

Article

적도수렴대의 위치변화에 따른 북동태평양 적도해역의 부유성 유공충
군집의 계절변동

이유리^{1,2} · Hirofumi Asahi⁴ · 우한준³ · 김형직^{2*} · 이성주¹ · 김부근⁵

¹경북대학교 자연과학대학 지질학과
(702-701) 대구광역시 북구 대학로 80
²한국해양과학기술원 심해저광물자원연구센터
³한국해양과학기술원 관할해역지질연구센터
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787
⁴한국해양과학기술원 부설 극지연구소
(406-840) 인천광역시 연수구 송도 미래로 26
⁵부산대학교 자연과학대학 해양학과
(609-735) 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

Seasonal Variation of Planktonic Foraminifera Assemblage in response to
Seasonal Shift of Inter-Tropical Convergence Zone in the Northeastern
Equatorial Pacific

Yuri Lee^{1,2}, Hirofumi Asahi⁴, Han Jun Woo³, Hyung Jeek Kim^{2*},
Seong-Joo Lee¹, and Boo-Keun Khim⁵

¹Department of Geology, College of Natural Sciences, Kyungpook National University
Daegu 702-701, Korea

²Deep-sea and Seabed Mineral Resources Research Center, KIOST

³Korean Seas Geosystem Research Center, KIOST
Ansan 426-744, Korea

⁴Korea Polar Research Institute, KIOST
Incheon 406-840, Korea

⁵Department of Oceanography, College of Natural Sciences, Pusan National University
Busan 609-735, Korea

Abstract : A time-series sediment trap was operated at a water depth of 4950 m from July 2003 to May 2004 at KOMO station (10°30'N, 131°20'W) in the northeastern equatorial Pacific, with the aim of understanding the temporal variation of planktonic foraminifera assemblages in response to the seasonal shift of Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ). A total of 22130 planktonic foraminifera specimens belonging to 30 species and 11 genera were identified, which shows a distinct seasonal variation with high values (125~288 specimens m⁻² day⁻¹) in the winter to spring (December-May) and low values (16~23 specimens m⁻² day⁻¹) in the fall (September-November). In addition, seasonal ecological differences of foraminifera assemblages are distinctly recognizable: omnivorous foraminifera occurred predominantly

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

during the summer season, whereas herbivorous ones were dominant during the winter season. Such seasonal variations correspond to the seasonal shift of the ITCZ. Enhanced occurrence of herbivorous species during the winter-spring season seems a result of surface water mixing generated by the southward shift of the ITCZ. The increase in omnivorous species during the summer season may be due to the northward movement of the ITCZ caused by weakened wind speed, resulting in the intensification of water column stratification and nutrient-poor environment. A significant reduction of planktonic foraminifera specimens during the fall is attributed to heavy precipitation and reduction in light intensity.

Key words : ITCZ, northeastern equatorial Pacific, planktonic foraminifera, seasonal variation

1. 서론

부유성 유공충의 군집분포는 다양한 환경 요소(수온, 염분, 광도 등)의 영향을 받기 때문에(Hemleben et al. 1989; Kuroyanagi et al. 2008) 해양 환경변화를 유추하는데 매우 유용한 도구로 활용된다(e.g. Coloma et al. 2005; Gajardo et al. 2013). 따라서 해양퇴적물 내 유공충 군집 분석을 통한 고환경복원(수온 및 수온약층 깊이 변화 등) 연구가 전 대양에 걸쳐 수행되고 있으며(Imbrie and Kipp 1971; Andreasen and Ravelo 1997), 최근에는 부유성 유공충의 군집구조를 이용하여 전 지구적 환경변화[예, 태평양 해역의 남방진동(El Niño Southern Oscillation)]의 영향과 원인에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Watkins et al. 1996, 1998; Kuroyanagi et al. 2008; Kim et al. 2010).

북동태평양 지역은 지구온난화에 따른 환경 변화(엘니뇨와 라니냐)의 핵심 연구 지역으로 이 해역의 적도수렴대 위치변동 또한 해양환경 변화에 영향을 미치는 주요 요인으로 인식되고 있다(Honjo et al. 1995; Amador et al. 2006; Fiedler and Talley 2006; Pennington et al. 2006; Kim et al. 2010, 2011). 적도수렴대의 계절적 위치변동은 수온, 강우(염분), 바람의 세기 등의 해양환경 변화를 유발하며, 이러한 해양환경 변화는 부유성 유공충과 같은 해양 생물상 변화를 유발하는 것으로 알려져 있다(Thunell et al. 1983; Barber et al. 1996; Kim et al. 2010).

적도수렴대의 계절변동이 부유성 유공충 군집 변화에 미치는 영향을 평가하기 위하여 시계열 퇴적물 포집장치, 플랑크톤 네트를 이용한 연구가 북동태평양에서 수행된 바 있다(Thunell et al. 1983; Watkins et al. 1996, 1998). Thunell et al. (1983)은 북동태평양 파나마 분지의 한 정점(5°21'N, 81°53'W)에서 1979년 12월부터 약 1년간 시계열 퇴적물 포집장치를 이용하여 적도수렴대의 계절변동에 따른 부유성 유공충의 군집 변화를 정량적으로 평가하였다. 이 연구에서는 적도수렴대가 남하하는 겨울에 강한 무역풍의 영향으로 표층 생산성이 높은 곳에 서식하는 종(*Neogloboquadrina dutertrei*, *Globorotalia theyeri*)이 증

가하였다고 보고하였다(Thunell et al. 1983). 하지만 Joint Global Ocean Flux Study(JGOFS) 프로그램의 일환으로 북동태평양 해역(9°N~12°S, 140°W)에서 플랑크톤 네트를 이용하여 수행된 Watkins et al. (1996, 1998) 연구에서는 겨울에 북적도 반류 해역(5°N~9°N, 140°W)은 빈영양 환경이었으며, 이 영향으로 주로 빈영양 해역에 서식하는 종(*Globigerinoides sacculifer*, *Globigerinoides ruber*)들이 우세하게 관찰되었다고 보고하였다. 이러한 상반된 연구 결과는 이 지역의 해양환경이 적도수렴대의 위치변화에 따라 계절적으로 민감하게 변화하며, 이들의 연구해역이 적도해역과 인접하여 엘니뇨/라니냐와 같은 전 지구적 환경변화가 영향을 미치기 때문인 것으로 파악된다. 따라서 북동태평양 해역에서 적도수렴대의 계절적 변동에 따른 해양환경 변화와 부유성 유공충 군집 변동 간 관계성을 파악하기 위해 평상시기 동안 고해상도의 시계열 퇴적물 포집장치로 획득한 침강입자 내 부유성 유공충 군집의 계절변화 연구가 필수적이다.

북동태평양 대한민국 망간단괴 광구 해역 내에 위치한 장기모니터링 정점(KOMO; Korea Deep-Sea Environmental Study Long-term Monitoring Station, 10°30'N, 131°20'W)은 적도수렴대의 계절적 변동범위에서 북쪽 가장자리에 위치하여 이 계절변동에 따른 해양환경 변화와 부유성 유공충 군집 변화 연구에 최적의 장소를 제공한다. 이 정점에서 장기간 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 Kim et al. (2008, 2010, 2011)은 기후환경 변화에 따른 침강입자 플럭스의 계절/연 변화를 평가하였지만, 부유성 유공충 군집 변화 등과 같은 해양 생물상 변화 연구는 아직까지 수행된 바 없다. 이번 연구에서는 KOMO 정점에서 엘니뇨/라니냐의 영향을 받지 않는 평상시기에 획득한 침강입자 시료를 이용하여 적도수렴대의 계절적 위치변동에 따른 부유성 유공충 군집의 변화를 분석하고, 해양환경인자 간의 상관성을 파악하였다.

2. 재료 및 방법

북동태평양 내 우리나라 망간단괴 광구 해역에 위치한

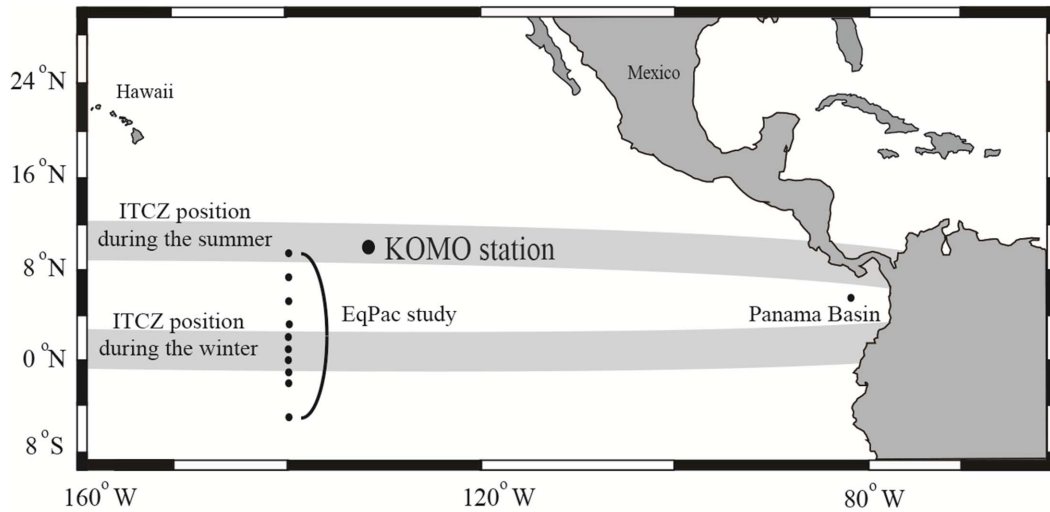


Fig. 1. Map showing the location of the mooring site and referred sites in the northeastern equatorial Pacific. The location of the Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ) is from Forsbergh (1969). Data for site EqPac study and Panama Basin from Watkins et al. (1996), Thunell et al. (1983) and Thunell and Reynolds (1984), respectively

KOMO 정점에서 2003년 7월부터 2004년 5월(정상시기: 미국국립 해양 대기국, www.cpc.noaa.gov)까지 시계열 퇴적물 포집장치를 수심 약 4,960 m에 계류하여 침강입자 시료를 획득하였다(Kim et al. 2008, 2010). 시계열 퇴적물 포집장치 계류 전에 붕산나트륨(sodium borate, BORAX)으로 중화된 약 5% 포르말린 용액을 시료용기에 넣어 포집된 침강입자가 부패되지 않도록 하였다(Kim et al. 2008, 2010). 연구기간 동안 KOMO 정점에서는 약 한달 간격으로 침강입자를 포집하였으나, 기기의 이상(rotator 작동결함)으로 2004년 2월과 3월의 시료가 동일한 시료용기에 포집되었다(Kim et al. 2008, 2010). 이 시기의 부유성 유공충 개체수는 평균 값을 사용하였다. 획득한 시료는 McLANE사의 WSD-10(Wet Sample Divider-10)을 이용하여 다섯 등분하였으며, 이 중 하나의 시료를 유공충 분석에 사용하였다. 유공충은 125 μm 체를 이용하여 침강시료에서 분리하였으며, 부유성 유공충 동정은 Saito et al. (1981)을 참고하여 실체 현미경 하에서 관찰하였다. 유공충은 개체수가 적은 시기(9~11월)를 제외하고 300~600 개체를 분석하였으며, 계수된 부유성 유공충은 정확한 월별 변화를 관측하기 위해 평방미터와 일수로 나누고 반올림하여 정수로 나타냈다.

3. 연구지역

KOMO 정점이 위치하는 연구해역의 표층특성은 엘니뇨/라니냐의 기후변화뿐만 아니라 북동무역풍과 남동무역풍의 상대적인 세기에 기인된 적도수렴대의 계절적인 위치변화에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려졌다(Thunell

et al. 1983; Kim et al. 2008, 2010, 2011). 북동태평양에서 적도수렴대는 여름과 가을에 북위 11°로 북상하고, 겨울에는 북위 1°로 남하하는 계절 변동을 보이며(Figs. 1 and 2a, modified from Forsbergh 1969), 이에 따라 표층수온과 염분도 뚜렷한 계절변동을 보인다(Fig. 2b, 2c). 적도수렴대가 북상하는 여름에 표층수온은 28°C 이상으로 나타나며, 표층염분은 34 PSU 이하로 감소하고, 풍속도 약 5 m s^{-1} 이하로 약해져서 혼합층 깊이도 16~24 m 정도로 얕아진다(Fig. 2c, 2d). 적도수렴대가 남하하는 겨울과 봄철에 풍속이 9~10 m s^{-1} 으로 강해지며, 혼합층 깊이가 약 55 m까지 발달한다(Fig. 2d). 표층수온은 26~28°C 정도로 감소하며, 표층 염분은 34 PSU 이상으로 높아진다(Fig. 2c).

북동태평양 해역에서 산출되는 부유성 유공충은 주로 *N. dutertrei*, *Globigerinoides conglobatus*, *G. ruber*, *Globorotalia menardii*, *G. sacculifer*, *Globigerina conglomerate*, *Globorotalia tumida*, *Pulleniatina obliquiloculata* 등으로 이들은 주로 열대-온대종이며, 개체수 및 서식 깊이의 계절적인 변화를 보인다. 여름에는 *G. ruber*, *G. sacculifer*, *G. conglobatus*가 우세하게 관찰되며, 겨울에는 *N. dutertrei*, *G. menardii*, *G. conglomerate*, *G. tumida*, *P. obliquiloculata* 등의 종들이 번성하는 것으로 알려진다(Thunell et al. 1983; Thunell and Reynolds 1984; Watkins et al. 1996).

4. 결 과

연구기간 동안 관찰된 부유성 유공충은 총 11속 30종으로 확인된다. 이 중 7속 13종이 우점종(월별 채집된 유공

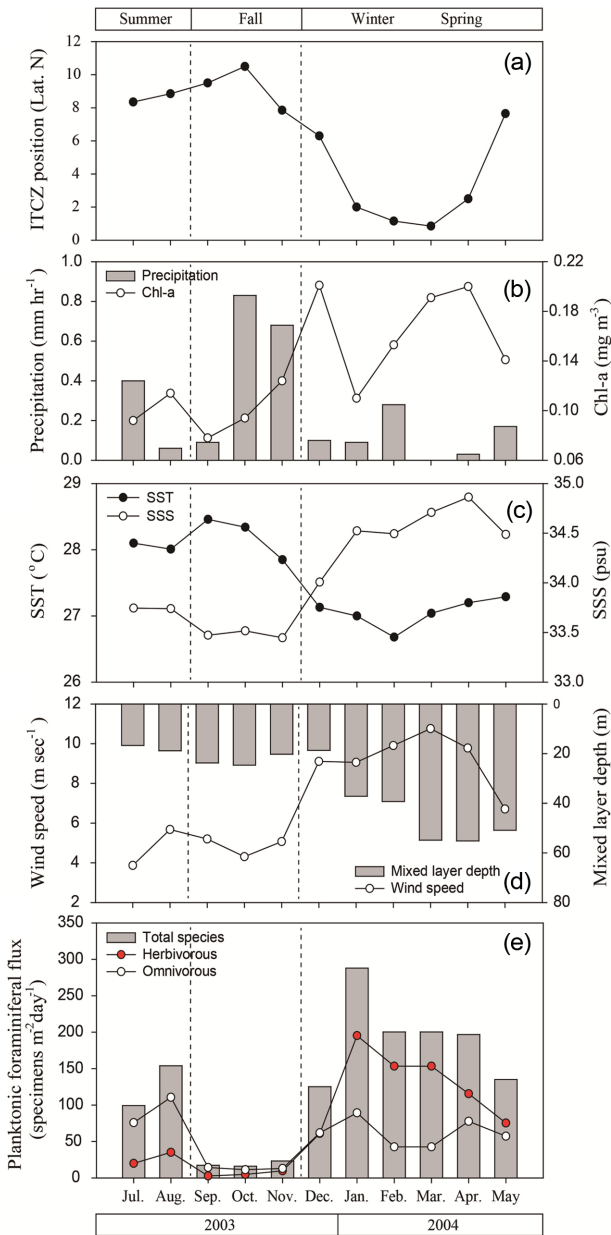


Fig. 2. Relation between monthly climate and planktonic foraminiferal flux (specimens $m^{-2} day^{-1}$) at KOMO station from July 2003 to May 2004. Monthly variation of Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ) from Forsbergh (1969) (a), precipitation and chlorophyll-a (b), sea surface temperature (SST) and sea surface salinity (SSS) (c), wind speed and mixed layer depth (d), planktonic foraminiferal flux (e). Precipitation and SST, SSS data were adopted from Tropical Atmosphere Ocean project data ($9^{\circ}N$, $140^{\circ}W$). The chlorophyll-a, wind speed and mixed layer depth data from Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) and the Global Ocean Data Assimilation System (GODAS). The vertical dashed line represents periods based on seasonal variation of planktonic foraminifera and environmental factors

층 군집에서 5% 이상을 차지하는 유공충)이고, 이는 전체 유공충 군집에서 90% 이상을 차지한다. 유공충 개체수는 $16 \sim 288$ specimens $m^{-2} day^{-1}$ (평균: 132 specimens $m^{-2} day^{-1}$)의 범위에서 변화하였으며, 계절적으로 뚜렷한 차이를 보였다(Fig. 2e). 겨울-봄(12~5월) 시기의 부유성 유공충 개체수($125 \sim 288$ specimens $m^{-2} day^{-1}$)는 가을(9~11월, $16 \sim 23$ specimens $m^{-2} day^{-1}$)보다 10배 이상의 높은 값을 보이며, 여름(7월과 8월, $99 \sim 154$ specimens $m^{-2} day^{-1}$)에 측정된 부유성 유공충 개체수는 겨울과 가을 사이의 값을 보인다(Fig. 2e).

연구 해역에서 산출된 유공충을 유사한 환경에 서식하는 생태그룹으로 구분한 결과, 총 10여종의 유공충이 4개의 생태 그룹(*G. ruber*, *G. sacculifer*, *Globigerina bulloides*, and *N. dutertrei*)으로 구분된다. 각각의 군집에 속하는 유공충 종들은 Table 1에 정리하였다. 이 중 KOMO 지역에서 우세하게 산출되는 유공충 그룹은 *N. dutertrei* 그룹과 *G. ruber* 그룹으로 각각 전체 종의 16%, 22%를 차지한다. 연구기간 동안 *N. dutertrei* 그룹의 개체수는 $0 \sim 109$ specimens $m^{-2} day^{-1}$ (평균: 30 specimens $m^{-2} day^{-1}$)의 범위에서 변화하였으며, 겨울과 봄철에 최대값을 보였다(Table 2). 반면, *G. ruber* 그룹의 개체수는 $5 \sim 57$ specimens $m^{-2} day^{-1}$ (평균: 22 specimens $m^{-2} day^{-1}$)의 범위에서 변화하였으며, 여름에 최대값을 보였다(Table 2).

부유성 유공충은 생태학적으로 잡식성 종(omnivorous species)과 초식성 종(herbivorous species)으로 구분된다(Table 1). 연구 해역에서 우세하게 산출된 유공충(7속 13종)은 5속 7종의 잡식성 종과 5속 6종의 초식성 종으로 나타났다(Table 1). 연구기간 동안 초식성 유공충(평균: 75 specimens $m^{-2} day^{-1}$)은 잡식성 유공충(평균: 54 specimens $m^{-2} day^{-1}$)에 비해 다소 우세하게 산출되며(Table 2), 이들의 상대적 비율은 계절에 따라 다르게 나타난다(Fig. 2e). 잡식성 유공충은 2003년 8월에 최대(113 specimens $m^{-2} day^{-1}$)로 번성하고 10월에 최저값(11 specimens $m^{-2} day^{-1}$)을 보이며, 겨울과 봄에 비교적 많은 개체수($47 \sim 93$ specimens $m^{-2} day^{-1}$)가 관찰된다(Fig. 2e). 반면 초식성 종은 9월부터 11월(<10 specimens $m^{-2} day^{-1}$)까지 매우 드물게 산출되고, 이후 급격하게 증가하여 2004년 1월에 최대값(192 specimens $m^{-2} day^{-1}$)을 보인다(Fig. 2e).

5. 토 의

연구 해역에서 계절에 따른 잡식성과 초식성 종의 변화 양상은 대체적으로 일치한다. 즉, 두 그룹의 경우 모두 초겨울(11월)부터 증가하여 1월에 최고로 번성하며 7월까지 는 지속적으로 감소하다 8월에 다시 단기간 번성기를 거

Table 1. Two ecological groups (herbivorous and omnivorous) of planktonic foraminifera collected at water depth of 4950 m of KOMO station (10°30'N, 131°20'W). Each group is identified on the basis of absence/or presence of foraminifera spines

	Herbivorous	Omnivorous
Spinose		<i>Globigerinoides ruber</i> group * <i>Globigerinoides ruber</i> <i>Globigerinoides cyclostomus</i> <i>Globigerinoides pyramidalis</i> <i>Globigerinoides elongatas</i> <i>Globigerinoides sacculifer</i> group * <i>Globigerinoides sacculifer</i> * <i>Globigerinoides trilobus</i> <i>Globigerinella aequilateralis</i> <i>Orbulina universa</i> <i>Globigerinoides conglobatus</i> <i>Globigerina bulloides</i> group * <i>Globigerina bulloides</i> * <i>Globigerina foliata</i>
Nonspinose	<i>Neogloboquadrina dutertrei</i> group * <i>Neogloboquadrina dutertrei</i> * <i>Neogloboquadrina blowi</i> <i>Pulleniatina obliquiloculata</i> <i>Globigerinita glutinata</i> <i>Globoquadrina hexagona</i> <i>Globoquadrina conglomerata</i> <i>Globorotalia tumida</i>	<i>Globorotalia menardii</i>

*Individual species including group

Table 2. Average of total and seasonal flux (specimens m⁻² day⁻¹) of omnivorous and herbivorous planktonic foraminifera species

Species	Average of flux (specimens m ⁻² day ⁻¹)			
	Total	Summer	Fall	Winter-Spring
Omnivorous	57	95	13	66
<i>Globigerinoides ruber</i> group	22	55	6	19
<i>Globigerinoides conglobatus</i>	12	2	0	22
<i>Globigerinella aequilateralis</i>	9	17	2	11
<i>Globigerinoides sacculifer</i> group	7	7	3	8
<i>Globorotalia menardii</i>	2	8	0	1
<i>Globigerina bulloides</i> group	3	2	0	4
<i>Orbulina universa</i>	2	6	1	1
Herbivorous	72	26	6	122
<i>Neogloboquadrina dutertrei</i> group	30	1	2	53
<i>Globorotalia tumida</i>	14	0	1	24
<i>Globigerinita glutinata</i>	12	14	1	17
<i>Globoquadrina conglomerata</i>	9	5	1	15
<i>Pulleniatina obliquiloculata</i>	6	0	0	11
<i>Globoquadrina hexagona</i>	3	7	1	2

치는 양상으로 변화한다. 하지만 두 그룹의 변화 비율은 다르다. 최고조(1월)로 증가한 후 지속적으로 감소하는 5월까지의 초식성 유공충이 잡식성 유공충에 대하여 약

2배 이상으로 증가하는 반면, 여름(7월과 8월)에는 이전의 계절과 달리 잡식성이 초식성에 비해 우세하게(약 3배) 관찰된다. 가을(9~11월)에는 두 그룹 모두 최저로 산출된다.

이와 같은 잡식성과 초식성 종의 계절에 따른 상대적 변성도의 차이는 해양에서 먹이 가용성(food availability)의 상대적 변화를 의미하며, 먹이 가용성은 또한 해양 환경변화에 기인한다. 따라서 잡식성과 초식성 종의 계절적 변동에 따라 KOMO 정점의 해양환경이 1년 동안에 크게 3번 변화했음을 지시한다. 즉 KOMO 정점의 해양환경은 잡식성이 번성하는 여름(7월과 8월)과 개체수가 급격하게 감소하는 가을(9~11월), 초식성이 번성하는 겨울-봄(12~5월) 세 시기로 구분된다(Fig. 2e).

여름(7월과 8월)에 잡식성 유공충의 상대적인 증가는 적도수렴대의 북상에 따른 해양환경 특성을 반영한 것으로 생각된다. 겨울에 최대로 남하한 적도수렴대는 여름에 연구해역에 접근한다(Fig. 2a). 이 시기 연구해역의 표층 수온은 28°C 이상이며, 적도수렴대의 북상에 의해 풍속은 약화된다(Fig. 2d). 이처럼 높은 수온과 약한 풍속의 영향으로 연구해역의 해양환경은 성층화가 강화되고, 혼합층의 깊이는 얕아진다(Fig. 2d). 따라서 수온약층 이하에서 표층으로 영양염 공급이 약화되어 연구해역의 표층해양은 엽록소 농도가 비교적 낮은 빈 영양 상태를 띤다(Fig. 2b). 이 시기에 높은 비율을 보이는 잡식성 유공충은 일반적으로 골침(spine)을 이용하여 동-식물 플랑크톤을 섭식하는 것으로 알려져 있다(Hemleben and Spindler 1983; Spindler et al. 1984). 실제로, 빈영양 환경에서 잡식성 군집(e.g. *G. ruber*, *G. conglobatus*)이 우세한 현상은 서태평양 적도 해역(Kawahata 2002)과 북동태평양 파나마 분지(Thunell and Reynolds 1984) 연구에서 보고되었다. 본 연구에서도 비교적 높은 수온과 빈 영양 환경 특성을 갖는 여름에 *G. ruber* 군집과 *G. aequilateralis*의 개체수가 상대적으로 높게 관찰되며, 이는 태평양에서 수행된 이전 연구결과와 잘 일치한다. 따라서 본 연구해역에서 여름철에 관측된 잡식성 유공충의 증가는 강한 성층화로 인한 수온약층 이하로부터 영양염 공급의 차단과 이에 따른 빈 영양 환경을 반영한 결과로 판단된다.

가을(9~11월)에 관찰된 부유성 유공충 개체수의 급격한 감소는 적도수렴대의 영향을 반영한 결과로 생각된다. 이 시기는 적도수렴대가 최대 북상하여 연구지역에 위치한다(Fig. 2a). 일반적으로 적도수렴대가 위치하는 지역은 풍속이 감소하고, 강우가 급격히 증가하여 그 해역의 염분이 감소하는 특성을 보인다(Kim et al. 2008). 실제로 이 시기의 염분은 33.45 PSU까지 감소하였으며, 이는 연구기간 중 가장 낮은 값이다. 이러한 표층 염분의 변화는 초식성 유공충 개체수의 변화와 매우 유사한 경향을 보이며, 이는 표층해양의 염분변화가 초식성 유공충의 성장과 번식에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다(Fig. 2c). 실제로 태평양과 인도양 등 대양에서 수행된 이전 연구에서도 부유성 유공충 개체수는 염분에 큰 영향을 받는 것으로

알려져 있으며, 특히 염분이 감소하는 시기에 부유성 유공충의 개체수도 급격히 감소하는 것으로 보고된다(e.g. Vincent and Berger 1981; Bijma et al. 1990; Gupta et al. 1997). 따라서 가을에 관측된 부유성 유공충 개체수의 감소는 염분변화의 영향을 반영한 것으로 판단된다. 표층염분 변화 이외에 빛의 세기도 부유성 유공충의 생산성과 성장을 제한하는 요인으로 알려져 있다(Ryther 1956; Latala 1991; Lionard et al. 2005). 가을철, 연구해역은 적도수렴대의 영향권에 위치하여 증가한 구름과 강우는 빛을 차단하여 부유성 유공충 개체수의 급격한 감소를 유발할 수 있다. 이러한 광량의 감소는 식물성 플랑크톤을 포식하는 생물의 성장에 영향을 미치며, 이에 따라 부유성 유공충의 먹이가 급격하게 감소하면서 개체수의 저하로까지 작용될 수 있다. 하지만, 이 시기 강우의 급격한 증가와 함께 표층 엽록소 농도도 함께 증가한 것으로 관찰되었다(Fig. 2b). 식물성 플랑크톤의 생체량 및 생산성을 지시하는 엽록소 농도의 증가는 표층해양에서 일차생산성의 증가를 의미한다. 이는 가을철 광량의 감소가 부유성 유공충 생산성 및 성장에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 따라서 가을철 부유성 유공충 개체수의 급격한 감소는 광량보다는 염분의 감소가 부유성 유공충의 성장에 제한을 주는 요인으로 작용한 것으로 판단되며, 이는 적도수렴대의 직접적인 영향을 반영한 결과로 해석된다.

겨울-봄(12~5월)에 부유성 유공충 개체수가 급격히 증가하였으며, 특히 초식성 유공충의 개체수 증가가 뚜렷하게 관찰되었다. 이러한 부유성 유공충 개체수의 증가는 적도수렴대 남하에 따른 해양환경 변화를 반영한 것으로 생각된다. 이 시기에 관찰된 초식성 유공충의 급격한 증가는 여름과 반대되며, 이는 적도수렴대 남하에 따른 영향을 반영한 것으로 생각된다. 겨울철 적도수렴대는 북위 4°까지 남하하여 연구해역과 멀어지게 되며, 연구해역은 강우량의 감소와 강한 북동무역풍의 영향으로 혼합층이 깊게 발달한다. 이에 따라 수온약층 이하로부터 표층으로 영양염 공급이 증가되며, 해양 생산성이 증가하는 것으로 알려진다(Kim et al. 2008, 2010) (Fig. 2b~2d). 일반적으로 초식성 유공충 종들은 주로 식물성 플랑크톤을 섭식하며, 용승(upwelling) 또는 바람에 의한 혼합이나 육성기원물질의 공급에 의해 식물성 플랑크톤이 번성하는 시기에 주로 관찰된다(e.g. Spindler et al. 1984; Hemleben et al. 1989; Chaisson 1995; Watkins et al. 1996; Kawahata 2002). 특히, 본 연구에서 겨울-봄에 우세하게 관찰된 *N. dutertrei* 군집과 *G. tumida*는 열대-아열대 해역의 표층이나 수온약층 이상의 깊은 수심에 서식하며, 해양 생산성이 높은 시기에 번성하는 종으로 알려진다(e.g. Thunell et al. 1983; Martinez et al. 1998; Kuroyanagi et al. 2004). 예를 들어, 북동태평양 해역 파나마 분지 내 정점(5°21'N, 81°53'W)

에서 시계열 퇴적물 포집장치를 이용하여 시기별 부유성 유공충 군집조성 변화를 관찰한 결과, 겨울에 *N. dutertrei*, *G. thyeri*와 같은 골침이 없는 초식성 종(nospinose and herbivorous species)들이 번성하였으며, 이는 이 시기에 강한 바람에 의한 용승과 일차 생산성 증가의 영향을 반영한 것으로 해석하였다(Thunell et al. 1983). 또한, 본 연구와 동일한 정점에서 수행된 Kim et al. (2008, 2010)의 연구에서도 겨울-봄에 강한 북동무역풍의 영향으로 해양 생산성과 부유성 유공충 개체수가 증가한다고 보고한다. 한편, 이 시기에 잡식성 유공충의 개체수는 여름철과 유사하게 관찰되었으며, 이는 잡식성 유공충의 성장과 번식은 표층해양 생산성 이외의 다른 요인이 큰 영향을 미쳤음을 의미한다(Fig. 2e). 잡식성 유공충은 대부분 따뜻한 표층에 사는 종으로 알려져 있다(Thunell et al. 1983). 이는 연구해역에서 겨울철 표층 수온의 감소가 잡식성 유공충의 생산성 및 성장에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다(Chaisson 1995). 따라서 겨울-봄 기간 동안 번성한 초식성 유공충은 적도수렴대의 남하에 따른 해양 생산성의 증가와 그 영향을 반영한 결과로 해석된다.

본 연구에서 적도수렴대의 계절적 위치변화에 따른 부유성 유공충 군집의 계절 변동은 북동태평양 파나마 분지 내에서 시계열 퇴적물 포집장치로 수행된 Thunell et al. (1983)과 Thunell and Reynolds (1984)의 연구결과와 대체로 일치한다. 이들의 연구에서는 적도수렴대의 계절적 위치 변동에 따라 겨울-봄(2월과 3월)과 여름-가을(6~9월)의 두 시기로 구분하여 부유성 유공충 군집을 비교 분석하였다(Thunell et al. 1983; Thunell and Reynolds 1984). 이들은 겨울-봄 시기에 적도수렴대의 남하에 따라 강한 무역풍의 영향으로 표층해양의 일차생산성이 증가하며, 이 영향으로 골침이 없는 초식성 유공충 군집이 우세하게 관찰된 반면, 여름-가을에는 비교적 작은 크기(125~250 μm)의 부유성 유공충 종들(*G. ruber*, *G. conglobatus*)이 우세하게 관측되었다고 보고하였다(Thunell et al. 1983; Thunell and Reynolds 1984). 이들의 연구에서는 강한 무역풍을 받는 시기(겨울-봄: 2월과 3월)와 그 외의 시기(여름-가을: 6~9월), 단 두 시기의 자료만을 비교하여 북동태평양 해역 내 부유성 유공충 군집의 계절 변동성을 해석하였다. 하지만 본 연구에서 관측된 부유성 유공충 군집은 해양환경 변화에 따라 크게 세 시기로 구분된다. 특히, 본 연구와 달리 Thunell et al. (1983), Thunell and Reynolds (1984)의 연구에서 고려되지 않은 시기는 적도수렴대가 연구해역에 위치한 시기이다. 이러한 급격한 해양환경 변화, 특히 염분의 변화는 표층해양에 주로 서식하는 부유성 유공충 군집에도 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 본 연구와 같이 북동태평양 해역에서 해양환경 변화에 따른 부유성 유공충의 군집변동을 보다 정확히

이해하기 위해서 적도수렴대의 영향하에서 부유성 유공충의 급격한 감소는 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다. 또한 JGOFS 프로그램의 일환으로 북동태평양 해역에서 플랑크톤 네트를 이용하여 수행된 Watkins et al. (1996, 1998)의 연구결과와 상반된다. 이들의 연구결과에 따르면, 겨울 동안 빈영양 해역에 서식하는 종들(*G. sacculifer*, *G. ruber*)이 우세하게 관측되었으며, 이는 이 시기에 빈영양 해양환경을 반영한 결과로 해석하였다(Watkins et al. 1996, 1998). 이들의 연구시기인 1992년 겨울(2월과 3월)은 1992년 엘니뇨가 성숙된 시기이지만, 이들은 엘니뇨의 영향을 배제하여 연구결과를 도출하였다. 북동태평양 해역의 해양환경과 해양 생산성, 해양 생물상은 엘니뇨에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(e.g. Dymond and Collier 1988; Honjo et al. 1995; Chavez et al. 1999; Kang et al. 2008). 특히 엘니뇨의 영향으로 북동태평양 해역의 표층 수온은 상승하고, 수온약층이 강하게 형성되며, 해양 생산성이 감소하는 것으로 알려진다(e.g. Murray et al. 1994; Kessler and McPhaden 1995; Wanninkhof et al. 1995; Barber et al. 1996; MacPhaden et al. 1998). 이러한 엘니뇨 기간 동안 높은 수온과 빈영양 해양환경은 부유성 유공충 군집에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 Watkins et al. (1996, 1998)의 연구결과는 북동태평양 해역에서 평상시기 동안 부유성 유공충 군집의 계절변동을 반영한 것보다는 엘니뇨의 영향을 반영한 것으로 생각된다. 결론적으로 북동태평양 해역에 서식하는 부유성 유공충 종은 적도수렴대의 계절적 변동뿐만 아니라 엘니뇨/라니냐와 같은 전 지구적 해양환경 변화에 민감하게 반응하는 것으로 판단된다.

6. 결 론

2003년 7월부터 2004년 5월까지 북동태평양에서 시계열 퇴적물 포집장치를 이용하여 관측된 부유성 유공충의 개체수와 종 조성은 뚜렷한 계절 변화를 보였다. 겨울-봄 동안 적도수렴대의 남하에 따른 강한 북동무역풍의 영향으로 깊어진 혼합층에 따른 영양염 공급 증가가 일차생산성 및 초식성 유공충 개체수 증가를 유발한 것으로 생각된다. 적도수렴대가 연구해역으로 북상하는 여름 동안 바람의 약화와 강한 성층으로 인하여 빈영양 환경이 조성되어 잡식성 유공충이 우세한 것으로 해석된다. 가을 동안 부유성 유공충 개체수의 현저한 감소는 적도수렴대의 직접적인 영향을 받아 급격한 강우량 증가에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 북동태평양 해역의 부유성 유공충 군집은 적도수렴대의 계절적 위치 변동에 따라 뚜렷한 변화를 보이며, 이 결과는 향후 심해퇴적물에 보존된 부유성 유공충의 군집조성 변화 연구에 중요한 기초자료로 사용될 수 있다.

사 사

본 연구는 “태평양 심해저 광물자원 개발(PM57950)”과 “심해퇴적물 고기후 지시자를 이용한 북태평양 순환류 변동성 연구(PE99184)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Amador JA, Alfaro EJ, Lizano OG, Magaa VO (2006) Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog Oceanogr* **69**:101-142
- Andreasen DJ, Ravelo AC (1997) Tropical Pacific Ocean thermocline depth reconstructions for the Last Glacial Maximum. *Paleoceanography* **12**(3):395-413
- Barber RT, Sanderson MP, Lindley ST, 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 Niño. *Deep-Sea Res Pt II* **43**:933-969
- Bijma J, Faber WW, Hemleben C (1990) Temperature and salinity limits for growth and survival of some planktonic foraminifers in laboratory cultures. *J Foramin Res* **20**(2): 95-116
- Chaisson WP (1995) Planktonic foraminiferal assemblages and paleoceanographic change in the trans-tropical Pacific Ocean: A comparison of west (Leg 130) and east (Leg 138), latest Miocene to Pleistocene. *Proc Ocean Drill Program Sci Results* **138**:555-597
- 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 Niño. *Science* **286**:2126-2131
- Coloma C, Marchant M, Hebbeln D (2005) Planktonic foraminifera during El Niño 1997-98 off Coquimbo (30°S; 73°W), Chile. *Gayana* **69**(1):48-77
- 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
- Fiedler PC, Talley LD (2006) Hydrography of the eastern tropical Pacific: a review. *Prog Oceanogr* **69**:143-180
- Forsbergh ED (1969) On the climatology, oceanography and fisheries of the Panama Bight. *Inter-American Trop Tuna Commission Bull* **14**(2):49-365
- Gajardo N, González HE, Marchant M (2013) Characterization of El Niño, La Niña, and normal conditions through planktonic foraminifera (2006-2007) in the southeastern Pacific. *Cienc Mar* **39**(3):253-264
- Guptha MVS, Curry WB, Ittekkot V, Muralinath AS (1997) Seasonal variation in the flux of planktic foraminifera: sediment trap results from the bay of Bengal, northern Indian ocean. *J Foramin Res* **27**(1):5-19
- Hemleben C, Spindler M (1983) Recent advances in research on living planktonic foraminifera. *Recons Marine Paleoenviron* **30**:141-170
- Hemleben G, Spindler M, Anderson OR (1989) *Modern Planktonic Foraminifera*. Springer, New York, NY, 63 p
- Honjo S, Dymond R, 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**(2-3):831-870
- Imbrie J, Kipp NG (1971) A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology, Application to a late Pleistocene Caribbean core. In: Turekian KK (ed) *Late Cenozoic Glacial Ages*. Yale Univ Press, New Haven, Conn, pp 71-182
- Kang JH, Kim WS, Chang KI, (2008) Latitudinal distribution of mesozooplankton in the off-equatorial northeastern Pacific before and after the 1998/99 La Niña event. *Mar Environ Res* **65**:218-234
- Kawahata H, Nishimura A, Gagan MK (2002) Seasonal change in foraminiferal production in the western equatorial Pacific warm pool: evidence from sediment trap experiments. *Deep-Sea Res Pt II* **49**:2783-2800
- Kessler WS, McPhaden MJ (1995) The 1992-1993 El Niño in the central Pacific. *Deep-Sea Res Pt II* **42**:295-333
- 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. *Korean Soc Oceanogr* **13**:200-209
- Kim HJ, Hyeong K, Yoo CM, Chi SB, Khim BK, Kim D (2010) Seasonal variations of particle fluxes in the northeastern equatorial Pacific during normal and weak El Niño periods. *Geosci* **14**:415-422
- Kim HJ, Kim D, Yoo CM, Chi SB, Khim BK, Shin HR, Hyong K (2011) Influence of ENSO variability on sinking-particle fluxes in the northeastern equatorial Pacific. *Deep-Sea Res Pt I* **58**:865-874
- Kuroyanagi A, Kawahata H, Nishi H, Honda M (2008) Seasonal to interannual changes in planktonic foraminiferal assemblages in the northwestern North Pacific: Sediment trap results encompassing a warm period related to El Niño. *Palaeogeogr Palaeoclimatol* **262**:107-127
- Latala A (1991) Effects of salinity, temperature and light on the growth and morphology of green planktonic algae. *Oceanologia* **31**:119-138

- Lionard M, Muylaert K, Gansbeke DV, Vyverman W (2005) Influence of changes in salinity and light intensity on growth of phytoplankton communities from the Schelde river and estuary (Belgium/The Netherlands). *Hydrobiologia* **540**:105-115
- Martinez JI, Taylor L, Keckker PD, Barrows T (1998) Planktonic foraminifera from the eastern Indian Ocean: distribution and ecology in relation to the Western Pacific Warm Pool (WPWP). *Mar Micropaleontol* **34**:121-151
- McPhaden M, Busalacchi AJ, Cheney R, Donguy J, Gage KS, Halpern D, Ji M, Julian P, Meyers G, Mitchum GT, Niiler PP, Picaut J, Reynolds RW, Smith N, Takeuchi K (1998) The Tropical Ocean-Global Atmosphere observing system: A decade of progress. *J Geophys Res* **130**(C7): 169-240
- Murray JW, Barber RT, Roman MR, Bacon MP, Feely RA (1994) Physical and biological controls on carbon cycling in the Equatorial Pacific. *Science* **266**:5865
- 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
- Ryther JH (1956) Photosynthesis in the ocean as a function of light intensity. *Limnol Oceanogr* **1**(1):61-70
- Saito T, Thompson PR, Breger D (1981) Systematic index of recent and Pleistocene planktonic foraminifera. University of Tokyo Press, Japan, 190 p
- Spindler M, Hemleben C, Salomons JB, Smit LP (1984) Feeding behavior of some planktonic foraminifera in laboratory cultures. *J Foramin Res* **14**(4):237-249
- 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**:44-55
- Thunell RC, Reynolds LA (1984) Sedimentation of planktonic foraminifera: Seasonal changes in species flux in the Panama Basin. *Micropaleontology* **30**(3):243-262
- Vincent E, Berger WH (1981) Planktonic foraminifera and their use in paleoceanography. *The Oceanic Lithosphere: The Sea, Vol. 7*, John Wiley and Sons, New York, P. 1025-1119
- Wanninkhof R, Feely RA, Atwood DK, Berberian G, Wilson D, Murphy PP, Lamb MF (1995) Seasonal and lateral variations in carbon chemistry of surface water in the eastern equatorial Pacific during 1992. *Deep-Sea Res Pt II* **42**(2-3):387-409
- Watkins JM, Mix AC, Wilson J (1996) Living planktonic foraminifera: tracers of circulation and productivity regimes in the central equatorial Pacific. *Deep-Sea Res Pt II* **43**(4-6):1257-1282
- Watkins JM, Mix AC, Wilson J (1998) Living planktonic foraminifera in the central tropical Pacific Ocean: articulating the equatorial 'cold tongue' during La Niña, 1992. *Mar Micropaleontol* **33**:157-174

Received Sep. 30, 2014

Revised Nov. 20, 2014

Accepted Dec. 5, 2014