

Article

북동태평양 한국 망간단괴 광구해역에서 환경충격 시험지역과 보존지역간의  
수층환경 및 침강입자 플럭스 유사성 비교

손주원 · 김경홍 · 김형직\* · 주세종 · 유찬민

한국해양과학기술원 심해저광물자원연구센터  
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Evaluation of Similarity of Water Column Properties and Sinking Particles  
between Impact and Preserved Sites for Environmental Impact Assessment in  
the Korea Contracted Area for Manganese Nodule Development,  
NE Pacific

Juwon Son, Kyeong Hong Kim, Hyung Jeek Kim\*, Se-Jong Ju, and Chan Min Yoo

*Deep-sea and Seabed Mineral Resources Research Center, KIOST  
Ansan 426-744, Korea*

**Abstract :** Verifying the similarity of environmental characteristics between an artificial impact site and a preserved or reference site is necessary to quantitatively and qualitatively evaluate the environmental impact of mining activity. Although an impact site (BIS station) and a preserved site (called KOMO station) that have been selected in the Korea manganese nodule contract area may share similar environmental characteristics, similarities in terms of the water column environment between both sites has not been investigated. In this study, we compared the chemical properties of the water columns and sinking particle fluxes between BIS and KOMO stations through two observations (August 2011 and September 2012). Additionally, we observed particle fluxes at the KOMO station for five years (July 2003~July 2008) to understand long-term natural variability. Vertical distributions of water column properties such as dissolved oxygen, inorganic nutrients (N, P, Si), total organic carbon below surface layer (within the depth range of 200 m) were not considerably different between the two sites. Especially, values of water column parameters in the abyssopelagic zone from 4000 m to bottom layer (~5000 m) were very similar between the BIS and KOMO sites. Sinking particle fluxes from the two sites also showed similar seasonality. However, natural variation of particle flux at the KOMO site varied from 3.5 to 129.9 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, with a distinct temporal variation originating from ENSO events (almost forty times higher than a minimum value). These results could provide valuable information to more exactly evaluate the environmental impact of mining activity on water columns.

**Key words :** Clarion-Clipperton Fracture Zone, manganese nodule, benthic impact experiment, sinking particle, natural variability

\*Corresponding author. E-mail : juac29@kiost.ac

## 1. 서론

북동태평양에 위치한 클라리온-클리퍼톤 균열대(5°N~15°N, 116°W~155°W, ca.  $5 \times 10^6$  km<sup>2</sup>)는 1970년대 이후부터 해양광물자원의 보고로 큰 관심을 받고 있다. 특히 최근들어 우리나라를 포함한 주요 해양선진국들(독일, 미국, 일본, 프랑스 등)은 2020년 이전에 망간단괴를 상업적으로 개발하기 위해 다양한 기초/응용 연구 및 기술 개발에 박차를 가하고 있다(Yamada and Yamazaki 1998; Muthunayagam and Das 1999; Yamada et al. 2009). 하지만 개발단계에서 망간단괴 채광시 우려되는 환경영향/충격에 대한 정확한 평가와 효과적인 관리 방안을 수립하기 위해 사전에 환경충격시험의 수행이 요구되고 있다. 채광시 발생하는 환경영향이나 충격으로는 집광기 운용을 통한 저서생물 서식처인 해저면 표층퇴적물의 물리적인 변화와 이러한 과정에서 미세 퇴적물의 재부유/재퇴적 또한 수층/저서환경에 중요한 영향(e.g. 저서생물의 매장, 여과식자의 섭식 효율 저하, 퇴적층 내 먹이공급원 회석 효과 등)을 미칠 수 있다(Yamazaki et al. 1997; Oebius et al. 2001; Sharma et al. 2001; Khrpounoff et al. 2006; Nath et al. 2012). 그 외에도, 채광된 단괴의 선상처리 과정에서 발생하는 잔사(단괴파쇄물과 심해퇴적물)의 방류로 인해 수층 내 광량 감소와 추가적인 유, 무기물 및 중금속 유입으로 동·식물플랑크톤의 성장과 조성 변화 등이 초래되어 해양 생태계의 구조와 기능에 큰 영향을 미칠 수 있다(Markussen 1994; Sharma 2005; SPC 2013). 따라서 이러한 채광 활동으로 예상되는 환경충격과 영향은 해양광물 자원 개발의 추진과정에서 정치적, 사회적 이슈로 크게 부각되고 있다(Sharma et al. 2001; Glover and Smith 2003; Van Dover 2011; Mengerink et al. 2014).

망간단괴 개발에 따른 해양환경 영향을 평가하고, 그 영향을 최소화하기 위해 공해상의 해저자원을 관리/감독하는 국제해저기구(International Seabed Authority, ISA)에서는 상업 채광 이전에 기초 환경조사 및 집광기(또는 심해퇴적물 교란기)를 이용한 환경충격시험의 수행을 권고하였다. 이에 따라 태평양 및 인도양에서 망간단괴 광구 탐사권을 보유한 일부 국가들은 자국의 광구지역 또는 그 주변지역에서 해양물리, 화학, 저서생물, 지질학적 특성 등의 환경연구와 심해퇴적물 교란기를 이용한 충격시험을 수행하였다(Ozturgut et al. 1980; Trueblood et al. 1997; Chung et al. 2001; Sharma et al. 2001). 남동태평양에서 약 10년간 수행된 독일의 충격시험(Disturbance and Recolonisation Experiment, DISCOL)에서는 충격시험 이후 중형저서동물인 선충류(Nematode)와 저서성 요각류(Harpacticoida)의 개체수가 50% 정도 감소한 것으로 보고되었다(Schriever et al. 1991, 1992, 2002; Thiel 1992;

Thiel et al. 2001). 인도양에서 수행된 인도의 충격시험(Indian Deep-sea Environmental Experiment, INDEX) 결과, 충격시험 직후의 침강입자 플럭스는 이전시기(평균  $50 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )에 비해 약 3배 증가하였으며, 5일 후에는 정상시기보다 1.5~2배 높게 측정되어 비교적 빠른 재퇴적 과정을 제시하였고(Parthiban 2000; Sharma et al. 2001), 재부유 물질의 영향으로 충격시험 기간동안 초대형 저서동물의 개체수가 32% 정도 감소한 것으로 보고되었다(Rodrigues et al. 2001).

기존 환경충격시험 및 그 영향을 평가한 연구들은 대부분 인위적 충격에 의한 저서생물의 영향과 이의 장기간 복원과정에 집중되어 있기 때문에 연구해역 내 부유물질의 농도, 수층 별 영양염 농도, 동·식물플랑크톤의 군집구조 등과 같은 환경 인자들의 자연 변동량에 대해서는 고려하지 않았다. 이는 환경 인자의 계절변화, 남방진동(El Niño Southern Oscillation), 화산폭발 등과 같이 주기적/비주기적으로 발생하는 자연현상에 의한 변동량과 채광과 같은 인위적인 활동에 의한 변동량을 정확히 구분해 파악하는 것에 한계가 있음을 의미한다. 특히, 이전 충격시험의 영향평가 항목 중 수층 내 영양염 농도와 부유물질의 농도는 주기적/비주기적 자연현상에 따라 시기별로 큰 차이를 보인다. 실제로 주요 해양선진국들의 망간단괴 광구가 위치한 북동태평양 해역은 엘니뇨/라니냐와 같은 기상이변에 의해 큰 영향을 받는 것으로 알려졌으며, 라니냐 기간동안 해양 생산성 및 침강입자 플럭스는 정상시기보다 3배 이상 증가하는 것으로 보고되었다(Dymond and Collier 1988; Honjo et al. 1995; Karl et al. 1995; Chavez et al. 1999; Kim et al. 2010, 2011, 2012). 이는 북동태평양 해역 내 침강입자 플럭스의 자연 변동량이 과거 충격시험에 의해 발생한 재부유 물질의 양과 같거나 크다는 것을 의미하며, 충격시험의 영향을 정량적으로 평가하고 자연적으로 복원 가능한 정도인지를 파악하기 위해 환경 인자들의 장기 자연 변동량 고려가 필수적임을 지시한다. 또한, 충격시험에 의한 단·장기적 환경 영향과 생태계 반응 및 복원 과정을 평가하기 위해서는 충격이 가해지는 시험지역은 물론 자연 변동량 고려를 위한 시험지역과 유사한 환경을 가진 지역(e.g. 대조지역 혹은 보존지역)의 병행관측이 요구된다. 따라서 충격시험에 의한 영향을 정량적으로 평가하고 해양 생태계의 자연적 복원과정을 파악하기 위해서는 망간단괴 광구 해역내 비교적 유사한 환경을 가진 지역(보존지역과 환경충격 시험지역)의 선정이 우선되어야 할 것이다.

우리나라도 망간단괴 개발에 따른 환경영향을 평가하고 그 영향을 최소화하기 위한 노력의 일환으로 2003년부터 망간단괴 광구해역 내에서 기초 환경연구를 수행하고 있다. 특히 장기 모니터링 정점(KODOS long-term monitoring

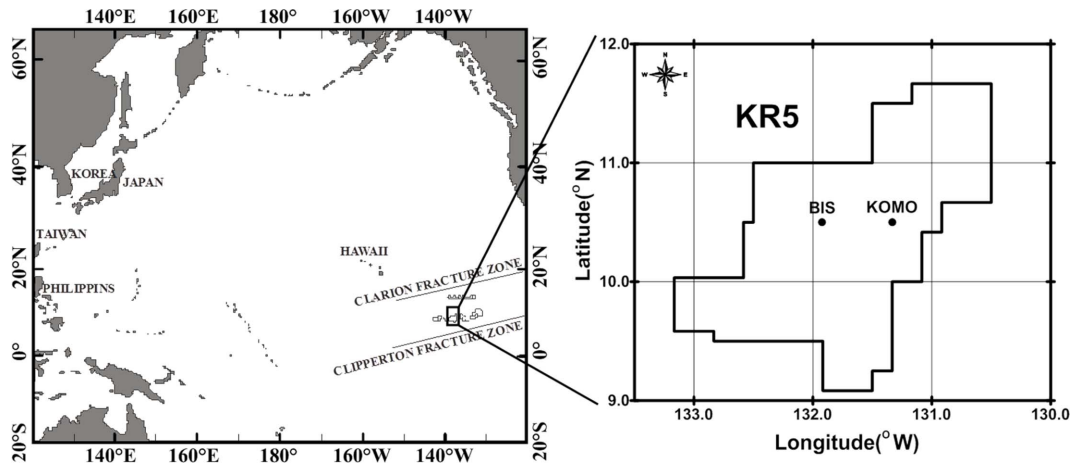


Fig. 1. Map of the study area with sampling stations. Study area is located between Clarion Fracture Zone and Clipperton Fracture Zone, and KR5 is the Korea contracted area for manganese nodule exploration. KOMO (Korea deep ocean study long-term monitoring station) represents preservation station, whereas BIS (benthic impact site) is station for impact experiment

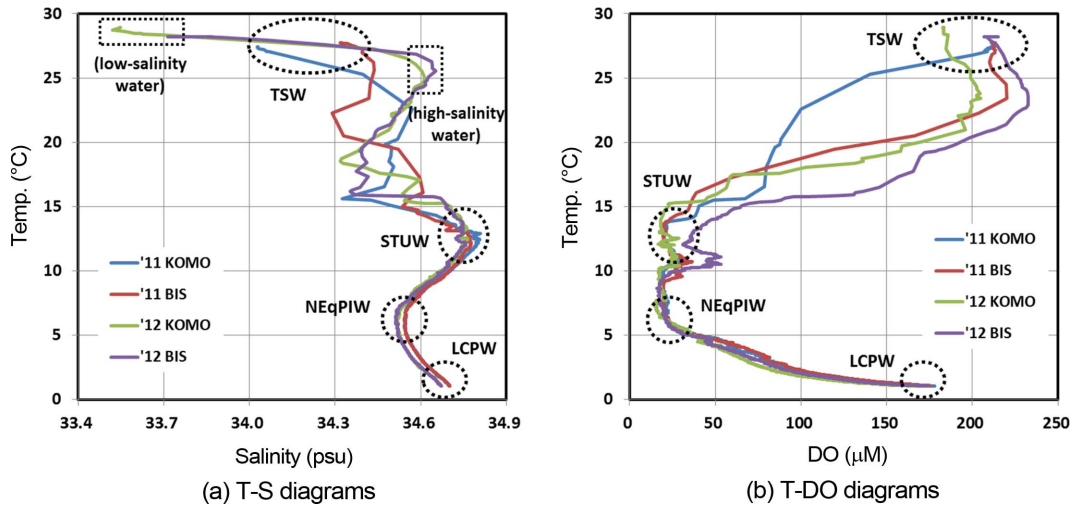
station, KOMO)과 그 주변해역을 보존지역으로 설정하여 광구해역 내 환경인자들의 자연 변동량을 지속적으로 측정하고 있다. 또한, 2010년에 보존지역의 생물학적 인자(e.g. 미생물, 중형저서생물, 대형저서생물) 및 지질학적 인자(e.g. 지형, 경사도, 망간단괴 부존율 등)와 유사한 값을 보이며 비슷한 환경 특성을 가질 것으로 고려되는 동일한 위도상에 환경충격 시험지역(Benthic Impact Site, BIS)을 설정하였다(MLTM 2011)(Fig. 1). 하지만 두 지역을 대상으로 채광활동에 의해 발생하는 부유물질과 잔사 배출 등과 같은 환경충격에 가장 민감한 수층환경 특성(e.g. 수괴, 무기영양염, 용존산소, 침강입자 등)에 대해서는 아직까지 비교 검증된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 망간단괴 광구해역 내에 선정된 보존지역에서 장기간 획득한 침강입자 플럭스를 이용하여 침강입자의 자연 변동량을 평가하였으며, 보존지역과 시험지역간의 수층환경 유사성을 비교 분석하였다.

## 2. 연구지역 및 방법

현장조사는 2011년 8월과 2012년 9월에 우리나라 망간단괴 광구지역인 KR5(9°N~11°N, 130°W~133°W)의 보존지역 내에 위치한 KOMO(131.33°W, 10.50°N) 정점과 환경충격 시험지역의 중앙부에 선정된 BIS(131.93°W, 10.50°N) 정점에서 수행하였다(Fig. 1). 해양물리 자료 및 해수 시료는 CTD system(Sea-Bird 911 Plus with Carousel water sampler)을 이용해 획득하였으며, 해수 시료는 표층에서 저층까지 수심별로 채수하였다. 해수 중 pH는 pH meter(Orion 3 star, Thermo)를 이용해 현장에서 측정하였으며, 기기는 표준액(Orion pH buffer)을 사용하여 보정하

였다. 용존산소는 CTD system으로부터 획득한 값을 현장에서 Winkler-Sodium Azide 방법으로 측정된 농도로 보정하였다(Parsons et al. 1984). 한편 무기영양염은 현장에서 채수한 시료를 60 mL HDPE(Nalgene) 용기에 담아 곧바로 냉동(-20°C 이하) 보관하였으며, 이후 실험실로 운반하여 영양염 자동분석기 Proxima(Alliance)로 분석하였다(Parsons et al. 1984). 영양염 분석의 정확도는 두 가지 표준물질(RMNS, Kanso; MOOS-2, NRC)로 검증하였다(평균  $105.4 \pm 1.9\%$ , RMNS; 평균  $109.9 \pm 5.8\%$ , MOOS-2). 총유기탄소 분석을 위한 시료는 450°C에서 4시간 이상 태운 40 mL glass amber vial에 냉동 보관 후 실험실로 옮겨 분석하였다. 분석은 Sugimura and Suzuki (1988)의 방법으로 TOC-5000A(Shimadzu)의 자동 시료 투입장치를 이용하여 측정하였으며, 운반 기체는 초고순도 산소 가스(일산화탄소, 이산화탄소, 탄화수소류 <1 ppm)를 사용하였다. 분석은 시료에 2 N HCl(Merck) 첨가 후 3분간 탈기시켜 무기탄소를 제거한 뒤 측정하는 NPOC(non-purgeable organic carbon) 방법으로 측정하였다. Milli-Q 초순수를 자외선으로 처리 후 바탕용액(blank) 및 표준용액 제조에 사용하였고, Milli-Q 초순수를 반복 측정하여 획득한 바탕용액 내 농도를 모든 시료 측정값에서 보정해주었다(Sugimura and Suzuki 1988).

침강입자 플럭스의 장기변동을 관측하기 위하여 KOMO 정점에서 2003년 7월부터 2008년 7월까지 시계열 퇴적물 포집장치를 수심 4950 m에 계류하였으며, 매년 CTD 표층 관측도 병행하였다(Fig. 1). 또한 보존지역과 시험지역 내 침강입자 플럭스의 변동을 비교하기 위하여 두 정점(KOMO와 BIS)에 2011년 8월부터 2012년 6월까지 시계열 퇴적물 포집장치를 수심 4500 m에 계류하였다. 퇴적물



**Fig. 2.** (a) Temperature-salinity diagrams and (b) temperature-dissolved oxygen (DO) diagrams at the KOMO and BIS stations. Water masses were divided into six, and STUW and NEqPIW were located in the zone of low concentration of DO below  $50 \mu\text{M}$  (TSW: tropical surface water, STUW: subtropical underwater, NEqPIW: north equatorial pacific intermediate water, LCPW: lower circumpolar water)

포집장치를 수층에 계류하기 전에 Sodium Borate로 중화된 약 5% 포르말린 용액을 시료 용기에 넣어 포집된 침강입자가 부패하지 않도록 하였다. 시계열 퇴적물 포집장치로 획득한 침강입자 시료는 McLane 사의 WSD-10(Wet sample divider-10)을 이용하여 다섯 등분하였다. 이들 중 일부를 Milli-Q 초순수로 세 번 이상 세척하여 원심 분리한 후에 동결 건조한 다음  $10 \mu\text{g}$  오차를 갖는 저울(Sartorius CP225D, Japan)로 무게를 측정하여 총질량 플럭스를 계산하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 보존지역과 시험지역의 수괴 특성

연구지역이 포함된 북태평양 해역은 아열대 표층수(Subtropical Surface Water, STSW), 열대 표층수(Tropical Surface Water, TSW), 적도 표층수(Equatorial Surface Water, ESW), 아열대 잠류수(Subtropical Underwater, STUW), 남극 중층수(Antarctic Intermediate Water, AAIW), 북태평양 중층수(North Pacific Intermediate Water, NPIW), 북태평양 적도중층수(North Equatorial Pacific Intermediate Water, NEqPIW), 북태평양 심층수(North Pacific Deep Water, NPDW), 극환류수(Lower Circumpolar Water, LCPW) 등 다양한 수괴가 존재하는 것으로 알려져 있다(Fiedler and Talley 2006; Pennington et al. 2006; Bostock et al. 2010). 2011년과 2012년 보존지역에 위치한 KOMO 정점과 시험지역의 BIS 정점에서 수온-염분 도표로부터 파악된 수괴는 크게 6개로 구분되는 특징을 보였다(Fig. 2a). 두 정점의 수온  $15^\circ\text{C}$ (평균 수심  $58 \pm$

$15 \text{ m}$ ) 이상에서는 공통적으로 열대 표층수(TSW) 수괴가 존재하였으며, 여름~가을철에  $11^\circ\text{N}$ 까지 북상하는 적도수렴대(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)와 연관된 강우의 영향으로 해수면 가까이(수심  $20 \text{ m}$  이내)에서는 저염(low-salinity water) 수괴가(Amador et al. 2006; Fiedler and Talley 2006), 그 이하의 수심( $20 \sim 40 \text{ m}$ )에서는 고염(high-salinity water) 수괴가 분포하였다. 이러한 고염 수괴는 북태평양 환류(North Pacific Gyre) 내에 위치하며, 염분  $35 \text{ psu}$  이상을 갖는 아열대 표층수(STSW)의 유입 영향으로 판단된다(Fiedler and Talley 2006). 한편 수온  $10^\circ\text{C}$ (평균 수심  $326 \pm 14 \text{ m}$ )에서  $15^\circ\text{C}$  사이에서는 비교적 고염의 아열대 잠류수(STUW)가(Fiedler and Talley 2006), 수온  $5^\circ\text{C}$ (평균 수심  $882 \pm 19 \text{ m}$ )에서  $10^\circ\text{C}$  사이에서는 북태평양 심층수(NPDW)와 남극 중층수(AAIW)의 조합으로 형성된 북태평양 적도중층수(NEqPIW)가(Bostock et al. 2010), 수온  $5^\circ\text{C}$  이하에서는 남극 저층수(AABW)와 북대서양 심층수(NADW)의 혼합으로 형성된 극환류수(LCPW)가 존재하였다(Fiedler and Talley 2006). 연구지역의 전반적인 수괴 특성은 표층으로부터 수온  $10^\circ\text{C}$ 를 나타내는 수심까지 다양한 수괴 분포를 보인 반면 그 이하에서는 두 정점간 유사하게 비교적 안정적인 형태로 수괴가 존재하였다.

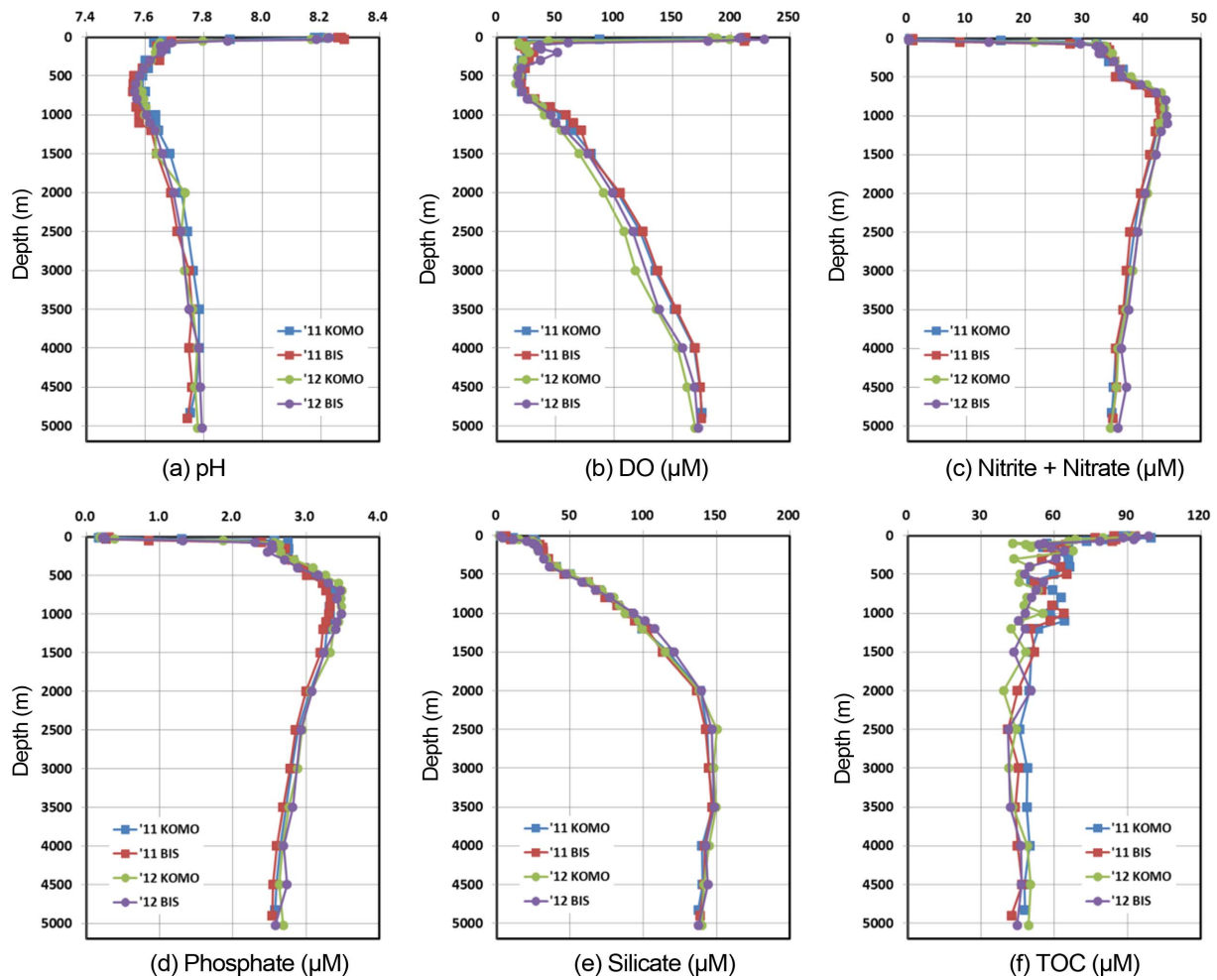
수온-염분 도표로부터 연구 해역에서 파악된 수괴를 수온-용존산소 도표에 적용한 결과에서는 용존산소  $50 \mu\text{M}$  이하의 낮은 농도 영역에 아열대 잠류수(STUW)와 북태평양 적도중층수(NEqPIW) 수괴가 위치하였다(Fig. 2b). 특히하게 두 수괴 사이에서는(특히 2012년 BIS 정점에서) 용존산소 농도가 증가한 현상이 관측되었는데, 이러한

현상은 아북극 환류(Subarctic Gyre)의 서쪽에 위치한 오호츠크해와 알래스카만에 그 기원을 둔 북태평양 중층수 (NPIW, 50~150  $\mu\text{M O}_2$ )의 유입 영향으로 판단된다(Talley 1991; Bostock et al. 2010).

**Table 1. Concentrations of pH, dissolved oxygen (DO), nitrite + nitrate, phosphate, silicate, and total organic carbon (TOC) at the KOMO and BIS stations, and mean values in the abyssopelagic zone (depth range from 4000 m to bottom)**

Year	Station	Range of water column	pH	DO	Nitrite+Nitrate	Phosphate	Silicate	TOC
				$(\mu\text{M})$				
'11	KOMO	SSL <sup>a</sup> ~BOL <sup>b</sup>	7.58~8.20	19.20~212.50	0.29~43.45	0.17~3.38	2.31~147.67	45.65~99.61
		APZ <sup>c</sup>	7.77 $\pm$ 0.02	172.23 $\pm$ 3.42	35.14 $\pm$ 0.34	2.61 $\pm$ 0.04	139.33 $\pm$ 1.54	48.53 $\pm$ 1.18
	BIS	SSL~BOL	7.56~8.28	19.64~212.50	0.72~43.23	0.27~3.33	4.86~146.89	40.88~93.06
		APZ	7.75 $\pm$ 0.01	172.47 $\pm$ 2.87	35.34 $\pm$ 0.34	2.56 $\pm$ 0.03	140.77 $\pm$ 1.80	44.69 $\pm$ 2.15
'12	KOMO	SSL~BOL	7.57~8.22	16.07~198.66	0.08~43.86	0.18~3.49	1.51~150.43	39.11~92.61
		APZ	7.78 $\pm$ 0.01	162.05 $\pm$ 7.38	35.38 $\pm$ 0.65	2.67 $\pm$ 0.03	142.13 $\pm$ 2.42	49.49 $\pm$ 0.66
	BIS	SSL~BOL	7.56~8.23	17.41~228.13	0.07~44.28	0.22~3.48	2.56~148.47	41.04~98.77
		APZ	7.79 $\pm$ 0.01	166.37 $\pm$ 7.01	36.52 $\pm$ 0.71	2.67 $\pm$ 0.08	141.46 $\pm$ 3.42	45.82 $\pm$ 0.96

a: sea surface layer (SSL), b: bottom layer (BOL), c: abyssopelagic zone (APZ, mean value  $\pm$  standard deviation)



**Fig. 3. Vertical profiles of (a) pH, (b) dissolved oxygen (DO), (c) nitrite + nitrate, (d) phosphate, (e) silicate, and (f) total organic carbon (TOC) at the KOMO and BIS stations**



### 수층 환경 인자의 분포 특성

2011년과 2012년 표층부터 저층까지 KOMO 정점에서 측정된 pH는 7.57~8.22의 범위를 나타냈고, BIS 정점에서는 7.56~8.28의 범위를 보였다(Table 1, Fig. 3a). KOMO 정점과 BIS 정점에서 측정된 용존산소(DO) 농도는 각각 16.07~212.50  $\mu\text{M}$ 과 17.41~228.13  $\mu\text{M}$ 의 범위로, 표층에서 가장 높은 값을 보였고, 수심 600 m까지 감소한 후 다시 저층까지 꾸준히 증가하는 전형적인 대양의 분포 양상을 나타냈다(Table 1, Fig. 3b). 두 정점에서 용존산소 농도가 20  $\mu\text{M}$  이하로 존재하는 용존산소 최소층은 수심 400~700 m 사이에 분포하는 것으로 파악되었다(Paulmier and Ruiz-Pino 2009). pH는 두 정점 모두 엽록소 최대층(subsurface chlorophyll maximum)이 존재하는 수심 40 m 내외에서 가장 높은 값을 나타냈고(Son et al. 2011), 수심 증가에 따라 감소하다가 용존산소 최소층이 존재하는 수심 600 m 전후에서 가장 낮은 값을 보였다(Figs. 3a and 3b). 수층 내 수소이온 농도의 증·감 여부를 탄산염 화학 측면에서 살펴보면, 이산화탄소의 증가는 수층 내 수소이온 농도의 증가를, 반대로 이산화탄소의 감소는 수소이온 농도의 감소 결과를 유발한다( $\text{CO}_{2(\text{aq})} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$ ; Millero 2006). 따라서 식물플랑크톤에 의한 광합성 과정이 가장 활발하게 일어나는 엽록소 최대층에서는 이산화탄소가 소모(i.e. 수소이온 농도감소)되어 결과적으로 pH 값이 높아지게 되고, 용존산소 최소층이 존재하는 수심 600 m 부근에서는 미생물에 의한 유기물 분해의 영향으로 이산화탄소가 생성(i.e. 수소이온 농도증가)되기 때문에 가장 낮은 pH 값을 보인다. 한편, 연구시기에 용존산소 최소층 중심부(core)에서 용존산소 농도는 KOMO 정점의 경우 평균  $17.63 \pm 2.21 \mu\text{M}$ , BIS 정점의 경우 평균  $18.53 \pm 1.58 \mu\text{M}$ 로 관측되었다. 이러한 중심부에서 측정된 용존산소 농도는 두 정점이 포함된 북태평양 동부 열대해역(Eastern Tropical North Pacific, ETNP,  $0^\circ \sim 25^\circ\text{N}$ ,  $75^\circ\text{W} \sim 180^\circ\text{W}$ )의 용존산소 최소층 중심부에서 보고된 평균 농도( $14 \pm 3 \mu\text{M}$ ; Paulmier and Ruiz-Pino 2009)와 비교해 수  $\mu\text{M}$  정도 높은 결과이며, 이는 ETNP에서 서쪽 해역으로 갈수록 용존산소 최소층이 확장하며 농도가 증가하는 특성이 반영된 것으로 판단된다(Karstensen et al. 2008).

엽록소 최대층 이하 수심 200 m 이내의 표층에서 용존산소 농도의 두드러진 감소 양상은 KOMO 정점의 경우 평균적으로 수심 30~50 m( $\Delta\text{O}_2/\Delta\text{depth} = -5.67 \mu\text{M}/\text{m}$ ) 사이에서, BIS 정점의 경우 수심 50~70 m( $\Delta\text{O}_2/\Delta\text{depth} = -6.01 \mu\text{M}/\text{m}$ ) 사이에서 관측돼 두 정점간 수심 증가에 따른 감소 비율은 유사하였지만 전반적으로 수심 20 m의 차이를 보였다. 이러한 차이는 표면혼합층의 출현 깊이 및 계절수온약층에 의한 성층화 정도, 표층 생산성, 강우 등

국지적 차이에 의한 영향으로 판단된다. 표층 환경의 국지적인 차이는 보존지역에 위치한 KOMO 정점과 시험지역에 설정된 BIS 정점간의 유사성을 통계적으로 파악한 결과에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 표층을 포함한 전 수층의 동일 수심에서 비교된 KOMO 정점과 BIS 정점간 용존산소 농도 분포의 유사성은 2011년(Chi-square test:  $\chi^2 = 1824.44 > \chi_{0.05,25}^2 = 37.65$ )과 2012년( $\chi^2 = 597.38 > \chi_{0.05,24}^2 = 36.42$ ) 모두 통계적으로 차이가 있는 결과를 나타낸 반면, 국지적 차이를 보인 표층을 제외한 잔사 배출과 같은 인위적인 충격 영향이 있을 것으로 예측되는 수심 200 m 이하부터 해저면(수심 약 5000 m)까지는 두 정점간 차이가 없는 것으로 파악되었다( $\chi^2 = 5.03 < \chi_{0.05,17}^2 = 27.59$ , 2011년;  $\chi^2 = 16.07 < \chi_{0.05,15}^2 = 25.00$ , 2012년).

무기영양염 항목 중 아질산염+질산염(2011~2012년 동안 KOMO: 0.08~43.86  $\mu\text{M}$ , BIS: 0.07~44.28  $\mu\text{M}$ )과 인산염(2011~2012년 동안 KOMO: 0.17~3.49  $\mu\text{M}$ , BIS: 0.22~3.48  $\mu\text{M}$ )의 수직 분포는 두 정점 모두 표면혼합층에서 낮은 농도를 보이다 계절수온약층을 지나면서 급격히 증가한 후, 수심 1000 m까지 꾸준히 증가하다 저층까지 감소하는 전형적인 대양의 분포 특성을 보였다(Figs. 3c and 3d). 특히 2011년과 2012년 두 정점의 수심 500 m 전후에서는 아질산염+질산염 농도의 증가 추세가 다소 약화된 경향이 관측됐는데 이는 용존산소 최소층에서 일어나는 탈질화 과정의 영향으로 판단된다(Quan and Falkowski 2009). 수층환경에서 채광 활동 또는 충격시험에 의한 영향이 보다 직접적으로 미치는 수심 4000 m 이하의 심해수층(abyssopeagic zone)을 대상으로 2011년과 2012년 KOMO 정점에서 파악된 아질산염+질산염(그리고 인산염)의 평균 농도는 오차범위 내에서 유사한 수준을 나타냈으며, BIS 정점 또한 연도별로 큰 차이를 보이지는 않았다(Table 1). 규산염(2011~2012년 동안 KOMO: 1.51~150.43  $\mu\text{M}$ , BIS: 2.56~148.47  $\mu\text{M}$ )의 분포는 표면혼합층에서 급격히 증가한 후 수심 2500 m까지 꾸준히 증가하는 형태를 나타냈으며(Fig. 3e), KOMO 정점과 BIS 정점의 심해수층에서 각각 파악된 규산염의 평균 농도 또한 아질산염+질산염이나 인산염과 마찬가지로 연도별로 유사한 결과를 보였다(Table 1). 한편 앞서 용존산소 분포에서 언급된 바와 같이 표층(수심 0~200 m) 이하에서 무기영양염(N, P, Si) 농도 분포는 KOMO 정점과 BIS 정점이 통계적으로 중요한 차이가 없음을 지시했다( $\chi^2 = 0.13(\text{N})$ ,  $0.01(\text{P})$ ,  $0.94(\text{Si}) < \chi_{0.05,17}^2 = 27.59$ , 2011년;  $\chi^2 = 0.29(\text{N})$ ,  $0.04(\text{P})$ ,  $3.50(\text{Si}) < \chi_{0.05,15}^2 = 25.00$ , 2012년).

해양에서 식물플랑크톤이 무기물을 흡수하여 유기물을 합성하거나 호흡에 의해 유기물이 분해되어 나타나는 원소의 비율은 세포의 유기물을 조성하는 원소 비율과 일정한 관계가 있다. 이러한 비율을 Redfield 비(N:P=16:1)라

일컫는데(Wada and Hattori 1991), 태평양 심층수의 경우 N:P 비가 15:1의 값으로 질소가 다소 부족한 것으로 보고된 바 있다(Anderson and Sarmiento 1994). 또한 실험실에서 다양한 종류의 규조류를 대상으로 배양 실험을 통해 성장에 필요한 Si:N 비는 약 1.1로 파악되었으며, 대양에서 규조류가 성장하기 위해 필요로 하는 Si:N 비는 일반적으로 1로 여겨지고 있다(Brzezinski 1985). KOMO 정점과 BIS 정점에서 아질산염 + 질산염과 인산염 농도로부터 파악된 N:P 비는 13.6으로 본 연구에서 질소계 무기영양염 분석시 고려되지 않은 암모니아 농도를 감안하더라도(북동태평양 지역에서 암모니아 농도는 0.4  $\mu\text{M}$  정도로 알려

짐; Wada and Hattori 1991; Jiang et al. 2003) 연구 해역 전반에 걸쳐 질소가 상대적으로 부족한 상태를 나타냈다(Fig. 4a). 이러한 N:P 비 결과는 인도양과 태평양의 수심 1000~2000 m 사이에서 조사된 결과(N:P ratio 12.5; Anderson and Sarmiento 1994) 보다는 높은 값이지만, 수온이 높고, 빈영양 상태이며, 질소가 제한된 환경에서 우세하게 발생하는 질소 고정이나 아산소/무산소 환경에서 일어나는 탈질화 과정에 의해 기존의 Redfield 비에 비해 낮은 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 한편 규산염 농도와 아질산염 + 질산염 농도로부터 파악된 Si:N 비는 수층 별로 상이한 결과를 나타냈다(Fig. 4b). 해수면(sea surface layer)으로부터 수심 100 m 이내의 유광층(euphotic zone)에서 파악된 Si:N 비는 0.68의 값을, 유광층에서 수심 700 m까지의 용존산소 최소층 사이에서는 4.8의 값을 가졌다. 용존산소 최소층 이하의 수심에서 Si:N 비는 비선형적인 관계를 나타냈는데 이는 아질산염+질산염과 규산염의 상이한 재무기질화 과정(질소: 미생물에 의한 유기물 분해, 규소: 물리적인 용해 과정)이 반영된 결과로 여겨진다. 전 수층을 통해 Si:N 비는 비교적 생물학적 활동이 왕성한 유광층 내에서 규조류가 성장하기 위해 필요로 하는 비율보다 낮아 규조류 성장을 위한 규소 또한 유광층내에서 결핍되어 있음을 시사했다.

대양에서 총유기탄소량(용존성 + 입자성)으로 파악되는 유기물은 생물학적 과정들을 통한 현장 생산성이 주를 이루며, 다양한 생물학적·물리적 과정(e.g. 일차생산, 미생물 분해과정, 표층해류 시스템, 계절수온약층 깊이)에 의해 분포가 결정된다(Doval and Hansell 2000). 연구시기에 KOMO 정점과 BIS 정점에서 분석된 총유기탄소량은 각각 39.11~99.61  $\mu\text{M}$ 과 40.88~98.77  $\mu\text{M}$ 의 범위로, 수직 분포는 표층에서 높고 수심이 깊어질수록 감소하는 분포를 나타냈다(Fig. 3f). 특히 표층에서 관측된 높은 농도는 이후 수심이 증가할수록 감소하는데 박테리아나 원생동물들이 그들의 에너지원으로 유기탄소를 이용하기 때문이다(Hill and Wheeler 2002). 유기물이 주로 생성되는 유광층(수심 100 m 이내)을 대상으로 총유기탄소 농도를 살펴본 결과, KOMO 정점에서는 2011년에 평균 85.85  $\pm$  9.86  $\mu\text{M}$ , 2012년에 평균 79.26  $\pm$  11.95  $\mu\text{M}$ 로 2011년에 비해 8% 정도 감소하였고, BIS 정점에서는 각각 84.65  $\pm$  5.76  $\mu\text{M}$ 과 90.37  $\pm$  7.55  $\mu\text{M}$ 로 2011년에 비해 2012년에 7% 정도 증가하였다. 이러한 차이는 지역적인 표면혼합층 두께, 계절수온약층 출현 깊이 및 성층화 강약 등에 의한 생산성 차이의 영향으로 여겨지지만 그 차이는 크지 않은 것으로 판단된다(Yang et al. 2004). 연도별로 KOMO 정점 그리고 BIS 정점의 심해수층에서 파악된 총유기탄소량은 낮은 농도로 비교적 일정하게 분포하였으며(Table 1), 평균적으로 유광층에서 파악된 총유기탄소량의 55  $\pm$  5% 정도를 차

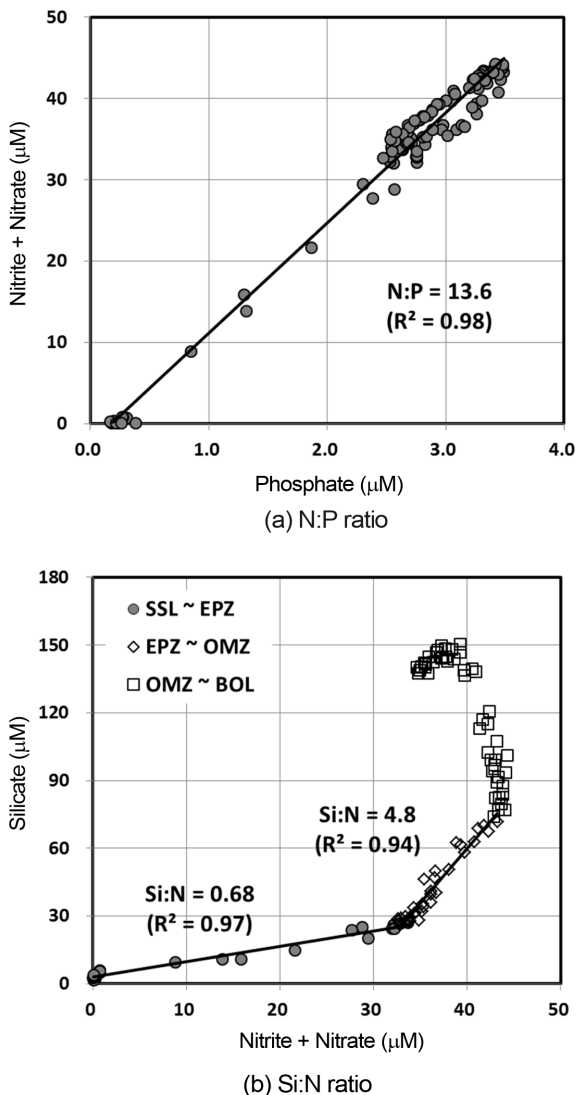


Fig. 4. Molar ratios of (a) nitrite + nitrate to phosphate (N:P ratio) and (b) silicate to nitrite + nitrate (Si:N ratio) at the study sites (SSL: sea surface layer, EPZ: euphotic zone (~100 m), OMZ: oxygen minimum zone (~700 m), BOL: bottom layer (~5000 m))

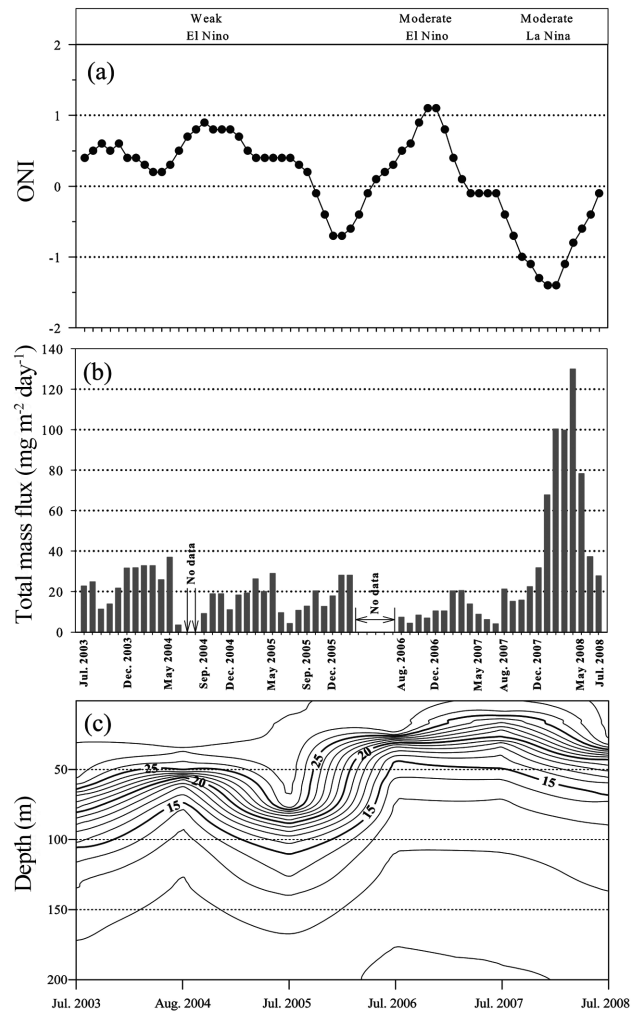
지하였다. 이러한 비율은 Son et al. (2011)이 북동태평양 10°N Thermocline Ridge 해역에서 용존유기탄소의 수직 분포에 exponential decay curve fit 모형을 적용해 수심 200 m에서 파악한 40% 정도의 유기물 감소율과 관측 수심을 감안하면 비교될 만한 수준인 것으로 여겨진다. 한편, KOMO 정점과 BIS 정점 사이의 총유기탄소 농도는 수심 200 m 이하에서 2011년( $\chi^2 = 7.02 < \chi_{0.05,17}^2 = 27.59$ ) 이나 2012년( $\chi^2 = 15.76 < \chi_{0.05,15}^2 = 25.00$ ) 모두 통계적으로 유사하게 분포하였다. 이상의 결과들로부터 확인된 두 정점간 수층 환경 인자들의 유사성은 향후 환경충격시험 수행 시 발생하는 교란 정도를 파악하는데 보존지역 (KOMO)이 기준으로 이용될 수 있음을 지시한다.

### 침강입자 플럭스의 장기변동

Niño 3.4 해역(5°N~5°S, 120°W~170°W)의 해수면 수온 이상치인 Ocean Niño Index(ONI, www.cpc.ncep.noaa.gov)에 근거하여 본 연구해역은 관측기간(2003년 7월~2008년 7월) 동안 두번의 엘니뇨(weak 엘니뇨: 2004년 6월~2005년 2월, moderate 엘니뇨: 2006년 8월~2007년 1월)와 한번의 라니냐(moderate 라니냐: 2007년 9월~2008년 5월)가 출현하였다(Fig. 5a)(Kim et al. 2011).

KOMO 정점의 수심 4950 m에서 5년간 관측된 총질량 플럭스는 3.5~129.9 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 범위에서 변화하였다(Fig. 5b). 총질량 플럭스의 최대값(129.9 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)은 2008년 5월에 관측되었으며, 이는 최소값(3.5 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)을 보인 2004년 6월에 측정된 값보다 40배 정도 높은 값이다. 연구기간 중 엘니뇨/라니냐 기간을 제외한 평상시기(2003년 7월~2004년 5월, 2005년 7월~2006년 2월)에 관측된 총질량 플럭스는 4.2~36.9 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 변화 범위를 보였으며, 평균 값은 22.1 ± 9.3 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>이었다. 엘니뇨 기간(2004/05: 평균 15.9 ± 4.6 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, 2006/07: 평균 7.9 ± 2.3 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>) 동안 관측된 총질량 플럭스는 평상시기보다 낮은 값을 보인 반면, 라니냐 기간(2007/08: 평균 62.4 ± 42.8 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>) 동안 관측된 총질량 플럭스는 평상시기에 비해 3배 가량 높은 값을 보였다. 이러한 침강입자 플럭스의 양적 변화는 엘니뇨/라니냐에 기인된 표층해양 환경변화와 밀접한 관련이 있다. CTD 수온 관측으로부터 파악된 표면혼합층은 라니냐 기간에 가장 얇은 7m에서 관찰되어 용승의 영향을 반영한 것으로 판단된다(Fig. 5c). 하지만 엘니뇨가 관측된 시기에는 수층 내 온도구배가 급격하게 증가하는 양상이 관찰되어 수온약층이 강하게 발달한 것으로 판단되며, 이 영향으로 해양 생산성 및 침강입자 플럭스가 감소한 것으로 여겨진다(Figs. 5b and 5c).

본 연구의 KOMO 정점에서 엘니뇨/라니냐 기간동안 관측된 침강입자 플럭스와 표층환경 변화는 북동태평양



**Fig. 5. (a) Sea surface temperature (SST) anomalies recorded in the Niño 3.4 region (5°N~5°S, 120°W~170°W) and given as Ocean Niño Index (ONI), (b) temporal variations in total mass flux, and (c) average near-surface temperature structure at the KOMO station for the monitoring periods from July 2003 to July 2008**

해역에서 수행된 이전 연구결과들과 잘 일치한다(Dymond and Collier 1988; Honjo et al. 1995; Karl et al. 1995). Dymond and Collier (1988)와 Honjo et al. (1995)은 북동태평양 해역에서 엘니뇨와 라니냐 기간 동안의 침강입자 플럭스 변화를 연구하였다. 이들은 엘니뇨 기간 동안 침강입자 플럭스는 감소한 반면, 라니냐 기간의 총질량 플럭스는 평상시기에 비해 2~3배 높게 관측되었음을 보고하였으며, 이러한 결과는 동태평양 적도해역 표층에서 관찰되는 용승 현상의 강약에 따른 해양 생산성 차이(엘니뇨 기간: 용승 약화, 생산성 감소, 라니냐 기간: 용승 강화, 생산성 증가)의 영향으로 해석하였다(Dymond and Collier 1988; Honjo et al. 1995). 따라서 KOMO 정점을 포함한



북동태평양 해역의 해양 생산성과 침강입자 플럭스는 엘니뇨/라니냐와 같은 기상이변에 큰 영향을 받으며, 이 영향으로 월별 침강입자 플럭스는 40배 정도의 매우 큰 자연 변동을 보였다.

### 연구지역의 침강입자 플럭스 비교

2011년 8월부터 2012년 6월까지 KOMO 정점의 수심 4500 m에서 관측된 총질량 플럭스는  $14.2 \sim 127.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위에서 변화하였으며, 평균값은  $45.3 \pm 33.4 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  ( $n = 11$ )로 관측되었다. 총질량 플럭스의 최대값은 2012년 2월에 나타났으며, 최소값은 2011년 8월에 관측되었다(Fig. 6). 연구기간동안 총질량 플럭스는 겨울~봄철(12월~5월,  $65.4 \pm 33.7 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )에 상대적으로 높았고, 여름~가을철(6월~11월,  $21.1 \pm 5.6 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )에 비교적 낮은 값을 보여 뚜렷한 계절적 차이를 나타냈다. 이러한 침강입자 플럭스의 계절 변화는 통계적으로 유의한 차이를 보였다(ANOVA test:  $F = 15.70 > F_{0.05,1,10} = 4.96$ ).

시험지역 내 BIS 정점에서 관측된 총질량 플럭스는 보존지역 내 KOMO 정점과 유사한 계절 변화를 보였다(Fig. 6). 총질량 플럭스는  $12.4 \sim 115.2 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위에서 변화하였으며, 평균값은  $39.7 \pm 32.3 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  ( $n = 11$ )로 관측되었다. 관측 기간 중 최대값을 보인 2012년 2월의 총질량 플럭스는 KOMO 정점의 같은 시기에 관측된 최대값과 유사하게 나타났다. 또한 BIS 정점에서 관측된 총질량 플럭스는 KOMO 정점과 유사하게 겨울~봄철( $58.0 \pm 34.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ,  $n = 6$ )에 높고, 여름~가을철( $17.8 \pm 6.7 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ,  $n = 5$ )에 비교적 낮은 플럭스를 나타냈으며, 통계적으로도 유의한 차이를 보였다( $F = 10.86 > F_{0.05,1,10} = 4.96$ ). 특히 BIS 정점과

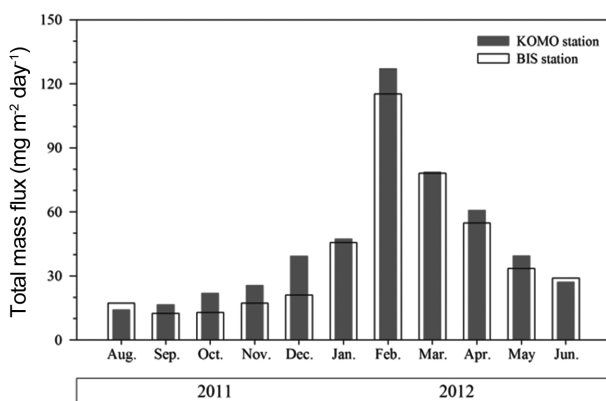


Fig. 6. Temporal variations of total mass fluxes at the KOMO and BIS stations from August 2011 to June 2012. Total mass fluxes at both stations tended to be high in winter-spring (December~May) and low in summer-fall (June~November)

KOMO 정점에서 관측된 총질량 플럭스의 월별 변동은 높은 상관성을 보였다( $R = 0.97$ ,  $n = 11$ ).

북동태평양 해역 내에 위치한 KOMO 정점과 BIS 정점에서 관측된 평균 총질량 플럭스는 각각  $45.3 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 와  $39.7 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 나타났다. 이는 동태평양 적도해역( $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$  in Fig. 7)에서 보고된 총질량 플럭스( $50 \sim 150 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )에 비해 낮았으며, 북동태평양 중위도에 위치한 하와이 인근 해역(ALOHA station in Fig. 7)에서 관측된 총질량 플럭스( $28 \sim 41 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )에 비해서는 약간 높았다(Fig. 7)(Dymond and Collier 1988; Honjo et al. 1995; Karl et al. 1995). 이러한 해역에 따른 총질량 플럭스의 차이는 위도에 따른 일차 생산성의 변화를 반영한다(Honjo et al. 1982; Chavez et al. 1999). 예를 들어, 인공위성(SeaWiFS)을 이용하여 관측한 표층해양 엽록소 농도는 동태평양 적도해역에서 가장 높게 관측되었으며, 북동태평양의 엽록소 농도는 적도해역에 비해 상대적으로 낮게 관측되었다(Chavez et al. 1999; Kim et al. 2011). 따라서 우리나라 망간단괴 광구해역 내 KOMO 정점과 BIS 정점에서 관측된 총질량 플럭스는 적도해역보다 낮은 값을 보였으며, 이는 해역별 일차 생산성 차이를 반영하는 것으로 해석된다.

두 정점(KOMO와 BIS)에서 관측된 총질량 플럭스는 겨울~봄철에 높고, 여름~가을철에 비교적 낮은 값을 보여 뚜렷한 계절변화를 나타냈다(Fig. 8). 이러한 결과는 표층해양 생산성의 계절변동을 반영하는 것으로, 북동태평양 표층의 엽록소 농도는 겨울~봄철( $0.2 \text{ mg m}^{-3}$ )에 높고, 여름~가을철( $0.1 \text{ mg m}^{-3}$ )에 낮은 뚜렷한 계절변동을 보였다(El-Sayed and Taguchi 1979; Dymond and Collier 1988; Haake et al. 1993; Honjo et al. 1995; Pennington et al. 2006; Kim et al. 2011). 또한, 표층에서 생성된 입자의 침강속도는 수심에 따라 증가하는 것으로 알려져 있으며, 태평양에서 입자의 침강속도는 약  $200 \text{ m day}^{-1}$  이상으로 보고된 바 있다(Honjo et al. 1995; Berelson 2002). 따라서 표층에서 심해저층까지 입자의 침강속도는 약 한 달 이내로 판단되며, 이는 표층해양 생산성의 시기적 변동이 심해저층까지 큰 영향을 미치는 것으로 해석된다.

Kim et al. (2011)은 북동태평양 해역에서 침강입자 플럭스를 측정하여 동일한 계절변동 결과를 얻었으며, 이를 적도수렴대의 계절적 위치변화에 의한 영향이라고 해석하였다. 북동태평양 해역에서 적도수렴대는 남동무역풍과 북동무역풍의 상대적인 세기에 비례하여, 계절적으로  $4^{\circ}\text{N}$ 와  $11^{\circ}\text{N}$  사이에서 그 위치가 변화한다(Amador et al. 2006; Romero-Centeno et al. 2007). 적도수렴대의 영향을 받는 해역은 표층 수온이 높고 많은 강우량을 보이며, 바람의 세기가 약해져 수층 내 강한 성층화가 발생하는 것으로

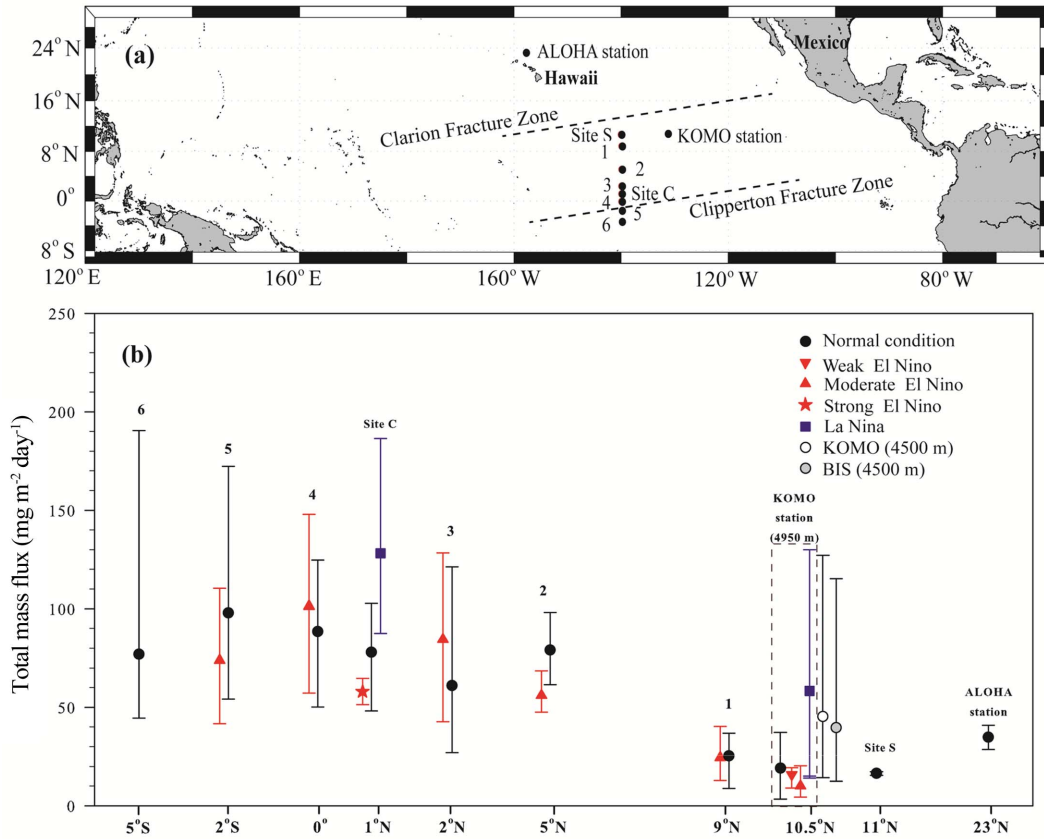


Fig. 7. (a) Map showing the locations of the study area. (b) Total mass fluxes, measured in previous and this studies, carried out in the northeastern equatorial Pacific. The locations of the sites are shown in Fig. 7a. Bars represent the entire error range of observed particle fluxes. Data for El Niño and normal periods at 5°S, 2°S, 0°, 2°N, 5°N, 9°N from Honjo et al. (1995). Data for ENSO and normal periods at Site C and Site S, ALOHA station, and KOMO station are from Dymond and Collier (1988), Karl et al. (1995), and Kim et al. (2011), respectively

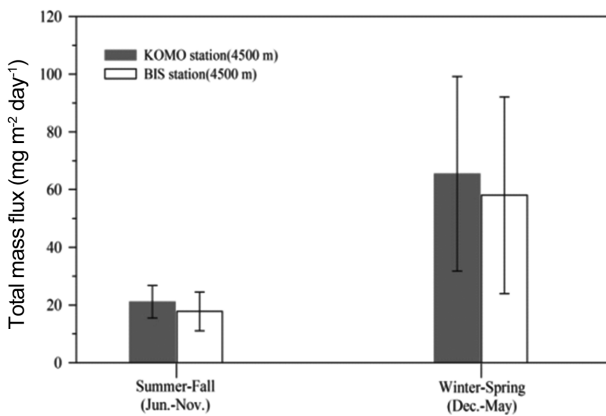


Fig. 8. Average total mass fluxes at the KOMO and BIS stations during the summer-fall and winter-spring seasons. Average total mass fluxes during winter-spring season at both stations were nearly three times higher than those during summer-fall season. Vertical solid bars denote standard deviation

알려져 있다(Amador et al. 2006; McGee et al. 2007; Kim et al. 2011). 여름~가을철에 강한 성층화로 인해 해양 생산성이 감소하며, 이 영향으로 침강입자 플럭스가 낮아지는 것으로 해석된다. 하지만, 겨울~봄철에 적도수렴대는 4°N로 남하하며, 이 영향으로 본 연구해역은 북동무역풍의 세기 증가와 강우량의 감소로 수층 내 혼합층이 깊게 발달하는 것으로 알려져 있다(Kim et al. 2011). 겨울~봄철에 북동무역풍이 증가함에 따라 수층 혼합이 활발해져서 저층으로부터 영양염 공급이 증가되어 해양 생산성 증가로 침강입자가 증가된 것으로 해석된다. 따라서 북동태평양 해역 내에 위치한 두 정점(KOMO와 BIS)에서 관측된 침강입자 플럭스의 계절변동은 적도수렴대 위치의 계절변동에 따른 동일한 해양환경 변화를 반영한 결과로 판단된다. 이는 보존지역과 시험지역이 동일한 해양환경의 영향을 받는 것으로 해석할 수 있으며, 두 지역 자료의 비교를 통하여 향후 환경충격시험의 영향을 정량적으로 평가할 수 있다.

## 4. 결 론

우리나라 망간단괴 광구해역 내에 위치한 보존지역과 환경충격 시험지역을 대상으로 조사한 물리·화학적 수층 특성과 침강입자 플럭스의 장기 변동 특성을 요약하면 다음과 같다.

1) 수온-염분 도표로부터 보존지역과 시험지역의 수심 500~1000 m 사이에서는 북태평양 적도중층수가, 수심 1000 m 이하에서는 극한류수가 동일하게 분포하였다. 광합성(이산화탄소 소모) 및 미생물에 의한 유기물 분해(이산화탄소 발생) 과정에서 유발된 수소이온 농도의 증감 현상이나 용존산소 감소에 따른 무기영양염의 재무기질화 같은 생물·화학적 반응 과정은 표층과 중층을 중심으로 발생하였다. 환경충격시험의 영향이 직접적으로 미치는 수심 4000 m 이하의 심해수층에서 두 지역의 유·무기물 농도는 일정하게 분포하였으며, 보존지역과 시험지역의 수층 환경은 유사한 것으로 파악되었다.

2) 북동태평양 해역에 위치한 보존지역의 침강입자 플럭스는 적도해역에서 기원한 엘니뇨/라니냐와 같은 기상 이변에 따라 큰 차이를 보였으며, 자연 변동량의 범위는  $3.5 \sim 129.9 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 파악되었다. 시계열 퇴적물 포집장치를 이용하여 두 지역(KOMO와 BIS)에서 관측된 침강입자 플럭스는 시기적으로 동일한 계절 변화를 보였다. 겨울과 봄에 관측된 총질량 플럭스와 생물기원 물질 플럭스는 여름과 가을에 관측된 값과 큰 차이를 보였으며, 이러한 계절적 변화의 요인은 적도 수렴대와 관련한 적도 용승대의 계절적 위치 변화에 의한 저층으로부터의 영양염 공급 변화가 표층 생산성의 변화를 일으킨 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 파악된 침강입자 플럭스의 자연 변동량은 망간단괴 광구 탐사권을 보유한 일부 국가들에 의해 수행된 인위적 환경충격시험에 의한 플럭스 변화 범위보다 더 넓은 변화 범위를 보였으며, 이러한 자료는 향후 충격시험으로 발생될 저층 퇴적물의 교란 정도를 파악하고 자연적 복원을 위해 얼마만큼의 시간이 소요될지 등을 이해하는데 중요한 정보를 제공할 것이다. 우리나라 망간단괴 광구해역 내에 설정된 보존지역과 환경충격 시험지역의 물리·화학적 수층 특성과 침강입자 플럭스는 유사하게 나타났다. 선정된 보존지역이 향후 충격시험에 따른 단·장기적 환경영향을 정확하게 평가하고 모니터링하기 위한 비교/기준해역으로서 타당함을 확인할 수 있었다.

## 사 사

본 연구는 해양수산부 R&D 사업인 “태평양 심해저 광물자원 개발(PM57950)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

논문의 완성도를 높이기 위해 세심한 검토와 의견을 주신 심사위원들과 논문게재과정에서 도움을 주신 편집위원회에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Amador JA, Alfaro EJ, Lizano OG, Magana VO (2006) Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: a review. *Prog Oceanogr* **69**:101-142
- Anderson LA, Sarmiento JL (1994) Redfield ratios of remineralization determined by nutrient data analysis. *Global Biogeochem Cy* **8**:65-80
- Berelson WM (2002) Particle settling rates increase with depth in the ocean. *Deep-Sea Res II* **49**:237-251
- Bostock HC, Opdyke BN, Williams MM (2010) Characterising the intermediate depth waters of the Pacific Ocean using  $\delta^{13}\text{C}$  and other geochemical tracers. *Deep-Sea Res I* **57**:847-859
- Brzezinski MA (1985) The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables. *J Phycol* **21**:347-357
- Chavez FP, Strutton PG, Friederich GE, Feely RA, Feldman GC, Foley DG, McPhaden MJ (1999) Biological and chemical response of the equatorial Pacific ocean to the 1997-1998 El Nino. *Science* **286**:2126-2131
- Chung JS, Lee K, Tischler A, Yarim G (2001) Effect of particle size and concentration on pressure gradient in two-phase vertically upward transport. In: *Proceedings 4th ISOPE Ocean Mining Symposium, Szczecin, Poland, 23-27 Sep 2001*, pp 132-138
- Doval MD, Hansell DA (2000) Organic carbon and apparent oxygen utilization in the western south and the central Indian Ocean. *Mar Chem* **68**:249-264
- Dymond J, Collier R (1988) Biogenic particle fluxes in the equatorial Pacific: evidence for both high and low productivity during the 1982-83 El Nino. *Global Biogeochem Cy* **2**:129-137
- El-Sayed SZ, Taguchi S (1979) Phytoplankton standing crop and primary productivity in the tropical Pacific. In: Bischoff JL, Piper DZ (eds) *Marine Geology and Oceanography of the Pacific Manganese Nodule Province*, Pergamon, New York, pp 241-286
- Fiedler PC, Talley LD (2006) Hydrography of the eastern tropical Pacific: a review. *Prog Oceanogr* **69**:143-180
- Glover AG, Smith CR (2003) The deep-sea floor ecosystem: current status and prospects of anthropogenic change by the year 2025. *Environ Conserv* **30**(3):219-241
- Haake B, Ittekkot V, Rixen T, Ramaswamy V, Nair RR, Cury WB (1993) Seasonality and interannual variability of

- particle fluxes to the deep Arabian Sea. *Deep-Sea Res I* **40**:1323-1344
- Hill JK, Wheeler PA (2002) Organic carbon and nitrogen in the northern California current system: Comparison of offshore, river plume and coastally upwelled waters. *Prog Oceanogr* **53**:369-387
- Honjo S, Dymond J, Collier R, Manganini SJ (1995) Export production of particle to the interior of the equatorial Pacific Ocean during the 1992 EqPac experiment. *Deep-Sea Res II* **42**:831-870
- Honjo S, Manganini S, Cole JJ (1982) Sedimentation of biogenic matter in the deep ocean. *Deep-Sea Res* **29**:609-625
- Jiang MS, Chai F, Gugdale RC, Wilkerson FP, Peng TH, Barber RT (2003) A nitrate and silicate budget in the equatorial Pacific Ocean: a couple physical-biological model study. *Deep-Sea Res II* **50**:2971-2996
- Karl DM, Letelier RM, Tupas LM, Dore JE, Christian JR, Winn CD (1995) Ecosystem changes in the North Pacific subtropical gyre attributed to the 1991-92 El Niño. *Nature* **373**:230-234
- Karstensen J, Stramma L, Visbeck M (2008) Oxygen minimum zones in the eastern tropical Atlantic and Pacific ocean. *Prog Oceanogr* **77**:331-350
- Khripounoff A, Caprais JC, Crassous P, Etoubleau J (2006) Geochemical and biological recovery of the disturbed seafloor in polymetallic nodule fields of the Clipperton-Clarion Fracture Zone (CCFZ) at 5000 m depth. *Limnol Oceanogr* **51**(5):2033-2041
- Kim HJ, Hyeong K, Yoo CM, Chi SB, Khim BK, Kim D (2010) Seasonal variations of particle fluxes in the northeastern equatorial Pacific during weak El Niño and normal periods. *Geosci J* **14**:415-422
- Kim HJ, Hyeong K, Yoo CM, Khim BK, Kim KH, Son JW, Kug JS, Park JY, Kim D (2012) Impact of strong El Niño events (1997/98 and 2009/10) on sinking particle fluxes in the 10°N thermocline ridge area of the northeastern equatorial Pacific. *Deep-Sea Res I* **67**:111-120
- Kim HJ, Kim DS, Yoo CM, Chi SB, Khim BK, Shin HR, Hyeong KS (2011) Influence of ENSO variability on sinking-particle fluxes in the northeastern equatorial Pacific. *Deep-Sea Res I* **58**:865-874
- Markussen JM (1994) Deep seabed mining and the environment: Consequences, Perceptions, and Regulations. In: Bergesen HO, Parmann G (eds) *Green Global Yearbook of International Co-operation on Environment 1994*, Oxford University Press, New York, pp 31-39
- McGee D, Marcantonio F, Lynch-Stieglitz J (2007) Deglacial changes in dust flux in the eastern equatorial Pacific. *Earth Planet Sci Lett* **257**:215-230
- Mengerink KJ, Van Dover CL, Ardron J, Baker M, Escobar-Briones E, Gjerde K, Koslow JA, Ramirez-Liodra E, Lara-Lopez A, Squires D, Sutton T, Sweetman AK, Levin LA (2014) A call for deep-ocean stewardship. *Science* **344**:696-698
- Millero FJ (2006) *Chemical oceanography* (3rd ed). CRC Press, Florida, pp 266-277
- MLTM (2011) *The report of deep sea mineral resources development (3rd level): precision environments*. Korea Ocean Research and Development Institute, BSPM55650-2267-5, 69 p, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (in Korean)
- Muthunayagam AE, Das SK (1999) Indian polymetallic nodule program. In: *Proceedings 3rd ISOPE Ocean Mining Symposium*, Goa, India, Nov 1999, pp 1-5
- Nath BN, Khadge NH, Nabar S, Raghukumar C, Ingole BS, Valsangkar AB, Sharma R, Srinivas K (2012) Monitoring the sedimentary carbon in an artificially disturbed deep-sea sedimentary environment. *Environ Moni Assess* **184**:2829-2844
- Oebius HU, Becker HJ, Rolinski S, Jankowski JA (2001) Parametrization and evaluation of marine environmental impacts produced by deep-sea manganese nodule mining. *Deep-Sea Res II* **48**:3453-3467
- Ozturgut E, Lavelle JW, Steffin O, Swift SA (1980) Environmental investigation during manganese nodule mining tests in the North Equatorial Pacific in November 1978. Technical Memorandum ERL MESA-48, NOAA, 50 p
- Parsons TR, Maita Y, Lalli CM (1984) *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, New York, 173 p
- Parthiban G (2000) Increased particle fluxes at the INDEX site attributable to simulated benthic disturbance. *Mar Georesour Geotech* **18**:223-235
- Paulmier A, Ruiz-Pino D (2009) Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean. *Prog Oceanogr* **80**:113-128
- Pennington JT, Mahoney KL, Kuwahara VS, Kolber DD, Calienes R, Chavez FP (2006) Primary production in the eastern tropical Pacific: a review. *Prog Oceanogr* **69**:285-317
- Quan TM, Falkowski PG (2009) Redox control of N:P ratios in aquatic ecosystems. *Geobiology* **7**:124-139
- Rodrigues N, Sharma R, Nath BN (2001) Impact of benthic disturbance on megafauna in Central Indian Basin. *Deep-Sea Res II* **48**:3411-3426

- Romero-Centeno R, Zavala-Hidalgo J, Raga GB (2007) Midsummer gap winds and low-level circulation over the Eastern Tropical Pacific. *J Clim* **20**. doi:10.1175/JCLI4220.1
- Schriever G, Blugm H, Boetius A, Borowski C, Bussau C, Thiel H (1992) DISCOL-precautionary large scale environmental impact studies for future polymetallic nodule mining from the deep sea. In: Proceedings 15th Congreso Mundial de Minería, Madrid, Spain, 1992, pp 1311-1319
- Schriever G, Borowski C, DISCOL working group (2002) Seafloor macrofauna in potential mining areas: Parameters for assessment, recommended techniques and levels of replication. In: Proceedings of the ISA's workshop on the standardization of environmental data and information-development of guidelines, Kingston, Jamaica, 2002, pp 326-368
- Schriever G, Bussau C, Thiel H (1991) DISCOL-precautionary environmental impact studies for future manganese nodule mining and first results on meiofauna abundance. *Proc Adv Mar Tech Conf* **4**:47-57
- Sharma R (2005) Deep-sea impact experiments and their future requirements. *Mar Georesour Geotech* **23**:331-338
- Sharma R, Nagender B, Parthiban G, Sankar SJ (2001) Sediment redistribution during simulated benthic disturbance and its implications on deep seabed mining. *Deep-Sea Res II* **48**:3363-3380
- Son JW, Kim KH, Kim MJ, Son SK, Chi SB (2011) Distribution and inter-annual variation of nutrients (N, P, Si) and organic carbon (DOC, POC) in the Equatorial thermocline ridge, Northeast Pacific. *Ocean and Polar Res* **33**(1):55-68 (in Korean)
- SPC (2013) Deep Sea Minerals. In: Baker E, Beaudoin Y (eds) Manganese nodules, a physical, biological, environmental, and technical review, Vol 1B. Secretariat of the Pacific Community (SPC)
- Sugimura Y, Suzuki Y (1988) A high-temperature catalytic oxidation method for the determination of non-volatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of a liquid sample. *Mar Chem* **24**:105-131
- Talley LD (1991) An Okhotsk Sea-water anomaly-implications for ventilation in the North Pacific. *Deep-Sea Res I* **38**:171-190
- Thiel H (1992) From Meseda to DISCOL: a new approach to deep-sea mining risk assessments. *Mar Mining* **10**:369-386
- Thiel H, Schriever G, Ahmed A, Bluhm H, Borowski C, Vopel K (2001) The large-scale environmental impact experiment DISCOL-reflection and foresight. *Deep-Sea Res II* **48**:3869-3882
- Trueblood DD, Ozturgut E, Pilipchuk M, Gloumov IF (1997) The ecological impacts of the joint US-Russian benthic impact experiment. In: Proceedings 2nd ISOPE Ocean Mining Symposium, Seoul, Korea, 24-26 Nov 1997, pp 139-145
- Van Dover CL (2011) Tighten regulations on deep-sea mining. *Nature* **470**:31-33
- Wada E, Hattori A (1991) Nitrogen in the sea: Forms, Abundances and Rate processes. CRC Press, Florida, pp 71-75
- Yamada A, Yamazaki T, Arai R, Nakatani N (2009) Combined analysis of ecology and economy of manganese nodule mining. In: Proceedings of the 8th ISOPE Ocean Mining Symposium, Chennai, India, Sep 2009, pp 73-79
- Yamada H, Yamazaki T (1998) Japan's ocean test of the nodule mining system. In: Proceedings 8th International Offshore and Polar Engineer Conference, Montreal, Canada, 24-29 May 1998, pp 13-19
- Yamazaki T, Barnett B, Suzuki T (1997) Optical determination of the JET deep sea sediment disturbance. In: Proceedings of the International Symposium on Environmental Studies of Deep-Sea Mining, Tokyo, Japan, 20-21 Nov 1997, pp 153-168
- Yang EJ, Choi JK, Hyun JH (2004) Distribution and structure of heterotrophic protest communities in the northeast equatorial Pacific Ocean. *Mar Biol* **146**:1-15

---

*Received Sep. 28, 2014*

*Revised Nov. 24, 2014*

*Accepted Dec. 3, 2014*