

Article

지자기 방향변화 및 베릴륨 동위원소비를 이용한 북동 적도 태평양  
주상시료의 층서확립

김원년<sup>1\*</sup> · 형기성<sup>1</sup> · 공기수<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국해양과학기술원 심해저광물자원연구센터  
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 석유해저연구본부  
(305-350) 대전시 유성구 가정동 30

Stratigraphy of a Sediment Core Collected from the NE Equatorial Pacific  
Using Reversal Patterns of Geomagnetic Field and Be Isotope Ratio

Wonnyon Kim<sup>1\*</sup>, Kiseong Hyeong<sup>1</sup>, and Gee Soo Kong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Deep-sea and Seabed Mineral Resources Research Center, KIOST  
Ansan 426-744, Korea

<sup>2</sup>Petroleum and Marine Research Division, KIGAM  
Daejeon 305-350, Korea

**Abstract :** A 570 cm-long sediment core was retrieved at 9°57'N and 131°42'W in 5,080 m water depth from the northeast equatorial Pacific and its stratigraphy was established with <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be and paleomagnetic measurements. Successive AF demagnetization reveals eight geomagnetic field reversals. In the reference geologic time scale, the eight reversal events correspond to an age of about 4.5 Ma. However, <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be-based age yields 9.5 Ma at a depth of 372 cm. Such a large discrepancy in determined ages is attributed to an extremely low sedimentation rate, 0.4 mm/kyr on average, of the study core and resultant loss or smoothing of geomagnetic fields. The composite age model reveals a wide range in the sedimentation rate - varying from 0.1 to 2.4 mm/kyr. However, the sedimentation rate shows systematic variation depending on sedimentary facies (Unit II and III), which suggests that each lithologic unit has a unique provenance and transport mechanism. At depths of 110-80 cm with a sedimentation rate of about 0.1 mm/kyr, ancient geomagnetic field reversal events of at least a 1.8 Myr time span have not been recorded, which indicates the probable existence of a hiatus in the interval. Such a sedimentary hiatus is observed widely in the deep-sea sediments of the NE equatorial Pacific.

**Key words :** age model, Be isotope, deep-sea sediments, northeast equatorial Pacific, paleomagnetism

1. 서 론

북동 적도 태평양 심해저는 풍부한 망간단괴의 부존으로 인해 기존 심해저 광물자원 개발 관점에서 다양한 연

구가 수행되어왔다(Friedrich et al. 1983; 지 등 2003; Lee and Kim 2004; Ko et al. 2006; 김 등 2007; 이 등 2011, 2012). 최근 망간단괴와 더불어 심해 퇴적물 내에 존재하는 희유금속자원에 대한 관심이 높아지면서 퇴적물에 대한 광물학적, 지화학적 연구가 활발히 수행되고 있다(Lee and Lee 1998; 최 등 2007; 박 등 2010; Kota et al. 2011).

\*Corresponding author. E-mail : wkim@kiost.ac

망간단괴 형성과 희유금속원소의 유입과 직접적인 연관이 있는 지질학적 시대 동안의 퇴적환경 변화에 대해서는 몇몇 연구에서 보고하고 있으나(Park et al. 2004; Hyeong et al. 2005, 2011; 최 등 2011), 이들 연구마다 매우 상이한 퇴적시기를 보이고 있다. 예로써, Park et al. (2004)은 북위 10° 부근에서 채취한 퇴적물 주상시료의 고지자기 방향 변화를 이용한 연대측정 결과 심도 229 cm에서 215만년의 연대를 보고하였으며, Hyeong et al. (2005)은 북위 16° 인근에서 채취한 퇴적물 주상시료의 심도 326 cm에서 Sr 동위원소 연대측정에 근거하여 약 1,550만년의 연대를 보고하였다. 물론 위도차이에 의한 퇴적물 차이와 결과적인 퇴적연대의 차이가 나타날 수 있지만, 뚜렷한 연대측정 결과 차이는 다양한 방법을 복합적으로 사용하여 북동 적도 태평양 심해퇴적물에 대한 퇴적연대모델 정립이 필요함을 지시한다.

지질시대 동안의 지구자기장 변화는 전 지구적으로 나타나는 현상으로서, 심해퇴적물에 대해서는 지자기 방향 변화를 이용한 연대 측정 및 층서대비는 물론(Joshima and Usui 1998; Lund et al. 2005; Guidry et al. 2012), 상대적인 지구자기장의 강도, 암석자기학적 특성과 고환경 변화의 상관성(Channell et al. 2012; Yamazaki 2012; Ohneiser et al. 2013; Yamazaki et al. 2013) 등 다양한 연구가 수행되고 있다. 탄산염 보상심도 이상의 수심에서 퇴적된 심해퇴적물의 경우, 매우 낮은 퇴적율로 인해 지구자기장의 역전과 같은 층서대비의 기준이 되는 방향변화의

기록들이 평준화되어 사라지는 현상, 혹은 퇴적 이후 탄산염 용해로 인해 과거 자기장 기록이 오염되는 현상이 빈번히 발생하기 때문에 동위 원소 연대 등 다른 연대측정 기법과 병행하여 퇴적연대모델을 확립하여야 한다(Valet and Meynadier 1993; Suganuma et al. 2010, 2011). 심해 퇴적물 연대측정으로는 어류 이빨의 Sr 동위원소를 주로 활용하지만(예, Hyeong et al. 2005), 어류 이빨 확보가 어려운 지역에서는  $^{10}\text{Be}$  연대측정이 활용되기도 한다(Suganuma et al. 2010, 2011; 최 등 2011).  $^{10}\text{Be}$ 은 일반적으로 1천5백만년까지의 연대측정에 주로 활용된다.

북동 적도 태평양 심해퇴적물 고수류 분석 및 퇴적구조 연구(Park et al. 2000)와 광물조성 변화 분석결과(형 등 2004)에 의하면 뚜렷한 퇴적상의 변화와 함께 퇴적결층이 존재하고 있으며, 그 기간은 3.0~0.5 백만년 전(Halbach et al. 1988) 혹은 2.0~0.6 백만년 전(Lee et al. 2001) 등 제3기에서 제4기로 지질시대가 변화하는 과정 중에 발생한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 고지자기 방향 변화 기록과  $^{10}\text{Be}$  연대측정기법을 활용하여 북동 적도 태평양 심해퇴적물에 대해 정밀한 퇴적연대모델을 확립하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

약 570 cm 길이의 연구시료(PC120201)는 2012년 대한민국 망간단괴 탐사권 지역에서 피스톤 주상시료 채취기

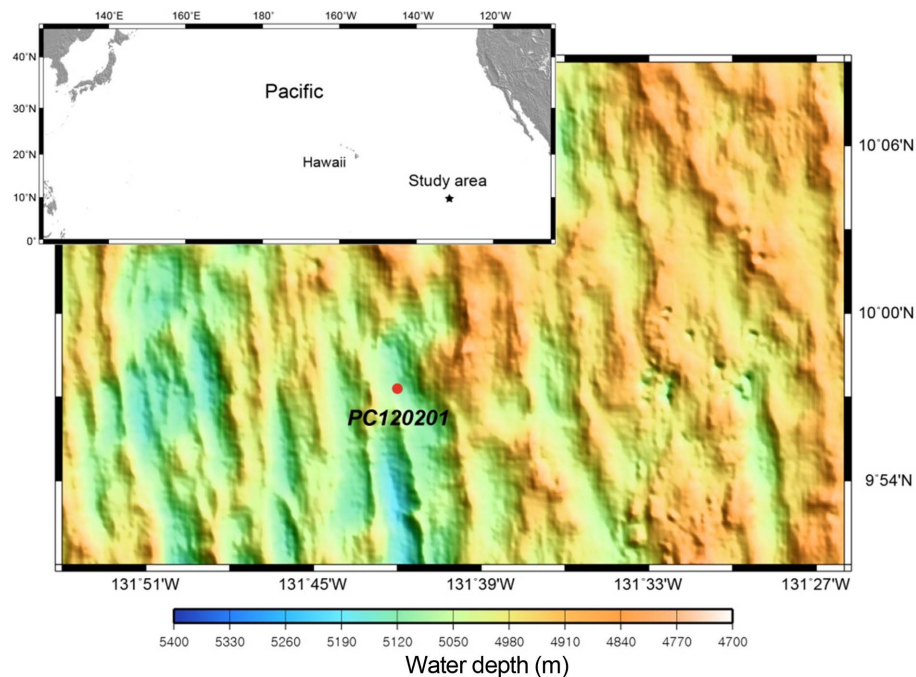


Fig. 1. Bathymetry of the study area. Well-layered flat area was selected as a sampling location using a sub-bottom profiler

를 이용하여 채취되었다(북위 9°57', 서경 131°42', Fig. 1). 회수된 시료의 상부 약 12 cm는 해수에 의해 퇴적물이 교란된 상태였으며, 상부 교란된 퇴적물이 재 침전된 다음 해수를 제거하고 하부에서부터 1 m 간격으로 코어를 절단하였고, 시료의 2차적인 화학적 변질을 방지하기 위해 밀봉하여 약 4°C에서 냉장 보관하였다. 이후 실험실에서 수직축을 따라 주상시료를 절개하여 가로·세로·길이 각각 2 cm × 2 cm × 110 cm인 U-channel 형태의 비자성 관을 이용, 총 6개의 고지자기 측정용 부시료를 채취하였고, 나머지 시료는 지질공학적 특성 및 지화학 특성 분석을 위해 1 cm 간격으로 부시료를 채취하였다.

연구시료는 퇴적상에 따라 크게 세개의 퇴적상으로 구분된다. 주상시료 상부 10 cm 구간의 Unit I은 갈색/암갈색(brown to dark brown, 10YR4/3)을 띠는 점토층으로 높은 함수율로 인해 균질하게 나타난다. Unit II는 주로 황색(brownish yellow, 10YR6/6)을 띠는 점토 퇴적물로 구성되며, 10~110 cm와 216~310 cm 깊이에서 나타난다. 상부의 Unit II에서는 80~110 cm 구간을 제외하고는 Unit I으로 충전된 생교란작용에 의한 서관구조(bioturbated burrows)가 부분적으로 관찰된다. Unit III은 암갈색(very dark brown, 10YR2/2)을 띠는 비교적 균질한 점토로 구성되며, 110~216 cm와 310 cm 하부에서 나타난다. Unit III 사이에 존재하는 Unit II와는 점이적인 퇴적상 변화를 보이지만 약 110 cm 깊이의 Unit II와 III 경계에서는 뚜렷한 퇴적상의 변화가 나타난다.

U-channel 시료에 대해 단계별 교류소자 실험을 수행하였다. 교류소자는 단계별로 증가된 세기의 교류자기장을 가하여 오랜 기간에 걸쳐 기록된 시료의 잔류자화 성분을 점차 제거함으로써 퇴적 당시의 지구자기장 방향을 추출하는 방법이다. 본 연구에서는 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 75, 90 mT로 총 15 단계에 걸쳐 교류소자 실험을 수행하였다. 각 소자단계별 잔류자화 방향(편각/복각)과 세기는 한국지질자원연구원에 설치된 초전도 자력계를 이용하여 1 cm 간격으로 측정하였다. 측정된 자료는 고지자기 분석 프로그램인 PuffinPlot(Lurcock and Wilson 2012)을 이용하여 분석하였으며, 벡터 다이어그램 상에 나타나는 방향변화로부터 주성분 분석법(Kirschvink 1980)을 이용하여 원점으로 수렴하는 안정된 특성 잔류자화 방향을 구하였다.

고지자기 및 암석자기 실험 이후, 비교적 생교란 흔적이 적은 11개 구간에서  $^{10}\text{Be}$  연대측정을 위해 각각 3 g의 퇴적물을 채취하였다.  $^{10}\text{Be}$ 의 AMS 측정 및  $^9\text{Be}$  함량은 최 등 (2011)에 제시된 처리 및 분석방법을 이용하였으며, 뉴질랜드 지질핵과학 연구소(IGNS) 국립 동위원소 센터의 EN-tandem 가속기와 ICP-OES를 이용하여 각각 분석하였다. 표준시료를 이용해 측정된  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 재연성

(relative standard deviation)은 2.0~2.3%로 나타났다.

### 3. 결과 및 토의

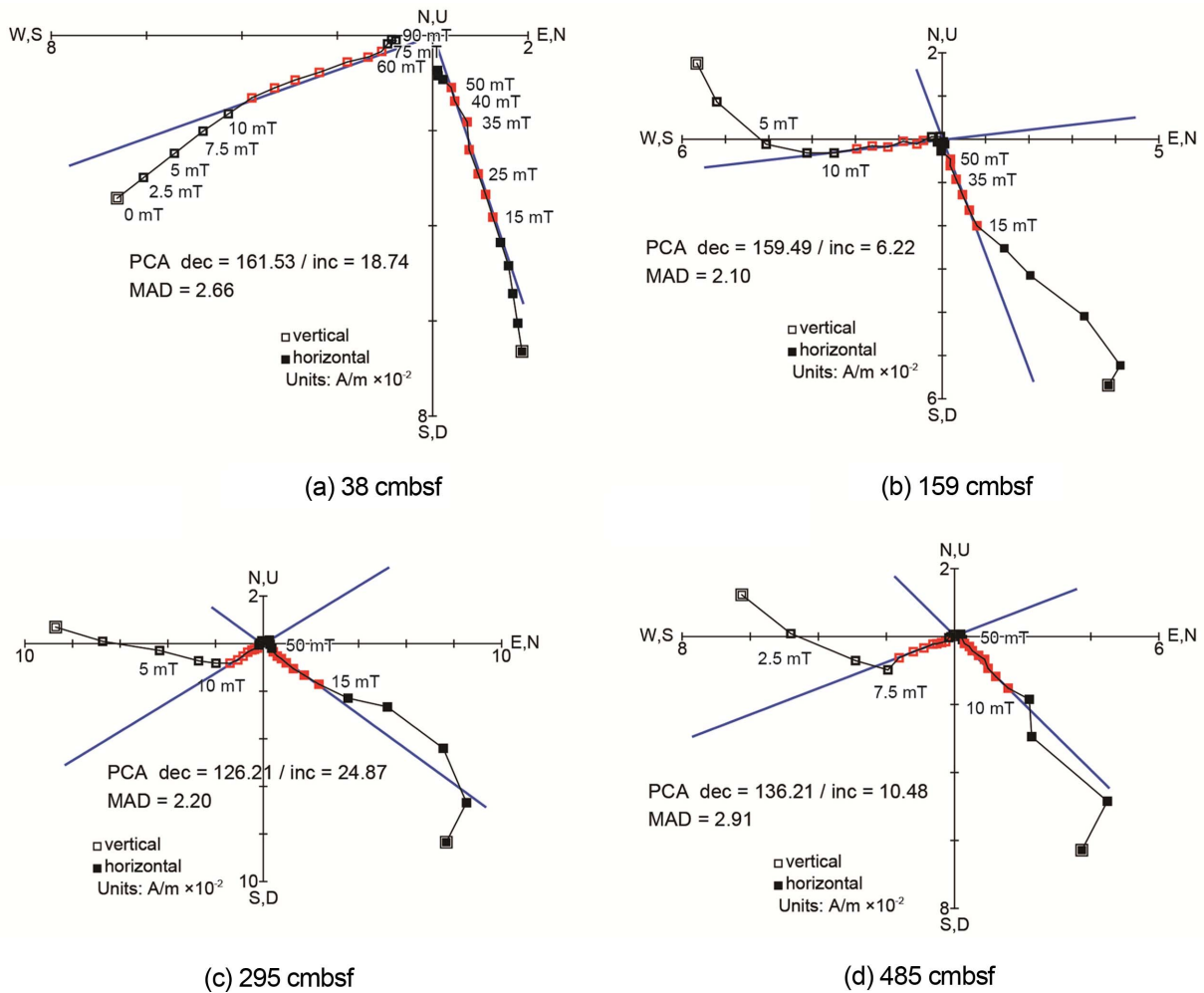
#### 고지자기 방향변화를 이용한 연령산출

570 cm 길이의 주상시료에 대해 1 cm 간격으로 최대 90 mT까지 총 15단계의 교류소자 실험을 통해 각각의 깊이에서 기록된 퇴적 당시 지구자기장 방향을 추출하였다. 소자실험 이전, 퇴적 이후 지질시대를 거치면서 획득된 주상시료의 자연잔류자화(natural remanent magnetization, NRM)의 세기는 1.92~14.75 mA/m의 범위로 나타나며, 소자실험 결과 시료 최상부에서부터 62 cm 깊이까지의 퇴적물을 제외하고 모든 구간에서 NRM의 10% 미만 세기로 완벽히 소자되었다.

퇴적물에 기록된 잔류자화 중 정상 자극을 보이는 대표적인 소자실험 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 대부분의 깊이에서 소자단계가 높아짐에 따라 퇴적 이후 획득된 불안정한 이차자화 성분은 약 10 mT의 교류자기장에서 소멸되고, 퇴적당시의 지구자기장 방향으로 예상되는 원점으로 향하는 특성 잔류자화(Characteristic Remanent Magnetization, ChRM) 성분은 15 mT부터 50 mT까지 나타난다. 이후 소자단계에서는 방향이 분산되는 경향을 보인다. 이차자화 성분은 원점으로 향하는 자화성분과 유사한 편각(declination, D)과 복각(inclination, I)을 보이는 경우도 있지만(Fig. 2a) 대부분의 정자극의 ChRM 방향을 보이는 퇴적물에서는 복각이 위에서 아래로 향하는 즉, “-”의 복각값을 보인다. 이러한 현상은 정자극기에 퇴적물이 쌓인 다음 지구자기장의 역전이 뒤따랐음을 의미하며, 태평양 심해의 매우 낮은 퇴적율을 감안했을 때 이러한 자극의 혼합은 일반적인 현상인 것으로 해석된다. 주성분 분석법을 이용한 ChRM 방향 추출 시, 15~50 mT 소자구간의 성분은 주성분에서부터의 최대 각거리(maximum angular deviation, MAD)가 0.1~9.9°로 나타나지만 대부분 5° 미만의 MAD를 보여 매우 안정된 자화방향을 기록하고 있는 것으로 나타난다.

Fig. 3은 지자기 역전이 기록된 퇴적물의 대표적인 교류소자 양상이다. 약 10 mT까지의 낮은 소자단계에서 제거되는 이차자화 성분은 일부 퇴적물(예, Fig. 3b)을 제외하고는 정상자극을 보이며, 이후 복각이 아래로 향하고 소자단계가 증가함에 따라 원점으로 수렴되는 안정된 성분이 40 mT 혹은 50 mT까지 나타난다. 정자극을 기록하고 있는 퇴적물과 비교하였을 때, 이차자화 성분과 ChRM 성분과의 각 변화가 90° 이상으로 매우 뚜렷하게 나타난다. 이로 인해 소자단계가 증가함에 따라 잔류자화의 세기가 감소, 증가, 다시 감소하는 경향을 보이게 된다.

정상 자극을 보이는 퇴적물의 지구자기장 기록은 상부



**Fig. 2. Representative AF demagnetization behavior showing normal magnetic polarity on the vector diagram. Red square: a stable remanence decaying toward the origin, Blue line: direction of the stable remanence determined by the principle component analysis**

10 cm까지 교란된 부분을 제외하고 편각이 약 82~168°로 나타나고, 북각은 -5~41° 범위로 나타난다. 퇴적물 주상시료 채취 시 피스톤 주상시료 채취기의 수평적인 방향을 알 수 없었기 때문에 측정된 편각은 연구지역에서 관측되는 현재 지구자기장의 편각(D = 9°22')을 기준으로 보정하였다. 또한 일부 음의 북각을 보이는 구간이 나타나지만 지구자기장의 역전 기록은 북각뿐만 아니라 편각의 180° 회전을 수반하기 때문에 편각값을 고려하여 정상 자극구간으로 설정하였다(Fig. 4). 역전 자극을 보이는 퇴적물은 편각이 약 280~340°로 나타나고, 북각은 약 -4~-40°로 나타난다. 역자극의 편각 역시 정자극 보정방법과 같은 방법으로 보정하였다. 역전 자극은 총 8개 구간에서 관찰되며, 특징적으로 정상에서 역전, 혹은 역전에서 정상으로 전이되는 동안에는 잔류자화 방향이 완벽히 대칭(편각: 180° 차이, 북각: + (-)에서 - (+)으로)되는 것이 아니라,

편각과 북각이 증가/감소하다가 점차 대칭적인 값을 보이게 된다(Fig. 4). 또한 지자기 전이 동안 MAD 또한 약 10° 내외의 높은 값을 보이며, 이는 잔류자화 방향이 상대적으로 불안정함을 의미하는데 서로 다른 자극의 혼합으로 인해 원점으로 향하는 ChRM 성분이 오염된 결과로 판단된다. 이러한 잔류자화 성분의 부분적인 오염은 자극이 안정화(방향의 대칭과 함께 MAD 값의 감소)되면서 점차적으로 제거된다.

결과적으로 본 연구에서 사용한 주상시료에는 총 8회의 지구자기장 역전현상이 기록되어 있으며, 이는 모든 지자기 역전현상이 기록되었다고 가정할 때 연구시료가 약 450만년에 걸쳐 평균 1.3 mm/kyr의 속도로 퇴적되었음을 지시한다. 이 결과는 Park et al. (2004)이 인근 지역(북위 10°27', 서경 132°05')에서 채취한 주상시료에서 고지자기 방향변화를 이용하여 보고한 1.1 mm/kyr(229 cm/

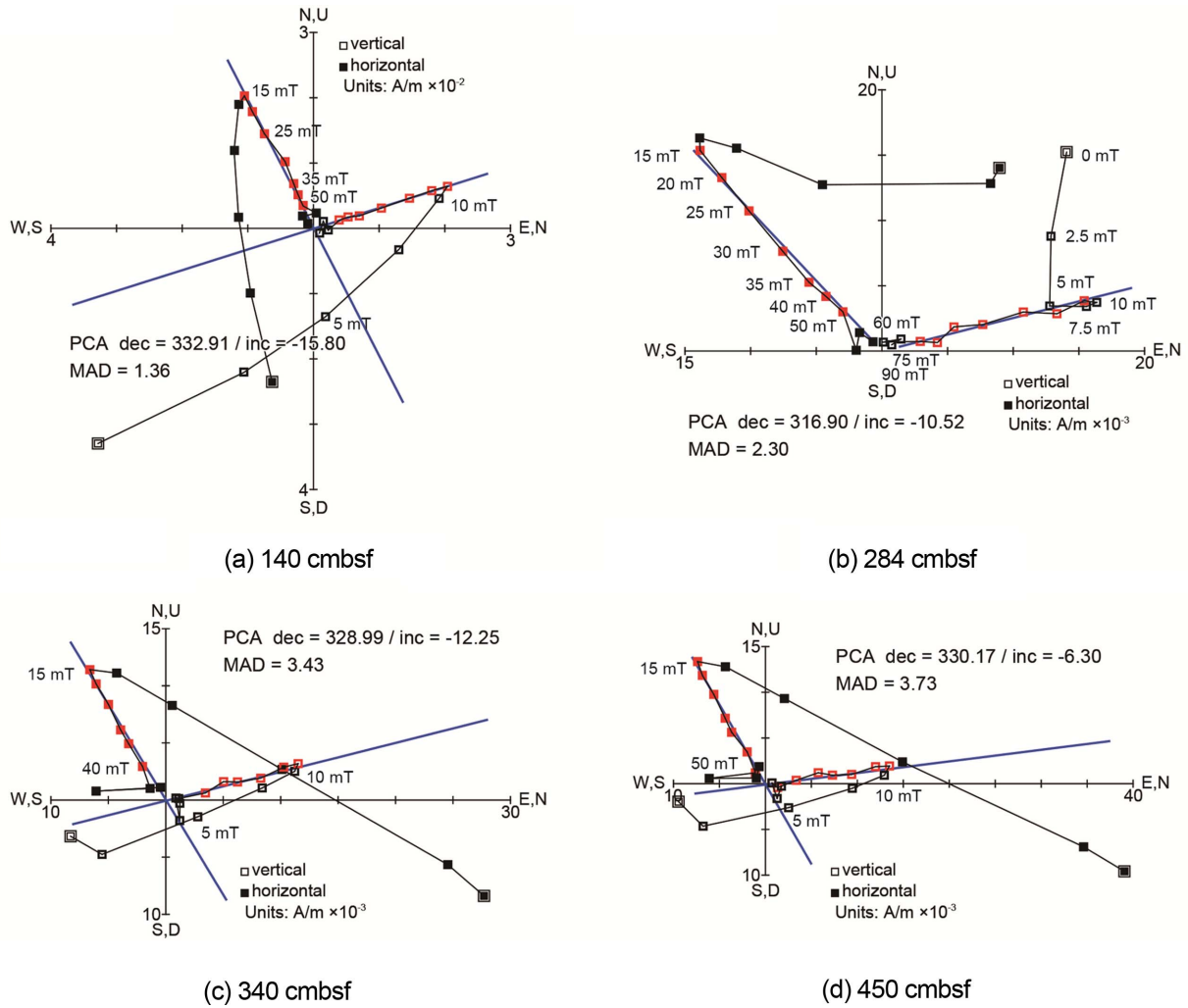


Fig. 3. Representative AF demagnetization behavior showing reverse magnetic polarity

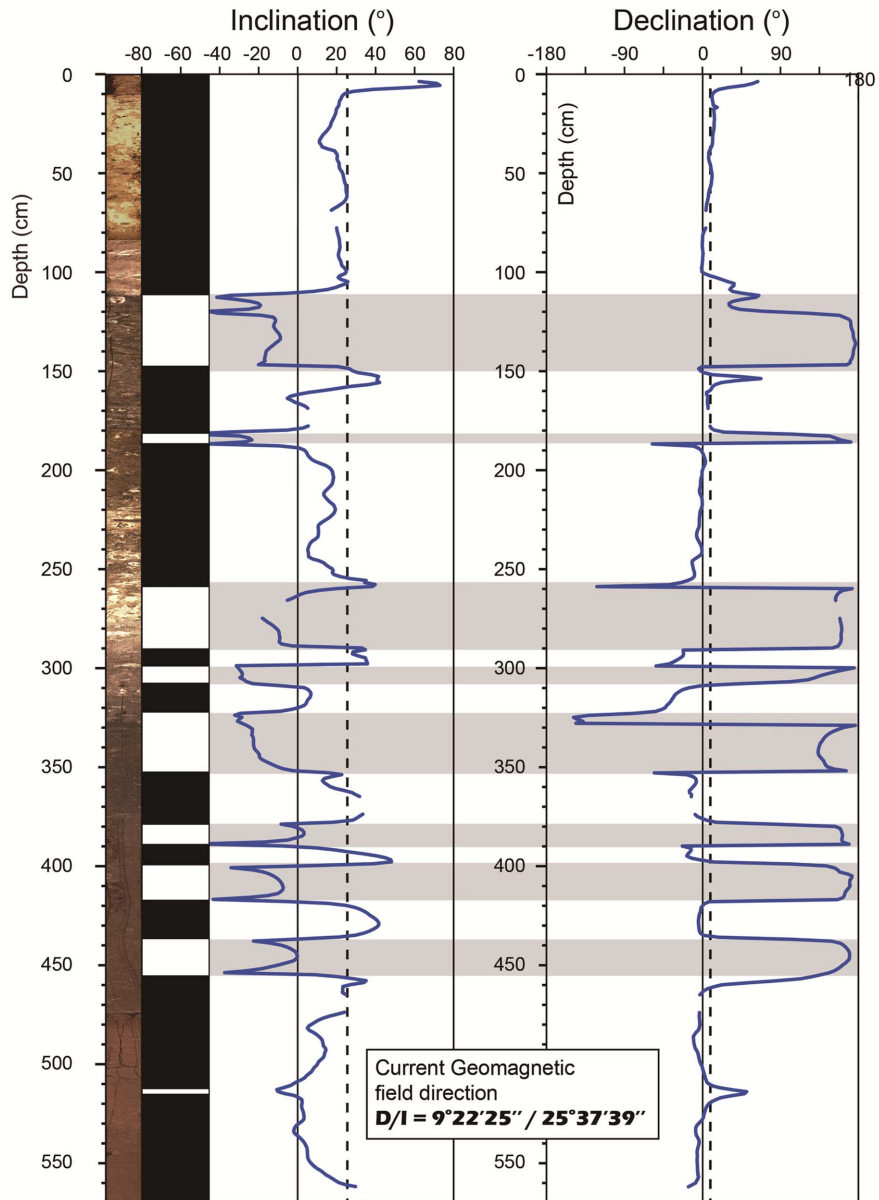
2.15 myrs)의 퇴적율과 잘 일치한다.

**Be 동위원소를 이용한 연대측정**

주상시료 심도별 <sup>9</sup>Be, <sup>10</sup>Be 농도, 그리고 <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be 값을 Table 1에 제시하였다. 측정된 <sup>10</sup>Be 농도는 최상부 48 cm 시료가 두 번째의 75 cm 시료보다 낮은 값을 보이는 역전 현상을 보인다, 하지만 <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be 값은 하부에 놓이는 시료가 더 낮은 일반적으로 예측되는 양상을 보인다(Fig. 5). 이렇게 상부 두 값의 차이가 크지 않고, 깊이에 따라 <sup>10</sup>Be 농도와 <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be 값이 다른 양상을 보이는 것은 생교란 작용에 의해 퇴적물의 혼합이 발생했을 가능성, 두 시기 <sup>10</sup>Be 생산율의 차이, 또는 해류에 의한 추가적인 물질의 공급이 있었을 가능성을 지시한다(Faure 1986; 최 등 2011). 하지만, <sup>10</sup>Be 농도와 <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be 사이의 강한 양의 상관관계( $r^2 = 0.98$ )는 <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be가 연령결정에 사용될 수 있음을 지시한다(Fig. 5). 측정된 <sup>10</sup>Be 농도와 <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be 값은

깊이에 따라 감소하는 일반적인 경향을 뚜렷이 보인다. 특징적으로 75~142 cm 구간에서 급격히 감소하며, 그 이후에 지수함수적으로 점차 감소한다(Fig. 5).

이번 연구에서는 퇴적물이 일정한 <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be를 획득한 후, 그 비가 연령에 따라 점차 감소한다는 가정을 적용하여 다음 식을 이용 퇴적물 연령(t)을 산정하였다:  $t = -\log_e((^{10}\text{Be}/^9\text{Be})_{\text{sample}} / (^{10}\text{Be}/^9\text{Be})_{\text{initial}}) / 0.693 \times t_{1/2}$ . 여기서, 표준 퇴적물의 <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be(<sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be)<sub>initial</sub>는 최상부 두개 값을 외삽한  $6.537 \times 10^{-8}$ 을 사용하였고, 반감기( $t_{1/2}$ )는  $1.36 \times 10^6$ 년을 사용하였다(Table 1). 앞서 설명한 바와 같이 상부 두 시료의 <sup>10</sup>Be 농도와 <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be가 서로 다른 깊이에 따른 변화양상을 보이기 때문에 표준퇴적물의 <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be(<sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be)<sub>initial</sub> 값의 정확성에 대해 논란이 있을 수 있다. 하지만 이 값이 인근정점(북위 10°27.1', 서경 131°59.8')에서 보고된 표준퇴적물의 값( $6.797 \times 10^{-8} \sim 7.178 \times 10^{-8}$ ; 최 등 2011)과 매우 유사한 점으로 고려할 때 산출 연령에



**Fig. 4. Downcore variation of ChRM directions. Distinctive eight reversal events were observed throughout a core. ChRM declination was corrected to the current geomagnetic field direction expected at the sampling location**

큰 오차를 야기하지 않을 것으로 판단된다. 실제로 연구시료가 생교란작용에 영향을 받은 것으로 가정하고 외삽값이 아닌 지역에서 보고된 가장 높은 값( $7.2 \times 10^{-8}$ )을 적용할 때 모든 연령은 20만년 정도 높은 값을 산출하며, 따라서 외삽한 초기값의 사용에 의한 오차는 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

이 방법으로 계산한 연구 주상시료의 연령은 372 cm 구간이 중기 마이오세에 해당하는 950만년의 연령을 갖는 것으로 확인되었으며, 측정오차는 4만년 혹은 5만년으로 나타났다(Table 1, Fig. 6). 그러나 심도 213 cm와 246 cm

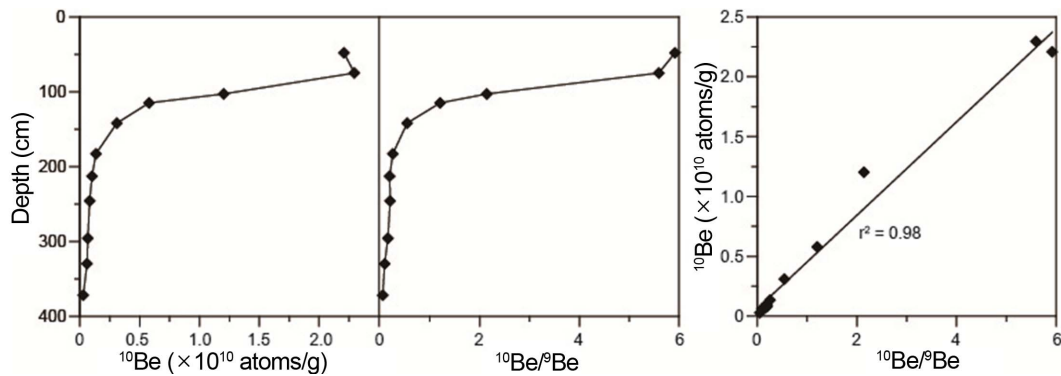
에서 측정 연대가 6.92 Ma와 6.81 Ma로 퇴적 연대의 역전이 나타났으며, 이는 생물학적 교란에 의한 결과로 판단된다.

#### 지자기 및 Be 동위원소 연대측정 결과 비교

일반적으로 지구자기장이 퇴적물에 화석과 같이 기록되는데 필요한 시간으로 인해  $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$  연대에 비해 상대적으로 젊은 고지자기 연대를 보이게 되지만, 심해 퇴적물의 느린 퇴적율을 감안했을 때 시차에 대한 영향은 배제할 수 있을 것이다(Christl et al. 2003; Raisbeck et al. 2006;

Table 1. Be isotope data of the samples from PC120201

Sample no.	Depth (cm)	$^9\text{Be}$ ( $\times 10^{17}$ atoms/g)	$^{10}\text{Be}$ ( $\times 10^{10}$ atoms/g)	$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ( $\times 10^{-8}$ )	Age (myrs)
1	48	$3.730 \pm 0.075$	$2.208 \pm 0.010$	$5.919 \pm 0.121$	$0.19 \pm 0.04$
2	75	$4.102 \pm 0.082$	$2.295 \pm 0.010$	$5.594 \pm 0.115$	$0.31 \pm 0.04$
3	103	$5.609 \pm 0.011$	$1.202 \pm 0.005$	$2.142 \pm 0.044$	$2.19 \pm 0.04$
4	115	$4.805 \pm 0.096$	$0.5784 \pm 0.0028$	$1.204 \pm 0.025$	$3.32 \pm 0.04$
5	142	$5.691 \pm 0.011$	$0.3105 \pm 0.0018$	$0.544 \pm 0.011$	$4.88 \pm 0.04$
6	183	$5.231 \pm 0.011$	$0.1342 \pm 0.0009$	$0.256 \pm 0.005$	$6.35 \pm 0.04$
7	213	$5.280 \pm 0.011$	$0.1016 \pm 0.0008$	$0.192 \pm 0.004$	$6.92 \pm 0.04$
8	246	$4.024 \pm 0.081$	$0.08185 \pm 0.0006$	$0.203 \pm 0.004$	$6.81 \pm 0.04$
9	296	$4.272 \pm 0.085$	$0.06662 \pm 0.0006$	$0.156 \pm 0.003$	$7.33 \pm 0.04$
10	330	$6.561 \pm 0.013$	$0.06010 \pm 0.0005$	$0.092 \pm 0.002$	$8.38 \pm 0.04$
11	372	$5.487 \pm 0.011$	$0.02830 \pm 0.0003$	$0.052 \pm 0.001$	$9.50 \pm 0.05$

Fig. 5. Plots of  $^{10}\text{Be}$  and  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  against depth and  $^{10}\text{Be}$  against  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 

Suganuma et al. 2010, 2011). 대표적인 보정 구간은 110 cm 깊이 부근으로서 본 연구 시료에서 처음으로 지자기 역전 현상(R1)이 나타나는 부분이다(Fig. 6).  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  연대 보정이 없었을 경우, R1은 표준 지자기 연대표(Gradstein et al. 2004)에 의해 78만년의 Brunhes-Matsuyama 자극 변환으로 인지되었을 것이다. 한편  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  연대는 47 cm와 74 cm 깊이에서 각각 19만년과 31만년으로서 2.44 mm/kyr의 비교적 높은 퇴적율을 보이다가, 이후 R1이 나타나는 구간인 103 cm와 114 cm 깊이(Unit II/III 경계부)에서 각각 219만년과 332만년의 퇴적연대를 보여 0.10 mm/kyr, 즉 만년당 1 mm의 퇴적물이 쌓일 정도로 퇴적물의 유입이 거의 없었던 퇴적환경이었음을 나타낸다. 최 등(2011) 또한 인근의 정점에서 채취한 32 cm 길이의 주상 시료의 Be 동위원소비를 이용하여 Unit II/III의 퇴적율을 본 연구결과와 유사한 0.11 mm/kyr로 보고한 바 있다. 이러한 퇴적환경은 동일한 퇴적상이 유지되는 Unit II 하부 약 110~80 cm 구간에서 지속되었을 것이다. 0.10 mm/kyr의 매우 낮은 퇴적율을 감안하더라도 259만년부터 78만

년 전까지 약 180만년의 Matsuyama 역자극 기록은 110~80 cm 구간 중 18 cm 두께로 나타나야만 한다. 그러나 본 연구에서는 110 cm 상부 퇴적층에서 정자극 기록만 관찰되었으며, 이는 매우 적은 퇴적물 유입뿐만 아니라 최소 180만년 동안 퇴적중단이 일어난 퇴적결층(hiatus)이 110~80 cm 구간에 존재함을 지시한다. 기존연구는 이 지역에서 5백만년 전부터 현재까지 퇴적결층이 빈번히 발생하는 것으로 보고하고 있으며(van Andel et al. 1975; Halbach et al. 1988; Lee et al. 2001), 따라서 이러한 해석은 기존의 연구결과와 잘 일치하는 것으로 판단된다.

지자기 역전은 약 180~460 cm 구간에서 집중되어 기록되어(8회 중 7회) 있다. 특히 180~380 cm 구간의 지자기 기록이 잘 보존되어 있으며, 이는 상대적으로 높은 퇴적율과 긴 지자기 역전주기에 의한 효과로 판단된다. 반면 380 cm 하부와 180 cm 상부의 경우에는 낮은 퇴적율로 인해 짧은 주기의 지자기 역전기록이 매몰, 평준화되는 현상이 나타났으며, 이러한 매몰현상은 교류소자 실험결과에 나타난 바와 같이 ChRM 방향이 이차자화 성분의 방

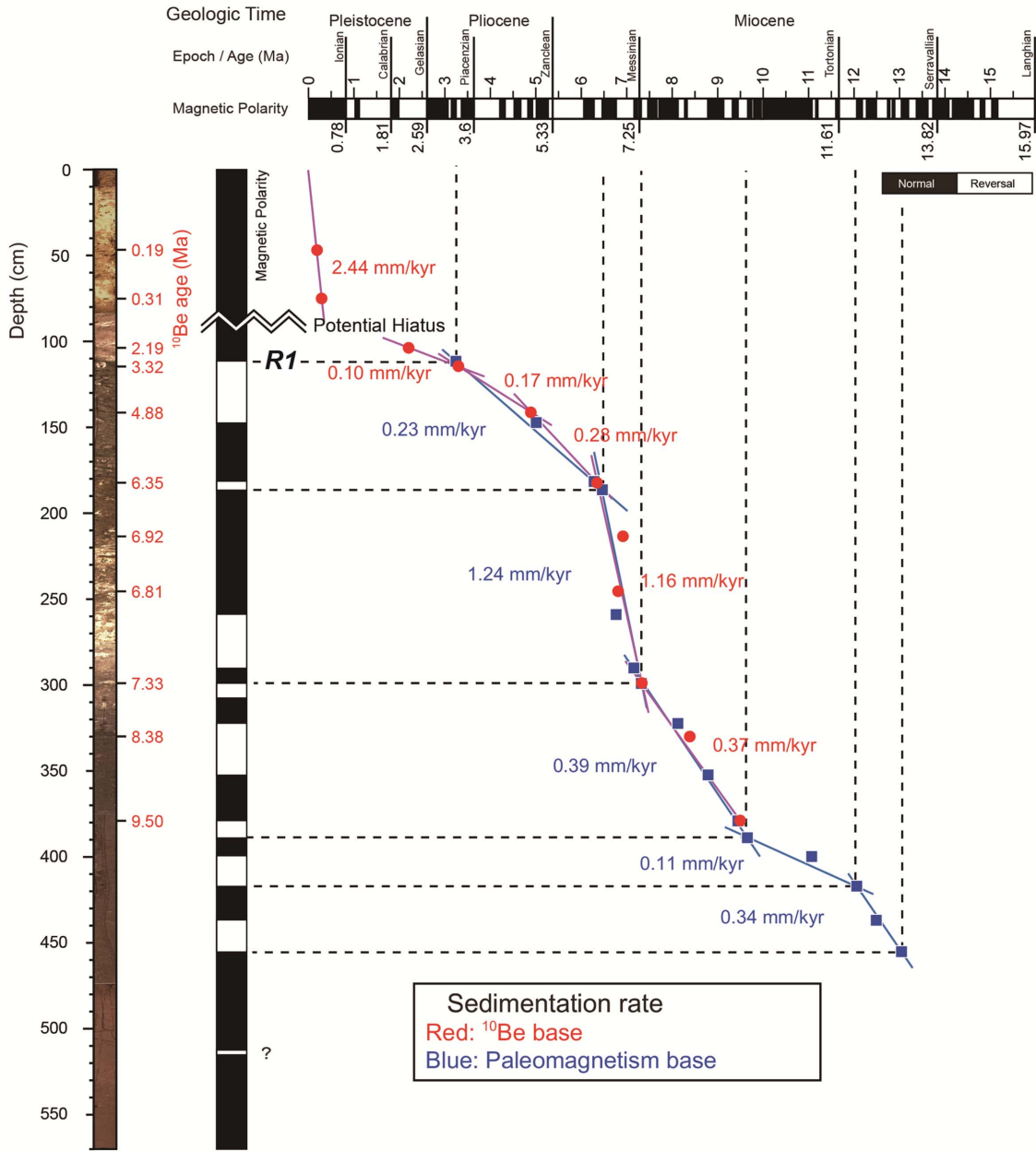


Fig. 6. Ages and sedimentation rates of PC120201 determined based on <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be and reversal patterns of geomagnetic field. R1: the first paleomagnetic reversal observed in the sediments core

향과 역전되어 나타나는 것으로 설명된다(Fig. 3).

<sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be 연대측정 자료를 이용한 372 cm 깊이까지의 고지자기 연대 보정 이후, 짧은 주기의 지자기 역전기록이 매몰되는 현상을 바탕으로 약 465 cm 깊이까지의 퇴적 연대를 1,340만년으로 추정하였다(Fig. 6). 퇴적율은 하부에서 상부로, 0.24 mm/kyr(혹은 0.34~0.11 mm/kyr), 0.38 mm/kyr, 1.24 mm/kyr로 300~180 cm 깊이 구간에서 급진적으로 증가하다가 다시 0.23 mm/kyr, 0.10 mm/kyr로 급감하여 약 110~80 cm 구간에서 최소 180만년의 퇴적

중단기간이 형성된다. 이러한 깊이에 따른 퇴적율의 변화는 암상의 차이와 밀접한 관련성을 보인다(Fig. 6). 즉 10~80 cm와 216~310 cm 구간의 Unit II는 각각 2.44 mm/kyr과 1.24 mm/kyr의 퇴적율로 110~216 cm의 Unit III이 보이는 퇴적율(0.23 mm/kyr) 보다 최소 5배 이상 높은 퇴적율을 보인다. 그리고 최하부에 위치한 Unit III 중 Be 동위원소에 의해 연령이 확인된 310~380 cm 구간의 퇴적율은 0.39 mm/kyr로서 중간 정도의 퇴적율을 보인다. 이와 같은 암상에 따른 뚜렷한 퇴적율의 차이는 암상에 따



라 퇴적물의 기원지, 공급량, 그리고 이동 기작 등에 차이가 있었음을 시사한다. 예로써 Rea (1994)와 Hyeong et al. (2006)에 의하면 북반구와 남반구 기원의 풍성기원 입자의 공급량은 2~10배 차이 나는 것으로 보고하고 있으며, 또한 열수기원 물질의 공급량에 따라서도 퇴적율이 크게 변화하는 것으로 알려져 있다. 그리고 암상별 퇴적율의 차이는 표층생산성의 시대별 차이와 시간에 따른 생물기원 물질의 용해 정도 차이에 기인했을 가능성이 있다. 즉, 상부와 하부 Unit II의 퇴적율 차이는 앞서 설명한 생교란작용 또는 퇴적결층에 기인했을 가능성이 있지만, 연구지역 퇴적물의 생물기원 규소함량과 유기탄소함량이 감소하는 경향을 고려하면 하부의 Unit II에 분포하는 생물기원물질의 용해가 심하여 퇴적율이 낮게 나타났을 가능성도 배제할 수 없다.

이번 연구결과는 퇴적율이 매우 낮은 연구지역에서 지자기 역전에 기반한 퇴적연령은 반드시 다른 지구화학적 연령측정 결과와 병행하여 사용되어야 함을 지지하며, 또한 지자기 역전기록은 지구화학적 연령측정이 갖는 낮은 해상도 자료의 신뢰도를 높이고, 지화학 연령측정 결과를 검증하는 보조자료로서 활용될 수 있음을 보여준다. 본 연구에서 수립한 연구시료의 층서는 향후 지화학분석 및 암석지자기 분석을 통해 암상별 기원지, 퇴적 기작 및 고기후 변화를 연구하는데 활용할 예정이다.

#### 4. 결 론

총 3개의 퇴적상으로 구분되는 570 cm 길이의 주상시료를 북동태평양 KR5 망간단괴 광구지역에서 채취하였다. 1 cm 간격의 정밀 교류소자 실험 결과 8회의 지구자기장 역전기록이 측정되었다. 11개 깊이에서의  $^{10}\text{Be}$  연대 측정 자료를 활용하여 과거 지구자기장 방향변화를 보정, 연구지역의 퇴적연대모형을 수립하였다. 이로부터 추정된 퇴적연대는 약 465 cm에서 1,340만년이며, 퇴적율은 암상에 따라 0.1~2.44 mm/kyr로 다양하게 변화하는 것으로 나타난다. 특히, 110 cm 깊이부터 0.1 mm/kyr의 매우 낮은 퇴적율 또는 무퇴적/침식으로 인해 최소 180만년 동안 지구자기장이 기록되지 못하였으며, 이러한 퇴적결층은 북동 적도 태평양 심해퇴적물에서 광범위하게 관찰된다.

#### 사 사

현장 조사에 도움을 주신 ‘온누리호’ 승조원들 여러분께 감사드립니다. 본 연구는 해양수산부 R&D 사업인 태평양 심해저 광물자원 개발(PM57950) 및 한국해양과학기술원의 심해퇴적물 고기후 지시자를 이용한 북태평양 순환류 변동성 연구(PE98915)의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 김현섭, 정미숙, 박정기, 고영탁 (2007) 해저면 영상 관찰을 통한 망간단괴 채광 장애지역 분포 특성 연구. *물리탐사* **10**(3):173-182
- 박상준, 문재운, 이경용, 지상범 (2010) 한국이 탐사 중인 해저광물자원의 희유금속 함량과 의미. *자원환경지질* **43**(5):455-466
- 이현복, 고영탁, 김종욱, 지상범, 김원년 (2011) KODOS 남쪽광구에서 자유낙하식 채취기로 채취된 망간단괴 부존률 평가를 위한 보정상수 검증. *자원환경지질* **44**(6):475-483
- 이현복, 김원년, 고영탁, 김종욱, 지상범, 박정기 (2012) 북동태평양 한국 KODOS 연구지역 중 KR1 지역 망간단괴의 지역적인 특성 변화. *자원환경지질* **45**(5):477-486
- 지상범, 형기성, 김종욱, 김현섭, 이근창, 손승규 (2003) 북동태평양 클라리온: 클리퍼톤 균열대 KODOS 지역 심해저 퇴적물의 지질공학적 특성에 따른 유형분류. *Ocean and Polar Res* **25**(4):529-543
- 최현수, 강중석, 장세원, 고상모, 엄인권 (2007) 망간단괴의 분화율과 망간단괴 분말 및 해저퇴적물의 물리적 특성. *한국광물학회지* **20**(4):277-287
- 최현수, 공기수, 엄인권, 김지훈 (2011) 북동태평양 해저퇴적물의 Be 연대측정. *한국광물학회지* **24**(3):179-188
- 형기성, 김기현, 지상범, 유찬민 (2004) 신생대 후기 북동태평양 지역 적도수렴대의 위치변화. *Ocean Polar Res* **26**:245-253
- Channell JET, Hodell DA, Curtis JH (2012) DOP Site 1063 (Bermuda Rise) revisited: Oxygen isotopes, excursions and paleointensity in the Brunhes Chron. *Geochem Geophys Geosy* **13**:Q02001
- Christl M, Strobl C, Mangini A (2003) Beryllium-10 in deep-sea sediments: a tracer for the Earth's magnetic field intensity during the last 200,000 years. *Quat Sci Rev* **22**:725-739
- Faure G (1986) Principles of isotope geology (2nd ed). John Wiley & Sons, 518 p
- Friedrich G, Glasby GP, Thijssen T, Plüger WL (1983) Morphological and geochemical characteristics of manganese nodules collected from three areas on an equatorial Pacific transect by R.V. *Sonne*. *Mar Mining* **4**:167-253
- Gradstein F, Ogg J, Smith A (2004) A geologic time scale. Cambridge Univ Press, Cambridge, 589 p
- Guidry EP, Richter C, Acton GD, Channell JET, Evans HF, Ohneiser C, Yamamoto Y, Yamazaki T (2012) Oligocene-Miocene magnetostratigraphy of deep-sea sediments from the equatorial Pacific (IODP Site U1333). *Geol Soci London, Special Pub* **373**. doi:10.1144/SP373.7
- Halbach P, Friedrich G, von Stackelberg U (1988) The

- manganese nodule belt of the Pacific ocean: geological environment, nodule formation, and mining aspects. Ferdinand Enke, Stuttgart, 254 p
- Hyeong K, Park SH, Yoo CM, Kim KH (2005) Mineralogical and geochemical compositions of the eolian dust from the northeast equatorial Pacific and their implications on paleolocation of the Intertropical Convergence Zone. *Paleoceanography* **20**:PA1010
- Hyeong K, Yoo CM, Kim J, Chi SB, Kim KH (2006) Flux and grain size variation of eolian dust as a proxy tool for the paleo-position of the Intertropical Convergence Zone in the northeast Pacific. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* **241**:214-223
- Hyeong K, Kim J, Pettke T, Yoo CH, Hur SD (2011) Lead, Nd and Sr isotope records of pelagic dust: Source indication versus the effects of dust extraction procedures and authigenic mineral growth. *Chem Geol* **286**:240-251
- Joshima M, Usui A (1998) Magnetostratigraphy of hydrogenetic manganese crusts from northwestern Pacific seamounts. *Mar Geol* **146**:53-62
- Kirschvink JL (1980) The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophys J Roy Astronom Soc* **62**(3):699-718
- Ko Y, Lee S, Kim J, Kim KH, Jung MS (2006) Relationship between Mn nodule abundance and other geological factors in the northeastern Pacific: application of GIS and probability method. *Ocean Sci J* **41**(3):149-161
- Kota Y, Fujinaga K, Nakamura K, Takaya Y, Kitamura K, Ohta J, Toda R, Nakashima T, Iwamori H (2011) Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geosci* **4**:535-539. doi: 10.1038/ngeo1185
- Lee CH, Lee SR (1998) Authigenic phillipsite in deep-sea manganese nodules from the Clarion-Clipperton area, NE equatorial Pacific. *Mar Geol* **148**:125-133
- Lee SH, Kim KH (2004) Side-scan sonar characteristics and manganese nodule abundance in the Clarion-Clipperton Fracture Zones, NE equatorial Pacific. *Mar Georesour Geotech* **22**:103-114
- Lee SR, Choi H, Chang SW, Graham I (2001)  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  Dating of Ferro-Manganese Nodules from the NE Pacific Ocean. *J Korean Physical Soc* **39**:766-771
- Lund SP, Schwartz M, Keigwin L, Johnson T (2005) Deep-sea sediment records of the Laschamp geomagnetic field excursion (<41,000 calendar years before present). *J Geophys Res* **110**:B04101
- Lurcock PC, Wilson GS (2012) PuffinPlot: a versatile, user-friendly program for paleomagnetic analysis. *Geochem Geophys Geosys* **13**:Q06Z45
- Ohneiser C, Acton G, Channell JET, Wilson GS, Yamamoto Y, Yamazaki T (2013) A middle Miocene relative paleointensity record from the equatorial Pacific. *Earth Planet Sci Lett* **374**:227-238
- Park CK, Doh SJ, Suk DW, Kim KH (2000) Sedimentary fabric on deep-sea sediments from KODOS area in the eastern Pacific. *Mar Geol* **171**:115-126
- Park CK, Son SK, Kim KH, Chi SB, Doh SJ (2004) Paleomagnetic results from deep-sea sediment of the Korea Deep Ocean Study (KODOS) area (northern equatorial Pacific) and their paleodepositional implications. *Geo-Mar Lett* **24**:112-124
- Raisbeck GM, Yiou F, Cattani O, Jouzel J (2006)  $^{10}\text{Be}$  evidence for the Matuyama-Brunhes geomagnetic reversal in the EPICA Dome C ice core. *Nature* **444**:82-84
- Rea DK (1994) The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: The geologic history of wind. *Rev Geophys* **32**:159-195
- Suganuma Y, Yokoyama Y, Yamazaki T, Kawamura K, Horng CS, Matsuzaki H (2010)  $^{10}\text{Be}$  evidence for delayed acquisition of remanent magnetization in marine sediments: Implication for a new age for the Matuyama-Brunhes boundary. *Earth Planet Sci Lett* **296**:443-450
- Suganuma Y, Okuno J, Heslop D, Roberts AP, Yamazaki T, Yokoyama Y (2011) Post-depositional remanent magnetization lock-in for marine sediments deduced from  $^{10}\text{Be}$  and paleomagnetic records through the Matuyama – Brunhes boundary. *Earth Planet Sci Lett* **311**:39-52
- Valet JP, Meynadier L (1993) Geomagnetic field intensity and reversals during the last four million years. *Nature* **366**:234-238
- van Andel TH, Heath GR, Moore TC Jr (1975) Cenozoic history and paleoceanography of the central equatorial Pacific. *Geol Soc Am Mem* **143**:1-223
- Yamazaki T (2012) Paleoposition and intertropical convergence zone in the eastern Pacific inferred from glacial-interglacial changes in terrigenous and biogenic magnetic mineral fractions. *Geology* **40**:151-154
- Yamazaki T, Yamamoto Y, Acton G, Guidry EP, Richter C (2013) Rock-magnetic artifacts on long-term relative paleointensity variations in sediments. *Geochem Geophys Geosys* **14**:29-43

#### 국문 참고자료의 영어 표기

**English translation / Romanization of references originally written in Korean**

- Kim H, Jung MS, Park CK, Ko Y (2007) A study on the distributional characteristics of unminable manganese

- nodule area from the investigation of seafloor photographs. *J Korean Geophys Soc* **10**(3):173-182 (in Korean)
- Pak SJ, Moon JW, Lee KY, Chi SB (2010) Rare metal contents and their implications of seabed mineral resources explored by Korea. *Econ Environ Geol* **43**(5):455-466 (in Korean)
- Lee HB, Ko Y, Kim J, Chi SB, Kim W (2011) Evaluation of correction parameter for the Free-fall grab based Mn nodule. *Econ Environ Geol* **44**(6):475-483 (in Korean)
- Lee HB, Kim W, Ko Y, Kim J, Chi SB, Park CK (2012) Regional variability of manganese nodule facies in the KR1 area in KODOS area, Northeastern Equatorial Pacific. *Econ Environ Geol* **45**(5):477-486 (in Korean)
- Chi SB, Hyeong K, Kim J, Kim HS, Lee GC, Son SK (2003) Classification of Deep-sea sediment by geotechnical properties from the KODOS Area in the C-C zone of the Northeast Equatorial Pacific. *Ocean and Polar Res* **25**(4):529-543 (in Korean)
- Choi H, Kang JS, Chang SW, Koh SM, Um I (2007) Shattering ratio of manganese nodule and physical properties of powdered manganese nodule and sea bottom sediment. *J Mine Soc Korea* **20**(4):277-287 (in Korean)
- Choi H, Kong GS, Um I, Kim JH (2011) Be age-dating of marine sediments from NE Pacific. *J Mine Soc Korea* **24**(3):179-188 (in Korean)
- Hyeong K, Kim KH, Chi SB, Yoo CM (2004) Paleo-latitude of the Intertropical Convergence Zone in the Northeast Pacific during Late Cenozoic. *Ocean and Polar Res* **26**:245-253 (in Korean)

---

*Received Oct. 6, 2014*

*Revised Nov. 12, 2014*

*Accepted Nov. 21, 2014*