

북동태평양 심해에서 관측된 퇴적물 입자 플럭스의 계절적 변동

김형직* · 김동선¹ · 형기성 · 김경홍 · 손주원 · 황상철¹ · 지상범 · 김기현 · 김부근²

한국해양연구원 해양자원연구본부
¹한국해양연구원 해양환경연구본부
²부산대학교 지구환경시스템학부

Seasonal Variations of Particle Fluxes in the Northeastern Pacific

HYUNG JEEK KIM*, DONGSEON KIM¹, KISEONG HYEONG, KYEONG-HONG KIM, JU-WON SON,
SANG-CHUL HWANG¹, SANG-BUM CHI, KI-HYUN KIM, AND BOO-KEUN KHMIM²

Marine Resource Research Department, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

¹*Marine Environment Research Department, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

²*Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea*

2003년 7월부터 2005년 6월까지 약 24 개월 동안 북동태평양 대한민국 망간단괴 개발광구 내에 위치한 정점 KOMO (Korea Deep-Sea Environmental Study Long-Term Monitoring Station, 10°30'N, 131°20'W)에서 시계열 퇴적물 포집장치를 설치하여 물질 플럭스를 측정하였다. 약 4,960 m 수심에서 획득된 침강입자의 총질량 플럭스는 겨울(12월-2월)과 봄(3월-5월)에 높고, 여름(6월-8월)과 가을(9월-11월)에 낮은 뚜렷한 계절변동을 보였다. 생물기원 물질플럭스도 총질량 플럭스와 유사하게 뚜렷한 계절변동을 나타냈다. 특히, 겨울과 봄에 관측된 탄산염 플럭스는 여름과 가을보다 두 배가량 높게 측정되어, 다른 생물기원 구성성분들의 계절변동에 비해 가장 크게 나타났다. 심해저층에서 관측된 침강입자의 총질량 플럭스와 생물기원 물질플럭스는 표층 해양 일차 생산력의 계절변동을 반영하는 것으로 생각된다. 겨울과 봄에는 강한 바람의 영향으로 혼합층 아래로부터 영양염의 공급이 증가되어 일차생산력이 높아진 것으로 생각되며, 여름과 가을에는 바람의 약화와 강한 성층으로 인하여 영양염 공급이 약해져서 일차생산력이 감소한 것으로 판단된다. 침강입자의 총질량 플럭스와 생물기원 물질플럭스의 계절적 변동은 이전에 연구된 엘니뇨/라니냐와 같은 환경변화에 따른 물질플럭스의 변화보다 크게 나타났다. 따라서 북동태평양 적도지역에서 엘니뇨와 라니냐 같은 환경변화의 영향에 의한 해양 물질플럭스의 변화를 이해하기 위해서는 일반적인 계절적 변동을 정확하게 측정하여야 한다.

Particle fluxes were measured with a time-series sediment trap from July 2003 to June 2005 at the St. KOMO (KOMO; Korea Deep-Sea Environmental Study Long-Term Monitoring Station, 10°30'N, 131°20'W) in the northeastern Pacific. Total mass fluxes at a depth of 4,960 m showed distinct seasonal variations with high values in the winter (December-February) and spring (March-May) and low values in the summer (June-August) and fall (September-November). Biogenic origin fluxes also displayed distinct seasonal variations similar to total mass fluxes. Particularly, calcium carbonate fluxes in winter and spring were more than two times greater than those in summer and fall. The prominent seasonal variations of total mass and biogenic fluxes were closely related with the seasonal changes of primary production in the surface waters; in winter and spring, primary production increased due to the enhanced supply of nutrients below the surface mixed layer by strong wind and less stratification, whereas it decreased as a result of the less supply of nutrient by reduced wind speed and strong stratification in summer and fall. The seasonal variations of total mass and biogenic fluxes in this study were higher than the differences of total mass and biogenic fluxes caused by the environmental changes such as El Niño and La Niña events in the previous studies. In order to understand the effects of El Niño and La Niña on the particle flux, therefore, the seasonal variation of particle flux in the northeastern equatorial Pacific needs to be well defined.

Keywords: Particle Flux, Sediment Trap, Northeastern Pacific, Seasonal Variation

*Corresponding author: juac29@kordi.re.kr

서 론

시계열 퇴적물 포집장치(Time-series sediment trap)는 해양 표층에서 일어나는 환경변화에 따른 생물상 변화와 대기로부터 유입된 입자의 변화량을 시간의 함수로 기록한다. 따라서 시계열 퇴적물 포집장치는 연구대상 지역의 기초적인 수층 생산성과 수층 내 침강입자 플럭스 변화에 대한 직접적인 정보를 제공하고, 장기 모니터링을 통하여 환경변화에 따른 해양 수층구조변화가 이들 변수에 어떤 영향을 미치는 지에 대해 많은 정보를 제공한다(Ittekkot, 1996; Conte *et al.*, 2001; Kawahata and Gupta, 2004). 그리고 전 지구 탄소순환의 관점에서, 표층 해양의 유기탄소 입자는 대기 이산화탄소를 심해로 제거하는 중요한 경로 중 하나이기 때문에(Kim *et al.*, 2002; Buesseler *et al.*, 2007), 대기 이산화탄소 농도 조절자로서 해양의 역할을 이해하고, 해양에서 탄소의 생지화학적 거동을 파악하기 위하여, 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 수층 침강 입자 플럭스에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔다(Fischer *et al.*, 2000; Honjo *et al.*, 2000; Palanques *et al.*, 2002).

북동태평양 해역은 엘니뇨(El Niño)/라니냐(La Niña)와 같은 기후/해양 환경변화에 영향을 받고 있다(Dymond and Collier, 1988; Honjo *et al.*, 1995; Wanninkhof *et al.*, 1995). 일반적으로 엘니뇨 현상이 발생하면 동태평양 적도해역의 표층 수온이 상승하고, 기압이 낮아지며, 풍속이 약해지는 반면, 라니냐 현상이 발생하면 표층 수온이 하강하고, 기압은 높아지며, 풍속이 강해지는 것으로 알려져 있다(Ross, 1995; McPhaden *et al.*, 1998). 이러한 엘니뇨/라니냐의 발생이 태평양 적도해역 표층의 생산성에 미치는 영향을 밝히기 위하여 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 물질 플럭스 변화 연구를 포함한 다양한 연구가 진행되어 왔다(Dymond and Collier, 1988; Honjo *et al.*, 1995; Kawahata and Gupta, 2004). Dymond and Collier(1988)는 북동태평양 해역(11°N, 140°W)에서 1982년 12월부터 1984년 2월까지 약 14개월간 시계열 퇴적물 포집장치를 이용하여 1983년 1월부터 3월까지 발생한 엘니뇨 영향에 의한 침강 입자의 총질량 플럭스와 유기탄소 변화를 정량적으로 측정하였다. 또한 Honjo *et al.*(1995)은 1992년 2월부터 1993년 1월까지 약 12개월간 시계열 퇴적물 포집장치를 운용하여 1992년 2월부터 7월까지 발생했던 엘니뇨에 의한 침강 입자 물질플럭스의 변화를 관측하였다. 이 두 연구에서는 1983년과 1992년에 발생한 엘니뇨의 영향으로, 북동태평양 해역 침강 입자의 총질량 플럭스와 생물기원 물질플럭스가 증가되었다고 보고하였으며, 이는 El-Sayed and Taguchi(1979)의 연구결과를 근거로 북동태평양 해역에서 일차생산력의 계절적 변동이 거의 없다는 가정 하에 엘니뇨가 해양 침강입자 물질플럭스에 미치는 영향을 평가하였다.

하지만 북동태평양 해역의 표층해수는 계절적으로 약 2°C의 수온변동을 보이며, 염분도 약 1psu의 계절적 변동을 보이는 것으로 보고되었다(Wanninkhof *et al.*, 1995; Fiedler and Talley, 2006). 이러한 계절적인 수온과 염분 변동은 적도수렴대(Inter Tropical Convergence Zone)에 기인된 지역적 용승대(upwelling)의 위치변화와 밀접한 관련이 있다(Amador *et al.*, 2006; Fiedler and Talley, 2006; Romero-Centeno *et al.*, 2007). 북동태평양 해역의 용승대는 빈영양의 표층 해양에 영양염이 풍부한 수온 약층이하의 해수가 공급되는 중요한 지역으로서(Blackburn *et al.*, 1970; Vinogradov,

1981; Barber *et al.*, 1996), 그 위치의 계절적인 변동은 수온과 염분뿐만 아니라, 일차생산력의 변화를 유발하는 중요한 요인으로 판단된다. 앞서 설명한 북동태평양 해역의 계절적인 해양 환경변화로 인한 일차생산력과 동식물 플랑크톤 개체량의 뚜렷한 계절적 변동은 많이 보고되어 왔다(El-Sayed and Taguchi, 1979; Barber *et al.*, 1996; Roman *et al.*, 2002). 따라서 엘니뇨/라니냐와 같은 기후/해양 환경변화에 따른 침강입자 물질 플럭스의 변화를 정확하게 관측하기 위해서는 정상시기(normal condition)의 물질 플럭스를 장기간 관측하여 물질 플럭스의 계절적 변동을 정확히 파악한 후, 기후/해양 환경변화에 따른 물질 플럭스의 변동 값을 해석하여야 한다. 현재 북동태평양지역에는 정상시기의 물질 플럭스에 대한 장기모니터링 결과가 없기 때문에 엘니뇨/라니냐와 같은 환경변화에 따른 물질 플럭스의 변화양상을 정량적으로 해석하는 것이 어려운 상황이다.

이 연구의 목적은 시계열 퇴적물 포집장치를 이용하여 북동태평양 수층 침강입자의 계절적 물질 플럭스 변동을 조사하여 엘니뇨/라니냐와 같은 기후/해양 환경변화에 따른 물질 플럭스의 변동을 정량적으로 파악하는데 있다.

연구 지역 및 연구 방법

연구해역의 표층해류는 바람에 의해 다양한 순환체계로 형성되어 있다(Pickard and Emery, 1982). 서향류인 북적도 해류(North Equatorial Current)와 남적도 해류(South Equatorial Current) 사이에 동향류인 북적도 반류(North Equatorial Countercurrent)가 존재한다. 이 연구의 조사정점인 KOMO(10°30'N, 131°20'W, 수심 약 5,010 m, Fig. 1)는 북적도 해류와 북적도 반류사이 형성되는 북동태평양 해역의 용승대에 위치하며, 이 용승대는 적도 수렴대의 위치변동에 따라 위치변동을 보인다. 적도수렴대는 북동무역풍과 남동무역풍의 상대적인 세기에 비례하여, 계절적으로 북위 4°-11° 사이에서 그 위치가 변동한다(Lavn *et al.*, 2006; McGee *et al.*, 2007; Romero-Centeno *et al.*, 2007). 따라서 정점 KOMO는 여름에 적도 수렴대의 영향으로 바람의 세기가 감소하여 표면혼합층(surface mixed layer)은 수심 50 m이내에 위치하고, 겨울에는 적도 수렴대가 북위 11°에서 4°로 이동하여 여름에 비해 강한 바람의 영향으로 표면혼합층이 수심 75 m까지 발달한다(El-Sayed and Taguchi, 1979). 연구지역을 포함하는 북동태평양 해역은 철결핍으로 일차생산력에 제한을 받을 뿐만 아니라, 표층은 강한 성층으로 인한 질소계 영양염의 고갈현상을 보인다(Lavn *et al.*, 2006; Pennington *et al.*, 2006). 이러한 빈영양조건 때문에 북동태평양 해역에서는 일차생산자 중 초미세플랑크톤(picoplankton)이 주로 우점하고 있다(Pennington *et al.*, 2006).

북동태평양의 대한민국 광구 지역인 KR5(9-11°N, 130-133°W)에 위치한 정점 KOMO에서 2003년 7월부터 2005년 6월까지 시계열 퇴적물 포집장치를 계류(약 4,960m)하였다(Fig. 1). 퇴적물 포집장치를 계류하기 전에 Na-borate로 중화된 약 2% 포르말린 용액을 시료병에 넣어 퇴적물 시료가 부패하지 않도록 하였다. 이 연구에서는 2003년 7월부터 2005년 6월까지 동일한 시계열 퇴적물 포집장치를 이용하여 수층 침강입자를 30일 또는 31일 간격으로 포집하였으나, 기기의 이상(rotator 오류)으로 두 달(2004년 2월과 3월, 9월과 10월)의 침강입자가 동일한 시료용기에 채집되

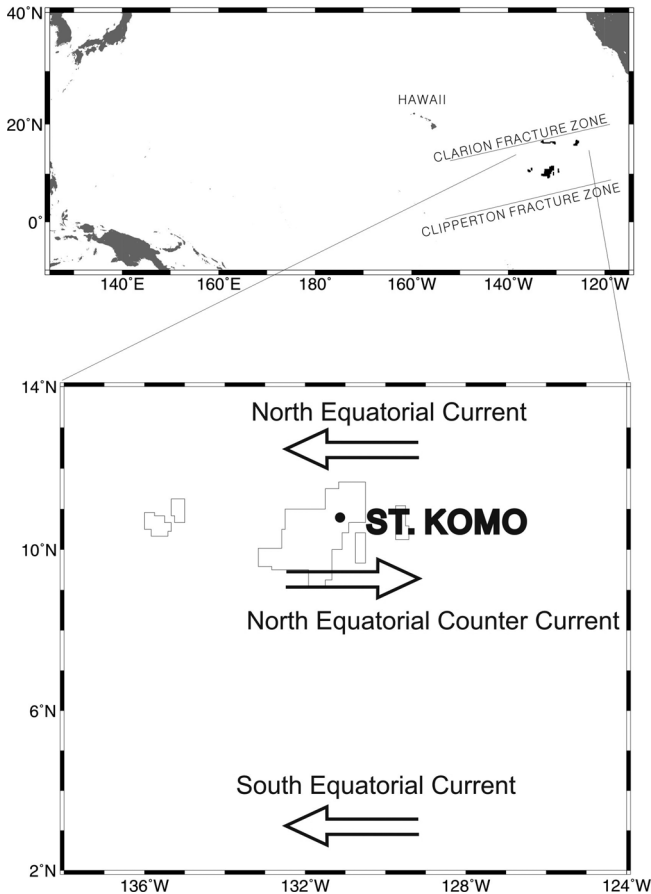


Fig. 1. Sediment trap mooring site located in the Clarion-Clipperton zone of northeastern equatorial Pacific Ocean.

어, 그 시기의 물질 플럭스는 평균값을 사용하였다. 회수된 퇴적물 시료는 지화학 분석과 현미경 관찰을 위하여 McLANE사의 WSD-10(Wet Sample Divider-10)을 이용하여 다섯 등분하였다. 다섯 등분한 시료 중 두 개는 지화학 분석을 위하여 증류수로 세

번 이상 세척하였고, 원심분리한 후에 동결건조하였다. 건조된 퇴적물 시료의 무게를 측정하여 총질량 플럭스를 계산하였다. 총탄소 함량은 CNS 원소분석기(Carlo-Erba EA 1112)를 이용하여 측정하였으며, 분석의 정밀도는 분석 시료들 사이에 약 10개의 표준 시료를 사용하여 약 3%이하로 유지하였다. 유기탄소 함량은 아황산을 사용하여 무기탄소를 제거하는 산 처리법을 이용하였다. 분석을 위해 건조된 퇴적물 시료 4-5 mg을 450°C에서 4시간 동안 태운 은 용기(silver cup)에 넣은 후, 먼저 3차 증류수 30 µl를 첨가한 다음 6% 아황산을 30 µl 첨가하여 자외선 램프를 이용하여 건조시켰다. 탄산염을 완전히 제거하기 위하여 아황산의 양을 40 µl, 50 µl, 60 µl, 70 µl까지 점차 증가시키며 산 처리를 반복한 후, CNS 원소분석기를 이용하여 유기 탄소량을 측정하였다. 유기탄소 분석의 정밀도는 분석중 시료와 시료 사이에 약 10개의 표준시료를 사용하여 약 3%이하를 유지하였다. 무기탄소 함량은 총탄소 함량에서 유기탄소 함량을 빼어 계산하였다. 생물기원규소(SiO₂) 함량은 85°C에서 0.5N 수산화나트륨(NaOH)를 이용하여 시간별로 용해하여 측정하였으며, 규산염(SiO₂)의 분자량을 곱하여 계산하였다(DeMaster, 1981). 시계열 퇴적물 포집장치에 포집된 퇴적물은 유기물질(유기탄소×2; 경험식으로서 총유기탄소의 양을 이용하여 유기물질을 계산하는 방법은 유기물질과 탄소의 분자량 값을 이용하여 환산(Fischer and Wefer, 1996; Iseki *et al.*, 2003)), 생물기원 규소, 탄산칼슘과 같은 생물기원 원소를 제외한 나머지 대부분이 육상기원 쇄설물을 포함한 생물기원 이외의 물질로 구성된다(Honjo *et al.*, 1982; Kim *et al.*, 2002). 따라서 생물기원 이외의 물질 플럭스는 총질량 플럭스와 생물기원 플럭스의 차로 계산하였다. 계절적인 물질 플럭스의 상호 관계는 일원분산분석(Oneway ANOVA test)과 사후비교분석을 실시하여 검증하였다(SPSS 11.5).

결 과

2003년 7월부터 2005년 6월까지 관측된 침강입자의 총질량 플럭스와 생물기원 입자 플럭스는 조사 기간 동안 월별로 큰 차이를 보였다(Fig. 2a). 총질량 플럭스는 3.48-36.9 mg m⁻² day⁻¹의 범

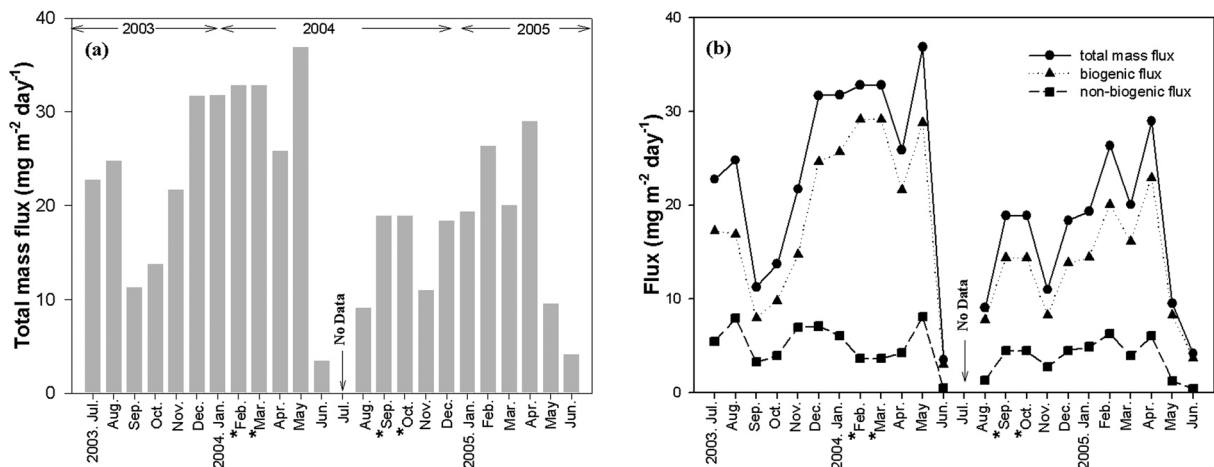


Fig. 2. (a) Temporal variations of total mass flux (mg m⁻² day⁻¹) from July 2003 to June 2005. (b) Monthly variation of total mass flux, biogenic origin flux and non-biogenic flux. [* marks indicated that two months(2004 *Feb and 2004 *Mar, 2004 *Sep and 2004 *Oct) collected one bottle due to the malfunction of sediment trap. Thus, these months fluxes were divided by each days.]

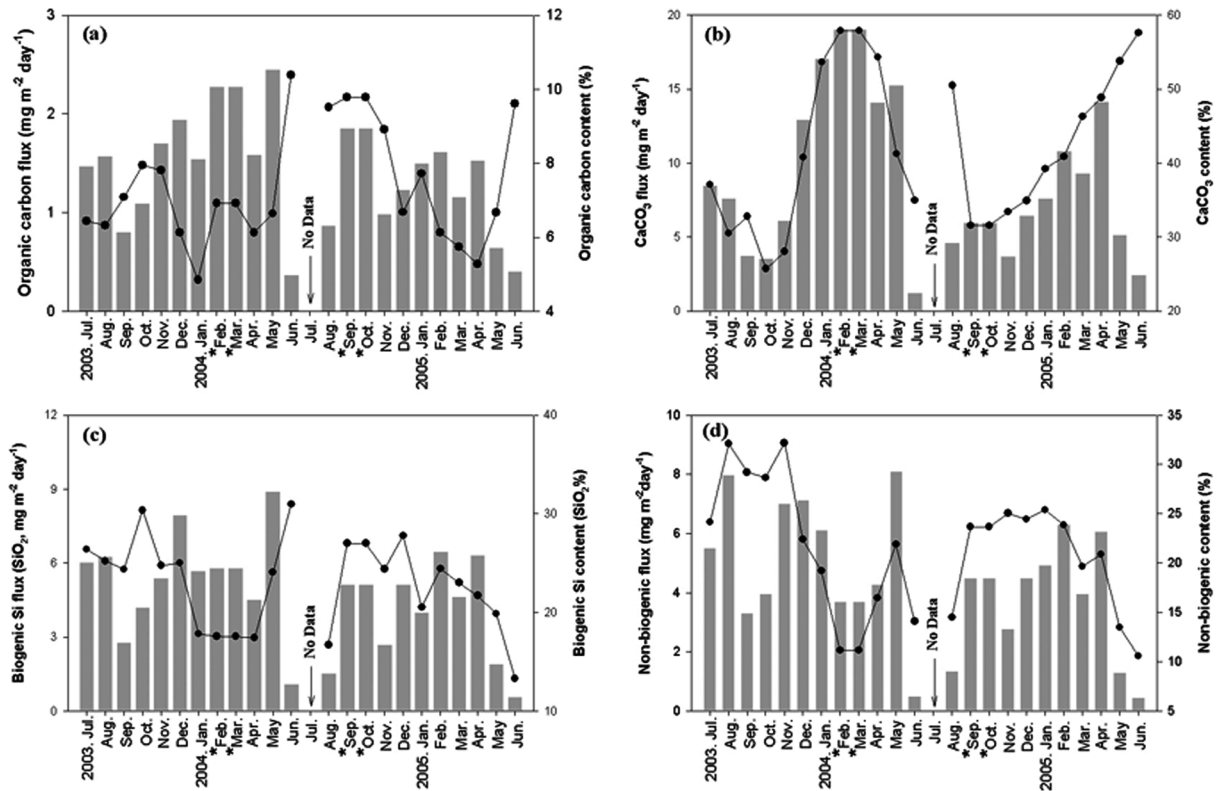


Fig. 3. Monthly variations of (a) organic carbon flux and content, (b) CaCO₃ flux and content, (c) biogenic silica flux and content, and (d) non-biogenic flux and content. Vertical bars denote fluxes, and line and scatter plots are contents.

위에서 변화하였으며, 평균 값은 20.6 mg m⁻² day⁻¹로 나타났다. 총질량 플럭스의 최대값(36.9 mg m⁻² day⁻¹)은 2004년 5월에 나타났으며, 최소값(3.48 mg m⁻² day⁻¹)은 2004년 6월에 관측되었다(Fig. 2a). 유기탄소 플럭스의 범위는 0.36-2.45 mg m⁻² day⁻¹이며, 2004년 5월에 최대값(2.45 mg m⁻² day⁻¹)과 2004년 6월에 최소값(0.36 mg m⁻² day⁻¹)을 나타냈다(Fig. 3a). 탄산염 플럭스는 1.22-19.0 mg m⁻² day⁻¹의 범위에서 변화하였고, 생물기원 성분 중 가장 많은 양을 구성한다. 최고 탄산염 플럭스(19.0 mg m⁻² day⁻¹)는 2004년 2월과 3월에 관측되었고, 최소값(1.22 mg m⁻² day⁻¹)은 2004년 6월에 나타났다(Fig. 3b). 생물기원 규소 플럭스의 범위는 0.55-8.87 mg m⁻² day⁻¹이었고, 2005년 6월에 0.55 mg m⁻² day⁻¹로 최소값을 보였으며, 2004년 5월에 8.87 mg m⁻² day⁻¹로 최대값을 나타냈다(Fig. 3c). 생물기원 이외의 물질 플럭스는 0.44-8.08 mg m⁻² day⁻¹의 변화범위를 보였으며, 최대값(8.08 mg m⁻² day⁻¹)은 2004년 5월에 관측되었고, 최소값(0.44 mg m⁻² day⁻¹)은 2005년 6월에 나타났다(Fig. 3d).

각 구성 성분의 상대적인 값을 나타내는 함량의 변화는 탄산염의 함량이 총질량 플럭스와 유사한 변화양상을 보인 반면, 유기탄소와 생물기원 규소 함량은 다른 경향을 나타냈다(Figs. 3a, 3b and 3c). 유기탄소 함량은 2004년 1월에 최소값(4.85%)과 2004년 6월에 최대값(10.4%)을 보였다(Fig. 3a). 탄산염 함량의 변화 범위는 25.7-57.9%이었고, 최소값과 최대값은 2003년 10월과 2004년 2월과 3월에 각각 관측되었다(Fig. 3b). 생물기원 규소의 함량은 13.3-40.0%의 범위에서 변화하였고, 2004년 6월에 최대값을 보였

으며, 2005년 6월에 최소값을 나타냈다(Fig. 3c). 그리고 생물기원 물질 이외의 물질(육상기원 쇄설물 포함) 함량은 10.6-32.2%의 변화범위를 보였으며, 최대값(32.2%)과 최소값(10.6%)은 2004년 11월과 2005년 6월에 각각 관측되었다(Fig. 3d).

심해저층으로 유입된 침강입자에 함유되어 있는 총질량, 유기탄소, 탄산염, 생물기원 규소 플럭스의 계절 변동을 파악하기 위하여, 약 2년 동안 관측된 자료를 계절별로 나누어 평균값과 표준편차를 계산하였다. 침강입자의 총질량 플럭스는 봄(3-5월, 평균: 25.7±9.79 mg m⁻² day⁻¹)과 겨울(12-2월, 평균: 26.7±6.51 mg m⁻² day⁻¹)에 상대적으로 높았고, 여름(6-8월, 평균: 12.9±10.2 mg m⁻² day⁻¹)과 가을(9-11월, 평균: 15.9±4.50 mg m⁻² day⁻¹)에 비교적 낮은 값을 보여, 두 배 가량의 뚜렷한 계절적 차이를 보였다(Fig. 4a). 유기탄소, 탄산염, 생물기원 규소 플럭스도 총질량 플럭스와 유사한 계절적 변동을 나타냈다(Figs. 4b, 4c and 4d). 특히, 봄과 겨울에 관측된 탄산염 플럭스는 여름, 가을보다 두 배 가량 높게 측정되어, 다른 생물기원 구성 성분들의 계절적 차이에 비해 훨씬 크게 나타났다(Fig. 4c).

토 의

입자 플럭스의 계절적 변동

수층 침강입자는 크게 생물기원과 육상기원 입자로 구성되며, 태평양과 같은 해양환경의 수층 침강 입자는 주로 생물기원으로 구성되어 있다(Collier *et al.*, 2000). 이 연구에서의 침강입자 중

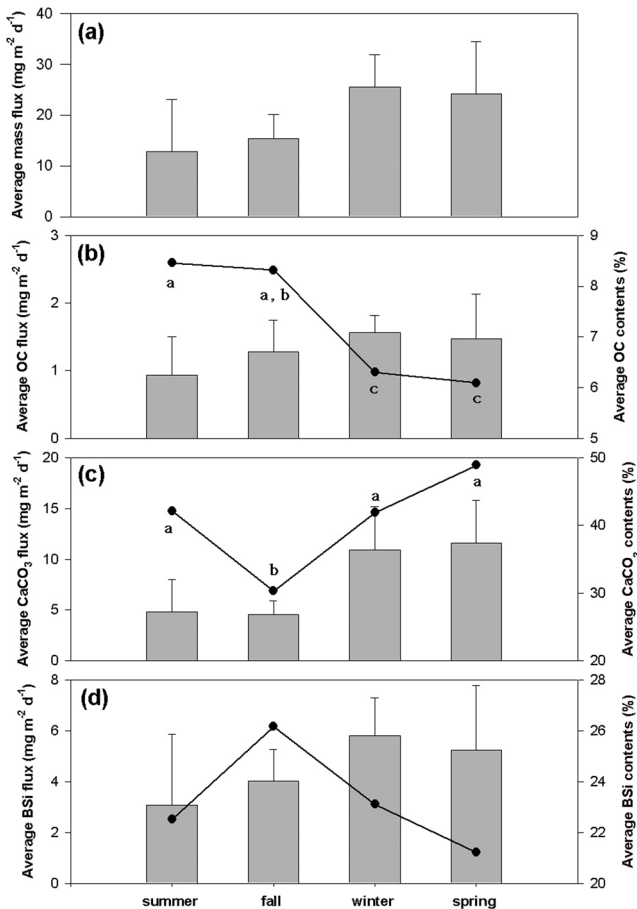


Fig. 4. Seasonal variation of total mass flux and biogenic particle flux: spring(March-May), summer(June-August), fall(September-November), and winter(December-February). Vertical bars showed an average flux with standard deviation. Line and scatter plots denote average contents. Means followed by the same letters are not statistically different as determined Post-Hoc LSD (least significant difference) test at $p=0.05$.

생물기원 물질 플럭스는 총질량 플럭스의 67-89%를 차지하였으며, 총질량 플럭스의 변동과 높은 상관성을 보였다($R=0.98$, $P<0.0001$, Figs. 2b, 6a). 그리고 총질량 플럭스는 탄산염 플럭스($R=0.92$, $P<0.0001$), 생물기원 규소 플럭스($R=0.93$, $P<0.0001$)와 상관성이 매우 높은 것으로 나타나, 이 두 생물기원에 의해 물질 플럭스가 크게 영향을 받고 있는 것으로 생각된다(Figs. 6c, 6d). 생물기원 각 성분들의 계절함량을 일원분산분석(Oneway ANOVA)한 결과, 탄산염 함량($df=19$, $F=5.43$, $p=0.009$)과 유기탄소 함량($df=19$, $F=5.13$, $p=0.011$)은 유의한 차이(significant difference)를 보이는 것으로 분석되었다(유의수준 $p=0.05$; Fig. 4). 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 동태평양 지역의 생물기원 물질 플럭스의 함량은 이미 다른 연구들에서 보고되었으며, 동태평양 심해저층에서 관측된 생물기원 물질 플럭스의 함량은 60-90%를 차지한다고 보고하였다(Honjo *et al.*, 1982; Dymond and Collier, 1988; Honjo *et al.*, 1995). 이들의 연구에서 관측된 탄산염 함량의 변화 범위가 30-60%를 보여, 본 연구결과와 유사한 값을 나타낸다.

침강입자 총질량 플럭스와 생물기원 물질 플럭스의 계절변동은

표층해양에서의 생물활동과 연관이 있는 것으로 생각된다. 연구해역에서 인공위성을 이용하여 2003년 7월부터 2005년 6월까지 측정된 엽록소 농도는 여름과 가을($0.10-0.12 \text{ mg m}^{-3}$)에 비교하여 봄과 겨울($0.14-0.16 \text{ mg m}^{-3}$)에 미약하지만 상대적으로 높았다(Noh, unpublished data). 이러한 엽록소 농도의 계절적 변동은 침강입자 총질량 플럭스의 계절적 변동과도 잘 일치하고 있다. 이러한 연구해역 표층 엽록소농도의 계절적 변동은 다른 연구에서도 이미 보고되었다(El-Sayed and Taguchi, 1979; Pennington *et al.*, 2006). El-Sayed and Taguchi (1979)의 연구에 의하면, 1975년 8월과 9월(여름), 1976년 2월과 3월(겨울)의 엽록소 농도가 여름과 겨울 각각 $0.063\pm 0.04 \text{ mg m}^{-3}$, $0.17\pm 0.059 \text{ mg m}^{-3}$ 로 측정되었으며, Pennington *et al.* (2006)이 1997년 9월부터 2005년 5월까지 인공위성(SeaWiFS)을 이용하여 관측한 북동태평양 해역 표층해양의 평균 엽록소 농도도 봄과 겨울(0.2 mg m^{-3})에 높았고, 여름과 가을(0.1 mg m^{-3})에 낮은 뚜렷한 계절변동을 보였다. 이러한 엽록소 농도의 계절적 변동은 동물플랑크톤 개체수에도 영향을 주어, 동물플랑크톤의 개체수가 1월부터 3월까지 다른 계절에 비해 높게 나타났다(Fernandez-lamo and Frber-Lorda, 2006). 심해에서 관측된 침강입자 총질량 플럭스와 생물기원 물질 플럭스의 뚜렷한 계절변동은 표층해양에서의 생물활동과 밀접한 관계가 있으며, 생물기원 침강입자의 계절적 변동에 의한 것으로 해석된다.

여름과 가을, 겨울과 봄에 관측된 생물기원 물질 함량 중, 탄산염과 생물기원 규소 함량은 서로 높은 음의 상관성($R=-0.86$, $P<0.0001$, Fig. 6f)을 보인 반면, 유기탄소와 생물기원 규소 함량은 유사한 변동을 보였으며(Fig. 4), 유기탄소와 생물기원 규소 플럭스는 서로 높은 양의 상관성을 보였다($R=0.87$, $P<0.0001$, Fig. 6e). 이러한 결과에 따르면, 본 연구해역에서 침강유기탄소의 주된 유입원은 생물기원 규소 기원에 의한 것으로 생각할 수 있다. Honjo *et al.* (1982)의 연구에 의하면, 유기물질은 동물 플랑크톤의 배설물인 fecal pellet, 동식물플랑크톤의 사체 등으로 구성되며, 생물기원 규소는 방산충(radiolarian), 규조류(diatom)등이고, 표층 해양의 생물기원 탄산염은 유공충, 원석조류(coccolith) 그리고 익족류(pteropod)등에 의해 기원한다고 보고하였다(Poulton *et al.*, 2007). 연구해역의 여름과 가을에 관측된 생물기원 규소와 유기탄소 함량의 증가는 식물플랑크톤인 규조류, 소형 동물플랑크톤(microzooplankton)인 방산충의 번성, 요각류와 같은 동물플랑크톤 배설물의 영향으로 생각된다. 동물플랑크톤의 계절적 개체수 변화와 관련한 Fernandez-lamo and Frber-Lorda (2002)의 연구에 의하면, 북동태평양 해역의 동물플랑크톤 개체수는 계절적으로 변동을 보이며, 다른 시기에 비해 1월과 3월에 높다고 보고하였다. 또한 북동태평양 해역은 철 결핍으로 규조류의 증식이 어려운 환경이라고 설명하였다. Fernandez-lamo and Frber-Lorda, 2002. 따라서 본 연구해역의 생물기원 규소는 주로 규조류보다는 방산충 등에서 기원된 것으로 해석된다. 겨울과 봄에 나타난 탄산염 함량의 증가는 원석조류나 유공충, 익족류의 개체수 증가로 인한 현상으로 생각된다. 일반적으로 태평양 해역의 원석조류는 5-20 μm 의 상대적으로 작은 크기를 나타내며, $10^4-10^7 \text{ cells l}^{-1}$ 의 밀도를 보인다. 특히 연구해역을 포함한 북동태평양 해역의 경우, *Umbellosphaera irregularis*와 *Emiliania huxleyi*가 우세하게 분포하며, 약 $10^3-10^4 \text{ cells l}^{-1}$ 로 존재한다고 보고하였다(Honjo and Okada, 1974). 태평

양 해역의 유공충과 익족류는 100 μm -5 mm의 비교적 큰 크기와 10²-10⁴ cells l⁻¹의 밀도를 보이며(Poulton *et al.*, 2007), 연구지역을 포함한 북동 태평양 해역에 서식하는 부유성 유공충은 약 50 shells l⁻¹로 나타난다고 보고하였다(Watkins *et al.*, 1998). 연구해역의 경우, 유공충에 비해 원석조류 개체수가 많이 존재하는 것으로 보고되었지만, 원석조류는 입자 크기가 작아서 심해저층으로 침강하는 동안 용해 영향(dissolution effect)을 많이 받는 것으로 보고되었을 뿐만 아니라(Honjo *et al.*, 1982), 침강속도가 유공충보다 느려 탄산염 보상심도 이하 수심에서의 탄산칼슘 플럭스에도 미미한 영향을 미칠 것으로 생각된다. 하지만 유공충은 입자 크기가 커서, 침강속도가 원석조류보다 빠르기 때문에 용해영향을 받기 전에 심해저층으로 퇴적될 수 있다. 이와 관련하여, Takahashi and Be(1984)는 북대서양의 표층해양에 서식하는 부유성 유공충이(150 μm 이상 크기) 약 3,800 m까지 침강하는데 약 3일에서 12일 걸린다고 보고하였다. 결과적으로 연구해역의 여름과 가을에는 방산충이 번성한 것으로 추측되며, 겨울과 봄에는 원석조류와 유공충이 우점하는 것으로 여겨진다.

연구 해역인 북동태평양에서 이미 보고된 표층 해양 염류소 농도와 동물 플랑크톤 개체수의 계절적 변동, 그리고 계절적 해양 생물 군집변화는 저층수의 용승에 의한 영양염 공급의 계절적인 변동에 의해 야기된 것으로 생각된다. 일반적으로 연구해역을 포함하는 북동태평양 “10°N Thermocline Ridge” 해역의 표층 해양은 질산염이 고갈된 빈영양 상태(Oligotrophic condition)이며, 수온약층이 50-100 m사이에 강하게 발달해 있다(Fiedler and Talley, 2006; Pennington *et al.*, 2006). 표층 해양의 인산염(phosphate: 0.2 $\mu\text{mol kg}^{-1}$), 질산염(nitrate: 0.1-0.5 $\mu\text{mol kg}^{-1}$), 규산염(silicate: 1-2 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) 농도는 수온약층 이하 수심(100-200m)보다 매우 낮게 관측되었다(Fiedler and Talley, 2006). 따라서 빈영양 상태인 연구 해역의 표층 일차생산력은 저층으로부터 유입되는 영양염의 공급에 의해 결정된다(Blackburn *et al.*, 1970; Barber *et al.*, 1996; Hyun *et al.*, 1998). 인근해역인 NOAA/TAO Project Office(9°N, 140°W)에서 관측한 수온, 염분 그리고 바람의 세기는 봄과 겨울 동안에 27.3 °C 이하의 비교적 낮은 수온과 33.9-34.8‰의 높은 염분을 나타냈고, 바람의 세기가 6.4-8.2 m s⁻¹로 강하였으며, 0-0.28 mm hr⁻¹의 적은 강우량이 보고되었다(Fig. 5). 이에 반하여, 여름과 가을 동안에는 28 °C 이상의 높은 수온과 33.4-34 psu의 낮은 염분을 나타냈으며, 겨울과 봄에 비해 바람의 세기가 3.3-6.6 m s⁻¹로 감소되었고, 강우량은 0.06-0.67 mm hr⁻¹로 나타나 상대적으로 높게 관측되었다(Fig. 5). 이러한 북동태평양 표층해수와 기상의 계절적인 변동은 남동, 북동 무역풍의 계절적 강도변화에 따른 적도수렴대의 위치변동과 관련이 있는 것으로 판단된다. 일반적으로 적도수렴대가 위치한 해역은 많은 강우량을 보였으며, 표층해수의 수온이 증가하였고, 바람의 세기가 약해진다고 보고되었다(Holton, 2004; Amador *et al.*, 2006; Romero-Centeno *et al.*, 2007). 연구해역의 여름과 가을에는 적도수렴대의 영향권에 위치하여 강우량의 증가로 표층 해수의 염분이 감소하고, 수온이 증가하여 표층해수에서 성층화가 강하게 발생한다. 따라서 여름과 가을에는 강한 성층화로 인해 저층에서 표층으로 영양염의 공급이 제한되어 해양 생산성이 감소하게 된다. 그러나 봄과 겨울에는 적도수렴대의 남하에 따른 바람의 세기 증가와 강우량의 감소로 표층 해양

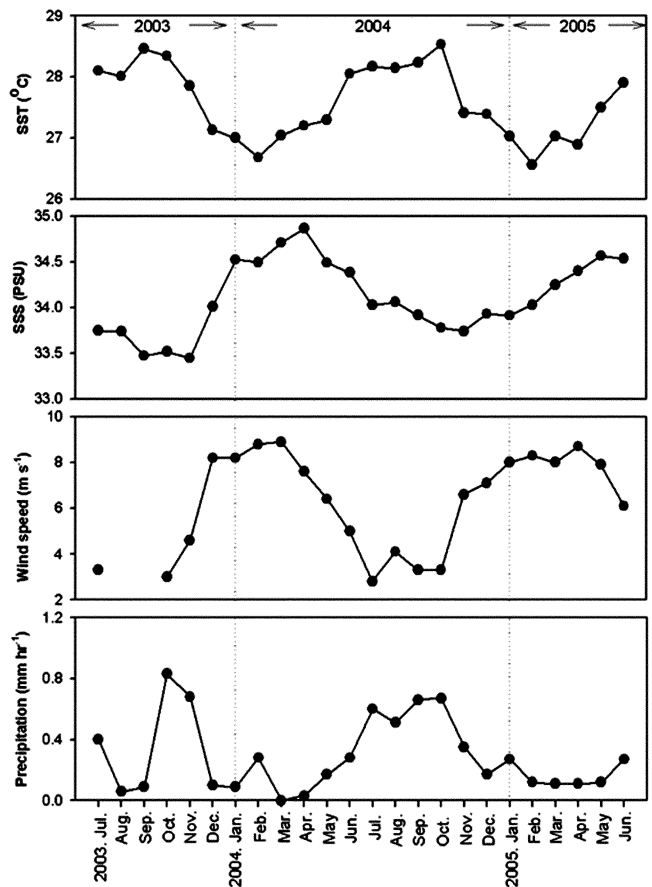


Fig. 5. Monthly variation of sea surface temperature(SST), sea surface salinity(SSS), wind speed, and amount of precipitation obtained from the Tropical Atmosphere Ocean project time series data (9°N, 140°W).

의 염분이 증가하고, 수온이 감소하여 표층 해양의 성층화가 상대적으로 약화된다. 또한 바람의 세기가 여름과 가을에 비해 상대적으로 증가함에 따라 수층혼합이 활발해져서, 저층으로부터의 영양염 공급이 증가되어 표층 해양의 일차생산력이 증가하게 된다. 결과적으로 북동태평양 연구해역에서 관측된 총질량 플럭스와 생물기원 물질 플럭스의 계절변동은 적도 수렴대 위치의 계절적 변동과 바람의 세기 변동에 따른 수층의 혼합 차이에 의한 표층의 생물 생산성의 변화 때문인 것으로 생각된다. 북동태평양 표층 해양에서 관측된 염류소 농도의 계절적 변동과 심해저층에서 획득된 물질 플럭스의 계절적 변동이 유사하게 관측되어, 표층해양 환경변화가 심해저층의 물질 플럭스에 잘 반영되는 것으로 여겨진다.

표층 해양 입자 플럭스와 심해저층 입자 플럭스의 관련성

심해저층에서 획득된 시료를 표층 해양 생산력의 계절변화와 연관시키기 위해서는 해양 표층에서 심해 저층까지 입자의 침강 속도(settling velocity), 그리고 퇴적물의 재부유(resuspended deposit sediment)와 수평이동(rebound flux)의 문제점을 고려해야한다(Gnanadesikan, 1999; Lampitt *et al.*, 2000; Berelson, 2002). 태평양과 대서양에서 시계열 퇴적물 포집장치를 이용하여 관측된 생물기원 입자의 침강속도는 약 70-180 m day⁻¹로 보고되었다(Honjo

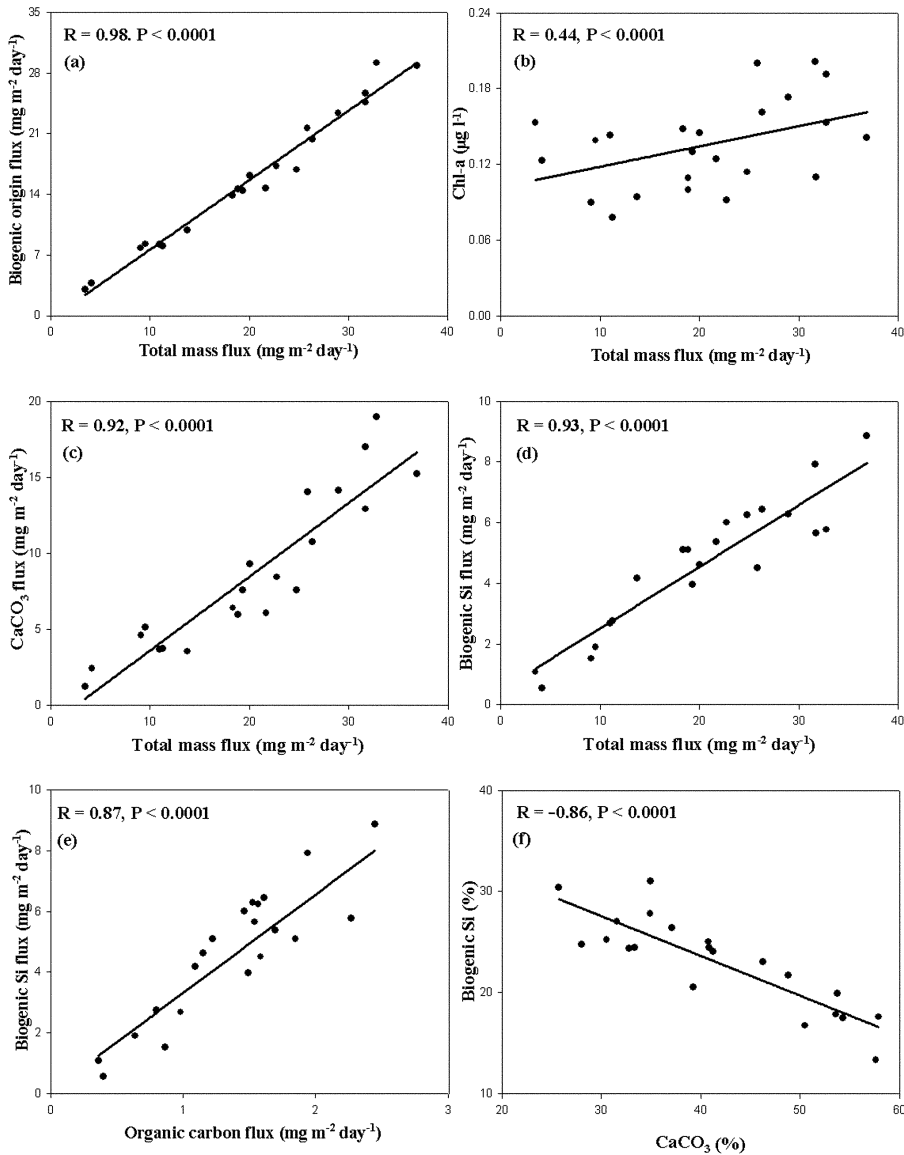


Fig. 6. Relationships between (a) total mass fluxes and biogenic origin fluxes, (b) total mass fluxes and Chl-a derived from SeaWiFS, (c) total mass fluxes and CaCO_3 fluxes, (d) total mass fluxes and biogenic Si fluxes, (e) organic carbon fluxes and biogenic Si fluxes, (f) CaCO_3 contents and biogenic Si contents.

and Manganini, 1993; Honjo *et al.*, 1995, 1999). 특히, 태평양해역에서 시계열 퇴적물 포집장치를 이용하여 관측한 Berelson (2002)의 연구에 의하면, 전체적으로 $80\text{-}270\text{ m day}^{-1}$ 사이의 침강 속도가 관측되었으며, 입자의 침강수심이 깊어짐에 따라 침강속도도 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 북동 태평양의 경우에서도 표층 해양에서 $3,700\text{ m}$ 까지 약 217 m day^{-1} , $4,400\text{ m}$ 까지 146 m day^{-1} 로 보고되었다(Dymond and Collier, 1988; Honjo *et al.*, 1995). 그리고 표층 해양의 엽록소-a 농도와 심해저층에서 관측된 총질량 플럭스의 상관관계를 계산한 결과, 상관이 있는 것으로 나타났다($R=0.44$, $P<0.0001$, Fig. 6b). 따라서 연구해역을 포함한 북동태평양 해역의 표층 해양 일차생산력과 생물량의 변화는 약 한 달의 차이로 심해저층에서의 물질 플럭스의 변화로 반영된다고 볼 수 있다. 심해 저층해류에 의한 퇴적물 재부유로 야기되는 물질 플럭스의 변화를 고려하기 위하여, 연구해역에서의 저층해류 유속을 측정하였다. Shin *et al.* (2004)은 연구해역의 해저면 약 20 m 상부에서 1997년 7월부터 1999년 7월까지 약 24개월간 심해저층

해류 유속을 측정하였다. 관측결과 저층해류는 평균 $1.7\text{-}2.1\text{ cm s}^{-1}$ 의 북동류가 우세하였으며, 저층류가 가장 강한 시기인 7월과 8월에 순간 최대유속이 12.7 cm s^{-1} 로 나타났지만, 전체적인 월평균 유속은 7 cm s^{-1} 이하로 관측되었다(Shin *et al.*, 2004). 그리고 일본의 금속광업사업단이 1993년 5월부터 1994년 5월까지 하와이 섬의 남쪽 해역($9^{\circ}8.5'N$, $146^{\circ}15.5'W$, 해저수심 $5,349\text{ m}$)의 해저면 5.5 m 와 15 m 상부에서 저층해류를 관측한 결과, 순간 최대유속은 8 cm s^{-1} 로 관측되었고, 평균유속은 $1.8\text{-}2.9\text{ cm s}^{-1}$ 로 나타났다(일본금속광물사업단, 1995). 일반적으로 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 수층 침강입자의 포집율과 퇴적물 재부유에 의한 영향은 저층해류의 유속에 영향을 받을 수 있으나, 10 cm s^{-1} 이하의 유속에서는 침강입자 포집에 영향을 받지 않으며, 7 cm s^{-1} 이하의 유속에서는 퇴적물의 재부유에 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다(Lampitt, 1985; Baker *et al.*, 1988; Gust *et al.*, 1992). 따라서 본 연구해역에서 퇴적물의 재부유가 물질플럭스에 미칠 영향은 아주 미약할 것으로 판단된다. 또한, 연구해역에서 심해저층 해류가 가장 강한

계 관측된 7월과 8월의 총질량 플럭스는 다른 계절에 비해 낮게 관측되었으며, 이는 심해저층에서 획득된 물질플럭스가 저층해류에 의한 재부유 영향을 거의 받지 않는다는 것을 시사한다.

결과적으로 이 연구에서 측정된 심해저층 물질 플럭스는 표층해양의 환경변화를 그대로 반영한 것으로 여겨지며, 표층해양의 환경변화에 따른 물질 플럭스의 변화가 심해저층에서도 유사하게 관측되는 것으로 해석된다.

물질플럭스의 계절변동과 엘니뇨 영향에 따른 물질 플럭스 차이 비교

Dymond and Collier(1988)는 1982년 북동태평양 해역(11°N, 140°W)에서 약 1년 동안(1982년 12월 29일-1984년 2월 14일) 침강입자의 총질량 플럭스를 관측한 결과, 엘니뇨 시기(1982년 12월-1983년 4월)의 총질량 플럭스가 엘니뇨 이후(post-El Niño; 1983년 5월-1984년 2월)에 비해 약 2-3배 높게 나타났다고 보고하였다. 또한 Honjo *et al.*(1995)은 1992년부터 1993년 1월까지 북동태평양 해역(9°N, 140°W)에서 Equatorial Pacific Process Study의 일환으로 시계열 퇴적물 포집장치를 설치한 결과, 9°N에서는 엘니뇨 시기(1992년 2월-1992년 7월)의 평균 총질량 플럭스가 엘니뇨 이후에 비해 약 39.8% 증가하였다고 보고하였다.

이 두 연구들은 연구해역에서 물질 플럭스의 계절적 변동을 고려하지 않았으며, 그 이유로 그들의 연구에 인용한 El-Sayed and Taguchi(1979)의 연구결과에서 일차생산력의 뚜렷한 계절변동이 나타나지 않았기 때문이다. El-Sayed and Taguchi(1979)는 북동태평양해역(5°N-18°N, 126°W-151°W)의 일차생산력을 1975년 8월과 9월(여름), 1976년 2월과 3월(겨울)에 현장 측정하였으며, 여름과 겨울에 관측된 일차생산력은 각각 $120 \pm 65.9 \text{ mg m}^{-2}$, $144 \pm 64.3 \text{ mg m}^{-2}$ 로 보고하였다.

하지만 북동태평양 해역에서 관측된 두 시기들의 엽록소 농도와 표층 일차생산력 값들은 일시적인 두 시점의 관측 값으로 북동태평양 전 해역의 계절변동을 대표하는 값이라 볼 수 없다. 이와 관련하여 Dandonneau *et al.*(2004)은 시공간적인 일차생산력과 표층해양의 엽록소 농도를 관측하기 위해서는 일시적인 현장 관측 보다는 인공위성을 이용한 광범위하고 장기간의 관측이 더 정확하다고 주장하였다. 그 이유로 현장측정실험은 관측일의 날씨, 광량, 온도, 현장실험의 일관성 등 여러 요인들로 큰 오차가 발생하며, 지속적인 관측이 어렵다고 설명하였다. Platt and Filion(1973)의 연구에서도 한 지점을 대상으로 일차생산력을 반복 측정 한 결과, 일차생산력 값이 일정하지 않았고, 측정치의 오차범위도 크게 측정되었다고 보고하였다.

또한 Dymond and Collier(1988), Honjo *et al.*(1995)의 연구시기인 1983년 겨울과 봄(NINO 3.4 지역의 표층 수온차 2.0°C 이상), 1992년 겨울과 봄(NINO 3.4 지역의 표층 수온차 1.6°C 이상)에는 강한 엘니뇨 현상이 나타났고, 여름과 가을(NINO 3.4 지역의 표층 수온차 1.0°C 이하)에는 비교적 평상시기로 관측되었다. 따라서 이들의 연구결과는 엘니뇨 영향 뿐만 아니라 계절적 물질 플럭스의 차이를 반영한 값으로 생각된다.

이번 연구에서 관측된 여름과 가을, 겨울과 봄의 총질량 플럭스의 평균값은 각각 $14.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, $26.2 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로서 약 2배의 차이를 보인다. 이는 Honjo *et al.*(1995)이 엘니뇨의 영향에

따른 물질 플럭스의 증가로 제시한 38%보다 더 크며, Dymond and Collier(1988)가 제시한 200-300%의 증가와 유사하다. 따라서 엘니뇨와 같은 해양환경변화에 의한 해양 물질 플럭스의 변화를 좀 더 정량적으로 제시하기 위해서는 계절적인 차이에 의한 영향을 우선 고려해야 한다. 이 연구에서의 물질 플럭스는 계절뿐만 아니라 연단위에서도 큰 변동을 보이는 것으로 관측되었다. 2003년 7월부터 2004년 6월까지 관측된 총질량 플럭스의 연평균은 $23.3 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 관측되었으며, 2004년 8월부터 2005년 6월까지의 $16.6 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 나타나 비교적 평상시기의 연변화도 큰 차이를 보였다. 특히, 2003-2004년의 평균 탄산염 플럭스는 $10.7 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이었고, 2004-2005년의 평균값은 $6.90 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 측정되어 약 2배의 연변화를 보였다. 이러한 결과는 본 연구 해역에서 해양환경변화에 의한 물질 플럭스의 변동을 정확히 파악하기 위해서는 장기 모니터링이 필수적임을 제안하고 있다.

결론

북동태평양 해역 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 심해저층에서 관측된 총질량 플럭스와 생물기원 성분의 계절변동은 동식물 플랑크톤의 생체량과 일차생산력의 계절적 변동을 반영한다. 2003년 7월부터 2005년 6월까지 약 24개월 동안 겨울과 봄에 관측된 총질량 플럭스와 생물기원 물질 플럭스는 여름과 가을에 관측된 값과 큰 차이를 보여, 뚜렷한 계절적 변동을 보였다. 계절적 변동의 요인은 적도 수렴대와 관련한 지역적인 용승대의 계절적 위치변동에 따른 영양염 공급과 일차생산력의 변동에 의한 것으로 판단된다. 이번 연구에서 관측된 총질량 플럭스와 생물 기원 물질 플럭스의 계절변동은 현재까지 보고된 엘니뇨의 영향에 의한 물질 플럭스의 차이보다 크게 나타났다. 따라서 북동태평양 해역에서 기후환경변화에 따른 물질 플럭스의 변동량을 정확히 이해하기 위해서는 장기모니터링을 통한 연변화, 계절변동과 같은 주기적인 물질 플럭스의 자연변동량을 파악해야 한다.

감사의 글

이 연구에 많은 도움을 주신 한국해양연구원 연구선 온누리호 선장님과 승조원 여러분께 감사드립니다. 그리고 논문을 세밀하게 심사해주신 이동섭교수님과 주세종박사님께 감사드립니다. 본 연구는 “태평양 심해저 광물자원 개발(심해환경연구, PM51103)”, “북서태평양이 한반도 주변해(대한해협)에 미치는 영향 연구(PP08410)”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 일본 금속광업사업단. 1995. 1994년도 망간단괴 채광 환경조사 보고서. 203 p.
- Amador, J.A., E.J. Alfaro, O.G. Lizano, V.O. Magaa. 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, **69**: 101-142.
- Barber, R.B., M.P. Sanderson, S.T. Lindley, F. Chai, J. Newton, C.C. Trees, D.G. Foley and F.P. Chavez. 1996. Primary production and its regulation in the equatorial Pacific during and following the

- 1991-1992 El Nio. *Deep-Sea Research II*, **43**(4-6): 933-969.
- Baker, E.T., H.B. Milburn and D.A. Tennant. 1988. Field assessment of sediment trap efficiency under varying flow condition. *Journal of Marine Research*, **46**: 573-592.
- Berelson, W.M. 2002. Particle settling rates increase with depth in the ocean. *Deep-Sea Research II*, **49**: 237-251.
- Blackburn, M., R.M. Laws, R.W. Owen and B. Zeitschel. 1970. Seasonal and areal changes in standing stocks of phytoplankton, zooplankton and micronekton in the eastern tropical Pacific. *Marine Biology*, **7**: 14-31.
- Buesseler, K.O., C.H. Lamborg, P.W. Boyd, P.J. Lam, T.W. Trull, R.R. Bidigare, J.K.B. Bishop, K.L. Casciotti, F. Dehairs, M. Elskens, M. Honda, D.M. Karl, D.A. Siegel, M.W. Silver, D.K. Steinberg, J. Valdes, B.V. Mooy, S. Wilson. 2007. Revisiting carbon flux through the ocean's twilight zone. *Science*, **316**: 567-569.
- Collier, R., J. Dymond, S. Honjo, S. Manganini, R. Francois, R. Dunbar. 2000. The vertical flux of biogenic and lithogenic material in the Ross Sea: moored sediment trap observations 1996-1998. *Deep-Sea Research II*, **47**: 3491-3520.
- Conte, M.H., N. Ralph, E.H. Ross. 2001. Seasonal and interannual variability in deep ocean particle fluxes at the Ocean Flux Program (OFP)/Bermuda Atlantic Time Series (BATS) site in the western Sargasso Sea near Bermuda. *Deep-Sea Research II*, **48**: 1471-1505.
- Dandonneau, Y., P.Y. Deschamps, J.M. Nicolas, H. Loisel, J. Blanchot, Y. Montel, F. Thieuleux, G. Bcu. 2004. Seasonal and interannual variability of ocean color and composition of phytoplankton communities in the North Atlantic, equatorial Pacific and South Pacific. *Deep-Sea Research II*, **51**: 303-318.
- DeMaster, D.J. 1981. The supply and accumulation of silica in the marine environment. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**: 1715-1732.
- Dymond, J. and R. Collier. 1988. Biogenic particle fluxes in the equatorial Pacific: evidence for both high and low productivity during the 1982-1983 El Nin. *Global Biogeochemical Cycles*, **2**(2): 129-137.
- El-Sayed, S.Z. and S. Taguchi. 1979. Phytoplankton standing crop and primary productivity in the tropical Pacific, in *Marine Geology and Oceanography of the Pacific Manganese Nodule Province*, edited by J. L. Bischoff and D. Z. Piper, Pergamon, New York, 241-286p.
- Fernandez-lamo, M.A. and J. Frber-Lorda. 2006. Zooplankton and the oceanography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, **69**: 318-359.
- Fiedler, P. C. and L. D. Talley. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, **69**: 143-180.
- Fischer, G., and G. Wefer. 1996. Seasonal and interannual particle fluxes in the Eastern Equatorial Atlantic from 1989 to 1991: ITCZ migration and upwelling. In: Ittekkot, V., Schafer, P., Honjo, S., Depetris, P.J. (Eds.), *Particle Flux in the Ocean*. SCOPE. John Wiley & Sons Ltd., pp. 199-214.
- Fischer, G., V. Ratmeyer, and G. Wefer. 2000. Organic carbon fluxes in the Atlantic and Southern Ocean: relationship to primary production compiled from satellite radiometer data. *Deep-Sea Research II*, **47**: 1961-1997.
- Gnanadesikan, A. 1999. A global model of silicon cycling: sensitivity to eddy parameterization and dissolution. *Global Biogeochemical Cycles*, **13**: 199-220.
- Gust, G., R.H. Byrne, R.E. Bernstein, P.R. Betzer and W. Bowles. 1992. Particle fluxes and moving fluids: experience from synchronous trap collections in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Research*, **39**: 1071-1083.
- Holton, J.R. 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*, fourth ed. Academic Press, New York, 535pp.
- Honjo, S. 1982. Seasonality and Interaction of Biogenic and Lithogenic Particulate Flux at the Panama Basin. *Science*, **218**: 883-884.
- Honjo, S., S. Manganini and J.J. Cole. 1982. Sedimentation of biogenic matter in the deep ocean. *Deep-Sea Research*, **29**(5A): 609-625.
- Honjo, S., S.J. Manganini, 1993. Annual biogenic particle fluxes to the interior of the N Atlantic Ocean; studied at 34°N 21°W and 48°N 21°W. *Deep-Sea Research* **40**: 587-607.
- Honjo, S., J. Dymond, R. Collier and S. J. Manganini. 1995. Export production of particles to the interior of the equatorial Pacific Ocean during the 1992 EqPac experiment. *Deep-Sea Research II*, **42**(2-3): 831-870.
- Honjo, S., J. Dymond, W. Prell, V. Ittekkot, 1999. Monsoon-controlled export fluxes to the interior of the Arabian sea. *Deep-Sea Research* **46**: 1859-1902.
- Honjo, S., R. Francois, S. Manganini, J. Dymond, and R. Collier. 2000. Particle fluxes to the interior of the Southern Ocean in the Western Pacific sector along 170°W. *Deep-Sea Research II*, **47**: 3521-3548.
- Hyun, J.H., J.K. Choi, E.J. Yang and K.H. Kim. 1998. Biomass and Productivity of Bacterioplankton Related to Surface Water Divergence in the Northeast Equatorial Pacific Ocean. *The Journal of Microbiology*, **36**(3): 151-158.
- Iseki, K., K. Okamura, Y. Kiyomoto. 2003. Seasonality and composition of downward particulate fluxes at the continental shelf and Okinawa Trough in the East China Sea. *Deep-Sea Research II*, **50**: 457-473.
- Ittekkot, V., P. Schafer, S. Honjo and P. Depetris. 1996. *Particle flux in the ocean*, John Wiley & Sons, Chichester. 327p.
- Kawahata H., and L.P. Gupta. 2004. Settling Particle Flux in Response to El Nio/Southern Oscillation (ENSO) in the Equatorial Pacific. *Global Environmental Change in the Ocean and Land*, Eds., M. Shiyomi et al., 95-108.
- Kim, D., D.Y. Kim, Y.J. Kim, and Y.C. Kang. 2002. Seasonal variations of particle fluxes in the Bransfield Strait, Antarctica. *Ocean and Polar Research*, **24**: 153-166.
- Lampitt, R.S., 1985. Evidence for the seasonal deposition of detritus to the deep-sea floor and its subsequent resuspension. *Deep-Sea Research*, **32**: 885-897.
- Lampitt, R.S., P.P. Newton, T.D. Jickells, J. Thomson, P. King, 2000. Near-bottom particle flux in the abyssal northeast Atlantic. *Deep-Sea Research II*, **47**: 2051-2071.
- Lavn, M.F., P.C. Fiedler, J.A. Amador, L.T. Ballance, J. Frber-Lorda, A.M. Mestas-Nuez, 2006. A review of eastern tropical Pacific

- oceanography: Summary. *Progress in Oceanography*, **69**: 391–398.
- McGee, D. and F. Marcantonio, J. Lynch-Stieglitz. 2007. Deglacial changes in dust flux in the eastern equatorial Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, **257**: 215–230.
- McPhaden, M., A.J. Busalacchi, R. Cheney, J. Donguy, K.S. Gage, D. Halpern, M. Ji, P. Julian, G. Meyers, G.T. Mitchum, P.P. Niiler, J. Picaut, R.W. Reynolds, N. Smith and K. Takeuchi. 1998. The Tropical Ocean-Global Atmosphere observing system: A decade of progress. *Journal of Geophysical Research*, **130**(C7): 169–240.
- Palanques, A., E. Isla, P. Puig, J.A. Snaches-Cabeza, and P. Masque. 2002. Annual evolution of downward particle fluxes in the Western Bransfield Strait (Antarctica) during the FRUELA project. *Deep-Sea Research II*, **49**: 903–920.
- Pennington, J.T., K.L. Mahoney, V.S. Kuwahara, D.D. Kolber, R. Calienes, F.P. Chavez. 2006. Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, **69**: 285–317.
- Pickard, G.L. and W.J. Emery. 1982. *Descriptive Physical Oceanography*. Pergamon Press, Oxford. p. 45.
- Platt, T. and C. Filion, 1973. Spatial Variability of the Productivity: Biomass Ratio for Phytoplankton in a Small Marine Basin. *Limnology and Oceanography*, **18**(5): 743–749.
- Poulton, A.J., T.R. Aday, W.M. Balch, P.M. Holligan. 2007. Relating coccolithophore calcification rates to phytoplankton community dynamics: Regional differences and implications for carbon export. *Deep-Sea Research II*, **54**: 538–557.
- Roman, M.R., H.G. Dam, R.L. Borgne, X. Zhang. 2002. Latitudinal comparisons of equatorial Pacific zooplankton. *Deep-Sea Research II*, **49**: 2695–2711.
- Romero-Centeno, R., J. Zavala-Hidalgo and G.B. Raga. 2007. Mid-summer Gap Winds and Low-Level Circulation over the Eastern Tropical Pacific. *Journal of Climate*, **20**, DOI: 10.1175/JCLI4220.1
- Ross, D.A., 1995. *Introduction to oceanography*. Harper Collins, 496p.
- Shin, H., S.C. Hwang, D. Jeon, K.H. Kim, C.H. Kwak and S.S. So. 2004. The characteristics of Physical Oceanographic Environments and Bottom Current in the KODOS Study Area of the Northeastern Tropical Pacific. *Ocean and Polar Research*, **26**(2): 341–349.
- Takahashi, K. and A.W.H. Be. 1984. Planktonic foraminifera: factors controlling sinking speeds. *Deep Sea Research*, **31**(12): 1477–1500.
- Vinogradov, M.E. 1981. Ecosystems of equatorial upwellings. p. 69–90. In: *Analysis of Marine Ecosystems*. ed. by A.R. Longhurst. Academic Press, New York.
- Wanninkhof, R., R.A. Feely, D.K. Atwood, G. Berberian, D. Wilson, P.P. Murphy and M.F. Lamb. 1995. Seasonal and lateral variations in carbon chemistry of surface water in the eastern equatorial Pacific during 1992. *Deep-Sea Research II*, **42**(2-3): 387–409.
- Watkins, J.M., A.C. Mix, J. Wilson, 1998. Living planktic foraminifera in the central tropical Pacific Ocean: articulating the equatorial ‘cold tongue’ during La Nia, 1992. *Marine Micropaleontology*, **33**: 157–174.

2008년 3월 30일 원고접수

2008년 6월 5일 수정본 채택

담당편집위원: 이경용