

보고서 번호
--------

BSPE9956A-11496-1
-------------------

# 쿠로시오 변동성과 북서태평양 해양-대기 환경의 상관성 연구 기획

2017. 12. 31

한국해양과학기술원

# 제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “쿠로시오 변동성과 북서태평양 해양-대기 환경의 상관성 연구 기획”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 12.

총괄연구책임자 : 민 흥 식

참 여 연 구 원 : 권 민 호

“ : 김 영 호

“ : 나 한 나

### 보고서 초록

과제고유 번호	BSPE9956A- 11496-1	해당단계 연구기간	2017. 8. 1 - 2017. 10. 31	단계 구분	1
연구사업명	중사업명	쿠로시오 변동성과 북태평양 해양-대기 환경의 상관성 연구 기획			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명				
연구책임자	민 흥 식	해당단계 참여연구원수	총 : 4 명 내부: 4 명 외부:    명	해당단계 연구비	정부: 3,000 천원 기업:        천원 계 :        천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 4 명 내부: 4 명 외부:    명	총 연구비	정부: 3,000 천원 기업:        천원 계 :        천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해양순환·기후연구센터		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	85
<p>○ 쿠로시오 변동을 이해하기 위해서는 대기환경(바람장)과 해양환경(중규모 소용돌이)과의 연관성을 조사하여야 함.</p> <p>○ 바람장과 쿠로시오 변동의 상관성 연구에 필요한 내용으로 다음과 같은 내용을 제시함.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 북태평양 바람장의 주요모드 변조에 따른 쿠로시오 변동 분석</li> <li>- 대규모 바람장에 대한 쿠로시오 변동의 지연상관 분석</li> <li>- 대규모 바람장과 북태평양 쿠로시오 변동의 결합모드 변화 분석</li> </ul> <p>○ 중규모 소용돌이에 대한 연구 기획으로 다음과 같은 내용을 제시함.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중규모 소용돌이 특징과 전파 경로 파악</li> <li>- 중규모 소용돌이 분석 시 요구되는 자료 제시</li> <li>- 중규모 소용돌이 관측 방법 제시</li> </ul> <p>○ 관측자료의 시공간적 공백을 보완하기위한 수준 높은 자료동화 모형 자료를 생산하기 위해 해면 고도가 동화되어야 함.</p> <p>○ 해면고도 자료동화와 관련된 연구 기획으로 다음과 같은 내용을 제시함.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 국내외 자료동화 현황 분석</li> <li>- 해면고도 자료동화 방법 검토</li> <li>- 해면고도 자료동화 이론적 방법 제시</li> </ul>					
책임어 (각 5개 이상)	한 글	쿠로시오, 변동성, 바람장, 중규모 소용돌이, 자료동화			
	영 어	Kuroshio, Variability, Wind field, Eddy, Data Assimilation			

# 요 약 문

## I. 제 목

쿠로시오변동성과 북서태평양 해양-대기 환경의 상관성 연구 기획

## II. 연구 기획의 목적 및 필요성

- 쿠로시오 변동은 북동아시아 지역에 막대한 기후적, 생태학적 영향을 주며 우리나라 주변 해역의 해양환경에도 큰 영향을 주므로 쿠로시오 변동을 이해하는 것은 매우 중요함.
- 쿠로시오의 변동이 동중국해의 해양환경 변화에 미치는 영향은 연구되었으나 쿠로시오 자체 변동성에 대한 연구는 미진한 편임.
- 해양환경에 미치는 쿠로시오의 영향이 아닌, 쿠로시오 자체의 변동 원인을 이해하는 연구 기획이 필요함.
- 쿠로시오 변동의 강제력 중 하나인 대기의 바람장 변동을 이해하여야 함.
- 쿠로시오 변동은 해양 자체의 영향도 받으며 그 대표적인 것이 중규모 소용돌이임.
- 쿠로시오 변동에 영향을 주는 중규모 소용돌이에 대한 연구가 필요함.
- 자료동화 모형 자료는 관측자료가 존재하지 않는 시공간적 공백을 보완하는 데 유용함.

- 자료동화 모형 자료 생산은 어느 수준으로 현장관측을 대신할 수 있으므로 수준 높은 자료동화 모형이 필요함.
- 중규모 소용돌이와 쿠로시오의 연관성 연구에 필요한 자료 생산을 위해서는 해면고도가 동화된 자료동화 모형이 필요함.

### Ⅲ. 연구 기획의 범위

- 쿠로시오 변동에 영향을 미치는 지역/원격 바람장 변동에 대한 연구 기획
- 쿠로시오 변동에 영향을 미치는 중규모 소용돌이에 대한 연구 기획
- 해면고도 자료 동화 기법 적용에 대한 연구 기획

### Ⅳ. 연구 기획 결과

- 바람장과 쿠로시오 변동의 상관성 연구에 필요한 분석 방법 제시
  - 재분석자료를 이용한 북태평양 지역/대규모 바람장의 주요모드 분석
  - 북태평양 바람장의 주요모드 변조에 따른 쿠로시오 변동 분석
  - 다중기후모형을 이용한 대규모 바람장의 주요모드 분석
  - 대규모 바람장에 대한 쿠로시오 변동의 지연상관 분석
  - 대규모 바람장과 북태평양 쿠로시오 변동의 결합모드 변화 분석
  - 쿠로시오 변동에 영향을 주는 기후인자 분석
- 중규모 소용돌이 연구 방법 제시
  - 중규모 소용돌이 특징과 전파 경로 파악
  - 중규모 소용돌이 분석 시 요구되는 자료 제시
  - 중규모 소용돌이 관측 방법 제시
- 해면고도 자료동화 적용 제시

- 국내외 자료동화 현황 분석
- 해면고도 자료동화 방법 검토
- 해면고도 자료동화 이론적 방법 제시

## V. 연구개발결과의 활용계획

- 우리나라 주변 해양 환경에 큰 영향을 미치는 쿠로시오의 변동 원인 규명
- 대기(바람)에 의한 변화와 해양(중규모 소용돌이)에 의한 변화의 상대적인 중요성 규명
- 우리나라 주변 해양환경 변동에 기여하는 지역적인 요인과 원격 요인 이해
- 해면고도 자료동화 방안 수립, 해양/기후 예측 시스템에 적용
- 쿠로시오 변동 원인 규명을 위해 주요 원인 중 하나인 중규모 소용돌이의 발생 해역을 대상으로 한 소용돌이 변동성 분석 계획과 관측 계획 수립
- 북서태평양 지역 쿠로시오 변동의 역학적 이해의 증대로 우리나라의 증장기 예측기술 개선
- 쿠로시오 변동에 영향을 받는 생태적 전망 및 장기 기후전망의 불확실성 감소에 적용

# S U M M A R Y

## I. Title

Implementation planning for research program on the relationship between Kuroshio and variation of ocean-atmosphere environment in the western North Pacific

## II. Purpose and Rationale

- It is very important to understand Kuroshio variabilities because the Kuroshio has a huge climatic and ecological impact on the North East Asian region and the ocean environment in the waters around Korea.
- The effects of Kuroshio variabilities on the ocean environment in the East China Sea have been studied, but studies on Kuroshio's own variabilities have been limited.
- Research planning to understand the reason of Kuroshio variabilites is necessary.
- Wind fields variabilities, one of the forcing of Kuroshio variability, should be understood.
- Kuroshio variabilities are also affected by the ocean itself, such as submeso-scale eddies.
- Submeso-sclae eddies, one of the forcing of Kuroshio variability,

should be investigated.

- Data assimilation model data are useful to complement spatio-temporal gaps where observation data do not exist.
- A data assimilation model is needed because data assimilation model data can be used as a substitute for observations for some extent,
- A data assimilation model in which sea surface height is assimilated is required in order to produce the data necessary for the research of the relationship between eddies and Kuroshio.

### III. Scope

- A study on regional/remote wind field variabilities affecting Kuroshio variabilities
- A study on submeso-scale eddies affecting Kuroshio variabilities
- Plan for application of sea surface height assimilation technique

### IV. Results

- Presenting the analysis method for relationship between wind field and Kuroshio variability
  - Analysis of major mode of large-scale wind field in North Pacific using reanalysis data
  - Analysis of Kuroshio variability by main mode modulation of the North Pacific wind field



- Analysis of major modes of large scale wind field using multi climate model
  - Analysis of delayed correlation of Kuroshio variabilities for large-scale wind field
  - Analysis of the combined mode change of large-scale wind field and Kuroshio variability
  - Analysis of climate factors affecting Kuroshio variability
- Presenting the method to research meso-scale eddies
    - Research of characteristics of submeso-scale eddy and its propagation path
    - Providing data in order to analyze the submeso-scale eddy
    - Presenting observation method for the submeso-scale eddy
  - Presentation of sea surface height assimilation
    - Analysis of domestic and overseas situation of data assimilation
    - Review of sea surface height assimilation method
    - Presenting theoretical method of sea surface height assimilation

## V. Utilization plan

- Identification of the reason of Kuroshio variability affecting the marine environment around Korea
- Identifying the relative importance of changes due to wind and eddy
- Understanding of local/remote factors contributing to changes in the ocean environment around Korea
- Establishing sea level height assimilation method and applying to ocean/climate prediction system

- Establishing plan for eddy variability analysis and observation plan for eddy region, one of the major causes of Kuroshio variability.
- Improvement of mid/long-term forecasting technology by understanding of Kuroshio variability in the Northwest Pacific
- Reducing uncertainty of ecology and long-term climate forecast affected by Kuroshio variability

# C O N T E N T S

Summary .....	i
Contents .....	x
Figure list .....	
Table list .....	xvi
Chapter 1 Introduction .....	1
Section 1 Background and necessity .....	1
Section 2 Scope .....	4
Chapter 2 Status of domestic and overseas development .....	5
Section 1 Wind field and Kuroshio variability .....	5
Section 2 Sub-meso scale eddies and Kuroshio variability .....	21
1. Kuroshio transport in the east of Taiwan .....	21
2. Kuroshio transport in the East China Sea .....	23
3. Kerama Gap transport .....	25
Section 3 Data assimilation of sea surface height .....	27
1. International trends in ocean data assimilation .....	27
2. Status of sensitivity test of sea surface height assimilation .....	30
3. KIOST data assimilation system .....	34
가. Global reanalysis data system - DASK .....	34
나. Prediction system for Northwestern Pacific - OPEM .....	40
Chapter 3 Results .....	49
Section 1 Research plan for wind field-Kuroshio variability .....	49
1. Wind field analysis plan .....	49
2. Research content and scope .....	55

Section 2 Research plan for Kuroshio variability by eddy .....	57
1. Eddy variability analysis plan .....	57
2. Eddy variability observation plan .....	60
Section 3 Plan for developing sea surface height assimilation technique .....	62
Chapter 4 Utilization plan .....	66
Chapter 5 References .....	67

# 목 차

요약문 .....	i
목차 x	
그림목차 .....	
표목차 .....	xvi
제 1 장 서론 .....	1
제 1 절 연구 기획의 배경 및 필요성 .....	1
제 2 절 연구 기획의 범위 .....	4
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	5
제 1 절 바람장과 쿠로시오 변동성 .....	5
제 2 절 중규모 소용돌이와 쿠로시오 변동 .....	21
1. 대만 동쪽 쿠로시오 수송량 .....	21
2. 동중국해 쿠로시오 수송량 .....	23
3. Kerama Gap 수송량 .....	25
제 3 절 해면고도 자료동화 .....	27
1. 해양자료동화 국제 동향 .....	27
2. 해면고도 자료동화 민감도 실험 현황 .....	30
3. 한국해양과학기술원 자료동화 시스템 .....	34
가. 전지구 재분석 자료 생산 시스템 - DASK .....	34
나. 고해상도 북서태평양 예측 시스템 - OPEM .....	40
제 3 장 연구개발수행 내용 .....	49
제 1 절 바람장과 쿠로시오 변동성 연구 계획 .....	49
1. 바람장 분석 계획 .....	49
2. 연구내용 및 범위 .....	55
제 2 절 중규모 소용돌이에 의한 쿠로시오 변동 연구 계획 .....	57

1. 중규모 소용돌이 변동성 분석 계획 .....	57
2. 중규모 소용돌이 변동성 관측 계획 .....	60
제 3 절 해면고도 자료동화 기법 개발 계획 .....	62
제 4 장 연구개발결과의 활용계획 .....	66
제 5 장 참고문헌 .....	67

## 그 립 목 차

그림 1.1.1. 쿠로시오 변동성과 우리나라 주변해역 변동 관련성의 모식도 .....	2
그림 2.1.1. 쿠로시오 입구 지역 연평균 지형류와 상대소용돌이도 .....	5
그림 2.1.2. 바람장과 쿠로시오 변동성의 모식도 .....	6
그림 2.1.3. 엘니뇨와 쿠로시오 변동성의 관계 .....	7
그림 2.1.4. 북서태평양 지역 동중국해 쿠로시오 평균 경로 .....	8
그림 2.1.5. 월평균 PDO 지수, 연평균 PDO 지수, 동해로 향하는 쿠로시오 수송량 및 류큐 수송량 .....	9
그림 2.1.6. (a) 바람결의 평균, (b) PDO에 회귀된 바람결, (c) PDO 지수와 바람결의 상관계수, (d) 동해로 향하는 수송량과 바람결의 상관계수 .....	10
그림 2.1.7. 쿠로시오 축이 연안쪽에 위치할 때 표층수온, 바람장, 열속 .....	10
그림 2.1.8. PDO가 음의 위상일 때, 바람장과 열속 .....	11
그림 2.1.9. 관측자료 기반 대만 북동쪽 지역의 쿠로시오 수송량과 PDO 지수 .....	12
그림 2.1.10. 일본 남쪽 쿠로시오 지형류의 연도별 수송량 .....	12
그림 2.1.11. 평균 바람응력 및 바람결과 1970년대 후반 전후 바람응력의 차이 .....	13
그림 2.1.12. 평균 지형류 유선함수와 1970년대 후반 전후 차이 .....	14
그림 2.1.13. 쿠로시오를 지나가는 동서평균된 해면고도 편차 .....	14
그림 2.1.14. 바람 응력의 EOF 1모드와 PDO 지수 .....	15
그림 2.1.15. 바람응력에 강제된 경압 로스비파 .....	16
그림 2.1.16. OFES 자료 기반 쿠로시오 지역 해면고도 변동성의 두 EOF 모드 .....	17
그림 2.1.17. PDO 지수, 엘니뇨 지수, 북태평양 대기 순환 지수, 엘니뇨와 북태평양 대기순환 지수가 제거된 바람응력에 의한 PDO 지수 .....	18

그림 2.1.18. 북태평양의 대기 강제력과 장주기 모드 .....	19
그림 2.1.19. 동태평양 엘니뇨와 중태평양 엘니뇨. 그 엘니뇨와 관련된 해면기압 및 해표면수온 편차 패턴 .....	20
그림 2.1.20. 북태평양과 열대태평양의 상호작용 모식도 .....	20
그림 2.2.1. 중규모 소용돌이와 대만 동쪽 쿠로시오 변동의 상관성에 대한 모식도 .....	22
그림 2.2.2. 대만 동쪽에 중규모 소용돌이가 많이 발생한 해와 적게 발생한 해의 해면고도 편차 및 쿠로시오 수송량 차이 .....	23
그림 2.2.3. 동중국해 쿠로시오와 류큐해류 수송량이 동시에 증가하거나 감소할 때의 해면고도 편차 .....	24
그림 2.2.4. Kerama Gap을 통한 동중국해 유입 수송량이 크거나(좌) 작을 때(우) 해면고도 편차(상)와 그로부터 계산한 지형류(하) .....	26
그림 2.3.1. 전세계 해양 자료동화 시스템에 사용되는 해양순환모델의 현황과 특성(GODAE) .....	28
그림 2.3.2. 전세계 자료동화 시스템 현황(GODAE) .....	29
그림 2.3.3. 해면고도 자료 현황 .....	30
그림 2.3.4. 해면고도 자료동화에 따른 해면고도 재현성 평가. 관측자료와의 상관도 .....	31
그림 2.3.5. 해면고도 자료동화에 따른 해면고도 재현성 평가. 멕시코만에서의 에디 변동성 재현 능력 비교 .....	32
그림 2.3.6. 해류 비교 검증을 위한 북대서양에서 뜰개 부이의 위치 자료. 2006년 1월 1일부터 3월 31일까지 .....	33
그림 2.3.7. 해면고도 위성 자료를 동화함에 따른 해류의 재현성 검증 결과. 관측 자료와의 상관도 .....	34
그림 2.3.8. JJA와 DJF의 평균 해표면수온 및 Bias (1947-2012 평균): (a) 관측자료 EN4, (b) DASK, (c) DASK Bias .....	37
그림 2.3.9. 1980-2010년 관측자료(EN4)에 대한 HC300의	



상관계수(신뢰도 99% 이상 채색, 이하 흰색):	
(a) DASK, (b) DASK wind-nudging data,	
(c) SODA, (d) ECDA .....	38
그림 2.3.10. ENSO skill test diagram .....	39
그림 2.3.11. 2017년 12월 6일 북서태평양 해역의	
SST 분포도: (좌) HYCOM 예측자료(1/12도),	
(우) OPEM 예측자료(1/24도) .....	43
그림 2.3.12. NASA GHRSSST 일자료에 대한	
SST RMSE (201601-201703): (적색) HYCOM,	
(청색) OPEM, x축은 2016년 1월 1일부터의 날짜 수 .....	44
그림 2.3.13. 재분석자료에 대한 수온 프로파일 및 RMSE .....	45
그림 2.3.14. 재분석자료에 대한 염분 프로파일 및 RMSE .....	46
그림 2.3.15. 2017년 7월 12일 우리나라 동해안 냉수대	
분포. (좌) HIMAWARI SST 위성 영상, (중) 천리안	
위성 클로로필 영상, (우) OPEM SST 예측자료 및	
KMA UM 10m 바람장(*출처 : 2017년 7월 19일자	
SBS 인터넷 신문 보도자료) .....	47
그림 2.3.16. 2015년 8월 평균 동해 북위 37도 단면의	
수온(상)과 염분(하) 분포. (좌) OPEM,	
(중) 관측자료, (우) HYCOM 에서의 결과물 .....	48
그림 3.1.1. 재분석자료 생산에 이용되는 관측자료 .....	49
그림 3.1.2. ECMWF 재분석자료 해양 관측자료 .....	49
그림 3.1.3. 주성분분석의 개념도 .....	51
그림 3.1.4. 정준상관분석의 모식도 .....	52
그림 3.1.5. CMIP5 모형의 해상도와 개발 기관 .....	53
그림 3.2.1. 인공위성 관측 해면고도 편차의 시간변동성으로,	
값이 클수록(적색일수록) 소용돌이가 활발한 것으로	
해석할 수 있음 .....	57
그림 3.2.2. 중규모 소용돌이의 주요 특징(발생 빈도, 평균	
운동에너지, 극성)의 공간 분포(좌)와 위도별 평균값(우) .....	58

그림 3.2.3. 반시계방향(a)과 시계방향(b) 중규모 소용돌이의 내부와 외부(c)를 관측한 Argo 플롯의 공간분포 .....	59
그림 3.2.4. 그림 3.2.3의 각 구역별 수온-염분 분포와 잠재와도 분포 .....	60
그림 3.2.5. 2014년 1월 2일 인공위성 관측 해면고도 분포와 인공위성 관측 경로(회색 실선)에 맞춘 동중국해 쿠로시오 관측 정점(황색 굵은 실선), 추가 관측 제안 지점(백색 삼각형) .....	61
그림 3.3.1. Cooper and Haines (1996)이 제시한 해면고도 변이로부터 가상의 수온과 염분 프로파일 추정 방법 개념도 ...	63
그림 3.3.2. OSCAR 표층 해류 자료와의 상관도 비교 검증: (상) 자료동화를 적용하지 않을 경우, (중) 수온과 염분 프로파일을 동화할 경우, (하) 수온과 염분 그리고 해면고도를 동화할 경우 .....	65

## 표 목 차

표 2.3.1. DASK의 자료동화 입력자료 .....	36
표 2.3.2. 한국해양과학기술원 해양예측시스템(OPEM)에 사용된 수치모델 입력 자료 .....	41
표 3.1.1 CMIP5의 시나리오 종류 .....	54

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구 기획의 배경 및 필요성

우리나라 주변 바다와 직접적으로 연결되어 있는 동중국해에서는 쿠로시오의 변동에 의해 수온, 해류 등의 변화가 크게 나타나며, 이는 우리나라 주변 해역의 해양환경에 큰 영향을 미친다. 다양한 현장 관측을 통해 쿠로시오의 변동이 동중국해의 해양환경 변화에 미치는 영향이 연구되어 왔다. 하지만 쿠로시오 자체 변동성에 대한 연구는 미진한 편이다. 이에 본 연구기획에서는 해양환경에 미치는 쿠로시오의 영향이 아닌, 쿠로시오 자체의 변동 원인을 이해하는 연구를 기획하고자 한다.

최근 지구온난화에 의해 전지구 지표면 부근의 기온과 수온이 상승하고 있으며 특히 서안경계류 수온 상승이 두드러진다. 실제로 쿠로시오와 관련된 북서태평양 해역에서 수온 상승의 기울기가 가장 가파르다. 이러한 수온 상승은 태풍 활동의 강화나 제트류의 변동성 증가에 크게 영향을 줄 수 있다. 이에 대한 예측 능력을 향상시키기 위해서는 이와 관련된 해양 및 대기 시스템의 이해가 필요하다.

수십일 정도의 계절내 시간규모에서 열대 서태평양 온난역에서 발생한 강한 적운 군집(cumulus cloud clusters)은 여름철 한반도로 북진하는 특성을 갖는다. 이러한 북진하는 계절내 진동은 장마와 매우 밀접한 관계가 있다. 왜냐하면, 북진하는 계절내 진동의 위상과 위상속도에 따라 한반도 장마의 시간적 패턴이 결정되기 때문이다. 이러한 북진하는 계절내 진동은 한반도로 직접적으로 영향을 줄 수 있어 그 이해가 우선적으로 요구됨에도 불구하고 그 기작에 대한 이해는 아직 부족하다. 그 기작과 관련하여 해양-대기 상호작용이 중요하다고 알려져 있지만 정확한 기작은 알려져 있지 않다.

열대온난역은 해양-대기 상호작용이 가장 활발하게 일어나는 지역이므로, 해양 자체에 의한 쿠로시오 변동 뿐 아니라 대기 변동과 관련된 상호작용을 이해하여야 한다. 그리고 열대서태평양 지역은 한반도 근해에 직간접적으로 영향을 주는 쿠로시오 해류의 근원 지역으로서 쿠로시오 변동은 한반도와 일본을 포함한 북동아시아 지역에 막대한 기후적, 생태학적 영향을 끼친다. 그러므로 쿠로시오 변동을 이해하는 것은 매우 중요하며 이를 위하여 이 변동의 강제력 중 하나인 대기의 바람

장 변동을 이해하여야 한다(그림 1.1.1).

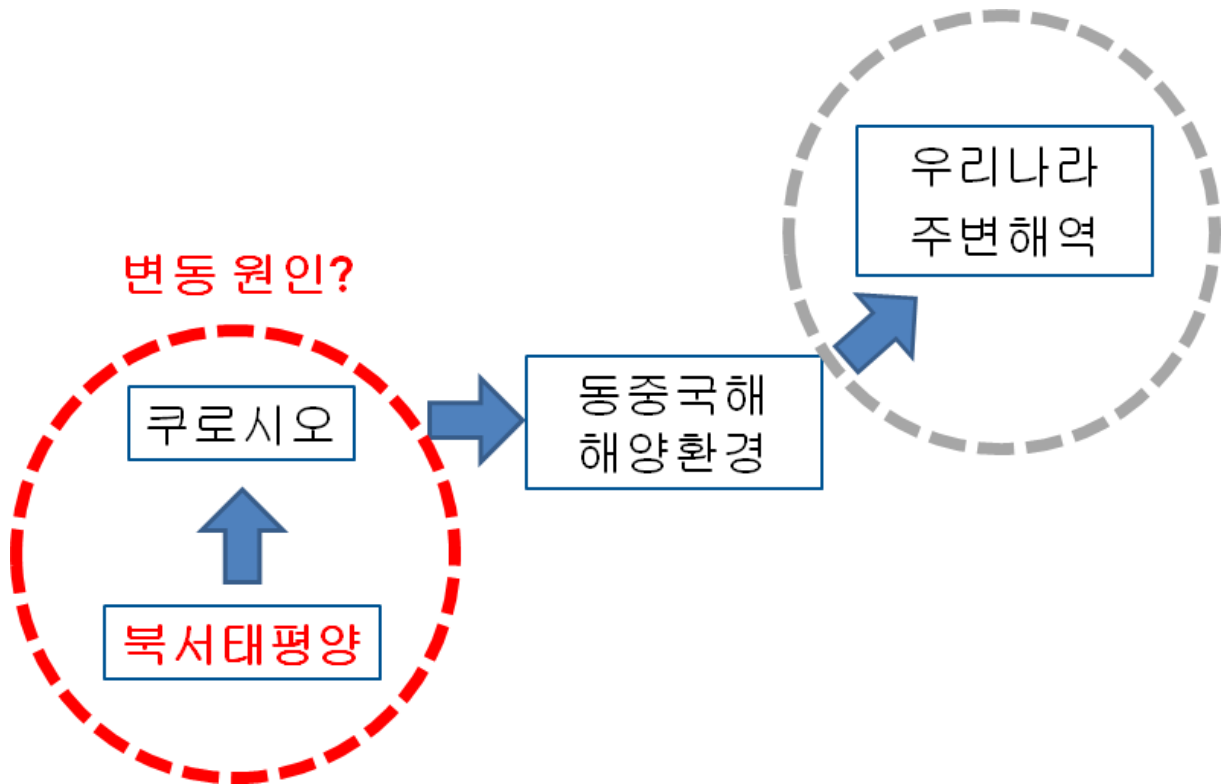


그림 1.1.1. 쿠로시오 변동성과 우리나라 주변해역 변동 관련성의 모식도.

쿠로시오의 변동은 다양한 시간규모의 바람장에 의해 영향을 받는데, 특히 계절내 규모의 시간 규모에서는 지역 바람장의 영향을 많이 받고, 계절 변동, 경년 변동 및 십년 변동의 시간 규모에서는 원거리 대규모 바람장에 의해서도 영향을 받을 수 있다. 그러나 관측 자료의 부족과 기후모형의 부정확성으로 인하여 쿠로시오 변동에 대한 바람장의 지역적 영향이나 대규모 영향이 뚜렷하게 알려져 있지 않다. 따라서 이 분야에 대한 연구가 필요하다.

한편 쿠로시오 변동은 바람장으로 대표되는 대기의 영향을 받을 뿐만 아니라 해양 자체의 영향도 받는다. 그 대표적인 것이 중규모 소용돌이의 영향이다. 중규모 소용돌이는 쿠로시오와 상호작용을 하며 그 자체가 변하기도 하고 쿠로시오 변동을 유발하기도 한다. 중규모 소용돌이와 쿠로시오 변동과의 연관성에 대한 연구는 기존에 여러 연구자에 의해 수행되었긴 하였으나 관측을 통한 연구는 상대적으로 부족한 편이다. 인공위성 해면고도 자료를 활용한 연구들을 보면 북태평양 서

안경계류의 동쪽에서 생성된 소용돌이가 서쪽으로 전파하면서, 해류와 지형, 그리고 소용돌이의 위치에 따라 쿠로시오를 강화시키기도 하고 약화시키기도 한다.

하지만 중규모 소용돌이가 많이 발생하는 북적도반류 해역을 비롯한 저위도 지역에서 인공위성 해면고도 자료의 오류가 상대적으로 크다는 것이 보고되면서 소용돌이를 현장에서 직접 관측할 필요성이 커지고 있다. 최근 들어 중규모 소용돌이를 직접 관측하기 위한 노력이 있었으나 그 지역이 한정적이고 우리나라 연구진이 수행한 관측은 매우 드물다. 그러므로 쿠로시오 변동에 영향을 주는 중규모 소용돌이에 대한 연구, 특히 현장 관측과 인공위성 자료를 함께 활용해서 각 자료의 단점을 보완하여 결론을 도출하는 연구가 필요하다.

자료동화 기법은 해양관측 자료를 해양순환모델에 동화하여 고해상도의 그리고 통계적으로 오차가 가장 작은 자료를 생산하고자 개발되었다. 이렇게 생산된 자료는 해양의 현재 상태를 진단하는데 다양한 정보를 제공할 뿐만 아니라 해양순환모델을 위한 최적의 초기 조건을 제시해주기 때문에 과학계 뿐만 아니라 해양예측 분야와 국방 분야에서도 많은 관심을 얻고 있다. 자료동화 기법을 적용하여 생산되는 자료를 재분석자료라고 하는데 기상 분야에서는 일찍이 재분석자료를 관측자료로 인식하고 다양한 기상 현상을 진단하는데 활용해오고 있다. 최근 해양재분석 자료에 대한 관심 또한 높아지고 있으며 해양 및 기후 현상을 진단하고 예측하는데 활용되고 있다. 특히 현장관측이 어려운 해역의 해양환경을 파악하거나 또는 현장관측으로 이루어지지 않은 시간적, 공간적 공백을 보완할 수 있는 자료로 인식되고 있다.

## 제 2 절 연구 기획의 범위

기존 연구들에서 쿠로시오의 주요 변동 원인으로 크게 두 가지가 제시되어 왔다. 하나는 북태평양 바람장이고, 다른 하나는 중규모 소용돌이이다. 북태평양 바람장 중에서도 쿠로시오 변동의 시공간 규모에 따라 대규모 바람장과 지역 바람장의 상대적인 중요성이 강조되어 왔으며, 중규모 소용돌이를 포함하여 우세한 변동 원인이 시공간적으로 달라질 수 있음이 제시되었다.

본 연구에서는 북서태평양 해양-대기 환경과 쿠로시오 변동성의 관계를 규명하기 위한 방안을 모색하고, 해면고도 자료동화 기법 개발 및 적용 계획을 수립하고자 한다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 바람장과 쿠로시오 변동성

Nakamura *et al.* (2015)는 아래와 같은 단순화된 에크만층 모형을 이용하여 이상적인 바람을 이용하여 그림 2.1.1에서 보이는 영역에 대하여 쿠로시오 변동성을 보였다.

$$-\left(f - \frac{\partial u_g}{\partial y}\right) \cdot \bar{v}_E + \left(u_g \frac{\partial}{\partial x} + v_g \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial u_g}{\partial x}\right) \cdot \bar{u}_E = \frac{\tau_x}{\rho_0 d},$$

$$\left(f + \frac{\partial v_g}{\partial x}\right) \cdot \bar{u}_E + \left(u_g \frac{\partial}{\partial x} + v_g \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial v_g}{\partial y}\right) \cdot \bar{v}_E = \frac{\tau_y}{\rho_0 d},$$

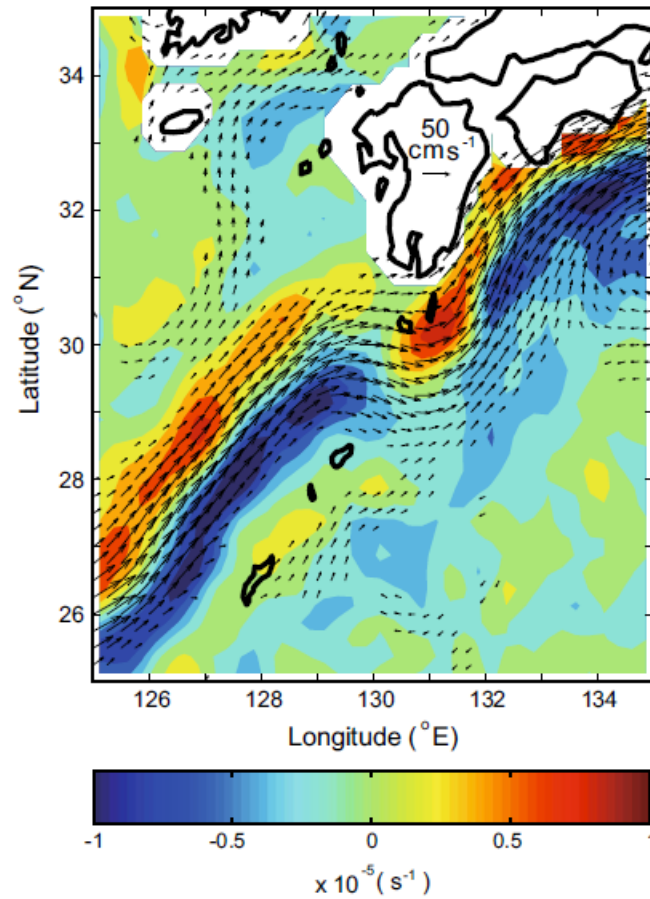


그림 2.1.1. 쿠로시오 입구 지역 연평균 지형류와 상대소용돌이도



Nakamura et al. (2015)의 결과를 토대로 지역바람장(local wind field)에 대한 쿠로시오 변동성에 대한 그림 2.1.2와 같은 모식도를 만들었으나, 모형이 다소 간단하여, 관측변동성을 잘 뒷받침하지는 못하며, 추가 관측 및 연구가 요구된다.

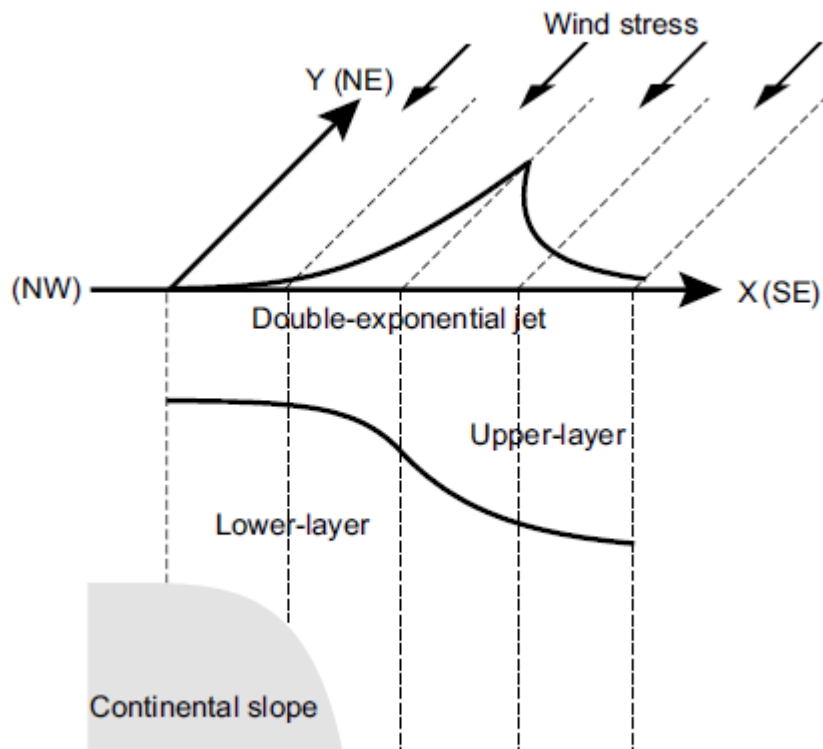


그림 2.1.2. 바람장과 쿠로시오 변동성의 모식도.

쿠로시오 변동은 대규모 바람장의 영향을 받으며, ENSO와 PDO와 같은 대규모 기후 변동성과 관련하여 연구가 수행되어 왔다. 특히, Yamagata *et al.* (1985)는 엘니뇨와 쿠로시오의 경년변동성의 연결성을 분석하였다(그림 2.1.3). 그들의 연구에 따르면, 엘니뇨와 연관된 쿠로시오 변동성에는 엘니뇨 주기에서 유의미한 공상관(coherency)이 있으며, 쿠로시오 변동성 뿐 아니라 북적도 해류와의 상관성도 분석되었다. 그러나 그들이 연구한 연구 기간이 비교적 짧고 이후 연구에서 엘니뇨와 쿠로시오 변동성 간의 직접적 원격상관이 보고되지 않고 있다.

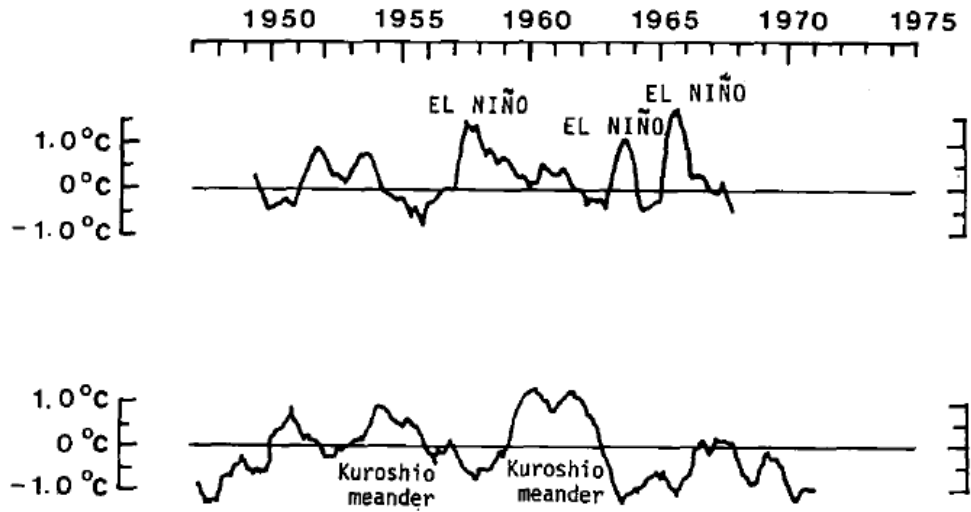


그림 2.1.3. 엘니뇨와 쿠로시오 변동성의 관계.

Andres *et al.* (2009)는 관측자료를 토대로 그림 2.1.4와 같이 동해로 향하는 해류의 수송량과 류큐 수송량이 연평균 PDO 지수와 상관성이 있음을 보였다(그림 2.1.5). 그들은 PDO와 연관된 대규모 바람장 패턴이 쿠로시오 변동성에 영향을 줄 수 있다는 것을 보였다(그림 2.1.6).

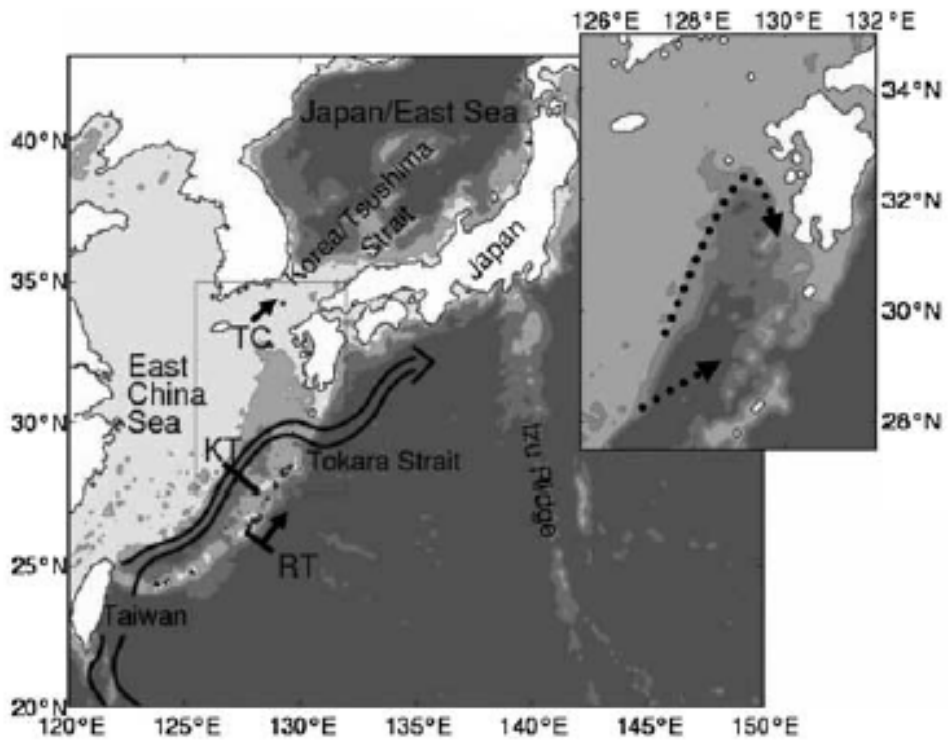


그림 2.1.4. 북서태평양 지역 동중국해 쿠로시오 평균 경로.

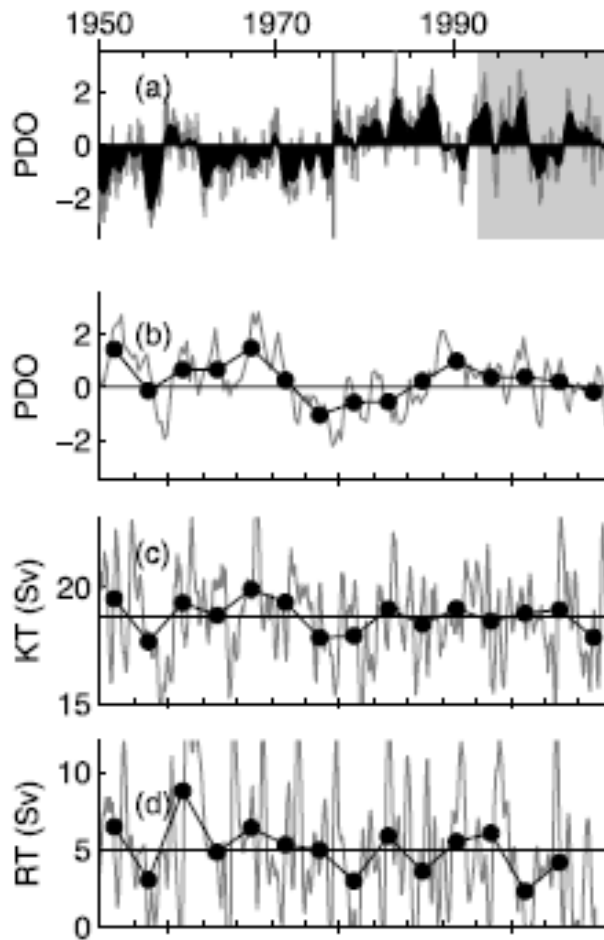


그림 2.1.5. 월평균 PDO 지수, 연평균 PDO 지수, 동해로 향하는 쿠로시오 수송량 및 류큐 수송량.

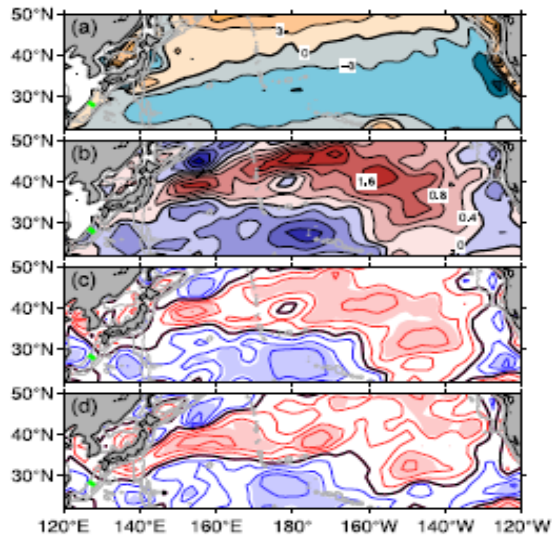


그림 2.1.6. (a) 바람결의 평균, (b) PDO에 회귀된 바람결, (c) PDO 지수와 바람결의 상관계수, (d) 동해로 향하는 수송량과 바람결의 상관계수.

Wang and Oey (2014)는 쿠로시오 변동성과 지역적/대규모 바람장과의 관계를 분석하였는데, 특히 쿠로시오 축이 연안쪽에 위치할 때(그림 2.1.7)와 음의 PDO 위상일 때 바람장(그림 2.1.8)이 유사한 패턴을 가진다는 것을 보였다. 그러나 그들은 PDO와 연관된 바람장은 지연상관이 있지만, 시간지연에 대한 연관성을 보이지는 않았다.

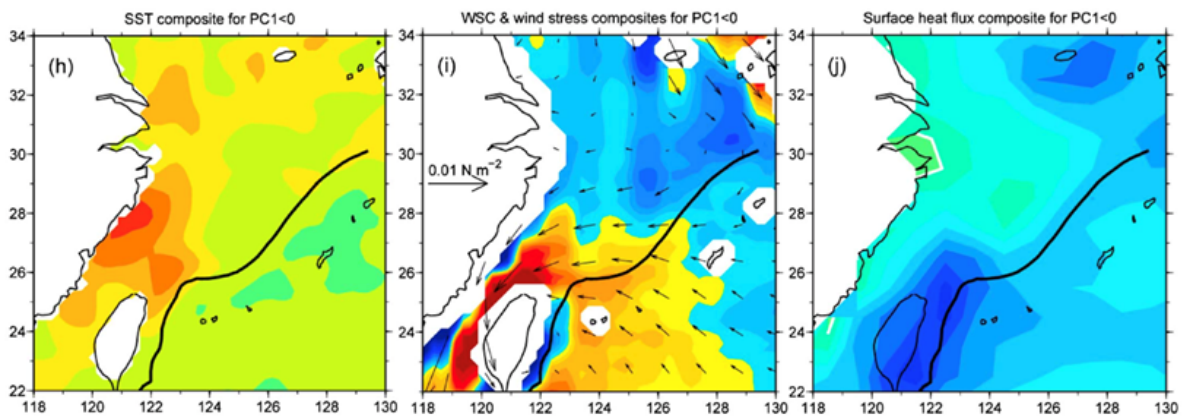


그림 2.1.7. 쿠로시오 축이 연안쪽에 위치할 때 표층수온, 바람장, 열속.

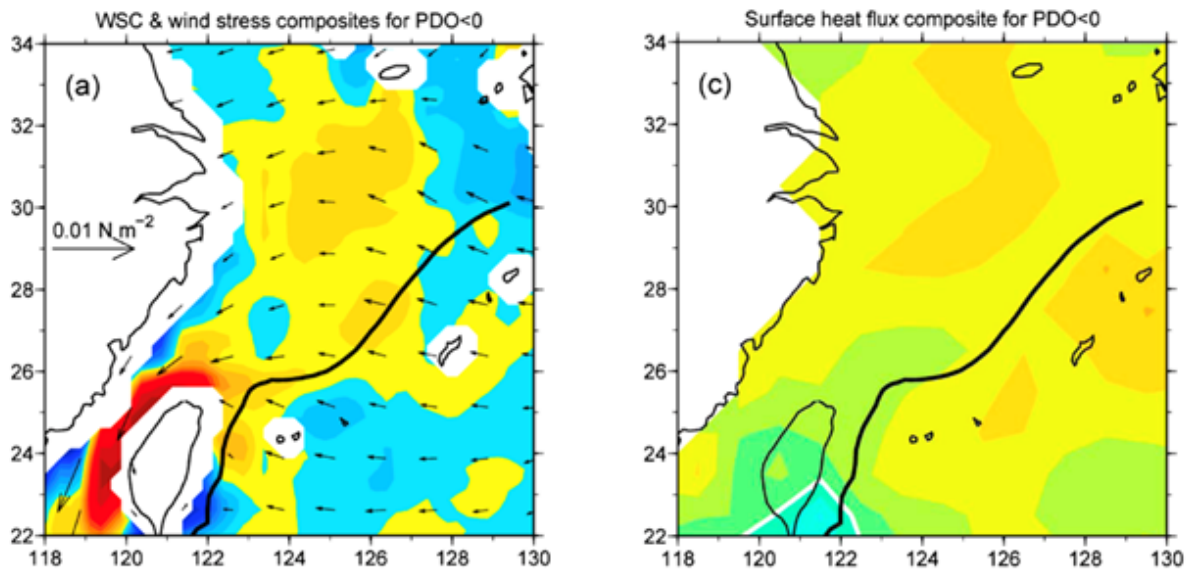


그림 2.1.8. PDO가 음의 위상일 때, 바람장과 열속.

Wu (2013)은 관측자료에 기반하여 북서태평양 지역 쿠로시오 수송량과 PDO의 경년변동의 연관성을 분석하였다. 그 연구에서 북서태평양 지역 쿠로시오 수송량은 ENSO와는 상관성이 거의 없지만, PDO와는 매우 뚜렷한 장주기 변조가 있음을 보였고, 이는 북서태평양 지역 고기압성 바람장과 관련이 있음을 밝혔다(그림 2.1.9). 한편, ENSO에 의한 쿠로시오 수송량의 관계가 시기에 따라 달라지며, 특정한 시기에는 경년변동에 대한 관계가 잘 나타날 수 있음을 보였다.

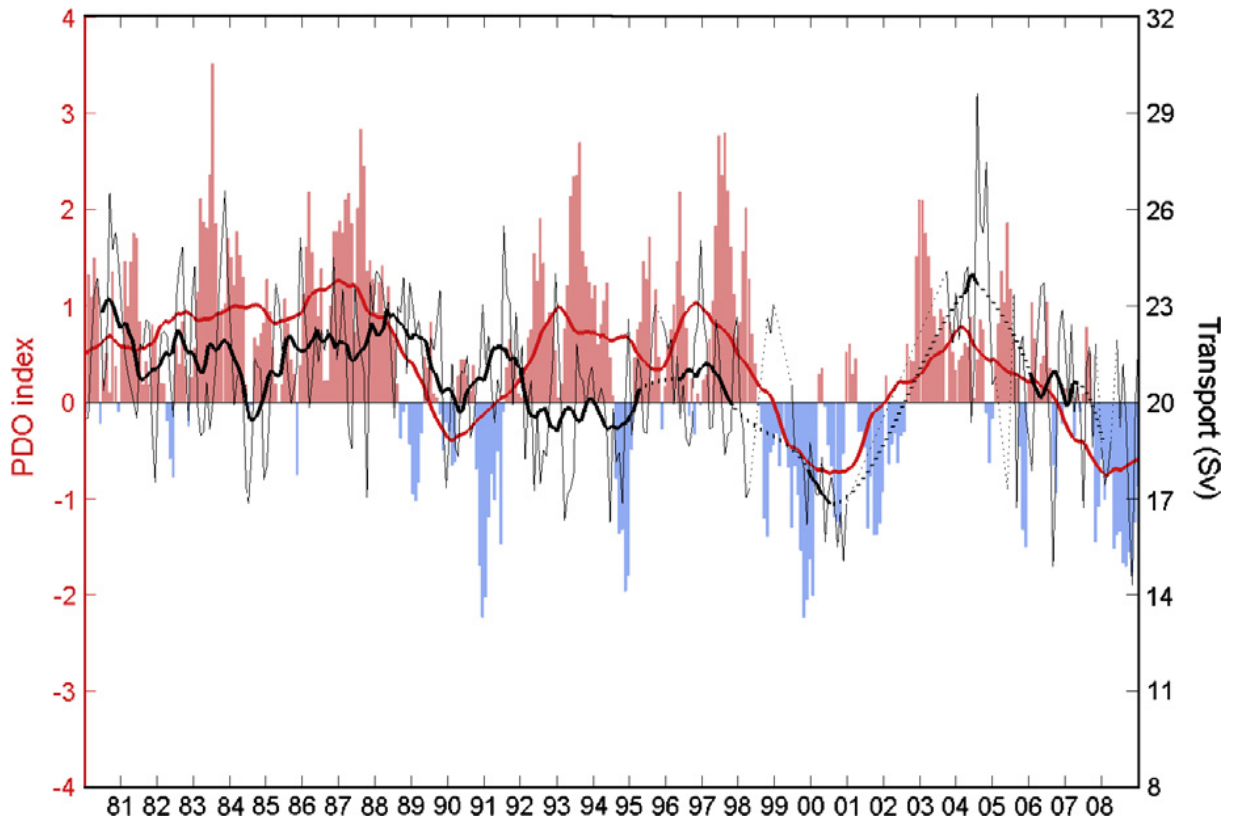


그림 2.1.9. 관측자료 기반 대만 북동쪽 지역의 쿠로시오 수송량과 PDO 지수.

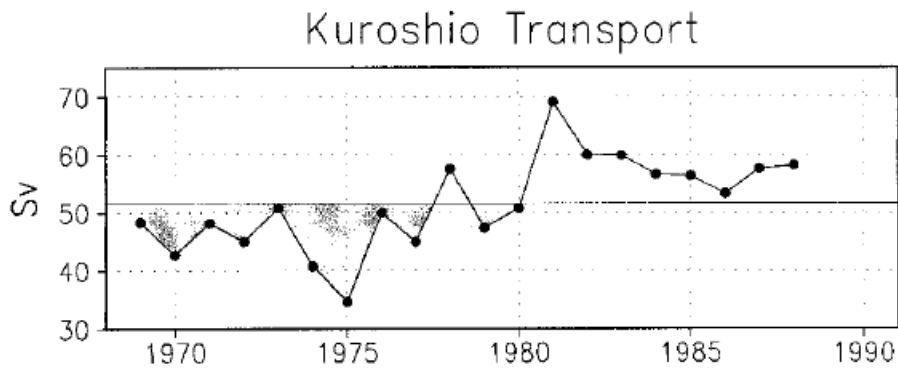


그림 2.1.10. 일본 남쪽 쿠로시오 지형류의 연도별 수송량.

Deser *et al.* (1999)는 관측 및 재분석자료 기반으로 1970년대 이후 쿠로시오 수송량이 강화되는 것을 보였는데(그림 2.1.10), 이는 북태평양 바람장의 장주기 변동에 따라 쿠로시오 수송량이 강화될 수 있음을 시사한다(그림 2.1.11과 2.1.12).

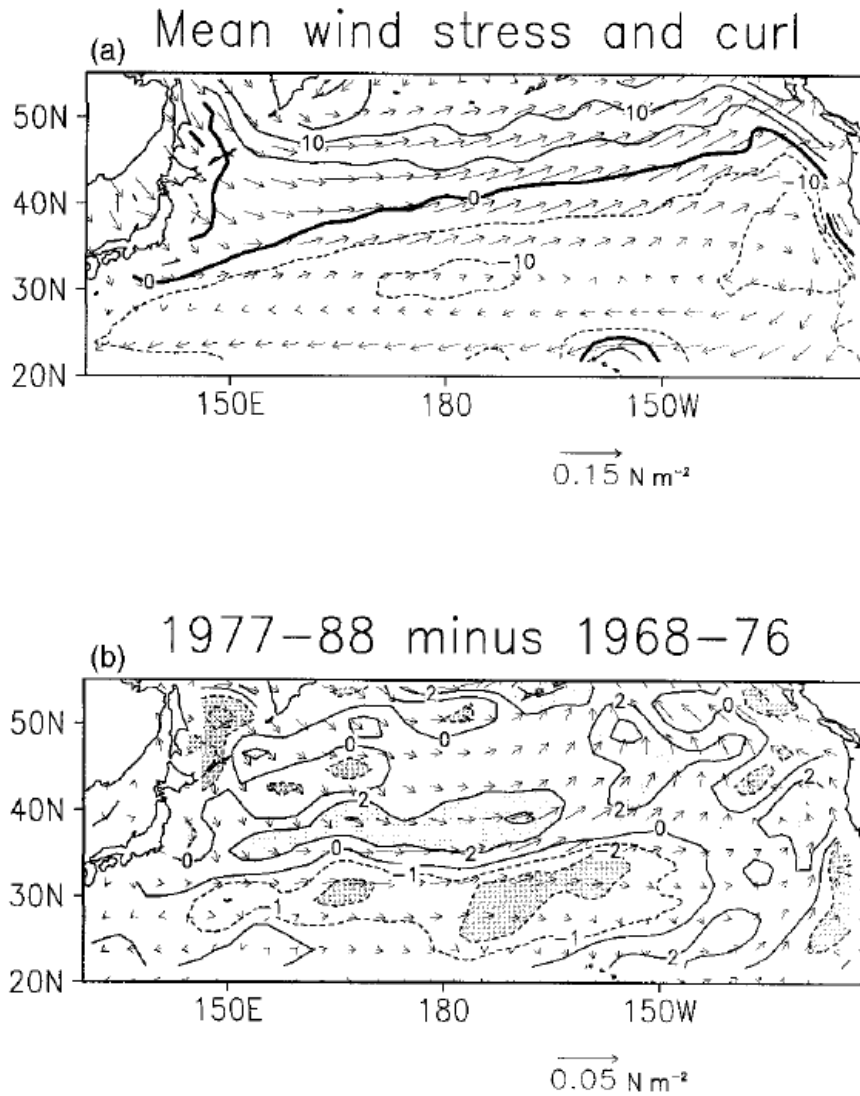


그림 2.1.11. 평균 바람응력 및 바람컬과 1970년대 후반 전후 바람응력의 차이.



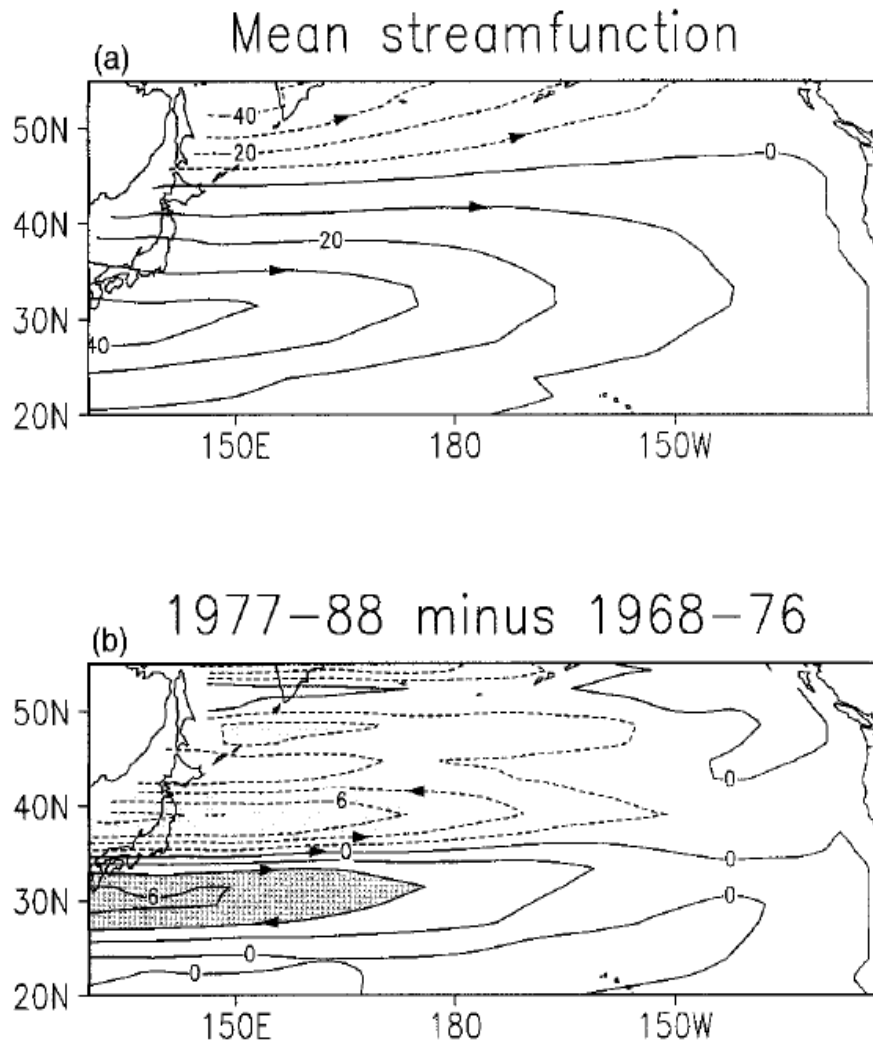


그림 2.1.12. 평균 지형류 유선함수와 1970년대 후반 전후 차이.

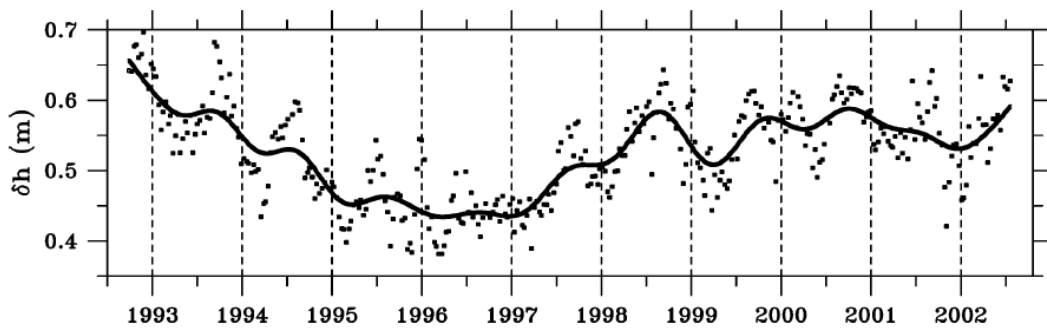


그림 2.1.13. 쿠로시오를 지나는 동서평균된 해면고도 편차.

Qiu (2003)는 Deser *et al.* (1999)의 연구를 확장하여 북태평양 지역 바람응력에 대한 경년변동성을 분석하고 PDO와 연관된 바람응력에 따른 서진하는 해양 로스비파에 의하여 쿠로시오의 변동성을 야기할 수 있다는 것을 보였다. 특히, 그 연구에서 쿠로시오를 따라海面고도 차이가 PDO와 연관된 시계열(그림 2.1.13)에 주목하였는데, 이 변동성과 연관된 시계열이 북태평양 바람응력 분포와 관련 있다는 것을 보였다(그림 2.1.14).

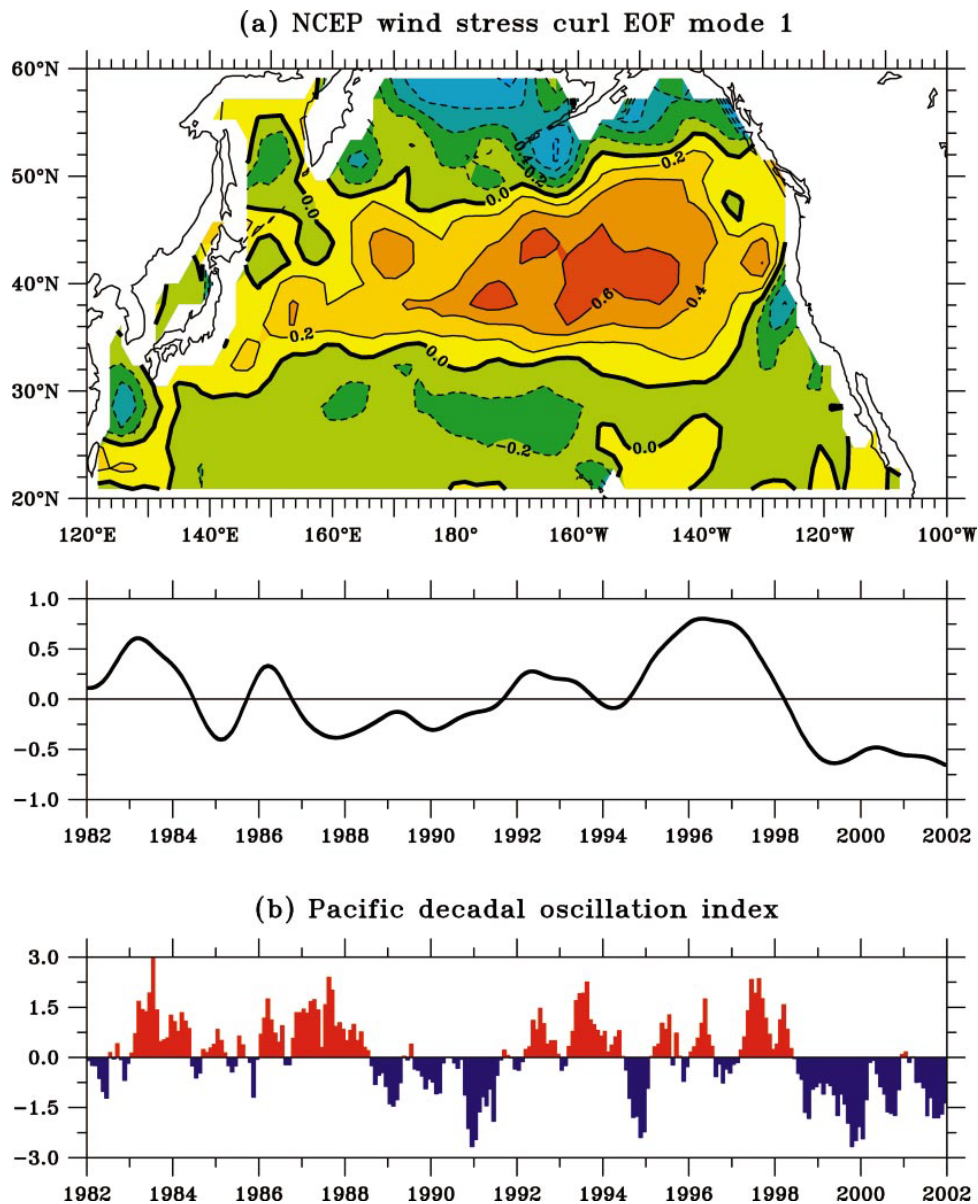


그림 2.1.14. 바람 응력의 EOF 1모드와 PDO 지수.

Qiu (2003)는 또한, 모델을 이용하여 북태평양 바람응력 패턴에 의해 강제된 서진하는 로스비파에 따른 쿠로시오 변동을 보였다(그림 2.1.15).

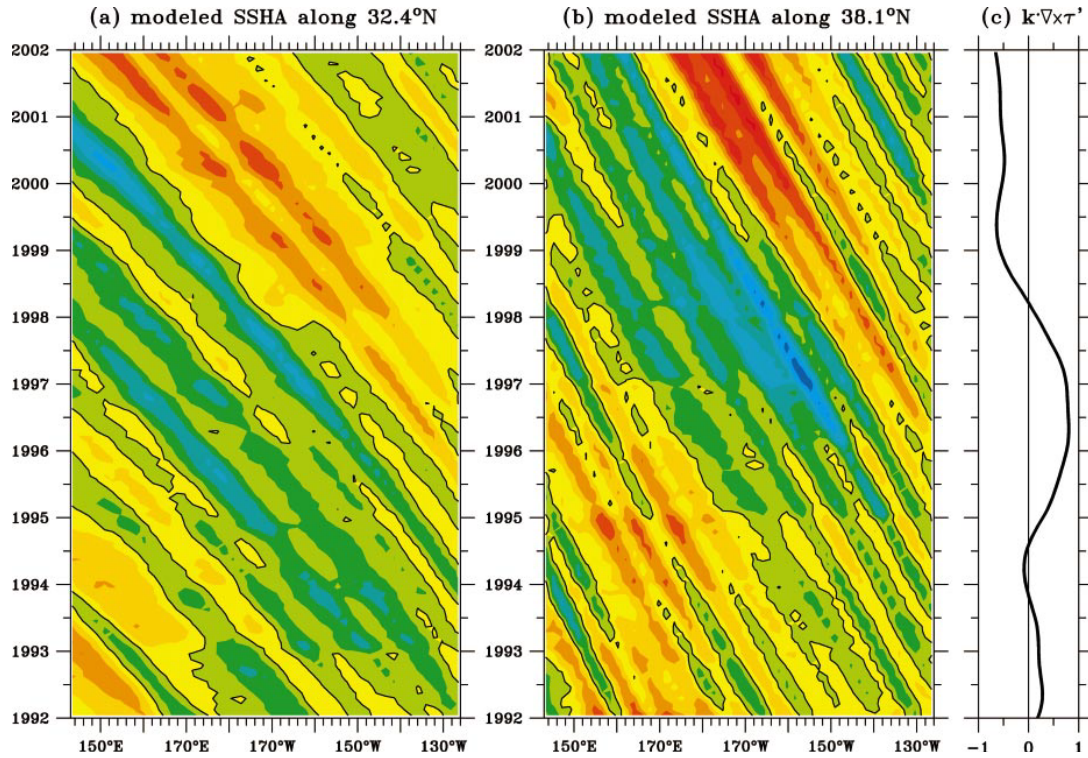


그림 2.1.15. 바람응력에 강제된 경압 로스비파.

Taguchi *et al.* (2007)은 쿠로시오 확장역의 변동성이 크게 두 가지 모드가 있다는 것을 보였다. 첫 번째 모드는 쿠로시오 확장역의 남북 이동과 관련된 모드이고, 두 번째 모드는 쿠로시오 확장역 해면고도의 동서 변동과 관련된 모드이다(그림 2.1.16). Di Lorenzo *et al.* (2008)은 이 두 모드를 각각 쿠로시오 변동 남북모드와 동서모드로 명명하였다.

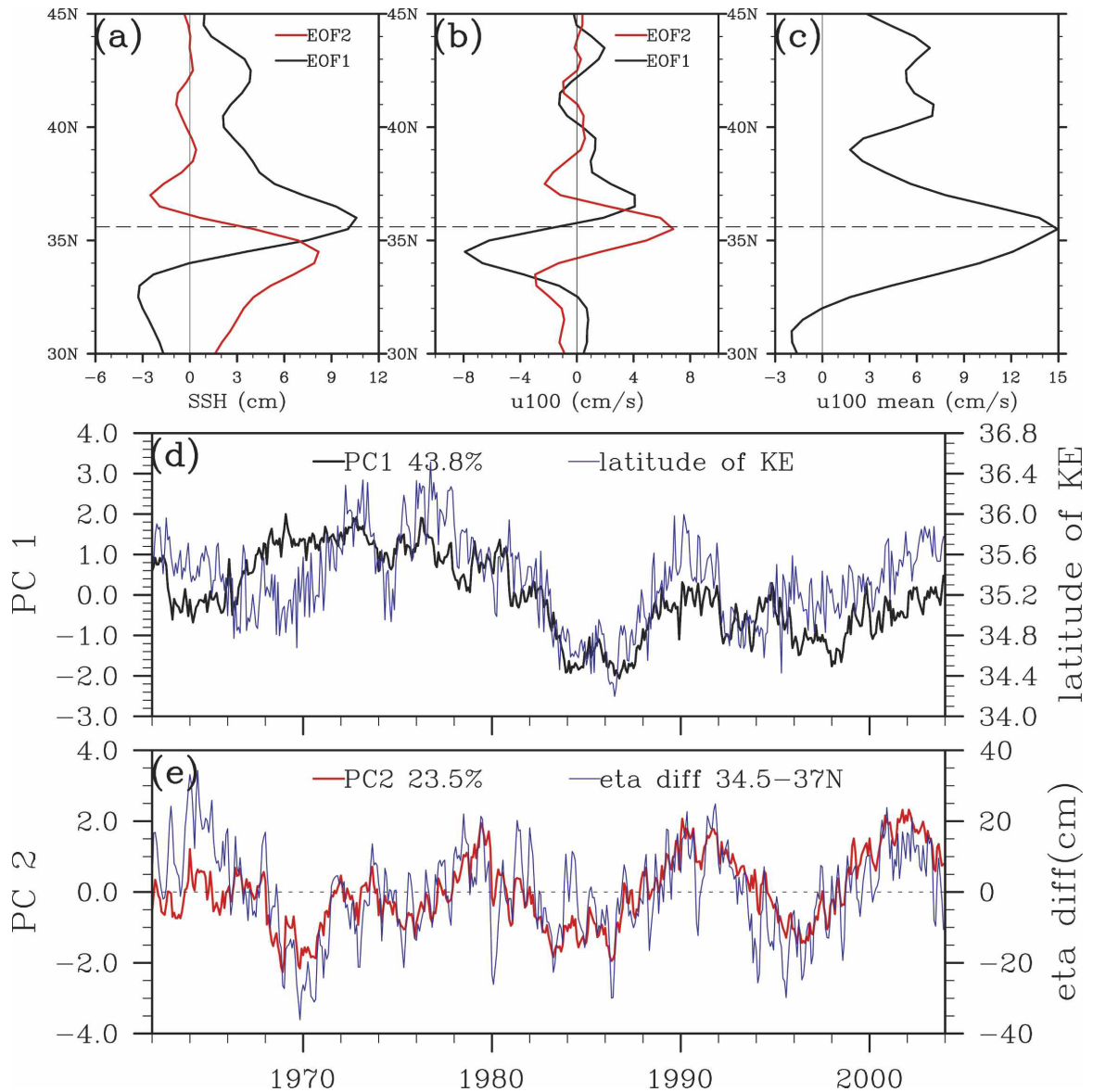


그림 2.1.16. OFES 자료 기반 쿠로시오 지역 해면고도 변동성의 두 EOF 모드.

Schneider and Cornuelle (2005)는 PDO의 강제력이 ENSO, 북태평양 알류산 저기압 대기 변동성, 그리고 쿠로시오 해류 변동성이라고 보고하였다(그림 2.1.17). 그들은 이 세 인자에 의하여 PDO의 대부분의 변동성이 재구성될 수 있음을 보였고, PDO의 단주기는 물론 장주기를 설명하는 모든 강제력이 이 세 가지 요인에 의해 나타날 수 있다는 것을 밝혔다. 또한, PDO 변동의 강제력이 쿠로시오 변동에 의해 나타날 수 있지만, 반대로 쿠로시오 변동이 PDO 변동에 따른 피드백이 있을 수 있음을 제시하였다.

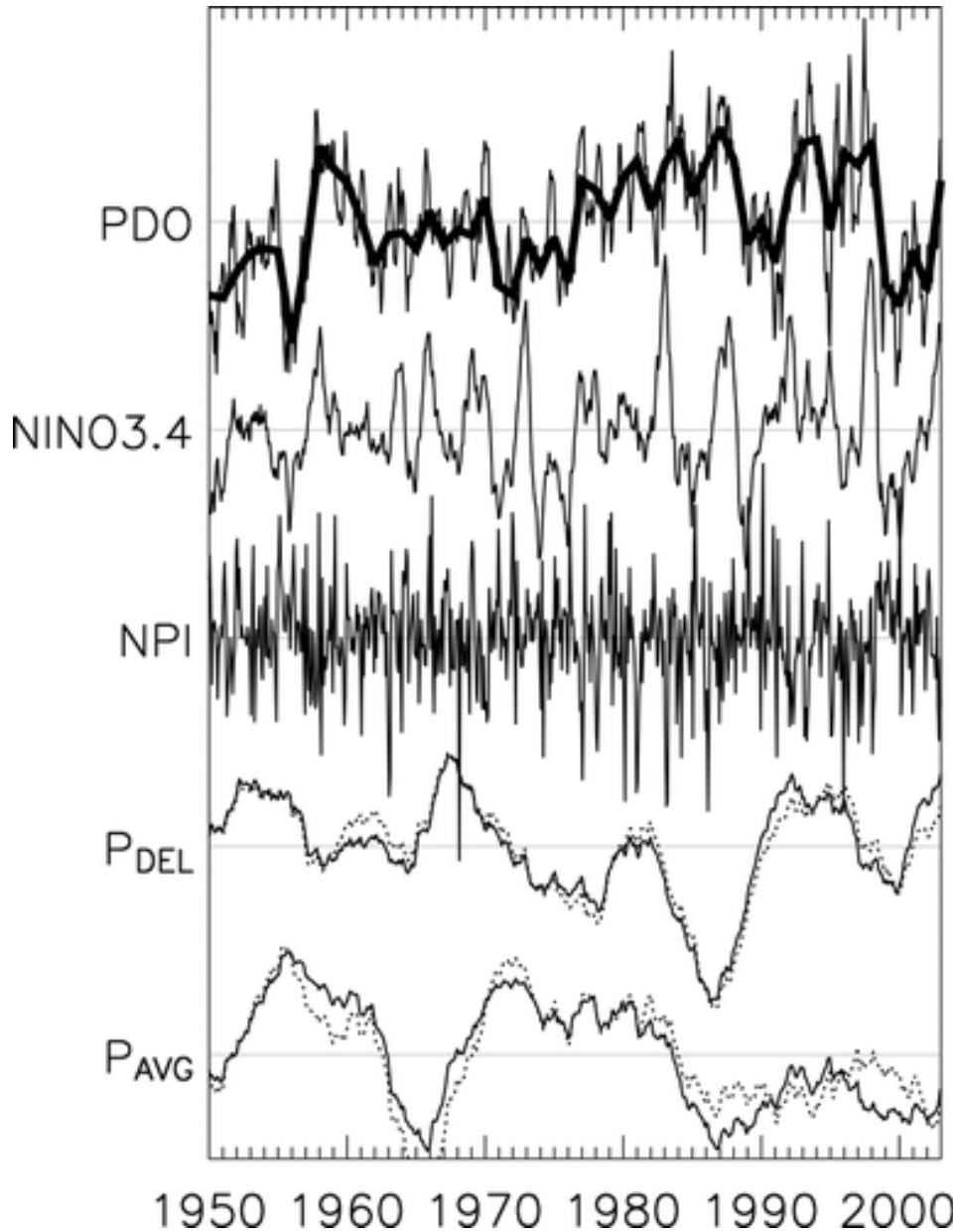


그림 2.1.17. PDO 지수, 엘니뇨 지수, 북태평양 대기 순환 지수, 엘니뇨와 북태평양 대기 순환 지수가 제거된 바람응력에 의한 PDO 지수.

북태평양 해표면수온의 변동성은 크게 두 가지 모드, 즉 PDO 모드와 NPGO (North Pacific Gyre Oscillation) 모드가 있다. 이는 서로 다른 대기의 강제력에 의해 유도될 수 있는데, 그들은 각각 알류산 저기압 모드(Aleutian Low mode)와 북태평양 진동 모드(North Pacific Oscillation mode)이다(그림 2.1.18). 한편, 이들 모드는 Ashok *et al.* (2007)에 의해 제시된 동태평양 엘니뇨(canonical El Nino)와 중태평양

엘니뇨(non-canonical El Nino)의 변동과 관련이 있음이 밝혀졌다(그림 2.1.19). 또한, Di Lorenzo *et al.* (2010)은 선행연구들을 종합하여 북태평양과 열대태평양이 상호작용하는 모식도를 제시하였다. 즉, 겨울철 통상적인 엘니뇨 때, 대기 로스비파를 통해 알류산 저기압 변동을 일으키고 이는 쿠로시오 남북변동 모드의 변동을 일으킨다. 이는 다시 알류산 저기압 변동을 일으키고, 이는 다시 PDO 변동을 일으킨다. 이러한 변동은 foot-print 이론에 따라 다시 엘니뇨 시작에 영향을 줄 수 있다 (Vimont *et al.* 2005). 반면에 중태평양 엘니뇨가 나타날 때, 쿠로시오 동서 변동이 나타나고 이는 북태평양 대기 진동모드를 일으키며 이와 관련된 바람응력 패턴은 북태평양의 NPGO 모드를 활성화한다. 이 모드는 서진하는 해양 로스비파를 활성화시켜 다시 쿠로시오 동서변동을 일으킨다. 또한, 이 모드는 foot-print 이론에 따라 다시 중태평양 엘니뇨를 발생시킬 수 있다.

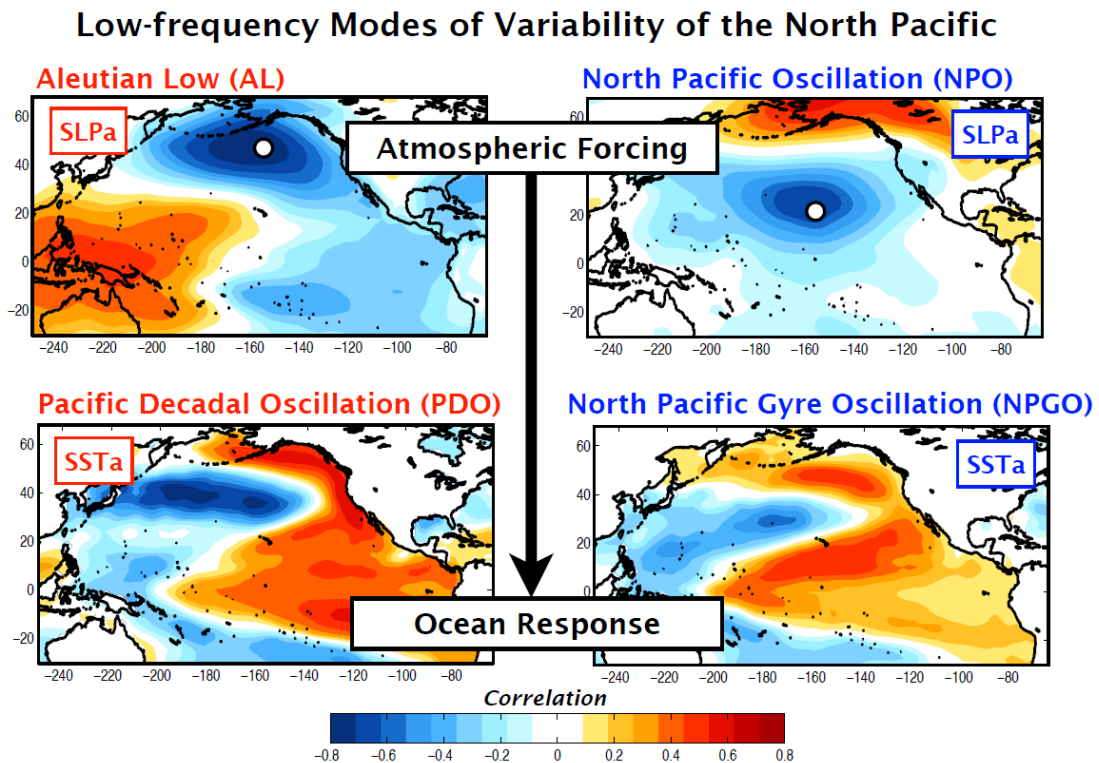


그림 2.1.18. 북태평양의 대기 강제력과 장주기 모드.

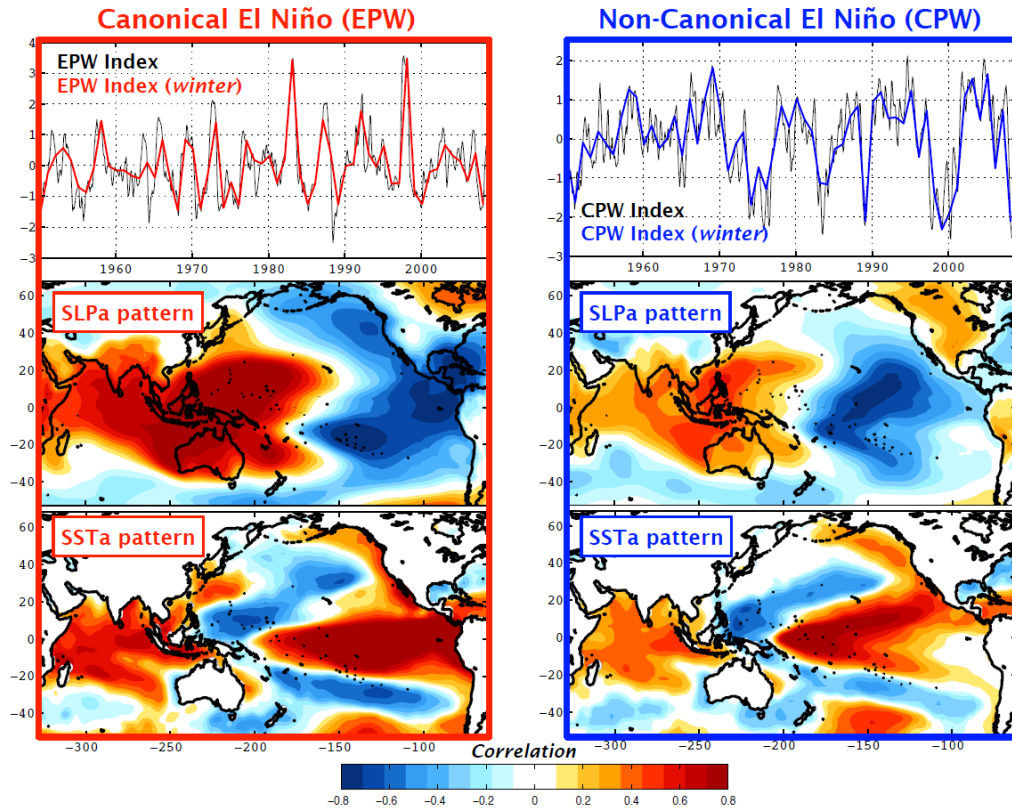


그림 2.1.19. 동태평양 엘니뇨와 중태평양 엘니뇨. 그 엘니뇨와 관련된 해면기압 및 해 표면수온 편차 패턴.

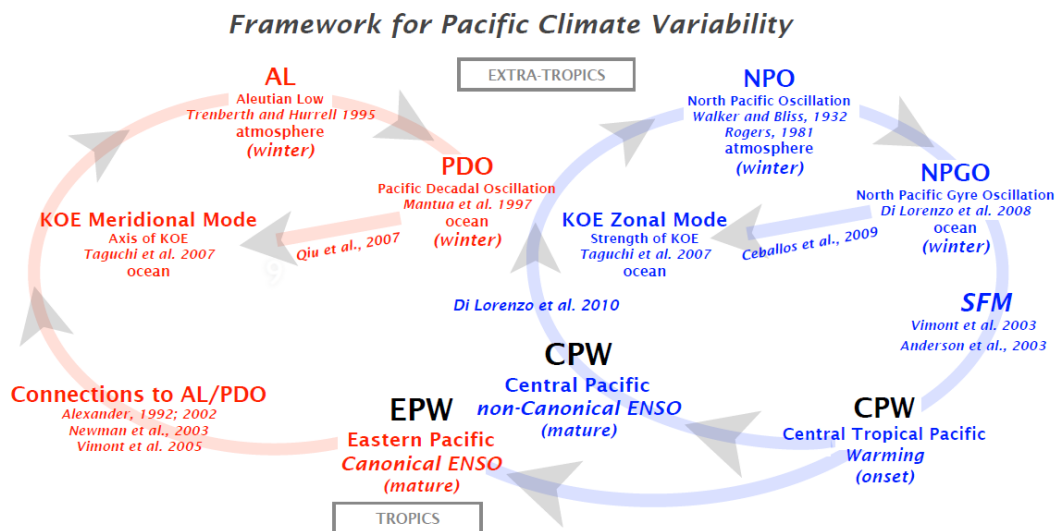


그림 2.1.20. 북태평양과 열대태평양의 상호작용 모식도.

## 제 2 절 중규모 소용돌이와 쿠로시오 변동

### 1. 대만 동쪽 쿠로시오 수송량

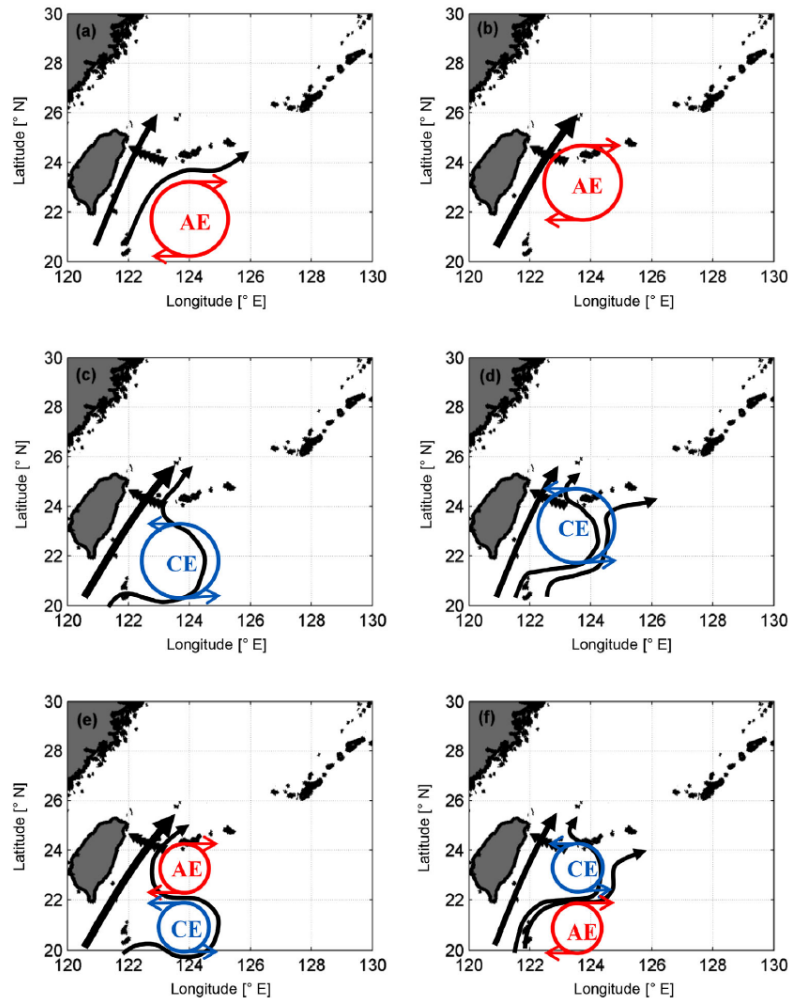
태평양 북적도해류에서 북쪽으로 분기된 쿠로시오는 대만 동쪽을 통해 동중국해로 진입한다. 이 해역에서는 동쪽 대양에서부터 서쪽으로 전파해오는 지름 약 100-300 km 의 소용돌이들이 쿠로시오와 활발하게 교류하며 쿠로시오의 세기와 공간 구조에 큰 변화를 일으키는데, 이러한 변화는 며칠에서부터 경년변동까지 다양한 시간 규모에서 일어나는 것으로 알려져 있다. 1994년 9월부터 1996년 5월까지 대만 동쪽 수송량 관측 결과 평균값은 21.5 Sv이고 약 100일 주기에서 10 Sv 정도의 큰 변동성이 나타났으며(Johns *et al.*, 2001), 이 100일 정도 주기의 변동성은 중규모 소용돌이에 의해 생기는 쿠로시오 meander의 영향인 것으로 보고되었다(Zhang *et al.*, 2001).

Yang *et al.*(1999)에 따르면 시계방향 소용돌이가 대만 동쪽으로 접근해올 때 쿠로시오의 수송량이 증가하고, 반시계방향 소용돌이의 경우는 수송량이 감소한다. 하지만, Zhang *et al.*(2001)의 연구에서는 시계방향 소용돌이와 쿠로시오가 연안 반대쪽 방향으로 meander하는 현상, 그리고 류큐열도 동쪽으로는 흐름이 서로 연관되어 결국 쿠로시오 수송량 감소를 일으킨다고 보고하였다. 이렇게 상반되는 연구 결과는 최근에 시계방향, 반시계방향 소용돌이 모두 쿠로시오 수송량을 증가시키거나 감소시킬 수 있으며, 이는 소용돌이의 남북방향 위치에 따라 결정된다는 결과로 정리되었다(Yan *et al.*, 2016). 또한 한 개의 소용돌이가 영향을 미칠 때와 두 개의 소용돌이가 동시에 영향을 미칠 때 쿠로시오의 경로와 meander 패턴도 달라지게 된다.

중규모 소용돌이와 쿠로시오 변동의 상관성을 모식도로 정리한 그림 2.2.1을 보면 시계방향 소용돌이가 상대적으로 남쪽에 위치할 경우 쿠로시오 본류에서 벗어나는 연안 반대 방향, 류큐열도 동쪽으로는 흐름을 유도하여 쿠로시오 수송량이 줄어들게 된다. 반면에 시계방향 소용돌이가 상대적으로 북쪽에 위치할 때는 쿠로시오의 수송량이 증가하게 된다. 반시계방향 소용돌이가 상대적으로 남쪽에 위치할 경우에는 meander가 북쪽에서 다시 동중국해로의 흐름에 합류되어 쿠로시오 수송량이 증가하고, 북쪽에 위치할 경우에는 류큐열도 동쪽으로는 흐름이 유도된다.



두 개의 소용돌이가 동시에 영향을 미치는 경우, 시계방향 소용돌이가 북쪽에 위치할 때는 남쪽에서 유도된 meander가 북쪽에서 다시 쿠로시오에 합류하며 수송량이 증가하는 반면, 남북방향 위치가 바뀔 경우에는 meander가 류큐열도 동쪽으로의 흐름을 유도시키며 쿠로시오 수송량이 감소하고 동중국해 내부에서도 지류가 발생한다.



**Figure 14.** Schematic plots showing how eddies influence Kuroshio volume transport at the ETC and branching of the Kuroshio east of Taiwan. Black triangles represent the PCM-1 moorings. Cyclonic eddies are drawn in blue; anticyclonic eddies in red. Formation of the Ryukyu Current branch generally corresponds to weakened Kuroshio volume transport through the ETC.

그림 2.2.1. 중규모 소용돌이와 대만 동쪽 쿠로시오 변동의 상관성에 대한 모식도 (Yan *et al.*, 2016).

중규모 소용돌이 변동성은 쿠로시오 수송량의 경년변동도 일으키는데, 소용돌이가 많이 발생한 해에는 대만 동쪽 쿠로시오 수송량이 증가한다고 알려져 있다.

또한 이러한 때에 시계방향 소용돌이가 더 많이 발생하여 쿠로시오를 강화시키는 역할을 한다고 보고되었다. 하지만 Hsin *et al.* (2013)은 쿠로시오 수송량의 경년변동을 일으키는 주요 요인은 시계방향과 반시계방향 소용돌이의 상대적인 개수가 아니라 강도의 차이라고 보고한 바 있다.

1992년 10월 인공위성 관측 전지구 해면고도 자료가 얻어지기 시작한 이후로 1995-1998년, 2003-2007년이 소용돌이가 많이 발생한 해, 1999-2002년, 2008-2011년이 소용돌이가 적게 발생한 해로 여겨진다. Yan *et al.* (2016)은 1992-2012년 기간 동안 나타난 소용돌이의 위치와 강도 등을 분석하여 아래 그림 2.2.2와 같은 결론을 얻었다. 대만 동쪽 쿠로시오의 경년 변동에 큰 영향을 미치는 것은 동경 125도 서쪽에 나타나는 시계방향과 반시계방향 소용돌이의 빈도수이며, 동경 125도 동쪽에 나타나는 소용돌이나 강도 등의 영향은 상대적으로 적게 나타남을 보였다. 소용돌이가 많이 발생하는 해에는 대만 동쪽 해면고도 편차가 양의 부호로 나타나서 북쪽으로의 흐름이 강해져 쿠로시오 수송량이 증가하며, 소용돌이가 적게 발생하는 해에는 대만 동쪽 해면고도 편차가 음의 부호로 나타나서 남쪽으로의 흐름이 강해져 쿠로시오 수송량이 감소하게 된다.

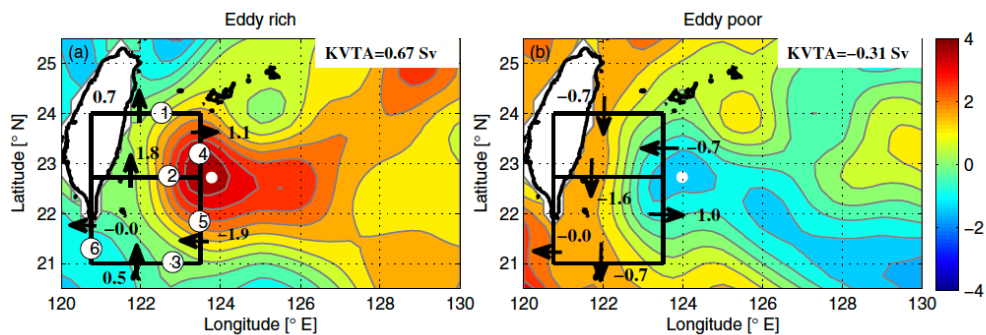


Figure 11. Composite SSHA fields (in cm) for: (a) eddy-rich years, and (b) eddy-poor years. White dot represents the center of the composite eddy east of Taiwan. Corresponding geostrophic volume transport anomalies (in Sv) through the six sections, as labeled in Figure 11a, are superimposed.

그림 2.2.2. 대만 동쪽에 중규모 소용돌이가 많이 발생한 해와 적게 발생한 해의 해면고도 편차 및 쿠로시오 수송량 차이(Yan *et al.*, 2016).

## 2. 동중국해 쿠로시오 수송량

대만 동쪽을 통하여 동중국해로 들어온 쿠로시오는 오키나와 trough를 따라 북상하다가 Tokara 해협을 통해 다시 북서태평양으로 빠져나간다. 동중국해의 동쪽

으로는 류큐열도가 자리하고 있어 대양에서부터 전파해오는 소용돌이의 영향이 적을 것으로 예상되지만, 류큐열도 동쪽으로 흐르며 소용돌이의 영향을 크게 받는 류큐해류와의 상관성이 보고되며 소용돌이의 영향을 간접적으로 받을 수 있음이 알려져 있다.

그림 2.2.3은 북서태평양 중규모 소용돌이가 북서태평양에서부터 서쪽으로 이동하며 류큐열도에 근접한 후 남쪽으로 이동하거나, Kerama Gap을 통해 동중국해 내부로 들어가는 듯한 경우를 인공위성 관측 해면고도 편차로부터 보여준다. Event 1의 경우, 동쪽에서부터 전파해온 시계방향 소용돌이의 영향으로 류큐해류 수송량이 증가한 후, 일정 시간차를 두고 쿠로시오 수송량이 증가한다. Event 2의 경우는 반대 부호 소용돌이의 예시로, 반시계방향 소용돌이의 영향으로 류큐해류 수송량이 감소한 후, 일정 시간차를 두고 쿠로시오 수송량도 감소한다. Event 3의 경우는 시계방향 소용돌이의 영향으로 류큐해류 수송량이 증가한 후, 동중국해 내부 오키나와 trough 동쪽면을 따라 양의 해면고도 편차가 유도되고, 이것이 쿠로시오 수송량을 증가시키는 것으로 보인다. 이러한 동중국해 쿠로시오와 류큐해류 수송량의 상관관계는 100-200일 주기 변동성에 존재하며, 류큐해류 변동성이 쿠로시오 변동성을 약 60일 정도 앞서는 것으로 나타난다.

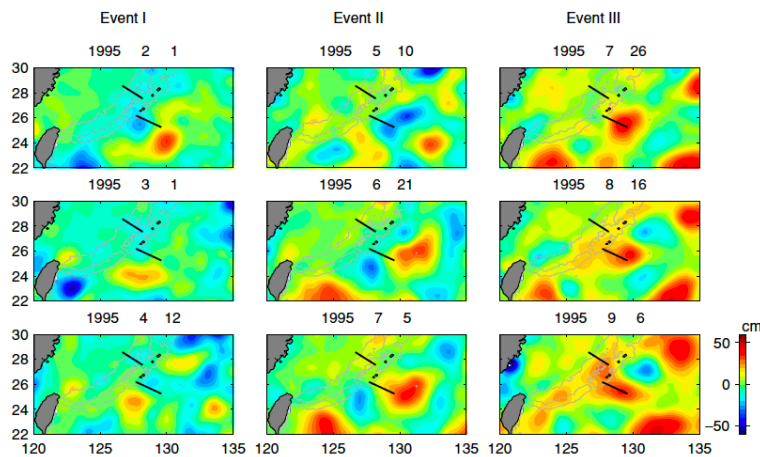


Fig. 11. Merged satellite SLA maps. Each column tracks a different event (I, II, III) identified in Fig. 10(a). Heavy black lines show C-line (north of Okinawa) and O-line (southeast of Okinawa). Gray contours show the 900 m isobath. In each panel the area-mean SLA was first removed to eliminate the effect of seasonal heating and cooling.

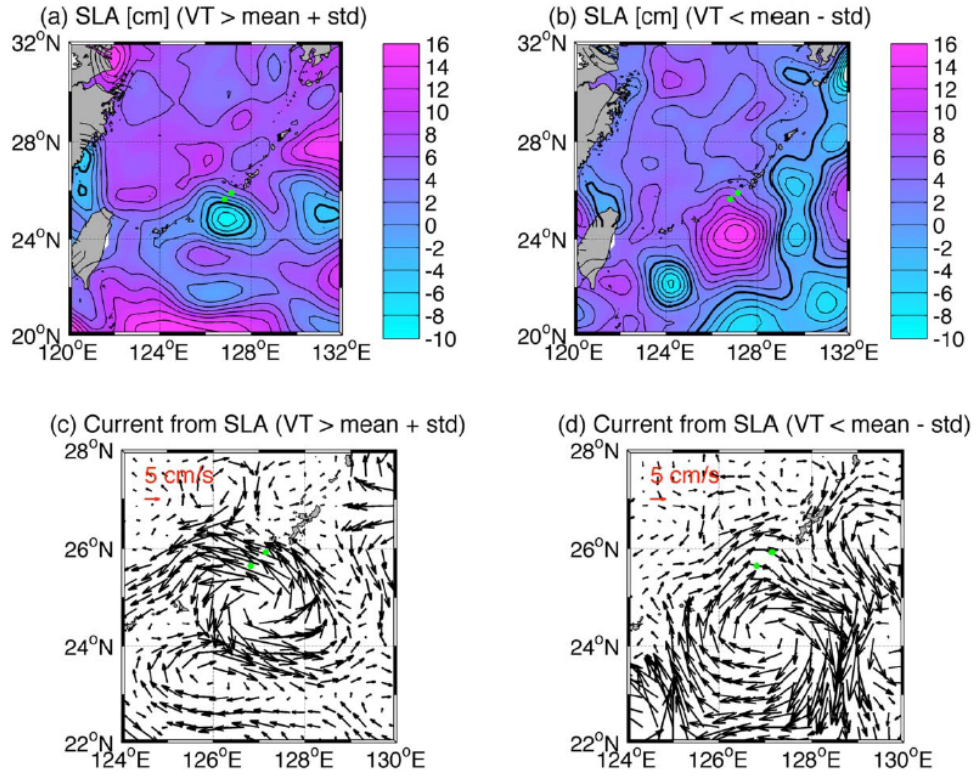
그림 2.2.3. 동중국해 쿠로시오와 류큐해류 수송량이 동시에 증가하거나 감소할 때의 해면고도 편차(Andres *et al.*, 2008).

### 3. Kerama Gap 수송량

Kerama Gap은 류큐열도의 중간쯤에 위치한 너비 약 50 km의 좁은 채널이지만, 그 깊이가 1000 m 이상으로 동중국해와 북서태평양 사이를 연결하는 채널 중에 가장 깊은 곳이다. 류큐열도의 서쪽편을 흐르는 동중국해 쿠로시오와 동쪽편을 흐르는 류큐해류 사이의 상관성을 밝힌 이전 연구에서 그 둘 사이의 연결고리로 Kerama Gap을 통한 흐름의 전달을 제시한 바 있다. 즉 북서태평양 중규모 소용돌이의 영향이 오키나와 남쪽에 위치한 Kerama Gap을 통해 동중국해로 유입되는 것이다. 이러한 영향이 쿠로시오에 전해진 후에는 북쪽 Tokara 해협까지 빠르게 전달된다.

2009년 6월에서 2011년 6월까지 만 2년 동안 Kerama Gap을 가로지르는 방향으로 유속 관측장비들을 설치하여 수송량을 계산한 결과를 보면, Kerama Gap을 통한 평균 수송량은 북서태평양에서 동중국해로 유입되는 방향으로 약 2 Sv 정도이다(Na 등, 2014). 즉 Kerama Gap을 통해 동중국해로 유입되는 흐름이 평균적으로 존재하는데, 그 시간 변동성이 커서(주요 조석보다 긴 주기에서의 표준편차가 3.2 Sv) PN-line에서 관측된 동중국해 쿠로시오의 시간 변동성(주요 조석보다 긴 주기에서의 표준편차가 4.0 Sv)과 견줄만 한 것으로 보고되었다.

2년 관측 수송량 시계열 자료는 약 100일 주기에서 에너지 피크를 보이는데 이 주기는 중규모 소용돌이 변동과 관련된 주기라고 알려져 있다. 따라서 중규모 소용돌이의 영향을 파악하기 위해 Kerama Gap 수송량이 크거나 작을 때 인공위성 해면고도 편차를 분석한 결과를 아래 그림에서 보면(그림 2.2.4), Kerama Gap 수송량이 클 때, 즉 북서태평양에서 동중국해로 유입되는 수송량이 많을 때, 오키나와 남쪽에 음의 소용돌이 편차가 존재하고, 이는 반시계방향 소용돌이가 동중국해 내부로의 흐름을 유도하기 때문으로 생각된다. 동중국해 쿠로시오와 류큐해류의 상관성을 보인 이전 연구에서 그 상관성의 연결고리로 Kerama Gap을 통한 수송량을 제시했던 바와 같이, 북서태평양에서 서쪽으로 움직이는 중규모 소용돌이는 류큐해류 수송량에 변동을 일으키고 그 이후 Kerama Gap을 통해 동중국해 내부에 해면고도 편차를 일으킴으로써 동중국해 쿠로시오 수송량에 영향을 미치는 것이다. 류큐해류 수송량과 쿠로시오 수송량 사이의 시간차는 이전 연구와 비슷하게 약 60일 정도인 것으로 나타났다.



**Figure 9.** (a and b, top) Satellite-altimeter-derived average SLA and (c and d, bottom) surface geostrophic velocity for (left) "high-Total" periods and (right) "low-Total" periods. These periods are shown in Figure 6 with cyan and magenta dots, respectively. Figures 9a and 9c represent means of 22 maps and Figures 9b and 9d means of 16 maps, each map corresponding to a 7 day time interval for which the SLA maps are produced. Bold contour lines in Figures 9a and 9b represent zero SLA. Green dots near the map centers denote locations of E51 and E54 in the Kerama Gap.

그림 2.2.4. Kerama Gap을 통한 동중국해 유입 수송량이 크거나(좌) 작을 때(우) 해면고도 편차(상)와 그로부터 계산한 지형류(하) (Na *et al.*, 2014).

## 제 3 절 해면고도 자료동화

### 1. 해양자료동화 국제 동향

전지구 그리고 지역 해양자료동화 시스템의 개발은 1990년대에 시작되었다. 이러한 발전이 가능했던 데는 몇 가지 이유가 있었다고 할 수 있다. 첫째는 해양순환모델의 발전이 현실적인 해양의 순환을 재현할 만큼 발전해왔다는 것이다. 최근 전산 자원의 발달과 프로그래밍 기법의 발전 그리고 표준화 작업들은 이러한 해양순환의 발전을 뒷받침했다. 둘째는 해양의 순환을 현실적으로 고려할 수 있는 해양자료동화 기법의 발전을 그 이유로 들 수 있다. 전산 자원의 발전은 해양순환 모델뿐만 아니라 해양자료동화 기법 또한 비약적으로 발전시켰다. 일반적으로 자료동화의 적용은 많은 양의 계산 자원과 메모리를 요구한다. 전산 자원의 발전은 해양순환모델의 발전뿐만 아니라 해양자료동화기법의 개발에도 기여한 바가 크다고 할 수 있다. 셋째는 전지구 해양관측망의 발전이다. 인공위성과 ARGO 프로파일 등 전지구적으로 고해상도의 관측 자료가 생산되고 동시에 실시간으로 현업 시스템에 전달됨으로 실시간 예측 시스템의 구동이 가능해졌다.

국제 사회는 GODAE(Global Ocean Data Assimilation Experiment) 국제프로그램을 중심으로 해양자료동화 시스템 개발에 협력하고 있으며, 특히 미국과 일본, 유럽 등을 중심으로 해양예측 및 기후예측 시스템을 개발하여 현업으로 운용하기 시작했다. 현재 사용되고 있는 자료동화 시스템은 앙상블 칼만필터, 앙상블 최적내삽기법, 3차원 변분동화기법, 4차원 변분동화기법 등 다양한 방법들이 제시되어 있다. 다양한 자료동화 시스템이 개발되고 적용되어 왔지만 결과적으로 해양관측 자료를 얼마나 적은 에러를 가지고 수치모델에 동화하느냐가 결국에 해양재분석 자료와 해양예측 또는 기후예측의 정확도에 영향을 줄 것이다.

그림 2.3.1은 현재 해양자료동화시스템에 적용되고 있는 해양모델의 현황과 특징들을 나타낸다. MOM4, NEMO, MIT 등의 모델은 z 격자체계를 적용하고 있으며 HYCOM, MRI.COM 등은 hybrid 격자체계를 적용하고 있다. 그림 2.3.2는 해양자료동화 기법의 현황과 특징들을 정리한 것이다. 일반적으로 해면수온(SST), 해면고도(SSH) 그리고 수온과 염분 프로파일 자료들을 동화하고 있으며 적용되는 자료동화 기법으로는 앙상블 칼만필터나 앙상블 최적내삽법등 앙상블 기법들과 3D-VAR와

4D-VAR 등의 변분자료동화 기법들이 적용되고 있다.

해면고도 자료의 동화는 그 중요성에도 불구하고 자료동화를 적용할 때 발생할 수 있는 기술적인 오류 때문에 어려운 과정 중의 하나이다. 해면고도를 직접 동화할 수도 있지만 해면 고도 자체의 오차가 클 뿐만 아니라 해면고도의 특성상 순압류 성분에 크게 영향을 주기 때문에 세밀한 기술적인 고려가 없을 경우 오히려 결과를 악화시킬 우려가 있다. 최근에는 해면고도를 직접 동화하기보다 해면고도로부터 수온과 염분의 가상 프로파일을 계산하여 이를 동화하는 방법을 택하고 있다. 이러한 방법들이 제시되면서 대부분의 해양자료동화 시스템에서 수온과 염분 그리고 해면수온과 함께 해면고도를 동화하고 있다 (그림 2.3.2).

System	OGCM	Domain	Horizontal Resolution	Vertical Sampling	Atmospheric Forcing
BLUElink>	MOM4	Global	1° global 1/10° around Australia	47 z-levels	GASP 3-hourly
C-NOOFS	NEMO	Canadian Atlantic	1/4°	50 z-levels	EC/GEM hourly
ECCO-GODAE	MIT	Global	1° global (JPL+MIT) 1° x 0.3° tropics (JPL only)	46 z-levels (JPL) 23 z-levels (MIT)	NCEP (JPL + MIT) + COADS (JPL only)
FOAM	NEMO	Global	1/4°	50 z-levels	UKMO 6-hourly
		North Atl. + Med. + Indian	1/12°		
HYCOM/NCODA	HYCOM	Global	1/12°	32 hybrid layers	NOGAPS 3-hourly
Mercator	NEMO	Global	1/4°	50 z-levels	ECMWF daily
		North Atl. + Med.	1/12°		
MFS	NEMO	Mediterranean	1/16°	71 z-levels	ECMWF 6-hourly
MOVE/MRI.COM	MRI.COM	Global	1°	54 sigma-z hybrid levels	JMA 6-hourly
		North Pacific	1/2°		
		Western North Pacific	1/10°		
NLOM/NCOM	NLOM	Global	1/32°	7 layers	NOGAPS
	NCOM	Global	1/8°	40 sigma or z levels	
NMEFC	IAP/CAS	Tropical Pacific (30°S–30°N)	2° x 1°	14 z-levels	NCEP + clim
RTOFS	HYCOM	North and Tropical Atlantic (> 25°S)	4–18 km	26 hybrid layers	NCEP 3-hourly
TOPAZ	HYCOM	Atlantic and Arctic	11–16 km	22 hybrid layers	ECMWF 6-hourly

그림 2.3.1. 전세계 해양 자료동화 시스템에 사용되는 해양순환모델의 현황과 특성(GODAE) (Dombrowsky *et al.*, 2009).

System	Assimilation Scheme	SST	SSH	Other
BLUElink>	Ensemble OI BODAS	AMSR-E	Along-track Jason + Envisat	T/S profiles
C-NOOFS	None	None	None	None
ECCO-GODAE	Kalman filter/ smoother (JPL) and adjoint (MIT)	Satellite + in situ	Along-track TOPEX, Jason (JPL + MIT), ERS, Envisat; tide gauges (MIT only)	Argo, XBT, CDT, TAO (JMP + MIT) QuikSCAT, SSM/I, SSS (MIT only)
FOAM	Analysis correction scheme + IAU	GHRSSST (AMSR-E, AVHRR, AATSR)	Along-track Jason + Envisat + GFO from Ssalto/Duacs	T/S profiles, ice concentration
HYCOM/NCODA	Multivariate, OI + IAU, NCODA	Satellite + in situ	Along-track Jason + Envisat + GFO from NAVO ADFC	T/S profiles, ice concentration
Mercator	SEEK filter, SAM2	RTG SST	Along-track Jason + Envisat + GFO from Ssalto/Duacs	T/S profiles from Coriolis
MFS	3DVAR with vertical EOFs, nudging (SST)	AVHRR maps from CNR/ISAC	Along-track Jason + Envisat + GFO from Ssalto/Duacs	T/S profiles
MOVE/MRI.COM	3DVAR with vertical EOFs + IAU	MGDSST	Along-track Jason + Envisat	T/S profiles
NLOM/NCOM	OI + IAU/MODAS, NCODA, nudging	MODAS SST	NLOM: Along-track Jason + Envisat + GFO from NAVO ADFC	MODAS synthetic 3D T/S, NCODA T/S profiles (NCOM)
NMEFC	3DVAR OVALS	Reynolds SST	Along-track Jason from PO.DAAC SSHA	T/S profiles from Coriolis and CADC/NMDIS
RTOFS	3DVAR with vertical 1D cov	GOES AVHRR + in situ	Along-track Jason + Envisat	T/S profiles
TOPAZ	Ensemble Kalman filter 100 members	Reynolds SST	SLA MAPS from Jason + Envisat + GFO from Ssalto/Duacs	T/S profiles, ice concen- tration + drift

그림 2.3.2. 전세계 자료동화 시스템 현황(GODAE) (Dombrowsky *et al.*, 2009).



## 2. 해면고도 자료동화 민감도 실험 현황

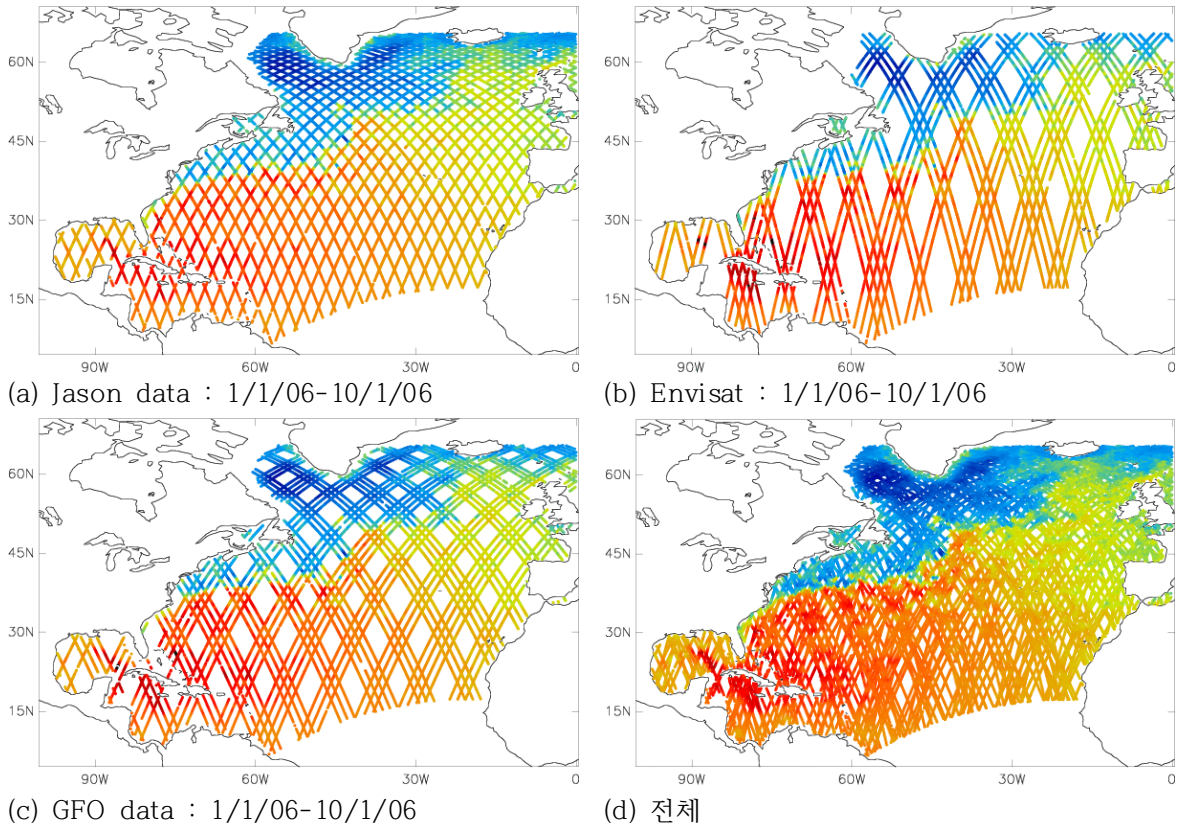


그림 2.3.3. 해면고도 자료 현황(Martin, 2014).

그림 2.3.3 은 해면고도 위성 관측자료의 현황을 나타낸 것이다. Jason, Envisat, GFO 위성 관측 자료를 각각 나타내었으며 각 자료별 관측 주기와 공간 규모가 달라 각 자료별로 민감도를 평가할 필요가 있다. Martin (2014)는 Jason 자료부터 Envisat 그리고 GFO 를 추가해가면서 해면고도 자료동화의 효과를 평가하였다. 그림 2.3.4는 해면고도 자료의 개수가 증가함에 따른 해면고도 재현 능력의 차이를 나타낸 것이다. 해면고도를 동화하지 않았을 때보다 Jason 자료를 동화함에 따라 해면고도의 재현 능력이 크게 증가하는 것을 보여주며, 자료의 개수가 증가함에 따라 해면고도의 재현 능력이 다소 향상되는 것을 알 수 있다. Martin (2014)는 북대서양 전체와 북동과 북서 대서양으로 구분하여 평균적인 해면고도의 재현 능력을 평가하였다. 그러나 태평양 영역에 대해서는 이러한 평가가 이뤄지지 않았으며 향후 후속 연구를 통해 민감도를 평가할 필요가 있다.

평균적인 해면고도 재현 능력뿐만 아니라 지역해 영역에서 중규모 소용돌이의 변동성 재현을 평가하였다. 그림 2.3.5는 멕시코만에서 에디 변동성 재현 능력을 나타낸 것이다. 해면고도를 동화하지 않을 경우 멕시코만으로 유입되는 중규모 소용돌이가 재현되지 않았지만 해면고도를 동화함에 따라 중규모 소용돌이의 유입을 잘 재현하고 있다. 이러한 중규모 소용돌이의 유입은 해양 순환뿐만 아니라 태풍 강도 등의 예측 능력을 개선하는 데 기여할 것이다.

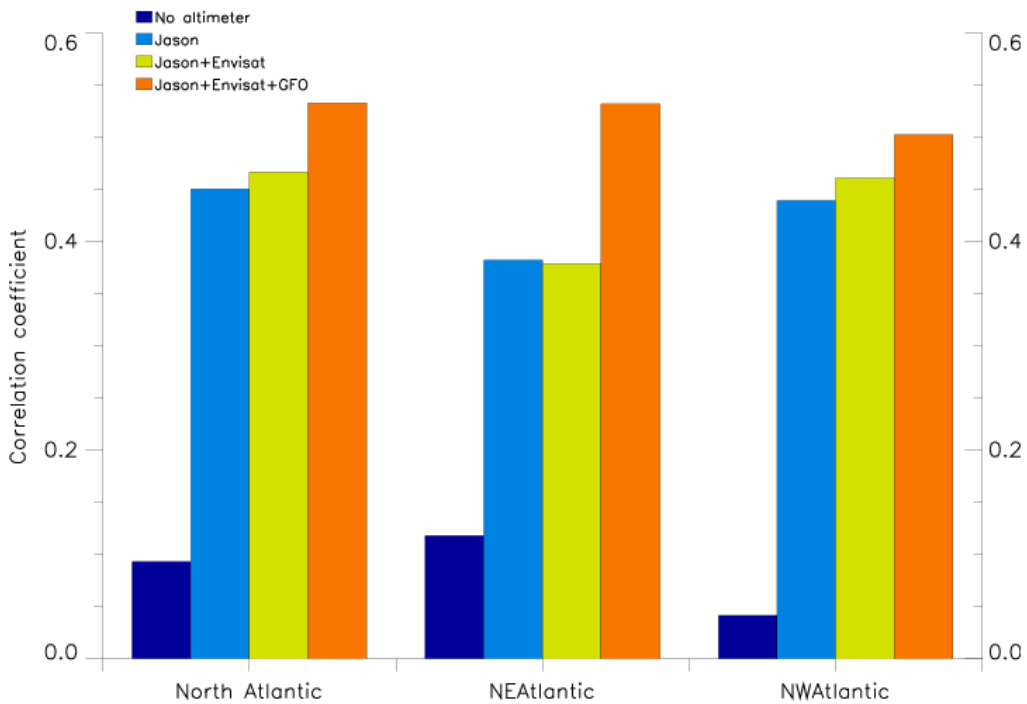


그림 2.3.4. 해면고도 자료동화에 따른 해면고도 재현성 평가. 관측자료와의 상관도 (Martin, 2014).

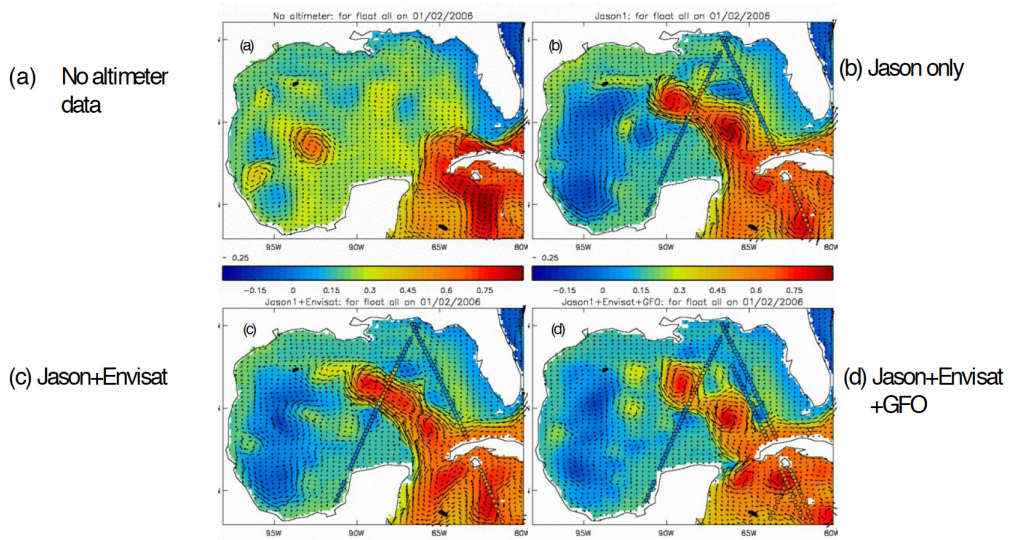


그림 2.3.5. 해면고도 자료동화에 따른 해면고도 재현성 평가. 멕시코만에서의 에디 변동성 재현 능력 비교(Martin, 2014).

Martin (2014)는 해면고도 위성 자료를 동화함에 따라 해류의 재현성을 평가하기 위해서 표층 뜰개 부이로부터 계산된 해류자료와 비교 검증하였다. 그림 2.3.6은 해류 비교 검증을 위해 사용된 북대서양의 뜰개 부이 위치를 나타낸 것이다.

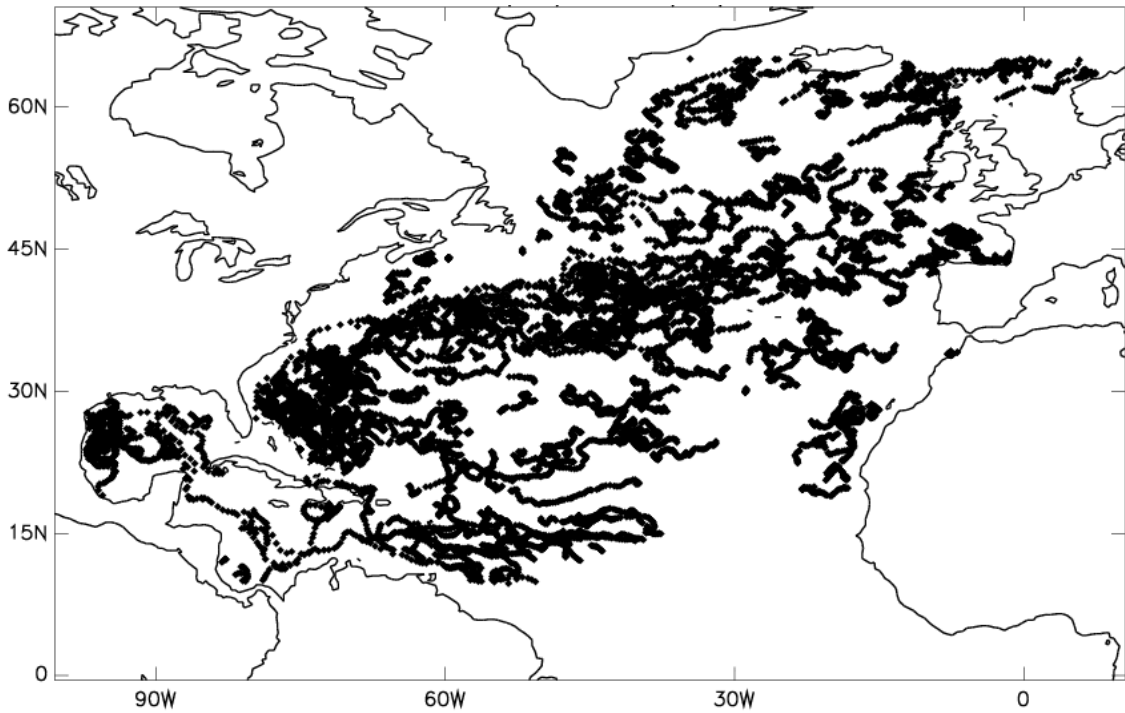


그림 2.3.6. 해류 비교 검증을 위한 북대서양에서 뜰개 부이의 위치 자료. 2006년 1월 1일부터 3월 31일까지(Martin, 2014).

그림 2.3.7는 해면고도 위성 자료를 동화함에 따른 표층 해류의 재현성을 검증한 결과이다. 북대서양과 북동 그리고 북서 대서양에서의 평균적인 해류의 재현성을 나타내었다. 해면고도 위성 자료를 동화함에 따른 동서방향 유속과 남북 방향 유속이 모두 개선되는 것을 알 수 있다. 다만 동서 방향의 유속은 해면고도 자료의 개수가 증가함에 따라 재현성이 개선되는 경향이 뚜렷한 반면 남북 방향 유속은 그러한 경향성이 뚜렷하지 않다. 또한 북동 대서양에서는 유속의 재현성이 크게 개선되지 못한 것으로 나타났다. 그러나 그림 2.3.6에서 보는 바와 같이 대부분의 뜰개 부이들이 서쪽에 치우쳐 있어서 자료의 대표성 문제가 예상되는 바 북동 대서양에서 해류의 재현성이 개선되지 않았다고 말할 수는 없을 것으로 보인다.

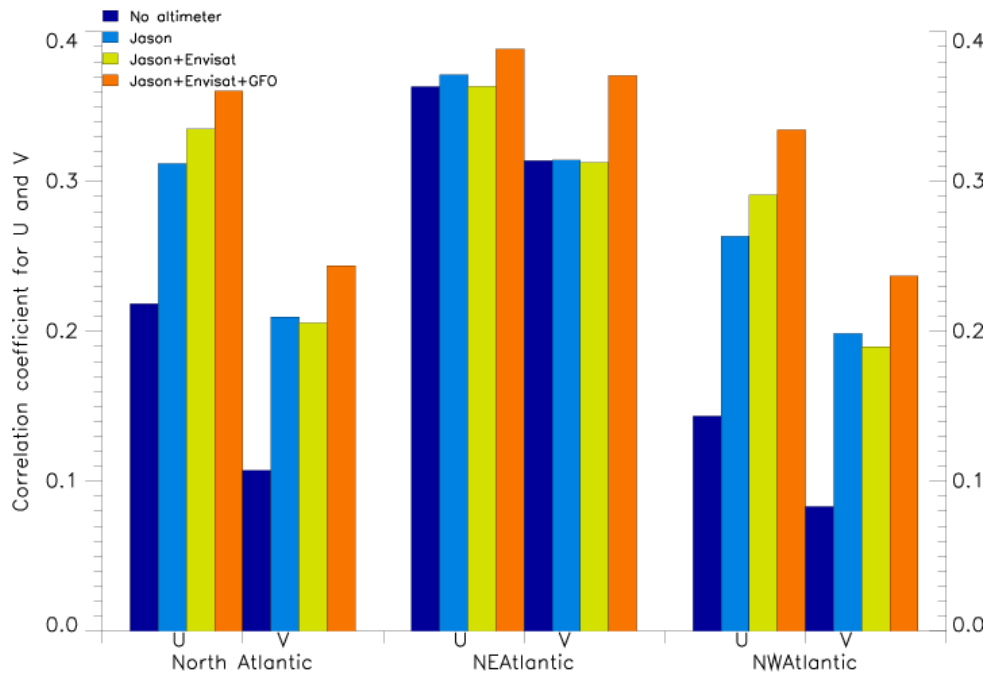


그림 2.3.7. 해면고도 위성 자료를 동화함에 따른 해류의 재현성 검증 결과. 관측 자료와의 상관도 (Martin, 2014)

결과적으로 해면고도 위성 자료를 동화함에 따라 해면고도로부터 관측되는 에디 등의 변동성을 보다 잘 재현하는 것으로 나타났으며 특히 해류의 재현 능력이 크게 향상되는 것을 알 수 있었다. 따라서 해면고도를 동화하는 방법을 고안하고 이를 현재 해양과학기술원에서 구동하고 있는 해양자료동화 시스템에 적용할 필요가 있다. 향후 해류의 개선 등에 대한 민감도 실험을 북태평양 영역에서 수행함으로써 해면고도 자료동화에 대한 효율성을 면밀히 분석할 필요가 있다.

### 3. 한국해양과학기술원 자료동화 시스템

#### 가. 전지구 재분석 자료 생산 시스템 - DASK

한국해양과학기술원에서는 접합 기후 모델인 GFDL-CM2.1과 앙상블 최적내삽(EnOI) 자료동화 기법을 기반으로 하여 전지구 재분석 시스템(DASK, Data assimilation system of KIOST)을 구축하였다. 본 시스템은 수치 모델 기술 및 해양 관측 자료의 자료동화 기술을 바탕으로 보다 정확한 지난 수십 년 간의 해양 및 대기장을 재현하는 것으로, 수십 년 단위의 과거 기후 변화 분석 및 자체 개발 중인

엘니뇨 예측 시스템이나 고해상도 지역 예측 시스템에 초기장을 제공한다. 1947년 1월부터 2015년 8월까지 기간 동안 월 단위의 재분석장이 생산되어 자료를 획득할 수 있다. 기본적으로 메모리가 큰 해양의 자료동화만을 수행하였으며, 접합자를 통해 해양의 변화가 대기 모델에도 반영되도록 상호작용을 하고 있다. 현재 해양 자료동화만을 수행하여 나온 접합 모델 결과인 DASK 1.4 버전과 동일한 모델 dynamics를 사용하면서 대기의 바람장에 ERA-interim 바람 재분석장을 0.5 비율로 nudging 시켜 바람장을 보다 실제에 가깝게 조정한 DASK 1.5 버전까지 배포된 상태이다. 해당 자료의 자세한 설명은 참고문헌 Kim et al. (2015)을 통해서 확인할 수 있다.

DASK에서는 EnOI기법을 바탕으로 해양장에 SST, 수직 수온/염분 프로파일 등을 동화하게 된다. EnOI기법은 Kalman gain matrix라는 일종의 모델 배경장과 관측장 사이의 반영 weight를 결정하는 행렬을 이용하여 관측값을 모델장에 반영하는 칼만 필터 기법과 유사한 방법론이다. 특히 EnOI에서는 특정 모델장들을 추출하여 앙상블들을 구성한 뒤 이로부터 배경오차 공분산(background error covariance)를 생성하여 Kalman gain matrix를 구성하는데, 이는 모델 dynamics나 초기장 및 강제력 등을 다르게 주어 비교적 독립적인 앙상블 모델들로부터 앙상블을 구성하는 앙상블 칼만필터(EnKF)와 매우 유사하다고 할 수 있다. 다만 EnOI는 EnKF와는 달리 하나의 모델에서 다른 time-step의 모델장들로부터 앙상블을 구성한다는 점에서 차이가 난다(Evensen, 2003 ; Oke et al, 2007). 이러한 이유로 EnOI는 EnKF에 비해 전산자원 소모량이 극도로 적다는 장점이 있으며, 다른 자료동화 방법론들과 비교해보아도 EnOI기법의 계산 비용은 상당히 저렴한 편이다. DASK에서는 해표면수온, 수온·염분 프로파일, 그리고 해표면고도 등 변수들을 대상으로 자료동화를 수행하며, 자료동화에 사용된 입력 자료는 다음과 같다. (표 2.3.1).

표 2.3.1. DASK의 자료동화 입력자료.

자료명	관측변수	기간	자료 출처
HadISST	SST	194701-198108	UK Met Office ( <a href="https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/">https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/</a> )
OISST	SST	198109-201212	NOAA( <a href="https://www.ncdc.noaa.gov/oisst">https://www.ncdc.noaa.gov/oisst</a> )
DT-MSLA	SSH anomalies	199211-201212	AVISO( <a href="https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/sea-surface-height-products/global/msla-h.html">https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/sea-surface-height-products/global/msla-h.html</a> )
MBT	T profile	194701-200407	WOD 2009 ( <a href="https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html">https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html</a> )
OSD	TS profile	194701-201212	WOD 2009 ( <a href="https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html">https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html</a> )
CTD	TS profile	196101-201212	WOD 2009 ( <a href="https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html">https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html</a> )
MRB	TS profile	197711-201212	WOD 2009 ( <a href="https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html">https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html</a> )
PFL	TS profile	199407-201212	WOD 2009 ( <a href="https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html">https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html</a> )
KODC	TS profile	1961-2012	<a href="http://www.nifs.go.kr/kodc/index.kodc">http://www.nifs.go.kr/kodc/index.kodc</a> 약 2개월 간격 자료

DASK 시스템을 통해 생산한 재분석 자료의 성능을 검증하기 위해서 계절 평균 SST를 Met Office에서 해양 hydrography 관측자료를 최적내삽(OI)법을 통해 생성한 EN4 자료(<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/>)를 통해 검증해 보았다. 북반구 여름(JJA) 및 겨울(DJF)의 DASK 평균 SST는 연안 제외한 대부분의 북태평양 및 북대서양에서는 관측값과의 차이가 0.5 °C 이내로 상당히 비슷한 값을 보였으나, 남반구 여름(DJF)에 남빙양 부근에서 큰 positive bias가 나타났고, 남반구 겨울(JJA)에는 남빙양을 포함하여 인도양 및 남태평양, 남대서양 등 남반구 대부분의 해

역에서 negative bias가 나타나는 것으로 확인되었다. 특히 계절을 막론하고 북반구 고위도에서도 상당한 bias들이 확인되는데, 이는 DASK에서 해빙이나 convection 등이 잘 모의되지 않았기 때문일 것으로 추측된다(그림 2.3.8).

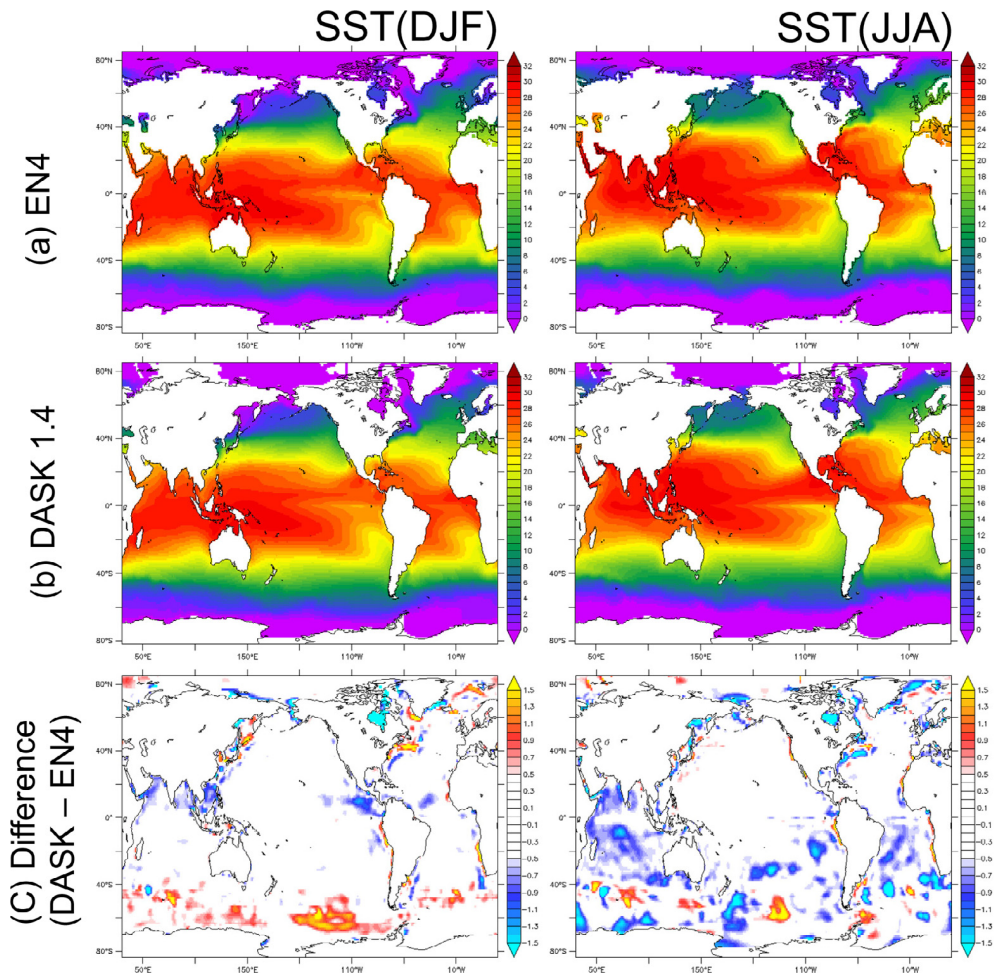


그림 2.3.8. JJA와 DJF의 평균 해표면수온 및 Bias (1947-2012 평균): (a) 관측 자료 EN4, (b) DASK, (c) DASK Bias.



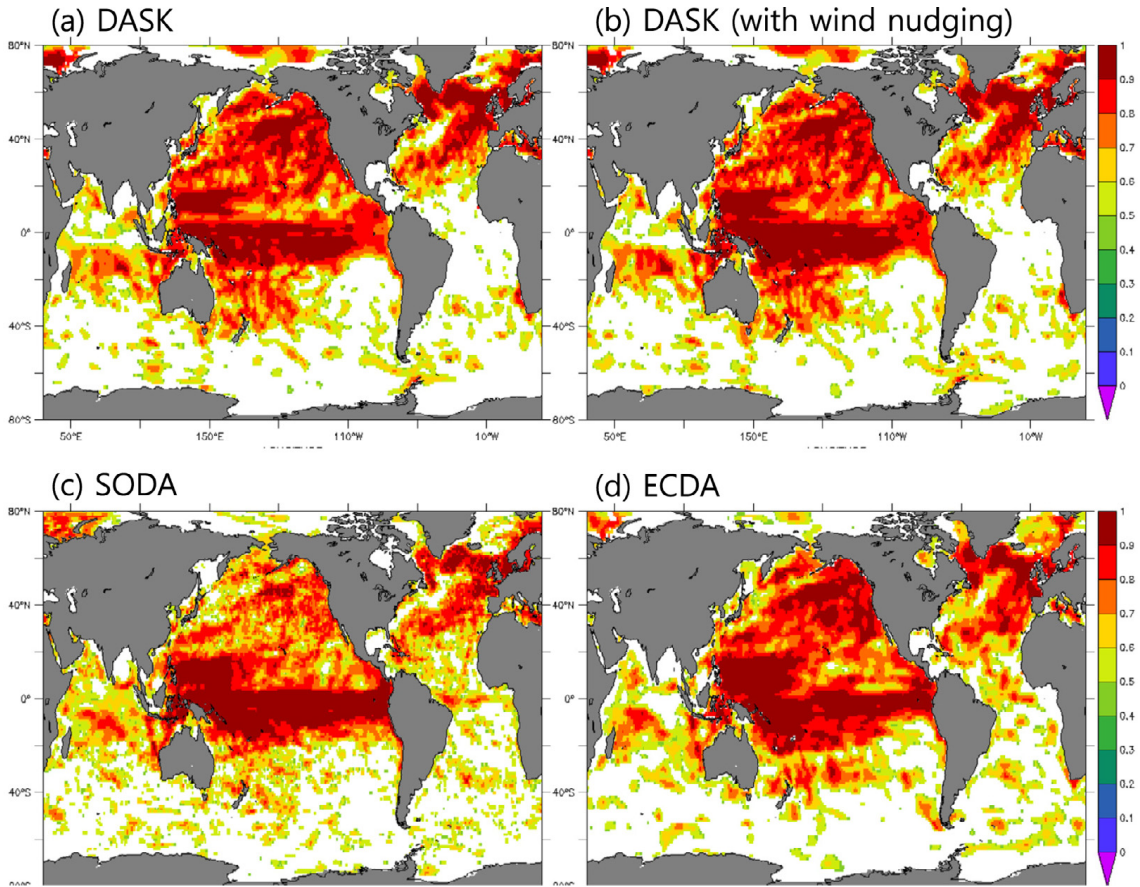


그림 2.3.9. 1980-2010년 관측자료(EN4)에 대한 HC300의 상관계수(신뢰도 99% 이상 채색, 이하 흰색): (a) DASK, (b) DASK wind-nudging data, (c) SODA, (d) ECDA.

실제로 상층 300 m의 열용량(HC300)의 변동성이 특히 남반구 해역들에서 잘 재현이 되지 않고 있음을 확인할 수 있는데(그림 2.3.9), 이는 이들 해역에서의 관측자료가 상대적으로 부족한 것도 하나의 이유가 될 것으로 생각된다. 반면, 관측자료가 많은 적도 해역 및 북태평양/북대서양에서는 EN4 관측자료에서 확인되는 변동성들이 잘 재현되어 상관계수가 매우 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. DASK의 경우 1.4버전(그림 2.3.9a)에 비해 ERA-interim 바람장이 어느 정도 반영된 1.5버전(그림 2.3.9b)에서 대체로 더 좋은 재현성을 보이고 있어 대기 자료동화도 어느 정도 필요함을 확인할 수 있다. 또한 DASK보다 고해상도(수평 해상도 0.5도)인 SODA 재분석 자료(그림 2.3.9c)나 GFDL에서 거의 동일한 모델을 통해 생산한 ECDA 재분석 자료(그림 2.3.9d)에서도 북태평양 및 북대서양에서 높은 상관 계수가 나타나고 다른 해역에서는 다소 떨어지는 상관 계수가 나타나는 것을 확인할 수 있

다. 흥미로운 것은 쿠로시오 해역 등 한국 및 일본 주변 해역에 대해서 DASK 결과가 다른 재분석 자료들에 비해 나은 결과를 보인다는 것인데, 이것은 KODC 등에서 제공하는 국립수산물과학원 정선관측 자료 등 우리나라 주변 관측 자료들이 추가 반영된 결과인 것으로 풀이된다. 이외에도 표층 및 아표층에서의 수온 및 염분 평균 값 및 시공간 변동성에 대해 분석을 진행한 바 있으며 자세한 내용은 참고문헌 Kim et al. (2015)를 통해 확인할 수 있다.

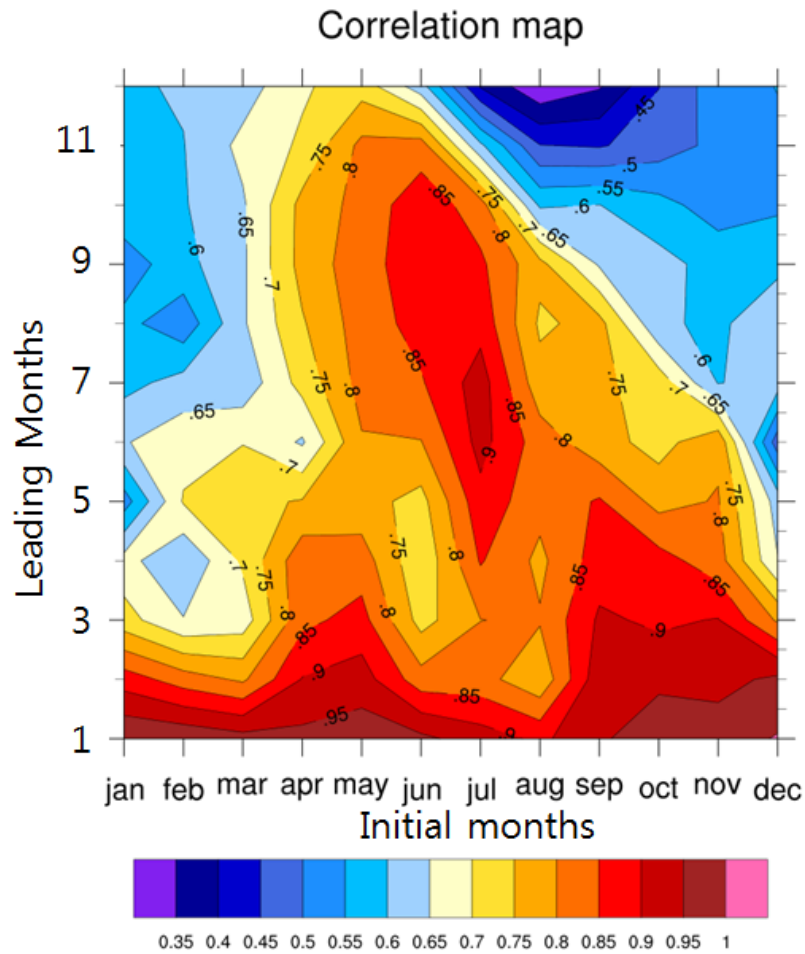


그림 2.3.10. ENSO skill test diagram.

DASK와 동일한 모델 시스템을 통해 엘니뇨(ENSO)를 비롯한 다양한 기후현상에 대한 예측 모델을 실험적으로 수행하고 있다. 해당 모델은 1981년부터 2012년까지 매월 1일을 시작점으로 하여 8개의 앙상블들을 생성하여 앙상블 예측을 수행

한 후, ENSO 변동성에 대한 skill 테스트를 통해 성능을 검증하고 있다. MOM4.0 및 MOM4.1에서 제공하는 time-stepping 방법론과 각 초기조건에서 0시간, 6시간, 12시간, 18시간 shift된 모델장들을 각각 조합하여 총 8개의 앙상블을 생성하여 예측 모델을 수행하게 된다. 각 월들로부터 12개월 예측에 대한 상관 계수(그림 2.3.10)를 확인해보면 5월부터 12개월 후 예측된 값이 0.7 이상으로 나타나고 있다. 즉, 이듬해 5월까지 어느 정도 정확한 예측을 한다고 할 수 있다. 하지만 이러한 예측 성능은 예측 시작 월을 바꾸더라도 이듬해 5월 이후로 급격히 나빠지는 것을 확인할 수 있어 12월 혹은 1, 2월 등의 초기장을 사용하게 되면 ENSO의 예측 가능 기간이 매우 짧아지게 되는 것을 확인할 수 있다. 이를 spring barrier (Duan and Wei, 2012)라고 부르며 현재 기후 예측 모델에 있어 상당히 중요한 이슈로 알려져 있어, 향후 이러한 문제를 해결할 방안에 대해 모색할 필요가 있다.

#### 나. 고해상도 북서태평양 예측 시스템 - OPEM

한국해양과학기술원에서는 GFDL-MOM5를 바탕으로 북서태평양 해역에 대한 고해상도 해양예측 시스템을 구축하였다. 시스템의 정식 명칭은 Ocean Predictability Experiment for Marine environment (OPEM)이다. 해양 모델의 수평 격자 시스템은 Arakawa B grid를 사용 하고 있으며, 연직 격자는 z-star coordinate 이다. 모델 영역은 북위 5.0~63.0도, 동경 98.9~170.0도로 한반도 주변 해역을 포함한 적도부근 지역부터 고위도의 북서태평양 해역이 속한다. 모델의 수평 해상도는 1/24도이고, 연직 51층이다. 수치모델의 초기장은 상기한 KIOST 해양 자료동화 시스템을 통해 생성한다.

고해상도 북서태평양 예측시스템의 특징은 다음과 같다. 첫째, 한반도 주변 해역에 최적화 된 모델 자료를 생성하는 것을 목표로 한다. 이를 위해서 ARGO 자료(<http://www.argo.ucsd.edu/>) 및 NOAA GTSPP 자료(<https://www.nodc.noaa.gov/GTSPP/>) 등 세계적으로 공개된 수온 및 염분 프로파일 관측자료뿐만 아니라, 국립수산물과학원(<http://www.nifs.go.kr/>)의 정기 정선 관측 자료 등 한반도 주변 해역에서 확보한 관측자료를 자료동화 입력자료로 추가 반영하여 초기장을 생성하였다. 둘째, 표층 염분 및 주요 해양 순환류에 대한 모의 성능 향상을 도모하기 위해서 담수 유출 관측자료를 모델에 반영하였다. 양자강, 황하, 메콩강 등 총 40개의 주요 하천에

대한 담수 유출 자료의 12개월 평균값(climatology)를 RIVDIS 웹사이트 ([https://daac.ornl.gov/RIVDIS/guides/rivdis\\_guide.html](https://daac.ornl.gov/RIVDIS/guides/rivdis_guide.html))로부터 제공받아 사용하였다. 조석 혼합은 수치모델에서 고려하지 않고 모수화 처리를 하였다.

한국해양과학기술원에서는 2017년 3월 1일부터 매주 수요일마다 해양 재분석자료 및 예측자료를 생성하고 있다. 단, 보다 정확한 초기장을 제공하기 위해 2017년 3월 1일 이전부터 지속적으로 자료동화모델을 수행하여 왔으므로 보다 긴 기간의 재분석 자료를 보유하고 있다. 모델의 총 수행 기간은 24일이며, 자료동화모델은 14일, 예측모델은 10일 간 구동된다.

고해상도 북서태평양 예측 시스템(OPEM)에서 자료동화는 SST 및 수온/염분 수직 프로파일을 대상으로 수행한다. 사용 자료에는 1/10도 해상도의 NOAA AVHRR OISST v2 위성자료(<https://www.esrl.noaa.gov>), GTSP real-time data, ARGO data 및 국립수산물과학원에서 제공하는 한국근해 정선 관측자료 등의 수온/염분 수직 프로파일 등이 있다. 위의 자료를 취합하여 자료동화 입력 자료를 생성 한다(표 2.3.2).

표 2.3.2. 한국해양과학기술원 해양예측시스템(OPEM)에 사용한 수치모델 입력 자료.

	자료 이름
해면경계조건 (SBC)	KMA Global UM data
개방경계조건 (OBC)	MYOCEAN data
담수유출 관측자료	RiVDis data
조석 혼합 모수화 자료	TPX07.0 (TOPEX/POSEIDON inverse Model)
SST 자료동화 입력자료	NOAA AVHRR OISST v2 (1/10°)
Profile 자료동화 입력자료	GTSP data, ARGO profile data, KODC data

DASK 시스템에서와 동일한 EnOI 기법을 통해 OPEM에서도 위에서 언급한 해양 관측 자료들을 자료동화 하게 된다. 자료동화는 SST에 대해서는 매일 1회 수행하고, 수온 및 염분 프로파일에 대해서는 1주일에 1회 시행하는데, 프로파일 자료 동화 날짜로부터 자료동화 시점을 전후로 3.5일 이내에 속하는 자료들을 모두 그

날짜에 관측된 자료로 간주하고 수행한다. 수십 년의 모델 적분 과정 중에서 조금씩 관측 자료를 반영시키는 DASK와는 조금 다르게, OPEM에서의 자료동화 수행의 목적은 예측모델 수행에 필요한 초기장 생성에 있다. 총 14일에 해당하는 자료동화 모델 수행 기간을 거쳐 특정 일자의 초기장을 생성하고, 이후 예측 모델을 수행하여 총 10일 가량의 예측 자료를 생성하게 된다. 자료동화모델은 다시 영구자료동화와 임시자료동화로 구분되는데, 영구자료동화는 이후 더 이상 수정되지 않고, 임시자료동화 기간 동안 생성된 자료동화 자료는 그 다음 주의 영구자료동화 때 관측자료의 추가 여부에 따라 수정이 될 가능성이 있다. 이는 최근 1주일 이내의 자료는 완전히 수집되지 않을 가능성이 있어 자료동화 시에 누락되는 입력자료를 최소화하기 위함이다.

OPEM의 모의성능을 살펴보기 위해 관측 자료와의 비교 검증을 수행하였으며, HYCOM 재분석 자료(해상도 1/12도, <http://hycom.org>)를 관측자료와 추가 비교 분석한 결과를 제시함으로써 HYCOM 결과와 모의성능을 비교하였다.

그림 2.3.11은 2017년 12월 6일자 HYCOM 및 OPEM 예측자료 SST 분포를 보여준다. 두 모델 모두 유사한 결과를 보여주고 있다. 쿠로시오 해류는 일본 열도 남해 연안을 따라 북상하다가, 일본 동쪽 연안(동경 140도, 북위 35도) 부근에서 분기하여 동진하게 되는데 이를 쿠로시오 확장역이라고 한다(Qiu, 2002; Taguchi et al., 2007). 북위 약 35도에 존재하는 쿠로시오 확장역을 기준으로 남북에서 수온, SSH 등 다양한 물리적 변수들이 확연히 달라지는 front를 형성하게 되므로 이는 해양 물리적인 의미 외에도 생물, 화학적인 의미에서도 중요한 의미를 가지는 해역이다. 하지만 많은 해양 수치모델에서 쿠로시오 해류가 강하게 모의되어 쿠로시오 확장역의 분기점이 알려진 위치보다 고위도에서 형성되는 overshooting 문제가 항상 논란이 되어왔다. 자료동화가 된 HYCOM 및 OPEM의 결과에서는 대략 수온 20 °C의 등온선을 통해 쿠로시오 확장역의 위치를 파악할 수 있는데, 북위 35도에 위치하는 쿠로시오 확장역으로부터 overshooting 문제가 많이 개선된 것을 확인할 수 있다. 또한 일본 동쪽 해역 북위 40도를 따라 강한 해표면수온 front인 오야시오 확장역(Oyashio Extension)이 존재하는데, 이러한 front들이 잘 재현되고 있는 것을 확인할 수 있어, OPEM의 공간적인 재현성이 상당히 괜찮은 것으로 짐작할 수 있다.

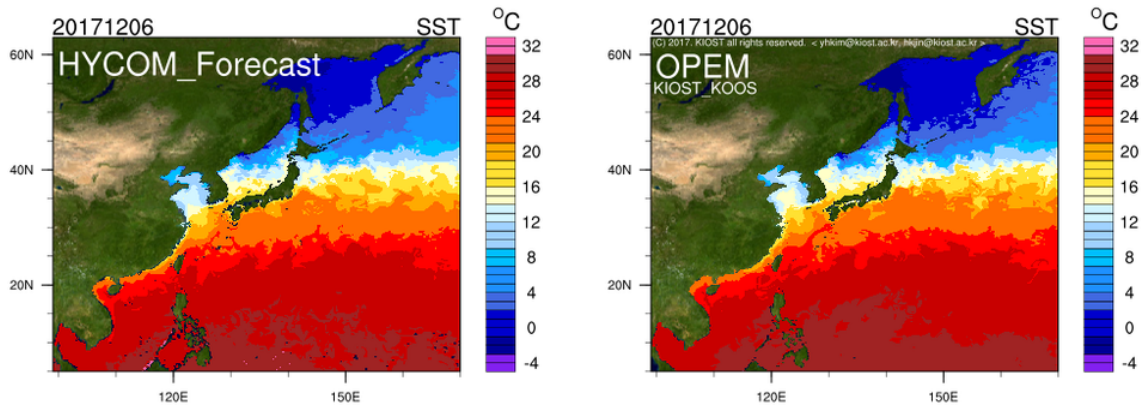


그림 2.3.11. 2017년 12월 6일 북서태평양 해역의 SST 분포도: (좌) HYCOM 예측자료(1/12도), (우) OPEM 예측자료(1/24도).

모델 재현성의 시간적인 변화를 객관적으로 확인해보기 위해, NASA GHR SST 위성자료(해상도 1/100도, <https://podaac.jpl.nasa.gov/GHRSST>)를 사용하여 각각 OPEM과 HYCOM 결과와 비교하였다. 분석 기간은 2016년 1월 1일부터 2017년 3월 31일까지 총 15개월이다. 실제 OPEM의 운용 기간은 2017년 3월부터 시작하지만, 준실시간 재분석 자료인 HYCOM과의 공평성을 가하기 위해, OPEM은 예측 모델 없이 1주 간격의 자료동화모델만을 통해 생성했던 과거 기간 자료를 본 장에서 사용하였다. 시간적으로는 앞에서 언급한 기간의 전체 평균, 공간적으로는 OPEM의 전체 영역을 기준으로 삼아 영역 평균을 취하는 형태로 각종 통계 수치를 구하였다.

RMSE (Root-mean-square-error)는 각 time step에 존재하는 모델 해표면수온 장에 대해 관측자료와의 차이를 계산해 제곱 평균 후 다시 제곱근을 취하는 형태로 계산되었다. 이는 각 격자별로 얼마나 해표면수온의 오차가 있는지를 측정하기 위한 통계적인 방법이다. 그림 2.3.12에 OPEM 및 HYCOM의 각 julian day별 RMSE가 제시되어 있으며, 해당기간의 평균값은 OPEM은  $0.91^{\circ}\text{C}$ , HYCOM은  $0.87^{\circ}\text{C}$ 으로 HYCOM의 오차가 조금 더 적게 나타나지만 이는 통계적으로 무시할 수 있을 만한 오차로 GHRSSST가 실제 해양 해표면수온을 잘 대표한다고 했을 때, 두 모델의 해표면수온 모의 성능이 거의 유사하다는 것을 보여준다. 참고로 julian day는 분석 시작 날짜인 2016년 1월 1일을 0으로 두고 날짜수를 계산한다. 또한 모델 수행 후 200일 정도 뒤, 즉 2016년 7월 중순부터 전체적인 RMSE가 두 모델 모두 줄어들어 분석 기간이 종료되는 이듬해 3월까지 유지되는 모습이 흥미로운 모습이 보이는데,

이 부분에 대해서는 분석 영역을 조금 더 세세하게 나누어 확인해볼 필요가 있다.

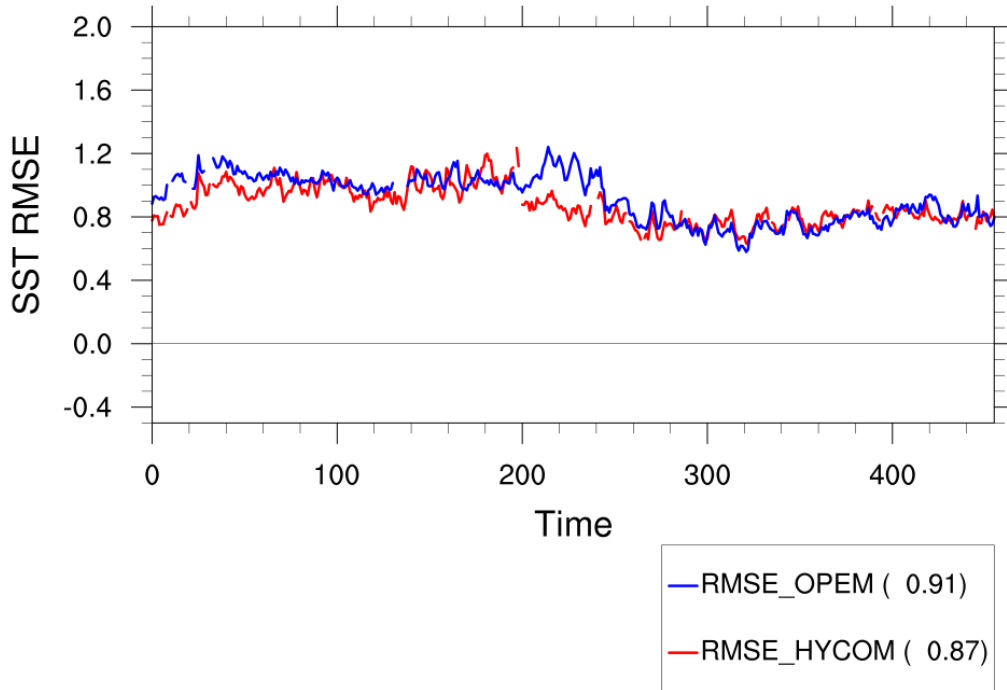


그림 2.3.12. NASA GHR SST 일자료에 대한 SST RMSE (201601-201703): (적색) HYCOM, (청색) OPEM, x축은 2016년 1월 1일부터의 날짜 수.

다음은 시공간 평균 수온 및 염분에 대한 연직 구조를 각 수심별 평균값과 RMSE값을 통해 살펴보았다. 모델의 비교검증을 위한 관측자료로 ARGO float 자료를 이용하였다. 여기서의 비교는 모델 영역 및 시간 범위에 속하는 ARGO자료들을 추출하여 각각의 모델 자료들을 ARGO 자료의 시공간 위치에 내삽시킨 뒤 수행하였다. 수온(그림 2.3.13)의 평균적인 연직구조는 HYCOM과 OPEM이 모두 ARGO와 유사하게 나타났는데, ARGO의 평균 프로파일(상층 500 m 평균 16.62°C)에 비해 HYCOM(평균 16.49°C)이 다소 과소모의하는 듯한 모습이 보이며, OPEM(16.72°C)은 아주 약간 과대모의를 하지만 ARGO와 매우 유사한 분포를 보인다. 하지만 공간적인 RMSE를 살펴보면 HYCOM(1.188°C)이 OPEM(1.415°C)보다 모든 수심에 대해 ARGO에 가까운 결과를 나타내고 있는데, 이러한 현상이 나타나는 이유에 대한 추가 분석이 향후 필요하다. RMSE의 경우 두 모델에 대해 모두 수심 100 m 부근의

아표층(subsurface)에서 가장 크게 나타나는데 이는 주로 수온약층이 형성되는 수심을 모델이 조금이라도 다르게 재현할 경우 큰 오차가 생기기 때문으로 대다수의 재분석 자료들이 이러한 분포를 나타내고 있다(그림 2.3.13).

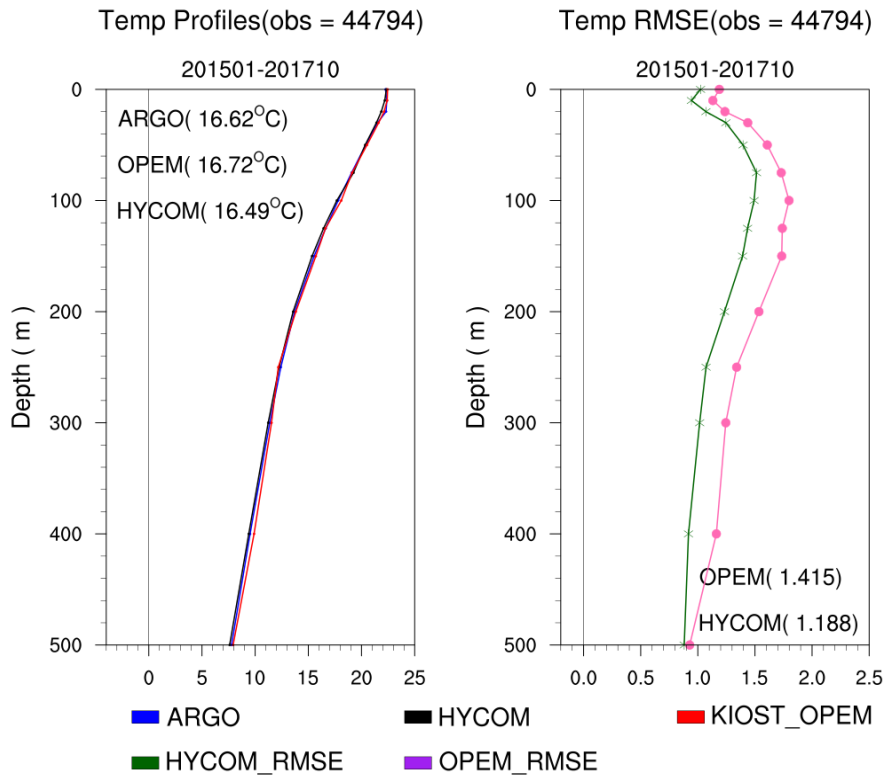


그림 2.3.13. 재분석자료에 대한 수온 프로파일 및 RMSE.

염분의 연직구조는 다소간의 차이가 나타났다. HYCOM은 시공간 평균 염분 프로파일에 대해 전층에 걸쳐서 일정하게 0.1psu 정도(34.44 psu)의 ARGO 관측대비 (34.36 psu) 과대 모의 오차가 발생하는데 비해, OPEM(34.42 psu)은 다른 층에서는 HYCOM과 유사한 분포를 보이지만 표층에서는 ARGO 염분과 매우 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다(그림 2.3.14). 하지만 OPEM 및 HYCOM 모두 표층에서 비슷한 그리고 가장 강한 RMSE가 나타나는 것으로 미루어 OPEM의 평균 표층 염분이 ARGO와 비슷하게 나타나는 이유에 대해서도 영역을 나누어 살펴볼 필요가 있을 것으로 보인다. 염분은 일반적으로 표층에서의 담수유입량에 의해 많이 좌우가 되고 있는데, 강수량 및 증발량 등 담수유입량에 대한 자료 확보가 쉽지 않아서



RMSE 관점에서 살펴본 표층에서의 염분이 잘 재현되지 않는 것으로 보인다.

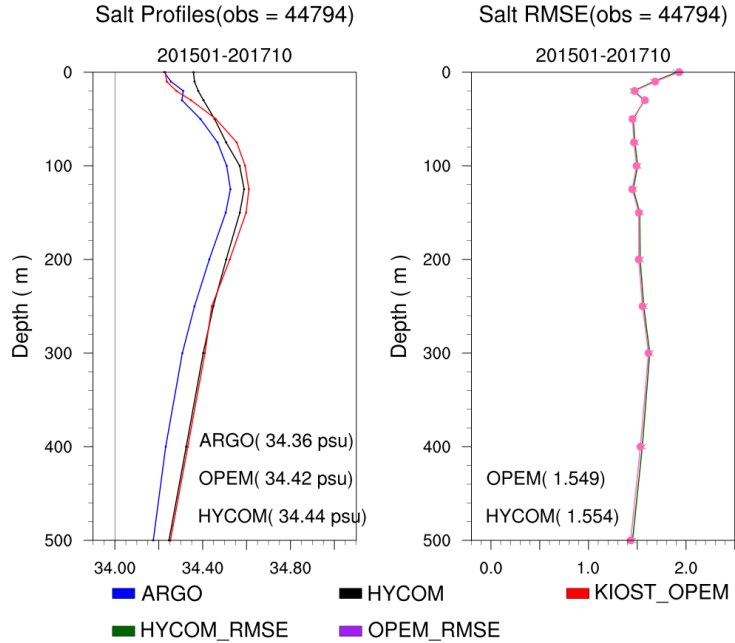


그림 2.3.14. 재분석자료에 대한 염분 프로파일 및 RMSE.

지난 2017년 7월 12일, 우리나라 동해안에 냉수대가 관측되었다. 우리나라 동해안 냉수대 형성의 원인은 크게 1) 북한한류의 남하, 2) 태풍 및 3) 남풍 또는 남서풍의 유입으로 인한 용승 등이 있다. 특히 용승 등을 통해 냉수대가 형성이 되면 해저의 영양염이 표층으로 수송됨에 따라 식물성 플랑크톤이 증가하는 경우가 많아, 해양물리학자뿐만 아니라 생물/화학자들도 동해안 연안에서의 냉수대 형성 현상에 많은 관심을 보이고 있다. 이번 냉수대의 경우에는 남서풍 등 남풍 계열의 바람이 유입됨으로 인해 동쪽/동남쪽으로 형성된 에크만 수송으로 인해 형성된 것으로 추측된다(그림 2.3.15). 실제 일본의 Himawari SST 등 다양한 SST 위성영상 등에서 동해안 냉수 발생이 확인되고 있으며, 뿐만 아니라 용승으로 인한 bloom이 일어났음을 천리안 클로로필 영상 등을 통해 확인가능하다. 실제 이러한 결과물은 TV 및 신문 기사 등을 통해 보도되기도 하였다.

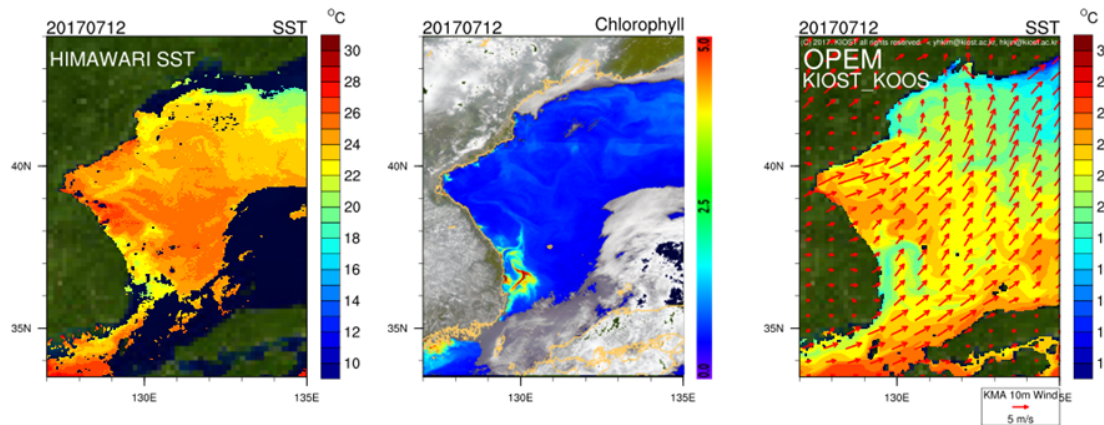


그림 2.3.15. 2017년 7월 12일 우리나라 동해안 냉수대 분포: (좌) HIMAWARI SST 위성 영상, (중) 천리안 위성 클로로필 영상, (우) OPEM SST 예측자료 및 KMA UM 10m 바람장(\*출처 : 2017년 7월 19일자 SBS 인터넷 신문 보도자료).

OPEM의 경우 다른 재분석 자료들에 비해 국립수산과학원의 정선 관측 자료 등 우리나라 주변 해역의 자료를 더 많이 자료동화 시스템에 입력함으로써 우리나라 주변 해역에 대해 보다 더 정확한 결과를 얻을 가능성이 높다. 특히 동해는 규모가 작은 marginal sea이긴 하지만, 중위도의 북태평양을 가로지르는 storm track의 upstream에 속하는 해역으로 다양한 북태평양의 기후 현상에 많은 영향을 주는 기후학적으로 매우 중요한 해역이다. Hirose and Fukudome (2006)에 의해 동해 수온이 동계계절풍과 연관되어 일본에서의 겨울철 강우량에 큰 영향을 미치게 되는 역할을 한다는 것이 밝혀져 있으며, 그 외에도 북서태평양의 주요 대기 순환 패턴 중 하나인 WP (West Pacific) teleconnection 패턴과도 연관되어 있음을 보여주는 결과(Hirose et al., 2009; Yamamoto and Hirose, 2011)도 많다. 또한 동해의 수온이 북서태평양 뿐만 아니라 북반구 전체에 걸친 대기 순환에도 영향을 미치는 것을 확인한 연구(Seo et al., 2014)가 있는 등, 동해는 그 규모에 비해 기후적으로 가지는 의미가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이처럼 동해의 수온을 잘 재현하는 것은 비단 우리나라 주변 해역의 수온 예측에만 도움이 되는 것이 아니라, 보다 큰 규모의 기후 변화 등을 예측하는데 도움이 될 것으로 생각되는데, 실제 OPEM의 결과를 살펴 보면 동해의 상층 순환을 잘 재현하는 것으로 보인다. 그림 2.3.16은 2016년 8월 동해의 북위 37도 정선 일부의 수온 및 염분 섹션을 나타낸 것으로, 특히 관측자료에

서의 값을 보면 울릉 난수성 소용돌이(Ulleung warm eddy)가 잘 발달한 것을 확인할 수 있다. 이러한 큰 규모의 eddy 구조는 생성 후 상당한 시간 동안 남아 동해의 열용량 등에 영향을 미치게 되는데, OPEM에서는 이러한 구조가 잘 재현되고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 HYCOM과 같이 훌륭한 성능의 재분석 자료조차도 이러한 구조가 잘 재현되지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 점에서 미루어 적어도 OPEM은 다른 재분석 자료들에 비해 우리나라 주변 해역 등에서 보다 강점을 가지고 있을 것으로 추측할 수 있으며, 이러한 자료를 이용한 예측 시스템도 앞으로 해양 및 기후 예측에서 큰 장점으로 작용할 수 있을 것으로 보인다.

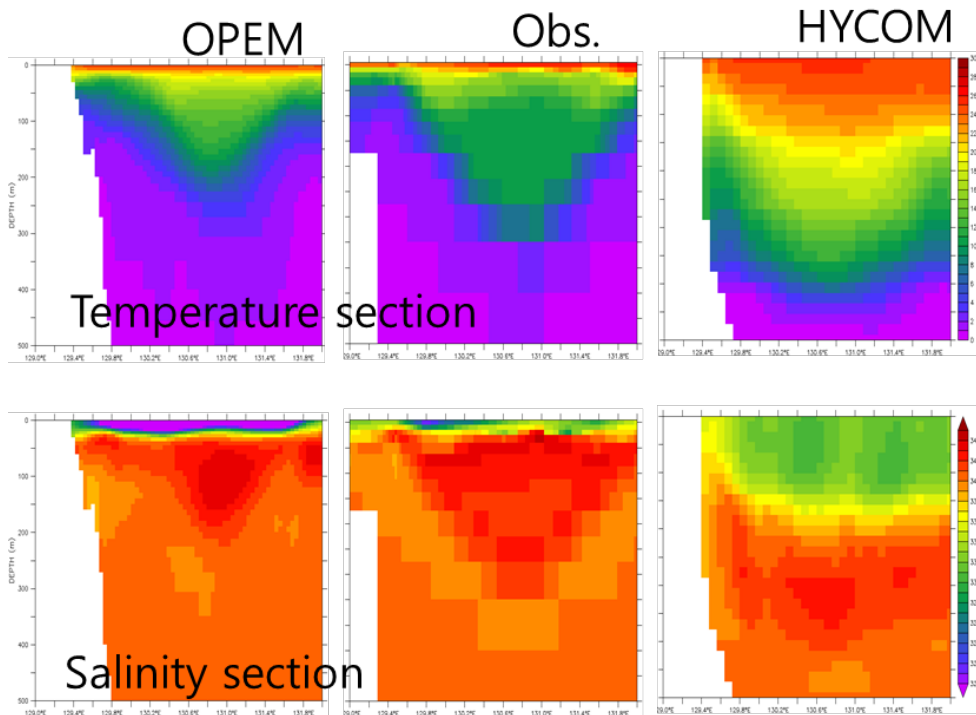


그림 2.3.16 2015년 8월 평균 동해 북위 37도 단면의 수온(상)과 염분(하) 분포: (좌) OPEM, (중) 관측자료, (우) HYCOM 에서의 결과물.

## 제 3 장 연구개발수행 내용

### 제 1 절 바람장과 쿠로시오 변동성 연구 계획

#### 1. 바람장 분석 계획

관측자료, 재분석자료를 기반으로 서태평양/북태평양 지역적/대규모 바람장의 주요모드를 이해하고 이에 따른 계절내 규모/경년 시간규모의 쿠로시오 변동을 이해하고자 한다. 기후모형관측자료를 활용하여 서태평양 지역의 쿠로시오 변동의 해양/대기 상호작용을 이해하고 이를 예측할 수 있는 기반을 구축한다.

대규모 바람장의 주요모드를 분석하기 위하여 격자화된 재분석자료가 필요하다. 대기의 재분석자료는 유럽의 ECMWF(European Center for Medium-range Weather Forecast) 재분석자료, 미국의 NCEP/NCAR(Nation Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)가 많이 활용된다. 재분석자료를 생산하기 위하여 그림 3.1.1과 같은 관측자료와 기후모형이 이용된다. 재분석자료 생산을 위해 그림 3.1.2와 같은 해양자료가 활용된다.

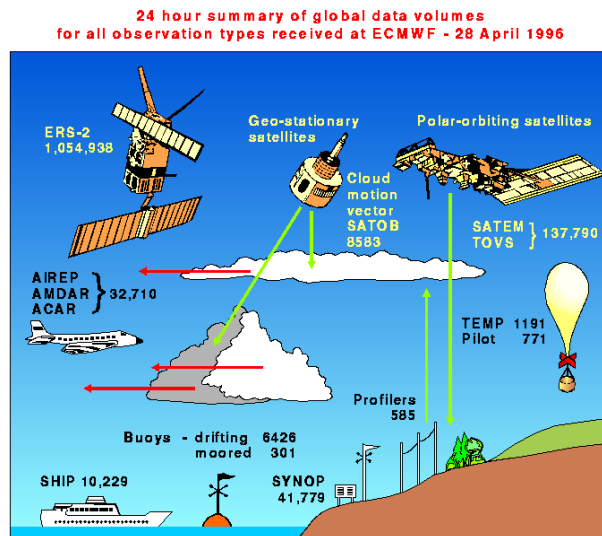


그림 3.1.1. 재분석자료 생산에 이용되는 관측자료.

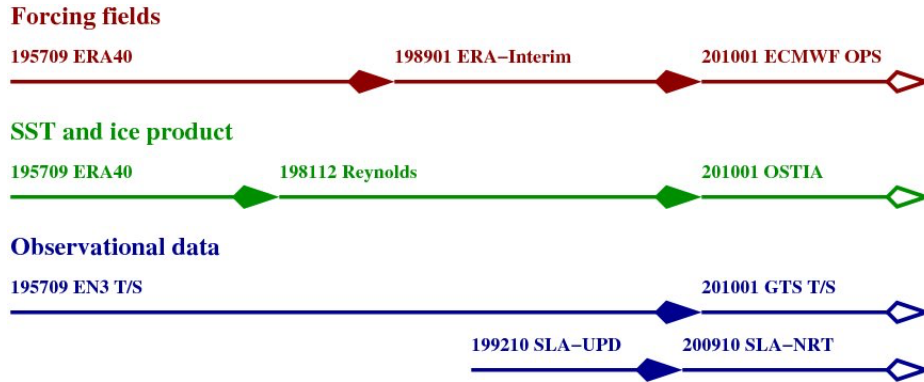


그림 3.1.2. ECMWF 재분석자료 해양 관측자료.

대규모 바람장 및 쿠로시오 변동성의 주요모드를 분석하기 위하여 주성분분석(Principal Component Analysis) 및 정준상관분석(Canonical Correlation Analysis)이 활용된다. 시공간의 이차원 변수로 이루어진 자료 행렬을  $X$ 라고 하였을 때, 고유벡터의 성질에 의하여, 다음과 같은 행렬식이 성립한다.

$$X^T X E = E D$$

여기서  $E$ 는 고유벡터로 이루어진 행렬이고,  $D$ 는 고유값으로 이루어진 대각행렬이다. 주성분(principal component)는  $U = XE$ 로 정의되는데, 위 행렬식으로부터 이 주성분은 다음과 같이 직교기저를 이룬다.

$$U^T U = D$$

이 주성분을 구하는 통계적 분석법을 주성분분석이라고 하며, 대규모 주요모드를 분석하기 위하여 이 방법이 이용될 수 있다.

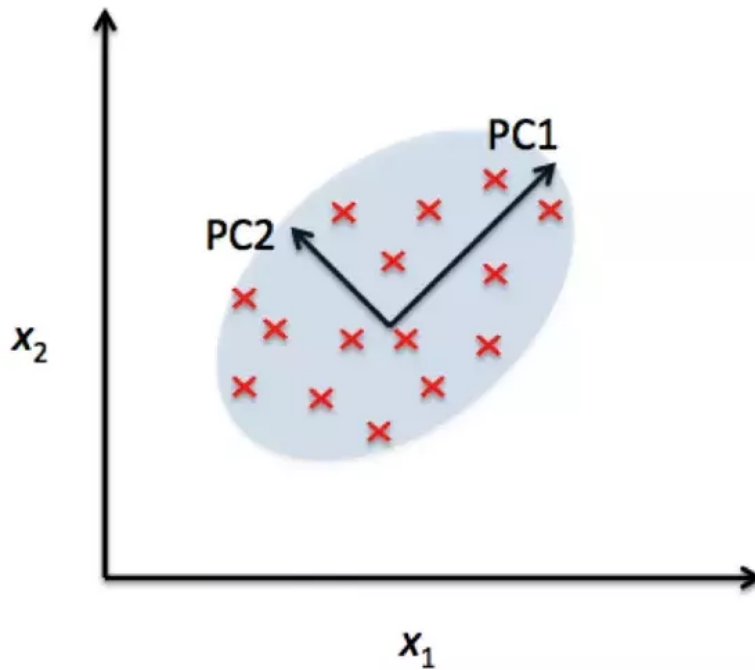


그림 3.1.3. 주성분분석의 개념도.

두 변수  $X$ ,  $Y$ 에 대한 대규모 결합패턴을 분석하기 위하여, 각각의 정규변수 (canonical variables)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P &= XU \\ Q &= YV \end{aligned}$$

두 변수의 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$P^T Q = U^T X^T Y V = S$$

이는 SVD(Singular Value Decomposition)에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X^T Y = V S U^T$$

이와 같이 정규변수  $P$ 와  $Q$ 의 상관관계를 최대로 하는 정준상관분석이라고 하며 두 변수의 대규모 결합패턴에 대한 주요모드를 분석하기 위하여 활용될 수 있다.

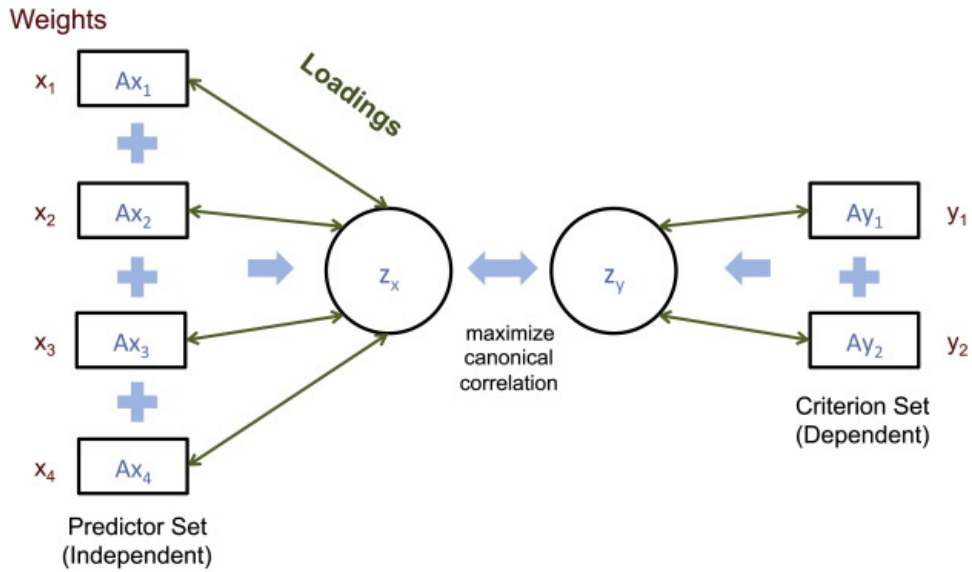


그림 3.1.4. 정준상관분석의 모식도.

해양-대기 상호작용을 이해하기 위하여 기후모형(climate model)이 활용될 수 있다. 기후모형은 대기대순환모형과 해양대순환모형에 해빙모형이 접합된 모형으로 현재 탄소순환, 해양생지화학 과정 등의 모듈이 추가되어 지구시스템 모형(Earth System Model; ESM)으로 발전되었다. 기후모형은 역학과정/물리과정의 이해가 부족하여 충분한 수준의 모의 성능을 가지고 있지 않아 서로 다른 기관에서 개발된 기후모형을 비교 분석하여 결론을 내린다. 정부간 기후변화 협의회(Intergovernmental Panel for Climate Change; IPCC)에서는 미래기후 전망을 위해 이들 모형들이 모여진 CMIP (Coupled Model Intercomparison Project)을 활용해 왔다. 현재는 CMIP5 (CMIP phase 5)의 자료가 공개되어 활용되고 있다(그림 3.1.5). 이 CMIP5는 지구온난화에 따른 미래 온난화 기후를 전망하는 데 활용될 뿐 아니라 현재 기후시스템 변동의 상호작용을 진단하고 이해하는 데 활용될 수 있다. 한편, CMIP5에는 기후시스템 변동을 이해하기 위하여 다양한 시나리오 적분 결과를 제공한다(표 3.1.1).

# CMIP5

Model name	Resolution (lon by lat)	Origin	
1	BCC-CSM1.1	2.815 × 2.815	Beijing Climate Center, China
2	CanESM2	2.815 × 2.815	Canadian Centre for Climate, Canada
3	CCSM4	1.25 × 0.9	National Center for Atmospheric Research, USA
4	CESM1-BGC	1.25 × 0.9	National Center for Atmospheric Research, USA
5	CESM1-CAM5	1.25 × 0.9	National Center for Atmospheric Research, USA
6	CMCC-CM	0.75 × 0.75	Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti, Italy
7	CMCC-CMS	1.875 × 1.875	Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti, Italy
8	CNRM-CM5	1.40 × 1.40	Centre National de Recherches Meteorologiques, France
9	CSIRO-Mk3.6	1.875 × 1.875	Commonwealth Scientific and Industrial Research, Australia
10	FGOALS-g2	2.815 × 3.0	Institute of Atmospheric Physics, CAS, China
11	GFDL-CM3	2.5 × 2.0	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
12	GFDL-ESM2G	2.5 × 2.0	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
13	GFDL-ESM2M	2.5 × 2.0	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
14	GISS-E2-H	2.5 × 2.0	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA
15	GISS-E2-R	2.5 × 2.0	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA
16	HadGEM2-CC	1.875 × 1.25	Met Office Hadley Centre, UK
17	HadGEM2-ES	1.875 × 1.25	Met Office Hadley Centre, UK
18	INM-CM4	2.0 × 1.5	Institute for Numerical Mathematics, Russia
19	IPSL-CM5A-LR	3.75 × 1.875	Institut Pierre-Simon Laplace, France
20	IPSL-CM5A-MR	2.5 × 1.25	Institut Pierre-Simon Laplace, France
21	IPSL-CM5B-LR	3.75 × 1.875	Institut Pierre-Simon Laplace, France
22	MIROC5	1.40 × 1.40	Atmosphere and Ocean Research Institute, Japan
23	MIROC-ESM	2.815 × 2.815	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan
24	MIROC-ESM-CHEM	2.815 × 2.815	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan
25	MPI-ESM-LR	1.875 × 1.875	Max Planck Institute for Meteorology, Germany
26	MRI-CGCM3	1.125 × 1.125	Meteorological Research Institute, Japan
27	NorESM1-M	2.5 × 1.875	Norwegian Climate Centre, Norway

- Climate Model Inter-Comparison Project, Phase 5 (CMIP5)
- 27 Climate Models are run with the same RCP scenarios
- The results of these simulations are averaged together to obtain the multi-model average (or ensemble mean)
- Caveat: Not all climate models are independent of each other

Table adapted from Feng & Fu (2013), Atmos. Chem. Phys., 13, 10081-10094.

그림 3.1.5. CMIP5 모형의 해상도와 개발 기관.



표 3.1.1. CMIP5의 시나리오 종류.

Experiment description	CMIP5 label	AOGCM	ESM or EMIC	High resolution <sup>a</sup>	Major purposes
Preindustrial control run	piControl	X	X		Evaluation, unforced variability
Past ~1.5 centuries (1850–2005)	historical	X	X		Evaluation
AMIP run (observed SSTs and sea ice prescribed for 1979–present)	amip	X	X	X	Evaluation
Future projection (2006–2300) forced by RCP4.5	rcp45	X	X		Projection
Future projection (2006–2300) forced by RCP8.5	rcp85	X	X		Projection
Future projection (2006–2300) forced by RCP2.6	rcp26	X	X		Projection
Future projection (2006–2100) forced by RCP6	rcp60	X	X		Projection
Benchmark 1% yr <sup>-1</sup> increase in CO <sub>2</sub> (to quadrupling)	lpctCO2	X	X		Climate sensitivity, feedbacks
Quadruple CO <sub>2</sub> abruptly, then hold fixed	abrupt4xCO2	X	X		Climate sensitivity, feedbacks, fast responses <sup>b</sup>
Climatological SSTs and sea ice imposed from piControl	sstClim	X	X		Fast responses <sup>b</sup>
As in sstClim, but with 4XCO <sub>2</sub> imposed	sstClim4xCO2	X	X		Fast responses <sup>b</sup>
As in sstClim, but with aerosols specified from year 2000 of the historical run	sstClimAerosol	X	X		Fast responses <sup>b</sup>
As in sstClim, but with sulfate aerosols specified from year 2000 of the historical run	sstClimSulfate	X	X		Fast responses <sup>b</sup>
Preindustrial conditions imposed as in piControl, but with atmospheric CO <sub>2</sub> determined by the model itself	esmControl		X		Evaluation, carbon cycle
Simulation of past, as in historical, but driven by CO <sub>2</sub> emissions rather than concentrations	esmHistorical		X		Evaluation, carbon cycle
Future projection as in rcp85, but driven by CO <sub>2</sub> emissions rather than concentrations	esmrcp85		X		Projection
Radiation code sees piControl CO <sub>2</sub> concentration, but carbon cycle sees 1% yr <sup>-1</sup> rise	esmFixClimI <sup>c</sup>		X		Carbon feedback
Carbon cycle sees piControl CO <sub>2</sub> concentration, but radiation sees 1% yr <sup>-1</sup> rise	esmFdbkI <sup>c</sup>		X		Carbon feedback
As in AMIP, but with radiation code seeing 4 × CO <sub>2</sub>	amip4xCO <sub>2</sub>	X	X	X	Clouds, fast responses <sup>b</sup>
Patterned SST anomalies added to AMIP conditions (as called for by CFMIP)	amipFuture	X	X	X	Cloud feedbacks
Zonally uniform SSTs imposed on an ocean-covered Earth (as called for by CFMIP)	aquaControl	X	X	X	Clouds
As in aquaControl, but with 4 × CO <sub>2</sub>	aqua4xCO2	X	X	X	Clouds, fast responses <sup>b</sup>
As in aquaControl, but with a uniform 4-K increase in SST	aqua4K	X	X	X	Cloud feedbacks
As in AMIP, but with a uniform 4-K increase in SST	amip4K	X	X	X	Cloud feedbacks
Historical simulation but with natural forcing only	historicalNat	X	X		Detection and attribution
Historical simulation but with GHG forcing only	historicalGHG	X	X		Detection and attribution
Historical simulation but with other individual forcing agents or combinations of forcings	historicalMisc	X	X		Detection and attribution
Extension of historical through year 2012	historicalExt	X	X		Evaluation, detection, attribution

## 2. 연구내용 및 범위

바람장과 쿠로시오 변동성의 관계를 밝히기 위한 연구 내용에 다음과 같은 내용이 포함될 수 있다.

1. 재분석자료를 이용한 북태평양 지역/대규모 바람장의 주요모드 분석
  - ERA40, NCEP/NCAR의 긴 기간의 재분석자료의 지상바람에 대하여 주성분분석을 이용하여 북태평양 지역의 주요모드 분석함
  - 지상바람, 해면고도, 해면기압 등을 이용한 다변수 주성분분석을 이용하여 북태평양 지역의 역학적 주요모드를 분석함
2. 북태평양 바람장의 주요모드 변조에 따른 쿠로시오 변동 분석
  - EN4 격자 해양 자료를 이용하여 쿠로시오 변동의 주요 모드를 분석함
  - 북태평양 바람장의 주요모드와 쿠로시오 변동의 주요모드의 결합모드를 분석함
3. 다중기후모형을 이용한 대규모 바람장의 주요모드 분석
  - CMIP5/CMIP6 기후모형 자료를 이용하여 북태평양 대규모 바람장의 주요모드를 분석함
  - 기후모형에서 분석된 주요모드와 관측자료에서 분석된 대규모 바람장 주요모드를 비교 분석함
4. 대규모 바람장에 대한 쿠로시오 변동의 지연상관 분석
  - CMIP5/CMIP6 기후모형 자료에서 나타나는 PDO 모드와 NPGO 모드의 foot-print 이론 검증
  - 기후모형에서 나타나는 바람장과 해면고도/해면기압 등의 지연 상관성을 분석함
5. 대규모 바람장과 북태평양 쿠로시오 변동의 결합모드 변화 분석
  - 기후모형의 시나리오 결과를 이용하여 대규모 바람장과 쿠로시오 변동의 결합모드의 변조를 분석함
  - 지구온난화 시나리오를 이용하여 쿠로시오 변동의 미래 전망을 분석함
6. 쿠로시오 변동에 영향을 주는 기후인자 분석
  - 재분석자료를 이용하여 쿠로시오 변동에 영향을 주는 기후인자 및 선행인자

를 발굴함

- 재분석자료 및 기후모형 자료를 이용하여 쿠로시오 변동에 영향을 주는 기후 인자의 상대적 기여도를 분석함

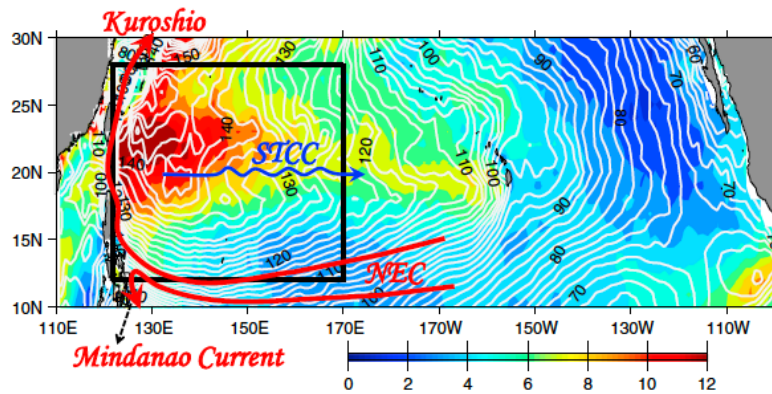
이러한 연구를 수행하기 위한 추진 전략으로 다음과 같은 내용을 들 수 있다.

1. 학계 및 기관이 보유한 재분석자료/기후모형 자료를 활용하고, 필요한 자료에 대하여 서버의 저장공간을 확보하여 추가
2. 북태평양 바람장 변동과 관련하여 국내외 연구진(한양대 예상욱 교수팀, POSTECH 국종성 교수 연구팀, 서울대 남성현 교수 연구팀, 미국 하와이대 Schneider 교수 연구팀, 미국 워싱턴대 김대현 교수 연구팀 등)과 공동으로 연구를 추진하여 연구의 효율성 확대
3. 북서태평양 쿠로시오 변동성과 관련한 해양/대기 상호작용과 관련하여 모형 자료는 물론 현장 관측자료를 지속적으로 확보하여 관련 연구 지원

## 제 2 절 중규모 소용돌이에 의한 쿠로시오 변동 연구 계획

### 1. 중규모 소용돌이 변동성 분석 계획

쿠로시오 변동에 영향을 주는 중규모 소용돌이는 북서태평양 Subtropical Counter Current (STCC) 지역에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있다. 인공위성 관측 해면고도 자료로 계산한 평균 변동성을 보면(그림 3.2.1), 저위도 동쪽에서 서쪽으로 흐르는 북적도해류가 육지를 만나 북쪽으로 분기하여 쿠로시오로 북상할 때, 쿠로시오 동쪽편으로 변동성이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

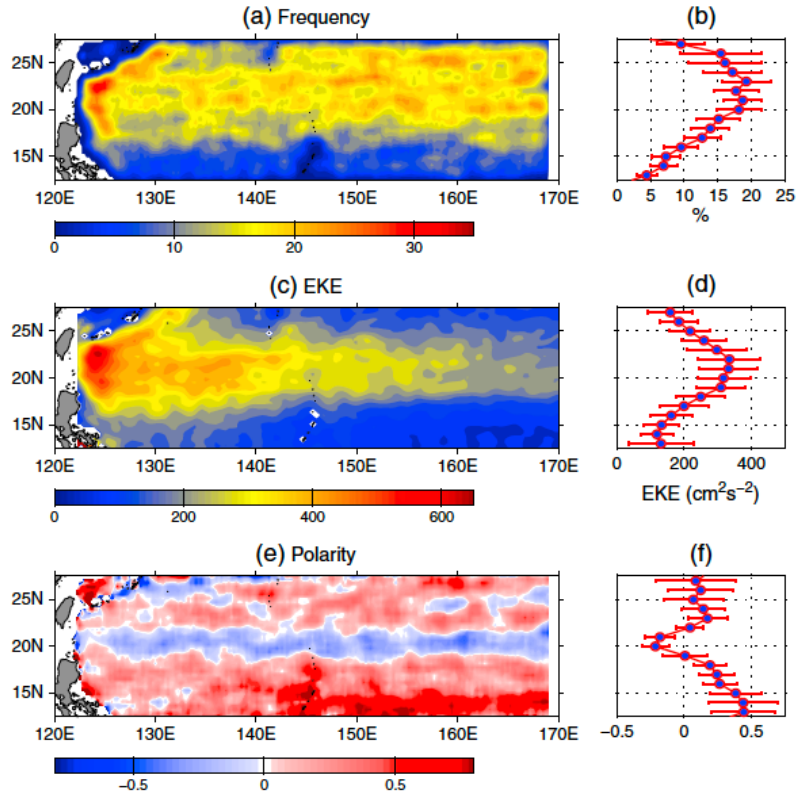


**Figure 1.** Root-mean-square (RMS) SSH variability (color shading; in cm) and mean SSH field (white contours; in cm) in the subtropical North Pacific Ocean based on the satellite altimeter data of the Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO) [Le Traon *et al.*, 1998; Ducet *et al.*, 2000] from October 1992 to February 2012, which are high passed with a 350 day cutoff period. The black rectangle denotes our study region (122°E–170°E, 12°N–28°N). Primary ocean currents in this region are shown as arrows: the North Equatorial Current (NEC), Mindanao Current (MC), Kuroshio, and Subtropical Countercurrent (STCC).

그림 3.2.1. 인공위성 관측 해면고도 편차의 시간변동성으로, 값이 클수록(적색일수록) 소용돌이가 활발한 것으로 해석할 수 있음(Yang *et al.*, 2013).

약 20년 동안의 인공위성 자료를 활용하여 중규모 소용돌이의 특징과 전과 경로 등을 통계 분석한 결과로부터, 북위 약 15도에서 27도 정도 사이에서 소용돌이 출현 빈도가 높게 나타나며, 서안경계에서 그 빈도가 특히 커짐을 알 수 있다(그림 3.2.2, a). 평균 운동에너지는 동경 140도 서쪽으로 크게 나타나며, 그 중에서도 서안 경계에서 특히 높은 값을 보인다(그림 3.2.2, c). 수평방향으로 평균하여 위도별로 비교한 그림으로부터는(그림 3.2.2, b와 d) 북위 약 20-25도에서 빈도와 운동에너지의 최댓값이 나타남을 알 수 있다. 또한 소용돌이의 회전방향을 나타내는 극성도 위도별로 다른 특성을 나타내는데, 북위 20도 이남 저위도에서 반시계방향 소용

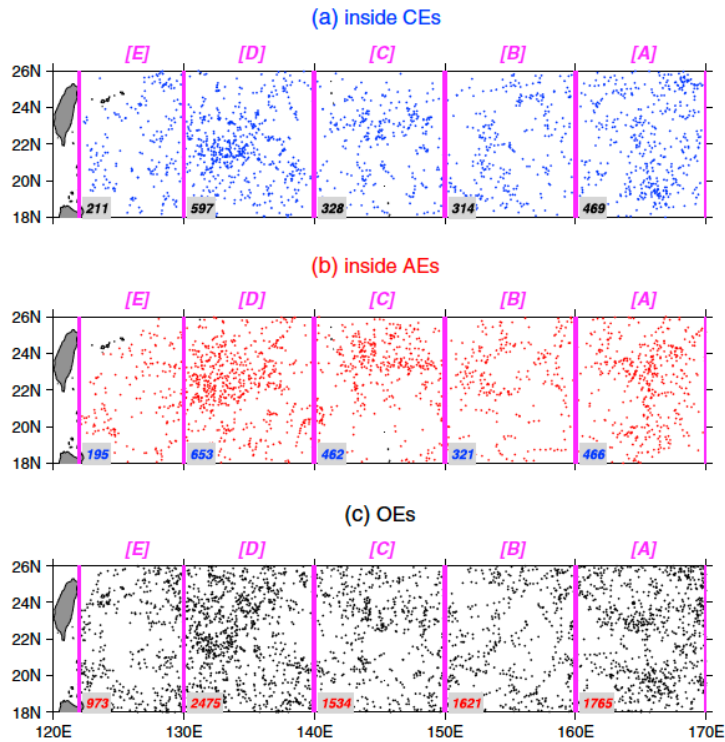
돌이가 상대적으로 많이 나타나는 한편, 북위 20도 부근에서는 시계방향 소용돌이가 많이 나타나고, 그보다 북쪽에서는 위도별 빈도가 비슷하게 나타난다(그림 3.2.2, e와f).



**Figure 3.** Spatial distributions of (a) eddy frequency (%), (c) mean EKE ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ ), and (e) eddy polarity (blue for CEs and red for AEs). (b, d, f) Zonal mean values and standard deviations.

그림 3.2.2. 중규모 소용돌이의 주요 특징(발생 빈도, 평균 운동에너지, 극성)의 공간 분포(좌)와 위도별 평균값(우) (Yang *et al.*, 2013).

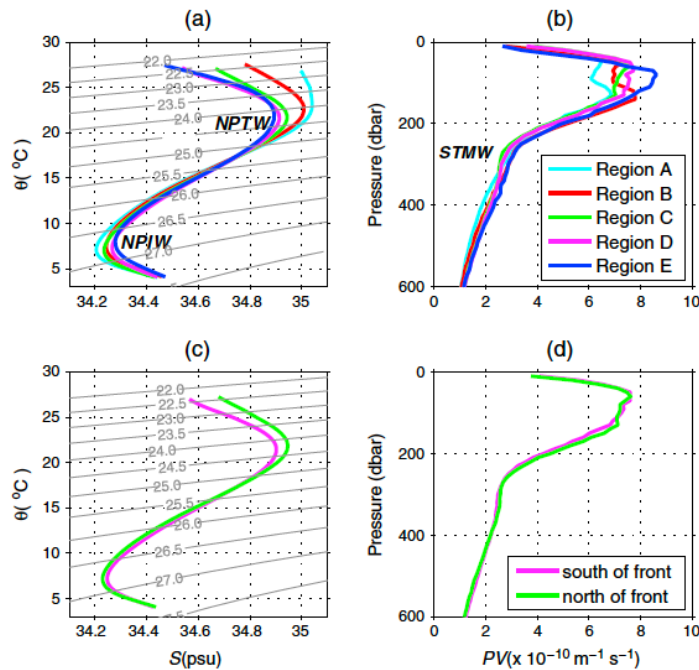
이러한 중규모 소용돌이는 수층 내부의 연직 물성 구조와 유속에도 큰 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 해양 내부의 변동은 해당 해역에 투하되거나 근처를 지나간 Argo 플로트 자료를 분석하여 유추할 수 있는데, 소용돌이의 유무와 회전방향에 따라 가용한 Argo 플로트 개수를 공간별로 정리한 그림 3.2.3을 보면 모든 경우에 각 구역 별로 최소 약 200개 이상의 수직 프로파일을 활용할 수 있음을 알 수 있다.



**Figure 8.** Geographic distributions of Argo profiles (a) inside CEs (blue dots), (b) inside AEs (red dots), and (c) out of eddies (OE; black dots). The pink rectangles denote the areas of the regions A-E. The profile number in each subregion is indicated at the southwest corner.

그림 3.2.3. 반시계방향(a)과 시계방향(b) 중규모 소용돌이의 내부와 외부(c)를 관측한 Argo 플롯의 공간분포(Yang *et al.*, 2013).

각 구역별 수직 프로파일의 수온-염분 분포와 잠재와도 분포를 통해 북태평양 열대수(North Pacific Tropical Water; NPTW)와 북태평양 중층수(North Pacific Intermediate Water; NPIW)를 구분할 수 있는데, 이를 경도별로 비교한 그림을 보면 (그림 3.2.4, a와 b) 서안경계 지역일수록(Region E) NPTW와 NPIW의 차이가 적어지고, 잠재와도도 크게 나타나고 있다. 또한 북위 22도를 기준으로 북쪽과 남쪽의 차이를 비교해보면 NPTW와 NPIW의 차이가 북쪽에서 약간 적어지는 것으로 보이나, 잠재와도에서는 큰 차이를 찾아볼 수 없어, 남북방향의 차이보다 동서방향의 차이가 상대적으로 더 큰 것을 알 수 있다.



**Figure 9.** (a) Mean potential temperature versus salinity ( $\theta$ - $S$ ) diagrams and (b) mean potential vorticity (PV) diagrams based on OE Argo profiles for the five subregions. Gray contours in Figure 9a denote potential density  $\sigma_{\theta}$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ). (c, d) Same as Figures 9a and 9b but for the areas south and north of the subtropical front ( $22^{\circ}\text{N}$ ) (SOF and NOF subregions).

그림 3.2.4. 그림 3.2.3의 각 구역별 수온-염분 분포와 잠재와도 분포(Yang *et al.*, 2013).

이처럼 쿠로시오 변동에 영향을 미치는 중규모 소용돌이 발생 지역의 변동성 분석을 위해 인공위성관측 해면고도 자료와 Argo 플롯 자료 뿐만 아니라 재분석장, 위성 관측 표층 뜰개 자료 등을 종합적으로 분석할 필요가 있다. 이를 바탕으로 쿠로시오의 변동을 일으키는 소용돌이의 특징을 파악하고, 이로 인한 쿠로시오 유속 및 물성 구조의 변화를 파악하는 것이 중요하다고 할 수 있겠다.

## 2. 중규모 소용돌이 변동성 관측 계획

2015년 6월부터 2017년 6월까지 유지된 동중국해 쿠로시오 수송량 관측 정점은 인공위성 관측 경로에 위치하고 있으며(그림 3.2.5), 이후 규모가 축소되어 한정점에서 관측이 계속되고 있다. 또한 2년 동안 관측된 쿠로시오 수송량은 해면고도 차이를 이용하여 인공위성 관측 자료가 가용한 장기간 동안 추정이 가능하다. 따라서 인공위성 관측 경로상에서 중규모 소용돌이 발생 위도에 해당하는 저위도

영역에 관측장비를 설치한다면, 동중국해 쿠로시오 수송량 변동의 원인이 되는 지역과 결과가 나타나는 지역의 동시 비교가 가능하게 된다.

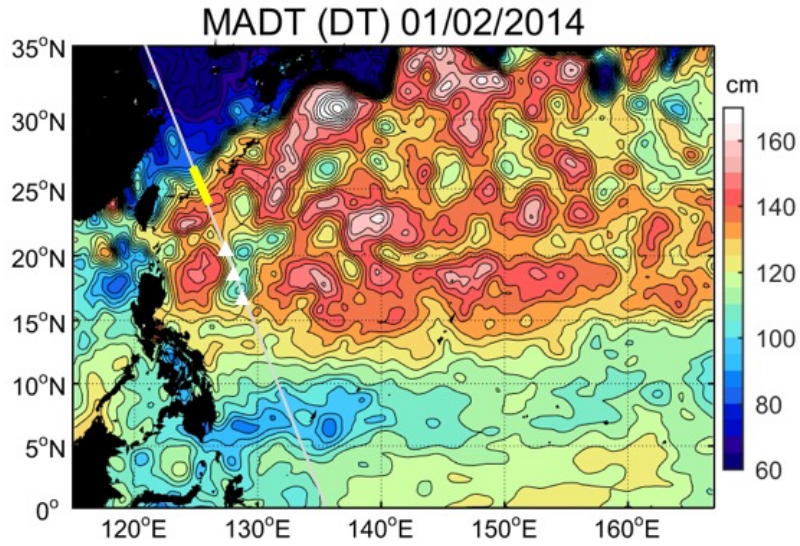


그림 3.2.5. 2014년 1월 2일 인공위성 관측 해면고도 분포와 인공위성 관측 경로(회색 실선)에 맞춘 동중국해 쿠로시오 관측 정점(황색 굵은 실선), 추가 관측 제안 지점(백색 삼각형).



### 제 3 절 해면고도 자료동화 기법 개발 계획

해면고도는 그 특성상 수층의 수온과 염분의 정보를 내포하고 있지만 해면고도 자체를 수정할 경우 순압류 성분을 변경하게 되고 변경된 순압류 성분은 빠른 속도의 중력파로 소산하기 때문에 오히려 해양 순환을 개선하기보다 악화시키는 결과를 가져올 수도 있다. 따라서 최근의 연구 결과들은 해면고도로부터 수온과 염분의 가상 프로파일을 추정하고 이를 수치모델에 동화하는 방법을 채택하고 있다. Cooper and Haines (1996)는 해면고도의 변이가 수층 내의 수온과 염분에 따른 밀도변화에 기인한 것으로 간주하여 가상의 프로파일을 생산하는 방법을 제시하였다. 그들의 기본 가정은 해면고도의 변이가 바닥 압력을 변화시키지 않으며, 수층의 수온과 염분에 의해 유발되었다는 것이다. 또한 새롭게 얻어진 수온과 염분 프로파일은 잠재 와도를 보존해야 하기 때문에 수온과 염분 프로파일을 전체적으로 상승시키거나 하강시키는 방법으로 새로운 가상의 프로파일을 생산하는 방법을 제시하였다. (그림 3.3.1)

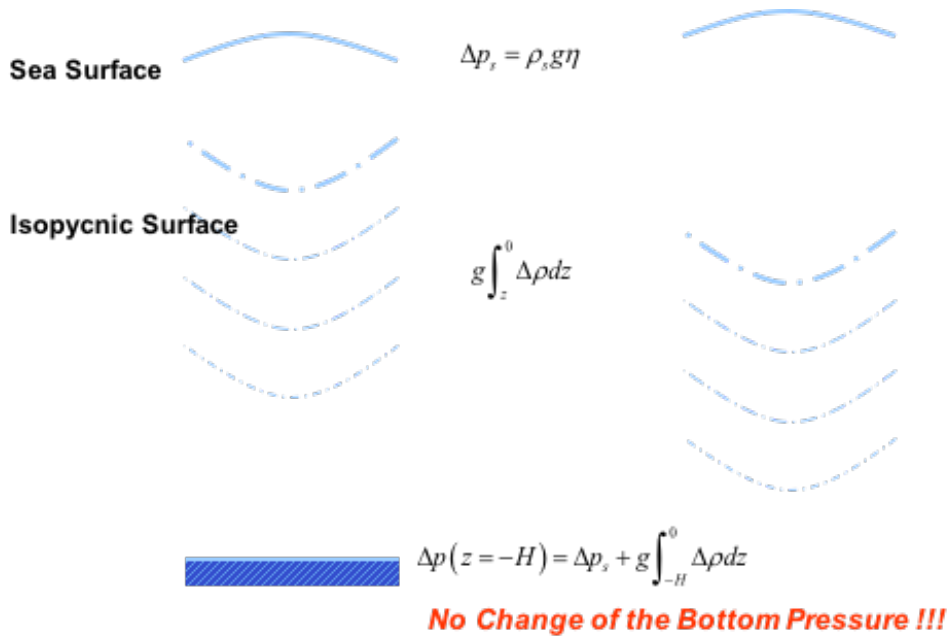


그림 3.3.1. Cooper and Haines (1996)이 제시한 해면고도 변이로부터 가상의 수온과 염분 프로파일 추정 방법 개념도.

Vidard *et al.* (2009)은 Cooper and Haines (1996)으로 부터 생산된 가상의 프로파일에 위도별 가중치를 곱하여 자료동화에 사용하였다. 위도별 가중치는 고위도 해역에서 위성 고도계 자료를 사용하지 않기 위한 방안으로 제시되었다.

$$\begin{pmatrix} \Delta T_{\text{alt}} \\ \Delta S_{\text{alt}} \end{pmatrix} = \text{CH96}(T^b, S^b, \eta^b, \eta^o), \quad (\text{식 1})$$

식1 은 Cooper and Haines (1996)에 의해 배경 수온과 염분, 해면고도와 관측 해면고도로부터 가상의 수온과 염분 프로파일을 추정하는 방법을 개념적으로 나타낸 것이다. 이렇게 얻어진 가상의 프로파일에 (식 2)와 같이 가중치를 곱하여 자료동화에 사용할 수온과 염분의 프로파일을 생산한다. 가중치는 (식 3)에서 주어지며  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  는 각각 0.3, 1, 0.8로 하였다.

$$\begin{aligned} T_{\text{alt}} &= T^b + \omega \Delta T_{\text{alt}} \\ S_{\text{alt}} &= S^b + \omega \Delta S_{\text{alt}}, \end{aligned} \quad (\text{식 2})$$

$$\omega = \min\{\alpha, \beta[\cos(\text{lat})]^\gamma\}. \quad (\text{식 3})$$

최종적으로 얻어진 가상의 프로파일 자료는 다른 관측 자료와 독립적으로 그리고 순차적으로 동화할 것을 제안하였다 (그림 3.3.2). 해면고도로부터 얻어진 가상의 프로파일들을 동화한 후에 수온 그리고 염분을 순차적으로 동화하고 마지막으로 해면고도 자료에 나타나는 인위적인 경향성을 제거하게 된다.

$$\begin{pmatrix} T^b \\ S^b \\ \eta^b \\ \mathbf{u}^b \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Aldi}} \begin{pmatrix} T_1^a \\ S_1^a \\ - \\ - \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Temp}} \begin{pmatrix} T_2^a \\ S_2^a \\ - \\ - \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Sal}} \begin{pmatrix} - \\ S_3^a \\ - \\ - \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{SL-Trend}} \begin{pmatrix} T^a \\ S^a \\ \eta^a \\ \mathbf{u}^a \end{pmatrix} \quad (\text{식 4})$$

기술적인 문제점들을 고려할 때 Vidard *et al.* (2009)를 적용하는 것이 적용 가능하며 또한 계산 비용 등을 고려할 때 현실적이라고 판단된다. Vidard *et al.* (2009) 는 해면고도 자료동화를 적용하여 표층 해류가 개선되는 것을 그림 3.3.2와 같이 보인 바 있다.

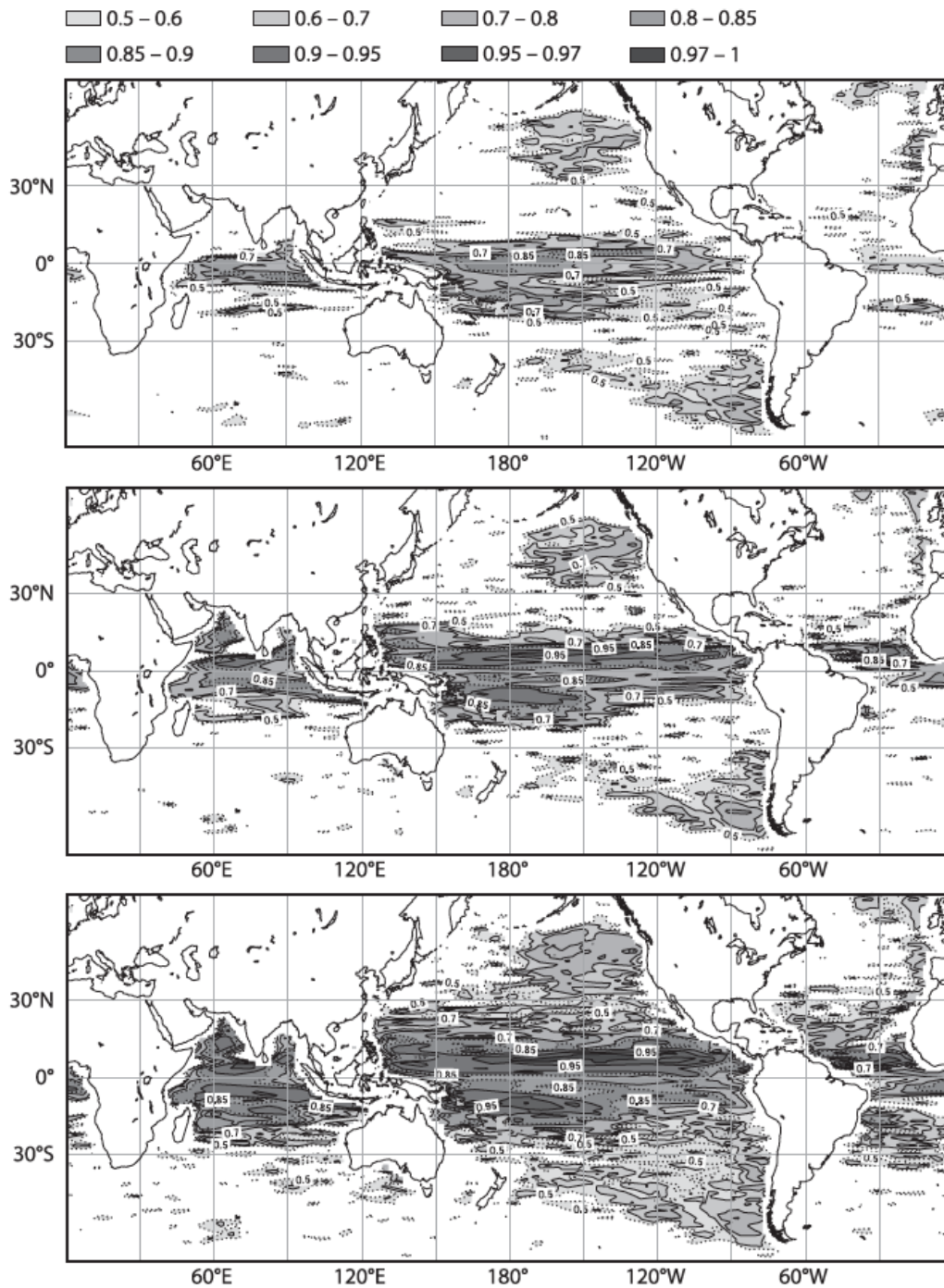


그림 3.3.2. OSCAR 표층 해류 자료와의 상관도 비교 검증: (상) 자료동화를 적용하지 않을 경우, (중) 수온과 염분 프로파일을 동화할 경우, (하) 수온과 염분 그리고 해면고도를 동화할 경우.

## 제 4 장 연구개발결과의 활용계획

- 바람장의 주요모드를 분석하는 연구 방법을 제시하고 추진 전략 수립
- 쿠로시오 변동 원인 규명을 위해 주요 원인 중 하나인 중규모 소용돌이의 발생 해역을 대상으로 한 소용돌이 변동성 분석 계획과 관측 계획 수립
- 북서태평양 지역 쿠로시오 변동의 역학적 이해의 증대로 우리나라의 중장기 예측기술을 획기적으로 개선하고, 쿠로시오 변동에 영향을 받는 생태적 전망 및 장기 기후전망의 불확실성 감소에 적용
- 북서태평양 지역 해양/대기 상호작용 이해의 증대로 기후모형의 성능을 개선하고 계절예측에 직접 활용 가능
- 기후모형과 재분석자료를 병행한 해양/대기 주요모드 분석 결과를 바탕으로 기후모형의 편이(bias)를 분석하고 이를 통한 기후모형 개선에 활용 가능
- 연구결과는 정부간 기후변화 협의회의 미래기후전망에 대하여 불확실성을 줄이고, 관련된 정책결정에 대한 기초 자료로 활용
- 우리나라 주변 해양 환경에 큰 영향을 미치는 쿠로시오의 변동 원인 규명
- 대기(바람)에 의한 변화와 해양(중규모 소용돌이)에 의한 변화의 상대적인 중요성 규명
- 우리나라 주변 해양환경 변동에 기여하는 지역적인 요인과 원격 요인 이해
- 해면고도 자료동화 방안 수립, 해양/기후 예측 시스템에 적용

## 제 5 장 참고문헌

- Andres, M., J.-H. Park, M. Wimbush, X.-H. Zhu, K.-I. Chang, and H. Ichikawa (2008), Study of the Kuroshio/Ryukyu Current system based on satellite-altimeter and in situ measurements, *J. Oceanogr.*, 64(6), 937-950.
- Andres, M., J.-H. Park, M. Wimbush, X.-H. Zhu, H. Nakamura, K. Kim, and K.-I. Chang (2009), Manifestation of the Pacific Decadal Oscillation in the Kuroshio, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L16602, doi:10.1029/2009GL039216.
- Ashok, K., S. Behera, S. Rao, H. Weng, and T. Yamagata (2007), El Nino Modoki and its possible teleconnection, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 112(C11), 27.
- Cooper, M. and K. Haines, 1996: Data assimilation with water property conservation. *J. Geophys. Res.*, 101 (C1), 1059-1077.
- Ceballos, L., E. Di Lorenzo, and C. Hoyos (2009), North Pacific gyre oscillation synchronizes climate fluctuations in the Eastern and Western boundary systems, *Journal of Climate*, 22, 5163-5173.
- Deser, C., M. Alexander, and M. Timlin (1999), Evidence for a wind-driven intensification of the Kuroshio current extension from the 1970s to the 1980s, *Journal of Climate*, 12, 1697-1706.
- Di Lorenzo, K. M. C., J. Furtado, N. Schneider, B. Anderson, A. Bracco, M. A. Alexander, and D. Vimont (2010), Central Pacific El Niño and decadal climate change in the North Pacific, *Nature Geosciences*.
- Dombrowsky, E., L. Bertino, G.B. Brassington, E.P. Chassignet, F. Davidson, H.E. Hurlburt, M. Kamachi, T. Lee, M.J. Martin, S. Mei, and M. Tonani, 2009. GODAE systems in operation. *Oceanography*, 22(3): 80-95, doi:10.5670/oceanog.2009.68.
- Hsin, Y., B. Qiu, T. Chiang, and C. Wu (2013), Seasonal to interannual variations in the intensity and central position of the surface Kuroshio east of Taiwan, *J. Geophys. Res.*, 118, 4305-4316, doi:10.1002/jgrc.20323.

- Johns, W., T. Lee, D. Zhang, R. Zantopp, C. Liu, and Y. Yang (2001), The Kuroshio east of Taiwan: Moored transport observations from the WOCE PCM-1 Array, *J. Phys. Oceanogr.*, 31(4), 1031-1053.
- Kalnay, E., et al. (1996), The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437-471.
- Kim, Y. H., C. Hwang, B.-J. Choi (2015), An assessment of ocean climate reanalysis by the data assimilation system of KIOST from 1947 to 2012, *Ocean Modelling*, 91, 1-22.
- Mantua, N., S. Hare, Y. Zhang, J. Wallace, and R. Francis (1997), A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6), 1069-1079.
- Martin, Matt, 2014, The impact of assimilating altimeter SSH data from different numbers of satellites on FOAM surface currents, GODAE-OOPC OSSE-OSE meeting
- Na, H., M. Wimbush, J.-H. Park, H. Nakamura, and A. Nishina (2014), Observations of flow variability through the Kerama Gap between the East China Sea and the Northwestern Pacific, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 689-703, doi:10.1002/2013JC008899.
- Nakamura, H., R. Hiranaka, D. Ambe, T. Saito (2015), Local wind effect on the Kuroshio path state off the southeastern coast of Kyushu, *Journal of Oceanography*, 71, 575-596.
- Qiu, B. (2003), Kuroshio extension variability and forcing of the Pacific decadal oscillations: responses and potential feedback, *Journal of Physical Oceanography*, 33, 2465-2482.
- Schneider, N., and B. Cornuelle (2005), The forcing of the Pacific decadal oscillation, *Journal of Climate*, 18(21), 4355-4373.
- Taguchi, B., S. Xie, N. Schneider, M. Nonaka, H. Sasaki, and Y. Sasai (2007), Decadal variability of the Kuroshio Extension: Observations and an eddy-resolving model hindcast, *Journal of Climate*, 20(11), 2357-2377.

- Vidard, Arthur, M. Balmaseda, and D. Anderson, 2009. Assimilation of Altimeter Data in the ECMWF Ocean Analysis System 3, *Monthly Weather Review*, 137, 1393-1408
- Vimont, D., J. Wallace, and D. Battisti (2003), The seasonal footprinting mechanism in the Pacific: Implications for ENSO, *Journal of Climate*, 16(16), 2668-2675.
- Yamagata, T., Y. Shibao, and S. Umatani (1985), Interannual variability of the Kuroshio extension and its relation to the Southern Oscillation/El Niño, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 41, 274-281.
- Yan, X., X.-H. Zhu, C. Pang, and L. Zhang (2016), Effects of mesoscale eddies on the volume transport and branch pattern of the Kuroshio east of Taiwan, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 7683-7700, doi:10.1002/2016JC012038.
- Yang, Y., C. Liu, J. Hu, and M. Koga (1999), Taiwan Current (Kuroshio) and impinging eddies, *J. Oceanogr.*, 55(5), 609-617, doi:10.1023/A:1007892819134.
- Yang, G., F. Wang, Y. Li, and P. Lin (2013), Mesoscale eddies in the northwestern subtropical Pacific Ocean: Statistical characteristics and three-dimensional structures, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 1906-1925, doi:10.1002/jgrc.20164.
- Zhang, D., T. Lee, W. Johns, C. Liu, and R. Zantopp (2001), The Kuroshio east of Taiwan: Modes of variability and relationship to interior mesoscale eddies, *J. Phys. Oceanogr.*, 31(4), 1054-1074.