

북서태평양 해양-태풍 상호작용 연구 기획

지구온난화 환경에서 북서태평양 난수성 소용돌이 해역 급격히 강화되는
태풍 예측기술 개선 연구

2016. 2

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 「북서태평양 해양-태풍 상호작용 연구 기획」과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2016. 2

세부과제책임자 : 강석구

참 여 연 구 원 : 강석구, 강동진, 강성현,
강정훈, 강현우, 권민호,
김경옥, 김동선, 김 성,
김영옥, 김윤철, 김은진,
김영호, 김철호, 석문식,
소재귀, 유신재, 이재학,
박요섭, 박종진, 백승호,
장찬주, 정경태, 주세종.



요 약 문

1. 제목

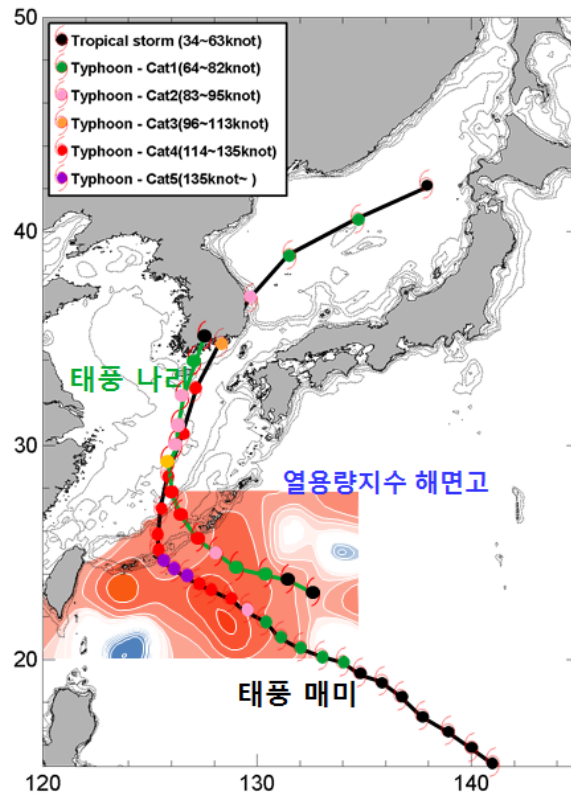
북서태평양 해양-태풍 상호작용 연구 기획

(부제: 지구온난화 환경에서 북서태평양 난수성 소용돌이 해역 급격히 강화되는 태풍 예측 기술개선 연구)

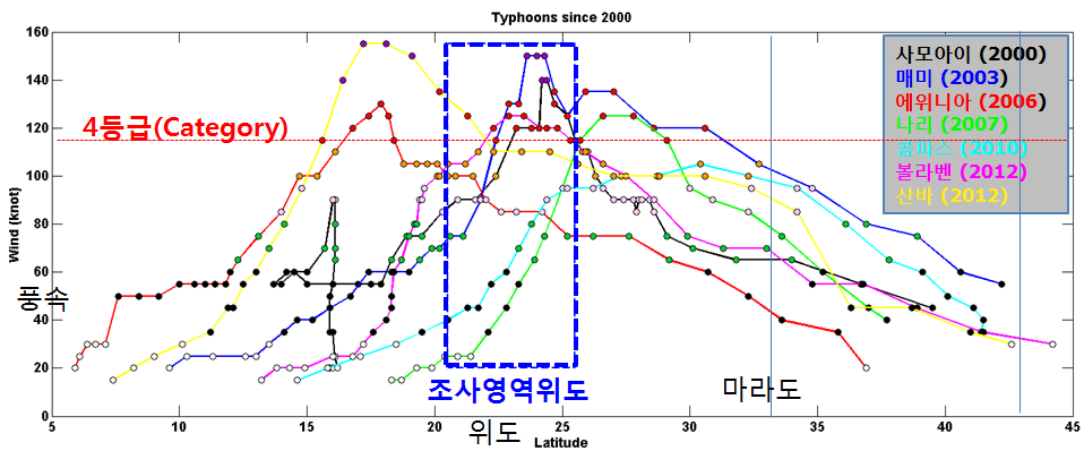
2. 연구사업의 개요

가. 연구의 필요성

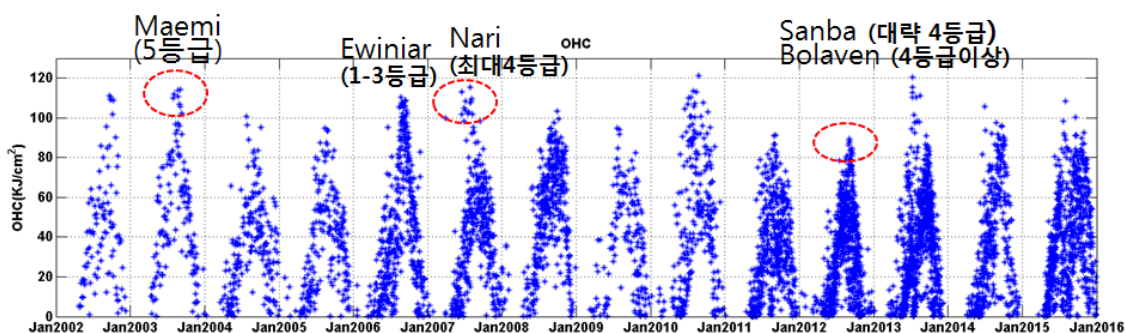
- 태풍은 우리나라에서 발생하는 자연재해 중 가장 파괴적이고 그 피해가 광범위하게 나타나는 해양기원 재해임. 발생한 태풍의 강도는 해양에서 얼마나 많은 에너지를 공급받느냐에 따라 결정되며, 해양온난화 환경에서 폭풍강도는 증대(Trenberth, 2005; 기초기술연구회, 2011)되어 오고 있고, 지난 수십년간 태풍(혹은 허리케인)(등급 4와 5)이 크게 증가하였으며, 북태평양은 허리케인이 크게 증가한 해역중의 하나(Webster et al., 2005)임. 온난화 진전에 따라 앞으로 더욱 강한 태풍이 내습할 것으로 예상되며, 국내에서 동중국해 해양반응 조사 및 예측모델 기반연구 등을 수행함(기초기술연구회, 2011).
- 북서태평양에서 태풍은 저위도(5°N - 15°N) 해역에서 대부분 발생하여 우리나라로 향하는 태풍은 북서태평양 해역에서 최대 강도에 이르며, 류큐열도를 통과하여 대륙붕 해역을 통과하는 중에 해양으로부터 에너지 공급 약화와 저수온 해역에서 에너지를 잃어서 강도가 점차 약화됨. 최대강도가 나타나는 북서태평양 해역은 예외적으로 깊은 수심까지 존재하는 따뜻한 난수성 소용돌이 때문이며, 2003년 한반도에 막대한 피해를 유발한 태풍 매미의 5등급 강화는 난수 소용돌이 영향으로 밝혀짐(Lin et al., 2005) (그림 1).
- 한반도로 향하는 강한 태풍은, 난수성 해역에서 급격히 강화되어(Rapidly Intensified) 4-5등급 강한 태풍으로 성장(그림 2)하며, 난수성 수괴의 열용량(그림 3)은 매년 4, 5등급의 태풍이 생성될 수 있음을 시사함. 북서태평양 난수성 소용돌이 해역에서 태풍과 해양의 상호작용에 대한 체계적이고 과학적인 자료획득과 이해를 통해, 강한 태풍 강화 과정 예측기술의 정확도를 향상시키는 연구가 집중되어야 할 필요가 있음.



[그림 1] 2003년 난수성 소용돌이 해역에서 태풍 매미 강화 (Lin et al., 2005) (본문 [그림 1-1-1])에 태풍나리 포함 개념도). 컬러는 난수괴의 열팽창으로 두꺼워진 해수면 높이를 나타냄.



[그림 2] 2000-2015년중 한반도에 태풍등급 1-2로 크게 영향을 준 태풍(사모아이, 매미, 에위니아, 나리, 콤파스, 볼라벤, 산바)은 북서태평양 난수괴 해역로 급격히 강화되는(RI) 태풍임. 산바와 에위니아는 보다 남쪽에서 최대 등급으로 강화됨. 연구 해역 위도를 청색으로 표기함 (강, 2016) (본문 [그림 4-1-3a]).



[그림 3] 2002-2015년간 북서태평양 난수괴 해역 상층 열용량. 4등급 블라벤, 5등급 매미 열용량 크기로 볼 때, 난수괴 해역에서 매년 4-5등급의 태풍이 발생 가능함을 시사 (강, 2016) (본문 [그림 4-1-3b]).

- 최근 태풍이 단지 상부 해양 혼합층 외에도 그 이하 해양 수백 m 깊이까지 수온구조를 바꾼다는 수치모델링 연구(Bueti et al., 2014)가 있으며, 대서양에서는 태풍이 심층의 Co2를 상층으로 이동시키고 해양표층에서의 농도를 급격히 변화시킨다는 연구가 보고된 바 있으나 태평양에서 이러한 특성이 직접 관측된 바 없음. 북서태평양에서 태풍이 해양에 미치는 단기적인 해양물리, 화학 및 생태 측면에서의 영향과, 더 나아가 태풍이 중기적으로 기후변화에 미치는 영향에 대한 규명 연구는 글로벌 이슈의 과학적 규명에 적극적으로 대응, 동참하고, 글로벌 현안에 우리가 주도적으로 과학적인 기여를 한다는 측면에서도 시급성이 있다고 하겠음.

나. 연구의 목적

- 급격히 강화되는 (Rapidly Intensifying, RI) 태풍이 자주 발생하는 북서태평양 난수성 소용돌이 해역에서 악천후에도 관측이 가능한 최신 연구조사선(RV 이사부호)과 다양한 첨단 해양로봇을 사용하여 다양한 실측자료 관측 획득과 축적된 태풍모델링 개선/원천 기술을 병용하여 태풍 예측의 정확도 개선.
 - 정량적인 목표: 2015년 기준 태풍진로 20% 개선 (72시간 예측기준 165km 오차).
 - 북서태평양 급격히 강화되는 태풍강도 중심기압 예측 정확도 20hPa (세계 수준 근접).
- 북서태평양에서 태풍이 해양에 미치는 다양한 수층구조, 온실기체 변화, 생태계 영향에 대한 단기변화와 기후변화 측면의 중기 변화를 규명함. 아울러 열대해역표층수온 상승을 포함한 기후변화와 태풍 발생빈도/강도의 장기변동성 연관성을 연구함.

다. 기획연구사업 기간

- 2015년 9월 1일 - 2016년 2월 29일



2. 연구추진 계획

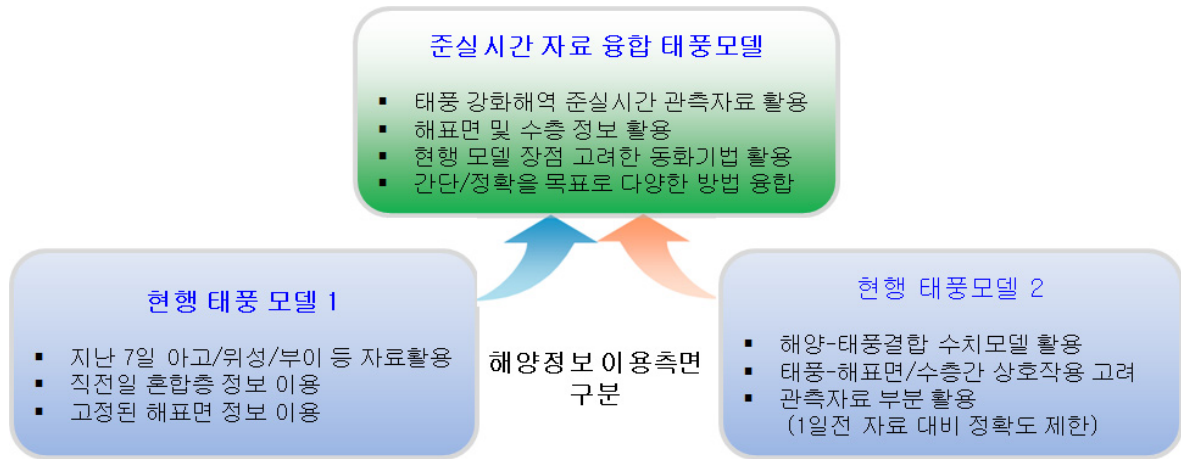
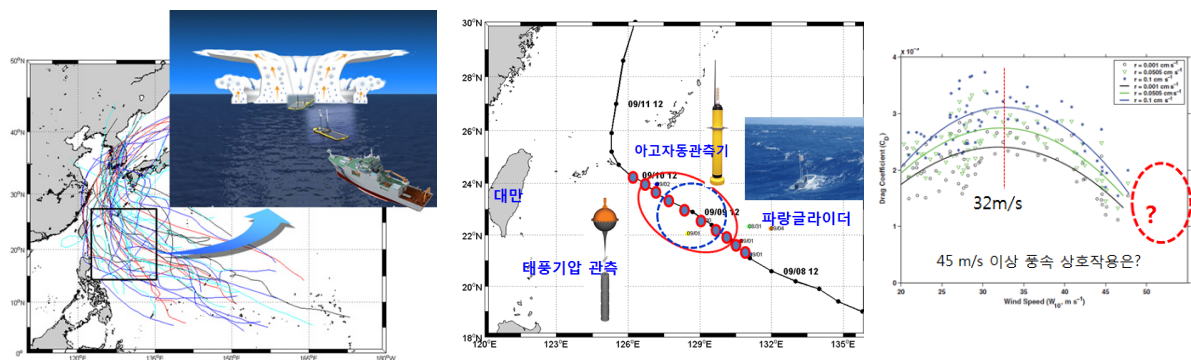
가. 세부과제 구분 및 연구내용

- 기획연구의 목적을 달성하기 위하여 다음 4개의 세부과제를 구성함
 - 세부과제 I : 북서태평양 난수괴 소용돌이해역 태풍예측기술 개선 연구
 - 세부과제 II : 기후변화와 태풍변동성 연구
 - 세부과제 III : 탄소순환 및 부유생태계에 태풍 역할 진단
 - 세부과제 IV : 장비 개발/개선 연구
- [세부과제 I]의 목표는 우리나라로 향하는 강한 태풍의 대부분이 급격히 강화되고, 최대 강도가 나타나는, 북서태평양 난수괴 소용돌이 해역에서 태풍전후와 태풍통과중의 해양-대기 경계층과 해양에서의 수온, 풍속 등 제반 물리요소를 관측하고 이를 통해 해양-태풍 상호작용을 이해하며, 관측 자료와 다양한 수치모델링 기술을 병용하여, 태풍-해양예측모델의 정확도를 개선하는 연구를 수행함 (그림 4).
- [세부과제 II]의 목표는 온난화에 따라 열대 온난역 확장, 엘니뇨 변동에 따른 태풍의 중장기적 변동성을 이해하며, 열대 온난역의 SST 상승 등 해양 변동성자료와 대기 열수지 관측을 통해 해양과 태풍의 상호작용을 연구함. 아울러 북서태평양 아열대 중규모 와류 형성 기작 모델링과 에디 구조와 기후 특성을 연구함 (그림 5).
- [세부과제 III]의 목표는 북서태평양에서 태풍 전후, 해양의 생지화학적 특성변화에 따른 해양-대기 이산화탄소 플럭스 및 침강입자(탄소) 플럭스 정량화와 부유생태계 변화 분석을 통해, 태풍에 의한 해양생태계반응과 대기 중 이산화탄소 탄소량 조절에 대한 평가와 예측을 통해 기후변화, 태풍, 해양생태계의 역학관계 이해를 위한 연구를 수행함 (그림6).
- [세부과제 IV]의 목표는 차세대 해양관측 로봇인 Wave Glider 장착용 장비 개발하여, 태풍전후 관측항목 확대와 개선을 통해 태풍이라는 악천후 하에서 현장 실시간 관측 역할을 향상시키고 함 (그림 7).



○ 세부과제 I:

과제명	북서태평양 태풍 예측기술 개선 연구
연구목표	북서태평양 난수성 와류해역에 나타나는 태풍 최대 강도 발생해역에 대한 집중 조사/예측연구를 통한 태풍예측기술 개선 -2015년 기준 진로 20% 개선 -북서태평양 급격히 강화되는 태풍 강도 예측 정확도 세계 수준 근접
연구내용	1. 북서태평양 태풍강화 해역 열구조 조건 및 물리요소 연구 2. 태풍에 의한 해양 혼합변화/Mesoscale eddy의 변동 기작 연구 3. 태풍-해양 결합모형을 이용한 태풍예측 정확도 개선

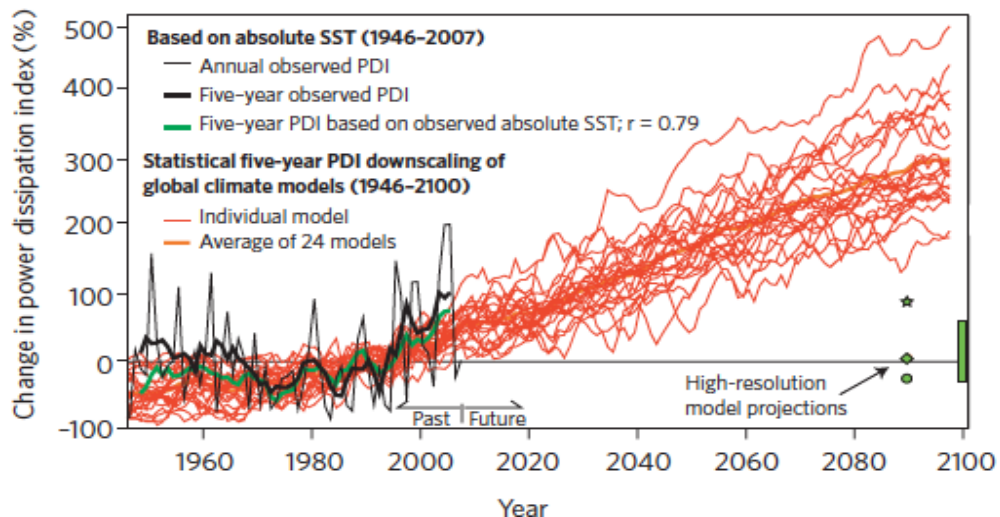
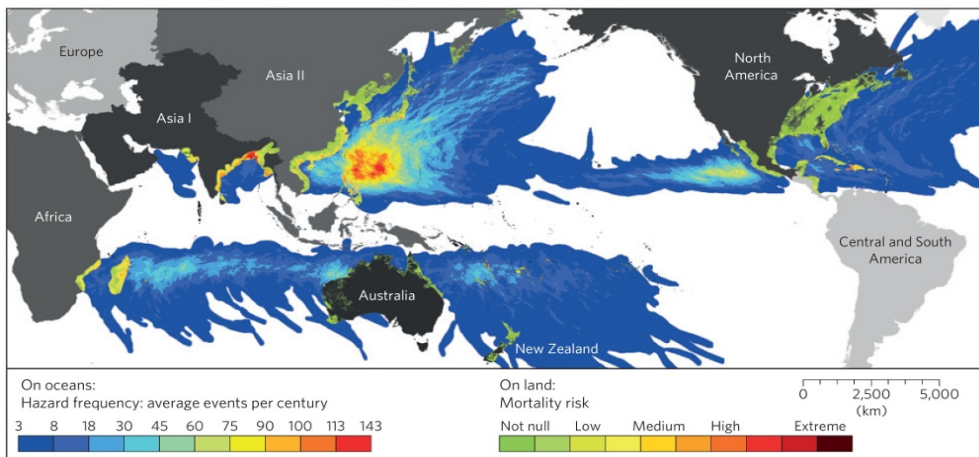


[그림 4] 북서태평양 조사선(상좌)/해양로봇(상중)/해양-대기 상호작용 변수(상우) 및 다양한 해양자료를 활용한 측면에서 태풍모델링 구분 (하).



○ 세부과제 II:

과제명	기후변화와 태풍변동성 연구
연구목표	열대 온난역 확장, 엘니뇨 변동에 따른 태풍의 중장기적 변동성을 이해하며, 열대 온난역의 SST 상승 등 해양 변동성자료와 대기 열수지 관측을 통해 해양과 태풍의 상호작용을 연구함. 아울러 북서태평양 아열대 중규모 와류 형성 기작 모델링과 에디 구조와 기후 특성을 연구함.
연구내용	1. 열대해양의 장기변동성에 따른 태풍의 중장기 변동성 분석 2. 해양혼합층 변동과 태풍강도 변화의 상관성 분석 3. 북서태평양 소용돌이 해역 고해상도 해양순환모델링을 통한 에디의 발생/기후특성 모의분석 및 시간/공간 변동성 이해

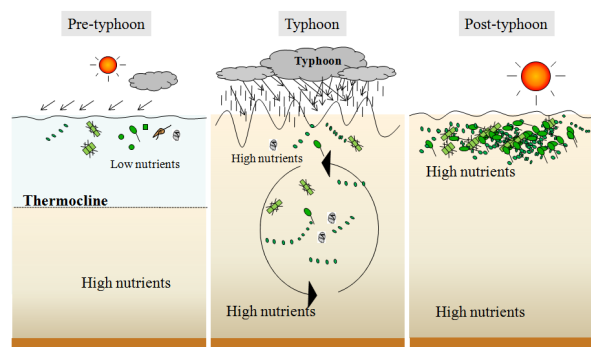
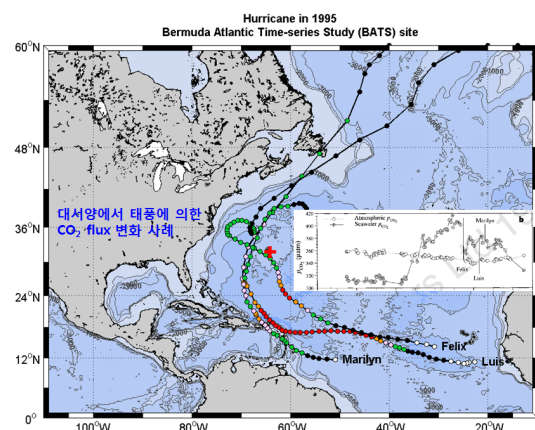
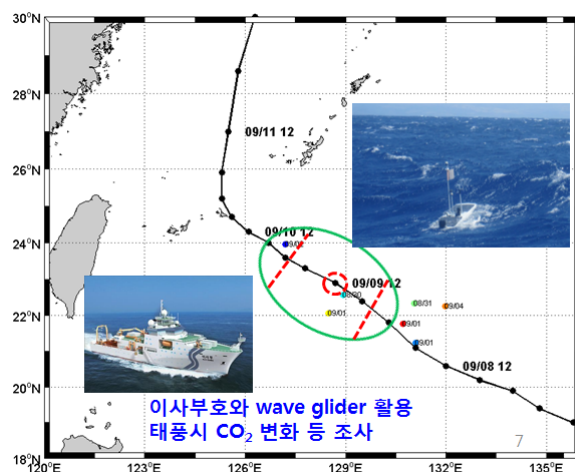


[그림 5] (위) 태풍에 의한 위험 빈도와 사망 위험도 분포 (2010년 기준) (Peduzzi et al., 2012) (본문 [그림 5-1-1a]). 및 (아래) 관측과 모델에 의한 태풍강도 변화 및 예측 (Knutson et al., 2010) (본문 [그림 5-1-1b]).



○ 세부과제 III:

과제명	탄소순환 및 부유생태계(생산성)에 대한 태풍의 역할 진단
연구목표	북서태평양에서 태풍 전후, 해양-대기 이산화탄소 및 침강입자(탄소) 플럭스 정량화와 부유생태계 변화 분석을 통해, 태풍에 의한 해양생태계 반응과 대기 중 이산화탄소와 입자탄소량 조절에 대한 평가와 예측을 통해 기후변화, 태풍, 해양생태계의 역학관계 진단
연구내용	<ol style="list-style-type: none"> 1. 태풍에 의한 해양-대기 이산화탄소 플럭스 및 침강입자 플럭스 변화와 표층 영양염 공급에 대한 정량적 평가 2. 태풍 전/후의 일차생산, 식물플랑크톤 군집구조 변화 및 천이양상 연구 3. 소용돌이(mesoscale eddy)의 특성에 따른 동물플랑크톤과 난자치어 구조와 분포 특성 파악 및 태풍 통과 전/후 비교 4. 물리-생지화학결합 하위생태계 모형 통한 태풍의 부유생태계 영향 평가

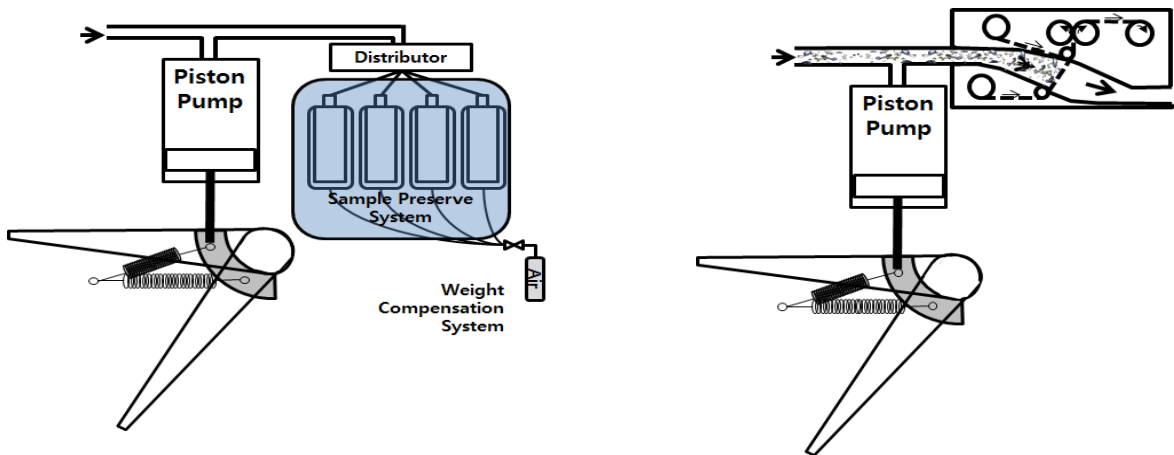
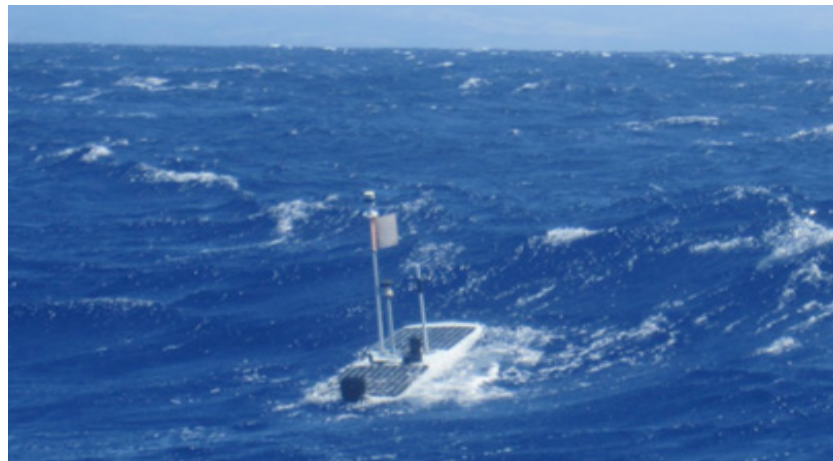


[그림 6] 북서태평양 태풍전후 탄소순환 등 조사(상좌), 대서양 관측사례(상우), 태풍 전/후의 식물플랑크톤의 증식모식도 (본문 [그림8-1-2]) (하좌), 태풍에 의한 해양/기후 변화 요소 (하우).



○ 세부과제 IV:

과제명	해양로봇 Wave Glider 탑재용 장비 개발/개선 연구
연구목표	차세대 해양관측 로봇인 Wave Glider 장착용 장비 개발하여, 태풍전후 관측항목 확대와 개선을 통해 태풍이라는 악천후 하에서 현장 실시간 관측 역량을 향상 시키고자 함.
연구내용	1. Wave Glider 장착용 윈치 개발 및 장착용 펌프 개발 2. Wave Glider 장착용 해수 채수기 개발 3. Wave Glider 장착용 연속 플랑크톤 채집기 개발



[그림 7] 웨이브글라이더 장착 해수채수기 모식도 [본문 그림 9-1-5] (하좌) 및 펌프와 채집망이 integration된 동물플랑크톤 채집기 모식도 (본문 [그림 9-1-6]) (하우).



나. 연차별 연구목표

구분	단계	단계별 연구목표	연차	연차별 연구목표
세부과제 I	1단계	북서태평양 최대 강도 발생해역 태풍예측기술 개선	1	NWP태풍강화해역 와류구조/열용량/난류/조사I 및 태풍해양 요소모델 수립I
			2	NWP태풍강화해역 와류구조/열용량/난류/조사II 및태풍예측 요소모델링/결합모델링연구II
			3	NWP태풍강화해역 와류구조/열용량/난류/조사III 및 요소기술 및 결합모델기반 태풍기인 기후반응 연구 및 태풍예측 요소/결합 모델링 연구III
			4	NWP와류해역 조사IV/태풍기인 기후반응 연구 및 태풍예측 요소/결합 모델링 연구IV
			5	NWP와류해역 조사V/기후반응연구 및 태풍예측 요소/결합 모델링 연구V
	2단계	독자개발 능력 확충		주요 관측 및 모델링 요소기술 원천개발 능력확충
세부과제 II	1단계	기후 변화에 따른 태풍 변동성 이해	1	열대해양과 태풍의 중장기 변동성 이해 및 북서태평양 아열대해역 고해상도 순환모델 수립
			2	기후모형을 이용한 태풍의 중장기 변동성 이해 및 북서태평양 아열대해역 상층순환 모의
			3	기후모형을 이용한 해양혼합층과 태풍강도의 상관성 이해 및 북서태평양 아열대해역의 중규모에디 발생·전파 모의
			4	해양관측을 이용한 해양혼합층과 태풍강도의 상관성 이해 및 북서태평양 태풍핵심해역의 중규모에디 변동특성 모의
			5	고해상도 기후모형을 이용한 해양혼합층 에디와 태풍활동의 상호작용 이해
	2단계	세부기후변화요소별 심층이해 및 예측기술연구		기후변화에 따른 태풍의 활동 변화 이해 및 북서태평양 태풍핵심해역 태풍-에디 상호작용에 의한 중 규모에디 변동특성 모의
세부과제 III	1단계	탄소순환 및 해양생태계(생산성)에 대한 태풍의 역할 진단 연구	1	NWP와류해역 조사I: 태풍 전후 해양-대기 이산화탄소 플럭스 및 표층 영양염 농도 변화 산출/부유생태계 주요 생물군 군집분포 특성 및 변동 파악/물리-생지화학 결합 생태계 모형 수립
	1단계	탄소순환 및 해양생태계(생산성)에 대한 태풍의 역할 진단 연구	2	NWP와류해역 조사II: 태풍 전후 및 통과시 해양-대기 이산화탄소 플럭스, 침강입자 플럭스, 표층 영양염 농도 변화 산출II/부유생태계 구조변동 기작 연구/생태모형 검증
			3	NWP와류해역 조사III: 이산화탄소 플럭스, 4차원적 생지화학적 특성(침강입자 플럭스 및 표층 영양염) 변동/시공간적 부유생태계 구조 및 기능 변화 관측/생태계 변화 모의 및 모형(파라미터) 민감도 실험
			4	NWP와류해역 조사IV: 태풍 통과시 생지화학적 특성(침강입자 플럭스 및 표층 영양염)과 부유생태계 간의 시공간적 상호변동성 연구/생태계 태풍영향 예측모델 제시
			5	NWP와류해역 조사V: 이산화탄소 및 침강입자 플럭스, 표층 영양염에 대한 태풍 영향을 광역규모 스케일로 평가/생지화학가 모델의 성능평가 및 개선(예측력 향상)

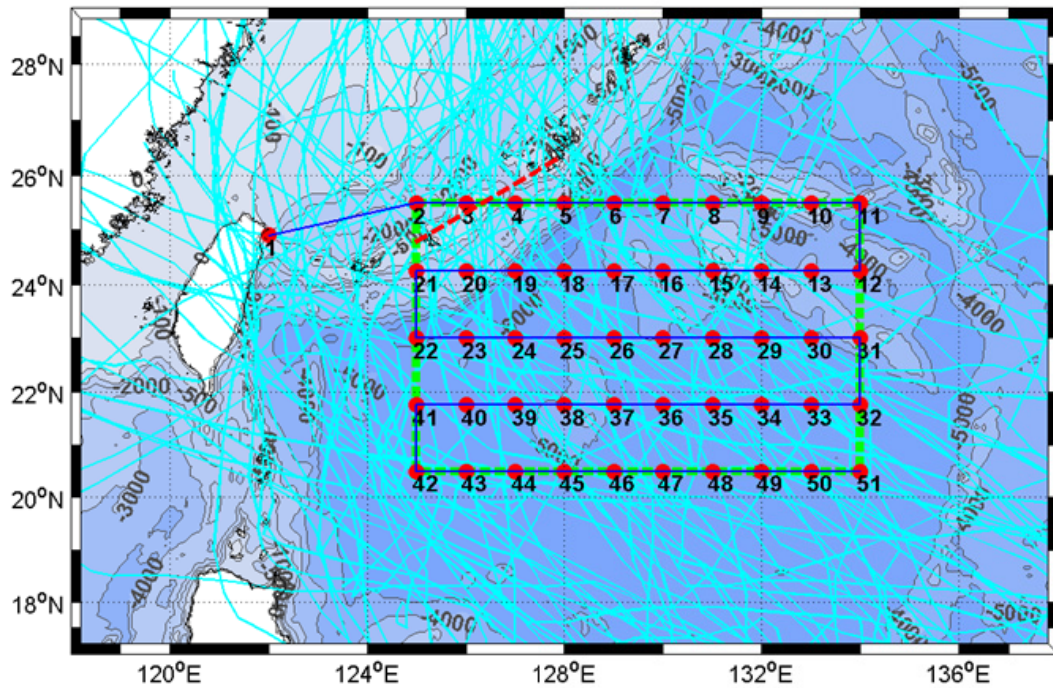


	2단계	탄소순환 및 해양 생태계 변동 정량화 연구		태풍 특성(규모, 이동속도, 시기, 빈도)에 따른 한반도 주변해역에서의 탄소순환 및 해양생태계 변동 정량화
세 부 과	1단계	해양로봇 Wave Glider 탑재용장비 개발/개선연구	1	Wave Glider 장착용 윈치 개발
			2	Wave Glider 장착용 펌프 개발
			3	Wave Glider 장착용 채수기 개발
			4	Wave Glider 장착용 연속 플랑크톤 채집기 개발
제 IV	2단계	추가 장비 개발/추가관측센서활용		지속적인 장비개발/성능개선 연구

다. 연구추진 방향

제1세부과제 [북서태평양 난수괴 소용돌이해역 태풍예측기술 개선 연구] 분야 :

- 해양열용량이 최대치를 나타내는 시기(8월 중·하순 - 9월 하순)에 해양조사선 이사부호를 활용하여 40-45일 기간동안 북서태평양 난수괴 해역 조사. 국내외 참여 기관별로 현장 조사 직접 참여 (그림 8과 그림 9).
- 조사선장착 장비에 추가하여 선박이 항행하며 수온구조를 관측하는 UCTD, 일정시간 간격으로 수온/염분 구조를 자동관측하는 ARGO 플로트, 설계한 위치를 따라 관측하는 수중 글라이더 (Underwater glider) 및 웨이브 글라이더 (Wave glider) 등을 추가로 투입. 국내외 각 기관의 연구 목적에 따라 관측 장비 동원.
- 미해양기상청(NOAA)의 유무인 항공기를 활용하여 태풍내 구조 이해 및 항공기를 이용한 해양자료 획득.
- 일본 및 대만 EEZ 해역에서 일본 가고시마 대학 실습선, 대만 연구진과 공동 조사 추진. 가고시마대학 조사선은 태풍이 자주 통과하는 류큐열도 해역 캐라마 갭(Kerama Gap) 관측기 계류 조사 참여.
- 매년 획득 북서태평양 수온자료 활용하여 태풍센터/기상청과 매년 태풍강도 공동 전망.
- 한국해양과학기술원이 태풍모델(GFDL)-해양모델(MOM4, HYCOM), 태풍모델(WRF)-해양모델(MOM5) 결합모델을 개발하는 중에 얻어진 기술력을 최대한 활용하며, 태풍예측에서 중요요소인, 해양관측자료 획득과 해양모델링 분야에서 독자적인 기술력 제고.
- 미해양기상청(NOAA), 로드아일랜드대학(URI) 등 최고수준 예측모델링 기술을 지닌 기관/대학과 급격히 강화되는 (RI) 태풍에 대한 공동연구를 통한 기술력 축적.
- 국내외 협력을 통한 해양 자료 수집 및 수집하는 자료의 품질 관리 방안 확보.
- 목표 해상도 및 목표 예측시간을 확정하여 이에 필요한 고성능 컴퓨팅 파워 자원 확보.



[그림 8] 북서태평양 태풍이 급격히 강화되는 난수 소용돌이 해역 조사정점도 (본문 [그림 3-3-1]).

국내외 기관별 관심연구 주제별 협력 전략



[그림 9] 국내외 대학/기관별 관심주제와 참여 관측항목 연계도 (본문 [그림 3-3-2]).



제2세부과제 [기후변화와 태풍변동성 연구] 분야 :

- 전세계적으로 축적된 해양 및 대기 재분석자료 기반으로 해양의 중장기 변동성과 태풍 활동의 중장기 변동성 분석.
- 저해상도 기후모형과 고해상도 기후모형 자료를 확보하여 태풍활동성 분석과 동시에 태풍을 추출하여 결과 비교. 기후모형에서 확보한 태풍활동지수와 태풍빈도 및 강도를 이용하여 ENSO와 PDO 등 해양 중장기 변동에 따른 각 지수 관련성 분석과 역학 파악.
- 수온 프로파일 등 해양관측자료를 확보하여 해양혼합층 변동과 태풍발달의 상관성 조사.
- 중규모 에디가 분석 가능한 북서태평양 해역 고해상도 해양순환모델의 수립;
- 해양기후자료(WOA) 분석; 대양 에디 공간분포, 유속장 추산, 에디 발생 계절변동 및 연 변동 특성 파악.
- 위성고도계자료 분석; 유속장 추산, 발생, 이동 파악, 모델 모의와 비교 분석.

제3세부과제 [탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍 역할 진단] 분야 :

- 연구선 관측과 Wave glider를 이용한 관측을 함께 수행함. 연구선 관측은 태풍 전과 후의 상황을 관측하고 wave glider는 태풍 기간 동안 관측.
- Wave glider에 pCO₂ sensor를 장착하여 태풍 통과 중 표층해수 이산화탄소 분압을 연속적으로 측정. Wave glider에 질산염 sensor를 장착하여 태풍 통과 시 표층 질산염 농도를 연속적으로 측정하여 태풍 통과 중 자료의 신뢰도를 높임.
- 연구해역(태풍통과 빈번해역)에서 태풍 통과 전/후 광합성 매개변수, 엽록소 수직분포, 광학적 자료와 표층 엽록소 농도, 일조량, 흡광계수, 표층수온 등의 관측, 자료 수집.
- 생물검증 실험에 의한 식물플랑크톤 성장률 및 종 천이 규명.
- 태풍의 영향에 따른 1차 생산력 및 부유하위생태계 먹이망 구조와 에너지 흐름의 생태계 모델 제시.
- 연구해역의 소용돌이 물리구조 특성에 따른 동물플랑크톤 태풍 반응 시나리오 점검 및 사전구성.
- 난자치어와 동물플랑크톤의 현장네트채집과 무인자동채집기 채집과 무인수중글라이드에 부착된 CPR과 네트 분석결과 사이의 비교 분석 후 각 방법 간의 장단점 비교 및 태풍영향 연구 방법론 제시.
- 태풍에 의한 부유하위생태계 구조 및 기능 변동 추적을 위한 전통적 기법(수조 섭식실



- 험)과 생화학적 기법(지방산, 스테롤, 탄소·질소동위원소비)의 적용.
- 태풍영향 전과 후에 수층 별 고해상도의 해양 유기물 침강 플럭스와 대기-해양 간 이산화탄소 교환량을 관측하여 태풍의 물리적 충격이 탄소 순환에 주는 영향 정량적 평가.
 - Bio-Argo 및 현장관측 자료와 비교를 통한 물리-생지화학 결합 하위생태계 모형 개선.

제4세부과제 [장비 개발/개선 연구] 분야 :

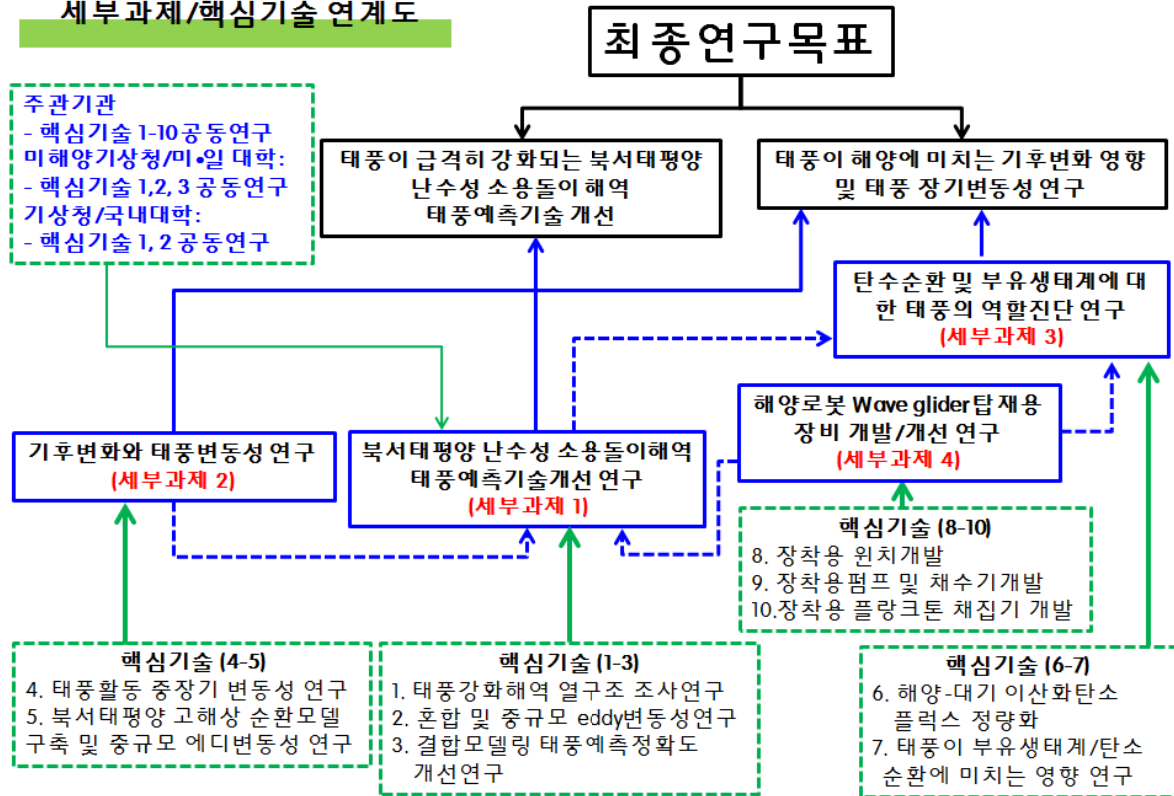
- 장착 장비 개발 전용 Wave Glider 구입.
- 개발된 제품을 조파 수조 및 실험해역에서 시험 운영을 실시하며, 조석, 해류, 파고 등을 감안하여 다양한 환경에서 현장 성능 시험을 실시하고 그 결과를 바탕으로 발견되는 문제점 보완, 개선.
- 개발된 제품의 기술 이전을 위한 특허 출원 및 등록.



라. 연구추진 체계

세부과제/핵심기술간 연계도 :

북서태평양 해양-태풍 상호작용
세부과제/핵심기술 연계도



[그림 10] 세부과제/핵심기술간 연계도 (본문 [그림 10-3-1]).

참여기관 :

- 기상청/태풍센터는 태풍 연구를 위한 장기 아고부이 투하를 이사부 조사 기간 중 투하할 예정임. 해양 열용량 등 관측 결과는 해당년도 태풍강도 예보를 위해 공동 활용 가능함. 이외에도 예측모델 등 다양한 분야에서 협력 연구 제안, 추진 중 임.
- 미해양기상청(NOAA)은 연구진 방한을 통하여 무인항공기를 활용한 관측 및 예측기술 분야 참여를 협의함. NOAA 자체 프로그램 개발을 위해 노력중임. 유인 항공기 지원이 가능한 경우, 무인 항공기 태풍기상 관측자료 확보 위해 한국측 연구비 투입계획임.
- 미국 대학(렛거스대학, 로드아일랜드대), 일본대학(가고시마대) 및 국내대학(경북대, 인하대, 제주대, 한양대 등) 연구진이 관측 및 예측모델링의 다양한 세부 핵심기술 분야에 참여할 예정임.



3. 기대효과 및 활용방안

가. 기대효과

제1세부과제 [북서태평양 난수괴 소용돌이해역 태풍예측기술 개선 연구] 분야 :

- 북서태평양 난수괴 통과 중에 급격히 강화되는 (Rapidly Intensified, RI) 태풍에 대한 해양자료 데이터베이스 구축. 고도 및 위성자료를 활용하여 단순 수온구조 예측에 활용.
- 북서태평양 해양자료 확보를 통해 RI 태풍강도 예측의 경우, 선진국 수준과 대등하거나 선도적인 태풍-해양결합 예측 모델의 정확도 개선기술 확보할 것으로 기대.
- 태풍에 의한 해양 기후변화 연구라는 글로벌 이슈에서 태풍이 해양기후에 미치는 영향 분야 등에서 선도적인 해양과학 연구 성과 창출 기대.
- 북서태평양 및 한반도 주변해역의 태풍 강도 예측 연구 능력 축적 및 미국 주요 대학/연구기관과 공동연구를 통해 독자연구 기술 축적 기회로 활용.
- 난수괴 해역에서 강화된 후 2일 이내에 한반도에 상륙하는 대규모 재해 유발 가능성이 있는 급격히 강화되는(RI) 태풍 예측 정확도 향상 통한 강한 태풍재해 대응능력 강화.
- 태풍-해양 상호작용 기반 예측기술 주요요소분야 원천기술의 지속적인 축적
- 태풍에 기인한 태풍해일 등 자연 재해 대응하여 과학적인 대처 능력 향상.

제2세부과제 [기후변화와 태풍변동성 연구] 분야 :

- 열대 온난역 해양변동의 역학 이해 및 태풍 이해에 대한 과학적 진보.
- 태풍진단 및 예측기법 향상 및 그에 따른 재해 대응 능력 제고.
- 15°-25°N 지역의 대양에디 발생과 이동에 대한 기후적 특성 분석도 및 사실적 해류 모사도(모델 결과물).
- 태풍모델과의 연계를 위한 해양순환 기반모델 수립 및 기본 해양장 제공.
- 해양생태계 변동 모의를 위한 생태계 모델과의 접합에서 해양순환 배경장 제공.

제3세부과제 [탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍 역할 진단] 분야 :

- 태풍이 지구온난화에 미치는 영향 평가 능력 고양 기대.



- 태풍이 해양생산성에 미치는 영향 평가 가능.
- 태풍 발생 변동에 따른 일차생산 변화 재현을 위한 모델 개발 및 과학적 검증자료 제시.
- 관측, 해색위성, 모형결과자료를 통하여 태풍 빈번도 변동에 따른 일차생산과 식물 플랑크톤 군집구조 변화의 메커니즘 이해.
- 태풍강도에 따른 영양염 공급의 차이 및 1차 생산력의 반응 기작 이해.
- 태풍에 의한 식물플랑크톤의 증식 기작 이해 및 자료 축적.
- 세계 최초로 태풍에 의한 휴면포자 seedling 연구결과 도출.
- 태풍과 소용돌이 특성사이의 상호작용에 따른 난자치어와 동물플랑크톤의 정성/정량적 분포 및 군집구조 변동연구는 미래지향적이며 선도적인 연구 성과 창출 기대.
- 해양생태계에서의 태풍의 역할을 정량화 할 수 있는 기회를 제공하며, 본 연구결과는 전 지구적 탄소순환과 해양 생산성 제고를 위해 직접적 증거로 활용될 수 있음. 향후 IPCC 및 UNRP 보고서 등에도 적극 인용될 수 있는 정보 산출 기대.

제4세부과제 [해장비 개발/개선 연구] 분야 :

- 태풍 중심부의 직접 관측 및 시료 채취를 실현함으로써 지금까지 연구되지 못했던 새로운 획기적인 자료 획득 가능 기대.
- Wave Glider 장착용 장비의 상용화에 따른 신 해양산업의 경제적 이익 창출.

나. 활용방안

- 태풍예측개선 모델의 기상청/태풍센터 등 현업모델로의 발전 연계 활용.
- 매년 하계 북서태평양 태풍강화 해역 조사 자료를 기반으로 매년 하계 이 해역을 통과하는 최대 가능 태풍 연례 전망에 활용.
- 난수성 소용돌이 해역 자료와 위성자료를 활용한 단순 2층 구조하의 준실시간 해양 연직 열구조 산정을 통한 응용 연구에 활용.
- 1단계 연구 이후 태풍예측 정확도 향상에 준실시간 자료의 효율성 확인을 통해 북서태평양 난수괴 해역 실시간/준실시간 자료 확보 위한 설계 기본 자료로 활용.
- 북서태평양 해역에서 태풍/태풍-해양상호작용/변동성 등 글로벌 이슈에 대한 국내 연구 그룹의 창의적인 연구 논문 발표를 위한 자료로 활용 기대.
- 북서태평양 온난화를 모니터링하기 위한 본 연구프로그램 관측자료 기반 해양기후변화 기본 데이터 베이스 구축.



4. 연차별 소요예산

단계		1단계				
		예산항목	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도
기 장 비	ARGO(0.2/대)	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4
	BioARGO(0.5/대)	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
	WaveGlider개발용	3.5	-	-	-	-
	WaveGlider(생화학센서포함)	5.5	5.5	5.5	-	-
	심해용TurboMAP	1.5	-	-	-	-
	MicroriderSensor	0.5	-	0.5	-	-
	수중글라이더부품	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
	DVLSensor	-	0.7	-	0.7	0.7
	계산노드	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	NitrateSensor	0.3	-	-	-	-
	Alkalinity분석기	0.2	-	-	-	-
	동물플랑크톤배양기(선상용)	0.1	-	-	-	-
	Double-tripmechanisms	0.1	-	-	-	-
	SedimentTrap	1.0	1.0	-	-	-
	기장비합계	16.6	10.5	9.2	4.0	3.0
직 · 간 접 비	전산처리비	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	재료비	3.0	3.0	3.5	3.5	3.5
	기장비보험료(2개월,1.7%)	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	선박비(이사부호,40일)	10.5	14	14	14	14
	직접비(여비,수용비,연구수당등)	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
	위탁연구개발비(국내)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	위탁연구개발비(국외)	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
	내부인건비 (총연구비 18%)	11.9	11.0	11.0	10.0	9.3
	외부인건비	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	간접비 (총연구비 17.7%)	11.6	10.8	10.8	9.8	9.0
합계	65.8	61.6	60.9	53.8	51.4	
5개년 총 예산규모 = 293.5억						



5. 경제성 분석

가. 경제사회적 기대효과

- 다양한 실측자료 획득을 통해 한반도에 영향을 주는 태풍의 예측오차를 줄여 태풍재해에 대한 대응력을 높임으로써 매년 발생하는 태풍 피해액 및 복구액 저감에 기여하며, 사회적 안전성을 높이고 국가 경제의 지속 발전을 위한 토대 마련
- ※ 최근 10년 간(2002~2011년) 태풍은 총 342회 발생하였으며, 연평균 42명의 사망자와 1조 460억 원의 피해액 및 1조 5,580억 원의 복구액 발생(2014년 재난재해 R&D투자전략(안), 미래부)
- ※ 한반도 태풍의 피해는 대부분 북서태평양의 RI(Rapidly Intensified) 태풍으로 야기되며, RI 태풍은 북서태평양에서 24시간에 30노트 (15m/s) 이상 급격히 강화되는 태풍을 의미함

기대효과	태풍경로와 RI 태풍 강도 예측 정확도 향상으로 인한 경제적효과		
효과 (2,100억 원)	태풍예보 정확도 1% 개선 시 경제적 효과 (15억 원/년)	× 태풍정확도 향상 목표율(%)(20)	× 효과 발생기간 (7년)
태풍예보정확도 개선의 경제적효과	· 태풍예보 정확도 20% 향상시 연간 300억원 경제적 효과 (2014년 재난재해 R&D 투자전략(안), 미래부)		
태풍정확도 향상목표율(%)	· 태풍경로예측 및 태풍강도예측 오차를 기존대비 20% 향상하고자 함 · 태풍경로예측오차의 현재 수준은 206km(기상청 72시간)이나, 동 사업은 165km까지 개선을 목표함		
효과 발생기간	· 기상학 관련 특허의 기술수명주기(TCT) 분석을 통해 효과발생기간을 7년으로 산정		

나. 경제성(비용-효과) 분석

- 동 사업으로 인해 발생하는 과학기술적 성과를 해수부 및 국가 전체 기초연구, 유사과제와 비교한 결과, 동 사업의 비용 대비 효과가 우수한 것으로 분석됨
- 투입 1억 원당 발생하는 전체 논문 성과는 0.50, SCI급 논문은 0.31건으로 해수부 기초 R&D에 비해 비용 대비 효과가 우수한 것으로 나타남
- ※ 동 사업은 SCI 등재 학술지 중에서도 상위 20%이내 저널에 45건 이상(동 사업 SCI 논문 목표량의 50%), 최상위저널인 Science/Nature지에 1건 이상 게재를 목표하는 등 성과의 질적 측면에 중심을 두고 있으므로 SCI급 논문의 양적 비교에 주의가 필요함
- 특허 등록의 경우 국가전체 기초R&D 및 유사과제군과 비교하여 낮은 성과를 보이지만,



자연현상에 대한 이해 자체를 목적으로 하는 동 사업의 특성을 고려하여 해석에 유의할 필요가 있음

(단위: 건)

비교	1 억 원당 과학기술적 효과			
	SCI급 논문	비SCI급 논문	논문전체 (SCI+비SCI)	특허등록
북서태평양 해양-태풍 상호작용 연구	0.31	0.20	0.50	0.01
해수부 기초R&D	0.06	-	0.06	0.01
국가전체 기초R&D	0.48	-	0.48	0.12
유사과제군(8개)	0.37	0.66	1.03	0.03

출처) 2016년 3월 NTIS 검색 결과, 기술과가치 분석

- 이 외에도 동 사업에서 창출되는 기술이전, 정책 활용 등의 성과가 과학기술적 성과와 맞물려 연구결과 확산을 촉진시키고 성과의 질적 우수성을 제고할 것으로 기대됨
- 동 사업은 2대 목표로 ‘북서태평양 난수성 소용돌이 해역에서 급격히 강화되는(RI) 태풍 예측 모델링 시스템 SW’개선/개발’을 제시하는 등 성과의 질적 고도화를 목표로하고 있으며, 그 가치는 SCI논문 수십 편에 해당할 것으로 평가됨
- 또한 동 사업으로 창출된 성과에 대해 기술이전 5건(기상청 등)을 계획하고 있어 과학기술적 성과활용의 외연을 넓힐 수 있을 것으로 예상

목차



❑ 요약문	i
❑ 목 차	xxi
❑ 표목차	xxiii
❑ 그림목차	xxiv
I. 기획 연구의 개요	1
1. 기획 연구의 개요	1
2. 기획 연구의 내용 및 범위	3
II. 국내외 연구 개발 현황 및 환경 분석	6
1. 국내·외 해양-태풍 관련 정책 동향	6
2. 국내·외 해양-태풍 연구 관련 동향 및 성과	7
III. 연구 목표 설정 및 연구 개발 추진 계획 수립	13
1. 연구 개발 최종 목표	13
2. 연구 목표 및 내용	13
3. 추진 전략 및 기술 개발 로드맵	14
4. 연구 개발 추진 체계	18
5. 연차별 연구 개발 소요 예산	19
IV. [세부과제 I] 북서태평양 난수성 소용돌이해역 태풍예측기술 개선	
연구: 1. 물리요소 조사 분야	20
1. 북서태평양 태풍강화 해역 열구조 조사 연구	20
2. 태풍에 의한 해양 혼합 관측	35
3. 해양무인관측기기를 활용한 최적화 통합 대양 관측 기술 개발:	
Mesoscale eddy의 변동 기작 연구	37



V. [세부과제 I] 북서태평양 난수성 소용돌이해역 태풍예측기술 개선	
연구: 2.태풍-해양 예측모델링 분야	45
1. 태풍-해양 결합모형을 이용한 태풍예측 정확도 개선	45
VI. [세부과제 II] 기후변화와 태풍변동성 연구	55
1. 태풍의 중장기 변동성 및 중규모 순환 모델링 연구	55
VII. [세부과제 III] 탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍 역할 진단:	
1. 화학 분야	64
1. 태풍에 의한 해양환경 변화 연구	64
VIII. [세부과제 III] 탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍 역할 진단:	
2. 생태 분야	72
1. 태풍이 부유 생태계 및 탄소순환에 미치는 영향 연구	72
IX. [세부과제 IV] 장비 개발/개선 분야	89
1. 해양관측 로봇 탑재용 장비 개발	89
X. 연차별 추진 계획	98
1. 연차별 연구목표 및 연구내용	98
2. 연차별 소요예산	101
3. 연구추진 방향 및 전략	102
4. 기대효과 및 활용 방안	105
XI. 경제성 분석	108
1. 경제성 분석의 개요	108
2. 투자계획 검토	111
3. 비용-효과 분석	120
4. 기대효과	129
XII. 참고문헌	135



표 목 차



[표 11-1-1] 국가연구개발사업의 비용검토를 위한 분석체계	109
[표 11-2-1] 총괄투자 계획	111
[표 11-2-2] 소요자원별 투자계획	112
[표 11-2-3] 소요장비 및 연도별 장비가액	112
[표 11-2-4] 연도별 소요인력	113
[표 11-2-5] 비목별 투자계획	114
[표 11-2-6] 키워드로 도출된 유사과제 Pool	115
[표 11-2-7] 유사과제와의 연구비 규모 비교	116
[표 11-2-8] 해양수산 R&D 분야별 투자현황	118
[표 11-2-9] 정부R&D 예산 대비 동 사업규모 비중	119
[표 11-3-1] 연도별 목표성과	120
[표 11-3-2] 투입액 1억 원당 목표성과	120
[표 11-3-3] 과학기술적성과 비교	122
[표 11-3-4] 기초연구의 과학기술적성과(2013년)	123
[표 11-3-5] 과학기술적성과 비교	123
[표 11-3-6] 유사과제의 과학기술적성과	124
[표 11-3-7] 유사과제와의 SCI급 논문 성과 비교	125
[표 11-3-8] 유사과제와의 논문전체(SCI+비SCI) 성과 비교	126
[표 11-3-9] 유사과제와의 특허등록 성과 비교	126
[표 11-3-10] 과학기술적 효과	127



그림 목 차



[그림 1-1-1] 2003년 난수성 소용돌이 해역에서 태풍 매미 강화
(Lin et al., 2005). 1

[그림 1-1-2] 최근 15년 한반도에 상륙, 큰 피해를 유발한 강한 태풍의 난수괴
통과 진로. 2

[그림 1-2-1] 최종목표 연계 주요분야별 연구내용 및 연구수단. 4

[그림 2-2-1] 2005-2008년 13개 태풍에 대한 해양초기조건별(NCODA:미해군자료,
NWPRO: 해양과기원산출자료) 평균경로 오차(좌) 및 평균 강도
오차(우). 8

[그림 2-2-2] 동중국해 특정 지점에서 태풍 나리 통과후 수온 변화 (해양과기원,
2011). 8

[그림 2-2-3] 2003년 실시간 해양관측 부이로 관측된 태풍 매미 통과 전·후의
관측 자료 (남 등, 2004). 9

[그림 2-2-4] 2012년 12월 Wave Glider를 이용한 태풍 Freda 통과 경로(좌) 및
관측 결과(우). 12

[그림 3-3-1] 북서태평양 태풍이 급격히 강화되는 난수 소용돌이 해역 조사정점도.
..... 15

[그림 3-3-2] 국내외 대학/기관별 관심주제와 참여 관측항목 연계도. 15

[그림 3-4-1] 주요 연구분야별 연구내용(붉은색) 및 연구수단(노란색) 활용 연계도.
..... 18

[그림 4-1-1] 2003년 8월30일에서 9월 4일 사이 태풍진로 인근에서 수온 연직
분포(좌) 및 태풍진로상 Argo 관측점 위치(별표 색깔 위치). 5등급
강화된 태풍위치는 검은색 표기. 21

[그림 4-1-2] 2000-2015년 사이 한반도에 태풍등급 1-2로 크게 영향을 준
태풍(사모아이, 매미, 에위니아, 나리, 콤파스, 볼라벤, 산바, 너구리)이
북서태평양 난수괴 해역을 통과하며, 급격히 강화되는 (RI) 태풍임.
태풍 산바와 에위니아는 보다 남쪽에서 최대 등급으로 강화됨.
연구조사가 필요한 해역의 위도구간을 청색으로 표기함. 22

[그림 4-1-3a] 2000-2015년 사이 한반도에 태풍등급 1-2로 크게 영향을 준
태풍(사모아이, 매미, 에위니아, 나리, 콤파스, 볼라벤, 산바,



너구리)이 북서태평양 난수괴 해역을 통과하며, 급격히 강화되는 (RI) 태풍임. 태풍 산바와 에위니아는 보다 남쪽에서 최대 등급으로 강화됨. 연구해역 위도구간을 청색 점선 표기. 22

[그림 4-1-3b] 2000-2015년 사이 한반도에 태풍등급 1-2로 크게 영향을 준 주요 태풍(매미, 에위니아, 나리, 볼라벤, 산바, 너구리)시의 북서태평양 난수괴 해역 상층 열용량. 4등급 태풍 볼라벤(Bolave), 5등급 태풍 매미(Maemi)시의 열용량 크기를 감안할 때, 북서태평양 난수괴 해역에서는 매년 4-5등급의 태풍은 발생할 수 있음을 시사함. 23

[그림 4-1-4] 2003-2005년간 태풍강도 개선 추이. 급격히 강화되는 (RI) 태풍의 경우 정확도가 36-84시간 예측구간에서 상대적으로 20-30노트(kts)의 큰 오차가 나타남 (Ginis, 2009). 23

[그림 4-1-5] 좌에서 우로 2007 (8월 하순), 2014 (9월 중순), 2015년 (8월 하순) 해양열용량(Ocean heat content). 2014년, 2015년에는 관측점 서측해역은 서쪽에서 저층냉수의 유입으로 열용량이 작으며, 대체로 동쪽은 대마난류로 인해 상대적으로 열용량이 큼. 2007년 최대 열용량이 70 KJ/cm²에 달하였으나, 2015년에는 같은 8월 하순임에도 최대치가 40 KJ/cm² 이하임. 멕시코만 Loop 해류 해역에서는 약 100 KJ/cm²에 달함. 25

[그림 4-1-6] 2010년 대만/미국 공동 조사 (Aug.20-Oct.20, 2010) (ITOP)시 계류부이(Mooring buoy), 항공기투하 표류부이, 및 항공관측을 사용한 조사 수행 (Lin, 2016). 26

[그림 4-1-7] 2004년 허리케인 Frances와 태풍 Songda에 따른 상하층 수온 anomaly 변화 (Bueti et al., 2014). 27

[그림 4-1-8] 2004년 태풍 Songda에 따른 상하층 수온 anomaly 변화 및 관련 물리 현상 (Bueti et al., 2014). 50m 이하까지 강한 혼합특성을 보임. ... 27

[그림 4-1-9] 관측장비 계류지점(M1-M14)와 NDBC 부이(42040) 위치 및 허리케인 Ivan 궤적. Inset은 NOAA위성(GOES-12)위성이 태풍크기를 보여줌 (Teague et al., 2007). 28

[그림 4-1-10] 남중국해 계류부이지점(SEATS) 및 Kuroshio 해류축 (검은색 선). Color는 평균적인 쿠로시오 해류 궤적(SSH=1.2m)의 고도위성 높이 정보(Lin et al., 2015). 29

[그림 4-1-11] 북서태평양 태풍강화 및 한반도 향하는 강한 태풍 통과 해역에서의 조사선 기본 관측 영역도. 적색은 관측 정점이며, 하늘색은 지난 25년



한반도 영향 태풍궤적.	31
[그림 4-1-12] 태풍 통과 예상 궤적을 기준으로 종방향 Argo 투하 관측점 (좌) 및 횡방향 wave 글라이더 조사 단면 (우측).	32
[그림 4-1-13] Kerama Gap을 통과하는 태풍의 강화특성을 조사하기 위하여 일본 가고시마 대학 실습선을 활용한 조사 실시. 계류조사, 단면 수온조사 및 기상자료 조사를 통해 태풍강화 모니터링.	32
[그림 4-1-14] 현재 검토/협의중인 기관별 해양/기상 조사 참여 관측항목 및 활용.	34
[그림 4-3-1] (a) 인공위성 해표면 고도 자료에서 나타난 mesoscale eddy의 위치 추적 결과 (b) warm eddy 의 변동과 관련되어 관측된 식물플랑크톤 번성	39
[그림 4-3-2] 널리 활용되고 있는 해양 무인관측기기 (a) 아르코 플로트 (b) 수중글라이더 (c) EM-Apex	39
[그림 4-3-3] (a) European Glider Ocean Observation Management 모식도 (b) Arctic Observing Network (c) 여름철 북극 빙하 추적 계획 (d) Acoustic Navigation and Communications for High-latitude Ocean Research	40
[그림 4-3-4] 대서양 아열대 강수-증발 시스템 연구를 위해 개발된 SPRUS project 모식도	40
[그림 4-3-5] (a) 태풍 궤적 (2000~2008) (b) AntiCyclonic eddy 궤적 (1992-2008)	41
[그림 5-1-1a] 태풍에 의한 위험 빈도와 사망 위험도 분포 (2010년 기준) (From Peduzzi et al., 2012).	46
[그림 5-1-1b] 관측과 모델에 의한 태풍의 강도 변화 및 예측 (Knutson et al., 2010.)	46
[그림 5-1-2a] 북서태평양 태풍 예측 기관별 진로오차 (km) (유, 2016)	47
[그림 5-1-2b] 1990-2015 기간 대서양 허리케인센터 예측 강도오차 (Tallapragada, 2016).	48
[그림 5-1-2c] 2003-2005년간 대서양 급격히 강화된(RI) 태풍의 예측 정확도 (좌) 및 파랑효과를 고려한 태풍 리타 강도 예측 (Ginis, 2009). 48-84시간 강도예측 오차가 20-30kts에 달함.	49
[그림 5-1-3] 태풍 매미(2003년)가 지나가기 전 해면고도변이와 관측으로부터 계산된 TCHP(Tropical Cyclone Heat Potential). 태풍 매미의 경로를 함께	



표시했으며 해양의 난수성 에디를 통과하면서 그 강도가 증가하는 것을 보여줌. (From Lin et al., 2012). 49

[그림 5-1-4] 표층조건(SST)에 따른 태풍경로 및 강도예측 결과 51

[그림 6-1-1] 지난 15년간 태풍진로빈도와 과거 15년간의 차이(등고선)와 과거 태풍진로빈도의 기후값 (채색역) 56

[그림 6-1-2] 고기압성 에디와 저기압성 에디 및 아열대 반류에 의한 북서태평양 대만 동방해역의 순환특성 모식도 56

[그림 6-1-3] 해양혼합층에 따른 태풍의 발달과 약화 58

[그림 6-1-4] 지구온난화에 따른 태풍 빈도의 변화. 59

[그림 6-1-5] 북서태평양 대만 동방해역에 존재하는 고기압성 에디와 저기압성 에디들의 공간적 분포와 월평균 해류(2009년 6월; 위성 관측에 의함) (Kim et al., 2014). 59

[그림 6-1-6] 순환모델의 대상해역과 해저지형 63

[그림 7-1-1] 질산염, 인산염, 규산염 농도의 태풍 전(왼쪽그림)과 후(가운데 그림), 그리고 전후차이(오른쪽 그림) 65

[그림 7-1-2] Sargasso Sea에서 표층수온과 염분의 시간변화 (a), 대기와 표층해수 이산화탄소 분압의 시간변화 (b), 혼합층 깊이와 용존무기탄소 농도의 시간변화 (c), 해양-대기 이산화탄소 플럭스의 시간변화 (d) 66

[그림 7-1-3] 북대서양에서 8월에 관측한 바람세기의 시간변화(a), 혼합층 깊이(MLD), 표층등밀도 깊이(PB), 유광층 깊이(ZEU)의 시간변화(b), 표층 질산염 농도의 시가변화(c), 표층 엽록소 농도의 시간변화(d) 67

[그림 8-1-1] 쿠로시오 해류 주축 흐름의 변화에 따른 생태계 구조 변화 모식도 72

[그림 8-1-2] 태풍 전/후의 식물플랑크톤의 증식모식도 73

[그림 8-1-3] 태풍 전/후 식물플랑크톤 영양세포와 휴면세포 수직분포 모식도 ... 73

[그림 8-1-4] 태풍 전(좌)과 후(우)의 엽록소 (Chl-a)와 어류 종 수 변화 (Yu et al., 2013) 75

[그림 8-1-5] 태풍에 의한 해양환경 변화(수층혼합& 육상기원 영양염류 공급) ... 77

[그림 8-1-6] 태풍 후 생성된 유기쇄설물의 상층부 사용율과 침강율 비교. 77

[그림 8-1-7] 남중국해에서 태풍 통과 후 수층의 광학적 및 생물학적 반응. 78

[그림 8-1-8] 하계 황해에서 태풍 유무에 따른 표층환경 특성 비교. 79

[그림 8-1-9] 태풍 유무에 따른 황해 하계 수층의 식물플랑크톤 및 엽록소 농도 변화. 79

[그림 8-1-10] eddy 형성 지역(좌)과 해역에 따른 자치어 출현량과 분류군수(우). · 80



[그림 8-1-11] Shelf와 eddy에서 neritic taxa의 크기별 상대 출현량 비교. 80

[그림 9-1-1] Wave Glider의 추진 원리 90

[그림 9-1-2] 2003년 실시간 해양관측 부이로 관측된 태풍 매미 통과 전·후의
관측 자료 (남 등, 2004) 91

[그림 9-1-3] 2012년 12월 Wave Glider를 이용한 태풍 Freda 통과 경로(좌) 및
관측 결과(우) 92

[그림 9-1-4] 웨이브글라이더 추진 fin의 운동 모습 93

[그림 9-1-5] 웨이브글라이더 장착 해수 채수기 모식도 94

[그림 9-1-6] 펌프와 채집망이 integration된 동물플랑크톤 채집기 모식도 95

[그림 10-3-1] 세부과제/핵심기술간 연계도 104

[그림 11-1-1] 경제적 타당성 분석 구조 108

[그림 11-2-1] 분석대상 유사과제군 115

[그림 11-2-2] 해양수산 R&D예산 추이 117

[그림 11-2-3] 해양수산 R&D 분야별 투자현황(비중) 118

[그림 11-3-1] 해수부 R&D사업 성과(2013년) 121

[그림 11-3-2] 해수부 기초연구 성과(2012년) 122



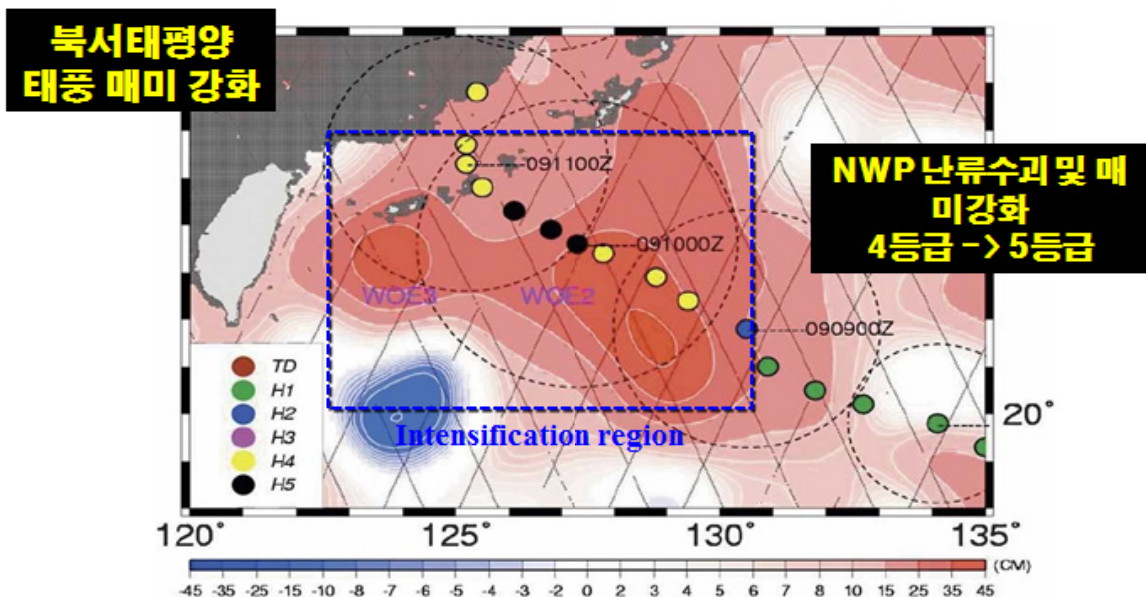
I 기획 연구의 개요

1) 기획 연구의 개요

1.1. 기획의 배경 및 목적

1.1.1 기획의 배경

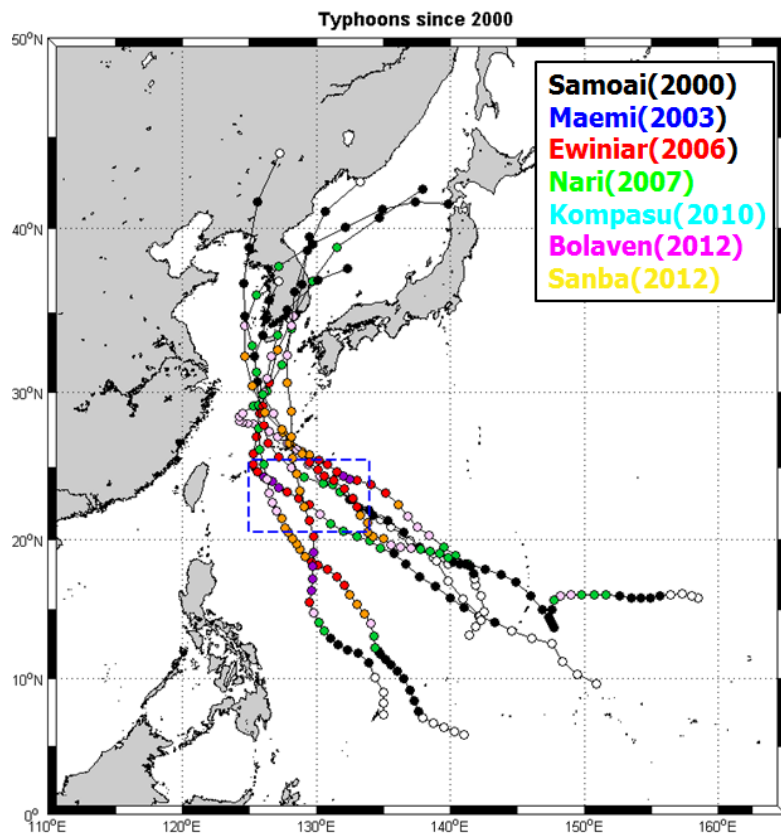
- 태풍은 우리나라에서 발생하는 자연재해중 가장 파괴적이고 그 피해가 광범위하게 나타나는 해양기원 재해 요소임. 발생한 태풍의 강도는 해양에서 얼마나 많은 에너지를 공급받느냐에 따라 그 강도가 결정됨.
- 북서태평양 저위도(5°N-15°N) 해역에서 발생하여 우리나라로 향하는 태풍은 (20°N-24°N) 해역에서 최대 강도가 나타남. 이는 이해역에 깊은 수심까지 따뜻한 난수성 소용돌이(warm eddies)의 존재 때문이며, 2003년 한반도에 막대한 피해를 유발한 태풍 매미의 경우, 난수성 소용돌이 영향으로 5등급으로 강화됨(Lin et al., 2005)(그림 1-1-1). 따라서 이 해역에서의 태풍강화 과정은 우리나라로 향하는 최대 태풍에 대한 정보 제공과 관련하여 매우 중요하나 해역적으로 멀리 떨어져 있고, 그간 관측장비의 한계로 연구, 조사가 수행된 바가 거의 없음.



[그림 1-1-1] 난수성 소용돌이 해역에서 2003년 태풍 매미 강화 과정.



- 북태평양은 허리케인이 크게 증가한 해역중의 하나(Webster et al., 2005)로서 온난화 진전에 따라 앞으로 더욱 강한 태풍이 내습할 것으로 예상되고 있음.
- 이같이 온난화 환경에서 한반도로 향하는 강한 태풍의 발생과 예측에 대한 특별한 이해와 연구가 필요함. 그림 1-1-2는 2000년 이후 한반도에 1-2등급 수준으로 상륙하거나 영향을 미친 강한 태풍의 진로를 나타내며, 이들 태풍은 북서태평양 난류해역을 통과하고 있음. 최대 강도가 발생하는 북서태평양 난수성 소용돌이 해역에서 태풍과 해양의 상호작용에 대한 보다 체계적이고 과학적인 자료획득과 이해를 통해, 최대 태풍과 태풍 강화과정 예측기술의 정확도를 향상시키는 연구가 시급히 요청됨.



[그림 1-1-2] 최근 15년 한반도에 상륙, 큰 피해를 유발한 강한 태풍의 난수괴 통과진로.

- 최근 태풍이 단지 상부 해양혼합층 외에도 그 이하 해양 수백 m 깊이까지 수온구조를 바꾼다는 수치모델링 연구(Bueti et al., 2014)가 있으며, 대서양에서는 태풍이 심층의 Co2를 상층으로 이동시키고 해양표층에서의 농도를 급격히 변화시킨다는 연구가 보고된 바 있으나 태평양에서 이러한 특성이 직접 관측된 바 없음. 북서태평양에서 태풍이 해양에 미치는 단기적인 해양물리, 화학 및 생태 측면에서의 영향과, 더 나아가 태풍이 장기적으로 기후변화에 미치는 영향에 대한 규명 연구는 글로벌 이슈의 과학적 규명에



적극적으로 대응, 동참하고, 글로벌 현안에 국제공동 연구를 통해 우리가 주도적으로 과학적인 기여를 한다는 측면에서도 시급성이 있다고 하겠음.

1.1.2 기획의 목적

- 북서태평양 태풍최대 강도발생 해역에 대한 해양-대기 상호작용 기획연구의 일환으로 5차례(1차: 2015년 10월 22일, 2차: 11월 13일, 3차: 11월 27일, 4차: 12월 4일, 5차: 12월 28일)의 모임을 갖고, 본 연구 포함되어야 할 핵심 주제에 관한 토의, 주요 세부과제 분류, 조사해역 표준 관측정점 확정, 연구목적 달성을 위해 관측장비 및 국내 자체기술로 개발하고자 하는 장비 개선, 관측장비와 관련된 구체적인 관측기법, 관측해역이 일본, 대만의 EEZ에 포함됨에 따른 국제 공동조사 방식 채택 및 일본 대학 등 외국기관 공동조사 방법 검토, 연두분야별 소요장비 검토 등을 검토 협의하였으며, 최종적으로 분야별로 개괄적인 소요분야별 연구비를 산출하였다. 아울러 본 연구기획과 관련하여 미국, 일본 연구자를 초빙하여 기획프로그램 추진을 위한 미니 워크숍을 개최함(한국해양과학기술원, 2016). 그간의 연구기획을 통해 본 기획을 통해 도달한 북서태평양 태풍-해양 상호작용 연구 프로그램의 최종 연구 목적은 다음과 같이 크게 2개로 제시하였다.
- 태풍이 급격히 강화되는, 북서태평양 난수성 소용돌이 해역에서 악천후에도 관측이 가능한 최신 연구조사선(RV 이사부호)과 다양한 첨단 해양로봇을 사용하여 실측자료 관측 획득과 축적된 태풍모델링 개선/원천기술을 병용하여 태풍 예측의 정확도 개선.
- 북서태평양에서 태풍이 해양에 미치는 다양한 수층구조, 온실기체 변화, 생태계 영향에 대한 단기변화와 기후변화 측면의 중기 변화를 규명함. 아울러 열대해역표층수온 상승을 포함한 기후변화와 태풍 발생빈도/강도의 장기변동성 연관성을 연구함.

2 기획 연구의 내용 및 범위

- 본 기획연구를 통해 기획한 주요 연구내용 및 범위는 아래 그림 1-2-1과 같이 이사부호 조사, 차세대 로봇 관측 활용조사 및 태풍수치모델링 연구를 통하여 태풍예측기술 개선, 태풍에 의한 해양반응 및 기후영향 분석 및 기후변화와 태풍변동성을 이해라는 핵심 연구목적을 달성하는 것으로 연계하였다.



주요 연구내용 및 목표연계 조사방법/항목/전략



[그림 1-2-1] 최종목표 연계 주요분야별 연구내용 및 연구수단.

○ 북서태평양 난수성 소용돌이 해역 태풍예측기술 개선 연구의 주요 연구내용은 다음과 같다.

1. NWP 태풍강화 해역 열구조 조건 및 물리요소 연구
2. 태풍-해양 결합모형을 이용한 태풍예측 정확도 고도화
3. 태풍에 의한 해양 혼합변화/Mesoscale eddy의 변동 기작 연구

○ 기후변화와 태풍변동성 연구 분야의 주요 연구내용은 다음과 같다.

1. 열대해양의 장기변동성에 따른 태풍의 중장기 변동성 분석
2. 해양혼합층 변동과 태풍강도 변화의 상관성 분석
3. 북서태평양 소용돌이 해역 고해상도 해양순환모델링을 통한 에디의 발생/기후특성 모의분석 및 시간/공간 변동성 이해



- 탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍의역할 진단 분야의 주요 연구내용은 다음과 같다.
 1. 태풍에 의한 해양-대기 이산화탄소 플럭스 및 침강입자 플럭스 변화와 표층 영양염 공급에 대한 정량적 평가
 2. 태풍 전/후의 일차생산, 식물플랑크톤 군집구조 변화 및 천이양상 연구
 3. 소용돌이(mesoscale eddy)의 특성에 따른 동물플랑크톤과 난자치어 구조와 분포 특성 파악 및 태풍 통과 전/후 비교
 4. 물리-생지화학결합 하위생태계 모형 통한 태풍의 부유생태계 영향 평가

- 장비 개발/개선 연구 분야의 다음의 주요 연구내용으로 구성된다.
 1. Wave Glider 장착용 윈치 개발 및 장착용 펌프 개발
 2. Wave Glider 장착용 해수 채수기 개발
 3. Wave Glider 장착용 연속 플랑크톤 채집기 개발



II

국내외 연구 개발 현황 및 환경 분석

1 국내외 해양-태풍 관련 정책 동향

1.1. 국내 정책 동향

- 기상청 태풍자료 활용 등을 위한 Argo 투하 사업 진행중.
- 해양과학기술원 해양-태풍 상호작용에 대한 대륙붕에서 난류관측 등의 연구를 위한 기본연구사업 수행 (2015).
- 공공기술연구회와 기초기술연구회 협동연구사업으로 기상청, 해양과학기술원, 과학기술정보연구원, 한국지질자원연구원 공동으로 협동연구사업 수행(2011).
- 제주도에 기상청 소속 국가태풍센터가 2008년 건립, 운영중이며, 우리나라의 태풍에 대한 분석과 예보 등을 전문으로 하는 기관임. 설립후 하루 2회 예보를 4회 예보로 늘림. 감시구역은 북서태평양으로 한정함.

1.2. 국외 정책 동향

- 미국지구물리연구소(GFDL)에서 태풍예측 모델, 태풍-해양 결합모델링 연구 지속적으로 추진하여 옴. URI 등과 같은 대학과 예측모델을 지속적으로 개선하고 있음.
- 태평양을 포함한 해역에서 열대저기압에 대한 분석과 예보를 목적으로 미해군해양기상센터내에 합동태풍경보센터 (JTWC, Joint Typhoon Warning Center) 운영중. 북서태평양뿐만 아니라 남태평양, 중태평양, 동태평양, 북인도양 등에서 발생하는 열대저기압 감시중. 1분 단위로 측정함. 미 공군/해군 인력으로 운영되며, 여러 대의 위성 시스템, 센서, 레이더, 기상모델 등을 이용함.
- 전세계적으로 6개의 지역특별기상센터와 6개의 열대저기압 경보센터가 열대저기압에 대한 예보를 하고 있음. JTWC와 RSMC는 지역특별기상센터임.
- 미국 국립 허리케인 센터(NHC)는 대서양과 북동 태평양에서 발생하는 허리케인 등 열대저기압활동을 감시, 예보를 함.

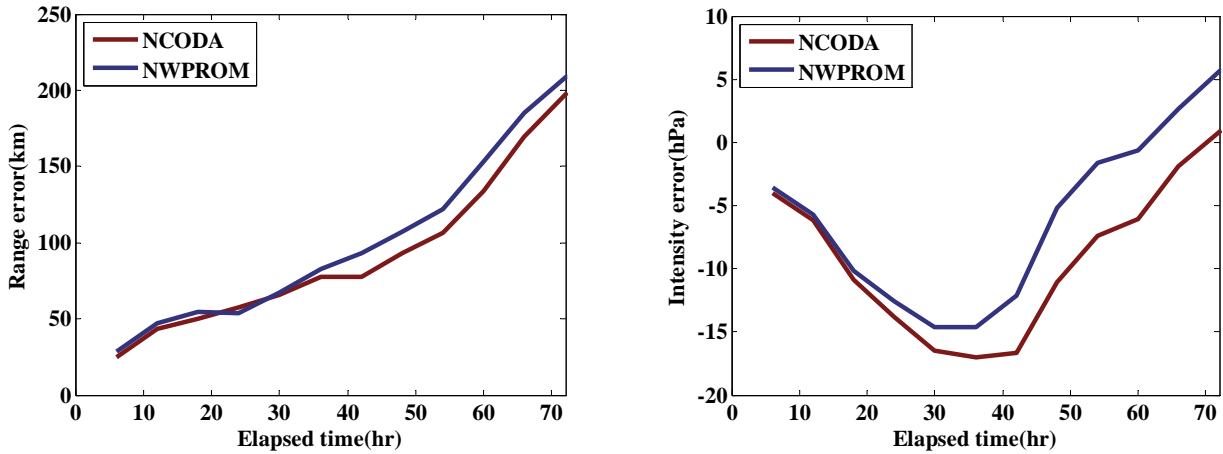


2) 국내·외 해양-태풍 연구 관련 동향 및 성과

1.1. 국내 연구 동향

○ 태풍예측기술 개선 연구 분야 [세부과제 I]

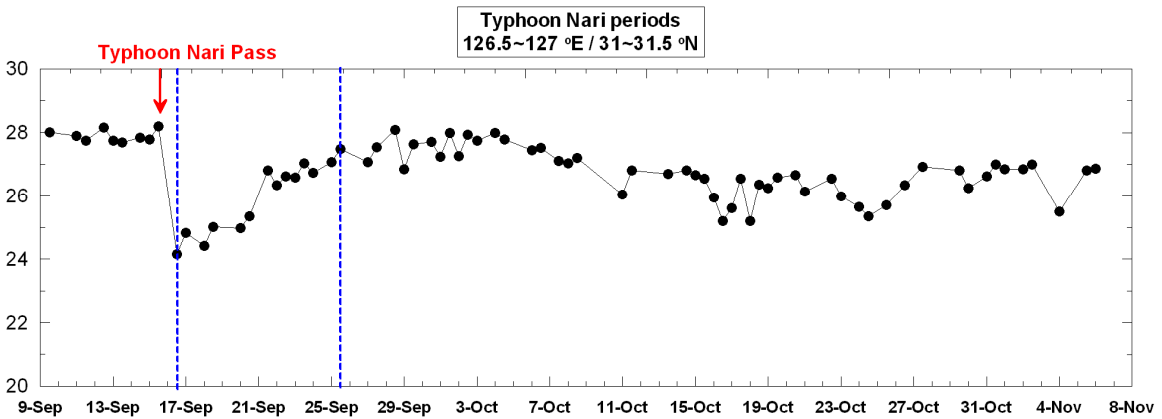
- 동중국해에서 태풍에 의한 해양반응 연구의 일환으로 해양조사를 실시함 (기초기술연구회, 2011). 관측기간중 동중국해를 직접 통과한 태풍은 2회(2007년 태풍 나리, 2010년 태풍 콤파스) 있었으며, 태풍나리시 태풍 통과후 수일후 관측한 CTD조사에서 용승과 혼합특성이 관측됨. 관측된 연직 단주기 운동은 태풍시 단주기 내부파의 발생 결과로 태풍혼합의 한 특징을 제시함.
- 동중국해 영역에서 내부파의 감쇄에 따른 난류혼합 연계성을 시사하는 추가적인 결과는 2014년 하계조사 관측자료 해석 연구에서 제시됨 (과학기술정보연구원, 2014). 대양에서의 혼합층 이하 수온약층에서 상층으로부터의 열전달과 관련된 혼합특성을 규명하는 데 내부파 역할에 대한 연구 필요성을 시사함.
- 해양과학기술원에서 수행한 연구(해양과학기술원, 2011)에서 MOM3-GFDL 결합모델을 사용하여, 2005-2008년 내습 13개 태풍에 대한 해양초기조건에 대한 평균 태풍 경로와 강도 예측 민감도를 제시함 (해양과학기술원, 2011)(그림2-1-1).
- 그림2-1-1에서 KIOST의 해양재분석장 (NWPROM)과 미해군 NCODA 자료를 이용한 2일 예측 결과 모두 약 100km 이하의 오차를 보임. 40시간 이후 NWPROM의 경로 오차가 NCODA보다 다소 크며, 강도 예측의 경우, 두 경우 모두 태풍의 강도를 과소 평가함. 30-40시간 이후 태풍강도는 NPWROM을 사용한 경우가 약 5hPa 정도 오차가 작음. 두 모델 결과가 1.5일 정도 예측계산이후 강도 오차 차이가 커지는 경우는 해양초기조건 효과의 감소하고, 진로오차가 추가로 기여를 하였을 것으로 보임. 최대 오차가 약 15 hPa 정도이나 강한 태풍의 경우 최대오차는 보다 커질 것으로 예상됨. 강한 태풍으로 인한 태풍 피해가 지배적임을 감안하며 강한 태풍의 강도오차 개선 노력이 보다 중요함.



[그림 2-2-1] 2005-2008년 13개 태풍에 대한 해양초기조건별(NCODA:미해군자료, NWPROM: 해양과기원산출자료) 평균경로 오차(좌) 및 평균 강도 오차(우).

- 해양과기원 수행 연구사업(2011)에서 2007년 태풍 나리 통과후 위성자료를 통해 본 표층 수온 변화는 약 8일 정도 지나야 회복되는 것으로 나타남(그림[2-1-2]).

AMSR-E satellite data



[그림 2-2-2] 동중국해 특정 지점에서 태풍 나리 통과후 수온 변화 (해양과기원, 2011).

○ 기후변화와 태풍변동성 연구 분야 [세부과제 II]

- Kim 등(2010, OSJ)은 18N, 135E 지역에서 ADCP 관측을 실시했으며 이를 통해 STCC의 분지를 직접 측류하였다. 남측의 STCC는 겨울부터 봄철까지 지속되는 것으로 관측되었으며, 동시에 17.5N와 20.5N 주변에 고기압성과 저기압성의 에디들이 각각 동서 방향으로 존재하였는데 이들 에디들은 동향하는 STCC를 유지시키는데 중요한 역할을 한다고 제시하였다.

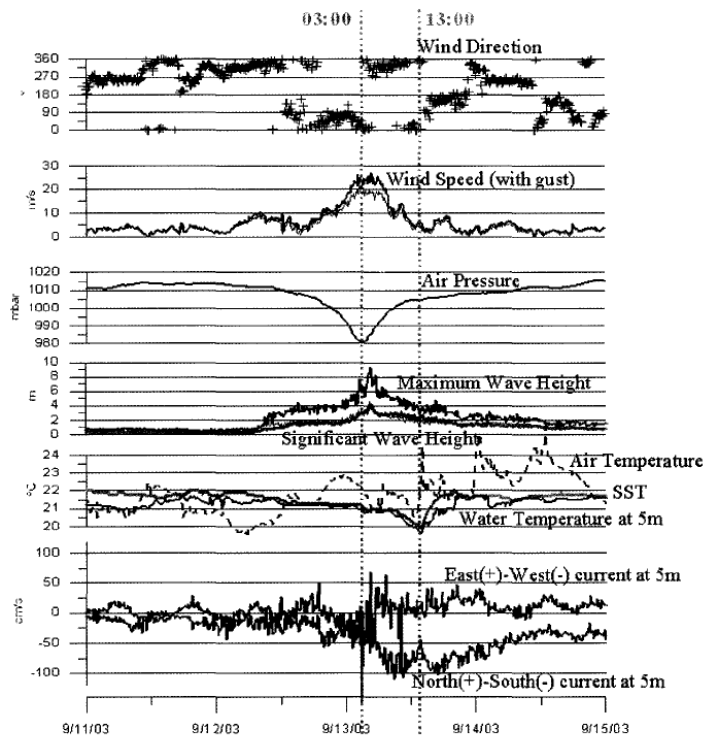


○ 탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍 역할 진단 분야 [세부과제 Ⅲ]

- Son et al. (2006)은 동해에서 태풍 메기가 지나간 후에 표층 영양염과 엽록소 농도변화를 위성자료를 이용하여 관측하였다. 표층 영양염 농도 변화는 표층 수온변화로부터 수온과 영양염 관계식을 이용하여 구하였는데, 태풍 메기가 지나간 후에 표층 질산염, 인산염, 규산염 농도가 각각 90%, 40%, 35%가 증가하고, 엽록소 농도는 MODIS 엽록소 자료를 분석하여, 태풍 메기가 지나간 후에 표층 엽록소 농도가 70% 가량 증가함을 보였다.
- 황해에서 2011년에 태풍 “무이파”가 통과 직후 표층 수온은 감소하였고, 염분은 증가, 엽록소-a 농도는 증가와 동물플랑크톤(요각류 *Calanus sinicus*)의 수직이동양상이 변화에 대한 연구가 있다 (KORDI, 2011).

○ 장비 개발/개선 연구 분야 [세부과제 Ⅳ]

- 국내의 경우 무인 자율 해양 관측 로봇을 이용한 해양의 관측은 전무하며, 특히 관측을 통한 태풍 연구도 거의 찾아보기 힘들다. 다만 2003년 이미 설치되어 있던 실시간 해양 관측 부이 인근으로 태풍 매미가 통과함에 따라 관측된 풍향, 풍속, 기압, 파고, 수온, 해류 등의 해양 자료가 보고된 바 있음 (남 등, 2004; [그림2-1-3]).



[그림 2-2-3] 2003년 실시간 해양관측 부이로 관측된 태풍 매미 통과 전·후의 관측 자료 (남 등, 2004).



1.2. 국외 연구 동향

○ 태풍예측 개선분야 [세부과제 I]

- 미국 국립허리케인센터(NHC)에서 과거 15년간(1990-2005) 대서양 허리케인 진로 48시간 예측 정확도는 200km오차에서 100km오차로 15년간 약 50% 개선됨. 급격히 강화되는 태풍의 경우, 2003-2005년간 대서양에서 48시간-84시간 예측 오차는 20-30노트(kts)로서 전체 평균적인 강도 오차보다 현격하게 크게 나타남.
- 해양-대기경계층인 해표면에서 파랑효과를 고려한 연구의 경우, 2005년 태풍 리타에 대한 실험 결과, 진로예측은 개선을 보이거나 강도예측 오차는 파랑고려에도 불구하고 강도 개선효과가 없음 (Ginis, 2009).
- 최근 연구 태풍으로 인한 수온약층과 장기변동성에 대한 영향을 시사하는 연구결과는 Bueti et al. (2014)에 의한 모델 연구로서, 허리케인 Frances와 태풍 Songda에 의한 반응실험 결과, 태풍이 지난후 상부 50m 혼합층에서는 냉각 특성이 나타나나, 50m에서 300m 층까지는 양의 수온 anomaly가 나타남을 보임. 이 연구는 이러한 수온 약층에서의 변화가 장기적으로 순환과 이에 따른 계절변화, 연변화를 유발할 수 있기 때문에 시사하는 바가 크다고 할 수 있으나, 실제 관측치로 확인된 것은 아님.

○ 기후변화와 태풍 변동성 분야 [세부과제 III]

- Lin et al. (2008)은 태풍의 강도변화가 표층의 해수면온도에 의한 열적 플럭스에 의해서 좌우되는 것이 아니라 해양 관측자료를 통해 해양혼합층이 태풍의 발달과 약화에 중요한 영향을 미칠 수 있다는 사실을 보고함.
- Emanuel, K. (1995)은 다음과 같이 열역학적 이론을 바탕으로 태풍의 강도가 해수면 온도와 엔트로피에 의해 제한된다는 것을 증명함.

$$V_{\max}^2 = \frac{SST - T_o}{T_o} \frac{C_k}{C_D} (k^* - k)$$

여기서 SST는 해수면온도, T_o 는 외향고도에서의 온도이고, k^* 와 k 는 각각 태풍과 주변의 엔트로피이다.

- Jin et al. (2014)은 열대 동태평양에서 발생하는 태풍이 엘니뇨에 의해 크게 변화될 수 있는데, Emanuel의 잠재강도를 변형하여 그 이유로 열대 동태평양의 해양혼합층변동을 제시함.
- Li et al. (2010)은 고해상도 기후모형을 이용하여 태풍 발생영역이 지구 온난화 환경에서 중태평양쪽으로 이동하며 이는 해양의 열적구조 변화에 의해서 나타남을 제시.
- Qiu 등(2014, JPO)은 위성고도계 자료와 고해상도 해양순환모델 모의결과 분석을 통해



STCC에 나타나는 150km 규모의 에디는 각각 5월과 4월에 에디운동에너지와 rms 와도의 계절적 최대치를 가짐을 보임. 고해상도 모델에서는 STCC의 에디운동에너지와 rms 와도가 모두 3월에 최대값을 가지고 계절적으로 큰 값의 양의 와도 skewness를 보임. 이차이는 서태평양 아열대순환 전선역의 표층 밀도 변화에 의한 경압불안정과 STCC 시스템 연직 쉬어 내부 경압불안정에 기인하는 것으로 제시.

- Qiu & Chen(2004, JPO)은 TOPEX/Poseidon 인공위성 고도계 자료 분석을 통해 남태평양의 21-29S 지역에서도 동향하는 남반구 아열대반류(STCC)와 높은 에디운동에너지 밴드 발견함. 에디운동에너지장(eddy kinetic energy field)은 남적도반류-남적도해류 시스템의 수평시어(shear)와 연관된 순압불안정에서 발생하며, 순압불안정성 세기의 계절적 변동이 에디운동에너지장의 계절적인 변화 유발한다고 보고함.

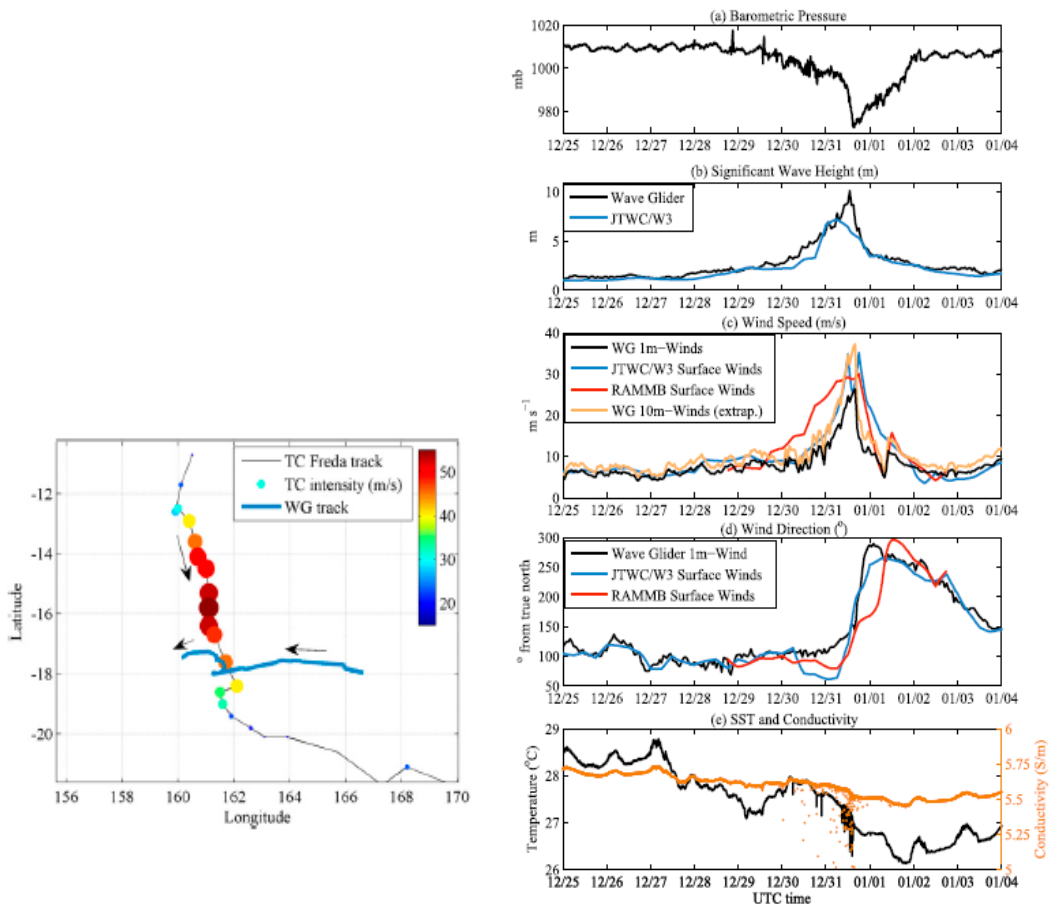
○ 탄소순환 및 부유생태계(생산성)에 대한 태풍의 역할 진단 분야 [세부과제 III]

- Bates et al. (1998)이 Sagasso Sea에서 해양/대기 이산화탄소 분압의 연속 관측 결과, 태풍시기에 해양-대기 이산화탄소 플럭스가 평상시기에 비해 100배 증가와 여름동안에 태풍에 의해 해양-대기 이산화탄소 플럭스가 55% 증가 보고함. Nemoto et al. (2009)은 동중국해에서 여름에 세 개의 태풍 통과후 해양-대기 이산화탄소 플럭스 증가는 여름전체 플럭스의 60%를 차지한다고 보고함.
- Rumyantseva et al. (2015)은 북대서양에서 태풍 전후에 표층해수 영양염 농도를 25일간 관측 결과, 태풍시 왕성한 표층혼합으로, 심층에서 표층으로 영양염 플럭스가 태풍전에 비해 25배 증가보고. 태풍에 의해 표층으로 공급되는 영양염 플럭스는 겨울동안 표층혼합에 의해 표층으로 공급되는 영양염 플럭스의 2.5~5.0% 차지한다고 보고함.
- 태풍에 의한 영향으로 엽록소 농도의 변화는 약 2 ~3 주 동안 지속된다고 알려져 있다 (Babin et al., 2004; Davis & Yan, 2004; Zheng & Tang, 2007; Huang et al., 2011). 특히 Lin et al. (2003)의 연구에서는 남중국해에서 엽록소 농도는 태풍에 의해 30배까지 증가되며 연간 일차생산은 약 20 ~ 30%까지 증가된다고 보고하였다.
- 그러나 해색위성 원격탐사는 오직 구름양이 적은 날에만 가능하며 표층에서의 수온 및 엽록소 농도만을 관측하기 때문에 전 수층에서의 변화를 이해하는데 한계가 있기 때문에 최근에 현장관측과 원격탐사를 연계한 연구가 진행되고 있다(Liu et al., 2013; Li et al., 2013; Ye et al., 2013).
- 장기 자료를 이용하여 태풍 발생과 일차생산 간의 관계를 이용하여 태풍에 의해 유도된 일차생산의 연간변동을 추정하였고(Siswanto et al., 2007; Chen et al., 2015), 해색 위성 데이터와 생태모형을 이용하여 태풍에 의해 생지화학적 반응의 시공간적 변화를 연구함 (Fujii et al., 2007; Wu et al., 2007; Fujii & Yamanaka, 2008).



○ 장비 개발/개선 연구분야 [세부과제 IV]

- 국외에서는 하와이에서부터 호주 시드니까지 Wave Glider를 이용한 태평양 횡단 관측을 수행하던 중 남태평양에서 인근을 통과하는 태풍 Freda를 향하여 방향을 돌려 태풍을 관통하는 관측을 수행하였다 (Lenain and Melville, 2014; 그림 [2-1-4]). 이 관측은 본래 태풍 관측을 위해 계획된 것이 아니었음에도 불구하고 실시간 관제가 가능한 덕분에 경로를 일부 수정하여 태풍을 통과하면서 관측할 수 있었다. 이를 통하여 Wave Glider가 30 m/sec 이상의 강풍과 10 m 이상의 파고를 동반한 태풍의 중심부에서도 아무런 문제없이 관측을 수행할 수 있음을 입증하였다. 그러나 이 연구에서는 기상관측, 표층의 수온 및 염분 관측에 국한되어 보다 종합적인 관측 자료를 제시하지 못하였다.



[그림 2-2-4] 2012년 12월 Wave Glider를 이용한 태풍 Freda 통과 경로(좌) 및 관측 결과(우).



Ⅲ 연구 목표 설정 및 연구 개발 추진 계획 수립

1 연구 개발 최종 목표

최종목표는 첫째, 우리나라에 최대 강도의 태풍이 나타나는 북서태평양 난수성 소용돌이 해역에서 악천후에도 관측이 가능한 최신 연구조사선(RV 이사부호)과 다양한 첨단 해양로봇을 사용하여 다양한 실측자료 관측 획득과 축적된 태풍모델링 개선/원천기술을 병용하여 태풍 예측의 정확도 개선을 위한 예측기술 개발/개선하며, 정량적인 목표는 2015년 기준 태풍 진로 20% 개선(72시간 예측기준 165km 오차)하며, 북서태평양 급격히 강화되는 태풍의 강도 중심기압 예측 정확도는 20hPa (최고수준 근접)를 달성함.

둘째, 기후변화 관련하여 북서태평양에서 태풍이 해양에 미치는 다양한 수층구조, 온실기체 변화, 생태계 영향에 대한 단기변화와 기후변화 측면의 중기 변화, 기후변화와 태풍의 장기변동성 연관성을 규명함. 이를 통해 OECD 국가로서 글로벌 이슈인 태풍과 기후변화 연구 선도를 통해 국가 및 기관의 위상제고에 기여하고자 한다.

2 연구 목표 및 내용

본기획 연구에서 검토한 연구 프로그램의 세부분야별 연구목표 및 내용은 다음과 같다.

○ 태풍예측 개선분야 [세부과제 I]

북서태평양 난수성 와류해역에 나타나는 태풍 최대 강도 발생해역에 대한 집중 조사/예측연구를 통한 태풍예측기술 개선을 목표로 한다. 구체적으로 NWP난수해역 열구조 초기조건 조사/물리요소반응 연구, 태풍-해양 결합모형을 이용한 태풍예보 정확도 개선, 태풍에 의한 해양 혼합/Mesoscale eddy의 변동 기작을 연구함.

○ 탄소순환 및 부유생태계(생산성)에 대한 태풍의 역할 진단 분야 [세부과제 II]

북서태평양 난수성 와류해역에서 태풍전후, 해양-대기 이산화탄소 플럭스 변화/영양염 표층공급 정량 평가 및 표층 영양염 농도 산출과 공급에 대한 정량적 평가를 통해, 해양반응과 기후변화 측면의 영향을 연구함.

○ 기후변화와 태풍 변동성 분야 [세부과제 III]

기후변화와 태풍변동성 분야에서는 열대 온난역 확장과 엘니뇨 변동에 따른 태풍의 중장기적 변동성 이해, 열대 온난역의 해양 변동성과 대기 열수지 관측을 통해 해양과 태



풍의 상호작용을 연구함. 아울러 북서태평양 아열대 순환역 중규모 에디 형성 기작, 에디 구조와 기후 특성을 연구함.

○ 관측장비 개발/개선분야 [세부과제 IV]

관측장비 개발/개선분야에서는 차세대 해양관측 로봇인 Wave Glider 장착용 장비 개발하여, 태풍전후 관측항목 확대와 개선을 통해 태풍이라는 악천후하에서 현장 실시간 관측 역량을 향상시키고함.

3 추진 전략 및 기술 개발 로드맵

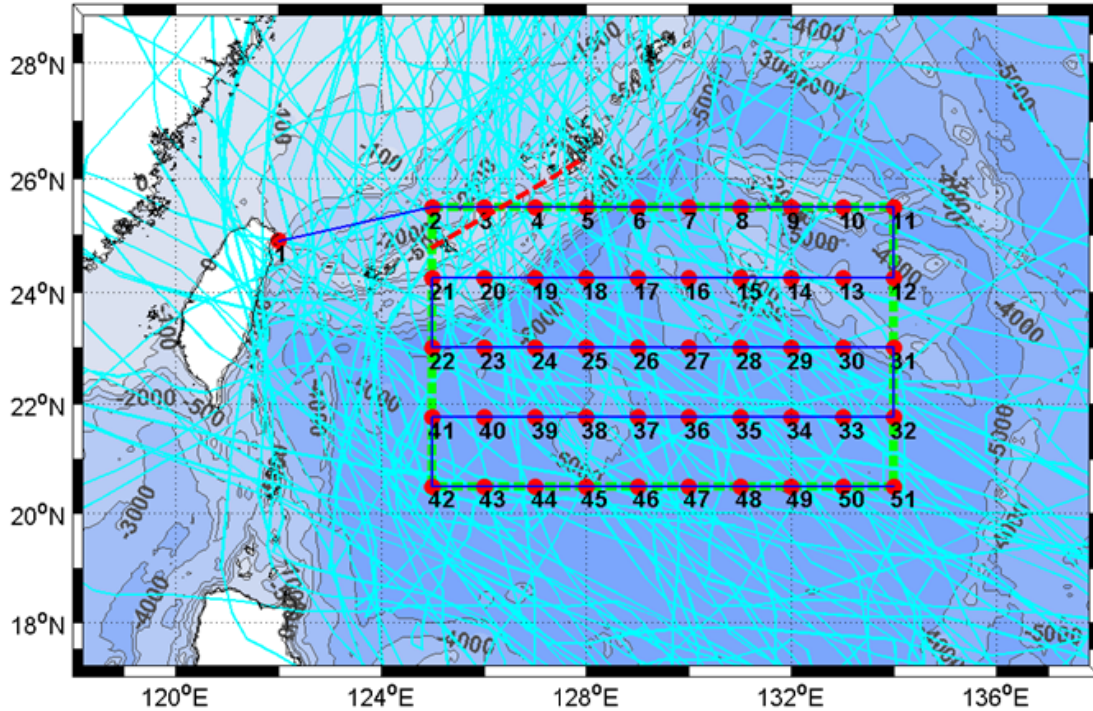
3.1. 추진전략

○ 북서태평양 난수성 소용돌이 해역 태풍예측기술 개선분야 [세부과제 I]

- 조사선 이사부를 이용한 북서태평양 태풍강화 난류 해역([그림 3-3-1])에 대한 하계(8월 중순-9월 하순) 정기적인 조사 수행을 통해 태풍전과 태풍 조사 수행.
- 조사선/argo/glider 등 다양한 관측방법을 동시 활용. 국내 대학 연구진과 국외 연구진이 동원하는 장비를 활용하여 다양한 태풍-해양 관측 항목 공동 조사.
- 기상청, 국내 대학, 및 국외 연구기관, 대학과 분야별 특화된 관심 주제에 대한 참여로 보다 집중된 연구조사가 가능한 국제공동 성격 연구로 추진 ([그림 3-3-2]).
- 예측기술 개선을 위한 핵심적인 관측요소로서 태풍이 진행하는 동안 태풍강화/약화를 유발하는 해양특성의 실시간 자료를 최대한 획득하도록 설계함. 이를 위해 각 기관의 보유한 Argo, Wave glider, underwater glider 등을 효율적으로 배치함.
- 태풍 진행에 관한 수일전 예측진로를 활용하여 태풍 진행 상류와 하류부에서 나타나는 해양 열용량 및 혼합층 변화를 효과적으로 모니터링 할 수 있도록 함. Wave glider를 통해 태풍 강도 요소인 해면기압과 태풍풍속을 태풍 진로상에서 연속적으로 관측될 수 있도록 설계함.
- 1개 이상의 태풍이 일정 시간을 두고 관측해역을 통과할 때, 태풍통과 전후에 기상요소와 해양요소를 효율적으로 관측하기 위한 실시간 관측 로봇 사용 전략을 검토함.
- 태풍모델 혹은 태풍-해양결합 모델이 관측된 대기-해양 관측치를 충분히 반영할 수 있도록 예측요소 기술의 개발, 개선을 연계함. 해양모델의 난류특성을 충분히 반영할 수 있도록 검토함.

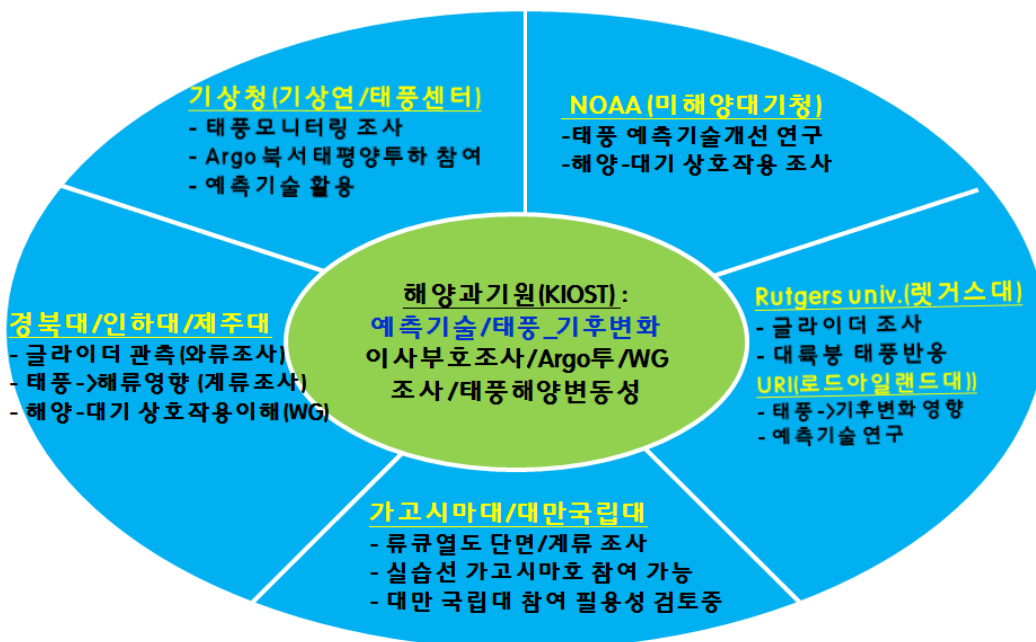


case01 v4.dat : 17.8days, (typhoons since 1981)



[그림 3-3-1] 북서태평양 태풍이 급격히 강화되는 난수 소용돌이 해역 조사정점도.

국내외 기관별 관심연구 주제별 협력 전략



[그림 3-3-2] 국내외 대학/기관별 관심주제와 참여 관측항목 연계도.



○ 기후변화와 태풍 변동성 분야 [세부과제 II]

- 해양 및 대기의 재분석자료를 확보하여 해양의 중장기변동성과 태풍활동의 중장기 변동성을 분석함
- 저해상도 기후모형과 고해상도 기후모형 자료를 확보하여 태풍활동지수를 정의하고, 이에 대한 태풍활동성을 분석함과 동시에 태풍을 추출하여 결과를 비교함
- 수온 프로파일 등 해양관측자료를 확보하여 해양혼합층 변동과 태풍발달 상관성 조사
- 중규모 에디가 분석 가능한 북서태평양 해역 고해상도 해양순환모델의 수립
- 해양기후자료(WOA) 분석; 대양에디 공간분포, 유속장 추산, 에디 발생의 계절변동 및 연변동 특성 파악
- 위성고도계자료 분석; 유속장 추산, 발생, 이동 파악, 모델 모의와 비교

○ 탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍 역할 진단 분야 [세부과제 III]

- 연구선 관측과 Wave glider를 병용한 관측 수행
- 연구선 관측은 태풍 전/후 상황을 관측하고 wave glider는 태풍 통과중 상황 관측
- Wave glider에 pCO₂ sensor를 장착하여 태풍 통과시, 표층해수 이산화탄소 분압을 연속적으로 측정하여 자료 신뢰도를 높임
- Wave glider에 질산염 sensor를 장착하여 태풍 통과시, 표층 질산염 농도를 연속적으로 측정하여 자료의 신뢰도를 높임
- 생물검증 실험에 의한 식물플랑크톤 성장률 및 종 천이 규명
- 태풍의 생태계 영향 특성을 예측하기 위한 생태계 모델링 수립을 위한 변수선택과 개선
- 태풍의 영향에 따른 1차 생산력 및 부유하위생태계 먹이망 구조와 에너지 흐름의 생태계 모델 제시
- 식물플랑크톤 휴면포자 정량/정성 분석을 위한 기존 영양세포 작용 방법론 응용
- 식물플랑크톤 영양세포 분야와 엽록소 자료 등 연계하여 자료 연계 해석
- 태풍과 해양 물리적 구조특성을 고려한 동물플랑크톤 채집과 영향요인 결정자 사전 고려
- 태풍영향 전과 후에 수층 별 고해상도의 해양 유기물 침강 플럭스와 대기-해양 간 이산화탄소 교환량을 관측하여 태풍의 물리적 충격이 탄소 순환에 미치는 영향을 정량적으로 평가
- Bio-Argo 자료 및 현장관측자료와 비교 통한 물리-생지화학 결합 하위생태계 모형 개선

○ 관측장비 개발/개선분야 [세부과제 IV]

- 장착 장비 개발 전용 Wave Glider 구입



- 개발된 제품을 조파 수조 및 실험실에서 시험 운영을 실시하며, 조석, 해류, 파고 등을 감안하여 다양한 환경에서 현장 성능 시험을 실시하고 그 결과를 바탕으로 발견되는 문제점 보완, 개선
- 개발된 제품의 기술 이전을 위한 특허 출원 및 등록

3.2. 기술개발 로드맵

	세부프로그램/ 연구목표	1단계					2단계
		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	
세부과제I [북서태평양 난수성 소용돌이 해역 태풍예측 기술 개선 연구]	NWP태풍강화해역 열 구조 및 물리요소연구	■	■	■	■	■	▨
	태풍-해양 결합모형 등 을 이용한 태풍예보 확도 개선	■	■	■	■	■	▨
	태풍에 의한 해양 혼합 /Mesoscale eddy의 변동 기작 연구	■	■	■	■	■	▨
세부과제II [기후변화와 태풍변동성 연구]	해양변동성에 따른 태 풍활동의 증장기 변동 성 연구	■	■	■	■	■	▨
	북서태평양 고해상도 순환모형 구축 및 중규 모 에디변동성 연구	■	■	■	■	■	▨
세부과제III [탄소순환 및 해양생태계 (생산성)에 대한 태풍 역 할 진단연구]	태풍에 의한 해양-대기 이산화탄소 플럭스 정 량화	■	■	■	■	■	
	침강입자 플럭스 및 표 층 영양염 변동 정량화	■	■	■	■	■	
	태풍에 의한 부유생태 계 기능 및 구조 변동 관측/예측모델 구축	■	■	■	■	■	
세부과제IV [관측장비 개 발/개선연구]	Wave Glider 장착용 원치 개발	■	■				
	Wave Glider 장착용 펌프 개발	■	■	■			
	Wave Glider 장착용 채수기 개발		■	■	■		
	Wave Glider 장착용 연속 플랑크톤 채집기 개발				■	■	▨



4 연구 개발 추진 체계

연구목표와 연계된 주요 연구분야별 연구내용과 연구 방법은 아래와 같다.

- 주요 연구분야: 난수성 소용돌이해역 태풍예측기술 개선분야 [세부과제 I], 기후변화와 태풍 변동성 분야 [세부과제 III], 탄소순환 및 부유생태계(생산성)에 대한 태풍의 역할 진단 분야 [세부과제 II], 관측장비 개발/개선분야 [세부과제 IV].
- 연구수단별 연구내용: 연구분야별 연구내용을 달성하기 위하여 조사선, 수중 로봇 관측, 해양 및 태풍 예측요소 모델링을 활용하여 관측/연구항목을 수행한다.

분야별 연구목표/내용 및 조사방법/항목/전략



[그림 3-4-1] 주요 연구분야별 연구내용(붉은색) 및 연구수단(노란색) 활용 연계도.



5 연차별 연구 개발 소요 예산

(단위:억)

단계		1단계				
예산항목		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
기 장 비	ARGO(0.2/대)	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4
	BioARGO(0.5/대)	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
	WaveGlider개발용	3.5	-	-	-	-
	WaveGlider(생화학센서포함)	5.5	5.5	5.5	-	-
	심해용TurboMAP	1.5	-	-	-	-
	MicroriderSensor	0.5	-	0.5	-	-
	수중글라이더부품	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
	DVLSensor	-	0.7	-	0.7	0.7
	계산노드	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	NitrateSensor	0.3	-	-	-	-
	Alkalinity분석기	0.2	-	-	-	-
	동물플랑크톤배양기(선상용)	0.1	-	-	-	-
	Double-tripmechanisms	0.1	-	-	-	-
	SedimentTrap	1.0	1.0	-	-	-
	기장비합계	16.6	10.5	9.2	4.0	3.0
직 · 간 접 비	전산처리비	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	재료비	3.0	3.0	3.5	3.5	3.5
	기장비보험료(2개월,1.7%)	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	선박비(이사부호,40일)	10.5	14	14	14	14
	직접비(여비,수용비,연구수당등)	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
	위탁연구개발비(국내)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	위탁연구개발비(국외)	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
	내부인건비 (총연구비 18%)	11.9	11.0	11.0	10.0	9.3
	외부인건비	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	간접비 (총연구비 17.7%)	11.6	10.8	10.8	9.8	9.0
합계	65.8	61.6	60.9	53.8	51.4	
5개년 총 예산규모 = 293.5억						



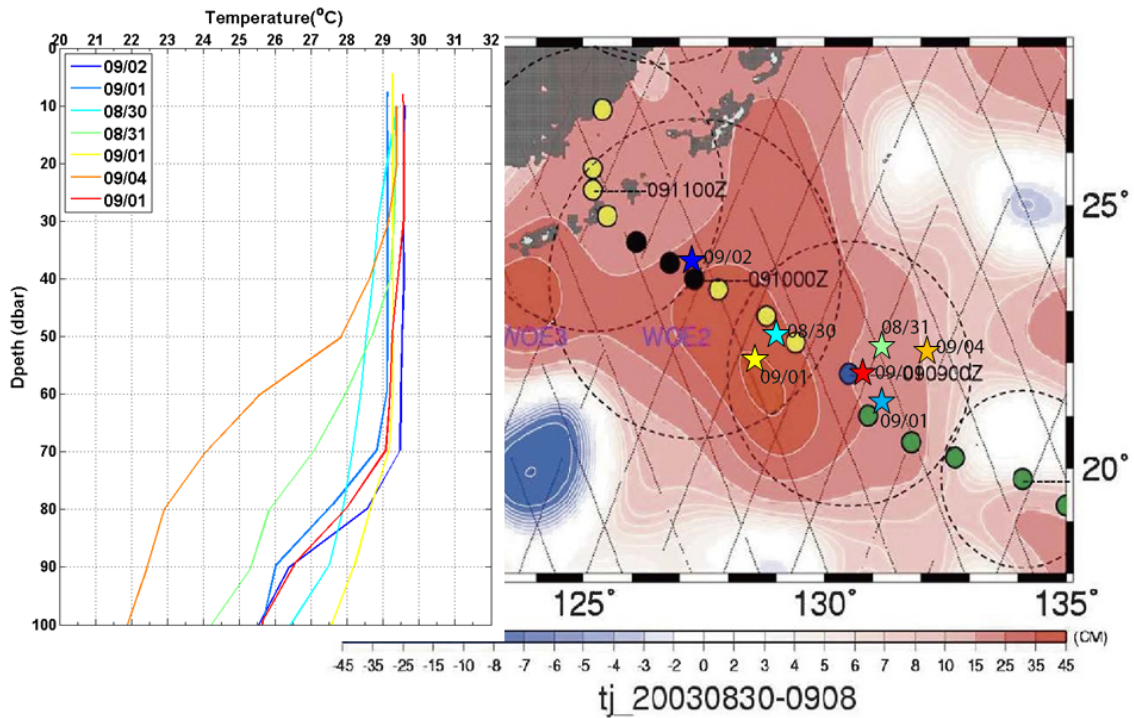
IV

[세부과제 I] 북서태평양 난수성 소용돌이해역 태풍예측기술개선 연구: 1. 물리요소 조사 분야

1) 북서태평양 태풍강화 해역 열구조 조사 연구

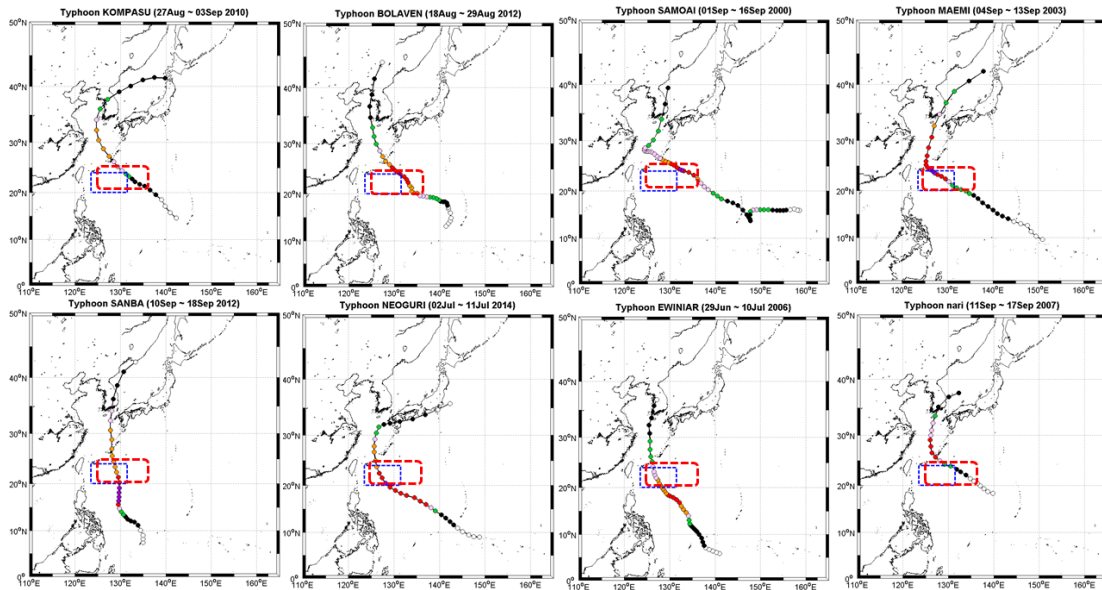
1.1 연구의 필요성

- 태풍은 대체로 북서태평양 저위도(5°N-15°N) 해역에서 발생하며, 우리나라로 향하는 태풍은 따뜻한 난수성 소용돌이(warm eddies, 난수괴)가 빈발하는 해역(20°N-25°N, 124°N-135°N)을 통과하며, 대체로 이해역내에서 최대 강도가 나타남. 이 해역에 특별히 깊은 수심까지 따뜻한 해수가 존재하였던, 2003년 한반도에 막대한 피해를 유발한 태풍 매미의 경우, 이 해역에 존재한 이 난수성 소용돌이 영향으로 5등급으로 강화됨(Lin et al., 2005)(그림4-1-1). 2003년 8월 30일에서 9월 4일간 Argo 자료 분석결과, 태풍 매미 통과전에 난수성 소용돌이 영역에서 나타난 최대 수온 구조 특성은 해수 표층에서 수심 70m까지 29.5°C 정도의 따뜻한 해수가 분포하였으며, 수백km 영역에 걸쳐 70m 수심까지 29°C 이상의 따뜻한 해수가 분포함(그림4-1-1).
- 2000년 이후 우리나라에 상륙하였거나 근접 통과하며, 상륙시 태풍 강도 카테고리 1-2를 유지한 강한 태풍은 7개로 북서태평양 난수 빈발 해역을 모두 통과함(그림4-1-2).
- 이 해역에서의 강화된 1-2일(그림4-1-3)만에 우리나라에 영향을 주므로 태풍 정보중 특히 중요하나, 해역적으로 멀리 떨어져 있고, 그간 조사선이나 관측장비의 한계로 이해역에서 태풍 강화 과정에 대한 직접적인 연구, 조사가 수행된 바가 거의 없었음.
- 우리나라에서 상륙 당시 가능한 최대 태풍은 대개 카테고리 1내지 2등급 (31m/s - 50m/s)이며, 이 태풍들은 북서태평양 난수괴 빈발 해역에서 4-5등급까지 강화됨(그림4-1-2). 2000-2015년 사이 한반도에 태풍등급 1-2로 크게 영향을 준 태풍(사모아이, 매미, 예위니아, 나리, 콤파스, 볼라벤, 산바, 너구리)이 난수괴 해역을 통과하며, 급격히 강화되는(RI, Rapidly Intensified; 24시간내에 30노트 이상 강화되는 태풍) 특성을 보임(그림4-1-3a). 이들 태풍의 북서태평양 난수괴 해역 상층 열용량(그림4-1-3b)은 4등급 태풍 볼라벤, 5등급 태풍 매미시의 열용량 크기를 감안할 때, 난수괴 해역에서는 매년 4-5등급의 태풍은 발생할 수 있음을 시사하며, 정확한 예측 시급하게 요청됨.
- 하지만 급격히 강화되는 태풍에 대한 강도예측 정확도는 미국에서도 정확도가 매우 낮으며(그림4-1-4), 이 분야 예측기술의 지속적인 발전이 요청됨.

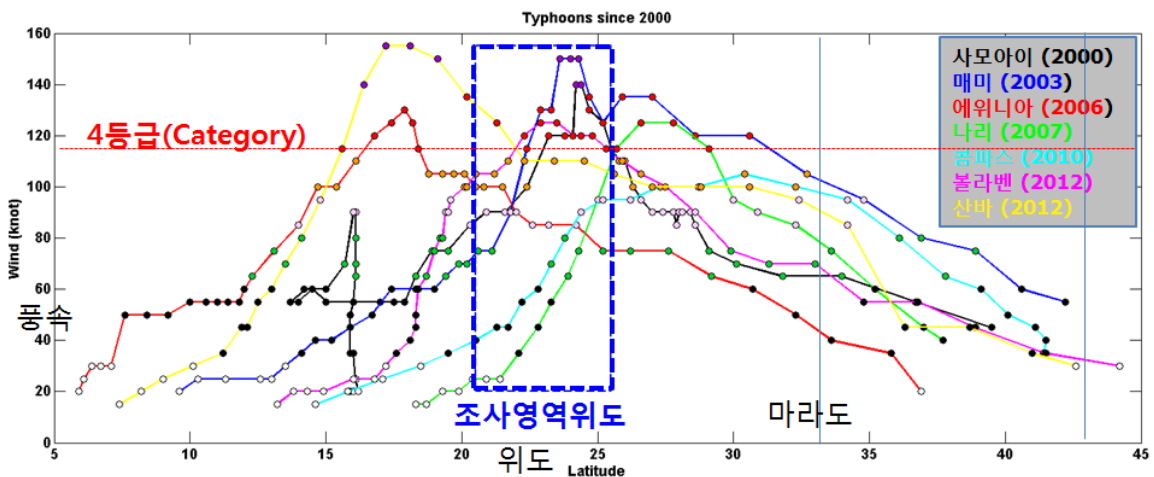


[그림 4-1-1] 2003년 8월30일에서 9월 4일 사이 태풍진로 인근에서 수온 연직 분포(좌) 및 태풍진로상 Argo 관측점 위치(별표 색깔 위치). 5등급 강화된 태풍위치는 검은색 표기.

- 난수권 해역에서 태풍예측 모델이 태풍이 최대 4-5등급 강도로 급격히 강화되는 해양-대기 과정을 정확히 재현하기 위해서는 해양열구조 정보와 해양-대기 상호작용에 대한 이해를 바탕으로 다양한 물리기상 현상을 잘 반영할 수 있는 예측기술 개선이 필요함. 현장 자료와 예측기술을 효율적으로 융합한 새로운 단계의 연구가 필요함.
- 전 지구적인 기후변화에 따른 해양온난화가 진행되고 있는 환경에서, 북서태평양에서 태풍 통과시에 해양 상부층 열구조를 실시간으로 조사하고, 해양-대기간의 열과 운동량 플럭스를 관측하며, 이를 통해 보다 정확한 해양모델을 개선하고, 지속적으로 태풍예측 모델의 성능을 개선하려는 연구노력은 시급한 필요성이 있다고 하겠음.



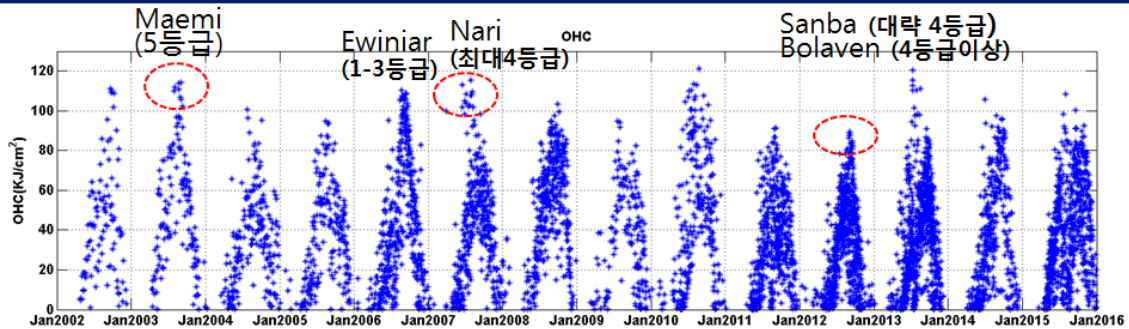
[그림 4-1-2] 2000-2015년 사이 한반도에 태풍등급 1-2로 크게 영향을 준 태풍(사모아이, 매미, 에위니아, 나리, 콤파스, 볼라벤, 산바, 너구리)이 북서태평양 난수괴 해역을 통과하며, 급격히 강화되는 (RI) 태풍임. 태풍 산바와 에위니아는 보다 남쪽에서 최대 등급으로 강화됨. 연구조사가 필요한 해역의 위도구간을 청색으로 표기함.



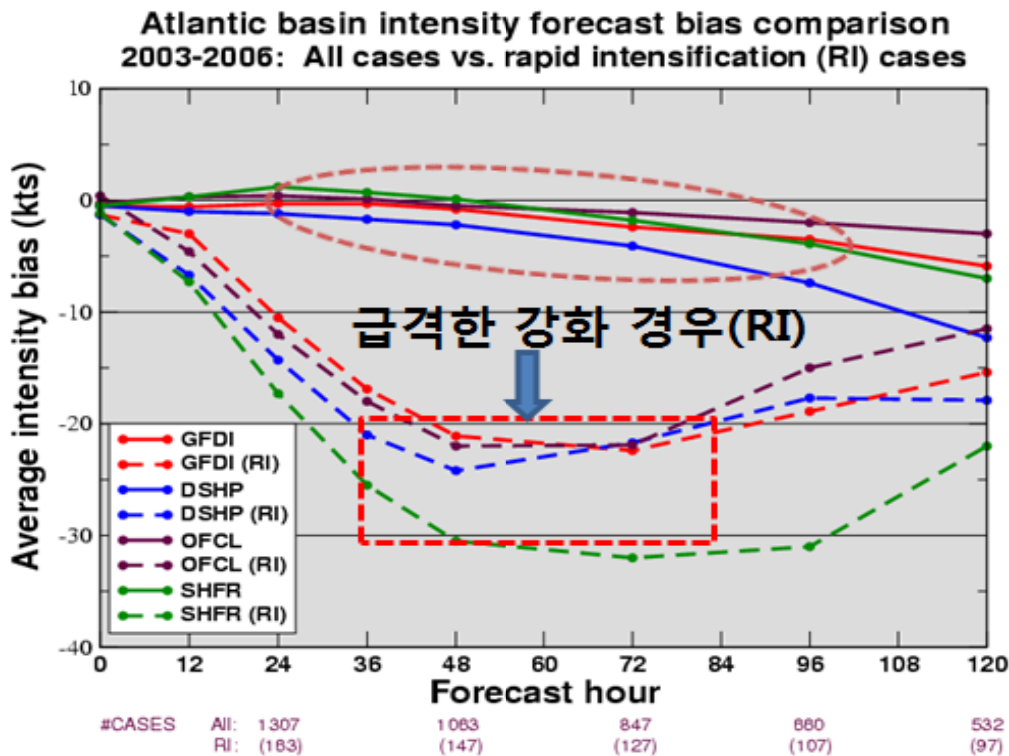
[그림 4-1-3a] 2000-2015년 사이 한반도에 태풍등급 1-2로 크게 영향을 준 태풍(사모아이, 매미, 에위니아, 나리, 콤파스, 볼라벤, 산바, 너구리)이 북서태평양 난수괴 해역을 통과하며, 급격히 강화되는 (RI) 태풍임. 태풍 산바와 에위니아는 보다 남쪽에서 최대 등급으로 강화됨. 연구해역 위도구간을 청색 점선 표기.



최근14년 연구해역 열용량: Ocean heat content (OHC)



[그림 4-1-3b] 2000-2015년 사이 한반도에 태풍등급 1-2로 크게 영향을 준 주요 태풍 (매미, 에위니아, 나리, 볼라벤, 산바, 너구리)시의 북서태평양 난수고 해역 상층 열용량. 4등급 태풍 볼라벤(Bolave), 5등급 태풍 매미(Maemi)시의 열용량 크기를 감안할 때, 북서태평양 난수고 해역에서는 매년 4-5등급의 태풍은 발생할 수 있음을 시사함.



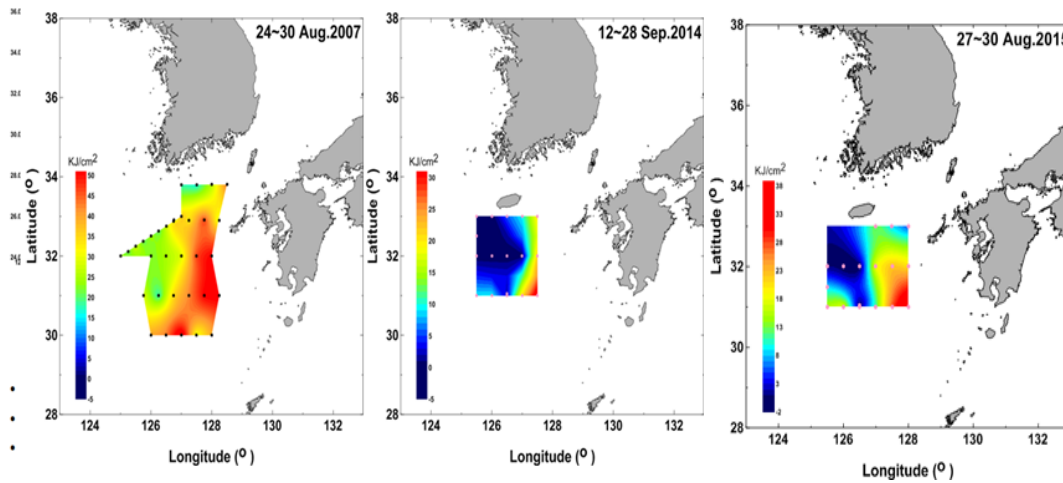
[그림 4-1-4] 2003-2005년간 태풍강도 개선 추이. 급격히 강화되는 (RI) 태풍의 경우 정확도가 36-84시간 예측구간에서 상대적으로 20-30노트(kts)의 큰 오차가 나타남 (Ginis, 2009).



1.2 국내외 연구 동향

1.2.1. 국내 동향

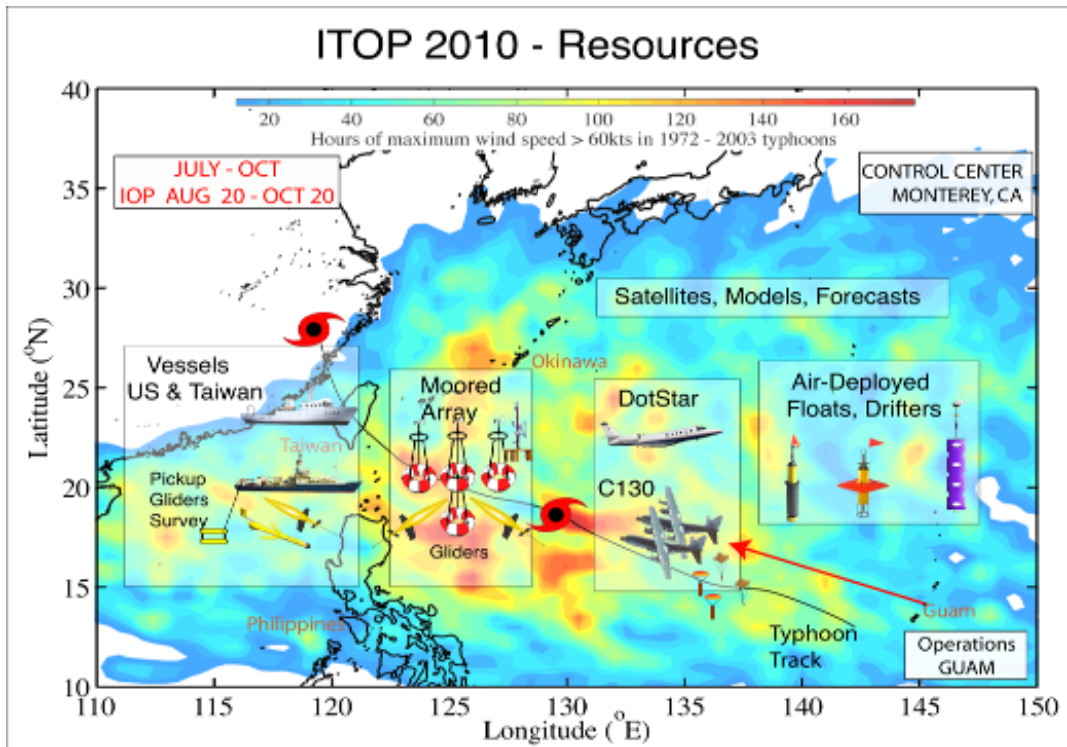
- 동중국해에서 태풍에 의한 해양반응 연구의 일환으로 해양조사를 실시함 (기초기술연구회, 2011). 관측기간중 동중국해를 직접 통과한 태풍은 2회(2007년 태풍 나리, 2010년 태풍 콤파스) 있었으며, 태풍 나리 통과후 수일후 관측한 CTD조사에서 용승과 혼합특성이 관측되었으며, 연직 단주기 운동이 나타나는 것으로 추정됨. 이같은 단주기 운동은 해양혼합과 관련하여 랑뮈르 순환 연계성이 추정됨. 2010년 5th beam을 장착한 관측기 계류로 태풍 통과전, 통과시, 통과후 해양반응중 유동특성이 상세히 관측됨. 이를 통해 태풍시 상부혼합층에서의 난류혼합이 왕성히 일어나며, 상부혼합층의 에너지가 수온약층이하로 전파되는 과정이 관측됨. 이는 태풍시 내부파의 발생 연계를 최초로 시사하는 관측결과로 태풍혼합의 새로운 역할 가능성을 제시하였다고 평가함.
- 동중국해상에서 2007, 2014년, 2015년에 동중국해에서 조사된 열용량 분포는 그림 4-1-5에 제시함 (기초기술연구회, 2011; 한국과학기술정보연구원, 2015). 관측점 서측해역은 서쪽에서 저층냉수의 유입으로 열용량이 작으며, 대체로 동쪽은 대마난류로 인해 상대적으로 열용량이 큼. 2007년 최대 열용량이 70 KJ/cm^2 에 달하였으나, 2015년에는 같은 8월 하순임에도 최대치가 40 KJ/cm^2 이하임. 멕시코만의 Loop 해류 해역에서는 약 100 KJ/cm^2 에 도달함. 이같이 작은 열용량은 동중국해역에서 태풍강도가 지속적으로 약화되는 특성(그림4-1-3)을 설명함.
- 동중국해 영역에서 내부파의 감쇄에 따른 난류혼합 연계성을 시사하는 추가적인 결과는 2014년 하계조사 관측자료 해석 연구에서 제시됨 (과학기술정보연구원, 2014). 이 해역에서 나타난 부력진동수 부근 단주기 내부파의 감쇄 및 이로 인한 혼합특성은 태풍시 상층혼합외에 내부파 발생을 통한 추가적인 혼합기작 존재 가능성을 시사함. 대양에서의 혼합층 이하 수온약층에서 상층으로부터의 열전달과 관련된 혼합특성을 규명하는 데 내부파 역할에 대한 연구 필요성을 시사함.



[그림 4-1-5] 좌에서 우로 2007 (8월 하순), 2014 (9월 중순), 2015년 (8월 하순) 해양열용량(Ocean heat content). 2014년, 2015년에는 관측점 서측 해역은 서쪽에서 저층냉수의 유입으로 열용량이 작으며, 대체로 동쪽은 대마난류로 인해 상대적으로 열용량이 큼. 2007년 최대 열용량이 70 KJ/cm^2 에 달하였으나, 2015년에는 같은 8월 하순임에도 최대치가 40 KJ/cm^2 이하임. 멕시코만 Loop 해류 해역에서는 약 100 KJ/cm^2 에 달함.

1.2.2. 국외 동향

- 2010년 대만과 미국은 북서태평양에서 대만으로 향하는 강한 태풍의 상호작용 연구를 실시함 (그림4-1-6). 2010년 8월 20일에서 10월 20일까지 현장 조사 프로그램(ITOP)를 수행하였으며, 실험 당시 파나피(Fanapi), 말라카(Malakas), 메기(Megi) 강 통과하여 다양한 연구가 진행됨. 항공기를 이용한 표층부이 (drifting buoy), 계류부이 (Mooring buoy), 및 태풍관측 항공기 (C130)를 사용하였음. 2 등급 태풍인 말라카스는 상층열용량(UOHC)이 $38\text{-}42\text{KJ/cm}^2$ 해역을 통과하였고, 3등급 태풍인 파나피는 상층열용량이 $65\text{-}78 \text{ KJ/cm}^2$ 해역을 통과함 (Lin, 2016).
- 이 조사에서 5등급 태풍 메기는 상층열용량이 $136\text{-}138 \text{ KJ/cm}^2$ 를 통과하였고, 최대 강도는 160kts에 달한 것으로 보고함. 이는 멕시코만이나 북서태평양에 나타난 그 어느 시기의 열용량보다도 큰 수치로 강력한 태풍이 발생하고 있음을 알 수 있음. 이시기에 26도 이상 수온층은 124-232 m에 달하는 것으로 보고함(Lin, 2016). 태풍 매미(2003) 당시 상층열용량이 $110\text{-}120 \text{ KJ/cm}^2$ 에 달했음을 고려하면, 당시 매미보다 강한 태풍을 생성한 막대한 수준의 열용량이 북서태평양 난수괴 해역에 나타났음을 알 수 있음.

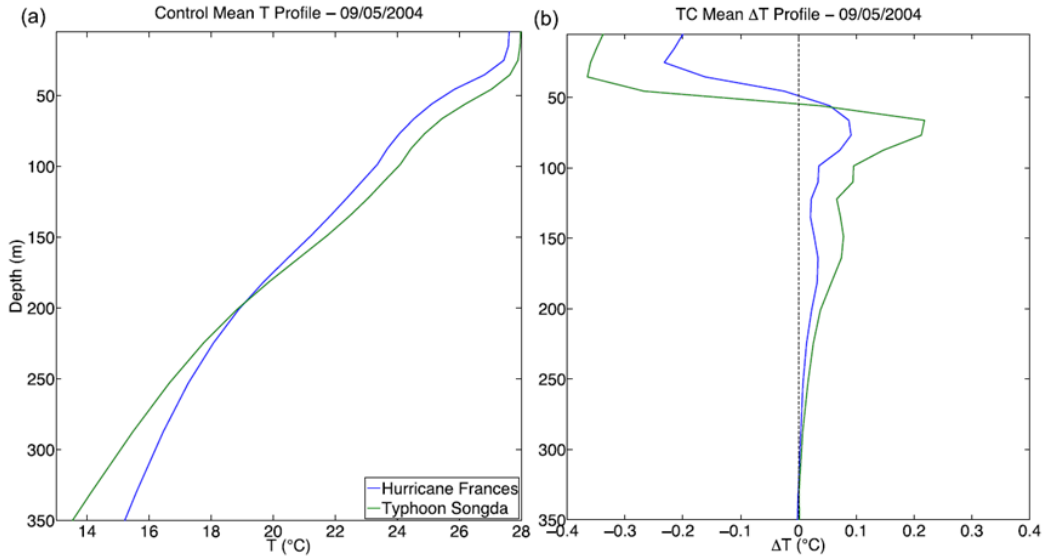


[그림 4-1-6] 2010년 대만/미국 공동 조사 (Aug.20-Oct.20, 2010) (ITOP)시 계류부이(Mooring buoy), 항공기투하 표류부이, 및 항공관측을 사용한 조사 수행 (Lin, 2016).

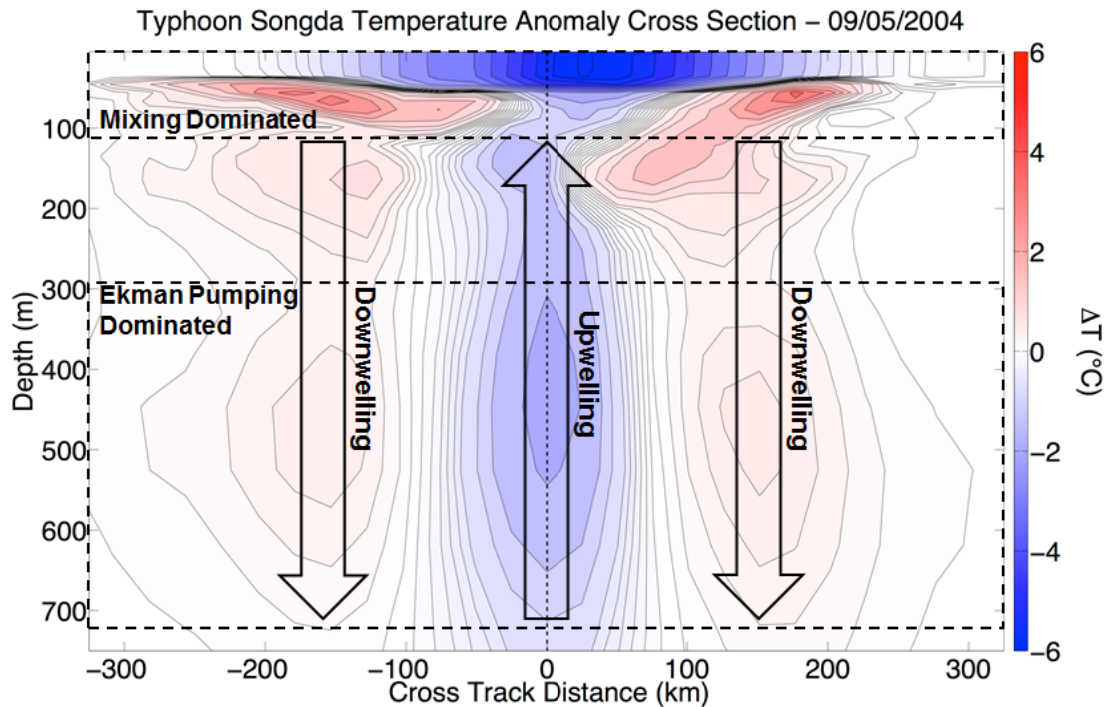
- 최근 연구 태풍으로 인한 수온약층과 장기변동성에 대한 영향을 시사하는 연구결과는 Bueti et al.(2014)에 의한 모델 연구로서, 허리케인 Frances와 태풍 Songda에 의한 반응실험 결과, 태풍이 지난후 상부 50m 혼합층에서는 냉각 특성이 나타나나, 50m에서 300m 층까지는 양의 수온 anomaly가 나타남을 보임(그림4-1-7). 이는 이제까지 예상된 결과와 다른 특성이며, 이 연구는 이러한 수온 약층에서의 변화가 장기적으로 순환과 이에 따른 계절변화, 연변화를 유발할 수 있기 때문에 시사하는 바가 크다고 할 수 있으나, 직접 현장관측을 통해 정성 및 정량적인 확인이 필요하며, 이는 태풍이 해양기후에 미치는 영향을 확인하는 것으로 의미하며 글로벌 이슈가 될 것으로 판단됨.
- Bueti et al.(2014)은 태풍 2004년 북서태평양에서 Songda가 통과하는 진로의 횡단면에서의 연직 수온 단면에서 수온 편차를 제시한 자료(그림4-1-8)에서 태풍의 영향이 수심 700m 가까이 나타남을 모델로 제시하였다. 이를 지배하는 물리적인 현상은 상층에서는 혼합이 지배하고, Ekman pumping이 지배하는 하층에는 용승(upwelling)이 지배하는 것으로 제시함. 하지만 일반적으로 알려진 상부 혼합층의 수심이 상대적으로 큰 것으로 보이며, 이를 설명하는 기작 등의 설명이 제시되지 않아 관측을 통해 확인, 검증해야 할 필요성이 제기됨. 50m 이하까지 강하게 나타나는 혼합특성은 난류혼합계수와 관



련된 모델 정확도와 관련이 있을 수도 있으며, 난류특성 조사에 의한 검증이 필요할 것으로 보임.



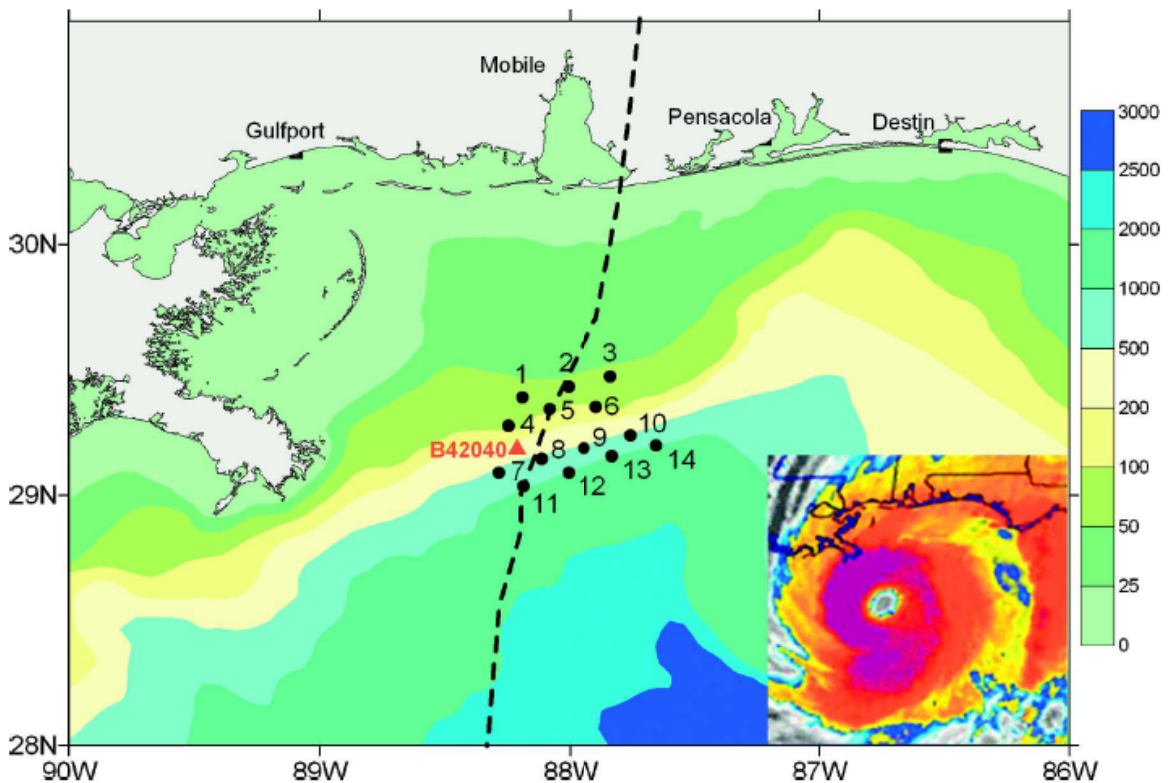
[그림 4-1-7] 2004년 허리케인 Frances와 태풍 Songda에 따른 상하층 수온 anomaly 변화 (Bueti et al., 2014).



[그림 4-1-8] 2004년 태풍 Songda에 따른 상하층 수온 anomaly 변화 및 관련 물리 현상 (Bueti et al., 2014). 50m 이하까지 강한 혼합특성을 보임.



- 2007년 Teague et al.(2007)은 대서양에서 다른 목적으로 관측 프로그램 중에 관측기 간중 태풍으로 인한 해양반응을 보고함 (그림4-1-9). 흐름은 Ekman 역학특성을 보임. 2-5일 주기의 아관성파 (Subinertial wave) 생성과 폭풍에 의해 준관성파(nearinertial wave)가 10일 정도 지속되는 특성을 보고하였다. 높은 파랑과 바닥층 근처의 강한 흐름이 90m 수심의 대륙붕에서 상당한 침식을 유발함을 보고함. 해양열 특성에 따른 허리케인의 영향이나 허리케인에 의한 열구조의 변화 등은 보고되지 않음.

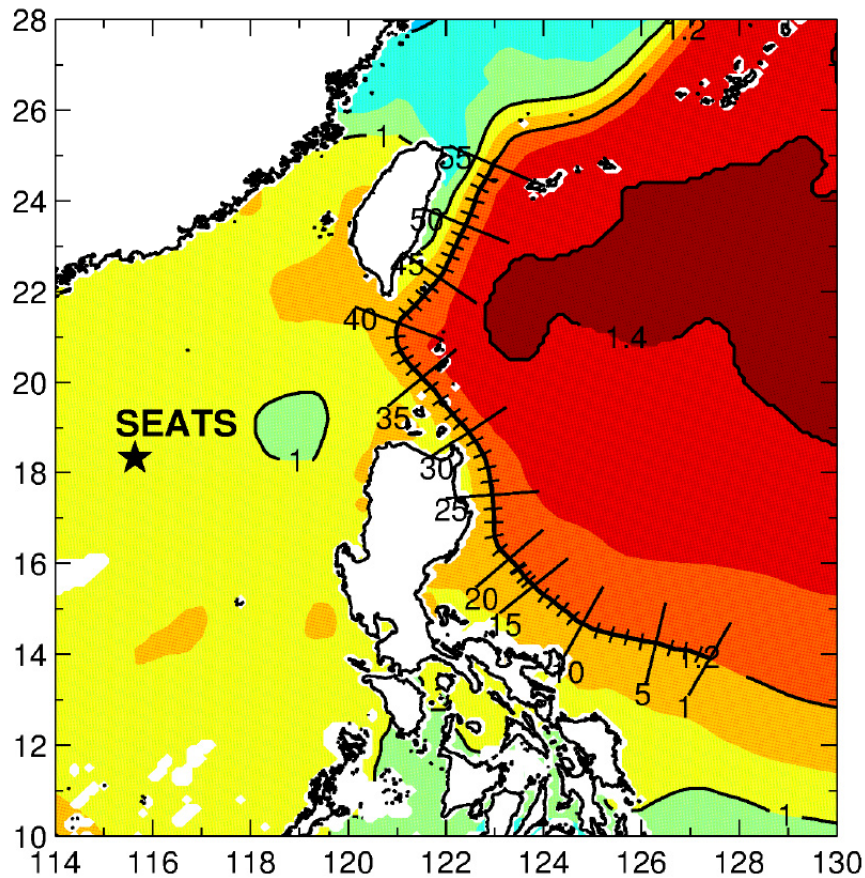


[그림 4-1-9] 관측장비 계류지점(M1-M14)와 NDBC 부이(42040) 위치 및 허리케인 Ivan 궤적. Inset은 NOAA위성(GOES-12)위성이 태풍크기를 보여줌 (Teague et al., 2007).

- 수온자료가 없었기 때문에 Teague et al.(2007), 다른 태풍과 모델링 연구결과를 인용하여, 상부혼합층에서는 냉각(cooling)이 나타나고, 아래로 수온약층에는 연직 혼합(vertical mixing)과 이류(Advection) 효과로 냉각이 나타난다고 기술함. 과거 수온자료에 수온약층은 60-150m 층에 존재하였으나, 허리케인 Ivan시 70-220m 층(수온약층)에서 강한 흐름이 나타나며, 그 층에서 용승(upwelling) 관련된 냉각이 일어나는 것으로 해석함. 하지만 수온약층에서의 냉각여부는 명확하게 설명되지 않았다고 생각됨.



- 남중국해에서는 최근 태풍반응 조사를 위한 계류부이를 설치한 바 있으며, 그림4-1-10은 계류부이 1개점 위치와 대만과 필리핀 사이 루손해협 동측의 높은 고도위를 나타내는 정보임 (Lin et al., 2015). 고도수위 H=1.4m, 0.4m 등고선 분포는 쿠로시오 해류의 강도를 나타냄. 그림4-1-10 우측의 강한 태풍해역의 높은 수위(H=1.4m)와 태풍으로 인한 기온기 변동성은 쿠로시오 해류의 변동성 유발 가능성을 시사함. 이는 우리나라 대한 해협으로 향하는 대마난류의 변동성과도 연관되어 있을 것으로 예상됨.



[그림 4-1-10] 남중국해 계류부이지점(SEATS) 및 Kuroshio 해류축 (검은색 선). Color는 평균적인 쿠로시오 해류 궤적(SSH=1.2m)의 고도위성 높이 정보 (Lin et al., 2015).

1.3. 연구 목표 및 내용

1.3.1. 연구 목표

- 북서태평양 따뜻한 소용돌이가 나타나는 RI 해역(급격히 태풍이 강화되는 해역)에서 상세한 수온구조 조사를 통해 태풍 통과 전후에 해양의 열구조 산정을 통한 태풍-해양결



합모델의 초기 해양조건 산출과 모델개선 등에 활용.

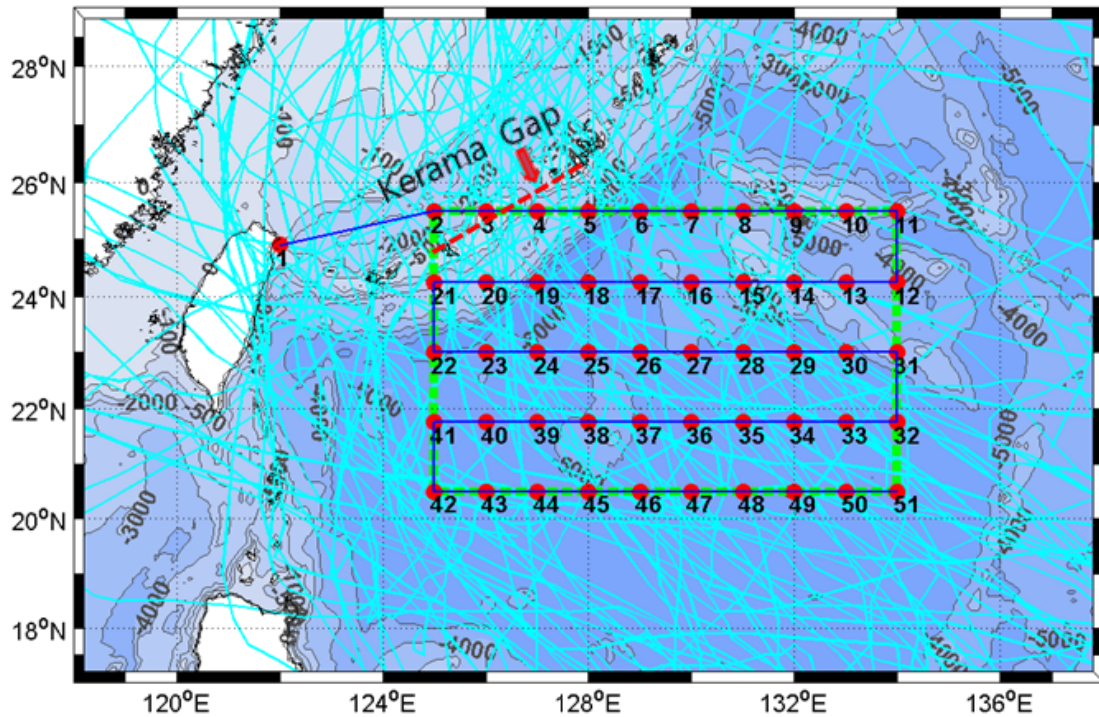
- 급격히 강화되는 태풍환경에서 다양한 기상, 해양인자를 조사하여 급격한 태풍강화 과정을 이해와 예측모델의 검증자료 확보.
- 다양한 물리요소 과정 조사를 통한 태풍에 의한 수온약층 온난화 등 해양반응 이해와 북서태평양 해양기후 자료 축적.

1.3.2. 연구 내용

- 태풍 통과 전후 조사선 조사를 통한 수온구조 조사 및 수치모델 초기장 산출
 - 북서태평양 난류 소용돌이 해역 기본정점 영역(그림4-1-11)에서 태풍 전의 1차 조사와 태풍 후 2차 CTD 조사를 통한 관측해역 열구조 조사. 정점간 이동시 UCTD를 활용하여, 연속 관측을 통해 소규모 난수성 와류 등 특성과 정밀한 모델 초기자료 산출.
 - CTD 조사와 병행하여 태풍 통과 기간 중 수온구조 변화 자료 수집을 위해 Argo 플로트를 태풍궤도 종방향을 따라 투하, 모니터링하고, 궤적과 수직 2개 횡단면을 따라 글라이더 조사 수온 자료 조사를 통한 수층 열구조 변화 조사.
 - 1개 정점 (최대 열용량 지점)에서 준 정점에서 해양/기상자료 확보를 위한 wave 글라이더 조사 (그림4-1-12 우측 적색점선).
 - 1차 조사 자료를 기반으로 수치모델을 위한 준실시간 초기 조건 산출. 다양한 기법을 활용한 초기장 산출.
- 난수성 소용돌이 해역 태풍 통과 중 환경에서 기상, 해양인자 동시 조사.
 - 태풍 통과 중에 Argo, 표층 부이 (Surface drifter) 수중 및 파랑 글라이더(Wave gliders)를 활용하여 태풍 통과중의 표층/중층 수온, 해표층 기압, 바람을 관측하여 태풍 통과시 해양의 변화를 조사.
 - 태풍 통과 중에 표층부이, 파랑 글라이더를 통해 해상풍과 기압, 습도(humidity)를 관측하고, 유·무인 항공기(미해양대기청 참여시)를 활용하여 바다표면과 대기중 태풍 속에서 기압, 바람, 습도 등 대기변수 조사를 조사하여 구조 변화 준실시간 조사.

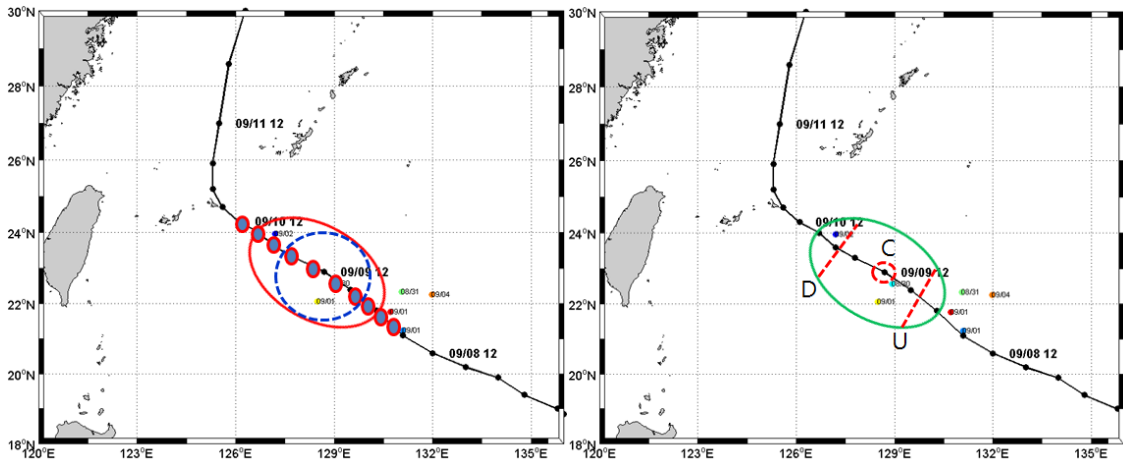


case01 v4.dat : 17.8days, (typhoons since 1981)

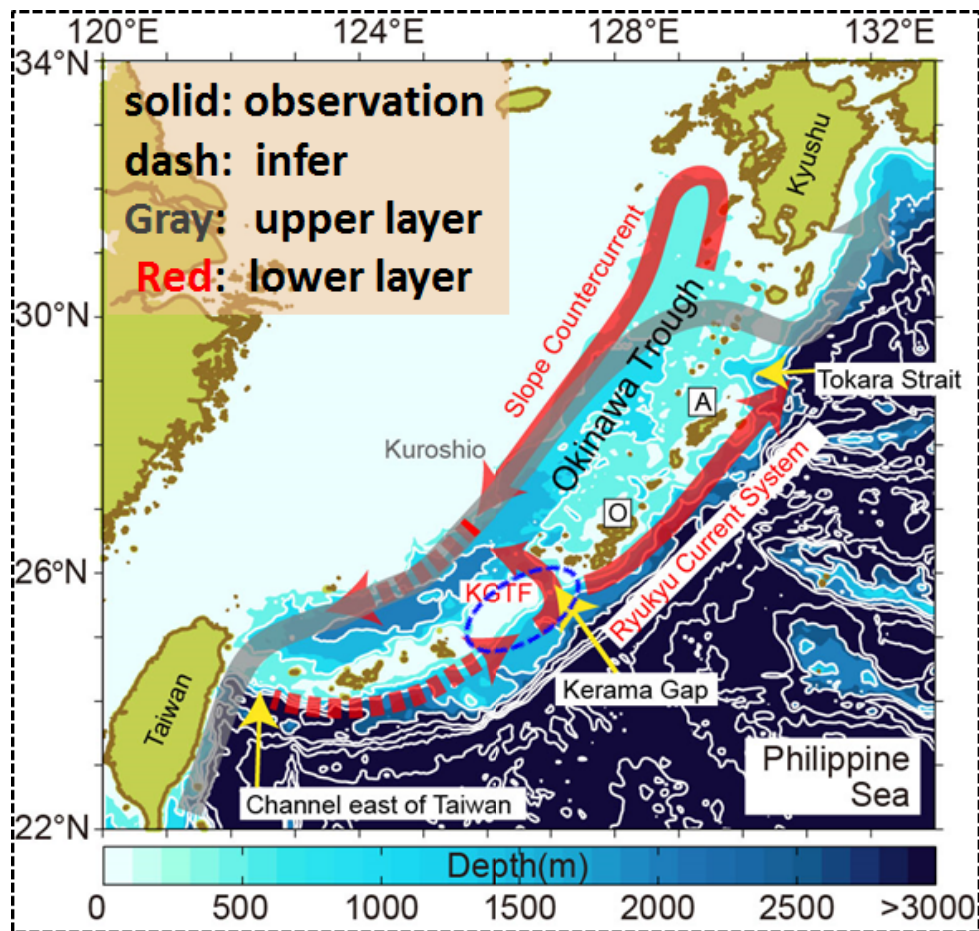


[그림 4-1-11] 북서태평양 태풍강화 및 한반도 향하는 강한 태풍 통과 해역에서의 조사선 기본 관측 영역도. 적색은 관측 정점이며, 하늘색은 지난 25년 한반도 영향 태풍궤적.

- 북서태평양 해역 수온 약층 수온구조 변화 모니터링 및 태풍전후 구조 변화 평가.
 - 조사선 조사 후반기에 그림4-1-11에 제시된 관측점에서 자료조사를 통해 태풍에 의한 수층구조 변화를 통한 해양 기후변화 영향 평가 자료 산출.
 - 최남단 관측단면인 20°N 위도선에서 적도방향 열변동성 이동 평가 자료 산출.
 - 관측해역에서 오키나와 trough로 향하는 Kerama Gab (그림4-1-13)의 청색점선 영역)에서 자료조사를 통해 이해역에서의 열용량 변화와 태풍 강화특성 비교. 태풍 나리의 경우는 오키나와 해역에서의 쿠로시오 해류 해역에서 최대 강도를 보인 바 있음.



[그림 4-1-12] 태풍 통과 예상 궤적을 기준으로 종방향 Argo 투하 관측점 (좌) 및 횡방향 wave 글라이더 조사 단면 (우측).



[그림 4-1-13] Kerama Gap을 통과하는 태풍의 강화특성을 조사하기 위하여 일본 가고시마 대학 실습선을 활용한 조사 실시. 계류조사, 단면 수온조사 및 기상자료 조사를 통해 태풍강화 모니터링.



1.3.3. 단계별 목표 및 내용

○ 1단계 연차별 목표 및 내용

구 분	연구개발목표	연구개발내용
1 단 계	1차 년도	○ 2017년 하계 태풍 전후 수온구조 조사 및 급격한 태풍강화 모니터링 I - 난수성 와류단면/정점 CTD, Argo, WG 조사 I - 태풍통과중 기압/바람/해양특성 등 태풍강화과정 분석 - 태풍전후 수온구조변화 평가, 열용량/해양초기장 산출
	2차 년도	○ 2018년 하계 태풍 전후 수온구조 조사 및 급격한 태풍강화 모니터링 II - 난수성 와류단면/정점 CTD, Argo, WG 조사 II - 태풍통과중 기압/바람/해양특성 등 태풍강화과정 분석 - 태풍전후 수온구조변화 평가, 열용량/해양초기장 산출 - 관측자료 기반 북서태평양 해양구조 1차 산출
	3차 년도	○ 2019년 하계 태풍 전후 수온구조 조사 및 급격한 태풍강화 모니터링 III - 난수성 와류단면/정점 CTD, Argo, WG 조사 III - 태풍통과중 기압/바람/해양특성 등 태풍강화과정 분석 - 태풍전후 수온구조변화 평가, 열용량/해양초기장 산출
	4차 년도	○ 2020년 하계 태풍 전후 수온구조 조사 및 급격한 태풍강화 모니터링 IV - 난수성 와류단면/정점 CTD, Argo, WG 조사 IV - 태풍통과중 기압/바람/해양특성 등 태풍강화과정 분석 - 태풍전후 수온구조변화 평가, 열용량/해양초기장 산출
	5차 년도	○ 2021년 하계 태풍 전후 수온구조 조사 및 급격한 태풍강화 모니터링 V - 난수성 와류단면/정점 CTD, Argo, WG 조사 V - 태풍통과중 기압/바람/해양특성 등 태풍강화과정 분석 - 태풍전 수온구조변화 평가, 열용량/해양초기장 산출 - 관측자료 기반 북서태평양 태풍강화해역 해양구조 산출
2 단 계	○ 북서태평양 난수괴 광역해역 상시 모니터링 및 태풍 모니터링 연구 - 동중국해 및 광역해역 정점 CTD, Argo, WG 조사 V - 예측기술과 연계한 자료획득 위한 모니터링 기술 개발 - 1/2단계 자료확보 기술에 따른 해양 초기장 비교	

1.4. 추진전략

- 해양열용량이 최대치를 나타내는 시기(8월 하순 - 9월 하순)에 해양조사선 이사부호를 활용하여 40-45일 기간동안 북서태평양 해역조사를 실시. 각 참여 예상 기관별로 현장 조사 관심 항목 조사 참여 (그림4-1-14)
- 하계조사시 정점 CTD 조사에 추가하여 UCTD, ARGO 플로트, 수중 글라이더, 웨이브 글라이더 (Wave glider) 등을 활용하여 조사.
- 일본 및 대만 EEZ 해역임을 감안하여 일본 (가고시마 대학 실습선), 대만 연구진과 공동



조사 추진하며, 가고시마 조사선을 활용하여 태풍이 동중국해로 통과하는 Kerama Gap (그림4-1-13)에서 계류 자료 조사를 통해 태풍통과시 혼합, 흐름 반응 조사.

- 미해양기상청(NOAA) 공동 조사를 통해, 유무인 항공기를 활용하여 태풍내 구조 이해 및 태풍 예측모델 검증 등을 위한 태풍 통과시 태풍강화 구조 등 자료 확보.
- 태풍이 대양 통과 후 동중국해에서 감쇄되는 기작 연구를 위한 대륙붕 해양혼합 및 태풍약화 기작 이해를 위해 Rutgers 대학과 공동 조사 및 모델링 연구 추진.
- 동중국해 수온구조를 기반으로 한 매년 태풍강도 전망 태풍센터/기상청과 공동 추진.

국내외 기관별 주제별 조사/활용 분야



[그림 4-1-14] 현재 검토/협의중인 기관별 해양/기상 조사 참여 관측항목 및 활용.



1.5. 기대성과

- 매년 하계 북서태평양 태풍강화 해역 조사 자료를 기반으로 하계 이 해역을 통과하는 최대 가능 태풍 전망.
- 정기적인 북서태평양 난수권 해역 자료 축적을 통해, 향후 위성자료, 해표면 수온 자료 등을 활용하여 난수권 해역 수온구조 예측을 위한 기초 데이터 수집 및 수온구조 예측 기반 기술 확보.
- 북서태평양 해역을 통과하는 일반적인 태풍과 난수권 상을 통과하는 태풍이 보일 것으로 예상되는 급격히 강화되는 (Rapidly Intensified, RI) 태풍에 대한 다양한 해양자료 데이터 베이스 구축 기대.
- 북서태평양 해양자료 확보를 통해 RI 태풍강도 예측의 경우, 선진국 수준과 대등하거나 선도적인 태풍-해양결합 예측 모델의 정확도 개선기술 확보. 태풍이 난수권 해역에서 강화된 후 2일 이내에 한반도에 상륙하는 대규모 재해성 유발 가능성 RI 태풍 예측 정확도의 획기적인 개선 기대.
- 태풍에 의한 해양 기후변화 연구라는 글로벌 이슈에서 선도적 연구성과 창출 기대.

2 태풍에 의한 해양 혼합 관측

2.1 연구의 필요성

태풍과 같은 강풍은 해양의 내부 혼합에 기여하는 정도가 매우 크다. 태풍과 해양의 상호작용을 이해하기 위해서는 혼합 정도를 정량적으로 파악해야 할 필요가 있다. 태풍 통과 전후의 해양 혼합 상태를 정량화하고 이를 모델에 활용하는 것이 태풍 진로 및 강도 예측의 정확도를 높이기 위하여 현장에서의 실측 자료가 가장 필요하다. 해양 혼합의 정도를 산출하는데 유속, 수온 및 염분 등의 자료를 이용하는 방법의 의존도가 높았지만 이제 관측 장비의 발달로 미세규모의 유속시어를 직접 측정하고 이를 이용한 혼합 정량화하는 것이 일반화 되었다.

2.2 국내외 연구 동향

국내에서는 태풍 통과 전후의 해양혼합을 직접 관측한 경우는 최근 들어 동중국해 대륙붕 해역에서 간헐적 관측이 있었으나 관측 횟수의 한계로 태풍 통과에 따른 해양혼합의 정량화 연구는 초보적인 단계에 있다. 태풍과 관계없이 상층의 난류 관측은 주로 여름철에 이루어져 왔으며 심층 난류 관측은 장비의 부재로 전무한 상태이다.



2.3. 연구 목표 및 내용

2.3.1. 연구 목표

- 태풍 통과 전후의 해양 혼합 상태 측정

2.3.2. 연구 내용

- 태풍 통과 전과 통과후의 해양 난류 관측
 - Microstructure profiler(예, TurboMAP)를 이용
 - 상층 (400 m) 관측 및 심층 (3000 m) 관측
- 태풍 통과후 해양 혼합 변화의 정량적 평가
 - 난류운동에너지 소산을 산출
 - 난류수직혼합계수 산출

2.3.3. 단계별 목표 및 내용

- 1단계 연차별 목표 및 내용

구 분		연구개발목표	연구개발내용
1 단계	1차 년도	○ 태풍 통과 전후 해양 상층 난류 관측 1	- TurboMAP 이용 400m 상층의 난류 관측 - 태풍 통과 전후 상층 해양 혼합 상태 변화 정량화
	2차 년도	○ 태풍 통과 전후 해양 상층 및 심층 난류 관측	- TurboMAP 이용 400m 상층의 난류 관측 - 심해용 난류 관측 장비 확보 및 관측 시험
	3차 년도	○ 태풍 통과 전후 해양 전층 난류 관측	- 심해용 난류측정기기 활용 관측 - 태풍 통과후 혼합 변화 수심 정량화 - 모델 활용을 위한 혼합 모수화 방안 개발



2.4. 추진전략

- 천해용 TurboMAP 활용 및 심해용 난류측정 장비 확보
- 자료 분석시 ARGO 플로트 관측 자료 활용
- 모델 결과를 활용하여 광역의 혼합상태 추정

2.5. 기대성과

- 태풍 통과후의 혼합 변화의 정량화 및 태풍 영향 수심 평가
- 태풍/해양 모델의 불확도 저감
- 태풍에 의한 전지구 해양의 해양혼합 정도 정량화

3) 해양무인관측기기를 활용한 최적화 통합 대양 관측 기술 개발: Mesoscale eddy의 변동 기작 연구

3.1. 연구의 필요성

해양무인관측기기는 최근 10년간 급속도로 발전해왔다. 아르고 플로트를 필두로 하여 무인으로 해양을 관측하고자 하는 연구자들의 꿈은 현실화되기 시작하였으며, Argo 프로그램의 성공에 힘입어 무인시스템에 최적화된 해양 센서들도 매우 다양하게 개발되었고, 최근 수중글라이더와 같은 무인잠수정이 실제 해양 관측망에 투입되어 활용될 수 있을 만큼 비약적인 기술발전이 이루어져 왔다. 현재는 wave glider와 같은 무인수상정이나, 프로펠러 형의 무인잠수정이 해양 관측에 활용될 수 있는지 시험 운용이 계속 진행되고 있다. 해양의 물속을 탐사하거나 관측하는 무인 기술은 장비가 물속에서 관측을 수행하는 순간을 볼 수 없기 때문에, 하늘을 날아다니는 드론이나 해표면에서 떠다니는 무인수상정에 비해서 하드웨어적이나 소프트웨어적으로 훨씬 복잡하고 어렵다. 그러나, 선진국에서 이미 10년 이상의 무인수중관측 기술을 축적해왔고, 이러한 기술축적에 힘입어 수중글라이더를 활용한 무인관측망을 구성하여 운용하는 수준에 이르렀다.

과거 우리나라는 미국 워싱턴 대학과 공동으로 1996년 세계 최초로 아르고 플로트를 시험 운용하였고 1999년 수중글라이더 운용시험에도 동참하였으며, 세계 최초로 바이오 아르고 플로트 시험도 선진국과 공동으로 수행했었던 경험이 있었다. 현재 수중글라이더의 운용기술을 개발하고 있으나, 이를 해양 관측에 활용하기 위한 연구를 진행하고 있지 못함으

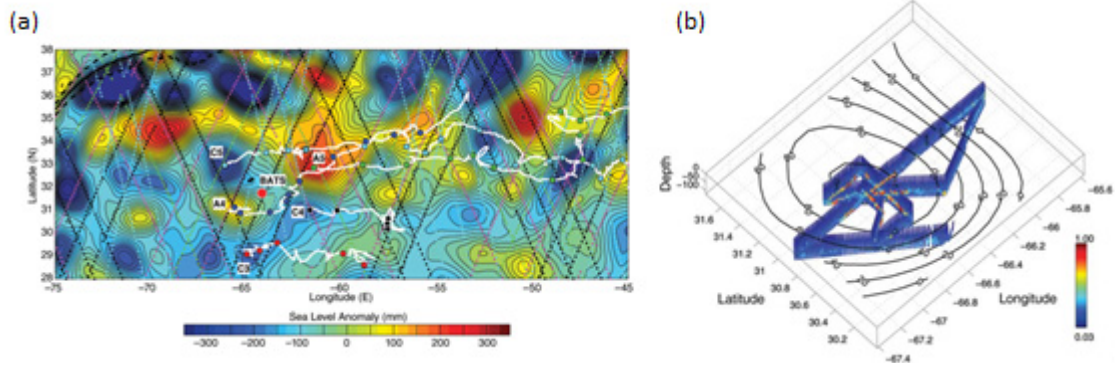


로 인해 선진국들에 비해 무인해양관측기술 수준이 매우 낮고, 기후변화나 환경변화에 민감하게 대처하는데 필요한 해양 정보를 빠르게 습득하는데 있어 다른 선진국에 비해 많이 뒤쳐져 있다. 따라서 본 연구를 통해 해양학적으로 중요한 문제를 해결함과 동시에 최적화된 해양무인기기들의 통합 기술을 개발하여 대양 환경에서 활용함으로써 국내 해양 무인관측 기술 수준을 높이고, 첨단 기술에 기반 하여 새로운 자료를 축적함으로써 한국의 해양 과학력을 향상시키는 노력이 필요한 시점이다.

최근 들어 해양학적으로 이슈가 되고 있는 중요한 해양 현상 중에 하나가 바로 mesoscale eddy이며, 이 현상의 특성상 멀티 해양무인관측기기의 최적화 통합 기술 개발을 통한 관측이 매우 필수적이다. mesoscale eddy는 해양의 비선형적 현상으로 운동량 및 열용량, 염용량 등의 물리량을 수송할 뿐 아니라 다양한 생지화학적 물질의 공간적 재분배에 영향을 주고 있는 중요한 해양현상이다. 이러한 mesoscale eddy의 변동은 수송된 물리량 및 물질량을 주변해역에 배출시킴으로써 해당해역의 특성을 결정하는 역할을 할 수 있으며, 특히 mesoscale eddy의 감속 과정에 관한 연구는 운동량 및 열용량의 수직 확산과 연계되어 있어 Meridional Overturning Circulation (MOC)를 유지하는 혼합 작용의 새로운 과정을 밝히는데 있어 중요한 주제이기도 하다. 이러한 mesoscale eddy의 감속 과정은 또한 수직적인 해수의 이동을 동반하므로 심층에 풍부한 영양염을 유광층으로 보내는 역할을 함으로써 추가적인 식물플랑크톤 번성에도 기여할 수 있다.

mesoscale eddy의 물리적 혹은 생지화학적 과정에 있어서의 중요도에도 불구하고, mesoscale eddy의 변동 특성 및 기작에 관한 연구는 매우 미흡하다. 그것은 mesoscale eddy가 비선형적인데다 끊임없이 이동하는 현상이기 때문에 선박을 이용한 관측에 비용이 천문학적으로 소요되기 때문이다. mesoscale eddy의 급격한 변형은 짧게는 수 주일에서 수개월에 걸쳐 일어나는데다, 이러한 변형은 강한 바람이 동반되었을 때 나타나기 쉽기 때문에, 기상 조건이 좋지 않는 환경에서 선박 운용이 힘들 뿐더러, 긴 기간 동안 eddy를 추적하면서 관측하는 것이 위험도도 높고 비용도 많이 들게 된다. 이러한 이유로 이제까지 eddy의 구조 변형에 관한 연구는 거의 이루어지지 못하였고, 과거 80년대 우즈홀 해양연구소에서 기상조건이 좋을 때에 eddy를 추적 조사한 이후로 거의 연구된 바가 없다.

특히 최근에는 인공위성 관측이 발달함에 따라 eddy를 발견하기가 과거보다 훨씬 수월해졌으며, 선박 관측을 보완할 수 있는 무인관측기기 (아르고 플로트 혹은 수중글라이더)등이 개발되어 실제 해양관측에 활용되고 있기 때문에, mesoscale eddy에 변동에 대한 자세한 연구가 가능해졌다. 국내에서 건조된 대양조사선을 활용하여 현재 발전한 첨단 무인해양관측 기기들을 eddy 내외에 투하하고 최적화하여 관측을 수행함으로써 해양의 블랙홀로 불리우는 mesoscale eddy의 특성과 변동에 대한 세계적인 연구가 가능할 것으로 보인다.



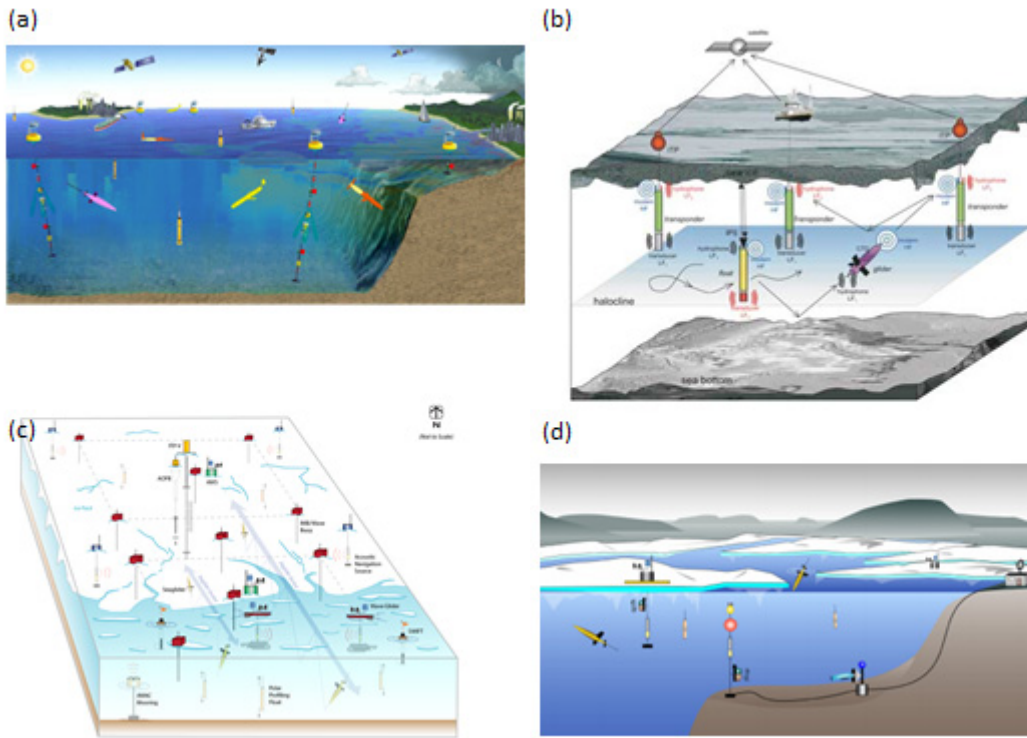
[그림 4-3-1] (a) 인공위성 해표면 고도 자료에서 나타난 mesoscale eddy의 위치 추적 결과 (b) warm eddy 의 변동과 관련되어 관측된 식물플랑크톤 변성



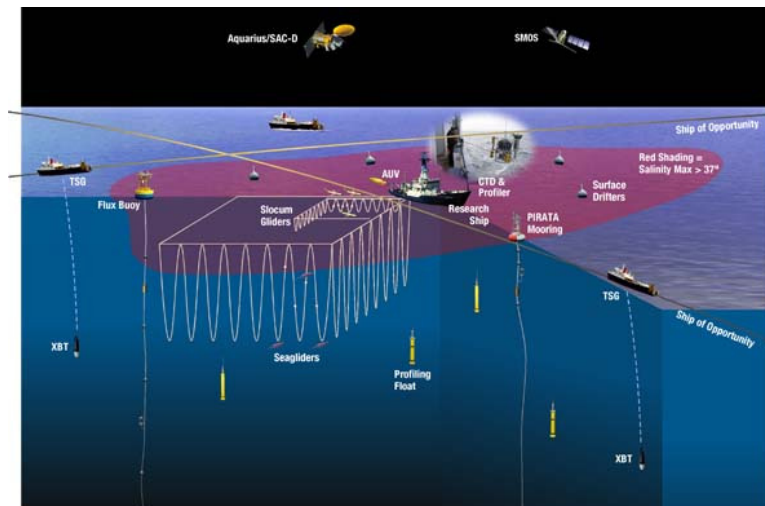
[그림 4-3-2] 널리 활용되고 있는 해양 무인관측기기 (a) 아르고 플로트 (b) 수중글라이더 (c) EM-Apex

3.2 국내외 연구 동향

국내에서는 해양무인관측기기를 최적화 통합함으로써 해양 관측을 수행하기 위한 기술개발이 이루어진 적은 없다. 국외에서는 미국, 유럽, 캐나다, 호주 등이 계류형 부이 시스템과 수중글라이더를 골자로 하는 무인해양 관측망을 구성하여 실시간으로 다양한 (적조, 오염, 기후 등) 해양 환경 정보를 수집하고 있다. (그림 4-3-3). 특히 미국은 북대서양에서 아르고 플로트, 수중글라이더, 웨이브글라이더, 무인잠수정 등 가용한 해양무인관측기기를 최적화 통합하여 기후변화에 따른 해양의 열용량 및 염용량 변동을 연구한 예가 있다. (SPURS project) (그림 4-3-4).



[그림 4-3-3] (a) European Glider Ocean Observation Management 모식도
 (b) Arctic Observing Network (c) 여름철 북극 빙하 추적 계획
 (d) Acoustic Navigation and Communications for High-latitude Ocean Research



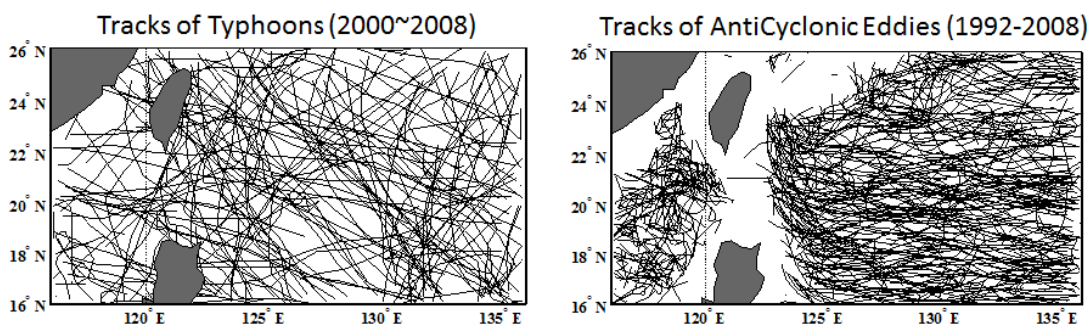
[그림 4-3-4] 대서양 아열대 강수-증발 시스템을 위해 개발된 SPRUS project 모식도



3.3. 연구 목표 및 내용

3.3.1. 연구 목표

- 아르고 플로트 및 수중글라이더를 활용한 중규모 최적화 관측 기술 개발
- Mesoscale eddy의 추적 관측을 통한 변동 기작 연구
- 태풍에 따른 mesoscale eddy의 반응 연구 및 태풍 모델 개선을 위한 해양 환경 자료 축적



[그림 4-3-5] (a) 태풍 궤적 (2000~2008) (b) AntiCyclonic eddy 궤적 (1992-2008)

3.3.2. 연구 내용

- 아르고 플로트 및 수중글라이더를 활용한 중규모 최적화 관측 기술 개발
 - 해류에 따라 수동적으로 이동하는 아르고 플로트와 능동적으로 이동하는 수중글라이더를 결합하여 중규모 현상을 관측하기 위한 최적 시공간 해상도 분석- 이리듐 아르고 플로트를 활용한 Active Array Management 기술 개발을 통해 수동 아르고 플로트의 능동제어 기술 개발
 - 아르고 플로트의 시공간적 분포를 기반으로 최적 시공간 해상도를 갖는 해양 관측 자료를 얻기 위한 수중글라이더의 최적화 관측 운용 기술 개발
- Mesoscale eddy의 추적 관측을 통한 변동 기작 연구
 - 강한 바람 하에서의 mesoscale eddy 변동 특성 추적 관측
 - 아르고 플로트 및 수중글라이더의 최적화 결합을 통한 3차원 물성 구조 및 해류 구조를 관측하고 이로부터 비지형류적 운동 분석
 - mesoscale eddy 주변 및 바닥에서의 동시 혼합도 측정



- 관측 결과를 통합 분석함으로써 급격히 변동하는 mesoscale eddy의 역학적 기작 이해
- 태풍에 따른 mesoscale eddy 반응 연구 및 태풍 모델 개선을 위한 해양 환경 자료 축적
 - 태풍 시기에 mesoscale eddy에 의한 열용량 변동 특성 관측을 통한 태풍으로의 열 이동량 분석
 - mesoscale eddy 위로 태풍 통과 후 mesoscale eddy 내의 물리량 변동 및 생지화학 특성 구조 변동 분석
 - 태풍에 의한 mesoscale eddy 변동의 전 지구적 영향도 평가

3.3.3. 단계별 목표 및 내용

- 1단계 연차별 목표 및 내용

구 분		연구개발목표	연구개발내용
1 단계	1차 년도	○ 이리듬 아르고 플로트 및 수중글라이더 성능 평가	- 이리듬 아르고 플로트 및 수중글라이더 성능 조사 및 도입 - 무인기기에 추가장착 가능한 생지화학 센서 조사 및 도입 - 현장 관측을 통한 플로트 및 수중글라이더 성능 테스트 및 센서 정밀도 검증 - mesoscale eddy 및 태풍 궤적 등의 기존 관측자료 수집 및 분석
	2차 년도	○ 북서태평양 현장 관측 투입 1차	- 이리듬 아르고 플로트 및 수중글라이더 투하를 위한 현장 해양 환경 분석 - Active Array Management 알고리즘 개발 - 아르고 플로트+수중글라이더 통합 운용 알고리즘 프로토타입 개발 - 북서태평양 현장 관측 투입 및 알고리즘 시험 운영 - 서안경계류와 mesoscale eddy 상호작용 연구
	3차 년도	○ 북서태평양 현장 관측 투입 2차	- 아르고 플로트+수중글라이더 통합 운용 알고리즘 개선 및 자동 운용 시스템 개발 - 인공위성 자료를 활용한 mesoscale eddy의 추적 및 선별 - 아르고 플로트+수중글라이더의 eddy 추적 관측 수행 - turbulence 및 ageostrophic current 관측 - 획득 자료의 분석 수행을 통한 eddy 변동 기작 이해



구 분		연구개발목표	연구개발내용
	4차 년도	○ 태풍시기의 eddy 변동 연구 - 3차 실험역 관측	- 태풍 경로 및 mesoscale eddy 경로 분석을 통한 관측 계획 수립 - 태풍 시기의 mesoscale eddy의 물리량 및 생지화학 자료 측정을 위한 최적화 관측 시스템 구성 - mesoscale eddy 추적 관측 수행 - 태풍 시기의 mesoscale eddy의 관측 자료 수집 및 eddy 변동 특성 분석 - 기존 자료와의 비교 분석을 통한 mesoscale eddy 변동성의 전지구적 영향도 이해 연구
	5차 년도	○ 태풍시기의 eddy 변동 연구 - 4차 실험역 관측	- 태풍 경로 및 mesoscale eddy 경로 분석을 통한 관측 계획 수립 - 태풍 시기의 mesoscale eddy의 물리량 및 생지화학 자료 측정을 위한 최적화 관측 시스템 구성 - mesoscale eddy 추적 관측 수행 - 태풍 시기의 mesoscale eddy의 관측 자료 수집 및 eddy 변동 특성 분석 - 기존 자료와의 비교 분석을 통한 mesoscale eddy 변동성의 전지구적 영향도 이해 연구

○ 2단계 중장기 목표 및 내용

구 분	연구개발목표	연구개발내용
2단계	○ mesoscale eddy의 태풍 영향 연구를 위한 무인해양 통합 관측 시스템의 지속적 운용	- 특정 해역을 선정하여 무인해양 통합 관측 시스템의 지속적 운용 - TAO array 혹은 OOI 관측망과 같이 국제 해양 관측망에 등록 - 태풍 및 북서태평양의 중장기 변동성 규명 및 기후 변화와의 상관성 이해를 위한 연구 수행

3.4. 추진전략

- 이리덱 플로트, EM-APEX (2기)와 수중글라이더 (3기), 및 클로로필 센서, turbulence 센서를 연차별로 구매.



- 시뮬레이션을 활용한 active array management 알고리즘 및 최적화 통합 알고리즘 개발
- 태풍 궤적 및 mesoscale eddy 궤적 자료를 분석함으로써 아르고 플로트+수중글라이더 무인관측시스템 투하 위치를 결정
- mesoscale eddy를 2주 이상 지속적으로 추적하면서 변동을 관측할 수 있도록 고안하고, 최소 3차레이상 실험역 관측을 수행

3.5. 기대성과

- 해양 무인 관측 시대에 맞추어 멀티 무인 플랫폼의 통합 운용 기술을 확보
- 국내 해양 무인 관측 기술력 및 해양 장비 개발 기술력 향상에 기여
- 중규모 소용돌이의 변형 및 진화에 대한 역학적 이해도 향상을 통한 국내 해양 과학력 증진에 기여
- 중규모 소용돌이의 거동 및 전 지구적 순환에의 기여도에 관한 과학적 발견 예상
- 태풍의 예측력 향상에 필요한 모형 검증 자료 축적 및 모형 개선에 기여



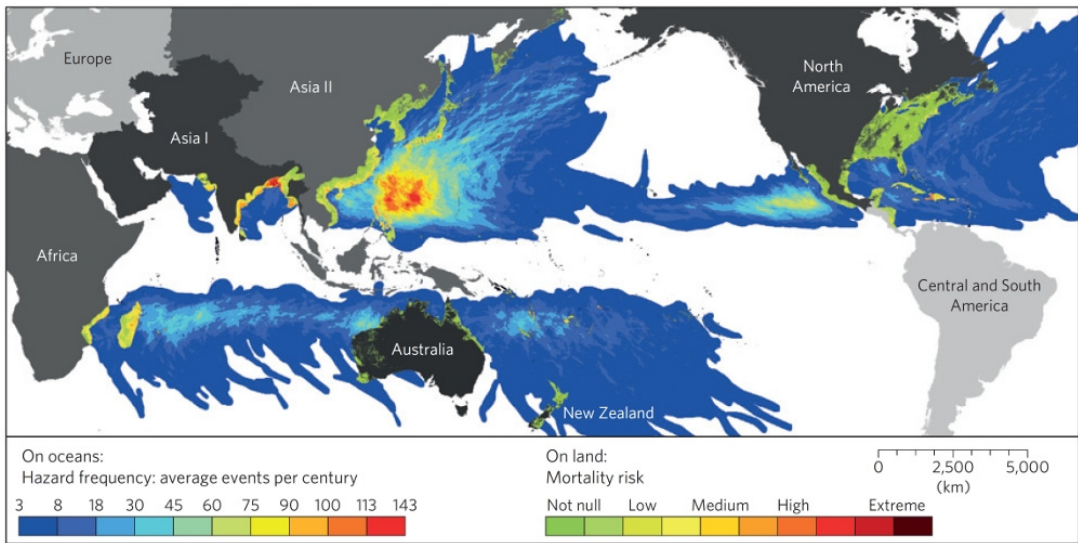
V

[세부과제 I] 북서태평양 난수성 소용돌이해역
태풍예측기술개선 연구: 2. 태풍-해양 예측모델링 분야

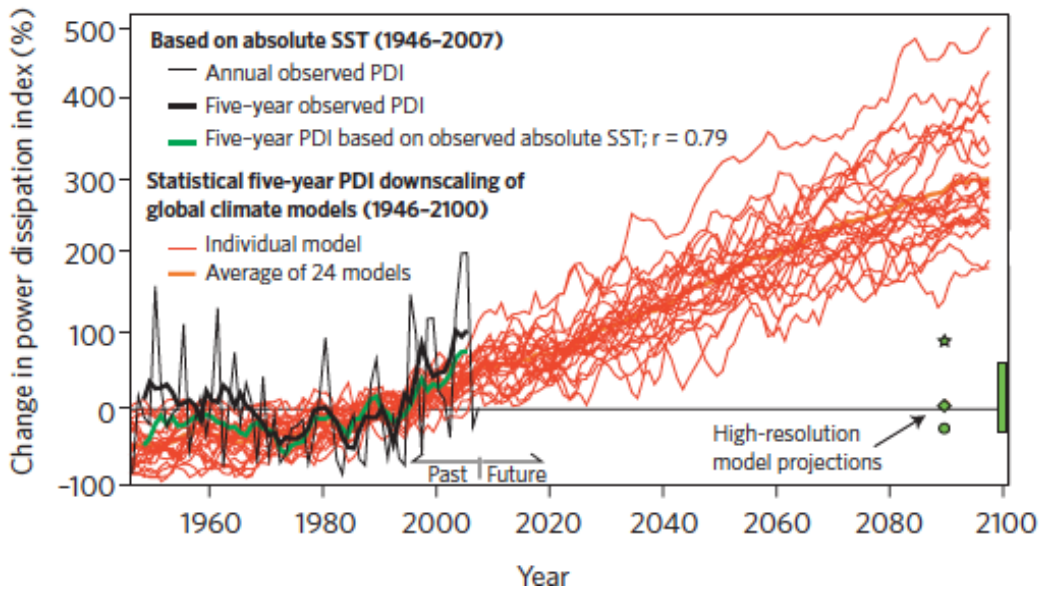
1) 태풍-해양 결합모형을 이용한 태풍예측 정확도 개선

1.1. 연구의 필요성

- 한반도는 강한 태풍의 발생빈도가 가장 큰 북서태평양 난수역의 가장 자리에 위치해 있으면서 (그림 5-1-1a), 종종 태풍에 기인한 해상의 큰 파도와 이에 수반되는 해일로 인하여 연안 침수는 물론 제반 시설물의 붕괴, 유실 등으로 막대한 인명과 재산 피해를 겪어 왔다. 2007년의 태풍나리는 남한에만 16명의 인명피해와 1,592억원의 재산피해를, 2003년는 태풍 매미는 132명의 인명피해와 4조 7천억 원의 재산피해를 그리고 2002년의 태풍 루사는 246명의 인명피해와 5조 1,479억원의 재산피해를 가져왔다.
- 최근의 연구 결과들(Peduzzi et al., 2012; Knutson et al., 2010; Emanuel, 1987)에 의하면 지구온난화에 따라 해표면의 열용량이 증가하면서 태풍의 빈도수는 감소하지만 태풍의 강도는 대체로 상승할 것이라고 예측되고 있다. 그림 5-1-1b는 그 한 예로서 관측값과 IPCC 4차 미래 기후변화 시나리오로부터 계산된 태풍의 강도를 나타내는 PDI (Power Dissipation Index)를 나타낸다. 관측으로부터 태풍의 강도가 최근 증가하는 것을 보여줄 뿐만 아니라 미래 기후 환경에서도 꾸준히 태풍의 강도가 증가할 것으로 예측되고 있다.
- 지구온난화에 따라 증가하는 태풍의 강도는 증가하는 접안 지역에서의 인간활동과 더불어 태풍으로 인한 자연 재해의 가능성을 높이고 있다. 뿐만 아니라 지구온난화에 따라 태풍의 활동이 활발한 서태평양 난수역이 확장한다면 한반도가 태풍으로 인한 자연 재해에 보다 직접적으로 노출될 가능성이 높아질 것으로 예상할 수 있다.
- 온난화에 따라 강한 태풍은 더욱 강해질 수 있다는 전망에 따라, 태풍이 급격히 강화되는 난수성 소용돌이 해역에 대한 상세한 해양 조건을 보다 현실적으로 반영하여 태풍 예측(진로, 강도) 정확도를 높이고, 특히 급격히 강화되는 (Rapidly Intensified, RI) 강한 태풍에 대한 예측 정확도 개선이 시급하게 요청되고 있다.



[그림 5-1-1a] 태풍에 의한 위험 빈도와 사망 위험도 분포 (2010년 기준)
(From Peduzzi et al., 2012).



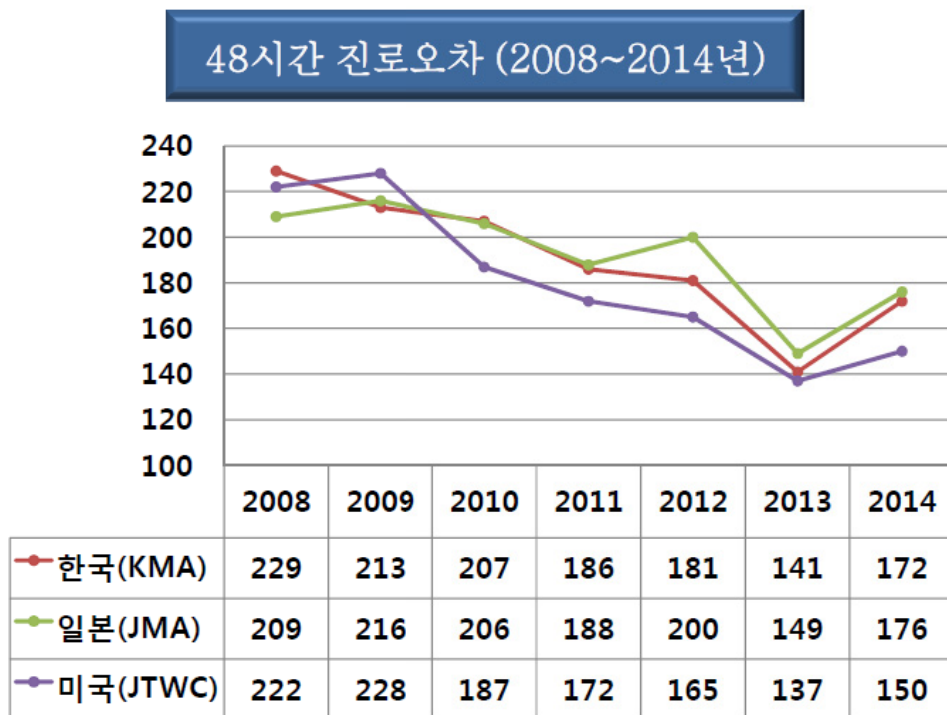
[그림 5-1-1b] 관측과 모델에 의한 태풍의 강도 변화 및 예측 (Knutson et al., 2010.)

미국 국립허리케인 센터(National Hurricane Center, NHC)에서 제시하는 대서양 허리케인 진로예측 정확도는 1990-2005 기간에 48시간 예측의 경우 200 km 오차에서 100 km 오차 수준으로 15년간 약 50% (50%/15년=3.3%/년, 연간 약 3% 정확도 상승)의 정확도가 상승되어 왔다.



- 북서태평양 우리나라에서 태풍 예보하는 영역에서, 최근 기상청(그림5-1-2a)에서 우리나라의 48시간 진로예측 정확도는 2008년 229km에서 2014년 약 172km 정도에 도달하여 연간 진로 정확도 개선율은 3.6 %로서, 일본보다는 양호하나 미국수준 (4.6%/년)에 도달위해 꾸준한 노력 필요성 강조하였다 (유, 2016). 태풍진로 예측의 경우, 해일예측에도 활용되기 때문에 48-72시간 예측 진로오차의 절대적인 거리가 중요하며, 우리의 경우 100-200km 거리는 상륙이 부산인가 여수인가의 차이가 날 수 있기 때문이다.

태풍 진로 예보 오차

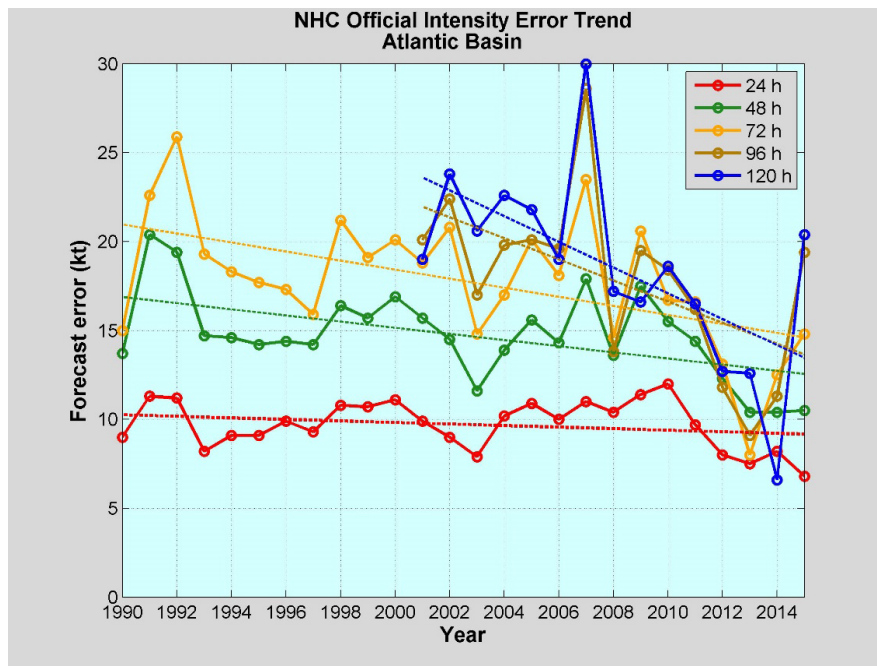


[그림 5-1-2a] 북서태평양 태풍 예측 기관별 진로오차 (km) (유, 2016).

- 진로보다 강도예측은 상대적으로 더디게 향상되어 왔으며, 대서양에서 미국립허리케인 센터에서는 1990-2015년 기간에 강도오차는 꾸준히 향상되어 왔음을 보임 (그림 5-1-2b). 그림에 보이는 바와 같이, 48시간 예측 오차는 15년간 약 17 kts에서 13 kts로 개선되는 데 그쳐, 강도 예측 개선이 매우 어려움을 알 수 있다.
- 그러나 급격히 강화되는 태풍의 경우, 정확도는 상대적으로 크게 떨어진다. 미국 대서양 태풍센터(NHC)의 2003-2005년 3년 평균적으로 48시간-84시간 예측 정확도는 그림 5-1-2c와 같이 20-30 노트(kts)에 달함(그림5-1-2c 좌측). 태풍예측 정확도를 향상시키기 위해 파랑효과를 고려한 미지구물리연구소(GFDL) 연구(그림5-1-2c 우측) 강도오차는 쉽게 30노트가 넘어선다.

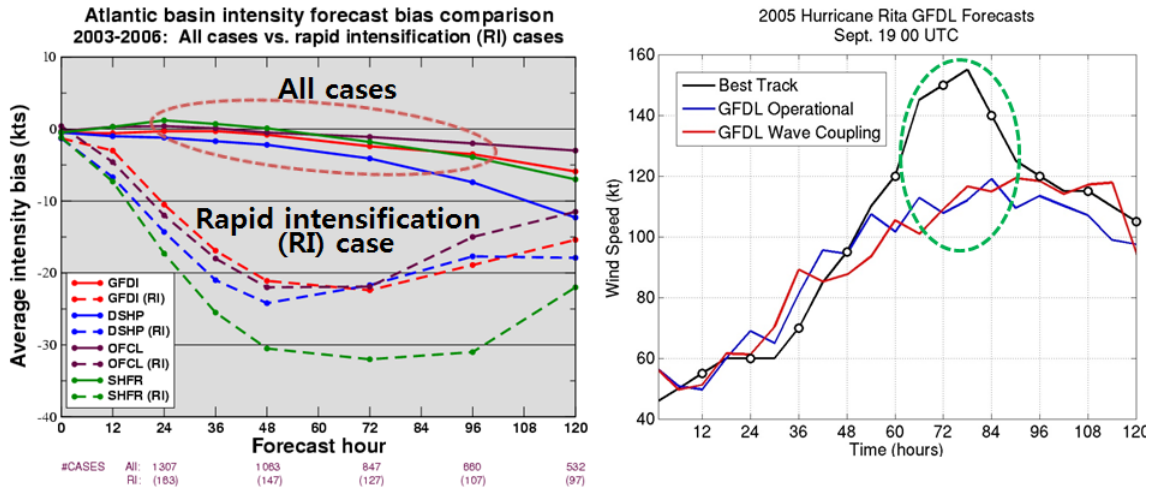


- 북서태평양 난수역에서는 급격한 강화가 자주 발생함. 매미(2003), 산바(2012)는 최대풍속이 각각 150노트, 155노트에 달하였으며, 급격히 강화된(RI) 태풍이었음 (그림4-1-3). 대만에 영향을 준 2010년 태풍메기는 160노트까지 달함. 급격히 강화되는 태풍이 대규모 피해를 야기한다는 점을 감안하면 보다 집중적인 태풍강도 예측기술 향상에 필요하다.

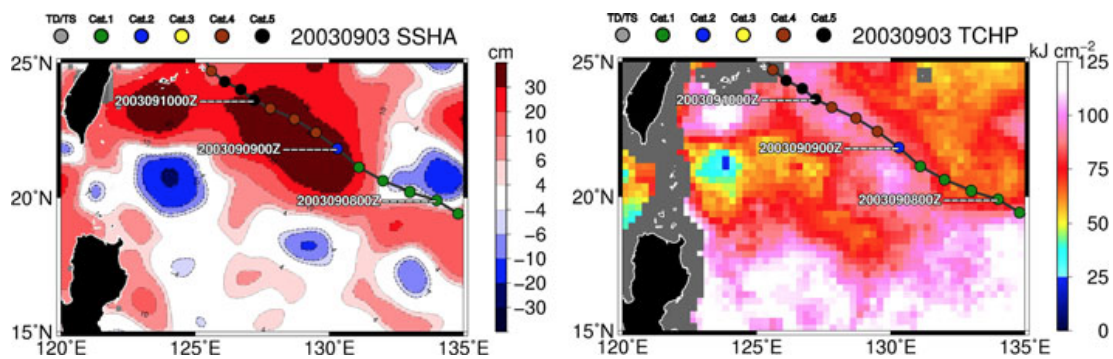


[그림 5-1-2b] 1990-2015 기간 대서양 허리케인센터 예측 강도오차 (Tallapragada, 2016).

- 태풍에 의한 자연재해에 대비하기 위하여 그 경로와 강도를 예측하고자 하는 노력들이 있어왔다. 태풍의 경로의 경우 기상 분야에서 괄목할만한 발전을 이뤄왔지만 태풍 강도 예측 분야는 해양 환경에 크게 좌우되는 것으로 알려져 있어 최근 발달하고 있는 해양 예측 분야와 함께 현재 연구 및 개발이 진행 중이다. 그림 5-1-3은 2003년 한반도에 크게 피해를 입혔던 태풍 매미가 해양의 난수성 에디를 지나면서 강도가 증가하는 것을 잘 나타내고 있다. Yablonsky and Ginis (2008)은 2005년 허리케인 카트리나의 예로부터 태풍의 강도 예측에 있어 해양의 초기화가 중요함을 수치모델로 보이기도 했다.
- 지구온난화에 따른 태풍의 강도변화를 모니터링하고 한반도에 미치는 태풍의 영향을 평가하기 위해서는 해양-대기 결합 모델에 기반한 태풍 모형의 개발이 필수적이며, 특히 해양 자료동화를 적용한 해양 초기화는 향후 태풍 강도 예측 기술의 발전에 필수적이라 할 수 있다. 또한 태풍의 강도를 보다 정확히 예측하기 위해서는 고해상도를 적용한 지역 모델이 요구된다.



[그림 5-1-2c] 2003-2005년간 대서양 급격히 강화된(RI) 태풍의 예측 정확도 (좌) 및 파랑효과를 고려한 태풍 리타 강도 예측 (Ginis, 2009). 48-84시간 강도예측 오차가 20-30kts에 달함.



[그림 5-1-3] 태풍 매미(2003년)가 지나가기 전 해면고도변이와 관측으로부터 계산된 TCHP(Tropical Cyclone Heat Potential). 태풍 매미의 경로를 함께 표시했으며 해양의 난수성 에디를 통과하면서 그 강도가 증가하는 것을 보여줌. (From Lin et al., 2012).

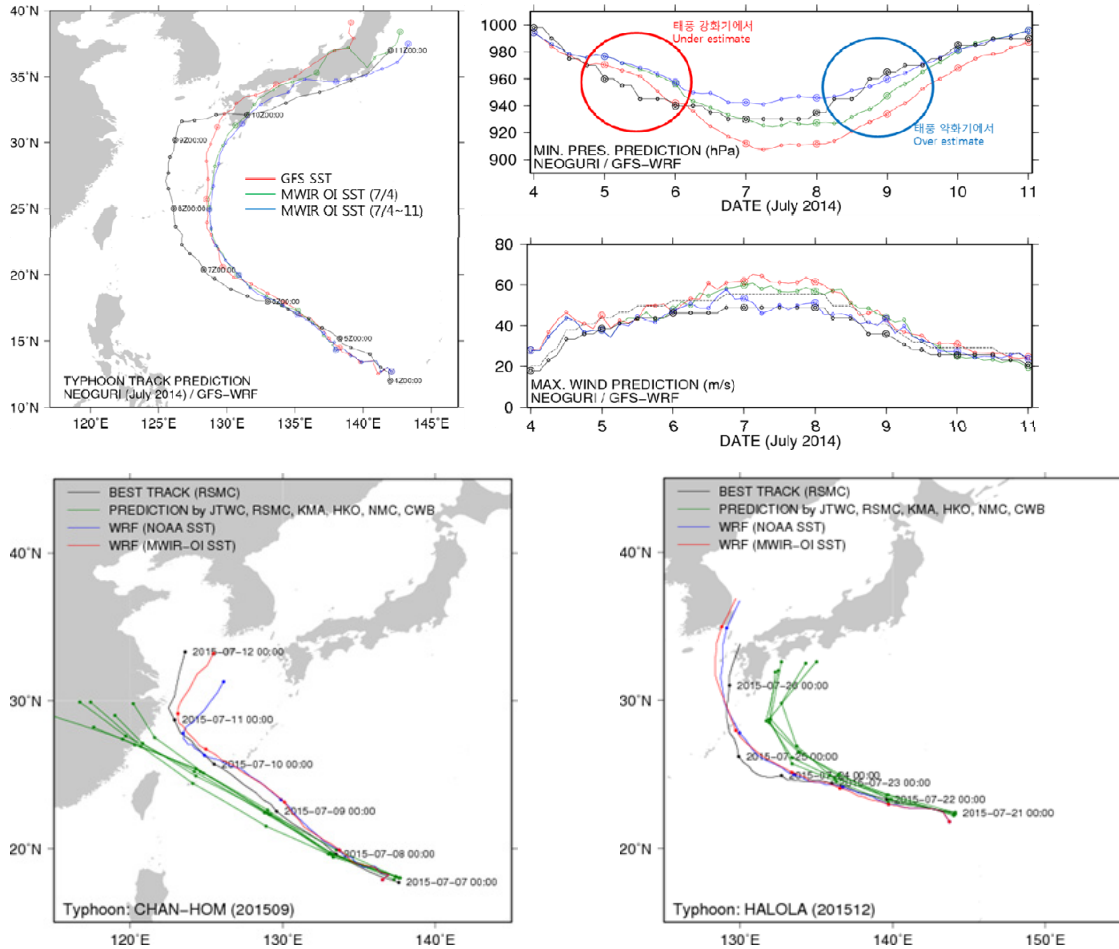
- 기존에는 시도하지 못했던 소규모의 해양물리현상을 규명하기 위한 연구는 정밀한 해상도를 가진 해양수치모델을 구성하여 시도되고 있는데, 대기와의 운동량 및 열·염 교환에 대한 자세한 연구는 아직 미진하다. 태풍으로 인한 대기-해양의 상호작용의 경우 단순한 모델을 동시에 고려하는 것 이상의 상호작용에 대한 자세한 관점에서의 연구가 필요하다. 현재까지는 관측자료를 통계로 도출된 모수를 이용하여 대기와 해양 사이의 교환율을 산정하고 있는데, 태풍과 같은 급격한 조건 변화에서는 공간적인 변화를 고려해야 한다. 파랑은 대기와 해양 사이의 경계층을 구성하는 물리적인 운동량 에너지로 정의될 수 있으며, 파랑의 에너지 및 표면 거칠기 등의 상태에 따라 대기와 해양의 교환율에 영



향을 미칠 수 있다. 파랑을 고려한 대기과 해양의 물리량 교환율을 산정하여, 대기 및 해양 예측 모델링의 정밀도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 국내외 연구 동향

- 국외에서는 미국, 일본 및 유럽 등 선진국을 중심으로 고해상도의 해양-대기 결합 모델을 기반으로 태풍의 강도를 예측하려는 시도가 있어 왔다. 미국의 GFDL/URI 결합 허리케인 예측 시스템(Yablonsky and Ginis, 2008)과 JMA의 CMSM (atmosphere-ocean coupled mesoscale model) (Ito et al., 2015) 이 해양 초기화를 적용한 태풍 강도 예측의 예들이다. 전세계적으로 고해상도 해양-대기 결합 모델과 해양 자료동화 기법을 적용한 기관에서만 태풍 강도 예측을 수행하고 있다.
- 한국해양과학기술원에서는 해양-대기 지역 결합 모델을 개발하고 있다. 해양모델로는 GFDL의 MOM5(Modular Ocean Model Version 5)를 대기모델로는 WRF (Weather Research and Forecasting) 모델을 OASIS 결합자를 이용하여 결합하였다. 또한 해양 모델의 초기화를 위하여 Ensemble Optimal Interpolation을 이용하여 자료동화를 수행할 수 있도록 하였다. 그러나 해양 모델인 MOM5는 기후모델에 적합한 Arakawa-B 격자로 구성된 모델이며 고해상도의 태풍 예측을 위해서 C 격자인 MOM6로 버전을 상향시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 MOM6와 WRF를 결합한 해양-대기 결합 모델을 개발할 것이며, 또한 해양자료동화를 적용하여 해양 초기화에 따른 태풍 강도 예측 시스템을 개발할 것이다. 이는 향후 태풍 강도 예측의 성능을 향상시킴으로 태풍으로 기인한 자연 재해에 대한 능동적인 대응 시스템을 구축하는데 기여할 것이다.
- NOAA에서는 WW3모델을 이용하여 극지방을 제외한 전구영역에 대한 5일 예보를 수행하고 있으며, 미국 해안의 주요지역에 대한 상세 영역을 따로 모자이크 방법으로 구성하여 예보에 활용하고 있다. 한국 기상청에서도 WW3모델을 이용하여 전구 및 한반도 부근의 파랑예측을 수행하고 있으나, 해상도 면에서 만족스럽지 않은 실정이며, 극지역은 제외되고 있다.
- 국내외에서 대기-해양-파랑 결합모델을 구축하고자 하는 연구는 여러 관점에서 수행되고 있는데, 저질에서의 현상을 모의하는데 있어, 파랑의 역할이 중요하나 대기 및 해양 상태에 따른 파랑의 변화는 무시하고, 해양에서의 대기의 결과를 가져오는데 있어 파랑의 역할을 부여하는 연구가 주로 수행되고 있다.



[그림 5-1-4] 표층조건(SST)에 따른 태풍경로 및 강도예측 결과

- 해양표층에서의 바람의 영향을 고려하기 위한 마찰응력은 경험식으로 제시되는데, 이는 주로 정상상태의 해양 및 대기의 관측치를 이용하여 회귀분석한 선형적인 관계를 갖고 있으며, 태풍과 같은 예외적으로 불안정한 상태에 적용하는데 문제가 있다. 기존 난류 모델에서는 쇄파나 기포의 혼합 등에 의한 표층 난류 전체를 부시네스크 과점성 가정으로 고려하고 있으며, 실제 모델 계산에서는 표층연직격자의 간격 이하이므로 거의 무시되고 있으나, 태풍과 같은 유의파고가 10미터 이상의 상황이 되는 경우 버스트층의 두께가 10미터 이상이 되어 파랑의 영향을 고려하는 연구가 필수적이다(Murakami and Yasuda, 2008). 해양 순환과 같은 중장기적인 관점에서의 파랑의 영향을 고려하기 위하여, 해수면에서의 진동인 파랑의 에너지가 수직적으로 영향을 미치는 것을 난류모델의 경계를 보완해줌으로써 고려하는 방법이 Mellor and Blumberg (2004)에 의해 제안되었고, 파랑에너지에 의한 수직적인 에너지를 산정하여 추가적으로 부여하는 방법(Qiao et al., 2010) 등이 사용되고 있다. 폭풍해일과 같은 상세규모의 실시간 시뮬레이션에서는 단기적인 관점에서의 파랑의 영향이 고려되는데, 파랑의 상태(파고, 주기, 파향 및 표층거칠기 등)에 따른 해양에 입력되는 교환을 모수화 개선, 파랑장으로부터 산



정되는 방사응력 또는 파랑으로부터 소산되는 에너지를 해양의 표층에 추가적인 마찰응력으로 부여하는 방안 (Lee et al., 2013) 등이 연구되고 있다.

1.3. 연구 목표 및 내용

1.3.1. 연구 목표

- 북서태평양 급격하게 강화되는(RI) 고해상도 해역 태풍-해양 결합 모델 개발. 정량적인 목표는 2015년 기준 진로 20% 개선하며, 북서태평양 급격히 강화되는 태풍 강도 중심 기압 예측 정확도는 20hPa (세계 수준 근접)을 달성하고자 함.
- 북서태평양 고해상도 지역 태풍-해양 결합 모델을 위한 해양자료동화 시스템 구축.
- 태풍-해양 결합 모델의 결합자로서의 파랑모델 개발.
- 태풍 중심 해역 해양연직구조-태풍강도 상호작용 이해 및 예측기술 개선.
- 미래 기후변화 시나리오에 따른 태풍 강도 장기 변동 연구.

1.3.2. 연구 내용

- 태풍이 급격하게 강화되는(RI) 고해상도 지역 태풍-해양 결합 모델 개발.
 - WRF에 기반한 급격히 강화되는(RI) 해역 고해상도 태풍모델 수립.
 - MOM6(Arakawa-C 격자 모델)에 기반한 고해상도 지역 해양순환모델 구축.
 - OASIS 결합자를 이용한 해양모델(GFDL MOM6)과 태풍모델(WRF) 결합.
- 고해상도 지역 태풍-해양 결합 모델을 위한 해양자료동화 시스템 구축.
 - 앙상블 기법에 기반한 해양 자료동화 시스템 구축.
 - 해양 초기화에 따른 태풍 강도 예측 민감도 실험 수행.
- 태풍-해양 결합 모델의 결합자로서의 파랑모델 개발.
 - 전구 및 지역 파랑모델 구축 및 연계체계 구축.
 - 태풍 및 해양 현상에서의 파랑의 역할 규명.
 - 태풍-파랑-해양 결합모델 구축.
- 태풍 중심해역 해양연직구조-태풍강도 상호작용 이해.
 - 태풍 강도변화에 따른 해양 연직구조 변화 분석.



- 해양 연직구조 변화에 따른 태풍 강도 변화 분석 및 주요 변수 도출.

○ 미래 기후변화 시나리오에 따른 태풍 장기 변동 연구.

- 지역 기후모형 수립.

- 북서태평양 태풍 장기 변동 실험 및 장기 변동성 분석.

1.3.3. 단계별 목표 및 내용

○ 1단계 연차별 목표 및 내용

구 분	연구개발목표	연구개발내용
1 단계	1차 년도	○ 고해상도 지역 태풍-해양 결합 모델 개발 I - 해양경계 SST조건에 따른 태풍예측 기술 개발 I - WRF 기반한 급격히 강화되는 해역 고해상도 태풍모델 수립 - MOM6에 기반한 고해상도 해양순환모델 수립 - 전구 파랑모델 구축 - 태풍 발달에 의한 해양연직구조 변화 분석
	2차 년도	○ 고해상도 지역 태풍-해양 결합 모델 개발 II - 해양경계 SST조건에 따른 태풍예측 기술 개발 II - OASIS 결합자를 이용한 지역 태풍-해양 결합 모델 구축 - 북서태평양 중규모 에디 변동성 재현 및 해양 순환 검증 - 지역파랑모델을 위한 상세격자 작성체계 구축 - 해양연직구조 변화가 태풍 발달에 미치는 영향 분석
	3차 년도	○ 고해상도 지역 태풍-해양 결합 모델 초기화를 위한 해양자료동화 시스템 구축 - 해양경계 SST조건에 따른 태풍예측 기술 개발 III - 고해상도 해양자료동화 시스템 구축 - 고해상도 결합 모델을 이용한 지역 기후 재분석 자료 생산 - 지역파랑모델 및 전구 파랑모델과 연계체계 구축 - 해양연직구조-태풍강도 상호작용 주요 변수 도출
	4차 년도	○ 태풍-파랑-해양 접합 모델 개발 I - 해양경계 SST 조건에 따른 태풍예측 기술 개발 IV - 해양 초기화에 따른 태풍 강도 예측 민감도 실험 수행 - 태풍-파랑-해양 접합 모델 개발 - 해양연직구조-태풍강도 상호작용 주요변수 민감도 실험
	5차 년도	○ 태풍-파랑-해양 접합 모델 개발 II - 태풍-파랑-해양 접합 모델을 이용한 태풍 및 해양 현상에서의 파랑의 역할 규명 - 과거 태풍에 대한 강도 예측 민감도 실험 수행 - 결합모델 기반 태풍 강도 예측 성능 평가 - 태풍 진로상 해양연직구조-태풍 상호작용에 의한 태풍강도 예측 성능 평가



○ 2단계 중장기 목표 및 내용

구 분	연구개발목표	연구개발내용
2단계	○ 미래 기후변화 시나리오에 따른 태풍 장기 변동 연구	- 지역 기후 모형 수립 - 북서태평양 태풍 장기 변동 실험 및 장기 변동성 분석
	○ 고해상도 지역 해양-대기 결합 모델 고도화	- 태풍-파랑-해양 접합 모델 고도화 - 해양 생지화학 과정 접합 모델 개발

1.4. 추진전략

- 한국해양과학기술원의 MOM5-WRF 결합 모델을 개발하는 중에 얻어진 기술력 최대한 활용 및 해양모델 독자 개발/개선 능력 확충.
- 북서태평양 난수괴 조건을 준실시간 반영한 예측기술 개선 전략 추진
- 미해양기상청(NOAA), 로드아일랜드대학(URI) 등 최고수준 예측모델링 기술을 지닌 기관/대학과 급격히 강화되는 (RI) 태풍에 대한 공동연구를 통한 기술력 제고.
- 국내외 협력을 통한 해양 자료 수집 및 품질 관리 방안 확보.
- 목표 해상도 및 목표 예측시간을 확정하여 이에 필요한 컴퓨팅 파워 자원 확보.

1.5. 기대성과

- 북서태평양 및 한반도 주변해역의 강한 태풍 강도 예측 성능 향상과 선진국 수준 연간 예측기술 개선 기대.
- 파랑 스펙트럼 성분 DB를 통해 통계적인 파랑자료를 생산하여 기후변화 연구에 활용.
- 새로 수집되는 북서태평양 해양자료 활용을 통해 태풍이 난수괴 해역에서 강화된 후 2일 이내에 한반도에 상륙하는 대규모 재해 유발 가능성이 있는 급격히 강화되는(RI) 태풍 예측 정확도향상 통한 강한 태풍재해 대응능력 강화.
- 지역 기후 모델 기술 확보.
- 태풍에 기인한 자연 재해 대응 능력 향상.
- 기후변화에 따른 중장기 지역 기후 및 생지화학 변화 예측 시스템 구축에 기여.



VI

[세부과제 II] 기후변화와 태풍변동성 연구

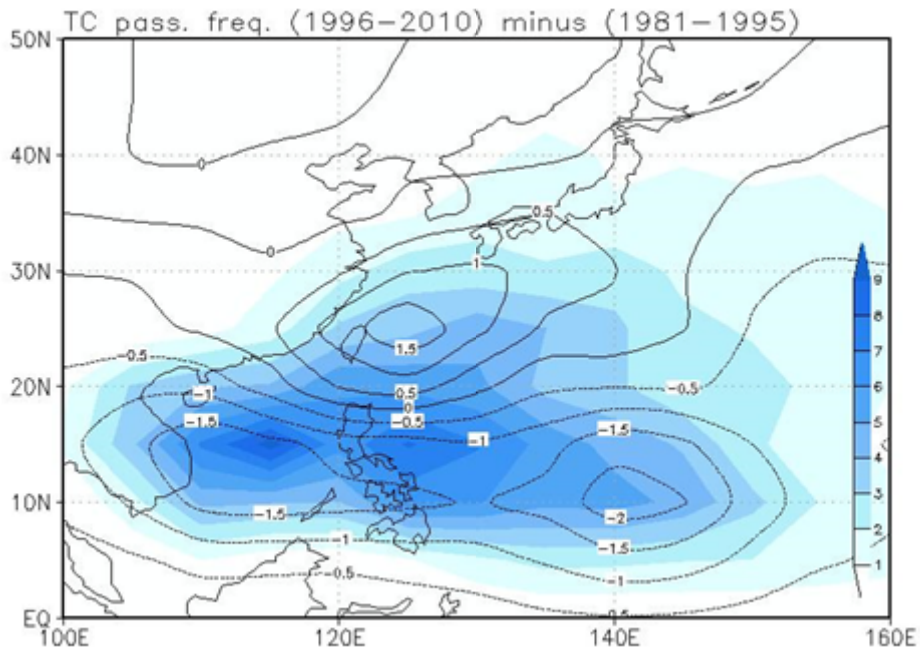
1 태풍의 증장기 변동성 및 증규모 순환 모델링 연구

1.1. 연구의 필요성

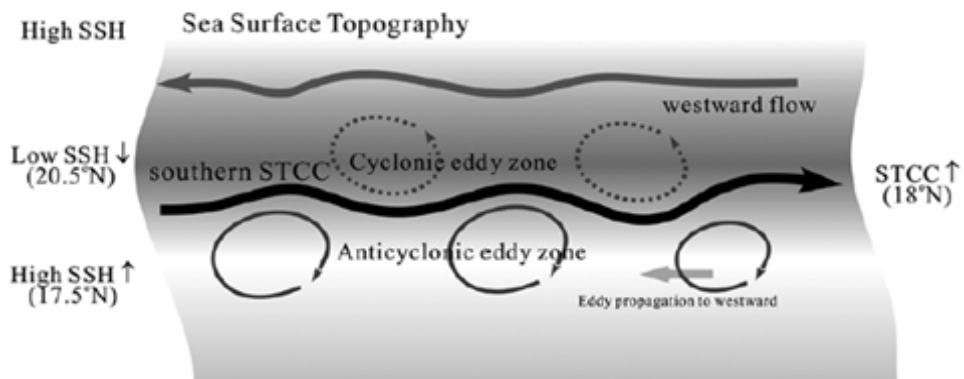
최근 서태평양과 인도해역의 온난해역이 확장되고 따뜻해지는 등 두드러진 변화가 감지되고 있으니, 이와 관련된 표층해수면 온도의 변화는 잘 보고되어 있는데 반하여 그 원인이나 해양 내부 구조 변화 조사는 제한된 해양 관측 자료 등에 의해 한계가 있다. 열대 온난역은 해양-대기 상호작용이 가장 활발하게 일어나는 지역이지만, 시간 규모에 따라 해양-대기 상호작용 과정의 상세 역학과정이 다양하게 달라지며, 단순히 해수면온도 뿐만 아니라 해양의 혼합층 변동이 해양-대기 상호작용에 매우 중요한 역할을 한다. 열대 해역의 변동은 열대 지역뿐만 아니라, 중위도 기후 예측성의 가장 중요한 근원이며, 기후예측 향상을 위해 최적의 열대 해역 예측인자를 찾는 것이 매우 중요하다. 특히, 한반도를 포함한 중위도 기후는 서태평양과 동인도양 온난역 변동에 매우 민감하게 변한다고 알려져 있지만, 그와 관련된 역학적 이해는 부족한 실정이다. 그와 관련하여 열대 북서태평양 지역에서 발생하고 우리나라에 영향을 주는 태풍의 이해는 매우 중요하다. 북서태평양의 태풍은 온난해역의 변동에 따라 그 활동이 변하고 있다(그림 6-1-1). 현재 태풍을 이해하고 모델링을 통해 예측에 활용하여 현업적으로 태풍을 어느 정도 수준으로 예측할 수 있다. 그러나 그러한 연구들은 해양이 일방적으로 대기에 영향을 주는 방식으로 연구가 되어 태풍의 진로를 예측하는 것은 상당한 수준이지만, 태풍의 강도를 예측하는 것은 아주 어려움을 겪고 있다. 이는 태풍이 발달할 때 태풍과 해양의 상호작용에 대한 이해가 부족하기 때문이다. 태풍의 예측, 특히 태풍 강도의 예측 수준을 향상시키고, 태풍에 대한 이해를 높이기 위해 해양관측을 통한 태풍과 해양의 상호작용 이해가 절실히 필요하다. 특히, 대만 동측의 20-25N 해역은 고기압성의 난수와(시계 방향으로 회전하며 상대적으로 온난한 warm eddy)가 연중 우세하게 나타나는 해역이며, 그 주변에는 저기압성의 한랭와(반시계 방향으로 회전하며 상대적으로 한랭한 cold eddy)가 발달하고 이동하는 것으로 알려져 있다. 이 난수와와 한랭와는 공간적으로 서로 상이한 열적 특성을 가지고 있기 때문에 태풍의 통과 시에 태풍이 어떤 특성의 에디 지역을 통과하는가는 태풍의 발달 과정에 매우 지대한 영향을 미치게 된다. 또한 대만 동방의 난수와/한랭와는 북태평양의 동측에서 발생하여 서측으로 전파되는 경향을 가지는 것으로 보고되며 한랭와 및 쿠로시오와의 상호작용을 통하여 다른 지역으로 이동 또는 소멸되는 것으로 보인다. 이 대양 에디들의 남북 지역에서 최근의 위성과 해양



관측을 통하여 동서 방향의 아열대반류(Subtropical Countercurrent: STCC)가 존재하는 것으로 알려지고 있다. 이 아열대반류 또한 난수와 및 한랭와의 형성과 발달 및 이동에 중요한 역할을 하는 것으로 보인다. 그림 6-1-2에서 이상과 같은 북서태평양 대만 동측 해역의 해양순환 특성을 개략적으로 살펴볼 수 있다.



[그림 6-1-1] 지난 15년간 태풍진로빈도와 과거 15년간의 차이(등고선)와 과거 태풍진로빈도의 기후값(채색역)



[그림 6-1-2] 고기압성 에디와 저기압성 에디 및 아열대 반류에 의한 북서태평양 대만 동방해역의 순환특성 모식도



1.2 국내외 연구 동향

Lin et al. (2008)은 태풍의 강도변화가 표층의 해수면온도에 의한 열적 플럭스에 의해서 좌우되는 것이 아니라 해양관측자료를 통해 해양혼합층이 태풍의 발달과 약화에 중요한 영향을 미칠 수 있다는 사실을 보고하였다(그림 6-1-3).

Emanuel, K. (1995)은 다음과 같이 열역학적 이론을 바탕으로 태풍의 강도가 해수면온도와 엔트로피에 의해 제한된다는 것을 증명하였다.

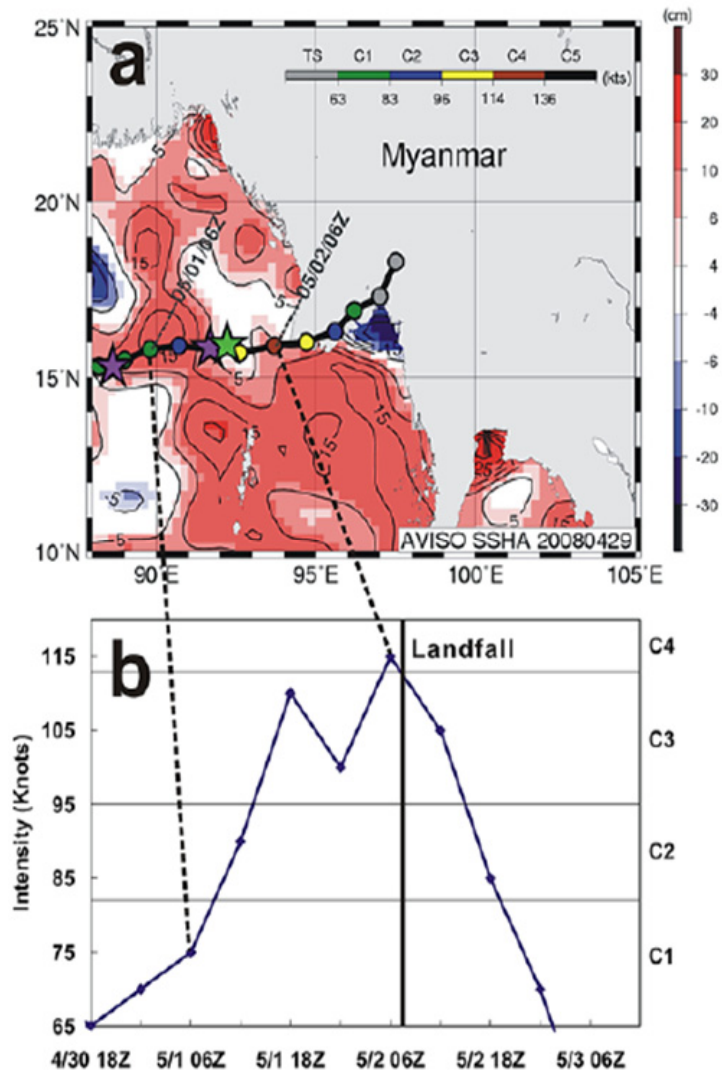
$$V_{\max}^2 = \frac{SST - T_o}{T_o} \frac{C_k}{C_D} (k^* - k)$$

여기서 SST는 해수면온도, T_o 는 외향고도에서의 온도이고, k^* 와 k 는 각각 태풍과 주변의 엔트로피이다.

Jin et al. (2014)은 열대 동태평양에서 발생하는 태풍이 엘니뇨에 의해 크게 변화될 수 있는데, Emanuel의 잠재강도를 변형하여 그 이유로 열대 동태평양의 해양혼합층변동을 제시하였다.

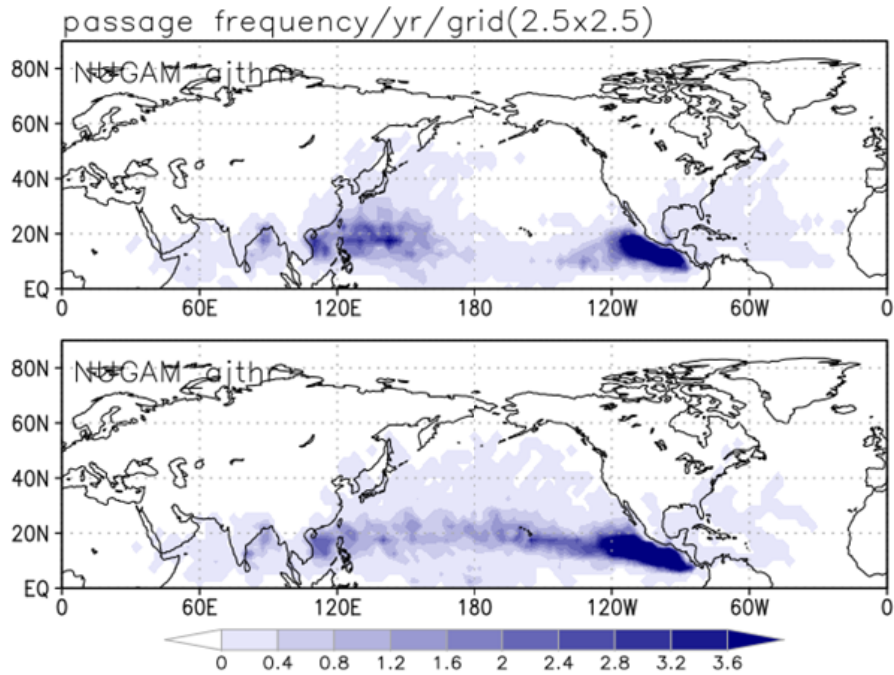
Li et al. (2010)은 고해상도 기후모형을 이용하여 태풍의 발생영역이 지구온난화환경에서 중태평양쪽으로 이동하고 이러한 특성이 해양의 열적구조 변화에 의해서 나타난다고 제시하였다(그림 5-2-4).

Qiu 등(2014, JPO)은 위성고도계 자료와 고해상도 해양순환모델 모의결과 분석을 통해 STCC에 나타나는 150km 규모의 중규모에디는 각각 5월과 4월에 에디운동에너지와 rms 와도의 계절적 최대치를 가지며 계절적 변동이 없는 약한 양의 값의 와도 skewness를 가지는데 반해, 그와 대조적으로 고해상도 모델에서는 STCC의 에디운동에너지와 rms 와도가 모두 3월에 최대값을 가지고 계절적으로 큰 값의 양의 와도 skewness를 가지는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 서태평양 아열대순환 전선역의 표층 밀도 변화에 의한 경압불안정과 STCC 시스템의 연직 쉬어에서 생기는 내부 경압불안정에 각각 기인하는 것으로 제시하였다. 또한 Chen 등(2015, JGR)은 민다나오 동방 북적도반류의 사행 위치 부근에 중규모 EKE의 강화가 특징적으로 나타나며 여름에 강하고 겨울에 약한 형태의 뚜렷한 계절적 특징을 보이는 것을 보고했는데, 대상 연구 지역에서 순압성 에디에너지의 전환율은 EKE의 변동과 유사한 계절 변화 주기를 가지며 순압성 에디에너지 전환율의 강화는 민다나오 해류와 뉴기니아 연안류의 계절 변화에 관계됨을 보였다.

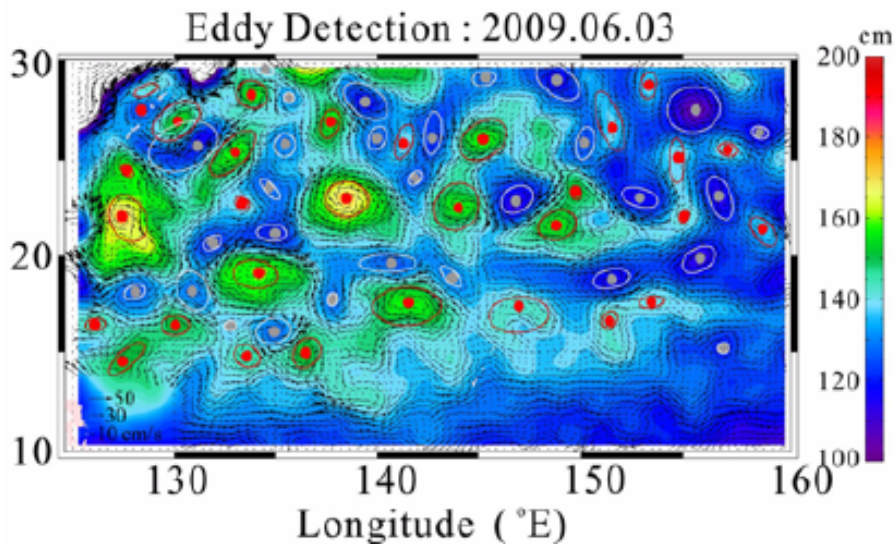


[그림 6-1-3] 해양혼합층에 따른 태풍의 발달과 약화

Qiu & Chen(2004, JPO)은 TOPEX/Poseidon 인공위성 고도계 자료의 분석을 통해 남태평양의 21-29S 지역에서도 동향하는 남반구 아열대반류(STCC)와 높은 에디운동에너지 밴드를 발견했다. 이와 같은 에디운동에너지장(eddy kinetic energy field)은 남적도반류-남적도해류 시스템의 수평 쉬어와 연관된 순압불안정에서 발생하는 것으로 나타나며 이 순압불안정성 세기의 계절적 변동이 에디운동에너지장에 계절적인 변화를 가져온다고 보고하였다.



[그림 6-1-4] 지구온난화에 따른 태풍 빈도의 변화.



[그림 6-1-5] 북서태평양 대만 동방해역에 존재하는 고기압성 에디와 저기압성 에디들의 공간적 분포와 월평균 해류(2009년 6월; 위성 관측에 의함) (Kim et al., 2014).

Kim 등(2010, OSJ) 은 18N, 135E 지역에서 ADCP 관측을 실시했으며 이를 통해 STCC의 분지를 직접 측정하였다. 남측의 STCC는 겨울부터 봄철까지 지속되는 것으로 관측되었으며, 동시에 17.5N와 20.5N 주변에 고기압성과 저기압성의 에디들이 각각 동서 방향으로 존재하였는데 이들 에디들은 동향하는 STCC를 유지시키는데 중요한 역할을 한다고 제시하였다(그림 6-1-5).



1.3. 연구 목표 및 내용

1.3.1. 연구 목표

- 열대 온난역 확장과 엘니뇨 변동에 따른 태풍의 중장기적 변동성을 이해함.
- 열대 온난역의 해양 변동성과 대기 열수지를 관측하고 해양과 태풍의 상호작용을 이해함.
- 북서태평양 태풍 핵심해역의 대양에디 구조와 기후 특성 파악.
- 북서태평양 아열대순환역 중규모에디의 형성 기작과 변동과정 규명.

1.3.2. 연구 내용

- 열대해양의 장기변동성에 따른 태풍의 중장기 변동성 분석.
- 해양혼합층 변동과 태풍강도 변화의 상관성 분석.
- 북서태평양 15-25N 해역의 고기압성 및 저기압성 에디 시공간 분포 및 구조 특성 파악.
- 고해상도 해양순환모델링을 통한 대양 에디의 기후특성 모의 분석.
 - 계절변동 및 연변동.
- 해양순환모델과 위성고도계 자료 및 현장자료 분석을 이용한 대양에디 발생과 이동과정 규명.

1.3.3. 단계별 목표 및 내용

- 1단계 연차별 목표 및 내용.

구 분		연구개발목표	연구개발내용
1 단계	1차 년도	○ 열대해양과 태풍의 중장기 변동성 이해	- 재분석자료를 이용한 열대해양의 장기 변동 및 ENSO diversity 분석 - ENSO와 PDO 위상에 따른 태풍 발생 및 빈도의 중장기 변동성 분석
		○ 북서태평양 아열대해역 고해상도 순환모델 수립	- 중규모에디가 모사 가능한 고해상도 순환모델 수립 - 북적도반류의 분기와 쿠로시오가 모사 가능한 광역의 북서태평양 모델 영역 설정 - 고해상도 순환모델의 스피업 및 상층순환 모의(5년 적분) - 상층 기후순환장 및 혼합층 분석



구 분		연구개발목표	연구개발내용
2차 년도		○ 기후모형을 이용한 태풍의 중장기 변동성 이해	- 기후모형과 태풍활동지수를 이용한 태풍활동의 중장기 변동성 분석 - 기후모형에서 나타나는 ENSO와 PDO 위상에 따른 태풍활동의 변동성 분석
		○ 북서태평양 아열대해역 상층순환 모의 분석	- 북서태평양 해역의 상층 순환에 대한 계절변동 특성 모의(수십년 기간 적분) - WOA 자료 및 위성자료에 의한 계절평균 순환 특성 파악
3차 년도		○ 기후모형을 이용한 해양혼합층과 태풍강도의 상관성 이해	- 기후모형에서 나타나는 해양혼합층 변동과 태풍활동의 상관성 분석 - 해양혼합층 분포에 따라 빠르게 발달하는 태풍의 관련성 분석 - 해양혼합층 변동 및 기작 분석
		○ 북서태평양 아열대해역의 중규모에디 발생·전파 모의 분석	- 북서태평양 순환모델의 아열대해역 중규모에디 발생 및 전파특성 모의 및 분석 - 위성고도계자료와 현장자료에 의한 에디 분포와 연직 구조 파악 - 태풍핵심해역의 중규모에디 계절변동 특성과 STCC와의 경압/순압 불안정성 관계 파악
4차 년도		○ 해양관측을 이용한 해양혼합층과 태풍강도의 상관성 이해	- 해양관측자료를 통한 해양 혼합층 분포와 태풍의 활동변동성 조사 및 분석 - 해양관측자료를 이용하여 혼합층 변동이 빠르게 발달하는 태풍에 대한 영향 분석
		○ 북서태평양 태풍핵심해역의 중규모에디 변동특성 모의 분석	- 태풍핵심해역의 중규모에디 발생과 이동과정 모의 및 기작 분석 - 바람장-에디 상호작용에 의한 상층순환 변동 모의 분석
5차 년도		○ 해양관측을 이용한 태풍강도의 모수화	- 혼합층 깊이를 이용한 태풍강도의 모수화 - 열역학적 인자를 이용한 태풍강도의 모수화 - 열역학적 인자와 대규모 역학적 인자를 이용한 태풍강도의 모수화
		○ 중규모에디의 중장기 변동성 이해	- 재분석자료를 이용한 태풍핵심해역의 중규모에디 변동성의 중장기 변동성 이해 - 순환모형을 이용한 중규모에디 변동성의 중장기 변동성 이해

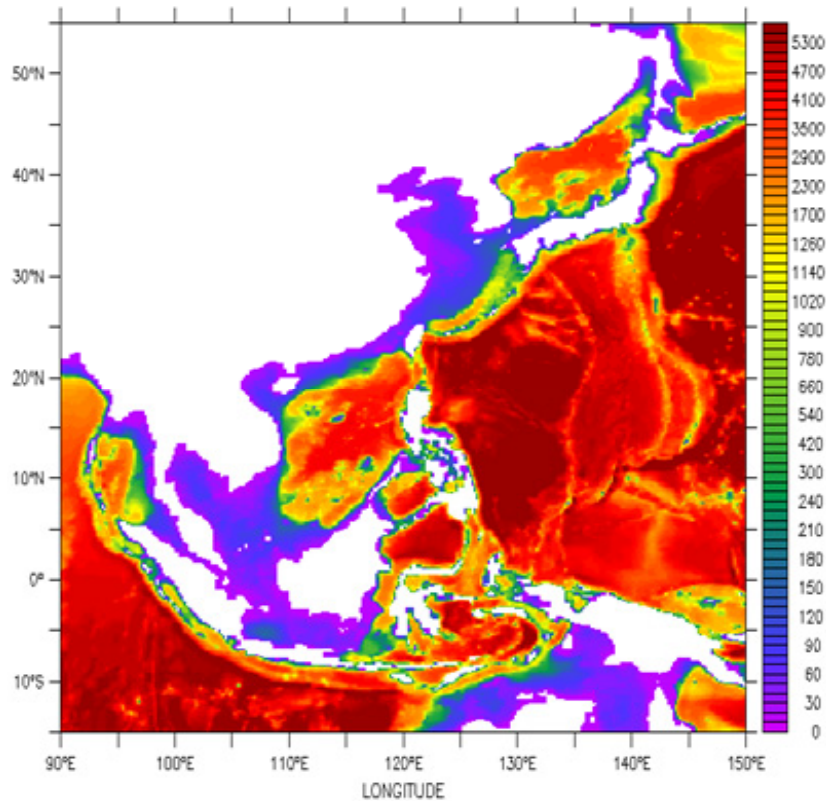


○ 2단계 중장기 목표 및 내용

구 분	연구개발목표	연구개발내용
2단계	○ 기후변화에 따른 태풍의 활동 변화 이해	- 다양한 고해상도 접합기후모형을 이용하여 지구온난화에 따른 태풍의 빈도 및 강도 변화를 분석함 - 지구온난화에 따른 태풍의 활동변화에 대한 역학을 이해함
	○ 북서태평양 태풍핵심해역 태풍-에디 상호작용에 의한 중규모에디 변동특성 모의 분석	- 북서태평양 아열대해역 해양-대기결합모델에 의한 태풍-에디 상호작용 모의 및 운동량·열속 변동 규명

1.4. 추진전략

- 해양 및 대기의 재분석자료를 확보하여 해양의 중장기변동성과 태풍활동의 중장기 변동성을 분석함.
- 저해상도 기후모형과 고해상도 기후모형 자료를 확보하여 태풍활동지수를 정의하고, 이에 대한 태풍활동성을 분석함과 동시에 태풍을 추출하여 결과를 비교함.
- 기후모형에서 확보한 태풍활동지수와 태풍빈도 및 강도를 이용하여 ENSO와 PDO 등 해양의 중장기 변동에 따른 각 지수의 관련성을 분석하고 그 역학을 파악함.
- 수온 프로파일 등 해양관측자료를 확보하여 해양혼합층 변동과 태풍발달의 상관성 조사.
- 중규모에디가 분석 가능한 북서태평양 해역 고해상도 해양순환모델의 수립;
동서방향 격자 해상도 1/5도, 남북방향 1/3 ~ 1/5도, 연직방향 60층 (그림 6-1-6).
- 해양기후자료(WOA) 분석; 대양에디 공간분포, 유속장 추산, 에디 발생의 계절변동 및 연변동 특성 파악.
- 위성고도계자료 분석; 유속장 추산, 발생, 이동 파악, 모델 모의와 비교 분석.



[그림 6-1-6] 순환모델의 대상해역과 해저지형

1.5. 기대성과

- 열대 온난역 해양변동의 역학 이해 및 태풍 이해에 대한 과학적 진보.
- 해양관측 불확실성 분석을 통한 대양관측의 필요성 제고.
- 해양관측 및 모니터링을 통한 태풍진단 및 예측기법 향상 및 그에 따른 재해 대응 능력 제고.
- 15-25N 지역의 대양에디 발생과 이동에 대한 기후적 특성 분석도 및 사실적 해류 모사도(모델 결과물).
- 태풍모델과의 연계를 위한 해양순환 기반모델 수립 및 기본 해양장 제공.
- 해양생태계 변동 모의를 위한 생태계 모델과의 접합에서 해양순환 배경장 제공.



VII

[세부과제Ⅲ] 탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍 역할 진단: 1. 화학 분야

1 태풍에 의한 해양환경 변화 연구

1.1. 연구의 필요성

태풍은 표층해양에 매우 강력한 충격을 끼쳐서, 태풍이 지나간 항적을 따라 표층수온이 상당히 감소한 것을 위성으로 관측 할 수 있다. 태풍이 지나간 항적은 태풍 중심에 국한되어 좁게 관측되는 것이 아니라, 수백 킬로미터에 이르는 넓은 폭으로 관측된다. 태풍에 의한 표층해수의 냉각은 해양-대기 기온차이를 감소시켜서 엔탈피(enthalpy) 플럭스를 감소시켜, 결국 태풍의 진로와 크기에 영향을 미친다. 태풍은 해양-대기 이산화탄소 플럭스에 도 매우 큰 영향을 미쳐서, 태풍시기에 해양-대기 이산화탄소 플럭스가 100배 가량 증가했다는 보고도 있다(Bates et al. 1998). 이들은 Sagasso Sea에서 여름에 태풍에 의해 해양-대기 이산화탄소 플럭스가 55% 증가하였다고 보고하였다. 또한, Nemoto et al. (2009)은 동중국해에서 여름에 세 개의 태풍이 지나가면서 증가한 해양-대기 이산화탄소 플럭스가 여름전체 플럭스의 60%를 차지한다고 보고하였다. 태풍은 해양-대기 이산화탄소 플럭스 이외에도 표층해수 영양염 분포에도 매우 큰 영향을 끼친다. Rumyantseva et al. (2015)은 북대서양에서 태풍시기에 표층혼합에 의해서 심층에서 표층으로 영양염 플럭스가 25배 증가하였으며, 태풍에 의해 표층으로 공급되는 영양염 플럭스는 겨울동안 표층혼합에 의해 표층으로 공급되는 영양염 플럭스의 2.5~5.0%를 차지한다고 보고하였다. 또한, Son et al. (2006)은 동해에서 태풍 메기가 지나간 후에 표층 질산염, 인산염, 규산염 농도가 각각 90%, 40%, 35%가 증가하였다고 보고하였다. 이처럼 태풍이 해양-대기 이산화탄소 플럭스와 표층해수 영양염 분포에 매우 큰 영향을 미치지 않지만, 아직까지 체계적이고 장기적인 관측은 미흡한 형편이다. 앞으로 지구온난화에 의해 태풍의 강도와 빈도가 증가할 것으로 예상되기 때문에 태풍이 해양-대기 이산화탄소 플럭스와 표층해수 영양염에 미치는 영향을 보다 정량적으로 파악하기 위해서는 태풍의 여항에 대한 체계적이고 장기적인 관측이 필요하다.

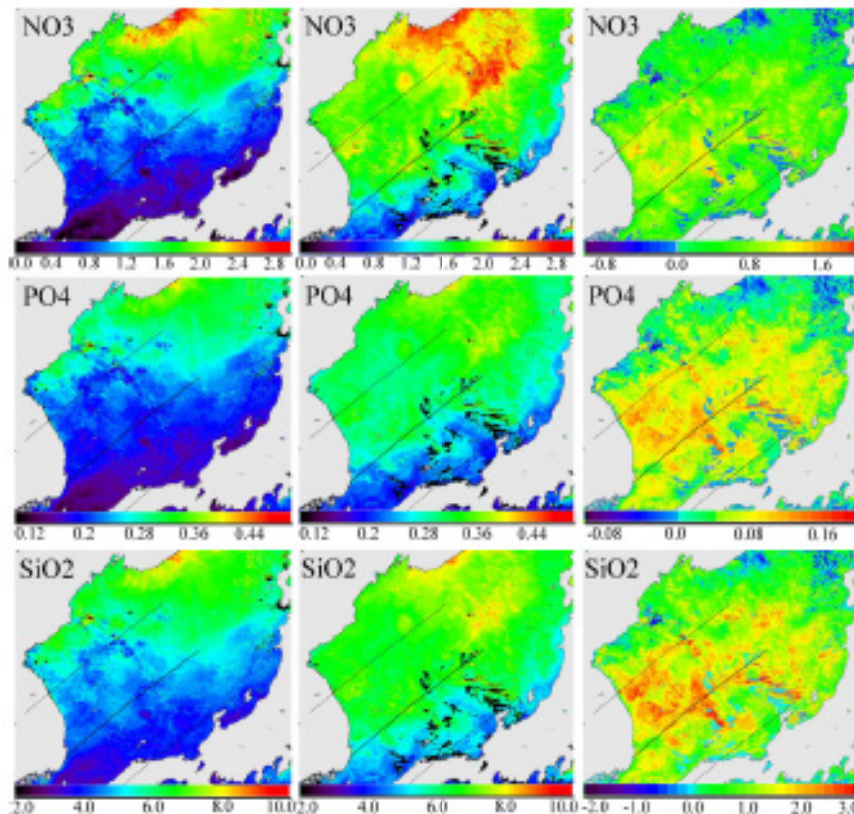
1.2. 국내외 연구 동향

1.2.1. 국내 동향

국내에서는 Son et al. (2006)은 동해에서 태풍 메기가 지나간 후에 표층 영양염과 엽록



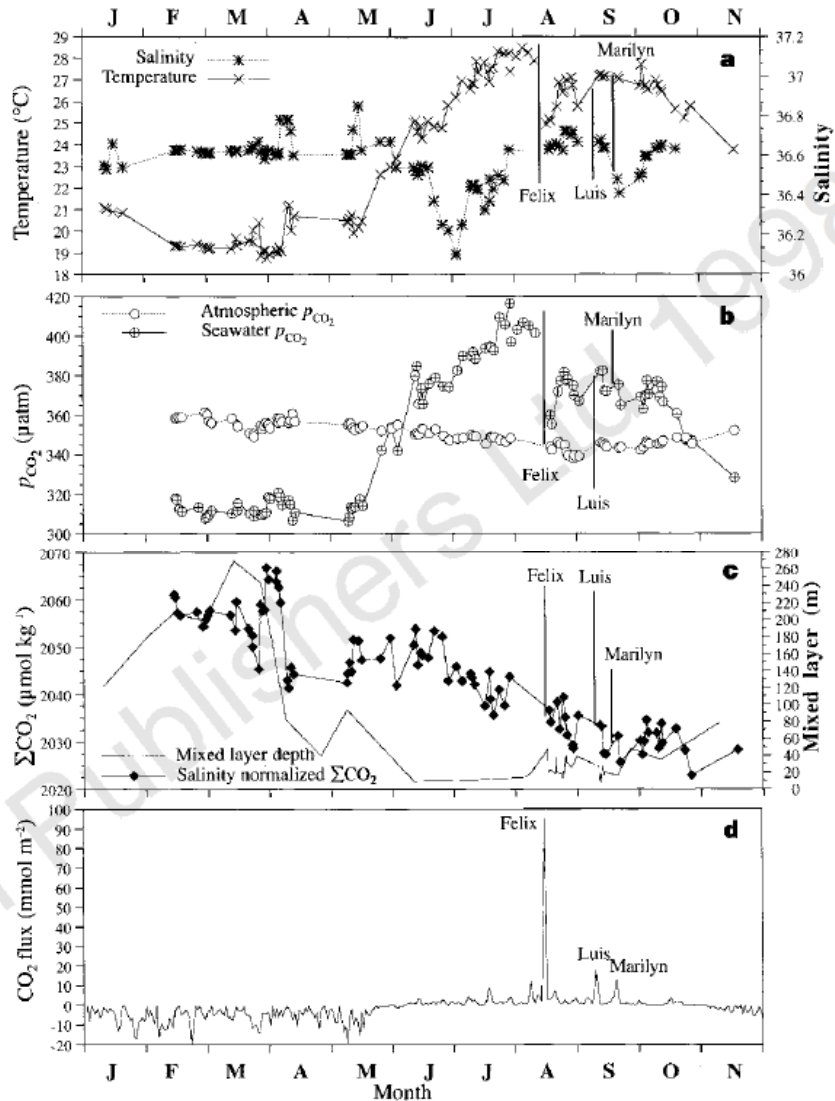
소 농도변화를 위성자료를 이용하여 관측하였다. 표층 영양염 농도 변화는 표층 수온변화로부터 수온과 영양염 관계식을 이용하여 구하였는데, 태풍 메기가 지나간 후에 표층 질산염, 인산염, 규산염 농도가 각각 90%, 40%, 35%가 증가하였다(그림 7-1-1). 엽록소 농도는 MODIS 엽록소 자료를 분석하여 구하였는데, 태풍 메기가 지나간 후에 표층 엽록소 농도가 70% 가량 증가하였다.



[그림 7-1-1] 질산염, 인산염, 규산염 농도의 태풍 전(왼쪽그림)과 후(가운데 그림), 그리고 전후차이(오른쪽 그림)

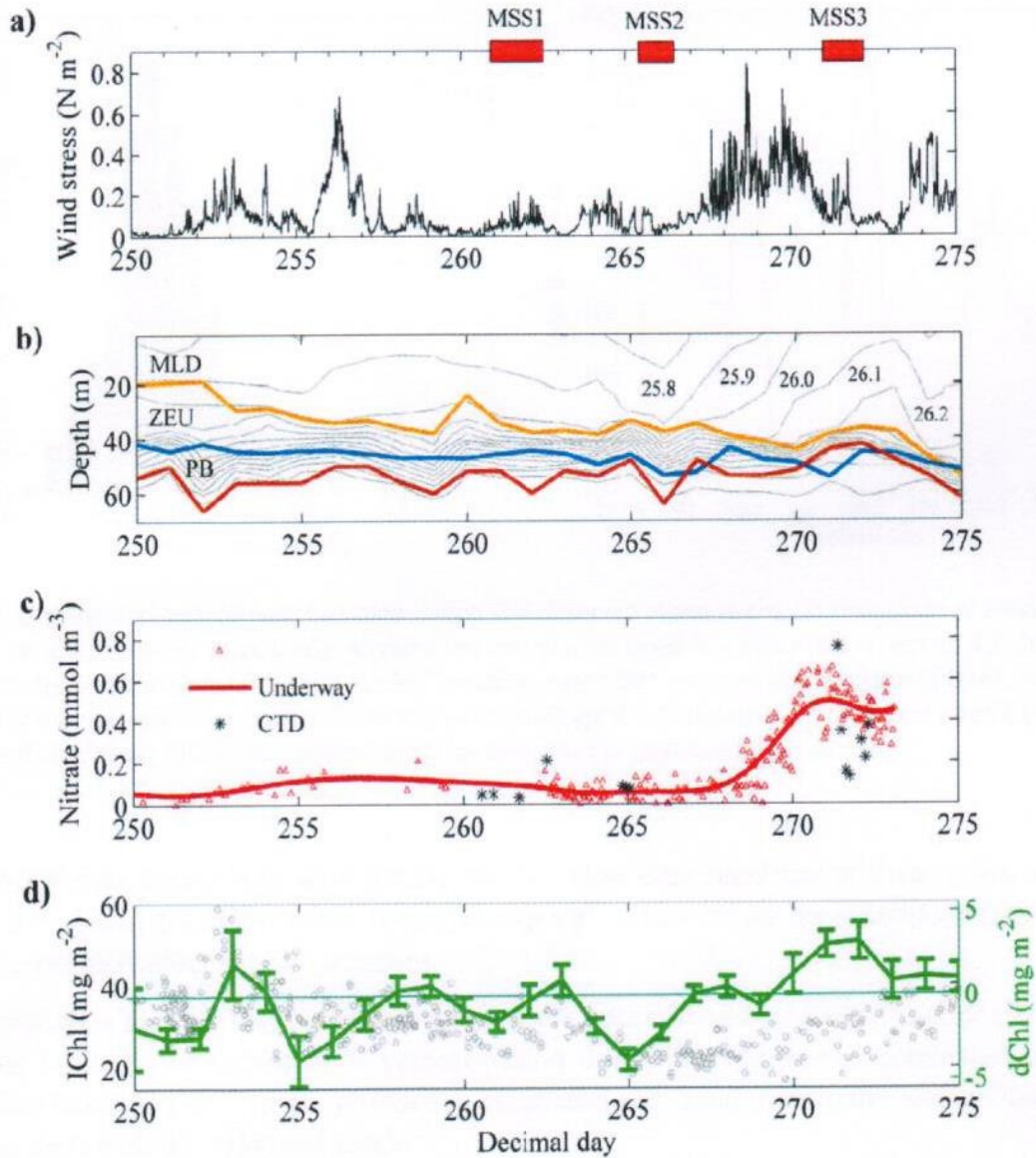
1.2.2. 국외 동향

국외에서는 Bates et al. (1998)이 Sagasso Sea에서 해양/대기 이산화탄소 분압 연속적으로 관측할 결과, 태풍시기에 해양-대기 이산화탄소 플럭스가 평상시기에 비해 100배 증가하였고 여름동안에 태풍에 의해 해양-대기 이산화탄소 플럭스가 55% 증가하였다고 보고하였다(그림 7-1-2). 또한 이들은 북반구에서 일년 동안 태풍에 의한 해양-대기 이산화탄소 플럭스의 증가량이 0.02 ~ 0.2 PgC (1015gC)이라고 제시하였다. 또한, Nemoto et al. (2009)은 동중국해에서 여름에 세 개의 태풍이 지나가면서 증가한 해양-대기 이산화탄소 플럭스가 여름전체 플럭스의 60%를 차지한다고 보고하였다.



[그림 7-1-2] Sargasso Sea에서 표층수온과 염분의 시간변화 (a), 대기과 표층해수 이산화탄소 분압의 시간변화 (b), 혼합층 깊이와 용존무기탄소 농도의 시간변화 (c), 해양-대기 이산화탄소 플럭스의 시간변화 (d)

Rumyantseva et al. (2015)은 북대서양에서 태풍 전후에 연구선과 seaglider를 이용하여 표층해수의 영양염 농도를 25일동안 관측한 결과, 태풍시기에 표층혼합이 매우 활발히 일어나서, 심층에서 표층으로 영양염 플럭스가 태풍전에 비해 25배 증가하였다(그림 7-1-3). 또한 이들은 태풍에 의해 표층으로 공급되는 영양염 플럭스는 겨울동안 표층혼합에 의해 표층으로 공급되는 영양염 플럭스의 2.5~5.0%를 차지한다고 보고하였다.



[그림 7-1-3] 북대서양에서 8월에 관측한 바람세기의 시간변화(a), 혼합층 깊이 (MLD), 표층등밀도 깊이(PB), 유광층 깊이(ZEU)의 시간변화(b), 표층 질산염 농도의 시가변화(c), 표층 엽록소 농도의 시간변화(d)



1.3. 연구 목표 및 내용

1.3.1. 연구 목표

- 태풍이 이산화탄소 플럭스와 영양염 분포에 미치는 영향에 대한 정량적 평가.

1.3.2. 연구 내용

- 태풍에 의한 해양-대기 이산화탄소 플럭스 변화에 대한 정량적 평가.
 - 태풍 전과 후에 연구선을 이용하여 연구해역에서 해양과 대기 이산화탄소 분압을 측정하여 해양-대기 이산화탄소 플럭스 계산.
 - Wave glider에 해수채집기를 장착하여 태풍 통과시 표층해수를 채수하고, 표층해수의 용존무기탄소와 alkalinity를 측정하여 이산화탄소 분압을 산출.
 - Wave glider에 pCO₂ sensor를 장착하여 태풍 통과시 표층해수 이산화탄소 분압을 측정하여 태풍기간 동안 해양-대기 이산화탄소 플럭스 계산하고, 이 값으로부터 태풍기간 동안 해양-대기 이산화탄소 플럭스 계산.
 - 태풍 전, 태풍기간, 태풍 후에 관측한 해양-대기 이산화탄소 플럭스를 비교하여 태풍에 의한 해양-대기 이산화탄소 플럭스 변화를 정량적으로 평가.
- 태풍에 의한 표층 영양염 공급에 대한 정량적 평가.
 - 태풍 전과 후에 연구선을 이용하여 연구해역에서 표층해수를 채집하고, 표층해수의 영양염 농도를 분석.
 - Wave glider에 해수채집기를 장착하여 태풍 통과시 표층해수를 채수하고, 표층해수의 영양염 농도를 분석.
 - Wave glider에 질산염 sensor를 장착하여 태풍 통과시 표층 질산염 농도를 연속적으로 관측.
 - 태풍 전, 태풍기간, 태풍 후에 관측한 표층 영양염 농도를 비교하여 태풍에 의한 표층 영양염 공급을 정량적으로 평가.



1.3.3. 단계별 목표 및 내용

○ 1단계 연차별 목표 및 내용

구 분		연구개발목표	연구개발내용
1 단계	1차 년도	○ 태풍전후 해양-대기 이산화탄소 플럭스 및 표층영양염 농도 산출	- 태풍 전과 후에 연구선을 이용하여 연구해역에서 해양과 대기 이산화탄소 분압을 측정하여 해양-대기 이산화탄소 플럭스 계산 - 태풍 전과 후에 연구선을 이용하여 연구해역에서 표층해수를 채집하고, 표층해수의 영양염 농도를 분석
	2차 년도	○ 태풍전후 해양-대기 이산화탄소 플럭스 및 표층영양염 농도 산출 ○ 태풍 통과시 해양-대기 이산화탄소 플럭스 및 표층영양염 농도 산출	- 태풍 전과 후에 연구선을 이용하여 연구해역에서 해양과 대기 이산화탄소 분압을 측정하여 해양-대기 이산화탄소 플럭스 계산 - 태풍 전과 후에 연구선을 이용하여 연구해역에서 표층해수를 채집하고, 표층해수의 영양염 농도를 분석 - Wave glider에 해수채집기를 장착하여 태풍 통과시 표층해수를 채수하고, 표층해수의 용존무기탄소와 alkalinity를 측정하여 이산화탄소 분압을 산출 - Wave glider에 해수채집기를 장착하여 태풍 통과시 표층해수를 채수하고, 표층해수의 영양염 농도를 분석
	3차 년도	○ 태풍전후 해양-대기 이산화탄소 플럭스 및 표층영양염 농도 산출 ○ 태풍 통과시 해양-대기 이산화탄소 플럭스 및 표층영양염 농도 산출	- 태풍 전과 후에 연구선을 이용하여 연구해역에서 해양과 대기 이산화탄소 분압을 측정하여 해양-대기 이산화탄소 플럭스 계산 - 태풍 전과 후에 연구선을 이용하여 연구해역에서 표층해수를 채집하고, 표층해수의 영양염 농도를 분석 - Wave glider에 해수채집기를 장착하여 태풍 통과시 표층해수를 채수하고, 표층해수의 용존무기탄소와 alkalinity를 측정하여 이산화



구 분		연구개발목표	연구개발내용
			<p>탄소 분압을 산출</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wave glider에 해수채집기를 장착하여 태풍 통과시 표층해수를 채수하고, 표층해수의 영양염 농도를 분석
	4차 년도	○ 태풍에 의한 해양-대기 이산화탄소 플럭스 변화 및 표층영양염 공급에 대한 정량적 평가	<ul style="list-style-type: none"> - Wave glider에 pCO₂ sensor를 장착하여 태풍 통과시 표층해수 이산화탄소 분압을 측정하여 태풍기간 동안 해양-대기 이산화탄소 플럭스 계산하고, 이 값으로부터 태풍기간 동안 해양-대기 이산화탄소 플럭스 계산 - Wave glider에 질산염 sensor를 장착하여 태풍 통과시 표층 질산염 농도를 연속적으로 측정 - 태풍 전, 태풍기간, 태풍 후에 관측한 해양-대기 이산화탄소 플럭스를 비교하여 태풍에 의한 해양-대기 이산화탄소 플럭스 변화 및 표층영양염 공급을 정량적으로 평가
	5차 년도	○ 태풍에 의한 해양-대기 이산화탄소 플럭스 변화 및 표층영양염 공급에 대한 정량적 평가를 전지구적 스케일로 확대	<ul style="list-style-type: none"> - 북서태평양에서 태풍 전, 태풍기간, 태풍 후에 관측한 해양-대기 이산화탄소 플럭스를 비교하여 태풍에 의한 해양-대기 이산화탄소 플럭스 변화 및 표층영양염 공급을 정량적으로 평가 - 전세계 대양에서 태풍 전, 태풍기간, 태풍 후에 관측한 해양-대기 이산화탄소 플럭스를 비교하여 태풍에 의한 해양-대기 이산화탄소 플럭스 변화 및 표층영양염 공급을 정량적으로 평가



1.4. 추진전략

- 연구선 관측과 Wave glider를 이용한 관측을 함께 수행.
- 연구선 관측은 태풍 전과 후의 상황을 관측하고 wave glider는 태풍 기간동안의 상황을 관측함.
- Wave glider에 pCO₂ sensor를 장착하여 태풍 통과시 표층해수 이산화탄소 분압을 연속적으로 측정하여 자료의 신뢰도를 높임.
- Wave glider에 질산염 sensor를 장착하여 태풍 통과시 표층 질산염 농도를 연속적으로 측정하여 자료의 신뢰도를 높임.

1.5. 기대성과

- 태풍이 지구온난화에 미치는 영향 평가 가능.
- 태풍이 해양생산성에 미치는 영향 평가 가능.
- 해양-대기-기후 모델에 입력 자료로 활용.



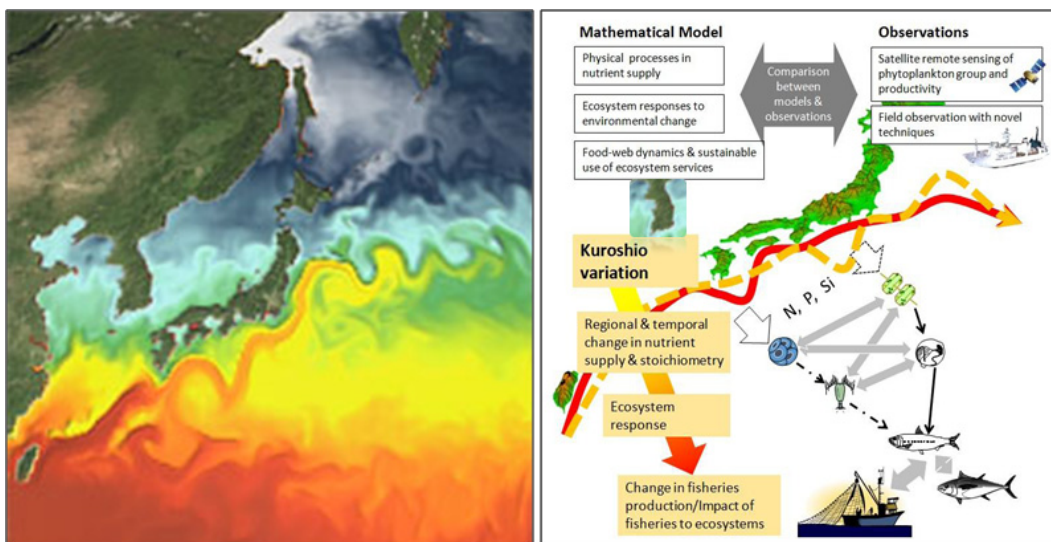
VIII

[세부과제Ⅲ] 탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍 역할 진단: 2. 생태 분야

1) 태풍이 부유 생태계 및 탄소순환에 미치는 영향 연구

1.1. 연구의 필요성

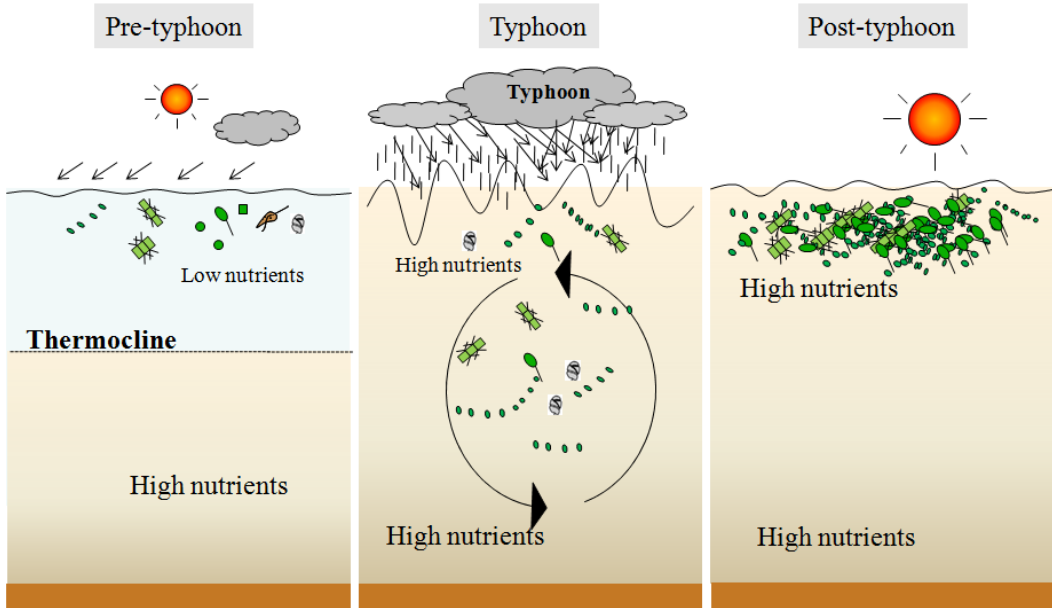
- 지난 수십 년 간 지구 온난화에 따른 열대해역 수온의 증가로 인해 북서태평양에서의 태풍 강도 및 공간적 영향 범위가 점점 커지고 있으며(Webster et al., 2005) 북서태평양에서 우세했던 태풍경로가 서쪽으로 이동하면서 동아시아 아열대 해역에서의 태풍 활동이 증가되고 있다(Wu et al., 2005).
- 북서태평양의 쿠로시오해류는 우리나라를 포함한 동아시아의 기후 및 해양환경변화에 지대한 영향을 미칠 뿐 만 아니라, 대만과 일본열도의 섬효과(Island effects)와 비섬효과(Non-island effects)에 의해 활동적인 물리적인 현상(소용돌이)을 일으킨다. 이러한 활동적인 물리현상은 태풍의 강도와 영향력을 변화 시킬 뿐 만 아니라 해양생태계 및 수산자원에 직, 간접적인 영향을 미칠 수 있다(그림 8-1-1).



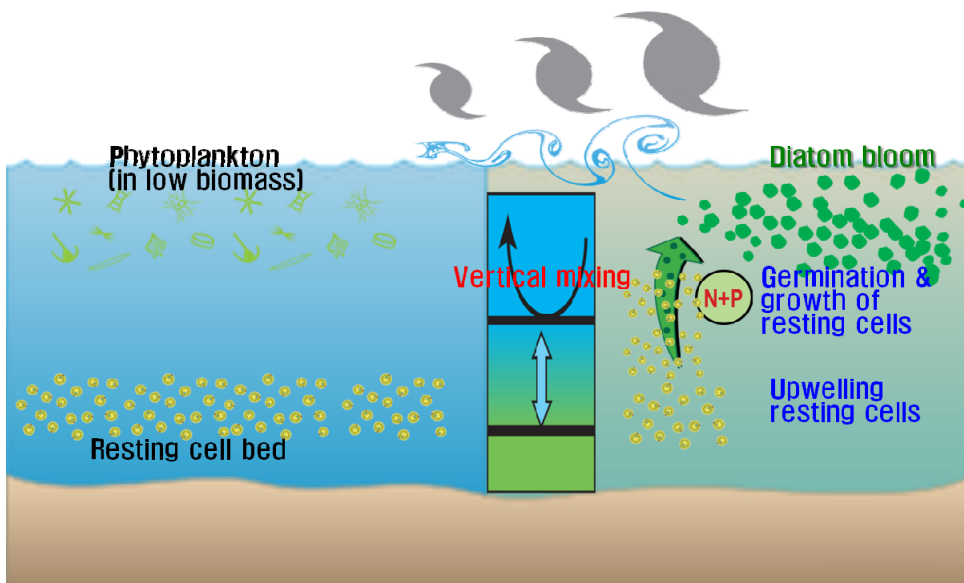
[그림 8-1-1] 쿠로시오 해류 주축 흐름의 변화에 따른 생태계 구조 변화 모식도



- 태풍은 연직 혼합과 용승을 일으켜 심층수의 풍부한 영양염을 유광층으로 공급하기에 식물플랑크톤 번성과 밀접한 관련이 있다(그림 8-1-2; Shiah et al., 2000; Chen et al., 2003; Lin et al., 2003; Babin et al., 2004; Walker et al., 2005; Li et al., 2007; Zheng & Tang, 2007; Eliot & Pattiaratchi, 2010; Rao et al., 2010).



[그림 8-1-2] 태풍 전/후의 식물플랑크톤의 증식모식도



[그림 8-1-3] 태풍 전/후 식물플랑크톤 영양세포와 휴면세포 수직분포 모식도

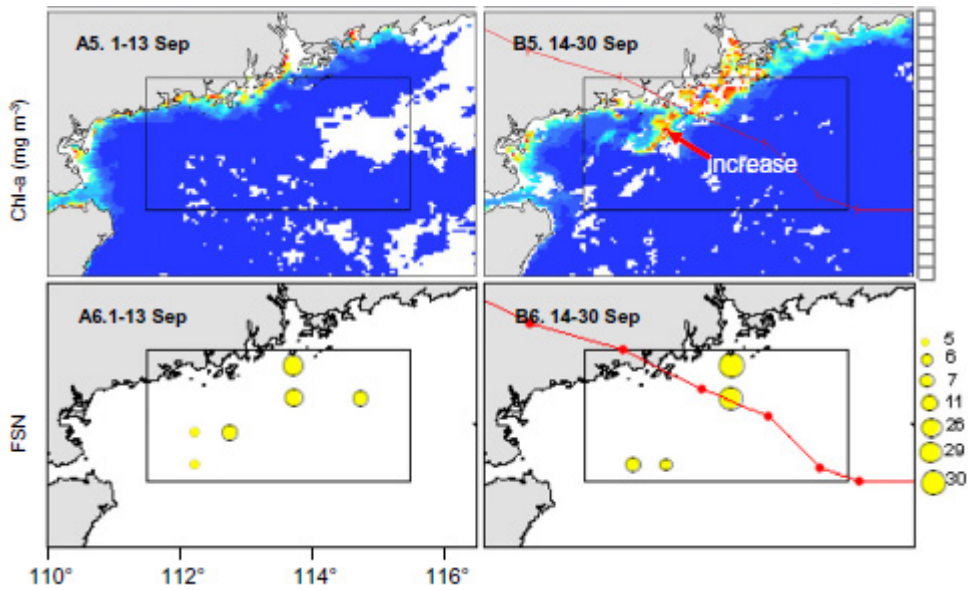


- 연안역(해저면 침강 휴면포자의 재부유에 의한 번성)과는 달리 외해에서는 식물플랑크톤의 휴면세포가 비교적 가벼운 형태로 만들어져 해저면이 아닌 일정수층에 침적되어 있다고 알려져 있다(Fryxell, 1983). 하지만 아직까지 태풍에 의한 식물플랑크톤의 번성 기작에 대해서는 정확히 밝혀진 바가 없다(그림 8-1-3).

- 태풍에 의한 빈영양 해역에서의 식물플랑크톤 번성은 부유생태계의 구조에 영향을 미칠 수 있다. 부유 생태계의 하위영양단계를 구성하는 소형/중형동물플랑크톤의 생체량 증가와 군집구성변화가 예상되며, 특히 기회종의 증가(예: cyclopooids/calanooids ratio)와 먹이조건으로 수직이동이 제한되었던 종의 표층유입 등이 예상된다. 이러한 결과로 저층으로 침강하는 유기탄소 플럭스 및 조성 차이가 나타날 수 있다.

- 해양 부유 생태계를 구성하는 생물 가운데 어류는 최상위 포식자이다. 하지만, 난자치어는 무척추동물들의 난과 유생과 함께 동물플랑크톤의 주요 먹이원이 된다. 요각류나 모악동물과 같은 동물플랑크톤은 발달단계에 따라 식성이 초식, 잡식, 육식으로 변하기 때문이다. 북대서양에서는 이러한 이유로 식물플랑크톤이 풍부해도 동물플랑크톤의 생물량이 적은 경우가 있다.(Debbi, 2002). Eddy로 인한 난자치어의 군집구조 변화(Holliday et al., 2011)는 해수의 물리적인 현상이 자치어 군집구조에 변화를 줄 것으로 예상된다. 따라서 태풍과 같은 물리적인 이벤트가 수층을 혼합시킴으로써 부유생태계를 구성하는 생물들의 군집구조 변화에 어떠한 영향을 끼치는지 연구가 필요하다.

- 태풍에 의한 저층수의 용승이 표층에 영양염 공급을 도와 해양의 표층에서 일차생산력이 증가한다. 일차생산력의 증가는 어류 자원량 증가로 연결된다(Palter, 2015; Rumyantseva et al., 2015; Ye et al., 2013; Tsuchiya et al., 2013; Yu et al., 2013; 그림 8-1-4). 주로 플랑크톤을 섭식하는 어종의 경우 그 영향이 클 것으로 생각된다. 따라서 태풍 전후 어류의 종조성을 모니터링 할 필요가 있다.



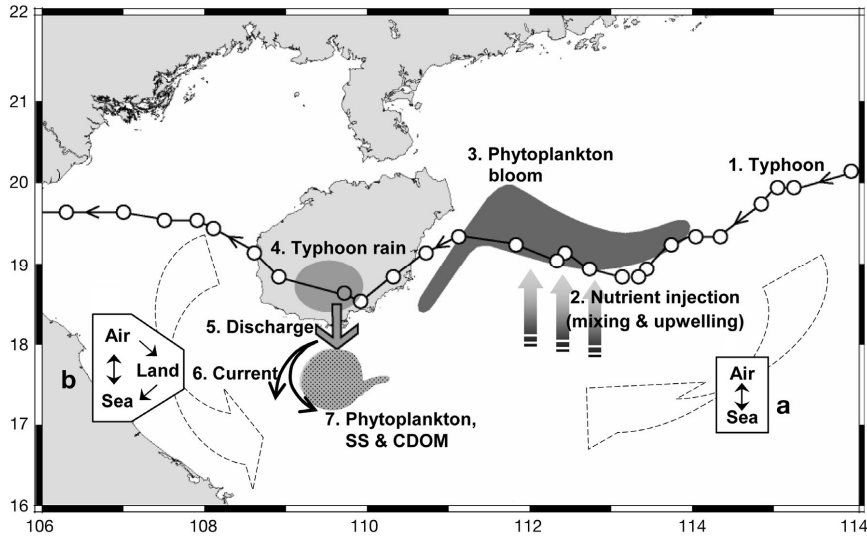
[그림 8-1-4] 태풍 전(좌)과 후(우)의 엽록소(Chl-a)와 어류 종 수 변화 (Yu et al., 2013)

- eDNA monitoring은 생물이 체외로 내놓은 DNA(손상된 조직, 부산물, gametes 등)를 분석함으로써 표본을 직접 채집하지 않아도 되는 장점이 있다(Darling and Mahon, 2011). 이 방법은 전통적인 방법(채집과 종동정)보다 여러 종을 동시에 분석할 수 있다(Minamoto et al., 2012; Thomsen et al., 2012). 동물플랑크톤에 비해 크기가 큰 어류의 경우 채집이 어렵지만 eDNA를 이용하면 직접 채집하지 않고 어류의 종조성을 모니터링 할 수 있다.
- 따라서, 이러한 태풍 강도 및 빈도의 변화로 인해 해양 생산력, 플랑크톤 군집구조, 더 나아가서는 전 지구적 탄소순환에 영향을 줄 수 있다(Chen et al. 2009; Yu et al. 2013). 하지만 아직 태풍의 해양 생태계 영향에 대한 정성, 정량적인 자료가 매우 부족하다.
- 특히 태풍은 시공간적 특수성(episodic event)과 위험성 때문에 태풍 통과 지역의 광역적 변화를 이해하기 위해서는 위성을 활용한 모니터링이 필요하고, 최근 활발히 개발, 활용되고 있는 수중글라이더와 무인자동시료 채집기 등을 이용한 종합적인 접근방법의 적용과 함께 광범위한 해양생물 분류군에 대한 고해상도 통찰이 가능한 유전자분석 기술의 적극적인 활용이 필요하다.



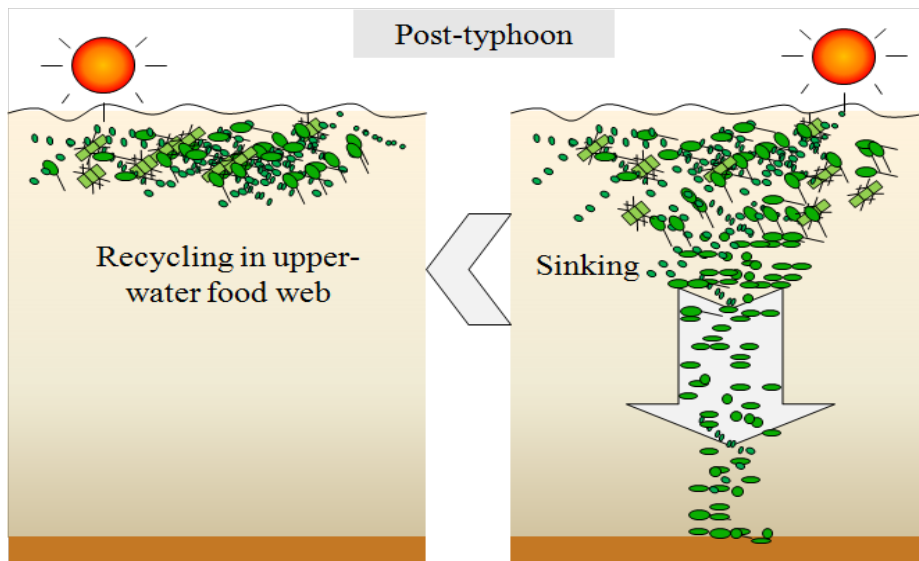
1.2 국내외 연구 동향

- 원격탐사를 활용한 연구는 태풍의 통과 전/후 자료를 비교하여 식물플랑크톤 생체량과 일차생산력이 얼마만큼 변화되었는지에 대해서 태풍이 통과하는 해역인 동중국해(Son et al., 2006; Chang et al., 2008), 남중국해(Lin et al., 2003; Zheng & Tang, 2007; Zhao et al., 2008), 남서대서양(Babin et al., 2004; Davis & Yan, 2004; Platt et al., 2005)에서 연구가 수행되었다.
- 태풍에 의한 영향으로 엽록소 농도의 변화는 약 2 ~3 주 동안 지속된다고 알려져 있다 (Babin et al., 2004; Davis & Yan, 2004; Zheng & Tang, 2007; Huang et al., 2011). 특히 Lin et al. (2003)의 연구에서는 남중국해에서 엽록소 농도는 태풍에 의해 30배까지 증가되며 연간 일차생산은 약 20 ~ 30%까지 증가된다고 보고하였다.
- 그러나 해색위성 원격탐사는 오직 구름양이 적은 날에만 가능하며 표층에서의 수온 및 엽록소 농도만을 관측하기 때문에 전 수층에서의 변화를 이해하는데 한계가 있기 때문에 최근에 현장관측과 원격탐사를 연계한 연구가 진행되고 있다(Liu et al., 2013; Li et al., 2013; Ye et al., 2013).
- 최근 연구에서는 장기 자료를 이용하여 태풍 발생과 일차생산 간의 관계를 이용하여 태풍에 의해 유도된 일차생산의 연간변동을 추정하였고(Siswanto et al., 2007; Chen et al., 2015), 해색위성 데이터와 함께 적합한 생태모형을 이용하여 태풍에 의해 생지화학적 반응이 시공간적으로 어떻게 변화하는지 연구가 이루어지고 있다(Fujii et al., 2007; Wu et al., 2007; Fujii & Yamanaka, 2008).
- 동아시아에서는 중국과 대만의 연구자에 의하여 태풍전후에 대한 해양환경 조사가 많이 수행됨. 태풍은 강한 바람으로 해양의 수층변화에 의한 영양염공급과 많은 강우에 의한 육상기원 다양한 오염물질의 해양으로 공급시켜, 식물플랑크톤의 대발생을 유발하는 것으로 알려져 있다(Zheng and Tang 2007; 그림 8-1-5).



[그림 8-1-5] 태풍에 의한 해양환경 변화(수층혼합& 육상기원 영양염류 공급)

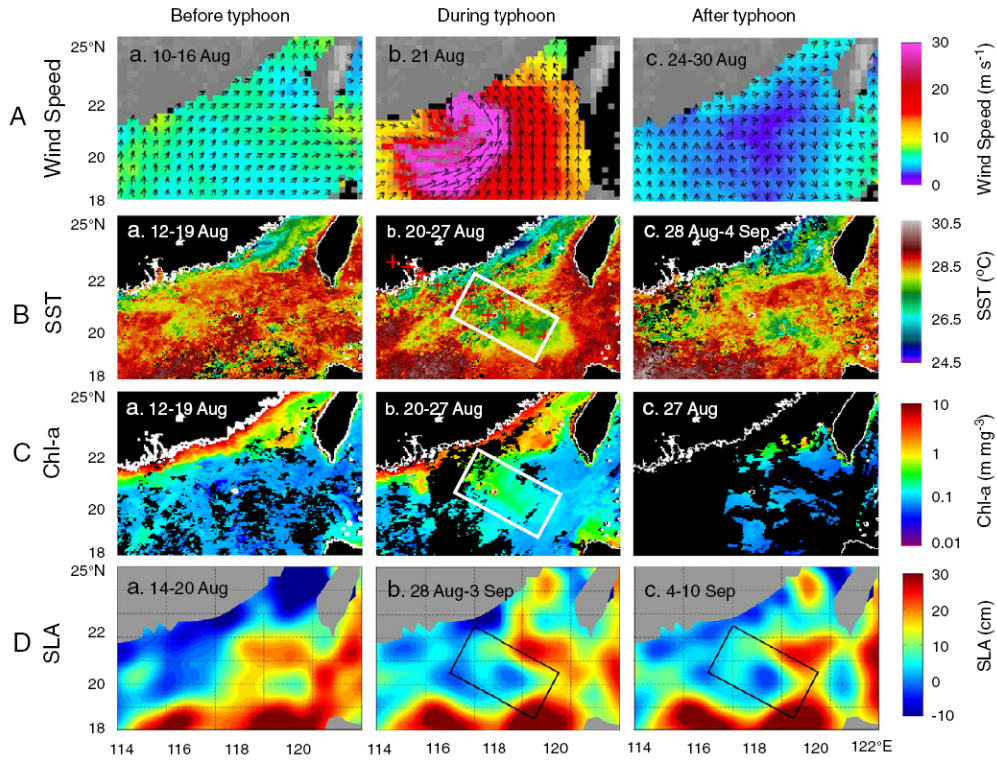
○ Chen et al.(2009)에 의하면, 대만 주변의 쿠로시오유역에서 태풍전후의 식물플랑크톤의 군집구성, 일차생산력의 변화를 추적함. 태풍 통과전에는 *Trichodesmium* spp.가 우점하였으나, 태풍통과 후 수층혼합에 의한 영양염류의 공급으로 규조류로 천이되는 양상을 규명하였고, 아울러 생성된 유기물은 표층부의 먹이망에 영향을 주는 것보다 저층으로 침강하는 경향이 강하다고 제시하였다(그림 8-1-6).



[그림 8-1-6] 태풍 후 생성된 유기물들의 상층부 사용율과 침강을 비교.



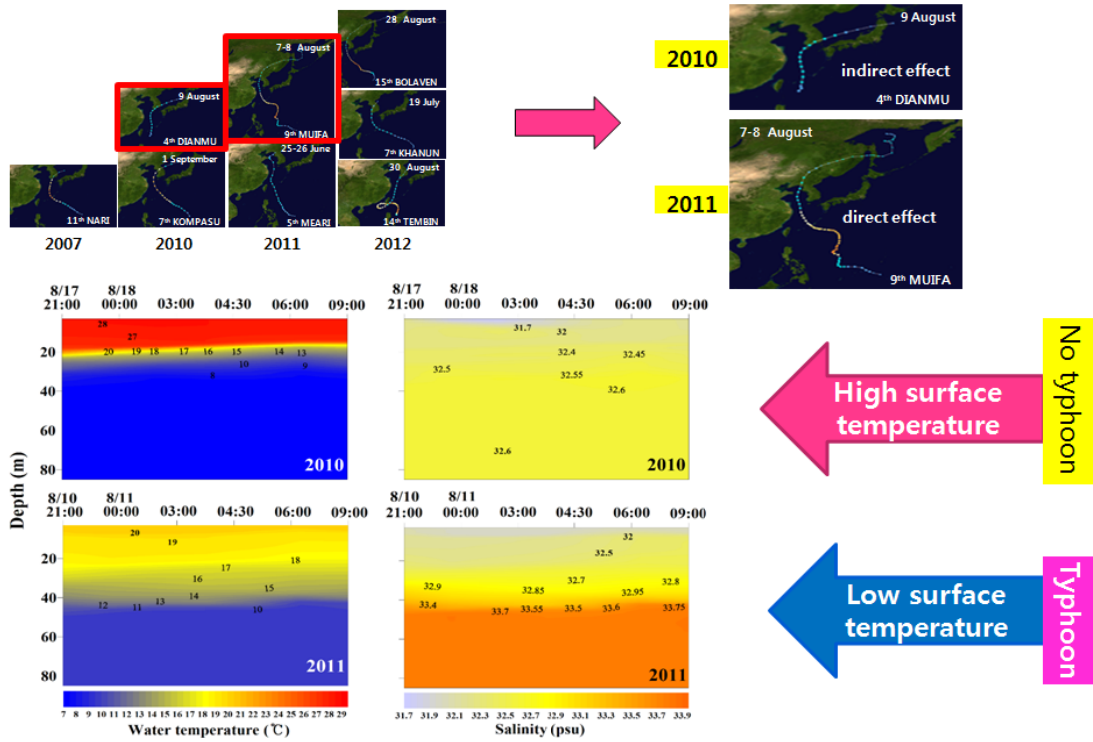
- 남중국해 해남도과 대만 중간 해역에서 태풍 “누리” 통과 후 표층 하 엽록소 최대층의 대발생이 관측되었다(Ye et al., 2013; 그림 8-1-7 참조).



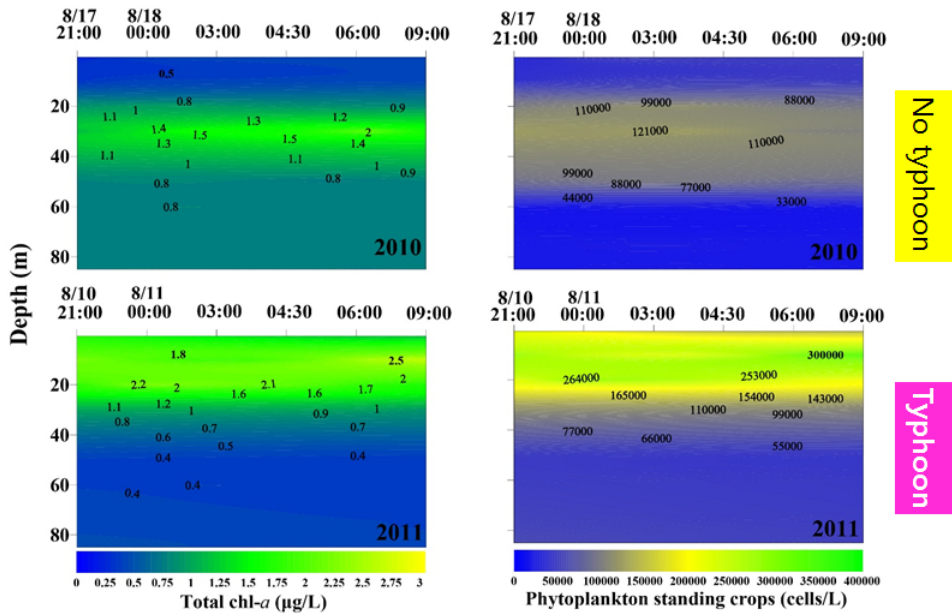
[그림 8-1-7] 남중국해에서 태풍 통과 후 수층의 광학적 및 생물학적 반응.

- 남중국해에서 두 개의 태풍(GONI, Koppu)이 통과한 이후 증가된 강수량에 의한 담수배출이 연안역에서 증가하였고, 외양역에서는 용승에 의한 영양염 증가와 엽록소 농도가 증가하였으며, 더불어 어류 개체수가 증가함이 보고됨 (Yu et al., 2013). 외양역에서는 소형어류의 수가 증가하였고, 연안역(하구역)에서는 소형 및 중형어류가 증가하였다(Yu et al., 2013).
- 황해에서 2011년에 태풍 “무이파”가 통과 직후 표층 수온은 감소하였고, 염분은 증가, 엽록소-a 농도는 증가하였다 (그림 8-1-8, 8-1-9). 그리고 동물플랑크톤(요각류 Calanus sinicus)의 수직이동양상이 변화되었다(KORDI, 2011).

Ⅷ. [세부과제 Ⅱ] 탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍 역할 진단:
2. 생태 분야



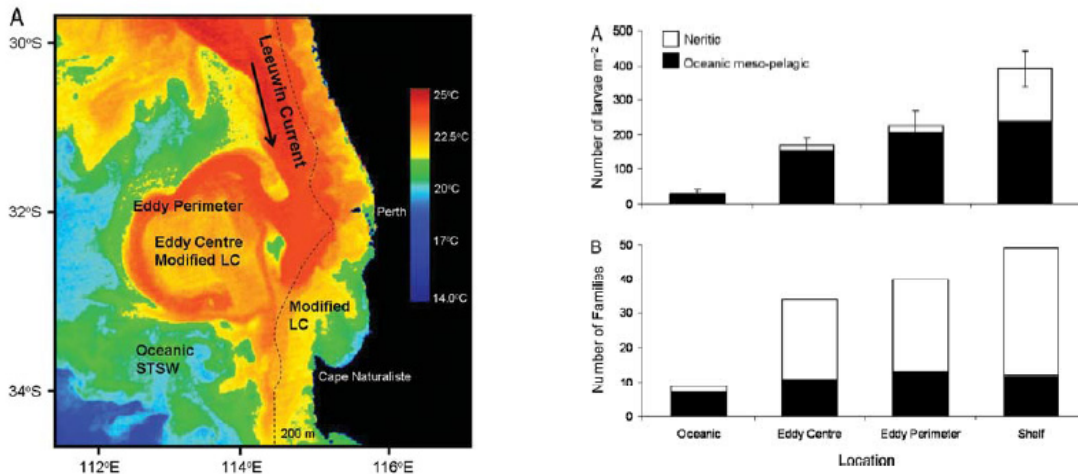
[그림 8-1-8] 하계 황해에서 태풍 유무에 따른 표층환경 특성 비교.



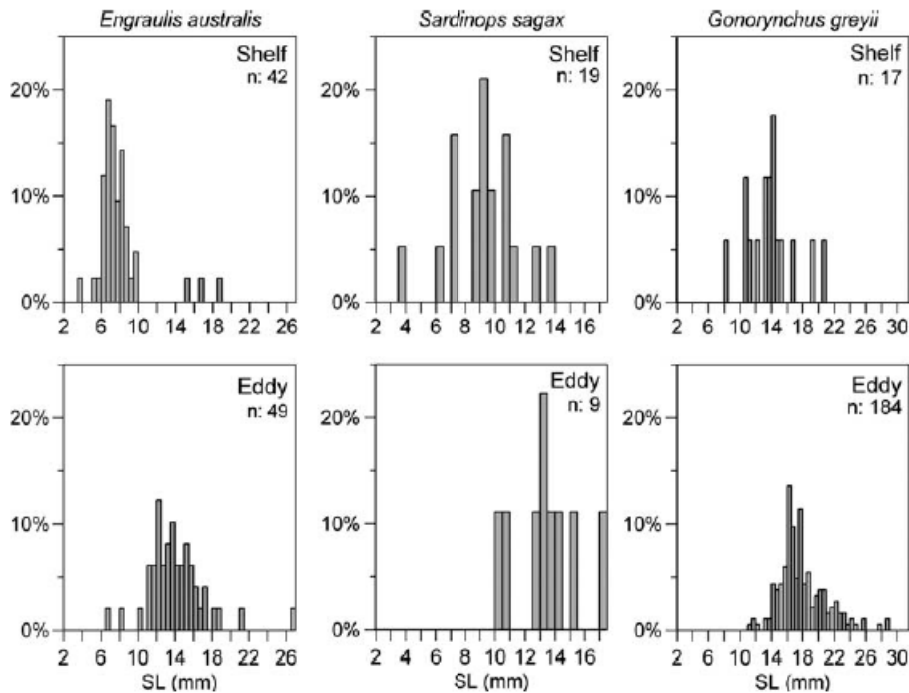
[그림 8-1-9] 태풍 유무에 따른 황해 하계 수층의 식물플랑크톤 및 엽록소 농도 변화.



- 남태평양 오스트리아 남서쪽에서 eddy내의 자치어 군집구조(assemblage)는 oceanic meso-pelagic한 것이 주를 이루고, neritic taxa가 소량 출현하였다. 연안 쪽보다 큰 사이즈의 neritic taxa가 출현하여 eddy가 shelf break에서 발생했고, 이 물리적인 현상을 따라 자치어가 이동했음을 설명하였다. 자치어의 이동에 해류의 역할이 중요함을 밝혔다 (Holliday et al., 2011; 그림 8-1-10, 8-1-11).



[그림 8-1-10] eddy 형성 지역(좌)과 해역에 따른 자치어 출현량과 분류군수(우).



[그림 8-1-11] Shelf와 eddy에서 neritic taxa의 크기별 상대 출현량 비교.



- 최근 급격하게 발달한 차세대 유전자 분석기술(NGS)을 다양한 해양생물군의 종분석에 적용한 사례가 증가하고 있다. 분자마커를 이용하여 종분석을 실시한 해양생물은 식물플랑크톤과 중형동물플랑크톤은 물론 형태적으로 종분석이 어려운 바이러스, 박테리아, 원생동물, 마이크로 동물플랑크톤, 어란, 무척추동물의 난과 유생 등 매우 다양하다. 뿐만 아니라 해수와 퇴적도에 있는 어류나 기타 해양동물의 흔적인 eDNA도 NGS 기술 검출이 가능하다(Tara Ocean Project; Pesant et al., 2015; Boga et al., 2015; de Vargas et al., 2015; Sunagawa et al., 2015; Brum et al., 2015; Lima-Mendez et al., 2015; KIOST, 2012; KIOST 미발표자료). 이와 같이 분자마커를 활용한 해양생물 종 분석의 정밀도와 정확도가 비약적으로 높아졌다.

1.3. 연구 목표 및 내용

1.3.1. 연구 목표

- 수괴 물리적 구조 특성(mesoscale eddy)에 따른 부유 생태계에 대한 태풍 영향 평가.

1.3.2. 연구 내용

- 연구해역에서 태풍 전/후의 일차생산, 식물플랑크톤 종조성 및 군집구조의 변화 관측.
 - 현장조사를 통한 광합성 매개변수, 엽록소 수직분포, 식물플랑크톤 군집조성, 광학적 자료 수집을 통해 해색위성 자료와 비교.
 - 광역 현장 관측자료와 해색위성자료를 이용하여 태풍 영향권과 비영향권 해역의 태풍 통과 전/후 일차생산과 식물플랑크톤 군집구조 변화의 시공간적 규모 평가를 위해 구름에 영향을 받지 않는 극초단파 위성으로 표층수온의 변화를 측정하고 이를 통하여 수층 혼합과 영양염의 유입량을 계산하고 일차생산의 증가(신생산량)를 추정.
- 태풍에 의한 일차생산과 식물플랑크톤 군집구조의 시공간적 변화를 재현하기 위한 모델 검증 자료 축적.
 - 현장관측을 통한 전 수층에서의 식물플랑크톤 군집조성, 엽록소 농도, 광합성 매개변수 등의 수직 분포 측정.
 - 대만 남동쪽 해역에서 태풍에 의한 일차생산과 식물플랑크톤 군집구조의 변화에 대한 생태 모형 검증 자료 제시.
 - 관측 자료로부터 도출된 여러 파라미터를 생태모형에 적용하여 태풍 영향권 해역에서 다른 해양의 물리적 조건하에서 태풍 빈도 및 강도 변동에 따른 일차생산과 식물플랑크톤 군집조성의 변화를 구현 및 검증.



- 연구해역에서 태풍 통과 전/후 식물플랑크톤의 종 천이양상 및 번성기작 규명.
 - 현장에서 태풍 통과 전 표층부의 저영양염수와 중층 및 저층의 고영양염수를 단계적으로 희석하여 자연상태 식물플랑크톤군집 성장률 산출.
 - 생물검증실험에서 시간의 경과에 따른 식물플랑크톤 종천이 양상규명.
 - 13C를 이용한 일차 생산력 산출.
 - 태풍 통과 후 혼합된 표층수를 이용한 생물검증실험 수행.
 - 태풍 전/후 수층별 식물플랑크톤 휴면포자 정량/정성 분석을 통해 식물플랑크톤 휴면세포 수직 분포 및 축적수층 탐색.
 - 태풍 통과 후 우점종 휴면포자 발아능과 발아세포 성장률 측정 및 영양세포로의 성장으로 인한 엽록소 증가율 산정.
- 태풍 통과 해역의 중규모 소용돌이(mesoscale eddy)의 물리 구조적 특성에 따른 동물플랑크톤과 난자치어 구조와 분포 특성 파악 및 태풍 통과 전/후 비교.
 - 태풍 통과 전/후에 태풍 관통 해역의 소용돌이 구조에서 동서남북 라인으로 네트와 무인자동채집기를 활용 수층별 동물플랑크톤 채집/분석.
 - 어류 eDNA, 난자치어, 동물플랑크톤 자료(CPR, 현미경)와 식물플랑크톤, 물리화학적 환경요인과의 상관성 분석.
 - 태풍 통과 이전 소용돌이 구조 관련 어류, 난자치어, 동물플랑크톤 분포특성과 태풍 통과 이후 분포특성간의 비교.
- 태풍에 따른 부유 하위생태계 구조 및 에너지 흐름 변화 진단 연구.
 - 태풍 전/후에 연구해역에서 크기별 부유입자(식물/동물플랑크톤, 난자치어 포함)를 채집하여 이들의 지방 먹이추적자와 탄소, 질소동위원소비를 분석하여 하위 생태계의 피-포식 관계 파악.
 - 현장 조건하에서의 주요 동물플랑크톤 개체군의 섭식실험을 통한 태풍 전/후의 성장률과 섭식률 정량화.
- 태풍이 탄소 순환에 미치는 영향 평가.
 - 태풍 전/후에 연구해역에서 수층 별 고해상도의 해양 유기물 침강 플럭스를 관측.
 - 태풍 전/후에 대기-해양 간 이산화탄소 교환량과 해양 내 유기물 침강 플럭스를 비교하여 태풍에 의한 물리적 충격이 탄소 순환에 미치는 영향을 정량적으로 평가.
- 물리-생지화학 결합 하위생태계 모형을 통한 태풍이 부유생태계에 미치는 영향 평가.
 - 태풍 전·후에 연구해역에서 변동하는 영양염-식물플랑크톤-동물플랑크톤-쇄설물간의



연결고리 변화 특성 규명.

1.3.3. 단계별 목표 및 내용

○ 1단계 연차별 목표 및 내용.

구 분		연구개발목표	연구개발내용
1 단계	1차 년도	<ul style="list-style-type: none"> 현장조사 및 관측자료 수집 및 분석 태풍 통과해역에서 생물검증실험을 통한 식물플랑크톤 성장률 정량적 산출 식물플랑크톤 휴면세포 추적수층 탐색 태풍 통과 해역의 난자치어와 동물플랑크톤 수평분포특성 파악 부유 하위생태계 구조 및 에너지 흐름 변화 해양 내 탄소 플럭스 변화 관측 해양 물리-생지화학 결합 하위생태계 모형 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 연구해역의 기존 관측자료 수집 및 분석 북서태평양의 위성 자료 수집 및 분석 태풍 발생 전/후 현장조사 및 시료채집 현장관측을 통한 전 수층에서의 식물플랑크톤 군집구성, 엽록소 농도, 광합성 매개변수 등의 수직 분포 측정 현장에서 태풍 통과 전 표층부의 저영양염수와 중층 및 저층의 고영양염수를 단계적으로 희석하여 자연상태 식물플랑크톤군집 성장률 산출 식물플랑크톤 휴면포자 수심별 개체수 및 종 구성 변화 파악 최대 개체수 분포층 파악 및 휴면포자 우점종 선별 태풍 통과 전/후에 태풍영향해역의 소용돌이 구조에서 네트와 무인자동채집기를 활용 수층별 난자치어와 동물플랑크톤 채집 및 정량, 정성분석 및 eDNA 분석 태풍 통과 전/후에 지방산 먹이 추적자 및 동위원소비 분석을 위한 크기별 입자유기물과 동물 플랑크톤 시료 채집 태풍영향 전/후에 수층 별 고해상도의 해양 유기물 침강 플럭스 관측 대만 남동쪽 해역에 맞는 하위생태계 모형 구축 하위생태계 모의실험용 태풍 대기강제력 및 해양경계 조건 산출
	2차 년도	<ul style="list-style-type: none"> 하위생태계 모형 검증 자료 수집 및 분석 태풍 통과해역에서 현장과 생물검증 실험을 통한 종천이 양상규명 태풍 전/후 식물플랑크톤 휴면세포의 	<ul style="list-style-type: none"> 모형 검증용 위성, 현장관측 자료 및 문헌조사를 통한 자료 수집 및 분석 현장관측과 위성데이터를 이용하여 생태모형 검증 및 이와 관련된 자료 제공 자연 식물플랑크톤 군집구성 분석 및 종천이 양상규명 생물검증실험을 통한 식물플랑크톤 군집구성 분석 및 현장자료와 비교 휴면포자 수심별 정량/정성 특성 비교 태풍 통과 후 우점종 휴면포자 발아능과



구 분	연구개발목표	연구개발내용
	<ul style="list-style-type: none"> • 수직분포 변화 탐색 • 난자치어와 동물플랑크톤 분포특성 영향요인과 핵심종 탐색 • 부유하위생태계 구조 및 에너지 흐름 변화 진단 • 탄소 순환 변화 관측 	<ul style="list-style-type: none"> - 발아세포 성장률 측정 및 영양세포로의 성장으로 인한 엽록소 증가율 산정 - 태풍 전/후 난자치어와 동물플랑크톤 수평 및 수직 분포 결정요인(생물 및 환경) 규명 - eDNA 기반의 어류 종조성 수직 분포 변화 분석 - 태풍 전/후의 분포결정 핵심종과 영향요인 규명 - 태풍 통과 전/후에 지방산 먹이 추적자 및 동위원소비 분석을 위한 크기별 입자유기물과 동물 플랑크톤 시료 채집 - Live tow를 통해 채집된 동물플랑크톤의 주요종을 선별하여 선상에서 현장섭식실험 수행 - 태풍영향 전/후에 대기-해양 이산화탄소 교환량과 수층 별 해양 유기물 침강 플럭스 비교를 통해 연구해역의 탄소 순환 변화 파악
3차 년도	<ul style="list-style-type: none"> • 해양조건에 따른 태풍 강도변화로 인한 일차 생산과 식물플랑크톤 군집구조 변화의 이해 • 태풍 전/후 1차 생산력 산출 및 차이 요인 진단 • 태풍 통과 후 휴면포자의 영양세포로 재가입 탐색 • 분포결정 핵심종의 생리학적 규명 • 부유하위생태계 구조/에너지 흐름 변화 진단 • 탄소 순환 조절인자 규명 • 과거 태풍에 대한 하위생태계 민감도 실험 	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 관측자료와 비교·분석을 통해 해양조건에 따른 태풍경로 및 강도변화의 이해 및 통계적 분석을 통한 모사할 강도 설정 - 태풍 강도 변동에 대한 모형 결과를 제시하여 대만 남동쪽 해역에서의 일차생산과 식물플랑크톤 군집구조의 변화 메커니즘 이해 - ¹³C를 이용한 1차 생산력 산출 - 태풍통과 전/후 표층수 1차 생산력과 태풍 전 표층수와 저층수 혼합배양에 의한 1차 생산력의 비교 - 수직 상승 분포한 휴면포자의 발아율 측정 - 태풍 후 환경조건과 휴면포자의 발아조건적 적합성 파악 - 태풍 전/후 동물플랑크톤 수직이동성 및 결정요인 파악 - 태풍 전/후 어류의 종조성 정량 분석(난자치어-성어) - 섭식률 실험을 통한 능동적 개체수 증가 vs. 수동적 개체수 증가 판별 (군집 섭식률 & 핵심종 섭식률) 및 식성 규명 (초식성 vs. 육식성) - 태풍 통과 전/후에 지방산 먹이 추적자 및 동위원소비 분석을 위한 크기별 입자유기물과 동물 플랑크톤 시료 채집 - Live tow를 통해 채집된 동물플랑크톤의 주요종을 선별하여 선상에서 현장섭식실험 수행 - 태풍의 규모 및 세기 별 탄소 순환의 변동성 측정 및 조절인자를 규명 - 과거 발생 태풍강제력을 하위생태계 모형에 적용함으로써, 태풍에 의한 생태계 변화 모의 및 파라미터에 따른 민감도 실험



구 분	연구개발목표	연구개발내용
4차 년도	<ul style="list-style-type: none"> • 생태계에 미치는 태풍영향력 평가 • 태풍이 생태계에 미치는 영향 모델 적용 • 태풍강도와 이동속도에 따른 식물/동물 플랑크톤/난자치어 번성 기작과 군집구조 변동 경향성 평가 • 부유하위생태계 구조/에너지 흐름 변화 진단 • 광역적인 규모(local → regional)의 탄소순환 변화 측정 	<ul style="list-style-type: none"> - 생태계모델을 적용하여, 태풍의 강도에 따른 생태계 변화추이 예측모델 제시 - 태풍 강도 및 이동속도에 따른 식물플랑크톤 성장 및 종천이 양상 정도 비교 - 태풍 강도와 이동속도에 따른 휴면포자 발아율 변동 및 엽록소 농도 증가 기여율 비교 - 태풍-해양조건 특성에 따른 동물플랑크톤/난자치어 분포 및 군집구조 경향성 분석 - 태풍 전/후의 차이 민감 지시종 판별 및 기여한 경요인 결정 - 태풍 강도 및 이동 속도에 따른 생태계 반응 및 영향도 결정 (먹이망 구조 변동 → 상위포식자로 에너지 전달효과 변동성 파악) - 태풍의 주요이동경로(남중국해-우리나라 주변해)에서 해역 별 탄소순환 변화 분석
5차 년도	<ul style="list-style-type: none"> • 일차생산성과 식물플랑크톤 군집구조의 중장기 변화추이 예측 • 태풍의 순기능에 의한 휴면포자의 생태학적 역할 재조명 • 태풍영향 미래예측을 위한 interface 구축 • 해역 별 탄소 순환과 생지화학적 물질 순환 변동성 측정 • 태풍이 한반도 주변 해역 해양생태계/탄소순환에 미치는 영향 평가를 위한 모형 개발 및 성능평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 태풍 시나리오별 환경변화에 따른 식물플랑크톤 군집 구조 및 생산성 중장기 변화 예측 및 종합적 평가자료 생산 - 위성관측 (극초단파, 해색 등)자료에서 일차생산력 증가 및 식물플랑크톤 기능성 그룹의 변동을 추산할 수 있는 모델 개발 - 태풍 전/후 휴면포자의 이동, 발아, 증식, 생식의 순환고리 특성 비교 - 휴면포자의 순환고리 활성화에 미치는 태풍의 순기능 분석 - 태풍기인 환경요인 중 생태계 영향변수 선택 - 태풍 통과 후 동물플랑크톤 개체수 변동 기작 규명[물리적 강제(수렴 혹은 축적) 및 기능적 관계(섭식, 포식-피포식 관계) 구분] - 다중규모 특성의 태풍과 동물플랑크톤 반응 지속성 파악 - 태풍 영향 예측 강화를 위한 최적 매개변수 선택 및 자료동화 제공 - 태풍 강도 및 이동속도에 따른 1차 생산 생태모델 적용 - 태풍을 포함한 외압(강수, 용승, 수온상승, 산성화 등)의 해양생태계 종합적 영향 평가



구 분	연구개발목표	연구개발내용
		<ul style="list-style-type: none"> - 해역 별 탄소 순환의 변화가 해양 내 생지화학적 물질순환 및 화학 조성비에 미치는 영향 평가/대기-해양 간 물질순환 이해 - 관측 자료에 근거한 생지화학 모델의 성능평가 및 개선 - 태풍전후 생물종수 및 생물량 예측 모형 - 태풍 강화 해역에서 동중국해 및 우리나라 근해로 확장한 해양 생태계 모형을 개발하고, 태풍 경로상의 해양 생태계 변화 고찰

○ 2단계 중장기 목표 및 내용

구 분	연구개발목표	연구개발내용
2단계	<ul style="list-style-type: none"> • 한반도 관통 태풍의 특성(규모 이동속도, 시기, 빈도)에 따른 한반도 주변해역의 생물·물리·화학적 변동 및 영향 정량화 • 태풍 빈도와 강도 변화에 따른 부유-저서 생태계 구조 및 기능 및 자원 생산력 변동 평가 • 태풍-해양-생태계 결합 모형 개발 및 적용 • 근해역(한반도 주변해)과 외해역(대만 남동해역)에서의 해양생태계에 대한 태풍 영향(탄소순환, 생태계 구조 등) 정량적 비교 	<ul style="list-style-type: none"> - 한반도 주변해의 태풍관련 기존자료 수집 및 분석으로 연구해역 선정 - 태풍 발생 전/후 현장관측을 지속·정기적으로 실시 및 자료확보 - 태풍 규모 및 이동경로, 속도, 시기(계절)에 따른 한반도 주변해의 생물·물리·화학적 특성 변동과 영향 비교 - 한반도 주변해 통과 태풍의 질과 양(횟수, 강도 등)이 한반도 주변해역의 해양환경과 수산자원의 장기적 변동 특성에 미치는 영향 정도 규명 - 태풍과 생태계를 연결하는 생태계 모델(부유-저서 생태계 결합 모델) 수립을 위한 적정변수 선택과 개발 그리고 비교개선 - 태풍 영향에 의한 생태계 변동과 기후변화와의 상관성 이해 - 많은 경우와 물리적인 수층 교란을 동반한 태풍이 우리나라 주변 해의 탄소 순환에 미치는 영향을 평가 - 태풍-해양-파랑-생태계 결합 모형 개발 및 태풍에 의한 생태계 및 수산자원 변동성 규명 - 1단계(외해역) 연구결과와 종합 비교/평가



1.4. 추진전략

- 기존 문헌과 자료를 비교분석하여 연구해역에서 태풍통과 빈번도 작성.
- 연구해역(태풍통과 빈번해역)에서 태풍 통과 전/후 현장조사를 통해 광합성 매개변수, 엽록소 수직분포, 광학적 자료와 원격탐사 자료인 표층의 엽록소 농도, 일조량, 흡광계수, 표층수온 등의 자료 수집.
- 현장생물검증실험을 수행할 수 있는 배양 수조제작 구매.
- 생물검증 실험에 의한 식물플랑크톤 성장률 및 종 천이 규명.
- 태풍의 생태계 영향 특성을 예측하기 위한 생태계 모델링의 수립을 위한 변수선택과 개선.
- 태풍의 영향에 따른 1차 생산력 및 부유하위생태계 먹이망 구조와 에너지 흐름의 생태계 모델 제시.
- 식물플랑크톤 휴면포자 정량/정성 분석을 위한 기존 영양세포 작용 방법론 응용.
- 식물플랑크톤 영양세포 분야와 엽록소 자료 등 연계하여 자료 연계 해석.
- 태풍과 해양 물리적 구조특성을 고려한 동물플랑크톤 채집과 영향요인 결정자 사전 고려.
- 연구해역의 소용돌이 물리구조 특성에 따른 동물플랑크톤 태풍 반응 시나리오 점검 및 사전구성.
- 난자치어와 동물플랑크톤의 현장네트채집과 무인자동채집기 채집와 무인수중글라이드에 부착된 CPR과 네트 분석결과 사이의 비교 분석 후 각 방법 간의 장단점 비교 및 태풍영향 연구 방법론 제시.
- 태풍에 의한 부유하위생태계 구조 및 기능 변동 추적을 위한 전통적 기법(수조 섭식실험)과 생화학적 기법(지방산, 스테롤, 탄소·질소동위원소비)의 적용.
- 태풍영향 전과 후에 수층 별 고해상도의 해양 유기물 침강 플럭스와 대기-해양 간 이산화탄소 교환량을 관측하여 태풍의 물리적 충격이 탄소 순환에 미치는 영향을 정량적으로 평가.
- Bio-Argo 자료 및 현장관측자료와의 비교를 통한 물리-생지화학 결합 하위생태계 모형 개선.



1.5. 기대성과

- 태풍 발생 변동에 따른 일차생산 변화 재현을 위한 모델 개발 및 과학적 검증 자료 제시.
- 관측, 해색위성, 모형결과자료를 통하여 태풍 빈빈도 변동에 따른 일차생산과 식물 플랑크톤 군집구조 변화의 메커니즘 이해.
- 태풍강도에 따른 영양염 공급의 차이 및 1차 생산력의 반응 기작 이해.
- 태풍에 의한 식물플랑크톤의 증식 기작 이해 및 자료 축적.
- 기후변화에 따른 태풍 강도, 빈도 변화 시나리오를 적용한 일차생산력 중장기 변동성 예측 및 수산자원의 변동성 이해 증진에 활용.
- 세계 최초로 태풍에 의한 휴면포자 seedling 연구결과 도출.
- 태풍과 같은 기상변동에 따른 해양의 물리적 용승, 화학적 조건과 생물학적 반응을 연계한 외해 연구모델 정립.
- 태풍과 해양 물리적 구조(소용돌이) 특성사이의 상호작용에 따른 난자치어와 동물플랑크톤의 정성/정량적 분포 및 군집구조 변동 연구는 문제해결을 위한 미래지향적이며 선도적인 다학제 연구임.
- 기후변화에 민감한 한반도 주변해는 기후변화로 인한 해양환경변화(수온상승, 산성화)와 태풍과 같은 비예측적인 환경충격에 취약하기에, 본 연구결과는 향후 한반도 주변해에서의 이런 스트레스요인들의 종합적인 분석을 위한 방향 설정에 중요한 정보를 제공할 것임.
- 해양생태계에서의 태풍의 역할을 정량화 할 수 있는 기회를 제공하며, 본 연구결과는 전지구적 탄소순환과 해양 생산성 제고를 위해 직접적 증거로 활용될 수 있음. 향후 IPCC 보고서 등 에도 적극 인용될 수 있는 정보 제공.



IX

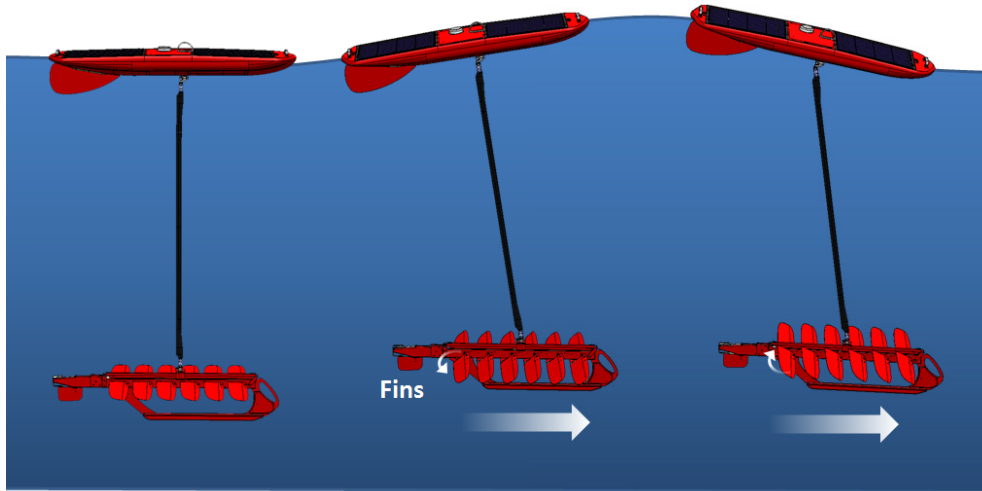
[세부과제M] 장비 개발/개선 분야

1 해양관측 로봇 탑재용 장비 개발

1.1. Argo 연구의 필요성

태풍은 그 동력원을 해양에서 얻는다. 따라서 해양이 태풍에 미치는 영향은 매우 크다고 하겠다. 동시에 태풍이 해수 표면을 지나면서 해양 표층을 교란시킴으로 인해 해양 내의 많은 특성들이 변화하게 된다. 그러나 태풍에 관한 연구는 대부분 모델에 의한 연구이거나 태풍이 통과한 후 수일이 지난 상태에서 선박을 이용한 관측을 통해 이루어져왔다. 선박을 이용한 관측의 경우에는 태풍의 특성 상 태풍 통과 시에 그 관측이 불가능하다. 이를 극복하기 위하여 예상되는 태풍의 진로 상에 해양관측 장비를 계류하여 관측을 시도하였다. 그러나 이러한 시도는 예상된 태풍의 경로가 빗나가거나 혹은 예상 경로는 적중했다 하더라도 태풍 통과 시의 강력한 바람과 파고에 의해 계류된 장비가 파손되어 적절한 자료를 얻지 못하는 경우가 대다수였다. 따라서 실시간 관제 가능하고 악천후에서도 관측이 가능한 자율 무인 관측의 필요성이 대두되었다.

현재 세계적으로 운용 가능한 무인 자율 관측 장비는 크게 위성추적플게, AUV (Autonomous, Underwater Vehicle), 수중글라이더, Wave Glider로 나눌 수 있다. 이 중 해양관측 로봇으로 일컬을 수 있는, 즉 원하는 항적에 따라 능동적으로 이동할 수 있는 장비는 AUV, 수중글라이더, Wave Glider이다. 그러나 AUV와 수중글라이더는 미리 정해 놓은 항적을 따라 이동하여 실시간으로 관제가 불가능하다. 미국 Liquid Robotics사에서 개발한 차세대 해양관측 로봇인 Wave Glider는 표층 파도의 힘을 이용하여 추진력을 얻기 때문에(그림 8-1-1) 무동력으로 장거리를 이동하면서 장기간(1년 14,000km) 해양을 탐사할 수 있을 뿐 아니라 태풍 중앙부와 같이 파고가 매우 높은 극한 환경에서도 대기 및 해양 관측을 수행할 수 있다. Wave Glider는 인공위성을 통한 양방향 통신으로 실시간 관제를 통한 위치 제어가 가능하여 태풍 진로 상에 위치시킬 수 있다는 장점이 있는 반면에 관측 범위가 표층에 한정된다는 단점이 있다. 뿐만 아니라 현재 Wave Glider에 장착하여 관측할 수 있는 장비는 카메라, AWS, acoustic modem, ADCP, CTD, Video camera, hydrophone, wave sensor, Fluorometer, DO sensor 등이며 pCO₂ sensor등도 시도되고 있다. 그러나 해수 또는 플랑크톤 등 시료의 채취는 아직까지 개발되지 않았다. 태풍관측에 적합한 해양관측 로봇인 Wave Glider에 이러한 단점을 보완한다면 매우 강력한 관측의 도구가 될 것이다.

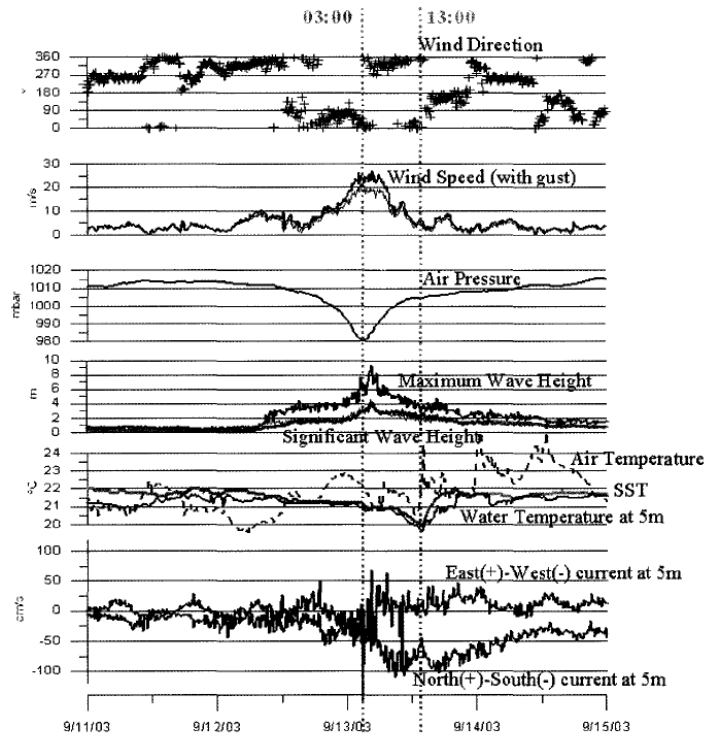


[그림 9-1-1] Wave Glider의 추진 원리

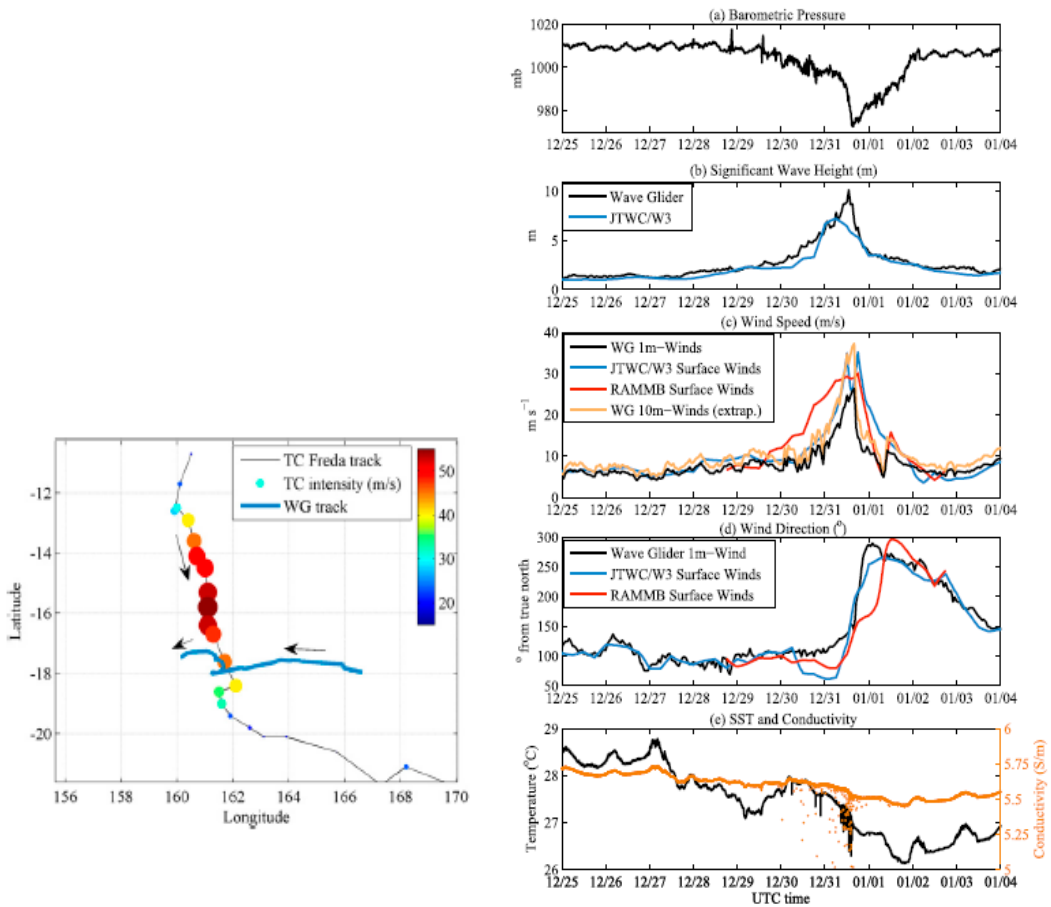
1.2 국내외 연구 동향

국내의 경우 무인 자율 해양 관측 로봇을 이용한 해양의 관측은 전무하며, 특히 관측을 통한 태풍 연구도 거의 찾아보기 힘들다. 다만 2003년 이미 설치되어 있던 실시간 해양관측 부이 인근으로 태풍 매미가 통과함에 따라 관측된 풍향, 풍속, 기압, 파고, 수온, 해류 등의 해양 자료가 보고된 바 있다 (남 등, 2004; 그림 8-1-2).

국외에서는 하와이에서부터 호주 시드니까지 Wave Glider를 이용한 태평양 횡단 관측을 수행하던 중 남태평양에서 인근을 통과하는 태풍 Freda를 향하여 방향을 돌려 태풍을 관통하는 관측을 수행하였다 (Lenain and Melville, 2014; 그림 8-1-3). 이 관측은 본래 태풍 관측을 위해 계획된 것이 아니었음에도 불구하고 실시간 관제가 가능한 덕분에 경로를 일부 수정하여 태풍을 통과하면서 관측할 수 있었다. 이를 통하여 Wave Glider가 30 m/sec 이상의 강풍과 10 m 이상의 파고를 동반한 태풍의 중심부에서도 아무런 문제없이 관측을 수행할 수 있음을 입증하였다. 그러나 이 연구에서는 기상관측, 표층의 수온 및 염분 관측에 국한되어 보다 종합적인 관측 자료를 제시하지 못하였다.



[그림 9-1-2] 2003년 실시간 해양관측 부이로 관측된 태풍 매미 통과 전·후의 관측 자료 (남 등, 2004)



[그림 9-1-3] 2012년 12월 Wave Glider를 이용한 태풍 Freda 통과 경로 (좌) 및 관측 결과(우)

1.3. 연구 목표 및 내용

1.3.1. 연구 목표

- 차세대 해양관측 로봇인 Wave Glider 장착용 장비 개발

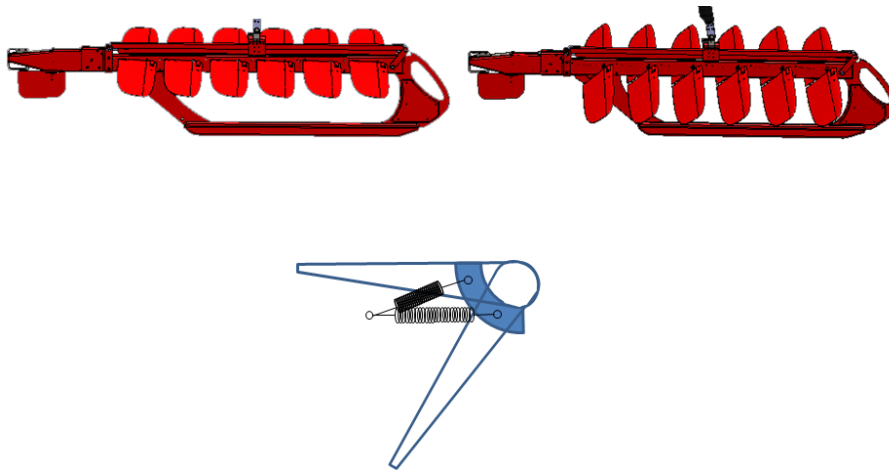
1.3.2. 연구 내용

- Wave Glider 장착용 원치 개발
 - 저전력 소모, 소형 원치 개발
 - Wave Glider의 항법 시스템과 연동하여 작동하는 Firmware 개발
- Wave Glider 장착용 펌프 개발
 - Wave Glider 작동 기작과 추진 fin의 동작에 관한 분석을 통하여 힘의 분포와 용수철



의 제원 등에 대한 정량적 분석

- Wave Glider 작동 기작의 정량적인 분석을 바탕으로 Wave Glider 추진 fin의 운동 시에 작동하는 용수철의 힘을 이용한 펌프 설계
- 적절한 압력을 발생 시킬 수 있도록 제원을 결정
- 펌프의 형태는 피스톤 운동 방식을 채택해야할 것으로 판단되므로 피스톤의 운동 방향에 따른 역류 방지 시스템 설계 및 적용
- Wave Glider의 속도 등에 따라 자율적으로 펌프가 운용될 수 있도록 하는 펌프 제어 소프트웨어 개발
- 조파 수조내 및 실험실에서 시운전



[그림 9-1-4] 웨이브글라이더 추진 fin의 운동 모습

○ Wave Glider 장착용 해수 채수기 개발

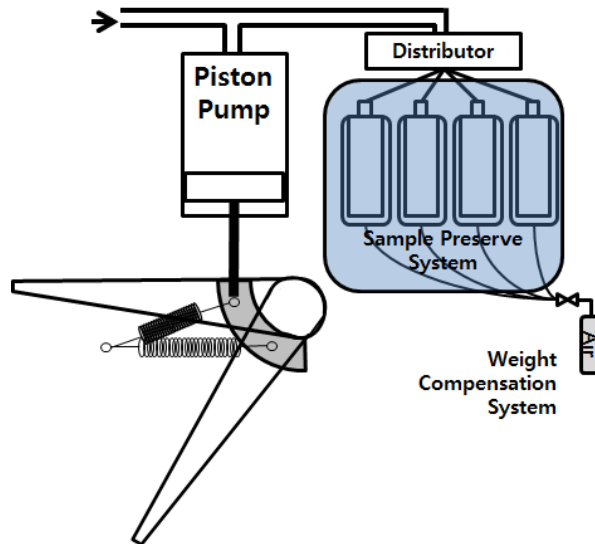
- 해수시료 채취용 분배기 개발
채취된 해수 시료를 용도에 맞게 적절한 양을 배분할 수 있는 장치 설계
시료병의 종류 및 상태에 따른 다양한 형태로 개발
- 채수시료 보존 장치 개발
시료의 목적에 따른 시료 보존 장치 개발: 동결, 보존제 삽입 등
시료병의 용량 및 채취 목적에 따라 전력소모를 최소화 할 수 있도록 다양한 방법 적용
- 채수시료 무게 보상 장치 개발
Wave Glider의 한정된 payload로 인해 시료채취 후 무게를 보상하는 방안 강구
압축 공기 등을 이용하여 추가된 무게를 보상할 수 있는 부력 생성 장치 개발



- 해수 채수기 개발

Wave Glider 장착 무동력 펌프와 분배기, 시료보존 장치, 무게보상장치를 결합한 해수채수기 개발

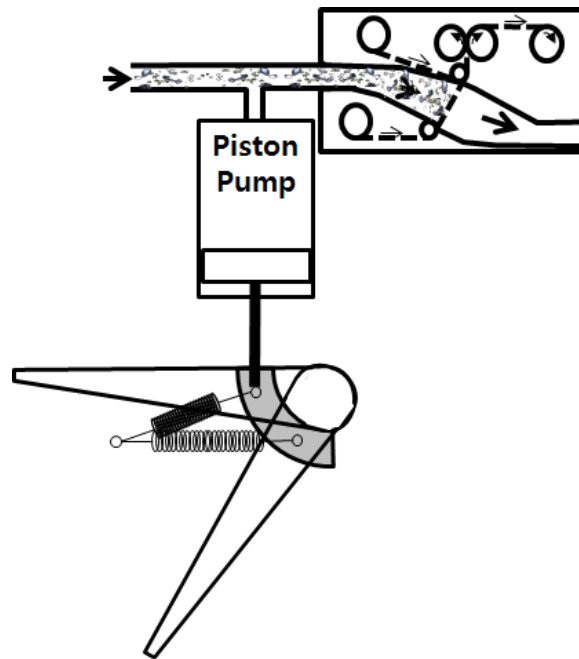
해수채수기의 전력 소모는 최소화하고, 자율적으로 운용할 수 있는 소프트웨어 개발



[그림 9-1-5] 웨이브글라이더 장착 해수 채수기 모식도

○ Wave Glider 장착용 연속 플랑크톤 채집기 개발

- 기존에 개발되어 사용중인 CPR (Continuous Plankton Recorder)의 연속 채집망을 응용하여 Wave Glider에 장착 가능한 연속 플랑크톤 채집기 설계
- Wave Glider의 운항 속도 및 무동력 펌프의 작동과 연동되어 자율 운용이 가능한 소프트웨어 설계
- 무동력 펌프 및 연속 채집망을 결합하여 작동 및 성능 확인
- 효율적인 운용을 위해서 Wave Glider 내에 펌프 및 채집기의 장착 위치 및 방법 연구
- 펌프 및 채집망 운용 소프트웨어를 결합한 통합 소프트웨어 개발
- Integration된 시제품을 조파 수조 및 실험해역에서 시험 운영을 실시하며, 조석, 해류, 파고 등을 감안하여 다양한 환경에서 시운전을 실시하고 그 결과를 바탕으로 발견되는 문제점 보완, 개선



[그림 9-1-6] 펌프와 채집망이 integration된 동물플랑크톤 채집기 모식도.



1.3.3. 단계별 목표 및 내용

○ 1단계 연차별 목표 및 내용

구 분		연구개발목표	연구개발내용
1 단계	1차 년도	○ Wave Glider 장착용 윈치 개발	- Wave Glider 구입 - 저전력 소모, 소형 윈치 개발 - Wave Glider의 항법 시스템 연동 Firmware 개발 - 조파 수조 및 실험역 시운전
		○ Wave Glider 장착용 펌프 개발	- Wave Glider 작동 기작 및 추진 fin의 동작 분석 - 펌프 설계 - 펌프 제원 결정
	2차 년도	○ Wave Glider 장착용 윈치 개발	- 문제점 보완 및 상용화 추진 - 실험역 투입으로 자료 획득
		○ Wave Glider 장착용 펌프 개발	- 역류 방지 시스템 설계 및 적용 - 펌프 제어 소프트웨어 개발 - 조파 수조 및 실험역 시운전
		○ Wave Glider 장착용 해수 채수기 개발	- 해수시로 채취용 분배기 개발 - 채수시로 보존 장치 개발 - 채수시로 무게 보상 장치 개발
	3차 년도	○ Wave Glider 장착용 펌프 개발	- 문제점 보완 및 상용화 추진
		○ Wave Glider 장착용 해수 채수기 개발	- 해수 채수기 설계 및 개발 - 조파 수조 및 실험역 시운전
	4차 년도	○ Wave Glider 장착용 해수 채수기 개발	- 문제점 보완 및 상용화 추진 - 실험역 투입으로 자료 획득
		○ Wave Glider 장착용 연속 플랑크톤 채집기 개발	- 연속 플랑크톤 채집기 설계 - 자율 운용 소프트웨어 설계 - 펌프 및 연속 채집망 결합하여 작동 및 성능 확인
	5차 년도	○ Wave Glider 장착용 연속 플랑크톤 채집기 개발	- 펌프 및 채집기의 장착 위치 및 방법 연구 - 통합 소프트웨어 개발 - 조파 수조 및 실험역 시운전 - 문제점 보완 및 상용화 추진



1.4. 추진전략

- 장착 장비 개발 전용 Wave Glider 구입
- 개발된 제품을 조파 수조 및 실험실에서 시험 운영을 실시하며, 조석, 해류, 파고 등을 감안하여 다양한 환경에서 현장 성능 시험을 실시하고 그 결과를 바탕으로 발견되는 문제점 보완, 개선
- 개발된 제품의 기술 이전을 위한 특허 출원 및 등록

1.5. 기대성과

- 태풍 중심부의 직접 관측 및 시료 채취를 실현함으로써 지금까지 연구되지 못했던 새로운 획기적인 자료 획득
- Wave Glider 장착용 장비의 상용화에 따른 신 해양산업의 경제적 이익 창출



X 연차별 추진 계획

1 연차별 연구목표 및 연구내용

○ 세부과제 I:

과제명	북서태평양 태풍 예측기술 개선 연구
연구목표	북서태평양 난수성 와류해역에 나타나는 태풍 최대 강도 발생해역에 대한 집중 조사/예측연구를 통한 태풍예측기술 개선 -2015년 기준 진로 20% 개선 -북서태평양 급격히 강화되는 태풍 강도 예측 정확도 세계 수준 근접
연구내용	1. 북서태평양 태풍강화 해역 열구조 조건 및 물리요소 연구 2. 태풍에 의한 해양 혼합변화/Mesoscale eddy의 변동 기작 연구 3. 태풍-해양 결합모형을 이용한 태풍예측 정확도 개선

○ 세부과제 II:

과제명	기후변화와 태풍변동성 연구
연구목표	열대 온난역 확장, 엘니뇨 변동에 따른 태풍의 중장기적 변동성을 이해하며, 열대 온난역의 SST 상승 등 해양 변동성자료와 대기 열수지 관측을 통해 해양과 태풍의 상호작용을 연구함. 아울러 북서태평양 아열대 중규모 와류 형성 기작 모델링과 에디 구조와 기후 특성을 연구함.
연구내용	1. 열대해양의 장기변동성에 따른 태풍의 중장기 변동성 분석 2. 해양혼합층 변동과 태풍강도 변화의 상관성 분석 3. 북서태평양 소용돌이 해역 고해상도 해양순환모델링을 통한 에디의 발생/기후특성 모의분석 및 시간/공간 변동성 이해

○ 세부과제 III:

과제명	탄소순환 및 부유생태계(생산성)에 대한 태풍의 역할 진단
연구목표	북서태평양에서 태풍 전후, 해양-대기 이산화탄소 및 침강입자(탄소) 플럭스 정량화와 부유생태계 변화 분석을 통해, 태풍에 의한 해양생태계 반응과 대기 중 이산화탄소와 입자탄소량 조절에 대한 평가와 예측을 통해 기후변화, 태풍, 해양생태계의 역학관계 진단



연구내용	1. 태풍에 의한 해양-대기 이산화탄소 플럭스 및 침강입자 플럭스 변화와 표층 영양염 공급에 대한 정량적 평가 2. 태풍 전/후의 일차생산, 식물플랑크톤 군집구조 변화 및 천이양상 연구 3. 소용돌이(mesoscale eddy)의 특성에 따른 동물플랑크톤과 난자치어 구조와 분포 특성 파악 및 태풍 통과 전/후 비교 4. 물리-생지화학결합 하위생태계 모형 통한 태풍의 부유생태계 영향 평가
------	--

○ 세부과제 IV:

과제명	해양로봇 Wave Glider 탑재용 장비 개발/개선 연구
연구목표	차세대 해양관측 로봇인 Wave Glider 장착용 장비 개발하여, 태풍전후 관측항목 확대와 개선을 통해 태풍이라는 악천후 하에서 현장 실시간 관측 역량을 향상 시키고자 함.
연구내용	1. Wave Glider 장착용 윈치 개발 및 장착용 펌프 개발 2. Wave Glider 장착용 해수 채수기 개발 3. Wave Glider 장착용 연속 플랑크톤 채집기 개발

나. 연차별 연구목표

구분	단계	단계별 연구목표	연차	연차별 연구목표
세 부 과 제 I	1단계	북서태평양 최대 강도 발생해역 태풍예측기술 개선	1	NWP태풍강화해역 와류구조/열용량/난류/조사I 및 태풍해양 요소모델 수립I
			2	NWP태풍강화해역 와류구조/열용량/난류/조사II 및 태풍예측 요소모델링/결합모델링연구II
			3	NWP태풍강화해역 와류구조/열용량/난류/조사III 및 요소기술 및 결합모델기반 태풍기인 기후반응 연구 및 태풍예측 요소/결합 모델링 연구III
			4	NWP와류해역 조사IV/태풍기인 기후반응 연구 및 태풍예측 요소/결합 모델링 연구IV
			5	NWP와류해역 조사V/기후반응연구 및 태풍예측 요소/결합 모델링 연구V
	2단계	독자개발 능력 확충		주요 관측 및 모델링 요소기술 원천개발 능력확충
세 부	1단계	기후 변화에 따른 태풍	1	열대해양과 태풍의 증장기 변동성 이해 및 북서태평양 아열대해역 고해상도 순환모델 수립



구분	단계	단계별 연구목표	연차	연차별 연구목표
과제 II		변동성 이해	2	기후모형을 이용한 태풍의 중장기 변동성 이해 및 북서태평양 아열대해역 상층순환 모의
			3	기후모형을 이용한 해양혼합층과 태풍강도의 상관성 이해 및 북서태평양 아열대해역의 중규모에디 발생 • 전파 모의
	4		해양관측을 이용한 해양혼합층과 태풍강도의 상관성 이해 및 북서태평양 태풍핵심해역의 중규모에디 변동특성 모의	
	5		고해상도 기후모형을 이용한 해양혼합층 에디와 태풍활동의 상호작용 이해	
	2단계	세부기후변화요소별 심층이해 및 예측기술연구		기후변화에 따른 태풍의 활동 변화 이해 및 북서태평양 태풍핵심해역 태풍-에디 상호작용에 의한 중규모에디 변동특성 모의
세부과제 III	1단계	탄소순환 및 해양생태계(생산성)에 대한 태풍의 역할 진단 연구	1	NWP와류해역 조사I: 태풍 전후 해양-대기 이산화탄소 플럭스 및 표층 영양염 농도 변화 산출I/부유생태계 주요 생물군 군집분포 특성 및 변동 파악/물리-생지화학 결합 생태계 모형 수립
			2	NWP와류해역 조사II: 태풍 전후 및 통과시 해양-대기 이산화탄소 플럭스, 침강입자 플럭스, 표층 영양염 농도 변화 산출II/부유생태계 구조변동 기작 연구/생태모형 검증
			3	NWP와류해역 조사III: 이산화탄소 플럭스, 4차원적 생지화학적 특성(침강입자 플럭스 및 표층 영양염) 변동/시공간적 부유생태계 구조 및 기능 변화 관측/생태계 변화 모의 및 모형(파라미터) 민감도 실험
			4	NWP와류해역 조사IV: 태풍 통과시 생지화학적 특성(침강입자 플럭스 및 표층 영양염)과 부유생태계 간의 시공간적 상호변동성 연구/생태계 태풍영향 예측모델 제시
			5	NWP와류해역 조사V: 이산화탄소 및 침강입자 플럭스, 표층 영양염에 대한 태풍 영향을 광역규모 스케일로 평가/생지화학가 모델의 성능평가 및 개선(예측력 향상)
	2단계	탄소순환 및 해양생태계 변동 정량화 연구		태풍 특성(규모, 이동속도, 시기, 빈도)에 따른 한반도 주변해역에서의 탄소순환 및 해양생태계 변동 정량화
세부과제 IV	1단계	해양로봇 Wave Glider 탑재용 장비 개발/개선연구	1	Wave Glider 장착용 윈치 개발
			2	Wave Glider 장착용 펌프 개발
			3	Wave Glider 장착용 채수기 개발
			4	Wave Glider 장착용 연속 플랑크톤 채집기 개발
2단계	추가 장비 개발/추가관측센서활용		지속적인 장비개발/성능개선 연구	

2 연차별 소요예산

단계		1단계				
		예산항목	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도
기 장 비	ARGO(0.2/대)	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4
	BioARGO(0.5/대)	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
	WaveGlider개발용	3.5	-	-	-	-
	WaveGlider(생화학센서포함)	5.5	5.5	5.5	-	-
	심해용TurboMAP	1.5	-	-	-	-
	MicroriderSensor	0.5	-	0.5	-	-
	수중글라이더더부품	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
	DVLSensor	-	0.7	-	0.7	0.7
	계산노드	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	NitrateSensor	0.3	-	-	-	-
	Alkalinity분석기	0.2	-	-	-	-
	동물플랑크톤배양기(선상용)	0.1	-	-	-	-
	Double-tripmechanisms	0.1	-	-	-	-
	SedimentTrap	1.0	1.0	-	-	-
기장비합계	16.6	10.5	9.2	4.0	3.0	
직 · 간 접 비	전산처리비	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	재료비	3.0	3.0	3.5	3.5	3.5
	기장비보험료(2개월,1.7%)	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	선박비(이사부호,40일)	10.5	14	14	14	14
	직접비(여비,수용비,연구수당등)	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
	위탁연구개발비(국내)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	위탁연구개발비(국외)	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
	내부인건비 (총연구비 18%)	11.9	11.0	11.0	10.0	9.3
	외부인건비	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	간접비 (총연구비 17.7%)	11.6	10.8	10.8	9.8	9.0
합계	65.8	61.6	60.9	53.8	51.4	
5개년 총 예산규모 = 293.5억						



3 연구추진 방향 및 전략

제1세부과제 [북서태평양 난수괴 소용돌이해역 태풍예측기술 개선 연구] 분야 :

- 해양열용량이 최대치를 나타내는 시기(8월 중·하순 - 9월 하순)에 해양조사선 이사부호를 활용하여 40-45일 기간동안 북서태평양 난수괴 해역 조사. 국내외 참여 기관별로 현장 조사 직접 참여 (그림4-1-14).
- 조사선장착 장비에 추가하여 선박이 항행하며 수온구조를 관측하는 UCTD, 일정시간 간격으로 수온/염분 구조를 자동관측하는 ARGO 플로트, 설계한 위치를 따라 관측하는 수중 글라이더 (Underwater glider) 및 웨이브 글라이더 (Wave glider) 등을 추가로 투입. 국내외 각 기관의 연구 목적에 따라 관측 장비 동원.
- 미해양기상청(NOAA)의 유무인 항공기를 활용하여 태풍내 구조 이해 및 항공기를 이용한 해양자료 획득.
- 일본 및 대만 EEZ 해역에서 일본 가고시마 대학 실습선, 대만 연구진과 공동 조사 추진. 가고시마대학 조사선은 태풍이 자주 통과하는 류큐열도 해역 캐라마 갭(Kerama Gap) 관측기 계류 조사 참여.
- 매년 획득하는 북서태평양 수온자료를 활용하여 태풍센터/기상청과 매년 태풍강도 공동 전망.
- 한국해양과학기술원이 태풍모델(GFDL)-해양모델(MOM4, HYCOM), 태풍모델(WRF)-해양모델(MOM5) 결합모델을 개발하는 중에 얻어진 기술력을 최대한 활용하며, 태풍예측에서 중요요소인, 해양관측자료 획득과 해양모델링 분야에서 독자적인 기술력 제고.
- 미해양기상청(NOAA), 로드아일랜드대학(URI) 등 최고수준 예측모델링 기술을 지닌 기관/대학과 급격히 강화되는 (RI) 태풍에 대한 공동연구를 통한 기술력 축적.
- 국내외 협력을 통한 해양 자료 수집 및 수집하는 자료의 품질 관리 방안 확보.
- 목표 해상도 및 목표 예측시간을 확정하여 이에 필요한 고성능 컴퓨팅 파워 자원 확보.

제2세부과제 [기후변화와 태풍변동성 연구] 분야 :

- 전세계적으로 축적된 해양 및 대기의 재분석자료 기반으로 해양의 중장기변동성과 태풍 활동의 중장기 변동성 분석.
- 저해상도 기후모형과 고해상도 기후모형 자료를 확보하여 태풍활동지수를 정의하고, 이에 대한 태풍활동성을 분석함과 동시에 태풍을 추출하여 결과를 비교함. 기후모형에서



확보한 태풍활동지수와 태풍빈도 및 강도를 이용하여 ENSO와 PDO 등 해양의 중장기 변동에 따른 각 지수의 관련성을 분석하고 역학을 파악함.

- 수온 프로파일 등 해양관측자료를 확보하여 해양혼합층 변동과 태풍발달의 상관성 조사.
- 중규모 에디가 분석 가능한 북서태평양 해역 고해상도 해양순환모델의 수립;
- 해양기후자료(WOA) 분석; 대양 에디 공간분포, 유속장 추산, 에디 발생의 계절변동 및 연변동 특성 파악.
- 위성고도계자료 분석; 유속장 추산, 발생, 이동 파악, 모델 모의와 비교 분석.

제3세부과제 [탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍 역할 진단] 분야 :

- 연구선 관측과 Wave glider를 이용한 관측을 함께 수행함. 연구선 관측은 태풍 전과 후의 상황을 관측하고 wave glider는 태풍 기간 동안의 상황을 관측함.
- Wave glider에 pCO₂ sensor를 장착하여 태풍 통과시 표층해수 이산화탄소 분압을 연속적으로 측정하여 자료의 신뢰도를 높임. Wave glider에 질산염 sensor를 장착하여 태풍 통과시 표층 질산염 농도를 연속적으로 측정하여 자료의 신뢰도를 높임.
- 연구해역(태풍통과 빈번해역)에서 태풍 통과 전/후 현장조사를 통해 광합성 매개변수, 엽록소 수직분포, 광학적 자료와 원격탐사 자료인 표층의 엽록소 농도, 일조량, 흡광계수, 표층수온 등의 자료 수집.
- 생물검증 실험에 의한 식물플랑크톤 성장률 및 종 천이 규명.
- 태풍의 영향에 따른 1차 생산력 및 부유하위생태계 먹이망 구조와 에너지 흐름의 생태계 모델 제시.
- 연구해역의 소용돌이 물리구조 특성에 따른 동물플랑크톤 태풍 반응 시나리오 점검 및 사전구성.
- 난자치어와 동물플랑크톤의 현장네트채집과 무인자동채집기 채집과 무인수중글라이드에 부착된 CPR과 네트 분석결과 사이의 비교 분석 후 각 방법 간의 장단점 비교 및 태풍영향 연구 방법론 제시.
- 태풍에 의한 부유하위생태계 구조 및 기능 변동 추적을 위한 전통적 기법(수조 섭식실험)과 생화학적 기법(지방산, 스테롤, 탄소·질소동위원소비)의 적용.
- 태풍영향 전과 후에 수층 별 고해상도의 해양 유기물 침강 플럭스와 대기-해양 간 이산화탄소 교환량을 관측하여 태풍의 물리적 충격이 탄소 순환에 주는 영향 정량적 평가.



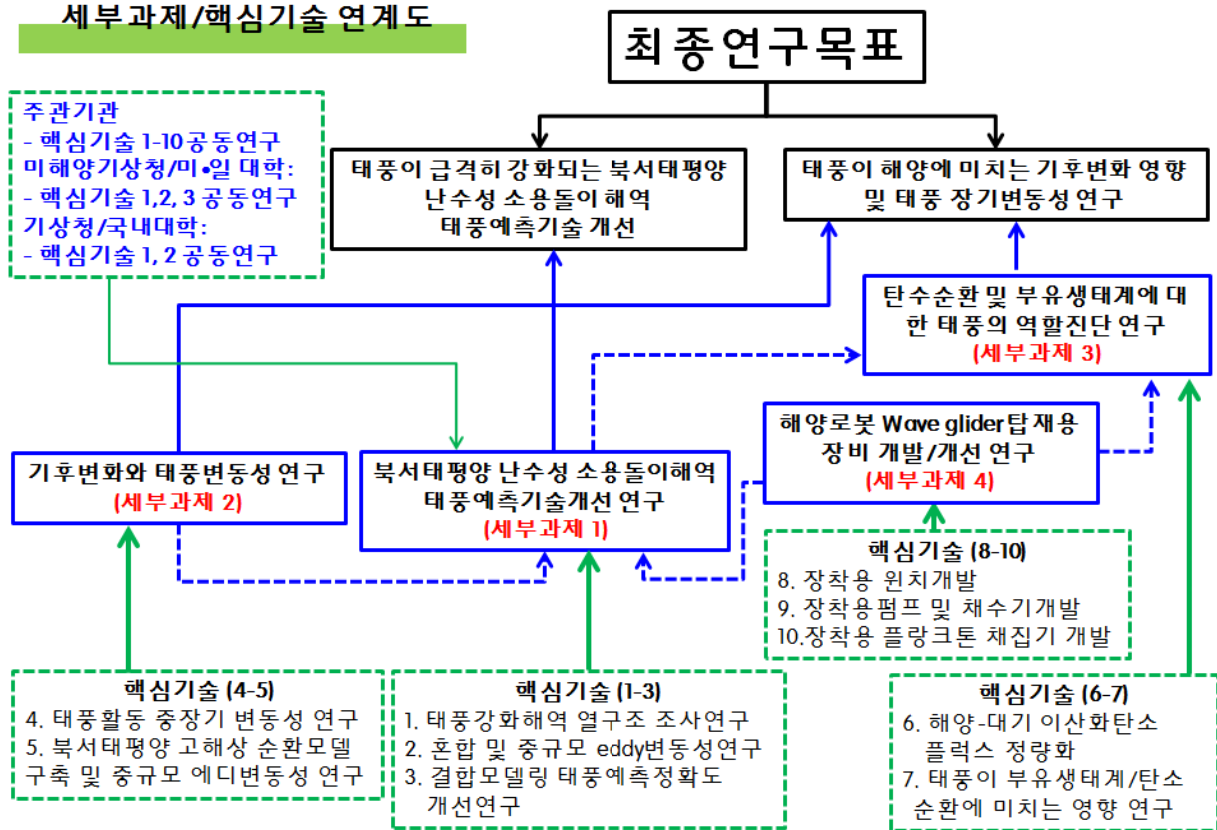
- Bio-Argo 및 현장관측 자료와 비교를 통한 물리-생지화학 결합 하위생태계 모형 개선.

제4세부과제 [장비 개발/개선 연구] 분야 :

- 장착 장비 개발 전용 Wave Glider 구입.
- 개발된 제품을 조파 수조 및 실험실에서 시험 운영을 실시하며, 조석, 해류, 파고 등을 감안하여 다양한 환경에서 현장 성능 시험을 실시하고 그 결과를 바탕으로 발견되는 문제점 보완, 개선.
- 개발된 제품의 기술 이전을 위한 특허 출원 및 등록.

세부과제/핵심기술간 연계도 :

**북서태평양 해양-태풍 상호작용
세부과제/핵심기술 연계도**



[그림 10-3-1] 세부과제/핵심기술간 연계도.



4 기대효과 및 활용 방안

제1세부과제 [북서태평양 태풍 예측기술 개선 연구] 분야 :

- 매년 하계 북서태평양 태풍강화 해역 조사 자료를 기반으로 매년 하계 이 해역을 통과하는 최대 가능 태풍 연례 전망.
- 태풍예측개선 모델의 기상청/태풍센터 등 현업모델로의 발전 연계 활용.
- 북서태평양 해역을 통과하는 일반적인 태풍과 난수괴 상을 통과하는 태풍이 보일 것으로 예상되는 급격히 강화되는 (Rapidly Intensified, RI) 태풍에 대한 다양한 해양자료 데이터 베이스 구축 활용. 수집자료와 고도 및 해표면 위성자료를 활용하여 단순 구조를 가정한 수온구조 예측에 활용.
- 북서태평양 해양자료 확보를 통해 RI 태풍강도 예측의 경우, 선진국 수준과 대등하거나 선도적인 태풍-해양결합 예측 모델의 정확도 개선기술 확보할 것으로 기대.
- 태풍에 의한 해양 기후변화 연구라는 글로벌 이슈에서 태풍이 해양기후에 미치는 영향 분야 등에서 선도적인 해양과학 연구성과 창출 기대.
- 북서태평양 및 한반도 주변해역의 태풍 강도 예측 연구 능력 축적 및 미국 주요 대학/연구기관과 공동연구를 통해 독자연구 기술 축적 기회로 활용.
- 파랑 스펙트럼 성분 DB 구축후 통계적인 파랑자료를 생산하여 기후변화 연구 활용.
- 난수괴 해역에서 강화된 후 2일 이내에 한반도에 상륙하는 대규모 재해 유발 가능성이 있는 급격히 강화되는(RI) 태풍 예측 정확도 향상 통한 강한 태풍재해 대응능력 강화.
- 1단계 연구 이후 태풍예측 정확도 향상의 효율성 확인을 통해 북서태평양 난수괴 해역 실시간/준실시간 자료 확보위한 기본 자료의 지속적 확보를 위한 설계자료로 활용.
- 북서태평양 온난화를 모니터링하기 위한 본 연구프로그램 관측자료 기반 해양기후변화 기본 데이터 베이스 구축.
- 태풍에 기인한 자연 재해 대응하여 과학적인 대처 능력 향상.

제2세부과제 [기후변화와 태풍변동성 연구] 분야 :

- 열대 온난역 해양변동의 역학 이해 및 태풍 이해에 대한 과학적 진보.
- 해양관측 불확실성 분석을 통한 대양관측의 필요성 제고.



- 해양관측 및 모니터링을 통한 태풍진단 및 예측기법 향상 및 그에 따른 재해 대응 능력 제고.
- 15°-25°N 지역의 대양에디 발생과 이동에 대한 기후적 특성 분석도 및 사실적 해류 모사도(모델 결과물).
- 태풍모델과의 연계를 위한 해양순환 기반모델 수립 및 기본 해양장 제공.
- 해양생태계 변동 모의를 위한 생태계 모델과의 접합에서 해양순환 배경장 제공.

제3세부과제 [탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍 역할 진단] 분야 :

- 태풍이 지구온난화에 미치는 영향 평가 능력 고양 기대.
- 태풍이 해양생산성에 미치는 영향 평가 가능.
- 태풍 발생 변동에 따른 일차생산 변화 재현을 위한 모델 개발 및 과학적 검증자료 제시.
- 관측, 해색위성, 모형결과자료를 통하여 태풍 빈번도 변동에 따른 일차생산과 식물 플랑크톤 군집구조 변화의 메커니즘 이해.
- 태풍강도에 따른 영양염 공급의 차이 및 1차 생산력의 반응 기작 이해.
- 태풍에 의한 식물플랑크톤의 증식 기작 이해 및 자료 축적.
- 기후변화에 따른 태풍 강도, 빈도 변화 시나리오를 적용한 일차생산력 중장기 변동성 예측 및 수산자원의 변동성 이해 증진에 활용.
- 세계 최초로 태풍에 의한 휴면포자 seedling 연구결과 도출.
- 태풍과 같은 기상변동에 따른 해양의 물리적 용승, 화학적 조건과 생물학적 반응을 연계한 외해 연구모델 정립.
- 태풍과 해양 물리적 구조(소용돌이) 특성사이의 상호작용에 따른 난자치어와 동물플랑크톤의 정성/정량적 분포 및 군집구조 변동 연구는 문제해결을 위한 미래지향적이며 선도적인 다학제 연구임.
- 북서태평양 해역에서 태풍/태풍-해양상호작용/변동성 등 글로벌 이슈에 대한 국내 연구 그룹의 창의적인 연구 논문 발표를 위한 자료로 활용 기대.
- 기후변화에 민감한 한반도 주변해는 기후변화로 인한 해양환경변화(수온상승, 산성화)와 태풍과 같은 비예측적인 환경충격에 취약하기에, 본 연구결과는 향후 한반도 주변해에서 이런 스트레스요인들의 종합적인 분석을 위한 방향 설정에 중요한 정보 제공.



- 해양생태계에서의 태풍의 역할을 정량화 할 수 있는 기회를 제공하며, 본 연구결과는 전 지구적 탄소순환과 해양 생산성 제고를 위해 직접적 증거로 활용될 수 있음. 향후 IPCC 및 UNRP 보고서 등에도 적극 인용될 수 있는 정보 산출 기대.

제4세부과제 [해장비 개발/개선 연구 분야 :

- 태풍 중심부의 직접 관측 및 시료 채취를 실현함으로써 지금까지 연구되지 못했던 새로운 획기적인 자료 획득 가능 기대.
- Wave Glider 장착용 장비의 상용화에 따른 신 해양산업의 경제적 이익 창출.



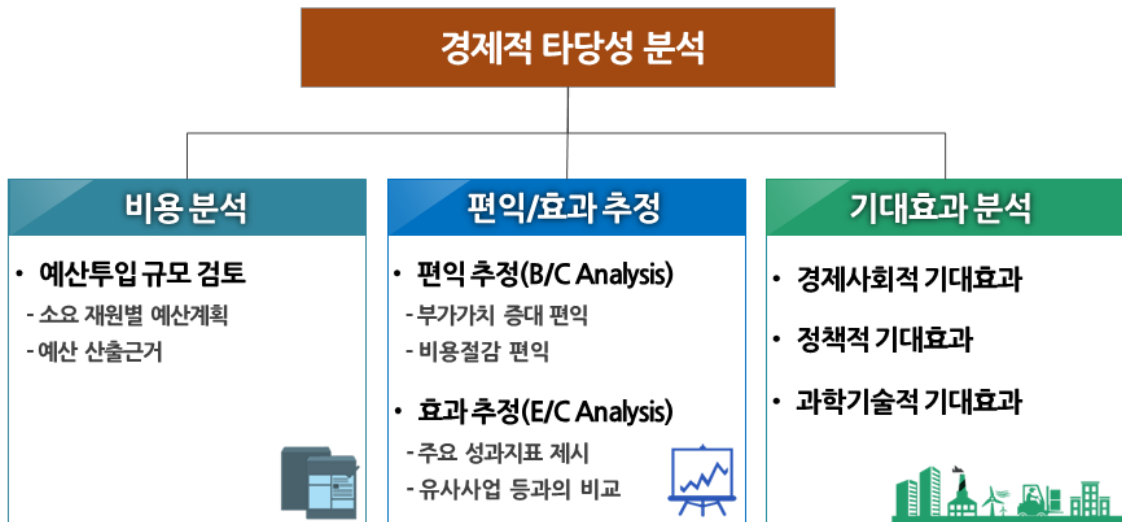
XI 경제성 분석

1) 경제성 분석의 개요

1.1 분석 목적

- ‘북서태평양 해양-태풍 상호작용 연구’의 경제적 타당성을 분석하여 동 사업의 가치를 사회적 또는 거시적 국가 관점에서 파악

1.2 분석 항목구성 및 관점



[그림 11-1-1] 경제적 타당성 분석 구조

- (비용 분석) 사업특성을 고려하여 국가 전체의 R&D사업 및 유사사업 등과의 비교·분석을 통해 비용적절성을 검토
 - 유사 연구개발과제 대비 동 사업의 총괄 투자계획, 연차별/과제별 예산 세부내역, 주요 비용 산정 근거 제시 여부, 예산 과다 산정 여부 등을 확인
- (효과 추정) 기초과학연구를 목적으로 하는 사업의 특성을 고려하여 동 사업이 목표로 하고 있는 과학기술적 편익을 분석하고 계량화가 불가능할 경우 비용효과분석을 실시
 - 동 사업의 기획시 도출된 주요 성과목표를 토대로 과학기술적 편익을 도출하고, 이를 해수부 및 유사과제 성과와 비교하여 사업의 효과를 분석
- (기대효과 분석) 동 사업을 통해 예상되는 간접적 편익을 기대효과로 분석하여 동 사업의 추진 타당성을 보완



- 동 사업은 우리나라 기후·해양변화의 원인규명과 미래 변화 예측을 목적으로 하는 기초 원천·공공적 성격을 지니고 있어 정부 주도의 기술개발 추진이 반드시 필요하며, 기대 효과 분석을 통해 이를 강조

1.3 분석 방법

- (분석의 신뢰성을 확보하기 위해 '연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 제2판 (KISTEP, 2014)'의 지침 및 권고사항을 준거로 삼음)
 - 기초원천연구 성격이 강한 사업특성을 반영하여 소요예산을 연구개발, 연구시설·장비 구입비, 연구관리비로 구분·검토

[표 11-1-1] 국가연구개발사업의 비용검토를 위한 분석체계

과제 성격	분류 기준
연구개발	연구시설·장비 구입 및 유지비, 연구관리비를 제외한 모든 연구개발비
연구 시설·장비 구입 및 유지비	연구시설 구축 및 유지비, 연구장비 구입 및 유지비, 시설·장비의 차입금 상환 등
연구관리	연구과제 평가 및 관리비, 국공립연구소와 출연연구소의 인건비, 경상비, 연구개발 관련 사무국 운영비 등

출처) 연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침(제2판), KISTEP

- 기초과학연구를 목적으로 하는 사업의 특성을 고려하여 과학기술적 편익 중심의 비용-효과분석을 통해 경제성 분석을 수행
 - 비용-효과분석은 시장가격의 측정이 곤란한 공공재나 집합재, 무형재를 다루는데 적합한 방법론으로 사용되고 있음
 - ※순수 R&D 사업과 같이 비용-편익분석이 적합하지 않다고 판단되는 사업의 경우, 경제사회적·과학기술적 파급효과 등을 산출하고 이를 통해 비용-효과분석을 실시(2014년도 예비타당성조사 운용지침, 기획재정부)
 - 과학기술적 편익은 연구개발사업을 통해 얻을 수 있는 새로운 과학기술적 지식이나 성과를 의미하는데, 연구개발사업의 대표적 성과지표로 적용되는 논문이나 특허는 그 가치를 화폐로 환산할 수 있는 객관적 방법이 아직 확립되지 않았기 때문에 화폐 단위로 변환하지 않고 비용효과 분석에서 반영(KISTEP, 2014)
 - 비용-효과분석 수행을 위해 국내 유사 R&D사업과 기존 유사 R&D사업 예비타당성조사 사례의 방법론을 참조



비용효과 분석 사례

- 기술개발의 비교 대안이 명확히 존재하지 않는 원천기술개발 사업의 특성을 고려하여 기존의 유사 국가연구개발사업과의 비교를 통해 비용효과분석을 수행
 - 사업목표는 A분야 자원에 대한 분석을 통하여 소자수준에서 기능을 규명하고, B분야 기술과 융합에 의한 새로운 고부가가치 소재 및 창의적 원천기술을 개발
 - 선행사업(B사업), 벤치마킹 대상 사업(C사업 7개), 유관부처사업 등 총 9개 사업을 대상으로 고정효과접근법을 이용하였으며, SCI논문 건수, 특허등록 건수, 기술이전 건수, 기술료/로열티 수입액, 기술 산업화 건수 등의 성과지표에 대해 투입되는 비용규모를 비교
 - * SCI논문건수, 특허등록건수, 기술이전 건수, 기술료/로열티 수입액, 기술 산업화 건수 등의 성과지표에 투입되는 비용규모를 비교하는 고정효과접근법을 수행
 - * 동일수준의 성과당 투입액 비교와 함께 자료포괄분석을 수행하여 9개 비교대안 대비 동 사업의 상대적 효율성을 판단

[분석 결과]

- 고정효과접근법을 이용하여 분석한 결과, 동 사업은 SCI논문 건수 및 Impact Factor 총량, 특허등록 건수, 기술이전 건수, 기술료/로열티 액수 등에서는 기존 유사 사업에 비해 상대적으로 큰 효과 발생을 목표하고 있으나, 산업화 건수는 크게 뒤처지는 것으로 분석

(단위 : 억 원)

구분	논문 1건당 투입액	논문 Impact Factor 1점당 투입액	특허등록 1건당 투입액	기술이전 1건당 투입액	기술료/로열티 1억 원당 투입액	산업화 1건당 투입액
ooo	2.58	0.81	6.38	124.61	140.65	95.31
A사업	2.06	0.83	2.10	40.18	3.52	264.71
B사업	2.28	0.91	8.15	39.04	872.00	-

- 동 사업의 논문·특허 등 과학기술적 효과를 중심으로 유사사업, 해수부 R&D사업, 국가기초연구개발사업의 투입대비 성과를 상호 비교하는 고정효과접근법을 수행
- ※ 순수 R&D 사업의 경우 기술개발 대상의 비교대안이 명확히 존재하는 경우, 대안끼리 비교하는 방식을 적용하나, 비교대안이 명확하지 않은 경우에는 기존의 유사 국가연구개발사업을 비교 대안으로 채택(KISTEP, 2014)



2 투자계획 검토

2.1 비용 내역

2.1.1 총괄 투자계획

- 동 사업은 총 사업비 293.5억 원(국고 100%, 민자 0%)의 예산을 투입하여 5년 간 (2017~2021년) 4개 세부과제를 추진할 계획
- 해양수산분야는 공공성이 매우 강하며 이윤창출이 불확실한 분야이므로 정부주도의 적극적 투자로 기술개발을 추진할 수 있도록 예산배분 필요

[표 11-2-1] 총괄투자 계획

(단위: 억 원)

구분	1차년도 (2017년)	2차년도 (2018년)	3차년도 (2019년)	4차년도 (2020년)	5차년도 (2021년)	총 계
A 북서태평양 난수성 소용돌이해역 태풍예측기술 개선 연구	29.3	31.0	29.9	31.3	30.2	151.7
B 기후변화와 태풍변동성 연구	7.5	6.1	7.5	6.0	5.7	32.8
C 탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍역할 진단	14.2	13.0	11.8	11.4	10.7	61.1
D 해양로봇 Wave Glider 탑재용 장비 개발/개선 연구	14.8	11.5	11.7	5.1	4.8	47.9
합 계	65.8	61.6	60.9	53.8	51.4	293.5

2.1.2 소요자원별 투자계획

- 동 사업은 기초연구개발로, 연구개발 67.5%, 장비구입 14.8%, 연구관리 및 기타 17.7%의 비율로 예산을 투입
- 연구개발 비용은 인건비, 연구활동추진비, 연구재료비, 위탁연구개발비(연구 시설·장비 구입 및 유지비 제외) 등이 포함되며, 총 198.2억 원으로 구성
- ※ 이사부호 활용 시 소요되는 선박비(66.5억 원/5년)를 연구개발비용에 포함
- 연구시설·장비 비용은 연구 시설 구축 및 유지비, 연구 장비 구입 및 유지비 등이 포함되며, 총 43.3억 원으로 산정



- 연구관리 및 기타 비용은 연구과제 평가 및 관리비, 국공립연구소와 출연연구소의 인건비, 경상비, 연구개발 관련 사무국 운영비 등으로 구성되며, 총 52.0억 원으로 산정

[표 11-2-2] 소요자원별 투자계획

(단위: 억 원, %)

구 분		총 사업비	구성비
대항목	소항목		
연구개발		198.2	67.5
연구시설 및 장비 구입	시설	-	-
	장비	43.3	14.8
	소계	43.3	14.8
연구관리 및 기타		52.0	17.7
합계		293.5	100.0

2.1.3 예산 산출근거

○ 장비가액

[표 11-2-3] 소요장비 및 연도별 장비가액

(단위: 억 원)

주요 장비명	장비가액	1차년도 (2017년)	2차년도 (2018년)	3차년도 (2019년)	4차년도 (2020년)	5차년도 (2021년)
ARGO(0.2/대)	7.2	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4
BioARGO(0.5/대)	3.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
WaveGlider개발용	3.5	3.5	-	-	-	-
WaveGlider(생화학센서포함)	16.5	5.5	5.5	5.5	-	-
심해용TurboMAP	1.5	1.5	-	-	-	-
MicroriderSensor	1.0	0.5	-	0.5	-	-
수중글라이더부품	1.8	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
DVLSensor	2.1	-	0.7	-	0.7	0.7
계산노드	4.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
NitrateSensor	0.3	0.3	-	-	-	-
Alkalinity분석기	0.2	0.2	-	-	-	-
동물플랑크톤배양기(선상용)	0.1	0.1	-	-	-	-
Double-tripmechanisms	0.1	0.1	-	-	-	-
SedimentTrap	2.0	1.0	1.0	-	-	-
합 계	43.3	16.6	10.5	9.2	4.0	3.0



○ 소요인력

[표 11-2-4] 연도별 소요인력

(단위: 명(M/Y))

구 분	1차년도 (2017년)	2차년도 (2018년)	3차년도 (2019년)	4차년도 (2020년)	5차년도 (2021년)	합 계
책임급	18	18	18	18	18	90
선임급	4	4	4	4	4	20
원 급	1	1	1	1	1	5
기 타	17	17	17	17	17	85
합 계	40	40	40	40	40	200

주) 기타: 학생인건비 등

2.2 비용의 적정성 검토

2.2.1 월가계산서의 적절성 검토

- 동 사업의 예산구조는 직접비(82.3%) 및 간접비(17.7%)로, 「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」의 비목별 계상기준(제12조 제5항 관련)을 준용하고 있음
 - (인건비) 동 사업의 인건비 비중은 23.2%(68.2억 원)로 국가 전체 R&D과제의 인건비 비중보다 낮은 수준임
 - ※ 국가 전체 R&D과제의 인건비 비중(%): 40.7('12년) → 41.7('13년) → 41.9('14년), (2014년도 연구개발활동조사)
 - (연구수당) 동 사업의 연구수당(7.5억)은 인건비의 20%(13.6억)내에 계상되어 있어 「해양수산 연구개발사업 운영규정」에 부합함
 - ※ 연구수당은 인건비(학생인건비 포함)의 20%범위에서 계상(「해양수산 연구개발사업 운영규정」)
 - (간접비) 간접비는 전체 예산의 17.7%로 한국해양과학기술원 간접비 비율인 21.52% 범위를 준수하고 있음



[표 11-2-5] 비목별 투자계획

(단위: 억 원, %)

비목	세부비목	총 사업비	
		금액	비중
직접비 (82.3%)	인건비	68.2	23.2
	학생인건비	0.0	0.0
	연구장비/재료비	69.8	23.8
	연구활동비	80.0	27.3
	연구과제추진비	5.5	1.9
	연구수당	7.5	2.6
	위탁연구개발비	10.5	3.6
	소 계	241.5	82.3
간접비(17.7%)		52.0	17.7
합계		293.5	100.0

2.2.2 유사과제 대비 과제당 규모 비교

- (유사과제 선정) 사업 목표, 연구내용 및 방법, 기대효과 등을 고려한 키워드를 토대로 국가과학기술지식서비스(NTIS)에서 검색된 10건의 유사과제 중 성과가 공개된 8개 과제를 분석대상으로 선정
- 대상해역이나 활용 장비 등의 차이로 인해 실질적인 연구내용이 상이할 수 있으므로 기존의 유사과제와 비교할 경우 해석상의 주의가 필요

유사과제 검색 키워드

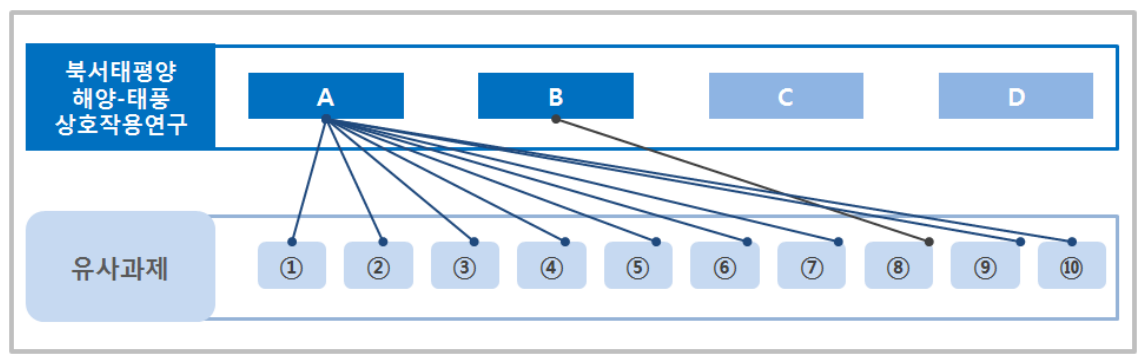
태풍, 북서태평양 소용돌이 해역, 급격한 태풍강화, 해양열구조, Mesoscale eddy, 해양-태풍 결합 모델, 북서태평양 고해상도 순환모형, 북서태평양 중규모 에디 변동성, 기후변화시나리오 기반 에디 변동성 전망, 탄소순환, 해양생태계, Wave Glider, 원치 개발, 펌프, 채수기, 플랑크톤 채집기 등

[표 11-2-6] 키워드로 도출된 유사과제 Pool

(단위: 년, 억 원)

유사과제명		성과정보 공개여부	NTIS에 등록된 연구기간
1	북서태평양이 한반도 주변해에 미치는 영향 연구	○	2006~2008
2	해양기인 중장기 기후변동의 역학적 연구와 예측기술 개발	○	2009~2014
3	진보된 태풍분석 및 예측시스템 개발	○	2006~2008
4	연안재해대응(지구온난화 환경에서 강화되는 태풍 해일 예측기술 개선 연구)	○	2006~2011
5	태풍-파랑-해양 접합모델 개발과 대기-해양 상호작용에 관한 연구	○	2006~2009
6	재해 기상/이상 기후 분석 및 예측: 태풍 및 재해성 스톱을 중심으로	○	2009~2012
7	태풍 계절예측기술 개발: 진로 및 강도를 포함한 예측성 향상	○	2010~2012
8	운용해양(해양예보)시스템 연구	○	2009~2016
9	태풍통과시 3차원모델을 이용한 해양의 수온변동 연구	X	2004~2007
10	통합 전구/지역 모델을 이용한 태풍 계절 예측	X	2013~2014

출처) 2016년 3월 NTIS 검색 결과



[그림 11-2-1] 분석대상 유사과제군

- (유사과제와의 연구비 규모 비교) 동 사업의 4개 세부과제별 연평균 연구비는 58.7억 원으로 기존 유사과제의 평균 연구비 규모(9.3억 원)보다 약 6배 규모
- 유사과제의 평균예산액이 0.6억~23.2억으로 편차가 크고 단기과제부터 장기과제까지 다양한 성격을 가지고 있어, 연구비 규모의 단순 비교보다 연구내용 및 범위를 고려한 분석이 필요함



[표 11-2-7] 유사과제와의 연구비 규모 비교

(단위: 억 원)

사업/과제명		총 예산	연평균 예산
북서태평양 해양-태풍 상호작용 연구		293.5	58.7
A	북서태평양 난수성 소용돌이해역 태풍예측기술 개선 연구	176.1	35.2
B	기후변화와 태풍변동성 연구	21.8	4.4
C	탄소순환 및 부유생태계에 대한 태풍역할 진단	52.1	10.4
D	해양로봇 Wave Glider 탑재용 장비 개발/개선 연구	43.5	8.7
↕			
유사과제①	북서태평양이 한반도 주변해에 미치는 영향 연구	185.5	23.2
유사과제②	해양기인 중장기 기후변동의 역학적 연구와 예측기술 개발	59.7	11.9
유사과제③	진보된 태풍분석 및 예측시스템 개발	9.7	3.2
유사과제④	연안재해대응(지구온난화 환경에서 강화되는 태풍 해일 예측기술 개선 연구)	42.0	8.4
유사과제⑤	태풍-파랑-해양 접합모델 개발과 대기-해양 상호작용에 관한 연구	1.9	0.6
유사과제⑥	재해 기상/이상 기후 분석 및 예측: 태풍 및 재해성 스톱을 중심으로	7.1	3.6
유사과제⑦	태풍 계절예측기술 개발: 진로 및 강도를 포함한 예측성 향상	0.9	0.9
유사과제⑧	운용해양(해양예보)시스템 연구	159.3	22.8
평균 예산액		58.3	9.3

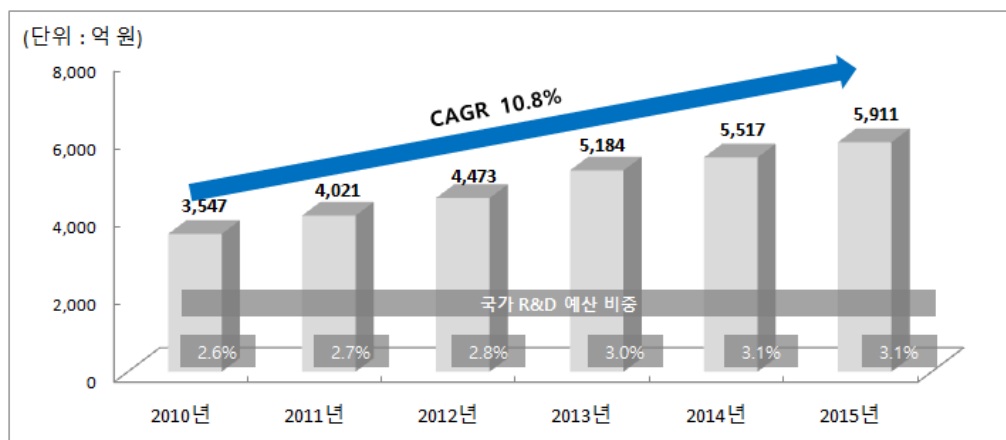
- 동 사업의 연구개발활동은 기존에 수행되었던 유사과제보다 더 폭넓은 연구범위 및 내용을 포함하고 있어 상대적으로 연구비 규모가 높게 계상됨
 - ※ 동 사업은 북서태평양의 따뜻한 난수권 소용돌이 해역에서 급격히 강화되는(RI: Rapidly Intensified) 태풍에 대한 예측모델 정확도 개선을 목표로 하고 있으며, 태풍이 해양기후변화에 영향을 주는 선도적인 기초과학 연구를 병행하는 등 유사과제에 비해 폭넓은 연구범위를 지님
 - ※ 또한 연근해탐사 혹은 이론연구 중심의 유사과제와는 달리, 동 사업은 대양조사선 이사부호를 활용한 대양(북서태평양) 직접탐사를 수행하는 연구내용을 담고 있어 이에 따른 선박비(66.5억 원/5년, 연평균 13.3억 원) 계상과 간접비 증가율 등을 고려해야 함
- (정부/민간 매칭 비중의 적절성) 동 사업은 우리나라 기후·해양변화의 원인규명과 미래 변화 예측을 목적으로 하는 기초연구개발사업으로 정부 차원의 전략적 투자가 필수적이므로 사업비 전액을 정부가 지원



- 일부 유사과제에 민간 매칭이 포함되어 있으나, 그 비중이 0.27%로 기초원천 및 공공성이 강함
- ※ 8개 유사과제 중 '유사과제8. 운용해양(해양예보)시스템 연구'만이 민간매칭을 포함하고 있었으나, 7년 간(2009~2015년) 총 사업비 159.3억 원 중 민간재원 연구비는 1.3억 원(0.80%)에 불과함

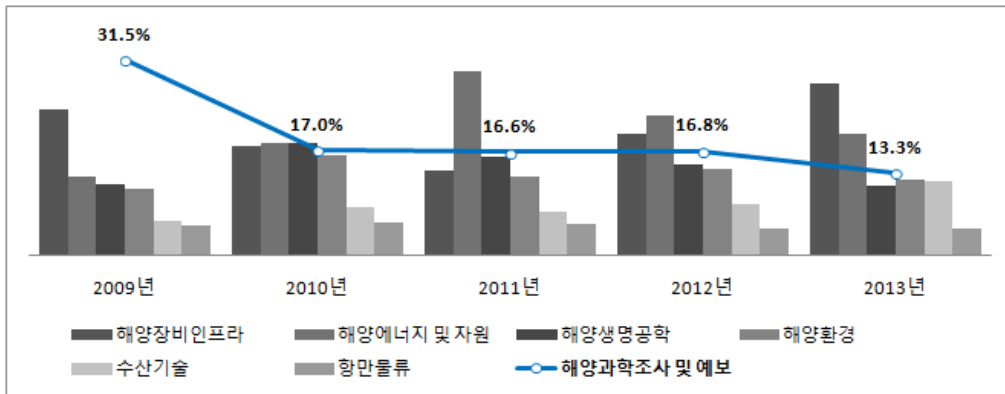
2.2.3 해양수산부 R&D 예산 증가의 적절성 검토

- 해양수산 R&D 예산이 매년 증가하고 있으나 그 절대적 규모가 국가 전체 R&D예산에서 차지하는 비중이 3%내외로 적은 수준임
- 지난 5년 간(2010~2015년) 해양수산 R&D 분야 투자는 연평균 10.8% 증가하였으며, 향후 2020년까지 지속적으로 확대될 전망
- '13년 해양수산 R&D 예산은 5,184억 원으로 국가 전체 R&D 예산의 약 3%를 차지하며, 이는 해외 주요국가와 비교할 때 상대적으로 낮은 비중임
- ※ 국가 전체 대비 해양수산 R&D예산 비중은 미국 7.3%, 일본 5.0%, 중국 7.0%('10년), 해양수산 R&D 중장기계획(2014~2020)



[그림 11-2-2] 해양수산 R&D예산 추이

- 동 사업의 목표와 부합하는 해양과학조사 및 예보 분야의 R&D 사업에 대한 투자는 2009년 이후 지속적인 감소추세를 보임



[그림 11-2-3] 해양수산 R&D 분야별 투자현황(비중)

[표 11-2-8] 해양수산 R&D 분야별 투자현황

(단위: 억 원, %)

사업	2009년	2010년	2011년	2012년	2013년	계	비중
해양장비인프라	375	246	225	344	564	2,078	21.5
해양과학조사 및 예보	504	237	276	296	271	1,873	19.4
해양에너지 및 자원	203	251	492	395	398	1,848	19.2
해양생명공학	182	250	262	259	230	1,300	13.4
해양환경	171	225	209	244	247	1,233	12.8
수산기술	90	109	115	147	241	782	8.1
항만물류	77	75	83	75	86	539	5.6
합 계	1,601	1,393	1,662	1,759	4,262	8,653	100.0

출처) 해양수산 R&D 중장기계획(해수부, 2014)

- 동 사업의 규모는 5년 간 293.5억 원(연평균 58.7억 원)으로 국가전체 R&D규모 및 해양수산부 R&D 예산에서 차지하는 비중은 크지 않으므로 자원조달에 무리가 없을 것으로 판단됨

※ 투자연도('17~ '21년)별 예산요구액은 국가 전체 R&D예산 추정치의 약 0.03%, 해양수산부 R&D예산 추정치의 2% 미만(0.62%~1.06%)에 불과

[표 11-2-9] 정부R&D 예산 대비 동 사업규모 비중

(단위: 억 원, (%))

R&D규모		2017(e)	2018(e)	2019(e)	2020(e)	2021(e)	CAGR ('13~'15)
R&D 예산 운용 (증액 전)	국가R&D	208,830	219,379	230,460	242,101	254,330	5.1%
	해수부R&D	6,159	6,628	7,133	7,676	8,260	7.6%
R&D 예산 운용 (증액 후)	국가R&D	208,896 (0.03)	219,440 (0.03)	230,521 (0.03)	242,155 (0.02)	254,381 (0.02)	5.1%
	해수부 R&D	6,225 (1.06)	6,689 (0.92)	7,194 (0.85)	7,730 (0.70)	8,312 (0.62)	7.6%
	동 사업 규모	65.8	61.6	60.9	53.8	51.4	-

주1) 증액 전 R&D예산운용액 : 국가 및 해수부 R&D예산의 '13~'15년 CAGR이 '19년까지 지속된다고 가정 시 추정액
 주2) 증액 후 R&D예산운용액 : 동 사업의 예산요구액(연 20억 원)이 증액될 경우 국가 및 해수부 R&D예산 추정
 출처) 정부연구개발투자 방향 및 기준(미래부, 각년도), 해양수산부 예산개요(각년도), 기술과가치 재구성



3) 비용-효과 분석

3.1 사업 목표성과

- (목표성과) 비용효과분석을 수행하기 위해 동 사업을 통해 발생할 수 있는 과학기술적성과의 목표를 설정
 - 동 사업은 관측 및 탐사를 통해 다양한 실측자료를 획득하고, 이를 통한 연구수행을 골자로 하고 있어 논문창출과 같은 학술적성과 발생이 기대됨
 - 반면 기술의 상업적 활용 목적의 기술이전, 기술료/로열티, 산업화 등의 성과발생은 사실상 어려울 것으로 예상되나, 일부 세부과제에서 특허등록과 같은 기술적성과 창출을 목표로 하고 있음

[표 11-3-1] 연도별 목표성과

(단위: 건)

성과		1차년도 (2017년)	2차년도 (2018년)	3차년도 (2019년)	4차년도 (2020년)	5차년도 (2021년)	계
논문	SCI급	10	18	22	20	20	90
	비SCI급	10	12	14	12	10	58
특허등록		-	1	2	-	1	4
기술이전		-	1	2	-	2	5
정책활용		-	-	3	-	1	4

- 동 사업에서 사업비 1억 원으로 발생 할 수 있는 과학기술적 편익은 SCI급 논문 0.31건, 비SCI급 논문 0.20건, 특허등록 0.01건, 기술이전 0.02건, 정책활용 성과 0.01건임

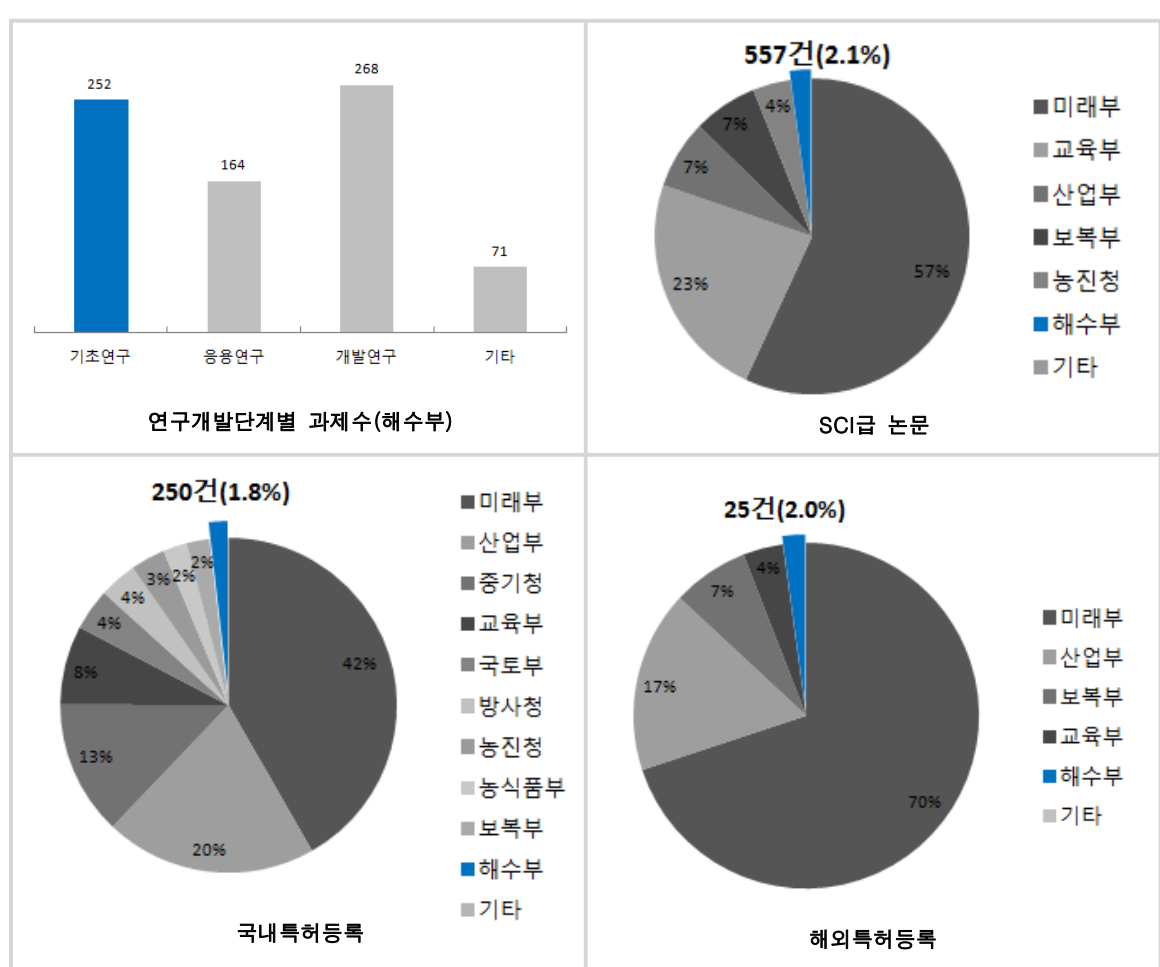
[표 11-3-2] 투입액 1억 원당 목표성과

(단위: 건)

성과	논문		특허등록	기술이전	정책활용
	SCI급	비SCI급			
목표성과	90	58	4	5	4
1억 원당 성과	0.31	0.20	0.01	0.02	0.01

3.2 해수부 R&D성과와 비교

- (해수부 R&D성과) 해수부의 과제는 개발연구와 기초연구단계에 집중되어 있으며, 발생한 과학기술적성과는 국가 R&D성과의 약 2% 수준임
- SCI급 논문 성과 557건(국가 R&D성과의 2.1%), 국내특허등록 250건(국가 R&D성과의 1.8%), 해외특허등록 25건(국가 R&D성과의 2.0%)임
- 공공성이 두드러지는 해양 분야의 연구는 지속적인 R&D 투자가 뒷받침되어야 원천기술개발이나 기술이전 등의 실적이 발생할 수 있음

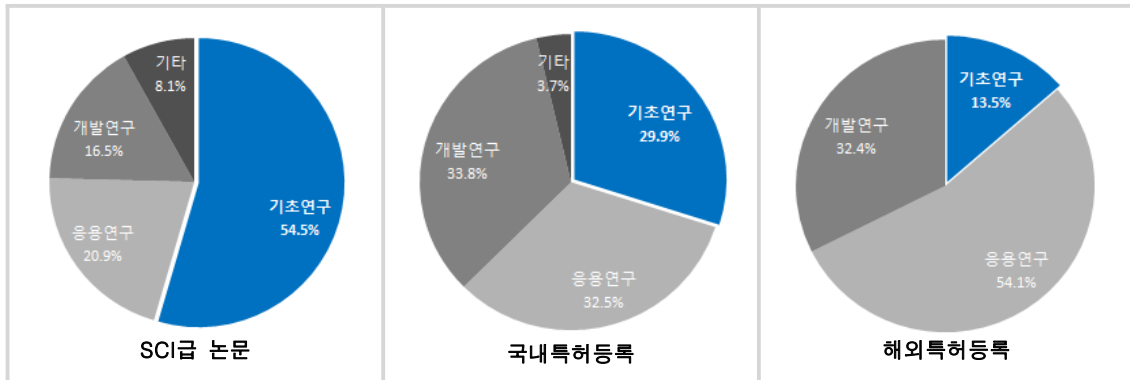


출처) 2016년 3월 NTIS 검색 결과, 기술과가치 분석

[그림 11-3-1] 해수부 R&D사업 성과(2013년)



- (해수부 기초연구 성과와의 비교) 해수부의 과학기술적성과 중 SCI급 논문 성과의 54.3%(258건), 특허등록 성과의 28.5%(국내60건, 해외3건)가 기초연구에서 발생
 - 해수부에서 기초연구에 투입한 사업비 1억 원당 발생한 과학기술적성과는 SCI급 논문 0.06건, 특허등록 성과 0.01건임



출처) 2016년 3월 NTIS 검색 결과

[그림 11-3-2] 해수부 기초연구 성과(2012년)

- 동 사업을 통해 발생하는 SCI급 논문은 1억 원당 0.31편으로 해수부 기초연구 성과의 약 5배의 비용대비 효과를 보임
- 반면, 특허등록의 경우 해수부의 기초연구와 동 사업의 목표 모두 0.01건으로 동일한 효과를 나타내고 있음

[표 11-3-3] 과학기술적성과 비교

(단위: 건)

성과	SCI급 논문	특허등록
해수부 기초연구 1억 원당 성과	0.06	0.01
동 사업 1억 원당 성과	0.31	0.01

출처) 2016년 3월 NTIS 검색 결과, 기술과가치 분석



3.3 국가 기초 R&D사업 성과와 비교

- 국가연구개발사업의 과학기술적성과 중 SCI급 논문 성과의 65.0%(17,576건), 해외특허 등록 성과 34.2%(434건)가 기초연구를 통해 발생
- 국가 기초연구에서 1억 원당 발생하는 과학기술적성과는 SCI급 논문 0.48건, 특허등록 0.12건 수준

[표 11-3-4] 기초연구의 과학기술적성과(2013년)

(단위: 건, (%))

연구개발단계		SCI급 논문	국내특허등록	해외특허등록
기초연구	건수	17,576(65.0)	3,998(28.3)	434(34.2)
	1억 원당 건수	0.48	0.11	0.01
응용연구	건수	4,825(17.8)	3,516(24.8)	370(29.2)
	1억 원당 건수	0.20	0.14	0.02
개발연구	건수	3,324(12.3)	5,861(41.4)	415(32.7)
	1억 원당 건수	0.06	0.10	0.01
기타*	건수	1,326(4.9)	775(5.5)	51(4.0)
	1억 원당 건수	0.03	0.02	0.00
합계	건수	27,052(100.0)	14,150(100.0)	1,270(100.0)
	1억 원당 건수	0.16	0.08	0.01

주) 기타는 연구장비, 시설 등 연구개발단계의 분류가 불가능한 경우

출처) 2016년 3월 NTIS 검색 결과, 기술과가치 분석

-동 사업을 통해 사업비 1억 원당 SCI급 논문은 0.31건, 특허등록 0.01건이 발생할 것으로 기대되며 타 국가 기초 R&D사업 대비 정량적 효과성은 다소 낮은 것으로 분석됨

※ 동 사업은 SCI 등재 학술지 중에서도 상위 20%이내 저널에 45건 이상(동 사업 SCI 논문 목표량의 50%), 최상위저널인 Science/Nature지에 1건 이상 게재를 목표로 하는 등 성과의 질적 측면에 중점을 두고 있으므로 SCI급 논문의 양적 비교 시 한계가 존재함

※ 동 사업의 경우, 기초연구 중에서도 자연현상에 대한 이해 자체를 목적으로 자연에 대한 새로운 이론과 창조적 지식을 획득하거나 정립하는 연구를 수행하는 것을 목적으로 하는 기초과학에 속함. 따라서 발명에 대한 배타적 권리를 인정하는 특허 성과를 대표성으로 보기 어려운 상황이므로, 특허등록에 따른 비용-효과분석 결과를 해석하는데 주의가 필요함

[표 11-3-5] 과학기술적성과 비교

(단위: 건)

성과	SCI급 논문	특허등록
국가 기초연구 1억 원당 성과	0.48	0.12
동 사업 1억 원당 성과	0.31	0.01

출처) 2016년 3월 NTIS 검색 결과, 기술과가치 분석



3.4 유사과제 성과비교

- 동 사업과 8개 유사과제의 과학기술적성과에 대한 비용효과분석을 수행
 - 유사과제에서 발생한 과학기술적성과의 평균값은 SCI급 논문 21.4건, 비SCI급 논문 38.6건, 특허등록 1.6건, 기술료 발생 0.3건임
 - 동 사업은 2021년까지 SCI급 논문 90건, 비SCI급 논문 58건, 특허등록 4건의 성과 창출을 목표하고 있음
 - 특히 동 사업은 상위 20%이내 SCI저널에 45건 이상, 최상위저널에 1건 이상 게재를 목표하는 등 연구의 질적 우수성 확보에 중점을 두고 있다는 점을 고려하여 분석을 수행함
- ※ '2017년 국가연구개발 성과평가 실시계획'에서 논문 건수가 성과 평가에서 원칙적으로 빠지고 부처에서 자율적으로 성과의 질적 측면을 평가하는 체계로 전환되었으나, 동 사업과 같이 기초연구의 비중이 높은 해수부R&D의 특성상 논문 성과가 연구의 질적 우수성을 방증하는 하나의 지표로 사용될 것으로 예상됨
- ※ 동 사업의 경우 기술이전 5건을 목표하고 있으나, 무상이전으로 기술료가 발생하지 않아 기술료 분석은 제외

[표 11-3-6] 유사과제의 과학기술적성과

(단위: 건)

과제명		SCI급 논문	비SCI급 논문	특허 등록	기술료 발생
동 사업	북서태평양 해양-태풍 상호작용 연구	90	58	4	-
유사 과제	1 북서태평양이 한반도 주변해에 미치는 영향 연구	72	179	3	-
	2 해양기인 중장기 기후변동의 역학적 연구와 예측기술 개발	33	79	-	-
	3 진보된 태풍분석 및 예측시스템 개발	1	6	-	-
	4 연안재해 대응 (지구온난화 환경에서 강화되는 태풍 해일 예측 기술 개선훈 연구)	11	4	-	-
	5 태풍-파랑-해양 접합모델 개발과 대가-해양 상호작용에 관한 연구	1	1	-	-
	6 재해 기상/이상 기후 분석 및 예측 태풍 및 재해성 스톱을 중심으로	12	1	4	-
	7 태풍 계절예측기술 개발 진로 및 강도를 포함한 예측성 향상	-	1	1	-
	8 운용해양(해양예보)시스템 연구	41	38	5	2
	합 계	171	309	13	2
평 균	21.4	38.6	1.6	0.3	

출처) 2016년 3월 NTIS 검색 결과, 기술과가치 분석



- 동 사업의 SCI급 논문 창출 효과는 유사과제 대비 약 3배 높은 것으로 분석됨
 - 유사과제를 통해 발생한 SCI급 논문성과는 총 171건으로 사업비 1억 원당 0.37건의 SCI급 논문이 게재되었으며, 동 사업에서는 5개년 간 90건, 1억 원당 0.31건의 SCI급 논문성과가 발생
 - ‘유사과제6’의 경우 1억 원당 1.69건의 SCI급 논문이 발생하였으나, 절대량은 12건으로 적어 타 사업과 효과 비교 시 주의가 필요
 - 비SCI급 논문 성과는 유사과제에서 1억 원당 0.66건의 효과가 나타났으나 동 과제는 1억 원당 0.20건으로 상대적으로 낮은 효과성을 보임

[표 11-3-7] 유사과제와의 SCI급 논문 성과 비교

(단위: 건)

과제명		SCI급		비SCI급		
		합계	1억 원당	합계	1억 원당	
동 사업	북서태평양 해양-태풍 상호작용 연구		90	0.31	58	0.20
유사 과제	1	북서태평양이 한반도 주변해에 미치는 영향 연구	72	0.39	179	0.97
	2	해양기인 중장기 기후변동의 역학적 연구와 예측기술 개발	33	0.55	79	1.32
	3	진보된 태풍분석 및 예측시스템 개발	1	0.10	6	0.62
	4	연안저해대응(지구온난화 환경에서 강화되는 태풍 해일) 예측기술 개선 연구	11	0.26	4	0.10
	5	태풍-파랑-해양 접합모델 개발과 대기-해양 상호작용에 관한 연구	1	0.53	1	0.53
	6	재해 기상/이상 기후 분석 및 예측: 태풍 및 재해성 스톱을 중심으로	12	1.69	1	0.14
	7	태풍 계절예측기술 개발: 진로 및 강도를 포함한 예측성 향상	-	-	1	1.16
	8	운용해양(해양예보)시스템 연구	41	0.26	38	0.24
	합 계		171	0.37	309	0.66

출처) 2016년 3월 NTIS 검색 결과, 기술과가치 분석

- SCI급과 비SCI급을 합한 전체 논문의 1억 원당 효과는 동 사업(0.50건)이 유사사업 (1.03건)보다 약 2배 낮게 나타남
- 그러나 논문 성과의 SCI급 비중은 동사업 60.8%, 유사과제 35.6%로 나타나 동 사업의 질적 성과가 상대적으로 더 우수한 것으로 분석됨



[표 11-3-8] 유사과제와의 논문전체(SCI+비SCI) 성과 비교

(단위: 건, %)

과제명		논문 성과		
		논문전체 (SCI+비SCI)	SCI급 논문 비중	1억 원당
동 사업	북서태평양 해양-태풍 상호작용 연구	148	60.8	0.50
유사 과제	1 북서태평양이 한반도 주변해에 미치는 영향 연구	251	28.7	1.35
	2 해양기인 중장기 기후변동의 역학적 연구와 예측기술 개발	112	29.5	1.88
	3 진보된 태풍분석 및 예측시스템 개발	7	14.3	0.72
	4 연안재해대응(지구온난화 환경에서 강화되는 태풍 해일 예측기술 개선 연구)	15	73.3	0.36
	5 태풍-파랑-해양 접합모델 개발과 대기-해양 상호작용에 관한 연구	2	50.0	1.05
	6 재해 기상/이상 기후 분석 및 예측: 태풍 및 재해성 스톱을 중심으로	13	92.3	1.83
	7 태풍 계절예측기술 개발: 진로 및 강도를 포함한 예측성 향상	1	0.0	1.16
	8 운용해양(해양예보)시스템 연구	79	51.9	0.50
	합 계		480	35.6

출처) 2016년 3월 NTIS 검색 결과, 기술과가치 분석

- 1억 원당 발생하는 특허등록건수로 기술적 성과의 효과성을 분석한 결과, 동 사업은 0.01건으로 유사과제 0.03건에 비해 다소 낮게 나타났으나 해당 연구는 기초 R&D특성을 강하게 띠고있어 '특허등록'을 대표성과로 보기 어려우므로 결과 해석에 주의가 필요함

[표 11-3-9] 유사과제와의 특허등록 성과 비교

(단위: 건)

과제명		특허등록	
		합계	1억 원당
동 사업	북서태평양 해양-태풍 상호작용 연구	4	0.01
유사 과제	1 북서태평양이 한반도 주변해에 미치는 영향 연구	3	0.02
	2 해양기인 중장기 기후변동의 역학적 연구와 예측기술 개발	-	-
	3 진보된 태풍분석 및 예측시스템 개발	-	-
	4 연안재해대응(지구온난화 환경에서 강화되는 태풍 해일 예측기술 개선 연구)	-	-
	5 태풍-파랑-해양 접합모델 개발과 대기-해양 상호작용에 관한 연구	-	-
	6 재해 기상/이상 기후 분석 및 예측: 태풍 및 재해성 스톱을 중심으로	4	0.56
	7 태풍 계절예측기술 개발: 진로 및 강도를 포함한 예측성 향상	1	1.16
	8 운용해양(해양예보)시스템 연구	5	0.03
	합 계		13

출처) 2016년 3월 NTIS 검색 결과, 기술과가치 분석



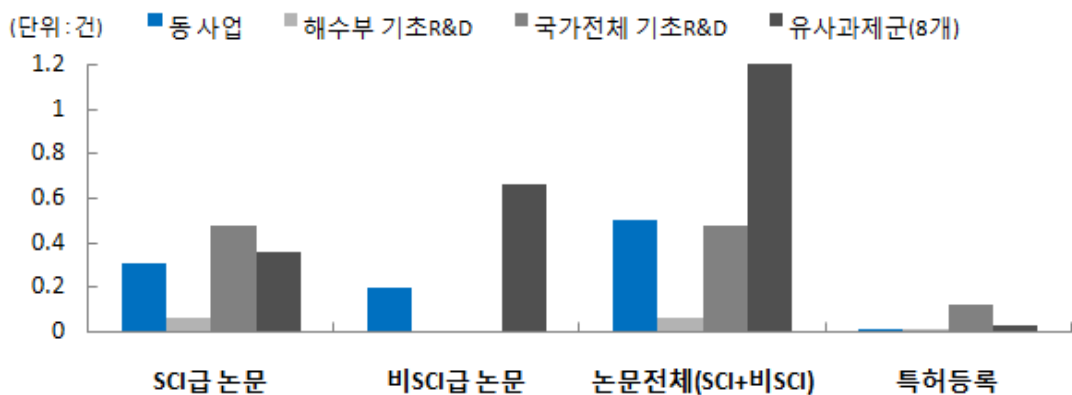
3.5 소결

- 동 사업으로 인해 발생하는 과학기술적성과를 해수부 및 국가전체기초연구, 유사과제와 비교한 결과, 동 사업의 비용 대비 효과가 우수한 것으로 분석됨
 - 투입 1억 원당 발생하는 전체 논문 성과는 0.50, SCI급 논문은 0.31건으로 해수부 기초R&D에 비해 비용 대비 효과가 우수한 것으로 나타남
 - ※ 동 사업은 SCI 등재 학술지 중에서도 상위 20%이내 저널에 45건 이상(동 사업 SCI 논문 목표량의 50%), 최상위저널인 Science/Nature지에 1건 이상 게재를 목표하는 등 성과의 질적 측면에 중점을 두고 있으므로 SCI급 논문의 양적 비교에 주의가 필요함
 - 특허등록의 경우 국가전체 기초R&D 및 유사과제군과 비교하여 낮은 성과를 보이지만, 자연현상에 대한 이해 자체를 목적으로 하는 동 사업의 특성을 고려하여 해석에 유의할 필요가 있음

[표 11-3-10] 과학기술적 효과

(단위: 건)

비교	1 억 원당 과학기술적 효과			
	SCI급 논문	비SCI급 논문	논문전체 (SCI+비SCI)	특허등록
복서태평양 해양-태풍 상호작용 연구	0.31	0.20	0.50	0.01
해수부 기초R&D	0.06	-	0.06	0.01
국가전체 기초R&D	0.48	-	0.48	0.12
유사과제군(8개)	0.37	0.66	1.03	0.03



출처) 2016년 3월 NTIS 검색 결과, 기술과가치 분석



- 이 외에도 동 사업에서 창출되는 기술이전, 정책활용 등의 성과가 과학기술적성과와 맞물려 연구결과 확산을 촉진시키고 성과의 질적 우수성을 제고시킬 수 있을 것으로 기대됨
- 동 사업은 2대 목표로 '북서태평양 난수성 소용돌이 해역에서 급격히 강화되는(RI)태풍 예측 모델링 시스템 SW'개선/개발'을 제시하는 등 성과의 질적 고도화를 목표하고 있으며, 그 가치는 SCI논문 수급 편에 해당할 것으로 평가됨
- 또한 동 사업으로 창출된 성과에 대해 기술이전 5건(기상청 등)을 계획하고 있어 과학기술적 성과활용의 외연을 넓힐 수 있을 것으로 예상



4 기대 효과

4.1 경제사회적 기대효과

- 다양한 실측자료 획득을 통해 한반도에 영향을 주는 태풍의 예측오차를 줄여 태풍재해에 대한 대응력을 높임으로써 매년 발생하는 태풍 피해액 및 복구액 저감에 기여하며, 사회적 안전성을 높이고 국가 경제의 지속 발전을 위한 토대 마련
- 동 기술개발을 통해 태풍경로 예측의 정밀도를 현재 수준보다 20% 향상시킴으로써 약 2,100억 원 이상의 경제적 효과 달성이 가능하며, 이는 동 사업의 소요예산(293.5억 원)의 약 10배에 달하는 경제적 손실예방 효과가 있는 것으로 분석됨
- ※ 최근 10년 간(2002~2011년) 태풍은 총 342회 발생하였으며, 연평균 42명의 사망자와 1조 460억 원의 피해액 및 1조 5,580억 원의 복구액 발생(2014년 재난재해 R&D투자전략(안), 미래부)
- ※ 한반도 태풍의 피해는 대부분 RI(Rapidly Intensified) 태풍이며, RI 태풍은 북서태평양에서 24시간에 30노트 (15m/s) 이상 급격히 강화되는 태풍을 의미함

기대효과	태풍경로와 RI 태풍 강도 예측 정확도 향상으로 인한 경제적효과
$\text{효과 (2,100억 원)} = \text{태풍예보정확도 1\%개선 시 경제적효과 (15억 원/년)} \times \text{태풍정확도 향상목표율(\% (20))} \times \text{효과 발생기간 (7년)}$	
태풍예보정확도 개선의 경제적효과	· 태풍예보 정확도 20% 향상시 연간 300억원 경제적 효과 (2014년 재난재해 R&D 투자전략(안), 미래부)
태풍정확도 향상목표율(%)	· 태풍경로예측 및 태풍강도예측 오차를 기존대비 20% 향상하고자 함 · 태풍경로예측오차의 현재 수준은 206km(기상청 72시간)이나, 동 사업은 165km까지 개선을 목표함
효과 발생기간	· 기상학 관련 특허의 기술수명주기(TCT) 분석을 통해 효과발생기간을 7년으로 산정

- 정확도 높은 태풍 예측정보를 제공해 어업인의 소득향상과 어업활동에 소모되는 제비용을 감소시킴으로써 수산업 발전에 기여
- 태풍 발생 전 상황을 파악한 후, 대응체계 구축을 통해 재난 및 인명피해를 최소화하고 재난 대응 시나리오와 복구관리 체계 구축을 통해 국가적 재난 대응력 강화
- 태풍 예보에 대한 국민의 신뢰성을 향상시키고, 재해발생에 선제적으로 대응함으로써 선진화된 국가 이미지 형성에 기여



○ 기상예측 및 해양연구 관련 장비의 국산화율 제고를 통해 관련 산업의 활성화 및 전·후방산업으로의 동반성장 활성화 촉진

-2012년 해양용도 Mobile Robot의 세계시장은 312.5백만달러, 국내시장은 374.7억 원으로 추정되며, 동 사업으로 인한 편익의 현재가치는 503.9억 원으로 분석됨

기대효과		해양용도 Mobile Robot 시장에서의 부가가치 창출										
효과 = (503.9억 원)		세계 해양용도 Mobile Robot 시장규모	×	국내 점유율 (10.6%)	×	부가 가치율 (29.6%)	×	R&D 기여율 (35.4%)	×	사업화 성공률 (38.6%)	×	사업 기여율 (35.3%)
편익기간 (2025~2031년)		<ul style="list-style-type: none"> · (편익회임기간) 개발·응용연구의 편익회임기간 3년(2022~2024년) 적용 · (편익발생기간) '기상학' 관련 특허의 기술수명주기(TCT)는 7년(2025~2031년) → 동 사업의 편익산정기간은 2025~2031년(총 7년 간) 										
가치 창출액	세계 해양용도 Mobile Robot 시장규모	<ul style="list-style-type: none"> · 전세계 mobile Robot 시장규모는 2012년 6249.6백만달러로 연 12.6% 성장 (Transparency Market Research free analysis, 2014.4.8.) · 전 세계산업 중 해양산업 비중 5%(한국해양수산개발원, 2009) → 해양용도 Mobile Robot 시장은 2012년 312.5백만달러로 연 12.6%성장 가정 										
	국내점유율 (10.6%)	<ul style="list-style-type: none"> · 전문로봇의 2013년 세계시장 \$3,567백만, 국내시장 \$378백만(KEIT, 2015) → 국내점유율 10.6% 										
	부가가치율 (29.6%)	<ul style="list-style-type: none"> · 매출액 중에서 실제 새롭게 창출된 경제적 편익이 차지하는 비중을 고려하기 위해 2012년 한국은행 산업연관표를 활용하여 '기타 특수목적용 기계' 부문의 부가가치율 29.59%를 산정 										
기술 활용률	R&D 기여율, (25.4%)	<ul style="list-style-type: none"> · 동 기술개발 활동이 부가가치를 창출하였을 때 연구개발에 의한 기여분을 추정하기 위해 일반적 R&D기여율인 35.4%(제3차 과학기술기본계획) 적용 										
사업 기여율	사업화성공률 (38.6%)	<ul style="list-style-type: none"> · R&D결과가 시장에서의 편익창출로 이어지는 과정에서의 불확실성을 반영하기 위해 사업화성공률을 고려하였으며, 평균값 38.6%를 적용함¹⁾ 										
	사업기여율 (35.3%)	<ul style="list-style-type: none"> · 유사 정부R&D투자액(유사과제 8건, 466억 원), 민간 R&D투자액(정부86.8 : 민간13.2비율 적용²⁾), 동 사업 예산(293.5억 원)을 고려하여 35.3% 도출 										
환율/할인율		<ul style="list-style-type: none"> · 2015년 평균환율인 1,131.5원 적용(2015년 국민계정(잠정)) · 현재가치(Present Value) 산출을 위한 할인율은 5.5%(KDI)를 적용 										
		2025년	2026년	2027년	2028년	2029년	2030년	2031년	합계			
세계해양로봇(백만불)		1,462	1,646	1,853	2,087	2,349	2,646	2,979	-			
국내 해양로봇(억원)		1,753	1,973	2,222	2,502	2,817	3,172	3,572	-			
↓ (지표요율 산정)												
편익		25	28	32	36	40	45	51	-			
편익(현재가치)		40.5	48.1	57.2	67.9	80.7	95.8	113.8	503.9			

1) 정보통신 39.8%(2008년 산업기술개발사업 성과활용조사, KEIT) 및 음향 및 통신장비 37.4%(2009년도 중소기업



- Wave Glider를 활용한 무인 해양관측 장비 개선·개발 연구는 현재 해외 의존도가 높은 국내 해양 기자재 산업을 육성할 수 있는 기회를 제공
- ※ 국산화율 목표: 동화모델 기반 해양-태풍결합 모델(95%), 준실시간 해양자료와 태풍결합용 해양 2층 모델(100%)
- 수중 및 수상에서 작동하는 로봇을 개발하여 향후 다양한 조선 기자재 개발을 위한 부품기술 수준을 향상시킬 수 있으며, 해양탐사, 해양자원 개발, 해양 감시 및 재난 대비와 관련한 산업에도 영향을 끼칠 것이라 기대
- 기상예측모델 개발은 연안레저, 관광산업으로 연계 활용할 수 있어 지방자치단체의 부가가치 창출 및 피해 최소화에 기여
- 중장기적으로 태풍이 지구온난화 및 해양생산성에 미치는 영향을 평가하고 기후변화 영향에 대처할 수 있는 대응체계 확립에 이바지함으로써 국민행복 실현
- 태풍이 해양환경에 미치는 직·간접적 영향을 연구하여 해양생태계 변화를 예측하고 이를 통해 수산자원량 통합관리를 가능케 함으로써 수산자원 고갈에 대응하고 글로벌 식량안보주권 확립
- ※ 세계야생동물기금협회(WWF)의 자료에 따르면 북미 지역의 미국과 캐나다 남방 해역에서 난류성 어종인 가자미, 넙치의 생산량이 감소할 것으로 예측되고, 대구의 주요 산란 지역인 북해 남부 해역에서 대구가 사라질 위험이 있다고 경고함
- 해양생태계의 중장기적 변화 예측을 통해 어획강도 및 수산자원 수급을 효율적으로 조절할 수 있으며, 물가를 안정적으로 유지함으로써 어민과 국민이 풍요로운 삶을 향유할 수 있는 환경 조성
- ※ 2011~2020년 세계 수산물 가격은 자원고갈, 사료값 상승 및 양식적지 부족 등으로 2001~2010년 대비 명목가격 35%(실질 14%) 상승을 경고(OECD-FAO Agriculture Outlook 2012-2021)

4.2 정책적 기대효과

- 해양관측·모니터링을 통해 태풍진단예측기법을 향상시킬 수 있어 재해·재난 대응 정책의 신뢰성 제고에 기여
- 박근혜 국정과제의 실현 및 「자연재해대책법」에 따라 태풍 등 자연재해에 적극 대응함으로써 국민 안전 체감도를 제고하고 ‘안전과 통합의 사회구축’이라는 국가비전 실현
- ※ (관련) 박근혜 정부의 140대 국정과제 중 ‘92. 총체적인 국가재난관리체계 강화’ 분야

기술통계조사보고, 중소기업중앙회)

2) 지구과학 분야 주체별 투자비율(2014년도 연구개발활동조사, KISTEP)



- ※ (관련) 「자연재해대책법」에서는 태풍 등 자연현상으로 인한 재난으로부터 국토 및 국민의 생명·신체 및 재산과 주요 기간시설 보호를 위해 필요한 사항을 규정
 - 태풍은 막대한 피해가 발생하는 반면, 피해보상 주체를 특정하기가 어렵기 때문에 이번 연구를 통해 국가대응체계를 마련하고 피해예방을 위한 지속적인 관리를 하는 것이 중요
- ※ 2010~2014년 동안 우리나라에 영향을 끼친 태풍은 총 18개이며, 이 중 48시간 진로 예측오차가 200km이상인 태풍은 7개, 100km이상인 태풍은 3개 발생
- 해양관측 로봇 탑재용 장비의 상용화 및 수치모델링 시스템을 개발하여 새로운 해양 산업을 창출하고 체계적인 해양관리를 가능케 함으로써 국정비전 실현을 위한 근거로 활용
 - 차세대 해양관측 로봇인 Wave Glider를 통해 기존의 기술로는 어려웠던 정교한 과학데이터를 확보함으로써 체계적인 해양관리를 목표로 하는 국정과제 실현에 기여
- ※ (관련) 박근혜 정부의 140대 국정과제 중 '13. 해양 신성장동력 창출 및 체계적 해양관리' 분야
 - 태풍예측 정확도 개선에 필요한 수치모델링 시스템을 개발하여 기상청에 제공하는 등 현업에 활용
 - 본 연구를 통해 축적된 데이터는 태풍뿐만 아니라 기후변화에도 활용할 수 있기 때문에 「자연재해대책법」 제16조에 따라 각 지자체가 수립하는 풍수해저감종합계획의 세부기준을 수립 등 정책적 목적으로도 이용 가능

4.3 과학기술적 기대효과

- 태풍예측모델 개발을 통해 국내 과학 기술의 글로벌 경쟁력을 향상시키고, 태풍재난 대응을 위한 국제협력연구 강화의 초석을 마련
 - 한반도 주변 해역은 태풍과 같은 기후변화로 인한 비예측적인 환경충격에 취약하기에 향후 한반도 주변 해역에서의 스트레스 요인들의 종합적 분석을 위한 방향 설정에 중요한 정보를 제공
 - 연구결과를 전 지구적인 탄소순환과 해양생산성 제고를 위한 직접적 증거로 활용하고, 국내 연구진에게 IPCC 보고서 등 국제 저널에 적극 인용될 수 있는 과학기술적 기초정보를 제공
 - 태풍에 의한 해양 기후변화 연구라는 글로벌 이슈에서 해외선진국과의 합동연구를 촉진하고 연구의 이니셔티브를 확보할 수 있는 동력을 확보



- ※ (해외기관과의 협력 전략 예시) NOAA(태풍 예측기술개선 연구, 해양-대기 상호작용 조사), Rutgers대학(글라이더 조사, 대륙붕 태풍반응), URI(태풍에 따른 기후변화 영향 예측기술연구), 가고시마대-대만국립대(류큐제도 단면/계류조사 등)
- 해양관측 무인플랫폼 및 장비기술력을 확보함과 동시에 태풍 통과중에 직접 관측 및 시료채취로 북서태평양 해양 자료를 획득함으로써, 지금까지 연구가 어렵거나 불가능 부분에 대한 새로운 선도적인 결과를 산출할 수 있을 것으로 기대
 - 무인 해양관측시대에 맞춰 멀티 무인플랫폼 통합운영기술 및 관련 해양 장비개발 기술력 향상에 기여
 - 북서태평양 난수괴(태풍은 해양에서 에너지를 얻음)를 통과하며 급격히 강화되는 RI 태풍에 대한, 최초의 해양 및 대기 자료 확보 및 DB 구축 가능
 - 최근 모델링 연구를 통해 제안된 글로벌 이슈인, 태풍에 의한 수온약층 온난화라는 현상에 대하여, 태풍전후 직접적인 북서태평양 조사선 조사를 통한 최초의 입체적인 검증을 통한 과학적 규명 기대
- 태풍전후 북서태평양 난수괴 해역 준실시간 해양구조 자료와 모델링기술을 융합하여 급격히 강화되는 태풍 예측모델링 기술력 강화
 - 태풍경로의 정확도 향상에 대한 연구는 전 세계적으로 상당한 진전을 보이고 있으나, 태풍강도의 정확성에 대한 연구(특히 RI 태풍의 강도 예측)의 경우 크게 향상되지 못하고 있어, 북서태평양 직접 정확한 해양자료를 확보하여 선진국과 대등한 수준의 태풍-해양결합 예측 모델의 정확도를 개선할 수 있을 것으로 기대
 - 북서태평양 RI 태풍 발생 해역의 준실시간 수온구조 자료는 자료동화 등을 통해 태풍-해양결합모델의 정확한 해양 초기조건 산출을 통해 정확한 RI 태풍 예측하기 위한 핵심자료로 활용 기대
- ※ (예시) 다양한 기상·해양인자 조사를 통한 RI과정에 대한 이해 및 예측모델 검증자료 확보
- 기후 및 해양환경에 미치는 태풍의 영향에 대한 과학적 이해 및 정량화
 - 태풍으로 인한 해양-대기 이산화탄소 플럭스, 해양생산력, 생물학적 탄소제거기작 (biological pump)변화를 파악함으로써 태풍의 미래 대기 이산화탄소 농도 조절 능력 평가 가능
 - 태풍이 수괴 및 해양-대기 간 열교환 수지에 미치는 영향을 정밀 평가하여 미래 기후변화 예측 시나리오에 태풍의 역할 추가로 예측 정확도 향상 기대
- 북서태평양 해양과 태풍의 상호작용 연구를 통해 약 148여건의 논문과 4건의 특허등록 등의 지식재산을 창출할 수 있을 것으로 기대



- 약 45건의 논문은 IF 상위 20%이내의 학술지에 발표할 예정이고, 연구기간 중 한두 분야에서 관련분야 최상위 저널에 발표할만한 수준의 연구성과 창출 노력
- ※ 피인용지수를 의미하는 IF(Impact Factor)는 전 세계 8,000개가 넘는 저널의 영향력을 평가하는 기준으로, 해당 저널에 실린 논문이 다른 연구자들에게 얼마나 많은 영향을 미쳤는지 보여주는 바로미터로 작용
- 기후변화와 태풍변동성 연구에서 1건, 해양 로봇 Wave Glider 탑재용 장비 개발/개선 연구에서 3건 등 총 4건의 특허등록이 목표



XII

참고문헌

- 강석구 (2016) 북서태평양 태풍 강화해역 해양-태풍 상호작용 연구프로그램 제안, 이사부 태풍/해양 프로그램 워크샵. 2-2 February 2016. 대한상공회의소.
- 남성현, 윤재열, 김구 (2004) 동해 실시간 해양관측 부이로부터 관측한 태풍 매미에 대한 연안해양의 반응 고찰. 한국해양학회지 바다, 9(3), 111-118.
- 유승협 (2016) 태풍 시기 기상청 협업 해양기상모니터링 시스템. 북서태평양 태풍-해양 상호작용 연구, 이사부 태풍/해양 프로그램 워크샵. 2-2 February 2016. 대한상공회의소.
- Babin, S., Carton, J., Dickey, T., Wiggert, J. 2004. Satellite evidence of hurricane-induced phytoplankton blooms in an oceanic desert. *J. Geophys. Res.* 109, C03043, doi:10.1029/2003JC001938.
- Babin, S., Carton, J., Dickey, T., Wiggert, J. 2004. Satellite evidence of hurricane-induced phytoplankton blooms in an oceanic desert. *J. Geophys. Res.* 109, C03043, doi:10.1029/2003JC001938.
- Bork, P., Bowler, C., de Vargas, C., Gorsky, G., Karsenti, E., and Wincker, P. 2015. Tara Oceans studies plankton at planetary scale. *Science*, 348(6237), 873-875.
- Brum, J.R., Ignacio-Espinoza, J.C., Roux G. Doulier, S., Acinas, S.G. Alverti, A. et al. 2015. Patterns and ecological drivers of ocean viral communities. *Science*, 348, 1261498
- Chang, Y., Liao, HT., Lee, MA., Chan, JW., Shieh, WJ., Lee, KT., Wang, GH., Lan, YC. 2008. Multisatellite observation on upwelling after the passage of Typhoon Hai-Tang in the southern East China Sea. *Geophys. Res. Lett.* 35, L03612, doi:10.1029/2007GL032858.
- Chen, C., Liu, C., Chuang, W., Yang, Y., Shiah, F., Tang, T., Chuang, S. 2003. Enhanced buoyancy and hence upwelling of subsurface Kuroshio waters after a typhoon in the southern East China Sea. *J. Mar. Syst.* 42, 65-79.
- Chen, X., Pan, D., Bai, Y., He, X., Chen, CTA., Kang, Y., Tao, B. 2015. Estimation of typhoon-enhanced primary production in the South China Sea: A comparison with the Western North Pacific. *Cont. Shelf. Res.* 111, 286-293.
- Chen, X., B. Qiu, S. Chen, Y. Qi and Y. Du (2015) Seasonal eddy kinetic energy modulations along the North Equatorial Countercurrent in the western



- Pacific. JGR.
- Chen Y.L., H.-Y. Chen, S Jan, S.-H Tuo. 2009. Phytoplankton productivity enhancement and assemblage change in the upstream Kuroshio after typhoons. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 385, 111-216.
- Darling, J.A., and Mahon, A.R. 2011. From molecules to management: Adopting DNA-based methods for monitoring biological invasions in aquatic environments. *Environmental Research* 111, 978-988.
- Davis, A., Yan, XH. 2004. Hurricane forcing on chlorophyll-a concentration off the northeast coast of the U.S. *Geophys. Res. Lett.* 31, L17304, doi: 10.1029/2004GL020668.
- Debbie, M. 2002. Fish eggs- the perfect food? <http://www.fisherycrisis.com/fisheggs.html>.
- de Vargas, C., Audie, S., Henry, N., Decelle, J., Mahé, F. et al. 2015. Eukaryotic plankton diversity in the sunlit ocean. *Science*, 348, 1261605.
- Eliot, M., Pattiaratchi, C. 2010. Remote forcing of water levels by tropical cyclones in southwest Australia. *Cont. Shelf. Res.* 30, 1549-1561.
- Emanuel, K. A., 1995: Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 52, 3969-3976.
- Emanuel, 1989. The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature* 326, 483-485
- Fujii, M., Yamanaka, Y. 2008. Effects of storms on primary productivity and air-sea CO₂ exchange in the subarctic western North Pacific: a modeling study. *Biogeosciences*. 5, 1189-1197.
- Fujii, M., Yamanaka, Y., Nojiri, Y., Kishi, M. 2007. Comparison of seasonal characteristics in biogeochemistry among the subarctic North Pacific stations described with a NEMURO-based marine ecosystem model. *Ecol. Modell.* 202, 52-67.
- Fryxell, G. 1983. *Survival strategies of the algae*. Cambridge, UK. Cambridge Univ. Press
- Holliday, D., Beckley, L.E., and Olivar, M.P. 2011. Incorporation of larval fishes into a developing anti-cyclonic eddy of the Leeuwin Current off south-western Australia. *Journal of Plankton Research* 22(11):1696-1708.



- Huang, W., Mukherjee, D., Chen, S., 2011. Assessment of Hurricane Ivan impact on chlorophyll-a in Pensacola Bay by MODIS 250 m remote sensing. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 490-498.
- Huntley, M.E., Gonzalez, A., Zhu, Y., Zhou, M. and Irigoien, X. 2000. Zooplankton dynamics in a mesoscale eddy-jet system off California. *Mar.Ecol.Prog.Ser.* 201, 165-178.
- Huskin, I., Anadon, R., Medina, G., Head, N. and Harris, R.P. 2001. Mesozooplankton distribution and copepod grazing in the Subtropical Atlantic near the Azores: Influence of mesoscale structures. *J. Plankton Res.* 23, 671-691.
- Ito et al., 2015. Forecasting a Large Number of Tropical Cyclone Intensities around Japan Using a High-Resolution Atmosphere-Ocean Coupled Model. *Wea. Forecasting*, 30, 793-808.
- Jin, F.-F., J. Boucharel, and I.-I. Lin (2014) Eastern Pacific tropical cyclones intensified by El Niño delivery of subsurface ocean heat, *Nature*, 516, 82-85.
- Kang, J.H., Kim, W.-S., Chang, K.-I. and Noh J.H. 2004. Distribution of plankton related to the mesoscale physical structure within the surface mixed layer in the southwestern East Sea, Korea. *J. Plankton Res.* 26(12), 1515-1528. KIOST 2012. 유비쿼터스
- KORDI 2011. 황해저층냉수괴의 거동과 생태계에 미치는 영향 연구. p.207 BSPE98562-10035-3.
- Kim E., D. Jeon, C. W. Shin and D. G. Kim (2014) Variation of the Southern Subtropical Countercurrent related to Sea Surface Height and Eddies in the Northwest Tropical Pacific. *Ocean Sci. J.* 49(1):35-46 <http://dx.doi.org/10.1007/s12601-014-0005-x>.
- Knutson et al., 2010. Tropical cyclones and climate change, *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/ngeo779
- KORDI 2011. 황해저층냉수괴의 거동과 생태계에 미치는 영향 연구. p.207 BSPE98562-10035-3
- Lee et al., 2013. Integrated modeling of the dynamic meteorological and sea surface conditions during the passage of Typhoon Morakot, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 59, 1-23.



- Lenai, L and Melville, W. K. (2014) Autonomous surface vehicle measurements of the Ocean's response to tropical cyclone Freda. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 31, 2169-2190.
- Li, M., Zhong, L., Boicourt, W., Zhang, S., Zhang, D. 2007. Hurricane-induced destratification and restratification in a partially-mixed estuary. *J. Mar. Res.* 65, 169-192.
- Li, Y., Wang, A., Qiao, L. 2013. Impact of Typhoon Morakot on chlorophyll a distribution on the inner shelf of the East China Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 483, 19-29, doi: 10.3354/meps10223.
- Lima-Mendez, G., Faust, K., Henry, N., Decelle, J., Colin, S. et al. 2015. Determinants of community structure in the global plankton interactome. *Science*, 349, 121262073-1-9, doi: 10.1126/science.1262073.
- Lin, I., Liu, W., Wu, C., Chiang, J., Sui, C., 2003. Satellite observations of modulation of surface winds by typhoon-induced upper ocean cooling. *Geophys. Res. Lett.* 30, 1131, doi:10.1029/2002GL015674.
- Liu, H., Hu, Z., Huang, L., Huang, H., Chen, Z., Song, X., Ke, Z., Zhou, L., 2013. Biological response to typhoon in northern South China Sea: A case study of "Koppu". *Cont. Shelf. Res.* 68, 123-132.
- Li, M., Zhong, L., Boicourt, W., Zhang, S., Zhang, D. 2007. Hurricane-induced destratification and restratification in a partially-mixed estuary. *J. Mar. Res.* 65, 169-192.
- Li, Y., Wang, A., Qiao, L. 2013. Impact of Typhoon Morakot on chlorophyll a distribution on the inner shelf of the East China Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 483, 19-29, doi: 10.3354/meps10223.
- Lin et al., 2012. Ocean heat content for tropical cyclone intensity forecasting and its impact on storm surge. *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-012-0214-5
- Lin, I., Liu, W., Wu, C., Chiang, J., Sui, C., 2003. Satellite observations of modulation of surface winds by typhoon-induced upper ocean cooling. *Geophys. Res. Lett.* 30, 1131, doi:10.1029/2002GL015674.
- Lin I-I, Wu CC, Pun IF, Ko DS (2008) Upper-ocean thermal structure and the western North Pacific category 5 typhoons. Part I: ocean features and the category 5 typhoons' intensification. *Mon Weather Rev.* 136(9):3288-3306



- Liu, H., Hu, Z., Huang, L., Huang, H., Chen, Z., Song, X., Ke, Z., Zhou, L., 2013. Biological response to typhoon in northern South China Sea: A case study of “Koppu”. *Cont. Shelf. Res.* 68, 123-132.
- Mellor and Blumberg, 2004. Wave breaking and ocean surface layer thermal response, *J. Phys. Oceanogr.*, 34, 693-698.
- Minamoto, T., Yamanaka, H., Takahara, T., Honjo, M.N., and Kawabata, Z.. 2012. Surveillance of fish species composition using environmental DNA. *Limnology* 13, 193-197.
- Murakami and Yasuda, 2008. Bursting-Layer Modeling Based on the Assumption of the Averaged Sea Surface for Strong Wind-Driven Current, *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 896-908.
- Palter, J. 2015. Storms bring ocean nutrients to light. *Nature.* 525, 460.
- Pesant, S., Not, F., Picheral, M., Kandels-Lewis, S., Le Bescot, N. et al. 2015. Open science resources for the discovery and analysis of Tara Oceans data. *Nature Scientific data*, 2: 150023, doi:10.1038/sdata.2015.23.
- Peduzzi et al., 2012. Global trends in tropical cyclone risk, *Nature Climate Change*, 2, 289-294.
- Platt, T., Bouman, H., Devred, E., Fuentes-Yaco, C., Sathyendranath, S. 2005. Physical forcing and phytoplankton distributions. *Sci. Mar.* 69(1), 55-73.
- Qiao et al., 2010. A three-dimensional surface wave-ocean circulation coupled model and its initial testing, *Ocean Dynamics*, 60(5), 1339-1355.
- Qiu B. and S. Chen (2004) Seasonal Modulations in the Eddy Field of the South Pacific Ocean. *JPO*.
- Qiu. B., S. Chen, P. Klein, H. Sasaki and Y. Sasai (2014) Seasonal Mesoscale and Submesoscale Eddy Variability along the North Pacific Subtropical Countercurrent. *JPO*.
- Rao, A., Joshi, M., Jain, I., Ravichandran, M., 2010. Response of subsurface waters in the eastern Arabian Sea to tropical cyclones. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 89, 267-276.
- Roman, M.R., Gauzens, A.L. and Cowles, T.J. 1985. Temporal and spatial changes in epipelagic microzooplankton and mesozooplankton biomass in warm-core Gulf Stream ring 82-B. *Deep-Sea Res.* 32, 1007-1022.



- Rumyantseva, A., Lucas, N., Rippeth, T., Martin, A., Painter, S.C., Boyd, T.J., and Henson, S. 2015. Ocean nutrient pathways associated with the passage of a storm. *Global Biogeochemical Cycles*. 29, 1179–1189, doi:10.1002/2015GB005097.
- Shiah, F., Chung, S., Kao, S., Gong, G., Liu, K. 2000. Biological and hydrographical responses to tropical cyclones (typhoons) in the continental shelf of the Taiwan Strait. *Cont. Shelf. Res.* 20, 2029–2044.
- Siswanto, E., Ishizaka, J., Yokouchi, K., Tanaka, K., Tan, C. 2007. Estimation of interannual and interdecadal variations of typhoon-induced primary production: A case study for the outer shelf of the East China Sea. *Geophys. Res. Lett.* 34, L03604.
- Son, S., Platt, T., Bouman, H., Lee, D., Sathyendranath, S. 2006. Satellite observation of chlorophyll and nutrients increase induced by Typhoon Megi in the Japan/East Sea, *Geophys. Res. Lett.* 33, L05607, doi:10.1029/2005GL025065.
- Tallapragada, V. 2016. Overview of the NCEP operational HWRf modeling system. HWRf Tutorial, NCWCP, 25–27, January 2016.
- Thomsen, P.F., Kielgast, J., Iversen, L.L., Møller, P.R., Rasmussen, M., and Willerslev, E.. 2012. Detection of a diverse marine fish fauna using environmental DNA from seawater samples. *PLoS ONE* 7(8), e41732
- Tsuchiya, K., Yoshiki, T., Nakajima, R. Miyaguchi, H., Kuwahara, V.S., Taguchi, S., Kikuchi, T., and Toda, T. 2013. Typhoon-driven variations in primary production and phytoplankton assemblages in Sagami Bay, Japan: A case study of typhoon Mawar (T0511). *Plankton Benthos Res.* 8(2), 74–87.
- Walker, N., Leben, R., Balasubramanian, S. 2005. Hurricane-forced upwelling and chlorophyll *a* enhancement within cold-core cyclones in the Gulf of Mexico. *Geophys. Res. Lett.* 32, L18610, doi:10.1029/2005GL023716.
- Webster, P., Holland, G., Curry, J., Chang, H. 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science* 309, 1844–1846.
- Wu, L., Wang, B., Geng, S. 2005. Growing typhoon influence on east Asia. *Geophys. Res. Lett.* 32, L18703, <http://dx.doi.org/10.1029/2005GL022937>.
- Wu, Y., Platt, T., Tang, C., Sathyendranath, S. 2007. Short-term changes in chlorophyll distribution in response to a moving storm: a modeling study, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 335, 57–68.



- Yablonsky and Ginis, 2008. Improving the Ocean Initialization of Coupled Hurricane-Ocean Models Using Feature-Based Data Assimilation, *Monthly Weather Review*, 136, 2592-2607.
- Ye, H., Tang, D., Afanasyev, Y. 2013. A subsurface chlorophyll a bloom induced by typhoon in the South China Sea. *J. Mar. Syst.* 128, 138-145.
- Yu, J., Tang, D. Li, Y., Huang, Z., Chen, G. 2013. Increase in fish abundance during two typhoons in the South China Sea. *Advances in Space Research.* 51, 1734-1749.
- Yu, J., Tang, D. Li, Y., Huang, Z., Chen, G. 2013. Increase in fish abundance during two typhoons in the South China Sea. *Advances in Space Research.* 51, 1734-1749.
- Yu, J., Tang, D., Chen, G., Li, Y., Huang, Z., Wang, S. 2014. The positive effects of typhoons on the fish CPUE in the South China Sea. 84, 1-12.
- Zhao, H., Tang, D., Wang, Y. 2008. Comparison of phytoplankton blooms triggered by two typhoons with different intensities and translation speeds in the South China Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 365, 57-65, doi: 10.3354/meps07488.
- Zheng, G., Tang, D. 2007. Offshore and nearshore chlorophyll increases induced by typhoon winds and subsequent terrestrial rainwater runoff. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 333: 61-74.

