



동태평양 열대해역에서 2009–2010년 침강입자 플럭스의 수직 변화

김형직^{1*} · 조소설² · 김동선² · 김경홍³ · 유찬민³¹한국해양과학기술원 제주특성연구센터
(63349) 제주특별자치도 제주시 일주동로 2670²한국해양과학기술원 해양환경연구센터
(49111) 부산광역시 영도구 해양로 385³한국해양과학기술원 심해저광물자원연구센터
(49111) 부산광역시 영도구 해양로 385

Vertical Variation of the Particle Flux in the Eastern Tropical Pacific from 2009 to 2010

Hyung Jeek Kim^{1*}, Sosul Cho², Dongseon Kim², Kyeong Hong Kim³, and Chan Min Yoo³¹*Jeju Marine Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Jeju 63349, Korea*²*Marine Environmental Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea*³*Deep-sea Mineral Resources Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea*

Abstract : A sediment trap had been deployed at 1250 m depth in the Eastern Tropical Pacific (ETP) from September 2009 to July 2010, with the aim of understanding the temporal and vertical variability of particle flux. During the monitoring period, total particle flux varied from 12.4 to 101.0 mg m⁻²day⁻¹, with the higher fluxes in January–March 2010. Biogenic particle flux varied in phase with the total particle flux. The increase in total particle flux during January–March 2010 was attributed to the enhanced biological production in the surface layer caused by wind-driven mixing in response to the seasonal shifts in the location of the Intertropical convergence zone. The export ratio (e-ratio) was estimated using the particulate organic carbon flux and satellite-derived net primary production data. The estimated e-ratios changed between 0.8% and 2.8% (1.4±0.6% on average). The ratio recorded in the negative phase of Pacific decadal oscillation (PDO) was similar to the previous results obtained from the ETP during the 1992/93 periods in the positive phase of PDO. This suggests that the regime shift of the PDO is not related to the carbon export ratio.

Key words : particle flux, carbon cycle, eastern tropical pacific, sediment trap, sinking particles

1. 서론

생물펌프(biological pump)는 해양의 표층에서 생산된 유기탄소를 심해로 전달하는 과정으로 대기 이산화탄소 농도 조절에 중요한 역할을 한다(Francois et al. 2002; Henson et al. 2012). 해양 표층에서 식물플랑크톤은 광합성을 통해 유기탄소를 만들어 낸다. 생성된 입자상 유기탄소(Particulate Organic Carbon, POC)는 표층에서 먹이사슬에 의해 소비되고 분해되어 극히 일부인 1% 이하만 심해로 침강한다(Buesseler et al. 2007; Henson et al. 2012). 따라서 생물펌프는 해양생물의 광합성과 분해 작용에 의해 결정된다. 심해로 전달되는 유기탄소 플럭스는 입자 크기와 침강속도에 비례하는 것으로 알려져 있다(e.g., Trull et al. 2001; Alonso-González et al. 2010; Lee et al. 2010). 예를 들어, 비교적 크고 무거운 입자(유공충 등)는 수층 내에서 다른 생물기원 입자와 뭉쳐진 덩어리 형태로 빠르게 침강하며, 수층 내에서 재순환되는 유기탄소의 양도 감소한다(e.g., Buesseler et al. 2007). 따라서 수층 환경변화에 따른 해양생물 생산력과 군집변화는 유기탄소의 심해 수송에 영향을 미치는 중요한 인자이다(Gnanadesikan 1999; Berelson 2002; Buesseler et al. 2007).

동태평양 열대해역에서 유기탄소 플럭스는 남방진동(El Niño Southern Oscillation, ENSO)과 같은 기후-해양 환경변화에 영향을 받는다(Dymond and Collier 1988; Honjo et al. 1995; Kim et al. 2011). 동태평양 열대해역에서 유기탄소 플럭스는 엘니뇨 기간에 감소된 반면, 라니냐 기간에 증가되었다(Dymond and Collier 1988; Honjo et al. 1995; Chavez et al. 1999; Kim et al. 2011). 남방진동에 따른 해양의 탄소순환을 이해하기 위해 Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) 프로그램의 일환으로 동태평양 열대해역에서 퇴적물 트랩을 활용한 탄소 플럭스 연구는 1990년대에 활발히 수행되었다(Dymond and Collier 1988; Honjo et al. 1995). Honjo et al. (1995)은 동태평양 열대해역에서 1992년 2월부터 1993년 1월까지 퇴적물 트랩을 운용하여 1992년 2월부터 7월까지 발생한 엘니뇨가 유기탄소 플럭스에 미치는 영향을 평가하였다. 이들은 동태평양 열대해역에서 일차생산력의 계절적 변동은 거의 없다는 가정에서 엘니뇨 기간과 그 이외의 기간에 측정된 유기탄소 플럭스를 비교하여 엘니뇨의 영향을 평가하였다(Honjo et al. 1995). 이 프로그램을 통해 수직적인 탄소 플럭스를 측정된 결과, 일차생산량의 극히 일부인 1% 미만이 심해로 침강하고, 나머지 대부분의 유기탄소는 수층 내에서 재순환되었다(Hernes et al. 2001; Armstrong et al. 2002). 한국해양과학기술원은 대한민국 망간단과 광구해역 내 수층환경 연구의 일환으로 동태평양 열대해역에서 2000년대 이후 침강입자 플럭스의 시간적 변동 연구를 수

행하였다(Kim et al. 2010, 2011, 2012, 2019). 동태평양 열대해역 내 고정 정점(Korea Ocean Monitoring Site, KOMO) 저층(수심 4,950 m)에서 획득한 침강입자 플럭스의 계절 변동을 보고하였으며, 이에 기초하여 남방진동에 따른 탄소 플럭스 변화를 정량적으로 평가하였다(Kim et al. 2011). Kim et al. (2019)은 동태평양 열대해역 내 정점 KOMO 저층에서 2003년부터 2013년까지 약 10년 간 획득된 침강입자 플럭스의 시간적 변동을 보고하였다. 동태평양 열대해역에서 2008년 이후 침강입자 플럭스는 이전 시기(2003년-2007년)에 비해 약 3배 증가하였으며, 이는 빈번한 라니냐 발생에 따른 표층해양에서 일차생산력 증가를 반영한 결과로 해석되었다(Kim et al. 2019).

동태평양 열대해역 침강입자 플럭스의 장기간 자연변동 연구는 저층에서 활발히 수행되었으나, 수심 1,000 m 내외의 중층에서 침강입자 플럭스 연구는 미미한 실정이다. 이로 인해 이 해역에서 탄소 플럭스의 수직적 변화 연구는 2000년대 이후 거의 수행된 바 없다. 탄소 플럭스의 수직 변화 연구는 수층 내에서 침강입자의 재순환 비율을 측정하고, 이를 통해 탄소순환을 평가하는데 중요한 인자이다. 특히 동태평양 해역에서 표층수온과 바람의 세기 등 해양환경은 2000년대 이후 급격한 변화를 보였다(England et al. 2014; DeVries et al. 2017; Kim et al. 2019). 동태평양 열대해역에서 탄소 플럭스의 수직 변화 연구는 기후변화에 따른 해양의 반응과 역할을 이해하는데 중요한 자료이다. 이 연구에서는 동태평양 열대해역 정점 KOMO 중층(수심 1,250 m)에서 2009년 9월부터 2010년 7월까지 획득된 침강입자 플럭스와 인공위성 기반으로 추정된 순일차생산력 자료를 이용하여 2009-2010년 탄소 플럭스의 수직 변화를 평가하였으며, 이를 2000년대 이전에 수행된 탄소 플럭스의 수직변화 자료와 비교하고 분석하였다.

2. 재료 및 방법

한국해양과학기술원은 동태평양 열대해역 내 정점 KOMO에 퇴적물 트랩을 설치하여 2009년 9월부터 2010년 7월까지 침강입자를 획득하였다(Kim et al. 2019). 퇴적물 트랩을 설치한 정점 KOMO의 위치는 북위 10.5°, 서경 131.2°이며, 수심은 5,030 m이다(Fig. 1). 정점 KOMO에서 퇴적물 트랩은 중층(수심 1,250 m)과 저층(수심 4,950 m)에 설치하였으며, 퇴적물 트랩 아래 35 m 지점에 해류 유속계를 계류하였다. 정점 KOMO 저층에서 획득한 침강입자 플럭스 자료는 이미 Kim et al. (2019)에 발표되었다. 중층에서 획득한 침강입자 플럭스의 시간적 변동 자료는 아직까지 발표된 바 없다. 하지만 중층에서 2009년 9월부터 2010년 7월까지 측정된 유기탄소와 무기탄소 플럭스의 대표값은 Kim et al. (2019)에 사용되었다. 퇴적물 트랩은

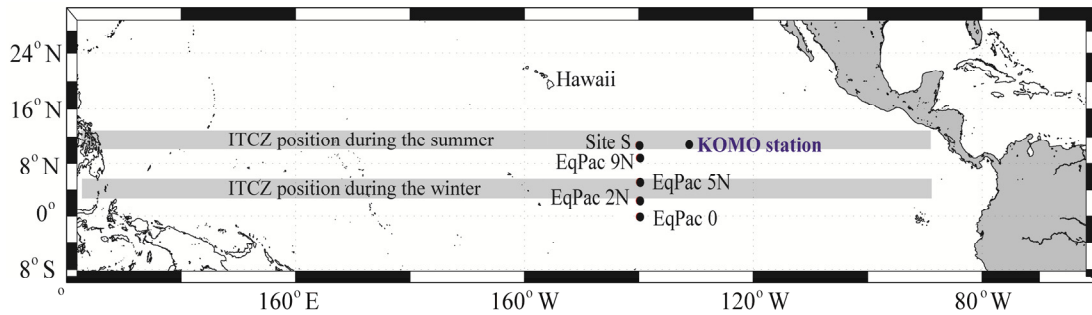


Fig. 1. A map showing the locations of sediment trap mooring stations in this study (KOMO station) and other study sites: site S from Dymond and Collier (1988), site EqPac 0, 2°N, 5°N, 9°N from Honjo et al. (1995). The location of ITCZ is taken from Amador et al. (2006) and Kim et al. (2010, 2011)

21개의 시료 병을 갖는 미국 McLane Research Laboratories 사의 ParFlux Mark 78H-21이며, 유속계는 Aanderrra 사의 RCM seaguard이다. 퇴적물 트랩을 이용한 침강입자 시료는 2009년 9월부터 2010년 7월까지 월별로 획득하였으며, 해류정보는 일별로 측정하였다(Kim et al. 2019). 퇴적물 트랩을 설치하기 전에 붕산나트륨(sodium borate, borax)으로 중화된 10% 포르말린 용액을 시료 병에 넣어 획득된 침강입자가 분해되지 않도록 하였다. 포르말린 고정액은 퇴적물 트랩을 설치할 수심에서 획득한 해수를 0.45 μm 필터로 부유입자를 거른 후, 포르말린 시약과 혼합하여 만들었다. 2010년 7월에 한국해양과학기술원 종합해양조사선인 온누리호를 이용하여 정점 KOMO에서 퇴적물 트랩을 회수하였다. 중층에 설치된 퇴적물 트랩에서 2010년 5월과 7월에 시료 병은 유실된 상태로 회수되어 침강입자 시료의 획득에 실패하였다.

획득된 침강입자 시료는 분할하기 전에 살아있는 상태로 퇴적물 트랩에 포집된 것으로 판단되는 유영생물(swimmer)은 핀셋을 이용하여 모두 제거하였다. 침강입자는 지화학 분석을 위해 시료 분할기(wet sample divider-10, McLane Research Laboratories)를 이용하여 다섯 등분하였다. 다섯 등분한 시료 중 세 개의 시료는 합쳐서 증류수로 세척하고 동결건조한 후, 무게를 측정하여 총입자 플럭스(total particle flux)를 계산하였다. 총탄소 함량은 CNS 원소분석기(Carlo-Erba EA 1112)를 이용하여 측정하였다. 침강입자 시료 사이에 총 7개의 표준시료(Sulfanilamide, CE Instruments)를 분석하여 분석오차는 1.5% 이하로 유지하였다. 무기탄소 함량은 무기탄소 분석기(CO_2 coulometer, CM5014 model, UIC)를 이용하여 측정하였으며, 분석 기기의 오차는 0.2%이다. 탄산칼슘 함량은 무기탄소 함량에 8.33(무기탄소와 탄산칼슘의 분자량 비)을 곱하여 계산하였다. 유기탄소 함량은 총탄소 함량과 무기탄소 함량의 차로 계산하였다. 생물기원 규소 함량은 85°C에서 0.5N 수산화나트륨(NaOH)을 이용하여 시간별로 용해하

여 측정하였으며, 규산염(SiO_2)의 분자량을 곱하여 계산하였다(DeMaster 1981). 육상기원 쇄설물은 총입자 플럭스와 생물기원 물질 플럭스(탄산칼슘+생물기원 규소+유기물질: 유기탄소 \times 1.88)의 차이로 계산하였다(e.g., Fischer and Wefer 1996; Khim et al. 2007; Kim et al. 2011, 2019).

인공위성 기반으로 추정된 순일차생산력(net primary production, NPP)은 Behrenfeld and Falkowski (1997)에 의해 개발된 Vertically Generalized Production Model (VGPM)을 기반으로 연구정점을 기준으로 $1^\circ \times 1^\circ$ 범위의 평균값을 사용하였다. 월별 표층 수온(Sea Surface Temperature, SST) 자료는 미국 국립해양대기연구소(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 표층 수온 자료(NOAA optimum interpolation, Reynolds et al. 2007)를 이용하였으며, 연구정점을 기준으로 $1^\circ \times 1^\circ$ 범위의 자료를 포함하였다. 월별 표층 염분과 바람세기 자료는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)에서 제공하는 $1^\circ \times 1^\circ$ 범위의 자료를 사용하였다(Behringer and Xue 2004).

3. 결 과

연구기간 동안 인공위성 기반으로 추정된 순일차생산력은 207–353 $\text{mgC m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 평균값은 $291 \pm 47 \text{ mgC m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 이다(Fig. 2a). 순일차생산력은 2009년 12월부터 상승하여 2010년 3월에 최고값을 보였으며, 이후 감소하였다(Fig. 2a). 순일차생산력의 시간적 변동은 표층해양 환경변화와 밀접한 연관성을 보였다(Fig. 2). 순일차생산력이 증가된 시기에 강한 바람에 의한 수층혼합으로 표층수온은 낮았고 염분은 증가하였다(Fig. 2b).

정점 KOMO에서 측정된 총입자 플럭스와 생물기원 입자 플럭스는 Table 1에 정리하였다. 연구기간 동안, 총입자 플럭스는 12.4–101.0 $\text{mg m}^{-2}\text{day}^{-1}$ (평균 $38 \pm 28 \text{ mg m}^{-2}\text{day}^{-1}$)의 범위에서 변화하였으며, 뚜렷한 시간적 변동을

보였다(Fig. 3b). 총입자 플럭스의 최고값은 2010년 3월에, (탄산칼슘, 오팔, 유기탄소 플럭스)도 총입자 플럭스와 동일한 시기에 최고값과 최저값을 보였다. 침강입자 내 생물

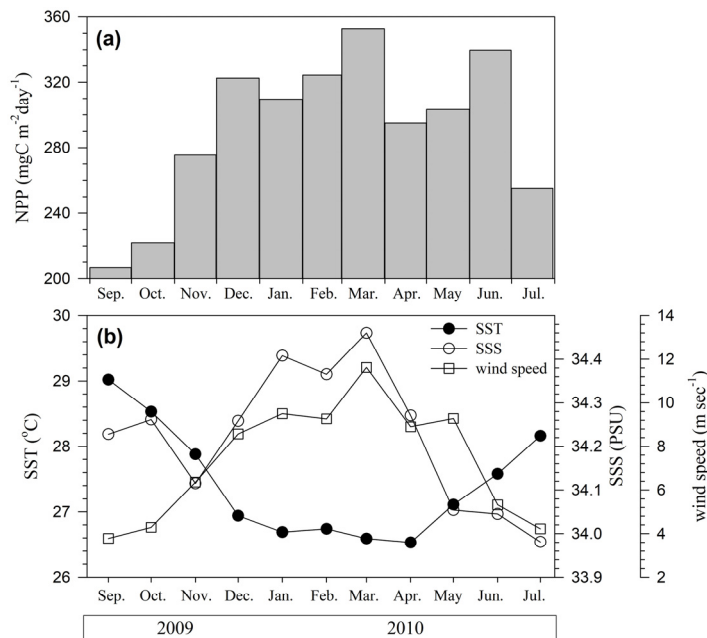


Fig. 2. Temporal variations of (a) satellite-derived net primary production (NPP), (b) sea surface temperature, salinity, and wind speed. SST data were obtained from National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). SSS data were obtained from the Global Ocean Data Assimilation System, produced at the National Center for Environmental Prediction. Wind speed data were obtained from the National Centers for Environmental Prediction Department of Energy (NCEP-DOE) Reanalysis 2 product

Table 1. Particle flux and content data recorded at the station KOMO from September 2009 to July 2010

open date (dd/mm/yy)	days	Fluxes in $\text{mg m}^{-2} \text{day}^{-1}$					Net primary production ($\text{mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$)	Export efficiency (%)*	Transfer efficiency (%)**
		Total particle	CaCO_3	Biogenic opal	POC	Lithogenic			
01/09/09	30	18.8	7.0	4.4	2.9	2.0	207	1.41	52
01/10/09	31	12.4	5.5	2.3	1.8	1.2	222	0.83	88
01/11/09	30	16.2	7.7	3.1	2.1	1.4	275	0.76	75
01/12/09	31	20.6	8.5	4.5	3.2	1.6	323	0.99	47
01/01/10	31	37.6	18.1	8.0	3.9	4.2	310	1.26	30
01/02/10	28	57.3	33.8	9.7	5.1	4.2	324	1.56	41
01/03/10	31	101.0	58.5	16.1	9.9	7.8	353	2.81	32
01/04/10	30	29.6	14.9	4.6	3.9	2.9	295	1.31	59
01/05/10	31	no data	no data	no data	no data	no data	303	-	-
01/06/10	30	48.4	19.9	10.5	5.7	7.3	340	1.67	20
01/07/10	31	no data	no data	no data	no data	no data	255	-	-

*Export efficiency: the ratio of POC flux at 1,250 m to net primary production

**Transfer efficiency: the ratio of POC fluxes between 4,950 m and 1,250 m. POC flux data at 4,950 m were taken from Kim et al. (2019)

기원 성분은 탄산칼슘(47±8%, 질량 퍼센트), 생물기원 규소(20±3%, 질량 퍼센트), 그리고 유기탄소(13±3%, 질량 퍼센트) 순으로 나타났다. 탄산칼슘 플럭스는 5.5–58.5 mg

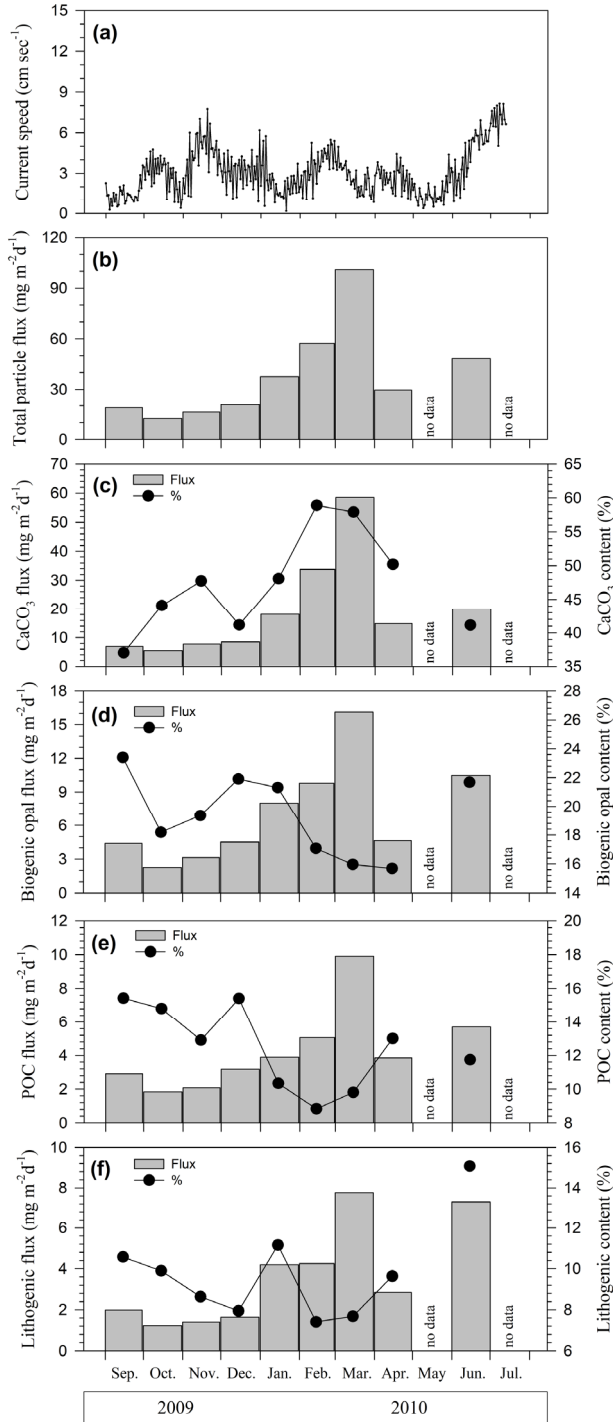


Fig. 3. Temporal variations of (a) daily current speed, (b) total particle, (c-e) biogenic, and (f) lithogenic material fluxes at station KOMO from September 2009 to July 2010

$\text{m}^2\text{day}^{-1}$ (평균 $19.3 \pm 17.2 \text{ mg m}^2\text{day}^{-1}$)의 범위에서 변화하였다(Fig. 3c). 2010년 3월에 관측된 탄산칼슘 플럭스는 2009년 10월 값보다 약 10배 높았다. 생물기원 규소 플럭스는 $2.3\text{--}16.1 \text{ mg m}^2\text{day}^{-1}$ (평균 $7 \pm 4.5 \text{ mg m}^2\text{day}^{-1}$)의 변화범위를 보였다(Fig. 3d). 유기탄소 플럭스는 $1.8\text{--}9.9 \text{ mg m}^2\text{day}^{-1}$ 의 변화범위를 보였으며, 평균 $4.3 \pm 2.5 \text{ mg m}^2\text{day}^{-1}$ 였다(Fig. 3e). 침강입자는 유기탄소, 생물기원 규소, 탄산칼슘과 같은 생물기원 원소 및 육상기원 쇄설물로 구성된다(e.g., Honjo et al. 1995; Kawahata et al. 1998; Kim et al. 2019). 본 연구지역과 같이 대륙으로부터 아주 멀리 떨어진 대양의 경우, 육상기원 쇄설물은 대기를 통해 유입된 입자로 구성된다(e.g., Kim et al. 2021). 육상기원 쇄설물 플럭스는 $1.2\text{--}7.8 \text{ mg m}^2\text{day}^{-1}$ (평균 $3.6 \pm 2.6 \text{ mg m}^2\text{day}^{-1}$)의 범위에서 변화하였으며, 최고값은 2010년 3월에 최저값은 2009년 10월에 나타났다(Fig. 3f). 정점 KOMO에서 포집된 침강입자의 유기탄소/질소 비율은 5.5–6.3의 변화범위를 보였고, 최고값은 2010년 2월에 최저값은 2009년 9월과 10월에 관측되었다.

4. 토 의

태평양에서 침강입자는 주로 동-식물 플랑크톤의 사체 등과 같은 생물기원 입자로 구성된다(Honjo et al. 1982, 1995; Dymond and Collier 1988; Kim et al. 2011). 본 연구에 이용된 시료에서 침강 입자는 대부분 생물기원 입자(80% 이상)로 구성되었다. 연구기간 동안 수심 1,285 m에서 측정된 해류는 $0.2\text{--}8.1 \text{ cm sec}^{-1}$ 의 범위에서 변화하였으며, 평균 $3.0 \pm 1.7 \text{ cm sec}^{-1}$ 였다(Fig. 3a). 일반적으로 퇴적물 트랩을 이용한 수층 침강입자의 포집효율은 해류의 유속에 영향을 받을 수 있으나, 10 cm sec^{-1} 이하의 유속환경에서 그 영향은 미미한 것으로 알려져 있다(Lampitt, 1985; Baker et al. 1988; Gust et al. 1992). 따라서 본 연구에서 획득된 침강입자는 연구해역의 표층해양에서 생성된 입자의 특성을 잘 반영하는 것으로 해석할 수 있다.

본 연구에서 측정된 총입자 플럭스($38 \pm 28 \text{ mg m}^2\text{day}^{-1}$)는 동태평양 적도 인근해역($9^\circ\text{N}\text{--}5^\circ\text{S}$, 140°W)에서 1992–1993년에 측정된 총입자 플럭스($38.1\text{--}82.2 \text{ mg m}^2\text{day}^{-1}$)의 절반가량으로 낮았으며, 동태평양 열대해역 정점 S (11°N , 140°W)에서 1982–1984년에 측정된 값($41 \pm 33 \text{ mg m}^2\text{day}^{-1}$)과 유사하였다(Dymond and Collier 1988; Honjo et al. 1995). JGOFS 프로그램의 일환으로 동태평양 열대해역에서 수행된 침강입자 플럭스 연구결과, 총입자 플럭스는 동태평양 적도해역에서 가장 높았고, 위도가 증가할수록 침강입자 플럭스는 감소하는 경향을 보였다(Honjo et al. 1995). 인공위성(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor, SeaWiFS)을 이용하여 관측된 표층해양의 엽록소 농도는 일

차생산력과 밀접한 관련성을 보이는 것으로 알려져 있으며, 적도해역에서 가장 높았고, 적도해역보다 북쪽에 위치한 아열대 해역에서는 적도해역에 비해 상대적으로 낮았다(Chavez et al. 1999; Pennington et al. 2006). 따라서 본 연구에서 측정된 침강입자 플럭스는 동태평양 열대해역에서 위도별 일차생산력 변화 특성을 잘 반영한 것으로 판단된다(Honjo et al. 1995; Chavez et al. 1999).

침강입자 플럭스의 시간적 변동

연구기간 동안 총입자 플럭스는 뚜렷한 시간적 변동을 보였다. 총입자 플럭스는 2010년 1월부터 증가하여 2010년 3월에 최대값을 보였다(Fig. 3b). 2010년 3월에 총입자 플럭스는 연구기간 동안에 측정된 평균 총입자 플럭스보다 약 3배 높았다. 생물기원 입자 플럭스는 총입자 플럭스의 시간적 변동과 잘 일치하였다. 총입자 플럭스는 탄산칼슘 플럭스($r = 0.99$, $p < 0.001$), 유기탄소 플럭스($r = 0.98$, $p < 0.001$), 생물기원 규소 플럭스($r = 0.98$, $p < 0.001$) 등과 매우 높은 양의 상관관계를 보였다. 생물기원 물질 플럭스 중에서 특히 탄산칼슘 플럭스는 2010년 1월부터 급격히 증가하여 2010년 3월에 최대값을 보였다. 2010년 3월에 탄산칼슘 플럭스는 평균 탄산칼슘 플럭스보다 약 3배 높았다. 따라서 정점 KOMO에서 총입자 플럭스는 탄산칼슘과 같은 생물기원 입자 플럭스의 변동에 의해 조절되는 것으로 판단된다.

일반적으로 동태평양 열대해역 중층에서 침강입자 플럭스는 표층해양에서 일차생산력 변화를 반영하는 것으로 알려져 있다(e.g., Dymond and Collier 1988; Pennington et al. 2006; Honjo et al. 1995). 연구기간 동안 인공위성 기반으로 추정된 순일차생산력은 총입자 플럭스와 좋은 양의 상관관계를 보였다($r = 0.72$, $p < 0.05$). 순일차생산력은 생물기원 원소 중에서 생물기원 규소 플럭스와 가장 좋은 양의 상관관계($r = 0.75$, $p < 0.05$)를 보였으며, 다른 생물기원 물질플럭스(유기탄소: $r = 0.72$, $p < 0.03$, 탄산칼슘: $r = 0.68$, $p < 0.05$)와도 좋은 양의 상관관계를 보였다. 이에 본 연구에서 측정된 침강입자 플럭스는 해양생물 생산성의 시간적 변화를 반영한 것으로 판단된다. Pennington et al. (2006)은 동태평양 열대해역에서 표층해양 엽록소 농도는 봄과 겨울에 높고, 여름과 가을에 낮은 뚜렷한 계절변동을 보고하였다. 정점 KOMO 저층에서 2003년 7월부터 2008년 7월까지 측정된 침강입자 플럭스는 겨울과 봄에 높고 여름과 가을에 낮은 뚜렷한 계절변동을 보였다(Kim et al. 2011). 이들은 정점 KOMO 저층에서 관측된 침강입자 플럭스의 시간적 변동은 적도수렴대(Inter-Tropical Convergence Zone, ITCZ)의 계절 변동에 따른 표층해양에서 생물생산력 변화를 반영한 결과로 해석하였다(Kim et al. 2011). 이에 본 연구에서 측정된 침강입자

플럭스의 시간적 변동은 해양생물의 생산력 변화를 반영한 결과로 해석된다.

그렇다면 어떤 해양생물이 겨울과 봄에 번성하는가? 일반적으로 대양에서 탄산칼슘 각질을 갖는 입자는 부유성 유공충(planktonic foraminifera)과 인편모조류(coccolithophorid)의 사체 등으로 구성된다(e.g., Honjo et al. 1982; Kim et al. 2008; Lee et al. 2014). 본 연구와 동일한 시기에 저층에서 획득한 침강입자 플럭스 연구 결과, 2010년 1월부터 3월까지 부유성 유공충 플럭스는 탄산칼슘 플럭스의 70% 이상을 차지하였으며, 이외의 시기에는 30% 이하로 보고되었다(Kim et al. 2012). 본 연구에서 측정된 탄산칼슘 플럭스는 정점 KOMO 저층에서 측정된 탄산칼슘 플럭스와 매우 좋은 양의 상관관계($r = 0.94$, $p < 0.001$)를 보였다(Fig. 4). 정점 KOMO 저층에서 보고된 부유성 유공충 플럭스 자료에 기초하여 계산한 결과, 중층에서 2010년 1월부터 3월까지 증가된 침강입자 플럭스의 약 42%는 부유성 유공충 플럭스 증가에 따른 영향으로 나타났다. 따라서 정점 KOMO 중층에서 2010년 1월부터 3월까지 증가된 침강입자 플럭스는 주로 부유성 유공충 생산성 증가에 따른 영향을 반영한 결과로 판단된다.

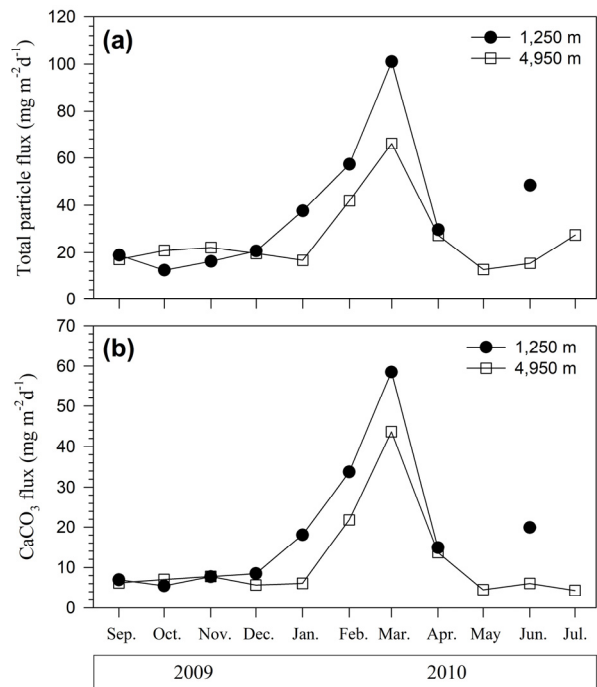


Fig. 4. Temporal variation of total particle (a) and CaCO₃ (b) fluxes both 1,250 m and 4,950 m depths at station KOMO in the eastern tropical Pacific from September 2009 to July 2010. Data for deep-sea (4,950 m) at the Station KOMO are from Kim et al. (2019)

일반적으로 부유성 유공충의 성장과 생산성은 먹이 가용성과 수층 환경변화에 의해 조절된다(e.g., Thunell et al. 1983; Lee et al. 2014). 동태평양 열대해역에서 부유성 유공충은 주로 식물성 플랑크톤을 섭식하는 것으로 알려져 있다(e.g., Sautter and Sancetta 1992; Lee et al. 2014). 동태평양 정점 KOMO 인근해역에서 일차생산력은 겨울과 봄철에 높고 여름과 가을에 낮은 뚜렷한 계절변동을 보였다(Kim et al. 2011; Lee et al. 2014). 겨울과 봄에 일차생산력의 증가는 적도수렴대 남하에 따른 무역풍 강화와 활발한 용승이 그 원인이다(Kim et al. 2008, 2011; Lee et al. 2014). 북동무역풍과 남동무역풍이 수렴하는 적도수렴대는 계절에 따라 북위 5도와 북위 11도 사이에서 남북방향으로 그 위치가 변화한다(Amador et al. 2006; Kim et al. 2011). 겨울과 봄에 적도수렴대는 북위 5도까지 남하하여 본 연구해역은 북동무역풍의 강화와 활발한 수층혼합으로 일차생산력이 증가하였다(e.g., Kim et al. 2008, 2010, 2011). 본 연구에서 인공위성으로 추정된 순일차생산력은 겨울과 봄에 높게 나타났다. 따라서 본 연구해역에서 겨울과 봄 시기에 침강입자 플럭스의 증가는 일차생산력과 부유성 유공충 개체수 증가를 반영한 결과로 생각된다.

매우 흥미로운 결과는 탄산칼슘 플럭스와 생물기원 규산염 플럭스가 매우 좋은 양의 상관관계($r = 0.94$, $p < 0.001$)를 보이는 점이다. 동태평양 해역에서 생물기원 규산염 플럭스는 주로 규조류로 구성된다(e.g., Honjo et al. 1982; Takahashi et al. 1990). 본 연구해역의 표층수는 영양염은 풍부하지만 엽록소 농도는 낮은 HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll)의 특성을 보인다(Dugdale and Wilkerson 1991). 이 해역에서 규조류의 성장은 활발한 수층혼합에 의한 질산염과 대기를 통해 유입된 철 공급에 영향을 받는다(e.g., Dymond and Collier 1988; Dugdale and Wilkerson 1991; DiTullio et al. 1993; Kim et al. 2021). 본 연구에서 생물기원 규소 플럭스는 육상기원 쇄설물 플럭스와 매우 좋은 양의 상관관계를 보였다($r = 0.87$, $p < 0.001$). 일반적으로 육상기원 쇄설물의 기원이 되는 대륙상부층에 존재하는 철 농도는 약 ~3.5%로 알려져 있다(Zhuang et al. 1990; Fung et al. 2000; Neuer et al. 2004; Kim et al. 2021). 이에 동태평양 열대해역에서 겨울과 봄 시기에 활발한 수층혼합과 대기를 통한 육상기원 쇄설물에 포함된 철 공급으로 인해 식물플랑크톤인 규조류가 번성하고, 부유성 유공충이 이를 섭식하는 해양생물 군집 구조를 보이는 것으로 해석된다.

동태평양 열대해역에서 수직적 탄소 플럭스

정점 KOMO 중층과 저층에서 측정된 침강입자 플럭스는 유사한 시간적 변동을 보였지만, 두 수심 간 침강입자 플럭스의 차이는 뚜렷한 시간적 변화를 보였다. 2010년

1월부터 3월까지 두 수심 간 총입자 플럭스의 차이는 $23.8 \pm 10 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이었으며, 이는 다른 시기(2009년 9월–12월, 2010년 4월)에 비해 뚜렷하게 높았다. 2010년 1월부터 3월까지 두 수심 간 탄산칼슘 플럭스의 차이는 $12.9 \pm 1.6 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이었으며, 이는 총입자 플럭스 차이의 55% 이상 차지하였다. 이에 두 수심 간 침강입자 플럭스 차이는 주로 탄산칼슘 플럭스 차이를 반영한 결과로 판단된다. 정점 KOMO 저층에서 2009년 9월부터 2010년 7월까지 보고된 침강입자 플럭스 자료에 따르면(Kim et al. 2012), 2009년 9월부터 12월까지 부유성 유공충 플럭스는 탄산칼슘 플럭스의 약 20%를 차지한 반면, 2010년 1월부터 3월까지 부유성 유공충 플럭스는 탄산칼슘 플럭스의 70% 이상 차지하였다. 태평양에서 탄산칼슘의 각질을 갖는 해양생물을 고려했을 때, 인편모조류는 2009년 9월부터 12월까지 우세한 시기였으며, 2010년 1월부터 3월까지 부유성 유공충이 우세한 시기로 구분된다. 태평양에서 탄산칼슘이 용해되기 시작하는 탄산염 용해약층(lysocline)은 수심 약 3,400 m이며, 탄산염 보상수심(Carbonate Compensation Depth, CCD)은 약 4,600 m로 알려져 있다(Rea and Leinen 1985). 태평양에서 수행된 이전연구 결과, 인편모조류는 부유성 유공충보다 탄산칼슘 용해에 보다 강한 것으로 알려져 있다(Hay 2004; Subhas et al. 2019). 이에 2010년 1월부터 3월까지 두 수심 사이 탄산칼슘 플럭스의 차이는 부유성 유공충의 용해 영향을 반영한 결과로 판단된다.

유광층에서 심해로 침전되는 유기탄소의 침강비율(export ratio)은 순일차생산력과 수층 내에서 측정된 유기탄소 플럭스의 비율로 구할 수 있다(e.g., Buesseler et al. 2007; Kim et al. 2009). 본 연구에서 순일차생산력은 현장에서 측정된 값이 아닌 인공위성 기반으로 추정된 값이라는 단점이 있다. 하지만, 인공위성 기반으로 추정된 순일차생산력은 동태평양 열대해역에서 보고된 일차생산력($236\text{--}376 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)과 유사한 범위를 보였으며(Barber et al. 1996; Hernes et al. 2001; Pennington et al. 2006), 북태평양 장기 모니터링 정점인 ALOHA에서 1989년부터 1993년까지 월별로 현장에서 측정한 일차생산력의 변화 범위($200\text{--}600 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)에 포함된다(Karl et al. 1996). 연구기간 동안 인공위성 기반으로 추정된 순일차생산력은 중층에서 측정된 침강입자 플럭스의 시기적 변동과 매우 유사하게 나타났다. 이에 본 연구에서 인공위성 기반으로 추정된 순일차생산력 값은 정점 KOMO 중층에서 측정된 침강입자 플럭스의 시간적 변동과 단순 비교하기에 적합한 자료라고 판단된다.

본 연구에서는 인공위성 기반으로 추정된 순일차생산력과 정점 KOMO 중층에서 측정된 유기탄소 플럭스 자료를 이용하여 유광층에서 수심 1,250 m로 유기탄소 침강비

율을 추정하였다. 정점 KOMO에서 유광층의 깊이는 약 100 m 내외로 알려져 있다(Son et al. 2014). 이에 인공위성 기반으로 추정된 해양표층에서 순일차생산력 값과 수심 1,250 m에서 측정된 유기탄소 플럭스 자료 비교를 통해 이 구간에서 침전되고 재순환되는 유기탄소의 비율을 추정하였다. 유기탄소의 침강비율은 0.8–2.8%의 변화범위를 보였고, 평균 1.4±0.6%이었다(Fig. 5).

정점 KOMO에서 2009년 9월부터 2010년 7월까지 측정된 침강입자 플럭스는 중층과 저층에서 동일한 시기적 변동을 보였으며(Fig. 4), 두 수심에서 측정된 침강입자 플럭스는 매우 좋은 양의 상관관계($r = 0.86$, $p < 0.003$)를 보였다(Kim et al. 2019). 이에 두 수심 간 침강입자 플럭스 자료를 이용하여 침강입자가 중층에서 저층으로 이동하는 동안 변화되는 비율을 분석하였다. 연구기간 동안 저층에서 측정된 침강입자 플럭스($26.1 \pm 15.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)는

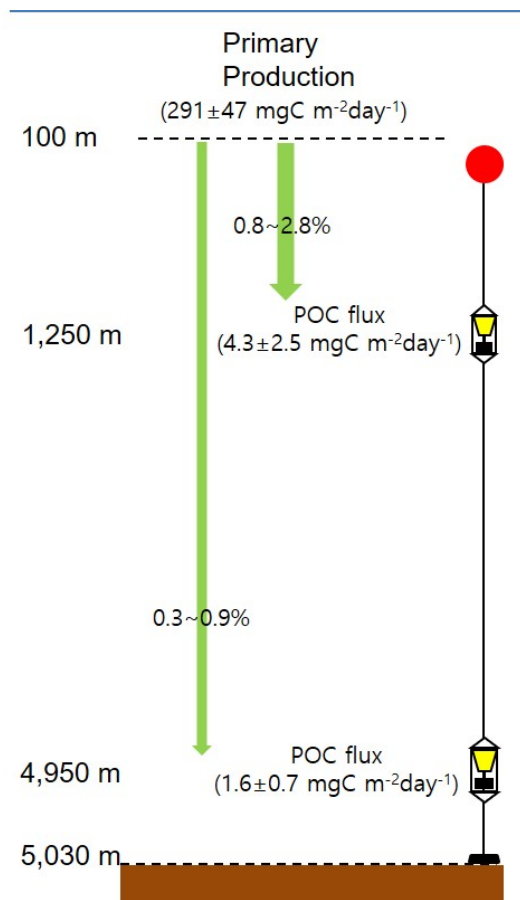


Fig. 5. Illustration of the POC flux at station KOMO calculated using sediment traps deployment and satellite-derived NPP in the Eastern tropical Pacific. The green arrows represent export fluxes from euphotic layer to each depths. Note that the drawing is not in scale

중층에서 측정된 값의 2/3 가량으로 낮았다(Fig. 6). 특히 저층에서 측정된 평균 유기탄소 플럭스($1.6 \pm 0.65 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)는 중층에 비해 1/3 가량으로 낮았으며, 저층에서 탄산칼슘 플럭스($11.5 \pm 11.8 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)는 1/2 가량이였다(Fig. 6). 이와 대조적으로, 저층에서 측정된 육상기원 쇄설물 플럭스($6.5 \pm 4.4 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)는 중층에서 측정된 값보다 높았다. 정점 KOMO 저층에 설치된 퇴적물 트랩은 해지면 상부 약 80 m에 위치하기 때문에, 증가된 육상기원 쇄설물 플럭스는 해지면 퇴적물의 재부유 가능성을 고려해야 한다. 정점 KOMO 인근 표층 퇴적물 내 육상기원 쇄설물 함량은 90% 이상이었으며, 유기탄소 함량은 0.5% 이하이다(Kim et al. 2015). 만약 저층에서 증가된 육상기원 쇄설물(약 $3 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)이 재부유 퇴적물의 유입이라고 가정한다면, 재부유된 입자에 포함된 유기탄소는 약 $0.02 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이하로 계산되었다. 이는 저층에서 측정된 유기탄소 플럭스의 1% 이하로, 탄소분석의 오차보다 낮았다. 이에 재부유 퇴적물이 정점 KOMO 저층 탄소 플럭스에 미치는 영향은 아주 미미한 것으로 판단된다. 이에 정점 KOMO에서 동일한 시기에 획득한 두 수심 간 유기탄소 플럭스 비교를 통해 중층에서 저층으로 유기탄소의 전달효율(transfer efficiency)을 추정하였다. 중층과 저층 간 유기탄소의 전달 효율은 20–88%의 범위를 보였고, 평균 비율은 49%이었다. 이는 수심 1,250 m에서 4,950 m로 침강하는 동안 약 51%의 유기탄소가 분해되어 재순환한다는 것을 의미한다. 중층과 저층 간 유기탄소의 전달효율은 2010년 1월부터 3월까지 약 40% 이하로 낮았고, 2009년 9월부터 11월까지 50% 이상으로 높은 뚜렷한 시간적 차이를 보였다. 이는 2010년 1월부터 3월까지 부유성 유공충의 용해와 함께 유기탄소도 일부 분해된 영향을 반영한 결과로 생각된다.

정점 KOMO 표층해양에서 평균 $291 \pm 47 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 정도 생산된 유기탄소는 수심 1,250 m까지 $4.3 \pm 2.5 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이 침강하였으며, 수심 4,950 m까지 평균 $1.6 \pm 0.7 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이 보존되어 심해로 침전되는 것으로 계산되었다. 이는 표층해양에서 생산된 유기탄소의 1.5% 정도가 수심 1,250 m까지 침강하고, 0.5%만이 심해로 침전되는 것을 의미한다. 본 연구에서 계산된 유기탄소 플럭스의 수직 변화 비율은 동태평양 인근해역에서 보고된 자료와 유사하였다(Hernes et al. 2001; Buesseler et al. 2007). JGOFS 프로그램을 통해 동태평양 열대해역에서 관측된 저층 유기탄소 플럭스와 일차생산력의 비율은 0.1–1%의 범위를 보였다(Honjo et al. 1995; Hernes et al. 2001). 특히 동태평양 열대해역 정점(EqPac 9N: 9°N, 140°W, 5N: EqPac 5°N, 140°W)에서 1992년 2월부터 1993년 1월까지 중층과 저층에서 유기탄소 플럭스 자료를 이용하여 계산된 유기탄소의 전달효율은 40–60%이었다(Honjo et al. 1995;

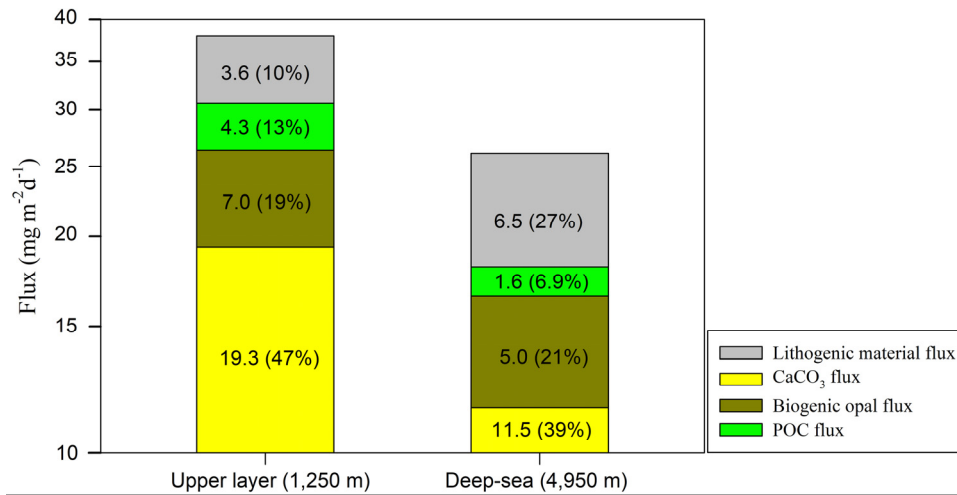


Fig. 6. Stacked bar plots of the biogenic fluxes at the Station KOMO from September 2009 to July 2010. The proportions (as %) of each component are included in parentheses. Note that the y-axis is log scale. Thus, the height of the stacked bar is not exactly equal to the total particle flux. Data for deep-sea (4,950 m) at the Station KOMO are from Kim et al. (2019)

Hernes et al. 2001). 이들의 연구는 1992/93년에 수행되었으며, 이 시기는 양의 PDO 기간이었다. 하지만 본 연구에서 측정된 침강입자는 2009/10년에 획득하였으며, 이 시기는 음의 PDO 기간에 해당한다. 따라서 동태평양 열대해역에서는 PDO의 값에 상관없이 유기탄소 플럭스의 수직 변화 비율은 유사하게 나타났다.

그렇다면 왜 동태평양 열대해역에서 유기탄소 침전비율은 양과 음의 PDO 기간에 유사하게 나타나는가? 일반적으로 수층 내에서 유기탄소의 침강비율은 입자의 침강속도와 해양생물 군집 구조, 생물기원 원소의 구성 비 등에 영향을 받는다(Ittekkot et al. 1996; Honjo et al. 1995; Buesseler et al. 2007). 본 연구의 경우처럼, 두 수심에서 퇴적물 트랩의 시료획득 기간과 주기가 동일하였고, 침강입자 플럭스의 시간적 변동이 매우 유사하였다. 특히 두 수심에서 측정된 침강입자 플럭스는 동일한 시기에 최대값을 보였다. 이러한 경우, 침강입자 플럭스의 시간적 변화 추적을 통해 입자의 침강속도는 아래의 방정식으로 계산할 수 있다(e.g., Honjo et al. 1995; Berelson 2002).

Settling velocity (m/day) = (d2-d1)/sampling interval (day)

위 방정식에서 d1과 d2는 각각 중층과 저층에 설치된 퇴적물 트랩 수심을 의미하며, sampling interval은 침강입자 시료 획득 주기를 지시한다. 위 방정식을 이용하여 추정된 입자의 침강속도는 123 m day⁻¹ 이상이다. 이는 동태평양 열대해역에서 동일한 방법으로 추정된 입자의 침강

속도(100–180 m day⁻¹)와 유사하다(Honjo and Manganini 1993; Honjo et al. 1995; Berelson 2002). 따라서 동태평양 열대해역 중층에서 저층까지 입자의 침강속도는 이전 연구결과와 큰 차이를 보이지 않았다.

음의 PDO 기간인 2010년 2월부터 4월까지, 정점 KOMO 저층에서 측정된 부유성 유공충 플럭스도 탄산칼슘 플럭스의 70%이상 차지하였다(Kim et al. 2019). 또한, 정점 KOMO 저층에서 2003년부터 2013년까지 측정된 침강입자 내 생물기원 원소 비(탄산칼슘: 40–50%, 생물기원 규소: 17–25%, 유기탄소: 10%)는 비교적 일정하게 유지되었다(Kim et al. 2019). 이에 본 연구정점에서 양과 음의 PDO 기간에 측정된 탄산칼슘 플럭스는 주로 부유성 유공충의 생산성 변화에 영향을 받는 것으로 생각되며, 이는 두 기간 동안 생물군집 구조는 뚜렷한 차이를 보이지 않았음을 의미한다.

Buesseler et al. (2007)은 북서태평양 정점 K2와 북동태평양 정점 ALOHA에서 트와일라잇 존(twilight zone: 유공충과 수심 500 m 사이)에서 유기탄소 침강비율을 측정하였다. 북서태평양 정점 K2에서 유기탄소 플럭스 침강비율(3.5–5.5%)은 북동태평양 정점 ALOHA에서 측정된 값(1.6–2.0%) 보다 약 2배 높게 나타났다(Buesseler et al. 2007). 이 해역별 유기탄소 플럭스 침전비율의 차이는 해양생물 군집 차이를 반영한 결과이다(Buesseler et al. 2007). 북동태평양 정점 ALOHA해역은 초미세플랑크톤(picophytoplankton)이 우점한 해양환경인 반면, 북서태평양 정점 K2에서 규조류가 우점한 환경이었으며, 침강입자 내 생물기원 규소 함량은 70–80%의 범위를 보였다(Honda et al. 2006;

Buesseler et al. 2007). 북서태평양에서 수행된 이전연구 결과, 규조류가 우세한 해양환경에서 멩쳐진 침강입자는 초미세플랑크톤의 사체로 구성된 침강입자 보다 무겁기 때문에 심해로 유기탄소 전달효율이 증가하는 것으로 보고된 바 있다(Honda et al. 2006; Buesseler et al. 2007). 본 연구에서 계산된 중층과 저층 간 유기탄소의 침강비율은 탄산칼슘이 우세한 동태평양 열대해역 침강입자 특성을 반영한 결과로 해석된다. 특히 탄산칼슘으로 구성된 부유성 유공충은 수층 내에서 매우 빠른 침강 속도($100\text{--}200\text{ m day}^{-1}$, Takahashi and Be 1984)를 보이기 때문에 탄산칼슘과 결합된 유기탄소를 보다 효율적으로 심해로 운반하는 것으로 판단된다. 결론적으로 동태평양 열대해역 침강입자는 탄산칼슘 함량이 우세한 특성을 보이며, 이로 인해 유광층에서 생성된 유기탄소가 심층으로 전달되는 효율이 높은 해역이라고 해석된다.

5. 결 론

동태평양 열대해역 내 KOMO 정점 중층에서 2009년 9월부터 2010년 7월까지 측정된 침강입자 플럭스는 뚜렷한 시간적 변동을 보였다. 이는 적도수렴대의 계절적 위치 변동에 따른 해양생산력 변화를 반영한 결과로 해석된다. 동일한 시기 정점 KOMO 저층에서 측정된 총입자 플럭스는 중층에서 측정된 값의 2/3 정도로 낮았다. 두 수심 간 총입자 플럭스 차이는 주로 탄산칼슘 용해의 영향을 반영한 결과로 나타났다.

연구기간 동안, 유광층에서 수심 1,250 m로 유기탄소 침강비율은 0.8–2.8%의 변화범위를 보였고, 평균 $1.4\pm 0.6\%$ 이었다. 또한 중층(수심 1,250 m)에서 저층(수심 4,950 m)으로 유기탄소 전달효율은 약 49%로 나타났으며, 이는 중층에서 저층으로 침강하는 동안 약 51%의 유기탄소가 분해되어 재순환되는 것을 의미한다. 이러한 중층과 저층 간 유기탄소의 침강 비율은 양의 PDO 기간에서 측정된 이전 연구결과 값과 유사하다. 이러한 결과는 동태평양 열대해역에서 침강입자는 주로 무거운 탄산칼슘으로 구성된 영향을 반영한 결과로 판단된다. 결론적으로 탄산칼슘 입자가 우세한 동태평양 열대해역에서 PDO 변동에 따른 해양생산성 변화가 수층 내 유기탄소 분해비율에 미치는 영향은 미미한 것으로 해석된다.

사 사

본 연구는 해양수산부 R&D 사업인 국제해저지구 의무 이행 및 심해저 개발역량 확충연구(20160099) 과제에 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Alonso-González IJ, Aristegui J, Lee C, Sanchez-Vidal A, Calafat A, Fabres J, Sangra P, Masque P, Hernandez-Guerra A, Benitez-Barrios V (2010) Role of slowly settling particles in the ocean carbon cycle. *Geophys Res Lett* **37**:L13608. doi:10.1029/2010GL043827
- Amador JA, Alfaro EJ, Lizano OG, Magaña VO (2006) Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: a review. *Prog Oceanogr* **69**:101–142
- Armstrong RA, Lee C, Hedges JI, Honjo S, Wakeham SG (2002) A new, mechanism model for organic carbon fluxes in the ocean based on the quantitative association of POC with ballast minerals. *Deep-Sea Res Pt II* **49**:219–236
- Baker ET, Milburn HB, Tennant DA (1988) Field assessment of sediment trap efficiency under varying flow condition. *J Mar Res* **46**:573–592
- Barber RT, Sanderson MP, Lindley S, Chai F, Newton J, Trees CC, Foley DG, Chavez FP (1996) Primary productivity and its regulation in the equatorial Pacific during and following the 1991–1992 El Nino. *Deep-Sea Res Pt II* **43**:933–969
- Behrenfeld MJ, Falkowski PG (1997) Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol Oceanogr* **42**(1):1–20
- Behringer D, Xue Y (2004) Evaluation of the global ocean data assimilation system at NECP: the Pacific Ocean. In: Eight Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land surface, American Meteorological Society 84th annual meeting, Washington, pp 11–15
- Berelson WM (2002) Particle settling rates increase with depth in the ocean. *Deep-Sea Res Pt II* **49**:237–251
- Buesseler KO, Lamborg CH, Boyd PW, Lam PJ, Trull TW, Bidigare RR, Bishop JKB, Casciotti KL, Dehairs F, Elskens M, Honda M, Karl DM, Siegel DA, Silver MW, Steinberg DK, Valdes J, Mooy BV, Wilson S (2007) Revisiting carbon flux through the oceans's twilight zone. *Science* **316**:567–570
- 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 1997–98 El Nino. *Science* **286**(5447):2126–2131
- DeMaster DJ (1981) The supply and accumulation of silica in the marine environment. *Geochim Cosmochim Acta* **45**:1715–1732
- DeVries T, Holzer M, Primeau F (2017) Recent increase in

- oceanic carbon uptake driven by weaker upper-ocean overturning. *Nature* **542**:215–218
- DiTullio GR, Hutchins DA, Bruland KW (1993) Interaction of iron and major nutrients controls phytoplankton growth and species composition in the tropical North Pacific Ocean. *Limnol Oceanogr* **38**(3):495–508
- Dugdale RC, Wilkerson FP (1991) Low specific nitrate uptake rate: a common feature of high-nutrient, low-chlorophyll marine ecosystems. *Limnol Oceanogr* **36**(8):1678–1688
- Dymond J, Collier R (1988) Biogenic particle fluxes in the equatorial Pacific: evidence for both high and low productivity during the 1982–1983 El Niño. *Global Biogeochem Cy* **2**(2):129–137
- England MH, McGregor S, Spence P, Meehl GA, Timmermann A, Cai W, Gupta AS, McPhaden MJ, Purich A, Santoso A (2014) Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nat Clim Change* **4**:222–227
- Fischer G, Wefer G (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 PJ (eds) *Particle flux in the Ocean*. SCOPE. John Wiley & Sons Ltd., New York, pp 199–214
- Francois R, Honjo S, Krishfield R, Manganini S (2002) Factors controlling the flux of organic carbon to the bathypelagic zone of the ocean. *Global Biogeochem Cy* **16**(4):1087. doi:10.1029/2001GB001722
- Fung L, Meyn S, Tegen I, Doney SC, John J, Bishop JKB (2000) Iron supply and demand in the upper ocean. *Global Biogeochem Cy* **14**:281–296
- Gnanadesikan A (1999) A global model of silicon cycling: sensitivity to eddy parameterization and dissolution. *Global Biogeochem Cy* **13**:199–220
- Gust G, Byrne RH, Bernstein RE, Betzer PR, Bowles W (1992) Particle fluxes and moving fluids: experience from synchronous trap collections in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Res* **39**:1071–1083
- Hay WW (2004) Carbonate fluxes and calcareous nannoplankton. In: Thierstein HR, Young JR (eds) *Coccolithophores*. Springer, New York, pp 509–528
- Henson SA, Sanders R, Madsen E (2012) Global patterns in efficiency of particulate organic carbon export and transfer to the deep ocean. *Global Biogeochem Cy* **26**:GB1028. doi:10.1029/2011GB004099
- Hernes PJ, Peterson ML, Murray JW, Wakeham SG, Lee C, Hedges JI (2001) Particulate carbon and nitrogen fluxes and compositions in the central equatorial Pacific. *Deep-Sea Res Pt II* **48**:1999–2023
- Honda MC, Kawakami H, Sasaoka K, Watanabe S, Dickey T (2006) Quick transport of primary produced organic carbon to the ocean interior. *Geophys Res Lett* **33**(16):L16603. doi:10.1029/2006GL026466
- Honjo S, Dymond J, Collier R, Manganini SJ (1995) Export production of particles to the interior of the equatorial Pacific Ocean during the 1992 EqPac experiment. *Deep-Sea Res Pt II* **42**:831–870
- Honjo S, Manganini S, Cole JJ (1982) Sedimentation of biogenic matter in the deep ocean. *Deep-Sea Res* **29**(5A):609–625
- Honjo S, Manganini SJ (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 Res* **40**:587–607
- Ittekkot V, Schafer P, Honjo S, Depetris P (1996) *Particle flux in the ocean*, John Wiley & Sons, Chichester, 327 p
- Karl DM, Christian JR, Dore JE, Hebel DV, Letelier RM, Tupas LM, Winn CD (1996) Seasonal and interannual variability in primary production and particle flux at Station ALOHA. *Deep-Sea Res Pt II* **43**:539–568
- Kawahata H, Yamamuro M, Ohta H (1998) Seasonal and vertical variations of sinking particle fluxes in the west Caroline basin. *Oceanol Acta* **21**(4):521–532
- Khim BK, Shim J, Yoon HI, Kang YC, Jang YH (2007) Lithogenic and biogenic particle deposition in an Antarctic coastal environment (Marian Cove, King George Island): seasonal patterns from a sediment trap study. *Estuar Coast Shelf S* **73**:111–122
- Kim D, Choi MS, Oh HY, Kim KH, Noh JH (2009) Estimate of particulate organic carbon export flux using $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium in the southwestern East Sea during summer. *The Sea* **14**(1):1–9
- Kim HJ, Hyeong KS, Yoo CM, Chi SB, Khim BK, Kim D (2010) Seasonal variations of particle fluxes in the north-eastern equatorial Pacific during normal and weak El Niño periods. *Geosci J* **14**(4):415–422
- Kim HJ, Hyeong KS, 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 Pt I* **67**:111–120
- Kim HJ, Kim D, Hyeong K, Hwang J, Yoo CM, Ham DJ, Seo I (2015) Evaluation of resuspended sediments to sinking particles by benthic disturbance in the Clarion-Clipperton nodule fields. *Mar Georesour Geotec* **33**:160–166
- Kim HJ, Kim D, Hyeong K, Kim KH, Son JW, Hwang SC, Chi SB, Kim KH, Khim BK (2008) Seasonal variations of particle fluxes in the Northeastern Pacific. *The Sea*

- 13:200–209
- Kim HJ, Kim D, Yoo CM, Chi SB, Khim BK, Shin HR, Hyeong K (2011) Influence of ENSO variability on sinking-particle fluxes in the northeastern equatorial Pacific. *Deep-Sea Res Pt I* **58**:865–874
- Kim HJ, Kim D, Yoo CM, Park JY, Jeong H, Hwang J (2021) Biological carbon pump efficiency enhanced by atmospheric dust deposition in the North Pacific Subtropical Gyre. *J Marine Syst* **224**:103634. doi:10.1016/j.marsys.2021.103634
- Kim HJ, Kim TW, Hyeong KS, Yeh SW, Park JY, Yoo CM, Hwang J (2019) Suppressed CO₂ outgassing by an enhanced biological pump in the Eastern Tropical Pacific. *J Geophys Res-Oceans* **124**(11):7962–7973. doi:10.1029/2019JC015287
- Lampitt RS (1985) Evidence for the seasonal deposition of detritus to the deep-sea floor and its subsequent resuspension. *Deep-Sea Res* **32**:885–897
- Lee TH, Kim D, Khim BK, Choi DL (2010) Organic carbon cycling in Ulleung basin sediments, East Sea. *Ocean Polar Res* **32**(2):145–156
- Lee Y, Asahi H, Woo HJ, Kim HJ, Lee SJ, Khim BK (2014) Seasonal variation of planktonic foraminifera assemblage in response to seasonal shift of inter-tropical convergence zone in the northeastern equatorial Pacific. *Ocean Polar Res* **36**(4):437–445
- Neuer S, Torres-Padron ME, Gelado-Caballero MD, Rueda MJ, Hernandez-Brito J, Davenport R, Wefer G (2004) Dust deposition pulses to the eastern subtropical North Atlantic gyre: does ocean's biogeochemistry respond? *Global Biogeochem Cy* **18**:GB4020. doi:10.1029/2004GB002228
- 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
- Rea DK, Leinen M (1985) Neogene history of the calcite compensation depth and lysocline in the South Pacific Ocean. *Nature* **316**:805–807
- Reynolds RW, Smith TM, Liu C, Chelton DB, Casey KS, Schlax MG (2007) Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J Climate* **20**(22):5473–5496
- Sautter LR, Sancetta C (1992) Seasonal associations of phytoplankton and planktonic foraminifera in an upwelling region and their contribution to the seafloor. *Mar Micro-paleontol* **18**:263–278
- Son J, Kim KH, Kim HJ, Ju SJ, Yoo CM (2014) 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. *Ocean Polar Res* **36**(4):423–435
- Subhas AV, McCorkle DC, Quizon A, McNichol AP, Long MH (2019) Selective preservation of coccolith calcite in Ontong-Java Plateau sediments. *Paleoceanogr Paleoclimatol* **34**:2141–2157
- Takahashi K, Be AWH (1984) Planktonic foraminifera: factors controlling sinking speeds. *Deep-Sea Res* **31**(12):1477–1500
- Takahashi K, Billing JD, Morgan JK (1990) Oceanic province: Assessment from the time-series diatom fluxes in the northeastern Pacific. *Limnol Oceanogr* **35**(1):154–165
- Thunell RC, Curry WB, Honjo S (1983) Seasonal variation in the flux of planktonic foraminifera: time series sediment trap results from the Panama basin. *Earth Planet Sc Lett* **64**(1):44–55
- Trull T, Bray S, Manganini S, Honjo S, Francois R (2001) Moored sediment trap measurement of carbon export in the sub-antarctic and polar frontal zones of the Southern Ocean, south of Australia. *J Geophys Res* **106**:31489–31509. doi:10.1029/2000JC000308
- Zhuang G, Duce RA, Kester DR (1990) The dissolution of atmospheric iron in the surface seawater of the open ocean. *J Geophys Res* **95**:16207–16216

Author's Information

Hyung Jeek Kim

Principal Research Scientist, Korea Institute of Ocean Science & Technology

Sosul Cho

Full-time Research Specialist, Korea Institute of Ocean Science & Technology

Dongseon Kim

Principal Research Scientist, Korea Institute of Ocean Science & Technology

Kyeong Hong Kim

Principal Research Scientist, Korea Institute of Ocean Science & Technology

Chan Min Yoo

Principal Research Scientist, Korea Institute of Ocean Science & Technology

Received Jun. 29, 2022

Revised Aug. 19, 2022

Accepted Sep. 7, 2022

Copyright © 2022 Ocean and Polar Research

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted educational and non-commercial use, provided the original work is properly cited.