

(해 설)

남제주 사람 발자국 화석을 포함한 지층의 층서와 지질 연대에 대한 고찰

김경수^{1,*} · 김정률²

¹충북과학고등학교, 363-853 충북 청원군 가덕면 상아리

²한국교원대학교 지구과학교육과, 363-371 충북 청원군 강내면 다락리

Review on the Stratigraphy and Geological Age of the Hominid Footprints-bearing Strata, Jeju Island, Korea

Kyung-Soo Kim^{1,*} and Jeong Yul Kim²

¹Chungbuk Science High School, Gadeog, Cheongwon, Chungbuk 363-853, Korea

²Department of Earth Science Education, Korea National University of Education, Cheongwon, Chungbuk 363-791, Korea

Abstract: On the basis of field observation, geology of the footprints site consists of the Kwanghaeak Basalt, unnamed strata, Songaksan Tuff, Hamori Formation, and Sand Dune, in ascending order at the Hamori-Songaksan area and the Kwanghaeak Basalt, the hominid footprints-bearing strata, and Dune Sand are consisted in ascending order at the Sagaeri area. According to the designation that the Hamori Formation overlies the Songaksan Tuff, age dating results, and geologic sequence observed in the field, the strata containing hominid footprints are not correlated with the Hamori Formation but the unnamed strata, though the strata are shown as the Hamori Formation in the geologic map. It seems to be more reasonable that the geologic age of the footprints-bearing strata is thought to be around ca 15,000 yrs B.P. according to the results of ¹⁴C dating.

Keywords: hominid footprints, age dating, stratigraphy, Hamori Formation, Jeju Island

요약: 송악산과 사람 발자국 화석지 주변에서 측정된 절대 연대 측정 결과와 야외 지질 조사를 근거로 할 때, 하모리-송악산 지역의 층서는 하부로부터 광해악 현무암, 명명되지 않은 퇴적층, 송악산 응회암, 하모리층 및 사구층으로 구성되어 있으며, 발자국 화석이 산출되는 사계리 지역은 하부로부터 광해악 현무암, 사람 발자국 화석 산출 지층 그리고 사구층으로 구성되어 있다. 하모리층은 송악산 응회암이 형성된 후 퇴적된 지층이라는 규정과 절대 연령 측정 결과 및 현지에서 조사된 바에 의하면, 사람 발자국 화석이 산출되는 지층은 하모리-송악산 지역의 송악산 응회암층 상부에 놓이는 하모리층이 아니라 하부에 분포하는 명명되지 않은 퇴적층과 대비된다. 따라서 사람 발자국 화석의 형성 시기는 ¹⁴C 측정 결과인 약 15,000년 전으로 해석하는 것이 합리적으로 생각된다.

주요어: 사람 발자국 화석, 연대 측정, 층서, 하모리층, 제주도

서 론

제주도 남제주군 사계리 해안에서 발견된 사람과 각종 동물의 발자국 화석은 국제 심포지움을 통하여 외국의 전문가들로부터 학술적 가치와 중요성을 인정

받은 바 있으며 국제적인 관심이 집중되고 있다(Kim et al., 2004). 2004년 2월 문화재청의 발표 당시 사람 발자국 화석의 형성 시기를 약 50,000년 전으로 추정·발표하였다. 이러한 이유는 저자들이 송악산 및 발자국 화석지의 지질 조사 결과, 사람 발자국 화석을 포함하고 있는 지층은 송악산 서쪽 지역의 하모리층보다 하부에 위치하며, 송악산 응회암보다도 하부의 지층으로 판단되었기 때문이다. 또한 Sohn et al.(2002)에 의해 송악산 서쪽의 하모리층에서 발견된

*Corresponding author: ksmstone@chol.com

Tel: 82-43-298-0576

Fax: 82-43-297-8408

패각에 의한 ^{14}C 연대 측정값인 약 4,000년 전의 측정값보다는 더 오래되었을 것으로 추정하였다. 하지만 손영관 교수는 송악산 서쪽의 하모리층에서 측정된 방사성 연대 측정값을 근거로 발자국 화석지의 지층은 4,000년 전보다 훨씬 젊은 3,000년 전~2,000년 전에 형성된 것이라고 주장하여 논란이 되었다. 이에 따라서 문화재청은 발자국 화석의 정확한 생성 연대를 구명하기 위하여 한국지질자원연구원에 연구 용역을 의뢰하였다.

이에 박기화 외(2005)는 사람 발자국 화석지 및 주변 지역에서 ^{14}C 연대 측정법과 OSL(Optically Stimulated Luminescence, 광여기루미네선스) 연대 측정 및 Ar-Ar 연대 측정을 실시하여 보고서를 제출하였으며, 이를 정리하여 다시 논문으로 발표하였다(조동룡 외, 2005). 이 보고서와 논문에서는 사람 발자국 화석의 생성 시기를 OSL 분석 결과만을 채택하여 7,600년 전~6,800년 전으로 결론지었다. 그러나 이와 같은 결론은 ^{14}C 연대 측정값을 배제하고 제시된 것으로 이에 대한 논의가 반드시 필요하다. 그리고 박기화 외(2005)의 방사성 연대 측정 결과와 함께 Cheong et al.(2005)에 의해 측정된 하모리층과 송악산 응회암의 OSL 분석 결과는 근래에 보기 드물게 특정한 지역에 대해 광범위하고 비교적 다양한 방법으로 절대 연대를 측정함으로써 발자국 화석지를 포함한 송악산 주변 지역의 층서 구명에 주요한 시사점을 제공한다.

따라서 본 연구에서는 연구 용역 의뢰 기관인 남제주군의 허가를 얻어 『남제주 해안 사람 발자국 화석 지질 연대 측정 보고서』의 연대 측정 결과와 이 외 황상구(2002) 및 Cheong et al.(2005)의 연대 측정 결과를 바탕으로 발자국 화석지의 층서적 위치에 대해 새로운 시각을 제공하고, 사람 발자국 화석의 형성 시기를 7,600년 전~6,800년 전으로 결정한 것이 타당한 것인지를 논의하고자 한다.

연구 지역의 지질

연구 지역의 지질은 하부에서부터 단산 응회암, 용머리 응회암, 산방산 조면암, 광해악 현무암, 범정동 조면현무암, 송악산 응회암, 송악산 분석구, 하모리층, 해빈사, 풍성 사구의 순으로 이루어져 있다(박기화 외, 2005; Fig. 1). 발자국 화석지를 포함한 송악산 주변 지역에는 광해악 현무암이 기반암으로 넓게 분포하며,

지질도 상에서는 하부로부터 광해악 현무암, 송악산 응회암, 하모리층 그리고 사구층으로 표시되어 있다(박기화 외, 2000). 그러나 지역에 따라서 해안가에 분포하는 지층의 순서에는 약간의 차이가 있다. 송악산에서 서쪽으로 하모리카지의 지역(이하 하모리-송악산 지역)은 하부로부터 광해악 현무암, 명명되지 않은 퇴적층, 송악산 응회암, 하모리층 그리고 사구층의 순으로 이루어져 있으며, 발자국 화석지인 사계리 지역에서는 광해악 현무암, 하모리층(발자국 화석 산출 지층) 그리고 사구층의 순으로 이루어져 있다(박기화 외, 2000).

광해악 현무암은 한림읍 옹포리에서 남제주군 안덕면 사계리 해안 노두에서 관찰되며, 수월봉 해안에서는 수월봉 응회암에 의해 파복된다(박기화 외, 2000).

하모리-송악산 지역의 광해악 현무암과 송악산 응회암의 사이에 발달된 명명되지 않은 퇴적층은 간조시에 관찰할 수 있는 퇴적층으로서 지질도에 표시되지는 않지만, 송악산 응회암이 분출되기 전에 퇴적된 층으로 별도의 층명이 주어지지 않은 퇴적층이다.

송악산 응회암은 송악산에서 북쪽으로 약 2 km 정도까지 분포하며, 동·서·남쪽으로는 바다가 위치하고, 해안 절벽을 따라 최대 80 m 두께의 응회암 단면을 잘 관찰할 수 있다. 송악산 응회암의 표식지는 송악산 남측 절벽이며, 하부로부터 응회암-스코리아층-조면현무암-스코리아의 순으로 이루어져 있다(박기화 외, 2000). 송악산의 동쪽 산이수동 선착장에서는 층리가 잘 발달된 송악산 응회암을 볼 수가 있으며, 탄낭을 쉽게 관찰할 수 있고, 동쪽 절벽 아래에는 일제 시대 때 파놓은 진지 동굴이 있다. 송악산 응회암은 송악산 서쪽 해안으로는 약 2 km 정도까지 분포하고 있다.

하모리층은 송악산 응회암을 중심으로 표식지인 서쪽의 하모리 지역에서 해안을 따라 약 1.5 km, 동쪽의 상모리 지역을 중심으로 산이수동에서 사계리까지 해안을 따라 약 1.8 km, 용머리에서 북동쪽 해안을 따라 약 1 km 정도 노출되어 있다(박기화 외, 2000). 그리고 박기화 외(2000)와 Sohn et al.(2002)은 퇴적 구조와 암상의 변화를 근거로 하모리층을 송악산 응회암이 분출한 후 퇴적된 층으로 간주하였다.

사구층은 해빈사와 풍성 사구를 포함하며, 서쪽의 모슬포항이 있는 하모리 지역과 안덕면 사계리 해안을 따라 대상으로 잘 발달되어 있다.

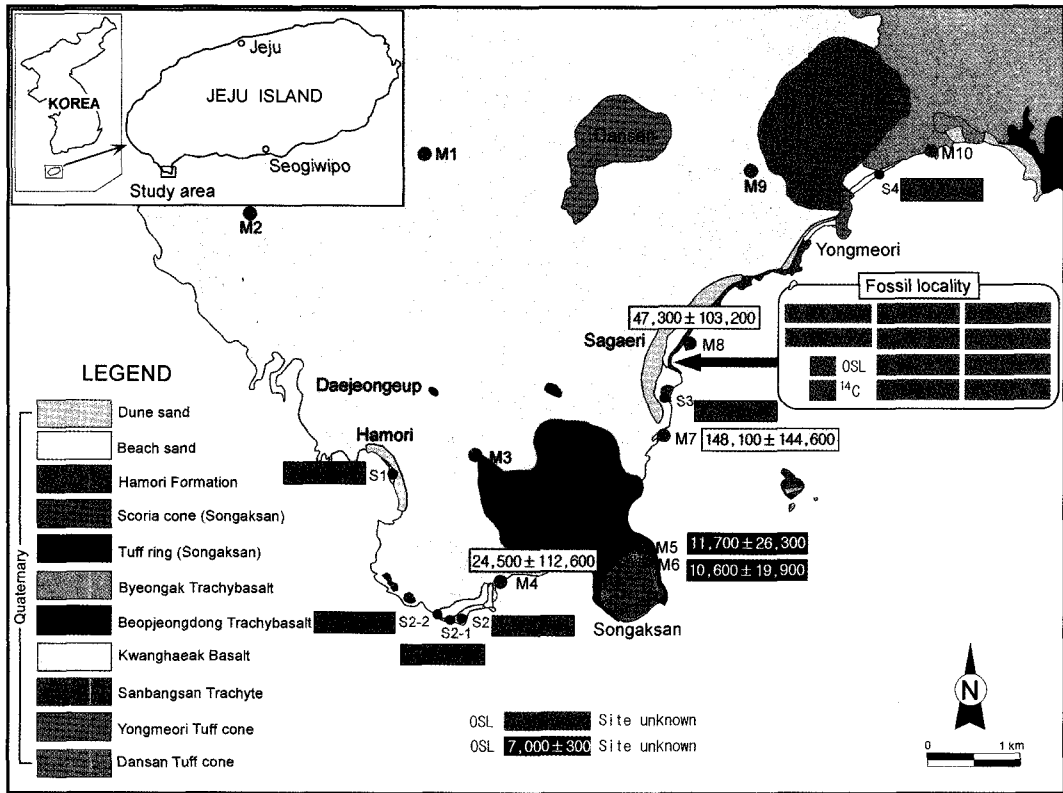


Fig. 1. The geologic map, the sample sites, and results of age dating (numbers in the box) around the Mt. Songak (after Park et al., 2005; Cheong et al., 2005). The yellow boxes are the Ar-Ar dating results of the Kwanghaeak Basalt. The black lined violet boxes are the Ar-Ar dating results of the trachybasalt from the Songaksan Tuff. The black lined green boxes are the radiocarbon dating results of the Hamori Formation. The unlined green boxes are the OSL dating results of the Hamori Formation. The unlined violet boxes are the OSL dating results of the Songaksan Tuff.

연대 측정 결과

박기화 외(2005)가 국내외의 연구 기관에 의뢰하여 지질 연대를 측정한 결과를 정리하여 작성한 보고서와 지금까지 송악산 주변 지역에서 실시된 연대 측정 결과를 모두 정리하여 Fig. 1과 2에 표시하였다. Fig. 2의 가로축은 해안을 따라 나타나는 지층의 분포를 의미하며, 세로축은 지층의 수직 분포를 나타낸다.

Ar-Ar법에 의한 연대 측정은 하모리층의 형성 시기의 하한을 결정하기 위한 목적으로 실시한 것으로 모두 5개의 지점에서 이루어졌으며, 광해악 현무암에서는 $24,500 \pm 112,600$ 년 전, $47,300 \pm 103,200$ 년 전 그리고 $148,100 \pm 144,600$ 년 전으로 측정되었고, 송악산 조면현무암에서는 $10,600 \pm 19,900$ 년 전과 $11,700 \pm 26,300$ 년 전으로 측정되었다(박기화 외, 2005; 조동룡 외, 2005). K-Ar 방법에 의한 절대 연령은 송악산

용암연 지역의 조면현무암에서 $50,000 \pm 23,000$ 년 전으로 측정되었다(황상구, 2002).

^{14}C 방법에 의한 연대 측정은 모두 20개의 시료에 대해 이루어졌다(Fig. 2). 하모리-송악산 지역의 하모리층에서는 Sohn et al.(2002)에 의한 $3,900 \pm 100$ 년 전과 $4,090 \pm 90$ 년 전의 측정값과 함께 박기화 외(2005)에 의해 $2,995 \pm 35$ 년 전~ $3,862 \pm 35$ 년 전 사이로 측정되었다. 발자국 화석 산지가 있는 사계리 지역의 고토양층에서는 $2,570 \pm 70$ 년 전과 $3,860 \pm 40$ 년 전으로 측정되었으며, 하모리층에서는 9개의 시료에서 방사성 연대가 $6,930 \pm 70$ 년 전~ $15,161 \pm 70$ 년 전 사이로 측정되었다. 산방산 동쪽 지역의 하모리층에서는 $3,044 \pm 35$ 년 전이다. 그리고 고토양층에서 측정된 $2,330 \pm 50$ 년 전의 측정값은 보고서에서 측정 장소가 서로 다르게 기재되어 정확한 위치를 알 수 없다(박기화 외, 2005; Fig. 2).

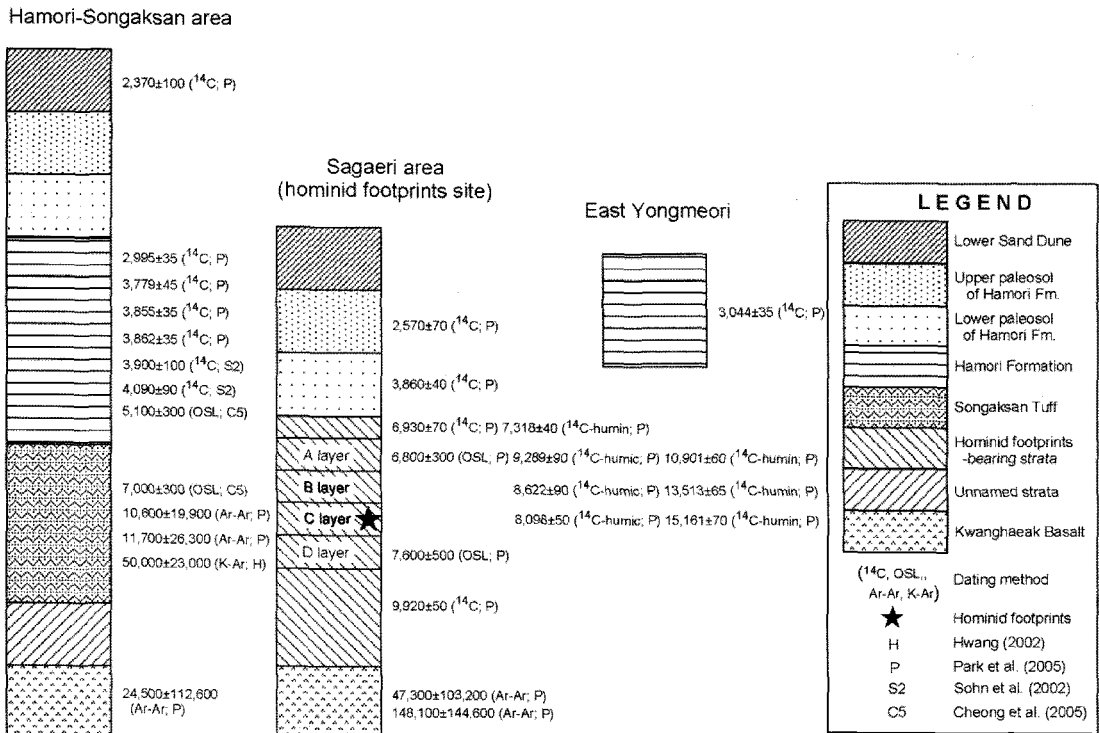


Fig. 2. The stratigraphy and correlation of the study area and the results of the radiometric age dating by many authors. The vertical thickness are not represented the relative thickness of the strata. ¹⁴C-humic and -humin are the radiocarbon AMS ages of humic and humin fractions, respectively. ¹⁴C are the AMS or conventional method of the radiocarbon dating. A, B, and D layers are the upper and lower layers of the hominid footprints bearing layer (C layer; See the Fig. 3).

OSL법에 의한 연대는 하모리-송악산 지역에서 하모리층과 송악산 응회암에 대해서 이루어졌다. 이 지역의 하모리층에서 측정된 OSL 연대는 5,100 ± 300년 전이며, 송악산 응회암에서는 두 개의 시료를 측정할 결과 모두 7,000 ± 300년 전이다(Cheong et al., 2005). 사계리 지역의 발자국 화석지에서 발자국 화석이 산출되는 상부의 층준과 하부의 층준에서 측정된 값은 상부층이 6,800 ± 300년 전이고, 하부층이 7,600 ± 500년 전이다(박기화 외, 2005; Fig. 2).

연구 지역의 층서

현재까지 수행된 사람 발자국 화석지를 포함한 주변 암석들에 대한 연구 결과와 야외 관찰 및 각 암석에서 측정된 연대를 중심으로 사람 발자국 화석지의 층서를 논의하고자 한다.

광해악 현무암

광해악 현무암의 형성 시기는 이전까지는 정확하

연대 측정 자료 없이 약 20만 년 전에 형성된 것으로 추정되었다(손영관, 2004). 그러나 박기화 외(2005)는 3개의 시료를 대상으로 Ar-Ar법으로 분석한 결과, 24,500 ± 112,600년 전, 47,300 ± 103,200년 전 그리고 148,100 ± 144,600년 전으로 측정되었다. 이 결과는 2개의 측정값에서 유효 숫자가 오차보다 크기 때문에 의미가 없다. 나머지 1개의 측정 자료는 오차가 유효 숫자의 값보다 크지는 않지만 거의 같고, 다른 2개의 측정값과 비교할 때 연대 차이가 크기 때문에 신뢰하기 어렵다. 따라서 현재까지 광해악 현무암의 정확한 형성 시기를 지시하는 신뢰할만한 자료는 없다. 다만 현재까지 야외에서 조사된 바에 의하면, 송악산과 화석지 일대에서 광해악 현무암이 기저를 이루고 있는 것은 분명하다.

명명되지 않은 퇴적층

이 퇴적층은 송악산 응회암 직하부 퇴적층으로 만조 시 물에 잠기며 간조 시에 관찰이 가능하다. 이 지역의 지질도 상에도 표시되거나 언급되지 않아 지

금까지 그 존재가 잘 알려지지 않았으며, 한국지질자원연구원의 절대 연령 측정 조사에서도 이 지층에 대한 절대 연령 측정은 이루어지지 않았다. 이 논문의 저자들은 야외 지질 조사에서 이 퇴적층의 존재를 확인하였고, 이 지역에서 오랫동안 연구를 수행한 손영관 교수도 송악산 응회암 하부에 퇴적층이 존재한다는 것을 확인하였다(개인 서신 교환). 이 퇴적층은 송악산 서쪽 해안을 따라 하모리 지역 사이에 분포하며, 층서적으로는 송악산 서쪽 절벽 하부에서부터 발달되고 광해악 현무암을 부정합으로 피복하고 있는 것으로 판단된다.

송악산 응회암

송악산 응회암/조면 현무암에 대해서는 지금까지 OSL법, K-Ar법 그리고 Ar-Ar법에 의해 절대 연령이 측정되었다(황상구, 2002; 박기화 외, 2005; Cheong et al., 2005). 송악산 조면 현무암에 대한 K-Ar 분석 결과는 $50,000 \pm 23,000$ 년 전이며, Ar-Ar 분석 결과는 $10,600 \pm 19,900$ 년 전과 $11,700 \pm 26,300$ 년 전이다. 그리고 송악산 응회암에 대한 OSL 분석법에서는 두 개의 시료에서 동일하게 $7,000 \pm 300$ 년 전으로 측정되었다. 이 중에서 K-Ar 분석 결과는 이 방법에서 사용되는 반감기가 길기 때문에 비교적 오래되지 않은 암석의 연령 측정에는 신뢰성이 떨어진다. Ar-Ar 분석법에 의한 두 개의 절대 연령 측정값은 모두 오차 범위가 유효숫자보다 크기 때문에 신뢰할 수 없다. 따라서 OSL 분석 결과만을 근거로 할 때, 송악산의 분출 시기는 약 7,000년 전으로 생각할 수 있다(Cheong et al., 2005).

하모리층과 발자국 화석 산출 지층

하모리층의 분포지는 Fig. 1에 의하면 하모리-송악산 지역, 사계리 지역(발자국 화석지) 그리고 용머리 동쪽 지역으로 크게 3개의 구역으로 구분할 수 있다. 하모리-송악산 지역에서는 ^{14}C -법과 OSL 분석법에 의해 연령 측정이 이루어졌다(박기화 외, 2005; Sohn et al., 2002; Cheong et al., 2005). ^{14}C -법에 의한 결과, 이 지역은 $2,995 \pm 35$ 년 전~ $4,090 \pm 90$ 년 전 사이의 연령값을 보이며, OSL 분석 결과는 $5,100 \pm 300$ 년 전의 연령값을 나타낸다. 이들의 값을 근거로 하모리-송악산 지역의 하모리층은 대략 5,100년 전~

2,995년 전 사이에 퇴적되었다고 할 수 있다(Fig. 2).

용머리 동쪽 지역 하모리층의 1개의 지점에서 패각을 이용한 ^{14}C -법 측정 결과는 $3,044 \pm 35$ 년 전이다(Fig. 1과 2). 이 결과는 이곳이 송악산 응회암보다 젊은 지층이며, 하모리-송악산 지역 하모리층의 퇴적 시기인 $5,100 \pm 300$ 년 전~ $2,995 \pm 35$ 년 전 사이의 값에 포함된다.

사람 발자국 화석이 발견된 사계리 지역은 박기화 외(2000, 2005)의 지질도에 의하면 하모리층으로 표시되어 있다. 이 지역 지층의 OSL 분석 결과는 $6,800 \pm 300$ 년 전과 $7,600 \pm 500$ 년 전이며, ^{14}C -법에 의한 측정 결과는 $6,930 \pm 70$ 년 전~ $15,161 \pm 70$ 년 전 사이의 값을 나타낸다(박기화 외, 2005; Fig. 2). 이와 같은 결과는 전체적으로 사람 발자국 화석이 산출되는 층이 하모리-송악산 지역과 용머리 동쪽 지역의 하모리층보다는 오래되었다는 것을 나타낸다. 그리고 이 지역의 하모리층은 적어도 송악산 응회암과 같은 시기에 형성되었거나 더 오래된 지층임을 나타낸다.

하모리층 상부 고토양층

하모리층 상부에는 부분적으로 수평 층리를 보이는 고토양층이 분포하고 있다(박기화 외, 2005). 이 고토양층에서 3개의 시료를 채취하여 절대 연령을 측정하였다. 사계리 지역의 고토양층에서는 상부가 $2,570 \pm 70$ 년 전, 하부가 $3,860 \pm 40$ 년 전으로 측정되었다. 그리고 나머지 1개의 시료(JJ-14)는 $2,330 \pm 50$ 년 전으로 측정되었는데, 연대 측정 보고서에서는 이 시료의 위치가 송악산 남서부 고토양층 상부와 발자국 산출 지점 고토양층 상부로 각각 기록되어 있어 정확한 위치를 알 수 없으나 고토양층 상부의 측정 자료임은 분명한 것으로 판단된다.

따라서 사계리 지역의 고토양층 상부는 약 2,500년 전에 형성되었으며, 고토양층 하부는 약 3,800년 전에 형성된 것으로 하모리-송악산 지역의 하모리층과 대비된다.

사구층

송악산 남서부 사구층의 패각편(JJ-6)을 이용한 연대 측정 결과는 $2,370 \pm 100$ 년 전이다. 따라서 하모리-송악산 지역의 사구층은 약 2,300년 전 이후에 형성된 것으로 판단된다.

논 의

하모리층의 정의와 발자국 화석지 지층의 대비

사람 발자국 화석지 주변에 대한 정밀 지질 조사는 국토 기본 지질도 작성 사업의 일환으로 한국지질연구소(현 한국지질자원연구원)에서 수행되었다(박기화 외, 2000). 그 결과 모슬포·한림 도폭 지질 보고서가 작성되었고, 처음으로 하모리층이 기재되고, 명명되었다(박기화 외, 2000). 이 도폭 지질 보고서에서 하모리층의 표식지는 대정읍 하모리 남측 해안으로 정하고, 이 지역에 노출된 퇴적암을 대표 암석으로 하였다. 상하 관계는 표식지와 산이수동 해안에서 하모리층이 광해악 현무암을 피복하며, 표식지에서 옹회질로 구성된 이 암석은 송악산 옹회암과 부분적으로 점이적인 관계를 보여주거나 부정합으로 피복한다고 하였다(박기화 외, 2000). 그리고 Sohn et al. (2002)는 앞서 언급한 바와 같이 송악산 서쪽의 하모리층에 대한 연구 결과, 하모리층을 송악산 옹회암이 분출된 후 퇴적된 지층으로 정의하였다.

그러나 현재까지의 연대 측정 결과, 사계리 지역의 하모리층 상부 고토양층을 제외한 나머지 OSL과 ^{14}C 연대 측정값들은 최소 6,800년 전보다 더 오래된 값을 보이므로 적어도 하모리층보다는 더 오래된 것이며, ^{14}C 연대 측정값만으로 보면 송악산 옹회암보다 더 오래된 것이다.

저자들은 초기 사람 발자국 화석의 생성 연대를 추정하여 발표할 당시 발자국 화석지의 층이 송악산 하부의 명명되지 않은 퇴적층과 대비되는 것으로 판단하였다. 그 이유는 첫 번째로 이 퇴적층의 상부를 구성하는 암석의 색과 입자의 크기 등의 암상이 발자국 화석지 지층의 상부 퇴적층과 유사하며, 두 번째는 이 퇴적층의 상부에서 우제류의 발자국 화석이 산출되고 있음을 확인하였기 때문이다. 물론 우제류 발자국 화석의 산출이 대비의 확실한 증거라고 할 수는 없지만 현재까지는 두 층이 대비될 가능성이 매우 높다. 그리고 세 번째는 송악산 서쪽의 하모리층과 발자국 화석을 포함한 층의 암상은 차이점이 있다. 송악산 서쪽 하모리층을 구성하는 퇴적물이 발자국 화석지의 퇴적물보다 전반적으로 더 세립의 물질로 구성되어 있으며, 발자국 화석지에서 건열의 산출이 더 빈번한 것으로 보아 송악산 서쪽의 하모리층보다 수심이 얕고, 대기 중의 노출이 더 빈번하였던 환경이었을 것으로 판단된다.

이와 같이 연대 측정값, 우제류 발자국 화석의 산출, 암상의 유사성 및 층서 관계를 근거로 할 때, 하모리-송악산 지역에 분포하는 송악산 옹회암 하부의 명명되지 않은 퇴적층은 사계리 지역의 사람 발자국 화석을 포함하는 층은 송악산 옹회암이 형성된 후 퇴적된 지층(박기화 외, 2000; Sohn et al., 2002)이 아니며, 하모리-송악산 지역에 분포하는 송악산 옹회암 하부의 명명되지 않은 퇴적층과 대비되는 것으로 판단된다.

사람 발자국 화석의 형성 시기와 해수면 변동

박기화 외(2005)와 조동룡 외(2005)의 연구에서 사람 발자국 화석의 형성 시기를 OSL 연대 측정 결과인 약 7,000년 전이라고 한 이유는 송악산 옹회암의 분출과 퇴적이 해수면 가까이에서 일어난 수성 분출이며, 사람 발자국 화석이 ^{14}C 연대 측정 결과인 15,161년 전에 형성되었다고 한다면 Waelbroeck et al.(2002)의 해수면 변동 자료와 일치하지 않기 때문이다.

Waelbroeck et al.(2002)의 해수면 변동 자료에서 약 15,000년 전의 해수면은 현재보다 약 78 m 아래에 위치해 있었으며, 대략 10,000년 전 이후에는 현재의 해수면과 비슷한 위치로 상승하여 큰 변동 없이 유지되었다. 이들의 해수면 변동 자료는 북대서양과 태평양 적도 지역에서 저서성 유공충의 산소 동위 원소비를 이용한 것으로서 전지구적 규모의 해수면 변동에 관한 것이다. 그러나 국지적인 해수면 변동은 비록 그 변동폭이 제한적일 수 있지만, 전지구적 규모의 해수면 변동과 다르게 나타날 수 있다는 것이 일반적인 해석이다(박용안 외, 2001; 최성자 외, 2004; Burroughs, 2005). 따라서 Waelbroeck et al. (2002)의 해수면 변동 자료는 제주도 주변의 해수면 변화와 일치하지 않을 수도 있다.

예를 들면, 최근 이연규(2005)는 남해 해역의 패류 군집에 대한 ^{14}C 의 연대를 측정하여 최종 빙하기 이후 해수면 변동을 구명하였다. 이 연구에서는 Feng (1983), Suk(1989) 그리고 Park et al.(2000)의 해수면 변동 곡선과 비교하여 나타내고 있으며(이연규, 2005의 Fig. 4), 이 자료에서 박기화 외(2005)가 발표한 사람 발자국 형성 시기인 약 7,000년 전의 해수면은 Feng(1983)의 연구 결과를 제외하고 3개의 연구 결과가 지금보다 약 55~70 m 아래에 있었음을 보여주고 있다. 그리고 약 15,000년 전의 해수면은 약 130~155 m 아래에 위치한다.

결국, 이연규(2005), Suk(1989) 그리고 Park et al. (2000)의 연구 결과에 의하면 남해 해역의 해수면 변동은 전지구적인 해수면 변동 양상과 다르게 진행되었다는 것을 나타낸다. 그리고 이 자료에 의하면, 사람 발자국 화석이 약 15,000년 전에 형성된 것이 아니라 약 7,000년 전에 형성되었다고 하더라도 해수면 부근에서 형성된 것이 아니라 적어도 고도 55 m 이상인 육상의 담수 환경에서 형성되었다는 결론에 도달한다. 그러나 하모리층에서 산출되는 연체 동물의 패각 화석, 다양하고 풍부한 생흔 화석의 존재, 이질 물질이 없는 사암의 존재, 그리고 사층리와 연흔 및 견열 등을 근거로 할 때, 바닷가 환경에서 퇴적되었음이 분명하다. 따라서 과거의 해수면 변동 자료에 근거하여 사람 발자국 화석의 형성 시기를 10,000년 이내로 제한한 것은 논의가 필요하다.

저자들은 사람 발자국 화석의 형성 시기와 해수면 변동 자료의 불일치에 대해서 다음과 같은 가능성을 제안하고자 한다. 발자국 화석지의 지층이 약 15,000년 전에는 현재보다 약 130~155 m 아래의 해안가에서 퇴적되었고, 그 후 해수면이 상승함에 따라서 이 지역이 마그마의 상승과 관련된 화산 활동의 영향으로 용기되었을 가능성이 있다. 이러한 용기가 송악산을 형성시킨 마그마의 상승에 의해 국지적으로 일어난 것인지 아니면 제주도 전역에 걸친 용기 작용의 일부였는지는 현재 정확히 알 수 없다. 그러나 최근 한라산이 용기에 의해 형성된 용기 산체라는 연구가 수행된 바 있으며(윤선 외, 2001, 2002, 2003, 2005; Yoon et al., 2002), 이러한 연구 결과는 해수면 변동과 관련된 문제점을 해결할 수 있는 가능성을 지니고 있다.

¹⁴C-법과 OSL 측정법에 의한 연대 측정값의 불일치

사람 발자국 화석 생성 시기를 결정하는데 가장 중요한 문제점은 ¹⁴C-법과 OSL 측정법에 의한 연대 측정값이 서로 다르다는 것이다. 따라서 이러한 결과가 나타나는 이유에 대해 검토해 보아야 한다. 그 가능성으로 첫 번째는 두 연대 측정법 중에 하나는 잘못 측정되었을 가능성이 있다. 그러나 이러한 가능성은 두 값 중 어느 값이 어떤 이유로 잘못 측정되었는지 현재 정확히 알 수 없다. 두 번째는 이 지역의 지층이 송악산 응회암이 분출할 당시 200~300°C 이상 고온의 영향을 받았을 가능성이 있다. OSL 측정법에서 중요한 것은 석영 입자가 지닌 OSL 신호이다. 석영 입

자의 OSL 신호는 햇빛에 노출되면 순간적으로 기존의 신호를 모두 잃게 된다(Godfrey-Smith et al., 1988). 하지만 이외에도 석영 입자가 자연 상태에서 신호를 모두 잃어버리는 경우가 있는데, Duller(2004)는 1) 마그마나 생물의 작용에 의한 결정화 작용에 의해 광물이 형성되는 경우, 2) 매우 높은 압력이 광물에 가해지는 경우, 그리고 3) 200~300°C 이상으로 석영 입자가 가열되는 경우에도 기존의 OSL 신호를 잃어버린다고 하였다.

사람 발자국 화석지는 송악산과 가까운 곳에 위치하고 있기 때문에 송악산 응회암이 분출할 당시 화산 활동과 관련된 온도(특히 열수의 작용)가 사람 발자국 화석지의 OSL 신호에 영향을 주었을 가능성이 매우 높다. 그 이유는 연구 지역의 기저를 이루고 있는 광해악 현무암은 기공과 절리가 잘 발달되어 있고, 광해악 현무암 위에 덮여있는 퇴적층은 당시 미고결 상태로 열수의 통과가 매우 용이했을 것이다. 또한 수성 화산 활동에 의해 송악산 응회암이 형성될(Chough and Sohn, 1990; Sohn et al., 2002; 손영관, 2003) 당시 공급된 해수나 지하수는 마그마에 의해 가열되어 열수가 되었을 가능성이 높다.

따라서 사람 발자국 화석을 포함한 퇴적층의 OSL 연대와 ¹⁴C 연대가 일치되지 않는 것을 다음과 같이 설명할 수 있다. 이 지역의 퇴적층은 이미 약 15,000년 전 이전에 퇴적되었고, 그 후 약 7,000년 전에 송악산 응회암이 분출하는 동안 화산 활동의 영향으로 200~300°C 이상의 고온 열수의 영향을 받아 OSL 신호가 초기화되었을 것이다. 이러한 경우에 이 지역에서 OSL 연대 측정값은 약 7,000년 전으로 측정되고, ¹⁴C 연대 측정 결과는 약 15,000년 전이 될 수 있다. 이러한 가능성을 강하게 뒷받침하는 것 중 하나가 바로 송악산 응회암에서 두 시료의 OSL 연대가 모두 7,000년 전으로 측정된 것이다. 발자국 화석지와 송악산 응회암에서 측정된 4개의 OSL 연대 측정값이 모두 오차 범위 내에서 약 7,000년 전후의 값을 나타내는 것은 약 7,000년 전후에 모두 열 또는 열수에 의한 영향을 받아 OSL 신호가 초기화되었음을 의미하는 것이다.

지사 요약

이상의 여러 연구자들의 연구 결과를 종합하면, 사람 발자국 화석지 주변 지역의 지질 층서를 다음과 같이 설명할 수 있다. 1) 남제주군 안덕면 서광서리

의 광해악에서 주로 분출한 용암이 모슬포 지역을 넓게 피복하여 광해악 현무암을 형성하였다(조동룡 외, 2005). 2) 그 후 광해악 현무암은 일정 기간동안 풍화와 침식 작용을 받았으며, 3) 15,000년 전 이전의 어느 시기부터 현재보다 약 150 m 아래에 위치한 해안가에서 하모리-송악산 지역의 송악산 응회암 하부의 명명되지 않은 퇴적층과 사계리 지역의 사람 발자국 화석을 포함한 층이 퇴적되기 시작하였고, 조류와 우체류 등의 각종 동물들이 이곳에 발자국을 남겼다. 그리고 약 15,000년 전 경에 사계리 지역의 하모리층에 사람 발자국이 남겨지게 되었다. 4) 그 후 해수면 상승과 더불어 송악산 주변 지역이 용기하였으며, 약 7,000년 전 경에 송악산 지역에서 수성 화산 활동이 일어나 송악산 응회암이 형성됨과 동시에 화산 활동에 의한 열 또는 열수에 의해서 송악산과 송악산 주변 지역 퇴적층의 OSL 신호가 초기화되었다. 5) 하모리-송악산 지역에서는 약 5,000년 전을 전후하여 송악산 응회암을 구성하는 퇴적물이 재동되어 약 3,000년 전 전후까지 퇴적되어 하모리층이 형성되었다. 사계리 지역에서는 송악산 응회암의 형성 이후에 지속적인 퇴적이 있었는지 아니면 일시적으로 퇴적이 중단되었는지는 현재 알 수 없다. 하지만 사계리 지역의 고토양층 하부(JJ3-1)의 방사성 연대가 $3,860 \pm 40$ 년 전인 것으로 보아 송악산 응회암이 분출한 후 하모리-송악산 지역에서 하모리층이 퇴적되는 동안, 사계리 지역에서는 고토양층이 형성되고 있었다. 6) 약 2,500년 전 이후에 전반적으로 해수면이 낮아지면서 하모리-송악산 지역의 하모리층과 사계리 지역의 하모리층 상부가 대기에 완전 노출되어 토양화 과정을 거친 후 그 위에 사구층이 형성되었다.

사람 발자국 화석의 형성 시기

박기화 외(2005)의 연구에서 사람 발자국 화석의 생성 시기를 약 7,000년 전으로 해석한 근거는 다음과 같다. 1) 하모리층은 퇴적 구조와 암상의 변화로 보아 송악산 응회암이 분출한 후에 퇴적된 퇴적층이다. 2) 송악산 응회암의 분출 시기는 Ar-Ar 연대 측정 결과와 과거 해수면 변동 자료와 결부시켜 해석하면 약 10,000년 전 이내로 추정된다. 3) 휴민 유기물에 의한 ^{14}C -연대 측정 결과는 휴민 유기물이 재순환되어 짧은 퇴적물에 유입된 것일 수 있기 때문에 휴민의 특성상 지층의 퇴적 시기보다는 최대 시기를

의미함으로 신뢰할 수 없다. 4) OSL 연대 측정 결과는 지층이 연대 측정에 필요한 석영을 충분히 포함하고, 퇴적 기간 중 석영이 햇빛에 충분히 노출되었으며, 퇴적 후 이차적인 교란의 증거를 보이지 않아 연대 측정의 조건을 충족하기 때문에 신뢰할 수 있다(박기화 외, 2005; 조동룡 외, 2005).

하지만 이와 같은 근거는 모두 문제점을 지니고 있다. 첫 번째와 두 번째 근거는 부적절하게 사람 발자국 화석의 형성 시기를 10,000년 전 이내로 제한하고 있다. 하모리층은 송악산 응회암이 분출한 후 퇴적된 지층이고, 송악산 응회암은 약 10,000년 이내에 분출한 것으로 추정하였기 때문에 결국 사계리 지역의 사람 발자국 화석이 산출되는 층이 하모리층이라면 그 생성 시기가 10,000년 전보다 오래될 수 없다는 결론이 저절로 도출되는 것이다. 이러한 근거 제시는 방사성 연대 측정 결과를 우선하여 해석하는 것이 아니라 일정한 틀을 먼저 만든 후에 그 틀에 맞는 연대 측정 결과만을 취사선택하는 것이다.

부연하여 설명하면, 우선 사람 발자국 화석을 포함한 층이 박기화 외(2000)에 의해 하모리층으로 기재되었지만, 앞서 언급한 바와 같이 연대 측정 결과, 최소 6,800년 전보다 오래된 것으로 적어도 송악산 응회암과 형성 시기가 같거나 더 오래된 퇴적층이다. 따라서 사계리 지역의 사람 발자국 화석을 포함한 층은 하모리층에 해당되지 않는다. 오히려 암상과 산출되는 화석 등으로 볼 때, 송악산 응회암 하부의 명명되지 않은 퇴적층과 대비될 가능성이 있다.

그리고 송악산의 분출 시기를 추정할 수 있는 근거로 제시한 것이 송악산 조면 현무암의 Ar-Ar 연대 측정 결과와 과거 해수면 변동 자료이다. 그러나 Ar-Ar 연대 측정 결과는 모두 유효 숫자보다 오차가 더 크기 때문에 의미가 없는 것이다. 해수면 변동 자료는 송악산 응회암이 수성 화산 활동에 의해 형성되었다는 것을 고려한 것이다. 하지만 이는 앞서 언급한 바와 같이 Waelbroeck et al.(2002)의 해수면 변동 자료를 인용한 것이 적절한 것인지 의문이며, 해수면 변동 자료는 송악산 응회암의 분출 시기를 알아내는데 참고 자료로만 활용될 수 있을 뿐이지 분출 시기를 정확히 알려주는 직접적인 근거 자료가 될 수 없다.

세 번째로 휴민 유기물의 ^{14}C 측정 결과는 퇴적 시기를 반영하는 것이 아니라 최대 시기를 반영하는 것이라고 하였으나, 어떤 경우에 이렇게 해석할 수 있는지 아니면 휴민 유기물의 ^{14}C -법에 의해 측정할

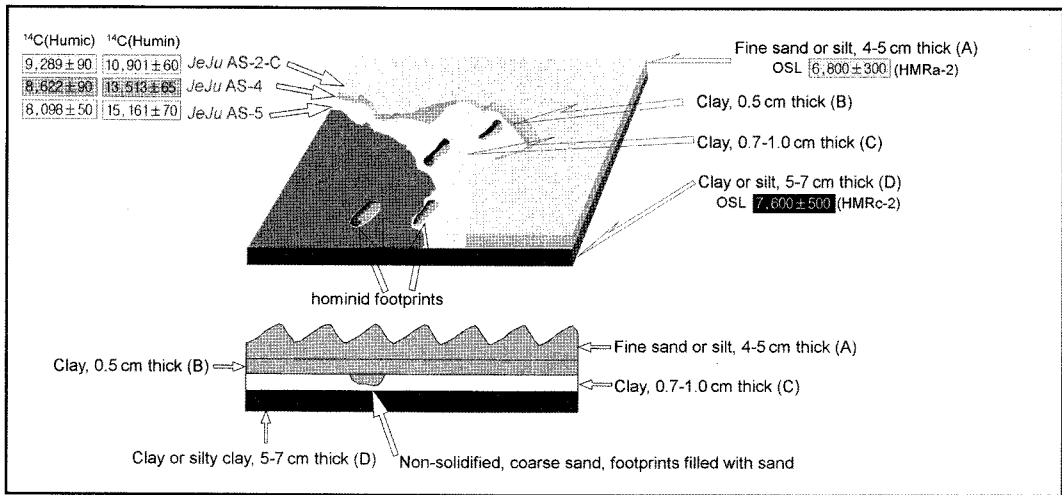


Fig. 3. Sampling sites and horizons, and age dating results in the hominid footprints site (after Park et al., 2005).

모든 결과를 퇴적 시기가 아니라 최대 시기로 간주하는 것인지 근거를 제시하고 있지 않다. 그리고 휴민 유기물이 재순환되어 퇴적층 내에 포함될 가능성을 언급하였으나 이에 대한 증거가 제시되어 있지 않다. 오히려 연구 시료의 분석을 의뢰한 뉴질랜드 지질 핵 과학 연구소(Institute of Geological and Nuclear Sciences)의 Prior 박사는 “많은 학자들은 산과 알칼리에 녹지 않는 휴민 성분이 휴믹(humic) 성분에 비하여 지층 형성 당시의 유기물을 잘 나타내는 것으로 생각하고 있다”고 하였으며(개인 서신 교환), 미국 크뤼거 지질 연대 측정 실험실(Geochron laboratories of Krueger Enterprise)의 Cherkinsky 박사는 자신의 실험실에서 측정한 JJ번호 시료의 측정 결과와 뉴질랜드에서 측정한 휴민 및 휴믹 분석 결과, 그리고 OSL 분석 결과 중 휴민 분석 결과를 지질 연대로 해석할 것을 권고하였다(개인 서신 교환).

네 번째로 OSL 분석 결과는 신뢰할 수 있다고 하였다. 하지만 OSL 연대 측정법은 비교적 오래되지 않은 퇴적층의 연대 측정에 유용하게 활용될 수 있는 장점이 있는 반면, 연대를 결정하기 위해 고려되는 여러 요소들에 수반되는 불확실한 요소(예를 들면, 수분 함량 문제, OSL 감쇄 곡선의 문제, 그리고 partial bleaching의 문제 등)들로 인해 방사성 연대 측정법에 비해 정밀도와 정확도가 낮다(Cherkinsky, 2005; 개인 서신 교환). 특히 화산 기원 석영의 경우, 정확한 등가선량 측정이 어렵기 때문에 연대 측정 결과에 오류가 발생할 수 있음이 잘 알려져 있다(최정현 외, 2004). 그리고 이 측정법은 특별히 민감한

것은 아니며 다른 측정법을 이용할 수 없는 곳에서 대안적인 방법으로 수 십 만년 이내의 연령 측정에 사용될 수 있다. 또한 이 방법으로 얻어진 연대 측정 결과는 종종 각각의 시료 채취 장소의 환경과 시료 측정 방법에 따라 상당히 달라질 수 있다(Burroughs, 2005). 그리고 앞서 언급한 바와 같이 송악산 응회암과 발자국 화석지에서 측정된 4개의 OSL 연대값이 ¹⁴C 연대값과 일치하지 않고 모두 오차 범위 내에서 약 7,000년 전의 값을 나타내는 것은 OSL 신호가 퇴적되기 전 햇빛에 의해 초기화된 것이 아니라 송악산 분출 당시의 열 또는 열수에 의해 초기화되었을 가능성을 배제할 수 없다.

이와 같이 발자국 화석지에서 측정된 연대 중에서 사람 발자국 화석의 형성 시기를 알려줄 수 있는 신뢰할만한 측정값은 발자국 화석이 보존된 상부 지층의 휴민 유기물 분석 결과이며, 그 중에서도 발자국 화석이 형성된 직후 그 위를 피복한 퇴적물인 Fig. 3과 Table 1 C층의 AS-5 시료에서 측정된 15,161 ± 70년 전이 사람 발자국 화석의 형성 시기로 해석하는 것이 더욱 합리적으로 판단된다.

결론

현재까지 측정된 절대 연령 측정 결과와 야외 지질 조사에 의하면, 사계리 지역의 사람 발자국 화석 포함 지층은 하모리층이 아니며, 송악산 서쪽의 송악산 응회암 하부에 위치하는 명명되지 않는 퇴적층과 대비되는 것으로 판단된다. 그리고 연대 측정 결과에

Table 1. Summary of age dating results of the footprint locality (Park et al., 2005)

Layer	Method	OSL (Korea Basic Science Institute)	Radiocarbon (Institute of Geological and Nuclear Sciences, New Zealand)	
			Humic	Humic
A: Fine sand or silt, 4~5 cm thick		6,800 ± 300 yr B.P.	9,289 ± 90 yr B.P.	10,901 ± 60 yr B.P.
B: Clay, 1 cm thick			8,622 ± 90 yr B.P.	13,513 ± 65 yr B.P.
C: Clay, 0.7~1.0 cm thick			8,098 ± 50 yr B.P.	15,161 ± 70 yr B.P.
D: Clay or silty clay, 5~7 cm thick		7,600 ± 500 yr B.P.		

의하면, 사계리 지역의 발자국 화석 포함 지층의 상부에 위치하는 하부 고토양층이 송악산 서쪽의 하모리층과 대비된다. 사람 발자국 화석의 형성 시기는 현재까지 가장 정확하고 신뢰성이 높은 ¹⁴C 연대 측정 결과에 따라서 약 15,000년 전으로 해석하는 것이 합리적이라고 생각된다.

감사의 글

본 연구를 위해 남제주 해안 사람 발자국 화석 지질 연대 측정 자료를 사용하도록 허락하여주신 남제주군 관계자님께 감사드립니다. 또한 원고를 읽어 주시고 꼼꼼하게 검토하여 훌륭한 조언을 주신 충북대학교 이창진 교수님, 공주대학교 김종현 교수님 그리고 익명의 심사 위원님께 감사드리며, 편집위원님의 조언에도 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

박기화, 조동룡, 김정찬, 2000, 모슬포 · 한림도폭 지질보고서. 한국자원연구소, 56 p.
 박기화, 진재화, 조동룡, 홍완, 김주용, 남욱현, 2005, 남제주 해안 사람 발자국 화석 지질연대 측정. 남제주군, 136 p.
 박용안, 공우석, 강영복, 김연옥, 김주용, 김태호, 박경, 박선주, 박승필, 박원규, 박희두, 배기동, 오건환, 우한준, 윤순옥, 이연규, 임동일, 장순근, 장진호, 장호, 정영화, 제종길, 조화룡, 최성길, 한영희, 황상일, 2001, 한국의 제4기 환경-제4기 환경과 인간. 서울대학교출판부, 서울, 564 p.
 손영관, 2003, 제주도 수성화산체의 형성과정. 제주화산연구소 개소기념 제1회 학술심포지엄 논문집, 제주화산연구소, 52-56.
 손영관, 2004, 제주도의 수성화산활동과 제4기 퇴적작용. 대한지질학회 춘계학술답사 안내서: 제주도의 화산암과 화산활동, 대한지질학회, 3-15.
 윤선, 정차연, 송시대, 양경희, 2001, 제주도 백록담 분화구

벽의 구성암석. 한국고생물학회 제17차 학술발표회 논문초록집, p. 18.
 윤선, 정차연, 송시대, 현원학, 2002, 제주도 형성사에 있어서 탐라층의 의의. 한국고생물학회 제18차 학술발표회 논문초록집. 17-18.
 윤선, 정차연, 송시대, 현원학, 2003, 제주도 한라산: 용기 산체. 제주화산연구소 제1회 학술심포지엄 논문집, 7-14.
 윤선, 현원학, 정차연, 2005, 제주도 한라산의 지질. 대한지질학회지, 41, 481-497.
 이연규, 2005, 한국 남해해역 패류근집에서 나타나는 시간평균화 현상과 최종 빙하기 이후 해수면 변동. 한국지구과학회지, 26, 541-550.
 조동룡, 박기화, 진재화, 홍완, 2005, 제주도 하모리층에 발달하는 사람 발자국의 형성시기. 한국암석학회지, 14, 149-156.
 최성자, 최위찬, Walter, C. R., 2004, 제주도 홀로세 해안단구의 Reconnaissance와 제주 발자국 화석의 소고. 대한지질학회지 2004년도 춘계학술발표회 초록집, 307-309.
 최정현, 정창식, 장호완, 2004, 석영을 이용한 OSL (Optically Stimulated Luminescence) 연대측정의 원리와 지질학적 적용. 대한지질학회지, 40, 567-583.
 황상구, 2002, 남제주 송악산 및 옹화환 화산체. 원종관, 손인석, 지질 · 광물 문화재 정밀 조사 보고서. 문화재청, 대전, 115-146.
 Burroughs, W. J., 2005, Climate change in prehistory: The end of the reign of chaos. Cambridge University Press, Cambridge, 356 p.
 Cheong, C. S., Choi, J. H., Shon, Y. K. and Jeong, G. Y., 2005, Optical dating of Holocene volcanism in Jeju Island, Korea. LED 2005 abstract volume, p. 41.
 Chough, S. K. and Sohn, Y. K., 1990, Depositional mechanics and sequences of base surges, Songaksan tuff ring, Jeju Island, Korea. Sedimentology, 37, 1115-1135.
 Duller, G. A. T., 2004, Luminescence dating of Quaternary sediments: recent advances. Journal of Quaternary Science, 19, 183-192.
 Feng, Y., 1983, Since 40 Ka sea-level change and lowest sea level. East China Sea, 1, 36-42.
 Godfrey-Smith, D. I., Huntley, D. J. and Chen, W. H.,

- 1988, Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extract. *Quaternary Science Reviews*, 7, 373-380.
- Kim, J. Y., Kim, K. S., Park, S. I. and Shin, M. K., 2004, Proceedings of International Symposium on the Quaternary Footprints of Hominids and Other Vertebrates. Namjejugun, Jeju, Korea, 175 p.
- Park, S. C., Yoo, D. G., Lee, C. W. and Lee, E. I., 2000, Last glacial sea-level changes and paleogeography of the Korea (Tsushima) Strait. *Geo-Marine Letters*, 20, 64-71.
- 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.
- Suk, B. C., 1989, Sedimentology and history of sea level changes in the east China sea and Adjacent seas. In Taira, A. and Masuda, F. (eds.), *Sedimentary facies in the active plate margins*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 215-221.
- Yoon, S., Jung, C. Y., Song, S. T. and Hyun, W. H., 2002, Mt. Halla, the main body of Jeju Island, Korea: an uplifted edifice. Proceedings of International Symposium on New Concepts in Global Tectonics (NCGT), La Junta, Colorado, USA, 165-170.
- Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Michel, E., Duplessy, C., McManus, J. F., Lambeck, K., Balbon, E. and Labracherie, M., 2002, Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Review*, 1, 295-305.

2006년 3월 6일 접수
2006년 3월 21일 수정원고 접수
2006년 3월 27일 원고 채택