

제주도 하모리층에 발달하는 사람 발자국의 형성시기

조등룡* · 박기화 · 진재화 · 홍 완

한국지질자원연구원, 305-350 대전 유성구 가정동 30

Age Constraints on Human Footmarks in Hamori Formation, Jeju Island, Korea

Deung-Lyong Cho*, Ki-Hwa Park, Jae-Hwa Jin and Wan Hong

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 Gajeong-daeng Yuseong-gu Daejeon 305-350 Korea

요 약: 사람 발자국을 포함하는 하모리층의 형성시기를 밝히기 위하여 탄소 AMS와 OSL 연대측정법을 적용하였고, 그 주변의 현무암류에 대해서는 Ar-Ar법 절대연령측정을 실시하였다. 송악산응회암 분출과 관련된 조면현무암의 Ar-Ar 분석결과는 $10.6 \pm 19.9 \sim 11.7 \pm 26.3$ Ka이며, 빙하기의 해수면 변동자료와 비교할 때 이의 분출과 퇴적은 약 10,000년 이내에 일어난 것으로 추정된다. 하모리층의 OSL 연대는 최상부층이 6.8 ± 0.3 ka, 사람 발자국 형성층 직하의 층은 약 800년 정도 고기인 7.6 ± 0.5 ka로서 사람 발자국의 형성시기는 7,600년~6,800년 사이로 제한된다. 한편 하모리층 휴민 성분의 AMS 연령은 $13,513 \pm 65 \sim 15,161 \pm 70$ yr B.P.로 측정되었으며, 이는 휴민의 특성상 지층의 퇴적시기보다는 최대시기를 의미한다. 휴믹 성분의 경우 최하부층이 $8,098 \pm 50$ yr B.P.이고, 최상부층이 $9,289 \pm 90$ yr B.P.인 역전된 연속계를 보여 신뢰성이 떨어진다.

핵심어: 하모리층, 사람 발자국, 광여기루미네선스, 가속질량분석기

Abstract: Ar-Ar, carbon AMS and OSL dating was carried out to clarify the age of the human footmarks on the Hamori Formation, Jeju Island, Korea. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of trachybasalt from the Songaksan Tuff, which is underlain by the Hamori Formation, range between 10.6 ± 19.9 Ka and 11.7 ± 26.3 Ka. Radiocarbon AMS ages of humin fractions extracted from sediment samples yielded the maximum limit age of the Hamori Formation as $15,161 \pm 70$ yr B.P. The OSL dating of the top and bottom layers of the Hamori Formation gave 6.8 ± 0.3 ka and 7.6 ± 0.5 ka, respectively, suggesting that timing of the human footmarks formation can be constrained as between ca 6,800 yr B.P. and 7,600 yr B.P.

Key words: Hamori Formation, Human footmark, OSL, AMS

서 언

남제주군 대정읍 하모리에서 안덕면 사계리를 거쳐 화순리를 잇는 해안에 하모리층이 분포한다. 송악산 서쪽 해안의 하모리층에서 조류 발자국 산출에 대한 보고가 있었고(Chough and Sohn, 1990), 제주도(남제주군)는 이 지역의 조류 발자국을 보존하는 노력을 해오고 있었다. 2004년에는 안덕면 사계리 해안에서 사람 발자국 외에 여러 종류의 짐승 발자국도 함께 산출된다는 보고와 함께 이의 형성시기가 50,000년 전이라는 주장이 제기되었다(한국교원대학교, 김정률 미발표). 따

라서 50,000년 전에 제주도에 인류가 살았었다는 해석이 가능하게 된다. 그러나 Sohn *et al.*(2002)은 송악산 서쪽 해안 하모리층의 조개파편으로 탄소동위원소 절대연령을 측정하여 형성시기가 4,000~5,000년으로 훨씬 짧다고 보고한 적이 있어 논란이 되고 있다. 사람 발자국이 지층 내에 남아있는 예는 전 세계에 걸쳐 극소수에 불과하고, 또한 한국에서 발견되었다는 점에서 형성된 시기에 대해 일반인도 큰 관심을 갖게 되었다. 이 연구의 목적은 우리 조상 내지는 인류의 발달 행적에 대한 정보를 얻을 수 있다는 점에서 학술적 및 문화재적 가치가 높은 제주도 하모리층의 발자국 형성

*Corresponding author: Tel: 82-42-868-3040, E-mail: dlcho@kigam.re.kr

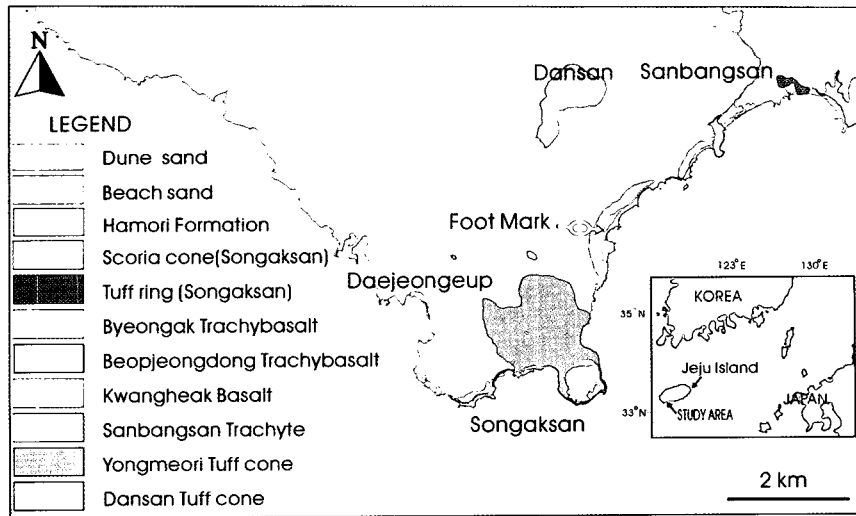


Fig. 1. Geological map of Hamori and vicinity area.

시기를 절대연령측정을 통해 명확히 규명하는데 있다.

지 질

연구지역의 지질은 화산암, 화산쇄설암과 퇴적암으로 구성된다. 화산암은 파호이호이성 용암과 아아 용암류로 이루어지며, 화산쇄설암은 용암돔의 부분분출과 마그마 가스폭발에 의해 형성된 분석구 및 마그마가 상승하면서 주변의 물과 만나 작은 알갱이로 깨져 분출한 응회암으로 구성된다. 퇴적암은 응회암이 재동되어 형성된 것이다. 이들 지층은 하부로부터 단산응회암, 용머리응회암, 산방산조면암, 광해악현무암, 범정동조면현무암, 병악조면현무암, 송악산응회암, 송악산 분석구, 하모리층, 해빈사, 풍성사구의 순으로 구분된다(Fig. 1).

단산응회암은 북쪽의 응회구와 남쪽의 낮은 구릉을 이루는 응회환으로 구분된다(Sohn and Park, 2005). 응회구는 100 m 높이며, 층리의 경사는 대부분 20° 이상이고 곳에 따라 60°를 넘는다. 층의 두께는 불규칙하다. 응회환은 높이 약 40 m이며, 층의 두께는 5 cm로 얇고, 곳에 따라 U-자형 하도구조가 발달한다.

용머리응회암은 주로 모래 크기의 현무암질 입자와 자갈 크기의 현무암질 및 이질 암편으로 구성되며, 그 외에 유문암, 안산암, 용결응회암의 암편이 산재한다. 이는 평행층리, 파동형층리, 탄낭, U-자형 하도구조 등의 퇴적구조를 나타내고, 층리 변화와 결부하면 3회의 화도의 이동이 있었던 것으로 해석된다(Sohn, 1995; Sohn and Park, 2005).

산방산조면암은 장경 약 2 km, 단경 약 1.4 km, 표고 395 m인 돔상을 이루며, 특징적으로 폭 1~2 m 내외의 주상절리가 잘 발달되어 있다. 산방산에서 화순해수욕장으로 가는 도로 정상부에서 산방산조면암이 분출할 때 형성된 각력회류(block and ash flow deposits)에 의한 응회질 각력암이 관찰된다.

광해악현무암은 남제주군 안덕면 서광서리의 광해악에서 주로 뿜어 나온 용암에 의해 형성되었으며, 모슬포 지역의 광활한 면적을 피복한다. 이 암석에서 유래한 원마도가 양호한 거력을 하모리와 사계리 해안의 송악산응회암과 하모리층이 피복한다. 병악조면현무암은 분석구 형성 후에 흘러나온 용암으로서 다량의 각력을 함유한다.

송악산응회암은 하부로부터 응회암, 분석층1, 조면현무암, 분석층2 순으로 구성된다(Sohn *et al.*, 2002). 응회암은 송악산을 중심으로 약 3 km 반경에 분포하며, 송악산 동쪽과 서쪽 해안절벽을 따라 80 m의 두께로 응회환을 이룬다(Chough and Sohn, 1990). 분석층1은 두께 2~4 m로 남쪽으로 가면서 점점되고, 조면현무암은 유동구조와 크링커가 발달하는 용암호(ponded lava)이다. 분석층2는 지름 약 300 m의 분석구로서 이의 중앙에 지름 약 100 m의 분화구가 있다. 송악산 응회환 최하부에는 천해 화석을 포함하는 재동된 퇴적층이 발견되어 송악산 주변 지역이 얕은 바다였음을 지시한다.

하모리층은 대정해수욕장 남측 해안, 송악산 서측 해안, 송악산 동측 해안에서 안덕면 사계리에 이르는 구간과 용머리 동측 해안에 분포한다. 이는 제주도에서 가장 젊은 암층으로 광해악현무암과 송악산응회환의

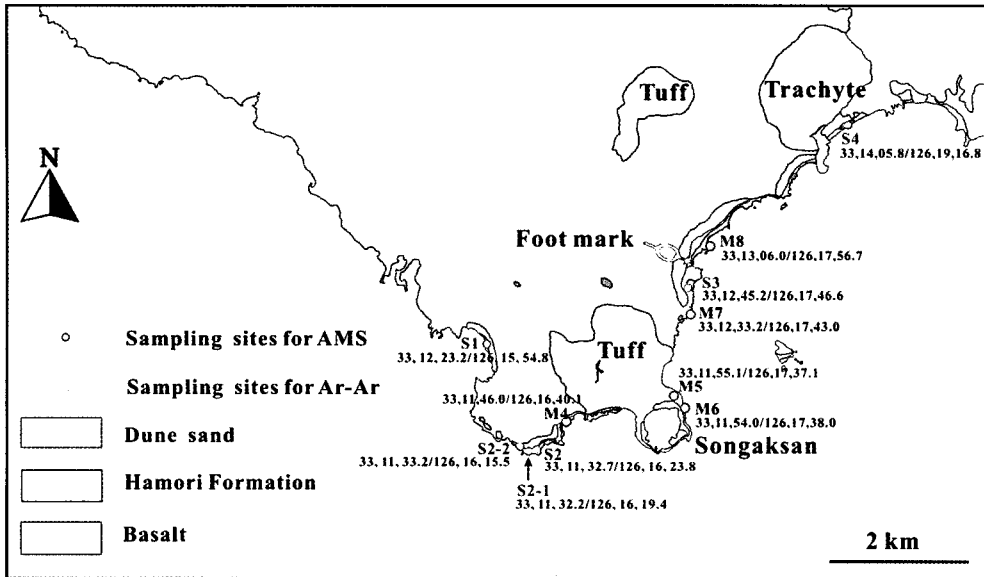


Fig. 2. Location of samples for Ar-Ar and AMS age datings. Coordinate of each sample is also given with its sample number.

원거리 퇴적상에 해당하는 얇은 응회암층을 부정합으로 피복한다. 하모리층은 일반적으로 수 m의 두께이며, 응회암에서 재동된 물질로서 역암, 역질사암, 현무암질응회질사암 및 실트암으로 구성된다. 현무암질 역과 응회질 모래는 비교적 원마도가 양호하다. 역암과 사암은 미립의 이질 물질이 적고, 부분적으로 석영 및 조개편을 포함한다. 송악산 서남부의 노두에서는 하모리층은 상부에 수평층리의 고토양층을 갖는다.

퇴적구조와 암상의 변화로 보아 하모리층은 송악산 응회암이 분출한 후에 퇴적된 지층이다(Sohn *et al.*, 2002). 다양한 형태의 사층리와 경사층리를 갖는 사암이 분포한 지역에는 이암층이 없고, 사암에 이질 물질이 없는 것으로 보아 바닷가 환경에서 파도에 의해 퇴적작용이 있었던 것으로 해석된다. 반면 송악산 서측과 사람 발자국이 산출되는 지역처럼 평행 내지는 저각도의 사층리를 갖는 이질층이 분포하는 곳에는 진폭이 낮고 파장이 짧은 연흔과 건열이 흔히 나타나 퇴적 기간 중에 지역에 따라 소규모의 얇은 깊이의 호수가 형성되어 메마른 적이 있었던 것을 시사한다.

대정읍 하모리, 안덕면 사계리와 화순리 해안에 응회질의 모래로 구성된 해변사가 분포하며, 화순해수욕장에서 산이수동에 이르는 구간에서는 해안에 따라 길게 풍성사구층이 높이 약 5m의 언덕을 이룬다. 이는 조개파편과 응회질 및 잔자갈 크기의 현무암편으로 구성되며, 일부는 미약한 층리를 보인다.

절대연령측정

Ar-Ar 연대측정

하모리층 형성시기의 하한을 규정하기 위해 사람 발자국이 산출되는 송악산 서측 해안에서 광해악현무암 3개 시료를 채취하고, 하모리층에 응회물질을 공급한 송악산응회암의 분출시기를 알기 위해 마지막으로 분출한 용암(조면현무암) 2개 시료를 채취하여(Fig. 2) Ar-Ar법에 의한 암석절대연령을 측정하였다. 분석은 미국 오레곤주립대학에서 이루어졌으며, 결과는 Table 1과 같다.

결과에서 광해악현무암은 $24.5 \pm 112.6 \sim 148.1 \pm 144.6$ Ka의 범위이며, 송악산응회암의 조면현무암은 10.6 ± 19.9 Ka와 11.7 ± 26.3 Ka의 연대를 보인다(Table 1). 이들 연령은 오차가 너무 커 정확한 암석 분출시기를 지시한다고 할 수 없다. 이와 같은 큰 오차는 암석형성 이후의 2차적인 변질의 가능성과 Ar-Ar법을 적용하기에 시료가 너무 젊은 것에 기인할 가능성이 있다.

OSL 연대측정

하모리층의 형성연대를 구하기 위해 광여기루미네선스(optically stimulated Luminescence; OSL) 연대측정법을 적용하였다. 이는 석영이 퇴적 기간 중 햇빛에 노출되면 순간적으로 기존의 신호를 모두 잃게 되고(Godfrey-Smith *et al.*, 1988), 퇴적 및 매몰 이후 햇빛

Table 1. Ar-Ar analytical data and age (2σ)

Sample	Tem (°C)	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	^{39}Ar (k) (%)	Age $\pm 2\alpha$ (ka)	Weighted Plateau Age
M-5	600°C	1.69406	0.00587	0.00587	19.62	98.4 \pm 103.8	
	800°C	0.32829	0.00137	0.00137	41.61	18.9 \pm 35.5	
	1000°C	0.21177	0.00091	0.00091	20.86	3.1 \pm 25.0	
	1200°C	0.55050	0.00280	0.00280	16.24	322.6 \pm 71.2	11.7 \pm 26.3
	1400°C	8.56911	0.00733	0.00733	1.66	20,895.9 \pm 304.1	
M-6	600°C	2.80860	1.09304	0.00977	10.21	6.1 \pm 123.2	
	800°C	0.31525	1.19391	0.00134	46.89	5.1 \pm 24.9	
	1000°C	0.24914	0.82295	0.00101	31.89	17.4 \pm 35.4	10.6 \pm 19.9
	1200°C	1.00712	8.51989	0.00554	10.96	77.5 \pm 132.6	
	1400°C	41.51941	11.18677	0.11076	0.05	28,605.1 \pm 9,762.1	
M-4	600°C	4.28560	0.99781	0.01470	51.82	32.5 \pm 238.1	
	800°C	1.84350	6.49741	0.00790	29.63	22.2 \pm 127.8	
	1200°C	2.21908	28.87464	0.01419	17.18	830.4 \pm 382.6	24.5 \pm 112.6
	1400°C	4.66083	51.02086	0.02793	1.37	1,185.4 \pm 914.3	
M-8	600°C	5.31196	0.51942	0.01788	25.01	9.8 \pm 286.3	
	800°C	1.95260	3.46494	0.00745	55.13	104.7 \pm 219.5	47.3 \pm 103.2
	1200°C	1.94228	18.55684	0.01141	17.40	320.6 \pm 261.4	
	1400°C	3.06674	48.72481	0.02319	2.46	440.7 \pm 2,095.9	
M-7	600°C	5.07184	0.77850	0.01733	60.81	9.8 \pm 286.3	
	800°C	3.31854	4.99908	0.01240	12.68	104.7 \pm 219.5	
	1200°C	2.44166	18.81499	0.01283	25.66	320.6 \pm 261.4	148.1 \pm 144.6
	1400°C	5.39527	66.67956	0.03534	0.86	440.7 \pm 2095.9	

으로부터 차단되면 시간이 지남에 따라 점점 더 신호가 다시 축적되므로, 이러한 신호의 양을 루미네선스로 측정하여 연대를 계산하는 원리를 이용한다(Huntely *et al.*, 1985). 따라서 OSL 연대측정법은 기존의 탄소동위원소 연대측정법 등에서 종종 논란이 되는 “과연 시료가 지층의 퇴적시기를 정확하게 반영하는가?, 오래된 물질이 다시 퇴적된 것은 아닌가?, 퇴적층에 젊은 물질이 이차적으로 유입된 것은 아닌가?”하는 문제점을 피할 수 있는 장점이 있다.

사람 발자국을 포함하는 하모리층의 노두는 모두 4개의 층으로 구성된다(Fig. 3). 최상부의 표면층은 4~5 cm 두께의 세립질 모래 혹은 실트층이며(A층), 그 하부에 두께 0.5 cm의 점토층이 놓이고(B층), 그 하부에 사람 발자국이 발달한 두께 0.7~1.0 cm의 다른 점토층이 존재한다(C층). C층에서 사람 발자국에 의해 흠이 파진 부분은 미고결 상태의 조립질 모래로 채워져 있다. C층의 하부는 5~7 cm의 점토 혹은 실트층이 놓인다(D층). A층, B층, C층과 D층은 서로 정합적 관계로 퇴적된 것처럼 보이며, 상당히 고화되어 있는데 물에 녹기 쉬운 탄산염광물 및 철광물이 시멘트 역할을 하

였기 때문으로 추정된다.

OSL 연대측정법을 적용하기 위해서는 시료에 석영이 있어야하므로 이를 확인하기 위해 하모리층의 각층에 대해 X선 회절분석을 실시하였다(Fig. 4). A층의 구성광물은 대부분 석영(low quartz), 사장석(anorthosite, sodian, intermediate), 카올리나이트(kaolinite 1Md), 백운모(muscovite-2M1), 몬몰릴로나이트(montmorillonte-15A)이며, B층은 석영(low quartz), 방해석, 단사회석, 적철석, 능철석, 사장석(anorthosite, sodian, ordered)으로 이루어졌다. 반면 C층과 D층은 석영(low quartz), 사장석(anorthosite, sodian, intermediate), 백운모(muscovite-2M1), 카올리나이트(kaolinite 1Md)로 비교적 단순한 조성을 가진다. 이와 같은 X선 회절분석 결과는 하모리층에 석영을 포함하는 중성 내지 산성의 화산물질이 유입된 것을 확인한다.

OSL 연대측정을 실시하기 위해 A층과 D층에서 시료를 채취하였으며, X선 회절 강도로 보아 이들은 최소 10 %의 석영을 포함한 것으로 추정된다. 사람 발자국을 포함하는 C층이 발자국 형성시기를 가장 잘 나타낼 수 있으나 층이 너무 얇아 충분한 시료를 확보할

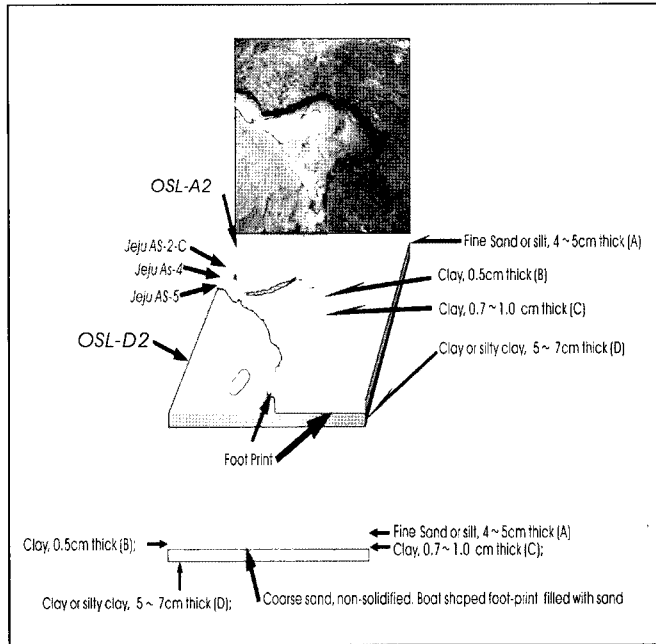


Fig. 3. Sub-layers of the Hamori Formation, and sampling sites for the AMS and OSL age datings.

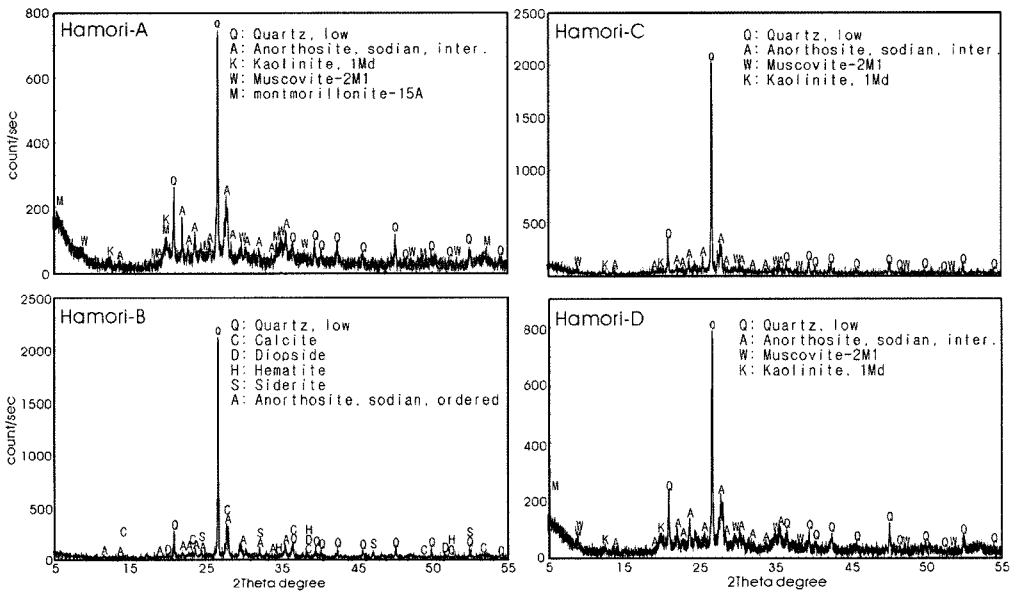


Fig. 4. Result of XRD analysis for four sub-layers samples form the Hamori Formation.

수 없어 제외하였다.

OSL 연대측정 시료는 일반적으로 플라스틱 혹은 스테인리스스틸 파이프를 퇴적층의 층리면에 평행하게 박아 채취하나 하모리층의 경우 교화가 상당히 진전된

어 파이프가 퇴적층에 박히지 않았다. 따라서 햇빛이 차단된 야간에 OSL 렌턴의 광원 하에서 시료를 채취 하였으며, 햇빛의 노출 하에 있었던 지층의 상부에서 1 cm 두께 정도의 퇴적층을 걷어낸 후 측정에 사용할

Table 2. OSL analytical data and age (2 σ)

Sample number	Dose rate (Gy/ka)	Equivalent dose (Gy)	Water content (%)	Aliquots used (n)	OSL age (ka)
OSL-A2	1.34 \pm 0.04	9.12 \pm 0.36	36.2	18	6.8 \pm 0.3
OSL-D2	1.67 \pm 0.04	12.6 \pm 0.75	39.4	18	7.6 \pm 0.5

Table 3. Carbon AMS analytical data and age (2 σ)

Sample	Material	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	age (BP)	$\delta^{14}\text{C}$ (‰)	$\delta-^{14}\text{C}$	Percent morden	Note
S1	shell	1.40	2,995 \pm 35	-278.1 \pm 3.4	-315.7 \pm 3.2	68.43 \pm 0.32	
S2	shell	1.80	3,855 \pm 35	-350.9 \pm 2.9	-385.1 \pm 2.7	61.49 \pm 0.27	
S2-1	shell	1.88	3,862 \pm 35	-351.4 \pm 2.9	-385.7 \pm 2.7	61.43 \pm 0.27	
S2-2	shell	1.97	3,779 \pm 45	-344.6 \pm 3.5	-379.4 \pm 3.4	62.06 \pm 0.34	
S4	shell	1.95	3,044 \pm 35	-281.7 \pm 3.2	-319.9 \pm 3.0	68.01 \pm 0.30	
S3	sediments	-31.35	7,318 \pm 40	-605.7 \pm 2.0	-600.5 \pm 2.0	39.95 \pm 0.20	humic
AS-2-C	sediment	-33.43	9,289 \pm 90	-692.8 \pm 3.5	-687.4 \pm 3.5	31.26 \pm 0.35	humic
	sediment	-27.00	10,901 \pm 60	-745.3 \pm 1.9	-744.2 \pm 2.0	25.58 \pm 0.20	humic
AS-4	sediment	-32.37	8,622 \pm 90	-655.5 \pm 3.8	-660.4 \pm 3.9	33.96 \pm 0.39	humic
	sediment	-29.01	13,513 \pm 65	-816.8 \pm 1.5	-815.2 \pm 1.5	18.48 \pm 0.15	humic
AS-5	sediment	-32.35	8,098 \pm 50	-642.9 \pm 2.2	-637.4 \pm 2.2	36.26 \pm 0.22	humic
	sediment	-28.14	15,161 \pm 70	-850.5 \pm 1.3	-849.5 \pm 1.3	15.05 \pm 0.13	humic

시료를 2~4 kg씩 각각 취하였다. 채취된 시료는 외부의 광원과 수분의 증발을 완전히 차단할 수 있도록 즉시 사진 인화지 보관용 봉투에 2층으로 포장하고 테이프를 완전히 밀봉하여 실험실로 가져왔다.

OSL 연대측정을 위한 시료 전처리와 기기 분석은 한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 실시되었다(담당자, 최정현 박사). 시료 전처리와 기기분석의 세부사항은 Choi *et al.*(2003)과 최정현 외(2004)의 방법과 같으며, 결과는 Table 2에 요약되었다. OSL 연대측정 결과 하모리층의 최상부 A층은 6.8 \pm 0.3 ka, 사람 발자국 형성층 직하의 D층은 약 800년 정도 고기인 7.6 \pm 0.5 ka에 각각 형성된 것으로 나타난다. 따라서 이들 자료에 의해 하모리층에 사람 발자국이 형성된 시기는 약 7,600년에서 약 6,800년 전 사이로 제한된다.

탄소동위원소 AMS 연대측정

퇴적물의 탄소동위원소 연대측정은 조개껍질, 유공충 골격 등의 탄산염 성분의 화석이나 초목편이나 토탄 등과 같은 유기질 입자를 주로 이용하여 이루어진다. 이런 물질이 존재하지 않을 경우는 지층 내 아주 미세한 입자로 존재하는 기타 유기물 성분 등을 추출하여 사용하는데, 이는 크게 산성 용액에 잘 녹는 펄빅(fulvic), 알칼리성 용액에 잘 녹는 휴믹(humic) 및 산성과 알칼리성 용액에 모두 잘 녹지 않는 휴민(humin)의 세 가지 성분으로 나뉜다.

탄소동위원소 연대측정을 위해 대정읍 하모리, 상모

리(송악산 서측), 안덕면 화순리(용머리 동측)의 하모리층에서 조개파편을 채취하였고, 사람 발자국 산출지에 인접한 하모리층은 조개파편을 포함하지 않아 휴민 성분을 추출하여 사용하였다(위치: Fig. 2). 사람 발자국이 산출되는 하모리층의 노두 역시 조개파편 등의 화석을 포함하지 않아 A층, B층, C층에서 각 층별로 휴민과 휴믹 성분을 추출하여 성분별로 연대측정에 이용하였다(Fig. 3). 펄빅 성분은 산성용액에 워낙 약하고 그만큼 지층 내 이동 가능성이 높아 연대측정 대상에서 제외하였다. 탄소동위원소 연대측정을 위한 분석은 뉴질랜드의 Institute of Geological and Nuclear Sciences에서 AMS를 사용하여 이루어졌으며 결과는 Table 3과 같다.

탄소동위원소 연대를 살펴보면 하모리층은 2,900 yr B.P.에서 15,200 yr B.P. 사이의 값을 보인다. 하모리층에서 채취한 조개껍질의 탄소동위원소 AMS 연대는 3,000 yr B.P. 내외이며, 사람 발자국 산출지 인접지역 지층에서의 휴민 성분의 절대연령은 7,318 \pm 40 yr B.P.로서 OSL 연령과 유사하다.

사람 발자국이 형성된 지층의 직하부 층에서 휴민이 15,161 \pm 70 yr B.P., 휴믹이 8,098 \pm 50 yr B.P.의 연령을 각각 보였다. 한편 사람 발자국 형성 지층 상부 두 개의 층 중 사람 발자국 형성 지층 직상부 층은 휴민이 13,513 \pm 65 yr B.P., 휴믹이 8,622 \pm 90 yr B.P.의 연령을 각각 보였고, 그 위의 최상부 층은 휴민이 10,901 \pm 60 yr B.P., 휴믹이 9,289 \pm 90 yr B.P.의 연령을 보인다. 즉

3개의 연속하는 층의 휴민 연령은 하부에서 상부로 가면서 층별로 2,000년~3,000년의 연령차를 보이며 매우 훌륭한 연속계를 보이는 반면, 휴믹은 8,000 yr B.P.~9,000 yr B.P.로서 연대값은 보다 좁게 수렴하나 약 600년의 연령차를 가지며 역전된 연령연속계로 나타난다.

토 의

송악산응회암 분출 및 퇴적시기

송악산응회암 분출과 관련된 조면현무암은 Ar-Ar 분석 결과 $10.6 \pm 19.9 \sim 11.7 \pm 26.3$ Ka로 오차가 커 명확한 값을 규정하기는 어렵지만(Table 1), 최근의 해수면 변동자료와 결부하면 분출시기를 추정할 수 있다. 즉, 송악산응회암의 분출과 퇴적은 해수면에 가까운 환경에서 일어났으므로 전 세계에 걸쳐 연구된 40만 년 이후의 빙하기와 관련된 해수면의 변동자료(Waelbroeck *et al.*, 2002)에서 최근 약 10,000년 혹은 128,000년 전이었음을 유추할 수 있다(Fig. 5). 송악산응회암의 조면현무암 Ar-Ar 연령은 최대오차 값을 적용해도 38,000년 이내이기 때문에 이의 분출시기가 128,000년일 가능성은 희박하다. 그리고 최근의 해수면 변동자료에서 38,000년 전의 해수면 높이는 현재보다 대략 110 m 낮아 송악산응회암의 분출과 퇴적이 일어난 환경에 해당하지 않는다. 따라서 송악산응회암의 형성시기는 현재 해수면 높이에 해당하는 약 10,000년 전 이내에 일어났을 가능성이 크다.

하모리층 사람 발자국 형성시기

OSL 연대측정은 석영 입자가 햇빛에 10초 정도만 노출되어도 원래 가지고 있던 OSL 신호의 약 99%를 잃어버리고, 퇴적작용에 의해 햇빛으로부터 차단되면 시간이 지남에 따라 다시 석영 입자에 OSL 신호가 축적되는 원리를 이용한다. 따라서 이러한 조건을 충족할 경우 제4기 퇴적층의 연대측정에 적용할 수 있는 여러 방법 중 가장 이상적인 것이다.

이 연구에서 OSL 연대측정을 실시한 하모리 A층과 D층은 비교적 분급이 양호한 세립질 모래 혹은 실트층이므로(Fig. 3) 퇴적작용 기간 중 햇빛에 충분히 노출되었을 것이고, 또한 퇴적된 후 이차적으로 다시 햇빛에 노출된 교란의 증거를 보이지 않는다. 따라서 이들의 OSL 연대는 퇴적시기를 정확하게 반영한다고 할 수 있고, 하모리층에 사람 발자국이 형성된 시기는 약 7,600년에서 약 6,800년 전 사이로 제한된다.

이미 언급한 것처럼 하모리층은 퇴적구조와 암상의 변화로 보아 송악산응회암이 분출한 후에 퇴적된 지층

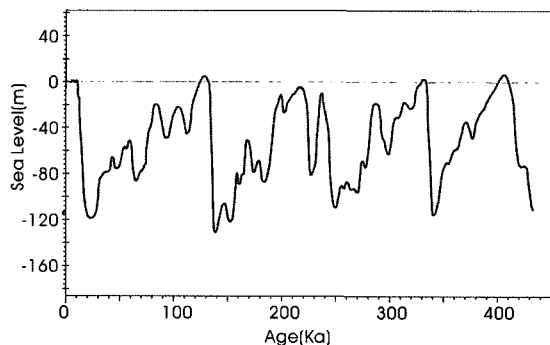


Fig. 5. Sea-level change during the last 460 Ka (after Waelbroeck *et al.*, 2002).

이며, 송악산응회암의 분출시기는 Ar-Ar 연대자료에 의해 약 10,000년 전 이내로 추정되었다. 따라서 OSL 연대측정에 의한 하모리층의 7,600년~6,800년 전 연령은 이에 잘 부합한다.

사람 발자국이 산출되는 곳에서 비교적 멀리 떨어진 송악산 서측과 용머리 동측의 하모리층에서 채취한(Fig. 2) 조개껍질의 탄소동위원소 AMS 연대는 OSL 연대보다 젊은 약 3,000 yr B.P. 내외를 보인다(Table 3). 이는 조개껍질이 하모리층 퇴적 후에 유입되었거나, 조개껍질을 포함하는 송악산 서측과 용머리 동측의 하모리층이 사람 발자국을 포함하는 하모리층보다 상위층이라는 2가지 해석으로 가능하지만 현재의 자료로는 어떤 것인지 확증하기 어렵다.

퇴적층 내 유기물의 휴민 성분은 산성, 알칼리성 용액에 모두 용해가 어려운 특성상 수차례의 재순환 과정을 거치면서도 없어지지 않고 새로운 층으로 다시 퇴적될 가능성이 있다. 따라서 사람 발자국 산출지 하모리층에서의 휴민 성분의 탄소동위원소 AMS 연대 $15,161 \pm 70$ yr B.P., ~ $10,901 \pm 60$ yr B.P.는 비록 하부에서 상부로 가면서 층별로 2,000년~3,000년의 연령차를 보이며 훌륭한 연속계를 갖지만 퇴적시기가 아니라 최대연령 즉, 이들 연령치 이후의 지층이라는 참고 자료로 활용되어야 한다. 한편 휴믹 성분의 탄소동위원소 AMS 연대는 모두 OSL 연대 7,600년~6,800년보다 고기이며 최하부층이 $8,098 \pm 50$ 년이고, 최상부층이 $9,289 \pm 90$ 년인 역전된 연속계를 보여 지층의 형성시기 자료로서의 신뢰성이 떨어진다.

결 론

1. 송악산응회암 분출과 관련된 조면현무암은 Ar-Ar 분석 결과 $10.6 \pm 19.9 \sim 11.7 \pm 26.3$ Ka이며, 40만 년 이후

의 빙하기와 관련된 해수면의 변동자료와 비교할 때 송악산응회암의 분출과 퇴적은 현재 해수면에 해당하는 약 10,000년 이내에 일어난 것으로 해석된다.

2. 사람 발자국이 형성된 하모리층에서 추출한 탄소 유기물 휴믹의 탄소동위원소 AMS 연령은 $13,513 \pm 65 \sim 15,161 \pm 70$ yr B.P.로 측정되었으며, 이 값은 휴믹의 특성상 지층의 퇴적시기보다는 최대시기를 의미한다. 한편 휴믹의 값은 최하부층이 $8,098 \pm 50$ yr B.P.이고, 최상부층이 $9,289 \pm 90$ yr B.P.인 역전된 연속계를 보여 신뢰성이 떨어진다.

3. 사람 발자국이 형성된 하모리층은 OSL 연대측정에 필요한 석영을 충분히 포함하고, 입자의 크기와 분급으로 보아 퇴적작용 기간 중 햇빛에 석영이 충분히 노출되었으며, 퇴적된 후 이차적으로 다시 지층이 교란된 지질학적 증거를 보이지 않아 OSL 연대측정의 조건을 충족한다. 이의 OSL 연령은 최상부층이 6.8 ± 0.3 ka, 사람 발자국 형성층 직하의 층은 약 800년 정도 고기인 7.6 ± 0.5 ka이다. 따라서 하모리층에 사람 발자국이 형성된 시기는 약 7,600년에서 약 6,800년 전 사이로 제한된다.

사 사

이 연구는 사람 발자국이 발견된 제주도 하모리층을 위한 한국지질자원연구원의 테스트포스탐에 의해 수행되었으며, 남제주군이 발주한 연구용역 결과의 일부이다. 시료의 OSL 분석을 담당한 한국기초과학지원연구원의 최정현 박사와 XRD 분석을 실시한 한국지질자원연구원의 안기호 연구원에게 사의를 표한다.

참고문헌

- 최정현, 정창식, 장호완, 2004, 석영을 이용한 OSL (optically Stimulated Luminescence) 연대측정의 원리와 지질학적 적용. 지질학회지, 40, 567-583.
- Choi, J.H., Murray, A.S., Jain, M., Cheong, C.-S., Chang, H.W., 2003, Luminescence dating of well-sorted marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea. Quaternary Science Reviews, 22, 407-421.
- Chough, S.K., and Sohn, Y.K., 1990, Depositional mechanics and sequences of base surges, Songaksan tuff ring, Cheju Island, Korea. Sedimentology, 37, 1115-1135.
- Godfrey-Smith, D.I., Huntley, D.J. and Chen, W.-H., 1988, Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extracts. Quaternary Science Reviews, 7, 373-380.
- Huntley D.J., Godfrey-Smith, D.I. and Thewalt, M.L.W., 1985, Optical dating of sediments, Nature, 313, 105-107.
- Sohn, Y.K., 1995, Structures and sequences of the Yongmeori tuff ring, Cheju Island, Korea: Sequential deposition from shifting vents. Journal of Geological Society of Korea, 31: 57-71.
- Sohn, Y.K., Park, J.B., Khim, B.K., Park, K.H., Koh, G.W., 2002, Stratigraphy, petrochemistry and Quaternary depositional record of the Songaksan tuff ring, Jeju Island, Korea. Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 119, 1-20.
- 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.
- 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 Reviews, 1, 295-305.

(2005년 8월 15일 접수; 2005년 9월 5일 채택)