Y., K. Tomizawa, Y. Kurasawa, and K. Hanawa, 1982: Seasonal and year-to-year variability of the Tsushima-Tsugaru Warm Current system with its possible cause. *La Mer.*, 20, 41-51.
- Uda, M., 1934: The results of simultaneous oceanographic investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June. *J. Imp. Fish. Exp. Sta.*, 5, 57-190 (in Japanese).
- UNESCO, 1981: 10th report of the joint panel on oceanographic tables and standards, UNESCO Tech. Papers in Marine Sci. No. 36, Paris.
- Van Rijn, L.C., 1984, Seditment transport, part I (bed load transport), *J.*

- Hydr. Eng., ASCE, Vol. 110(10), pp1431-1455.
- Van Rijn, L.C., 1984, Seditment transport, part II(bed load transport), J. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 110(11), pp1613-1641.
- Varwick, F., 1945. Zur Fliess formel fur offene Kunstliche Gerinne., these inedite, Dresden University.
- Wahr, J. M. 1981. Body tides on an elliptical, rotating, elastic oceanless Earth, Geophys. J. R. Astron. Soc. : 677-703.
- Wheless, G.. H., and Valle-Levinson, A. in press. A modeling study of tidally-driven estuarine exchange through a narrow inlet into a sloping shelf. J. Geophys. Res.
- Wheless, G.. H., Valle-Levinson, A., Atkinson, L. P., Hofmann, E. E., and Klinck, J. M. 1994. A walk through Chesapeake Bay. Visusal proceedings, SUGGRAPH 94, ACM, New York, p.248.
- Wheless, G.. H. 1994. Estuary/shelf exchange variability due to synoptic scale wind events and runoff: Implications for biological recruitment. In Toward a sustainable coastal watershed: The Chesapeake experiment : Proceedings of the 1994 Chesapeake Research Conference, edited by P. Hill and S. Nelson. Solomons, MD: Chesapeake Research Consortium, pp. 147-156.
- Wheless, G.. H., Valle-Levinson, A., and Sherman, W. 1995. Virtual reality in oceanography. Oceanography 8:52-58.
- Wu, J., 1969, Wind stress and surface roughness at air-sea interface, Journal of Geophysical Research, 74, pp.444~455.
- Yanagi, T. and K. Inoue 1994 Tide and tidal current in the Yellow Sea/East China Sea, La mer, 32, 153-165.
- Yanagi, T., A. Morimoto and K. Ichikawa. 1997. Co-tidal and Co-range charts for the Est China Sea and the Yellow Sea derived from satellite altimetric data. J. of Oceano. : 303-309.

- Ye, A. and L. Mei 1995 Numerical modeling of tidal waves in the Bohai Sea, the Huanghai Sea and the East China Sea, *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 26, 63-79. (in Chinese with English abstract)
- Yi, S.U., 1966: Seasonal and secular variations of the water volume transport across the Korea Strait. *J. Oceanogr. Soc. Korea.*, 1, 7-13.
- Yoo, D. and O'Connor, 1986, B.A., Mathematical modelling of wave-induced nearshore circulations, *Proc. 20th Int. Conf. on Coastal Eng., American Society of Civil Engineers* : 1667-1682.
- Yoo, D. and O'Connor, 1988, B.A., Numerical modeling of waves and wave-induced currents on groyned beach, *Proc. Int. Cong. on Sediment Transport in the Coastal Region, IAHR* : 127-136.
- Yoon, J.-H., 1982a: Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part I. Formation of the East Korean Warm Current. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 38, 43-51.
- Yoon, J.-H., 1982b: Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part II. Influence of seasonal variations in atmospheric conditions on the Tsushima Current. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 38, 81-94.
- Yoon, J.-H., 1982c: Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea Part, III. Mechanism of the Nearshore Branch of the Tsushima Current. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 38, 125-130.
- Yoshikawa, Y., T. Awaji, and K. Akitomo, 1999: Formation and circulation processes of intermediate water in the Japan Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 1701-1722.

PART II

공동연구기관 : 기상연구소

요 약 문

I. 제 목

해양기상 환경의 분석 및 예측기술개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

안개(fog)란 기상학적으로 비, 눈, 우박, 이슬, 서리 등과 같이 대기 중의 수증기가 모여 발생하는 현상으로, 수평 시정이 1 km 미만일 때를 일컫는다. 특히, 해무(Sea fog)는 해상에서 발생하는 모든 형태의 안개를 해무(Sea fog)라 총칭하는데, 발생원인 또는 발생지에 따라서 수십 가지로 분류될 수 있다. 해무에 의한 해난 사고는 경제적 손실, 인명 피해 등과 직관되어 있다. 특히 군사적 측면에서 볼 때 군사적 요충지라 할 수 있는 한반도 주변에서의 해무의 발생 및 지속 그리고 소산은 중요하다. 따라서 해무의 발생을 예측하고 이것에 대한 기술을 확보하는 것은 예보 기술적 측면과 더불어 사회·경제·군사적으로 중요하다. 그러나 이러한 중요성에도 불구하고 아직 해무 예측을 위한 도구가 마련되지 못하고 있다.

또한 해표면에서 일어나고 있는 현상중 역사적으로 인간의 해상활동에 크게 영향을 미치고 있는 인자로 파랑(Wind Wave) 현상을 들 수 있다. 해양이 대기와 경계를 이루고 있는 해표면에서는 해양과 대기는 서로 열, 물질, 에너지 등을 주고받는다. 해양은 대기로부터 바람 등의 형태로 에너지를 공급받아 파랑, 표층 순환과 같은 형태의 운동을 하게 되고, 대기는 해양으로부터 주로 열이라는 형태를 통해 에너지를 받아 기상학적으로 변화를 일으킨다. 일련의 해양-대기 상호작용의 물리과정중에 시-공간 스케일이 비교적 짧으며 해상풍에 대한 대기의 에너지 공급원으로부터 해양의 반응시간이 가장 짧은 현상중의 하나가 파랑현상인 것이다.

예측 성능이 향상된 해상풍 모형과 이를 입력자료로 갖는 파랑 예측 시스템 구축은 정치-외교적으로 매우 중요한 위치인 한반도 주변 해역에서의 해군과 같은 국가 방위 차원에서뿐만 아니라 국가 경제 차원의 안전한 해상조업을 위해서 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 통계적 방법을 이용하여 우선적으로 한반도 동해안의 안개발생 특성에 관해 연구하고, 지상 및 고층관측을 통해 안개발생시 기상을 조사하였다. 또한 안개 발생시의 다양한 미세 물리 과정을 고려한 해무 예측 모형을 독자적으로 개발하였으며, 다양한 사례기간에 대한 모형 적용 실험을 수행하여 해무 예

측 모형의 이용 가능성을 살펴보았다. 또한 해무의 실시간 관측을 위하여 시정모니터링 시스템을 구축하였다.

또한 제 3세대 파랑모델로 알려져 있는 WAVEWATCH-III 모델의 이론적 특성과 파랑 예측시스템의 구축 내용 및 검증 결과를 제시했으며, 파랑 현상에 대한 수치 실험에 대한 결과들을 포함시켰다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

가. 동해 해무의 통계적 특성 연구

- 해무 발생 빈도 분석
- 해무 발생, 소멸 및 지속 시간 분석
- 경년별 상대습도 분석
- 해무 발생시 풍향 및 풍속 분석

나. 울릉도 관측

- 울릉도 평년 기상 특성 요약
- 지상 및 고층 관측자료, 지상 일기도 분석

다. 해무 발생에 대한 진단적 연구

- 한반도 주변 해무 관련 자료 수집 및 분석
- 사례 연구를 통한 MM5의 수치 실험
- 기본 모형 실험으로부터 모형에 나타난 특성 분석

라. 해무 예측 모형의 개발

- 최적 해무 모형 개발을 위한 모형 기본 연구
- Gayno-Seaman PBL 모형을 기본으로 한 예측 모형의 구조 설계 및 개발

마. 해무 예측 모형의 검증

- 모형의 문제점 파악과 개선
- 모형에 의한 객관적인 예측 가능성을 파악
- 해무 예측의 검증

바. 시정모니터링 시스템 구축

- 해양기상정보의 실시간 자료수집
- Web을 통한 원격지 시스템을 실시간 제어

사. 파랑예측 시스템 구축

- WAVEWATCH-III의 물리적, 수치적 특성
- 모델 수행시간 및 자동화 셀 구성 소개
- 웹 기반의 파랑 예측 모델 시스템 소개

아. 파랑예측 결과 검증

- 태풍 등 악기상 사례기간 적용
- 부이자료 수집
- 해상풍 및 유의파고의 모사성능에 대한 통계 검증
- 예보시간대별 파랑인자 검증

자. 수치 실험

- 해저 마찰 민감도 실험
- 공간 격자 민감도 실험
- 해류, 조류에 의한 파랑 변조 효과 분석

차. 월별 파랑 분포도 작성

- 동아시아 영역의 월평균 파랑인자 분포도 제시

IV. 연구개발결과

- 통계적 분석을 통하여 동해에서 월별 안개발생일수, 지속시간, 안개 발생시 상대습도와 바람장의 분포를 분석하였다.
- 울릉도에서 2000년 5월 20일 ~ 30일 사이에 발생하는 안개특성을 지상관측, 고층관측, 일기도 분석을 통하여 안개발생의 원인을 진단하였다.
- 연구 기간동안의 해무 관련 자료에 대한 수집과 1999년 이후 발생한 해무에 대한 분류 작업을 완성하였다. 또한, 실무 예보 모형인 MM5V3을 설치하여 선정된 해무 사례에 대한 시범적 사례 실험을 수행하였으며, 모형에 의한 객관적인 해무 예측 가능성을 살펴보았다.
- 안개 발생시의 물리적인 특성을 보다 현실적으로 표현하고자 Gayno- Seaman에 의해 개발된 PBL scheme를 기본으로 한 해무 예측 모형의 구조를 설계하였다. 개발된 해무 예측 모형은 크게 두 가지의 미세 물리 과정으로 구성되는데, 이는 아격자 규모 응결 모수화 과정과 안개 발생시의 복사과정 되먹임 작용이다. 아격자 규모 모수화로부터 고안된 안개의 LWC는 안개의 객관적 예측 인자로서 효율성을 보여주었다. 또한 아격자 규모 모수화와 더불어 복사과정 되먹임까지 고려된 해무 예측 모형이 관측에 더 유사한 결과를 보여주었다.

- 개발된 해무 예측 모형을 다양한 사례들에 적용하여 문제점을 발견하고 개선하여 보다 정확한 안개 예측을 위한 모형을 구축하였다. 개선된 모형을 이용하여 선정된 해무 사례들에 대한 수치실험을 수행하였으며, 거의 대부분의 사례에서 모사된 안개 발생기간이 관측기간과 유사하였다. 또한 범주 통계(Categorical statistics)법을 이용하여 해무 예측 모형의 예측 능력을 검증하였는데, 대체적으로 그 예측성이 높게 나타났다
- 강릉지방기상청 속초기상대에 시정모니터링 시스템을 설치하여 AWS, 시정계 및 영상 데이터를 웹을 통해 정보를 제공이 가능하도록 하였다.
- 제 3세대 파랑모델인 WAVEWATCH-III 의 물리과정과 적분기법 등의 이론적 부분에 대한 고찰이 이루어졌다.
- 모델 자동화 셸 프로그램을 개발하여 웹기반의 48시간까지의 실시간 파랑 예측 시스템을 구현하였다.
- 기상청 해양기상 관측부이의 자료를 이용하여 예측시간대별 예측 성능을 검증하였다. 태풍 등 악기상 시에도 연안역의 최대 8미터 이상의 높은 파고까지 안정적으로 재현하였으며, 예보시간대별 예측성능이 크게 떨어지지 않았다.
- 파랑모델을 이용하여 해저 바닥 마찰과 공간격자에 대한 파랑모델의 민감도 진단 실험을 실시하였으며, 해류, 조류에 의한 파랑 변조 효과의 정량값을 분석하였다.
- 1년 이상 축적된 파랑예측 자료를 이용하여 한반도 주변해역의 월평균 파랑 분포도를 작성하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

해무 및 파랑 예측에 대한 사회적인 요구 증대에 비해 객관적이고 독립적인 예측 시스템이 마련되고 있지 못한 현재 실정에 비추어 볼 때 본 연구에서 개발한 해무 및 파랑 예측 모형은 다양한 측면에서의 활용이 기대가 된다.

1. 기술적 측면

- 해무의 발생 역학 이해 및 해무 예보 기술 향상
- 파랑 인자의 정량적 특성 파악 및 파랑 예보 기술 향상
- 해양 예보 능력 향상
- 해양 재해 방지를 위한 기초 기술 축적

2. 군사·경제적 측면

- 해양 기상 정보 지원에 따른 생산성 향상
- 해양 재해 예방에 따른 경제적 손실 감소
- 해상 및 해변의 레저 시설 증가에 따른 양질의 예보 서비스 제공

S U M M A R Y

I . Title

Analysis of Marine Meteorology Environment and Development of prediction technology

II . Objectives and significance of the research

The fog is one of the phenomenon related with the condensation of vapor in the atmosphere such as rain, snow, hailstone, dew, and frost. It is defined as the reduced visibility of below 1 km due to water vapor in the atmosphere. Especially, the sea fog is a genetic term, defined as the fog of all types occurring over the sea. Incidents caused by the sea fog usually result in the loss of economical properties and lifes damage. In the military view, the formation, maintenance and dissipation of sea fog are very important natural phenomenon since korean peninsula is surrounded by ocean in the midmost of the military strategic area. Therefore, predicting occurrence of sea fog by acquiring sea fog forecasting technique is important not only in the technical but also in social, economical and military view point. Although there is operational demands for an objective method to predict sea fog forecast. it is not yet developed and operated in Korea.

Also, Among the phenomena arisen in sea surface, wave motion is most noticeable parameter to people. Atmosphere and ocean interact in the form of exchanging of heat, material, and energy at sea surface each other. In the ocean, there exist surface current and wind wave due to energy source from atmosphere, and atmosphere generates climate change as it gets heat and other material source from sea surface. Wind wave phenomenon has little time and spatial scale and the fastest interaction with ocean and atmosphere.

Construction of wave prediction system makes a very important role to safeguard fishing, carry trade and defense nation in the sea around East Asian marginal Sea.

In this study, we developed the sea fog prediction model that includes microphysical processes related with fog formation and verified the sea fog model by applying to the selected various sea fog cases. From these results, we tried to find out the possibility of using the model to forecast sea fog

objectively.

As for wave prediction parts, we showed the technical and numerical characteristics of WAVEWATCH-III and the results of wave prediction system and it's verification including various numerical experiments.

III. Content and Scope of the research

- i . Statistical analysis on sea fogs in East sea
 - Analysis of frequency
 - Analysis of formation, duration and dissipation time
 - Analysis of relative humidity
 - Analysis of wind during foggy day

- ii. Observation in Ulleung Do
 - Analysis of normal meteorological characteristics
 - Analysis of surface synoptic data, upper air sounding and weather chart

- iii. Diagnostic study of sea fog occurrence
 - Selection and analysis of climatic observation data related to the sea fog occurring around korean peninsula
 - Performing numerical experiments using MM5 without additional prescription for the fog forecast
 - Predictability and analysis of sea fog characteristics showed in the model using basic model, MM5, without sea fog prediction module

- iv. Development of sea fog prediction model
 - A basic model study for development of the most suitable sea fog prediction model
 - Analysis of fog forecast model to find out the model characteristics
 - Design and development of sea fog prediction model based on Gayno-Seaman PBL model

- v . Verification of the developed sea fog model
 - Analysis of the objective predictability of sea fog by using the

- numerical model
- Problem finding and improvement of the developed sea fog prediction model
- Analysis of model sensitivity for various physical processes
- vi. Construction of sea fog monitoring system
 - Real time transmission of meteorological information
 - Remote control of the system using the web page
- vii. Construction of wave prediction system
 - Physical and numerical characteristics of WAVEWATCH-III model
 - Introduction to model calculating time and operational shell routine
 - Introduction to wave prediction system based on Web
- viii. Verification of the wave prediction results
 - Applying to typhoon events
 - Compile of buoy data
 - Statistic results between sea wind and wave height
 - Verification of wave parameters according to prediction time
- ix. Numerical experiments
 - Experiments about the sensitivity of bottom friction
 - Experiments about the sensitivity of spatial resolution
 - Analysis of wave modulation due to current and tide effects
- x. Construction of the distribution chart about wave parameter
 - Construction of the monthly mean distribution chart about wave parameter around East Asian marginal seas

IV. Results

- Frequency, time of forming, duration and dissipation, humidity and wind during foggy day are analysed.

- Observation data of Ulleung do and weather charts are analysed in 20-30 May, 2000 and we found the condition of fog formation.
- We had finished collecting all types of data necessary for the study of sea fog and classified sea fog cases occurred at the research region, the East sea, since 1999 based on their formation mechanism. Also, we set up MM5V3, operational forecasting model of Korea Meteorological Administration, and performed a number of numerical experiments for the selected sea fog cases to find out and understand a objective predictability of sea fog by using the numerical model.
- To simulate the physical characteristics of sea fog more reasonably, we designed and developed sea fog prediction module based on Gayno-Seaman PBL model. The developed model has two physical processes : one is sub-grid condensation parameterization and the other is radiation parameterization.
- Results show the liquid water content derived from sub-grid condensation parameterization as a possible objective forecast index or variable for sea fog prediction. Also, the results from the sea fog model including not only sub-grid condensation parameterization but also radiation parameterization are more similar to the observation than those from the model which has only sub-grid condensation parameterization.
- We had applied the developed model to various sea fog case, and based on the experiment we found some problems. After improving the fog model, the sea fog prediction model has been tested for the fog prediction again.
- With the improved model, we performed a number of numerical experiments for various sea fog cases for the verification of the model. The results from the improved sea fog model are more resonable and similar in many respects. Also, we verified prediction ability of the sea fog prediction model using categorical statistics. Generally the result showed that the model has high prediction ability for fog.

- Visibility Monitoring System was constructed in the Sokcho surface synoptic station belong the Kangnung regional meteorological office and the meteorological information which is AWS, visibility, image data, is offered using the webpage.
- It is introduced that physical and numerical schemes about third generation wave model, WAVEWATCH-III.
- We constructed wave prediction system till 48 hours based on web after creating real time operation shell.
- We verified the wave prediction capability using marine meteorology buoy data. It simulated wave height over 7m very well though sever weather event like typhoon and do not decreased wave capability according prediction time.
- Various numerical experiments have been carried out such as bottom topography effect, sensitivity of spatial resolution and wave modulation due to current and tide effects.
- We constructed wave distribution chart around East Asian marginal seas using monthly mean data.

V. Plan To Use the Results

In spite of increasing social and operational demand for sea fog and sea wave forecasting, the objective prediction system has not been prepared yet. Therefore it is expected that the sea fog and sea wave prediction model developed in this study can be used successfully.

i . Technical view

- Understanding the formation mechanism and improving forecast skill of sea fog
- Understanding the characteristics about wave parameter and improving

forecast skill of sea wave

- Improving numerical forecast skill
- Obtaining forecast skill for preventing accidents over the ocean

ii. Military and economical views

- Growing interest in sea fog forecast supplying marine meteorological information.
- Reducing loss of lives and economic deficit associated with the disaster occurring in the sea due to reduced visibility.
- Supplying meteorological information of good quality for increasing facilities and leisure activity over sea and offshore.

C O N T E N T S

SUMMARY	773
CONTENTS	783
LIST OF TABLES	393
LIST OF FIGURES	538
CHAPTER 1. INTRODUCTION	7-10 4
CHAPTER 2. STATUS OF TECHNIQUE (Marine meteorology prediction)	
2.1 Domestic situation	411
2.2 Foreign situation	412
CHAPTER 3. DEVELOPMENT CONTENT AND RESULT FOR STUDY	
Section 1. Characteristics of sea fog formation in the East sea	415
1.1 Introduction	415
1.2 Data	416
1.3 Analysis of frequency about sea fog formation	47
1.4 Analysis of time about sea fog formation, decaying and duration	48
1.5 Analysis of relative humidity at interannual time scale	428
1.6 Analysis of wind speed and direction during sea fog events	48
1.7 Conclusion	440
Section 2. Sea fog prediction model(DUT-METRI-2000) and Case study I	44 4
2.1 Model outline	441
2.2 Case outline	442
2.3 Sea fog classification by the cause of formation	443
2.4 Synoptic status of stream fog case	444
2.5 Synoptic status of advection fog case	448
2.6 Synoptic status of front fog case	453
Section 3. Sea fog prediction model(MM5) and case study(II)	4
3.1 Climatologic characteristics of sea fog	458

3.2 Diagnostic study of sea fog formation	469
3.3 Improvement of sea fog prediction model	4
3.4 Verification of sea fog prediction model	531
Section 4. Observation in Ulleung Do	53
4.1 Meteorology characteristics in Ulleung Do	53
4.2 Meteorology observation and analysis methods	4
4.3 Observation result	544
4.4 Comparison with model output	6
4.5 Conclusion	562
Section 5. Construction of visibility monitoring system	563
5.1 Introduction	563
5.2 Introduction about visibility monitoring system	563
5.3 Expectation effects	566
Section 6. Construction of wave prediction system	57
6.1 Introduction	567
6.2 Wave numerical modelling	5
6.3 Structure and results of wave prediction system	55
Section 7. Verification of sea surface wind and wave prediction system	58
7.1 Verification of prediction results	585
Section 8. Numerical experiments about sensitivity of wave model	60
8.1 Numerical experiment about bottom friction effect	62
8.2 Numerical experiment about spatial resolution	604
8.3 Analysis of wave modulation due to current and tide	6
Section 9. Monthly distribution of wave parameters	65
Section 10. Conclusion	645

CHAPTER 4. DEGREE OF ACHIEVEMENT FOR OBJECTIVE AND CONTRIBUTION4.....

CHAPTER 5. UTILIZATION PLANS ABOUT OUTPUT OF STUDY	640
1. Utilization plan	649
2. Actual results of study output	652
CHAPTER 6. CONCLUSION AND DISCUSSION	756
CHAPTER 7. REFERENCE	166
Appendix. Manual for setting of WAVEWATCH-III ver.1.18	766

목 차

요 약 문	377
목 차	388
LIST OF TABLES	493
LIST OF FIGURES	688
제 1 장 서 론	407
제 2 장 국내외 기술개발 현황 (해양 기상 예측기술)	
1. 국내 기술 개발 현황	411
2. 국외 기술 개발 현황	412
제 3 장 연구개발의 내용 및 범위	
제 1 절 동해안의 해무발생 특성 분석	415
1.1 개요	415
1.2 자료	416
1.3 해무 발생 빈도 분석	417
1.4 해무 발생, 소멸 및 지속 시간 분석	423
1.5 경년별 상대습도 분석	428
1.6 해무 발생시 풍향 및 풍속 분석	432
1.7 소결론	440
제 2 절 해무예측모델(DUT-METRI-2000) 및 사례분석(I)	444
2.1 모델 개요	441
2.2 사례개요	442
2.3 해무 발생 원인별 사례 분류	443
2.4 증기 해무 사례의 종관적 상태	444
2.5 이류 해무 사례의 종관적 상태	448
2.6 전선 해무 사례의 종관적 상태	453
제 3 절 해무예측모델(MM5) 및 사례분석(II)	488

3.1 해무의 기후학적 특성	458
3.2 해무 발생에 대한 진단적 연구	469
3.3 해무 예측 모형의 개발과 개선	496
3.4 해무 예측 모형의 검증	531
제 4 절 울릉도 관측	543
4.1 울릉도의 기상 특성	543
4.2 기상 관측 및 분석 방법	544
4.3 관측 결과	544
4.4 모델결과와 비교	560
4.5 결론	562
제 5 절 시정모니터링 시스템 구축	563
5.1 서론	563
5.2 시정모니터링시스템의 소개	563
5.3 기대효과	566
제 6 절 파랑예측 시스템 구축	567
6.1 서론	567
6.2 파랑 수치 모델링	567
6.3 파랑 예보 시스템 구성 및 결과	575
제 7 절 해상풍 및 파랑예측 시스템의 검증	585
7.1 예보결과의 검증	585
제 8 절 파랑모델의 민감도 수치 실험	602
8.1 해저마찰 민감도 실험	602
8.2 공간격자 민감도 실험	604
8.3 해류, 조류에 의한 파랑변조 효과 분석	608
제 9 절 월별 파랑 분포도	625
제 10 절 결론	645

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	647
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	
1. 활용 계획	649
2. 연구 개발 결과 활용 실적	652
제 6 장 결론 및 토의	657
제 7 장 참고문헌	661
Appendix. (WAVEWATCH-III ver. 1.18 셋팅 방법)	766

List of Tables

Table 1.1. Information about data from observation station in east coast of Korea(KMA: Korea Meteorological Administration, MOMAF: Ministry of Maritime Affairs and Fisheries)	417
Table 1.2. The statistical analysis(maximum, minimum, average, standard deviation) about frequency of foggy day(unit: day).	420
Table 1.3. The frequency of monthly average foggy day in East coast of Korea.	421
Table 1.4. The frequency of foggy day in East coast of Korea in 2000.	42
Table 1.5. The frequency of foggy day in East coast of Korea in 2001.	42
Table 1.6. The normals of monthly fog duration time in East coast of Korea(unit: hours).	426
Table 1.7. The same as Table 1.6. except for 2000 year.	42
Table 1.8. The same as Table 1.6. except for 2001 year.	42
Table 2.1. Representative fog case the East coast of Korea.	44
Table 3.1. Model description.	470
Table 3.2. Synoptic characteristics and period of selected typical fog cases.	472
Table 3.3. Classification of fog model experiments	501
Table 3.4. Model description	502
Table 3.5. Selected cases of typical fog analysed in the study.	503
Table 3.6. Schematics of a contingency table.	532
Table 3.7. Contingency table for a period of July - August, 1999.	539
Table 3.8. Contingency table for a period of June - August, 2000.	539
Table 3.9. Contingency table for a period of June - August, 2001.	539
Table 3.10. Contingency table for June of year 2000- 2001.	545
Table 3.11. Contingency table for July of year 1999- 2001.	549
Table 3.12. Contingency table for August of year 1999- 2001.	545
Table 3.13. The result of categorical statistics for Ulleung Do.	541
Table 3.14. Summer mean result of categorical statistics for Ulleung Do.	541
Table 3.15. Monthly mean result of categorical statistics for Ulleung Do.	541
Table 6.1. Suggested constants in DIA for input-dissipation package.	572

Table 6.2. The information for the WAVEWATCH-III model domain	675
Table 6.3. The information about the calculating of WAVEWATCH-III model	675
Table 7.1. Statistics for the forecasting wind speed at the buoy position marked in Fig. 6.1, and partly shown in Fig. 7.1.	586
Table 7.2. Statistics for the significant wave height at the buoy position marked in Fig. 6.1, and partly shown in Fig. 7.3 and Fig. 7.4.	592
Table 8.1. The information of buoy position operating by KMA.	6
Table 8.2. Correlation coefficient between wind speed and significant wave height considering to wind direction	613

List of Figures

- Fig. 1.1. The map of study area(▲:lighthouse, ●: KMA observation station).
 416
- Fig. 1.2. Monthly frequency of fogs occurred around coastal area of Korea
 over period of 1992 to 1996. a) West coast, b) South coast, c) East
 coast, d) all around coastal area. 418
- Fig. 1.3. Annual variation of frequency (days) of fogs occurred at Kangnung,
 Sokcho, Tonghae, Ulleung Do over the period of 1982 to 2001.914
- Fig. 1.4. The same as in Fig. 1.3. except for monthly average variation at
 the period of 1982 to 2001. 49
- Fig. 1.5. The frequency of foggy events in East coast of Korea during (a) the
 30 years(normal) (b) 2000 year (c) 2001 year. 2
- Fig. 1.6. The percentage of the formation time of fogs in (a) KN(Kangnung),
 TH(Tonghae), SC(Sokcho), UL(UlleungDo), (b) TC(Taechin), TT(Tokto),
 MH(Muk-ho), CM(Chumunjin),TH(Taeha).424
- Fig. 1.7. The same as Fig.1.5 except for the dissipation time. 424
- Fig. 1.8. The frequency of monthly fog duration time in East coast of Korea
 during (a) the 30 years(normal) (b) 2000 year (c) 2001 year. 4
- Fig. 1.9. The yearly mean variation of relative humidity in (a) SC over the
 period of 1968 to 2000 (b) KR over the period of 1961 to 2000. 924
- Fig. 1.10. The yearly mean variation of relative humidity in (a) DH over the
 period of 1992 to 2000 (b) UL over the period of 1961 to 2000.924
- Fig. 1.11. Monthly average relative humidity in East coast of Korea during
 (a) the 30 years(normal) (b) 2000 year (c) 2001 year. 4
- Fig. 1.12. The frequency of relative humidity during the foggy hours the
 periods of 1970 to 2001. 41
- Fig. 1.13. The windrose of the mean wind during 30 years in (a)Kangnung, (b)
 Sokcho, (c)Ulleung Do, ○:Frequency of calms < 0.3 m/s, ■;
 0.3~3.3 m/s, ■; 3.4~7.9 m/s, ■; 8.0~13.8 m/s, ■; >
 13.9 m/s. 432
- Fig. 1.14. The windrose on (a)spring, (b)summer in 2000 year, ○:Frequency of
 calms < 0.3 m/s, ■; 0.3~3.3 m/s, ■; 3.4~7.9 m/s, ■;

8.0~13.8 m/s, > 13.9 m/s	433
Fig. 1.15. The same as Fig. 1.14. except of (a)autumn, (b)winter in 2000 year.	434
Fig. 1.16. The same as Fig. 1.14. except of (a)spring, (b)summer in 2001 year.	435
Fig. 1.17. The same as Fig. 1.15. except of (a)autumn, (b)winter in 2001 year.	436
Fig. 1.18. The windrose during foggy hours at (a) Kangnung (b) Tonghae (c) Sokcho (d) Ulleung Do at the period of 1970 to 2001.	437
Fig. 1.19. The frequency of each wind direction in KN(Kangnung), TH(Tonghae), SC(Sokcho), UL(Ulleung Do) during the foggy hours in 2000.	438
Fig. 1.20. The same as Fig. 1.19. except for wind speed in 2000.	438
Fig. 1.21. The frequency of each wind direction in DJ(Dae-jin), TT(Tokto), MH(Mokho), CM(Chumunjin), TH(Taeha) during the foggy hours.	439
Fig. 1.22. The same as Fig. 1.21. except for wind speed.	439
Fig. 2.1. The Surface weather chart during the Fog case 1(12-14 Jul. 1999, 16 Jul. 2000).	445
Fig. 2.2. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4) (a)19:46 UTC 1 Jun, 2000, (b)20:04 UTC 4 July, 2000.	444
Fig. 2.3. The distribution of Horizontal and Vertical surface wind along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC May.	447
Fig. 2.4. The distribution of Horizontal and Vertical ceiling height along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC May 31.	447
Fig. 2.5. The Surface weather chart during the Fog case(28 July 1999, 10 August 2000).	449
Fig. 2.6. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4) (a)19:49 UTC June, 18, 2000 (b)20:33 UTC July, 27,2000.	454
Fig. 2.7. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4) (a)19:47 UTC Aug, 9, 2000 (b)20:29 UTC Aug., 14, 2000.	454
Fig. 2.8. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4) 20:55 UTC Aug., 29, 2000.	454

Fig. 2.9. The distribution of Horizontal and Vertical surface wind along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC Aug. 31.	452
Fig. 2.10. The distribution of Horizontal and Vertical ceiling height along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC May 31.	452
Fig. 2.11. The Surface weather chart during the Fog case(1-3 July 1999, 1 June 2000).	454
Fig. 2.12. The distribution of horizontal and vertical sea surface pressure and precipitation along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC July 15.	554
Fig. 2.13. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4) (a)20:32 UTC June 23, 2000 (b)19:37 UTC July 15, 2000.	654
Fig. 2.14. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4) 19:49 UTC August 26, 2000.	654
Fig. 2.15. The distribution of horizontal and vertical surface wind along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC July 15.	457
Fig. 2.16. The distribution of horizontal and vertical sea surface wind along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC July 15.	457
Fig. 3.1. Horizontal distribution of surface meteorological observation station(KMA/SFC) and fixed offshore observation station (NFRAD/SEA).	8
Fig. 3.2. Observed number of fog occurrences.	9
Fig. 3.3. Observed occurrence frequency of sea fog around Korean Peninsula for a) West sea, b) South sea, c) East sea and d) all around the peninsula.	460
Fig. 3.4. Seasonal variability and difference of (a) monthly mean Air temperature and sea surface temperature and (b) the difference between the two around Korean Peninsula(unit: °C).	4
Fig. 3.5. Mean difference between surface air temperature and sea surface temperature during 18 years of 1983-2000 for a) fog cases and	

b) none fog cases.	463
Fig. 3.6. Temperature difference between surface air temperature and sea surface temperature during 18 years of 1983-2000 for a) fog cases and b) none-fog cases at different marginal seas.	464
Fig. 3.7. Same as Fig. 3.5, but for mean wind speed.	45
Fig. 3.8. Observed mixing ratio(q)(dotted points) and saturation mixing ratio(qs)(solid line) as a functions of temperature for a) Wonju, b) Jinju, c) Inchon, d) Sokcho, e) Ulleung Do, and f) Jeiju.	466
Fig. 3.9. Percentages of air temperature anomaly for the case of fog occurrence for the period of 1999-2000 at a) Sokcho, b) Kangnung, c) Ulleung Do, and d) Ulchin.	467
Fig. 3.10. Same as Fig. 3.9, but for wind speed.	468
Fig. 3.11. Horizontal domain and geometry of model(contour interval : 100 m).	471
Fig. 3.12. Synoptic distributions of (a) air temperature and wind for Case 1-a, (b) mixing ratio and wind for Case 2-a and (c) Surface pressure and wind for Case 3-a for the selected cases.	4
Fig. 3.13. Differences between air temperature and sea surface temperature for a) Case 1-a, b) Case 2-a, c) Case 3-a (unit: °C).	474
Fig. 3.14. Spatial evolution of simulated air temperature at the lowest layer in the model for Case 1-a (unit : °C).	475
Fig. 3.15. Same as Fig. 3.14, but for relative humidity (unit : %).	476
Fig. 3.16. Time-longitude plots of simulated a) air temperature, b) heat flux, c) turbulent kinetic energy, and d) relative humidity at the lowest level of the model along 37.5oN of East Sea across the Ulleung Do for Case 1-a.	47
Fig. 3.17. Same as Fig. 3.15, but for Case 1-b(unit : %).	479
Fig. 3.18. Same as Fig. 3.16, but for Case 1-b.	480
Fig. 3.19. Spatial evolution of simulated relative humidity at the lowest layer in the model for Case 2-a(unit : %).	483
Fig. 3.20. Same as Fig. 3.19, but for mixing ratio(unit : g/kg).	484
Fig. 3.21. Time-longitude plots of simulated a) mixing ratio, b) wind vector, c) air temperature, and d) relative humidity at the lowest level	

of the model along 37.5oN of East Sea across the Ulleung Do for Case 2-a.	45
Fig. 3.22. Same as Fig. 3.20, but for Case 2-b(unit : g/kg).	486
Fig. 3.23. Same as Fig. 3.21, but for Case 2-b(unit : g/kg).	487
Fig. 3.24. Spacial evolution of simulated air temperature at the lowest layer in the model for Case 3-a(unit: °C).	489
Fig. 3.25. Same as Fig. 3.24, but for mixing ratio(unit: g/kg).	490
Fig. 3.26. Same as Fig. 3.24, but for relative humidity(unit: %).	491
Fig. 3.27. Time-longitude plots of simulated a) wind vector, b) mixing ratio, c) turbulent kinetic energy, and d) relative humidity at the lowest level of the model along 37.5oN of East Sea across the Ulleung Do for Case 3-a.	492
Fig. 3.28. Same as Fig. 3.26, but for Case 3-b(unit : %).	493
Fig. 3.29. Same as Fig. 3.27, but for Case 3-b.	494
Fig. 3.30. Horizontal domain and geometry of model(contour interval : 100 m).	502
Fig. 3.31. Time series of observed visibility(cross), air temperature (diamond), dew-point temperature (closed circle), and wind bars(bottom) at Ulleung Do station during 21 -23 July 1999.	504
Fig. 3.32. Distributions of a) air temperature and wind and b) mixing ratio and wind for the selected fog case averaged during 21 - 23 July 1999.	505
Fig. 3.33. Time - latitude plots of simulated Qc+ Qr and LWC(Liquid Water Contents) at the lowest level of the model along 131oE of East Sea across Ulleung Do for a) EXP-1, b) EXP-2, c) EXP-3, and d) EXP-4.	506
Fig. 3.34. Time series of simulated a) visibility and b) fog depth at Ulleung Do during 21 - 23 July 1999.	507
Fig. 3.35. Same as Fig. 3.31, but for during 29-30 July 1999.	509
Fig. 3.36. Same as Fig. 3.32, but for during 29 - 30 July 1999.	510
Fig. 3.37. Same as Fig. 3.33, but for during 29 - 30 July 1999.	511
Fig. 3.38. Same as Fig. 3.34, but for during 29 - 30 July 1999.	512
Fig. 3.39. Same as Fig. 3.31, but for during 27- 29 July 2000.	513

Fig. 3.40. Same as Fig. 3.32, but for during 27 - 29 July 2000.	54
Fig. 3.41. Time - latitude plots of simulated LWC(Liquid Water Contents) at the lowest level of the model along 131oE of East Sea across the Ulleung Do during 27 - 29 July 2000 for a) EXP-3 and b) EXP-4.	515
Fig. 3.42. Same as Fig. 3.41, but for during 5 - 7 August, 1999.	55
Fig. 3.43. Same as Fig. 3.41, but for during 16 - 18 June, 2000.	56
Fig. 3.44. Same as Fig. 3.41, but for during 19 - 20 June, 2000.	56
Fig. 3.45. Same as Fig. 3.41, but for during 7 - 8 August, 2000.	57
Fig. 3.46. Same as Fig. 3.41, but for during 29 - 30 August, 2000.	57
Fig. 3.47. Same as Fig. 3.31, but for during 12 - 14 July, 1999.	519
Fig. 3.48. Same as Fig. 32, but for during 12 - 14 July, 1999.	520
Fig. 3.49. Same as Fig. 3.33, but for during 12 - 14 July, 1999.	521
Fig. 3.50. Same as Fig. 3.34, but for during 12 - 14 July, 1999.	522
Fig. 3.51. Same as Fig. 3.31 , but for during 4 - 6 July, 2000.	523
Fig. 3.52. Same as Fig. 3.32, but for during 4 - 6 July,2000.	525
Fig. 3.53. Same as Fig. 3.41, but for during 4 - 6 July, 2000.	526
Fig. 3.54. Same as Fig. 3.41, but for during 4 - 6 July, 2000.	526
Fig. 3.55. Same as Fig. 3.31, but for during 2 - 4 July, 1999.	527
Fig. 3.56. Time - latitude plots of simulated LWC(Liquid Water Contents) from EXP4 at the lowest level of the model along 131oE of East Sea crossing Ulleung Do during 2 - 4 July, 1999.	528
Fig. 3.57. Same as Fig. 3.34, but for during 2 - 4 July, 1999.	528
Fig. 3.58. Same as Fig. 3.31, but for during 18 - 20 August, 1999.	529
Fig. 3.59. Same as Fig. 3.41, but for during 18 - 20 August, 1999.	529
Fig. 3.60. Schematic diagram of fog model verification experiment for each of 276 model integration.	531
Fig. 3.61. Fog duration observed at Ulleung Do for a) July-August, 1999, b) June-August, 2000 and c) June-August, 2001.	535
Fig. 3.62. Same as Fig. 3.61, but for the number of times of visibility below 10 km.	535
Fig. 3.63. Same as Fig. 3.62, but for the model result.	538
Fig. 4.1. The monthly frequency of foggy day in Ulleung Do.	538

Fig. 4.2. The vertical distribution of temperature T_a , dew point T_d and wind on the skew T-log p diagram, 00 UTC ~ 18 UTC May, 27.	645
Fig. 4.3. The same as Fig. 4.2. except for 00 UTC ~ 18 UTC May, 28.	745
Fig. 4.4. The same as Fig. 4.2. except for 00 UTC ~ 18 UTC May, 29.	845
Fig. 4.5. The same as Fig. 4.2. except for 00 UTC ~ 18 UTC May, 30.	945
Fig. 4.6. The same as Fig. 4.2. except for 00 UTC ~ 18 UTC May, 29. 00 UTC May 31, 2000 during the sea fog event.	6
Fig. 4.7. The variation of air temperature, sea surface temperature, relative humidity during the observation period.	552
Fig. 4.8. The fluctuation in (a)visibility (b)humidity (c)temperature (d) pressure on May, 2000.	52
Fig. 4.9. The fluctuation in (a)visibility (b)wind direction (c)wind speed (d) precipitation on May 2000.	53
Fig. 4.10. The same as 4.3 except for May 22-31, 2001.	45
Fig. 4.11. The same as 4.4 except for May 22-31, 2001.	55
Fig. 4.12. Surface weather chart, (a)the beginning (b)the middle, (c)the last of fog event in May 22, 2000.	5
Fig. 4.13. Surface weather chart, (a)before and (b)after foggy hour in May 24, 2000.	57
Fig. 4.14. The photos of Sea fogs during (a)fog formation(22 UTC May 24, 2000) (b)fog dissipation(01 UTC May 25, 2000).	5
Fig. 4.15. Surface weather chart, (a)the beginning (b)the middle, (c)the last foggy + rainy hour in May 26-27, 2000.	55
Fig. 4.16. Surface weather chart, (a)before (b)under (c)after foggy hour in May 30-31, 2000.	5
Fig. 4.17. Sea Surface Temperature in East sea during foggy day(May, 22~29, 2000) in Ulleung Do.	50
Fig. 4.18. (a)The photo of Sea fogs, 00 UTC, (b) The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4), 19:57 UTC, (c)The distribution of ceiling height and relative humidity, 18 UTC 24 May, 2000.	51
Fig. 5.1. It is take a picture of the installation of visibility monitoring system.	55

Fig. 5.2. Visibility monitoring system and the part of this equipment.	565
Fig. 5.3. The wireless automatic weather system.	566
Fig. 6.1. WAVEWATCH-III first model domain and KMA(1-3) and JMA(4) buoy points. Box areas are second and third domains, respectively.	575
Fig. 6.2. Basic program flow chart.	578
Fig. 6.3. Basic program execution flow chart.	578
Fig. 6.4. The main web page of Marine Meteorology and Earthquake Research Laboratory.	579
Fig. 6.5. The main menu of the wave prediction system using WAVEWATCH-III model operated by marine meteorology and earthquake research laboratory.	580
Fig. 6.5.1. The model output capture image at the WAVEWATCH-III web page. This page shows the result of first domain.	580
Fig. 6.5.2. The same as Fig. 6.5.1 except for second domain.	581
Fig. 6.5.3. The same as Fig. 6.5.1 except for third domain.	582
Fig. 6.6. The same as Fig. 6.5.1 except for global area.	583
Fig. 6.7. The same as Fig. 6.5.1 except for Cheju-domain.	584
Fig. 7.1. Track of the typhoon PRAPIROON (black circle) and SAOMAI(white circle) and corresponding time(UTC).	585
Fig. 7.2. Comparison between observed data of buoy at (a)East-China sea, (b)Chilbal, (c)Dukjok, and (d)Gojae island and wave model input data which is calculated by MM5 model during typhoon event. Black circles indicate sea surface winds by buoy recorder and solid lines indicate predicted sea surface winds by MM5 model.	588
Fig. 7.3.1. Distribution of significant wave height calculated by the WAVEWATCH-III during PRAPIROON event.	590-8-5
Fig. 7.3.2. The same as Fig. 7.3.1 except for SAOMAI event.	590
Fig. 7.4. (a) Comparison between observed data (dotted line) of buoy at East China Sea and calculated significant wave height (solid line) calculated by WAVEWATCH-III model during typhoon event. (b) Scatter plot between above two results and linear regression line.	591
Fig. 7.5. (Left Panel) Comparison between observed of buoy at (a) Chilbal,	

(b) Dukjok, and (c) Gaujae island and calculated significant wave height by the WAVEWATCH-III model during typhoon event. Black cycles indicate significant wave height by KMA buoy and solid lines indicate significant wave height by WAVEWATCH-III. (Right panel) Scatter plot between above two results, and linear regression line.	594
Fig. 7.6. The same as Fig. 7.5 except for wave direction.	595
Fig. 7.7. The same as Fig. 7.5 except for wave period.	595
Fig. 7.8. Sea surface wind speed and direction by the model output and 5 point buoy observation data according to prediction time.	598
Fig. 7.9. The same as Fig. 7.8 except for significant wave height.	599
Fig. 7.10. The same as Fig. 7.8 except for wave direction.	600
Fig. 7.11. Correlation coefficient between model output and observation buoy data according to prediction time during April in 2002.	601
Fig. 8.1. Real topography (Left) and semi-flat topography (Right) for numerical experiment about bottom friction effect.	602
Fig. 8.2.1. The difference between model output applied in real topography and semi-flat topography during PRAPIROON typhoon event. Red color indicates over-estimating result applying in semi-flat topography.	603
Fig. 8.2.2. The same as Fig. 8.2.1 except for SAOMAI event.	604
Fig. 8.3. 3-D mesh plot of the bottom topography applied in 0.2°(EXP.1), 0.1°(EXP.2), and 0.05°(EXP.3), respectively.	605
Fig. 8.4. Comparison between observed significant wave height of the buoy at Chilbal island (dotted line) and calculated significant wave height (solid line) by the WAVEWATCH-III model in the (a) 0.05°,(b) 0.1°,and (c) 0.2°resolution, respectively, during typhoon event.	607
Fig. 8.5. Wave number and frequency relationship with opposing(a) and following(b) current. (after Oh and Kim, 1992)	609
Fig. 8.6. The position of KMA ocean and meteorology buoys.	616
Fig. 8.7. Time series of wave speeds(blue line) and significant wave heights(red line) and cross correlation results between two parameters.	612

Fig. 8.8. Time series of deviation between wind speed and significant wave height(left panel) and power spectrum(right panel).	614
Fig. 8.9. Stick vector diagram of wind field and wave field. Lower panels indicate enlargement figures when wind speed is weak.	615
Fig. 8.10. The horizontal distribution of the calculated current vector on January (after Jang et al. 2002)	616
Fig. 8.11. The horizontal distribution of the sea surface winds on June which is applied to wave model as initial condition.	617
Fig. 8.12. The horizontal distribution of the difference of significant wave height on June between model outputs which uncoupled and coupled with current fields, respectively.	618
Fig. 8.13. The same as Fig. 8.11 except on November.	616
Fig. 8.14. The same as Fig. 8.12 except on November.	618
Fig. 8.15. The horizontal distribution of the calculated current vector of warm eddy in the East Sea.	618
Fig. 8.16. The horizontal distribution of the sea surface winds on June which is applied to wave model as initial condition in the East Sea.	622
Fig. 8.17. The horizontal distribution of the difference of significant wave height between model outputs which uncoupled and coupled with anti-cyclonic eddy type current fields.	623
Fig. 8.18. The same as Fig. 8.17 except for wave direction.	624
Fig. 8.19. Stick vector diagram of wind field and wave field which is convoluted by 5 day low pass filter.	624
Fig. 9.1. Job schedule of wave prediction system.	625
Fig. 9.2.1. Distribution of monthly mean sea surface winds from January to April in 2001.	627
Fig. 9.2.2. The same as Fig. 9.2.1 except for May to August.	628
Fig. 9.2.3. The same as Fig. 9.2.2 except for September to December.	628
Fig. 9.3.1. Distribution of monthly mean significant wave height from January to April in 2001.	630
Fig. 9.3.2. The same as Fig. 9.3.1 except for May to August.	631
Fig. 9.3.3. The same as Fig. 9.3.1 except for September to December.	631
Fig. 9.4.1. Distribution of monthly mean deviation of significant wave height	

from January to April in 2001.	633
Fig. 9.4.2. The same as Fig. 9.4.1 except for May to August.	64
Fig. 9.4.3. The same as Fig. 9.4.2. except for September to December.	65
Fig. 9.5.1. Distribution of monthly mean wave length from January to April in 2001.	636
Fig. 9.5.2. The same as Fig. 9.5.1 except for May to August.	67
Fig. 9.5.3. The same as Fig. 9.5.2 except for September to December.	68
Fig. 9.6.1. Distribution of monthly mean wave period from January to April in 2001.	639
Fig. 9.6.2. The same as Fig. 9.6.1 except for May to August.	64
Fig. 9.6.3. The same as Fig. 9.6.1 except for September to December.	66
Fig. 9.7.1. Distribution of monthly mean wave direction from January to April in 2001.	642
Fig. 9.7.2. The same as Fig. 9.7.1 except for May to August.	64
Fig. 9.7.3. The same as Fig. 9.7.1 except for September to December.	66

제 1 장 서 론

기상예보관을 비롯한 대기과학자, 군사작전 전문가, 해양관련 산업 및 어업 종사자 그리고 실시간 자연환경정보를 얻으려는 사용자들에 이르기까지 해상에서 발생하는 해양환경 예측자료를 필요로 하고 있다. 해상에서 발생하는 악기상의 예로써 태풍, 폭풍, 해일 그리고 안개나 강수 등에 의한 저 시정 등이 있다. 특히 평균 10m/s 이상의 강한 해상풍이 불 때, 높은 파고에 의해 야기되는 폭풍이나 저 시정을 야기시키는 해무는 해상에서 일어나는 악기상들 중 가장 빈번히 발생하는 기상현상 중의 하나이다. 해무에 의한 저 시정과 파랑현상에 의한 높은 파고는 해상 활동을 저하시키고 선박의 좌초 등 경제적 손실과 인명 피해와 직관되기도 한다. 군사적인 측면에서도 해무와 파랑은 작전 능력을 약화시키는 주요한 자연적 원인이기도 하다. 따라서 해무와 파랑의 발생을 보다 정밀하게 예측하고 기술을 확보하는 것은 단순한 예보 기술적 차원을 넘어 사회·경제·군사적으로도 중요하다. 본 연구는 대기-해양 상호작용의 비교적 짧은 시-공간 스케일을 가진 해무와 파랑이라는 크게 두가지 주제에 집중해서 예측 기술 확보라는 범위에 집중되어 수행되었다.

해무 예측 기술을 향상시키는 것은 대단히 어렵는데 그 주된 원인은 해양에서의 관측자료의 부족 때문이다. 관측 자료의 부족으로 해무 예측 실험 결과를 검증하기도 어려울 뿐만 아니라 발생 초기 조건을 생산하기도 힘들다. 따라서 지금까지의 연구를 살펴보면 대부분 예측보다는 해무 발생에 대한 통계적 분석 등 학술적인 방향에 치우쳐 있다. 해무 발생에 대한 객관적인 예측을 위해서는 앞으로의 해무 연구는 해무에 대한 수치 실험을 통하여 이루어져야하며 이로부터 해무의 시공간적 분포와 이동 및 발달 등을 살펴봄으로써 해무 예측의 가능성이 제시하여야 한다. 이를 토대로 하여 해무의 발생 및 유지 기구를 이해하고 이를 통해 해무의 예측성을 높이는 작업이 필요하다.

안개(fog)란 기상학적으로 비, 눈, 우박, 이슬, 서리 등과 같이 대기 중의 수증기가 모여 발생하는 현상으로, 수평 시정이 1 km 미만일 때를 일컫는다. 일반적으로 안개(fog)는 수증기 공급이 충분한 강이나 하천, 호수, 바다 등에서 빈번히 발생하며, 비가 온 후에 우적의 증발에 의해서 많이 발생하기도 하는 것으로 알려져 있다(기상학회, 1999). 안개가 발생하는 역학은 구름이 발생하는 역학과 기본적으로 유사하다. 구름은 대기중의 수증기가 응결되는 현상으로 지표에서 높은 고도에서 발생하는 기상현상이지만 안개는 지표 근처에서 발생하는 것이 다를 뿐이다. 때로는 하층운이 지면으로 하강하여 구름의 바닥이 지면에 닿아서 발생하기도 한다.

안개의 발생 역학의 가장 기본은 응결이다. 일반적으로 응결은 대기중에 충분한 응결핵이 존재하고 증기압이 포화수증기압에 도달할 때 발생한다. 응결핵이 충분한 바다나 대도시에서 발생하는 안개의 경우 상대습도가 100%이하 일때도 안개가 빈번히 발생하는 것은 응결핵이 안개 발생에서 차지하는 역할이 크다는 것을 의미

한다. 특히, 흡습성의 응결핵이 풍부한 해안에서는 일반적으로 90%이하의 불포화 상태에서도 해무가 발생하기도 한다.

대기중의 수증기가 포화에 이르는 과정은 몇 가지로 나눌 수 있는데, 먼저, 기온이 이슬점 온도까지 하강함에 따라 수증기가 응결하는 냉각에 의한 과정과 충분한 수증기의 공급에 의한 응결과정 그리고 혼합에 의한 응결과정으로 구분할 수 있다. 그러나 대부분의 안개는 이러한 과정이 복합적으로 작용하여 발생하기 때문에 안개가 발생하였을 경우 어느 한 과정에 의해 발생하였다고 할 수는 없다.

동해 해상에서 발생하는 해무는 주로 장마 전선에 동반되어 나타나거나 연해주 지역이나 동해 북부 해상에 형성되는 찬 고기압의 영향으로 형성된다(기상청, 1997). 동해상에서 북동기류에 의해 차고 습한 공기덩이가 상대적으로 따뜻한 해상으로 이동하면서 해양에서의 기단변질에 의해 혼합층이 발달하면서 안개 혹은 층운형의 구름이 발생하게 되는 현상을 Yamase 현상이라고 하는데 이때의 해무는 증기 안개의 성격을 띄게 된다(Kikuro et. al., 1998). 동해안을 따라 발생하는 안개의 경우는 연해주 지역에서 남하하는 북한 한류와 태백산맥을 넘으면서 고온 건조해진 기류의 영향으로 발생하기도 한다. 또한 쿠로시오 난류의 지류인 대마난류가 대한해협을 통과하여 북상하는 동한 난류에 의해 소규모 에디의 운동이 활발하게 일어나는 해양학적 특성으로 대기-해양 상호작용이 매우 활발히 일어나는 동해상에서 발생하는 해무의 발생학적 기구는 일반적으로 복잡하다(김해동, 1997).

해표면에서 일어나는 현상중 인간의 해상활동에 크게 영향을 미치고 있는 파랑의 발생 및 성장 기작에 관한 모의는 그 동안 비교적 체계적으로 연구되어 왔다(Phillips(1957,1958), Miles(1957, 1960) and Hasselmann, K.(1962)). 이론의 주요한 주제들은 수면파의 전파 과정, 바람에 의한 수면파의 형성, 주기가 서로 다른 수면파 사이의 상호작용 및 수면파의 소산과정 등의 통계적 기술 방식들이었다. 특히 Hasselmann(1962)에 의한 원천함수의 일반적 표현이 가능해 짐에 따라, 오늘날의 수치모델에도 그대로 적용되고 있는 실정이다. 현재 세계 거의 모든 나라의 기상청 등은 해양기상 관측 부이 자료의 부족에 기인하여 파랑예보를 수치모델에 의존하여 현업적으로 운영하고 있는 상태이다. 그러므로, 근래의 파랑 현상에 관한 연구들은 대부분 수치모델에 의존하고 있는 실정이다.

성분과 상호간의 비선형 에너지 전달항의 취급 형태에 의해 1985년 SWAMP(Sea Wave Modelling Project) 그룹에 의해 나뉜 파랑모델은 1세대, 2세대, 3세대로 분류되었으며, 현재 한국의 기상청에서 현업적으로 사용되고 있는 모델은 독인 DKRZ 연구소 Hasselmann이 주축이 된 WAMDI(Wave Model Development and Implementation Group)에 의해 개발된 WAM 모델이다. 최근에는 성분과 상호간의 비선형 에너지 전달항을 명시적으로 계산하며, 시-공간적으로 변화하는 해상풍 및 해류, 조류의 효과와 에너지 소산, 해저면과의 상호작용에 의한 분산 작용까지 잘 묘사하고 있다고 보고되고 있는 WAVEWATCH-III 파랑모델에 의해 많은 모델들이 대

체되고 있는 실정이다(NOAA/NCEP).

본 연구에서는 2000년 여름철 동해안을 중심으로 속초, 동해, 묵호, 독도, 주문진, 태하 및 울릉도 기상대 및 관측소에서 관측한 시정을 비롯한 안개발생에 관련 있는 기상요소를 중심으로 동해의 해무 발생 특성을 살펴보았다.

또한, 제 3세대 파랑모델인 WAVEWATCH-III를 이용하여 웹기반의 실시간 파랑 예측 모델을 구축하였으며, 태풍기간의 사례를 대상으로 기상청 해양기상관측 감시 부이의 자료와 비교, 검증을 실시하였다. 이와 동시에 기상연구소의 해양기상연구실의 DUT-METRI-2000 (Dual Use Technology) 시스템에 의한 해무 예측성능을 검토해 보았으며 울릉도를 중심으로 관측 자료를 통한 위성에 의한 해무탐지 및 해무 예측 수치모형의 검증이 이루어졌으며, 3차원적인 대기 운동이 모두 고려되는 중규모 대기 역학 모형을 이용하여 동해상에 발생하는 해무의 이동 및 발달을 살펴보고 모형에 의한 예측 가능성을 제시하였다.

이러한 연구를 바탕으로 해무 및 파랑 예측 모형의 성능 평가 및 이용 가능성을 살펴보고자 하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1. 국내 기술 개발 현황

지금까지의 해무에 관한 국내 연구는 특정지역에서 발생하는 안개의 발생학적 특성을 안개 발생시 기상요소 분석을 통하여 그 물리적 기구를 이해하고 규명하고자 하였다(김과 이, 1990; 변 등, 1997; 전 등, 1999). 그리고 안개 발생 및 소산의 특성 규명뿐만 아니라 안개의 예측을 위한 연구 역시 1970년 이후 계속 진행되어 왔으나 대부분의 연구가 특정지역에 대한 통계모형 개발에 편중되어 왔다. 예로써 이(1975)는 전주 지방에서의 가을철·겨울철의 안개 예상도를 일몰시 기온과 노점온도, 22시의 기온을 이용하여 작성하였으며, 봄철 동해안에 발생하는 복사무 예보에 대한 예상도를 제시하였다. 그리고 기상연구소(1986)와 오(1995)는 각각 3시간 단위와 1시간 단위의 자료를 이용한 통계모형을 개발하였다.

이와 같이 현재까지 우리나라에서 사용되거나 적용하였던 안개 예보 모형들은 임의 지역에서만 적용가능하며 또한 객관적 기준에 의한 방법이라기보다 실무자들의 경험을 바탕으로 한 것이 주를 이루었다. 즉, 관측자료의 부재와 발생역학에 대한 이해 부족으로 해무 발생의 물리적 특성연구와 통계적 방법으로서의 발생 가능성 추정을 하는 수준의 연구가 대부분이었다. 그러나 연근해에서 빈번히 발생하는 해무에 대한 경제적, 사회적, 기상학적 측면을 고려해 볼 때 아직까지 실시간 해무 예보에 대한 연구개발은 대단히 미흡한 실정이다.

이처럼 관측의 어려움과 이류에 의한 비선형 효과가 큰 해무의 예측은 수치모형에 의한 객관적인 연구가 필요하다. 그러나 아직까지 국내에서는 모형에 의한 해무 예측 모형에 대한 연구가 거의 없으며, 본 연구에 의한 해무 예측 모형 개발이 시초가 된 것으로 사료된다.

지금까지의 파랑모형에 관한 국내외의 연구 결과들은 다음과 같다.

기상청 수치예보과에서는 1992년 극동아시아 예보 모델 운영에 따른 해상풍 모델(Cardone Model) 및 1세대 파랑 모델(DSA-5)의 운영을 시작으로, 1996년에는 천해(40km) 및 심해(80km) 파랑 모델을 운영하기 시작하였다. 1998년에는 0.5도의 분해능을 가지는 제 3세대 파랑모형(WAM)의 현업화 구축을 연구하였으며, 1999년도에는 30km로 영역 분해능을 확장하였으며, 전구 파랑 예보 시스템(GoWAM)의 현업 운영을 시작하였다.

이와같이 현재까지 우리나라에서 적용되었던 파랑현상에 관한 연구들은 대부분 모델 적용에 관한 부분이고, 파랑의 물리적 현상 자체에 관한 독립적인 연구는 거의 전무한 상태이다. 1960년대 이후로 특별한 새로운 파랑 이론이 제창되지 못한 것은 실정에서 앞으로의 연구 방향은 심도 있는 파랑현상에 대한 물리적 고찰과 더불어 우리나라 주변 해양환경에 잘 맞는 모델을 적용하고 비교적

많은 파랑 사례 분석을 통해 검증하는 과정이 중심이 될 것이다.

2. 국외 기술 개발 현황

국외에서도 통계적인 방법이나 관측자료를 근거한 안개 예보법이 개발되어왔다(Leipper, 1994). 일반적으로 통계적 방법에 의한 예측법은 predictors(임의의 기상변수)와 predictant(해무 또는 안개)의 상관관계를 근거로 마련된다. 그러나 이러한 상관 관계는 대상 지역에 따라 달라지고 관측값의 결점이 그대로 반영될 수 있다. 무엇보다도 통계적 방법에 의한 해무 예측 및 특성 이해의 문제점은 predictor와 predictant간의 상관관계는 정확한 안개 발생원인에 대한 물리적 역학 규명에는 이용될 수 없다는 것이다. 따라서 최근에는 수치 모형이나 위성 자료를 이용하여 이러한 문제를 해결하고자 하는 노력이 진행되고 있다.

다양한 접근법 중에서 수치모형을 이용한 안개 예측 및 모사는 Taylor(1917) 이후 지속적으로 진행되고 있다. 대부분의 선행 연구자들은 안개의 운동 및 역학을 경계층 모형의 모수화와 연계시켜 해결하고자 하였다(Brown and Roach, 1976; Musson, 1987; Gayno, 1995). Oliver 등(1978)은 안개나 저층운의 발달에 있어서 난류의 수송과 복사적인 수송의 역할을 비교함으로써 난류 운동의 중요성을 제시하였다. 그리고 안개나 구름이 있는 경계층 내의 역학 및 물리 과정은 기본적으로 turbulent-radiative theory에서 기인함을 주장하였다. Musson(1987)은 1-D 경계층 모형에 안개의 미세 물리과정인 아격자 규모 응결과정과 과성장한 안개 물량의 gravitational settling 효과, 안개가 발생함에 따른 단파와 장파복사와의 상호 작용에 대한 모수화를 적용하여 모형에 의한 안개 모사 능력을 보여주었다. 이처럼 대부분의 선행 연구자들은 해무의 객관적인 예측 기술을 확보하기 위하여 1-D이나 3-D의 경계층 모형을 이용하여 안개 발생 시 야기되는 미세 물리 과정에 대한 모수화를 통하여 문제를 해결하고자 하였다. 안개의 발달과 소산에 있어서 간과할 수 없는 물리과정이 난류 운동이다.

난류는 3차원적인 운동을 하는 소용돌이로 열, 에너지, 운동량 등의 수송의 역할을 한다. 따라서 경계층 모형의 개발에 있어서 난류의 정확한 모사는 매우 중요하며, 이것이 모형 개발에 있어서 기본적인 요소가 되어왔다. 그러므로 대기가 포화되어 응결에 이르기 위해서는 난류에 의한 혼합이 중요하며, 결국은 안개의 발생과 발달에 있어 중요한 역할을 하게된다(Gayno, 1995; Musson, 1987; Wang, 1996). Bechtold et al.(1992)은 해양 경계층에서 격자내 구름량을 진단할 때, 난류 운동에너지의 예단 방정식으로부터 난류의 교환계수를 모수화하여 고려하였으며, 아격자 규모 응결 모수화에서도 습윤 물리량의 난류적 섭동치에 대한 정보가 필요하다(Sommeria and Deardroff, 1977). 그러나 대부분

의 현업 모델에서는 이와 같은 고차원의 난류 운동 방정식을 고려하지 않고 있다. 이는 적분 시간이 많이 걸리는 단점 때문이다.

그러나 최근에는 대형 컴퓨터의 발달에 따라 안개 발생의 미세 물리과정에 대한 모수화 과정이 고려된 경계층 모형을 현업 모델에 접합하여 이용하고자 하는 시도가 늘어나고 있다. 예를 들어 Ballard et. al.(1991)은 The United Kingdom Meteorological Office(UKMO)의 중규모 모형에 복잡한 미세 물리 과정을 고려한 경계층 모형을 포함시켜 North Scotland에서의 해무 모사 능력을 보여주었다. 또한 Gayno(1995)는 난류속 모수화를 개선하여 모형을 이용한 안개 예측이 향상될 수 있음을 보였다. 최근에 Teixeira(1999)는 ECMWF 모형을 이용한 예단적 구름 방안으로 전구 수치 예보 모형을 이용하여 안개를 모사하고자 하였다.

선진 외국의 경우에도 해무의 예측에 대한 기술 수준은 악기상시 해양에서의 관측 부재와 이로 말미암은 모형 초기 및 경계조건의 부정확성 그리고 모형 자체의 불확실성 때문에 해무 예측은 악기상과 관련한 예보에서 가장 어려운 부분 중의 하나로 알려져 있다.

이론적인 부분에서 파랑의 발생 및 성장 기작에 관한 모의는 국외의 대학이나 연구소를 중심으로 그 동안 비교적 체계적으로 연구되어 왔다(Phillips(1957,1958), Miles(1957, 1960) and Hasselmann, K.(1962)). 이론의 주요한 주제들은 수면파의 전파 과정, 바람에 의한 수면파의 형성, 주기가 서로 다른 수면파 사이의 상호작용 및 수면파의 소산과정 등의 통계적 기술 방식들이었다. 또한 평균 흐름(U)인 해류, 조류 등에 의한 효과가 파랑 에너지에 미치는 영향에 대한 이론적인 부분도 그동안 많은 학자들에 의해서 체계적으로 연구되어져 왔다(Peregrine(1976), Christoffersen(1982), Tolman(1991), Oh and Kim(1992)). 특히 멕시코 만류나 쿠로시오와 같이 강한 해류가 존재하는 해역에서는 파랑 스펙트럼에 있어서 시공간적 변조가 강하게 나타난다는 사실이 제시되었다(Komen et al.(1994), Holthuijsen and Tolman(1991)).

Gelci(1956,1957)에 의해 최초로 시도되었던 파랑 수치 모델은 JONSWAP(Hasselmann et al, 1973), SWAMP(SWAMP Group, 1985), SWIM(SWIM Group, 1985) 등의 프로젝트들에 의해 급속도로 발전되어져 왔다. 파고, 파장, 파주기 및 파향 등의 여러 파장 인자들에 대한 스펙트럼 방법에 기반을 둔 파랑 모델 중 본 연구에서 사용된 WAVEWATCH-III는 미국 Delf 대학에서 Tolman에 의해 처음 개발되었으며(WAVEWATCH-I),NASA에서 WAVEWATCH-III로 발전되었다. 현재는 NOAA/NCEP에서 WAVEWATCH-III로 발전된 모델을 현업적으로 운영하고 있으며, 본 연구에서도 이 부분에 관한 내용들을 심도 있게 다룰 것이다.

제 3 장 연구개발의 내용 및 범위

제 1 절 동해안의 해무발생 특성 분석

1.1 개요

동해 해상에서 발생하는 해무는 주로 장마 전선에 동반되어 나타나거나 연해주 지역이나 동해 북부 해상에 형성되는 찬 고기압의 영향으로 형성된다(기상청, 1997). 동해상에서 북동기류에 의해 차고 습한 공기덩이가 상대적으로 따뜻한 해상으로 이동하면서 해양상에서의 기단변질에 의해 혼합층이 발달하면서 안개 혹은 층운형의 구름이 발생하게 되는 현상을 Yamase 현상이라고 하는데 이때의 해무는 증기 안개의 성격을 띠게 된다(Kikuro et. al., 1998). 또한 동해안을 따라 발생하는 안개의 경우는 연해주 지역에서 남하하는 북한 한류와 태백산맥을 넘으면서 고온 건조해진 기류의 영향으로 발생하기도 한다. 한편, 쿠로시오 난류의 지류인 대마난류가 대한해협을 통과하여 북상하는 동한 난류에 의해 소규모 에디의 운동이 활발하게 일어나는 해양학적 특성으로 대기-해양 상호작용이 매우 활발히 일어나는 동해상에서 발생하는 해무의 발생학적 기구는 일반적으로 복잡하다(김해동, 1997).

강릉지방기상청에서 지난 30년 동안 발생한 안개 월별 발생빈도를 분석해 보면 동절기인 1,2,11,12월의 발생빈도는 거의 전무함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 동해안 지방의 지형특색으로 기인한다고 볼 수 있다. 즉 태백산맥으로부터 동쪽으로 경사를 이루어 복사무의 발생이 어려운 지형 특징을 가지고 있어 이 지역은 과무(寡霧)지역으로 한국의 안개 기후구에 분류되고 있다(金聖三, 1970). 반면에 동해안의 월별 안개발생빈도를 조사해 보면 4월에서 9월까지의 안개 발생빈도가 90%이상을 차지하고 있음을 알 수 있다. 이 안개는 봄과 여름철에 상대적으로 찬 해수면 위로 이루어지는 따뜻한 기단이 냉각, 포화되어 생기는 이류무로써 바닷가 근처의 해안을 따라서 이류하면서 발생하는 병풍모양의 안개가 발생한다. 이 안개는 해상에서 발생하여 해안가로 이류하면서 발생하기 때문에 이와 같은 이류무를 해무(Sea Fog)라 불리운다.

이와 같이 해상에서 발생하는 해무는 주변의 종관적 특성뿐만 아니라 해양학적 특성에 따라서 그 발생 빈도가 계절적·지역적인 차이를 나타내기도 한다. 따라서 2장에서는 지역적인 해무발생 특성을 기상인자와 연관하여 발생 및 소멸 패턴을 분류하고 통계적인 특성을 파악하고자 한다.

1.2 자료

본 연구에서는 관측지역에 따라 동해안 연안지역과 해상지역(독도, 울릉도)으로 나누었고, 연안지역을 다시 관측기관에 따라 기상청(KMA: Korea Ministration Administration) 지상관측지점인 속초, 강릉, 동해와 등대관측소인 대진, 묵호, 주문진, 태하로 분류하여 분석하였다. 안개발생 특성을 분석하는데 있어서, 기상청 자료는 1970년에서 2001년까지의 자료를 사용하였고, NOAA/VHRR 안개탐지 영상자료 및 등대관측자료는 2000년 한 해의 자료를 사용하였다. 안개발생빈도 및 안개지속 시간은 기상청에서 발간한 기상연보 및 기상통계표 등을 참고로 하였다. 등대 관측 자료는 해양수산부(MOMAF:Ministry of Maritime Affairs and Fisheries)의 협조로 입수하였다. 분석 방법으로는 안개발생빈도 분석으로서 년·월별 안개발생빈도, 최근 2년간 월별 안개발생빈도, 안개발생시간 분석으로서 2000년도 안개발생 및 소멸시간 분석, 평년 및 최근 2년간 월별 안개 지속시간 분석, 안개발생시 기상 상태 분석으로서 경년별 상대습도 분석, 월평균 상대습도, 안개발생시 상대습도 분포를 분석하였고, 바람장미로 도시화하여 평년 년별 및 계절별 바람장 분포와 평년 안개발생시 바람장, 최근 1년간 안개발생시 바람장으로부터 동해 연안 지역 및 해상지역에서의 안개발생특성을 비교분석 하였다.

Fig. 1.1은 본 연구의 연구지역과 비교대상지역을 나타내고 있으며 Table 1.1은 본 연구에서 통계분석을 위해 사용된 수집자료의 목록과 내용이다.

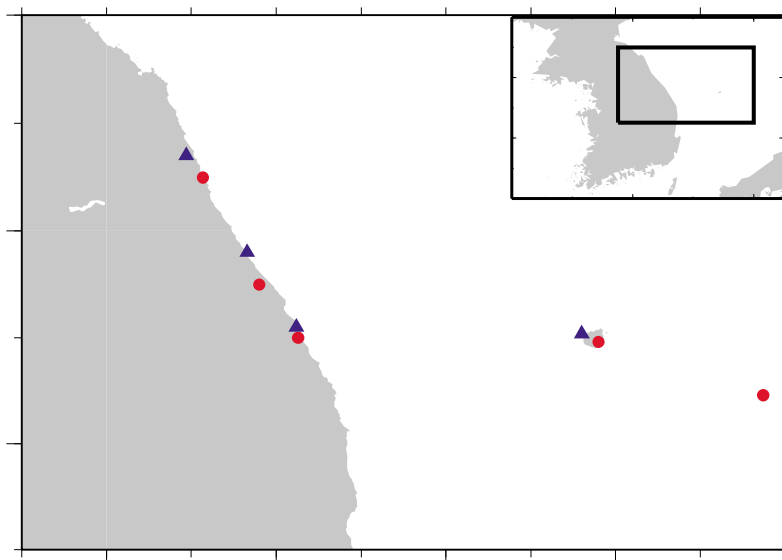


Fig. 1.1. The map of study area(▲:lighthouse, ●: KMA observation station).

Table 1.1. Information about data from observation station in east coast of Korea(KMA: Korea Meteorological Administration, MOMAF: Ministry of Maritime Affairs and Fisheries)

Data source	Station	Period	Variable
KMA	Sokcho	70. 1. 1 ~ 01.12.31	wind, visibility, wheather, cloud amount, T, Td, SLP, AP, RH
	Kangnung	70. 1. 1 ~ 01.12.31	
	Tonghae	92. 5. 1 ~ 01.12.31	
	Ulleung Do	70. 1. 1 ~ 01.12.31	
	Tokto	98.12.13 ~ 01.12.31	
MOMAF	Taechin	00. 5. 1 ~ 00.11.30	wind, visibility,WH, cloud amount
	Muk-ho	00. 5. 1 ~ 00.11.30	
	Chumunjin	00. 5. 1 ~ 00.11.30	
	Taeha	00. 5. 1 ~ 00.11.30	
KMA	Sea area	99. 1. 1 ~ 00.12.31	FOG, SST

1.3 해무 발생 빈도 분석

한반도 주변해역에서 관측된 해무 발생빈도를 살펴보면 서해, 동해, 남해상에서 각각 6월~7월, 6월, 7월에 해무발생 월이 집중되어있다(Fig.1.2). 다른 해역과는 달리 동해해역의 해무발생월의 특징은 5월부터 8월까지의 기간에 해무 발생빈도가 집중되어 있으며 다른 월에는 안개가 거의 발생하지 않고 있다.

기상청 지상관측지점(강릉, 동해, 속초, 울릉도)에서 1982년부터 2001년까지 년별 안개발생일과 평균 월별 안개발생일수를 알아보았다. 동해 연안에 위치한 강릉, 동해, 속초는 유사한 년별 변화를 보이나 울릉도는 연안역보다 최고 50일 이상 안개가 더 발생하여 상이한 분포를 나타내며, 1984년부터 1992년까지 감소하는 경향을 보였으나 2000년까지 증가하는 경향을 나타냈다. 연안에 위치한 세 지역 모두 1996년에 매우 높은 안개발생빈도(강릉: 35일, 동해: 36일, 속초: 27일)을 나타냈으며, 울릉도는 1998년에서 2000년까지 3년간 약 60일의 높은 안개발생을 나타냈다(Fig. 1.3). 연평균 안개발생은 강릉이 11.6일로 가장 낮고, 울릉도가 36.5일로 가장 높으며, 표준편차 값은 동해가 8.68로 작은 변동성을 보이며, 울릉도는 18.3으로 큰 폭의 변동성이 나타난다(Table 1.2). 월별 평균 안개 발생빈도를 보면 연안역에서는 안개 발생일이 동해(7.22일), 속초(5.15일), 강릉(3.1일) 순으로 6월에 최고 값을 보이고 7월과 8월에 감소하나 울릉도에서는 7월에 9.3일로 가장 높은 값을 보인다. 이는 김과 이(1970)의 남한 동해안 기후구의 결과와 일치하는 것이다. 강릉과 동해에서는 6월, 7월, 8월, 5월 순으로 안개가 발생했고, 연안과 가장 인접한 속초에서는 6월, 7월, 5월, 8월 순으로 안개가 발생하였다. 울릉도에서는 7월, 6월, 5월, 8월 순으로 안개가 발생하였으며, 이 결과는 변(1997)의 결과와 일치한다. 전 연구지역에서 9월에서 이듬해 3월까지의 발생빈도가 매우 작다. 이로부터

터 초봄, 가을, 겨울에 주로 발생하는 복사무보다는 여름에 주로 발생하는 이류무, 증기무가 연구지역에서 발생함을 알 수 있다. 또한 4-5월에 8-9월에 비해 온도가 높게 나타남에도 불구하고 안개가 더 많이 형성되는데, 이것은 4-5월에 표층해수가 가열되지 않아 해기차가 크게 나타나나 8-9월에는 표층해수의 온도가 올라가면서 해기차가 감소하여 나타난 현상이라고 할 수 있다. 안개발생에 기온 뿐 아니라 찬 표층해수가 영향을 주는 것을 추정할 수 있다. 연안역에서는 평균적으로 동해에서 가장 많은 안개발생을 보이나 최근 2년간에는 속초에서 다른 연안역보다 훨씬 높은 안개발생빈도를 나타냈다. 1년간 평균안개 발생일수는 울릉도, 속초, 동해, 강릉 순으로 나타났다(Table 1.3, Fig. 1.4).

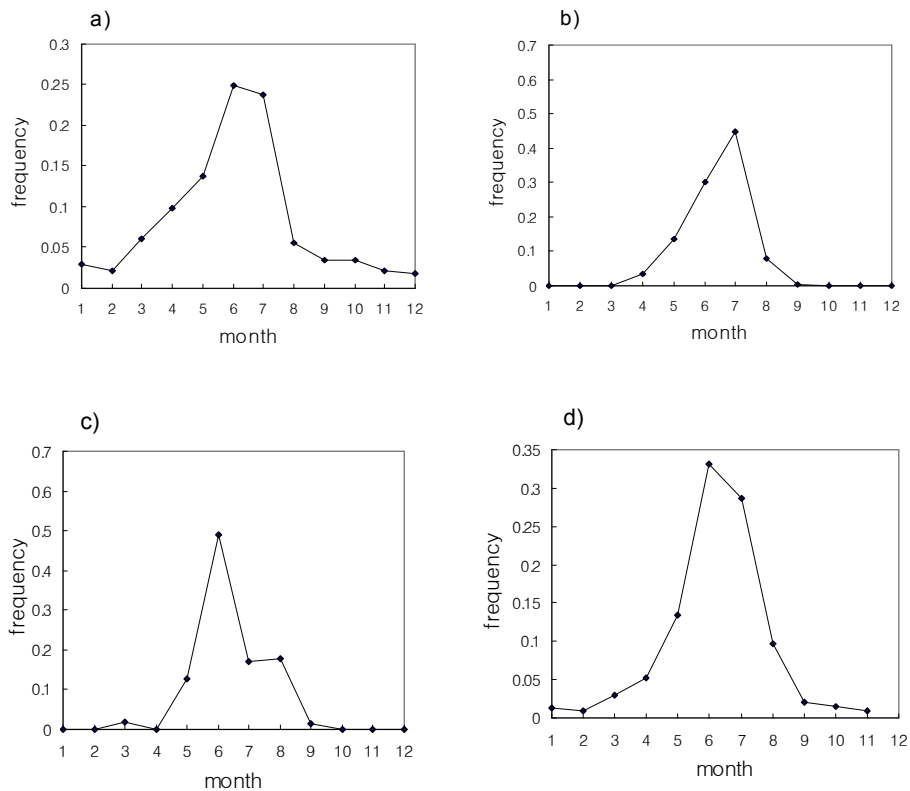


Fig. 1.2. Monthly frequency of fogs occurred around coastal area of Korea over period of 1992 to 1996. a) West coast, b) South coast, c) East coast, d) all around coastal area.

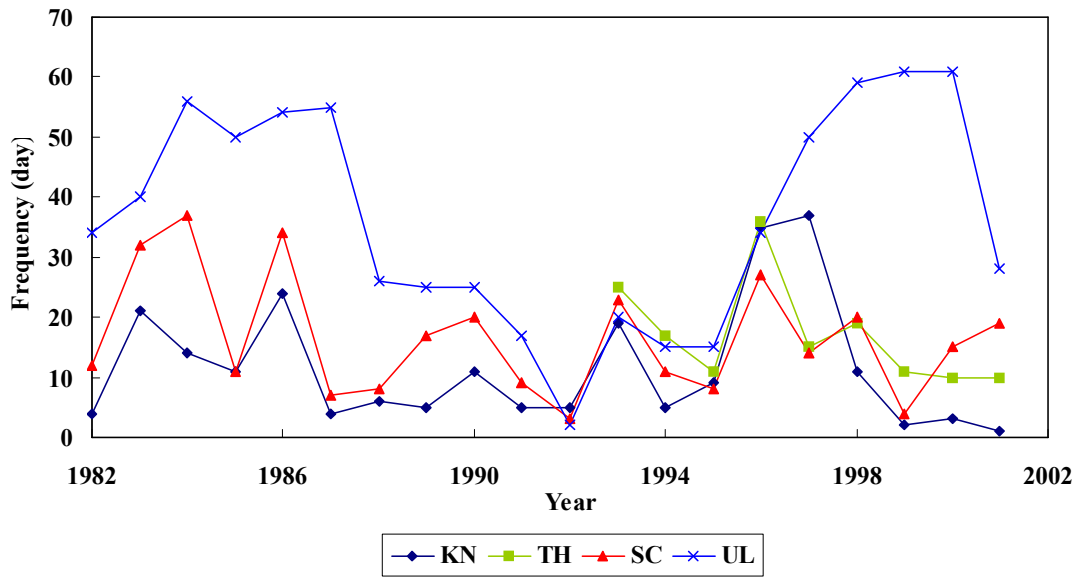


Fig. 1.3. Annual variation of frequency (days) of fogs occurred at Kangnung, Sokcho, Tonghae, Ulleung Do over the period of 1982 to 2001.

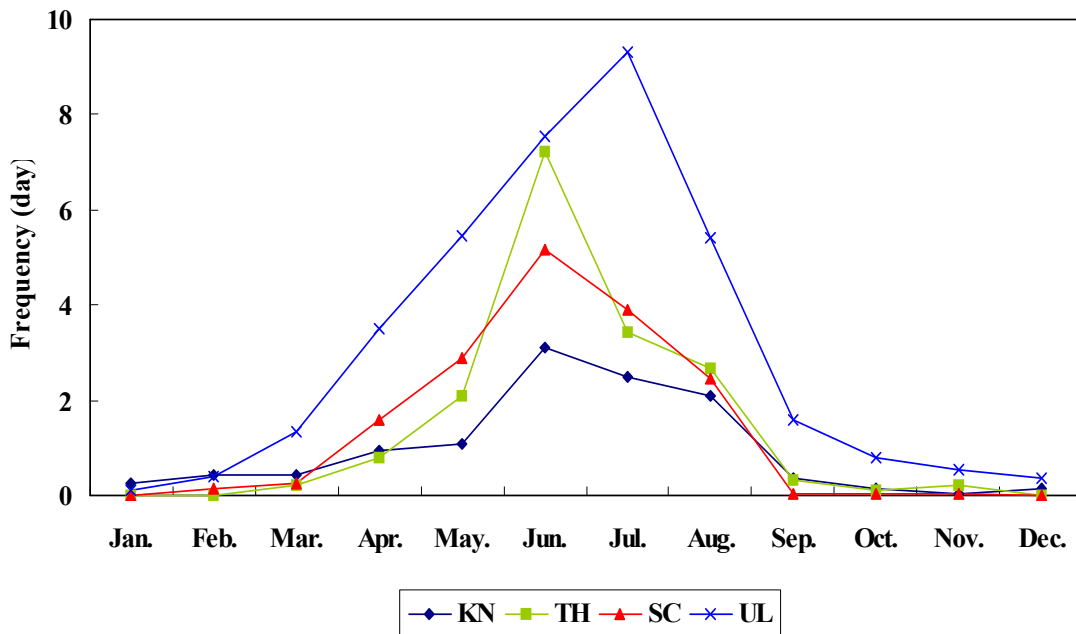


Fig. 1.4. The same as in Fig. 1.3. except for monthly average variation at the period of 1982 to 2001.

Table 1.2. The statistical analysis(maximum, minimum, average, standard deviation) about frequency of foggy day(unit: day).

	Kangnung	Sokcho	Tonghae	Ulleung Do
Max.	37	36	37	61
MIN.	1	10	3	2
AVE.	11.6	17.11111	16.55	36.35
STD	10.52	8.68	9.92	18.27

최근 2년간 (2000년, 2001년) 월별 안개발생을 분석하기 위해서 동해안 지역별 월별 안개발생빈도를 Table 1.3와 Table 1.4로 나타내었고, 월별 평균안개발생빈도, 2000년, 2001년 월별 안개발생빈도를 Fig. 1.4에 도시화하였다.

지역별 안개 발생건수를 살펴보면 2001년에 2000년에 비해 속초를 제외하고 안개발생일이 약 1/3로 감소하였고, 속초에서의 안개발생은 다른 연안지역에 비해 훨씬 높게 나타났다.

2000년에는 연안역에서 5월에 가장 높은 안개발생을 나타냈으며, 울릉도에서는 8월에 17일로 가장 많은 안개발생이 있었다. 2001년에는 주로 속초와 울릉도에서 6월에서 8월 사이에 안개가 발생했고 속초에서 6월, 울릉도에서는 7월에 가장 높은 안개발생을 나타냈다(Table 1.3, 1.4, Fig. 1.5).

Table 1.3. The frequency of monthly average foggy day in East coast of Korea.

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Total
	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	
Sokcho	0.00	0.15	0.25	1.60	2.90	5.15	
	3.90	2.45	0.05	0.05	0.05	0.00	16.55
Kangnung	0.25	0.45	0.45	0.95	1.10	3.10	
	2.50	2.10	0.35	0.15	0.05	0.15	11.60
Tonghae	0.00	0.00	0.22	0.78	2.11	7.22	
	3.44	2.67	0.33	0.11	0.22	0.00	17.11
Ulleung Do	0.10	0.40	1.35	3.50	5.45	7.55	
	9.30	5.40	1.60	0.80	0.55	0.35	36.35

Table 1.4. The frequency of foggy day in East coast of Korea in 2000.

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Total
	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	
Sokcho	0	0	0	0	10	1	
	1	3	0	0	0	0	15
Kangnung	0	0	0	0	2	1	
	0	0	0	0	0	0	3
Tonghae	0	0	0	0	4	4	
	0	2	0	0	0	0	10
Ulleung Do	0	0	0	5	10	11	
	9	17	4	2	2	1	61

Table 1.5. The frequency of foggy day in East coast of Korea in 2001.

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Total
	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	
Sokcho	0	0	0	2	2	7	
	3	5	0	0	0	0	19
Kangnung	0	0	0	1	0	0	
	0	0	0	0	0	0	1
Tonghae	0	0	0	1	0	0	
	0	0	0	0	0	0	1
Ulleung Do	0	0	0	1	6	7	
	8	1	0	1	1	0	25

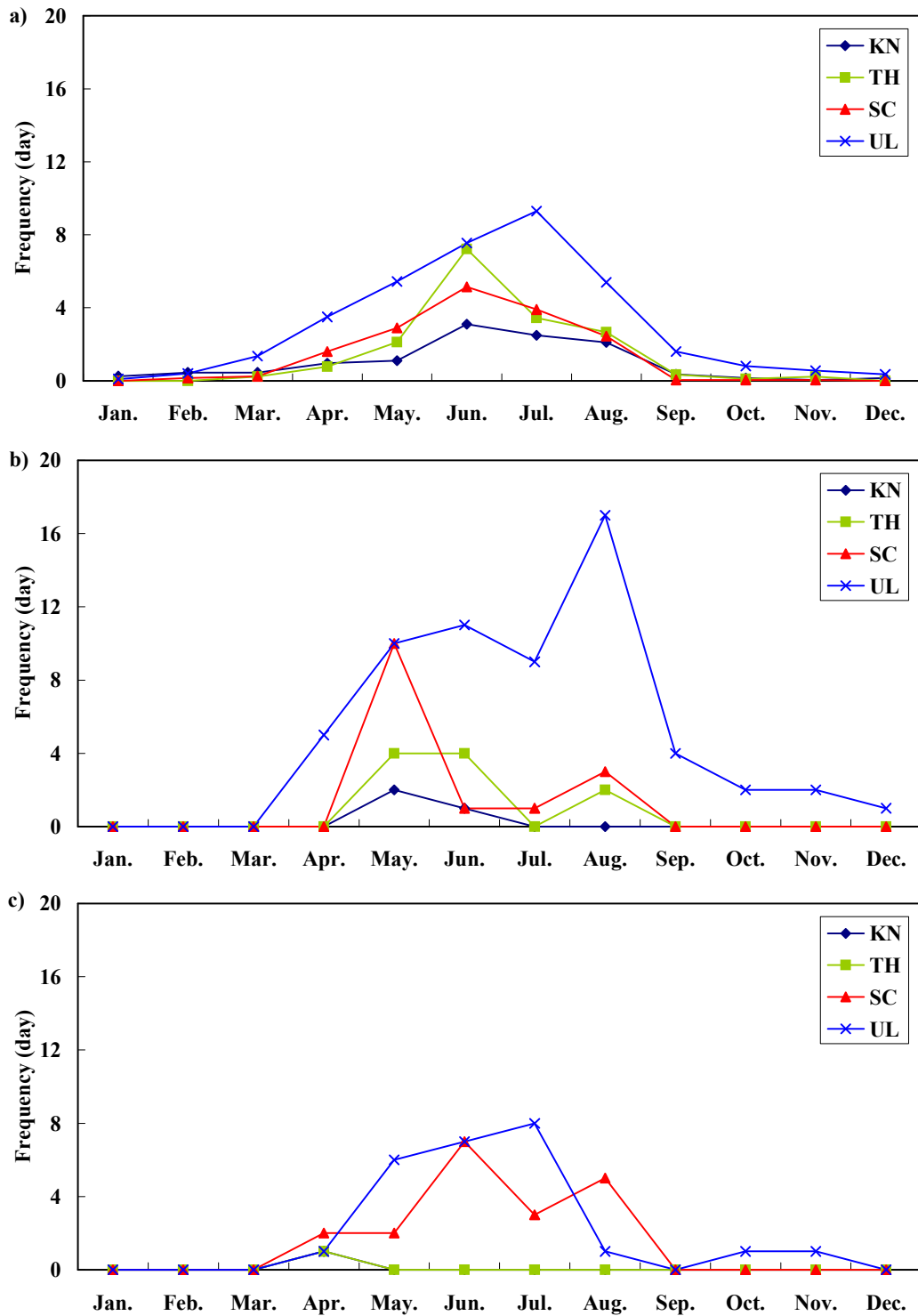


Fig. 1.5. The frequency of foggy events in East coast of Korea during (a) the 30 years(normal) (b) 2000 year (c) 2001 year.

1.4 해무 발생, 소멸 및 지속 시간 분석

동해안의 안개발생은 지형적 영향으로 다른 지역보다는 복사무의 안개 발생이 비교적 적게 일어나고 상대적으로 해상에 위치할수록 이류무 성격의 해무가 발생하는 특성을 가지고 있다. 또한 복사무는 발생원인의 특성상으로 새벽이나 저녁에 일어나지만 낮 시간에는 이류무 이외에는 발생하기가 어렵다. 따라서 안개발생 시간과 소멸시간 분석으로 적어도 복사무 인지 이류무인지는 구별 할 수 있다고 볼 수 있다.

이 장에서 해무 발생시간 분석에 쓰여진 자료는 기상청 자료 외에 등대관측자료를 입수하여 분석 한 것으로 자료의 기간이 2000년 5월부터 11월까지이다. 따라서 기상청 관측 자료는 32년간의 기간과 기상요소의 다양성이 있지만 등대관측자료에 기준하여 자료기간과 요소를 선택하여 비교하였다. 지속시간 분석은 기상청 지상관측지점인 강릉, 동해, 속초, 울릉도에서 평년과 최근 2년(2000년, 2001년)간 자료로부터 이루어졌다. Fig. 1.6에 나타난 주된 특징은 강릉과 울릉도의 안개 발생 시간 분포가 많은 차이를 보이고 있다는 것이다.

강릉지역에서는 안개발생시간이 24시와 3시에 집중되어 있고 나머지 시간에는 안개 발생이 나타나지 않는다(Fig. 1.6). 그러나 울릉도 해역에서는 전 시간에 고루 발생 비율을 보이며 특히 낮 시간대인 3시에 속초지역과 함께 발생한다는 것을 알 수 있다(Fig. 1.6). 또한 18시에는 울릉도에서만 안개 발생 시간이 나타난다. 특히 유의할 점은 분석된 자료가 5월부터 11월까지이므로 사실상 겨울철 복사무의 발생 시각은 많이 걸러졌다고 볼 수 있기 때문에 18시의 안개발생은 이류무인 해무라고 해도 좋을 것이다. 안개 소산시간에서도 발생시간 분포도와 마찬가지로 울릉도해역이 시간대별로 고르게 분포하는 특징을 보이며 9시에는 동해, 속초, 강릉지역이 소산 시간을 보이며 상대적으로 울릉도는 다른 시간과 비교해서 이 시각에 소산되는 비율이 적은 특징을 나타낸다(Fig. 1.7). 이는 여름철의 종관적인 이류안개와 관련이 있다고 생각된다. 한편, 안개 발생 특성상 복사안개가 내륙에서 자주 발생하기 때문에 내륙적 특징을 갖는 위치에 있는 강릉지방 기상청의 관측자료는 야간의 24시 및 3시에 발생하여 3시에 소산하는 것과 관련이 있는 것으로 사료된다(Fig.1.7).

등대관측자료의 해무발생 시간을 분석해 보면 연안의 등대자료(대진, 묵호, 주문진)와 외해에 위치하고 있는 등대자료(독도, 태하)의 특성이 다르게 나타남을 알 수 있다(Fig. 1.6). 독도와 태하의 자료에는 연안의 등대자료와는 달리 오후 3시에 해무발생이 나타난다. 동해연안의 기상대자료와 비교해서 주목할 만한 차이점은 12시와 18시에 해무발생이 비율이 고르게 분포되어있다는 점이다. 등대관측자료의 해무 소산시간은 독도의 경우 전 시간대에서 고르게 분포하고 있으며 대진의 경우 9시에 40%, 15시에 30%의 비율을 보이고 묵호, 주문진의 경우는 70%이상이 9시와 12시경에 소산되는 특징을 보이고 있다(Fig.1.7).

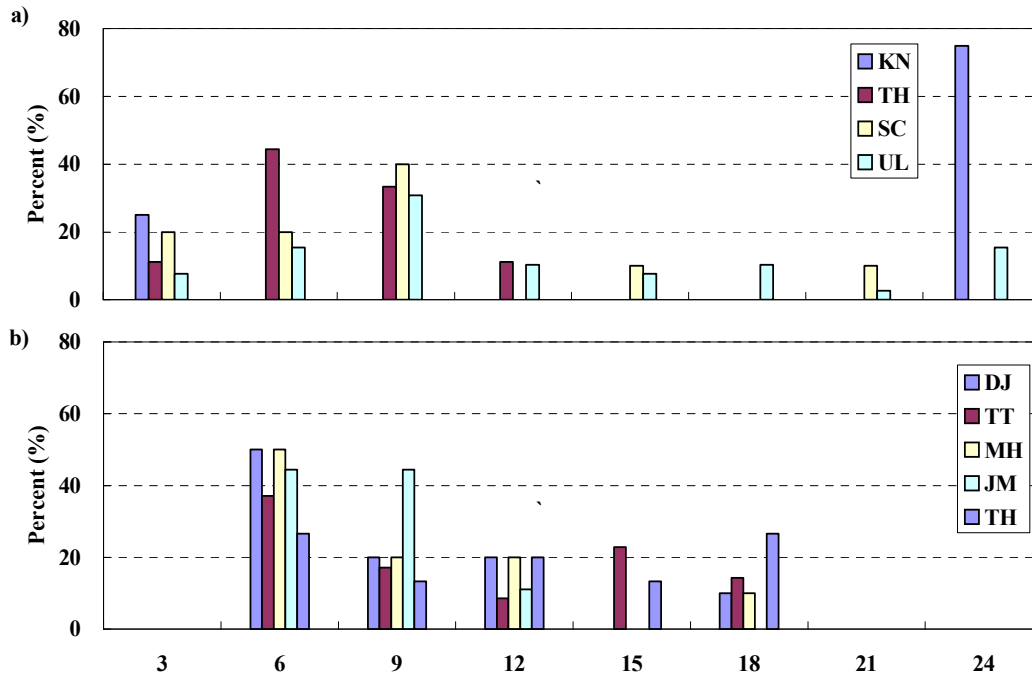


Fig. 1.6. The percentage of the formation time of fogs in (a) KN(Kangnung), TH (Tonghae), SC(Sokcho), UL(Ulleung Do), (b) TC(Taechin), TT(Tokto), MH(Muk-ho), CM(Chumunjin),TH(Taeha).

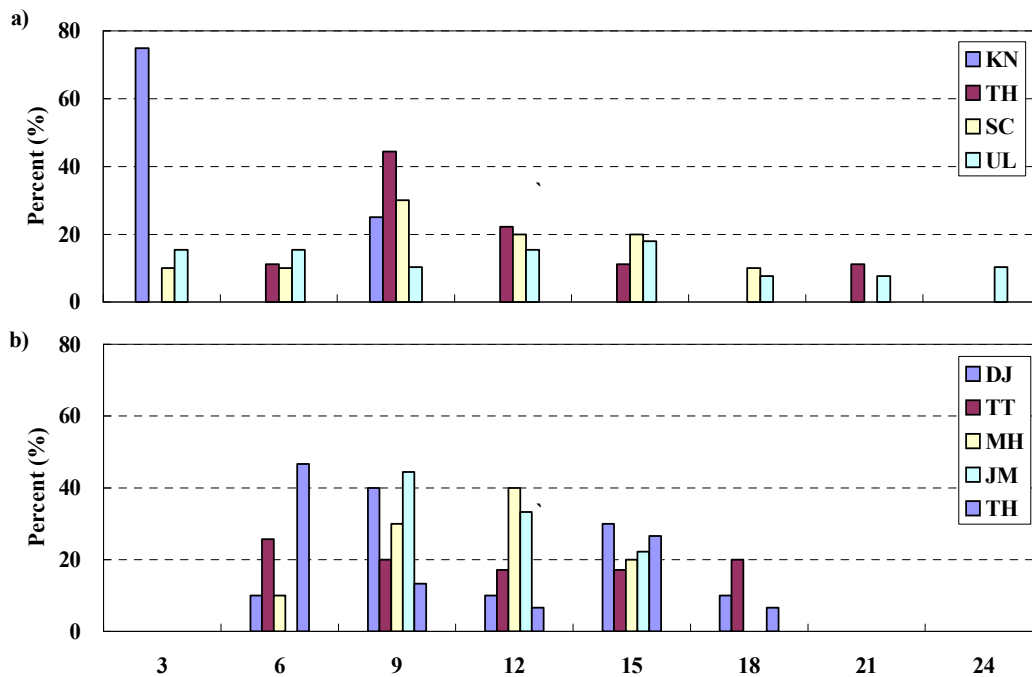


Fig. 1.7. The same as Fig.1.5 except for the dissipation time.

안개 지속시간은 평년에 연안역에서는 6월(속초: 57.52 h, 강릉:20.31 h)에 울릉도에서는 7월(92.88 h)에 가장 높은 값을 보여 안개발생빈도와 유사한 경향을 나타냈다. 2000년도에는 다른 연안지역보다 속초에서 높은 안개발생빈도와 긴 지속시간을 보이는데, 이것은 다른 지역보다 속초가 연안 가까이에 위치했기 때문인 것으로 생각된다. 울릉도에서 6월과 8월에 100시간 이상으로 장기간 해무발생이 있었고, 이 시기에 연안지역의 해무가 울릉도의 1/5에 미치지 못했으므로 이 때 일어난 해무는 해양에서 일어나는 이류성 해무인 것으로 추정된다. 2001년에는 2000에 비해 지속시간이 울릉도에서는 감소하였으나 다른 연안역에서는 비슷한 수준을 유지했다. 강릉은 전체 지속시간이 1.5시간으로 안개발생이 거의 없었고, 동해와 울릉도는 6월(16.66 h, 55.88 h)에 속초는 8월(23.84 h)에 안개지속시간이 가장 길었고, 이는 울릉도(11.68 h)에서 보다 약 2배정도 더 많은 수치이다.

Table 1.6. The normals of monthly fog duration time in East coast of Korea(unit: hours).

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Total
	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	
SC	0	5.51	11.5	15.33	20.87	27.52	
	22.8	11.27	1.38	4.25	0.25	0	80.73
KN	9.51	4.69	6.63	6.13	12.04	20.31	
	14.83	8.82	3.55	5.06	1.1	2.11	59.31
UL	10.36	9.55	12.75	32.7	42.2	77.85	
	92.88	40.1	22.44	7.72	6.93	3.49	185.41

Table 1.7. The same as Table 1.6. except for 2000 year.

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Total
	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	
Sokcho	0	0	0	0	36.75	3.67	
	5.5	5.17	0	0	0	0	51.09
Kangnung	0	0	0	0	3.17	6.83	
	0	0	0	0	0	0	10
Tonghae	0	0	0	0	10.67	16.08	
	0	9	0	0	0	0	35.75
Ulleung Do	0	0	0	29.53	61.59	102.75	
	24.42	115.13	27.31	1.92	1.67	2.25	366.57

Table 1.8. The same as Table 1.6. except for 2001 year.

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Total
	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	
Sokcho	0	0	0	22.67	7.42	16.24	
	11.25	23.84	0	0	0	0	81.42
Kangnung	0	0	0	1.5	0	0	
	0	0	0	0	0	0	1.5
Tonghae	0	0	0	4.58	1.25	16.66	
	1.17	1.67	0	0	0	0	25.33
Ulleung Do	0	0	0	1.58	35.95	55.88	
	39.3	11.68	0	1.17	1.33	0	146.89

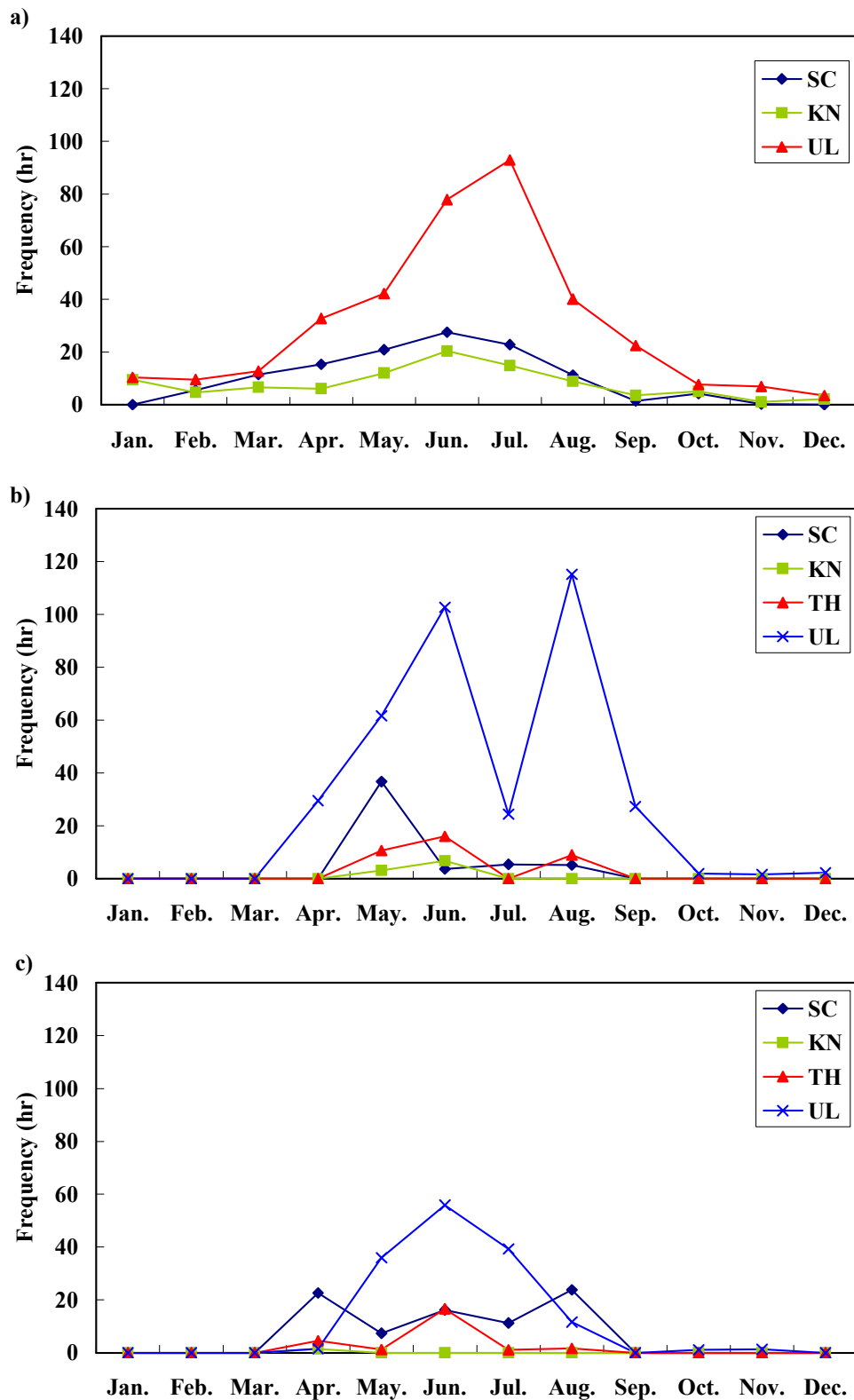


Fig. 1.8. The frequency of monthly fog duration time in East coast of Korea during (a) the 30 years(normal) (b) 2000 year (c) 2001 year.

1.5 경년별 상대습도 분석

30년 이상의 장기자료를 이용하여 안개의 경년별 변화추이를 살펴보고자 하였다. 장기자료 중 안개의 특성을 가장 많이 포함하고 있는 기상요소는 상대습도 일 것이다. 그러나 상대습도가 높고 낮음은 강수유무와 일차적인 관계가 있으므로 상대습도의 변화만으로 안개가 많이 발생하였다고는 볼 수 없다. 따라서 이 장에서는 지역별로 상대습도 변화분포를 비교함으로써 동해안 지방에서 내륙(강릉, 동해), 해안(속초), 해상(울릉도)의 특성을 파악하고자 하였다. Fig. 1.9에서 나타나는 속초지방의 상대습도 변화는 88년도에 60%로 가장 적었으며 92년도에 77%로 가장 높은 상대습도를 나타내고 있으며 그 이후로 차츰 낮아지면서 2000년도에 61%의 상대습도를 보여준다(Fig. 1.9-a).

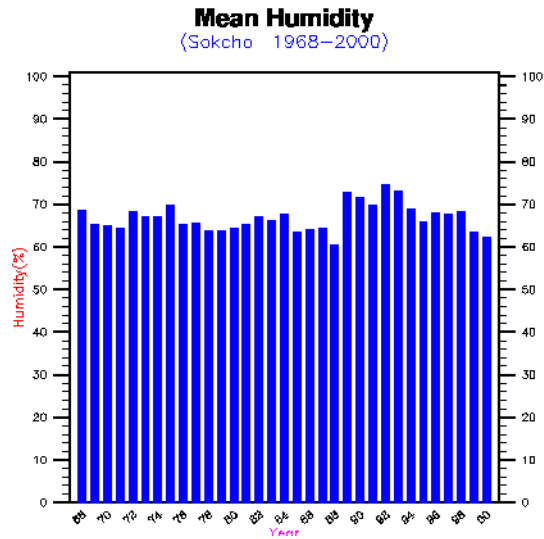
강릉지방은 87-88년도에 61%로 가장 적었으며 64, 89, 93년도에 각각 71%, 68%, 68%로 높은 상대습도를 나타내고 있으며 그 이후로 차츰 낮아지면서 2000년도에 59%의 상대습도를 보여준다(Fig. 1.9-b).

동해 레이더기상대는 자료의 기간이 상대적으로 다른 지역에 비해 짧아 90년도 이전의 경향은 알 수 없으나 전체적인 양상은 다른 지역과 마찬가지로 93년도에 71%로 가장 높고 2000년도에 61%로 가장 낮다(Fig 1.10-a). 그러나 울릉도해역은 다른 지역과는 다른 양상을 보이고 있다. 전체적으로 다른 지역보다는 상대습도가 높다는 점이다. 93년도에 80%로 가장 높고 2000년도에 71%로 가장 상대습도가 낮은 해이지만 다른 지역에서는 가장 높은 수치에 해당한다(Fig. 1.10-b).

안개발생기작을 규명하기 위한 분석의 한 부분으로서 평년 월별 상대습도, 2000년 월별 상대습도, 2001년 월별 상대습도를 도시화해보았다. 평년에 상대습도는 울릉도, 속초, 강릉 순으로서 해역으로 갈수록 상대습도가 높게 나타난다. 울릉도는 1년 내내 70-90 %로 적은 편차를 나타내지만 강릉과 속초는 봄, 가을, 겨울에 65 % 이하, 6월에서 9월까지 70 % 이상을 보여 전형적인 대륙성 기후의 특성을 보여준다. 2000년에는 특이하게 연안역에서 5월과 8월에 6-7월에 비해 높은 습도가 나타났는데 이는 5월과 8월에 연안역에서 평년보다 높았던 안개발생빈도와 연결하여 생각할 수 있다. 2001년에는 6월부터 8월까지 높은 분포를 보여 해무가 주로 발생하는 시기에 평년값과 유사한 분포를 나타냈다(Fig.11).

각 지역에서 해무발생시 상대습도의 분포를 보면 4지역 모두 해무발생시 90 % 이상의 높은 습도를 보였고, 울릉도, 동해, 강릉에서는 상대습도 94-97 %일 경우 주로 해무가 발생했으나, 속초에서는 안개발생시 상대습도가 85-99 %까지 고른 분포를 보였다.

(a)



(b)

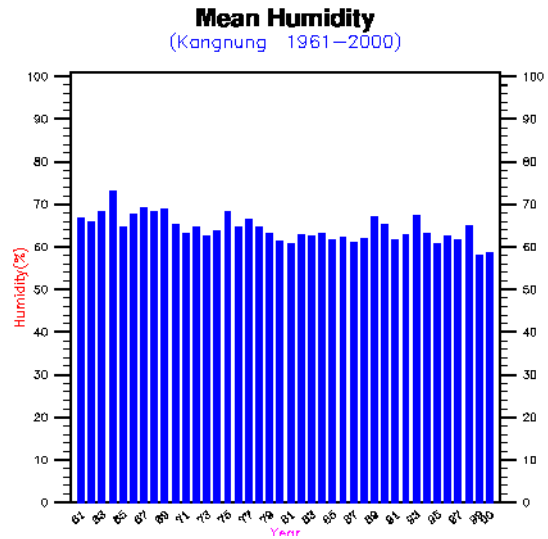
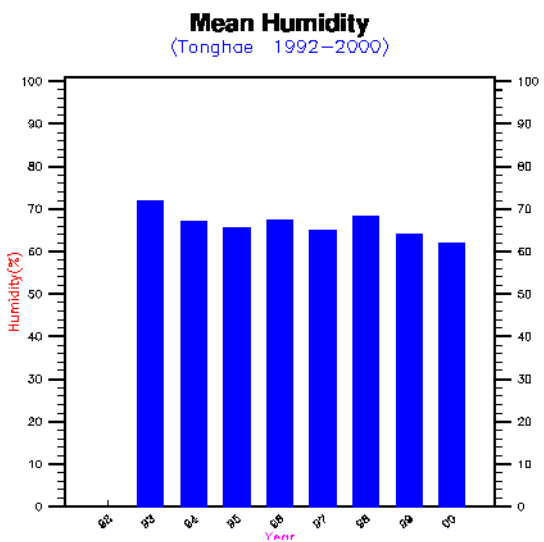


Fig. 1.9. The yearly mean variation of relative humidity in (a) SC over the period of 1968 to 2000 (b) KR over the period of 1961 to 2000.

(a)



(b)

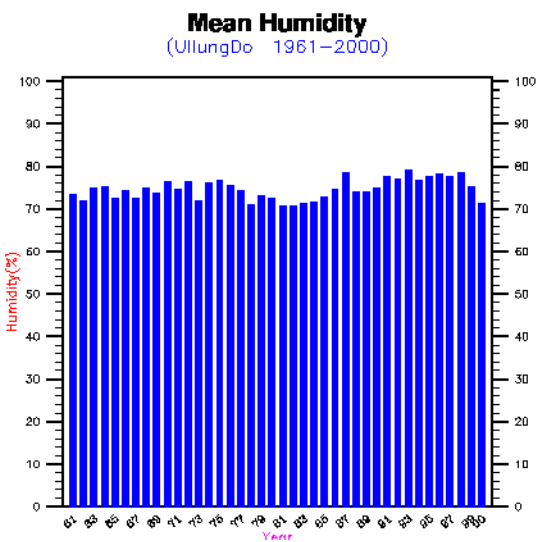


Fig. 1.10. The yearly mean variation of relative humidity in (a) DH over the period of 1992 to 2000 (b) UL over the period of 1961 to 2000.

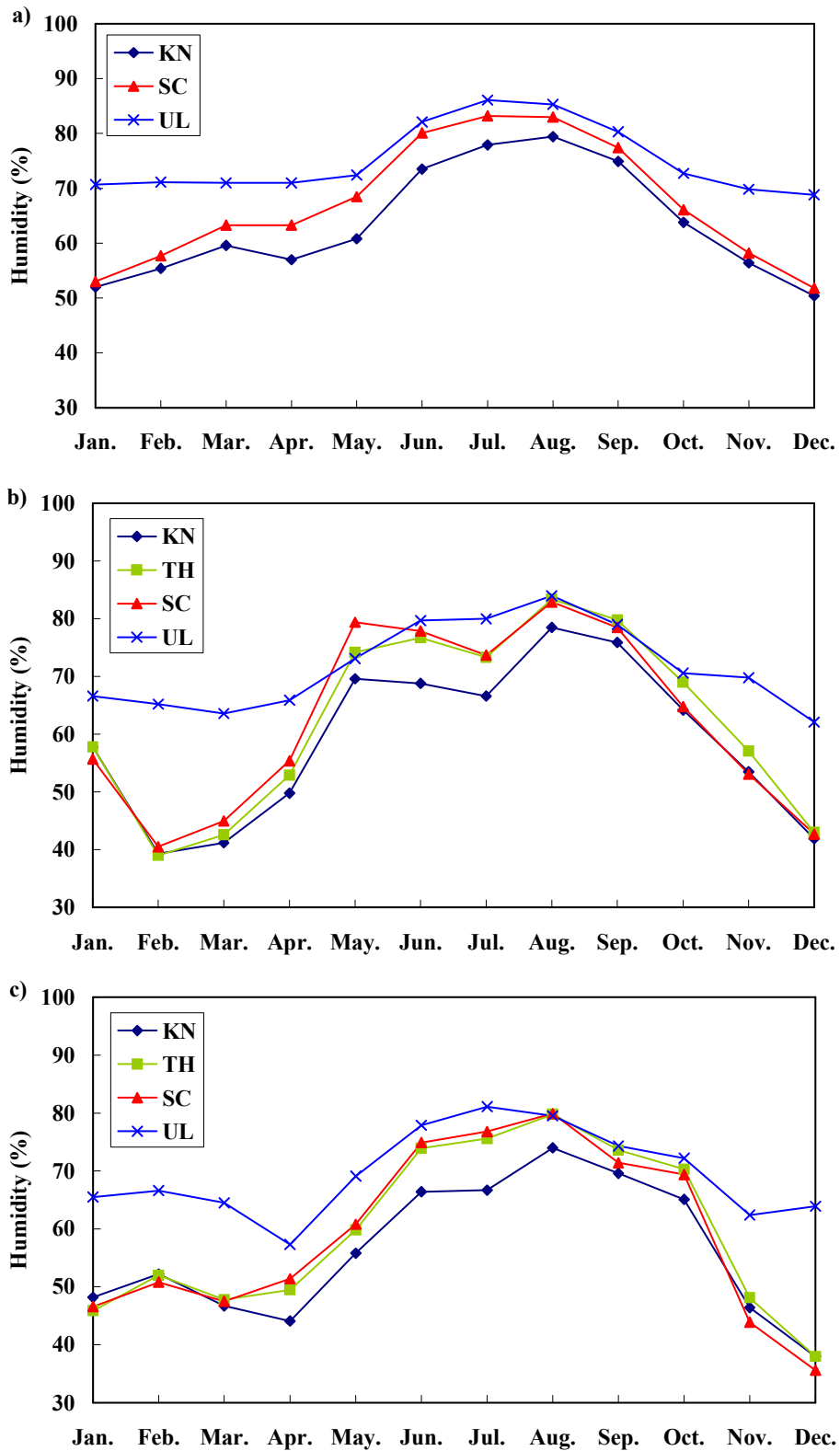


Fig. 1.11. Monthly average relative humidity in East coast of Korea during (a) the 30 years(normal) (b) 2000 year (c) 2001 year.

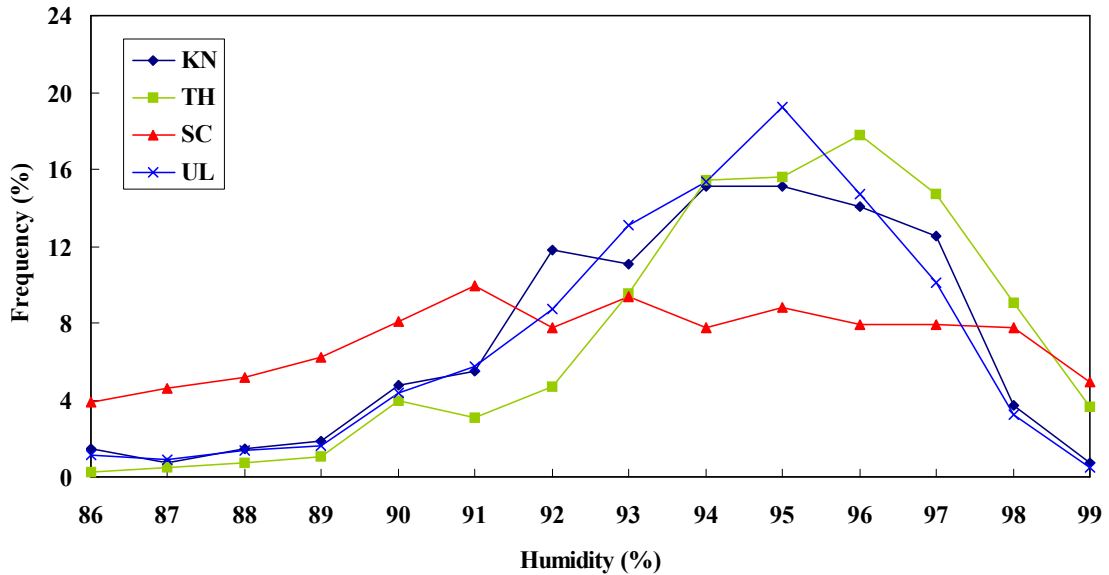


Fig. 1.12. The frequency of relative humidity during the foggy hours the periods of 1970 to 2001.

다시 정리하면 상대습도가 90년대 이후 가장 높은 해는 93년이라 할 수 있으며 상대적으로 가장 낮은 해는 2000년도라 할 수 있겠다. 지역별로는 강릉이 가장 상대습도가 낮고 동해, 속초, 울릉도 순으로 상대습도가 높다는 것을 알 수 있었다. 따라서 동해안 지방의 강수의 영향이 비슷하게 나타난다고 가정하면 상대습도가 높은 순으로 안개발생의 빈도 수가 상대적으로 높게 나올 것이라는 것을 알 수 있으며 93년도 이후 상대습도가 점차 낮게 나타난다는 점은 추후 강수량의 추이분석을 통해 안개발생의 변화를 파악해야 할 것이다.

1.6 해무 발생시 풍향 및 풍속 분석

동해안의 주 풍향, 풍속을 파악하기 위해 1971년부터 2000년까지의 30년간의 자료를 바탕으로 바람장미를 나타내었다(Fig 1.13).강릉지방의 주 풍향은 남서풍, 속초지방은 서풍계열, 울릉도는 북동풍이 주 풍향이다.

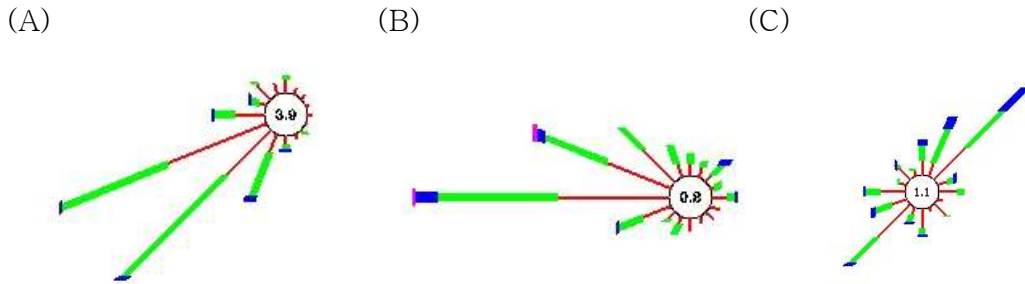


Fig. 1.13. The windrose of the mean wind during 30 years in (a)Kangnung, (b) Sokcho, (c)Ulleung Do, ○:Frequency of calms <math>< 0.3\text{ m/s}</math>, ■:

각 지방의 계절별 2년간(2000년, 2001년)의 바람 자료를 바람장미로 도식화하였다(Fig. 1.14-17). 2000년의 속초지방의 바람장미는 강도에 있어서는 차이가 있지만, 여름철의 남동풍과 그 외의 계절에는 서풍에서 북서풍 사이의 풍향 계열을 보인다. 강릉지방은 30년 바람자료와 계절별 바람장미가 큰 차이를 보이지 않고 있다(Fig. 1.13). 동해의 풍향은 여름철에 북동풍, 남서풍이, 그 외의 계절에는 북서풍 계열의 풍향을 보인다(Fig. 1.14-15). 울릉도의 바람장미도의 경우는 다른 지방과는 달리 봄, 여름에 남서풍이, 가을과 겨울에 북동풍이 주 풍향으로 나타나며 겨울철의 풍속이 세지 않은 점이 특이하다. 아마도 울릉도 기상대 주변의 지형 때문인지 분석해 볼 필요가 있어 보인다(Fig. 1.14-15).

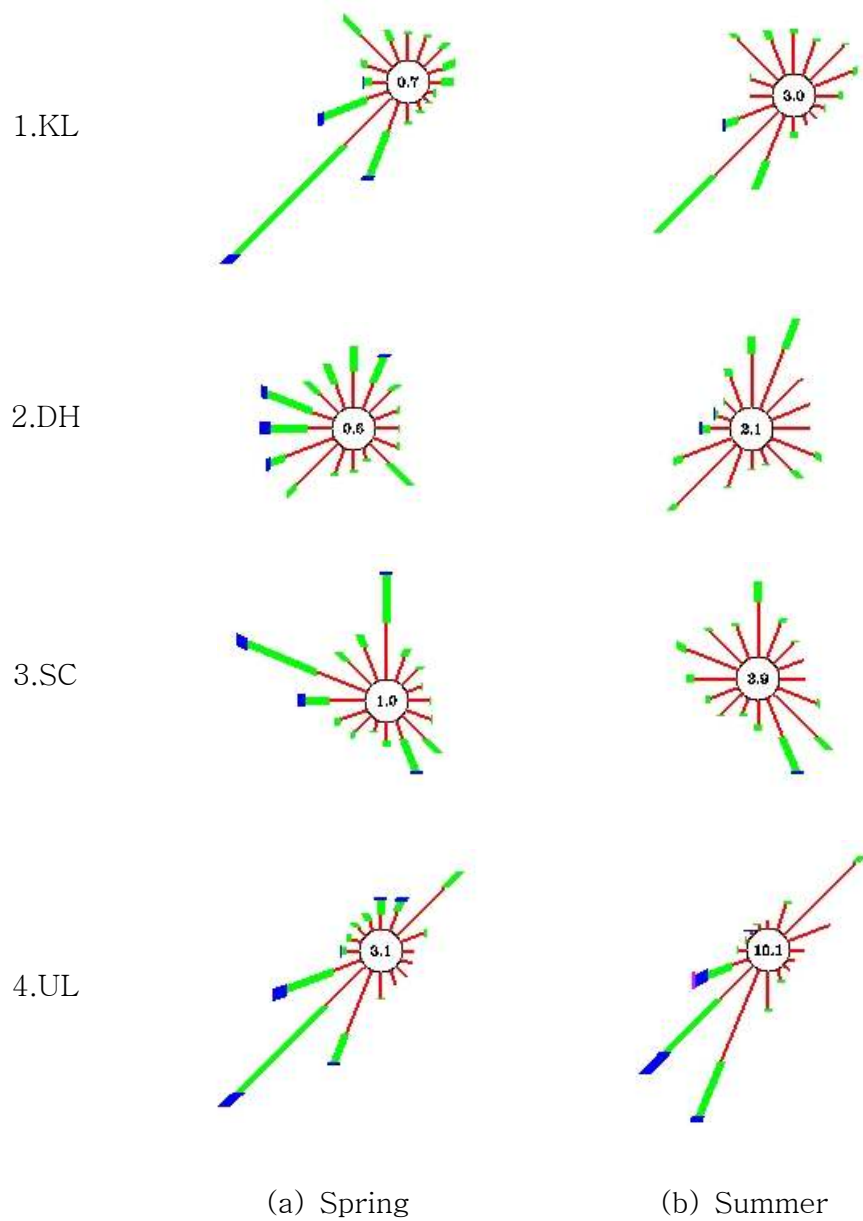


Fig. 1.14. The windrose on (a)spring, (b)summer in 2000 year, ○:Frequency of calms < 0.3 m/s, ■: 0.3~3.3 m/s, ■: 3.4~7.9 m/s, ■: 8.0~13.8 m/s, ■: > 13.9 m/s

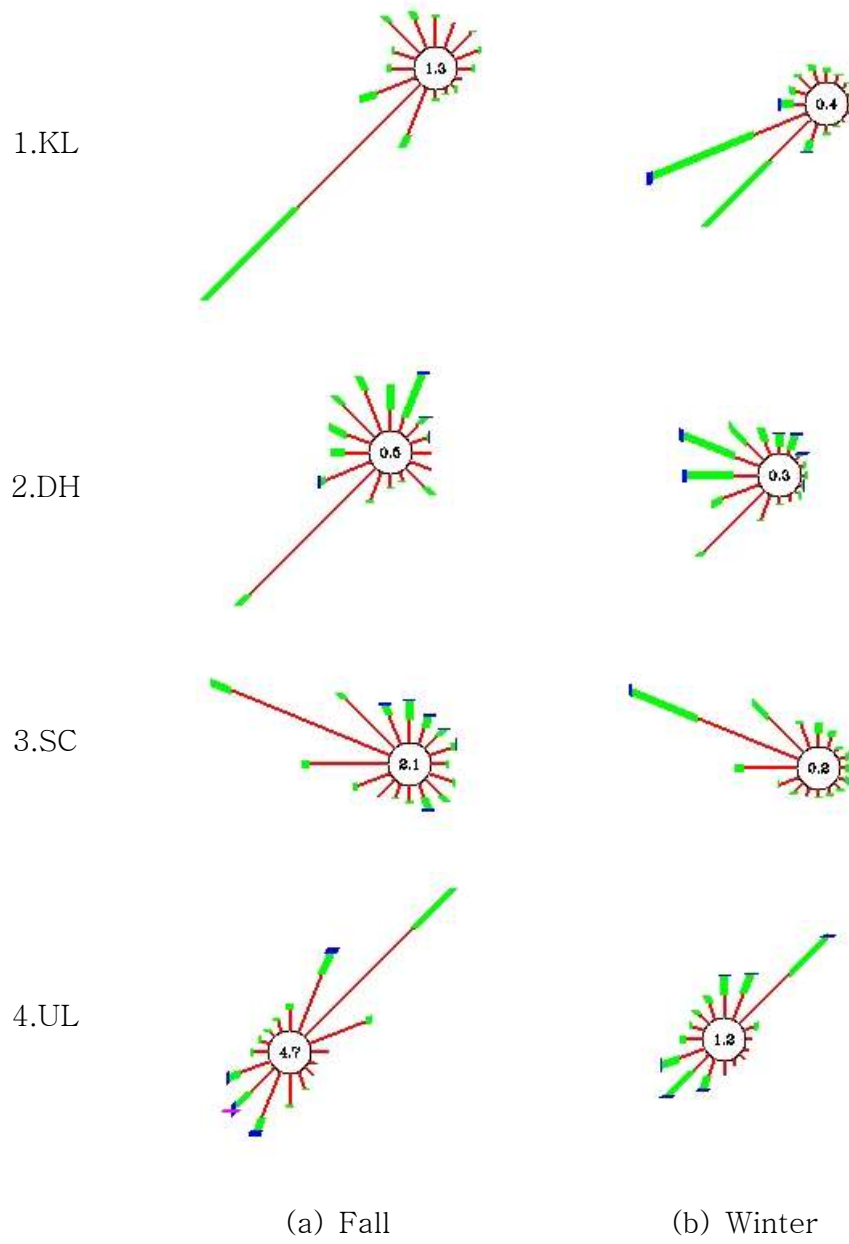


Fig. 1.15. The same as Fig. 1.14. except of (a)autumn, (b)winter in 2000 year.

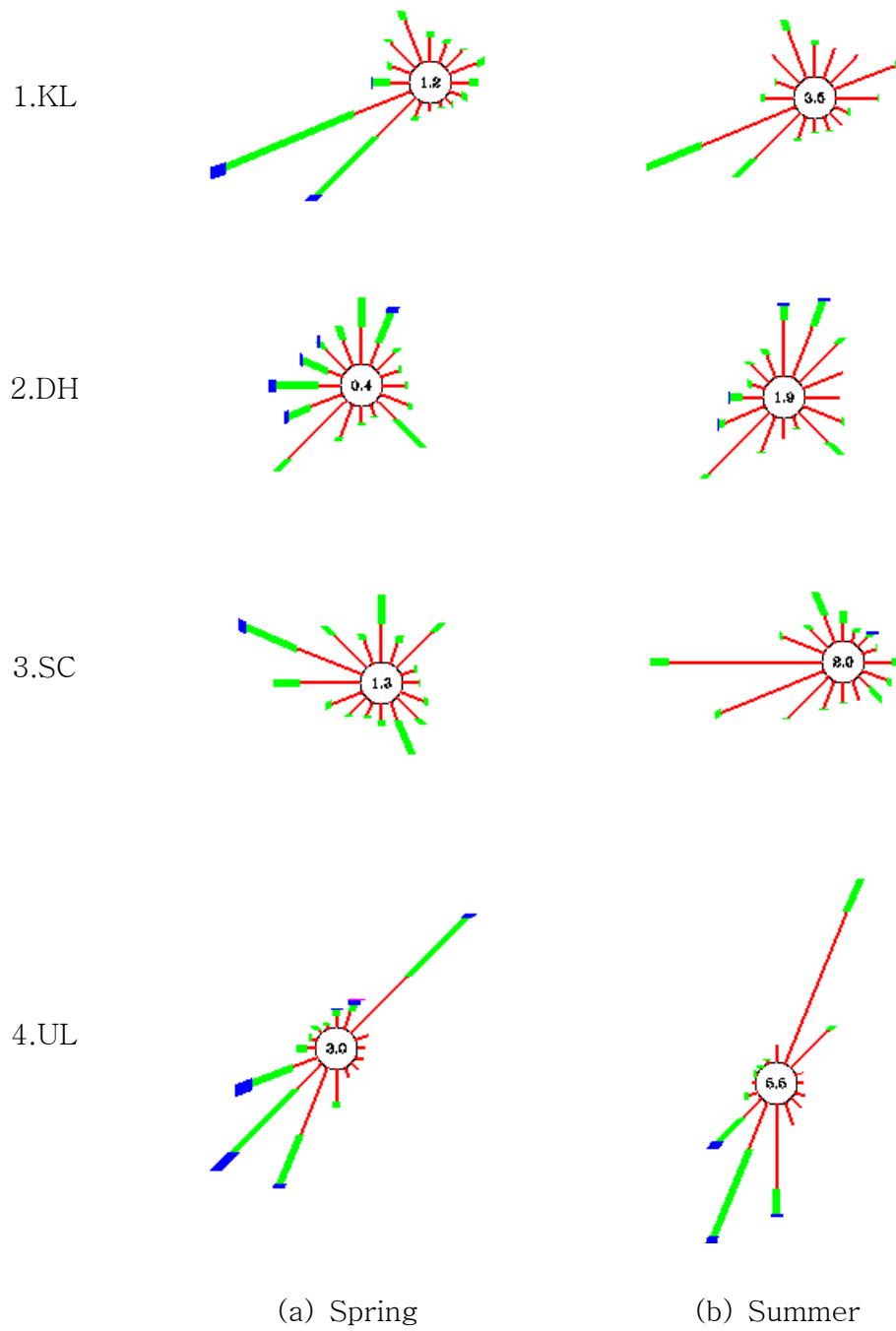


Fig. 1.16. The same as Fig. 1.14. except of (a)spring, (b)summer in 2001 year.

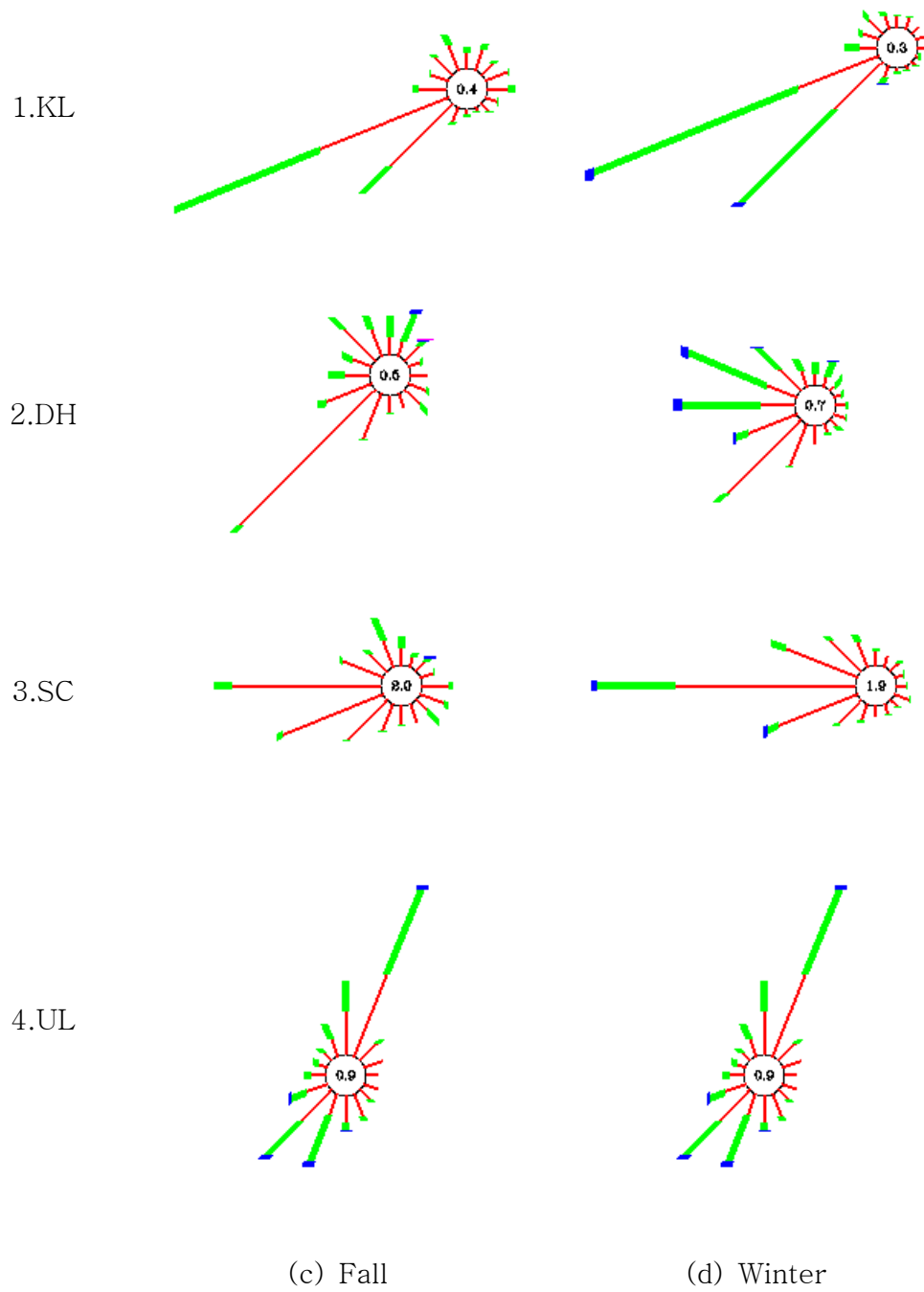


Fig. 1.17. The same as Fig. 1.15. except of (a)autumn, (b)winter in 2001 year.

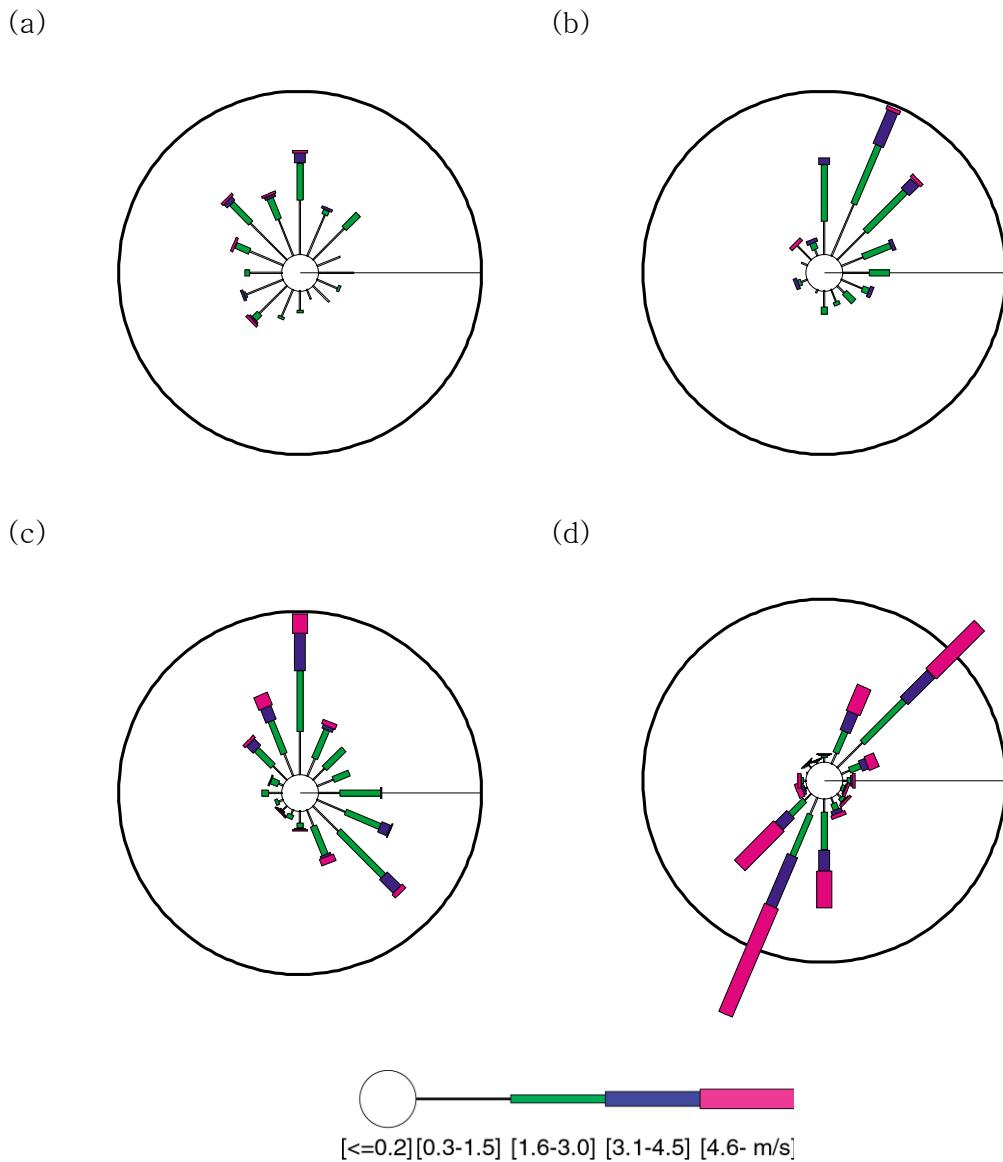


Fig. 1.18. The windrose during foggy hours at (a) Kangnung (b) Tonghae (c) Sokcho (d) Ulleung Do at the period of 1970 to 2001.

32년간 해무발생시 바람장의 분포를 보면 가장 내륙에 위치한 강릉에서는 주풍향이 북, 북서풍으로 풍속 3 m/s 이하의 바람이 약하게 불 때 안개가 발생했으며, 무풍도 약 30 % 차지하여 내륙에서 흔히 볼 수 있는 북사무의 특성을 보여주었다. 동해에서는 주풍향이 북, 북동풍으로 해역으로부터 1.5-4.5 m/s의 바람이 불 때 안개가 발생하였고, 속초에서는 주풍향이 북, 남동풍으로 동해와 같은 수준의 강도로 바람이 불 경우 안개가 발생하여 해역과 가깝게 인접한 연안역에서 볼수 있는 이류무의 특성을 잘 보여주었다. 동해와 속초는 해상으로부터 바람이 불어올 때에 주로 안개가 발생하게 되는데, 이는 해상으로부터 한랭이류에 의해 안개가 주로 형성되

는 것이며, 서해에서 발생하는 안개와는 다른 성격을 가지고 있다. 울릉도에서는 북동, 남서풍이 4.6 m/s 이상까지 동해나 속초에 비해 강한 바람이 불 때 안개가 발생하였다. 울릉도에서 발생하는 해무는 여름 몬순인 남서풍에 의해 온난 습윤한 이류가 차가운 해수면위로 이동하면서 형성되는 것으로 보인다(Fig.1.18)

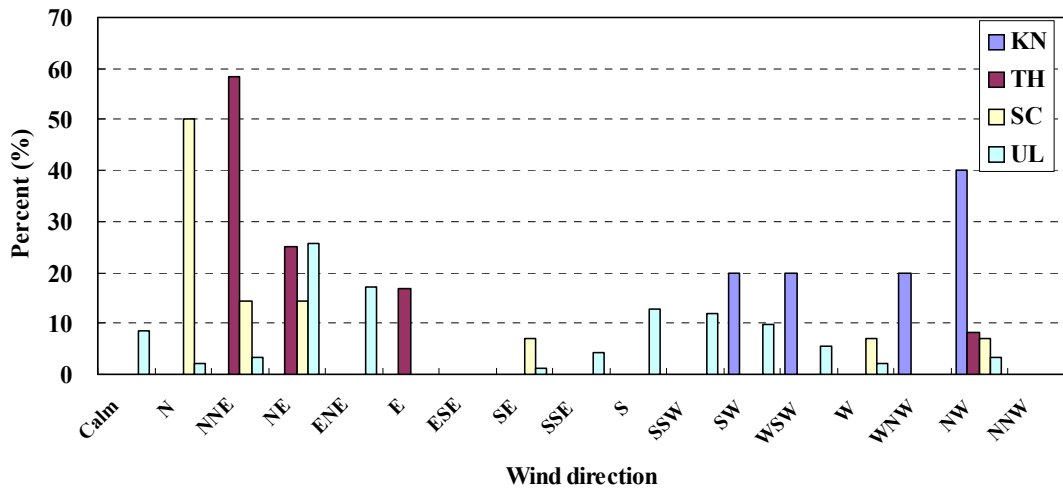


Fig. 1.19. The frequency of each wind direction in KN(Kangnung), TH(Tonghae), SC(Sokcho), UL(Ulleung Do) during the foggy hours in 2000.

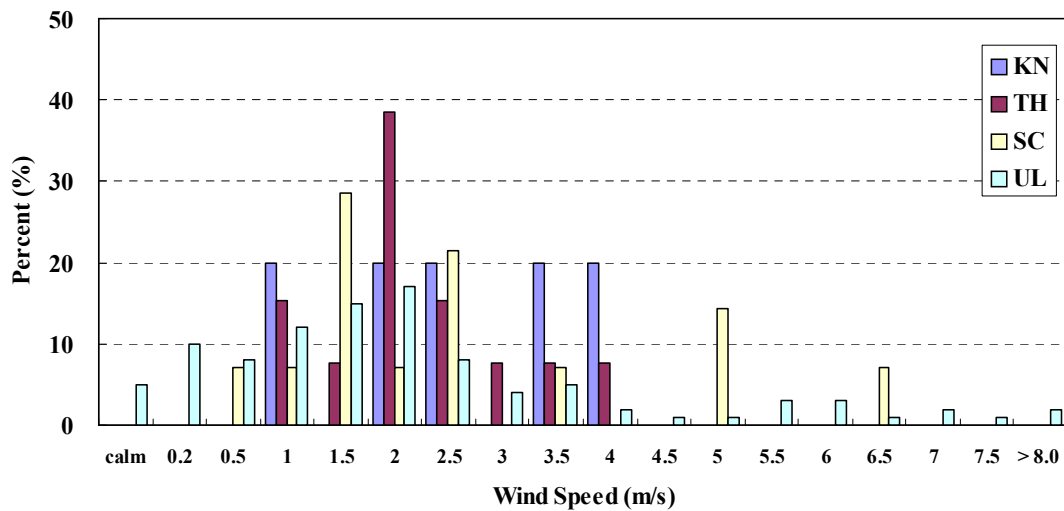


Fig. 1.20. The same as Fig. 1.19. except for wind speed in 2000.

해무 발생시의 풍향을 1년(2000년)간의 자료를 이용하여 분석하였다. 강릉지방은 30년자료 및 계절별 주풍향에서 나타나듯이 남서 계절의 풍향과 북서풍이 주 풍향이다(Fig. 1.19). 동해지방의 해무발생시의 주풍향은 북북동과 북동풍 계열이 80%이상이고 북서풍이 10%이내의 풍향을 보이고 있다. 이는 봄, 여름, 가을의 주

풍향의 특성을 보이고 있다(Fig. 1.19). 속초는 30년 자료와 계절별 주 풍향과는 다르게 북풍 및 북동풍 계열이 80%를 차지하고 있다. 울릉도의 해무 발생시 주 풍향은 북동풍 계열이 56%이고 남서풍 계열이 40% 정도이다. 결국 강릉지역을 제외하고는 동해의 다른 지역은 북동풍 계열의 풍향이 나타날 때 해무 발생이 일어나는 것을 알 수 있다.

해무 발생시의 풍속은 예상대로 전 해역에서 4 m/s 이하의 풍속을 나타내고 있으나 속초와 울릉도는 6 m/s 이상의 풍속에서도 해무 발생이 나타나는 것을 볼 때 이 두 해역은 이류무 성격의 해무발생이 나타나는 것으로 사료된다(Fig. 1.20).

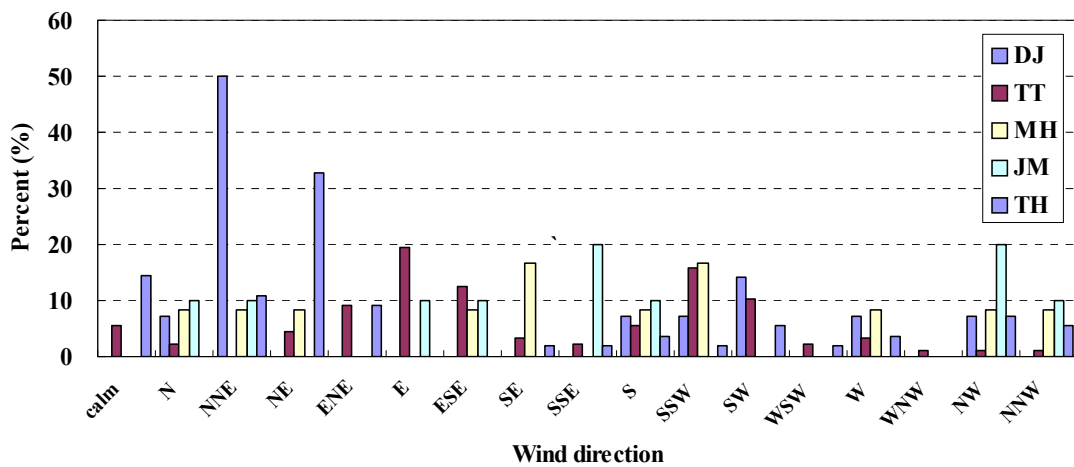


Fig. 1.21. The frequency of each wind direction in DJ(Dae-jin), TT(Tokto), MH(Mokho), CM(Chumunjin), TH(Taeha) during the foggy hours.

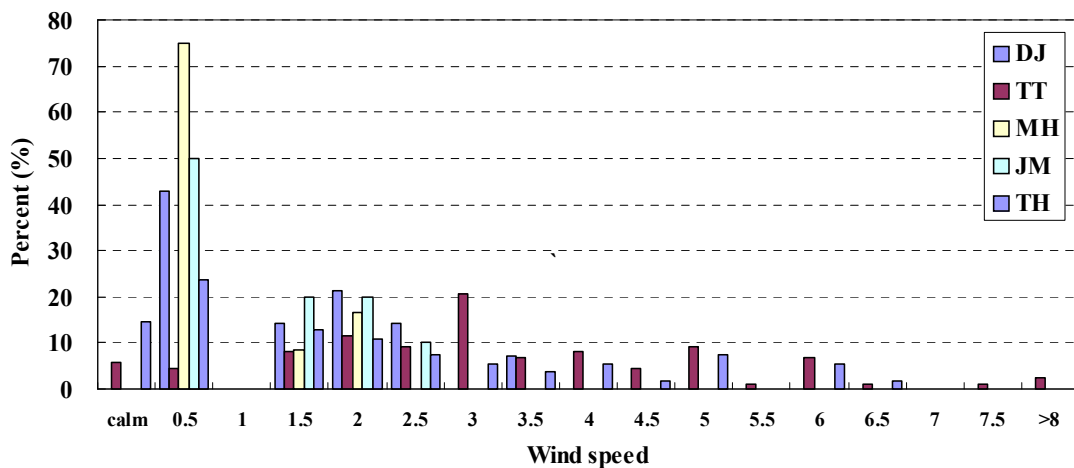


Fig. 1.22. The same as Fig. 1.21. except for wind speed.

등대관측자료에 의한 해무 발생시의 풍향을 분석해 보면 대진의 경우 북동풍이 50%이고, 태하에서 동북동풍이 33%의 주풍향을 보이고, 다른 지역은 독도에서 동남동, 묵호에서 남남동, 주문진에서 남남동, 북북서풍이 각각 20% 이내의 풍향을 보이고 있다(Fig. 1.21). 강릉, 속초, 동해, 울릉도의 기상대 관측 값과는 다른 특성이 보이는 점이다. 즉 등대관측 자료는 남풍계열이 주를 이루고 있다는 점이 주목된다. 즉, 동해, 울릉도, 속초지방은 북동계열의 풍향이 주를 이루고 강릉은 북서계열의 풍향이, 등대관측자료는 남서, 남동, 북동풍의 풍향을 보이고 있다.

등대관측 자료의 풍속을 살펴보면 대진, 묵호, 주문진 해역이 40~70%가 1 m/s 이하의 풍속을 나타내고 독도와 태하 해역은 6 m/s 이상의 풍속에서도 해무발생이 나타난다(Fig. 1.22).

1.7 소결론

안개발생을 예측하기 위해 많은 경험적 법칙(empirical rule)이 나왔지만, 안개발생하는 조건으로 지역적 요소(local factor)가 매우 강하므로 안개예보능력은 향상되기 어렵다. 한반도 동해안에서 지역적 요소를 알기 위한 기초연구로서 안개발생빈도, 안개발생, 소멸, 지속시간, 안개발생시 습도, 바람을 위에서 서술하였고 이것은 다음과 같이 요약할 수 있다.

동해안의 해무는 5월부터 8월에 집중되어있고 9월부터 4월까지의 거의 발생하지 않는데, 이는 5월부터 8월까지 높은 해기차를 보이거나 9월에는 표층해수가 따뜻해져 해기차가 감소하기 때문이다. 연안에 위치한 강릉, 속초, 동해는 6월에 가장 많이 발생했고, 도서지역인 울릉도는 7월에 가장 많은 안개발생을 보인다. 평년에 안개지속시간도 울릉도에서 7월에, 강릉, 속초에서는 6월에 가장 높은 값을 보인다. 또한 봄, 여름철에는 동해안을 따라서 병풍모양의 띠를 이루는 해무가 새벽녘이나, 야간에 많이 발생하는 특징을 보이고 있다.

연구지역에서 기상요소를 요약하면 울릉도는 1년 내내 상대습도 70% 이상을 보이며 6월에서 9월까지 80% 이상을 보인다. 강릉과 속초는 6월에서 9월 사이에 상대습도 70% 이상을 나타내며 동계와 춘계에는 65% 이하를 보인다. 안개발생시 습도분포는 속초를 제외하고는 상대습도 90% 이상에서 안개가 발생해서 도서지역에서 발생하는 이류무의 특성을 잘 보여주고 있다(2000, 기상연구소). 바람은 강릉지방의 주풍향은 남서풍, 속초지방은 서풍계열, 울릉도는 북동풍이 주 풍향이다. 강릉지방에서는 연구지역 중 가장 내륙에 위치되어 있으므로 약한 풍속에서 안개가 발생하며 지형상 북풍계열의 바람이 새벽에 바다로부터 불어오므로 주풍향이 북풍일 때 안개가 발생한다. 안개발생시 동해는 북, 북동풍, 속초는 북, 남동풍, 울릉도는 북동, 남서풍이 주풍향을 이룬다.

동해의 안개는 해기차로 인해 국지적으로 발생하는 것으로 보이며, 해역에서 발생한 안개는 바다로부터 불어오는 바람으로 인해 연안역으로 이동하는 하여 내륙까지 영향을 주는 것으로 보인다.

제 2 절 해무예측모델(DUT-METRI-2000) 및 사례분석(I)

2.1 모델 개요

해무는 비선형적인 대기-해양 상호 작용에 의해서 발생하는 대표적인 기상현상 중의 하나로 이를 연구하고 궁극적으로 예보의 단계에 도달하기 위해서는 3차원적인 대기-해양간의 운동이 종합적으로 다루어지는 중규모 역학 모형을 통해서 해무의 물리적인 특성을 살펴보고자 한다.

본 연구에서는 현재 기상청에서 실무 예보를 위해 사용 중인 PSU(Pennsylvania State University)/NCAR(National Center for Atmospheric Research) 중규모 대기 모형 PSU/NCAR MM5 이며 현재 기상청 현업 운영 중인 모델을 기본으로 기상연구소 해양기상지진연구실에서 구축하여 1일 2회 계산하고 있는 해양기상예측시스템(DUT-METRI-2000)을 이용하였다.

모형은 σ -좌표계상에서의 지배방정식으로 구성되어 있으며, 비정역학을 도입하였다. 차분화는 Arakawa B형 staggered 격자망으로 구성되었는데, 공간적으로 2차 중앙차분법을 사용하였으며, 시간적으로는 준암시적 방안(semi-implicit scheme) 및 시간 분리방안(time splitting scheme)을 적분 방법으로 사용하였다. 본 연구에서 사용된 구름 모수화 과정은 대류운동과 관련한 상승·하강운동과 이에 따른 보상운동을 고려하는 Grell(1993)의 모수화 방법을 사용한다. 이 방안은 특히 10-30km이내의 수평격자에 유용하게 사용되며 격자 규모 강수와 대류성 강수를 분리하여 고려한다. 그리고 복사과정은 명시적 구름(explicit cloud)과 장파 및 단파복사의 상호작용을 충분히 고려한 구름-복사 방안(Cloud-radiation scheme)을 사용하였다. 지면의 온도와 수분을 계산하기 위하여 5층 토양 모형을 사용하였다. 또한 모형에 사용된 경계층 물리과정에는 Mellor-Yamada TKE(Turbulent Kinetic Energy) Scheme을 기본으로 한 Gayno-Seaman PBL Scheme(1994)을 사용하였는데, 이 방안은 MRF PBL이나 Eta PBL에 비하여 비교적 안개 연구에 적절히 사용될 수 있는 방안으로 알려졌다. 이 방안은 물 온위 (liquid-water potential temperature)와 총 물혼합비(total liquid water mixing ratio)를 예보 변수로 활용하는 방안으로 다른 PBL scheme과 구분된다.

수치 실험을 수행한 모형의 영역은 한반도를 포함한 동아시아 영역(mother domain)과 동해를 중심으로 한 영역(nested domain)으로 구성된다. 제 1영역(mother domain)은 동서로는 115°E에서 145°E에 이르며, 남북으로는 20°N에서 50°N에 이르는 영역이다. nested domain인 제 2영역은 127.5°E에서 132.5°E, 36°N에서 40°N에 이르는 영역이다. 두 영역의 수평 격자 간격은 mother domain과 nested domain에서 각각 30km, 10km이고, 연직 간격은 지형을 따르는 33층 σ -좌표계이다.

모델 수행은 12시간의 Nudging 단계와 48시간의 예보과정으로 구성되어있다.

모델의 초기자료는 전지구 예보시스템(GDAPS)의 12시간전의 자료와 GDAPS 현재시각의 분석자료를 초기 추정치 자료로 사용하고 GDAPS 현재시각 6시간 간격 예보자료를 경계자료로 사용하여 12시간 간격으로 하루에 2번 48시간 예측결과를 계산한다. 본 연구에서 사용한 해무 예측 시스템은 MM5 모델의 출력결과 중 수직 수평성분의 3차원 바람, 기압, 기온, 강수, 고도 등의 기상요소를 이용하여 3차원의 해상풍, MSLP(Mean Sea Level Pressure), 시정과 운고 강수량, 구름영역, 상대습도와 기온을 생산하고 있는 해양기상예측모델 즉 DUT-METRI-2000 (Dual Use Technology-METRI-2000)이다.

DUT-METRI 2000 모델 영역은 한반도를 중심으로 30 km의 수평격자 간격으로 하였으며 북위 20°-50°, 동경 115°-145°영역으로 하였다. 특히 본 연구에서 관심해역인 동해상 동경 127.5°에서부터 132.5°사이 0.2°간격으로 수직 단면도가 위도별(40°, 39°, 38°, 37°, 36°)로 고도별 25개 층으로 구성 되어있다.

2.2. 사례개요

안개발생은 여러 가지 성인에 의해 발생하며 시정 1km 이하의 시정을 나타낼 때 즉, 공기 중에 미세한 수적(水滴; 물방울)이 부유하여 시정(가시거리)을 감소시키는 것을 말하며, 시정이 1km 이상일 때는 안개라고 하지 않는다. 안개가 생성되기 위한 조건은 공기가 포화되기 위해 공기 속으로 수증기가 공급되거나, 습한 공기가 냉각되어서 포화되어 응결이 일어나거나 또는 지표부근의 공기와 상층의 공기가 혼합할 때 안개가 생성될 수 있다. 본질적으로 하층운의 하나인 층운과 같지만 안개는 지면에 접해 있다는 점이 다르다. 공기 속으로의 증발과 공기 속 수증기의 냉각에 의해 공기가 포화되어 응결(물방울)이 일어나서 안개가 생성된다. 따라서 안개의 종류는 크게 나누어 증발과 냉각 메커니즘에 따라 분류된다.

증발에 의한 안개에는 전선안개와 증발 안개가 있으며 따뜻한 공기와 찬 공기가 만나는 온난전선이나 한랭전선부근에서 따뜻하고 습윤한 공기가 전선면을 따라 상승하게 되는데 이때 이 공기가 온난전선내의 찬 공기와 만나면 냉각되고 포화되어 응결이 일어나서 비가 오며, 빗방울이 하강하면서 안개를 생성한다. 이를 전선안개라 하고 주로 습기 많은 온난전선 부근에서 잘 발생한다.

증발안개는 찬 공기가 따뜻한 수면 또는 습한 지면 위를 이동해 오면 기온과 수온의 차에 의해 수면으로부터 물이 증발하여 수증기가 공기속으로 들어오게 된다. 수증기의 공급에 의해 공기가 포화되고, 응결되어 안개가 발생한다. 마치 김이 올라오는 것처럼 보인다고 해서 김안개라 하고 또 증발에 의해 안개가 생성되므로 증기안개라 한다. 이른 봄이나, 겨울철 해수나 호수(안동댐, 청평댐, 대청댐 등)의 온도가 높고 그 위의 공기의 온도가 매우 낮으므로 수면으로부터 증발이 많이 일어나 증발안개가 잘 발생한다.

냉각에 의한 안개에는 활승안개, 복사안개와 이류안개로 나눌 수 있다. 활

승안개는 습윤한 공기가 산비탈을 따라 빠르게 상승해 가면서 냉각되고 포화되어 응결이 일어나 안개가 발생한다. 이 경우 상승하는 공기가 외부의 다른 공기와 열을 주거나 받거나 하지 않고 상승해 가면서 단지 이 공기에 미치는 기압의 감소에 따라 공기가 팽창을 하게 되어 냉각되므로 단열과정에 의한 생성되는 안개이다. 우리나라에서 안개 다발지역인 강릉연안, 속초연안과 같이 연안의 동쪽에 바다가 있어 습윤한 공기가 바다에서 서쪽에 있는 높은 산으로 활승하면서 활승안개가 잘 발생한다.

복사안개는 해가 진 후 야간에는 낮에 태양복사에 의해 가열된 공기와 지면이 동시에 냉각되게 된다. 지표의 흙은 공기보다 열용량이 작아 빠르게 차진다. 따라서 지표부근의 공기는 찬 지표에 의해 많이 냉각되고, 그 위의 공기는 약간만 냉각되어 지면에서 위로 올라 갈수록 기온이 높아진다. 이것은 기온의 역전이라 하고 이 층을 역전층이라 하며, 무거운 찬공기가 밑에, 가벼운 따뜻한 공기가 위에 있어 매우 안정층을 형성한다. 이 때 지면에서 공기가 많이 냉각되어 포화되고 응결이 일어남으로 복사안개라 한다. 또는 역전층 내에서 일어난다고 해서 역전안개라고도 한다. 이 안개는 대부분 육지 내에서 새벽이나 늦은 밤에 끼는 안개이며, 아침에 해가 뜨면 태양복사에너지에 의해 사라진다.

이류안개는 차가운 지면이나 수면 위로 따뜻한 공기가 이동해 오면 이 공기의 밑 부분이 냉각되고 포화되어 응결이 일어나므로 이류안개라 한다. 특히 연안이나 해상에서 발생하는 안개는 대부분이 이류안개이며, 이 안개를 연안무(Coastal Fog), 해무(Marine Fog or Sea Fog)라고 한다. 속초공항의 안개는 먼저 바다로부터 이류 되어 온 습윤한 공기에 의해 먼저 이류안개가 발생하고, 이 안개가 속초공항을 거쳐 설악산쪽으로 활승(상승)하면서 활승안개가 되기도 한다. 따라서 이를 이류-활승안개라 한다. 이때 강한 바람이 불면 수렵자들이 깨어져서 안개생성이 잘되지 않지만, 약한 바람이 불면 안개생성이 잘 된다.

해상 및 연안에서 발생하는 안개는 앞서 기술한 안개의 발생 조건 중 증발에 의한 것과 냉각에 의한 것 모두 발생할 수 있다. 또한 연안 지형의 영향을 많이 받기 때문에 일반적으로 예측하기에 어려움이 있으나 근래에 들어 수치모델에 의한 연안 안개 발생을 예측하는 단계에 이르고 있다.

따라서 3장에서는 동해에서 발생하는 안개의 생성원인별로 분류하고 이를 예측하기 위한 수치모델 연구를 통해서 해무발생 예측 및 검증 연구 결과를 소개하고자 한다.

2.3 해무 발생 원인별 사례 분류

모형을 이용한 해무 발생 수치 실험을 위해서 대표적인 해무 발생 원인별 사례의 선정이 필요하다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 해무는 다양한 기구에 의해서 발생하는데 그 중 증기 안개, 이류 안개, 전선 안개 등이 대부분을 차지한다(기상청, 1997). 따라서 본 연구에서는 지난 1999년에서 2000년까지의 두 해 동안 울

릉도에서 발생한 안개 발생 일을 기본으로 위 세 가지 안개에 대한 대표적인 사례로써 각각 증기 안개 사례, 이류 안개, 전선 안개 사례를 분류하였다(Table 2.1 참조).

Table 2.1. Representative fog case the East coast of Korea.

	Sort of fog	Period	Characteristics
Case 1	Stream fog	12-14 Jul. 1999	Cold and dry airmass is advected according to extension of Okhotsk high pressure system
		1 Jun. 2000, 5 Jul. 1999	
Case 2	Advection fog	28-30 Jul. 1999	Warm and damp air is advected according to extension of North Pacific high pressure system
		25 May., 19, 25 Jun., 28 Jul., 7, 9 - 10,15,30 Aug. 2000	
Case 3	Frontal fog	1 - 3 Jul. 1999	Passing a Warm front accompanied by low pressure system
		28 May, 24 Jun., 16 Jul., 27 Aug. 2000	

2.4 증기 해무 사례의 종관적 상태

본 연구에서 선택한 사례 기간인 1999년 7월 12-14일과 2000년 6월 1일, 19일, 7월 5일은 한반도 전역이 오호츠크해 고기압의 영향에 있었던 기간이다. Fig. 2.1은 7월 12일 00Z부터 13일 12Z까지의 지상일기도이다. 오호츠크해의 강한 고기압의 확장으로 말미암아 장마전선이 정상적으로 북상하지 못하고 있었으며, 북위 30° 부근에는 열대 저압부가 위치하고 있었다. 이와 같은 기압 배치는 소위 북고 남저형의 종관 분포로써, 이러한 종 관계가 나타날 때, 북쪽의 오호츠크해의 찬 공기가 북동 기류를 타고 남하하면서 남쪽의 열대 저압부로 몰려들게 된다. 이 때 남쪽으로 장출하는 한기가 상대적으로 따뜻한 해면 위로 하층 유입되면서 해무나 층운형의 저층운이 형성하는데 이 때 발생하는 안개는 전형적인 증기 해무라 할 수 있다 (Kikuro et. al., 1998; 김해동, 1997; Kozo Ninomiya et. al.,1996).

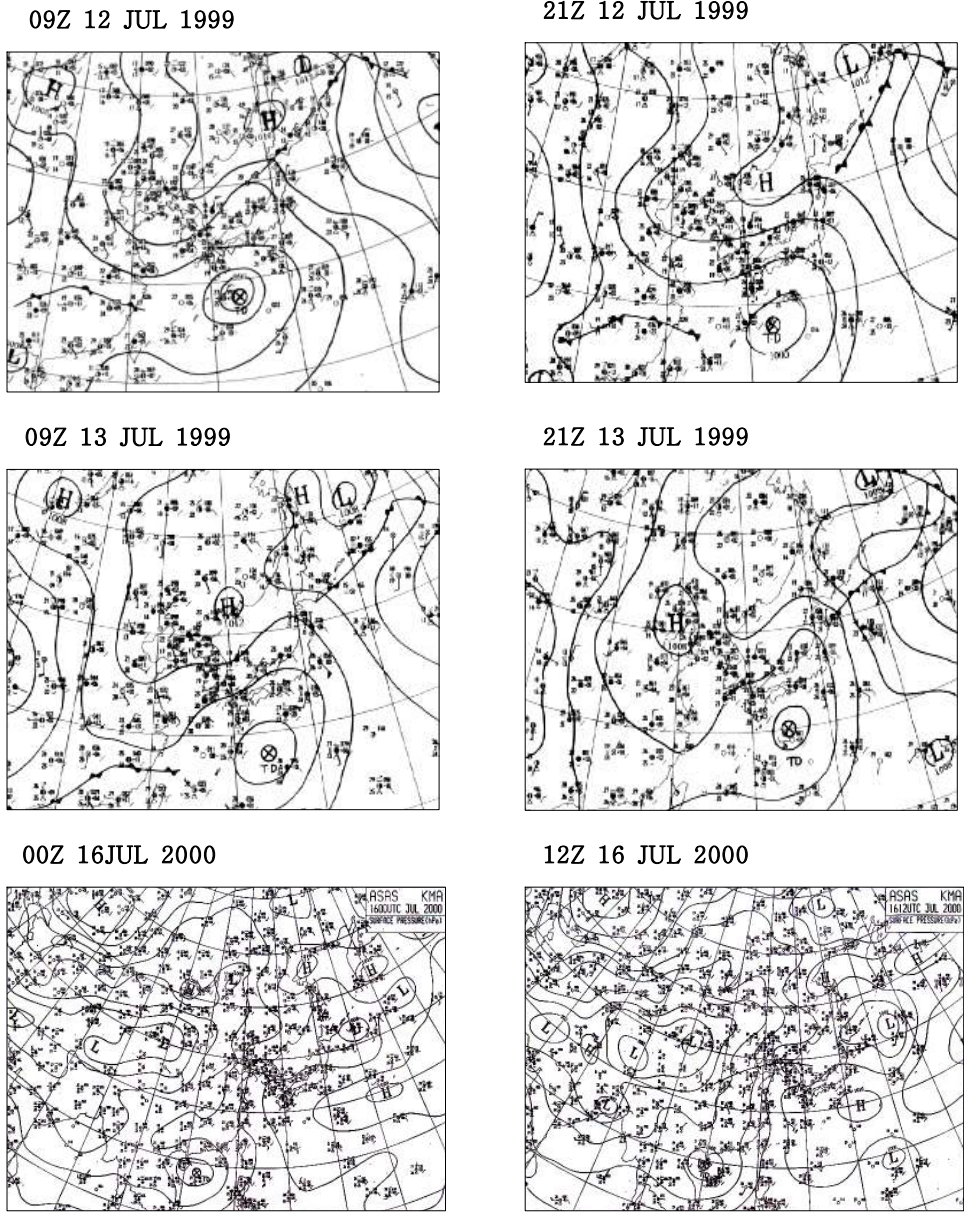


Fig. 2.1. The Surface weather chart during the Fog case 1(12-14 Jul. 1999, 16 Jul. 2000).

따라서 이 기간 동안에 발생한 해무는 오호츠크해 고기압의 확장에 따른 찬 북동기류의 동해상 이류에 의해 발생한 전형적인 증기 해무라 할 수 있다.

위성자료에서 살펴 본 해면 온도와 기온과의 해기차를 살펴보면 평균적으로 안개 발생기간동안 해면 온도가 기온보다 2°C 정도 높은 것으로 나타났다. 즉, 중관 일기도에 의하면 오호츠크해의 찬 공기가 상대적으로 따뜻한 해수면위로 이류하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 증기 안개는 찬 공기가 따뜻한 해면 위로 이류되면서 접촉면에서의 증발에 의해 안개가 발생한다. 이와 같은 증기해무의 사례를

2000년 6월 1일과 7월 4일의 NOAA-14(CH3-CH4)에 의한 위성 해무탐지 사진을 살펴 보았다. 위성사진에 나타나는 주황색은 지상에서 850 hpa 까지의 안개 또는 하층운을 나타내고 녹색은 850 hpa 에서 700 hpa 사이의 안개 또는 하층운을 의미하는 것이다. 2000년 6월 1일과 7월 4일에 발생한 안개는 전형적인 증기해무로써 위성 사진에도 울릉도 해역에 주황색으로 나타나 있다. 증기해무시에는 맑은 날에 발생하는 특징을 가지고 있어서 위성사진에도 중층운이나 고층운에 가리지 않기 때문에 위성에 의한 해무탐지가 가장 잘 되는 사례이다(Fig. 2.2).

또한 이 기간(2000년 6월 1일)의 DUT-METRI-2000에서 예측된 해무 발생의 환경 조건을 분석해 보기 위해서 Fig. 2.3과 2.4에 예측된 해상풍과 운저고도(ceiling height), 울릉도 상층의 바람 단면도와 상대습도 분포도를 나타내었다. DUT-METRI-2000에서 예측된 해상풍을 살펴보면 울릉도 주변은 2 m/s이하의 약한 남서풍이 불고 있었고, 울릉도 상공은 구름이 없는 맑은 날씨를 보이고 있었으며 상대습도는 85%이상으로 안개 예측이 가능하였다(Fig. 2.3, 2.4).

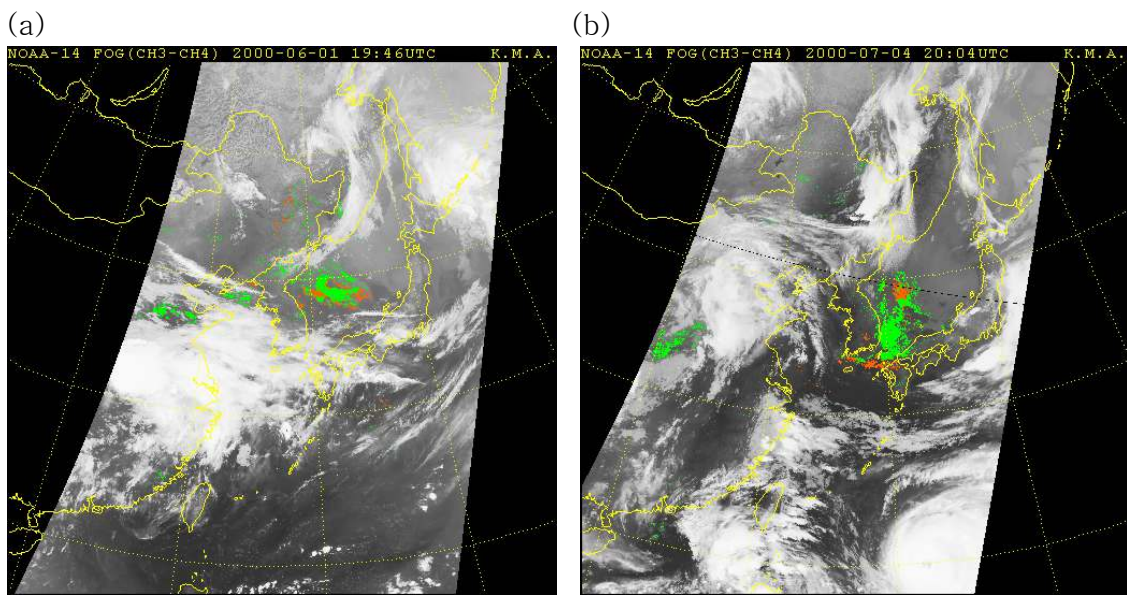


Fig. 2.2. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4) (a)19:46 UTC 1 Jun, 2000, (b)20:04 UTC 4 July, 2000.

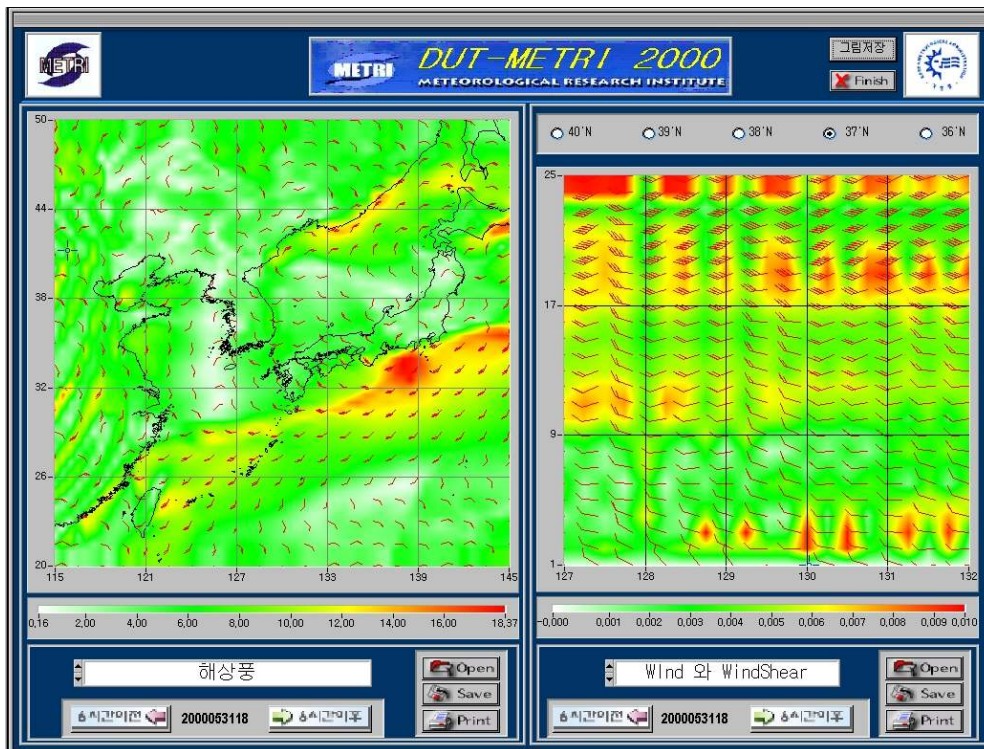


Fig. 2.3. The distribution of Horizontal and Vertical surface wind along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC May. 31.

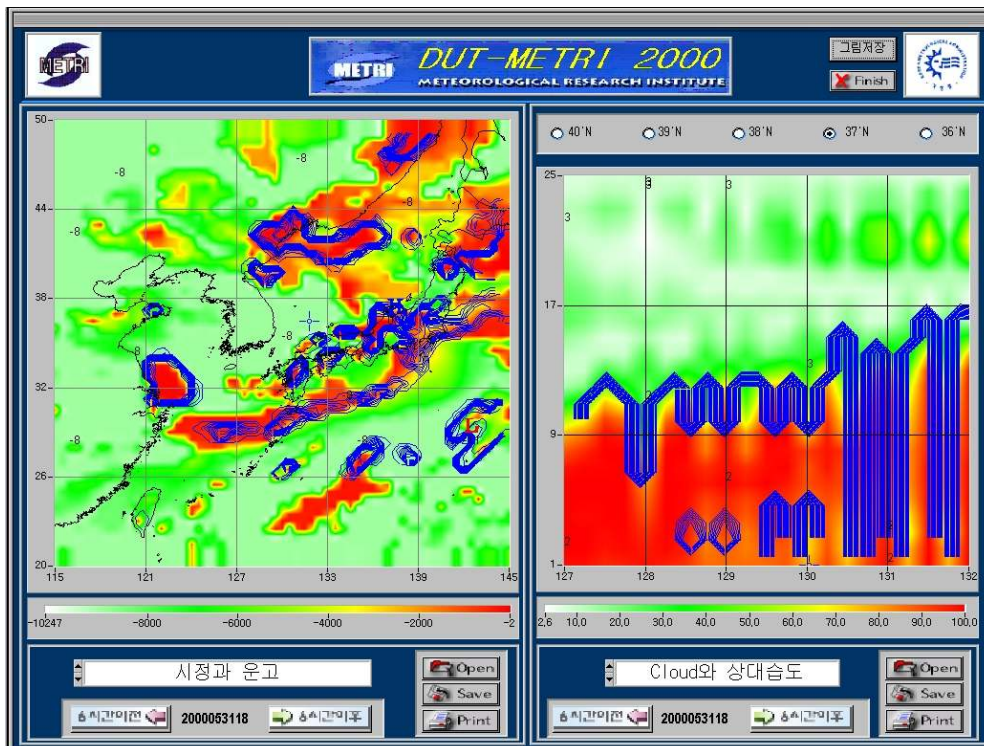


Fig. 2.4. The distribution of Horizontal and Vertical ceiling height along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC May 31.

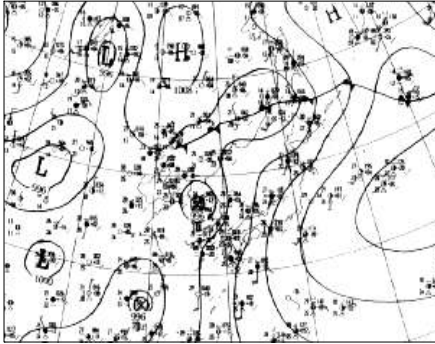
2.5 이류 해무 사례의 종관적 상태

구축된 MM5 모형을 이용한 해무 사례 실험을 위하여 선택한 사례 기간인 1999년 7월 28 - 30일과 2000년 5월 25일, 6월 19, 25일, 7월 28일과 8월 7일, 9-10일, 15일, 30일은 북태평양 고기압의 확장으로 동해 전역이 고기압의 가장자리에서 영향을 받았던 기간이다 (Fig 2.5).

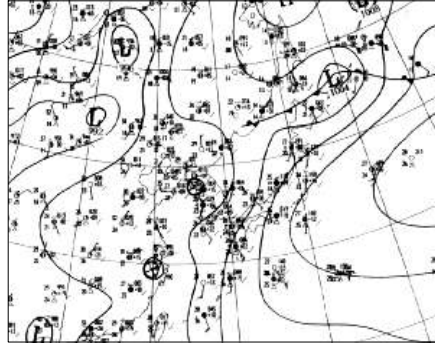
이 기간은 북태평양 고기압에 의한 남풍 계열의 바람이 동해로 유입되면서 수증기가 이류되어 안개 발생을 위한 종관적인 상황이 전개된 시기이다. 이러한 상황에서 발생할 수 있는 해무는 이류 해무라 할 수 있다. 그러나, 이와 더불어 해수온이 여전히 높았기 때문에 이기간 동안 발생한 해무는 증기 해무의 성격을 어느 정도 갖고 있는 이류 해무로 보아야 한다.

안개 발생 기간동안 기온과 해면온도와의 차이는 사례-1과는 달리 평균적으로 1℃ 이상 기온이 해면온도보다 높게 나타남을 보인다. Fig. 2.5의 지상일기도와 함께 고려할 때 이는 지속적인 남풍의 영향으로 따뜻하고 습윤한 공기가 동해상으로 유입되기 때문이며, 따라서 이 기간에 발생한 안개는 습윤한 공기가 이류되어 상대적으로 온도가 낮은 해면 위에서 응결하는 이류 안개의 성격을 가진 것으로 사료된다.

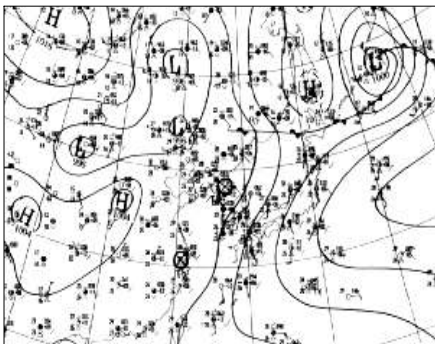
12Z 28 JUL 1999



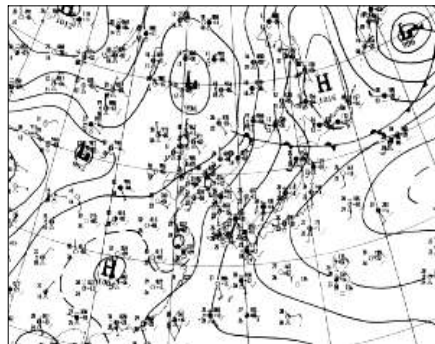
00Z 29 JUL 1999



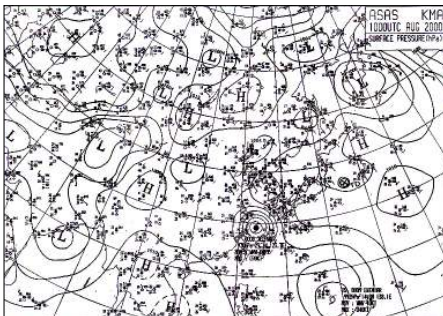
12Z 29 JUL 1999



00Z 30 JUL 1999



00Z 10 AUG 2000



12Z 10 AUG 2000

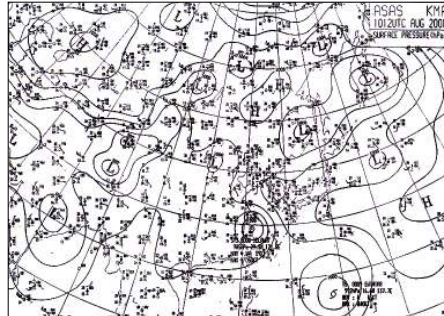


Fig. 2.5. The Surface weather chart during the Fog case(28 July 1999, 10 August 2000).

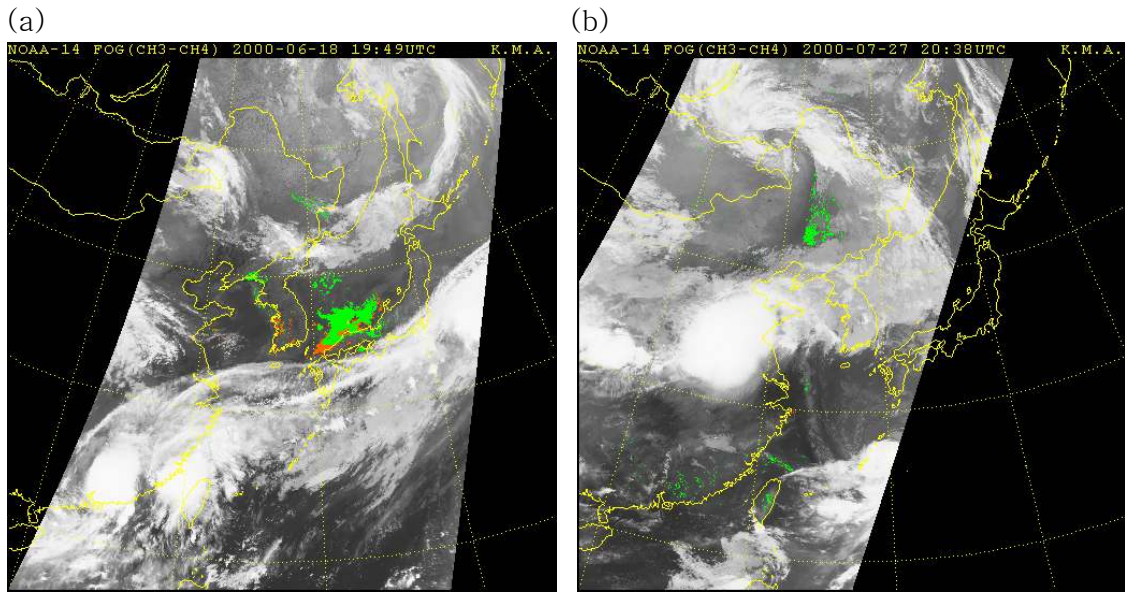


Fig. 2.6. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4)
 (a)19:49 UTC June, 18, 2000 (b)20:33 UTC July, 27, 2000.

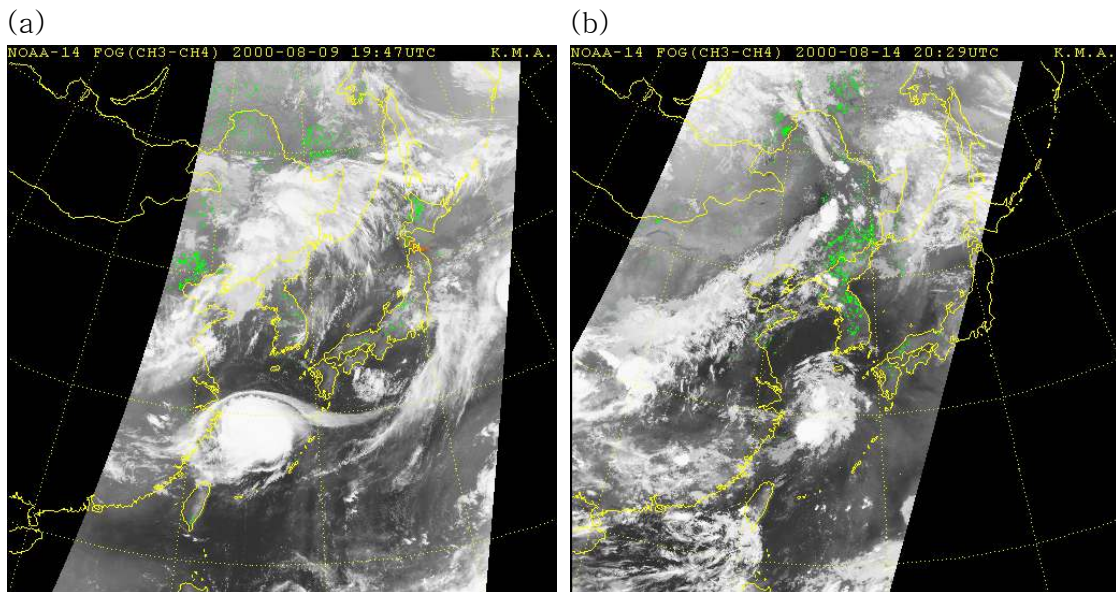


Fig. 2.7. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4)
 (a)19:47 UTC Aug, 9, 2000 (b)20:29 UTC Aug., 14, 2000.

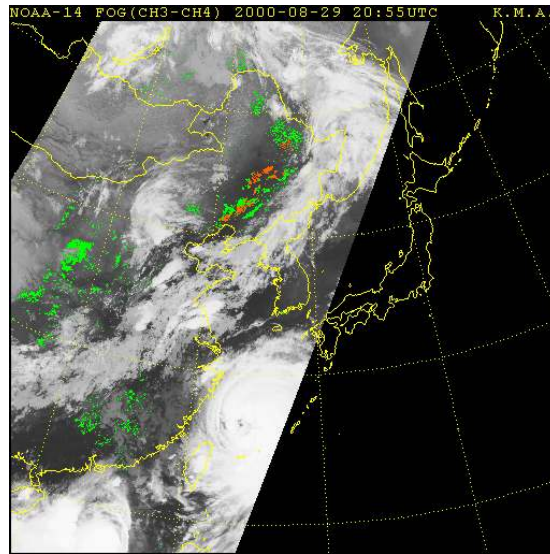


Fig. 2.8. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4) 20:55 UTC Aug., 29, 2000.

2000년 6월 19일과 8월10일, 8월15일에 발생한 안개는 이류해무로써 울릉도 주변해역의 위성사진에는 탐지가 잘 되지 않고 있다(Fig. 2.6(a), 2.7). 이류 해무는 맑은 날 또는 다량의 수증기를 머금은 저기압 가장자리에 발생하는 특징을 가지고 있어서 위성사진에는 중층운이나 고층운에 의해 가리워 지거나 맑은 상태를 나타내기 때문에 위성에 의한 해무탐지가 어려운 사례이다.

이류 해무 기간(2000년 8월 15일)의 DUT-METRI-2000에서 예측된 해무 발생을 분석해 보기 위해서 Fig. 2.9와 2.10에 예측된 해상풍과 운저고도(ceiling height), 울릉도 상층의 바람 단면도와 상대습도 분포도를 나타내었다. DUT-METRI-2000에서 예측된 해상풍을 살펴보면 울릉도 주변 해역에서 5 m/s의 남동풍이 불다가 15일 새벽 3시에는 2 m/s이하의 약한 남풍이 불고 있었고, DUT-METRI-2000에서 예측된 운저고도와 이 시각의 사진을 살펴보면 울릉도 상공은 맑은 날씨를 보이고 있었으며 DUT-METRI-2000의 단면도는 상대습도 90%, 울릉도 상공에 안개 예측이 가능하였다 (Fig. 2.7(b), 2.9-10).

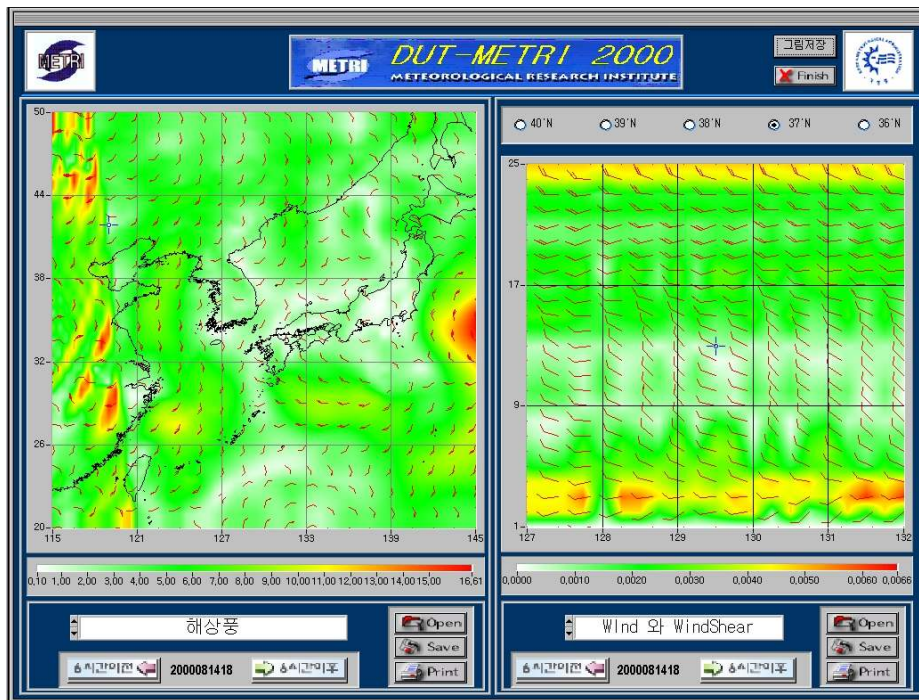


Fig. 2.9. The distribution of Horizontal and Vertical surface wind along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC Aug. 31.

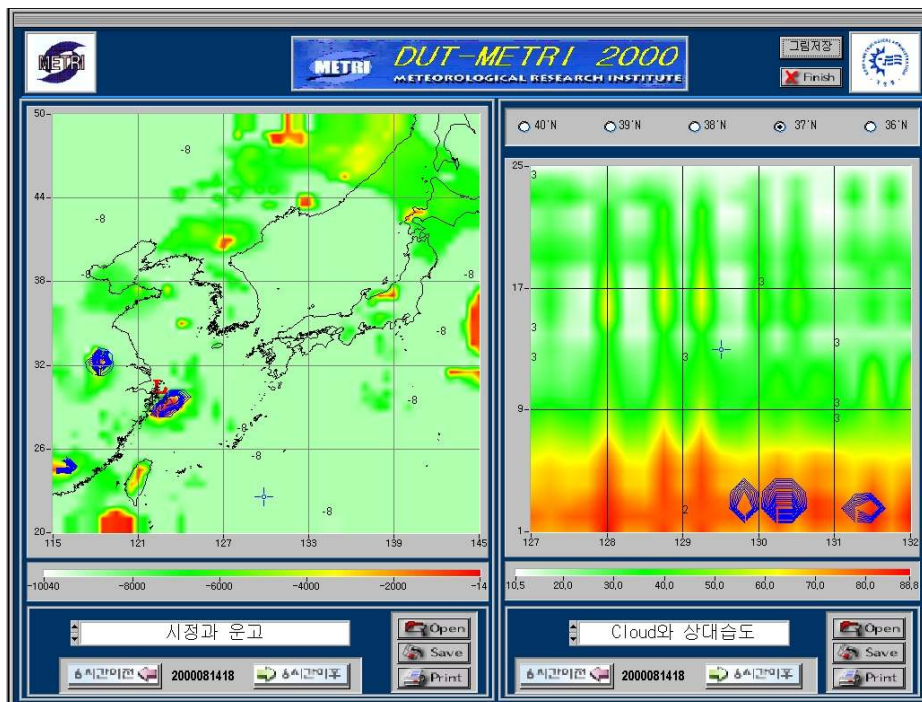
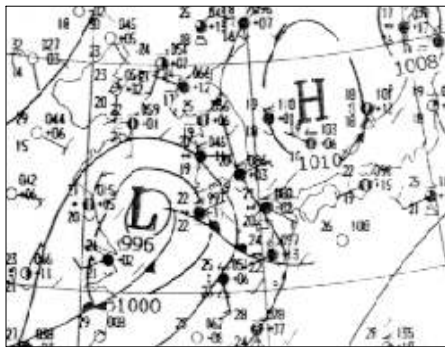


Fig. 2.10. The distribution of Horizontal and Vertical ceiling height along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC May 31.

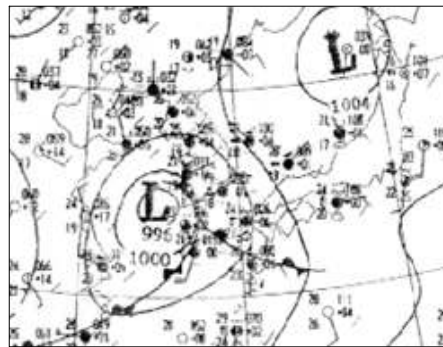
2.6 전선 해무 사례의 종관적 상태

전선 해무는 일반적으로 강수와 동반되어 발생하며 해상에서 발생하는 해무의 50% 이상을 차지하고 있는 또 다른 사례는 1999년 7월 1 - 3일과 2000년 5월 28일 6월 24일, 7월 16일과 8월 27일 동안은 동해에서 발생한 전선 해무 사례이다(Fig. 2.11). 이 기간 동안에는 한반도가 장마 전선의 영향을 받던 시기로 우리나라 서해 상에서 자리를 잡고있던 저기압계가 남해를 거쳐 동해 남부로 빠져나가면서 일본 열도와 남중국해에 장마전선이 형성되었던 시기이다. 따라서 이시기에 발생한 해무는 전선 해무라 할 수 있다. Fig. 2.11는 7월 1일 21Z부터 3일 09Z까지의 지상일기도 이다. 사례3 동안은 저기압계가 북동진 하면서 동해상에 충분한 수증기의 공급과 한랭 전선 후면에서 찬공기의 이류가 있었으며, 이에 따라 강수에 의한 전선면에서의 증발에 의해 안개가 형성되었을 것으로 판단된다. 안개 발생기간 동안 기온이 해면 온도보다 상대적으로 낮은 상황이었으며, 이 사례는 찬공기의 이류와 수증기의 유입이 저기압계 운동을 통하여 복합적으로 일어나는 전형적인 전선 해무 사례라 본다. DUT-METRI-2000 표출시스템은 해양기상예측모형의 역할 외에도 화면상에서 Fig. 2.12와 같이 전선기압이 가능한 표출시스템이다. 이에 전선해무 사례기간의 2000년 7월 15일의 해면기압과 전선위치와 강수예측을 나타내었으며 이 시각의 위성사진과 비교하였다(Fig. 2.12).

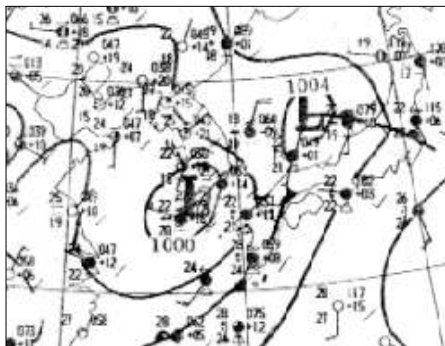
21Z01JUL 1999



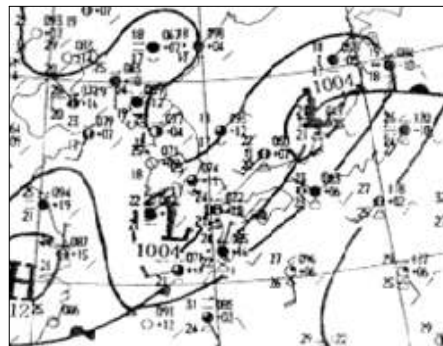
09Z02JUL 1999



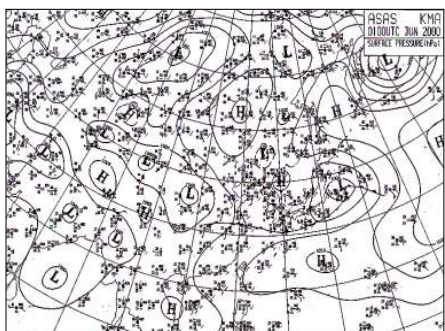
21Z02JUL 1999



09Z03JUL 1999



0100 JUN 2000



0100 JUN 2000

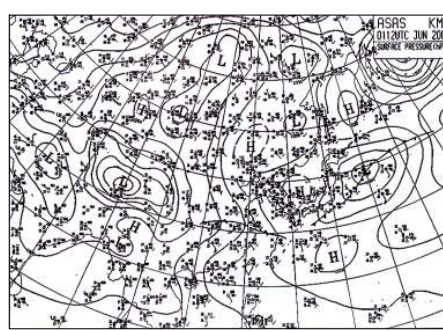


Fig. 2.11. The Surface weather chart during the Fog case(1-3 July 1999, 1 June 2000).

전선안개 발생시의 위성사진을 살펴보면 DUT-METRI-2000에서 예측된 강수대와 전선대의 위치에 구름이 분포하는 것을 볼 수 있다(Fig. 2.13(b)). 즉 전선해무 사례에는 강수를 동반한 전선대를 따라서 많은 구름이 분포하기 때문에 위성에 의한 해무탐지가 이류무와 같이 어려운 실정이다.

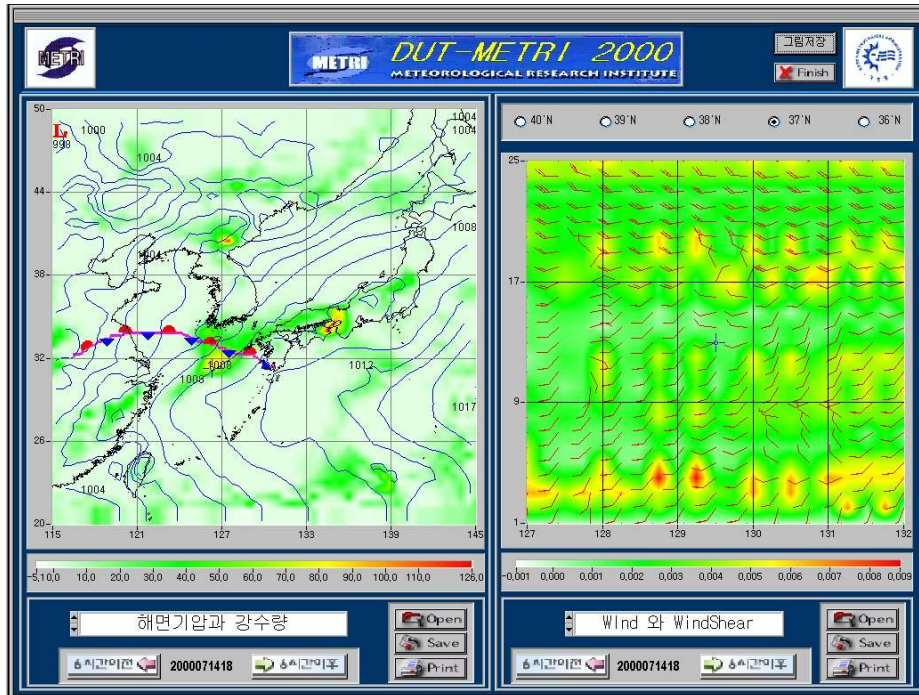


Fig. 2.12. The distribution of horizontal and vertical sea surface pressure and precipitation along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC July 15.

전선 해무 기간(2000년 7월 15일)의 DUT-METRI-2000에서 예측된 기상환경을 분석해 보기 위해서 Fig. 2.15와 2.16에 예측된 해상풍과 운저고도(ceiling height), 울릉도 상층의 바람 단면도와 상대습도 분포도를 나타내었다.

DUT-METRI-2000에서 예측된 해상풍을 살펴보면 울릉도 주변 해역에서 다소 강한 7 m/s의 남서풍이 예측되었으며, DUT-METRI-2000에서 예측된 운저고도와 이 시각의 위성사진을 살펴보면 울릉도 남부해역에 강수를 동반한 전선대와 구름영역을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다(Fig. 2.13(b), 2.16).

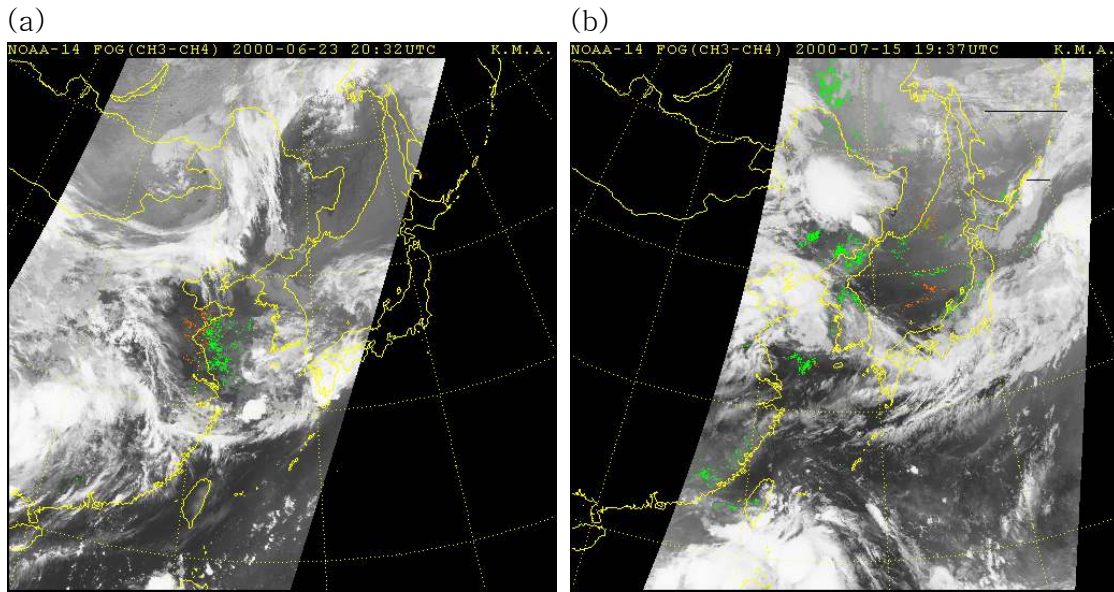


Fig. 2.13. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4) (a)20:32 UTC June 23, 2000 (b)19:37 UTC July 15, 2000.

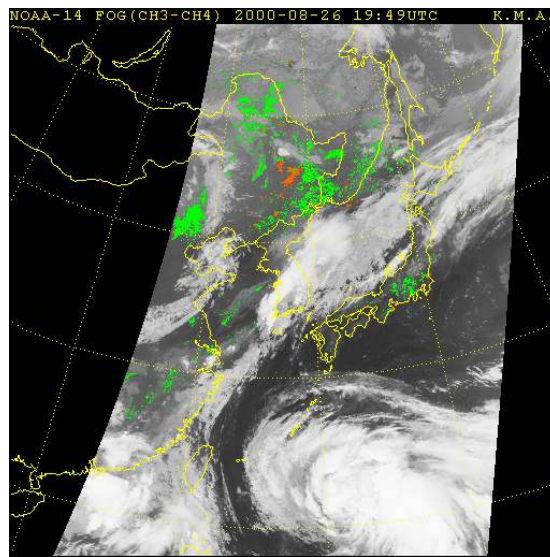


Fig. 2.14. The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4) 19:49 UTC August 26, 2000.

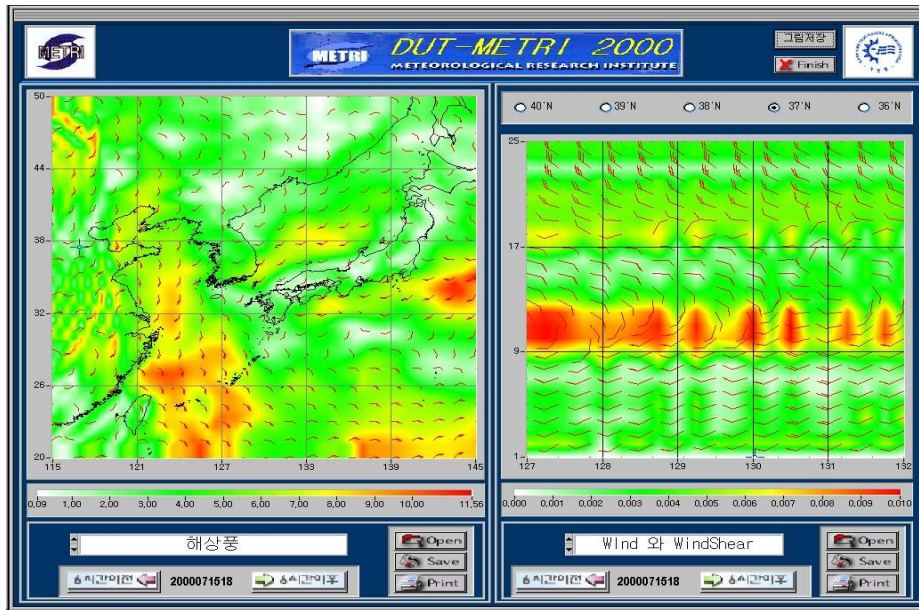


Fig. 2.15. The distribution of horizontal and vertical surface wind along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC July 15.

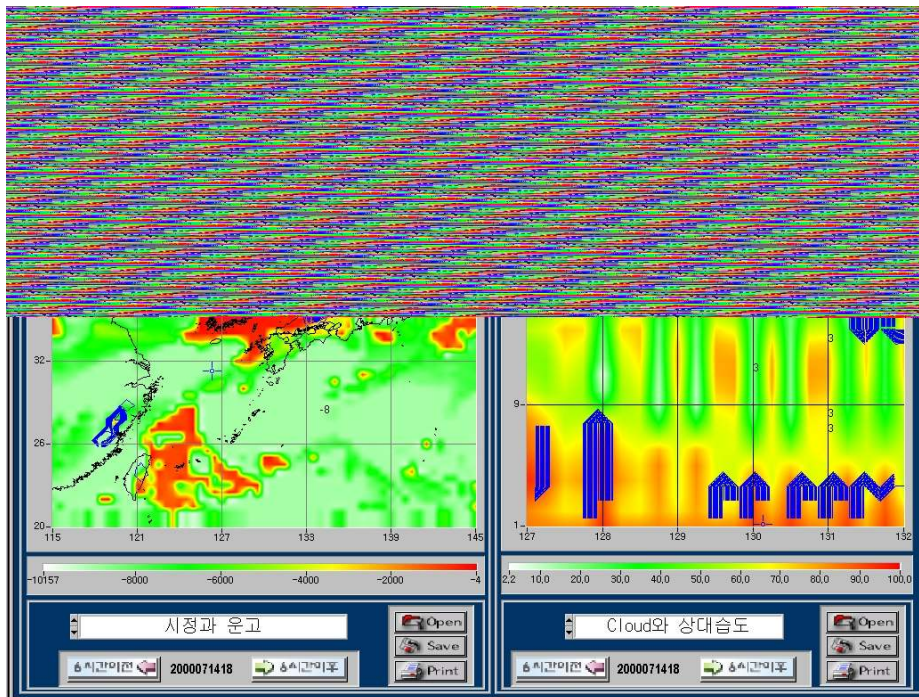


Fig. 2.16. The distribution of horizontal and vertical sea surface wind along the Ulleung Do section forecasted by DUT-METRI-2000 at 18 UTC July 15.

제 3 절 해무예측모델(MM5) 및 사례분석(II)

3.1 해무의 기후학적 특성

현재 우리나라에 설치된 지상 기상 관측망은 83개 지점의 관측소와 460개 지점의 자동 기상 관측망으로 구성되어지며, 평균 격자 간격은 15km정도이다. 그러나 비교적 조밀하게 구성되어있는 지상관측망에 비해서 해양기상관측은 해안기상관서, 해양 기상관측 부이(Buoy), 그리고 해양기상영상감시장비(CCTV)등을 통해 이루어지고 있으며, 먼바다의 기상현상 관측 및 부이 관리를 위해 150톤급 기상관측선(기상 2000호)을 운영되고 있는 것이 전부이다. 특히, 해양 기상관측 부이는 현재 서해 해상 2개 소, 남해 해상 2개 소, 동해 해상 1개 소에 각각 설치되어 운영되고 있는데 해양 기상의 중요성에 비해서 매우 열악한 관측망으로 이루어져있는 실정이다.

이처럼 전 해상에 대한 종합적이고 장기적인 자료 수집이 불가능하며 이로 인해 육상에서 발생하는 안개에 비해서 해무에 대한 발생 특성 및 역학적 이해가 부족한 실정이다. 그러나 해무의 기후학적 자료분석이나 해양학적·지형적 특성에 대한 연구는 그 지역에서 발생하는 해무의 특성과 역학을 이해하는데 유용한 정보를 제공한다. 따라서 본 연구에서는 지상 관측소의 20년간 일기상 자료와 국립 수산 진흥원의 18년간 연안 정지 관측소 자료를 이용하여, 우리나라 주변에 발생하는 해무 특성을 살펴보았다.

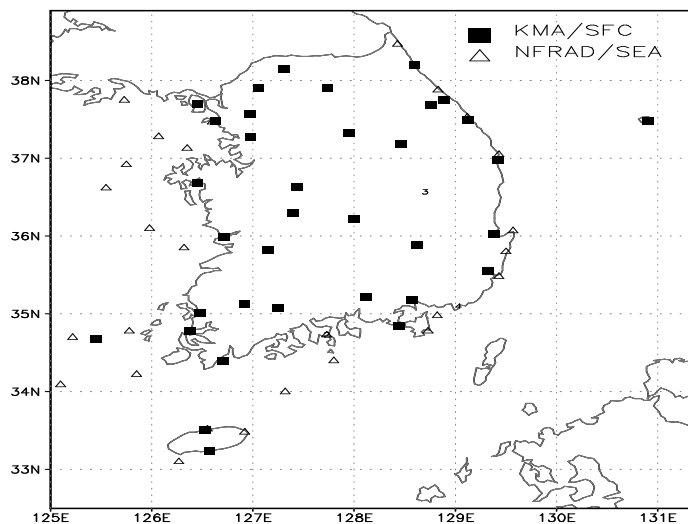


Fig. 3.1. Horizontal distribution of surface meteorological observation station(KMA/SFC) and fixed offshore observation station (NFRAD/SEA).

사용한 자료는 지상 관측소에서 관측된 일기상 자료(이하, KMA/SFC)와 국립수산진흥원의 연안정지관측자료(이하, NFRAD/SEA), 그리고 기상청의 위탁관측자료 등이다(Fig. 3.1). 먼저, KMA/SFC는 1980년부터 2000년까지 21년 간의 자료를 사용하였다. 그리고 안개 발생시 강수에 의한 저시정 효과를 배제하기 위하여 강수가 0.1 mm이상인 날은 분석에서 제외하였으며, 강수가 0.1 mm이하이면서 안개 지속시간이 1시간 이상인 날만을 분석 사례에 포함하였다. 또한 NFRAD/SEA는 매일 오전 10시에 1회 관측되며, 주로 200해리 내의 섬 지역을 포함한다. 이 자료는 해양수산부의 국립수산진흥원에서 1963년 이후 기상특성 및 해상의 특성을 이해하고자 수집되어왔다. 본 연구에서는 1983년부터 2000년까지의 18년간의 자료를 사용하였다

Fig. 3.2은 KMA/SFC에 나타난 안개 발생일수(opened bar)과 NFRAD/SEA의 안개 발생일(closed bar)수를 월별로 누적하여 나타낸 것이다. KMA/SFC의 자료의 83개 관측지점 중 울릉도, 흑산도, 제주 등의 6개 관측지점을 제외하고는 거의 대부분의 관측소가 내륙에 위치하므로 육상안개의 특성을 대표하는 것으로 사료되며, NFRAD/SEA 자료는 우리나라 200해리 내의 해상에 위치한 섬 지역에서 관측된 자료로 해상에서 발생하는 해무의 특성을 대표 할 수 있다고 사료된다. 그림에서 나타나듯 육상의 안개(opened bar)는 계절에 상관없이 거의 연중 발생하고 있으나 반면에 해무(closed bar)의 경우는 4월부터 증가하기 시작하여 7월에 최빈월이 나타나며, 가을철과 겨울철에는 거의 안개 발생일수가 급격하게 감소함을 보인다. 이는 해양이 육상에 비해서 큰 열적 관성을 가지고 있기 때문에 대기의 기온이 해수온도에 비해서 급격하게 높아짐에 따라 평균 해기차가 양의 값을 가지는 난절기(4월-8월)에 발생 빈도가 높아지는 것이다(김문옥, 1998; 기상청, 1997).

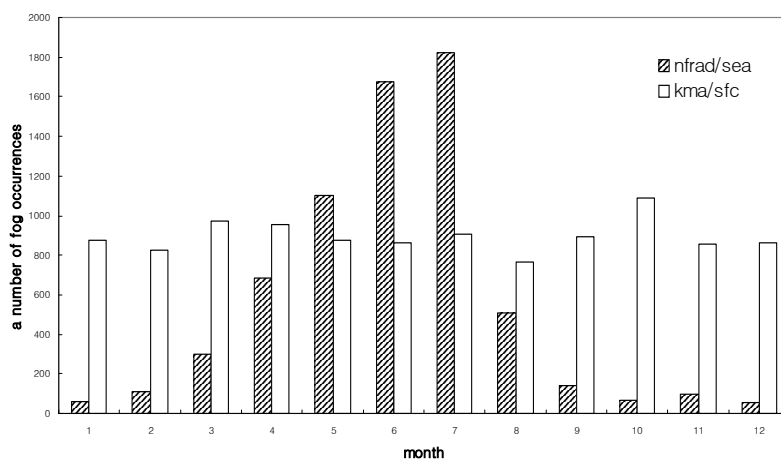


Fig. 3.2. Observed number of fog occurrences.

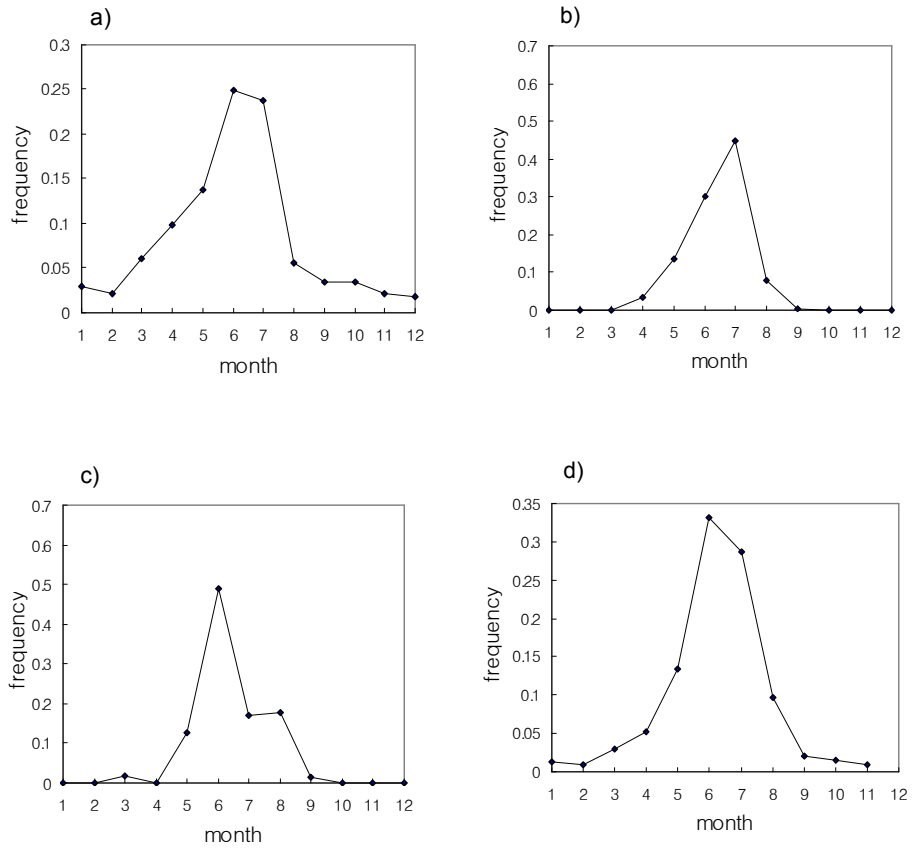


Fig. 3.3. Observed occurrence frequency of sea fog around Korean Peninsula for a) West sea, b) South sea, c) East sea and d) all around the peninsula.

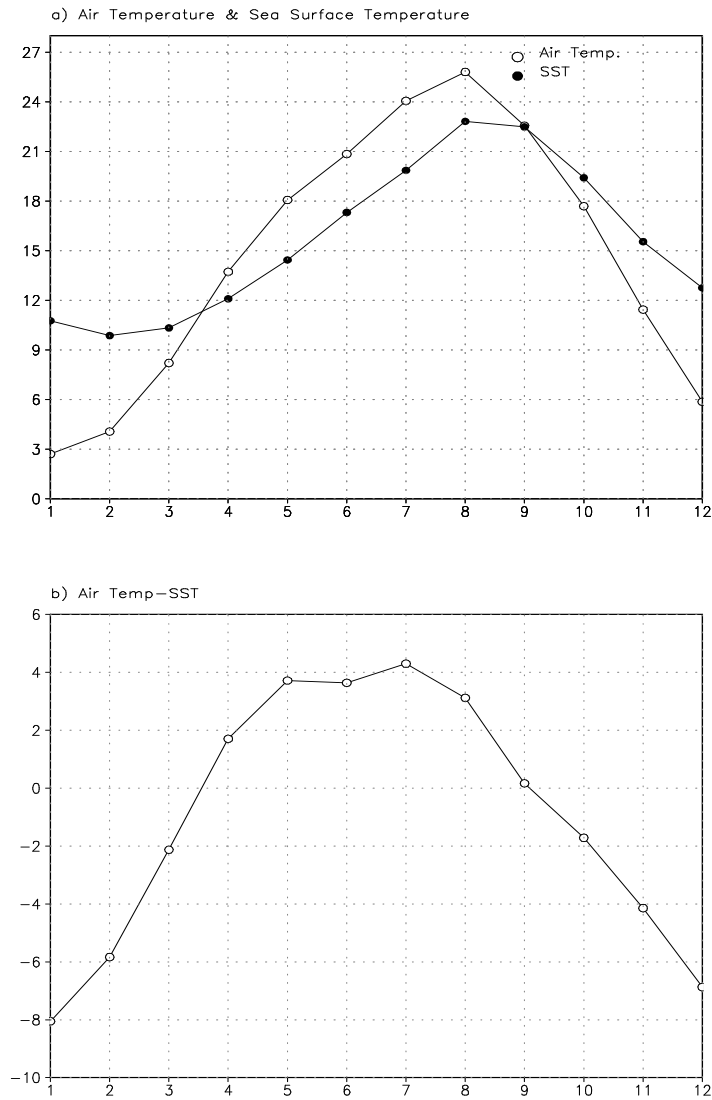


Fig. 3.4. Seasonal variability and difference of (a) monthly mean Air temperature and sea surface temperature and (b) the difference between the two around Korean Peninsula(unit: °C).

Fig. 3.3은 우리나라 주변해역에서 발생한 해무의 발생 빈도를 지역별로 나누어 살펴본 것이다. (a)는 서해, (b)는 남해, (c)는 동해 그리고 (d)는 우리나라 전 해상에서 발생하는 해무의 발생빈도이다. 해역별로 약간의 차이는 있으나 우리나라 근해에서 발생하는 해무는 6월과 7월에 빈도가 가장 높으며, 4월에서 8월까지의 안개 발생빈도가 전체의 80-90%를 차지하고 있다. Fig. 3.2과 3.3에서 살펴본 것처럼 난절기인 4월에서 8월 사이에 안개의 발생이 빈번히 나타나는 요인은 기온과 해수온도와의 계절적인 특성으로부터 찾을 수 있다.

Fig. 3.4는 우리나라 주변해역의 기후학적 월평균 해수온도와 기온 그리고 그

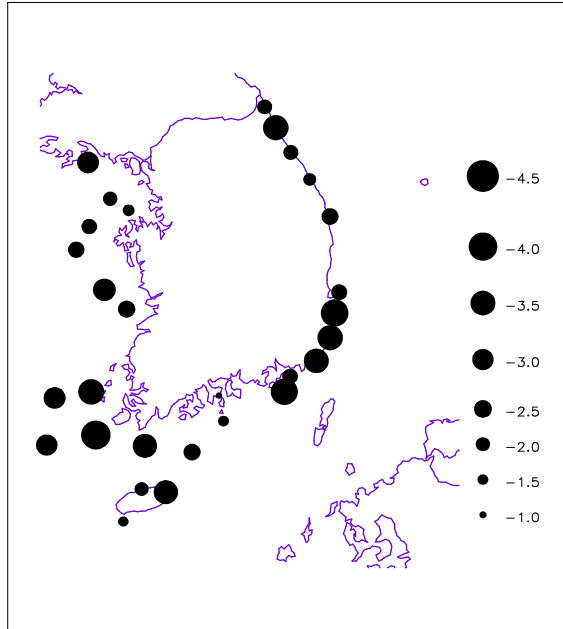
차이를 월별로 나타낸 것이다. 국립 수산 진흥원의 18년 연안 정지 관측 자료를 이용하였다. a)는 기온과 해수온의 분포이며, b)는 기온과 해수온의 차이이다. 그림에서 4월부터 기온이 해수온보다 높아지기 시작하여 8월 이후 해수온보다 낮아지는 분포를 보이고 있다. 대기와 해양간의 열적 관성 차이에 의해서 열의 강제에 빨리 반응하는 대기 온도가 해수온에 비해서 급속하게 증가하는 4월부터 대기와 해양간의 해기차가 커진다. 이처럼 대기의 온도가 해수온보다 높았던 기간이 해무 발생이 높았던 기간(Fig. 3.2, Fig. 3.3)과 일치한다. 비록, 해상에서 발생하는 해무의 발생 역학을 위와 같이 단순히 판단하기는 어렵지만 안개 발생시의 평균적인 대기와 해양의 상태를 보여준다(이해진, 2000; 변 등, 1997).

Fig. 3.5는 NFRAD의 연안정지 관측소 자료로부터 1983년부터 2000년까지 총 18년 간의 우리나라 근해에서 발생한 안개 기간동안의 평균 해기차(a)와 비안개 기간동안의 평균 해기차(b)를 나타낸다. 그림에서 보듯이 대부분의 해상에서 안개 발생시 3-4°C 정도의 양의 해기차를 가지며, 반대로 안개가 발생하지 않은 기간동안의 평균 해기차는 음의 해기차를 나타내고 있다. 그리고 Fig. 3.6은 Fig. 3.5와 같이 안개 기간과 비안개 기간에 대한 평균 해기차의 분포를 해역별 정지 관측소별로 구분하여 살펴본 것이다. 안개 기간동안 우리나라 대부분의 해역에서 양의 해기차를 가지며, 특히 황해상에서 발생하는 안개의 경우는 다른 해역에 비해서 해기차가 평균적으로 약 3°C 정도 비교적 크게 나타난다. 이와 대조적으로 비안개 기간동안에 황해상의 해기차는 거의 나타나지 않거나 약 -1°C 정도로 나타난다. Fig. 3.5와 3.6을 종합해보면, 전반적으로 비 안개기간에는 음의 해기차를 가지고, 안개 기간에는 양의 해기차를 가지는 특성을 가진다.

Fig. 3.7은 NFRAD의 1983년부터 2000년까지 총 18년 간의 연안정지 관측소 자료로부터 우리나라 근해에서 발생한 안개 기간동안의 평균 풍속(a)과 비안개 기간동안의 평균 풍속(b)을 나타낸다. Fig. 3.6과 달리 풍속의 경우는, 안개기간과 비안개 기간에 대한 차이가 크게 나타나지 않으나 여기서 주목할만한 특성은 황해 남부 지역인 흑산도 주변 지역에서 안개 기간동안 평균 풍속이 3-4m/s로 다른 해역에 비해 강한 바람이 안개 발생 역학에 기여하고 있음을 보여준다.

Fig. 3.8은 육지안개, 연안안개, 그리고 해무의 특성을 보다 명확하게 살펴보고자 각 안개를 대표하는 원주(a), 진주(b), 인천(c), 속초(d), 울릉도(e), 그리고 제주(f) 관측소에서 관측된 안개 발생시의 Clausius-Clapeyron diagram(이하, C-C diagram)를 보인 것이다. 그림에 나타난 굵은 실선은 온도에 따른 포화 비습선을 나타내며, 얇은 실선은 안개 발생시의 비습에 대한 평균 분포를 나타내는 추세선이다.

a) Fog Cases



b) None Fog Cases

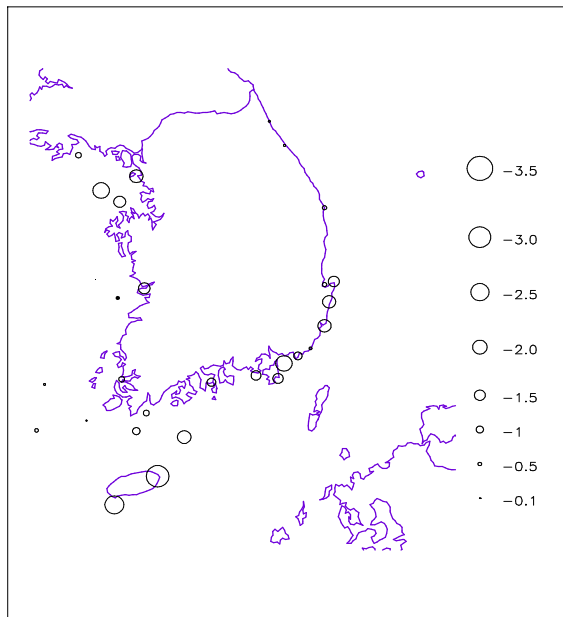
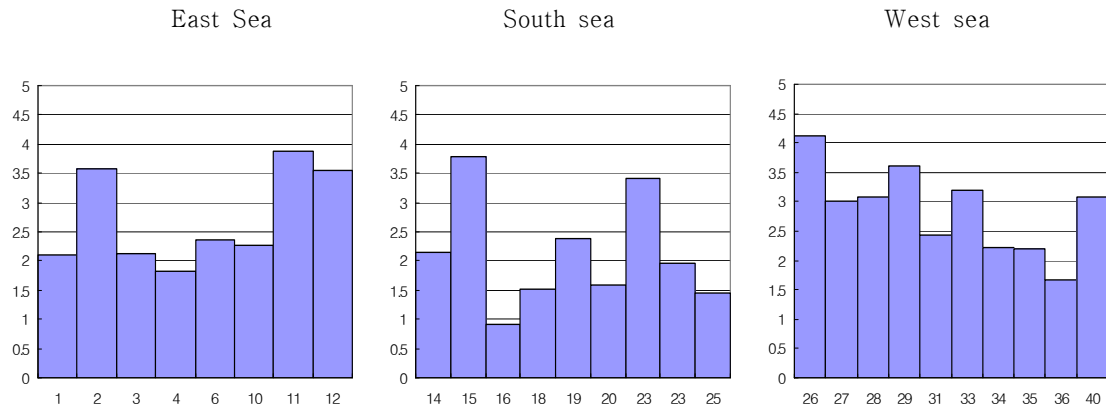


Fig. 3.5. Mean difference between surface air temperature and sea surface temperature during 18 years of 1983–2000 for a) fog cases and b) none fog cases.

a) Fog Cases



b) None Fog Cases

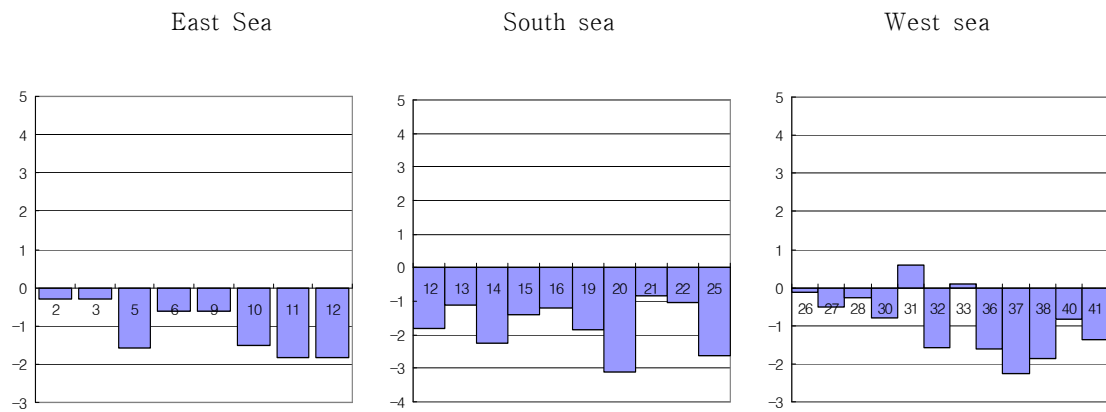
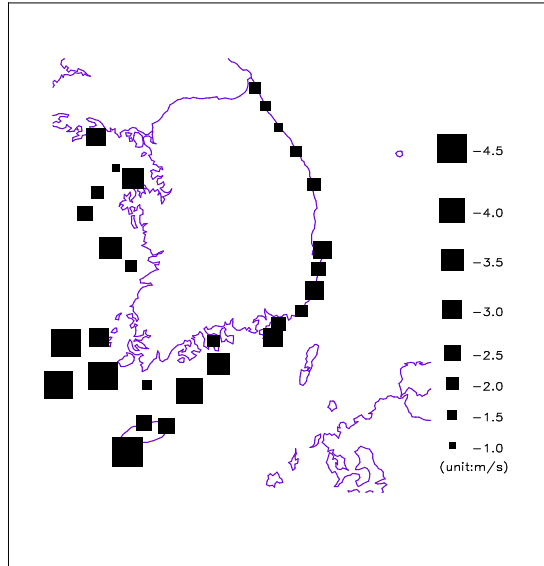


Fig. 3.6. Temperature difference between surface air temperature and sea surface temperature during 18 years of 1983–2000 for a) fog cases and b) none-fog cases at different marginal seas.

a) Fog cases



b) None fog cases

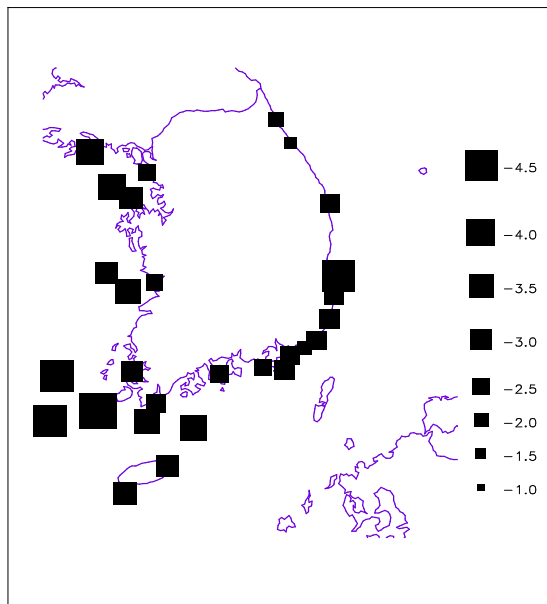


Fig. 3.7. Same as Fig. 3.5, but for mean wind speed.

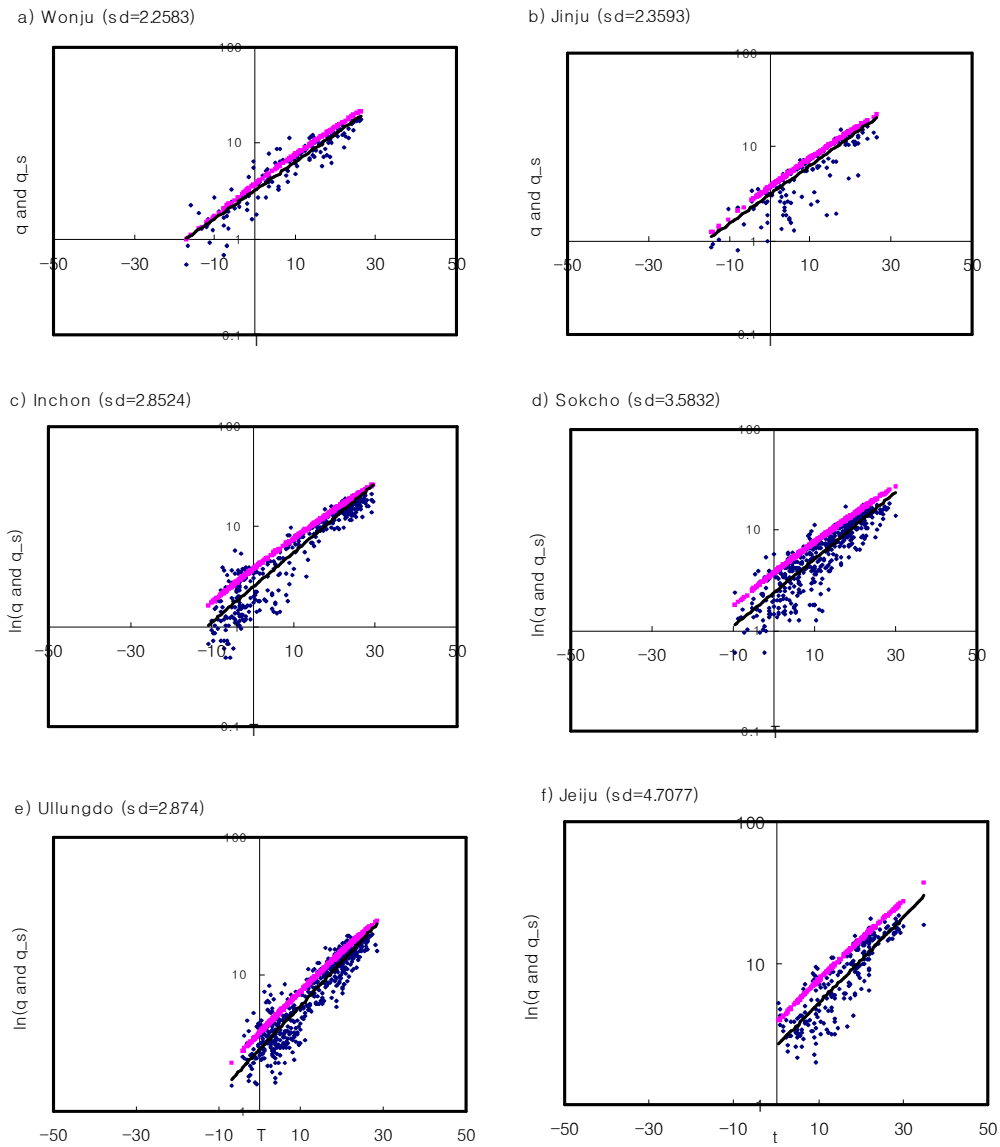


Fig. 3.8. Observed mixing ratio(q)(dotted points) and saturation mixing ratio(q_s)(solid line) as a functions of temperature for a) Wonju, b) Jinju, c) Incheon, d) Sokcho, e) Ullung Do, and f) Jeiju.

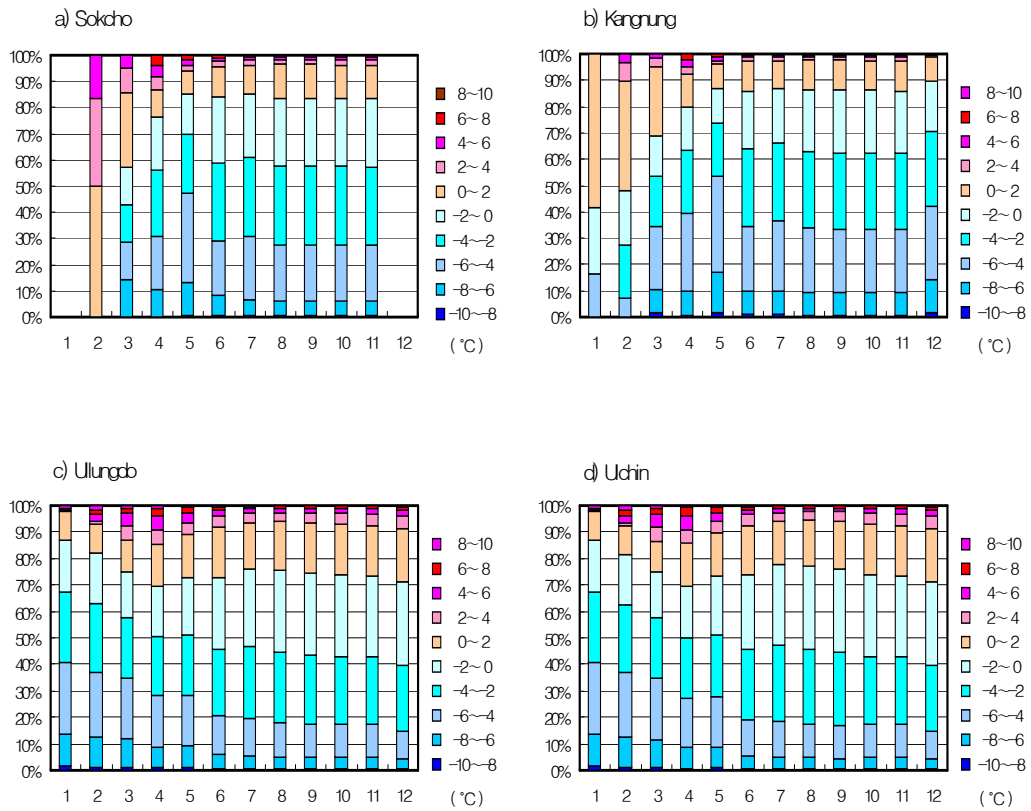


Fig. 3.9. Percentages of air temperature anomaly for the case of fog occurrence for the period of 1999–2000 at a) Sokcho, b) Kangnung, c) Ulleung Do, and d) Ulchin.

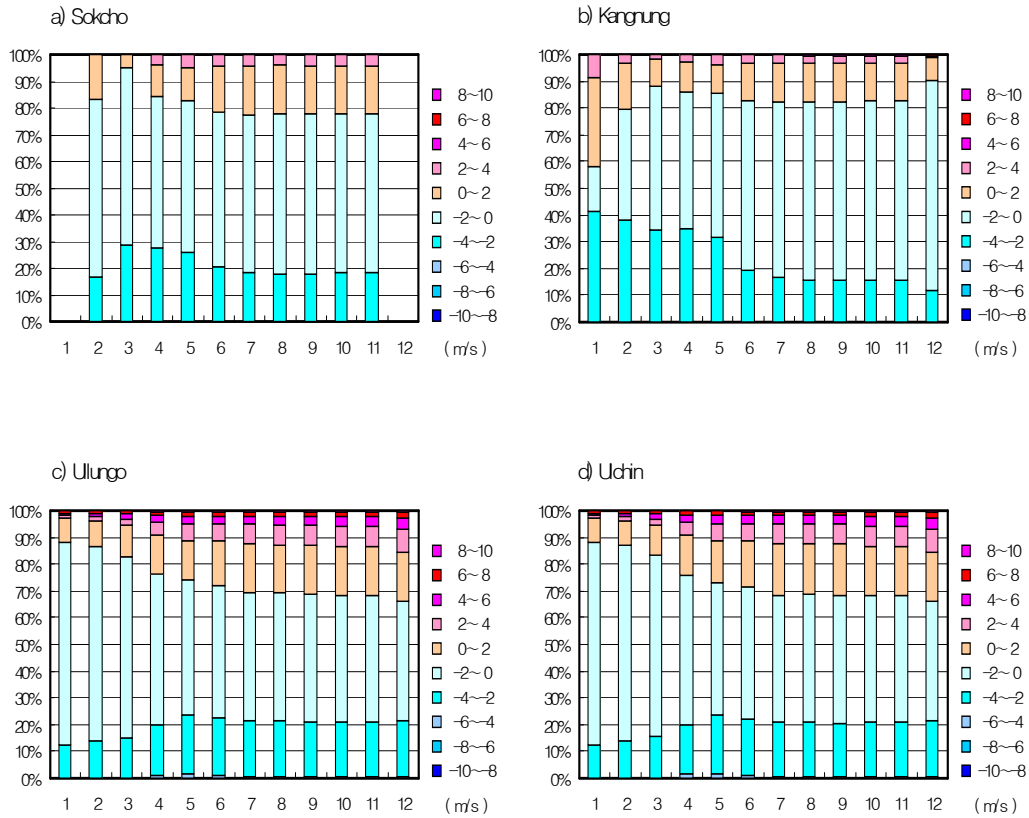


Fig. 3.10. Same as Fig. 3.9, but for wind speed.

Fig. 3.8을 살펴보면, 육상 안개의 특성을 가지는 내륙의 원주(a)와 진주(b)에서는 안개 발생시의 비습의 추세선이 C-C diagram의 포화 비습선과 거의 붙어 있으나 해무의 대표지점인 울릉도(e)와 제주(f)의 경우는 관측된 비습의 추세선이 포화 비습선보다 아래에 분포되고 있다. 또한 연안에 위치하고는 인천(c)과 속초(d)의 경우도 울릉도(e)의 모습과 유사한 분포를 나타내고 있다. 이는 해상에서 발생하는 해무의 경우, 상대습도가 100%에 도달하지 않더라도 응결핵의 영향으로 대기중의 수증기가 응결되어 포화될 수 있음을 보여주는 것으로 단순히 냉각에 의한 응결 현상으로 해무의 발생 역학을 정의하기 어려움을 단적으로 보여주고 있다. 따라서 육상에서 발생하는 안개와 구별되는 안개 예측 기준이 해상에서 발생하는 해무에 적용되어야 하며, 이에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

Fig. 3.9는 1980년부터 2001년까지 안개 발생시 월평균 기온에 대한 편차의 월별 분포를 살펴본 것이다. 그림에서 x축은 월을 의미하며, y축은 월평균 기

온에 대한 편차들의 분포의 비를 의미한다. (a) 속초, (b) 강릉, (c) 울릉도, (d) 울진, (e) 포항, and (f) 영덕에서의 분포이다. 편차의 분포는 $-10^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ 까지 2°C 간격이다. 전반적으로 동해안에 위치하는 대부분의 관측소에서 안개 발생시 기온은 평년의 월평균 기온보다 낮게 나타나고 있다. 거의 0°C 이하의 경우가 연평균적으로 70%이상을 나타내고 있다. 이는 안개 발생시 기온이 평년보다 낮은 경우에 안개 발생빈도가 높음을 의미하는 것으로 찬공기의 이류나 유입에 의한 안개 발생 역학을 생각할 수 있다. 특히, 본 연구의 연구 대상지역인 동해 해상에서 발생하는 해무는 주로 장마 전선에 동반되어 나타나거나 연해주 지역이나 동해 북부 해상에 형성되는 찬 고기압의 영향으로 형성되는 것으로 알려져 있다(기상청, 1997).

Fig. 3.10은 1980년부터 2001년까지 안개 발생시 풍속의 평년에 대한 편차를 월별로 살펴본 것이다. (a) 속초, (b) 강릉, (c) 울릉도, (d) 울진, (e) 포항, and (f) 영덕이다. 그림에서 속초(a)를 제외한 대부분의 지역에서 안개 발생기간 동안 평년 풍속보다 약한 풍속을 가진다. 속초(a)의 경우는 풍속에 따른 특성을 보기가 어렵다.

3.2 해무 발생에 대한 진단적 연구

해무는 비선형적인 대기-해양 상호 작용에 의해서 발생하는 대표적인 기상현상 중의 하나로 이를 연구하고 궁극적으로 예보의 단계에 도달하기 위해서는 3차원적인 대기-해양간의 운동이 종합적으로 다루어지는 중규모 역학 모형을 통해서 해무의 물리적인 특성을 살펴보아야 한다. 이 절에서는 동해상에 발생하는 해무의 특성을 규명하기 위해 대기와 해양간의 열, 수증기 그리고 복사 등의 상호 교환이 종합적으로 다루어지는 중규모 대기 모형으로 대기 상태를 재현하고 그것으로부터 해무의 특성을 규명하고 이해하고자 한다. 따라서 이를 위하여 현재 기상청에서 실무 예보를 위해 사용 중인 PSU(Pennsylvania State University) /NCAR(National Center for Atmospheric Research) 중규모 대기 모형 PSU/NCAR MM5를 이용하였다.

가. 역학적 모형의 구조

MM5V34는 σ -좌표계상에서의 지배방정식으로 구성되어 있으며, 비정역학계이다. 차분화는 Arakawa B형 staggered 격자망으로 구성되었는데, 공간적으로 2차 중앙 차분법을 사용하였으며, 시간적으로는 준암시적 방안(semi-implicit scheme) 및 시간 분리방안(time splitting scheme)을 적분 방법으로 사용하였다. Table 3.1은 모형에 대한 개요를 요약한 것이다.

Table 3.1. Model description.

Item	Mother domain	Nested domain
Dynamic	Non-hydrostatic	
DX/Dimension	60km(61×61)	20km(61×61)
Vertical layer	Terrain-following σ -coordinate(23layers)	
Time step	180(s)	60(s)
Time integration	Split semi-implicit	
Lateral boundary condition	Time and inflow/outflow dependent relaxation	
Vertical boundary condition	Radiation	
Planetary boundary Layer	Gayno-Seaman PBL(Gayno, 1995)	
Ground Temperature	5-layer soil model	
Radiation	Cloud radiation scheme	
Cumulus Convection	Deep convection (Grell, 1993)	
Explicit Moisture	Warm rain	

본 연구에서 사용된 물리과정은 다음과 같다. 구름 모수화 과정은 대류운동과 관련한 상승·하강운동과 이에 따른 보상운동을 고려하는 Grell(1993)의 모수화 방법을 사용하였는데 방안은 특히 10-30 km이내의 수평격자에 유용하게 사용되며 격자 규모 강수와 대류성 강수를 분리하여 고려한다. 그리고 복사과정은 명시적 구름(explicit cloud)과 장파 및 단파복사의 상호작용을 충분히 고려한 구름-복사 방안(Cloud-radiation scheme)을 사용하였다. 지면의 온도와 수분을 계산하기 위하여 5층 토양 모형을 사용하였다. 또한 모형에 사용된 경계층 물리과정에는 Mellor-Yamada TKE(Turbulent Kinetic Energy) Scheme을 기본으로 한 Gayno-Seaman PBL Scheme(1994)을 사용하였다. 이 방안은 물 온위 (liquid-water potential temperature)와 총 물혼합비(total liquid water mixing ratio)를 예보 변수로 활용하는 방안으로 다른 PBL scheme과 구분되며, 난류 운동에너지(Turbulent Kinetic Energy)를 예단하여 난류속(turbulent flux)을 모수화한 방안이다. 안개의 발생은 결국은 난류의 혼합에 의한 문제로 귀결된다(Gayno, 1995). 이러한 측면에서 Gayno-Seaman PBL Scheme은 난류 모사 능력에 있어서 다른 경계층 모형보다 안개 예측에 있어 더 효율적이라 사료된다.

Fig. 3.11은 수치 실험을 수행한 모형의 수평영역과 지형고도를 나타낸다. 수치 실험을 수행한 모형의 영역은 한반도를 포함한 동아시아 영역과 동해를 중심으로 한 영역으로 구성되며, 그 중심은 36°N, 137°E이다. 그리고 각각의 수평 격자

간격은 60 km, 20 km이고, 연직 간격은 지형을 따르는 σ -좌표계로 연직 23층이며, σ 는 0.995, 0.985, 0.970, 0.945, 0.910, 0.870, 0.825, 0.775, 0.725, 0.675, 0.625, 0.575, 0.525, 0.475, 0.425, 0.375, 0.325, 0.275, 0.225, 0.175, 0.125, 0.075, 0.025 에 위치한다.

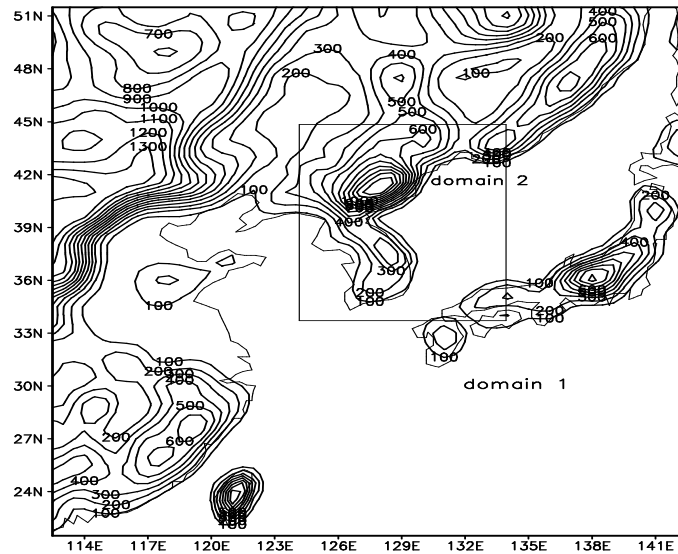


Fig. 3.11. Horizontal domain and geometry of model(contour interval : 100 m).

모형의 초기 및 경계자료는 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmosphere Research) 6시간 재분석자료를 사용하였다. 측면 경계 조건은 유입/유출이 시간에 따라 변화할 때 이를 고려할 수 있는 Time and inflow/outflow dependent relaxation 방안을 선택하였다.

나. 해무 발생 수치 모의 결과

모형을 이용한 해무 특성 규명을 위해서 대표적인 발생 원인별 해무 사례의 선정이 필요하다. 일반적으로 해무는 해상에서 발생하는 모든 안개를 총칭하는 것으로 그 중 증기 안개, 이류 안개, 전선 안개 등이 대표적인 종류이다(기상청, 1997). 따라서 본 연구에서는 위의 세 가지 안개에 대한 대표적인 사례로써 각각 증기 안개(Case1-a, Case1-b), 이류 안개(Case2-a, Case2-b) 그리고 전선 안개(Case3-a, Case3-b)를 두 사례씩 택하여 분석하였다(Table 3.2).

기본적으로 MM5V34를 아무런 수정 없이 Table 3.1에 나타난 물리적 모수화 과정을 고려하여 선정된 사례에 대한 수치 모의 실험을 수행하였다.

Table 3.2. Synoptic characteristics and period of selected typical fog cases.

	Period	Characteristic
Case1-a	July 12-14, 1999	Cold advection due to the expansion of maritime polar(mP) air mass: Steam fog
Case1-b	July 4-6, 1999	
Case2-a	July 28-30, 1999	Warm advection due to the expansion of maritime tropical(mT) air mass : Advection fog
Case2-b	July 27-29, 2000	
Case3-a	July 1-3, 1999	Accompanied with extratropical cyclone : Front fog
Case3-b	August 18-20, 2000	

(1). 증기 해무 발생 수치 실험

본 연구에서는 MM5 모형을 이용하여 증기 해무 사례 Case1-a와 Case1-b에 대한 사례적용 연구를 먼저 수행하였다.

Case1-a사례의 경우, 1999년 7월 12일 00Z부터 14일 12Z까지 60시간 동안 적분하였으며 모형의 해무 모사 능력을 비롯한 종관 상태 재현 능력을 살펴보았다. 이를 위하여 사례에 해당하는 NCEP/NCAR 6시간 재분석 자료를 내삽하여 모형의 경계 자료로 하였으며 또한 해면 온도 자료를 이용하여 하층 경계 자료를 생산하여 모형을 수행하였다.

해무 사례 실험을 위하여 연구에서 선택한 사례 기간인 1999년 7월 12 - 14일은 한반도 전역이 오호츠크해 고기압의 영향에 있었던 기간이다. Fig. 3.12(a)는 해무 발생기간인 7월 13일 0000UTC에서의 기온과 바람의 분포이다.

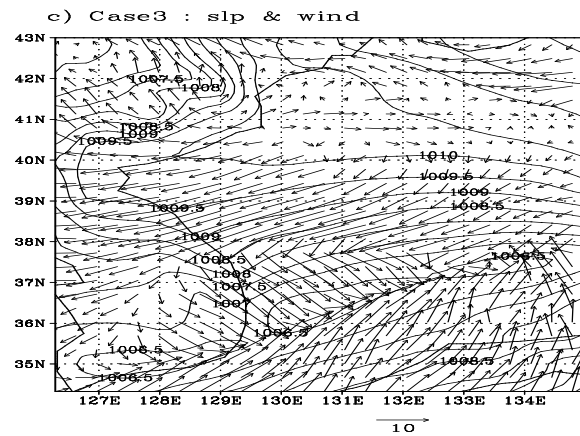
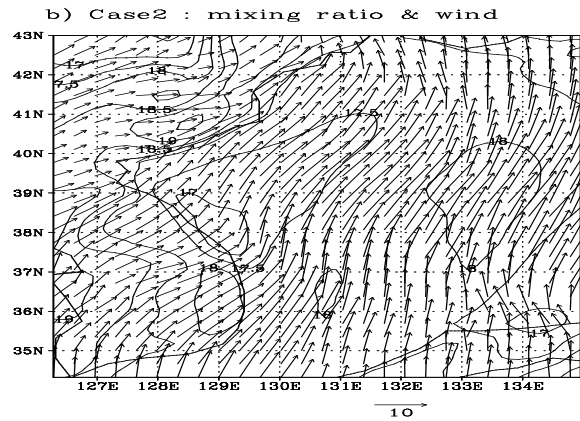
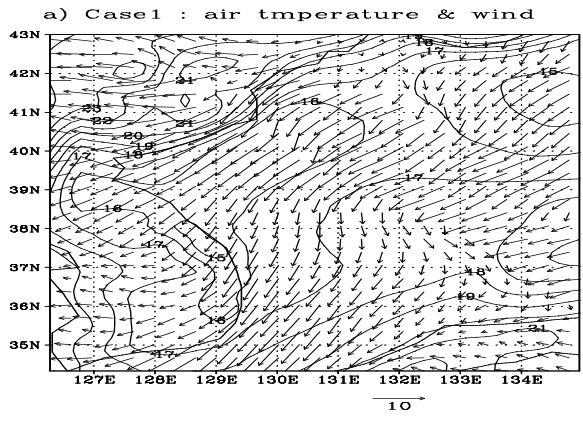


Fig. 3.12. Synoptic distributions of (a) air temperature and wind for Case 1-a, (b) mixing ratio and wind for Case 2-a and (c) Surface pressure and wind for Case 3-a for the selected cases.

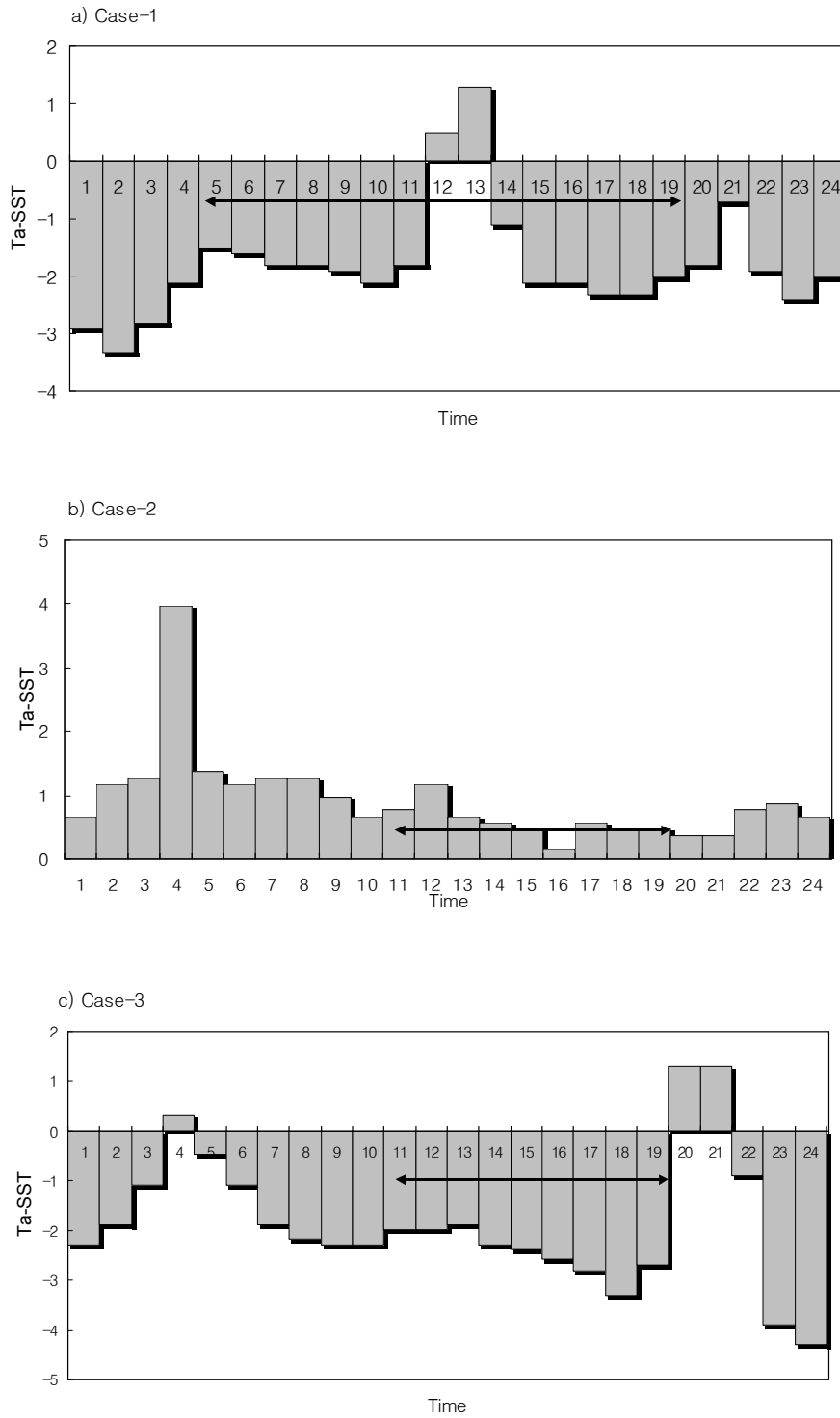


Fig. 3.13. Differences between air temperature and sea surface temperature for a) Case 1-a, b) Case 2-a, c) Case 3-a (unit: °C).

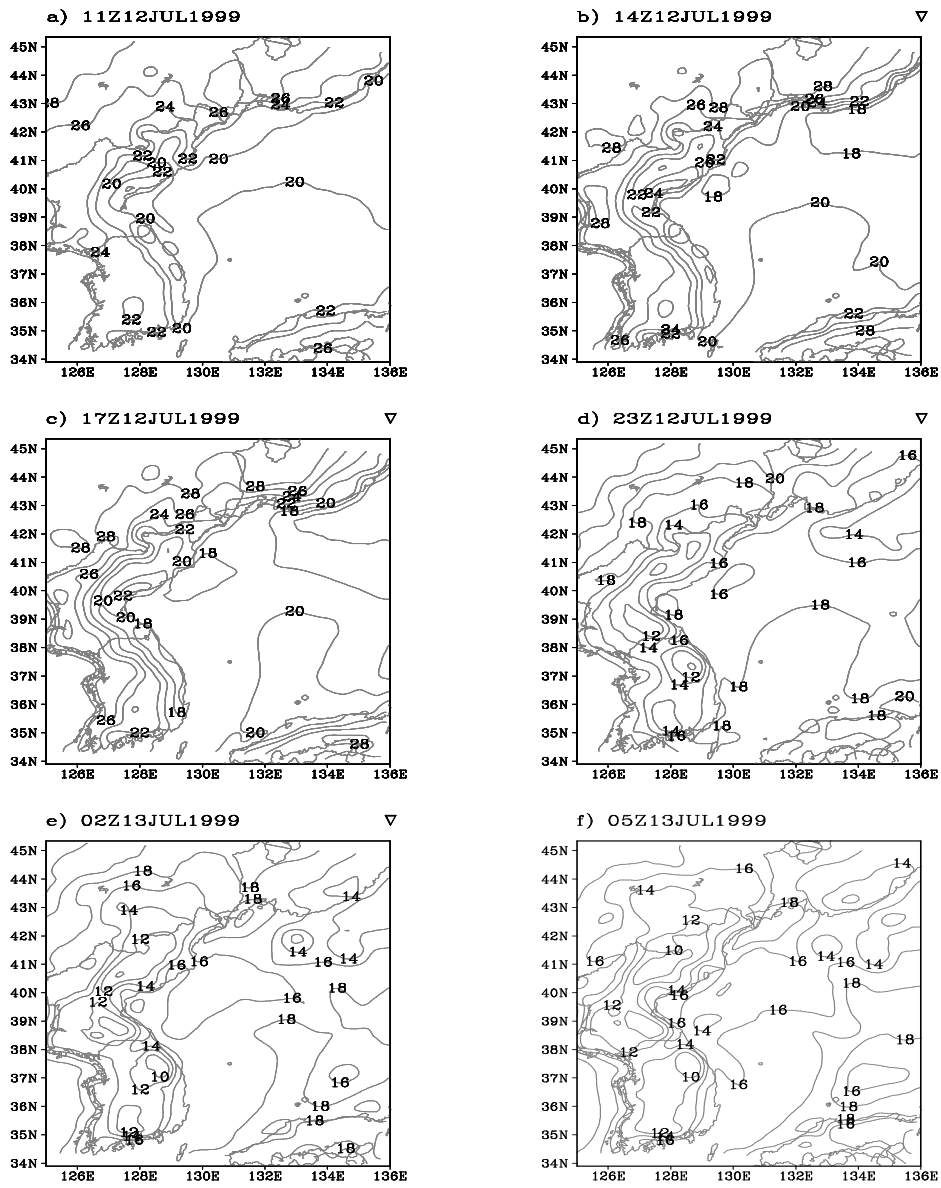


Fig. 3.14. Spatial evolution of simulated air temperature at the lowest layer in the model for Case 1-a (unit : $^{\circ}\text{C}$).

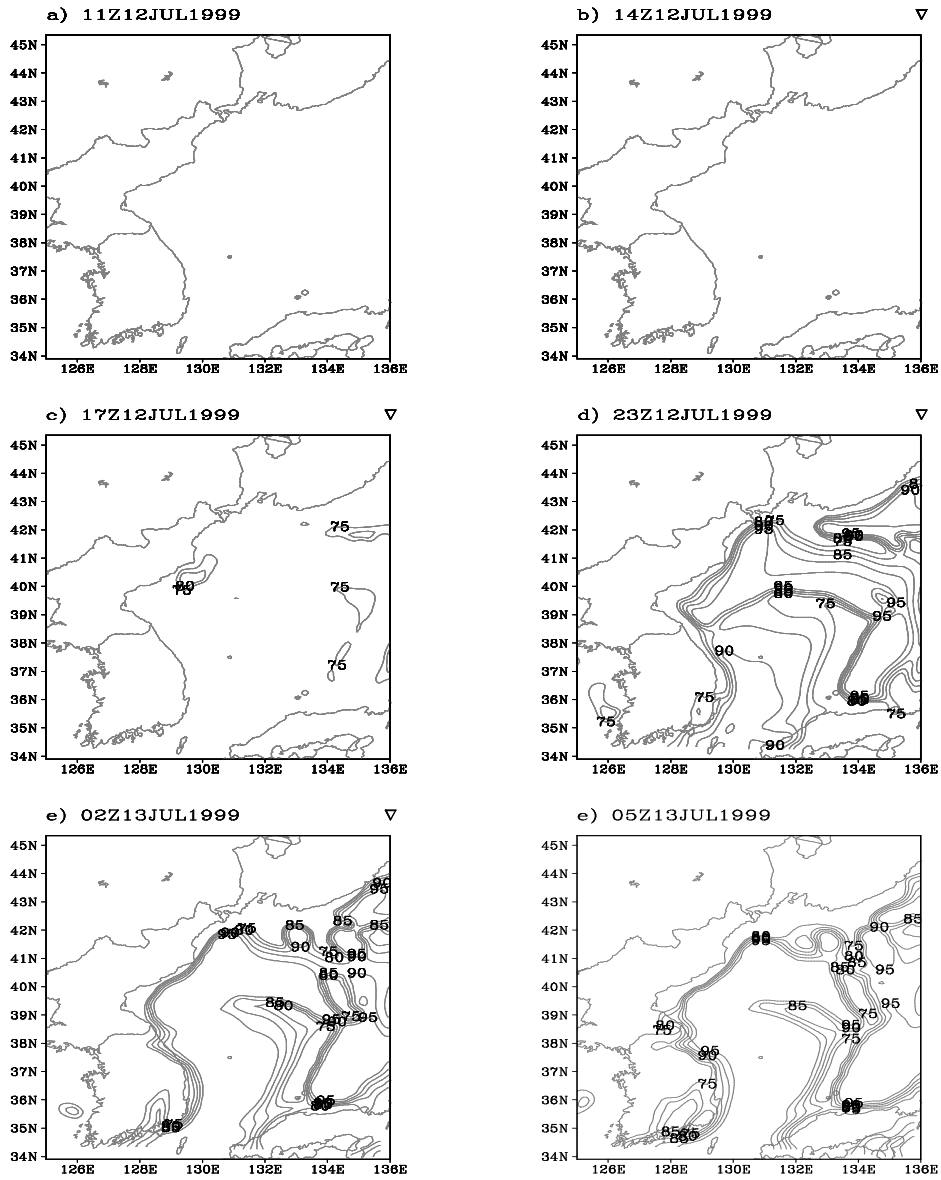


Fig. 3.15. Same as Fig. 3.14, but for relative humidity (unit : %).

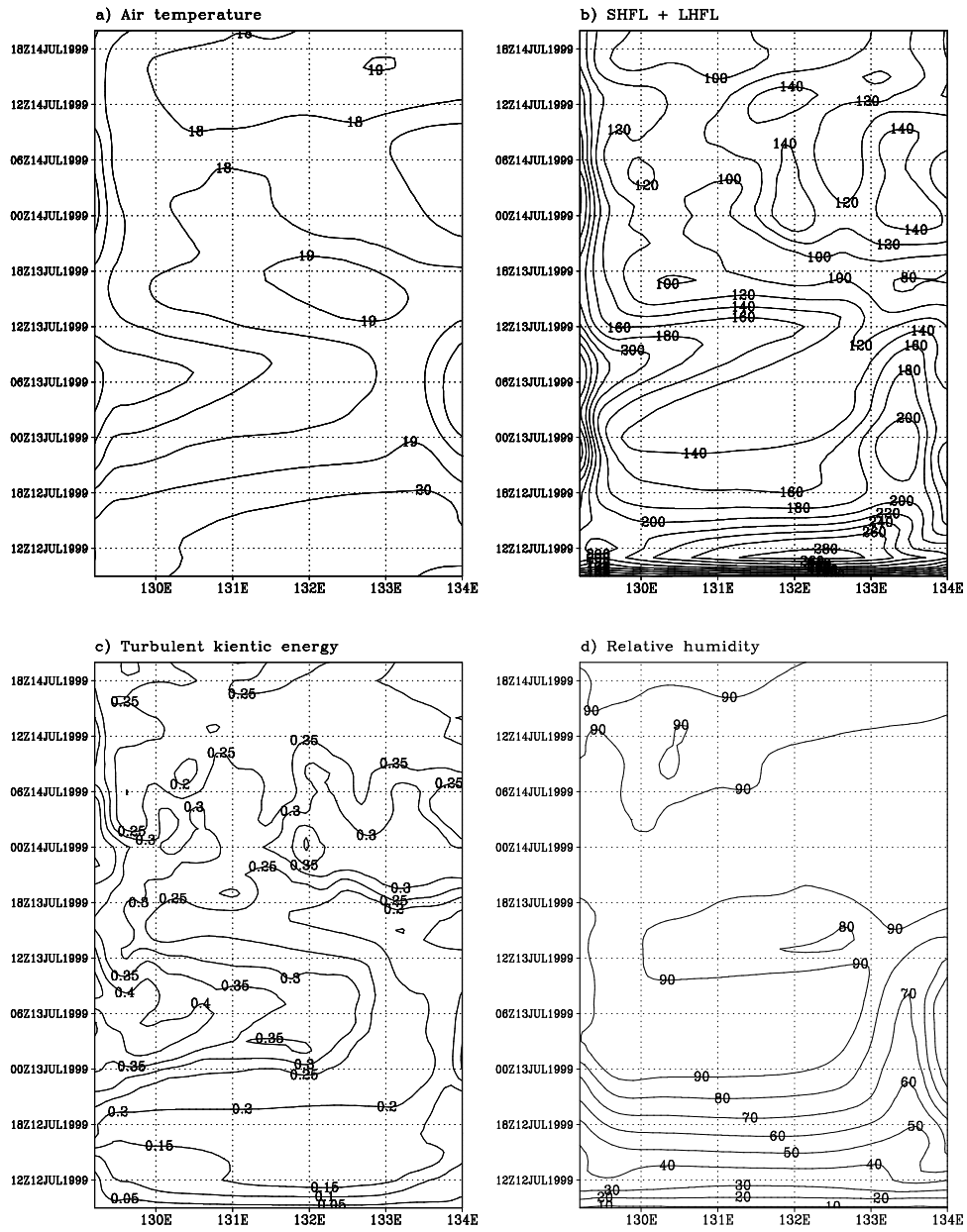


Fig. 3.16. Time-longitude plots of simulated a) air temperature, b) heat flux, c) turbulent kinetic energy, and d) relative humidity at the lowest level of the model along 37.5°N of East Sea across the Ulleung Do for Case 1-a.

오호츠크해의 고기압의 확장으로 말미암아 장마 전선이 정상적으로 북상하지 못하고 있으며, 동해 상에 16°C 이하의 찬 공기가 동해 북북동 지역에서 남서로 확장되고 있는 모습이다. 즉, 오호츠크해 고기압이 장출함에 따라 찬 공기가 따뜻한 해수면 위로 이류하여 안개가 발생한 것이다. 이와 같은 기압 배치는 소

위 북고남저형의 종관 분포로써, 북쪽의 오호츠크해의 찬 공기가 북동 기류를 타고 남하하면서 남쪽의 열대 저압부로 몰려들게 되어 남쪽으로 장출하는 한기가 상대적으로 따뜻한 해면 위로 하층 유입되면서 해무나 층운형의 저층운이 잘 발달하는 것으로 알려져 있다.(Kikuro *et. al.*, 1998; Ninomiya *et. al.*, 1996).

Fig. 3.13(a)는 Case1-a동안 기온과 해면온도의 차이를 나타내는 것으로, 평균적으로 안개 발생기간동안 해면 온도가 대기보다 2°C 정도 높은 것으로 나타났다. 증기 안개 사례인 Case1-a의 종관적 상황(Fig. 3.12(a))에 비추어 보면 오호츠크해상의 찬공기가 상대적으로 따뜻한 해수면위로 이루어짐에 따라서 이러한 특성을 가지게 된다고 사료된다. 이렇게 대기가 해면보다 온도가 낮게 됨에 따라서 접촉면에서의 냉각이 일어나고, 이에 따른 증발 작용으로 안개가 발생하게 되는 것으로 알려져 있다(김해동, 1997; 안중배와 이해진, 2000).

Fig. 3.14는 Case1-a동안 모형의 최하층($\sigma=0.995$)에서 모사된 기온의 분포이다. 12일 12Z부터 16°C 이하의 기온이 동해 북북동 해상에서 나타나며, 13일 00Z에는 동해 전 해상에 16°C 이하의 기온이 나타나 찬 공기(16°C 이하)가 동해 북북동 지역에서 남서로 확장되고 있다. 이는 강한 북동풍에 의해 찬공기가 상대적으로 따뜻한 동해상으로 이류가 뚜렷한 기간이었음을 보여주는 것으로 이러한 찬공기의 이류는 해무 발생에 있어 주요한 요인으로 작용하였을 것으로 사료된다.

Fig. 3.15는 Case1-a동안 모형 최하층($\sigma=0.995$)에서 모사된 상대습도의 공간적인 분포이다. 그림에서 보듯 Fig. 3.14의 기온 분포와 공간적인 시간 전개가 유사하다. 모형에서는 12일 11Z부터 동해 북동부 해상에서 상대습도가 85% 이상이 나타나기 시작하여 13일 00Z에는 동해 전해상에서 상대습도가 95% 이상으로 높게 모사되었다. 그리고 13일 05Z에는 95%이상인 지역이 서서히 감소하는 모습을 보인다. 이처럼 상대습도 분포가 북북동 지역에서 남서 지역으로 확장되어 나타나는데, 이것은 오호츠크해 고기압의 강한 북동기류의 진행과 관계가 깊은 것으로 사료된다. 그리고 Fig. 3.14에서 살펴본 기온의 모습과 유사한 것으로 기온의 하강이 상대습도의 증가를 이끈 것으로 판단된다.

이러한 찬공기의 이류가 뚜렷한 증기 해무 사례인 Case1-a의 발생 특성을 보다 더 자세하게 살펴보고자 현열과 잠열의 열속 분포와 난류 운동에너지의 분포를 기온과 상대습도의 분포와 비교하여 살펴보았다. Fig. 3.16는 모형 최하층($\sigma=0.995$)에서 모사된 a)기온, b) 열속(현열+잠열), c) 난류운동에너지 그리고 d) 상대습도의 분포를 울릉도 지역(37°N)을 가로지르는 남북 위도선을 따라 살펴본 그림이다. 그림에서 위도에 따른 점선은 울릉도 관측소에서 해무가 관측된 기간을 표시한다. Fig. 3.16을 살펴보면 12일 12Z부터 상대습도가 85% 이상이 나타나 12일 18Z에서 13일 00Z에 최대를 보이며, 14일 06Z까지 높은 상대습도를 유지하고 있는데, 이와 같은 모습에서 관측에 나타난 안개 시작과 지속 기간이 모형의 최하층에서의 상대습도가 85%이상인 기간과 일치하고 있다. 이

러한 모습은 다른 변수에서도 유사하게 나타나는데 기온(Fig. 3.16(a))의 분포에서도 안개 기간동안 17°C 이하의 찬공기가 울릉도 지역에서 분포하는 특성을 보인다. 또한 난류 운동에너지(Fig. 3.16(c))와 열속(Fig. 3.16(b))의 분포에서도 각각 증가하는 특성이 나타난다.

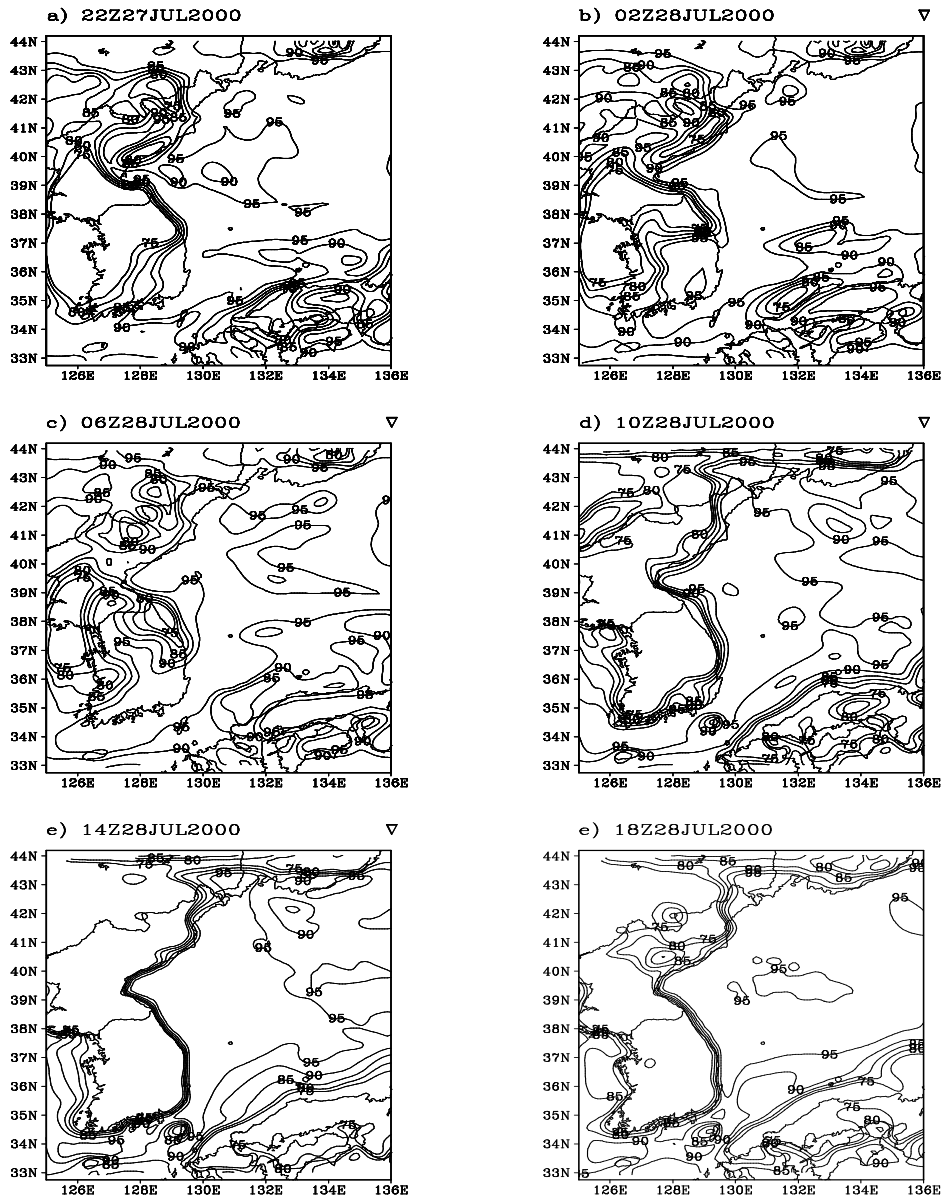


Fig. 3.17. Same as Fig. 3.15, but for Case 1-b(unit : %).

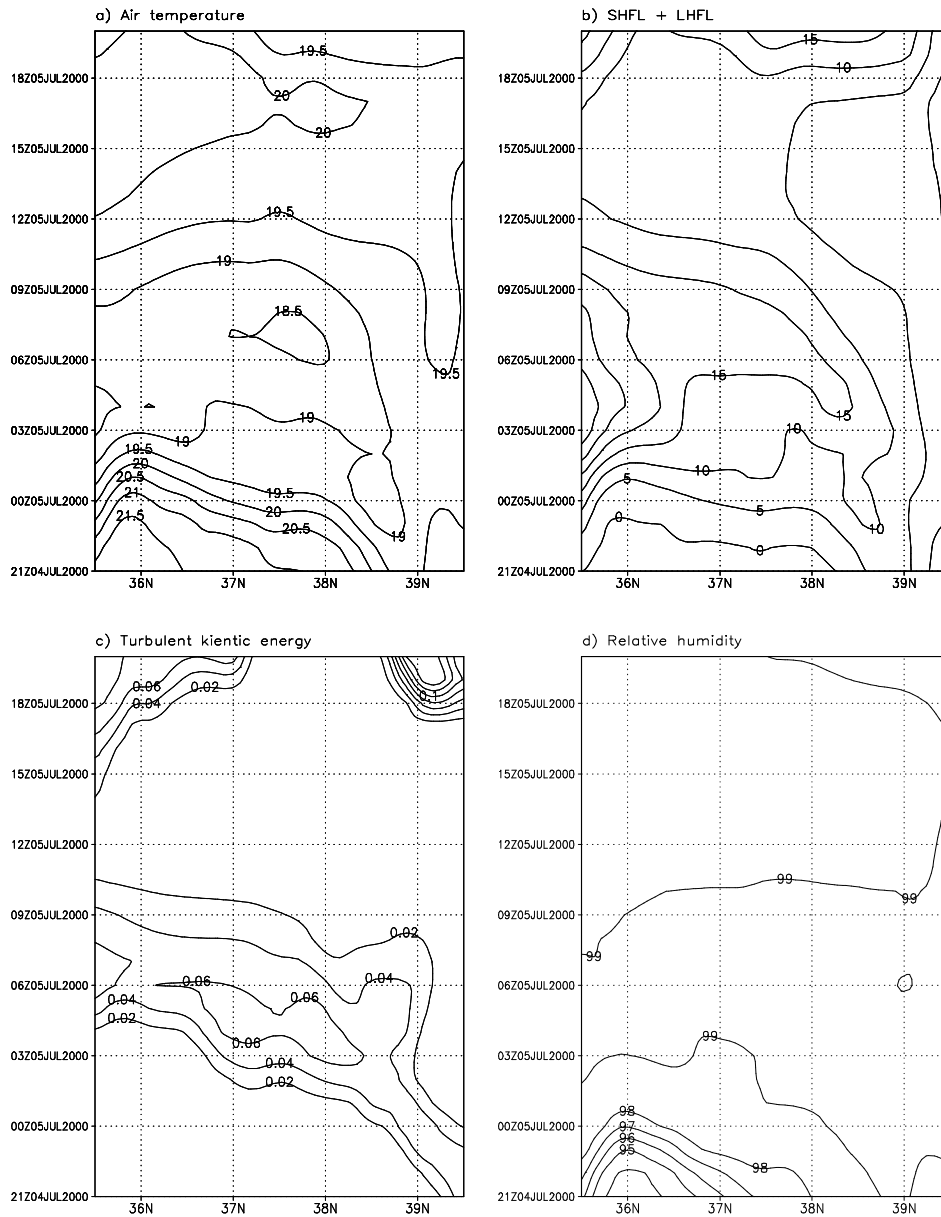


Fig. 3.18. Same as Fig. 3.16, but for Case 1-b.

또한 2000년 7월 4일 - 6일에 발생한 Case1-b사례 또한 증기 안개 특성 또한 모형에서 잘 모사하고 있는데, Fig. 3.17은 Case1-b에 대한 수치실험 결과로 모형 최하층에서 모사된 상대습도의 분포이다. 앞에서 살펴본 Case1-a와 같이 Case1-b 사례에서도 동해의 북북동 지역부터 95%이상의 높은 상대습도가 나타나기 시작하여 7월 28일 06Z경에는 동해상 전역에서 95%이상의 높은 상대습도 분포가 나타난다.

Case1-b에 발생한 해무의 특성을 보다 물리적으로 이해하기 위하여 열속과

난류운동에너지를 상대습도와 기온과 같이 살펴보았다. Fig. 3.18은 모형 최하층($\sigma=0.995$)에서 모사된 a) 기온, b) 열속(현열+잠열), c) 난류운동에너지 그리고 d) 상대습도의 분포를 울릉도 지역(37°N)을 가로지르는 남북 위도를 따라 살펴본 그림이다. 그림에서 보이듯이 전체적으로 찬공기의 이류에 의한 기온의 하강과 이에 따른 대기로의 열속의 증가가 유도되고, 유도된 열속에 의해서 경계면에서의 난류운동이 강화되는 인과관계를 보이고 있다. 이와 같은 모습은 앞에서 살펴본 Case1-a와 유사하다.

이처럼 Case1-a와 Case1-b의 증기 안개 사례에 대한 결과를 종합해보면, 증기 안개는 찬공기의 이류에 의해 대기로의 열속 증가가 유도되고 증가된 열속에 의해 경계면에서의 강한 난류의 혼합에 의한 상대습도의 증가를 이끌게 된다. 이처럼 포화된 대기중의 수증기가 응결하여 안개가 발생하는 것으로 사료된다.

(2) 이류 해무 발생 수치 실험

북태평양 고기압과 TD의 영향으로 덥고 습윤한 공기의 지속적인 유입으로 해무가 발생한 Case2-a에 대해서 1999년 28일 00Z부터 30일 12Z까지 60시간 동안 적분하였다.

선택한 해무 사례 기간인 1999년 7월 28 - 30일은 북태평양 고기압의 확장으로 동해 전역이 고기압의 가장자리에서 영향을 받았던 기간이다. 이 기간은 북태평양 고기압에 의한 남풍 계열의 바람이 동해로 유입되면서 수증기가 이류되어 안개 발생을 위한 종관적인 상황이 전개된 시기이다. Fig. 3.12(b)는 Case2-a동안 7월 29일 0000UTC에서의 혼합비와 바람의 공간적 분포이다. 그림에서 보듯이 이 기간은 북태평양 고기압에 의한 남풍 계열의 바람이 동해로 유입되면서 습윤한 공기가 이류되어 상대적으로 온도가 낮은 해면 위에서 응결하여 안개 발생을 위한 종관적인 상황이 전개된 시기이다. Case1-a의 경우와는 달리 이러한 종관적인 상태에서 발생하는 안개는 이류 해무로 분류한다(김문옥, 1998; 기상청, 1997).

Fig. 3.13(b)는 Case2-a에 대한 안개 발생 기간동안 기온과 해면온도와의 차이를 보여준다. Case2-a는 평균적으로 1°C 이상 기온이 해면온도보다 높게 나타남을 보인다. 이것은 Fig. 3.11(b)와 함께 고려할 때 지속적인 남풍의 영향으로 따뜻하고 습윤한 공기가 동해상으로 유입되기 때문이며, 이러한 모습은 습윤한 공기가 이류되어 상대적으로 온도가 낮은 해면위에서 응결하는 이류 안개의 성격과 유사하다.

Fig. 3.19은 Case2-a동안 모형 최하층($\sigma=0.995$)에서 모사된 상대습도의 공간적인 분포이다. 29일 05Z에 상대습도가 85% 이상인 지역이 동해 중부 해상을 포함하여 북동쪽으로 분포하였다. 이러한 흐름이 29일 23Z까지 유지되어 동해 남서지역과 북동부지역 그리고 울릉도 지역을 포함하는 중부 해역에 걸쳐

95%이상의 높은 상대습도를 보이다가 30일 05Z에 서서히 감소하는 모습을 보인다. 이것은 TD와 북태평양고기압의 영향으로 강한 남서풍에 의한 습윤한 공기가 지속적으로 이루어진 종관적 특성을 뚜렷하게 모사하고 있음을 의미한다. 그리고 이와 같은 수증기공급이 상대습도 상승을 유도하여 안개가 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 3.20는 모형 최하층($\sigma=0.995$)에서 모사된 비습의 공간적 분포이다. Fig. 3.12(b)에서 살펴 본 것과 같이 Case2-a기간은 우리나라에 강한 남풍이 지속되었다. 이처럼 29일 06Z에는 남풍에 의한 수증기의 유입으로 13g/kg이상의 혼합비를 가지는 습한 공기가 동해상으로 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 29일 12Z에는 동해 전 해상에서 비습이 13g/kg이상인 지역이 넓게 분포되었으며, 29일 00Z에 비해 약 2g/kg 정도의 비습의 증가가 보인다. 그리고 29일 18Z에는 동해상에 넓게 분포하였던 습윤 지역이 감소하는 분포를 보인다. 그림에서 나타나듯이 Fig. 3.20에서 살펴본 모형 최하층서 모사된 비습의 공간적 분포가 상대습도의 공간적 분포(Fig. 3.19)와 유사하게 나타나고 있다. 이것은 Case2-a동안 발생한 해무는 Case1-a과 달리 수증기의 이류에 따른 수증기의 공급으로 대기가 포화되어 안개가 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 3.21은 Case2-a동안 모형 최하층($\sigma=0.995$)에서 모사된 a) 비습, b) 현열과 잠열, c) 난류운동에너지 그리고 d) 상대습도를 울릉도를 가로지르는 남북 위도선을 따라 살펴본 것이다. 그림에서 시간에 따른 점선은 울릉도 관측소에서 발생한 안개 기간이다. 그림에서 보이듯 이류 안개 사례인 Case-2는 관측된 안개 기간동안 울릉도 지역으로의 수증기의 유입이 뚜렷하게 나타난다(Fig. 3.21(a)). 또한 바람(Fig. 3.21(b))의 분포와 더불어 살펴보면 남서풍에 의한 수증기의 유입이 이 사례기간의 주요한 특성임을 찾을 수 있다. 또한 기온의 분포(Fig. 3.21(c))에서도 미소한 증가이나 약 0.5°C 정도의 증가가 나타나고 있다.

그리고 또 다른 이류 해무 사례인 Case2-b에 대한 수치 실험에서도 위와 같은 모습을 공통적으로 찾을 수 있었는데, Fig. 3.22는 Case2-b동안 모형에서 모사된 비습의 공간 분포로 평균적으로 16 g/kg이상의 비습을 가진 수증기가 안개 기간동안 지속적으로 유지되고 있으며, 시간이 지날수록 남동쪽으로부터 18 g/kg의 비습선이 확장되고 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 3.23에서도 Case2-b에 발생한 해무 사례가 남서풍에 의한 수증기의 유입이 안개 발생의 주요 요인임을 잘 보여주고 있다. 이처럼 이류 해무 사례(Case2)인 두 사례에 대한 수치 실험에서 이류 해무는 습한 공기의 찬 해수면으로의 이류에 의해 대기 중으로 수증기의 공급이 활발하여 상대습도를 높이고, 대기가 응결됨에 따라서 안개가 발달하고 이동하는 것으로 파악되었다.

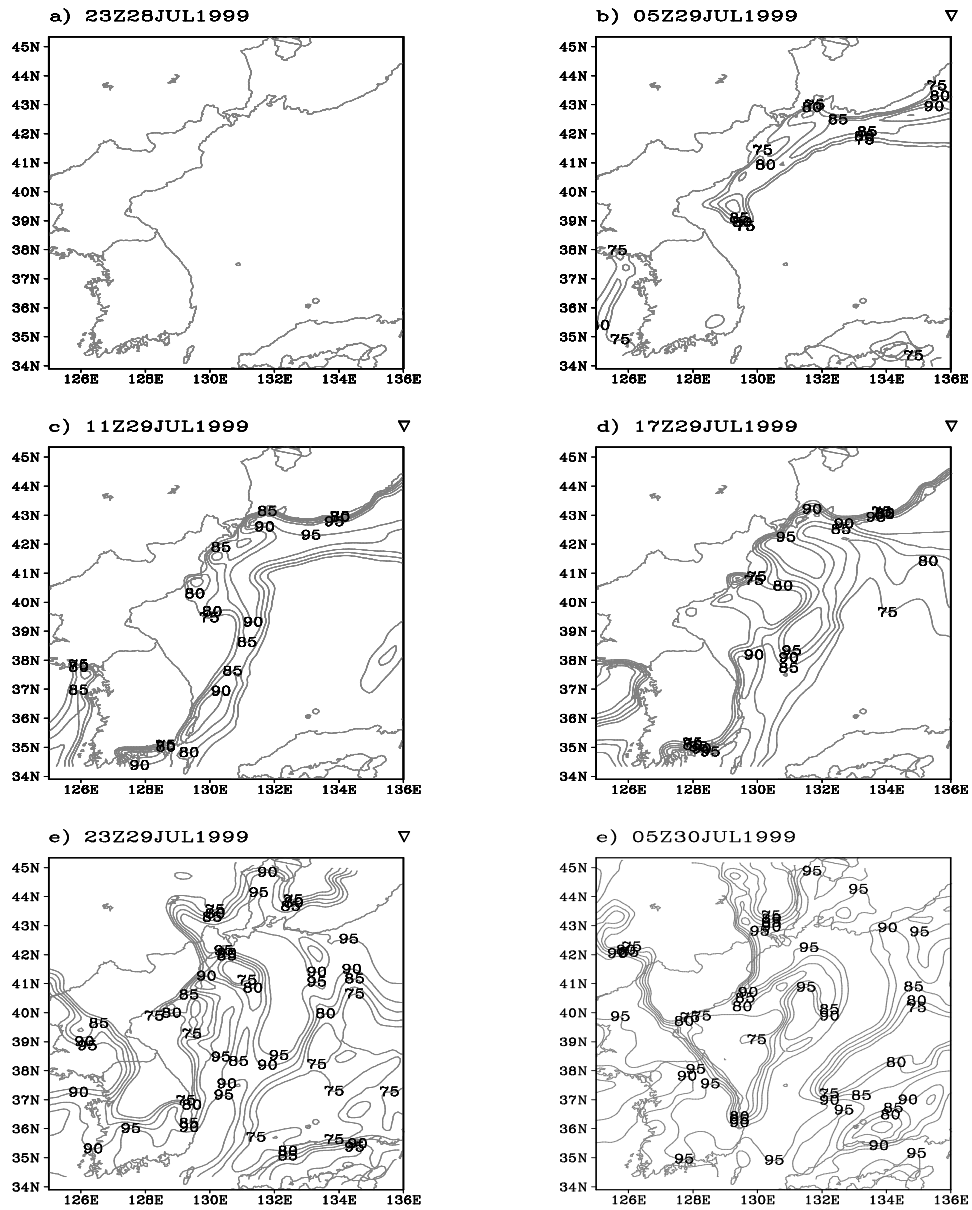


Fig. 3.19. Spatial evolution of simulated relative humidity at the lowest layer in the model for Case 2-a(unit : %).

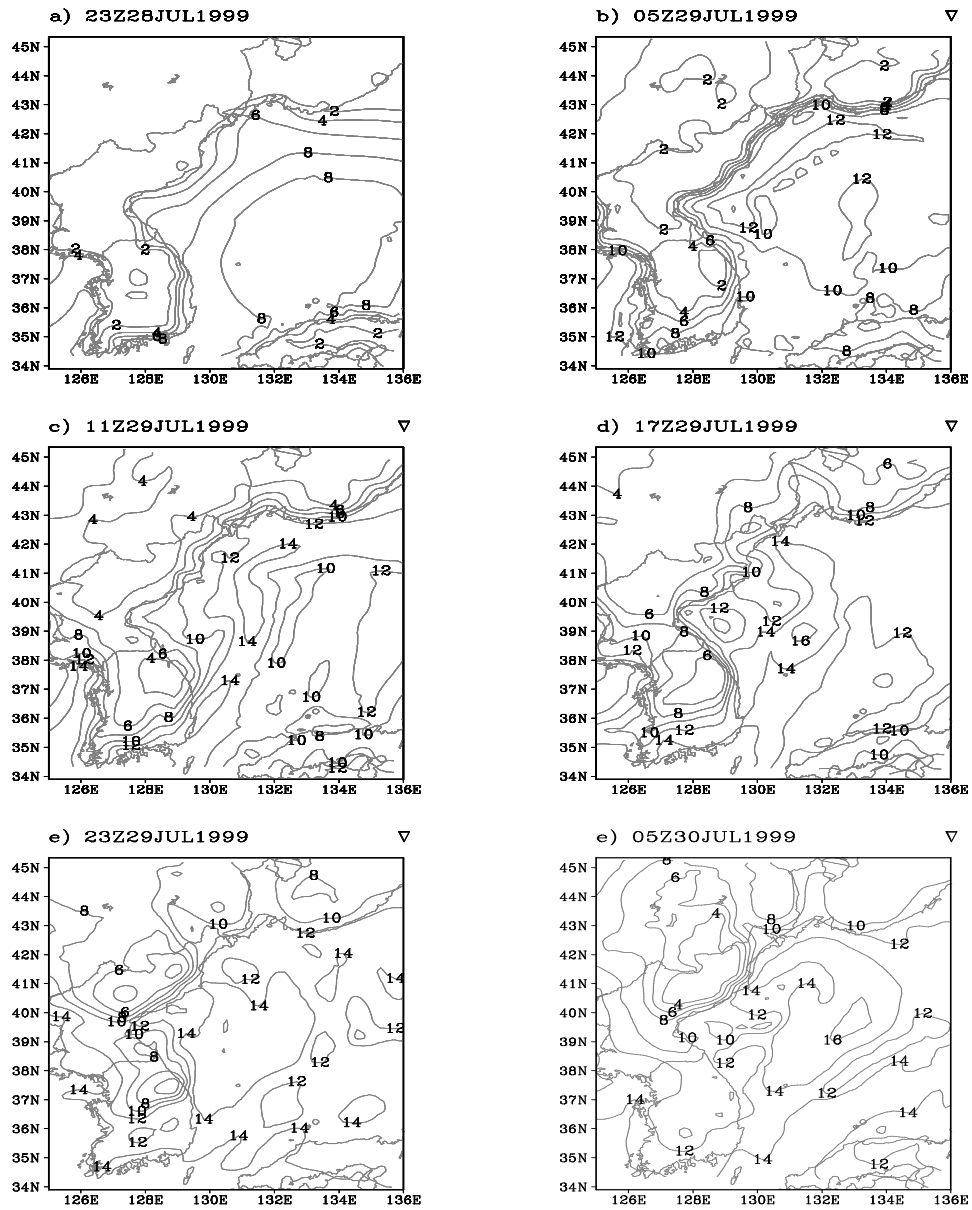


Fig. 3.20. Same as Fig. 3.19, but for mixing ratio(unit : g/kg).

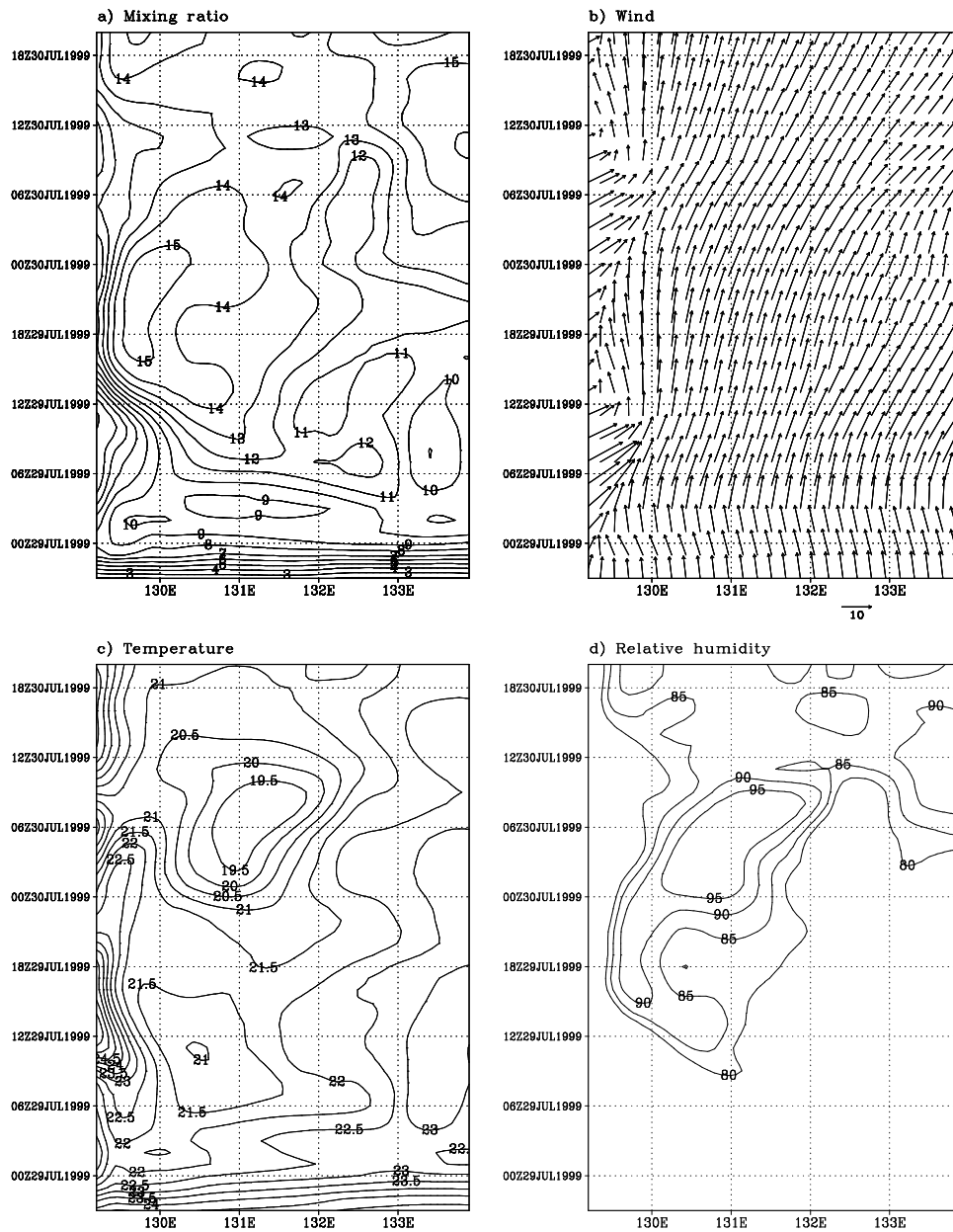


Fig. 3.21. Time-longitude plots of simulated a) mixing ratio, b) wind vector, c) air temperature, and d) relative humidity at the lowest level of the model along 37.5°N of East Sea across the Ulleung Do for Case 2-a.

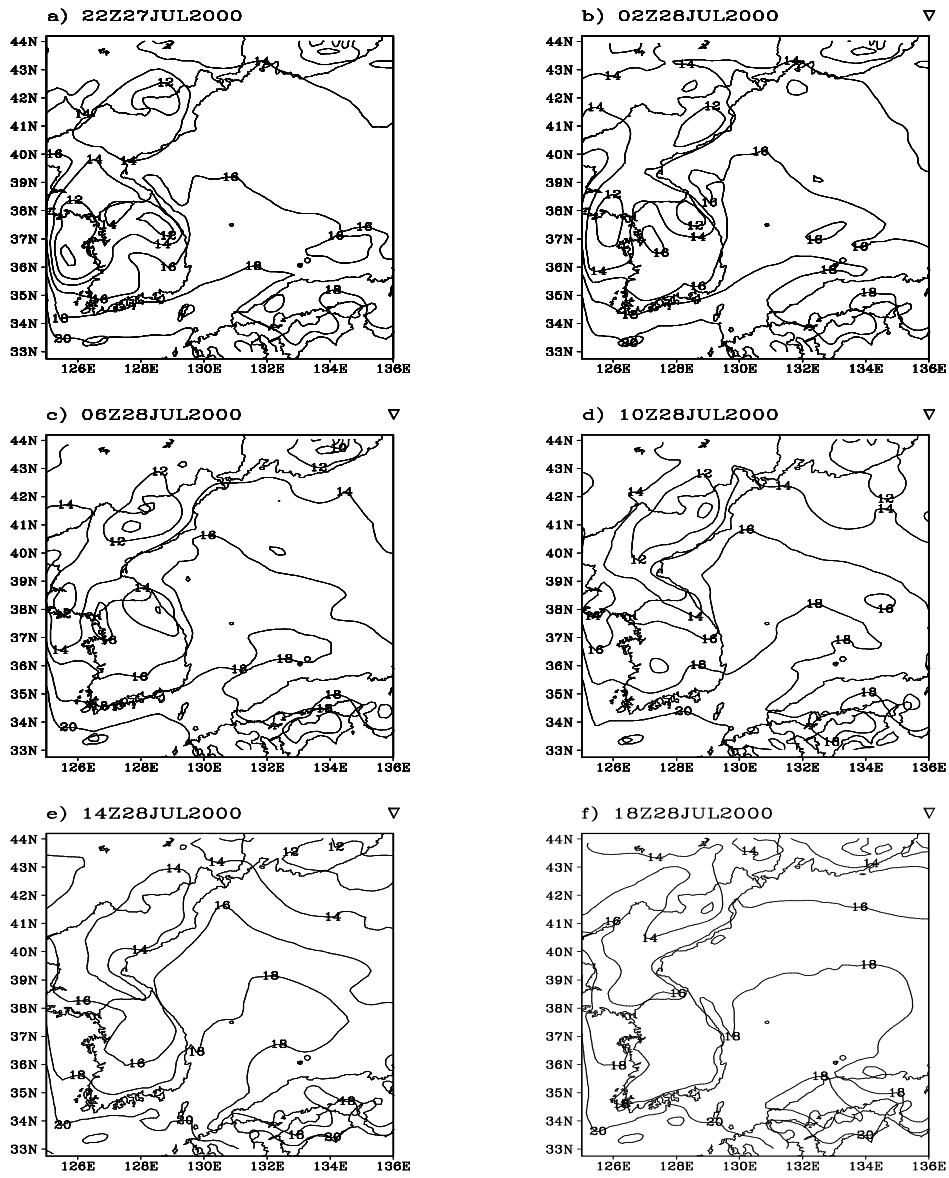


Fig. 3.22. Same as Fig. 3.20, but for Case 2-b(unit : g/kg).

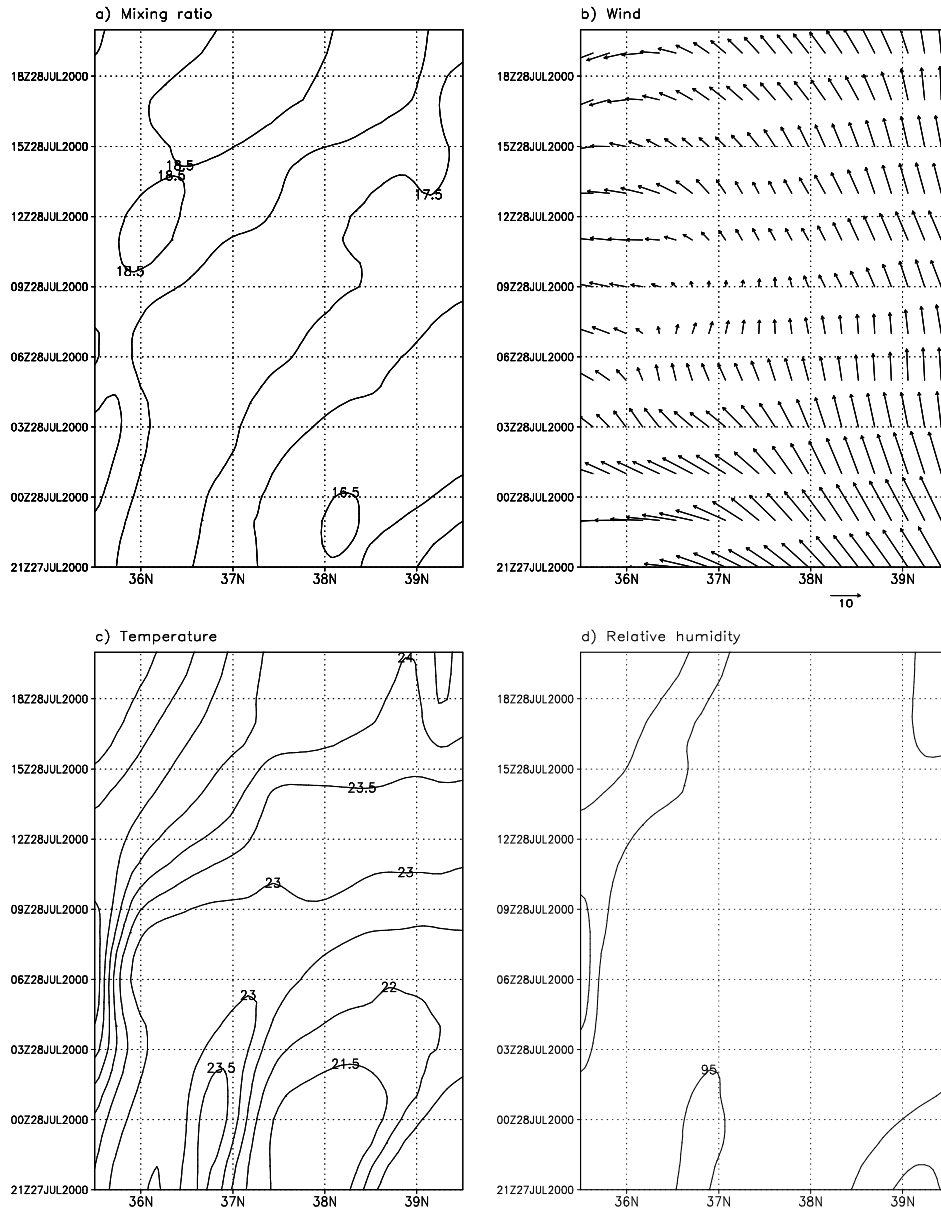


Fig. 3.23. Same as Fig. 3.21, but for Case 2-b(unit : g/kg).

(3) 전선 해무 발생 수치 실험

전선 해무는 일반적으로 강수와 동반되어 발생하며 해상에서 발생하는 해무의 50% 이상을 차지한다. 본 연구에서 선택한 Case3-a는 1999년 7월 1 - 3일 동안 동해에서 발생한 전선 해무 사례이다. 이 기간은 장마 전선의 영향을 받던 시기로 우리나라 서해 상에서 자리를 잡고있던 저기압계가 남해를 거쳐 동해 남부로 빠져나가면서 동해 남쪽으로부터 남중국해에 걸쳐 장마전선이 형성되었던 시기이다. Fig. 3.12(c)는 7월 2일 0000UTC에서의 바람 및 등압선의 분포이다. 우리나라 남부지방과 동해상에 걸친 정체성 수렴대가 형성되어있어 이 수렴대를 통한 충분한 수증기의 유입과 강수 활동이 있음을 알 수 있다. 사례 기간 동안에 저기압계가 북동진하면서 동해 상으로의 충분한 수증기의 공급과 한랭 전선 후면에서 찬공기의 이류가 있었으며, 이에 따라 강수에 의한 전선면에서의 증발에 의해 전선 해무가 형성되었을 것으로 판단된다. 안개 발생기간 동안 기온이 해면 온도보다 상대적으로 낮은 상황(Fig. 3.13(c))을 살펴볼 때 Case3-a는 찬공기의 이류와 수증기의 유입이 저기압계 운동을 통하여 복합적으로 일어나는 전형적인 전선 해무 사례이다.

Fig. 3.24는 Case3-a 사례에 대한 수치 실험 결과로 모형 최하층($\sigma=0.995$)에 나타난 기온의 공간 분포이다. 1일 23Z부터 16°C이하의 찬공기가 연해주 지역에서 나타났으며, 동해상이 한랭전선 후면에 들어서기 시작한 2일 14Z에는 16°C이하의 찬공기가 39°N까지 남하하여 3일 03Z까지 지속되어 나타난다.

Fig. 3.25는 모형 최하층($\sigma=0.995$)에서 비습의 공간적인 시간전개이다. 동해 전해상이 온난전선 후면에 들었던 1일 23Z부터 남풍에 의한 수증기 수송이 뚜렷하게 나타난다. 이와 같은 흐름은 2일 17Z까지 지속되다가 저기압계가 북동진하면서 동쪽으로 빠져나가는 3일 03Z에는 서풍에 의한 수증기의 동해상 유입이 나타나고 있다. 이처럼 Fig. 3.24과 Fig. 3.25에서 나타난 것처럼 전선 해무인 Case3-a은 안개 발생 전에 온난전선 후면에서 남풍의 영향으로 수증기의 공급과 찬공기의 이류에 의한 증발작용으로 안개 발생을 위한 충분한 조건 아래에 있었던 기간이다.

Fig. 3.26은 모형 최하층($\sigma=0.995$)에서 모사된 상대습도의 공간적인 분포이다. 1일 23Z부터 울릉도 북동쪽지역에서 상대습도가 85%이상인 지역이 나타나기 시작하여, 저기압계가 북동진하여 동해상에 놓인 2일 12Z에는 37°N이상의 동해 북부 해상이 상대습도가 95%이상인 나타나며, 이러한 분포가 3일 03Z까지 지속되고 있다. 이렇듯 상대습도 95%이상인 지역의 시간적 전개가 저기압계의 한랭전선 후면에 들었던 기간과 일치하고 있음을 보인다. 또한 주로 전선면 부근에서 높은 상대습도를 모사하고 있음을 알 수 있다.

저기압계에 동반되어 발생한 Case3-a의 해무는 한랭 전선 후면에서의 찬공기의 이류와 온난전선 전면에서의 덥고 습윤한 공기의 이류에 의해 상대습도가 상승하고 이차적으로 찬공기의 이류에 따른 열속의 증가에 의해 난류운동의 강화가 운적을

형성시켜 안개가 발생하는 일련의 과정을 겪는 것으로 판단된다(Fig. 3.27). 따라서 사례-3과 같은 전선 안개의 경우는 앞에서 살펴 본 증기 안개(Case-1)와 이류 안개(Case-2)의 성격을 동시에 가진다.

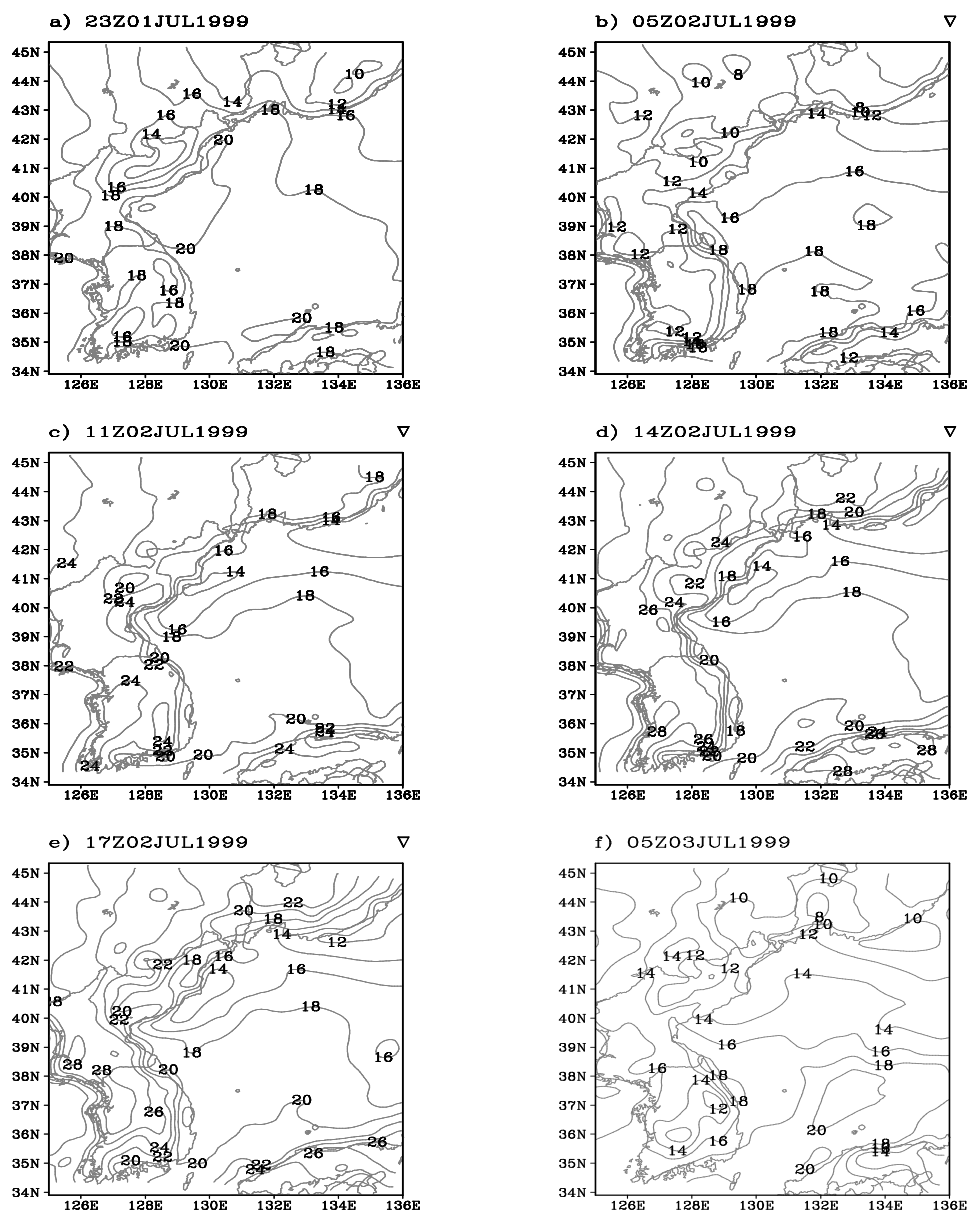


Fig. 3.24. Spatial evolution of simulated air temperature at the lowest layer in the model for Case 3-a(unit: $^{\circ}\text{C}$).

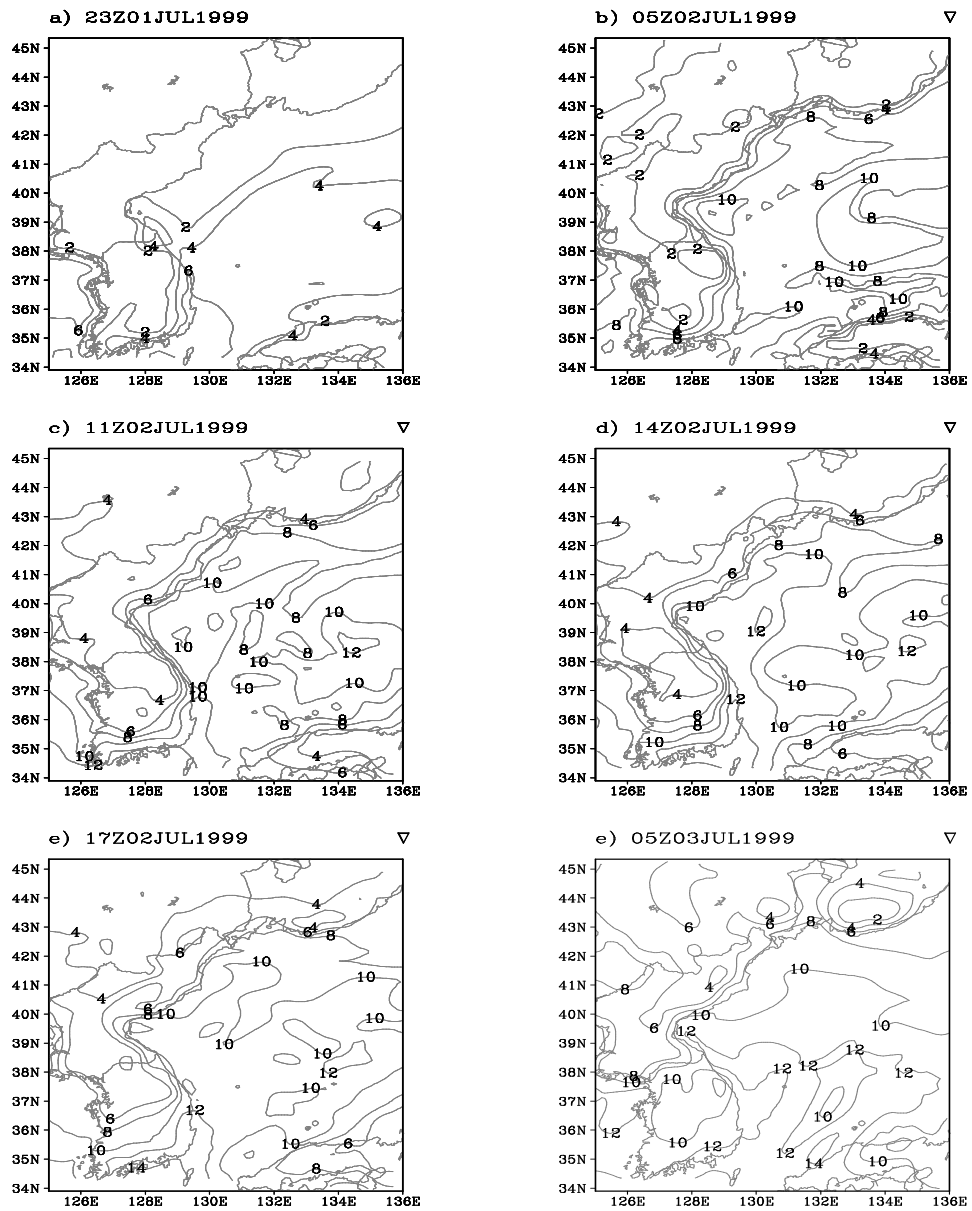


Fig. 3.25. Same as Fig. 3.24, but for mixing ratio(unit: g/kg).

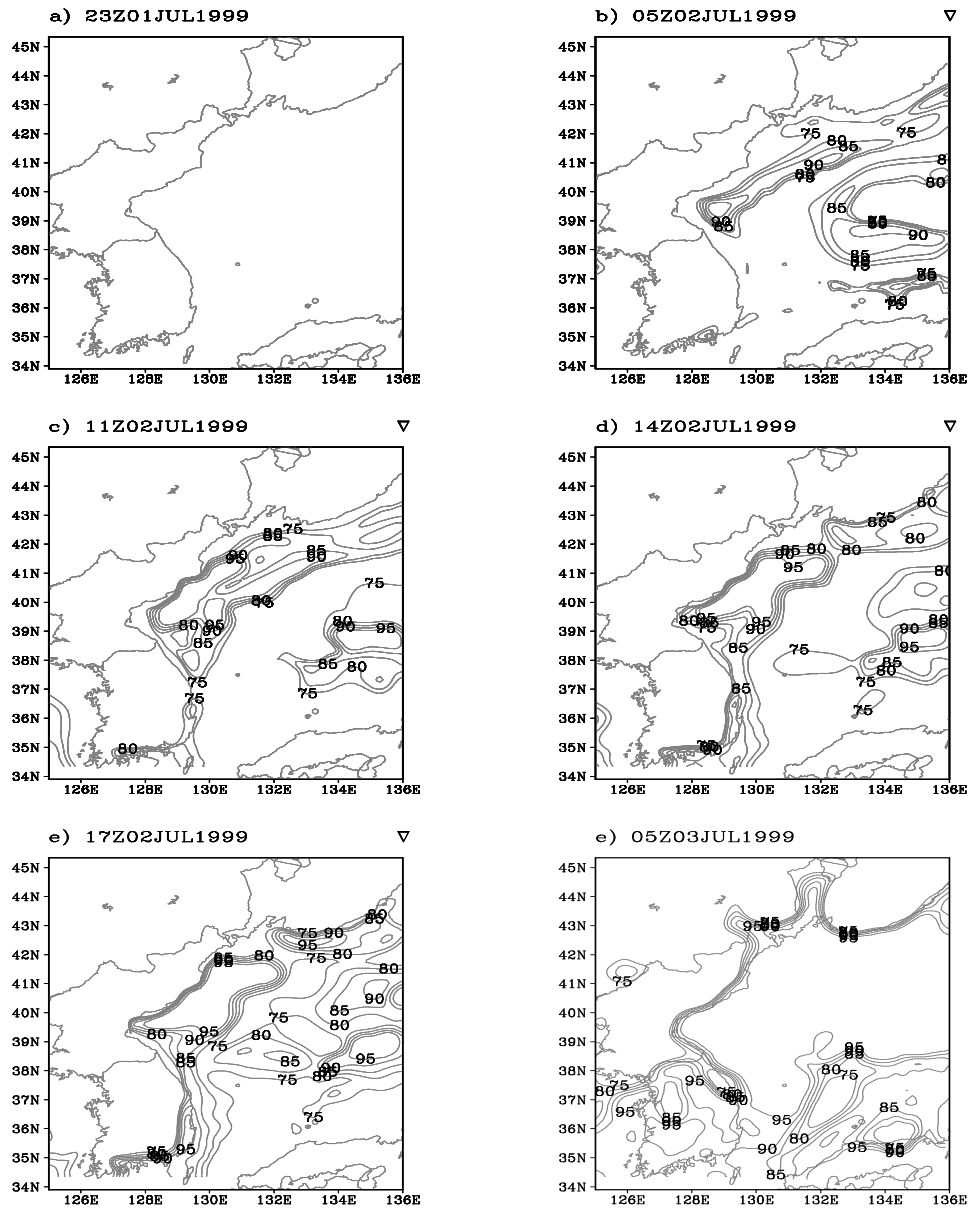


Fig. 3.26. Same as Fig. 3.24, but for relative humidity(unit: %).

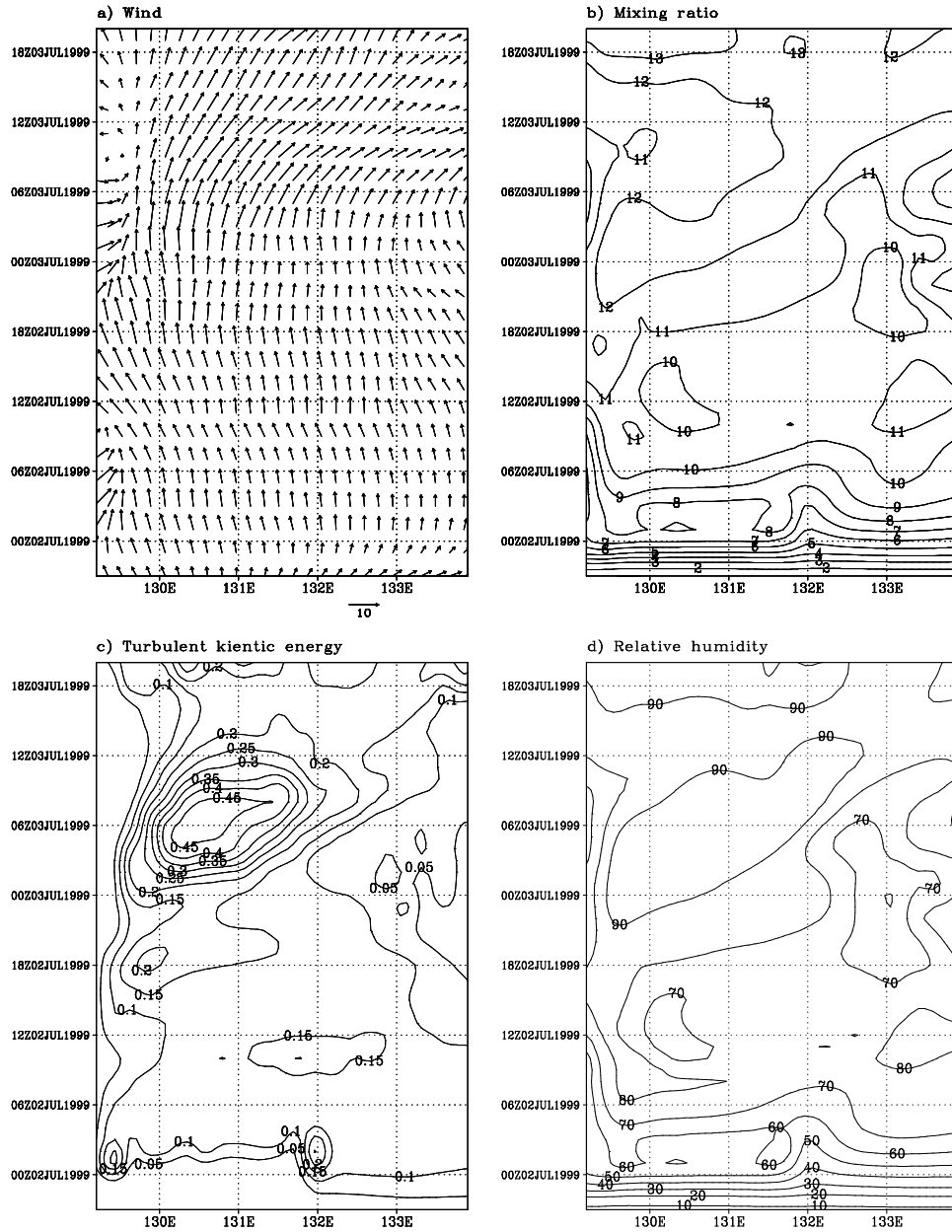


Fig. 3.27. Time-longitude plots of simulated a) wind vector, b) mixing ratio, c) turbulent kinetic energy, and d) relative humidity at the lowest level of the model along 37.5°N of East Sea across the Ulleung Do for Case 3-a.

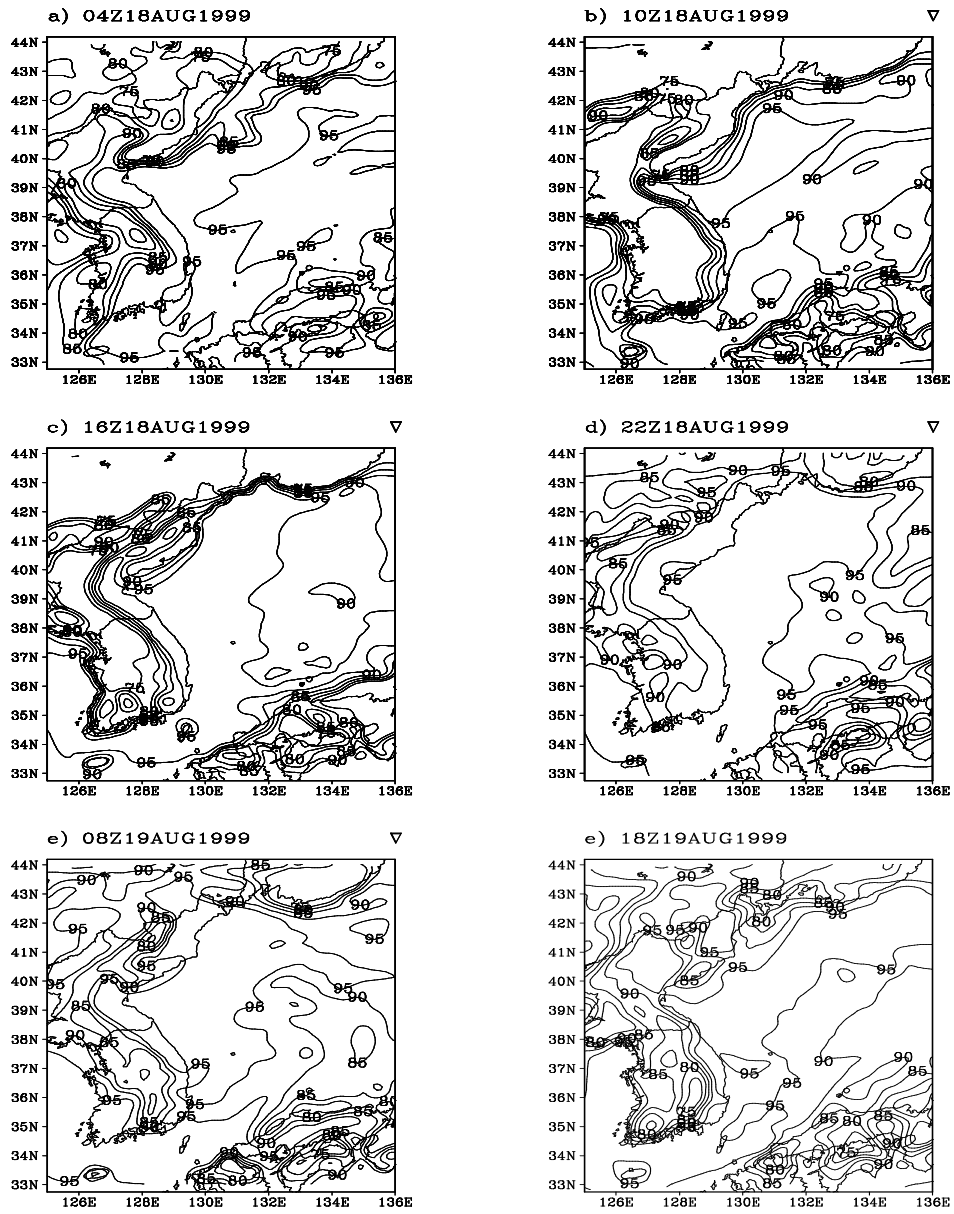


Fig. 3.28. Same as Fig. 3.26, but for Case 3-b(unit : %).

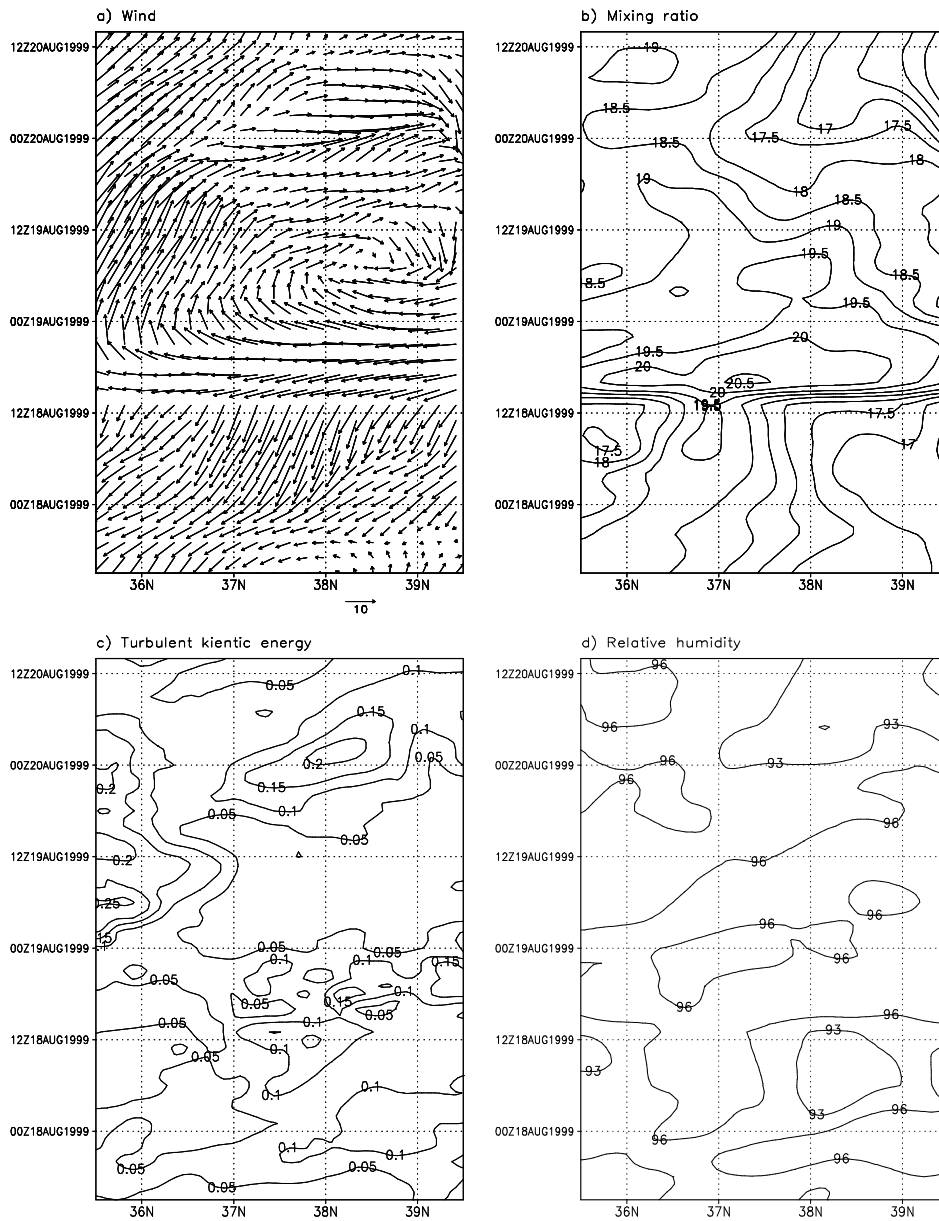


Fig. 3.29. Same as Fig. 3.27, but for Case 3-b.

이러한 특성은 Case3-a뿐 아니라 본 연구에서 선정된 전선 해무 사례인 Case3-b에서도 잘 나타나는데, Fig. 3.28은 Case3-b 사례에 대한 수치 실험 결과로 모형 최하층($\sigma=0.995$)에서 모사된 상대습도의 공간적인 분포이다. 8월 18일 04시부터 북동부 해상에서부터 95%이상의 높은 상대습도의 분포가 보이고 있으며, 이후 저기압계가 북동진함에 따라 온난 전선의 전면에 놓였던 19일 08시 이후부터는 동해 남동부 해상의 상대습도가 비교적 높은 값을 나타내고 있다. 그림에서처럼 상대습도의 분포를 보이는 지역이 Case3-a에서와 같이 저기압

계의 이동에 밀접한 관계를 가지고 있음을 보인다. 또한 주로 전선면 부근에서 높은 상대습도를 모사하고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 3.29는 Case3-b동안 모형에서 모사된 a)바람, b)비습), c)난류 운동에너지,그리고 d)상대습도의 분포를 윗층도를 가로지르는 위도를 따라 살펴본 그림이다.그림에서 저기압계의 한랭전선 후면에 들었던 안개 발생 초기에는 북동풍이 주로 불었으며, 이후 8월 19일 00시 이후에는 풍향이 동풍에서 남서풍으로 변화되는 모습이 명확하게 보인다. 이처럼 Case3-b 사례에서도 저기압계에 동반되어 찬공기의 이류와 습윤한 공기의 이류가 복합적으로 작용하여 전선면에서 안개가 발생하였다.

3.3 해무 예측 모형의 개발과 개선

가. 해무 예측 모형의 개발

경계층내의 구름 또는 안개를 모형에서 적절히 모사하고 예측하기 위해서는 안개 발생시 야기되는 미세 물리과정(sub-grid scale condensation process, thermal cooling, turbulent transport, deposition of water on the soil)에 관한 모수화가 필요하다(Wang *et. al.*, 1997; Smith, 1990; Ballard *et. al.*, 1991; Gayno, 1995). 안개는 구름과 같이 대기중의 수증기가 포화되어 응결되는 현상으로 운동규모에 상관없이 정확한 구름이나 안개를 예측하는 것은 매우 중요하다(Tiedtke, 1993; Bechtold *et al.* 1992). 또한 안개의 발생에 따라 경계층내의 물리과정에 많은 영향을 주지만 무엇보다도 경계층내의 복사적 특성을 변화시킨다. 이에 따라 지표면에서의 에너지 수지를 크게 변화시킨다.

컴퓨터 능력의 증가에 따라 최근에는 5km이내의 수평 격자내의 운동을 고려하는 것이 불가능한 문제가 아니지만 안개가 발생하는 일반적인 규모가 아직까지는 격자내 문제로 해결하지 못한다. 따라서 현재 사용중인 대부분의 대규모나 중규모 모형에서는 격자보다 작은 규모의 구름이나 안개를 취급 할 때, 격자(grid) 전체가 격자의 평균 온도에 해당하는 수증기압을 가질 때만 응결이 발생하는 것으로 가정하여 왔다. 간단히 말하면, "all or nothing"의 개념이 모형에서 적용되어 왔다. 그러나 이와 같은 가정은 실제 안개의 발생 역할을 고려할 때 적절하지 못한 가정이다. 실제 안개는 갑자기 발생하였다가 갑자기 소산하는 현상이 아니므로 이와 같은 가정은 안개 발생 초기는 다소 늦게, 소산 시에는 관측보다 빨리 소산해 버리는 오류를 내포한다. 또한 이러한 가정은 모형의 수평 격자가 수십 m^2 의 상세격자라 할지라도 적합하지 못함을 Sommeria and Deardorff(1977)는 지적한바 있다. 따라서 본 연구에서는 Sommeria and Deardorff(1977)와 Bougeault(1981)에 의해 제시된 아격자 규모 응결 모수화를 기본으로 해무 예측 모형을 개발하였다.

일반적으로 국지적인 응결은 난류의 운동에 의해 유도되며, 물량(liquid-water)과 일정한 상관관계(correlations)를 가진다. 이러한 기본적인 특성에 의해서 Sommeria and Deardorff(1977)는 구름이 있는 지역에서의 통계적인 난류의 특성을 규정하고 격자규모보다 작은 규모에서의 구름 또는 안개를 이와 같은 변량으로 모수화하는 방안을 제시하였다. 이들이 제시한 아격자 규모 응결 모수화 방안은 기본적으로 θ_l (liquid water potential temperature)과 q_w (total water content)의 난류변동이 a joint normal-probability distribution임을 가정한다. 이러한 가정에 의해서 격자내의 안개의 fraction(F_f)과 LWC(q_f)는 아래와 같이 정의된다.

$$R = \int_{-Q_1}^{\infty} G(t) dt \quad (3.1)$$

$$\overline{q_l} / 2\sigma_s = \int_{-Q_1}^{\infty} (Q_1 + t) G(t) dt \quad (3.2)$$

여기서, t 는 normalized variable(s/σ_s)이며, $G(t)$ 는 t 의 확률밀도 (probability density) 그리고 Q_1 은 $a\Delta \overline{q}/2\sigma_s$ 이다.

(3.1)-(3.2)에서 임의 격자내의 안개 fraction, F_f 와 물량 q_l 는 확률 밀도 함수 (probability density function)인 $G(t)$ 의 정의에 따라 결정되게 된다. 따라서 본 연구에서는 $G(t)$ 를 다음과 같은 skewed distribution으로 두었다.

$$G(t) = H(t+1) \exp[-(t+1)]$$

최종적으로 (1.1), (1.2)식의 안개 fraction(F_f)과 LWC(q_l)는 (1.3)-(1.4)식과 같이 정리된다.

$$R = \begin{bmatrix} \exp(Q_1 - 1) & Q_1 \leq 1 \\ 1 & Q_1 \geq 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\frac{\overline{q_l}}{2\sigma_s} = \begin{bmatrix} \exp(Q_1 - 1) & Q_1 \leq 1 \\ Q_1 & Q_1 \geq 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

(3.3), (3.4)에 대한 해를 구하기 위해서는 θ_l 과 q_w 의 second-order turbulent closer의 정보가 필요하다. 그러나 지금까지 예보모형에서는 적분시간 문제에 의해서 higher-order closure turbulence parameterization을 이용하는 경계층 모형을 이용하지 않았다. 그러나 최근 Gayno(1995)는 PSU/NCAR MM5에 higher order turbulent closure의 경계층 모형을 접합시킴으로써 가능성을 보여주었다. 따라서 본 연구에서는 θ_l 과 q_w 의 second-order turbulent closure의 정보를 얻기 위해서 기본적으로 Gayno-Seaman 경계층 모형을 이용하였다. Gayno-Seaman 경계층 모형은 2.5 level의 second-order turbulent closure model이며, Turbulent Kinetic Energy(이하, TKE)를 예단하고, Yamada(1977)의 정의에 의해 eddy viscosity와 관련된 난류속(turbulent flux)을 모수화 하였다. 그리고 모형은 기본적으로 K-theory를 사용하였으며, 모형에서 사용된 θ_l 과 q_w 의 분산(variances)과 공분산(covariance)를 모형에서 아래와 같이 두었다.

$$\overline{\theta_l'^2} = -2\tau_3 \overline{w'\theta_l'} \frac{\partial \theta_l}{\partial z}$$

$$\overline{q_w'^2} = -2\tau_3 \overline{w'q_w'} \frac{\partial q_w}{\partial z}$$

$$\overline{\theta_l'q_w'} = -\tau_3 \left[\overline{w'\theta_l'} \frac{\partial q_w}{\partial z} + \overline{w'q_w'} \frac{\partial \theta_l}{\partial z} \right]$$

위와 같은 아격자 규모 응결 모수화 과정과 더불어 안개발생 시 반드시 고려해야 할 물리과정이 복사적 특성에 대한 변화를 모형에 적절히 고려하는 것이다. 안개는 일단 발생하면 경계층 내의 물리적 과정과 유기적인 관계를 가지고 있음을 이미 많은 학자들은 제기하여왔다(Randall, 1980; Deardorff, 1980). 특히, 안개발생 후의 복사수지에 대한 적절한 처방은 정확한 안개의 소산을 가능하게 한다. Musson(1987)는 1-D 경계층 모형에 간단한 복사 모수화를 포함하여 모형에 의한 안개 예측성을 보여주었으며, 복사 과정이 안개 발달에 있어서 중요한 요소임을 주장하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 해무 예측 모형에도 이와 같은 물리 과정을 고려하였다.

2차 년도에 개발된 모형에 포함된 복사 모수화의 기본 개념은 다음과 같다. 먼저, 장파복사(Longwave Radiation, IR)의 측면에서 안개에 의한 복사효과를 고려하기 위하여 다음과 같은 기본 개념으로 모수화 하였다. 지면에 비하여 안개는 1에 가까운 emissivity를 가지기 때문에 안개의 층에서는 순 장파 복사 손실이 있게 된다. 이것은 지면 냉각을 유도하여 안개의 성장과 유지에 주요한 역할을 하게된다(Musson, 1987). 이와 같은 물리적인 과정을 2차년도에 개발된 해무 예측 모형에서는 아래와 같이 순 장파 복사속(R_D)을 정의하여 모형에 적용하였다.

$$R_D = B_I + (1 - \varepsilon_g) F_I + U_I - 2F_I$$

여기서 $B_I = \varepsilon_a \sigma T_{CPW}^4$ 는 하향 단파속, $U_I = \varepsilon_g \sigma T_g^4$ 는 지면으로부터의 상향 장파복사속, $F_I = 2\sigma T_f^4$ 는 안개층으로부터 방출되는 장파속, 그리고 ε_g 는 토양의 emissivity이다. 그리고 안개층에 흡수되는 shortwave energy에 대한 효과가 개발된 해무 예측 모형에 고려되었다. 기본적으로 모형에서는 안개층에 흡수되는 단파복사 에너지를 아격자 규모 응결 모수화로부터 추정된 fog fraction, Fr를 이용하여 모수화 하였다. 추정된 fog fraction를 이용하여 안개에 의해 지면에 투과되는 단파복사의 transmissivity, $TSCC_f$ 는 아래와 같이 정의 되었다.

$$TSCC_f = TSCC [1 - (ALB_f \times F_f)]$$

여기서, ALB_f 는 안개층의 반사도이며, F_f 는 LWC로부터 추정된 fog fraction이다. 그리고 $TSCC$ 는 단파복사가 지표에 투과되는 총 투과율(total transmissivity)이다. 안개층의 알베도는 Sellers(1965)에 의해 제시된 방안으로

계산되었다.

일단 TSCCF와 안개를 제외하고 구름에 의한 shortwave energy의 transmissivity가 결정되면, Anthes et al.(1987)에 의해 제시된 방안으로 total shortwave transmissivity가 계산된다. 따라서 지면에 흡수되는 insolation, FSW는 아래와 같이 정의된다.

$$FSW = S_0(1 - A_g)\tau \cos \zeta$$

여기서, S_0 는 solar constant, A_g 는 지면의 알베도(albedo), 그리고 ζ 는 태양 청전각이다. 윗식에 의해 격자내 FSW가 결정되면, 안개에 의해 흡수되는 insolation, S_a 가 아래와 같이 계산된다.

$$S_a = FSW (0.30 - 0.15 \cos \zeta)$$

이처럼 안개층에 의해 흡수되는 S_a 는 IR 모수화에 의해서 결정된 R_D 에 더해짐으로써 안개층에서의 순 복사량이 결정된다. 결정된 순 복사량은 아래 식과 같이 격자의 θ_L tendency에 영향을 준다.

$$\left. \frac{\partial \theta_L}{\partial t} \right|_K = \dots + (F_R)_K \times (R_D / \rho C_{pm} \Delta z)_K$$

여기서 $F_{Rn} = \frac{1}{N_f^2} + (n-1) \frac{2}{N_f^2}$, N_f 는 안개를 포함하는 모형의 층의 수, n 은 1에서 N_f , R_D 는 순 복사량, ρ 는 대기 밀도, C_{pm} 은 specific heat of moist air 그리고 Δz 는 층의 두께이다.

이와 같이 안개층에 대한 복사 모수화가 모형에 적용되었다. 따라서 본 연구에서 개발된 해무 예측 모형은 앞에서 살펴 본 것처럼 아격자 규모 응결 모수화에 의해 LWC와 fog fraction이 진단되어 나오며, 새로이 진단된 변수들(LWC, fog fraction)을 고려하여 안개층에서의 복사효과가 모수화되는 구조를 가진다.

나. 해무 예측 모형의 개선

개발된 해무 예측 모형은 단순히 경계층 모형에서만 구동되는 것이 아니라 3차원의 예보 모형인 PSU/NCAR MM5에 장착되어 구동됨에 따라서 이미 MM5에서 작동되는 다른 물리과정들과의 불필요한 중복의 문제가 발생하게 된다. 특히, 복사과정에 대한 모수화 과정이 중복됨에 따라서 적분시간의 연장 뿐 아니라 과도한 복사 냉각에 의해서 일단 안개가 발생한 후 빨리 소산되지 않는 특성을 보인 바 있다. 따라서 당해 연도(3차 연도)에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 아격자 규모에서 계산되는 수증기 변량을 다른 물리 과정에 되먹임되도록 Simth(1990)에 의해 ECMWF의 중규모 대기모형과 대규모 모형에서 이용된 바 있는 방안을 개발된 해무 예측 모듈에 적용하였다. 이는 개발된 안개 모듈에서는 아격자규모 모수화 방안(Sommeria and Deardroff, 1977)으로부터 격자내 층운 또는 안개 fraction(이하, C^+)과 Liquid Water Contents(이하, q_{LWC}^+)가 계산된다. 이렇게 계산된 C^+ 와 q_{LWC}^+ 는 아래 정의된 것과 같이 T , q , q_c 에 되먹임을 준다.

$$\begin{aligned}
 T^+ &= T_L^* + (L/c_p)q_c^+ \\
 q^+ &= q_T^* - q_c^+ \\
 q_c^+ &= q_{LWC}(T_L^*, q_c^+) \\
 C^+ &= C(T_L^*, q_c^+)
 \end{aligned}$$

여기서, (+)는 안개예측 모듈로부터 구해진 C^+ 와 q_{LWC}^+ 에 의해 되먹임 된 후 경계층 모형에 되돌려지는 값을 의미하며, (*)는 안개 예측 모듈 전의 물리과정에서 계산되는 값을 의미한다. 그리고 q 는 vapor mixing ratio, q_T 는 total water mixing ratio 그리고 T_L 은 liquid water temperature이다. 따라서 개발된 안개 모듈로부터 계산된 C^+ 와 q_{LWC}^+ 가 경계층과 복사 물리과정에 되먹임되어 안개 발생에 따른 별개의 복사과정 모수화가 불필요하게 된다.

다. 실험설계

앞 절에서 소개한 바와 같은 해무 모형을 개선하여 기존의 중규모 모형 MM5V3에 적용하였다. 따라서 개발된 해무 예측 모형을 검증하기 위하여 네 가지의 수치 실험을 수행하였다. 먼저, MM5의 기본적인 해무 예측 능력을 살펴보고 해무 예측 모형을 적용한 경우에 대한 비교를 위하여 해무 예측 모형을 적용하지 않은 기준 수치실험(No fog module experiment, EXP-1)을 실시하였다.

그리고 개발된 해무 예측 모형 내의 복사 효과의 중요성을 살펴보기 위하여 아격자 규모 응결 모수화만 포함된 예측모형을 적용한 경우(Fog module w/o radiation experiment, EXP-2)에 대한 수치실험을 하였다. 또한 아격자 규모의 응결 모수화 뿐만 아니라 안개 발생시의 복사효과까지 고려한 경우(Fog module with radiation experiment)에 대한 수치 실험을 수행하였는데 이는 다시 2차년도에 개발된 복사 모수화를 포함한 경우(EXP-3)와 3차 연도에 개선된 복사 모수화를 포함한 경우(EXP-4)에 대하여 수치실험 하였다.

본 연구에서는 이와 같은 네 가지의 실험을 수행하였는데, Table 3.3에 본 연구에서 수행한 실험을 정리하였다. EXP-3과 EXP-4는 복사 효과를 고려하는 개념에 따라 모형에 차이를 두는 것으로 아격자 규모 응결 모수화에 대한 내용은 동일하다.

Table 3.3. Classification of fog model experiments

EXP-1	EXP-2	EXP-3	EXP-4
No fog module	fog module w/o radiation	fog module with radiation before improvement	fog module with radiation after improvement

Fig. 3.30은 위 네 가지 실험을 수행한 모형의 수평 영역이다. 이전의 연구와 달리 one-domain으로 구성되며, 수평격자 간격은 20 km로 이전의 수행영역의 nested domain과 동일하다. 그러나 연직 간격은 33층으로 경계층 내의 물리 과정을 보다 자세하게 살펴보고자 850 mb아래의 층을 보다 세밀화 하였는데, 각층의 σ 값은 1.0, 0.99, 0.979, 0.967, 0.955, 0.940, 0.923, 0.903, 0.882, 0.858, 0.832, 0.800, 0.768, 0.732, 0.698, 0.658, 0.621, 0.584, 0.547, 0.511, 0.474, 0.437, 0.400, 0.363, 0.326, 0.289, 0.254, 0.216, 0.179, 0.142, 0.105, 0.068, 0.032, 0.0이다. Table 3.4는 수치적분을 위해 사용한 물리과정을 정리한 것이다.

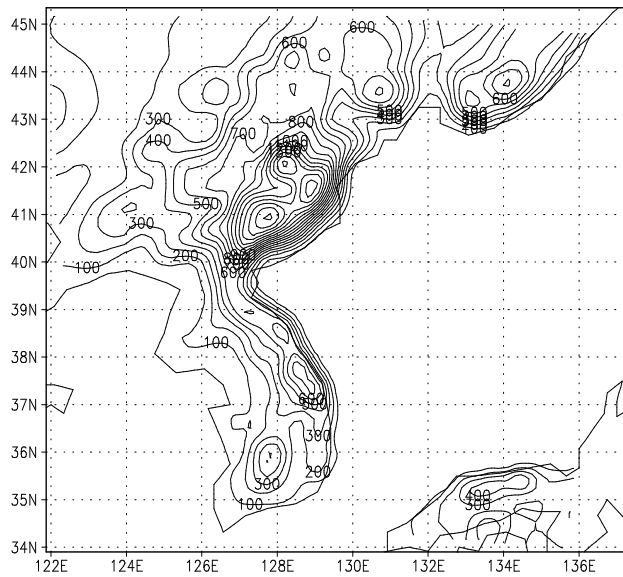


Fig. 3.30. Horizontal domain and geometry of model(contour interval : 100 m).

Table 3.4. Model description

Item	Option
Dynamic	Non-hydrostatic
Vertical layer	Terrain-following σ -coordinate(33layers)
Time integration	Split semi-implicit
Lateral boundary condition	Time and inflow/outflow dependent relaxation
Vertical boundary condition	Radiation
Planetary boundary Layer	Gayno-Seaman PBL(Gayno, 1994)
Ground Temperature	5-layer soil model
Radiation	RRTN scheme
Cumulus Convection	Deep convection (Grell, 1993)
Explicit Moisture	Mixed phased

라. 실험 결과

Table 3.5는 앞 절에서 설명한 실험을 수행하기 위해 본 연구에서 선정한 해무 사례이다. 지난 1999년 4월부터 현재까지 사례 수집과 분석을 통하여 선정된 총 12개의 사례에 대하여 수치 실험을 수행하였다. 이 절에서는 모형에서 모사한 해무의 특성보다는 본 연구에서 개발된 해무 예측 모형에 대한 예측성과 이용 가능성의 측면에서 중점을 두어 분석하였다.

일반적으로 안개에 대한 처방이 없는 MM5에서는 아격자 규모의 응결과정 없이 격자규모의 습윤 과정으로부터 구름물 혼합비(Cloud water mixing ratio, Q_c)와 빗물혼합비(Rain water mixing ratio, Q_r)를 계산한다. 따라서 본 연구에서는 모듈을 사용하지 않는 실험의 경우(EXP-1), $Q_c + Q_r$ 의 양을 물혼합비로 표현하여 안개의 변수로 이용하였다. 그리고 모듈을 사용한 경우(EXP-2, EXP-3, EXP-4)는 LWC(Liquid Water Contents)가 명시적으로 계산되므로 이것을 안개 변수로 사용하였다. 이러한 물혼합비를 안개의 변수로 이용하는 것은 미세 물리적인 관점에서 대기중의 물혼합비가 0.05 g/kg ~ 0.2 g/kg인 경우를 안개로 정의(Cotton and Anthes, 1989)하는 것에 근거한다.

Table 3.5. Selected cases of typical fog analysed in the study.

	Period
Advection fog	1999년 7월 21일 ~ 23일
	1999년 7월 28일 ~ 31일
	1999년 8월 5일 ~ 7일
	2000년 6월 16일 ~ 18일
	2000년 6월 19일 ~ 20일
	2000년 7월 27일 ~ 29일
	2000년 8월 7일 ~ 8일
	2000년 8월 29일 ~ 31일
Stream fog	1999년 7월 12일 ~ 14일
	2000년 7월 4일 ~ 6일
Frontal fog	1999년 7월 2일 ~ 4일
	1999년 8월 18일 ~ 20일

(1) 이류 안개 사례

① 1999년 7월 21일 - 23일 사례

Fig. 3.31은 사례기간동안 울릉도 관측소에서 관측된 시정, 기온, 노점온도, 바람의 시간변화이다. 이 기간은 21일 00시 이후부터 시정의 감소가 빠르게 나타나고 23일 12시 이후에 10 km이상의 시정을 기록하였다. 21일 00시부터 23일 12시까지 시정이 1 km이하인 안개를 포함하여 박무(10 km이하) 상태를 유지하고 있었다. 또한 같은 시간동안 기온과 노점온도의 편차는 거의 없으며, 남서풍이 우세하였다.

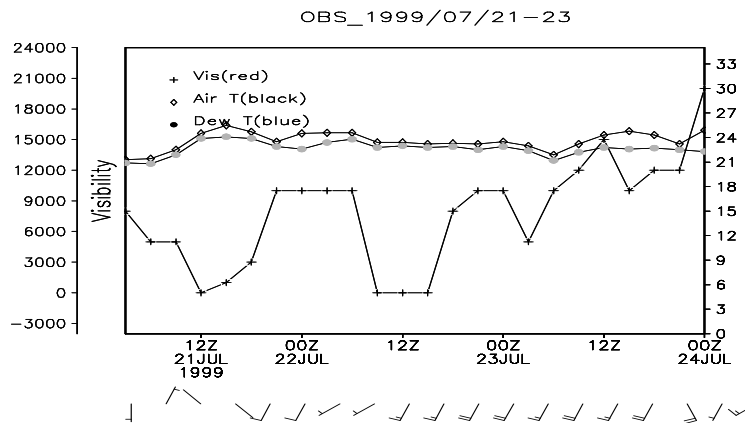


Fig. 3.31. Time series of observed visibility(cross), air temperature (diamond), dew-point temperature (closed circle), and wind bars(bottom) at Ulleung Do station during 21 -23 July 1999.

이처럼, 1999년 7월 21일 - 23일동안 동해상에서 발생한 해무 사례는 이류 안개 로써 안개 발생 기간동안 남서풍의 영향으로 동해상으로 고온 다습한 수증기의 유입이 있었던 것으로 사료된다. 이러한 특성이 모형에서도 잘 묘사되었는데, Fig. 3.32은 사례기간동안 (a) 바람과 기온 그리고 (b) 바람과 비습의 공간 분포이다. 그림에서 나타나듯 연구 대상지역인 울릉도를 포함한 동해상으로 남서풍이 우세하였으며, 남서풍의 영향으로 16 g/kg의 비습선이 40°N까지 나타나며, 비습선과 유사하게 기온이 분포하고 있다. 따라서 안개 발생 기간동안 동해상으로의 고온 다습한 수증기 유입이 있었을 것으로 판단된다.

Fig. 3.33은 수치 실험 결과로 울릉도가 위치한 경도 131°E를 중심으로 위도를 따라 살펴본 물혼합비와 Liquid Water Contents(이하, LWC)의 분포이다. 안개 예측 모형을 사용하지 않은 경우(EXP-1)의 경우에는 구름 물혼합비(Qc)와 강수 물혼합비(Qr)의 합을 물혼합비로 정의하였으며, 나머지 세 실험의 경우에는 해무 예측

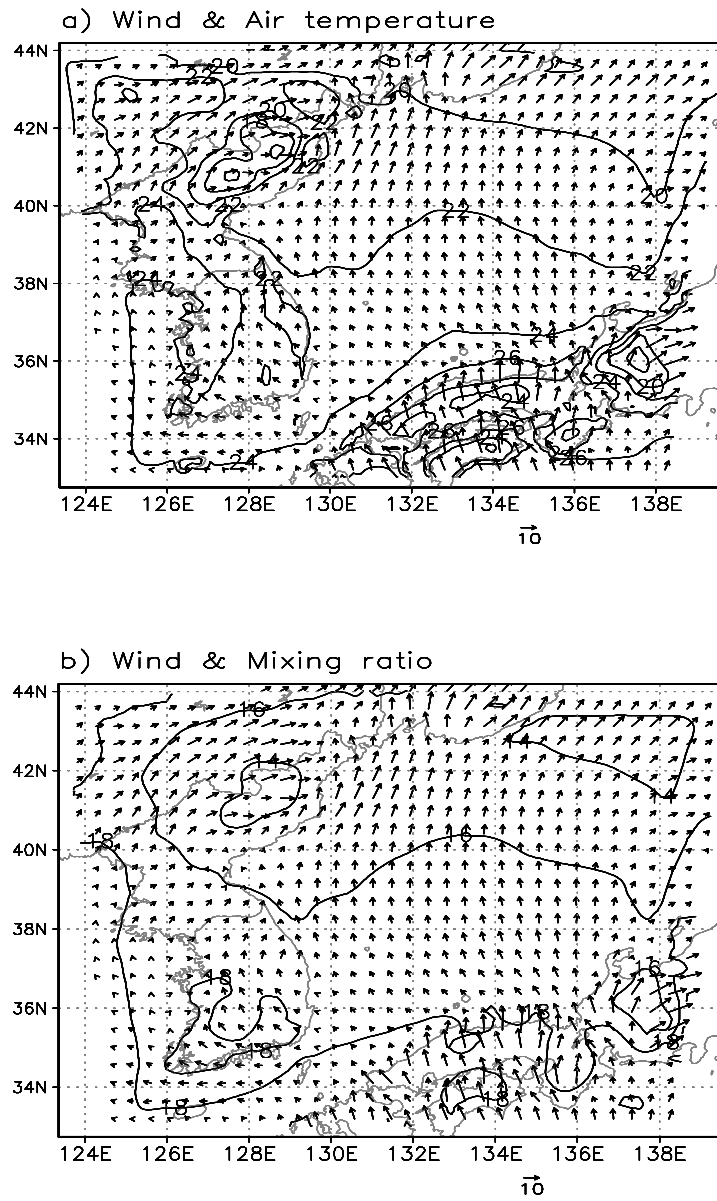


Fig. 3.32. Distributions of a) air temperature and wind and b) mixing ratio and wind for the selected fog case averaged during 21 - 23 July 1999.

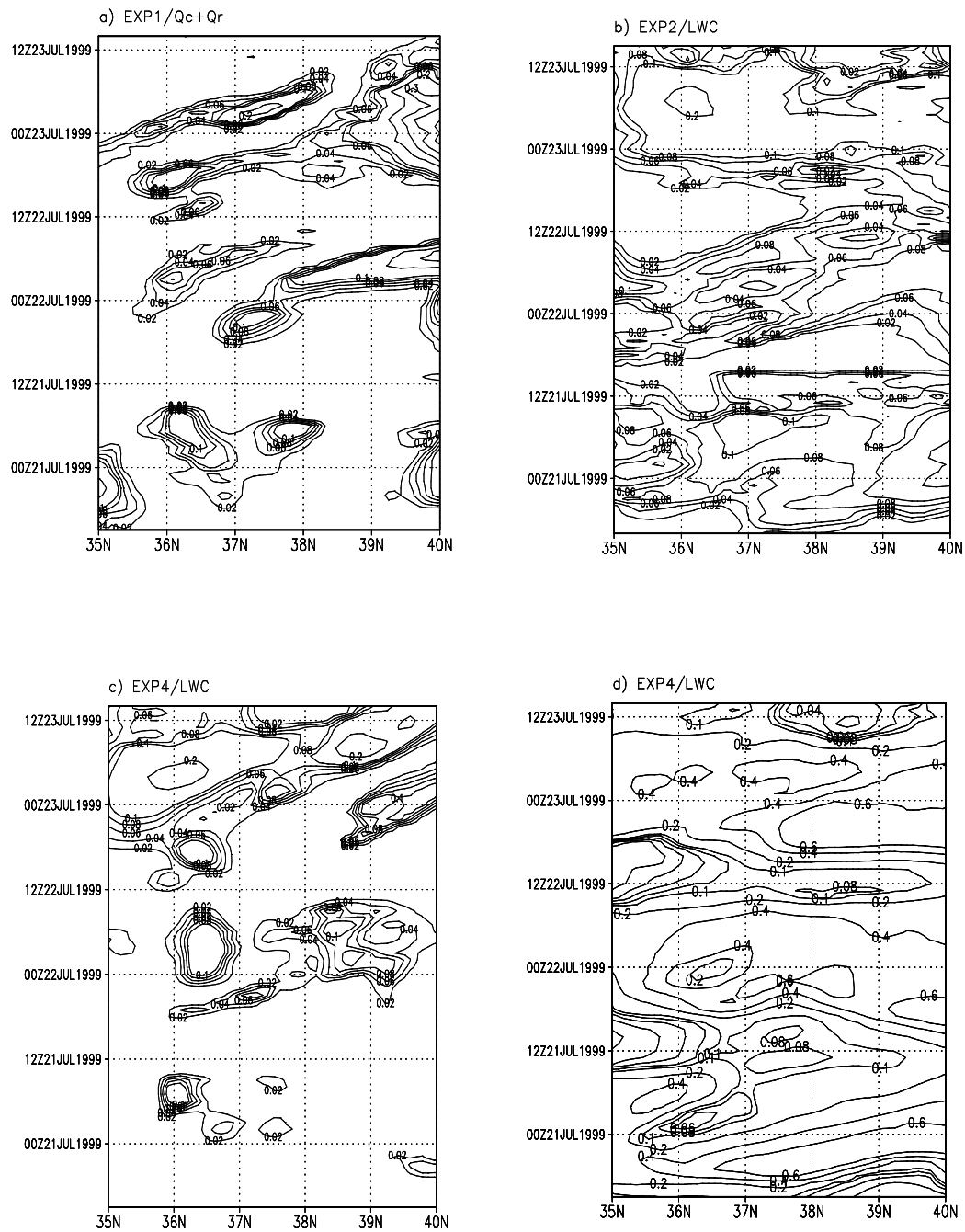


Fig. 3.33. Time - latitude plots of simulated Qc+Qr and LWC(Liquid Water Contents) at the lowest level of the model along 131°E of East Sea across Ulleung Do for a) EXP-1, b) EXP-2, c) EXP-3, and d) EXP-4.

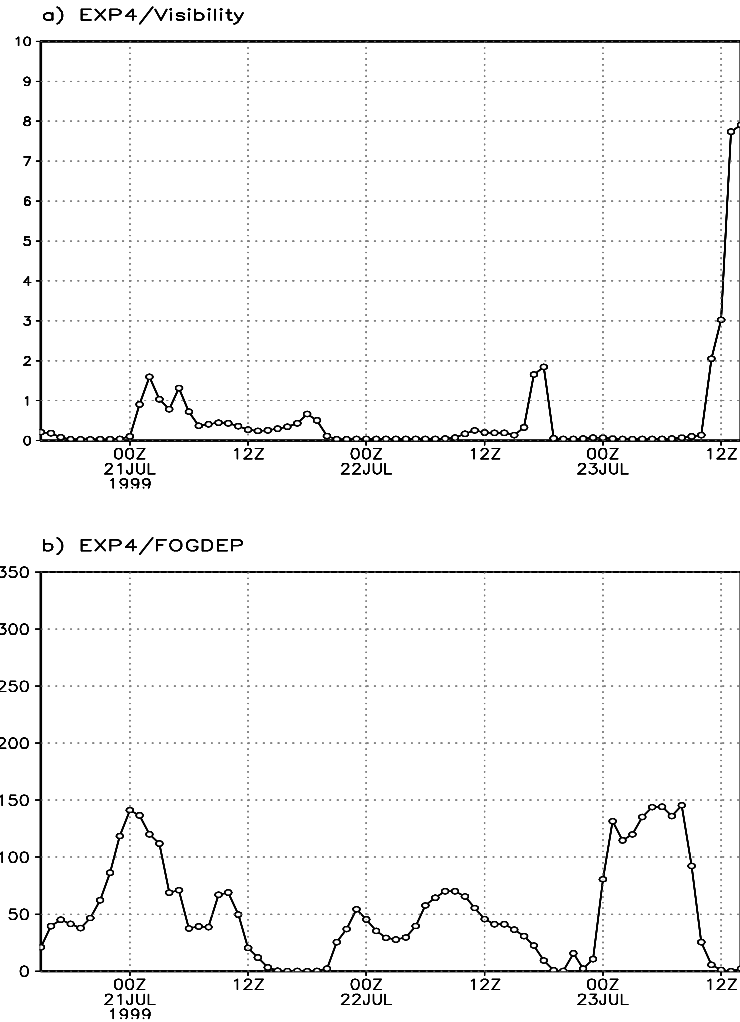


Fig. 3.34. Time series of simulated a) visibility and b) fog depth at Ulleung Do during 21 - 23 July 1999.

모형에서 예단되는 LWC를 안개 지표로 사용하였다. Fig. 3.33의 (a), (b), (c), (d)는 각각 EXP-1, EXP-2, EXP-3, EXP-4에 대한 수치 실험 결과이다. Fig. 3.33에서 나타나듯이 약간의 차이는 있으나 모든 수치 실험에서 안개 발생 기간동안 0.05 g/kg이상의 물혼합비가 나타나고 있다. EXP-1의 경우(Fig. 3.33(a))는 안개가 관측된 기간동안 0.05 g/kg이상의 물혼합비가 나타나고 있지만, 시정이 1 km이하로 떨어진 두 번의 안개기간(21일 06시 - 15시, 22일 06시 - 15시)에는 물혼합비의 분포가 나타나지 않는다. 이것은 모형에서 나온 물혼합비가 안개의 예측 인자로서

의 이용 가능성은 보여주고 있으나 안개에 대한 특별한 처방이 없는 경우, 안개 전 기간에 대한 정확한 모사는 불가능함을 보여준다.

따라서 본 연구에서 개발된 예측 모형의 성능 및 모형의 결과를 EXP-2~EXP-4에서 살펴보았다. Fig. 3.33(b)는 EXP-2에 대한 LWC의 시간 전개로 EXP-1(Fig. 3.33(a))에 비해서 0.05 g/kg이상의 물혼합비가 모사된 기간이 증가하고 있다. EXP-1의 경우(Fig. 33(a))는 연속적인 물혼합비의 모사가 나타나지 않으나, EXP-2(Fig. 33(b))에서는 LWC가 지속적으로 0.05 g/kg이상의 값이 나타난다.

안개 발생시 반드시 고려되어야 할 몇 가지 미세 물리 과정 중에 본 연구에서는 복사 물리 과정에 대한 영향을 해무 예측 모형에 적용하여 그 특성을 살펴보고자 하였다. 해무 예측 모형에 아격자 규모 응결 모수화 뿐 아니라 복사과정에 대한 모수화까지 고려한 경우(EXP-3, EXP-4)에 대한 수치 실험의 결과는 Fig. 3.33(c)와 Fig. 3.33(d)이다. Table 3.3에서 설명하였듯이 EXP-3은 복사 물리과정에 대한 개선 전의 모형을 이용하여 수치 실험 한 경우이며, EXP-4는 개선후의 모형을 적용한 실험이다. 그림에서 보듯이 개선전의 복사 모수화 과정을 해무 예측 모형에 이용한 경우(Fig. 3.33(c))가 아격자 규모 모수화만 적용하였을 때(Fig. 33(b))보다도 관측에 비해서 과소 모사하는 모습을 보여준다. 반면에 개선된 모형(Fig. 33(d))에서는 비록 전체적으로 LWC의 값이 높게 나타나지만, 울릉도 관측소에서 관측된 안개 기간동안 0.05 g/kg 이상의 LWC가 지속적으로 모사되고 있다.

이러한 LWC의 적절한 모사는 모형에서 진단되는 시정(Visibility)과 안개두께(fog depth)의 정확한 예측에 영향을 준다. 이는 시정과 안개 두께가 LWC의 함수로 모형에서 진단되기 때문이다. Fig. 3.34는 EXP-4에 대한 수치실험 결과로 울릉도 지점에서의 (a) 시정과 (b) 안개 두께의 시간 전개이다. Fig. 3.34(a)에서 나타나듯이 안개 기간동안 거의 2km이하의 시정이 지속적으로 예측되고 있으며, 이는 관측과도 매우 유사한 결과이다.

2) 1999년 7월 28일 - 31일 사례

Fig. 3.35는 또 다른 이류 안개 사례기간동안 울릉도 관측소에서 관측된 기온, 노점온도, 바람 그리고 시정의 시간전개이다. 안개는 1999년 7월 29일 06시부터 발생하기 시작하여 30일 06시까지 지속되었으며, 이후 시정이 회복되는 모습을 보이고 있다. 또한 사례기간동안 울릉도는 남서풍의 영향을 받고 있었다.

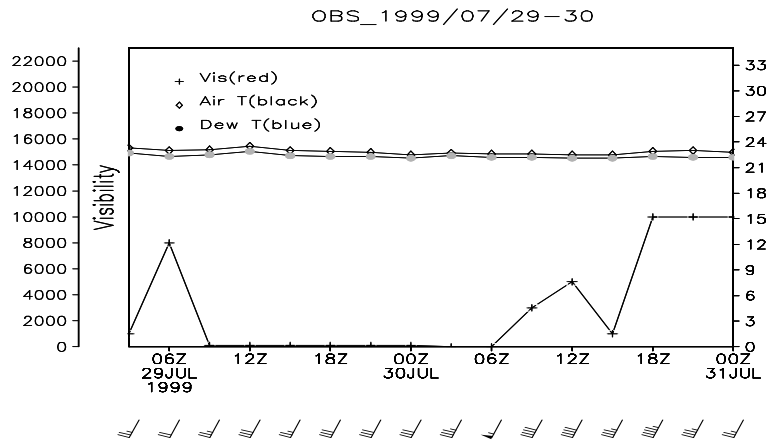


Fig. 3.35. Same as Fig. 3.31, but for during 29-30 July 1999.

두 번째 이류안개 분석 사례(1999년 7월 28일 -31일)은 동해상에서 북태평양 고기압의 확장으로 동해 전역이 고기압의 가장자리에 영향을 받았던 기간이다(Fig. 3.36).

Fig. 3.37은 수치 실험 결과로 울릉도가 위치한 경도 131°E를 중심으로 위도를 따라 살펴본 물혼합비와 LWC의 분포이다. Fig. 3.37의 (a), (b), (c), (d)는 마찬가지로 각각 EXP-1, EXP-2, EXP-3, EXP-4에 대한 수치 실험 결과이다. 첫 번째 이류 안개 사례와 유사하게 1999년 7월 28일 - 31일에 발생한 사례에 대한 수치 실험에서도 유사한 결과가 나타났다. 전체적으로 EXP-1(Fig. 3.37(a))에 의한 물혼합비 모사기간보다 안개 예측 모형을 이용한 실험의 결과들이 관측과 유사하게 나타난다. 특별한 처방없이 MM5를 구동하였을 경우에 대한 실험 결과가 Fig. 3.37(a)인데, 그림에서 나타나듯이 전체 안개 발생 기간 중 대략 30일 00시 - 06시까지만 0.05g/kg이상의 물량을 모사하고 있다.

반면에 해무 예측 모형을 이용한 경우의 실험들(Fig. 3.37(b), Fig. 3.37(c), Fig. 3.37(d))에서는 약간의 차이가 있으나 관측된 기간동안 0.05 g/kg 이상의 물량을 모사하였다. 그러나 EXP-2(Fig. 3.37(b))와 EXP-3(Fig. 3.37(c))에서는 안개가 관측에 비해서 다소 빨리 소산되는 모습을 보인다. 그러나 당해연도에 개선된 해무 예측 모형을 이용하여 실험한 EXP-4(Fig. 3.37(d))의 경우에는 EXP-2(Fig. 3.37(b))와 EXP-3(Fig. 3.37(c))에 비해서 빨리 발생하고 늦게 소산되는 특성이 보이나 전체적으로 EXP-2(Fig. 3.37(b))와 EXP-3(Fig. 3.37(c))에서는 물량이 낮게 모사되는 것에 비해서 0.05 g/kg이상의 값이 지속적으로 나타나고 있다.

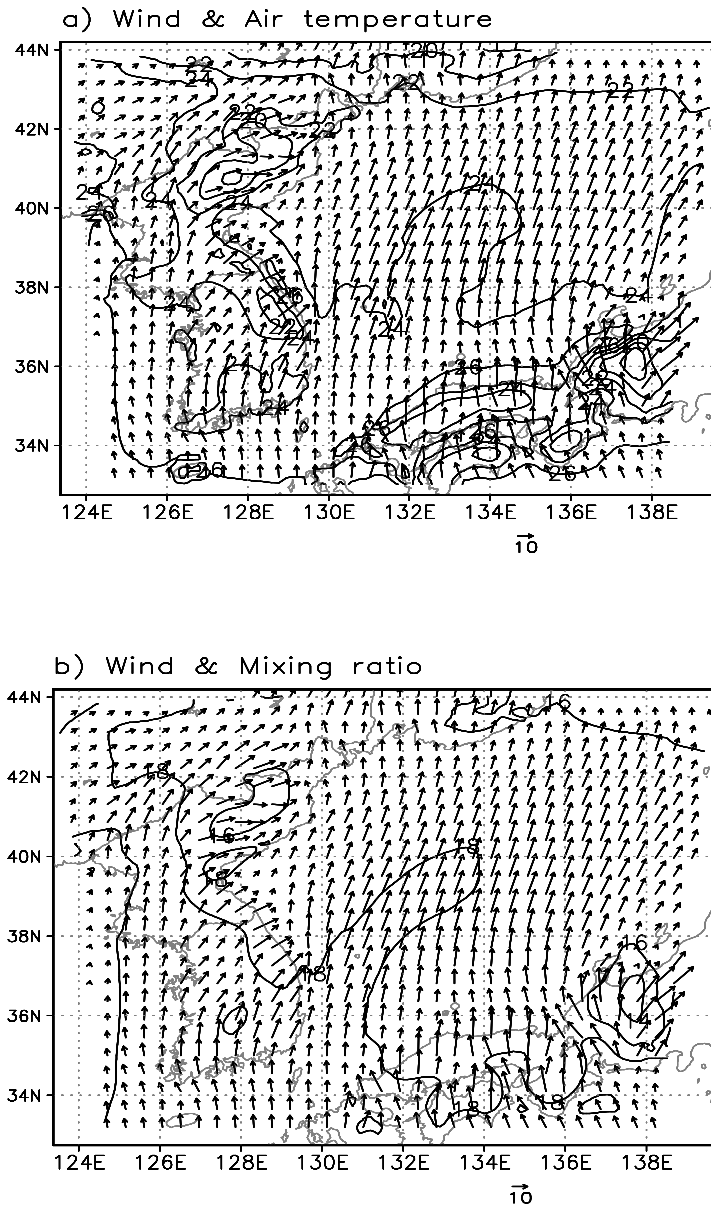


Fig. 3.36. Same as Fig. 3.32, but for during 29 - 30 July 1999.

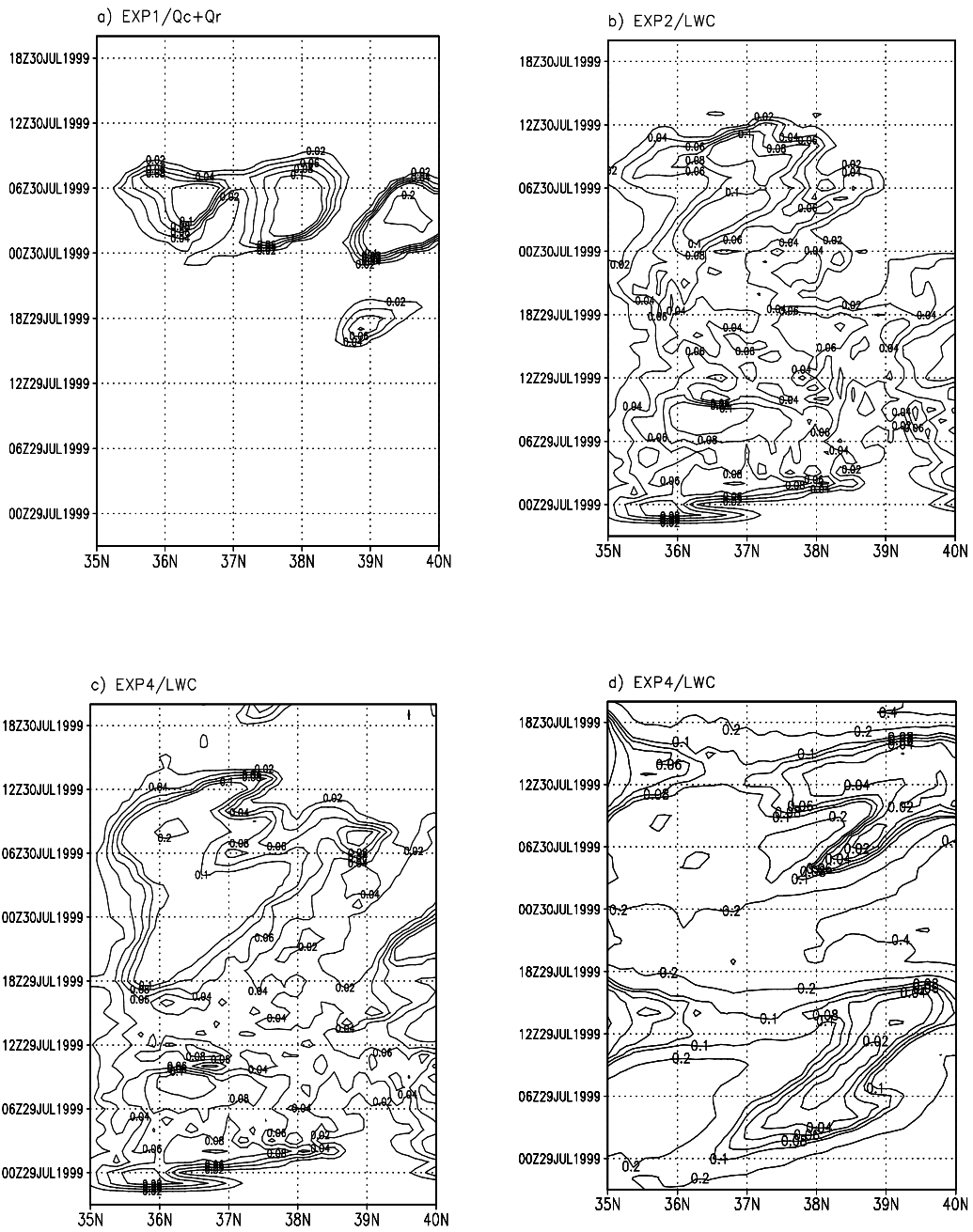


Fig. 3.37. Same as Fig. 3.33, but for during 29 – 30 July 1999.

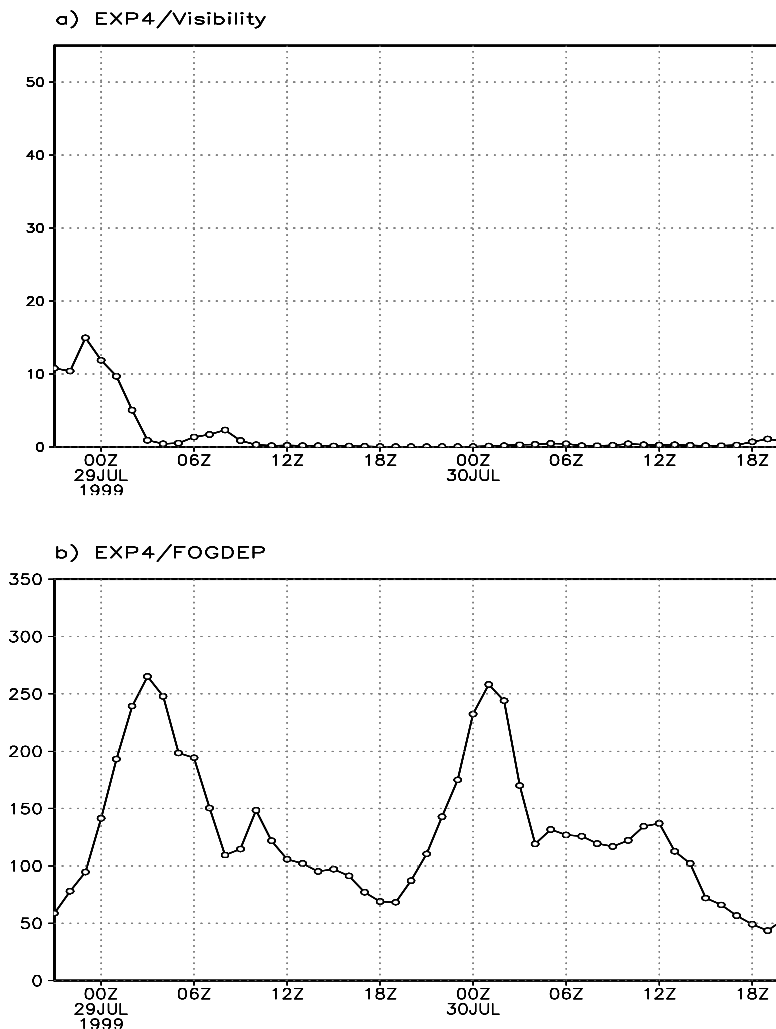


Fig. 3.38. Same as Fig. 3.34, but for during 29 - 30 July 1999.

이처럼 당해연도에서 수행한 복사 모수화 과정에 대한 모형의 개선이 이전의 해무 예측 모형보다 더 관측에 유사하며, 예측성을 높이고 있음을 잘 보여주고 있다. 또한 EXP-4에서 예측된 시정과 안개 두께도 역시 관측과 유사하였다(Fig. 3.38).

3) 2000년 7월 27일 - 29일 사례

이류안개의 세 번째 분석 사례는 2000년 7월 27일 -30일에 발생한 해무 사례이다. Fig. 3.39은 울릉도 관측소에서 사례기간동안 관측된 기온, 노점온도, 바람 그리고 시정의 시간전개이다. 그림에서 나타나듯이 안개는 28일 03시부터 발생하여 09시경에 최대로 발달하여 15시부터 시정이 회복되었다.

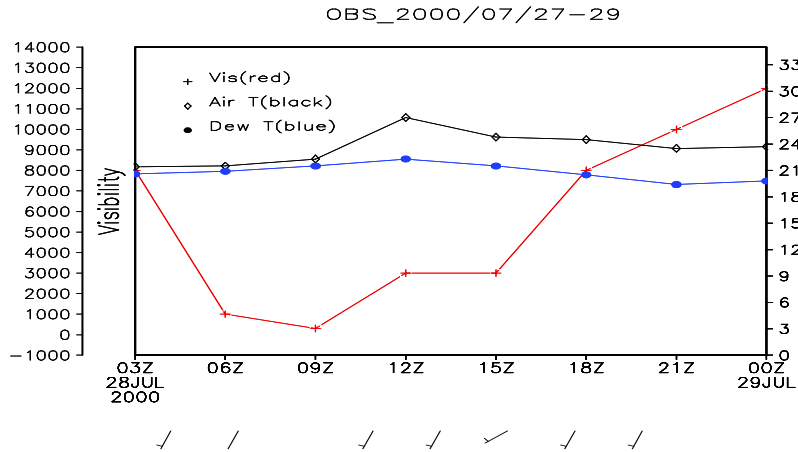


Fig. 3.39. Same as Fig. 3.31, but for during 27- 29 July 2000.

Fig. 3.40는 안개 발생 사례동안 바람과 기온(a) 그리고 바람과 비습(b)의 공간 분포이다. 그림에서 나타난 듯이 이 기간에는 연구 대상지역인 울릉도를 포함한 동해상으로 남동풍에 의하여 평균적으로 16g/kg이상의 높은 혼합비를 가진 수증기가 동해상으로 유입되는 종관적인 특성을 보이고 있다. 이러한 종관적인 특성은 위의 두 이류 해무 사례와 유사한 모습으로 주로 이류 안개 특성을 보인다.

이류 안개 사례의 세 번째 사례인 2000년 7월 27일 - 29일 사례에서도 앞의 두 사례와 같이 해무 예측 모형을 적용하지 않은 경우(EXP-1)에 관측에 비해서 과소 모사하는 모습을 여전히 보여주었다(그림 미제시). 그리고 해무 예측 모형을 적용한 경우의 수치 실험들에서의 결과가 관측에 더 유사하였는데, Fig. 3.41는 EXP-3와 EXP-4에서의 수치 실험 결과로 울릉도가 위치한 경도 131°E를 중심으로 위도를 따라 살펴본 물혼합비와 LWC의 분포이다. a) EXP-3, b) EXP-4에 대한 결과이다. 앞의 사례들과 유사하게 EXP-3(Fig. 3.41(a))에서는 관측된 기간에 대하여 과소 모사하고 있다. 거의 약 3시간 정도만 물량이 안개 발생기간동안 모사되고 있으며, 모사된 물량 또한 0.02 g/kg으로 다소 낮은 값을 나타낸다. 그러나 복사 모수화가 개선된 경우(Fig. 3.41(b))에는 안개 발생기간인 동안 0.05g/kg이상의 LWC가 모형에서 모사되고 있다.

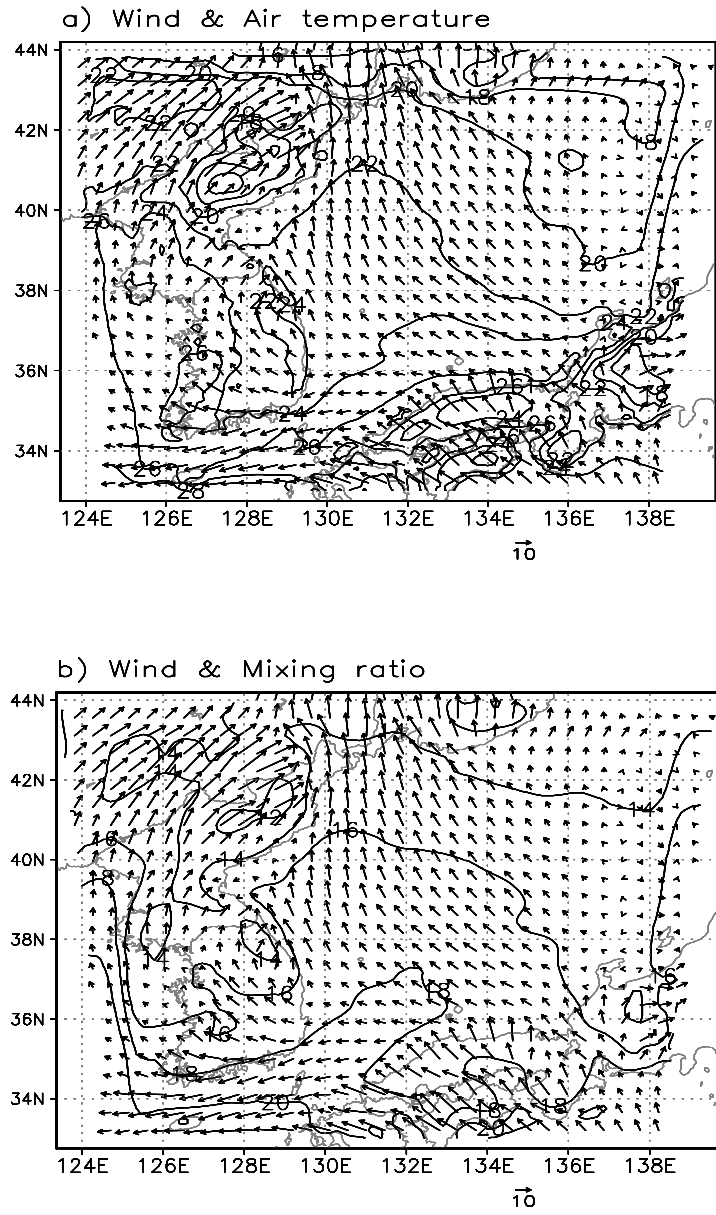


Fig. 3.40. Same as Fig. 3.32, but for during 27 - 29 July 2000.

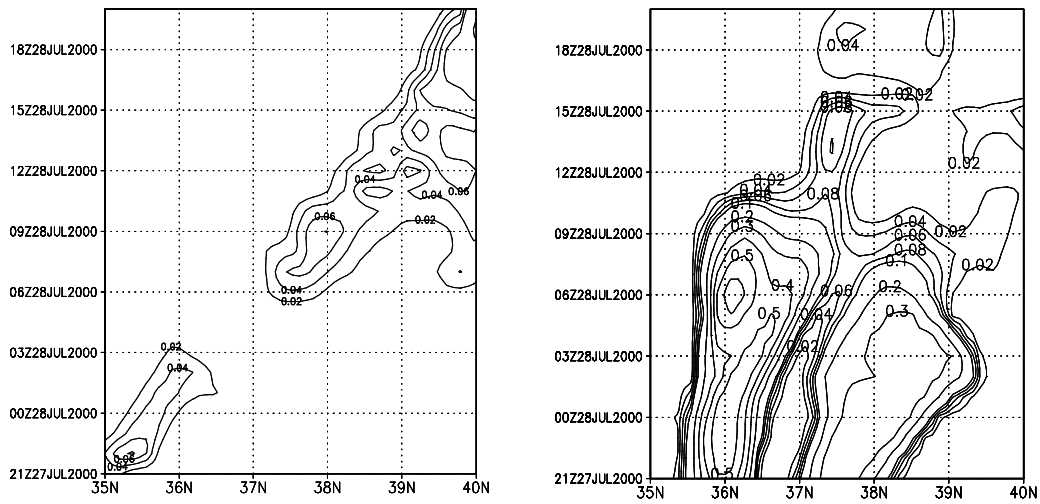


Fig. 3.41. Time - latitude plots of simulated LWC(Liquid Water Contents) at the lowest level of the model along 131°E of East Sea across the Ulleung Do during 27 - 29 July 2000 for a) EXP-3 and b) EXP-4.

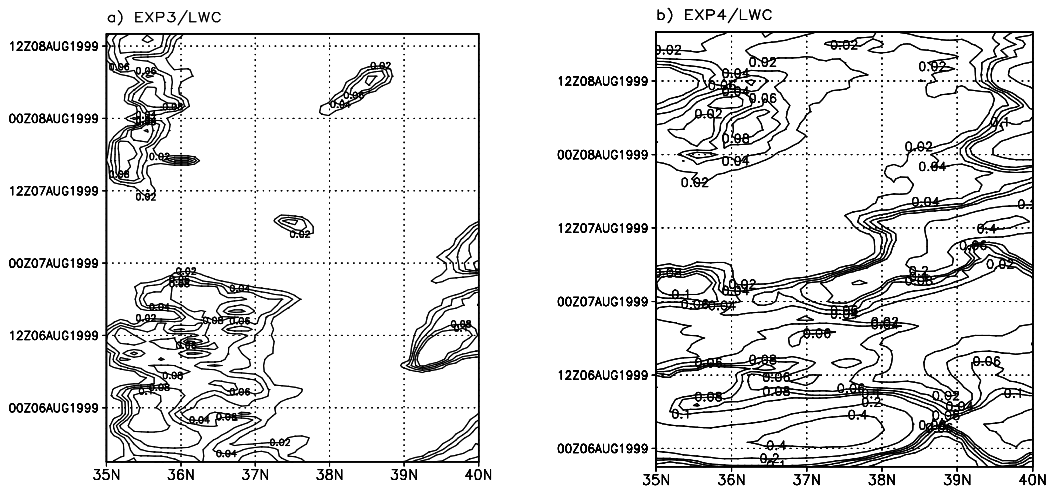


Fig. 3.42. Same as Fig. 3.41, but for during 5 - 7 August, 1999.

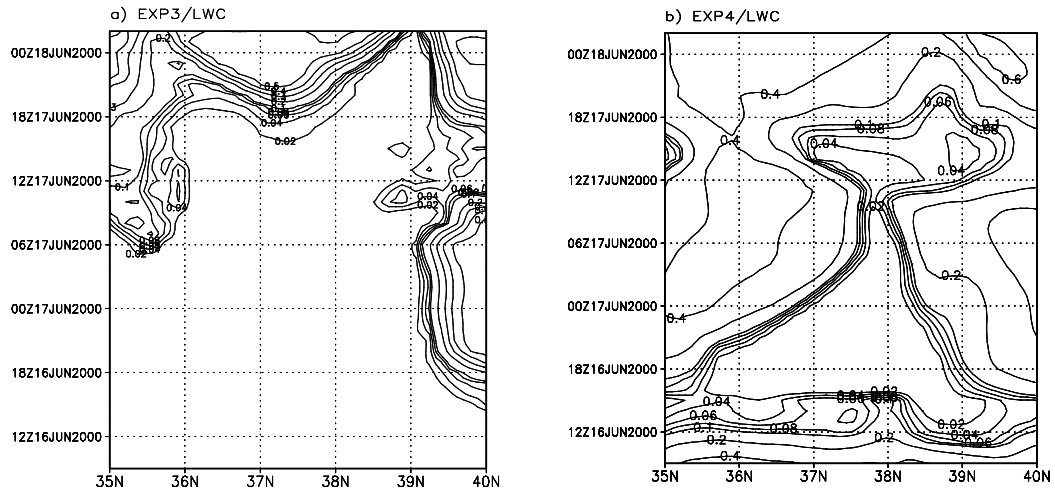


Fig. 3.43. Same as Fig. 3.41, but for during 16 - 18 June, 2000.

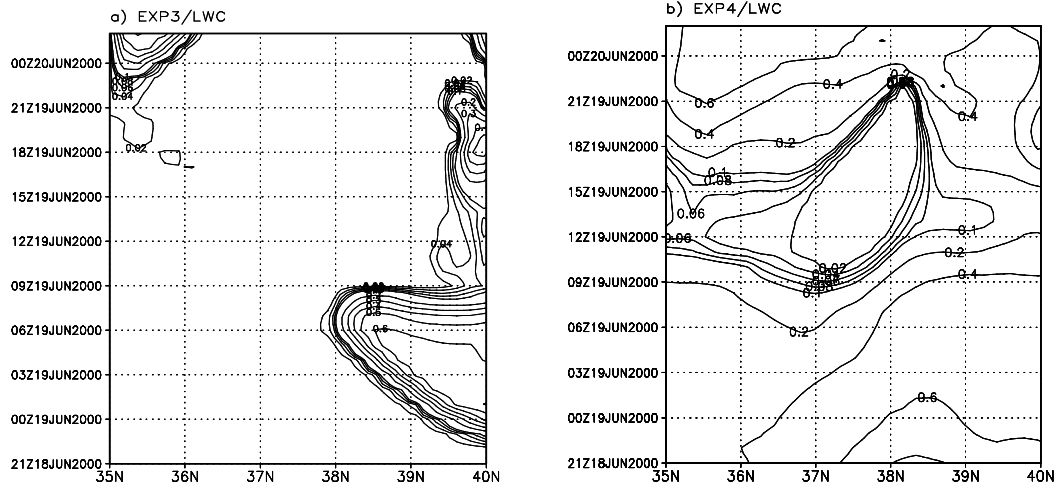


Fig. 3.44. Same as Fig. 3.41, but for during 19 - 20 June, 2000.

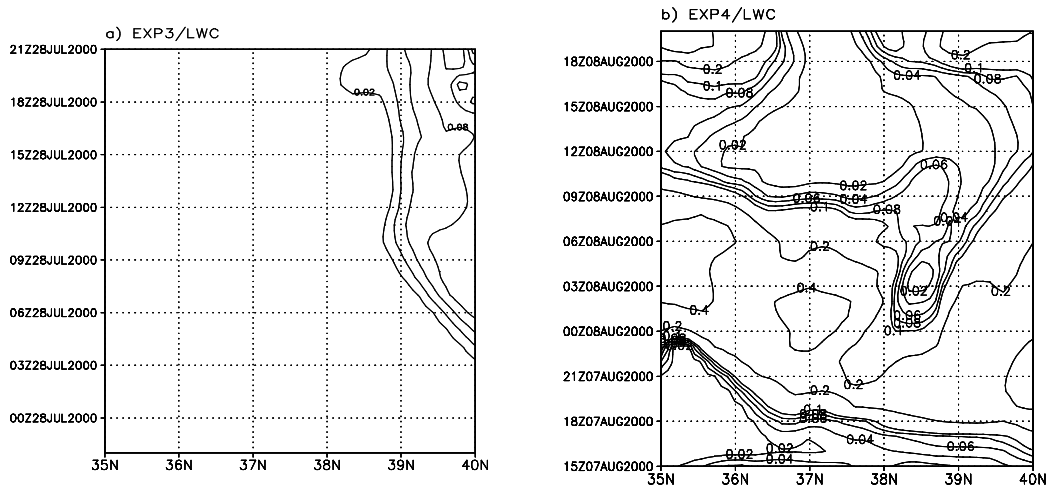


Fig. 3.45. Same as Fig. 3.41, but for during 7 - 8 August, 2000.

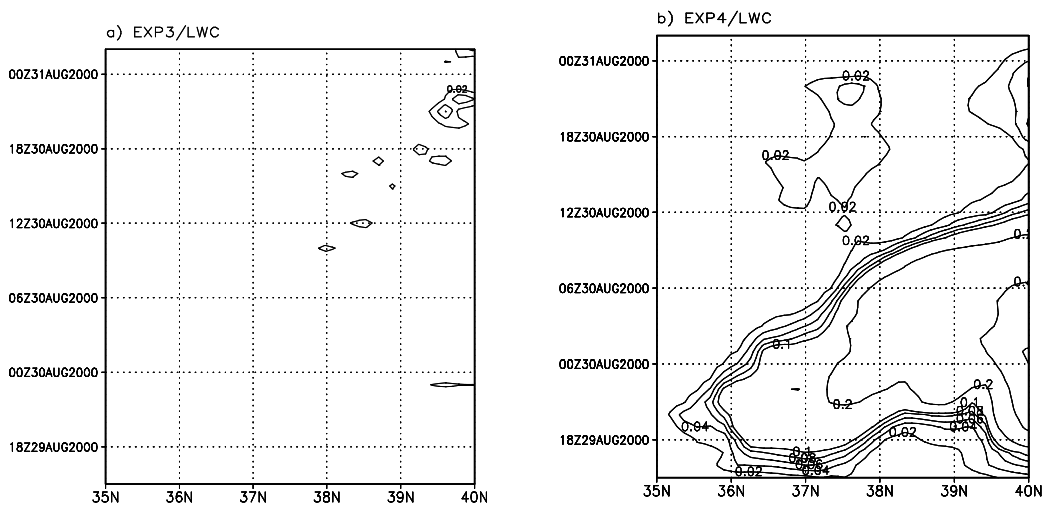


Fig. 3.46. Same as Fig. 3.41, but for during 29 - 30 August, 2000.

본 연구에서 1999년 4월 이후 현재까지 수집되어 분석된 이류 안개 사례 중 Table 3.6에서와 같이 전형적인 이류 안개로 분류된 8개의 사례에 대한 수치 실험 결과를 분석하였는데, 앞에서 살펴본 사례들과 같이 나머지 사례(1999년 8월 5일 - 7일 사례(Fig. 3.42), 2000년 6월 16일 - 18일 사례(Fig. 3.43), 2000년 6월 19일 - 20일 사례(Fig. 3.44), 2000년 8월 7일 - 8일 사례(Fig. 3.45), 2000년 8월 29일 - 30일 사례(Fig. 3.46))에서도 유사한 모습을 보였다. 대부분의 사례에서 해무에 대한 아무런 처방을 하지 않은 EXP-1보다는 해무 예측 모형을 적용한 경우에 대한 실험 결과(EXP-2,EXP-3,EXP-4)가 더 관측과 유사하였으며, 복사 효과에 대한 민감도 실험에서는 아격자 규모 응결 모수화만 포함한 경우의 실험(EXP-2)보다는 개선된 복사 모수화 과정을 포함한 경우의 해무 예측 모형을 적용한 결과가 관측에 가깝게 나타났다. 또한 당해연도에서는 복사 모수화에 대한 문제점을 발견하고 그것을 개선하여 개선 전후의 모형의 결과를 살펴보았는데, Fig. 3.42에서 Fig. 3.46은 Table 3.6에 나타난 이류 해무 사례에 대한 수치 실험 결과로 EXP-3와 EXP-4에 나타난 결과를 보여준 것이다. 거의 대부분의 사례에서 모형에서 모사된 LWC가 EXP-3보다는 EXP-4에서 관측과 유사한 모습을 보였으며, 2000년 6월 16일 - 18일 사례와 2000년 6월 19일 - 20일 사례의 경우에는 EXP-3에서는 안개를 전혀 모사하고 있지 못하나 반면에 EXP-4에서는 관측된 기간동안 0.05 g/kg 이상의 LWC가 모형에서 모사되고 있었다. 이처럼 본 연구에서 개발된 해무 예측 모형을 이류 안개 사례들에 대한 사례에 적용한 결과 모형이 해무의 객관적 예측을 위한 도구로서의 가능성을 충분히 보여주고 있었다.

(2) 증기 안개 사례

① 1999년 7월 12일~14일 해무 발생일

Fig. 3.47는 울릉도 관측소에서 관측된 1999년 7월 12일 -15일까지 기온, 노점 온도, 바람 그리고 시정의 시간전개이다. 이 사례 기간은 총 4번의 안개 기간을 포함하여 12일 03시부터 14일 18시까지 10km이하의 박무가 지속적으로 나타났다. 사례동안 울릉도 관측소에는 10knot 이상의 북동풍 계열의 바람이 우세하였으며, 대기의 온도와 노점 온도의 편차가 거의 0에 가까운 상태를 유지하였다.

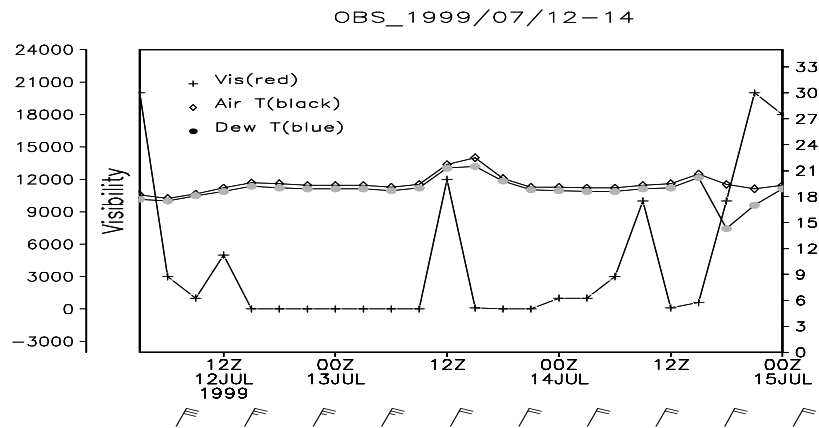


Fig. 3.47. Same as Fig. 3.31, but for during 12 - 14 July, 1999.

Fig. 3.48은 모형에 나타난 사례기간에 대한 평균적인 상태를 보여주는 것으로 a) 평균 바람과 온도 와 b) 평균 바람과 비습의 공간적인 분포이다. 이 기간은 한반도 전역이 오호츠크해 고기압의 영향권에 있었던 기간으로 보통 북쪽의 찬공기가 북동풍의 기류를 타고 남하하면서 상대적으로 따뜻한 해면위로 이류됨에 따라 해무나 층운형의 구름의 형성을 좋게 하는 종관적 특성을 가졌다.

Fig. 3.49는 Table 3.3에서 소개한 수치 실험을 수행한 결과로 울릉도가 위치한 경도 131°E를 중심으로 위도를 따라 살펴 본 물혼합비와 LWC의 분포이다. Fig. 3.49의 (a), (b), (c), (d)는 각각 EXP-1, EXP-2, EXP-3, EXP-4에 대한 수치 실험 결과이다. 전체적으로 모든 실험에서 물량의 값이 적게 모사되고 있으며, 해무 예측 모형을 적용하지 않은 EXP-1(Fig. 3.49(a))의 경우 전체 안개 발생기간 중 13일 00Z부터 09Z동안만 물량이 모사되고 있다. 또한 EXP-2(Fig. 3.49(b))의 경우는 EXP-1에 비해서 물량이 모사된 기간이 증가하고 있으나 여전히 관측에 비해서 과소 모사하고 있다.

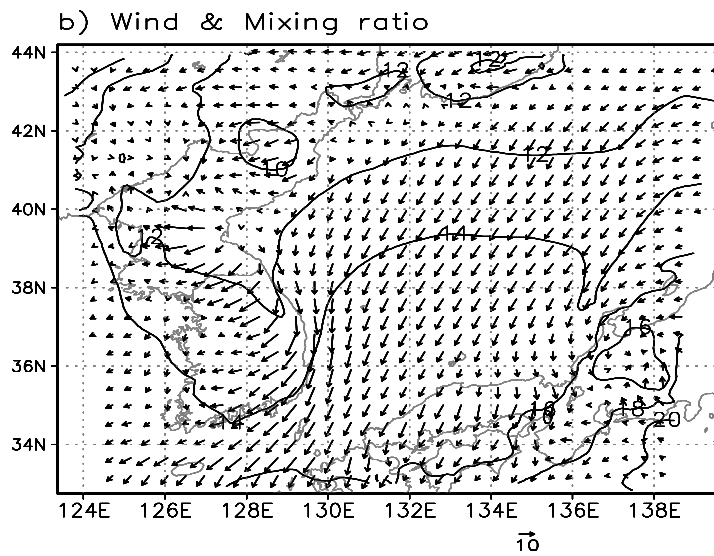
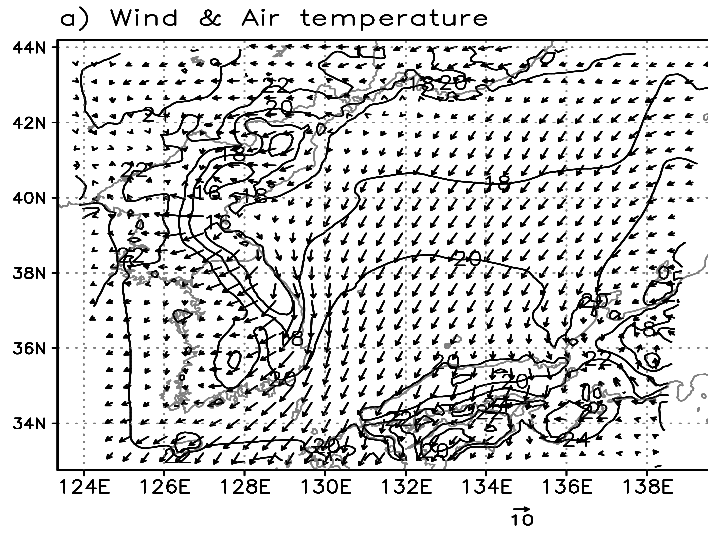


Fig. 3.48. Same as Fig. 32, but for during 12 - 14 July, 1999.

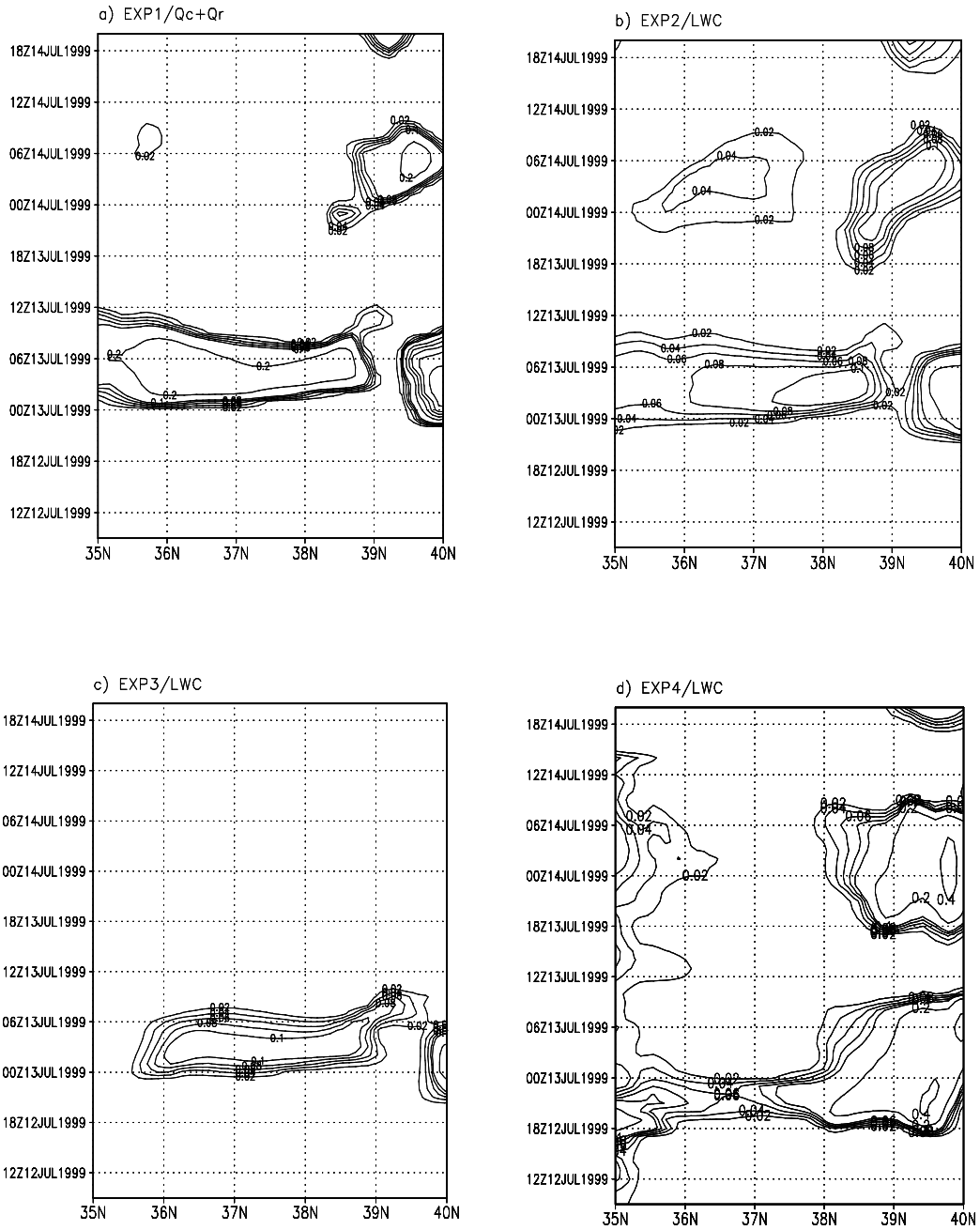


Fig. 3.49. Same as Fig. 3.33, but for during 12 - 14 July, 1999.

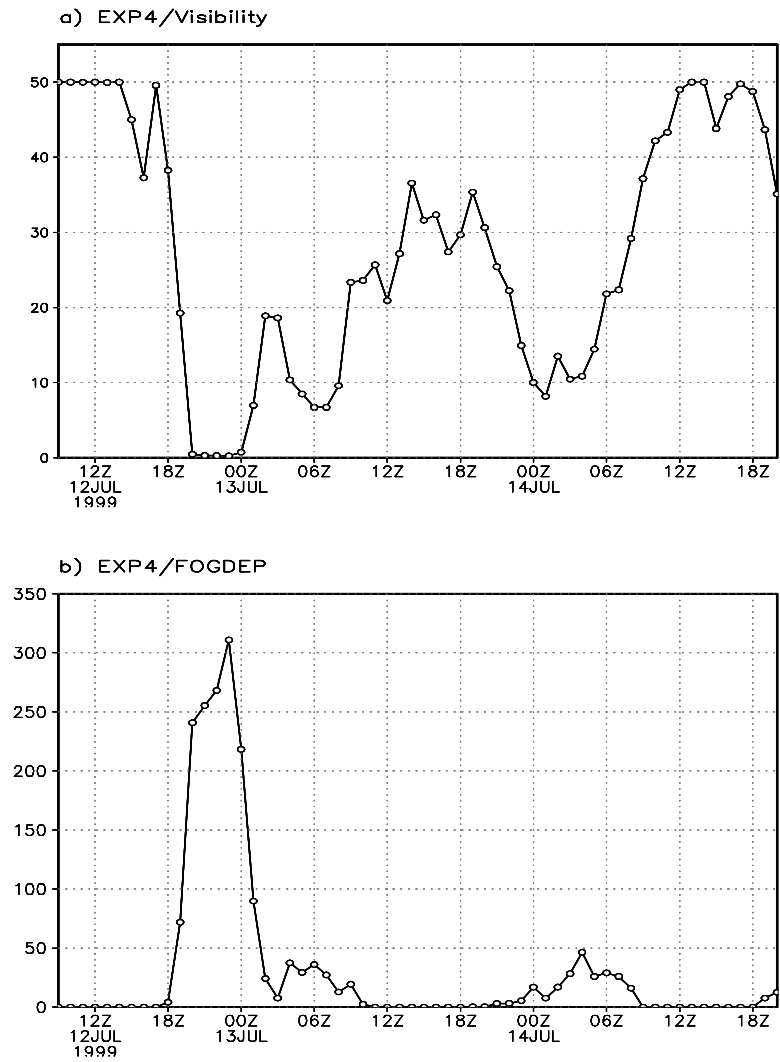


Fig. 3.50. Same as Fig. 3.34, but for during 12 - 14 July, 1999.

EXP-3의 경우(Fig. 3.49(c))는 아격자 규모 응결 모수화만 적용한 Fig. 3.49(b)보다도 안개 기간동안 물량을 적게 모사하여, 이전의 복사 모수화 과정에 문제가 있었음을 보여주고 있다. 이와 달리 EXP-4(Fig. 3.49(d))의 경우는 전체 안개기간 동안 0.02g/kg 이상의 물량이 지속적으로 모사되고 있다. 따라서 개선된 복사 모

수화 방안이 예전보다 더 실제적인 방안임을 보여준다. 또한 아격자 규모 응결 모수화만 고려한 경우(Fig. 3.49(b))보다 관측에 유사한 결과를 보이는 것은 안개 발생에 따른 복사적 효과를 모형에 고려하는 것이 해무 예측모형의 예측성을 높이고 더 실제적인 예측을 위해서 반드시 고려되어야 하는 요소임을 의미한다.

이와 같이 개선된 모형은 이류 안개에서도 나타나듯이 증기 안개 사례의 경우에서도 안개를 잘 모사하였다. 또한 모형에서 모사된 시정(Visibility)과 안개 두께(fog depth)의 시간전개 역시 관측된 안개 발생기간과 유사하게 나타났다(Fig. 3.50).

② 2000년 7월 4일~6일 해무 발생일

지난 1999년 이후 지금까지 수집된 해무 사례 중 두 번째 증기 해무 사례는 2000년 7월 4일-6일동안 동해상에서 발생하였다. Fig. 3.51은 울릉도 관측소에서 사례동안 관측된 기상요소들의 시간 전개이다. 그림 아래의 wind bar에서 나타나듯이 이 기간동안에는 비교적 풍속이 약한 기간이었으며, 주로 북동풍이 우세하였다. 시정이 회복되는 5일 18시 이후에는 남서풍으로 바뀌고 있다. 그러나 이 기간은 전체적으로 시정이 10 km이하의 박무 상태를 가지고 있다. 따라서 5일 18시 이후 시정이 회복되고는 있으나 여전히 저시정을 나타내고 있었던 사례이다.

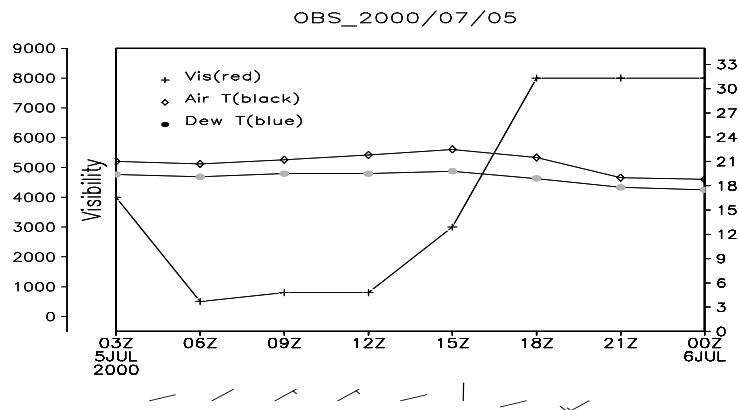


Fig. 3.51. Same as Fig. 3.31 , but for during 4 - 6 July, 2000.

Fig. 3.52은 사례기간동안 모형에서 모사된 평균 상태를 보여주는 것으로 a) 평균 바람 및 온도 와 b) 평균 바람과 비습의 공간적인 분포이다. 앞에서 살펴본 증기 안개의 첫 번째 사례보다는 다소 약한 북동풍 계열의 바람이 동해상으로 불어

들어오고 있다. 평균적으로 14 g/kg의 비습을 가진 수증기가 북동풍이나 동풍의 영향으로 이루어지는 특성이 보인다.

Fig. 3.53은 수치 실험한 결과로 울릉도가 위치한 경도 131°E를 중심으로 위도를 따라 살펴본 LWC의 분포이다. 그림의 (a)는 EXP-3에 나타난 것이며, (b)는 EXP-4에 대한 수치 실험 결과이다. Fig. 3.53(a)에 나타난 EXP-3의 결과는 이전 사례에 대한 결과보다는 관측과 유사하게 나타났으나, 여전히 안개 발생 초기에는 물량이 모사되지 않았으며, 전체적으로 그 값이 낮게 나타난다. 반면에 EXP-4에 대한 결과인 Fig. 3.53(b)에서는 안개 발생기간인 5일 00Z부터 18Z까지 0.05 g/kg 이상의 LWC가 모사되고 있다. 이와 같은 모습을 Fig. 3.54에서도 찾을 수 있는데 Fig. 3.54는 EXP-4의 수치 실험 결과로 울릉도 지점에서의 시정(Visibility)과 안개 두께(fog depth)의 시간전개이다. 안개 기간인 5일 00시 이후부터 모형에서 모사된 시정의 값이 0에 가깝게 나타나고 있는데, 이는 Fig. 3.53(b)에 나타나듯이 모사된 LWC의 값이 매우 높게 나타나는 특성에 기인하며, 모형에서 모사된 fog depth도 안개 기간동안 평균적으로 약 50 m 정도 모사 되었다.

따라서 이류 안개에 대한 모사 결과와 마찬가지로 증기 안개의 모사에 있어서도 EXP-1, EXP-2, EXP-3, EXP-4의 결과는 유사하였다. 즉, 역학적 모형도 해무에 대한 종관적인 예측가능성을 보였으며(EXP-1), 아격자 응결과정과 더불어 복사과정을 고려한 경우(EXP-3)가 복사과정을 고려하지 않은 경우(EXP-2)보다 적절히 안개를 모사하고 있음을 보였다. 또한 물리적 과정의 모수화에 대한 개선이 이루어진 EXP-4의 경우에는 보다 현실적인 해무의 예측이 가능할 수 있음을 보였다.

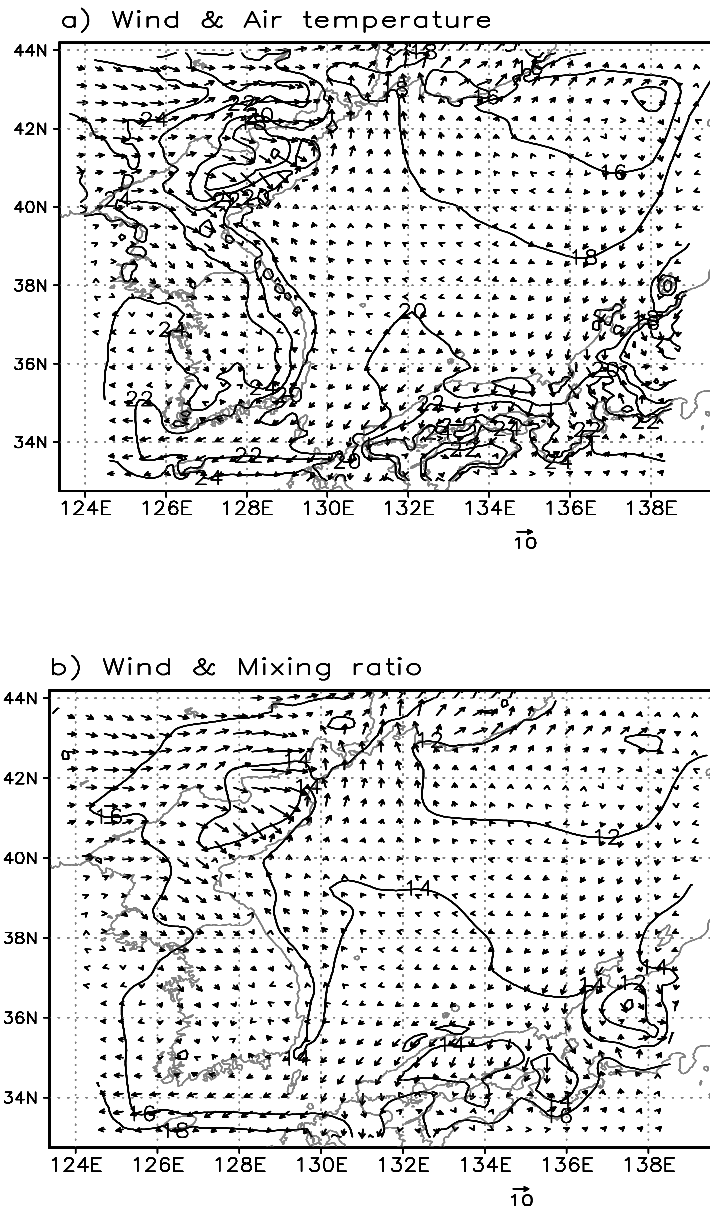


Fig. 3.52. Same as Fig. 3.32, but for during 4 - 6 July, 2000.

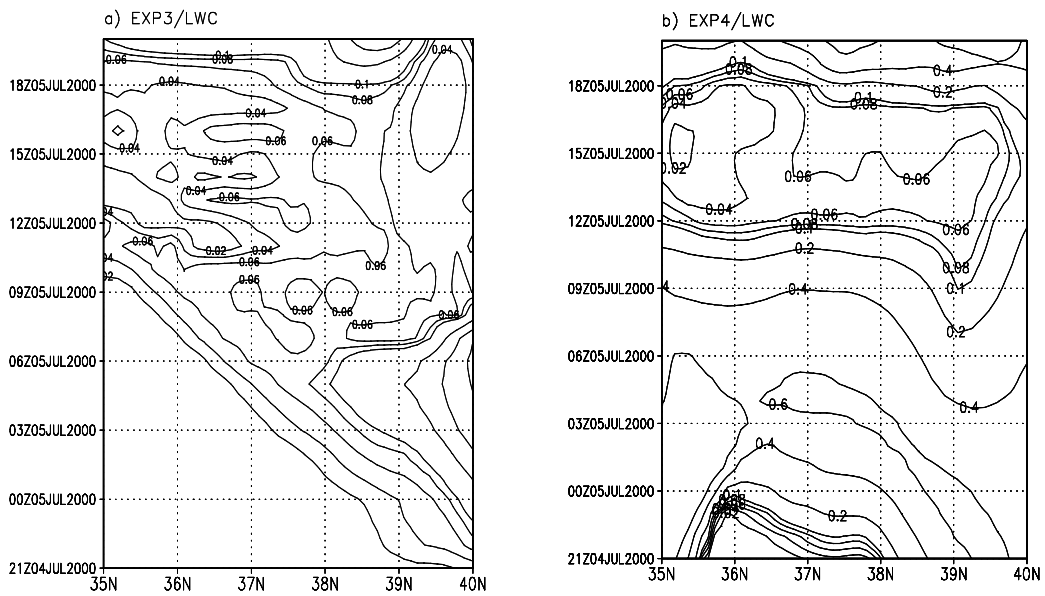


Fig. 3.53. Same as Fig. 3.41, but for during 4 - 6 July, 2000.

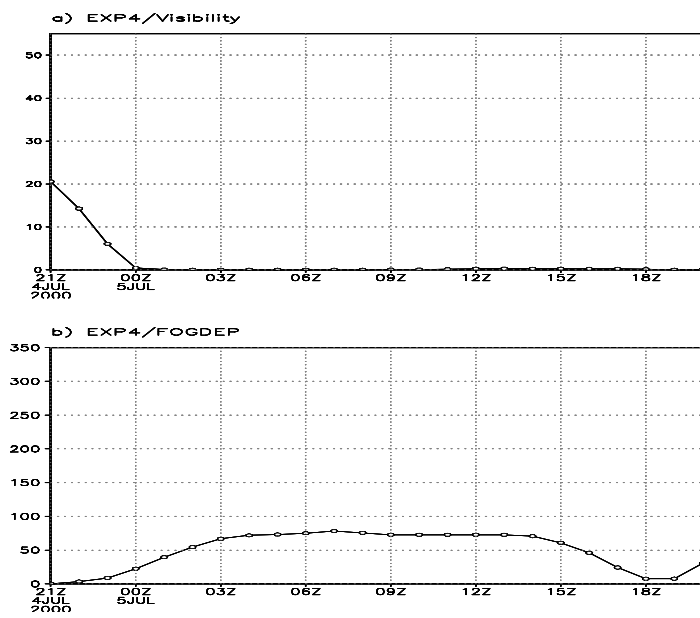


Fig. 3.54. Same as Fig. 3.41, but for during 4 - 6 July, 2000.

③ 전선 안개 사례

전선 안개는 전선상에서 강수와 동반되어 발생하는 경우가 높아 그 발생 특성뿐만 아니라 예측에 있어서도 그리 쉬운 문제가 아니다. 또한 두 공기괴 즉 찬공기와 따뜻한 공기괴의 접촉면상에서 발생하는 것이 전선이라는 특성상 이와 같은 전선과 동반되어 나타나는 전선 안개의 경우도 이 두 가지 성격을 다 가지고 있음을 이미 제 3절에서 살펴본 바 있다. 이 절에서는 전선 해무 사례인 1999년 7월과 8월에 나타난 사례를 Table 3.3과 같은 수치 실험을 각각 수행하였다. 기본적으로 각 수치 실험에 대한 결과는 앞에서 살펴본 많은 사례와 유사한 특성을 보여주었다. 이미 많은 사례에서 개선 후의 해무 예측 모형(EXP-4)이 개선 전의 예측 모형(EXP-3)보다 관측에 더 실제적임을 보여준 바 있다. 따라서 이 절에서는 EXP-4에 나타난 결과를 중심으로 살펴보았다.

먼저, Fig. 3.55는 1999년 7월 2일- 4일까지 2일 동안 발생한 전선 안개사례의 관측이다. 그림에서 나타나 듯이 2일 06시 이후부터 시정이 나빠지기 시작하여 3일 03시까지 안개가 발생하였고 06시 이후에는 시정이 회복되는 모습을 보여준다.

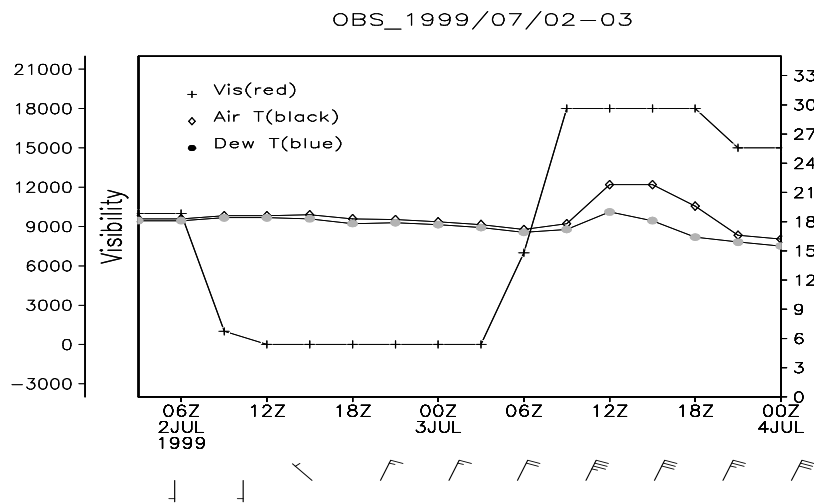


Fig. 3.55. Same as Fig. 3.31, but for during 2 - 4 July, 1999.

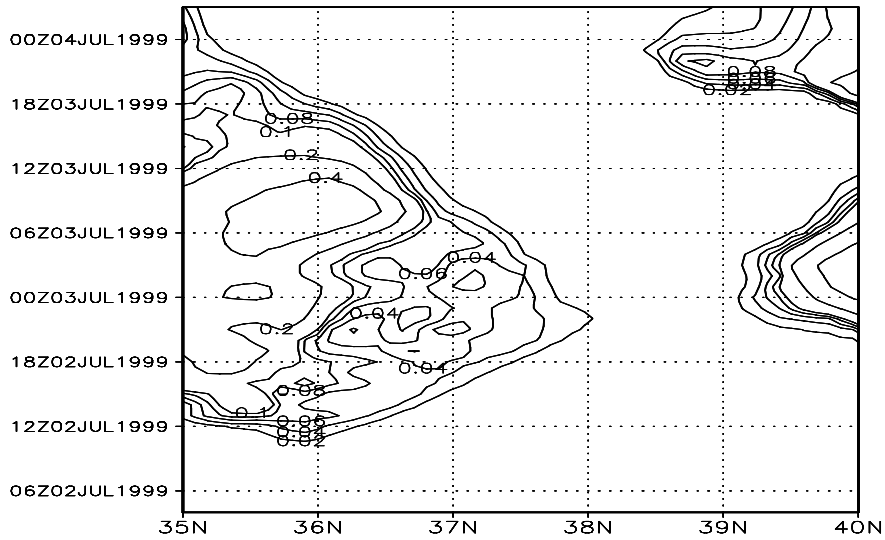


Fig. 3.56. Time - latitude plots of simulated LWC(Liquid Water Contents) from EXP4 at the lowest level of the model along 131°E of East Sea crossing Ulleung Do during 2 - 4 July, 1999.

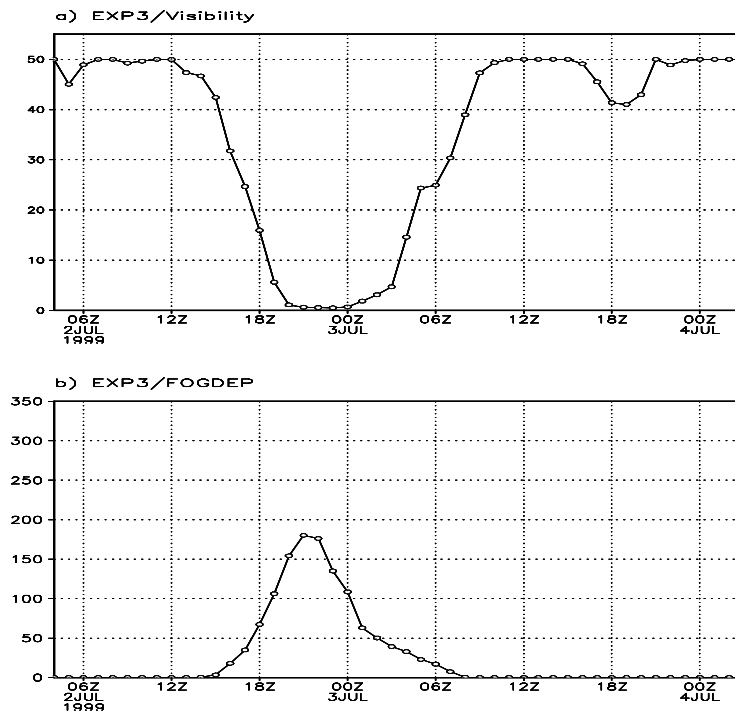


Fig. 3.57. Same as Fig. 3.34, but for during 2 - 4 July, 1999.

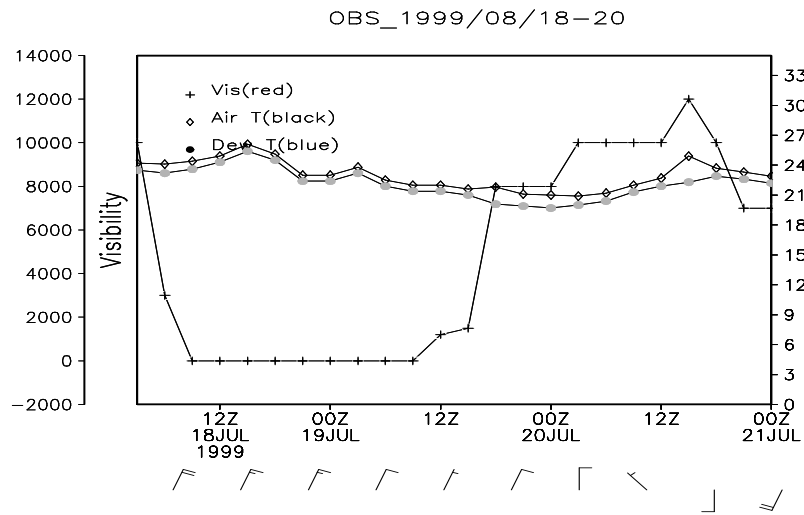


Fig. 3.58. Same as Fig. 3.31, but for during 18 - 20 August, 1999.

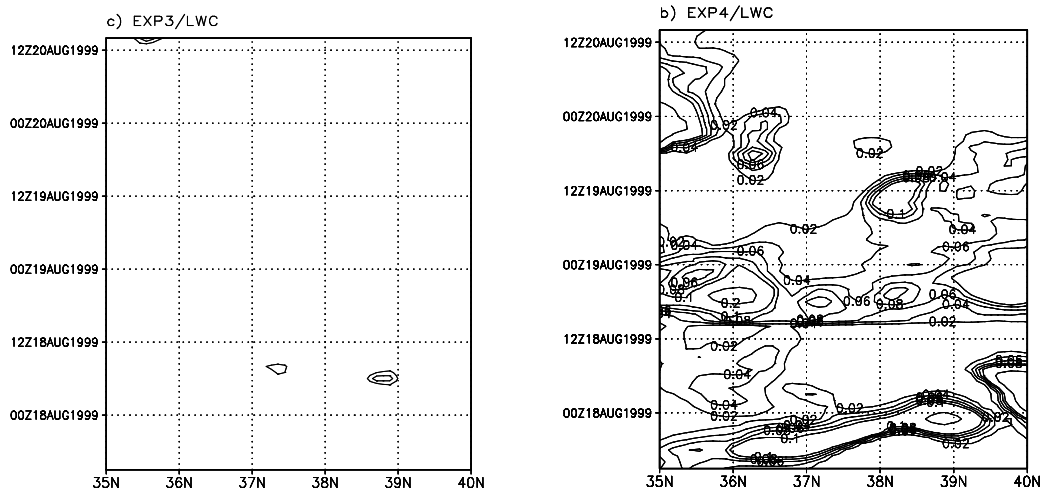


Fig. 3.59. Same as Fig. 3.41, but for during 18 - 20 August, 1999.

Fig. 3.56은 EXP-4에 나타난 수치 실험 결과로 울릉도를 중심으로 위도를 따라서 살펴본 LWC의 분포이다. 그림에 나타나듯이 안개 기간인 7월 2일 06Z부터 3일 06Z 기간동안 모형에서 0.02 g/kg이상의 LWC가 모사되고 있다. 이러한 모습은 모형에서 모사된 시정(Visibility)과 안개 깊이(fog depth)의 시간전개에서도 잘 나타나고 있는데, Fig. 3.57은 EXP-4에 나타난 결과로 모형에서 모사된 울릉도지점의 a) 시정(Visibility)과 b) 안개 깊이(fog depth)의 시간전개이다. 그림에서 나타나듯이 관측에서의 안개기간과 거의 유사하게 시정의 감소와 회복되는 모습이 잘 모사(Fig. 3.57(a))되고 있으며, fog depth(Fig. 3.57(b))의 모습도 관측과 일치하고 있다.

또한 다른 전선 안개 사례인 1999년 8월 18일 - 20일에 발생한 해무 사례에 대한 수치 실험에서도 이전의 많은 사례와 동일한 결과를 보여주었다. 이 기간은 18일 06시부터 시정이 감소하기 시작하여 19일 12시까지 2 km이하의 저시정이 기록되었으며 18시까지 박무 상태를 기록하였다(Fig. 3.58). 전선 안개의 두 번째 사례에 대한 수치 실험에서도 앞에서 보인 사례와 유사한 모습을 보였는데, 전체적으로 개발된 해무 예측 모형이 관측된 안개기간을 잘 모사하고 있었다(Fig. 3.59).

결과적으로 지금까지의 결과들은 최종적으로 개선된 형태의 해무 모형이 다양한 메카니즘에 의해 발생하는 해무(즉, 이류 해무, 증기 해무, 전선 해무 등)를 적절히 모사 할 수 있는 능력이 있음을 보여 주었다.

3.4 해무 예측 모형의 검증

개발된 해무 예측 모형의 예측 능력을 검증하기 위하여 이 절에서는 지난 1999년부터 2001년까지 해무가 빈번히 발생하는 난절기인 6월부터 8월(총 276일)에 대한 적분을 수행하였다. 적분에 사용된 모형의 수평 영역과 지형 고도는 Fig. 3.30과 같다. 적분 기간으로 선정된 기간은 일반적으로 우리나라 해역에서 발생하는 해무의 발생 빈도가 전체 발생 빈도의 80%이상을 차지하는 최다빈기이다. 앞 절에서는 안개 기간에 대한 적분만을 수행하여 전형적인 해무 발생 사례에 대한 개발된 해무 예측 모형의 성능을 검증한바 있으나 이 절에서는 안개기간과 비안개기간의 구분 없이 적분하여 더 포괄적인 의미에서의 모형 검증을 목적으로 실험하였다.

적분은 18UTC부터 3일후 06UTC까지 매 60시간 적분을 수행하였으며, 모형이 초기에 조정하는 기간을 고려하여 이를 제거하기 위하여 18UTC부터 06UTC까지의 결과는 분석에서 제외하고 그 나머지 기간을 분석에 이용하였다. 따라서 각 실험에서 적분시간은 60시간이며 분석에는 나머지 48시간의 적분 결과가 이용되었다. 본 연구에서는 모형을 검증하기 위하여 이러한 방식의 실험을 1999년, 2000년, 2001년의 6, 7, 8월의 총 276일에 대하여 실시하였다. Fig. 3.60은 총 적분기간과 분석기간을 나타내는 모식도이다. 또한 검증지점으로는 연구 대상 지역이며 해무의 검증이 가장 용이한 울릉도를 선정하였다.

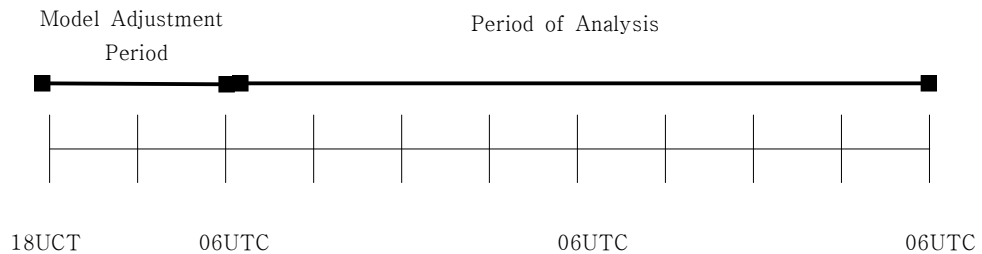


Fig. 3.60. Schematic diagram of fog model verification experiment for each of 276 model integration.

가. 검증 방법

본 연구에서는 범주 통계(Categorical statistics)를 이용하여 해무 예측 모형의 예측 능력을 검증하였다. 먼저 결과에 대한 토의를 하기 전에 본 연구에서 사용된 범주 통계의 몇 가지 지표들을 설명하고자 한다.

범주 통계(Categorical statistics)는 모형의 예측치과 관측의 유무의 행렬로 이루어진 Contingency table에 기초한다. Table 3.6은 해무 예측에 대한 모형 예측 능력과 예측에서 발생하는 오차의 종류에 대한 정보를 알려준다. 표에서 yes와 no는 각각 해무의 발생과 비발생을 의미한다.

Table 3.6. Schematics of a contingency table.

Verifying analysis		Observation	
		yes	no
Forecast	yes	a	b
	no	c	d

(1) Hit rate(H)

H는 실제 관측이 적중한 경우와 그렇지 않은 모든 경우에 대해 적중한 예보 비율을 의미한다. 즉, 이 경우는 해무가 발생하였을 경우 모형이 해무 발생을 예측하거나 해무가 발생하지 않았을 경우 모형이 해무가 발생하지 않은 것을 예측한 경우로 예측이 적중된 비를 나타낸다. 이는 총 예측 횟수(a+ b+ c+ d)에 대한 적중한 예보(a+d)의 비율로 나타낸다. Hit rate는 0과 1사이의 값을 가지며, 1이 perfect score이다.

$$ACC = \frac{\text{correct for ecast}}{\text{total for ecast}} = \frac{a+d}{a+b+c+d}$$

(2) Treat score(TS)

TS는 안개 발생 예측이 적중한 사례와 더불어 안개 발생의 예측이 틀린 두 경우를 모두 고려하는 지수이다. 즉, TS는 안개 발생이 없는 경우 안개 발생 예측이 적중한 경우를 제외한 사례에 대한 적중률을 나타낸다. 일반적으로 TS는 0에서 1사이의 값을 가지며, perfect score인 1의 경우 관측된 event 현상에 대해서 정확하게 예보했음을 의미한다.

$$TS = \frac{\text{correct event for ecast}}{\text{event for ecast} + \text{observations}} = \frac{a}{a+b+c}$$

(3) BIAS SCORE(BS)

BIAS는 예보 정확도와는 상관없이 관측과 예측의 범위를 비교하는 것으로 0에서 무한대의 값을 가진다. 만약 BIAS의 값이 1이면 예측과 관측 bias가 있음을 의미하며, 이 정보로는 같은 장소 및 동일한 시간에 예측한 것에 대한 모형의 정확도를 알 수는 없다. 단지 전반적으로 BIAS값이 1보다 큰 경우는 과대모사, 1보다 작은 경우는 과소 추정하는 것으로 해석함으로써 모형의 예측이 어떠한 성향으로 예측을 하는지를 판단하는 근거를 알게된다.

$$BIAS = \frac{\text{event for ecast}}{\text{event observation}} = \frac{a+b}{a+c}$$

(4) Probability Of Detection(POD)

POD는 사건이 발생한 관측치(a)와 예측치(a+c)의 정확도의 비율을 의미하는 것으로 범위는 0에서 1이다.

$$POD = \frac{\text{correct event for ecast}}{\text{event observation}} = \frac{a}{a+c}$$

만약에 어떤 현상을 모형에서 과대 추정하는 경우는 POD의 값이 좋게 나오게 되므로 이것은 아래의 FAR 값과 함께 고려하여야 한다.

(5) False Alarm Ration(FAR)

FAR는 사건을 모형이 예측한 사례(b+d)중 관측과 틀린 경우(b)의 비율의 의미한다.

$$FAR = \frac{\text{false event for ecast}}{\text{eventfor ecast}} = \frac{b}{a+b}$$

나. 검증 결과

Fig. 3.61 는 적분기간 동안 울릉도 관측소에서 관측된 안개 지속시간을 일별로 표기한 것이다. (a)는 1999년 7월에서 8월에 발생한 안개 지속시간이며, b)는 2000년 6월에서 8월 그리고 c)는 2001년 6월에서 8월에 대한 것이다. Fig. 3.62는 안개뿐만 아니라 박무가 기록된 일까지 포함하여 나타낸 것으로 하루중에 안개와 박무가 기록된 시간을 횡수로 나타낸 것이다. 따라서 관측소에서 시정이 3시간 간격으로 관측되므로 횡수가 8인 것은 하루종일 저시정을 기록한 날을 의미한다. 일반적으로 박무는 시정이 10 km이하의 값을 가질 때로 정의하는데 WMO에서 지정한 시정계급에 의하면 계급이 4로 안개와 같이 시정이 10 km이하일지라도 일반 생활에 영향을 줄 수 있는 일기 현상이다. Fig. 3.62에서 나타나듯이 동해 중부해상에 위치하는 울릉도는 거의 대상 사례기간동안 거의 대부분의 날이 안개가 발생하고 있다. 그리고 약간의 차이는 있으나 8월이 다른 6월과 7월에 비해서 안개 발생이 감소하고 있음을 보인다. 이는 8월부터 대기의 기온이 해면온도보다 낮아지기 시작하는 특성에 기인한 것으로 해무의 경우에 8월부터 안개 발생이 감소하는 특성이 잘 보인다.

Fig. 3.63는 울릉도 지점에 대하여 모형에서 모사된 시정이 10 km이하인 횡수를 일별로 나타낸 것으로 a) 1999년, b) 2000년, 그리고 c) 2001년에 대한 것이다. 그림에서 나타나듯이 모형은 전반적으로 많은 저시정을 예측하고 있다. 이러한 특성은 Fig. 3.62에 나타난 관측과 크게 다르지 않는 결과이다. 그러나 일반적으로 해무는 8월부터 발생이 감소하는데 비해서 전체적으로 모형은 저시정인 기간을 많이 예측하고 있다. 이것은 모형이 안개를 포함한 저시정일을 어느 정도 과대 모사하고 있음을 나타내는 것으로 관측보다 계절적인 특성을 덜 민감하게 모사하는 것으로 사료되나 이것만으로는 쉽게 판단하기가 어렵다고 생각된다.

본 연구에서는 Fig. 3.62와 Fig. 3.63에 나타난 관측과 모형의 저시정일을 기준으로 개발된 해무 예측 모형의 예측 능력을 살펴보았다. 이때 검증 방법은 앞에서 설명한 범주 통계(Categorical statistics)법을 이용하였다.

Table 3.7, Table 3.8, Table 3.9는 울릉도 지점에 대한 Contingency Table로 각각 1999년, 2000년, 2001년에 대한 것이다. Table 3.7에 나타나듯이 1999년의 경우에는 43일의 저시정 발생 사례 중 33일을 모형이 예측하였으며, 19일의 고시정일 중 13일을 모형이 예측하고 있다. 또한 2000년의 경우(Table 3.8)에는 69일의 저시정 사례 중 54일의 저시정일을 모형에서 예측하고 있으며, 고시정일의 경우는 23일 중 6일만 모형에서 예측하고 있다. 2001년의 경우(Table 3.9)는 54회의 저시정일이 울릉도에서 발생하였는데 모형은 이 중 42일을 예측하고 있으며, 38일의 고시정일 중 20개의 사례를 모형에서 고시정일로 예측하였다. 따라서 전체적으로 모형은 저시정일과 고시정일을 적절하게 예측하고 있음을 Table 3.7, 3.8, 3.9는 보여주고 있다. 그러나 1999년의 경우(Table 3.7) 총 43회의 저시정 발생일 중 10개의 사례는 모형이 예측하지 못하고 있으며, 반대로 고시정이 나타난 사례에 대하여

모형은 6개의 사례에 대하여 저시정일로 예측하고 있다. 그리고 2000년에는 (Table 3.8) 15개의 저시정 사례를 모형이 저시정 기간으로 예측하였고, 17회의 사례에 대해서는 고시정일 임에도 불구하고 모형에서 저시정일로 과대 예측하고 있다. 2001년도에는 54회의 저시정일 중 12회의 사례에 대해서 모형이 예측하지 못하였고, 18회는 관측과 달리 모형에서 저시정 사례로 예측하였다. 이처럼 모형은 다소 과대 또는 과소 모사하는 경향을 보였으나 전반적으로 모형에 의한 예측성이 높게 나타남을 Table 3.7, 3.8, 3.9에서 살펴볼 수 있었다.

Table 3.10, 3.11, 3.12는 월별로 울릉도 지점에 대한 Contingency Table이며, 각각 6월, 7월, 8월에 대한 것이다. 전체적으로 앞에서 살펴본 연도별 울릉도 지점에 대한 Contingency Table에서처럼 모형에서 예측된 사례일이 관측과 일치하는 경우가 많이 나타나고 있다. 7월의 경우(Table 3.11)는 총 67회의 저시정 사례중 60회의 사례를 모형에서 예측하였다. 6월의 경우도 7월과 비슷하게 나타나는데, 42회의 저시정 사례 중 38회의 사례를 모형에서 예측하고 있다. 그러나 거의 80%이상의 예측률을 보이는 6월과 7월에 비해서 8월의 경우(Table 3.12)는 총 57회의 저시정 사례중 모형에서 예측하는 사례는 31회이며, 모형이 예측하지 못한 사례는 26회로 나타났다. 이는 거의 50%정도의 예측성으로 모형이 저시정 사례를 잘 예측하지 못하고 있음을 보여준다. 또한 모형의 예측률을 보다 명확하게 파악하기 위해서 앞 절에서 설명한 5개의 index(Hit rate, Treat score, Bias score, Probability Of Detection, False Alarm Ration)를 살펴보았다. 이에 대한 결과를 Table 3.13에 나타내었다. Table에 나타나듯 전체적으로 울릉도지역에서의 모형에 의한 예측이 2000년 8월과 2001년 8월을 제외하고 예측 정확도(Hit rate)와 TS의 값이 0.6 이상의 값을 가지고 있다. 보통 예측 정확도(Hit rate)값이 1에 가까운 값을 가질수록 모형의 예측성이 높은 것으로 판단하는데, 이 값만으로는 성급한 판단을 하기에 힘들다. 왜냐하면, 예측 정확도(Hit rate)가 높더라도 이것에는 고시정 기간에 대한 정보가 들어가 저시정일의 정확한 예측률에 대한 정보를 부여하지 못하기 때문이다. 따라서 저시정 발생에 대한 정확한 예측률은 주로 TS 값으로 판단하는데, Table 3.13에 나타나듯이 TS값 또한 1에 가까운 값을 가지고 있음을 볼 수 있다. POD값 역시 각 해의 8월을 제외하고는 매우 높은 값이 나타나는데, 2001년 6월과 7월의 경우는 0.9의 높은 값을 가진다. 이 값은 보통 관측된 사건에 대한 예측된 사례에 대한 비율로 1에 가까운 수일수록 예측성이 높음을 의미한다. 만약에 어떤 현상을 모형에서 과대 추정하는 경우는 POD의 값이 좋게 나오지만, 전반적으로 FAR 값이 낮게 나타나고 있어, 높은 POD값이 과대모사에 의한 결과가 아님을 증명해준다. 또한 관측과 예측의 범위에 대한 지표로 사용되는 BS는 전체적으로 1에 가까운 값이 나타난다. 보통 Bias score는 예측성과 별개로 모형의 예측이 1보다 큰 경우는 과대 예측을 1보다 작은 경우는 과소 예측을 의미하는데, Table 3.13의 BS 값으로부터 개발된 해무 예측 모형이 관측과 거의 유사하게 예측하고 있음을 보여주고 있다.

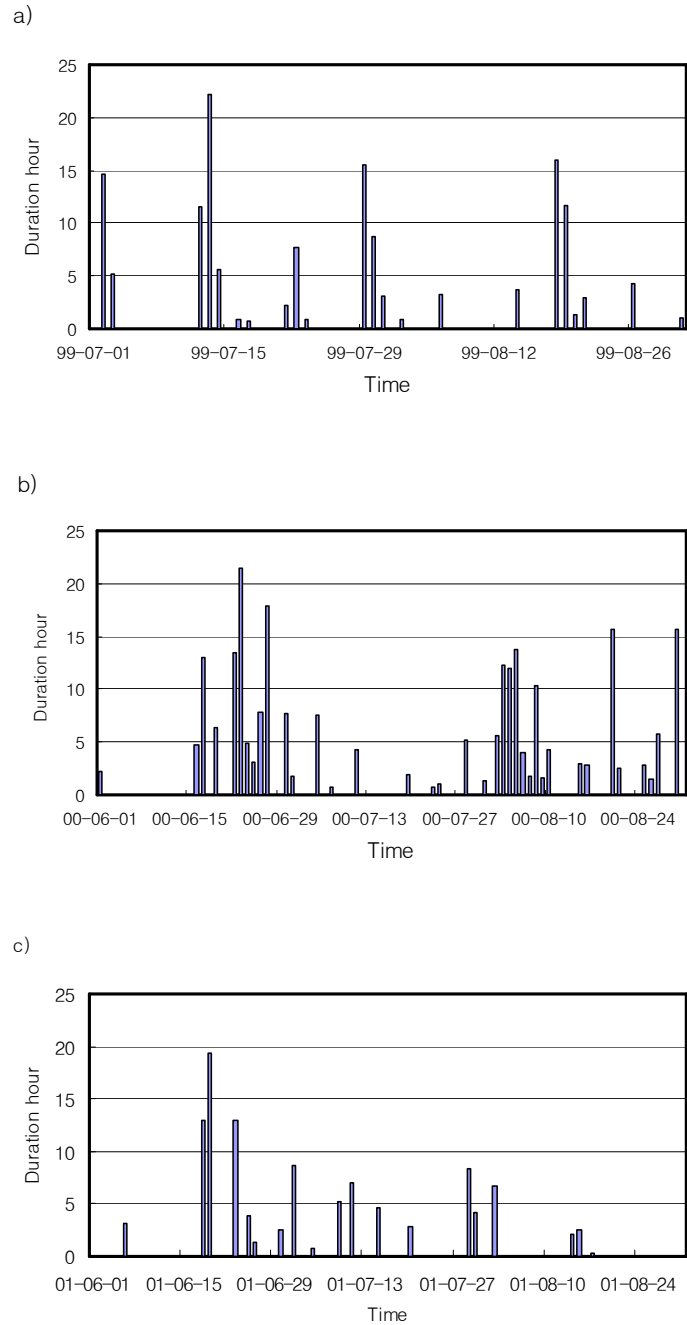


Fig. 3.61. Fog duration observed at Ulleung Do for a) July-August, 1999, b) June-August, 2000 and c) June-August, 2001.

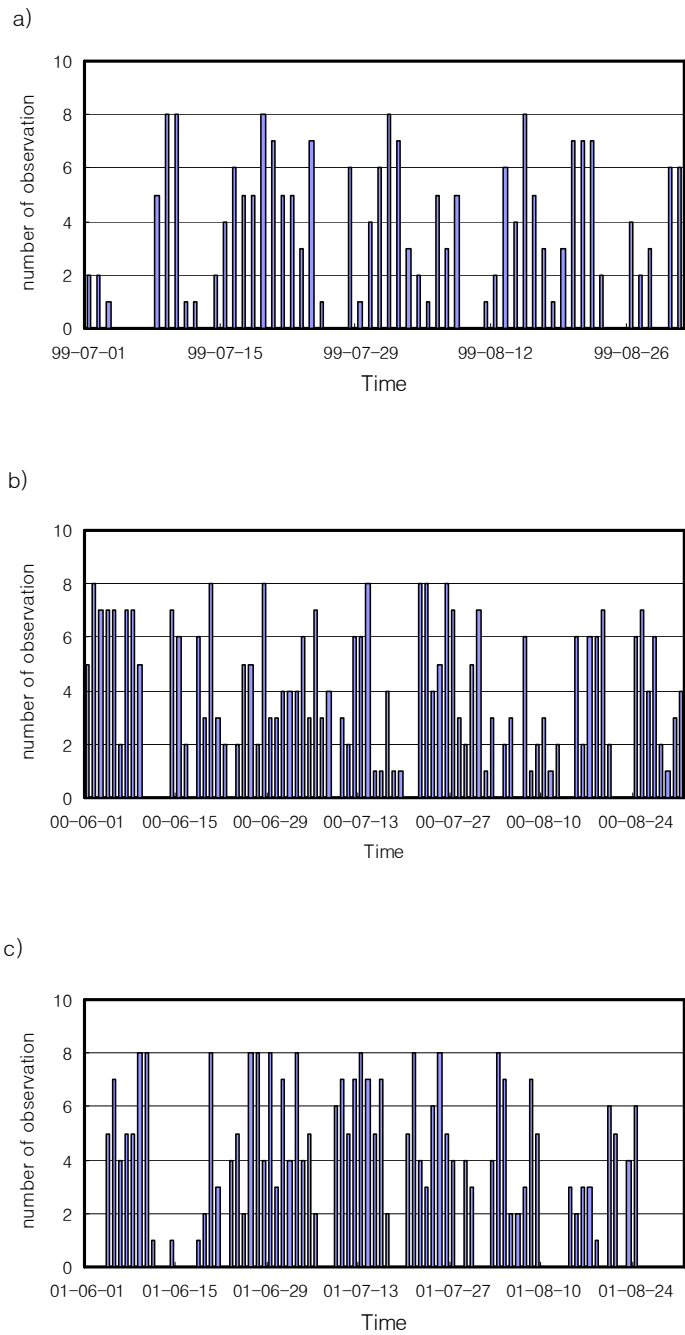


Fig. 3.62. Same as Fig. 3.61, but for the number of times of visibility below 10 km.

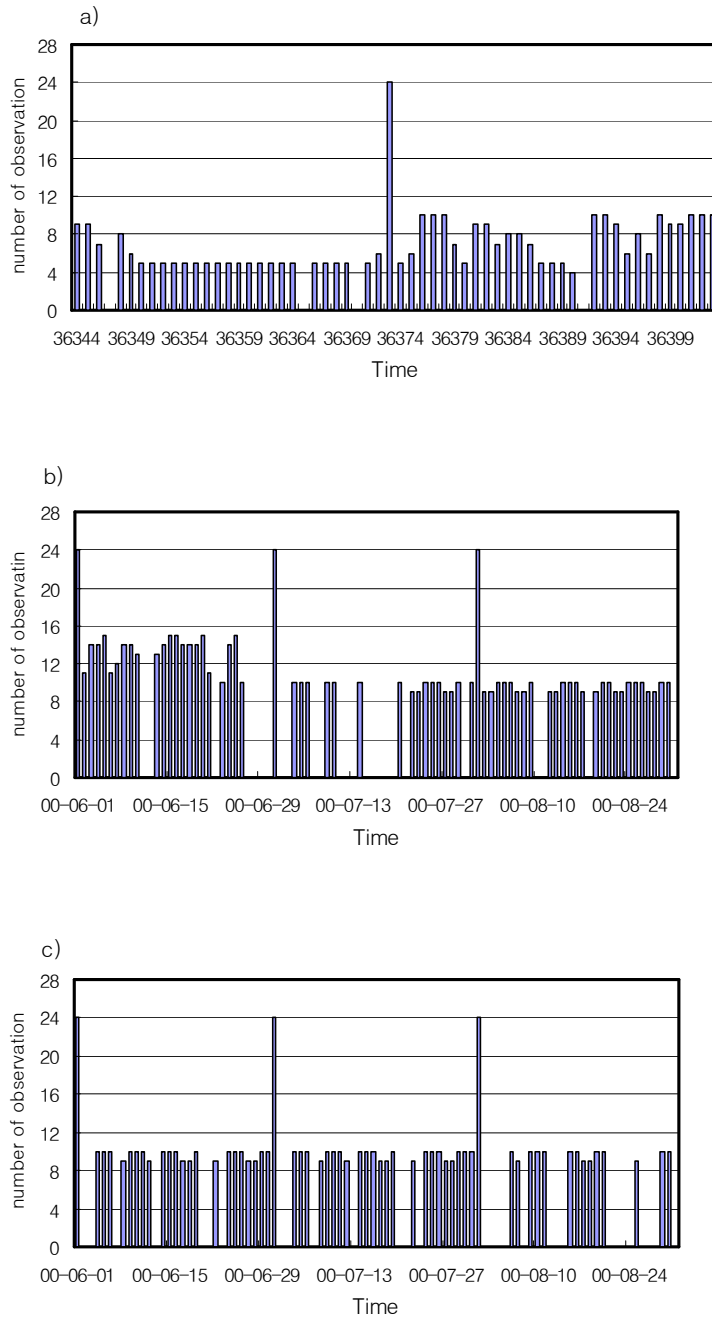


Fig. 3.63. Same as Fig. 3.62, but for the model result.

Table 3.7. Contingency table for a period of July - August, 1999.

Verifying analysis		'99 Observation	
		yes	no
Forecast	yes	33	6
	no	10	13

Table 3.8. Contingency table for a period of June - August, 2000.

Verifying analysis		'00 Observation	
		yes	no
Forecast	yes	54	17
	no	15	6

Table 3.9. Contingency table for a period of June - August, 2001.

Verifying analysis		'01 Observation	
		yes	no
Forecast	yes	42	18
	no	12	20

Table 3.10. Contingency table for June of year 2000–2001.

Verifying analysis		June, Observation	
		yes	no
Forecast	yes	38	8
	no	4	10

Table 3.11. Contingency table for July of year 1999–2001.

Verifying analysis		July, Observation	
		yes	no
Forecast	yes	60	16
	no	7	10

Table 3.12. Contingency table for August of year 1999– 2001.

Verifying analysis		August, Observation	
		yes	no
Forecast	yes	31	17
	no	26	19

Table 3.13. The result of categorical statistics for Ulleung Do.

	HS	TS	POD	FAR	BS
1999. 07	0.84	0.78	0.82	0.05	0.86
1999. 08	0.65	0.58	0.71	0.25	0.95
2000. 06	0.77	0.75	0.91	0.19	1.13
2000. 07	0.74	0.74	0.96	0.23	1.25
2000. 08	0.45	0.37	0.46	0.33	0.68
2001. 06	0.83	0.77	0.90	0.15	1.05
2001. 07	0.68	0.68	0.90	0.30	1.29
2001. 08	0.52	0.52	0.43	0.54	0.93

Table 3.14. Summer mean result of categorical statistics for Ulleung Do.

	HS	TS	POD	FAR	BS
1999	0.75	0.68	0.77	0.15	0.90
2000	0.65	0.62	0.78	0.25	0.67
2001	0.68	0.67	0.74	0.33	1.09

Table 3.15. Monthly mean result of categorical statistics for Ulleung Do.

	HS	TS	POD	FAR	BS
June	0.80	0.76	0.90	0.17	1.09
July	0.80	0.73	0.89	0.19	1.13
August	0.54	1.47	1.6	0.37	0.85

Table 3.14와 Table 3.15는 울릉도 지점에 대한 검증 결과로 Table 3.14는 연도별로 검증결과이다. Table에서는 평균적으로 0.6이상의 Hit rate와 TS값이 나타나며, POD의 값은 1에 가까운 값이 나타난다. 이는 관측에 대한 모형의 저시정 발생일에 대한 예측성이 전반적으로 높음을 잘 보여준다. 그러나 연도별 특성은 뚜렷하게 나타나지 않는다. 그러나 월별 검증 결과를 나타낸 Table 3.15에서는 다소 다른 결과가 나타나는데, 8월에 대한 모형의 예측률이 다른 계절(6월과 7월)보다 상대적으로 낮은 값이 나타난다. 특히, POD 값이 1.6을 나타냄에도 불구하고 Hit rate와 TS 값이 낮게 나타나는데, 이는 모형이 저시정일에 대한 예측보다 고시정일에 대한 예측률이 더 높음을 보여주는 것이다. 이처럼 8월의 경우는 저시정 발생일에 대한 예측률이 비교적 낮았다. 이는 Fig. 3.62에서 나타나듯이 모형이 8월에 안개를 포함하여 10 km 이하의 저시정 발생이 감소하는 특성을 민감하게 나타내지 못하기 때문이라 판단된다. 반면에 6월과 7월은 모형이 저시정 사례에 대한 예측률이 각각 0.8을 나타내며, 모형에서 예측한 사례 중 관측과 틀린 경우의 비율을 의미하는 FAR 값이 0.3을 가지는 8월에 비해서 0.2이하의 낮은 값을 나타내었다.

제 4 절 울릉도 관측

4.1 울릉도의 기상 특성

울릉도는 북위 37°29', 동경 130°54'에 위치하며 오각형 형태의 섬으로 동서길이 10 km, 남북길이 9.5 km, 해안선 길이는 56.5 km에 이른다. 면적은 72.56 km²이며 독도와는 92 km 떨어져 있다. 육지와 떨어진 동해 가운데 위치해 있으므로 동해연안의 내륙지역과는 다른 기상특성을 나타낸다. 1절에서 설명했던 울릉도의 기상특성을 정리하면 다음과 같다.

년별 안개발생빈도는 1992년에 2일, 2000년에는 안개발생일이 61일까지 증가하여 1992년부터 점점 증가하는 경향을 나타내며 2001년에는 28일까지 감소하였다(Fig. 1.2). 월별안개발생빈도는 7월 9.3일로 가장 많이 발생하며 7월, 6월, 5월, 9월 순으로 발생한다. 울릉도에서 관측이 이루어졌던 2000년 5월에는 10일간 안개가 발생하였고, 8월에 17일간 발생하여 가장 많은 안개발생일수를 나타냈다(Fig. 4.1).

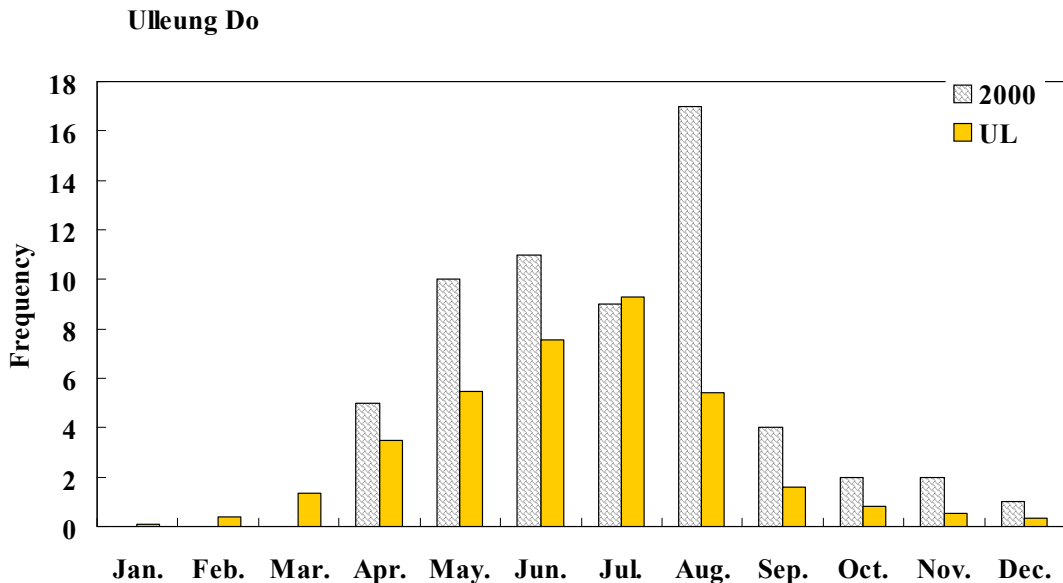


Fig. 4.1. The monthly frequency of foggy day in Ulleung Do.

울릉도의 안개 발생, 소멸, 지속시간을 살펴보면 9시에 가장 많이 발생하며 12, 15시에 주로 안개가 소멸된다. 평년 지속시간은 185.41 시간으로 길며 이중 7월에 92.88 시간으로 가장 장시간 발생한다. 관측이 이루어졌던 2000년 5월에는 지속시간이 61.59 시간이었다(Fig. 1.6-8).

평년 울릉도의 습도는 1년 내내 70% 이상의 습한 상태를 보이고 안개가 주로 발생하는 6월부터 9월까지 80% 이상의 상대습도를 보인다. 해무발생시에는 90% 이상의 상대습도를 보여 해상에서 발생하는 이류무의 특성을 잘 나타낸다(Fig.

10-12). 평년 울릉도의 바람장은 모순 계절풍의 영향으로 북동, 남서풍을 향하며 안개발생시 주풍향도 이와 같다. 2000년에는 북동, 남서풍이 우세할 때, 해무가 발생하였다(Fig. 19-20).

4.2. 기상 관측 및 분석 방법

울릉도의 해무 발생과 관련된 기단의 연직 구조를 분석하기 위해 울릉도 기상대에서 2000년 5월 27일에서 31일까지 6시간 간격으로 상층 기상 관측을 실시하였다. 관측장비로는 Air Inc.의 Rawin sonde를 사용하였고, 관측된 자료는 SkewT/LogP diagram을 이용하여 지상의 기상상황, 상층 안정도 및 바람장을 분석하였다. 또한 2000년 5월에 안개발생시 상층일기도를 통해 종관분석이 이루어졌으며, 기상청 지상지점관측자료로부터 시정, 상대습도, 기온, 해면기압, 풍향, 풍속, 강수량의 시간별 자료를 통해 국지적인 기상현상을 분석하였다. 여기서 시정, 해면기압은 3시간 간격으로 정시에 관측되었고 상대습도, 기온, 풍향, 풍속, 강수량은 매시 관측되었다. 안개발생현상을 Dut-metri로부터 계산된 결과와 비교하여 수치모델의 타당성을 검증해보았고, NOAA-14의 분석 영상 위성사진으로부터 관측기간 중 동해 해무의 종관적인 상태를 분석하였다.

4.3. 관측 결과

2000년 5월 27일에서 31일까지 3시간 간격으로 관측된 고층관측 결과는 다음과 같다. 5월 27일 00UTC에 지상에서는 북서풍이 불며 850 hPa에서 얇은 역전층이 생기며 풍향은 북동풍으로 바뀐다. 850 hPa에서 500 hPa까지 혼합층이 형성되며 북서풍을 나타낸다. 역전층 아래에서는 안정층을 위에서는 조건부 불안정층을 나타낸다. 5월 27일 06UTC에는 지상에서 습도가 매우 높고 북동풍이 불며 900 hPa 사이에서 약한 역전층을 보인다. 900 ~ 500 hPa 사이에서 상대습도가 높은 혼합층이 형성되며 지상과 같이 북동풍이 분다. 500 hPa 이상에서는 건조층이 나타나며 전층에 걸쳐 안정층을 나타낸다. 5월 28일 00UTC에 지상에서 낮은 습도를 보이며 북동풍이 약하게 불고 있다. 600 hPa까지 혼합층이 형성되어 있으며, 안정층이 형성되어 맑은 날씨를 보인다. 전층에서 동풍이 불어오고 있다. 5월 28일 12 UTC에 지상과 하층에서는 구름이 형성되어 있지 않으나 700 ~ 450 hPa 까지 두꺼운 구름이 형성되어 있으며 지상에서 450 hPa까지 조건부 불안정층으로 되어있다. 하층에서는 남풍계열의 바람이 불며 상층으로 살수록 반시계 방향으로 돌아 동풍이 분다. 상층으로 건조층이며 안정층으로 되어있다. 5월 28일 18 UTC에는 하층과 중층에서 남풍계열의 바람이 불며, 전층에서 건조층이 형성되어 구름이 없는 맑은 날씨를 보인다. 950 ~ 750 hPa까지 조건부 불안정층으로 되어있고 지면과 상층에서는 안정층을 나타낸다. 5월 29일 12 시에는 400 hPa 이상의 고층에서 구름이 형성되어 높은 구름이 낀 날씨를 보인다. 전층에서 동풍이 우세하게 불며 지상으로부터 구름이 형성되기 시작되는

층까지는 조건부 불안정층을 나타내고 구름이 형성되는 상층은 안정층으로 되어 있다. 5월 30일 12UTC에는 구름층이 600 hPa로 낮아지며 구름층에서는 동풍이 불며 그 아래 건조층에서는 북풍이 불며, 건조층이 없어지는 지상에서는 동풍이 불고 있다. 지상으로부터 건조층이 끝나는 600 hPa까지는 조건부 불안정층으로 되어있으며 상층구름이 형성된 고도에서는 안정층으로 되어있다. 5월 31일 0시에는 지상에서 온도가 12°C 까지 떨어지며 북동풍의 바람이 불어오면서 안개가 형성되었다. 안개층은 지면에서 약 950 hPa까지 매우 얇은 층에서 형성되어 있는 것으로 나타난다. 700~600 hPa 사이에서는 중층운이 형성되어 안개가 걷힌 다음에도 흐린 날씨가 계속될 것으로 보인다(Fig. 4.2-6).

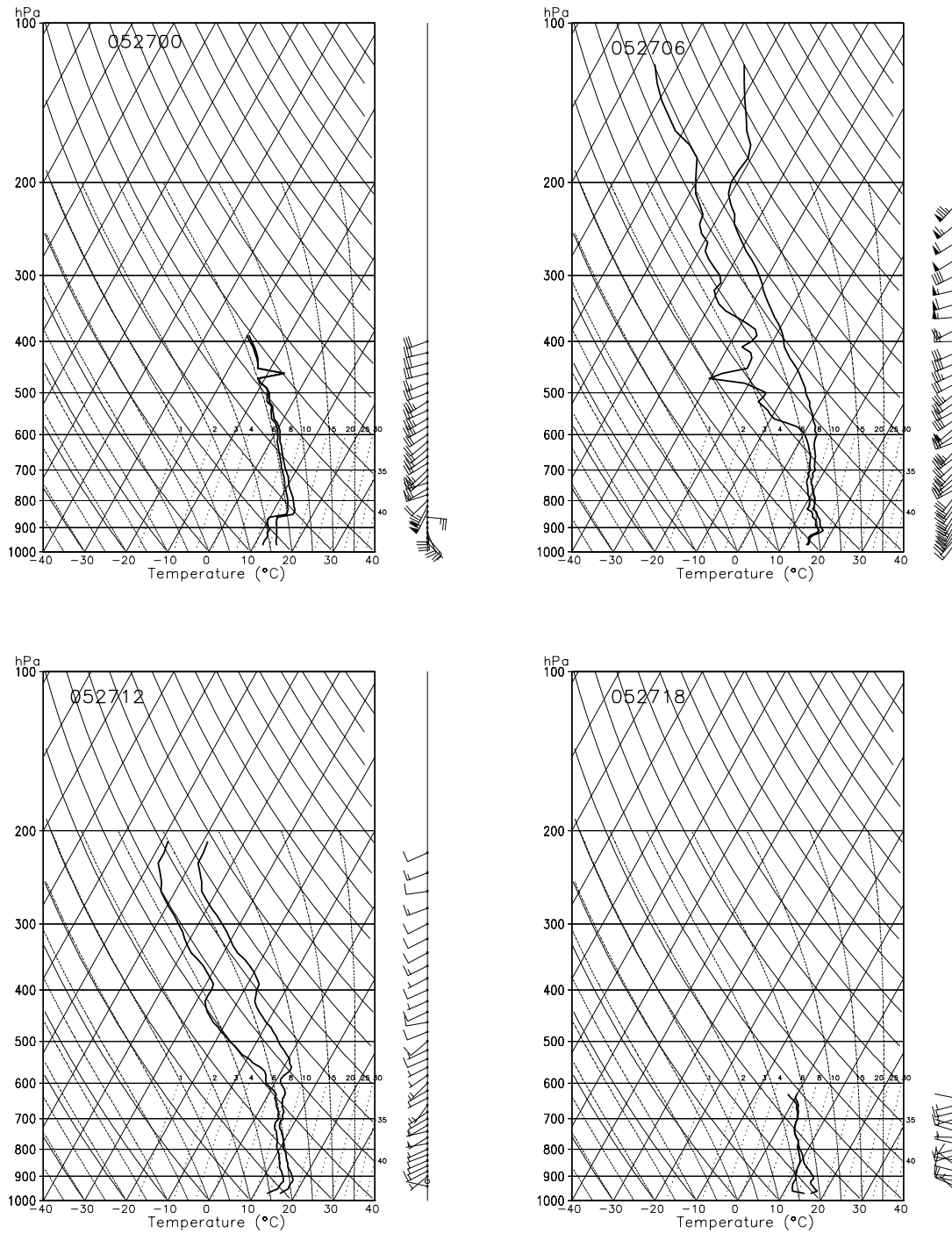


Fig. 4.2. The vertical distribution of temperature T_a , dew point T_d and wind on the skew T-log p diagram, 00 UTC ~ 18 UTC May, 27.

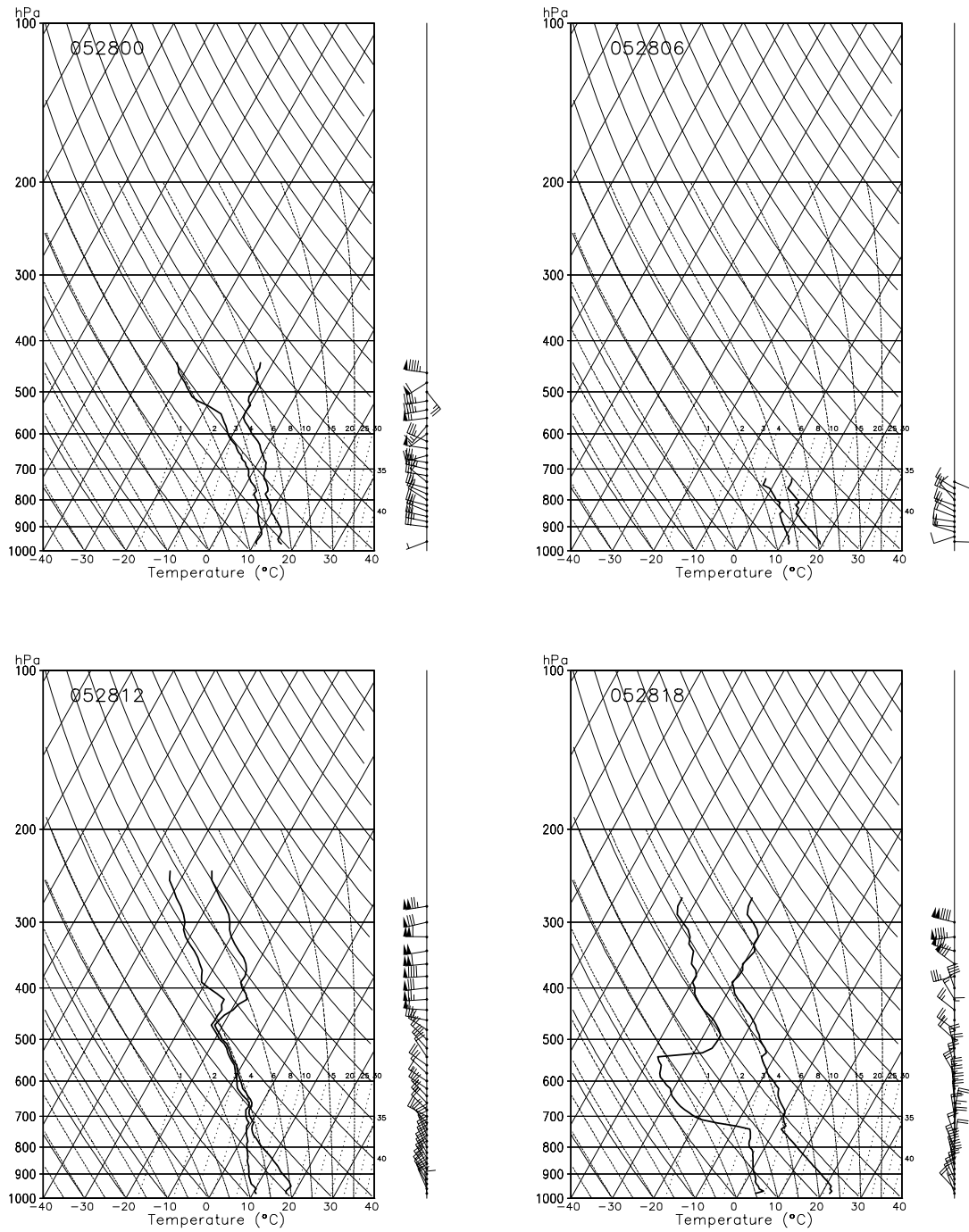


Fig. 4.3. The same as Fig. 4.2. except for 00 UTC ~ 18 UTC May, 28.

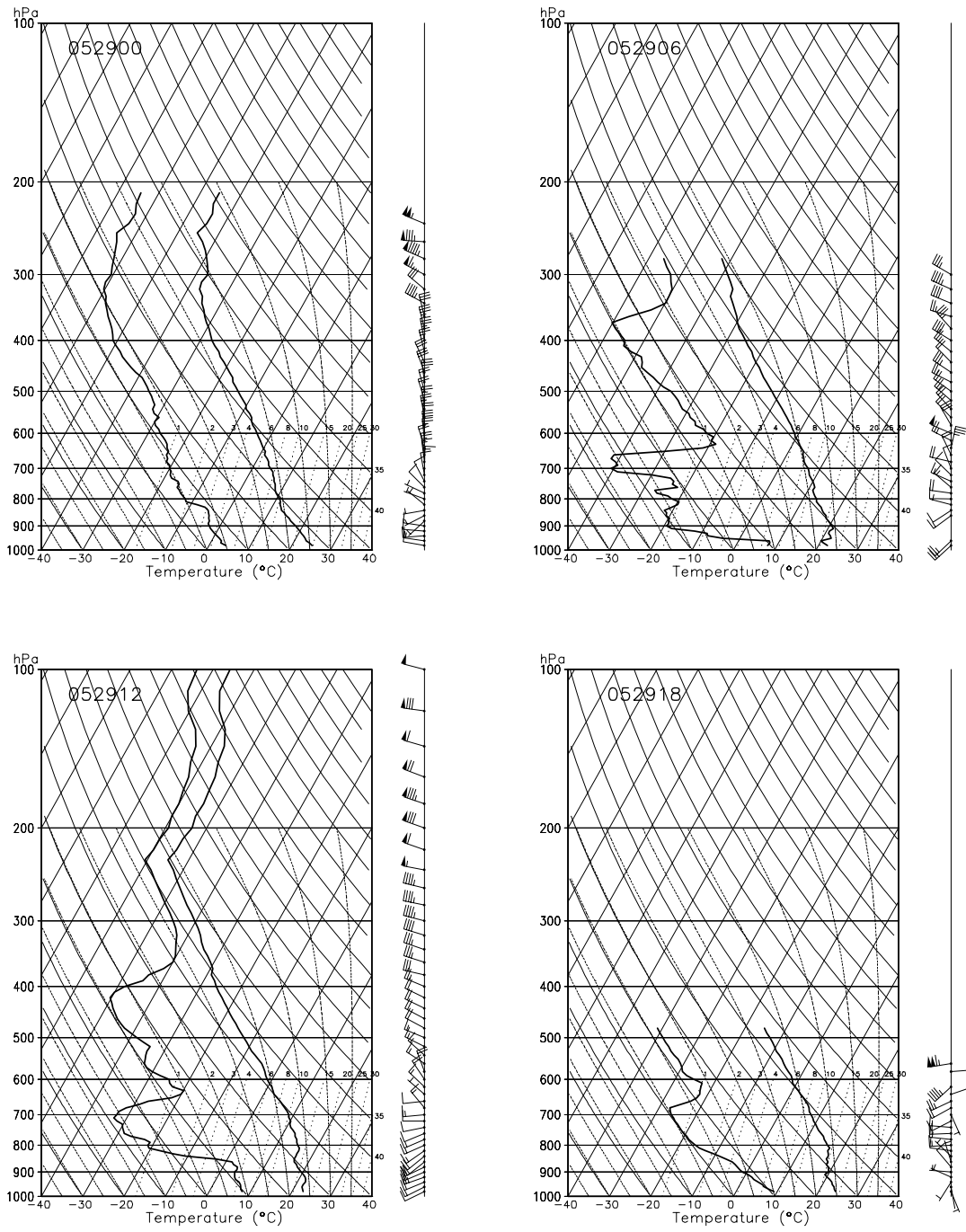


Fig. 4.4. The same as Fig. 4.2. except for 00 UTC ~ 18 UTC May, 29.

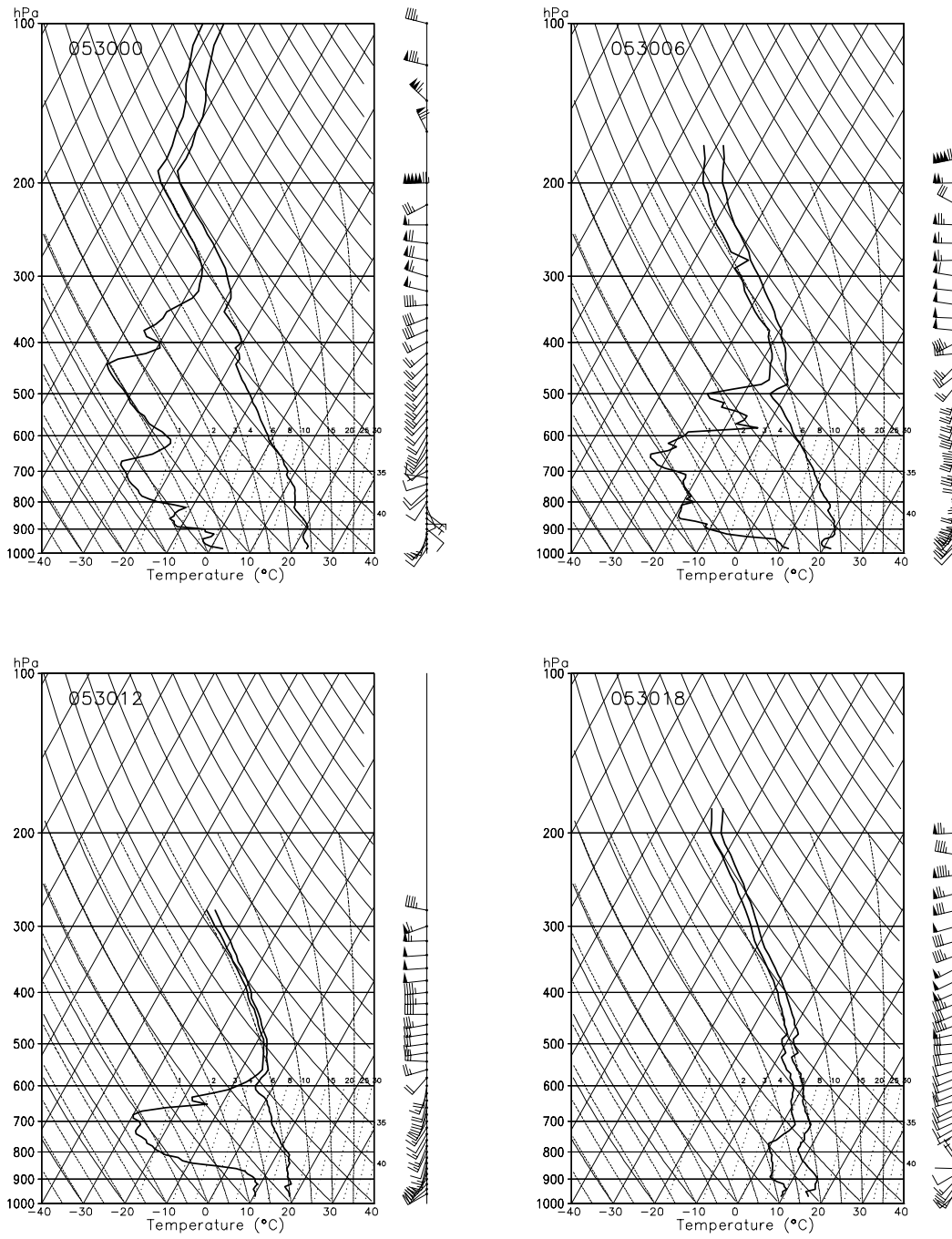


Fig. 4.5. The same as Fig. 4.2. except for 00 UTC ~ 18 UTC May, 30.

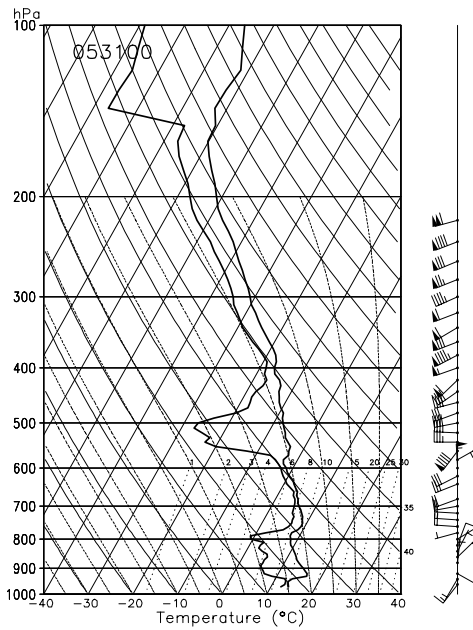


Fig. 4.6. The same as Fig. 4.2. except for 00 UTC ~ 18 UTC May, 29. 00 UTC May 31, 2000 during the sea fog event.

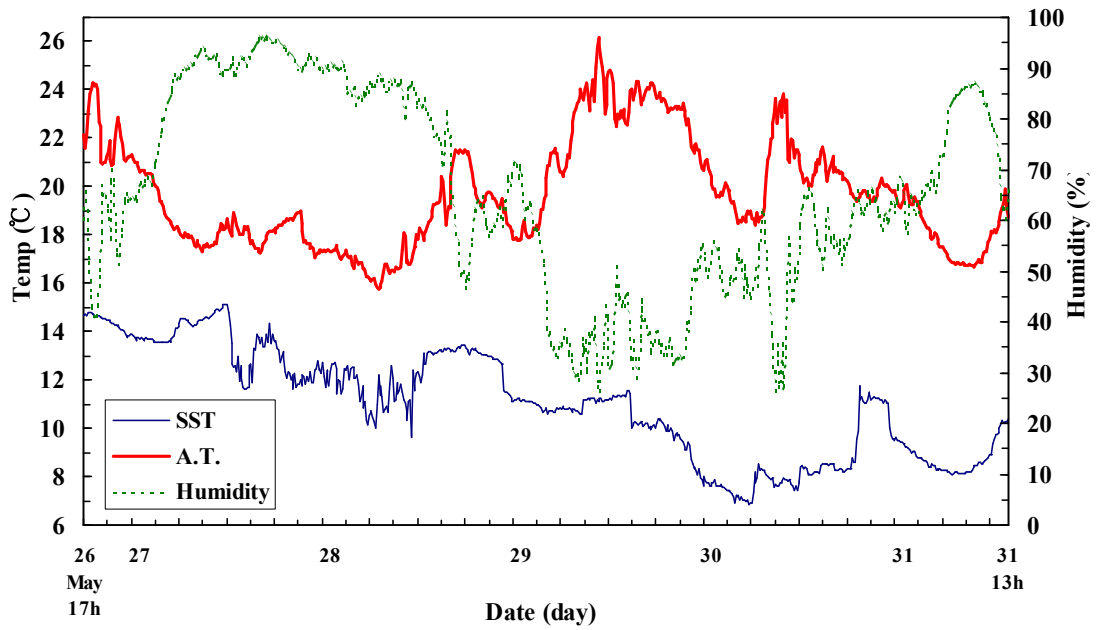


Fig. 4.7. The variation of air temperature, sea surface temperature, relative humidity during the observation period.

Fig. 4.7은 상층기상관측 기간동안 기온, 표층해수온도, 습도의 분포를 나타낸 것이다. 27일 6시부터 28일 9시까지 90% 이상의 높은 습도와 18℃ 이하의 낮은 온도를 나타냈다. 풍향이 남풍계열로 바뀌고 날씨가 맑아지면서 습도가 40% 이하로 낮아졌고 습도가 시간이 지나면서 점차적으로 높아져 안개가 형성되는 31일에는 90% 까지 증가하였다.

Fig. 4.2와 Fig. 4.3은 2000년 5월 한 달간 시정, 상대습도, 기온, 해면기압, 풍향, 풍속, 강수량의 변동성을 나타냈고, Fig. 4.4와 4.5는 관측이 이루어졌던 기간을 포함하여 2000년 5월 23일부터 31일까지 앞의 그림들과 같은 기상변수를 나타내고 있다. 5월 한 달간 1 km 이하의 저시정은 5번 보였고 31일에 형성된 안개는 단시간 발생했으므로 기록되지 않았다. 상대습도는 시정 3km 이하만 되어도 80% 이상의 습한 상태를 나타냈고 기온은 5월 중순까지는 10 ~ 25℃를 나타냈으며 20일 이후에 최저기온이 상승하여 16 ~ 25℃의 분포를 나타냈다. 해면기압은 저시정을 나타냈던 10일과 25일에 낮은 값을 보여 저기압이 지나가면서 시정을 악화시켰음을 보여준다. 풍향은 주로 남서풍이 불었고 풍속은 5월 중순까지 보통 2 ~ 4 m/s의 바람이 불었고 5월에는 기상이 악화되면서 4 ~ 10 m/s로 강한 바람이 불었다(Fig. 4.2-3).

5월 23일에서 31일 사이에 안개가 4번 형성되었고 23일에는 2 m/s 이하로 바람이 불지 않을 때 형성되었다가 8 m/s 이상으로 바람이 강해지면서 안개가 소멸된 것으로 보이며 24일에 형성된 안개는 남서풍이 계속 불면서 고온고습의 공기가 이동해오면서 발생한 안개로 보이며 27-28일에 발생한 안개는 995 hPa의 저기압이 이동해오면서 비를 많이 오면서 발생한 것으로 보인다. 31일에 형성된 안개는 남서쪽으로부터 고온고습의 공기가 이동해 온 후, 기온이 하강하면서 수증기가 응결하여 형성된 것으로 보인다(Fig. 4.4-5).

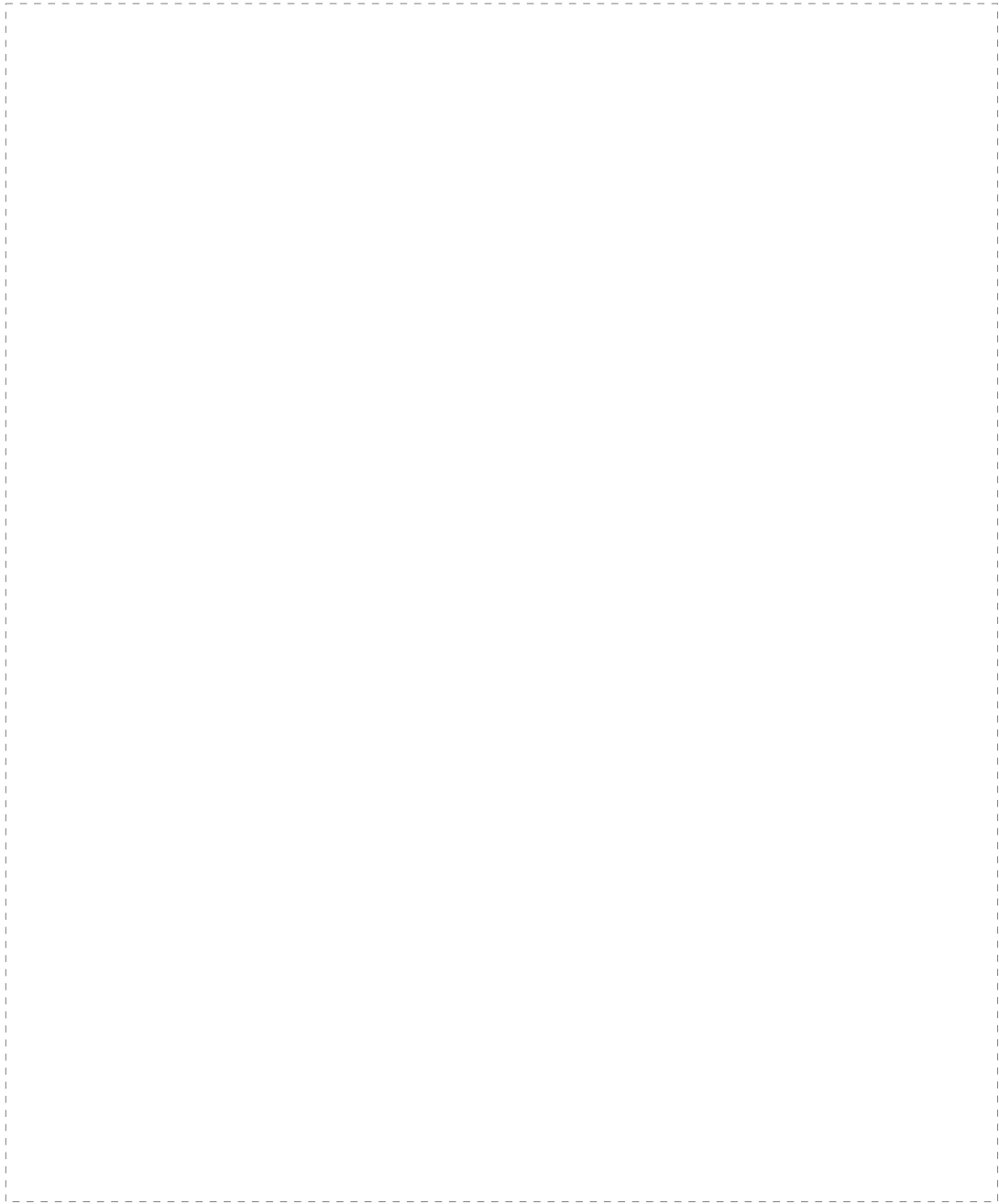


Fig. 4.8. The fluctuation in (a)visibility (b)humidity (c)temperature (d) pressure on May, 2000.



Fig. 4.9. The fluctuation in (a)visibility (b)wind direction (c)wind speed (d) precipitation on May 2000.



Fig. 4.10. The same as 4.3 except for May 22-31, 2001.



Fig. 4.11. The same as 4.4 except for May 22-31, 2001.

▶ 2000년 5월 22-23일 일기도

만주지방과 중국 내륙에 위치한 저기압이 점점 발달하면서 동진하여 저기압의 중심이 알류산 열도로 이동하며, 안개형성시 남하하여 기압골을 이룬다. 이로 인해 상대적으로 저온인 해상에 저기압으로부터 온난 습윤한 남서류가 동해상으로 유입되면서 해무가 발생한 것으로 보인다(Fig. 4.12. a-c). 이러한 현상은 Fig. 4.11에서 5월 22일에 풍향이 180-240°사이에서 3-8 m/s로 바람이 불은 후에 23일에 안개가 형성된 것에서도 볼 수 있다.

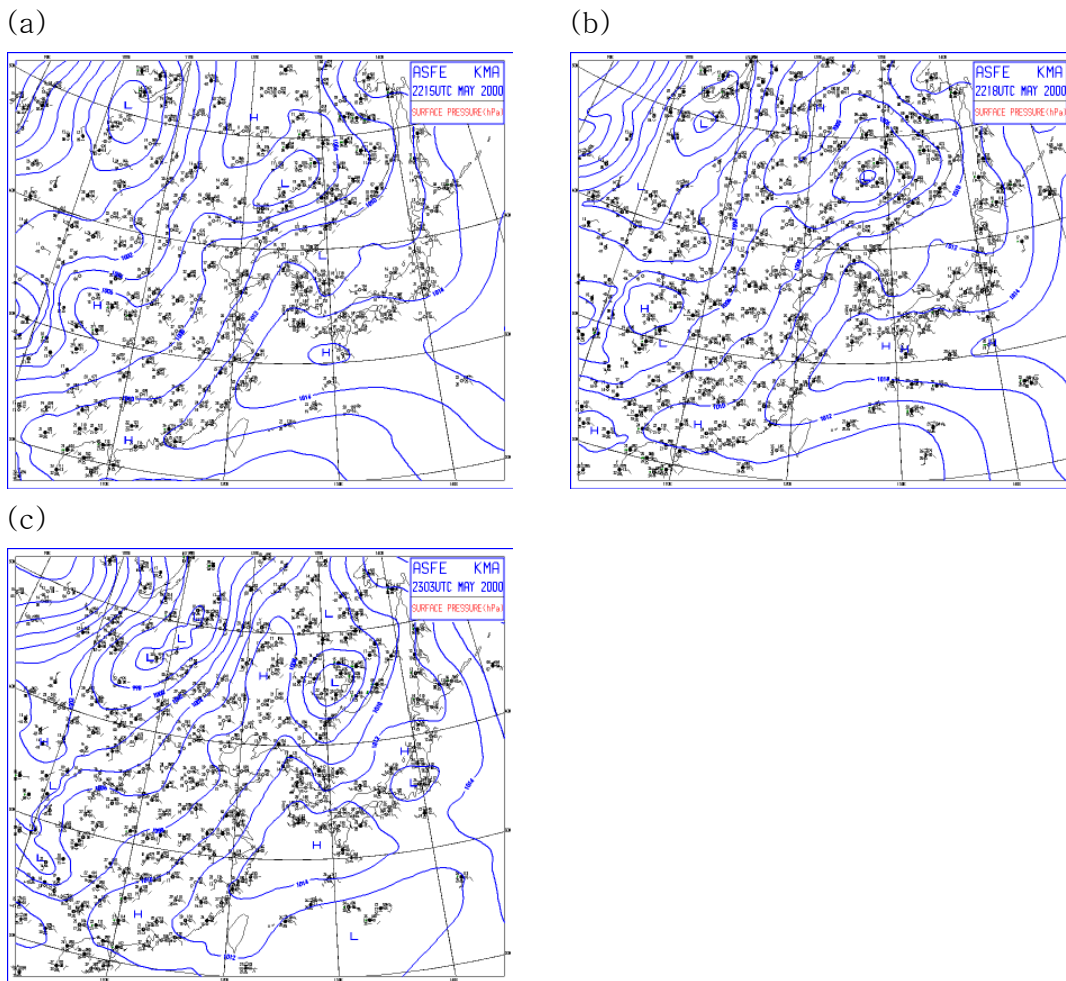


Fig. 4.12. Surface weather chart, (a)the beginning (b)the middle, (c)the last of fog event in May 22, 2000.

▶ 2000년 5월 24-25일 일기도

이 안개는 새벽에 5시간 정도 단시간 발생하였다. Fig. 4.13은 안개형성 전·후의 일기도를 보여주고 있다. 동해상에 고온고습의 북태평양 고기압이 영향을 주고 있으며 남서풍에 의해 습한 공기가 차가운 해수위로 이동하게 된다. 차가운 해수면 위에서 수증기는 응결되어 해무가 형성된다(Fig. 4.13, Fig.4.11). 고기압의 영향으로 안정된 층이 형성되면서 지상에서 Fig. 4.15과 같이 얇은 층의 이류무가 형성되는 것을 볼 수 있다. Fig. 14의 (a)는 5월 24일 22UTC의 안개형성시 사진이며, (b)는 5월 25일 01시의 안개소멸시 사진이다.

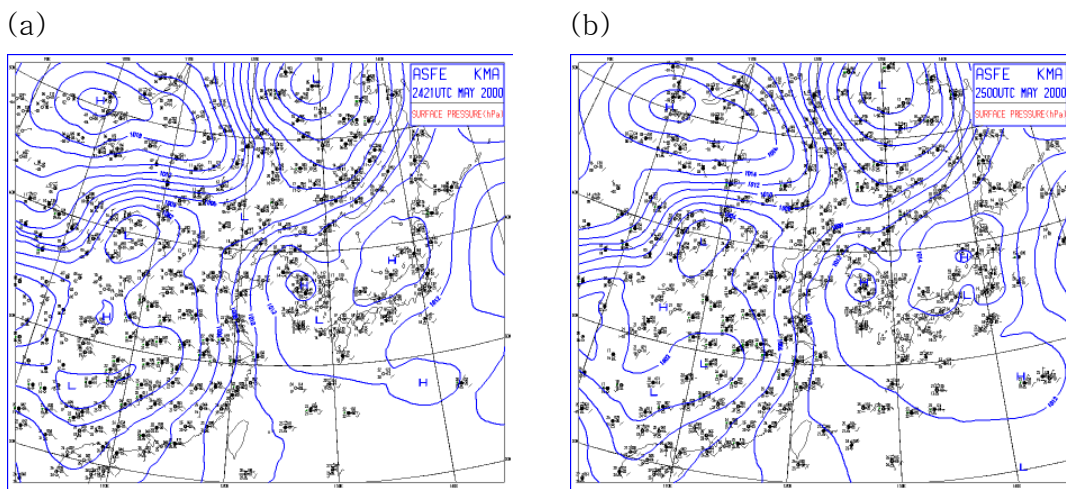


Fig. 4.13. Surface weather chart, (a)before and (b)after foggy hour in May 24, 2000.

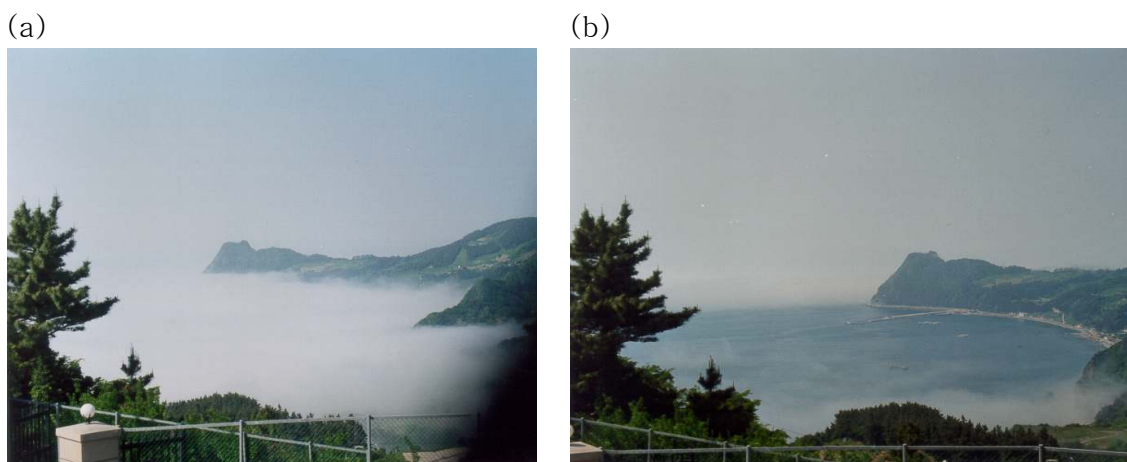


Fig. 4.14. The photos of Sea fogs during (a)fog formation(22 UTC May 24, 2000) (b)fog dissipation(01 UTC May 25, 2000).

▶ 2000년 5월 26-27일 일기도

Fig. 4.15는 안개형성 초기, 중기, 말기의 일기도를 나타내고 있다. 강한 저기압이 남서부로부터 유입되어(Fig. 4.15-a), 한반도에 머물며 많은 비를 내리다가(Fig. 4.15-b), 동해를 지나 북동쪽으로 이동한다(Fig. 4.15-c). 이 저기압은 강한 비구름을 동반하므로 울릉도에 많은 비가 오도록 한다(Fig. 4.12). 이 시기의 안개는 강한 저기압으로 인해 대기가 불안정해지면서 비구름에 의해 시정이 악화되며 저층에서 중층까지 구름층이 두껍게 형성되어 안개층이 만들어진다. 비가 멈춘 후에도 강수지역에서 증발로 인해 안개가 한동안 안개가 계속 형성된다. 즉, 수증기 공급이 비가 내린 습한 지면으로부터 증발에 의해 이루어져 안개가 형성된다.

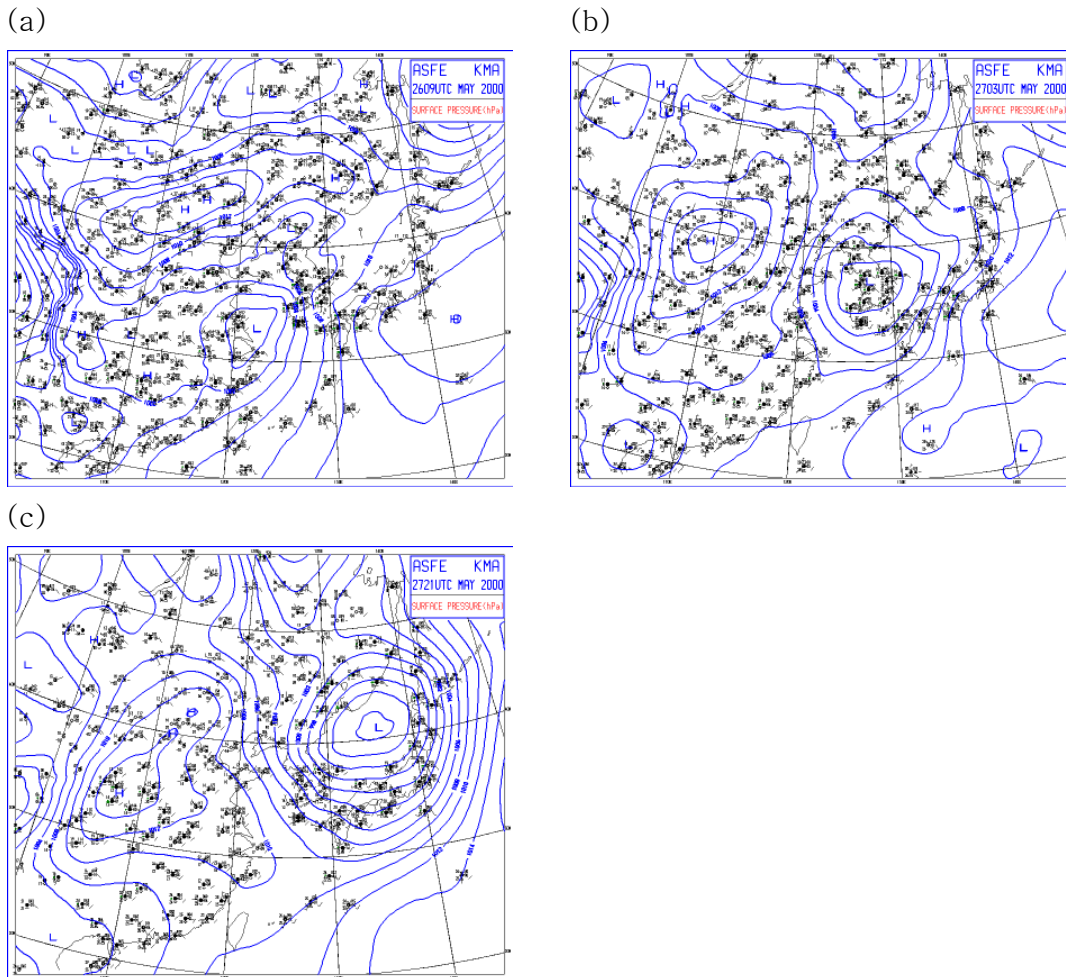


Fig. 4.15. Surface weather chart, (a)the beginning (b)the middle, (c)the last foggy + rainy hour in May 26-27, 2000.

▶ 2000 5월 30-31일 일기도

전선을 동반한 저기압이 한반도상(Fig. 4.16-a)에서 동해(Fig. 4.16-b)로 유입되면서 전선안개가 형성되어 진다. 이 저기압이 동쪽으로 이동하면서 안개는 소멸된다. 온난전선 전면의 찬공기가 안정하고 바람이 약해지면서 안개가 형성된다.

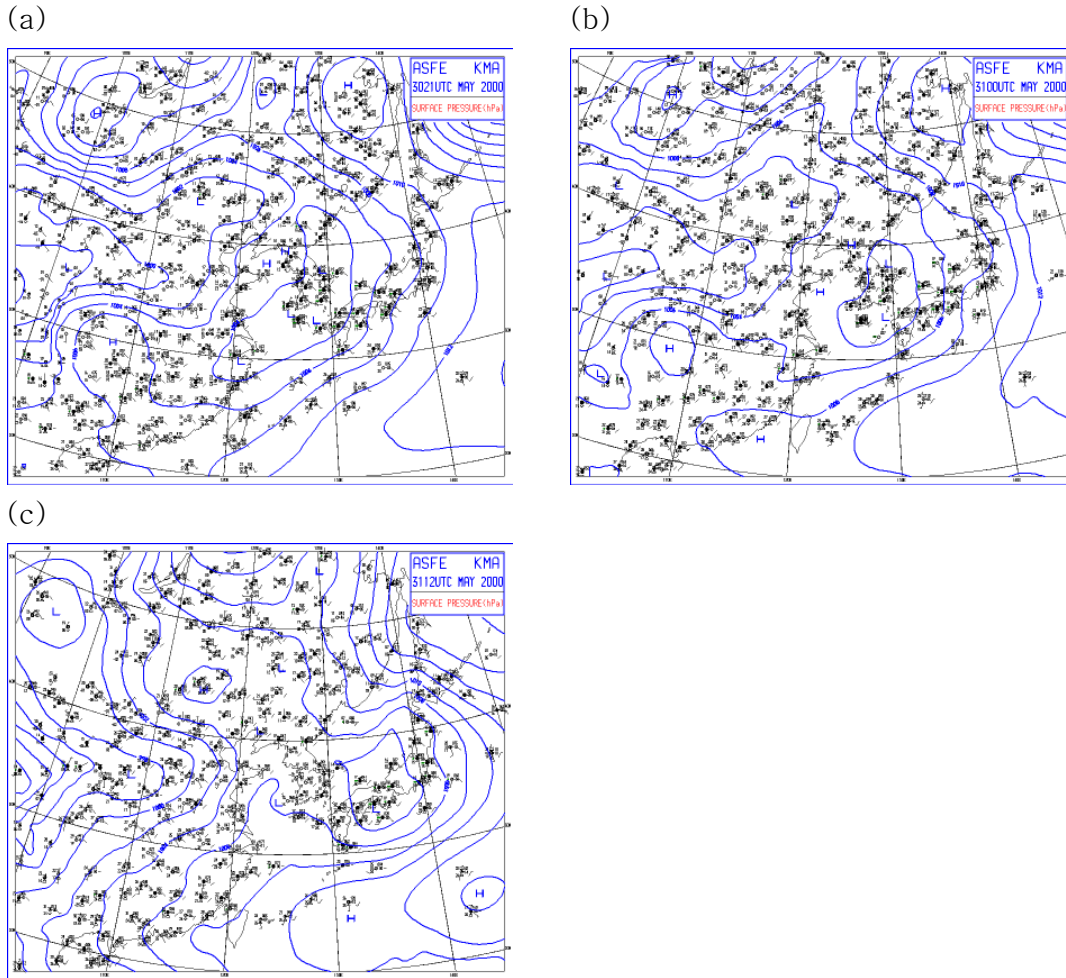


Fig. 4.16. Surface weather chart, (a)before (b)under (c)after foggy hour in May 30-31, 2000.

4.4. 모델결과와 비교

해상의 해수면 온도분포특성을 살펴보면 Fig. 4.16의 해무 발생 일자에 해당하는 일시(5월 24일)에 울릉도 주변해역에 냉수가 존재함을 볼 수 있다. 이와 같이 해상에서 발생하는 해무는 주변의 종관적 특성뿐만 아니라 해양학적 특성에 따라서 그 발생 빈도가 계절적·지역적인 차이를 나타내며, 특히 여름철 동해 울릉도의 해무발생은 맑은날 하층에 약 100m이내에서 발생하고 있으며 중규모 모형에 의한 예측은 매우 어렵다(Fig. 18-b, c). 또한 이류해무나 전선해무와 같이 중층운과 상층운이 해상에 존재하면 위성에 의한 해무탐지도 어려운 실정이다. 맑은 날이라 할지라도 Fig. 4.18-b와 같이 위성사진에는 해무가 나타나지 않았으나 25일 오전 7시에 울릉도 기상대에서 찍은 사진에는 시정 50m도 안되는 자욱한 이류무 성격의 해무가 발생한 것을 알 수 있다(Fig.4.18-a,b). 이날 발생한 해무는 같은 날 오전 10시경에 만 외각은 여전히 고도 100m이내에 해무가 지속되고 있으며 만 안쪽에서는 마치 목욕탕의 증기와 흡사하게 소산하는 것을 볼 수 있다.

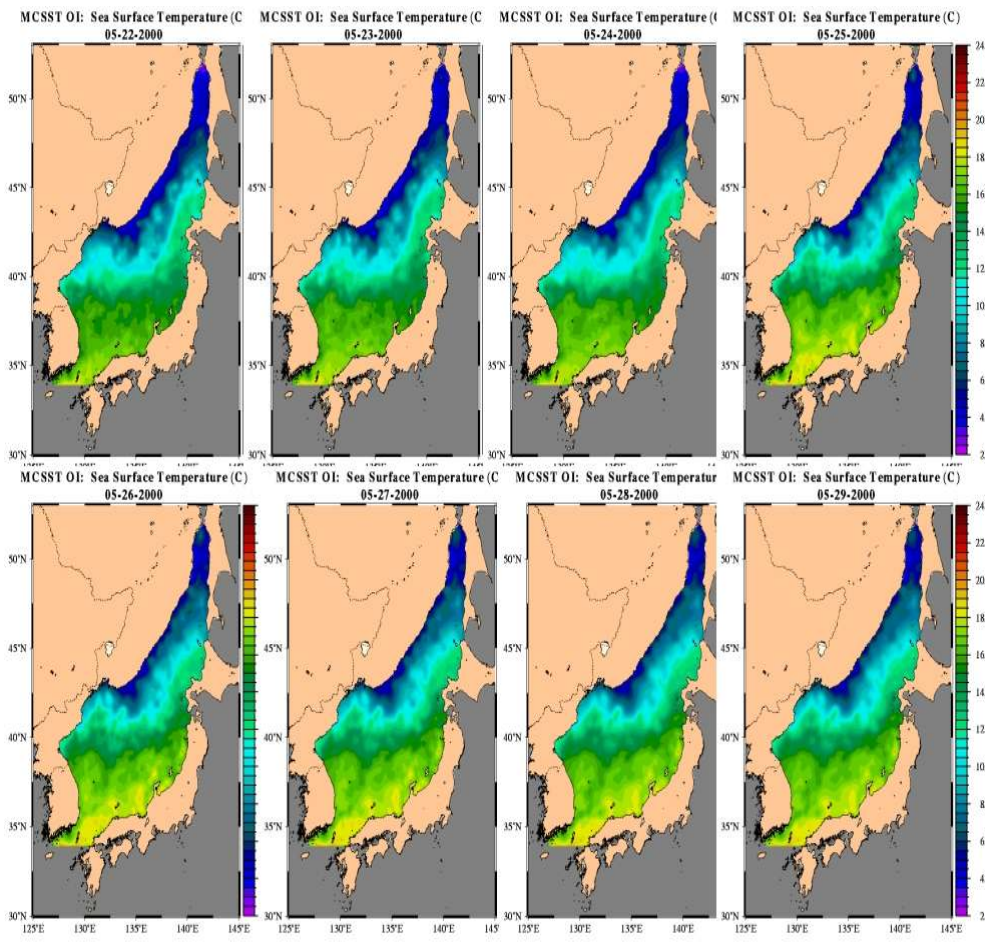


Fig. 4.17. Sea Surface Temperature in East sea during foggy day(May, 22~29, 2000) in Ulleung Do.

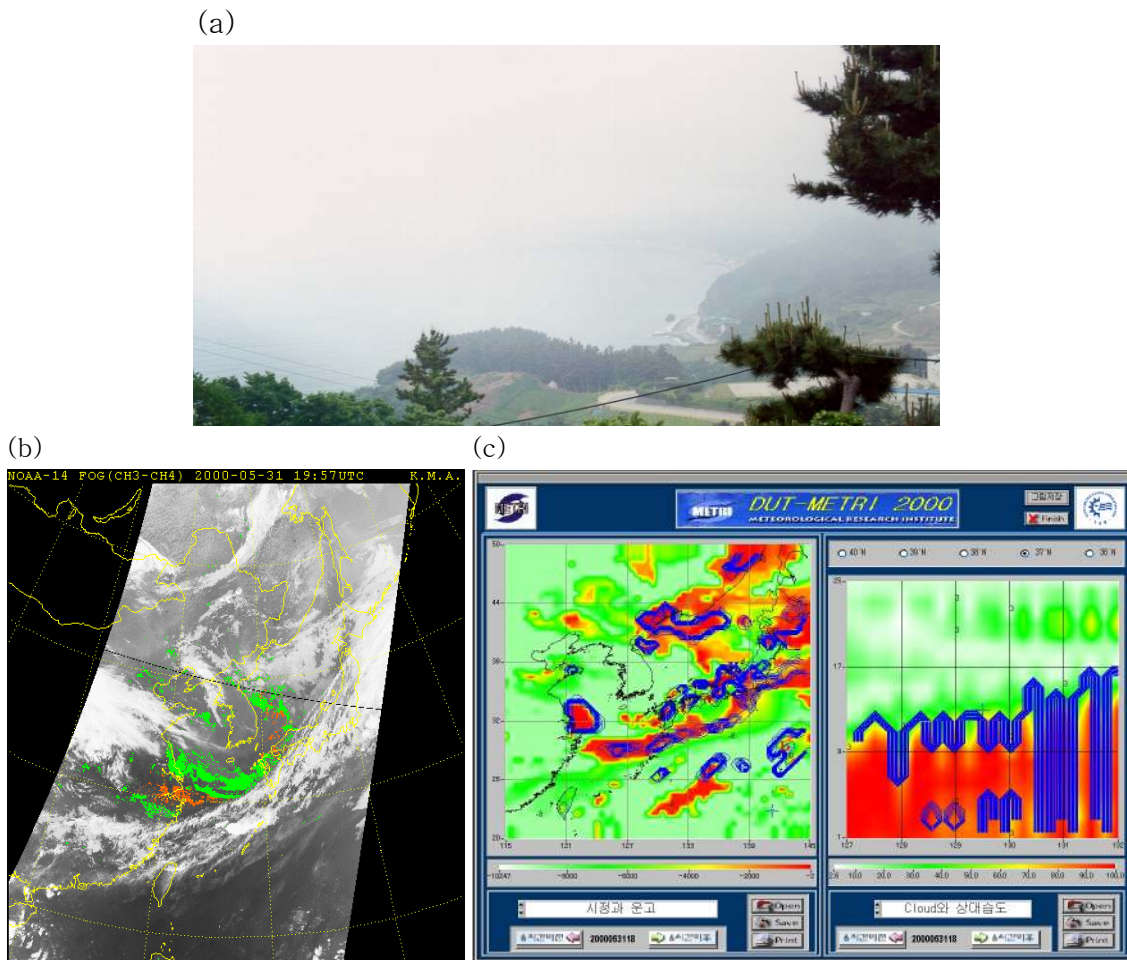


Fig. 4.18. (a)The photo of Sea fogs, 00 UTC, (b) The satellite image of fog detection transmitted by NOAA-14(CH3-CH4), 19:57 UTC, (c)The distribution of ceiling height and relative humidity, 18 UTC 24 May, 2000.

4.5. 결론

울릉도에서 2000년 5월은 평년(5.5일)에 비해 약 5일정도 안개가 더 발생하였다. 5월말인 24일에 해무발생 현상을 사진으로 촬영을 하였고, 27일에서 31일까지 상층관측이 이루어졌다. 이것을 중심으로 22일부터 31일까지 기상청 지상지점관측 자료와 지상 일기도를 분석하였다. 2000년 5월 23일에는 알류산 열도에 위치한 저기압이 남하하여 기압골을 이루면서 온난 습윤한 남서류가 상대적으로 저온인 동해상으로 유입되면서 해무가 발생한 것으로 나타났다. 5월 25일에는 고기압 하에서 단시간 나타나는 전형적인 이류무의 특성을 나타내고 있다. 이 안개는 새벽에 5시간 정도 짧은 시간동안 발생하였다. 동해상에 고온고습의 북태평양 고기압이 영향으로 습한 공기가 차가운 해수위로 이동하게 된다. 차가운 해수면 위에서 수증기는 응결되어 해무가 형성되며 풍속이 증가하면서 소멸되는 것으로 보인다. 5월 27일에는 강수현상을 동반한 전형적인 안개발생을 보여주고 있다. 강한 저기압이 남서부로부터 유입되어 한반도를 지나 동해로 이동하여 울릉도에 많은 비가 오게 한다. 저층에서 중층까지 구름층이 두껍게 형성되어 안개층이 만들며, 비가 멈춘 후에도 강수지역에서 습한 지면으로부터 증발이 일어나 안개가 한동안 안개가 계속 형성된다. 5월 31일에는 전선을 동반한 저기압이 한반도에서 동해로 유입되면서 전형적인 전선안개를 나타낸다. 고층관측으로부터 지면에 얇게 형성되어 있으며 중층에 구름이 형성되어 있음을 알 수 있다. 이것은 저기압이 동쪽으로 이동하면서 안개는 소멸된다.

5월 24일에 발생했던 안개현상을 Dut-metri로부터 계산된 결과, NOAA-14의 분석 영상 위성사진으로부터 찾으려했으나 여기에서는 해무를 감지하지 못했다. 이것은 단시간에 지면에서 얇게 형성되는 이류무의 예측이 어렵다는 것을 보여주고 있다.

제 5 절 시정모니터링 시스템 구축

5.1 서론

해무와 폭풍해일은 해상에서 일어나는 악기상 들 중 가장 빈번히 발생하는 기상 현상이다. 해무에 의한 저 시정과 높은 파고는 해상 활동을 저하시키고 선박의 좌초 등 경제적 손실과 인명 피해로 직결되기도 한다. 또한, 군사적인 측면에서도 해무와 높은 파고는 작전 능력을 약화시키는 주요한 자연적 원인이기도 하다. 따라서 해무와 파랑의 발생을 예측하고 기술을 확보하는 것은 단순한 예보 기술적 차원을 넘어 사회·경제·군사적으로도 중요하다. 하지만, 해무 예측 기술을 향상시키는 것은 대단히 어려운 일로 그 주된 원인은 해양에서의 관측자료가 아직까지 많이 부족하기 때문이다. 이로 인해 해무 예측 실험 결과를 검증하기도 어려울 뿐만 아니라 발생 초기 조건을 생산하기도 힘들다. 그러므로, 안개의 발생 및 유지 기구를 이해하고 실시간 안개관측을 통해 상시 모니터링 시스템 구축이 필요하다.

이에 따라, 본 시스템은 기상연구소 해양기상지진연구실에서 해양기상의 상태를 실시간으로 다수의 사용자가 모니터링 할 수 있으며 기존 시정계의 문제점을 보완하여 개발한 새로운 형식, 즉 신개념의 시스템으로 그 특성 및 구조에 대하여 개략적으로 소개하고자 한다.

5.2 시정모니터링시스템의 소개

가. 특징

강릉지방기상청 속초기상대에 설치되어 운용되었던 본 시스템은 현재 동해안 감시를 더욱 용이하게 하기 위하여 동해레이더기상대로 이전하여 설치·운용하고 있다. 속초기상대의 설치되어 있을 당시의 모습은 Fig. 5.1에서 보여준다.

본 시스템의 특징을 간략히 요약·정리해 보면 다음과 같다.

- (1) 해양기상정보의 실시간 자료수집
- (2) 영상자료의 디지털화
- (3) Web을 통한 원격지 시스템을 실시간 제어
- (4) 암호화 및 선택적인 Web 접속자 환경 제공
- (5) 다수 인원이 각기 다른 장소에서 Web을 통한 감시 솔루션
- (6) 기존의 고가 장비에 비해 저렴한 설치 및 유지비용
- (7) 시정과 실시간 영상의 동시 서비스로 실제 해양기상 상황을 보다 정확하게 확인 가능
- (8) 시정계 오작동시 사용자에게 판단 기준 제공
- (9) AWS, 시정계 및 영상 데이터 저장과 웹 기반에서 검색 가능

위에서 살펴보았듯이 본 시스템은 전방 산란 방식의 시정계를 사용하였고 TCP/IP 방식을 이용하여 웹 상에서 실시간 원격 장비제어가 가능하도록 하였으며 AWS에서 수신되는 자료와 고정 및 팬틸트 카메라의 영상자료가 동시에 표출이 된다. 또한, 과거의 획득된 시정영상자료의 녹화, 조회 및 검색이 가능하며 특히, 30배 줌의 저조도(0.005 LUX) 카메라를 장착하여 야간 시에도 해안 감시가 가능하다. 기존의 해양영상정보는 고가의 CODEC 장비를 통한 화상전송시스템과 고속 전용선으로 인하여 설치에 어려움이 있었으나 본 시스템은 WEB DVR과 저렴한 유지비용의 인터넷 전용선을 통하여 서비스가 가능하므로 도입이 용이하다. 그리고, 현재는 기상청 인터넷에 연결되어있어 기상청에서만 접속이 가능하나 외부기관에서도 필요시 미러사이트 구축으로 모니터링을 할 수 있다. 이와 더불어 서해안에서는 안개가 자주 발생하여 항공기 이·착륙에 큰 장애를 주고 있는 인천국제공항의 안전운항을 위하여 영종도 항공기상대에서도 각종 기상정보를 시정모니터링시스템을 구축·운용하여 제공·활용하고 있다. 또한, 해상 기상상태를 동시에 다수의 사용자가 실시간으로 모니터링이 가능하므로 군에서도 손쉽게 활용할 수 있어 해안감시가 더욱 용이할 것으로 사료된다.

나. 구조

본 시스템의 구성요소는 크게 네 가지로 다음과 같이 이루어져 있다. (1) 시정계, (2) 영상전송서버, (3) 영상서버 운용 S/W, (4) 고화질 디지털 카메라 상기 구성요소를 세부적으로 살펴보면, 먼저 시정계는 현 시정상태를 육안식별자료에 대하여 $\pm 20\%$ 이내의 오차로 감지해낼 수 있는 것으로 시정범위는 1,000 m 이상이며 사용환경은 우선 기온은 $-40 \sim 55$ °C, 습도는 0 ~ 100 % 및 최대풍속은 60 m/s 이하에 적합하도록 하였다. 또한, 각 측정값을 물리량으로 변환하고 기상청이 정하는 데이터 형식으로 출력이 가능하도록 데이터로거를 구성하여 향후 사용자가 사용하기 용이하도록 프로그램을 제작하여 자료 처리를 하도록 하였다. 시정계로부터 수신되는 실시간 자료를 디지털화하여 주변 기상대의 AWS 자료(기온, 바람, 기압, 습도, 일사 등)와 고정 및 팬틸트 카메라를 통해 수신되는 실시간 영상정보를 함께 영상전송서버를 통해 전송하고 이 서버를 운영하는 소프트웨어를 이용하여 AWS 및 시정계의 데이터를 네트워크를 통해 실시간으로 웹상에서 수신하여 동시에 표출이 가능하도록 하였다. 또한, 획득된 영상과 데이터를 녹화, 저장 및 출력 기능을 추가하여 원격지 사용자의 편의를 배가하였다.

본 시스템의 안전성을 위해 Fig. 5.2와 같이 랙을 제작하여 주요장비를 외부의 기상재해로부터 보호하였으며 이동이 용이하도록 하기 위하여 랙의 밑단에는 바퀴를 달았다. 그리고, 강한 바람에 대비하여 전복되지 않도록 철근을 사방으로 설치하여 고정시켰다.



Fig. 5.1. It is take a picture of the installation of visibility monitoring system.



Fig. 5.2. Visibility monitoring system and the part of this equipment.

다. 영상 표출 형태

해양 또는 지상 기상 감시를 위하여 관측되어진 영상이 제대로 표출되기 위하여 우선 환경설정이 필요하다. 환경설정에는 크게 카메라 서버와 데이터 서버로

나뉘어진다. 데이터 서버는 현장에서 모아지는 AWS, 시정, 영상 데이터들의 저장 control 기능들을 관리하며 클라이언트로부터의 요구를 수렴하는 역할을 한다. AWS 데이터는 1분 간격으로 전송되며 영상정보는 카메라 서버에서 프레임 단위로 전송되어 1시간 간격으로 이미지를 저장한다. 또, 시정 데이터는 시정계에서 시정 값이 표출되는 주기에 맞춰 데이터를 저장한다. 카메라 서버는 카메라의 on/off 상태를 보여주며 데이터 서버와 AWS 서버 주소를 기입하도록 되어있다.

5.3. 기대효과

본 시스템은 기존 시정계의 개념에서 탈피하여 각 기상장비의 특성을 최대한 고려하여 구축하였기에 해안의 시정 및 해양기상감시가 용이하므로 주요 해안 및 항만의 감시망으로 활용을 극대화 할 수 있다. 또, 웹을 이용한 장비제어 기술을 축적하였으며 통신비 절감에도 큰 몫을 차지하였다. 마지막 3차 년도에는 무선 이동형 AWS장비를 개발하여 관측현장에 AWS를 설치하고 자료는 무선(CDMA)전송으로 기상연구소에 전달되기도 하고 무선으로 다른 위치의 노트북에 전송되어지는 장비를 개발 하여 시험 운용을 해보았다. 이 장비의 활용도는 향후 선박 및 무인 도서지역에 AWS를 설치하고 이를 실시간으로 각 관련기관에서 자료를 획득할 수 있는 체계 구성에 활용될 것이라고 본다.



Fig. 5.3. The wireless automatic weather system.

제 6 절 파랑예측 시스템 구축

6.1 서론

해양이 대기와 경계를 이루고 있는 해표면에서는 해양과 대기는 서로 열, 물질, 에너지 등을 주고받는다. 해양은 대기로부터 바람 등의 형태로 에너지를 공급받아 파랑, 표층 순환과 같은 형태의 운동을 하게 되고, 대기는 해양으로부터 주로 열이라는 형태를 통해 에너지를 받아 기상학적인 변화를 일으킨다.

해표면에서 일어나는 현상중 인간의 해상 활동에 크게 영향을 미치고 있는 파랑의 발생 및 성장 기작에 관한 내용들은 그 동안 체계적으로 연구되어 왔다 (Phillips(1957,1958), Miles(1957, 1960) and Hasselmann, K.(1962)). 또한 Gelci(1956, 1957) 등에 의해 최초로 시도되었던 파랑 수치 모델은 지난 몇 세기 동안 JONSWAP (Hasselmann et al. 1973), SWAMP (SWAMP Group 1985), SWIM (SWIM Group 1985) 등의 프로젝트들에 의해 급속도로 발전되어져 왔다.

현재 해양에서의 파랑 발생 모사는 파고, 파장, 파주기 및 파향 등의 여러 파랑 인자들에 대한 스펙트럼 방법에 기반을 둔 파랑모델이 사용된다. 본 연구에서는 성분파 상호간의 비선형 에너지 전달항을 명시적으로 계산하며 시·공간적으로 변화하는 해상풍 및 해류, 조류의 효과와 에너지 소산, 해저면과의 상호작용에 의한 분산 작용까지 고려하고 있는 제 3 세대 파랑 모형(WAVEWATCH-III)의 검증이 실시되었으며, 이를 기반으로 파랑 예측 시스템을 구성하였다. WAVEWATCH-III 모델은 현재 NOAA/NCEP에서 기존의 WAM 모델을 대신해서 현업적으로 이용되는 모델이며, 미국 Delf 대학에서 Tolman에 의해 처음 개발되었고(WAVEWATCH-I), NASA에서 WAVEWATCH-II로 발전되어져 왔다.

본 장에서는 WAVEWATCH-III 모델의 이론적 특성과, 파랑 예보시스템의 구축 내용 및 검증 결과를 다룰 것이며, 파랑 현상에 관한 수치 실험에 대한 내용이 포함될 것이다. 모델 셋팅 방법에 대한 구체적인 매뉴얼은 부록에 첨가시켰다.

6.2. 파랑 수치 모델링

6.2.1. 지배 방정식

해수면에서의 파랑발생은 단순하지 않기 때문에 파고, 파장, 주기 및 파향이 서로 다른 여러 가지의 규칙적인 성분파로 서로 겹치거나 간섭하는 양상을 가진다고 가정 하에 해수면의 파의 성질을 여러 가지의 sinusoidal wave로 분해하여 각기 다른 주파수, 진폭 및 위상의 성질을 파악하는 스펙트럼 방법을 사용한다. 평균흐름(U)에 대해 파랑은 에너지 스펙트럼 형태로 표현될 수 있으며, 그 스펙트럼의 요소

는 파의 방향(θ), 파수(k), 절대주파수(ω), 상대주파수(σ) 및 평균 해수면 깊이(d) 등으로 정의되고, 그 요소들은 Dispersion relation(1) 과 Doppler equation(2) 을 기본 방정식으로 한다.

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \quad (6.2.1)$$

$$\omega = \sigma + K \cdot U \quad (6.2.2)$$

위상 함수로부터 파수벡터(k)와 절대 주파수(ω)와의 관계는 식(3) 과 같다 (Phillips 1977; Mei 1983).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \omega = 0 \quad (6.2.3)$$

(6.2.1), (6.2.2), (6.2.3)식으로부터 각각의 파랑인자들의 시간에 따른 변화율 계산할 수 있다.

서두에서 언급했듯이, 중첩된 풍파의 경우, 해표면의 변화는 에너지 밀도함수 (energy spectra)의 변화를 통해 기술하여야만 한다. 에너지 밀도함수 ($F(k, \omega, \sigma, t, x)$)는 파수벡터, 절대주파수, 상대주파수, 시간, 그리고 공간의 함수이며, 각각의 인자들은 선형적으로 독립적이지는 않다. 일반적으로 파수벡터와 파향의 인자들은 서로 독립적이기에 에너지 밀도함수를 이들의 향으로 나타내어 이차원으로 확장하여 사용한다. 다음 식은 파수벡터 함수($F(k, \theta)$)가 상대 및 절대 주파수 ($F(f_r, \theta), F(f_a, \theta)$) 에너지 밀도 함수로 표현될 수 있음을 보이는 과정이다.

$$F(f_r, \theta) = \frac{\partial k}{\partial f_r} F(k, \theta) = \frac{2\pi}{c_g} F(k, \theta)$$

$$F(f_a, \theta) = \frac{\partial k}{\partial f_a} F(k, \theta) = \frac{2\pi}{c_g} \left(1 + \frac{k \cdot U}{kc_g}\right)^{-1} F(k, \theta)$$

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = n \frac{\sigma}{k}, \quad n = \frac{1}{2} + \frac{kd}{\sinh 2kd}$$

전방향으로 위의 식들을 적분하여 2차원 스펙트럼의 에너지 밀도함수를 얻게 된다.

이제까지 언급한 파랑 스펙트럼의 개념을 이용하여 파랑 수치모델은 파랑 스펙트

럼 에너지가 source term (S) 에 의해 보존된다는 개념을 기본 방정식으로 사용하
다.

$$\frac{DF}{Dt} = S$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \nabla_x \cdot \dot{x}F + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}F + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}F = S$$

$$\dot{x} = c_g + U$$

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - k \cdot \frac{\partial U}{\partial s}$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} - k \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right]$$

위의 식을 구면 좌표계를 적용하여 바꿔 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} F \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} F + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} F + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g F = S$$

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos \theta + U_\phi}{R}$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \phi + U_\lambda}{R \cos \phi}$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \phi \cos \theta}{R}$$

R은 지구반경이고, U_ϕ, U_λ 는 경위도 방향의 유속을 나타낸다.

WAVEWATCH-III 모델에서는 보존방정식의 우측항인 source term 이 다음과 같이 4
가지 항으로 분류되며 각각의 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot}$$

S_{in} : wind-wave interaction term

S_{nl} : nonlinear wave-wave interaction term

S_{ds} : dissipation(white-capping) term

S_{bot} : wave-bottom interaction term

㉠ S_{in} : wind-wave interaction term

본 모델은 파랑생성과 소멸에 대해 Chalikov and Belevich (1993) 식과 Tolman and Chalikov (1996) 방정식이 사용되었다. 바람 입력항의 원천 함수는 다음과 같다.

$$S_{in}(k, \theta) = \sigma \beta N(k, \theta)$$

여기서 β 는 wind-wave interaction 파라메타이며 다음과 같이 근사된다.

$$10^4 \beta = \begin{pmatrix} -a_1 \tilde{\sigma}_a^2 - a_2, & \tilde{\sigma}_a \leq -1 \\ a_3 \tilde{\sigma}_a (a_4 \tilde{\sigma}_a - a_5) - a_6, & -1 < \tilde{\sigma}_a < \Omega_1/2 \\ (a_4 \tilde{\sigma}_a - a_5) \tilde{\sigma}_a, & \Omega_1/2 < \tilde{\sigma}_a < \Omega_1 \\ a_7 \tilde{\sigma}_a - a_8, & \Omega_1 < \tilde{\sigma}_a < \Omega_2 \\ a_9 (\tilde{\sigma}_a - 1)^2 + a_{10}, & \Omega_2 < \tilde{\sigma}_a \end{pmatrix}$$

$$\text{where } \tilde{\sigma}_a = \frac{\omega u_\lambda}{g} \cos(\theta - \theta_w)$$

여기서 $\tilde{\sigma}_a$ 는 무차원 주파수이며, 풍향 (θ_w) 과 ‘apparent’ 파장 ($\lambda_a = \frac{2\pi}{k|\cos(\theta - \theta_w)|}$)에 대응되는 높이에서의 풍속 (u_λ) 에 의존한다. 파라메타 식의 계수들 $a_1 - a_{10}$, Ω_1 , Ω_2 는 다음 식과 같이 $z = \lambda_a$ 높이에서의 바람 응력계수 (drag coefficient) C_λ 에 의존한다.

$$\Omega_1 = 1.075 + 75 C_\lambda$$

$$\Omega_2 = 1.2 + 300 C_\lambda$$

$$a_1 = 0.25 + 395 C_\lambda$$

$$a_2 = 0.35 + 150 C_\lambda$$

$$a_3 = (a_0 - a_2 - a_1) / (a_0 - a_4 + a_5)$$

$$a_4 = 0.30 + 300 C_\lambda$$

$$a_5 = a_4 \Omega_1$$

$$a_6 = a_0(1 - a_3)$$

$$a_7 = (a_9(\Omega_2 - 1)^2 + a_{10}) / (\Omega_2 - \Omega_1)$$

$$a_8 = a_7\Omega_1$$

$$a_9 = 0.35 + 240C_\lambda$$

$$a_{10} = -0.05 + 470C_\lambda$$

$$a_0 = 0.25a_5^2/a_4$$

파랑모델에서는 표준 고도(z_r)에서의 해상풍(u_r)을 원천 함수 입력항으로 사용하기 때문에 u_λ , C_λ 의 모수화가 필수적이다.

해수표면의 아주 얇은 층을 제외하면 평균 해상풍은 다음과 같은 로그함수로 근사된다.

$$u_z = \frac{V_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

여기서 κ 는 Von Karman 상수로서 0.4로 주어지며 z_0 는 조도(roughness) 파라메타이다.

위의 식은 표준 고도에서의 바람응력 계수의 항으로 다시 쓸 수 있다(Chalikov, 1995).

$$C_r = \kappa^2 [R - \ln(C)]^2$$

$$\text{where } R = \ln\left(\frac{z_r g}{\chi \sqrt{\alpha} u_r^2}\right)$$

여기서 κ 는 0.2 상수이며, α 는 고주파수 영역에서의 무차원 에너지 레벨을 의미한다. 위 식은 좀 더 정확한(explicit) 근사로 다음과 같이 사용된다.

$$C_r = 10^{-3} \left(0.021 + \frac{10.4}{R^{1.23} + 1.85} \right)$$

위와 같이 정확한 바람 응력 계수를 얻기 위해서는 고주파수 영역의 에너지 레벨을(α) 알아야 하며, 이는 파랑 모델에서 직접적으로 계산될 수 있으나, 스펙트럼을

계산하는 과정에서 몇가지 에러가 존재하게 된다. 그러므로 Janssen(1997) 에 의해 계산된 다음과 같은 모수화 식을 사용한다.

$$\alpha = 0.57 \left(\frac{U_*}{C_p} \right)^{3/2}$$

바람응력 계수의 계산은 위의 세 개의 식들을 반복 계산함으로써 얻어질 수 있으며, 조도 파라미터 또한 다음 식에 의해 계산이 가능하다.

$$z_0 = z_r \exp(-\kappa C_r^{-1/2})$$

그러므로, 일정 높이 λ 에서의 풍속(u_λ)과 응력계수(C_λ)는 다음과 같다.

$$u_\lambda = u_r \frac{\ln(\lambda/z_0)}{\ln(z_r/z_0)}$$

$$C_\lambda = C_r \left(\frac{u_a}{u_\lambda} \right)^2$$

Ⓞ S_{nl} : nonlinear wave-wave interaction term

Hasselmann et al.(1995)은 무수히 많은 성분과 상호 작용의 조합 가운데, 한 개의 선택된 조합만을 사용하는 이산 상호 작용근사(Discrete Interaction Approximation)를 제안하였고, 이 방법은 기상청 현업 모델인 WAM과 WAVEWATCH-III에 공통으로 사용되지만 사용되는 경험 상수가 다르다. WAVEWATCH-III에서는 Tolman and Chalikov 의 전달 경험 상수($C=1.00 \times 10^7$)가 사용된다(Table 1).

Table 6.1. Suggested constants in DIA for input-dissipation package.

	λ_{nl}	C
WAM-3	0.25	2.78×10^7
Tolman and Chalikov	0.25	1.00×10^7

4개의 성분파수 벡터 k_1, k_2, k_3, k_4 에 대해 비선형 에너지 전달을 근사할 수 있는

성분과수 벡터 \vec{k} 와 각주과수 σ 는 다음의 관계를 갖는다.

$$k_1 + k_2 = k_3 + k_4$$

$$\sigma_2 = \sigma_1$$

$$\sigma_3 = (1 + \lambda_{nl})\sigma_1$$

$$\sigma_4 = (1 - \lambda_{nl})\sigma_1$$

where $\lambda_{nl} = 0.25$

위와같은 공명 상호 작용 배치에 대하여 비선형 간섭에 의한 에너지 전달항의 시간변화율은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \delta S_{nl,1} \\ \delta S_{nl,3} \\ \delta S_{nl,4} \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} C g^{-4} F_{r,1}^4 \times [F_1^2 \left(\frac{F_3}{(1 + \lambda_{nl})^4} + \frac{F_4}{(1 - \lambda_{nl})^4} \right) - \frac{F_1 F_3 F_4}{(1 - \lambda_{nl}^2)^4}]$$

where $F_1 = F(f_{r,1}, \theta_1)$ and $\delta S_{nl,1} = \delta S_{nl}(f_{r,1}, \theta_1)$

C는 이산 상호작용 근사식이 엄밀히 계산된 결과와 맞도록 조절하여 주는 수치 상수인 proportionality 상수로 Table 6.1 과 같이 1.00×10^7 값을 산정한다.

위 식을 모든 주과수, 파향, 상호작용 배치에 대하여 총합을 나타낸 것이 비선형 원천 함수 S_{nl} 이 된다.

⊕ S_{ds} : dissipation term

파랑 소산항은 다음과 같이 주과수에 따라 크게 두 가지($S_{ds,l}, S_{ds,h}$) 항의 선형적 조합으로 이루어져 있다.

$$S_{ds}(k, \theta) = A S_{ds,l} + (1 - A) S_{ds,h}$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \text{for } f < f_1 \\ \frac{f - f_2}{f_1 - f_2} & \text{for } f_1 \leq f < f_2 \\ 0 & \text{for } f_2 \leq f \end{pmatrix}$$

각각의 파의 주과수 영역에 따라 파의 소산에 관한 다른 경험식을 사용함으로써,

파의 에너지 손실을 기존의 파랑 모델 보다 잘 모사할 수 있을 것으로 기대하고 있다(Tolman, 1999).

㉔ S_{bot} : wave-bottom interaction term

해저면 마찰항은 JONSWAP 프로젝트를 통해 얻어진 다음과 같은 경험식으로 표현된다.

$$S_{\text{bot}}(k, \theta) = 2\Gamma \frac{n-0.5}{gd} N(k, \theta)$$

Γ 는 너울의 경우 $-0.038\text{m}^2\text{s}^{-3}$, 해파의 경우 $-0.067\text{m}^2\text{s}^{-3}$ 의 경험 상수이며, n 은 군속도와 위상속도의 비로써, $n = \frac{1}{2} + \frac{kd}{\sinh 2kd}$ 로 표현될 수 있다.

6.3. 파랑 예보 시스템 구성 및 결과

6.3.1. 모델 영역 및 초기 자료

한국 근해를 포함하는 동아시아 해역의 파랑 전파를 모사하기 위해 고안된 첫 번째 모델 영역은 경도 115°E-145°E, 위도 20°N-50°N 의 영역으로 해상도는 위, 경도 각각 0.5°이다. Global and CFL time step 은 Tolman(1996)의 식에 따라 900 초, Minimum source term time step 은 300초로 각각 계산하였다.

동해와 남해역의 국지적 파랑 전파를 모사하기 위해서 동해역은 0.1°의 해상도에 127.5°E-132.5°E, 36°N-40°N, 남해역은 0.05°의 해상도에 124°E-128°E 32°N-36°N 의 모델 영역을 산정 하였다. 각각의 모델 영역과 해상도에 대한 정보는 Fig.6.1, Table 6.1에 자세히 표시하였다.

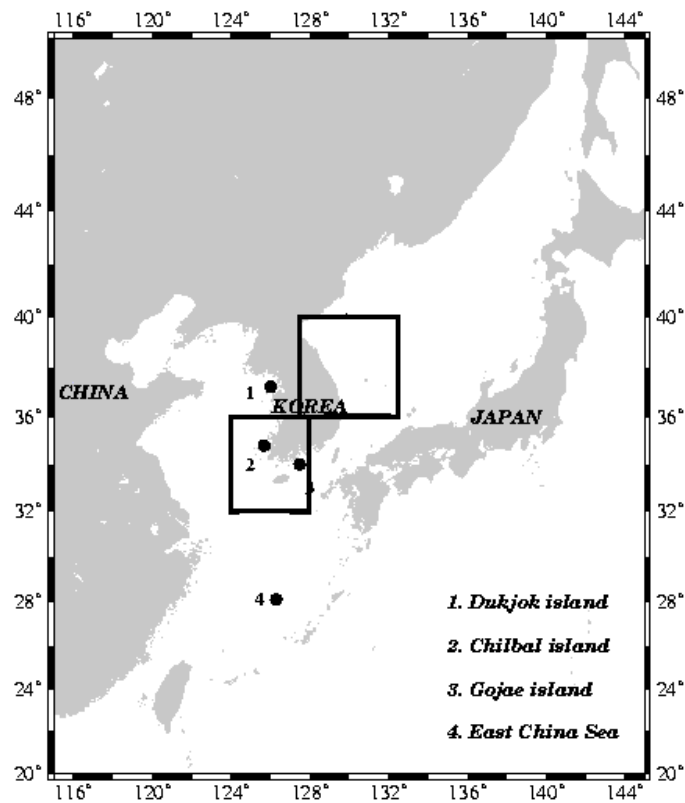


Fig. 6.1. WAVEWATCH-III first model domain and KMA(1-3) and JMA(4) buoy points. Box areas are second and third domains, respectively.

Table 6.2. The information for the WAVEWATCH-III model domain

	Latitudinal Range	Longitudinal Range	Resolution	Time Step
First Domain	115°E-145°E	20°N-50°N	0.5° by 0.5°	900/300
Second Domain	127.5°E-132.5°E	36°N-40°N	0.1° by 0.1°	900/300
Third Domain	124°E-128°E	32°N-36°N	0.05° by 0.05°	450/100

해저면과의 상호작용을 고려하고 있는 본 모델에서는 수심 자료로는 ETOP5의 전 구 수심 자료와 연안 수심 1km 상당의 Digitizing 자료 중 연구 해역의 자료를 뽑아서 사용하였으며, 해저면 마찰계수는 경험 상수인 $0.067\text{m}^2/\text{s}^3$ 이 적용되었으며 (Tolman, H. L, 1999), 최저수심은 2.5m 로 산정하였다.

안정화된 파랑의 생성과 그 예측을 위한 초기조건으로 가장 중요한 해상풍으로는, PSU/NCAR에서 개발된 중규모 기상모델(MM5)을 기상청 및 기상연구소에서 한반도 상황에 맞게 재구성한 해상풍 예측 결과를 이용하였다(Yamada, 1976).

해상풍 예측 모델에 관한 이론적 내용 및 자세한 검증은 전 장에서 설명되었으며, 이와 같이 향상된 해상풍 예측 계산 결과는 파랑 모델의 초기 조건으로 사용됨으로서, 파랑 예측의 정밀도를 높일 수 있을 것으로 기대되고 있다.

6.3.2. 모델 수행 시간 및 시스템 자동화 셀 구조 및 내용

본 파랑 예측 모델은 일정 시스템 시간이 되면 크론탭(crontab)에 설정된 순서에 의해 자동으로 계산이 수행되도록 설계되어 있다. 계산 수행시간과 환경에 대한 정보는 Table 6.3. 에 소개되어 있다. 계산 시간은 각 시간대의 CPU load 상태에 따라 조금씩 달라질 수 있다.

Table 6.3.The information about the calculating of WAVEWATCH-III model.

	Calculating machine	Starting time	Turn-around time
First Domain	NEC Super-computer SX-5/16A	03:00, 15:00	15 minute
Second Domain	AlphaServer DS20	03:30, 15:30	30 minute
Third Domain	AlphaServer DS20	03:30, 15:30	35 minute

프로그램이 위치하는 디렉토리 구조는 다음과 같다.

- * ~/aux : 부 프로그램 위치한다.
- * ~/bin : 모델 셋업 파일들이 존재한다. 기본 셋팅은 리눅스 컴파일러로 되어 있고, 워크스테이션의 CPU 종류와 포트란 컴파일러에 따라 컴파일 옵션을 달리 사용해야 한다.
- * ~/exe : 실행 파일과 실행 셸이 존재한다.
- * ~/ftn : 주 프로그램이 존재한다.
- * ~/inp : 초기조건을 정의하는 셸이 존재한다.
- * ~/obj : Object 파일이 존재한다.
- * ~/test : Model test를 위한 파일이 압축되어 있다.
- * ~/work : ~/inp 의 실행 셸 디렉토리의 모든 셸들이 링크되어 있어 모델 디자인을 위한 작업공간이다.
- * ~/ww3_temp : Temporary 파일들이 존재한다.

본 작업인 ~/exe/ww3_shel* 이 수행되기 위해서 필요한 날짜 정보, 바람 자료, 그 외 필요한 기본 input condition을 정의해 주는 셸들은 다음과 같다.

- * ww3_grid.inp : Time step, 바닥 마찰 계수 등 경험 상수를 정의해 주고, 해저 지형 등의 grid와 관계된 자료를 정의한다.
- * ww3_strt.inp : Cold, hot start 여부를 결정하고, Restart file을 생성한다.
- * ww3_prep.inp : 해상풍, 해류, 조류 등의 입력 자료를 선택적으로 추가한다.

Initial condition 의 입력이 끝나면 실제 적분과정을 격는 ww3_shel*을 실행시키기 위해 적분 시간에 대한 정보를 고쳐주는 셸은 ww3_shel.inp 이며, 자동으로 계산시간을 update 시켜주기 위해 makeshel.f 프로그램을 실행시킴으로 ww3_shel.inp 의 계산 시각 정보를 바꾸어 준다. 계산이 끝나면 후처리 과정으로 다음의 셸 작업이 이루어진다.

- * ww3_outf.inp : 각각의 도메인의 필드 데이터를 생성한다.
- * ww3_outp.inp : 도메인 내의 필요연구 정점의 시간별 포인트 자료를 생성한다.

이상의 작업 과정들을 모식화 하면 Fig. 6.2 와 같다.

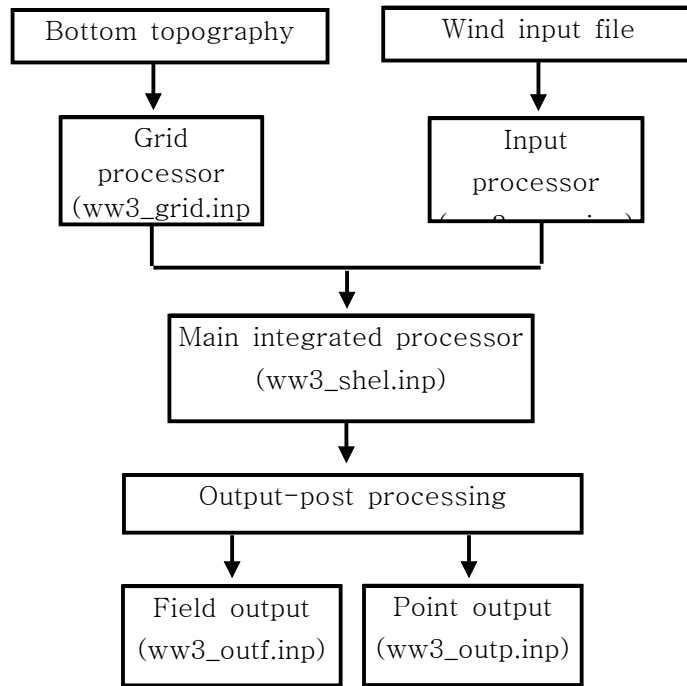


Fig. 6.2. Basic program flow chart.

위의 순서대로 모델 셋업이 이루어지면 다음의 순서대로 실행 파일을 실행시킨다.

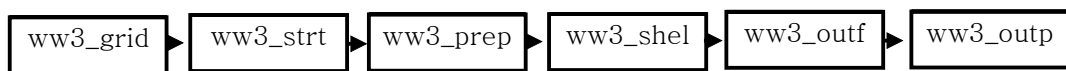


Fig. 6.3. Basic program execution flow chart.

생성된 필드 데이터는 매일 2회 GMT(Generic Mapping Tools) 그래픽 패키지를 통해 contouring 작업을 거친 후 jpg 파일로 변환된 후 기상연구소 해양기상지진연구실 웹서버(<http://www.metri.re.kr/marweb/wavewatch>)에 전송됨으로써, 일반 사용자들이 매일의 48시간까지의 파랑예측 정보를 준 실시간으로 확인할 수 있다. 아직까지는 사용자들이 실제 데이터를 확인할 수 있는 데이터 베이스 구축은 안 되어 있는 실정이지만, 차후에 안정적이고 대용량을 지원할 수 있는 데이터 베이스를 구축함으로써 그동안 축적되고 매일 자동으로 계속 생성되는 파랑인자들에 대한

ASCII 및 NetCDF 포맷의 자료를 제공할 예정이다.

더욱 자세한 모델 셋팅 방법과 구조는 Appendix 에 수록하였다.

6.3.3. 웹 기반의 파랑 예측 모델 시스템 소개

6.3.2의 과정을 통해 산출되는 파랑 인자들의 결과를 매일 실시간으로 웹 페이지 (<http://www.metri.re.kr/marweb>) 에 게시함으로써, 일반 사용자들이 파랑정보를 손쉽게 접할 수 있도록 구현하였다.



Fig. 6.4. The main web page of Marine Meteorology and Earthquake Research Laboratory.

파랑 예측에 관한 메인 메뉴는 기상연구소 해양기상 지진연구실의 메인 홈페이지 하단(Fig. 6.4)에 WAVEWATCHIII 버튼에 링크되어 있고 Fig. 6.5 과 같이 총 6개의 서브 메뉴로 구성되어 있고 각각은 다음과 같은 내용을 포함한다.

1. **Model Description** : WAVEWATCH-III 모델에 대한 개괄적인 설명과 물리적 수치적 기본 개념들이 소개되어 있으며 기타 reference 페이지들이 링크되어 있다.



Fig. 6.5. The main menu of the wave prediction system using WAVEWATCH-III model operated by marine meteorology and earthquake research laboratory.

2. **Regional Prediction** : Fig. 6.1과 Table 6.3에 소개된 한반도 주변의 3개 영역에 대한 유의파고, 파향의 정보를 나타낸다. 하루에 두 번씩 각각의 영역에 대해 3시간 간격으로 최대 48시간까지의 예측 결과가 나타나고, 간단한 동영상 기능을 포함하고 있다. Fig. 6.5.1은 한반도 전체 영역(first domain), Fig. 6.5.2는 울릉도를 포함하는 동해(second domain), Fig. 6.5.3은 제주도를 포함한 남해 영역(third domain)에 대한 표출 결과이다.

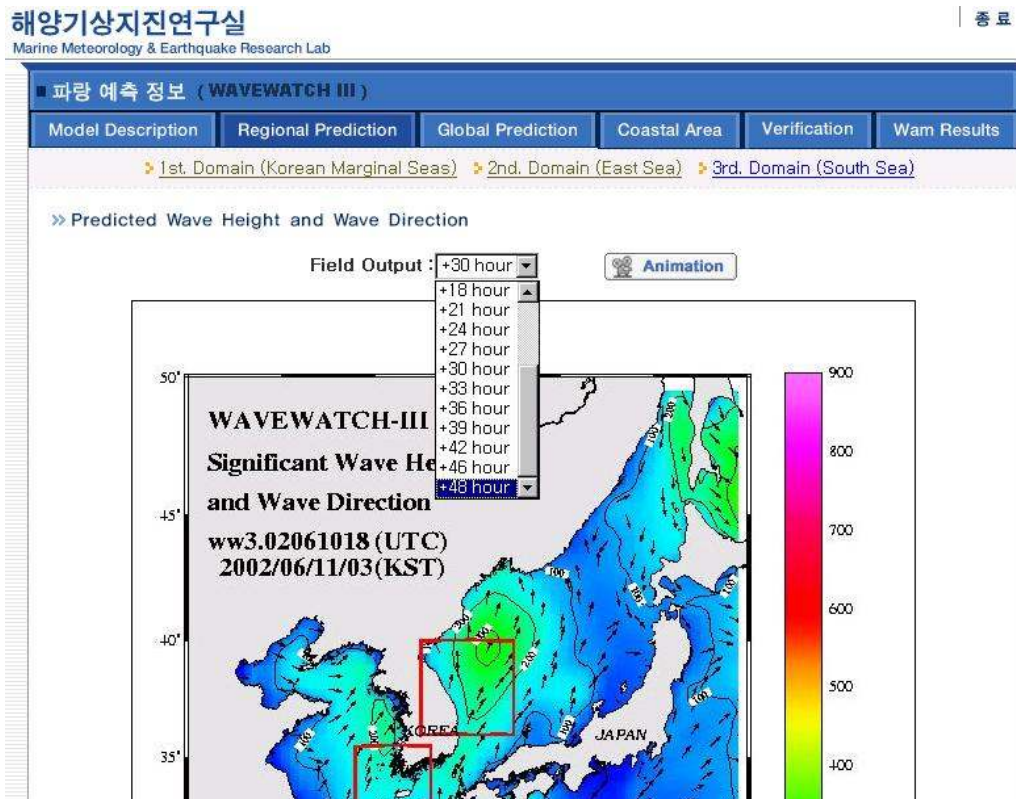


Fig. 6.5.1. The model output capture image at the WAVEWATCH-III web page. This page shows the result of first domain.

1st. Domain (Korean Marginal Seas) 2nd. Domain (East Sea) 3rd. Domain (South Sea)

>> Predicted Wave Height and Wave Direction

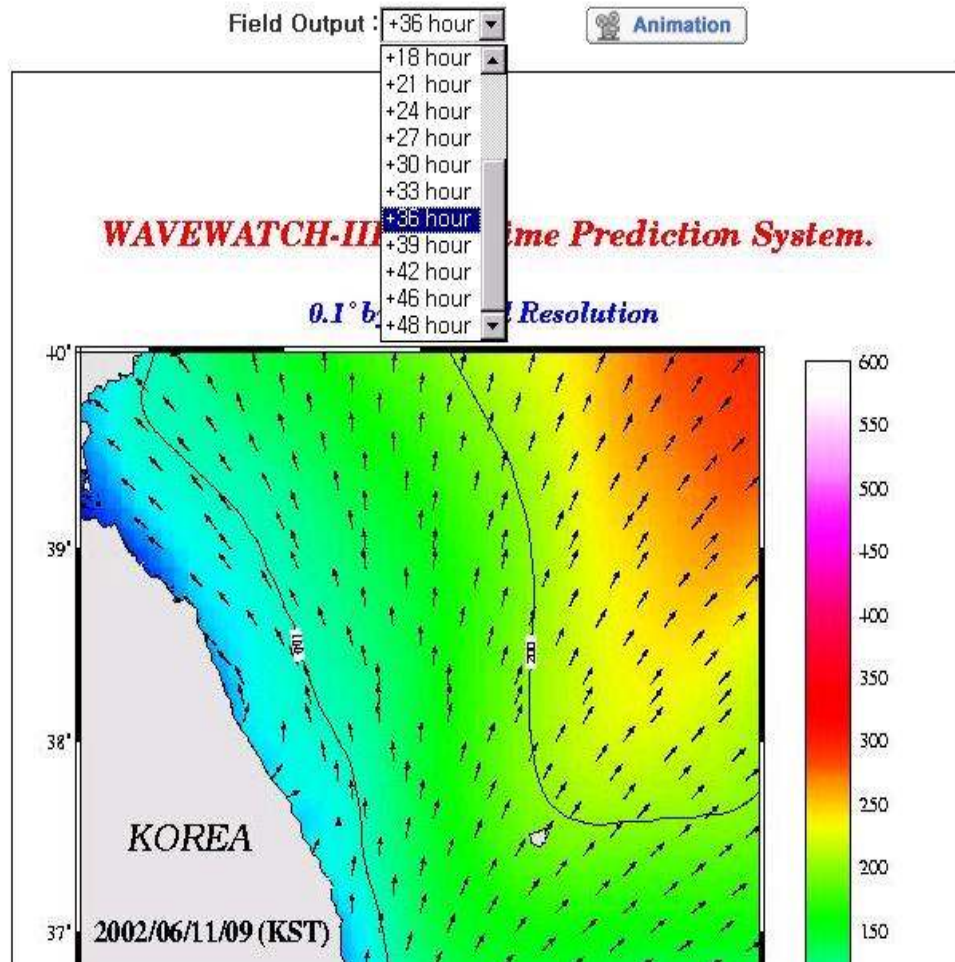


Fig. 6.5.2. The same as Fig. 6.5.1 except for second domain.

» Predicted Wave Height and Wave Direction

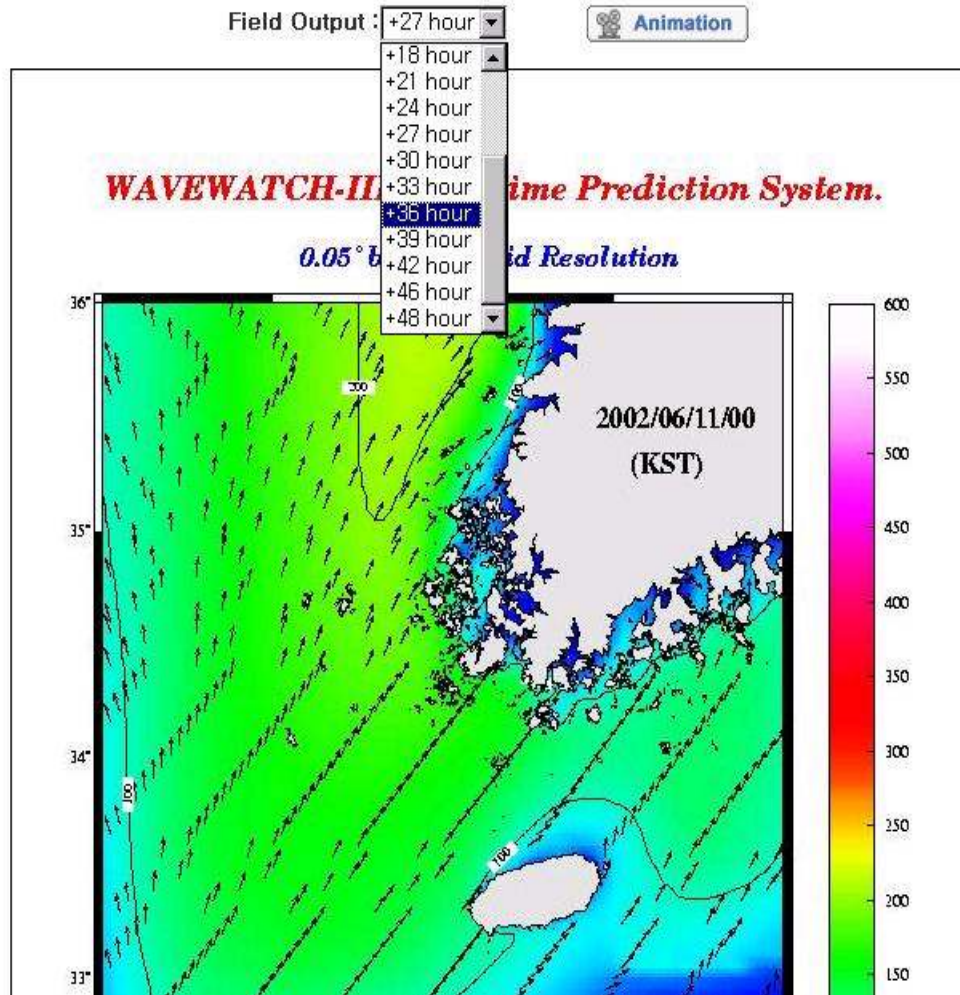


Fig. 6.5.3. The same as Fig. 6.5.1 except for third domain.

3. Global Prediction : Fig. 6.6은 기상청 현업 전구예보 모델인 GDAPS 해상풍을 이용하여 전구파랑 예측 시스템을 시험 운영하는 내용이다. 본 보고서의 연구 범위에 벗어나는 내용이므로 구체적인 검증 결과 및 예측 성능의 언급은 생략한다.

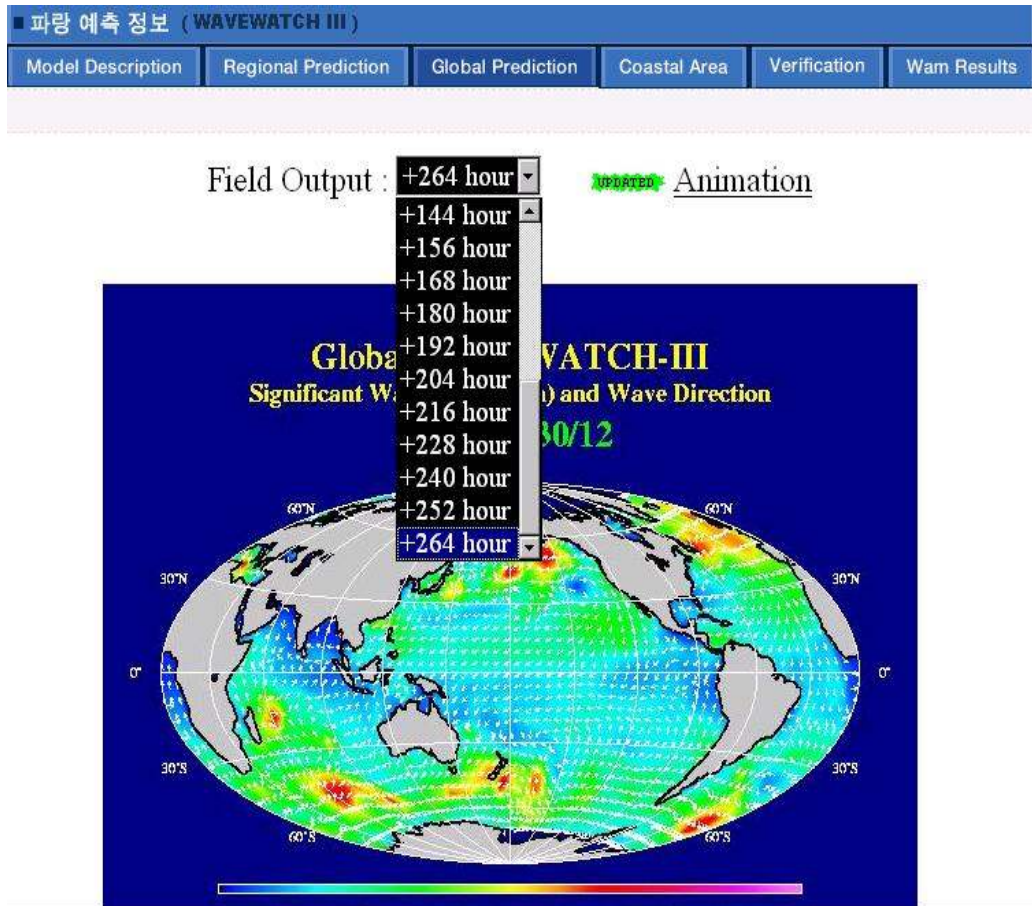


Fig. 6.6. The same as Fig. 6.5.1 except for global area.

4. **Coastal Area** : Third domain 내의 제주해역만(125.5°E-127.5°E , 32.3°N-34.0°N)의 자료만을 선택하여 제주해역 국지파랑 예측 시스템을 구축하였다. 해안선 근처에서의 파의 굴절, 회절 효과를 잘 모사하고 있으며 이 페이지는 현재 제주 지방 기상청 페이지(<http://190.1.51.190>)에도 구축되어 있다.

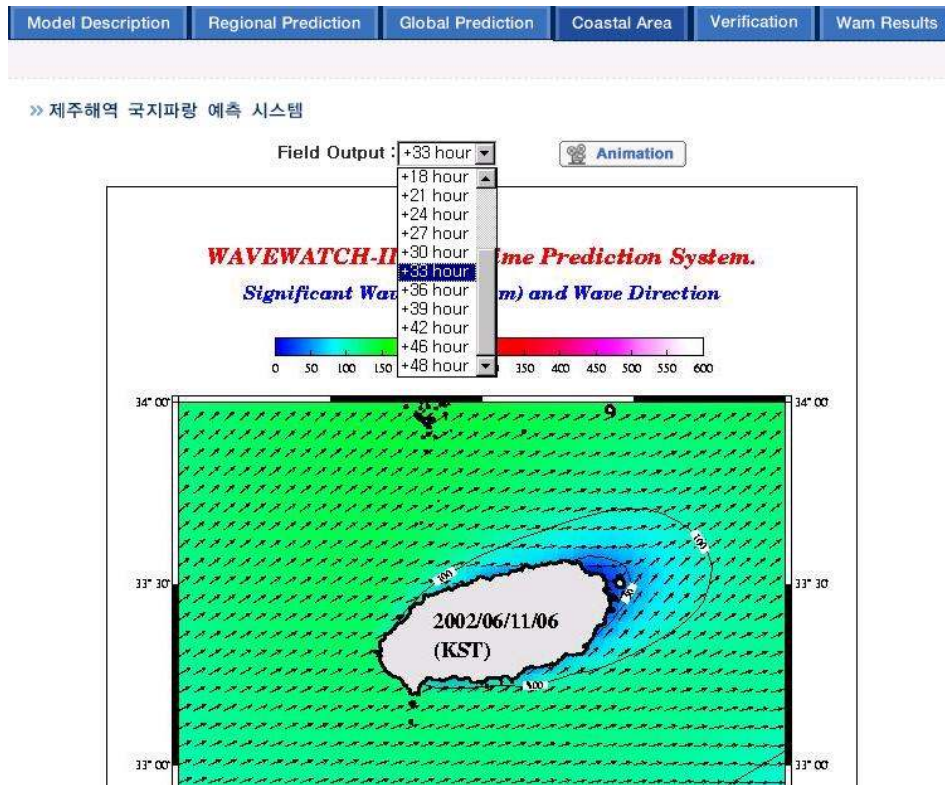


Fig. 6.7. The same as Fig. 6.5.1 except for Cheju-domain.

5. **Verification** : 본 파랑모델의 결과를 부이 자료와의 비교를 통해서 검증한 결과를 보여준다. 이 결과에 대한 자세한 내용은 7절 예보 결과의 검증에서 구체적으로 소개할 것이다.

6. **WAM-Results(NMO)** : 미국 Naval Oceanography Office(NAVO) 에 제공되는 WAM 모델의 결과를 본 WAVEWATCH-III 결과와 비교하기 위해 링크되어 있다.

제 7 절 해상풍 및 파랑예측 시스템의 검증

7.1 예보결과의 검증

2000년 여름에 한국과 일본 근해에 큰 피해를 가한 제 12호 태풍 프라피룬과 제 14호 태풍 사오마이 기간의 해양 자료를 바탕으로, 강한 풍속과 폭풍 해일 발생시의 해상풍과 파고를 제 3 세대 파랑 모형(WAVEWATCH-III)을 이용해 예측하고, 이와 같은 극대치의 바람자료에 의한 파랑 예측 성능과 한반도 주변해역에서의 급격한 수심변화에 대한 모델의 안정성을 진단하였다.

대개의 경우의 태풍은 고위도로 향할수록 해수면 온도가 낮아지면서 고온의 수증기에너지를 공급받지 못하게 되어 태풍의 위력을 상실하지만 태풍 프라피룬과 사오마이는 Fig. 7.1과 같이 한반도 서해상을 따라서 북진하면서 초속 50m/s가 넘는 최강급의 태풍으로 오히려 북진하면서 평년보다 2°C정도 높은 중위도 지역의 해수면 온도의 영향으로 규모가 세졌다.

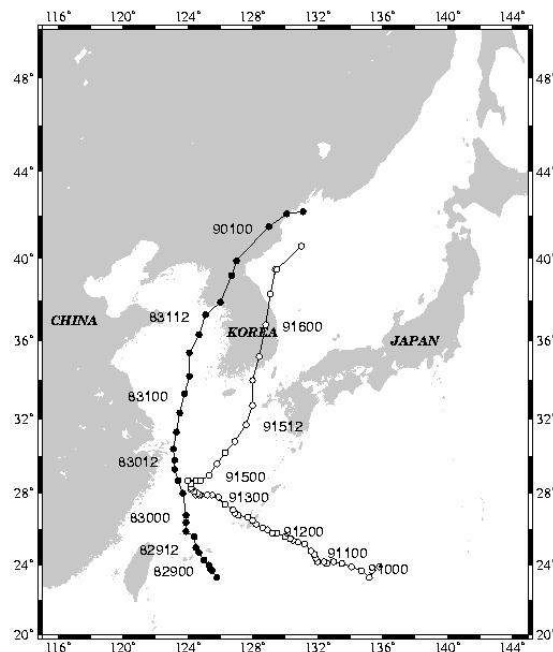


Fig. 7.1. Track of the typhoon PRAPIROON (black circle) and SAOMAI(white circle) and corresponding time(UTC).

이 태풍 기간 중에 관측된 유의 파고는 최대 9.5m에 달하였으며, 8월 31일 태풍이 상하이 연근해를 지날 때에 일본 기상청 부이에서 관측된 유의 파고는

9.5m(Fig. 7.4), 한반도 서해안의 칠발도의 부이에서 관측된 파고는 8m 까지 보고 되었다(Fig. 7.5).

7.1.1. 해상풍 자료의 검증

파랑예측의 신뢰도는 대기모델의 결과인 해상풍 예측 결과에 매우 의존적이다. 그러므로 파랑 모델의 결과를 검증하기에 앞서, 우선적으로 해상풍 예측 결과에 대한 검증을 실시하여야만 한다. 본 모델의 초기자료로 들어가는 해상풍은 PSU/NCAR 에서 개발되고, 현재 기상청에서 현업적으로 운영되고 있는 중규모 기상모델(MM5)의 결과이다. MM5의 해상풍 예측 결과와 기상청에서 운용되고 있는 부이 관측 결과를 비교하였다 (Fig. 7.2, Table 7.4).

CORR(=Correlation Coefficient), BIAS(=mean error), RMSE(Root Mean Square Error), Regression slope 등의 간단한 통계적 기법들이 시계열 검증에 사용되었다. BIAS, RMSE, CORR은 다음과 같이 정의되며, Regression Slope 는 선형 회귀법을 통해 구해진다.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum (Y_{model} - Y_{obs})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (Y_{model} - Y_{obs})^2}$$

$$CORR = \frac{[\frac{1}{N-1} \sum (Y_{model} - \overline{Y_{model}})(Y_{obs} - \overline{Y_{obs}})]}{[\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (Y_{model} - \overline{Y_{model}})^2} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (Y_{obs} - \overline{Y_{obs}})^2}]}$$

Table 7.1. Statistics for the forecasting wind speed at the buoy position marked in Fig. 6.1, and partly shown in Fig. 7.1.

	CORR	BIAS(m/sec)	RMSE(m/sec)	Regression Slope
East China Sea	0.975	-1.024	1.788	0.85
Chilbal island	0.602	1.899	4.051	0.88
Dukjok island	0.654	-0.511	3.233	0.65
Gojae island	0.634	-0.845	3.689	0.59

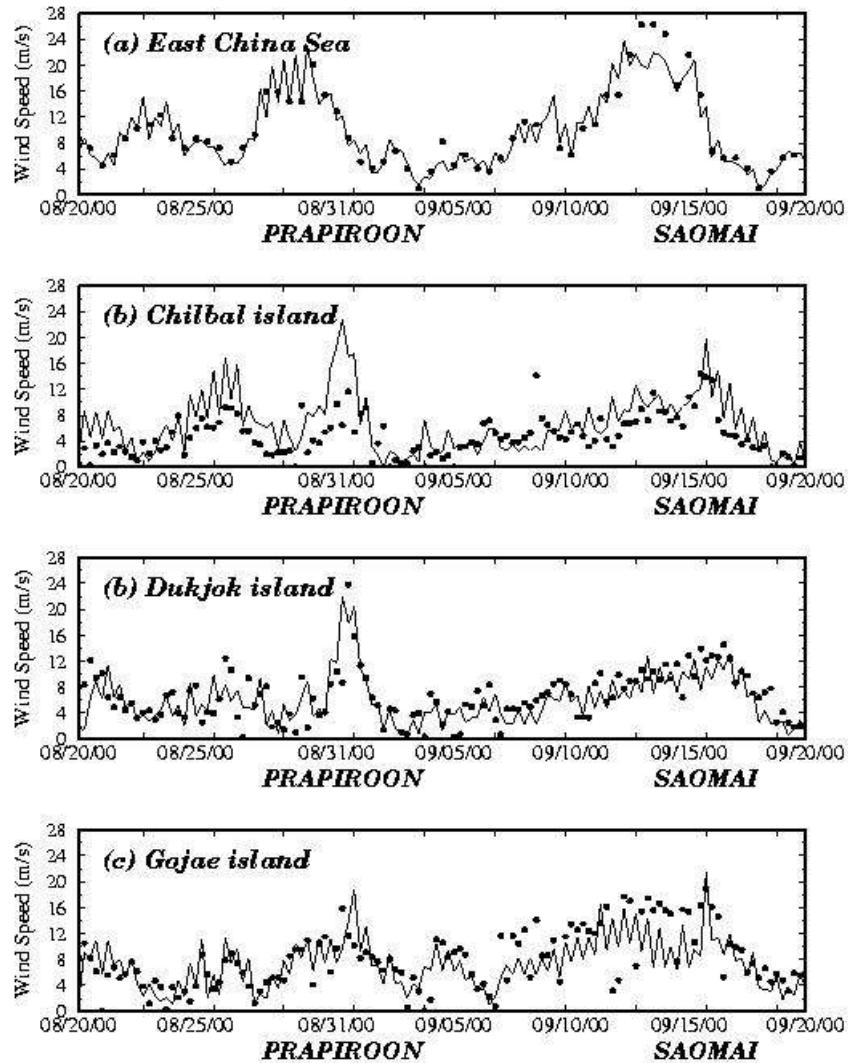


Fig. 7.2. Comparison between observed data of buoy at (a)East-China sea, (b)Chilbal, (c)Dukjok, and (d)Gogae island and wave model input data which is calculated by MM5 model during typhoon event. Black circles indicate sea surface winds by buoy recorder and solid lines indicate predicted sea surface winds by MM5 model.

전체적으로 해상풍 예측 결과와 부이 관측 결과의 상관성이 높게 나타나고 있다. 특히 일본 기상청에서 운영되는 동중국해 지역의 부이 자료와의 비교 결과가 한국 연안의 부이 자료의 결과보다 높게 계산되었고, 이것은 일본 기상청에서 운영되고 있는 동중국해의 부이가 지형적인 영향을 많이 받는 연안이 아닌 비교적 외해에 위치해 있기 때문이라 사료된다. 칠발도를 제외하고 전체적으로 음의 편차를 보임으로써, 예측모델에서 풍속이 다소 약하게 모사 되었다는 사실을 알 수 있으

며, 특히 거제도에서는 태풍 사오마이 기간에 순간적으로 급변하는 풍속변화를 모사하는 부분은 다소 한계점을 나타내었다. 0.5°의 해상도를 가진 본 모델의 해상역에서 수km 이하의 공간 스케일을 가지는 연안지역의 국지적인 해상풍을 모사하는데 있어서는 수치적인 한계점이 존재한다. 그러므로 모델 해상도를 높임으로써, 후속연구들에서는 더 좋은 결과를 나타낼 수 있으리라 사료된다. 하지만, 비교적 태풍 통과시 25m/sec 이상의 강풍도 안정적으로 정확히 예측함으로써, 파랑 예측 모델의 초기장으로서 좋은 자료가 될 수 있을 것이라고 판단되었다.

7.2.2. Field Output 검증

Fig. 7.3은 연구 기간의 동아시아 지역의 유의 파고 등치선이다. 최대 파고를 보이는 지점을 시간별로 연결해보면 Fig. 7.1의 태풍 궤적과 잘 일치함을 알 수 있다. 태풍 중심역의 파고분포는 일반적으로 태풍의 진행방향에 대한 우측반원에서 풍향과 태풍의 진행방향이 같아져 높은 파고가 생기는데, 본 모델에서도 파고 등치선이 태풍 진행방향의 우측으로 편향하는 동일한 결과를 나타낸다.

프라피룬(Fig. 7.3.1)과 사오마이(Fig. 7.3.2) 태풍 기간 중 태풍 중심이 상하이 인근해를 통과할 때(Fig. 10(a,b)), 높은 파고가 해안선에서 반사되고 굴절되는 과정에서 매우 안정적인 해파의 소산이 일어남을 알 수 있다. 기존의 파랑 수치모델에서 7m 이상의 높은 파고가 연안 경계면에서 계산될 때, 수치적 불안정의 문제점 등이 나타났지만, 본 3세대 파랑 모델인 WAVEWATCH-III에서는 해파의 소산을 백파(whitecap)의 항(Tolman, H. L, 1999)으로 잘 처리하고 있다고 사료된다.

태풍 중심이 한국 근해로 접근함에 따라 파고의 등치선이 한국 연안선에 평행하게 잘 배열되고 있음을 확인 할 수 있고(Fig. 7.3(c)), 이러한 결과는 해저면과의 에너지 소산을 잘 반영하고 있는 증거가 된다. 본 결과는 모델의 해상도를 높임으로써, 후속 연구에서 국지적 파랑 특성을 더욱 잘 모사할 수 있을 것이라 기대된다.

Fig. 7.3.2(d,e,f)는 2000년 9월 15일 이후에 태평양으로부터 또 하나의 열대성 저기압이 북진하는 사실을 보여주고 있다.

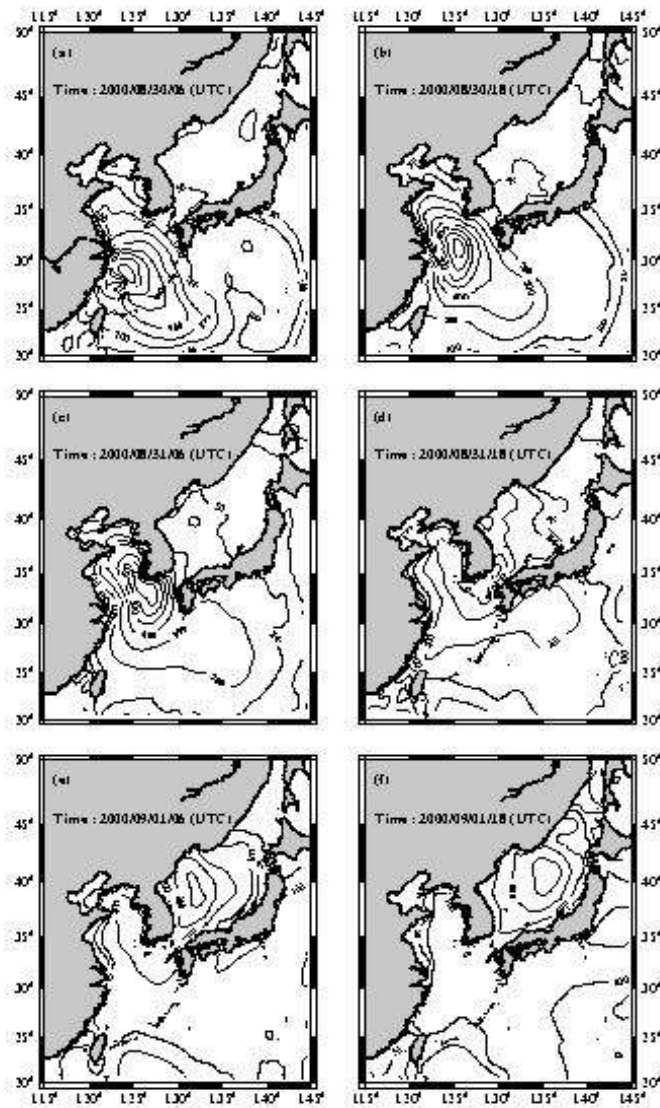


Fig. 7.3.1. Distribution of significant wave height calculated by the WAVEWATCH-III during PRAPIROON event.

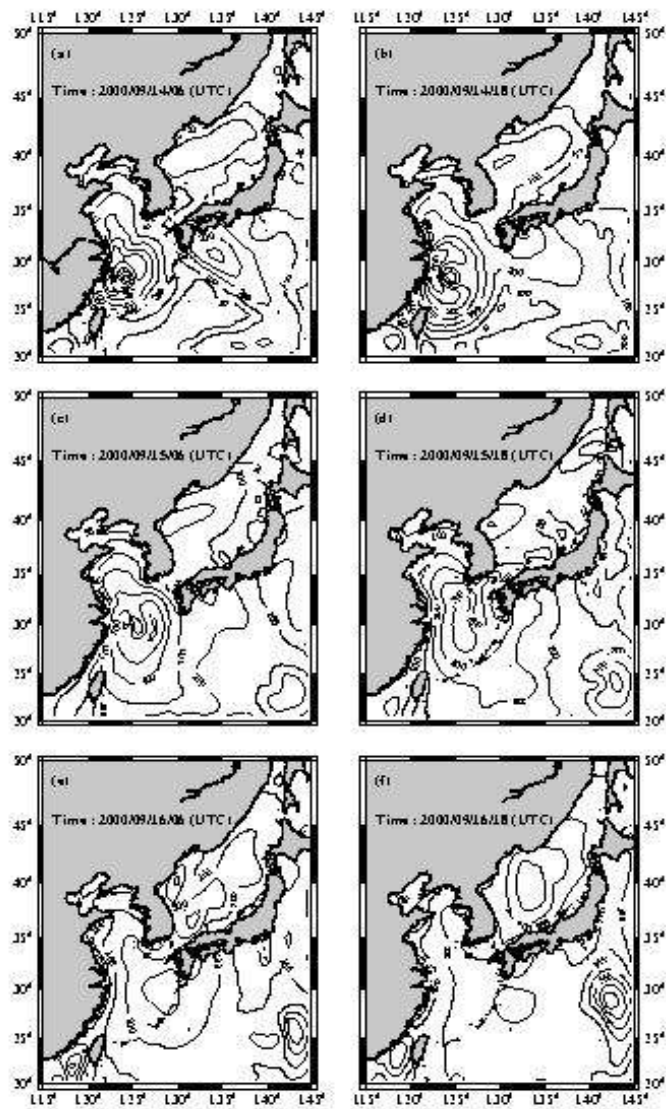


Fig. 7.3.2. The same as Fig. 7.3.1 except for SAOMAI event.

7.2.3. Point Output 검증

특히 계산된 결과는 외해뿐만 아니라 천해에서의 파랑특성을 잘 나타내는 것을 기상청 부이 자료와의 검증에서 확인 할 수 있었다(Fig. 7.4). 지금까지의 다른 연구결과에서는 기상청 부이가 연안에 인접한 천해에 위치하고 있어서 기상청 부이와의 검증 시 만족스러운 결과를 얻지 못하였는 반면, 본 연구결과에서는 유의파고, 파향, 파주기 모두에서 비교적 높은 상관도를 나타내고 있다.

Fig. 4는 동중국해에 위치하고 있는 일본 기상청 Buoy22001 과 WAVEWATCH-III 모델의 유의파고 결과를 비교한 것이다. 동중국해 부이 자료는 매 6시간 단위로 입수되며, 측정단위는 0.5m 이다. 50cm 의 잔잔한 해상상태에서 10m까지의 거친 바다의 파고를 잘 재현하고 있으며, 두 자료의 단순상관계수는 95.18%로 매우 유의미하게 계산되었다.

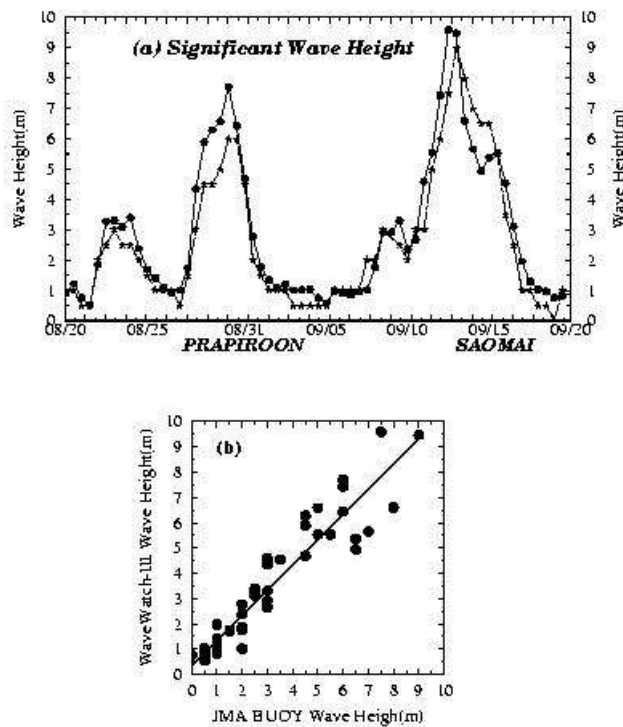


Fig. 7.4. (a) Comparison between observed data (dotted line) of buoy at East China Sea and calculated significant wave height (solid line) calculated by WAVEWATCH-III model during typhoon event. (b) Scatter plot between above two results and linear regression line.

Fig. 7.5는 칠발도(a), 덕적도(b), 거제도(c)에 위치하고 있는 기상청 부이와 모델의 유의파고 결과를 비교한 것이다. 한국 기상청 부이 자료는 매 1시간씩 수집되며, 15분씩 계산되는 본 모델에서도 동일한 관측 시간의 결과 값을 비교하였다. 두 자료의 단순상관계수를 계산한 결과 칠발도는 83.38%, 덕적도는 73.87%, 거제도는 84.53%로 동중국해에 위치해 있는 부이(Fig. 7.11)보다는 낮지만, 매우 유의미하게 계산되었다(Fig. 7.12). 파고 결과에 있어서 해상풍과는 다르게 한국 연해의 각 지점간의 지역간 계산 결과의 차이는 거의 없었고, 단지 유의 파고 계산에 있어서, 모델 결과와 약 50cm 정도 크게 계산됨을 알 수 있다. 자세한 통계적 결과는 Table 7.2에 나타나 있다.

Table 7.2. Statistics for the significant wave height at the buoy position marked in Fig. 6.1, and partly shown in Fig. 7.3 and Fig. 7.4.

	CORR	BIAS(m/sec)	RMSE(m/sec)	Regression Slope
East China Sea	0.952	0.377	0.798	1.00
Chilbal island	0.834	0.290	0.612	0.97
Dukjok island	0.739	0.340	0.613	1.12
Gojae island	0.845	0.466	0.466	1.17

해상풍 예측 결과인 Table 7.1의 통계치와 비교해 보았을 때 흥미로운 몇 가지 사실을 발견할 수 있다. 우선 특징적으로 확인할 수 있는 사실은 한국연안 지역에 있어서, 모델 초기자료로 들어가는 해상풍 검증치 보다 파고 모델 검증 결과 값의 상관계수가 더 높게 계산되었다는 점이다. 칠발도의 경우 해상풍 상관계수는 0.602에서 유의 파고의 상관계수는 0.834로, 덕적도는 0.654에서 0.739로, 거제도는 0.634에서 0.845로 높아짐을 알 수 있었다. 이는 천해의 파고의 높이가 단순히 그 지역의 해상풍의 세기에 따른 직접적인 반응의 결과만이 아니라는 사실을 설명해 준다. 특히 천해역에서 한 지점에서의 파고의 시, 공간적 변화는 외해로부터 전파되어 오며 여러 가지 파의 중첩 형태로 표현되며, 이러한 결과들은 그 지점의 파랑의 변동성에 상당한 양의 변화를 일으킬 수 있을 것이다. 그러므로 천해역에서의 파랑 모델 검증 결과가 모델의 초기자료로 들어가는 해상풍 예측 자료의 검증결과 보다 향상되었다는 사실은 외해에서의 잘 모사된 파의 에너지가 천해역까지 전달되어 오며 효과가 본 파랑 모델에 잘 반영되어 나타남에 기인 하다고 설명할 수 있을 것이다.

또한 해상풍의 풍속이 약 50cm/sec에서 1m/sec 정도 낮게 예측되었던 반면, 유

의 파고는 전체적으로 관측치 보다 약 50cm 높게 계산되었다. 다양한 원인이 존재할 수 있으나, 우선적으로 생각할 수 있는 사실은 천해역에서의 수심의 공간적 변화에 기인한 바닥 마찰의 효과가 조금 적게 모사되었을 가능성이 있다. 이에 대한 좀 더 자세한 수치적 실험 결과를 7.5.1절에서 언급할 것이다. 또한 본 모델에서는 유일하게 해상풍만이 파고를 발생시키는 에너지 입력 항으로 작용하였지만, 우리나라 남, 서해 연안과 같이 강한 조석과 해류가 존재하는 지역에서 해파에 영향을 줄 수 있는 요인인 해류, 조류, 폭풍해일 등의 해황의 다양한 변동성도 파랑모델에 포함되어야 할 것이다. 최근에는 파랑 모델과 조석모델, 순환모델, 폭풍해일 모델간의 접합에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다 (Unna(1942, 1947), Longuet-Higgins and Stewart (1960, 1961), Bretherthon and Garret(1968), christoffersen(1982)). 본 연구에서도 7.5.3절에 해류 효과를 적용시킨 파랑 변조 효과에 관한 정량적인 실험 결과를 분석하였다.

파향의 경우 태풍이 부이 계류 지점을 통과할 때 파향이 급변하는 시기를 모델에서 잘 모사하고 있는 것으로 나타난다(Fig. 7.6). 파주기(Fig. 7.7)의 경우도 주기적 변동 패턴은 거의 일치하나, 전체적으로 절대적인 값들에 있어서는 비교적 큰 차이를 보인다. Christoffersen(1982)은 수심과 해류의 공간적 변화가 파 인자 중 특히 파향과 파주기에 큰 영향을 미친다고 설명하고 있다. 본 연구에서도 수심 변화에 대한 공간적 해상도를 높이고, 조류, 해류 성분을 모델 초기조건에 첨가하면 파향과 파주기를 보다 잘 모사할 수 있을 것이라고 사료된다.

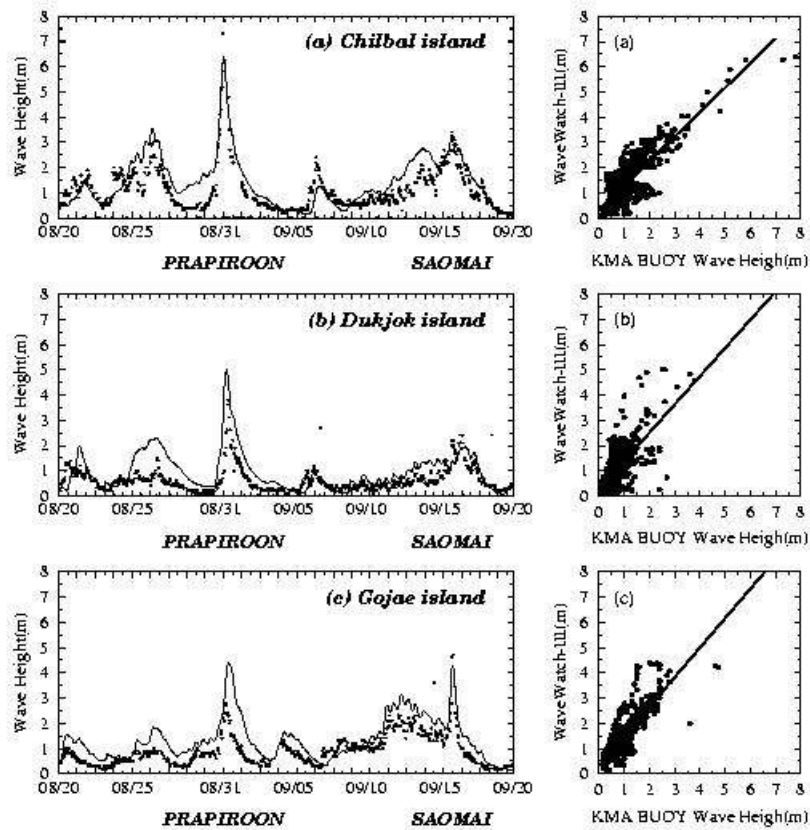


Fig. 7.5. (Left Panel) Comparison between observed of buoy at (a) Chilbal, (b) Dukjok, and (c) Gaujae island and calculated significant wave height by the WAVEWATCH-III model during typhoon event. Black cycles indicate significant wave height by KMA buoy and solid lines indicate significant wave height by WAVEATCH-III. (Right panel) Scatter plot between above two results, and linear regression line.

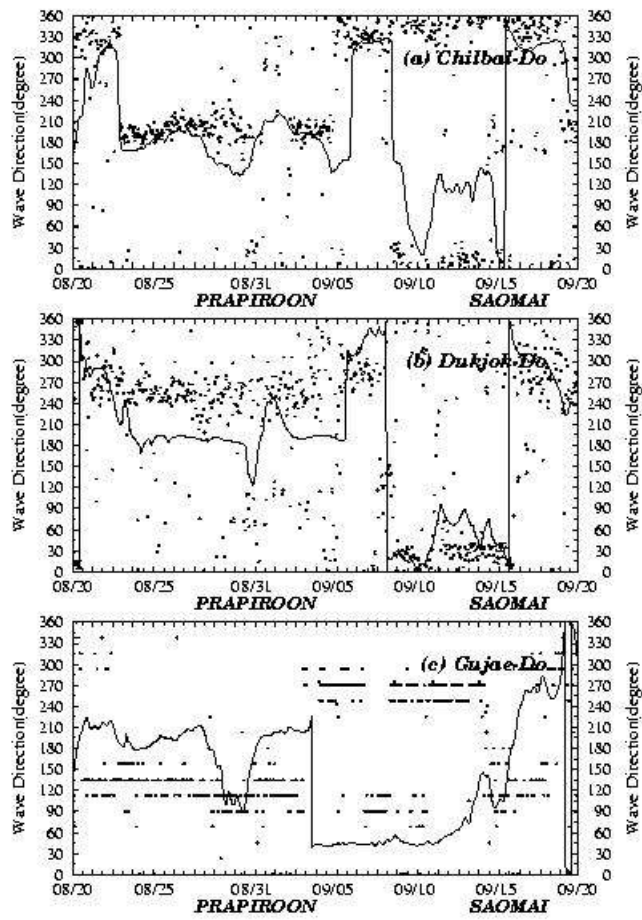


Fig. 7.6. The same as Fig. 7.5 except for wave direction.

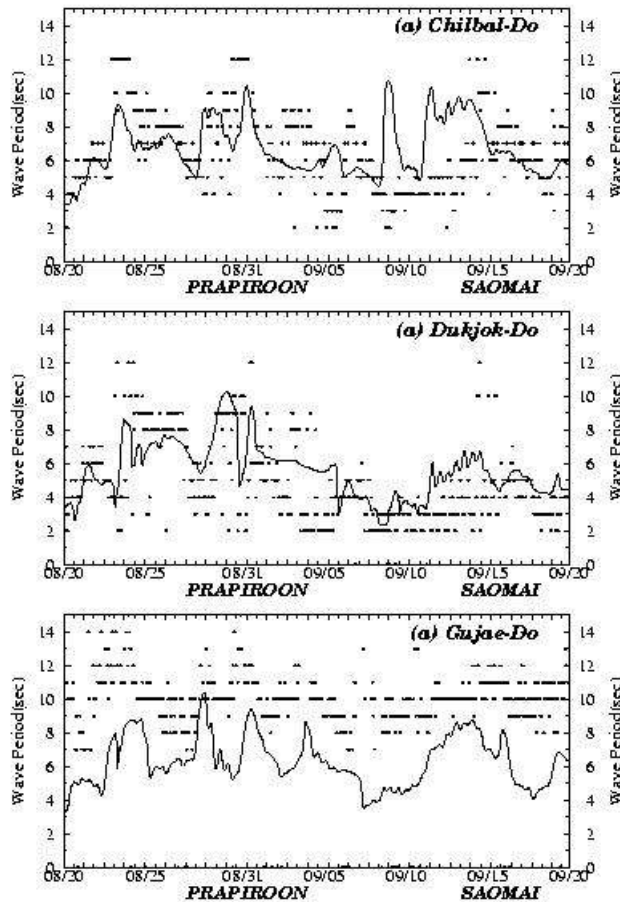


Fig. 7.7. The same as Fig. 7.5 except for wave period.

7.2.4. 예보 시간대별 유의 파고 검증

매일 2회에 걸친 48시간까지의 예보 시간대별 파랑예측 모델의 성능 평가를 위해 기상청 부이 자료와의 예측 시간대별 검증을 실시해 보았다. 비교적 풍향과 풍속의 변화가 심한 봄철의 기상장 중에 2002년 3월 자료를 중심으로 해상풍, 파고, 파향에 대한 예측 모델에 대한 검증을 실시해 보았다.

Fig. 7.8은 2002년 3월의 약 한달 동안의 해상풍 예측 결과를 예보 시간별로 나타낸 것이다. 전체적으로 해상풍의 풍향과 풍속이 부이 자료와 일치하는 형태를 보이고 있으며, 예보시간이 증가함에 따라 상관성이 크게 떨어지지 않는 형태를 보인다. 이러한 결과는 유의파고 검증에서도 잘 나타나며 (Fig. 7.9) 이러한 결과는

파랑 단기 예보의 성능향상에 있어서 매우 고무적인 결과이다.

Fig. 7.10은 예보 시간별 파향 벡터 결과를 나타낸다. 부이 관측자료와 비교해보았을 때, 해상풍 예측과 유의 파고 예측에 비해서 예측 성능이 크게 떨어진다는 사실을 알 수 있다. 해류, 조류 등에 의한 파향 변조효과에 대한 내용은 7.5.3절 수치실험의 해류, 조류에 의한 파랑 변조효과에서 자세히 언급되어 있다.

Fig. 7.11은 4월 한달 동안의 평균 예보 시간별 유의 파고 상관성을 나타낸 결과이다. 기존의 WAM 결과에 비해서 48시간대까지 상관지수가 크게 떨어지지 않는 예측 성능을 보이고 있으며, 천해역에 위치해 있는 부이 자료와의 비교임에도 불구하고, 전체적으로 0.7-0.8 사이의 높은 상관 지수를 유지하고 있다.

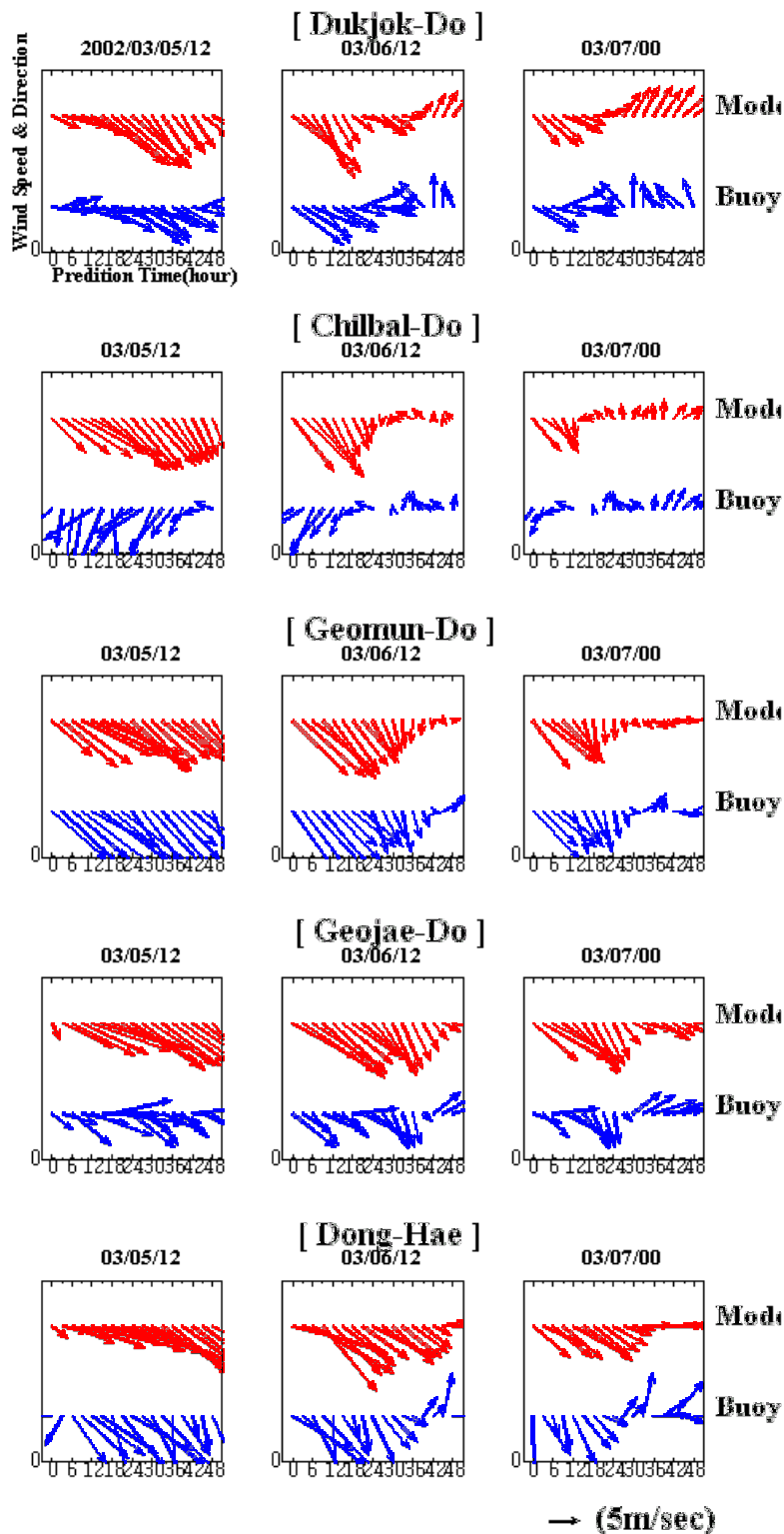


Fig. 7.8. Sea surface wind speed and direction by the model output and 5 point buoy observation data according to prediction time.

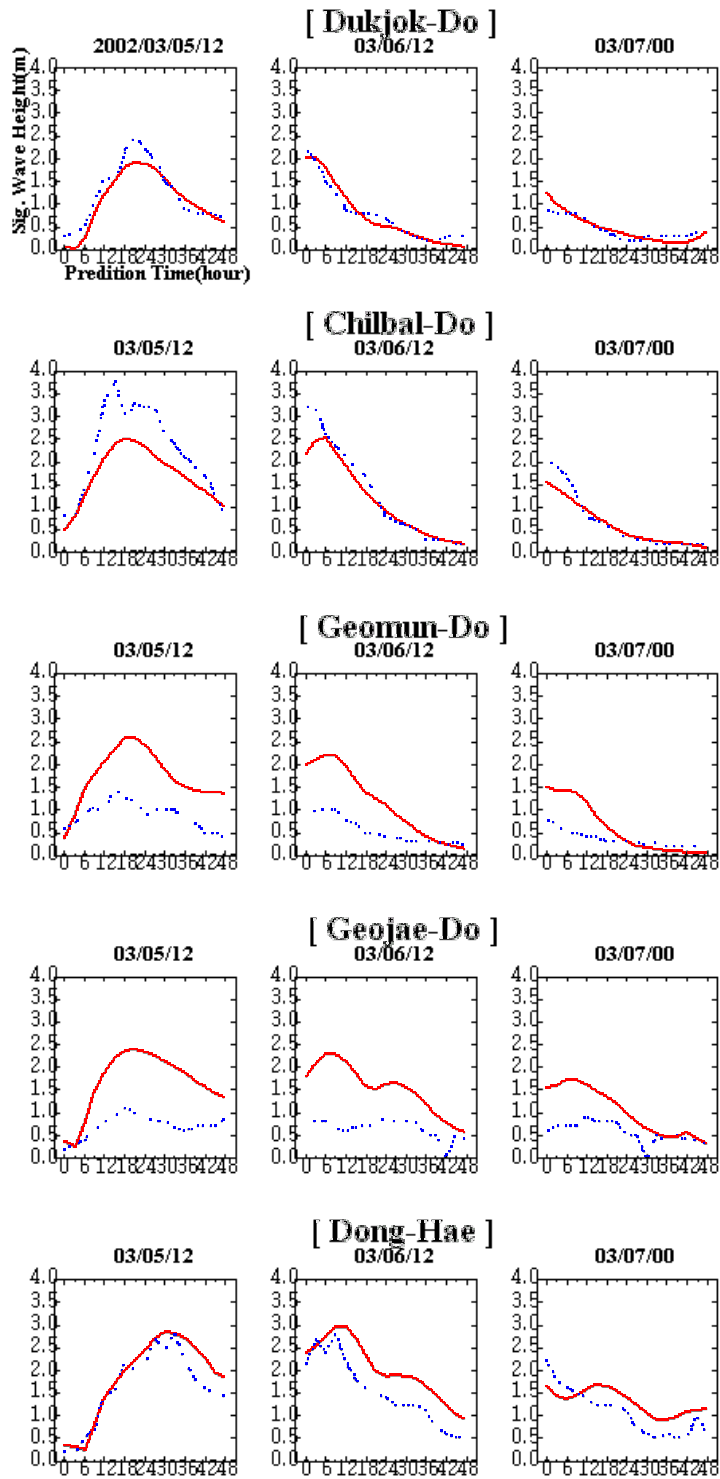


Fig. 7.9. The same as Fig. 7.8 except for significant wave height.

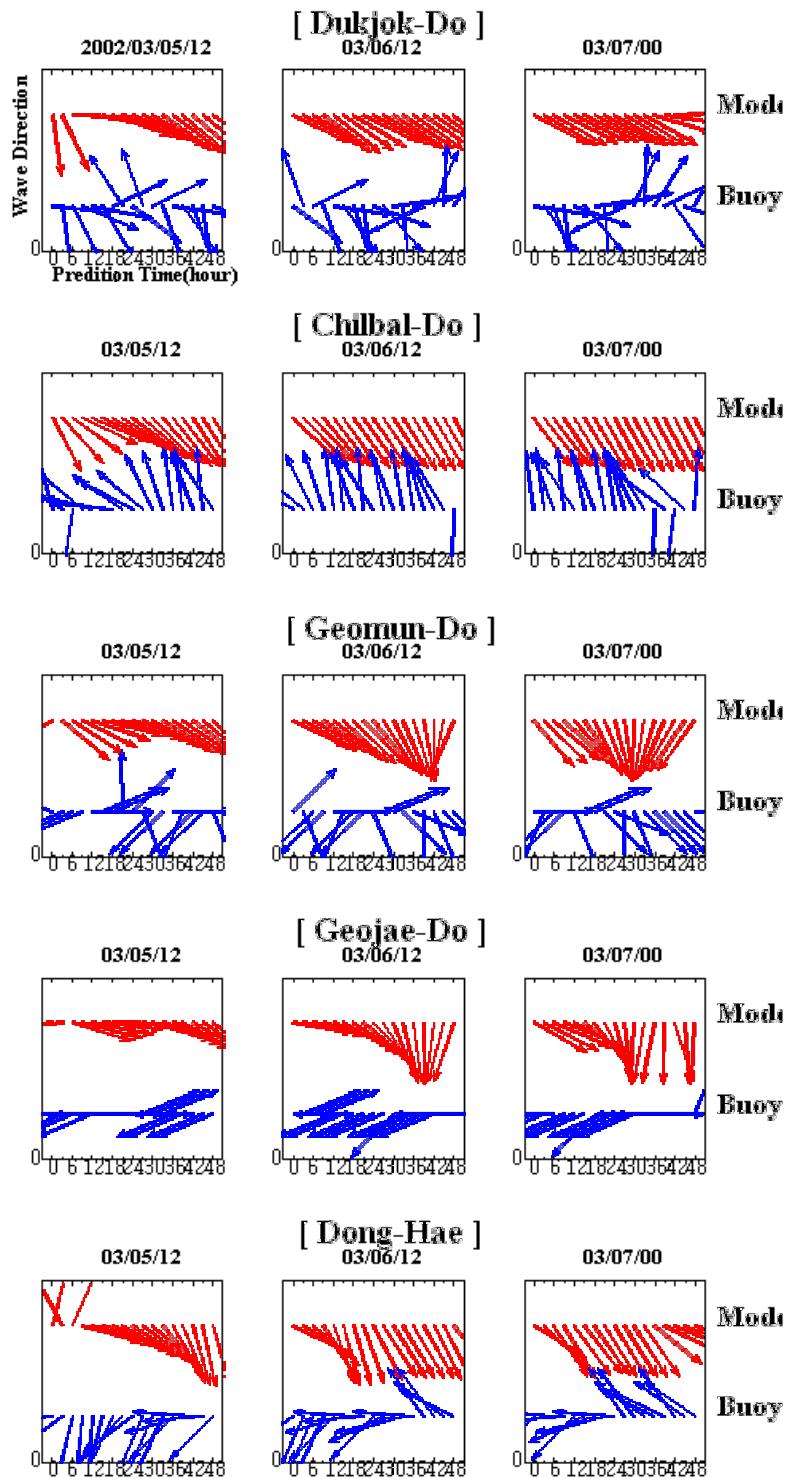


Fig. 7.10. The same as Fig. 7.8 except for wave direction.

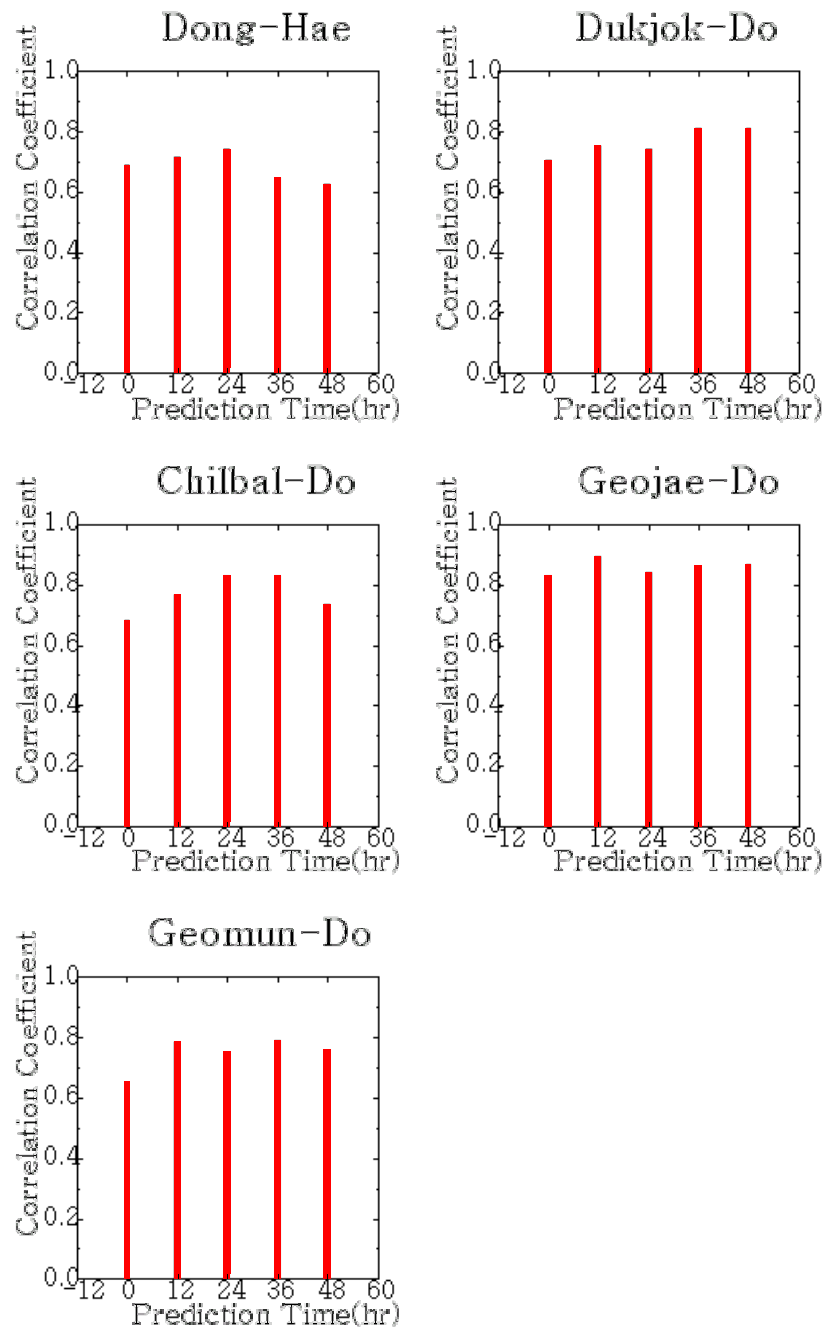


Fig. 7.11. Correlation coefficient between model output and observation buoy data according to prediction time during April in 2002.

제 8 절 파랑모델의 민감도 수치 실험

8.1. 해저마찰 민감도 실험

2000년 태풍 기간동안의 모델 결과 검증을 통해 제 3세대 파랑모형인 WAVEWATCH-III 는 해저면과의 에너지 소산을 잘 모사하고 있다는 사실을 알 수 있었다(Fig. 7.3)

해저면 마찰항은 다음 식으로 표현된다.

$$S_{\text{bot}}(k, \theta) = 2\Gamma \frac{n-0.5}{gd} N(k, \theta)$$

Γ 는 경험 상수이며, n 은 군속도와 위상속도의 비로써, $n = \frac{1}{2} + \frac{kd}{\sinh 2kd}$ 로 표현될 수 있다. 본 실험에서는 수심 d 의 효과를 모델에서 얼마나 민감하게 반영하는지의 여부를 판단하기 위해 가상의 수심을 적용시켰을 때와 실지형을 적용했을 때의 결과 차이를 비교해 보았다.

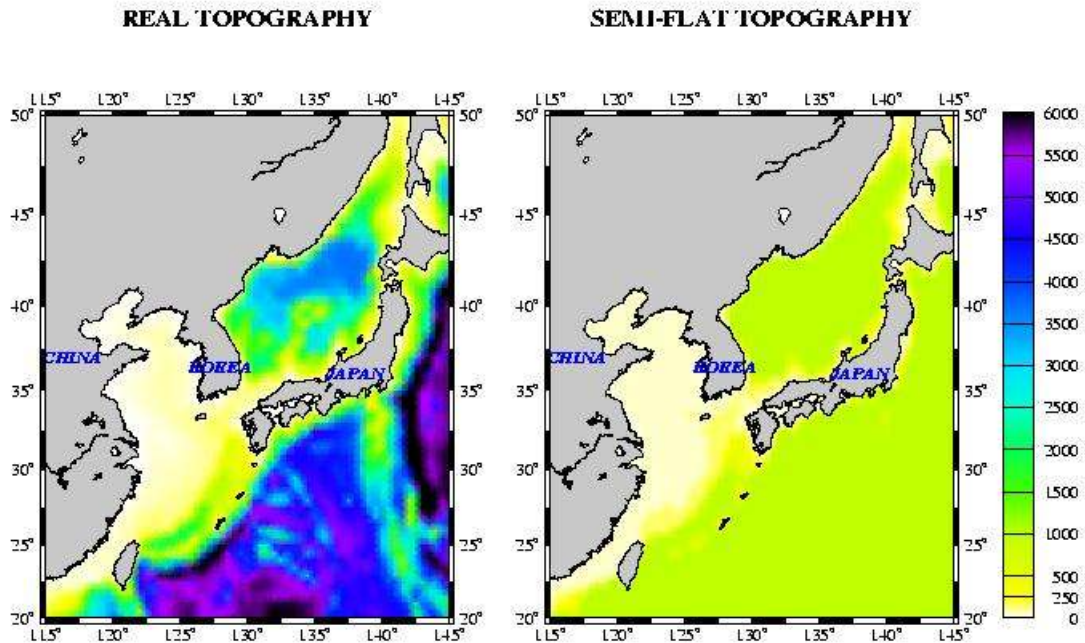


Fig. 8.1. Real topography (Left) and semi-flat topography (Right) for numerical experiment about bottom friction effect.

Fig. 8.1 의 semi-flat topography 는 공간적으로 변화는 바다마찰의 효과를 인위적으로 감쇄시키며 비선형 불안정과 같은 수치적 에러를 최대한 감쇄시키기 위해 50m부터 1000m 까지 50m 간격의 평탄한 지형으로 구현되었다. 태풍 프라피룬과 사오마이 통과 시 평탄한 해저 수심을 적용하였을 때의 파고와 실제 해저 지형을 적용하였을 때의 파고의 차이를 계산한 결과는 Fig. 20 과 같다.

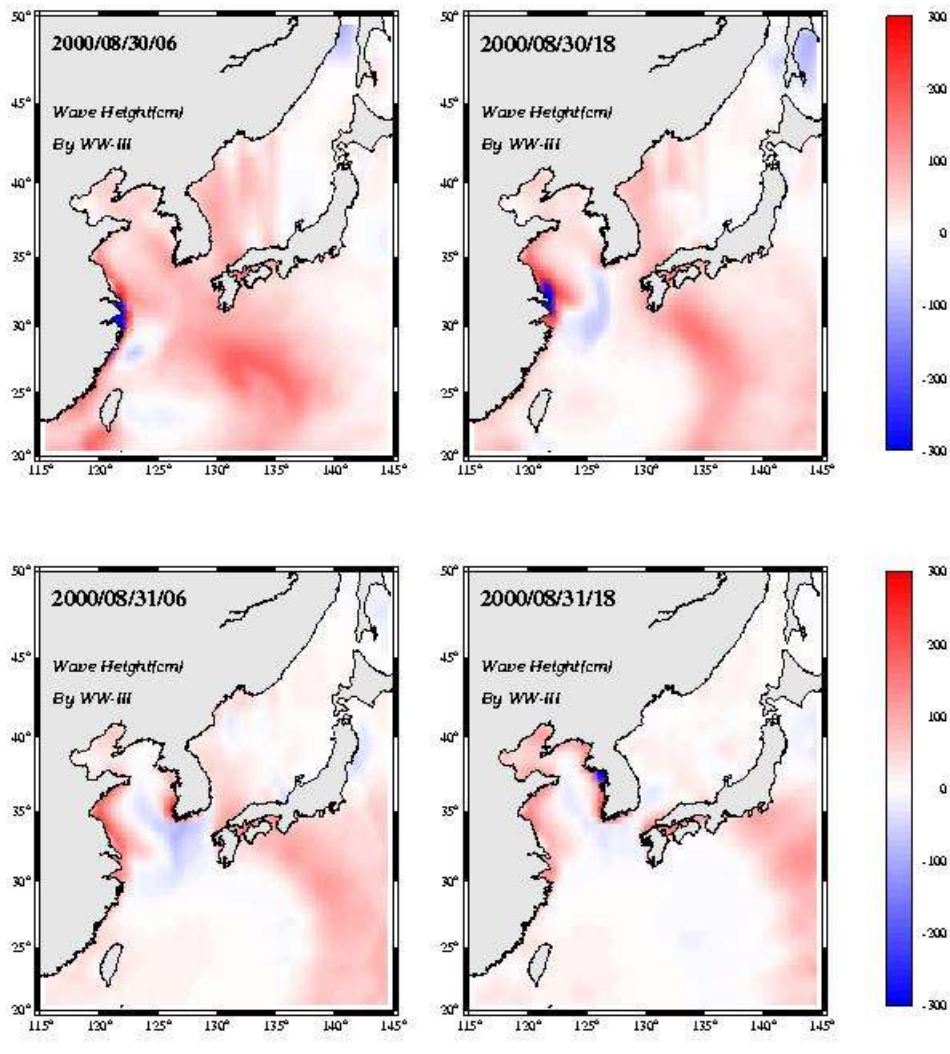


Fig. 8.2.1. The difference between model output applied in real topography and semi-flat topography during PRAPIROON typhoon event. Red color indicates over-estimating result applying in semi-flat topography.

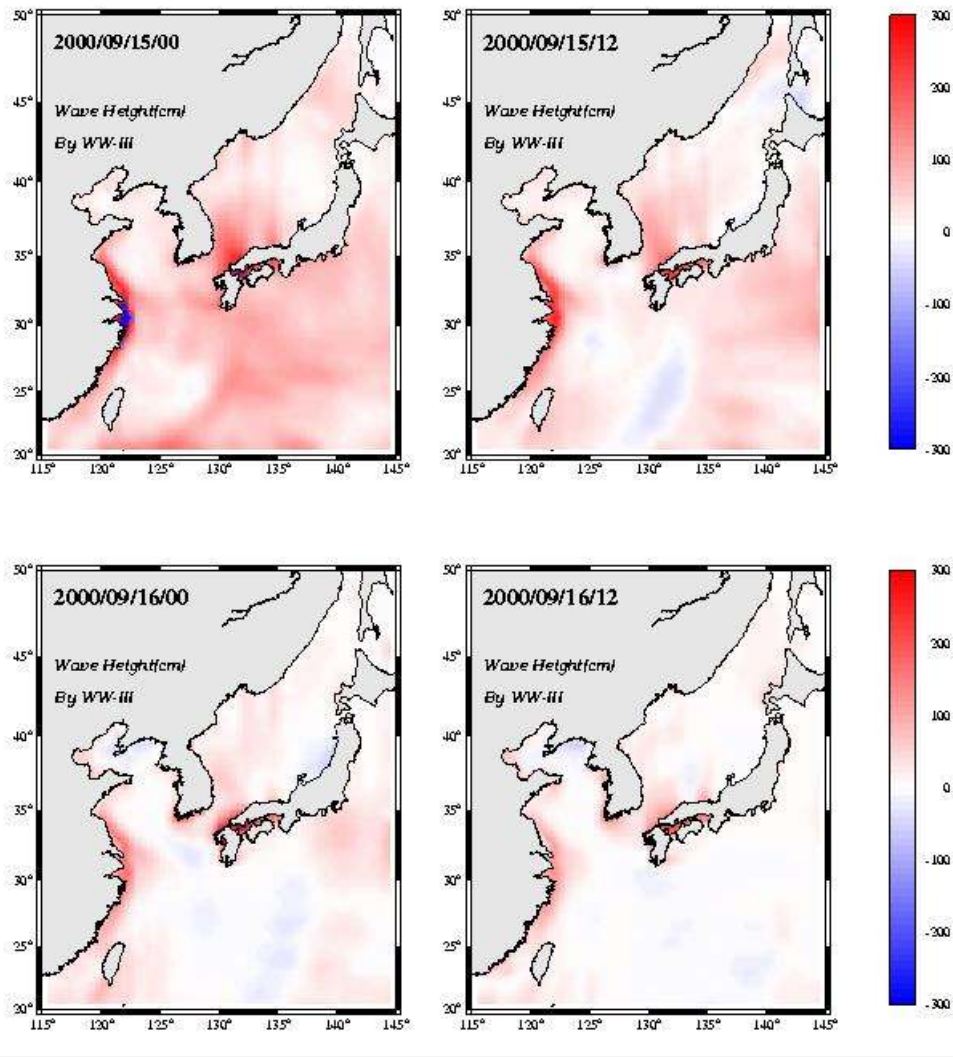


Fig. 8.2.2. The same as Fig. 8.2.1 except for SAOMAI event.

평탄한 지형을 적용했을 때는 Fig. 8.2에서 확인할 수 있는 것처럼 바닥 마찰의 효과가 감소되기 때문에 파고가 높게 계산되었다. 실제 지형을 적용했을 때보다 상당히 연근해나 우리나라의 서해, 일본 남쪽 열도 부근에서의 파고가 최대 3m 이상 높게 계산된 경우도 존재하였고 특히 이러한 지역은 공간적으로 최대 50m 정도의 해저면 변화가 큰 지역임을 확인할 수 있었다. 본 수치실험의 결과를 통해 정밀하고 세밀한 지형자료를 확보 또한 파랑모델의 성능을 향상시킬 수 있는 중요한 결론을 얻을 수 있다.

8.2. 공간격자 민감도 실험

제주해역을 중심으로 한 third domain 에서의 수치모델 공간 해상도에 따른 파랑 인자에 대한 결과 차이를 비교해 보았다. 다른 모든 인자들은 동일하게 하였으며, 초기 조건으로 들어가는 해상풍과 수심자료는 0.2°의 자료를 가지고 해상도가 높아짐에 따라 단순 선형 내삽을 통해 사용하였다. 각각의 격자 개수와 실험 영역은 Fig. 8.3과 같다.

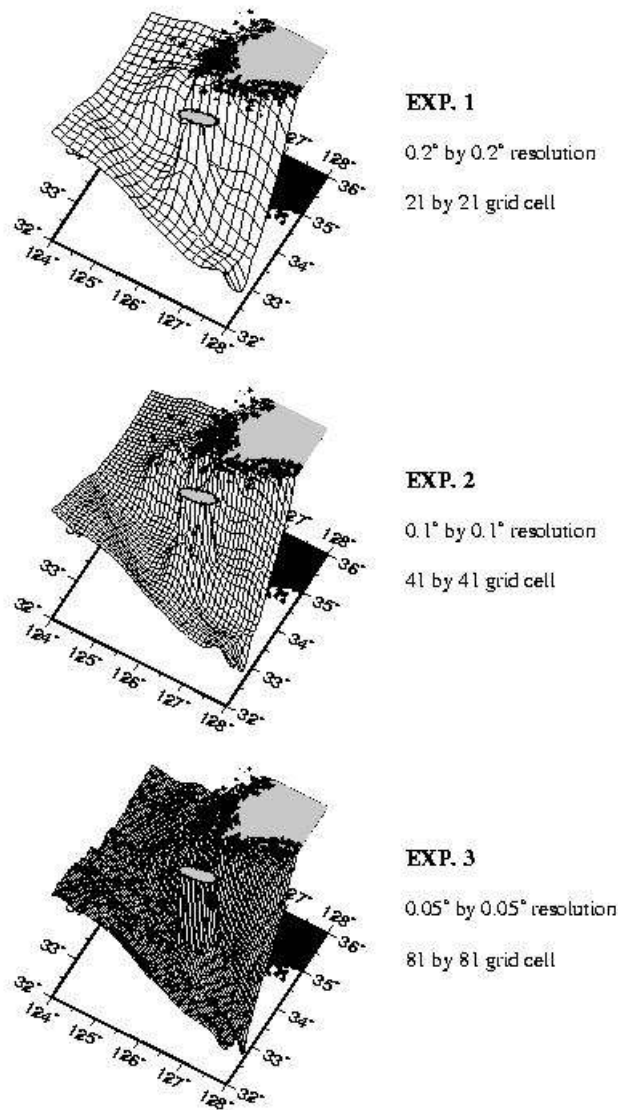


Fig. 8.3. 3-D mesh plot of the bottom topography applied in 0.2°(EXP.1), 0.1°(EXP.2), and 0.05°(EXP.3), respectively.

2000년 8월 20일부터 9월 20일 까지 태풍 통과 시 각각의 공간 해상도에 따른 계

산된 파고의 높이와 부이 관측 자료의 결과를 비교해 보았다. Fig. 8.4 에서 알 수 있듯이, 해상도가 높아짐에 따라 모델의 성능이 크게 개선되고 있는 경향을 찾아보기 힘들다. 이는 초기조건의 공간적 변동성이 반영되지 않을 시에 단순 분해능의 효과가 모델 결과에 미치는 영향이 아주 미비하다는 결과를 나타낸다.

또한 본 실험에서 9월 초순의 두 태풍 기간의 사이에 해상풍의 세기가 약할 시에는 부이 관측 자료와 많은 차이를 나타내고 있다. 약 1m 정도의 낮은 파고를 잘 재현하지 못하는데, 이 결과는 바람이 약할 시에 외해로부터 전파되어져 오는 파랑 정보가 본 모델에 첨가되어져 있지 않기 때문이라고 사료된다. 즉, 태풍 통과시에는 강한 바람에 의해 파고가 직접적으로 반영되는 단순 해파의 성격이 짙기 때문에 좋은 결과를 나타내는 반면, 바람이 약할 시에는 파랑인자에 외해로부터 전달되어 오는 너울 등의 파의 효과가 많이 반영되기 때문에 천해역의 지역 파랑모델에서는 반드시 Nesting 의 기법을 통해 외해의 파랑정보가 모델에 반영되어야 함을 확인할 수 있었다.

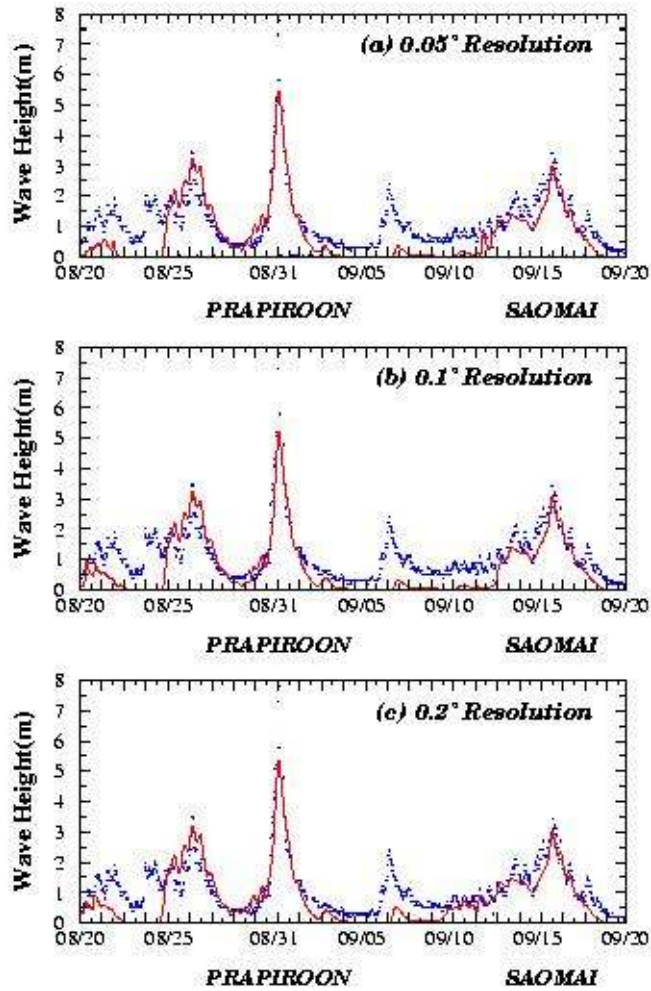


Fig. 8.4. Comparison between observed significant wave height of the buoy at Chilbal island (dotted line) and calculated significant wave height (solid line) by the WAVEWATCH-III model in the (a) 0.05°, (b) 0.1°, and (c) 0.2° resolution, respectively, during typhoon event.

8.3. 해류, 조류에 의한 파랑변조 효과 분석

서론에서 언급된 것과 같이 파랑모델을 지배하는 기본적인 방정식은 다음과 같다.

평균흐름(U)에 대해 파랑은 에너지 스펙트럼 형태로 표현될 수 있으며, 그 스펙트럼의 요소는 파의 방향(θ), 파수(k), 절대주파수(ω), 상대주파수(σ) 및 평균 해수면 깊이(d) 등으로 정의되고, 그 요소들은 서두에서 밝혔던 Dispersion relation(1) 과 Doppler equation(2) 을 기본 방정식으로 한다.

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \quad (8.1)$$

$$\omega - k \cdot U = \sigma \quad (8.2)$$

평균 흐름인 해류, 조류 등에 의한 효과가 파랑 에너지에 미치는 영향에 대한 이론적인 부분은 그동안 많은 학자들에 의해서 체계적으로 연구되어져 왔다 (Peregrine(1976), Christoffersen(1982), Tolman(1991), Oh and Kim(1992)).

절대주파수(ω)와 파향(θ)을 아는 경우, 파수(k) 또는 상대주파수(σ)에 대한 이론적인 몇 가지 해가 구해진다.

Fig. 8.5는 Christoffersen(1982), Oh and Kim(1992) 에 의해 제시된, 주어진 절대주파수와 파향, 수심에 대한 Dispersion relation 식과 Doppler equation 의 해이다. 평균 흐름이 없는 경우 k_{o1}, k_{o2}, k_{o3} 는 일정 수심인 h_1, h_2, h_3 에 대한 파수를 나타내며 ω_o 는 절대주파수를 각각 나타낸다. 평균 해류인 유속이 존재할 때, 평균 유속 U 는 파수에 대한 선형 방정식의 기울기로 표시될 수 있다. 식(8.2) 의 왼쪽 항은 기울기가 U 이고 $\omega-k$ 축상에서의 y 절편이 ω_o 로 산정된다. Fig. 8.4에서 k_1, k_2, k_3 는 해류가 존재할 때 일정 수심인 h_1, h_2, h_3 의 파수가 된다.

파향에 대해 해류가 반대 방향으로 흐를 때에는 (Fig. 8.5(a)) 해류가 없을 때와 비교해 볼 때 일정 파수에 대해 파 주파수가 커짐을 알 수 있다. 즉 파장과 파주기는 작아짐을 이론적으로 설명할 수 있다. 또한 이 경우에는 유속이 강해짐에 따라 임계 파수 k_c 와 그에 해당하는 임계 주파수가 생긴다.

파향과 같은 방향으로 해류가 흐를 때에는 (Fig. 8.5(b)) 반대로 일정 파수에 대해 파주파수는 작아지며, 파장과 파주기는 커짐을 알 수 있으며, 임계 파수는 나타나지 않는다.

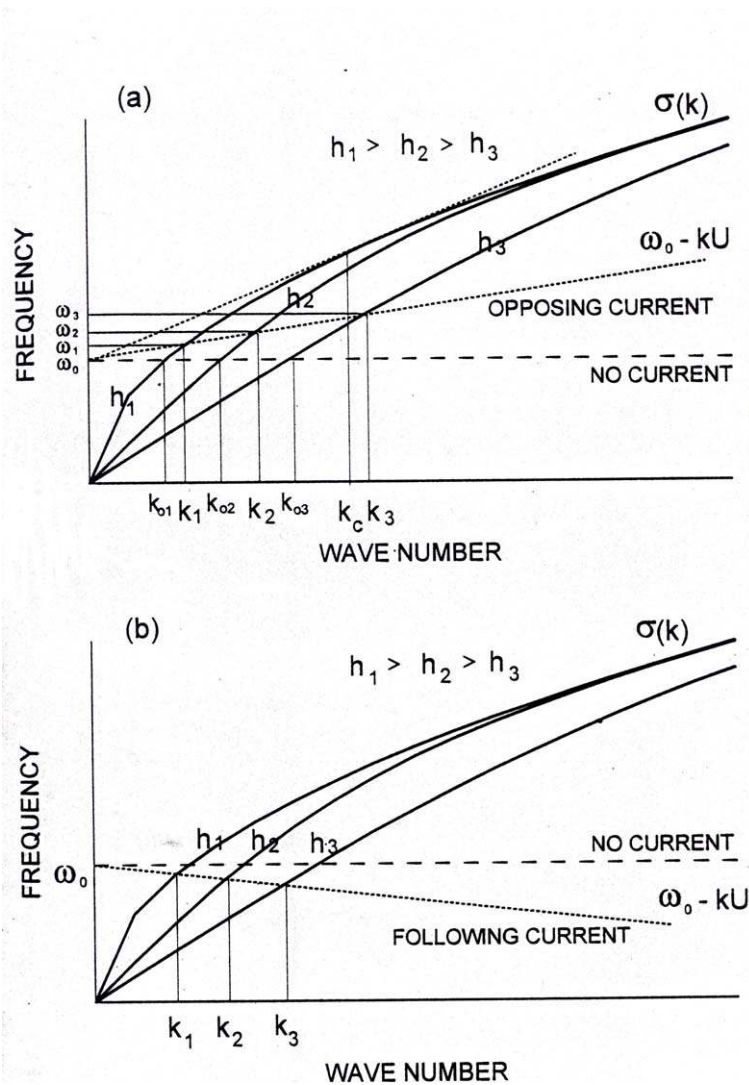


Fig. 8.5. Wave number and frequency relationship with opposing(a) and following(b) current. (after Oh and Kim, 1992)

본 장에서는 기상청 해양기상 관측부이 자료의 파랑인자에서 나타나는 해류, 조류에 의한 파랑인자의 변조 형태를 분석하였으며, 이를 기반으로 WAVEWATCH -III 파랑 모델을 이용하여 평균 해류장이 있는 상황을 적용시켜 파랑변조에 대한 수치 실험을 실시하였다.

해양기상 관측부이의 분석기간은 비교적 풍향과 풍속의 변화가 심한 2001년 9월, 10월의 가을철 자료를 선정하였다. 현재까지 운영되고 있는 해양기상 관측 부이 위치와 정보는 Fig. 8.6과 Table 8.1에 정리되어 있다.

Table 8.1 The information of buoy position operating by KMA.

부이	위치
덕적도 부이	덕적도 서방 15km, 37°14'N, 126°01'E
칠발도 부이	칠발도 북서방 2km, 34°48'N, 125°47'E
거문도 부이	거문도 동방 14km, 34°00'N, 127°30'E
거제도 부이	거제도 동방 16km, 34°46'N, 128°54'E
동해 부이	동해시 동방 70km, 37°32'N, 130°00'E

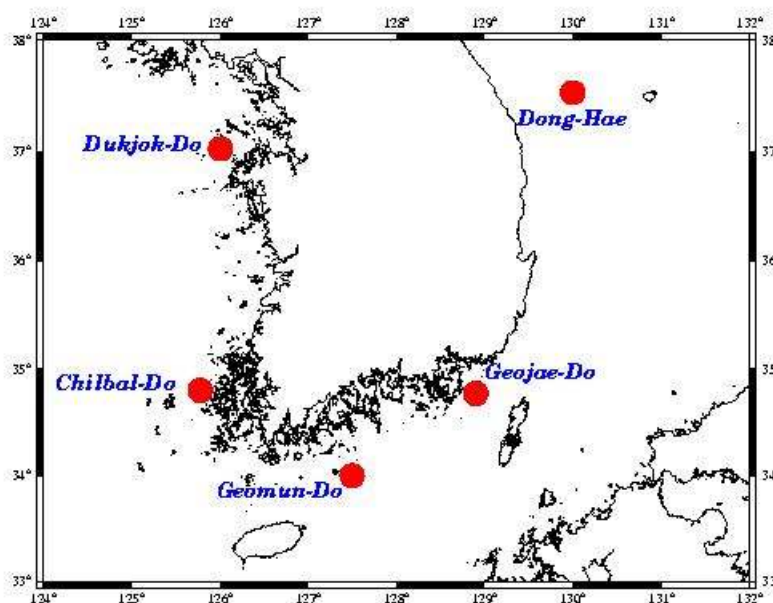


Fig. 8.6. The position of KMA ocean and meteorology buoys.

5개의 기상청 해양기상 부이에 대해 비교적 결측이 많았던 거문도 부이를 제외한 칠발도, 덕적도, 거제도, 동해 부이에 대해서 몇 가지 시계열 자료 분석을 실시하였다.

일반적으로 풍파의 경우 해상풍에 의해서 파의 생성과 전달이 크게 좌우 받는다. 부이자료에 나타난 풍속과 유의 파고의 일대일 상관성을 비교하기 위해 모든 자료를 우선적으로 $\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$ 식에 의해 평균과 표준편차를 각각 0과 1로 산정하는 표준화를 실시한 후 모든 분석이 이루어졌다.

지역에 따른 풍속과 유의 파고 사이의 상관성 분석 결과는 Fig. 8.7 과 같다.

풍속이 셀 때 파고가 높아지며, 풍속이 약할 때 파고가 낮아지는 일반적인 현상이 부이 자료에서 잘 나타난다. 칠발도에서는 0.69, 덕적도에서는 0.66, 거제도에서는 0.72의 상관성을 보이며, 위 세 지점에서는 모두 최대 풍속이 발생한 후 2시간 후에 최대 파고가 나타난다는 사실을 교차 상관계수 분석을 통해서 확인할 수 있었다. 비교적 외해에 위치해 있는 동해 부이에서는 상관계수가 0.74로 천해에 위치한 위의 세 지점보다 풍속과 파고간의 상관성이 약간 더 높았으며, 풍속에 대한 파고의 반응시간도 충분히 큰 취주 거리를 가질 수 있는 환경으로 인해서 한시간이 늦은 3시간으로 계산되었다.

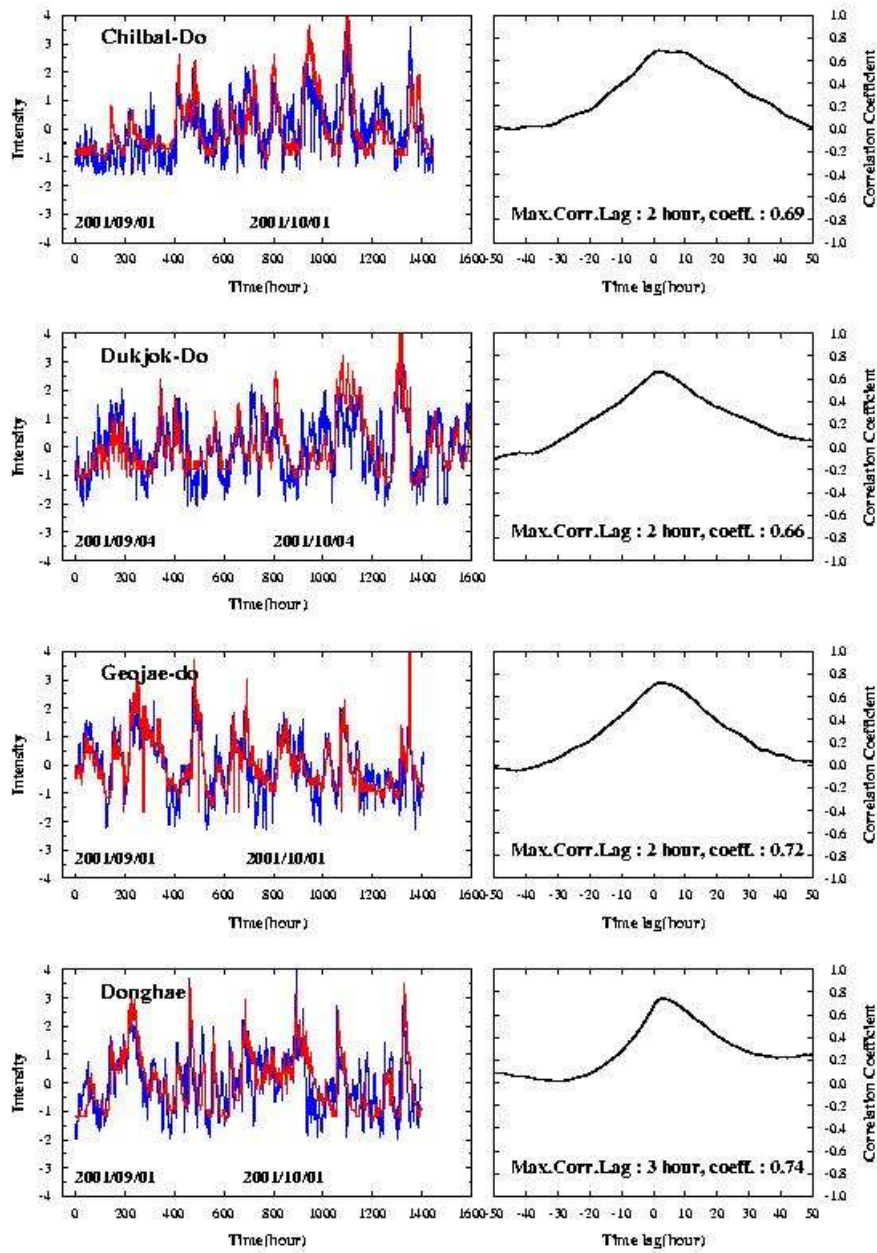


Fig. 8.7. Time series of wave speeds(blue line) and significant wave heights(red line) and cross correlation results between two parameters.

천해에 위치한 칠발도, 덕적도, 거제도 부이자료에서 풍향에 따른 풍속과 유의파고 사이의 상관성을 분석한 결과는 Table. 8.2와 같다.

Table. 8.2. Correlation coefficient between wind speed and significant wave height considering to wind direction

	동풍 (70°- 110°)	서풍 (250°- 290°)	남풍 (160°- 200°)	북풍 (-20°- 20°)
덕적도	0.29(육풍)	0.70	0.75	0.72
칠발도	0.66(육풍)	0.90	0.54	0.78
거제도	0.81	0.71(육풍)	0.88	0.83

전체적으로 볼 때 지형적인 효과에 의한 풍속과 풍향의 변화가 심한 육풍 발생 시에 상관성이 크게 떨어지는 것을 알 수 있다. 즉 파랑이 충분히 발달하기 위한 취주 시간과 취주 거리가 짧아지는 환경에서는 파랑 인자는 바람 정보를 많이 포함하지 않는 사실을 알 수 있다.

풍속, 유의파고 편차에 대한 시계열 자료 분석 결과는 Fig. 8.8과 같다. 스펙트럼 분석 결과 12시간, 24시간의 조석주기를 가지고 편차 값이 변하는 사실을 발견할 수 있다. 비교적 조석이 강한 덕적도가 조석 주기에서 스펙트럴 밀도 함수 값이 가장 크며, 조석류가 약한 동해에는 유의미한 조석 성분을 찾아볼 수 없다. 이 결과를 통해 풍파에도 조석이나 해류에 의한 정보가 반영되어 나타난다는 사실을 확인할 수 있었으며 스펙트럼 분석을 통해서 뿐만 아니라, 실제 파향 자료 분석에서도 이러한 정보를 찾아낼 수 있다.

Fig. 8.9는 2002년 9월부터 10월까지의 덕적도 부이에서 관측된 풍향과 풍속에 대한 stick vector diagram 과 파고, 파주기에 대한 stick diagram 이다. 풍속이 강할 때에는 전체적으로 파향과 파고가 풍향, 풍속과 비슷한 패턴으로 나타나지만 풍속이 약할 시에는 풍향과 파향의 경우 그 패턴이 일치하지 않는다. 덕적도 주변 역의 파향의 변화가 풍계의 변화보다는 창조(북서방향), 낙조류(남동방향)의 방향과 그 주기성이 일치하는 것을 확인할 수 있다.



Fig. 8.8. Time series of deviation between wind speed and significant wave height(left panel) and power spectrum(right panel).

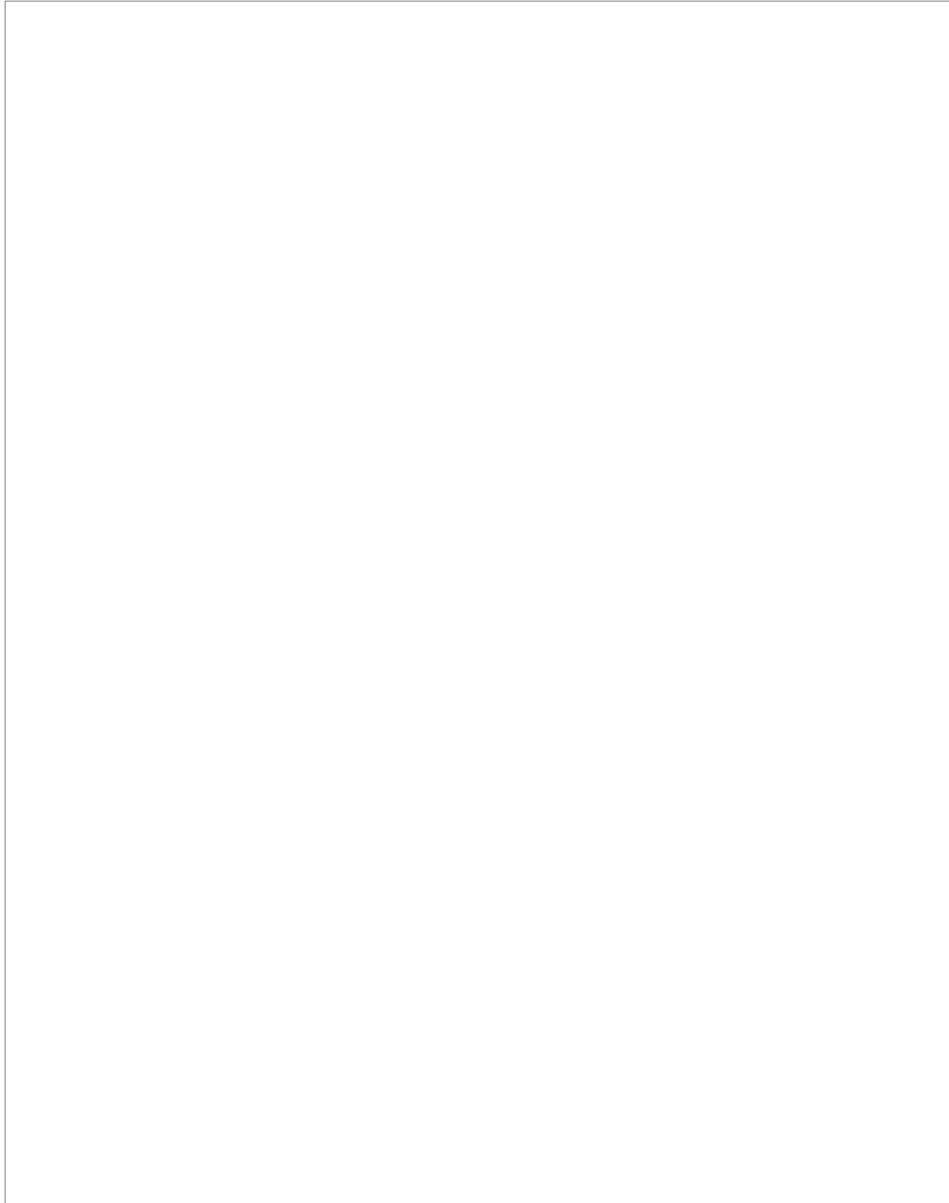


Fig. 8.9. Stick vector diagram of wind field and wave field. Lower panels indicate enlargement figures when wind speed is weak.

해양기상 관측 부이의 파고, 파향 자료에서 나타나는 해류, 조석 등의 효과를 정량적으로 분석하기 위해 WAVEWATCH-III 파랑모델에 해상풍 외에 해류장을 첨가하여 파랑 변조 효과를 분석하였다.

쿠로시오 해류에 의한 파랑 변조 효과를 분석하기 위해 고안된 모델 영역으로는 경도 115°E 에서 145°E 이며, 위도 20°N에서 50°N으로 0.5°간격의 구면 좌표

계로 25주파수 24방향의 스펙트럴 요소를 사용하였다. 초기 조건으로는 NCEP/NCAR에서 제공하는 6월과 10월의 기후평균 자료를 영역 해상도에 맞추어 사용하였으며, 해류장으로는 Jang 등(2002)에 의해 계산된 OGCM 1월 해류 평균장을 사용하였다(Fig. 8.10). OGCM의 결과는 북동 방향으로 진행되는 쿠로시오 해류축이 잘 묘사되어 있으며, 전구 순환 모델의 결과의 일부분이므로 한반도 주변 해역의 해류패턴은 정확하다고 보기는 힘들다. 그러나 해류 효과를 고려한 파랑 모델 접합 실험에는 충분히 사용 가능한 자료라고 판단된다.



Fig. 8.10. The horizontal distribution of the calculated current vector on January (after Jang et al. 2002)

Fig. 8.11은 NCEP/NCAR의 6월 평균 해상풍이다. 전체적으로 남풍 또는 남서풍 계열의 풍향을 보이고 있으며, 쿠로시오 해류의 방향과 일치하는 바람이 불 때의 파랑변조 효과를 파악하기 위해 특별히 6월 기후평균 자료를 사용하였다.

Fig. 8.12는 해류장을 파랑모델에 접합을 시켰을 때와 시키지 않았을 때의 파고 편차를 나타낸 그림이다. 양의 편차는 해류장을 적용했을 때가 파고가 낮아지는 부

분을 의미하며, 반대로 음의 편차는 파고가 높아지는 부분을 의미한다. 해류방향과 풍향이 일치했던 쿠로시오의 중심 축에서는 파고가 낮아지며 쿠로시오 축의 아랫부분인 쿠로시오 반류가 존재하는 부분에서는 반대의 결과가 나타나는 것을 알 수 있으며, 해류의 크기가 센 지역에서 파고 변조 효과가 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

쿠로시오 해류의 진행방향과 반대 방향인 북동풍이 지배적인 11월의 경우, 6월과 반대의 결과가 나오는 것을 알 수 있다. 쿠로시오 축을 중심으로 해류장을 첨가시켰을 때 파고가 약 20-30 cm 정도 높아짐을 확인할 수 있다(Fig. 8.13, 8.14).

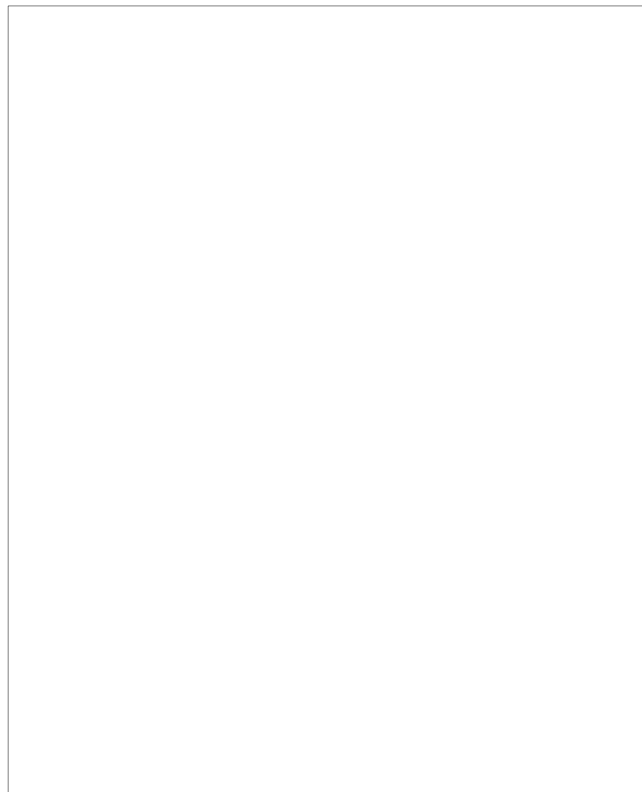


Fig. 8.11. The horizontal distribution of the sea surface winds on June which is applied to wave model as initial condition.

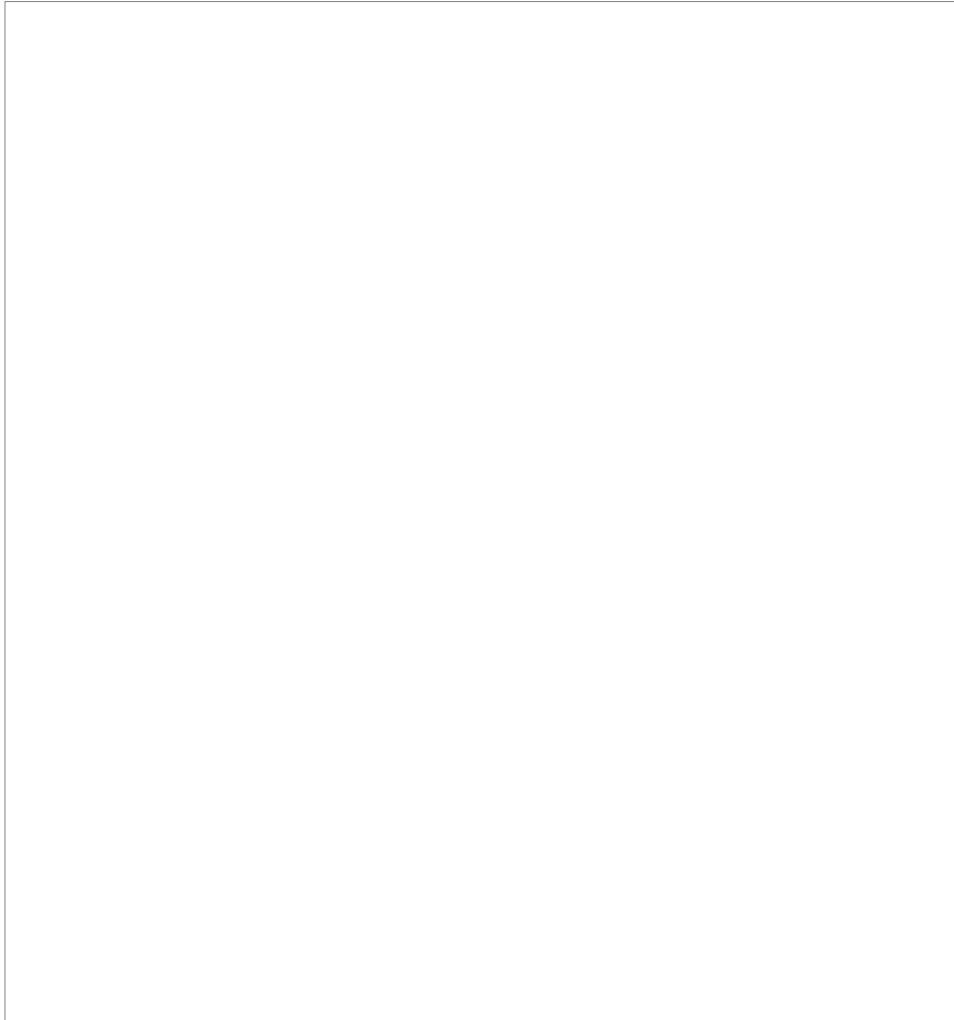


Fig. 8.12. The horizontal distribution of the difference of significant wave height on June between model outputs which uncoupled and coupled with current fields, respectively.

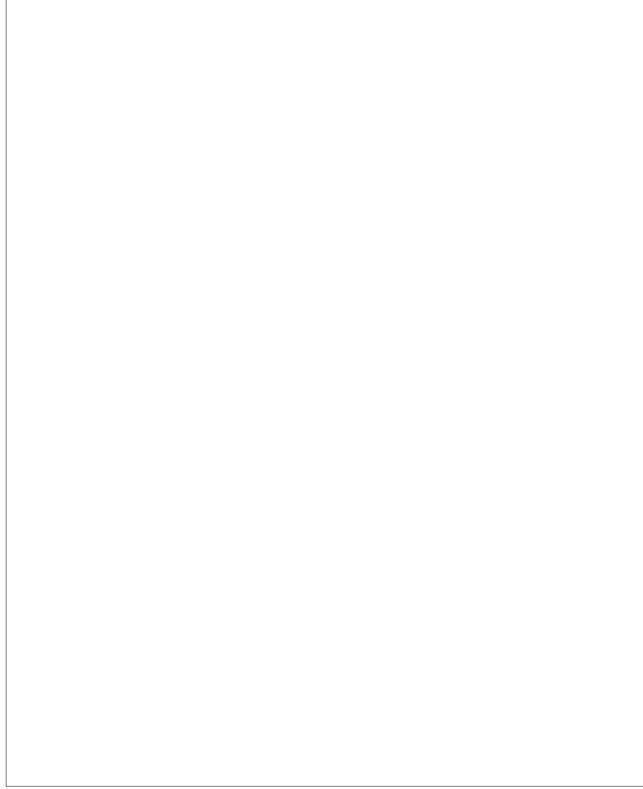


Fig. 8.13. The same as Fig. 8.11 except on November.

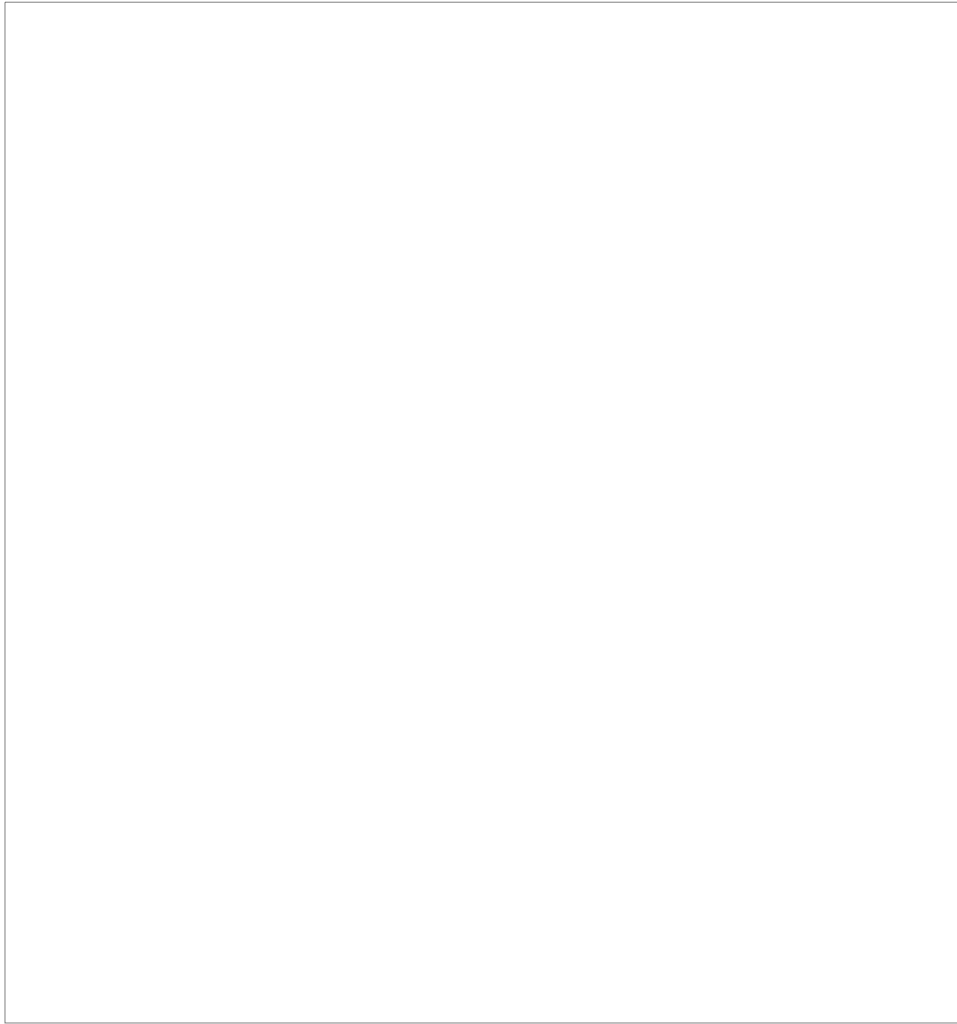


Fig. 8.14. The same as Fig. 8.12 except on November.

동해해역에서 난수성 소용돌이의 효과가 파랑변조에 미치는 영향에 관한 수치실험을 실시하였다. 모델영역으로는 난수성 소용돌이의 공간분포를 충분히 분해할 수 있는 경도 127.5°E 에서 132.5°E, 위도 36°N에서 40°N 의 0.1°간격으로 구성하였다.

이상적인 난수성 소용돌이의 해류 패턴으로는 다음과 같은 기본적인 지형류 평형을 만족시키는 시계방향의 해류를 적용시켰으며 최대 유속은 2m/sec로 정의하였다.

$$f_v = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad , \quad f_u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}$$

위 식을 만족시키는 모델 초기조건으로 적용되는 해류장은 Fig. 8.14와 같으며, 적용된 해상풍으로는 NCEP/NCAR 의 남풍계열의 6월 평균 자료를 내삽 하여 사용하였다(Fig. 8.16).

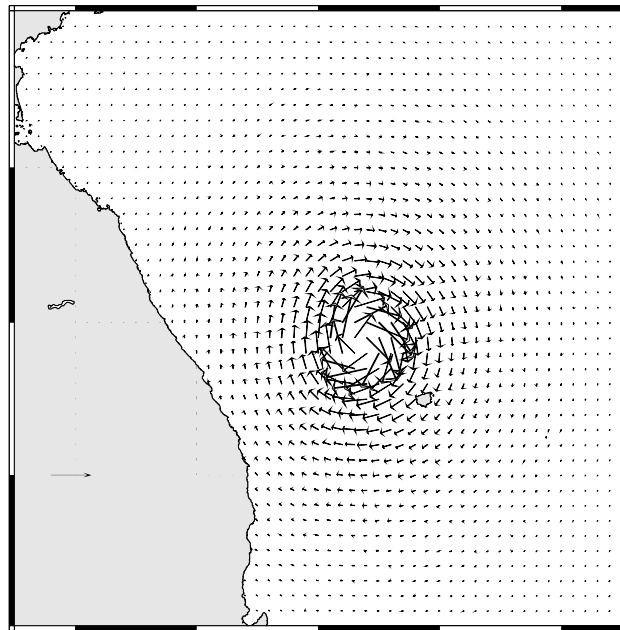


Fig. 8.15. The horizontal distribution of the calculated current vector of warm eddy in the East Sea.

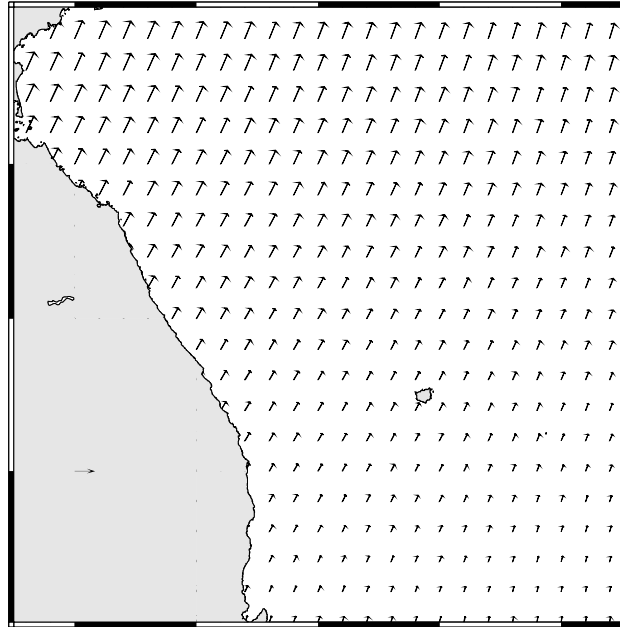


Fig. 8.16. The horizontal distribution of the sea surface winds on June which is applied to wave model as initial condition in the East Sea.

난수성 소용돌이의 해류장을 적용시켰을 때와 그렇지 않을 때의 파고, 파향의 변조양상은 Fig. 8.17, Fig. 8.18과 같다.

난수성 소용돌이의 중심축을 중심으로 서쪽(동해안 연해쪽)은 해류방향과 풍향이 같은 영역으로 파고가 낮아지는 양상을 나타내며, 동쪽은 해류방향과 풍향이 반대인 영역으로 파고가 높아지는 양상을 대칭적으로 잘 모사하고 있다. 본 실험에서는 양의 편차가 음의 편차보다 약 10cm 내외로 크게 모사되고 있다. 파고 변조에 대한 비대칭성의 문제는 초기자료로 적용시킨 풍속의 패턴이 공간적으로 균일하지 않다는 점과 초기자료를 적용시키고 12시간 후의 결과를 나타낸 자료이므로, 해안선 등의 boundary 경계 역에서의 파의 굴절 반사 효과가 어느 정도 중첩되어 나타난 결과라고 사료된다.

파향의 최대 변조를 보이는 영역도 강한 난수성 소용돌이가 존재했던 울릉도 북서방 부근에서 나타나며, 동해안 영역에서 파의 굴절, 회절, 반사 효과에 의해서도 크게 영향을 받는 것으로 보인다.

정량적인 수치 값을 적용하였을 때, 즉 평균풍속 5m/sec 와 평균유속 1m/sec 적

용 시에 최대파고 1.5m 에 대해 평균 20cm 정도 약 13% 의 파고 변조 양상이 나타내는 것으로 계산되었다. 이러한 변조 폭은 풍속이 약하거나 해류의 크기가 강할수록 잘 나타나는 것으로 계산되었다.

Fig. 8.19는 동해 관측 부위에 나타난 파랑 변조 증거이다. 2001년 8월부터 2002년 3월까지 풍속과 풍향, 파고와 파향의 자료를 5일 저주파 통과 필터를 사용하여 stick vector diagram을 비교한 결과이다. 일반적으로 겨울철 풍향이 북서풍으로 일정하고 비교적 풍속이 센 시기에는 파향과 파고가 풍향, 풍속 패턴을 잘 따라 흐르고 있지만, 풍향의 방향이 자주 바뀌며, 풍속이 약한 가을철에는 전체적인 파향 방향과 풍향 방향의 상관성이 낮게 나타나는 것을 실측 자료에서도 발견할 수 있다.

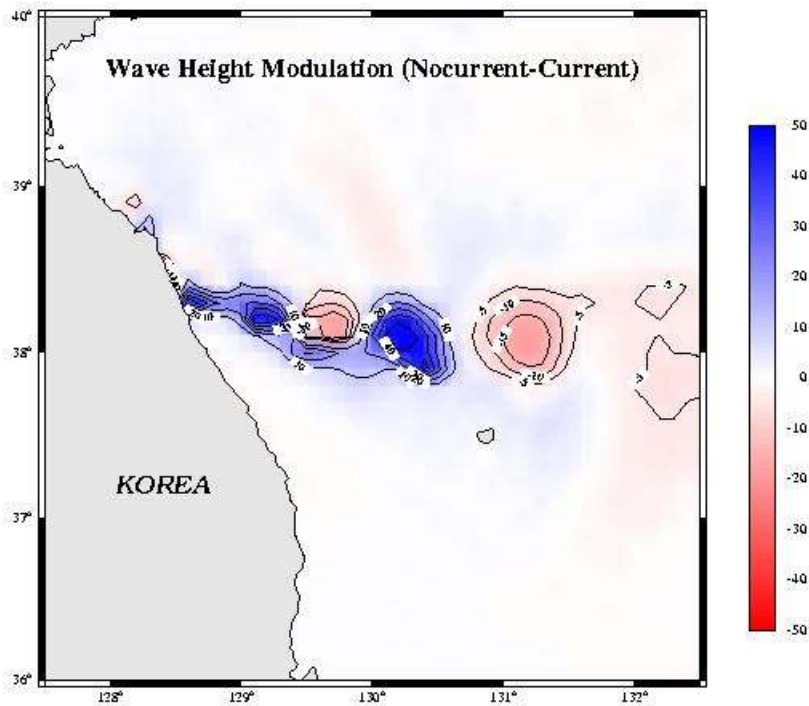


Fig. 8.17. The horizontal distribution of the difference of significant wave height between model outputs which uncoupled and coupled with anti-cyclonic eddy type current fields.

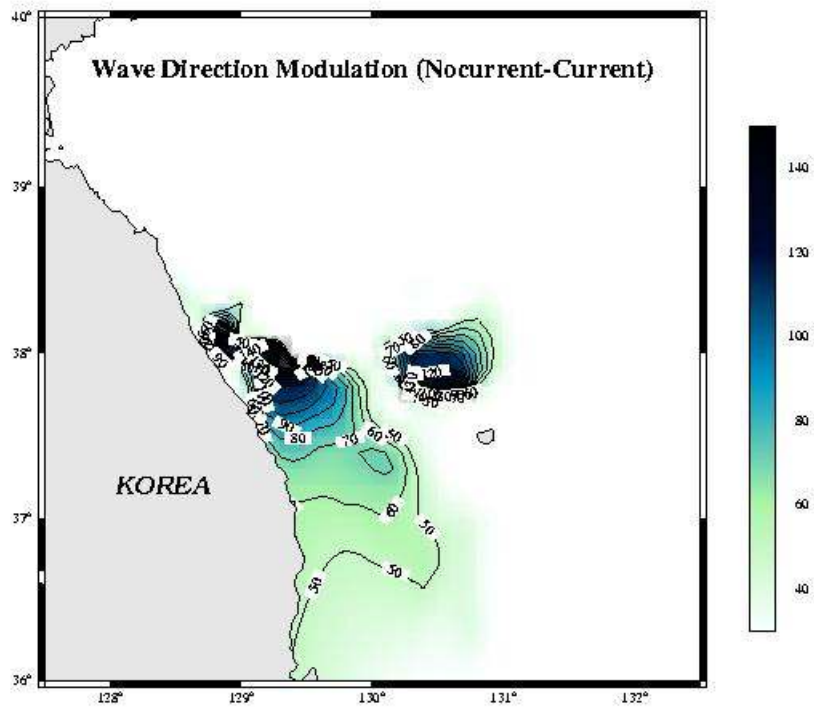


Fig. 8.18. The same as Fig. 8.17 except for wave direction.

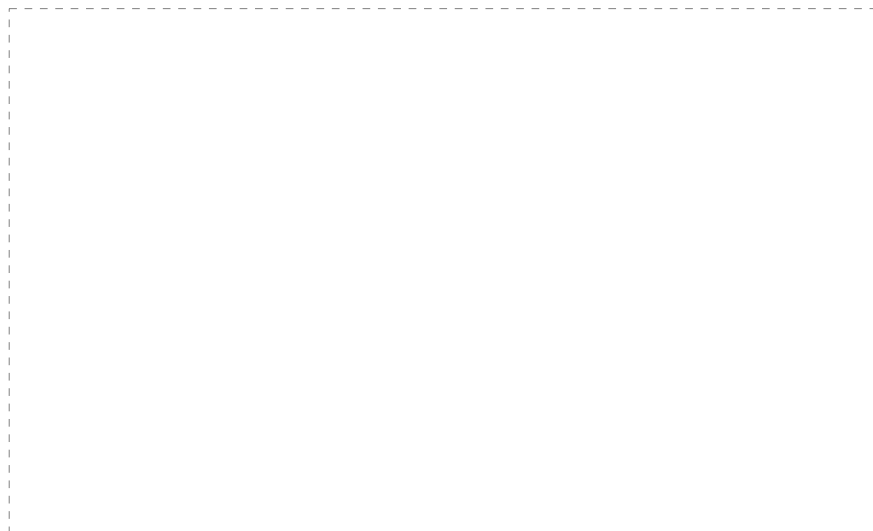


Fig. 8.19. Stick vector diagram of wind field and wave field which is convoluted by 5 day low pass filter.

제 9 절 월별 파랑 분포도

6절에서 설명된 파랑예측 시스템을 2001년 1년 동안 구동시킨 결과에 대한 월별 파랑 분포 양상은 다음과 같다.

사용된 모델은 기상청 현업모델인 MM5를 기반으로 한 DUT-METRI 해상기상 예측 모델과 NOAA 의 NCEP에서 현업 파랑모델로 운영중인 WAVEWATCH-III 1.18 버전이다. 모델 해상도는 한반도를 포함한 동아시아 영역의 0.5°간격이다. 2001년 1년 동안 해상풍과 유의파고, 파향, 파주기, 파장의 4가지 파랑 인자들의 월평균 값과 편차를 계산하였으며 모든 작업은 기상청 슈퍼컴퓨터인 SX5b-16A를 통해서 하루에 2회씩 수행되었다. 매일 반복되는 계산 작업 과정은 Fig. 9.1 과 같다.

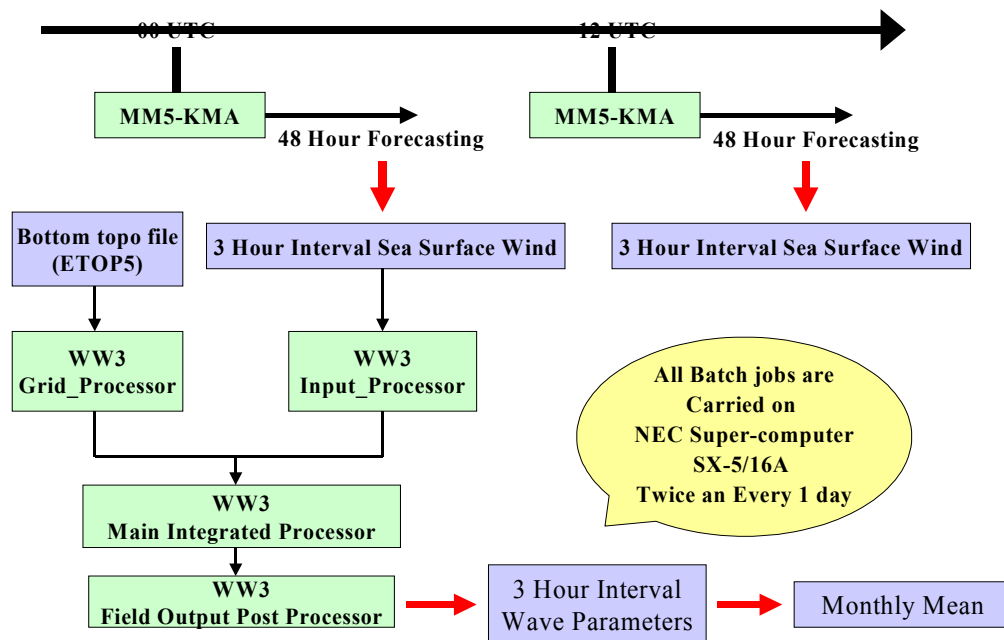


Fig. 9.1. Job schedule of wave prediction system.

월평균 해상풍은 기존의 Na, NCEP, Hellerman 등의 기후평균 자료에 비해 공간변화율이 큰 해상풍 값이 산출되었으며, 계절 풍계에 따른 양, 음의 쉼이 잘 모사되었다. 특히, 겨울철의 북, 북서 계절풍 과 여름철의 남서 계절풍이 잘 모사되고 있으며, 블라디보스톡 근처의 양의 쉼, 남서해역의 음의 쉼, 태풍 북상지역의 양의 쉼 모사되고 있는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 9.2).

유의파고와 그 편차에 관한 결과는 Fig. 9.3, Fig. 9.4와 같다. 유의 파고가 큰 해역이 파고 편차 또한 크다는 사실을 알 수 있었으며, 대만해협 지역이 연중 파고

와 그 변동성이 가장 높게 계산되었다. 한반도 근해지역에서는 봄철과 가을철에 남, 서해역에 비해 동해역의 파고가 높다는 사실을 알 수 있다. 육지부근의 파의 중첩과 반사가 일어날 때 파고가 높아지며 일반적으로 평균 파고의 크기에 비해 파고 편차 값이 크다.

8, 9월에 태풍 통과 지역에서는 그 파장이 큰 장파가 주로 존재하며, 일반적으로 풍속이 강한 겨울철에 장주기 파가 많이 발생한다. 또한 파향은 일반적으로 풍향과 일치하며 풍향의 변화율보다 파향의 변화율이 적은 것을 알 수 있다. 파가 수렴하는 곳에서는 파고가 높아지고 발산하는 지역에서는 파고가 낮아지는 현상도 잘 나타난다 (Fig. 9.5, Fig. 9.6, Fig. 9.7).

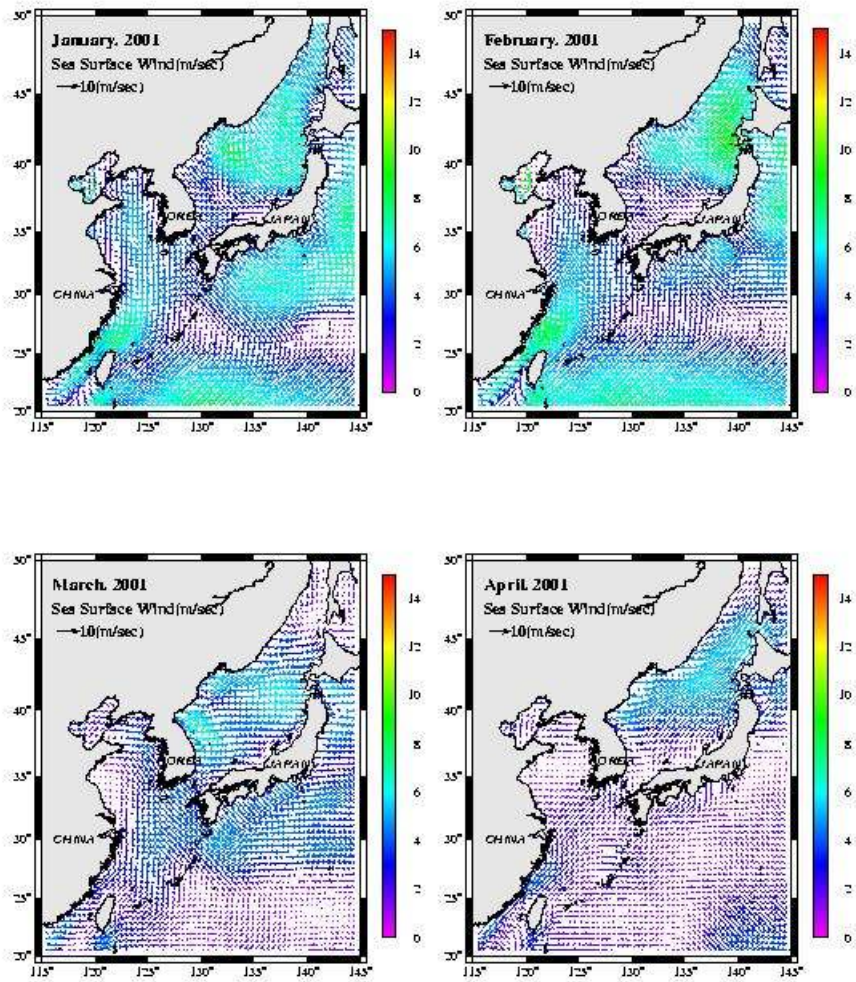


Fig. 9.2.1. Distribution of monthly mean sea surface winds from January to April in 2001.

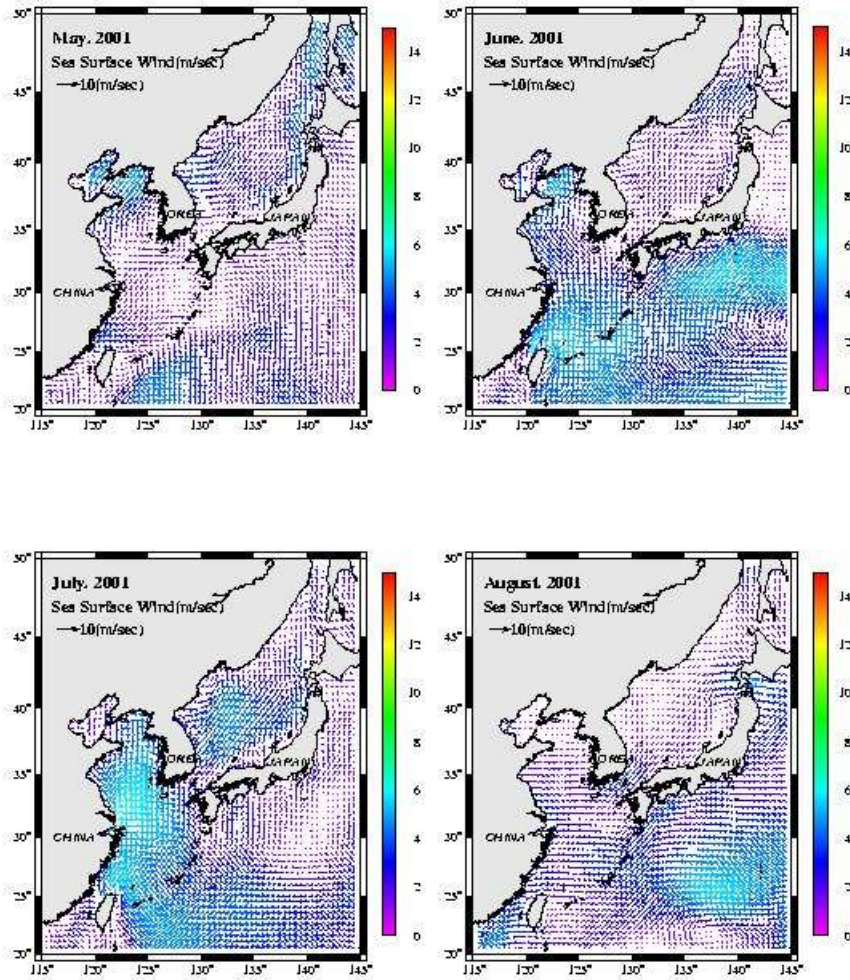


Fig. 9.2.2. The same as Fig. 9.2.1 except for May to August.

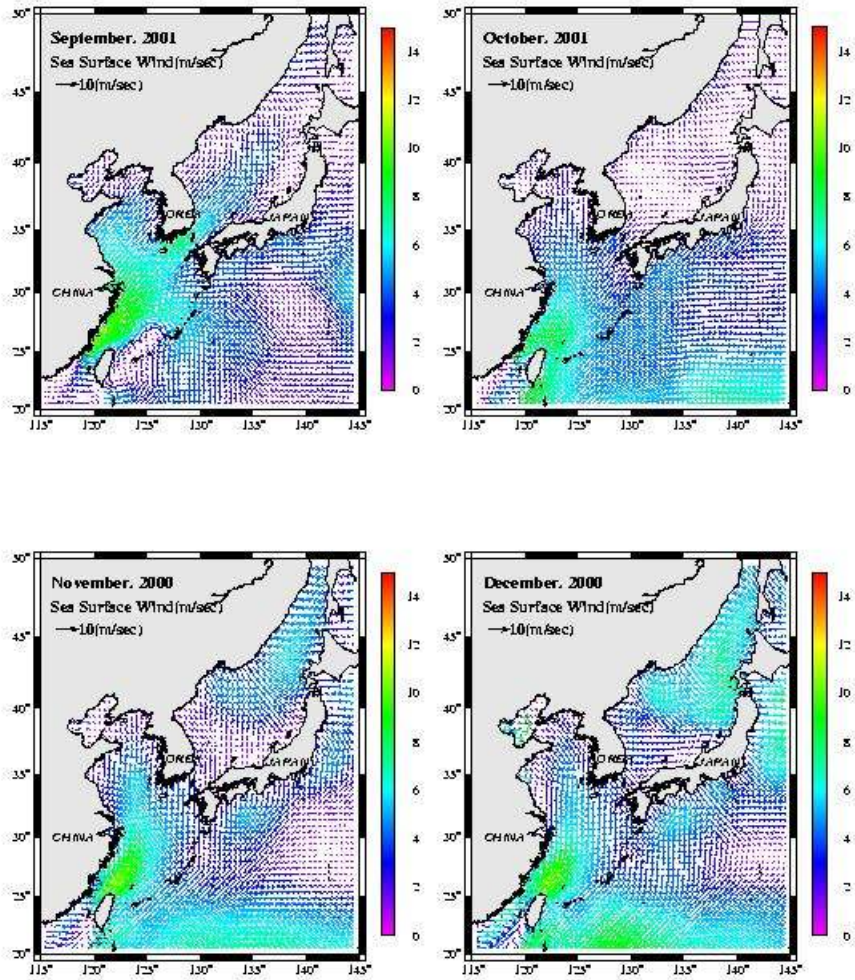


Fig. 9.2.3. The same as Fig. 9.2.2 except for September to December.

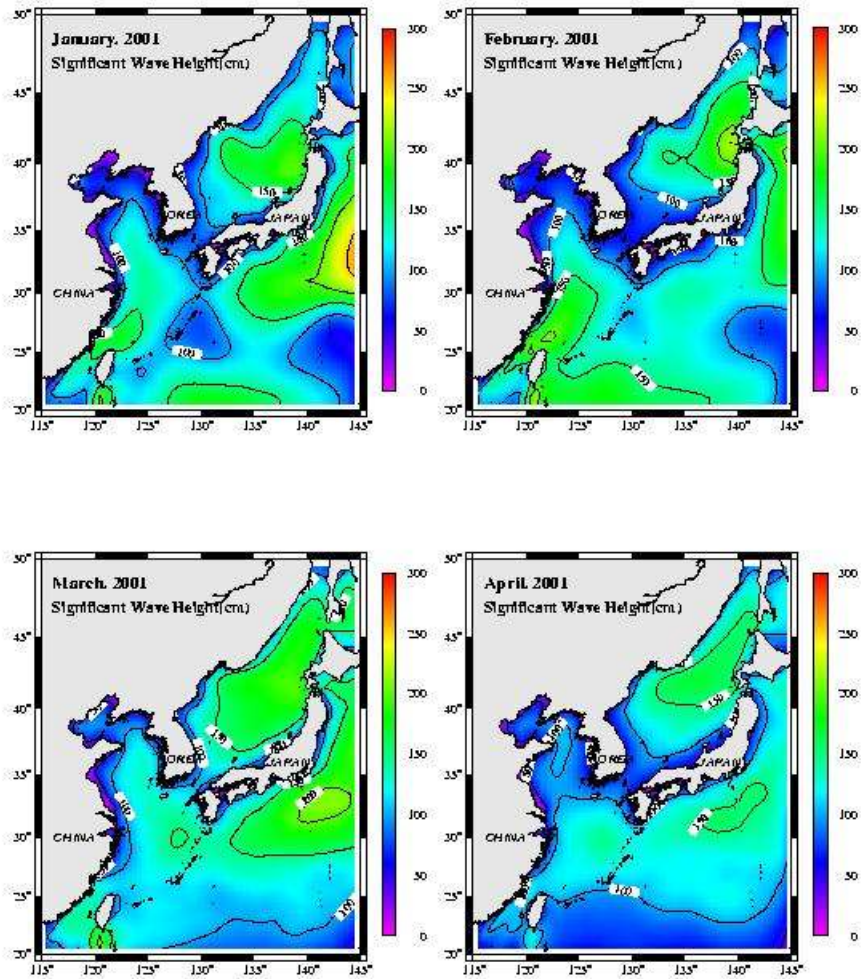


Fig. 9.3.1. Distribution of monthly mean significant wave height from January to April in 2001.

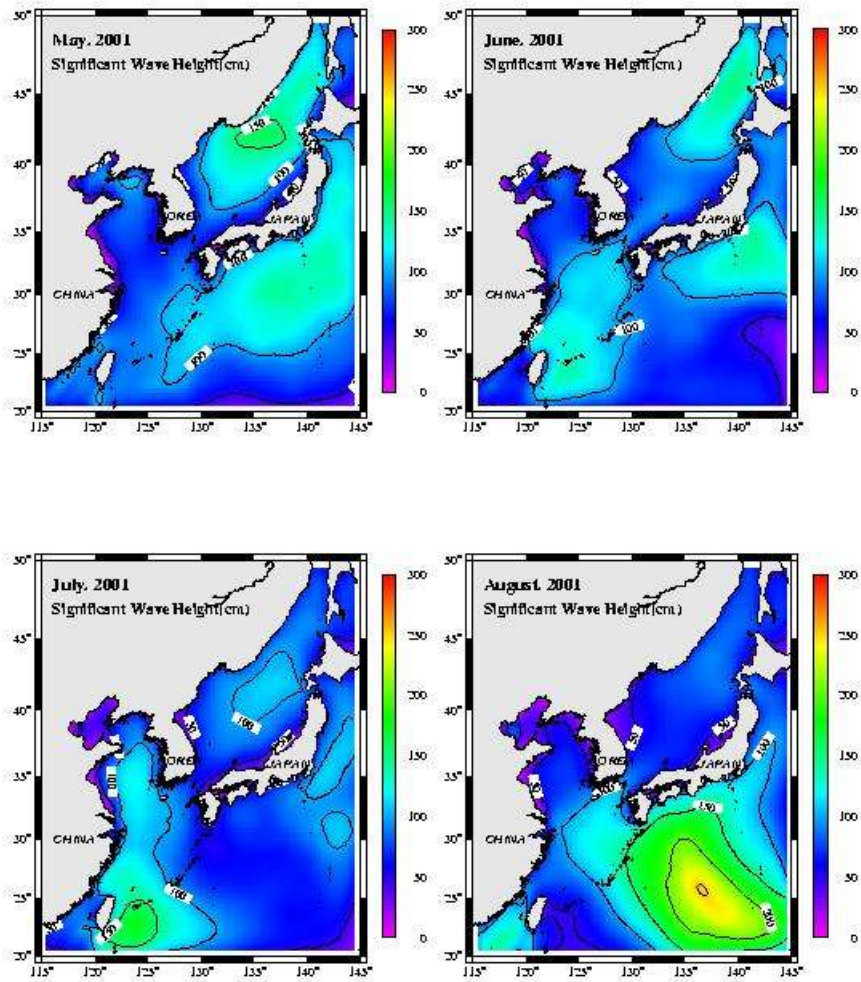


Fig. 9.3.2. The same as Fig. 9.3.1 except for May to August.

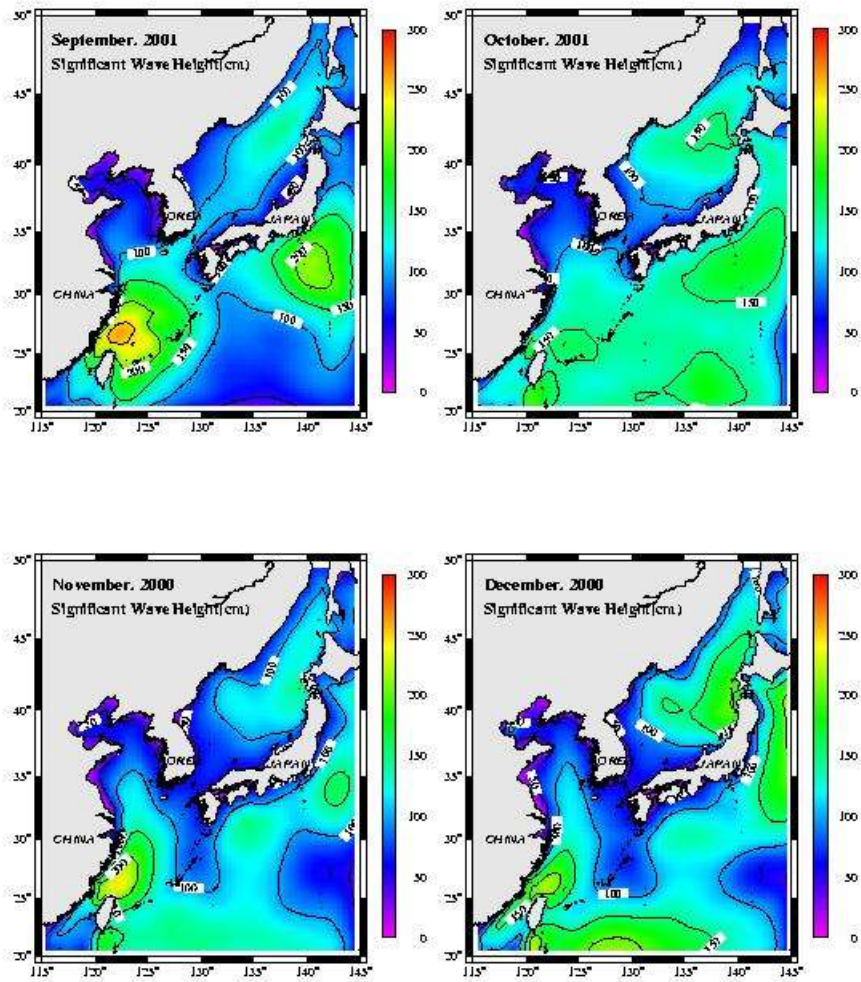


Fig. 9.3.3. The same as Fig. 9.3.1 except for September to December.

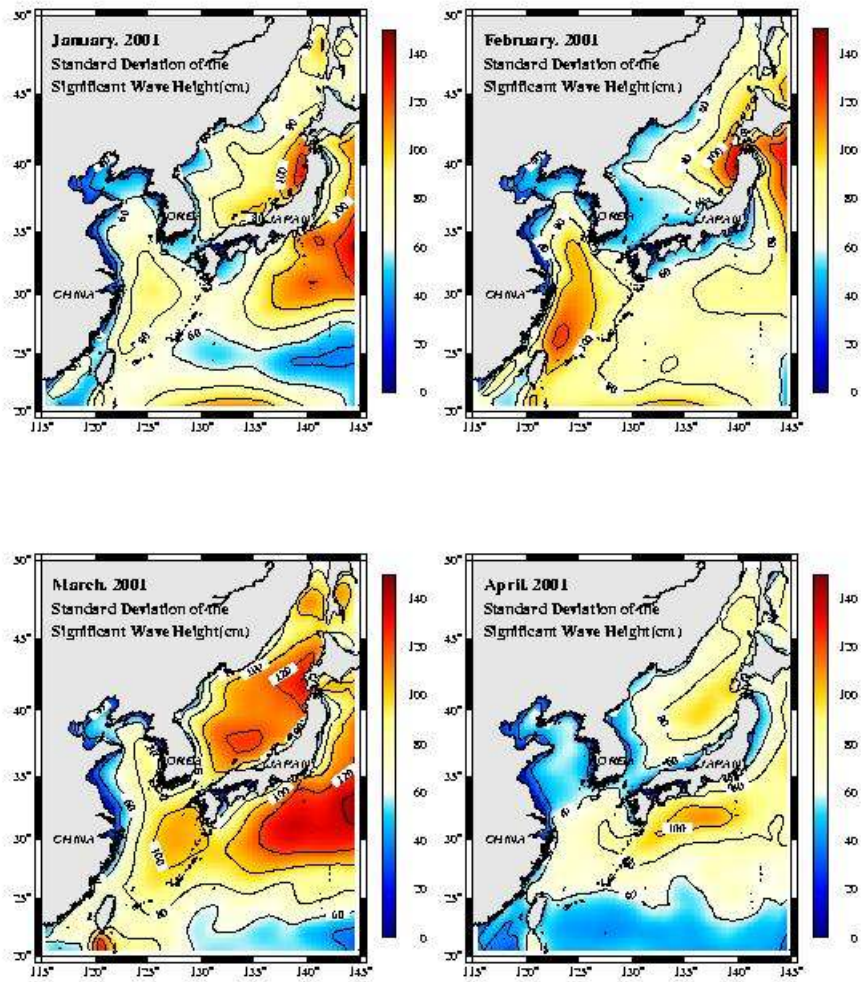


Fig. 9.4.1. Distribution of monthly mean deviation of significant wave height from January to April in 2001.

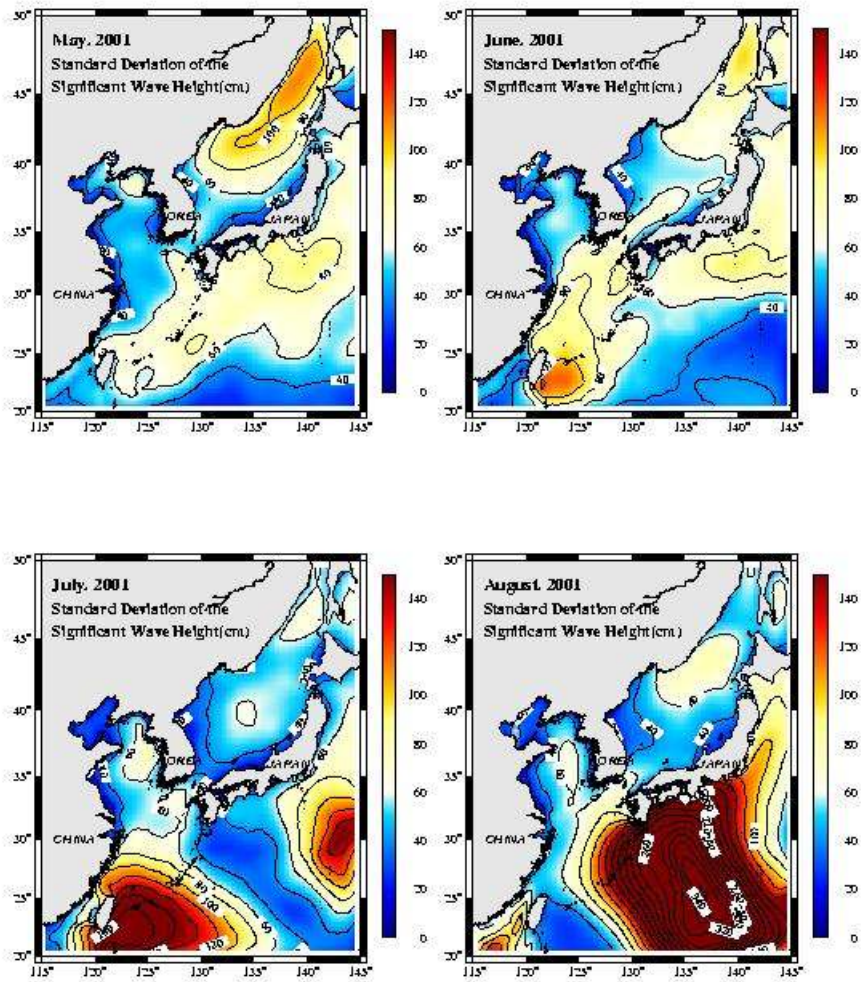


Fig. 9.4.2. The same as Fig. 9.4.1 except for May to August.

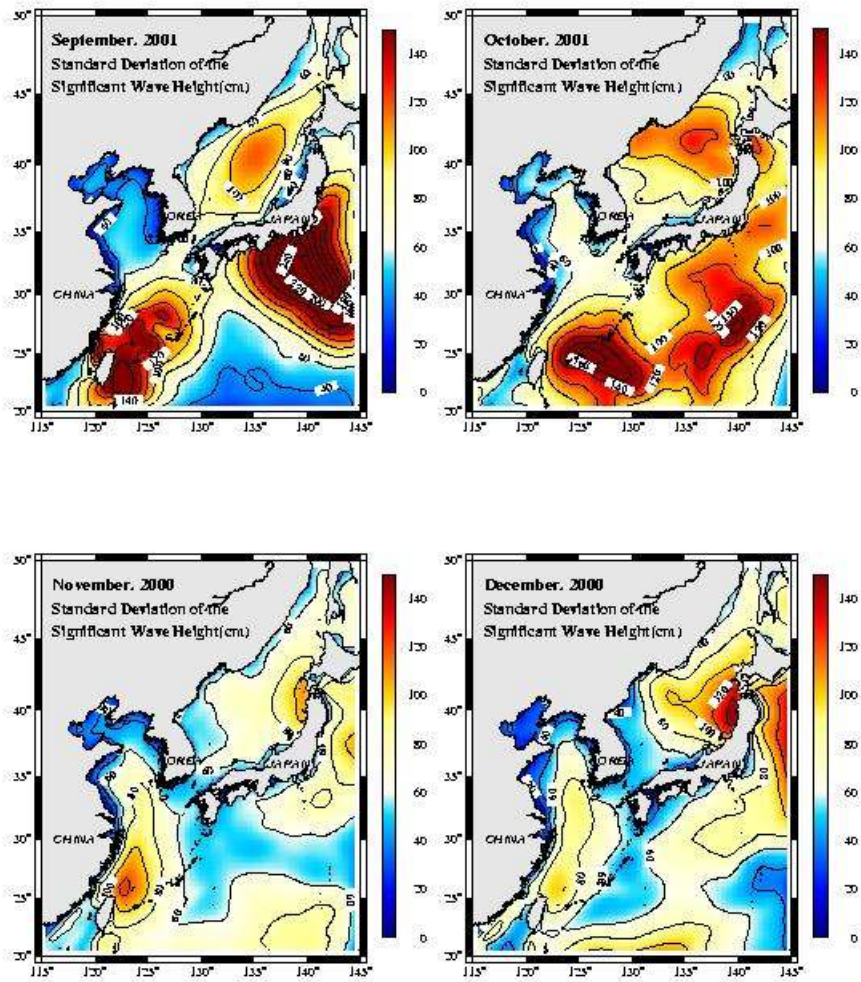


Fig. 9.4.3. The same as Fig. 9.4.2. except for September to December.

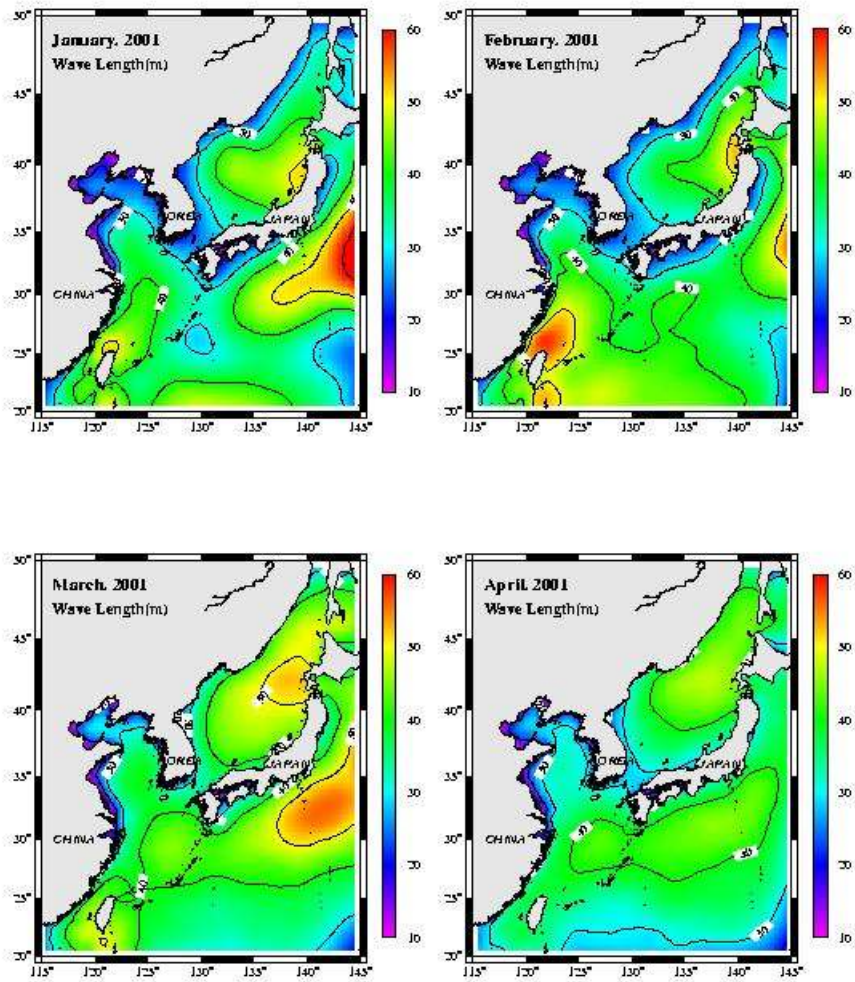


Fig. 9.5.1. Distribution of monthly mean wave length from January to April in 2001.

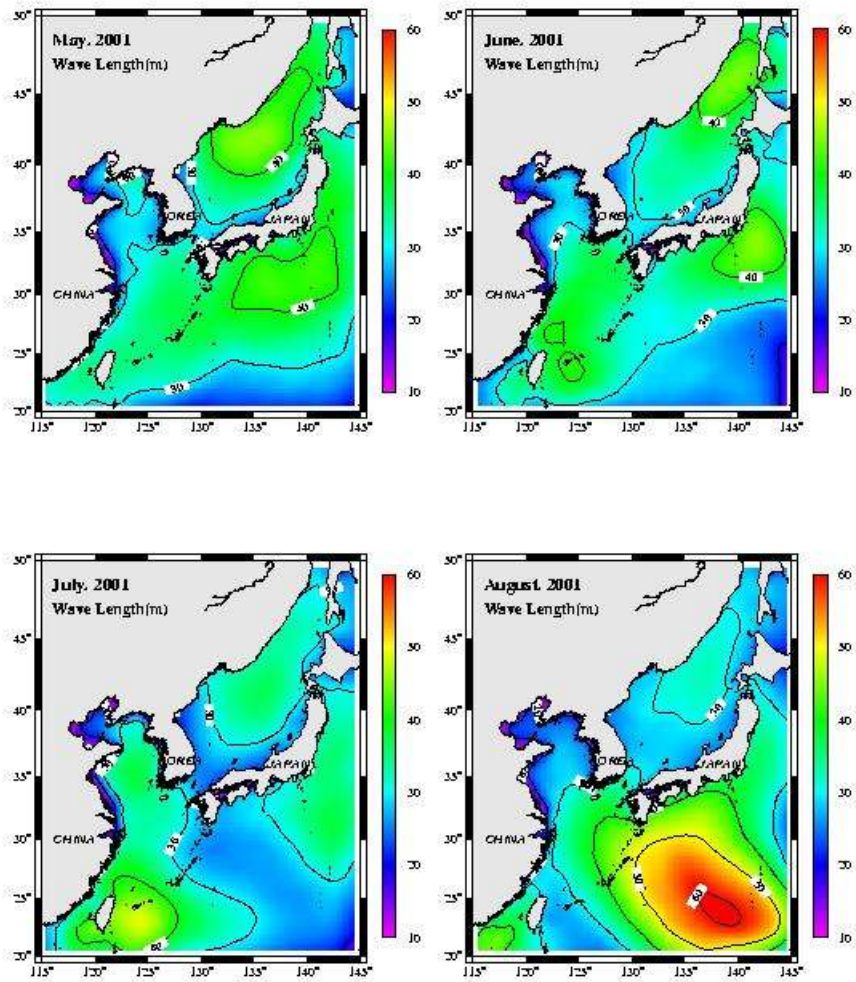


Fig. 9.5.2. The same as Fig. 9.5.1 except for May to August.

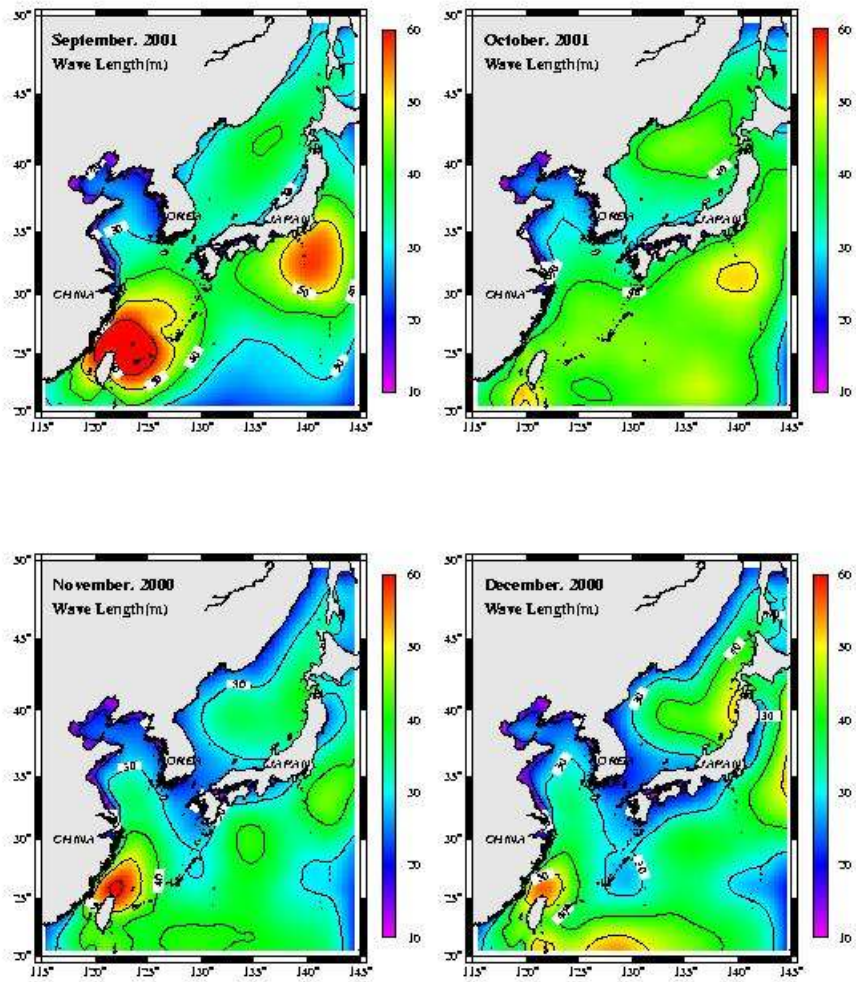


Fig. 9.5.3. The same as Fig. 9.5.2 except for September to December.

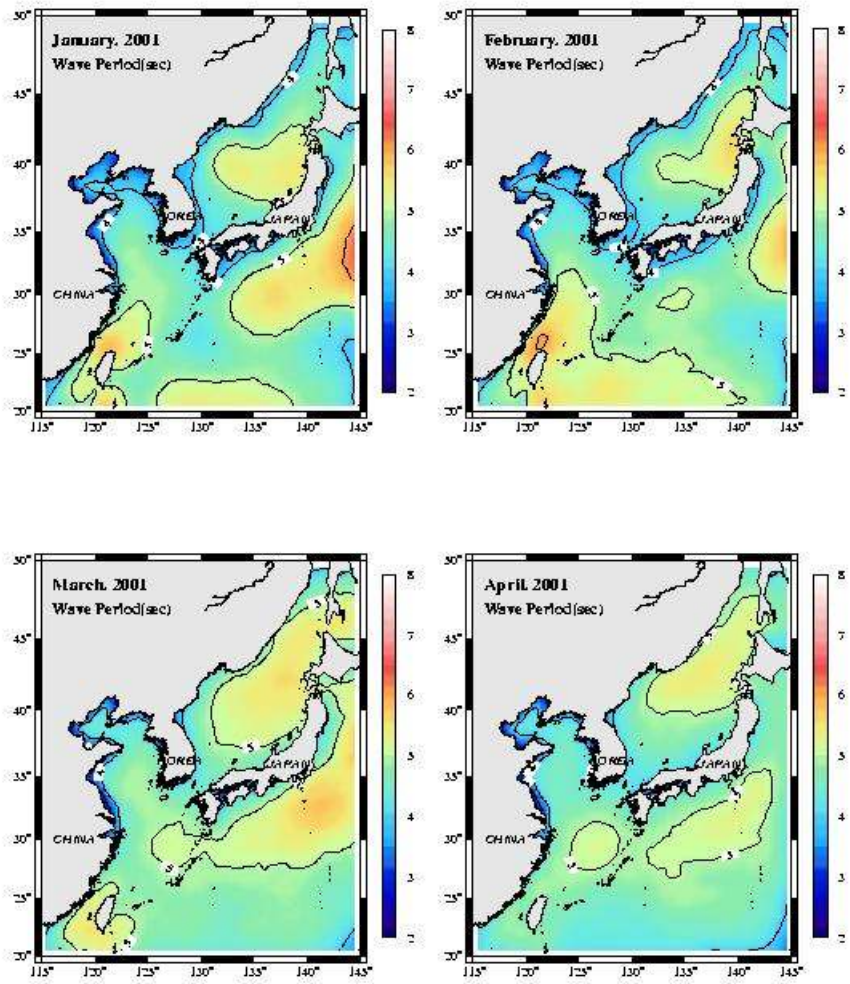


Fig. 9.6.1. Distribution of monthly mean wave period from January to April in 2001.

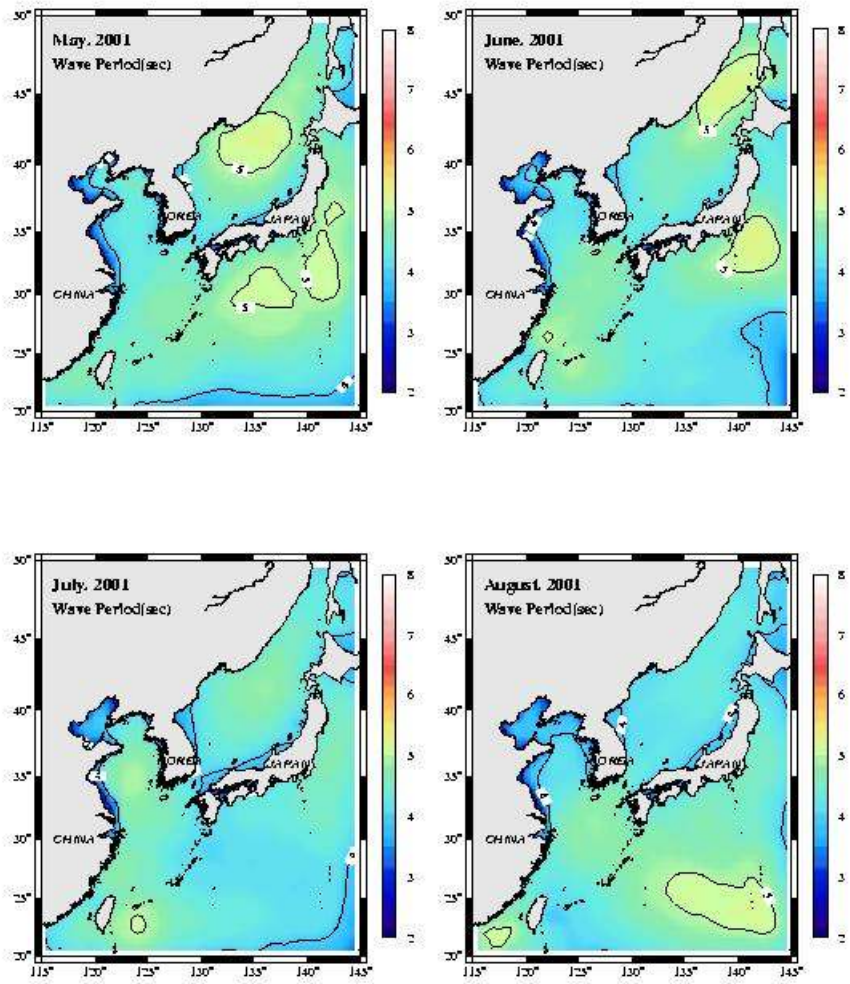


Fig. 9.6.2. The same as Fig. 9.6.1 except for May to August.

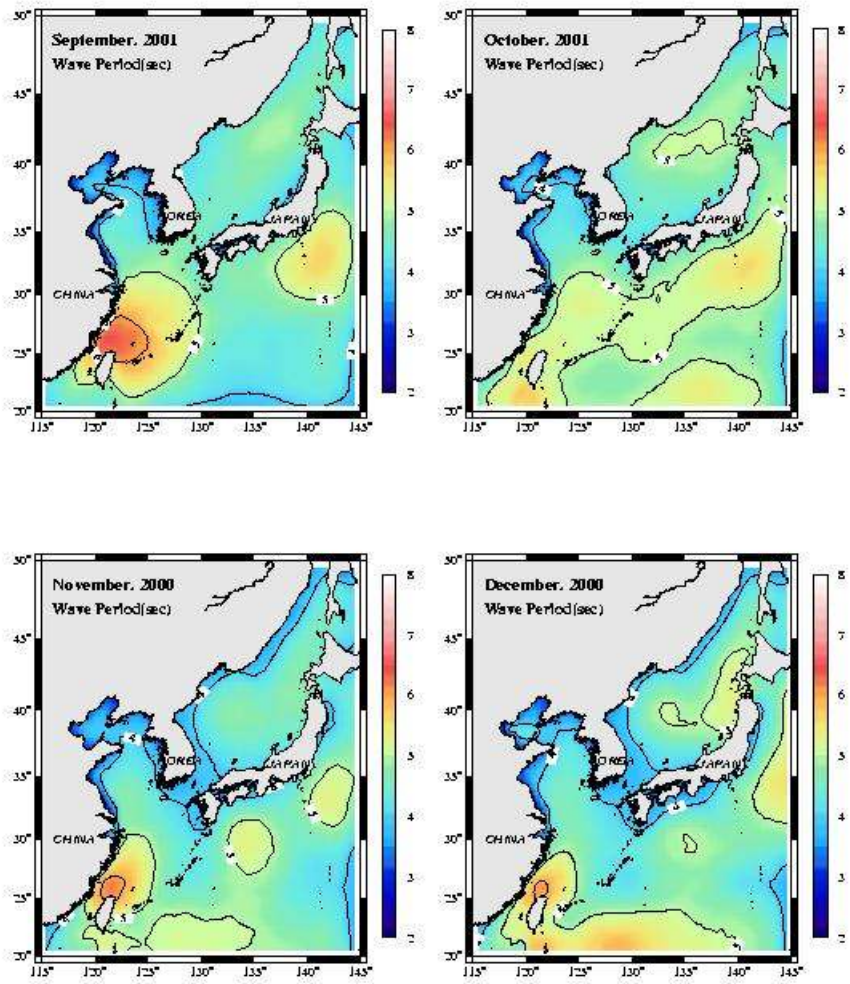


Fig. 9.6.3. The same as Fig. 9.6.1 except for September to December.

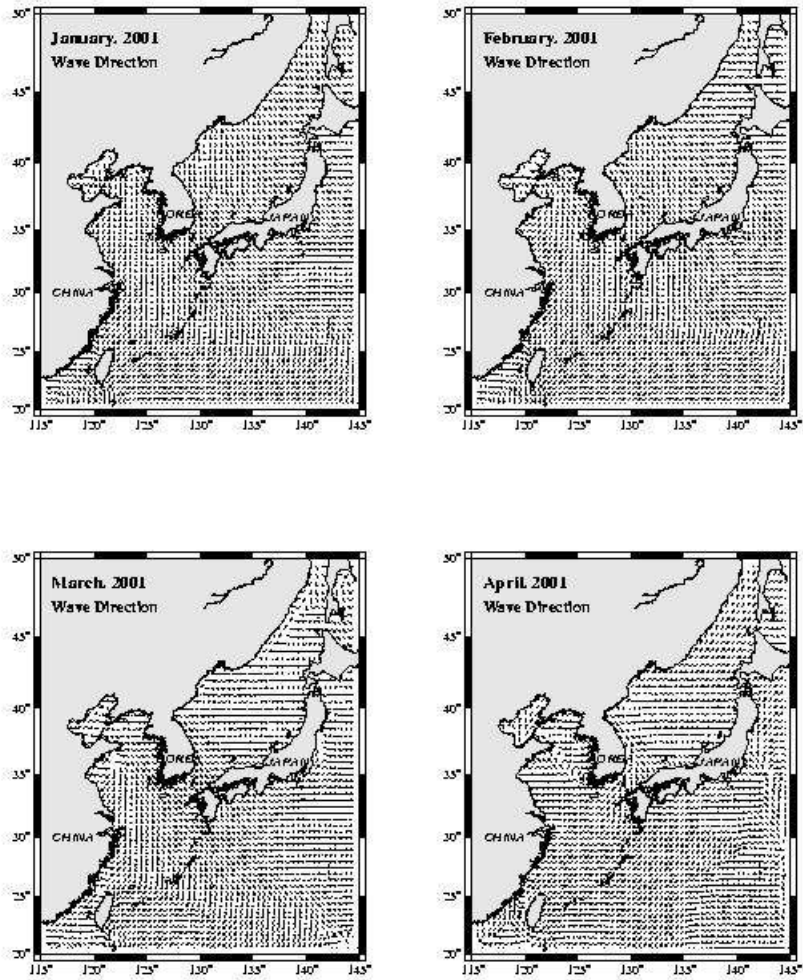


Fig. 9.7.1. Distribution of monthly mean wave direction from January to April in 2001.

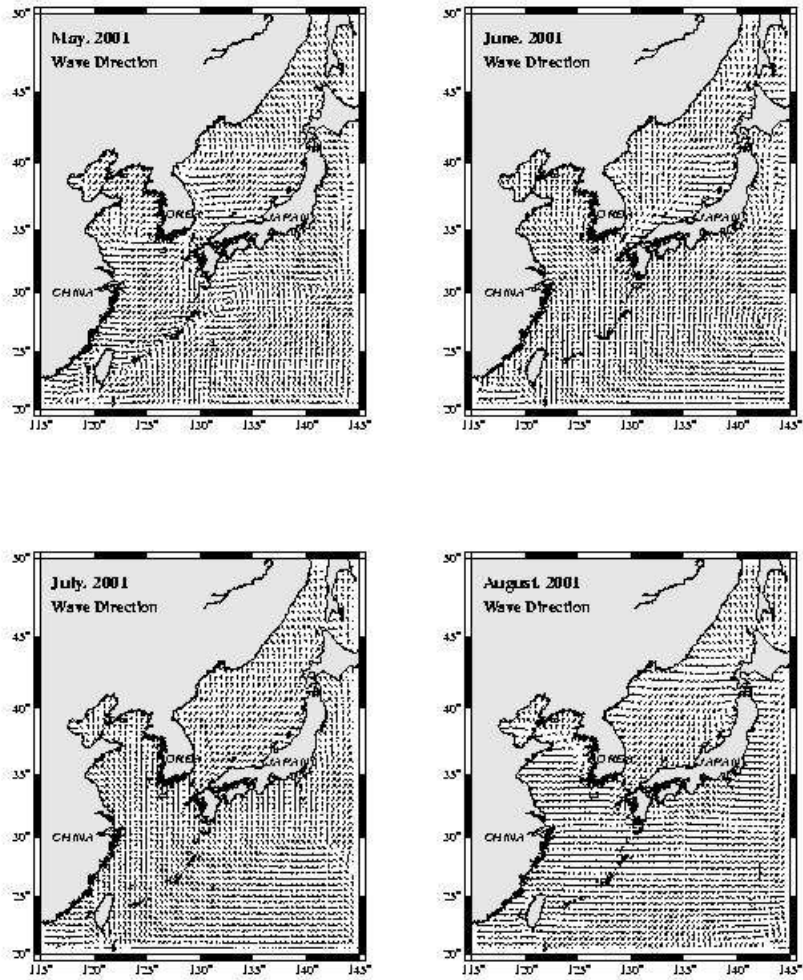


Fig. 9.7.2. The same as Fig. 9.7.1 except for May to August.

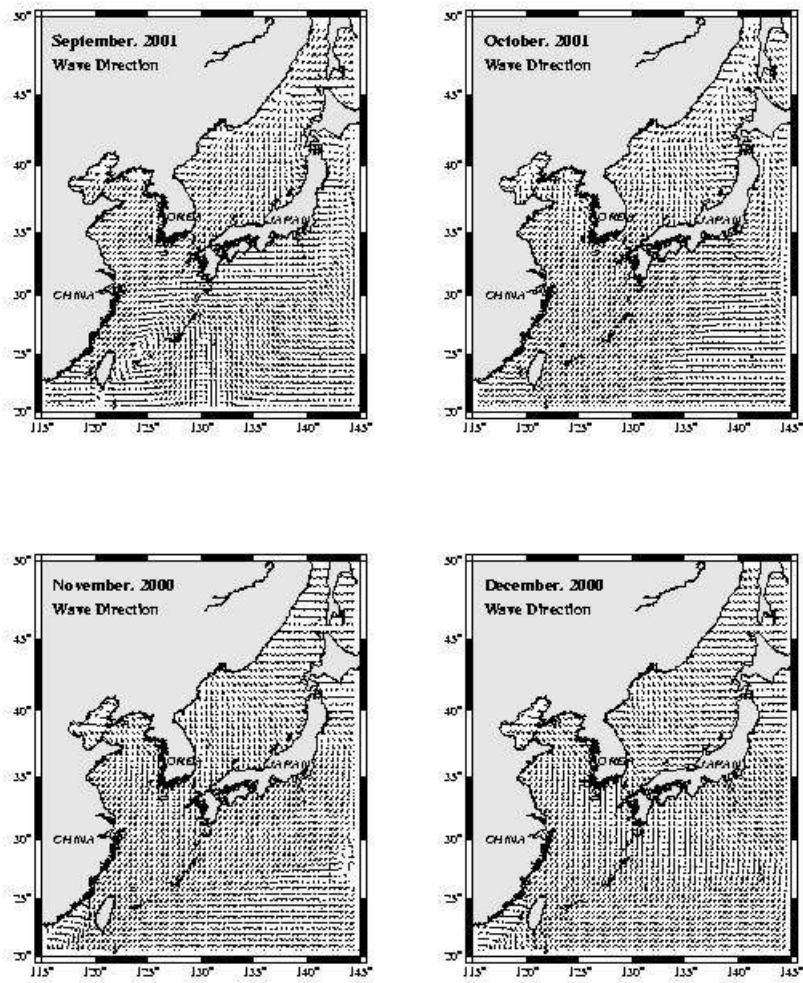


Fig. 9.7.3. The same as Fig. 9.7.1 except for September to December.

제 10 절 결론

태풍을 비롯한 해양 악기상 예측은 정치·외교적으로 매우 중요한 위치인 한반도 주변 해역에서의 해군과 같은 국가 방위차원에서 뿐만 아니라 국가 경제차원의 안전한 해상조업을 위해서 해상상태의 정확한 예측정보의 필요성은 더욱 증대되고 있으며 이를 위해 보다 예측 성능을 높인 해상풍 모형과 이를 입력자료로 갖는 파랑 예측모형의 검증을 위해서 일본기상청(동중국해 위치)과 한국 기상청에서 각각 운영되고 있는 5지점(덕적도, 칠발도, 거제도, 거문도, 동해부이)의 해양 관측 부이 자료를 이용하여 본 연구에서의 파랑 모델 결과와 비교하여 보았다.

본 파랑모형에서는 극대치의 풍속에 대해 계산 과정에서의 안정성을 보였으며, 파의 소산 형태와 해저면 마찰의 상호작용이 잘 반영되어 있다. 태풍 통과시 부이 관측치는 최대 8.5m에 달하는 높은 파고를 천해에 위치한 기상청 부이에서 관측이 가능하였다. 이 기간 동안의 WAVEWATCH-III에 의한 유의파고 계산자료와 부이에서 관측된 자료와의 상관계수는 동중국해에서는 0.95, 칠발도에서 0.83, 덕적도에서 0.74, 그리고 거제도에서 0.85의 상관 관계를 나타내는 성능을 보였다.

본 연구에서 수행된 결과를 토대로 한반도 영역에 대해 0.5°의 동아시아 격자, 0.1°의 동해 해역 격자, 0.05°의 남해해역을 대상으로 한 파랑예보 시스템을 구축하였으며, 매일 2회 48시간까지의 파랑 예보자료가 웹 페이지를 통해 실시간으로 제공되고 있으며, 앞으로 더 세밀하고 정교한 모델을 계속 구축하고 비교 검증할 계획이다.

파랑 모델을 이용한 수치실험 결과, 파랑 인자 계산에 있어서 바닥마찰 계수의 효과가 무시할 수 없을 정도로 중요하다는 결론을 얻었으며, 해류, 조류의 효과도 파랑 인자 변조에 10-20% 범위 내에서 영향을 끼친다는 사실을 확인 할 수 있었다.

향후 Nesting 기법을 통한 외해로부터의 파랑 인자정보를 첨가하는 5km 이하의 격자 체계에서 공간적 수심 변화와 조석, 해류와의 상호작용을 모두 포함한 파랑분석과 그 예측이 가능하도록 구축 할 예정이며 위성 자료와 동해상의 기상청 부이 및 해군함정의 자료와도 비교검증 하여 보다 더 정확한 파랑 예측 정보를 생산해 낼 예정이다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

연구 개발 목표	달성도	비고
□ 국지 해양기상 예측 모형 개발 및 검증	100%	<ul style="list-style-type: none"> ■ 연차별 DUT-METRI 개발 및 입력 자료 및 해양기상예측자료 DB화 구축 - 대기모형(MM5)에 연계된 해상풍, 해무 및 파랑 예측모형개발로 현업운영체제 구축 - 해양기상 종합 분석 시스템 구축을 위한 연차별 DUT-METRI 개발로 해군작전에 직접 활용 가능체제 구축 - 민군겸용기술과제 기간의 해양기상 산출자료 DB 구축
□ 해무자료 실시간 수집 및 모니터링 시스템 구축	100%	<ul style="list-style-type: none"> ■ 해안감시 모니터링 시스템 구축 - 해상 기상상태를 실시간으로 모니터링 하기 위한 새로운 형식의 시스템으로 시정계의 단점을 보완하고 동시에 다수의 사용자가 접근 가능한 시스템 개발 - 통신비 절감 및 원격 웹 상에서의 기상장비 제어 기술 축적 - 해군의 해안 및 항만 감시가 가능한 시스템 구축 ■ 해무예측 및 검증시스템 구축 - 안개 발생시의 물리적인 특성을 보다 현실적으로 표현하고자 Gayno-Seaman에 의해 개발된 PBL scheme를 기본으로 한 해무 예측 모형의 구조를 설계 구축

연구 개발 목표	달성도	비고
□ 상세 국지 파랑예측시스템 구축	100%	<ul style="list-style-type: none"> ■ 파랑예측시스템 구축 - WAVEWATCH III를 이용한 상세 파랑정보 예측 및 제공 시스템 구축 - 프라피룬과 사오마이 태풍 등과 같은 폭풍시의 파랑예측시스템의 안정성 검증 - 기상청 부이(덕적도, 칠발도, 거문도, 거제도)에 의한 해상풍 및 파랑예측 성능 검증 및 다수의 연구발표 및 논문화 - 동해에서의 난류성 소용돌이에 의한 파향 및 파고 변화 특성 분석 - 서해, 남해에서의 조류 및 쿠로시오의 영향에 따른 wave modulation 특성 분석 - 전지구 10일 예측 파랑예측시스템 시험 운영체계 구축
□ web 기반의 해양기상정보 제공시스템 구축	100%	<ul style="list-style-type: none"> ■ 해양기상정보제공시스템 구축 - 실시간 Web을 이용한 3시간 간격의 1일 2회 48h 상세 해양기상예측 정보 제공시스템 구축 - 국지 해역별 해상풍 및 파랑예측제공 - 전지구 파랑예측정보 제공 - web 기반의 시정, 감시카메라, AWS 제어 및 모니터링 시스템 구축 - DUT-METRI VRML 개발에 따른 3차원 해양기상자료 정보 제공

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 활용 계획

해상에서 발생하는 악기상의 예로써 태풍, 폭풍, 해일 그리고 안개나 강수 등에 의한 저시정 등이 있는데, 특히 해무와 파랑정보는 해상에서 일어나는 악기상들 중 가장 빈번히 발생하는 기상현상 중의 하나이다. 해무에 의한 저시정은 해상 활동을 저하시키고 선박의 좌초 등 경제적 손실과 인명 피해와 직관되기도 한다. 군사적인 측면에서도 해무와 높은 파도는 작전 능력을 약화시키는 주요한 자연적 원인이기도 하다. 따라서 해무 및 파랑의 발생을 예측하고 기술을 확보하는 것은 단순한 예보 기술적 차원을 넘어 사회·경제·군사적으로도 중요하다.

따라서 해무 발생에 대한 객관적인 예측을 위해서 3차원적인 대기 운동이 고려되는 대기 역학 모델을 이용하여야 한다. 이를 통하여 해무의 시·공간적 분포와 이동 및 발달 등을 살펴봄으로써 해무예측의 가능성을 제시 할 수 있으며, 또한 해무의 발생 및 유지 기구를 이해하고 이를 통해 해무의 예측성을 높일 수 있을 것이다. 그리고 모델의 기본적인 특성을 분석하고 문제점을 분석함으로써 이를 보완하고 안개의 물리적인 과정이 고려되는 해무 예측 모델을 개발하였다. 이처럼 객관적이고 독립적인 해무 예측 시스템이 마련되고 있지 못한 현재 실정에 비추어 볼 때 본 연구에서 개발한 해무 예측 모델은 다양한 측면에서의 활용이 기대가 된다.

또한 태풍을 비롯한 해양 악기상 예측은 정치·외교적으로 매우 중요한 위치인 한반도 주변 해역에서의 해군과 같은 국가 방위차원에서 뿐만 아니라 국가 경제차원의 안전한 해상조업을 위해서 해상상태의 정확한 예측정보의 필요성은 더욱 증대되고 있으며 이를 위해 보다 예측 성능을 높인 해상풍 모델과 이를 입력자료로 갖는 파랑예측모델의 검증을 위해서 일본기상청(동중국해 위치)과 한국 기상청에서 각각 운영되고 있는 5지점(덕적도, 칠발도, 거제도, 거문도, 동해부이)의 해양 관측 부이 자료를 이용하여 본 연구에서의 파랑 모델 결과와 비교하여 본 결과 이전의 연구결과에서는 볼 수 없었던 연안의 파고예측성능이 향상된 점이 발견되었다. 즉 이로써 향후 상세 국지 파랑모델로 연안의 상세한 파랑정보가 제공되어지리라 기대가 된다.

가. 기술적 측면

- 해무의 발생 역학 이해 및 해무 예보 기술 향상
- 파랑예측 기술 향상
- 해양 재해 방지를 위한 기초 기술 축적

나. 군사·경제적 측면

- 해상 교통 및 어업 활동 증가에 따른 해양 기상 정보 지원을 통한 생산성 향상
- 해양 재해 예방에 따른 경제적 손실 감소
- 해상 및 해변의 레저 시설 증가에 따른 양질의 예보 서비스 제공

다. 군수 적응성

- 항공 및 해상작전 성분별 필요한 해양기상 요소를 군이 자체적으로 생산할 수 있는 능력 제공 (Synoptic Forecasting System: DUT-METRI-2000 활용)
- 작전해역에서의 실시간 예보를 할 수 있는 예보체계를 구축하여 작전해역의 독자적인 예보체계 운용 능력보유 (Real-Time Local Forecasting System: DUT-METRI-2001 활용)
- 실시간 해상풍 예보에 따른 대잠 작전환경(혼합층, 수중소음) 요소파악
- 보다 이해하기 쉽고 정확한 기상예측자료의 3차원 영상표출로 작전능력 향상(DUT-METRI-2002 VRML 활용)
- 작전해역에 대한 해상풍, 안개, 파랑 예측능력 확보(DUT-METRI 및 www.metri.re.kr/marweb web을 활용한 실시간 분배 시스템)

라. 기대효과

- 해상풍, 파랑, 해무 등의 해상상태 예측에 의한 가상해양환경 활용기술의 활용으로 활용극대화
- 가상해양환경의 체계운용을 위한 활용으로, 성분작전의 시뮬레이션 및 작전 교육의 효율성 증대
- 원격 지형 및 해양환경을 선상 또는 육상에서 직접 보고, 느끼고, 체험할 수 있음으로 전략수립에 정밀도 향상.
- 해저지형, 해수흐름, 해수구조, 수온, 염분, 밀도 등을 입체적 운동으로 제시하여 현실감 있는 체험과 작전 통제기능 강화
- 해양과학의 첨단장비 운영기술 및 수치모델링 기술의 민수분야 파급효과 극대화
- 민수분야에서 다양하게 활용 전망되는 가상현실기법 및 재현장치의 발전으로 21세기 국제 정보운용산업의 선진화 조기달성
- 21세기에 대비한 해군작전체계의 우월성 확보 및 관련산업의 수출지향 도모
- 본 연구로 축적된 가상현실 기술에 정보통신 기능을 부가함으로써 새로운 개념의 기술과 제품 창출가능(예를 들면, Remote Automation이나 공장 자동화와 같은 원격 관리 시스템은 사용자가 사용하기에는 너무 복잡하고 불편하며, 원격 조작의 실수도 비일비재한 실정이다. 이때 가상현실의 3차원 형상 GUI를 통하여, 이러한 문제를 해결)
- 실시간 해양기상자료의 확보 및 데이터 베이스화에 따른 보다 정확한 기상

변동 및 악기상 예측 등으로 해양산업활동 지원

- 대기-해양의 접목에 의한 입체 운동을 현실감 있는 시뮬레이션 제공
- 해양기상 관측자료 확보, 모델개발 및 검증에 활용되어 예측정확도 향상
- 해상의 물류수송 및 해상조업을 위한 실시간 기상정보 제공
- 해난재해 시 해상상태 정보제공 체계 구축으로 재해방지시스템 기반 구축
- 해상상태 및 기상정보를 현장감 있게 사실적으로 시뮬레이션으로 인한 과학적, 교육적 관심도 증폭

2. 연구 개발 결과 활용 실적

그 동안의 연구 개발 결과를 바탕으로 아래와 같은 연구 내용을 전문 학술 학회에 발표하였으며 이를 통하여 연구 개발 결과에 대한 전문적 평가를 받고 동시에 연구 개발로 얻어진 기술을 공유·활용하고자 하였다.

국내논문

1. Hyo Choi, Jang Won Seo and Chang Shik Kim, 2000: Numerical Prediction on Sea Surface Drift Induced by Windstorm in the Coastal Complex Terrain. *Korean Journal of the Atmospheric Sciences*. Vol 3, 2, pp.67-82.
2. 안중배, 남재철, 서장원, 이해진, 2002: 해무 예측 모듈 개발과 울릉도 해무 사례 적용 연구. 제38권 제2호, pp. 155-164. *한국기상학회지*

국제 proceeding

- Jang-Won Seo, You-Soon Jang, Jae-Cheol Nam, 2002: Introduction of Marine Meteorology Prediction System operated in METRI/KMA, Muju, METRI/IAP, p66-71.
- Jang-Won Seo, You-Soon Jang, Jae-Cheol Nam, 2001: The verification of wind waves prediction system using the buoy data, USA, 10-14, AGU
- Seung-On Hwang, Tae Hee Kim, Jang-Won Seo, 2001: Introduction of Argo in Korea and preliminary investigation on temperature data from floats, USA, 10~14, AGU
- Seung-On Hwang, Yong-Sang Kim, and Jang-Won Seo, 2001(7): The effect of using LAPS in the mesoscale numerical prediction for heavy rainfall, 18th Conference Weather Analysis and Forecasting, p116-117, Florida, USA.
- Jang-Won Seo, You-Soon Jang, Jae-Cheol Nam, Chang-Shik Kim, 2001: The System of Fine-Mesh Wind Wave Prediction in the East Sea, PAMS & JECSS, April, 11-13, Cheju KAL Hotel
- Jae-Cheol Nam, Jang-Won Seo, You-Soon Chang, 2001: A study on the Sensitivity of wave parameter using numerical model. *Proceedings of Fifth IOC/WESTPAC International Scientific Symposium*. Seoul, Korea.
- Jang-Won Seo, Chang-Shik Kim, Jae-Cheol Nam, 2000: Prediction System of Sea Surface Winds and Wind Waves, International Workshop on Development of Operational Ocean Prediction System around Korean Waters, October 6-7, 2000, Pusan, Korea
- Jang-Won Seo, Chang-Shik Kim, Jae-Cheol Nam, 2000: Prediction System of

- Sea Surface Winds and Fogs using Mesoscale Model(MM5), Nov. 16, 2000, GSA Annual meeting, Reno, USA
- Haman Cho¹, Jangwon Seo¹, Yonghee Lee¹, 2000: A Variability of Net Heat Flux in the East Asian Marginal Seas and Its Impacts on the Precipitation Change Associated with the El-Niño Event, ISAM2, pp. 152-158.
- Jang-Won Seo, 2000: Numerical Simulation of Seawinds and Fogs using Mesoscale Model(MM5), *China-Korea international symposium*. pp. 20-24.

국내학술발표

1. 서장원, 한주영, 안중배, 1999: 중규모 기상모형을 이용한 해양악기상 예측 시스템 구축연구. *한국해양학회 추계학술발표회*, 목포대학교, 목포
2. 안중배, 이해진, 서장원, 1999: 중규모 기상모형을 이용한 동해상 안개발생 및 소산 탐지 연구. *한국해양학회 추계학술발표회*, 목포대학교, 목포
3. 안중배, 이해진, 서장원, 1999: 동해상 해무의 열적 연직구조 특성에 관한 모형연구. *한국기상학회 추계학술발표회*, 기상청 기상연구소, 서울
4. 윤용훈, 서장원, 김충기, 이현정 1999: 한반도 주변연안의 조석예보. *한국기상학회 추계학술발표회*, 기상청 기상연구소, 서울
5. 안중배, 이해진, 서장원, 1999: 모형을 이용한 동해 해무의 발생학적 특성 연구. *한국환경과학회, 부산신라대학교, 부산*
6. 서장원, 1999: 중규모 기상모형을 이용한 여름철 동해안의 안개발생 및 소산 예측. 한국해양연구소 초청 세미나.
7. 서장원, 김희철, 조하만, 엄향희, 1999: 여름철 동해 해역의 해무 예측 시스템 구축연구, *한국해양환경공학회, 목포해양대학교, 목포*
8. 서장원, 조하만, 김희철, 민기철, 2000: 중규모 기상모형을 이용한 국지 해양기상예측 시스템 구축연구, *한국기상학회, 공군전대*
9. 안중배, 이해진, 서장원, 2000: 1999년도에 발생한 울릉도 해무특성에 대한 수치적 실험, *한국기상학회, 공군전대*
10. 서장원, 민기철, 김창식, 2000: 한국동해에서의 해양기상 예측 및 표출 시스템 구축연구, *한국해양학회, 인하대학교*
11. 안중배, 이해진, 조하만, 윤용훈, 서장원, 2000: 우리나라 주변해역 해무 발생 예측을 위한 모형실험, *한국해양학회, 인하대학교*
12. 서장원, 장유순, 2000: Wave Watch III 모형을 이용한 파랑예측 및 검증, 추계 한국기상학회, Oct. 17, 2000, 기상청
13. 서장원, 이현정, 2000: 울릉도 주변해역의 해무 특성 및 예측 연구, 추계 한국기상학회, Oct. 17, 2000, 기상청

14. 안중배, 이해진, 남재철, 서장원, 윤용훈, 2000: 해무예측을 위한 수치모형연구, 추계 한국기상학회, Oct. 17, 2000, 기상청
15. 강윤정, 서장원, 황승연, 김태희, 남재철, 2000: BUOY 자료를 이용한 서해해역의 해양-대기 열교환량 산출, 추계 한국기상학회, Oct. 17, 2000, 기상청
16. 서장원, 김창식, 남재철, 2000: 2000년 여름철 태풍시 Wave Watch III 모형에 의한 파랑예측 및 검증, 추계 한국해양학회, Oct. 18, 2000, 서울대
17. Jang-Won Seo, Chang S. Kim, 2000: The prediction and Verification of the Sea Surface Winds in the East Asian Marginal Seas. 추계 한국해양학회, Oct. 18, 2000, 서울대
18. 서장원, 김태희, 서은진, 남재철, 민기철, 2000: 동해해역의 해무특성 및 예측시스템 연구, 추계 한국해양학회, Oct. 18, 2000, 서울대
19. 안중배, 이해진, 남재철, 서장원, 윤용훈, 2000: 안개모듈개발을 통한 해무의 수치적 예보연구, Nov. 16, 한국환경과학회, 전남대학교
20. 서장원, 2000: “해군작전을 위한 해양기상정보 지원 체계 구축방안”, Nov. 24, 2000, 초청세미나, 계룡대 해군본부
21. 서장원, 2001: “동해해역의 해무예측 시스템 연구”, Mar. 9, 2001, Ocean Informatics 초청세미나, 대전 충남대
22. 서장원, 2001: 해양악기상 감시 및 예측기술개발, Mar. 10, 2001, 성균관대학교 토목공학과 초청세미나
23. 서장원, 2001: 태풍사례기간의 파랑예측 및 폭풍해일 예측, April, 4, 2001, 한국해양연구원 초청세미나
24. 서장원, 2001: 상세 국지해역 파랑예측시스템 구축, April, 19, 2001, 부산기상2000호 선상세미나
25. 이호만, 서장원, 남재철, 2001: 2000년 여름 한반도 연안 폭풍해일 연구, April 26-27, 춘계 한국기상학회, 조선대학교, 광주
26. 서장원, 남재철, 김유철, 2001: 영종도 주변지역 안개발생사례에 대한 특성분석, April 26-27, 춘계 한국기상학회, 조선대학교, 광주
27. 서장원, 장유순, 남재철, 2001: 제주해역의 국지파랑 예측시스템, April 26-27, 춘계 한국기상학회, 조선대학교, 광주
28. 이윤경, 서장원, 남재철, 나정열, 2001: 서해 갯벌에서의 미세 열교환량 관측 및 분석, April 26-27, 춘계 한국기상학회, 조선대학교, 광주
29. 안중배¹, 이해진¹, 남재철², 서장원, 2001: 안개 모듈 개발을 통한 해무 예측연구, April 26-27, 춘계 한국기상학회, 조선대학교, 광주
30. 서장원, 장유순, 김창식, 2001: 수치모형을 이용한 파랑인자 민감도 특성연구, May 11-12, 춘계한국해양학회, 국립수산진흥원, 부산
31. 이윤경, 나정열, 서장원, 남재철, 2001: 갯벌에서의 미세규모 열속변화,

- May 11-12, 춘계한국해양학회, 국립수산진흥원, 부산
32. 서장원, 오희진, 남재철, 2001: 해륙풍에 의한 국지규모의 해양기상특성 고찰, 10월 25-26, 추계한국기상학회, 연세대학교
 33. 안중배, 서장원, 이해진, 2001: 해무특성별 발생 메카니즘 모사 연구, 10월 25-26, 추계한국기상학회, 연세대학교
 34. 서장원, 이윤경, 서은진, 나정열*, 2001: 국지적 열교환 차이에 의한 바람 특성 고찰, 11월 5-6, 추계한국해양학회, 한국해양연구원
 35. 서장원, 오희진, 남재철, 2001: 해륙풍에 의한 국지규모의 해양기상특성 고찰, 10월 25-26, 추계한국기상학회, 연세대학교
 36. 안중배, 서장원, 이해진, 2001: 해무특성별 발생 메카니즘 모사 연구, 10월 25-26, 추계한국기상학회, 연세대학교
 37. 서장원, 이윤경, 서은진, 나정열*, 2001: 국지적 열교환 차이에 의한 바람 특성 고찰, 11월 5-6, 추계한국해양학회, 한국해양연구원
 38. 서장원, 장유순, 남재철, 2002: 48시간 파랑 예측 모델 성능 평가, 4월 p46-50, 춘계기상학회, 경북대학교.
 39. 안중배, 남재철, 서장원, 이해진, 2002: 한반도 안개 특성 연구, 4월 p616-618, 춘계기상학회, 경북대학교.
 40. 장유순, 서장원, 김태희, 남재철, 2002: The Analysis of Wave Parameters using Wave Modeling and Observation Buoy data, 5월, 전남대학교, 춘계 한국해양학회.
 41. 서은진, 서장원, 남재철, 정해순, 2002: 실시간 시정변화 감시를 위한 시정 모니터링 시스템, 5월, 전남대학교 춘계한국해양학회.
 42. 이윤경, 서장원, 나정열, 남재철, 2002: 서해연안의 갯벌과 해빈에서의 열속 변화분석, 5월, 전남대학교 춘계한국해양학회.
 43. 서장원, 남재철, 장유순, 2002: 한반도 주변해역의 월평균 파랑 분포도, 5월, 전남대학교 춘계한국해양학회.

제 6 장 결론 및 토의

동해안의 해무는 5월부터 8월에 집중되어있고 9월부터 4월까지의 거의 발생하지 않으며, 연안에 위치한 강릉, 속초, 동해는 6월에 가장 많이 발생했고, 도서지역인 울릉도는 7월에 가장 많은 안개발생을 보인다. 평년에 안개지속시간도 울릉도에서 7월에, 강릉, 속초에서는 6월에 가장 높은 값을 보인다. 안개발생시 습도분포는 속초를 제외하고는 상대습도 90% 이상에서 안개가 발생해서 도서지역에서 발생하는 이류무의 특성을 잘 보여주고 있다. 안개발생시 풍계는 연구지역 중 가장 내륙에 위치한 강릉지방에서 바람이 적을 때 안개가 발생하며 지형상 북풍계열의 바람이 새벽에 바다로부터 불어오므로 주풍향이 북풍일 때 안개가 발생한다. 동해는 북, 북동풍, 속초는 북, 남동풍, 울릉도는 북동, 남서풍이 주풍향일 때 주로 안개가 발생한다. 동해의 안개는 해기차로 인해 국지적으로 발생하는 것으로 보이며, 해역에서 발생한 안개는 바다로부터 불어오는 바람으로 인해 연안역으로 이동하는 하여 내륙까지 영향을 주는 것으로 보인다.

2000년 5월 20일에서 31일까지 지상기상관측, 지상 일기도, 고층관측 결과, 이 기간에 안개는 4회 발생하였다. 사례 1(2000년 5월 22-23일)에서는 알류산 열도에 위치한 저기압이 남하하면서 악기상과 함께 안개가 발생한 경우를 보여주었고, 사례 2(2000년 5월 24-25일)는 북태평양 고기압의 영향으로 고온고습의 남서류가 해상으로 유입되면서 안개가 발생하는 전형적인 이류무의 특징을 보여주었다. 사례 3(2000년 5월 26-27일)에서는 강한 저기압이 동해상으로 유입되면서 많은 양의 비가 내리게 하고, 저층에서 중층까지 구름층이 두껍게 형성되어 저시정을 나타내며, 비가 멈춘 후에도 강수지역에서 증발로 인해 안개층이 유지된다. 고층관측이 함께 이루어졌던 사례 4(2000년 7월 30-31일)에는 전선을 동반한 저기압이 동해 유입되면서 전선안개가 형성되는 것을 볼 수 있었다.

본 연구에서는 3차원적인 대기 운동이 모두 고려되는 중규모 대기 역학 모형을 이용하여 동해상에 발생하는 해무의 이동 및 발달을 살펴보고 모형에 의한 예측 가능성을 살펴보았으며, 이러한 연구를 바탕으로 해무 예측 모형을 개발하여 해무 예측 모형의 이용 가능성을 연구하였다.

먼저 연구를 위하여 연구 대상 지역인 울릉도 관측소에서 발생한 해무 발생일을 기준으로 발생학적으로 성격이 서로 다른 전형적인 이류 해무와 증기 해무 그리고 전선 해무 사례를 선정하여 수치 실험하였다. 이러한 수치 실험을 통하여 중규모 역학 모형에 의한 해무 발생시 종관장에 대한 예측 가능성과 해무 발생과 관련한 사례별 특성을 살펴보고자 하였다. 각 사례기간에 대한 수치 실험 결과는 발생학적인 요인과 종관적인 조건에 의해 각각 특징적인 모습을 보여주었다.

먼저 전형적인 증기 안개 사례인 Case 1-a와 Case 1-b의 경우, 따뜻한 해면

위를 찬공기가 이동하면서 대기로의 열속의 증가가 안개 기간동안 나타났으며, 난류 운동에너지 증가도 보였다. 이것은 대기로 공급된 열속의 영향으로 접촉면에서의 난류 운동을 강화시킨 것이다. 이와 같은 난류에 의한 혼합으로 상대습도가 증가하고, 대기중의 수증기 응결하여 안개가 발생하게 되는 것이다. 중규모 모형은 증기 안개발생과 관련한 이러한 일련의 특성을 모사할 수 있는 능력이 있음을 보여주었다.

또한 이류 안개 사례(Case 2-a, Case 2-b)에서는 온난 습윤한 공기가 동해상으로 이류하면서 수증기 공급과 따뜻한 해수면에서의 증발 작용으로 안개가 발생하였다. 따라서 안개 발생 초기에는 따뜻하고 습윤한 공기의 동해상 이류가 나타났으며, 이로 인해 비교적 높은 혼합비가 모델에서 나타났다. 이처럼 안개 발생 지역으로의 수증기의 공급이 활발한 이류안개의 경우, 수증기의 공급이 상대습도의 증가를 이끌게 되어 수증기가 응결하는 것으로 모사되었다. 중규모 모형은 역시 이류 안개와 관련한 기본적인 종관장을 적절히 모사할 수 있었다.

마지막으로 전선과 동반되어 발생하는 전선 안개 사례(Case 3-a, Case 3-b)에 대해서도 모형은 그 특성을 잘 모사하고 있었다. 전선 해무 사례로 전선의 이동에 따라 발생지역으로 안개가 발생하기 좋은 종관적 상태가 모델에서 모사되었으며, 주로 전선의 이동에 따라 높은 상대습도를 가지는 지역이 발달하는 모습을 보여주었다. 이처럼 전선 안개는 전선면에서의 운적의 대류활동이나 강수현상에 동반되어 모형에서 모사되었다. 이상에서 살펴본 바와 같이 모델의 결과는 각 사례기간에 발생한 해무의 각기 다른 발생학적 특성을 중규모 모형이 적절히 모사하고 있음을 보여주었다.

그리고 모형에서는 최하층의 상대습도가 95%이상으로 높은 시기와 관측된 해무 발생시기가 유사하여 수증기량에 의한 해무 예측 판단기준의 가능성을 살펴볼 수 있었지만, 상대습도의 높고 낮음은 해무의 발생 여부와 관련하여 단순히 높은 상관관계를 가질 뿐이며 해무 예측의 절대적 판단 기준이 될 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 대기중의 물량(Liquid water content)이 관측에서 나타난 안개 발생기간과 체계적인 연관성을 가지고 있는지 살펴보았는데 모델의 결과들은 대체적으로 0.05 g/kg 이상의 물량이 모사된 기간이 관측된 기간과 일치하거나 유사한 것으로 모사함으로써 물량에 의한 해무 예측 가능성을 보여 주었다. 그러나 기본적으로 MM5만을 이용하였을 경우(EXP-1), 모형에서 안개의 임계 기준치인 0.05 g/kg이상이 모사된 기간이 사례별로 울릉도에서 관측된 해무의 기간에 비하여 짧게 모사됨으로써 구름 물량이 과소 모사됨을 보여주었다. 이는 해무 발생에 관한 특별한 처방이나 해무 발생에 관한 객관적 판단의 기준이 없는 기존의 모형은 개선되어야 할 소지가 있음을 의미한다.

따라서 본 연구에서는 Gayno(1995)와 Sommeria and Deardroff(1977) 등에 근거하여 안개 발생과 관련한 미세 물리과정인 아격자 응결 모수화와 복사적 효과를 포함한 안개 예측 모델을 개발하였으며 개발된 해무 예측 모형을 중규모 모형에 장착

하였다. 또한 개발된 예측모델을 많은 사례 적용을 통하여 분석함으로써 문제점을 발견해내고 이에 대한 개선작업도 수행하였다. 개발된 해무 예측 모델을 검증하기 위하여 본 연구에서는 네 가지 형태의 수치 실험을 수행하였다. 즉, MM5의 기본적인 해무 예측 능력을 살펴보고 해무 예측 모델을 적용한 경우에 대한 비교를 위하여 해무 예측 모델을 적용하지 않은 기준 실험(No fog module experiment, EXP-1)을 실시하였으며, 아격자 규모 응결 모수화만 포함된 예측모델을 적용한 경우(Fog module w/o radiation experiment, EXP-2)에 대한 수치실험을 하였다. 또한 아격자 규모의 응결 모수화 뿐만 아니라 안개 발생시의 복사효과까지 고려한 경우(Fog module with radiation experiment)에 대한 수치 실험을 수행하였는데 이는 다시 2차 연도에 개발된 복사 모수화를 포함한 경우(EXP-3)와 3차 연도에 개선된 복사 모수화를 포함한 경우(EXP-4)에 대하여 수치실험 하였다.

수치 실험 결과 선정된 대부분의 사례에서 안개 예측 모델을 적용한 경우(EXP-2, EXP-3, EXP-4)가 그렇지 않은 경우(EXP-1)에 비해서 관측과 더 유사한 결과를 보여주었다. 특히, 안개 발생시의 복사적 특성을 간단히 모수화한 EXP-3와 EXP-4가 아격자 규모의 응결 모수화만 적용한 경우(EXP-2)에 비해 안개의 발달과 소산과정을 비교적 현실적으로 모사하였다. 이는 보다 자세한 안개 미세 물리과정에 대한 특성을 모형에 고려함에 따라서 그 예측성이 높아지고 더욱더 실제적으로 모사함을 단적으로 보여주는 것이다.

그러나 EXP-3와 EXP-4는 해무 예측 모델의 복사과정에 대한 문제점을 개선한 전과 후에 대한 실험으로 해무 예측 모델이 단순히 경계층 모델에서만 구동되는 것이 아니라 3차원의 예보 모델인 PSU/NCAR MM5에 장착되어 구동됨에 따라서 이미 MM5에서 작동되는 다른 물리과정들과의 불필요한 중복의 문제를 개선하여 개발된 해무 예측모델에 의한 결과(EXP-4)가 EXP-3보다 예측성이 더 높게 나타났다.

선정된 12개의 사례에 대한 수치실험 결과 거의 대부분의 사례에서 모델에서 모사된 안개 발생기간과 관측된 기간이 유사하게 나타났다. 이처럼 본 연구에서는 해무 예측 모델을 개발하고 그것에 대한 꾸준한 사례 실험으로부터 문제점을 발견하고 개선하여 보다 더 정확한 안개 예측을 위한 모델을 개발하였다.

마지막으로 개발된 해무 예측 모델의 검증을 위하여 본 연구에서는 안개가 빈번히 발생하는 난절기 동안에 대한 수치 실험을 수행하였다. 총 8개월간 적분하였으며, 매 60시간씩 적분하여 12시간 이후의 결과만을 분석 결과에 포함하여 개발된 예측 모델의 예측 가능성을 검증하였다. 검증은 범주 통계(Categorical statistics)법을 이용하여 해무 예측 모델의 예측 능력을 검증하였는데, 대체적으로 그 예측성이 높게 나타났다.

이처럼 개발된 해무 예측 모델은 안개 발생 예측성이 상당히 높게 나타났으며, 모형에서 모사되는 안개의 발생학적인 특성 또한 잘 모사하고 있었다. 그러므로 앞으로 안개 발생시의 다양한 미세물리적인 과정에 대한 모수화와 경계층 모델의 개선작업은 해무 예측에 관한 실제적인 예보에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

한편 본 과제에서 구축된 파랑예측시스템은 극대치의 풍속에 대해 계산 과정에서의 안정성을 보였으며, 파의 소산 형태와 해저면 마찰의 상호작용이 잘 반영되어 있다. 태풍 통과 시 부이 관측치는 최대 8.5m에 달하는 높은 파고를 천해에 위치한 기상청 부이에서 관측이 가능하였다. 이 기간 동안의 WAVEWATCH-III에 의한 유의파고 계산자료와 부이에서 관측된 자료와의 상관계수는 동중국해에서는 0.95, 칠발도에서 0.83, 덕적도에서 0.74, 그리고 거제도에서 0.85의 상관 관계를 나타내는 성능을 보였다. 5개의 기상청 해양기상 부이에 대해 비교적 결측이 많았던 거문도 부이를 제외한 칠발도, 덕적도, 거제도, 동해 부이에 대해서 몇 가지 시계열 자료 분석을 실시한 결과 풍속이 셀 때 파고가 높아지며, 풍속이 약할 때 파고가 낮아지는 일반적인 현상이 부이자료에서 잘 나타난다. 기상청 부이 중 칠발도, 덕적도, 거문도 부이 세 지점에서는 모두 최대 풍속이 발생한 후 2시간 후에 최대 파고가 나타난다는 사실을 교차 상관계수 분석을 통해서 확인할 수 있었다. 비교적 외해에 위치해 있는 동해 부이에서는 상관계수가 천해에 위치한 위의 세 지점보다 풍속과 파고간의 상관성이 약간 더 높았으며, 풍속에 대한 파고의 반응시간도 충분히 큰 취주 거리를 가질 수 있는 환경으로 인해서 한시간이 늦은 3시간으로 계산되었다.

본 연구에서 수행된 결과를 토대로 한반도 영역에 대해 0.5°의 동아시아 격자, 0.1°의 동해 해역 격자, 0.05°의 남해해역을 대상으로 한 파랑예보 시스템을 구축하였으며, 매일 2회 48시간까지의 파랑 예보자료가 웹 페이지를 통해 실시간으로 제공되고 있으며, 앞으로 더 세밀하고 정교한 모델을 계속 구축하고 비교 검증할 계획이다.

파랑 모델을 이용한 수치실험 결과, 파랑 인자 계산에 있어서 바닥마찰 계수의 효과가 무시할 수 없을 정도로 중요하다는 결론을 얻었으며, 해류, 조류의 효과도 파랑 인자 변조에 10-20% 범위 내에서 영향을 끼친다는 사실을 확인 할 수 있었다.

향후 Nesting 기법을 통한 외해로부터의 파랑 인자정보를 첨가하는 5km 이하의 격자 체계에서 공간적 수심 변화와 조석, 해류와의 상호작용을 모두 포함한 파랑분석과 그 예측이 가능하도록 구축 할 예정이며 위성 자료와 동해상의 기상청 부이 및 해군함정의 자료와도 비교검증 하여 보다 더 정확한 파랑 예측 정보를 생산해 낼 예정이다.

제 7 장 참고문헌

- 기상청, 1997: 한반도 연안 해무 특성집.
- 기상연구소, 1986: 한국 서해 중부 연안의 해무 특성 조사. 한국 기상 연구소. MR 86-1, 83 pp.
- 기상학회, 1999: 대기과학개론. 시그마프레스.
- 기상연구소, 2000: 영동 해안지방의 안개(해무)발생 특성조사.
- 기상연구소, 2000: 영종도 주변 해역의 해무예측연구(I) 기상연구소 MR000M03.
- 김문옥, 1998: 한반도 주변해역의 해무 분포 특성. 전남대학교 대학원 석사학위논문, pp 64.
- 김성삼, 이내영, 1970: 한국 안개 기후구 설정에 관하여. 한국 기상학회지, 6, 1-15.
- 김해동, 1997: 초여름 한반도 동해안의 해무 발생에 관한 수치실험. 한국기상학회지, 33, 337-347.
- 변희룡, 이동규, 이화운, 1997: 동해 및 주변에서 발생하는 해무의 특성과 예측 가능성 조사, 한국기상학회지, 33, 41-62.
- 서장원, 조하만, 김희철, 민기철, 2000: 중규모 기상모형을 이용한 국지 해양기상 예측 시스템 구축연구, 한국기상학회, 공군전대
- 서장원, 민기철, 김창식, 2000: 한국동해에서의 해양기상 예측 및 표출 시스템 구축연구, 한국해양학회, 인하대학교.
- 서장원, 이현정, 2000: 울릉도 주변해역의 해무 특성 및 예측 연구, 추계 한국기상학회, Oct. 17, 2000, 기상청.
- 서장원, 김태희, 서은진, 남재철, 민기철, 2000: 동해해역의 해무특성 및 예측시스템 연구, 추계 한국해양학회, Oct. 18, 2000, 서울대
- 안중배, 이해진, 2000: 중규모 해양모형을 이용한 한반도 주변 해역 해양순환 재현. 한국해양학회지 바다, 5, 186-194.
- 안중배, 이해진, 서장원, 2000: 1999년도에 발생한 울릉도 해무특성에 대한 수치적 실험, 한국기상학회, 공군전대.
- 안중배, 이해진, 조하만, 윤용훈, 서장원, 2000: 우리나라 주변해역 해무발생 예측을 위한 모형실험, 한국해양학회, 인하대학교.
- 안중배, 이해진, 남재철, 서장원, 윤용훈, 2000: 안개모듈개발을 통한 해무의 수치적 예보연구, Nov. 16, 한국환경과학회, 전남대학교.
- 안중배, 이해진, 남재철, 서장원, 윤용훈, 2000: 해무예측을 위한 수치모형연구, 추계 한국기상학회, Oct. 17, 2000, 기상청.
- 안중배, 남재철, 서장원, 이해진, 2002: 해무 예측 모듈 개발과 울릉도 해무 사례 적용 연구. 한국 기상학회지, 38권 제2호, 155-164.

- 오귀영, 1995: 황해 중부 연안 안개의 발생특성 분석과 예측가능성 조사. 부산 수산대학교 대학원 석사학위논문, 58 pp.
- 이내영, 1975: 청진시 일 최저 기온과 복사 안개의 경험적 예보에 관한 연구. 이화여자대학교 생활과학 연구원 논총, 16, 187-197.
- 이해진, 2000: 동해상에서 발생하는 해무의 특성에 대한 모형 연구. 부산대학교 대기과학과 석사학위논문, 85 pp.
- 전영신, 부경은, 김지영, 김시완, 조하만, 홍성길, 1999: 가을철 김포국제공항 복사무 발생의 기상조건. 기상연구, 61, 30-43.
- Anthes, R.A., E.Y. Hsie, and Y. H. Kuo, 1987: Description of the Penn State/NCAR Mesocale Model Version 4 (MM4). NCAR Technical Note-282+ STR, National Center for Atmospheric Research(NCAR),Boulder, 66 pp.
- Ballard, S. P., B. W. Golding and R. N. B. Smith, 1991: Mesocale Model Experimental Forecasts of the Haar of Northeast Scotland. Mon. Wea. Rev. 199, 2107-2122.
- Bougeault, P., 1981: Modeling the trade-wind cumulus boundary layer. Part I: Testing the ensemble cloud relations against numerical data. J. Atmos. Sci., 38, 2414-2428.
- Bechtold Peter, Charles Fravalo and Jean Pierre Pinty, 1992: A model of Marine Boundary-Layer Cloudiness for Mesoscale Applications. J. Atmos. Soc. 49, 1723-1744.
- Bretherthon, F.P. and C.J.R. Garrett, 1968 : Wave trains in inhomogeneous moving media. Proc. Roy. Soc. London. A, 302, 529-554.
- Brown, R., and W.T.Roach, 1976: The physics of radiation fog: II - a numerical study. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 102, 335-354.
- Chalikov. D. V. and Belevich, M. Y., 1993 : One-dimensional theory of the boundary layer. Boundary-Layer Meteor., 63. 65-96.
- Christoffersen, J. B., 1982: Current depth refraction of dissipative water waves. Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Techn, Univ. Denmark, Series paper no. 30, 150pp.
- Cotton, W. R., and R. A. Anthes, 1989: Storm and cloud dynamics. Academic Press, San Diego, USA.
- Gayno, G.A., 1995: Development of a higher-order, fog-producing boundary layer model suitable for use in numerical weather prediction. M.S. Thesis, The Pennsylvania State University, pp 104.
- Grell et al. 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus

- parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 746-787.
- Gelci, R., H. Cazale and J. Vassal, 1956: Utilization des diagrammes de propagation a la prevision energetique de la houle. *Bulletin dinformation du commite central doceanographie et detudes des cotes*, 8, 169-197.
- Gelci, R., H. Cazale and J. Vassal, 1956: Prevision de la haule. La methode des densites spectrographiques. *Bulletion dinformation du commite central doceanographie et detudes des cotes*, 9, 416-435.
- Hasselmann, K., 1962: On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part 1. General theory. *Jour. Fluid Mech.* 12(4)481-500.
- Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carison, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Muller, D. J. Olbers K. Richter, W. Sell. And H. Walden, 1973: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project(JONSWAP). *Erg. Dtsch. Hydrogr. Z, Reihe A(8)*. No. 12, 95pp
- Hyo Choi, Jang Won Seo and Chang Shik Kim, 2000: Numerical Prediction on Sea Surface Drift Induced by Windstorm in the Coastal Complex Terrain. *Korean Journal of the Atmospheric Sciences*. Vol 3, 2, pp.67-82.
- Jang C J, Y, Noh and C-H Kim, 2002 : Seasonal variation of global volume transport calculated from an ocean general circulation model. *Ocean and Polar Research*, v, 24(1), 1-18.
- Kikuro Tomine, Takashi Kawabata and Tsutomu Setoguchi, 1998: A Case Study of Fogs at Misawa Fishing Port. *J. Meteor.Soc. Japan*. 76, 115-168.
- Kozo Ninomiya, Junzo Fujimori, Takako Akiyama, 1996: Multi-scale features of the cold air outbreak over Japan sea and the Northwestern Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*. 74, 745-761.
- Leipper, Dale F., 1994: Fog on the U.S. West Coast: A Review. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 75, 229-240.
- Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart, 1960 : Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents. *J. Fluid Mech.*, 9W8, 565-583.
- Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart, 1961 : The changes in amplitude of short gravity wves on steady non-uniform currents. *J. Fluid Mech.*, 10, 529-549.

- Mark T. Stoelinga, 1997: A user's Guide to Read/Interpolate/Plot, 53 pp.
- Miles, J. W., 1957: On the generation of surface waves by shear flows. *Jour. Fluid Mech.* 21(2)305-331.
- Miles, J. W., 1960: On the generation of surface waves by turbulent shear flows. *Jour. Fluid Mech.* 7(3)469-478.
- Musson-Genon, L., 1987: Numerical simulation of a fog event with a one dimensional boundary layer model. *Mon. Wea. Rev.*, 155, 592-607.
- Oliver, D. A., W.S. Lewellen, and G.G. Williamson, 1978: The interaction between turbulent and radiative transport in the development of fog and low-level stratus. *J. Atmos. Sci.*, 35, 301-316.
- Oh, I. S. and Y. Y. Kim, 1992 : Wave characteristics changes under a strong tidal current influence. *La mer* 30, 275-285.
- Peregrine, D. H., 1976: Interaction of water waves and currents. *Advances in applied mechanics*, 16, 417-445
- Phillips, O.M., 1957: On the generation of waves by turbulent wind. *Jour. Fluid Mech.* 2(5) 417-445.
- Phillips. O.M., 1958: On some properties of the spectrum of wind-generated ocean waves. *Jour. Marine Res.* 16(3) 231-245.
- Randall, D. A., 1987: Turbulent fluxes of liquid water and buoyancy in partly cloudy layer., *J. Atmos. Sci.*, 44, 850-853.
- Sellers, W. D., 1965: *Physical Climatology*. The University of Chicago Press, pp 272.
- Seo Jang-Won, Chang S. Kim, 2000: The prediction and Verification of the Sea Surface Winds in the East Asian Marginal Seas. *Proceeding of the Autumn Meeting 2000 of the Korean Society of Oceanography*. 29-33.
- Smith, R. N., 1990: A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 116, 435-460.
- Sommeria, G., and J. W. Deardorff, 1977: Subgrid-scale condensation in models of non-precipitating clouds. *J. Atmos. Sci.*, 34, 344-355.
- SWAMP Group, 1985: *Ocean Wave Modelling*. Plenum Press, 256pp.
- SWIM Group, 1985: A shallow water intercomparison of three numerical wave prediction models(SWIM). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 111, 1087-1112.
- Taylor, G. I., 1917: The formation of fog and mist. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 43, 241-268.

- Tiedke, M., 1993: Representation of clouds in large-scale models., *Mon. Wea. Rev.*, 121, 3040-3061.
- Teixeira Joao, 1999: Simulation of fog with the ECMWF prognostic cloud scheme. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 125, 529-552.
- Tremant, M., 1989: The forecasting of sea fog. *Meteo. Magazine.* 118, 69-75.
- Tolman, H. L., 1991 : A third generation model for wind waves on slowly varying unsteady, and inhomogeneous depth and currents. *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 782-797.
- Tolman. H. L. and Chalikov, D., 1996 : source terms in a third-generation wind-wave model. *J. Phys. Oceanogr.*, 26, 2497-2518.
- Tolman, H. L., 1999, User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. *Technical Note, NCAR NWS Ocean Modeling Branch, 110pp*
- Unna, P.J., 1942 : Waves on tidal streams. *Nature*, 149, 219-220.
- Unna, P.J., 1947 : Sea waves. *Nature*, 159, 239-242.
- Wang Shouping, 1996; Defining Marine Boundary Layer Clouds with a Prognostic Scheme. *Mon. Wea. Rev.* 124, 1817-1833.
- WAMDI Group 1988: The WAM model A third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810.
- Yamada, T. 1976.: On the similarity functions A,B and C of the planetary boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 33, 781-793
- Yamada, T., 1979; A numerical experiment on pollutant dispersion in a horizontally homogeneous atmospheric boundary layer. *Atmos. Environ.*, 11, 1015-1024.

Appendix. (WAVEWATCH-III ver. 1.18 셋팅 방법)

1. Program install

- ① wwatch3.1.18.pack1.tar.gz를 푼다.

```
gzip -d wwatch3.1.18.pack1.tar.gz
tar -xvf wwatch3.1.18.pack1.tar
```

- ② 다음과 같은 4개의 또 다른 tar 파일과 1개의 install script 실행 파일이 생성된다.

```
wwatch3.aux.tar*    # tar file with auxiliaries
wwatch3.ftn.tar*    # tar file with source code
wwatch3.inp.tar*    # tar file with input files
wwatch3.tst.tar*    # tar file with test programs
install_wwatch3*    # install script execution file
```

- ③ install_wwatch3 script를 실행시킨 후 다음과 같은 기본환경 정보를 입력시킨다.

```
Printer (listings)      : lpr
-> 기본 프린터 정의
FORTRAN comp. (aux only) : f77 또는 f90
-> 포트란 컴파일러 정의
C Compiler (aux only)   : cc
-> C 컴파일러 정의
Scratch directory       : /tmp/mingun1
-> 임시저장 파일 디렉토리 표시
Save source code        : yes
Save listings           : yes
```

④ install을 마치게 되면 ~/aux, ~/bin, ~/exe, ~/ftn, ~/inp, ~/obj, ~/work 의 디렉토리가 생성되며, ~/.wwatch3.env 파일에 다음과 같이 저장정보가 생성된다. 다른 디렉토리에 또다시 인스톨을 하고자 한다면 반드시 .wwatch3.env 파일에서 WWATCH3_DIR 부분을 수정해 주어야만 자신의 홈 디렉토리가 아닌 원하는 디렉토리에 인스톨된다.

인스톨 후에 생성된 ~/.wwatch3.env 파일

```
#
# Environment variables for wavewatch III
# -----
#
WWATCH3_LPR      lpr
WWATCH3_F77      f77
WWATCH3_CC       cc
WWATCH3_DIR      /mingun1/WAVEWATCHIII/
WWATCH3_TMP      /tmp/mingun1
WWATCH3_SOURCE   yes
WWATCH3_LIST     yes
```

2. Compiler and Linking script 수정

각각의 셋팅 컴퓨터마다 컴파일 옵션이 조금씩 다르므로 컴파일과 링크 스크립트를 반드시 수정해 주어야 한다.

① vi ~/bin/comp*

WAVEWATCH-III 의 기본 셋팅은 디폴트로 Linux 포트란 컴파일러로 되어있기 때문에 일반적으로 Digital Unix 계열의 컴파일러 사용시 comp* 파일을 다음과 같이 바꿔주어야 한다.

* 71 line : f77 -c -N109 -B101 -N26 \$name.f > \$name.out 2> \$name.err
부분을 '#' 로 주석 처리 한다.

* 59 line : f77 -c \$name.f > \$name.out 2> \$name.err 부분을 열어준

다. 단, NEC Super-computer SX-5/16A 와 같이 벡터 컴퓨터의 컴파일러 사용 시에는 '-C hopt' 옵션을 추가시켜 주어야 한다.

② vi ~/bin/link*

* comp* 파일과 같은 방법으로 link* 파일도 Generic 옵션으로 다음과 같이 바꾸어 주어야 한다.

vi ~/bin/link*

```
51 # ----- #
52 # 2. Compile #
53 # ----- #
54 # Add here the correct compiler call including switches
55 # Note: - do not invoke a link step
56 # - if possible, generate a listing
57
58 # Generic -----
59 f77 -c $name.f > $name.out 2> $name.err
60
61 # ABSOFT on Linux (mpich with 'mpif77' option) -----
62 # f77 directives :
63 # -B101 Pentium family optimization
64 # -C Bounds checking
65 # -N26 Big-endian files
66 # -N27 Little-endian files
67 # -N32 ANSI check
68 # -N109 Fold all to upper case (needed for MPICH)
69 # -N114 Warning on undeclared
70 #
71 # f77 -c -N109 -B101 -N26 $name.f > $name.out 2> $name.err
72 # mpif77 -c -N109 -B101 -N26 $name.f > $name.out 2> $name.err
73
74 # Cray C90 -----
75 # ...."bland" (vectorizing)
76 # cf77 -c -Wf"-e ms -l $name.l" -- $name.f > $name.out 2> $name.err
77 # ....multitasking
78 # cf77 -Zp -c -Wf"-e ms -l $name.l" -- $name.f > $name.out 2> $name.err
79 # ....perfrace
80 # cf77 -F -c -Wf"-e ms -l $name.l" -- $name.f > $name.out 2> $name.err
81 # ....bounds and symbol table
82 # cf77 -c -Wf"-e msz -Rb -l $name.l" -- $name.f > $name.out 2> $name.err
83
84 # Save exit code -----
85 OK="$?"
86
87 # ----- #
```

3. Options & Parameters 수정

① vi ~/bin/switch

WAVEWATCH-III 모델에서는 다양한 모델 디자인 선택 옵션이 존재한다. 본 모델에 쓰여진 옵션은 다음과 같으며, 각각의 옵션은 Tolman(1999)에 자세히 소개되어 있다.

```
vi ~/bin/switch
```

```
DUM LRB4 SHRD GRIST SFTST PR2 ST2 STAB2 NL1 BT1 WND1 CUR1 SEED BPI0 BPO1 PNT5 O1 O2 O2a O3 O4 O5 O6  
O7
```

② cd ~/ftn

~/ftn 디렉토리는 실제 본 모델 소스 코드가 모여져 있는 곳이다. 여기서 모델 도메인에 따른 격자 개수와 관계 있는 파일(dimx.cmn, tab1.cmn, ww3_prep.ftn)에 대하여 다음과 같은 파라메타를 고쳐주어야 한다.

* **dimx.cmn** : MX는 x방향의 격자 개수이고, MY는 y방향의 격자 개수이다. MSEAL과 MSEAL은 MX*MY로 산정한다.

* **tab1.cmn** : NAR1D는 $(MX-1)*(MY-1)$ 이고, DFAC는 최대 수심으로써 본 모델에서는 1000m이하의 수심에서는 바닥 마찰효과가 거의 없다는 가정으로 1000m를 산정하였다.

* **ww3_prep.ftn** : 바람자료의 dimension을 정의하는 곳으로 MXI, MYI는 바람자료 격자 개수와 일치시켜 준다. 일반적으로 모델 전 영역의 도메인인 MX, MY와 동일하다.

4. Compiling and linking

① cd ~/bin

1-3까지의 과정이 끝나고 모델의 새로운 옵션이 정해지면 **ww3_clean***,

w3_new*를 실행시킨 후 w3_make*를 실행시킨다. 컴파일 되고 실행되는 파일들은 ~/exe 디렉토리 밑에 모두 형성된다.

5. Execution Shell 수정

우선 ~/work 또는 ~/inp 디렉토리에 생성된 모든 파일들을 실행 디렉토리인 ~/exe로 옮긴다. 실행 디렉토리 안의 실행파일 (ww3_grid*, ww3_strt*, ww3_prep*, ww3_shel*, ww3_outf*, ww3_outp*) 들이 수행되기 위해서 필요한 날짜 정보, 바람 자료, 그 외 필요한 기본 초기 조건, 적분 시간 등을 정의해 주고, 결과 파일 등을 출력해 주는 셸들은 다음과 같다.

- * **ww3_grid.inp** : Time step, 바닥 마찰 계수 등 경험 상수를 정의해 주고, 해저지형의 grid와 관계된 자료를 정의한다.
- * **ww3_strt.inp** : Cold, hot start 여부를 결정하고, Restart 파일을 생성한다.
- * **ww3_prep.inp** : 해상풍, 해류, 조류 등의 입력 자료를 선택적으로 추가한다.
- * **ww3_shel.inp** : 실제 적분 시간을 정의한다.
- * **ww3_outf.inp** : 각각의 도메인의 필드 데이터를 생성한다.
- * **ww3_outp.inp** : 도메인 내의 필요 연구 정점의 시간별 포인트 자료를 생성한다.

본 메뉴얼에서는 모델 영역과, input, output 파라메타들에 관계된 부분 중 필수적으로 수정해야만 하는 부분에 대해서만 강조하였다. 다른 부분들은 JONSWAP(Hasselmann *et al.* 1973), SWAMP(SWAMP Group 1985), SWIM(SWIM Group 1985) 등의 프로젝트들에 의해 정의되어진 상수들이기 때문에 되도록 그냥 사용하는 것이 좋다.

① vi ~/exe/ww3_grid.inp

- * Grid name (C*30, in quotes) : 원하는 모델의 이름을 작은 따옴표(‘)안에 30자 내외로 적는다. (line 6)
- * Frequency increment factor and first frequency (Hz) : **1.1 0.0418** (line 10)

* Set model flags : **F T T T F T** (line 18)

* Define constants in source terms : 2-1절 참조.
 Height of wind (zr), swell factor in (2.48) : **10.0 0.125** (line 33)
 c0, ST0, c1, c2 and f1 : **1.4 -0.01 -0.1 0.1 150.** (line 34)

* Nonlinear interaction coefficient : **0.25 1.00e7 0.75 0.50 5.5 0.833 -1.25** (line 47)

* Dissipation coefficient : **4.8 1.7e-4 2.0 0.3e-3 0.47 0.003** (line 59)

* Bottom friction coefficient : **-0.067** (line 67)

* Ice 관련 기타 상수 : **0.5** (line 75), **2.0** (line 76)

* Set parameters for numerical schemes
 Time step : 격자의 해상도가 바뀌면 각각의 Time step 은 바뀌어야 한다.
 0.5°by 0.5° 해상도에 적합한 time step은 다음과 같다.
 (line 83)
 Maximum global time step : **900**
 Maximum CFL time step : **900**
 $k-\theta$: **900**
 Minimum source term time step : **300**

* Additional data for propagation schemes
 UQ scheme : **0.7 F 1. 70.** (line 96)
 dynamic integration scheme : **0.15 1.00 0.05** (line 101)

* Define grid
 (경도 115°E-145°E, 위도 20°N-50°N 의 위, 경도 각각 0.5°해상도 적용시)
 grid number : **61 61** (line 127)
 Grid increments SX, SY (°) and scaling (division) factor. : **1. 1. 2.**
 (line 128)
 Coordinates of (1,1) (°) and scaling (division) factor. : **115. 20. 1**
 (line 129)
 Limiting bottom depth (m), minimum water depth (m), unit number, scale factor for bottom depths, IDLA, IDFM, FROM
 : **-0.1 2.5 15 -1. 3 1 '(...)' 'NAME' 'topo.dat'**
 -> topo.dat 라는 지형자료를 IDLA 3 번 포맷 (Read line-by-line top to

bottom) 으로 정의해 준다. unit number를 10으로 쓸 경우에는 따로 topo.dat 파일을 만들지 않고 바로 수심 값을 그 밑 라인부터 포함시켜야 한다.

② vi ~/exe/ww3_strt.inp

* type of initial field ITYPE : 일반적인 경우 **ITYPE=3** 인 Fetch-limited JONSWAP type을 사용한다. ww3_strt.inp shel 은 restart 파일이 생성되지 않았을 때, 즉 모델을 처음 돌릴 때만 사용한다.

③ vi ~/exe/ww3_prep.inp

* Major types of field and time flag : Input 자료의 종류를 결정한다. 해상풍 자료를 사용하며, 시간 정보를 포함하며 모델 격자체계와 동일한 포맷인 경우는 다음 형식을 따른다. 또한 AI 포맷을 사용할 경우 line 22 와 line 28 은 '\$'로 닫는다.

'WND' 'AI' T (line 17)

* Define data files : 수심자료와 마찬가지로 문 번호를 10이 아닌 다른 번호로 지정해야 외부의 'wind.dat' 파일을 읽을 수 있다.

'NAME' 3 1 '(..T..)' '(..F..)' (line 49)

15 'wind.dat' (line 50)

초기 입력자료인 wind.dat 파일의 포맷은 다음과 같다.

wind.dat 파일 포맷

```
20010101 000000      -> 2001년1월1일 00시 자료
(1,MY) (2,MY) ..... (MX,MY)
(1,MY-1) (2,MY-1) ..... (MX, MY-1)
...
...
...
(1,2) (2,2) ..... (MX,2)
(1,1) (2,1) ..... (MX,1)
20010101 060000      -> 2001년1월1일 06시 자료
(1,MY) (2,MY) ..... (MX,MY)
...
...
...
```

④ vi ~/exe/ww3_shel.inp

* Define input : wind data 만을 초기자료로 사용할 경우 다음과 같이 적용한다.

기타 해수면 변화나 해류, 빙하의 효과를 고려한다면 F를 T로 고쳐주고 초기 자료를 ww3_prep.inp에서 정의해 주어야 한다.

F F (line 11)

F F (line 12)

T F (line 13)

F (line 14)

* Time frame of calculations : 적분의 시작시간과 끝 시간을 정의한다. 자동화 시스템으로 고칠 경우에는 자동으로 이 시간 정보가 바뀌게 부 프로그램을 첨가시켜야 할 것이다. 다음은 2001년 1월 1달간을 적용한 경우이다.

20010101 000000 (line 20) -> 적분 시작 시각

20010131 210000 (line 21) -> 적분 마침 시각

* Define output data (Type1 : Field output): 2001년 1월 1일부터 3시간 간격으로 2001년 1월 31일까지의 모델영역 전체의 결과파일을 출력하기 위해서 다음과 같이 정의한다.

20010101 000000 10800 20010131 210000 (line 38)

계산되는 변수들은 다음과 같다.

1. The mean water depth (m)
2. The mean current velocity (m/sec)
3. The mean wind speed (m/sec)
4. The air-sea temperature difference (°C)
5. The friction velocity (scalar)
6. Significant wave height (m)
7. Mean wave length (m)
8. Mean wave period (sec)
9. Mean wave direction (°)
10. Mean direction spread (°)
11. Peak frequency (Hz)
12. Peak direction (°)
13. Peak frequency of the wind sea part of the spectrum (Hz)
14. Wind sea direction (°)
15. Average time step (sec)
16. Cut-off frequency (Hz)

계산을 원하는 결과만을 선택할 수 있으나 ww3_outf.inp 와 ww3_outp.inp shell에서 다시 출력 부분을 정의해 주는 부분이 있으므로 빠른 계산 시간을 필요로 하지 않을 경우에는 일반적으로 16개의 변수에 대해서 모두 T를 선택해 준다.

T T T T T T T T T T T T T T T T T (line 39)

* Define output data (Type 2 : Point output) : 특정 지점에 대한 계산을 필요할 시에는 line 39와 같은 형태로 정의해 준다. 여기서 출력 간격은 최소한 time-step 보다는 커야 한다. 다음은 한시간 간격으로 point 결과를 원하는 경우이다.

20010101 000000 3600 20010131 210000 (line 50)

보고자 하는 point 의 위경도 값을 다음과 같이 정의해준다. (line 53-56)

```
125.52 37.23 'Dukjok'  
125.7 34.8 'Chilbal'  
128.9 34.77 'Gojae'  
126.3 28.1 'Eastchina'
```

* Define output data (Type 3,4,5 : Output along track, Restart Files, Boundary data)

line 38, line 50 과 같은 형태로 필요시에 정의해 준다.

⑤ vi ~/exe/ww3_outf.inp

* Time, time increment and number of outputs : 출력 결과 값의 시작 시각 및 출력 간격, 총 출력 개수를 정의한다.

```
20010101 000000 10800 248 (line 6)
```

* Request flags identifying fields : 출력 파라메타들을 선택한다. 유의파고, 평균 파장, 파주기, 파향의 결과 파일만 생성하고자 할 때는 다음과 같이 선택한다.

```
F F F F F T T T T F F F F F F (line 39)
```

* Output type ITYPE [0,1,2,3] : 일반적으로 위,경도값이 포함되어서 저장되는 3번을 선택한다.

⑥ vi ~/exe/ww3_outp.inp

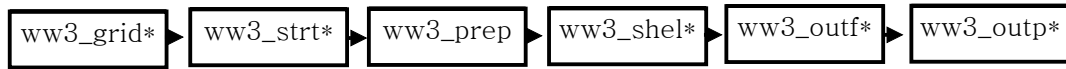
* Time, time increment and number of outputs : ww3_outf.inp 와 동일한 포맷으로 정의해 준다.

* Points requested : ww3_shel.inp의 line 53-56 에서 정의해준 point output 중에 어느 정점을 출력할 것인가를 선택한다.

* Output type ITYPE [0,1,2,3] : Table 형태로 저장되는 2번을 선택한다.

6. Execution

5번 과정까지의 Execution 파일이 모두 수정되었으면 다음과 같은 순서로 실행과 일을 실행시킨다.



7. Output Files

각각의 실행 파일의 실행이 끝날 때마다 나오는 결과 파일들은 다음과 같다.

① ww3_grid*

- * mask.ww3 : 모델의 격자체계에서 해양과 육지의 masking 파일들이다.
- * mod_def.ww3 : 모델 전반적인 격자체계에 대한 정보를 담고 있는 파일이며 ww3_strt*, ww3_shel* 파일이 실행되기 위한 파일이다.

② ww3_strt*

- * restart.ww3 : Restart 정보를 담고 있는 파일이다.

③ ww3_prep*

- * wind.ww3 : ww3_shel* 에 들어가는 wind 정보가 WW3 포맷으로 저장되어 있다. 기타 sea leve, current, ice 등의 정보를 입력시켜 줄 시에는 level.ww3, current.ww3, ice.ww3 파일들이 생성된다.

④ ww3_shel*

- * log.ww3 : 모델 전반에 걸친 log 가 저장되어 있다. 적분 계산과정에 따른 input parameter 와 field and point output parameter 등의 정보가 담겨있다.
- * restart?.ww3 : 다음번에 hot start 로 모델을 구성할 때 필요한 restart 정보가 WW3 포맷으로 담겨있다.
- * nest?.ww3 : nesting grid를 사용할 시 이와 관계된 정보가 WW3 포맷으로 담겨있다.
- * out_pnt.ww3, out_grd.ww3 : output 파일을 생성하기 위한, ww3_outf* 와 ww3_outp* 가 실행되기 위한 파일이다.

⑤ ww3_outf*

- * **ww3.yymmddhh.????** : 위경도를 포함한 field output 파일들이다. ww3_outf.inp에서 선택되었던 output parameter 만 출력된다.

2000년 9월 20일 00시(UTC) 유의파고 결과 파일 (ww3.00092000.hs) 의 예

```

WAVEWATCH III 20000920 000000 115.50 145.00 60 20.50 50.00 60 .hs 0.0100 m 5 2 (1X,3214) -999
115.50000 20.50000 43
116.00000 20.50000 67
116.50000 20.50000 86
117.00000 20.50000 103
117.50000 20.50000 111
118.00000 20.50000 104
118.50000 20.50000 101
119.00000 20.50000 99
119.50000 20.50000 98
120.00000 20.50000 98
120.50000 20.50000 116
121.00000 20.50000 135
121.50000 20.50000 107
122.00000 20.50000 89
    
```

⑥ ww3_outp*

* **tab33.ww3** : ww3_outp.inp에서 출력형태를 2번으로 선택하였을 때, table 형태로 point output 파일들이 시간대 별로 저장되어 있다.

Point-output 파일인 tab33.ww3 파일의 예

```

Time : 2000/08/20 00:00:00 UTC

  Long.   Lat.     Hs    L    Tr  Dir. Spr.   fp  p_dir p_spr
          (m)    (m)  (s) (d.N) (deg) (Hz) (d.N) (deg)
-----
 125.520  37.230   0.564  16.3  3.14  350.3  31.51  0.2836  350.3  31.51
 125.700  34.800   0.557  16.2  3.12  163.8  36.72  0.2844  163.8  36.72
 128.900  34.770   0.557  16.2  3.12  142.5  36.40  0.2844  142.5  36.40
 126.300  28.100   0.910  22.9  3.71  196.4  31.65  0.2378  196.3  31.67

Time : 2000/08/20 01:00:00 UTC

  Long.   Lat.     Hs    L    Tr  Dir. Spr.   fp  p_dir p_spr
          (m)    (m)  (s) (d.N) (deg) (Hz) (d.N) (deg)
-----
 125.520  37.230   0.509  17.9  3.31  349.8  31.99  0.2822  349.8  30.98
 125.700  34.800   0.527  18.0  3.31  167.1  42.38  0.2826  167.2  41.66
 128.900  34.770   0.520  17.9  3.31  144.6  37.94  0.2826  144.4  37.14
 126.300  28.100   0.928  23.7  3.79  196.8  31.45  0.2380  197.2  29.87
    
```