

# 동해 울릉분지 침강물질 특성 및 플럭스 변화연구

[단계 완료 보고서]

2019. 2.

BSPE 99603-11862-3

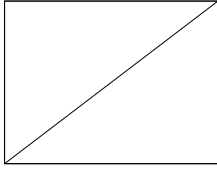
동해 울릉분지 침강물질 특성 및 플럭스 변화연구

2019. 2.

한국해양과학기술원



한국해양과학기술원



BSPE 99603-11862-3

# 동해 울릉분지 침강물질 특성 및 플럭스 변화연구

[단계 완료 보고서]

2019. 2.



한국해양과학기술원

# 제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “동해 울릉분지 침강물질 특성 및 플릭스 변화 연구” 사업의 단계 완료 보고서로 제출합니다.

2019. 2. 28.

총괄연구책임자 : 김영일

참 여 연 구 원 : 권지남, 김창준, 이병길, 이승민,  
이준규, 임수진, 장영석, 최기영,  
최문정



# 요 약 문

□ 과제명 : 동해 울릉분지 침강물질 특성 및 플럭스 변화연구

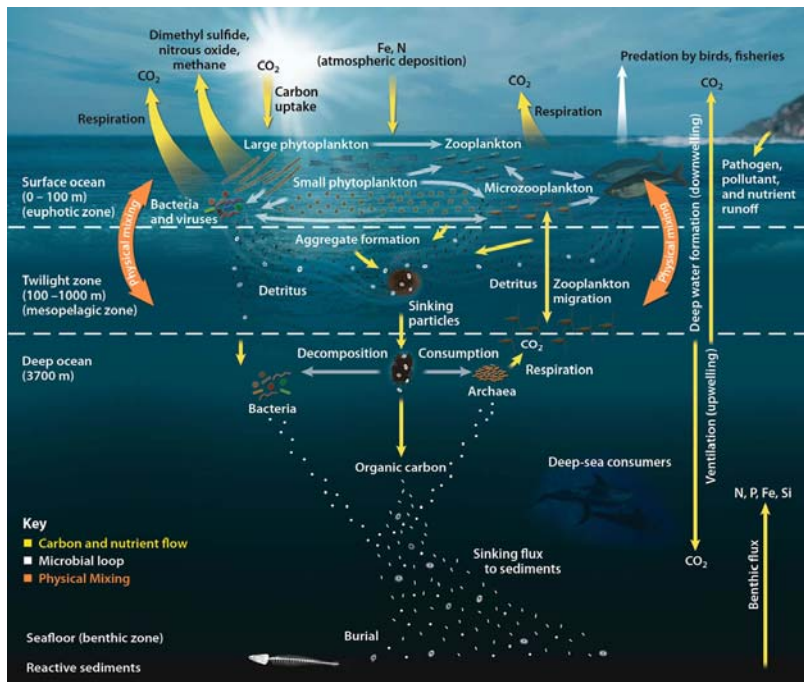
## 1. 연구의 목적 및 필요성

□ 연구의 목적

- 동해 울릉분지 침강 물질 특성 및 물질별 플럭스 변화 파악을 통한 표층생물생 산력과 침강플럭스의 상관관계 파악 및 POC 물질수지 계산

□ 연구의 필요성

- 과학·기술적 측면



[해양의 물질순환 모식도 ([https://public.ornl.gov/site/gallery/originals/Pg081\\_CCycle08.jpg](https://public.ornl.gov/site/gallery/originals/Pg081_CCycle08.jpg))]



- 해양에서의 물질순환과정은 다양한 물리, 화학, 생물학적 과정이 상호 연결되어 매우 복잡하지만, 해역의 생지화학적 특성, 생태계의 구조 파악 및 미래 해역환경 및 생태계 변화를 예측하기 위해서 해역의 물질 순환과정을 이해하는 것은 매우 중요함.
  - 물질순환 과정 중에서 해수중을 침강하는 입자를 통해 저층으로 유입되는 물질 수송과정은 수층에 존재하는 물질의 제거 과정, 퇴적물의 환경과 서식하는 생물의 에너지원 측면 등 저서생태계를 지지하는 기반 및 영향을 이해하는데 중요함.
- 동해는 그 순환구조가 대양과 유사하며, 특히 울릉분지는 우리나라 관할해역 중 유일하게 수심 2,000m 이상으로 심해도 함께 보유하고 있어 대양규모의 생지화학적 물질순환 연구에 최적지이지만 체계적인 물질 순환연구는 빈약함.
  - 동해는 약 90%의 해역이 수심 200m 이하의 심해(평균 수심 약 1,684m, 최대 수심 4,049m, 200m 이상의 수심 약 90%)로 구성되어 있음



[동해 울릉분지 해저 단면도]

- 동해의 심해는 연중 1도 이하의 차가운 해수가 존재하여 유입된 유기물의 분해속도가 느려 대양에 비해서도 퇴적물에 높은 유기탄소를 함유하고 있는 자연냉장고의 특징을 지니고 있음
- 동해 울릉분지의 생지화학적 물질순환의 자료 및 지식 빈약
  - 동해 전체에서 유일하게 우리나라 관할 구역임에도 불구하고 관련 연구과제의 부재로 체계적인 물질순환에 관한 연구가 수행되지 않아 해양과학적 지식이 매우 부족함
  - 특히 울릉분지 심층으로 유입되는 물질의 거동 및 특성과 동해 표층 생물생산력 변동과의 상관성 연구 극히 미비
  - 심층으로 유입되는 물질의 특성과 플럭스 연구에는 침강입자 포집기가 유용하지만 계류비용과 유지/관리의 어려움으로 관련 연구는 매우 부족하며 동해에서는 그 연구사례가 우리원에서 수행된 것이 대부분임.



- 동해 심해 서식 생물의 에너지 공급원에 대한 학술적 연구 부족
  - 울릉분지는 동일 면적의 다른 해역과 비교하여 표층생물생산력이 가장 높은 해역이며 생물다양성과 고유성도 높게 평가되고 있으나, 지역민에게 있어서 중요한 기초생산력, 주요 수산생물 등과 같은 현안 문제와 연관된 연구는 매우 제한적임.
  - 특히 동해 심해의 주요 저서 수산자원의 유지/조절 요인이 되는 에너지 근원에 대한 연구는 매우 부족함
- 경제·사회적 측면
  - 동해 심해 생물자원의 유지/조절인자 규명으로 저서 수산자원 관리 정책에 필수 기본자료 확보 필요
  - 동해 주도권 확보를 위한 국가간 갈등 및 경쟁 심화에 과학적 자료 생산 및 관리를 통한 학술적 주도권 확보 필요
  - 동해지역 현안문제에 대한 학술적 해결 방안 제시로 우리원의 지역사회 신뢰 및 위상 향상 기여 필요
- 해양과기원 임무 및 경영목표 등과의 연계성
  - 경영목표의 중점전략인 원천·기반연구 강화 및 국가 사회적 해양현안 해결에 직접 연계된 동해 저층 유입 물질 특성 및 플럭스 연구 성과 도출
    - 동해로 유입된 물질의 이동/순환 과정의 과학적 이해를 바탕으로 동해지역 현안문제인 어업자원을 포함한 주요 저서 해양생물량의 유지/조절 요인 파악에 기여
  - 전략목표 해양연구를 통한 기후변화 예측 및 대응에 직접 연계
    - 동해 저층 유입 물질의 특성 및 플럭스 변화를 파악함으로써 한반도 주변해역, 해수순환, 물질교환 및 고해양연구의 성과목표에 직접 기여
  - 전략목표 지속 가능한 해양생태계 관리 및 미래 유용자원 탐색활용에 직접 연계
    - 동해 저층 유입물질이 저서 생태계에 미치는 영향에 유용한 자료 생산으로 환경변화에 따른 해양생태계 반응 이해 및 대응기술 연구의 성과목표에 기여
- 국가적 아젠다(정부 140대 국정과제, 제3차 과학기술기본계획 등)와의 연계성
  - 정부 140대 국정과제의 해양환경 보전과 개발의 조화, 체계적인 해양영토관리 및 해양수산업의 미래산업화에 연계
    - 기후변화에 따른 동해 표층생물생산의 변화에 따른 심해환경 영향 파악을 통하여 기후변화 대응 필수자료 확보



- 주변해역에 대한 해양관측과 조사활동 강화에 연계하여 지속적인 동해 저층 유입물질 조사 부분을 담당
- 동해 심해서식 수산생물의 유지/조절 요인을 파악에 필요한 자료를 생산하여 미래 해양생물자원 조성사업에 기여
- 제3차 과학기술 기본계획의 19개 분야의 3. 미래성장 동력 확충의 해양수산의 미래 산업화와 4. 깨끗하고 편리한 환경조성의 기후변화 대동력 강화에 연계
  - 동해 저층 서식 수산생물의 생산량을 유지/조절하는 원인을 조사하여 해양수산의 미래 산업화에 기여
  - 기후변화에 따른 동해의 환경변화 반응 및 생태계 영향을 파악하여 기후변화 대응역량 강화에 필수 자료 확보

## 2. 연구개발 내용 및 범위

### □ 울릉분지 표층생물 생산력 변화 조사

- 위성자료를 활용한 울릉분지 표층생물생산력 시계열 변화 특성 파악

### □ 울릉분지 침강 물질 특성 및 플럭스 조사

- 시계열 울릉분지 침강 Total Massflux 변화 파악
- 침강입자의 시계열 주요화학적성분별 (Major Elements, 친생물원소, 금속성분 등) 농도 특성 및 기원 파악
- 침강입자를 통해 울릉분지로 유입되는 주요화학적성분별 (Major Elements, 친생물원소, 금속성분 등) 시계열 플럭스 변화 특성 파악
- 울릉분지 표층생물생산력과 침강 물질 플럭스와의 상관관계 파악

### □ 울릉분지 POC(Particulate Organic Carbon) 수지 산정

- 천연방사성 핵종  $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 비를 이용한 Export Flux 계산
- 천연방사성핵종  $^{210}\text{Pb}$ 을 이용한 Lateral Transport Flux 및 Accumulation rate 계산

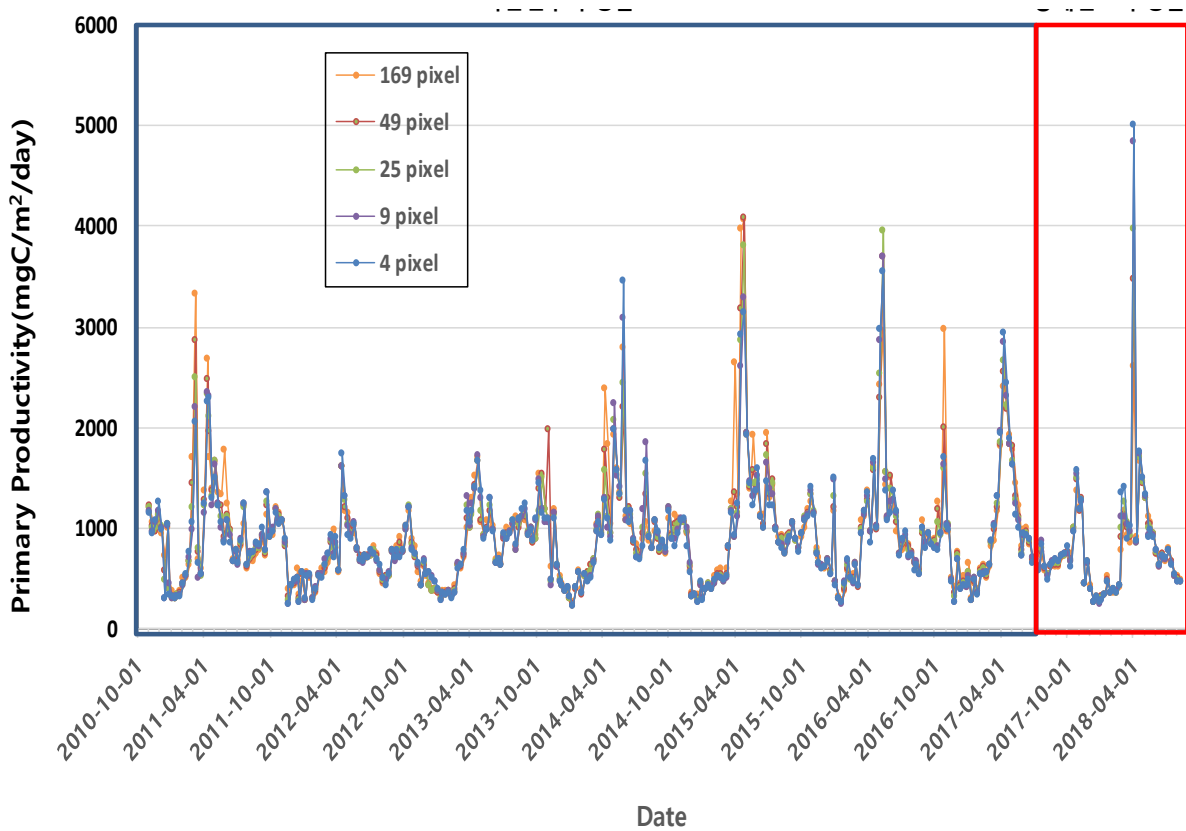


### 3. 주요 연구 결과

#### □ 울릉분지 표층생물 생산력 변화 조사

○ 위성자료를 활용한 표층생물생산력 시계열 변화 파악

- 계산된 각 픽셀의 범위에 따른 계산값의 차이는 크지 않고, 시간에 따른 변화양상도 잘 일치하였음.



[울릉분지 표층생물생산력의 시간 변화]

- 2010년 11월부터 2018년 8월까지 울릉분지 표층생물생산력은 226~5,006 mgC/m<sup>2</sup>/day (평균 891 mgC/m<sup>2</sup>/day)의 범위로 계절에 따라 1자리수 이상 차이를 나타냄.
- 3월~4월의 봄철 Bloom 및 9월~10월의 가을철 Bloom시기에 타 시기에 비해 높은 생산력을 나타냄.
- 8년간의 장기 자료의 분석을 통해 동해 울릉분지 표층생물생산력의 시계열 변화가 나타났으며, 2014년을 기준으로 표층생물생산력의 증가가 발견됨



- 2011년 1월 1일 ~ 2013년 12월 31일 : 282~2,588 mgC/m<sup>2</sup>/day (평균 : 822 mgC/m<sup>2</sup>/day)
- 2014년 1월 1일 ~ 2016년 12월 31일 : 239~3,677 mgC/m<sup>2</sup>/day (평균 : 968 mgC/m<sup>2</sup>/day)  
 ⇒ t-테스트 결과 2013년 이전에 비해 약 17% 표층생물생산력 증가함(n=276, 유의수준 0.05, P=0.007)
- 기후변화에 따른 동해 표층해양환경 변화에 기인한 것으로 사료되며, 추가 연구를 통해 표층생물생산력 증가원인 파악 및 정량적인 증가규모 파악 연구가 필요함

## □ 울릉분지 침강 물질 특성 및 플럭스 조사

### ○ 장기 시계열 울릉분지 침강물질 포집기 계류 시스템 운영

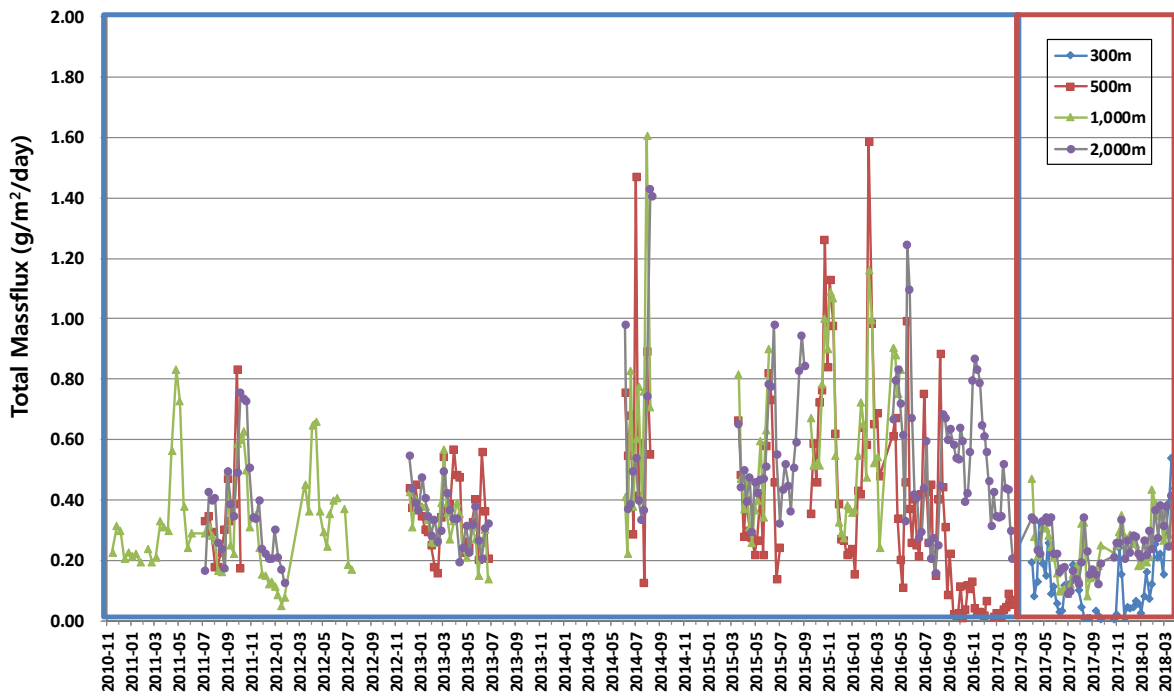
- 설치 위치 : 울릉분지의 북쪽 수심 2,357m 해역(37°38.057'N, 131°20.619'E)
- 장착 장비 : Sediment Trap(NGK SMD-26S Type) : 3개 수층(300m, 1,000m, 2,000m)  
 Current Meter(RCM DW Type) : 2개 수층 (550m, 2,050m)

### - 시료 수집 및 처리 현황

- 2016년 9월~2017년 3월 계류 : 시료수집 및 Total Massflux 계산완료
- 2017년 4월~2017년 9월 계류 : 시료수집 및 Total Massflux 계산완료
- 2017년 10월~2018년 3월 계류 : 시료수집 및 Total Massflux 계산완료
- 2018년 4월~2018년 9월 계류 : 시료수집 완료 및 현재 전처리 중

### ○ 시계열 울릉분지 침강 Total Massflux 변화 파악

- 2010년 11월 10일~2018년 3월 30일까지 약 8년간의 동해 울릉분지 침강입자 플럭스는 2017년 4월부터 계류를 시작한 300m 수심을 제외하고 500m, 1,000m, 2,000m에서의 침강입자 플럭스의 시간에 따른 플럭스의 변화양상 및 플럭스의 크기가 유사하며 수심에 따른 플럭스 피크의 시간차이가 나타나지 않았음.
  - 500m : 0.01~1.59g/m<sup>2</sup>/day(평균 0.38g/m<sup>2</sup>/day)
  - 1,000m : 0.05~1.61g/m<sup>2</sup>/day(평균 0.38g/m<sup>2</sup>/day)
  - 2,000m : 0.09~1.43g/m<sup>2</sup>/day(평균 0.42g/m<sup>2</sup>/day)
- 울릉분지는 표층에서 생물생산에 의해 생성된 입자가 수일 이내에 빠르게 해저 퇴적물로 유입되는 것으로 사료됨



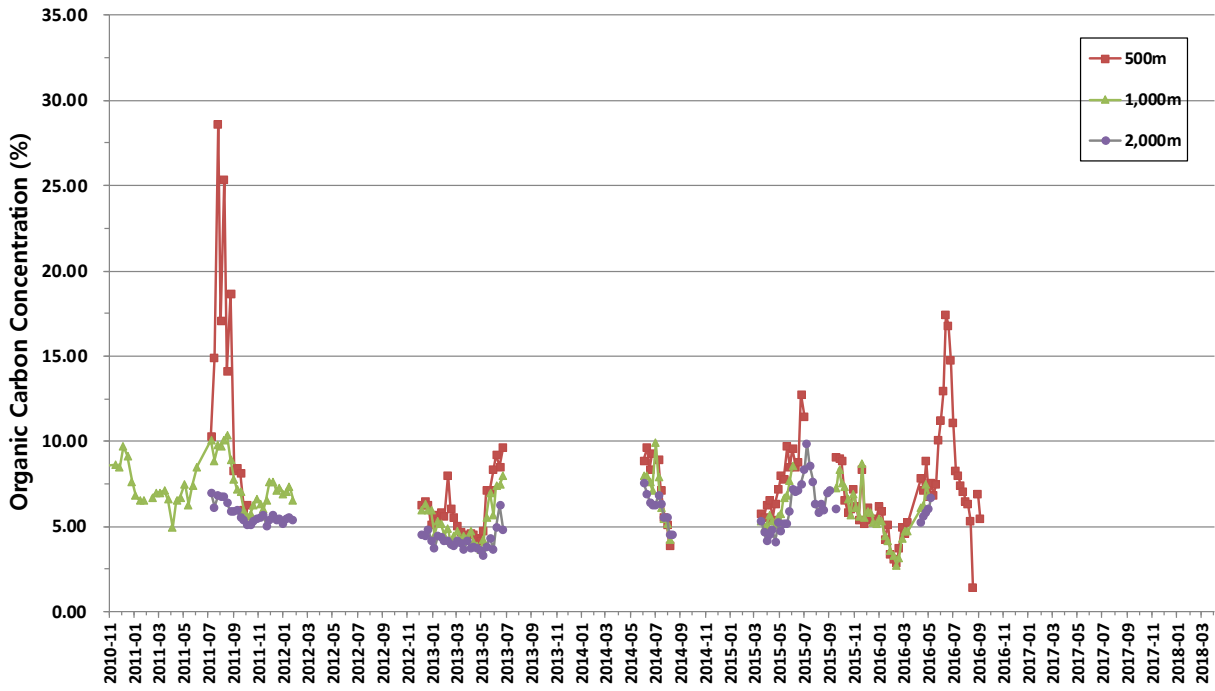
[울릉분지 침강입자 플럭스의 시계열 변화]

- 2014년을 기준으로 2011년~2013년에 비해 2014년 이후에 Total Massflux가 증가하고 있으며, 2017년부터 다시 감소하고 있는 경향을 보임.
- 특히 1,000m와 2,000의 Sediment Trap에서 증가 경향이 현저함.

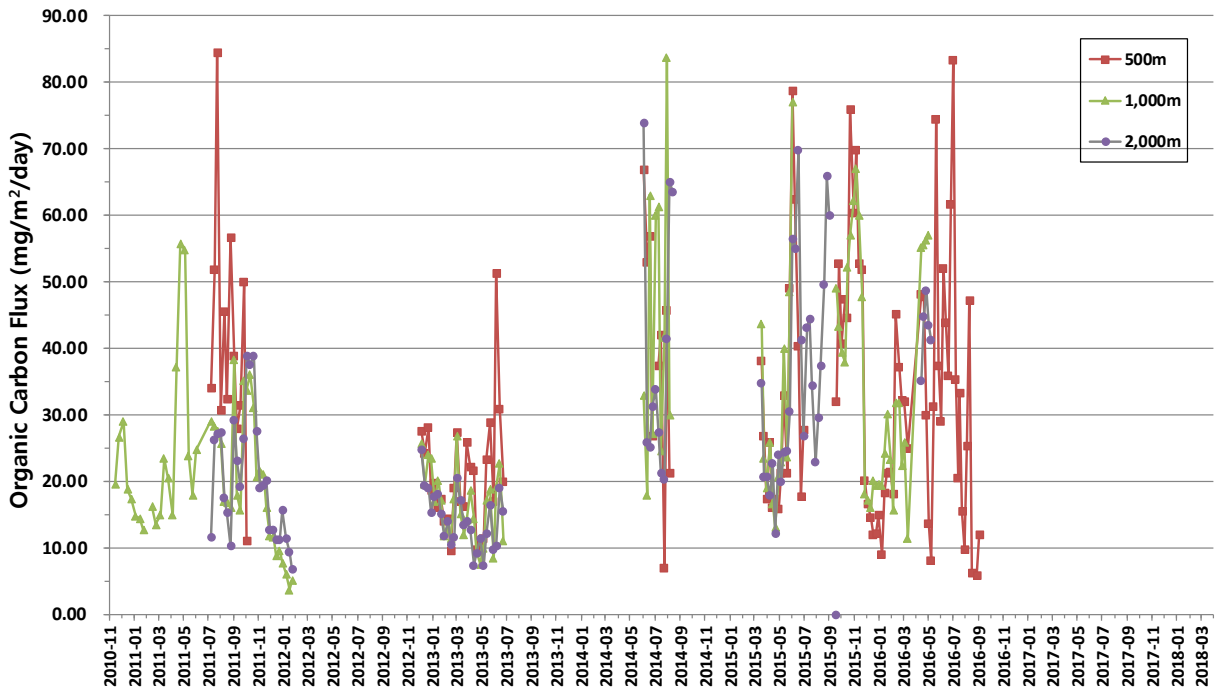
[Total Massflux의 시기별 비교표]

	2010년 ~ 2013년				2014년 ~ 2016년				2017년 이후			
수심	300m	500m	1,000m	2,000m	300m	500m	1,000m	2,000m	300m	500m	1,000m	2,000m
최소		0.16	0.05	0.13		0.01	0.22	0.16	0.01		0.08	0.09
최대		0.83	0.83	0.76		1.59	1.61	1.43	0.54		0.47	0.42
평균		0.35	0.32	0.35		0.39	0.61	0.56	0.13		0.24	0.25

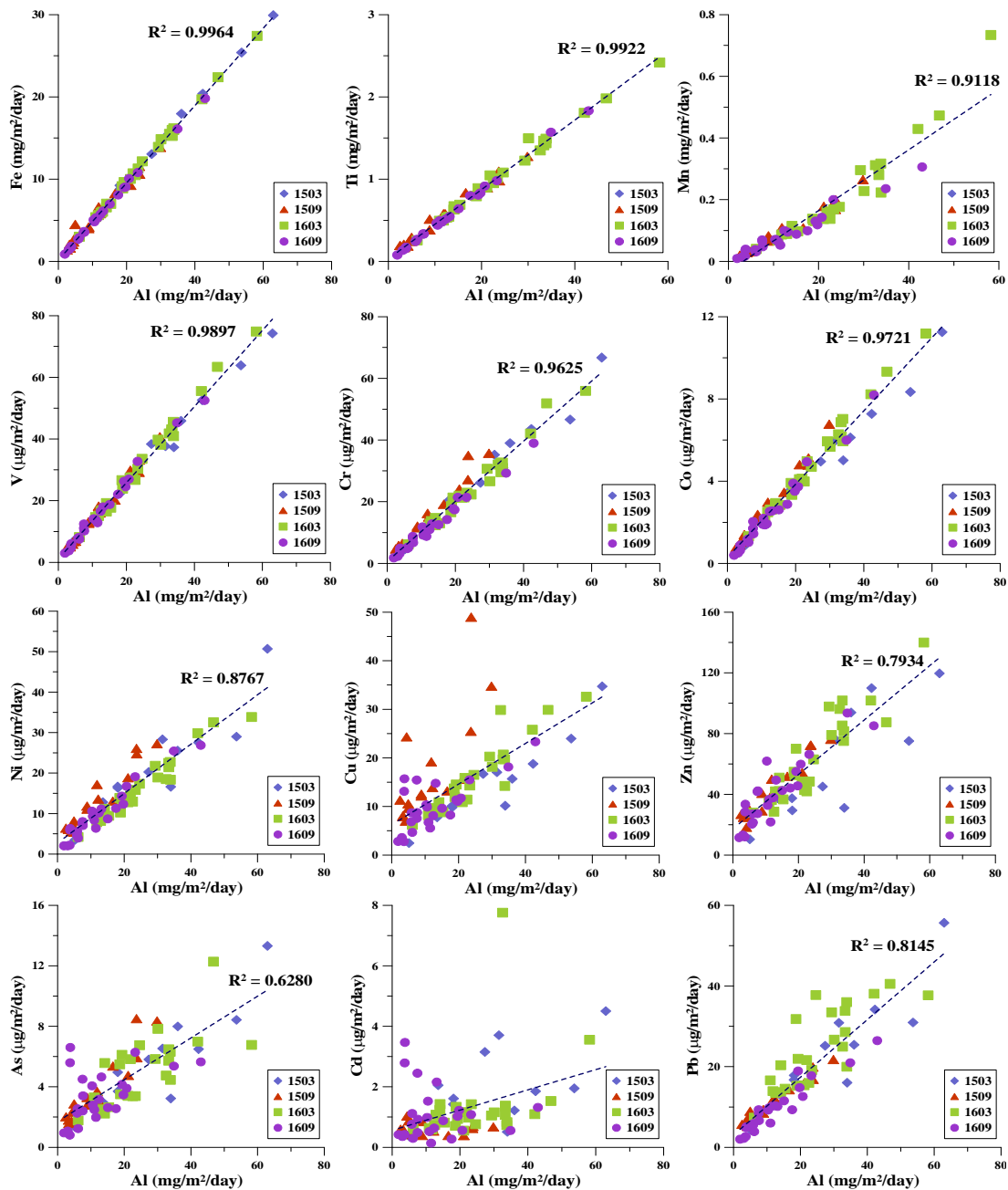
- 침강입자의 시계열 주요화학적분별 (Major Elements, 친생물원소, 금속성분 등) 농도 특성 및 기원 파악
- 울릉분지 침강물질의 유기물 농도 및 플럭스
  - 침강입자의 유기탄소 농도 및 플럭스의 연간변화는 Total Massflux의 변화양상과 유사함



[울릉분지 침강입자 중 유기탄소 농도의 연간 변화]



[울릉분지 침강입자 중 유기탄소 플럭스의 연간 변화]



[울릉분지 침강입자 중 Al에 대한 각 금속성분의 상관관계(500m)]

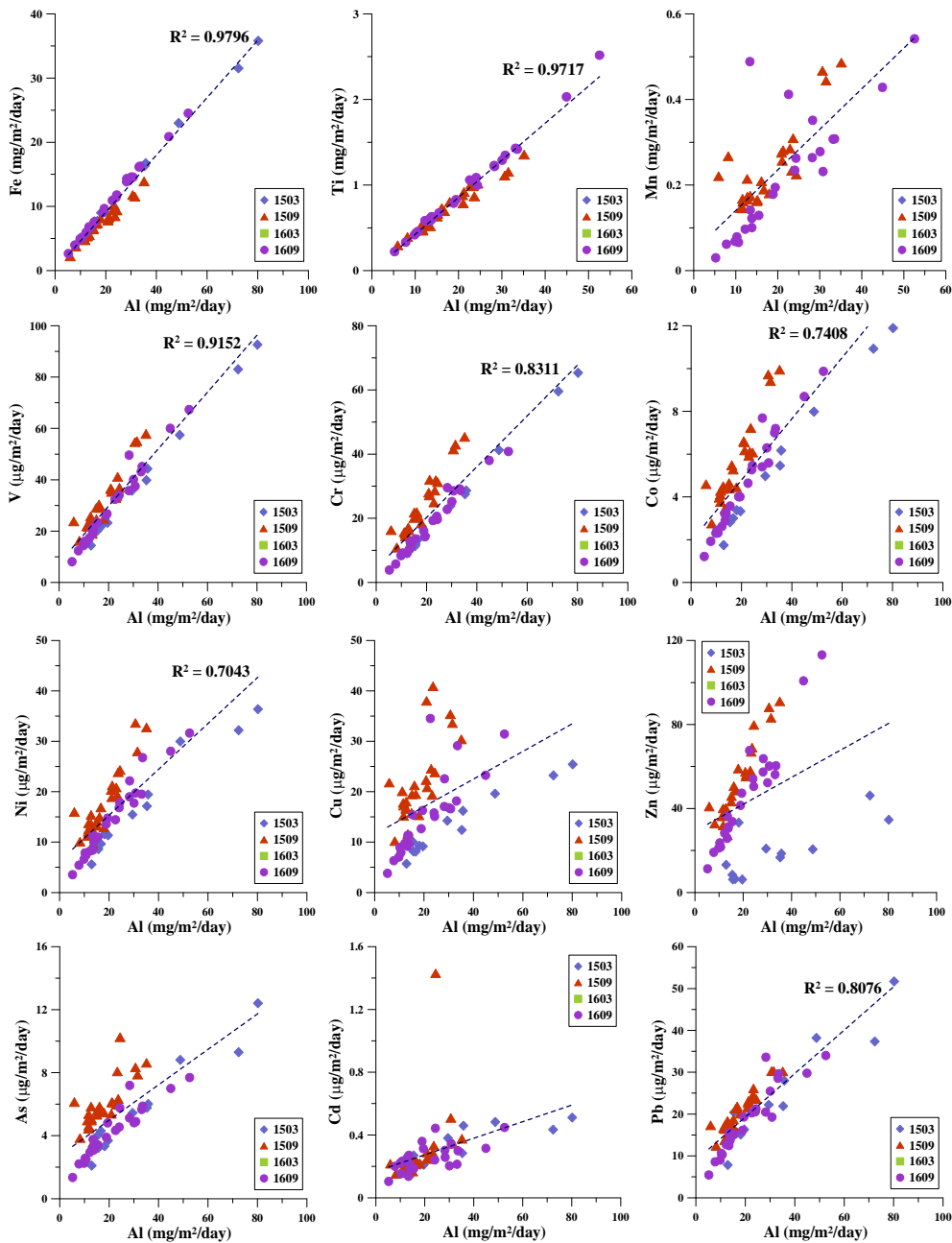
- 울릉분지 침강물질의 금속성분 농도 및 기원 분석

- 울릉분지로 심해로 유입되는 물질의 특성을 파악하기 위하여 침강입자 중의 주요 금속성분을 분석하고, Al 농도와 각 금속성분의 상관관계로부터 기원을 파악함
- 수심 500m에 계류된 침강입자 포집기에 의해 포집된 침강입자의 금속성분 중 Fe, Ti, Mn, V, Cr, Co 등은 모두 상관계수가 0.95 이상으로 대기를 통해 육상

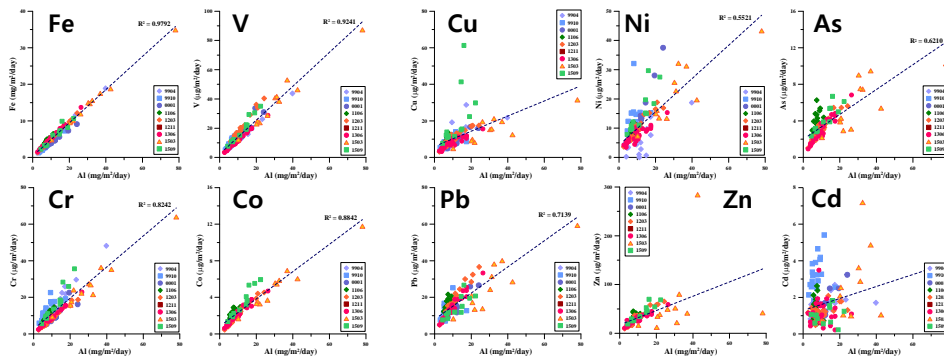


으로부터 유입된 육상지각 기원의 것으로 사료되며, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb 등은 육상의 인간활동 등에 의해 방출된 오염물질 기원의 것이 많이 포함되어 있는 것으로 사료됨.

- 수심 2,000m에 계류된 침강입자 포집기에 포집된 침강입자의 금속성분은 Mn을 제외하고 모두 500m에서 포집된 침강입자의 금속성분 기원과 동일하였음. Mn은 저층퇴적물에서 용출된 것이 재부유하여 다시 입자에 포집된 것들이 나타남



[울릉분지 침강입자 중 Al에 대한 각 금속성분의 상관관계(2,000m)]



알루미늄플럭스와 금속원소 플럭스와의 상관관계

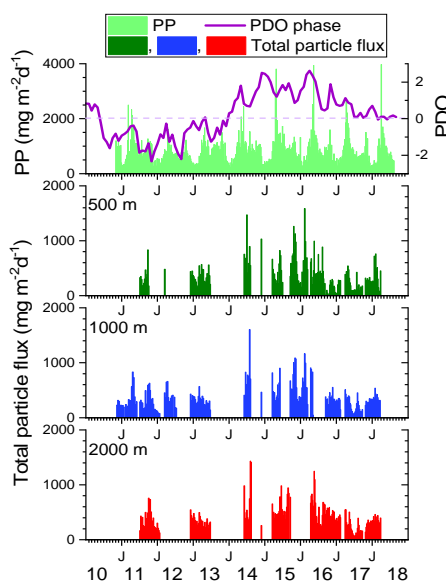
	Fe	V	Cr	Co	Cu	Ni	As	Pb	Zn	Cd
R <sup>2</sup>	0.98	0.92	0.82	0.88	0.30	0.55	0.62	0.71	0.25	-

미량금속의 농축계수(Enrichment Factor : EF)

	EF_V	EF_Cr	EF_Co	EF_Ni	EF_Cu	EF_Zn	EF_As	EF_Cd	EF_Pb
Min	0.7	0.4	0.5	0.6	0.6	0.5	1.5	8.1	1.9
Max	1.3	1.2	1.4	2.4	8.4	9.4	10.9	297	10.7

[침강입자의 금속성분의 시에 대한 상관관계 및 농축계수]

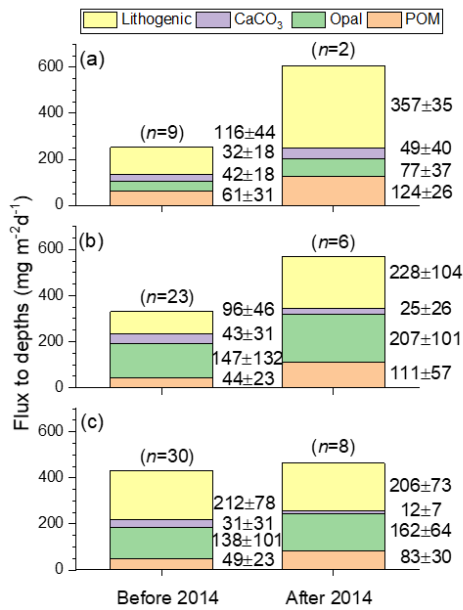
- 침강입자 형태로 심해로 유입되는 금속성분 중 Fe, V, Cr, Co 등은 모두 상관 계수가 0.8 이상으로 대기를 통해 육상으로부터 유입된 육상지각 기원의 것으로 사료되며, Cu, Ni, As, Pb, Zn, Cd 등은 육상의 인간활동 등에 의해 방출된 오염물질 기원의 것이 많이 포함되어 있는 것으로 사료됨.
- 울릉분지 표층생물생산력과 침강 물질 플럭스와의 상관관계 파악
  - Total Massflux의 변화 요인을 파악하기 위해 여러 가지 환경요소와의 비교분석



[침강입자 플럭스와 표층생물생산력 및 PDO의 시계열 변화]



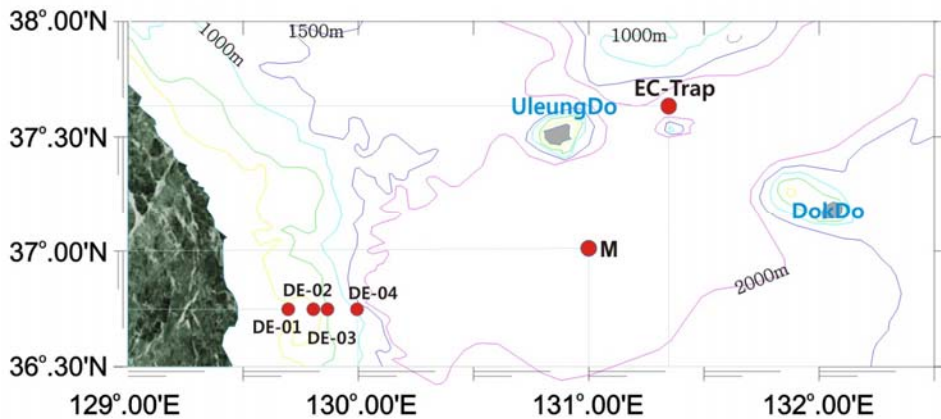
- Total Massflux가 증가하는 2014년부터 위성자료로부터 계산한 표층생물생산력이 증가함.
- Total Massflux가 증가하는 2014년부터 PDO(Pacific Decadal Oscillation)가 (+)값으로 바뀜
- 2014년 이후부터 침강입자 중의 생물기원 Opal 및 Lithogenic Flux가 증가함



[침강입자의 주요성분 비교]

□ 울릉분지 POC(Particulate Organic Carbon) 수지 산정

- 천연방사성 핵종 <sup>234</sup>Th/<sup>238</sup>U비를 이용한 Export Flux 계산



[울릉분지 조사 Station Map]

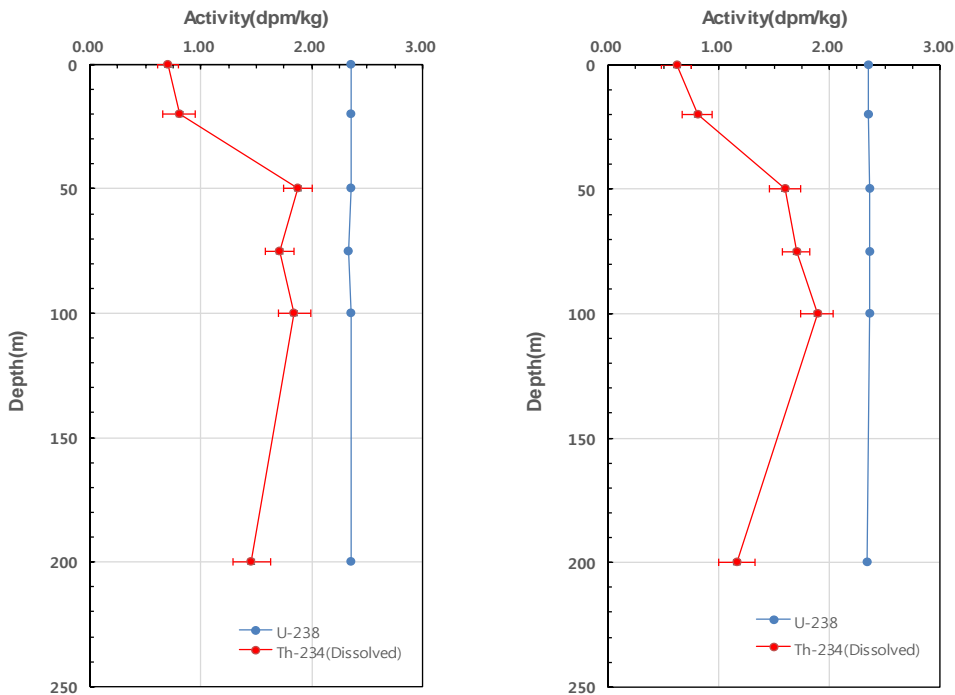


- 수층의  $^{234}\text{Th}$  농도분포

- 정점 M : 표층에서 낮고, M정점에서는 100m까지 증가한 후 200m까지 감소
- 정점 EC-Trap : 표층에서 낮고, M정점에서는 50m까지 증가한 후 200m까지 거의 일정

[울릉분지 해수 중  $^{234}\text{Th}$  및  $^{238}\text{U}$  농도]

Stn.	Depth (m)	$^{234}\text{Th}$ Activity			Part/Total (%)	$^{238}\text{U}$ (dpm/kg)	Salinity
		Dissolved (dpm/kg)	Particulate (dpm/kg)	total (dpm/kg)			
M	0	0.616 ± 0.134	0.039 ± 0.022	0.655 ± 0.136	6.0	2.35	34.25
	20	0.804 ± 0.132	0.121 ± 0.02	0.925 ± 0.133	13.1	2.36	34.33
	50	1.595 ± 0.142	0.237 ± 0.01	1.832 ± 0.142	12.9	2.36	34.35
	75	1.698 ± 0.124	0.159 ± 0.01	1.857 ± 0.124	8.6	2.36	34.44
	100	1.886 ± 0.144	0.179 ± 0.019	2.065 ± 0.145	8.7	2.36	34.38
	200	1.163 ± 0.16	0.356 ± 0.06	1.519 ± 0.171	23.4	2.34	34.05
EC-Trap	0	0.705 ± 0.095	0.124 ± 0.005	0.829 ± 0.096	15.0	2.36	34.33
	20	0.803 ± 0.146	0.121 ± 0.011	0.924 ± 0.146	13.1	2.35	34.29
	50	1.875 ± 0.134	0.13 ± 0.008	2.005 ± 0.134	6.5	2.36	34.33
	75	1.712 ± 0.129	0.125 ± 0.009	1.837 ± 0.129	6.8	2.34	34.05
	100	1.842 ± 0.147	0.128 ± 0.01	1.97 ± 0.148	6.5	2.36	34.35
	200	1.457 ± 0.171	0.35 ± 0.017	1.807 ± 0.171	19.4	2.35	34.30



[울릉분지 해수 중 용존태  $^{234}\text{Th}$  농도분포]

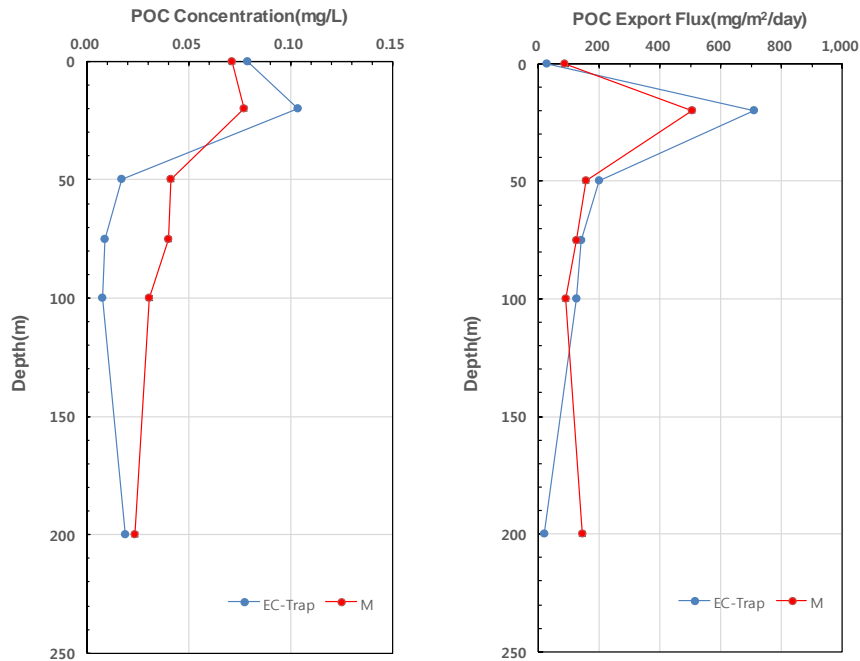


- Particulate Export Flux(신생산율) 산정

- 수층의 POC 농도는 아표층인 20m에서 가장 높음
- POC Export Flux는 표층에서 낮고 아표층인 20m에서 가장 높음
- 혼합층 수심 100m까지의 신생산(New Production)은 M에서 80.65mmolC/m<sup>2</sup>/day, EC-Trap에서 100.36mmolC/m<sup>2</sup>/day로 계산됨.

[울릉분지 해수 중 POC 농도 및 POC Export Flux]

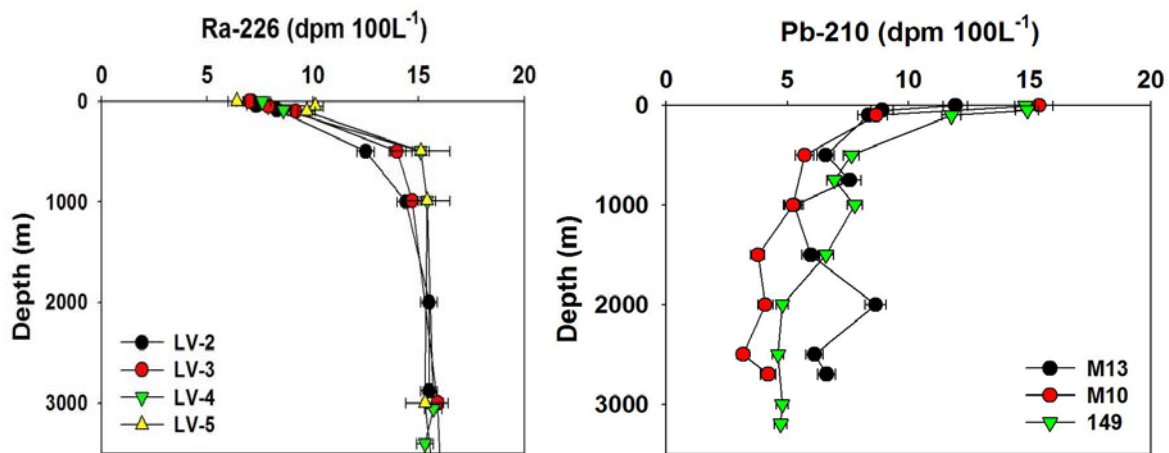
Stn.	Depth (m)	POC (mg/L)	POC/ <sup>234</sup> Th (mgC/dpm <sup>234</sup> Th)	POC Export flux (mgC/m <sup>2</sup> /d)
M	0	0.071	1.83 ± 1.03	88 ± 413
	20	0.077	0.64 ± 0.11	507 ± 3359
	50	0.041	0.17 ± 0.01	157 ± 1134
	75	0.040	0.25 ± 0.02	127 ± 1417
	100	0.030	0.17 ± 0.02	89 ± 591
	200	0.024	0.07 ± 0.01	145 ± 1548
EC-Trap	0	0.079	0.64 ± 0.01	27 ± 116
	20	0.104	0.86 ± 0.02	709 ± 3751
	50	0.017	0.13 ± 0.02	201 ± 802
	75	0.009	0.07 ± 0.01	140 ± 583
	100	0.008	0.06 ± 0.00	127 ± 458
	200	0.019	0.05 ± 0.00	20 ± 458



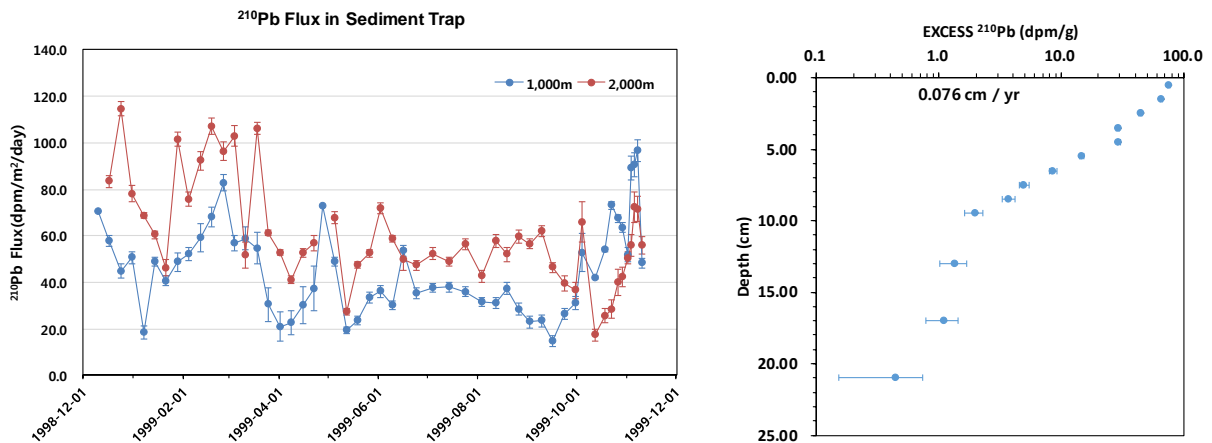
[울릉분지 POC 및 POC Export Flux의 수직분포]

○ 대기로부터 해양으로 유입되는  $^{210}\text{Pb}$ 의 유입 플럭스 조사

- 대기로부터 울릉분지로 유입되는  $^{210}\text{Pb}$  플럭스를 산정하기 위하여 해양에서  $^{210}\text{Pb}$ 의 Mass-Balance를 계산함.
- $^{210}\text{Pb}$ 의 Mass-Balance를 계산하기 위한 입력자료
  - 해수 중  $^{226}\text{Ra}$  농도(Tsunogai and Harada, 1986) 및  $^{210}\text{Pb}$  농도(서울대 EAST1자료) 인용
  - 침강입자 및 퇴적물 중  $^{210}\text{Pb}$  농도, Accumulation Rate (본 연구 자료)



[해수 중  $^{226}\text{Ra}$ (Tsunogai and Harada, 1986) 및  $^{210}\text{Pb}$ (서울대 East1) 분포]



[침강입자 및 퇴적물의  $^{210}\text{Pb}$  Flux 분포]



- 정상상태로 가정하면  $^{210}\text{Pb}$ 의 Mass-Balance는 다음의 식으로 계산됨

$$F_{Pb, Atm} = F_{Pb, Trap} - (\lambda_{Pb}I_{Ra} - \lambda_{Pb}I_{Pb})$$

$\lambda$  : decay constant (1/day)

$I$  : Inventory (dpm/cm<sup>2</sup>)

$F_{Pb, Atm}$  : Atmospheric Flux (dpm/cm<sup>2</sup>/year)

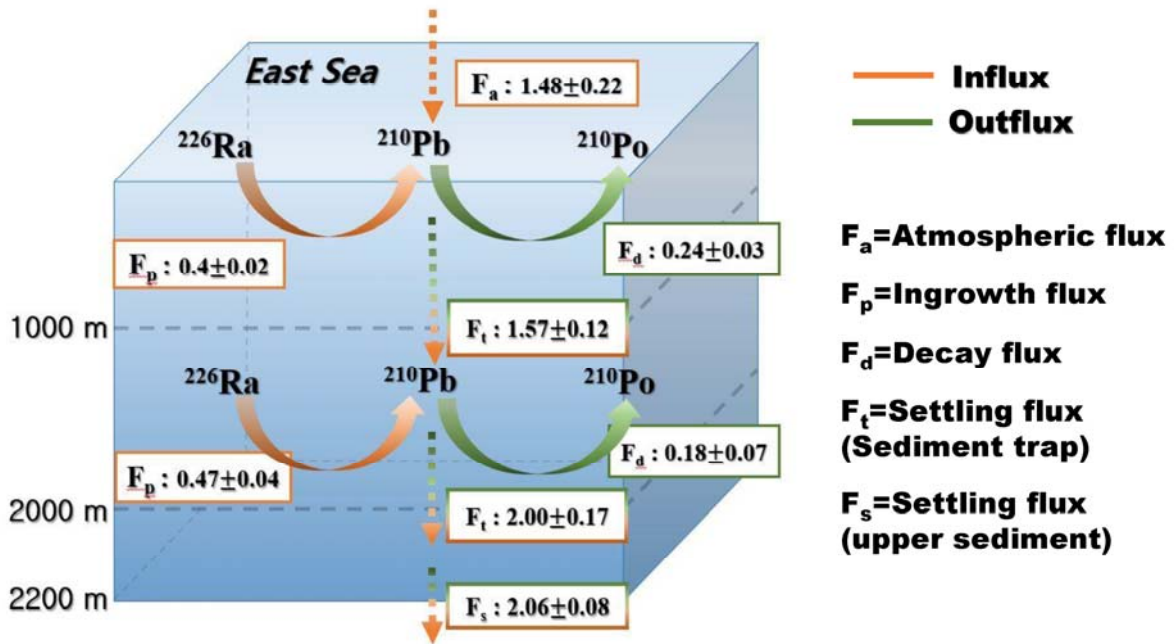
$\lambda_{Pb}I_{Ra}$  : Ingrowth Flux (dpm/cm<sup>2</sup>/year)

$F_{Pb, Trap}$  : Settling Flux (dpm/cm<sup>2</sup>/year)

$\lambda_{Pb}I_{Pb}$  : Decay Flux (dpm/cm<sup>2</sup>/year)

- 해양의  $^{210}\text{Pb}$  Mass-Balance를 이용하여 대기로부터 유입되는  $^{210}\text{Pb}$ 의 유입플럭스는 1.41~1.55 dpm/cm<sup>2</sup>/year(38.63~42.47dpm/m<sup>2</sup>/day)로 계산됨

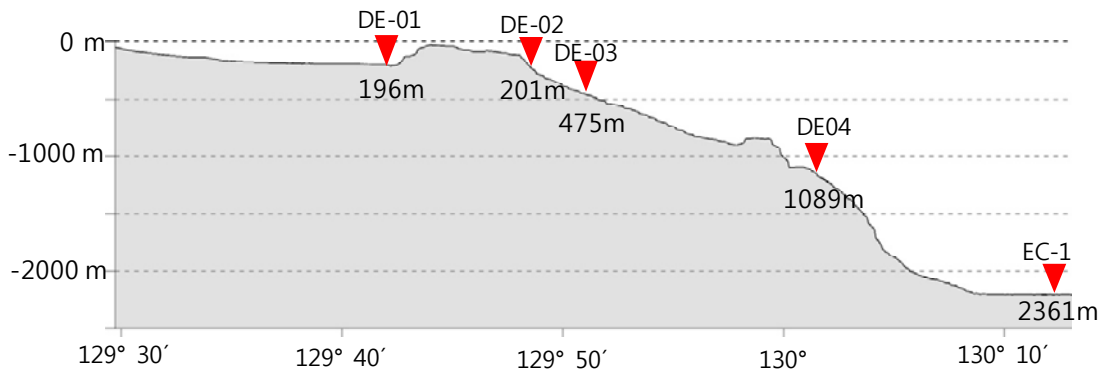
• 동해를 대상으로 대기로부터 유입되는  $^{210}\text{Pb}$ 의 유입플럭스 계산은 처음으로 이루어진 것이며, 1996년 Tokieada 등이 일본에서 계산한 50dpm/m<sup>2</sup>/day와 유사함.



[동해 울릉분지의  $^{210}\text{Pb}$  Flux 및 수치]

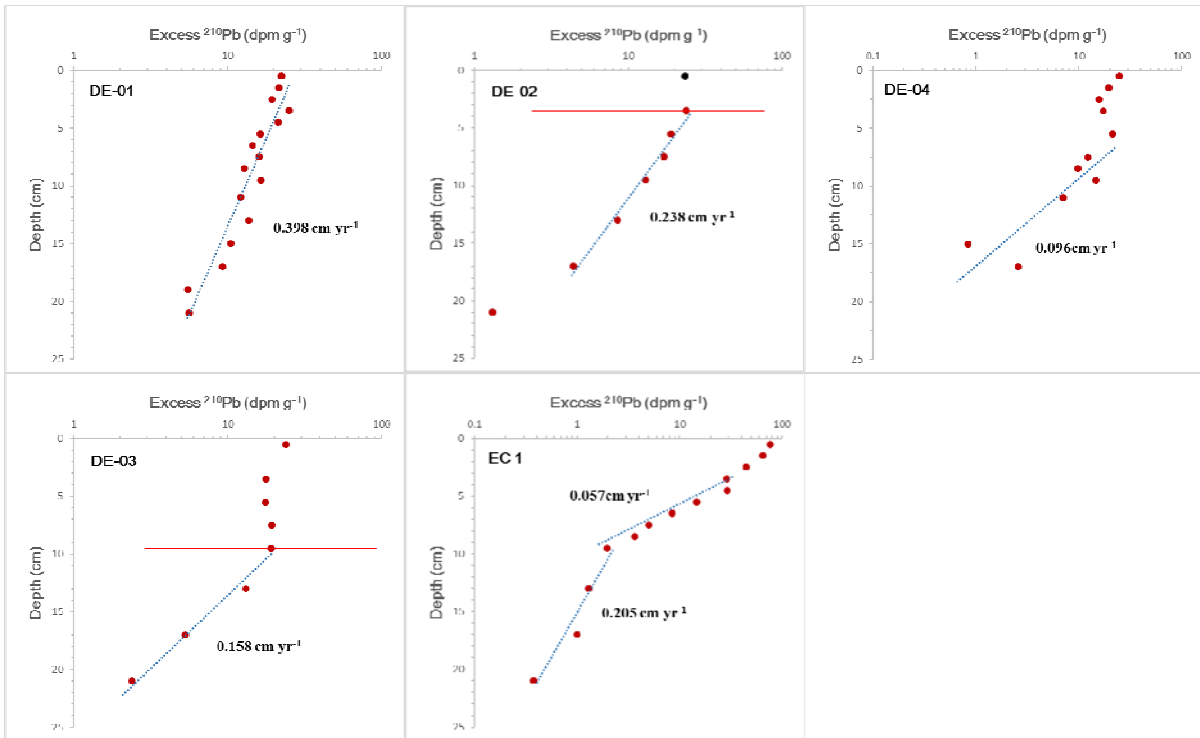
○ 울릉분지 대륙사면 퇴적물의 퇴적속도 조사

- 울릉분지 퇴적물로 유입되는 유기물 중 수평이동에 의해 유입된 유기물의 기여율을 계산하기 위한  $^{210}\text{Pb}$ 의 수치계산에서 울릉분지 대륙사면과 중앙부 퇴적물로의 Accumulation rate를 계산하기 위하여 대륙사면의 4개 정점 및 중앙부 1개 정점에서 주상퇴적물을 채취하여 분석함



[퇴적물 채취 수심]

- 울릉분지 대륙사면의 퇴적속도는 0.057~0.398cm/yr로 수심이 얇은 곳에서 빠르고 수심이 깊어질수록 늦어짐
- 수심이 가장 깊은 울릉분지 중앙부의 퇴적속도는 약 170년 전에 0.205cm/yr에서 0.057 cm/yr로 약 3.6배 늦어진 것으로 나타남



[울릉분지 대륙사면 퇴적속도]



○ 울릉분지 대륙사면 퇴적물의 Accumulation rate 계산

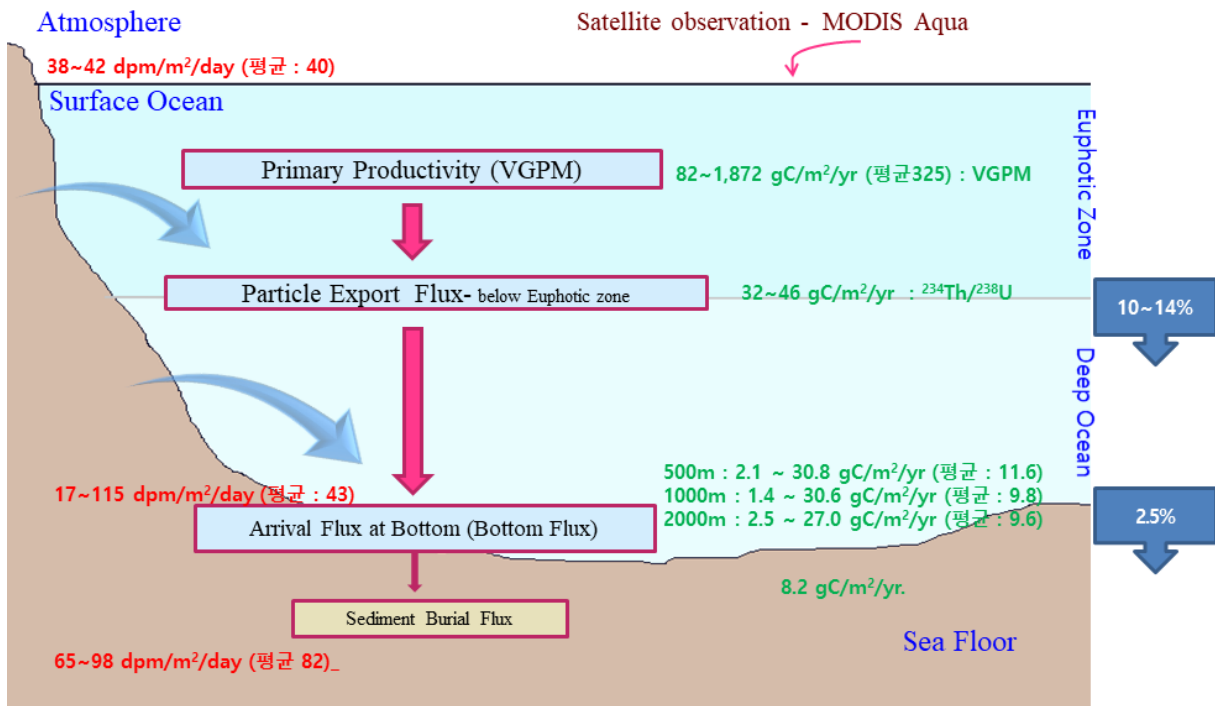
- $^{210}\text{Pb}$ 을 이용하여 계산된 울릉분지 대륙사면의 퇴적속도로부터 퇴적물의 Accumulation rate를 계산함
- 수심에 따른 퇴적속도 차이에 의해 퇴적물의 Accumulation rate 역시 연안에 가깝고 수심이 낮은 곳에서는 크고, 수심이 깊어질수록 작아짐

[울릉분지 대륙사면 퇴적물 Accumulation rate]

Station	Poraosity (%)	Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Sedimentation rates ( $\text{cm}/\text{yr}$ )	Mass accumulation rates ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{yr}$ )
DE 01	63.9	2.56	0.398	0.3678
DE 02	66.2	2.56	0.238	0.2059
DE 03	68.9	2.56	0.158	0.1258
DE 04	69.8	2.56	0.096	0.0742
EC 01	72	2.56	0.057	0.0409

○ 울릉분지 POC 수지 계산

- POC 수지를 계산하기 위한 입력자료
  - Primary Productivity : 82~1,872  $\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$  (VGPM)
  - Particle Export Flux : 32~46  $\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$  ( $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ )
  - Bottom Flux : 25~2.7  $\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$  (Sediment Trap)
  - Sediment Burial Flux : 8.2  $\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$  ( $^{210}\text{Pb}$  Accumulation rate)
- 울릉분지 POC 수지계산 결과 표층의 생물생산에 의해 생성된 POC 중 약 10~14%가 유광층 아래의 심해로 공급됨(그림 3-2-3)
- 울릉분지 해저로 도달하는 POC는 표층에서 생산된 POC의 약 2.5%로 계산됨
- 한편  $^{210}\text{Pb}$  Flux의 수지에서 대기로부터 입력된 Flux와 침강입자에 의해 해저로 도달하는 Flux는 유사하는데 비해 해저로 매몰되는 Flux는 약 2배 정도 큼
- 따라서 울릉분지 해저 퇴적물로 매몰되는 POC의 Flux 중 절반은 상부 표층에서 만들어진 생물생산의 기원이 아닌 재부유된 퇴적물 등이 수평이동에 의해 유입된 것이 기여하고 있는 것으로 사료됨.



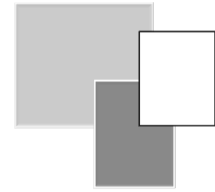
[울릉분지의 POC 수지]





# 목 차

요 약 문 .....	i
목 차 .....	xxi
표 목 차 .....	xxiii
그림목차 .....	xxiv
제1장 서 론 .....	1
제1절 서 론 .....	3
1. 동해의 자연환경 .....	3
제2절 동해 물질순환 연구의 중요성 .....	13
제2장 울릉분지 표층생물 생산력 조사 .....	15
제1절 위성자료를 활용한 표층 생물생산력의 시계열 변화 .....	17
1. 위성자료 수집 및 처리 .....	17
2. 울릉분지 시계열 표층생물생산력 변화 .....	18
제3장 동해 울릉분지 침강물질 특성 및 플럭스 변화 .....	21
제1절 장기 시계열 침강물질 포집기 계류 시스템 운영 .....	23
1. 설치 위치 .....	23
2. 시료 채집 및 처리 현황 .....	24
제2절 울릉분지 심해 유입물질 특성 및 플럭스 변화 .....	26
1. 울릉분지 총입자 플럭스 변화 특성 .....	26
2. 침강입자의 주요성분 특성 및 기원 .....	30
3. 표층생물생산력과 침강물질 플럭스의 관계 .....	33



<b>제4장 동해 울릉분지 POC 수치</b> .....	<b>35</b>
<b>제1절 천연 방사성 핵종을 이용한 Export Flux 계산</b> .....	<b>37</b>
1. 시료 채취 및 분석 .....	37
2. Export Flux 계산 .....	38
<b>제2절 대기로부터 해양으로 유입되는 <math>^{210}\text{Pb}</math> 플럭스</b> .....	<b>41</b>
1. 대기 입자 시료 채취 및 분석 .....	41
2. 울릉분지 $^{210}\text{Pb}$ 플럭스 수치 계산 .....	41
<b>제3절 울릉분지 대륙사면 퇴적물 퇴적속도</b> .....	<b>46</b>
1. 퇴적물 시료 채취 및 분석 .....	46
2. 울릉분지 대륙사면 퇴적물 퇴적속도 계산 .....	46
<b>제4절 울릉분지 POC(Particulate Organic Carbon) 수치</b> .....	<b>48</b>
1. 울릉분지의 POC 수치 계산 .....	48
<b>참고문헌</b> .....	<b>51</b>

# 표 목 차

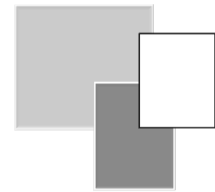


표 2-1-1. 울릉분지 표층생물생산력 계산에 사용된 Pixel별 범위 ..... 18

표 3-1-1. 울릉분지에서 수행된 Sediment Trap실험 현황표 ..... 25

표 3-2-1. Total Massflux의 시기별 비교표 ..... 27

표 4-1-1. 울릉분지 해수 중  $^{234}\text{Th}$  및  $^{238}\text{U}$  농도 ..... 39

표 4-1-2. 울릉분지 해수 중 POC 농도 및 POC Export Flux ..... 39

표 4-3-1. 울릉분지 대륙사면 퇴적물 Accumulation rate ..... 47



# 그림 목 차

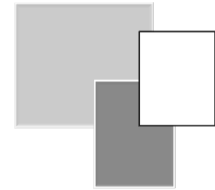


그림 1-1-1. 동해의 지리적 특징 .....	3
그림 1-1-2. 동해 해저지형도 .....	4
그림 1-1-3. 정기여객선에 장착된 ADCP로 관측된 대한해협 수송량의 5년간 변화 양상 .....	6
그림 1-1-4. RIAMOM을 이용한 동해 연평균 표층 수온 및 해류 모사 결과 .....	7
그림 1-1-5. 동해 심층 수온의 증가 및 용존 산소의 감소 .....	8
그림 1-1-6. 동해 심층 대류의 변화로 인한 저층수 생성 중단 모식도 .....	9
그림 1-1-7. 2040년경 동해 저층수가 중층수로 대체되는 변화를 보여주는 실험 결과 .....	9
그림 1-1-8. 인공위성 추적 중층 부표(ARGO)로 계산된 동해 중층 순환 모식도 .....	9
그림 1-1-9. 대한해협 해류계의 모식도 .....	10
그림 1-1-10. 동해 표층퇴적물 입도 분포 .....	12
그림 1-2-1. 해양의 물질순환 모식도 .....	13
그림 1-2-2. 후포뱅크-울릉분지 해저 단면도 .....	14
그림 1-2-3. 동해의 홍계 및 대계 수산자원 .....	14
그림 2-1-1. Ocean Productivity Website .....	17
그림 2-1-2. 울릉분지 표층생물생산력 계산에 사용된 픽셀 .....	18
그림 2-1-3. 울릉분지 표층생물생산력의 시간 변화 .....	19
그림 3-1-1. Sediment Trap 계류 위치 및 계류라인 설계도 .....	23
그림 3-2-1. 울릉분지 침강입자 플럭스의 시계열 변화 .....	26
그림 3-2-2. 침강입자 플럭스와 표층생물생산력 및 PDO의 시계열 변화 ..	28

그림 3-2-3. 울릉도 주변 수심 200m의 수온분포 .....	29
그림 3-2-4. 침강입자의 주요성분 비교 .....	29
그림 3-2-5. 울릉분지 침강입자 중 유기탄소 농도의 연간 변화 .....	30
그림 3-2-6. 울릉분지 침강입자 중 유기탄소 플럭스의 연간 변화 .....	31
그림 3-2-7. 울릉분지 침강입자 중 Al에 대한 각 금속성분의 상관관계 (500m) .....	32
그림 3-2-8. 울릉분지 침강입자 중 Al에 대한 각 금속성분의 상관관계 (2,000m) .....	33
그림 3-2-9. Total Massflux 및 VGPM 값의 시간변화 .....	34
그림 3-2-10. Total Massflux 및 Organic Carbon Flux에 대한 VGPM 값의 상관관계 .....	34
그림 4-1-1. 울릉분지 조사 Station Map .....	37
그림 4-1-2. 울릉분지 해수 중 용존태 $^{234}\text{Th}$ 농도분포 .....	38
그림 4-1-3. 울릉분지 POC 및 POC Export Flux의 수직분포 .....	40
그림 4-2-1. 대기시료 포집 장치(동해연구소 옥상) .....	41
그림 4-2-2. 대기입자 중 $^{210}\text{Pb}$ 의 농도변화 .....	42
그림 4-2-3. 해수 중 $^{226}\text{Ra}$ (Tsunogai and Harada, 1986) 및 $^{210}\text{Pb}$ (서울대 East1) 분포 .....	43
그림 4-2-4. 침강입자 및 퇴적물의 $^{210}\text{Pb}$ Flux 분포 .....	44
그림 4-2-5. 동해 울릉분지의 $^{210}\text{Pb}$ Flux 및 수지 .....	45
그림 4-3-1. 퇴적물 채취 수심 .....	46
그림 4-3-2. 울릉분지 대륙사면 퇴적속도 .....	47
그림 4-4-1. 울릉분지의 POC 수지 .....	49



# 제1장 서론







# 제1장 서론

## 제1절 서론

### 1. 동해의 자연환경

#### 가. 동해의 지리적 특성

동해는 한국, 북한, 일본, 러시아에 의하여 둘러싸인 북서태평양의 지역해로서 총면적 약 1,007,600km<sup>2</sup>, 평균수심 1,684m, 최대수심 4,049m, 총 용적 1,693,800km<sup>3</sup>인 반폐쇄성 대륙주변해이다(김 등, 1991). 황해와 비교하면, 면적은 2배보다 약간 크지만 용적은 약 100배 크다.



그림 1-1-1. 동해의 지리적 특징



동해는 모두 수심이 140m 보다 얇은 4개 해협(타타르스키해협, 소야해협, 츠가루해협 및 대한해협)을 통하여 외부와 연결되고 이들 해협을 통해 오호츠크해, 북태평양 및 동중국해로 연결된다(그림 1-1-1~2).

따라서 외해와 연결되는 해협의 얇은 수심으로 인하여 동해 전체 해수 약 10% 정도의 표층수만 인접 해역과 교환되고 대부분의 중·저층수는 동해 내에서 형성, 순환, 변형되는 과정을 거친다. 동해의 해저지형을 살펴보면, 중앙의 야마토 해저마루(Yamoto Ridge)를 중심으로 북쪽에 수심 3,500m가 넘는 일본분지(Japan Basin)가 넓게 형성되어 있으며 남쪽으로는 야마토 해저마루의 동서로 수심 2,000m가 넘는 울릉분지(Ulleung Basin)와 야마토분지(Yamato Basin)들이 형성되어 있다.

동해는 그 크기는 작지만 대양과 유사한 특징들을 가지고 있어서 흔히 축소판 해양(miniature ocean)으로 불린다. 이런 특징으로는 이중 자이로(double gyre) 형태의 상층 순환의 존재와 동해 내에서의 심층수 형성과 순환 등을 들 수 있다.

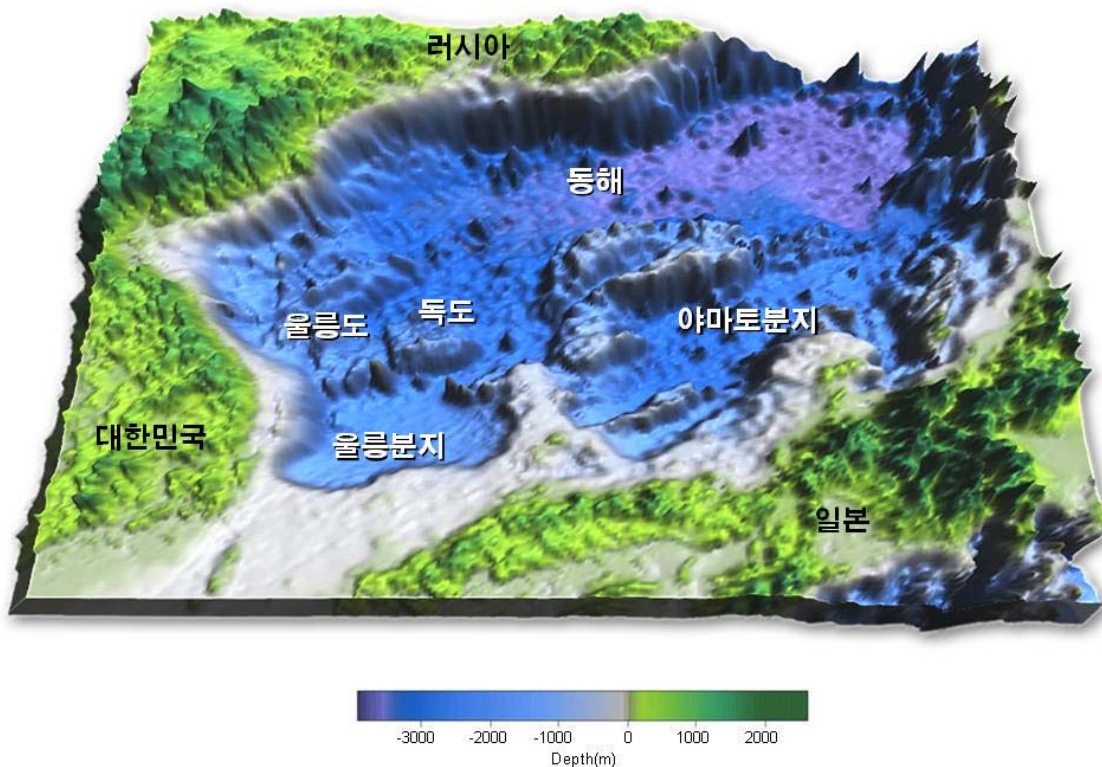


그림 1-1-2. 동해 해저지형도



## 나. 동해의 해수유동 특성

동해는 평균 수심이 약 1,700m이고 최대 수심이 4,049m이지만, 남해 및 오호츠크해, 태평양 등과 같은 주변해와는 수심 140m 이하의 얇은 해협(대한해협, 쓰가루해협, 쓰야해협 및 타타르해협)들로 연결되어 있다(그림 1-1-1). 따라서 이들 해협을 통해서 주로 물질 교환이 일어나게 되며, 기본적으로 대한해협을 통해 동해로 유입된 물이 나머지 3개 해협을 통해서 유출되지만 주요 유출 통로는 쓰가루해협과 쓰야해협으로 알려져 있다. 이렇게 해협을 통해서 유입·유출되는 해류는 유입·유출구가 천해인 까닭에 주로 표층에 국한되어 있으며, 유입해역에 있는 대마도의 명칭을 따라 대마난류로 명명되어 왔다.

동해로 유입된 대마난류는 동해의 상층부 순환에 큰 영향을 미친다. 동해로 유입된 대마난류는 동해 극전선 남쪽에서 북동쪽으로 흐른 후, 전체 수송량의 약 70%는 쓰가루해협을 통해 북태평양으로 유출되고(Moriyasu, 1972), 나머지는 쓰야해협을 통해 오호츠크해로 유출되며 일부는 동해 내에서 재순환한다. 대마난류는 동해로 유입된 후 동해안을 따라 북상하는 동한난류와 일본 연안을 따라 동해의 출구인 쓰가루해협 방향으로 흐르는 일본 연안류로 크게 나뉜다(Uda, 1934). 동한난류는 동해안을 따라 연안 가까이에서 북상하다가 36~38°N 부근에서 그 방향을 동쪽으로 바꿔 해안으로부터 떨어져 간다.

대한해협을 통해 동해로 유입되는 동해 통과류 수송량의 시계열 변화는 동해의 상층 순환을 결정하는 중요한 요인이다. 1997년부터 2002년까지 약 5년간 정기여객선을 이용한 ADCP 조사에 따르면, 대한해협의 평균 수송량은 약 2.64Sv 정도이며 1월에 최소값을 나타내고 4월 및 10월에 최고값을 보였다. 그리고 일반적으로 4월보다 10월의 평균 수송량이 더 큰 것으로 나타났다(Takikawa et al., 2005, 그림 1-1-3). 동수도와 서수도의 유입량은 각각 1.10Sv과 1.54Sv 정도로 계절변동뿐만 아니라 연간 변동도 매우 크게 나타나는 것으로 보고되었다. 해수 수송량의 계절 변동은 대마난류 주축과 수직 방향의 해수면 차이의 계절변동과 유사한 경향을 보이고 있어(Yi, 1966; Toba et al., 1982; Mizuno et al., 1989) 해협내 해류가 지형류 균형을 이룸을 시사한다.

동해는 아시아 대륙의 동쪽 끝의 북태평양 연해로 중위도에 위치하고 있어 강한 대륙성 기후와 계절풍의 영향을 받는다. 이러한 지리적인 특성으로 인해 해황은 수평·수직적으로 변화가 매우 크다. 동해의 수괴(water mass)는 북위 40°근처에 나타나는 수온이 남북방향으로 급격히 변하는 극전선을 중심으로 북쪽의 냉수역과 남쪽의 난수역



으로 나눌 수 있다. 동해에 분포하는 해수는 수심에 따라 표층수, 중층수 및 심층수로 구분되며, 독도 주변을 포함한 극전선 남쪽의 경우 200m 보다 얇은 수심에 분포하는 표층수는 대한해협을 통해 동중국해로부터 유입되는 해수인 반면, 동해를 구분하는 해협의 수심보다 깊은 수심에 분포하는 중층수와 심층수는 동해 내에서 형성되어 순환하는 해수이다. 특히 동한난류에 의해 유입되는 대마난류수와 북쪽에서 남하하는 북한한류수는 계절적으로 공간적 분포변이를 하며(Lim and Chang, 1969; An, 1974), 그 변화 양상에 따라 동해의 해황과 특성이 결정된다.

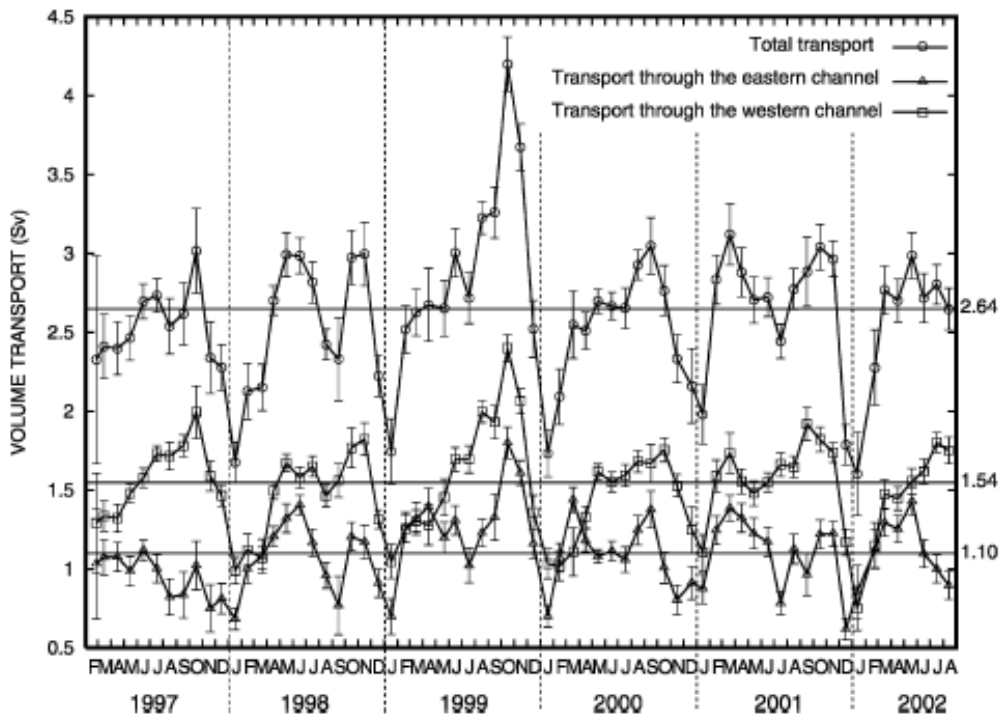


그림 1-1-3. 정기여객선에 장착된 ADCP로 관측된 대한해협 수송량의 5년간 변화 양상(Takikawa et al., 2005)

동한난류는 봄에서 여름사이에 북으로 발달하여 가을과 겨울 사이에 세력이 감소한다(Ohwada and Ogawa, 1966; Hong and Cho, 1983). 이에 따라 여름철 표층 수온은, 대마난류의 확장과 육지로부터 유입되는 육수의 영향 및 태양 복사열의 증가로 인해, 남부해역은 최고 26~27°C, 북한 근해에서는 18~20°C의 범위를 갖는다. 반면 겨울철에는 대마난류의 영향을 받는 남부해역에서는 13~14°C 범위를 갖지만 북한 연해의 대부분은 4°C 이하이다(이, 1992).

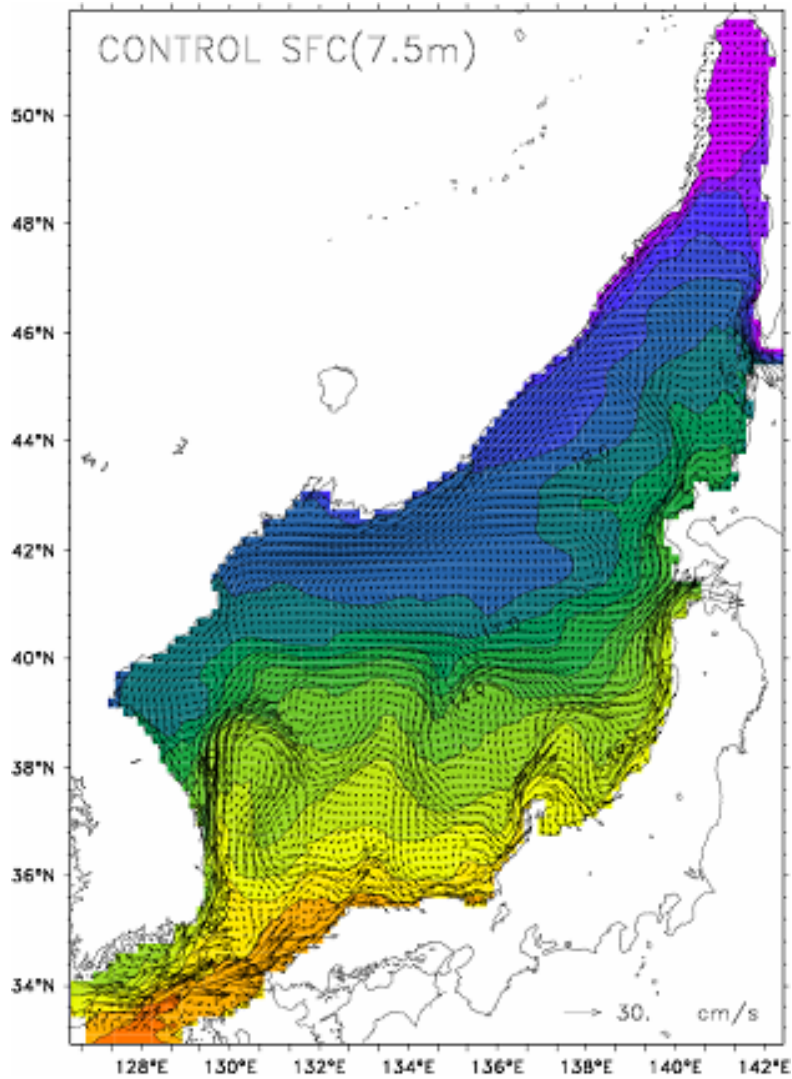


그림 1-1-4. RIAMOM을 이용한 동해 연평균 표층 수온 및 해류 모사 결과

동한난류는 주변의 다양한 해양현상과 상호 밀접한 관계를 맺고 있다. 동한난류와 주변의 냉수 사이에 형성되는 전선은 그 자체의 불안전성으로 인해 주위의 해양환경에 영향을 미치게 된다. 동한난류의 북상과 북한한류계수의 남하한계와 밀접한 관계가 있으리라 추측되며(김과 김, 1983), 울릉도 부근에 나타나는 난수성 와류는 동한난류로부터 분지되는 것으로 알려져 있고(Kim, 1991; 한국해양연구소, 1993; Isoda and Saitoh, 1993; Kim 1995), 이러한 와류에는 오염물질이 집적될 수 있다. 울릉도 부근에는 난수성 와류가 종종 관측되어 거의 매년 1-2개의 난수성 와류가 존재하며, 이러한 난수성 와류는 이동을 하거나 한 장소에서 수개월 동안 정체하기도 한다(An 등, 1994; 한국해양연구소, 1993, 1994). 난수성 와류의 형성 기작은 동한난류의 이안(Moriyasu, 1972), 해저지형(Kim, 1991), 바람과 대마난류 유입의 시간에 따른 변동 그리고 극전선의 불



안정성(Kim, 1995), 경계면 마찰과 해저지형(Lim and Kim, 1995) 등의 영향으로 형성될 수 있는 가능성들이 제시되어 왔다.

동해 북쪽의 반시계방향 순환은 러시아와 북한연안을 따라 남하하는 리만해류와 북한해류가 주 해류이며, 북한해류계수는 주문진 이북해역에서는 표층부터 중층까지 연중 지속적으로 존재하며 목호 이남 해역에서는 동해난류계수와 접하여 전선을 이루고 난류계수의 밑으로 침강하여 동해고유수의 상부에 위치한다(김과 김, 1983). 침강한 북한해류계수는 염분이 낮고 용존산소량은 매우 높아 동해고유수와 구별되며 북한해류계수는 동계보다 하계에 우세하고 남하한계는 축산-장기갑 해역정도로 추정하였다.

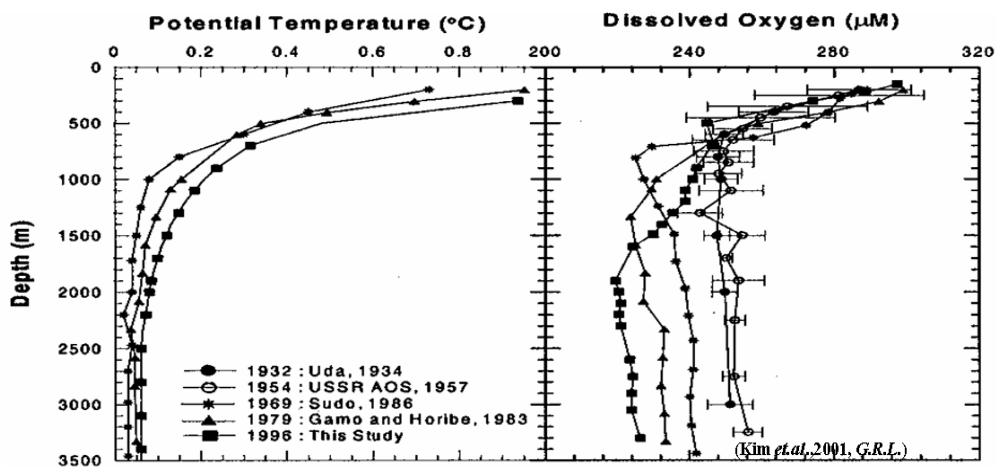


그림 1-1-5. 동해 심층 수온의 증가 및 용존 산소의 감소(Kim et al., 2001)

최근 동해는 심각한 지구 온난화의 영향을 받고 있는 것으로 보고되고 있으며, 대표적인 변화는 심층 수온의 증가 및 용존 산소의 고갈로 나타나고 있다(Kim et al., 2001, 그림 1-1-5). 이와 같은 변화는 동해 북부해역에서의 심층수의 형성과 연계되어 있는 것으로 밝혀지고 있으며, Gamo et al.(2001)가 제시한 바에 따르면 그림 1-1-5에 나타난 바와 같이 저층수의 형성 모드가 바뀌었기 때문인 것으로 이해되고 있다. Kang et al.(2003)은 단순한 이동식 박스 모델을 이용하여 지금까지의 변화가 계속되면 2040년 경에는 동해 중층수(Central Water)가 저층수(bottom water)를 대신하게 될 것이라고 예측한 바 있다(그림 1-1-7).

한편 Park et al.(2004) 등은 그림 1-1-8에서 보는 바와 같이 인공위성으로 추적되는 중층 순환 부표(ARGO) 자료를 이용하여 울릉분지를 중심으로 하는 동해 중층(약 7~800m)의 순환 모식도를 제시한 바 있는데, 그림에서 보는 바와 같이 일반적으로 대륙사면에 나란한 방향으로 반시계 방향의 순환을 하는 양상이 나타난다.

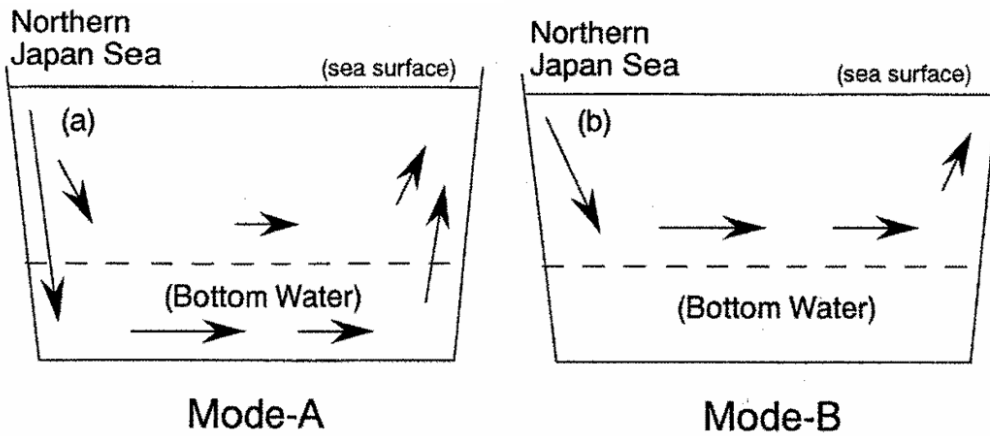


그림 1-1-6. 동해 심층 대류의 변화로 인한 저층수 생성 중단 모식도(Gamo et al, 2001)

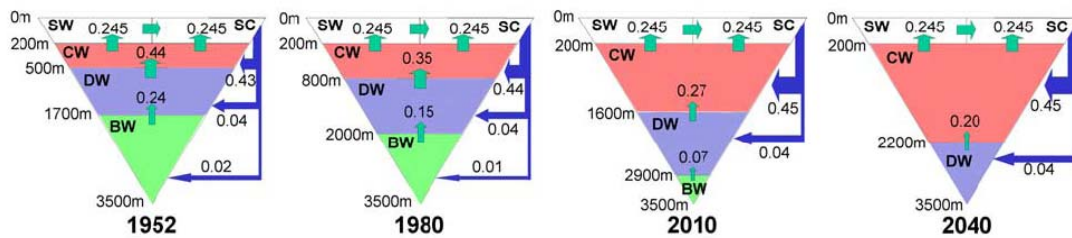


그림 1-1-7. 2040년경 동해 저층수가 중층수로 대체되는 변화를 보여주는 실험 결과(Kang et al, 2003)

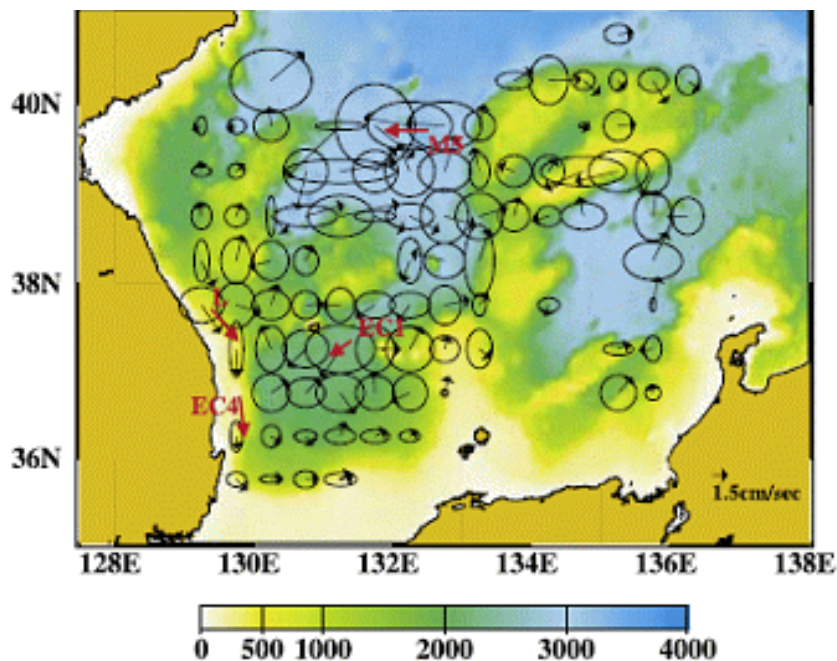


그림 1-1-8. 인공위성 추적 중층 부표(ARGO)로 계산된 동해 중층 순환 모식도(Park et al., 2004)



### 다. 동해의 해수특성

동해의 수괴는 크게 3가지로 나눌 수 있는데, 대한해협을 통해 유입되는 대마난류의 분류인 동한난류(East Korea Warm Current)와 북쪽에서 겨울철 냉각에 의해 형성되어 유입되는 북한난류(North Korea Cold Current)와 저온고염고영양염의 동해고유수로 구분할 수 있다(Seung and Yoon, 1995). 또한 일부 연구에서는 저염분 중층수를 추가적으로 보고하기도 하였다(김과 김, 1983).

동해 고유수는 동해 냉수의 대부분을 차지하는 1°C 이하의 해수를 말하는 것으로 Uda(1934)가 명명하였다. Sudo(1987)에 의하면 주 수온약층(main thermocline) 아래의 단일수괴를 동해고유수라고 하고, 그 특성을 수온 2°C 이하, 염분도 34.00psu 이상, 용존산소 7.0ml/l 이하라고 규정하였다.

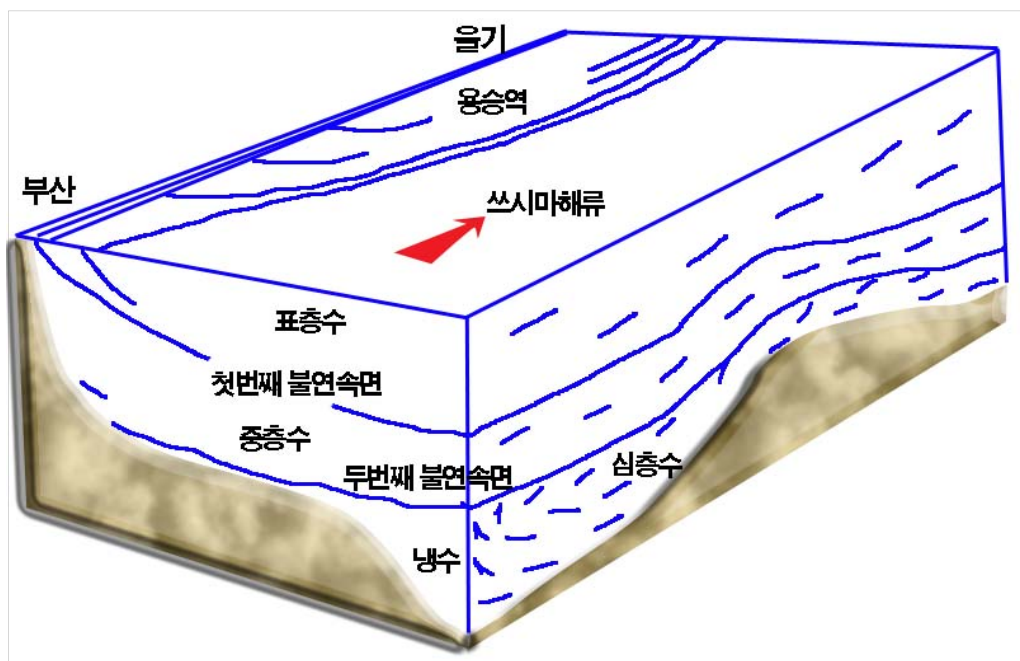


그림 1-1-9. 대한해협 해류계의 모식도(이석우, 2004)

최근의 정밀한 관측기기에 의하여 약 1,500m 수심의 심해 염분최소층이 존재하는 수괴를 East Sea Deep Intermediate Water로, 심해염분 최소층 위의 상대적으로 용존산소가 높고 염분이 34.067psu 이상인 해수와 심해 염분 최소층 아래의 용존산소 최소를 가지는 해수를 각각 East Sea Central Water와 East Sea Deep Water로 명명한 적이 있다(Kim, 1996; Kim et al., 1996). 동해 고유수의 형성은 동해북부의 일본분지로 추정되고





있다. 동해 고유수의 영양염은 최근 동해의 남서부인 북위 36°~38°에서 조사된 바에 의하면, 질산염(nitrate)의 경우 150m 이하의 수심에서 대략 20 $\mu$ M 이상의 농도를 보이며, 인산염(phosphate)은 1 $\mu$ M에서 2.3 $\mu$ M 정도의 농도를, 그리고, 규산염(silicate)은 10 $\mu$ M 이상의 농도를 보인다(한국해양연구소, 1997). 동해 고유수의 화학적 특징 중의 하나로 생각되는 높은 용존산소는 최근 수십년 간의 관측에 의하면 저층수에서 점차 그 농도가 감소하는 경향을 보여 이를 지구 기후 변화의 한 요인에 의한 것으로 보기도 한다(Chen et al., 1999). 동해 심층수의 연령은 탄소동위원소(<sup>14</sup>C)로 측정된 자료에 의하면, 300년 정도로 추정되나, 삼중수소와 <sup>226</sup>Ra으로 계산된 동해심층수의 수직혼합에 소요되는 시간은 100년, 대마난류수를 제외한 동해 전체해수의 평균체류시간은 1,000년으로 계산되었다(Tsunogai et al., 1993).

#### 라. 동해의 해저퇴적물 특성

동해 대륙사면은 세립질 퇴적물이 우세한 비해저협곡-선상지의 대륙사면으로 분류될 수 있으며, 선형 퇴적물 공급이 우세하게 일어났을 것으로 보인다. 울릉분지 중앙 분지평원은 특별한 지형적 변화가 없으며, 대륙사면에서 재동된 퇴적물들이 저탁류로 전이되어 퇴적하거나 원양성 퇴적물이 퇴적되는 곳으로 생각된다.

울릉도와 독도 사이는 울릉분지와 일본분지를 연결하는 통로를 이루며, 강한 저층해류의 작용을 지시하는 침식기원의 해저수로가 저탁류 퇴적층 내에 발달해 있다(한, 1996). 동해의 퇴적물 성분은 수심에 따라 셋으로 구분된다. 대략 수심 300m까지는 육성사질이며 곳에 따라서는 암반, 모래 및 자갈 등이 분포한다. 수심 300~800m에는 유기물의 침전이 많다. 수심 800~3,000m에서는 상부는 산화철 또는 해록석으로 인하여 적니(red clay), 하부는 청니(blue mud)로 구성되어 있다. 3,000m 이심은 적점토로 구성되어 있다(그림 1-1-10).

퇴적물 축적률은 남쪽의 대륙붕과 대륙사면 상단부에서 약 200mg/cm<sup>2</sup>/yr, 대륙사면 하단과 분지에서는 20~30mg/cm<sup>2</sup>/yr로 매우 낮다(Hong et al, 1997). 또한 일본분지의 퇴적율은 2~11mg/cm<sup>2</sup>/yr로서 이보다 더 낮고 서쪽이 동쪽보다 높다(Hong et al., 1999b). 퇴적물의 표면층은 생물교란된 니질로 구성되어 있으나 분지에서는 혼합물이 매우 낮다. 퇴적물 중의 유기탄소 함량은 퇴적물이 사질로 구성된 대륙붕해역에서는 1% 정도로 낮고 수심이 2,000m 이상인 울릉분지에서는 1.9~3.1% 정도의 함량을 보이는데, 대륙붕해역을 제외하고는 유기탄소함량은 대략적으로 수심이 깊어질수록 감소하는 경향을 가진다.

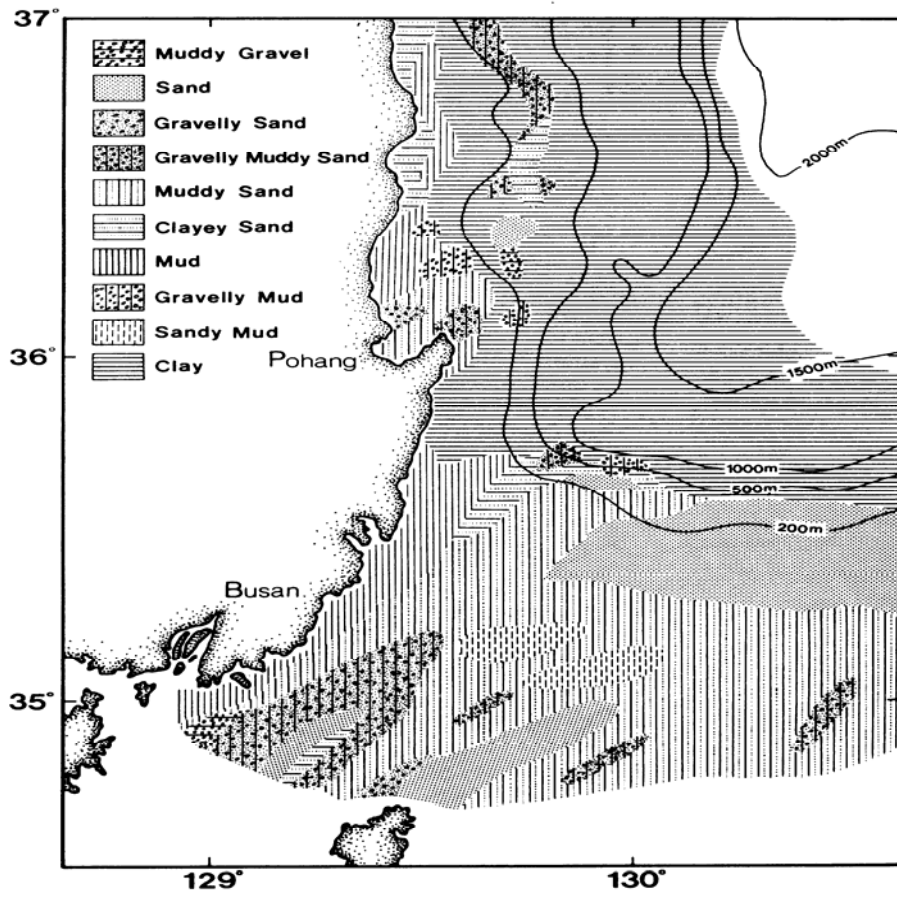


그림 1-1-10. 동해 표층퇴적물 입도 분포(Chough, 1983)

## 제2절 동해 물질순환 연구의 중요성

해양에서의 물질순환과정은 다양한 물리, 화학, 생물학적 과정이 상호 연결되어 매우 복잡하지만, 해역의 생지화학적 특성, 생태계의 구조 파악 및 미래 해양환경 및 생태계 변화를 예측하기 위해서 해역의 물질 순환과정을 이해하는 것은 매우 중요하다.

특히 물질순환 과정 중에서 해수중을 침강하는 입자를 통해 저층으로 유입되는 물질 수송과정은 수층에 존재하는 물질의 제거 과정, 퇴적물의 환경과 서식하는 생물의 에너지원 측면 등 저서생태계를 지지하는 기반 및 영향을 이해하는데 중요하다.

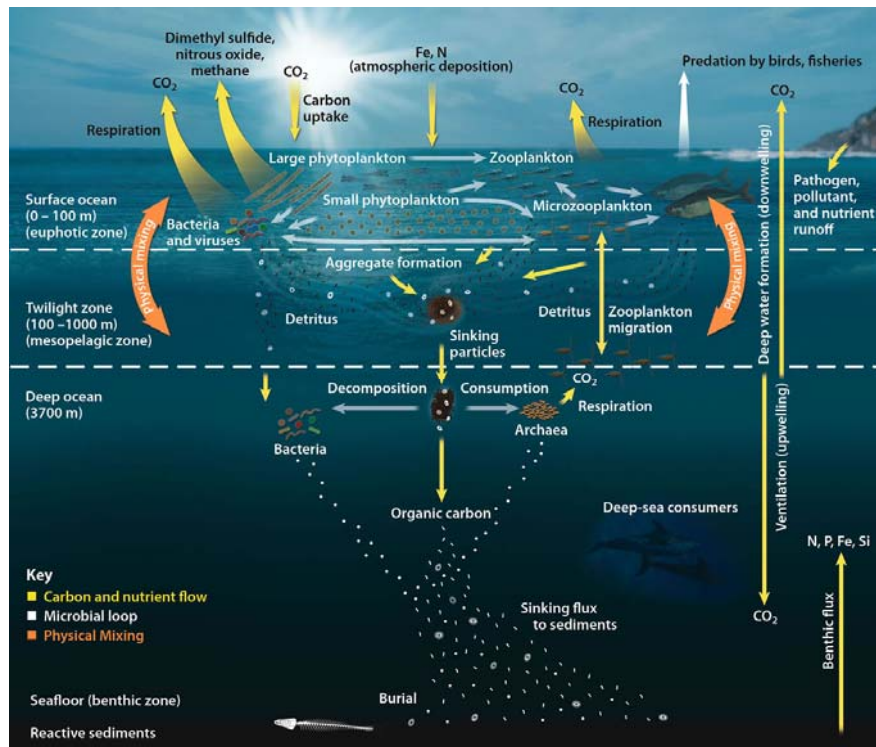


그림 1-2-1. 해양의 물질순환 모식도

동해는 그 순환구조가 대양과 유사하며, 특히 울릉분지는 우리나라 관할해역 중 유일하게 수심 2,000m 이상으로 심해도 함께 보유하고 있어 대양규모의 생지화학적 물질순환 연구에 최적지이지만 체계적인 물질 순환연구는 빈약한 상태이다.

동해는 약 90%의 해역이 수심 200m 이하의 심해(평균 수심 약 1,684m, 최대 수심 4,049m, 200m 이상의 수심 약 90%)로 구성되어 있으며, 심해는 연중 1도 이하의 차가운 해수가 존재하여 유입된 유기물의 분해속도가 느려 대양에 비해서도 퇴적물에 높은 유기탄소를 함유하고 있는 자연냉장고의 특징도 지니고 있다.



그림 1-2-2. 후포뱅크-울릉분지 해저 단면도

그러나 동해 울릉분지는 동해 전체에서 유일하게 우리나라 관할 구역임에도 불구하고 관련 연구과제의 부재로 체계적인 물질순환에 관한 연구가 수행되지 않아 해양과학적 지식이 매우 부족하다. 특히 울릉분지 심층으로 유입되는 물질의 거동, 특성 및 플럭스 변화 그리고 동해 표층 생물생산력 변화에 따른 심층으로 유입되는 물질과의 상관성 연구는 극히 미비하다. 심층으로 유입되는 물질의 특성과 플럭스 연구에는 침강입자 포집기가 매우 유용하지만 계류비용과 유지/관리의 어려움으로 관련 연구는 매우 부족하며 동해에서는 그 연구사례가 우리원에서 수행된 것이 대부분이다.



그림 1-2-3. 동해의 홍게 및 대게 수산자원

이로 인해 동해 심해 서식 생물의 에너지 공급원에 대한 학술적 연구가 매우 부족하다. 울릉분지는 동일 면적의 다른 해역과 비교하여 표층생물생산력이 가장 높은 해역이며 생물다양성과 고유성도 높게 평가되고 있으나 지역민에게 있어서 중요한 기초생산력 및 주요 수산생물 등과 같은 현안 문제와 연관된 연구는 매우 제한적이며 특히 동해 심해의 주요 저서 수산자원의 유지/조절 요인이 되는 에너지 근원에 대한 연구는 매우 부족한 상황이다.

따라서 본 연구는 동해 울릉분지를 중심으로 울릉분지 심해 유입되는 물질의 특성과 물질별 플럭스 변화를 파악하고, 울릉분지의 입자태유기물(POC)의 물질수지를 계산 하는 것을 목적으로 수행되었다.

## 제2장 울릉분지 표층 생물생산력 조사





## 제2장 울릉분지 표층 생물생산력 조사

### 제1절 위성자료를 활용한 표층 생물 생산력의 시계열 변화

#### 1. 위성자료 수집 및 처리

울릉분지 표층생물생산력 변화와 침강입자 Flux 변화와의 관계를 살펴보기 위하여 Sediment Trap 계류정점(EC Trap-01)의 표층생물생산력을 Oregon 주립대의 Ocean Productivity (<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php>)에서 제공하는 MODIS Aqua 위성 자료 기반의 VGPM (Vertically Generalized Production Model) 계산자료를 이용하여 계산하였다(그림 2-1-1). 표층생물생산력 값은 위경도 5분 간격의 1개 픽셀에서 계산된 값의 8일간의 평균을 계산하여 각각 4, 9, 25, 49, 169 Pixel의 범위에 대해 자료를 정리하였다(표 2-1-1 및 그림 2-1-2).

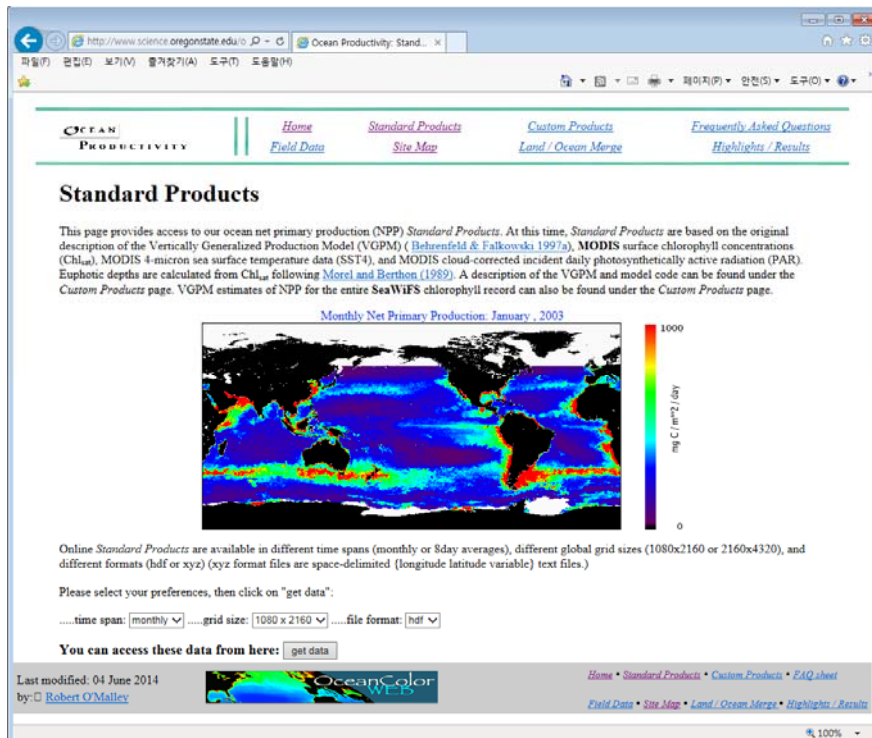


그림 2-1-1. Ocean Productivity Website



표 2-1-1 울릉분지 표층생물생산력 계산에 사용된 Pixel별 범위

Pixel 수	Pixel 범위	
169 pixel	좌측상단 38도 10분, 130도 50분	우측하단 37도 10분, 131도 50분
49 pixel	좌측상단 37도 55분, 131도 05분	우측하단 37도 25분, 131도 35분
25 pixel	좌측상단 37도 50분, 131도 10분	우측하단 37도 30분, 131도 30분
9 pixel	좌측상단 37도 45분, 131도 15분	우측하단 37도 35분, 131도 25분
4 pixel	좌측상단 37도 40분, 131도 20분	우측하단 37도 35분, 131도 25분

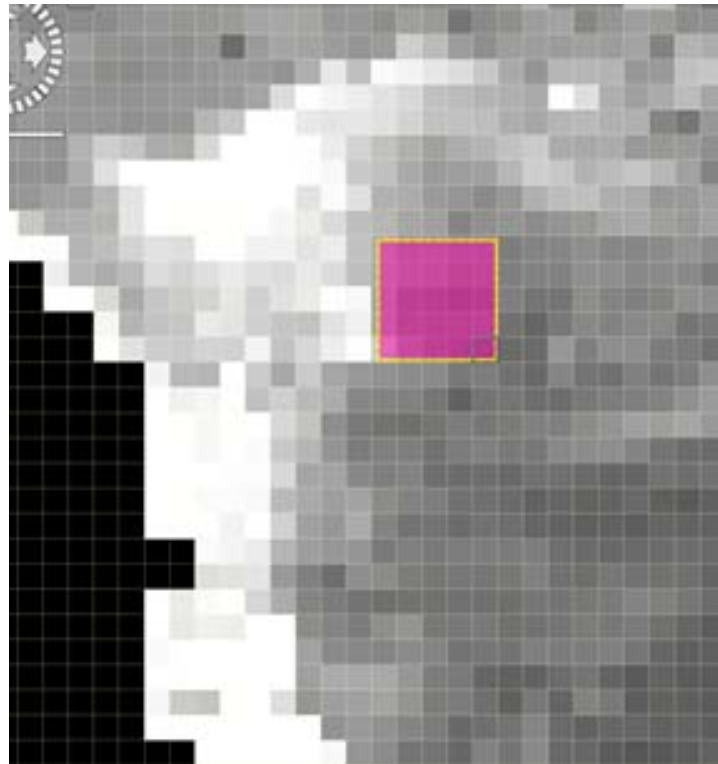


그림 2-1-2. 울릉분지 표층생물생산력 계산에 사용된 픽셀

## 2. 울릉분지 시계열 표층 생물생산력 변화

Sediment Trap이 계류된 해역에서 VGPM을 이용하여 표층생물생산력을 계산한 결과 각 픽셀의 범위별로 계산된 결과값의 차이는 크지 않고, 시간에 따른 변화양상도 잘 일치하였다(그림 2-1-3).



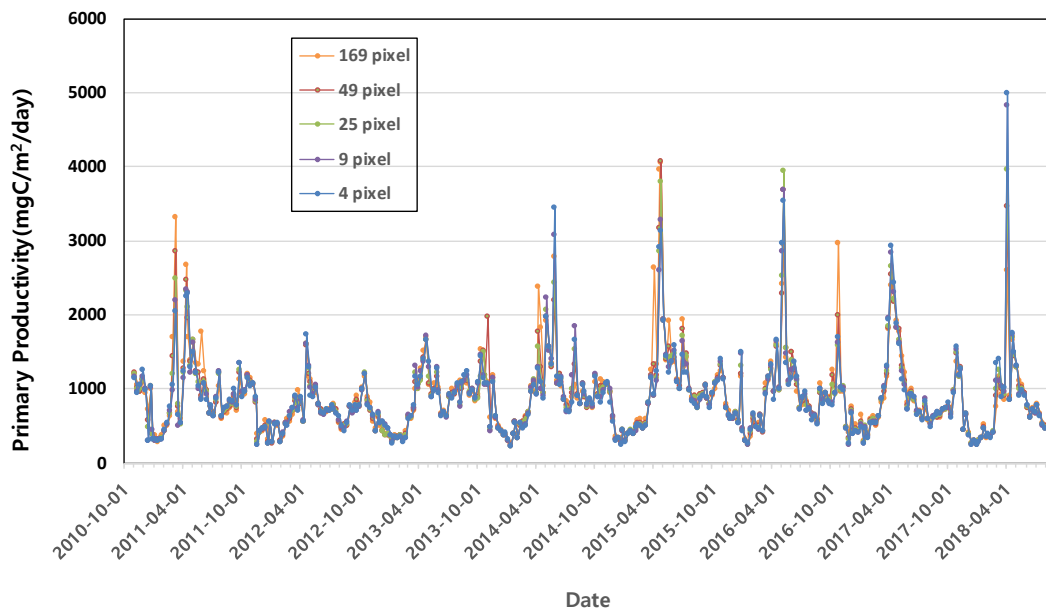


그림 2-1-3. 울릉분지 표층생물생산력의 시간 변화

2010년 11월부터 2018년 8월까지 울릉분지 표층생물생산력은 226~5,006 mgC/m<sup>2</sup>/day (평균 891 mgC/m<sup>2</sup>/day)의 범위로 계절에 따라 1자리수 이상 차이를 나타내었다. 특히 3월~4월의 봄철 Bloom 및 9월~10월의 가을철 Bloom시기가 다른 시기에 비해 높은 생산력을 나타내었다.

8년간의 장기 자료를 분석한 결과 동해 울릉분지 표층생물생산력의 시계열 변화에서 2014년을 기준으로 표층생물생산력이 약간 증가하는 것이 발견되었다.

- 2011년 1월 1일 ~ 2013년 12월 31일 : 282~2,588 mgC/m<sup>2</sup>/day (평균 : 822 mgC/m<sup>2</sup>/day)
  - 2014년 1월 1일 ~ 2016년 12월 31일 : 239~3,677 mgC/m<sup>2</sup>/day (평균 : 968 mgC/m<sup>2</sup>/day)
- ⇒ t-테스트 결과 2013년 이전에 비해 약 17% 표층생물생산력 증가함(n=276, 유의수준 0.05, P=0.007)

이러한 결과는 기후변화에 의해 동해의 해양 표층환경이 변화하여 평균 수온의 상승 등의 영향으로 표층의 생물생산력이 다소 증가한 것으로 생각되며 향후 보다 장기적인 추가 연구를 통해 표층생물생산력 증가원인 파악하고 정량적인 증가규모를 파악하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.



# 제3장 동해 울릉분지 침강물질 특성 및 플럭스 변화





# 제3장 동해 울릉분지 침강물질 특성 및 플럭스 변화

## 제1절 장기 시계열 침강물질 포집기 계류 시스템 운영

### 1. 설치 위치

울릉분지 심해로 유입되는 물질을 포집하기 위하여 2010년 11월부터 매년 2회씩 7~10일 간격의 고해상도로 울릉분지 북부 해역의 고정관측점 EC Trap-01 정점(수심 2,250m)에서 500m, 1,000m, 2,000m의 3개 수층에 Sediment Trap 및 500m와 2,000m에 해류계를 계류하여 심해로 유입되는 물질의 특성과 플럭스의 변화를 관측하였다(그림 3-1-1).

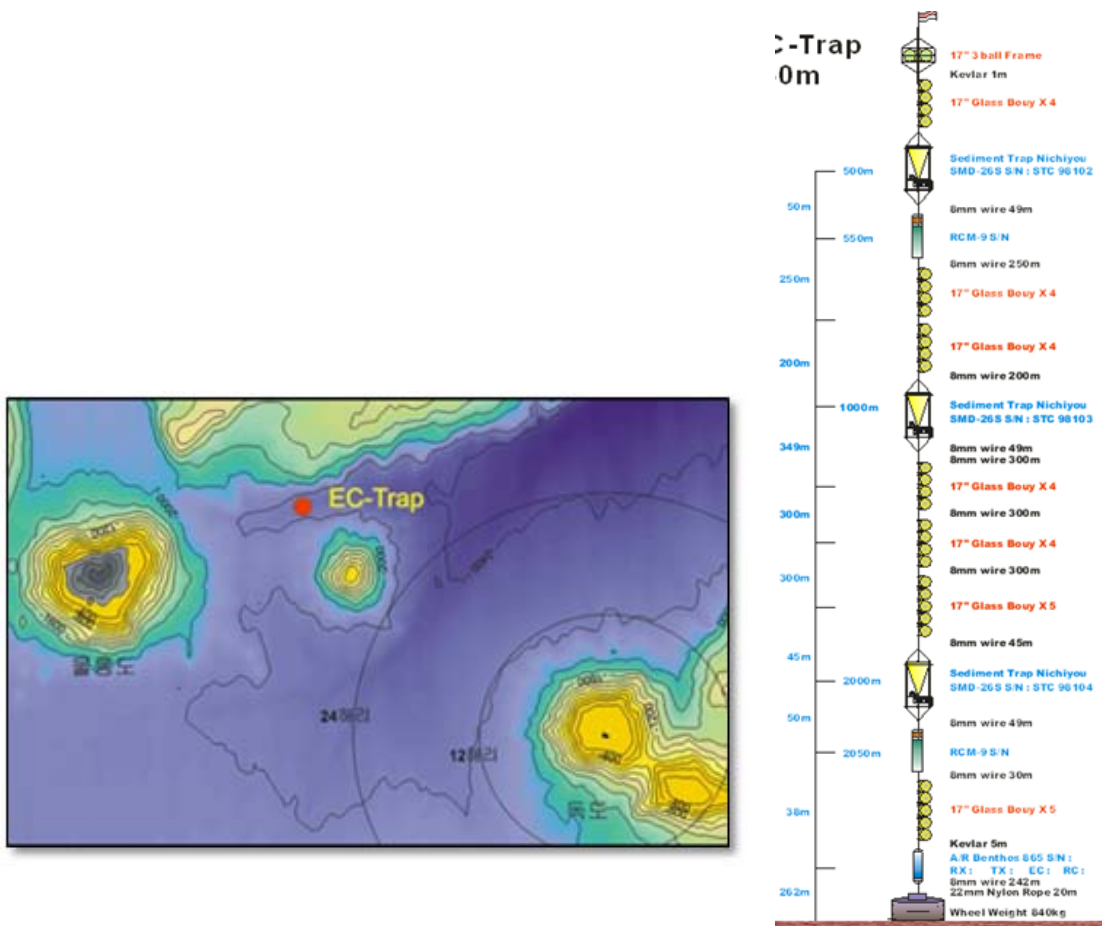


그림 3-1-1. Sediment Trap 계류 위치 및 계류라인 설계도



Sediment Trap 계류의 상세한 내용은 아래와 같다.

- 계류위치 : 울릉분지의 북쪽 수심 2,357m 해역(37°38.057'N, 131°20. 619'E)
- 계류기간 : 2010년 11월 ~ 2018년 10월
- 장착 장비 : Sediment Trap(NGK SMD-26S Type) : 3개 수층(500m, 1,000m, 2,000m)  
Current Meter(RCM DW Type) : 2개 수층 (550m, 2,050m)

## 2. 시료 채집 및 처리 현황

침강입자 시료는 각 채집 기간을 7~10일 간격으로 시간 설정하여 고해상도로 수집하였다(표 3-1-1). 본 연구단계에서 수행한 구체적인 시료채집 현황을 아래에 정리하였다.

- 2016년 10월~2017년 3월 계류 : 500m, 2,000m 수층 시료채취  
26개 전기간 시료수집
- 2017년 4월~2017년 9월 계류 : 300m, 1,000m, 2,000m 수층 시료채취  
26개 전기간 시료수집
- 2017년 10월~2018년 3월 계류 : 300m, 1,000m, 2,000m 수층 시료채취  
26개 전기간 시료수집
- 2018년 4월~2018년 9월 계류 : 300m, 1,000m, 2,000m 수층 시료채취  
23개 기간 시료수집

채취된 침강입자 시료는 핀셋 및 1mm 채를 이용하여 눈에 보이는 동물플랑크톤 및 작은 어류 등 침강입자로 정의되지 않는 부분들을 제거한 후, 원심분리하여 해수와 입자물질을 분리하였다. 분리된 입자물질은 동결건조기를 이용하여 건조한 후 입자물질의 함량을 구하여 총침강입자 플럭스를 계산하였다.



표 3-1-1. 울릉분지에서 수행된 Sediment Trap 실험 현황표

Sediment Trap 계류 현황													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2010												1차계류 완료 1000m 시료채취 성공	
2011	1차계류 완료 (ES1106) 1000m 시료채취 성공 플럭스계산, 주요성분 분석완료					2차계류 완료 (ES1203) 500m, 1000m, 2000m 시료채취 성공 (500m는 12기간/26기간만 성공) 플럭스계산, 주요성분 분석완료							
2012	3차계류 완료 (ES1211) 500m, 1000m, 2000m 1000m 14기간/26기간만 시료채취성공 플럭스계산, 주요성분 분석완료					Sampling Bottle은 정상적으로 회전하였으나 Trap 콘의 배출구가 막혀 시료채취 실패							
2013	4차계류 완료 (ES1306) 500m, 1000m, 2000m 시료채취 성공 플럭스계산, 주요성분 분석완료						5차계류 완료 (ES1405) Trap 콘의 배출구가 막혀 시료채취 실패						
2014	5차계류 완료 (ES1405) Trap 콘의 배출구가 막혀 시료채취 실패					6차계류 완료 (ES1503) 500m, 1000m, 2000m 일부 시료채취 성공 (10기간/26기간) 플럭스계산 완료, 주요성분 분석 완료							
2015	7차계류 완료 (ES1509) 500m (16/26), 1000m (12/26), 2000m (25/26) 플럭스 계산 중, 주요성분 분석 중								8차계류 완료 (ES1603) - 플럭스 계산완료, 주요성분 분석중 2000m 실패				
2016	8차계류 완료 (ES1603)			9차 계류 완료 (ES1609) - 플럭스 계산 완료, 주요성분 분석 중 - 500m, 2000m 시료채취 성공 - 1000m : 1~5 기간까지만 시료채취 성공						10차 계류완료 (ES1703) - 플럭스 계산 완료 - 500m, 2000m만 성공 - 주요성분 분석중			
2017	10차계류완료 (ES1703) - 플럭스 계산 완료 - 주요성분 분석중			11차 계류 완료 (ES1710) - 여기부터 500m Trap을 300m로 이동 - 플럭스 계산 완료						12차 계류 완료 (ES1803) - 플럭스 계산 완료			
2018	12차 계류 완료 (ES1803) - 플럭스 계산 완료			13차 계류 완료 (ES1810) - 시료 전처리 중 - 23/26 기간 시료채취 성공						13차 계류중 (ES1903)			



## 제2절 울릉분지 심해 유입물질 특성 및 플럭스 변화 조사

### 1. 울릉분지 총입자 플럭스 변화 특성

2011년~2018년 기간 동안 Total massflux는 수심 500m에서 0.01~1.59g/m<sup>2</sup>/day(평균 0.38g/m<sup>2</sup>/day), 1,000m에서 0.05~1.61g/m<sup>2</sup>/day(평균 0.38g/m<sup>2</sup>/day), 2,000m 0.09~1.43g/m<sup>2</sup>/day(평균 0.42g/m<sup>2</sup>/day)로 시기에 따라 10배 이상 차이가 났다. 계절적 변화로는 특히 춘계 및 추계 Bloom 시기에 2배 이상 많은 입자플럭스가 관측되었고, 특이하게도 1월 및 2월의 동계 시기에도 높은 플럭스가 관측되었다(그림 3-2-1). 또한 울릉분지의 Total massflux의 규모는 동해 북부해역(T. Nakanishi & M. Minagawa, 2003)에 비해 최대 1자릿수 큰 Flux를 나타내고 있었다.

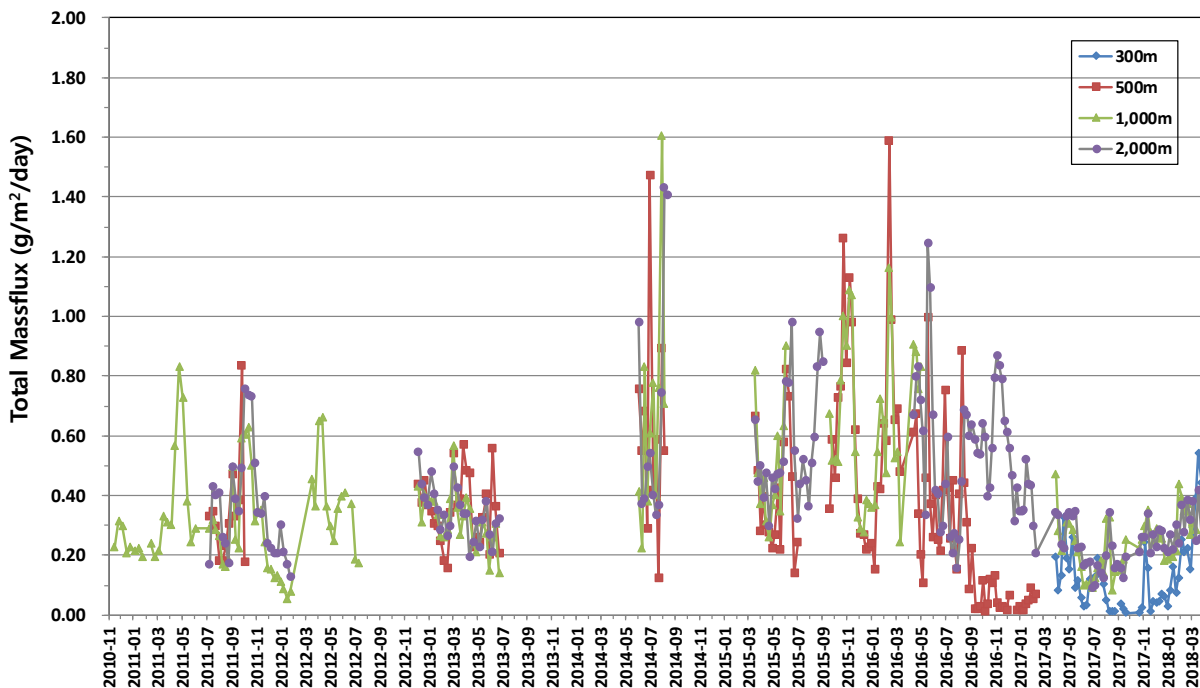


그림 3-2-1. 울릉분지 침강입자 플럭스의 시계열 변화

울릉분지 침강입자 플럭스의 특징으로 500m, 1,000m, 2,000m에서의 침강입자 플럭스의 시간에 따른 플럭스의 변화양상 및 플럭스의 크기가 유사하며 수심에 따른 플럭스 피크의 시간차이가 나타나지 않았다.





- 500m : 0.01~1.59g/m<sup>2</sup>/day(평균 0.38g/m<sup>2</sup>/day)
- 1,000m : 0.05~1.61g/m<sup>2</sup>/day(평균 0.38g/m<sup>2</sup>/day)
- 2,000m : 0.09~1.43g/m<sup>2</sup>/day(평균 0.42g/m<sup>2</sup>/day)

이는 울릉분지는 표층에서 생물생산에 의해 생성된 입자가 수일 이내에 빠르게 해저퇴적물로 유입되는 것을 나타내고 있다.

한편 본 연구를 통해 8년간 장기간 침강입자 포집기 실험을 수행한 결과 국내에서 처음으로 울릉분지 심해로 유입되는 침강입자 플럭스가 주기성을 나타내는 것을 발견하였다. 즉 2014년을 기준으로 2011년~2013년에 비해 2014년 이후에 Total Massflux가 증가하고 있으며, 2017년부터 다시 감소하고 있는 경향을 보였다(그림 3-2-1 및 표 3-2-1). 이러한 경향은 특히 1,000m와 2,000m의 Sediment Trap에서 현저하게 나타났다.

표 3-2-1. Total Massflux의 시기별 비교표

	2010년 ~ 2013년				2014년 ~ 2016년				2017년 이후			
	300m	500m	1,000m	2,000m	300m	500m	1,000m	2,000m	300m	500m	1,000m	2,000m
수심												
최소		0.16	0.05	0.13		0.01	0.22	0.16	0.01		0.08	0.09
최대		0.83	0.83	0.76		1.59	1.61	1.43	0.54		0.47	0.42
평균		0.35	0.32	0.35		0.39	0.61	0.56	0.13		0.24	0.25

이러한 Total Massflux의 변화 요인을 파악하기 위해 여러 가지 환경요소와의 비교분석을 수행하였다. 환경요소의 비교 분석에는 표층생물생산력의 장기변화자료, PDO(Pacific Decadal Oscillation) 및 침강입자를 분석하여 입자를 구성하고 있는 주요성분의 함량 등을 이용하였다.

다양한 환경요소와 비교분석한 결과 먼저 Total Massflux가 증가하는 2014년부터 위성자료로부터 계산한 표층생물생산력이 증가하였고, PDO(Pacific Decadal Oscillation)가 (+)값으로 바뀌었다(그림 3-2-2).

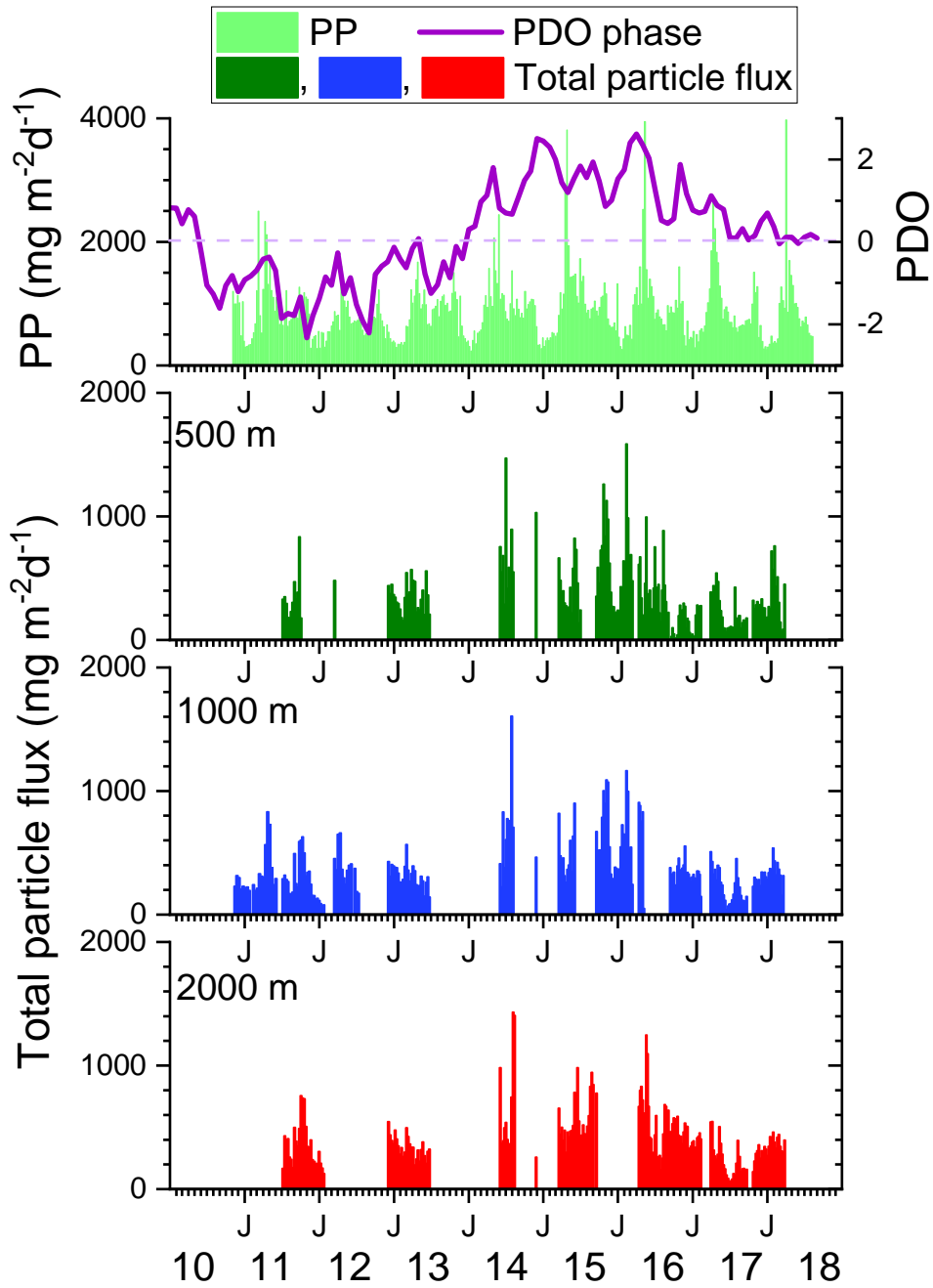


그림 3-2-2. 침강입자 플럭스와 표층생물생산력 및 PDO의 시계열 변화

그리고 울릉분지 주변의 200m 수심의 수온분포를 살펴보면 2014년부터 2017년까지 울릉도 주변(침강입자 포집기가 계류된 해역 주변)에 강한 난수성 소용돌이가 존재하고 있었다(그림 3-2-3).

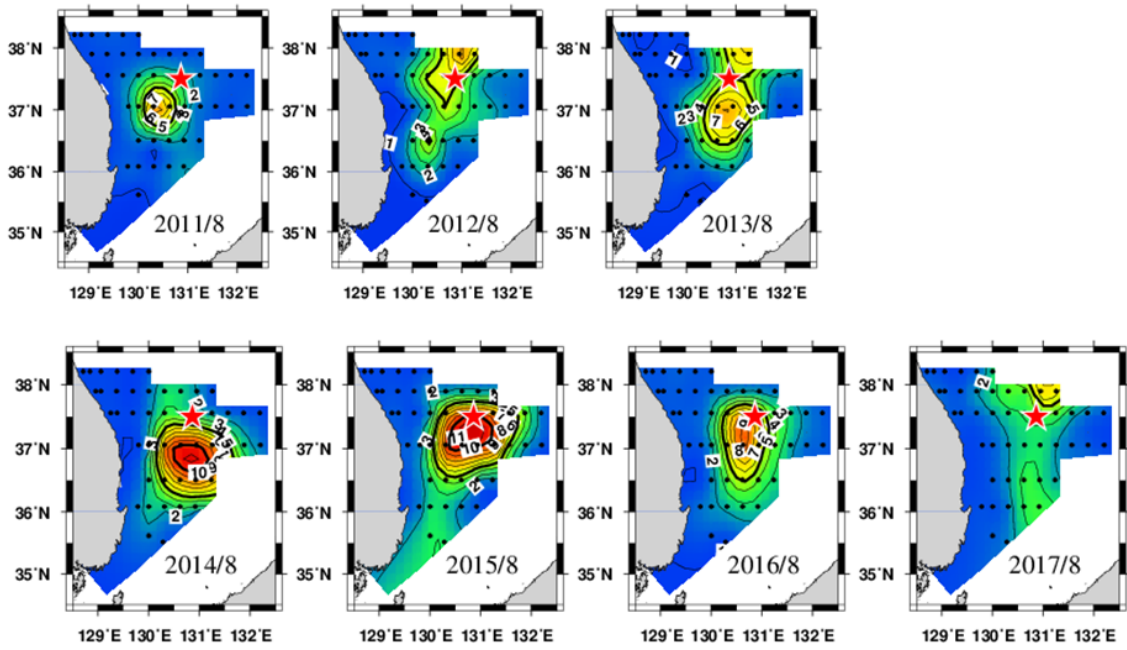


그림 3-2-3. 울릉도 주변 수심 200m의 수온분포(국립수산과학원 정선관측자료)

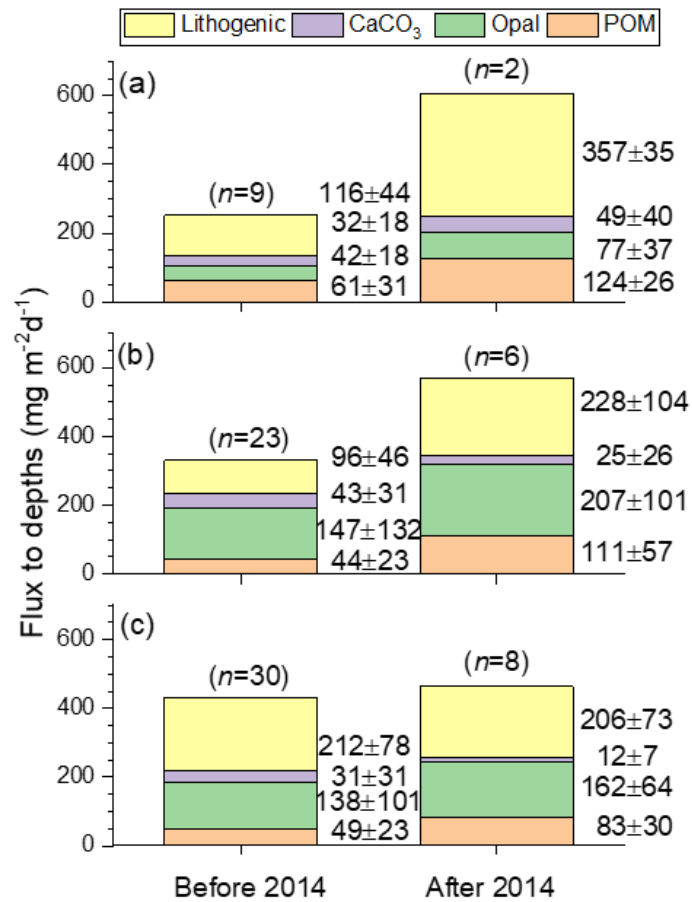


그림 3-2-4. 침강입자의 주요성분 비교



한편 침강입자를 구성하고 있는 주요성분 함량의 변화를 살펴보면 2014년 이후부터 침강입자 중의 생물기원 Opal Flux, Lithogeinc Flux 및 입자성유기물의 플럭스가 증가하고 있었다(그림 3-2-4).

이러한 분석결과를 종합하여 보면, 울릉분지의 심해로 유입되는 침강입자 플럭스는 약 6-7년의 주기성을 가지고 변화할 가능성이 있으며, 플럭스 변화의 요인은 울릉도 주변에 형성된 난수성 소용돌이의 영향으로 생각 할 수 있다. 이 난수성 소용돌이는 PDO에 의해 영향을 받는 동해 극전선 위치의 변화에 의해 일어난다고 보고되어 있다.

침강입자의 주요성분의 플럭스 변화로부터 생물기원 입자도 증가하지만 그보다도 육상기원 입자의 증가가 더 현저한 것으로부터 난수성 소용돌이의 영향으로 울릉분지 사면에 퇴적된 육상기원 물질의 함량이 많은 퇴적물 등이 재부유하여 수평이동하여 울릉분지 심해저로 유입되는 것을 시사한다.

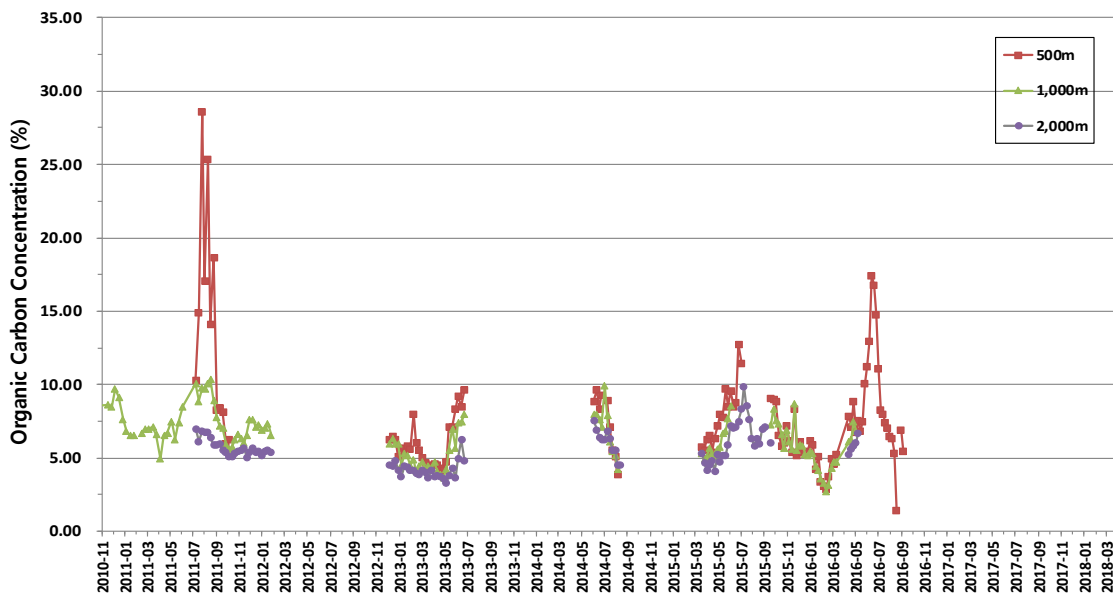


그림 3-2-5. 울릉분지 침강입자 중 유기탄소 농도의 연간 변화

## 2. 침강입자의 주요성분 특성 및 기원

### 가. 유기탄소 플럭스 변화

울릉분지로 심해로 유입되는 침강입자 중 유기탄소의 농도 분포와 플럭스의 시계열 변화를 그림 3-2-5 및 3-2-6에 나타내었다.

침강입자의 유기탄소 농도 및 플럭스의 시계열 변화는 Total Massflux의 변화양상과 유사하여 Total Massflux가 큰 시기에 농도 및 플럭스도 높았다.

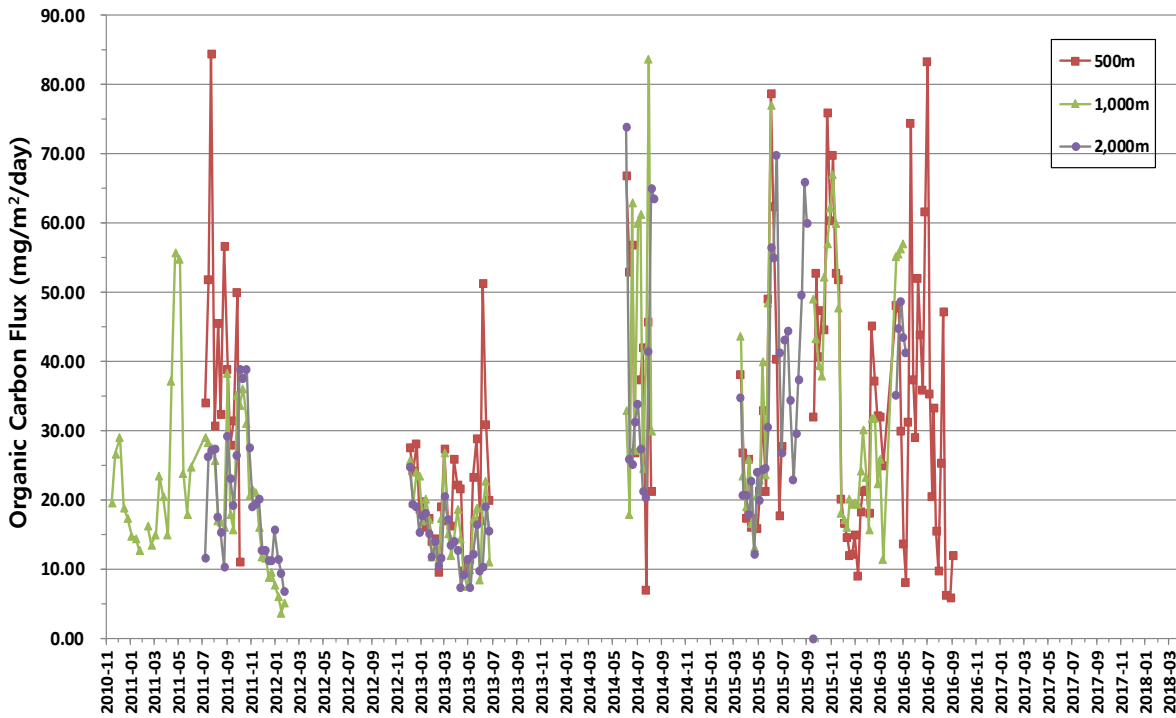


그림 3-2-6. 울릉분지 침강입자 중 유기탄소 플럭스의 연간 변화

#### 나. 침강입자 중 주요 금속 성분 농도 및 기원

울릉분지로 심해로 유입되는 물질의 특성을 파악하기 위하여 침강입자 중의 주요 금속성분을 분석하고, Al 농도와 각 금속성분의 상관관계로부터 기원을 파악하였다(그림 3-2-7, 3-2-8).

수심 500m에 계류된 침강입자 포집기에 의해 포집된 침강입자의 금속성분 중 Fe, Ti, Mn, V, Cr, Co 등은 모두 상관계수가 0.95 이상으로 대기를 통해 육상으로부터 유입된 육상지각 기원의 것으로 사료되며, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb 등은 육상의 인간활동 등에 의해 방출된 오염물질 기원의 것이 많이 포함되어 있는 것으로 나타났다.

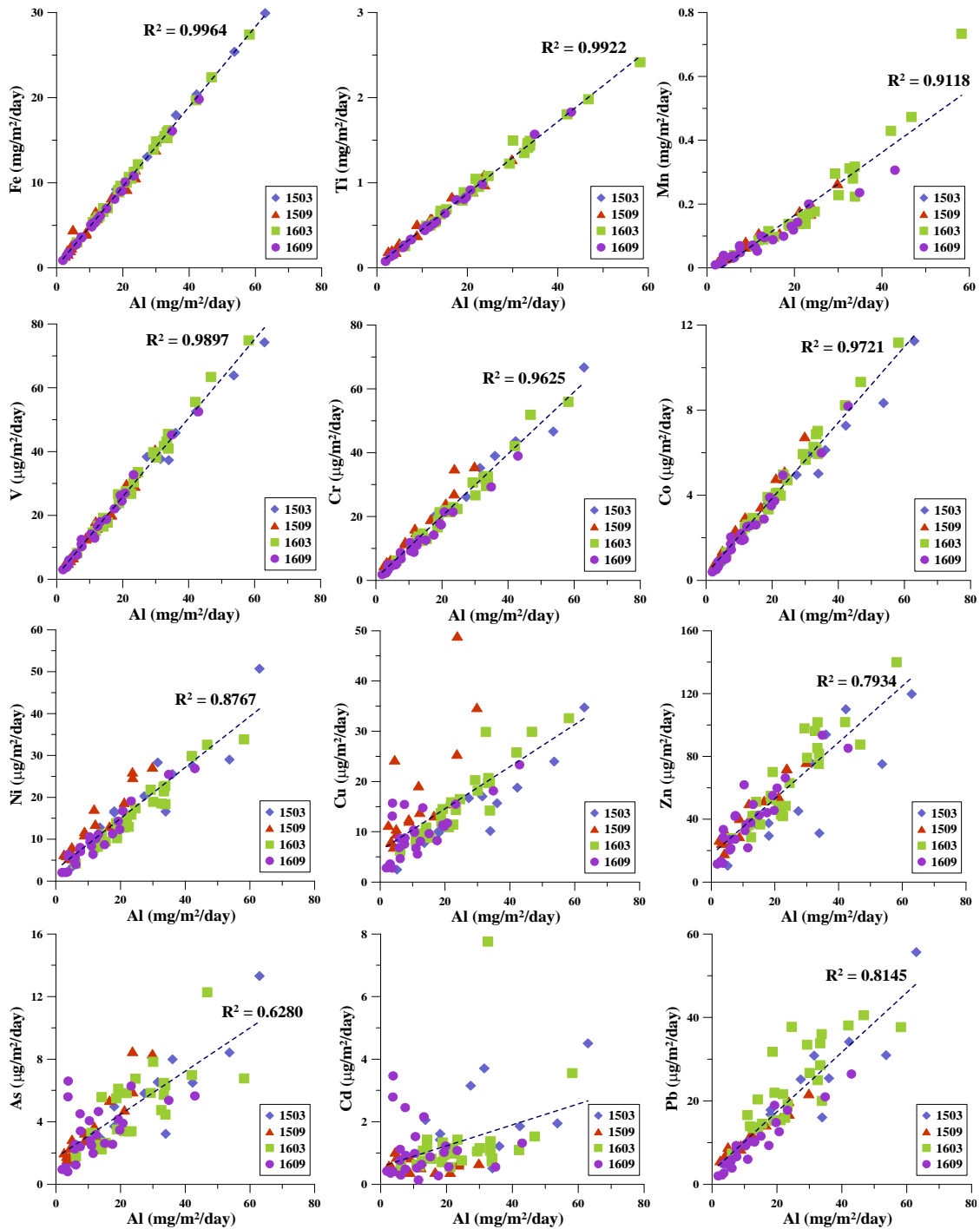


그림 3-2-7. 울릉분지 침강입자 중 Al에 대한 각 금속성분의 상관관계(500m)

수심 2,000m에 계류된 침강입자 포집기에 포집된 침강입자의 금속성분은 Mn을 제외하고 모두 500m에서 포집된 침강입자의 금속성분 기원과 동일하였다. Mn은 저층 퇴적물에서 용출된 것이 재부유하여 다시 입자에 포집된 것들로 사료된다.

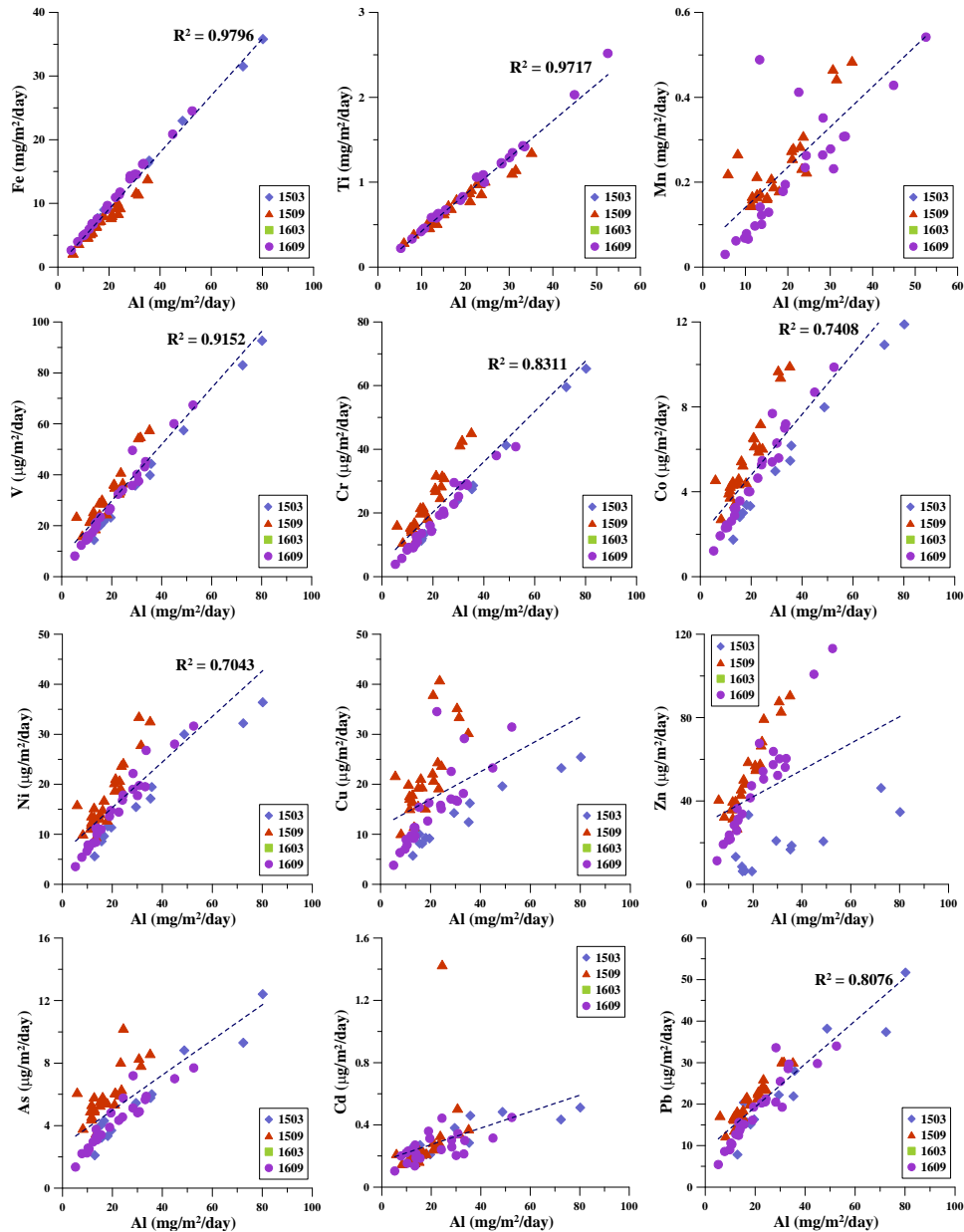


그림 3-2-8. 울릉분지 침강입자 중 Al에 대한 각 금속성분의 상관관계(2,000m)

### 3. 표층생물생산력과 침강물질 플럭스의 관계

울릉분지 표층의 생물생산력 변화가 심해로 유입되는 물질 플럭스에 미치는 영향을 살펴보기 위해 2010년 11월부터 2018년 4월까지 Sediment Trap에서 포집된 Total Massflux 및 Organic Carbon flux와 MODIS Aqua위성 자료기반의 VGPM으로 계산된 표층의 생물생산력 자료와 비교하여 상관성 분석하였다(그림 3-2-9, 3-2-10).

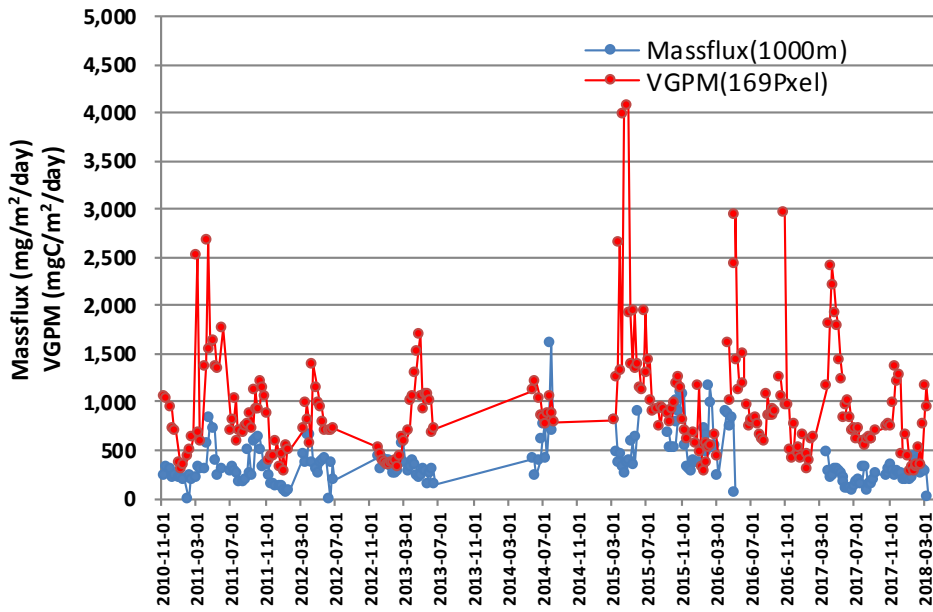


그림 3-2-9. Total Massflux 및 VGPM 값의 시간변화

시간에 따른 Total Massflux와 VGPM 값의 변화양상은 춘계와 추계 Bloom 시기에 함께 높아지는 등 유사한 패턴을 나타내지만, 상관관계는 분산이 크고 상관계수도 낮았다. 가장 자료수가 많은 수심 1,000m의 Sediment Trap의 Organic Carbon Flux와의 상관관계 역시 분산이 크고 상관계수가 낮았다.

VGPM값에 대한 Total Massflux와 Organic Carbon Flux의 사이에 상관관계가 낮은 것은 표층에서 생산된 입자물질이 유광층 내에서 소비되고, 재순환 되는 과정 후에 Export Flux로 유출된 입자물질이 Sediment Trap에 포집된 것으로 Total Massflux가 표층의 생물생산력의 변화를 그대로 반영하지 않음을 시사한다. 향후 유광층 내에 Sediment Trap을 계류하여 보다 상세한 상관성 분석 실험이 필요할 것으로 생각된다.

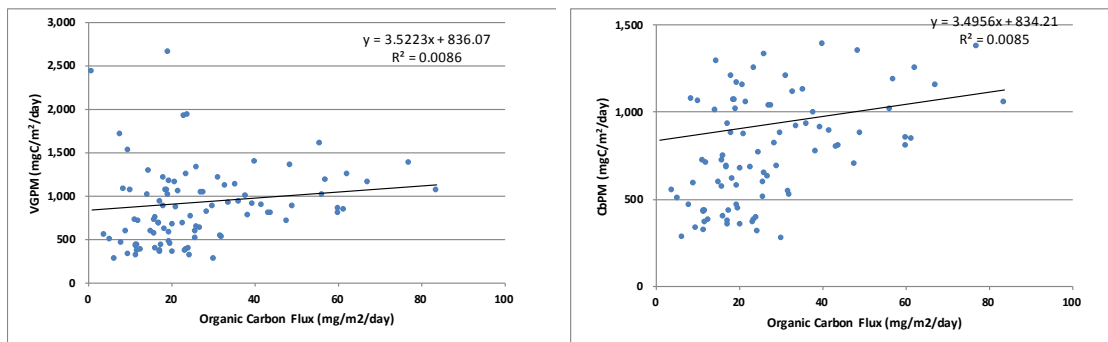


그림 3-2-10. Total Massflux 및 Organic Carbon Flux에 대한 VGPM 값의 상관관계



## 제4장 동해 울릉분지 POC 수치





## 제4장 동해 울릉분지 POC 수치

### 제1절 천연방사성 핵종을 이용한 Export Flux 계산

#### 1. 시료 채취 및 분석

울릉분지의 유광층으로부터 심해로 유입되는 Export Flux를 계산하기 위하여 EC-Trap 및 M 정점에서 수층별로 해수를 채취(2018년 3월 18일~3월 24일)하여 용존태 및 입자태의 천연방사성핵종인  $^{234}\text{Th}$ 의 농도를 측정하여 어미핵종인  $^{238}\text{U}$ 과의 방사능비평형을 살펴보았다(그림 4-1-1).

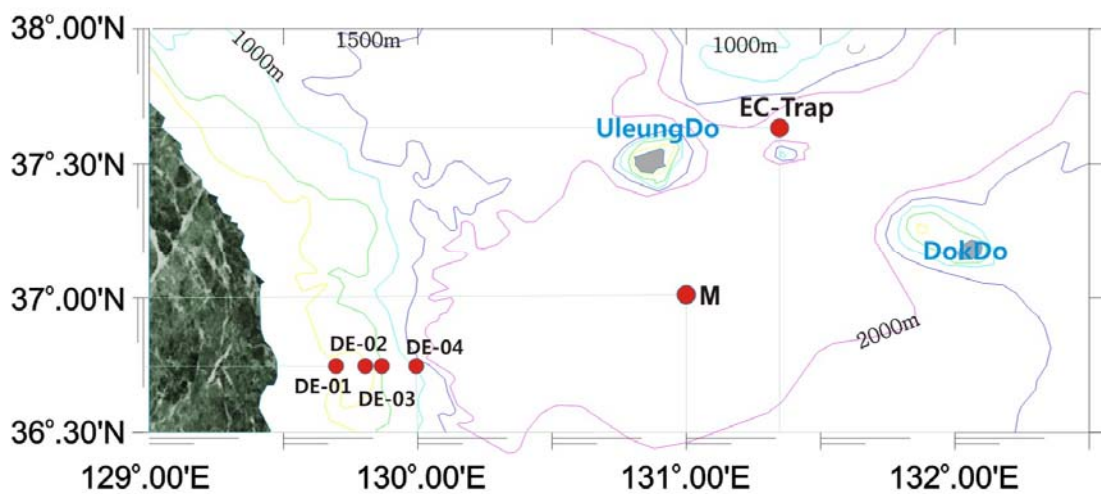


그림 4-1-1. 울릉분지 조사 Station Map

$^{234}\text{Th}$ 은 시료로부터 분리/정제하여 Low-Background Beta Counter를 이용하여 측정하였고  $^{238}\text{U}$ 은 아래의 식을 이용하여 염분으로부터 계산하였다.

$$^{238}\text{U}(\text{dpm/l}) = 0.0686 \times \text{salinity}$$



## 2. Export Flux 계산

울릉분지 수층의  $^{234}\text{Th}$  농도분포를 그림 4-1-2 및 표 4-1-1에 나타내었다. 정점 M에서는 표층에서 입자에 의해 효율적으로 제거되기 때문에 100m까지 증가한 후 200m까지 다시 감소하는 분포를 나타내었다. 정점 EC-Trap에서도 표층에서 낮고 50m까지 증가한 후 100m까지 거의 일정한 후에 200m까지 다시 낮아지는 분포를 보였다.

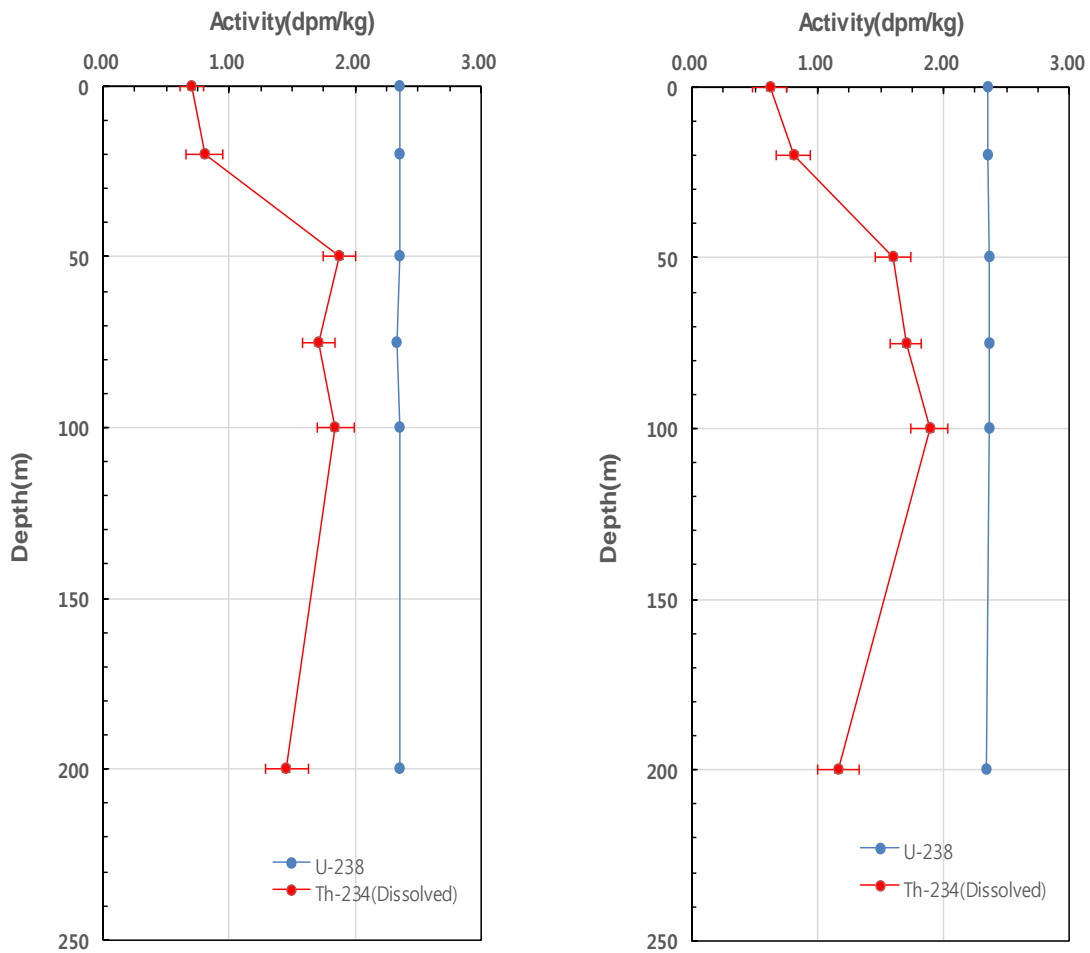


그림 4-1-2. 울릉분지 해수 중 용존태  $^{234}\text{Th}$  농도분포

표 4-1-1. 울릉분지 해수 중  $^{234}\text{Th}$  및  $^{238}\text{U}$  농도

Stn.	Depth (m)	$^{234}\text{Th}$ Activity			Part/Total (%)	$^{238}\text{U}$ (dpm/kg)	Salinity
		Dissolved (dpm/kg)	Particulate (dpm/kg)	total (dpm/kg)			
M	0	0.616 ± 0.134	0.039 ± 0.022	0.655 ± 0.136	6.0	2.35	34.25
	20	0.804 ± 0.132	0.121 ± 0.02	0.925 ± 0.133	13.1	2.36	34.33
	50	1.595 ± 0.142	0.237 ± 0.01	1.832 ± 0.142	12.9	2.36	34.35
	75	1.698 ± 0.124	0.159 ± 0.01	1.857 ± 0.124	8.6	2.36	34.44
	100	1.886 ± 0.144	0.179 ± 0.019	2.065 ± 0.145	8.7	2.36	34.38
	200	1.163 ± 0.16	0.356 ± 0.06	1.519 ± 0.171	23.4	2.34	34.05
EC-Trap	0	0.705 ± 0.095	0.124 ± 0.005	0.829 ± 0.096	15.0	2.36	34.33
	20	0.803 ± 0.146	0.121 ± 0.011	0.924 ± 0.146	13.1	2.35	34.29
	50	1.875 ± 0.134	0.13 ± 0.008	2.005 ± 0.134	6.5	2.36	34.33
	75	1.712 ± 0.129	0.125 ± 0.009	1.837 ± 0.129	6.8	2.34	34.05
	100	1.842 ± 0.147	0.128 ± 0.01	1.97 ± 0.148	6.5	2.36	34.35
	200	1.457 ± 0.171	0.35 ± 0.017	1.807 ± 0.171	19.4	2.35	34.30

표 4-1-2. 울릉분지 해수 중 POC 농도 및 POC Export Flux

Stn.	Depth (m)	POC (mg/L)	POC/ $^{234}\text{Th}$ (mgC/dpm $^{234}\text{Th}$ )	POC Export flux (mgC/m <sup>2</sup> /d)
M	0	0.071	1.83 ± 1.03	88 ± 413
	20	0.077	0.64 ± 0.11	507 ± 3359
	50	0.041	0.17 ± 0.01	157 ± 1134
	75	0.040	0.25 ± 0.02	127 ± 1417
	100	0.030	0.17 ± 0.02	89 ± 591
	200	0.024	0.07 ± 0.01	145 ± 1548
EC-Trap	0	0.079	0.64 ± 0.01	27 ± 116
	20	0.104	0.86 ± 0.02	709 ± 3751
	50	0.017	0.13 ± 0.02	201 ± 802
	75	0.009	0.07 ± 0.01	140 ± 583
	100	0.008	0.06 ± 0.00	127 ± 458
	200	0.019	0.05 ± 0.00	20 ± 458

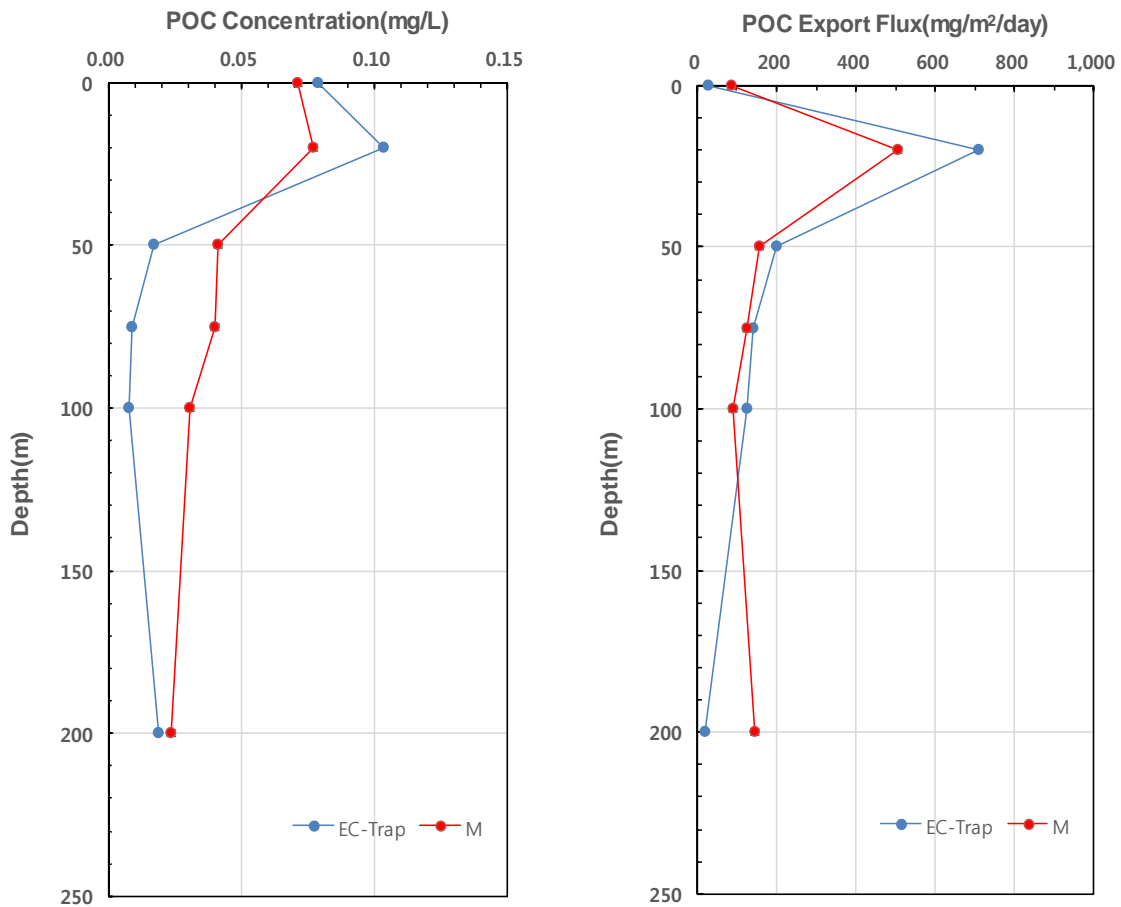


그림 4-1-3. 울릉분지 POC 및 POC Export Flux의 수직분포

수층의  $^{234}\text{Th}$  농도분포와 정상상태 모델로부터 입자태  $^{234}\text{Th}$  Flux를 계산하여, 입자물질의  $\text{POC}/^{234}\text{Th}$ 의 비로부터 POC의 Export Flux를 계산하였다(표 4-1-2, 그림 4-1-3).

수층의 POC 농도는 아표층인 20m에서 가장 높았으며 POC Export Flux는 표층에서 낮고 아표층인 20m에서 가장 높았으며 정점 M에서  $89\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$ , EC-Trap 정점에서  $127\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 계산되었다.

또한 혼합층 수심인 100m까지의 신생산(New Production)은 M에서  $80.65\text{mmolC}/\text{m}^2/\text{day}$ , EC-Trap에서  $100.36\text{mmolC}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 계산되었다.

## 제2절 대기로부터 해양으로 유입되는 $^{210}\text{Pb}$ 플럭스

### 1. 대기입자 시료 채취 및 분석

울릉분지 퇴적물로 유입되는 유기물 중 수평이동에 의해 유입된 유기물의 기여율을 계산하기 위하여  $^{210}\text{Pb}$ 의 수치계산을 수행하였다. 먼저  $^{210}\text{Pb}$ 의 대기로부터 입력량을 파악하기 위하여 동해연구소 옥상에 설치된 high volume Sampler와 Total Sampler(dry fallout)를 이용하여 해양으로 유입되는 대기입자를 포집하였다(그림 4-2-1).

- 대기입자 시료 포집 현황

- high volume sampler : 2011년 7월 18일 ~ 2018년 10월 26일(2~10일 간격, 930개 시료 확보)
- Total Sampler : 2011년 11월 25일 ~ 2017년 6월 24일(2~11일 간격, 264개 시료 확보)



그림 4-2-1. 대기시료 포집 장치(동해연구소 옥상)

포집된 대기 시료는 혼합산을 이용하여 분해 한 후  $^{210}\text{Pb}$ 과 방사평형을 이루고 있는 딸 핵종인  $^{210}\text{Po}$ 을 은판에 전착시켜 알파선을 측정하였다.

### 2. 울릉분지 $^{210}\text{Pb}$ 플럭스 수치 계산

해양으로 유입되는 대기입자 중  $^{210}\text{Pb}$ 의 시계열 농도 변화를 살펴보기 위해 high volume sampler에 포집된 대기입자 중 2016년 8월 1일 ~ 2017년 7월 25일까지 약 1년간의 대기시료를  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도변화를 파악하였다(그림 4-2-2).



대기입자 중  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도는  $0.13\sim 1.98\text{mBq/m}^3$ (평균  $1.08\text{mBq/m}^3$ )로 시기에 따라 1자릿 수 이상 차이가 났다. 대기로부터  $^{210}\text{Pb}$ 의 입력 플럭스를 실측하기 위한 Total Sampler로 포집된 대기시료는 차기년도에 분석 예정이다.

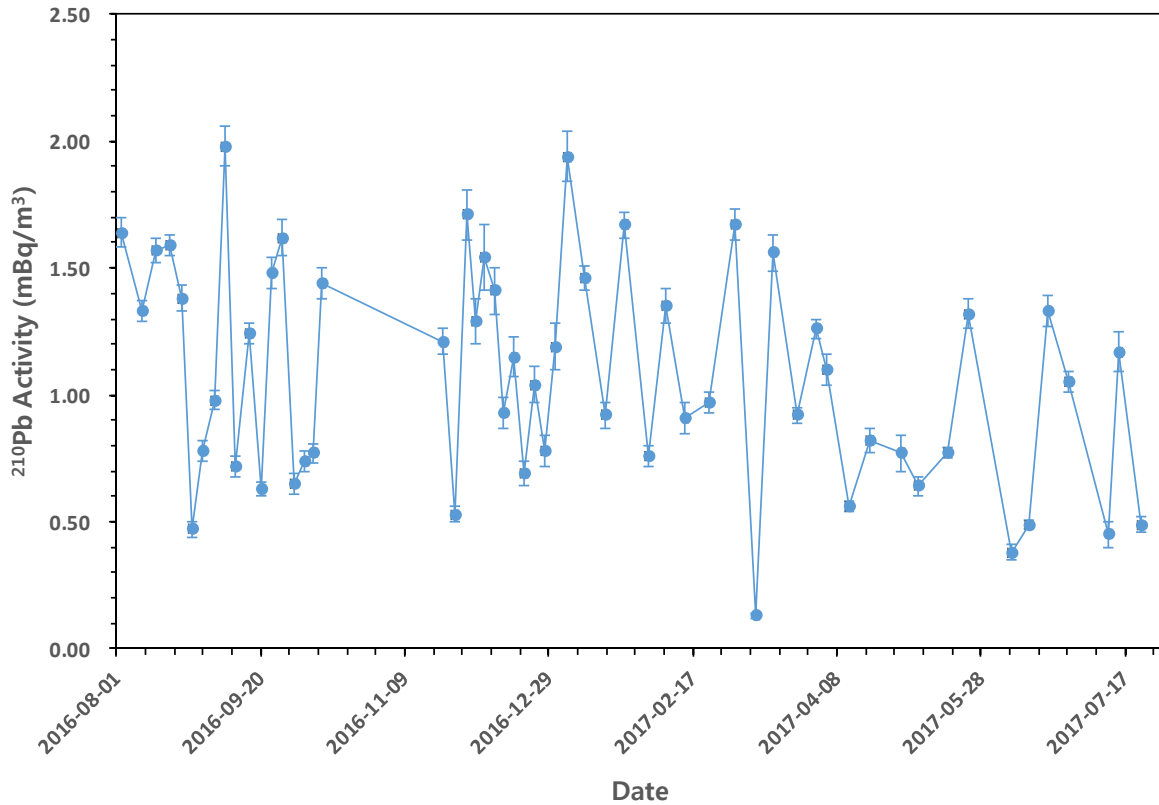


그림 4-2-2. 대기입자 중  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도변화

대기로부터 울릉분지로 유입되는  $^{210}\text{Pb}$  플럭스를 산정하기 위하여 해양에서  $^{210}\text{Pb}$ 의 Mass-Balance를 계산하였다.

$^{210}\text{Pb}$ 의 Mass-Balance를 계산하기 위해 이용된 입력자료는 다음과 같다

- 해수 중  $^{226}\text{Ra}$  농도(Tsunogai and Harada, 1986) 및  $^{210}\text{Pb}$  농도(서울대 EAST1자료) 인용
- 침강입자 및 퇴적물 중  $^{210}\text{Pb}$  농도, Accumulation Rate(본 연구 자료)



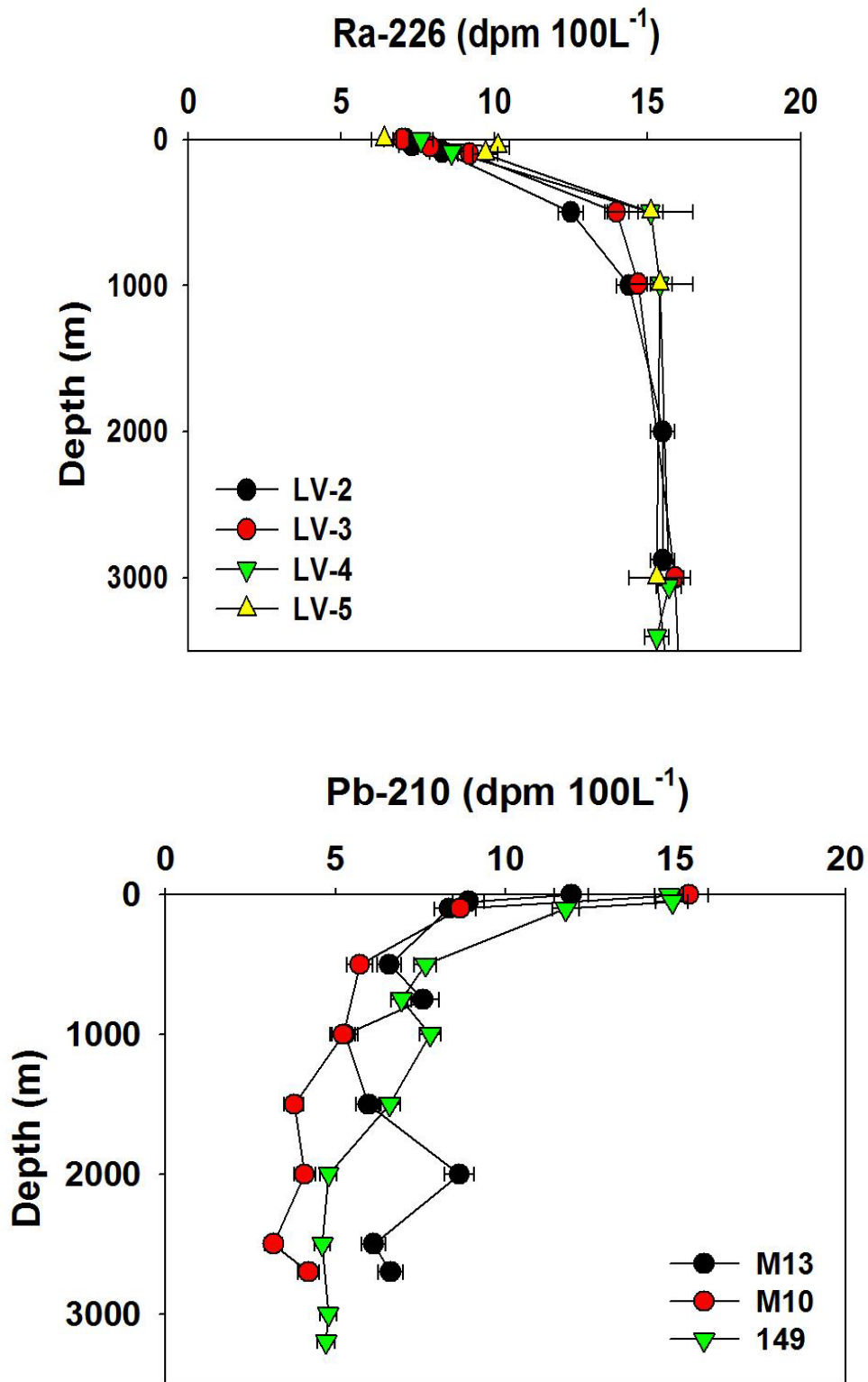


그림 4-2-3. 해수 중 <sup>226</sup>Ra(Tsunogai and Harada, 1986) 및 <sup>210</sup>Pb(서울대 East1) 분포

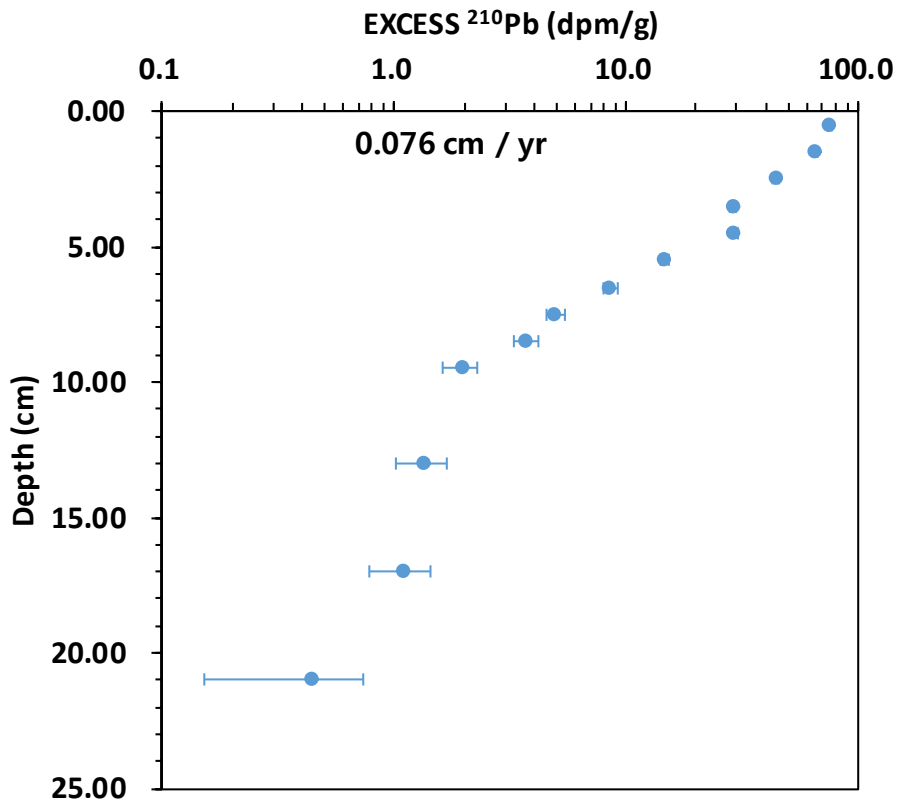
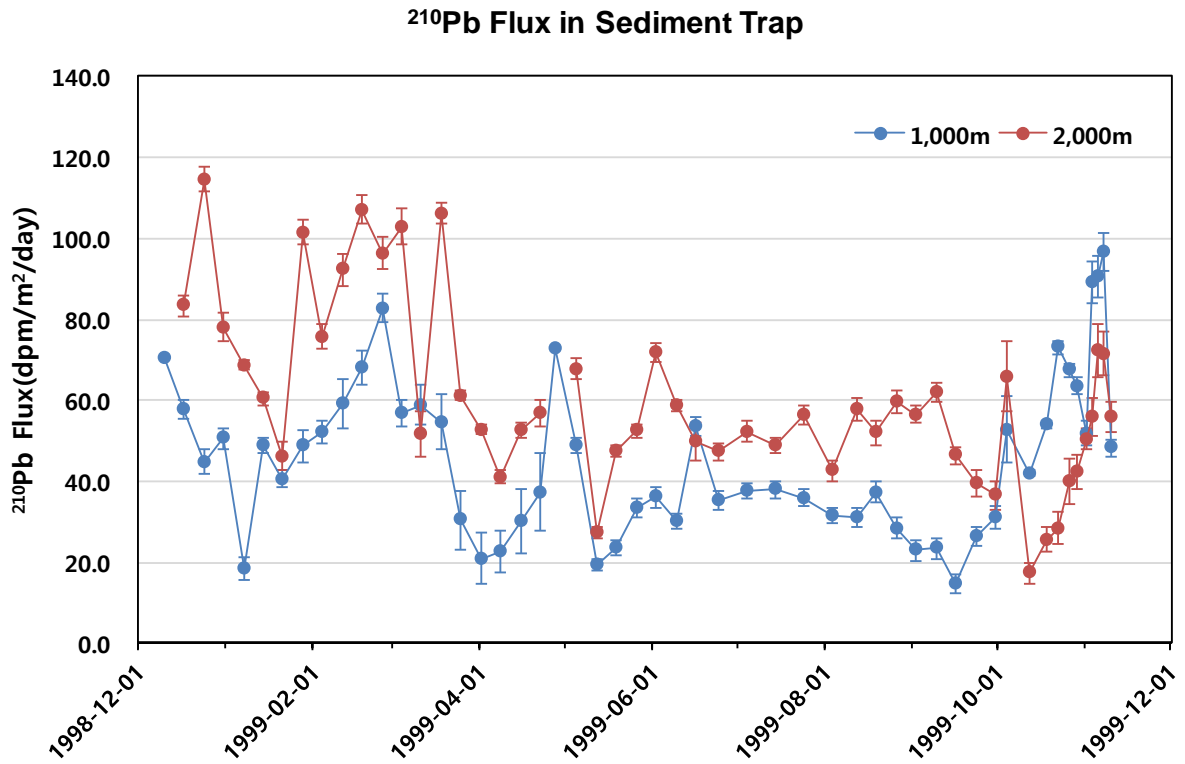


그림 4-2-4. 침강입자 및 퇴적물의  $^{210}\text{Pb}$  Flux 분포

울릉분지를 정상상태로 가정하면  $^{210}\text{Pb}$ 의 Mass-Balance는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$F_{Pb, Atm} = F_{Pb, Trap} - (\lambda_{Pb}I_{Ra} - \lambda_{Pb}I_{Pb})$$

- $\lambda$  : decay constant (1/day)
- $I$  : Inventory (dpm/cm<sup>2</sup>)
- $F_{Pb, Atm}$  : Atmospheric Flux (dpm/cm<sup>2</sup>/year)
- $\lambda_{Pb}I_{Ra}$  : Ingrowth Flux (dpm/cm<sup>2</sup>/year)
- $F_{Pb, Trap}$  : Settling Flux (dpm/cm<sup>2</sup>/year)
- $\lambda_{Pb}I_{Pb}$  : Decay Flux (dpm/cm<sup>2</sup>/year)

해양의  $^{210}\text{Pb}$  Mass-Balance를 이용하여 계산된 대기로부터 유입되는  $^{210}\text{Pb}$ 의 유입플럭스는 1.41~1.55 dpm/cm<sup>2</sup>/year(38.63~42.47dpm/m<sup>2</sup>/day)로 계산되었다.

동해를 대상으로 대기로부터 유입되는  $^{210}\text{Pb}$ 의 유입플럭스 계산은 처음으로 이루어진 것이며, 1996년 Tokieada 등이 일본에서 계산한 50dpm/m<sup>2</sup>/day와 유사하였다.

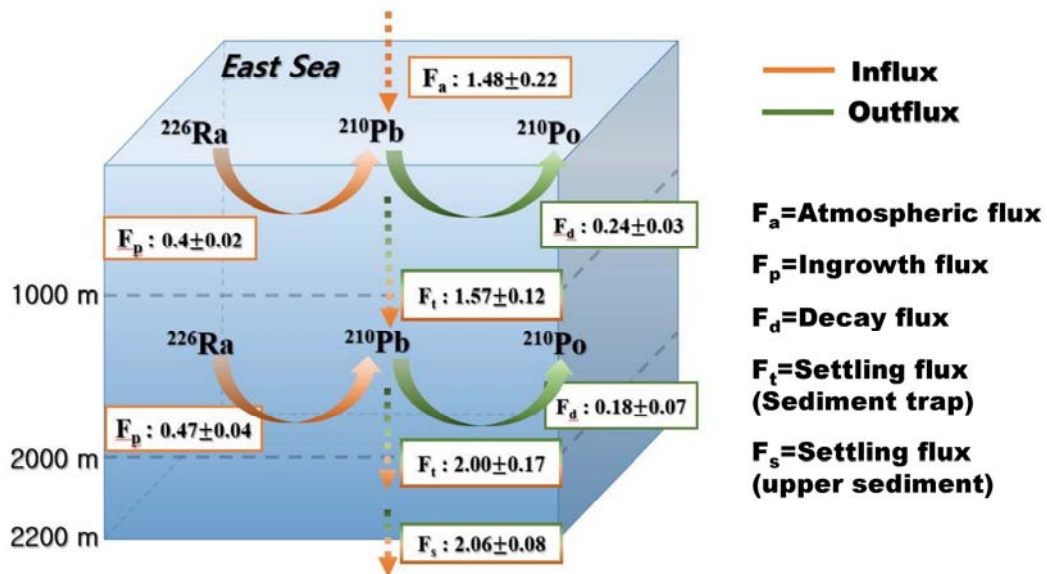


그림 4-2-5. 동해 울릉분지의  $^{210}\text{Pb}$  Flux 및 수치



### 제3절 울릉분지 대륙사면 퇴적물 퇴적속도

#### 1. 퇴적물 시료 채취 및 분석

울릉분지 퇴적물로 유입되는 유기물 중 수평이동에 의해 유입된 유기물의 기여율을 계산하기 위한  $^{210}\text{Pb}$ 의 수지계산에서 울릉분지 대륙사면과 중앙부 퇴적물로의 Accumulation rate를 계산하기 위하여 대륙사면의 4개 정점 및 중앙부 1개 정점에서 주상퇴적물을 채취하였다(그림 4-3-1).

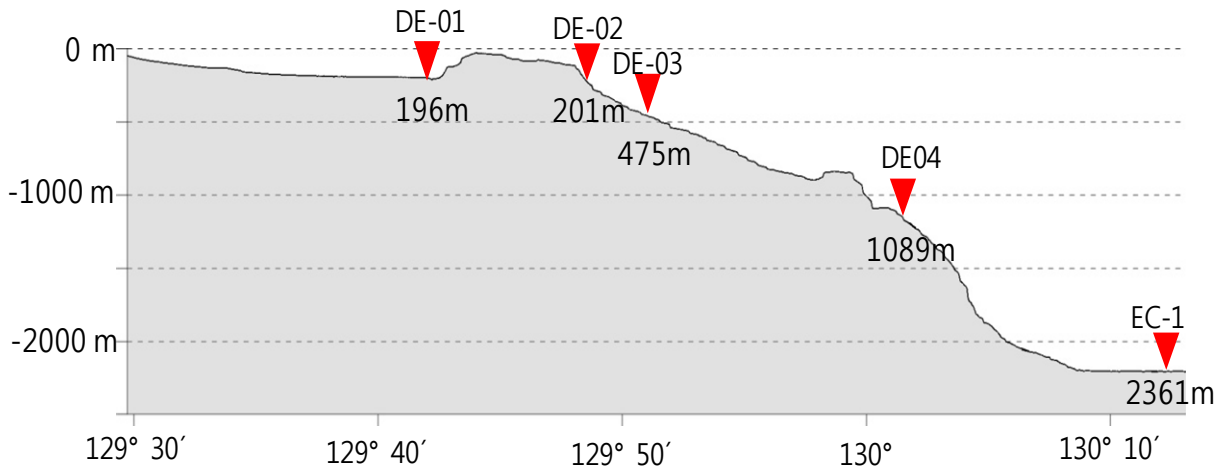


그림 4-3-1. 퇴적물 채취 수심

#### 2. 울릉분지 대륙사면 퇴적물 퇴적속도 계산

울릉분지 대륙사면의 퇴적속도는 0.057~0.398cm/yr로 수심이 얇은 곳에서 빠르고 수심이 깊어질수록 늦어지는 경향을 나타내고있었다(그림 4-3-2). 또한 수심이 가장 깊은 울릉분지 중앙부의 퇴적속도는 약 170년 전에 0.205cm/yr에서 0.057 cm/yr로 약 3.6배 늦어진 것이 특이하게 나타났다.

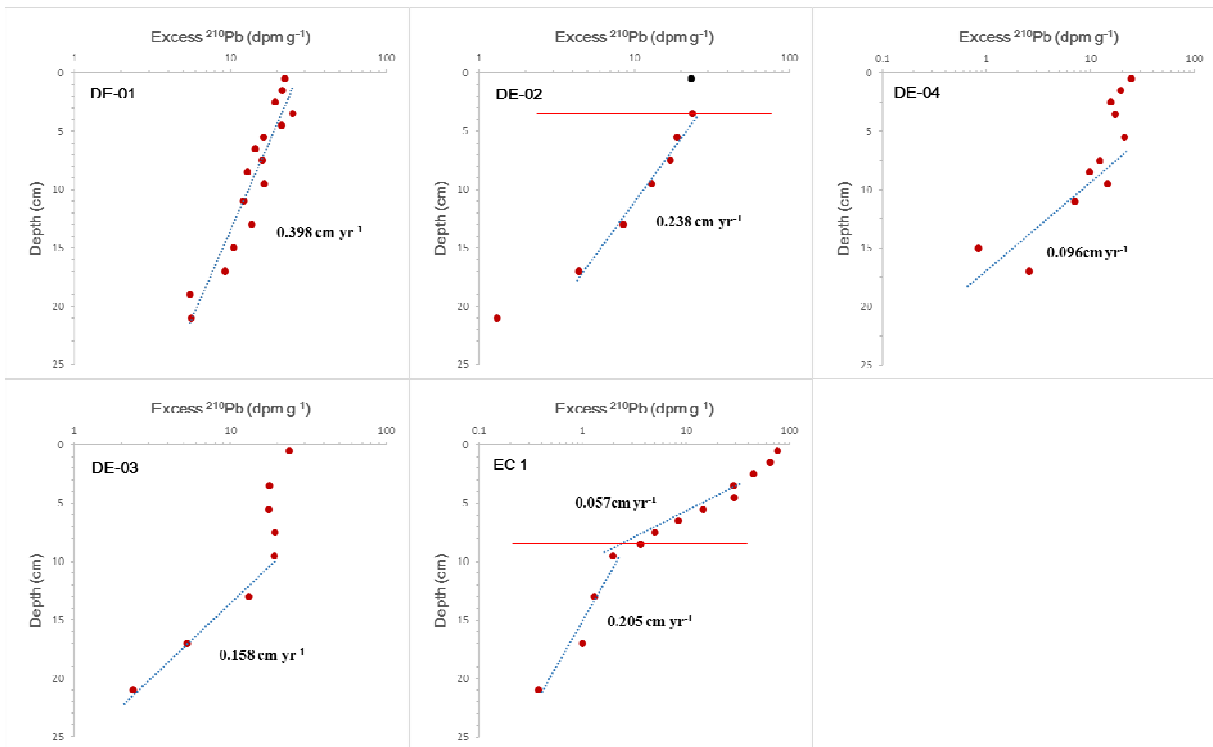


그림 4-3-2. 울릉분지 대륙사면 퇴적속도

$^{210}\text{Pb}$ 을 이용하여 계산된 울릉분지 대륙사면의 퇴적속도로부터 퇴적물의 Accumulation rate를 계산하면 표 4-3-1과 같다.

수심에 따른 퇴적속도 차이에 의해 퇴적물의 Accumulation rate 역시 연안에 가깝고 수심이 낮은 곳에서는 크고, 수심이 깊어질수록 작아지고 있었다.

표 4-3-1. 울릉분지 대륙사면 퇴적물 Accumulation rate

Station	Poraosity (%)	Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Sedimentation rates ( $\text{cm}/\text{yr}$ )	Mass accumulation rates ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{yr}$ )
DE 01	63.9	2.56	0.398	0.3678
DE 02	66.2	2.56	0.238	0.2059
DE 03	68.9	2.56	0.158	0.1258
DE 04	69.8	2.56	0.096	0.0742
EC 01	72	2.56	0.057	0.0409



## 제4절 울릉분지 POC 수지

### 1. 울릉분지의 POC 수지 계산

울릉분지 해저퇴적물에 존재하는 유기탄소 중 표층에서 일차생산에 의해 생산된 유기탄소의 기여율을 파악하고자 단순 박스모델을 이용하여 POC 수지를 계산하였다(그림 4-4-1).

계산에 사용된 각 요소별 자료는 다음과 같다

- Primary Productivity : MODIS Aqua 위성자료의 VGPM 일차생산력
- Particle Export Flux :  $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$  방사비평형
- Arrival Flux at Bottom : Sediment Trap에서 포집된 침강입자중 POC Flux 평균
- Sediment Burial Flux :  $^{210}\text{Pb}$  Accumulation rate에서 계산

각 요소에 사용 값은 아래와 같다.

- Primary Productivity : 82~1,872 gC/m<sup>2</sup>/yr (VGPM)
- Particle Export Flux : 32~46 gC/m<sup>2</sup>/yr ( $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ )
- Bottom Flux : 25~2.7 gC/m<sup>2</sup>/yr (Sediment Trap)
- Sediment Burial Flux : 8.2 gC/m<sup>2</sup>/yr ( $^{210}\text{Pb}$  Accumulation rate)

표층유광대에서 생산된 탄소는 82~1,872 gC/m<sup>2</sup>/yr의 범위로 이 중 Particle Export Flux로써 유광층 아래로 유출되는 양은 32~46 gC/m<sup>2</sup>/yr로 표층생산력의 10 ~ 14%에 해당되었다.

Sediment Trap에서 포집된 POC 플럭스는 500m에서 2.1~30.8 gC/m<sup>2</sup>/y, 1000m에서 1.4~30.6 gC/m<sup>2</sup>/y, 2000m에서 2.5~27.0 gC/m<sup>2</sup>/y로 유광층 아래의 수심에서는 유사한 양이며, 해저퇴적물로 매몰되는 유기탄소의 플럭스는 8.2 gC/m<sup>2</sup>/y로 침강입자의 POC 플럭스와 유사한 범위내에 존재하는 것으로부터 Sediment Trap에 포집된 POC가 그대로 해저 표층퇴적물로 유입되는 것으로 사료되며 표층에서 생산된 탄소의 2.5% 정도가 해저퇴적물로 도달하는 것으로 계산되었다.

해저퇴적물로 유입되는 물질은 해양표층에서 생산된 것 외에도 수평이동에 의해 유입된 것도 존재하기 때문에 수평이동되어 유입된 양을 파악하기 위하여 대기, 침강입

자, 해저퇴적물의 천연방사성 핵종인  $^{210}\text{Pb}$  플럭스 계산하여 비교하였다.

대기에서 울릉분지의 해수면으로 유입되는  $^{210}\text{Pb}$ 의 유입량은  $38\sim 42 \text{ dpm/m}^2/\text{day}$ (평균  $40 \text{ dpm/m}^2/\text{day}$ )이며, 입자에 흡착되어 해저로 침강하는  $^{210}\text{Pb}$ 의 제거량은  $17\sim 115 \text{ dpm/m}^2/\text{day}$ (평균  $43 \text{ dpm/m}^2/\text{day}$ )로 대기로부터 유입되는 양과 유사하였다. 그러나 해저 퇴적물로 매몰되는  $^{210}\text{Pb}$  accumulation rate는  $35\sim 98 \text{ dpm/m}^2/\text{day}$ (평균  $82 \text{ dpm/m}^2/\text{day}$ )로 대기 및 수층을 침강한 양의 약 2배를 나타내었다. 이와 같은 것을 고려하면 울릉분지로 퇴적되는 퇴적물의 약 절반은 사면 등에서부터 수평이동 되어온 것을 시사하며, 이러한 수평이동은 가을 및 겨울철의 Sediment Trap에 포집된 큰 플럭스와 관계가 있는 것으로 추정된다. 향후 상세한 계절별 침강입자 특성 파악 및 물질기원 파악 연구가 필요하다고 생각된다.

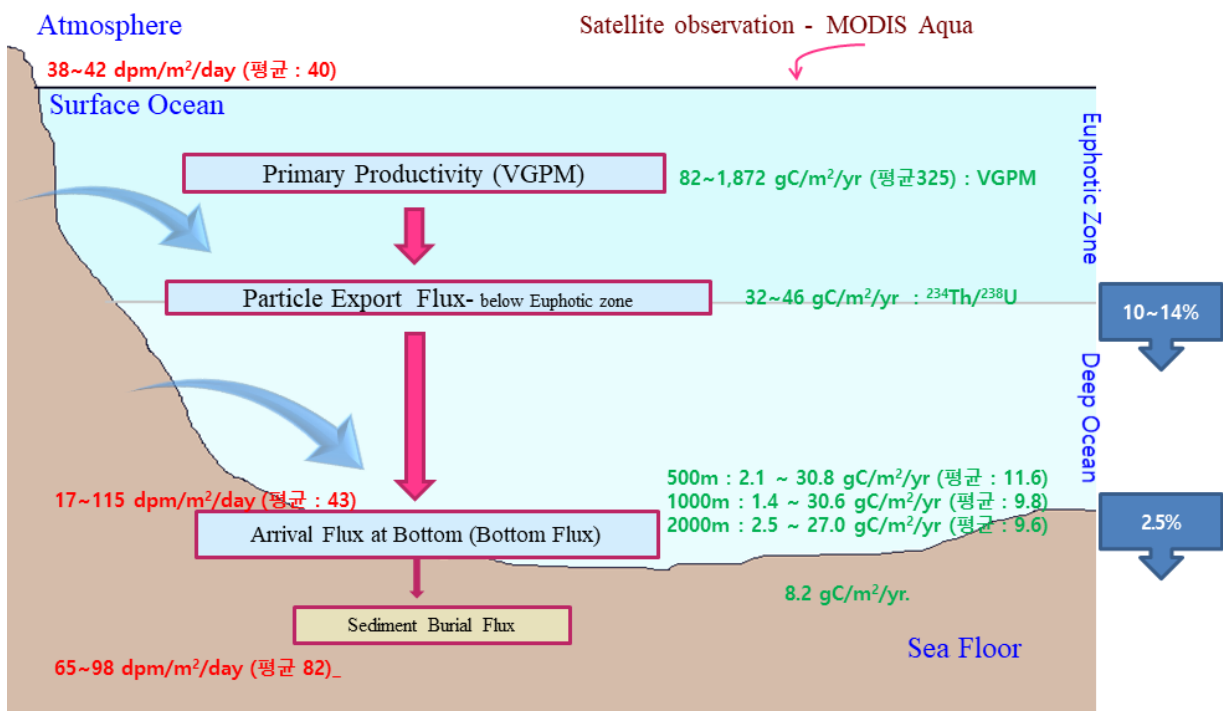


그림 4-4-1. 울릉분지의 POC 수치





# 참 고 문 헌





## 참고문헌

- 김성용, 2004. “전지구적 지구관측시스템들의 시스템(GEOSS)” 구축을 통한 지구환경변화 대비 및 지속가능 발전 동향. 한국지구시스템공학회지, vol 41(5), pp. 418-423.
- 김원·김사홍·송성준, 1996. 울릉도·독도의 해산 십각류. 자연실태종합보고서, 10: 413-437.
- 김한준·주형태·유해수·김광희·유이선, 2011, 신기 지구조운동의 해석을 위한 한반도 근해 천부지질의 고해상 탄성과 탐사: 울진 주변해역, 지구물리와 물리탐사, Vol. 14, No. 2, pp. 127-132.
- 김훈수·최병래, 1981. 울릉도 및 독도의 해양 무척추동물상. 한국 자연보호 협회 조사 보고서, 19: 193-198.
- 서해립·김성수·고유봉·남기완·윤성규·윤양호·조수근·홍재상, 1995. 영일만 표영군집 내의  $^{210}\text{Po}$  축적. 한국수산학회지. 28권 2호, pp. 219-226.
- 양한섭·김성수·이재철, 1995. 동해 중부해역에서  $^{210}\text{Po}$ 과  $^{234}\text{Th}$ 의 순환에 대한 소용돌이의 영향. 한국해양학회지, 30권, 4호, pp. 279-287.
- 양한섭·김성수·이재철, 1996. 봄철 동해에서 해수 중  $^{210}\text{Po}$ 과  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도분포 특성. 한국수산학회지, 29권, 2호, 238-245.
- 이재호, 2007. 유비쿼터스 세상 구현을 위한 또 하나의 인프라 IP-USN. 한국정보사회진흥원.
- 이태희·김동선·김부근·최동립. 2010. 동해 울릉분지 퇴적물에서 유기탄소 순환. *Ocean and Polar Research* 32(2) : 145-156.
- 이행필·양한섭·김기현, 1996. 춘계 동해남부 연안해역에서 해수 중  $^{210}\text{Po}$ 와  $^{234}\text{Th}$ 의 제거. 한국수산학회지, 29권 3호. 332-344.
- 정희동, 1999. 동북아해양관측시스템 제4차 조정위원회 보고서. 해양수산부 국립수산진흥원.
- 최재선, 2009, 해양산업 동향 제6호. 한국해양수산개발원.
- 한국해양연구소, 1996 동해종합연구기획.
- 한국해양연구원, 2004. 동해 기후변동과 생태계 반응 역학과 예측 연구사업 수행을 위한 기획 연구. BSPE88000-1643-1



한국해양연구원 동해연구소, 2009. 동해·독도 기초과학연구. 교육과학기술부.

환경부, 1996. 해양투기장 해역의 환경모니터링 기술

Anderson RF, Fleer AP. 1982. Determination of natural actinides and plutonium in marine particulate matter. *Analytical Chemistry*, pp. 1142-1147.

Bacon M. P. Belastock R. A., Tecotzky M., Turekian K. K. and Spencer D. W., 1988. Lead-210 and polonium-210 in ocean water profiles of the continental shelf and slope south of New England. *Continental Shelf Research*, 8, 841-853.

Bacon M. P., Spencer D. W. and Brewer P. G., 1976.  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  and  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  disequilibrium in seawater and suspended particulate matter. *Earth and Planetary Science Letters*, 32, 277-296.

Balls P. W., 1988. The control of trace metal concentrations in coastal seawater through partitioning onto suspended particulate matter *Earth and Planetary Science Letters*, 32, 277-296.

Baskaran M. and Santschi P. H., 1993. The role of particles and colloids in the transport of radionuclides in coastal environments of Texas. *Marine Chemistry*, 43, 95-114.

Boucot, A.J., 1981. *Principles of Benthic Marine Palaeoecology*. Academic Press, San Diego, CA, 463 pp.

C. H. Kim, J. W. Park, M. H. Lee and C. H. Park, 2013. Detailed bathymetry and submarine terraces in the coastal area of the Dokdo volcano in the Ulleung Basin, the East Sea (Sea of Japan). *Journal of Coastal Research*, No. 65, 523-528 pp.

Cermeno, P., Dutkiewicz, S., Harris, R.P., Follows, M., Schofield, O. and Falkowski, G., 2008. The role of nutricline depth in regulating the ocean carbon cycle. *PNAS*, v. 105, 20344-20349 pp.

Chace, F. A., Jr., 1951. The number of decapod and stomatopod Crustacea. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 41(11): 369-372.

Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjornsdottir, A. E., Jouzel, J. and Bond, G., 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record, *Nature*, vol. 364, 218-220 pp.



- Dodge JD. 1982. Marine dinoflagellates of the British Isles. pp.303. Her majesty's stationery office.
- Fisher N. S., Burns K. A., Cherry R. D. and Heyraud M., 1983. Accumulation and cellular distribution of  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in two marine algae. Marine Ecology Progress Series, 11, 233-237.
- Flesch, L. M., Holt, W.E., and Haines, A. J., 2001. Dynamics of the India-Asia collision zone, Journal of Geophysical Research, vol. 106, 16435-16460 pp.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain-size parameters. Journal of Sedimentary Petrology, v. 27, 3-26 pp.
- G. H. Lee, H. J. Kim, S. J. Han, and D. C. Kim, 2001. Seismic stratigraphy of the deep Ulleung Basin in the East Sea (Japan Sea) back-arc basin, Marine and Petroleum Geology, vol. 18, 615-634 pp.
- Gao, S., 1996. A Fortran program for grain-size trend analysis to define net sediment transport pathways. Computers and Geosciences, 22, 449-452 pp.
- Gavini M. B., Beck J. N. and Kuroda P. K., 1974. Mean residence time of the long-lived radon daughters in the Atmosphere. Journal of Geophysical Research, 79, 4447-4452.
- H. J Kim, H. T. Jou, G. H. Lee, D. L. Choi, B. Y. Yi, L. S. Yoo, S. H. Lee, K. H. Kim and H. S. Yoo, 2011. High-resolution Seismic Imaging of Geologic Deformation, offshore East Coast of Korea at 37N: Implications for Assessments of Seismic Activity, Disaster Advances, 4, 40-46 pp.
- H. J. Kim, K .H. Lee, H. T. Jou, H. M. Cho, H. S. Yoo, G. T. P. and J. J. Kim, 2007. Evolution of the eastern margin of Korea: Constraints on the opening of the East Sea (Japan Sea), Tectonophysics, 436, 37-55 pp.
- H. J. Kim, S. J. Han, W. H. Lee, S. Huh, 1998. Seismic study of the Ulleung Basin crust and its implications for the opening of the East Sea (Japan Sea). Mar. Geophys. Res. 20, 219-237 pp.
- Hampton MA, H. J. Lee and Locat J, 1996. Submarine landslides. Rev Geophys 34: 33-59 pp.
- Harris, P.T., Patiaratchi, C.B., Keene, J.B. and Cole, A., 1990. Modelling the evolution of a linear sandbank field, Moreton Bay, Queensland. Report of Results Obtained During the Cruise of A.M. Brolga in July, 1989, v. 41. Ocean Sciences Institute, University of Sydney.



- Hirose, N., and Ostrovskii, A. G. (2000). Ouasi-biennial variability in the Japan Sea. *Journal of Geophysical Research*, 105,14011-14027.
- Holloway, G., Sou, T., and Eby, M. (1995). Dynamics of circulation of the Japan Sea. *Journal of Marine Research*, 53, 539-569.
- Honeyman B. D., Balistrieri L. S. and Murray L. S., 1988. Oceanic trace metal scavenging; the importance of particle concentration, *Deep-Sea Research*, 35, 227-246.
- Hong G. H., Park S. K., Baskaran M., Kim S. K., Chung C. S. and Lee S. H., 1999. Lead-210 and polonium-210 in the winter well-mixed turbid waters in the mouth of the Yellow Sea. *Continental Shelf Research*, 19, 1049-1064.
- Hung C.-C, Wei C.-L. 1992. Th-234 Scavenging in the water column off southwestern Taiwan. *Terrestrial, Atmosphere and Ocean (TAO)* 3, 183-197.
- J. J. Bahk, S. J. Han, B. K. Khim, 2004. Variations of terrigenous sediment supply to the southern slope of the Ulleung Basin, East/Japan Sea since the Last Glacial Maximum. *Geosci J* 8: 381-390 pp.
- J. J. Bahk, S. K. Chough and S.-J. Han, 2000. Origin of laminated muds and its paleoceanographic significance in the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), *Marine Geology*, vol. 162, 459-477 pp.
- Jolivet, L., Tamaki, K. & Fournier, M., 1994. Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis, *J. Geophys. Res.*, 99, 22,237-222,259 pp.
- Jolivet, L., P. Huchon, X. Lepichon, N. Chamot-Rooke, and J. C. Thomas, 1991. Arc Deformation and Marginal Basin Opening: Japan Sea as a Case Study, *J. Geophys. Res.*, v. 96(B3), 4367-4384 pp.
- Jolivet, L., Tamaki K., 1992. Neogene Kinematics in the Japan Sea Region & Volcanic Activity of the Northeast Japan Arc, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Science Result*, 127/128(part 2), 1311-1331 pp.
- K. H. Kim, Y. Park, 2010. The January 2007 ML 4.8 Odaesan Earthquake and Its Implications for Regional Tectonics in Korea, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100, 1395-1495 pp.
- Kadko D., 1993. Excess <sup>210</sup>Po and nutrient cycling within the California coastal transition zone. *Journal of Geophysical Research*, 98, 857-864.

- Kamita, T., 1941. Studies on the decapod Crustaceans of Chosen. Par I. Crabs. (in Japanese, with English summary). Fisher. Soc. Chose, pp. 1-289, pls. 1-2.
- Kang, T.-S. & Shin, J.S., 2006. The offshore Uljin, Korea, earthquake sequence of April 2006: seismogenesis in the western margin of the Ulleung Basin, *Geosciences Journal*, 10, 159-164 pp.
- Kharkar D. P., Thomson J., Turekian K. K. and Forster W. O., 1976. Uranium and Thorium decay series nuclides in plankton from the Caribbean. *Limnology and Oceanography*, 21, 294-299.
- Kido, Y., Minami, I., Tada, R., Fujine, K., Irino, T., Ikehara, K. and Chun, J., 2007. Orbital-scale stratigraphy and high-resolution analysis of biogenic components and deep-water oxygenation conditions in the Japan Sea during the last 640 kyr, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 247, 32-49 pp.
- Kim, H. S., 1973. Anomura·Brachyura. In: *Illustrated Encyclopedia of Fauna and Flora of Korea*. Vol. 14. Seoul, 649 pp.
- Kim, K.-R., Kim, G., Kim, K., Lobanov, V., Ponomarev, V., and Salyuk, A. (2002). A sudden bottom-water formation during the severe winter 2000-2001: The case of the East/Japan Sea. *Geophysical Research Letters*, 29, 1234, doi:10.1029/2001GL014498.
- Krumbein, W.C., 1934. Size frequency distribution of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 4, 65-77 pp.
- Lallemand, S., and L. Jolivet, 1986, Japan Sea: a pull-apart basin?, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 76, 375-389 pp.
- Lamarche, G., 2000, Constraining fault growth rates and fault evolution in New Zealand, *EOS*, vol. 81, 481 pp.
- Lambert G. A., Martin H. and Buland K. W., 1979. Modification of the atmospheric polonium 210 to lead 210 ratio by volcanic emissions. *Journal of Geophysical Research*, 84, 6980-6986.
- Lee SH, Whitledge T, Kang SH. 2007. Recent carbon and nitrogen uptake rates of phytoplankton in Bering Strait and the Chukchi Sea. *Continental Shelf Research* 27, 2231-2249.
- Lee, K. H. & H. S. Ko, 2008. First records of three crabs (Crustacea: Decapoda) from Korea. *Korean J. Syst. Zool.*, 24(1): 17-24.



- Lee, S. (1999). Self-excited variability of the East Korea Warm Current: A quasi-geostrophic model study. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 34, 1-21.
- Lee, S. H., K. H. Lee, & H. S. Ko, 2011, First records of two pilumnid crabs (Crustacea: Decapoda) collected from Jeju Island, Southern Korea. *Korean J. Syst. Zool.*, 27(2): 191-196.
- Lee, S. -k., M. -H. Shin, T. S. Park, & W. Kim. 2012. New Report of Three Xanthid Crabs (Crustacea: Decapoda: Xanthidae) from Korea. *Animal Systematics, Evolution and Diverstiy*, 28:117-125.
- Lee, S.-k, 2013. Systematic study on the Korean pilumnoids and xanthoids (Crustacea: Decapoda: Brachyura) based on morphology and molecular data. Seoul National University, Seoul. Dissertation for Ph. D. degree
- Li Y. H., Santschi P. H., Kaufman A., Benninger L. K., and Feely H. W., 1981. Natural radionuclides in waters of the New York Bight. *Earth and Planetary Science Letters*, 55, 217-228.
- Locat J, H. J. Lee, 2002. Submarine landslides: advances and challenges. *Can Geotech J* 39: 193-212 pp.
- Lyu, S. J., and Kim, K. (2003). Absolute transport from the sea level difference across the Korea Strait. *Geophysical Research Letters*, 30,1285, doi:10.1029/2002GL016233.
- Martinson, D. G., Pisias, N. G., Hays, J. D., Imbrie, J., Moore Jr., T. C. and Shackleton, N. J., 1987. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy, *Quaternary Research*, vol. 27, 1-29 pp.
- McCave, I.N., 1978. Grain size trends and transport along beaches: and example from eastern England. *Marine Geology*, v. 28, 43-51 pp.
- McKee B. A., 1986. The fate of particle-reactive radionuclides in the Amazon and Yangtze Continental shelves. Ph. D. Dissertation, North Carolina State University.
- Menuir, A., 2005. *Clays*, Springer-Verlag, Berlin, 472 pp.
- Miers, E. J., 1879. On Crustacea from Korean and Japanese Seas. *Zool. Sco. London*, pp. 18-60.





- Miita, T., & Ogawa, Y. (1984). Tsushima currents measured with current meters and drifters. In T. Ichiye (Ed.), *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas* (pp. 67-76). Amsterdam: Elsevier.
- Minobe, S., Sako, A., and Nakamura, M. (2004). Interannual to Interdecadal Variability in the Japan Sea Based on a New Gridded Upper Water Temperature Dataset. *Journal of Physical Oceanography*. 34, 2282-2397.
- Mitchell, D. A., Watts, D. R., Wimbush, M., Tracey, K. L., Teague, W. J., Book, J.W., Chang, K. -I., Suk, M.-S., and Yoon, J. -H. (2005a). Upper circulation patterns in the Ulleung Basin. *Deep-Sea Research II* .52. 1617-1638.
- Mitchell, D. A., Teague, W. J., Wimbush, M., Watts, D. R., and Sutyrin G. G. (2005b). Dok Cold Eddy. *Journal of Physical Oceanography*. 35. 273-287.
- Moore H. E., Poet S. E. and Martell E. A., 1973.  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$  and  $^{210}\text{Po}$  profiles and aerosol residence times versus altitude. *Journal of Geophysical Research*, 78, 7065-7075.
- Mothersill, J., 1969. A grain size analysis of longshore bars and troughs, Lake Superior, Ontario. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 39, 1317-1324 pp.
- Mulder T, Cochonat P, 1996. Classification of offshore mass movements. *J Sediment Res* 66: 43-57 pp.
- Ng, P.K.L., D. Guinot & P.J.F. Davie, 2008. *Systema Brachyurorum: Part I. An annotated checklist of extant brachyuran crabs of the world*. The Raffles Bulletin of Zoology, Supplement 17, 286pp.
- Nof, D. (2000). Why much of the Atlantic circulation enters the Caribbean Sea and very little of the Pacific circulation enters the Sea of Japan. *Progress in Oceanography*, 45, 39-67.
- Nozaki Y., Ikuta N. and Yashima M., 1990. Unusually large  $^{210}\text{Po}$  deficiencies relative to  $^{210}\text{Pb}$  in the Kuroshio Current of the East China and Philippine Seas. *Journal of Geophysical Research*, 95, 5321-5329.
- Nozaki Y., Tsubota H., Kasemsupaya V., Yashima M. and Ikuta N., 1991. Residence times of surface water and particle reactive  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the East China and Yellow Seas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 1265-1272.



- Otsuki, K., 1992. Oblique subduction, collision of microcontinents and subduction of oceanic ridge: their implications on Cretaceous tectonics of Japan. *Isl. Arc* 1, 51-63 pp.
- Park, T.K., 1964. On the crabs in the eastern sea of Korea. *The Korean Journal of Systematic Zoology*, 7(1): 15-19, fig. 1. (In Korean.)
- Parke M and J Dixon. 1968. Check list of British marine algae-Second revision. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* 45 : 537-557.
- Passega, R., 1964. Grain size representation by CM patterns as a geological tool. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 34, 830-847 pp.
- Peirson D. H., Cambrey R. S. and Spicer G. S., 1966. Lead-210 and polonium-210 in the atmosphere. *Tellus*, 18, 427-433.
- Petit, C., and Fournier, M., 2005. Present-day velocity and stress fields of the Amurian Plate from thin-shell finite-element modeling, *Geophysical J. International*, vol. 160, 357-369 pp.
- Pettijohn, F.G., Potter, P.D. and Siever, R., 1972. *Sand and Sandstone*. Springer, New York, NY.
- Piper DJW, Farre JA, Shor A ,1985. Late Quaternary slumps and debris flows on the Scotian slope. *Bull Geol Soc Am* 96: 1508-1517 pp.
- Romankevich, E.A., 1990. Biogeochemical problems of living matter of the present-day biosphere, in *Facets of Modern Biogeochemistry: Festschrift for E.T. Degens* (eds Ittekkot, V., Kempe, S., Michaelis, W. and Spitzky, A.), Springer-Verlag, Berlin, 39-51 pp.
- Schrader HJ. 1971. Fecal pellets: role in sedimentation of pelagic diatoms. *Science* 174 : 55.
- S. H. Lee, J. J. Bahk and S. K. Chough, 2004. Late Quaternary sedimentation in the eastern continental margin of the Korean Peninsula. In: Clift P, Kuhnt W, Wang P, Hayes D (eds) *Continentocean interactions within east Asian marginal seas*, vol 149, *Geophysical monograph*. American Geophysical Union, Washington, DC, 205-233 pp.
- S. H. Lee, J. J. Bahk, H. J. Kim, K. E. Lee, H. T. Jou and B. C. Suk, 2010. Changes in the frequency, scale, and failing areas of latest Quaternary (<29.4 cal. ka B.P.) slope failures along the SW Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea), inferred from depositional characters of densely dated turbidite successions, *Marine and Geo-Marine Lett.*, vol. 30, 133-142 pp.

- S. H. Lee, S. K. Chough, G. C. Back, Y. B. Kim, B. S. Sung, 1999. Gradual downslope change in highresolution acoustic characters and geometry of large-scale submarine debris lobes in Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), Korea. *Geo-Mar Lett* 19: 254-261 pp.
- S. H. Yoon, and S. K. Chough, 1995. Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107, 83-97 pp.
- Simonsen R. 1979. The diatom system: Ideas on phylogeny. *Bacillaria* 2 : 9-71.
- S. K. Chough, H. J. Lee and S. H. Yoon, 2000. *Marine geology of Korean seas*. Elsevier, Amsterdam
- S. K. Chough, K. S. Jeong and Honza E., 1985. Zoned facies of mass-flow deposits in the Ulleung (Tsushima) basin, East Sea (Sea of Japan). *Mar. Geol.*, vol. 65, 113-125 pp.
- S. K. Chough, S. H. Lee, J. W. Kim, S. C. Park, D. G. Yoo, H. S. Han, H. S. Yoon, S. B. Oh, Y. B. Kim and G. G. Back, 1997. Chirp (2-7 kHz) echo characters in the Ulleung Basin. *Geosci J* 1: 143-153 pp.
- Sakai, T. 1939. *Ibid.* IV. Brachygnatha, Brachyrhyncha. *Ibid.*, pp. 365-741, pls. 42-111.
- Santschi N. R., Li Y. H. and Bell J., 1979. Natural radionuclides in the water of Narragansett Bay. *Earth and Planetary Science Letters*, 45, 201-213.
- Self, R.P., 1977. Longshore variation in beach sands, Nautla area, Veracruz, Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 47, 1437-1443 pp.
- Senjyu, T., M. Matsuyama, and N. Matsubara, 1999: Interannual and decadal sea-level variations along the Japanese coast. *Journal of Oceanography*, 55, 619-633.
- Seung, Y. H. (2003). Significance of shallow bottom friction in the dynamics of the Tsushima Current. *Journal of Oceanography*, 59, 113-118.
- Shannon L. V., Cherry R. D. and Orren M. J., 1970. Polonium-210 and lead-210 in the marine environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34, 701-711.
- Tada R, Irino T, Koizumi I, 1999. Land-ocean linkages over orbital and millenia timescales recorder in late Quaternary sediments of the Japan Sea. *Paleoceanography* 14: 236-247 pp.



- Tamaki, K., K. Suyehiro, J. Allan, J. C. Ingle, and K. A. Pisciotta, 1992. Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Science Result, 127/128(part 2), 1333-1348 pp.
- Tanaka N., Takeda Y. and Tsunogai S., 1983. Biological effect on removal of  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Po}$  from surface water in Funka Bay. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, 1783-1790.
- Taylor F, A McMinn and D Franklin. 1997. Distribution of diatoms in surface sediments of Prydz Bay, Antarctica. *Marine Micropaleontology* 32 : 209-229.
- Tokieda T., Yamanaka K., Harada K., and Tsunogai S, 1996. Seasonal variations of residence time and upper atmospheric contribution of aerosols studied with Pb-210, Po-210 and Be-7. *Tellus*, 48B, 690-702.
- Tyson, R.V., 1995. *Sedimentary Organic Matter*. Chapman & Hall, London, 615 pp.
- Visher, G.S., 1969. Grain size distributions and depositional processes. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 39, 1074-1106 pp.
- Wei C. L. and Murray J. W., 1994. The behavior of scavenged isotopes in marine environments:  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the water column of the Black Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 1795-1811.
- Weiss RF. 1970, The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. *Deep-Sea Research* 17, 721-735.
- Werner D. 1977. *The Biology of Diatoms*. pp.498. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Yeakel, L.S., 1962. Tuscarora, Juintina and Bald Eagle paleocurrents and paleogeography in the central Appalachians. *Geological Society of American Bulletin*. v. 73, 1515-1540 pp.
- Yun, J. -Y., Magaard, L., Kim, K., Shin, C.-W., Kim, C., and Byun, S. -K. (2004). Spatial and temporal variability of the North Korean Cold Water leading to the near-bottom cold water intrusion in Korea Strait. *Progress in Oceanography*. 60, 99-131.