

동해 한국대지 코어퇴적물의 특성과 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비를 이용한 퇴적시기 규명

김진경 · 우경식* · 윤석훈¹ · 석봉출²

강원대학교 지질학과, ¹제주대학교 해양과학부, ²한국해양연구원 해양환경특성연구사업단

Sedimentary Characters of the Core Sediments and Their Stratigraphy Using $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Ratio in the Korea Plateau, East Sea

JIN KYOUNG KIM, KYUNG SIK WOO*, SEOK-HOON YOON¹ AND BONG-CHOO SUK²

Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

¹Faculty of Ocean Science, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

²Korea Ocean Research and Development Institute (KORDI), Ansan 425-600, Korea

동해 한국대지의 정상부 해저산 사면에서 획득한 코어퇴적물의 퇴적상 분석, 입도와 구성성분 분석, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비를 이용한 연대측정을 통하여, 세 단계에 걸친 코어퇴적물의 퇴적과정을 해석하였다. 코어의 하부 구간인 Unit I-a (코어깊이 465~587 cm)는 주로 폭풍파에 의해 재동된 천해성 탄산염퇴적물로 이루어져 있으며, 이매패류와 부유성 유공충의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비를 분석한 결과, 퇴적물의 생성시기가 약 13~15 Ma(마이오세 중기)로 나타났다. 이는 당시 이 지역 일대가 폭풍파의 영향을 받는 천해환경이었음을 의미한다. Unit I-b (코어깊이 431~465 cm)는 저탁류에 의해 운반된 퇴적물로 이루어져 있으며, 이매패류와 부유성 유공충의 생성연대는 각각 약 11~14 Ma, 약 6~13 Ma 인 것으로 분석되었다. 이로부터 11 Ma까지는 이 지역 일대가 천해환경을 유지하고 있었으나 그 이후로는 침강하기 시작하였음을 알 수 있다. 그러나 부유성 유공충은 11 Ma 이후에도 지속적으로 생성되어 퇴적물 내에 공급되었으며, 이렇게 생성된 퇴적물들은 연안이나 사면과 같은 근해역에 퇴적되어 있다가 6 Ma 경에 저탁류에 의해 사면 아래로 재동되어 퇴적된 것으로 해석된다. Unit II (코어깊이 0~431 cm)는 주로 원양성 퇴적물로 이루어져 있으며, 부유성 유공충의 생성연대가 약 1 Ma로 분석되어, 이로부터 Unit I-b와 Unit II 사이에 약 5 Ma 정도의 결층(hiatus)이 있는 것을 알 수 있다. 또한 Unit II가 퇴적되었던 1 Ma 경에는 이 지역 일대가 충분히 침강하여 현재와 같이 수심 600 m 이상의 심해저환경을 이루고 있었으나, 때때로 주변의 급경사의 사면으로부터 암설류나 저탁류에 의해 조립질 천해퇴적물이나 화산쇄설물 등이 재동되어 퇴적된 것으로 해석된다.

A piston core (587 cm long) was recovered from the upper slope of a seamount in the Korea Plateau. Three episodes of sedimentation were identified based on sedimentary facies, grain size distribution, carbonate constituents and initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of carbonates. The lower part of the core, Unit I-a (core depth 465~587 cm) is composed of shallow marine carbonate sediments the deposited by storm surges, and is about 13~15 Ma (Middle Miocene) based on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ initial ratio. This suggests that the depositional environment was relatively shallow enough to be influenced by storm activities. Unit I-b (core depth 431~465 cm) is mostly composed of turbidites, and Sr isotope ages of bivalves and planktonic foraminifera are about 11~14 and 6~13 Ma, respectively. This indicates that the Korea Plateau maintained shallow water condition until 11 Ma, and began to subside since then. However, planktonic foraminifera were deposited after 11 Ma and redeposited as turbidites as a mixture of planktonic foraminifera and older shallow marine carbonates about 6 Ma ago. Unit II (core depth 0~431 cm) is composed of pelagic sediments, and the Sr isotope age is younger than 1 Ma, thus the time gap is about 5 Ma at the unconformity. About 1 Ma ago, the Korea Plateau subsided down to a water depth of about 600 m. The sampling locality was intermittently influenced by debris flows and/or turbidity currents along the slope, resulting the deposition of re-transported coarse shallow marine and volcanoclastic sediments.

Keywords: Shallow Carbonates, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Ratio, Miocene, Korea Plateau, East Sea

*Corresponding author: wooks@kangwon.ac.kr

서론

동해는 동아시아 대륙과 일본열도에 의해 둘러싸인 후열도 분지로써, 약 32~10 Ma에 걸쳐 일본열도가 남동쪽 방향으로 이동하는 과정에서 서서히 확장되어 생성되었다(Tatsumi and Kimura, 1991; Yoon and Chough, 1995). 동해가 확장됨에 따라 대륙지각이 열개되어 3개의 깊은 분지(일본분지, 아마토분지, 울릉분지)와 각 분지들 사이의 상대적으로 수심이 낮은 해저고지대(한국대지, 아마토뱅크, 오키뱅크)를 형성하였다. 한국대지는 일본분지와 울릉분지 사이에 위치하고 있는 해저지형으로, 해릉(ridge)이나 해곡(trough), 해저산(seamount) 등이 산재하는 불규칙한 형태를 띠고 있으며, 수심은 약 600~1600 m이다(Tamaki, 1988). 최근 들어 한국대지 지역에 대한 탐성과 자료를 이용한 연구가 수행된 바 있으나(Lee and Chough, 2001; Lee et al., 2002), 아직까지 한국대지의 퇴적작용 양상과 울릉분지의 제 4기 퇴적물과의 연계성에 관한 연구는 부족한 상황이다.

현재 동해는 최대수심이 약 3700 m에 이르는 깊은 바다로서, 비교적 얇은 수심의 4개의 해협을 통해 주변의 대양과 해수 교환이 이루어지고 있다. 그러나, 전세계의 해수면이 낮아졌던 빙하기에는 이 해협들이 거의 닫힌 상태가 되었으며, 결국 동해는 주변 대양과의 해수 교환이 거의 없는 고립된 해양환경을 이루었을 것으로 생각되고 있다(Oba et al., 1991; Keigwin and Gorbarenko, 1992; Gorbarenko, 1993; Tada, 1994; Tada et al., 1999; Gorbarenko and Southon, 2000; Lee and Nam, 2003, 2004). 이처럼 동해는 과거의 기후변화에 대해 매우 민감하게 반응한다는 특성을 지니고 있기 때문에, 이를 이용하여 과거 동해의 고해양환경 변화를 이해하려는 많은 연구들이 이루어져 왔다(Park et al., 1997; Crusius et al., 1999; Kim et al., 2000; Bahk et al., 2001; Lee and Kim, 2002). 그러나 이제까지 동해에서 획득한 코어퇴적물의 연령은 대부분 0.1 Ma를 넘지 못하였고, 따라서 그 이전 시기의 고해양환경 변화를 규명하는 데에는 많은 어려움이 있어 왔다.

이 연구에서 사용한 코어퇴적물은 2004년 한국해양연구원에 의해 동해 한국대지 정상부 해저산 사면에서 획득한 것으로, 코어의 하부에서는 천해성 탄산염 퇴적물이 발견되었으며, 이에 대한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비로부터 이 퇴적물이 마이오세 중기에 생성된 것임이 밝혀졌다. 동해의 심해환경에서 발견된 천해성 탄산염 퇴적물은 국

내에서는 최초로 보고되는 것이며, 뿐만 아니라 이 코어에 대한 연구를 통하여 동해가 확장되던 시기인 마이오세 중기 이후로 현재까지 한국대지의 진화과정을 밝히는 데에도 큰 기여를 할 수 있을 것으로 생각된다.

연구지역 및 연구방법

동해 한국대지 정상부의 해저산 사면에서 총 길이 587 cm의 피스톤 코어(M04-PC1A)를 획득하였다. 이 지점은 위도 38°00.043', 경도 131°27.937'에 해당하며, 수심은 758.7 m이다(Fig. 1). 획득한 코어의 중심부를 절개하여, 그 단면에서 퇴적구조와 퇴적경계면, 퇴적물의 색, 인위적 변형여부 등을 관찰하였으며, 코어의 단면을 슬랩으로 제작하여 칼라스틸 사진과 X선 사진을 촬영하였다. 이러한 자료들을 종합하여 코어퇴적물의 퇴적학적 특성과 퇴적과정을 파악하였다.

코어의 하부 구간에 약 150 cm 두께로 나타나는 탄산염 퇴적물에 대해서는 1 cm 간격으로 퇴적물의 입도와 구성성분을 분석하였다. 입도는 퇴적물을 건조시킨 후 손으로 체질하여 1Φ 간격으로 무게 백분율을 구하는 방법으로 분석하였으며, 퇴적물을 실체현미경으로 직접 관찰하거나, 박편으로 제작한 후 편광현미경으로 관찰하여 퇴적물을 이루고 있는 구성성분을 파악하였다.

코어퇴적물이 퇴적된 시기를 파악하기 위하여 코어의 여러 지점에서 부유성 유공충과 이매패류의 각질을 선별한 후, 이들에 대하여 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비(Strontium Initial Isotopic Ratio)를 측정하였고 이로부터 절대연령을 구하였다. 부유성 유공충에 대한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비 분석은 코어의 전 구간에서 총 40개 지점을 택하여 수행하였으며, 이매패류에 대한 분석은 코어의 하부 구간에 나타나는 탄산염질 퇴적물에서만 총 31개의 지점을 택하여 수행하였다. 특히 이매패류를 분석한 31개 지점 중 코어의 가장 하부에 해당하는 7개 지점에서는 이매패류 중에서도 가리비조개류의 각질만을 선별하여 분석에 사용하였으며, 나머지 24개 지점에서는 가리비조개류 뿐 아니라 다른 이매패류의 각질도 포함하여 분석에 사용하였다(Table 1).

선별한 부유성 유공충과 이매패류의 각질은 초음파세척기를 이용하여 증류수로 여러 번 씻어내는 과정을 통하여 각질의 내, 외부에 붙어 있는 이물질들을 제거하였다. 특히 부유성 유공충은 각

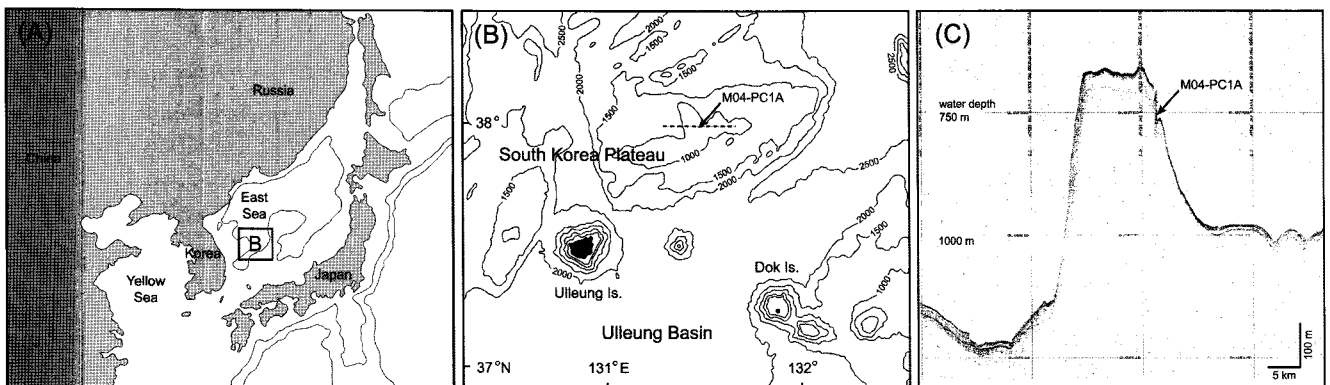


Fig. 1. (A) Location map of the study area. Contour interval is 2000 m. (B) Bathymetric map of the study area showing the location of piston core and seismic trackline of (C) in the Korea Plateau. Contour interval is 100 m. (C) A Seismic profile showing the core location.

Table 1. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic initial ratios of the planktonic foraminifera, bivalves and pectenids from the core sediments

Core depth (cm)	Sedimentary Unit	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$		
		P. Foraminifera	Bivalve	Pectenid
83		0.709154		
120		0.709148		
153		0.709131		
193		0.709140		
220	Unit II	0.709150		
258		0.709141		
290		0.709126		
347		0.709149		
425		0.709137		
432		0.708915	0.708829	
433		0.708946	0.708837	
434		0.708892	0.708829	
435		0.708922	0.708873	
436		0.708910	0.708832	
437		0.708982	0.708832	
438		0.708907	0.708827	
440		0.708896	0.708831	
441		0.708862	0.708836	
442		0.708880	0.708828	
443	Unit I-b	0.708916	0.708832	
444		0.708872	0.708824	
445		0.708855	0.708832	
446		0.708878	0.708830	
448		0.708914	0.708817	
449		0.708866	0.708838	
452		0.708972	0.708859	
454		0.708973	0.708840	
456		0.708872	0.708837	
458		0.708826	0.708839	
460		0.708940	0.708859	
468		0.708817	0.708829	
473		0.708824	0.708813	
480		0.708823	0.708832	
492		0.708828		0.708836
506	Unit I-a	0.708813		0.708812
526		0.708819		0.708829
542		0.708814		0.708827
558		0.708793		0.708805
571		0.708819		0.708817
586		0.708803		0.708806

방(chamber)들을 모두 깨끗이 방 내부에 있는 이물질도 깨끗하게 제거될 수 있게 하였다. 세척 후에 실체현미경 하에서 관찰하여 이물질이 깨끗하게 제거된 것을 확인하였으며, 이를 기초과학지원연구원에 의뢰하여 질량분석기(TIMES; Thermal Ionization Mass Spectrometer)로 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비를 측정하였다. 분석에 사용

한 표준시료 NBS 987의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비는 0.710224와 0.7102461이며, 각 오차범위는 ± 0.000016 (n=30)과 ± 0.000004 (n=14)이다. 분석된 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비를 Howarth and McArthur(1997)가 제시한 현생이던 동안의 전 세계 해수의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비의 변화 곡선과 비교하였으며, 이로부터 코어퇴적물의 퇴적시기를 유추하였다.

결 과

퇴적학적 특성 및 퇴적환경

코어퇴적물은 대부분 사질 역 내지 니질 사의 조립질 퇴적물로 구성되어 있으며, 대부분의 조립질 퇴적물은 상당부분 유백색의 부석질 라펠리를 함유하고 있는 특징을 보인다. 또한 코어 하부에는 약 150 cm 두께의 탄산염 퇴적물이 나타나는데, 이는 주로 천해에서 서식하는 이매패류나 따개비류, 부유성 및 저서성 유공충으로 이루어져 있다.

코어의 퇴적상은 생물교란 니 또는 사(BT/M, BT/S), 희미한 층리 니(CL/M), 균질 니(HM/M), 괴상 역 또는 사(MS/G, MS/S), 비조직성 역 또는 사(DO/G, DO/S), 점이층리 역 또는 사(GR/G, GR/S)의 총 6개로 분류할 수 있다(Fig. 2). 코어의 퇴적상과 구성성분을 기준으로 하여 코어퇴적물을 크게 3부분(Unit I-a, I-b and II)으로 구분할 수 있다(Fig. 2).

코어의 가장 하부에 해당하는 Unit I-a (코어깊이 465~587 cm)는 주로 이매패류나 따개비류와 같은 천해성 탄산염질 퇴적물로 이루어져 있으며, 입자의 크기는 사질에서 역질 크기에 해당하고, 세립질 기질은 거의 나타나지 않는다. 480~587 cm 구간에서는 상부로 갈수록 입자의 크기가 작아지는 상향세립화의 점이층리 퇴적구조를 보이고 있으며, 이는 연안 또는 근해역에 퇴적되어 있던 천해성 탄산염질 퇴적물이 폭풍파에 의해 재동되어 퇴적된 층으로 해석할 수 있다(Aigner, 1985). 이 구간의 탄산염질 퇴적물이 모두 생성지에서부터 어느 정도 재동되어 온 것은 사실이나, 입자의 크기가 대부분 조립질에 해당하며 원마도가 매우 불량할 뿐 아니라, 간혹 퇴적물 내에 거의 파괴되지 않은 상태의 이매패류 각질이 포함되어 있는 현상을 고려할 때, 퇴적물이 먼 거리를 이동하지는 않은 것으로 생각된다. 또한 465~480 cm 구간에는 비조직성 퇴적구조가 나타나는데, 이 퇴적상은 니질 퇴적물 내에 원마도가 불량한 역들이 불규칙하게 분산되어 있는 형태인 기질 지지의 조직특성을 보이며, 퇴적구조가 일부 변형되어 있는 점으로 보아, 암설류(debris flow)나 사면사태(slump)에 의해 집적된 층으로 해석할 수 있다.

Unit I-b (코어깊이 431~465 cm)는 주로 부유성 및 저서성 유공충과 이매패류, 그리고 화산쇄설물 등으로 이루어져 있다. 입자의 크기는 니질에서 사질 크기에 해당하며, 괴상의 퇴적구조를 보인다. 이 퇴적상은 부석질 화산암편의 함량이 적은 반면 유공충이나 이매패류와 같은 생물기원 입자의 함량이 많으며, 퇴적층의 하부에는 침식 경계면이 나타나는데, 이로부터 고밀도 저탁류(high-density turbidity current)에 의해 운반되어 퇴적된 층으로 해석된다.

코어의 상부에 해당하는 Unit II (코어깊이 0~431 cm)는 생물교란 구조를 보이는 퇴적상과 비조직성 또는 괴상의 퇴적상이 주를 이루고 있으며, 일부 구간에 희미한 층리를 보이는 퇴적상과 균질한 구조를 보이는 퇴적상이 얇게 나타난다. 생물교란 퇴적상

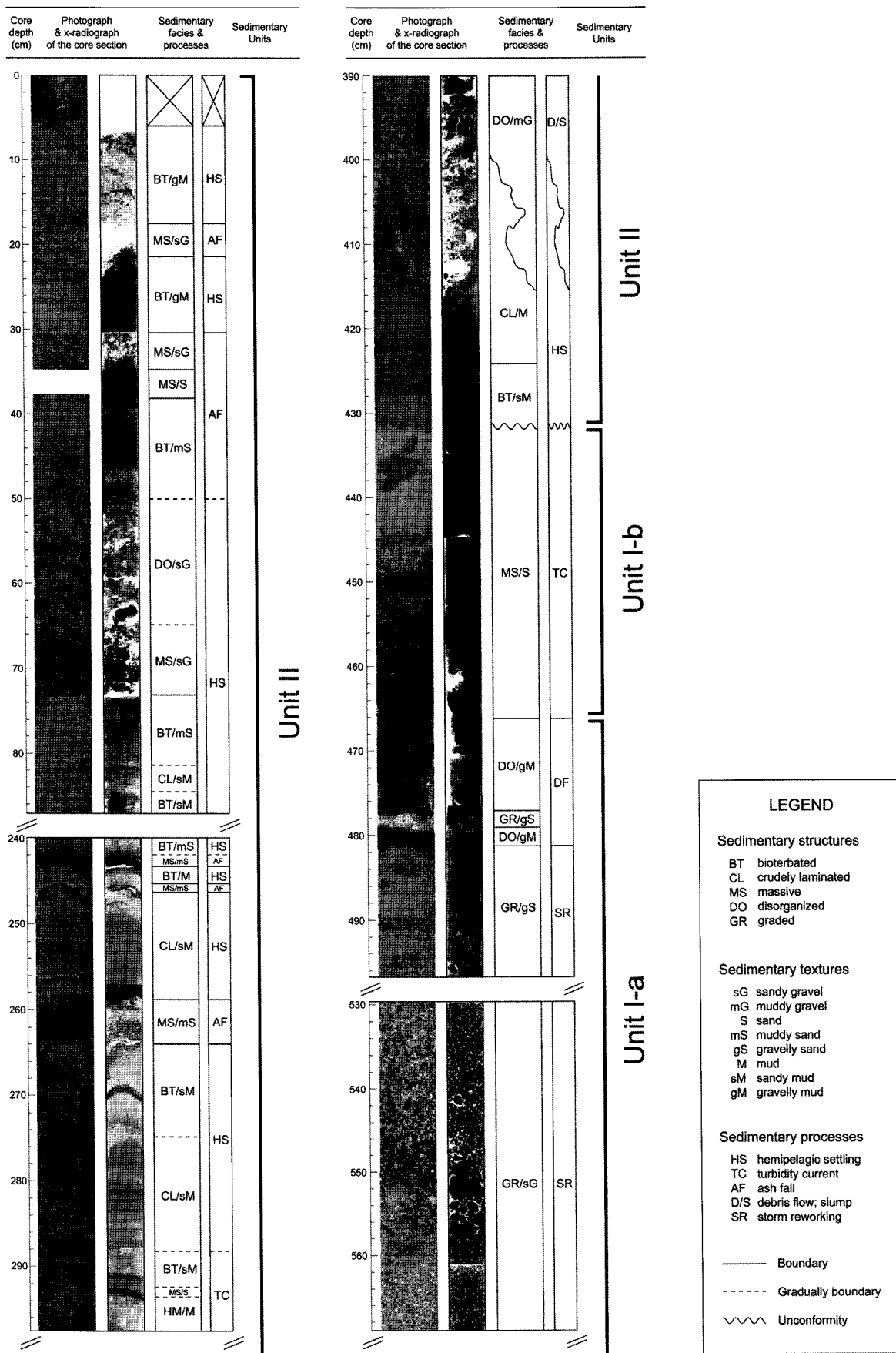


Fig. 2. Photograph including X-ray photograph of the core and the corresponding sedimentary facies and units.

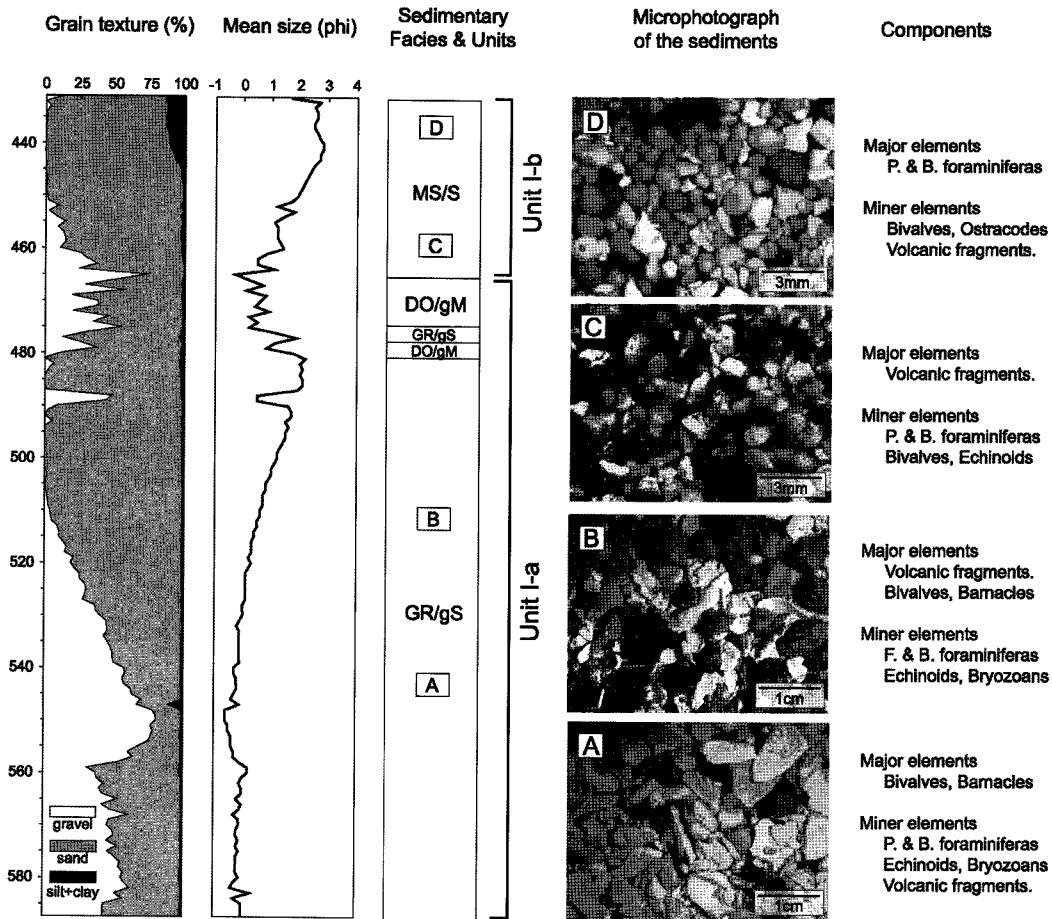


Fig. 3. Grain texture, mean size, sedimentary facies and units of the core sediments in this study.

은 유공충과 같은 생물기원 퇴적물과 세립질의 쇄설성 퇴적물로 이루어져 있으며, 입자의 크기는 니질에서 사질 크기에 해당한다. 이 퇴적상에는 생물활동에 의한 교란구조가 나타나는데, 이는 해수의 순환이 양호하게 일어나는 호기성 원양 환경에서 세립질의 부유성 입자들이 느린 속도로 침전하는 (반)원양성 퇴적에 의해 형성된 것임을 나타낸다. 또한 비조식성 또는 괴상의 퇴적상은 부석질 화산암편이나 조립질 쇄설성 퇴적물, 그리고 화산재 등으로 이루어져 있으며, 입자의 크기는 사질에서 역질 크기에 해당한다. 이 퇴적상은 주변의 급경사 사면으로부터 암설류나 사면사태에 의해 퇴적물이 재동되어 퇴적되었거나 또는 화산재의 낙하로 인해 퇴적된 것으로 해석된다.

퇴적상의 분석 결과, 코어의 하부에 나타나는 탄산염질 퇴적물이 퇴적될 당시 이 지역은 폭풍의 영향이 미치는 천해 내지 연안 환경이었으며, 이후 점차 침강하여 현재와 같은 심해 원양환경으로 변화된 것으로 볼 수 있다. 침강이 일어난 이후에는 세립질의 원양성 퇴적물이 퇴적되었으며, 때때로 발생한 암설류와 저탁류에 의해 조립질 퇴적물과 화산재 등도 재동되어 퇴적된 것으로 해석된다.

Unit I-a, b의 탄산염 퇴적물의 입도분포와 구성성분의 변화

Unit I-a와 Unit I-b의 퇴적물은 입도분포와 구성성분에 있어서 큰 차이를 보인다. Unit I-a 퇴적물은 전체적으로 하부에서 상부로

갈수록 입자의 크기가 점차 작아지는 상향세립화의 경향이 뚜렷이 나타나며, 평균입도는 약 0Φ에서 2Φ로 변화한다. 부분적으로 입자의 크기가 증가하는 세 구간이 나타나는데, 535~558 cm에서는 평균입도가 약 -0.5Φ에 이르며, 487~489 cm와 466~480 cm에서는 약 0~1Φ에 이른다(Fig. 3). Unit I-a의 퇴적물은 대부분 천해에서 서식하는 생물들의 각질로 이루어져 있다. 이 중 가장 많은 양을 차지하는 것이 이매패류와 따개비류이며, 이들이 이 구간 퇴적물의 약 80% 이상을 차지하고 있다. 그 다음으로 많은 양을 차지하는 것은 부유성과 저서성 유공충이며, 그 외에는 극피류와 태선류, 그리고 화산쇄설물이 매우 소량 포함되어 있다(Fig. 3A). Unit I-a에서는 하부에서 상부로 갈수록 입자의 크기가 점차 작아지지만, 퇴적물을 이루고 있는 구성성분과 그 함량에는 거의 변화가 없다. 단지 하부에서 상부로 갈수록 유공충을 제외한 다른 생물들의 각질 조각의 크기가 점차 작아지는 변화만을 보이고 있다. 그러나 부분적으로 퇴적물의 입자 크기가 증가하는 세 구간(535~558 cm, 487~489 cm, 466~480 cm)에서는 이러한 천해성 탄산염질 퇴적물 내에 많은 양의 화산쇄설물이 포함되어 있는데, 퇴적물 중 화산쇄설물의 함량이 약 50% 정도를 차지하기도 한다(Fig. 3B).

Unit I-b 퇴적물의 경우에도 하부에서 상부로 갈수록 입자의 크기가 점차 작아지는 경향이 나타나는데, 평균입도는 약 1Φ에서 3Φ로 변화하게 된다. Unit I-a의 퇴적물이 대부분 이매패류와 따

개비류로 이루어져 있으며, 소량의 부유성 및 저서성 유공충을 포함하고 있다고 한다면, 이와는 반대로 Unit I-b의 퇴적물은 대부분 부유성 및 저서성 유공충으로 이루어져 있으며, 소량의 이매패류를 포함하고 있는 것이 특징이다(Fig. 3D). Unit I-b의 하부에서는 퇴적물의 평균입자 크기가 상부에 비해 상대적으로 크게 나타나는데, 이는 하부의 퇴적물 내에 다량의 조립질 화산쇄설물이 포함되어 있기 때문이다(Fig. 3C). 이 화산쇄설물은 부유성 및 저서성 유공충에 비해 입자의 크기가 크기 때문에, 화산쇄설물의 함량이 많을수록 퇴적물의 평균입자의 크기가 증가하게 된다. Unit I-b의 상부로 갈수록 퇴적물 내에 화산쇄설물의 함량이 적어지고, 따라서 평균입자의 크기는 감소하게 된다.

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비와 코어퇴적물의 연령

코어퇴적물 내에서 이매패류와 부유성 유공충을 선별하여 각각에 대한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비를 분석하였다(Table 1). 이매패류의 각질은 코어의 하부구간에 해당하는 Unit I-a와 I-b의 탄산염질 퇴적물 내에서만 산출되고 있으며, 이보다 상부구간의 퇴적물에서는 산출되지 않기 때문에, Unit I-a와 I-b에서만 총 31개 지점을 택하여 퇴적물로부터 이매패류를 선별하여 분석에 사용하였다. 또한 이 31개의 지점 중, 코어의 가장 하부에 해당하는 7개 지점에서는 이매패류 중에서도 가리비조개류만을 선별하여 분석하였다(Table 1). 이는 가리비조개류의 경우 그 각질이 저마그네슘 방해석(low-Mg calcite)으로 이루어져 있어 일반적으로 속성작용에 의해 변질되지 않기 때문에 더욱 정확한 분석 값을 제공할 것으로 생각되기 때문이다. 그러나 코어의 상부로 가면서 퇴적물 입자의 크기가 점차 작아지기 때문에, 최하부의 7개 지점을 제외한 지점에서는 실제 현미경 하에서 가리비조개류와 그 외의 다른 이매패류의 각질을 구분할 수 없으며, 따라서 이 경우에는 가리비조개류 뿐 아니라 다른 이매패류도 함께 분석에 사용하였다. 부유성 유공충은 일부 층을 제외한 코어의 전 구간에서 부분적으로 산출되고 있으며, 따라서 이 연구에서는 코어의 전 구간에서 총 40개 지점의 퇴적물로부터 부유성 유공충을 선별하여 분석하였다. 특히 이 중 Unit I-a와 I-b에서는 이매패류의 분석에서 사용하였던 31개 지점과 동일

한 지점을 택하였으며, Unit II에서 9개 지점을 추가로 택하여 분석을 실시하였다(Table 1).

이매패류나 부유성 유공충과 같은 탄산염질 퇴적물의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비를 분석하면 이로부터 코어퇴적물의 생성시기를 유추할 수 있다. 이는 해수 내의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비는 현생이던 동안 시간에 따라 다양하게 변화하여 왔으며, 해양에서 생성된 탄산염암은 당시 해수의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 조성을 반영하고 있어, 이로부터 그 생성연대를 결정할 수 있기 때문이다(Burke *et al.*, 1982; Koepnick *et al.*, 1990; Denison *et al.*, 1997; Denison *et al.*, 1998). 특히 이러한 방법은 신생대에 생성된 탄산염암에 대해 매우 유용하게 사용될 수 있는데, 이는 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비가 백악기 후기(~90 Ma)에는 약 0.7074였으나, 그 이후로 점차 증가하여 현재에는 약 0.7092의 값을 보이고 있기 때문이다. 그러나 이 기간 동안 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비가 일정하게 증가한 것은 아니며, 백악기 후기(약 90~65 Ma) 동안에 급격하게 상승하였으며, 팔레오세와 에오세(약 65~35 Ma) 동안에는 거의 일정하게 유지되다가, 올리고세에서 마이오세 초기(약 35~16 Ma) 동안 다시 급격하게 상승하였고, 그 후로 현재까지는 점차적으로 증가하고 있는 추세이다(DePaolo and Ingram, 1985; Koepnick *et al.*, 1985; Hess *et al.*, 1986; Hodell *et al.*, 1989). Howarth and McArthur(1997)는 LOWESS (LOcally-WEighted regression Scatterplot Smoother) 방법을 이용하여 지난 206 Ma로부터 현재까지의 가장 적합한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비 변화 곡선을 제시한 바 있다. 이 연구에서도 Howarth and McArthur(1997)의 방법을 이용하여 퇴적물의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비로부터 그 생성연대를 구하였다.

이매패류에 대한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비의 분석결과, Unit I-a에서는 0.70881~0.70884로 거의 일정한 값을 보이고 있으며, Unit I-b에서는 0.70882~0.70887로 역시 큰 변화 없이 거의 일정한 값을 유지하고 있으나 Unit I-a에 비해서는 값이 조금 증가한 것으로 보인다(Table 1, Fig. 4). 또한 Unit I-a에서 가리비조개류만을 분석하였을 때와 다른 이매패류도 함께 분석하였을 때의 분석 값이 차이가 없음을 알 수 있는데, 이는 이매패류의 각질이 속성작용에 의해 변질되지 않았음을 지시하는 것이며, 이로부터 그 분석 값을 사용하는 데에 문제가 없음을 확인할 수 있다. 분석된 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초

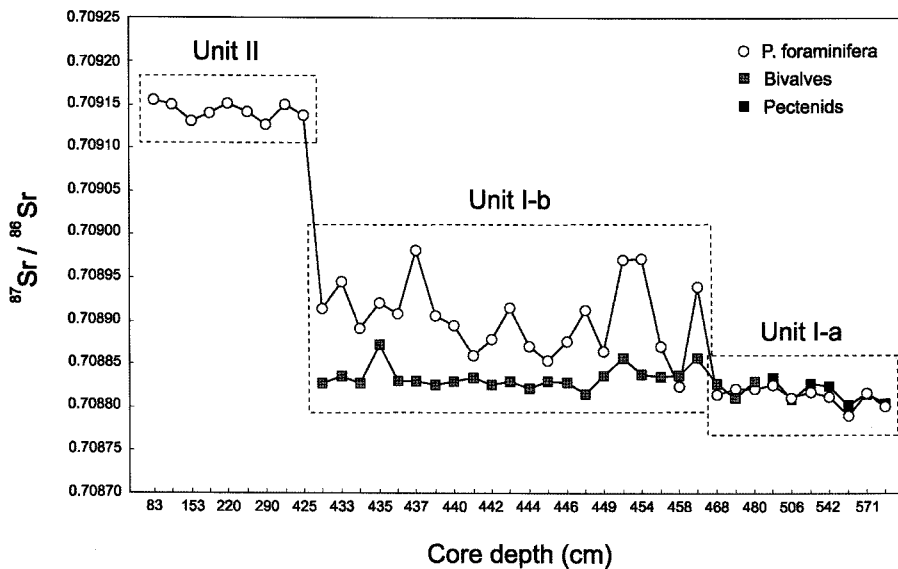


Fig. 4. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic initial ratios of the planktonic foraminifera, bivalves and pectenids from the core sediments.

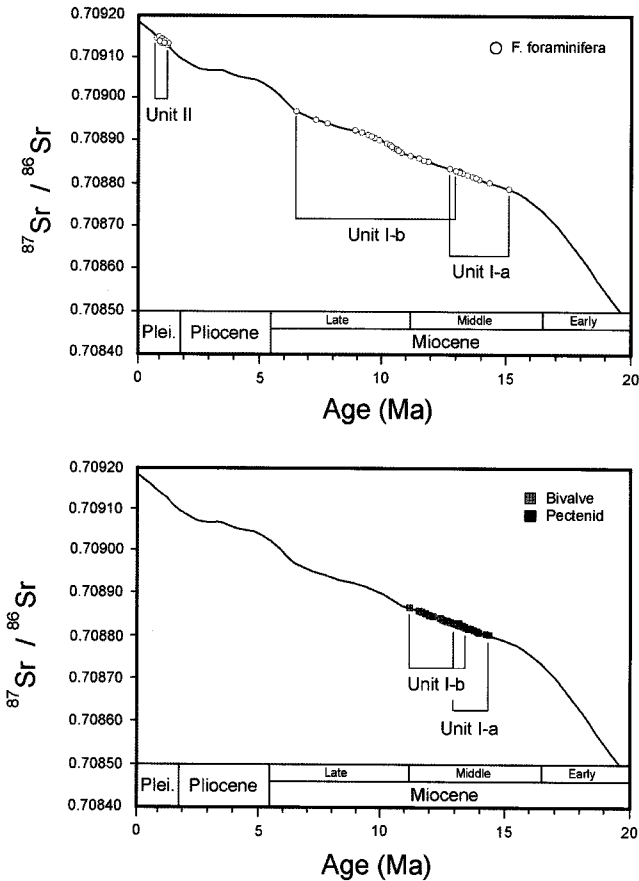


Fig. 5. Estimated absolute ages of the planktonic foraminifera, bivalves and pectenids from the core sediments based on the LOWESS fit of Howarth and McArthur (1997).

기비 값을 LOWESS 곡선(Howarth and McArthur, 1997)에 대입하여 보면, Unit I-a와 Unit I-b는 각각 마이오세 중기인 13~15 Ma, 11~14 Ma에 생성되었음을 알 수 있다(Fig. 5).

부유성 유공충에 대한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비의 분석결과는 코어의 각 구간마다 서로 특징적인 값의 변화를 보인다. Unit I-a에서는 0.70879~0.70883으로 상당히 일정한 값을 보이고 있는데, 이는 Unit I-a의 이매패류의 분석 값과도 거의 일치하며, 약 13~15 Ma에 생성된 것임을 나타내고 있다(Table 1, Figs. 4&5). Unit I-b에서는 0.70883~0.70898로 다른 구간의 시료에서보다 값의 범위가 매우 넓게 나타나고 있을 뿐만 아니라, 각 시료마다 값의 변화가 매우 심하게 변화하는 현상을 나타내고 있다. 그러나 전반적으로는 Unit I-a에 비해 값이 상당히 증가한 것으로 생각할 수 있다. 이 구간의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비가 넓은 범위의 값을 보인다는 것은 오랜 기간에 걸쳐 퇴적된 부유성 유공충이 저탁류에 의해 재동되었음을 의미하는 것이며, 생성연대를 구해보면 이는 마이오세 중기에서 후기에 해당하는 약 6~13 Ma에 생성되었음을 알 수 있다(Table 1, Figs. 4&5). 또한 이 구간의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비가 각 시료마다 매우 심하게 변화하는 이유는 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비를 분석하기 위해 한 개체의 부유성 유공충을 사용한 것이 아니라, 보통 한 지점의 퇴적물에서 적어도 100개체 이상의 부유성 유공충을 모아 분석에 사용하였기 때문이다. 각 지점의 퇴적물 내에는 오랜 기간에 걸쳐

퇴적된 여러 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비를 가지는 부유성 유공충이 포함되어 있으며, 분석을 위해 임의적으로 여러 개체를 모으는 과정에서, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비가 높은 개체들을 많이 선별하게 되면 전반적으로 이 시료의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비도 높아지게 되고, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비가 낮은 개체들을 많이 선별하게 되면 전반적으로 이 시료의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비도 낮아지게 되는 것이다. Unit II에서는 모든 시료에서 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비가 0.70913~0.70915로 일정한 수준의 값을 유지하고 있으며, 이는 Unit I-b에서보다 매우 증가한 값으로 약 1 Ma에 해당하는 매우 최근에 생성된 것임을 나타내고 있다(Table 1, Figs. 4&5).

토 의

코어퇴적물의 퇴적학적인 분석, 입도와 구성성분에 대한 분석, 그리고 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기비를 이용한 연령 자료를 종합하여 코어퇴적물이 퇴적된 과정을 다음과 같이 해석할 수 있다.

Unit I-a의 하부구간(480~587 cm)은 주로 이매패류나 따개비류와 같은 천해성 탄산염퇴적물로 이루어져 있는데, 이들은 천해에서 생성되어 연안 내지 근해역에 퇴적되어 있다가 폭풍과 같은 큰 에너지에 의해 사면 아래로 재동되어 재퇴적된 것으로 생각된다. 또한 Unit I-a의 상부구간(465~480 cm)은 화산쇄설물의 함량이 특히 많은 퇴적물로 이루어져 있는데, 이는 주변의 사면으로부터 암설류나 사면사태에 의해 운반되어 온 것으로, 그 하부에 이미 퇴적되어 있던 탄산염퇴적물의 일부 층을 침식하며 퇴적된 것으로 생각된다. Unit I-a의 퇴적물에 포함되어 있는 이매패류와 부유성 유공충의 연령을 측정된 결과, 이들은 모두 마이오세 중기에 해당하는 약 13~15 Ma에 생성된 것으로 분석되었다. 따라서 Unit I-a의 퇴적물이 생성되던 시기에는 이 지역 일대가 지금과는 다른 천해환경을 이루고 있었던 것으로 생각할 수 있다. 또한 이 구간에서 분석한 모든 시료의 연령이 13 Ma보다 오래된 것으로 분석된 점으로 보아, 천해에서 생성된 다량의 탄산염질 퇴적물이 사면 아래로 재동된 시기와 사면으로부터 암설류나 사면사태에 의해 퇴적물이 공급된 시기는 모두 13 Ma 경에 해당한다고 해석할 수 있다.

Unit I-b의 퇴적물은 저탁류에 의해 운반되어 퇴적되었으며, 주로 부유성 및 저서성 유공충과 이매패류, 화산쇄설물 등으로 이루어져 있다. 이 구간의 이매패류와 부유성 유공충의 생성연대를 분석한 결과, 이매패류는 약 11~14 Ma, 부유성 유공충은 약 6~13 Ma에 걸쳐서 생성된 것으로 분석되었다. 이매패류의 생성시기가 11~14 Ma라는 것은 조사지역인 해저산 일대가 11 Ma까지는 탄산염질 퇴적물이 생성될 수 있는 천해환경을 유지하고 있었음을 의미한다. 즉, 13 Ma 경에 Unit I-a가 퇴적된 이후에도 11 Ma 경까지 한동안 이 지역 일대에서는 지속적으로 천해성 탄산염퇴적물이 생성되었다고 할 수 있다. 그러나 11 Ma를 경계로 더 이상 이매패류와 같은 천해성 탄산염퇴적물은 나타나지 않고 있으며, 이는 이 시기에 해저산 일대가 침강하기 시작하였고 수심이 깊어지게 되어, 더 이상 이 지역에서는 천해성 탄산염퇴적물을 생성하는 생물이 서식할 수 없었기 때문인 것으로 생각된다. 또한 해저산 정상부가 약 11 Ma 경에 해수면 근처에 위치했었다고 한다면, 현재의 해저산 정상부의 수심이 약 650 m이므로(Fig. 1C) 해저산

의 평균 침강속도는 약 6 cm/kyr로 추정된다.

반면 부유성 유공충은 그 이전 시기부터 지속적으로 생성되어 퇴적물로 공급되었으며, 특히 11 Ma 이후에는 퇴적물 내에 부유성 유공충의 함량이 더 많아지게 되었는데, 이는 침강이 일어나고 수심이 깊어진 상태에서 다른 기원의 탄산염 또는 쇄설성퇴적물의 공급이 상대적으로 줄어들었기 때문인 것으로 생각된다. 이와 같이 Unit I-b의 퇴적물은 11~14 Ma(마이오세 중기)에 생성된 천해성 탄산염퇴적물과 6~13 Ma(마이오세 후기~중기)에 생성된 부유성 유공충의 두 종류 퇴적물이 섞여 있는 상태라고 할 수 있다. 이 두 종류의 퇴적물이 연안이나 사면과 같은 근해역에 일차적으로 퇴적되어 있다가, 6 Ma 경에 저탁류에 의해 사면 아래로 재동되고 재퇴적되어 Unit I-b를 형성하게 된 것으로 해석할 수 있다. 이 구간에서 부유성 유공충의 연령은 모두 6 Ma 이상을 나타내고 있으며, 이는 곧 6 Ma보다 더 최근에 생성된 부유성 유공충은 퇴적물 내에 포함되어 있지 않음을 의미하는 것이다. 따라서 퇴적물이 사면 아래로 재동되어 퇴적된 시기를 6 Ma 경으로 해석하는 것이 타당하다고 생각된다. Unit I-b의 상부에는 뚜렷한 부정합의 경계가 나타나는데, 이는 때때로 발생했던 사면으로부터의 암설류나 저탁류에 의해 일부 층군이 침식되었음을 의미한다.

Unit II의 부유성 유공충의 생성연대는 모든 시료에서 약 1 Ma로 분석되었으며, 따라서 Unit I-b와 Unit II 사이의 부정합은 5 Ma 가량의 시간적인 차이를 지니고 있음이 밝혀졌다. 부정합에 의해 침식되어 없어진 5 Ma의 기간 동안 이 지역 일대가 어떤 진화 과정을 겪었는지는 알 수 없지만, Unit II가 주로 원양환경에서 부유성 물질들이 침전하여 퇴적된 퇴적물로 이루어져 있는 것으로 보아, Unit II가 퇴적된 약 1 Ma 경에는 이미 이 지역이 충분히 침강하여 지금과 같이 수심 600 m 이상인 심해저에 이르게 된 것으로 생각된다. 그 후로 현재까지는 심해저 원양환경을 유지하며 부유성 물질들이 퇴적되고 있으며, 때때로 주변의 사면으로부터 발생한 암설류와 저탁류 등에 의해 기존의 조립질 천해퇴적물과 화산쇄설물 등이 공급되어 퇴적되는 것으로 해석할 수 있다.

결 론

동해 한국대지의 정상부 해저산 사면에서 획득한 코어는 하부로부터 Unit I-a, Unit I-b, 그리고 Unit II의 세 구간으로 나누어 그 퇴적과정을 해석할 수 있다.

Unit I-a (코어깊이 465~587 cm)는 상향세립화의 점이층리 구조를 보이는 천해성 탄산염질 퇴적물로 이루어져 있으며, 이는 폭풍파에 의해 재동되어 퇴적된 것으로 해석된다. 이 구간의 이매패류와 부유성 유공충에 대한 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 초기비는 각각 0.70881~0.70884와 0.70879~0.70883으로 분석되었으며, 이는 약 13~15 Ma에 생성되었음을 지시하는 것이다. 따라서 마이오세 중기에 해당하는 약 13~15 Ma 동안에 이 지역 일대는 탄산염질 퇴적물이 생성될 수 있는 천해환경을 이루고 있었음을 알 수 있으며, 때때로 발생한 폭풍파 등에 의해 퇴적물이 사면 아래로 재동되어 퇴적되는 과정을 거쳤던 것으로 해석할 수 있다.

Unit I-b (코어깊이 431~465 cm)는 저탁류에 의해 화산쇄설물과 부유성 및 저서성 유공충, 탄산염질 퇴적물이 운반되어 퇴적된 층으로 해석할 수 있다. 이 구간의 이매패류의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 초기비는

0.70882~0.70887로 Unit I-a에 비해 값이 조금 상승하였으나 각 시료에서 거의 일정한 수준의 값을 보이고 있는 반면, 부유성 유공충의 경우에는 0.70883~0.70898로 Unit I-a에 비해 전반적으로 값이 상승하였을 뿐 아니라 값의 범위가 매우 넓게 나타나는 특징을 보이고 있다. 이로부터 각 시료의 생성연대를 구해보면, 이 매패류는 약 11~14 Ma에 생성되었으며, 부유성 유공충은 약 6~13 Ma에 걸쳐 생성되었음을 알 수 있다. 따라서 약 11 Ma까지는 이 지역 일대가 천해의 탄산염질 퇴적물이 생성될 수 있는 환경을 유지하고 있었음을 알 수 있으며, 그 이후로 평균 약 6 cm/kyr의 속도로 침강한 것으로 보인다. 그러나 부유성 유공충은 약 11 Ma 이후에도 지속적으로 침강하여 퇴적되었으며, 이 퇴적물들이 약 6 Ma 경에 저탁류에 의해 사면 아래로 재동되어 재퇴적된 것으로 해석할 수 있다.

Unit II (코어깊이 0~431 cm)는 주로 원양환경에서 생물기원 퇴적물이 서서히 침강하여 퇴적되거나, 때때로 주변의 사면으로부터 암설류나 저탁류에 의해 공급되어 퇴적된 퇴적물로 이루어져 있다. 이 구간의 부유성 유공충의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 초기비는 0.70913~0.70915로 Unit I-b에 비해 상당히 상승한 값을 보이며, 그 생성연대가 약 1 Ma 경에 해당함을 지시하고 있다. 따라서 Unit I-b와 Unit II 사이에는 약 5 Ma의 부정합이 존재함을 알 수 있으며, Unit II가 퇴적된 약 1 Ma 이후로는 이 지역 일대가 충분히 침강하여 지금과 같은 원양환경을 이루게 되었던 것으로 해석할 수 있다.

사 사

이 연구는 공공기술연구회 정책연구사업비(BSPG-39200-1705-5)에 의해 지원되었다. 절대연령 분석을 위한 전처리실험에 도움을 준 강원대학교 지질학과 퇴적암석학실험실의 지효선에게 고마움을 전하며, 이 논문을 심사하여 주신 심사위원께 감사드린다.

참고문헌

- Aigner, T., 1985. Storm Depositional Systems. Lecture Notes in Earth Sciences, Springer-Verlag, 3: 174 pp.
- Bahk, J.J., Chough, S.K., Jeong, K.S. and Han, S.J., 2001. Sedimentary records of paleoenvironmental changes during the last deglaciation in the Ulleung Interplain Gap, East Sea (Sea of Japan). *Global and Planetary Change*, 28: 241-253.
- Burke, W.H., Denison, R.E., Hetherington, E.A., Koepnick, R.B., Nelson, N.F. and Otto, J.B., 1982. Variation of seawater ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr throughout Phanerozoic time. *Geology*, 10: 516-519.
- Crusius, J., Pedersen, T.F. and Calvert, S.E., 1999. A 36kyr geochemical record from the Sea of Japan of organic matter flux variations and changes in intermediate water oxygen concentrations. *Paleoceanography*, 14: 248-259.
- Denison, R.E., Koepnick, R.B., Burke, W.H. and Hetherington, E.A., 1998. Construction of the Cambrian and Ordovician seawater ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr curve. *Chemical Geology*, 152: 325-340.
- Denison, R.E., Koepnick, R.B., Burke, W.H., Hetherington, E.A. and Fletcher, A., 1997. Construction of the Silurian and Devonian seawater ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr curve. *Chemical Geology*, 140: 109-121.
- DePaolo, D.J. and Ingram, B.L. 1985. High-resolution stratigraphy

- with strontium isotopes. *Science*, **227**: 938–941.
- Gorbarenko, S.A., 1993. Reasons for freshening of surface water mass in Sea of Japan during Last Glaciation determined from ratios of oxygen isotopes in plankton foraminifera. *Oceanology*, **33**: 359–364.
- Gorbarenko, S.A. and Southon, J.R., 2000. Detailed Japan Sea paleoceanography during the last 25kyr: constraints from AMS dating and $\delta^{18}\text{O}$ of planktonic foraminifera. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **156**: 177–193.
- Hess, J., Bender, M.L. and Schilling, J.-G., 1986. Evolution of the ratio of strontium-87 to strontium-86 in seawater from Cretaceous to present. *Science*, **231**: 979–984.
- Hodell, D.A., Mueller, P.A., McKenzie, J.A. and Mead, G.A., 1989. Strontium isotope stratigraphy and geochemistry of the late Neogene ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, **92**: 165–178.
- Howarth, R.J. and McArthur, J.M., 1997. Statistics for strontium isotope stratigraphy: A robust LOWESS fit to the marine Sr-isotope curve for 0 to 206 Ma, with look-up table for derivation of numeric age. *The Journal of Geology*, **105**: 441–456.
- Keigwin, L.D. and Gorbarenko, S.A., 1992. Sea level, surface salinity of the Japan Sea, and the Younger dryas event in the North-western Pacific Ocean. *Quaternary Research*, **37**: 346–360.
- Kim, J.-M., Kennett, J.P., Park, B.-K., Kim, D.C., Kim, G.Y. and Roark, E.B., 2000. Paleoclimatographic change during the last deglaciation, East Sea of Korea. *Paleoceanography*, **15**: 254–266.
- Koepnick, R.B., Denison, R.E., Burke, W.H., Hetherington, E.A. and Dahl, D.A., 1990. Construction of the Triassic and Jurassic portion of the Phanerozoic curve of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. *Chemical Geology*, **80**: 327–349.
- Koepnick, R.B., Burke, W.H., Denison, R.E., Hetherington, E.A., Nelson, H.F., Otto, J.B. and Waite, L.E., 1985. Construction of the seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ curve for the Cenozoic and Cretaceous: supporting data. *Chemical Geology*, **58**: 55–81.
- Lee, E. and Nam, S., 2003. Freshwater supply by Korean rivers to the East Sea during the last glacial maximum: a review and new evidence from the Korea Strait region. *Geo-Marine Letters*, **23**: 1–6.
- Lee, E. and Nam, S., 2004. Low sea surface salinity in the East Sea during the last glacial maximum: review on freshwater supply. *Geosciences Journal*, **8**: 43–49.
- Lee, K.E. and Kim, K.-R., 2002. Past sea surface temperature of the East Sea inferred from alkenone. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **37**: 27–34.
- Lee, S.H. and Chough, S.K., 2001. High-resolution (2–7 kHz) acoustic and geometric characters of submarine creep deposits in the South Korea Plateau, East Sea. *Sedimentology*, **48**: 629–644.
- Lee, S.H., Chough, S.K., Back, G.G. and Kim, Y.B., 2002. Chip (2–7 kHz) echo characters of the South Korea Plateau, East Sea: styles of mass movement and sediment gravity flow. *Marine Geology*, **184**: 227–247.
- Oba, T., Kato, M., Kitazato, H., Koizumi, I., Omura, A., Sakai, T. and Takayama, T., 1991. Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years. *Paleoceanography*, **6**: 499–518.
- Park, B.-K., Shin, I.C. and Han S.-J., 1997. East Sea (Japan Sea) Climate Event during the Younger Dryas and Last Deglaciation. *Ocean Research*, **19**: 257–264.
- Tada, T., 1994. Paleoclimatographic evolution of the Japan Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **108**: 487–508.
- Tada, R., Irino, T. and Koizumi, I., 1999. Land-ocean linkages over orbital and millennial timescales recorded in late Quaternary sediments of the Japan Sea. *Paleoceanography*, **14**: 236–247.
- Tamaki, K., 1988. Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implications. *Bulletin of Geological Survey of Japan*, **39**: 269–365.
- Tamaki, Y. and Kimura, N., 1991. Backarc extension versus continental breakup: petrological aspects for active rifting. *Tectonophysics*, **197**: 127–137.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1995. Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Geological Society of America Bulletin*, **107**: 83–97.

2007년 3월 16일 원고접수

2007년 11월 12일 수정본 채택

담당편집위원: 전승수