

테프라 연대학: 화산유리의 세척, 분리 및 감정

Tephrochronology: Washing, Separation and Identification of Volcanic Glass Shard

길영우 (Young-Woo Kil)* · 정창식 (Chang-Sik Cheong)** · 박세진 (Se-Jin Park)* · 박명호 (Myong-Ho Park)*

요약 : 화산분출물 중에서 균질한 화학조성을 가지는 화산유리는 제4기 지형 발달순서 및 지층연대에 많이 사용된다. 비정질 화산유리는 실험실에서 세척, 분리, 감정의 과정을 걸쳐 시료로부터 분리되어 분석된다. 그러나 일련의 과정들 속에서 오류가 발생할 수 있고, 오류로부터 층서대비 및 연대측정에 오차를 발생시킬 수 있으므로 화산유리 연구의 오차 범위를 줄이기 위해, 간단하며 정확한 화산유리 세척, 분리, 감정과정의 이해가 필요하다. 여기에서는 테프라를 통한 정확한 실험을 하기 위해 필요한 올바른 절차에 대해 제안을 해본다.

주요어 : 테프라 연대학, 화산유리, 테프라 분리, 테프라 세척, 테프라 감정

Abstract : Volcanic glass shard, which shows relatively homogeneous chemical composition in volcanic eruption materials, is used to determine ages of tephra layers and then to correlate tephra layers each other for understanding of evolution of Quaternary geomorphology. For reducing processing errors in age determination and correlation of units, amorphous glass shard should be separated carefully from soil sample through laboratory procedures such as washing, separation, and identification. Introduction of these processes in detail could be reduced errors in tephrochronology by using volcanic glass shard.

Keywords : tephrochronology, volcanic glass shard, tephra washing, tephra separation, tephra identification

서론

46억 년의 지질시대중 제4기는 1.8 Ma부터 현재에 이르는 짧은 시기에 해당된다. 그러나 제4기 동안 일어났던 현상에 대한 이해는 최근 지질학, 지리학, 환경과학, 생물학, 고고학과 같은 여러 분야에서는 가까운 인류의 미래를 예측할 수 있는 중요한 수단으로 부각되고 있다. 제4기 지질학은 이러한 맥락에서 매우 중요한 의미를 가진다. 우리나라에서는 최근 막대한 예산과 인력이 투입되는 원전시설의 부지 안전성 관련 연구와 해양분지 지층대비의 목적으로 테프라 연대학의 중요성이 더욱 더 강조되고 있다.

테프라는 화산에서 분출된 모든 물질을 지칭하는 것으로, 테프라층은 짧은 시간 안에 퇴적되어 상하 지층 대비에 건층(key bed)으로 사용될 수 있다. 최근 테프라층을 절단하는 제4기 단층의 상대적인 연대를 결정하는 방법으로, 지형 발달순서를 결정하는 방법으로, 그리고 지층연대를 결정하는 기준으로 테프라가 흔히 사용되고 있다.

테프라를 층서대비에 이용한 초기 선구자는 아이슬랜드의 Thorarinsson (1944)이다. 그 후로 북미 (Izett, 1981; Sarna-Wojcicki *et al.*, 1987; Perkins *et al.*, 1998), 유럽 (Bogaard and Schmincke, 1985; Dugmore *et al.*, 1995; Pelcher *et al.*, 1995), 일본 (Machida and Arai, 1992), 아프리카 (Sarna-

Wojcicki *et al.*, 1985), 남극 (Palais *et al.*, 1988), 뉴질랜드 (Froggatt and Lowe, 1990) 등지에서 테프라층은 건층으로서 체계적인 연구가 진행되어졌다.

우리나라에서는 테프라층을 울릉분지 해양퇴적층 연구에 이용하였으나 (Chun *et al.*, 1997; 천종화 외, 1998; Park *et al.*, 2003, 2005), 한반도 내륙, 제주도, 동해에서 산출되는 화산유리에 대한 연구는 대부분 일본 지질학자들에 의해 수행되어왔다 (Machida *et al.*, 1983; Machida and Arai, 1983; Furuta *et al.*, 1986; Machida and Arai, 1992).

이 연구의 목적은 테프라를 이용한 연대측정시에 화산유리의 세척, 분리, 감정과정을 소개하고, 일련의 과정을 통하여 화산유리 분석에 유의사항을 지적함으로써 화산유리를 통한 층서대비 및 연대측정의 오차를 줄이는데 있다.

테프라의 분류 및 특성

화산에서 분출되는 물질은 크게 용암과 화산쇄설물로 구분되고, 화산쇄설물은 형성기원에 따라 화성쇄설성 낙하 퇴적물 (volcaniclastic fall deposits)과 화산쇄설류 퇴적물 (volcaniclastic flow deposits)로 구분된다. 이중 화성쇄설성 낙하 테프라는 화산폭발과 동시에 화산구름의 형태로 대기 중에서 이동되다가, 수 시간에서 수일에 걸쳐 지표에 퇴적되

*한국석유공사 해외개발본부(Overseas E&P, KNOC, 1588-14, Kwanyang-Dong, Anyang, 430-060, Korea), ykil@knoc.co.kr

**한국기초과학지원연구원 동위원소환경연구부(Division of Isotope Geoscience, KBSI, 52 Yeoeun-dong Yusong-Gu, Daejeon 305-333, Korea)

어 쌓이게 된다. 이렇게 퇴적된 테프라 층은 건층으로 사용될 수 있다.

테프라는 입자 크기에 따라 화산진 (<1/16 mm), 화산재 (1/16~2 mm), 화산력 (2~64 mm), 그리고 화산탄 (>64 mm)으로 분류되고, 기원 마그마의 성분에 따라 유문암질, 안산암질, 현무암질 테프라로 구분된다 (Fisher and Schmincke, 1984). 테프라의 구성물질은 부서, 화산유리, 결정질과 화산 폭발 이전에 존재하던 암석들이 테프라와 함께 운반 퇴적된 암편이 있다.

화산재보다 큰 화산력, 화산탄은 화산에서 멀리 이동될 수가 없고, 화산재보다 작은 크기의 화산진은 현미경 관찰과 EPMA 분석의 어려움이 있으므로, 테프라 연구에서는 화산재 크기의 테프라가 주로 사용된다. 테프라의 구성물질 중에서 화산유리는 화학조성이 균질하며, 본원 마그마의 화학조성을 대표할 수 있으므로 테프라 구성물질 중에서 화산유리가 연구에 주로 사용된다. 결과적으로 화산재 크기 (63~250 μm; 2-4φ)의 화산유리가 테프라 연구에 가장 적당하다.

화산유리 세척

Fig. 1은 화산유리의 세척, 분리, 감정 과정을 간단한 흐름도로 만들어 표시한 것이다. 야외에서 시료는 화산유리 함유 양에 따라 약 1 kg 내외로 채취하며, 연대측정이 필요한 경우 2~3 kg 정도의 시료를 채취한다. 시료 내에 포함된 먼지를 제거하기 위해 물을 이용하여 세척한다. 이 때에 금속 체는 화학적 오염이나 녹이 슬기 때문에 나일론 체를 이용한다. 250 μm 이상의 시료는 다시 분쇄하여 체질하고, 63 μm 이하의 시료는 버린다.

분리된 시료 중 유기물질이 많은 시료에 대해서는 시료 세척 이전에 가정용 세제를 이용하여 유기물을 제거한다. 이 방법을 간단히 기술하면, 후드 안에서 뜨거운 물이 담긴 통에 세제와 시료가 함께 들어있는 비커를 10~15분 정도 담근다. 이 때 비커 바닥은 통에서 떨어진 상태로 놓여야 한다.

비커에 2차 증류수를 채워 희석시킨 후 수 분 동안 방치한 후에, 표면에 떠있는 물질을 제거한다. 이러한 과정이 더 필요할 경우 위의 방법을 되풀이한다.

시료 중에 포함된 탄산염 물질을 제거하기 위해 후드 안에서 10% HCl에 시료를 수 분 동안 담근 후, 2차 증류수를 사용하여 세척한다. 화산유리 주위의 토양 찌꺼기를 제거하기 위해 시료를 후드 안에서 8% HF에 30초에서 1분 정도 담근 후, 2차 증류수를 사용하여 세척한다. 유기질 물질은 2% HNO₃에 수 분 정도 담근 후에 2차 증류수를 사용하여 세척함으로써 제거할 수 있다. 화산유리는 탈유리화 되기 쉽고, 불산에서 오랫동안 방치 되었을 때 모양이 변하는 경우도 있으므로 유의하여야 한다.

초음파 세척은 화산유리나 결정에 붙어있는 이물질들을 제거하기 위해 사용된다. 1000 ml 비커에 500 ml의 물과 200~300 ml 시료를 초음파 세척기에 2~5분 정도 넣어둔다. 5분 이상 장기간 사용은 화산유리를 분쇄시킬 수 있으므로 주의하여야 한다. 초음파는 인체에 유해하므로 귀를 보호할 수 있는 귀마개를 착용하는 것이 좋다. 처리된 시료는 가능하면 상온에서 24시간 정도 건조시키고, 필요한 경우 오븐에서 50°C로 건조하기도 한다.

화산유리 분리

시료를 건조시킨 후, 자력분리와 중액분리를 사용하여 필요한 화산유리를 분리, 회수한다. 자력분리는 광물(결정)들이 가지고 있는 자성을 이용하여 광물들을 분리하는 기기이다. 광물들은 자성의 정도에 따라 강자성, 상자성, 그리고 반자성으로 분류된다. 일반적으로 자력분리를 통해 반자성의 석영, 장석, 화산유리가 강자성, 상자성 결정으로부터 분리된다.

중액분리는 화산유리를 석영, 장석으로부터 분리하는데 사용된다. 중액은 가격이 비싸고, 인체에 유해하므로 후드 안에서 매우 조심스럽게 처리하여야 하는데, 화산유리 분리에 사용되는 중액은 크게 Methylene iodide (CH₂I₂), Zinc

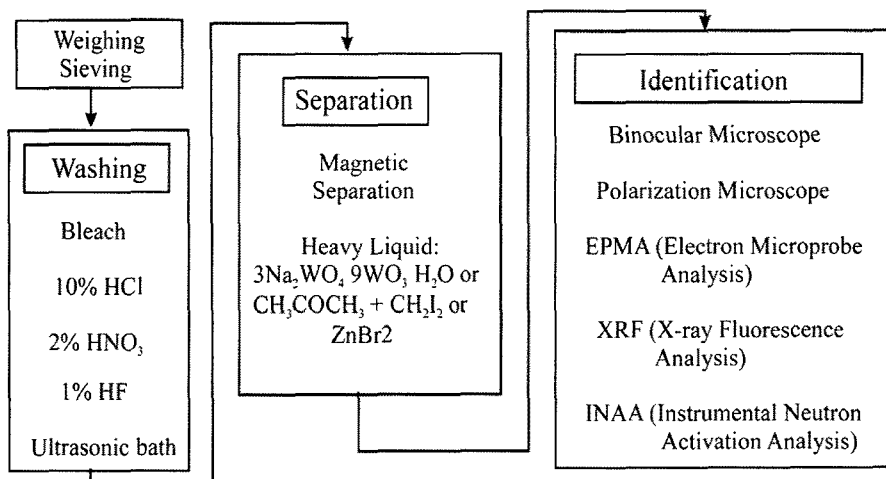


Fig. 1. Flow chart for washing, separation and identification of volcanic glass shards.

bromide ($ZnBr_2$), 그리고 Sodium polytungstate hydrate (SPT; $3Na_2WO_4 \cdot 9WO_3 \cdot H_2O$)가 있다.

SPT는 무독성이므로 사용하기 적당하나, 가격이 비싸다. SPT는 미세한 가루로 되어 있으므로 호흡기를 통하여 인체에 흡수될 수 있으므로, 마스크와 장갑을 착용 후 SPT 중액을 다루어야 한다. 분말상태의 SPT를 20°C 정도의 열판 위에서 증류수에 용해하여 사용한다. 화산유리 ($1.9\sim 2.2\text{ g/cm}^3$)를 상대적으로 비중이 높은 석영 (2.65 g/cm^3), 장석 ($2.54\sim 2.76\text{ g/cm}^3$)과 같은 결정체로부터 분리하고자 한다면 중액 비중 2.4 g/cm^3 정도가 적당하다. 비중 차에 의해 분리된 부분들은 거름종이 (Whatman, cat. No. 1004 150)를 이용하여 분리하고, 분리된 비중액은 회수하여 다시 사용할 수 있다. 회수된 비중액은 증발시켜 건조하거나, 2차 증류수를 첨가하여 재활용 할 수 있다. 회수된 비중액의 비중치를 확인하기 위해 부표를 사용할 수도 있고, 부표대신 간단히 석고 (2.4 g/cm^3)와 석영 (2.65 g/cm^3)을 사용하기도 한다.

Methylene iodide (CH_2I_2)와 Zinc bromide ($ZnBr_2$)는 가격이 SPT에 비해 상대적으로 저렴하여 비중액으로 널리 사용되고 있다. 그러나 이들 중액들은 유독성이므로 후드 안 작업이 필수적이다. 석영, 장석으로부터 화산유리를 분리하기 위해 Methylene iodide (CH_2I_2 , $3.30\sim 3.33\text{ g/cm}^3$)와 Acetone (CH_3COCH_3 , 0.79 g/cm^3)을 혼합하여 비중 2.4 g/cm^3 로 만들거나, 비중 2.3 g/cm^3 의 Zinc bromide ($ZnBr_2$)를 직접 사용한다.

화산유리 감정

세척과 분리과정을 거친 등방체 화산유리는 특유의 모양과 색을 가지고 있어 쌍안현미경, 편광현미경을 이용하여 적은 비용으로 빠른 시일 내에 감정할 수 있고, 고가 기자재인 EPMA (Electron Probe Micro Analyser), XRF (X-ray Fluorescence Analysis), INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis) 등을 이용하여 감정할 수 있다 (Fig. 1).

시료 중에 포함된 화산유리의 양이 많은 경우에는 세척된 시료를 쌍안 현미경을 이용하여, 둥근 낫 모양 또는 초승달이나 Y자 모양의 화산유리를 감정할 수 있다. 편광현미경을 이용한 방법에는 박편을 만들어 복굴절을 하지 않는 등방체

화산유리를 조암광물로부터 쉽게 구분하는 방법과 굴절액과 가정용 식용유를 사용하는 방법이 있다. 여기서 가정용 식용유를 사용한 가장 저렴하고, 신속한 방법을 소개하기로 한다.

- 1) 세척된 시료가 들어 있는 병을 흔들어 잘 섞은 후, 적은 양의 시료를 슬라이드 글라스위에 올린다.
- 2) 18×18 mm 커버 글라스를 슬라이드 글라스에 덮는다.
- 3) 가정용 식용유를 커버 글라스 가장자리에 떨어뜨려 슬라이드 글라스와 커버 글라스 사이에 스며들게 한다. 조심스럽게 식용유가 시료 사이에 퍼지도록 한다.
- 4) 슬라이드 글라스를 편광현미경 위에 올려놓고, 크로스 니콜 (polarized cross)하에서 석고판 (gypsum plate)을 삽입한다. 화산유리는 식용유에서 나오는 색깔과 동일하게 붉은색이나 자홍색을 띤다. 스테이지를 돌릴 경우에도 등방체인 화산유리는 색의 변화가 없다.
- 5) 화산유리가 포함된 시료는 따로 담아 보관한다. 커버 글라스는 버리고, 슬라이드 글라스는 세척하여 다시 쓴다.

고가의 기자재를 사용하여 감정하는 방법 중에서 비교적 간단하고 저렴한 방법은 EPMA를 이용한 방법이다. 화산유리 시편은 에폭시 디스크와 슬라이드 글라스를 이용하여 만든다 (Fig. 2). 슬라이드 글라스 방법은 열판 위에서 30~40개의 화산유리를 올려놓은 슬라이드 글라스를 약 30초 정도 가열한 후에, 한 방울의 에폭시를 슬라이드 글라스 위에 떨어뜨려 만든다. 상온에서 하루 정도 건조한 후 #1200, #4000 사포와 다이아몬드 페이스트를 이용하여 0.2 mm 이상의 두께로 연마한다. 연마된 시편은 반사 현미경을 통해 표면이 부드러운지 확인하고, 탄소 코팅 (carbon coating)한 후에 EPMA 분석에 사용한다 (Fig. 2a).

에폭시 디스크 방법은 드릴을 이용하여 에폭시 디스크에 구멍을 뚫은 후에, 에폭시 디스크 한쪽 면에 스카치테이프를 부치고, 화산유리를 스카치테이프에 부착시켜 사용한다. 부착 후 열판 위에 에폭시 디스크를 올려놓고, 기포가 생기지 않게 에폭시를 구멍 안에 넣는다. 하루 정도 상온에서 건조한 후에 스카치테이프를 제거한 하고, 사포와 다이아몬드 페이스트를 이용하여 연마한다.

EPMA를 이용하여 화산유리를 원소 분석할 때는 몇 가지 사항들을 고려하여야 한다. Na, K와 같은 알칼리 원소는 화

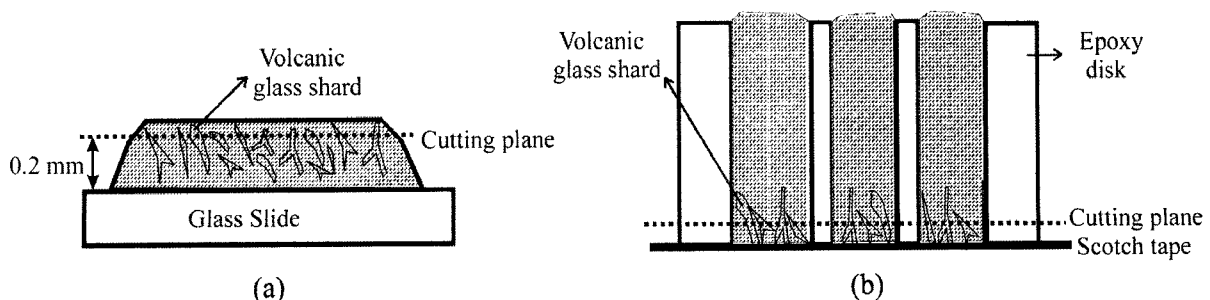


Fig. 2. Sample preparation methods for volcanic glass shard at EPMA analysis. (a) slide glass and (b) epoxy disk methods.

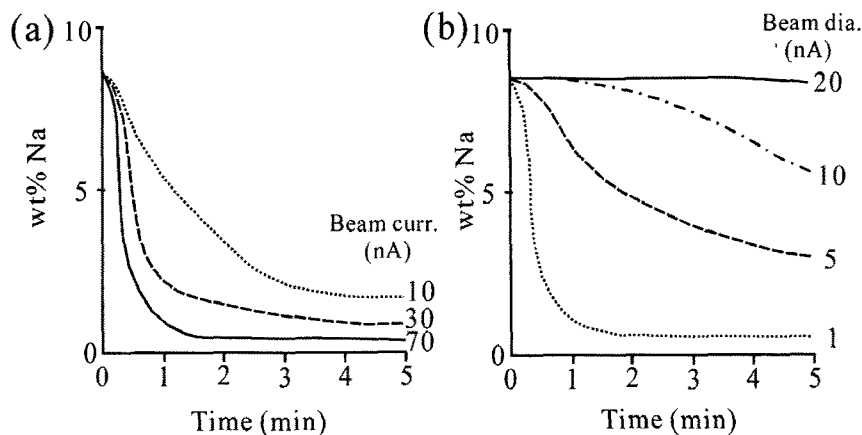


Fig. 3. Loss of Na from albite as a function of time (accelerating voltage 15 kv), (a) 1 μm beam diameter, different current, (b) 50 nA beam current, different diameter (Modified from Autefage and Couderc, 1980).

산유리뿐만 아니라 결정 내에서 전자 빔에 의해 이동될 수 있다 (Fig. 3). 특히 화산유리가 비정질이므로, 결정 내에서 보다 화산유리 내에서 알칼리원소 (Na, K)의 이동이 쉽게 이루어진다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다음의 몇 가지 사항들을 고려하여 EPMA 분석을 하여야 한다. 첫째, 빔 크기는 기존의 1~3 μm 크기보다는 10 μm 이상의 크기여야 한다. 둘째, 기존의 15 nA의 전류 값보다는 8~10 nA의 낮은 전류값을 적용해야 한다. 셋째, 분석 시간은 기존의 10~30초 정도보다 짧은 10초 이하여야 한다. 위의 분석 조건들을 이용하면, 화산유리에서 알칼리원소 (Na, K)의 이동을 줄일 수 있으나, 반면에 이들 원소의 분석적 오차를 증가시킬 수 있는 단점이 있다. 따라서 여러 시료에 대한 반복적인 분석이 필수적이다. 분석오차와 알칼리금속의 이동 문제를 최소화하기 위해 화산유리 분석은 10 μm , 15 Kv, 10 nA의 분석 조건 하에서 이루어져야 한다.

비정질인 화산유리는 쉽게 수화되는 경향이 있다. EPMA를 이용한 주성분 분석 결과는 수화된 정도에 따라 총량이 91~99%의 다양한 범위에 놓이게 된다 (Shane, 2000). 그러므로 이들 자료를 100%로 표준화 시켜야 한다. 비정질의 화산유리는 쉽게 변질되어 K는 부화되고 Na는 결핍되는 양상을 보이기 때문에 분석을 위해서는 신선한 화산유리를 사용하는 것이 좋다.

EPMA 분석에 사용되는 표준물질 (standard material)은 분석하려는 시료와 유사한 결정구조를 가지고 있는 것이 좋다. 예를 들어, 화산유리 분석에 사용되는 표준물질은 흑요석이나 유리질 표준물질이 적당하다.

EPMA 분석 이외에도 화산유리 분석에는 Fig. 1에서와 같이 고가의 분석기기들이 이용될 수 있다. XRF은 0.5~3 g의 화산유리를 이용하여 K, Ca, Ti, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, La, Ce을 분석할 수 있는 기기이나, 이 분석법은 미세한 크기의 결정입자들이 화산유리에 포함되어 같이 분석되는 문제점이 있을 수 있다. XRF 방법으로 감정이 불가능할 경우 INAA를 이용할 수 있다. 시료 0.1~1 g를 이용 20개 이상의 원소를 정밀하게 측정 할

수 있으나, 많은 시간과 금액을 필요로 하는 단점이 있다. 이들 외에도 가능한 화학분석 기기로는 ICP-AES (Induced Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer), ICP-MS (Induced Coupled Plasma-Mass Spectrometer), AAS (Atomic Absorption Spectrometer), Ion Probe 등이 있다.

참고문헌

- 천종화, 한상준, 정대교, 허식, 박장준, 최동림, 1998, 울릉분지 북동부 해저수로 주변 퇴적층의 화산재층서, 지질학회지, 34, 192-210.
- Autefage, F., and Couderc, J.-J., 1980, Étude du mécanisme de la migration du sodium et du potassium au cours de leur analyse a la microsonde électronique, *Bull. Mineral.*, 103, 623-629.
- Bogaard, P.V.D., and Schmincke, H.-U., 1985, Laacher See Tephra - a widespread isochronous Late Quaternary tephra in central and northern Europe, *Geological Society of America Bulletin*, 96, 1554-1571.
- Chun, J.-H., Han, S.-J., and Cheong, D.-K., 1997, Tephrostratigraphy in the Ulleung Basin, East Sea: Late Pleistocene to Holocene, *Geoscience Journal*, 1, 154-166.
- Dugmore, A.J., Larsen, G., and Newton, A.J., 1995, Seven tephra isochrones in Scotland, *The Holocene*, 5, 257-266.
- Fisher, R.V., and Schmincke, H.U., 1984, *Pyroclastic rocks*, Springer-Verlag, Berlin and New York, 472p.
- Froggatt, P.C., and Lowe, D.J., 1990, A review of late Quaternary silicic and some other tephra formations from New Zealand: their stratigraphy, nomenclature, distribution, volume and age, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 33, 89-109.
- Furuta, T., Fujioka, K., and Arai, F., 1986, Widespread submarine tephra around Japan-Petrographic and chemical properties, *Marine Geology*, 72, 125-142.
- Izett, G.A., 1981, Volcanic ash beds: recorders of Upper Cenozoic silicic pyroclastic volcanism in the Western United States. *Journal of Geophysical Research*, 86, 10200-10222.
- Machida, H., and Arai, F., 1983, Extensive ash falls in and around the Sea of Japan from large Quaternary eruptions, *Journal of*

- Volcanology and Geothermal Research*, 18, 151-164.
- Machida, H., Arai, F., Lee, B.-S., Moriwaki, M., and Esaka, T., 1983, Two time-marker tephra of Kyushu origin discovered in Korean Peninsula and Cheju island, *Journal of Geoscience*, 92-96. (in Japanese)
- Machida, H., and Arai, F., 1992, Atlas of Tephra in and around Japan. University of Tokyo Press, 276p.
- Palais, J.M., Kyle, P.R., McIntosh, W.C., and Seward, D., 1988, Magmatic and phreatomagmatic volcanic activity at Mt. Takaha, West Antarctica, based on tephra layers in the Byrd Ice core and field observation at Mt. Takaha, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 35, 295-317.
- 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.
- Park, M.H., Kim, J.H., Kim, I.S., Ryu, B.J., and Yu, K.M., 2005, Tephrostratigraphy and paleo-environmental implications of Late Quaternary sediments and interstitial water in the western Ulleung Basin, East/Japan Sea, *Geo-Mar Lett.*, 25, 54-62
- Pelcher, J.R., Hall, V.A., and McCormac, F.G., 1995, Dates of Holocene Icelandic volcanic eruptions from tephra layers in Irish peats, *The Holocene*, 5, 103-110.
- Perkins, M.E., Brown, F.H., Nash, W.P., McIntosh, W., and Williams, S.K., 1998, Sequence, age and source of silicic fallout tuffs in middle to late Miocene basins of the northern Basin and Range province, *Geological Society of America Bulletin*, 110, 344-360.
- Sarna-Wojcicki, A.M., Meyer, C.E., Roth, P.H., and Brown, F.H., 1985, Ages of tuff beds at East African early hominid sites and sediments in the Gulf of Aden, *Nature*, 313, 306-308.
- Sarna-Wojcicki, A.M., Morrison, S.D., Meyer, C.E., and Hillhouse, J.W., 1987, Correlations of Upper Cenozoic tephra layers between sediments of the Western United State and Eastern Pacific Ocean and comparison with biostratigraphic and magnetostratigraphic age data, *Geological Society of America Bulletin*, 98, 207-223.
- Shane, P., 2000, Tephrochronology: a New Zealand case study, *Earth Science Reviews*, 49, 223-259.
- Thorarinsson, S., 1944, Tefrokronologiska studier pa Island, *Geografiska Annaler*, 26, 1-217.
-
- (2006. 2. 10. 원고 접수)
(2006. 9. 10. 수정본 채택)