

안동저반 심성암류의 암석성인

황상구* · 장운득¹ · 이윤종²

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과
¹경북대학교 자연과학대학 지질학과, ²경북대학교 사범대학 지학교육과

Petrogenesis of Plutonic Rocks in the Andong Batholith

Sang Koo Hwang*, Yun Deuk Jang¹ and Yoon Jong Lee²

Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 760-749, Korea

¹Department of Geology, Gyeongbuk National University, Daegu 702-701, Korea

²Department of Earth Sciences, Gyeongbuk National University, Daegu 702-701, Korea

요약: 안동저반은 안동, 도산, 풍산, 임하, 녹전 등의 5개 심성암체로 구분되며 이후에 각섬석 반력암의 예안심성암체가 동부에 별도로 노출된다. 이는 각 암체들이 관입·고결이 시간 간격을 두고 맥동적으로 다상정지되었음을 반영한다. 본역에서 암체들은 화학적 성질과 변화에 의하면 예안심성암체를 제외하고 모두 칼크알칼리 계열에 속하며, 모두 조산대의 대륙호 환경에 속한다. 그러나 모든 암체는 동일한 REE 패턴을 가지면서 서로 다른 독자적 변화를 나타내기 때문에 동일 마그마에 의한 분화 산물이 아니라 그 성인과 마그마과정이 달랐다는 것을 지시한다. 또한 주원소와 미량원소에서 예안과 도산심성암체는 기타 암체와는 거의 모든 변화도에서 독자적으로 조성단절, 불일치 변화경향 등의 매우 뚜렷한 차이를 나타낸다. 안동, 풍산와 임하심성암체는 일부 원소에서 연속 변화경향을 나타내지만 몇몇 원소에서 불일치 변화경향이 관찰된다. 따라서 본역의 모든 암체는 각각 서로 다른 조성의 마그마로부터 형성되었음을 지시한다. 안동저반에서 암체들간의 조성변화와 REE 패턴은 동일한 일차 마그마로부터 단순한 분별결정작용에 의해 설명될 수 없고 마그마의 근원물질이 다르거나 불균질 기원을 나타낸다. 안동, 도산과 풍산심성암체에서 $Al_2O_3/(MgO+FeO)$ 몰비가 낮고 $CaO/(MgO+FeO)$ 몰비가 높은 것은 변성현무암질 내지 변성토날라이트질 근원지로부터 용융에 의해 유래되었음을 지시한다. 반면에 임하심성암체에서 $CaO/(MgO+FeO)$ 몰비가 비슷하지만 변성그라이와케 근원암을 지시하는 높은 $Al_2O_3/(MgO+FeO)$ 몰비를 나타낸다.

주요어: 심성암복합체, 조성다양성, 불일치 변화경향, 불균질 기원, 근원암

Abstract: The Andong granitoid batholith represents five temporally distinct episodes (phases) of igneous activity. The batholith represents a plutonic complex of five pulsatively emplaced distinct intrusive multiphases. The petrochemical data show that the plutons fall into calc-alkaline series except for the Yean pluton, and plot within the diagnostic range for I-type origin and continental arc orogenic tectonic setting. Each pluton reveals systematic compositional variations of major and trace elements with SiO_2 or MgO , but different variation trends for some elements and considerably different REE patterns. Thus discontinuous, inconsistent variations in the elements indicate that the five plutons can not be explained by simple fractional crystallization from the same primary magma, but were intruded and solidified from the independent magmas of chemically heterogeneous origin. In the Andong, Dosan and Pungsan plutons, high values of molar $CaO/(MgO+FeO)$ combined with low $Al_2O_3/(MgO+FeO)$ and K_2O/Na_2O ratios suggest a magma originated by dehydration melting of a metabasaltic to metatonalitic protolith. Whereas the Imha pluton show similar values of $CaO/(MgO+FeO)$, but significantly higher ratios of $Al_2O_3/(MgO+FeO)$ and K_2O/Na_2O implying to a metagreywacke protolith.

Key words: Plutonic complex, Compositional diversity, Inconsistent variation trend, Heterogeneous origin, Protolith

*Corresponding author: Tel. 82-54-850-5469, E-mail. hwangsk@andong.ac.kr

서 언

안동저반은 영남육괴의 변성암류를 북동-남서 방향으로 관입하면서 존재한다. 이 저반은 쥬라기 동안에 일어났던 화산호 마그마작용 동안에 정치한 심성암 복합체이다. 각 심성암체의 정치시기는 K-Ar 광물 연대에 의해 검토되었다(황상구 외, 2002). 이 저반은 여러 암상(lithofacies)으로 분대되고 이 암상 대부분은 생성된 마그마가 정치 전에 지각심부에서 진화를 거치면서 맥동적인 관입에 의한 다상 정치(multiphase emplacement)를 나타내는 관입상(intrusive phase)에 의한 것이며(황상구 외, 2002), 일부는 지각 천부의 현재 레벨에 정치된 후의 마그마 분화단계에 의한 공간적인 조성변화에 의한 분화상(differentiated phase)에 의한 것이다(황상구 외, 2000; 황상구 · 이보현, 2002).

화강암질 저반에서 조성의 다양성은 (1) 근원지 조성차이, (2) 다양한 용융 조건, (3) 결정 분별에 의한 분화작용, (4) 고철질과 규장질 마그마 간의 물리·화학적 혼합작용, (5) 지각 혼염에 의해 일어난다(예 Zorpi *et al.*, 1989). 앞의 두 개는 관입상을 나타내고 세 번째는 분화상을 나타내며 뒤의 두 개는 대체로 암체 내에서 혼합과 혼염을 나타낸다. 따라서 심성암체간(inter-pluton)에 조성 차이를 나타낼 뿐만 아니라 심성암체내(intra-pluton)에서도 일반적으로 조성구배를 나타낼 것이며 이 조성 차이의 원인이 무엇이고 그 과정이 어떠한지를 알아내는 것이 중요하다.

화산호 저반의 마그마 근원지를 증명한다는 것은 복잡한 암석화학적 문제를 가진다. 심성암류는 마그마작용이 일어나는 동안에 맨틀, 해양지각과 대륙지각의 용융에 의해 형성될 수 있다(예 DePaolo, 1981; Huppert and Sparks, 1988; Hyndman and Forster, 1988). 토날라이트질 내지 화강암질 칼크알칼리 마그마는 대륙지각의 부화된 부분이 780C 이상의 온도에서 탈수용융에 의해 형성된다고 제안된 바 있다(예 Wolf and Wylie, 1994; Rapp, 1995; Rapp and Watson, 1995; Patino Douce and Beard, 1996). 이 높은 열은 여러 저자가 맨틀에서 대륙지각 내로 열의 유입을 제안하게 하였다(예 Huppert and Sparks, 1988; Bergantz, 1989; Roberts and Clemens, 1993).

안동저반은 이미 그 암상을 정확히 분대하고, 이들이 갖고 있는 내부구조의 철저한 기재와 K-Ar 연대를 측정하여 마그마과정의 일부를 밝힌 바 있다(황상구 외, 2002). 그러므로 이 논문에서는 각 심성암체마다 아직도 검토되지 않은 화학적 성질과 변화를 보고하고

이 자료를 이용하여 마그마 근원지와 생성과정을 검토하고자 한다.

지질개요

안동일대의 지질은 선캄브리아기 변성암류, 중생대 전·중기의 화성암류와 백악기 퇴적암류로 구성된다. 변성암류는 주로 다양한 편마암류와 편암류로 구성되어 있다. 이들은 대부분 여러 종류의 변성사질암, 변성이질암, 변성석회질암 등에 해당되며, 대부분 녹색 편암상에서 녹염석 각섬암상으로 변성되었다(이희천, 1986; 김규상, 1988). 그리고 저반의 중서부 내에 편마암과 각섬암이 큰 현수체(roof-pendent)로 나타난다.

안동저반은 선캄브리아기의 변성암류를 관입하는 심성암 복합체이다. 안동저반의 심성암류는 조성이 석영섬록암에서 화강암 범위이고 입도가 극조립질에서 중립질 범위로서 다양하다. 따라서 이 저반은 구성광물의 함량차이와, 반정 유무, 입도 차이와 색지수 등에 의한 암질로부터 8개 암상으로 분대되었고, 그리고 마그마성 엽리, 내포체 유무, 상호관계, K-Ar 광물연대에 의하면 각섬석 흑운모 석영섬록암, 각섬석 흑운모 토날라이트, 흑운모 화강섬록암, 반상 흑운모 화강암, 반상 흑운모 화강섬록암, 극조립질 흑운모 화강암, 세립질 흑운모 화강암과 각섬석 반려암으로 세분하였다(Fig. 1). 이 가운데 처음의 3개 암상은 서로 매우 점이적인 분화상을 나타내고(황상구 · 이보현, 2002). 기타 암상들은 관입상을 나타낸다(황상구 외, 2002).

백악기 퇴적암류는 경상누층군의 신동층군 상부와 하양층군 하부에 해당된다. 이들은 선캄브리아기 변성암류와 화성암류를 부정합으로 덮고 있거나 단층접촉을 하고 있다. 저반의 동부에서 퇴적암류는 영양소분지 내의 동화치층과 가송동층(이대성 · 이하영, 1963)에 해당되며, 남부에서의 퇴적암류는 의성소분지 내의 하산동층, 진주층, 일직층과 후평동층(윤석규 외, 1988; 김봉균 외, 1988)으로 구성된다.

안동저반에서 변형작용의 흔적은 북동-남서 방향의 압쇄엽리이며, 이 엽리는 이 저반의 북측부 변성암류와의 경계부에 형성된 전단대에 일치되고 저반의 북측부 변성암류에 나타나는 광역엽리와도 대체로 평행하다(Chang, 1990). 그리고 이후에 안동단층이 서북서-동남동 방향으로 지나고(김남장 외, 1970) 웅천단층과 대곡단층이 북북동-남남서 방향으로 달린다(이대성 · 이하영, 1963).

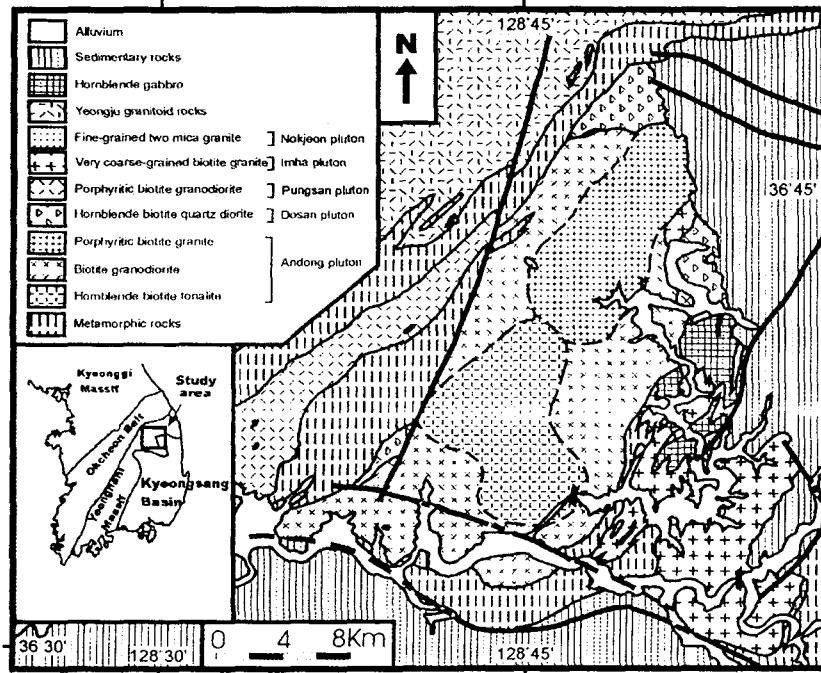


Fig. 1. Generalized geological map of the Andong batholith.

관입암 단위와 연대

안동일대의 심성암류는 조성이 반려암과 석영섬록암에서 화강암 범위에 해당하고 입도가 극조립질에서 세립질까지 존재하며 반정이 있는 반상과 없는 비반상을 이룬 것이 있다. 그래서 이 일대의 심성암류는 조성과 조직에 따라 분류하면 각섬석 흑운모 토날라이트, 흑운모 화강섬록암, 반상 흑운모 화강암, 각섬석 흑운모 석영섬록암, 반상 흑운모 화강섬록암, 극조립질 흑운모 화강암, 세립질 흑운모 화강암과 각섬석 반려암 등의 8개 암상으로 구분된다(황상구 외, 2002).

이 암상들은 관입관계, 광물조성, 광물 연대에 근거하여 6개 심성암체(안동, 도산, 풍산, 임하, 녹전, 예안)로 분류되었다(황상구 외, 2002). 안동심성암체(Andong pluton)는 이 저반에서 가장 넓게 분포되고 각섬석 흑운모 토날라이트, 흑운모 화강섬록암과 반상 흑운모 화강암으로 구성된다. 도산심성암체(Dosan pluton)는 이 저반의 북동부에서 각섬석 흑운모 석영섬록암으로 구성되며, 풍산심성암체(Pungsan pluton)는 이 저반의 서부에서 반상 흑운모 화강섬록암으로 구성된다. 임하심성암체(Imha pluton)는 남동부에 극조립질 흑운모 화강암으로 구성되며, 녹전심성암체(Nokjeon pluton)는 북

서부에 백운모 화강암으로서 소규모로 노출된다. 그리고 예안심성암체(Yean pluton)가 이 저반의 동측부에 각섬석 반려암으로서 노출된다.

K-Ar 흑운모 연대는 안동심성암체에서 211.4 ± 6.0 ~ 196.0 ± 3.7 Ma 범위이다. 이 암체 내에서 흑운모 화강섬록암이 211.4 ± 6.0 Ma이고 반상 흑운모 화강암이 200.3 ± 3.8 Ma이며 각섬석 흑운모 토날라이트가 196.0 ± 3.7 Ma이다. 도산심성암체의 K-Ar 흑운모 연대는 182.6 ± 3.5 Ma이고, 풍산심성암체가 179.2 ± 3.4 Ma이다. 그리고 임하심성암체가 166.2 ± 3.2 Ma이고 예안심성암체가 128.6 ± 2.5 Ma이다(황상구 외, 2002).

이 K-Ar 연대치로부터 얻어진 각 암체들의 정치순서는 구조관계에 의한 순서에 일치된다. 그러므로 안동저반의 화성과정은 이와 함께 구조관계에 관련시키면 각 암체의 에피소드 간에 3.4~13.4 Ma 연대 차이를 가지면서 서로 다른 시기에 맥동적으로 다상 정치되었던 것을 시사하며 이는 각 정치단계에 따르는 관입상으로 구분되었다. 여기서 안동관입상은 주된 관입상이 되고 그외는 부수적인 관입상이 될 것으로 생각된다. 그리고 임하심성암체와 예안심성암체간에는 약 37.8 Ma 차이로 매우 큰데, 이는 다음 장에서 설명되는 성인적 차이와도 결부된다.

Table 1. Major and trace element composition of the plutonic rocks in the Andong batholith.

Rock	Hornblende biotite tonalite					Biotite granodiorite unit					Porphyritic biotite granite				Biotite hornblende quartz diorite		
	HA74	HA83	HA85	HA90	HA91	HA72	HA78	HA82	HA89	HA95	HA75	HA76	HA86	HA87	HA401	HA407	HA417
Spl No																	
SiO ₂	64.20	63.27	68.04	63.21	62.99	69.93	67.42	64.43	65.71	64.72	68.92	70.15	69.67	68.11	50.21	63.95	49.89
Al ₂ O ₃	17.55	17.81	16.82	16.87	17.45	15.46	16.00	17.75	16.73	16.92	15.92	15.74	15.57	15.51	16.65	16.26	18.73
Fe ₂ O ₃ ^t	4.82	4.23	3.22	4.77	4.66	3.17	4.04	4.22	3.82	4.07	2.80	2.68	2.74	3.59	11.11	5.20	8.77
MgO	1.41	1.30	0.92	1.56	1.56	0.81	1.06	1.32	1.27	1.30	0.70	0.59	0.73	1.32	4.45	1.78	3.89
CaO	4.57	4.81	3.56	5.07	4.91	3.51	2.99	4.17	4.52	4.25	3.00	2.77	2.50	3.58	8.42	4.21	8.28
Na ₂ O	4.66	4.76	4.19	4.42	4.32	4.28	3.97	4.57	4.33	4.06	4.34	4.07	4.03	3.78	3.09	3.76	2.77
K ₂ O	1.86	1.90	3.07	1.51	1.84	2.31	3.55	2.36	1.58	2.22	3.15	3.46	3.55	2.86	1.35	1.68	1.41
TiO ₂	0.75	0.69	0.48	0.91	0.73	0.42	0.54	0.65	0.65	0.70	0.37	0.32	0.35	0.54	1.53	0.61	0.87
P ₂ O ₅	0.24	0.22	0.17	0.22	0.22	0.17	0.18	0.23	0.18	0.21	0.14	0.14	0.13	0.14	0.17	0.16	0.16
MnO	0.06	0.05	0.04	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.07	0.19	0.10	0.15
total	100.12	99.04	100.51	98.60	98.74	100.11	99.81	99.75	98.84	98.50	99.38	99.96	99.31	99.50	97.17	97.71	94.92
Ba	848	676	1371	634	895	633	1223	566	618	1009	1081	1122	1306	709	405	689	467
Co	7	8	7	8	9	6	6	7	7	8	5	5	5	7	30	10	20
Cr	30	9	7	11	10	24	43	9	9	9	6	22	6	12	305	171	187
Cu	7	4	9	6	5	8	20	9	9	7	11	10	16	5	21	12	17
Li	19	19	16	20	14	19	37	26	18	22	30	25	30	22	14	42	18
Nb	9	9	6	10	9	5	7	8	7	9	6	7	7	9	-	-	-
Ni	7	8	4	11	6	6	8	7	8	10	4	5	4	6	25	18	23
Sc	5	5	2	5	5	3	4	7	4	4	3	3	3	8	25	14	16
Sr	988	966	836	896	931	724	762	733	907	901	676	641	675	549	536	459	679
V	67	64	44	77	74	38	46	63	61	61	26	22	27	58	239	70	182
Y	13	13	11	15	13	9	10	11	8	11	8	8	8	14	46	25	26
Zn	90	82	68	98	101	60	75	93	80	91	69	59	68	72	104	62	83
Zr	214	174	173	232	193	137	135	195	166	202	175	155	156	126	63	232	86
Rb	43	46	59	37	44	68	80	80	35	44	108	101	100	82	31	51	42

Rock	Biotite hornblende quartz diorite		Porphyritic biotite granodiorite				Very coarse-grained biotite granite					Hornblende gabbro				
	HA441	HA447	HA462	HA466	HA468	HA469	HA5	HA8	HA17	HA48	HA53	HA11	HA45	HA46	HA62	HA63
Spl No																
SiO ₂	64.41	58.52	67.77	70.89	66.95	68.19	73.09	70.53	70.87	68.59	69.34	46.50	41.63	45.67	44.94	44.29
Al ₂ O ₃	15.12	16.47	14.26	13.69	14.50	14.23	14.22	14.72	15.19	16.04	15.58	17.85	16.38	17.84	18.21	19.66
Fe ₂ O ₃ ^t	4.59	6.42	3.25	2.51	3.68	2.84	2.52	2.98	3.53	2.77	3.13	13.20	13.53	13.42	13.24	12.86
MgO	2.02	3.05	0.94	0.65	1.09	0.70	0.44	0.66	0.81	0.85	0.83	5.32	9.78	6.06	5.68	5.55
CaO	4.44	6.05	3.42	2.44	3.85	2.95	1.60	1.98	2.26	2.47	2.63	8.46	10.74	9.07	9.46	10.65
Na ₂ O	2.96	3.15	3.53	3.19	3.46	3.41	3.60	3.57	4.04	4.53	3.88	2.83	1.91	3.01	3.36	2.66
K ₂ O	3.12	2.37	2.13	3.78	2.01	3.73	4.44	4.37	3.75	4.11	4.04	1.93	0.45	0.83	0.74	0.64
TiO ₂	0.55	0.79	0.55	0.44	0.64	0.51	0.23	0.30	0.35	0.47	0.34	1.48	1.98	1.44	1.33	1.52
P ₂ O ₅	0.11	0.14	0.16	0.12	0.20	0.14	0.09	0.11	0.14	0.15	0.13	0.20	0.16	0.19	0.32	0.27
MnO	0.06	0.10	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.08	0.09	0.05	0.07	0.14	0.15	0.14	0.17	0.15
total	97.38	97.06	96.04	97.74	96.41	96.73	100.29	99.30	101.03	100.03	99.97	97.91	96.71	97.67	97.45	98.25
Ba	651	430	792	846	882	1150	1119	1336	1151	1624	1367	717	155	326	273	279
Co	12	17	6	4	8	5	4	6	6	7	7	27	35	32	27	25
Cr	250	324	264	245	231	378	5	5	6	11	26	11	97	14	25	27
Cu	13	13	8	4	5	5	4	5	5	11	30	10	37	34	46	20
Li	16	36	25	16	39	23	11	18	16	39	13	21	14	16	15	9
Nb	-	-	-	-	-	-	3	9	10	4	8	5	5	6	6	7
Ni	17	36	21	21	14	23	6	7	6	11	5	8	40	10	12	8
Sc	8	14	3	2	4	2	2	4	5	3	2	35	59	34	31	37
Sr	408	462	567	440	630	600	289	407	443	845	484	695	444	650	795	726
V	86	133	44	28	50	34	17	28	33	40	36	347	441	377	280	296
Y	18	54	8	7	8	44	8	38	38	8	23	28	29	27	36	38
Zn	53	67	72	65	80	60	27	27	31	56	31	81	72	85	89	96
Zr	182	166	148	144	208	143	109	87	128	142	129	180	49	70	88	157
Rb	125	105	77	103	79	106	61	83	87	64	101	39	9	16	16	12

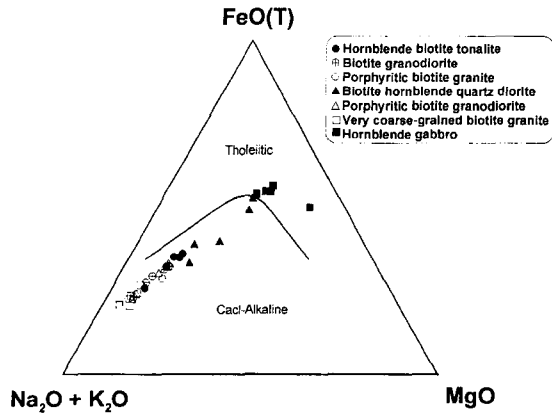


Fig. 2. AFM diagram by Irvine and Baragar (1971).

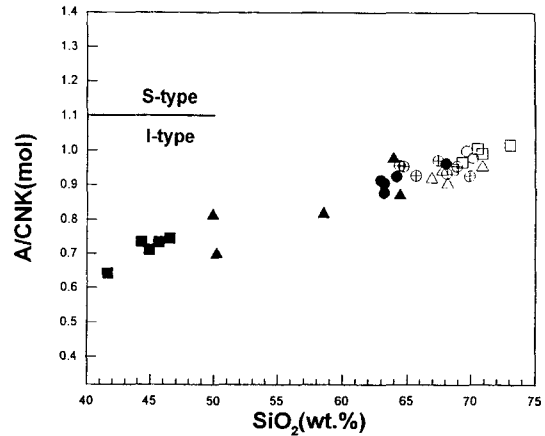


Fig. 3. Molar $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ versus SiO_2 diagram by Chappell and White (1974). Symbols are the same as in Fig. 2.

전암 화학

각 암체의 대표적인 암석에서 나온 주원소 및 미량 원소(Table 1)와 희토류원소 자료(Table 2)로부터 이들의 암석화학적 성질과 변화에 대해 검토하였다.

암석계열과 근원마그마

Irvine and Baragar(1971)의 AFM 삼각도에 기준하면

안동저반에서 암체들은 화학적으로 칼크알칼리 계열에 도시되며 가지런한 선형 변화경향을 나타내지만 반면에 도산심성암체는 이로부터 약간 벗어나고 예안심성암체는 이 계열로부터 크게 벗어나 도시된다(Fig. 2). 즉 안동저반 암석들은 마그마 진화를 통하여 철분이 거의 농집되지 않는 진화 경향을 나타내고 예안심성암

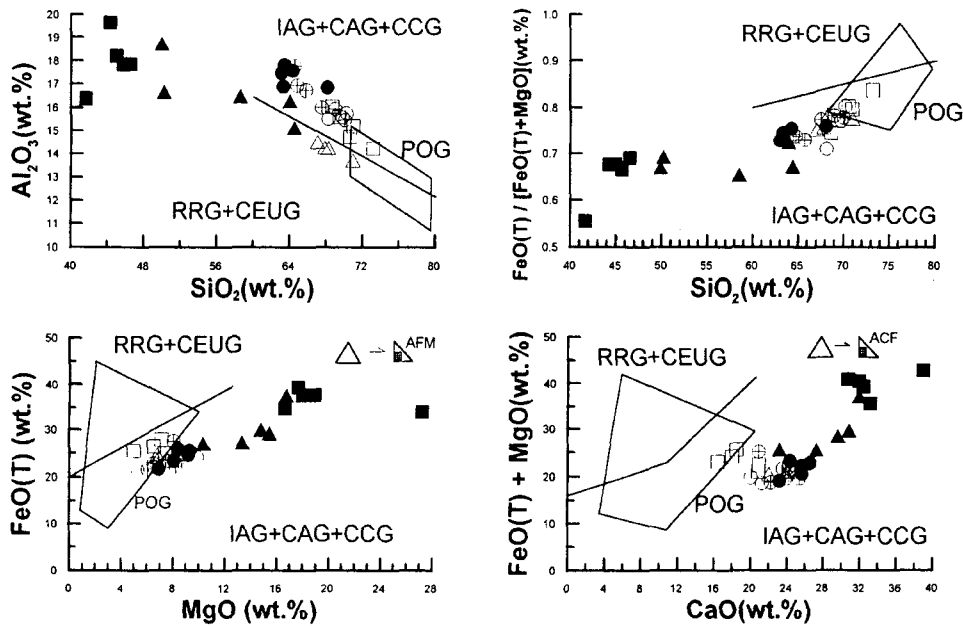


Fig. 4. Tectonic discriminant diagrams by major elements from Maniar and Piccoli (1989). IAG, island arc granitoids; CAG, continental arc granitoids; CCG, continental collision granitoids; POG, post-orogenic granitoids; RRG, rift-related granitoids; CEUG, continental epeirogenic uplift granitoids. Symbols are the same as in Fig. 2.

체는 철분이 다소 농집되는 양상을 나타낸다. 이러한 양상은 MgO 함량을 마그마 진화의 기준으로 할 때 철분함량의 변화 양상에서 잘 나타난다. 즉 이 저반에서 5개 관입상이 대체로 후기 관입단계로 가면서 MgO 및 FeO 함량이 감소하는데 이는 MgO의 함량이 5% 이내에 이를 때까지 철분이 계속 농집되는 대조적인 양상을 나타낸다.

본역에서 각 암체에 대한 근원물질은 Chappell and White(1974)의 A/CNK-SiO₂의 관계도에서 A/CNK 몰비가 대부분 1.0 이하인 메타알루미나질이고 입하심성암체가 1.0 근처에 양쪽에 걸쳐 있지만 거의 메타알루미나질이며, 또한 모두 A/CNK 몰비가 1.1 이하인 I형에 해당된다(Fig. 3). 그러므로 안동저반의 모든 암체와 예안심성암체는 화성기원이라 할 수 있지만, 이 저반 내에는 거의 대부분 산성 심성암들로만 구성되어 있어 이 저반을 유래시킨 마그마는 아마도 지하하부에 존재하던 화성암이 근원암이 되어 기원된 것으로 생각된다 (Lee et al., 1998).

조구조적 위치

지금까지의 주요 조구조 판별도를 본역의 모든 암체들에 적용시켜 이들이 관입할 당시의 조구조 위치를 알아본다.

Maniar and Piccoli(1989)가 주원소를 이용하여 제시한 Al₂O₃-SiO₂, FeO/FeO' + MgO - SiO₂, FeO - MgO 과 FeO' + MgO - CaO의 표준화 상관도에서 모든 암체는 대체로 도호 + 대륙호 + 대륙충돌 영역, 즉 조산대 환경에 도시된다(Fig. 4). 그런데 입하심성암체는 대체로 조산대 중에서도 후조산대 근처에 떨어진다.

Y, Nb, Rb 등 미량원소는 마그마작용에 특히 민감하기 때문에 조구조 판별에 흔히 이용된다. 암체들은 Y-Nb의 상관도에서 모두 화산호 + 동시충돌 영역에 도시된다(Fig. 5A). 그러나 화산호와 동시충돌 영역 간의 판별은 Y-Nb 그림에서 거의 불가능하다. 따라서 Nb + Y에 대한 Rb의 상관도에 적용시키면 모든 암체들은 화산호 영역에 도시된다(Fig. 5B).

희토류원소에서도 이 저반의 모든 암체들은 LREE가 크게 부화되고 HREE가 고갈되어 위로 오목하게 강하게 분별되는 LREE/HREE 비((La/Lu)_n: 평균 22.4)를 나타내며(Fig. 6), 이러한 패턴은 본역의 암체들이 화산호에서 형성되었음을 반영한다(Wilson, 1989). 그러나 이들은 각 심성암체내에서 체계적인 변화를 보이지 않 심성암체간에서 체계적인 것을 찾을 수 없다. 도산 심성암체는 LREE/HREE 비가 다소 낮고((La/Lu)_n: 4.1~23.7, 평균 9.1) 예안심성암체는 더 낮은 양상을 나

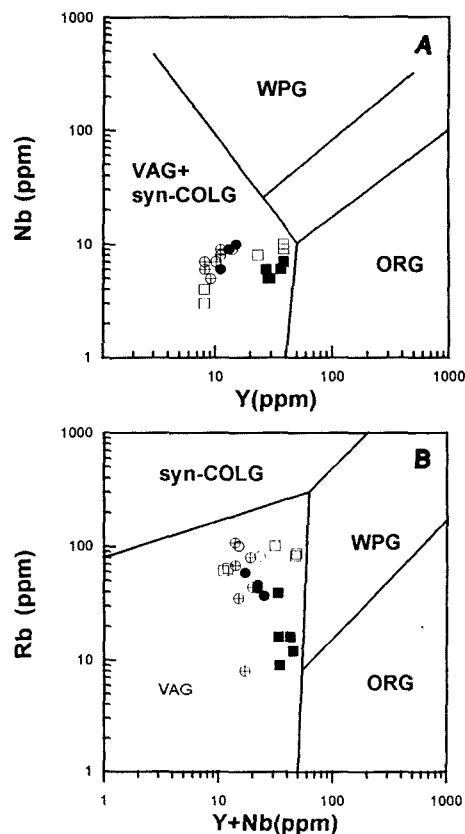


Fig. 5. Tectonic discriminant diagrams by trace elements Nb, Y and Rb from Pearce et al. (1984). WPG, within plate granite; VAG, volcanic arc granite; syn-COLG, syn-collisional granite; ORG, oceanic ridge granite. Symbols are the same as in Fig. 2.

타낸다((La/Lu)_n: 1.5~5.5, 평균 4.0). 그리고 안동심성암체, 풍산심성암체와 입하심성암체는 LREE/HREE 비가 매우 커서 강한 분별 양상을 나타내지만 안동심성암체에 비하여((La/Lu)_n: 30.4~37.5, 평균 34.6) 풍산심성암체는 훨씬 더 강하고((La/Lu)_n: 10.0~74.7, 평균 55.0), 입하심성암체가 보다 약한 분별을 나타낸다((La/Lu)_n: 10.0~26.4, 평균 17.1). 그러므로 본역에서 심성암체들은 섭입대 위에서 생성되었지만 각각 성인이 서로 다르거나 진화과정이 달랐음을 나타낸다.

조성변화와 무리

주원소 중에 SiO₂ 조성은 41.6~73.1% 범위로서 반려암에서 화강암 조성에 이른다(Table 1). 안동심성암체는 토날라이트에서 화강암의 조성범위(63.0~70.2%)이며, 도산심성암체는 반려암에서 화강섬록암 조성범위

Table 2. Rare earth element concentration (ppm) of the plutonic rocks in the Andong batholith.

Spl No	HA74	HA72	HA78	HA76	HA401	HA407	HA417	HA441	HA447	HA462	HA466
La	43.26	26.04	25.85	34.85	21.80	69.60	18.50	12.60	33.10	69.00	41.60
Ce	88.00	54.53	55.13	69.49	65.90	137.10	47.70	36.50	80.40	138.60	85.30
Pr	10.02	6.19	6.46	7.62	7.26	14.96	5.28	3.85	9.21	15.07	9.24
Nd	34.40	21.00	22.80	25.00	45.40	52.00	27.30	20.50	48.30	53.30	34.00
Sm	5.03	3.05	3.45	3.48	9.81	8.18	5.58	4.49	10.88	7.93	5.65
Eu	1.40	0.84	0.97	0.96	2.33	1.63	1.57	0.93	1.62	1.75	1.34
Gd	3.46	2.20	2.35	2.31	8.31	5.73	4.53	3.58	9.20	4.07	3.14
Dy	2.12	1.41	1.50	1.41	8.14	4.89	4.34	3.27	9.72	1.94	1.71
Ho	0.39	0.27	0.26	0.27	1.74	1.14	1.01	0.78	2.04	0.54	0.46
Er	0.87	0.64	0.57	0.58	4.66	2.91	2.64	1.96	5.41	1.12	0.94
Yb	0.78	0.56	0.54	0.60	3.69	2.07	2.12	1.53	3.63	0.61	0.37
Lu	0.12	0.09	0.08	0.10	0.55	0.30	0.34	0.25	0.49	0.10	0.07
REEs	189.85	116.82	119.96	146.67	179.59	300.51	120.91	89.24	214.00	294.03	183.82
(La/Lu) _n	37.46	30.35	34.04	36.41	4.08	23.70	5.55	5.23	6.92	74.68	63.05
Spl No	HA468	HA469	HA5	HA8	HA17	HA53	HA11	HA45	HA46	HA62	HA63
La	59.60	41.50	29.57	58.16	36.45	34.53	16.92	4.16	14.95	18.76	14.82
Ce	120.00	86.80	50.58	103.20	67.51	64.99	37.46	13.54	36.10	45.83	39.45
Pr	13.09	9.35	5.22	11.11	7.68	6.80	5.03	2.34	4.56	5.94	5.57
Nd	47.00	39.40	15.60	34.10	24.60	21.70	19.50	13.40	19.30	25.90	25.10
Sm	7.05	7.96	2.36	6.40	4.63	3.57	4.30	3.83	4.23	5.65	5.58
Eu	1.57	1.91	0.73	0.92	0.84	0.88	1.24	1.34	1.34	1.73	1.85
Gd	3.76	6.24	1.70	5.63	4.17	3.18	4.44	4.86	4.46	5.96	6.15
Dy	1.99	6.37	1.02	5.18	4.14	3.05	3.74	4.73	4.30	5.62	5.95
Ho	0.51	1.48	0.21	1.12	0.94	0.63	0.83	0.98	0.89	1.17	1.26
Er	1.06	4.16	0.53	2.89	2.67	1.59	2.25	2.50	2.29	2.98	3.22
Yb	0.47	3.36	0.63	2.54	2.61	1.50	2.04	2.00	2.07	2.65	2.87
Lu	0.09	0.43	0.11	0.35	0.38	0.24	0.32	0.30	0.33	0.41	0.46
REEs	256.19	208.96	108.26	231.60	156.62	142.66	98.07	53.98	94.82	122.60	112.28
(La/Lu) _n	72.24	9.98	26.35	17.27	9.95	14.94	5.52	1.45	4.72	4.74	3.35

(49.9~64.4%)이고 풍산심성암체는 거의 화강섬록암 조성범위(66.9~70.9%)이다. 그리고 임하심성암체는 거의 화강암 범위(68.6~73.1%)이고 예안심성암체는 반력암의 조성범위(41.6~46.5%)이다. 암체들 중에 조성범위가 가장 넓은 것은 도산심성암체로서 무려 14.5% 차이를 나타내고 그 다음은 안동심성암체로서 7.2%의 넓은 차이를 나타낸다. 그러나 다른 암체들은 풍산심성암체가 4.9%, 임하심성암체가 5.5%와 예안심성암체가 4.9%로서 좁은 차이를 나타낸다.

각 암체의 마그마과정의 차이를 이해하기 위해 하커도를 사용하여 고찰한다. 안동심성암체에서 SiO₂가 증가함에 따라 MgO, MnO, Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₂, P₂O₅와 CaO 등의 조성은 대체로 각섬석 흑운모 토날라이트로부터 흑운모 화강섬록암과 흑운모 화강암으로 점차 연속적으로 감소하는 선형 변화경향을 나타낸다(Fig. 7).

이 선형 변화경향은 SiO₂가 감소 부분에서 차례로 도산심성암체와 예안심성암체로 연장되며, SiO₂의 증가 부분에서 임하심성암체로 연속된다. 이와 반대로 K₂O와 Na₂O 등은 SiO₂의 증가에 따라 안동심성암체에서 각섬석 흑운모 토날라이트로부터 반상 흑운모 화강암으로 가면서 다소 산재되지만 연속적으로 증가되는 선형 변화경향을 나타내며, 오른쪽으로 임하심성암체가 연속되고 왼쪽으로 차례로 도산심성암체와 예안심성암체가 연속된다. 그러나 도산심성암체와 예안심성암체는 이 선형 변화경향 내에서 SiO₂의 조성차이가 있어 약간의 간격을 두면서 불연속적인 단절을 나타낸다. 또한 암체에 따라 일부 주원소의 조성차이를 나타낸다. 즉 SiO₂ 조성이 겹치는 부분에서 도산심성암체는 안동심성암체의 토날라이트에 비해 MnO와 K₂O가 많고 Al₂O₃, TiO₂, P₂O₅와 Na₂O가 적음을 알 수 있다. 이러

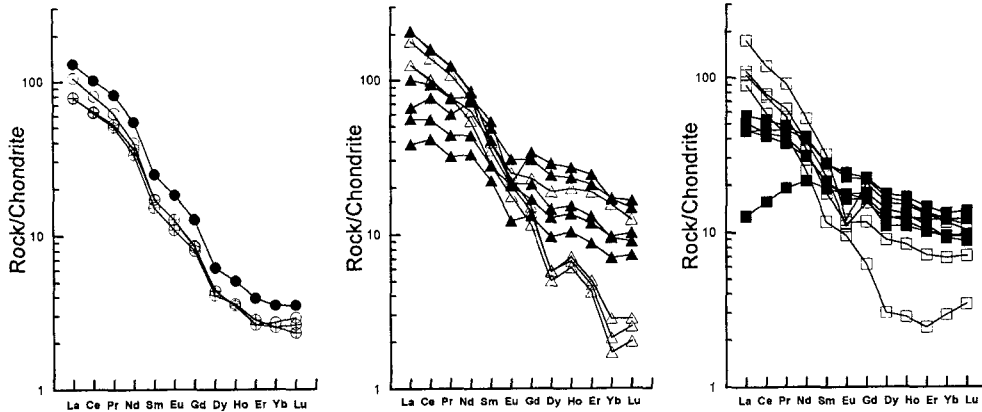


Fig. 6. Chondrite-normalized REE patterns for the granitoids in the Andong batholith. Symbols are the same as in Fig. 2.

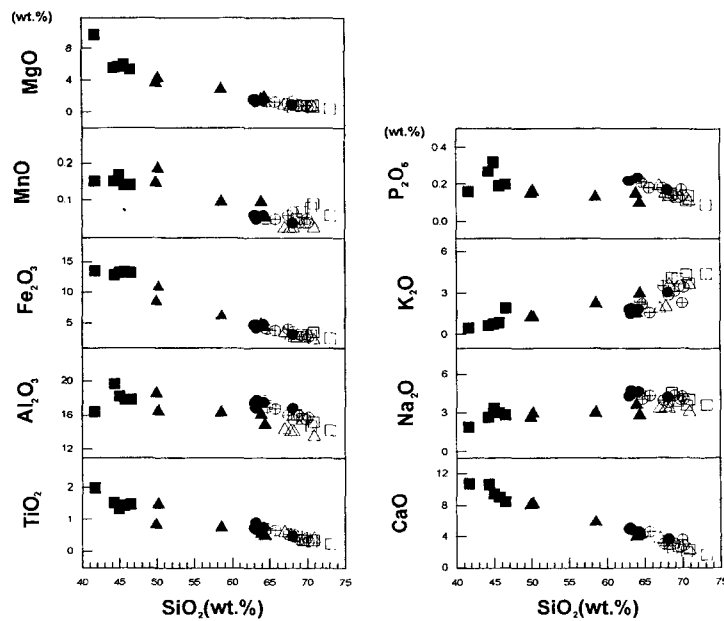


Fig. 7. Harker's diagram composite of major elements with SiO₂ content. Symbols are the same as in Fig. 2.

한 차이는 AFM 그림의 칼크알칼리 영역 내에서도 도산심성암체가 기타 다른 암체들과 뚜렷한 불일치 변화 경향을 나타낸다(Fig. 6). 풍산심성암체는 안동심성암체의 화강섬록암에 비해 MnO, Al₂O₃, K₂O와 NaO가 적음을 알 수 있는데 이 조성차이는 풍산심성암체가 안동심성암체의 화강섬록암에 일치되지 않고 약간 아래에서 이에 평행한 불일치 변화 경향을 나타낸다. 또한 임하심성암체는 안동심성암체의 반상 화강암에 비해 MnO와 K₂O가 많은 불일치 변화 경향을 인지할 수

있다. 이러한 조성차이에 의한 불일치 경향은 회토류 패턴의 차이에서와 같이 안동심성암체가 도산, 풍산과 임하심성암체가 각각 다른 화학적 특징을 가진 마그마로부터 유래되었음을 알 수 있고 각 암체가 성인적으로 관계가 없던지 아니면 관련성이 있더라도 마그마 과정이 달랐음을 암시하는 것이다.

미량원소에서 Cu, V, Sc, Co 등은 MgO의 증가에 따라 연속적으로 증가하는 선형 변화 경향을 보인다. 반면에 Ni, Cr, Li, Sr, Ba, Rb, Zr, Y, Zn, Nb 등의 기

타 미량원소들은 MgO의 증가에 대하여 산재되지만 암체마다 혹은 몇 개 암체끼리 무리를 이루며 별도의 불일치 변화경향을 나타내는 것을 발견할 수 있다(Fig. 8). 즉 도산과 예안심성암체는 MgO가 증가함에 따라 모든 미량원소에서 분리되어 무리를 이루고 별도의 불일치 변화경향을 나타낸다. 그러나 안동, 풍산과 임하심성암체는 다같이 MgO가 적어지면서 함께 무리를 이루고 같은 변화경향을 나타낸다. 한편 이 세 암체는 일부 미량원소에서의 조성차이에 의한 불일치 변화경향을 인지할 수 있다. 즉 풍산심성암체는 다른 두 암체에 비해 Ni와 Cr이 많아서 이들로부터 분리되는 불일치 변화경향을 보여주고 임하심성암체는 다른 두 암체에 비해 Y가 더 많고 Zn이 더 적어서 이들로부터 독립되는 불일치 변화경향을 보여준다.

마찬가지로 미량원소들은 SiO₂가 증가할 때 Cu, V, Sc, Co 등이 연속적으로 감소되는 선형 변화경향을 나타내고, Ni, Cr, Li, Sr, Ba, Rb, Zr, Y, Zn, Nb 등의 기타 미량원소들은 SiO₂의 증가에 따라 암체마다 혹은 암체들끼리 무리를 이루며 일치되지 않는 별도의 변화경향을 나타낸다(Fig. 9). 즉 도산심성암체와 예안심성암체는 모든 미량원소에서 분리되어 독자적인 불일치

변화경향을 보인다. 그러나 안동심성암체, 풍산심성암체와 임하심성암체는 SiO₂가 증가함에 따라 함께 무리를 이루고 불규칙적이지만 별도의 변화경향을 나타낸다. 한편 이 세 암체는 미량원소에 따라 조성차이를 보이는 불일치 변화경향을 나타낸다. 즉 풍산심성암체는 Ni와 Cr이 다른 두 암체보다 많으며, 임하심성암체는 다른 두 암체보다 Y이 더 많고 Zn이 더 적어서 불일치 변화경향을 나타낸다(Fig. 9).

각 심성암체들은 Ba-Sr/Nd 상관도에서 각기 무리를 지어 가장 쉽게 구분된다(Fig. 10A). 풍산심성암체는 Ba와 Sr/Nd가 동시에 가장 낮고 안동심성암체는 Ba와 Sr/Nd가 동시에 높다. 임하심성암체는 Ba가 가장 높고 Sr/Nd가 낮으며, 풍산심성암체는 Ba가 높고 Sr/Nd가 가장 낮다. 임하심성암체는 Ba가 가장 낮고 Sr/Nd가 가장 높다. 또한 Sr/Y-SiO₂ 상관도에서도 각 심성암체가 무리를 지어 구분된다(Fig. 10B).

그러므로 조성변화에서 심성암체내에서 체계적인 변화를 보이지만 심성암체간에 불일치 경향을 보이고 별도로 무리를 짓는 체계적인 양상은 정치후 원소이동을 의미하지 않으며 각 심성암체가 야외에서 관입관계라는 것을 지지해주고 서로 독립적인 조성의 마그마로부

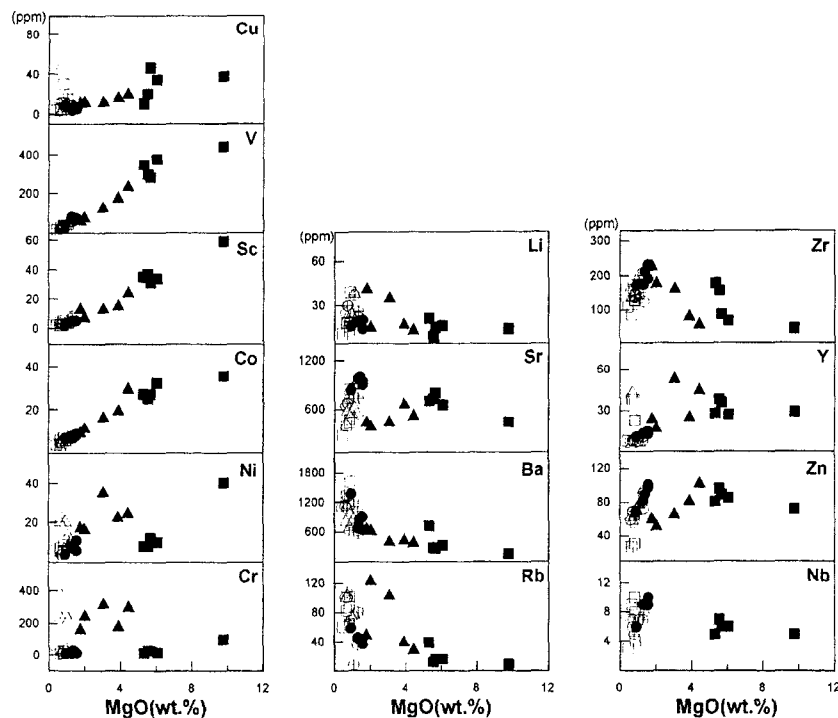


Fig. 8. Harker's diagram composite of trace elements with MgO content. Symbols are the same as in Fig. 2.

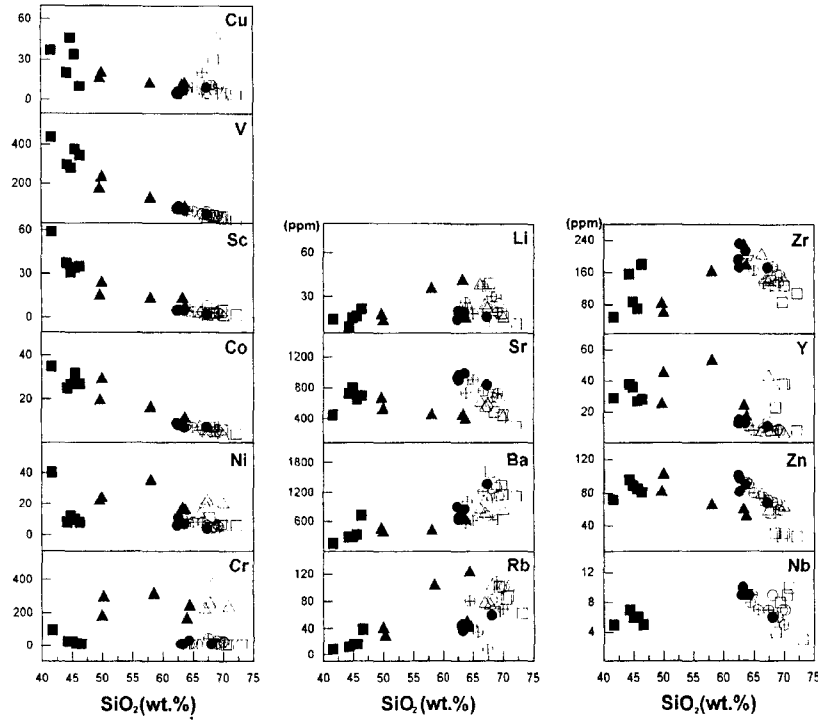


Fig. 9. Harker's diagram composite of trace elements with SiO₂ content. Symbols are the same as in Fig. 2.

터 유래되었음을 지시한다. 또한 예안심성암체는 다른 암체들과 성인적 연관성이 전혀 없으며, 이를 제외한 다른 암체들은 마그마 환경이 같을지라도 성인적으로 관계가 없던지 아니면 관련성이 있더라도 마그마과정 이 달랐음을 암시한다. 그 이유는 위에서 언급한 바와 같이 예안심성암체를 제외한 모든 암체가 같은 조구조 환경에서 마그마계열이 동일하기 때문이다.

토 의

시간에 따른 화성활동의 구분

본역은 안동, 도산, 풍산, 임하, 녹전심성암체와 예안 심성암체 등의 6개 암체로 구성되고 이들은 정치시기가 각기 다르다. 그래서 이 암체들은 여섯 번의 관입 단계에 따라 맥동적으로 정치했던 별도의 에피소드를 나타내기 때문에 각기 안동, 도산, 풍산, 임하, 녹전관 입상과 예안관입상으로 나눌 수 있었다. 그리고 화학적 자료에 의하면 이들 각 관입상은 관입시의 조구조 환경이 화산호 마그마작용에 의해 생성된 산물이었다. 또한 이 저반의 심성암체는 대륙충돌의 산물에 해당되는 S-형이 아니고 조산운동의 산물에 해당되는 I-형이

라는 것을 알 수 있었다(Lee and Lee, 1991; Lee *et al.*, 1998; 이보현, 1999). 그러나 예안심성암체를 제외한 안동저반의 모든 암체는 칼크알칼리 마그마로부터 형성된 산물이다.

화산호 환경에서 나온 심성암은 계열에 따라 이들의 주원소와 광물조성이 체계적으로 변화한다. 일반적으로 대양호나 대륙호 등의 화산호에서 나온 칼크알칼리 심성암은 Streckeisen의 분류도에서 석영섬록암, 토날라이트, 화강섬록암, 석영몬조니암 영역에 일차적으로 도시되고, 특징적인 고철질 광물은 각섬석과 흑운모를 가진다(Peccerillo and Taylor, 1976). 따라서 안동저반의 암체들은 각섬석 흑운모 석영섬록암, 각섬석 흑운모 토날라이트, 흑운모 화강섬록암, 흑운모 화강암, 복운모 화강암으로 구성되고 고철질광물로서 흑운모와 각섬석을 포함하기(황상구 외, 2002) 때문에 대륙호에 속함을 알 수 있다.

요약하면 이 저반의 암석은 도호, 대륙호 혹은 대륙충돌 화강암 중에서도 대륙호 조구조 환경에 속하는 것(Lee and Lee, 1991; Lee *et al.*, 1998; 이보현, 1999)으로 생각할 수 있다. 왜냐하면 대륙충돌 암석에 속하지 않는다 것은 Rb-(Y + Nb) 분별도에서도 알 수

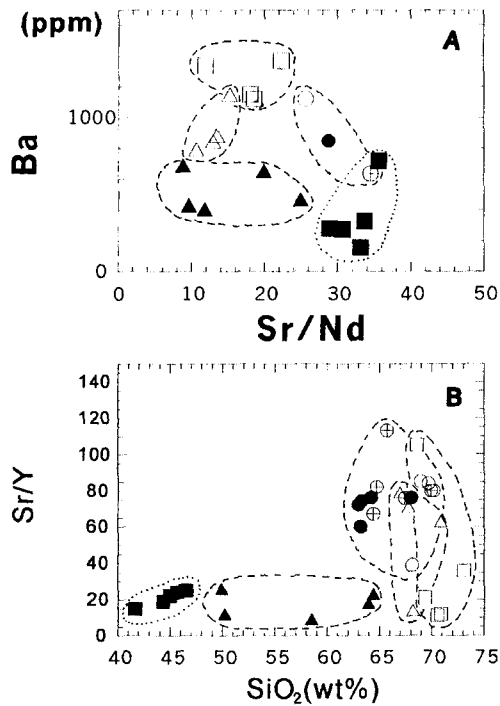


Fig. 10. Ba versus Sr/Nd diagram (A) and Sr/Y versus SiO₂ diagram (B) from I-type granitoids in the Andong batholith. Symbols are the same as in Fig. 2.

있었기 때문이다(Fig. 5B). 그리고 야외 자료에 의하면 도호에서 필수적으로 나타나야 할 대양지각의 흔적이 발견된 바 없고 주변에 대륙을 지시하는 섀캄브리아가의 고변성암이 대규모로 둘러싸고 있기 때문이다. 따라서 대륙충돌과 도호에 대한 조구조 환경은 배제되어야만 한다. 이러한 환경은 영주저반에서도 동일한 양상을 나타낸다(황상구 외, 1999). 그러나 영주저반은 전암 대자율 값과 불투명광물의 조성으로부터 티탄철석계열에 속해 환원환경이지만, 반면에 안동저반은 자철석계열에 속해 산화환경을 나타내기(Lee and Lee, 1991; Jin *et al.*, 2001) 때문에 서로 성인적으로 상당히 다르다는 것을 지시한다. 또한 Lee and Lee(1991)의 Fig. 3에서 영주저반은 안동저반에 비해 Fe₂O₃, Na₂O, P₂O₅가 더 낮고 MgO가 더 높아 동원 마그마가 아니라는 것을 지시한다. 본역은 대륙호가 형성되는 조산대 조구조적 환경에서 먼저 안동관입상이 관입되었고 도산, 풍산, 임하, 녹전관입상이 단계적으로 관입되면서 점차 후조산대 조구조 환경으로 접근되면서 관입되었음을 지시한다. 그리고 이후에 성인이 완전히 다른 예안관입상이 이 저반의 동측부에서 관입되었다.

시공간적 조성변화

안동저반 내에서 연대가 다른 암체들의 공간적 분포는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 하나의 주요 경향을 인지할 수 있다. 이 저반에서 관입상들이 일반적으로 안동관입상을 중심으로 하여 왼쪽으로 회전하면서 차례로 젊어진다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 대체로 안동저반 내에서의 토날라이트로부터 화강암까지의 조성분대와 일치된다. 이는 저반의 주 암체인 안동관입상으로부터 기타 관입상들이 밖으로 마그마작용을 확대시켜 나갔음을 의미한다.

야외의 증거와 함께 K-Ar 연대치에 의해 이 저반 내의 마그마작용이 별도의 다관입상(multi-intrusive phase)으로 구분되는 것(황상구 외, 2002)은 이 저반의 암석들이 비교적 긴 기간 동안에 생성된 마그마의 복수 배취로부터 결정화되었음을 의미한다. 또한 마그마 정치의 연대는 대체로 마그마 냉각의 연대를 나타낸다. 암석들의 시간적 구분에 근거하여, 우리는 이 저반의 마그마 근원지에 대한 것도 깊어봐야만 한다.

안동심성암체의 3개 암상은 주원소와 미량원소가 SiO₂와 MgO의 증가에 따라 체계적이고 연속적인 조성변화를 보여 분화작용에 의한 마그마진화를 겪었다(황상구 · 이보현, 2002). 반면에 본역의 기타 암체들은 산화물의 조성변화에서 서로에 대한 체계적이고 연속적인 변화를 인식할 수 없어 각각의 암체는 동일 마그마로부터 유래되지 않고 서로 독립적인 조성의 마그마로부터 형성되었다고 판단된다(예 Kwon *et al.*, 1994; Cheong and Chang, 1996; Amelin *et al.*, 1997). 이는 Ba-Sr/Nd와 Sr/Y-SiO₂ 관계도에서 각 심성암체가 독립적인 관입체라는 것을 확실하게 알 수 있다(Fig. 10). 그러나 예안심성암체는 다른 암체들과 성인적 연관성이 전혀 없다고 볼 수 있지만, 이를 제외한 다른 암체들은 조구조 환경이 같을지라도 처음부터 마그마 근원지로부터 달랐던지 아니면 처음 근원지에서 같았더라도 마그마과정이 달랐음을 암시한다. 그러나 전자인 경우 이질적 근원지의 부분용융으로부터 유래되었는지 혹은 동질적 근원지의 부분용융 정도차이로부터 달라질 수도 있기 때문에 성인적 관계를 더 살펴볼 필요가 있다.

그러면 우리는 관입 이전의 마그마과정을 체쳐두고 안동저반을 형성하는 마그마들이 시간적 간격을 두고 일어난 여러 차례의 마그마 에피소드 즉 관입상에 의한 화성과정을 엮을 수 있다. 안동저반에서 모든 관입상에 대한 마그마는 서로 다른 마그마에서 유래되었으며, 각 관입상의 정치는 각 에피소드 간에 시간적 간격을 두고 맥동적으로 일어났다. 즉 본역에서 산성 심

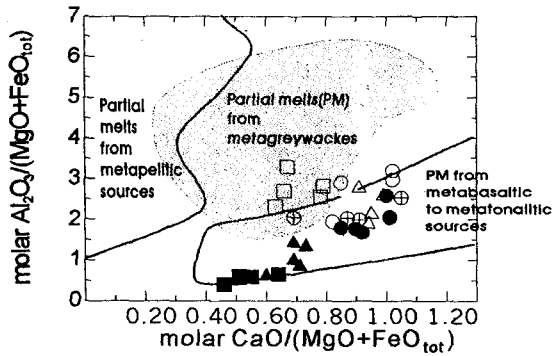


Fig. 11. Molar $Al_2O_3/(MgO+FeO)$ versus molar $CaO/(MgO+FeO)$ diagram. Outlined fields denote compositions of partial melts obtained in experimental studies by dehydration melting of various bulk compositions (Altherr *et al.*, 2000). Symbols are the same as in Fig. 2.

성암의 관입이 5차례에 걸쳐 일어나 안동저반을 형성하였으며 그후에 이 저반 동측부에서 염기성 심성암이 관입하여 예안심성암체를 형성하였다. 안동저반의 정치압력은 5.5~7.4 kb 범위로서 평균 6.5 kb이며 정치심도는 평균 23 km 정도에 위치했다(홍세선, 2001). 또한 안동저반의 암체들은 모두 전암 대자율 값과 불투명광물 조성이 높은 자철석계열에 속해 산화환경에서 관입·고결되었다(Lee and Lee, 1991; Jin *et al.*, 2001).

마그마 성인

안동저반은 영주저반과 같이 분별결정작용을 지시하는 체계적인 변화(황상구 외, 1999)를 나타내지 않기 때문에 암체들간의 조성변화와 REE 패턴은 동일한 일차 마그마로부터 단순한 분별결정작용에 의해 설명될 수 없다. 원소들의 불규칙한 거동은 다양한 근원물질 혹은 상이한 근원물질의 불완전한 혼합을 지시한다. 이러한 조성변화는 조산운동 윤회 동안과 후에 상이한 근원물질의 유입에 관련될 수도 있다(Batchelor and Bowden, 1985). 단적인 예를 들면 풍산심성암체의 화강섬록암은 REE 전함량이 조사암체 중에서 가장 높으며, 반면에 임하심성암체의 화강암은 더 진화된 REE 패턴(즉 보다 높은 $(La/Lu)_n$ 값 혹은 높은 Eu의 부이상 등)을 보여주지 않는다. 그러므로 임하심성암체는 각섬석과 장석과 같은 풍산심성암체로부터 주구성광물의 분별작용에 따른 잔류용융물에 의해 형성된 후기단계 분화물로 생각되지 않는다. 안동저반은 독립적으로 일어나는 내부적인 분화과정이나 혹은 혼합과정만으로 설명할 수 없다. 이 저반은 각 암체 자체를 형성할 때

에 근원물질이 불균질했었는지가 미지수이며 분화와 혼합의 조합이 결부되었는지가 문제이다. 근원물질이 불균질하더라도 이 자체가 불균질 근원물질의 부분용융에만 의한 결과인지 혹은 혼합에 의한 결과인지는 분명하지 않다. 그러므로 이러한 차이를 알아내기 위해서는 각 암체간에 더 많은 원소들의 상이성을 찾아내야 한다.

화강암질 저반의 조성 다양성은 부분적으로 다른 근원물질의 차이에서 일어날 것이며, 그러나 H_2O 함량, 압력, 온도와 같은 용융조건 변화도 똑같이 중요한 역할을 할 것이다(예 Wolf and Wyllie, 1994; Patino Douce and Beard, 1995, 1996; Singh and Johannes 1996). 다양한 용융조건하에서 각섬암, 변성토날라이트, 변성그레이와케와 변성이질암과 같은 다른 근원암의 부분용융에 의해 생성된 마그마의 조성차이는 $CaO/(MgO + FeO)$, $Al_2O_3/(MgO + FeO)$, K_2O/Na_2O 와 같은 산화물 몰비에 의해 구체화할 수 있다. 예를들면 변성현무암과 변성안산암의 부분용융에 의해 유래된 마그마는 변성이질암에서 유래된 것보다 낮은 $Al_2O_3/(MgO + FeO)$ 를 가지고 높은 $CaO/(MgO + FeO)$ 를 가진다(Fig. 11). 반면에 일정한 근원암에서 유래된 마그마의 조성은 용융시에 강한 물리적 변수에 좌우된다. 예를들면 온도, 압력과 H_2O 함량은 용융물 조성을 좌우하는 잔류광물의 안전영역과 부분용융 정도를 조절한다(예 Patino Douce and Beard, 1996). Fig. 11에서 보여주는 바와 같이 안동, 도산과 풍산심성암체는 임하심성암체보다 낮은 $Al_2O_3/(MgO + FeO)$ 값을 가지며 이들의 마그마는 근원암이 변성현무암 내지 변성토날라이트와 같은 변성화성암에서 유래되었음을 나타낸다. 반면에 임하심성암체는 변성그레이와케로부터의 성인과 관련되는 화학적 특징을 가진다. 그러나 안동저반의 모든 암석은 $CaO/(MgO + FeO)$ 비가 매우 높기 때문에 그 근원이 변성이질암과는 거리가 멀다. 예안심성암체는 그 근원암이 변성현무암의 경계부에 걸치므로 지각물질이 아니라는 결론을 얻을 수 있다. 그러나 안동, 도산과 풍산심성암체가 같은 화성암 근원인면서 서로 조성차이를 보이는 것은 그 근본 원인이지를 알아내기 위하여 앞으로 암체마다 더 자세한 연구가 필요하다.

결론

안동저반은 안동, 도산, 풍산, 임하와 녹전심성암체 등의 5개 관입단위로 구성되는 심성암 복합체이며, 이 저반과 별도로 예안심성암체가 동부에 관입되어 있다.

본역에서 관입상들은 화학적 성질과 변화에 의하면 예안심성암체를 제외하고 모두 칼크알칼리 계열에 속하며, 모두 조산대의 대륙호 환경에 속한다. 그러나 모든 암체는 동일한 REE 패턴을 가지면서 서로 다른 독자적 변화를 나타내기 때문에 동일 마그마에 의한 분화 산물이 아니라 그 성인이 달랐다는 것을 지시한다. 또한 주원소와 미량원소에서 예안과 도산심성암체는 기타 암체와는 거의 모든 변화도에서 독자적으로 조성 단절, 불일치 변화경향 등의 매우 뚜렷한 차이를 나타낸다. 안동, 풍산과 임하심성암체는 일부 원소에서 연속 변화경향을 나타내지만 몇몇 원소에서 불일치 변화경향이 관찰된다. 따라서 본역의 모든 암체는 각각 서로 다른 조성의 마그마로부터 형성되었음을 지시한다.

안동저반은 암체들간의 조성변화와 REE 패턴은 동일한 일차 마그마로부터 단순한 분별결정작용에 의해 설명될 수 없고 마그마의 근원물질이 다르거나 불균질했던 것을 나타낸다. 안동, 도산과 풍산심성암체에서 $Al_2O_3/(MgO + FeO)$ 몰비가 낮고 $CaO/(MgO + FeO)$ 몰비가 높은 것은 변성현무암질 내지 변성토날라이트질 근원암으로부터 부분용융에 의해 생성되었음을 암시한다. 반면에 임하심성암체에서 $CaO/(MgO + FeO)$ 몰비가 비슷지만 $Al_2O_3/(MgO + FeO)$ 몰비가 더 높은 것은 근원암이 변성그레이트와케의 부분용융에 유래되었음을 나타낸다.

사 사

화학분석은 영국 런던대학교의 Walsh 박사에게 의해 ICP-MS로 실시되었다. 심사와 편집과정을 통하여 초기 원고를 검토하고 비평과 조언을 해주신 강원대 민경원 교수님, 전남대 김용준 교수님과 전북대 오창환 교수님께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 김규상, 1988, 영주-안동간의 소위 "원남층군"에 관한 변성 암석학적 연구. 고려대학교 이학석사 학위논문, 42p.
- 김남장, 강필중, 이홍규, 1970, 한국지질도 중평동 도폭. 국립지질조사소, 19p.
- 김봉균, 이하영, 김수진, 정지근, 1988, 안동도폭 지질보고서. 한국동력자원연구소, 20p.
- 윤석규, 차문성, 김정진, 이종덕, 1988, 예천도폭 지질보고서. 한국동력자원연구소, 12p.
- 이대성, 이하영, 1963, 한국지질도 예안도폭. 국립지질조사소, 22p.
- 이보현, 1999, 안동지역 화강암질암류에 대한 암석학적 연구. 안동대학교 이학석사 학위논문, 71p.
- 이희천, 1986, 경북 안동군 일대에 분포하는 변성암류의 변성작용에 관한 연구. 서울대학교 석사 학위논문, 41p.
- 홍세선, 2001, 각섬석 지압계를 이용한 영남육괴 내 화강암의 정치심도와 그 의미. 암석학회지, 10, 36-55.
- 황상구, 김상욱, 장태우, 김정민, 이상근, 1999, 영주저반의 관입상과 화성과정. 자원환경지질, 32, 669-688.
- 황상구, 안웅산, 김상욱, 2000, 영주저반의 부석암체 내에서 공간적 조성변화와 그 성인. 자원환경지질, 33, 147-163.
- 황상구, 이보현, 2002, 안동심성암체의 역누대 조성변화와 그 성인. 자원환경지질, 35, 75-95.
- 황상구, 장태우, 김정민, 안웅산, 이보현, 2002, 안동저반의 암상과 다양정치. 지질학회지, 38, 51-65.
- Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., Langer, C. and Kreuzer, H., 2000, High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). Lithos, 50, 51-73.
- Amelin, Y.V., Larin, A.M. and Tucker, R.D., 1997, Chronology of multiphase emplacement of the Salmi rapakivi granite-anorthosite complex, Baltic Shield: implications for magmatic evolution. Contrib. Mineral. Petrol., 127, 353-368.
- Batchelor, R.A. and Bowden, P., 1985, Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using muticationic parameters. Chem. Geol., 48, 43-55.
- Bergantz, G.W., 1989, Underplating and partial melting: implications for melt generation and extraction. Science, 245, 1093-1094.
- Chang, T.W., 1990, Relative timing of shear zone formation and granite emplacement in the Yechon shear zone, Korea. J. Kor. Instit. Mining Geol., 23, 453-463.
- Chappel, B.W. and White, A.J.R., 1974, Two contrasting granite types. Pacific Geology, 8, 173-174.
- Cheong, C.-S. and Chang, H.-W., 1996, Geochemistry of the Daebo granitic batholith in the central Ogcheon belt: a preliminary report. Econom. Environm. Geol., 29, 483-493.
- DePaolo, D.J., 1981, A neodymium and strontium isotopic study of the Mesozoic calc-alkaline granitic batholiths of Sierra Nevada and Peninsular Ranges, California. J. Geophys. Res., 86, 10470-10488.
- Gardien, V., Thompson, A.B., Grujic, D. and Ulmer, P., 1995, Experimental melting of biotite+plagioclase+quartz ± muscovite assemblages and implications for crustal melting. J. Geophys. Res., 100, 15581-15591.
- Huppert, H.E. and Sparks, R.S.J., 1988, The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. J. Petrol. 29, 599-624.
- Hyndman, D.W. and Foster, D.A., 1988, The role of tonalites and mafic dikes in the Idaho Batholith. J. Geol., 96, 31-46.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R., 1971, A guide to the chemical classification of the common igneous rocks. Canad. J.

- Earth Sci., 8, 523-548.
- Jin, M.-S., Lee, Y.S. and Ishihara, S., 2001, Granitoids and their susceptibility in South Korea. *Resource Geol.*, 51, 189-203.
- Jwa, Y.J., 1998, Temporal, spatial and geochemical discriminations of granitoids in South Korea. *Resource Geol.*, 47, 273-284.
- Kwon, S.T., Cho, D.L., Lan, C.Y., Shin, K.B., Lee, T. and Mertzman, S.A., 1994, Petrology and geochemistry of the Seoul granitic batholith. *J. Petrol. Soc. Korea*, 2, 109-127.
- Lee, J.I., Jwa, Y.-J., Park, J.-H., Lee, M.J. and Moute, J., 1998, Petrology and geochemistry of the Youngju and Andong granites in the northeastern Yeongnam massif, Korea. *Geosci. J.*, 2, 1-14.
- Lee, J.I. and Lee, M.S., 1991, Mineralogy and petrology on the granitic rocks in the Youngju area, Kyoungsang Bukdo, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 27, 626-641.
- Maniar, P.D. and Piccoli, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101, 635-643.
- Patino Douce, A.E. and Beard, J.S., 1995, Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar. *J. Petrol.*, 36, 707-738.
- Patino Douce, A.E. and Beard, J.S., 1996, Effects of P, $f(\text{O}_2)$ and Mg/Fe ratio on dehydration melting of model metagreywackes. *J. Petrol.*, 37, 999-1024.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25, 956-983.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976, Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58, 63-81.
- Rapp, R.P., 1995, Amphibole-out phase boundary in partially melted metabasalt, its control over liquid fraction and composition, and source permeability. *J. Geophys. Res.*, 100, 15601-15610.
- Rapp, R.P. and Watson, E.B., 1995, Dehydration melting of metabasalt at 8-32kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling. *J. Petrol.*, 36, 891-931.
- Roberts, M.P. and Clemens, J.D., 1993, Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21, 825-828.
- Singh, J. and Johannes, W., 1996, Dehydration melting of tonalites: Part II. Composition of melts and solids. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 125, 26-44.
- Wilson, M., 1989, *Igneous petrogenesis*. Unwin hyman, London, 466p.
- Wolf, M.B. and Wyllie, J.P., 1994, Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 115, 369-383.
- Zorpi, M.J., Coulon, C., Orisini, J.B. and Cocirca, C., 1989, Magma mingling, zoning and emplacement in calc-alkaline granitoid plutons. *Tectonophysics*, 157, 315-329.

(2002년 9월 2일 접수, 2002년 10월 29일 채택)