

BSPE17260-077-12

제 출 문

아북극-동아시아-서태평양 기후변화
국제감시망 및 예측시스템 구축을
위한 기획 연구

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “아북극-동아시아-서태평양 기후변화 국제감시망 및 예측시스템 구축을 위한 기획 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 03.

Designing KIOST-KOPRI-KRISO convergence research project :
“Global Ocean Climate Observatory“

연구 책임자 : 김영호

참여 연구원 : 권민호, 노태근, 민홍식,
박영규, 신창웅, 이재학,
신형철, 강성호, 김백민,
김주홍, 박기홍, 박지수,
박태욱, 조경호

2018. 03

연구기관

한국해양과학기술원 • 극지연구소

극지연구소

보고서 초록

요 약 문

과제관리번호	PE17260	해당단계 연구기간	2017.09.01. ~ 2018.03.31.	단계 구분	1 / 1
연구사업명	중 사업명				
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	아북극-동아시아-서태평양 기후변화 국제감시망 및 예측시스템 구축을 위한 기획 연구			
연구책임자	김영호	해당단계 참여연구원수	총 : 명 내부 : 명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 30,000천원 기업: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원, 해양순환기후연구센터		참여기업명	-	
국제공동연구 위탁 연구	-				
요 약				보고서 면수	125
<p>이 과제는 한반도 극한 기후-해양 현상에 대한 예측력을 향상시킴으로 한반도 기후변화 대응 능력을 강화할 수 있는 방안 모색하고자 수행되었다. 이 목표는 아북극-동아시아-아열대서태평양에 종합관측거점을 구축하여 기후변화 연결고리를 상세관측하고 고해상도 지역기후 예측시스템을 구축하여 달성할 수 있다.</p> <p>연구내용은 크게 두 개의 세부과제로 구성되었다. 세부과제 1은 아북극-동아시아-아열대서태평양 기후변화 감시망 구축 연구로 최근 한반도 기후에 대한 영향력을 확대하고 있는 아북극, 아열대서태평양 해역에서의 종합관측망 구축과 아북극-동아시아-아열대서태평양 기후변화 연결고리 규명 연구 등으로 구성되어 있다. 세부과제 2는 고해상도 지역기후 예측 시스템 구축으로 해양-해빙-대기 결합 지역 기후모델과 자료동화기법 개발로 구성되어 있다.</p> <p>한반도 극한 기후-해양 예측력을 제고함으로써 기후변화 연구역량과 국내외적인 기후변화 대응 능력 향상에 기여함으로써 기후변화에 따른 사회적 비용 감소와 안전성 확보에 기여할 것이다. 또한, 국제기후변화감시망 구축에 기여하여 국제사회에서 한국의 위상을 높일 수 있을 것이다.</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	아북극, 동아시아, 서태평양, 기후예측, 기후변화, 극한 기후 현상			
	영 어	Sub-Arctic, East Asia, West Pacific, Climate Prediction, Climate Change, Extreme Climate Event			

I. 제 목

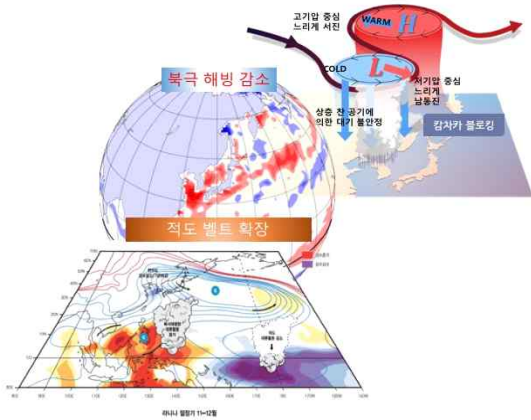
- 아북극-동아시아-서태평양 기후변화 국제감시망 및 예측시스템 구축을 위한 기획 연구

II. 연구사업 개요

가. 기획연구의 필요성

① 시급성 및 수월성

- 한반도 기후 진단을 위해서는 아북극/아열대해역에 종합관측거점(지속적·종합적인 관측) 구축 필요
 - 한반도 극한 해양현상과 이상기후로 인한 피해가 증가함으로써 사회적인 비용*을 저감하기 위한 과학적 규명이 필요
 - * 최근 10년('06~'15) 간 기후재해로 인한 연평균 재산피해액 : 5,252억원 (2015 재해연보)
- 한반도 해역의 극한 해양현상(고수온, 저수온, 저염수, 태풍 등)에 대한 예측 성능 향상을 위한 지역기후모형 개발이 필요
 - * 특히, 아북극해역(베링해)과 아열대서태평양 해역은 최근 한반도 기후와 밀접하게 연관된 해역임이 연구결과로 증명되고 있음
- 최근의 기후변화 양상은 북극해빙의 감소와 적도벨트의 확장으로 대표되는데 중위도에 속한 한반도의 기후가 아북극과 아열대로부터 동시에 영향을 받음으로 한반도의 기후변동성이 커짐.
- 최근에 빈번해진 여름철 고수온 현상과 폭염, 겨울철 저수온 현상과 한파 등 극한 기후·해양 현상이 아북극과 아열대의 기후변화에서 발원하는 것으로 밝혀지고 있음



<북극해빙 감소와 적도벨트 확장으로 아북극의 대기 블로킹 현상과 열대태평양 지역의 엘니뇨 변동이 한반도 기후에 직접적인 영향을 줌>

- 아북극 베링해에는 기후감시 관측망이 없고, 아열대서태평양의 기후변화 감시망을 구성하던 일본의 TRITON 시스템이 유실되거나 철수되면 이 해역의 기후변화 감시망이 부실해지고 있음.
- 2016년에 5천톤급 대형 연구선인 이사부호가 취항하면서 국제 사회에서 기후변화 국제감시망 구축에 한국의 역할을 기대하고 있으나 현재까지 한국의 기여도는 매우 미미함

② 국가 주도 사업으로 공공 서비스 강화

- 해양 거점 관측망과 지역기후예측 모델링 관련 기술은 아직 연구개발 단계인 기술이며, 본 제안 사업은 기후변화로 인한 사회적인 비용을 저감하기 위한 공공서비스 성격의 사업으로 국가적인 지원이 요구됨.

③ 국익에 부합하는 방향으로 국제협력 주도

- OceanSITES : 고품질의 장기간 고분해능(시간) 고정형 해양 시계열 관측 자료의 수집과 제공 및 교류증진을 위한 국제 네트워크
 - * 1999년 이래 계류 및 연구선 기반 연구를 위한 자료와 비용을 공유해 왔으며, 오늘날 30개의 표층과 수중 계류선 배열 등으로 구성하게 됨. 종합관측체계의 수립과 원활한 운용을 위한 협력관계 구축
- 열대태평양관측체계 2020(TPOS2020, Tropical Pacific Observing System 2020)에서 열대태평양 기후감시망의 재편을 논의하고 있음
 - * '14년 미국, 일본, 중국, 유럽 주도 국제협력 프로그램으로 열대계류부표체계의 개량 및 대체를 위한 프로그램, KIOST에서 참여하고 있음
 - ** 아열대서태평양 기후감시망을 그동안 일본의 TRITON (TRIangle Trans-Ocean buoy Network) 시스템이 담당해왔으나 현재 대부분 유실되거나 철수되었음
 - *** 일본의 역할이 축소된 지금 한국이 필요한 아열대서태평양에 기후감시망을 구축한다면 국익과 국제사회의 기대에 동시에 부응할 수 있을 것임
- YOPP(Year Of Polar Prediction)에서는 급격한 기후변화를 겪고 있는 북극과 남극에 대한 예측시스템을 구축하고자 하는 관측과 모델링 분야의 국제적 그리고 다학제적 네트워크
 - * 극지연구소는 북극해에서 라디오존데 비양과 이의 예측 활용을 통해 YOPP 미션에 참여중임
 - ** 북극해와 마찬가지로 북태평양의 아북극해 해상 지역도 상층대기 프로파일 관측이 희소함. 북태평양의 아북극해 해상 지역은 극한기상의 원인인 저지고기압(블로킹) 발달의 핵심 영역이므로 이 지역으로의 관측 확대는 저지고기압 예측성 향상에 도움이 될 수 있음

○ **일본 극지연구소(NIPR)와의 협력**

- * 일본 극지연구소는 연구선 미라이호의 북극연구항해(8월말~10월 중순)에서 라디오존데 비양을 통한 상층대기 관측을 꾸준히 수행하고 있음. 북극으로 가는 중 북태평양과 아북극해에서도 라디오존데 비양을 수행함
- ** 아라온호의 연구항해는 미라이호보다 앞서 진행되므로 두 연구선의 자료를 공동 활용하는 협력을 하면 보다 긴 기간의 관측자료를 확보할 수 있음

○ **종합관측부이 개발을 위한 미국 WHOI 연구소와의 협력**

- * 종합관측부이의 선진기술을 보유한 미국 우즈홀로부터 부이관측 기술을 도입
- * 본과제에서 제안하는 지역은 미국의 기후에서 영향을 미치는 지역이므로 한미 협력과제로 추진 협의

④ **기관 융복합수행으로 연구효과 극대화**

- 해양과기원, 극지(연) 각각 해당기관의 특화된 영역의 연구를 통해 주요 해역의 **통합적인 관측이 가능**
- 기 수행된 중저위도, 극지관련 연구는 해당 영역중심연구에 국한, **통합적인 관점에 해당하는 연구 필요성 제기**

⑤ **(IPCC 보고서 제출)**

- '18년 발간되는 'IPCC 해양·빙권 특별보고서'에 기여
- '22년 발간되는 'IPCC 6차 기후변화 평가보고서'에 기여

⑥ **장기 관측자료의 학문적 가치**

- 장기 관측자료의 학문적 가치는 매우 높음 (최근 5년간 미국의 KEO 부이 자료를 이용한 30편 이상의 연구논문이 해양 및 기후연구 분야의 상위 10% 최고수준의 국제학술지에 발간됨)
- 본과제에서 추진하는 두 지역의 장기 관측자료가 국제적인 관심을 환기시킴으로 동아시아 기후 연구 및 예측에 국제적인 공조를 이끌어낼 수 있음.

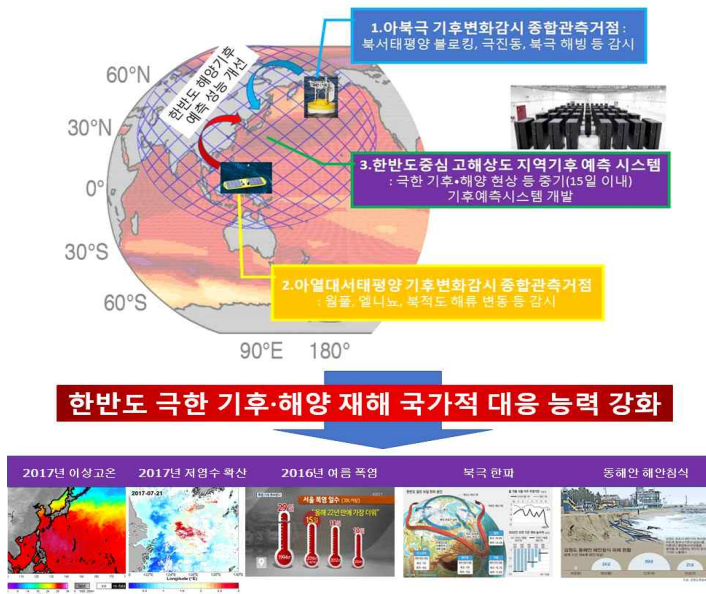
나. **기획연구의 목적**

- 한반도 극한 기후·해양 현상에 대한 예측력을 향상시킴으로 한반도 기후 변화 대응 능력을 강화할 수 있는 방안을 제시함

III. **연구추진 계획**

가. **연구개발 목적**

- 아북극-동아시아-아열대서태평양 기후변화 연결고리를 상세관측하고 한반도 극한 기후·해양 현상에 대한 예측 능력을 향상시킴으로 한반도 기후변화 대응 능력을 강화하고 관련 분야에서 국제사회 선도에 기여함



<본 과제 의 전체 개략도>

나. 연구개발 내용

(세부과제 1) 아북극-동아시아-아열대서태평양 기후변화 국제감시망 구축

- 아북극해 종합관측체계 구축
 - : 기후변화 국제 감시망 구축을 위한 베링해 슈퍼스테이션 구축 연구
 - : 기후변화 연결고리 규명을 위한 아북극해 해양-대기 관측 조사
- 아열대서태평양 종합관측체계 구축
 - : 기후변화 국제 감시망 구축을 위한 아열대서태평양 해양-대기 자동관측 시스템 구축 연구
 - : 기후변화 연결고리 규명을 위한 아열대서태평양 해양-대기 관측 조사

- 아북극-동아시아-아열대서태평양 기후변화 연결고리 규명 연구
 - : 적도 벨트의 확장과 북극 해빙 감소에 따른 한반도 기후 변동 역학 규명
 - : 기후변화와 한반도 주변역의 극한 기후 및 해양 현상의 상관성 규명

(세부과제2) 한반도 중심 고해상도 지역기후 예측시스템 구축

- 해양-해빙-대기 결합 지역 기후모델 개발
 - : 해양-해빙-대기 결합 기후모델 구축
 - : 기후모델 개방경계 조건 처리 기법 연구
 - : 해양-극지 종합 관측망 자료의 기후예측 성능 민감도 진단
- 기후예측을 위한 기후자료동화 기법 개발
 - : 해양 자료동화기법 적용 연구
 - : 해빙 자료동화기법 개발
 - : 기상장 초기화 방안 적용 연구
- 고해상도 지역기후 예측시스템 구축
 - : 예측 시스템 구축을 위한 실시간 해양, 해빙 자료처리 시스템 구축
 - : 한반도 영역에 대한 기후예측성 평가
 - : 기후예측 시스템 구축

다. 연구기간/총사업비 : '19 ~ '23 / 15,000백만원

연도	'19	'20	'21	'22	'23	계
투자계획	2,831 (한도내 1,500 한도외 1,331)	3,500	3,500	3,000	2,169	15,000

(백만원)

라. 연구개발 추진체계



국가 기후변화 예측 능력 향상에 기여

<연구개발추진체계>

- 한국해양과학기술원과 극지연구소의 대형 인프라 시설과 모델링 역량을 공동 활용하여 아북극 해역과 중저위도 관측 대상과 모델링 수요를 상시 접합시키고 조율함
- 대양 및 극지 관측은 학문적 및 현업적으로 필수적인 기반 기술로 인식되고 있으나 막대한 자원과 인프라가 소요되기 때문에 개별 국가의 역량으로 접근하기 어려움. 다양한 국제협력 관계를 통해 통합적인 국제 기후감시망을 구축하는데 기여하면서도 한국에 필요한 자료를 확보하기 위해 협업할 것임
- 동아시아 기후예측시스템은 한국 뿐만 아니라 일본에서도 관심을 갖는 분야임. 아북극에서 동아시아 그리고 아열대서태평양까지 아우르는 고해상도 지역기후예측 시스템을 구축하기 위해 선진기술을 보유한 일본과 협력할 것임
- 국내 대학의 전문 역량을 활용할 뿐 아니라 학문 후속 세대 양성과 관측 조사

기회 공유가 동시에 이루어지도록 함

IV. 기대효과 및 활용계획

가. 기대효과 및 성과

- 해수부 최초의 연구기관 (해양(연)-극지(연)) 융합 협력 연구과제 수행을 통한 전 지구적 측면의 해양기후변화 예측 정확도 향상 및 우리나라 해양 기후 피해저감 및 대응효과 기대
- 기후예측 정확도 20% 향상 시 210억원/년 피해저감 효과 기대
 - 기후재난 피해액 5,252억/년(기후예측 의존도 0.2 가정시)
- 국익에 부합하는 국제적 공조 강화
 - 국제종합관측망 구축에 있어 한국의 역할이 미약하며, 국제적으로 한국의 역할을 요구받고 있음.
 - 한국이 필요한 두 해역에 기후감시망을 구축함으로써 국익과 국제사회의 기대에 동시에 부응할 수 있을 것임.
 - 두 지역에 대한 국제적인 관심을 환기시킴으로 동아시아 기후 연구 및 예측에 국제적인 공조를 이끌어낼 수 있음.
- 한반도 극한 기후·해양 현상 예측 능력 향상
 - 한국해양과학기술원에서는 계절내 기후예측 시스템을 개발하여 성과를 내고 있음. 그러나 십여일 단위로 일어나는 극한 기후나 해양 현상을 예측

하지 못하고 있음. 본 과제를 통해 국제 기후감시망과 연계된 고해상도 지역기후 예측시스템을 구축함으로써 현재 월단위 예측을 십여일 단위의 예측으로 향상시킬 것임.

나. 활용방안

- 한반도 기후와 밀접한 관련이 있는 아북극과 아열대서태평양 해역에서 해양-대기 종합관측체계를 운용함으로써 전지구 기후예측을 위한 기반 자료 제공
- 고해상도 지역기후 예측시스템을 운용함으로써 한반도 극한 기후·해양 현상을 예측하여 기후변화에 따른 기후재해 대응 체계 마련에 기여

목 차

요 약 문 i

제 1 장 서 론 1

제1절 연구의 배경 및 필요성 3

제2절 연구 목표 및 범위 15

제 2 장 기후변화 국제감시망 구축의 국내외 동향 17

제1절 해외동향 19

제2절 국내동향 37

제 3 장 기획과제 개요 45

제1절 기획과제의 개요 47

제2절 기후변화 감시를 위한 통합관측망 개요 49

제3절 해양해빙대기 결합 모델 개발 및 기후 예측시스템 구축 51

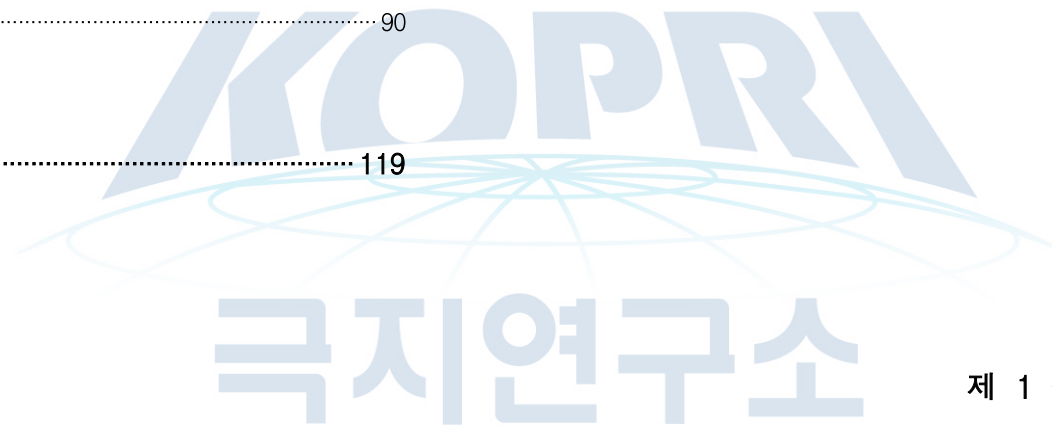
제 4 장 기획과제 내용 53

제1절 아북극-동아시아-아열대서태평양 기후변화 국제감시망 구축 55

제2절 한반도 중심 고해상도 지역기후 예측시스템 구축 60

제3절 추진체계 및 연차별 로드맵 66

제 5 장 활용방안 및 기대효과	73
제1절 활용방안	75
제2절 기대효과	75
제 6 장 경제성 평가	77
제1절 정책·기술적 타당성 분석	79
제2절 경제성 타당성 분석	90
제 7 장 참 고 문 헌	119



제 1 절 연구의 배경 및 필요성

○ 한반도를 비롯한 중국과 일본은 전지구에서 가장 인구밀도가 높은 지역 중 하나로서 대기/해양 접합 시스템인 동아시아 몬순의 영향을 받고 있다. 이에 따라 한반도의 기후는 여름철에는 덥고 습하고, 겨울철에는 춥고 건조한 특성을 보인다. 지구온난화에 따라 전지구시스템은 다양한 기후변화가 탐지되고 있다. 지구온난화에 따라 한반도의 평균기온이 증가함은 물론 여름철 폭염이나 겨울철 한파가 더욱 빈번히 나타나고 있다. 특히, 폭염은 태풍보다 더 많은 인명피해를 가져오는 위험한 극한 현상이다. 지난 2016년 8월 한반도에 나타난 폭염은 관측 이래 가장 길게 지속된 것으로 기록되고 있다. 그러나 지난해 기상청은 극심한 폭염을 예측하였을 뿐만 아니라 아직까지 유의미한 수준의 성능을 갖는 폭염예측시스템을 갖추고 있지 못하다. 또한, 역설적으로 겨울철 평균기온은 증가하지만, 2000년대 들어 한파의 강도와 지속 기간이 더 길어졌다. 이런 현상은 과거에 관측되지 않았던 특이 기상 현상으로 지구온난화와 무관하지 않다. 한편, 북서태평양에서 발생하여 한반도를 강타하는 태풍의 강도와 빈도는 관측기간 동안 통계적으로 유의미한 수준으로 변화한다는 보고는 없지만, 많은 연구에서 지구온난화와 같이 온난한 지구환경에서 한반도에 영향을 주는 태풍의 강도가 강해짐은 물론, 온난화가 지속되면 현재 관측되지 않았던 강도의 슈퍼태풍이 한반도에 영향을 줄 수 있을 것이라고 경고하고 있다. 이에 따른 인명피해는 물론 막대한 경제적 사회적 손실을 막기 위하여 극한 현상에 대한 이해는 물론 이를 통한 예측시스템 및 방재 시스템 구축이 절실히 요구된다.

○ 지구시스템의 기후변화는 대기, 해양, 생태계와 태양 활동의 전개 양상에 따라 매우 복잡한 형태로 나타나고 있으며 이로 인해 지구가 전체적으로 더워지고 있다고 하더라도 지역마다 그 양상이 매우 다른 형태로 나타난다. 기후 변화의 가장 초기의 명백한 징표로 대기와 해양의 온난화 그리고 극지역 육빙과 해빙의 감소를 들 수 있다. 그러나 최근 연구들은 열대 지방이 변화하고 있으며 몇가지 증거들은 적도 벨트가 넓어지고 있음을 보여주고 있다 (Seidel et al., 2008) (그림 1).

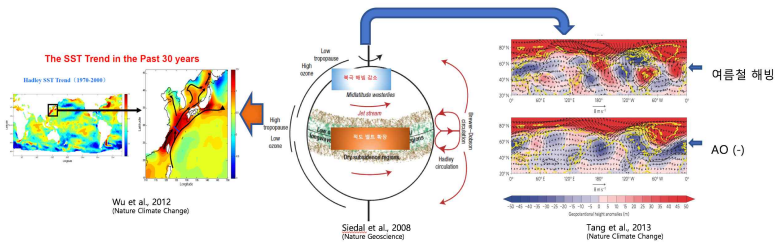


그림 1. 지구온난화에 따른 적도 벨트의 확장과 북극 해빙의 감소로 인한 중위도 기후 변동

○ 적도 벨트가 넓어진다는 것은 그 영향이 적도 주변에 국한된 현상이 아니라 잠재적으로 중위도의 기후를 변화시킬 수 있다. 태평양에서의 서안경계류인 쿠로시오는 열대해역에서 발원하는 북적도 해류가 필리핀해에서 분기하여 북쪽으로 흐르며 열과 염을 북서태평양 해역으로 공급하게 된다. 적도 벨트가 확대됨에 따라 열대의 영향도 중위도로 확장할 것으로 예상되며 실제로 최근의 연구 결과는 북적도 해류의 분기점이 북쪽으로 북상하며 쿠로시오에 영향을 주는 것을 보여주고 있다 (Hu et al., 2015).

○ 최근 지구온난화에 의해 전지구 수온이 상승하고 있지만 그 중에서도 서안경계류의 수온의 상승이 두드러진다. 실제로 쿠로시오가 영향을 주는 북서태평양 해역에서 수온 상승의 기울기가 가장 가파른 것으로 보고되고 있다. 이러한 수온의 상승은 태풍의 진로나 제트류의 변동성 증가에 영향을 줄 수 있으며 특히 한반도 주변에서 기후 및 해양의 극한 현상을 유발할 수 있어 이에 대한 대응 능력을 키우기 위해서는 관련된 해양 및 기후 역학을 이해하고 예측 능력을 향상시키는 것이 필요할 것이다 (Wu et al., 2012).

○ 열대 서태평양 온난역(western Pacific warm pool)은 지구상에서 가장 해수면온도(sea surface temperature)가 높은 지역으로서 해양-대기 상호작용이 활발하게 일어나는 지역이다. 또한, 이 지역의 기후변동성은 우리나라를 비롯한 북동아시아 지역 기후에 다양한 시간 규모에서 큰 영향을 미친다. 수십일 정도의 계절내 시간규모에서 열대 서태평양에서 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. 특히, 1990년대 중반까지 장마전선은 6월말에서부터 발달하고 7월말에

쇠퇴하여 8월에는 건조한 시기(dry spell)가 되는데, 1990년대 중반 이후에는 그 시기가 앞당겨지고 강해져 8월에도 비가 많이 오는 특성을 보이게 되었다(그림 3; Kim et al., 2011). 이러한 북진하는 계절내 진동은 한반도로 직접적으로 영향을 줄 수 있어 그 이해가 우선적으로 요구됨에도 불구하고 그 북진하는 기작도 분명히 알려져 있지 않다. 반면에 인도양에서 북진하는 계절내 진동은 그 기작이 비교적 잘 알려져 있다(Jiang et al., 2004). 그 기작이 비교적 잘 알려질 수 있었던 배경은 그 기작의 가장 중요한 요소가 동풍쉬어(easterly shear), 즉 관측이 많이 되어 있는 대기 변수이기 때문이다. 그러나 북서태평양 지역에서 북진하는 계절내 진동은 그 명확한 기작은 알려져 있지 않다. 그 이유는 그 기작과 관련하여 해양-대기 상호작용이 중요하다고 알려져 있는데(Chou et al., 2010), 해양-대기 상호작용이 북서태평양 해양-대기 관측시스템의 부재로 인해 그 연구 및 분석에 한계가 있기 때문이다. 계절 시간규모에서 북서태평양 지역 지상부근 기압패턴은 여름철 우리나라를 비롯한 북동아시아 지역과 지역적 정상로스비파(local stationary Rossby wave)의 영향으로 반대 패턴을 갖는 것으로 알려져 있다(그림 2; Kwon et al., 2005). 즉, 북서태평양 지역이 고기압이면 북동아시아 지역은 저기압이고 북서태평양 지역이 저기압이면 북동아시아 지역은 고기압이 되는 경향을 갖는다. 계절 규모에서 이러한 기압패턴의 유지는 북동아시아 지역의 강수량과 기온의 변동에 크게 영향을 주게 된다. 그러나 북서태평양 지역의 기압변동은 경년 시간규모(interannual time-scale)에 따라서도 크게 변화한다. 일반적으로 북서태평양 아열대 고기압 변동은 엘니뇨, 특히 라니냐의 원격적 영향과 인도양 온난화에 따른 지역적 피드백(local feedback)에 의해 생성되고 유지되는 것으로 알려져 있다(Wang et al., 2013). 특히, 겨울철 엘니뇨가 여름철로 가면서 빠르게 소멸하는 경우 북서태평양 지역은 고기압이 되는 뚜렷한 경향을 갖는다. 즉, 엘니뇨 혹은 라니냐를 비롯한 열대지역 해양-대기 변동은 계절마다 조금씩 차이는 있지만 열대 서태평양을 통해 한반도에 기후적 영향을 주게 된다. 한편, 북서태평양의 북동아시아 지역 기후에 대한 영향은 십년 이상의 중장기 변동 및 기후변화에 따라 변할 수 있다. 최근 열대 서태평양과 인도해역의 열대 온난역이 확장되고 온난화되는 기후적 변화가 탐지되고 있으나 해양 내부구조는 물론 해양-대기 상호작용에 대한 관측자료가 부족하여 그 영향에 연구와 이해에 한계가 있다. 특히 열대 서태평양의 온난화에 따라 북서태평양 지역의 태풍활동이 활발해지고 이에 따른 태풍활동 변화로 인하여 북서태평양과 북동아시아 지역 기압패턴의 관계는 크게 변할 수 있음이 알려져 있다(Kwon et al., 2005; 2007).

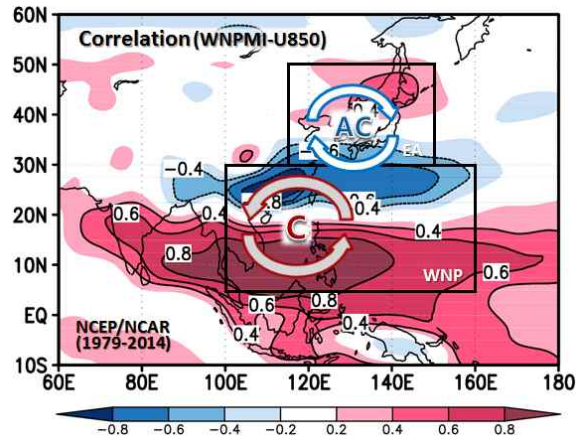


그림 2. 북서태평양 문순지수와 하층바람의 상관도

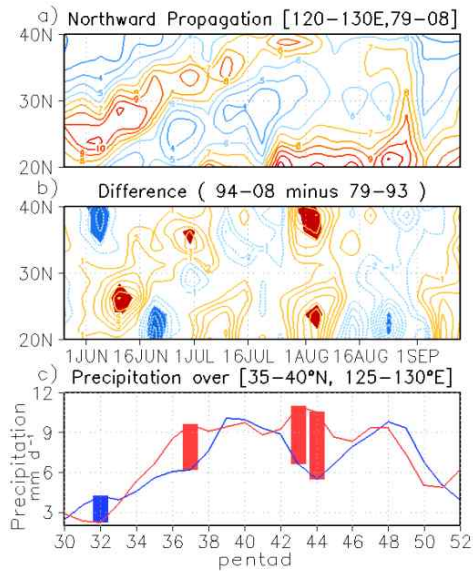


그림3. 북진하는 계절내진동과 십년변화

○ 급격한 북극 해빙의 감소는 결빙되었던 북극항로가 개방된다는 의미도 있으나 북극 진동의 약화로 북극의 영향이 중위도로 확장하고 이로 인해 가뭄, 한파, 폭설 및 폭염 등 전 지구적으로 이례적인 기상이변이 초래된다는 것이 최근 연구들로부터 입증되고 있다. 북극 해빙 감소는 북극의 고온현상에 따른 현상이며, 이로부터 한 대 제트와 플라볼텍스의 약화가 중위도 기상이변 이해의 열쇠가 된다는 것이 알려지고 있음. 특히, 북극 고온현상은 중위도와 고위도간 온도차를 줄임으로서 플라볼텍스의 약화를 가져오고 있다고 알려지고 있다.

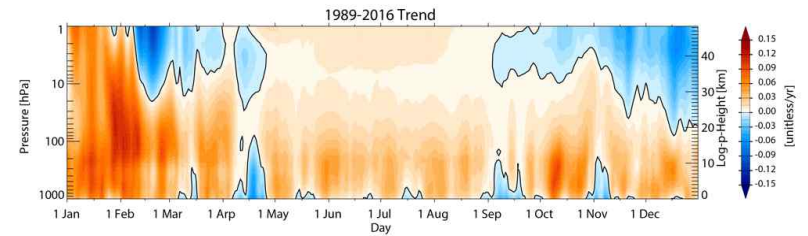


그림 4. 플라볼텍스의 강도를 대표하는 지표로 사용되고 있는 극지역 평균 (60N 이북) 지위고도 아노말리의 경향 (1989-2016). 값이 클수록 극지역 고기압성 아노말리가 강해짐을 의미. 모든 계절에 걸쳐 플라볼텍스의 강도가 약화되고 있음을 보여주고 있는 그림(양수: 플라볼텍스 약화, 음수: 플라볼텍스 강화).

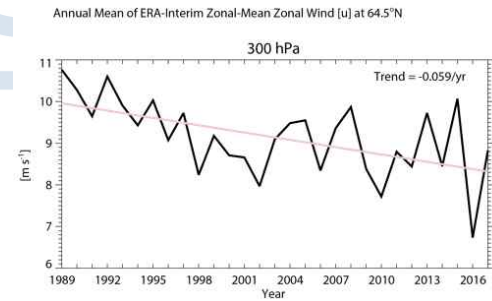


그림 5. 극지 경계(Arctic circle, 65N)에서 측정된 연평균 편서풍 (zonal mean). 시간에 따라 편서풍 즉, 한대 제트의 평균적인 강도가 크게 약화되고 있음을 확인할 수 있음.

○ 북극 해빙의 감소는 다량의 수증기와 열의 방출을 동반하며, 동시에 북극 지역에 거대한 고기압이 형성되어 북극 상공에 위치한 제트 기류의 흐름을 바꾸게 된다. 북극 상공 위치한 한대제트는 기후변화와 상관없이 안정된 흐름으로, 약해졌다가 강해지기를 반복하는데 이를 북극진동이라고 부르며, 북극진동은 플라볼텍스가 강약을 반복하는 자연 변동성을 일컫는다. 해빙이 녹는 양이 많아져 더욱 많은 열이 나오면 북극진동이 약화되어 제트기류가 느슨해지고 이렇게 되면 북극의 찬공기가 남쪽으로 내려오게 된다. 특히, 한반도는 시베리아를 거쳐서 차가운 공기가 내려오는 길목에 위치하므로 북극 해빙의 감소에 따라 느슨해진 제트기류 때문에 찬공기가 한반도로 쉽게 내려올 수 있게 된다. 즉, 지구온난화에 따라 해빙이 녹고 온도가 상승할 것으로 예상할 수 있지만, 동아시아를 비롯한 한반도에서 겨울철에 그와 반대되는 현상이 나타나는 것은 이런 이유 때문이다.

○ 한반도 기상이변에 있어 아북극 지역의 대표적 변동성인 북극진동과 한대제트에 주목해야 하는 이유는 1) 한반도 지역의 경우, 대륙의 동안에 위치하고 있어서 북미 동부 지역과 함께 한대제트와 플라볼텍스 변동이 큰 지역에 해당하기 때문이며, 2) 플라볼텍스가 한반도 지역으로 남하하는 경우, 상층 한기가 급속히 유입되어 한반도 지역에 대류 불안정이 유도되거나 강력한 한파가 발생하기 때문이다. 특히, 적도 서태평양 변동성과 관련있는 한반도 해수면 온도가 따뜻한 경우 상하층 간 온도차에 의해 큰 대류 불안정 상태가 유지되고 기류에 따라 고온 다습한 하층 공기가 유입될 시 강한 강수 현상 혹은 겨울철 폭설이 나타나게 된다. 또한, 편서풍의 약화는 이상기후 현상과 밀접한 관련이 있다고 알려져 있는 지역적인 블로킹 증가에 큰 역할을 할 수 있음이 선행연구를 통해 밝혀진 바 있어 아북극 지역의 대표 변동성에 대한 이해는 한반도 지역 극한기후/기상 현상 이해에 필수적이다.

○ 기후변화가 진행됨에 따라 우리나라가 속한 동아시아 지역에서도 최근 이상 기후 및 이상 해양 현상의 출현이 빈번해지고 있다. 만성적인 가뭄, 한파 및 열파의 지속성 증가, 홍수의 강도 증가, 열대폭풍의 강도 증가 그리고 이상 수온 상승으로 인한 양식장의 어 폐류 폐사나 적조 발생 등의 기상·기후 재해는 경제, 사회에 크게 영향을 미치고 있으며 국가적·사회적 관심 또한 높아지고 있다 (그림 6, 7).

○ 그러나, 아직까지는 이러한 극한 기후를 예측하기에는 기술적인 한계가 있어 사후적인 진단에 그치고 있으며 유라시아 대륙의 많은 국가들에서 여름철 폭염 및 가뭄에 의한 피해 규모가 확대되고 있어 이상기후 조기 경보 체계 구축을 위한 예측성 확보가 시급한 실정이다.



그림 6. 기후변화에 따른 빈번한 극한기후현상 출몰

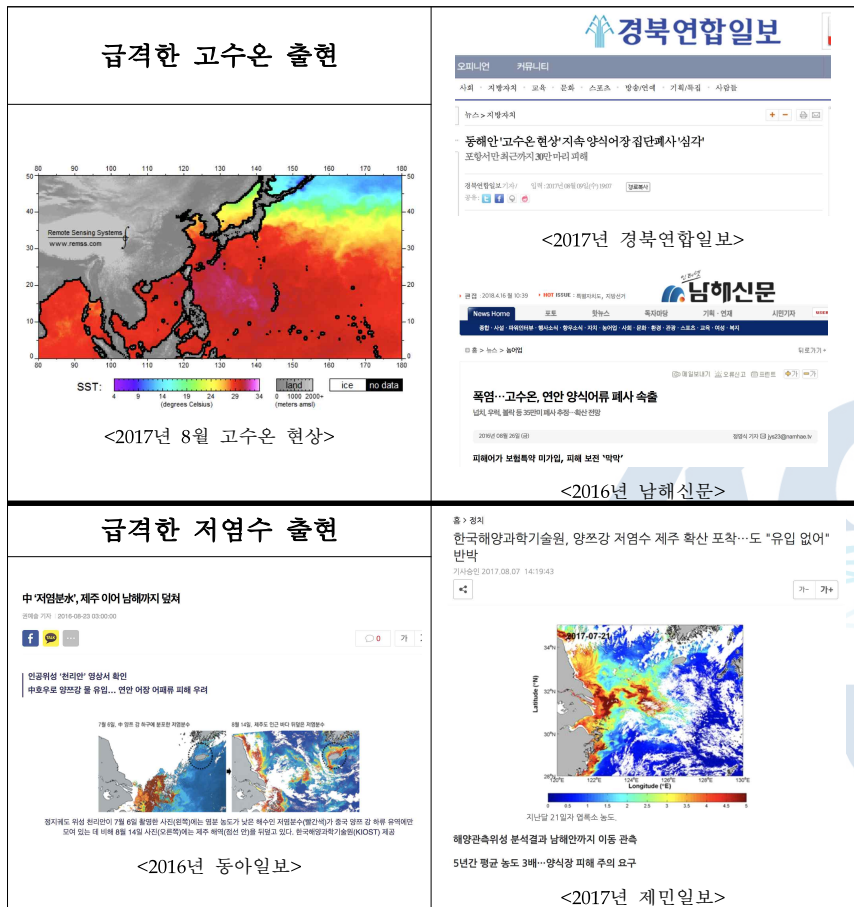


그림 7. 기후변화에 따른 빈번한 극한 해양현상 출몰

○ 한반도 기후는 동아시아 몬순의 영향으로 여름철에는 남서풍의 영향을, 겨울철에는 북서풍의 영향을 우세적으로 받는다. 그러므로 한반도 지역 기후의 변동성은 여름철에는 저위도 기후의 영향, 그리고, 겨울철에는 고위도 기후의 영향을 많이 받지만, 최근 들어 여름철에도 고위도 기후변동성의 영향을, 그리고 겨울철에도 저위도 기후변동성의 영향을 다분히 받을 수 있음이 알려져 있다. 특히, 봄철 유라시아 대륙의 눈덮힘(snowcover)

정도는 여름철 강수량 및 기온에 크게 영향을 줄 수 있으며(Yim et al., 2010), AMO(Atlantic Meridonal Oscillation) 등 대서양 기후 현상이 한반도 여름철 기후에 영향을 줄 수 있음이 알려져 있다(e.g., Ham et al., 2016). 겨울철에는 극진동과 같은 고위도 기후현상과 한반도 기후가 높은 상관성이 있지만, 동시에 ENSO(El Nino and Southern Oscillation)와 같은 저위도 기후현상과도 높은 상관성이 있다(Kug et al., 2010). 그러므로 한반도 지역 기후의 변동성을 이해하기 위해서는 극지역에 대한 영향과 저위도에 대한 영향이 동시에 고려되어야 한다.

○ WMO에서는 이러한 이상기상·기후 현상으로 인한 피해를 경감하기 위해 단기 및 중기 예측보다 길고 계절 예측보다 짧은 계절내 규모 예측의 연구 및 기술 향상의 필요성을 인식하고 있다. 많은 정책 결정들은 수 주일의 시간 규모에서 이루어지기 때문에 최종 수요자의 관점에서 날씨 예측과 계절 예측 사이에 있는 2주~2개월의 계절내 규모의 예측은 매우 유용하며, 최근 연구들에 의해 기상 연구와 기후 연구의 협동의 중요성이 강조되어 왔고 이음새가 없는 기상/기후 예보 시스템의 개발이 추진되고 있다. 즉, 계절내 규모는 날씨와 기후 영역을 연결 짓는 중요한 가교이다.

○ 계절내 규모의 기후예측을 위해서는 해양-대기 실시간 관측망이 요구된다. 특히 대기 관측망에 비해 기술적인 어려움과 관측 환경으로 인하여 해양 관측망의 설치 및 유지에 어려움을 겪어 왔다. 미국의 주도로 1985~1994년에 수립된 TAO(Tropical Atmosphere Ocean) 부이 관측망은 1997년부터 설치된 TRITON (TRiangle Trans-Ocean buoy Network) 부이와 함께 엘니노를 포함한 열대 기후의 변동성에 대한 감시와 예측에 크게 기여해 오고 있다 (그림 8).

○ 그러나, 태평양의 열대계류부표체계(TMA, tropical moored buoy array)가 노후화됨에 따라 2012~2014년에 엘니노-남방진동 (ENSO, El Niño - Southern Oscillation)의 예측 능력과 이에 관련된 서비스에 심각한 위험성이 있음이 확인되었다. 실제로 TRITON 부이 관측망의 대부분의 부이들은 이미 운영이 중단되었거나 중단될 예정이다 (그림 8). 이를 대체하기 위한 장비는 TPOS2020 프로그램에서 논의되고 있으나 지금 설치를 시작해도 수년 후이나 정상적인 운영이 가능할 것이다.

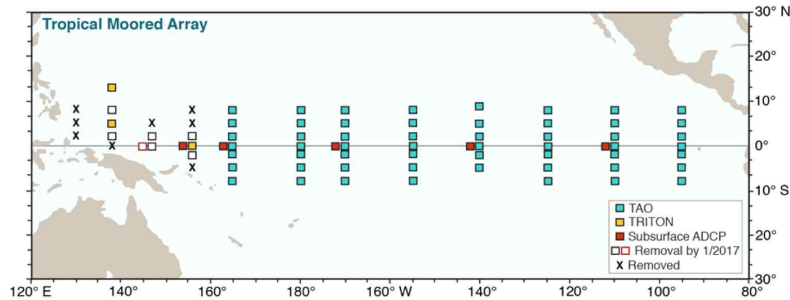


그림 8. 태평양 TAO/TRITON 부이 관측망. x 는 운영이 중단된 TRITON 부이를, 하얀색 사각형은 중단 예정인 부이들을 나타냄

○ 북극으로 들어가는 태평양 쪽 입구에 해당하는 베링해는 한반도 기후와 밀접하게 관련된 해역으로 최근 연구 결과 알려지고 있다. 그러나 이 해역에 대한 관측망이 구축되어 있지 않으며 한반도 기후 예측의 정확도를 높이기 위해서는 이 지역에 대한 관측망 구축이 요구된다.

○ 북극기후변화 연구의 중요성에도 불구하고, 현재까지의 북극에 대한 기후변화 연구는 일부 북극해를 중심으로 한 단발적인 탐사와 지역적으로 제한된 현장 관측을 중심으로 수행되어 왔다. 특히, 해빙과 극지역 구름물리에 대한 학술적 이해도가 부족한 관측 자료의 한계로 매우 미흡한 실정이다. 이에 따라 컴퓨터 모델링을 통한 미래 예측에 있어서도 극지역의 불확실성이 다른 어떤 지역보다 크게 나타나고 있다. 극지 기후를 구성하는 다양한 기후요소의 상호작용 연구, 이에 기반한 지구시스템모델을 활용한 극지역 미래예측, 극지-글로벌 상호작용에 대한 본격적인 연구 역량이 요청된다.

○ 급변하고 있는 열대 태평양과 극지의 기후변화 연동 메커니즘을 규명하기 위해 대양 관측과 극지관측을 위한 인프라를 갖추고 있는 한국해양과학기술원과 극지연구소 간의 융복합 과제의 발굴과 이를 통해 지구시스템 모델에 기반한 미래예측 역량을 확보할 수 있을 것이다.

○ 기후변화로 북극항로가 열린 것처럼 대기-해양 또한 열대-극간 직접 상호작용함이

최근 일부 알려지기 시작했다. 한반도 기후에 대한 열대 서태평양과 북극의 영향을 동시에 보고자 하는 연구는 시도된 바가 없으며 국내외적으로 선도할 수 있을 것이다.

○ 전지구 기후시스템 모델(Global Climate Model)은 미래의 기후변화를 전망하는데 기여해 왔다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 그동안의 기후변화 평가보고서를 작성함에 있어 전지구 기후시스템 모델들이 참여하는 CMIP (Climate Model Inter-comparison Program)의 기후 전망 결과를 인용해 왔으며 기후변화 대응 및 적응에 주요 참고 자료로 활용해 오고 있다. 특히, 인간 활동에 의한 온실 기체의 증가로 인하여 전지구적으로 온난화 현상이 나타남과 동시에 기후 변동성의 증가가 예상되었다 (IPCC, 2013). 특히, 기후시스템 모델들은 온실 기체의 증가에 따른 미래의 기후 환경에서 대부분의 지역에서 극한 기후가 증가할 것으로 예측하고 있다 (Kharin and Zwiers, 2000, 2005; Tebaldi et al., 2006). 따라서 기후변화에 대한 대응과 적응을 위해서는 극한 기후에 대한 연구 및 예측이 중요하게 받아들여지고 있다.

○ 기후변화의 속도를 늦추기 위한 정책적인 결정은 전 지구적인 규모에서 그리고 국제적인 공조 속에서 이뤄지는 것이 타당할 것이다. 그러나 기후변화에 대한 적응 및 기후 재해의 저감 정책은 전적으로 개별 국가 또는 지역 정부에서 의해 결정될 사안이다. 이를 위해서는 보다 정밀한 지역기후 예측 정보가 요구된다 (Walton et al., 2016). 예를 들어, 지역 정부나 투자자들은 사회 기반시설을 설계하고 수자원을 관리하기 위한 장기적인 계획을 수립함에 있어, 향후 50년 내에 해당 지역에 가뭄이나 홍수가 얼마나 자주 발생하게 될 것인지 또는 태풍의 내습이 얼마나 잦을 것인지에 대한 정보를 필요로 하게 된다. 그러한 정보의 부족은 기후변화 적응 정책을 입안함에 있어 오류를 범하게 하고 이로 인해 대규모의 사회적 비용이 발생할 수도 있다(Walton et al., 2016).

○ 최근 국제 사회는 지역별 미래 기후 전망 및 극한 기후의 변화 경향 등 지역기후 정보 산출을 위한 노력을 경주하고 있으며, 기후변화 대응과 관련하여 위험한 수준의 기후변화 크기 및 온실 기체 농도의 평가에 관심을 집중하고 있다. 또한, 기후변화에 관한 과학적 결과들을 바탕으로 한 다양한 부문별, 지역별 영향 및 취약성 평가와 함께 사회경제적 통합 평가 필요성이 꾸준히 제기되고 있다. 따라서 한반도를 중심으로 한 다양한 지역 기후변화 시나리오의 생산과 평가는 부문별, 지역별 기후변화 영향과 취약성을 평가하기 위한 기초 자료의 확보와 직결되며, 한편으로는 온실 기체 감축과 관련한 국제협상에서의 중요한 과학적 근거로 국가 장기 정책 수립에 필수적이다(홍 등, 2011).

○ 지역기후모델(Regional Climate Coupled Model, RCCM)은 전지구 기후시스템 모델로는 제시할 수 없는 보다 상세한 지역기후에 대한 예측 정보를 생산할 수 있을 것으로 기대된다. 상세 지역기후 정보들은 지역적인 극한 기후 현상을 재현하고 예측함으로써 향후 기후변화 적응 정책 등에 활용될 수 있을 것이다. 또한 지역적인 극한 기후 예측을 위한 기술적인 발전에 기여할 수 있을 것이다.

○ 지역해는 전지구적인 탄소 순환 측면에서도 중요한 영역이다. 풍부한 영양염의 공급에 따른 높은 일차생산량은 대기로부터 탄소를 흡수하는 중요한 요소이기 때문이다. 최근 지역해에서의 탄소 플럭스는 관측망의 발달로 인하여 그 정확도가 높아지긴 했지만, 전지구적인 기후변화를 예측하기 위해서는 그 정도가 충분하지가 않다. 관측의 부족뿐만 아니라 지역해에서의 생지화학 과정에 대한 이해의 부족은 전지구적인 기후변화 예측에 불확실성을 더해주고 있다(Dai et al., 2013). 전지구적인 탄소 순환에 대한 지역해의 기여도를 평가하기 위해서는 지역기후모델에 생지화학 과정을 접합함으로써 지역해에서의 탄소순환 과정에 대한 모델 기반 연구 또한 필요할 것이다.

○ 최근 배터리 기술의 발전은 장기간에 걸쳐 넓은 해역을 무인 플랫폼을 이용하여 자율 이동식 해양관측이 가능하도록 만들었다. 최근에는 장거리 이동 및 여러 종류의 탐사를 동시에 수행할 수 있는 대형 AUV 개발이 추진되고 있다. 이러한 경향은 2000년대 들어 개발된 장거리 AUV, 수중글라이더와 무인파력선을 중심으로 계류부이 및 ARGO 플랫폼을 이용한 해양관측 분야를 대체할 신기술로서 그 기술 개발이 꾸준히 이루어지고 있다. 이러한 새로운 무인화 관측 플랫폼들은 자율제어를 수행하면서 장기간 운용할 수 있는 장점이 있고, 해양과학 분야뿐 아니라, 해양방위 목적으로도 크게 주목받는 등, 그 활용도가 점차 증가되고 있다. 관측의 효율성을 높이기 위하여 연구선과 함께 무인 관측 플랫폼을 활용을 고려해 볼만 하다.

제2절 연구 목표 및 범위

1. 연구 목표

- 아북극-동아시아-아열대서태평양 기후변화 연결고리를 상세관측하고 한반도 극한 기후-해양 현상에 대한 예측 능력을 향상시킴으로써 한반도 기후변화 대응 능력을 강화하고 관련 분야에서 국제사회 선도에 기여한다.

2. 연구의 범위

(세부과제 1) 아북극-동아시아-아열대서태평양 기후변화 국제감시망 구축 연구

- 아북극해 종합관측체계 구축
 - : 기후변화 국제 감시망 구축을 위한 베링해 슈퍼스테이션 구축 연구
 - : 기후변화 연결고리 규명을 위한 아북극해 해양-대기 관측 조사
- 아열대서태평양 종합관측체계 구축
 - : 기후변화 국제 감시망 구축을 위한 아열대서태평양 해양-대기 자동관측 시스템 구축 연구
 - : 기후변화 연결고리 규명을 위한 아열대서태평양 해양-대기 관측 조사
- 아북극-동아시아-아열대서태평양 기후변화 연결고리 규명 연구
 - : 적도 벨트의 확장과 북극 해빙 감소에 따른 한반도 기후 변동 역학 규명
 - : 기후변화와 한반도 주변역의 극한 기후 및 해양 현상의 상관성 규명

(세부과제2) 한반도 중심 고해상도 지역기후 예측시스템 구축

- 해양-해빙-대기 결합 지역 기후모델 개발
 - : 해양-해빙-대기 결합 기후모델 구축
 - : 기후모델 개방경계 조건 처리 기법 연구
 - : 해양-극지 종합 관측망 자료의 기후예측 성능 민감도 진단
- 기후예측을 위한 기후자료동화 기법 개발
 - : 해양 자료동화기법 적용 연구
 - : 해빙 자료동화기법 개발
 - : 기상장 초기화 방안 적용 연구
- 고해상도 지역기후 예측시스템 구축

- : 예측 시스템 구축을 위한 실시간 해양, 해빙 자료처리 시스템 구축
- : 한반도 영역에 대한 기후예측성 평가
- : 기후예측 시스템 구축



제 2 장 기후변화 국제 감시망 구축의 국내외 동향

제 1 절 해외동향

○ 열대 서태평양 기후감시 시스템 (부이 중심)

기후모니터링을 위해서 다양한 방법으로 해양과 대기를 관측하고 있다. 해양을 관측하기 위해 선박을 이용하여 정점을 반복적으로 장기간 관측하여 많은 결과를 산출하였다. 그러나 선박을 이용하여 관측하기에는 한계가 있어 많은 영역을 조사할 수 없고 반측 횟수에 제한이 된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 Argos 표층플게와 ARGO 플게를 사용하여 물의 흐름을 따라 관측하는 시스템을 사용하지만 고정점에 대한 시계열 관측과 대기에 대한 관측이 어렵다. 위성으로 넓은 해역을 동시에 수온, 염분, 해표면 고도, 해표면 바람, 해색 등을 주기적으로 관측할 수 있다. 그러나 위성을 통한 관측은 해 표면에 국한된 것이며 관측 값에 대한 확신을 갖기 위해서는 실제 관측한 자료가 필요하다. 실시간 관측 부이 시스템은 설치비용이 많이 들고 첨단 기술이 필요하지만 대기와 해양에서 동시에 안정적으로 시계열 자료를 획득할 수 있는 장점이 있다. 더욱이 위성자료를 보정하기 위해서는 부이를 활용하여 관측한 자료가 더 필요한 실정이다.

기후모니터링을 위한 부이의 위치 등 정보는 OceanSITES (<http://www.oceansites.org/index.htm>)를 통해서 알 수 있다. OceanSITES의 임무는 해양의 고정점에서 장기간의 고주파 관측으로부터 고품질의 데이터를 수집, 전달 및 홍보하는 것이다. OceanSITES는 목적은 일반적으로 수면 위의 대기를 포함하여 수층 전체의 다분야 자료를 수집하는 것이다. 2016년 1월 31일 현재 OceanSITES에 등록되어 있는 부이를 포함한 관측 위치는 그림과 같다. 열대 서태평양의 파푸아뉴기니 북쪽 필리핀해는 관측 점이 없다. 열대태평양의 관측은 TAO/TRITON 부이 관측점으로 나타났다.

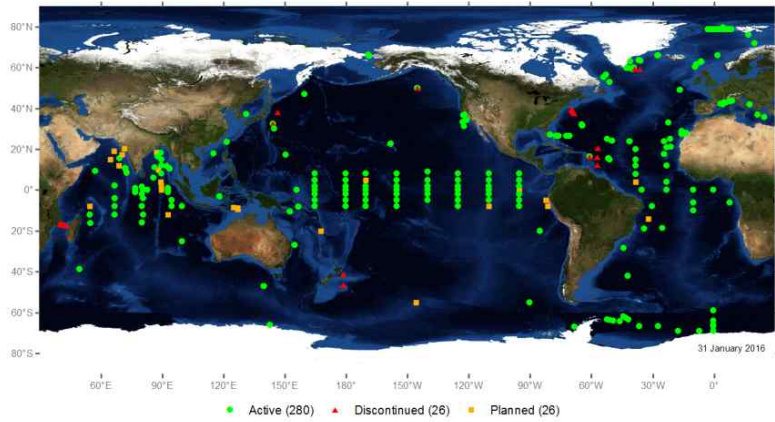


그림 9. OceanSite 2016년 1월 31일에 등록되어 있는 관측 위치



그림 10. OceanSite의 열대서태평양 관측위치

TAO/TRITON Array는 미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 PMEL(Pacific Marine Environmental Laboratory; <https://www.pmel.noaa.gov/gtmba/>)에서 설치 및 관리하고 있는 TAO(Tropical Atmosphere Ocean)와 일본 JAMSTEC(Japan Agency for Marine-earth Science and TEchnology)에서 관리하는 TRITON(Triangle Trans Ocean Buoy Network)를 합한 것을 뜻한다(그림 11). TAO와 TRITON은 2000년 1월 1일에 합하여 배열되었다. TRITON은 CLIVAR, GOOS 및 GCOS의 지원하에 TAO와 긴밀히 협력하여 구현되었다. TRITON 부표는 일본 연구 조사선박인 MIRAI가 서비스한다. NOAA/PMEL의 TAO 프로

젝트는 JAMSTEC의 TRITON 프로젝트와 긴밀하게 협력하여 TAO와 TRITON 부표 사이의 센서 유형 및 샘플링 방식의 일관성을 극대화하였다. 결합된 TAO/TRITON 데이터는 TAO 프로젝트에 의해 통합되고 통합된 데이터 세트에 관리되고 배포된다.

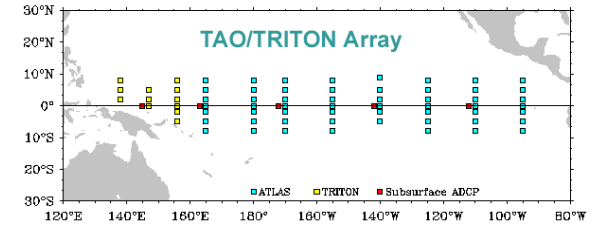


그림 11. 열대 태평양 부이 관측 배열

TAO/TRITON Array는 엘니뇨 및 남방진동(ENSO)과 관련된 기후 변화를 더 잘 이해하고 예측할 수 있도록 설계되었다. ENSO는 지구상에서 가장 강한 기후 변동을 나타내어, 정상적인 기후 패턴을 크게 혼란에 빠뜨리고 전 세계 사람들의 삶에 영향을 미친다. 부이에서는 관측한 자료는 인공위성을 통하여 실시간으로 자료를 전송한다. 관측항목은 대기 요소로 풍향풍속, 기온, 기압, 상대습도, 강우량, 장파장방사(Long Wave Radiation), 단파장방사(Short Wave Radiation) 등이고 해양 요소는 수온, 염분, 유속 등이 있다.

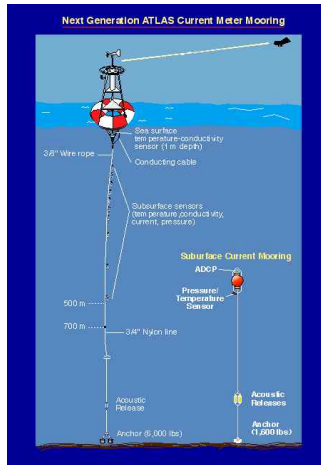


그림 12. 차세대 ATLAS 계류 시스템

TAO/TRITON Array는 그동안 ENSO 현상 규명 및 예측에 큰 공헌을 하였다. 그러나 2012-2014년의 평가 결과는 현재의 부이배열 유지가 어렵다는 것을 보여주며, 현 부이배열을 변경하기 위해 TPOS 2020 프로젝트가 시작되었다(Cravatte et. al., 2016). 최종 부이배치 계획은 2020년 제시될 예정이다. 이 프로젝트의 새로운 목적은 해양-대기 상호작용 플럭스, 일일주기, 적도 해양-대기 결합모델, 태평양의 경계해역, 생지화학, 해양-대기 탄소 플럭스 등을 포함하여 더 진전된 이해를 위한 것이다. 1차 보고서에 나타난 권고사항은 다음과 같다. 해표면 바람/바람응력 관측은 위성관측자료 보정과 일주기 변화 파악을 위해 측정간격을 매6시간으로 하고, 바람 벡터를 측정할 것, 해수면 수온을 지속적으로 관측하되 위성으로 관측이 어려운 강우대와 구름이 자주 끼는 해역에 대하여 중점을 둘 것, 해면고도는 중규모 및 그 이하 규모의 변동 파악과 조석 보정 등을 위해 해저에 장치를 설치할 것, 위성관측 강수량 보정을 위해 열대 태평양 대류해역에 강수량 측정, 그리고 염분, 표층부근 유속의 연직 분포, 열 플럭스 산출을 위한 기상 파라미터, 등 물리적인 변수들 외에, pCO₂, 해색, 산소 등 생지화학 분야도 측정할 것을 권고하고 있다.

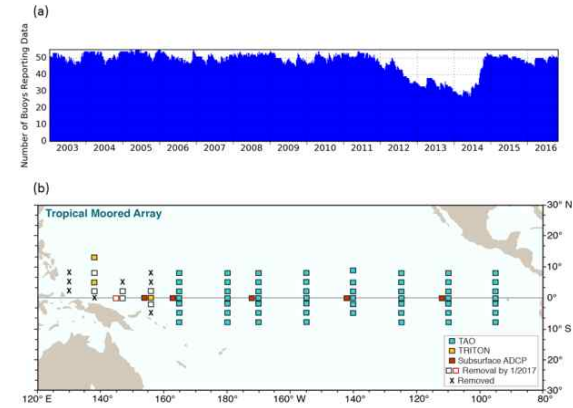


그림 13. (a) 2003-2016년 TAO/TRITON Array 자료 획득율, (b) 2017년부터 관측이 중단될 부이 위치

○ 해양 부이를 이용한 장기관측 국외 성공사례 : Ocean Climate Stations (OCS) Project (<https://www.pmel.noaa.gov/ocs/>)

OCS의 미션은 자동관측 플랫폼에서 기상 및 해양을 측정하는 것입니다. 이러한 표준 시계열과 혁신적인 관측은 위성 관측 자료와 예측모델을 개선하고 대기-해양 상호 작용에 대한 이해 및 기후 시스템 내에서의 역할을 규명하는데 사용됩니다.

지구의 70% 이상이 바다로 덮여 있기 때문에 전지구 기상과 기후는 바다와 공기 사이의 열과 습기의 교환에 크게 영향을 받는다. 기후 시스템에 대한 향상된 이해는 사회가 기후 변동과 변화에 적응하는 것을 도울 것입니다. 개선된 그리고 물리적으로 보다 현실적인 예측모델은 극한 기후 극단에 대한 사회의 취약성을 줄이는 데 도움이 될 것이다.

OCS프로젝트에서 유지하고 대표적 부이는 Kuroshio Extension Observatory (KEO), Ocean Station Papa, 그리고 Agulhus Return Current (ARC)가 있다. 이중 북서태평양 쿠로시오 직류해역에 위치한 KEO 부이(북위 32.3도, 동경 144.6도)는 미국연구재단(NSF)이 지원한 대형 현장연구사업인 Kuroshio Extension System Study (KESS)의 일환으로 2004년부터 NOAA PMEL 주도로 관측을 시작하여 현재도 관측이 진행 중인 국제적으로 매우 잘 알려진 슈퍼스테이션이다.

일본은 KEO 부이 주변 해역에서 KEO 부이 자료 활용을 극대화 하는 추가적인 대형 현

장관측 프로그램들을 개발하여 진행하고 있다 (그림 15). 슈퍼스테이션이 장기간 유지될 경우 이러한 시너지 효과가 기대된다. 최근 5년간 KEO 부이 자료를 이용한 30여편 이상의 연구 논문이 해양 및 기후연구 분야의 최고수준 국제학술지에 발간 될 정도로 장기 관측자료의 학문적 가치는 매우 높다 (KEO 홈페이지 Publication자료 참조).



그림 14. OCS프로젝트의 대표적 부이인 KEO, Papa, ARC의 위치

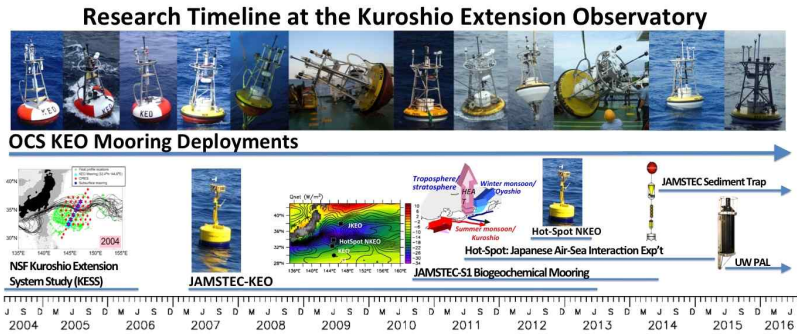


그림 15. KEO 부이를 활용한 대형 현장관측 프로그램의 경과

○ 북극해 관측 프로그램

미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration), 해군연구소(Office of Naval Research)이 러시아 남북극 연구소(Arctic and Antarctic Research Institute)와 공동으로 Russian-American Long-term Census of the Arctic (RUSALCA) 프로그램의 일환으로 1990년부터 베링해협 관측 프로그램 (Pacific Gateway to the Arctic)을 시작하였다. 관측 초기 해협의 물성 특성과 계절변동을 주로 관측 해오다가 베링해의 기후 관련성이 중요해지면서 계류 정점을 확장하며 장기 변동성을 모니터링한다.

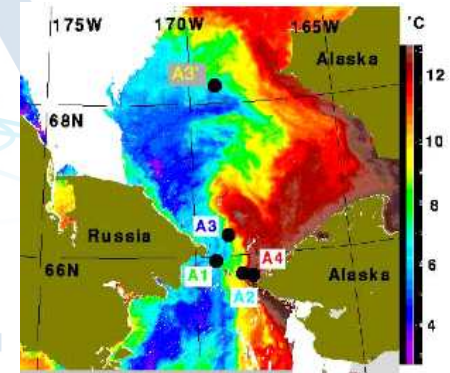


그림 16. 베링해협 및 척치해의 계류 정점

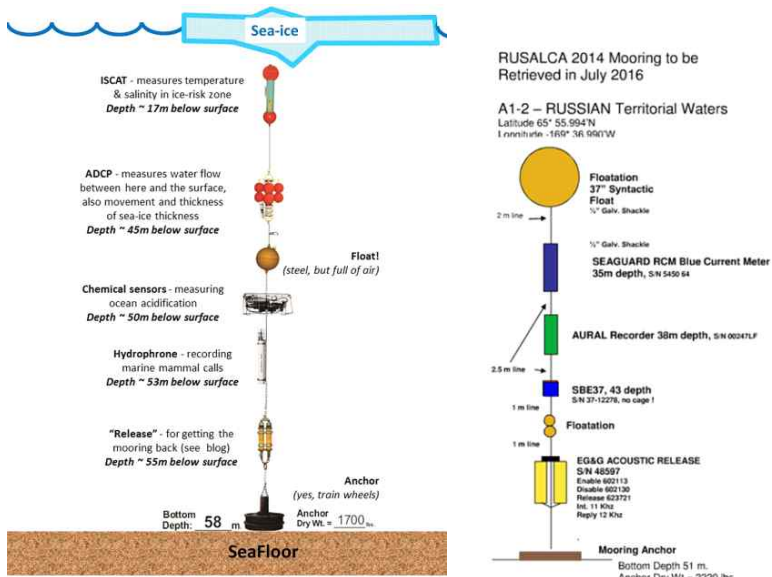


그림 17. 계류 장비 모식도(왼쪽) 및 베링해 서쪽 러시아 해역 조사를 위해 A1 정점에서 2014년부터 2년 동안 계류한 관측장비(오른쪽)

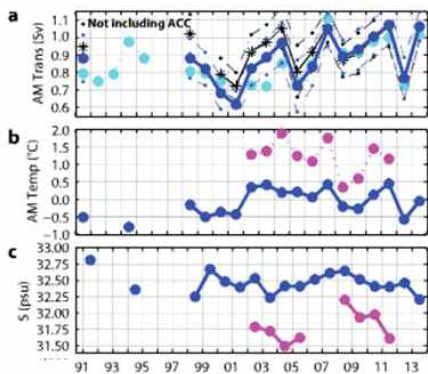


그림 18. 베링해협에서 관측한 1991년부터 2013까지의 시계열. (a) A3(파란색), A2(하늘색)에서 관측한 수송량 및 오차범위(검은색); (b) A3(파란색)와 A4(자주색)의 해저면 부근 수온 및 (c) 염분(Woodgate et al. 2015)

베링해 해양 생태 및 어류 협동조사 프로그램 (Ecosystems & Fisheries- Oceanography Coordinated Investigations; EcoFOCI) 은 1995년부터 베링해 동쪽 해역에 대해 해양환경 모니터링을 수행하여 수온, 염분, 해류, 해빙, 클로로필 농도 등을 연중 관측한다. 베링해 수온에 기후 변동 요소가 크게 나타나는 것으로 관측되어, 생태시스템도 더운시기(2000-2005)와 추운시기(2006-2010)에 따라 어떻게 다르게 반응하는지에 대해 조사하고, 베링해 생태계를 장기적인 기후변동과 기후변화 측면에서 모니터링 한다.

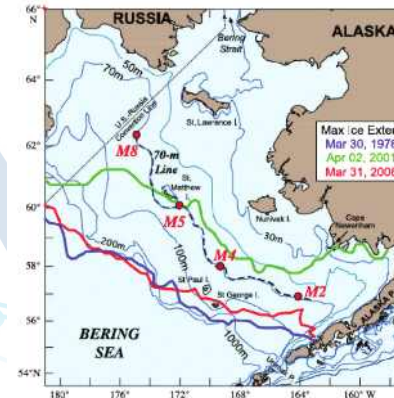


그림 19. EcoFOCI 프로그램의 관측정점

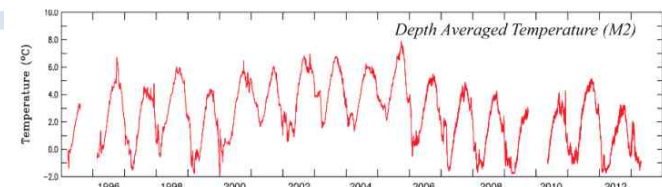


그림 20. M2 정점에서 관측한 수심평균 수온 변동 그래프(1995-2011)

일본 JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)에서는 척지해 모니터링 시스템을 운영하고 있다. 국제공동 관측프로그램인 Distributed Biological Observatory(DBO)와 협력하여 장기 모니터링 부이를 운용한다. 북동 척지해

의 Barrow Canyon에서 태평양 수가 북극해 내부로 들어가서 미치는 영향을 밝히는데 초점을 맞추어 2000년부터 모니터링 부이를 운용한다. 모니터링 자료에 나타난 장기 기후 변동성을 조사하여 베링해협 해류 수송량이 북극해와 북태평양 사이의 해면기압 차이와 관련있음을 보였다(Itoh et al. 2013). 2012년 이후에는 척치해 남쪽해역의 Hope Valley에서도 연중 계류를 추가 수행하고 있다.

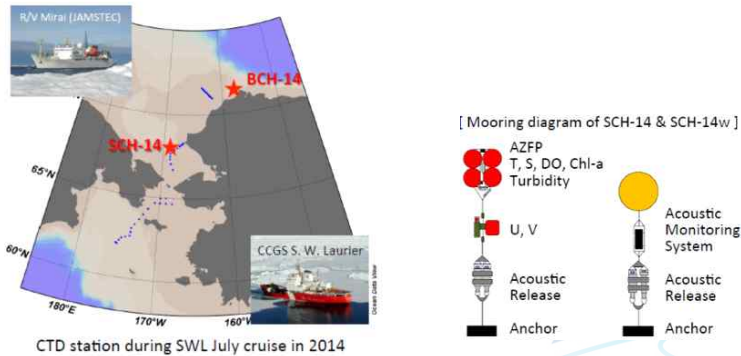


그림 21. 일본 JAMSTEC 운용 부이. Barrow Canyon에 설치된 부이(BCH-14) 및 남척치해에 설치된 부이(SCH-14) (왼쪽). 계류에 사용된 장비 및 관측 변수(오른쪽)

○ 지역 기후 전망 및 예측 모델 개발¹⁾

전지구 기후시스템 모델 상호 비교 프로그램(CMIP3) 자료를 분석하여 인간 활동에 의한 기후변화가 중국 대륙의 강수량 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 다중 모델 앙상블 실험 결과는 중국 대륙의 강수량 변화의 공간 구조는 비교적 잘 모의하고 있으나, 모든 전지구 기후시스템 모델이 극한 기후를 과소 모의하는 것으로 나타났다(Li et al., 2011) (그림 22). 고해상도 지역기후 모델의 필요성이 대두되었다.

1) “고품질 해양-대기 플렉스 산정 및 지역기후 모형 개발 기획(2016)” 보고서의 지역기후모델 분야를 발췌하여 정리하였음.

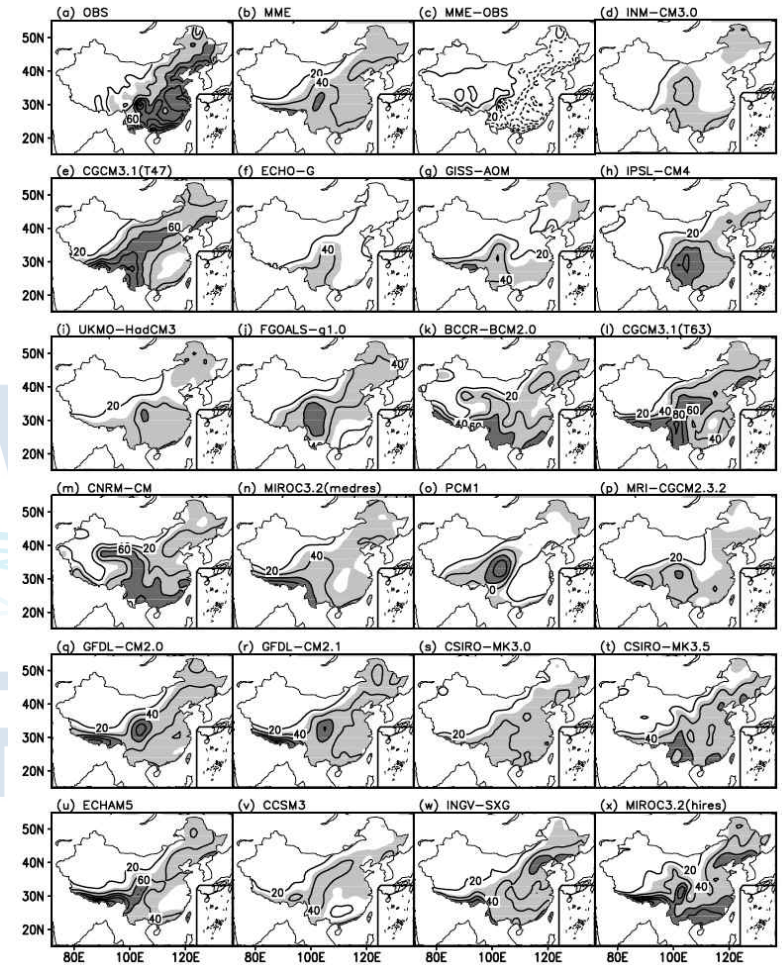


그림 22. 중국 대륙에서 1961-2000 평균 July-August 강수량. 단위: 100 mm. (a) 관측 (b) 다중모델 앙상블 평균값 (MME), (c) MME와 관측의 차이, (d)-(x) 개별 모델 결과. Li et al. (2011).

CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment)는 WCRP (World

Climate Research Programme) 등 국제기후과학 기구들의 지원을 받아 지역기후 예측 연구의 협력을 지원하는 프로그램이다(http://www.cordex.org). 각 지역별 CORDEX 가 구성되어 과학자들간의 상호 협력 관계를 지원하고 있다(그림 23). 14개의 영역으로 구분되어 있으며, 한반도는 East-Asia 영역에 속해 있다.

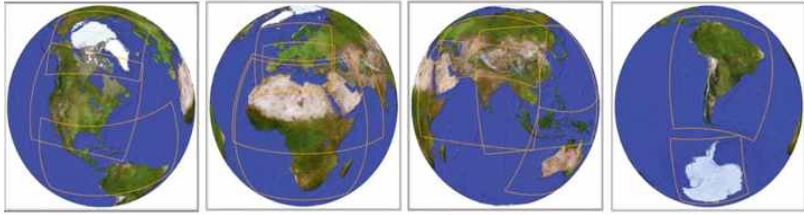


그림 23. CORDEX의 연구 영역들. http://www.cordex.org

Loikith et al. (2015)는 지역기후모델을 이용한 북미 대륙에서의 극한 기온의 모의 성능 진단하는 연구를 수행하였다. 이 연구를 통해 관측 자료 간에도 불확실성이 나타나고 있으나 수치모델을 이용한 극한 기온 예측의 가능성을 보여주었다(그림 24). 그러나 이 연구는 대기 모델을 기반으로 하여 기후 역학을 종합적으로 해석하기에는 한계가 있다.

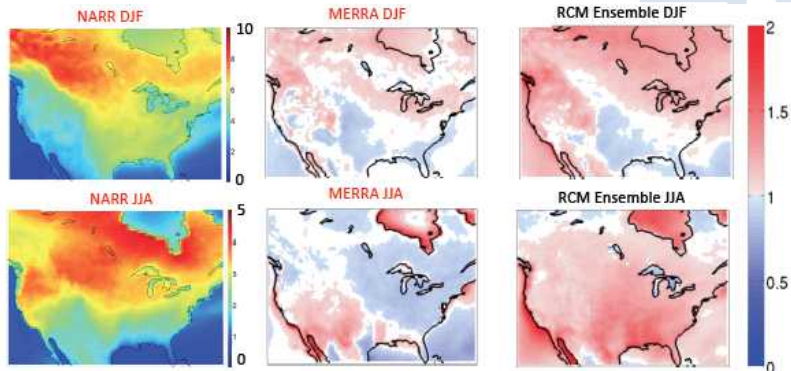


그림 24. NCEP 북미 지역 재분석 자료(NARR)에 나타난 일별 기온의 표준편차 (왼쪽)와 MERRA 재분석 자료의 표준편차와의 비율 (가운데) 그리고 지역기후 앙상블 모델의 표준편차와의 비율(오른쪽). Loikith et al. (2015).

Ruti et al. (2016)은 MED-CORDEX (지중해 영역)의 일환으로 극한 기후 모의 성능에 대한 비교 검증을 수행하였다. 이 연구 또한 대기 모델을 기반으로 하고 있으며 모델의 해상도에 따른 극값 모의 성능을 비교하고, 저해상도 모형에서 극한 기후를 저평가하고 있음을 보였다.

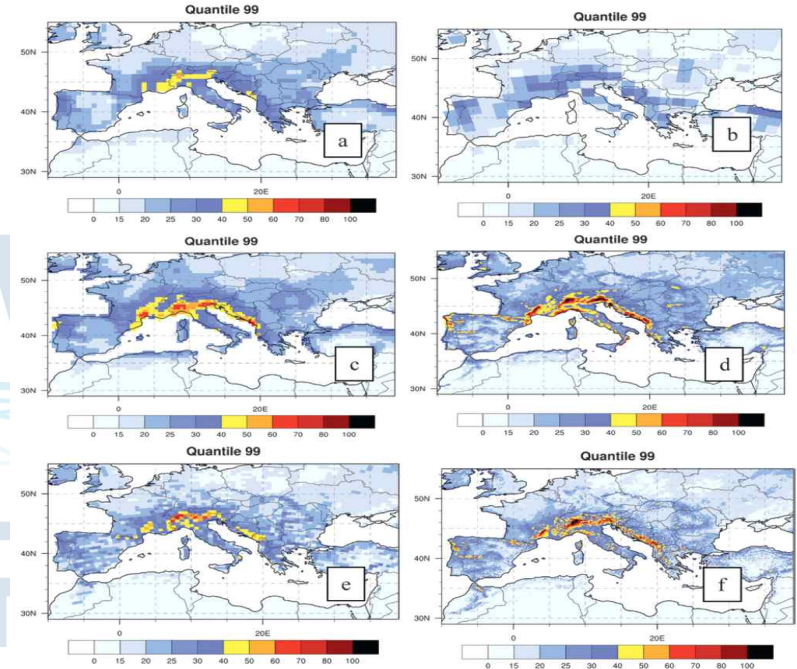


그림 25. 1989년부터 2009년 기간의 9월부터 11월까지 일별 강수량의 99% quantile (1% 극값) (mm day⁻¹): (a) ERA-Interim; (b) ALADIN-Climate model, 150 km; (c) COSMO-CLM model, 50 km, forced by ERA-Interim; (d) COSMO-CLM model, 12 km; (e) ALADIN-Climate model, 50 km; and (f) ALADIN-Climate model, 12 km. Ruti et al. (2016).

여름 몬순에 대한 해양-대기 상호 작용의 영향을 평가하기 위하여 WRF (Weather Research and Forecasting)와 ROMS (Regional Ocean Modeling System)을 이용하여 결합 지역기후모델을 개발한 연구가 있다(Samala et al., 2013). 인도 여름 몬순에 대하

여 관측과 결합 지역기후모델 그리고 대기모델 결과를 비교하여 결합 지역기후모델이 인도 여름 몬순 시기에 강수량의 계절적인 특성 뿐만 아니라 계절내 진동 (Intra-seasonal oscillation)에 대한 모의 성능을 향상시키는 것을 보였다.

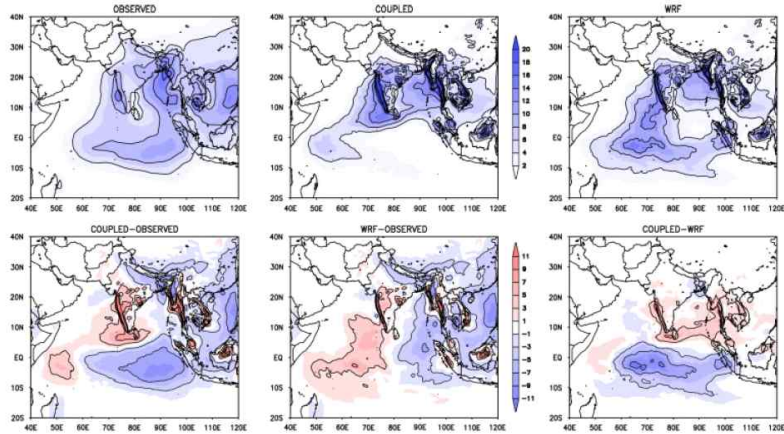


그림 26. 관측 JJAS 기후평균 강수량 (mm day^{-1}) 관측 (왼쪽 위), 결합 기후모델 (중간 위) 그리고 대기 모델 (오른쪽 위). 결합모델-관측 (왼쪽 아래), 대기모델-관측 (중간 아래) 그리고 결합모델-대기모델 (오른쪽 아래). Samala et al. (2013).

해양에서의 탄소 순환을 모의하기 위한 해양생지화학 과정 모듈로는 19개의 예단 변수를 모의하는 TOPAZ (Dunne et al., 2013), 6개의 예단 변수를 모의하는 BLING (Galbraith et al., 2010), 3개의 예단 변수를 모의하는 miniBLING 등이 개발되었다(그림 27). 최근의 해양-대기-생지화학과정이 결합된 모델을 지구시스템 모델이라고 하며, 지구시스템 모델의 해상도가 높아짐에 따라 수치계산량을 줄이기 위한 단순화된 생지화학 과정이 제안되었다 (miniBLING). Galbraith et al. (2015)는 TOPAZ와 BLING 그리고 miniBLING의 성능을 비교함으로써 단순화된 형태의 생지화학 모듈이 기존의 복잡한 모델에 비해 성능이 크게 뒤지지 않음을 보였으며 오히려 수치계산량에 있어 장점을 갖음을 제안하였다(그림 28).

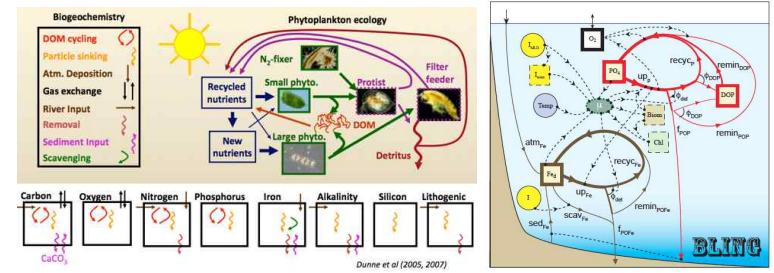


그림 27. 해양생지화학 모듈인 TOPAZ(왼쪽)와 BLING(오른쪽)의 개념도

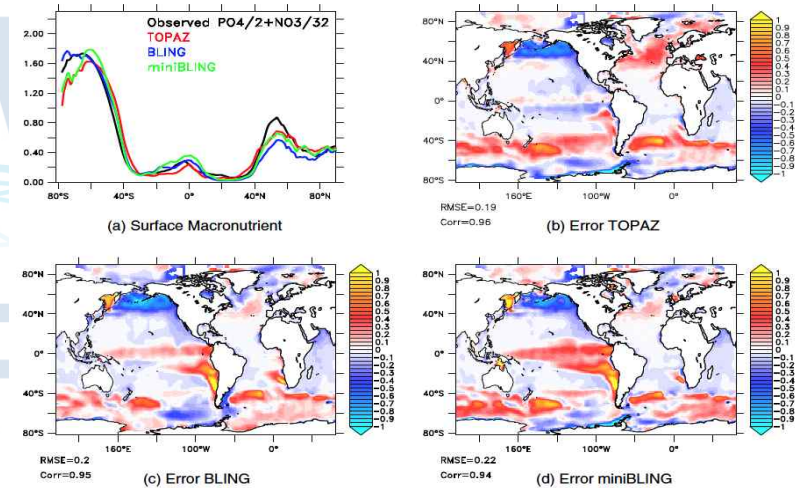


그림 28. 해면 영양염 농도 분포. 관측 [Garcia et al., 2014]과 TOPAZ, BLING, minBLING을 비교함. 단위 μM . Galbraith et al. (2015).

결합 지역기후모델을 개발하기 위해서는 결합자를 통한 해양-대기 모듈의 결합이 필수적이다. 대표적인 결합자로 MCT (Modeling Coupling Toolkit; <http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mct/>) 와 OASIS (<https://verc.enes.org/oasis>) 가 개발되어 있다. MCT가 미국을 중심으로 OASIS 는 유럽을 중심으로 개발된 태생적인 이유 때문에 MCT 는 주로 미국 중심의 모델에 사용된 반면 OASIS 는 유럽 중심의 모

델에 주로 사용되고 있다. MCT는 ACME/CESM, COWAST, WRF/ROMS Hurricane model 등에 사용된 반면, OASIS 는 유럽의 대표적인 해양 모델인 NEMO를 비롯한 다양한 유럽의 모델들을 결합하는데 사용되고 있다. 최근에는 OASIS-MCT가 개발되어 OASIS에 MCT의 기능을 사용할 수 있게 되었다. 이러한 결합자의 발전에 따라 해양-대기 결합 지역기후 모델의 개발이 용이해졌다.

지금까지 극한 기후에 대한 연구는 주로 대기 모델을 중심으로 개발된 기후예측 시스템에 기반해 수행되었다. 최근 전산 자원의 발달과 결합자의 개발로 인하여 해양-대기 결합 지역기후모델을 이용한 지역기후 연구가 활발하게 수행되고 있다. 지역에서 탄소순환에 대한 연구는 아직 미흡하나, TOPAZ 또는 BLING과 같은 해양 생지화학 모듈이 개발되어 지역해에 적용이 가능하다. 해양-대기 결합 지역기후모델의 개발로 인하여 해양-대기 상호 작용에 의한 지역기후 민감도 실험이 가능해졌다. 그러나 아직까지 해양-대기 플럭스는 기존의 전지구 기후모델에 적합하도록 개발되었으며, 지역기후 모델을 위한 해양-대기 플럭스 모듈을 개선할 필요가 있다.

○ 모델을 이용한 극한기상 예측성 동향

단기, 중기 예측의 문제는 주로 대기 초기값 문제로 여겨짐. 중위도 기상 시스템에서 우수한 예측을 생산해 내기 위해 추정되는 한계는 2주이며, 이는 주로 대기 초기 조건에 따른 예측의 민감도 문제 때문임 (Lorenz 1965, 1969). 그러나, 최근 극단적 재해를 초래하는 극한 기상 현상의 경우, 2주 이상의 시간규모를 지니고 발생하는 특징이 있음. 예를 들어, 2010년 한달이상 우크라이나 지역에 40도 이상의 고온이 발생/유지된 러시아 폭염, 최근 북미나 동아시아 지역에 수주 이상 머무르면서 막대한 피해를 초래하고 있는 한파/폭설, 중위도 지역 곳곳에서 출몰하고 있는 수개월 지속되는 가뭄 등이 그 예이다. 이러한 지속시간을 초래하는 극단적 기상/기후 현상에 대한 예측성을 향상시키기 위해서는 극지역의 지면 조건 즉 해빙, 적설 변동과 같은 장주기 요소들의 변동을 반드시 고려하여 준계절 예측이 수행되어야 한다. 특히, 극한 기상의 준계절 예측성이 최근 기후 예측 분야의 주된 관심사로 떠오르고 있는데, 2010년 러시아 열파와 (Matsueda 2011; Schultz 2011; Dole et al. 2011) 2010년 파키스탄 홍수에 (Webster et al. 2011; Lau and Kim 2011) 관한 모델을 이용한 예측 연구들이 수행된 바 있다. 러시아 열파는 9일전까지 예측이 가능하였고, 파키스탄 홍수는 6-8일 전까지 예측 가능하였으며, 두 극한 현상들 모두 이례적으로 강력하고 오랫동안 지속되는 온대성 폐색 사례, 러시아 서부 지역, 카자흐스탄, 중국 북서부 지역, 티벳 고원 지역에 걸친 대규모 로스

비 파동으로 인한 자극, 몬순성 계절내 진동과 관련되어 있었음이 밝혀진 바 있다 (Lau and Kim 2011). 기존에 수행된 준계절 연구들은 결정론적 예측가능성의 한계를 넘어서는 주기에 대한 예측이기에 날씨의 매일매일의 변동성을 예측하는 것이 아니라 모델의 앙상블 평균치와 스프레드 계산을 통해 확률적인 극단적 기상/기후 상태의 평균적 조건이 어느정도 지속될 것인가를 평가하는데 초점이 맞추어져 있었다.

○ 급격한 북극얼음 감소와 한반도 극단적 기상현상 발생에 관한 모델링 연구

극지연구소는 최근 급증하고 있는 중위도 겨울철 이상기후 현상 발생의 근본 원인이 지구 온난화에 따른 북극 해빙면적 감소에 있음을 최초로 밝혀냈다. 동 연구에서는 최근 급격히 줄어들고 있는 북극 해빙 면적 감소로 인해 유례없이 다량의 열과 수증기가 대기 중으로 유입되고 있음에 주목하였으며, 이로 인한 대규모 대기 파동의 교란이 북극의 냉기를 자주 중위도 지역까지 남하시켜 최근 북미/동아시아 지역에 잦은 한파와 폭설을 발생시키고 있음을 입증하였다 (Kim et al. 2014). 동 연구는 Nature Communications 2014년 9월 2일자에 하이라이트 논문으로 선정되어 발표되었다. 기존의 기후 모델링 주류 연구들이 주로 적도 지역과 중위도 지역의 물리 상호작용들을 수치 모델링하여 기후 예측 능력을 향상시키는데 노력해 왔으나, 본 연구에서 명확히 밝힌 바와 같이 북극해의 극히 일부 지역에서의 해빙 면적 감소가 아북극 및 중위도 지역의 대기 순환인 북극 소용돌이를 요동치게 만들 수 있고 이에 의해 지역에 따라 극한 기후현상이 나타난다는 것이 입증되었다. 본 연구는 예측 측면에서 북극의 기후변동이 얼마나 중요한지를 처음으로 제시한 데 그 의의가 있다. 특히, 한반도를 포함한 동아시아 지역의 경우 이러한 아북극 지역의 한대제트 변동에 영향을 매우 민감하게 받는 지역임이 이 연구를 통해 밝혀져 급격히 진행되고 있는 북극의 기후변화에 대한 정확한 이해와 이를 반영한 기후 예측이 한반도 기후변화 대응과 재난방지, 피해 저감 측면에서 반드시 필요한 분야라는 것을 확인시켰다.

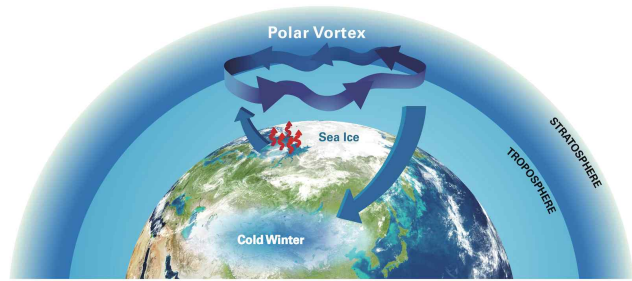


그림 29. 북극 해빙 감소가 동아시아 지역의 극한 한파 발생을 유도하는 과정에 대한 모식도 (Kim et al. 2014, Nature Communications).

제 2절 국내동향

○ 열대서태평양 조사연구는 한국해양과학기술원에서 2006년부터 2014년까지 시행한 ‘북서태평양이 한반도 주변해(대한해협)에 미치는 영향 연구(POSEIDON)’와 ‘통합기후예측을 위한 열대 서태평양 관측’ 사업이 있다. POSEIDON 사업은 선박을 이용한 관측과 더불어 심해계류를 통해 북적도해류 아래에서 흐르고 있는 잠류의 변동성과 아열대반류의 변동성을 확인하는 성과가 있었다(한국해양과학기술원, 2014; Kim et. al. 2014)

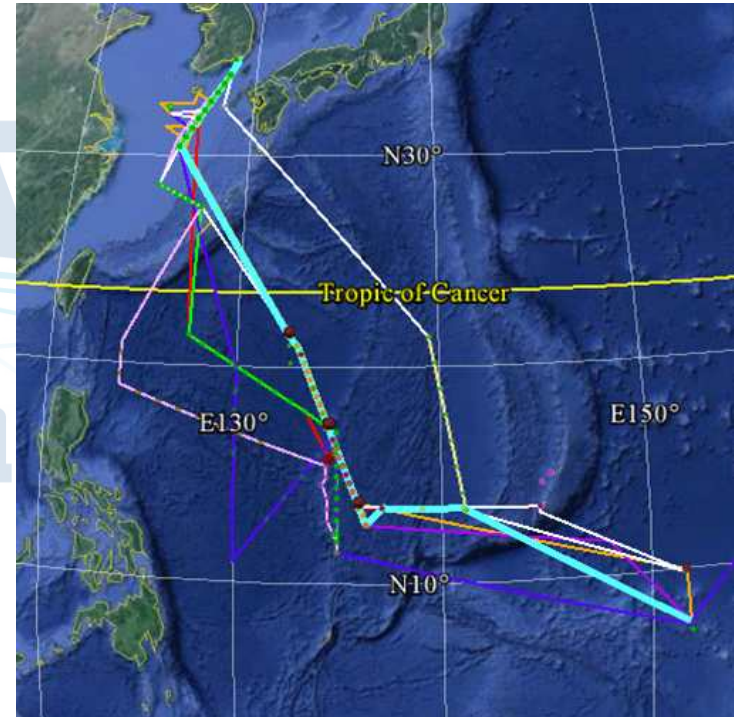


그림 30. POSEIDON 사업의 관측 경로들. 남해와 북적도해류 해역에서 집중 관측이 이루어짐. 3개 정점에서 아표층계류 방법으로 유속을 측정하였고 PIES를 2년간 운영함. 2014년에는 해양-대기 관측을 위한 표층 부이 시스템을 계류하여 3개월간 자료 수신에 성공.

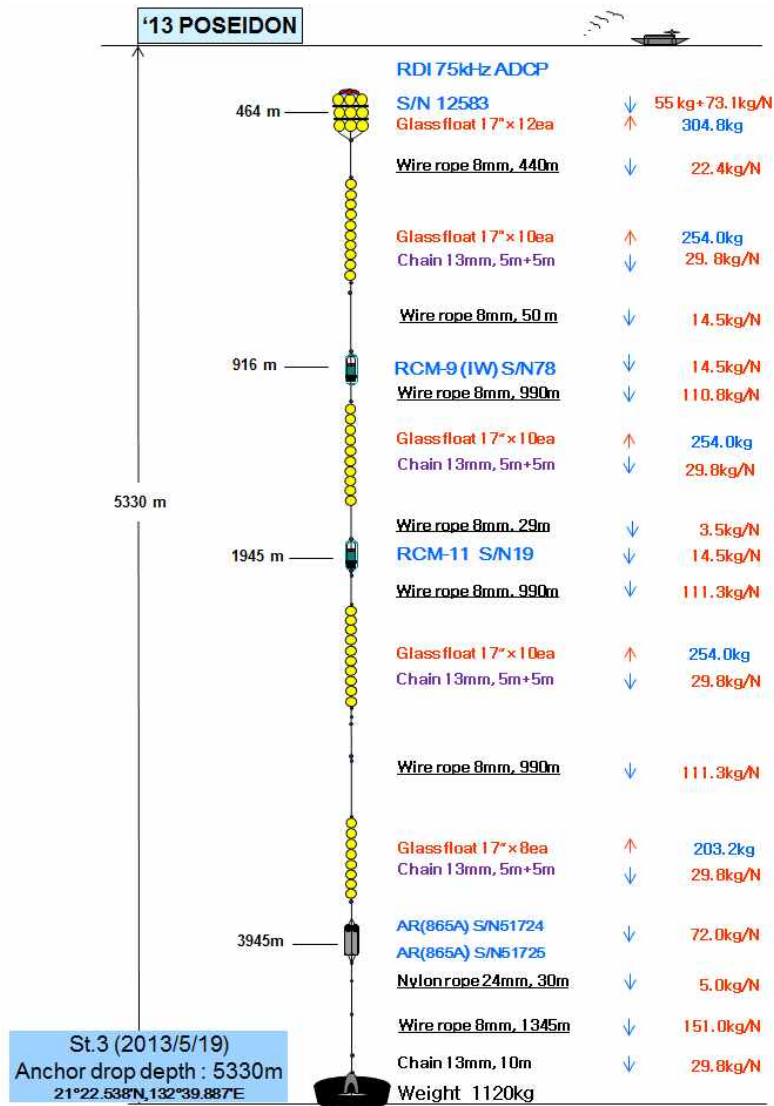


그림 31. 아표층계류 모식도

○ POSEIDON 사업에서 실시한 해양-대기 실시간 모니터링을 위한 부이 시스템(한국 해양과학기술원, 2011)

한국해양과학기술원에서는 북서태평양 열대해역의 해양/기상 변동성을 연구하기 위하여 2010년 5월 22일에 마이크로네시아 축주의 북부 해역 09° 47.43' N, 151° 41.23' E에 설치하여 운영한 경험이 있다.

표층 부이의 구조는 직경 3.5m의 부이체, 센서부, 전원부, 함체부로 구성이 되어 있다. 센서부는 부이 상부에는 기상 하부에는 해양관측 장비들을 장착하였다(표 1 참조).

함체부는 수중의 C-T센서 자료를 수신하는 Inductive Modem, 관측된 자료를 저장 및 처리하는 Datalogger, 위성 송신하는 ARGOS 위성 단말기로 구성되어 있다. 관측된 모든 자료들은 Datalogger 에 10분 간격으로 저장되며, 이 자료들로부터 1시간 간격의 평균 자료를 재생산하여 위성단말기로 보낸다. Datalogger 에는 기본적으로 최근 6시간 동안의 1시간 평균 자료들이 임시로 저장되어 있어서 ARGOS 위성이 부이 해역을 통과할 때, 이 6개의 자료세트가 위성으로 송신된다. 매 송신 시각에 6시간 자료를 송신하는 이유는 ARGOS 위성의 부이 통과시각이 일정하지 않은 것과 통과시간의 길이가 다르므로 인하여 1개의 자료를 보내는 경우 불규칙하게 시간 결핍 포인트가 발생하기 때문이다. 프랑스의 ARGOS 본사에서 수신된 부이 자료는 한국해양연구원의 ftp 서버로 1시간에 한 번씩 전송되어 최종적으로 사용자에게 자료가 전달된다.

표 1. 2010년 POSEIDON 사업의 해양-대기 실시간 모니터링 부이 시스템 요약

작업 내용	세부 내용
실시간 관측	* 기상 - 풍속, 풍향, 기온, 습도, 대기압, 일사량, 강우량 * 해양 - 표층유속, 표층CO ₂ , 수온(5,10,20,50,150,400m), 염분(5,10,20,50,150,400m) 압력(150, 400m)
자료 주기	* 관측 주기 매 10분 간격
자료전송주기	* 매 1시간 평균 자료를 1시간 간격으로 전송
전송방법	* ARGOS-2 시스템 이용(현장에서 프랑스로 전송) * 1회전송시 이전 6시간 자료 전송(통신불량 해소 차원) * FTP 이용 프랑스에서 KORDI로 전송

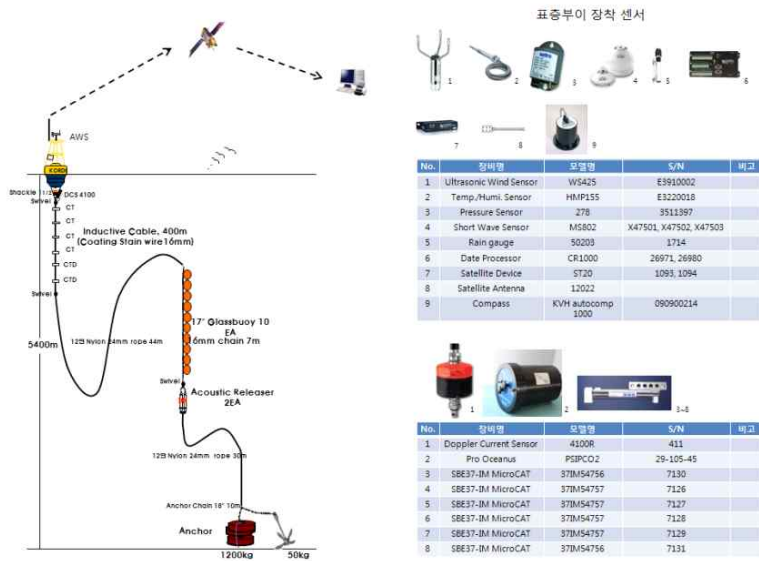


그림 32. 2010년 POSEIDON 사업의 해양-대기 실시간 모니터링 부이 설치 개념도 및 장착된 센서

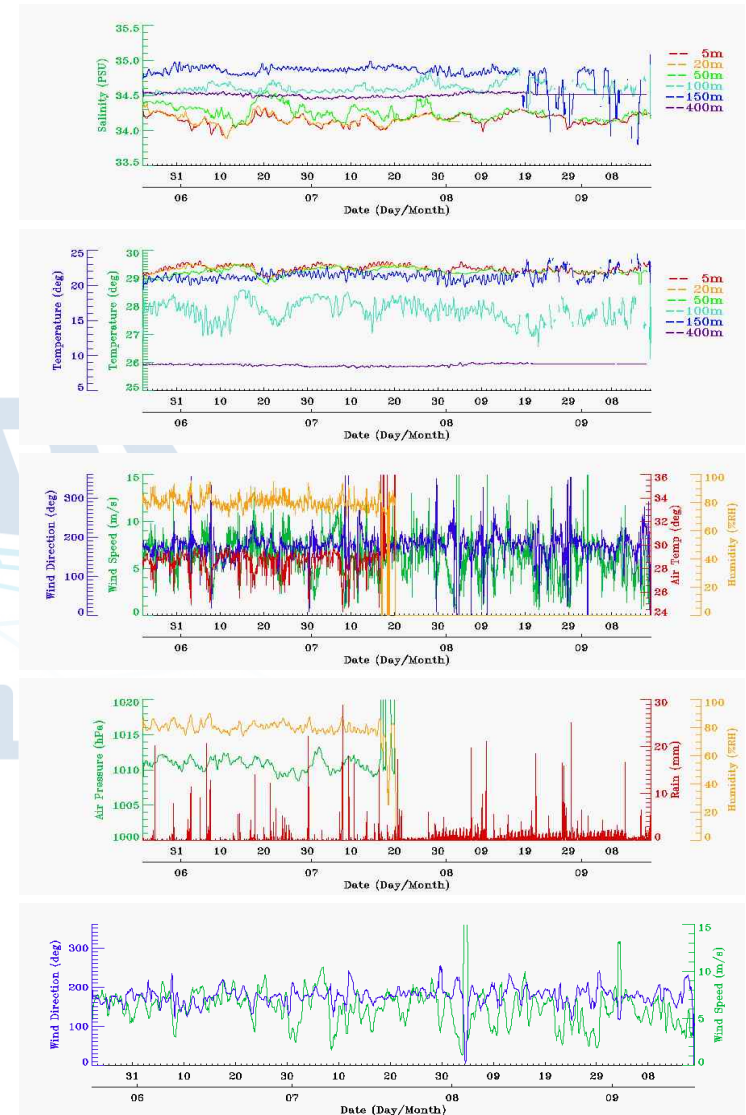


그림 33. 2010년 POSEIDON 사업에서 열대 서태평양에서 해양-대기 실시간 모니터링 부이로부터 관측한 자료 예.

○ 극지연구소에서 서북극해 결빙해역 해양-해빙 물리특성 변화 연구 일환으로 해양 환경 모니터링 계류 시스템 운용을 시도 중이다. 또 동경해양대학교(Tokyo University of Marine Science and Technology)가 극지연구소와 국제협력으로 2012년부터 계류 시스템을 운용 중이다.

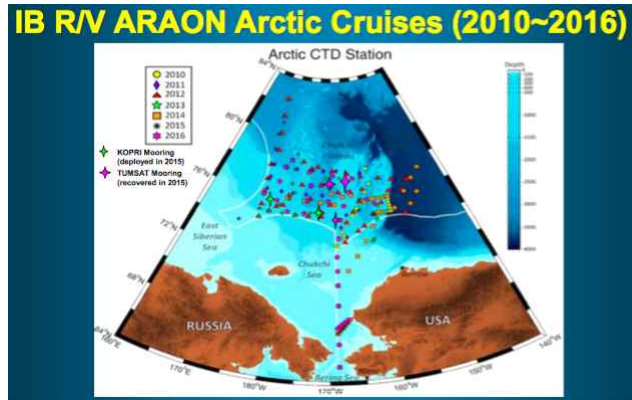


그림 34. 극지연구소와 동경해양대학교의 계류 관측점(녹색, 자주색 별표) 및 CTD 현장관측 정점.

○ Asia CORDEX에 참여하는 5개의 기후모델 (HadGEM3-RA, RegCM4, SNU-MM5, SNU-WRF, YSU-RSM)의 여름철 극한 기온과 극한 강수량에 대한 모의 성능을 평가한 바 있다 (Park et al., 2015). 모델의 평균적인 편향(bias)과 극한 기후의 모의 성능 사이에 상관성이 있음을 보였으며 지역기후모델이 전지구 기후모델에 비해 극한 기후의 모의 성능을 향상시킴을 보였다 (그림 35). 그러나 사용된 모델이 대기 모델에 기반하여 해양-대기 상호 작용을 평가하기에 한계가 있다.

○ 해양-대기 결합 지역기후모델에 대한 연구는 국내에서는 아직 기초적인 연구만 수행되고 있으며, 타기관에서 개발된 모델 (COWAST)을 도입하여 한반도 영역에 적용한 지역기후 연구가 수행된 바 있다.

○ 한국해양과학기술원은 [온난화환경에서 강화되는 태풍해일 (국내독자) 예측기술 실용화 연구(한국과학기술정보연구원 지원)]를 수행하면서 태풍 강도 예측을 위하여 해양

-대기 결합 모형을 개발한 바 있다. 해양은 GFDL MOM5, 대기는 WRF에 기반하고 있으며 결합자는 OASIS-MCT를 이용하였다.

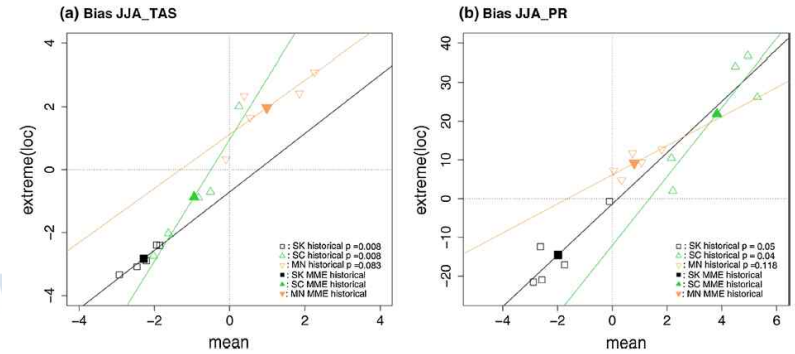


그림 35. 일별 기온(TAS, °C)과 강수량 (PR, mm day⁻¹)에 대한 평균 평향에 대한 극값 편향의 상관관계. 5개의 개발 모델 결과(열린 도형)에 대해 다중 모델 앙상블 평균값(질게 칠한 도형)을 제시함. Park et al. (2015).

○ 한국해양과학기술원은 [한반도 해역 생태계 미래변화예측 I] 과제를 통해 해양순환 모형(POLCOMS)과 생지화학 모형(ERSEM)을 결합한 지역해양시스템 모형을 우리나라 주변해역에 수립하여, 물리-생지화학 변화를 동시에 고려한 하위생태계 변동성 및 미래 예측 연구를 수행하고 있으나, 지역 대기모형과의 결합은 아직 시도되지 못했다.

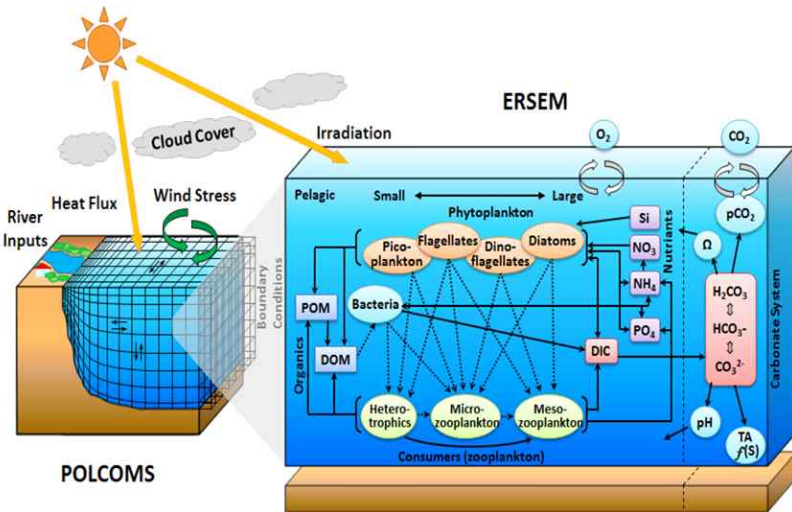


그림 36. 한국해양과학기술원에서 연구 중인 물리-생지화학 결합 지역해양시스템 모형 모식도

제 3 장 기획과제 개요

○ 극지연구소의 경우, 극지의 급격한 기후변화로 초래된 제트기류와 극 소용돌이 (Polar Vortex)의 흐름 변화를 예측하는 모델을 자체 개발중*에 있으며, 관련 분야 학술적 우수성과 달성과 극지 기인 기후재난 예측 기반 구축 등 가시적 성과를 창출하고 있으나, 제한된 전산자원 활용으로 인하여 연구 파급효과는 제한적인 상황이다.

*과제명: 극지 기후변화/기상재해 예측시스템(KPOPS)의 개발 및 활용연구 (2016-2019)

제 1 절 기획과제 개요

전지구 기후변화 가속화로 인해 우리나라가 속한 동아시아 및 한반도 지역의 기후에 미치는 중저위도 열대 해역과 북극 해역의 영향이 커지고 있으며, 극한 기후 및 해양 현상이 급증함에 따라 사회적 비용의 증가가 심화되고 있다. 기후변화에 적응하고 그에 따른 피해를 저감하기 위해서는 기후변화 국제 감시망의 구축과 이를 활용한 기후 예측 시스템의 구축이 시급하며 대규모 관측기술, 수치모델링 기술, 자료의 가공기술 등 기초 요소기술의 개발이 필요하다. 본 기획연구에서는 기후변화 국제 감시망 구축의 요소기술을 2 부분으로 구분하여 과제를 기획하였다.

- 아북극-동아시아-아열대서태평양 통합 관측 연구
- 아북극-동아시아-아열대서태평양 해양-해빙-대기 결합 모델 구축 및 기후예측 시스템 구축

1. 아북극-동아시아-아열대서태평양 통합 관측 연구

기후변화 감시 및 예측에 활용하기 위한 기후정보 서비스는 실시간으로 수행되어야 한다. 육상에서의 기상관측은 실시간 서비스가 용이하지만 대양에서 얻어진 자료는 송수선에 한계가 있어왔다. 최근의 원격 탐사 기술인 인공위성 자료의 활용이 증가하고 있지만 주로 해수면의 상태만을 제공할 수 있어 기후 감시에 중요한 변수인 해양의 열용량 및 해양-대기 플럭스 교환량을 파악하기에는 한계가 있어 왔다. 또한 정보의 종류도 수온, 해상 상태, 해상풍, 해면고도 및 해색 등 그 범위가 제한적이다. 현재의 기술로는 기후 감시를 위해서는 현장 관측이 유일한 방법이다. 본 기획에서는 해양-대기 플럭스를 포함한 관측 요소의 다양화, 전 수층에서의 자료 획득 및 지속 반복적인 관측을 전제로 부이를 이용한 무인 관측망 구축을 제시하였다.

2. 아북극-동아시아-아열대서태평양 해양-해빙-대기 결합 모델 개발 및 기후예측 시스템 구축

현장 관측에 의한 자료의 확보는 정확도는 높지만 분해능(관측 영역)에 한계가 있어 기후 역학을 규명하는데는 한계가 있다. 열대 서태평양과 북극 해역의 기후변화에 따른 한반도 기후변동성을 규명하고 예측하기 위해서는 해양-해빙-대기 결합 지역 기후모델을 활용할 필요가 있다. 또한 기본적으로 수치모델을 이용한 예보는 초기값 문제이다. 예보모델을 위한 초기값을 결정하는 것은 매우 중요하면서도 복잡한 문제이다. 기후예측 시스템을 위해서도 기후 관측 자료로부터 기후모델

을 위한 최적의 기후초기장을 결정하는 자료동화 시스템의 구축이 요구된다. 최적의 기후초기장으로부터 기후예측 시스템을 구동할 수 있게 된다. 본 기획에서는 북극-동아시아-서태평양 기후예측을 위한 해양-해빙-대기 결합 모델의 구축과 기후예측 시스템 구축을 위한 연구를 제시하였다.

제 2 절 기후변화 감시를 위한 아북극-동아시아-아열대서태평양 통합 관측망 개요

○ 열대 서태평양 해양-기상 실시간 모니터링 관측부이 설치: 열대 서태평양은 일본 JAMSTEC에서 TRITON 부이를 운영하다가 중단된 해역이어서 관측부이 설치가 매우 절실한 해역이다. 현재 열대태평양 관측을 위한 부이 배열을 TPOS 2020 사업으로 연구를 진행 중이다. 부이 설치 위치 및 관측 장비 구성은 TPOS 2020의 권고사항을 따르는 것이 국제공동연구가 용이하며 국제사회의 해양 분야에 기여할 수 있다. 2016년 1차 보고서의 권고사항은 설치 위치를 적도수렴대, 워플경계, 서안경계 등으로 연구하고자 하는 해역과 일치한다. 관측항목으로는 기존의 해양-기상 관측 항목에 추가로 생지화학 분야 장비를 장착할 것을 권고하고 있다. 본 연구에서는 열대 워플 경계역에서 해양-대기 종합관측 부이 설치를 위한 연구를 수행하여 Super Station 구축의 기반을 마련한다. 또한 열대 해역으로부터 발원하는 북적도 해류와 중규모 소용돌이 등에 의한 열 수송을 파악하기 위하여 현장 조사를 수행한다.

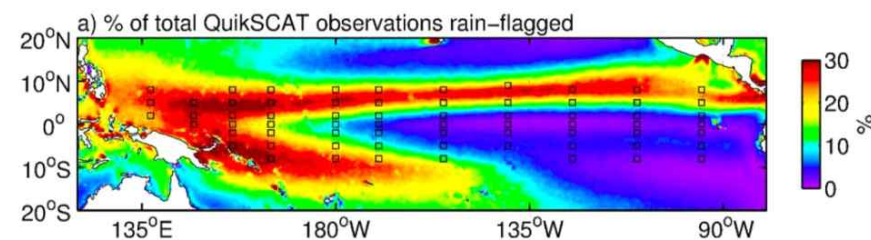


그림 37. 1999년 8월부터 2009년 7월까지 10년간 QuikSCAT 위성으로 관측한 강우 빈도수. 위성관측 자료를 보정하기 위해 장비를 이용한 직접관측이 요구됨.

○ 베링해 서쪽 해역에 있는 도넛홀로 알려진 해역은 미국과 러시아 배타적경제수역으로 둘러싸인 수심 2000미터 넘는 공해로, 태평양의 열과 염이 해류를 따라 북극으로 흘러 들어가는 해역 중 하나이다. 베링해의 열과 염의 이동 양상은 북극해의 해양 환경, 특히 해빙 분포를 예측하는데 중요하며(Screen and Francis, 2016), 척치해 해빙 분포와 함께 우리나라를 포함하는 중위권 기후에도 장기적으로 영향을 주는 것으로 알려졌다(Yeo et al. 2014).



그림 38. 미국과 러시아 배타적경제수역에 의해 둘러 싸여 있는 베링공해(international water) 위치(Flanders Marine Institute)

따라서 이 해역에 대한 수온, 염분, 해류, 기상 등 물리 변수들에 대한 계절변동과 수년 주기 변동 장기 모니터링은 북극해 해양환경과 해빙변화 이해, 예측과 동시에 우리나라 기후 연구에 필요한 자료를 제공할 수 있다. 또 이 해역은 어업자원이 풍부한 해역으로 우리나라는 미국해양대기청(NOAA) 알래스카 수산과학센터와 공동으로 1998년부터 2007년까지 총 6회에 걸쳐 어업자원에 대해 조사 한 바 있고 향후 베링공해 조업국과 함께 생물생산력에 대해 지속적으로 모니터링 해야 할 해역이다.

○ 블로킹으로 인한 대기 흐름의 정체는 대류권 상층과 성층권 하부 흐름에 초기 시그널이 나타난다. 기상예측에서 대류권-성층권 경계 부근은 여러 성장이 가장 빠른 곳으로 상층 관측을 사용하여 초기에러를 줄여야 예측성을 높일 수 있으므로 (Hakim, 2005), 대류권-성층권의 기상 연직 프로파일에 대한 관측은 필수적이다. 공해상의 대기 상층 기상요소(온도, 지위고도, 습도, 풍향, 풍속)의 장기 모니터링은 위성 원격탐사를 통해서만 가능하나 직접 관측이 아닌 원격탐사는 연직 해상도가 충분치 않고 산출값의 불확실성이 있어 한계가 있다. 따라서 공해상 선박에서 라디오존데 비양을 통한 성층권-대류권의 직

접 관측자료를 확보하여 위성자료의 비교 검증, 예측모델 자료동화에 사용할 필요성이 있다.

제 3 절 아북극-동아시아-아열대서태평양 해양-해빙-대기 결합 모델 개발 및 기후예측 시스템 구축

○ 최근 국제 사회는 지역별 미래 기후 전망 및 극한 기후의 변화 경향 등 지역기후 정보 산출을 위한 노력을 경주하고 있으며, 기후변화 대응과 관련하여 위험한 수준의 기후변화 크기의 평가에 관심을 집중하고 있다. 또한, 기후변화에 관한 과학적 결과들을 바탕으로 한 다양한 부문별, 지역별 영향 및 취약성 평가와 함께 사회경제적 통합 평가 필요성이 꾸준히 제기되고 있다. 따라서 한반도를 중심으로 한 다양한 지역 기후변화 시나리오의 생산과 평가는 부문별, 지역별 기후변화 영향과 취약성을 평가하기 위한 기초 자료의 확보와 직결되며, 한편으로는 온실 기체 감축과 관련한 국제 협상에서의 중요한 과학적 근거로 국가 장기 정책 수립에 필수적이다(홍 등, 2011).

지역기후모델(Regional Climate Coupled Model, RCCM)은 전지구 기후시스템 모델로는 제시할 수 없는 보다 상세한 지역기후에 대한 예측 정보를 생산할 수 있을 것으로 기대된다. 상세 지역기후 정보들은 지역적인 극한 기후 현상을 재현하고 예측함으로써 향후 기후변화 적응 정책 등에 활용될 수 있을 것이다. 또한 지역적인 극한 기후 예측을 위한 기술적인 발전에 기여할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 한반도를 포함하여 북극에서부터 열대 태평양을 포괄하는 해양-해빙-대기 결합 모델을 수립하고 예측 시스템의 구축을 제안한다. 이에 기반하여 한반도 기후 예측 시스템을 구축하고 고도화하는데 기여할 수 있을 것이다.



제 4 장 기획과제 내용

제1절 아북극-동아시아-아열대서태평양 기후변화 국제감시망 구축

1. 북극해 해양-해빙-기상 종합 관측 연구



그림 39. 북극해 관측프로그램의 항적도 및 계획도

- 베링해 도넛홀 장기계류 및 현장관측을 통한 태평양과 북극해 사이 길목해역의 기후 변동성 모니터링(수온, 염분, 해류, 기상 관측)
 - 태평양 유입수 경로 및 열량/담수량 계산과 계절 및 장기변동성 조사
 - 해양 표층에서 해양-대기 열교환량 등 관측을 통해 해양-대기 상호작용 조사
 - 베링해의 해양변동이 북극해 및 중위도 해역 기후변동에 미치는 영향 조사

- 해양 물리-화학-생물 변동 연관성 조사(엽록소 농도와 광량, 질산염, 이산화탄소 등 관측)
 - 베링해 도넛홀은 베링해 내에서도 생물학적 생산성이 높은 해역이므로 기초생산자의 생물량 변화와 계절에 따른 광조건 변화 및 기작 조사
 - 베링해 길목해역에 대한 해양-대기 종합관측 부이를 운용하여 수온, 염분 및 수심별 해류 양상을 조사하고, 열역학 과정 등을 포함한 해양-대기 상호작용을 조사
 - 척치해 관측 프로그램과 연계하여 북극해-베링해 사이의 물리적 상호관계를 이해하고, 북극해와 베링해 변동이 우리나라를 포함하는 중위도 해역에 미치는 영향 파악

2. 열대서태평양 해양-기상 종합관측 프로그램

필수적으로 장비를 장착하여 관측할 항목은 대기의 풍향, 풍속, 기온, 기압, 습도, 강우량, 장파복사, 단파복사와 해양의 수층별 수온, 염분, 연직 유속 분포 등이다. 측정 간격은 일변화를 파악할 수 있도록 1시간 간격으로 하며 실시간으로 자료가 전송되도록 한다. 설치 위치는 12° N, 131° E로써 열대수렴구역에 해당하며 북적도해류대역으로 태평양의 서안경계류 형성 근원해역에 해당한다.

○ 관측 항목

- 대기 기본 관측 항목 및 관측고도: 풍향·풍속(4 m), 장파·단파복사(3.5 m), 강우량(3.5 m), 기온·기압·습도(3 m)
- 해양 기본 관측 항목 및 관측 수심: 표층수온·염분(1 m), 수온(20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 180, 300, 500 m) 압력(300, 500 m), 표층부근의 유속프로파일
- 추가 장착 항목: 해색, 파고, O2

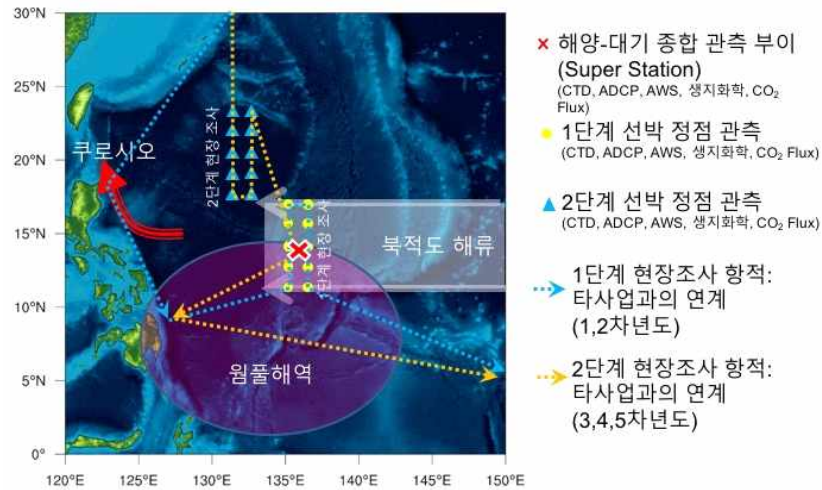




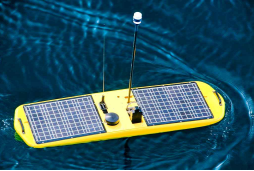
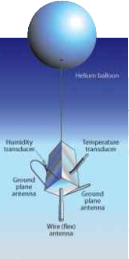


그림 40. 열대 서태평양 관측 프로그램 항적 및 계획도

- 열대 임폴 경계역에서 Wave Glider 를 활용한 해양-대기 자동관측망을 운용하여 수온, 염분 및 수심별 해류 양상을 조사하고, 열역학 과정 등을 포함한 해양-대기 상호작용을 조사한다.
- 북적도 해류의 물리적 특성을 조사하기 위하여 선박을 이용한 수온, 염분, 산소 등을 관측한다.

○ 관측 장비

3. 라디오존데 비양을 통한 상층기상 관측 조사

- 대류권-성층권 하부에 걸친 지위고도, 온도, 습도, 풍향, 풍속 프로파일의 현장 관측자료 확보하여 대기모델예측의 초기조건 구성을 위한 추가자료와 위성자료의 해상 프로파일 검증자료로 활용한다.
- 대기 프로파일 자료는 해수 프로파일 관측, 선상 기상 및 에너지 플럭스 관측과 종합하여 대기-해양 열교환 상호작용에 의한 중위도 해양 상층대기 반응을 연구하는데 활용한다.

<p>아북극 종합관측부이</p> 	<p>종합관측부이 개념도 및 관측 항목</p>  <ol style="list-style-type: none"> 1. 해양 센서 <ul style="list-style-type: none"> • 수온 • 염분 • 해류 • 파랑 2. 기상센서 <ul style="list-style-type: none"> • 기온 • 습도 • 기압 • 복사열 • 풍향-풍속
<p>Wave Glider</p>  <p>관측 항목 : 기상(기온, 기압, 바람 등), 해양(수온, 염분, 해류 등) 관측 위치 : 원격 조정</p>	<p>라디오존데</p>  <p>관측항목 : 기압, 고도, 기온, 이슬점온도, 풍향, 풍속 관측위치 : 선박 항로상</p>
<p>CTD</p>  <p>관측 항목 : 수온, 염분 등 관측 위치 : 정점 관측점</p>	<p>ADCP</p>  <p>관측 항목 : 유속, 음향 잔향음 관측 위치 : 선박 항로상</p>

제2절 한반도 중심 고해상도 지역기후 예측시스템 구축

1. 해양-해빙-대기 결합 지역기후 모델 개발²⁾

- 지역 대기 모델 수립
 - WRF(Weather Research and Forecasting Model)에 기반, 코드의 접근성과 활용 톨의 편이성 등을 고려한다.
- 지역 해양-해빙순환 모델 수립
 - GFDL MOM5, ROMS 등을 적용할 수 있다.
 - 한반도 주변의 순환장에 대한 모의 성능을 고려해야 할 때, ROMS는 황동중국해 순환을 모의하는데 장점이 있는 반면, MOM5는 태평양 및 동해 순환을 모의하는데 장점을 가지고 있다.
 - GFDL MOM5에는 해빙 모델인 CICE 모델이 접합되어 있으며 이를 활용하여 해양-해빙 모델을 구축할 수 있다.
- 해양-해빙-대기 결합자
 - OASIS-MCT를 사용하는 것이 현실적이다. 해양-대기 플럭스 교환과 병렬 처리에 있어서 효율적이다.
 - 한국해양과학기술원에서 개발한 GFDL MOM5-WRF 결합 모델을 해양-대기 결합 지역기후모델로 활용할 수 있다.(그림 41).

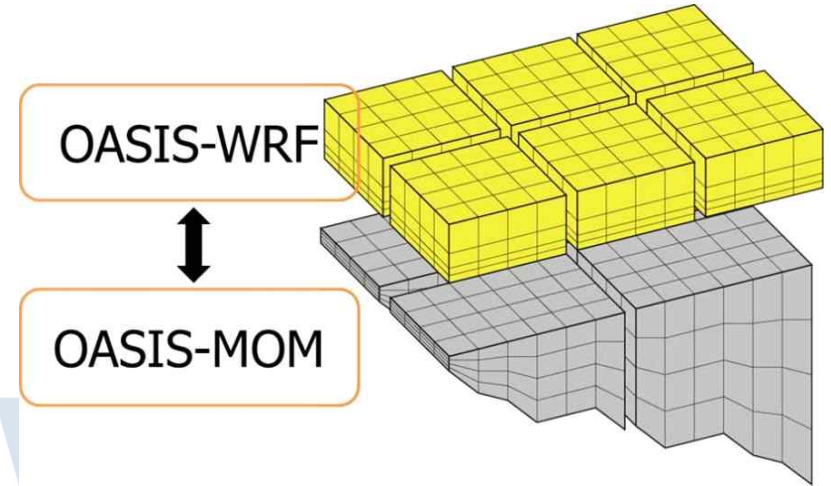


그림 41. 한국해양과학기술원 해양-대기 결합모델의 개념도

2. 해양-대기 상호 작용 모수화 방안 연구

- 해양 혼합층 방안 개선
 - 해양 혼합층 모델은 해양 상층부에서 해양의 수직혼합을 모수화하는 방안으로서 해양순환 및 기후모델의 성능을 좌우하는 주요한 요소이다.
 - 해양에서 랑뮈르 순환은 바람에 의해 수십 m 규모의 수직 순환을 유도하며 이는 해양 혼합층 내에서 수직 혼합을 강화하는 효과가 있다 (그림 42). Noh et al. (2015)는 해양에서 바람에 의해 발생하는 랑뮈르 순환을 모수화하는 방안을 제안하였으며 해면 수온과 혼합층의 깊이 등의 모의를 개선할 수 있음을 보였다. Mixing length scale (l_0)을 랑뮈르 순환의 강도(La)에 따라 모수화한다.

$$l_0 = \frac{\kappa \Gamma (z + z_0)}{1 + \kappa \Gamma (z + z_0) / h}$$

$$\text{with } \Gamma = 1 + ALa^{-2}$$

2) “고품질 해양-대기 플럭스 산정 및 지역기후 모형 개발 기획(2016)” 보고서의 지역기후모델 분야를 발췌하여 정리하였음.

○ 해양, 대기 대류 모수화 방안 개선

- 해양과 대기의 대류 현상은 해면의 열속 및 운동속과 더불어 순환을 좌우하는 주요한 현상이다. 해양과 대기 대류 모수화 방안에 대한 개선이 요구된다.
- 해양에서 대류 환경을 모의하기 위한 일반적인 접근 방식으로 convective adjustment scheme이 많이 사용되나 대류 현상을 모의하기보다는 수직 혼합을 과도하게 처방함으로써 불안정성을 해소하는 방안이다.
- 대류 현상을 모의하기 위해 plume convection scheme 등이 제안되어 있으나(Kim and Stossel, 2001), 대류의 크기 및 강도에 대한 현실적인 고려가 필요하다.

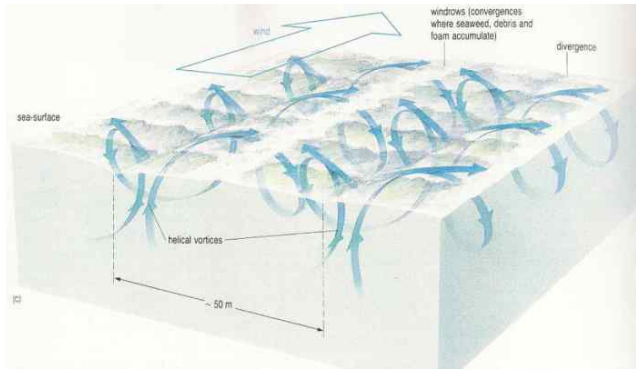


그림 42. 랑뮈르 순환에 대한 개념도

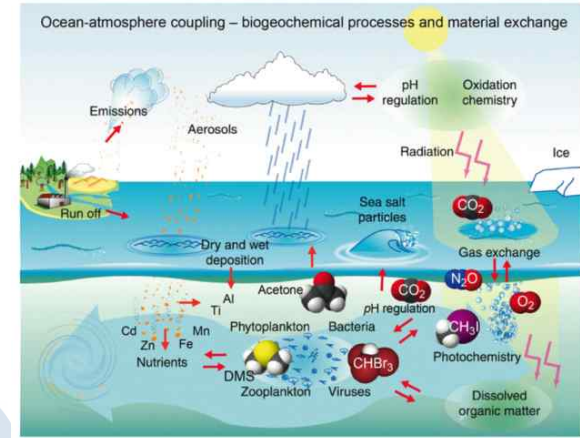


그림 43. 해양-대기 생지화학 과정과 물질 교환 모식도 (GEOMAR)

3. 지역 탄소순환 모의

○ 해양 생지화학 과정 접합

- 지역해 탄소 플럭스는 연안 해양 역학, 해양-대기 상호 작용 그리고 해양의 생지화학 과정에 크게 영향을 받는다 (그림 43). 이를 진단하고 예측하기 위해서 해양 생지화학 과정의 접합이 필요하다.
- TOPAZ, BLING 등을 적용할 수 있다. 각 생지화학 모델 별로 전산 자원의 요구량 및 성능에서 차이가 있으며 지역해 기후모델에서의 성능을 평가할 필요가 있다.
- 생지화학 모델의 성능을 향상시키기 위한 매개변수 조정 과정이 요구된다. 기존 관측 자료 분석 또는 자료동화 기법 적용을 통한 최적 변수 추정이 가능하다.

○ 해양-대기 탄소 플럭스 모수화 개선

- 불용성 기체인 이산화탄소의 해양-대기 교환에 여러 해양 현상들(wave breaking, turbulence, sea spray, 등)에 의해 영향을 받는다 (그림 44).
- 해양-대기 기체 교환에 영향을 주는 해양 현상들 (wave breaking, Langmuir circulation, sea spray 등)이 대부분 고려되고 있지 않다.
- 해양-대기 물질 플럭스(C)를 계산할 때 일반적으로 Gas transfer coefficient(Dc)를 사용함. 대부분의 수치모델에서 Dc를 상수로 처방하며 지역적인 특성을 고려할 수 없다.
- 본 연구를 통해 얻어지는 관측자료를 기반으로 아래 식과 같이 Dc에 대한 추정식을 다시 설계할 수 있을 것이며 지역해 특성을 고려한 모수화 방안을 구축할 수 있을 것이다.

$$C = \rho_a c_p \overline{w'c'} = D_c U_z (C_z - C_0) \quad (\text{Garbe et al., 2014})$$

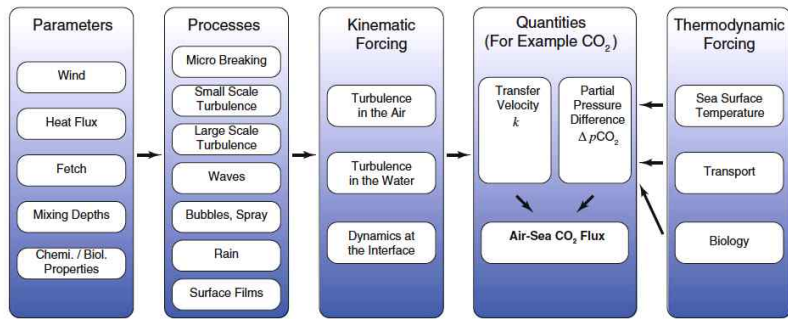


그림 44. 해양-대기 이산화탄소 플럭스에 영향을 주는 요소들에 대한 개념도. Garbe et al. (2014).

4. 고해상도 지역기후 예측 시스템

○ 해양-해빙 자료동화 기법 개발

기후예측 시스템을 위해서도 기후 관측 자료로부터 기후모델을 위한 최적의 기후초기장을 결정하는 자료동화 시스템의 구축이 요구된다. 최적의 기후초기장으로부터 기후예측 시스템을 구동할 수 있게 된다. 한국해양과학기술원에서는 앙상블 칼만필터 기법, 앙상블 Optimal Interpolation 그리고 Optimal Interpolation 에 기반한 해양자료동화 모듈을 개발해오고 있다. 고해상도의 지역기후 모델에 자료동화 기법을 적용하기 위해서는 전산자원을 고려하여 Ensemble Optimal Interpolation을 적용하는 것이 현실적일 것이다.

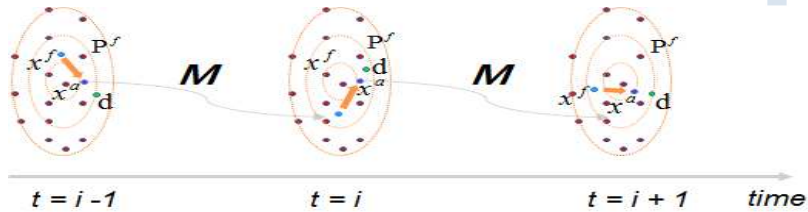


그림 45. Ensemble Optimal Interpolation 의 개념도. 적색, 하늘색, 청색 그리고 녹색 점들은 각각 앙상블 멤버들, 예측장, 분석장 그리고 관측을 나타내며 적색점들로 표시된 앙상블 멤버들이 시간적으로 변하지 않는 것이 Ensemble Kalman Filter와는 다른 특징임.

○ 북극-동아시아-서태평양 지역기후 예측 시스템

지역기후 모델을 구동하기 위해서는 개방경계조건을 입력해야 한다. 한국해양과학기술원에서는 전지구 지구시스템 모형을 적용한 기후예측 시스템을 개발해오고 있으며(그림 46) 이를 개방경계조건으로 활용할 것이다. 지역 기후를 모의하기 위해서는 중규모 해양-대기 현상에 대한 모의 성능을 향상시킬 필요가 있다. 이를 위해 고해상도의 모델을 적용할 필요가 있다. 이를 위해서 북태평양 지역 기후모델을 수립하여 북서태평양과 북극 해역을 아우르는 예측 시스템을 구성할 수 있으며 또는 북서태평양과 북극해역을 분리한 독립적인 시스템을 구축할 수 있다 (그림 47). 전산 자원 등을 고려한 전략적인 선택이 필요하다.

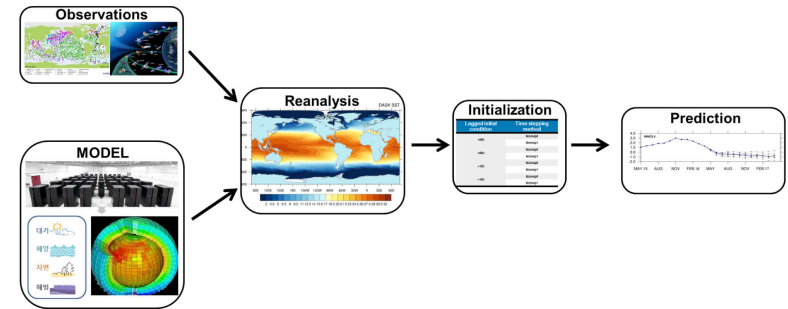


그림 46. 한국해양과학기술원의 전지구 기후예측 시스템 개념도

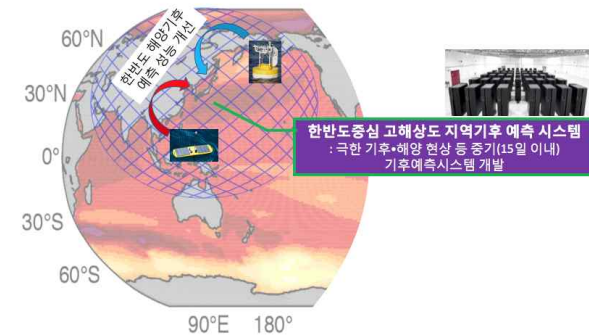


그림 47. 한반도중심 고해상도 지역기후 예측 시스템 개념도

○ 아북극-아열대서태평양 종합관측망 생산 자료 활용을 통한 대기경계층 모수화 개선

대기-해양 경계에서 에너지 및 물질 교환에 관한 해상 관측 자료는 대기-해양 접합 모델의 물리과정 개발에 있어 매우 중요하다. 그중에서도 대기-해양 접점에서 열속, 잠열속의 정확한 관측과 모델 검증 활용이 필수적이다. 대기-해양 상호작용은 특히 태풍 및 폭풍우가 발생한 지역에서 크게 활성화되어 많은 양의 에너지 교환이 일어나게 되며, 따라서 이러한 악천후 발생 시기에서 에너지 속들의 정확한 관측치의 획득은 무엇보다 중요하다. 그러나, 이러한 악천후 시기는 대부분의 해양/기상 관측 장비가 정상 작동하기 어려운 환경이어서 자료 획득에 큰 어려움이 존재한다. 본 연구에서 구축할 종합관측망의 위치 선정이 무엇보다 중요한데 가능한 이러한 에너지 교환이 큰 지역으로서 종합관측망의 운영 안정성이 만족되는 위치에 설치할 예정이며, 이를 통해 획득된 자료는 지역규모 대기-해양 접합모델의 대기경계층 모수화 및 에너지속 개선 연구에 투입될 예정이다.

제3절 추진체계 및 연차별 로드맵

1. 국제협력추진

○ OceanSITES : 고품질의 장기간 고분해능(시간) 고정형 해양 시계열 관측 자료의 수집과 제공 및 교류증진을 위한 국제 네트워크

1999년 이래 계류 및 연구선 기반 연구를 위한 자료와 비용을 공유해왔으며, 오늘날 약 30개의 표층과 수중 계류선 배열으로 구성하게 되었으며, 일부는 인공위성을 통해 실시간 자료 접근이 가능해졌다. OceanSITES 와의 네트워크 구축으로 종합관측체계의 수립과 원활한 운용을 위한 협력관계를 구축할 것이다.

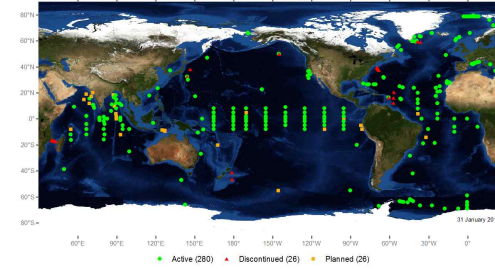


그림 48. OceanSITES를 통해 공개된 종합관측부 현황

○ 열대태평양관측체계 2020(TPOS2020, Tropical Pacific Observing System 2020)

'14년 미국, 일본, 중국, 유럽 주도로 열대계류부표체계의 개량 및 대체를 위한 구성된 국제협력 프로그램으로 한국해양과학기술원을 포함하여 한국인 과학자들도 참여하고 있다.

아열대서태평양 기후 감시망을 그동안 일본의 TRITON 시스템이 담당해왔으나 현재 대부분 유실되거나 철수되었다 (그림 49). 향후 소규모로 재설치 계획을 갖고 있으나 자료의 공백이 클 수 밖에 없다.

현재 국제협력 프로그램인 TPOS2020에서 열대태평양 기후감시망의 재편을 논의하는 중에 있으며 한국의 역할을 요구받고 있다. 2016년에 5천톤급 대형조사선인 이사부호가 취항하면서 미국 해양기상청 (NOAA)로부터 열대태평양 관측망의 일부를 담당해 달라는 요청을 받고 있다. 이러한 상황에서 일본의 역할이 축소된 지금 한국이 필요한 아열대서태평양에 기후감시망을 구축한다면 국익과 국제사회의 기대에 동시에 부응할 수 있는 기회가 될 것이다.

TPOS 2020 Tropical Pacific Observing System

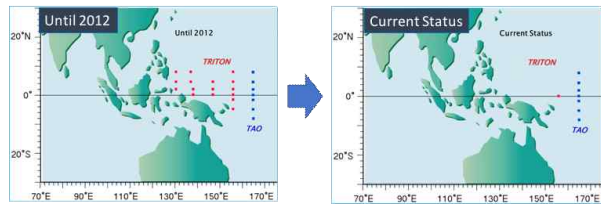
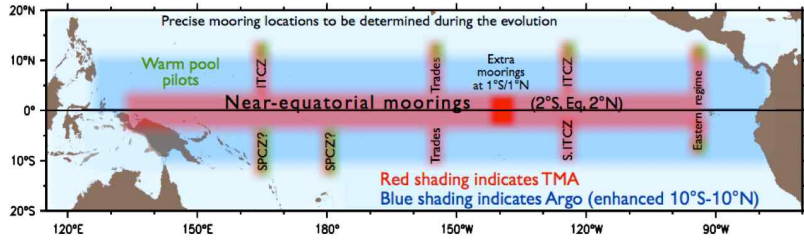


그림 49. TPOS2020에서 제안하는 열대태평양 관측체계 개념도 (위)와 열대태평양 관측체계의 현황 (아래)

○ YOPP (Year Of Polar Prediction)

급격한 기후변화를 겪고 있는 북극과 남극에 대한 예측시스템을 구축하고자 하는 관측과 모델링 분야의 국제적 그리고 다학제적 네트워크이다. 극지연구소는 북극해에서 라디오존데 비양과 이의 예측 활용을 통해 YOPP 미션에 참여하고 있으며, 북극해와 마찬가지로 북태평양의 아북극해 해상 지역도 상층대기 프로파일 관측이 희소하여 본과제와의 협력을 통해 보다 양질의 자료를 확보할 수 있을 것으로 기대한다. 북태평양의 아북극해 해상 지역은 극한기상의 원인인 저지고기압(블로킹) 발달의 핵심 영역이므로 이 지역으로의 관측 확대는 저지고기압 예측성 향상에 도움이 될 수 있다.

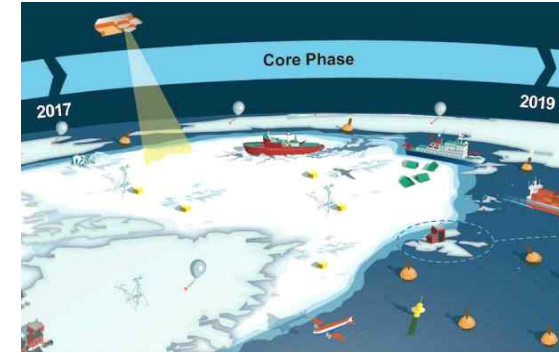


그림 50. Year Of Polar Prediction 프로그램의 개념도

○ 일본 극지연구소(NIPR)와의 협력

일본 극지연구소는 연구선 미라이호의 북극연구항해(8월말~10월 중순)에서 라디오존데 비양을 통한 상층대기 관측을 꾸준히 수행하고 있으며, 북극으로 가는 중 북태평양과 아북극해에서도 라디오존데 비양을 수행하고 있다. 아라온호의 연구항해는 미라이호보다 앞서 진행되므로 두 연구선의 자료를 공동 활용하면 보다 긴 기간의 관측자료를 확보할 수 있다.

○ 종합관측부이 개발을 위한 미국 WHOI 연구소와의 협력

본과제를 통해 종합관측부이의 선진기술을 보유한 미국 우즈홀로부터 부이관측 기술을 도입할 예정이다. 또한 본과제에서 제안하는 지역은 미국의 기후에서 영향을 미치는 지역이므로 한미 협력과제로 추진을 협의하고 있다.

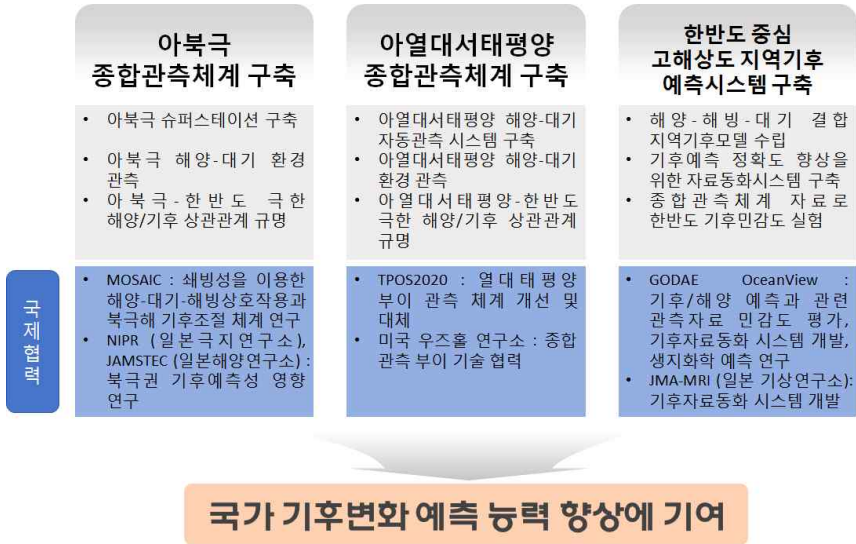


그림 51. 요소기술별 국제협력 관계 개략도

2. 추진전략

- 한국해양과학기술원과 극지연구소의 대형 인프라 시설과 모델링 역량을 공동 활용하여 북극 해역과 중저위도 관측 대상과 모델링 수요를 상시 접합시키고 조율함
- 대양 및 극지 관측은 학문적 및 현업적으로 필수적인 기반 기술로 인식되고 있으나 막대한 자원과 인프라가 소요되기 때문에 개별 국가의 역량으로는 접근하기 어려운 점이 있음. 다양한 국제 협력 관계를 통해 통합적인 국제 기후감시망을 구축하는데 기여하면서도 한국에 필요한 자료를 확보하기 위해 협업할 것임
- 동아시아 기후예측시스템은 한국 뿐만 아니라 일본에서도 관심을 갖는 분야임. 아북극에서 동아시아 그리고 아열대서태평양까지 아우르는 고해상도 지역기후예측 시스템을 구축하기 위해 선진 기술을 보유한 일본과 협력할 것임
- 국내 대학의 전문 역량을 활용할 뿐 아니라 학문 후속 세대 양성과 관측 조사 기회 공유가 동시에 이루어지도록 함

- 해양과학기술원과 극지연구소의 대형 인프라 시설과 모델링 역량을 공동 활용하여 아북극 해역과 중저위도 관측 대상과 모델링 수요를 상시 접합시키고 조율할 것이다.
 - 멀리 떨어진 해역에서 별도의 연구진이 다른 기반시설을 이용해서 수행한 별도의 관측을 사후 조합하는 결과가 되지 않고 또 관측과 모델링이 공동 목표를 잃지 않도록 수행기관과 관측 모델링 분야의 연구진들이 균형있게 대표되는 태스크 그룹을 6-8명 정도로 운영하고 외부 전문가 2명 내외를 합류시킴
- 인접 해역이나 시점을 조사하는 해외 연구 기관들과 관측 대상 시공간이 상호보완적이 되고 자료 활용성이 극대화되도록 협업하며 특히 초기에 관측 장비와 노하우 교환에 초점을 둠
- 국내 대학의 전문 역량 뿐 아니라 학문 후속 세대 양성과 관측 조사 기회 공유가 동시에 이루어지도록 함
 - 핵심 관측 해역 뿐 아니라 통과 이동 해역에 대해서도 연속 관측을 기획해 국내 대학의 대학원 과정 학생들을 참여시키고 학문 후속 세대 양성의 매개가 되도록 함

3. 추진체계

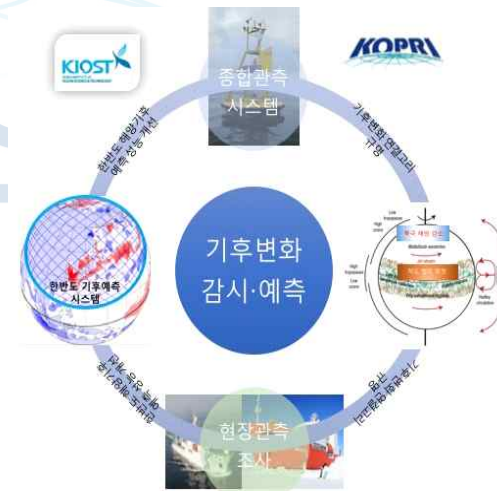


그림 52. 추진체계

4. 연차별 로드맵

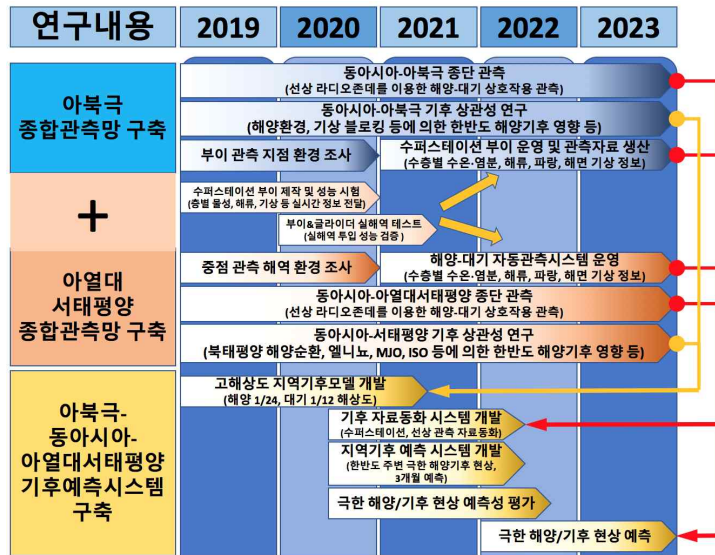


그림 53. 연차별 로드맵

제 5 장 활용방안 및 기대효과

극지연구소

제 1 절 활용방안

- 공공적 : 한반도 주변해역에 대한 극한 기후·해양 예측 자료의 공공 제공
- 기술적
 - 극한 환경에서의 첨단 장비 개발 및 활용
 - 고해상도 지역기후모델을 이용한 극한 기후·예측 예측 기술 개발
- 학술적
 - 장기 관측자료의 학문적 가치는 매우 높음 (최근 5년간 미국의 KEO 부이 자료를 이용한 30편 이상의 연구논문이 해양 및 기후연구 분야의 상위 10% 최고수준의 국제학술지에 발간됨)
 - 본과제에서 추진하는 두 지역의 장기 관측자료가 국제적인 관심을 환기시킴으로 동아시아 기후 연구 및 예측에 국제적인 공조를 이끌어낼 수 있음.
 - 기후변화 관련 국제협력 프로그램 주도적 참여 가능
 - 국제적으로 추진된 바 없는 새로운 연구 영역으로의 확장
- 경제적 : 한반도 이상기후 예측능력 향상을 통한 재난·재해 관련 비용 감소
- 인프라 : 아북극-아열대서태평양 종합관측체계 인프라 구축

제 2 절 기대효과

- 경제적 파급효과
 - 한반도 극한 기후·해양 예측능력 향상으로 기후재해로 인한 사회적 비용 절감에 기여
 - 기후예측 정확도 20% 향상 시 210억원/년 피해저감 효과 기대
(기후재난 피해액 5,252억/년, 기후예측 의존도 0.2 가정시)
 - * 최근 10년('06~'15) 간 기후재해로 연평균 재산피해액 : 5,252억원(2015 재해연보, 국민안전처)
 - 적도와 북극의 영향이 한반도 기후에 미치는 영향을 종합 진단*하고 해양-대기 종합 관측망과 고해상도 지역기후예측모델링을 개발하여 기후재해로 인한 사회적 비용절감**

가능

- * 기후변화로 한반도의 기후가 아열대와 아북극으로부터 동시에 영향을 받게 됨에 따라 기후 예측 능력을 향상시키기 위해서는 종합적인 진단이 요구됨.

○ 기술적 파급효과

- 중저위도 태평양-북극해 통합 관측망 구축·운영으로 기후변화 예측기술 제고

○ 정책적 파급효과

- '제3차 기후변화대응 해양수산부문 종합계획'(16.11) 중점 추진과제인 '해양 기후변화 영향 관측 및 예측 고도화'와 '기후변화 대응 이행기반 확립'에 기여
- 'IPCC 해양·빙권 특별보고서'(18), 'IPCC 평가보고서 6판'(22) 등에 대한 국가 위상 강화
- * 한국 기후변화 평가와 대응 보고서 '해양수산 부문' 필요
- 기상청 기상과학원과 협업 모델 구축
- * 극지연구소-기상과학원 기관간 협력약정 체결(2014)

제 6 장 경제성 평가



제 1 절 정책 · 기술적 타당성 분석

1. 정책적 타당성 분석

① 정책적 타당성 검토 개요

- 정부 R&D사업 또는 출연연구기관 고유사업 등 공공부문 연구개발 과제의 정책적 타당성 검토의 목적은 국가과학기술기본계획 등 국가상위계획에 따른 정책방향 및 세부 기술단위의 범부처 혹은 부처별 추진계획과의 연계성을 높임으로서 공공 투자에 대한 효율성을 확보하는데 있음
- 특히 각 정부부처는 연구개발 등 과학기술분야 공공투자시 앞서 언급한 과학기술 기본계획을 비롯한 국정과제, 부처별 연구개발 로드맵 등에 제시된 과제를 중심으로 예산 투자의 우선순위를 설정하고 있음으로 기획단계에서의 정책적 타당성 검토는 실질적인 사업의 추진을 위해 주요한 요인으로 작용하고 있음
- 한편 정책적 타당성 검토는 개발하고자하는 기술이 현행 관련 국가정책과의 부합성이 떨어지는 경우 기술개발의 추진방향 혹은 성과물의 연계 등을 재검토함으로써 위험요소를 배제하는 기획연구의 주요 항목으로 진행됨
- 이번 기획연구는 '북극-동아시아-서태평양 기후변화 국제 감시망 구축 기획'을 목적으로 추진
 - 해당 기술과 관련한 정책적 이슈를 해양과학기술분야 기초원천기술의 확보, 해양기후 관측 및 예측모델링 기술 개발, 해양기인 자연재해의 대응 등으로 설정하여 정책적 타당성을 검토

② 국가상위계획과 추진기술간의 정책 연계

- 정부는 과학기술기본법 제7조(과학기술기본계획)에 따라 매 5년마다 과학기술발전 에 관한 중장기 정책목표와 방향을 설정하고 있음
- 과학기술기본계획을 통해 정부의 과학기술 관련 계획과 시책 등을 종합한 과학기술 기본계획을 수립·시행하고 있음

- 국가과학기술기초계획은 '03차 기본계획(12~17)의 종료에 따라 새로운 국정방향을 반영한 제4차 과학기술기초계획(18~22) 수립이 진행 중
- (4대 전략) '과학기술로 국민 삶의 질을 높이고 인류사회 발전에 기여'를 비전으로 이를 달성하기 위한 핵심적인 4대 전략을 제시
 - (전략1) 미래도전을 위한 과학기술역량 확충
 - (전략2) 혁신이 활발히 일어나는 과학기술생태계 조성
 - (전략3) 과학기술이 선도하는 신산업·일자리 창출
 - (전략4) 과학기술이 만드는 모두가 행복한 사회 구현



그림 54. 제4차 과학기술기초계획의 비전 및 전략체계(안)

- 앞서 언급한 바와 같이 국가과학기술기초계획은 각 정부의 국정기조 및 대내외 환경변화를 반영하여 작성되고 있으며 과학기술의 역량강화, 과학기술을 통한 산업활성화 등을 중심으로 한 지속적인 과학기술 성장정책을 추진

- 이러한 점에서 해양과학기술분야 원천기술 확보, 기후 예측 모델링 구현, 해양 기인 기후변화 대응 중심의 본 과제는 국가과학기술기초계획과 큰 틀에서 연계성이 높다고 할 수 있음

☉ 정부 R&D 중장기 투자전략과 추진기술간의 정책 연계

- 한편 정부 R&D 중장기 투자전략(16~18)에 따라서는 기술의 시장전망, 수준, 공공성, 정부투자 생산성 등의 지표분석과 전문가 설문등을 통해 9대 분야별 중점 투자 분야를 제시한바 있음
- 해당 중점 기술분야는 ①ICT·SW, ②생명·보건의료, ③에너지·자원, ④소재·나노, ⑤기계·제조, ⑥농림수산·식품, ⑦우주·항공·해양, ⑧건설·교통, ⑨환경·기상분야로 각 분야별 중점투자분야를 도출하고 제4차 과학기술기초계획과 연계 추진

표 2. 정부 R&D 중장기 투자전략에 따른 기술분야별 중점투자 분야

중점 기술분야	중점투자분야 및 전략
ICT·SW	<ul style="list-style-type: none"> ■ 소프트웨어 및 콘텐츠 ■ 사물인터넷, 빅데이터 및 클라우드, 정보보안
생명·보건의료	<ul style="list-style-type: none"> ■ 신약 및 의료기기 ■ 감염병 대응
에너지·자원	<ul style="list-style-type: none"> ■ 신재생에너지 및 에너지저장 ■ 비전통 석유·가스자원 및 희토류 등 전략자원
소재·나노	<ul style="list-style-type: none"> ■ 탄소·나노 소재 ■ 하이브리드 자동차, 스마트섬유, 차세대 태양전지
기계·제조	<ul style="list-style-type: none"> ■ 제조기반기술, 조선·해양플랜트, 자동차 ■ 로봇틱스, 스마트공장, 고부가 차세대 선박
농림·수산·식품	<ul style="list-style-type: none"> ■ 식품, 축산·수의 ■ 품종개발, 농축수산물물의 안전성 확보
우주·항공·해양	<ul style="list-style-type: none"> ■ 무인기, 인공위성 ■ 선박교통관리체계, 해양 재난재해 대응
건설·교통	<ul style="list-style-type: none"> ■ 사회기반구조물, 건축구조물, 철도교통 ■ 친환경공간개발, 수요자편의 주거환경 개선
환경·기상	<ul style="list-style-type: none"> ■ 기후·대기, 환경보건 및 예측 ■ 환경성 질환 대응, 유해물질 및 생활환경 관리기술

- 이번 기획연구의 주제와 밀접하게 연계된 부분은 ① ICT·SW분야의 소프트웨어 및 콘텐츠, ⑦ 우주·항공·해양 분야의 해양 재난재해 대응, ⑨ 환경·기상분야의 기후·대기와 관련이 있는 것으로 판단

● **해양수산부문 계획과 추진기술간의 정책 연계**

- **(해양수산 R&D 중장기 계획)** 해양수산 R&D 중장기계획('14~'22) 은 해양수산발전 기본법에 따른 최상위 해양수산과학기술 정책계획으로 '국민의 꿈과 행복을 실현하는 창조형 해양과학기술'을 비전으로 3대 R&D 전략 및 12대 실행전략을 제시

- (전략1) 해양영토주권 강화 및 해양경제영토 확대

- * **해양과학조사 및 예보 역량 강화** : 해양 예보시스템 개선 및 해양영토 광역 감시망을 구축하고, 주변국과의 해양경제계획에 대비한 해양과학조사 역량 강화
- * **극한 공간 활용 및 국제협력 확대** : 극지 및 대양 심해저 활용 촉진을 위한 기반을 마련하고 남·북극 과학 인프라 활용연구를 확대하며 국제협력을 다변화

- (전략2) 창조형 해양수산 산업 육성

- * **해양자원 및 해양에너지 개발 활성화** : 국가 전략자원의 안정적 공급원 확보를 위한 해양자원을 개발하고 해양에너지 복합플랜트 개발 및 미활용 에너지원 활용
- * **첨단 해양 장비산업 육성** : 수중심해저의 산업 활동을 위해 첨단 장비 및 시스템을 국산화하고 해양레저 확산을 위해 레저장비산업 육성 및 기반 조성
- * **항만·해운물류의 허브기능 고도화** : 선박 대형화 추세 및 재난재해 대응을 위한 항만인프라를 개선하고 해운물류시스템의 효율화 및 항만운영 자동화 추진
- * **해양수산 생명자원의 산업화 촉진** : 해양수산생물 유래 소재산업 육성 및 에너지생산체제를 구축하고 국내외 해양수산생명자원 발굴 및 관리시스템 체계화
- * **해양플랜트 산업 경쟁력 확보** : 해양플랜트 엔지니어링 경쟁력 확보 및 기자재 인증



그림 55. 해양수산 R&D 중장기계획 비전 및 전략

- 체계를 구축하고 해저플랜트, LNG 벙커링, 서비스산업 등 신시장 진출 지원
- * **친환경선박 시장 선도** : 국제해사기구(IMO) 등 국제규제에 대비하여 친환경선박 운항기술을 개발하고 국제규제 선제대응을 통한 시장 선점 효과 창출

- (전략3) 국민행복 해양공간 창조

- * 해양환경 개선 및 위해요소 대응역량 강화 : 해양오염, 유해해양생물 등에 대한 관리·대응체계를 고도화하고 지속가능한 해양환경관리 및 해양생태계다양성 보전
- * 연안재해 저감 및 해양교통 안전 확보 : 기후변화 등에 따른 연안지역 재해 피해를 최소화하고 침식해안 관리를 체계화하며, 해양교통 안전을 확보하기 위한 융복합 시스템 개발

□ (2018 해양수산부 주요 업무 계획) '18년도 해양수산부 주요 업무 계획에 따르면 '글로벌 해양강국, 대한민국' 비전 달성을 위해 '강한 해양수산업으로 재도약'을 제시하고 6대 정책 방향을 언급

- (정책방향1) '18년을 해운항만 산업 재도약 원년으로 도약

- * 해양산업 New Start, 항만운영 개혁과 글로벌 물류네트워크 구축, 항만 인프라 확충을 통한 물류 거점화 추진

- (정책방향2) 사람과 자본이 모이는 혁신형 해양수산업 창출

- * 스마트·친환경 해상물류 실현, 양식산업의 스마트화·고급화, MT를 활용한 신산업 육성, 해양수산 창업·벤처 활성화 추진

- (정책방향3) 연안·어촌 개발로 지역균형발전 선도

- * 어촌 뉴딜 300을 통한 활력 넘치는 어촌 조성, 해양관광·레저 산업육성을 통한 지역경제 활성화, 연안지역 해상교통 선진화 추진

- (정책방향4) 깨끗하고 풍요로운 바다 조성

- * 우리바다 되살리기와 지속가능한 연근해 어업 육성, 해양공간 통합관리 체계 구축, 해양환경 및 생태계의 건강성 회복

- (정책방향5) 해양영토를 수호하고 안전한 바다를 실현

- * 해양영토 관리기반 강화 및 불법조업 대응, 해양사고 예방체계 구축, **해양재난·재해 피해 예측 및 대응능력 강화**

- (정책방향6) 해양문화를 확산하고 국제적 위상을 제고

- * 신해양문화 확산 및 관련 인프라 확충, 해외 해양수산 자원 확보 및 **대양·극지 연구**

선도, 해양수산 국제 위상 강화

□ (해양수산과학기술 관련 계획의 체계) 해양수산R&D 중장기계획은 앞서 언급한 국가상위계획 및 부처상위계획의 정책 방향을 수렴하여 작성되는 세부적인 실행계획의 성격을 가지고 있으며, 예산투자 계획의 가장 중요한 검토요인으로 활용되고 있는 만큼 해양수산부의 정책방향을 가장 잘 나타내고 있다고 볼 수 있음

- 동 계획은 정부 정책방향의 변화 및 정부부처 조직개편에 따라 목표 기간이 혼재되어 있는 상태이나 '11년 2020 MT 로드맵은 '14년 수립된 해양수산 R&D 중장기계획으로 수립된 것으로 언급되고 있음

□ '13년 해양수산부가 부활한 후 산업부처로서의 역량을 확대하기 위해 해양수산업 등 부가가치 창출 중심의 기술개발 추진 정책을 진행하고 있으나, 정부주도의 지원이 필수적인 공공기술분야에 대해서는 정책 우선순위에 따른 선택과 집중 전략을 추진하고 있는 것으로 판단됨



그림 56. 해양수산과학기술 관련 계획의 체계

- (정책적 연계성이 높은 기술) 각각의 계획에서 제시된 최우선 추진과제를 이번 계획에서 제시된 추진기술과의 연계 관점에서 보면 **해양관측 및 예측모델링과 연안 재해관리기술, 해양종합관측시스템 구축 및 활용 등과 밀접**하다고 할 수 있음

● **소결 : 추진기술의 정책 부합성**

- 앞서 국가상위계획 및 해양수산부문 계획과의 정책연계성 분석에서 나타난 바와 같이 이번 기획연구에서 제시된 ‘기후변화 국제 감시망 구축 기획’ 연구는 해양 기후 예측/예보 시스템 구축과 국가해양영토 광역감시망 구축, 해양기후관측 및 예측모델링 기술뿐만 아니라 극한해역 관측 등 핵심적인 요소기술로서 관련 정책 방향과 명확히 연계되어있음

표 3. 해양수산 R&D 계획에서 제시된 최우선 추진과제 목록

구분	최우선 추진과제
2020 MT 로드맵(11)	1. 해양에너지 복합발전플랜트 기술 2. 해수용존물질의 산업소재화 생산기술 3. 해양생물유래 산업신소재 기술 4. 탄소배출 저감 녹색선박 기술 5. 연안재해관리기술 6. 전지구적 통합 해양기후관측 및 예측모델링 기술 7. 해양 종합관측시스템 구축 및 활용 8. 해양생명자원 확보 및 통합관리 기술
해양수산 R&D 중장기계획(14)	1. 해양 예측·예보 시스템 구축 기술 2. 국가해양영토 광역감시망 구축·활용 3. 극한환경 용복합 플랜트·장비 기술 4. 해저자원 탐사 및 개발 기술 5. 수중로봇 개발 및 시스템 기술 6. 마리나 등 해양레저산업 관련 기술 7. 초대형 해양 구조물 구축·활용 8. U기반 해운물류 시스템 구축기술 9. 해양 바이오에너지 생산 기술 10. 친환경 고부가 양식기술 11. 수산물 안전 및 유통 선진화 기술 12. 해양플랜트 기자재 기술 13. 선박평형수 관리기술 14. 유류·HNS 해양유출사고 대응 기술 15. 적조·해파리 등 유해해양생물 관리 16. CO2 해양지중저장 기술 17. 연안재해 관리기술 18. e-Navigation 기술 19. 유무인 도서관리 및 활용기술 20. 해양 헬스케어 기반구축 기술

2. 기술적 타당성 분석

● 기술적 타당성 검토 개요

- 기술적 타당성분석은 사업의 성공 여부를 결정하는 주요한 요인으로서 기술개발 추진계획 및 달성 목표수준의 적절성, 개발 기술의 경쟁력 및 성공가능성, 기술수명 주기 등 다양한 요소들을 종합적으로 검토함
- 다만 본 기획연구에서는 이미 국내외 기술동향분석을 통해 기술개발 목표를 설정하고 요소기술의 개발 방향 등을 제시하고 있는 만큼 정부 R&D 사업으로서의 예산 투자 효율성 측면을 중심으로 분석함
 - 특히 제3차 과학기술기본계획 등 최근의 정부 R&D 추진 정책이 관련 부처간 협업 및 유사중복과제의 배제 등 효율성을 강조하는 방향으로 진행되고 있는 만큼 기존 R&D 추진 기술과의 중복성 회피전략은 신규 예산확보 차원에서 정책적 타당성과 더불어 가장 우선시 되는 요소로 작용하고 있음
- 따라서 본 연구에서는 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)를 통해 제시된 중점기술과 관련된 과제 혹은 사업의 추진 여부와 해양수산 R&D 연도별 시행계획 등을 바탕으로 유사과제의 추진 현황을 파악하였음
- 유사중복과제의 검토 시 대분류 혹은 중분류 기술단위에 국한하지 않고 가능한 세부 기술단위까지를 검토하여 기존 탐사기술의 고도화를 목적으로 하는 제안기술의 특성이 반영될 수 있도록 하였음

● 기술적 타당성 검토

- NTIS를 통해 '14년~'16년까지 추진된 정부 R&D 사업 중 해양 기후변화 국제 감시망 구축 관련 과제(주관연구과제)를 검색해본 결과 기후변화 5건의 과제가 검색되었으며, 이번 기획연구에서 제시된 북극-동아시아-서태평양 기후변화 국제 감시망 구축과 관련된 과제는 없는 것으로 분석됨
- 해당 과제는 해양의 기후변화에 대한 감시망 구축을 주 내용으로 하는 것으로 과거 추진된 기후변화 R&D 사업이 대부분 해양이 아닌 대기 기후변화 예측과 관련

된 것으로 해당 과제의 기술개발 내용 및 범위는 과거 기후변화 R&D 사업과 뚜렷한 차이가 있는 것으로 나타났음

- [표 1-3]은 최근 3년간(2014~2016년) NTIS상의 기후변화 대응과 관련한 연구개발 사업 추진 주체, 과제명 및 연구비 현황임

표 4. NTIS 검색을 통한 관련 과제 추진현황

부처명	사업명	과제명	연구비 (백만원)	비고
기상청	기상연구	기후변화 예측기술 지원 및 활용연구	6,860	
		기후변화감시예측 국가정책지원 강화	20,929	
	기후변화과학	울릉도/독도 기후변화 감시소 신설	470	인프라 건설
환경부	기후변화대응 및 대기보전	기후변화대응 환경기술 개발	20,000	
미래창조과학부	기후변화대응기술개발	기후변화대응 기술개발	140,891	

* 연구비는 사업별 연도별 투입예산 산출의 어려움으로 특정시기(2014~2016년) 예산의 합임

- 따라서 해당 기술은 기 추진되고 있는 타부처 및 해양수산R&D사업과의 유사중복성은 없는 것으로 판단
- 이에 해양 기후변화 국제 감시망 구축 연구개발을 통해 과학기술적 가치 확대는 물론 국가과학기술 역량 강화에 도움이 될 것으로 기대됨

제 2 절 경제성 타당성 분석

1. 편익 추정

가. 경제적 가치 추정의 일반 이론

● 경제적 가치의 정의

- 기후변화 국제감시망 구축 연구의 목표가 실현되고 기후변화 예측의 정확도가 높아지면서 기후 재난 피해가 저감 되면 이는 경제적 가치로 식별
 - 경제적 가치란 화폐단위로 계산된다는 것을 의미하며, 경제학적 개념에 근거
- 경제적 의미의 가치는 신고전학파(neo-classical)의 후생경제학에 근거하는데, 그 기본적인 전제는 개인의 경제활동은 개인들이 자신의 후생을 증가시키고자 하는데 있고, 어떤 주어진 상황에 대한 각 개인의 후생 수준은 자신이 가장 잘 판단

● 잠재적 비시장재 소비에 따른 경제적 가치

- 각 개인의 후생은 자신의 시장재 소비뿐만 아니라 아직 시장에서 거래되고 있지 않은 잠재적인 비시장재(non-market goods)의 소비에도 의존
- 환경재의 질이나 양 변화에 대한 경제적 가치는 그 변화가 인간의 복지에 미치는 영향에 근거
- 본 경제적 가치는 다른 종의 생존이나 복지에 대한 관심을 포함
 - 경제적 가치의 구성요소 중 하나인 비사용가치의 근원이 되는 이타적(altruistic), 윤리적(ethical) 관심도 경제적 가치에 포함

● 경제학적 접근 방법론의 특징

- 경제적 가치를 추정하기 위한 방법론은 크게 경제학적 접근법과 비경제학적 접근법으로 구분

- 경제학적 관점에서 본다면 분석 대상 재화나 사업의 경제적 가치를 추정하기 위해서는 경제학적 접근법을 적용하는 것이 적절하며, 경제학적 접근법의 적용이 어려운 경우에 한하여 제한적으로 비경제학적 기법을 적용하는 것이 타당
- 비경제학적 기법은 적용결과를 받아들이는 데 있어서 제약성이 존재하며, 결과의 활용이란 관점에서도 제약적
- 예를 들어 연구개발사업의 경제적 가치를 추정하기 위해서는 원칙적으로 수요곡선 접근법이나 부가가치 접근법과 같은 경제학적 방법론에 근거해야 하나 경우에 따라서는 이것이 용이하지 않거나 불가능할 수 있음
 - 이런 경우에는 국내외 분석사례를 참고하여 해당 상황에 맞게 조정하는 편익이전(benefit transfer) 작업을 해야 하는 상황
 - 예를 들어 외국에서 측정된 편익을 구매력지수와 분석시점 등을 종합적으로 고려하여 국내 상황에 맞게 조정한 값을 이용할 수 있으나, 이러한 방법은 왜곡된 결과를 초래할 수 있으므로 적용과 해석상의 주의가 요구
- 한편 편익이전 기법 적용도 용이하지 않다면 대체비용 접근법을 이용하여 구한 값을 편익의 대응 값으로 삼는 것을 고려할 수 있음

● 비시장재 가치의 성격 및 특징

- 비시장재의 가치는 크게 사용가치(use value)와 비사용가치(non-use value)로 구분
- 사용가치는 인류가 현재의 생산 및 소비 행위에 환경을 직접 연관시킴으로써 발생하는 가치
- 비사용가치는 사용가치 이외의 가치를 의미하며, 크게 선택가치(option value), 존재가치(existence value), 유산가치(bequest value)로 구분
 - 선택가치는, 현재는 사용하지 않는 어떤 비시장재화가 미래에 사용될 가능성이 있다고 판단되는 경우에 그 환경을 지금 훼손하게 되면 미래의 선택 폭이 감소하게 되고 따라서 그 만큼의 비용이 미래에 발생할 수 있다는 의미
 - 존재가치란 대상 자원으로부터 얻게 되는 효용이 사람들과 대상 자원과의 어떠한 직접적인, 간접적인 상호작용에도 영향을 받지 않음을 전제

- 예를 들어, 따라서 어떤 환경을 현재 이용하고 있지 않고 미래에도 이용할 의사가 없다 할지라도, 그 존재 자체만으로 의미를 갖는다고 생각하는 경우, 이를 존재가치라 함
- 본 연구개발사업의 경우, 해양 기후변화에 대한 기초과학 연구의 시현이 앞으로도 활용할 의사가 없는 사람이라 할지라도 해양 기후변화 자체의 연구가 진행되는 것만으로도 어떤 가치를 느낀다면, 이 사람은 본 연구 개발 사업에 대해 존재가치를 가지고 있는 것을 의미
- 유산가치란 미래세대를 위하여 해양의 기후변화에 따른 각종 자원을 보전하는 것 자체가 가치를 갖는다는 것을 의미
- 예를 들어 해양의 기후변화가 이후의 미래세대에 심각한 영향을 미칠 것으로 예상되어 현재 자신의 소비를 줄여 해양의 기후변화를 줄일 수 있는 기금조성에 기여이 동참하고자 하는 사람의 경우 기금에 내고자 하는 금액을 유산가치로 볼 수 있음

㉞ 경제적 가치 추정을 위한 접근법 개요

- 경제적 가치 추정을 위한 접근법은 크게 현시선호 접근법과 진술선호 접근법으로 구분

표 5. 경제적 가치 추정을 위한 방법론

구 분	현시선호 평가법	진술선호 평가법
직접적 추정법	경쟁시장에서의 가격	조건부 가치추정법
간접적 추정법	헤도닉 가격기법 여행비용 평가법 회피행동 모형	선택실험법
특징	시장에서의 거래행위 관찰 사후적 평가법	가상적 시장 이용 사전적 평가법

- 현시선호 접근법은 경제주체의 행동으로 나타난 자료를 이용하여 관심대상 비시

장재화의 가치를 간접적으로 추정하는 기법

- 현시선호 접근법은 사후적(ex post)·간접적 접근법이므로 적용대상에 있어서 제약성이 크며, 이론적인 관점에서 과대추정 혹은 과소추정의 문제점을 안고 있는 상황
- 진술선호 접근법은 사전적(ex ante)·직접적 접근법으로 비시장재화에 대한 선호에 대해 경제주체에게 직접 물어보고 응답을 이끌어내어 분석함으로써 가치를 추정하는 기법
- 하지만 실증적인 관점에서 살펴보면 진술선호 접근법으로 구한 값이 현시선호 접근법의 적용을 통해 구한 값보다 작은 경우가 흔히 관측
- 따라서 사전적으로 어느 방법이 더 우월하다고 판단하기에는 어려움이 크나 판단해야 하는 재화는 사업의 속성에 따라 적용해야 함
- 진술선호접근법에는 소비자에게 선호를 직접 물어보는 조건부가치 측정법(CVM, contingent valuation method)과 선호를 간접적으로 물어보는 선택실험법(Choice Experiment)이 있음
- 진술선호접근법은 현시선호접근법에 비해 적용상의 제약이 적고, 이론적으로도 우수하나 비용이 많이 드는 단점이 존재
- 결론적으로 경제적 기법은 시장에서의 소비자 잉여 또는 생산자 잉여 등 거래 행위 속에서 나타나는 가치를 정확히 추정하는 방법론으로서 분석 대상 재화 또는 사업의 객관적 타당성을 제시할 수 있는 장점이 존재

㉞ 현시선호 평가법 및 진술선호 평가법의 주요 방법론

- 경제적 추정 방법론 개요
- 비시장재화의 질 변화 혹은 추가적 공급에 대한 개개인의 후생변화를 화폐단위로 추정하기 위해서는 비시장재화의 직접적인 거래를 관찰하는 것이 불가능하므로, 시장재를 이용하여 간접적으로 편익을 추정하거나 가상적인 시장을 만들어야 함
- 사람들의 행동으로 나타난 선호를 바탕으로, 즉 현시된 선호(revealed preference)에 기반하여 비시장재화의 가치를 추정하는 전자의 방법을 현시선호 평가법이라 할 수 있음

- 현시된 선호를 관측하기 어려울 때나 그 선호가 정확하다고 보기 어려울 때, 가상적인 시장에 사람들을 몰입시키고 그 상황에서 가상적인 거래를 어떻게 할지를 질문하고 이에 대해 대답한 선호, 즉 진술된 선호(stated preference)를 이용하여 가치를 추정하는 방법을 진술선호 평가법이라 통칭

- 본 방법의 대표적 방법론은 조건부 가치추정법과 선택실험법이 대표적이며, 조건부 가치추정법은 편익을 직접적으로 추정하기 때문에 직접적 접근법이라 할 수 있으며, 선택실험법은 간접적으로 편익을 유도한다는 측면에서 간접적 접근법이라고 할 수 있음

□ 헤도닉 가격기법

- 본 기법은 비시장재화에 대한 시장이 명시적으로 존재하지 않는 상황에 그 대체시장으로서 주택시장이나 토지시장을 이용하여 주택이나 토지의 가격에 반영된 비시장재화의 가치를 간접적으로 측정하는 것을 의미

- 사람들은 은연중에 깨끗한 물이나, 아름다운 경치 등에 대해 가치를 부여하는데, 이러한 가치가 특정 상품의 가격에 내포되는 경우가 많음

- 예를 들면, 공기 좋은 곳의 부동산 값은 공기가 나쁜 곳의 부동산 값에 비해서 비싸 짐

- 즉, 깨끗한 환경의 가치가 토지 가격이나 주택 가격에 포함되는 것임

- 헤도닉 가격기법은 이러한 차이에 착안하여 특정 재화에 대해 시장에서 직접 거래되지 않는 어떤 요인이 가격결정에 영향을 미친다는 가정 하에 소비자가 재화 구매를 결정하고 가격을 지불할 때 간주하였을 가능한 모든 속성으로 분해하여 각각의 속성에 대해 가치를 측정하는 방법론

□ 여행비용 접근법

- 여행비용 접근법(TCM, travel cost method)은 Hotelling(1947)에 의해 처음 제안되었으며, 여행객이 여행할 때 소요된 비용을 휴양지의 가치를 측정하는 데 사용될 수 있다고 제시

- 이후 Clawson(1959)와 Clawson and Knetsch(1966)에 의해 실증모형이 개발되었고, 그 이후 TCM은 주로 휴양지와 관련된 비시장재화의 가치추정에 대해 널리 사용

- 여행비용 접근법은 휴양지 방문객을 대상으로 설문조사를 실시하는 방법이며, 주거지, 사회경제적 변수, 여러 휴양지에 대한 방문 횟수, 여행목적, 여행기간, 여행비용과 같은 여행과 관련된 정보를 수집

- 조사된 자료에 근거하여 여행비용을 계산하며, 여러 관련된 요소와 함께 방문횟수를 계산하여 여행에 대한 수요함수를 구하며 그 다음 단계로 휴양지에 대한 가치를 추정하거나 더 나아가 휴양지 특성의 변화에 대한 가치도 추정

- 본 방법은 비시장재화의 가치추정 방법 중에서 가장 역사가 오래된 것으로 주로 등산, 낚시, 사냥, 숲의 이용 등 야외 여가활동과 관련된 레크리에이션 목적의 가치 추정에 많이 이용되고 있는 상황

□ 조건부 가치추정법

- 조건부 가치추정법은 환경재와 같은 비시장재화를 사고 팔 수 있는 시장(constructed market)을 가상으로 혹은 실제로 만들어 지불의사액(WTP)이나 수용의사액(WTA)을 직접 측정하는 방법론을 의미

- 조건부 가치추정법(contingent valuation method, CVM)에서 사용되는 가상적인 시장은 실험시장(experimental market) 혹은 모의시장(simulated market)이라 불리기도 하는데, 중요한 특징은 시장이 가상적이든, 모의적이든 간에 시장의 참여자들에게 익숙하지 않기 때문에 평가 대상의 속성과 특징을 정확히 설명하고 이에 대한 가치를 면밀하게 도출하는게 중요

- 조건부 가치추정법은 사람들이 특정 공공재나 비시장재에 부여하고 있는 가치를 직접적으로 이끌어내는 방법으로서 지불수단과 질문 원칙, 지불의사 유도 방법 등 적용이 엄밀해야 하며, 우리나라에서는 한국개발연구원 예비타당성조사 수행시 CVM의 적용 방법론과 가이드라인을 준수해야 함

- 현재, 국가 및 지방재정 사업에서 제안하고 있는 대규모 비정형사업과 R&D 사업의 비시장재가치 분석의 경우, 대부분 CVM 방법론을 적용하여 경제적 가치를 평가하고 있는 상황

□ 선택실험법

- 선택실험법은 컨조인트 방법론으로 불리기도 하며, CVM과 유사하게 환경재와 같은

비시장재화를 사고 팔 수 있는 시장(constructed market)을 가상으로 또는 실제로 만들어 지불의사액(WTP)이나 수용의사액(WTA)을 직접 측정 가능

- 선택실험법은 응답자들에게 비시장재 평가재화의 다양한 환적속성들로 구성된 가상의 선택대안들을 제시한 후 가장 선호하는 대안을 선택하게 함으로써 서로 상충관계에 놓여 있는 개별 속성들의 수준변화에 따른 화폐가치를 유도하는 방법
- 선택실험법 역시, CVM과 마찬가지로 비시장재 가치를 반영하는 예비타당성조사 등에서 적용되고 있음

나. 연구개발사업의 편익 추정 방법론

㉞ 연구개발 활동의 파급효과 분류

- 편익 추정의 단위는 개별 사업이고 평가 대상의 장단점을 합리적으로 분석하여 평가결과를 도출하는데,
- 사업 전후(before and after)가 아닌 시행 유무(with or without) 비교를 통하여 사회 후생의 차이를 분석해야 함
- 사전적으로 편익(benefit)이란 (+)의 사업효과를 의미하며 연구개발사업의 편익이란 연구개발사업의 수행으로 인해 발생할 것으로 기대되는 (+)의 결과물을 의미
- 미시경제학적으로 연구개발사업의 편익은 추가적으로 발생하는 소비자 잉여의 증가분 또는 생산자 잉여 증가분 등으로 정의 가능
- 연구개발활동은 과학기술 지식, 민간의 수익, 파급효과 등의 관점에서 정의할 수 있는데, 이를 파급의 관점에서 다시 정의하면, 지식파급, 시장파급, 네트워크 파급 등으로 구분 가능
- 지식파급은 지식의 창출자와 사용자가 다른 경우 발생, 시장파급은 시장기능에 의해 여타 주체들에게 제품이나 공정상의 편익을 전달해주는 것을 의미
- 네트워크 파급은 관련 기술들의 집적을 통해 기능 향상을 가능케 하는 것을 의미하는데, 타당성조사에서 반영하는 효과는 지식파급과 시장파급에 한정

- 지식파급과 시장파급은 사업목표와 직접적으로 연결되고 객관적 산출이 가능할 경우 경제적 타당성의 효과 분석에 반영

표 6. 연구개발활동 파급 분류와 예비타당성조사 반영 여부

구분	정의 및 특성	예비타당성조사 반영 여부
지식 파급 (knowledge spillovers)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지식의 창출자와 사용자가 다른 경우 발생 ○ 역설계, 발간, 특허공개, 연구자 이동 등을 통해 발생 ○ 일부 계측 가능 ○ 화폐환산 불가 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 사업목표와 직접적으로 연결되고 객관적 산출이 가능할 경우 경제적 타당성의 효과 분석에 반영
시장 파급 (Market spillovers)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시장 기능에 의해 여타 주체들에게 제품이나 공정상의 편익을 전달해주는 것 ○ 추가기능의 구비, 가격의 인하, 저렴한 제품 및 서비스 제공 등으로 발생 ○ 계측 가능 ○ 화폐환산 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 사업목표와 직접적으로 연결되고 객관적 산출이 가능할 경우 경제적 타당성의 편익 분석에 반영
네트워크 파급 (Network spillovers)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 관련기술들의 집적을 통해 기능 향상을 가능케 함 ○ 각각 기술들의 개발 주체가 분산되어 있어서 개별 주체별로 투자를 망설임 ○ 계측 불가 ○ 화폐환산 불가 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 경제적 타당성에서 미반영 ○ 정책적 타당성의 특수평가항목에서 반영 가능

자료 : KISTEP(2011), 『연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침연구(제1판)』

㉞ 연구개발 활동의 편익 추정의 장애요소

- 연구개발사업은 대표적인 비투자 재정사업이자 비정형 사업에 해당
- 이에 연구개발사업의 경제적 가치 평가는, 기술적 불확실성이 높고 가시적 효과를 정량적으로 추정하기 어려우므로, KISTEP(2011)과 OECD(2007)³⁾은 다음과 같이 편익 추정의 어려움을 진단
- 투자 및 성과간의 직접적 인과관계가 불투명하고 편익을 누리는 대상을 명확히 구분

3) OECD(2007), 『Accessing the Socio-Economic Impact of Framework Programme』, OECD DSTI Report

하고 식별하는 것이 어려움

- 파급효과의 전달경로가 다양하고 시차를 두고 시현하는 과정도 발생
- 편익의 화폐환산화가 어려움

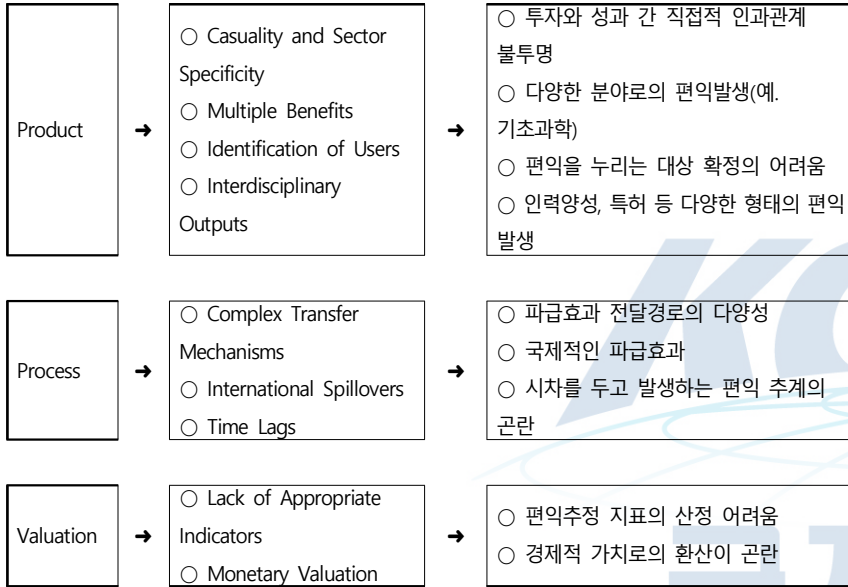


그림 57. 연구개발사업의 편익 추정을 어렵게 하는 요소

연구개발사업의 일반적 편익 항목

- KISTEP(2016)⁴⁾은 연구개발부문 예비타당성조사의 일반적 편익항목을 다음과 같이 제안
 - 가치창출편익은 크게 소비자 중심 편익과 생산자 중심 편익으로 대별
 - 소비자 중심 편익은 연구개발사업의 효과가 소비자에게 영향을 주는 경우를 식별하고 생산자 중심 편익은 생산자에게 영향을 주는 경우를 식별하는 것임

4) 한국과학기술기획평가원(2016), 『연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(2-1판)』, 연구보고서

- 비용저감편익은 생산비용 저감 편익과 피해비용저감 편익으로 구분

- 생산비용 저감 편익은 자원비용, 공정비용, 연구장비 사용비용 등의 각종 생산비용 저감의 가치를 식별
- 피해비용저감 편익은 재난 및 재해, 사고, 질병 등으로 인해 발생하는 피해비용의 저감을 의미
- 한편, 각 과학기술 지식의 증대 및 관련 파급효과는 가치창출 요소로 분석될 수 있으나 실제 타당성조사시에는 반영하지 않는 것으로 진단하고 있음

표 7. 예비타당성조사시 반영되는 편익 항목 구분

구분	예비타당성조사시 편익 반영	예비타당성조사시 편익 미반영	
가치창출 편익	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소비자 중심 편익 <ul style="list-style-type: none"> - 연구개발사업의 효과가 소비자에게 영향을 주는 경우 (후생경제학에 근거) ○ 생산자 중심 편익 <ul style="list-style-type: none"> - 연구개발사업의 효과가 생산자에게 영향을 주는 경우 (i.e. 시장수요 접근법) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 과학기술 지식 (논문, 특허 등)[†] ○ 과학기술자의 교육훈련 ○ 지역개발효과 ○ 지역산업구조 개편 ○ 생산 유발효과 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 부가가치 유발효과 ○ 고용 유발효과 ○ 수입 유발효과 ○ 수출 유발효과 ○ 소득 분배효과 ○ 취업 유발효과
비용저감 편익	<ul style="list-style-type: none"> ○ 생산비용저감 <ul style="list-style-type: none"> - 자원비용, 공정비용, 연구장비 사용비용, 출장비용 등 각종 생산비용의 저감 ○ 피해비용저감 편익 <ul style="list-style-type: none"> - 재난·재해, 사고, 질병 등으로 인해 발생하는 피해비용의 저감 		

연구개발사업의 편익 분석을 위한 기준선 분석 원칙

- 연구개발사업의 사업 시행 효과를 분석하기 위해서는 사업 유무에 따라 각각에 대한 분석을 하여 그 차이를 비교하는데, 이를 위해 합리적인 기준선 분석이 시급
 - 첫째, 사업 추진을 통해 해결되는 문제를 중심으로 현재와 미래의 상태에 관련된 경제사회적 변수들을 구체적이고 명료하게 제시해야 함
 - 둘째, 분석을 위한 모든 변수들을 구분하여 정량값을 제시해야 함

- 셋째, 기준선 구체화를 위한 노력 수준을 적절히 결정해야 함
- 넷째, 기준선의 상태를 구체화하기 위한 모든 가정들을 명시하고 구체적으로 설명할 필요가 있음
- 예를 들어, 기준선 분석은 현재 상태 및 미래에 대한 예측분석이므로 확보가 어려운 사항과 관계에 대한 가정이 필수적으로 수반되며, 타당성조사 주체는 분석에 적용된 가정의 목록을 제시하고 값들을 명시함으로써 기준선 분석결과의 재현성을 확보해야 하고 적용된 가정과 더불어 경쟁기술의 발전 추이, 해당 기술의 요소 중 불확실한 부분 등과 같이 논의를 통해 제외되는 가정도 있게 되는데 제외의 이유를 구체적으로 보고서에 명시할 필요가 있음
- 다섯째, 시간 기준으로 기준선을 설정하는 시점과 종료시점을 구체적으로 제시 할 필요가 있음
- 여섯째, 기준선 설정의 과정에서 불확실한 모든 요인에 대해 상세히 기술해야 함
- 마지막으로, 분석 대상사업의 경제적 타당성 분석 과정에서 기준선에 적용된 가정들을 준용해야 함

표 8. 연구개발부문 예비타당조사에서 기준선 분석시 준수해야 할 사항

준수 사항	설 명
사업 추진을 통해 해결되는 문제를 중심으로 현재와 미래의 상태에 관련된 경제사회적 변수들을 구체적이고 명료하게 제시할 것	사업 추진을 통해 해결되는 문제에 대한 구체화와 해결되는 정도의 정량적인 제시, 현재의 상태, 문제가 해결되는 과정에 대한 사항, 사업 추진 과정과 결과물에 의해 영향을 받는 주체들에 대한 사항을 중심으로 기술
분석을 위한 모든 변수들을 구분하여 정량값을 제시할 것	예비타당성조사 주체는 사업 시행과 미시행 경우의 비교분석을 수행해야 하므로 이 과정에서 필요한 변수들의 식별은 결과의 엄밀성 확보를 위해 필요
기준선 구체화를 위한 노력의 수준을 적절히 결정할 것	기준선에 대한 분석은 확보된 자료를 토대로 자료를 연결시키는 모형을 적용하고 이 과정에서 자료가 확보되지 않은 부분에 대한 적절한 가정 도입으로 진행될. 즉, 자료의 수준, 모형의 수준, 가정의 수준 등이 기준선 분석 결과의 수준을 결정하게 되므로 구체화를 위한 노력의 수준을 예비타당성조사 기간과 자원의 범위 내에서 설정해야 함
기준선의 상태를 구체화하기 위한 모든 가정들을 명시하고 구체적으로 설명할 것	기준선 분석은 현재 상태 및 미래에 대한 예측분석이므로 확보가 어려운 사항과 관계에 대한 가정이 필수적으로 수반됨. 예비타당성조사 주체는 분석에 적용된 가정의 목록을 제시하고 값들을 명시함으로써 기준선 분석결과의 재현성을 확보해야 함. 적용된 가정과 더불어 경쟁기술의 발전 추이, 해당 기술의 요소 중 불확실한 부분 등과 같이 논의를 통해 제외되는 가정도 있게 되는데 제외의 이유를 구체적으로 보고서에 명시
시간 기준으로 기준선을 설정하는 시점과 종료시점을 구체적으로 제시할 것	예비타당성조사 기준선 분석의 시점은 사업 착수 시점이며 종료시점은 경제적 타당성 분석의 기간과 동일함. 종료시점의 설정은 사업 추진을 통한 효과 발생의 지연 및 지속과 관련된 사항임
기준선 설정의 과정에서 불확실한 모든 요인에 대해 상세히 기술할 것	불확실한 요인을 명확히 제시하고 가정에 따른 민감도 분석 결과를 제시함
분석 대상사업의 경제적 타당성 분석 과정에서 기준선에 적용된 가정들을 적용할 것	경제적 타당성 분석에서 다수의 시나리오를 비교하는 경우, 비용효과 분석에서 다수의 대안을 비교하는 경우에 있어서 기준선은 동일하게 적용해야 함

● 연구개발사업의 경제성 분석 프로세스

- 연구개발사업의 경제성 분석은 시장 수요 진단 가능성, 대리시장 존재 가능성 등을 종합적으로 판단하여 비용효과분석 또는 비용편익분석으로 나누어 분석

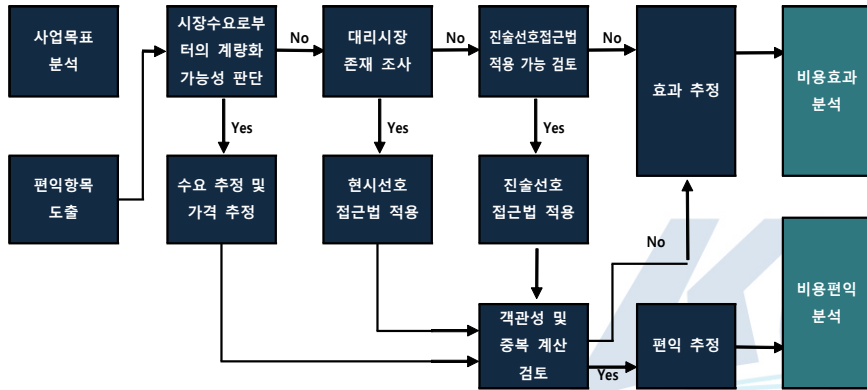


그림 58. 경제성 분석 프로세스

● 연구개발사업의 경제성 분석 절차

- 최종적으로 연구개발사업의 경제성 분석은 연구개발 내용 검토, 편익구도 수립, 경제성 분석 수행 순으로 이루어지며 무엇보다도 사업 내용의 특징 분석과 최종적인 기대효과를 명확히 식별하는 것이 중요

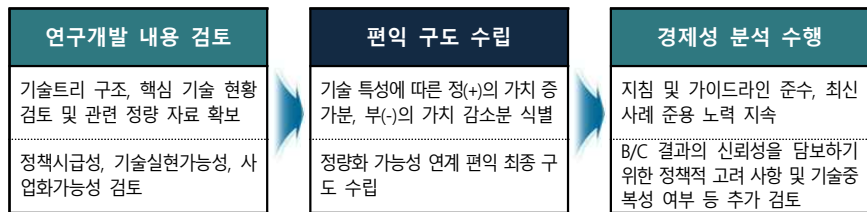


그림 59. 연구개발사업의 경제성 분석 절차

2. 경제성 분석 결과

가. 편익 추정 결과

● 연구 기대 효과를 통한 편익 항목 도출

- 편익항목은 연구사업의 개요 중 기대효과 및 활용방안을 바탕으로 식별 가능한 편익항목을 도출함
- 기대효과 및 활용방안을 바탕으로 발생하는 편익항목을 도출하면, 해양-대기 종합 관측 부이 운영으로 전 지구 기후예측을 위한 기반 자료 제공을 통해 한반도 기후예측 정확도가 향상됨으로써 기후예측 개선 편익이 식별될 수 있을 것으로 판단
- 뿐만 아니라 기후예측 정확도 향상을 통해 우리나라의 해양기후 변화에 대한 대응을 통해 해양 기후 피해 저감 편익이 식별될 수 있을 것으로 판단

● 주요 편익 항목 개요

- 기후예측 정확도 개선 편익
 - 한반도 기후에 영향을 미치는 것으로 알려진 북극해과 서태평양의 해양 기후변화에 대한 국제감시망을 구축함으로써 기후변화에 기인하는 잠재적 위험요소의 발생 메커니즘의 이해도 향상을 통한 기후예측 정확도 개선에 대한 경제적 가치를 반영
- 해양기후 피해 저감 편익
 - 한반도 이상기후 예측능력 향상에 기여하여 매년 기상재해로 발생하는 사회적 재난 비용 절감분을 반영

● 편익 추정 구도

- 주요 편익 항목 중 해양기후 피해 저감 편익은 기후예측 정확도 개선 편익과 중복 산정 가능성이 높고 기상재해로 인한 사회적 비용 절감분에 대한 정확한 자료

가 존재하지 않아 현 타당성 분석 단계에서는 반영하지 않음

- 본 분석에서는 본 연구개발사업의 최종적인 기대효과가 명확한 기후예측 정확도 개선 편익만을 반영하기로 함

표 9. 편익 항목 개요

편익 항목	내용	반영 여부
기후예측 정확도 개선 편익	기후변화에 기인하는 잠재적 위험요소의 발생 메커니즘에 대한 이해도 향상을 통한 기후예측 정확도 개선	반영
해양기후 피해 저감 편익	기상재해로 인한 사회적 비용 절감 효과	미반영

● 기후예측 정확도 개선 편익

- 기후예측 정확도 개선 편익 산출식은 다음과 같음

$$\text{기후예측 정확도 개선 편익} = \text{기후예측 개선 편익} \times \text{R\&D 기여율} \\ \times \text{R\&D 사업화 성공률} \times \text{예측정확도 개선 효과}$$

- 기후예측 개선 편익 원단위
 - 기후예측 및 기상정보의 경제적 가치 및 기상정보 서비스 개선 등에 대한 국내외 선행연구사례들을 살펴보면 다음과 같음
 - 기후예측 및 기상정보의 가치는 비시장재 가치 속성이 있기에 조건부 가치 측정법이 나 선택실험법(컨조인트 분석법)으로 수행
 - 선행연구 중 국내 기상정보 서비스에 대한 개선 효과를 추정한 최신 연구는 「The Economic Value of the National Meteorological Service in the Korean Household Sector: A Contingent Valuation Study」(Park. et. al., 2016) 로서 선택실험법을 활용하여 가구당 개선 월간 편익 원단위 860원을 추정한 바 있음
 - Park et al.(2016)의 연구는 우리나라 국민들을 대상으로 하는 설문조사를 수행한 뒤

기상정보 개선에 따른 다양한 속성의 가치를 선택실험법으로 추정한 연구로서, 편익 이전법 원리에 근거, 해당 연구 결과를 본 분석의 편익 원단위로 적용

표 10. 기상정보의 경제적 가치 분석에 대한 선행연구

논문명	국가	대상	분석방법	총가치
Valuation of haze management and prevention using the contingent valuation method with the sure independence screening algorithm (Wang et. al., Sustainability, 8/4, 2016)	중국	기상정보	조건부가치 측정법	110억 달러
Using willingness-to-pay to assess the economic value of weather forecasts for multiple commercial sectors (Rollins et. al, Report Prepared for NOAA, 2002)	캐나다	상업부문	조건부가치 측정법	농업분야 : 2.17달러 공공분야 : 0.60달러
Valuing improved hurricane forecasts (Lazo, et a., Economic Letters, 111/1, 2011)	미국	개선된 허리케인 예보	선택실험법	13달러/년/가구당
What Are Weather Forecasts Worth? Stated Preference Approaches to Valuing Information (Lazo. J. CANSEE: Toronto, ON, Canada, 2005)	미국	기상예측 향상	조건부가치 측정법	17.88달러/년/가구당 (9개주)
Agriculture and Climate Change: An Evaluation of the Willingness to Pay for Improved Weather Forecasts Università degli Studi di Trento Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (Predicatori et al., Trento, Italy, 2008)	이태리	농업부문에서의 기상정보	조건부가치 측정법	44~447달러/년/분야
What Is the Value of Hazardous Weather Forecasts? Evidence from a Survey of Backcountry Skiers (Alberini et al., FEEM Working Paper No.85, 2010)	스위스	눈사태 예측 개선	조건부가치 측정법	42~46달러
Economic Value of Current and Improved Weather Forecasts in the U.S. Household Sector (Lazo et al., Report Prepared for NOAA, 2002)	미국	기상정보	조건부가치 측정법	109달러/년/가구당
The Economic Value of the National Meteorological Service in the Korean Household Sector: A Contingent Valuation Study (Park. et al. Sustainability, 8/9, 2016)	한국	기상정보	선택실험법	860원/월/가구당

□ 기후예측 개선 편익 원단위 적용

- 기후예측 정확도 개선 편익 분석하기 위한 편익 원단위는 예비타당성조사 지침에 의거, 분석 연도 직전 연말인 2017년 말 기준 소비자 물가지수로 보정하여 적용
- 기상정보 개선 효과는 국가 공공적인 효과로서 우리나라 전국민이 수혜를 받는다는 점을 감안하여 편익 원단위는 전국 규모로 확장 가능
- * 비시장재 가치 분석 방법론을 적용한 KDI·KISTEP 예비타당성조사의 모든 사례에서도 편익 원단위를 전국 가구수를 활용하여 확장하고 이를 경제적 가치로 반영

□ R&D 기여율

- 국가연구개발사업의 직접적 경제적 편익을 산정하기 위해서는, 본 연구개발사업으로 창출된 경제적 가치 중에서 연구개발이 기여한 정도를 고려할 필요가 있음
- R&D 기여율은 연구개발성과의 상업화를 통해 부가가치가 창출되었을 때, 전체 부가가치 가운데 연구개발에 의한 기여분이 어느 정도인지를 나타내는 지표이며, 해당 사업의 경제적 가치를 정확히 추정하기 위해 활용
- 본 분석에서는 최근 2013년에 확정된 「3차 과학기술기본계획」에 근거하여 35.4%를 적용
- 참고적으로, 본 R&D기여율은 KISTEP이 주관하는 최근 예비타당성조사에서 동일하게 적용되고 있는 수치

□ R&D 사업화 성공률

- 연구개발사업을 통한 기술개발 성과가 시장에서의 편익창출로 이어지기 위해서는 실증 및 상용화 과정을 거치게 되는데, 이러한 과정에서 존재하는 불확실성을 반영하기 위해 R&D사업화 성공률을 반영함
- R&D사업화 성공률은 통상적으로 연구관리 전문기관들에서 발간하는 최신 성과보고서 또는 연구보고서의 수치를 활용하여 적용
- 임현(2016)의 연구는 기술분야별 사업화 성공률을 제시하고 있는데, 본 보고서에서의 기술분야별 사업화 성공률은 다음과 같음
- 본 연구개발사업은 임현(2016)의 연구에서 제시하고 있는 기술분야별 사업화 성공률에서 정보통신과 밀접한 연관이 있어, 정보통신 분야의 사업화 성공률 48.0%를 적용함

표 11. 기상정보 서비스 개선에 대한 가구당 지불의사액 추정결과

구분	2014년 지불의사액(평균) (원/월/가구당)	소비자 물가지수*		2017년 지불의사액(평균) (원/월/가구당)
		2014년 11월	2017년 12월	
기상정보 서비스 개선편익	860	99.108	103.04	894

자료 : 국가통계포털

□ 기후예측 개선 편익

- 기상정보 개선 편익 원단위에 2017년 전국 가구수(19,523,587 가구)를 곱하여 기후예측 개선 연간 편익을 추정하면 연간 209,477백만원임

표 12. 기후예측 개선 편익 추정결과

구분	지불의사액 (원/월/가구당)	2017년 가구수	기간(월)	연간편익 (백만원)
기후예측 개선 편익	894원	19,523,587	12	209,477

자료 : 국가통계포털

표 13. 기술분야별 사업화 성공률

기술분야	9단계 이상 사업화 성공률(%)
전체	46.4
기계소재	47.7
바이오의료	42.3
전기전자	44.4
정보통신	48.0
지식서비스	57.6
화학	49.2
에너지·자원	24.3

자료 : 임현(2016), 2015년 R&D사업 예비타당성조사 일관성 제고를 위한 조사 체계 개선 방향 연구, 미래창조과학부

표 14. 국제특허분류의 섹션별 기술수명주기

섹션	의미	특허건수	TCT(중위수)	TCT(평균값)
A	생활필수품	196,330	10.0	12.5
B	분리; 혼합	243,098	11.0	13.6
C	화학; 야금	127,590	9.0	11.1
D	섬유; 지류	11,314	12.0	15.4
E	고정구조물	35,843	14.0	16.6
F	기계공학; 조명; 가열; 무기; 폭발	111,308	11.0	14.1
G	물리학	453,085	6.0	7.5
H	섹션 전기	370,268	6.0	7.5

- 기후예측 정확도 개선 효과
 - 기후예측 정확도 개선 효과(비율)은 본 기획 연구진이 목표로 제시하고 있는 비율 20%를 적용
- 기술수명주기
 - 국제특허분류(IPC)별 분류체계를 활용하여 각 기술별 기술수명주기를 분석한 이승규(2011)⁵⁾의 연구에 따르면, 물리학으로 기술수명주기는 중위수값이 약 6.0년, 평균값이 7.5년으로 나타남
 - 기술수명주기는 편익발생기간과 연동됨
 - 본 분석은 특허 기술별 연구의 평균값과 유사 예비타당성조사의 연구 사례를 고려하여 편익발생기간 7.5년으로 하되, 분석의 편익을 위하여 8년으로 적용함

- 기후예측 개선 편익 분석 결과
 - 분석 결과, 연간 편익은 7,118.9백만원이며, 편익기간을 고려하면 56,951백만원의 편익이 발생하는 것으로 분석됨

표 15. 기후예측 정확도 개선 편익 분석 결과

기후예측 개선 편익 (백만원)	R&D 기여율	R&D 사업화 성공율	기후예측 정확도 개선 효과(비율)	기후예측 정확도 개선 편익 (백만원)
209,477	35.4%	48.0%	20.0%	7,118.9

나. 경제성 분석 개요

● 경제성 분석 방법

- 경제적 타당성에 관한 분석은 일단 그 사업이 어느 정도의 경제적 가치가 있는 사업인지를 파악할 수 있도록 함으로써 사업에 대한 이해를 돕게 됨
- 경제적 타당성을 평가하는 분석기법으로는 편익/비용 비율(B/C ratio), 순현재가치(NPV, Net Present Value), 내부수익률(IRR, Internal Rate of Return,) 등이 있는데, 일반적으로 이해가 용이하고, 사업규모의 고려가 가능한 B/C 분석 기법을 많이

5) 이승규(2011), 『예비타당성조사를 위한 지식기반 및 분석시스템 구축』, KISTEP

사용함

● **경제성 분석 기법 비교**

- 경제성 분석 기법 개요

표 16. 경제성 분석 기법

분석기법	장 점	단 점
편익/비용 비율	·이해 용이 ·사업규모 고려 가능 ·비용편익 발생기간의 고려	·편익과 비용의 명확한 구분 곤란 ·상호배타적 대안선택의 오류발생 가능 ·사회적 할인율의 파악
내부수익률	·사업의 수익성 측정 가능 ·타 대안과 비교가 용이 ·평가과정과 결과 이해가 용이	·사업의 절대적 규모 고려치 않음 ·몇 개의 내부수익률이 동시에 도출될 가능성 내재
순현재가치	·대안 선택 시 명확한 기준 제시 ·장래발생편익의 현재가치 제시 ·한계 순현재가치 고려 ·타 분석에 이용가능	·할인율의 분명한 파악 ·이해의 어려움 ·대안 우선순위 결정시 오류발생 가능

- **편익/비용 비율** : 사업 운영 후 연도별 발생하는 편익과 투입되는 비용(사업비 및 유지관리비)을 적정 할인율로 할인하여 기준년도 가격으로 환산한 금액의 비율을 말하며, 일반적으로 (편익/비용 비율)≥1이면 경제성이 있다고 판단함

$$\text{편익:비용비율}(B/C) = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

여기서, B_t : 편익의 당해 연도 값
 C_t : 비용의 당해 연도 값
 r : 할인율(이자율)
 n : 내구년도(분석년도)

- **내부수익률** : 내부수익률이란 현재가치로 환산한 편익과 비용의 값이 같아지는 할인율 r 을 구하는 방법으로 일반적으로 내부수익률이 사회적 할인율보다 크면 경제성이 있다고 판단

$$\text{내부수익률}(IRR) : \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

- **순현재가치** : 순현재가치란 사업에 수반된 모든 비용과 편익을 기준년도의 현재가치로 할인하여 총 편익에서 총 비용을 제한 값이며 (순현재가치) ≥ 0 이면 경제성이 있다고 판단

$$\text{순현재가치}(NPV) = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

● **경제성 분석 시 고려 사항**

- 경제성 분석에 있어 비용과 편익은 모두 사회적 비용 및 편익으로 간주할 수 있는데 일반적으로 공공투자시설의 경우 비용은 실질적으로 투자되어 사용된 비용을 계상하는 반면 편익은 회수방법을 통한 실제수익이 아닌 사회적 편익을 기준으로 함
- 본 사업이 추진되면, 5년의 연구기간(2019년~2023년)이 소요될 것으로 예상됨에 따라 단계별 연구기간 완료 후, 2024년부터 편익이 순차적으로 발생하는 것으로 가정함
- 연구개발 사업은, 그 성격상 비용이 초기에 집중 발생하는 반면, 편익은 연구개발 사업후 후 장기간 동안 발생하기 때문에 분석기간 동안 예상되는 비용과 편익에 사회적 할인율을 적용하여 현재가치로 환산하여 평가함

● **경제성 분석 시 전제**

- 사회적 할인율
 - 비용과 편익의 미래 흐름을 비교하기 위하여 사용되는 할인율은 자원의 기회비용, 즉 투자사업에 사용된 자본이 다른 투자사업에 사용되었을 경우 얻을 수 있는 수익을 추정하게 할 뿐 아니라 사람에 따라 혹은 사회에 따라 그리고 시대에 따라 다를 수 있는 시간의 객관적인 가치를 나타냄

- 할인율 개념의 적용에 있어서는 많은 이견이 있으나 특정 건설사업이 정부에 의해 주도되는 경우에는 사회적 할인율의 개념을 적용하고 민간자본에 의해 추진되는 경우에는 시장이자율에 근거한 재무적 할인율을 적용하는 것이 일반적
- 사회적 할인율은 통상 시장이자율보다 낮은 수준으로 책정되는데 그 이유는 사회적 할인율을 사용하여 사업타당성을 평가하는 주체가 주로 정부이며 정부로서는 미래사업의 중요성이 더 높게 평가되어야 하기 때문임
- 대부분의 국가는 투자사업의 특성에 따른 할인율을 자국의 경제성장률, 물가상승률, 경제적 잠재능력 등을 고려하여 개괄적인 방법으로 정부가 추정하여 사용하고 있는데 본 연구에서의 사회적 할인율은 기획재정부가 2017년 8월에 발표한 「예비타당성조사제도 개편안」에 의거하여 4.5% 적용

□ 편익 기간

- 앞서 언급한대로 국제특허분류(IPC)별 분류체계를 활용하여 각 기술별 기술수명주기를 분석한 이승규(2011)의 연구에 따르면, 2000년부터 2009년까지 미국 등록 특허 155만 여건의 인용정보를 이용해 국제특허분류(IPC) 클래스별 기술수명주기 중위수 (median)를 산정하여 제시한 바, 이에 근거하여 편익발생 기간을 결정
- 이승규(2011) 연구에 따르면, 본 연구개발사업의 관련 학문인 생화학 및 미생물학 등에 해당하는 기술수명주기의 중위수를 7.5년으로 분석
- 기술수명주기는 편익발생기간과 연동되며 본 분석은 특허 기술별 연구의 중위수값과 함께 7.5년의 편익발생기간을 규정하되 분석의 편의상 8년으로 가정함
- 본 사업이 장비 구입 및 설치에 따라 연구 프로세스 및 효과가 바로 발생하는 점을 감안하여 편익 회입 기간은 별도로 산정하지 않음

□ 경제성 분석의 고려 사항

- 분석 시점 : 본 분석 직전연도 2017년 기준으로 현재가치화
- 비용 : 기후변화 국제감시망 구축 단계별 예산안
- 분석 기간 : 편익발생 시점인 2022년 이후부터 단계별 연구기간 종료 후 8년간
- 할인율 : 최근 개정된 기획재정부 방침에 근거하여 4.5% 적용

다. 경제성 분석 결과

● 경제성 분석 결과

- 경제성 분석 결과 편익-비용비율은 1.54로서 본 연구개발사업은 경제적으로 타당한 것으로 분석
- 추후 본 연구개발사업을 통해 기후변화 국제 감시망 구축을 통해 해양 기인 재난 피해의 저감분에 대한 가치가 추가로 식별되면 본 편익-비용비율은 변화될 수 있음
- 내부수익율은 12.7%이며, 순현재가치는 12,575백만원인 것으로 분석

표 17. 경제성 분석 결과 요약

구 분	분석 결과
총 편익의 현재가치 (백만원)	36,057
총 비용의 현재가치 (백만원)	23,481
순현재가치 (백만원)	12,575
편익-비용 비율	1.54
내부수익률(IRR)	12.7%

● 민감도 분석

- (민감도 분석 개요) 사업 추진에 있어 사업비가 변경되거나 편익 추정치가 변화할 수 있는 점을 감안하여 (예비)타당성조사는 경제성 분석 수행 후 민감도 분석 시행을 제안
- 편익 및 비용 변화에 대한 민감도 분석을 위해서 편익과 비용을 ±20%까지 10%p씩 변화시킴
- 최저 B/C가 1.23, 순현재가치 5,364백만원으로서 모든 편익과 비용 변화율에 있어 본 사업은 경제적 타당성을 확보한 것으로 판단

표 18. 민감도 분석 결과

구분	변화율 (%)	총편익의 현재가치 (백만원)	총비용의 현재가치 (백만원)	순현재가치 (백만원)	B/C
편익의 변화	-20%	28,845	23,481	5,364	1.23
	-10%	32,451	23,481	8,970	1.38
	0%	36,057	23,481	12,575	1.54
	10%	39,662	23,481	16,181	1.69
	20%	43,268	23,481	19,787	1.84
비용의 변화	-20%	36,057	18,785	17,272	1.92
	-10%	36,057	21,133	14,923	1.71
	0%	36,057	23,481	12,575	1.54
	10%	36,057	25,830	10,227	1.40
	20%	36,057	28,178	7,879	1.28

3. 고용창출효과 분석경제성 분석 결과

가. 고용창출효과 분석 개요

● 고용창출효과 분석의 목적

- 각종 정책 등의 수립·추진에 따른 고용 효과를 사전·사후적으로 분석하여 그 정책 등이 본래의 목적을 달성하면서도 보다 많은 양질의 일자리를 만들 수 있도록 하는데 있음

● 직접고용효과 및 간접고용효과

- (직접고용효과) 정부정책 시행으로 직접고용을 창출하는 경우를 말하며, 정부 재정지원사업의 경우 하도급 기업에 의한 고용창출도 직접 고용에 포함하도록 되어 있음
- (간접고용효과) 정부의 사업비 지출에 의해 파급되는 산업 파급과정에서 유발되는 고용창출 효과와 직접 고용자의 소득 증가가 소비로 파급되는 과정에서의 추가적으로 유발되는 고용창출효과를 말함

나. 일자리 창출효과 분석 방법론

● 일자리 유형 구분

- 공공부문 일자리(공무원, 공공기관, 공공근로 등)
- 민간부문(기업)의 신규고용(새로운 시장조성 등)
 - (정부조달 및 구매) 해당 물품 및 서비스 생산기업의 고용 증가
 - (보조금 지급 또는 세금감면) 기업의 생산비용을 감소시켜 제품·서비스 가격의 인하를 가져오고, 매출 및 고용 증가로 연계
 - (규제완화 및 노동시장 법·제도 개선) 투자를 촉진하여 새로운 시장 확대 및 고용을 촉진하거나 기업의 신규채용(고용유지)을 지원
 - (공공서비스 및 인프라 제공) 기반시설·R&D(기술개발)·컨설팅 등을 제공→ 민간기업의 매출증가 및 새로운 시장 확대로 신규고용 창출
 - (미스매치 완화 및 취업애로요인 해소) 직업능력개발 훈련 및 상담·취업알선, 취업지원 사업대상 확대, 육아휴직 활성화 등

● 일자리 창출효과 측정 방법

- (1단계) 기존(유사) 정책·사업의 신규고용 실적에 대한 경험치·실태조사 결과, 고용 계획 등을 확인·활용(필요 시 기타자료* 활용)
 - 기타 자료 활용 시 우선순위 : 기존사업에 대한 논문 및 보고서 → 유사 국내·외 사례 → 전문가 의견
- (2단계) 1단계를 적용하기 어려운 경우, 정부지출액(또는 매출액) 당 신규고용효과 등을 추정하여 계산
 - 이용 가능한 자료가 없는 경우, 재정사업 가이드라인에 따라 산출

● 일자리 창출효과 분석 결과

- 총연구비 250억원 중 부이구입비 45억원을 제외한 205억원을 바탕으로 일자리 창출효과 분석
- 직접고용효과
 - 인건비는 순수 연구개발비 205억원 중 30%로 가정
 - 직접고용효과는 「고용영향평가 가이드 라인」(고용노동부, 2017)의 산정원칙과 관련 산업 연평균 임금 중 연구개발업의 평균임금 적용
 - 분석결과, 직접고용효과는 약89명

표 21. 본 연구개발사업에 따른 총 고용창출효과 분석 결과

구분	일자리창출효과(명)
직접고용효과	89
간접고용효과	184
총 합계	273

표 19. 직접고용효과 분석 결과

구분	인건비 (백만원)	산업연평균임금 (백만원)	직접고용효과 (명)
본 연구개발사업	6,150	68.73	89

- 간접고용효과
 - 간접고용효과는 「고용영향평가 가이드 라인」의 산정원칙과 관련 산업별 1인 고용 창출을 위한 평균 지출액 중 연구개발업 지출액 적용
 - 분석결과, 간접고용효과는 약 184명임

표 20. 간접고용효과 분석 결과

구분	인건비 (백만원)	산업연평균임금 (백만원)	직접고용효과 (명)
본 연구개발사업	14,350	78.0	184

- 총고용창출 효과
 - 본 연구개발사업에 따른 고용창출효과는 직접 및 간접 고용효과를 포함하여 약 273 명으로 분석됨



제 7 장 참고문헌

한국해양과학기술원 (2016), 고품질 해양-대기 플렉스 산정 및 지역기후 모형 개발 기획, pp. 1-76

이용국 (2015), 해양관측분야 무인화 시스템 개발 및 활용, SEE the SEA, Vol. 374.

홍성유, 권원태, 정일웅, 백희정, 변영화, 차동현 (2011), 전구 및 지역기후 모델 결과에 근거한 동아시아 및 한반도 지역기후 변화 전망 연구 소개 및 고찰, 한국기후변화학회지, 2(4), pp. 269~281

Dai, M., Z. Cao, X. Guo, W. Zhai, Z. Liu, Z. Yin, Y. Xu, J. Gan, J. Hu, and C. Du (2013), Why are some marginal seas sources of atmospheric CO₂?, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2154-2158, doi:10.1002/grl.50390.

Dunne, J. P., et al. (2013), GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part ii: Carbon system formulation and baseline simulation characteristics, *J. Clim.*, 26(7), 2247-2267.

Galbraith, E. D., A. Gnanadesikan, J. P. Dunne, and M. R. Hiscock (2010), Regional impacts of iron-light colimitation in a global biogeochemical model, *Biogeosciences*, 7(3), 1043-1064.

Galbraith, E. D., et al. (2015), Complex functionality with minimal computation: Promise and pitfalls of reduced-tracer ocean biogeochemistry models, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 7, 2012-2028, doi:10.1002/2015MS000463.

Garbe et al., (2014), Transfer Across the Air-Sea Interface in P.S. Liss and M.T. Johnson (eds.), *Ocean-Atmosphere Interactions of Gases and Particles*, Springer Earth System Sciences, DOI 10.1007/978-3-642-25643-1_2

Garcia, H. E., R. Locarnini, T. P. Boyer, J. I. Antonov, M. Baranova, J. Zweng, and D. Johnson (2014), Dissolved Inorganic Nutrients Phosphate, Nitrate, Silicate, *World Ocean Atlas 2013*, vol. 4, National Oceanic and Atmospheric

- Administration (NOAA).
- Hakim, G. J., 2005: Vertical structure of midlatitude analysis and forecast errors. *Mon. Weather. Rev.*, 133, 567–578.
- Ham, Y.-G., Y. Chikamoto, J.-S. Kug, M. Kimoto, and T. Mochizuki, 2016: Tropical Atlantic-Korea teleconnection pattern during boreal summer season. *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-016-3474-z.
- Hu, D., et al., (2015). Pacific western boundary currents and their roles in climate, *Nature*, 522, 299-308.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Itoh, M., S. Nishino, Y. Kawaguchi, and T. Kikuchi (2013) Barrow Canyon volume, heat, and freshwater fluxes revealed by long-term mooring observations between 2000 and 2008, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 118, 4363-4379, doi:10.1002/jgrc.20290
- Jiang, X., T. Li, and B. Wang, 2004: Structures and mechanisms of the northward propagating boreal summer intraseasonal oscillation. *J. Climate*, 17, 1022-1039.
- Kharin, V., and F. Zwiers, 2000: Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *J. Climate*, 13, 3760-3788.
- Kharin, V., and F. Zwiers, 2005: Estimating extremes in transient climate change simulations. *J. Climate*, 18, 1156-1173.
- Kim, S.-J. and A. Stossel (2001), Impact of Subgrid-Scale Convection on Global Thermohaline Properties and Circulation, *J. Phys. Oceano.*, 31, 656-674.
- Kim, W., J.-G. Jhun, K.-J. Ha, and M. Kimoto, 2011: Decadal changes in climatological intraseasonal fluctuation of subseasonal evolution of summer precipitation over the Korean Peninsula in the mid-1990s. *Adv. Atmos. Sci.*, 28,591-600.
- Kug, J.-S., Ahn, M.-S., Sung, M.-K. et al., 2010: Statistical relationship between two types of El Nino events and climate variation over the Korean Peninsula. *Asia-Pacific J Atmos Sci* (2010) 46: 467. doi:10.1007/s13143-010-0027-y.
- Kwon, M. H., J.-G. Jhun, B. Wang, S.-I. An, and J.-S. Kug, 2005: Decadal change in relationship between East Asian and WNP summer monsoons. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16709.
- Kwon, M., J.-G. Jhun, and K.-J. Ha, 2007: Decadal change in East Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s. *Geophys. Res. Lett.*, 34,L21706. doi:10.1029/2007GL031977.
- Li, H. M., L. Feng, T. J. Zhou, 2011: Multi-model projection of July-August climate extreme changes over China under CO2 doubling. Part I: Precipitation. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(2), 433-447, doi:10.1007/s00376-010-0013-4.
- Loikith et al., 2015: Evaluation of large-scale meteorological patterns associated with temperature extremes in the NARCCAP regional climate model simulations. *Clim. Dyn.*, 45, 3257-3274, DOI 10.1007/s00382-015-2537-x
- Noh, Y., H. Ok, E. Lee, T. Toyoda, and N. Hirose, (2016), Parameterization of Langmuir Circulation in the Ocean Mixed Layer Model Using LES and Its

Application to the OGCM, *J. Phy. Oceano.*, 46, 57-78, DOI: 10.1175/JPO-D-14-0137.1

Park, C. et al., 2015: Evaluation of multiple regional climate models for summer climate extremes over East Asia, *Clim. Dyn.*, DOI:10.1007/s00382-015-2713-z.

Ruti et al., 2016: MED-CORDEX INITIATIVE FOR MEDITERRANEAN CLIMATE STUDIES, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1187-1208, DOI:10.1175/BAMS-D-14-00176.1

Samala, B.K., Nagaraju C, Sudipta B., Akshara K. and Mohit D., 2013: Study of the Indian summer monsoon using WRF-ROMS regional coupled model simulations, *Atmos. Sci. Let.*, 14, 20-27, DOI: 10.1002/asl.409

Screen, J.A. and Francis, J.A. (2016) Contribution of sea-ice loss to Arctic amplification is regulated by Pacific Ocean decadal variability, *Nature Climate Change*, 6, 856-860, doi:10.1038/nclimate3011

Seidel, D. J., Q. Fu, W. J. Randel, T. J. Reichler, (2008). Widening of the tropical belt in a changing climate, *Nature Geoscience*, 1, 21-24.

Tebaldi, C., K. Hayhoe, J. Arblaster, and G. Meehl, 2006: Going to the extremes: An inter-comparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Climatic Change*, 79, 185-211.

Walton, P.J., Yarker, M.B., Mesquita, M.D.S, and Otto, F.E.L., 2016: Helping to make sense of regional climate modelling : Professional Development for Scientists and Decision-Makers Anytime, Anywhere, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1173-1185, DOI:10.1175/BAMS-D-14-00111.1.

Wang, B., B. Xiang, and J.-Y. Lee, 2013: Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 110, 2718-2722.

Wi. L., et al., (2012). Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents, *Nature Climate Change*, 2, 161-166.

Woodgate, R.A., K.M. Stafford, and F.G. Prah (2015) A synthesis of year-round interdisciplinary mooring measurements in the Bering Strait (1990-2014) and the RUSALCA years (2004-2011), *Oceanography* 28(3):46-67

Yeo, SR., Kim, KY., Yeh, SW. et al. (2014) Recent climate variation in the Bering and Chukchi Seas and its linkages to large-scale circulation in the Pacific, *Climate Dynamics* 42: 2423. doi:10.1007/s00382-013-2042-z

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

