

북극해 침강입자 플럭스 연구

Particle fluxes in the Arctic Ocean



한국해양과학기술원

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “양극해 환경변화 이해 및 활용연구” 과제의 위탁연구 “북극해 침강입자 플렉스 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자	:	강성호
위탁연구기관명	:	해양과학기술원
위탁연구책임자	:	김동선
위탁참여연구원	:	정진현
“	:	조소설

보고서 초록

위탁연구과제명	북극해 침강입자 플럭스 연구				
위탁연구책임자	김동선	해당단계 참여연구원수	3	해당단계 연구비	50,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 환경기반연구센터		참여기업명	없음	
국제공동연구	상대국명 : 없음		상대국연구기관명 : 없음		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	27
<ul style="list-style-type: none"> • 퇴적물트랩 2대를 Medeleev Ridge의 남동쪽 가장자리 (KAMS-1, 75°46.014'N, 177°04.109'W)와 Chukchi Borderland (KAMS-2, 75°46.014'N, 177°04.109'W), 두 지점(수심 500m)에 계류하였음 • 퇴적물트랩 시료 채집 기간은 4월-10월동안에는 15/16일, 11월-3월동안에는 30/31일로 정하였음 • 퇴적물트랩을 2015년 8월에 계류하였고 2016년 8월에 회수할 계획임 • Canada Basin에서 식물플랑크톤에 의해 생성된 유기탄소는 심층으로 침강되지 않고 대부분 표층에서 분해되어서, Biological pump 효율이 매우 낮음 • 북극 Beaufort Sea와 Mackenzie 대륙붕에서 침강입자 플럭스는 매우 큰 연간변화를 보였는데, 이런 연간변화는 해빙이 녹는 타이밍과 밀접한 관계를 나타냈음 • 북극 Canada Basin에서는 소용돌이(eddy)가 오랫동안 존재할 때, 침강입자 플럭스의 피크가 나타남 • 북극 Laptev Sea에서는 증가한 일차생산력, Lena River의 유출수, 퇴적물의 재부유 등이 유기탄소 플럭스의 증가 요인으로 작용하였음 • 북극 Lomonosoc Ridge에서는 Lena River으로부터 유입된 육상기원 퇴적물이 침강입자 플럭스에 매우 큰 역할을 하였음 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	침강입자, 퇴적물 트랩, 유기탄소 플럭스, 생물펌프, 북극해			
	영어	Sinking particle, sediment trap, organic carbon flux, biological pump, Arctic ocean			

요 약 문

I. 제 목

- 북극해 침강입자 플럭스 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

- 북극해에서 생기원원소의 침강플럭스 규명

2. 연구개발의 필요성

- 북극해에서 “Biology pump”가 감소하면 대기 이산화탄소 농도가 증가하고, “Biology pump”가 증가하면 대기 이산화탄소 농도가 감소하기 때문에, “Biology pump” 변화를 정확히 측정하는 것을 지구온난화를 예측하는데 있어서 매우 중요함.
- “Biology pump” 변화는 퇴적물트랩을 이용하여 표층에서 저층으로 침강하는 유기탄소 플럭스를 측정함으로써 정확히 파악할 수 있음.
- 북극해에서 “Biology pump” 자료는 미래 지구온난화를 예측하는 모델에 있어서 중요한 입력자료임

III. 연구개발의 내용

- 북극 척치해 두지점에 퇴적물트랩을 1년 동안 계류
- 북극해에서 입자플럭스에 대한 최신 연구동향 파악

IV. 연구개발결과

1. 퇴적물트랩 계류

- 퇴적물트랩 2대를 Medeleev Ridge의 남동쪽 가장자리(KAMS-1, 75°46.014'N, 177°04.109'W)와 Chukchi Borderland(KAMS-2, 75°46.014'N, 177°04.109'W), 두 지점(수심 500m)에 계류하였음
- 퇴적물트랩 시료 채집 기간은 4월-10월동안에는 15/16일, 11월-3월동안에는 30/31일로 정하였음
- 퇴적물트랩을 2015년 8월에 계류하였고 2016년 8월에 회수할 계획임

2. 최신 연구동향

- Canada Basin에서 식물플랑크톤에 의해 생성된 유기탄소는 심층으로 침강되지 않고 대부분 표층에서 분해되어서, Biological pump 효율이 매우 낮음
- 북극 Beaufort Sea와 Mackenzie 대륙붕에서 침강입자 플럭스는 매우 큰 연간변화를 보였는데, 이런 연간변화는 해빙이 녹는 타이밍과 밀접한 관계를 나타냈음
- 북극 Canada Basin에서는 소용돌이(eddy)가 오랫동안 존재할 때, 침강입자 플럭스의 피크가 나타남
- 북극 Laptev Sea에서는 증가한 일차생산력, Lena River의 유출수, 퇴적물의 재부유 등이 유기탄소 플럭스의 증가 요인으로 작용하였음
- 북극 Lomonosoc Ridge에서는 Lena River으로부터 유입된 육상기원 퇴적물이 침강입자 플럭스에 매우 큰 역할을 하였음

V. 연구개발결과의 활용계획

- 북극해에서의 “Biology pump” 자료는 미래 지구온난화를 예측하는 모델에 입력자료로 활용됨
- 북극해의 기후조절능력 평가에 활용

S U M M A R Y

I. Title

- Particle fluxes in the Arctic Ocean

II. Purpose and Necessity of R&D

1. Purpose of R&D

- Investigating the sinking fluxes of biogenic elements in the Arctic Ocean

2. Necessity of R&D

- In the Arctic Ocean, biological pump efficiency is a major factor for controlling the atmospheric CO₂
- biological pump efficiency can be determined by using sediment trap which estimate the sinking flux of organic carbon from the surface ocean to the deep ocean
- In the Arctic Ocean, biological pump efficiency is an important input data on the model for predicting the climate changes

III. Contents of R&D

- Deploying sediment trap in the Chukchi Sea for 1 year
- Investigating the recent research trends on the particle fluxes in the Arctic Ocean

IV. R&D Results

1. Deployment of sediment trap

- Sediment trap was deployed at the southeastern edge of the Medeleev Ridge (KAMS-1, 75°46.014'N, 177°04.109'W) and Chukchi Borderland (KAMS-2, 75°46.014'N, 177°04.109'W)

- The sampling interval was 15/16 days from April to October and 30/31 days from November to March
- Sediment trap was deployed on August 2015 and will be recovered on August 2016

2. The recent research trends

- In the Canada Basin, the biological pump efficiency is very low because the most of organic carbon produced at the surface is decomposed in the water column, and particle fluxes show the peak when the eddy exists for the long time
- In the Beaufort Sea and Mackenzie shelf, particle fluxes show distinct seasonal variations, which is closely related with the timing of sea ice melting
- In the Laptev Sea, enhanced primary production, discharge of Lena River, and resuspension of the bottom sediments are main factors for the increase of organic carbon fluxes
- The Lomonosoc Ridge, the terrigenous materials from the Lena River acts a major role for the sinking particle fluxes

V. Application Plans of R&D Results

- Application for the input data on the model for predicting the climate changes
- Application for evaluating the role of the Arctic Ocean on controlling the climate changes

목 차

제 1 장 서론	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황	2
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	5
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	25
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	26
제 6 장 참고문헌	27



제 1 장 서론

제 1 절 연구개발 목적

- 북극 척치해에서 장기간동안 시계열 퇴적물트랩을 계류하여 유기탄소, 탄산칼슘, 생기원규소 침강플릭스의 장기간 자료를 획득함으로써, 지구온난화와 해양 산성화에 의한 북극해 물질순환 변동을 파악함

제 2 절 연구개발 필요성

- 북극해는 전지구상에서 지구온난화에 가장 민감한 지역으로, 1950년대 이후 연평균 기온이 2-3℃ 상승하였고, 이에 인해 북극해 얼음이 약 40 %가 감소하였음.
- 또한, 북극해는 전지구상에서 해양산성화에 가장 취약한 지역으로, 최근에는 북극해 수심 100m 이내에서 "aragonite undersaturation"이 보고되었음.
- 이런 급격한 북극해 환경변화는 해양생태계에 직접적인 영향을 줄 뿐만 아니라 식물플랑크톤 생산성도 매우 큰 영향을 끼쳐서, 북극해에서의 "Biology pump"가 크게 변화할 가능성이 높음
- 북극해에서의 "Biology pump"가 감소하면 대기 이산화탄소 농도가 증가하고, "Biology pump"가 증가하면 대기 이산화탄소 농도가 감소하기 때문에, "Biology pump" 변화를 정확히 측정하는 것을 지구온난화를 예측하는데 있어서 매우 중요함.
- "Biology pump" 변화는 퇴적물트랩을 이용하여 표층에서 저층으로 침강하는 유기탄소 플릭스를 측정함으로써 정확히 파악할 수 있음.
- 퇴적물트랩을 이용한 침강입자 플릭스 연구는 "Biology pump"를 정량적으로 측정할 뿐만 아니라 생태계 변화를 지시해 주는 식물·동물플랑크톤 종조성 변화까지 파악할 수 있음
- 북극해에서의 "Biology pump" 자료는 미래 지구온난화를 예측하는 모델에 있어서 중요한 입력자료임
- 미래 지구온난화를 정확히 예측하는 것은 지구온난화에 의한 경제산업적 손실을 최소화 할 수 있는 최선책임.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

1. 극지연구소

- 남극 아문젠해 세 지점에 퇴적물트랩을 계류하여 침강입자 플럭스를 관측하고 있음
- 정점 K1에서 2012년 2월 15일부터 2013년 2월 12일까지 일년동안 측정한 총질량 플럭스는 $15.6 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었고 유기탄소 플럭스는 $1.02 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었으며, CaCO_3 플럭스는 $0.50 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었음.
- 정점 K2에서 2012년 2월 24일부터 2013년 2월 21일까지 일년동안 측정한 총질량 플럭스는 $15.9 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었고 유기탄소 플럭스는 $1.08 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었으며, CaCO_3 플럭스는 $0.24 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었음.
- 정점 K3에서 2012년 3월 4일부터 2013년 3월 1일까지 일년동안 측정한 총질량 플럭스는 $7.49 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었고 유기탄소 플럭스는 $0.62 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었으며, CaCO_3 플럭스는 $0.20 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었음.

2. 해양과학기술원

- 2006년부터 2014년까지 8년 동안 북서태평양 열대해역 두 지점에 퇴적물트랩을 계류하여 침강입자 플럭스를 관측하였음.
- 정점 FM1과 정점 FM2에서 총질량 플럭스는 $0.13 \sim 31.12 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 와 $2.03 \sim 31.46 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위를 나타냈고, 이 중 유기탄소와 탄산염, 생물기원 규소의 평균 함량은 두 정점 모두에서 각각 8.0%, 68.0%, 4.0%로 탄산염이 가장 많은 비중을 차지하였음.
- 총질량 플럭스는 정점 FM1에서는 겨울에 최고 값을 보였고 정점 FM2에서는 여름에 최고 값을 보여, 해역에 따라 계절 변동성이 다르게 나타남.
- 침강입자 플럭스가 두 정점 모두에서 2006년부터 2014년까지 시간에 따른 뚜렷한 감소를 보였는데, 이는 지구온난화에 따른 일차생산성 감소 때문이라고 추정됨.

제 2 절 국외 기술개발 현황

1. 미국

- 북극해 Canada Basin에 퇴적물트랩을 계류하여 침강입자 플럭스를 관측하였는데, 일년동안 관측한 유기탄소 플럭스는 $0.08 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 다른 북극해에서 관측한 값보다 매우 낮게 관측되었으며, 생기원규소 플럭스와 lithogenic 플럭스도 다른 해역에 비해 매우 낮게 관측되었음.
- Canada Basin에서 유기탄소 플럭스가 매우 낮게 관측한 것은 표층해수에 쇄설성 입자 농도가 매우 낮아서 표층에서 식물플랑크톤에 의해 생성된 유기물이 심층으로 침강하지 못하고 표층에서 대부분 분해되어 용존유기탄소로 전환되었기 때문임.

2. 독일

- 2000년부터 2009년까지 10년동안 북극해 Farm Strait에 퇴적물트랩을 계류하여 침강입자 플럭스를 관측하였음
- 10년동안 침강입자 플럭스를 관측한 결과, 지구온난화에 의해 수온이 증가하면서 식물플랑크톤 종조성이 크기가 작은 종으로 변화하였으며, 생기원규소 플럭스도 감소하였음. 또한 동물플랑크톤 종조성도 크기가 작은 종으로 변화하였으며, 동물플랑크톤의 배설물인 Fecal pellet 플럭스도 감소하였음
- 지구온난화에 의해 수온이 증가에 의해 Pteropod 종조성도 변화하여 2000년부터 2005년까지는 냉수종(cold-water adapted)인 *L. helicina*가 우세하였지만 2006년부터 2009년까지는 아극종(subarctic boreal)인 *L. retrovers*가 우세하였음.
- 2000년부터 2009년까지 10년동안 지구온난화에 의해 생기원규소 플럭스는 감소한 반면, 탄산칼슘 플럭스는 증가하였음
- 지구온난화에 의해 식물·동물플랑크톤 종조성이 크기가 작은 종으로 변화하고 있으며, 이런 추세가 계속되면 북극해에서의 “Biology pump”는 크게 감소할 것으로 예상됨

3. 캐나다

- 북극해 Beaufort Sea, Baffin Bay, Laptev Sea 등 세 해역에 퇴적물트랩을 계류하여 침강입자 플럭스를 관측하였는데, 일년동안 관측한 유기탄소 플럭스는 $1.6\text{-}5.9 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었으며, Baffin Bay에서 가장 높은 플럭스를 보였고 Beaufort Sea에서 가장 낮은 플럭스는 나타냈음.

- 퇴적물트랩을 1년동안만 계류하여 침강입자 플럭스를 관측하였기 때문에, 지구 온난화에 의한 침강입자 플럭스 변화는 파악하지 못하였음



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구개발수행 내용

- 북극 척치해 두지점에 퇴적물트랩을 1년 동안 계류
- 북극해에서 입자플럭스에 대한 최신 연구동향 파악

제 2 절 연구개발수행 결과

1. 퇴적물트랩 계류

- 퇴적물트랩 2대를 Medeleev Ridge의 남동쪽 가장자리(KAMS-1, 75°46.014'N, 177°04.109'W)와 Chukchi Borderland(KAMS-2, 75°46.014'N, 177°04.109'W), 두 지점에 계류하였음(Fig. 1).
- 계류정점 KAMS-1에는 ADCP (Work Horse Sentinel 150 kHz, Teledyne RDI), 5 microCAT CTD sensors (SBE37SM), 8 temperature loggers (SBE56), one sediment trap (Parflux Mark 78H-21, Mclean), one Acoustic Zooplankton, Fish Profiler (AZFP, ASL), dual acoustic releasers 등의 장비들이 계류되었음(Fig. 2a).
- 계류정점 KAMS-2에는 ADCP (Work Horse Sentinel 300 kHz with bottom tracking option, Teledyne RDI), 5 microCAT CTD sensors (SBE37SM), 7 temperature loggers (SBE56), one sediment trap (Parflux Mark 78H-21, Mclean), one Recording Current Meter-Intermediate Water (RCM-IW, Aanderaa SeaGuard), dual acoustic releasers 등의 장비들이 계류되었음(Fig. 2a).
- 두 개의 계류라인은 수심 500m 해역에 계류하였고 CTD 센서는 해빙형성에 태평양 기원해수의 영향을 평가하기 위해서 표층 혼합층에서 태평양 기원해수의 바닥까지 계류하였음
- 퇴적물트랩 시료 채집 기간은 4월-10월동안에는 15/16일, 11월-3월동안에는 30/31일로 정하였음(Table 1)
- 퇴적물트랩을 2015년 8월에 계류하였고 2016년 8월에 회수할 계획임

Table 1. Time table for collecting sediment trap samples

No	Open day	Close day	Duration (day)
1	2015-08-10	2015-08-31	22
2	2015-09-01	2015-09-15	15
3	2015-09-16	2015-09-30	15
4	2015-10-01	2015-10-15	15
5	2015-10-16	2015-10-31	16
6	2015-11-01	2015-11-15	15
7	2015-11-16	2015-11-30	15
8	2015-12-01	2015-12-31	31
9	2016-01-01	2016-01-31	31
10	2016-02-01	2016-02-28	28
11	2016-03-01	2016-03-31	31
12	2016-04-01	2016-04-15	15
13	2016-04-16	2016-04-30	15
14	2016-05-01	2016-05-15	15
15	2016-05-16	2016-05-31	16
16	2016-06-01	2016-06-15	15
17	2016-06-16	2016-06-30	15
18	2016-07-01	2016-07-15	15
19	2016-07-16	2016-07-31	16
20	2016-08-01	2016-08-15	15
21	2016-08-16	2016-08-31	16

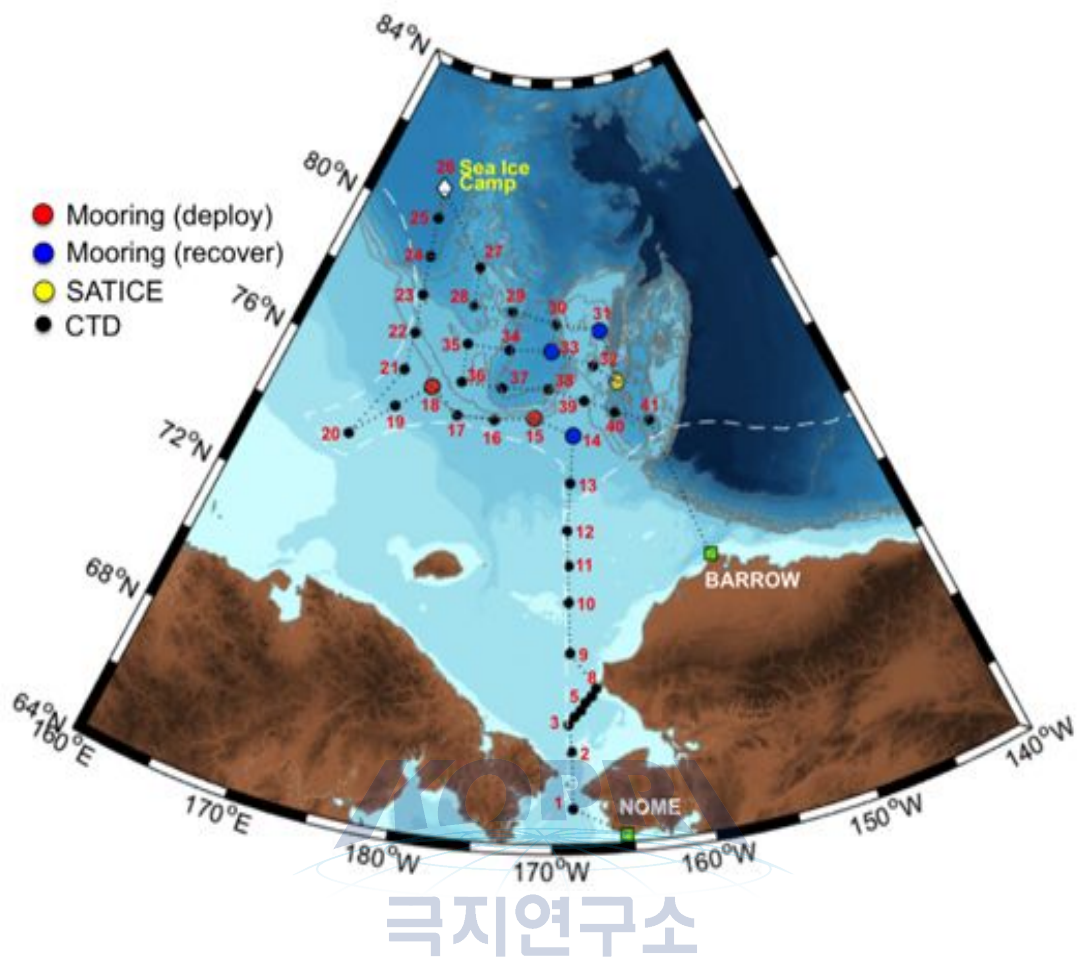


Fig. 1. Study area and sediment trap mooring stations (st. 15 and 18, red circle)

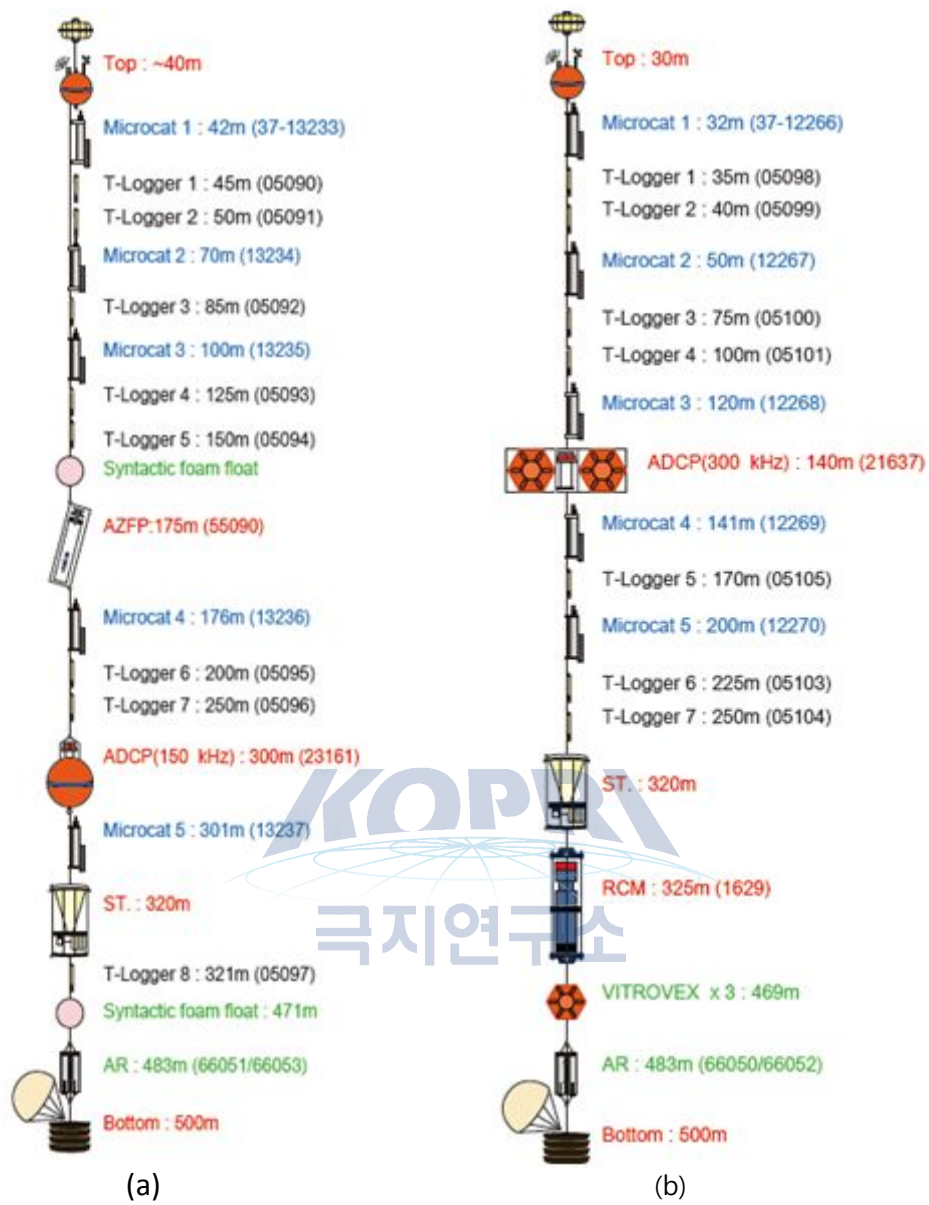


Fig. 2. KOPRI mooring systems deployed in the Arctic Ocean: (a) KAMS-1 and (b) KAMS-2.

2. 최신 연구동향

가. Canada Basin과 Chuchi Rise에서 Biological pump 프로세스

- Honjo et al. (2010)은 Canada Basin과 Chuchi Rise에서 퇴적물트랩을 이용하여 유기탄소 플럭스를 조사함으로써, 해빙 해역에서 biological pump 프로세스를 이해하려고함
- 수심 200m에서 관측한 총질량 플럭스(total mass flux)는 $0.4 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었고 유기탄소 플럭스는 $7.0 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었는데, 이들 플럭스는 전세계 해양에서 관측한 값들보다 1/100 정도 밖에 되지 않았음(Fig. 3)
- Canada Basin에서 식물플랑크톤에 의해 생성된 유기탄소는 심층으로 침강되지 않고 대부분 표층에서 분해되어서, Biological pump 효율이 매우 낮음
- 수심 3000m에서 관측한 총질량 플럭스는 수심 200m에서 관측한 것보다 10배 가량 높았고 유기탄소 플럭스는 $14.2 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 수심 200m에서 관측한 것보다 2배 가량 높았으며, 수심 3000m에서 관측한 육상기원 쇄설물 플럭스는 수심 200m에서 관측한 것보다 18배 높았음(Fig. 4)
- 수심 200m에서 채집한 유기탄소의 기원은 "autochthonous" 인 반면 수심 3000m에서 채집한 유기탄소의 기원은 "allochthonou" 임
- 수심 3000m에서 채집되는 대부분의 침강입자는 표층에서 수직적으로 유입된 것보다는 대륙붕과 대륙사면으로부터 수평적으로 유입된 것임
- Canada Basin에서 관측한 유기탄소 플럭스와 퇴적 프로세스는 Chuchi Rise에서 관측한 것과 크게 다름

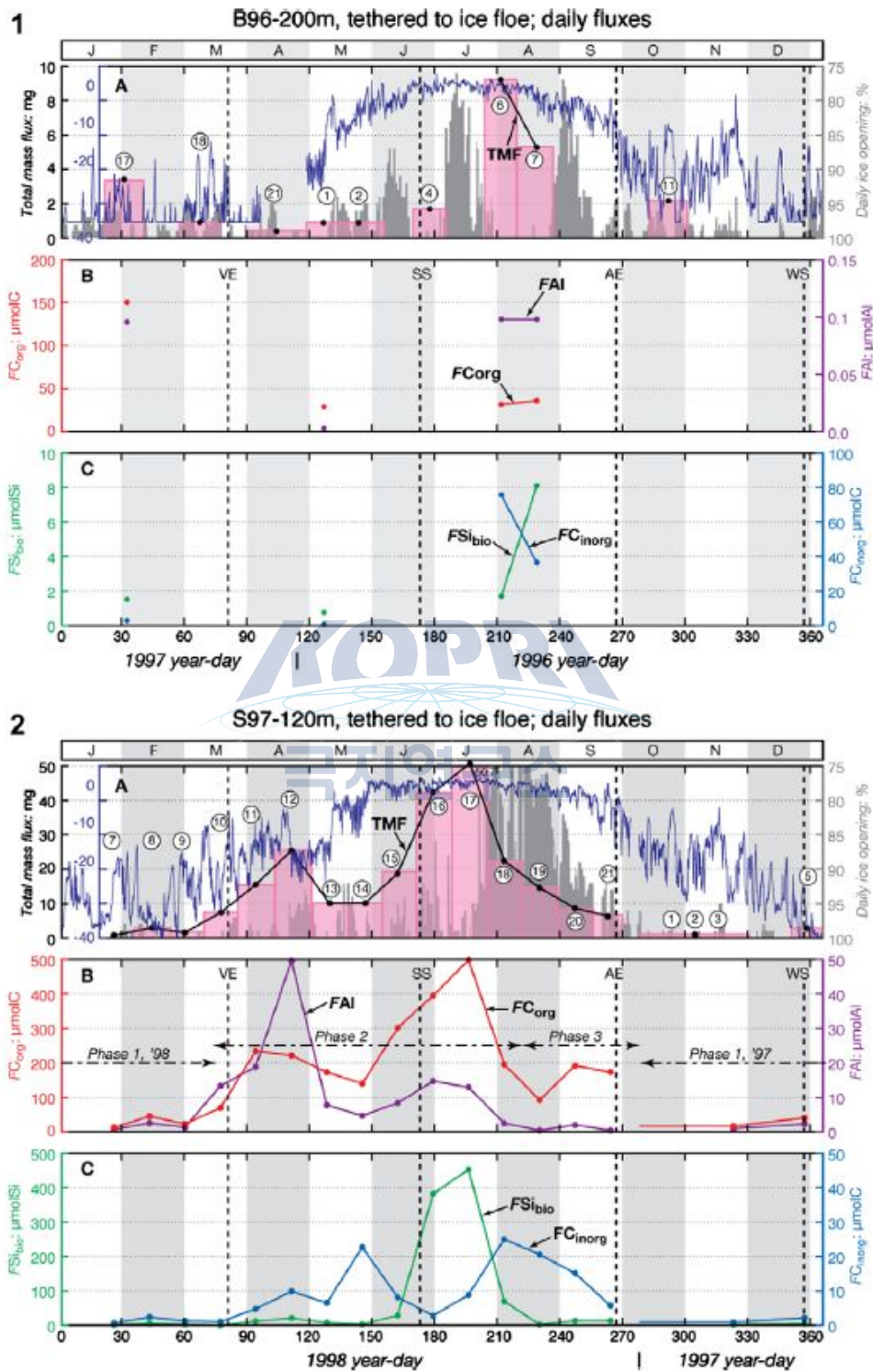


Fig. 3. Export fluxes of total mass and four biogeochemical element at the water depths of 200 m and 120 m of the Canada Basin

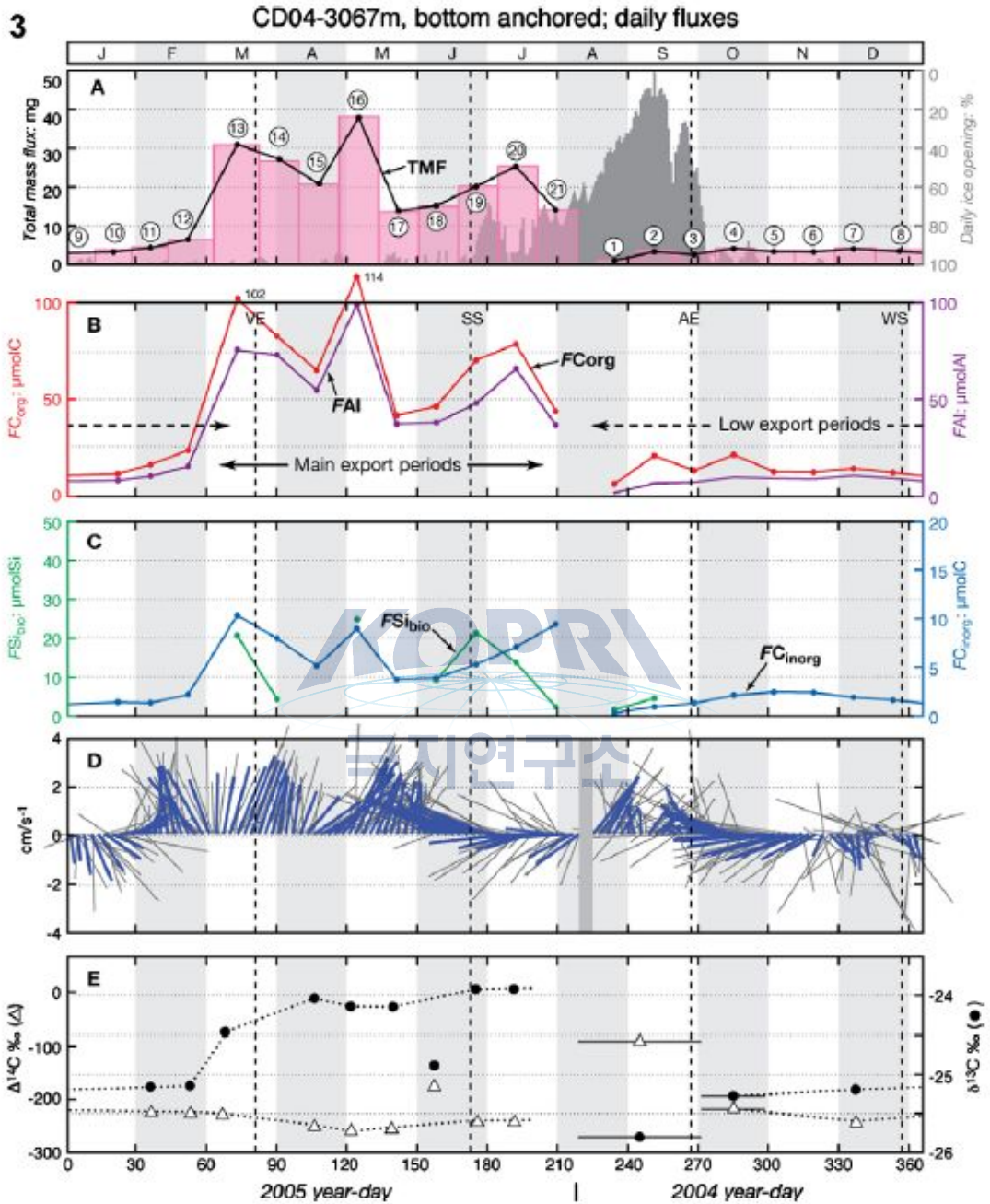


Fig. 4. Export fluxes of total mass and four biogeochemical element at the water depths of 3000 m of the Canada Basin

나. 북극 Beaufort Sea에서 유기탄소 플럭스 변화

- Forest et al. (2010)은 북극 Beaufort Sea에서 2004년부터 2006년까지 퇴적물 트랩을 이용하여 유기탄소 플럭스의 연변화를 파악했음
- 수심 100m에서 유기탄소 플럭스는 2004년에 $3.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 2005년에 $4.2 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 2006년에 $6.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었고 수심 210m에서는 2004년에 $1.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 2005년에 $2.2 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 2006년에 $3.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이였음(Fig. 5).
- 유기물의 autochthonous 기원은 수심 100m에서 75-84%이었고 수심 200m에서는 61-75%이였음
- 2004년에는 해빙이 정상적으로 융해(break-up)됨에도 불구하고 오래된 해빙(Old sea ice)이 연구해역을 지나갔기 때문에 일차생산력이 감소했고 이로 인해, 유기탄소 플럭스도 감소하였음
- 2005년에는 해빙이 존재하지 않는 기간이 길어서 연안 해역에서는 일차생산력이 증가하였지만 외해역에서는 유기탄소 플럭스가 조금밖에 증가하지 않았음
- 2006년에는 늦은 시기에 해빙이 융해되어 "ice edge bloom"을 야기시켰고 이로 인해 유기탄소 플럭스가 크게 증가하였음
- 해빙이 녹는 타이밍이 표층 유기탄소 생성과 심층으로의 침강을 결정하는 가장 중요한 요인임
- 표층에서 생산된 유기탄소의 5%만이 수심 200m까지 침강하고 나머지 95%는 수층에서 분해됨
- 미래에 지구온난화로 인해 북극 해빙이 점점 더 많이 녹으면 표층에서 유기탄소 생산은 증가할 것으로 예상되며, 이로 인해 유기탄소 침강플럭스도 증가할 것임

다. 북극 Canada Basin에서 침강입자 플럭스에 대한 소용돌이(eddy)의 영향

- O'Brien et al. (2013)은 북극 Canada Basin에서 1990년 9월부터 1994년 7월까지 퇴적물트랩을 계류하여 침강입자 플럭스를 관측하여 침강입자 플럭스에 대한 소용돌이의 영향을 파악함
- 3년동안 관측한 총질량 플럭스는 4.2, 2.1, 8.2 $\text{g m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 로 다른 해역에서 비해 매우 낮았음(Fig. 6)
- 침강입자 플럭스는 매년 여름에 피크를 보였지만, 피크 타이밍과 침강입자의 조성은 매년 다른 양상을 보였음
- 여름에 해빙이 녹으면서 일차생산력이 증가하여 유기탄소 플럭스도 증가하였고 육상기원 쇠설물 플럭스도 여름에 증가하였는데, 이것으로 보아 육상기원 유기탄소도 일부 포함되었을 것으로 예상됨
- 1991년에는 여름에 해빙이 완전히 녹지 않아서 표층 유기탄소 생성이 제한되어 유기탄소 플럭스가 크게 감소한 반면, 1993년에는 여름에 해빙이 완전히 녹아서 일차생산력이 크게 증가하였고 이로 인해 유기탄소 플럭스도 크게 증가하였음
- 침강입자 플럭스의 피크가 소용돌이와 잘 일치함; 1994년 겨울에 매우 높은 침강입자 플럭스가 관측되었는데, 이 기간동안 소용돌이가 연구해역에 60일동안 존재하였음
- 10 $\text{mg m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 이상의 총질량 플럭스는 소용돌이가 존재할 때 관측됨
- 퇴적물트랩 시료의 조성이 매년 크게 다른 것은 그 해에 연구해역을 통과한 소용돌이 특성이 다르기 때문임. 즉 cyclonic eddy와 anticyclonic eddy에 따라 침강입자 조성이 달라짐
- 북극 Canada Basin에서는 소용돌이에 의한 퇴적물의 수평이동이 침강입자 플럭스를 증가시킴

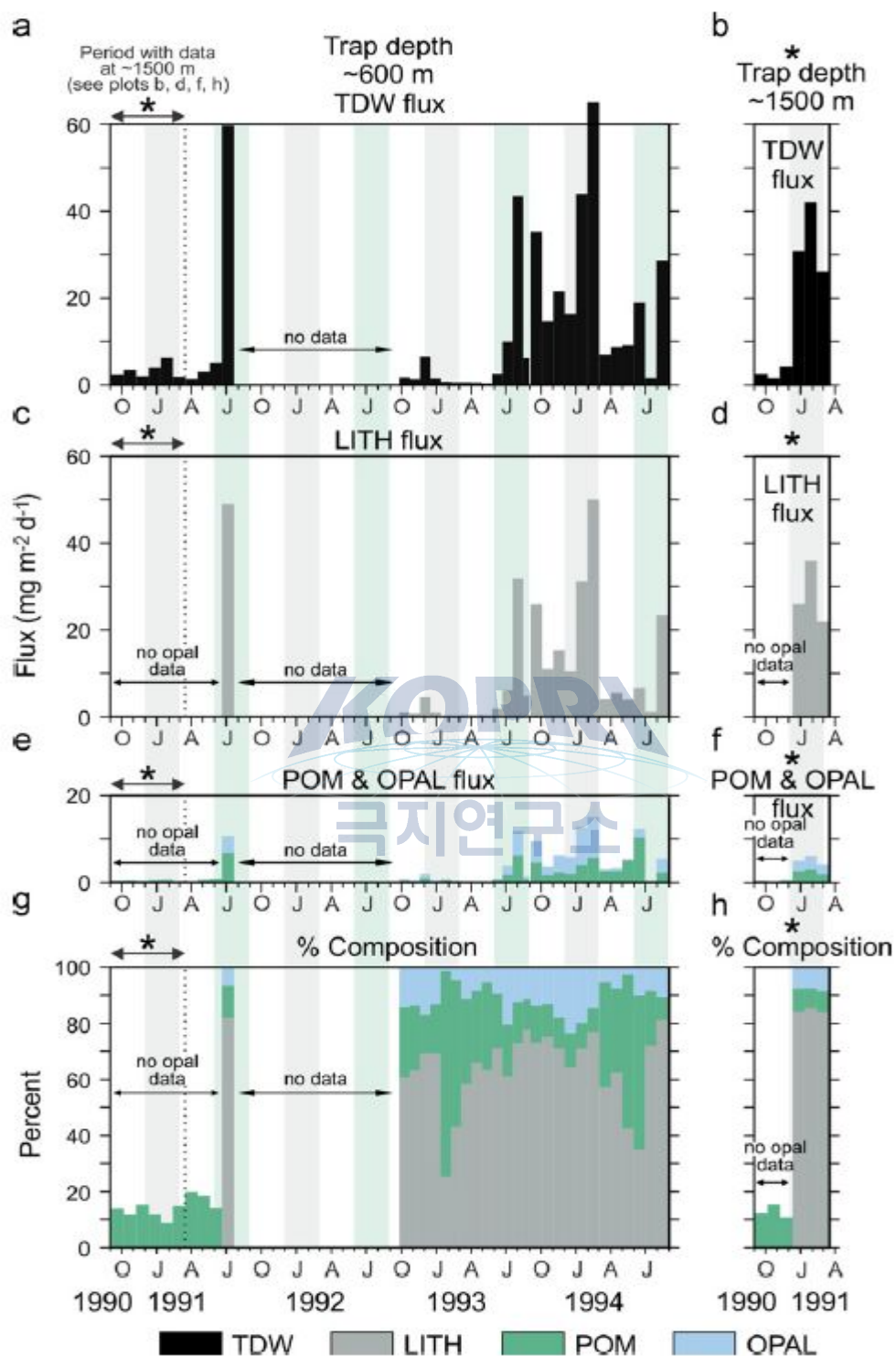


Fig. 6. Total dry weight flux, lithogenic flux, particulate organic matter and opal fluxes at the water depths of 600 m and 210m of the Canada Basin from 1990 to 1994.

라. 북극 대륙붕에서 유기탄소 플럭스의 연변화

- Lalande et al. (2009)은 북극 Baffin Bay, Laptev Sea, Meckenzie shelf, Amundsen Gulf에서 시계열 퇴적물트랩을 2005년부터 2006년 까지 1년동안 계류하여 유기탄소 플럭스를 관측하였음
- 수심 200m에서 유기탄소 플럭스는 $1.6-5.9 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 의 범위였으며, Baffin Bay에서 가장 높았고 Meckenzie shelf에서 가장 낮았음(Fig. 7)
- 모든 해역에서 유기탄소 플럭스는 해빙이 녹기 전과 녹는 동안에 증가하였지만, 그 외 다른 기간동안에는 각기 해역에 따라 다른 변화양상을 보였음
- Laptev Sea에서는 증가한 일차생산력, Lena River의 유출수, 퇴적물의 재부유 등이 유기탄소 플럭스의 증가 요인으로 작용하였음
- Baffin Bay에서는 높은 유기탄소 플럭스는 North Water Polynya에서 일차생산력이 높았던 기간에 관측되었음
- Laptev Sea에서는 해빙의 감소와 Lena River의 유출수 증가 때문에 미래에도 유기탄소 플럭스가 크게 증가할 것으로 예상됨
- Amundsen Gulf에서는 3년동안 연속해서 유기탄소 플럭스가 감소하였는데, 이것은 해빙 감소가 퇴적물 재부유를 증가시켜서 일차생산력이 감소하였기 때문임
- 유기탄소 플럭스가 계절적으로 또는 해역에 따라 큰 차이를 보이는 것은 북극해에서 해빙이 녹는 정도가 계절과 해역에 따라 크게 다르기 때문임
- 북극 대륙붕에서의 탄소순환은 지구온난화에 따른 해빙감소로 인해 매우 큰 변화를 보이고 있음

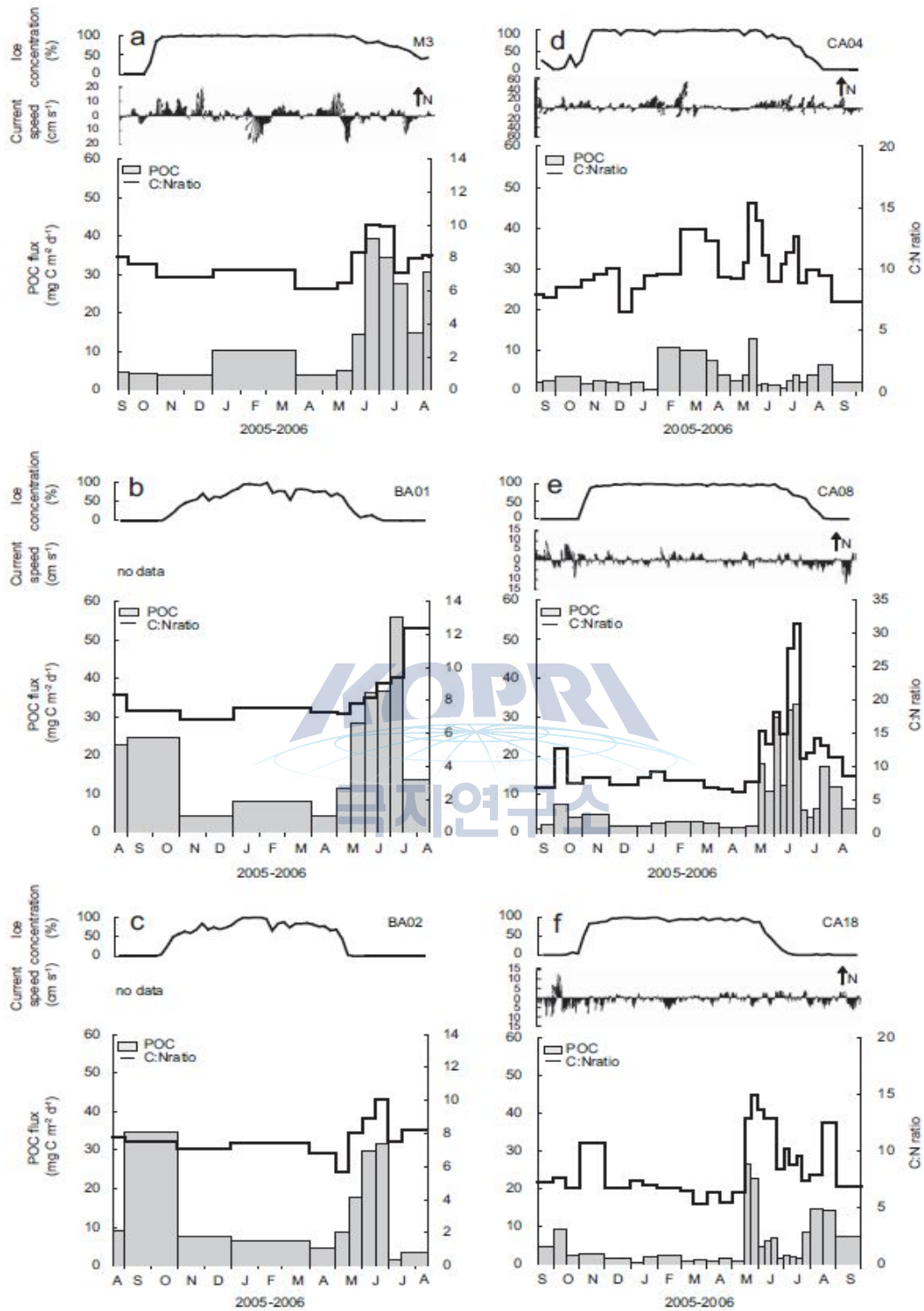


Fig. 7. Organic carbon fluxes in (a) the Laptev Sea, (b) Baffin Bay (449m above seafloor), (c) Baffin Bay (224 m above seafloor), (d) Mackenzie Shelf, (e) Amundsen Gulf (197 m above seafloor), and (f) Amundsen Gulf (340 m above seafloor)

마. 북극 Mackenzie 대륙붕에서 유기탄소 플럭스 연구

- Forest et al. (2007)은 북극 Mackenzie 대륙붕에서 2003년부터 2004년까지 퇴적물트랩을 이용하여 대륙붕에서 심해로 유기탄소 이동에 대한 메카니즘을 연구하였음
- 유기탄소 플럭스의 계절변화는 대륙붕에서의 해빙의 순환과 밀접한 관계를 보였음
- 10월부터 4월까지 유기탄소 플럭스의 뚜렷한 증가는 폭풍, 열염분 순환, 해류 등에 의한 대륙붕 퇴적물의 재부유때문이며, 대륙붕에서 재부유된 퇴적물은 대륙사면으로 이동하게 됨
- 대륙붕으로부터 심해로의 유기탄소 플럭스는 $1.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로, 수심 300m에서 관측한 유기탄소 플럭스의 58%를 차지함(Figs. 8, 9)
- 가을과 겨울에 채집한 침강입자에는 육상기원 물질함량이 25-60%로 다른 계절에 비해 높았음
- 5월과 6월동안에 유기탄소 플럭스가 최고 값을 보였으며, 이 시기동안 입자성 유기탄소/질소 비율도 높았고 탄소동위원소(^{13}C) 값도 높았음
- 7월에 높은 침강입자 플럭스는 해빙의 후퇴, 증가한 일차생산력, fecal pellet의 생성 등과 잘 일치하였음
- 가을과 겨울동안에 대륙붕에서 심해로의 유기탄소 플럭스가 증가한 것은 해빙의 열역학적 순환과 대륙붕 퇴적물의 재부유에 의한 것임
- 여름동안 일차생산력 증가에 의한 대륙붕에서 심해로의 유기탄소 플럭스에 대한 영향을 아직 불분명함

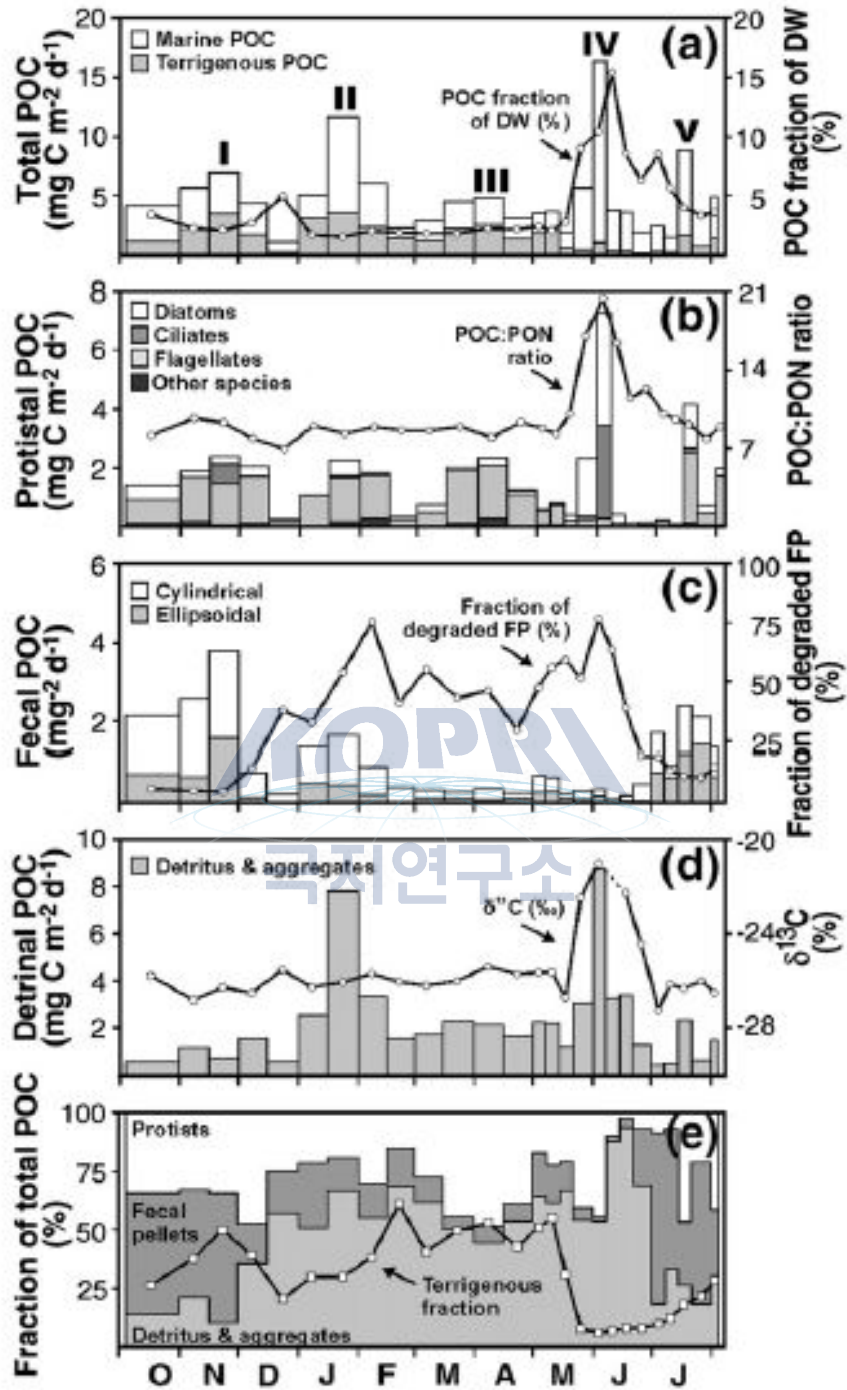


Fig. 8. Mackenzie 대륙붕(수심 300m)에서 2003년부터 2004년까지 관측한 유기 탄소 플럭스

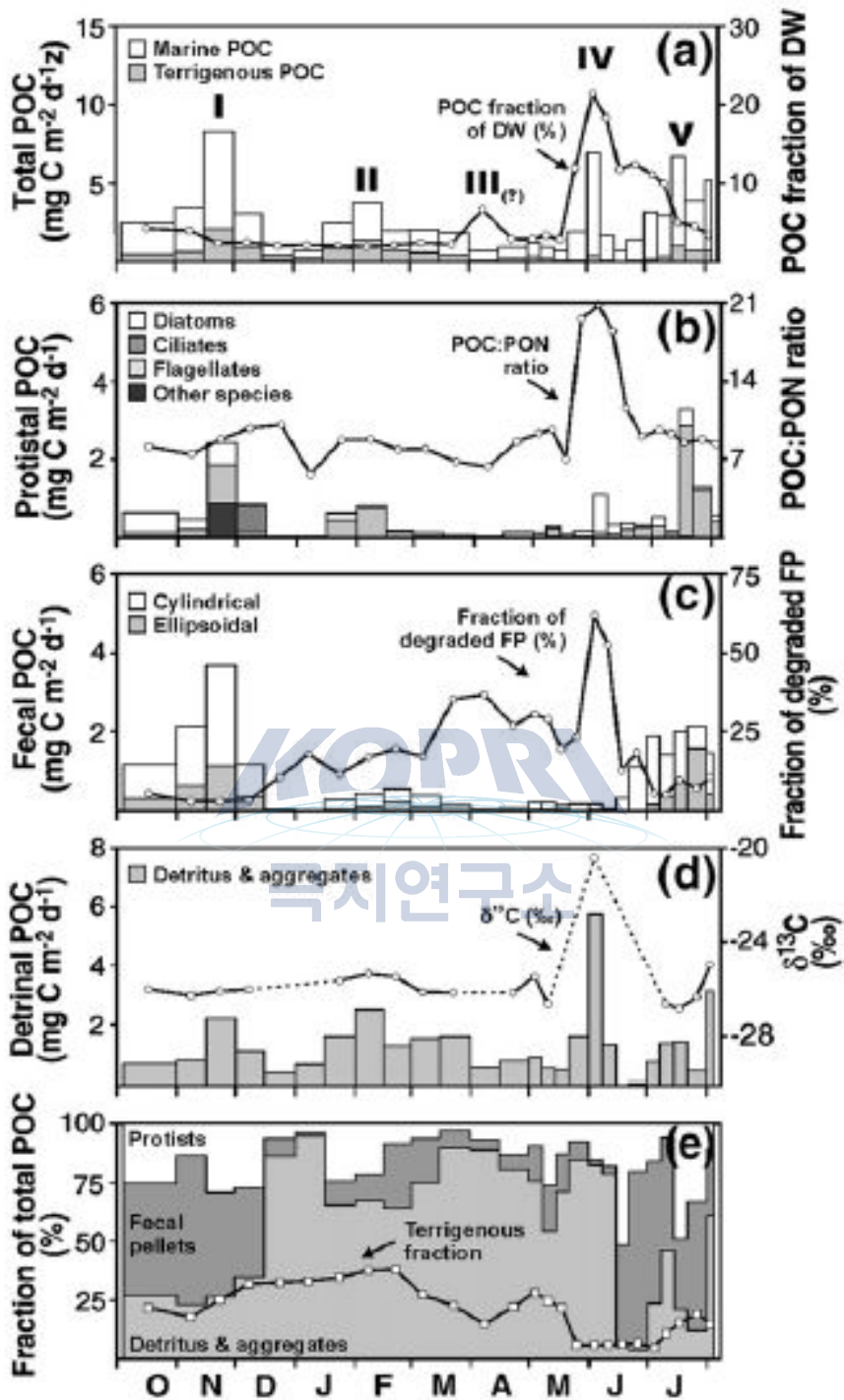


Fig. 9. Mackenzie 대륙사면(수심 500m)에서 2003년부터 2004년까지 관측한 유기탄소 플럭스

바. 북극 Lomonosoc Ridge에서 생기원 플럭스와 육상기원 플럭스

- Fahl and Nothig (2007)은 북극 Lomonosoc Ridge에서 1995년부터 1996년까지 1년동안 퇴적물트랩을 계류하여 생기원 플럭스와 육상기원 플럭스를 관측하였으며, 퇴적물트랩은 수심 150m와 1550m에 계류하였음
- 수심 150m에서 관측한 육상기원 플럭스는 $3.9 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 탄산칼슘(CaCO_3) 플럭스는 $0.8 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 오팔(opal) 플럭스는 $2.6 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 유기탄소 플럭스는 $1.5 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 임
- 수심 1550m에서 관측한 육상기원 플럭스는 $11.3 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 탄산칼슘 플럭스는 $0.5 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 오팔 플럭스는 $2.9 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 유기탄소 플럭스는 $1.05 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 임
- 총질량 플럭스는 두 수심 모두에서 7월-10월동안에 높게 관측되었음; 수심 150m에서 $75\text{-}130 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, 수심 1550m에서 $40\text{-}225 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$.
- 다른 기간 동안에는 두 수심 모두에서 총질량 플럭스가 $10 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이하로 매우 낮았음.
- 7월과 8월에 침강입자 플럭스가 증가한 것은 일차생산력이 증가했기 때문이고 9월과 10월에 증가한 것은 Lena River 유출수가 증가하여 육상기원 플럭스가 증가했기 때문임
- 9월과 10월에는 심층에서의 총질량 플럭스가 표층보다 증가하였는데, 이것은 이 시기 동안에 침강입자가 수평적으로 이동하였다는 것을 지시해줌
- Lomonosoc Ridge에서는 Lena River으로부터 유입된 육상기원 퇴적물이 침강입자 플럭스에 매우 큰 역할을 하였음

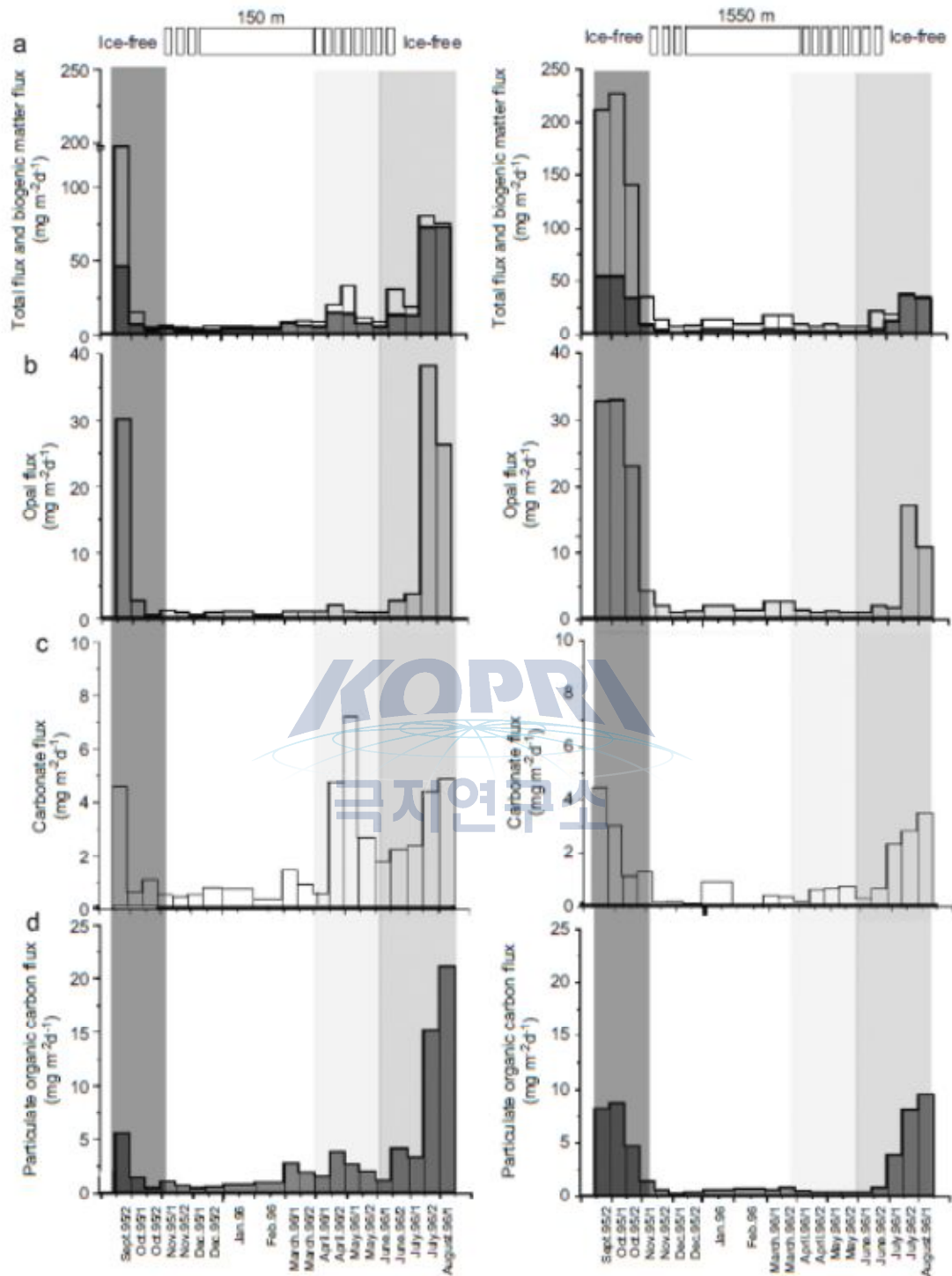


Fig. 10. Lomonosoc Ridge에서 1995년부터 1996년까지 관측한 (a) 총질량 플럭스, (b) 오팔 플럭스, (c) 탄산칼슘 플럭스, d) 유기탄소 플럭스

사. 북극 Farm 해협에서 침강입자 퇴적 양상

- Bauerfeind et al. (2009)은 북극 Farm 해협에서 2000년부터 2005년까지 퇴적물트랩을 계류하여 침강입자 플럭스를 관측하였음
- Farm 해협은 따뜻하고 소금끼가 많은 대서양 기원의 물과 차가우면서 소금끼가 적은 북극 기원해수가 만나는 해역으로, 북극해 가운데서 지구온난화에 가장 민감한 해역임
- 침강입자 플럭스는 5월/6월과 8월/9월동안 높은 값을 보여 bimodal 양상의 계절변화를 보였음
- 수심 300m에서 총질량 플럭스는 $13\text{--}32\text{ g m}^{-2}\text{ yr}^{-1}$ 의 범위를 보이며, 탄산칼슘이 6-13%, 유기탄소가 4-21%, 생기원규소가 3-8%를 차지함
- 생기원 플럭스는 총질량 플럭스의 27-67%를 차지하였으며 생기원 플럭스는 해빙이 가장 오랫동안 존재했던 연도에 가장 낮은 값을 보임
- 식물플랑크톤 플럭스는 $60\times 10^6\text{ m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ 이었고 규조류와 coccolithophorid가 가장 많은 종임
- 규조류는 주로 pennate 종으로 이루어졌고 2000년에 가장 많이 존재하였으며, 2005년에 규조류가 감소한 반면, coccolithophorid가 증가하여 식물플랑크톤 종 변화가 일어났으며, 이런 변화는 생기원규소 플럭스가 2005년에 감소하는 결과를 야기하였음
- 생기원 플럭스는 2000년부터 2005년까지 $8.5\text{--}8.8\text{ g m}^{-2}\text{ yr}^{-1}$ 의 범위로 시간에 따라 거의 변화가 일어나지 않았음
- 동물플랑크톤 가운데서 pteropod가 총질량 플럭스와 탄산칼슘 플럭스가 가장 큰 기여를 하였음

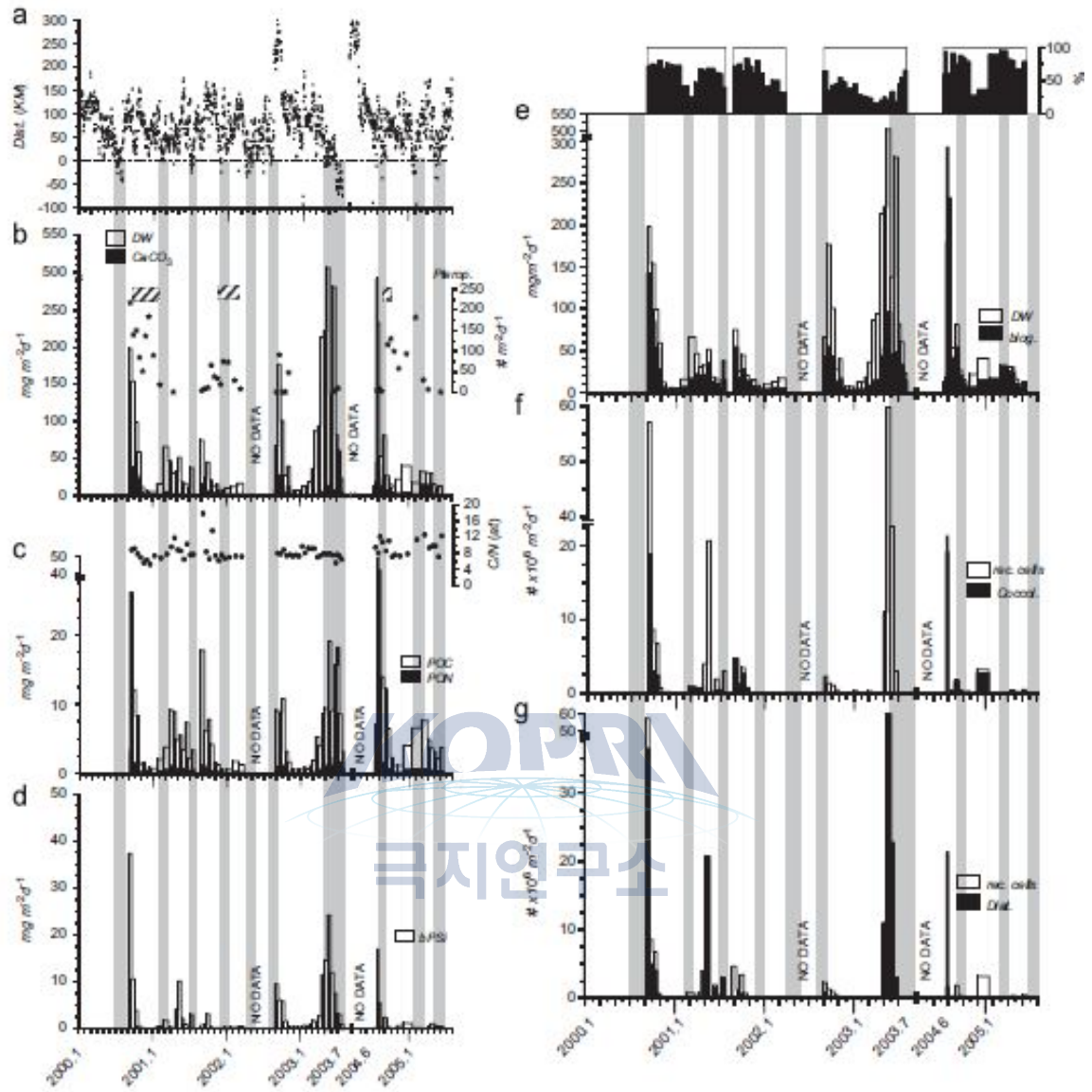


Fig. 11. 북극 Farm 해협에서 2000년부터 2005년까지 관측한 (b) 총질량 플럭스와 탄산칼슘 플럭스, (c) 유기탄소/질소 플럭스, (d) 생기원규소 플럭스, (e) 생기원 플럭스, (f) coccolithophorid 플럭스, (g) 규조류 플럭스

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 목표 달성도

성과목표	세부목표		평가지표(핵심성과 스펙)	달성 여부	가중치 (%)
1. 북극해에서 생기원원소의 침강플럭스 규명	1-1	퇴적물트랩 계류	- 남극 척치해 두 지점에 일년동안 계류한 퇴적물트랩 계류	완료	70
	1-2	최신 연구동향 파악	- 북극해에서 입자플럭스에 대한 최신 연구동향 파악	완료	30

제 2 절 대외 기여도

- 없음



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 북극해에서의 “Biology pump” 자료는 미래 지구온난화를 예측하는 모델에 입력자료로 활용됨
- 북극해의 기후조절능력 평가에 활용
- 북극해에서 해빙감소에 따른 생지화학적 물질순환 이해에 활용
- 북극해 국제프로그램에 자료 공유 및 제공에 활용



제 6 장 참고문헌

- Bauerfein E., nothing E-M., Beszczynska A., Fahl K., Kaleshke L., Kreker K., and Wegner J. (2009) Particle sedimentation patterns in the eastern Fram Strait during 2000-2005: Results from the Arctic long-term observatory HAUSGARTEN. *Deep-Sea Research I* 56, 1471-1487.
- Fahl K. and Nothing E-M. (2007) Lithogenic and biogenic particle fluxes on the Lomonosov Ridge (Central Arctic Ocean) and their relevance for sediment accumulation: Vertical vs. lateral transport. *Deep-Sea Research I* 54, 1256-1272.
- Forest A., Sampi M., Hattori H., Makabe R., Fukuchi M., Wassmann P., and Fortier L. (2007) Particulate organic carbon fluxes on the slope of the Mackenzie Shelf (Beaufort Sea): Physical and biological forcing of shelf-basin exchange. *Journal of Marine System* 68, 39-54.
- Forest A., Belanger S., Sampi M., Lalande C., and Fortier L. (2010) Three-year assessment of particulate organic carbon fluxes in Amundsen Gulf (Beaufort Sea): Satellite observation and sediment trap measurements. *Deep-Sea Research I* 57, 125-142.
- Honjo S., Krisgfield R., Eglinton T., Kemp J., Doherty K., Mckee T., and Takizawa T. (2010) Biological pump processes in the cryopelagic and hemipelagic Arctic Ocean: Cadanda Basin and Chukci Rise. *Progress in Oceanography*, 85, 137-170.
- Lalade C., Grebmeier J., Wassmann P., Cooper L., Flint M., and Sergeeva M. (2007) Export fluxes of biogenic matter in the presence and absence of seasonal sea ice cover in the Chukchi Sea. *Continental Shelf Research* 27, 2015-2065.
- O'Brien M., Melling H., Pederson T., and Macdonald R. (2013) The role of eddy on particle flux in the Canada of the Arctic Ocean. *Deep-Sea Research I* 71, 1-20.