

사람 발자국 퇴적층 하부의 테프라 유리 조성 연구: 테프라 기원지와 사람 발자국의 형성시기

안웅산¹ · 손영관^{2,*} · 유우석³ · 류춘길⁴ · 정종욱⁵ · 강창화⁶

¹제주특별자치도 세계유산·한라산연구원

²경상대학교 지질학과 및 기초과학연구소

³제주특별자치도개발공사 지역가치연구팀

⁴한국지질환경연구소

⁵경상대학교 공동실험실습관

⁶제주고고학연구소

요 약

제주도 사거리 사람 발자국 흔적은 2004년 발견 이후 그 형성 시기에 관하여 논쟁이 계속되어 왔다. 본 논문에서는 사람 발자국 퇴적층의 하부에서 현무암질 응회암층을 보고하고, 인근에 위치하는 두 개의 화산체(송악산, 형제섬)와의 테프라 유리 조성 및 외래 암편 함량 비교, 그리고 층서적 관계 해석을 통해 응회암층의 기원 화산체를 추정하고자 한다. 더 나아가 기원 화산체의 화산활동 시기를 밝힘으로써 응회암층 상위에 퇴적된 사람 발자국 퇴적층의 퇴적 시기를 유추하고자 한다. 사람 발자국 퇴적층 하부의 응회암층은 노두상에서 송악산 응회암체까지 연속하여 분포하고, 테프라 유리 조성이 송악산 근거리 화산쇄설층의 그것과 일치한다. 또한, 송악산 화산쇄설물 내에 산출되는 석영 외래 암편들이 사람 발자국 퇴적층 하부의 응회암에서도 확인된다. 이러한 일련의 결과들은 사람 발자국 퇴적층 하부의 응회암층이 송악산 화산분출 시 퇴적된 것임을 지지한다. 더 나아가 사람 발자국 퇴적층 인근 내륙 지역의 고고 유적 발굴지에 분포하는 송악산 응회암층 직하부의 고토양에서 얻은 방사성탄소연대(약 BP 3,600년) 및 토기편의 OSL연대(5.5±0.7 ka), 그리고 최근 얻어진 송악산 응회암 최하부의 응회암층에서 채취된 조개편의 방사성탄소연대(약 BP 3,800년) 등을 종합적으로 고려할 때, 송악산에서 유래한 응회암층 상위에 퇴적된 사람 발자국 퇴적층은 송악산 분출 시기(BP 3,800년 이후) 보다 후기에 퇴적된 현세 후기 퇴적층으로 판단된다. 기존 연구에서 사람 발자국 퇴적층에서 얻은 방사성탄소연대(BP 8,000 ~ 21,000년)는 퇴적 당시 인근 내륙의 육상 고토양층의 침식으로 인해 유입된 재동 탄소 성분에 의해 실제 퇴적 시기보다 더 오랜 연대를 지시하는 것으로 판단된다.

주요어: 제주도, 홀로세, 발자국, 테프라, 유리 샤아드, 방사성탄소연대, 층서

Ung San Ahn, Young Kwan Sohn, Woo Seok Yoon, Choon Kil Ryu, Jong Ok Jeong and Chang Wha Kang, 2015, Geochemical fingerprinting of basaltic glass in tephra deposits underlying the human footprints-bearing strata in Jeju Island, Korea: Provenance of tephra and age of the human footprints. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 51, no. 2, p. 105-126

ABSTRACT: Age of the human footprints in Sagyeri area, Jeju Island, Korea has been a subject of controversies since the discovery in 2004. This study reports a new basaltic tephra layer beneath the human footprints-bearing strata, and infers the source volcano of the tephra by comparing the major element composition of the glass and the componentry of accidental grains with those of the two nearby volcanic edifices (Songaksan volcano and Hyeongje Island) in addition to stratigraphic observations. Then we constrain the deposition age of the human footprints-bearing strata above the tephra layer, via revealing the eruption age of its source volcano. We found that the tephra layer at the footprints site is not only stratigraphically equivalent to the tephra rim beds of the Songaksan volcano but also compositionally identical to the glass in the major element content. Accidental quartz grains, which occur characteristically within the Songaksan Tuff, are also found in the tephra layer beneath the human footprints-bearing strata. These results suggest collectively that the tephra layer beneath the footprints-bearing strata was produced by the eruption of the Songaksan volcano. A set of new age data from the paleosol

* Corresponding author: +82-55-772-1476, E-mail: yksohn@gnu.ac.kr

(^{14}C age : ca. 3,600 yr BP) and the earthenware (OSL age : 5.5 ± 0.7 ka) directly beneath the Songaksan tephra at a nearby archeological site, and from the shells (^{14}C age : ca. 3,800 yr BP) from the lowermost tuff layer of the Songaksan tuff ring indicate that the human footprints-bearing strata, which accumulated above the tephra layer, are late Holocene strata that were deposited after the eruption of the Songaksan Volcano, ca. 3,800 yr BP. The significantly older ages of the organic matter in the bulk sediments at and near the footprints site (ca. 8,000 ~ 21,000 yr BP) are interpreted to be the results of the input of old terrestrial carbon material from the inland areas by reworking processes.

Key words: Jeju Island, Holocene, footprint, tephra, glass shard, radiocarbon age, stratigraphy

(Ung San Ahn, World Heritage & Mt. Hallasan Research Institute, Jeju Special Self-Governing Provincial Government, Jeju 690-700, Republic of Korea; Young Kwan Sohn, Department of Geology and Research Institute of Natural Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Republic of Korea; Woo Seok Yoon, Local Values Research Team, Jeju Special Self-Governing Province Development Corporation, Jeju 695-961, Republic of Korea; Choon Kil Ryu, Korea Institute of Geological Environments, Busan 617-731, Republic of Korea; Jong Ok Jeong, Center for Research Facilities, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Republic of Korea; Chang Wha Kang, Jeju Archaeological Institute, Jeju 690-813, Republic of Korea)

1. 서론

일반적으로 화산분출 작용은 수 시간에서 수일에 걸치는 비교적 짧은 기간 동안 일어난다. 이렇게 분출된 화산쇄설물들은 짧은 시간동안 매우 넓은 지역에 퇴적되는 특징이 있다. 에어로졸 상태의 물질(aerosol component)의 경우에는 지표상에 퇴적되는데 몇 년의 시간이 걸리기도 하지만, 일반적으로 테프라는 수분에서 단 수 일만에 지표로 낙하한다. 이러한 특징을 가지는 테프라(미고결된 화산쇄설물)는 비교적 넓은 지역에 걸쳐 건축(key bed)으로 활용될 수 있어, 고해상도의 동정(synchronizing)과 연대 측정이 요구되는 제4기의 고환경적 혹은 고고학적 기록들을 해석하는 데 중요하게 사용되고 있다(Lowe, 2011).

제주도 남서부 사계리 지역에 분포하는 사람 발자국 퇴적층은 2004년 학계에 보고된 이후 10여 년에 걸쳐 형성시기에 대한 논쟁이 계속되어 왔다(Kim *et al.*, 2004, 2006, 2009, 2010; Cho *et al.*, 2005; Cheong *et al.*, 2006, 2007; Kim and Kim, 2006). 그동안 사람 발자국 화석의 형성시기에 관하여 논쟁이 계속된 것은 상세한 층서적 연구가 부족한 상황에서 단편적인 수치연대(numerical age)(Ar-Ar, OSL, radiocarbon dating 등)에 의존하여 퇴적 연대를 해석하려 하였기 때문으로 여겨진다. 뿐만 아니라, 퇴적층에 대한 방사성탄소연대 측정에 있어서 탄소 성분의 재동 작용은 실제 퇴적 시기보다 오랜 연대치를 나타내거나(Newnham *et al.*, 2004), 젊은 탄소 성분이 퇴적층

을 침투해 아래로 스며들거나 후기의 식물뿌리에 의해 보다 젊은 연대를 보이는 현상들이 보고되기도 하였다(Hammond *et al.*, 1991; Vandergoes and Prior, 2003). 이와 같이 방사성탄소연대가 여러 요인에 영향을 받을 수 있음을 감안하여, 우리는 퇴적 시기에 대한 논란이 계속되고 있는 사람 발자국 사이트에서 건축으로 이용될 수 있는 테프라층을 찾아내고, 테프라연대학(tephrochronology)적 관점에서 층서를 해석하고 동정하여 지금까지 분쟁이 되었던 수치연대적 관점에서의 연구 한계를 극복하고자 한다.

본 연구에서 우리는 제주도 남서부에 위치한 사람 발자국 사이트의 사람 발자국 퇴적층 하부에서 10~24 cm 두께의 현무암질 응회암층을 새롭게 발견하였다. 사람 발자국 사이트 주변에는 동남쪽과 남서쪽으로 각각 2.0 km와 2.3 km의 거리에 두 개의 단성화산체가 위치한다(송악산과 형제섬; 그림 1). 이러한 지리적 여건을 고려하여 새롭게 발견된 사람 발자국 퇴적층 하부의 응회암층의 기원지 및 화산분출 시기를 밝힌다면, 사람 발자국 퇴적층의 퇴적 시기를 보다 명확히 밝힐 수 있을 것이다.

유문암질 테프라의 경우 비교적 균질한 화학 조성을 가지면서 넓은 지역에 걸쳐 분포하여 테프라연대학적 측면에서 비교적 활용이 용이하다. 이에 비해 현무암질 및 안산암질 테프라는 하나의 화산체에서 조성의 다양성이 나타나기도 한다(Fisher and Schmincke, 1984; Shane and Smith, 2000; Luhr, 2001; Erlund *et al.*, 2010; Brenna *et al.*, 2011). 이러한 특징은 상대적으로 테프라 유리 조성을 이용한

기원 화산체 추정이나 응회암층 대비에 어려움으로 작용하기도 한다. 하지만 근거리에 퇴적된 테프라에서 얻어진 상세한 분석 자료를 원거리 테프라와 비교한다면, 화산분출 과정에서 조성 변화를 가지는 테프라일지라도 충분히 동정이 가능할 것이다(Shane and Smith, 2000). 특히 테프라 조성의 불균질성 및 조성 변화의 패턴을 확실히 밝힌다면 테프라 동정에 보다 확실한 증거로 활용될 수 있을 것이다(Lowe *et al.*, 2008).

우리는 사람 발자국 퇴적층 최하부에서 새롭게 발견된 현무암질 응회암층의 분포와 유리 조성 특성, 외래 암편의 함량 등을 근거로 본 응회암층이 송악산 화산분출시 퇴적된 것임을 밝히고, 연대 자료를 바탕으로 송악산의 화산분출 시기를 추정함으로써 사람 발자국 퇴적층의 퇴적 시기를 밝히고자 한다.

2. 지질 개요

제주도는 한반도 남서쪽의 황해 대륙붕에 위치하는 화산섬으로, 약 180만 년 전에서부터 역사시대에 걸친 다양한 화산활동에 의해 형성되었다(Brenna *et al.*, 2012). 동-서 길이가 74 km이며 남-북 길이가 32 km인 제주도는 동북동 방향으로 신장된 타원형의 전형적인 순상화산체이다.

제주도 화산암은 약 45~65%의 SiO₂ 함량 범위를 가지며, 알칼리 현무암에서 조면암에 이르는 알칼리암류를 비롯하여, 전이질 현무암 및 서브알칼리암류인 톨레아이트질 현무암과 톨레아이트질 안산암에 걸친 조성을 나타낸다. 특히 제주도 동서부 지역의 용암류는 남부 및 북부 지역에 비해 전이질 현무암과 서브알칼리암류가 상대적으로 더 우세하게 분포하는 경향이 있다(Koh *et al.*, 2013). 제주화산섬

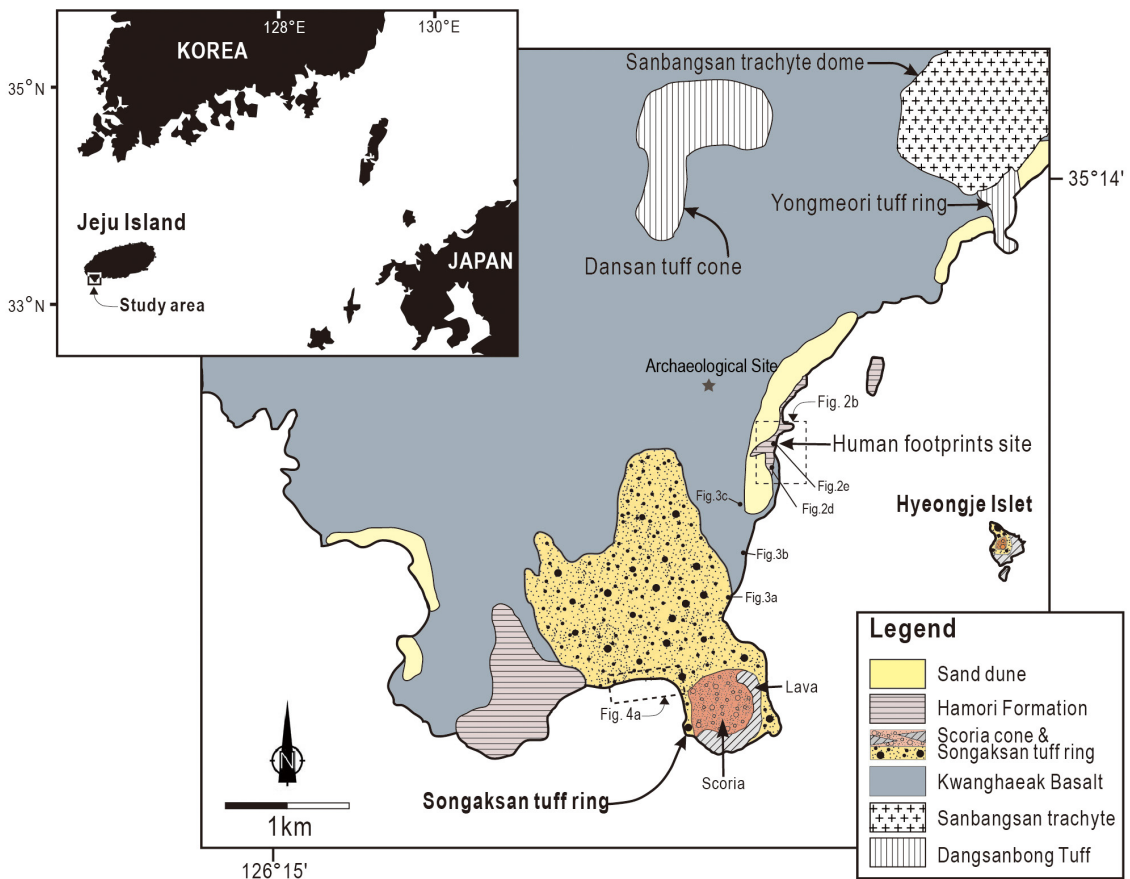


Fig. 1. Geologic map of the southwestern part of Jeju Island (after Park *et al.*, 2000). Inset : Location of Jeju Island.

을 형성한 용암의 양은 대략 350~500 km³ 정도일 것으로 추정된다(Brenna *et al.*, 2012).

1960년대 이후 지하수 개발을 위한 제주 전역에 걸친 시추 작업으로 제주도의 지표 및 지하 지질에 대한 이해가 크게 증대되었다. 시추공 자료 및 화산암내 압편 등에 의하면 제주도의 기반암은 한반도 남서부와 유사하게 선캠브리아 시대의 변성암류, 쥐라기에서 백악기의 화산암과 산성 화산암류 등으로 구성된다(Kim *et al.*, 2002). 이러한 기반암의 상부에는, 제주도의 화산활동이 본격적으로 시작하기 전인 플라이오세 기간 동안 퇴적된 대륙붕 퇴적물로 해석되는 분급이 좋은 석영모래와 진흙이 70~250 m의 두께로 쌓여 형성된 U층(미고결 퇴적층)이 놓여 있다(Koh, 1997; Sohn and Park, 2004). 이러한 U층의 상부에는 현무암질 화산쇄설물과 화석이 다량 포함되어 있는 약 100 m 두께의 서귀포층이 분포하는데, 이 지층은 제주도 화산활동 초기에 대륙붕 환경에서 형성된 수성화산체(응회환과 응회구)와 이들 화산체가 침식되고 다시 퇴적되어 형성된 해성 퇴적암 등으로 구성된다(Sohn and Park, 2004; Sohn *et al.*, 2008). 이 기간 동안 제주도 지하 맨틀에서는 상대적으로 적은 양의 마그마가 형성되어 간헐적이고 국지적인 화산활동이 약 100만 년에 걸쳐 일어났다. 서귀포층이 퇴적되면서 원시 제주도는 변동하는 신생대 제4기의 해수면 위로 점점 성장하였고, 약 30~45만 년전 이후부터 상대적으로 짧은 시간동안 많은 양의 마그마가 생성·분출되어 용암대지 및 순상화산이 형성되고 오늘날과 같은 한라산을 비롯한 제주도의 대략적인 지형이 형성되었다(Brenna *et al.*, 2012; Koh *et al.*, 2013). 특히 지금으로부터 약 18,000년 전의 최종빙기 최성기 이후부터 중기 홀로세 동안에도, 즉 현재와 해수면이 비슷해진 시기에 현재의 해안선을 따라 여러 장소에서 수성화산활동이 일어나 송악산과 일출봉 등의 응회환과 응회구가 형성되었다(Sohn *et al.*, 2002, 2012; Cheong *et al.*, 2007). 최근에는 병악오름과 같은 제주도 내륙 지역에서도 약 5,000년 이내의 화산활동이 보고되고 있다(Lee *et al.*, 2014). 비록 화산분출의 정확한 위치는 알려지지 않았으나 세종실록 『지리지』 등의 역사기록에 의하면 약 1천 년 전에도 제주도에는 소규모의 화산활동이 있었다(Won, 1976).

3. 사람 발자국 퇴적층과 그 하부의 응회암층

우리는 사람 발자국 사이트에서 기반을 이루는 광해악현무암과 사람 발자국 퇴적층 사이에서 지금까지 인지되지 않았던 10~24 cm 두께의 현무암질 응회암층(반고결)을 새롭게 발견하였다(그림 2). 또한, 이 응회암층과 그 남서쪽 2.3 km 거리에 위치한 송악산 응회환 사이에서 동일한 층준의 응회암층이 분포하는 것을 확인하였다(그림 3). 응회암층의 두께는 송악산 응회환으로 가면서 뚜렷이 증가하는 경향이 인지된다. 이는 새롭게 발견된 응회암층이 송악산에서 유래했음을 지시하는 직접적인 증거인 것이다. 이러한 층서적 해석은 연구 지역에 대한 기존의 Park *et al.* (2000) 및 Sohn *et al.* (2002)의 해석과 일치한다. 이러한 야외 증거에 근거하여 우리는 사람 발자국 사이트의 층서를 하부로부터 광해악현무암, 송악산 응회암, 하모리층(사람 발자국 퇴적층), 사구층으로 기재하고 연구 결과를 서술해 나갈 것이다(그림 2).

기반을 이루는 광해악현무암은 해안지대에서 낮고 완만한 언덕 지형을 이루는 파호이호이 현무암으로 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 연대 측정으로 50±15 ka (Koh *et al.*, 2013)의 연대가 보고된 바 있다. 비록 연대의 오차가 크긴 하지만 용암류의 연대는 후기 플라이스토세로 추정된다.

사람 발자국 퇴적층 하부의 응회암은 총 10~24 cm 두께를 가지며, 각각 3~7 cm의 두께를 갖는 2~4개의 층으로 구성된다. 사람 발자국 사이트 내 A 지점과 B 지점에서 응회암층의 색은 유사하나 층의 두께와 퇴적구조는 서로 다르다(그림 2b vs. 2c). A 지점의 응회암층은 일차적 강하퇴적상(광해악현무암의 기복을 맨틀링하는 구조, 괴상 혹은 약한 평행층리, 정점이를 보이는 부가화산력, 부가화산력에 의한 충격구조 등)이 주를 이루나, 부분적으로 근거리 재동 퇴적상(연흔사층리 발달, 랜덤하게 분포하는 부가화산력, 부가화산력의 부분적 마모 등)을 보이는 얇은 층이 협재한다(그림 2b, 2f, 2g). B 지점(사람 발자국 흔적을 가지는 퇴적층 인근 지점)의 응회암층은 얇은 층리가 발달하고 연흔사층리가 흔히 관찰될 뿐만 아니라 층내에 부가화산력이 불규칙하게 분포하며 박편 상에서 부가화산력이 마모된 흔적이 관찰되어, 강하 테프라가 조간대(intertidal zone)에

서 재동되어 퇴적된 것으로 추정된다(그림 2c). 비교적 근거리에서 위치하는 두 지점에서 응회암층의 두께 및 퇴적구조가 서로 상이한 것은 해안지대에 완만한 언덕지형을 이루는 광해악현무암의 지형기복을 따

라 화산쇄설물이 일차적으로 강하 퇴적되고 뒤이어 발생한 재동작용에 의해 부분적으로 재퇴적된 것으로 판단된다. 사람 발자국 사이트 내 A와 B 두 지점에서 일차 및 근거리 재동 응회암층 내에서 공통적

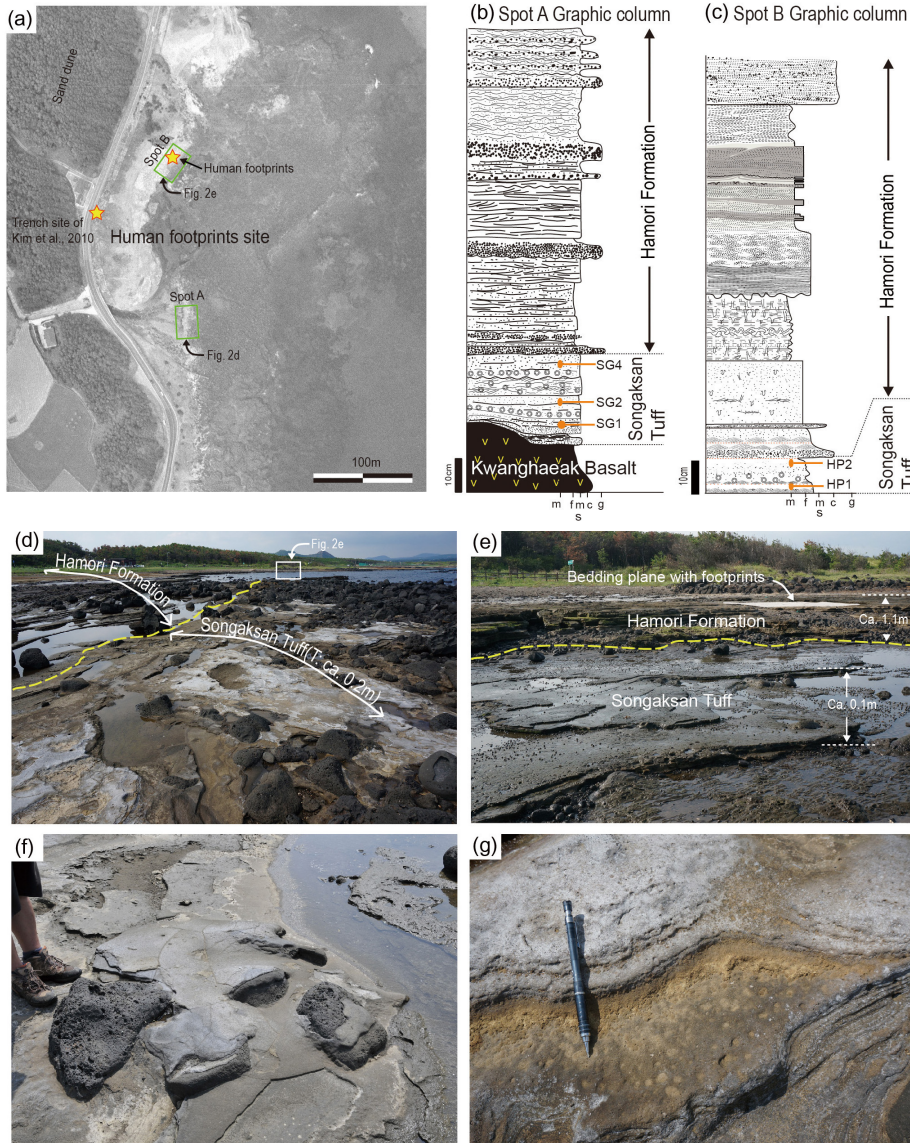


Fig. 2. Aerial view and outcrop features of the human footprints site. (a) Areal view of the human footprints site; (b) Columnar log of the Spot A in the footprints site. SG-numbers represent sample positions; (c) Columnar log of the Spot B in the footprints site. Human footprints are found in the upper part of the Hamori Formation at this spot. HP-numbers represent sample positions; (d) An overview of the Spot A in the human footprints site. Songaksan Tuff is intercalated between the Hamori Formation above and the Kwanghaeak Basalt below; (e) An overview of the Spot B, where the Songaksan Tuff immediately underlies the Hamori Formation having the footprints; (f) Primary fallout tuff bed mantling the protruded blocks of the Kwanghaeak Basalt in the Spot A; (g) Impacted texture on the upper bedding plane of a tuff bed by accretionary lapilli showing normal grading in size on the cross-section.

으로 관찰되는 부가화산력은 사람 발자국 사이트 인근의 응회암층(그림 1의 3b와 3c 지점)에서도 관찰되는 특징으로, 동일한 기원의 응회암층이 주변 지역에 연속적으로 분포함을 유추할 수 있다.

새롭게 발견된 응회암층 상부에 놓이는 사람 발자국 퇴적층(하모리층)은 하부의 중립질에서 왕모래질 입자로 구성된 재동 화산쇄설층과 상부의 이질 퇴적층으로 구성된다. A 지점에는 세립 내지 왕모래 크기의 유리질 재동 화산쇄설층이 주로 퇴적되어 있으나, 그 상위의 이질 퇴적층은 노두 상에서는 확인되지 않는다. 특히 0.7 m 두께의 재동화산쇄설층은 서쪽 혹은 서북서 방향으로 저각으로 경사지는데, 이는 광해악현무암에 의한 국지적 지형 구배에 영향을 받은 것으로 판단된다. B 지점에서는 0.1 m 두께의 세립질의 재동 화산쇄설층이 분포하며, 그 상위에 평행엽층리가 발달하는 이질 퇴적층(사람 발자국이 나타남)이 거의 수평에 가깝게 퇴적되어 있다(그림 2c). 두 지점 모두 최상위에는 중립 내지 조립질의 모래층이 피복하고 있다.

본 연구 대상인 사람 발자국 퇴적층 하부의 응회암층은 일차 강하 퇴적구조(부분적으로 근거리 재동의 특징을 가짐)를 보임과 동시에 주변에 분포하는 응회암층으로 연장된다. 이러한 특징은 본 응회암층이 사람 발자국 퇴적층 인근 지역에서 하나의 테프롤로아이스크론(tephroisochron)으로 활용될 수 있음을 의미하는 것이다. 이 응회암층의 분출 시기를 추정한다면 그 상위에 퇴적된 사람 발자국 퇴적층의 퇴적 연대의 상한을 설정하는 데 크기 기여할 것이다.

4. 시료 채취 및 분석

4.1 테프라 유리 조성 분석

사람 발자국 사이트에 분포하는 응회암층의 기원 지 및 퇴적 시기를 밝히기 위하여 사람 발자국 사이트 내 응회암층, 기원지로 추정되는 두 개의 수성화산체, 그리고 사람 발자국 사이트 인근의 고고 유적 발굴지에서 시료를 채취하였다. 특히 고고 유적 발굴지 응회암층 하부의 고토양층과 토기편에 대해서는 방사성탄소연대와 OSL 연대를 측정하였다. 고고 유적 발굴지의 응회암 하부에서 발굴된 토기편은 응회암의 퇴적 연대를 직·간접적으로 지시한다.

사람 발자국 사이트 내 두 지점에서 반고결된 테

프라 시료(5개)를 채취하였다. 일차 강하퇴적상을 보이는 A 지점에서 3개, 근거리 재동의 특징을 보이는 B 지점에서 2개를 채취하였다(그림 2b, 2c). 그리고 사람 발자국 사이트 응회암층과의 비교를 위해 인근에 위치하는 두 수성화산체(송악산과 형제섬)

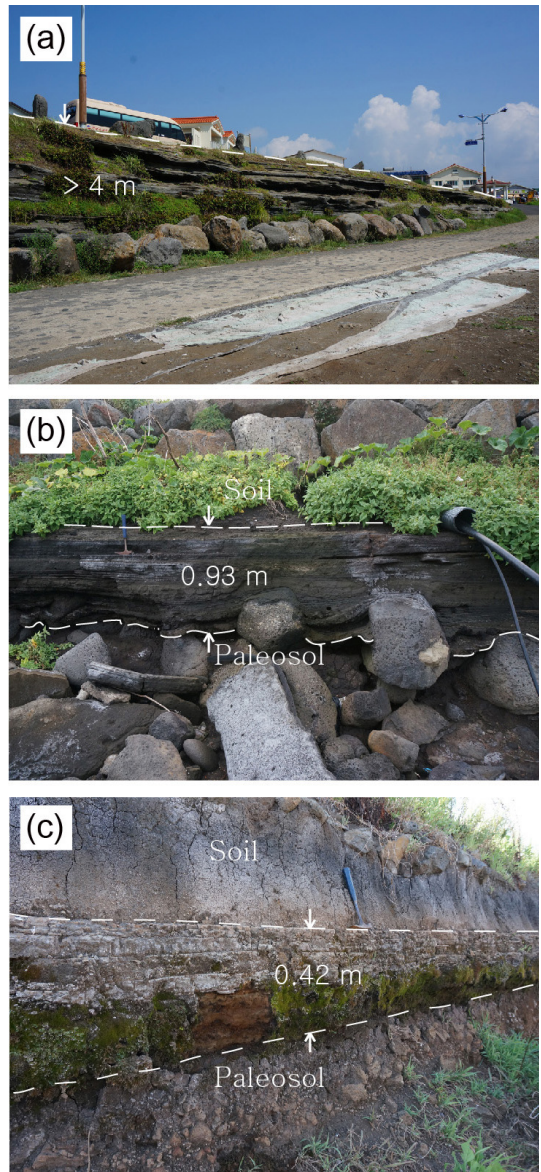


Fig. 3. Outcrops of the Songaksan Tuff from the proximal (a) to the distal parts along the northeastern coast of Songaksan. These tephra beds gradually thin to the footprints sites with lateral continuity (Fig. 2d and Fig. 2e). See Figure 1 for the locations of these outcrops.

의 근거리 화산쇄설층(proximal deposit)에서 각각 15개, 4개의 시료를 채취하였다(그림 4). 송악산과 형제섬은 모두 초기 수성화산활동에 이어 후기의 마그마성 분출과 용암분류(lava effusion)로 화산분출 양상이 변해가는 특징을 보이는 화산체이다.

송악산의 경우 초기 수성화산분출에 의해 퇴적된 근거리 화산쇄설층은 침식면, 퇴적층의 색상, 층격 구조(impact sag)를 가지는 층, 조성변화 등을 기준으로 크게 4개의 층단위(unit)로 구분된다(Brenna *et al.*, 2011). 전암 조성에 있어 하부의 두 개 층단위

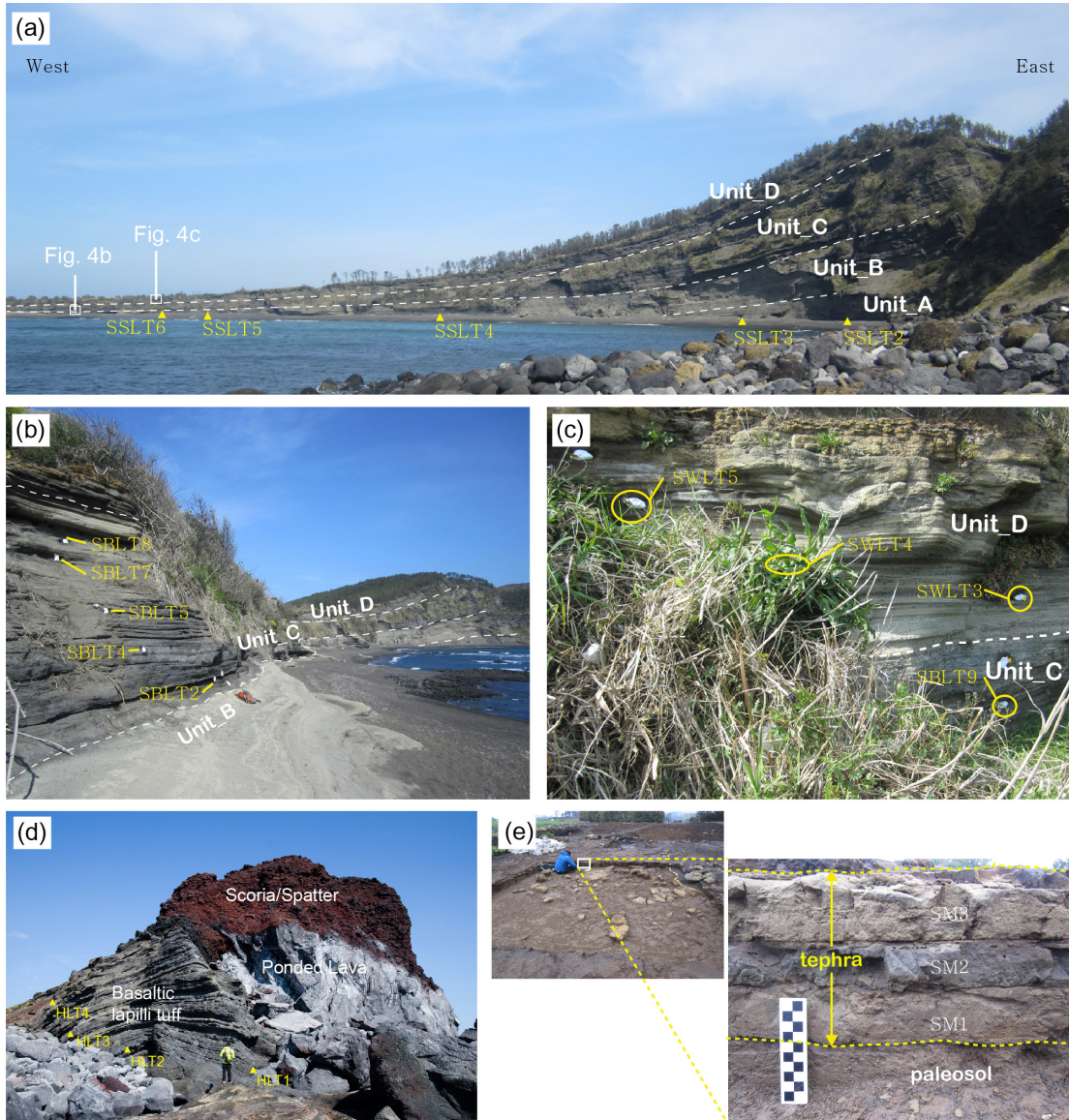


Fig. 4. (a)~(c) Sample positions for the proximal Songaksan tephra. (a) The western rim beds of Songaksan tuff ring divided into four units by truncation surface or impact sag horizons, color of tephra, and chemical composition (Brenna *et al.*, 2011). SSLT_numbers represent sample positions; (b) Sample positions within Unit C (3.5 m thick); (c) Sample positions within Unit D (2 m thick). (d) Sample positions (HLT_number) for the proximal Hyeongje Islet tephra. The outcrop displays bedded basaltic lapilli tuff, ponded lava, and scoria deposit from base to top, which constituted a tuff cone. (e) Sample position for the archeological trench site ca. 600 m to the northeast of the human footprints site, showing the distal Songaksan Tuff above a paleosol. See Figure 1 for the locations of these sampling sites.

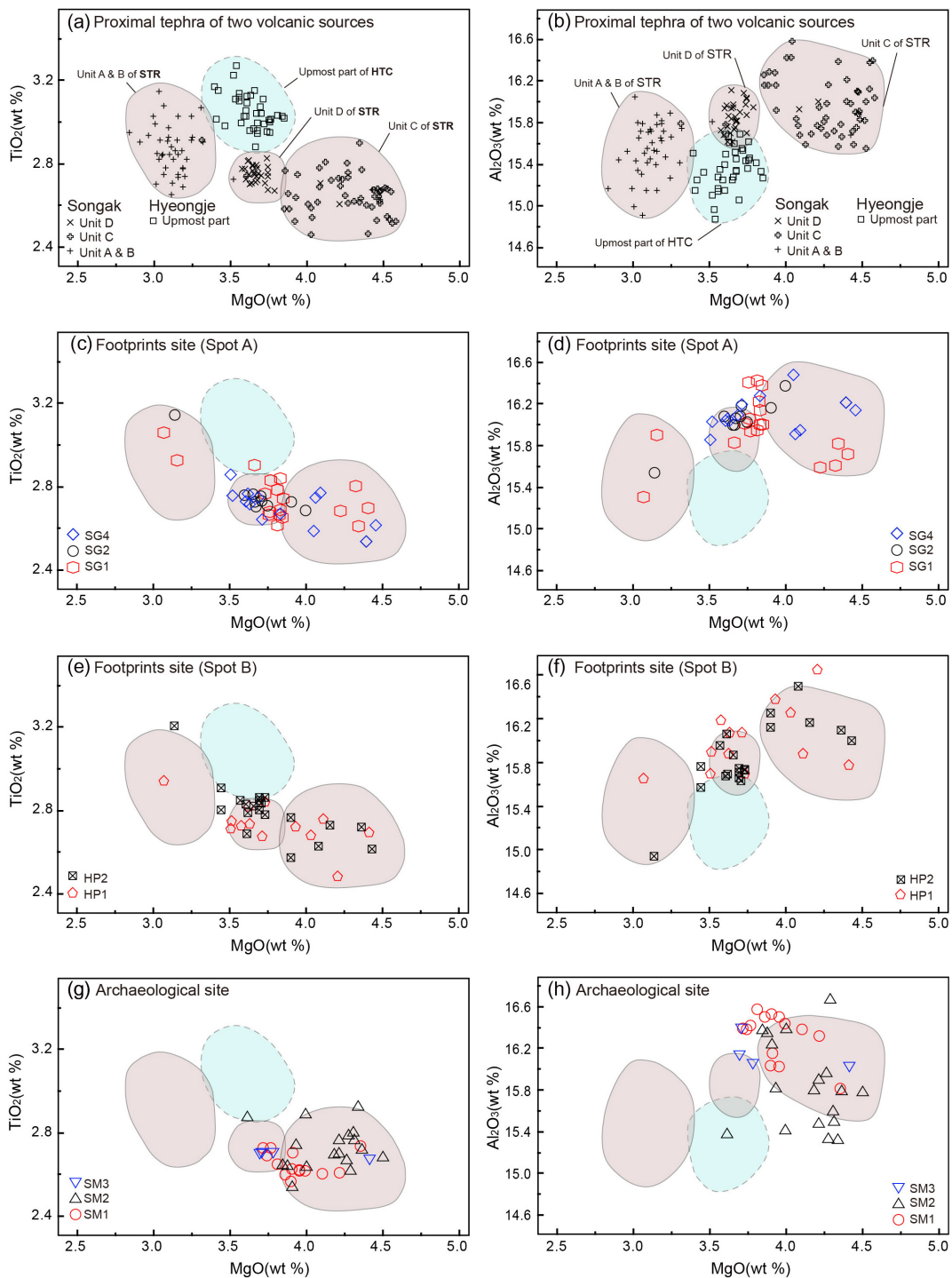


Fig. 5. Composition of individual glass shards. (a) and (b) proximal tephra from two possible source volcanoes; (c) and (d) tephra from Spot A in the footprints site; (e) and (f) tephra from Spot B in the footprints site; (g) and (h) tephra from the archeological site. Data points represent single glass shard analyses. Compositional fields outlined by solid lines represent the each unit of the Songaksan tuff ring (STR), and those outlined by dashed lines represents the Hyeongje Islet tuff cone (HTC). Full data are available from the first author upon request.

는 비교적 조성이 유사하다. 이에 비해 상위 두 개의 층단위는 상대적으로 덜 분화된 것에서 상대적으로 분화된 것으로 조성적 변화를 보인다(Brenna *et al.*, 2011). 우리는 암석 조성과 퇴적구조에 근거하여 송악산 근거리 화산쇄설층을 Unit A ~ Unit D까지 총 네 개의 층단위로 기재하고, 각 층단위 별로 2~5개의 시료를 채취하였다(그림 4a~4c). Unit A와 Unit B는 쇄설물의 구성비 및 색상은 서로 차이가 있으나 조성이 유사하여 Unit A & B로 표기하였다.

형제섬은 초기 수성화산분출에 의한 응회구의 최상부 일부와 후기의 마그마성 분출에 의한 분석층과 용암연(ponded lava) 일부만이 해수면 상에 노출된 작은 섬으로, 수치해도에 의하면 해수면 하에 직경 500 m, 높이 30~50 m 정도의 화산체가 존재할 것으로 판단된다. 이곳에서는 시료 채취가 가능한 해수면 상의 응회암층 부분에 대하여 아래에서 위로 2~3 m 간격으로 4개의 시료를 채취하였다(그림 4d).

사람 발자국 사이트로부터 북서쪽으로 600 m 거리의 내륙에 위치하는 고고 유적 발굴지에도 반고결 상태의 응회암층이 20 cm 두께로 분포한다. 본 사이트에서는 시료 3개를 채취하여 근거리 화산쇄설층 및 사람 발자국 사이트의 테프라 유리 조성과 비교하였다(그림 4e).

송악산과 형제섬의 근거리 화산쇄설층에서 채취된 미고결 혹은 반고결 상태의 테프라는 250~500 μm 의 체로 체질한 후 실체 현미경 하에서 미세 반정 함량이 적은 유리편 10~15개를 골라내어, 에폭시를 이용하여 고정시켜 전자현미분석용 시편으로 제작하였다. 사람 발자국 사이트와 고고 유적 발굴지에서는 반고결 상태로 시료를 채취하여 에폭시로 굳혀 박편을 제작하여 전자현미분석에 사용하였다.

테프라 유리의 주성분은 경상대학교 공동실험실 습관의 JEOL, JXA-8100을 이용하여 분석하였다. 분석 조건은 15 kv, 조사 전류 10 nA, 빔 직경 10 μm , 측정 시간 20 s 이다. 각각의 테프라 시료에 대해 측정이 가능한 10개 이상의 유리 샤드편(glass shard)을 분석하였으며, 분석 총계가 96.5% 이하인 분석치는 비교에서 제외시켰다.

4.2 석영질 외래 암편 함량 측정

화산쇄설물 내에는 분출 당시 기반암으로부터 뜯

겨 올라온 외래 암편(accidental clast)들이 포함되어 있다. 이러한 이유로 외래 암편의 함량과 종류는 폭발 심도를 비롯한 화산활동의 분출 특징을 지시하며, 때에 따라 서로 다른 기원지에서 유래한 테프라들을 구분하는 기준이 되기도 한다(Lorenz, 1986; Németh *et al.*, 2001; Auer *et al.*, 2007). 우리는 후보 화산체들의 근거리 화산쇄설층과 사람 발자국 퇴적층 하부 테프라층 시료에 대하여 BSE (Back-scattered electron) 이미지를 촬영하고, Image J (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>) 프로그램을 이용하여 석영 외래 암편의 부피함량을 측정하였다.

4.3 연대 측정

우리는 사람 발자국 사이트로부터 600 m 이격된 내륙의 고고 유적 발굴지에서 응회암층의 연대를 간접적으로 밝히기 위해 응회암층 아래의 약 2 m 두께의 고토양층에 대하여 상부로부터 순차적으로 시료를 채취하여 방사성탄소연대(5개) 및 OSL 연대(2개)를 측정하였다(그림 9). 더불어 응회암층 하부에서 발굴된 신석기시대 토기편에 대하여 OSL 연대측정을 실시하였다. 탄소 연대 측정은 서울대학교 기초과학공동기기원에서 실시하였으며, OSL 연대 측정은 한국기초과학지원연구원에서 실시하였다.

5. 연구결과

5.1 테프라 유리조성

5.1.1 송악산 응회환의 근거리 화산쇄설층

Brenna *et al.* (2011)은 전암 조성 및 퇴적구조 등을 바탕으로 송악산 응회환 화산쇄설층을 네 개의 층단위로 구분한 바 있다. 본 연구에서 테프라 유리 분석 결과에 의하면 하부 두 개의 층단위인 Unit A와 Unit B는 조성이 유사하여 서로 쉽게 구분되지 않는다. 우리는 테프라 유리 조성에 따라 하부 두 개의 층단위를 묶어서 Unit A & B, 상위 두 개의 층단위는 각각 Unit C와 Unit D로 크게 세 층단위로 구분하였다. 특히 이들 테프라 유리 조성은 MgO의 함량 변화에 따라 쉽게 구분된다(그림 5a, 5b). 하부의 Unit A & B는 2.8~3.3 wt%, Unit C는 3.8~4.5 wt%, Unit D는 3.6~3.8 wt%의 범위를 보인다(그

림 8). MgO 함량을 근거로 판단할 때, 초기의 테프라는 상대적으로 분화되었으며, 중기는 보다 덜 분화되었고, 후기 테프라는 중간 정도 분화되었음을 알 수 있다. 이러한 테프라 유리 조성의 변화는 기존의 Brenna *et al.* (2011)의 화산쇄설물에 대한 전암 조성 연구 결과와 서로 유사하다. 테프라 유리의 MgO 함량이 증가함에 따라 SiO₂, TiO₂, FeO, Na₂O, K₂O, P₂O₅는 감소하고, Al₂O₃, CaO는 증가하며, MnO는 거의 일정한 조성 변화 경향성을 보인다. Unit D 테프라는 전체적으로 Unit A & B와 Unit C의 중간적 조성을 보인다. 이와 같이 송악산 근거리 화산쇄설층 내의 테프라 유리 조성은 각 층단위 별로 비교적 잘 구분됨을 알 수 있다(그림 5a, 5b).

5.1.2 형제섬 응회구의 근거리 화산쇄설층

형제섬의 경우 4개의 화산쇄설물 시료에서 분석된 테프라 유리 조성이 비교적 유사하고, 각 시료별로 큰 차이 없이 동일한 영역에 도시된다(그림 5a, 5b). 형제섬 테프라 유리 조성이 좁은 영역에 도시되는 것은 현재 해수면 위로 드러난 형제섬 응회구의 최상부 부분에 국한된 시료를 분석하였기 때문일 수 있다. 하지만 테프라 유리 조성은 TiO₂, Al₂O₃, FeO, CaO, MgO 성분에 있어서 송악산 테프라 유리 조성 과 확연히 구분된다. MgO 함량에 있어서는 송악산의 Unit D와 유사하나, TiO₂, FeO 함량은 상대적으로 높고, Al₂O₃ 함량은 낮아 서로 확연히 구분된다(그림 5a, 5b). CaO, MnO, SiO₂, P₂O₅, Na₂O, K₂O

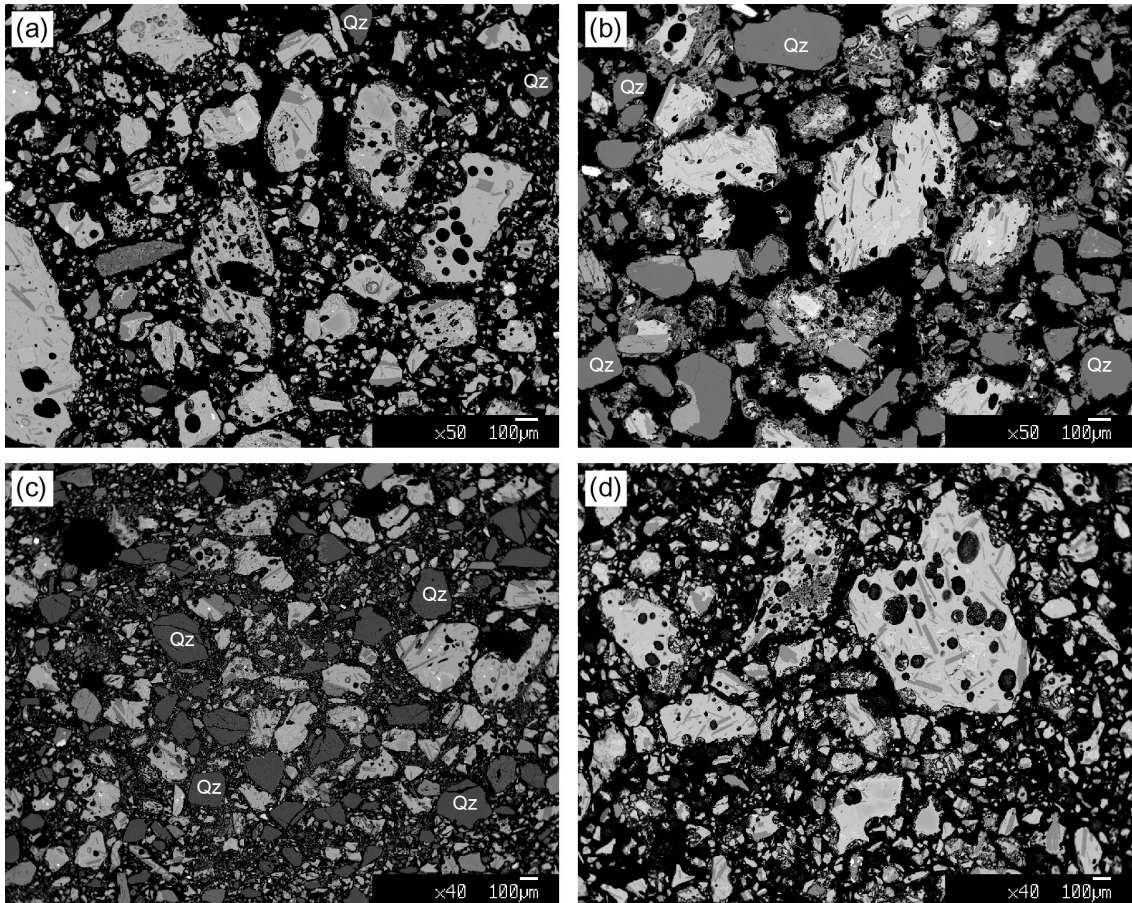


Fig. 6. Back-scatter electron images of bulk tephra, which shows the variable content of accidental quartz grains in each tephra. (a) Unit C of proximal Songaksan Tuff with ca. 1.5 vol % quartz; (b) Unit D of proximal Songaksan Tuff with ca. 22 vol % quartz; (c) Tephra bed beneath the Hamori Formation at Spot A in the footprints site with ca. 15 vol % quartz; (d) Tephra with scarce quartz grains in the uppermost part of the Hyeongje Islet tuff cone.

등의 값은 송악산 테프라 유리 조성과 상당 부분 중첩된다.

5.1.3 사람 발자국 퇴적층 하부의 응회암층

사람 발자국 사이트 내 A 지점의 테프라에서 개별 테프라 입자들 각각의 유리 조성은 송악산 근거리 화산쇄설층의 Unit A & B, Unit C와 Unit D의 조성 영역에 걸쳐 도시된다(그림 5c, 5d). 그러나 대부분의 테프라들은 송악산 근거리 화산쇄설층의 Unit C와 Unit D의 조성 영역에 도시되며, 일부 소수의 테프라 편들이 송악산 Unit A & B 영역에 도시된다. 최하부 시료 SG1 (그림 2b에 표기)은 하나의 박편에서 근거리 화산쇄설층의 4개 층단위에서 관찰되는 조성을 갖는 테프라들이 모두 인지되며, 시료 SG2와 SG4에서는 Unit C와 Unit D 조성을 갖는 테프라가 우세하다.

사람 발자국 사이트 내 B 지점에서 사람 발자국 퇴적층 직하부에서 채취된 테프라 시료는 하부 시료 HP1과 상부 시료 HP2에서 송악산 근거리 화산쇄설층의 Unit A & B, Unit C와 Unit D에 해당하는 조성을 갖는 테프라 편들이 관찰된다(그림 5e, 5f). 특히 Unit C와 Unit D 조성을 가지는 테프라 입자가 우세한 편이다.

테프라 유리 조성을 MgO에 대한 TiO₂, Al₂O₃의 이성분 그래프에 도시해보면, 사람 발자국 사이트의 테프라 유리 조성은 송악산의 Unit C와 Unit D의 조성에 해당하며, 형제섬과는 확연히 구분된다(그림 5b~5f). 앞서 언급한 것과 같이 송악산 근거리 화산쇄설층 테프라 조성은 각 층단위 조성 영역 내에 각각 도시되는데 비해, 사람 발자국 사이트 테프라층은 송악산 근거리 화산쇄설층의 서로 다른 층단위에 해당하는 조성을 갖는 테프라 편들이 하나의 테프라층 내에서 관찰된다.

5.1.4 고고 유적 발굴지 내 응회암층

점토질의 고토양층 상위에 쌓인 응회암층은 심하게 풍화되어 분석 가능한 테프라편들이 드물다(그림 4e, 9c). 이러한 이유로 우리는 상대적으로 풍화되지 않은 유리편, 혹은 유리편 내에서 상대적으로 풍화되지 않은 부분을 분석하였다. 테프라 유리 조성은 송악산 근거리 화산쇄설층의 Unit C와 Unit D의 조성영역에 도시되기도 하지만 전반적으로 Al₂O₃는

약간 높거나 낮은 값을 나타낸다(그림 5g, 5h). 실제로 최하위 시료 SM1은 Al₂O₃가 높게, 그리고 상위 시료 SM2와 SM3은 상대적으로 낮은 영역에 도시되는 경향이 있다. 이는 풍화에 의한 화산유리의 변질에 의한 것으로 여겨진다(Oelkers and Gislason, 2001). 이러한 변질의 영향을 감안한다면 이 테프라는 송악산 근거리 화산쇄설층의 Unit C와 Unit D의 조성과 유사하다.

5.2 응회암층 내 외래 암편의 함량

송악산 근거리 화산쇄설층 내에는 세립의 석영편들이 노두 상에서 맨눈으로도 관찰될 만큼 함유되어 있으며, 그 함량은 층단위 별로 다르다. Unit A와 Unit C는 각각 그 함량이 1.6 vol%와 1.5 vol%로 상대적으로 적으며, Unit B와 Unit D는 각각 8.7 vol%와 22.0 vol%로 월등히 많이 포함되어 있다. 사람 발자국 사이트의 응회암층에서는 A 지점과 B 지점에서 각각 8.0 vol%와 15.0 vol%를, 고고 유적 발굴지

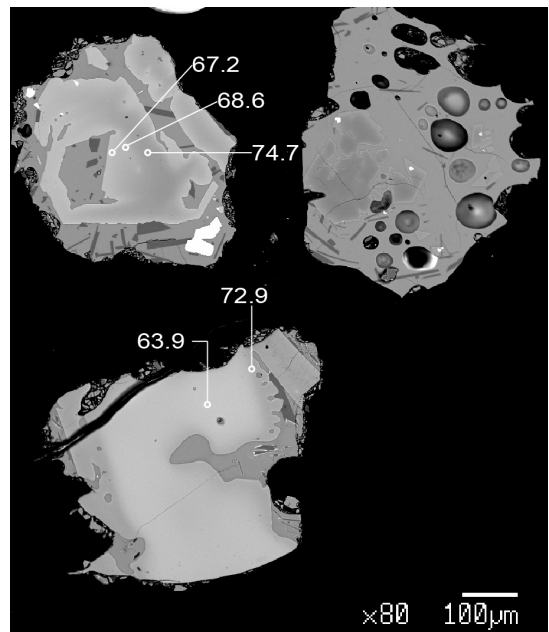


Fig. 7. Back-scatter electron images of olivines in Unit C. One (upper-left) displays an Mg-rich core (darker grey) surrounded by an Mg-poor mantle (pale grey). Another (lower) shows an Mg-poor and resorbed core (pale grey) surrounded by an Mg-rich and partially resorbed mantle (darker grey). Numbers on BSE image are Fo content [Fo=100*Mg/(Mg+Fe_i) in mol; Fe_i=total iron].

에서는 2.5 vol%의 석영이 포함되어 있다. 반면 형 제섬 근거리 화산쇄설층 내에는 석영이 거의 포함되어 있지 않다(그림 6).

5.3 연대 측정

우리는 고고 유적 발굴지의 응회암층 하위에 놓 이는 고토양층에서 가장 상부에서 하부로 가면서

Table 1. AMS radiocarbon data for paleosol underlying the tephra bed in the archeological site.

Sample code	¹⁴ C age yr BP	δ ¹³ C (‰)	Calibrated age (2σ range) Cal yr BP	Laboratory code	Note
SSAMS4-1	3,640±50	-20.16	3,965±135	SNU13-062	paleosol
SSAMS4-2	6,740±60	-17.63	7,590±100	SNU13-063	paleosol
SSAMS4-3	11,860±80	-23.41	13,690±210	SNU13-064	paleosol
SSAMS4-4	15,860±110	-18.91	19,095±225	SNU13-065	paleosol
SSAMS4-5	15,420±130	-25.00	18,755±185	SNU13-066	paleosol

Calibrated ages are based on IntCal04 calibration curve and Oxcal v3.10.

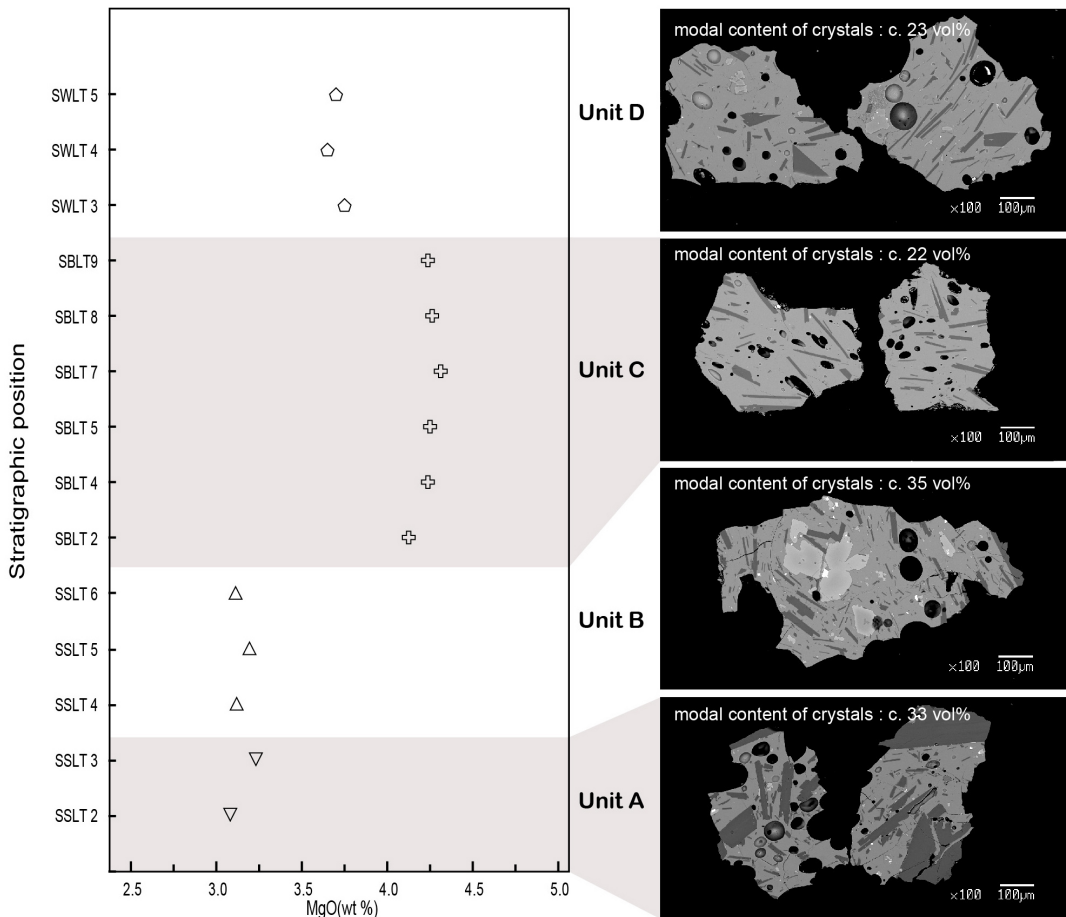


Fig. 8. Variation of MgO contents and crystallinity of glass shards according to the stratigraphic position in the Songaksan tuff ring.

Table 2. OSL age results and summary of dosimetry for paleosol and earthenware underlying the tephra bed in the archeological site.

Sample Code	Dose Rate (Gy/ka)	Water content*(%)	Equivalent Dose (Gy)	Aliquots used** (n/N)	OSL age (ka, 1σ SE)
SS4-1	2.20±0.06	29.6	35.3±0.4	16/16	16.0±0.5
SS4-1	2.59±0.07	27.6	69.2±1.0	14/16	26.7±0.8
BOSUNG (earthenware)	3.43±0.02	20±20	15.9±0.5	16	5.5±0.7

3,640±50 yr BP에서 15,860±110 yr BP의 탄소 연대를 얻었다(그림 9). 최하부에서의 일부 역전된 연대치를 제외하면 하부에서 상부로 가면서 고토양층의 연대는 점진적으로 젊어진다(표 1). 더불어 방사성 탄소연대 측정 지점의 상하부에서 두 개의 OSL 연대를 측정하였는데, 방사성탄소연대에 비해 10~15 ka 정도 더 오랜 연대를 보인다(그림 9; 표 2). 또한, 응회암층 직하부에서 발굴된 토기편에 대해 OSL 연대 측정을 실시하여 5.5±0.7 ka의 연대를 얻었다(표 2). 이 연대는 고토양층에서 얻은 가장 젊은 탄소 연대보다는 오랜 연대를 갖지만 고토양층에서 얻은 OSL 연대보다는 매우 젊은 연대를 보인다.

6. 토 의

6.1 테프라 공급지 추정

테프라 공급지 추정에 앞서 우리는 인근에 위치하는 두 개의 고기 화산체(용머리응회환, 단산 응회환 및 응회구)를 공급지 후보 화산체에서 제외하였다. 왜냐하면 두 개의 오래된 수성화산체는 모두 층서상 광해악현무암 아래에 놓일 뿐만 아니라(Park *et al.*, 2000), 사람 발자국 사이트와 그 주변의 동일한 층준에 분포하는 응회암층이 일차 강하 응회 퇴적상 및 근거리 재동 퇴적상을 보이기 때문에 사람 발자국 퇴적층 하부의 응회암층이 고기 수성화산체로부터 먼 거리를 재동 퇴적되었을 가능성은 매우 낮기 때문이다. 또한 사람 발자국 퇴적층과 고기 화산체 사이의 지형적 구배 및 하천 발달 양상 등을 고려할 때, 이들 고기 화산체로부터 침식된 화산쇄설물이 사람 발자국 사이트로 이동되기는 어려웠을 것으로 판단된다(그림 9b).

일반적으로 화산쇄설물의 공급지 추정을 위해 테프라 유리의 주성분 원소, 미량원소뿐만 아니라 광

물 조합, 외래 암편의 포함 유무 등 다양한 비교 방법이 적용된다(Lowe, 2011). 본 연구에서는 사람 발자국 사이트의 최하부에서 발견된 테프라의 유리 조성 및 외래 암편의 함량(유무)을 인근에 위치한 두 화산체의 근거리 화산쇄설물과 비교하여 그 공급지를 추정하였다.

먼저 테프라 유리조성을 살펴보면, 사람 발자국 퇴적층 하부 응회암층의 테프라 유리 조성은 대체로 송악산 근거리 화산쇄설층의 Unit C와 Unit D의 조성 영역에 걸쳐 나타난다. 그리고 지리적 위치, 층서 및 암상에 근거할 때, 사람 발자국 퇴적층 하위의 응회암층과 동일한 층준에 놓이는 것으로 판단되는 고고 유적 발굴지(사람 발자국 사이트로부터 내륙으로 약 600 m 이격된 곳)의 응회암층 또한 송악산 근거리 화산쇄설층의 Unit C와 Unit D 테프라 조성영역에 분포한다. 이에 비해 해당 화산쇄설물의 또 다른 기원지로 고려되었던 형제섬 근거리 화산쇄설물의 유리 조성은 동일한 MgO 함량 구간에서 사람 발자국 사이트 테프라에 비해 TiO₂와 FeO 함량은 많고, Al₂O₃는 적어, 사람 발자국 사이트 및 고고 유적 발굴지의 테프라 유리와는 그 조성이 서로 다름을 확인하였다. 테프라의 유리 조성 비교는 사람발자국 사이트 응회암층의 기원지가 송악산임을 지시하는 것이다.

다음으로 각 조사 지점에서의 응회암내 석영 외래 암편 함량을 살펴보면, 송악산 근거리 화산쇄설물의 경우 층단위 별로 적게는 1.5 vol%에서 많게는 22 vol%까지의 범위를 보이는데 반해, 형제섬 근거리 화산쇄설물의 경우 거의 관찰되지 않는다. 이는 석영 외래 암편 포함 유무만으로도 이들 두 화산체로부터 유래한 화산쇄설물을 구분할 수 있는 기준으로 활용될 수 있음을 의미하는 것이다. 이러한 관점에서 사람 발자국 사이트 및 고고 유적 발굴지 응회

암층에서의 석영 외래 압편 함량을 살펴보면, 각각 8 ~ 15 vol%와 2.5 vol%의 함량을 보여, 이들 두 지역의 응회암층 모두 송악산에서 유래했음을 유추할 수 있다.

그렇다면, 사람 발자국 사이트와 고고 유적 발굴지의 테프라 유리 조성은 대체로 송악산 근거리 화산쇄설물의 Unit C와 Unit D에 유사한데 비해, 그 석영 외래 압편의 함량은 송악산 근거리 화산쇄설물의 Unit C (1.5 vol%)와 Unit D (22 vol%) 중 어느 것보다도 꼭 일치하지는 않는 이유는 무엇일까? 이는 외래 압편이 화도 주변의 기반암 조성, 마그마 파편화 심도 변화 등의 다양한 원인에 의해 마그마 분출 과정에서 그 함량이 크게 달라질 수 있기 때문으로 판단된다. 또한, 원거리 화산쇄설층의 경우 기원 화산체의 모든 화산분출 사건들을 기록하고 있는 것이 아니기 때문에 원거리와 근거리 화산쇄설층에서의 외래 압편 함량은 서로 크게 다를 수 있을 것이다. 이는 특정 화산활동 시기만을 지시하는 제한된 시료에서 측정된 외래 압편 함량만으로 테프라를 대비하는 것에는 제한이 있을 수 있음을 의미하는 것이다. 이에 비해 테프라의 유리 조성은 마그마 펄스 단위별로 일정 기간 비교적 일정한 조성을 나타내기 때문에 테프라의 기원 화산체를 추적하는데 보다 유용한 지시자가 될 수 있을 것으로 판단된다.

이상을 종합해 보면, 사람 발자국 퇴적층 하위에 쌓여 있는 응회암층은 송악산 응회환을 형성한 수성 화산분출시 퇴적된 것으로 해석하는 것이 타당할 것이다. 이러한 해석은 앞서 언급한 바와 같이 사람 발자국 사이트와 송악산 응회환체 사이에서 응회암층이 연속해서 분포하는 야외 증거에 의해서도 지지된다.

6.2 테프라 조성의 다양성

흔히 많은 소규모 화산체들이 단성화산(monogenetic volcano)으로 인식되고 있지만, 이들 화산체들은 작은 시간적 간격을 두거나 혹은 거의 연속적으로 분출하면서 다양한 마그마 조성 변화를 보이거나 다양한 분출 양상을 보인다(Fisher and Schmincke, 1984; Shane and Smith, 2000; Luhr, 2001; Erlund *et al.*, 2010; Brenna *et al.*, 2011). 이는 테프라를 분출한 기원 화산체의 근거리 화산쇄설물과 화산체로부터 먼 거리에 분포하는 원거리 테프라층을 상호 비교 동정하는 것에 어려움으로 작용할 수 있다(Shane

and Smith, 2000). 하지만, 조성이 서로 다른 하나 이상의 마그마 펄스로부터 유래한 서로 다른 조성의 테프라들이 인지된다면 이들 테프라 조성의 다양성은 다중 지문(multiple fingerprints)으로서 보다 확실한 테프라 동정의 도구가 될 수도 있다(Lowe *et al.*, 2008). 더 나아가, 근거리 테프라층(proximal tephra deposit)에 대한 상세한 테프라 조성 연구가 수행된다면, 마그마 조성 및 화산분출 양상에서 나타나는 다양성은 화산 및 마그마 분화 과정에 대한 전반적인 기록을 유추해 낼 수 있는 단서가 되기도 한다(Smith *et al.*, 2002, 2006; Shane *et al.*, 2005; Tryon and McBrearty, 2006; Turner *et al.*, 2008).

본 연구에서 송악산 근거리 화산쇄설층과 사람 발자국 사이트의 응회암층 내 테프라 유리 조성은 개별 유리 샤아드(glass shard)들 사이에서 상당한 조성적 다양성이 관찰된다(그림 5). 이에 비해 형제섬 테프라의 경우 비록 제한적 시료 채취로 조성의 다양성이 관찰되지 않을 수 있지만, 송악산 근거리 테프라 및 사람 발자국 사이트 테프라에 비해 조성의 다양성이 잘 관찰되지 않는다. 더 나아가 이들 응회암층에서 나타나는 테프라 조성 다양성의 양상을 살펴보면, 근거리 화산쇄설층의 경우 층단위(Unit) 별로 조성이 변화하는데 비해, 사람 발자국 사이트 및 고고 유적 발굴지와 같은 원거리 응회암층의 경우 박편 크기 정도의 두께를 갖는 하나의 층에서 다양한 조성을 가지는 테프라편들이 함께 산출된다. 즉, 송악산 화산분출로 퇴적된 근거리 화산쇄설층과 사람 발자국 사이트 및 고고 유적 발굴지와 같은 원거리 화산쇄설층에서의 테프라 조성에 있어서 그 다양성의 양상이 서로 다른 것이다.

먼저 송악산 응회환의 근거리 화산쇄설층에 나타나는 층단위별 조성의 변화는 짧은 시간적 간격을 가지고 분출한 서로 다른 마그마 조성을 가지는 마그마 펄스에서 기인한 것으로 해석된 바 있다(Brenna *et al.*, 2011). 송악산의 근거리 화산쇄설층의 각 층단위별 MgO 함량과 결정화 정도의 변화도를 살펴보면, Unit A & B와 Unit C 사이에서 불연속적인 간격이 뚜렷이 인지된다(그림 8). 이러한 특징은 화학 조성, 상승 속도, 냉각 속도, 온도, 탈가스화 정도 등에 있어서 상당한 차이를 보이는 서로 다른 마그마 펄스가 순차적으로 분출하였음을 지시하는 것으로 추정된다(Helz and Thornber, 1987; Luhr, 2001;

Johnson *et al.*, 2008, 2010; Del Gaudio *et al.*, 2010). 더불어, 서로 다른 조성 혹은 물리적 조건을 가진 순차적 마그마 펄스들은 혼합(mixing)과 물리적 간섭을 경험한 것으로 판단된다(Sparks and Pinkerton, 1978; Gerlach and Grove, 1982). 왜냐하면 송악산 근거리 화산쇄설층의 네 개의 층단위 모두에서 누대상 감람석 반정 혹은 부분 용식된 감람석 반정들이 관찰되기 때문이다. 이러한 조직은 순차적 마그마 펄스들 간의 혼합과 간섭에 의해 마그마가 비평형 상태에 있었음을 지시하는 것이다(Coombs *et al.*, 2000; Costa and Chakraborty, 2004; Morgan *et al.*, 2004; Shane *et al.*, 2008). 특히 상대적으로 분화된 특징을 보이는 마그마 펄스(Unit B와 Unit D) 사이에서 덜 분화된(less evolved) 마그마 펄스에 의해 분출된 Unit C 테프라의 경우 정누대(normal zoned)와 역누대(reversed zoned) 감람석 반정이 동시에 관찰된다(그림 7). 이러한 특징들은 조성이 서로 다른 순차적 마그마 펄스들 간에 혼합 작용이 일어났음을 지시한다. 결과적으로 송악산 근거리 화산쇄설층의 테프라 조성은 서로 다른 조성의 마그마 펄스들이 지표로 상승하는 과정에서 화도(conduit) 혹은 분출 전 천부 마그마 방에서의 혼합과정을 겪은 결과물로 여겨진다(Bons *et al.*, 2004; Shane *et al.*, 2005, 2008; Smith *et al.*, 2005). 하지만 마그마 펄스 사이의 혼합과정이나 공간적 위치에 관한 세부 논의는 이번 논문의 연구 범위를 벗어나는 것으로 별도의 연구가 필요할 것이다.

반면, 사람 발자국 사이트와 고고 유적 발굴지의 원거리 테프라의 경우 송악산 근거리 화산쇄설층의 4개 층단위에 해당하는 조성을 가진 테프라편들이 박편 크기의 두께를 가지는 하나의 층에서 관찰된다. 하지만 대부분의 경우 Unit C와 Unit D의 조성을 가진 테프라 입자가 주를 이룬다. 앞서 살펴본 바와 같이 하나의 층 내에서 서로 다른 마그마 펄스를 지시하는 각각의 층단위 조성을 가지는 테프라들이 동시에 나타나는 원인으로는 ① 테프라 퇴적지에서의 화산재의 근거리 재동 작용(Davies *et al.*, 2004; Shane *et al.*, 2006), ② 서로 다른 조성의 마그마 혼합(Smith *et al.*, 2002, 2005, 2006; Shane *et al.*, 2005), ③ 퇴적 후 테프라편의 수직적 이동(Enache and Cumming, 2006; Brendryen *et al.*, 2010; Payne and Gehrels, 2010), ④ 화구 내로 재순환된 테프라의 재분출(Shane

and Smith, 2000) 등의 가능성을 생각할 수 있다.

앞서 우리는 서로 다른 조성의 마그마 펄스들의 순차적 분출과 그들 간의 부분적 혼합으로 인해 층단위 별로 서로 다른 조성을 보이지만 층단위 내에서는 비교적 일정한 조성을 가지는 테프라가 분출되었다는 것을 살펴보았다. 근거리 화산쇄설층의 각 층단위 내에서는 테프라 유리 조성이 비교적 동일한 것으로 미루어 볼 때, 원거리 화산쇄설층 내 하나의 층에서 관찰되는 테프라 유리 조성의 불균질성을 단순히 마그마 혼합의 결과로 해석하기는 어려울 것이다. 더불어 사람 발자국 산출지의 A 지점과 같이 원거리 화산쇄설층이 일차 강하에 의한 퇴적구조를 갖고 있는 것으로 미루어 재동작용에 의해 서로 다른 조성의 테프라가 혼합되었다고 유추하기에도 어려움이 있다. 뿐만 아니라 퇴적 후 테프라 입자가 이차적 수직 이동을 하였다고 판단할 야외 기재적 혹은 박편 상에서의 특징은 관찰되지 않는다. 이러한 이유로 우리는 원거리 화산쇄설층에서 하나의 층에서 관찰되는 테프라 조성 다양성의 원인을 화산분출 과정에서 미고결 쇄설성 퇴적물로 이루어진 응회환체로부터 화구 내로 붕괴되어 들어간 테프라가 뒤이어 발생한 화산분출로 인해 재순환되어 분출한 결과라 생각한다. 현무암질 마그마를 분출하는 단성 화산활동은 여러 번의 분출 에피소드와 휴지기를 가지는 분출특징을 가질 뿐만 아니라(Luhr, 2001; Heliker *et al.*, 2003; Pioli *et al.*, 2008; Brenna *et al.*, 2011), 단속적인 화산분출 과정 동안 미고결 화산쇄설물로 이루어진 화산체들이 화구 내로 붕괴되고 다시 분출하는 현상들이 몇몇 화산체에서 목격되거나 유추된 바 있다(Lorenz, 1986; Heliker *et al.*, 2003; Sohn and Park, 2005; Auer *et al.*, 2007; White and Ross, 2011).

따라서 사람 발자국 사이트 및 고고 유적 발굴지에서의 원거리 테프라 조성의 불균질성을 토대로 송악산 화산체에서의 특별한 화산 사건과 원거리에서의 화산쇄설물 퇴적 시기를 유추할 수 있을 것이다. 사람 발자국 사이트에서의 테프라 편들은 대부분 Unit C와 Unit D의 조성 영역에 해당한다. 이는 사람 발자국 사이트의 화산쇄설물들이 Unit D 분출시에 퇴적된 것임을 지시하며, Unit C를 퇴적시킨 화산분출 이후 화구의 대규모 붕괴가 있었음을 유추할 수 있다. 다시 말해, Unit A & B, Unit C 분출 단계

를 거치면서 화구직경이 매우 커지고 깊어진 상태에서, Unit C와 Unit D 사이의 분출 휴지기에 많은 양의 미고결 화산쇄설물들이 화구 내부로 무너져 내렸을 것으로 예상된다. 이 시기에 화구 내로 붕괴되어 들어간 화산쇄설물들은 Unit D 분출 시 함께 분출되어 원거리까지 이동되어 퇴적되었을 것으로 판단된다.

한편, 사람 발자국 사이트와 고고 유적 발굴지 등이 위치한 송악산 북동쪽 원거리 화산쇄설층에서는 네 번의 마그마 펄스 중 Unit C와 Unit D의 조성영역에 도시되는 테프라층만이 주로 분포한다. 이는 원거리 화산쇄설층이 송악산 화산분출 사건들을 모두 기록하기 보다는 강력한 분출 사건에 의해 분출된 일부 화산쇄설물만을 기록하거나(Shane and Smith, 2000), 혹은 화산분출 과정에서 우세한 바람의 방향에 의해 화산체의 특정 방향에만 특정 시기의 테프라만이 차별적으로 퇴적되었을 가능성을 생각할 수 있을 것이다(Shane *et al.*, 2008).

6.3 사람 발자국 퇴적층의 퇴적 시기

앞서 주변 화산체의 테프라 유리 조성 및 석영 외래 암편 유무 비교를 통해, 사람 발자국 퇴적층 하부의 응회암층이 송악산 분출시 퇴적된 것임을 밝혔다. 아울러 본 응회암층과 층서적으로 동일하다고 추정되는 고고 유적 발굴지의 응회암층 또한 송악산에서 유래한 것임을 재차 확인함으로써, 송악산 기원의 화산쇄설물이 인근 주변의 지표면 직하부에 수평적으로 연속적으로 분포하는 것을 확인하였다. 따라서 제주도 남서부 일대에 분포하는 송악산 테프라의 분출 시기를 측정할 수 있다면 층서적으로 연관된 사람 발자국 퇴적층의 퇴적 시기를 간접적으로 파악할 수 있을 것이다.

테프라의 연대를 추정하는 방법으로는 테프라 내 유리 혹은 일차 광물(zircon, hornblende, K-felspar, biotite, quartz 등)을 이용하여 직접적으로 연대를 측정하거나, 테프라 주변 물질을 이용하여 간접적으로 연대를 추정하는 방법(radiometric, incremental, age-equivalence, age-modelling of sediment sequences)이 있다(Lowe, 2011).

우리는 고고 유적 발굴지에서 고토양층에 대한 방사성탄소연대 측정 결과 3,640±50 yr BP (그림 9), 그리고 응회암층 직하부에서 발굴된 신석기 시대 토

기편에 대한 OSL 연대 측정으로 5.5±0.7 ka의 연대를 얻었다(그림 9). 그리고 최근 Sohn *et al.* (in review)은 송악산 서쪽 근거리 화산쇄설층 최하부에서 채취된 3개의 조개편에서 각각 3,720±50 yr BP, 3,740±50 yr BP, 4,130±60 yr BP의 방사성탄소연대를 보고한 바 있다. 이러한 탄소 연대 결과들은 송악산 서쪽의 하모리층의 기저부에서 채취된 조개편에서 얻어진 기존 방사성탄소연대(3,900±100과 4,090±90 yr BP (Sohn *et al.*, 2002); 3,840±40 yr BP (Cheong *et al.*, 2006))와 비교적 잘 일치한다(그림 10). 비록 하모리층의 기저부에서 얻은 조개편 탄소 연대 중 일부가 송악산 응회암층 하부에 얻은 조개편 탄소 연대에 비해 조금 더 오랜 연대를 보이긴 하지만, 일반적으로 화산활동에 연이어 거의 동시적으로 화산쇄설물이 재동 퇴적된다는 점과 조개편과 같은 연대 측정 대상 물질이 재동될 수 있다는 점을 고려한다면, 이들 송악산 응회암층 하부에서 얻은 조개편의 연대 측정 결과(Sohn *et al.*, in review)들은 송악산 화산분출 시기로 추정할 수 있는 가장 이른 시기를 지시하는 것이라 생각된다.

하지만 이러한 방사성탄소연대들은 사람 발자국 퇴적층(사람 발자국 사이트내 및 인근)에서 얻은 기존 벌크 탄소 연대(10,901±60 ~ 15,161±70 yr BP (Cho *et al.*, 2005); 8,842±55 ~ 21,160±110 yr BP (Kim *et al.*, 2010))보다 훨씬 젊은 연대이다.

본 연구를 통해 밝혀진 층서에 의하면, 사람 발자국 퇴적층이 송악산 응회암층 상위에 놓이는 퇴적층이라면 마땅히 송악산 응회암 하부에서 얻은 탄소 연대(약 3,600 yr BP)나 송악산 응회암층 하부의 조개편에서 얻은 탄소 연대(약 3,700 ~ 4,100yr BP)보다 더 젊은 연대를 보여야 할 것이다. 그렇다면 왜 송악산 응회암층 상위에 퇴적된 사람 발자국 퇴적층의 탄소 연대가 송악산 화산활동 시기로 보다 더 오랜 연대를 보이는 것인가? 우리는 재동된 탄소 성분이 사람 발자국 퇴적층 형성 시 유입되었을 가능성을 제기한다. 재동된 탄소 성분의 유입은 해안의 조간대 퇴적상을 갖는 사람 발자국 퇴적층 내 탄소 성분이 육상 환경에서 기원한 탄소 성분임을 지시(Lamb *et al.*, 2006)하는 매우 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 값(-27.00 to -33.4 3‰ of Cho *et al.*, 2005; -23.1 to -35.8‰ of Kim *et al.*, 2010)을 보이는 점, 그리고 사람 발자국 사이트 인근 트렌치에 노출된 퇴적층에서 얻은 벌크 방사성

탄소연대(Kim *et al.*, 2010)에서 연속적인 연대 역전 현상이 나타나는 점(from 17,612±95 to 21,160±110 yr BP in ascending order from Table 1 in Kim *et al.*, 2010) 등으로 미루어 강하게 의심된다. 일례로 Newnham *et al.* (2004)는 뉴질랜드의 Lake Omapere로부터 회수된 코아에서 8.0 ka와 5.4 ka의 방사성탄소연대를 보이는 호수 퇴적층 사이에서 이미 그 분출 연대를 알고 있는 Kaharoa Tephra (700 yr BP)를 발견한 바 있다. 이들은 탄소 연대와 테프라 연대의 부조화를 탄소 연대 측정 시 퇴적 과정에서 유입된 재동 탄소(reworked carbon)성분의 영향을 받은 것으로 해석하였다.

그렇다면 사람 발자국 퇴적층 내 재동된 탄소 성분은 어디에서 기원하였을까? 사람 발자국 퇴적층의 북서부 지역에는 송악산 응회암층이 지표에 얇게 분포하며 그 아래에는 1~2 m 두께의 고토양이 분포한다. 고토양층의 하위에는 광해악현무암이 놓인다(그림 9). 사람 발자국 퇴적층 내의 탄소 성분은 사람 발자국 사이트의 북서부 내륙에 퇴적된 고토양층이 작은 하천에 의해 침식되면서 해안의 조간대로 이동되어 퇴적되면서 유입된 재동 탄소 성분(reworked carbon material)으로 여겨진다. 이러한 해석은 사람 발자국 사이트로부터 600 m 내륙에 위치하는 고고 유적 발굴지의 응회암층 하부에 놓이는 고토양층

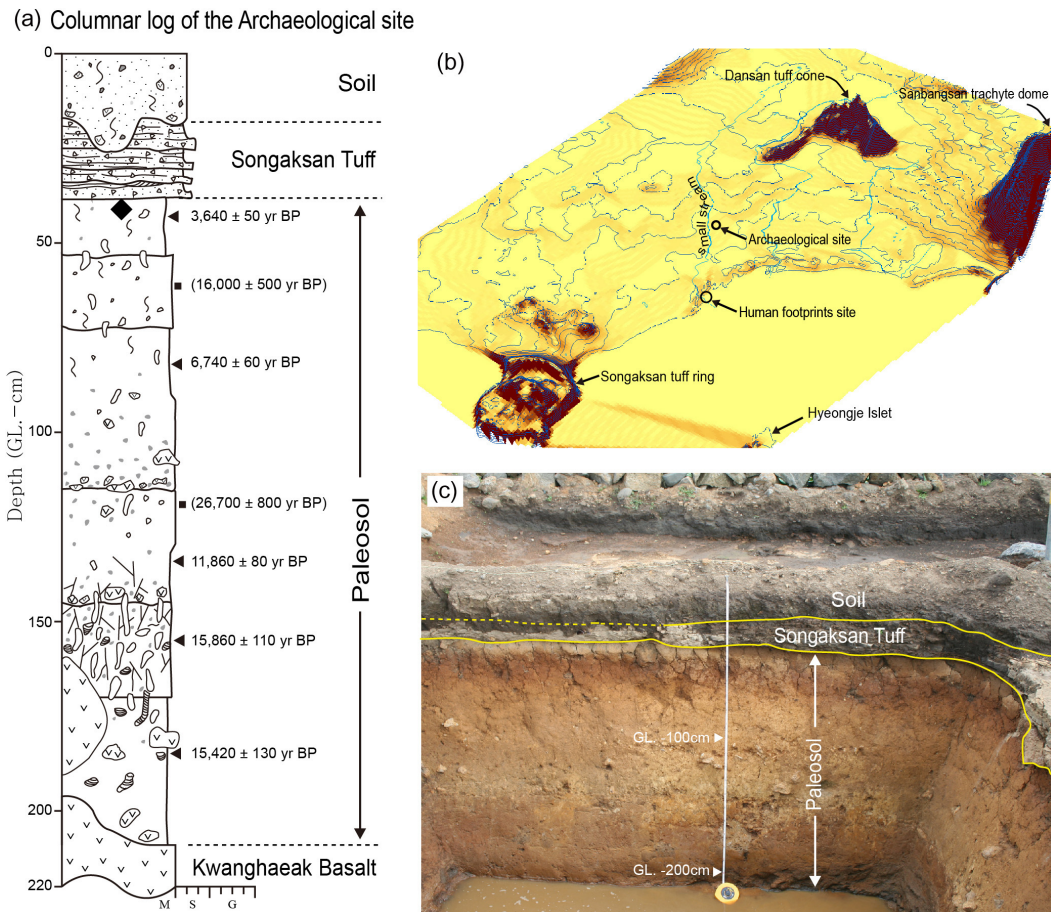


Fig. 9. (a) Columnar log of the archeological trench site with ¹⁴C ages (black triangle) and OSL ages (black square) for the paleosol beneath the Songaksan Tuff. Black diamond shows the sampling location of earthenware dated by OSL method. (b) Digital elevation model of the southwestern part of Jeju Island presented on Fig. 1. A small stream flows through the wide lava field toward the footprints sites at the coast. The archaeological trench site is adjacent to the small stream. (c) Overview of the trenched section in the archeological site, of which the columnar log is shown on the left.

에서 얻은 방사성탄소연대 측정치에 의해 지지된다. 이 응회암층의 직하부에서 광해악현무암까지 하부로 내려가면서 3,640±50 yr BP에서 15,420±130 yr BP로 고토양층의 방사성탄소연대는 대체로 증가한다(그림 9). 이러한 탄소 연대는 기존의 사람 발자국 퇴적층(Cho *et al.*, 2005)과 그 인근 퇴적층(Kim *et al.*, 2010)에서 얻은 탄소 연대의 범위와 비교적 조화롭다(그림 10). 이렇게 고토양층과 사람 발자국 퇴적층 사이의 탄소 연대 유사성으로 미루어 볼 때, 사람 발자국 퇴적층 내의 탄소 성분은 그 북서부 내륙에 퇴적된 고토양층이 작은 하천에 의해 침식되면서 해안의 조건대로 이동되어 퇴적될 때 유입된 것으로 해석하는 것이 타당할 것이다. 결국 재동된 탄소 성분이 사람 발자국 퇴적층에서 보다 오랜 탄소 연대 값이 나타나게 한 주원인으로 판단된다(그림 9, 10).

그런가 하면, 기존 연구에서 OSL 기법을 이용한 연대 결과를 살펴보면 송악산 근거리 응회암에서 7.0±0.3 ka, 송악산 서쪽에 분포하는 하모리층의 기저부에서 5.1±0.3 ka (Cheong *et al.*, 2007), 그리고

사람 발자국 퇴적층에서 6.8±0.3 ka와 7.6±0.5 ka (Cho *et al.*, 2005)이 보고된 바 있다(그림 10). 특히 Cho *et al.* (2005)의 연구는 사람 발자국 퇴적층 아래에서 송악산 응회암층의 존재를 인지하지 못했던 시기에 수행된 것으로, 사람 발자국 퇴적층이 얇은 해안의 조건대 환경을 지시하는 퇴적구조를 가진다는 점을 고려하여 약 8,000~15,000 yr BP의 벌크 방사성탄소연대 측정치보다는, 해수면 높이가 현재와 유사했던 시기인 약 6,800~7,600년 전 사이의 시기를 지시하는 OSL 연대를 사람 발자국 퇴적 시기로 판단하였다.

우리는 고고 유적 발굴지 응회암층 아래의 고토양에 대하여 탄소 연대 측정과 함께 OSL 연대 측정을 함께 실시하였는데, OSL 연대가 탄소 연대에 비해 적게는 1만년에서 많게는 1.5만년까지 훨씬 더 오랜 연대를 보인다(그림 9). 방사성탄소연대 측정치와 OSL 연대 간에 연대 불일치의 원인에 대해서는 향후 보다 많은 연구들이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

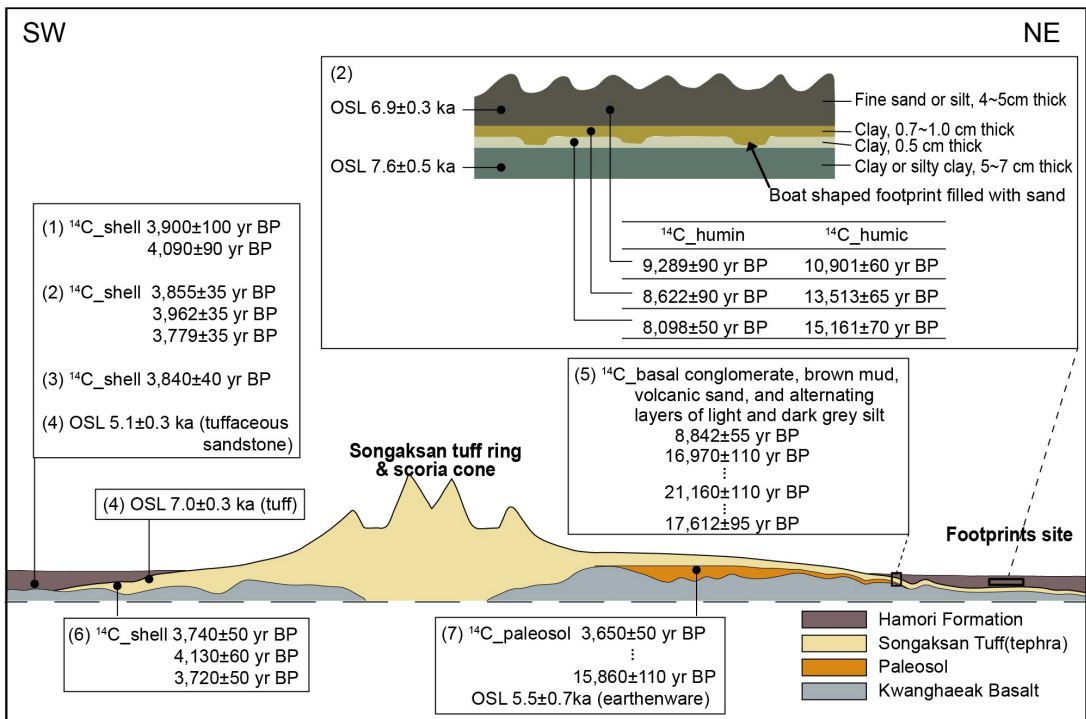


Fig. 10. Schematic cross section of the area around the Songaksan tuff ring, summarizing the recent age data from (1) Sohn *et al.* (2002), (2) Cho *et al.* (2005), (3) Cheung *et al.* (2006), (4) Cheung *et al.* (2007), (5) Kim *et al.* (2010), (6) Sohn *et al.* (in review) and (7) this study.

본 연구를 통해서 밝혀진 테프라층서학적(tephrostrigraphy) 관점에서 송악산 응회암층 최하부(Sohn *et al.*, in review) 및 송악산 응회암층 상부의 하모리층 기저부(Sohn *et al.*, 2002; Cheong *et al.*, 2006) 등에서 얻어진 신뢰성 있는 탄소물질인 조개편의 연대 측정치들이 비교적 일관된 연대를 보인다는 것을 고려한다면, 송악산 응회암층이라는 테프로아이스크론을 형성한 송악산 화산분출의 시기는 송악산 응회암층 최하부의 조개편에서 얻은 탄소 연대인 약 3,800 yr BP 보다는 이후였던 것으로 판단된다(그림 10).

이상의 사람 발자국 사이트의 층서 및 연대측정 결과들을 종합해 보면, 사람 발자국 퇴적층은 송악산 화산활동(약 3,800 yr BP) 이후의 어느 시기에 퇴적된 것으로 판단된다. 또한 이러한 연구 결과는 해안 지대나 호수 등을 대상으로 방사성탄소연대 측정법을 이용하여 퇴적층의 퇴적 시기를 측정할 때에는 육지로부터 유입된 재동된 탄소 성분에 의한 영향을 확인하는 작업이 꼭 필요하다는 것을 일깨운다. 이런 관점에서 이미 분출 시기가 밝혀진 응회암층 혹은 해저나 호수의 퇴적층 내에 포함된 크립토테프라(cryptotephra)는 하나의 테프로아이스크론(tephroisochron)으로 사용이 가능하며, 퇴적층에서 얻어진 탄소 연대나 OSL 연대 자료와 같은 수치연대(numerical age)를 검증하고 보정하는 도구로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

7. 결론

- 1) 야외 조사를 통해 사람 발자국 퇴적층 하부에서 현무암질 응회암층을 새롭게 확인하였다. 이 응회암층은 주변에 비교적 넓은 지역에 연속적으로 분포하기 때문에 하나의 테프로아이스크론(tephroisochron) 및 건층(key bed)으로 사용 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 사람 발자국 퇴적층 하부 응회암층의 테프라 유리 조성과 주변 화산체의 근거리 화산쇄설층 사이의 테프라 유리 조성 및 외래 암편 함량 비교 등을 통해 사람 발자국 퇴적층 하부 응회암층의 기원지가 송악산 화산체임을 확인하였다.
- 3) 송악산 응회암층의 근거리 화산쇄설층은 수직적으로 조성이 서로 다르다. 이러한 조성적 다양성은 시간적 간격을 두고 서로 다른 조성의 마

그마 펄스가 순차적으로 분출한 것으로 판단된다. 송악산의 근거리 화산쇄설층에 나타나는 조성적 다양성과 달리 송악산의 원거리 화산쇄설층(사람 발자국 사이트, 고고 유적 발굴지)에서는 화산활동 동안 분출한 일부 화산쇄설물만이 퇴적되어 있다. 이는 사람 발자국 및 고고 유적 발굴지에는 네 번의 마그마 펄스 중 3 번째 및 4 번째 펄스 기간에 분출한 화산분출물만이 쌓인 것으로 추측된다. 이는 화산분출강도 및 화산활동 기간 바람의 영향 등으로 인해 테프라가 화산체의 서로 다른 방향으로 퇴적된 결과라 여겨진다.

- 4) 송악산 응회암층 하부에서 최근 얻어진 조개편의 방사성탄소연대, 고고 유적 발굴지 응회암층 하부의 고토양층에 대한 방사성탄소연대, 고토양층에서 발굴된 토기편의 OSL 연대, 근거리 화산쇄설층 하부에서의 조개편 탄소 연대 등을 고려할 때, 송악산 화산체의 분출 시기는 지금으로부터 약 3,800년 이전으로 여겨진다. 따라서 테프라층서학적 관점에서 송악산 응회암층 상부에 퇴적된 사람 발자국 퇴적층은 그 퇴적 시기가 지금으로부터 약 3,800년 전 이후에 퇴적된 것으로 판단된다.
- 5) 기존 연구에서 사람 발자국 퇴적층에서 얻은 방사성탄소연대는 퇴적 당시 인근 내륙의 고토양층이 침식되면서 유입된 재동 탄소 성분에 의해 퇴적 시기보다 더 오랜 연대를 지시하는 것으로 판단된다.
- 6) 본 연구는 연대가 밝혀진 테프라층이 해저나 호수 퇴적층 내에서 하나의 테프라층(혹은 크립토테프라)으로 인지된다면 그 층은 테프로아이스크론으로 사용 가능하며, 퇴적층에 대해 얻어진 방사성탄소연대나 OSL 연대와 같은 수치연대를 검증하고 보정하는 도구로 사용될 수 있음을 시사한다.

사 사

이 논문은 서귀포시 지원으로 제주고고학연구소에서 실시한 “서귀포 보성지구 배수개선사업지역의 제4기 층서 및 고환경 분석” 연구사업과 한국연구재

단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(no. 2014R1A2A1A11053516)의 일환으로 수행된 연구결과에 기초하여 쓰여졌다. 논문의 심사과정에서 건설적인 비평과 유익한 조언으로 논문의 오류와 부정확한 표현을 바로잡아 주신 한국기초과학지원연구원 최정현 박사님과 진주교육대학교 김경수 교수님께 감사 드린다.

REFERENCES

- Auer, A., Martin, U. and Németh, K., 2007, The Fekete-hegy (Balaton Highland Hungary) "soft-substrate" and "hard-substrate" maar volcanoes in an aligned volcanic complex - Implications for vent geometry, subsurface stratigraphy and the palaeoenvironmental setting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159, 225-245.
- Bons, P.D., Arnold, J., Elburg, M.A., Kalda, J., Soesoo, A. and van Milligen, B.P., 2004, Melt extraction and accumulation from partially molten rocks. *Lithos*, 78, 25-42.
- Brendryen, J., Haflidason, H. and Sejrup, H.P., 2010, Norwegian Sea tephrostratigraphy of marine isotope stages 4 and 5: Prospects and problems for tephrochronology in the North Atlantic region. *Quaternary Science Reviews*, 29, 847-864.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Németh, K., Smith, I.E.M. and Sohn, Y.K., 2011, The influence of magma plumbing complexity on monogenetic eruptions, Jeju Island, Korea. *Terra Nova*, 23, 70-75.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Maas, R., 2012, Spatio-temporal evolution of a dispersed magmatic system and its implications for volcano growth, Jeju Island Volcanic Field, Korea. *Lithos*, 148, 337-352.
- Cheong, C.S., Choi, M.S., Khim, B.K., Sohn, Y.K., Kwon, S.-T., 2006, $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dating of Holocene mollusk shells from Jeju Island, Korea, by multiple collectors inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geosciences Journal*, 10, 67-74.
- Cheong, C.S., Choi, J.H., Sohn, Y.K., Kim, J.C. and Jeong, G.Y., 2007, Optical dating of hydromagmatic volcanoes on the southwestern coast of Jeju Island, Korea. *Quaternary Geochronology*, 2, 266-271.
- Cho, D.-L., Park, K.-H., Jin, J.-H. and Hong, W., 2005, Age constraints on human footmarks in Hamori Formation, Jeju Island, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 14, 149-156 (in Korean with English abstract).
- Coombs, M.L., Eichelberger, J.C. and Rutherford, M.J., 2000, Magma storage and mixing conditions for the 1953-1974 eruptions of Southwest Trident volcano, Katmai National Park, Alaska. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140, 99-118.
- Costa, F. and Chakraborty, S., 2004, Decadal time gaps between mafic intrusion and silicic eruption obtained from chemical zoning patterns in olivine. *Earth and planetary science letters*, 227, 517-530.
- Davies, S.M., Wohlfarth, B., Wastegård, S., Andersson, M., Blockley, S. and Possnert, G., 2004, Were there two Borrobol Tephra during the early Lateglacial period: implications for tephrochronology? *Quaternary Science Reviews*, 23, 581-589.
- Del Gaudio, P., Mollo, S., Ventura, G., Iezzi, G., Taddeucci, J. and Cavallo, A., 2010, Cooling rate-induced differentiation in anhydrous and hydrous basalts at 500 MPa: Implications for the storage and transport of magmas in dikes. *Chemical Geology*, 270, 164-178.
- Enache, M. and Cumming, B., 2006, The Morphological and Optical Properties of Volcanic Glass: A Tool to Assess Density-induced Vertical Migration of Tephra in Sediment Cores. *Journal of Paleolimnology*, 35, 661-667.
- Erlund, E.J., Cashman, K.V., Wallace, P.J., Pioli, L., Rosi, M., Johnson, E. and Granados, H.D., 2010, Compositional evolution of magma from Parícutin Volcano, Mexico: The tephra record. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197, 167-187.
- Fisher, R.V. and Schmincke, H.-U., 1984, *Pyroclastic Rocks*. Springer Berlin Heidelberg, 472 p.
- Gerlach, D. and Grove, T., 1982, Petrology of Medicine Lake Highland volcanics: Characterization of end-members of magma mixing. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80, 147-159.
- Hammond, A.P., Goh, K.M., Tonkin, P.J. and Manning, M.R., 1991, Chemical pretreatments for improving the radiocarbon dates of peats and organic silts in a gley podzol environment: Grahams Terrace, north Westland. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 34, 191-194.
- Heliker, C., Swanson, D.A. and Takahashi, T.J., 2003, The Pu'u 'Ō'ō-Kūpaianaha eruption of Kilauea Volcano, Hawai'i : the first 20 years. US Geological Survey, Reston, Virginia, 206 p.
- Helz, R. and Thornber, C., 1987, Geothermometry of Kilauea Iki lava lake, Hawaii. *Bulletin of volcanology*, 49, 651-668.
- Johnson, E.R., Wallace, P.J., Cashman, K.V. and Delgado Granados, H., 2010, Degassing of volatiles (H₂O, CO₂, S, Cl) during ascent, crystallization, and eruption at mafic monogenetic volcanoes in central Mexico.

- Journal of Volcanology and Geothermal Research, 197, 225-238.
- Johnson, E.R., Wallace, P.J., Cashman, K.V., Granados, H.D. and Kent, A.J.R., 2008, Magmatic volatile contents and degassing-induced crystallization at Volcán Jorullo, Mexico: Implications for melt evolution and the plumbing systems of monogenetic volcanoes. *Earth and planetary science letters*, 269, 478-487.
- Kim, C.B., Kim, J.Y., Kim, K.S. and Lim, H.S., 2010, New age constraints for hominid footprints found on Jeju Island, South Korea. *Journal of Archaeological Science*, 37, 3338-3343.
- Kim, J.Y., Kim, K.S. and Kim, S.H., 2006, A fossil feather from the Late Pleistocene deposits in Jeju Island, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 27, 579-584.
- Kim, J.Y., Kim, K.S., Lee, C.Z. and Lim, J.D., 2004, Occurrence of hominid and other vertebrate footprints of Jeju Island, Korea. In: Kim, J.Y., Kim, K.S., Park, S.I. and Shin, M.K. (eds.), *Proceedings of International Symposium on the Quaternary Footprints of Hominids and Other Vertebrates*. Namjejugun, Jeju, pp. 1-26.
- Kim, K.H., Tanaka, T., Suzuki, K., Nagao, K. and Park, E.J., 2002, Evidences of the presence of old continental basement in Cheju volcanic Island, South Korea, revealed by radiometric ages and Nd-Sr isotopes of granitic rocks. *GEOCHEMICAL JOURNAL-JAPAN*-, 36, 421-442.
- Kim, K.S. and Kim, J.Y., 2006, Review on the stratigraphy and geological age of the Hominid footprints-bearing strata, Jeju Island, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 27, 236-246 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.S., Kim, J.Y., Kim, S.H., Lee, C.Z. and Lim, J.D., 2009, Preliminary report on hominid and other vertebrate footprints from the Late Quaternary strata of Jeju Island, Korea. *Ichnos*, 16, 1-11.
- Koh, G.W., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguipo Formation in Cheju Island. Ph. D. Thesis, Pusan National University, Pusan, 326 p.
- Koh, G.W., Park, J.B., Kang, B.-R., Kim, G.-P. and Moon, D.C., 2013, Volcanism in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 209-230 (in Korean with English abstract).
- Lamb, A.L., Wilson, G.P. and Leng, M.J., 2006, A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $d^{13}C$ and C/N ratios in organic material. *Earth-Science Reviews*, 75, 29-57.
- Lee, J.Y., Kim, J.C., Park, J.B., Lim, J.S., Hong, S.S. and Choi, H.W., 2014, Age of volcanic activity from Quaternary deposits in Sangchang-ri, Jeju island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*. 50, 697-706 (in Korean with English abstract).
- Lorenz, V., 1986, On the growth of maars and diatremes and its relevance to the formation of tuff rings. *Bulletin of volcanology*, 48, 265-274.
- Lowe, D.J., 2011, Tephrochronology and its application: A review. *Quaternary Geochronology*, 6, 107-153.
- Lowe, D.J., Shane, P.A.R., Alloway, B.V. and Newnham, R.M., 2008, Fingerprints and age models for widespread New Zealand tephra marker beds erupted since 30,000 years ago: a framework for NZ-INTIMATE. *Quaternary Science Reviews*, 27, 95-126.
- Luhr, J., 2001, Glass inclusions and melt volatile contents at Parícutin Volcano, Mexico. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 142, 261-283.
- Morgan, D.J., Blake, S., Rogers, N.W., DeVivo, B., Rolandi, G., Macdonald, R. and Hawkesworth, C.J., 2004, Time scales of crystal residence and magma chamber volume from modelling of diffusion profiles in phenocrysts: Vesuvius 1944. *Earth and planetary science letters*, 222, 933-946.
- Németh, K., Martin, U. and Harangi, S., 2001, Miocene phreatomagmatic volcanism at Tihany (Pannonian Basin, Hungary). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 111, 111-135.
- Newnham, R.M., Lowe, D.J., Green, J.D., Turner, G.M., Harper, M.A., McGlone, M.S., Stout, S.L., Horie, S. and Froggatt, P.C., 2004, A discontinuous ca. 80 ka record of Late Quaternary environmental change from Lake Omapere, Northland, New Zealand. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 207, 165-198.
- Oelkers, E.H. and Gislason, S.R., 2001, The mechanism, rates and consequences of basaltic glass dissolution: I. An experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of aqueous Al, Si and oxalic acid concentration at 25°C and pH = 3 and 11. *Geochimica et cosmochimica acta*, 65, 3671-3681.
- Park, K.H., Lee, B.J., Kim, J.C., Cho, D.L., Lee, S.R., Choi, H.I., Park, D.W., Lee, S.R., Choi, Y.S., Yang, D.Y., Kim, J.Y., Seo, J.Y. and Sin, H.M., 2000, Explanatory note of the Jeju (Baekado, Jinnampo) sheet (1:250,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Taejeon.
- Payne, R. and Gehrels, M., 2010, The formation of tephra layers in peatlands: An experimental approach. *CATENA*, 81, 12-23.
- Pioli, L., Erlund, E., Johnson, E., Cashman, K., Wallace, P., Rosi, M. and Delgado Granados, H., 2008, Explosive dynamics of violent Strombolian eruptions: The eruption of Parícutin Volcano 1943-1952 (Mexico). *Earth and planetary science letters*, 271, 359-368.

- Shane, P., Nairn, I.A., Martin, S.B. and Smith, V.C., 2008, Compositional heterogeneity in tephra deposits resulting from the eruption of multiple magma bodies: Implications for tephrochronology. *Quaternary International*, 178, 44-53.
- Shane, P., Nairn, I.A. and Smith, V.C., 2005, Magma mingling in the ~50 ka Rotoiti eruption from Okataina Volcanic Centre: implications for geochemical diversity and chronology of large volume rhyolites. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 295-313.
- Shane, P., Sikes, E.L. and Guilderson, T.P., 2006, Tephra beds in deep-sea cores off northern New Zealand: implications for the history of Taupo Volcanic Zone, Mayor Island and White Island volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154, 276-290.
- Shane, P. and Smith, I., 2000, Geochemical fingerprinting of basaltic tephra deposits in the Auckland Volcanic Field. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 43, 569-577.
- Smith, V., Shane, P., Nairn, I. and Williams, C., 2006, Geochemistry and magmatic properties of eruption episodes from Haroharo linear vent zone, Okataina Volcanic Centre, New Zealand during the last 10 kyr. *Bulletin of volcanology*, 69, 57-88.
- Smith, V.C., Shane, P. and Nairn, I.A., 2005, Trends in rhyolite geochemistry, mineralogy, and magma storage during the last 50 kyr at Okataina and Taupo volcanic centres, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148, 372-406.
- Smith, V.C., Shane, P. and Smith, I.E.M., 2002, Tephrostratigraphy and geochemical fingerprinting of the Mangaone Subgroup tephra beds, Okataina Volcanic Centre, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 45, 207-219.
- Sohn, Y.K., Cronin, S.J., Brenna, M., Smith, I.E.M., Németh, K., White, J.D.L., Murtagh, R.M., Jeon, Y.M. and Kwon, C.W., 2012, Ilchulbong tuff cone, Jeju Island, Korea, revisited: A compound monogenetic volcano involving multiple magma pulses, shifting vents, and discrete eruptive phases. *Geological Society of America Bulletin*, 124, 259-274.
- Sohn, Y.K., Park, J.B., Khim, B.K., Park, K.H. and Koh, G.W., 2002, Stratigraphy, petrochemistry and Quaternary depositional record of the Songaksan tuff ring, Jeju Island, Korea. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 119, 1-20.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2004, Early-stage volcanism and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sagye borehole, SW Jeju Island, Korea. *Geosciences Journal*, 8, 73-84.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2005, Composite tuff ring/cone complexes in Jeju Island, Korea: possible consequences of substrate collapse and vent migration. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141, 157-175.
- Sohn, Y.K., Park, K.H. and Yoon, S.H., 2008, Primary versus secondary and subaerial versus submarine hydro-volcanic deposits in the subsurface of Jeju Island, Korea. *Sedimentology*, 55, 899-924.
- Sohn, Y.K., Yoon, W.S., Ahn, U.S., Kim, G.B., Lee, J.-H., Ryu, C.K., Jeon, Y.M. and Kang, C.H., in review, Stratigraphy and age of the human footprints-bearing strata in Jeju Island, Korea: Controversies, fallacies, and new findings. *Journal of Archaeological Science*.
- Sparks, R.S.J. and Pinkerton, H., 1978, Effect of degassing on rheology of basaltic lava. *NATURE*, 276, 385-386.
- Tryon, C.A. and McBrearty, S., 2006, Tephrostratigraphy of the Bedded Tuff Member (Kaphthurin Formation, Kenya) and the nature of archaeological change in the later middle Pleistocene. *Quaternary Research*, 65, 492-507.
- Turner, M.B., Cronin, S.J., Stewart, R.B., Bebbington, M. and Smith, I.E.M., 2008, Using titanomagnetite textures to elucidate volcanic eruption histories. *Geology*, 36, 31-34.
- Vandergoes, M.J. and Prior, C.A., 2003, AMS dating of pollen concentrates—a methodological study of late Quaternary sediments from south Westland, New Zealand. *Radiocarbon*, 45, 479-492.
- White, J.D.L. and Ross, P.S., 2011, Maar-diatreme volcanoes: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201, 1-29.
- Won, C.K., 1976, Study of petrochemistry of volcanic rocks in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 12, 207-226 (in Korean with English abstract).

Received : February 4, 2015

Revised : March 19, 2015

Accepted : March 28, 2015