

## 마지막 빙하기 동안 베링해 알류산 분지 북부 지역의 점토광물 조성 변화

### Changes of Clay Mineral Assemblages in the Northern Part of the Aleutian Basin in the Bering Sea during the Last Glacial Period

김 성 한(Sunghan Kim)<sup>1</sup> · 조 현 구(Hyen Goo Cho)<sup>2</sup> · 김 부 근(Boo-Keun Khim)<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 지구환경시스템학부

(Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea)

<sup>2</sup>경상대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea)

요약 : 베링해 알류산 분지의 북부 사면지역에서 채취된 피스톤 코아 PC25A의 퇴적물에서 점토광물의 반정량적 함량 분석을 통해 지난 마지막 빙하기 동안 퇴적물의 기원지와 운송 경로의 변화를 살펴보았다. 코아 PC25A의 연대는 방산충 *L. nipponica sakaii*의 마지막 출현 시기(48.6 ± 2 ka)와 인근 지역에서 채취한 연대가 잘 정립된 코아 PC23A의 퇴적물 색도(a\*, b\*) 및 퇴적 엽리층의 대비를 통해 설정되었다. 코아 PC25A의 최하단부가 약 57,600년 전으로 계산되었고, 코아 상부는 손실된 것으로 판단된다. 지난 마지막 빙하기 동안 스멕타이트, 일라이트, 캐올리나이트, 녹니석의 평균 함량은 각각 11% (5~24%), 47% (36~58%), 13% (9~19%), 29% (21~40%)이다. 코아 PC25A의 인근 지역에서 채취한 코아 MC24에서 분석된 홀로세의 점토광물 함량에 비하여 마지막 빙하기동안에 특징적으로 일라이트 함량이 증가하였고 스멕타이트 함량은 감소하였다. 따뜻한 기후의 홀로세 전기(Early Holocene) 동안 일라이트 함량이 높은 점토 퇴적물이 알래스카 대륙의 북부 지역(Province 1)으로부터 유입되는 용빙수에 의해 운반된 것으로 판단된다. MIS 2의 후빙기(Bølling-Allerød)동안에도 용빙수에 의해 점토광물이 운반되었으나, 일라이트 함량이 홀로세 전기에 비해 낮기 때문에 북쪽의 Province 1보다는 남쪽에 위치한 Province 2와 Province 3에서 점토입자들이 기원된 것으로 해석된다. 마지막 최대 빙하기(Last Glacial Maximum)동안 나타나는 높은 스멕타이트 함량은 베링해 남동쪽 알래스카 반도 인근 지역(Province 4)에서 공급되는 점토 퇴적물의 양이 증가하였기 때문으로 보인다. MIS 3 초기에서 중기로 가면서 일라이트와 스멕타이트 함량이 감소하고, 녹니석의 함량은 증가하였다. MIS 3 동안 해수면이 낮아지면서 Province 2와 Province 3에서 점토 퇴적물의 공급이 증가한 것으로 보인다. 베링해 알류산 분지의 북부 사면지역에서 채취된 코아 PC25A에서 분석된 점토광물 조성의 변화는 마지막 빙하기동안 해수면의 하강으로 인하여 점토광물의 이동과 관련된 베링해의 표층 해류 순환이 현재와는 다른 양상으로 변화되었기 때문이다.

주요어 : 점토광물, 기원지, 표층해류, 해수면, 빙하기, 베링해

**ABSTRACT:** Clay mineral assemblages of core PC25A collected from the northern part of the Aleutian Basin in the Bering Sea were examined in order to investigate changes in sediment provenances and transport pathways. Ages of core PC25A were determined by both Last Appearance Datum of radiolaria

\*교신저자: bkkhim@pusan.ac.kr

(*L. nipponica sakaii*;  $48.6 \pm 2$  ka) and age control points obtained by the correlations of a\*, b\*, and laminated sediment layers with the adjacent core PC23A, whose ages are well constrained. The core-bottom age of core PC25A was calculated to be about 57,600 yr ago and core-top might be missing during coring execution. Average contents of smectite, illite, kaolinite, and chlorite during the last glacial period are 11% (5~24%), 47% (36~58%), 13% (9~19%), and 29% (21~40%), respectively. Clay mineral assemblages of the last glacial period are characterized by higher illite and lower smectite contents than those of core MC24 representing the modern values. Illite-rich clay sediments during the warm Early Holocene were transported from the northern part of Alaska continent (Province 1) through the ice-melt waters. During the deglacial period (Bølling-Allørod) of MIS 2, clay-sized particles seemed to be also transported by ice-melt waters mainly from Province 2 and Province 3 located farther south than Province 1. Higher smectite content during the Last Glacial Maximum is attributed to increased amounts of clay particles from the adjacent Alaska Peninsula (Province 4). From the early to the middle MIS 3, illite and smectite contents decreased, whereas chlorite content increased. With the low sea level standing during MIS 3 the supply of clay sediments from Province 2 and Province 3 was most likely intensified. Changes in clay mineral assemblages of core PC25A located in the northern part of the Aleutian Basin in the Bering Sea are closely related to the change of surface current system caused by sea level variation during the last glacial period.

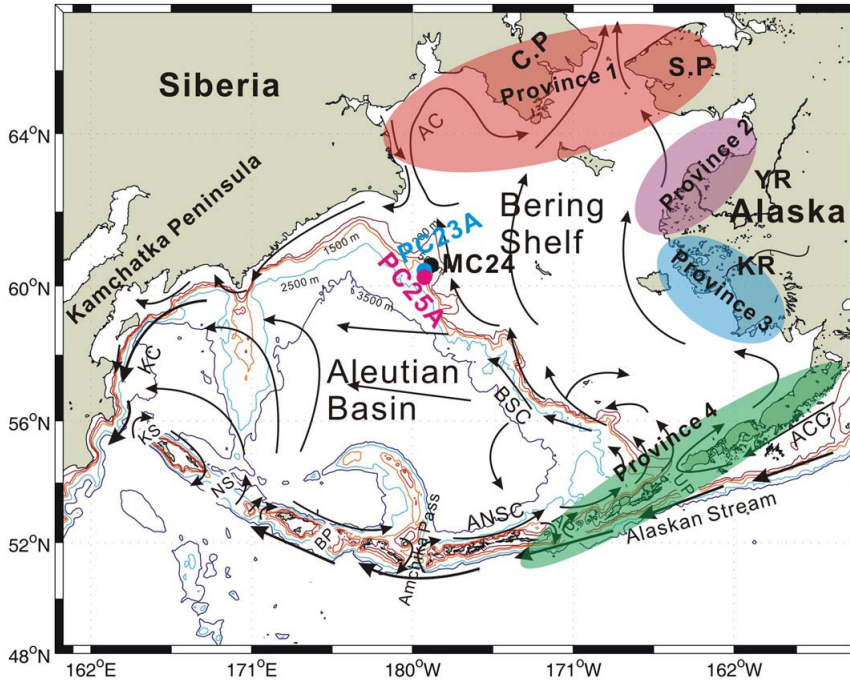
**Key words** : clay mineral, provenance, surface current, sea level, glacial period, Bering Sea

## 서 론

해양퇴적물은 대부분 육상기원의 다양한 쇄설성 광물들, 생물기원 광물입자(탄산염과 오판), 그리고 화산 쇄설성 물질들로 구성되어 있다. 일반적으로 해양퇴적물 중  $2 \mu\text{m}$  이하의 점토 입경을 가지는 미립의 광물들은 주로 스멕타이트(smectite), 일라이트(illite), 캐올리나이트(kaolinite), 녹니석(chlorite), 그리고 혼합층 광물(mixed-layered mineral) 등의 점토광물들로 구성된다. 스멕타이트, 혼합층 광물, 캐올리나이트는 육상에서 높은 가수분해(hydrolysis)가 일어나는 지역에서 생성될 수 있고, 일라이트와 녹니석은 화성암과 다른 암석의 물리적 풍화에 의해서 생성된다(Grim, 1968; Chamley, 1989; Trentesaux *et al.*, 2003). 해양퇴적물을 구성하는 점토광물의 조성은 기원지(provenance) 모암의 조성, 물리적-화학적 풍화작용, 그리고 운송 매체 및 퇴적 기작에 의해 조절된다(Ehrmann *et al.*, 1992; Khim and Park, 1992; Park and Khim, 1992; Diekmann *et al.*, 1999). 따라서 점토광물들의 반정량적인 분석은 점토 퇴적물의 기원지와 분포 양상(distribution pattern)을 연구하는데 유용하다고 알려져 있다(Deer *et al.*, 1971). 결과적으로 점토광물의 조성은 퇴적물 기원지의 기후와 지질 및 지형에 의하여 큰 영향을 받기 때문에, 점토광물의 조성과 함량은 기후 변화와 시간에 따라 변화될 수 있다(Singer, 1984;

Bouquillon *et al.*, 1990; France-Lanord *et al.*, 1993).

점토광물을 이용한 기존의 연구결과에 의하면 해양퇴적물을 구성하는 점토광물의 조성과 함량의 시간적 변화는 점토광물이 쇄설성이고 속성작용을 겪지 않았다면 고기후 인자로서 사용될 수 있다(Gingele, 1996; Sirocko and Lange, 1991; Vanderaeroet *et al.*, 1999). Gingele (1996)은 아프리카 남서쪽 대륙사면에서의 점토광물 조성 및 유입 정도 변화가 기후변화에 의해 조절된다고 보고하였다. Sirocko and Lange (1991)은 아라비아해(Arabian Sea)에서 지난 마지막 빙하기 동안 풍성기원 퇴적물의 유입이 증가했다고 보고하였다. Vanderaeroet *et al.* (1999)는 뉴저지(New Jersey) 인근 사면의 빙하기/간빙기동안 점토광물 조성의 차이는 기후변화와 관련된 기원지의 변화 때문이라고 해석하였다. Trentesaux *et al.* (2003)은 남중국해(South China Sea)에서 플라이스토세(Pleistocene) 동안 점토광물 함량의 급격한 변화는 가수분해 환경의 변화 보다, 빙하기/간빙기에 따른 해수면의 변화에 의한 대륙의 퇴적/침식 균형의 변화를 반영한다고 해석하였다. Chamley (1997)은 북대서양 고위도에 위치한 프람해협(Fram Strait) 지역에서 점토광물 조성 변화를 통해 마이오세 중기동안 기원지와 운송기작의 변화를 복원하였고, 이러한 변화가 프람해협 지역의 표층순환 강화와 관계된다고 제안하였다. Thamban *et al.* (2002)은 제4기 동안 아라비아해의 점토



**Fig. 1.** Present-day surface current system in the Bering Sea and the locations of cores PC25A, PC23A, and MC24. Clay mineral provinces (1, 2, 3, 4) for the modern surface sediments in the Bering Sea were summarized from Naidu and Mowatt (1983). CP: Chukotsk Peninsula, SP: Seward Peninsula, YR: Yukon River, KR: Kuskokwim River, KC: Kamchatka Current, KS: Kamchatka Strait, NS: Near Strait, BP: Buldir Pass, ANSC: Aleutian North Slope Current, BSC: Bering Slope Current, and ACC: Alaska Coastal Current.

광물 조성 변화는 몬순의 변동과 관련된 육상에서의 가수분해 및 침식의 변화를 잘 반영한다고 보고하였다. Damiani *et al.* (2006)은 동남극에 위치한 Wilkes Land 대륙대에서 채취한 코아 퇴적물에서 분석된 점토광물 함량과 석영입자의 표면구조의 변동은 퇴적물의 퇴적상 변화, 기원지 및 유입 경로의 변화와 관계된다고 주장하였다. Stephan *et al.* (2008)은 지난 17,000년 동안 남중국해 남서쪽 지역의 퇴적물의 점토광물 조성 변화가 해수면의 변화에 따른 기원지 및 경로 변화에 기인된다고 발표하였다. 이상의 연구결과에서 알 수 있듯이, 해양퇴적물의 점토광물 조성 변화와 함량의 시간적 변화는 고기후 및 고환경의 변화와 매우 밀접한 관련이 있다.

베링해는 북태평양의 고위도 지역에 위치한 대륙과 열도로 둘러싸인 폐쇄형 연해이다(그림 1). 이러한 베링해에서 Brunelle *et al.* (2007), Cook *et al.* (2005), Gorbarenko *et al.* (2005), Itaki *et al.* (2009), Katsuki and Takahashi (2005) 등은 미화석,

유공충의 산소동위원소, 그리고 퇴적물의 지화학적 함량 분석 등을 이용하여 지난 마지막 빙하기동안 베링해의 고기후/고해양 환경 변화를 성공적으로 복원하였다. 베링해는 북쪽에 위치한 수심 50 m 미만의 베링해협(Bering Strait)을 통해 북극해와 연결되어 있다. 그러나 해수면이 130 m 정도 하강된 지난 마지막 빙하기 동안에는 베링해협이 대기에 노출되어 베링해와 북극해의 연결이 단절되었다(Keigwin *et al.*, 2006). 따라서 베링해의 경우 현재 상태와는 다르게 지난 마지막 빙하기 동안에 점토광물의 기원지 변화와 운송 경로 및 기작의 변화가 예상된다. 하지만 지난 마지막 빙하기 동안 베링해에서 육상기원 퇴적물의 유입과 관련한 점토광물 조성 변화에 대한 자료는 매우 부족하다.

이 연구에서는 베링해 알류산 분지(Aleutian Basin)의 북부 사면 지역에서 채취한 피스톤 코아(PC25A) 퇴적물의 점토광물 조성을 이용하여 지난 마지막 빙하기동안 고해양/고기후 환경 변화와 관련하여 점

**Table 1.** Clay mineral compositions of main provinces in the Bering Sea and the modern sediments of core MC24, and last glacial sediments of core PC25A. Clay mineral data are summarized from Naidu and Mowatt (1983) except for cores MC24 and PC25A.

	Province 1	Province 2	Province 3	Province 4	MC24 (Present)	PC25A (Last glacial)
Smectite	< 20	10~20	< 10	> 40	14	11
Illite	38~59	38~48	38~48	< 28	43	47
Kaolinite/ Chlorite	0.5~0.1	> 0.5	0.5~0.1	0.5~0.1	0.5	0.5

토광물의 기원지 및 유입 경로 변화를 해석하였다.

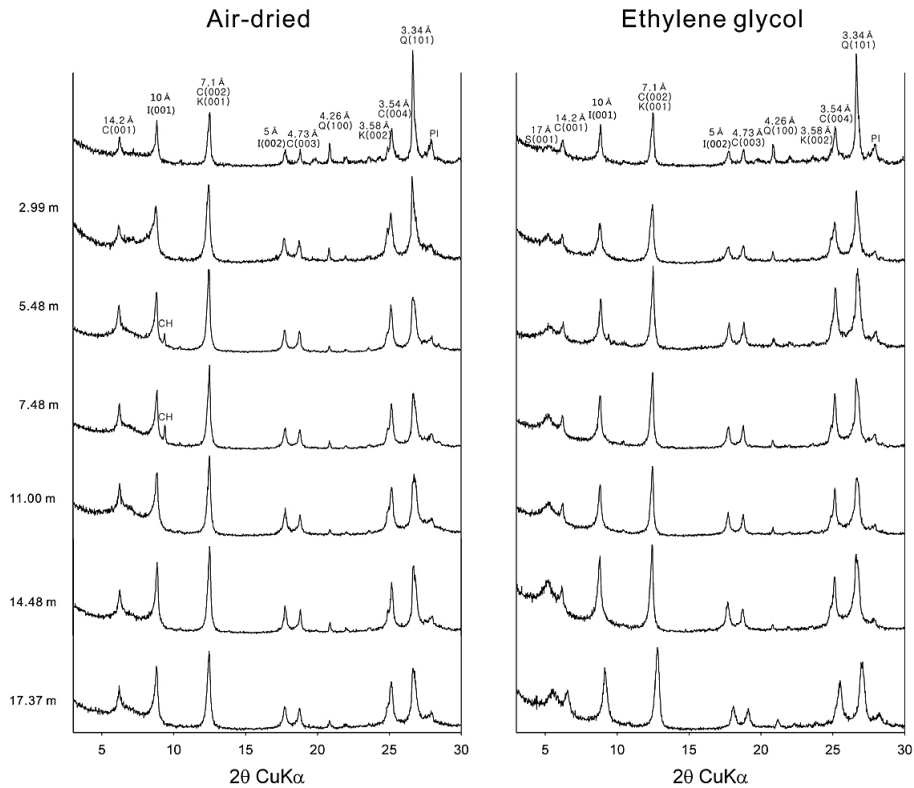
### 연구 해역

베링해는 환태평양 지역에서 가장 넓은 반 폐쇄형 연해이며 겨울철동안 해빙이 형성되는 것이 특징적이다(Niebauer *et al.*, 1999). 베링해의 해빙은 일반적으로 11월에 형성되기 시작하여 5월에 사라지는데, 겨울동안 대륙붕의 75% 정도가 해빙으로 덮인다. 베링해의 북동 지역은 수심 200 m 이하의 대륙붕이 넓게 발달해 있는 반면에 남서 지역은 수심 3500 m 이상의 알류산 분지가 위치한다(그림 1). 베링해의 남쪽 경계인 알류산 열도들 사이에 위치한 다양한 수심의 통로들을 통해 북태평양 수괴와의 교환이 일어나며, 알류산 열도의 남쪽을 따라 서쪽으로 흐르는 알라스카 해류(Alaskan Stream)는 알류산 열도의 동쪽 통로들로 유입되어 일부는 반시계 방향으로 흘러 대부분 캄차카 해협(Kamchatka Strait)으로 빠져 나간다(Stabeno *et al.*, 1999). 베링해의 대륙사면을 따라 북서쪽으로 흐르는 베링사면해류(Bering Slope Current)의 일부는 대륙붕으로 유입되어 아나디르 만(Gulf of Anadyr)과 알라스카 연안을 따라 북쪽으로 흘러 베링해협을 통해 북극해로 유출된다(Coachman *et al.*, 1975).

베링해, 알라스카만, 척치해(Chukchi Sea) 표층 퇴적물의 점토광물 함량 및 기원지에 대하여 여러 연구들이 수행되었다(Naidu *et al.*, 1982; Naidu and Mowatt, 1983). 이들 연구 결과에 의하면 베링해 대륙붕 지역의 점토광물의 분포 양상은 대륙붕에서 북쪽으로 흐르는 표층 해류의 순환 경로와 밀접한 관계가 있다. 이러한 점토광물의 연구결과를 바탕으로 코아 PC25A 지역에 운반될 수 있는 점토 입자들과 관련된 주변 지역의 점토광물 조성을 정리하였다(표 1) (Naidu *et al.*, 1982; Naidu and Mowatt,

1983).

척코츠 반도(Chukotsk Peninsula)와 세워드 반도(Seward Peninsula) 지역을 포함하는 Province 1은 스멕타이트 함량이 20% 이하로 낮고, 일라이트 함량은 38~59%로 높으며, 캐올리나이트와 녹니석의 비는 0.1~0.5 정도이다(그림 1, 표 1) (Naidu *et al.*, 1982; Naidu and Mowatt, 1983). Province 1에서 베링해협을 따라서 비교적 높은 스멕타이트 함량(20~30%)과 비교적 낮은 일라이트 함량(38~48%)이 나타나지만, 척코츠 반도와 세워드 반도 인근에서는 낮은 스멕타이트 함량(< 10%)과 높은 일라이트 함량(> 48%)이 나타난다. 이 지역의 대부분의 점토 입자들은 베링해협을 통하여 척치해 및 북극해로 유출된다. 유콘강(Yukon River) 하구의 삼각주 표층 퇴적물의 점토광물 조성은 스멕타이트 21%, 일라이트 41%, 캐올리나이트 12%, 녹니석 26%로 캐올리나이트와 녹니석의 비가 베링해의 다른 지역에 비해 높다. 하지만 유콘강의 영향이 하구지역에 제한되기 때문에 Province 2에서 스멕타이트의 함량이 10~20%, 일라이트는 38~48%, 캐올리나이트와 녹니석의 비는 0.5 이상으로 높다(그림 1, 표 1) (Naidu *et al.*, 1982; Naidu and Mowatt, 1983). Province 3은 스멕타이트의 함량(< 10%)이 매우 낮고, 일라이트, 녹니석, 캐올리나이트의 함량이 각각 60, 35, 5%를 보이는 쿠스코킴강(Kuskokwim River)의 영향을 크게 받는 지역으로 스멕타이트 함량(< 10%)이 낮고, 일라이트 함량은 38~48%, 그리고 0.5 이하의 캐올리나이트와 녹니석의 비가 나타난다(그림 1, 표 1) (Naidu *et al.*, 1982; Naidu and Mowatt, 1983). 현재 Province 2와 Province 3에서 기원된 점토 입자들은 하구 지역에 퇴적된 후에 나머지는 알라스카 연안류에 의하여 알라스카 연안을 따라 북쪽으로 이동된다. Province 4는 알류산 열도와 알라스카 반도 지역으로 높은 스멕타이트의 함



**Fig. 2.** Representatives of X-ray diffractograms of the air-dried and ethylene glycol treated smear slides. S: smectite, C: chlorite, I: illite, K: kaolinite, CH: chabazite, Q: quartz, Pl: plagioclase.

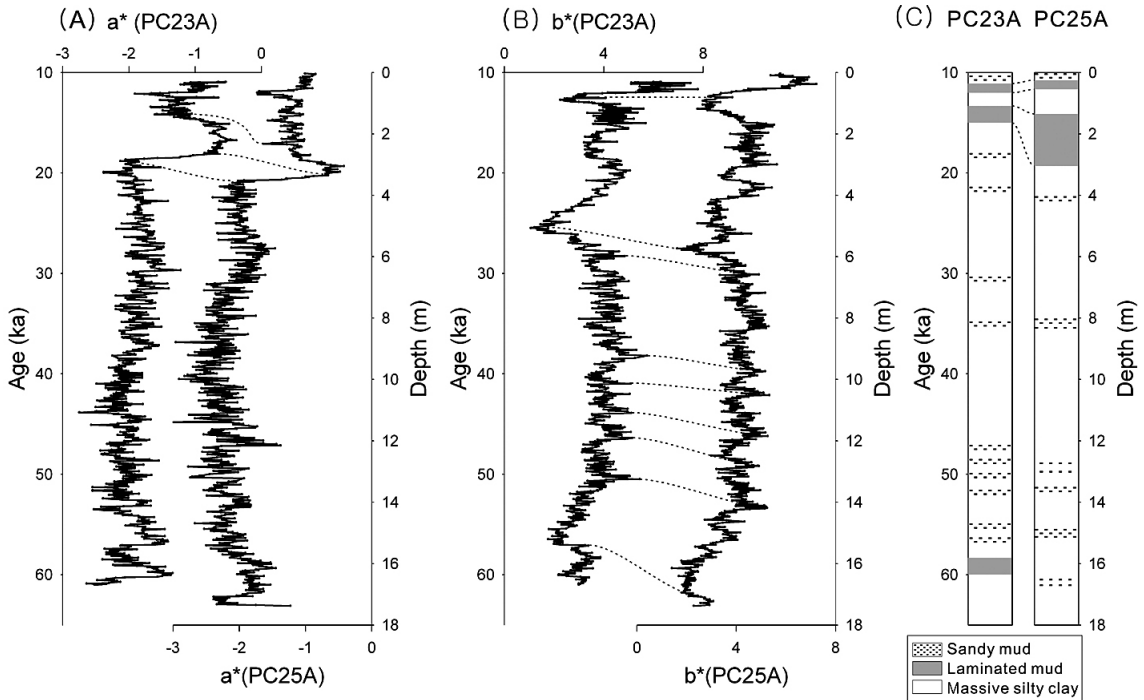
량(> 40%), 낮은 일라이트 함량(< 28%), 0.5 이하의 캐올리나이트와 녹니석의 비가 특징적이다(그림 1, 표 1) (Naidu *et al.*, 1982; Naidu and Mowatt, 1983).

### 재료 및 방법

이 연구에서 이용된 코아 MR06-04 PC25A (60° 04.48' N, 179° 27.80' W, 수심 1158 m), PC23A (60° 09.52' N, 179° 27.82' W, 수심 1002 m), MC24 (60° 15.70' N, 179° 25.34' W, 수심 852 m) 는 베링해의 알류산 분지의 북부 사면에서 R/V Mirai호에 의해서 2006년 8월에 피스톤 코아러를 이용하여 채취되었으며(그림 1), 길이는 각각 17.5, 17.5, 0.2 m이다. 코아는 선상에서 절개되어 암상의 특성을 기재하고 부시료를 채취한 후, 냉장 보관한 것을 이용하였다.

코아 퇴적물은 부산대학교 공동실험실습관에서 동결 건조된 후 점토광물 분석을 위하여, 약 50 cm 간격으로 총 36개의 구간에서 선택되었다. 퇴적물

내의 유기물을 6% 과산화수소수를 이용하여 제거한 후, 63  $\mu\text{m}$  체를 사용하여 사질 퇴적물을 분리한 후, 남아있는 세립질 입자에 2% 황산제(sodium hexametaphosphate) 50 ml를 넣고 물을 500 ml까지 넣은 후, 유리막대로 잘 저어준 뒤 2  $\mu\text{m}$  이하의 점토 입자를 Stoke's law를 이용하여 추출하였다. 원심분리기를 이용하여 4000 rpm으로 30분간 추출된 2  $\mu\text{m}$  이하의 점토 입자들을 농축시킨 후에, Stokke and Carson (1973)의 방법을 따라 슬라이드 글라스 (slide glass) 위에 얇게 도포하는 “smear-on-glass slide” 방법을 이용하여 방향성 시료를 제작하여 점토광물 분석을 실시하였다. 대기 중에서 자연 건조시킨 슬라이드 글라스는 점토광물 동정과 반정량적 함량 분석을 위하여 경상대학교의 X-선 회절분석기(SIEMENS/BRUKER D5005)를 이용하여 분석한 후, Brunton (1955)에 의해 제안된 방법을 따라 60 °C에서 24시간 동안 에틸렌 글리콜 처리(ethylene glycol)하고 다시 X-선 회절분석을 실시하였다. X-선 회절분석은 흑연 단색화된 파장( $\text{CuK}\alpha = 1.5406$



**Fig. 3.** (A) Correlation of sediment color  $a^*$ . (B) Correlation of sediment color  $b^*$ . (C) Correlation of laminated sediment layers between cores PC23A (Itaki *et al.*, 2009) and PC25A. Dashed lines represent corresponding age control points between cores PC23A and PC25A.

Å)을 사용하여 35 mA, 40 kV 조건 아래에서 3~30° 2θ 범위를 분석하였다. 발산슬릿(divergence slit)은 1.0°, 수광슬릿(receiving slit)은 0.6°로 측정하였다. 저각도에서 피크 강도 변화가 감소되는 것을 막기 위하여 시편은 회전시키지 않았다.

점토광물의 동정은 대기중 건조시킨 시료와 에틸렌글리콜 처리된 시료의 X-선 회절분석도에 나타나는 광물 고유의 특징적인 피크를 기준으로 실시하였다(그림 2). 스�멕타이트는 대기중 건조시킨 시료의 X-선 회절분석도에서 (001) 피크가 5.9~6.5° 2θ (14~14.7 Å)의 가장 강한 기저면(basal d-spacing)에서 나타나고, 에틸렌글리콜 처리시 약 5.2° (17 Å)로 증가하는 팽창성 점토광물군(expanding clay minerals)을 지칭하여 스�멕타이트 그룹 광물로 하였다(Brindley, 1980). 일라이트는 대기중 건조 시료의 X-선 회절분석도에서 10 Å (001), 5 Å (002), 3.3 Å (003)과 2.5 Å (004)의 피크로서 동정되었다. 녹니석은 저면 간격이 14.2 Å (001), 7.1 Å (002), 4.73 Å (003), 3.52 Å (004)인 피크로 확인되었다. 이 중 (002)와 (004)의 두 피크는 캐올리

나이트의 (001)과 (002) 피크와 중복되어 나타나지만, 녹니석의 약한 (003) 피크와 2θ 값이 24.95°~25.15° 범위에서 캐올리나이트의 3.58 Å (002) 피크와 매우 잘 분리되어 나타나는 3.54 Å (004) 피크로 녹니석의 존재가 확인되었다(Biscaye, 1965). 즉, 녹니석은 3.54 Å (004) 피크에서 나타나며, 캐올리나이트는 3.58 Å (002) 피크에서 뚜렷하게 구분된다.

Biscaye (1965)의 방법을 따라 스�멕타이트, 일라이트, 캐올리나이트, 녹니석의 상대적 함량을 피크의 면적을 이용하여 반정량적으로 계산하였다. X-선 회절분석도에서 주요 점토광물들의 피크 면적은 구적계(Digitizing Area-liner MT-10S, ±0.1%)를 사용하여 계산하였다. 기저선(base line)은 피크의 양 끝 지점을 이어서 설정하였다. 스�멕타이트, 일라이트, 캐올리나이트와 녹니석 함의 상대적인 양은 각각 에틸렌 글리콜 처리된 시료의 X-선 회절분석도에서 17 Å (001) 피크 면적, 10 Å (001) 피크 면적, 7 Å 피크 면적을 합하여 100%로 가정하였다. 각 광물의 고유한 피크 강도 차를 보정하기 위하여 계산

된 피크 면적에 일정한 가중치(weighting factor; 스펙타이트 1, 일라이트 4, 녹니석과 캐올리나이트의 합 2)를 곱하였다(Biscaye, 1965). 한편 캐올리나이트와 녹니석의 비는 무처리된 시료의 X-선 회절분석도에서 캐올리나이트의 3.58 Å (002) 피크와 녹니석의 3.54 Å (004)의 피크의 높이의 비를 통해서 계산되었다(Biscaye, 1964).

### 코아 PC25A의 연대 설정

베링해에서는 코아 PC25A에서 방사성 탄소동위원소 연대가 측정되지 않았기 때문에, 연대층서가 잘 설정된 인근에서 채취된 코아 PC23A (60° 09.52' N, 179° 27.82' W, 수심 1002 m)와 퇴적물의 색도(a\*, b\* 값) 및 엽리퇴적층(laminated sediment layer)의 대비를 이용하여 PC25A의 연대를 추정하였다(그림 3) (Itaki *et al.*, 2009). 코아 PC23A와 코아 PC25A의 색도지시자 a\*와 b\*값의 변화는 서로 매우 흡사한데(그림 4), 이것은 두 코아 지점에서 퇴적과정이 비슷하다는 것을 지시한다. 베링해에서 관찰되는 뚜렷한 퇴적학적 특징은 후빙기의 Bolling-Allerød (BA) 시기와 홀로세 전기(Early Holocene: EH) 동안 탄산염, 생물기원 오팔, 총유기탄소의 높은 함량이 나타나는 엽리퇴적층이 발견되는 것이다(Cook *et al.*, 2005; 김성한 외, 2009; Itaki *et al.*, 2009). 이러한 특징들을 고려하여 코아 PC23A와의 대비를 통하여 설정된 코아 PC25A의 간접적인 연대에는 큰 무리가 없음을 시사한다.

방산충 *Lychnocanoma nipponica* (Nakaseko) *sakaii* (Morley and Nigrini)의 마지막 출현(Last Appearance Datum; LAD)은 48,600±2000년으로 알려져 있다(Morley *et al.*, 1982). 코아 PC25A와 같은 지점에서 채취된 코아 PC25B에서 이 종의 마지막 출현 깊이는 12.28±0.5 m로 밝혀졌고, 이 깊이는 PC25A의 13.69±0.5 m에 해당된다. 이 결과 코아 PC25A의 상부 연대는 약 10,500 cal. yr BP로 계산된다. 코아 상부에서 이러한 연대가 계산되는 것은 피스톤 코아를 이용하여 코아를 채취하는 동안 코아 상부가 손실되었기 때문이다. 코아 하부는 약 57,600 cal. yr BP로 추정된다. 코아 PC25A의 퇴적율은 상부 3 m 구간은 약 60 cm/kyr로 매우 높으며 하부 15 m 구간은 약 35 cm/kyr로 감소한다. 점토광물 분석에 사용된 시료 구간 50 cm는 코아 깊이가 3 m보다 상부 구간은 800년, 하부 구간은 1500년 간격에 해당된다.

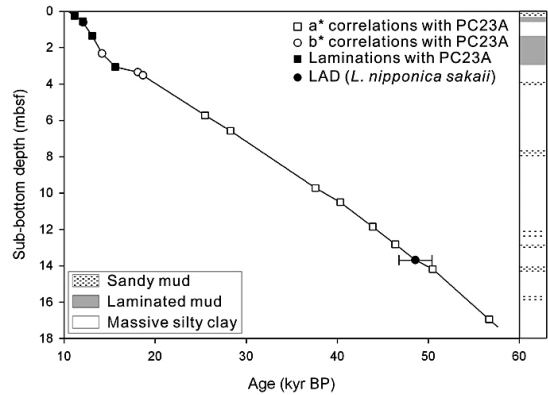


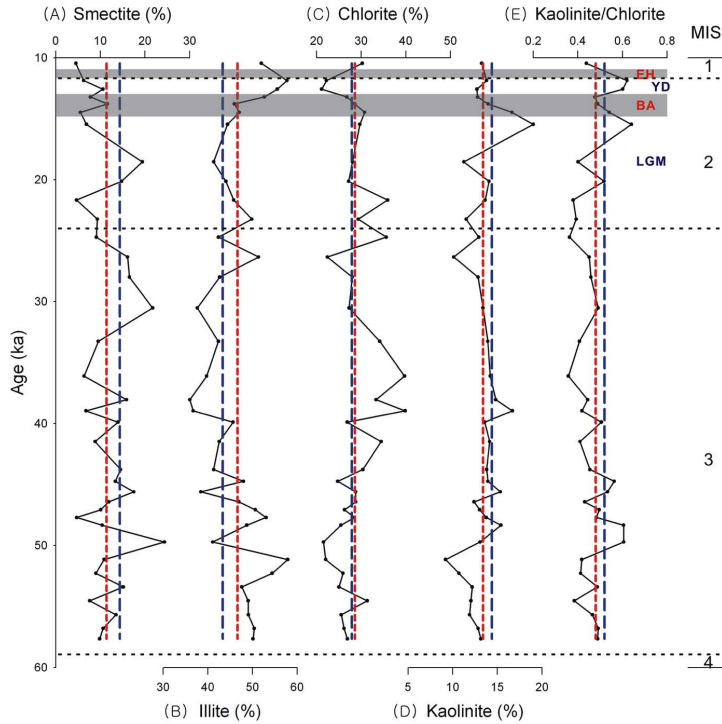
Fig. 4. Age model and lithology of core PC25A. Open squares, open circles, and solid squares represent age control points obtained from the correlations of sediment color (a\*, b\*) and laminated sediment layers with core PC23A (Itaki *et al.*, 2009), respectively, as shown in Fig. 2. A solid circle indicates Last Appearance Datum (48.6±2 ka) of *L. nipponica sakaii*.

### 결과 및 토의

코아 PC25A에서 코아 상부의 손실로 인해 홀로세의 점토광물 조성비를 알 수 없기 때문에, 인근 코아 MC24의 홀로세 퇴적물에서 점토광물을 분석하였다. 그 결과 홀로세기간동안 스펙타이트, 일라이트, 캐올리나이트, 녹니석의 함량이 각각 14, 43, 14, 28%로 나타났으며, 캐올리나이트와 녹니석의 비는 0.52로 계산되었다(표 1).

그림 5는 지난 마지막 빙하기부터 홀로세 전기까지 코아 PC25A에서 분석된 점토광물 함량의 변화를 보여준다. 지난 마지막 빙하기(60~10 ka) 동안 스펙타이트 함량은 5~24%, 일라이트 함량은 36~58%, 캐올리나이트 함량은 9~19%, 녹니석 함량은 21~40%의 범위에서 변화한다. 각 점토광물의 평균 함량은 11, 47, 13, 29%로, 코아 MC24에서 분석된 홀로세기간과 비교하면 스펙타이트 함량이 감소했고, 일라이트 함량은 증가하였다. 캐올리나이트와 녹니석의 비는 0.36~0.64%에서 변화하며 평균 0.48%로 홀로세에 비하여 약간 감소하였다.

Katsuki and Takahashi (2005)에 의하면, 해수면이 현재보다 낮아진 빙하기동안 북태평양에서 베링해로 유입되는 알래스카 해류가 약해지고, 알류산 열도에서 주요 유입 수로가 서쪽으로 이동했다. 따라서 베링해에서 베링사면해류에 의하여 Province 4로부터 기원된 점토광물 운송 기작이 감소되었을



**Fig. 5.** Downcore profiles of (A) smectite, (B) illite, (C) chlorite, (D) kaolinite, and (E) ratio of kaolinite and chlorite of core PC25A during the last glacial period. Note Marine Isotope Stages (MIS) on the right. EH: Early Holocene, YD: Younger Dryas, BA: Bølling Allerød, LGM: Last Glacial Maximum. Shaded bars represent sediment laminated layers. Vertical red short-dashed and blue long-dashed lines indicate average contents of the last glacial period (core PC25A) and Holocene period (core MC24), respectively.

것이다. 빙하기 동안 낮아진 해수면으로 인해 베링 해협이 막히고 수심이 낮은 대륙붕의 대부분이 대기로 노출되어 코아 PC25A 지점과 일라이트가 풍부한 주변 대륙과의 거리가 가까워져 Province 1, Province 2, Province 3 기원지에서 점토광물의 운반이 증가되었을 것으로 보인다. 그리고 베링해에서 겨울철 동안 형성되는 해빙도 오늘날보다 빙하기 동안 더 확장되었기 때문에 Province 1, Province 2, Province 3 지역에서 점토광물의 공급이 증가되었을 것이다. Naidu and Mowatt (1983)은 유콘강 하구 지역에서 비교적 높은 캐올리나이트와 녹니석의 비가 나타난다고 보고하였지만, 빙하기 동안 캐올리나이트와 녹니석의 비의 평균값과 큰 차이가 없는 것으로 보아 해수면이 낮았던 빙하기 동안에는 유콘강으로부터 점토광물 유입은 크지 않았을 것으로 생각된다.

코아 PC25A에서 Marine Isotope Stage (MIS) 1

동안의 퇴적물은 시추 당시 상부 퇴적물의 유실로 인해 거의 남아있지 않다. MIS 1 초기인 홀로세 전기는 Gorbarenko *et al.* (2005)가 명명한 Melt Water Pulse 1B (MWP1B)에 해당되며 Bølling-Allerød 시기(MWP1A)에 이은 해수면이 급격히 상승한 따뜻한 시기이다. Sancetta *et al.* (1985)은 구조의 산소 동위원소 분석을 통해 홀로세 전기 동안 주변의 알래스카 대륙으로부터 많은 양의 담수 유입이 있었다고 보고하였다. 따라서 알래스카 대륙으로부터 유입된 많은 양의 용빙수가 점토광물의 주요 운송 기작으로 작용하였을 것이다. 하지만 홀로세 전기의 급격한 해수면 상승 시기가 BA 시기에 비해 일라이트의 함량이 높고 스멕타이트의 함량이 낮다는 것은 두 시기 동안 용빙수의 유입지역이 다르다는 것을 의미한다(그림 5). 홀로세 전기 동안은 아마도 스멕타이트가 풍부한 Province 4의 영향은 감소하고, 일라이트가 풍부한 Province 1의 영향이 증가되



었기 때문에 주로 고위도 지역인 Province 1에서 용빙수가 점토입자들을 운반한 것으로 해석된다.

마지막 최대 빙하기동안 스펙타이트 함량이 20%로 높게 나타나며, 일라이트 함량은 41%로 낮게 나타난다(그림 5). 베링해에서 마지막 최대 빙하기 동안 해빙이 베링해 남쪽에 위치한 보우어스 해령 지역까지 확장되었다(Katsuki and Takahashi, 2005). 따라서 이 시기 동안에는 남쪽에 위치한 Province 4에서 알래스카 해류에 의해 스펙타이트를 다량 함유한 점토입자들이 코아 지역으로 운반된 것으로 보인다. MIS 2 후기에 해수면이 급격히 상승한 BA 시기동안 10%의 스펙타이트, 46%의 일라이트 30%의 녹니석 함량을 보이며, 이러한 조성은 Province 2와 Province 3의 점토광물 조성비와 비슷하다. 따라서 온난한 기후동안 Province 2와 Province 3으로부터 유입된 용빙수에 의해 점토광물이 이동된 것으로 보인다. BA 시기 후기와 추운 Younger Dryas 시기동안에는 일라이트의 함량이 60%까지 증가하고 녹니석은 22%까지 감소한다(그림 5). BA 시기 동안 해수면이 오늘날에 비해 60 m 정도 낮은 수준으로 급격히 상승했기 때문에(Fairbanks, 1989), Province 1의 영향을 크게 받는 대륙붕 북쪽은 해수면 아래에 잠기게 되었을 것이다. 이 결과 Province 1이 점토광물의 주요 기원지로서 작용하였을 것이다.

MIS 3동안 57에서 38 ka로 가면서 일라이트 함량은 60에서 35%로 감소하는 반면 녹니석은 21에서 40%로 증가하였다(그림 5). 이러한 변화는 일라이트의 함량이 매우 높은 Province 1로부터의 점토입자의 유입이 감소하고, 상대적으로 녹니석이 풍부한 Province 2와 Province 3으로부터의 점토광물 유입이 증가한 것으로 보인다. 따라서 일라이트가 감소하고 녹니석이 증가하는 경향은 해수면 하강과 함께 대륙붕 지역에서 점토입자의 공급이 증가되었지만, Province 1보다는 Province 2와 Province 3에서 더 많이 공급된 것으로 생각된다. 또한 이 기간 동안 스펙타이트 함량은 24에서 7%로 급격히 감소하였다. 베링해에서 스펙타이트는 Province 4에서 대부분 공급되기 때문에, 스펙타이트의 감소는 빙하기 동안 해수면 하강으로 인해 알래스카 해류로부터 기원하는 베링사면해류의 약화에 기인하는 것으로 해석된다.

## 결 론

베링해 알류산 분지의 북부 사면 지역에서 획득한 코아 PC25A의 점토광물 조성 변화 분석을 통해 지난 마지막 빙하기 동안의 점토광물의 기원지 및 운송 경로 변화를 복원할 수 있었다. 매우 높은 일라이트 함량이 특징적인 해수면이 급격히 상승한 홀로세 전기동안 일라이트 함량이 높은 고위도 지역 Province 1에서 용빙수의 유입에 의한 점토광물 공급이 우세한 반면, 해수면 상승 속도가 다른 BA 시기 동안에는 홀로세 전기에 비해 일라이트의 함량이 낮고, Province 2와 Province 3의 점토광물 조성과 비슷하기 때문에, Province 2와 Province 3으로부터 용빙수에 의한 점토광물의 유입이 증가했을 것으로 해석된다. 해수면이 가장 낮았던 마지막 최대 빙하기동안 스펙타이트 함량의 증가는 스펙타이트가 풍부한 남쪽의 Province 4에서 점토입자 퇴적물의 공급이 증가했기 때문으로 해석된다. MIS 3에서 MIS 2로 가면서 스펙타이트, 일라이트 함량이 감소한 반면, 녹니석의 함량은 증가하였다. 아마도 해수면이 낮아지고 더 추운 기후로 되면서 해빙의 형성 및 발달 지역이 점점 남쪽으로 확장되어 일라이트 함량이 풍부한 Province 1으로부터 유입되는 점토 퇴적물에 비해 남쪽에 위치한 Province 2와 Province 3으로부터 점토광물의 유입이 증가한 것으로 보인다. 결과적으로 코아 PC25A에서 분석된 점토광물 조성의 변화는 마지막 빙하기동안 기후 변화와 관련된 해수면의 변동으로 인하여 점토광물의 이동과 관련된 베링해의 표층 해류 순환이 현재와는 다른 양상으로 변화되었기 때문으로 해석된다.

## 사 사

이 연구를 위해 베링해 시추퇴적물을 공급해 주신 동경대학교의 Tada 교수님께 감사드리며 탐사기간 동안 수고해 주신 R/V Mirai호의 승무원들에게도 감사를 드립니다. 논문의 자료해석에 대한 건설적인 비판과 지적을 아끼지 않으신 두 분의 심사위원들께도 감사를 드립니다. 이 연구는 Polar Academic Program (PAP), KOPRI의 지원으로 수행되었다.

## 참고문헌

- 김성한, 김부근, 신혜선, Uchida, M., Itaki, T., and Ohkushi, K. (2009) 베링해 중부 지역의 마지막 빙하기 이후 고생산성의 고해상 변화. 한국해양학회지, 14,

- 133-144.
- Biscaye, P.E. (1964) Distribution between kaolinite and chlorite in recent sediments by x-ray diffraction. *Am. Mineral.*, 49, 1281-1289.
- Biscaye, P.E. (1965) Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and Adjacent Seas and Oceans. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 76, 803-832.
- Bouquillon, A., France-Lanord, C., Michard, A., and Tiercelin, J.J. (1990) Sedimentology and isotopic chemistry of the Bengal Fan sediments: the denudation of the Himalaya. In: Cocharn, J.R., Stow, D.A.V., *et al.* (eds.), *Proc. ODP: Sci. Results, Ocean Drilling Program Vol. 116*, ODP: College Station, TX, 43-58.
- Brindley, G.W. (1980) Order-disorder in clay mineral structures. In: Brindley, G.W. and Brown, G. (eds.), *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*. Mineralogical Society Monograph, 5, 125-195.
- Brunelle, B.G., Sigman, D.M., Cook, M.S., Keigwin, L.D., Haug, G.H., Plessen, B., Schettler, G., and Jaccard, S.L. (2007) Evidence from diatom-bound nitrogen isotopes for subarctic Pacific stratification during the last ice age and a link to North Pacific denitrification changes. *Paleoceanography*, 22, PA1215, doi:10.1029/2005PA001205.
- Brunton, G.D. (1955) Vapour pressure glycolation of oriented clay minerals. *Am. Mineral.*, 40, 803-832.
- Chamley, H. (1989) *Clay Sedimentology*. Springer-Verlag, Berlin, 623p.
- Chamley, H. (1997) Clay mineral sedimentation in the ocean. In: Paquet, G. and Clauer, N. (eds), *Soils and sediments, Mineralogy and Geochemistry*. Springer, 269-302.
- Coachman, L.K., Aagaard, K., and Tripp, R.B. (1975) *Bering Strait: The Regional Oceanography*. University of Washington Press, Seattle, 172p.
- Cook, M.S., Keigwin, L.D., and Sancetta, C.A. (2005) The deglacial history of surface and intermediate water of the Bering Sea. *Deep-Sea Res. II*, 52, 2163-2173.
- Damiani, D., Giorgetti, G., and Turbanti, I.M. (2006) Clay mineral fluctuations and surface textural analysis of quartz grains in Pliocene-Quaternary marine sediments from Wilkes Land continental rise (East-Antarctica): Paleoenvironmental significance. *Mar. Geol.*, 226, 281-295.
- Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussaman, J. (1966) *An introduction to the rock forming minerals*. Longmans, London, 528p.
- Diekmann, B., Kuhn, G., Mackensen, A., Petschick, R., Futterer, D.K., Gersonde, R., Rühlemann, C., and Niebler, H.S. (1999) Kaolinite and chlorite as tracers of modern and late Quaternary deep water circulation in the South Atlantic and the adjoining Southern Ocean. In: Fischer, G. and Wefer, G. (eds.), *Use of Proxies in Paleoceanography: examples from the South Atlantic*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1-29.
- Ehrmann, W.U., Melles, M., Kuhn, G., and Grobe, H. (1992) Significance of clay mineral assemblages in the Antarctic Ocean. *Mar. Geol.*, 107, 249-273.
- Fairbanks, R.G. (1989) A 17,000-year glacioeustatic sea-level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342, 637-642.
- France-Lanord, C., Derry, L., and Michard, A. (1993) Evolution of the Himalaya since Miocene times: isotopic and sedimentological evidence from the Bengal Fan. In: Treloar, P.J. and Searle, M. (eds.), *Himalayan Tectonics. Spec. Publ. Geol. Soc. London*, 7, 603-621.
- Gingele, F.X. (1996) Holocene climatic optimum in Southwest Africa - evidence from the marine clay mineral record. *Paleogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 122, 77-87.
- Gorbarenko, S.A., Basov, I.A., Chekhovskaya, M.P., Southon, J., Khusid, T.A., and Artemova, A.V. (2005) Orbital and millennium scale environmental changes in the southern Bering Sea during the last glacial-Holocene: geochemical and paleontological evidence. *Deep-Sea Res. II*, 52, 2174-2185.
- Grim, R.E. (1968) *Clay Mineralogy*. McGraw-Hill, New York, 596p.
- Itaki, T., Uchida, M., Kim, S., Shin, H.S., Tada, R., and Khim, B.K. (2009) Late Pleistocene stratigraphy and paleoceanographic implications in northern Bering Sea slope sediments: evidence from the radiolarian species *Cycladophora davisiana*. *Jour. Quat. Sci.*, 24, 856-865.
- Katsuki, K. and Takahashi, K. (2005) Diatoms as paleo-environmental proxies for seasonal productivity, sea-ice and surface circulation in the Bering Sea during the late Quaternary. *Deep-Sea Res. II*, 52, 2110-2130.
- Keigwin, L.D., Donnelly, J.P., Cook, M.S., Driscoll, N.W., and Brigham-Grette, J. (2006) Rapid sea-level rise and Holocene climate in the Chukchi Sea. *Geology*, 34, 861-864.
- Khim, B.K. and Park, Y.A. (1992) Smectite as a possible source-indicative clay mineral in the Yellow Sea. *Geo-Mar. Lett.*, 12, 228-231.
- Morley, J.J., Hays, J.D., and Robertson, J.H. (1982) Stratigraphic framework for the late Pleistocene in the northwest Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.*, 29, 1485-1499.

- Naidu, A.S., Creager, J.S., and Mowatt, T.C. (1982) Clay mineral dispersal patterns in the north Bering and Chukchi Seas. *Mar. Geol.*, 47, 1-15.
- Naidu, A.S. and Mowatt, T.C. (1983) Sources and dispersal patterns of clay minerals in surface sediments from the continental-shelf areas off Alaska. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94, 841-854.
- Niebauer, H.J., Bond, N.A., Yakunin, L.P., and Plotnikov, V.V. (1999) An update on the climatology and sea ice of the Bering Sea. In: Loughlin, T.R. and Ohtani, K. (eds.), *Dynamics of the Bering Sea*, Univ. Alaska Sea Grant, Fairbanks, 29-59.
- Park, Y.A. and Khim, B.K. (1992) Origin and dispersal of the recent clay minerals in the Yellow Sea. *Mar. Geol.*, 104, 205-213.
- Sancetta, C., Heusser, L., Labeyrie, L., Naidu, S.A., and Robinson, S.W. (1985) Wisconsin-Holocene paleoenvironment of the Bering Sea: evidence from diatoms, pollen, oxygen isotopes and clay minerals. *Mar. Geol.*, 62, 55-68.
- Singer, A. (1984) The paleoclimatic interpretation of clay minerals in sediments - a review. *Earth Sci. Rev.*, 21, 251-293.
- Siroko, F. and Lange, H. (1991) Clay accumulation rates in the Arabian Sea during the late Quaternary. *Mar. Geol.*, 97, 105-119.
- Stabeno, P.J., Schumacher, J.D., and Ohtani, K. (1999) The physical oceanography of the Bering Sea. In: Loughlin, T.R. and Ohtani, K. (eds.), *Dynamics of the Bering Sea*, Univ. Alaska Sea Grant, Fairbanks, 1-28.
- Stephan, S., Hanebuth, T.J.J., Vogt, C., and Statterger, K. (2008) Sea level induced variations in clay mineral composition in the southwestern South China over the past 17,000 yr. *Mar. Geol.*, 250, 199-210.
- Stokke, P.R. and Carson, B. (1973) Variation in clay mineral X-ray diffraction results with the quantity of sample mounted. *Jour. Sediment. Petrol.*, 43, 957-964.
- Thamban, M., Rao, V.P., and Schneider, R.R. (2002) Reconstruction of late Quaternary monsoon oscillations based on clay mineral proxies using sediment cores from the western margin of India. *Mar. Geol.*, 186, 527-539.
- Trentesaux, A., Liu, Z., Colin, C., Clemens, S.C., Boulay, S., and Wang, P. (2003) Pleistocene paleoclimatic cyclicity of southern China: clay mineral evidence recorded in the South China Sea (ODP Site 1146). In: Prell, W.L., Wang, P., Blum, P., and Clemens, S., (eds.), *Proc. ODP Sci. Res.*, Vol. 184, 1-10 (online).
- Vanderaverroet, P., Averbuch, O., Deconinck, J.F., and Chamley, H. (1999) A record of glacial/interglacial alternations in Pleistocene sediments off New Jersey expressed by clay mineral, grain size and magnetic susceptibility data. *Mar. Geol.*, 159, 79-92.
- 
- 접수일(2011년 1월 19일), 수정일(1차 : 2011년 3월 21일), 게재확정일(2011년 3월 23일)