J. Korean Earth Sci. Soc., v. 43, no. 6, p. 680–690, December 2022
https://doi.org/10.5467/JKESS.2022.43.6.680

ISSN 1225-6692 (printed edition)
ISSN 2287-4518 (electronic edition)

Review

한국의 육상에서 발견되는 광역테프라층의 지질학적 활용과 한계

김정빈[1] · 김영석[2] · 임현수[3,*]

[1]순천대학교 물리교육과, 57922, 전라남도 순천시 중앙로 255
[2]부경대학교 지구환경과학과, 48513, 부산광역시 남구 용소로 45
[2]부산대학교 지질환경과학과, 46241, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

Geological Applications and Limitations of Regional Tephra Layers in Terrestrial Deposits in Korea

Cheong-Bin Kim[1], Young-Seog Kim[2], and Hyoun Soo Lim[3,*]

[1]Department of Phycics Education, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea
[2]Department of Earth & Environment Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea
[3]Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Abstract: Tephrochronology uses regional tephra for age dating and stratigraphic correlations. Regional tephras are important in Quaternary geology and archaeology because they can be used as stratigraphic time-markers. In this review, identification and dating methods of tephra are summarized. In addition, the characteristics of regional tephras in terrestrial deposits of the Korean Peninsula are elaborated, and geological applications and limitations of the regional tephra layers are also discussed. So far, AT, Ata, and Kb-Ks tephra layers from Kyushu, Japan have been found in Pleistocene paleosol, marine terrace deposits, and lacustrine deposits in Korea. Also, although not officially confirmed, Aso-4 tephra is likely to occur in terrestrial deposits. The regional tephra layers are vital for dating, especially with regard to sediments over 50 ka beyond the range of radiocarbon dating, and for dating of active faults. Furthermore, it can provide important information for preparing countermeasures against volcanic disasters. However, in order to use the tephra layer geologically, it must be confirmed whether it is a primary deposit based on sedimentological study.

Keywords: tephrochronology, regional tephra, AT tephra, Ata tephra, Kb-Ks tephra

요 약: 테프라연대학은 광역테프라를 연대측정과 층서대비에 이용하는 연구이다. 광역 테프라층은 층서적 건층으로 사용될 수 있기 때문에 제4기지질학과 고고학 분야에서 매우 중요하다. 이 논평에서는 테프라의 동정 방법과 연대측정 방법에 대해 정리하였다. 또한 한반도의 육상퇴적층에서 발견되는 광역테프라층의 종류와 산출 특성에 대해 정리하였고, 광역테프라층의 지질학적 활용 방법과 한계점에 대해서도 토의하였다. 지금까지 한반도 육상의 고토양층, 해안단구 퇴적층, 호수퇴적층에서는 일본 큐슈 기원의 AT와 Ata, Kb-Ks 테프라가 발견되었다. 또한 공식적으로 발견되지는 않았지만 Aso-4 테프라도 발견될 가능성이 높은 것으로 판단된다. 광역테프라층은 제4기 퇴적층, 특히 방사성탄소연대측정의 범위를 넘는 5만년 이상 퇴적층의 연대측정과 층서대비에 유용하며, 활성단층의 연대측정과 화산재해에 대한 대응책 마련에도 유용한 정보를 제공한다. 하지만 테프라층을 지질학적으로 이용하기 위해서는 퇴적학적 연구를 통해 일차퇴적 여부에 대한 확인이 필요하다.

주요어: 테프라연대학, 광역 테프라, AT 테프라, Ata 테프라, Kb-Ks 테프라

*Corresponding author: tracker@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-2251

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

테프라(tephra)는 화산 분출 시 화산쇄설성 물질들이 바람에 의해 이동되어 퇴적된 층으로 화구로부터 최대 수천 km 거리까지 운반될 수 있다. 테프라는 해양과 육상 등 퇴적환경에 관계없이 지질학적으로

동일한 시기에 쌓이기 때문에 층서적 건층(keybed or time-marker)으로 간주할 수 있어 퇴적층의 연대측정이나 층서 대비에 유용하다.

테프라는 크기에 따라 화산재(<2 mm), 라필리(2-64 mm), 화산력 또는 화산탄(>64 mm)으로 구분하는데, 테프라연대학(tephrochronology)에서는 주로 화산재를 이용한다. 지금까지 국내에서는 '화산재'와 '테프라'라는 용어가 혼용되어 왔지만, 이 논평에서는 혼동을 피하기 위해 '테프라'라는 용어를 사용하였다. 테프라층은 고생대 오르도비스기(e.g., Kolata et al., 1996)에서부터 현생까지 여러 지역에서 발견되고 있지만, 연대측정이나 층서대비에 이용할 수 있는 것은 주로 넓은 지역에 분포하는 광역 테프라(regional tephra)이다. 광역테프라가 분포하는 지역은 북미, 유럽, 일본, 동아프리카, 뉴질랜드, 남태평양 및 남극 등이다(Lim et al., 2006).

지금까지 한국의 테프라 연구는 주로 동해의 해양퇴적물에서 이루어졌다(e.g., Chun et al., 1997, 1998, 2004; Park et al., 2003). 육상의 경우 대부분 불연속적인 퇴적층이기 때문에 해양퇴적물에 비해 광역테프라층의 산출이 상대적으로 미약하지만 1998년 아이라-탄자와(Aira-Tanzawa, AT) 테프라가 처음 공식적으로 보고된 이후 지속적인 연구가 수행되고 있다(e.g., Yi et al., 1998; Danhara et al., 2002; Lim et al., 2006, 2007; Kim et al,, 2021).

이 논평에서는 광역테프라층의 동정방법과 연대측정 방법에 대해 한국의 상황을 중심으로 정리하였다. 또한 한반도의 육상퇴적층에서 산출되는 테프라층의 종류와 특성에 대해 정리하였고, 광역테프라층의 지질학적 활용방법과 한계점에 대해서도 토의하였다.

연구 방법

(1) 테프라층의 동정

퇴적물 내에서 산출되는 테프라층의 기원 화산을 확인하는 방법에는 야외조사와 테프라층에 포함된 화산유리(volcanic glass)의 형태학적 특징, 화산유리와 함께 산출되는 수반광물 분석, 화산유리의 지화학조성 분석과 굴절률(refractive index) 측정 등이 있다. 테프라층의 기원을 보다 정확하게 동정하기 위해서는 가능한 두 가지 이상의 방법을 이용하여 중복 확인하는 것이 좋은데, 한국의 육상에서 산출되는 테프라는 주로 장거리를 이동해서 쌓였기 때문에 화산유리의 지화학조성과 굴절률을 함께 측정하는 것이 바람직하다.

화산유리의 굴절률

특정 화산에서 분출된 화산유리들은 일정한 고유 범위의 굴절률을 가지고 있어 테프라층의 동정에 이용될 수 있다. 이 방법은 테프라연대학의 초기단계에 주로 이용되던 방법으로 현미경 하에서 표준용액(index oil)을 이용하여 굴절률을 측정하였다. 하지만 화산유리의 굴절률 측정은 시간이 많이 소요되고 부정확하며 화산유리의 굴절률 범위가 넓어 다른 테프라층에서 기원한 화산유리의 굴절률 범위가 중복될 수 있다는 문제점을 가지고 있다. 또한 2만년 이내의 연대를 갖는 화산유리들은 수화(hydration) 정도에 따라 굴절률이 바뀌게 되는데(Steen-McIntyre, 1975), 일반적으로 화산유리의 수분함량이 높을수록 굴절률이 증가하는 경향을 보인다(Ross and Smith, 1955).

하지만 1960년대 후반부터 전자현미분석기(electron microprobe; EPMA)가 보급되면서 화산유리의 주원소 조성을 이용하는 방법이 주로 사용되고 있다(e.g., Smith and Westgate, 1969). 이는 EPMA를 이용한 주원소 분석이 빠르고 간단하기 때문이다. 하지만 일본에서 화산유리의 굴절률과 온도의 관계를 고려하여(thermal immersion method) 굴절률을 정확하게 (±2×10-4) 측정하는 장비(Refractive Index Measuring System: RIMS)가 개발되면서 굴절률을 이용한 동정방법은 여전히 많이 사용되고 있다(Danhara et al., 1992; Nakamura et al., 2002). 굴절률에 영향을 주는 수화에 의한 현상도 가열이나 불산처리로 수화된 주변부를 제거하는 방식으로 극복되었다. 화산유리의 굴절률 측정을 직접 하는 것은 많은 시간이 소요되므로 상업적인 분석기관(Kyoto Fission Track Company)을 이용하는 것이 바람직하다.

화산유리의 지화학조성

화산유리의 지화학조성을 이용하는 방법은 테프라층의 동정에 가장 많이 이용되고 있는데, 일반적으로 EPMA를 이용하여 테프라층에서 산출되는 화산유리의 주원소 조성을 분석한 후 통계적으로 처리하게 된다(Smith and Westgate, 1969). 보통 63-500 μm 입도 범위의 퇴적물에서 자성분리와 중액분리법을 이용하여 화산유리를 분리한 후, 에폭시에 마운팅하고 연마한 후 시료당 10개 이상의 화산유리를 분석한다

(Froggatt, 1992). 분석을 통해 SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, FeO (total Fe), MnO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O 등 9-10개의 주원소에 대한 wt.% 함량비를 얻게 된다. 주의할 점은 수화현상이 심할수록 LOI (loss on ignition) 값이 증가하기 때문에, 분석총량이 95% 이상인 값들만을 선택해야하며, 이차적인 수화의 영향을 배제하기 위해 100%로 재계산한 값을 사용하는 것이 바람직하다(Froggatt, 1983). 화산유리는 지표근처에 노출될 경우 쉽게 변질되므로 주원소 조성을 절대적인 기준으로 사용하기 어렵고, 분석조건에 따라 값이 달라질 수 있으므로 주의가 필요하다. 화산유리의 EPMA 분석시 주의점과 분석방법에 대해서는 구체적인 조건이 제시된 바 있다(Froggatt, 1992; Hunt and Hill, 1996),

화산유리의 주원소 조성을 분석한 후에는 기존에 알려진 자료들을 그래프(Harker and triangular plots)에 함께 도시하여 비교할 수 있지만, 보다 정확한 동정을 위해 상관계수(similarity coefficient; SC)를 이용하여 정량적으로 비교하는 방법이 사용된다 (Borchardt et al., 1972; Sarna-Wojcicki et al., 1987). SC는 아래와 같은 식으로 얻을 수 있다.

$$d_{(A,B)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_i}{n}$$

$d_{(A,B)}=d_{(B,A)}$=similarity coefficient for comparison between sample A and B,

i=element number,

n=numer of elements,

Ri=XiA/XiB if XiB≥XiA; otherwise XiB/XiA,

XiA=concentration of element i in sample A, and

XiB=concentration of element i in sample B.

이론적으로 동일한 기원의 화산유리인 경우 SC값이 1.0이 되어야 하지만, 화산유리의 변질과 3-4%의 분석오차 등에 의해 보통 ~0.96-0.97 정도의 값이 나오는 것으로 알려져 있다(Sarna-Wojcicki et al., 1987). 일반적으로 두 시료에 대한 SC값이 0.95 이상이며 층서적으로 잘 일치한다면 동일한 기원으로 판정한다 (Sarna-Wojcicki and Davis, 1991; Busacca et al., 1992; Hallet et al., 2001; King et al., 2001).

SC값을 계산할 때 중요한 것은 주원소들의 함량이나 분석오차, 풍화에 의한 영향 등을 고려하여 각 원소별로 가중치를 적용하는 것이다. 일반적으로 함량이 높은 원소에 대해서는 1의 가중치를 적용하지만, 함량이 낮거나 이동성이 높은 원소에 대해서는 0.25의 가중치를 적용하거나 제외하게 된다. 예를 들어 Ti와 Mg의 경우 함량비가 낮고 이로 인해 상대적으로 측정오차가 증가할 수 있기 때문에 0.25의 가중치를 적용한다(Rieck et al., 1992; Hallet et al., 2001; King et al., 2001). Cr과 Mn, P의 경우에도 유사한 이유로 SC값 계산에서 제외될 수 있다(Sarna-Wojcicki, 1976; Carson et al., 2002). Na의 경우 분석기술과 장비에 민감하고(Smith and Westgate, 1969; Sarna-Wojcicki et al., 1984), 퇴적환경에서 이동성이 높은 것으로 알려져 있다(Cerling et al., 1985; Sarna-Wojcicki and Davis, 1991). 따라서 SC값 계산 시 Na의 가중치를 0.25로 하거나 아예 제외시키기도 한다(Sarna-Wojcicki and Davis, 1991; Rieck et al., 1992; King et al., 2001; Toms et al., 2004).

광역테프라층을 형성시키는 화산분출은 유문암질 내지는 석영안산암질 마그마에 의한 경우가 많기 때문에 주원소 조성이 유사할 수 있고, 특히 동일 화산에서 다른 시기에 분출한 화산유리의 경우 주원소 조성이 거의 동일할 수 있다는 문제가 있다(Westgate et al., 1994). 이와 같은 경우에는 레이저를 이용한 유도결합플라즈마 질량분석기(LA-ICP-MS)로 화산유리의 미량원소나 희토류원소 조성을 분석하여 이용할 수 있다(Pearce et al., 1996, 1999, 2004). 하지만 미량원소와 희토류원소 조성에 대해서는 충분한 데이터베이스가 구축되어 있지 않아 대비가 어렵다는 문제점이 있다(Lim et al., 2006).

(2) 테프라층의 연대측정

테프라층을 테프라연대학이나 테프라층서학 분야에서 사용하기 위해서는 테프라층의 절대연령, 즉 테프라층을 형성시킨 화산의 분출시기를 알아여 한다. 테프라층의 연대를 측정하는 방법으로는 직접적인 방법과 간접적인 방법이 있다. 직접적인 방법은 테프라층에 포함된 화산유리나 저어콘을 이용하여 핵분열비적연대측정법(fission track dating)으로 연대를 측정하는 것이다(Westgate and Briggs, 1987). 간접적인 방법은 테프라층 상하부층의 연대를 측정하여 테프라층의 퇴적시기를 추정하는 것인데, 일반적으로 테프라층이 5만년 이내인 경우에는 테프라층 상하부에서 산출되는

유기물을 이용하여 방사성탄소연대를 측정하는 것이 가장 정확한 방법이다. 하지만 한반도의 육상에서 발견되는 테프라층은 모두 일본 큐슈지역에서 기원한 것이고, 일본은 화산재연대가 이미 정립되어 있기 때문에 테프라층의 연대를 별도로 측정할 필요는 없다.

한반도 육상에서 산출되는 광역테프라

아이라-탄자와(Aira-Tanzawa; AT) 테프라

AT 테프라는 플라이스토세 후기에 일본 큐슈 남부의 아이라(Aira) 칼데라에서 분출한 유문암질 테프라로 일본과 한국 주변의 육상 및 해양퇴적물에 광범위하게 분포하며, 동 시기에 형성된 광역테프라 중에서 가장 뚜렷한 건층으로 사용된다(Machida and Arai, 1976; 1983; 1992; Machida, 1999). AT 테프라는 지금까지 100회 이상의 방사성탄소연대측정이 실시되었으며, 분출시기는 대략 25 ka로 알려졌다(Matsumoto et al., 1987; Murayama et al., 1993; Miyairi et al., 2004). 이 시기는 MIS(marine isotope stage) 2와 3의 경계부에 해당되므로 고기후학 분야에서도 중요한 의미를 갖는다. 기존 연구에 따르면 AT 테프라층의 형성 시기에 낙엽성 활엽수림에서 아한대의 침엽수림으로 식생의 변화가 보고되었으며, 층서적인 증거들도 추운 기후와 낮은 해수면을 지시하는 것으로 보고되었다(Tsuji and Kosugi, 1991).

AT 테프라는 한국의 육상에서 가장 흔하게 발견되는 화산재이며, 특히 제4기지질학 분야와 구석기고고학 분야에서 많이 사용되고 있다(Yi et al., 1998; Danhara et al., 2002; Lim et al., 2006). AT 테프라는 한국의 플라이스토세 고토양층의 소위 토양쐐기층(soil-wedge layer) 직상부와 쐐기 충진물에서 산출되는 것으로 알려져 있다(Lim et al., 2006, 2007).

아소-4(Aso-4) 테프라

큐슈 중앙부에 위치한 아소 칼데라는 플라이스토세 중기에서 후기까지 많은 분출을 했는데, Aso-4 테프라는 그 중에서 가장 규모가 크고 젊은 테프라층으로 육상에서는 큐슈에서 홋카이도까지, 해양에서는 동해와 북서 태평양까지 광범위한 지역에 퇴적되었다(Machida, 1999). Aso-4 테프라의 분포 면적은 약 4×10^6 km^2으로 AT 테프라와 유사한 것으로 알려져 있다. Aso-4 테프라는 데사이트 조성이며 알칼리 원소 함량이 높은 특징을 가지고 있다. 방사성탄소연대는 약 70-89 ka이지만, Aso-4 테프라는 MIS 5b 또는 5a/5b 경계부에서 발견되기 때문에 89±7 ka의 K-Ar 연대가 가장 신뢰도가 높은 것으로 보고되었다(Oba, 1991).

Choi et al. (2005)은 한반도 남동부의 단구퇴적층에서 Aso-4와 Ata 테프라의 혼재층, Aso-4 테프라의 함유층을 발견하였다고 보고하였으나, 화산유리의 굴절률과 지화학조성 등의 자료가 구체적으로 제시되지 않아 공식적으로 인정하기 어렵다. 하지만 Aso-4 테프라의 최대 확산범위가 1500 km (Machida, 2002)에 달하는 것으로 알려져 있으므로, 향후 후속 연구를 통해 한반도 육상에서 충분히 발견될 수 있을 것으로 예상된다.

기카이-토주라하라(Kikai-Tozurahara, K-Tz) 테프라

기카이 칼데라에서 기원한 것으로 알려진 유문암질의 K-Tz 테프라는 큐슈 남부에서 혼슈 동부와 태평양까지 넓은 지역에서 산출되는 광역테프라층으로, 소위 베타석영(β-Quartz)를 특징적으로 수반하다고 알려져 있다(Machida and Arai, 1992). K-Tz 테프라는 일반적으로 혼슈 중앙부의 온타케(Ontake) 화산에서 기원한 플리니식 테프라인 Ontake 1 테프라층의 직상부에서 발견된다. 두 테프라층은 일본 관동지역 남부 오바라다이(Obaradai) 해안단구 퇴적층에서 발견되기 때문에, 오바라다이 아간빙기(Obaradai interstadial)의 지시자로 알려져 있다(Machida, 1999). K-Tz 테프라의 분출시기는 층서적 위치 및 열루미네선스(thermoluminescence, TL) 연대측정 결과에 의해 약 95 ka로 보고되었다(Machida and Arai, 1992).

Danhara et al. (2002)은 전곡 지역의 플라이스토세 고토양층에서 AT 테프라 함유층 하부에 K-Tz 테프라층이 산출된다고 보고하였다. 당시 K-Tz로 추정되는 화산유리는 단 2개가 발견되었고, 전체적으로 수화되어 있어 굴절률이나 지화학조성에 대한 분석은 전혀 이루어지지 않았다. 그럼에도 불구하고 Danhara et al. (2002)은 같은 층준에서 K-Tz 테프라의 특징인 베타석영이 다수 발견되었다는 이유로 K-Tz 테프라층으로 동정하였으며, 그 후 많은 연구에서 전곡지역 고토양층에서 K-Tz 테프라가 산출되는 것으로 인용되었다(예, Shin et al., 2004). 하지만 테프라층이 일차퇴적 기원인지 재동된 것인지에 대한 명확한 증거 없이 간접적인 증거만을 이용하여, 이를 연대측정과 층서대비에 이용하는 것은 매우 위험하다. 더욱이 일

Table 1. Detailed information of regional tephra layers found in the Quaternary terrestrial deposits in Korea (after Machida, 1999).

Tephra	Age (ka) (method[a])	Marine Isotope Stage	Eruption sequence[b]	Eruption volume (km^3)	Petrographic properties		References
					vol. glass[c]	phenocryst[d]	
AT	24-25 (C)	2-3	p, i, c	>450	bw, pm 1.498-1.501	opx, cpx, (ho, qt) opx 1.728-1.734	Machida & Arai (1976)
Aso-4	84-89 (KA, MIS)	5a-5b	i, c	>600	bw, pm 1.506-1.510	ho, opx, cpx opx 1.699-1.701 ho 1.685-1.691	Machida *et al*. (1985) Ono *et al*. (1977)
K-Tz	90-95 (TL)	5b-5c	pp, i, c	>150	bw, pm 1.494-1.500	opx, cpx, qt opx 1.705-1.709	Machida & Arai (1992) Machida (1999)
Ata	95-110 (MIS)	5c	pp, p, i, c	>300	bw, pm 1.508-1.512	opx, cpx, (ho) opx 1.704-1.708	Machida & Arai (1992)
Kb-Ks	ca. 520 (FT, MIS)	13-14	i, p, i, c	>100	bw, pm 1.504-1.507	bi, ho, (opx) ho 1.677-1.685	Machida and Arai (1992)

Tephra	Major element composition of volcanic glass (wt.%)									No. of analyses	Reference and notes
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O		
AT	77.9	0.13	12.3	1.3	0.04	0.13	1.1	3.6	3.5	46	Furuta *et al*. (1986)
	72.7	0.37	14.6	1.5	0.1	0.4	1.1	4.5	4.7	36	Furuta *et al*. (1986)
Aso-4	74.0	0.45	13.9	1.6	0.1	0.4	1.1	4.4	4.2	20	Machida *et al*. (1985)
	72.0	0.48	15.3	1.7	0.1	0.5	1.5	4.6	3.8	4	bimodal
K-Tz	79.0	0.22	12.0	1.1	0.05	0.2	1.0	3.2	3.2	44	Furuta *et al*. (1986)
Ata	74.7	0.48	13.5	2.2	0.1	0.5	1.9	4.0	2.8	11	Furuta *et al*. (1986)
Kb-Ks	74.7	0.34	14.0	1.3	0.06	0.26	1.1	4.0	4.3	12	Machida (1999)

[a]Dating methods: C=radiocarbon, KA=K-Ar, TL=thermoluminescence, FT=fission-track, MIS=marine isotope stratigraphy
[b]Eruption sequence: arranged in chronological orcer from older to younger. pp=phreato-plinian, c=co-ignimbrite ash, i=ignimbrite, p=plinian
[c]Volcanic galss: pm=pumiceous type, bw=bubble-wall type
[d]Phenocryst: opx=orthopyroxene, cpx=clinopyroxene, ho=hornblende, qt=quartz, bi=biotite (numerals are frefractive indices)

본에서 연구된 K-Tz 테프라의 분포범위와 등층후도(isopach map)를 고려하면 한반도 중부 지역에서 K-Tz 테프라가 발견되기는 어려울 것으로 보인다. 향후 한반도 육상퇴적층에서 K-Tz 테프라가 발견될 가능성을 배제할 수는 없지만, 발견되더라도 한반도 남부에 국한될 것으로 예상되므로, K-Tz 테프라보다는 발견 가능성이 높은 Aso-4 테프라에 집중하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

아타(Ata) 테프라

일본 큐슈 남부의 가고시마만 남쪽 끝부분에서 Ata 칼데라의 폭발에 의해 분출한 유문암질 조성의 Ata 테프라는 해안단구의 층서대비에 유용한 건층으로 사용되어 왔다(Machida, 1999). Ata 테프라는 화산유리와 휘석, 각섬석 등의 중광물로 구성되어 있으며, 분출시기는 전자자기공명(electron spin resonance; ESR)과 열루미네선스(thermoluminescence, TL), K-Ar 연대측정에 의해 약 105-110 ka로 보고되었다(Machida and Arai, 1992). Ata 테프라의 분포지역은 화구로부터 북동쪽 약 500 km까지 발견되는 것으로 보고되었다(Machida, 1999),

Ata 테프라는 Inoue et al. (2002)과 Kim et al. (2006)에 의해 한반도 남동부 지역 해안단구 퇴적층에서 산출되는 것으로 언급되었다. 특히 Kim et al. (2006)은 Ata 테프라가 울산 산하동과 정자동, 포항 용한리와 신창리에서 발견된다고 보고하였으나, 이 논문에서는 Ata 테프라의 산상이나 지화학조성, 굴절률과 같은 구체적인 분석결과가 제시되지 않아 Ata 테프라의 발견에 대해 공식적으로 인정받지 못했다. 하지만 최근 Kim et al. (2021)이 울산 산하동과 정

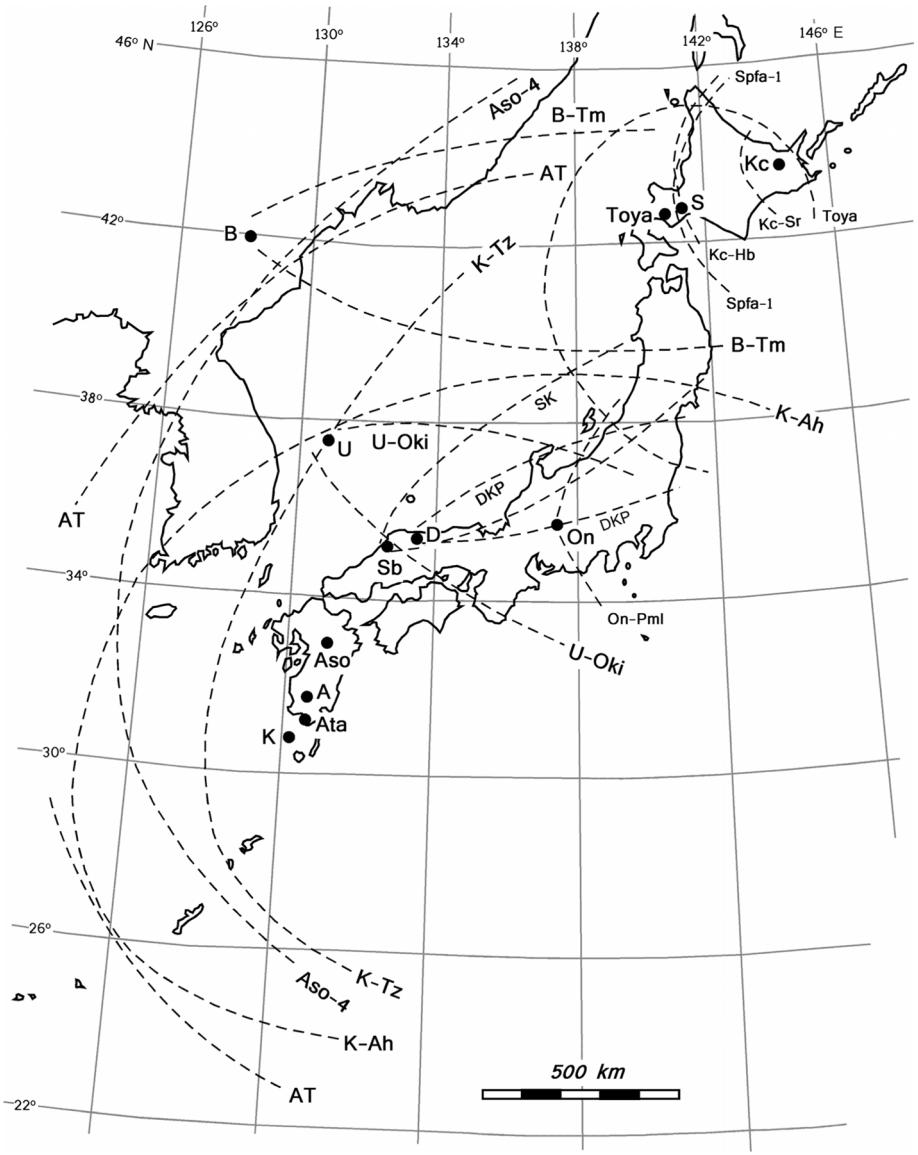

Fig. 1. Map showing the distribution of the representative marker-tephras of the Late Pleistocene in and around Japan (modified from Machida and Arai, 1992). Kc (Kuccharo); S (Shikotsu); On (Ontake); D (Daisen); Sb (Sanbe); A (Aira); K (Kikai); B (Baekdu), U (Ulreung).

자동의 제2단구층에서 산출된 화산유리의 굴절률과 주원소조성 SC값을 이용한 동정 결과를 보고하면서 한반도 육상에서 Ata 테프라의 발견이 공식적으로 인정되었다. 기존 연구에서는 Ata 테프라가 한반도의 부산 인근까지 산출될 수 있는 것으로 보고되었으나 (Machida, 1999), Kim et al. (2021)의 보고로 인해 Ata 테프라의 분포범위가 북쪽으로 최소 40 km 이상 더 확장되었다.

고바야시-카사모리(Kobayashi-Kasamori; Kb-Ks) 테프라

최근 한국 남동부 합천 지역의 적중-초계분지에서 충격원뿔암(shatter cone)과 석영의 변형구조(planar deformation features)가 발견되면서 그 동안 논란이 있었던 분지의 형성기작이 운석충돌에 의한 것임이 밝혀졌다(Lim et al., 2021). 이 분지는 운석충돌 후 호수가 형성되어 두꺼운 호수퇴적물이 퇴적되었는데,

최근 적중-초계분지 66 m 시추코어(20HCL04)의 18.32-18.44 m 구간에서 약 12 cm 두께의 화산재층이 발견되었다. Shin et al. (2022)는 화산재층에서 산출된 화산유리의 굴절률과 주원소조성의 SC값을 이용하여 Kb-Ks 테프라로 동정하였는데, 이는 일본 외의 육상에서 처음으로 보고된 것이다.

흑운모와 각섬석 반정이 함께 산출되는 특징을 가지는 Kb-Ks 테프라는 기원 화구가 정확하지 않지만 가쿠토(Kakuto) 근처의 고바야시 칼데라에서 분화한 것으로 추정된다(Machida and Arai, 1992). Kb-Ks 테프라의 분출시기는 MIS 13과 14의 경계인 약 520-530 ka로 추정되며, 테프라의 분포는 큐슈에서부터 혼슈 동부까지 산출되는 것으로 보고되었다(Machida and Arai, 1992). 테프라층의 두께는 관서지방에서 약 25 cm, 관동지방에서 약 15 cm로 보고되어 AT 테프라층보다 조금 더 두꺼운 것으로 알려졌다(Machida and Arai, 1992).

토 의

한반도 육상에서 산출되는 광역테프라층에 대한 이해

전술한 바와 같이 한반도 육상에서 발견되는 광역테프라는 모두 일본 큐슈 지역의 화산에서 기원된 것이며, 백두산이나 울릉도 기원의 테프라는 육상에서 발견되지 않는다. 기본적으로 테프라는 화산의 폭발적인 분화에 의해 넓은 지역에 퍼지게 되는데, 특히 플리니식 분화(plinian eruption)의 경우 분연주(eruption column)가 10-25 km 이상 수직 상승하며 대류권과 성층권 사이의 대류경계면 부근에서 중성부력이 형성되어 횡적인 장거리 이동이 발생한다(Sparks, 1986, Fero et al., 2009). 테프라의 대기중 확산은 지형분포, 고도별 바람장, 입도 분포, 테프라의 총 분출량 등 다양한 요소의 영향을 받는다(Bonadonna and Houghton, 2005, Costa et al., 2009). 광역테프라의 분포 범위는 일차적으로는 화산폭발의 규모와 분출량에 의해 제어되지만, 분포 지역은 바람의 방향에 의해 결정된다.

화산폭발이 빈번한 일본열도의 경우 한반도 남동쪽에 위치하므로 편서풍이 우세한 정상적인 기상조건하에서 화산이 폭발할 경우 테프라는 한반도 육상에 퇴적되기 어렵고 주로 동쪽으로 확산되어 동해 쪽에 퇴적된다(Lee et al., 2014). 하지만 화산 폭발시 남동풍이나 동풍이 발달하는 특이 기상장일 경우 테프라가 서진 또는 북상하다가 동해 쪽으로 진행할 수 있다(Lee and Yun, 2011; Yun et al., 2016). 이와 같은 사실은 한반도의 육상퇴적물에서 AT와 Ata, Kb-Ks 테프라 같은 큐슈 기원의 테프라층이 발견되는 것으로 이미 입증되었다. 또한 일본에서 보고된 기존 연구결과에 따르면 K-Ah와 Aso-4, K-Tz 테프라도 향후 한반도 육상에서 발견될 가능성이 있다.

육상퇴적물에서 산출되는 광역테프라층을 바르게 이용하기 위해서는 몇 가지 주의할 점이 있다. 첫 번째는 일차 퇴적기원 여부를 확인해야 한다는 것이다. 테프라는 화산 폭발 시 지질학적으로 동일한 시기에 넓은 범위에 퇴적되지만, 퇴적 이후 다시 운반되어 재퇴적될 가능성이 있으며, 특히 육상의 경우 재동가능성이 더욱 높다. 따라서 해당 지층에 대한 퇴적학적 연구가 반드시 함께 수행되어야 한다. 두 번째는 테프라가 산출되는 층의 두께를 그대로 받아들일 수 없다는 점이다. 한국의 육상 퇴적층에서 발견되는 광역테프라층은 모두 일본 큐슈에서 기원한 것이기 때문에 화구로부터 먼 거리를 이동해서 퇴적된 것이다. 따라서 일본에서 보고된 등층후도와는 전혀 다른 양상을 보인다는 점을 유의해야 한다. AT 테프라의 경우에도 한반도 중부의 육상 고토양층에서 거의 15 cm 두께에서 산출되는 것으로 알려져 있다. Kb-Ks 테프라처럼 호수퇴적층이나 습지퇴적층에서 산출되는 경우에는 주로 일차퇴적기원이므로 테프라층의 두께를 어느 정도 신뢰할 수 있지만, 고토양층이나 단구퇴적층 등에서 산출되는 경우에는 재동퇴적작용의 영향이 크기 때문에 실제 두께보다 훨씬 두껍게 나온다는 점을 고려해야 한다.

광역테프라층의 지질학적 활용과 한계

화산폭발에 의해 지질학적으로 동일한 시기에 넓게 퇴적되는 광역테프라층은 층서적인 건층으로 사용되거나 서로 다른 지역의 층서 대비에 사용될 수 있으므로 매우 유용하다. 특히, 제4기 퇴적층 중에서 방사성탄소연대측정 범위인 5만년이 넘는 퇴적층의 경우 광여기루미네선스(OSL) 연대측정 외에는 신뢰도 높은 연대측정 방법이 거의 없기 때문에 광역테프라층의 활용도가 매우 높다. 따라서 Aso-4나 K-Tz, Ata, Kb-Ks 테프라의 경우 특히 유용하게 활용될 수 있다.

AT 테프라의 경우 방사성탄소연대측정이 가능한

연대를 가지고 있지만, 한반도의 플라이스토세 후기 고토양층이나 해안단구 퇴적층에서 지난 빙하기에 형성된 토양쐐기층의 직상부나 충진물에서 산출되기 때문에 오랜 기간 동안 구석기고고학 및 제4기지질학 분야에서 건층으로 유용하게 사용되어 왔다(Yi et al., 1998; Lim et al., 2006; Lim et al., 2007). AT 테프라의 장점은 분포범위가 넓고 분출량이 많기 때문에 한반도 전역에서 발견되고 분석 및 동정하기에 충분한 양의 화산유리가 산출된다는 점이다.

Ata 테프라는 한반도 남동부의 해안단구 퇴적층에서 발견되기 때문에 단구층의 연대측정과 층서대비에 유용할 뿐 아니라, 테프라 함유층과 활성단층과의 절단관계를 이용하여 활성단층의 형성시기를 제한해줄 수 있다는 장점이 있으며(Inoue et al., 2002; Choi et al., 2003, 2005; Kim et al., 2021), 방사성탄소연대측정이 어려운 연대의 퇴적층의 연대를 제한할 수 있으므로 중요성이 높다. 하지만 기존에 보고된 Ata 테프라의 분포범위를 고려하면 한반도의 남동부 지역에서만 발견이 가능하므로 중부 이북의 지역에서는 이용하기 어렵다는 단점이 있다(Machida, 1999).

가장 최근에 합천의 적중-초계분지에서 발견된 Kb-Ks 테프라는 지금까지 한반도 육상 퇴적층에서 발견된 큐슈기원의 테프라 중에서 가장 오래된 것이다(약 520 ka). 이 테프라층은 적중-초계분지 호수퇴적층의 퇴적시기를 결정하는데 결정적인 역할을 했으며(Shin et al., 2022), 향후 한반도 육상에서 유사한 시기의 호수 또는 습지퇴적층이 발견될 경우 연대측정과 층서대비에 유용할 것으로 기대된다. 하지만 한반도 육상에서 플라이스토세 중기에 해당하는 퇴적층이 발견될 가능성은 낮으므로 Kb-Ks 테프라층의 활용도는 그리 높지 않을 것으로 예상된다.

연대측정이나 층서대비 외에도 육상에서 발견되는 광역테프라층은 화산재해에 대한 대응책 마련을 위해 중요한 정보를 제공한다. 최근 백두산 분화가 임박한 것으로 알려지면서 이에 대한 우려가 커지고 있지만, 백두산이 분화하더라도 한반도 남부에는 큰 영향이 없을 것으로 예상된다. 하지만 최근 합천지역의 호수퇴적층에서 발견된 Kb-Ks 테프라층의 두께가 12 cm에 달하기 때문에, 일본 큐슈 지역에서 화산폭발지수(volcanic explosivity index, VEI) 4-5 이상인 대규모 화산폭발이 발생할 경우 적어도 한반도 남부에는 ~10 cm 두께에 달하는 테프라층이 퇴적될 가능성이 있다. 이처럼 두꺼운 테프라층이 육상에 퇴적될 경우 심각한 자연재해와 경제적 손실을 유발할 수 있기 때문에 이에 대한 모니터링과 대응책 마련이 필요할 것으로 판단된다.

결 론

이 논평에서는 광역테프라층의 동정 방법과 연대측정 방법에 대해 정리하였다. 또한 한반도의 육상퇴적층에서 발견되는 광역테프라층의 종류와 산출 특성에 대해 정리하였고, 광역테프라층의 지질학적 활용 방법과 한계점에 대해서도 논의하였다. 테프라층은 화산유리의 주원소조성을 이용한 상관계수를 통해 쉽게 동정할 수 있으며, 일본 기원의 테프라인 경우 화산유리의 굴절률을 함께 이용하는 것이 바람직하다. 지금까지 한반도 육상의 고토양층, 해안단구 퇴적층, 호수퇴적층에서는 일본 큐슈 기원의 AT와 Ata, Kb-Ks 테프라가 발견되었고, 아직 공식적으로 발견되지는 않았지만 Aso-4 테프라도 발견될 가능성이 높은 것으로 판단된다. 광역테프라층은 제4기 퇴적층, 특히 방사성탄소연대측정의 범위를 넘는 5만년 이상 퇴적층의 연대측정과 층서대비에 유용하며, 활성단층의 연대측정과 화산재해에 대한 대응책 마련에도 유용한 정보를 제공한다. 하지만 광역테프라층을 지질학적으로 이용하기 위해서는 재동퇴적 여부에 대한 확인이 선행되어야 한다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 연구비 지원으로 수행되었습니다(No. 20201510100020). 논문을 검토하고 좋은 의견을 주신 두 분의 심사위원들과 편집위원께 감사드립니다.

References

Bonadonna, C. and Houghton B.F., 2005, Total grain-size distribution and volume of tephra-fall deposits. Bulletin of Volcanology, 67, 441-456. Bary, J.R., 1976, Volcanic triggering of glaciation. Nature, 260, 414-415.

Borchardt, G.A., Aruscavage, P.J., and Millard Jr., H.T., 1972, Correlation of Bishop Ash, a Pleistocene marker bed, using instrumental neutron activation analysis. Journal of Sedimentary Petrology, 42, 301-306.

Busacca, A.J., Nelstead, K.T., McDonald, E.V., and Purser,

M.D., 1992, Correlation of distal tephra layers in loess in the Channelled Scabland and Palouse of Washington State. Quaternary Research, 37, 281-303.

Carson, E.C., Fournelle, J.H., Miller, T.P., and Mickelson, D.M., 2002, Holocene tephrochronology of the Cold Bay area, southwest Alaska Peninsula. Quaternary Science Reviews, 21, 2213-2228.

Cerling, T.E., Brown, F.H., and Bowman, J.R., 1985, Low-temperature alteration of volcanic glass; Hydration, Na, K, ^{18}O, and Ar mobility. Chemical Geology, Isotopic Geosciences Section, 52, 281-293.

Choi, W.H. Chang, C.J., Inoue, D., Yanagida, M., Sasaki, T., Shin, H.J., Lee, J.D., and Kim, Y.J., 2003, Paleosol and tephra stratigraphy above the marine terrace in southeastern Korean Peninsula. In. Proc. Geological Society of Korea Fall Meeting, 50. (in Korean)

Choi, W.H., Chang, C.J., Lee, D.S., Inoue, D., Sasaki, T., and Yanagida, M., 2005, Paleosol and tephra stratigraphy above the marine terrace in southeastern Korean Peninsula. In. Proc. Geological Society of Korea Fall Meeting, 107. (in Korean)

Chun, J.H., Han, S.J., and Cheong, D.K., 1997, Tephrostratigraphy in the Ulleung Basin, East Sea Late Pleistocene to Holocene. Geosciences Journal, 1, 154-166.

Chun, J.H., Han, S.J., Cheong, D.K., Huh, S., Bahk, J.J., and Choi, D.L., 1998, Tephrostratigraphy of deep-sea sediments around submarine channels, northeastern Ulleung Basin. Journal of the Geological Society of Korea, 34, 192-210. (in Korean with English abstract)

Chun, J.H., Ikehara, S., 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, Japan, 43, 99-112.

Costa, A., Macedonio, G., and Folch, A., 2006, A threedimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes. Earth and Planetary Science Letters, 241, 634-647.

Danhara, T., Bae, K., Okada, T., Matsufuji, K., and Hwang, S., 2002, What is the real age of the Chongokni Paleolithic site? A new approach by fission track dating, K-Ar dating and tephra analysis. In Bae, K., Lee, J. (eds.), Paleolithic Archaeology in Northeast Asia. Yeoncheon County and the Institute of Cultural Properties, Hanyang University, 77-116.

Danhara, T., Yamashita, T., Iwano, H., and Kasuya, M., 1992, An improved system for measuring refractive index using the thermal immersion method. Quaternary International, 13/14, 89-91.

Fero, J., Carey, S.N. and Merrill, J.T., 2009. Simulating the dispersal of tephra from the 1991 Pinatubo eruption: Implications for the formation of widespread ash layers. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 186, 120-131.

Froggatt, P.C., 1983, Toward a comprehensive Upper Quaternary tephra and ignimbrite stratigraphy of New Zealand using electron microprobe analysis of glass shards. Quaternary Research, 19, 188-200.

Froggatt, P.C., 1992, Standardization of the chemical analysis of tephra deposits. Report of the ICCT Working Group. Quaternary International, 13/14, 93-96.

Furuta, T., Fujioka, K., and Arai, F., 1986, Widespreaqd sub-marine tephras around Japan - Petrographic and chemical properties. Marine Geology, 72, 125-142.

Hallett, D.J., Mathewes, R.W., and Foit Jr., F.F., 2001, Mid-Holocene glacier peak and Mount St. Helens We tephra layers detected in lake sediments from southern British Columbia using high-resolution techniques. Quaternary Research, 55, 284-292.

Hunt, J.B. and Hill, P.G., 1996, An inter-laboratory comparison of the electron probe microanalysis of glass geochemistry. Quaternary International, 34-36, 229-241.

Inoue, D., Sasaki, T., Yanagida, M., Choi, W.H., and Chang, C.J., 2002, Stratigraphy of the Marine Terraces along the East Coast in Korea by means of the loess-paleosol sequence and Japanese Tephra, In. Proc. Geological Society of Korea Fall Meeting, 81.

Kim, C.B., Kim, Y.S., and Lim, H.S., 2021, Occurrence and Identification of Tephra Layers found in the Ulsan area, Southeastern Korea. Journal of the Korean Earth Science Society, 42(1), 55-64.

Kim, J.Y., Yang, D.Y., Choi, W.H., and Kim, J.C., 2006. Estimation of uplift rate based on morphostratigraphy and chronology of coastal terraces in the SE part of Korean Peninsula. The Korean journal of Quaternary research, 20(2), 51-57. (in Korean with English abstract)

King, M., Busacca, A.J., Foit Jr., F.F., and Kemp, R.A., 2001, Identification of disseminated Trego Hot Springs tephra in the Palouse, Washington State. Quaternary Research 56, 165-169.

Kolata, D.R., Huff, W.D., and Berstrom, S.M., 1996, Ordovician K-b entonites of eastern North America. Geological Society of America, Special Paper 313, 84 p.

Lee, S.H. and Yun, S.H., 2011, Impact of meteorological wind fields average on predicting volcanic tephra dispersion of Mt. Baekdu. Journal of Korean Earth Science Society, 32(4), 360-372. (in Korean with English abstract)

Lee, S.H., Jang, E.S., and Yun, S.H., 2014, Numerical simulation of volcanic ash dispersion and deposition during 2011 eruption of Mt. Kirishima. Journal of Korean Earth Science Society, 35(4), 237-248. (in Korean with English abstract)

Lim, H.S., Lee, Y.I., Yi, S., Kim, C.-B., Chung, C.-H., Lee, H.J., and Choi, J.H., 2007, Large vertebrate burrows in Upper Pleistocene paleosols at Korean

Palaeolithic sites and their significance as a stratigraphic time-marker. Quaternary Research, 68, 213-219.

Lim, H.S., Nam, Y.J., Lee, Y.I., Kim, C.B., Yi, S., Chung, C.H., Lee, H.J., and Yoon, H.I., 2006, Principles and applications of tephrochronology: widespread AT (Aira-Tanzawa) tephra found in the Korean Peninsula. Journal of the Geological Society of Korea, 42, 645-656. (in Korean with English abstract)

Lim, J., Hong, S. S., Han, M., Yi, S., and Kim, S. W., 2021, First finding of impact cratering in the Korean Peninsula. Gondwana Research, 91, 121-128.

Machida, H., and Arai, F., 1976, The discovery and significance of the very widespread tephra: the Aira-Tn ash. Kagaku (Science), 46, 339-347.

Machida, H., and Arai, F., 1983, Extensive ash falls in and around the Sea of Japan fro large Late Quaternary eruptions. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 18, 151-164.

Machida, H., and Arai, F., 1992, Atlas of tephra in and around Japan. University of Tokyo Press, 276 p.

Machida, H., Arai, F., and Momose, M., 1985, Aso-4: A widespread tephra and its implications to the events of late Pleistocene in and around Japan. Bulletin of the Volcanological Society fo Japan, 30, 49-70.

Machida, H., 1999. The stratigraphy, chronology and distribution of distal marker-tephras in and around Japan. Global and Planetary Change, 21, 71-94.

Machida, H., 2002, Volcanoes and tephras in the Japan area, Global Environmental Research, 6, 19-28.

Matsumoto, E., Maeda, Y., Takemura, K., and Nishida, S., 1987, New radiocarbon age of Aira-Tn ash (AT). The Quaternary Research of Japan, 26, 79-84.

Miyairi, Y., Yoshida, K., Miyazaki, Y., Matsuzaki, H., and Kaneoka, I., 2004, Improved ^{14}C dating of a tephra layer (AT tephra, Japan) using AMS on selected organic fractions. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 223-224, 555-559.

Murayama, M., Matsumoto, E., Nakamura, T., Okamura, M., Yasuda, H., and Taira, A., 1993, Re-examination of the eruption age of Aira-Tn Ash (AT) obtained from a piston core off Shikoku determined by AMS?^{14}C dating of planktonic foraminifera. Journal of Geological Society of Japan, 99, 787-798.

Nakamura, Y., Katayama, Y., and Hirakawa, K., 2002. Hydration and refractive indices of Holocene tephra glass in Hokkaido, Northern Japan. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 114, 499-510.

Oba, T., 1991. The eruption age of the Aso-4 and Ata ashes inferred from oxygen isotope stratigraphy. The Earth Monthly, 13, 224-227.

Ono, K., Matsumoto, Y., Miyahisa, M., Teraoka, Y., and Kambe, N., 1977, Geology of the Taketa district. With Geolgoical Sheet map at 1: 50,000. Geological Survey of Japan, 145 p.

Park, M.-H., Kim, I.-S., and Shin, J.-B., 2003, Characteristics of the late Quaternary tephra layers in the East/Japan Sea and their new occurrences in western Ulleung Basin sediments. Marine Geology, 202, 135-142.

Pearce, N.J.G., Westgate J.A., and Perkins, W.T., 1996, Developments in the analysis of volcanic glass shards by laser ablation ICP-MS: Quantitative and single internal standard-Multi-element methods. Quaternary International, 34-36, 213-227.

Pearce, N.J.G., Westgate, J.A., Perkins, W.T., Eastwood, W.J., and Shane, P., 1999, The application of laser ablation ICP-MS to the analysis of volcanic glass shards from tephra deposits: bulk glass and single shard analysis. Global and Planetary Change, 21, 151-171.

Pearce, N.J.G., Westgate, J.A., Perkins, W.T., and Preece, S.J., 2004, The application of ICP-MS methods to tephrochronological problems. Applied Geochemistry, 19, 289-322.

Rieck, H.J., Sarna-Wojcicki, A.M., Mayer, C.E., and Adam, D.P., 1992, Magnetostratigraphy and tephraochronology of an Upper Pliocene to Holocene record in lake sediments st Tule Lake, Northern California. Geological Society of America Bulletin, 104, 409-428.

Ross, C.S. and Smith, R.L., 1955. Water and other volatiles in volcanic glasses. American Mineralogist, 40, 1071-1089.

Sarna-Wojcicki, A.M. and Davis, J.O., 1991, Quaternary tephrochronology. In Morrison, R.B. (ed.), Quaternary Nonglacial Geology: Conterminous United States. Geological Society of America, DNAG Series, V. K-2, 93-116.

Sarna-Wojcicki, A.M., 1976, Correlation of late Cenozoic tuffs in the Central Coast Ranges of California by menas of trace- and minor-element chemistry. USGS Professional Paper 972, 30 p.

Sarna-Wojcicki, A.M., Bowman, H.R., Meyer, C.E., Russell, P.C., Woodward, M.J., McCoy, G., Rowe, J.J., Jr., Baedecker, P.A., Asaro, F., and Michael, H., 1984, Chemical Analyses, Correlations, and Ages of Upper Pliocene and Pleistocene Ash Layers of East-Central and Southern California. US Geological Survey Professional Paper 1293.

Sarna-Wojcicki, A.M., Morrison, S.D., Meyer, C.E., and Hillhouse, 1987, Correlation of upper Cenozoic tephra layers between sediments of the western United States and eastern Pacific Ocean and comparison with biostratigraphic and magnetostratigraphic age data. Geological Society of America Bulletin, 98, 207-223.

Shin, J.B, Yu, K.M., Naruse, T., and Hayashida, A., 2004, Study on loess-paleosol stratigraphy of Quaternary unconsolidated sediments at E55S20-IV pit of

Chongokni Paleolithic Site. Journal of the Geological Society of Korea, 40(4), 369-381. (in Korean with English abstract)

Shin, S., Lee, J.Y., Hong, S.S., Nahm, W.H., Kim, C.B., and Lim, H.S., 2022, Kb-Ks tephra found in lake sediments in the Jeokjung-Chogye Basin, which was formed by a meteorite impact, and its geological implications. Scientific Reports (in review).

Smith, D.G.W. and Westgate, J.A., 1969, Electron probe technique for characterising pyroclastic deposits. Earth and Planetary Science Letters, 5, 313-319.

Sparks, R.S.J., 1986. The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns. Bulletin of Volcanology 48, 3-15.

Steen-McIntyre, V., 1975, Hydration and superhydration of tephra glass: a potential tool for estimating age of Holocene and Pleistocene ash beds. In: Suggate, R.P. and Cresswell, M.M. (Eds.), Quaternar Studies. Royal Society of New Zealand. Wellington, pp. 271-278.

Toms, P.S., King, M., Zarate, M.A., Kemp, R.A. and Foit Jr., F.F., 2004, Geochemical characterization, correlation, and optical dating of tephra in alluvial sequences of central western Argentina. Quaternary Research, 62, 60-75.

Tsuji, S., and Kosugi, M., 1991. Influence of Aira-Tn ash (AT) eruption on ecosystems. The Quaternary Research of Japan, 30, 419-426.

Westgate, J.A. and Briggs, N.D., 1987, Dating methods of Pleistocene deposits and their problems: V. tephrochronology and fission-track dating. In Rutter, N.W. (ed.), Dating Methods of Pleistocene Deposits and their Problems. Geoscience Canada Reprint Series 2, Ottawa, 31-38.

Westgate, J.A., Perkins, W.T., Fuge, R., Pearce, N.J.G. and Wintle, A.G., 1994. Trace element analysis of volcanic glass shards by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry: application to tephrochronological studies. Applied Geochemistry, 9, 323-335.

Yi, S.B., Soda, T., and Arai, F., 1998, New discovery of Aira-Tn ash (AT) in Korea. Journal of the Korean Geographical Society, 33, 447-454.

Yun, S.H., Choi, E.K., Chang, C., 2016. Selecting hazardous volcanoes that may cause a widespread volcanic ash disaster to the Korean Peninsula. Journal of the Korean Earth Science Society, 37(6), 346-358. (in Korean with English abstract)

Manuscript received: December 26, 2022
Revised manuscript received: December 31, 2022
Manuscript accepted: December 31, 2022