

동해 키타-야마토 해곡에서 채취된 시추코아의 테프라층서와 고환경

천종화^{1*} · 정대교² · 한상준³ · 허식³ · 유해수³

¹한국지질자원연구원 석유해저자원연구부, ²강원대학교 지질학과, ³한국해양연구원 해저환경연구사업단

Tephrostratigraphy and Paleoenvironments of Marine Core in the Kita-Yamato Trough, East Sea/Japan Sea

Jong-Hwa Chun^{1*}, Daekyo Cheong², Sang-Joon Han³, Sik Huh³ and Hai-Soo Yoo³

¹Petroleum & Marine Resources Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

³Marine Geo-Resource Research Division, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan 425-600, Korea

The Kita-Yamato Trough is characterized by a SW-NE trending narrow graben between the Yamato Bank and the Kita-Yamato Bank in the central East Sea/Japan Sea (ES/JS). Core 20EEZ-1 was obtained in the flat summit of a small ridge from the southwest Kita-Yamato Trough. The sedimentation was mainly controlled by the supply of hemipelagic sediments and substantial tephra from explosive volcanic eruptions of the Quaternary volcanoes. The aim of this study is to reconstruct the tephrostratigraphy from the marine sediments collected from the Kita-Yamato Trough and to provide the atmosphere and ocean conditions during the explosive volcanic eruptions. According to the detailed tephrostratigraphy and lithofacies records, the core sediments were deposited during the last marine isotope stage (MIS) 7. The core consists of four lithofacies, identified as, oxidized mud (OM), crudely laminated mud (CLM) and bioturbated mud (BM), interbedded with coarse-grained tephra (TP). The major element geochemistry and stratigraphic positions of seven tephra layers suggest that they originated from the Aira caldera in Kyushu area among the Japanese islands (AT tephra; 29.24 ka), unknown submarine volcano in the south Korea Plateau (SKP-I; MIS 3, SKP-II; MIS 4, SKP-IV; boundary between MIS 6 and MIS 5e, SKP-V; MIS 6, respectively), and the Baegdusan volcano in the Korean Peninsula (B-KY1; ca. 130 ka, B-KY2; ca. 196 ka). The absence of tephra originated from Ulleung Island in core 20EEZ-1 suggest that the tephra had not been transported into the Kita-Yamato Trough by atmosphere conditions during the eruptions. On the other hand, the B-KY1 and the B-KY2 tephra derived from the Baegdusan volcano were founded in the Kita-Yamato Trough by a presence of prevailing westerly winds during the eruptions. Furthermore, the SKP tephra were characterized by the transport across the air-water interface, causing quickly thrust of raising eruption plumes from subaqueous explosive eruptions. Surface currents may play an important role in controlling the distribution patterns of the SKP tephra to distal areas. The tephrostratigraphic study in the Kita-Yamato Trough provides the important chronostratigraphic marker horizons and the detailed atmosphere and ocean conditions during the explosive eruptions.

Key words : Kita-Yamato Trough, SKP tephra, Baegdusan, westerly winds, Marine Isotope Stage 7

동해 중부에 위치하는 키타-야마토 해곡은 야마토 뱅크와 키타-야마토 뱅크 사이에 형성된 좁고 긴 남서-북동 방향의 지구이다. 20EEZ-1 시추퇴적물은 키타-야마토 해곡의 남서쪽 가장자리에 위치하는 해령의 평탄한 정상부에서 채취되었다. 이 시추퇴적물은 반원양성 퇴적물로 구성되어 있으며, 폭발적인 화산활동에 의해서 공급된 테프라들을 포함한다. 이 연구의 목적은 키타-야마토 해곡에서 채취된 시추퇴적물의 테프라층서를 복원하고, 시추퇴적물에 포함된 테프라의 종류에 의해서 화산활동 당시의 대기환경과 해양환경을 밝히는 것이다. 20EEZ-1 시추퇴적물은 테프라층서 복원과 퇴적상의 해석에 의해서 그 연대가 동위원소층서(marine isotope stage; MIS) 7에 해당되는 것으로 해석되었다. 이 시추퇴적물은 최상부에 산화된 빨 퇴적상이 발달하며, 그 하부에 암색의 희미한 층리가 발달된 빨 퇴적상과 담

*Corresponding author: jhchun@kis.kigam.re.kr

색의 생물고란된 빨 퇴적상이 교호하고 테프라들이 협재한다. 이 시추퇴적물에 포함된 테프라는 주요 원소함량 분석과 층서적 관계를 고려하였을 때, 일본 큐슈 지방의 아이라(Aira) 칼데라로부터 기원된 AT 테프라(29.24 ka), 동해 한국대지에 위치하는 해저화산으로부터 기원된 SKP-I (MIS 3), SKP-II (MIS 4), SKP-IV (MIS 6과 MIS 5e 경계)와 SKP-V (MIS 6) 테프라, 백두산 기원의 B-KY1 (약 130 ka)과 B-KY2 (약 196 ka) 테프라로 해석되었다. 20EEZ-1 시추퇴적물에서는 울릉도 기원의 테프라가 관찰되지 않는데, 키타-야마토 해곡 지역은 울릉도 화산 활동에 의한 테프라의 대기를 통한 이동 경로에 포함되지 않음을 지시한다. 백두산 기원의 테프라는 분출 당시의 편서풍이 키타-야마토 해곡 지역까지 영향이 있었음을 지시한다. 그리고 한국대지에 위치하는 해저화산으로부터 해저 분출로 공급된 SKP 테프라는 표층 해류에 의해서 키타-야마토 해곡까지 장거리 이동이 일어났다. 키타-야마토 해곡에서의 테프라층서 연구는 시추퇴적물의 시간층서 복원과 함께 테프라의 분출 당시의 해양과 대기의 고환경 해석에 도움을 준다.

주요어 : 키타-야마토 해곡, 테프라층서, 백두산, 편서풍, 동위원소층서 7

1. 서 론

20EEZ-1 시추퇴적물은 동해 중부에 위치하는 키타-야마토 해곡에서 채취되었다(Fig. 1). 키타-야마토 해곡은 활발한 지구조 활동에 의해서 대부분 재동된 질량류 퇴적물로 구성된 것으로 보고되었으며, 제3기 중기 마이오세 이후에 256 매의 테프라가 확인되었으나 기원화산 연구는 이루어지지 않았다(허식 등, 2001; Pouclet and Scott, 1992). 지금까지 키타-야마토 해곡은 테프라층서와 고환경 연구에 적합하지 않은 지역으로 생각되었다.

동해 시추퇴적물에 포함된 테프라 연구는 주로 동해 남부의 울릉분지, 한국대지, 야마토분지, 오키해령에서 이루어졌으며, 동해 북부의 일본분지에서도 일부 있었다(천중화 등, 1998; Arai *et al.*, 1981; Chun *et al.*, 1997; Machida and Arai, 2003). 동해 남부 시추퇴적물에서 발견된 테프라는 울릉도와 한국대지의 해저화산, 일본 큐슈 지역에 위치하는 화산들로부터 공급된

것이며, 동해 북부 시추퇴적물에서는 백두산과 일본 큐슈와 홋카이도 지역에 위치하는 화산들로부터 공급된 테프라가 발견되었다(Machida and Arai, 2003). 따라서 동해 중부에 위치하는 키타-야마토 해역에서의 테프라 연구는 울릉도, 한국대지의 해저화산, 백두산의 화산활동으로부터 공급된 테프라의 분포 범위를 결정할 수 있는 중요한 의미를 갖는다. 이 연구에서는 키타-야마토 해곡에서의 테프라층서 복원과 화산활동 당시의 대기환경과 해양환경을 밝히기 위하여, 질량류 퇴적물이 공급되지 않았을 것으로 추정되는 키타-야마토 해곡에 위치하는 해령의 정상부에서 시추퇴적물을 채취하였다(Fig. 1).

키타-야마토 해곡은 북위 39°~40°와 동경 133°~135° 사이에 위치하는데, 이곳은 일본분지와 야마토분지의 지형적인 경계이고 난류와 한류가 교차하는 해양 전선(oceanographic frontal zone)이 형성된 지역이다(Muza, 1992). 최근에 천중화 등(1998)은 울릉분지에서 채취된 시추퇴적물의 테프라의 분석으로 해저화산 기

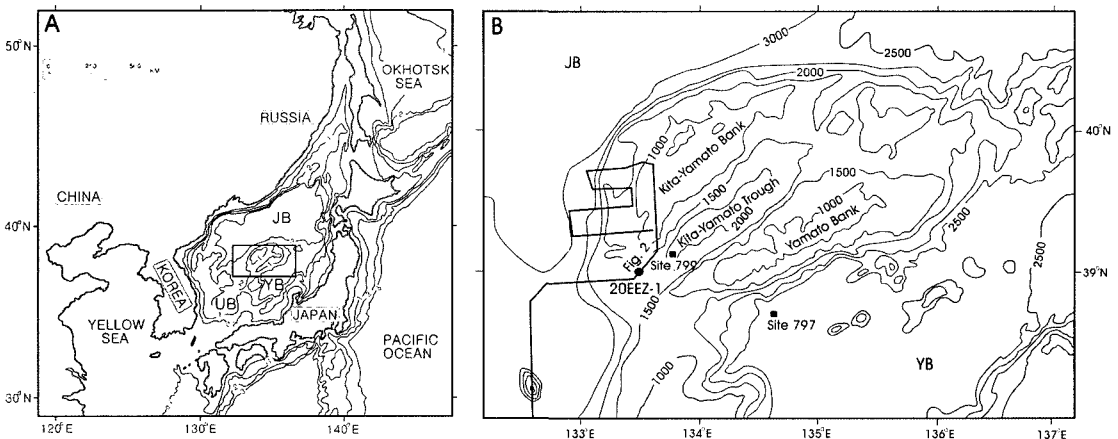


Fig. 1. Location map of the study area. (A) Principal marine basins. (B) Chirp seismic tracklines and coring site. Depth contours are in meters. UB: Ulleung Basin, YB: Yamato Basin, JB: Japan Basin.

원의 테프라를 보고하였다. 이 테프라들은 한국대지에
서 채취된 시추퇴적물의 테프라 분석과 지자기이상 자
료에 의해서 한국대지에 위치하는 해저화산으로부터 공
급된 것으로 해석되었다(Chun, 2003). 그러나 아직까
지는 예상지점에서 정밀한 해저지형 조사와 시추 작업
이 이루어지지 않아, 해저화산의 정확한 위치는 파악
되지 못하였다. 이러한 이유로 해저화산 기원의 테프라
는 SKP(south Korea Plateau)로 표기하게 되었다
(Chun, 2003; Chun *et al.*, 2004). Arai *et al.*(1981)
은 오키헤령에서 채취된 시추퇴적물에서 울릉도 기원의
U-Ym 테프라를 보고하였다. 이 테프라는 울릉도의 폭
발적인 화산분출의 최초의 산물로 보고되었다(Machida
and Arai, 2003). 그러나 U-Ym 테프라는 울릉도 기원
이 아니라 한국대지에 위치하는 해저화산으로부터 기원
된 SKP 테프라로 재해석되었다(Chun and Ikehara,
2003). 이 연구에서도 키타야마토 해곡에서 해저화산
기원의 테프라가 동위원소층서(marine isotope stage;
MIS) 6 시기까지 총 4 매가 관찰되어, U-Ym 테프라의
분출 시기 이전에도 많은 양의 해저화산 분출이 있었음
이 밝혀졌다. 해저화산 기원의 테프라의 중요성은 울릉
도, 백두산, 일본 큐슈 지역의 화산으로부터 공급된 테
프라는 분출 당시의 대기환경에 의해서 이동 되지만, 해
저화산 기원의 테프라는 해류에 의해서 이동됨으로 고

해양환경을 밝힐 수 있는 것이다.

이 연구에서는 키타야마토 해곡에서 채취된 시추퇴
적물의 테프라 분석하여 테프라의 기원 화산과 분출 시
기를 해석하고, 화산활동 당시의 대기환경과 해양환경을
밝힐 것이다. 그리고 동해 중부 키타야마토 해곡에서의
테프라 연구는 동해 남부와 북부에서 보고된 테프라의
분포 범위를 알 수 있는 중요한 자료가 될 것이다.

2. 연구방법

동해 중부 키타야마토 해곡에서 테프라 연구는 질
량류 공급이 없는 원양성 또는 반원양성 퇴적작용이
일어나는 퇴적 장소를 찾는 것이 가장 중요하다. 따라
서 한국해양연구원 연구선 ‘온누리호’에 장착된 3-11
kHz 주파수 대역의 Chirp 방식 천부지층탐사기를 이
용하여 키타야마토 해곡 주변해역에서 총 길이 420
line-km의 자료를 획득하였으며, 현장에서 해저 지형과
탄성파상을 일차적으로 분석하였다(Fig. 2). 이 연구에
서 획득된 천부지층탐사 자료에 의해서, 키타야마토
해곡의 남서측 가장자리에 발달된 소규모 해령에서 시
추작업을 실시하였다. 20EEZ-1 시추퇴적물은 바렐 길
이 12 m의 피스톤 코아러를 이용하여, 북위 39°
00.0', 동경 133°35.7'에 위치하는 수심 1,700 m의 해

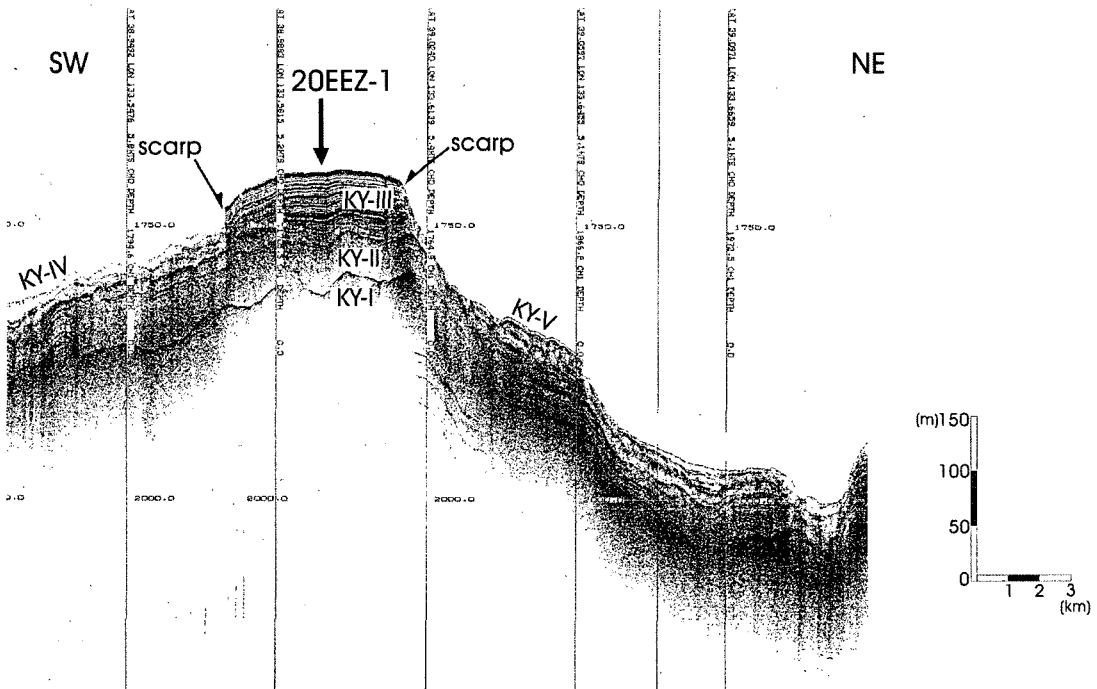


Fig. 2. Chirp seismic profile around the small-scale ridge, southwestern Kita-Yamato Trough. See Fig. 1B for location.

령 정상부에서 채취하였다. 시추 지점에서 1,105cm 길이의 해령 정상부 퇴적물을 획득하였다. 시추퇴적물은 선상에서 3m 간격으로 절단하여, 절단된 양면을 방수 테이프로 밀봉한 뒤에 실험실로 운반하였다. 시추퇴적물은 양면으로 절개하여, 퇴적구조, 색상, 생흔구조를 기재하고 테프라 시료를 채취하였다. 테프라 시료는 4 phi 체를 사용하여 습식 체질 한 후에 초음파 세척기를 사용하여 테프라에 흡착된 미세퇴적물을 완전히 분리하였다. 이 테프라 시료는 레진을 사용하여 언마편을 제작하였다. 테프라의 주요 원소함량은 일본지질조사소(Geological Survey of Japan/AIST)가 보유하고 있는 전자현미분석기(Electron Probe Microanalyzer; JEOL 8900R)를 사용하여 분석하였다. 테프라는 Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K의 주요 원소를 분석하였으며, 분석 조건은 15 KeV 전압과 12 nA 전류에서 10 µm의 빔 크기로 각 원소의 측정시간은 10 초로 하였다.

3. 연구지역

동해는 후열도 심해분지와 상대적으로 얕은 수심의 벵크와 해령으로 구성된다(Fig. 1A). 동해 남부는 울릉분지와 야마토분지가 발달하며, 상대적으로 얕은 한국대지와 오키해령으로 구성된다. 동해 중부는 얕은 수심의 야마토 벵크와 키타-야마토 벵크가 위치하며, 그 사이에 키타-야마토 해곡이 발달한다. 동해 북부는 일본분지가 발달된다. 연구지역은 키타-야마토 해곡으로 야마토 벵크와 키타-야마토 벵크 사이에 형성된 지구이며, 수심이 2,000 m 이상으로 북동-남서방향의 좁고 긴 함몰지역이다(Fig. 1B). 키타-야마토 해곡은 남서쪽을 제외한 해곡의 삼면이 주변 벵크와 급경사로 경계한다. 이 연구에서는 키타-야마토 해곡의 남서쪽에 위치하는 소규모의 해령의 정상부에서 시추퇴적물을 채취하였다.

키타-야마토 해곡은 난류와 한류가 교차하는 해양 전선이 형성되는 지역이며(Muza, 1992), 주변 화산으로부터 대기를 통한 장거리 이동된 테프라는 편서풍의 영향으로 키타-야마토 해곡에 공급된 것이다. 따라서 시추퇴적물의 테프라 분석은 육지와 섬에 위치하는 화산으로부터 분출된 테프라의 이동 수단인 편서풍 방향을 알 수 있다. 그리고 해저화산으로부터 분출된 테프라의 운반은 표층 해류에 의해서 영향을 받으므로, 이 테프라는 키타-야마토 해곡에 영향을 미치는 해류를 추정할 수 있는 증거로 활용될 수 있다.

4. 결 과

4.1. 탄성파상 분석

이 연구에서는 키타-야마토 해곡 주변에서 획득된 총 420 line-km의 Chirp 고해상 천부지층탐사 자료에서 20EEZ-1 시추 지점 주변의 27 line-km를 정밀 분석하여 5개의 탄성파상으로 구분하였다(Fig. 2).

키타-야마토 해곡 남서측 가장자리에 위치하는 해령은 약 5 km 길이의 평탄한 정상부가 발달하며, 해령 정상부의 가장자리는 가파른 단애가 발달한다(Fig. 2). 탄성파상 KY-I는 뚜렷한 해저 표층 반사파를 보이며, 내부 반사파는 나타나지 않고 수 m 높이의 굴곡이 심한 지형 변화가 특징이다(Fig. 2). 이 탄성파상은 해령의 음향기반암(Damuth, 1980)으로 해석되었다. 탄성파상 KY-II는 KY-I 상위에 발달하며 측면연속성이 다소 양호하며, 내부 반사파가 없는 탄성파적으로 투명한 특성을 가진다(Fig. 2). 이 탄성파상은 음향기반암 상위에 50m의 두께로 평행하게 피복되어 있는데, 키타-야마토 해곡의 급경사면으로부터 공급된 대규모의 암설류(Damuth, 1980) 퇴적물로 해석된다. 탄성파상 KY-III는 해령의 최상부에 발달하며, 측면연속성이 매우 양호한 뚜렷한 해저 표층 반사파와 내부 반사파가 잘 나타나는 특성을 가진다(Fig. 2). 이 탄성파상의 내부 반사파는 KY-I의 불규칙한 지형 기록을 따라서 발달하는데, 반원양성 퇴적물의 퇴적작용(윤석훈 등, 1996)으로 해석된다. 탄성파상 KY-IV는 해령의 남서측 경사면에서 발달하는데 표면이 파형의 반사파를 보이며, 내부 반사파가 없는 탄성파적으로 투명한 5~10 m의 두께를 갖는다(Fig. 2). KY-IV는 KY-II 상위에 발달하는데 탄성파상 KY-III으로부터 기원된 암설류 퇴적물로 해석된다. 탄성파상 KY-V는 해령의 북동측 상부 경사면에 발달하는데 표면이 다소 굴곡진 파형의 반사파를 보이며, 내부 반사파는 심하게 불규칙한 변형이 나타난다(Fig. 2). 이 탄성파상은 슬립프 퇴적물(Lyså *et al.*, 2004)로 해석된다.

4.2. 퇴적상 분석

20EEZ-1 시추퇴적물은 입도와 색상, 내부 퇴적구조의 분석에 의하여, 생물교란된 뿔(bioturbated mud: BM), 희미한 층리가 발달된 뿔(crudely laminated mud: CLM), 산화된 뿔(oxidized mud: OM)과 테프라(tephra: TP)의 네 개의 퇴적상으로 구분되었다. 이 시추퇴적물의 뿔 퇴적물은 대부분 평균 입도가 9.0~9.9 phi 범위이며, 점토와 실트로만 구성되어 있다. 조립질의 테프라는 평균입도가 5.5~8.6 phi 범위이다.

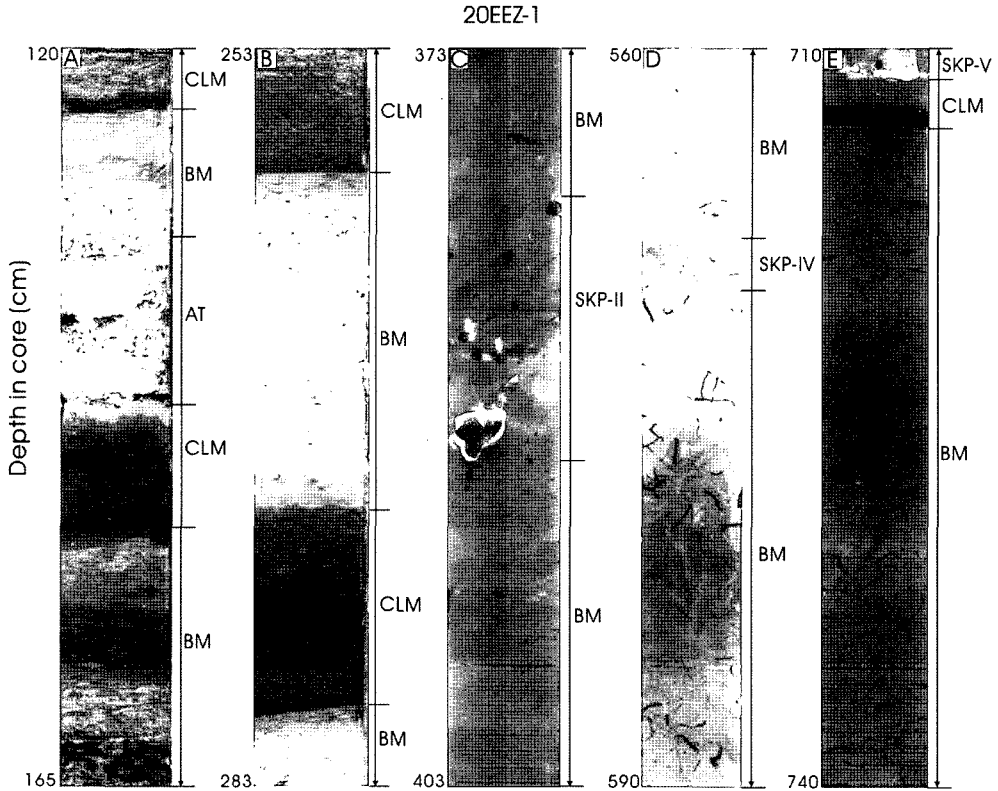


Fig. 3. Photographs (A and B) and X-radiographs (C, D and E) showing lithofacies in the core 20EEZ-1. AT, SKP-II, SKP-IV, and SKP-V represent tephra. CLM: crudely laminated mud, BM: bioturbated mud.

생물교란된 빨 퇴적상은 시추퇴적물에서 가장 높게 산출되며, 다양한 생물교란 형태가 발달한다. 생물교란 흔적은 퇴적당시의 저서환경에 따라서 형태를 구별할 수 없거나(Fig. 3C), 충전퇴적물이 황철석으로 구성된 것으로 구분된다. 황철석이 나타나는 생물교란된 빨 퇴적상은 수 십 cm 두께의 올리브색 또는 회색(5Y 4/2 또는 5Y 4/1) 퇴적물로 구성된다(Fig. 3E). 생물교란 형태가 가지상(Fig. 3A)인 생물교란 빨 퇴적상은 수 cm~수 십 cm 두께의 회백색(5Y 8/1) 퇴적물로 구성되며, 희미한 층리가 발달된 빨 퇴적상과 교호한다(Fig. 3B). 생물교란된 빨 퇴적상은 산소환경 또는 저산소 환경에서 원양성 또는 반원양성 퇴적작용에 의해서 형성된 것으로 해석되었다(Chun *et al.*, 2004). 그리고 생물교란 형태는 저서환경의 용존산소의 차이에 의한 것으로, 황철석은 퇴적 당시 또는 직후에 낮은 용존산소 함량을 지시하는 것이다(Thomsen and Vorren, 1984).

희미한 층리가 발달된 빨 퇴적상은 20EEZ-1 시추퇴적물의 깊이 66cm에서 처음으로 발달하며, 그 하부에서는 수십 차례 반복적으로 나타난다. 이 퇴적상은 두

께가 1~25cm 범위이며, 암색 또는 올리브 암색(5Y 2/1 또는 5Y3/2)으로 상하부의 퇴적상과 뚜렷한 경계를 가진다(Fig. 3B). 이 퇴적상은 일부 상부에서 올리브색 또는 회색의 생물교란 충전퇴적물의 교란으로 상부 경계면이 불분명하다(Fig. 3A). 이 퇴적상은 용존산소가 극히 부족한 저산소 또는 무산소 환경에서 형성된 것으로 해석되었다(Tada *et al.*, 1999; Bahk *et al.*, 2000; Chun *et al.*, 2004). Tada *et al.* (1999)은 오키뱅크와 야마토분지에서 채취한 시추퇴적물에서 높은 함량의 유기탄소를 갖는 희미한 층리가 발달된 빨 퇴적상(thin laminated; TL)을 보고하였는데, 이것은 저 염분의 높은 영양염을 포함하는 동중국연안수가 아간극기 동안에 동해로 유입되어 해양 생산력을 증가시켰으며, 심층수 순환의 감소에 의한 저산소 환경으로 형성된 것으로 해석되었다. 그리고 이 퇴적상은 그린랜드 빙하 시추코어에서 보고된 후기 플레이스토세의 천년단위의 단주기 기후변동(Dansgaard-Oeschger Interstadials, Dansgaard *et al.*, 1993)에 관련된 동아시아 몬순 기후변동의 결과로 해석되었다(Nakajima *et al.*, 1996;

Tada *et al.*, 1999). 또한 최후최대빙하기에 형성된 희미한 층리가 발달된 빨 퇴적상은 대한해협을 통한 동한남류의 급격한 유입 감소 또는 단절에 의해서 동해해수의 성층화로 부산소 환경에서 형성된 것으로 해석되었다(Oba *et al.*, 1991).

산화된 빨 퇴적상은 시추퇴적물의 최상부에서 11 cm 깊이 까지만 발달한다. 이 퇴적상은 적갈색 또는 암적갈색(5Y 4/3 또는 5Y 3/3)이 특징이다. Ichikura and Juie (1976)는 일본분지의 해저 표층에서 수 십 cm 두께의 산화층을 보고하였는데, 이 퇴적상은 동해고유수의 높은 용존산소 함량의 영향에 의해서 산화환경에서 형성된 것으로 보고되었다. 동해 울릉분지 시추퇴적물에서는 이 퇴적상이 울릉분지 북부에서만 수 cm 두께로 발달한다(천중화 등, 1998).

테프라 퇴적상은 20EEZ-1 시추퇴적물에서 7개가 발견되었다. 이 퇴적상은 입자 크기와 형태에 의해서 세립질의 화산유리와 조립질의 부석으로 구분된다. 시추퇴적물의 깊이 126~134cm에서는 화산유리로 구성된 테프라가 발견되며, 이 테프라는 상하부의 빨 퇴적물과 뚜렷한 경계를 가진다(Fig. 3A). 시추퇴적물 깊이 380.5~390.4cm에서는 부석들이 생물교란된 빨 퇴적상 내에 흩어져 나타난다(Fig. 3C). 이 테프라는 퇴적 당시에 생물교란 작용이 활발했음을 지시한다. 시추퇴적물의 깊이 710.1~711.8cm에서는 부석들이 흩어지지 않고 층에 평행하게 잘 보존되어 있다.

4.3. 테프라 분석

20EEZ-1 시추퇴적물에서는 7개의 테프라가 발견되었으며, 이들은 주요 원소함량과 입자형태, 층서적 위치를 분석하여 기원화산과 분출시기를 해석하였다. 이 테프

라들은 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (Fig. 4A)와 FeO^*-CaO (Fig. 4B) 성분 변화도에 도시하여, 일본 큐슈 지역의 아이라(Aira) 칼데라와 백두산, 한국대지의 해저화산으로부터 폭발적인 화산 분출로 공급된 것으로 해석되었다.

시추퇴적물의 깊이 128~134cm에 나타나는 테프라는 암색의 희미한 층리가 발달된 빨 퇴적상 하부에 발달하며, 상하부의 빨 퇴적물과 뚜렷한 경계를 가진다(Fig. 3A). 이 테프라의 평균입도는 5.5 ϕ 이고, SiO_2 함량은 78.19 wt%이며 총 알카리($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) 함량은 6.31 wt%로 유문암 성분이다(Fig. 4A; Table 1). 이 테프라의 입자는 대부분이 화산유리로 구성된 것이 특징이다(Fig. 5A). 이 테프라의 주요 원소함량은 일본 큐슈 지역의 아이라 칼데라 기원의 AT 테프라에 대비된다(Fig. 4A; Machida and Arai, 2003). AT 테프라는 29.24 ka이 분출된 것으로 보고되었다(Kitagawa and van der Plicht, 1998). 울릉분지에서 채취된 시추퇴적물에서는 AT 테프라가 최후최대빙하기에 형성된 저탁류층 하부에 위치하며(Chun *et al.*, 1997; Chun *et al.*, 2004), 오키해령에서 해양굴착프로그램(Ocean Drilling Program, ODP)에 의해서 채취된 시추공 797에서는 최후최대빙하기에 형성된 암색의 희미한 층리가 발달된 빨 퇴적상 하부에서 발견되었다(Tada *et al.*, 1999). AT 테프라층은 20EEZ-1 시추퇴적물에서도 암색의 희미한 층리가 발달된 빨 퇴적상 하부에 발달하는데, 상부의 빨 퇴적상은 최후최대빙하기 시기에 형성되었음을 지시하는 것이다. 울릉분지에서 채취된 시추퇴적물에 포함된 AT 테프라는 2.0~3.7 cm의 두께인데(Chun *et al.*, 1997), 기원 화산으로부터 먼 거리에 위치하는 20EEZ-1 시추퇴적물에서는 6.0 cm로 더욱 두껍게 발달한다. 울릉분지에서 채취된 시

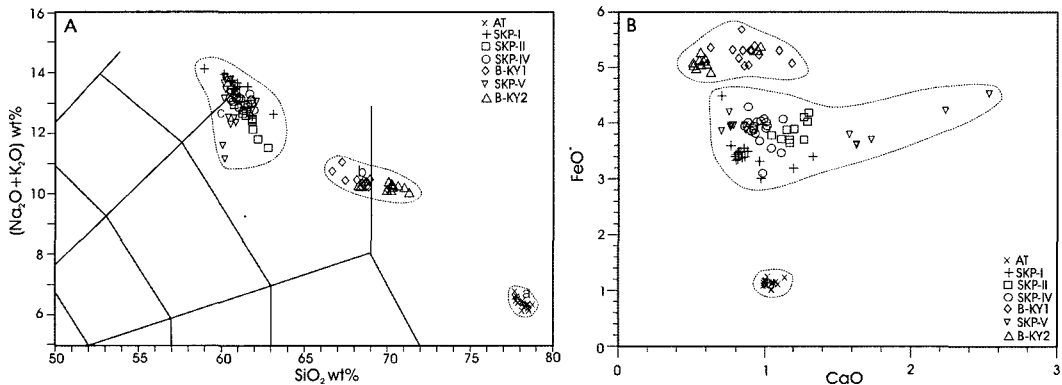


Fig. 4. Geochemical variations of tephra samples in the core 20EEZ-1 by microprobe analysis. (A) Total alkali-silica diagram. (B) FeO^* versus CaO . FeO^* expressed as total iron. The a and b data is from Machida and Arai (2003). The c data is from Chun *et al.* (1998).

Table 1. Electron microprobe analyses of major element compositions in tephra samples of the core 20EEZ-1 in the Kita-Yamato Trough, East Sea/Japan Sea. Means of *n* analyses normalized to 100 wt%, water free. Standard deviations in parentheses. FeO* expressed as total iron.

Depth (cm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	<i>n</i>	Tephra
128-134	78.19 (0.51)	13.09 (0.17)	0.09 (0.06)	1.13 (0.06)	0.04 (0.02)	0.11 (0.02)	1.04 (0.04)	3.05 (0.44)	3.26 (0.10)	19	AT
203.6-205.1	60.97 (0.73)	20.87 (0.47)	0.03 (0.04)	3.46 (0.30)	0.27 (0.05)	0.05 (0.06)	0.88 (0.16)	7.90 (0.55)	5.57 (0.29)	17	SKP-I
380.5-390.4	61.67 (0.52)	20.28 (0.40)	0.13 (0.12)	3.86 (0.18)	0.19 (0.04)	0.23 (0.06)	1.19 (0.08)	6.43 (0.30)	6.01 (0.24)	12	SKP-II
567.7-570.5	61.11 (0.46)	20.55 (0.27)	0.08 (0.07)	3.87 (0.26)	0.23 (0.03)	0.07 (0.04)	0.96 (0.07)	7.66 (0.18)	5.47 (0.15)	19	SKP-IV
611.5-615.6	68.45 (0.94)	14.70 (0.05)	0.17 (0.05)	5.20 (0.30)	0.17 (0.02)	0.05 (0.03)	0.90 (0.13)	5.33 (0.28)	5.05 (0.21)	14	B-KY1
710.1-711.8	60.58 (0.63)	20.63 (0.44)	0.15 (0.14)	3.96 (0.25)	0.23 (0.06)	0.28 (0.33)	1.26 (0.62)	7.11 (1.39)	5.79 (0.70)	14	SKP-V
800.5-801.0	70.08 (0.92)	13.68 (0.56)	0.16 (0.08)	5.11 (0.13)	0.14 (0.03)	0.01 (0.02)	0.63 (0.16)	5.27 (0.12)	4.92 (0.13)	12	B-KY2

추퇴적물에 포함된 AT 테프라의 중간입자크기는 2.5~3.0 phi이며, 20EEZ-1 시추퇴적물에서는 5.5 phi로 감소하였다. AT 테프라의 입자 크기와 두께 자료는 울릉분지에서 발견된 AT 테프라층이 퇴적 이후에 침식되어 삭박되었을 가능성을 지시하는 것으로 해석된다.

시추퇴적물의 깊이 203.6~205.1cm에서 발견된 테프라는 육안으로는 관찰되지 않고 X선 자료에서만 확인되었다. 이 테프라는 생물교란된 빨 퇴적상에 포함되어 있으며, 테프라의 경계가 불분명하다. 테프라의 평균 입도는 6.89 phi이며, SiO₂ 함량은 60.97 wt%이고 총 알카리 함량은 13.47 wt%로 조면암 성분이다 (Fig. 4A; Table 1). 이 테프라는 부석과 광물로 구성되어 있다 (Fig. 5B). 이 테프라는 주요 원소함량과 테프라의 층서적인 위치가 한국대지의 해저화산 기원의 SKP-I 테프라에 대비된다 (Chun *et al.*, 2004). 울릉분지에서 채취된 시추퇴적물에 포함된 SKP-I 테프라는 평균입도가 0.4 phi이고 57.7cm 두께로, 생물교란 작용을 받은 희미한 층리가 발달된 빨 퇴적상이 테프라 상부에서 관찰되었다 (Chun *et al.*, 2004). 20EEZ-1 시추퇴적물에서도 SKP-I 테프라 상부에서는 생물교란 작용이 발달된 희미한 층리가 발달된 빨 퇴적상이 나타난다. SKP-I 테프라는 MIS 3에 분출된 것으로 해석되었다 (Chun *et al.*, 2004).

시추퇴적물 깊이 380.5~390.4cm에서 발견된 테프라는 직경 5~19 mm의 부석들이 생물교란된 빨 퇴적상 내에 흩어져 있다 (Fig. 3C). 이 테프라는 SiO₂ 함량이 61.67 wt%이고 총 알카리 함량은 12.44 wt%로 조면암 성분이다 (Fig. 4B; Table 1). 이 테프라는 주요

원소함량과 층서적 위치가 한국대지의 해저화산 기원의 SKP-II 테프라에 대비된다 (Chun *et al.*, 2004). SKP-II 테프라는 하부에 10cm 이상 두께의 희미한 층리가 발달된 빨 퇴적상이 잘 보존되어 있으며, 분출 시기는 MIS 4로 해석되었다 (Chun *et al.*, 2004).

시추퇴적물 깊이 567.7~570.5cm에서 확인된 테프라는 X선 자료에서 확인되었다 (Fig. 3D). 이 테프라는 층을 구성하지만, 상하부 경계면이 분명하지 않다. 이 테프라는 평균입도가 8.93 phi로 주로 실트 크기의 부석으로 구성되어 있으며 (Fig. 5D), SiO₂ 함량이 61.11 wt%이고 총 알카리 함량은 13.13 wt%로 조면암 성분이다 (Fig. 4B; Table 1). 테프라는 하부의 황철석이 발달된 생물교란된 빨 퇴적상과 상부의 생물교란 형태를 구별할 수 없는 빨 퇴적상 사이에 발달한다 (Fig. 3D). 이 테프라는 주요 원소함량과 층서적 위치가 SKP-IV 테프라에 대비된다 (Chun *et al.*, 2004). 울릉분지에서 채취된 시추퇴적물에서도 MIS 6시기에 형성된 황철석이 포함된 생물교란된 빨 퇴적상과 MIS 5e 시기의 생물교란 형태를 구분할 수 없는 퇴적상 사이에 SKP-IV 테프라가 3.5cm 두께로 관찰되었다 (Chun *et al.*, 2004).

시추퇴적물 깊이 611.5~615.6cm에서 발견된 테프라는 상부의 황철석이 포함된 생물교란된 빨 퇴적상과 하부의 희미한 층리가 발달된 빨 퇴적상 사이에서 경계면이 뚜렷하게 발달한다. 이 테프라의 평균입도는 6.32 phi이고, SiO₂ 함량은 68.45 wt%이고, 총 알카리 함량은 10.38 wt%로 유문암 성분이다 (Fig. 4A; Table 1). 이 테프라는 화산유리와 부석들이 혼합되어 구성되어 있다 (Fig. 5E). 이 테프라는 주요 원소함량과 입자 형태는

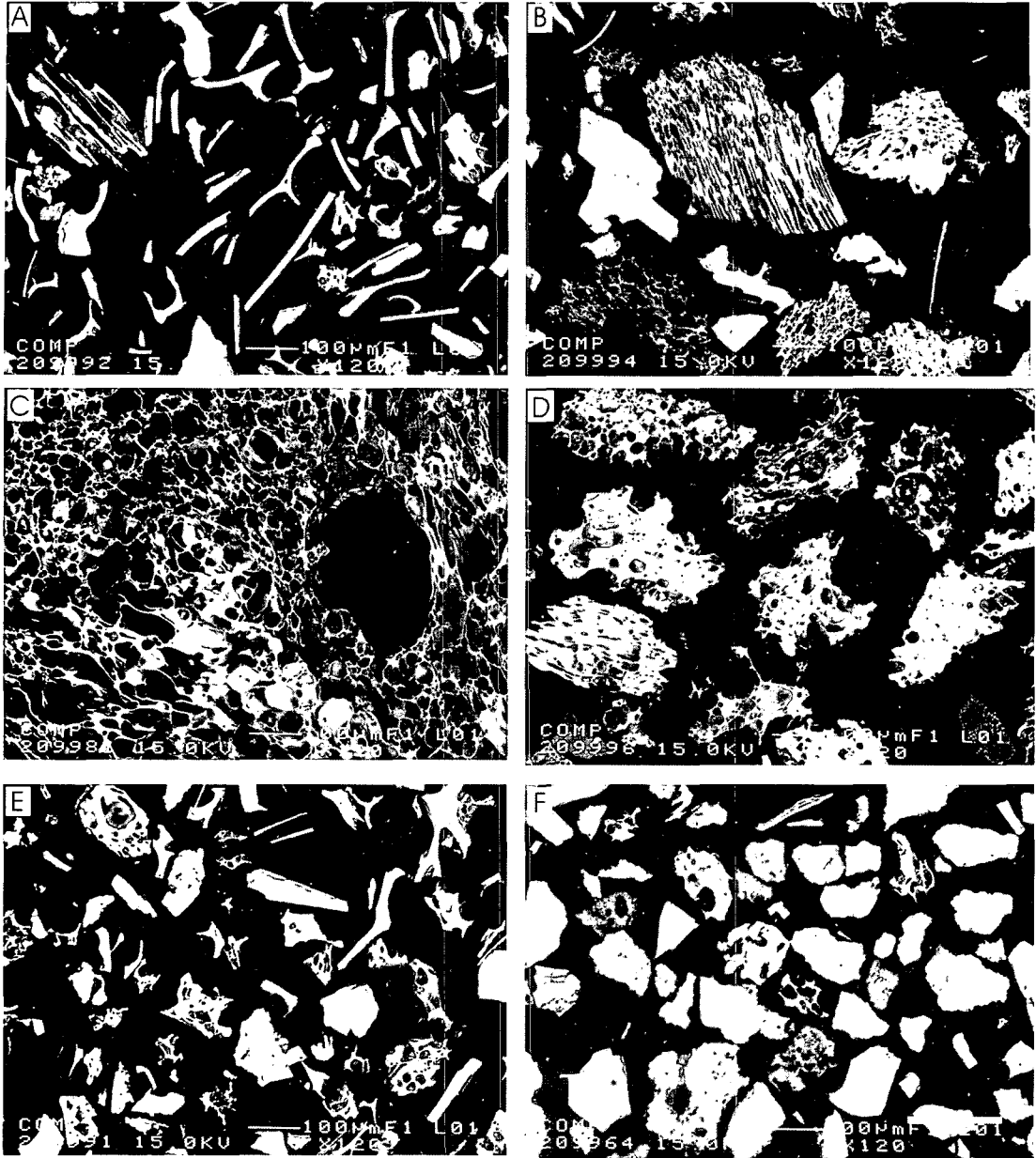


Fig. 5. Backscattered electron images of the thin sections for tephra samples collected from core 20EEZ-1. (A) AT, (B) SKP-I, (C) SKP-II, (D) SKP-IV, (E) B-KY1, (F) B-KY2.

백두산 기원의 테프라에 대비되는데(Machida and Arai, 2003), 일본분지에서 채취된 ODP 794A 시추공에서 발견된 약 130 ka의 백두산 기원 테프라와 대비 할 수 있다(Shirai *et al.*, 1999). 이 테프라는 아직까지 명칭이 없어, 이 연구에서는 임시적으로 Baegdusan-Kita Yamato 1 (B-KY1)로 명명하였다.

시추퇴적물 깊이 710.1~711.8m에서 관찰된 테프라는 약 30cm 두께의 희미한 층리가 발달된 퇴적상 내에 발달한다(Fig. 3E). 이 테프라는 최대 크기가 20 mm인 부석으로 구성되어 있으며, 층에 평행하게 배열되어 있다. 이 테프라는 SiO₂ 함량이 60.58 wt%이고 총 알카리 함량은 12.90 wt%로 조면암 성분이다

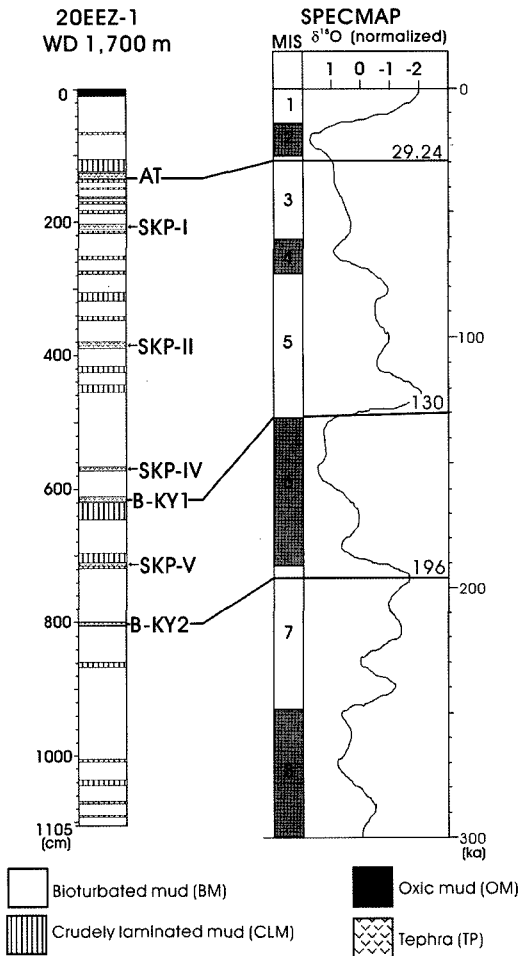


Fig. 6. Tephrostratigraphy in the core 20EEZ-1 obtained from the Kita-Yamato Trough.

(Fig. 4A; Table 1). 이 테프라는 주요 원소함량과 입자 형태에 의해서 한국대지에 위치하는 해저화산 기원으로 해석되며, 이 연구에서 처음으로 확인되는 테프라로 임시적으로 SKP-V로 명명하였다. 동해 시추퇴적물에는 저해수면시기에 형성된 무산소 환경으로 두꺼운 회미한 층리가 발달된 빨 퇴적상이 형성되었다(Oba *et al.*, 1991). 20EEZ-1 시추퇴적물에서도 MIS 2시기에 형성된 두꺼운 회미한 층리가 발달된 빨 퇴적상이 AT 테프라 상부에 발달한다(Fig. 3A). SKP-V 테프라가 발달된 두꺼운 회미한 층리가 빨 퇴적상은 MIS 6 시기에 형성된 것으로 해석된다.

시추퇴적물 깊이 800.5~801.0cm에서 발달된 테프라는 회미한 층리가 발달된 빨 퇴적상 내에 발달하지만, 0.5cm 미만의 두께로 경계가 불분명하다. 이 테프

라는 평균입도가 8.59 phi이며, SiO₂ 함량은 70.08 wt%이고 총 알칼리 함량은 10.19 wt%로 조면암과 알칼리 유문암 성분에 도시된다(Fig. 4A; Table 1). 이 테프라는 대부분이 부석과 광물로 구성된다(Fig. 5F). 이 테프라의 주요 원소함량은 백두산 기원의 테프라와 대비되며, B-KY1 테프라에 비해서 SiO₂ 함량이 높게 나타난다. 이 테프라는 야마토분지에서 채취된 ODP 797A 시추공의 약 196 ka의 백두산 기원 테프라에 대비할 수 있다(Shirai *et al.*, 1999). 이 테프라는 아직까지 명칭이 없어, 이 연구에서는 임시적으로 Baegdusan-Kita Yamato 2 (B-KY2)로 명명하였다.

4.4. 고환경 해석

동해 한국대지에 위치하는 해저화산으로부터 공급된 SKP 테프라는 키타야마토 해곡에서 채취된 20EEZ-1 시추퇴적물에서 4매가(SKP-I, SKP-II, SKP-IV, SKP-V)가 확인되었다(Fig. 6). 이에 반해 울릉분지와 한국대지에서 채취된 시추퇴적물에서 보고된 울릉도 기원의 테프라는 발견되지 않았다(천중화 등, 1998; Chun *et al.*, 1997; Chun *et al.*, 2004). 울릉도의 폭발적인 화산활동으로 공급된 테프라는 일본열도의 육상 퇴적층에서 관찰되었는데(Machida and Arai, 2003), 울릉도에서 키타야마토 해곡까지는 이보다 짧은 거리이다. 이것은 울릉도 기원의 테프라들이 분출 당시의 편서풍 영향에 의해서 대부분 동쪽으로 이동되었으며, 울릉도로부터 북동쪽에 위치하는 키타야마토 해곡으로는 이동되지 않음을 지시한다. 그리고 울릉분지와 한국대지에서 채취된 시추퇴적물에서는 해저화산 기원의 SKP 테프라들이 발견되었는데(천중화 등, 1998; Chun *et al.*, 2004), 키타야마토 해곡에서 채취된 20EEZ-1 시추퇴적물에서도 SKP 테프라가 다수 확인되었다. 이것은 울릉도 기원의 테프라와는 달리 SKP 테프라는 해류에 의해서 이동된 것으로, 20EEZ-1 시추퇴적물에 포함된 SKP 테프라의 입도와 두께의 변화는 화산 폭발력과 함께 해류의 세기 또는 방향 변화에 의한 것으로 추정된다.

백두산 기원의 테프라는 약 1,000년 전에 공급된 B-Tm 테프라가 잘 알려져 있으며, 이 테프라는 동해 시추퇴적물과 일본 육상의 퇴적층에서도 잘 보존되어 있다(Machida and Arai, 2003). 이 연구에서는 백두산 기원의 테프라들이 약 130 ka와 약 196 ka에 키타야마토 해곡으로 공급되었음을 밝혔다(Fig. 6). 그러나 이 시추퇴적물에서는 약 1,000년 전에 백두산으로부터 기원된 B-Tm 테프라는 발견되지 않는다. 이것은 후기 플

라이스트세 분출 시기에는 홀로세에 비해서 백두산으로부터의 편서풍의 방향이 남동쪽으로 치우쳐져 있었음을 지지하는 것이다.

5. 결 론

동해 중부에 위치하는 키타-야마토 해곡에서 천부지층탐사 자료를 이용하여 테프라층서와 고환경 연구를 할 수 있는 해령정상부의 20EEZ-1 시추퇴적물을 채취하였다. 해령정상부는 측면연속성이 매우 양호하고, 뚜렷한 해저 표층 반사파와 내부 반사파가 나타나는 탄성파상 KY-III이 발달한다. 20EEZ-1 시추퇴적물은 원양성 또는 반원양성 퇴적물로 구성되어 있으며, 폭발적인 화산활동에 의해서 공급된 테프라가 잘 보존되어 있다. 이 시추퇴적물에서 확인된 테프라는 일본 큐슈 지역의 아소 칼데라로부터 29.24 ka에 공급된 AT 테프라, 한국 대지에 위치하는 해저화산으로부터 기원된 SKP-I (MIS 3), SKP-II (MIS 4), SKP-IV (MIS 6와 MIS 5e 경계) 테프라이다. 그리고 이 연구에서는 한국대지의 해저화산으로부터 기원된 SKP-V (MIS 6) 테프라와 백두산 기원의 B-KY1 (약 130 ka), B-KY2 (약 196 ka) 테프라가 새로이 발견되었다.

20EEZ-1 시추퇴적물은 테프라층서 복원에 의해서 MIS 7 시기 동안에 형성된 것으로 해석된다. 백두산 기원의 테프라는 후기 플라이스토세 동안에 백두산으로부터의 편서풍의 방향이 홀로세에 비해서 남동쪽으로 치우쳐져 있었음을 지지한다. 이것은 20EEZ-1 시추퇴적물에 약 1,000년 전에 백두산 기원의 B-Tm 테프라가 발견되지 않는 것과 약 130 ka와 약 196 ka의 백두산 기원 테프라의 발견에 의해서 추정 할 수 있다. 그리고 울릉분지와 한국대지에서 채취된 시추퇴적물에서는 울릉도 기원의 테프라들이 흔히 관찰되지만, 20EEZ-1 시추퇴적물에서는 울릉도 기원의 테프라가 발견되지 않았다. 이것은 울릉도 기원의 테프라의 공급이 키타-야마토 해곡까지 미치지 않았음을 지지하며, 울릉도 기원 테프라의 분출 당시의 대기환경에 의해서 키타-야마토 해곡까지의 테프라 공급이 제한된 것으로 해석된다. 한국대지에 위치하는 해저화산으로부터 기원된 SKP 테프라는 키타-야마토 해곡에서도 잘 관찰되는데, 이것은 해저화산 분출 당시에 한국대지로부터 키타-야마토 해곡으로 향하는 해류가 있었음을 지지하는 것이다. 동해 중부의 키타-야마토 해곡에서의 테프라 연구는 시추퇴적물의 테프라층서 복원과 함께, 주변 화산들의 분출 당시의 대기환경과 해양환경을 밝힐 수 있는 중요한 단서

임이 밝혀졌다.

사 사

이 연구는 학술진흥재단의 신진연구자 연구지원사업 (M02-2004-000-20253-0)과 한국해양연구원의 “동해 고기후 및 고해양 변동의 시간적·공간적 분석(PE93000)” 연구사업에서 지원받았다. 이 논문에 이용된 시추퇴적물과 지구물리탐사 자료는 해양수산부의 “2000 배타적 경제수역 해양자원조사(PM31600)” 연구사업에서 획득된 것이다. 이 논문의 심사에 유익한 조언을 주신 오재호 박사님과 윤석훈 교수님께 감사를 드린다.

참고문헌

- 윤석훈, 이희준, 한상준, 김성렬 (1996) 동해 대륙사면(삼척-양양)에서의 제4기 퇴적작용. 대한지질학회지, v. 32, p. 250-266.
- 천종화, 한상준, 정대교, 허식, 박장준, 최동립 (1998) 동해 울릉분지 북동부 해저수로 주변 퇴적층의 화산재층서. 대한지질학회지, v. 34, p. 192-210.
- 허식, 유해수, 박찬홍, 한상준, 주형태 (2001) 동해 키타-야마토 뱅크 주변 해역의 지질구조 및 퇴적층서 해석. 한국석유지질학회지, v. 9, p. 16-23.
- Arai, F., Oba, T., Kitazato, H., Horibe, Y. and Machida, H. (1981) Late Quaternary tephrochronology and paleo-oceanography of the sediments of the Japan Sea. The Quaternary Research, v. 20, p. 209-230.
- Bahk, J.J., Chough, S.K., Han, S.J. (2000) Origins and paleoceanographic significance of laminated muds from the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). Marine Geology, v. 162, p. 459-477.
- Chun, J.H., Han, S.J. and Cheong, D.K. (1997) Tephrostratigraphy in the Ulleung Basin, East Sea: Late Pleistocene to Holocene. Geoscience Journal, v.1, p. 154-166.
- Chun, J.H. (2003) Evidence for the late Quaternary volcanic eruptions of the SKP submarine volcano in the Korea Plateau, East Sea/Japan Sea: Proceeding of the XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics. Sapporo, June 30-July 11, p. A522.
- Chun, J.H. and Ikehara, K. (2003) Source and correlation of the U-Ym tephra based on chemical composition, distribution, and microtexture of vesicles: Proceeding of the Japan Association for Quaternary Research, Osaka, August 29-September 1, p. 64-65.
- Chun, J.H., Ikehara, K. and Han, S.J. (2004) Evidence in Ulleung Basin Sediment Cores for a Termination II (Penultimate Deglaciation) Eruption of the Aso-3 Tephra. The Quaternary Research, v. 43, p. 99-112.
- Damuth, J.E. (1980) Use of high-frequency (3.5-12 kHz) echograms in the study of near-bottom sedimentation processes in the deep-sea: a review. Marine Geology, v. 38, p. 51-75.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jansen,

- D., Gundestrup, N.S., Hummer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjornsdottir, A.E., Jouzel, J. and Bond, G. (1993) Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, v. 364, p. 218-220.
- Ichikura, M. and Juie, H. (1976) Lithology and planktonic foraminifera of the Sea of Japan piston core. *Bulletin of Science Museum Series Japan*, v. 2, p. 151-178.
- Kitagawa, H. and van der Plicht, J. (1998) A 40,000-year varve chronology from Lake Suigetsu, Japan: Extension of the radiocarbon calibration curve. *Radiocarbon*, v. 40, p. 505-516.
- Lysá, A., Sejrup, H.P. and Aarseth, I. (2004) The late glacial-Holocene seismic stratigraphy and sedimentary environment in Ranafjorden, northern Norway. *Marine Geology*, v. 211, p. 45-78.
- Machida, H. and Arai, F. (2003) Atlas of Tephra in and around Japan (revised edition). University of Tokyo Press, 336p.
- Muza, J.P. (1992) Calcareous nannofossil biostratigraphy from the Japan Sea, Sites 798 and 799: evidence for an oscillating Pleistocene oceanographic frontal boundary: *Proceedings of Ocean Drilling Program Scientific Results 127/128, Pt. 1*, p. 155-170.
- Nakajima, T., Kikkawa, K., Ikehara, K., Katayama, H., Kikawa, E., Joshima, M. and Seto, K. (1996) Marine sediments and late Quaternary stratigraphy in the southeastern part of the Japan Sea-Concerning the timing of dark layer deposition. *Journal of Geological Society of Japan*, v. 102, p. 125-138.
- 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*, v. 6, 499-518.
- Poulet, A. and Scott, S.D. (1992) Volcanic ash layers in the Japan Sea: tephrochronology of sites 798 and 799: *Proceedings of Ocean Drilling Program Scientific Results 127/128, Pt. 1*, p. 791-803.
- Shirai, M., Tada, R. and Fujioka, K. (1999) Widespread tephra sampled from the middle-upper Pleistocene at eastern Japan Sea. *Proceeding of the Japan Association for Quaternary Research, Kyoto, August 23-25*, p. 160-161.
- Tada, R., Irino, R. and Koizumi, I. (1999) Land-ocean linkages over orbital and millennial timescales recorded in late Quaternary sediments of the Japan Sea. *Paleoceanography*, v. 14, p. 236-247.
- Thomsen, E. and Vorren, T.O. (1984) Pyritization of tubes and burrows from late Pleistocene continental shelf sediments off north Norway. *Sedimentology*, v. 31, p. 481-492.