

북동태평양 해저퇴적물의 Be 연대측정

Be Age-dating of Marine Sediments from NE Pacific

최 현 수(Hunsoo Choi)* · 공 기 수(Gee Soo Kong) · 엄 인 권(In Kwon Um) ·
김 지 훈(Ji-Hoon Kim)

한국지질자원연구원 석유해저연구본부
(Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)
30, Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea)

요약 : 북동태평양 우리나라 광구 KR5지역의 해저퇴적물 퇴적연대와 퇴적환경의 변화를 살펴보고자, 상자형 코어 시료에 대해 심도에 따른 Be 동위원소 분석을 실시하였다. 분석 코어 시료(BC08-02-13)는 상부에서부터 Facies I, Facies II, Facies III 세 개의 압상으로 구분된다. Facies I은 갈색/암갈색을 띠는 (10YR4/3) 균질한 머드로 높은 함수량을 보이는 것이 특징적이다. Facies II는 갈황색을 띠고(10YR6/6), Facies I 과는 부정합적인 관계를 보이며, Facies III는 암갈색을 띠는 머드층이다. Facies II 과 Facies III에는 생교란작용에 의한 서관구조가 발달되어 있다. Be 연대측정 결과에 의하면 BC08-02-13 코어의 Facies III는 3.7 Ma 이전에 퇴적되었으며, Facies II는 2.3 Ma 이전에 퇴적되었고, 그 후 환경변화에 의해 Facies II 상부가 침식을 받은 후 약 1.8 Ma 이후 현재까지 Facies I 이 퇴적되었다. Facies I 과 Facies II 경계의 부정합은 적도수렴대의 이동에 의한 환경변화에 의한 것으로 보인다.

주요어 : Be 연대측정, 해저퇴적물, 북동태평양, 퇴적환경

ABSTRACT: In order to investigate absolute age of marine sediment in the KR5 region, northeastern Pacific, we measured the Be isotope (^{10}Be and ^9Be) of box core (BC08-02-13) sediment with depth. Core sediment is divided into three sedimentary facies (Facies I, Facies II, Facies III). Facies I mainly consists of brown to dark brown (10YR4/3) homogeneous mud with high water content. Facies II shows brownish yellow (10YR6/6) color. The unconformity is recognized at the boundary between Facies I and Facies II, Facies III consists of very dark brown (10YR2/2) mud. Many bioturbated burrows are observed at Facies II and Facies III. Based on Be dating results, Facies III and Facies II had been deposited before 3.7 Ma and 2.3 Ma, respectively. After 2.3 Ma, the upper part of Facies II was eroded due to the change of sedimentary environment. Facies I has been deposited since 1.8 Ma. The unconformity located at the boundary between Facies I and Facies II may be driven by the environmental change due to the migration of Intertropical Convergence Zone.

Key words : Be age-dating, marine sediment, NE Pacific, sediment environment

*교신저자: hunsoo@kigam.re.kr

서 론

북동태평양 우리나라 망간단괴 등록광구인 KR5 지역에 우세하게 분포하고 있는 적점도 퇴적물은 생물성 연니와 더불어 전 지구적으로 볼 때 해저에 가장 넓게 분포하고 있는 퇴적물이다. 그러나, 수심 5,000 m 이하이며 연안으로부터 1,000 km 이상 떨어져 있는 지리적 한계 때문에 국제공동 해양 시추사업(DSDP/ODP/IODP)같은 큰 규모의 시추 탐사를 제외하면 이 지역에서 퇴적학적 연구가 거의 수행되지 않고 있다. 비록 연구가 수행되었어도 연대측정을 통한 퇴적물의 지질연대는 확립하지 못하고 있다. 왜냐하면 이들 지역에는 절대연령을 알고 있는 화산재 층이나 화석은 거의 존재하지 않고, 탄산염 보상심도(CCD; 4,500 m) 이하에서 대부분의 탄산염이 모두 용해되어 유공층 패각을 찾을 수 없을뿐더러 일부 방산층들은 적도지역에서만 제한적으로 분포하여 ^{14}C 연대측정이 이루어지지 않았기 때문이다.

지속적인 과학기술의 발전에 따라 적점도 퇴적물의 연대측정을 위한 향상된 기술들이 개발되어, 퇴적물 내 어류 이빨의 Sr 동위원소를 사용하여 절대연령을 측정하는 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 어류의 이빨 시료를 확보하기 어

려운 지역에서는 퇴적물의 상대적인 연대값을 알기 위하여 Be연대측정 방법을 많이 이용하고 있다. Goel *et al.* (1957)과 Amin *et al.* (1966)이 처음으로 ^{10}Be 을 이용하여 해양퇴적물의 퇴적률을 측정 한 후 ^{10}Be 을 이용한 연대측정은 0~15 Ma까지의 해양 퇴적물 연대를 측정하는 데 자주 사용되어 왔다. 그러나 자연계에는 ^{10}Be 이 매우 미량으로 존재하기 때문에 실질적인 측정이 어려웠으나, 1970년대 질량가속기가 개발되면서 짧은 시간에 적은 시료로 정밀한 측정이 가능하게 되면서 ^{10}Be 이용한 연대측정이 본격적으로 가능하게 되었다(Tanaka and Inoue, 1979; Beets *et al.*, 1991).

해저퇴적물 내 방사성 동위원소인 ^{10}Be 와 안정 동위원소인 ^9Be 함량은 지질연대 측정하는 방법뿐만 아니라, 태양활동의 변화를 모니터링하는 지시자(Kent and Schneider, 1995) 및 지화학적, 지질학적 추적자로(Sharma *et al.*, 1987) 자주 사용되고 있다. 해저퇴적물 내 ^{10}Be 농도 변화는 여러 가지 요인에 의해 영향을 받으며 주로 퇴적률 변화, 제거효과, 대기 중 ^{10}Be 의 생산율 등에 의해 영향을 받는다. 반면에 안정동위원소인 ^9Be 는 해수 및 해저퇴적물 내 ^{10}Be 농도를 평준화하는 데 일반적으로 사용되며 해수 중의 ^9Be 는 주로 육상(Brown *et al.*, 1992)으로부터 유입되고 일부 지역에서는

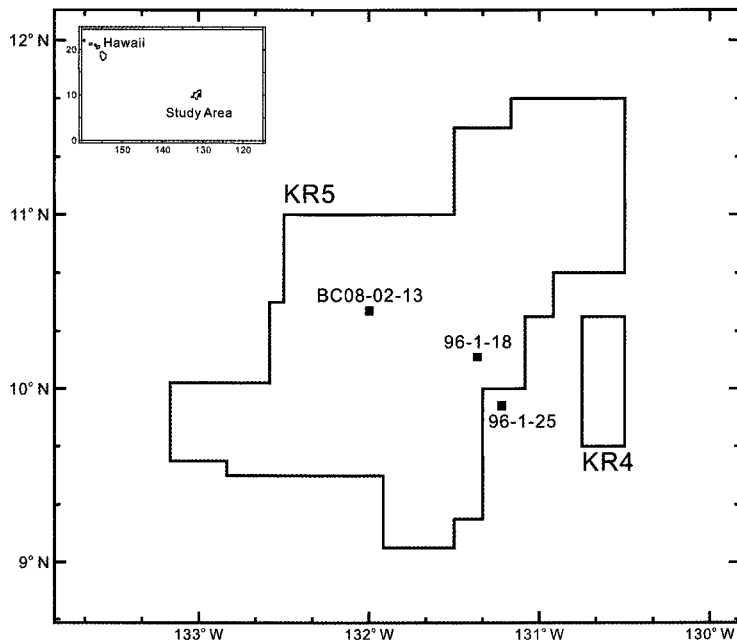


Fig. 1. Site map of core samples.

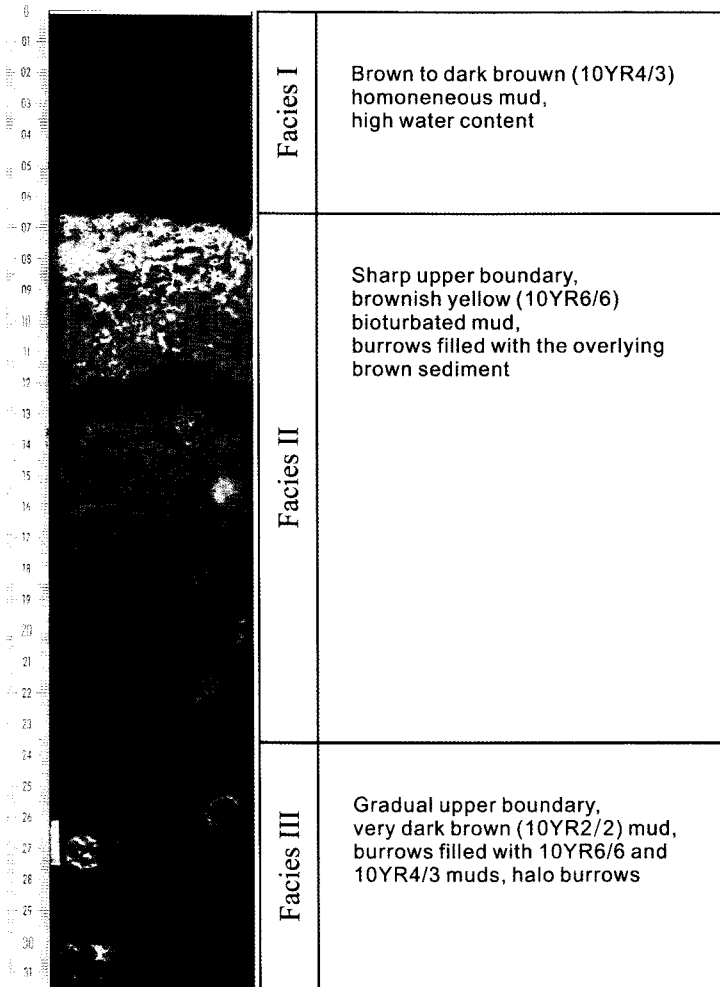


Fig. 2. Description of core BC08-02-13.

열수작용(Bourles *et al.*, 1991)에 의해 공급된다.

본 연구에서는 이러한 Be 동위원소 연령측정법을 이용하여 북동태평양 지역에서 획득한 퇴적물 시료의 퇴적상 변화의 퇴적연대를 밝히고자 한다.

연구방법

연구시료

북동태평양의 퇴적물 시료는 2008년 KODOS08 탐사에서 채취된 상자형 주상시료 중 세 개의 퇴적상이 뚜렷이 구분되는 BC08-02-13 코아(10° 27.122'N, 131° 59.843'E, 수심 4984 m, 코아 길이 31.5 cm)를 이용하였다(그림 1). 이 정점에서 산출된 망간

단괴의 외형은 원반 형(D-type) 또는 탁상 형(T-type)이며 표면조직은 상하가 다르거나(d-type) 또는 거친 형(r-type)으로 산출된다. 부존밀도는 3.44 kg/m²로 그렇게 높지 않은 값을 보이는 지역이다.

퇴적물은 상부에서부터 색상, 함수율, 조직 등의 특성 차이에 따라 크게 Facies I, Facies II, Facies III 세 개의 퇴적상으로 구분할 수 있다. 코어 상부 6.5 cm 구간의 Facies I은 갈색/암갈색(brown to dark brown, 10YR4/3)을 띠는 매우 균질한 머드로 매우 높은 함수량을 보이는 것이 특징적이다. Facies I 하부에서 심도 23.5 cm 구간의 Facies II는 갈황색(brownish yellow, 10YR6/6)을 띠고, Facies I과는 부정합적인 관계를 보인다. 생교란작용에 의한 서관구조가 부분적으로 형성되어 있으며 Facies I

Table 1. Be isotope data of the core samples from BC08-02-13

Sample No.	Subsample depth (cm)	⁹ Be (mg/kg)	⁹ Be (atoms/g × 10 ¹⁶)	¹⁰ Be (atoms/g × 10 ⁹)	¹⁰ Be/ ⁹ Be (× 10 ⁻⁸)
1	0 - 1	1.204 ± 0.025	8.045 ± 0.326	5.639 ± 0.030	7.009 ± 0.149
2	3 - 4	1.181 ± 0.024	7.893 ± 0.421	5.666 ± 0.030	7.178 ± 0.151
3	5 - 6	1.268 ± 0.026	8.472 ± 0.412	5.759 ± 0.028	6.797 ± 0.142
4	7 - 8	1.577 ± 0.032	10.54 ± 0.545	3.506 ± 0.021	3.325 ± 0.070
5	12 - 13	1.630 ± 0.033	10.89 ± 0.666	2.698 ± 0.013	2.477 ± 0.051
6	17 - 18	1.578 ± 0.032	10.55 ± 0.625	2.157 ± 0.011	2.045 ± 0.043
7	21 - 22	1.599 ± 0.032	10.69 ± 0.571	2.329 ± 0.011	2.179 ± 0.045
8	23 - 24	1.596 ± 0.032	10.67 ± 0.496	1.556 ± 0.010	1.459 ± 0.031
9	25 - 27	1.627 ± 0.033	10.88 ± 0.572	1.499 ± 0.008	1.378 ± 0.029
10	30 - 31	1.594 ± 0.032	10.65 ± 0.677	1.171 ± 0.007	1.100 ± 0.023

퇴적물로 채워져 있다. 코어 최하부의 FaciesⅢ는 암갈색(very dark brown, 10YR2/2)을 띠는 머드층으로, 생교란작용에 의한 서관구조에 Facies I 과 FaciesⅡ의 퇴적물로 채워져 있다(그림 2).

Be 동위원소 분석

¹⁰Be 연대측정 및 환경변화 연구를 위하여 상자형 주상시료인 BC08-02-13 코아에서 총 10개의 부시료를 채취하였다. 상부 3개의 시료는 Facies I 에서, 4개는 FaciesⅡ에서, 나머지 하부 3개 시료는 FaciesⅢ에서 채취하였다. 채취된 부시료에서 약 3 g의 시료를 80℃ 오븐에서 24시간 건조시킨 후 건조된 시료의 무게를 측정하였다. 건조된 시료에 2N HCl을 부어 탄산염을 제거한 후 다시 그 무게를 측정하였다. 조사지역이 CCD보다 낮은 지역이기 때문에 탄산염이 존재하지 않을 것으로 예상되나 정확한 분석을 위해 탄산염을 제거하였다. 산처리된 시료에 carrier로 0.2 mg Be를 첨가하여 25 ml Teflon bombs에 46% HF와 HNO₃ 혼합산과 함께 넣어 14시간 동안 140℃에서 용해시킨 후 ICP-OES를 이용하여 ⁹Be 농도를 측정하였다.

¹⁰Be 농도를 측정하기 위하여 위와 동일한 절차를 따라 Be(OH)₂을 만들었으며, 이때 Be carrier는 넣지 않았다. Be(OH)₂에 열을 가해 BeO로 변환시킨 후 AMS (Accelerator mass spectrometry) 분석을 위해 은 분말과 혼합을 시켰다. ¹⁰Be의 AMS 측정은 뉴질랜드지질해과학연구소(IGNS) 국립동위원소센터의 EN-tandem 가속기를 이용하였다. 표

준시료를 이용해 측정된 ¹⁰Be/⁹Be의 재연성(relative standard deviation)은 2~5%로 나타났다.

결과 및 토의

퇴적물 ¹⁰Be와 ⁹Be 농도 변화

BC08-02-13 코아에서 측정된 ¹⁰Be, ⁹Be 농도, 그리고 ¹⁰Be/⁹Be는 표 1에 제시되어 있다. ¹⁰Be 농도는 표층에서 심도 6 cm까지 5.6~5.8 × 10⁹ atoms/g의 일정한 값을 보이고 이후 급격히 감소하여 21.5 cm에서 2.3 × 10⁹ atoms/g보인 다음 다시 감소하여 최하부 심도 30.5 cm에서 1.2 × 10⁹ atoms/g의 값을 보인다. 전체적으로 심도가 깊어질수록 감소하나 퇴적상 경계에서 급격히 감소하는 특징을 보인다(그림 3). 각 퇴적상에 따른 ¹⁰Be 평균 농도는 Facies I 에서 5.7 × 10⁹ atom/g, FaciesⅡ에서 2.7 × 10⁹ atom/g, FaciesⅢ에서 1.4 × 10⁹ atom/g로 하부 퇴적상으로 갈수록 약 50%씩 감소하는 경향을 보인다.

⁹Be의 농도는 0~6 cm 사이에 7.9~8.5 × 10¹⁶ atoms/g의 일정한 값을 보이다가 이후 7 cm에서 급격히 증가하여 1.1 × 10¹⁷ atoms/g을 가지며, 이후 전체 심도에서 일정한 값을 갖는다(그림 3). 각 퇴적상에 따른 ⁹Be 평균 농도는 Facies I 에서 8.1 × 10¹⁶ atom/g, FaciesⅡ와 FaciesⅢ에서 1.1 × 10¹⁷ atom/g로 나타났다. ¹⁰Be/⁹Be는 ¹⁰Be농도와 유사한 경향을 보이며 6 cm 상부에서 7.0 × 10⁻⁸ (atoms/atoms)의 값을 갖고 이후 점차 감소하여 최하부에

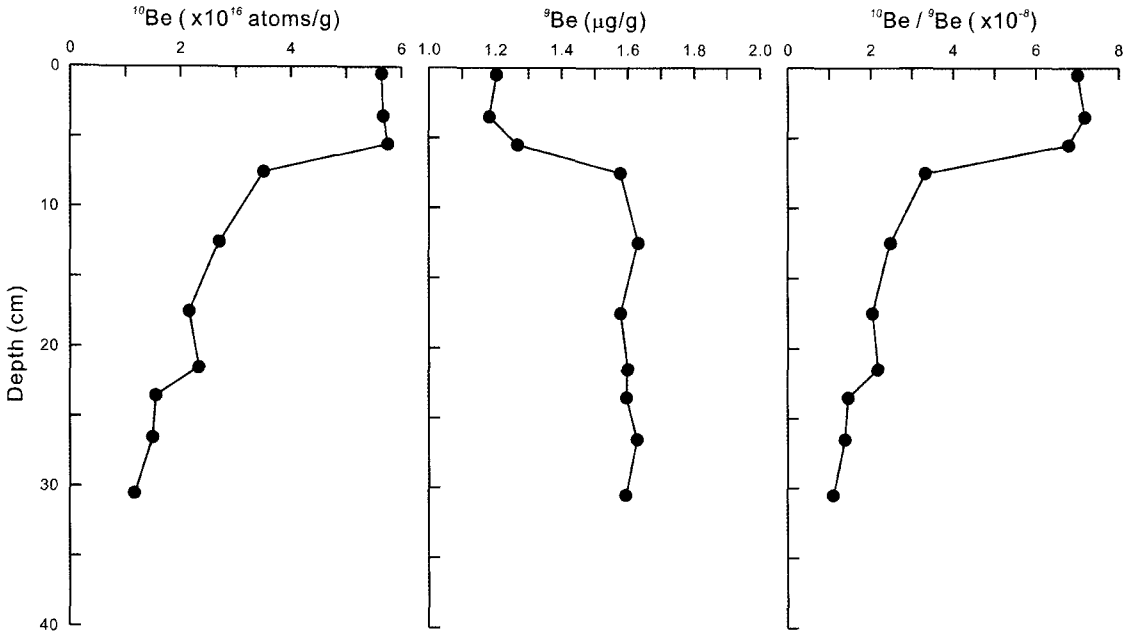


Fig. 3. Graphs of Be isotope data versus sediment depth for BC08-02-13.

서 1.1×10^{-8} 을 보인다(그림 3). 평균 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 값은 Facies I에서 7.0×10^{-8} , Facies II에서 2.5×10^{-8} , Facies III에서 1.3×10^{-8} 로 나타났다.

우주기원의 ^{10}Be 동위원소는 강수에 의해 대기 중에서 빠르게 제거되어 강을 통해 바다로 이동되거나 직접 강수를 통해 바다로 이동되어 심해저 퇴적물로 최종 이동 퇴적되거나 육상에서는 북극과 남극의 빙하에 갇히게 된다(Faure, 1986). 다른 방사성 동위원소에 비해 빠른 붕괴율 때문에 대기과학, 표층해수, 해양 및 호소환경의 퇴적물의 퇴적 연대를 연구하는데 유용하게 사용되고 있다.

그러나 이러한 우주기원인 ^{10}Be 동위원소의 생산율은 일차적으로 태양활동 변화, 지구자기장의 변화에 영향을 받기 때문에 퇴적물이나 빙하 속에 있는 ^{10}Be 동위원소의 농도는 대기중 방사성 동위원소 생산율, 퇴적률, 고도 및 퇴적이후의 시간과 같은 여러 요인에 의해 조절된다(Faure, 1986). 이러한 여러 가지 요인에도 불구하고 ^{10}Be 이 지질학적 추적자로 사용될 수 있는 근거는 ^{10}Be 와 total Be 사이의 강한 상관관계와 ^{10}Be (atom/g)의 절대량과 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 사이에 양의 상관관계를 갖기 때문이다(그림 4).

연구지역인 BC08-02-13에서 측정된 ^{10}Be 농도,

$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 는 인근 지역의 BC96-18과 BC96-25에서 측정된 값(해양수산부, 2004)과 다소 차이를 보인다. BC96-18과 BC96-25에서의 ^{10}Be 농도는 $2.0 \sim 7.0 \times 10^9$ atoms/g 범위를 보이며, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 는 $2.0 \sim 8.7 \times 10^{-8}$ 을 보여, BC08-02-13 코아에서 측정된 값보다 전체적으로 높은 값을 보였다.

일반적으로 강수나 강으로부터 유입되는 해수 중의 ^{10}Be 는 높은 이온성(ionic potential) 때문에 유기물 및 세립입자에 쉽게 흡착되어 해수 중에서 빠르게 제거되어 퇴적된다. 따라서 해수 중의 ^{10}Be 농도는 담수보다 낮고, 표층해수의 ^{10}Be 는 심층수(태평양 심층수의 평균 ^{10}Be 농도는 2×10^9 atoms/g 임)의 ^{10}Be 농도보다 낮게 나타나며 심해 표층 퇴적물에서 가장 높은 값을 갖게 된다(Kusakabe *et al.*, 1987). 이처럼 모든 ^{10}Be 는 표층해수로부터 해수 중으로 유입되어 심해 퇴적물 속에 퇴적되기 때문에 일부 극지역을 제외한다면 모든 지역에서 유사한 값을 보여야 한다. 따라서 두 지역 간의 이러한 차이는 수직적인 요인(표층유입)에서 야기되기 보다는 수평적인 요인(해류)에 의한 것일 수 있다. 그러나 표층 Facies I의 ^{10}Be 함량과 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 가 깊이에 따라 거의 변화가 없는 점으로 볼 때, 생교란작용에 의해 낮은 값을 갖는 하부층과 섞임으로

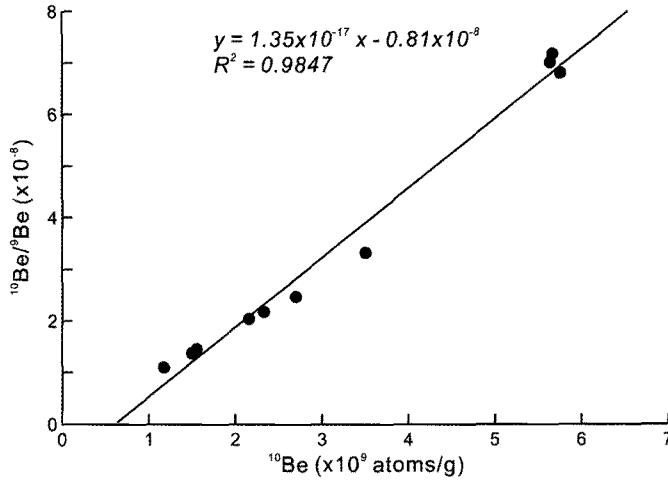


Fig. 4. Relationship of $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ratio versus ^{10}Be content for BC08-02-13.

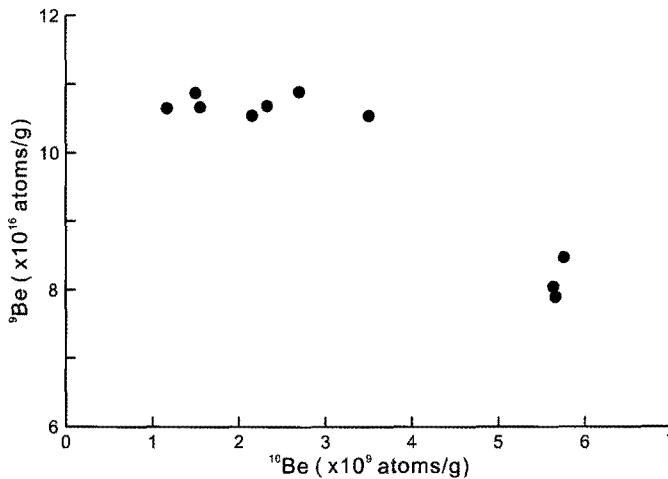


Fig. 5. Relationship of ^9Be content versus ^{10}Be content for BC08-02-13.

인하여 전체 값이 낮아졌을 가능성이 더 클 것으로 생각된다.

적도 대서양에서 측정된 ^{10}Be 농도는 심도 1 m 이내에서 ^{10}Be 농도는 6.8×10^7 atoms/g으로 매우 낮은 값을 보이고(Murayama *et al.*, 1997), 인도양 중앙에서 측정된 값은 $0.13 \sim 5.93 \times 10^9$ atom/g 범위로(Nath *et al.*, 2007) 연구지역과 유사한 값을 보였다.

일반적으로 해수 중 ^9Be 는 주로 육상기원이기 때문에 ^{10}Be 농도와 ^9Be 농도가 강한 양의 상관관계를 보이게 되면 해수 중 ^{10}Be 이 육상기원의 ^9Be 에 의한 것임을 지시한다. 그러나 조사지역의 ^{10}Be

농도와 ^9Be 농도는 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다(그림 5). 이것은 조사지역의 ^{10}Be 가 육상기원의 영향을 받지 않았음을 지시하는 것으로 해석된다.

퇴적물 Be 연대측정

일반적으로 Be를 이용한 연대측정에는 퇴적물이 해수로부터 Be를 흡착하여 침전될 때, 일정한 값의 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 를 갖는다는 가정을 적용하여, 깊이에 따른 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 감소율을 이용한다. 방사능 연대는 깊이와 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 의 자연로그 값의 직선 회귀식

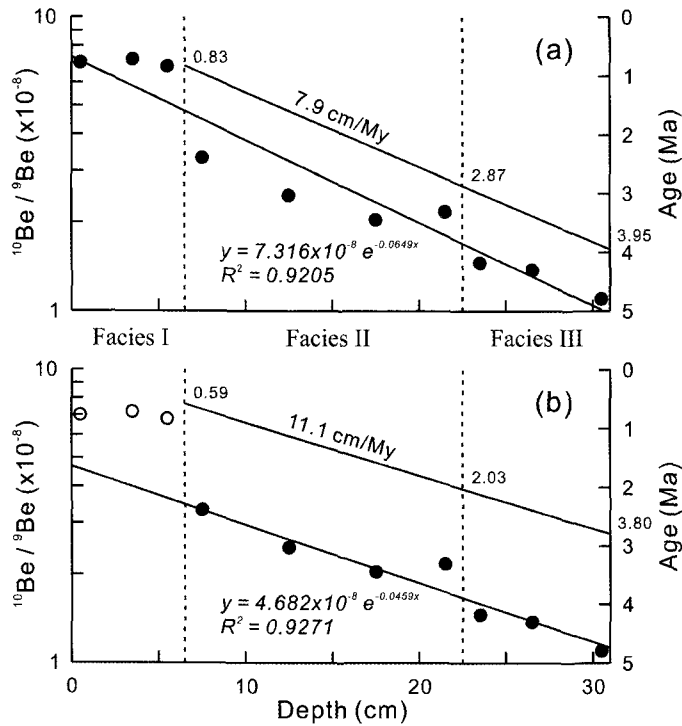


Fig. 6. $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ age calculation for Facies II and III of BC08-02-13 using Be data from all Facies (a) and from Facies II and III (b).

을 이용하여 계산할 수 있다. 이때 이 직선 회귀식을 도출하기 위한 측정값을 어떻게 사용하는가에 따라 연대측정 값이 차이를 보일 수 있다. 모든 자료를 다 함께 사용하거나 또는 뚜렷한 경향의 차이를 보이는 자료들을 분리하여 사용할 수 있다.

BC08-02-13 코아 퇴적물의 모든 심도별 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비의 변화를 이용한 퇴적물 연령을 계산하여 보면 (그림 6a), Facies II 최상부는 0.83 Ma, Facies III 최상부는 2.87 Ma로 퇴적률은 7.9 cm/My이다. 코아 BC08-02-13의 Facies I에서 채취한 세 지점의 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 는 거의 유사한 값을 보이며, Facies II와 Facies III의 값들의 경향성과 뚜렷한 차이를 보이므로, Facies I의 세 값을 제외한 나머지 자료만을 이용하여 퇴적물의 연령을 계산하면(그림 6b), Facies II 최상부는 0.59 Ma, Facies III 최상부는 2.03 Ma로 퇴적률은 11.1 cm/My이다.

한편, 조사지역 BC08-02-13 코아 퇴적물은 Facies I과 Facies II의 경계에서 회토류를 비롯한 다른 성분의 변화가 뚜렷하고(국토해양부, 2009), ^9Be 함량의 차이도 뚜렷하다(그림 3). 이러한 경우는 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 를 이용하는 것보다 ^{10}Be 함량으로 퇴적물

을 구하는 것이 더 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 사료된다(Ditchburn, personal comm.). 그러므로 ^{10}Be 의 변화를 이용한 퇴적물 연령을 계산하여 보면(그림 7a), Facies II 최상부는 0.70 Ma, Facies III 최상부는 2.42 Ma로 퇴적률은 9.3 cm/My이다. 또한 Facies I의 세 값을 제외한 나머지 자료만을 이용하여 퇴적물의 연령을 계산하면(그림 7b), Facies II 최상부는 0.58 Ma, Facies III 최상부는 2.01 Ma로 퇴적률은 11.2 cm/My이다. ^{10}Be 함량의 변화를 이용한 연령과 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 를 이용한 연령이 유사한 값을 보인다. 특히 Facies I을 제외한 측정값은 거의 같은 값을 보인다.

이러한 결과로 볼 때, Facies II와 Facies III의 퇴적률은 11 cm/My이었음이 분명하다. 그러나, Facies I과 Facies II사이의 경계가 뚜렷한 부정합을 보이고 있으며, 거의 모든 화학성분도 이 경계에서 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 보아(국토해양부, 2009), Facies II의 퇴적 후 일정기간동안 침식이 있는 후 다시 Facies I이 퇴적되었음을 알 수 있다. 이러한 현상을 볼 때, Facies II와 Facies III 최상부의 연령은 보다 더 오래 되었을 것으로 사료된다.

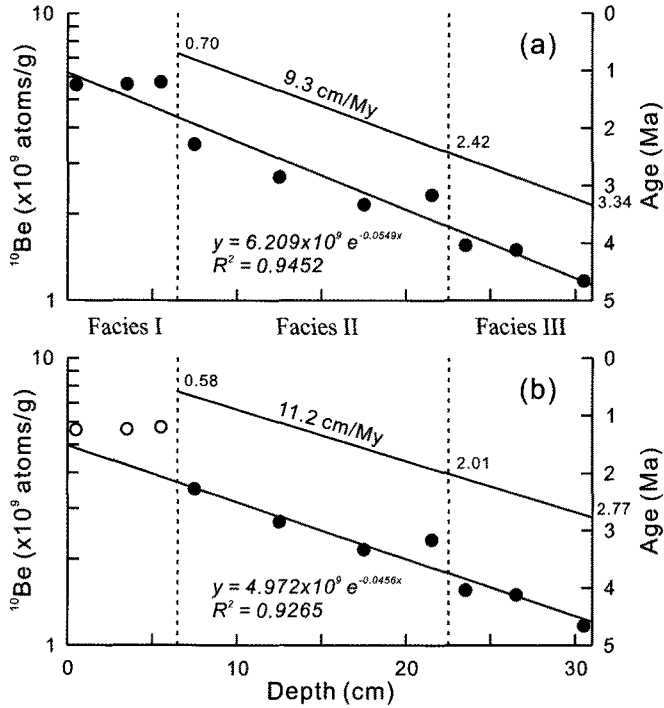


Fig. 7. ^{10}Be age calculation for Facies II and III of BC08-02-13 using Be data from all Facies (a) and from Facies II and III (b).

또한 Facies I의 퇴적물은 생교란작용에 의해 서로 뒤섞여 거의 균질한 양상을 보이며, Be 함량의 변화도 거의 없다. 그러므로 실험에서 얻은 Be 함량 값들은 Facies I 전체 0~6.5 cm 구간의 평균값으로 간주할 수 있다. 현재 태평양 심해저 해수의 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 는 1.0×10^{-7} (Ku *et al.*, 1990) 또는 1.1×10^{-7} 의 값을(Kusakabe *et al.*, 1987) 갖는다고 보고되고 있다. 심해저 퇴적물의 Be 동위원소 분석 결과는 보고된 바가 있으나(Amin *et al.*, 1975), 표층의 값이 아니라 상당한 깊이까지의 평균값으로 현생 퇴적물의 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 값으로 볼 수 없다. 그러나 망간단괴나 망간각에 대한 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 는 많은 보고가 이루어졌으며, 이들의 자료에 의하면 망간단괴나 망간각의 최외각 부분의 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 는 1.1×10^{-7} 부터 1.9×10^{-7} 의 값을 보인다(Sharma and Somayajulu, 1982; Kusakabe and Ku, 1984; von Blanckenburg *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 2001). 망간각은 일반적으로 높은 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 값을 갖는 수심이 낮은 해산에 주로 침전되며, 철망간산화물이 ^{10}Be 를 잘 흡착하여 침전된다는 점을 고려할 때 (Kusakabe *et al.*, 1987), 현재 해저퇴적물의 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$

는 망간단괴나 망간각보다 낮은 값을 가질 것으로 생각된다.

현재 표층 해저퇴적물의 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 비를 1.1×10^{-7} 로 가정하고 Facies I의 퇴적물을 계산하면, 3.7 cm/My의 값을 갖는다. 이 가정에 의하면 코아 BC08-02-13의 최하부는 4.5 Ma이며 3.7 Ma까지 Facies III이 퇴적되고 그후 Facies II가 퇴적되다 2.3 Ma 이후 퇴적이 중단되었으며, 1.8 Ma부터 Facies I이 퇴적되었던 것으로 보여진다(그림 8).

조사지역의 퇴적물은 Facies II와 Facies III에서는 11 cm/My로 인근 지역 BC96-18 및 BC96-25 코아의 퇴적률(7~9 cm/My)보다 조금 높은 것으로 나타났다(해양수산부, 2004). 그러나 BC96-18 및 BC96-25 코아의 퇴적물은 모든 Facies의 값을 함께 사용하여 계산된 값으로 조사지역에서 전체 측정값으로 계산한 7.9 또는 9.3 cm/My와 비슷한 값을 보인다. BC96-18 코아의 퇴적상을 3개의 Units (Unit I/II, Unit IIIa, Unit IIIb)로 나누었으며, Unit IIIa는 1.6 Ma에서 2.5 Ma까지, Unit IIIb는 3.0 Ma에서 3.4 Ma까지로 계산되었다(해양수산부, 2004). BC96-18 코어의 Unit I은 갈색을 띠며(10YR5/3)

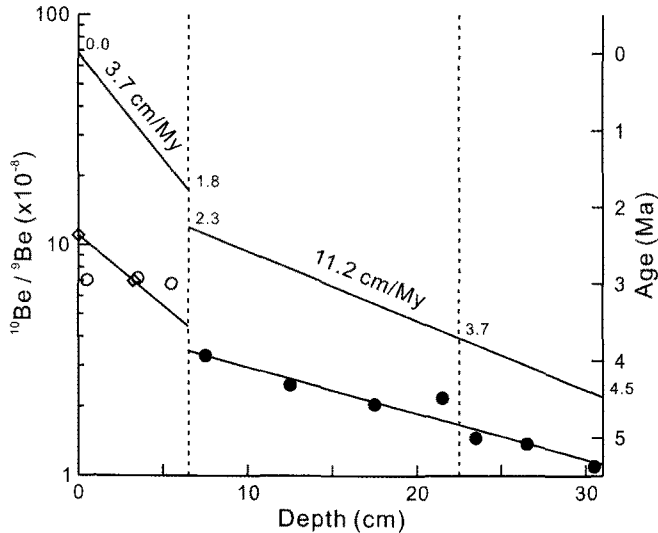


Fig. 8. $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ age calculation for BC08-02-13 (closed circle; Be data for age dating of Facies II and III, open circle; Be data for calculating average of Facies I, diamond; Be data for age dating of Facies I).

함수율이 높은 머드층이며, Unit II는 옅은 갈색의 (10YR8/4) 머드층에 Unit I 퇴적물로 채워진 서관 구조를 많이 보이는 층이다. 그러므로 코어 BC96-18의 Unit I은 조사지역 Facies I에 대비되며, Unit II는 생교란작용을 받은 Facies II에 대비된다. Unit IIIa는 황색을 띠는 (10YR7/6) 괴상의 머드층으로 조사지역의 Facies II에 대비된다. Unit IIIb는 암갈색의 (10YR2/2) 머드층으로 조사지역의 Facies III에 대비된다. 이들의 연령을 비교해 보면 각 Facies의 경계부가 조사지역에 비하여 많이 낮은 값을 보이지만, Unit IIIa와 Unit IIIb의 자료만 사용하여 퇴적물을 계산하면 보다 비슷한 값을 보일 것으로 생각된다. 또한 같은 코어시료에 대한 중정석을 이용한 Sr 동위원소 연령을 살펴보면 Unit IIIa는 2.9 Ma에서 3.0 Ma까지, Unit IIIb는 3.2 Ma에서 3.5 Ma까지로(해양수산부, 2004), 이는 본 연구에 보다 가까운 연령을 보이는 것이다.

Facies I 하부와 Facies II 상부 경계인 1.8 Ma에서 2.3 Ma 사이에 급격한 환경변화가 있었으며, 이때 Facies II 상부가 일부 침식을 받았을 것으로 사료된다. Lee *et al.* (2001)에 의하면 주변지역의 망간단괴에서 2.0 Ma부터 0.6 Ma까지 단괴의 성장이 중지되었다가 다시 성장하고 있는 양상을 보고하였는데, 이 두 시기가 잘 일치함을 알 수 있다. 조사지역 인근의 피스톤코어의 광물조성 변화를 통한 적도수렴대의 변화에 대한 연구에 따르면, 적

도수렴대가 제3기 동안 현재보다 북쪽에 위치해 있다가 제3기 이후 점차 남하하여 현재에 이른 것으로 보고하였다(형기성 등, 2004). 특히 8~11°N 사이의 시료에서는 적도수렴대와 밀접히 관련이 있는 스펙타이트-일라이트 전이대가 2~4 Ma의 심도에서 나타나고 있다고 보고하였다(Lyle *et al.*, 2002; 해양수산부, 2004). 이들을 종합하여 고려해 보면, 조사지역의 Facies I과 Facies II의 부정합은 적도수렴대와 밀접히 관련된 것으로, 적도수렴대의 이동에 따른 퇴적환경의 변화로 부정합이 형성되었으며, 시대별로 Facies I은 제4기에, Facies II와 Facies III는 제3기말에 퇴적된 것으로 보인다. 이에 대한 보다 정확한 해석을 위해서는 퇴적상의 변화에 따른 광물학적 및 지화학적 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

결론

Be 동위원소를 이용한 퇴적시기와 함께 환경의 변화를 고찰하고자 하였다. 조사지역의 ^{10}Be 농도와 ^9Be 농도의 낮은 상관관계는 이 지역의 ^{10}Be 은 육상기원의 영향을 받지 않았음을 지시한다. BC08-02-13 코어는 3개의 Facies로 나뉘는데 Facies III는 3.7 Ma 이전에, Facies II는 2.3 Ma 이전에 퇴적되었고, 그 후 환경변화에 의해 Facies II 상부가 침식을 받은 후 약 1.8 Ma 이후 현재까지 Facies I이

퇴적된 것으로 보인다. 시대별로 Facies I는 제4기에, Facies II, Facies III는 제 3기말에 퇴적된 것으로 보이며, Facies I 과 Facies II 경계의 부정합은 적도수렴대의 남하에 따른 퇴적환경의 변화에 의해 형성된 것으로 보인다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원의 위탁으로 한국지질자원 연구원에서 수행한 “심해저 광물자원의 광물·지화학적 요인연구” 과제 결과의 일부로 이에 사의를 표합니다. 또한 원고를 검토하여 보완할 수 있도록 도와주신 두 분의 심사위원께도 감사드립니다.

참고문헌

- 국토해양부 (2008, 2009) 심해저 광물자원 개발사업 보고서. I. 자원탐사 및 환경연구, 596p.
- 형기성, 김기현, 지상범, 유찬민 (2004) 신생대 후기 북동태평양 지역 적도수렴대의 위치변화. *Ocean Polar Research*, 26, 245-253.
- 해양수산부 (2003, 2004) 심해저 광물자원 개발 보고서. I. 자원탐사 및 환경연구, 770p.
- Amin, B.S., Kharkar, D.P., and Lal, D. (1966) Cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al in marine sediments. *Deep Sea Research*, 13, 805-824.
- Beets, C.J., Klaver, G.T., Kroon, D., van der Borg, K., and de Jong, A.F.M. (1991) ^{10}Be contents of the Cenozoic sediments from Sites 720, 722 and 728 in the western Arabian Sea. In: *Prell, W.L., Niitsuma, N., et al., Proc. ODP, Sci. Results*, 117, 455-458.
- Bourles, D.L., Raisbeck, G.M., Brown, E.T., Yiou, F., and Edmond, J.M. (1991) Beryllium isotope systematics of submarine hydrothermal sediments. *Earth Planet. Sci., Lett.*, 105, 141-153.
- Brown, E.T., Measures, C.I., Edmond, J.M., Bourles, D.L., Raisbeck, G.M., and Yiou, F. (1992) Continental inputs of beryllium to the oceans. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 114, 101-111.
- Faure, G. (1986) *Principles of Isotope Geology* (2nd Ed.). John Wiley & Sons, 518pp.
- Goel, P.S., Kharkar, D.P., Lal, D., Narasappaya, N., Peters, B., and Yatirajam, V. (1957) Beryllium-10 concentration in deep-sea sediments. *Deep Sea Research*, 4, 202-210.
- Kent, D.V. and Schneider, D.A. (1995) Correlation of paleointensity variation records in the Brunhes/Matuyama polarity transition interval. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 129, 135-144.
- Ku, T.L., Kusakabe, M., Measures, C.I., Southon, J.R., Cusimano, G., Vogel, J.S. Nelson, D.E., and Nakaya, S. (1990) Beryllium isotope distribution in the western North Atlantic: a comparison to the Pacific. *Deep Sea Research*, 37, 795-808.
- Kusakabe, M. and Ku, T.L. (1984) Incorporation of Be isotopes and other trace elements into the ferromanganese deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 2187-2193.
- Kusakabe, M., Ku, T.L., Southon, J.R., Vogel, J.S., Nelson, D.E., Measures, C.I., and Nozaki, Y. (1987) Distribution of ^{10}Be and ^9Be in the Pacific Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 82, 231-240.
- Lee, S.-R., Choi, H., Chang, S.W., and 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.
- Lyle, M., Wilson, P.A., Janecek, T.R., et al. (2002) *Proceedings of the Ocean Drilling Program. Initial Reports* 199.
- Murayama, M., Nagai, H., Imamura, M., Hatori, S., Kobayashi, K., and Taira, A. (1997) A long-term variation of ^{10}Be flux changes at ODP Site 925 on the Ceara Rise in the equatorial Atlantic. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 123, 302-306.
- Nath, B.N., Aldahan, A., Possnert, G., Selvaraj, K., Mascarenhas-Pereira, M.B.L., and Chen, C.T.A. (2007) ^{10}Be variation in surficial sediments of the Central Indian Basin. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 259, 610-615.
- Sharma, P. and Somayajulu, B.L.K. (1982) ^{10}Be dating of large manganese nodules from world oceans. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 59, 235-244.
- Sharma, P., Mahannah, P., Moore, W.S., Ku, T.L., and Southon, J.R. (1987) Transport of ^{10}Be and ^9Be in the ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 82, 69-76.
- Tanaka, S. and Inoue, T. (1979) ^{10}Be dating of north Pacific sediment cores up to 2.5 million years B.P. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 45, 181-187.
- von Blanckenburg, F., Belshaw, N.S., and O’Nions, R.K. (1996) Separation of ^9Be and cosmogenic ^{10}Be from environmental materials and SIMS isotope dilution analysis. *Chem. Geology*, 129, 93-99.

접수일(2011년 6월 16일), 수정일(1차 : 2011년 9월 5일), 게재확정일(2011년 9월 22일)