

보고서번호
BSPE9944J-11134-1

고품질 해양-대기 플릭스 산정 및 지역기후 모형 개발 기획

2017. 5.

한국해양과학기술원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “고품질 해양-대기 플렉스 산정 및 지역기후 모형 개발 기획” 사업의 최종보고서로 제출합니다.

2017년 5월

연구책임자 : 박영규

참여연구원 : 강현우, 권민호, 김경옥,
김영호, 김원국, 나한나,
민홍식, 최상화

요 약 문

1. 제 목

고품질 해양-대기 플럭스 산정 및 지역기후 모형 개발 기획

2. 연구사업 개요

가. 기획연구의 필요성

- 지구온난화는 인류가 당면한 심각한 문제임.
- 지구온난화에 대한 대책을 세우기 위해서는 향후 지구온난화가 어떻게 진행되어 갈 것인지 예측해야 함.
- 기후변화로 인한 해양의 이산화탄소 흡수량의 변화를 예측하기 위해서는 기후모델과 해양-대기 이산화탄소 교환과 관련된 해양 경계면에서의 과정을 이해하고 교환량을 관측해야 함.
- 해양-대기 이산화탄소 교환량은 표층 해수와 해양대기의 이산화탄소 분압과 이산화탄소의 용해도, 기체교환상수를 이용한 bulk flux로 산정하나 기체교환상수의 선택에 따라 해양-대기 이산화탄소 교환량 산정결과가 달라짐.
- 에디 공분산(eddy covariance, EC)을 측정해 이산화탄소의 연직 플럭스를 직접 산정하는 것이 가능해졌음. 특히 육상생태계연구에서는 이산화탄소 순 교환량 산정을 위해 EC를 활용한 전지구 네트워크와 표준 관측방법 및 자료처리 방법을 활용하고 있음.
- 반면 해양에서는 플랫폼의 움직임 제거하는 자료 후처리, 샘플링 오차와 시료관 및 관측기 내에서의 신호 감쇄, 밀도효과 등 자료의 신뢰성 확보를 위한 과정이 필요하며, 현재 상당한 연구의 진전이 보고되고 있음.

- 관측선에서 신뢰성 있는 에디 공분산과 이산화탄소 분압을 측정하는 기술을 확보하면 관측선의 이동 항적에 따라 해양-대기 이산화탄소 교환량을 직접 산출해 낼 수 있으며, 이를 활용해 해양의 탄소 흡수량 추정의 품질을 높일 수 있음.
- 지구온난화는 지역마다 다르게 나타나기 때문에, 대상지역에 특화된 기후모형이 필요함.
- 현재 IPCC 등에서 제공하는 전지구 기후모형은 한반도 주변 해역에 대한 변화를 자세하게 모사하지는 못하고 있음.
- 기상청 등에서 지역기후에 대한 연구를 수행하고 있으나 대기에 초점이 맞추어져 있음.
- 지구온난화에 의한 고수온 현상 등 극한 해양현상을 포함한 다양한 해양환경변화를 예측하기 위해서는 해양에 초점을 기후모형이 필요함.

나. 기획연구의 목적

- 움직이는 플랫폼에서 난류 플럭스를 측정하고 처리하는 기술의 현 상태를 파악하고, 이를 앞으로 연구선과 부이에 활용할 수 있는 방안을 모색.
- 해양-대기 결합 지역기후 모형 개발 계획 수립.

다. 기획연구사업 기간

2016년 8월 1일 ~ 10월 31일

3. 연구추진 계획

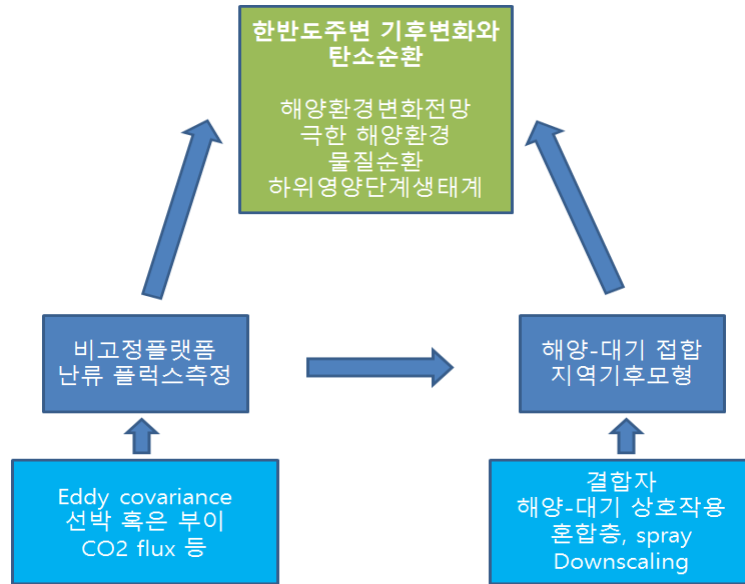
가. 연구개발 목적

- 선박, 부이 등 움직이는 플랫폼에서 해양-대기 이산화탄소 플럭스 직접 측정 자료 획득.
- 직접 관측한 자료를 활용하여 해양-대기 상호작용 모수화를 개선시킨 해양-대기 접합 지역기후모형 개발 및 한반도 기후변화 시나리오 제공.

나. 연구개발 내용

- 고품질 해양-대기 플럭스 산정
 - 에디 공분산(eddy covariance) 기법을 사용하여 비고정 플랫폼에서 이산화탄소 플럭스를 관측하는 시스템 구축.
 - 부이, 관측선 등 움직이는 플랫폼에서 관측 시스템 안정운영, 자료 생산 및 제공.
 - 해양-대기 접합 지역기후 모형의 이산화탄소 플럭스 모수화에 활용.
- 해양-대기 접합 지역기후 모형개발
 - 관측 플럭스 자료를 활용하여 해양-대기 접합 모수화를 개선한 접합모형 구축.
 - 온난화 전망에서의 시나리오 구성 및 한반도 기후 변화 시나리오 적분.

다. 연구개발 추진체계



4. 기대효과 및 활용방안

가. 기대효과

- 3차원 직접 측정을 통한 해양-대기 플럭스 산정은 한반도 주변 해역에서 실행된 바 없으므로, 북서태평양과 한반도 주변해역에 대한 고품질 자료 생산을 통해 선도형 기술 개발의 기초 마련.
- 부이와 관측선에 시스템을 설치하여 기후변화에 중요한 변수로 작용하는 해양-대기 플럭스를 다양한 환경에서 직접 측정하고, 이를 해양-대기 결합 지역기후 모형에 적용하는 계획을 수립함으로써 고품질 미래예측 자료 생산의 기초를 마련.

나. 활용방안

- 연구원에서 운영중인 관측선을 이용해 해양-대기 플럭스 직접 관측을 수행함으로써 고품질 플럭스 자료 생산.
- 개선된 해양-대기 접합 기후모형을 이용한 한반도 기후변화 시나리오 결과 제공.

목 차

요약문	i
목차	v
그림목차	vi
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구의 배경 및 필요성	1
제 2 절 연구의 목표 및 범위	5
제 2 장 국내외 연구동향	6
제 1 절 해외동향	6
제 2 절 국내동향	21
제 3 장 연구내용	24
제 1 절 에디 공분산(Eddy covariance)을 이용한 해양-대기 이산화탄소 플럭스 직접 산정 기술	24
제 2 절 지역기후 모형 개발	33
제 4 장 추진전략 및 추진체계	38
제 5 장 활용방안 및 기대성과	41
제 6 장 경제성 평가	43
제 1 절 정책적 타당성	43
제 2 절 경제적 타당성	51
참고문헌	69

그 립 목 차

그림 2.1. GasEx-98에서 EC로 측정한 기체교환상수와 기존 관계식과의 차이	6
그림 2.2. GasEx-01에서 EC 플럭스 측정을 위해 사용된 다양한 플랫폼: (좌) 관측선, (중) 소형보트, (우) 뜰개(drifter) 어레이	7
그림 2.3. R/V MIRAI의 EC 플럭스 측정 장비	7
그림 2.4. R/V MIRAI에서 관측된 EC 이산화탄소 플럭스(위)와 Wanninkhof(92)를 이용한 bulk 이산화탄소 플럭스(아래)	7
그림 2.5. 자료 후처리 과정에 따른 기체교환속도 결과의 차이	8
그림 2.6. R/V Knorr에 설치된 EC 이산화탄소 플럭스 장비 모식도	9
그림 2.7. R/V MIRAI에 설치된 EC 플럭스 관측장비	10
그림 2.8. 이산화탄소 관측장비 특성에 따른 이산화탄소 플럭스 추정량 차이	10
그림 2.9. NOAA R/V Ronald Brown에 설치된 EC 플럭스 관측장비	11
그림 2.10. 풍속에 따른 기체교환속도의 차이	11
그림 2.11. 이산화탄소 측정기 특성에 따른 이산화탄소 분석결과. 측정기 특성에 따른 자료 후처리가 필수적임을 보여주는 결과임	12
그림 2.12. R/V NBP에 설치된 자동 EC 플럭스 관측장비	13
그림 2.13. 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).	14
그림 2.14. CORDEX의 연구 영역들. http://www.cordex.org	15
그림 2.15. 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).	16
그림 2.16. 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).	· 17
그림 2.17.	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).	18
그림 2.18.	해양생지화학 모듈인 TOPAZ(왼쪽)와 BLING(오른쪽)의 개념도	19
그림 2.19.	해면 영양염 농도 분포. 관측 [Garcia et al., 2014]과 TOPAZ, BLING, minBLING을 비교함. 단위 μM . Galbraith et al. (2015).	19
그림 2.20.	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(짙게 칠한 도형)을 제시함. Park et al. (2015).	22
그림 2.21.	한국해양과학기술원에서 연구 중인 물리-생지화학 결합 지역해양시스템 모형 모식도	23
그림 3.1.	관측점 부근 에디운동과 농도 이송 개념도	24
그림 3.2.	자료처리 절차(Miller et al., 2010)	30
그림 3.3.	Ship Heave Effect 실험결과 (Miller et al., 2010)	31
그림 3.4.	Motion-Induced Errors의 예(LI-7000: closed-path; LI-7500: open-path)	31
그림 3.5.	고주파 변동 감쇄 보정을 위한 누적 도수분포 보정	32
그림 3.6.	한국해양과학기술원 해양-대기 결합모델의 개념도.	34
그림 3.7.	랑뮈르 순환에 대한 개념도	35
그림 3.8.	해양-대기 생지화학 과정과 물질 교환 모식도 (GEOMAR)	· 36
그림 3.9.	해양-대기 이산화탄소 플럭스에 영향을 주는 요소들에 대한 개념도. Garbe et al. (2014).	37

그림 6.1. 제3차 기본계획 비전 및 중점 추진전략	45
그림 6.2. 해양수산과학기술 관련 계획의 체계	47
그림 6.3. 연구개발 편익 추정을 어렵게 하는 요소	53

제 1 장 서론

제 1 절 연구의 배경 및 필요성

- 해양-대기 경계면에서의 이산화탄소 교환은 대기 중 이산화탄소 수준을 결정하는 주요 요소이다. 현재 인간 활동에 의해 대기로 추가 방출되는 탄소의 약 1/3~1/2 가량이 해양으로 흡수되는 것으로 알려져 있는데(Takahashi et al., 2002; Sabine et al., 2004; Jacobson et al., 2007; Takahashi et al., 2009), 향후 기후변화로 인한 해양의 이산화탄소 흡수량의 변화를 예측하기 위해서는 해양-대기 이산화탄소 교환과 관련된 해양 경계면에서의 과정을 이해해야 한다.
- 해양-대기 이산화탄소 교환량은 통상 표층 해수와 해양대기의 이산화탄소 분압과 이산화탄소의 용해도, 기체교환상수를 이용해 다음과 같이 bulk 플럭스(flux)로 산정한다.

$$Flux = ks(pCO_{2w} - pCO_{2a})$$

Flux : 해양-대기 이산화탄소 교환량

k : 기체교환상수

s : 이산화탄소 용해도

pCO_{2w} : 표층 해수의 이산화탄소 분압

pCO_{2a} : 해양대기의 이산화탄소 분압

따라서 해양-대기 이산화탄소 교환량은 표층 해수와 해양대기의 이산화탄소 분압 차이와 풍속에 의해 결정되는 기체교환상수에 의해 결정된다. 기체교환상수는 C-14나 다른 지화학 추적자를 이용해 경험식으로 산출한 값을 활용하는데, 제안자에 따라 풍속의 2차, 3차 혹은

4차 관계식으로 표현되어(Liss and Merlivat, 1986; Wanninkhof, 1992; Wanninkhof and McGillis, 1999; Nightingale et al., 2000; McGillis et al., 2001; Ho et al., 2006; Sweeney et al., 2007; Weiss et al., 2007; Prytherch et al., 2010; Edson et al., 2011) 기체 교환상수의 선택에 따라 해양-대기 이산화탄소 교환량 산정 결과가 달라진다.

- 기상 관측기술의 발달에 따라 에디 공분산(eddy covariance, EC)을 측정해 이산화탄소의 연직 플럭스를 직접 산정하는 것이 가능해졌다. 특히 육상 생태계 연구에서는 생태계의 계절변동에 따른 이산화탄소 순 교환량 산정에 에디 공분산을 활용한 연구를 전 지구적 차원의 네트워크를 통해 진행하고 있으며(<http://fluxnet.ornl.gov>, Baldocchi et al., 2001), 관측 자료 별 오차를 줄이기 위한 표준 관측 방법과 자료 처리 방법을 활용하고 있다(Lee et al., 2004).
- 반면 해양에서는 관측선이나 부이 등 움직이는 플랫폼을 활용해 에디 공분산 관측을 수행해야 하기 때문에 관측 플랫폼의 구조물에 의한 에디 공분산 영향을 최소화 할 수 있는 관측 디자인부터 관측 자료에서 플랫폼의 움직임을 제거하는 자료 후처리, 샘플링 오차와 시료관 및 관측기 내에서의 신호 감쇄, 밀도효과 등 자료의 신뢰성 확보를 위한 세심한 보정 작업이 필수적이다.
- 관측선에서 신뢰성 있는 에디 공분산과 이산화탄소 분압을 측정하는 기술을 확보하면 관측선의 이동 항적에 따라 해양-대기 이산화탄소 교환량을 직접 산출해 낼 수 있으며, 이를 활용해 해양의 탄소 흡수량 추정의 품질을 높일 수 있다.
- 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 기후 변화 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 사회적인 비용이 발생할 수도 있다 (Walton et al., 2016).
- 한반도에도 최근 여름철 폭서와 겨울철 폭한, 국지성 호우의 증가 그리고 이상 수온 상승으로 인한 적조 발생 등으로 인하여 극한 기후에

대한 국가적·사회적 관심이 증가하고 있다. 그러나 아직까지는 이러한 극한 기후를 예측하기에는 기술적인 한계가 있으며 사후적인 진단에 그치고 있다.

- 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 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.
- 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). 전 지구적인 탄소 순환에 대한 지역해의 기여도를 평가하기 위해서는 지역기후모델에 생지화학 과정을 접합함으로써 지역해에서의 탄소순환 과정에 대한 모델 기반 연구 또한 필요할 것이다.

제 2 절 연구의 목표 및 범위

- 관측선이나 부이와 같은 해양 관측이 이루어지는 움직이는 플랫폼에서 플랫폼의 움직임을 제거하고 신뢰성있는 에디 공분산을 산출해 고품질의 해양-대기 플럭스를 추정할 수 있는 연직 플럭스 산정.
- 에디 공분산 산출 결과에 대응 가능한 시·공간적으로 해상도 높은 이산화탄소 분압 관측을 통해 고품질의 해양-대기 이산화탄소 교환량 산정.
- 지역기후 결합 모델 개발
 - 해양-대기-생지화학 과정 결합 지역기후모델 개발.
 - 해양-대기 상호작용 모수화 방안 개선.
- 지역 기후변화 시나리오 작성
 - 극한 해양기후 현상 분석.
 - 온실 기체 상승에 따른 지역 기후변화 시나리오 작성.

제 2 장 국내외 연구동향

제 1 절 해외동향

- 미국 R/V Ronald H. Brown을 이용해 1998년 5월과 6월 북대서양의 GasEX-98 항차 해양의 움직이는 플랫폼에서 EC 플럭스 관측이 처음 시도되었다(McGillis et al., 2001). C-14를 이용한 이산화탄소 흡수량과 유사한 결과가 나타나나 풍속이 11 m/s 이상인 경우 직접 측정된 플럭스가 확연히 더 크게 나타난다는 결과가 보고되었다.

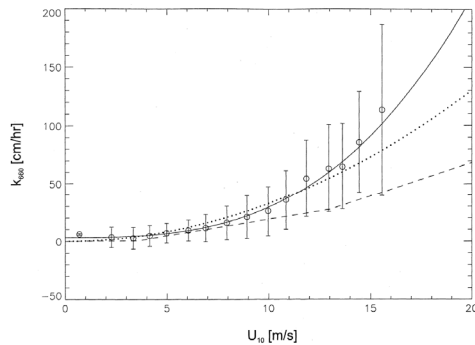


Figure 8. Direct covariance air-sea CO_2 transfer velocities and standard deviations corrected to $Sc = 660$ versus 10-m wind speed during GasEx-98. The Wanninkhof [1992] relationship (dotted line), Liss and Merlivat [1986] relationship (dashed line), and the cubic wind speed relationship (2S) (solid line).

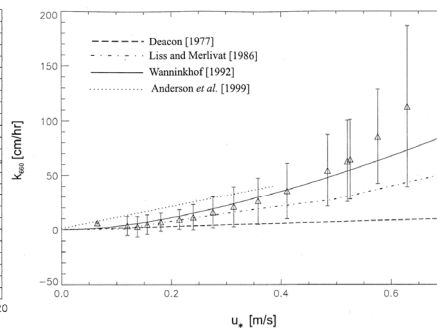


Figure 9. Direct covariance air-sea CO_2 transfer velocities and standard deviations corrected to $Sc = 660$ versus friction velocity during GasEx-98. Wanninkhof [1992], Liss and Merlivat [1986], Deacon [1977], and Anderson et al. [1999] relationships are shown for comparison. Anderson et al. [1999] data are from direct flux measurements over a lake. Referenced wind speeds are converted to friction velocities using bulk drag coefficients.

그림 2.1. GasEx-98에서 EC로 측정된 기체교환상수와 기존 관계식과의 차이

- 이후 McGillis 연구그룹에서 열대 태평양에서 GasEx-01 항차에서 EC 플럭스 관측을 다시 수행하였다(McGillis et al., 2004). GasEx-01 관측에서는 대형 관측선으로 인한 바람장 변형의 영향을 제거하기 위해 소형보트와 뜰개(drifter) 어레이를 이용해 각각 EC 플럭스 측정을 수행하였다.

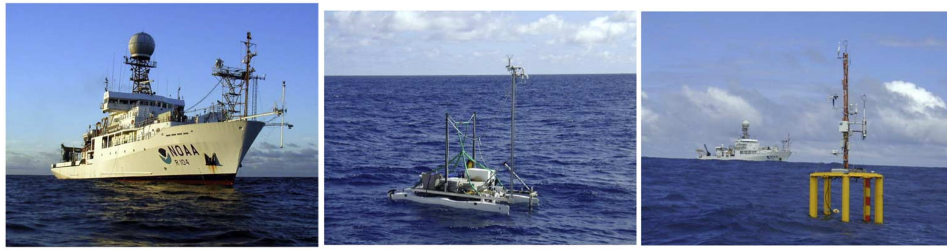


그림 2.2. GasEx-01에서 EC 플럭스 측정을 위해 사용된 다양한 플랫폼: (좌) 관측선, (중) 소형보트, (우) 뜰개(drifter) 어레이

○ 일본 연구진들도 JAMSTEC의 R/V MIRAI를 이용해 2001 열대 서태평양에서 1개월 관측을 시도하였다(Tsukamoto et al.).

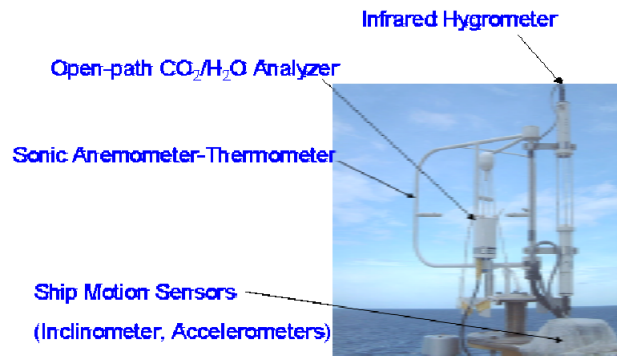


그림 2.3. R/V MIRAI의 EC 플럭스 측정 장비

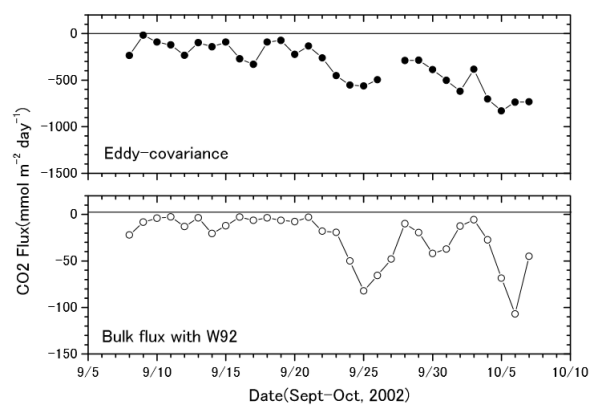


그림 2.4. R/V MIRAI에서 관측된 EC 이산화탄소 플럭스(위)와 Wanninkhof(92)를 이용한 bulk 이산화탄소 플럭스(아래)

- 덴마크 R/V Vaedderen을 이용해 2006년 8월 시작한 지구일주 Galathea 3 항차에서 관측(Christiansen et al.)을 시행했으며, 이 관측에서는 기존 해수 이산화탄소 분압 측정과 EC를 이용한 직접산정을 동시진행 하였다.
- 발틱해의 Arkona Spar 관측타워에서 EC 이산화탄소 플럭스 관측을 수행하였다(Weiss et al., 2007).
- 일본 연구진에 의해 R/V MIRAI를 이용해 열대 인도양에서 MR05-03 항차에서 관측이 수행되었다(Kondo and Tsukamoto, 2007).
- 북대서양에서 G.O. Sars 항차에서 관측이 수행되었다(Lauvset et al., 2011).
- 북대서양에서 Polarfront 항차에서 관측이 수행되었다(Prytherch et al., 2010).

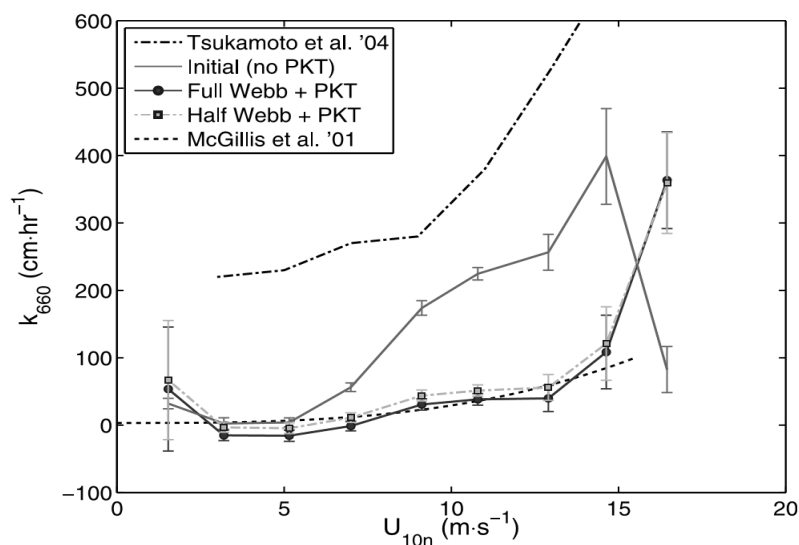


그림 2.5. 자료 후처리 과정에 따른 기체교환속도 결과의 차이

- 미국 R/V Knorr를 이용해 2007년 여름 북대서양에서 2개 항차에서 관측을 수행하였다(Miller et al., 2010).

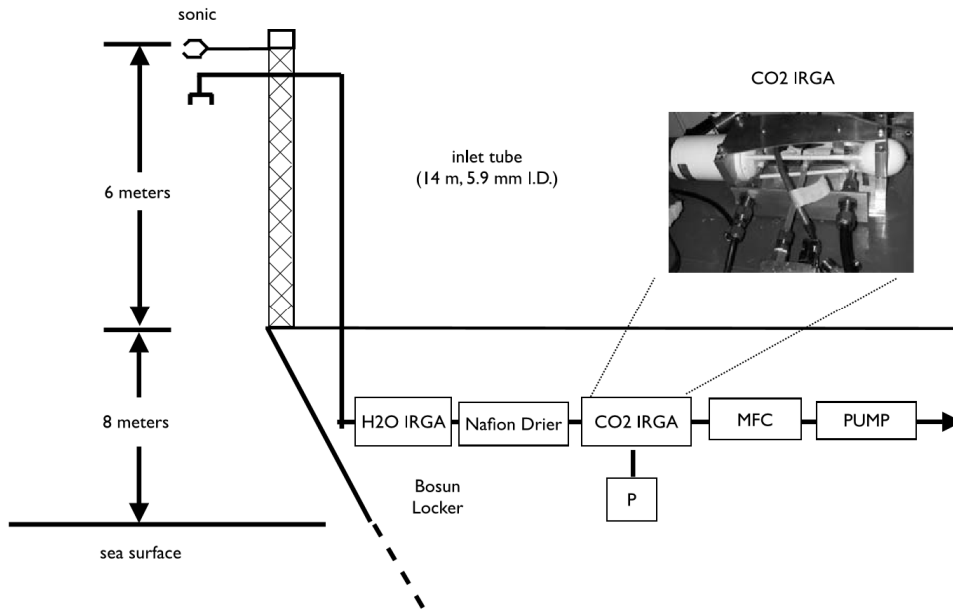


그림 2.6. R/V Knorr에 설치된 EC 이산화탄소 플럭스 장비 모식도

- 일본 JAMSTEC의 R/V MIRAI를 이용해 2008년 7월 적도태평양 (MR08-03 항차)에서 관측을 수행하였다(Kondo and Tsukamoto, 2012). 플럭스 관측을 위해 4개 지점(1개 지점 test run 3회, 이후 3개 지점에서 각 12시간씩 관측)에서 항속과 선수방향을 일정하게 유지하여 관측을 진행하였다.

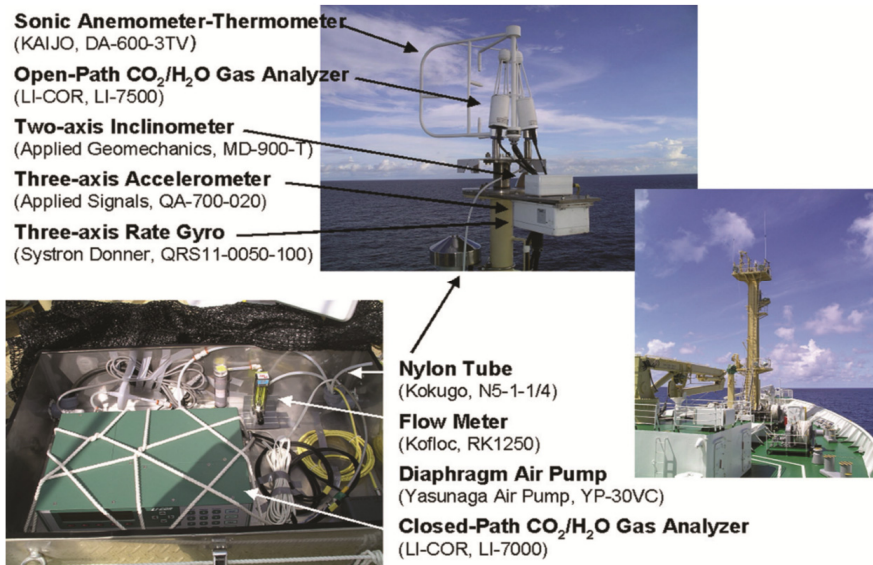


그림 2.7. R/V MIRAI에 설치된 EC 플럭스 관측장비

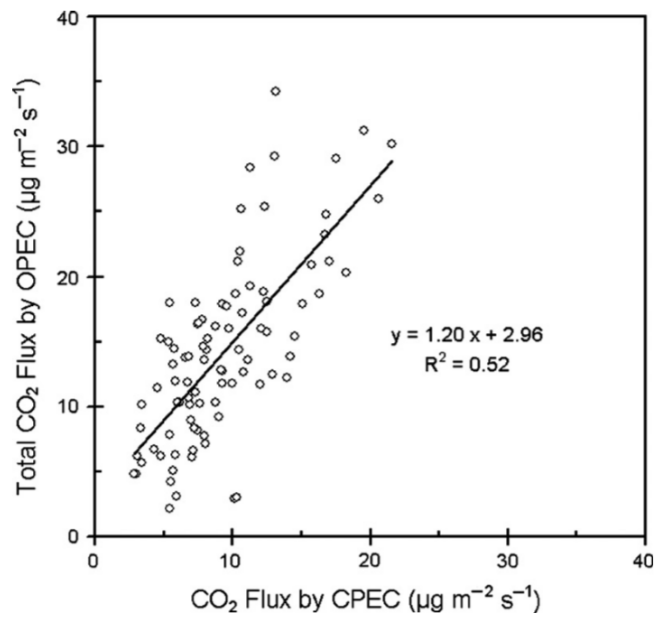


그림 2.8. 이산화탄소 관측장비 특성에 따른 이산화탄소 플럭스 추정량 차이

- 남극해에서 SO GasEx 항차에서 관측을 수행하였다(Edson et al., 2011).



그림 2.9. NOAA R/V Ronald Brown에 설치된 EC 플럭스 관측장비

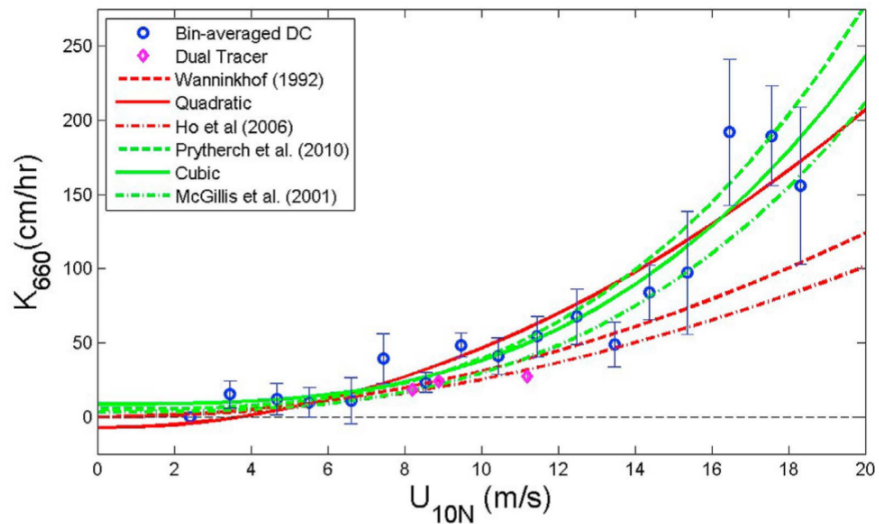


그림 2.10. 풍속에 따른 기체교환속도의 차이

- R/V Roger Revelle을 이용해 2011년 8월~2012년 2월 열대 인도양 DYNAMO 항차에서 관측을 수행하였다(Blomquist et al., 2014).
- R/V Ka'imimoana를 이용해 2012년 1월~2월 열대 태평양 TORERO 항차에서 관측을 수행하였다(Blomquist et al., 2014).

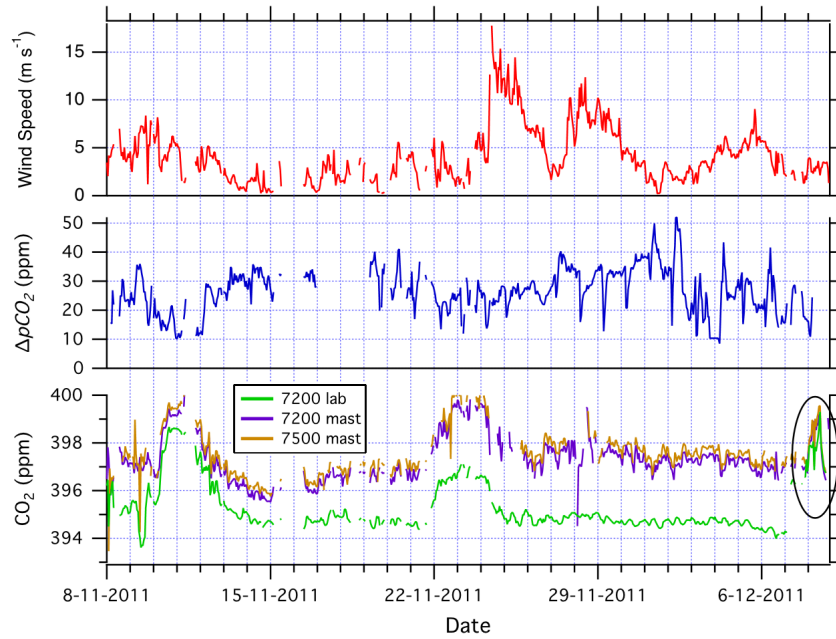


그림 2.11. 이산화탄소 측정기 특성에 따른 이산화탄소 분석결과. 측정기 특성에 따른 자료 후처리가 필수적임을 보여주는 결과임

- 미국 R/V I/B NBP를 이용해 2013년 1월부터 2014년 6월까지 18개월간 9개 항차(남극 및 북극 고위도)에서 무인관측을 수행하였다 (Butterworth and Miller, 2016).



그림 2.12. R/V NBP에 설치된 자동 EC 플럭스 관측장비

- 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 2.13). 고해상도 지역기후 모델의 필요성이 대두되었다.

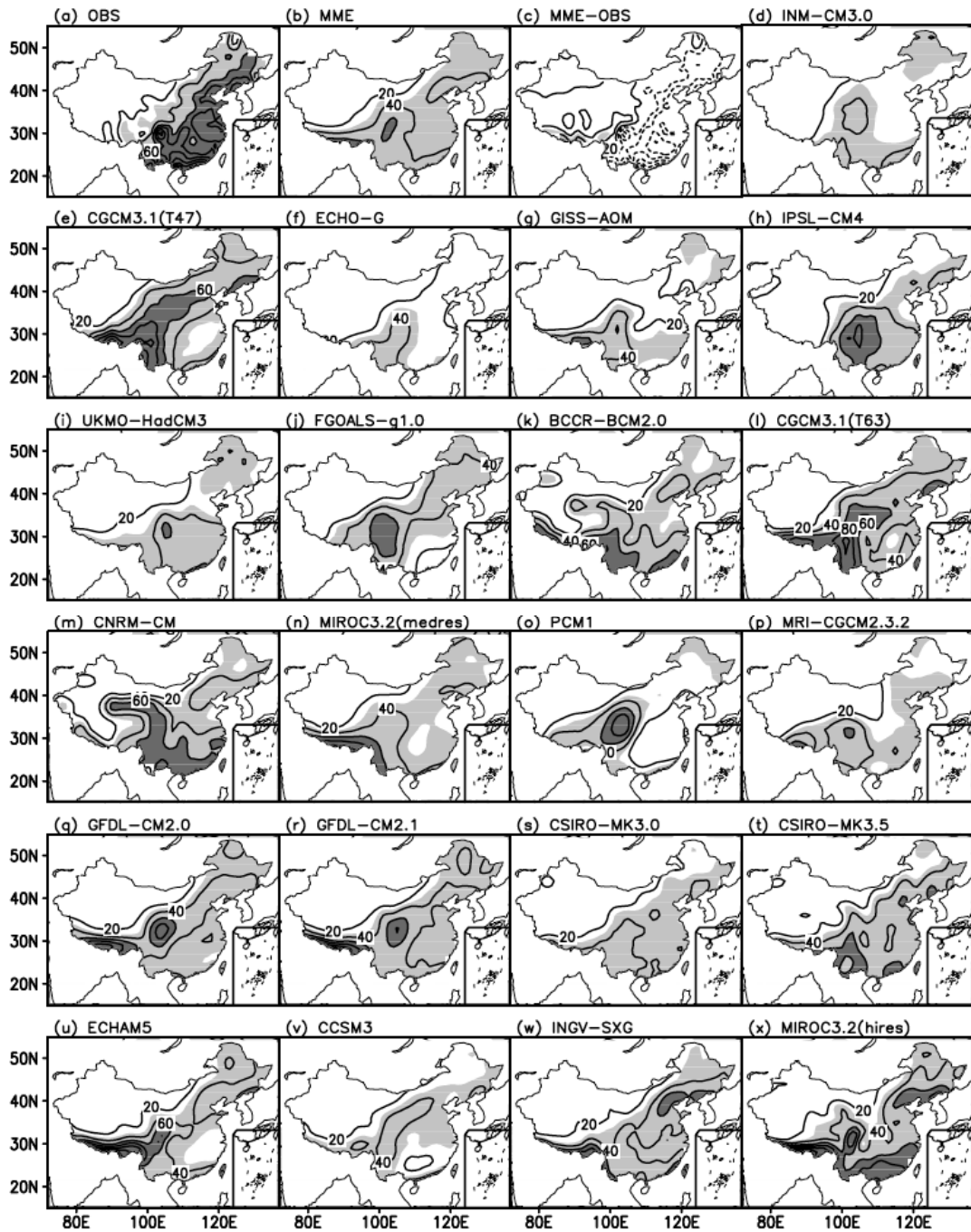


그림 2.13. 중국 대륙에서 1961-2000 평균 July-August 평균 강수량. 단위: 100 mm. (a) 관측 (b) 다중모델 앙상블 평균값 (MME), (c) MME와 관측의 차이, (d)-(x) 개별 모델 결과. Li et al. (2011).

○ 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 2.13). 14개의 영역으로 구분되어 있으며, 한반도는 East-Asia 영역에 속해 있다.

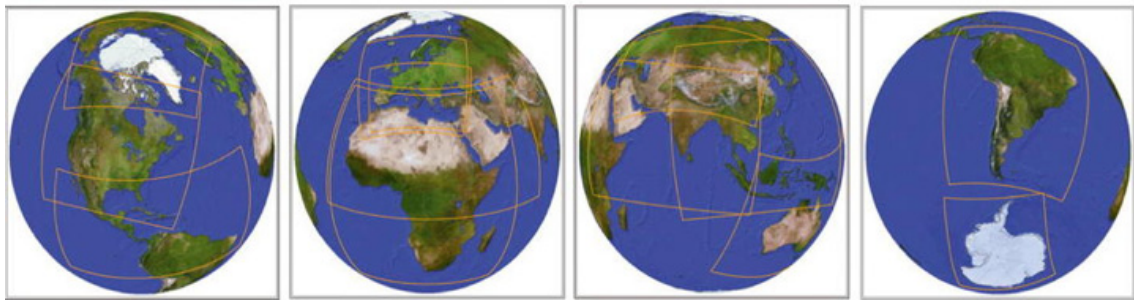


그림 2.14. CORDEX의 연구 영역들. <http://www.cordex.org>.

- 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 기후 예측의 가능성을 보여주었다(그림 2.15). 그러나 이 연구는 대기 모델을 기반으로 하여 기후 역학을 종합적으로 해석하기에는 한계가 있다.

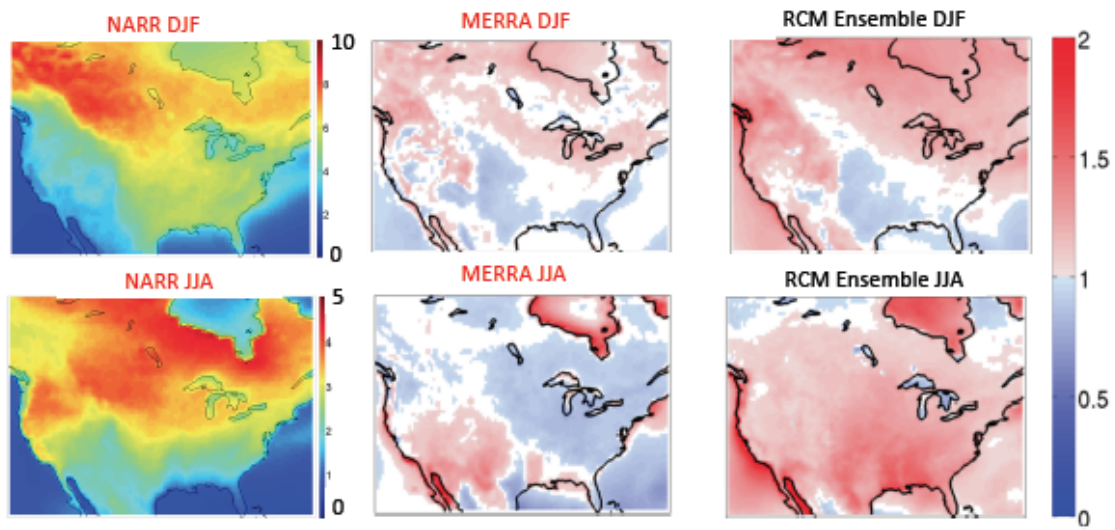


그림 2.15. NCEP 북미 지역 재분석 자료(NARR)에 나타난 일별 기온의 표준편차 (왼쪽)와 MERRA 재분석 자료의 표준편차와의 비율 (가운데) 그리고 지역기후 앙상블 모델의 표준편차와의 비율(오른쪽). Loikith et al. (2015).

- 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.

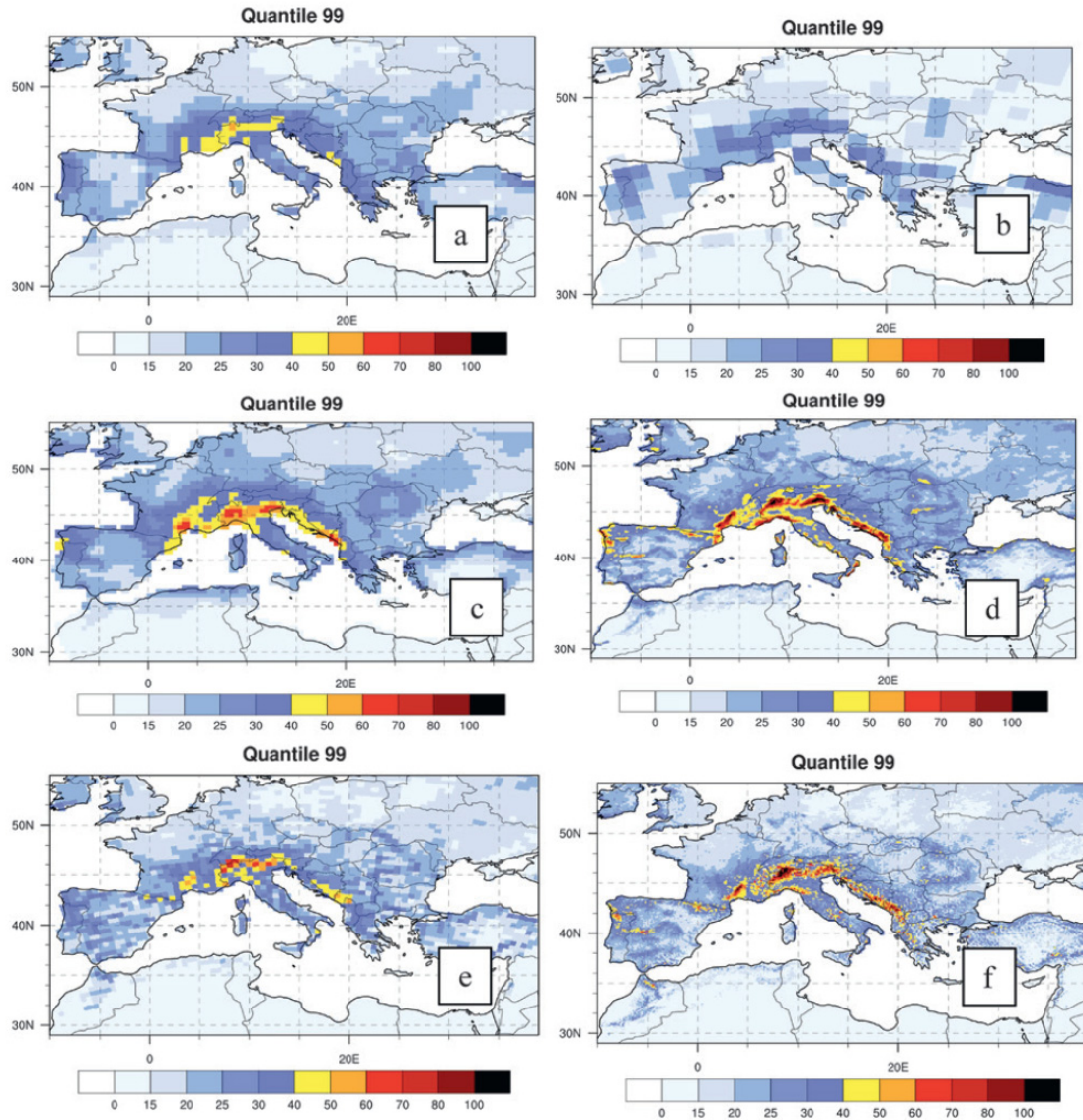


그림 2.16. 1989년부터 2009년 기간의 9월부터 11월까지 일별 강수량의 99% quantile (1% 극값) (mm day^{-1}): (a) ERA-Interim; (b) ALADIN-Climate model, 150 km; (c) COSMO-CLM model, 50 km, forced by ERA-Interim; (d) COSMO-CLM model, 12 km; (e) ALADIN-Climate model, 50 km; and (f) ALADIN-Climate model, 12 km. Ruti et al. (2016).

- 인도 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 대하여 관측과

결합 지역기후모델 그리고 대기모델 결과를 비교하여 결합 지역기후 모델이 인도 여름 몬순 시기에 강수량의 계절적인 특성 뿐만 아니라 계절내 진동 (Intra-seasonal oscillation)에 대한 모의 성능을 향상 시키는 것을 보였다.

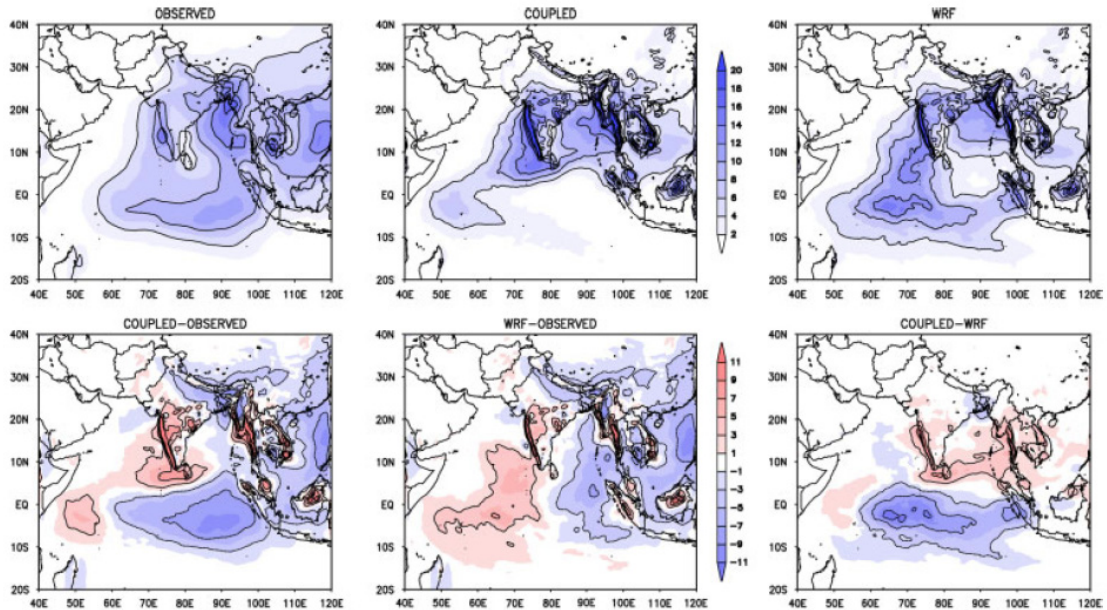


그림 2.17. 관측 JJAS 기후평균 강수량 (mm day⁻¹) 관측 (왼쪽 위), 결합 기후모델 (중간 위) 그리고 대기 모델 (오른쪽 위). 결합모델-관측 (왼쪽 아래), 대기모델-관측 (중간 아래) 그리고 결합모델-대기모델 (오른쪽 아래). Samala et al. (2013).

- 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 2.18). 최근의 해양-대기-생지화학과정이 접합된 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 2.19).

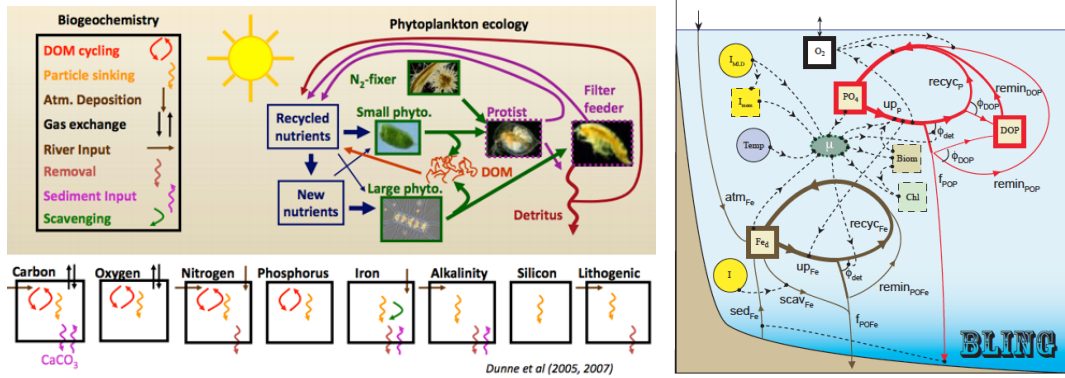


그림 2.18. 해양생지화학 모듈인 TOPAZ(왼쪽)와 BLING(오른쪽)의 개념도

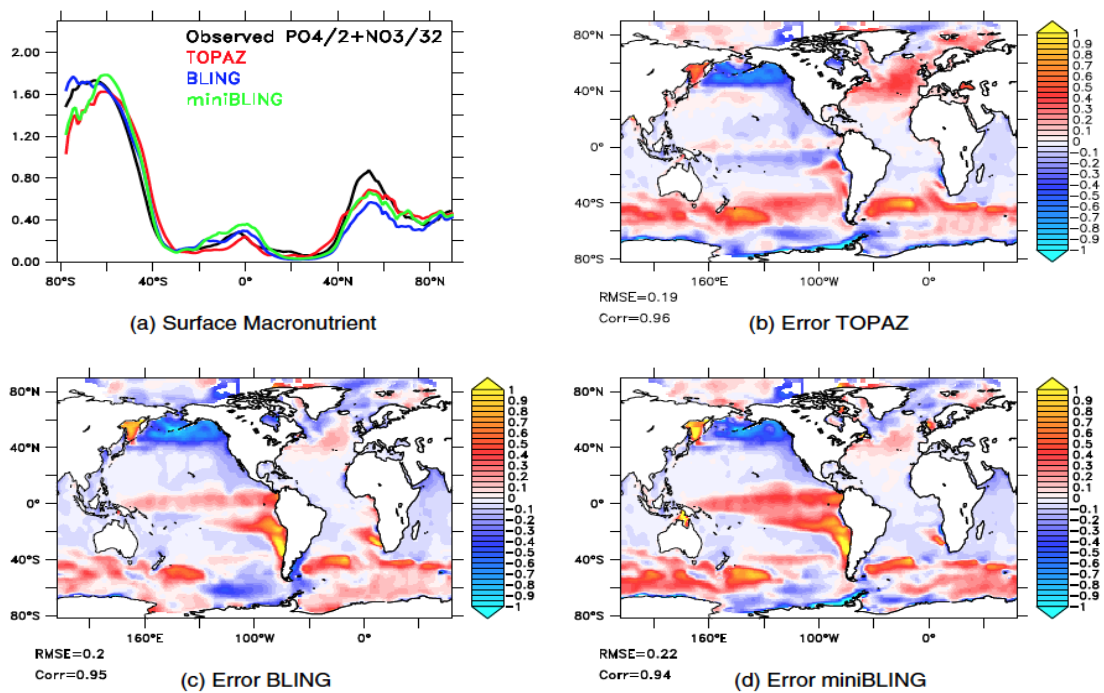


그림 2.19. 해면 영양염 농도 분포. 관측 [Garcia et al., 2014]과 TOPAZ, BLING, miniBLING을 비교함. 단위 μM . Galbraith et al. (2015).

- 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 모델에 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 지역 기후 연구가 활발하게 수행되고 있다. 지역해에서 탄소순환에 대한 연구는 아직 미흡하나, TOPAZ 또는 BLING과 같은 해양 생지화학 모듈이 개발되어 지역해에 적용이 가능하다. 해양-대기 결합 지역기후 모델의 개발로 인하여 해양-대기 상호 작용에 의한 지역기후 민감도 실험이 가능해졌다. 그러나 아직까지 해양-대기 플럭스는 기존의 전 지구 기후모델에 적합하도록 개발되었으며, 지역기후 모델을 위한 해양-대기 플럭스 모듈을 개선할 필요가 있다.

제 2 절 국내동향

- 이어도 과학기지에 관측장비로 설치된 EC 측정장비를 통해 부산대에서 난류속, 잠열속, 현열속 등을 산출하였다.
- 북극 다산기지에 EC 측정기와 고사양 이산화탄소 측정기를 설치해 극지연에서 고속 EC 이산화탄소 플럭스 측정연구를 수행중이다.
- 소청초 과학기지에서도 EC 측정기와 고사양 이산화탄소 측정기를 설치해 고려대에서 고속 EC 이산화탄소 플럭스 측정연구를 수행중이다.
- 움직이는 플랫폼을 이용한 EC 이산화탄소 플럭스 측정은 극지연구소 아라온호를 이용해 극지연에서 2012년 관측을 시도했으나, EC 이산화탄소 플럭스 산정결과가 이산화탄소 bulk 플럭스 보다 10배 이상 큰 값이 나와 아직 자료 후처리에 대한 분석을 진행중이다.
- 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 2.20). 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.

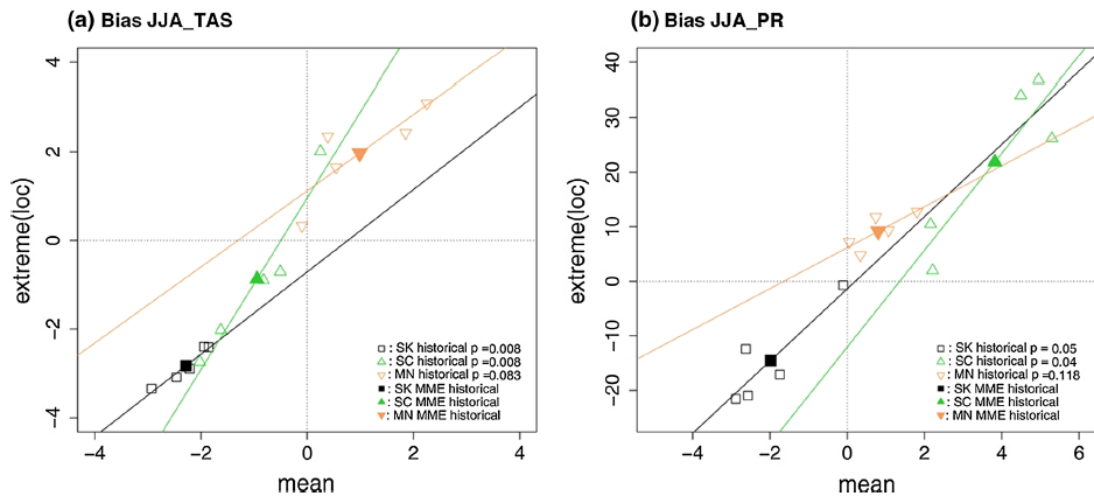


그림 2.20. 일별 기온(TAS, ° C)과 강수량(PR, mm day⁻¹)에 대한 평균 평향에 대한 극값 편향의 상관관계. 5개의 개발 모델 결과(열린 도형)에 대해 다중 모델 앙상블 평균 값(짙게 칠한 도형)을 제시함. Park et al. (2015).

- 한국해양과학기술원은 [한반도 해역 생태계 미래변화예측 I] 과제를 통해 해양순환모형(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.

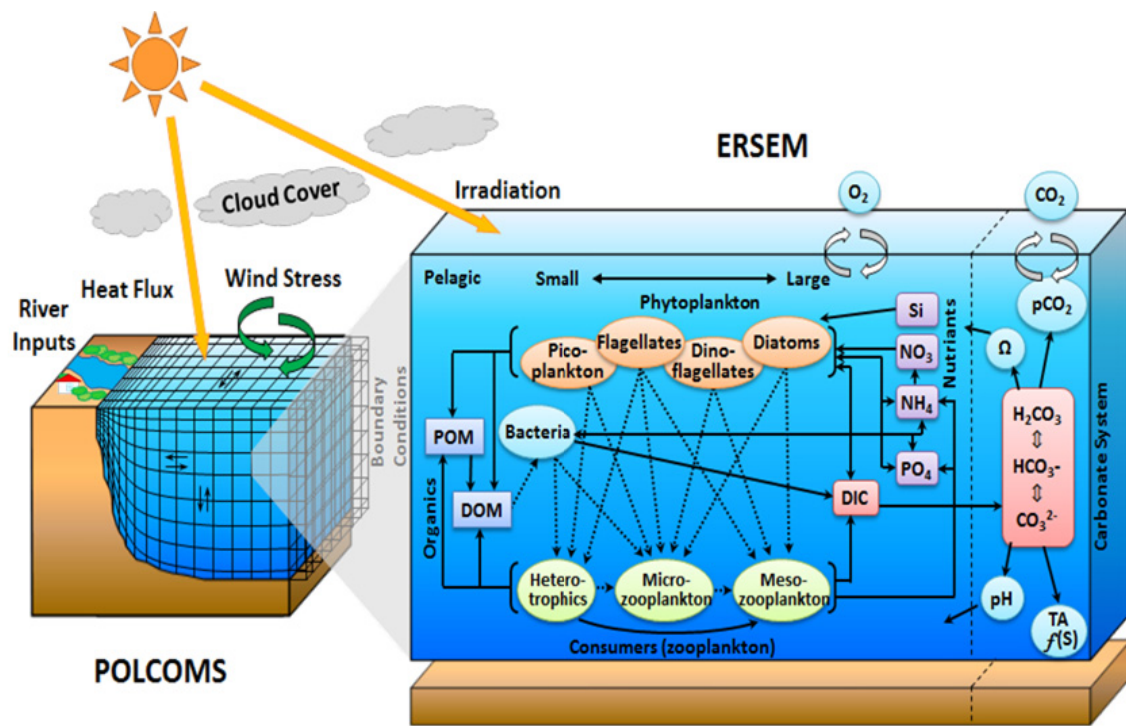


그림 2.21. 한국해양과학기술원에서 연구 중인 물리-생지화학 결합 지역해양시스템 모형 모식도

제 3 장 연구내용

제 1 절 에디 공분산(Eddy covariance)을 이용한 해양-대기 이산화탄소 플럭스 직접 산정 기술

1. 에디 공분산 측정 기본 개념

○ 에디플럭스 개념

- 대기-해양 경계 부근에는 다양한 크기의 에디가 존재한다.
- 에디운동 중 상방 운동(w_1)은 그 시간(time1)의 하층 정보(s_1)를 상층으로 전달한다.
- 에디운동 중 하방 운동(w_2)은 그 시간(time2)의 상층 정보(s_2)를 하층으로 전달한다.
- 열, 습도, 모멘텀, 기체 등의 농도(s)와 연직운동(w)를 알면 플럭스 산출이 가능하다.

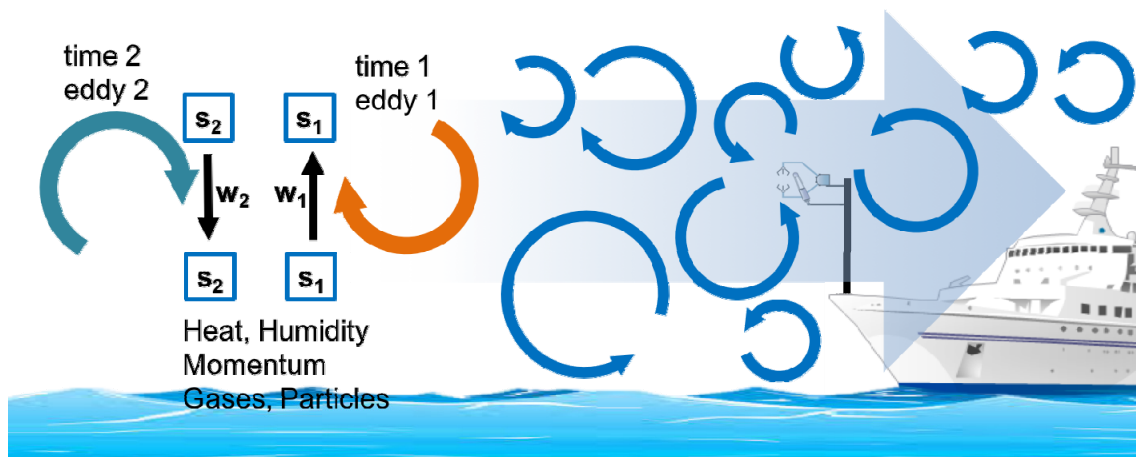


그림 3.1. 관측점 부근 에디운동과 농도 이송 개념도

○ 에디 공분산

- 물질이동은 대기밀도(ρ), 연직유속(w), 농도(s)의 곱에 해당된다.
- 물질이동에 관여하는 항목을 평균값과 섭동 성분으로 분리한 후 평균한다.
- 물질이동은 연직유속의 섭동 성분과 농도의 섭동 성분의 곱에 해당된다.
- 연직유속과 농도의 공분산($\overline{w's'}$)이 에디플럭스(F)에 해당된다.

$$F = \overline{\rho w s}$$

$$F = \overline{(\bar{\rho} + \rho')(\bar{w} + w')(\bar{s} + s')}$$

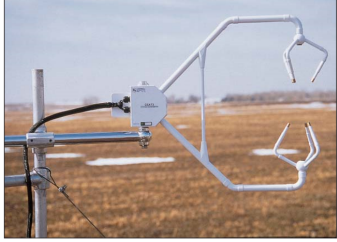
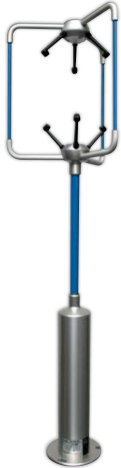
$$F = \overline{\bar{\rho}\bar{w}\bar{s}} + \overline{\bar{\rho}w's'} + \overline{\bar{w}\rho's'} + \overline{\bar{s}\rho'w'} + \overline{\rho'w's'}$$

○ 움직이는 플랫폼에서의 플럭스산정

- 고정점과 달리 플랫폼의 이동이 야기하는 공분산($\overline{w's'}$)을 고려할 필요가 있다.
- 통계적 방법을 통한 신뢰도 확보가 필요하다.

2. 측정 항목 및 기기

○ 3차원 풍속(& 기온)

No.	제품	특성	
1		구분	3-D Sonic Anemometer
		제조사	Campbell Scientific
		모델명	CSAT3
		특징	-10cm vertical measurement path -3방향 풍속과 음속 측정 -측정주기: 1~60 Hz -Accuracy Off set error: $\langle \pm 8.0 \text{ cm s}^{-1} \text{ (ux, uy)}$ $\langle \pm 4.0 \text{ cm s}^{-1} \text{ (uz)}$ Gain error: $\langle \pm 2\%$ of reading (wind vector within $\pm 5^\circ$ of horizontal) $\langle \pm 3\%$ of reading (wind vector within $\pm 10^\circ$ of horizontal) $\langle \pm 6\%$ of reading (wind vector within $\pm 20^\circ$ of horizontal)
2		구분	3-Axis Ultrasonic Anemometer
		제조사	Gill
		모델명	WindMaster / WindMaster Pro
		특징	-3방향 풍속과 음속, 기온(sonic) 측정 -측정주기: 20 Hz or 32 Hz / 32 Hz -측정범위: 0-50 m/s / 0-65 m/s -측정해상도: 0.01 m/s -Accuracy $\langle \pm 1.5\%$ RMS @12 m/s

○ 플랫폼 움직임(3차원 가속도; pitch, roll, and yaw)

No.	제품	특성	
1		구분	Multi-Axis Inertial Sensing System
		제조사	Systron Donner
		모델명	Motionpak II
		특징	-linear accelerations과 angular rate -측정범위: $\pm 100^\circ / \text{sec}$ / $\pm 1, 2, 3, 5, 10 \text{ g's}$ -G Sensitivity: $\leq 0.02^\circ / \text{sec/g}$ -Resolution: $\leq 0.004^\circ / \text{sec}$ / $\leq 10 \mu \text{g}$
2		구분	Singel-Axis Analog Gyroscope
		제조사	Systron Donner
		모델명	QRS11-0050-100
		특징	-MEMS Quartz Angular Rate Sensor -측정범위: $\pm 100^\circ / \text{sec}$ -G Sensitivity: $\leq 0.02^\circ / \text{sec/g}$ -Resolution: $\leq 0.004^\circ / \text{sec}$
3		구분	Miniature Attitude Heading Reference System
		제조사	Microstrain
		모델명	3DM-GX3-25
		특징	-Attitude heading range: 3방향 각 360° -Accelerometer range: $\pm 5 \text{g}$ -Gyroscope range: $\pm 300^\circ / \text{sec}$ -Static accuracy: $\pm 0.5^\circ$ pitch, roll, heading -Dynamic accuracy: $\pm 2.0^\circ$ pitch, roll, heading -Resolution: $< 0.1^\circ$ -Data output rate: 최대 1000 Hz
4		구분	3D accelerometer
		제조사	Applied Signals
		모델명	QA-700-020
		특징	-R/V MIRAI 시스템에 사용됨
5		구분	2D inclinometer
		제조사	Applied Geomechanics
		모델명	MD-900-T
		특징	-R/V MIRAI 시스템에 사용됨

3. 자료처리 기술

○ 각 플럭스 산정은 아래 식에 따른다.

Momentum

$$\tau_x = -\overline{\rho_a u'w'}, \quad (2)$$

Sensible heat

$$H = \overline{\rho_a c_p w' T'}, \quad (3)$$

Latent heat

$$H_L = \overline{\rho_a L_v w' q'}, \quad (4)$$

Carbon dioxide

$$F_c = \overline{\rho_a w' c'}, \quad (5)$$

τ_x : 동서방향 모멘텀 플럭스

u : 동서방향 풍속

H : sensible heat flux

H_L : latent heat flux

c_p : specific heat capacity of air

T : dry air temperature

L_v : latent heat of vaporization

q : specific humidity

○ 이산화탄소 관측값은 다음과 같은 보정절차가 필요하다.

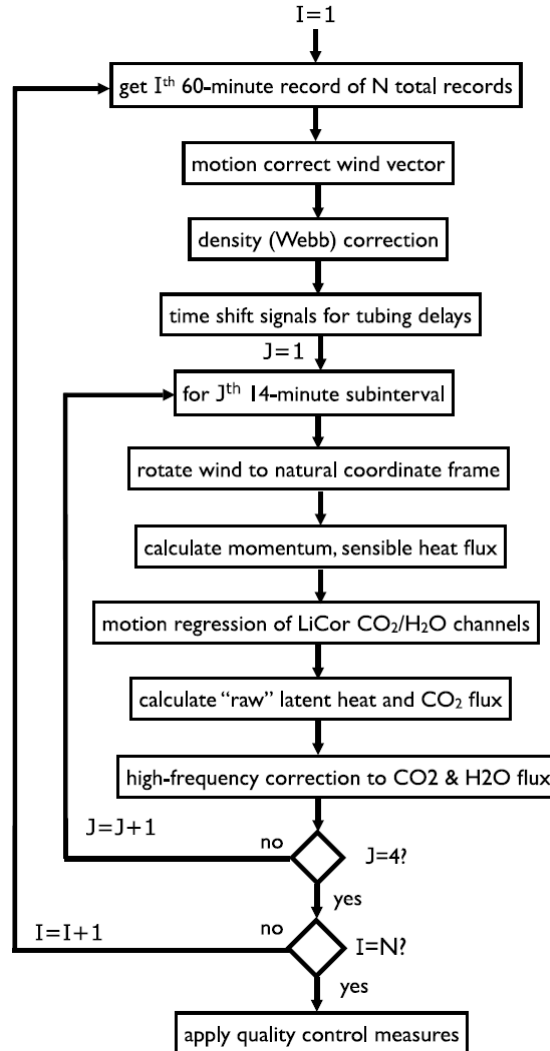


그림 3.2. 자료처리 절차(Miller et al., 2010)

(1) Density Correction(Webb corrections)

- open-path 측정기에서 관측한 이산화탄소 molar density를 mixing ratio로 변환한다.
- 온도, 수증기, 압력 변동에 관한 Webb corrections 이다.

$$F_c = \overline{w' \rho'_c} + (1 + \mu\sigma) \frac{\overline{\rho_c}}{T} \overline{w' T'} + \mu \frac{\overline{\rho_c}}{\rho_a} \overline{w' \rho'_v} + (1 + \mu\sigma) \frac{\overline{\rho_c}}{P} \overline{w' P'}$$

(2) Ship Heave Effects

- 플랫폼의 상하 움직임으로 인한 압력 변화에 대한 보정이 필요하다.
- 빠른(50 Hz) 압력 센서를 이용해 보정을 시행한다.

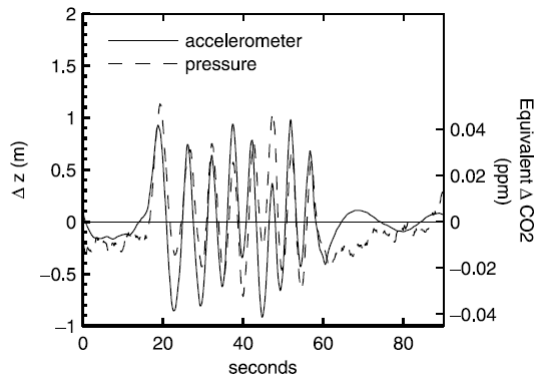


그림 3.3. Ship Heave Effect 실험결과 (Miller et al., 2010)

(3) Motion-Induced Errors

- LI-6262, LI-7000 등의 closed-path 측정기에서 나타나는 오류이다.
- 6개 플랫폼 운동요소(3개 angle rates와 3개 linear accelerations)와 측정된 이산화탄소 분압의 선형회귀식을 이용해 제거한다.

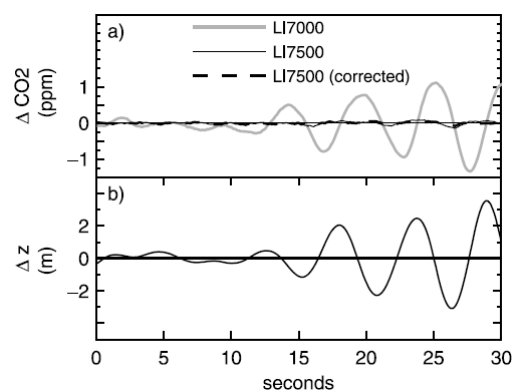


그림 3.4. Motion-Induced Errors의 예
(LI-7000: closed-path;
LI-7500: open-path)

(4) 고주파 변동의 감쇄

- 해양-대기 이산화탄소 플럭스 측정에서 어려운 점은 상업용 센서의 감도에 비해 해양의 이산화탄소 변동이 작다는 것이다.
- 대기 경계층에서의 에너지 밀도는 빈도(f)가 증가함에 따라 $f^{-5/3}$ 으로 감소해, 고주파 변동은 저주파 변동에 비해 감지가 어렵다.
- 고주파 변동은 분석기로 연결된 시료 채취관 내에서 감쇄되어 사라져 난류로 인한 변동은 감지되지 않고 EC 플럭스가 저평가 되게 된다.
- 이를 방지하기 위해, 가능한 분석기로 연결되는 시료관의 길이는 짧게 설계하고, 누적 도수분포 법을 활용해 고주파 변동 감쇄를 보정한다.

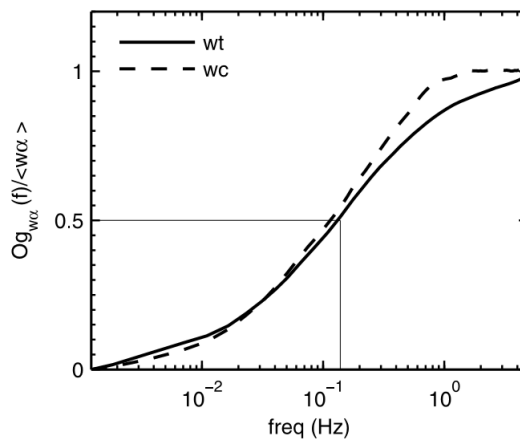


그림 3.5. 고주파 변동 감쇄 보정을 위한 누적 도수분포 보정

(5) 바람장 변형 효과

- 일반적으로 제안된 바람장 변형 효과 보정방안은 없지만, 바람장 변형에 의한 열속의 변동량은 모멘텀 플럭스 변동에 비해 적은 것으로 알려져 있으며, 이산화탄소 플럭스 역시 열속과 같은 스칼라양이므로 바람장 변형 효과는 크지 않은 것이다.

제 2 절 지역기후 모형 개발

1. 해양-대기 결합 지역기후 모델 개발

○ 지역 대기 모델 수립

- WRF(Weather Research and Forecasting Model)에 기반, 코드의 접근성과 활용 툴의 편이성 등을 고려해야 한다.

○ 지역 해양순환 모델 수립

- GFDL MOM5, ROMS 등을 적용할 수 있다.
- 한반도 주변의 순환장에 대한 모의 성능을 고려해야 한다. ROMS는 황동중국해 순환을 모의하는데 장점이 있는 반면, MOM5는 태평양 및 동해 순환을 모의하는데 장점이 있다.

○ 해양-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 3.6).

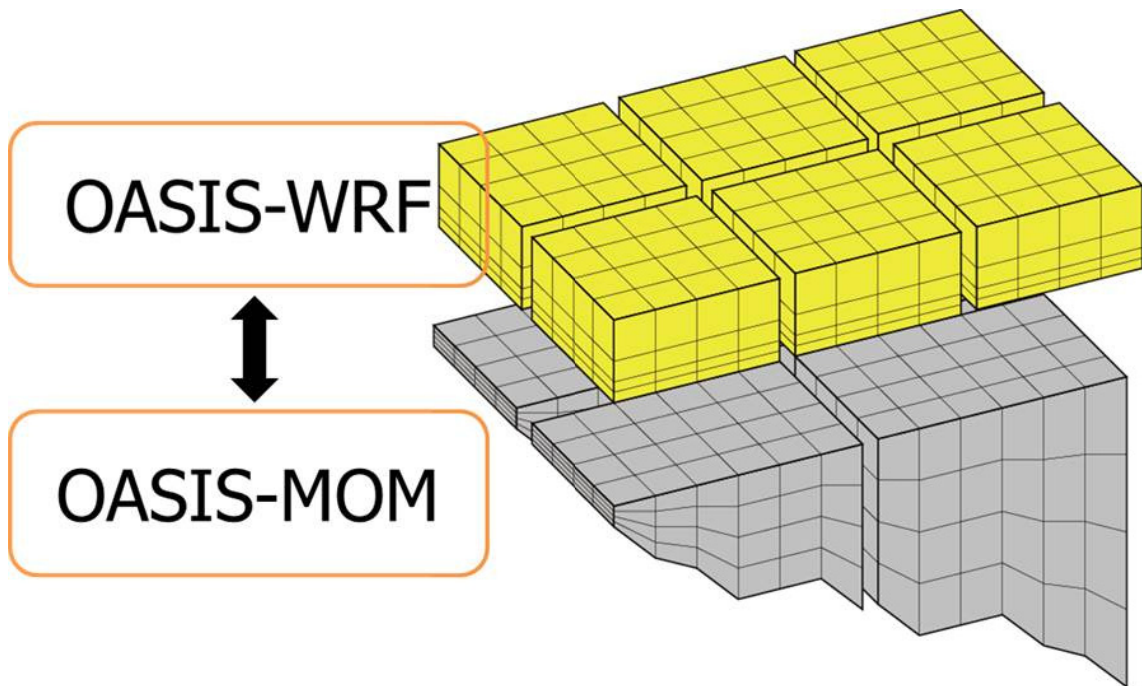


그림 3.6. 한국해양과학기술원 해양-대기 결합모델의 개념도.

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 11). 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.

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

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

○ 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 모의하기 보다는 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.

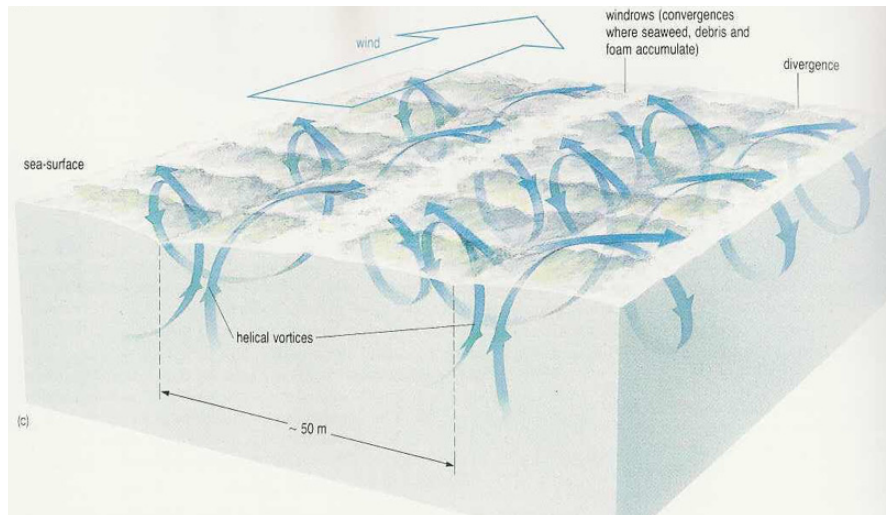


그림 3.7. 랑뮈르 순환에 대한 개념도

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 3.8). 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 변수를 추정한다.

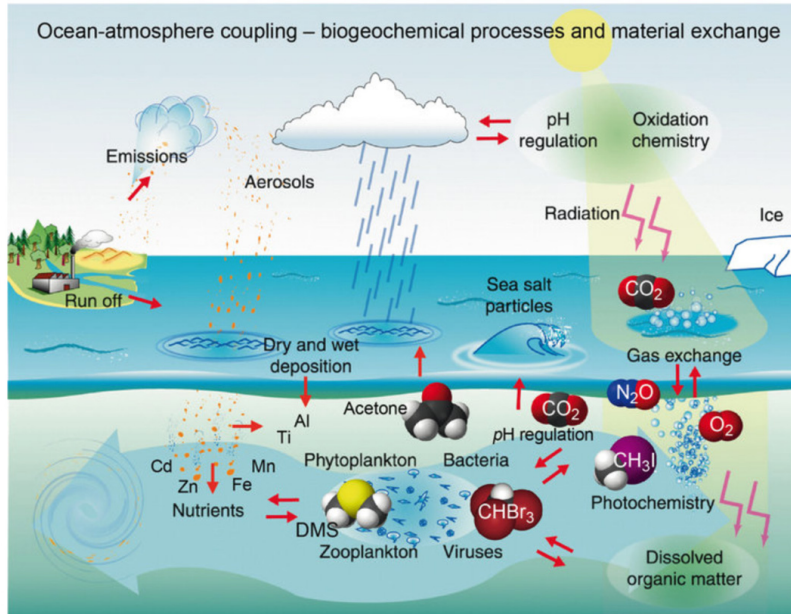


그림 3.8. 해양-대기 생지화학 과정과 물질 교환 모식도 (GEOMAR)

○ 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 3.9).
- 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 사용한다. 대부분의 수치모델에서 Dc를 상수로 처방하며 지역적인 특성을 고려할 수 없다.
- 본 연구를 통해 관측되는 eddy covariance 자료를 기반으로 아래 식과 같이 Dc에 대한 추정식을 다시 설계할 수 있을 것이며 지역해 특성을 고려한 모수화 방안을 구축할 수 있을 것이다.

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

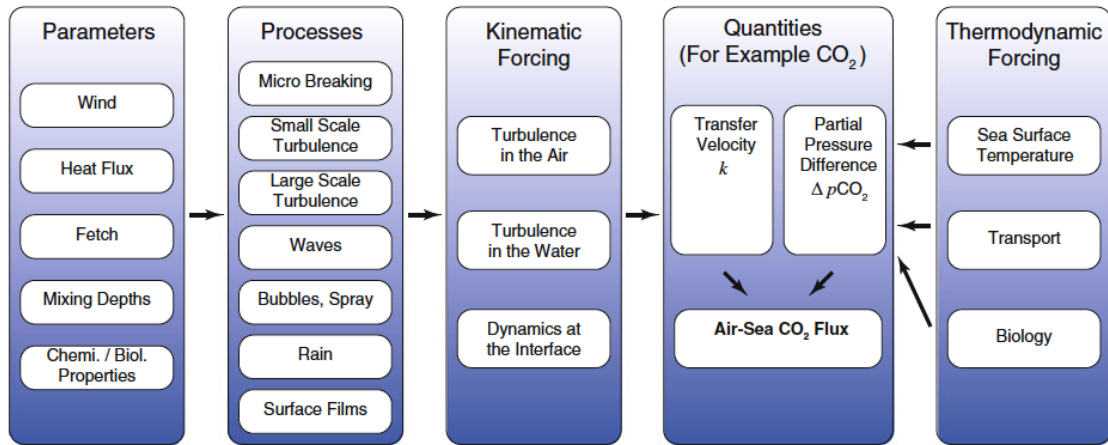


그림 3.9. 해양-대기 이산화탄소 플럭스에 영향을 주는 요소들에 대한 개념도. Garbe et al. (2014).

4. 한반도 지역기후 시나리오 생산

○ 한반도 주변 지역 탄소 순환 변동 모의

- 한반도 지역해에서 일어나는 탄소 순환을 모의함으로써 탄소 budget을 계산한다.
- 전지구 기후변화에 대한 한반도 지역해의 영향을 진단한다.

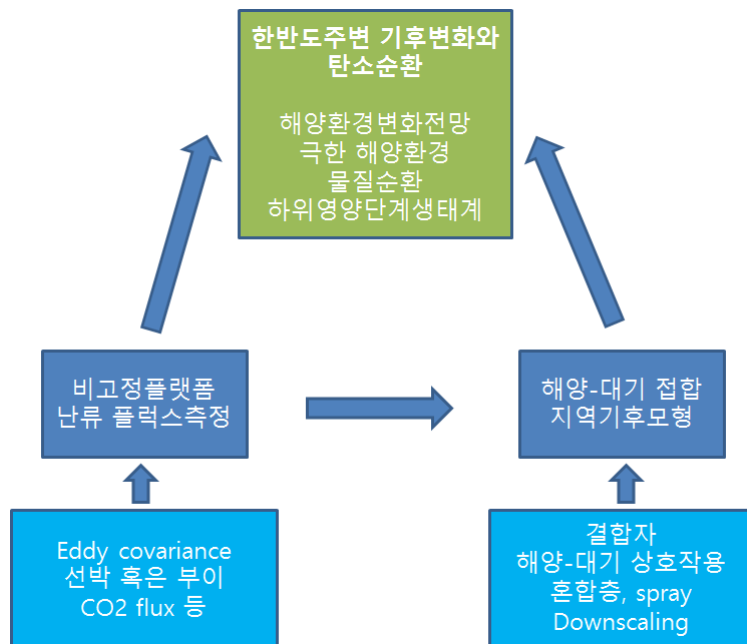
○ 한반도 극한 기후 현상 진단 및 모의

- 한반도 지역에서 일어난 극한 해양기후 현상 분석하고 진단한다.
- 한반도 지역 극한 해양 기후 현상 재현 실험을 통한 지역기후 모형 민감도 실험을 수행한다.

○ 한반도 지역기후 변화 시나리오 작성

- 한반도 지역기후 변화 시나리오 조건을 생성한다.
- 한반도 지역기후 변화 시나리오를 작성한다.

제 4 장 추진전략 및 추진체계



□ 연차별 연구계획

구분	년도	세부연구목표	연구내용
1차년도	2017	교환량 직접 산정을 위한 시스템 구성	<ul style="list-style-type: none"> •관측기기 및 부이 선정 및 구매 <ul style="list-style-type: none"> - 측정기기 및 센서 비교/선정, 구매 - 부이 구성내역 검토 및 주문 •시스템 구성을 위한 시험자료 생산 <ul style="list-style-type: none"> - 선박 설치 위치 선정 - 부이용 장비 구성 및 시험운영
		이동플랫폼 생산자료 처리기술 수립	<ul style="list-style-type: none"> •자료처리 기술 습득 <ul style="list-style-type: none"> - 해외 EC flux 연구팀 기술연수를 통한 기술정보 습득 •자료처리 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - EC 및 inertial measurement test data 생산 - 부이 motion correction 기술 개발
		해양 및 대기 단독모형 수립	<ul style="list-style-type: none"> • 해양 모델 수립 <ul style="list-style-type: none"> - 모델 영역 및 해상도, 개방경계 조건, 지형 등 준비 - 모델 초기 구동 • 대기 모델 수립 <ul style="list-style-type: none"> - 모델 영역 및 해상도, 개방경계 조건, 지형 등 준비 - 모델 초기 구동
			<ul style="list-style-type: none"> • 모델 모수화 개선 방안 연구 <ul style="list-style-type: none"> - Sea spray - Mixed layer scheme - Convection scheme
		해양-대기 상호 작용 모수화 방안 연구	<ul style="list-style-type: none"> • 이산화탄소 플럭스 모수화 방안 연구 <ul style="list-style-type: none"> - 관측 자료와의 연계 방안 도출
2차년도	2018	교환량 직접 산정을 위한 시스템 구성 및 설치	<ul style="list-style-type: none"> •부이 관측시스템 완성 <ul style="list-style-type: none"> - 시스템 완성 및 시범운영 •관측선 장비 integration <ul style="list-style-type: none"> - 온누리호 설치 - 시험운영
		EC flux 시범자료 생산	<ul style="list-style-type: none"> •부이 관측시스템 시범운영 <ul style="list-style-type: none"> - EC 이산화탄소 플럭스 자료 평가 - process 개선 •관측선 시범자료 생산 <ul style="list-style-type: none"> - 관측선 관측시스템 시험운영 - 관측선 motion correction 기술 개발 - 관측선 bulk flux 자료와 비교

구분	년도	세부연구목표	연구내용
2차년도	2018	접합 지역기후 모형 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 결합 모델 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 해양-대기 결합 모델 구축 - 해양-대기 플릭스 교환 모수화 연구 • 지역기후 모형 시험 구동 <ul style="list-style-type: none"> - 초기 구동
		해양-대기 상호 작용 모수화 방 안 구현	<ul style="list-style-type: none"> • 모수화 방안 구현 <ul style="list-style-type: none"> - Sea Spray - Mixed layer scheme
3차년도	2019	교환량 직접 산정 시스템 안정화	<ul style="list-style-type: none"> • 부이 관측시스템 안정화 • 관측선 관측시스템 시범운영
		EC flux 자료 생산	<ul style="list-style-type: none"> • 부이 EC flux 자료 생산 및 제공 <ul style="list-style-type: none"> - 지역 기후모형 평가자료 제공 • 관측선 시범자료 생산 <ul style="list-style-type: none"> - 시범자료 평가 - process 개선
		결합 지역기후 모형 민감도 실험	<ul style="list-style-type: none"> • 민감도 실험 <ul style="list-style-type: none"> - Sea spray 모수화 방안에 따른 모델 민감도 실험 - mixed layer scheme 방안에 따른 모델 민감도 실험
		이산화탄소 플릭스 개선	<ul style="list-style-type: none"> • Gas Transfer Coefficient 추정
		시나리오 구성 과 실험을 위한 자료 준비	<ul style="list-style-type: none"> • 온난화 전망 <ul style="list-style-type: none"> - 온난화 전망에 따른 전지구 및 지역 기후 영향 분석 - 극한 해양 현상 분석
4차년도	2020	관측 시스템 안정화 및 최적화	<ul style="list-style-type: none"> • 부이 관측시스템 안정운영 • 관측선 관측시스템 안정화
		EC flux 자료 생산	<ul style="list-style-type: none"> • EC flux 자료생산 및 제공 <ul style="list-style-type: none"> - 부이 및 관측선 EC flux 자료생산 - 지역 기후모형 평가자료 제공
		모델 개선	<ul style="list-style-type: none"> • 모델 민감도 분석 <ul style="list-style-type: none"> - Sea spray - Mixed layer scheme • 이산화탄소 플릭스 적용 실험 <ul style="list-style-type: none"> - 이산화탄소 플릭스 모수화 개선에 따른 모형 성능 진단
		시나리오 적분	<ul style="list-style-type: none"> • 한반도 기후 변화 시나리오 적분
5차년도	2021	관측 시스템 안정운영	<ul style="list-style-type: none"> • 부이 및 연구선 관측시스템 안정운영 • EC flux 자료생산 및 제공
		모델 완성	<ul style="list-style-type: none"> • 모델 완성 <ul style="list-style-type: none"> - 모델 동결 및 매뉴얼 작성 - 모델 성능 제시 - 이산화탄소 플릭스 개선 결과 제시
		시나리오 완성	<ul style="list-style-type: none"> • 시나리오 완성

제 5 장 활용방안 및 기대성과

- 3차원 직접 측정을 통한 해양-대기 플럭스 산정은 한반도 주변 해역에서 실행된 바 없으므로, 북서태평양과 한반도 주변해역에 대한 고품질 자료 생산을 통해 선도형 기술 개발의 기초를 마련할 수 있다.
- 부이와 관측선에 시스템을 설치하여 기후변화에 중요한 변수로 작용하는 해양-대기 플럭스를 다양한 환경에서 직접 측정하고, 이를 해양-대기 결합 지역기후 모형에 적용하는 계획을 수립함으로써 고품질 미래예측 자료 생산의 기초를 마련할 수 있다.
- 개선된 해양-대기 접합 기후모형을 이용한 한반도 기후변화 시나리오의 결과를 제공할 수 있다.
- 미래의 지구 시스템 변화에 대한 상세한 예측을 도출 할 수 있으며, 이렇게 도출된 결과는 2차 가공 및 제공을 통해 인간 활동과 직결된 자연환경 요소, 산업 활동, 국가경제, 개인 경제에 걸쳐 다양하게 이용될 수 있다. 기존에 존재하지 않았던 신사업의 배경이 되어 부가적인 이익을 창출하거나 발생 할 수 있는 인적/ 물적 피해를 감소시킬 수 있다.
- 지구 온난화에 따른 장기 기후 변동을 예측하여 기초 자료를 제공할 것이며, 기후변화 적응 정책을 위한 기초 자료를 제공할 수 있다.
- 발생할 수 있는 기상 재해를 예측함으로써 기상재해 저감에 활용될 수 있다. 즉, 홍수, 가뭄, 태풍 등의 예측 능력을 향상시킴으로 국민의 재산과 생명을 보호하고 국민 복지에 기여할 수 있다.
- 기후 변화에 따른 연안지역의 해수면 변화를 예측함으로써 국토 개발 장기

계획 수립에 활용될 수 있다.

- 한반도 지역의 탄소순환을 보다 정밀하게 산출함으로써 온실 기체 저감 및 전지구 기후변화 대응 정책 수립에 국가 차원에서 기여할 수 있다.
- IPCC 지역기후 변화 예측 시나리오 산출에 활용될 수 있다.

제 6 장 경제성 평가

제 1 절 정책적 타당성

1. 정책적 타당성

가. 정책적 타당성 검토 개요

- 정부 R&D사업 혹은 공공부분(출연연 고유사업 등) 연구개발 과제의 정책적 타당성 검토의 목적은 국가과학기술기본계획 등 국가상위 계획에 따른 정책방향 및 세부 기술단위의 범부처 혹은 부처별 추진 계획과의 연계성을 높임으로서 공공투자에 대한 효율성을 확보하는데 있다.
- 특히 각 정부부처는 연구개발 등 과학기술분야 공공투자 시 앞서 언급한 과학기술기본계획을 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 있다.
- 한편 정책적 타당성 검토는 개발하고자하는 기술이 현행 관련 국가 정책과의 부합성이 떨어지는 경우 기술개발의 추진방향 혹은 성과물의 연계 등을 재검토함으로서 위험요소를 배제하는 기획연구의 주요 항목으로 진행된다.
- 이번 기획연구는 해양대기플렉스 산정 및 지역기후모형개발사업을 목적으로 추진되고 있는 만큼 해당 기술과 관련한 정책적 이슈를 해양 과학기술분야 기초원천기술의 확보, 기후변화 대응, 배출량 감축효과, 연안지역 해수면 변화 예측 등으로 설정하여 정책적 타당성을 검토 하였다.

나. 국가상위계획과 추진기술간의 정책 연계

- 정부는 과학기술기본법 제7조(과학기술기본계획)에 따라 매 5년마다 과학기술발전에 관한 중장기 정책목표와 방향을 설정하고 정부의 과학 기술 관련 계획과 시책 등을 종합한 과학기술기본계획을 수립·시행하고 있다.
- 국가과학기술기본계획은 '03년 제1차 기본계획('03~'07)이 수립된 이후 577계획으로 알려진 제2차 기본계획('08~'12), 박근혜정부의 창조경제 정책을 수립한 제3차 기본계획('12~'17)이 수립되어 추진 중에 있다.
- 앞서 언급한 바와 같이 국가과학기술기본계획은 각 정부의 국정기조를 반영하여 작성되고 있으나 1~3차 기본계획까지 과학기술의 역량강화, 과학기술을 통한 산업활성화 등을 중심으로한 지속적인 성장정책을 추진하고 있다는 점에서 큰 틀에서의 유사성을 가지고 있다.
- 제3차 기본계획에서는 경제부흥과 국민행복을 실현하기 위한 5대 핵심 전략을 제시한 바 있으며, ①국가연구개발 투자 확대 및 효율화, ② 국가전략기술개발, ③중장기 창의역량 강화, ④신산업 창출 지원, ⑤ 과학기술 일자리 확대 등이다.
- 이번 기획연구의 주제와 밀접하게 연계된 부분은 ②국가전략기술개발 분야 및 ③중장기 창의역량 강화 분야로 해양수산분야 기후변화 대응력 강화, 창의적 기초연구 진흥, 과학기술 글로벌화 등에 기여할 것으로 판단된다.
 - 특히, 본 과제는 범국가적으로 대응해야할 기후변화대응 사업에 부합하는 창의적 기초연구 진흥 사업 및 과학기술 글로벌화 사업으로 판단된다.
 - 또한 연안지역의 해수면 변화를 보다 과학적으로 예측하여 연안관리에 기여하는 창의적 기초연구라고 할 수 있다.

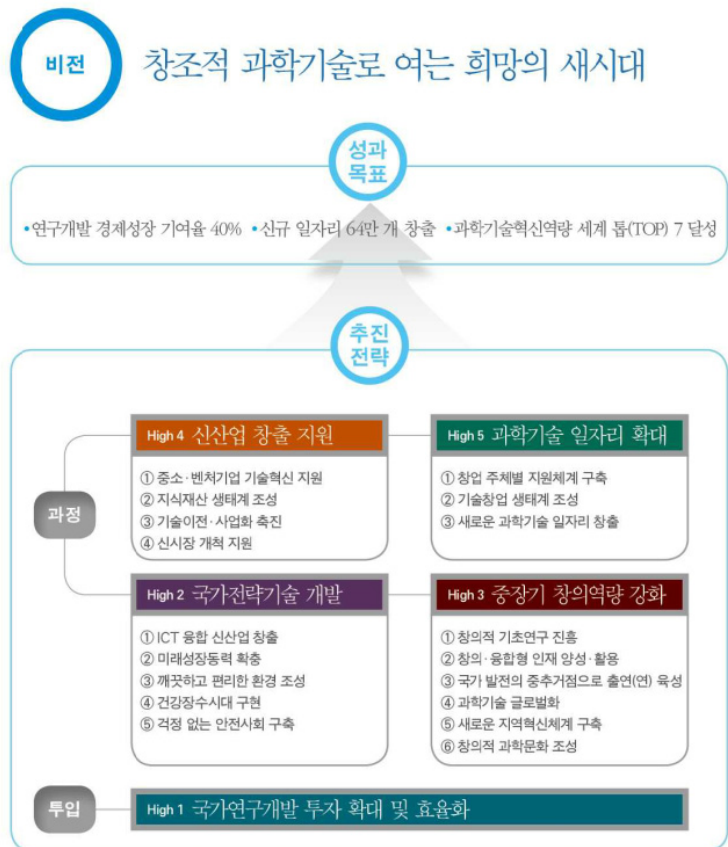


그림 6.1. 제3차 기본계획 비전 및 중점 추진전략

- 제3차 과학기술기본계획에서 제시된 국가전략기술개발의 실현가능성 확보 및 범부처 연계를 위해 '국가중점과학기술 전략로드맵(안, '14년)'이 수립된바 있으며, 동 로드맵에서는 120개 국가전략기술을 중요도 등을 고려하여 5대 분야 30개 기술로 분류하고 보다 효과적인 투자 방향을 제시하였다.
- 제시된 5대 분야는 ①ICT 융합 신산업 창출 분야, ②미래 신산업 기반 확충 분야, ③깨끗하고 편리한 환경 조성 분야, ④건강장수시대 구현 분야, ⑤걱정없는 안전사회 구축 분야이며, 각 전략별 세부과제를 검토해 볼 때 본 기획연구의 주제와 가장 밀접한 부분은 '깨끗하고 편리한 환경 분야' 전략기술 중 기후변화 대응력 강화 과제와 유사하다.

(추진과제) 기후변화 대응력 강화

표 6.1. 깨끗하고 편리한 환경분야 중 기후변화 대응력 강화 기술 세부 내용

추진과제	국가전략기술안
기후변화 대응력 강화 기술	<ul style="list-style-type: none"> ■ 기후변화 감시, 예측, 적응 기술 ■ 이산화탄소 포집, 저장 이용, 기술 ■ 온실가스 저감 기술 ■ 온실가스 감축 통합관리 기술

다. 해양수산부문 계획과 추진기술간의 정책 연계

- 해양수산부 해양수산과학기술 관련 계획은 해양수산발전기본법 제6조에 따른 해양수산발전기본계획(Ocean Korea 21)을 최상위 계획으로 구성되고 있으며, 그 하위에 해양수산R&D 중장기계획('14년)과 소관 기술 혹은 사업별 실행전략 등으로 구성된다.
- 제2차 해양수산발전기본계획('11~'20)은 해양수산분야 국가 종합계획이며 법정계획으로 '세계를 주도하는 선진 해양강국 실현'을 달성하기 위한 3대 목표 ①지속가능한 해양환경의 관리 및 보전, ②신해양산업의 육성 및 전통적 해양산업의 고도화, ③신해양질서의 능동적 수용을 통한 해양영역 확대를 제시한 바 있다.
- 특히 3대 목표를 지원하는 5대 추진전략의 26개 중점과제를 제시하고 있으며, 이번 기획연구의 주제와 밀접한 연관 분야는 '건강하고 안전한 해양이용·관리 실현' 전략으로 해당 중점과제 중 연안지역 기후변화 적응·복구 체제 구축 과제 등과 관련된다.

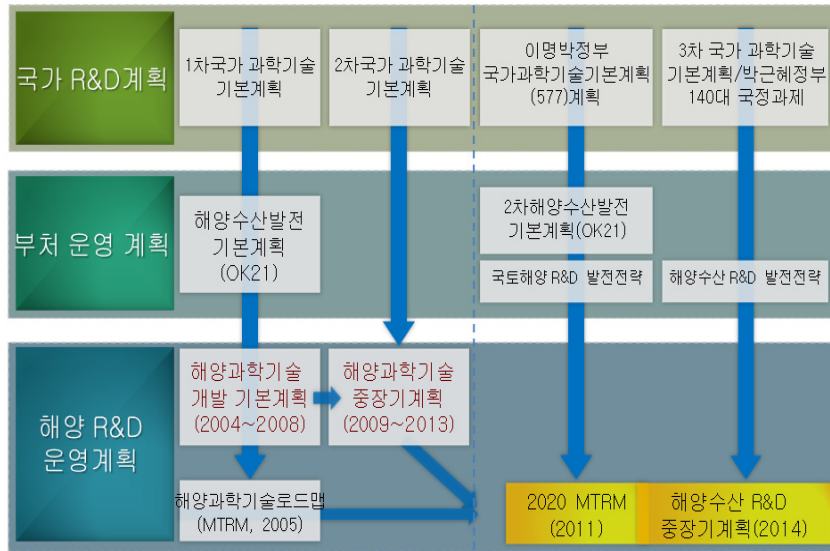


그림 6.2. 해양수산과학기술 관련 계획의 체계

- 해양수산R&D 중장기계획은 앞서 언급한 국가상위계획 및 부처상위 계획의 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 있다.
- 동 계획은 정부 정책방향의 변화 및 정부부처 조직개편에 따라 목표 기간이 혼재되어 있는 상태이나 '05년 수립된 MT 로드맵과 '11년 2020 MT 로드맵은 모두 '14년 수립된 해양수산 R&D 중장기계획으로 수렴된 것으로 언급되고 있다.
- 각각의 계획에서 제시된 최우선 추진과제를 이번 기획에서 제시된 추진기술과의 연계 관점에서 보면 특히, 국가관할해역 내에서의 관측 역량강화를 통한 해양영토주권 강화, 연안재해의 대응과 밀접하다고 볼 수 있으며, 특히 중점기술로 제시하고 있는 전지구적 통합 해양 기후 관측 및 모델링 기술과 상관성이 아주 높다.

- '13년 해양수산부가 부활한 후 산업부처로서의 역량을 확대하기 위해 해양신산업 등 부가가치 창출 중심의 기술개발 추진 정책을 진행하고 있으나, 정부주도의 지원이 필수적인 공공기술분야에 대해서는 정책 우선순위에 따른 선택과 집중 전략을 추진하고 있는 것으로 판단된다.
- 특히 최우선 추진 과제 중 해양예측·예보 시스템 구축 기술, CO2 해양 지중 저장 기술, 연안재해 관리 기술 등의 과제와 관련성이 높다.

표 6.2. 해양수산 R&D 계획에서 제시된 최우선 추진과제 목록

구분	최우선 추진과제
MT 로드맵('05)	1. U-기반 해양물류 스마트 시스템 개발 2. 친해역 해상산업기지 조성기술 3. 해상풍력·파력에너지 복합이용 실용화 기술개발 4. 해양생물 자원을 이용한 신기능성 품종 개발 5. 해양기인 자연재해 예측 및 대응시스템기술 6. 해양생태계 U-기반 통합 관리기술 7. 생태친화 적조제어 및 발생예측 기술
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 융복합 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

라. 추진기술의 정책 부합성

- 앞서 국가상위계획 및 해양수산부문 계획과의 정책연계성 분석에서 나타난 바와 같이 이번 기획연구에서 제시된 '해양대기플럭스 산정 및 지역기후모형 개발 기술'은 해양영토주권 강화, 연안재해의 대응 분야에서 전지구적 통합 해양기후 관측 및 모델링 기술과 상관성이 아주 높아 관련 정책방향과 명확히 연계되어 있다.
- 특히 기후변화 대응 관련 기초 연구개발 능력 증대와 관련 데이터 축적은 국가차원에서 장기 지속적으로 투자해야할 핵심적인 공공기반 기술임과 동시에 정책적 활용도가 높은 기술 분야로서 연구개발의 추진 필요성이 높다고 판단된다.

2. 유사 과제 검토 분석

가. 유사 과제 검토 개요

- 유사 연구 과제 검토는 사업의 성공 여부를 결정하는 주요한 요인으로서 기술개발 추진계획 및 달성 목표수준의 적절성, 개발 기술의 경쟁력 및 성공가능성, 기술수명 주기 등 다양한 요소들을 종합적으로 검토하였다.
- 다만 본 기획연구에서는 이미 국내외 기술동향분석을 통해 기술개발 목표를 설정하고 요소기술의 개발 방향 등을 제시하고 있는 만큼 유사과제의 중복성 측면에서 검토하였다.
- 특히 제3차 과학기술기본계획 등 최근의 정부 R&D 추진 정책이 관련 부처 간 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 있다.

- 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 파악하였다.
- 유사중복과제의 검토 시 대분류 혹은 중분류 기술단위에 국한하지 않고 가능한 세부 기술단위까지를 검토하여 기존 기후변화 대응을 목적으로 하는 제안기술의 특성이 반영될 수 있도록 하였다.

나. 유사 과제 검토 결과

- NTIS를 통해 '13년~'15년까지 추진된 정부 R&D 사업 중 기후변화 대응 관련 과제의 현황 등을 분석하면 다음과 같다.

표 6.3. NTIS 검색('13~'16년)을 통한 관련 과제 추진 현황

부처명	과제명	연구비* (백만원)
해양수산부	해양연구를 통한 기후변화 예측 및 대응	2,175
	기후변화 및 해양재해 대응기술 개발	3,225
	기후변화에 따른 지구시스템 상호 작용 연구	513
	위성기반 한반도 주변해역 해양탄소 추정모델 개발	3,282
기상청	CORDEX-동아시아다중지역기후모델자료의극한기후미래전망 활용성연구	181
	RCP 시나리오와 지역기후모델을 이용한 한반도 장기 기후변화 정보 산출 및 불확실성 분석	860
	기후모델의 지면 과정 개선과 이를 이용한 동아시아 탄소 수지 추정	61
	온실가스 플럭스의 시계열 DB구축과 생태계 탄소역학 구명	180

* 연구비는 사업별 연도별 투입예산 산출의 어려움으로 해당시기 예산을 표기

- 해당 과제는 앞선 국내 연구현황에서 분석된 바와 같이 기후변화 대응 성격의 기초 연구과제로서 해양대기플렉스 산정을 통한 지역기후모형 개발사업과는 다소 차이가 있는 것으로 판단된다.
- 다만, 기후변화 대응 관련 기초 연구가 전세계적으로 지속적으로 이루어지고 있는 현실을 감안하면, 국내 연구개발 지원사업은 오히려 적은 것으로 판단된다.
- 이에 해양수산R&D 측면에서 기후변화 대응을 위한 기초 연구개발 사업은 강력하게 지원되어야 할 것으로 보인다.

제 2 절 경제적 타당성

1. 편익 추정

가. 편익 추정 방법론

- 편익 추정 단위 및 방법론
- 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 한다.
- 사전적으로 편익(benefit)이란 (+)의 사업효과를 의미하며 연구개발 사업의 편익이란 연구개발사업의 수행으로 인해 발생할 것으로 기대되는 (+)의 결과물을 의미한다.
- 미시경제학적으로 연구개발사업의 편익은 추가적으로 발생하는 소비자 잉여의 증가분 또는 생산자 잉여 증가분 등으로 정의 가능하다.

- 연구개발활동은 과학기술 지식, 민간의 수익, 파급효과 등의 관점에서 정의할 수 있는데, 이를 파급의 관점에서 재정의하면, 지식파급, 시장파급, 네트워크 파급 등으로 구분 가능하다.
- 지식파급은 지식의 창출자와 사용자가 다른 경우 발생, 시장파급은 시장기능에 의해 여타 주체들에게 제품이나 공정상의 편익을 전달해주는 것을 의미한다.
- 네트워크 파급은 관련 기술들의 집적을 통해 기능 향상을 가능케 하는 것을 의미하는데, 타당성조사에서 반영하는 효과는 지식파급과 시장파급에 한정한다.
- 지식파급과 시장파급은 사업목표와 직접적으로 연결되고 객관적 산출이 가능할 경우 경제적 타당성의 효과 분석에 반영한다.

표 6.4. 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

- 연구개발사업은 대표적인 비투자 재정사업이자 비정형 사업에 해당한다.
- 이에 연구개발사업의 경제적 가치 평가는, 기술적 불확실성이 높고 가시적 효과를 정량적으로 추정하기 어려우므로, OECD(2007)¹⁾은 다음과 같이 편익 추정의 어려움을 진단한다.

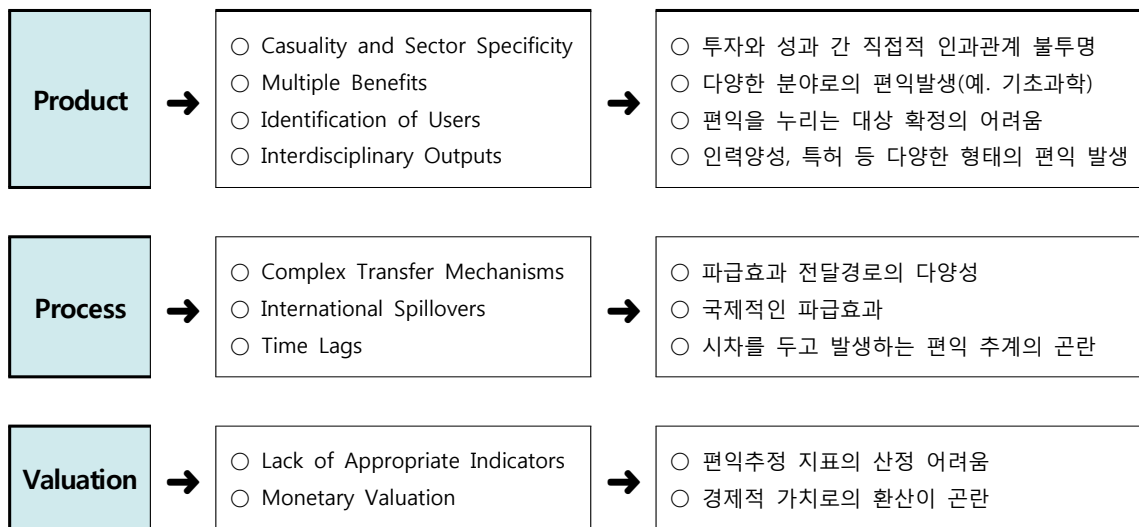


그림 6.3. 연구개발 편익 추정을 어렵게 하는 요소

- KISTEP(2011)²⁾은 연구개발부문 예비타당성조사의 일반적 편익항목을 다음과 같이 제안하였다.

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

2) 한국과학기술기획평가원(2011), 『연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(1판)』, 연구보고서

표 6.5. 연구개발부문 예비타당성조사의 일반적 편익항목

구분	예비타당성조사 비용편익 분석 시 편익 반영	예비타당성조사 비용편익 분석 시 편익 미 반영
정(+) 의 가치 증가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 가치창출·증대 <ul style="list-style-type: none"> - 신기술 적용을 통한 생산량 증가 - 신기술 개발로 인한 가치창출 ○ 기술거래 <ul style="list-style-type: none"> - 기술이전에 의한 로열티 수입 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 과학기술 지식 (논문, 특허 등)[†] ○ 과학기술자의 교육 훈련 ○ 지역개발효과 ○ 지역산업구조 개편 ○ 생산 유발효과 <ul style="list-style-type: none"> ○ 부가가치 유발 효과 ○ 고용 유발효과 ○ 수입 유발효과 ○ 수출 유발효과 ○ 소득 분배효과 ○ 취업 유발효과
부(-) 의 가치 감소	<ul style="list-style-type: none"> ○ 생산비용저감 <ul style="list-style-type: none"> - 생산투입 자원 및 시간의 저감 - 연구기간, 출장횟수 등의 연구수행 비용저감 - 물류비용저감 ○ 피해비용저감 <ul style="list-style-type: none"> - 재난·재해·사고로 인한 피해 감소 ○ 질병비용저감[‡] ○ 환경비용저감[‡] 	

† 논문이나 특허는 비용효과 분석으로 반영할 수 있음

‡ 질병비용저감과 환경비용저감은 사업이 기여한 부분만의 산출과 이중계산 배제에 제약이 있을 경우 비용편익 분석이 아닌 비용효과 분석으로 수행 가능

○ KISTEP(2011)은 (+)의 가치 증가와 (-)의 가치 감소라는 관점에서, 가치창출 증대, 기술거래, 생산비용 저감, 피해비용 저감 등을 연구 개발사업의 편익항목으로 제안하였다.

- 논문 및 특허 등은 비용효과 분석등에서 반영하는 지표로 규정한다.
- 국민경제적 파급효과 역시, 비용편익분석에는 활용하지 않는 것으로 규정한다.

○ 연구개발사업의 사업 시행 효과를 분석하기 위해서는 사업 유무에 따라 각각에 대한 분석을 하여 그 차이를 비교하는데, 이를 위해 합리적인 기준선 분석이 시급하다.

- 첫째, 사업 추진을 통해 해결되는 문제를 중심으로 현재와 미래의 상태에 관련된 경제사회적 변수들을 구체적이고 명료하게 제시해야 한다.
- 둘째, 분석을 위한 모든 변수들을 구분하여 정량값을 제시해야 한다.
- 셋째, 기준선 구체화를 위한 노력 수준을 적절히 결정해야 한다.
- 넷째, 기준선의 상태를 구체화하기 위한 모든 가정들을 명시하고 구체적으로 설명할 필요가 있다.
- 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 있다.
- 다섯째, 시간 기준으로 기준선을 설정하는 시점과 종료시점을 구체적으로 제시 할 필요가 있다.
- 여섯째, 기준선 설정의 과정에서 불확실한 모든 요인에 대해 상세히 기술해야 한다.
- 마지막으로, 분석 대상사업의 경제적 타당성 분석 과정에서 기준선에 적용된 가정들을 준용해야 한다.

표 6.6. 연구개발부문 예비타당성조사에서 기준선 분석 시 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 진행됨. 즉, 자료의 수준, 모형의 수준, 가정의 수준 등이 기준선 분석 결과의 수준을 결정하게 되므로 구체화를 위한 노력의 수준을 예비타당성조사 기간과 재원의 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 효과가 생산자에게 미치는 경우, 생산자 잉여의 창출 분이나 증가분의 개념으로 편익 추정이 가능하다.
 - 즉, 시장에 반영되는 수요의 변화, 가격의 변화, 혁신을 이용하여 생산자가 획득하는 기술 또는 제품 단위당 이익을 반영한다.

나. 연구개발사업의 개요

㉠ 연구기획의 목적

- 본 연구개발사업은, 움직이는 플랫폼에서 난류 플럭스를 측정하고 처리하는 기술의 현 상태를 파악하고, 이를 앞으로 연구선과 부이에 활용할 수 있는 방안을 모색한다.
- 해양-대기 결합 지역기후 모형 개발 계획을 수립한다.

㉡ 연구개발의 목적

- 선박, 부이 등 움직이는 플랫폼에서 해양-대기 이산화탄소 플럭스 직접 측정 자료를 획득한다.
- 직접 관측한 자료를 활용하여 해양-대기 상호작용 모수화를 개선시킨 해양-대기 접합 지역기후모형 개발 및 한반도 기후변화 시나리오를 제공한다.

㉢ 연구개발의 내용

- 고품질 해양-대기 플럭스 산정
 - 에디 공분산(eddy covariance) 기법을 사용하여 비고정 플랫폼에서 이산화탄소 플럭스를 관측하는 시스템을 구축한다.
 - 부이, 관측선 등 움직이는 플랫폼에서 관측 시스템 안정운영, 자료생산 및 제공한다.
 - 해양-대기 접합 지역기후 모형의 이산화탄소 플럭스 모수화에 활용한다.
- 해양-대기 접합 지역기후 모형개발
 - 관측 플럭스 자료를 활용하여 해양-대기 접합 모수화를 개선한 접합 모형을 구축한다.

- 온난화 전망에서의 시나리오 구성 및 한반도 기후 변화 시나리오를 적분한다.

④ 활용방안 및 기대효과

- 3차원 직접 측정을 통한 해양-대기 플럭스 산정은 북서태평양과 한반도 주변해역에 대한 고품질 자료 생산을 통해 선도형 기술 개발 기초를 마련할 수 있다.
- 부이와 관측선에 시스템을 설치하여 기후변화에 중요한 변수로 작용하는 해양-대기 플럭스를 다양한 환경에서 직접 측정하고, 이를 해양-대기 결합 지역기후 모형에 적용하는 계획을 수립함으로써 고품질 미래예측 자료 생산 기초를 마련할 수 있다.
- 개선된 해양-대기 접합 기후모형을 이용한 한반도 기후변화 시나리오 결과를 제공할 수 있다.
- 미래의 지구 시스템 변화에 대한 상세한 예측을 통해 도출된 결과는 인간 활동과 직결된 자연환경요소, 산업 활동, 국가경제, 개인 경제에 걸쳐 다양하게 이용될 수 있으며, 기존에 존재하지 않았던 신사업의 배경이 되어 부가적인 이익을 창출하거나 발생 할 수 있는 인적/물적 피해를 감소시킬 수 있다.
- 지구 온난화에 따른 장기 기후 변동을 예측하여 기초 자료 제공을 통한 기후변화 적응 정책을 위한 기초 자료를 제공할 수 있다.
- 발생할 수 있는 기상 재해를 예측함으로써 국민의 재산과 생명을 보호하고 국민 복지에 기여하는 등 기상재해 저감에 활용될 수 있다.

- 기후 변화에 따른 연안지역의 해수면 변화를 예측함으로써 국토 개발 장기 계획 수립에 활용될 수 있다.
- 한반도 지역의 탄소순환을 보다 정밀하게 산출함으로써 국가 차원에서 온실 기체 저감 및 전지구 기후변화 대응 정책 수립에 기여할 수 있다.
- IPCC 지역기후 변화 예측 시나리오 산출에 활용될 수 있다.

다. 편익 추정

④ 편익 추정 구도

- 편익항목은 연구사업의 개요 중 기대효과 및 활용방안을 바탕으로 식별 가능한 편익항목을 도출한다.
- 기대효과 및 활용방안을 바탕으로 편익항목을 도출하면, 기후변화 적응 비용 절감편익과 온실가스 배출량 감축 편익, 연안관리기여 편익이 도출된다.
- 기후변화 적응비용 절감 편익 : 한반도 기후변화 시나리오 제공을 통해 향후 우리나라가 부담해야 할 기후변화 적응비용 중 본 사업 추진으로 절감 가능한 비용을 편익으로 간주한다.
- 온실가스 배출량 감축 편익 : 한반도 지역의 탄소순환을 보다 정밀하게 산출함으로써 정부의 온실 가스 저감 정책 수립을 통해 이산화탄소 배출이 줄어들므로써 발생하는 환경편익으로 간주한다.
- 연안관리기여 편익 : 기후 변화에 따른 연안지역의 해수면 변화를 예측함으로써 국토 개발 장기 계획 수립에 활용될 수 있는 편익으로

간주한다.

표 6.7. 편익 항목 개요

편익 항목	내용	반영
기후변화 적응비용 절감 편익	기후변화 적응비용 절감 효과	반영
온실가스 배출량 감축 편익	배출량 감축효과를 탄소배출권 판매이익으로 추산	미반영
연안관리기여 편익	연안지역의 해수면 변화 예측을 통한 국토 개발 장기 계획 수립	미반영

- 편익 항목 중 지질정보 구축을 통한 기후변화 적응비용 절감 편익을 제외한 나머지 편익은 현재 수준에서 반영하지 않는다.
 - 온실가스 배출량 감축 편익 : 현재 연구개발사업의 성과로 이산화탄소 배출량 감축 효과를 정량적으로 예측하기 어려우므로 이는 연구개발 사업이 진행되면서 자료 확보를 통해 식별해야하는 경제적 가치로 판단한다.
 - 뿐만 아니라 온실가스 배출량 감축 편익 일부 항목은 기후변화 적응비용 절감 편익과 중복될 소지가 높다.
 - 연안관리기여 편익 : 해양대기플럭스 관련 연구개발사업으로 연안 지역의 해수면 변화를 예측하여 국민경제적으로 기여하는 바는 확실하나, 이를 현재 수준에서 정량적으로 판단하기에는 어려움이 있다.
 - 이에 본 분석에서는 기후변화 적응비용 절감 편익만을 반영하기로 한다.

☞ 기후변화 적응비용 절감 편익의 개요

- 기후변화 적응비용 절감편익 산출식은 다음과 같다.
 - 기후변화 적응비용 절감편익 = 실질 GDP 추계 × GDP 대비 기후변화 적응비용 비율 × 기후변화 적응비용 절감 비율 × 사업기여율

- GDP 대비 기후변화 적응비용 비율은 World Bank가 발표한 개발도상국의 기후변화 적응 비용 보고서에서 제시한 동아시아와 태평양 연안 국가의 GDP 대비 기후변화 적응비용 비율을 적용하였다.
- 기후변화 적응비용 절감 비율은 2008년 국가 기후변화 적응 종합 계획에 제시된 기상재해 피해 감소 목표에 근거하였다.
- 사업기여율은 국내 기후변화 대응기술 개발 전체 R&D 예산 대비 본 사업 투입예산 비중으로 산정하였다.

📊 분석 자료

- 국내 GDP 규모 전망
 - 국내 GDP 규모는 2006년 996조에서 2015년 1,558조로 크게 증가하였으며, 이 기간 동안 연평균 5.4% 성장하였다.

표 6.8. 최근 10년간 우리나라의 GDP 규모

(단위 : 천억원, %)

구분	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
국내 총생산	9,660.5	10,432.6	11,044.9	11,517.1	12,653.1	13,326.8	13,774.6	14,294.5	14,860.8	15,585.9
평균 증가율	-	8.0%	5.9%	4.3%	9.9%	5.3%	3.4%	3.8%	4.0%	4.9%

주: 국가통계포털(kosis.kr)

- 향후 국내 GDP 규모를 추정하기 위해서는 지난 10년간의 연평균 성장률을 적용할 수도 있겠으나, 최근 공신력 있는 국제기구인 IMF는 2016년 10월 우리나라의 2017년 경제성장률을 3.0%로 예측하였으며, OECD는 Economics Department Policy note(2012)에서 우리나라의 2011년부터 2030년까지 한국의 경제성장률을 2.7%로 예측하고 있다.

표 6.9. OECD의 우리나라 장기 경제성장 전망

(단위 : %)

구분	1995-2011	2011-2030	2030-2060	2011-2060
GDP	4.6	2.7	1.0	1.6
1인당 GDP	4.0	2.5	1.4	1.8

주: OECD(2012), 『Economics Department Policy note No.15』

- 또한 국회예산정책처는 우리나라의 2020년대 실질성장률 전망을 2.8%로 예측하고 있다.

표 6.10. 국회예산정책처의 우리나라 장기 경제성장 전망

(단위 : %)

구분	2016-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2050-2060
실질성장률	3.1	2.8	2.1	1.6	1.1

주: 국회예산정책처(2016), 『2016~2060년 NABO 장기 재정전망』

- 따라서, 우리나라의 2020년대 경제성장률은 가장 보수적으로 전망한 OECD의 2.7%를 적용하였다.

표 6.11 우리나라의 경제규모 예측

(단위 : 천억원)

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
GDP	18,781.3	19,288.4	19,809.2	20,344.0	20,893.3	21,457.4	22,036.8	22,631.8	23,242.8	23,870.4	24,514.9

○ 기후변화 적응비용

- 기후변화 적응비용은 세계은행의 2010년 보고서인 『The Cost to Developing Countries of Adapting to Climate Change』을 참고하여 제시하였다.
- 먼저 비관적 시나리오에 따르면 동아시아/태평양 지역의 GDP 대비 기후변화 적응의 연간 총비용은 2010년대 0.19%에서 2020년대 0.15%, 2030년대 0.09%로 감소하는 것으로 나타났으며, 긍정적

시나리오에서는 2010년대 0.13%에서 2030년대 0.08%로 감소하는 것으로 나타났다.

- 본 조사에서는 보수적인 접근법에 따라 동아시아/태평양 지역의 긍정적 시나리오에 제시된 수치를 활용하여 비용절감분에 대해 보수적으로 접근하였다.

표 6.12 지역별, 기간별 GDP 대비 기후변화 적응의 연간 총비용 비율

(단위 : %)

구분	동아시아/ 태평양	유럽/ 중앙아시아	라틴아메리카/ 카리브 연안	중동/ 북아프리카	남아시아	사하라 이남 아프리카	Total	비고
2010-19	0.19	1.11	0.3	0.08	0.2	0.7	0.22	Wettest Scenario
2020-29	0.15	0.11	0.27	0.06	0.16	0.68	0.19	
2030-39	0.09	0.12	0.19	0.07	0.12	0.55	0.14	
2040-49	0.08	0.11	0.16	0.08	0.09	0.49	0.12	
2010-19	0.13	0.08	0.2	0.1	0.23	0.57	0.17	Driest Scenario
2020-29	0.11	0.07	0.17	0.12	0.25	0.52	0.16	
2030-39	0.08	0.07	0.18	0.07	0.17	0.56	0.14	
2040-49	0.06	0.07	0.16	0.06	0.09	0.5	0.11	

주: World Bank, The Cost to Developing Countries of Adapting to Climate Change, 2010.

○ 기후변화 적응비용 절감 비율

- 2008년 『국가 기후변화 적응 종합계획』에 따르면, 후변화 적응 프로그램 수행을 통해 기상재해로 인한 2030년의 인명손실과 재산피해를 과거 10(1996~2005) 대비 각각 10% 감소시키는 것을 목표로 제시하고 있다.

○ 사업기여율

- 사업기여율은 연구개발사업의 성과가 시장을 통해 발생하는 가치창출 편익의 추정 시 적용하는 주요 인자이다.
- 사업기여율 추정시 활용되는 기존 정부재원 연구개발비는 기존의 유사·중복사업 및 과제의 연구개발비이므로, 편익 대상의 범위(과제/기술/제품 등)와 대응하는 범위로 유사·중복성의 분석이 이루어지는 것이 적절

하다.

- 통상적으로 사업기여율 산식은, (본 사업 투자규모/(본 사업관련 분야 국가전체투자규모 + 본 사업 투자규모)에 대입하여 추정한다.
- 그러나 본 사업의 경우, 아직 기초연구이기 때문에 사업 기여율을 추정할 수 없어, 기후변화대응 환경기술개발사업 예산 3,378억원(사업 기간 2012년~2021년)을 이용하여 사업 기여도를 추정하였다.
- 이 때, 사업기여율은 1.23%로 나타났다.

○ 기술수명주기

- 국제특허분류(IPC)별 분류체계를 활용하여 각 기술별 기술수명주기를 분석한 이승규의 『예비타당성조사를 위한 지식기반 및 분석시스템 구축』(KISTEP, 2011)연구에 따르면, 물리학의 기술수명주기는 중위수값이 약 6년, 평균값이 7.5년으로 나타났다.
- 기술수명주기는 편익발생기간과 연동된다.

표 6.13. 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; 폭파	111,308	11.0	14.1
G	물리학	453,085	6.0	7.5
H	섹션 전기	370,268	6.0	7.5

☞ 기후변화 적응비용 절감 편익 분석 결과

- 분석 결과, 사업이 완료되는 2022년부터 2032년까지의 기후변화 적응비용 절감 편익은 총 222.1억원에 이르는 것으로 분석된다.

표 6.14. 기후변화 적응비용 절감 편익 분석 결과

(단위 : 억원)

구분	기후변화 적응비용 절감 편익
2022년	26.1
2023년	26.8
2024년	27.5
2025년	28.2
2026년	29.0
2027년	29.8
합계	222.1

2. 경제성 분석

① 비용 추정

- 본 연구개발사업의 연구비 총액은 42억원으로 산정하였다.
- 연차별 연구비는 2017년도 12억원, 2018년도 8.5억원 2019년도 8.5억원, 2020년 6.5억원, 2021년 6.5억으로 가정하였다.

② 경제성 분석 개요

- 경제적 타당성에 관한 분석은 일단 그 사업이 어느 정도의 경제적 가치가 있는 사업인지를 파악할 수 있도록 함으로써 사업에 대한 이해를 돕게 된다.
- 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 사용한다.
- 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) ≥ 1 이면 경제성이 있다고 판단한다.

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

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 판단한다.

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

- 순현재가치 : 순현재가치란 사업에 수반된 모든 비용과 편익을 기준 연도의 현재가치로 할인하여 총 편익에서 총 비용을 제한 값이며 (순현재가치) ≥ 0 이면 경제성이 있다고 판단한다.

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

☛ 비용편익 분석(경제성 분석)을 위한 기준 설정 원칙

- 경제성 분석을 위해서는 사업의 시행전/후의 변화를 명확히 평가하기 위한 기준설정(Baseline Sepcification) 작업이 필요하다.
- 경제성 분석을 위한 기준설정을 정확히 하기 위해서는 사업 대상 재화의 속성과 관련한 질문의 명확성, 기준의 명확성, 기준의 일관성, 자원배분의 적절성, 시점 및 정책 시나리오의 명확성, 효과기간 상술 등이 반드시 고려해야 한다.

④ 비용편익 분석(경제성 분석)의 단계적 절차

- 우선 경제성 분석 대상 사업을 명확히 정의하고, 본 사업에 따른 영향을 정확히 식별할 필요가 있다.
- 이어 사업 속성에 따라 고려해야할 영향의 범위를 확정하고 영향의 수요 또는 계획 등에 따른 물량적 범위를 명확히 파악한다.
- 사업 속성이 명확히 확정 된 후 경제적 방법론을 통해 화폐적 평가를 진행하고 이에 대한 현재가치를 추정하고 비용편익분석을 진행한다.
- 비용편익분석과 함께 정성적인 평가 및 정책적인 평가를 통해 경제성 분석을 보완하고 필요에 따라 재무성 분석 및 민감도 분석을 수행한다.

④ 비용편익 분석(경제성 분석)의 고려사항

- 경제성 분석에 앞서 한국개발연구원(2011)의 「예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보완 연구(제5판)」, KISTEP(2011)의 「R&D 사업 예비타당성조사 표준지침」에 따라 다음과 같은 조건을 가정한다.
- 첫째, 경제성 분석의 모든 비용과 편익은 분석 직전년도 말 기준 불변가격으로 산정한다.
- 둘째, 편익의 발생기간은 예비타당성조사의 일반지침 상 투자완료 후 몇 년으로 가정하고 분석하는데 본 분석에서는 기술수명주기를 고려하여 분석한다.
- 셋째, 동 사업은 그 성격상 비용이 초기에 집중 발생하는 반면 편익은 건설 후 장기간 동안 발생하기 때문에 분석기간 동안 예상되는 비용과 편익에 사회적 할인율을 적용하여 현재가치로 환산하여 평가하였으며, 본 연구에서는 사회적 할인율은 「예비타당성조사 일반지침(제5판)의 수정·보완: 사회적 할인율의 조정」 등 예비타당성 관련 연구 사례를 참고하였다.

④ 비용편익 분석(경제성 분석)의 전제사항

- 분석 시점 : 사업 시작 기간인 2016년 말로 통일하였다.

- 분석 기간 : 편익발생 시점 이후부터, 기술수명주기의 중위수 기간인 6년만큼 편익 기간이 발생하였다.
- 할인율 : 예비타당성조사 일반지침에 근거하여 5.5%로 적용하였다.

④ 비용편익 분석(경제성 분석) 결과

- 본 연구개발사업의 경제성은 비용 대비 편익 비율이 2.91로서 경제성이 존재하는 것으로 분석된다.

표 6.15. 경제성 분석 결과

비용의 현재가치 (억원)	편익의 현재가치 (억원)	순편익 (억원)	B/C	내부수익률 (%)
34.57	100.59	66.02	2.91	27.0%

참고문헌

- 홍성유, 권원태, 정일웅, 백희정, 변영화, 차동현 (2011), 지구 및 지역기후 모델 결과에 근거한 동아시아 및 한반도 지역기후 변화 전망 연구 소개 및 고찰, 한국기후변화학회지, 2(4), pp. 269 ~ 281.
- Baldocchi D, Falge E, Gu L, Olsen R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw UKT, Pilgaard K, Schmid HP, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S (2001) FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull Am Meteorol Soc* 82(11): 2415–2434.
- Blomquist B W, B J Huebert, C W Fairall, L Bariteau, J B Edson, J E Hare, W R McGillis (2014) Advances in Air–Sea CO₂ Flux Measurement by Eddy Correlation, *Boundary–Layer Meteorol* 152:245–276 DOI 10.1007/s10546–014–9926–2.
- 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.
- Edson J B, Fairall C W, Bariteau L, Zappa C J, Cifuentes–Lorenzen A, McGillis W R, Pezoa S, Hare J E, Helmig D (2011) Direct covariance measurement of CO₂ gas transfer velocity during the 2008 Southern Ocean Gas Exchange Experiment: Wind speed

- dependency. *J Geophys Res* 116:C00F10.
- 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).
- Ho D T, Law C S, Simth M J, Schlosser P, Harvey M, Hill P (2006) Measurements of air–sea gas exchange at high wind speeds in the Southern Ocean: implications for global parameterizations. *Geophys Res Lett* 33:L16611.
- 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.
- Jacobson A R, Fletcher S E M, Gruber N, Sarmiento J L, Gloor M (2007) A joint atmosphere–ocean inversion for surface fluxes of

- carbon dioxide: 1. Methods and global-scale fluxes. *Glob Biogeochem Cycles* 21:GB1019.
- 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.
- Kondo F, Tsukamoto O (2007) Air-sea flux by eddy covariance technique in the Equatorial Indian Ocean. *J Oceanogr* 63:449–456.
- Lauvset S K, McGillis W R, Bariteau L, Fairall C W, Johannessen T, Olsen A, Zappa C J (2011) Direct measurements of CO₂ flux in the Greenland Sea. *Geophys Res Lett* 38:L12603.
- Lee X, Massman W, Law B (eds)(2004) *Handbook of micrometeorology: a guide for surface flux measurement and analysis*. Kluwer, Dordrecht.
- 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.
- Liss, P. S., and L. Merlivat (1986), Air-sea gas exchange rates: Introduction and synthesis, in *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling*, edited by P. Buat-Menard, pp. 113–127, Reidel, Dordrecht, Netherlands.
- 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.
- McGillis W R, Edson J B, Hare J E, Fairall C W (2001a) Direct covariance air–sea CO₂ fluxes. *J Geophys Res* 106:16,729–16,745.
- McGillis W R, Edson J B, Zappa C J, Ware J D, McKenna S P, Terray E A, Hare J E, Fairall C W, Drennan W, Donelan M, DeGrandpre M D, Wanninkhof R, Feely R A (2004) Air–sea CO₂ exchange in the equatorial Pacific. *J Geophys Res* 109:C08S02.
- Miller S D, Marandino C, Saltzman E S (2010) Ship–based measurement of air–sea CO₂ exchange by eddy covariance. *J Geophys Res* 115:D02304.
- Nightingale P D, Malin G, Law C S, Watson A J, Liss P S, Liddicoat M I, Boutin J, Upstill–Goddard R C (2000) In situ evaluation of air–sea gas exchange parameterizations using novel conservative and volatile tracers. *Glob Biogeochem Cycles* 14:373–387.
- 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.
- Prytherch J, Yelland M J, Pascal R W, Moat B I, Skjelvan I, Neill C C (2010a) Direct measurements of the CO₂ flux over the ocean: development of a novel method. *Geophys Res Lett* 37:L03607.
- Prytherch J, Yelland M J, Pascal R W, Moat B I, Skjelvan I, Srokosz V A (2010b) Open ocean gas transfer velocity derived from long–term direct measurements of the CO₂ flux. *Geophys Res Lett*

37:L23607.

- 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.
- Sabine C L, Feely R A, Gruber N, Key R M, Lee K, Bullister J L, Wanninkhof R, Wong C S, Wallace D W R, Tilbrook B, Millero F J, Peng T-H, Kozyr A, Ono T, Rios A F (2004) The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305(5682):367–371.
- 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.
- Sweeney C, Gloor E, Jacobson A R, Key R M, McKinley G, Sarmiento J L, Wanninkhof R (2007) Constraining global air–sea gas exchange for CO₂ with recent bomb 14C measurements. *Glob Biogeochem Cycles* 21:GB2015.
- Takahashi T, Sutherland S C, Sweeney C, Poisson A, Metzl N, Tilbrook B, Bates N, Wanninkhof R, Feely R A, Sabine C, Olafsson J, Nojiri Y (2002) Global sea–air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep Sea Res II* 49:1601–1622.
- Takahashi T, Sutherland S C, Wanninkhof R, Sweeney C, Feely R A, Chipman D W, Hales B, Friederich G, Chavez F, Sabine C, Watson A, Bakker D C E, Schuster U, Metzl N, Yoshikawa–Inoue H, Ishii M, Midorikawa B. W. T, Nojiri Y, Kortzinger A, Steinhoff T, Hoppema M, Olafsson J, Arnarson T S, Tilbrook B, Johannessen T, Olsen A, Bellerby R, Wong C S, Delille B, Bates N R, de Baar H J W (2009) Climatological mean and decadal change in surface ocean

- pCO₂, and net sea–air CO₂ flux over the global oceans. *Deep Sea Res II* 56:554–577.
- 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.
- Wanninkhof R (1992) Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *J Geophys Res* 97(C5): 7373–7382.
- Wanninkhof R, McGillis W R (1999) A cubic relationship between air–sea CO₂ exchange and wind speed. *Geophys Res Lett* 26(13): 1889–1892.
- Weiss A, Kuss J, Peters G, Schneider B (2007) Evaluation transfer velocity–wind speed relationship using long–term series of direct eddy correlation CO₂ flux measurements. *J Mar System* 66: 130–139.