

남극 킹조지섬 바톤반도의 열수변질작용에 관한 K-Ar 연대와 지구화학

허순도*¹ · 이종익¹ · 황정² · 최문영¹

¹ 한국해양연구원 극지연구본부

² 대전대학교 지구시스템공학과

K-Ar Age and Geochemistry of Hydrothermal Alteration in the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica

Soon Do Hur*¹, Jong Ik Lee¹, Jeong Hwang², and Moon Young Choe¹

¹Polar Sciences Laboratory, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Department of Geo-system Engineering
Taejon University, Taejon 300-716, Korea

Abstract : K-Ar ages of the altered rocks from the Barton Peninsula are belows; altered tuffaceous andesite from southwestern part is 42 Ma, altered rocks contacted with quartz vein from southern part are 28 and 33 Ma, and advanced argillic altered andesite from northeastern part are 33 and 35 Ma. Those K-Ar ages are 10 My younger than granitic rocks of the Barton Peninsula. Hydrothermal alteration of the Barton Peninsula was originated from mixing of magmatic water from parent magma of granitic rocks with meteoric water. The Al content in the hostrock is relatively constant during hydrothermal alteration, on the contrary the Mg content is in proportion to total alkali. The variation of total alkali and Mg contents in hydrothermal alteration indicates that those elements was washed out during hydrothermal alteration. The sequences of hydrothermal alteration of the Barton Peninsula is chloritization of amphiboles, sericitization of feldspars and kaolitization of sericite.

Key words : 열수변질 (Hydrothermal alteration), K-Ar 연대 (K-Ar age), 주성분원소 (Major element), 바톤반도 (Barton Peninsula).

1. 서론

남극 킹조지섬 바톤반도에는 섬록암과 화강섬록암으로 이루어진 화강암체를 중심으로 광역적인 열수변질대가 분포한다. 이 변질대의 성인에 대하여 박(1990)은 천열수 모델로 설명하였고, So *et al.* (1995)은 바톤반도의 광화작용에 대하여 남부의 연-아연 맥과 북부의 석영-황철석 맥으로 구분하고 유체포유물 및 안정동위원소 연구를 수행하였다. 또한

Hwang and Lee (1998)는 화강암체와 주변 암석의 광물조합과 광물조성의 변화를 통하여 모암변질 특성을 밝히고 바톤반도의 광화작용과 열수변질작용은 화강섬록암의 관입과 관련이 있는 것으로 해석하였다.

열수변질작용은 모암이 열수용액과 반응하여 모암의 조암 광물을 새로운 광물로 변화시키는 물리화학적 작용으로서 모암의 종류, 유입된 유체의 화학조성, 반응시의 온도, 압력, pH, Eh 등에 따라 생성되는 광물의 종류가 다르다. 따라서 열수변질작용의 특성을 규명하기 위해서는 변질암의 산출상태와 화학조성에 대한 체계적인 연구가 수행되어야 한다. 앞

* Corresponding author. E-mail : sdhur@kordi.re.kr

의 연구들에서는 모암변질작용과 관련된 유체의 온도, 압력, 조성과 관련된 변질 특성과 정성적인 변질시대를 규명하였으나, 열수변질작용에 따른 원소의 거동과 구성광물의 변화 및 변질시기에 대한 정량적인 고찰은 미흡하다.

이 연구는 바톤반도의 열수변질작용 시기를 규명하기 위해 열수변질물에 대한 K-Ar 절대연령 측정을 실시하였다 또한 변질작용의 시간적 순서에 따른 광물조합의 변화와 구성원소의 변화를 편광현미경 관찰, X-선 회절분석 및 주성분원소 분석을 통하여 검토한 것이다.

2. 지질개요 및 광화작용

남쉐틀랜드 군도는 중생대 이후 중첩된 화성활동으로 형성된 일련의 도호들과 섭입과정 중 부가되거나 변성된 섭입 복합암체들로 구성되어 있다. 섭입과 관련되어 분출 또는 관입한 화성암류들은 대체적으로 로우섬에서 킹조지섬까지 광범위하게 분포하는데, 이들의 화성활동은 대체적으로 남서부에서 북동부를 향해 진행되어 온 것으로 알려져 왔다 (Smellie *et al.* 1984).

남쉐틀랜드군도에서 가장 큰 킹조지섬은 거의 대부분 백악기-신생대의 칼크-알카리 계열의 화산암류와 화강암류로 구성된다.

바톤반도의 화산암은 현무암, 현무암질 안산암, 응회암질 안산암과 집괴암으로 구성되어 있고, 화강암류는 섬록암과 화강섬록암이 분포한다 (Fig. 1). 화산암층은 비교적 층리가 잘 보존되어 있고, 일반적으로 북동 또는 북서 방향의 주향을 보이며, 남쪽으로 10° 내외의 경사를 가진다. 집괴암은 약 10 m의 두께를 갖는 층으로 바톤반도의 남부 해안을 따라 분포한다. 이들 화산암층을 피복한 현무암질 안산암은 반정질 조직이 우세하며, 반정은 사장석이 가장 많고, 소량의 휘석과 각섬석이 산출된다.

화강암복합체의 초기 관입암체로 생각되는 섬록암은 사장석, 투휘석, 각섬석, 흑운모와 소량의 석영으로 구성되어 있다. 이 암체의 대부분을 차지하는 화강섬록암은 사장석, 석영, K-장석, 각섬석, 흑운모로 구성되어 있다. Lee *et al.* (1996)은 화강암복합체에 대한 암석학적 및 지구화학적 연구에서 이 암체를 생성시킨 마그마는 수직적인 분화양상을 보인다고 하였다.

바톤반도 일대의 광화작용에 대하여 박(1990)과 So *et al.* (1995)은 열수변질된 화산암 내에 발달한 단층대를 충전한 연-아연-석영-방해석맥 천열수광상과 함 황철석-자연황-석영-방해석맥 천열수 광상으로 구분하였다. 이 중에서 연-아연 맥은 중성열수에 의한 견운모 변질대를 수반하며, 이는 하부에서 반암동광상을 형성한 광화용액이 구리를 침전시킨 후, 지각의 틈을 따라 상승하다가 냉각되어 생성된 것으로 추정하였다. 황철석-자연황 맥에서는 광범위한 고령토화작용과 강고령토변질작용이 수반된다. 이는 열수가 지표까지 도달할 때 비등에 의해 이탈된 H₂S와 CO₂가 대기의 산소에

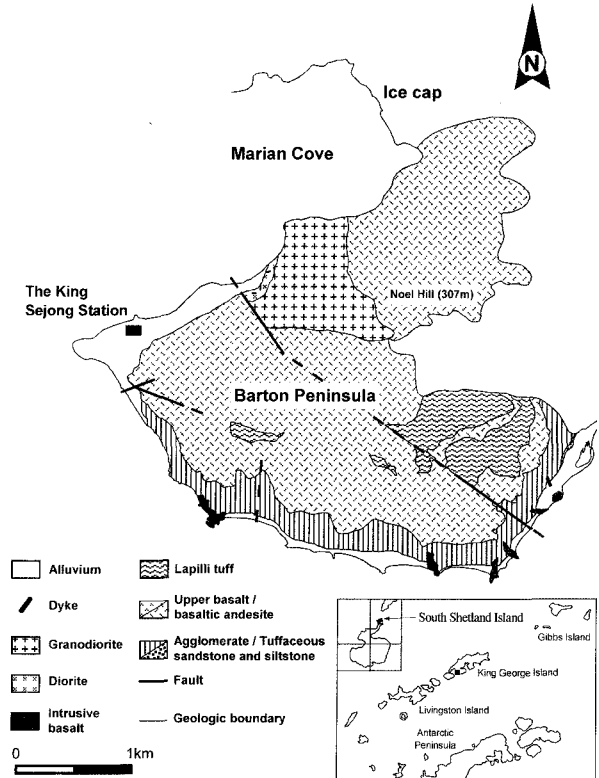


Fig. 1. Geologic map of the Barton Peninsula, King George Island.

의해 산화됨으로서 생성된 산성 황화용액이 기존의 모암과 반응하여 강고령토 변질작용을 형성한 것으로 해석하였다.

Hwang and Lee (1998)는 화강섬록암과 그 주변에서 고온형 필릭(Phyllic) 변질대가 나타남을 보고하였으며, 황과 산소 안정동위원소 연구를 통하여 바톤반도의 광화작용과 모암변질작용은 화강섬록암의 관입과 관련있는 것으로 해석하였다.

3. 열수변질작용

바톤반도 일대의 암석들은 대부분 광범위한 열수작용에 의해 변질되어 있고 부분적으로 여러 변질작용이 중첩되어 있어 변질대를 구분하기도 힘들다. 그러나 반도의 중북부에 노출된 화강암체를 중심으로 반도의 북부가 남부에 비하여 변질 정도가 강하다. 이 연구에서는 화강암체를 중심으로 남부와 북부의 변질작용을 비교하기 위하여 각각의 변질대에서 시료를 채취하였다. 또한 화강암체 접촉부에서의 변질양상을 알아보기 위해 화강암체로부터 일정한 간격으로 시료를 채취하였다 (Fig. 2).

변질광물의 산출상태

바톤반도의 남부와 북부에서 산출되는 대표적인 열수변질

암에 대한 편광현미경 관찰과 X-선 회절분석결과를 토대로 열수변질광물의 산출상태를 기재하면 다음과 같다. X-선 회절분석은 한국해양연구원의 Phillips 회사 제품의 PW 1830 X-선 회절분석기를 사용하였으며, 분석조건은 40kV/30mA의 CuK α X-선을 사용하였다.

바톤반도 남부에는 해안선을 따라 분포하는 집괴암, 응회암질 사암과 니암으로 구성된 화산쇄설암과 이를 피복하고 있는 안산암질 현무암의 경계에 황화광물을 함유한 변질대와 렌즈 상의 거정질 석영- 방해석 맥이 관찰된다. HB02와 HB03 시료는 바톤반도 남서부에 분포하는 안산암질 현무암을 모암으로 하는 변질암의 시료이다. HB02 시료는 장석반정들이 거의 대부분 견운모화 작용을 받아 X-선 회절분석에서 장석의 회절선이 나타나지 않으며 전반적으로 규화작용이 우세하여 석영의 피크가 강하게 나타난다 (Fig. 3). HB03에서는 장석의 견운모화 정도가 HB02에 비하여 약하며 사장석과 견운모의 회절선이 함께 나타나나 견운모의 피크는 HB02에 비하여 약하다 (Fig. 3). 이들 두 시료에서는 모두 황철석 반정들이 많이 분포한다.

HB04와 HB05은 바톤반도 남부에 분포하는 집괴암 내에 렌즈상으로 산출되는 석영맥과 직접 접하고 있는 시료이다. 이들 시료에서는 렌즈상의 거정질 석영 (최대 직경 15 cm)을 중심으로 짙은 회색 또는 흑색의 변질대가 수 cm 내지 수십 cm 폭으로 나타난다. 이 변질암의 구성광물들은 맥과 직접 접한 곳에서는 대부분 큰 결정의 석영으로 이루어져 있어 석영 외의 다른 광물은 관찰되지 않는다 (Fig. 4). 현미경하에서 이들 시료는 사장석이 심하게 변질되어 있으며, 사장석이 용해되어 빠져나간 공간은 석영들이 채우고 있으며, 석영이 성장하고 난 빈 공간은 백운모가 다시 채우고 있다. 변질대의

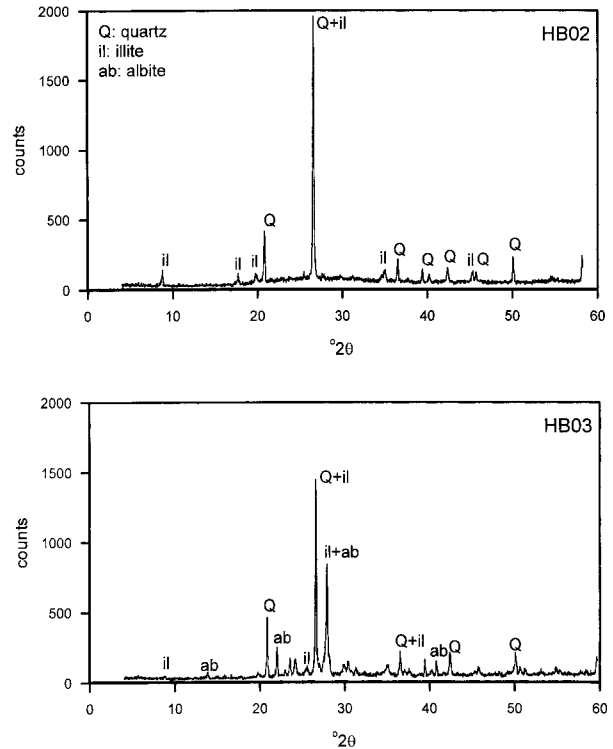


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of rock samples from the southwestern part of the Barton Peninsula.

외각부에서는 석영, 방해석 외에도 고령토와 녹니석이 인지되나 그 양은 매우 적다. 현미경하에서는 매우 작은 석영의 재결정들이 파동소광을 보이며, 미세열극을 따라 심하게 변질을 받아 고령토화 되어있다 (Fig. 5a).

HB06과 HB07, HB16 시료는 앞의 시료에 비하여 규모가 작은 미세 석영맥과 접하고 있는 변질암 시료이다. 이들은 X-선 회절분석결과 석영- 사장석- 녹니석- 방해석으로 이루어져 있다 (Fig. 4). 현미경하에서는 사장석의 반정이 비교적 신선하게 보존되어 있는 반면 각섬석 반정들은 심하게 녹니석화 되어 있어 각섬석은 거의 관찰되지 않는다 (Fig. 5b). 이들 시료에서 산출되는 불투명 광물은 자철석, 티탄철석과 황철석이다.

바톤반도에서 가장 강한 열수변질 작용은 중앙부에 분포하는 화강섬록암의 북동부에서 관찰된다. 특히 시료번호 HB26, HB27, HB28과 HB29는 강한 고령토변질작용이 인지되는 것으로 HB26에서 HB29로 갈수록 육안적으로 볼 때 모암변질의 양상이 심해지는 경향이 현저하다. HB26은 비교적 신선한 현무암질 안산암으로 장석과 각섬석이 반정으로 산출되며, 기질에는 석영과 사장석이 우세하다. 반정 중 장석은 비교적 잘 보존된 반면 각섬석은 녹니석화 되어 있다. 이 시료의 X-선 회절분석 결과에서도 주로 석영과 장석이 인지되고 미약한 녹니석의 피크가 나타난다 (Fig. 6).

HB27 시료는 규화작용이 우세하게 진행된 시료이며 현미

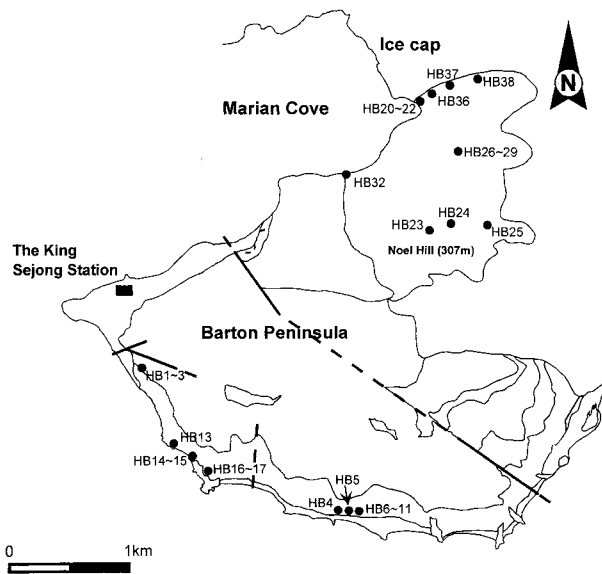


Fig. 2. Sampling location map of the study area.

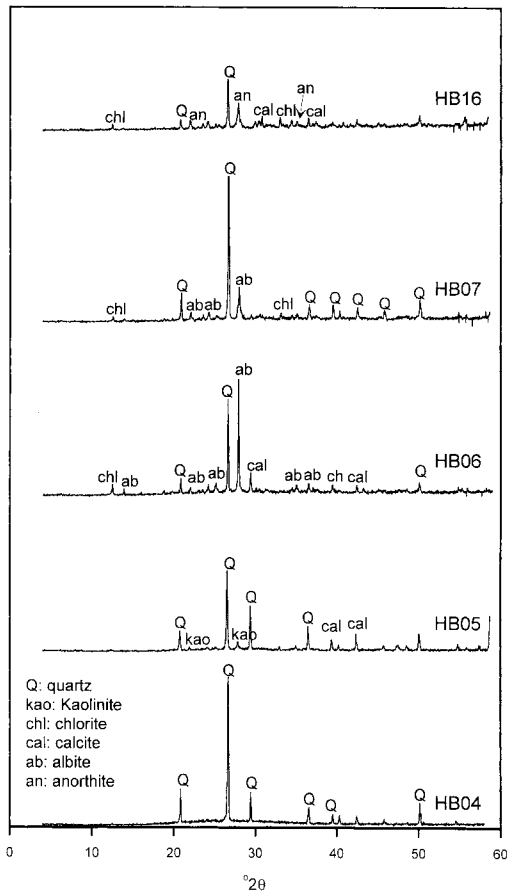


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of rock samples from the southern part of the Barton Peninsula.

경하에서 대부분 재결정된 석영으로 구성되어 있고 장석들은 알바이트화 작용이 우세하게 발달되어 있다. 특히 장석의 연변부에는 새로 성장한 알바이트의 림(rim)들이 발달한다. HB28 시료에서는 녹니석화 작용이 우세하게 일어났으며, 규화작용은 비교적 미약하다. HB29는 가장 강한 점토광물화 작용을 받은 시료로서 현미경하에서 원 광물을 알아보기 힘들 정도로 심하게 변질되어 있다 (Fig. 5c). X-선 회절분석 결과에서도 고령토와 녹염석이 우세하게 나타나고, 장석류는 모두 알바이트화 되어있다 (Fig. 6).

화강섬록암으로부터의 수평적인 모암변질 영향을 알아보기 위해 화강섬록암의 접촉경계로부터 약 1 m 정도 간격으로 시료를 채취하였다 (HB32). 비교적 신선한 화강섬록암인 HB32-1 시료는 석영과 사장석을 주로 하는 광물조성을 보이며, 점토광물로는 약간의 할로이사이트 (halloysite)가 산출된다 (Fig 7). 이와 조금 떨어진 HB32-2는 각섬석과 운모류가 심하게 녹니석화 되어 X-선 회절분석 결과에서 녹니석의 회절강도가 크게 나타났다. 화강암체로부터 약 3 m 정도 떨어진 HB32-3에서부터는 K-변질작용이 인지되며, X-선 회절분석 결과에서는 견운모와 정장석이 나타난다 (Fig

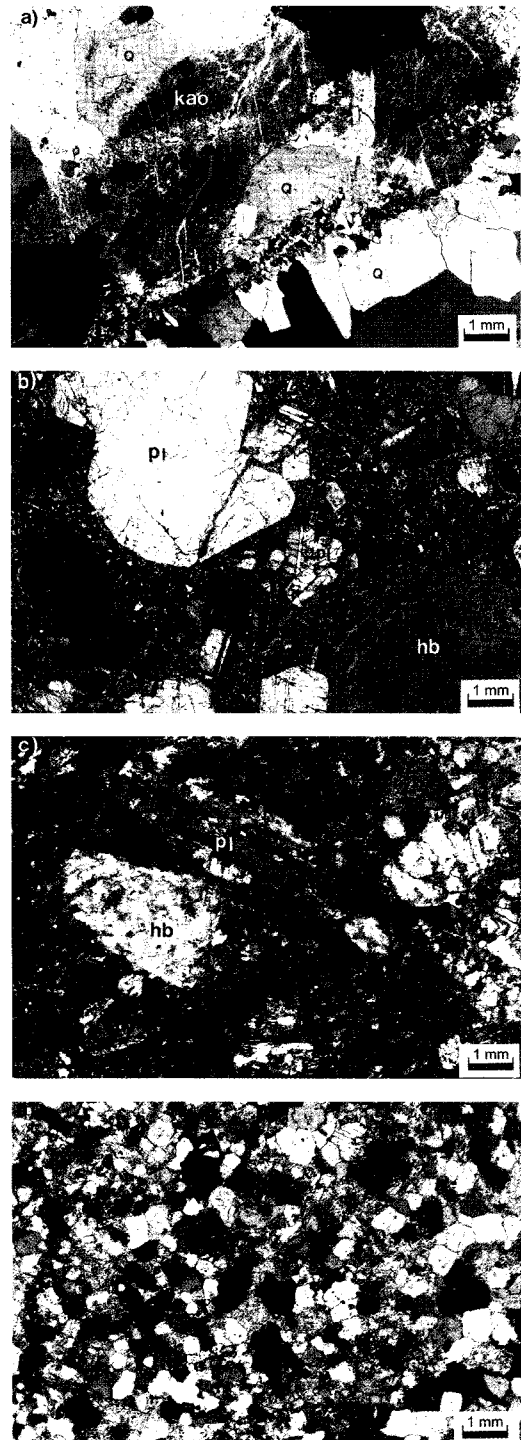


Fig. 5. Photographs of altered rock samples from the Barton Peninsula. a) Re-crystallized quartz and kaolinite replaced quartz along the micro fissure in coarse grained quartz (sample No. HB05, cross), b) Hornblende was altered to chlorite, but plagioclase is relatively fresh (sample No. HB06, cross), c) Hornblende and plagioclase was altered to clay minerals and chlorite (sample No. HB29, cross), d) Highly altered andesite is composed of re-crystallized quartz and clay minerals (sample No. HB32-7, cross).

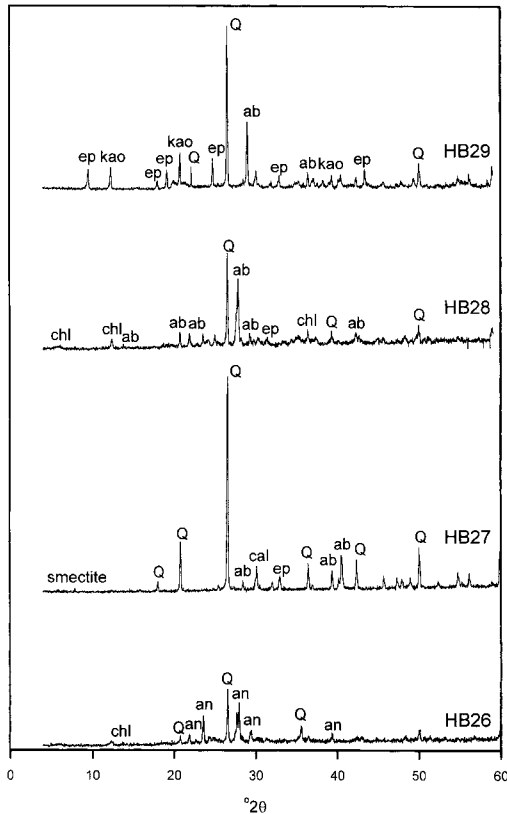


Fig. 6. X-ray diffraction patterns of rock samples from the northern part of the Barton Peninsula. Abbreviations are the same as those in Fig.3 and 4.

7). 현미경하에서도 석영들은 모두 재결정되어 있고 사장석들이 심하게 견운모화 되어있는 것이 관찰된다.

HB32-4 시료에서는 K-변질작용이 보다 우세하게 일어나 상대적으로 석영보다 장석의 피크가 높게 나타나며 견운모의 강도도 세게 나타난다 (Fig. 7). HB32-6 시료에서는 견운모들이 다시 녹니석화 되어 녹니석과 견운모가 함께 나타나며, 알바이트화 작용에 의해 생성된 알바이트도 관찰된다 (Fig. 7). 화강섬록암으로부터 가장 멀리 떨어진 HB32-7 시료에서는 점토광물화 작용과 규화작용이 관찰되며, 현미경하에서 재결정된 석영 외에는 모두 점토광물로 구성된다 (Fig. 5d). X-선 회절분석 결과에서도 고령토와 �멕타이트 (smectite)의 점토광물 등이 나타난다 (Fig. 7).

주성분원소 지구화학 및 K-Ar 연대

모암변질에 따른 주성분 원소의 거동을 알아보기 위해 화학 분석을 실시하였다. 주성분원소 분석은 한국해양연구원의 X-선 형광분석기 (XRF Phillips PW1480)를 이용하여, 이(1994)가 제시한 방법에 의해 분석하였다. 분석결과는 Table 1과 같다. SiO₂의 함량은 신선한 현무암질 안산암에서 54~58 wt.%로서 비교적 좁은 범위의 값을 갖지만 변질 받은 현무암질 안산암은 49~77 wt.%의 넓은 조성 범위를

보인다. 석영맥과 접하고 있는 시료들에서의 SiO₂ 함량은 93 wt.%를 보이는 한 개의 시료를 제외하면 48~68 wt.%의 조성을 갖는다. 신선한 화강섬록암의 SiO₂ 함량은 61~62 wt.% 이고 변질받은 화강섬록암은 65 wt.%로 신선한 화강섬록암에 비하여 높은 값을 보인다. 이러한 경향은 나머지 주 성분원소에서 모두 나타나며, 이는 변질과정에서 주 성분원소의 이동이 많았음을 보여준다. Fig. 8은 SiO₂의 함량 변화에 따른 다른 주 성분원소의 거동을 도시한 것으로 모암 변질 작용에 따른 주 성분원소들의 변화경향을 알 수 있다.

CaO, MgO와 P₂O₅의 함량은 변질작용에 의하여 낮아지는 경향을 보이며, K₂O의 함량은 변질받은 암석에서 높아진 값을 갖는다. Al₂O₃와 TiO₂의 값은 같은 범위의 SiO₂함량 범위에서는 높아진 반면, SiO₂의 증가에 따라서는 특별한 변화 경향은 갖지 않는다. Fe₂O₃는 신선한 암석과 같은 범위의 SiO₂ 함량 범위에서는 높아진 반면, SiO₂가 증가하는 범위에서는 낮아지는 경향을 보인다. Na₂O의 함량변화는 SiO₂의 변화에 따라 불규칙한 변화양상을 나타낸다. 석영맥과 접하

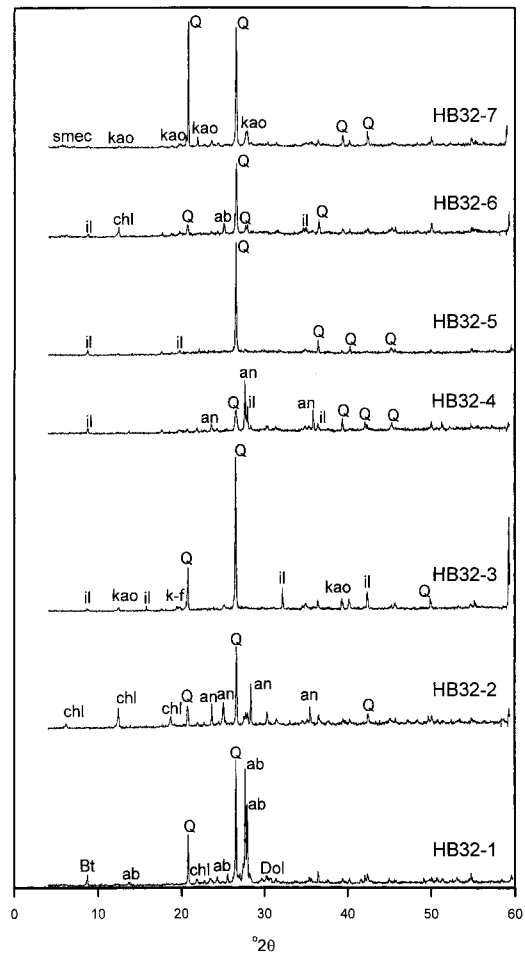


Fig. 7. X-ray diffraction patterns of rock samples around granodiorite of the Barton Peninsula. Abbreviations are the same as those in Fig. 3 and 4.

고 있는 암석에서는 다른 암석과 비하여 Fe_2O_3 와 CaO 의 함량이 매우 높고 Al_2O_3 와 K_2O 의 함량은 상대적으로 낮다.

바톤반도의 모암변질 시기를 알아보기 위해 전암시료를 대상으로 K-Ar 연대를 측정하였다. 전암의 K-정량은 한국 해양연구원의 X-선 형광분석기 (XRF Philips PW1480)를 이용하였다. 표준 시료를 이용하여 계산된 K의 정량 오차는 3%이다. Ar 동위원소의 질량분석은 일본 동경대학 지각화학연구소에서 질량분석기 (modified VG5400)를 이용하였다. 자세한 분석방법은 Nagao and Itaya (1988)와 Nagao *et al.* (1996)을 참조하였다. 연대계산에 사용한 K의 동위원소비와 붕괴상수는 다음과 같이 $\lambda_{\beta} = 4.962 \times 10^{-10} y^{-1}$, $\lambda_{\alpha} = 0.581 \times 10^{-10} y^{-1}$, $^{40}K/K = 0.01167$ (atomic %) 이다 (Steiger and Jäger 1977).

분석결과 바톤반도 남서부의 변질받은 응회암질 안산암의 K-Ar 연령은 42 Ma이고, 반도 남부의 석영맥과 직접 접하고 있는 시료의 K-Ar 연령은 28과 33 Ma이다. 반면 반도의 북동부에서 전반적인 강한 고령토변질작용을 받은 시료에서는 33~35 Ma의 값을 가진다 (Table 2).

4. 토 의

변질작용의 시기

바톤반도 일대에서 산출되는 화성암에 대한 절대연령자료를 정리하면 Table 3 및 Fig. 9와 같다. 킹조지섬의 필데스 반도와 어드밀러티만에 분포하는 화산암의 동위원소 연대는 중생대를 지시하는 것으로 보고되어 있다 (Davis 1982;

Table 1. Major elements composition (wt.%) of fresh and altered rocks from the Barton Peninsula.

Sample No.	Rock type	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ *	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
HB25	fresh	55.77	0.74	17.43	7.64	0.14	3.13	7.68	2.93	1.32	0.28	3.39	100.45
HB26	basaltic	54.87	0.69	17.77	7.71	0.17	3.06	8.72	2.86	0.50	0.21	3.36	99.90
HB37	andesite	57.77	0.70	17.28	7.46	0.13	4.44	9.43	2.88	1.05	0.18	0.23	101.55
HB38		53.99	0.66	17.86	7.41	0.12	3.98	10.27	2.48	0.20	0.17	2.53	99.68
HB02	altered	77.28	0.46	16.70	0.39	0.00	0.52	0.10	0.20	4.65	0.03	0.64	100.98
HB03	basaltic	70.93	0.36	15.17	2.65	0.04	0.63	0.45	4.60	3.26	0.02	1.75	99.86
HB24	andesite	55.14	0.67	17.05	7.71	0.15	4.28	5.91	3.95	1.95	0.20	2.76	99.77
HB36		78.29	0.06	5.65	4.05	0.13	1.59	8.64	0.54	0.11	0.01	1.44	100.51
HB23		68.95	0.67	15.50	3.90	0.22	0.46	3.53	5.66	1.11	0.20	0.55	100.74
HB21		56.54	0.65	17.30	8.05	0.19	5.21	5.89	1.90	0.46	0.13	2.71	99.04
HB22-1		57.55	0.39	14.34	9.39	0.21	2.64	11.92	0.40	0.55	0.45	2.28	100.12
HB27		76.16	0.07	12.55	1.36	0.08	0.11	0.22	3.28	5.47	0.01	0.18	99.48
HB28		57.78	0.70	17.45	7.45	0.16	2.89	5.72	3.57	0.87	0.22	2.79	99.62
HB29		60.64	0.92	22.99	9.97	0.00	0.00	0.28	0.51	0.13	0.12	4.29	99.83
HB32-2		55.02	0.62	17.86	8.82	0.35	7.04	4.14	2.00	0.63	0.20	2.46	99.12
HB32-3		69.66	0.87	16.59	6.64	0.02	0.07	0.38	0.21	2.33	0.11	2.81	99.69
HB32-4		53.92	0.85	20.93	12.42	0.01	0.11	2.70	2.60	2.80	0.16	2.57	99.07
HB32-5		73.07	0.78	15.08	6.83	0.03	0.15	0.47	0.39	3.14	0.12	0.74	100.79
HB32-6		60.23	0.65	21.15	7.43	0.16	1.47	2.82	1.16	2.23	0.13	2.23	99.66
HB32-7		63.03	0.93	18.17	8.83	0.16	2.03	2.58	4.13	1.14	0.27	0.21	101.48
HB33		68.57	0.52	16.99	5.55	0.04	0.35	3.70	2.07	1.07	0.08	1.38	100.32
HB35		48.96	0.53	17.31	9.73	0.26	3.23	13.58	2.45	0.14	0.21	2.80	99.21
HB04-2	wall-rock of vein	92.68	0.09	2.22	1.25	0.03	0.36	1.83	0.01	0.27	0.07	1.56	100.37
HB05		68.44	0.79	8.96	8.07	0.14	0.78	6.60	1.32	1.11	0.12	2.89	99.22
HB06		56.91	1.11	16.09	9.39	0.16	2.99	5.67	2.77	1.17	0.25	3.17	99.67
HB07		66.72	0.64	10.46	11.02	0.07	1.14	3.54	2.28	0.43	0.11	3.21	99.62
HB16A		55.86	0.81	15.08	12.82	0.13	1.59	6.01	3.17	1.05	0.27	2.32	99.08
HB16B		48.20	0.71	17.32	8.38	0.50	1.85	20.90	0.18	0.36	0.29	2.03	100.72
HB01	altered dyke	47.01	0.41	24.19	6.35	0.12	6.21	10.84	2.07	0.14	0.06	2.54	99.93
HB14		59.66	1.07	16.62	10.06	0.38	1.15	2.89	3.00	3.24	0.54	2.19	100.78
HB15		57.81	1.05	13.34	16.87	0.17	2.25	6.30	1.48	1.68	0.38	0.28	101.61
HB30	fresh granodiorite	60.57	0.68	15.17	6.73	0.13	3.11	4.69	3.58	2.48	0.22	1.66	99.01
HB31		62.00	0.63	14.25	6.85	0.13	2.95	4.83	3.30	2.42	0.23	1.63	99.23
HB32-1	altered granodiorite	65.20	0.59	15.64	5.51	0.13	2.09	3.79	4.59	3.19	0.46	0.24	101.42

* Total Fe as Fe₂O₃.

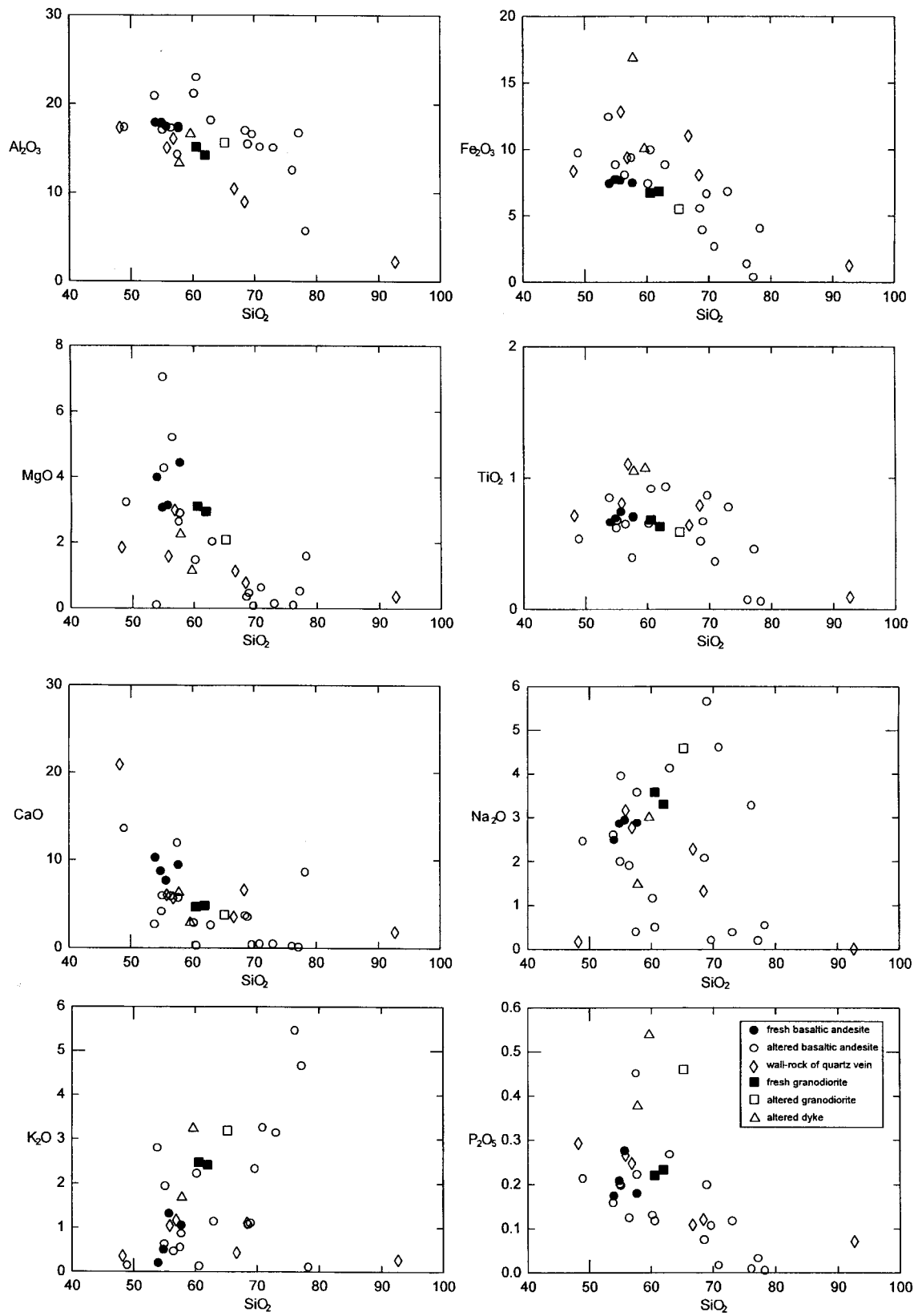


Fig. 8. Variation diagrams showing major elements composition (wt.%) versus SiO_2 of fresh and altered rock samples from the Barton Peninsula.

Table 2. Analytical results of K-Ar whole-rock ages from the Barton Peninsula.

Sample No.	K conc.(wt%)	[⁴⁰ Ar]rad (E ⁵ cc/g)	Atm. ⁴⁰ Ar (%)	K-Ar age(Ma)
HB03	2.70497	441.04 ± 16.52	20.4	41.60 ± 1.97
HB05	0.91964	101.56 ± 3.58	57.1	28.22 ± 1.30
HB06	0.96944	126.05 ± 4.79	43.8	33.17 ± 1.59
HB29	0.10458	13.15 ± 0.50	93.9	33.55 ± 1.62
HB32-2	0.52622	73.53 ± 3.00	51.2	35.39 ± 1.78

Birkenmajer 1983; Birkenmajer *et al.* 1983a). 바톤반도의 화산암류의 연대는 팔레오신에서 에오신으로 알려져 왔으나 (Birkenmajer *et al.* 1983b; Park 1989), 최근에 Ar-Ar 절대연령 측정 결과, 백악기를 지시하는 연대가 보고되어 있다 (김 등 1998; 이 등 1999).

백악기를 지시하는 Ar-Ar 연대에서는 두 개의 plateau age를 보이는 데, 저온부의 plateau age는 신생대 초 팔레오신에서 에오신 사이의 시대를 지시하며, 고온부의 plateau age는 백악기 초기를 지시한다. 바톤반도에서 신생대 초기의 화성활동으로 알려진 것은 백두봉 일대에 관입한 화강섬록암과 섬록암이 있다. 이들의 K-Ar과 Ar-Ar 연령은 모두 신생대 초기를 지시하고 있어 화산암의 Ar-Ar 연령중 저온부의 plateau age는 화강섬록암의 관입에 따른 재 평형 연령으로 해석된다 (이 등 1999).

이번 연구에서 얻어진 모암변질대의 K-Ar 연령은 신생대 초기 에오신과 올리고신 시기를 나타낸다. 이는 바톤반도의 최후기 화성활동인 석영섬록암의 시기와 유사하거나 보다 젊은 연령이다. 모암변질물에 대한 K-Ar 연령 측정은 변질작용에 의해 형성된 K를 함유한 광물들 (정장석, 백운모, 흑운모, 견운모, 각섬석 등)이 열적영향 등에 의해서 변질작용 중 K와 Ar의 동위원소가 재평형을 이룬 이후의 연령을 측정하는 것이다. 이번 연구에서 측정된 연령들은 모암변질 작용 중 견운모의 함량이 많은 시료들로서 주로 K-변질작용에 수반되어 이루어진 것이다. 분석결과 중 바톤반도 남서부의 응회암질 안산암의 절대연령은 화강섬록암의 연대와 유사하여 시공간적으로 보아 화강섬록암의 관입에 따른 직접적인 영향을 받은 것으로 생각된다.

바톤반도 남부의 두 시료 (HB05와 HB06)는 석영맥과 직접 접하고 있는 암석에 대한 K-Ar 연대로서 이들의 연령이 반도 북동부의 강한 고령토변질작용을 받은 시료와 유사한 값을 보인다. 따라서 반도 곳곳에서 관찰되는 렌즈 상의 석영맥은 강한 고령토변질작용과 같은 시기에 있었던 것으로 생각된다. 산성 화강암에 수반된 변질작용의 모델에서 K-변질작용은 화강암에 인접한 곳에서 비교적 화강암의 관입 초기에 형성되는 것으로 알려져있다. 이 연구에서 구해진 K-Ar 연령은 화강암체의 관입연령과 약 10My 정도의 차이가 있어 화강섬록암의 관입에 의한 직접적인 영향이라기 보다는 화강암체를 형성한 모 마그마에서 유래된 열수와 천수가 혼합되

Table 3. Previous reported K-Ar and Ar-Ar radiogenic age of igneous rocks from the Barton Peninsula.

Rock	Kind	Method	Age (Ma)	Source
Andesite	Whole-rock	K-Ar	48.5 ± 4.0	Park (1989)
Altered basaltic andesite	Whole-rock	K-Ar	35.3 ± 3.4	Park (1989)
Lapilli Tuff	Whole-rock	K-Ar	44.2 ± 2.4	Park (1989)
Granodiorite	Whole-rock	K-Ar	45.2 ± 1.9	Park (1989)
Granodiorite	Whole-rock	K-Ar	42.1 ± 1.9	Park (1989)
Quartz Diorite	Whole-rock	K-Ar	45.2 ± 2.4	Park (1989)
Granodiorite 1	Whole-rock	K-Ar	46.0 ± 0.7	Watts (1982)
Granodiorite 2	Whole-rock	K-Ar	50.2 ± 0.6	Watts (1982)
Granodiorite	Whole-rock	K-Ar	46.0 ± 1.0	Smellie <i>et al.</i> (1984)
Quartz Diorite	Whole-rock	K-Ar	55	Grikurov (1977)
Basaltic Andesite	Whole-rock	Ar-Ar	52 ± 1	Kim <i>et al.</i> (1998)
Basaltic Andesite	Whole-rock	Ar-Ar	119 ± 1	Kim <i>et al.</i> (1998)
Basaltic Andesite	Whole-rock	Ar-Ar	53.1 ± 1.5	Kim <i>et al.</i> (1998)
Basaltic Andesite	Whole-rock	Ar-Ar	120.4 ± 1.6	Kim <i>et al.</i> (1998)
Basaltic Andesite	Whole-rock	Ar-Ar	61.4 ± 0.9	Kim <i>et al.</i> (1998)
Diorite	Whole-rock	Ar-Ar	48.4 ± 0.5	Kim <i>et al.</i> (1998)
Basaltic Andesite	Whole-rock	K-Ar	73.9 ± 4.4	Kim <i>et al.</i> (1998)
Basaltic Andesite	Whole-rock	K-Ar	45.9 ± 3.8	Kim <i>et al.</i> (1998)
Granodiorite	Biotite	K-Ar	41.9 ± 0.9	Lee <i>et al.</i> (1996)
Granodiorite	Biotite	K-Ar	41.2 ± 0.9	Lee <i>et al.</i> (1996)
Weaver Peninsula Nunatak	Whole-rock	Ar-Ar	51.5 ± 0.5	Lee <i>et al.</i> (1999)
Weaver Peninsula Nunatak	Whole-rock	Ar-Ar	99.7 ± 0.5	Lee <i>et al.</i> (1999)
Three Brothers Hill	Whole-rock	Ar-Ar	58.6 ± 0.3	Lee <i>et al.</i> (1999)
Three Brothers Hill	Whole-rock	Ar-Ar	113.8 ± 0.4	Lee <i>et al.</i> (1999)
Florence Nunatak	Whole-rock	Ar-Ar	63.6 ± 0.2	Lee <i>et al.</i> (1999)
Florence Nunatak	Whole-rock	Ar-Ar	120.5 ± 0.4	Lee <i>et al.</i> (1999)
The Tower	Whole-rock	Ar-Ar	62.2 ± 0.4	Lee <i>et al.</i> (1999)
The Tower	Whole-rock	Ar-Ar	112.5 ± 0.5	Lee <i>et al.</i> (1999)
Jamec	Whole-rock	Ar-Ar	59.6 ± 0.8	Lee <i>et al.</i> (1999)
Jamec	Whole-rock	Ar-Ar	106.8 ± 0.4	Lee <i>et al.</i> (1999)
Czajkowski needle	Whole-rock	Ar-Ar	58.1 ± 0.3	Lee <i>et al.</i> (1999)
Czajkowski needle	Whole-rock	Ar-Ar	116.2 ± 0.3	Lee <i>et al.</i> (1999)
Copacabana	Whole-rock	Ar-Ar	53.3 ± 0.9	Lee <i>et al.</i> (1999)
Copacabana	Whole-rock	Ar-Ar	108.2 ± 0.4	Lee <i>et al.</i> (1999)

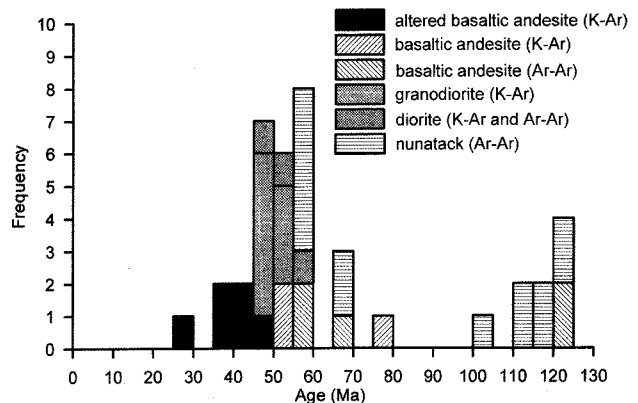


Fig. 9. Histogram of ages (Ma) for K-Ar and Ar-Ar dating from the Barton Peninsula.

는 과정에서 바톤반도 일대에 광역적인 변질작용을 형성한 것으로 생각된다.

변질작용에 따른 광물조합과 원소의 변화

바톤반도 일대의 열수변질작용에 대하여는 반도의 남부에 고령토변질, 필릭 또는 견운모 변질작용이 우세하고 반도의 북동부는 고령토 변질작용 또는 강고령토 변질작용이 우세하다는 보고가 있다 (So et al. 1995; 박 1990). 또한 화강섬록암과 그 주변암에서는 고온형의 필릭 변질작용이 우세하다고 하였다 (Hwang and Lee 1998). 그러나 바톤반도 일대는 전반적인 프로필리틱(prophyllitic) 변질작용이 있었으며, 화강섬록암의 관입에 따른 마그마와 천수의 혼합에 의한 여러 차례의 변질작용이 중첩되어 변질광물의 조합으로부터 모암변질대를 분류하기가 어렵다.

이 연구에서는 반도의 남부와 북부의 변질대에서 산출되는 모암변질물에 대한 광물조성의 차이와 주 성분원소 함량의 차이를 비교하고 화강섬록암 및 석영맥과 직접 접한 변질 시료에 대하여 광물조성과 화학조성을 비교하였다. 반도의 남동부에서 관찰되는 응회암질 안산암에서의 변질작용은 견운모화 작용이 가장 우세하며, 장석들에서 알바이트화 작용이 있었다. 또한 SiO₂의 함량이 전반적으로 높아 규화작용이 우세하였음을 알 수 있다. 이 시료의 K-Ar 연령도 화강섬록암의 절대연령과 유사하여 화강섬록암의 관입과 관련된 견운모화 작용과 규화 작용의 산물로 생각된다. 따라서 반도 남부에서 산출되는 석영맥과 접한 변질시료에서는 약간의 고령토가 관찰되지만 전반적으로 석영맥의 관입과 관련된 규화작용과 각섬석의 변질에 따른 녹니석화 작용이 우세하였음을 알 수 있다.

반도 북부의 강고령토변질대에서 산출되는 신선한 현무암질 안산암에서 강고령토변질암으로 갈수록 점차 고령토의 함량이 증가하며 또한 녹염석의 함량도 증가한다. 반면 녹니석과 견운모의 함량은 감소한다. 이는 변질작용이 진행됨에 따라 사장석과 각섬석은 녹니석화 되고, 알카리장석은 견운모화 된 다음, 녹니석은 녹염석화 되고, 견운모는 고령토화 된 결과로 추정된다. 화강암체의 관입에 따른 모암의 직접적인 영향은 화강암체와 직접 접하는 부분에서는 녹니석화 작용 및 알바이트화 작용이 나타나며, 거리가 멀어짐에 따라 견운모화 작용이 우세하고 보다 먼 곳에서는 고령토화 작용이 우세하다.

화강섬록암과의 거리에 따른 주성분원소의 분포는 Fig. 10과 같다. 화강암과 접한 곳의 암석에서는 녹니석화와 알바이트화의 영향에 따라 Si와 Na의 함량이 일시적으로 증가하며, 반면 Fe, Mg의 함량은 감소한다. 견운모화 작용이 우세한 곳에서는 Al의 함량은 감소하고 K의 함량은 증가한다. 또한 견운모화 작용에 수반된 방해석화 작용과 알바이트화 작용에 따라 Ca와 Na의 함량도 함께 증가한다. 화강섬록암과 비교적 멀리 떨어져 있으며 고령토화 작용이 우세한 시료에서는 Al과 Fe의 함량이 증가한 반면, Ca와 K 함량은 감소한

다. 이는 고령토화 작용, 녹염석화 작용과 황화광물의 증가와 관련된 것으로 생각된다.

총 알카리에 대한 Mg와 Al의 변화도에서 Al의 함량변화에 따른 알카리는 뚜렷한 변화를 보이지 않으나, Mg의 변화에 따른 알카리의 변화는 비례관계를 보여준다 (Fig. 11). 이는 바톤반도의 모암변질작용은 사장석의 변질에 따른 견운모화 작용에서 Al의 함량은 비교적 잘 보존된 반면 각섬석의 녹니석화 작용에서 여분의 Mg은 유체를 통하여 빠져나갔음을 지지하는 것이다. 또한 각섬석이 비교적 잘 보존된 시료에서는 알바이트화 작용이 우세하였고, 녹니석화 작용이 우세한 곳에서는 동시에 견운모화 작용이 우세하여 총 알카리 함량의 변화는 적었던 것으로 판단된다. 그러나 각섬석의 녹니석화가 우세한 지역에서는 견운모화 작용이 미약하여 총 알카리 함량도 함께 감소한 것을 볼 수 있다.

5. 결론

바톤반도에서 산출되는 열수변질 시료의 K-Ar 연령은 남서부에 분포하는 변질받은 응회암질 안산암이 42 Ma이고, 반도 남부의 석영맥과 직접 접하고 있는 시료에서는 28과 33 Ma이다. 또한 북동부에서 강고령토변질작용을 받은 시료는 33~35 Ma이다. 이는 화강섬록암의 절대연령과 약 10 My 정도의 차이를 보이는 것으로 화강섬록암의 관입에 따른 직접적인 영향이라기 보다는 화강암체의 모 마그마에서 유래

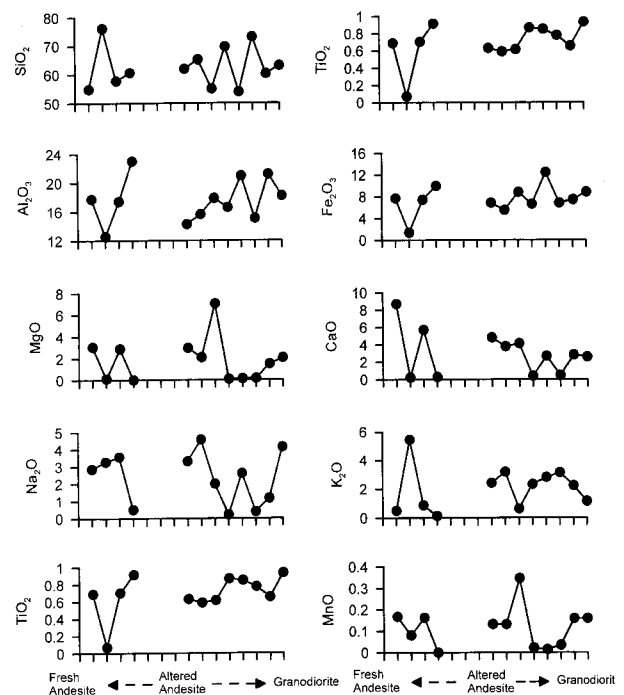


Fig. 10. Diagrams showing variation of major element composition (wt.%) from fresh andesite to granodiorite.

된 열수와 천수가 혼합되는 과정에서 바톤반도 일대에 발생한 광역적인 변질작용의 연령으로 생각된다.

반도의 남동부에서 관찰되는 응회암질 안산암의 변질작용은 견운모화 작용이 가장 우세하며, 장석들에서 알바이트화 작용이 있었다. 또한 SiO_2 의 함량이 전반적으로 높다. 이 시료의 K-Ar 연령도 화강섬록암의 절대연령과 유사한 것으로 보아 화강섬록암의 관입과 관련된 변질작용의 산물로 생각된다. 반도 남부에서 산출되는 석영맥과 접한 암석에서는 약간의 고령토가 관찰되지만 전반적으로 석영맥의 관입과 관련된 규화작용과 각섬석의 변질에 따른 녹니석화 작용이 우세하였음을 알 수 있다.

반도 북부의 강고령토변질대에서 산출되는 시료들에서, 신선한 현무암질 안산암에서 강고령토변질암으로 갈수록 점차 고령토의 함량이 증가하며 또한 녹염석의 함량도 증가한다. 반면 녹니석과 견운모의 함량은 감소한다. 이는 변질작용이 진행됨에 따라 사장석과 각섬석은 녹니석화 되고, 알카리 장석은 견운모화 된 다음, 녹니석은 녹염석화 되고, 견운모는 고령토화된 결과로 생각된다.

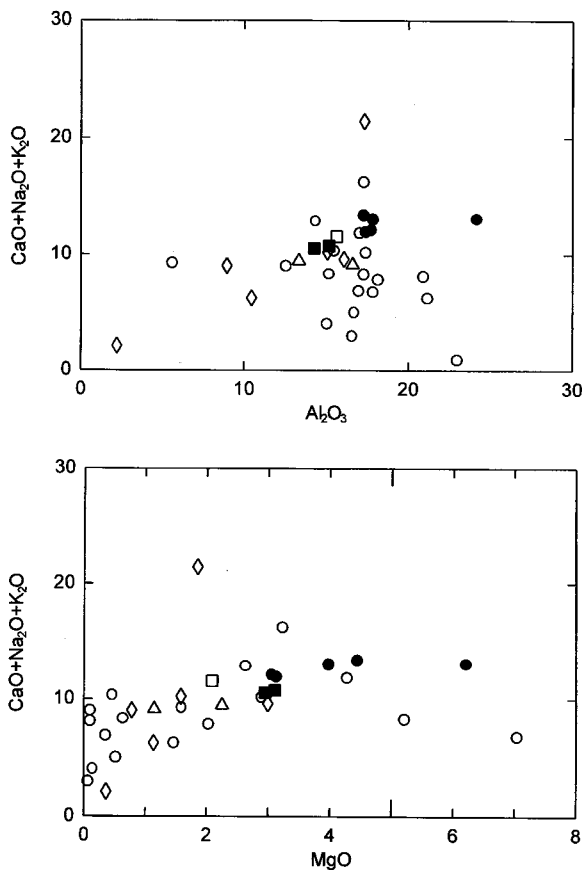


Fig. 11. Diagrams of total alkali ($\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) versus MgO and Al_2O_3 for fresh and altered rocks from the Barton Peninsula. Symbols are the same as those in Fig. 8.

화강암체의 관입에 따른 모암의 직접적인 영향은 화강암체와 직접 접하는 부분에서는 녹니석화 작용과 알바이트화 작용이 있었고 거리가 멀어짐에 따라 견운모화 작용이 우세하고 보다 먼 곳에서는 고령토화 작용이 우세하다. 따라서 바톤반도 일대에서 모암변질작용의 순서는 화산암의 주 구성광물인 각섬석의 녹니석화 작용이 먼저 있었고, 이후 장석류의 견운모화 작용이 있었으며, 최후기에 견운모의 고령토화 작용이 있었던 것으로 추정할 수 있다.

사사

이 연구는 한국해양연구원의 기관교유사업인 '극지환경 특성 및 보존에 관한 연구 (PP00001-03)'의 연구비에 의해 이루어졌다. K-Ar 절대연령을 측정하여 주신 일본 동경대학교의 Nagao 교수님께 깊이 감사드립니다. 이 논문을 심사하여 주시고 많은 조언을 해 주신 서울대학교 이인성 교수님, 충북대학교 이찬희 박사님과 경상대학교 좌용주 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- 김현철, 이종익, 최문영, 허순도. 1998. 남극 킹조지섬 바톤반도에서의 백악기초 화산활동에 대한 지구연대학적 증거. 극지환경 특성 및 보존에 관한 연구. 한국해양연구소 보고서, BSPP 98001-04-1149-7.
- 박맹언. 1990. 바톤반도 천열수 변질작용과 광화작용의 특성에 관한 연구. 남극 과학기지 주변 환경조사(제3차년도), 과학기술처, BSPG 00111-317-7.
- 이종익. 1994. X-선 형광분석기를 이용한 화강암류의 정량 분석 프로그램 개발에 관한 연구. 한국해양연구소 보고서, BSPE 00431-671-7, 43 p.
- 이종익, 허순도, 최문영, 김현철. 1999. 남극 킹조지섬 남서부 화산암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대. 극지환경 특성 및 보존에 관한 연구. 한국해양연구원 보고서, ECPP 99001-03.
- Birkenmajer, K. 1983. Late Cenozoic phases of block-faulting on King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica. *Bull. Acad. Pol. Sci.*, 30, 21-32.
- Birkenmajer, K., W. Narebski, M. Nicoletti, and C. Petrucciani. 1983a. K-Ar ages of the Jurassic volcanics and Andean intrusions of King George Island, South Shetland Islands (West Antarctica). *Bull. Acad. Pol. Sci.*, 30, 121-131.
- Birkenmajer, K., W. Narebski, M. Nicoletti, and C. Petrucciani. 1983b. Late Cretaceous through Late Oligocene K-Ar ages of King George Island Supergroup volcanics, South Shetland Islands (West Antarctica). *Bull. Acad. Pol. Sci.* 30, 133-143.
- Davis, R.E.S. 1982. The geology of the Marian Cove area, King George Island, and Tertiary age for its supposed Jurassic volcanic rocks. *Brit. Antarct. Surv. Bull.*, 51, 151-166.

- Grikurov, G. E., M. M. Krylov, and Y. N. Tsovbun. 1977. Age of rocks of the northern part of the Antarctic Peninsula and the South Shetland Islands. *Inf. Bull. Sov. Antarkt. Eksped.* 80, 30-34.
- Hwang, J. and J. I. Lee. 1998. Hydrothermal alteration and mineralization in the granodioritic stock of the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. *Econ. Environ. Geol.*, 31, 171-183.
- Lee, J. I., H. Kim, J. Hwang, C. Y. Kang, M. J. Lee, and K. Nagao. 1996. Subvolcanic zoned granitic pluton in the Barton and Weaver Peninsulas, King George Island, Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Antarcti Geosciences*, 9, 76-90.
- Nagao, K. and T. Itaya. 1988. K-Ar age determination. *Mem. Geol. Soc. Japan*, 29, 5-21.
- Nagao, K., A. Ogata, Y. N. Miura, and K. Yamaguchi. 1996. Ar isotope analysis for K-Ar dating using two modified-VG5400 mass spectrometers I: Isotopic dilution method. *J. Mass Spectrometry Soc. Japan*, 44, 39-61.
- Park, B.-K. 1989. K-Ar radiometric ages of volcanic and plutonic rocks from the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. *J. Geol. Soc. Korea*, 25, 495-497.
- Smellie, J.L., R. J. Pankhurst, M. R. A. Thomson, and R. E. S. Davies. 1984. The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. *British Antarctic Survey Scientific Report 87, Cambridge*, 85 p.
- So, C.-S., S.-T. Yun, and M.-E. Park. 1995. Geochemistry of a fossil hydrothermal system at Barton Peninsula, King George Island. *Antarc. Sci.*, 7, 63-72.
- Steiger, R.H. and E. Jäger. 1977. Subcommittee on geochronology convention on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology. *Earth Planet. Sci. Lett.* 36, 359-362.
- Watts, D.R. 1982. Potassium-argon ages and paleomagnetic results from King George Island, South Shetland Islands. p. 255-261. In : *Antarctic Geoscience*. ed. by C. Craddock. Univ. of Wisconsin Press, Madison.

Received Feb. 5, 2001

Accepted Mar. 30, 2001