

## Note

## 북동태평양 KOMO 정점에서 수온약층에 따른 무기영양염 분포 특성(1995-2002)

손승규\* · 손주원 · 김경홍 · 강정훈 · 지상범 · 유찬민 · 박정기 · 김웅서

한국해양연구원 해저환경 · 자원연구본부  
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

### Inorganic Nutrient Distributions in Association with Thermocline at KOMO Station in the Northeast Equatorial Pacific Ocean during 1995-2002

Seung-Kyu Son\*, Ju-Won Son, Kyeong-Hong Kim, Jung-Hoon Kang, Sang-Bum Chi,  
Chan Min Yoo, Cheong-Kee Park, and Woong-Seo Kim

Marine Geoenvironment and Resources Research Division, KORDI  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

**Abstract :** Annual variations of inorganic nutrients such as nitrate(+nitrite), phosphate and silicate in association with thermocline were investigated in the upper 200 m of the water column at KODES Long-term Monitoring (KOMO) station in the northeast equatorial Pacific from 1995 to 2002. Global climatic disturbances such as El Niño and La Niña, should have affected KODES area during the study period. In 1995-97 and 2000-2002, a thermocline where temperatures rapidly decrease with depth, was formed at 50-70 m water depth. Nutrient depletion, specially for nitrate and phosphate, was extended down to approximately 50 m depth, which coincided with the surface mixed layer depth. In 1998 and 1999, however a very fluctuating thermocline was observed at 20-100 m water depth. In the photic zone (up to 100 m depth), depth integration of nitrate, phosphate and silicate ranged from 2.02 to 23.14 gN/m<sup>2</sup>, from 0.87 to 4.05 gP/m<sup>2</sup> and from 35.67 to 176.21 gSi/m<sup>2</sup>, respectively. As a result of changes in the water column structures, nutrient concentrations also showed fluctuation parallel to the changes of thermocline in the study area.

**Key words :** 수온약층(thermocline), 영양염류(nutrient), 태평양(Pacific), 한국심해환경모니터링(KOMO)

## 1. 서 론

적도태평양의 표층은 엘리뇨/라니냐의 직접적 영향을 받고 있는 해역으로서 범 지구기후변화 및 탄소순환 등과 관련된 GLOBEC, JGOFS, TOGA, WOCE 등 국제적 프로그램의 주요 연구대상이 되고 있다(Goyet and Peltzer 1994; Murray *et al.* 1995). 지난 10여년 동안 진행된 연구들은 태평양해역에서 발생된 엘리뇨(1991~1993, 1997~

1998)/라니냐(1995, 1999)가 표층의 해수면 변동 및 표층 수온 그리고 부유생물의 분포, 유광층 내의 CO<sub>2</sub> 및 무기 영양염 분포, 일차생산력 등 표층 200 m 이내에서 직접적인 수층생태계의 환경변화요인으로 작용하고 있음을 제시하였다(Feely *et al.* 1995; Kaczmarek and Fryxell 1995; Barber *et al.* 1996; Bidigare and Ondrusek 1996; El Niño theme page 2004). 수온의 급격한 변화에 의해 형성되는 수온약층(thermocline)은 밀도약층(pycnocline) 및 염분약층(halocline)과 함께 수층을 성층화하는 요인으로 작용한다(Millero and Sohn 1992; Ross 1995). 이러한 수온약층

\*Corresponding author. E-mail : skson@kordi.re.kr

은 표층의 수층구조를 결정짓는 중요한 요인으로서 작용하고, 수층의 성층화로 인하여 형성된 서로 다른 환경의 수괴(water mass) 사이에서 화학적 물질교환이 활발히 진행되는 특성을 갖고 있다. 수온약층 변화에 의하여 유발된 화학적 환경 변화는 수층내 생물군집, 개체수 및 분포, 기초생산력 등에 직접적인 변화요인으로 작용될 것이며 결과적으로 수층생태계의 자연적 변동을 지시한다.

본 연구해역은 심해저자원개발과 관련하여 우리나라를 포함한 미국, 캐나다, 영국, 일본, 중국 등 많은 국가들이 UN으로부터 할당받은 등록광구가 위치한 곳이다. UN 해양법협약에 의해 설치된 국제해저기구(International Seabed Authority)는 심해저 다금속단괴의 탐사 및 개발에 대한 규정(Mining Code)을 2000년 7월에 제정하여 환경기초연구에 대한 의무조항을 명시하였다(해양수산부 2001). 환경기초연구는 장래 심해저 망간단괴의 본격적인 상업적 광업활동이 수행될 때 일어날 수 있는 환경교란 및 이에 따른 해양생태계의 변화를 예측하고 이를 최소화하기 위한 환경보전방안의 일환으로서 망간단괴 채취를 위한 탐사 및 개발 초기단계에서 개발해역에 대한 환경특성을 파악하고자 함이다. 이러한 배경으로부터 동태평양 한국심해환경연구(KODES) 해역에 중·장기 모니터링을 위한 정점을 KOMO(KODES Long-term Monitoring)라 명명하였다. 따라서 본 연구는 1995년부터 2002년 사이에 KOMO 정점에서 수온약층 변화에 따른 무기영양염류의 분포특성을 연구하였다. 아울러 범기후변화의 직접적 영향권에 속한 연구해역에서 자연적으로 발생하는 환경요인이 수층의 무기영양염류 분포에 미치는 영향을 파악하여 자연변동량

을 정량화하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구는 연구선 온누리호(한국해양연구원)를 이용하여 동태평양 한국 심해연구해역의 정점 KOMO(10.5°N, 131.5°W)에서 1995년부터 2002년 사이에 수행되었다(Fig. 1). 수온자료는 CTD System(Sea-Bird 911 Plus)으로 얻었으며, 무기영양염류 분석을 위한 해수 시료는 CTD Rosette에 부착된 채수기(Niskin sampler)를 이용하여 수심별로 채수하였다. 채수된 시료는 염산(10% HCl) 처리된 플라스틱 병(60 ml, HDPE)에 담아 냉동 상태에서 실험실로 옮겨진 후 영양염 자동분석기(Alliance, EVOLUTION II)를 사용하여 질산염(아질산염 포함), 인산염 및 규산염을 분석하였다(Parsons et al. 1984). 이때 각 영양염 검정곡선은 표준용액을 이용하여  $R^2 > 0.99$ 로 하였다. 또한 분석된 영양염 자료는 수심별 농도변화를 정량 비교하기 위하여 수심( $\Delta Z$ , unit: m)에 따른 농도증감( $\Delta C$ , unit:  $\mu M$ )의 비( $\Delta C/\Delta Z$ )로 표현하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 연구해역의 수층구조 특성

연구해역 수층은 수온분포에 의해 형성된 수직적 특성과 태평양 표층해류 변화에 따른 수평적 구조 변화에 의하여 크게 영향을 받고 있다. 수층구조는 주로 수온의 분포에 따라 성층화된 표층수, 중층수 그리고 심층수로 분리

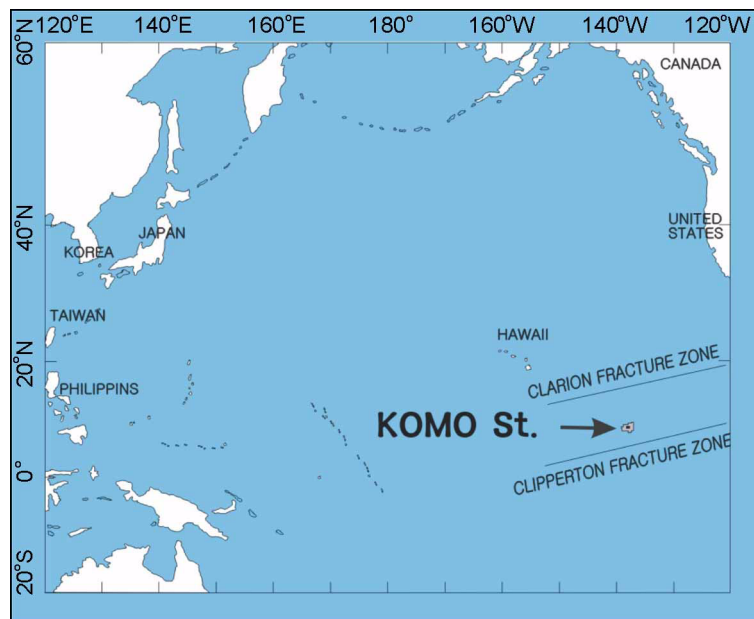


Fig. 1. Map showing sampling station in the northeast Equatorial Pacific.

되고(Millero and Sohn 1992), 표층수는 고온저염수로서 빈영양환경(oligotrophic condition)의 특성을 갖고 있는 표면혼합층(surface mixed layer)과 수온이 급격히 감소하는 수온약층으로 세분된다(Ross 1995; 손 등 2001). 수심 200-1500 m 사이의 증층수는 영구수온약층을 포함하고 수심의 증가에 따라 온도가 감소되는 양상을 보인다. 저층수는 온도변화가 거의 없는 저온수로서 가장 큰 부피를 차지하고 있다(Millero and Sohn 1992). 한편, 연구해역의 수평적 구조에 영향을 주는 표층해류 순환체계는 10°N 북쪽의 북적도류(NEC)와 4°N 남쪽의 남적도류(SEC)가 있으며, 이들 해류 사이 적도반류(ECC)가 동쪽으로 흐르고 있다(Bowden 1975; Pickard and Emery 1982). 무역풍에 의해 형성된 북적도류의 표층 유속은 25-30 cm/s이고, 적도반류는 봄철을 제외하고는 35-60 cm/s의 유속으로 수심 1500 m까지도 영향을 주는 것으로 보고된다(Millero and Sohn 1992). 특히 적도반류의 위치는 4-10°N(Pickard and Emery 1982), 6-9°N(Bitterman and Hansen 1989) 및 4-9°N(Hansen and Swenson 1996) 등 계절 및 기후변동(엘리뇨/라니냐 등)에 따라 남-북 방향으로 수백 km씩 이동하여 나타났다. 흥미로운 사실은 지난 1998년과 1999년에

위도별(북위 5-13°N)로 관측된 결과에서 1998년의 표층해류는 6°30'-8°N 사이 최고 유속 30-40 cm/s의 동향류를 경계로 8°N 북쪽(유속 10-20 cm/s)과 6°N 남쪽(유속 약 50 cm/s)은 서향류가 있었다. 그러나 1999년에는 10°N 이 북에서 서향류가 18 cm/s의 유속으로 흐르고 있었고 남쪽 해역에서 동향류가 70 cm/s의 유속으로 흐르고 있었다. 따라서 1998년은 북적도류와 적도반류의 경계가 8°N 사 이로 추정되는 반면에 1999년은 이들 두 해류의 경계지역 이 10°N 부근에 존재하였던 것으로 사료된다. 결과적으로 북적도류와 적도반류가 만나는 경계해역은 발산(divergence)에 의한 용승현상이 경계지역 부근 표층에서 발생됨에 따라 수온약층은 상승되고 수층구조의 변화를 초래 한다(Pickard and Emery 1982; 해양수산부 1999; 손 등 2001).

#### 수온약층에 따른 무기영양염류 분포변화

무기영양염류는 해양환경 특성을 이해하는 해양화학 분야의 가장 오랜 역사를 갖는 연구 항목으로서(Spencer 1975) 무기 질소, 인 및 규소 등의 생물 친화적 원소는 생물의 성장 제한요인으로 작용하며 생물의 분포와 군집 그

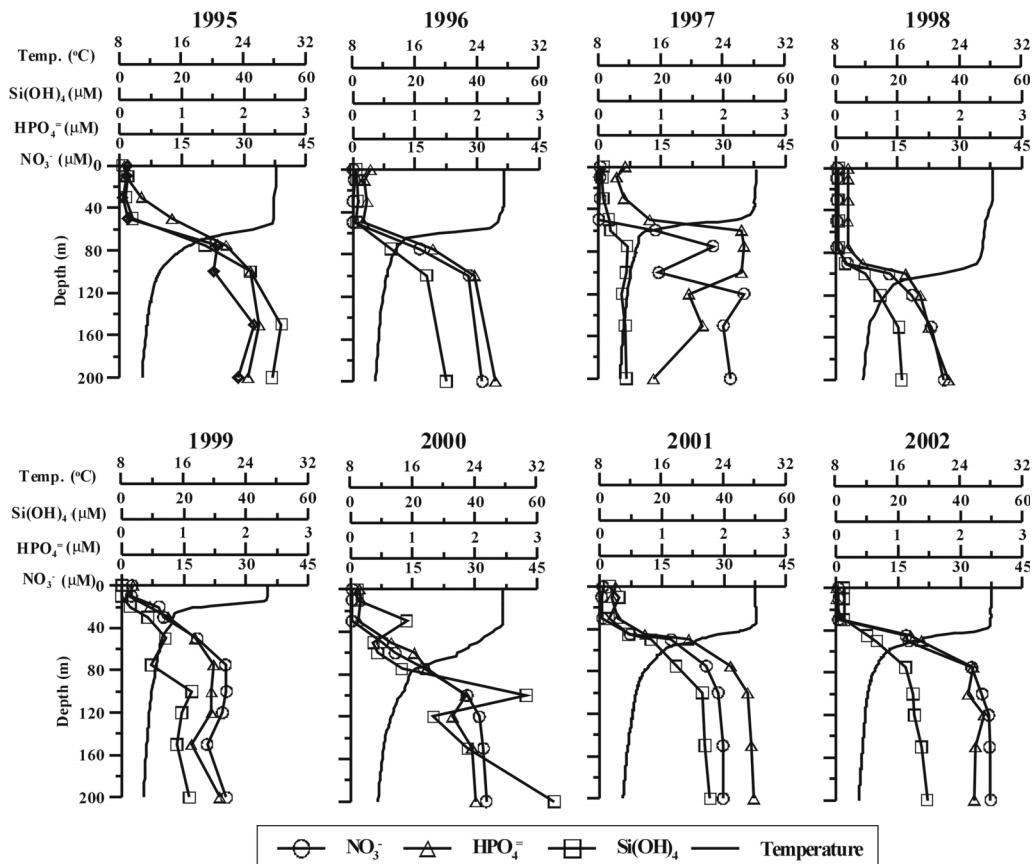


Fig. 2. Vertical profiles of temperature and nutrients in the northeast Equatorial Pacific.

리고 조성 등에 영향을 주고 있다. 또한 수괴내에서 이들 원소의 순환 경로는 먹이사슬 속에서 생산과 소비와 관련된 많은 정보를 제공하고 있다(Broecker 1974; Millero and Sohn 1992). 아울러 연구해역과 같은 외부의 인위적 환경변화가 없는 태평양의 경우 해수 중의 영양염류는 식물플랑크톤에 의해 소비되고 미생물의 유기물분해에 의해 재생산되는 생화학적 순환과정을 갖고 있으며, 해류 및 심층수의 순환 등 물리적 환경요인에 따라 결정된다. 따라서, 대양의 영양염류는 유사한 형태의 수직 분포를 갖고 있으나 심층수의 경우, 무기영양염류의 농도는 태평양이 대서양과 비교하여 2배 이상 높으며 인도양과는 유사하고 용존산소는 대서양의 약 1/2인 것으로 알려져 있다(Spencer 1975).

지난 1995년부터 2002년까지 KOMO 정점에서 관측된 수온과 무기영양염류의 수직분포를 Fig. 2에 도시하였다. 표층 수온은  $27.91 \pm 0.43^\circ\text{C}$ 의 값을 나타냈으며, 고온저염의 표층수가 균일하게 확장된 표면혼합층은 1995년 수심 약 60 m 부근에 형성되었고, 1996년과 1997년 큰 변화를 보이지 않다가 1998년 크게 확장되어 수심 100 m 부근까지 형성되었다. 그러나 1999년의 경우 표면혼합층은 수심 20 m 부근까지 축소되어 나타났으며, 2000년 이후 40 m 부근까지 분포하였다. 이러한 표면혼합층의 바로 아래 수층에는 수온이 급격히 감소하는 수온약층이 강하게 발달하였다. 표면혼합층 이하에서 20-30 m의 폭을 가진 수온 약층에서의 온도변화는 감소의 폭이 완만하였던 2000년도를 제외하면 표층수온보다 10-13°C 이상 감소하였다.

연구해역의 질산염은  $0.24\text{-}37.36 \mu\text{M}$ 의 범위로 분석되었다(Table 1). 질산염의 수직분포는 표층수가 균일하게 확장된 표면혼합층에서  $2 \mu\text{M}$  이하의 저농도로 분포하였고, 수온약층에서는 급격히 증가한 후 증가의 폭이 다소 둔화되는 특징을 보여주고 있었다. 이러한 무기영양염의 수심별 농도변화를 정량비교하기 위한 수단으로 수심의 변화에 따른 농도의 증감비( $\Delta\text{C}/\Delta\text{Z}$ )를 계산하였다. 질산염 농도증감비는  $-0.53\text{-}1.98$ 의 범위를 보였는데, 이때 음의 값은 수심의 증가에 따라 질산염의 농도가 감소한 것을 지시한다. 각 년도별 최대값은 수심에 따라 농도가 가장 크게 변화한 수층을 나타내는 값으로서 표면혼합층과 수온약층과의 경계수심에 분포하였다. 증감비가 1이상의 값은 수심 10 m 변화에 질산염 농도가  $10 \mu\text{M}$  이상 증가된 것을 나타내는 것이다. 최대값은 2001년도 수심 50 m 부근에서 수심 10 m의 변화에 농도가 약  $20 \mu\text{M}$  변화하였다. 향후 이러한 접근 방식을 좀더 보완한다면, 다른 해역과의 비교에도 매우 유용하게 활용될 것으로 사료 된다.

인산염 및 규산염은 각각  $0.01\text{-}2.47 \mu\text{M}$ 와  $0.13\text{-}65.58 \mu\text{M}$ 의 범위를 보였다(Table 1). 인산염의 경우 규산염과 매우 유사한 수직분포를 보인 반면, 규산염은 농도의 증가

**Table 1. Analysed nutrient at KOMO station in the northeast Equatorial Pacific.**

Date	Depth (m)	Nitrate* ( $\mu\text{M}$ )	Phosphate ( $\mu\text{M}$ )	Silicate	N/P molar ratio
07-Jul-95	0	1.92	0.08	1.0	24.01
	10	2.02	0.10	2.7	20.24
	30	0.76	0.36	2.1	2.12
	50	2.00	0.84	4.1	2.38
	75	24.44	1.72	27.5	14.21
	100	22.75	2.11	42.0	10.78
	150	32.34	2.25	52.1	14.37
200	28.65	2.06	49.0	13.91	
17-May-96	0	0.29	0.28	1.0	1.01
	10	0.53	0.18	1.2	2.93
	30	0.27	0.24	1.6	1.16
	50	0.24	0.17	1.2	1.44
	75	16.57	1.29	12.3	12.87
	100	28.27	1.96	23.7	14.40
	200	31.48	2.30	30.0	13.69
30-Jun-97	0	0.49	0.43	1.6	1.14
	10	0.40	0.29	1.1	1.38
	30	0.44	0.41	1.3	1.08
	50	0.42	0.82	3.2	0.51
	60	14.44	2.29	3.8	6.30
	75	27.67	2.33	9.1	11.87
	100	14.51	2.29	8.7	6.34
120	35.05	1.45	7.5	24.17	
150	30.11	1.67	8.5	17.99	
200	31.79	0.88	8.8	36.29	
04-Jul-98	0	0.55	0.21	1.1	2.62
	10	0.46	0.21	0.9	2.18
	30	0.50	0.21	1.0	2.40
	50	0.48	0.20	1.0	2.38
	75	0.47	0.21	1.1	2.24
	90	3.07	0.44	3.1	6.97
	100	13.26	1.13	9.4	11.74
120	19.39	1.37	14.4	14.15	
150	23.22	1.50	20.5	15.48	
200	26.35	1.82	21.3	14.48	
23-Jun-99	0	2.72	0.19	0.1	14.32
	10	2.43	0.12	No data	20.25
	20	9.44	0.46	2.8	20.52
	30	10.50	0.76	8.5	13.82
	50	18.51	1.18	14.1	15.69
	75	25.14	1.48	9.7	16.99
	100	25.37	1.45	22.6	17.50
120	24.40	1.45	19.3	16.83	
150	20.68	1.12	17.7	18.46	
200	25.34	1.58	21.8	16.04	

Table 1. Continued.

Date	Depth (m)	Nitrate* ( $\mu\text{M}$ )	Phosphate ( $\mu\text{M}$ )	Silicate ( $\mu\text{M}$ )	N/P molar ratio
23-Jul-00	0	0.45	0.15	2.2	3.00
	10	0.49	0.16	2.2	3.06
	30	0.44	0.13	18.1	3.38
	50	8.67	0.66	7.4	13.14
	60	11.55	1.02	8.7	11.32
	75	18.17	1.23	16.5	14.77
	100	28.17	1.85	56.5	15.23
	120	31.13	1.64	26.7	18.98
	150	32.16	1.96	37.7	16.41
200	32.82	2.01	65.6	16.33	
17-Jul-01	0	0.77	0.26	3.2	2.92
	10	0.48	0.19	6.2	2.49
	30	0.67	0.29	2.9	2.29
	45	7.36	0.74	9.4	10.01
	50	17.24	1.43	16.5	12.08
	75	25.73	2.10	24.6	12.23
	100	28.58	2.38	33.0	12.02
	150	29.73	2.44	33.8	12.20
	200	29.77	2.47	35.6	12.04
16-Jun-02	0	0.59	0.01	2.6	58.90
	10	0.70	0.01	2.6	69.78
	30	0.62	0.08	2.7	7.54
	45	16.96	1.21	10.1	14.01
	50	17.59	1.38	13.2	12.73
	75	32.78	2.21	22.4	14.83
	100	35.28	2.13	24.8	16.58
	120	36.86	2.39	25.3	15.44
	150	37.08	2.25	27.6	16.48
200	37.36	2.22	29.4	16.82	

\*Nitrate=Nitrate + nitrite

비가 완만하거나 증감이 반복되는 불안정한 분포를 보였다(Fig. 2). 특히 인산염의 농도증감비는  $-0.04-0.15$ 의 값을 보였고, 각 년도별 최대값은 질산염의 최대값을 보인 수층과 동일한 수층에서 나타났다. 이러한 최대값을 보인 수층은 미생물의 유기물 산화에 따른 무기영양염의 재생산과정(nutrient regeneration)이 가장 활성화되어 있음을 지시한다(Millero and Sohn 1992; 손 등 2001). 반면 규산염은  $-1.49-1.60$ 의 증감비를 보였고, 질산염 및 인산염에서와는 달리 다른 수층에서 최대값이 나타나고 있었다. 규산염의 경우 생산과정에서 용해에 의한 재생산 속도가 질소나 인의 생화학적 재생산 속도 보다 빠르지 못하고 완만하며, 질산염 및 인산염과 같은 유기물에서 기인된 것이 아님을 시사한다(Gamo and Horibe 1983).

이상의 결과로부터 수온약층의 변화는 규산염보다는 질

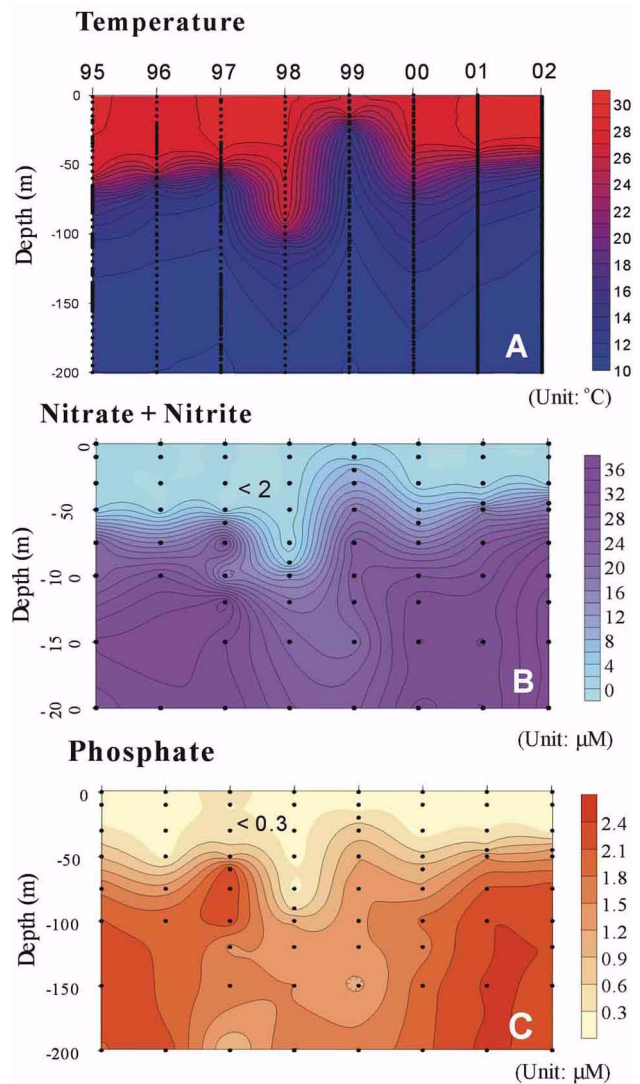


Fig. 3. Vertical profiles of Temperature (A), nitrate + nitrite (B) and phosphate (C) from 1995 to 2002 in the northeast Equatorial Pacific.

산염 및 인산염의 농도 분포에 더 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. Fig. 3에 제시된 바와 같이 연구기간 동안 수온약층을 경계로 상층부에 형성된 표면혼합층은 1998년 최대 100 m까지 확장되었고, 1999년에는 20 m의 최소 폭을 보였다. 이러한 변화의 가장 큰 요인은 1997년 겨울과 1998년 사이 적도 태평양해역에 발생한 엘니뇨(Webster and Palmer 1997)와 이어서 1998년 겨울부터 발생된 라니냐의 영향으로 판단된다(El Niño theme page 2004). 따라서 KOMO정점의 수온약층은 최대 80 m의 변화폭을 갖고 있음을 확인하였다. 또한 수온약층 상부에 형성된 표면혼합층은 질산염의 경우  $2 \mu\text{M}$  이하이고, 인산염은  $0.3 \mu\text{M}$  이하인 빈영양 환경(oligotrophic regions) 특성을 보이고 있었다.

**Table 2. Integrated values of nitrate, phosphate and silicate from 1995 to 2002 at KOMO station in the northeast Equatorial Pacific.**

Year	Nitrate <sup>a</sup>			Phosphate			Silicate		
	gN/m <sup>2</sup>		% <sup>b</sup>	gP/m <sup>2</sup>		%	gSi/m <sup>2</sup>		%
	0-100 m	0-200 m		0-100 m	0-200 m		0-100 m	0-200 m	
Jul-95	13.95	54.60	25.5	3.02	9.73	31.0	39.11	176.21	22.2
May-96	11.04	52.89	20.9	2.15	8.75	24.6	19.29	94.80	20.3
Jun-97	13.15	55.47	23.7	4.05	8.64	46.9	12.27	35.67	34.4
Jul-98	2.02	32.91	6.1	0.87	5.55	15.8	4.78	55.53	8.6
Jun-99	23.14	55.71	41.5	3.09	7.27	42.5	28.03	83.17	33.7
Jul-00	14.13	58.49	24.2	2.36	8.18	28.8	46.64	169.60	27.5
Jul-01	18.99	60.25	31.5	3.73	11.26	33.1	42.93	138.66	31.0
Jun-02	24.07	75.80	31.8	3.60	10.62	33.9	35.64	111.98	31.8
Min.	2.02	32.91	6.1	0.87	5.55	15.8	4.78	35.67	13.4
Max.	24.07	75.80	31.8	4.05	11.26	36.0	46.64	176.21	26.5
Avg.	15.06	55.77	27.0	2.86	8.75	32.7	28.59	108.20	26.4

Nitrate<sup>a</sup>=Nitrate + nitrite

%<sup>b</sup>: Expressed ratio of integrated sum to 0-100 m for 0-200 m depth.

#### 무기영양염의 수층 총량 변화

KOMO 정점에서 무기영양염의 총량과약을 위하여 각 수심에 따라 분석된 자료를 적분하였다(Table 2). 아울러 해양생태계의 일차생산자인 식물플랑크톤의 광합성이 활발히 진행되고 해양생물활동 및 환경변화가 큰 수심 100 m까지의 유광층과 수심 200 m까지의 총량을 비교하였다(Fig. 4).

수심 200 m까지 총 질산염은 32.91-75.80 gN/m<sup>2</sup> 범위와 평균 55.77 gN/m<sup>2</sup>로 2002년에 최대값을 보였고, 1998년에 최소값을 보였다(Table 2). 유광층의 값은 평균 15.06 gN/m<sup>2</sup>의 값으로 수심 200 m까지의 평균총량 중 27.0%를 차지하고 있었다. 한편 최소값을 보인 1998년의 경우 유광층에서의 값은 2.02 gN/m<sup>2</sup>으로 200 m까지 총량의 6.1%만을 차지하고 있었다(Fig. 4). 이러한 결과는 1998년 엘니뇨의 영향으로 연구해역의 표면혼합층이 수심 100 m 부근까지 확대되었기 때문이다. 반면에 라니냐의 영향을 받았던 1999년에는 수온약층의 상승으로 인하여 표면혼합층의 폭은 20 m로 좁게 형성하였고, 유광층에서의 총 질산염은 200 m까지 총량의 41.5%(23.14 gN/m<sup>2</sup>)가 분포하고 있었다. 결과적으로 질산염의 자연변동량은 42.88 gN/m<sup>2</sup>으로 확인되었으며, 이중 유광층에서의 변동량은 최대 22.05 gN/m<sup>2</sup>를 차지하였다.

수심 200 m까지 인산염 총량은 5.55-11.26 gP/m<sup>2</sup>범위와 평균 8.75 gP/m<sup>2</sup>을 보였다(Table 2). 유광층에서의 인산염은 평균 2.86 gP/m<sup>2</sup>값으로 약 32.7%를 차지하였다. 최소값은 질산염의 경우와 같은 해인 1998년에 2.86 gP/m<sup>2</sup>으로 분석되었고, 이중 유광층은 0.87 gP/m<sup>2</sup>를 차지하

였다. 최대 자연변동량은 5.70 gP/m<sup>2</sup>의 결과를 보였고, 유광층은 이중 55.7%인 3.18 gN/m<sup>2</sup>를 차지하였다.

규산염 총량은 35.67-176.21 gSi/m<sup>2</sup>범위와 평균 108.20 gSi/m<sup>2</sup>를 보였다(Table 2). 이중 유광층까지의 총량은 4.78-46.64 gSi/m<sup>2</sup>(평균 28.59 gSi/m<sup>2</sup>) 범위를 차지하였다. 최소값을 나타낸 해는 질산염의 경우와는 다른 해인 1997년에 관측되었고, 유광층은 1998년에 4.78 gSi/m<sup>2</sup>값으로 8.6%를 차지하였다(Fig. 4). 규산염의 최대 자연변동량은 140.53 gSi/m<sup>2</sup>로 산출되었고, 유광층은 이중 29.8%인 41.86 gSi/m<sup>2</sup>를 차지하여 질산염과 인산염에 비교하여 낮은 비율을 차지하였다.

결과적으로 연구해역의 수온약층 변화는 표층 무기영양염류 분포에 직접적인 영향을 주고 있으며, 이러한 영향의 결과로 질산염의 경우 42.88 gN/m<sup>2</sup>, 인산염은 5.70 gP/m<sup>2</sup>, 그리고 규산염은 140.53 gSi/m<sup>2</sup>의 자연변동량을 갖고 있었다. 이중 질산염과 인산염은 유광층의 비중이 약 50% 이상을 차지하여 규산염(30% 이하)보다 더 큰 변화를 받고 있는 것으로 사료된다.

#### KOMO 정점의 환경 특성

연변화 관측을 통하여 KOMO 정점의 환경특성은 크게 정상 환경(normal condition)과 엘니뇨 및 라니냐 등의 자연적 충격에 의한 환경으로 구분된다. Table 3에 지난 1995년 이후 2002년까지 KOMO 정점에서의 분석자료를 토대로 환경적 특성을 제시하였다. 앞서 밝힌 바와 같이 수온약층 변화에 의한 수층의 물리적 구조 변화는 해수 내 무기영양염류의 농도분포에 직접적 요인으로 작용하여



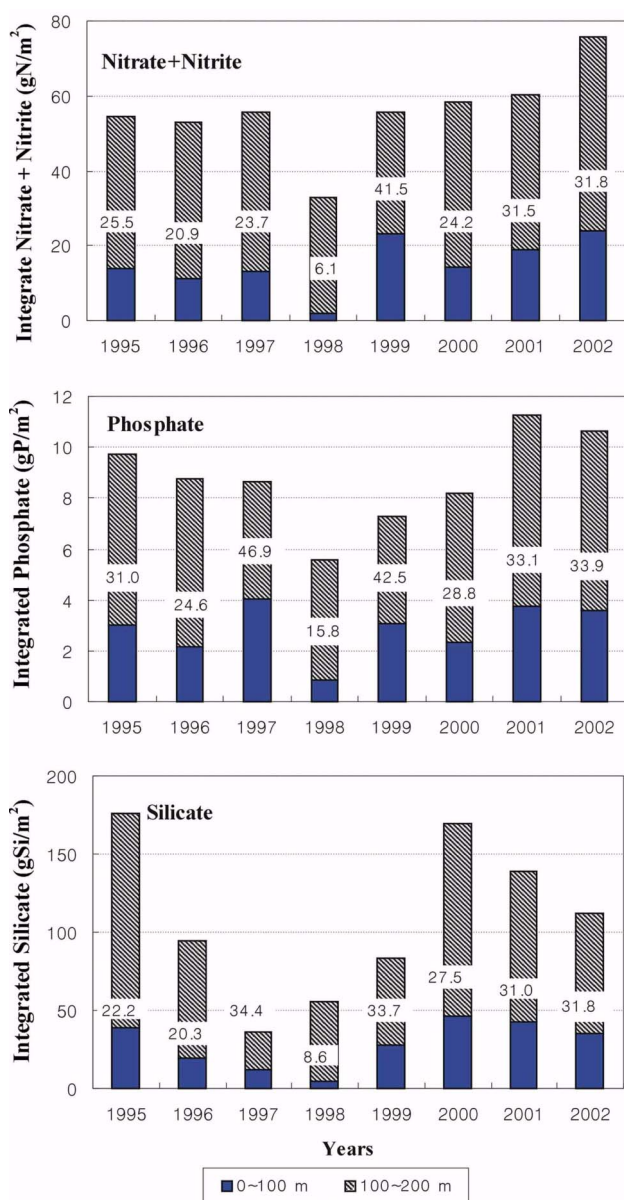


Fig. 4. Integrated values of nitrate + nitrite and phosphate from 1995 to 2002 in the northeast Equatorial Pacific. Marked value (%) expressed ratio of integrated sum to 0-100 m for 0-200 m depth.

표면혼합층에는 질산염 및 인산염의 농도가 낮은 표층수가 존재하였다. 따라서 KOMO 정점의 정상 환경은 수온약층의 수심이 60-90 m 사이에 분포하며, 이로 인해 표면혼합층은 수심 60 m까지 형성된다. 이때 유광층까지의 질소 총량은  $15.89 \text{ gN/m}^2$ 이며, 인과 규소의 총량은 각각  $3.15 \text{ gP/m}^2$  및  $32.65 \text{ gSi/m}^2$ 으로 산출되었다. 엘리뇨 환경에서는 수온약층이 수심 100-120 m 수층으로 하강하며 표면혼합층이 가장 넓게 확장되고, 라니냐환경에서는 이와 반대로 수온약층의 상승으로 인해 표면혼합층은 수심 20 m로 축소된다.

따라서, 엘리뇨 및 라니냐가 연차적으로 발생하는 연구해역은 정상상태에서 자연적 충격에 의한 환경변화를 갖고 있음을 본 연구를 통하여 확인하였다. 특히, 엘리뇨 이후 라니냐환경으로 전환될 때, 유광층에는 질소가 약  $21.12 \text{ gN/m}^2$ , 인 및 규소가 각각  $2.22 \text{ gP/m}^2$ 와  $23.2 \text{ gSi/m}^2$ 이 자연적으로 수층에 유입되는 변화를 갖는다.

연구해역은 심해저 광물자원(망간단괴) 개발과 관련하여 2002년 UN으로부터 우리나라의 등록광구가 확정되었고, 향후 자원개발에 따른 환경영향 파악 및 보전연구를 수행하여야 할 대상이다. 본 연구해역에서 차후 수행될 망간채취 활동 후 발생하는 높은 농도의 부유물질과 간극수 내의 영양염류, 유기물 및 중금속 등은 표층수로 재방출될 수 있다. 이때 고농도의 영양염을 함유하고 있는 저층수 및 공극수 등의 처리는 표층생태계에 심각한 환경교란(environment stress)을 줄 수 있다. 결과적으로 본 연구에서 시도된 자연변동의 정량적 산출은 이러한 인위적 환경충격을 최소화하기 위한 초기연구단계라 할 수 있다. 아울러, 연구결과를 통하여 확인된 자연적 변동은 망간단괴 채광에 따른 인위적 환경변화파악을 위한 환경 모니터링 및 환경영향평가의 중요한 자료로 제시된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 1995년부터 2002년까지 태평양 한국심해연구해역의 KOMO 정점에서 수온약층 변화에 따른 무기영양염의 연간 변화특성을 연구하였다.

Table 3. Environmental characteristics at KOMO station in the northeast Equatorial Pacific.

	Normal condition	El Niño event	La Niña event
Thermocline	60-90 m	100-120 m	20-45 m
SML*	up to 60 m	up to 100 m	up to 20 m
Depth integrated nitrate in the photic zone	$15.9 \text{ gN/m}^2$	$2.0 \text{ gN/m}^2$	$23.1 \text{ gN/m}^2$
Depth integrated phosphate in the photic zone	$3.2 \text{ gP/m}^2$	$0.9 \text{ gP/m}^2$	$3.1 \text{ gP/m}^2$
Depth integrated silicate in the photic zone	$32.7 \text{ gSi/m}^2$	$4.8 \text{ gSi/m}^2$	$28.0 \text{ gSi/m}^2$

SML\*: Surface mixed layer

연구해역의 수층환경은 1) 정상 상태, 2) 엘리노 영향권 그리고 3) 라니냐 영향권 등으로 구분되었다. 수온약층에 의해 성층화된 빈영향환경의 표면혼합층은 정상환경 하에서 수심 60 m까지 분포하였고, 자연적 환경 충격(엘리노/라니냐)에 의하여 수심이 20-100 m까지 변화함을 보여주었다. 또한 자연적으로 발생하는 유광층(수심 100 m까지)에서의 영양염 변화량은 질소의 경우  $22.1 \text{ gN/m}^2$ 이며, 인과 규소는 각각  $3.2 \text{ gP/m}^2$  및  $41.9 \text{ gSi/m}^2$ 임을 확인하였다.

## 사 사

본 연구는 해양수산부 R&D 연구과제인 '심해저광물자원탐사사업'의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 본 논문을 세심하게 검토하고 심사하여 주신 한국해양연구원의 김경태 박사님과 김동선 박사님께 진심으로 감사드립니다. 또한 현장 연구수행에 도움을 주신 온누리호 선장님 이하 전 승조원 분들과 심해저자원연구센터 연구원 모두에게도 감사드립니다.

## 참고문헌

- 손승규, 한정호, 박정기, 지상범, 김기현. 2001. 북동적도태평양 표층 수온변화에 따른 화학적 환경 특성. *한국해양환경공학회지*, 4, 24-37.
- 해양수산부. 1999. '99 심해저 광물자원 탐사 보고서. I 정밀 탐사 및 환경연구. 780 p.
- 해양수산부. 2001. 2000 심해저 광물자원 탐사 보고서. I 정밀탐사 및 환경연구. 594 p.
- Barber, R.T., M.P. Sanderson, S.T. Lindley, F. Chai, J. Newton, C.C. Trees, D.G. Foley, and F.P. Chavez. 1996. Primary productivity and its regulation in the equatorial Pacific during and following the 1991-1992 El Niño. *Deep-Sea Res.*, 43, 933-969.
- Bidigare, R.R. and M.E. Ondrusek. 1996. Spatial and temporal variability of plankton pigment distributions in the central equatorial Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.*, 43, 809-833.
- Bitterman, D.S. and D.V. Hansen. 1989. Direct measurements of current shear in the tropical Pacific Ocean and its effect on drift buoy performance. *J. Atmos. Ocean Technol.*, 6, 274-279.
- Bowden, K.F. 1975. Oceanic and estuarine mixing processes. p. 1-41. In: *Chemical Oceanography*. Vol. 1. eds. by J.P. Riley and G. Skirrow. Academic Press, London.
- Broecker, W.S. 1974. *Chemical oceanography*. Harcourt Brace Jovanovich. 214 p.
- El Niño theme page. 2004. <<http://www.pmel.noaa.gov/tao/elnino/el-nino-story.html#recent>>
- Feely, R.A., R. Wanninkhof, C.E. Cosca, P.P. Murphy, M.F. Lamb, and M.D. Steckley. 1995. CO<sub>2</sub> distributions in the equatorial Pacific during the 1991-1992 ENSO event. *Deep-Sea Res.*, 42, 365-386.
- Gamo, T. and Y. Horibe. 1983. Abyssal circulation in the Japan Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 39, 220-230.
- Goyet, C. and E.T. Peltzer. 1994. Comparison of August-September 1991 and 1979 surface partial pressure of CO<sub>2</sub> distribution in the equatorial Pacific Ocean near 150°W. *Mar. Chem.*, 45, 257-266.
- Hansen, D.V. and M.S. Swenson. 1996. Mixed layer circulation during EqPac and some thermochemical implications for the equatorial cold tongue. *Deep-Sea Res.*, 43, 707-724.
- Kaczmarek, I. and G.A. Fryxell. 1995. Micro-phytoplankton of the equatorial Pacific: 140°W meridional transect during the 1992 El Niño. *Deep-Sea Res.*, 42, 535-558.
- Millero, F.J. and M.L. Sohn. 1992. *Chemical Oceanography*. CRC Press, London. 414 p.
- Murray, J.W., E. Johnson, and C. Garside. 1995. A U.S. JGOFS process study in the equatorial Pacific (EqPac): Introduction. *Deep-Sea Res.*, 42, 275-293.
- Parsons, T.R., Y. Maita, and C.M. Lalli. 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, Frankfurt. 173 p.
- Pickard, G.L. and W.J. Emery. 1982. *Descriptive physical oceanography*. Pergamon Press. 249 p.
- Ross, D.A. 1995. *Introduction to oceanography*. Harper Collins, New York. 496 p.
- Spencer, C.P. 1975. The micronutrient elements. p. 245-300. In: *Chemical Oceanography*. eds. by J.P. Riley and G. Skirrow. Academic Press, London.
- Webster, P.J. and T.N. Palmer. 1997. The past and the future of El Niño. *Nature*, 390, 562-564.

Received Apr. 19, 2004

Accepted Jun. 1, 2004