

여수시 도서지역의 백악기층에 나타나는 화성활동 및 퇴적시기

박계현^{*1,2} · 백인성^{1,2} · 허민³

¹부경대학교 환경 · 해양대학 환경지질학과, ²부경대학교 지질환경연구소

³전남대학교 자연과학대학 지구환경과학부

Age of the volcanism and deposition determined from the Cretaceous strata of the islands of Yeosu-si

Kye-Hun Park^{*1,2}, In Sung Paik^{1,2} and Min Huh³

¹Department of Environmental Geosciences and

²Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

³Department of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

요약: 전라남도 여수시 화정면에 속하는 사도, 추도, 목도, 낭도, 적금도 등 도서지역에는 다양한 종류의 화산암과 화산쇄설성 퇴적암 및 공룡화석이 산출되는 퇴적층 등이 산출된다. 이 연구는 이러한 화산암 및 퇴적암들의 생성 및 퇴적시기를 규명하기 위하여 수행되었다. K-Ar 연대추정을 통해 알아낸 이 지역의 화성활동은 주로 $91.8 \pm 3.5(1\sigma)$ Ma에서 $65.5 \pm 1.3(1\sigma)$ Ma의 시기에 걸쳐 일어났음이 밝혀졌다. 조사지역 퇴적암의 퇴적연대는 야외에서 관찰된 퇴적암과 화산암과의 관계와 화산암의 연대로부터 추정하였다. 이 지역에서 가장 오래된 퇴적암은 적금도의 화산력을 갖는 역암으로써 최고 생성연대는 약 8천 1백만년이다. 총서적으로 더 상위에 놓이며 많은 공룡 발자국 화석을 포함하는 추도의 세일층은 최소 7천 7백만년, 목도의 역암은 약 7천 2백만년 내지 7천만년, 사도의 공룡화석층은 최소 6천 5백만년전에 퇴적되었던 것으로 판단된다. 즉, 여수시 도서지역에서 조사된 화산암과 퇴적암들은 모두 백악기 최후기에 분출 및 퇴적된 것이며, 이 지역에서는 공룡들이 백악기 최후기까지 활동하였던 것으로 생각된다.

핵심어: 백악기, K-Ar 연대, 화산암, 공룡, 여수

Abstract: Sado, Chudo, Mokdo, Nangdo, and Jeokgeumdo are the islands which belong to Hwajeongmyeon, Yeosu-si, Jeollanam-do and there are various kinds of volcanic rocks, volcanoclastic sedimentary rocks, and dinosaur-fossil bearing sedimentary rocks on these islands. This study is designed to constrain geologic ages of these volcanic and sedimentary rocks. K-Ar ages of these rocks indicate that the volcanism of this area occurred mainly during the period of 91.8 ± 3.5 - $65.5 \pm 1.3(1\sigma)$ Ma. Deposition ages of the sedimentary rocks were bracketed based on the ages of the volcanic rocks and observed field relationship between sedimentary and volcanic rocks. The oldest sedimentary deposit of the area is the volcanic pebble bearing conglomerate of the Jeokgeumdo and its deposition age is ca. 81 Ma or less. The deposition age of the Chudo shale, which belongs to stratigraphically upper sequence and bears many dinosaur footprints, is at least ca. 77 Ma. Conglomerate of the Mokdo was deposited at ca. 72-70 Ma. The deposition age of the dinosaur fossil deposit of the Sado is at least ca. 65 Ma. All the investigated volcanic and sedimentary rocks of the Yeosu islands, were formed during the late Cretaceous and dinosaurs lived until the latest Cretaceous in this area.

Key words: Cretaceous, K-Ar age, volcanic rocks, dinosaur, Yeosu

*Corresponding author: Tel. 82-51-620-6241, E-mail. khpark@mail.pknu.ac.kr

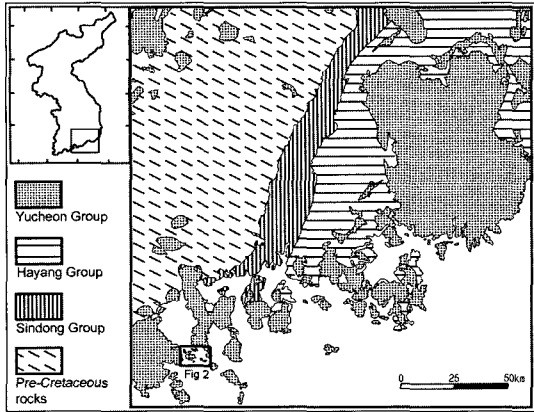


Fig. 1. The box on the right figure indicates the location of the study area and upper left figure shows the location of right map. Yeosu islands area lies on the extension of the early Cretaceous deposit of the Gyeongsang Basin. Also it is included within the belt of Cretaceous volcanic rocks along the south coast of the Korean peninsula.

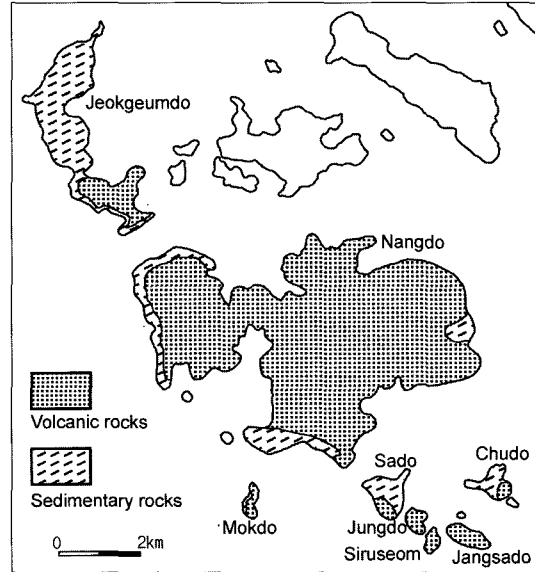


Fig. 2. Geologic map of the study area. Clastic sedimentary rocks and intermediate to acidic volcanic rocks are the main rock types of the study area.

서론

우리나라의 백악기 퇴적분지는 경상분지를 비롯하여 한반도의 여러 지역에서 다양한 크기로 분포하며 한반도의 지각진화 및 지질환경의 변화를 이해하는데 매우 중요하다. 또한 지난 수 년간 국내에서는 여러 지역에서 공룡뼈, 알, 발자국 등 다양한 종류의 공룡화석이 발견되었다. 그러나 이들이 산출된 퇴적층의 퇴적시기와 같은 정량적인 연대자료가 매우 부족하여 국내에서 발견된 공룡화석들 사이의 상호 관계나 다른 나라와의 지질 대비 및 공룡의 진화 등에 대한 연구가 큰 제약을 받고 있다. 이와 같이 연대자료가 부족한 이유는 우리나라 백악기 퇴적암에서는 생성시기를 좁게 한정하기에 적합한 종류의 화석이 발견되지 않고 있으며, 퇴적암들은 일반적으로 직접적인 절대연령 측정이 매우 어렵거나 또는 현재 기술로는 불가능하기 때문이다. 퇴적층과 동시기 또는 전후에 있었던 화성활동에 대한 절대연대 측정을 통해 퇴적시기를 알아내는 방법 역시 화성활동이 백악기의 분지발달 최후기에 집중되어있어 일반적인 적용이 어렵고 그나마 많은 시도가 없었다. 고지자기를 이용하여 지질시대를 알아내는 방법도 있으나 백악기에는 오랜 기간 동안 정자극기가 지속되어 백악기 초에 해당하는 연대는 정밀하게 알아낼 수 없다. 이 논문의 연구지역은 전라남도 여수시 화정면에 속하는 사도, 추도, 목도, 낭도, 적금도 등의 도서지역으로써 이 지역에는 백악기의 퇴적암과 화산암들이 분포

하는 것으로 알려져 있으며(Fig. 1, 2), 최근에는 이 지역으로부터 국내 최대규모의 공룡 발자국 화석군이 발견되었다(허민 외, 2001). 하지만 연구 지역 역시 경상분지의 다른 지역들과 마찬가지로 정확한 지질시대가 잘 알려져 있지 못하다. 이 지역의 지질시대를 알아보기 위하여 기존 지질도(한국자원연구소, 1995)에 나타나는 경상누층군 내의 일반적인 지질분포와 비교해보면 영남 서부지역의 경상분지 최하부 낙동층의 연장선상에 놓인다고 볼 수 있다. 그러나 퇴적의 전후에 활발한 화성활동이 있었던 것은 경상분지 발달의 최후기(Chang, 1975)와 매우 비슷하다. 따라서 이 지역이 경상누층군의 최하부에 대비되는지 아니면 최상부에 대비되는지도 확인해야 할 과제이다.

이 연구에서는 야외조사를 통해 연구지역의 퇴적층과 화산활동과의 선후관계를 파악하고 이를 바탕으로 화산암에 대한 K-Ar 연대측정을 수행하였다. 화산암의 연대를 토대로 퇴적층들의 퇴적시기를 한정하였으며, 퇴적층에 발자국 화석을 남긴 공룡의 활동시기에 대하여 논의하였다.

화산암의 분포와 산상

조사지역의 지질은 역암, 사암, 세일 등의 백악기 퇴적암류와 다양한 조성을 갖는 화산암류로 이루어져 있

다(Fig. 2). 조사 대상 모든 섬에 화성암이 분포하는 것으로 확인되었다. 이러한 양상은 조사지역에 인접한 고흥(박영석 외, 1997; 윤성효와 황인호, 1988), 돌산(김희남 외, 1994), 벌교(김정빈과 박영석, 1996) 및 광양-송주지역(이창신 외, 1992) 등에서도 중생대 화성활동이 매우 활발하여 다양한 조성의 화산암과 심성암체들이 산출하는 것과 일치하는 현상이다. 화성암들은 암상(岩床, sill)이나 암맥(dyke)상으로 관입하거나 혹은 응회암이나 용암류 형태로 퇴적암들을 덮고 있다. 퇴적작용을 전후하여 비교적 빈번한 화성활동이 일어났었기 때문에 퇴적암 자체를 구성하는 물질들에도 상당량의 화산암 기원물질이 포함된 것으로 판단된다. 특히 역암의 경우 다양한 크기의 화산력을 많이 함유하고 있다. 이와 같은 화성암의 다양한 산출상태는 퇴적암의 생성시기를 한정하는데 매우 좋은 조건을 제공하고 있다. 우선 각 섬들의 화성암 분포와 산상에 대해 알아보면 다음과 같으며 화산암의 분류는 박편관찰과 주원소 분석자료를 근거로 Le Bas *et al.*(1986)의 총알칼리-실리카 분류도를 이용하였다. 화학분석은 부경대학교 공동실험실습관의 X-선 형광분석기(Shimadzu XRF-1700)로 분석하였다(Table 1).

사도

일반적으로 사도라고 불리우는 섬은 간조시에 서로 연결되는 몇 개의 섬들로 구성된다. 가장 면적이 넓으며 주민들이 거주하는 사도와 인접한 중도, 주민들이 시루섬이라고 부르는 중도 남쪽의 섬, 더 남쪽에 위치한 장사도의 네 섬은 대부분 화산암으로 구성되어 있으며 사도에만 퇴적암이 비교적 넓게 산출된다(Fig. 2). 사도의 경우에는 남쪽 및 남서부의 해안절벽 상부에 화산암이 분포하여 하위의 백악기 퇴적암류를 덮고 있다.

중도는 주로 응회암이며 화산암력들도 포함된다. 화산암력의 조성과 함량은 지역에 따라 크게 변화하는데 대체로 시루섬을 마주보는 지역에서는 화산암력이 거의 관찰되지 않거나 비교적 적은 편이며 사도를 마주보는 부분에서는 주먹 크기 이상의 화산암력이 상당히 밀집되어 나타난다. 응회암의 조성은 Le Bas *et al.*(1986)의 분류에 따르면 안산암에 해당하며 화산력이 밀집된 곳에서 채취한 화산력은 조면암에 해당하는 조성을 갖는다. 중도의 응회암 중에서는 나무의 단면과 유사한 동심원적인 모양을 갖는 탄화목도 함께 관찰된다.

시루섬에도 화산쇄설성 퇴적암 및 각력질 응회암 등이 넓고 두껍게 분포하며 이 암석들에는 여러 종류의 화산암력 또는 세일 등의 퇴적암편이나 화산암편들이 포함된다. 부분적으로는 층리가 잘 발달되기도 한다.

응회암층 내에 있는 화산암력의 조성은 조면안산암에서 유문암까지의 변화를 보인다. 시루섬의 응회암은 약 1m 내외의 폭을 가지는 거의 수직으로 관입하고 있는 담록색의 안산암 맥이 관찰된다.

사도 남쪽의 중도를 마주보는 부분에는 상부에 두꺼운 응회암이 분포한다. 한편 퇴적암 내에는 퇴적암을 거의 수직으로 자르는 암맥들도 여러 곳에서 관찰된다. 사도 남쪽의 공룡 발자국 화석이 관찰되는 퇴적암층을 관입한 어두운 색 맥암의 경우 현무암질 안산암 조성을 가지며 반대편인 사도 남서쪽 절벽에 나타나는 맥암은 현무암질 조면안산암의 조성을 가진다.

장사도에 분포하는 화산암들은 대체로 밝은 회백색 내지 담황색의 유문암질 조성의 응회암이며 곳에 따라 화산력의 함유량이 크게 변화한다. 이를 관입한 어두운 색 맥암들도 관찰되며 이들은 상대적으로 SiO₂가 낮은 현무암질 조면안산암에서 포노테프라이트의 조성을 갖는다.

추도

추도는 멀리서 볼 때도 추도를 둘로 갈라놓는 좁게 갈라진 틈이 관찰되는데 이 틈은 원래 퇴적암을 거의 수직으로 관입한 현무암질 조면암산암의 조성을 갖는 맥암이 있던 곳이다. 이 부분을 차지하던 맥암은 내부에 발달한 절리에 따라 점차 떨어져 나가버리고 지금은 마치 칼로 두부를 잘라놓은 듯한 형상을 만들었다. 이 부분을 통과하여 반대편으로 넘어가면 퇴적암을 관입하고 있는 암맥이 잘 관찰된다. 한편 추도의 윗부분에는 퇴적암층을 층리와 거의 평행하게 덮고 있는 비교적 두꺼운 조면안산암질 조성의 화산암층이 자리잡고 있다(Fig. 3). 이 화산암체와 하부에 놓인 퇴적층의 경계는 대체로 평행하여 얼핏보면 서로 조화적인 관계인 것처럼 보이나 접촉부를 따라가며 관찰해보면 층리가 절단되어있는 것이 거시적인 규모에서도 관찰된다. 이 화산암층과 하부의 퇴적암층 사이의 관계는 접촉부를 근접해서 관찰하면 화산암에 의해 퇴적층이 교란되어있는 것이 잘 나타난다.

목도

목도에도 화산암이 넓게 분포하며 하부지역이 노출된 곳에서는 퇴적암이 분포한다. 상부의 화산암은 유문암질 용암류이며 수직 방향의 절리가 발달하고 있다. 그 하부에 부분적으로 분포하는 역암에 포함된 화산력에는 조면암 조성의 것도 발견된다. 한편 현무암 조성의 맥암이 퇴적암들을 거의 수직으로 관입하고 있는 것도 관찰된다.

Table 1. Major element abundances in volcanic and volcanoclastic sedimentary rocks of the Yeosu islands.

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
Sado												
S-2	57.05	17.78	0.84	6.20	0.11	1.30	4.80	5.15	1.77	0.27	2.89	98.15
S-4	73.16	12.89	0.31	2.71	0.07	0.64	1.58	4.51	2.33	0.06	1.31	99.55
S-6	58.19	14.25	0.63	5.36	0.07	3.00	5.65	2.38	3.48	0.22	6.44	99.67
S-7	60.99	14.64	1.09	7.85	0.14	1.81	2.98	6.21	0.07	0.42	3.51	99.72
S-1	49.95	16.01	1.19	8.49	0.11	5.66	4.32	3.93	3.19	0.98	4.88	98.71
S-2	49.04	14.44	1.05	8.35	0.09	3.82	8.13	3.55	0.99	0.89	8.91	99.27
S-3	61.06	15.61	0.70	6.78	0.11	2.54	2.20	2.99	3.69	0.17	3.77	99.62
JU-1	56.80	16.82	0.71	5.42	0.10	1.87	5.63	3.52	2.34	0.23	6.79	100.24
JU-4-1	57.77	18.04	0.54	3.79	0.07	1.40	3.48	5.80	4.77	0.66	3.05	99.37
JU-1-2	74.06	13.84	0.13	1.84	0.05	0.59	1.16	3.37	3.00	0.02	2.23	100.29
JU-2	50.33	15.54	1.20	9.40	0.13	3.15	5.11	2.85	5.05	1.02	5.09	98.86
JA-3	76.98	12.89	0.06	0.53	0.03	0.11	0.69	4.04	3.90	0.00	1.18	100.41
JA-4	79.72	11.41	0.13	0.96	0.02	0.15	0.13	3.41	3.13	0.02	0.89	99.98
JA-5	43.85	18.40	1.31	11.11	0.22	2.26	5.81	3.24	4.21	0.55	8.20	99.16
Chudo												
C-1	50.27	16.35	1.00	10.81	0.17	4.20	5.28	4.00	1.70	0.21	5.57	99.56
C-3	58.84	16.83	0.72	7.35	0.12	3.01	2.77	4.73	3.11	0.19	2.82	100.49
Mokdo												
M-1	69.01	13.97	0.32	3.19	0.09	1.11	1.87	4.01	2.86	0.06	3.23	99.72
M-2	65.87	13.85	0.33	2.99	0.12	1.42	2.77	5.00	1.96	0.06	4.48	98.86
M-3	45.26	13.94	0.88	9.79	0.20	5.55	10.62	1.55	1.47	0.31	9.20	98.76
M-4	69.92	14.76	0.35	2.98	0.07	0.48	1.73	3.72	3.53	0.07	2.33	99.95
M-7	59.10	16.39	0.86	6.46	0.09	2.27	2.61	6.09	2.21	0.22	2.92	99.22
Nangdo												
N-1	64.11	15.59	0.59	5.13	0.09	1.66	2.37	4.34	3.21	0.13	1.81	99.02
N-2	62.88	15.67	0.63	5.57	0.09	1.80	2.19	4.43	3.24	0.13	2.17	98.80
N-3	74.34	12.88	0.23	2.05	0.04	0.55	1.05	3.27	4.55	0.03	1.01	100.00
Jeokgeumdo												
JE-1	62.76	16.57	0.68	5.83	0.11	1.38	2.34	0.14	4.14	0.10	5.33	99.37
JE-2-1	58.55	14.54	0.83	10.71	0.14	1.53	3.01	5.33	1.04	0.14	3.66	99.47
JE-2-2	56.50	17.97	0.97	6.58	0.08	1.49	3.45	8.49	0.24	0.29	2.76	98.80
JE-2-3	59.65	16.51	1.33	8.81	0.06	0.72	2.23	8.61	0.07	0.38	1.16	99.53
JE-2-4	61.85	16.35	0.90	4.81	0.05	0.34	3.47	8.63	0.16	0.27	2.42	99.26
JE-2-5	52.78	15.99	0.86	9.31	0.08	1.04	6.70	6.02	0.11	0.44	5.86	99.19
JE-2-6	50.55	18.28	0.91	7.10	0.18	3.22	5.54	6.33	1.25	0.22	5.90	99.47
JE-3	55.83	17.19	0.84	6.90	0.06	1.43	6.21	2.93	0.17	0.15	7.27	98.98
JE-4	54.50	17.33	1.16	8.85	0.12	3.81	6.98	3.40	1.32	0.36	1.81	99.62

남도

남도의 상당부분이 화산암으로 구성되지만 이 조사에서는 사도를 마주보고 있는 일부 구역에서만 시료의 채취 및 분석이 수행되었다. 조사지역에 분포하는 남도의 화산암들은 목도와 대체로 유사한 조성으로 유문암 내지 조면암에 속한다. 사도에서 가까이 마주보이는 남도의 등대가 위치한 지점으로부터 사도에서 멀리

보이는 지점으로 가면서 몇 차례 화산암과 퇴적암층이 교호한다. 부분적으로는 화산암층 위에 다른 화산암층이 덮고 있는 곳도 있으며 화산암력이 매우 높은 밀도로 포함된 부분도 관찰된다.

적금도

적금도에서는 큰 화산암력이 매우 높은 밀도로 포함

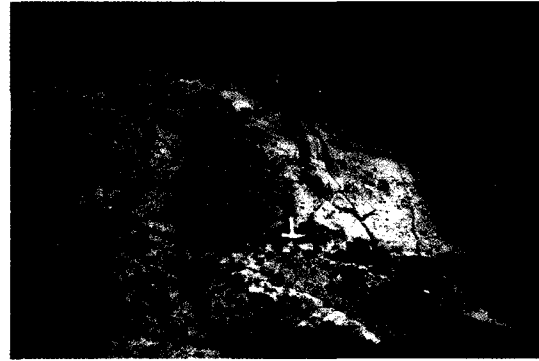


Fig. 3. Lava flow which conformably overlies the sedimentary strata at the Chudo. The thickness of this flow is about 15 meters.

되어있는 역암이 특징적으로 관찰된다(Fig. 4). 역암 내에 사층리가 잘 발달된 부분도 있으며(Fig. 4a) 화산력의 조성 및 밀도의 변화가 매우 심하다. 비교적 큰 크기의 화산력이 고도로 밀집되어있는 역암도 있으며 경우에 따라서는 장경이 1 m 90 cm에 달하는 화산암괴가 발견되기도 한다(Fig. 4b). 화산력들의 조성은 현무암질 안산암, 안산암, 현무암질조면안산암, 조면안산암, 조면암 등으로 매우 다양하지만 화산력 중에서는 이 지역의 도서에 널리 분포하는 유문암 조성이 관찰되지 않는 것이 특이하다. 이는 적금도의 화산력 함유 역암의 생성 이전에는 가까운 지역에 유문암질 화성활동이 없었던 것을 의미하며 이 역암에 함유된 화산암들은 다른 유문암들과는 생성시기가 달랐을 것으로 추정된다.

종합

연구지역의 퇴적암들의 주향 및 경사방향으로 볼 때 퇴적층 중에서 가장 오래된 것은 가장 북쪽에 분포하는 적금도의 역암이며 남쪽으로 갈수록 점차 젊은 퇴적층이 분포하는 것으로 판단된다. 한편 조사지역에 분포하는 화산암류는 층서적 위치에 따라 대체로 세 종류로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째의 종류는 퇴적암 내에 포함된 화산쇄설성 물질로 포함된 것이다. 이러한 화산쇄설성 물질들은 퇴적작용의 이전에 활동했던 화성활동을 나타낸다. 여러 지역에서 화산력을 갖는 역암 및 화산쇄설성 입자들을 다량 포함하는 사암 등이 나타난다. 이 중에서도 연구지역에서 제일 먼저 생성된 화산암류는 적금도의 역암에 포함되어 있는 화산력들을 꼽을 수 있다. 이 화산력들의 조성은 현무암질 안산암, 안산암, 현무암질 조면안산암, 조면안산암, 조면



(a)



(b)

Fig. 4. Conglomerate of the Jeokgeumdo. (a) This picture shows cross bedding. Most of the pebbles are volcanic rocks. (b) There are occasional large boulders in the Jeokgeumdo conglomerates. The long diameter of the boulder in this picture is about 1.9 m.

암 등으로 매우 다양하다. 특기할 만한 사항은 화산력 중에서는 이 지역의 도서에 널리 분포하는 유문암 조성이 관찰되지 않는 것이다. 이는 적금도의 화산력 함유 역암의 생성 이전에는 가까운 지역에 유문암질 화성활동이 없었던 것을 의미함과 동시에 초기의 화성활동은 후기의 유문암질 내지 안산암질 암석으로 나타나는 산성 내지 중성의 화성활동에 비해 상대적으로 분화가 덜된 염기성 내지 중성의 화성활동이 일어났음을 나타낸다.

두 번째의 종류는 대부분의 섬들에서는 넓은 지역에 걸쳐 두껍게 산출되는 응회암이나 용암류다. 이들은 해당 지역의 퇴적암보다 후기의 화성활동 산물이다. 사도와 중도, 시루섬, 장사도에서 퇴적암의 상위에 분포하는 회백색 내지 담황색과 같은 밝은 색을 띠는 응회암은 대체로 유문암질이며 일부분은 안산암질 조성이다. 이 응회암은 다양한 조성의 화산력과 세일과 같은

일부 퇴적암편 및 규화물 등을 포함한다. 응회암에 포함되어 있는 화산력의 양과 조성은 지역에 따라 큰 변화를 보인다. 화산력의 조성은 유문암질인 것도 있으나 조면안산암 및 조면암 등과 같이 유문암보다 상대적으로 낮은 SiO_2 량을 갖는 것이 대부분인 것으로 관찰된다. 이는 마그마 분화 초기에 만들어졌던 분화가 상대적으로 덜된 화산암들이 폭발적인 유문암질 내지 안산암질 응회암의 분출시 파쇄되어 응회암에 포함된 것으로 추정된다. 한편 추도와 목도의 윗부분에 분포하는 조면안산암질 내지 유문암의 조성의 용암류는 층리와 거의 평행하게 퇴적암층을 덮고 있으며 수직의 절리가 잘 발달되어있다. 낭도에서 퇴적암과 몇 차례 교호하거나 상부에 놓이는 화산암들은 유문암 내지 조면암에 속한다.

세 번째 종류는 암맥들로 이들 역시 퇴적암보다 후기에 형성된 마그마의 산물이다. 이러한 화성암맥들은 추도를 두 부분으로 갈라놓는 지역을 포함하여 사도, 시루섬, 장사도 및 목도에서는 퇴적암층이나 응회암을 대체로 수직에 가까운 고각으로 관입하고 있는 것이 자주 관찰된다. 이들은 담록색 내지는 더 어두운 색을 가지며 SiO_2 함량도 더 낮은 현무암, 현무암질 안산암, 현무암질 조면안산암, 안산암 및 포노테프라이트의 조성을 갖는다.

세 가지의 형태로 나타나는 화성활동의 산물들은 각 섬 안에서는 암상간의 접촉 관계 등으로부터 선후 관계를 알 수 있지만 직접적인 접촉관계를 보이지 않는 각 섬들 사이의 비교는 곤란한 실정이다.

K-Ar 분석

분석방법

이번 조사에서는 화산암류의 연대측정에 일반적으로 널리 적용되고 있는 K-Ar 연대측정을 수행하였다. 화산활동의 시기규명뿐만 아니라 공통화석층의 퇴적시기를 알아내기 위하여 퇴적층과의 야외관계를 확실하게 보이는 것을 위주로 분석표품을 선정하였다. K-Ar 연대측정을 위한 시료의 준비는 부경대학교 환경지질과 학과의 실험실에서 수행되었다. 각 노두를 대표하는 시료를 선정하여 암석 절단기로 약 5 mm 두께의 슬랩을 만들고, 톱자국을 사포로 문질러 없앤 뒤에 풍화 및 변질된 부분을 제거하였다. 나머지 부분을 텅스텐 카바이드 재질의 파쇄기(Jaw crusher)로 파쇄한 뒤 표준망체를 이용하여 60~100 메쉬에 해당하는 부분을 취하였다. 탈이온수로 세척하고 오븐에서 약 60°C로 건조시킨 후 K-Ar 연대측정을 실시하였다. K-Ar 연대측정

은 한국기초과학지원연구원에서 수행하였다. K는 원자흡광분광분석기(Atomic Absorption Spectrophotometer)를 이용하여 정량분석하였고 Ar은 ^{38}Ar 스파이크(enriched isotope spike)와 불활성기체질량분석기(static vacuum mass spectrometer)를 이용하여 분석하였다.

연대측정 결과

우선 전체적인 연대분포를 살펴보면 제일 오래된 화산암이 $95.3 \pm 1.9(1\sigma)\text{Ma}$ 이고 가장 젊은 것은 $38.1 \pm 0.8(1\sigma)\text{Ma}$ 까지의 분포를 보인다(Table 2). 이를 시기별로 나누어 살펴보면 오래된 시기의 것들은 앞에서 야외관계로부터 추정했던 것과 같이 적금도의 역암에 들어가 있는 화산력들이다. 이 중에서 조면안산암의 조성을 갖는 시료가 $91.8 \pm 3.5(1\sigma)\text{Ma}$ 의 가장 오래된 연대를 나타낸다. 화산쇄설성 입자를 다량 포함하는 퇴적암시료 역시 비슷한 $95.3 \pm 1.9(1\sigma)\text{Ma}$ 의 연대를 나타내는 것으로 보아 이 퇴적암을 이루는 대부분의 물질은 이 시기의 화산암분포지에서 유래한 것으로 해석된다. 한편 적금도의 역암에는 이보다 조금 후기의 화산력들도 포함된다. 이러한 화산력으로는 조면암과 현무암질 조면안산암에 해당하는 것들로 각각 $80.8 \pm 3.1(1\sigma)\text{Ma}$ 및 $81.1 \pm 1.6(1\sigma)\text{Ma}$ 의 시기로 연대측정되었다.

다른 섬들의 화산암들은 적금도의 화산력들에 비해서는 젊은 생성연대를 보여준다. 우선 암맥들을 제외하고 응회암이나 퇴적암에 들어가 있는 화산력과 용암류로 산출하는 화산암들을 먼저 살펴보면 73~65 Ma의 연대범위를 갖는다. 우선 목도의 역암 내에 들어가 있는 화산력이 $72.4 \pm 1.5(1\sigma)\text{Ma}$ 로 연대측정되었다. 이 연대와 목도에 분포하는 세일층 하부의 화산쇄설성 퇴적암에서 측정된 $73.7 \pm 1.5(1\sigma)\text{Ma}$ 는 오차범위 내에서 일치하며 퇴적암의 근원물질이 주로 화산암지역에서 유래되었던 것임을 반영한다고 판단된다. 장사도의 유문암과 추도 상부의 조면암질 안산암 용암류 역시 비슷한 시기인 $72.9 \pm 1.4(1\sigma)\text{Ma}$ 와 $71.1 \pm 1.4(1\sigma)\text{Ma}$ 에 분출된 것으로 나타났다.

한편 사도에 연결된 중도의 응회암과 시루섬의 응회암에 들어있는 화산암력들은 이보다 약간 후기인 연대를 나타낸다. 이를 각각 살펴보면 중도의 안산암질 응회암은 $67.5 \pm 1.3(1\sigma)\text{Ma}$, 시루섬의 화산력들은 조면안산암질인 것이 $65.5 \pm 1.3(1\sigma)\text{Ma}$, 그리고 유문암질인 것이 $67.8 \pm 1.6(1\sigma)\text{Ma}$ 이다.

마지막으로 암맥들을 연대순으로 살펴보면 우선 추도에서 세일층을 거의 수직으로 관입하고 있는 암맥이 $77.0 \pm 2.3(1\sigma)\text{Ma}$ 로 연대측정되었다. 이 연대는 추도의 상부에 분포하는 조면암질 안산암보다 다소 오래된 연

Table 2. K-Ar ages measured from various volcanic and volcanoclastic sedimentary rocks.

Sample	Type	K (wt%)	wt (g)	⁴⁰ Ar radiogenic (10 ⁻⁸ ccSTP/g)	error (1σ)	³⁶ Ar (10 ⁻¹⁰ ccSTP/g)	error (1σ)	Age (Ma)	error (1σ)	Air (%)
Chudo	C-1	1.311	0.02069	400.4	9.2	35.2	2.5	77.0	2.3	20.6
	C-3	2.134	0.02002	600.6	1.8	105.8	0.5	71.1	1.4	34.2
Sado	S-2	1.452	0.01869	375.9	1.6	62.3	0.4	65.5	1.3	32.9
	S-4	1.679	0.01812	450.4	6.2	168.1	1.1	67.8	1.6	52.5
	S-7	0.670	0.01635	180.7	2.3	42.2	0.5	68.2	1.6	40.8
	JU-1	1.936	0.01589	517.0	1.8	32.7	0.3	67.5	1.3	15.7
	JA-1-2	2.687	0.01525	775.8	1.6	29.8	0.4	72.9	1.4	10.2
	JA-2	4.366	0.01473	653.0	6.5	32.8	0.4	38.1	0.8	12.9
Mokdo	M-2	1.292	0.01710	377.0	1.7	24.1	0.4	73.7	1.5	15.9
	M-3	1.088	0.01924	299.6	1.2	20.7	0.3	69.6	1.4	17.0
	M-7	1.318	0.01761	378.2	2.9	23.9	0.2	72.4	1.5	15.7
Jeokgeumdo	JE-1	0.713	0.01910	271.0	1.2	16.4	0.2	95.3	1.9	15.2
	JE-2-2	0.075	0.01925	27.4	0.9	18.5	0.2	91.8	3.5	66.6
	JE-2-4	0.112	0.02125	35.9	1.2	16.1	0.2	80.8	3.1	56.9
	JE-2-6	1.120	0.02116	360.6	1.3	18.9	0.3	81.1	1.6	13.4

대이며 추도에 분포하는 공룡 발자국 화석이 산출되는 세일층의 최소 퇴적연대로 생각할 수 있다. 한편 목도의 수직 현무암질 암맥은 $69.6 \pm 1.4(1\sigma)\text{Ma}$ 의 연대를 나타내며 이 시기는 목도에서 연대측정된 화성암류의 연대와 아주 비슷하다. 시루섬의 응회암을 수직으로 관입하는 안산암질 암맥은 $68.1 \pm 1.6(1\sigma)\text{Ma}$ 로 시루섬의 응회암에 포함된 화산암력들의 연대와 유사하다. 응회암보다 이전에 마그마로부터 고화되어 폭발적인 응회암 분출시 포함된 화산력과 응회암이 쌓인 이후에 응회암을 관입한 암맥의 연대가 비슷하게 측정된 것은 이러한 일련의 화성활동들이 비교적 짧은 시기 안에 이루어졌음을 나타낸다. 이 지역에서 가장 후기의 화성활동은 장사도에 나타나는 현무암질 조면안산암 조성을 갖는 암맥으로써 신생대 에오세 말에 해당하는 $38.1 \pm 0.8(1\sigma)\text{Ma}$ 이다.

이상과 같은 연대측정 결과를 종합하여 살펴보면 다음과 같다. 이 지역의 화성활동은 약 9천 2백만년 전에 시작되었다. 처음의 화성활동은 비교적 분화가 덜 된 염기성 내지 중성의 화성활동이었다. 이후 역암과 사암, 셰일 등의 퇴적암들이 퇴적되는 동안에도 간헐적인 화성활동을 보였으나 백악기 최후기에 해당하는 약 7천 2백만년에서 6천 5백만년의 시기에 집중적인 화산활동이 있어 많은 양의 응회암과 용암류가 분출하여 공룡화석을 포함하는 퇴적암층들을 덮게 되었다.

조사지역 퇴적암들의 퇴적시기는 최하부의 적금도 퇴적암의 경우 그 안에 포함된 화산력들 중에서 젊은 연대를 나타내는 8천 1백만년 이후라고 추정할 수 있다. 그리고 추도의 세일층은 7천 7백만년으로 연대측정된 화성암맥이 관입하고 있으므로 그 이전에 퇴적되었을 것이다. 사도의 경우도 상위에 분포하는 응회암들에 포함된 화산력들이 나타내는 6천 5백만년보다는 더 오래된 퇴적암이라고 할 수 있다. 추도에 분포하는 퇴적암이나 화산암, 그리고 장사도의 유문암질 화산암과의 직접적인 접촉관계가 관찰되지 않아 현재로는 사도에 분포하는 퇴적암의 최소연대만 추정할 수 있으나 보다 세밀한 조사를 통해 보다 정밀한 퇴적연대를 밝힐 수도 있을 것으로 생각한다.

목도의 경우 퇴적층 최상위에 놓이는 역암에 포함된 화산력이 약 7천 2백만년이고 퇴적암을 관입하고 있는 화성암맥이 약 7천만년의 연대를 나타내므로 이 퇴적암의 생성시기는 이들과 비슷한 연대임을 알 수 있다. 이 역암층보다 하위에 놓이는 사암층과 세일층의 아래에 있는 화산쇄설성 퇴적암의 K-Ar 분석결과가 약 7천 4백만년으로 앞에서의 연대와 비슷하지만 약간 더

오래된 연대를 나타내고 있음을 감안하면 목도의 퇴적암층을 비롯하여 인접한 사도와 추도의 퇴적암들도 대부분 약 7천만년보다 약간 이전 시기에 생성되었을 것으로 추정할 수 있다. 낭도의 사도를 향한 부분에서 퇴적암과 화산암과의 관계를 살펴보면 어떤 경우에는 화산암이 퇴적암을 관입하거나 덮고 있지만 화산암을 역으로 갖고 있는 역암이나 화산암을 부정합으로 덮고 있는 퇴적암도 발견된다. 이를 보면 이 지역의 퇴적암 생성연대는 같은 지역에 분포하는 화산암의 생성연대와 대체로 비슷한 범위에 속함을 나타내는 것으로 추정할 수 있으며 앞에서의 추론을 뒷받침한다. 즉, 여주시 도서지역의 공룡화석층은 모두 백악기 최후기에 만들어진 것이며, 공룡의 활동시기 역시 이와 같은 백악기 최후기임을 알 수 있다.

이 지역에서 $38.1 \pm 0.8(1\sigma)\text{Ma}$ 의 연대로 가장 후기의 화성활동을 나타내는 장사도의 현무암질 조면안산암 조성 암맥은 매우 국지적인 분포만을 보이고 있다.

결론

전라남도 여주시 화정면에 속하는 사도, 추도, 목도, 낭도, 적금도 등의 도서지역에는 최고 9천 2백만년에서 최소 3천 8백만년에 이르는 매우 긴 기간의 화성활동을 보이며 이러한 화성활동의 결과로 만들어진 화성암은 매우 다양한 조성과 함께 다양한 산출양상을 보인다. 이러한 화산암들에 대한 연대측정 결과를 공룡화석층과의 상호관계를 통해 공룡화석층의 퇴적시기를 한정하면 제일 오래된 적금도의 역암의 최고 퇴적시기는 약 8천 1백만년이고 추도의 세일층은 최소 7천 7백만년, 목도의 역암은 약 7천 2백만년 내지 7천만년, 사도의 공룡화석층은 최소 6천 5백만년 전에 퇴적되었던 것으로 판단된다. 이를 종합하면 조사지역의 퇴적암은 넓게 보더라도 약 8천 1백만년~6천 5백만년의 백악기 최후기에 해당하는 시기에 퇴적되었음을 알 수 있다. 조사지역의 섬들에서 관찰된 퇴적암과 화산암과의 관계를 살펴보면 퇴적암의 퇴적시기는 화산암의 생성연대와 대체로 비슷한 범위에 속한다고 판단된다. 즉, 여주시 도서지역의 공룡화석층은 모두 백악기 최후기에 퇴적된 것이며, 이 지역에서는 공룡들이 백악기 최후기까지 활동하였던 것으로 생각된다. 만약 보다 세밀한 추가조사를 수행한다면 이러한 퇴적 및 공룡활동 시기는 더욱 좁은 범위로 한정할 수 있다고 판단된다.

참고문헌

- 김정빈, 박영석, 1996, 벌교지역에 분포하는 심성암류의 암석화학과 지질시대에 대한 연구. 지구과학회지, 17, 227-240.
- 김희남, 신인현, 안건상, 1994, 돌산지역에 분포하는 화강암체의 암석지화학적 특징과 광화작용과의 관련성 연구. 지구과학회지, 15, 439-451.
- 박영석, 김정빈, 윤정환, 안건상, 1997, 고흥지역에 분포하는 백악기 심성암류의 지질시대와 암석화학적 연구. 지구과학회지, 18, 70-83.
- 윤성효, 황인호, 1988, 전남 고흥반도에 분포하는 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구. 광산지질, 21, 335-348.
- 이창신, 김용준, 박천영, 이창주, 1992, 광양-승주지역에 분포하는 화강암류의 암석화학. 광산지질, 25, 51-60.
- 한국자원연구소, 1995, 1:1,000,000 한국지질도.
- 허민, 백인성, 정철환, 박재봉, 김보성, 2001, 전남 여수시 도서지역에서 발견된 공룡발자국 화석. 지질학회지, 37, 653-658.
- Chang, K. H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, 11, 1-23.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., and Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. Jour. Petrology, 27, 745-750.

(2003년 3월 19일 접수; 2003년 5월 18일 채택)