화순 서유리의 백악기 화석산지에 대한 K-Ar 연대

김정빈^{1,*} · 강성승²

¹순천대학교 물리교육과, 540-950, 전라남도 순천시 중앙로 255

²조선대학교 에너지자원공학과, 501-759, 광주광역시 동구 필문대로 309

K-Ar Ages of Cretaceous Fossil Sites, Seoyuri, Hwasun, Southern Korea

Cheong Bin Kim^{1,*} and Seong Seung Kang²

¹Department of Physical Education, Sunchon National University, Jeonnam 540-950, Korea

²Department of Energy and Resources Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

Abstract: The Cretaceous fossil sites of Seoyuri in Hwasun was designated as the Korean Natural Monument No. 487 in November 2007. It provides important resources for paleoenvironmental studies, including theropod trackways, plant fossils, mudcracks, ripple marks, and horizontal bedding. The Cretaceous sedimentary strata contain a wide variety of volcanic pebbles, 5–40 cm in diameter in the lower portion and are overlain by the Late Cretaceous Hwasun andesite. Whole rock absolute K-Ar age determinations were performed on six volcanic pebbles from the Cretaceous sedimentary strata and on two samples from the overlaying Hwasun andesite. These ages indicate that the rocks belong to the period between the Turonian of the late Cretaceous (91–70 Ma) and the Pliocene age of the early Cenozoic (63.4±1.2 and 62.1±1.2 Ma). Thus, the K-Ar ages indicate that the maximum geological age of the dinosaur track-bearing sedimentary deposits is about ca. 70 Ma. Therefore, it suggests that the age is comparable to the formation ages of the dinosaur footprints-bearing deposits in Sado area of Yeosu (71–66 Ma).

Keywords: Cretaceous, dinosaur, K-Ar dating, volcanic activity

요 약: 2007년 11월에 천연기념물 제487호로 지정된 화순군 서유리의 백악기 화석산지는 수각류 발자국 보행렬, 식물 화석, 건열, 연흔, 수평층리 등 고환경을 연구하는데 중요한 자료들을 포함한다. 이 백악기 퇴적층은 하부에 직경 5–40 cm의 다양한 성분의 화산암역을 함유하며, 후기의 화순안산암에 의해 덮인다. 백악기 퇴적층과 동시퇴적된 6시료의 화산암역과 이 지층을 덮는 화순안산암 2시료를 대상으로 전암을 이용한 K-Ar법 절대연대측정을 실시하였으며, 그 결과 백악기말의 투로니안(90–70 Ma)에서 신생대 초기인 플라이오세(63.4±1.2, 62.1±1.2 Ma)에 해당한다. 연대측정 결과 백악기 퇴적층의 퇴적시기와 공룡의 활동시기에 대한 최대지질연대는 약 70 Ma이다. 이 연대는 여수 사도지역에서 공룡발자국을 포함하는 백악기층의 퇴적시기(71–66 Ma)와 서로 대비될 가능성을 시사한다.

주요어: 백악기, 공룡, K-Ar 연대측정, 화산활동

*Corresponding author: cbkim@sunchon.ac.kr

Tel: +82-61-750-3393

Fax: +82-61-750-3308

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

서론

한국에 분포하는 퇴적암 중 가장 넓은 범위를 차지하는 것은 중생대 백악기에 퇴적된 경상누층군 및 이에 대비되는 퇴적층들이다. 백악기 퇴적층은 주로 경상남북도 일대의 경상분지에 가장 넓게 분포하고 있으며, 충북 옥천과 영동을 중심으로 북동-남서 방향의 구조적 방향성을 가지는 옥천습곡대의 주변부를

따라 영동분지, 무주분지, 진안분지, 능주분지 등이 대상으로 분포한다(Kim, 2008; Kim et al., 2008a).

한반도 남해안지역에 널리 분포하는 백악기 퇴적층은 다양한 화석들의 보고이다. 특히 신안, 해남, 화순, 보성, 여수, 남해, 진주 및 고성 등지의 남해안 백악기층에는 공룡발자국, 공룡알, 공룡뼈, 익룡뼈, 새, 식물화석, 절지동물 발자국 그리고 연체동물에 의한 생흔화석 등 다양한 화석들이 산출되고 있어, 지층의 시대구분과 대비는 물론 퇴적물이 퇴적될 당시의 고환경과 고생태계 연구에 대한 학술적인 가치가 높다(Paik and Chun, 1993; Huh et al., 1999, 2003; Huh and Hwang, 2004; Lee et al., 2000, 2007; Hwang et al., 2002; Paik et al., 2006). 그러나 이 퇴적층의 퇴적시기를 밝히는 절대연대 자료가 매우 부족하기 때문에, 국내에서 발견된 공룡화석들 사이의 상호 관계나 외국의 지층 및 공룡의 진화 등에 대한 비교 연구에 있어 큰 제약을 받고 있다. 이와 같이 연대자료가 부족한 이유는 한국의 백악기 퇴적암에서는 퇴적시기를 좁게 한정하기에 적합한 종류의 표준화석이 거의 발견되지 않고 있으며, 퇴적암의 직접적인 연대측정이 매우 어렵기 때문이다. 퇴적층과 동시기 또는 전후에 있었던 화성활동에 대한

절대연대측정을 통해 퇴적시기를 알아내는 방법 역시 화성활동이 백악기의 분지발달 최후기에 집중되어 있어 적용하기 어렵고 더욱이 많은 시도가 없었다(Park et al., 2003).

이번 연구에서는 2007년 11월에 천연기념물 제487호로 지정된 전라남도 화순군 북면 서유리 일대의 백악기 화석군을 중심으로 이 층에서 동시퇴적된 화산암력 및 이 층을 덮는 화순안산암을 대상으로 전암을 이용한 K-Ar 절대연대측정을 실시하였다. 백악기 화석군을 포함하는 지층에서 지질시대를 좁게 한정할 수 있는 표준화석이 발견되지 않았기 때문에, 이 연구는 퇴적층의 퇴적시기와 공룡의 활동시기 결정에 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다. 이 연대측정 결과를 근거로 백악기층의 퇴적시기, 공룡들의 활동시기, 화산암의 형성시기를 추정하고 이를 바탕으로 한반도의 다른 지역에서 알려진 공룡의 활동시기에 대하여 논의하였다.

연구지역의 일반지질

연구지역은 행정구역상으로 전라남도 화순군 북면 서유리 일대에 속하며, 위도 35°10'00", 경도 127°05'30"

Fig. 1. The simplified geologic map showing the locations of sampling sites.

에 위치한다. 연구지역은 경상누층군의 유천층군에 대비되며 백악기 장동응회암을 기저로 이 층을 덮는 화순안산암, 상기의 모든 암층을 관입하는 맥암류로 구성된다(Fig. 1).

연구지역에 분포하는 백악기 퇴적암류는 암상과 산상에 따라 오례리층, 장동응회암, 만월산응회암, 연화리층, 적벽응회암으로 구분된다(Kim and Park, 1966). 장동응회암은 동북도폭의 중앙에서 남북방향으로 분포하며 주로 세립질응회암, 응회암질사암, 세일, 라필리응회암 등이 협재되어 있다. 이 층의 표식지는 화순군 남면 장동리 지역이며, 층후는 최대 800 m로 추정된다. 장동응회암은 구암탄전 부근에서 평안누층군에 대비되는 함탄대와 선캄브리아기 화강편마암을 부정합으로 덮고, 담양군 오산면 갈전리 부근에서 화순안산암에 의해 부정합으로 덮힌다. 연구지역에서 장동응회암층의 주향과 경사는 대체로 N30-40°W, 20-30°SW이다. 암상은 전반적으로 남서측에서는 응회암층이 발달하고 북서측으로 가면서 점차 흑색세일 및 세립질 사암등이 우세해지는 추세를 보인다(Kim and Park, 1966).

장동응회암층의 북쪽에 해당하는 본 역에서 층상부에 연속성이 좋으며 층후가 100 m 내외인 흑색 세일층이 발달한다. 흑색세일내에는 회색에서 암회색을 띠는 세일, 세립질사암 및 이암층이 박층으로 협재한다. 흑색세일층이 가장 발달한 곳은 화순군 북면 와천리 부근이다. 이 곳에서는 층리의 발달이 좋은 두꺼운 세일층내에 연흔이 잘 발달되어 있으며, 공룡발자국 화석, 규화목, 견열, 식물화석 등이 관찰된다(Fig. 2a-d). 북면 길성 부락 북서 약 1 km의 지점에서 개형층 화석이 밀집되어 산출되지만 보존상태가 불량하여 종을 식별하기는 어렵다(Kim and Park, 1966). 최근 Huh et al.(2003)에 의해 화순 북면 온천 부근의 흑색세일과 세립질사암층에서 공룡발자국화석이 대량으로 발견되었다. 공룡보행열화석이 발견된 층준에서 약 20 m 하부에 분포하는 안산암질역을 이용하여 K-Ar 전암연대측정을 수행하였다.

화순안산암은 동북도폭(Kim and Park, 1966)과 능주도폭(Cheong and Kim, 1966)지역에 분포하는 무등산지역이 그 표식지로 널리 분포하며, 암록색에서 담록색을 띠고, 반자형에서 자형의 사장석과 휘석 반정을 함유한다. 연구지역에서 화순안산암은 장동응회암과 적벽응회암을 부정합으로 덮고 광주광역시 북구 산장 부근에서 미문상화강암에 의해서 관입된다.

화순안산암은 화순군 북면지역에서 유동구조를 보여주기도 하나 대부분은 괴상의 세립질로 관찰되며 부분적으로 관입암상을 보인다. 편광현미경하에서는 사장석과 휘석 및 석영 반정이 관찰되며, 석기는 미립 내지 은미정질 휘석, 녹니석, 유리질 및 소량의 불투명광물로 구성된다(Fig. 2g, 2h). 이들 미정 내지 은미정질의 광물들은 방향성있게 배열되어 유상구조를 이루기도 한다. 사장석은 석기내에서 외형(畏形)이나, 반정에서는 정방형 또는 직사각형의 자형결정으로 나타나며 대부분 알바이트쌍정을 보이고 그 성분은 안데신(An_{32-38})에 해당한다. 쌍정의 대부분은 견운모화작용을 받아서 심하게 변질되어 있으며 녹니석은 펜나이트로 휘석이 초생변질을 받아 만들어졌다. 방해석은 기공을 충전하는 것과 절리나 깨진면을 충전하는 세맥상의 형태가 있으며 이들은 주위의 퇴적암으로부터 이동해 온 것이다(Kim and Kim, 1984). 녹립석도 주위암에서 이동해온 세맥상인 것과 휘석등의 유색광물로부터 초생변질을 받아 만들어져서 석기에 산재되어 있는 두 가지 유형이 있으며 후자가 우세하다.

연구방법

K-Ar법 지질연대측정에 필요한 전암시료는 정밀야외지질조사를 통하여 열변성 가능성을 배제할 수 있는 가급적 신선한 암석을 채취한 후 박편관찰을 통해 변질유무를 확인하였다. 박편의 제작은 서울대학교 지구환경과학부 박편실에 의뢰하였으며 편광현미경 관찰과 전처리에는 순천대학교 지구과학실험실을 이용하였다. 동위원소분석은 한국기초과학지원연구원에서 실시하였다. 선택된 시료는 암석분쇄기에서 미립으로 분쇄하고 체를 이용하여 45, 60 및 80 메쉬 크기로 분리하였다. 실체현미경하에서 변질광물을 포함하지 않은 최대 크기로 입도(보통 45-60 mesh)를 선별한 후 초음파 세척기를 이용하여 불순물을 제거하였다. K 측정은 시료 0.1 g을 HF:HNO₃:HClO₄=4:4:1의 혼합산 용액으로 테플론 압력 비이커에서 용해시킨 후 유도결합 플라즈마 발광분광기(ICP-AES)를 이용하였다. Ar의 정량화와 오차계산은 Nagao et al. (1996)의 방법을 따랐다. 시료를 1500°C까지 가열하여 Ar을 추출한 후, ³⁸Ar 스파이크를 혼합하여 VG 5400 질량분석기로 측정하였다. 대기 중의 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 비율은 295.5로 하여 시료의 방사성 ⁴⁰Ar양을 계산하

Fig. 2. (a) Subparallel stratification of Cretaceous formation at Seoyuri fossil site, (b) Ripple mark of Cretaceous formation near Seoyuri, (c) Sun crack of Cretaceous formation near Seoyuri, (d) Theropod foot print of Cretaceous formation at Seoyuri fossil site, (e) Volcanic pebble of Cretaceous formation, (f) Microphotographs of andesite (cross nicol, $\times 50$), (g) Amygdaloidal texture of andesite, and (h) Microphotographs of Amygdaloidal andesite (cross nicol, $\times 50$).

였다. 시료의 분석 전후에 표준시료 LP-6(흑운모)의 ^{40}Ar 양을 측정하였으며, 그 값은 동일 오차범위 내에 포함된다. K-Ar 연령계산은 Steiger and Jager(1977)

의 붕괴상수($\lambda_\beta = 4.962 \times 10^{-10}/\text{yr}^{-1}$, $\lambda_e = 0.581 \times 10^{-10}/\text{yr}^{-1}$)를 이용하여 계산하였으며 보다 상세한 내용은 Kim (2001)에 기술되어 있다.

연구결과

화산암에 대한 암석기재

백악기 퇴적층에서 화산암은 각력암 또는 역질사암 층을 구성하는 역으로 발견되며 그 장경은 5-40 cm의 다양한 크기를 갖는다. 이 화산암역의 외형은 주로 각력에서 아각력이며, 색은 암회색, 담회색, 담청색, 담갈색 등으로 다양하게 관찰된다. 본 층에서 발견되는 화산암들은 구성광물과 조직을 근거로 과상안산암, 안산암, 행인상안산암, 그리고 석영안산암으로 구분할 수 있다. 이 연구에서 K-Ar법 절대연령측정에 이용된 화산암역은 화순군 이천리 도로변에서 채취하였고, 백악기 퇴적층을 덮는 화순안산암은 담양군 오산면 갈전리 마을에서 채취하였다.

과상안산암(Hd-3a, 3e)은 치밀하고 견고한 세립질 화산암으로 암회색에서 회색을 띤다. 주된 조성광물은 2 mm 이하의 사장석, 휘석, 불투명광물이며 소량의 각섬석, 흑운모 그리고 이차적으로 형성된 방해석, 녹염석, 녹니석, 견운모 등이 기질부를 채우고 있다.

안산암(Hd-3b, Hd-3t)은 담록색을 띠고 1-3 mm 내외의 사장석 반정을 함유하며 가장 흔하게 관찰된다. 사장석은 자형 내지 반자형으로 관찰되며 견운모에 의해 심하게 변질되어 있다. 휘석은 1-2 mm 정도의 반정으로 관찰되며 석기는 미립 내지 은미정질 휘석, 녹니석, 유리질 및 불투명광물로 구성된다.

행인상안산암(Hd-3c)은 담록색을 띠며, 2 mm 이하의 사장석, 불투명광물과 기질로 구성되며 이차적으로 형성된 방해석과 녹염석으로 충전된 2-5 mm 내외의 행인상구조를 함유한다.

석영안산암(Hd-3d)은 담적색을 띠며 세립질이고 치밀한 특징을 보인다. 본 암석은 1-2 mm의 사장석, 각섬석, 석영, 불투명광물과 기질로 구성되며, 사장석과

각섬석은 견운모와 녹염석에 의해 변질되어 있다.

화순안산암(Hd-1a, 1b, 2)은 담록색을 띠고, 반정으로 사장석과 휘석을 함유하며 석기는 미립 내지 은미정질 휘석, 녹니석 및 소량의 불투명광물로 구성된다. 이들 미정 내지 은미정질의 광물들은 방향성 있게 배열되어 부분적으로 유상구조를 이루기도 한다. 본 연구에서는 화순안산암의 3개 시료에 대하여 K-Ar 전암연대측정을 실시하였다. Hd-1a와 Hd-2는 과상구조를 보이는 담록색 안산암이고 Hd-1b는 암록색 안산암에 해당한다.

화산암에 대한 K-Ar 연대측정결과

백악기 퇴적층에 협재된 각력암질화산암과 이 층을 덮고 있는 화순안산암 중에서 상대적으로 풍화작용을 덜 받아 신선한 8개 시료를 대상으로 K-Ar 전암연대측정을 수행하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다. 이 연구에서 확인된 가장 오래된 화산암은 암회색을 띠는 치밀한 과상안산암(Hd-3e)이며, 그 결과는 90.5 ± 1.8 Ma로 백악기말의 투로니안(Turonian)에 속한다. 행인상안산암은 담록색을 띠며 소량의 사장석과 기질로 구성되며, 이차적으로 충전된 녹염석과 방해석에 의해 행인상구조를 이룬다. 그 결과는 77.8 ± 1.5 Ma로 백악기말의 캄파니안(Campanian)에 속한다. 사장석 반정을 함유하는 담록색 안산암(Hd-3b, Hd-3t)에 대한 연대측정 결과는 각각 73.6 ± 1.4 Ma와 72.3 ± 1.6 Ma로 백악기말의 캄파니안에 속한다. 담적색을 띠는 석영안산암의 연대측정 결과는 70.1 ± 1.4 Ma로 백악기말의 마스트리크티안(Mastrichtian)에 속한다. 본 연구에서 확인된 가장 젊은 화산암은 백악기 퇴적암을 피복하는 화순안산암이며, 그 결과는 각각 63.4 ± 1.2 Ma, 76.7 ± 1.7 Ma, 62.1 ± 1.2 Ma로 백악기말의 캄파니안과 신생대초 팔레오신에 속한다.

Table 1. Whole rock K-Ar ages of the volcanic rocks from Jangdongri Formation

Sample No.	Rock type	K (wt.%)	Sample weight (g)	40 radiogenic 10^{-8} ccSTP/g	Error (1)	^{36}Ar 10^{-10} ccSTP/g	T (Ma)	Error (1)	Air fraction
Hd-1a	andesite	2.156	0.01792	539.93	0.79	26.75	63.4	1.2	12.77
Hd-1b	andesite	0.491	0.01427	204.89	2.17	132.69	76.7	1.7	65.68
Hd-2	andesite	2.452	0.01538	600.98	1.02	30.03	62.1	1.2	12.87
Hd-3a	vol. pebble	1.607	0.01748	519.61	0.87	43.56	81.4	1.6	19.85
Hd-3b	vol. pebble	1.625	0.01112	474.12	0.50	25.33	73.6	1.4	13.60
Hd-3c	vol. pebble	1.640	0.01590	506.12	0.58	20.33	77.8	1.5	10.60
Hd-3d	vol. pebble	1.714	0.01840	475.83	0.47	24.66	70.1	1.4	13.30
Hd-3e	vol. pebble	0.670	0.00993	241.33	0.59	233.00	90.5	1.8	74.00
Hd-3t	vol. pebble	0.674	0.01442	140.62	1.52	110.33	72.3	1.6	69.89

논 의

백악기 화석층의 지질시대

천연기념물 제487호로 지정된 화순군 서유리 일대의 백악기 화석층은 약 57개의 수각류 발자국 보행렬, 식물화석, 건열, 연흔, 수평층리 등 중생대 고환경을 연구하고 복원하는 중요한 자료들이 발견되었다(Huh et al., 2003). 이 화석층의 형성시기와 공룡들의 활동시기를 밝히기 위하여 퇴적시기를 제한할 수 있는 층서적 의미를 갖는 화성암에 대해서 K-Ar법 절대연대측정을 실시하였다. 본 연구지역에서 화석층의 하부에 해당하는 화순군 북면 이천리 부근에서 백악기 퇴적층에 포함된 화산암력을 대상으로 정밀 야외지질조사, 조성광물과 편광현미경 관찰을 통하여 치밀한 괴상안산암, 행인상안산암, 안산암, 석영안산암으로 구분하고 6시료에 대해서 연대측정을 실시하였다. 연대측정 결과 가장 오래된 지질연대는 91 Ma이고 가장 젊은 지질연대는 70 Ma이다. 이 연구에서 보고된 70 Ma는 백악기 퇴적층의 퇴적시기를 제한하는 최대지질연대로 지질학적 의미를 갖는다. 즉, 본 지역에서 백악기 퇴적층의 퇴적시기와 공룡들의 활동시기는 적어도 70 Ma 보다 후기임을 암시한다. 또, 백악기 퇴적층을 덮고 있는 화순안산암의 지질시대는 63-62 Ma로 신생대 초를 지시한다. 전세계적으로 공룡화석은 K-T 경계(65 Ma)를 기준으로 그 이후에는 발견되지 않으므로 서유리지역의 공룡의 활동시기는 70-65 Ma 사이로 해석할 수 있다.

전남 해남, 보성, 신안, 여수지역에서 공룡발자국, 공룡알 등 다양한 백악기 화석층이 발견되었고 그들에 대한 절대연령측정 연구가 몇몇 연구자들에 의해 수행되었다(Kim et al., 2003, 2008a; Park et al., 2003; Lee et al., 2012). 해남 우항리층에서 발견된 익룡, 공룡, 물발퀴새발자국을 포함하는 우항리 화석층에 대한 지질연대측정은 Kim et al.(2003)에 의해서 수행되었으며 그 값은 81-78 Ma이다. 보성 선소층에서 발견된 공룡알둥지의 화석의 상부와 하부에 분포하는 라필리웅회암에 대한 절대연령 측정결과는 약 81 Ma로 보고되었다(Kim et al., 2008a). 신안 압해지역에서 발견된 수각류 공룡알둥지의 하부에 협재된 화산암역과 이를 부정합으로 덮는 산성웅회암에 대한 절대연령측정 결과는 약 83-77 Ma이다. 이 세 지역에서 확인된 백악기 퇴적층의 퇴적시기와 공룡의 활동시기는 모두 캄파니안에 해당하며 서로 대비될

가능성을 시사한다. 그러나 여수 사도지역에서 확인된 백악기 퇴적층의 퇴적시기와 공룡의 활동시기는 약 71-66 Ma로 확인되었으며(Park et al., 2003), 이 지질연대는 화순 서유리지역에 분포하는 백악기 퇴적층의 퇴적시기와 공룡들의 활동시기에 대비된다.

연구지역 퇴적층에는 건열구조와 연흔이 동일 지층에서 흔히 관찰된다. 건열구조는 이질이 우세한 부분에서 흔히 다각상으로 산출되는데, 일부 퇴적층의 단면에서는 켜기형태의 깊은 건열구조가 나타나고 건열작용의 반복에 의해 이루어진 수직층리도 관찰된다(Huh et al., 2003). 연구지역에서 연흔은 파랑연흔이 주를 이루며, 전반적으로 수 cm의 파장과 1 cm 내외의 파고를 보인다. 연흔정선은 거의 굴곡이 없는 직선형을 이루나 일부 경사진 퇴적면에서 형성된 유수 연흔에서는 불규칙한 연흔이 관찰된다(Huh et al., 2003). 그리고 응회질 실트스톤 내지 사암층 내에서 상위에 발달된 처어트층의 일부가 아래로 뜯긴 결과인 소위 “뜯긴 암편”(Chough and Chun, 1988)이 관찰된다.

연구지역 퇴적층의 위와 같은 산출특성은 당시의 퇴적환경이 호수 연변부의 이질 내지 얇은 수심의 호저에 이르는 환경이었음을 지시한다. 또한 연구지역 퇴적층을 비롯하여 상하위에 발달한 지층들에서 응회암 및 응회질 퇴적층들이 일반적으로 협재하는 것은 퇴적 당시 주변 지역에서 화산활동이 빈번하였음을 시사한다(Huh et al., 2003). 이 호수는 화순안산암의 대규모 분출에 의해 매워지고 그 이후에는 퇴적층은 물론이고 공룡발자국 화석은 발견되지 않는다. 즉 해남, 신안, 보성, 여수지역에서 발견된 공룡 관련 화석군은 예외 없이 후기의 두꺼운 화산암이나 화산쇄설물에 의해 덮히는 것으로 보아 활발한 화산활동으로 호수들은 매워진 것으로 추정된다. 한반도 지역에서 지구조운동에 의해 형성된 호수들이 사라지면서 공룡들도 사라진 것으로 생각된다. 지금까지 밝혀진 연대측정 자료를 근거로 한국에서 공룡들이 사라진 시기는 전세계적으로 공룡들이 멸종된 것으로 알려지는 65 Ma 보다 다소 빠를 가능성이 있다. 그리고 이번 연구를 통해 화순 서유리지역의 백악기 퇴적층의 퇴적시기와 공룡들의 활동시기를 70 Ma 이후로 제한하였다는데 지질학적 의미가 있다.

화성암의 지질시대와 화성활동 시기

옥천습곡대 서남대와 영남육괴 서남대 연변부를 따

라서 소규모 독립적으로 분포하는 백악기 분지에서의 화산활동에 대한 연대측정은 주로 광물과 전암을 이용한 K-Ar법, Ar-Ar법 및 Rb-Sr법으로 수행되었다(Kim and Nagao, 1992; Kim et al., 2003, 2008a; Lee et al., 2012). 본 연구에서 확인된 가장 오래된 화산암은 암회색을 띠는 치밀한 괴상안산암역으로 그 결과는 백악기 투로니안(90.5 ± 1.8 Ma)에 해당한다. 나머지 화산암역들은 색깔, 조직 및 광물조성에 따라 행인상안산암, 안산암, 석영안산암으로 구분되며, 생성시기는 각각 백악기말의 캄파니안(81.4 ± 1.6 , 77.8 ± 1.5 , 73.6 ± 1.4 , 72.3 ± 1.6 , 70.1 ± 1.4 Ma)에 집중적으로 나타난다. 본 연구지역의 백악기 퇴적층에서 가장 빈번하게 관찰되는 화산암역은 담록색을 띠는 안산암으로 그 지질시대는 73-72 Ma이다.

연구지역과 인접하는 옥천습곡대 서남부지역에서 보고된 지질연대중 이에 대비되는 화산암은 해남 우항리층에 협재된 산성응회암(전암, Rb-Sr, 81.0 ± 2.0 Ma), 공룡알둥지를 포함하는 보성 선소층의 라필리움회암(새니딘, Ar-Ar, 81.1 ± 1.4 , 81.0 ± 2.4 Ma), 월호유문암(81-82 Ma) 등이다(Kim and Nagao, 1992; Kim et al., 2003, 2008a). 해남 우항리지역에서 공룡발자국 화석층을 부정합으로 덮는 황산응회암에 대한 전암을 이용한 Rb-Sr법 절대연령측정은 Kim et al. (2003)에 의해 수행되었으며 그 결과는 77.9 ± 4.1 Ma로 캄파니안을 지시하며 본 역의 행인상안산암의 지질시대와 일치한다. Park et al. (2003)는 여수시 사도지역의 백악기 퇴적층에서 발견되는 공룡발자국 화석의 생성시기를 밝히기 위하여 추도, 사도, 목도, 적금도지역에 분포하는 화산암에 대하여 전암을 이용한 K-Ar법 절대연대측정을 수행하였다. 이 연구에서 지질시대를 밝히기 위하여 절대연대측정에 이용된 암석은 백악기 퇴적층에서 역으로 발견되는 현무암질안산암, 안산암, 석영조면암, 조면암, 그리고 이 지층을 관입하는 맥암류와 이 층을 덮는 응회암 및 화산암질퇴적암이다. 이 연구결과 지금까지 밝혀진 여수 인근도서지역에서 가장 오래된 화성활동의 산물은 적금도지역에 분포하는 백악기 퇴적층에 함유된 화산암력과 화산암질퇴적암으로 그 값은 95-91 Ma이며 세노마니안(Cenomanian)에서 투로니안에 속한다. 나머지 화산암류에 대한 절대연대측정 결과는 캄파니안(81-74 Ma), 마스트리크티안(66 Ma), 그리고 에오신(38 Ma)으로 구분된다(Park et al., 2003).

본 연구지역에서 백악기 퇴적층을 덮는 화산안산암의 절대연령은 76.7 ± 1.7 Ma(Hd-1b), 63.4 ± 1.2 Ma(Hd-1b), 62.1 ± 1.2 Ma(Hd-2)로 캄파니안에서 마스트리크티안에 속한다. 이 연구에서는 백악기 퇴적층에 포함된 화산암역 보다 더 오래된 지질연대를 보이는 Hd-1b(76.7 ± 1.7 Ma)의 분석 결과를 해석에서 제외하였다.

옥천습곡대 서남부지역에서 신생대 화성활동을 지시하는 화성암은 보성, 해남, 여수, 목포, 영암지역에서 보고되었다. 목포시 고하도지역에서 백악기 산성응회암을 관입하는 송지암을 대상으로 K-Ar 전암연대측정이 수행되었으며, 그 결과는 62.4 ± 2.1 Ma로 플라이오신에 해당한다(Kim et al., 2008b). Kim et al. (2008a)은 보성지역에서 선소층을 관입하는 중성맥암에 대하여 Ar-Ar법으로 절대연령측정을 수행하고 관입시기를 에오신(42.6 ± 3.8 Ma)으로 해석하였다. 여수 사도지역에서 공룡발자국을 포함하는 중생대층을 관입하는 현무암질조면안산암의 지질연대는 Park et al. (2003)에 의해 전암을 이용한 K-Ar법으로 수행되었으며 그 값은 38.1 ± 0.8 Ma로 에오신에 해당한다. 옥천습곡대 서남부지역에서 보고된 가장 젊은 화성암은 영암군 삼호읍지역에서 백악기 산성응회암층을 맥상으로 관입하는 송지암으로 그 값은 12.7 ± 0.9 Ma(전암, K-Ar)로 중기 마이오신에 속한다(Cho et al., 2011).

본 연구지역과 인접하는 옥천습곡대 서남부지역에 분포하는 중생대층에서 발견되는 다양한 시기와 성분을 갖는 화산암은 이 지역에서 91-62 Ma 사이에 유라시아판과 태평양판의 충돌에 의한 활발한 화산활동이 지속적으로 진행되었음을 알려준다(Kim et al., 2003, 2008b). 본 연구지역과 인접하는 여수, 보성, 영암, 목포지역에서 확인된 신생대 초기에서 후기에 해당하는 화성활동 산물에 대해 그것들의 개략적인 기재와 지질시대는 보고되었으나 화성암체를 생성한 마그마의 성인을 규명하는 암석학적인 연구는 미미한 수준이다. 지금까지 한반도지역에서 신생대 중기에서 후기에 이르는 화성활동은 주로 포항분지와 연일분지 지역을 중심으로 동해의 생성과 확장과정에 관련지어 해석하는 경향이 농후하였다(Lee et al., 1992). 옥천습곡대 서남부지역에 맥상으로 분포하는 신생대 중기와 후기에 이르는 화산암에 대한 연구는 한반도뿐만 아니라 동아시아지역의 화성활동사와 지체구조사를 재정립하는데 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.

결 론

1. 서유리지역의 중생대 퇴적층에서 관찰되는 화산암은 직경은 3-40 cm의 역으로 발견되며 광물조성과 조직을 근거로 치밀한 괴상안산암, 행인상안산암, 안산암, 석영안산암으로 구분된다. 이 지역에서 화순안산암은 대체로 괴상이지만 부분적으로 유동구조를 보이며 백악기 퇴적암층을 부정합으로 덮는다.

2. 화석층에 포함된 수각류 발자국, 식물화석, 연흔, 건열과 동시퇴적구조를 보이는 6시료의 화산암역과 이 지층을 부정합으로 덮는 화순안산암 2시료를 대상으로 전암을 이용한 K-Ar법 절대연대측정을 실시하였으며, 그 결과 백악기말의 투로니안(90.5 ± 1.8 , 81.4 ± 1.6 , 77.8 ± 1.5 , 73.6 ± 1.4 , 72.3 ± 1.6 , 70.1 ± 1.4 Ma)에서 신생대 초기인 플라이오신(63.4 ± 1.2 , 62.1 ± 1.2 Ma)에 해당한다.

3. 연대측정 결과에 의하면 중생대 퇴적층의 퇴적시기와 공룡의 활동시기에 대한 최대지질연대는 약 70 Ma이며, 이 결과는 여수 사도지역에서 공룡발자국 화석을 포함하는 중생대층의 퇴적시기(71-66 Ma)와 서로 대비될 가능성을 시사한다.

4. 화순 북면지역의 중생대층에서 발견되는 다양한 지질시대와 성분을 갖는 화산암은 이 지역에서 91-62 Ma 사이에 유라시아판과 태평양판의 충돌에 의한 활발한 화산활동이 진행되었음을 지시한다. 이 연구 결과는 궁극적으로 시코테-알렌(극동 러시아), 북한, 중국 및 일본지역의 중생대 화산활동과 지체구조운동을 대비하고 고환경을 복원하는데 기여할 것으로 기대된다.

사 사

본 논문을 세심하게 검토하고 유익한 조언을 주신 한국기초과학지원연구원 김정민박사와 부산대학교 임현수 교수 그리고 한국지질자원연구원 장태수박사에게 감사드린다. 이 연구는 한국연구재단의 지역우수과학자 연구과제(2011-0014824)와 화순군의 지원에 의해 수행되었으며, K-Ar법 절대연대측정은 한국기초과학지원연구원에서 실시하였다.

참고문헌

Cheong, C.H. and Kim, K.S., 1966, The geological map of

- Neungju sheet. Geological Survey of Korea. (in Korean)
 Cho, K.S., Rajesh, V.J., Kang, S.S., and Kim, C.B., 2011, Petrologic, chemical, and isotope evaluation of pitchstone in the Samho area, southwestern Okcheon Belt, South Korea. *Geoscience Journal*, 15, 137-147.
 Chough, S.K. and Chun, S.S., 1988, Intrastratal rip-down clasts, Late Cretaceous Uhangri Formation, Southwest Korea. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58, 530-533.
 Huh, M. and Hwang, K.G., 2004, Dinosaur footprints from the Cretaceous of South Korea: With reference to Jeollanam-do dinosaur sites. *Journal of the Palentological Society of Korea*, Special Issue, 319-335. (in Korean)
 Huh, M., Paik, I.S., Chung, C.H., Hwang, K.G., and Kim, B.S., 2003, Theropod tracks from Seoyuri in Hwasun, Jeollanam-do, Korea: Occurrence and petrological significance. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 461-478. (in Korean)
 Huh, M., Paik, I.S., Lee, Y.I., and Kim, H.K., 1999, Dinosaur eggs and nests from Bosung, Jeollanam-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 35, 229-232. (in Korean)
 Hwang, K.G., Huh, M., and Paik, I.S., 2002, Sauropod tracks from the Cretaceous Jindong Formation, Hogyeri, Masan-city, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 361-375. (in Korean)
 Kim, B.K. and Park, B.K., 1966, The geological map of Dongbok sheet. Geological Survey of Korea. (in Korean)
 Kim, C.B., 2008, The K-Ar age of the volcanic pebbles in Lake Siwha Formation and its geological implication. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 399-408. (in Korean)
 Kim, C.B., Huh, M., Cheong, C.S., Lockley, M.G., and Chang, H.W., 2003, Age of the pterosaur and web-footed bird tracks associated with dinosaur footprints from South Korea. *The Island Arc*, 12, 125-131.
 Kim, C.B., Kim, J.M., and Huh, M., 2008a, Age and stratification of Dinosaur eggs and clutches from Seonso Formation, South Korea. *The Korean Earth Science Society*, 29, 386-395.
 Kim, C.B. and Kim, Y.J., 1984, Petrologic study on the so-called Schistose Granites in the northeastern part of the Kwangju. *Journal of Korean Institute Mining Geology*, 17, 197-214. (in Korean)
 Kim, C.B., Rajesh, V.J., and Santosh, M., 2008b, Geochemistry, K-Ar geochronology and Sr-Nd-Pb isotope compositions of pitchstone in Gohado, southwestern Okcheon Belt, South Korea. *The Island Arc*, 17, 26-40.
 Kim, I.J. and Nagao, K., 1992, K-Ar ages of the hydrothermal clay deposits and the surrounding igneous rocks in southwest Korea. *Journal of Petrological Society Korea*, 1, 58-70.
 Kim, J.M., 2001, New K-Ar dating system in Korea basic

- science institute: Summary and performance. *Journal of Petrological Society of Korea*, 10, 172-178. (in Korean)
- Lee, C.Y., Kim, B.S., Kim, M.G., and Kim, C.B., 2012, K-Ar ages of dinosaur egg nest found in Cretaceous Formation of Aphae Island, Jeollanam-do, Korea. *Journal of Korean Earth Science*, 33, 329-336. (in Korean)
- Lee, H.K., Moon, H.S., Min, K.D., Kim, I.S., Yun, H.S., and Itaya, T., 1992, Paleomagnetism, stratigraphy and geologic structure of the Tertiary Pohang and Changgi Basins: K-Ar ages for the volcanic rocks. *Journal of Korean Institute Mining Geology*, 25, 337-349. (in Korean)
- Lee, Y.N., Jeong, K.S., Chang, S.K., Choi, M.Y., and Choi, J.I., 2000, The preliminary research on the dinosaur eggs and nests found in the reclaimed area south to the Siwha Lake. *Journal of Palentological Society of Korea*, 16, 27-36. (in Korean)
- Lee, Y.N., Kim, B.C., Lee, Y.S., and Kee, W.S., 2007, New dinosaur egg site found in the Namyang Basin, Hwaseong city, Gyeonggi Province. *Journal of the Palentological Society of Korea*, 23, 15-26. (in Korean)
- Nagao, K., Ogato, A., Miura, Y.N., and Yamaguchi, T., 1996, K-Ar isotope analysis for K-Ar dating using two modified-VG 5400 mass spectrometer- 1: Isotope dilution method. *Journal of Mass Spectrometer Society of Japan*, 44, 39-61.
- Paik, I.S. and Chun, J.H., 1993, Laminar calcretes, calcrete pisoids and ooids, and phizoliths from the Kyeonsang Supergroup, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 29, 108-117. (in Korean)
- Paik, I.S., Huh, M., Park, K.H., Hwang, G.K., Kim, K.S., and Kim, H.J., 2006, Yeosu dinosaur track sites of Korea: The youngest dinosaur track records in Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28, 457-468.
- Park, K.H., Paik, I.S., and Huh, M., 2003, Age of the volcanism and deposition determined from the Cretaceous strata of the island of Yeosu-si. *Journal of Petrological Society of Korea*, 10, 172-178. (in Korean)
- Steiger, R.H. and Jager, E., 1977, Subcommittee on geochronology: Convention on the use of the decay constant in geo- and cosmochemistry. *Earth Planetary Science Letter*, 36, 359-362.

2012년 11월 17일 접수
 2012년 12월 1일 수정원고 접수
 2012년 12월 17일 채택