

## 영남 육괴 북동부 변성퇴적암과 흑운모 화강편마암의 변성 온도 입력 조건과 전암 붕소 함량사이의 상관관계

정원석<sup>1,3</sup> · 선광민<sup>2</sup> · 나기창<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>한국기초과학지원연구원 연대측정팀, <sup>2</sup>한국원자력연구원 원자로시스템기술개발본부,

<sup>3</sup>충북대학교 자연과학대학 지구환경과학과

## Relation between Metamorphic P-T Conditions and Boron Concentrations of Metasedimentary Rocks and Biotite Granitic Gneisses from NE Yeongnam Massif around Samcheok Area, South Korea

Won-Seok Cheong<sup>1,3</sup>, Gwang-Min Sun<sup>2</sup> and Ki-Chang Na<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Basic Science Institute, Geochronology Team, 804-1 Yangcheon-ri, Ochang, Cheongwon-gun, Chungbuk Korea, 363-883

<sup>2</sup>Korea Atomic Energy Research Institute, 150-1 Deokjin-dong, Yuseng-gu, Daejeon, Korea, 305-353

<sup>3</sup>Department of Earth & Environmental Sciences, College of natural Science, Chungbuk National University, 48 Gaesin-dong, Cheongju, Chungbuk, Korea, 361-763

This study is focused on the relationship between whole rock boron contents and metamorphic P-T conditions of metasedimentary rocks from northeastern Yeongnam massif around Samcheok area, Korea. Metamorphic P-T conditions of sillimanite and garnet zones based on the Ti-biotite geothermometer is 553-687°C and 582-722° at 4-6 kbar, respectively. In the metasedimentary rocks, boron contents in whole rock decrease with increasing metamorphic grade, from sillimanite zone (9.60-189 ppm B) to garnet zone (2.63-15.97 ppm B), except one sample (90.9 ppm B) from garnet zone containing graphites. Boron depletion in garnet zone has relation with mode of tourmaline which are broken down with increasing metamorphic temperature. Boron contents are indirectly proportional to major and trace elements such as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Li, Ba, Sc, Co, Cr, Rb and Cs that are abundant in tourmalines. In conclusion, tourmalines and graphite are modulator of boron contents in metasedimentary rocks. In the biotite granitic gneisses, boron contents (2.62-12.2 ppm B) are similar or lower than those of metasedimentary rocks and have no relation with metamorphic P-T conditions.

**Key words :** Yeongnam massif, metasedimentary rocks, biotite granitic gneiss, boron, tourmaline

영남육괴의 북동부에 분포하는 변성퇴적암류의 전암 붕소를 분석했다. 연구지역의 변성퇴적암류는 광물 조합에 따라 규선석대와 석류석대로 나누어지며, Ti-흑운모 지온계를 이용한 4-6 kbar 사이의 변성온도는 각각 553-687°C와 582-722°C이다. 붕소의 전함량은 흑연이 다량 포함된 석류석대의 한개 시료(89.95 ppm B)를 제외하고 규선석대(9.60-189.18 ppm B)에서 석류석대(2.63-15.97 ppm B)로 높은 온도를 지시하는 지역에서 상대적으로 적은 함량을 갖는다. 붕소와 양의 상관관계를 이루는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Li, Ba, Sc, Co, Cr, Rb, Cs는 전기석을 구성하는 주 원소로 전기석의 비율이 증가할수록 붕소의 함량이 증가한다는 것을 부분적으로 지시한다. 광물의 모드비와 붕소의 전함량 비교는 붕소를 조절하는 주된 광물이 전기석 및 흑연임을 지시한다. 흑운모 화강편마암의 전암 붕소 함량(2.62-12.2 ppm B)은 전반적으로 변성퇴적암보다 붕소함량이 낮거나 비슷하며 변성 압력-온도 조건과는 관련성이 없다.

**주요어 :** 영남육괴, 변성퇴적암, 흑운모 화강편마암, 붕소, 전기석

\*Corresponding author: petrona@chungbuk.ac.kr

## 1. 연구개요

붕소는 암석의 종류에 관계없이 상부 지각에 널리 분포하며 상부지각에서 27번째로 많은 원소이다(평균 15 ppm B; Anovitz and Grew, 1996). 변성퇴적암 내 붕소의 함유량은 그 원암의 성분에 많은 영향을 받기도 하지만 구성 광물 조합에 따라 크게 변화한다. 변성이질암 또는 사질암을 구성하는 광물 중에서 붕소를 가장 많이 함유하는 것은 전기석(약 10 wt.% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 또는 33,000-34,000 ppm B), 코너루핀(kornerupine), 듀모티에라이트(dumortierite)와 같이 붕소가 주원소인 것들이다. 비록 붕소가 주구성 성분은 아니지만 1,000 ppm 이상의 붕소를 함유할 수도 있는 광물은 백운모(10-1,340 ppm B), 규선석(9-1,300 ppm B) 및 일라이트(100-2,000 ppm B) 등이다(Henry and Dutrow, 1996). 각종 광물에 주원소 및 부수 원소로 존재하는 붕소는 최근에 변성작용, 화성작용, 퇴적작용 및 변질작용 등의 환경을 추적하는 대상으로서 주목을 받고 있다.

고온/저압 변성작용을 받은 암석에서 전암 붕소 함량은 변성도가 증가할수록 감소한다(Moran *et al.*, 1992). 이러한 양상은 변성퇴적암류에서 온도의 증가에 따른 백운모와 전기석의 붕괴 때문으로 보고 있다(Kawakami, 2001, 2004; Kawakami and Ikeda, 2003). 또한 전암 붕소 함량은 원암 주변에 알칼리 유체가 유입하는 경우에도 감소한다(Morgan and London, 1989; Wilke *et al.*, 2002). 고압/저온의 변성작용을 받은 지역에서는 변성도가 증가하여도 전암 붕소 함량이 그대로 유지되는 양상이 나타난다(Nakano and Nakamura, 2001). 이러한 이유로 변성암 내부의 붕소의 전함량을 조사하면 저압/고온 변성작용의 변성도 변화나 관입 유체로 인한 주변 암석의 환경변화를 관찰하는데 유리하다.

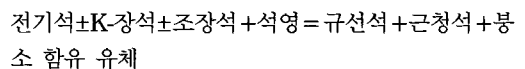
영남육괴 북동부 삼척지역에는 상부 각섬암상에서 하부 백립암상까지 이르는 고온/저압 변성작용을 받은 변성퇴적암류와 변성화성암류들이 복잡한 관계를 갖으며 분포한다(Lee *et al.*, 1986; Cheong *et al.*, 2006; Cheong and Na, 2008). 따라서 이 지역은 변성도 변화나 화성활동에 의한 전암 붕소의 변화를 관찰할 수 있는 유리한 지역이다. 붕소의 거동과 전기석과 같은 붕소 함유 광물의 산출을 연구할 경우 광역적인 교대 변성작용을 확인할 수 있을 것이다. 이 논문에서는 삼척지역 영남육괴의 붕소 교대변성작용을 확인하기 위해서 우선 기존에 제안된 북동 영남육괴에 분포하는 변성퇴적암류의 변성온도-압력 범위(Cheong and Na, 2008)를 다시 정리한다. 또한 광물의 조합 및 모드비,

전암 주원소 및 붕소를 포함한 미량원소 분석을 통하여 전암 붕소 함량 변화가 이 지역의 화성작용과 변성작용 중 어떤 것에 영향을 더 받았고, 어떤 광물이 붕소의 주된 조절자인지에 관하여 논의해 본다.

## 2. 지질 개요

연구지역은 영남육괴 북동부인 삼척시 남부 원덕읍과 근덕면 일대에 걸치는 곳에 해당한다. 북동 영남육괴는 기저부를 이루는 변성퇴적암류와 이를 흑운모 화강편마암 및 우백질 화강편마암이 곳곳에서 관입한 변성복합체이다. 이 변성복합체의 형성 이후에 연구지역의 북서부와 남부 일부를 고생대 퇴적암류가 부정합으로 피복하고 있고 남부에서 중생대 퇴적암류 및 화산암류가 부정합 및 관입관계를 이루며 분포하고 있다(Fig. 1).

연구지역의 변성퇴적암류는 이질 및 사질 편암과 미그마타이트질 편마암으로 구성되어있다. 주구성 광물은 석영+사장석+K-장석+흑운모±규선석±근청석±석류석±백운모이며 부수광물은 홍주석, 전기석, 티탄철석, 금홍석, 황철석, 흑연, 저어콘, 모나자이트, 인회석이 있다(Cheong and Na, 2008). 연구지역의 서남부에 분포하는 변성퇴적암의 광물조합은 석영+사장석+K-장석+흑운모±규선석±근청석±백운모이고 북동부는 동일한 광물조합에 석류석이 포함된다. 따라서 이 지역은 석류석이 최초로 나타나는 곳을 기준으로 등변성도선(garnet-in isograd)이 도시되며 석류석의 유무에 따라서 석류석대와 규선석대로 나뉜다(Fig. 1; Cheong *et al.*, 2006; Cheong and Na, 2007; Cheong and Na, 2008). 각 변성대에 따른 변성퇴적암류의 광물산출은 Fig. 2에 종합적으로 나열해 놓았다. 전기석은 비록 소량 산출하는 광물이긴 하지만 규선석대에서는 잘 나타나는 반면 석류석 등변성도선으로 갈수록 규선석과 근청석으로 붕괴되는 양상이 관찰되고 석류석대에서는 거의 나타나지 않는다(Cheong and Na, 2007). 이러한 전기석의 붕괴 양상은 고온 변성작용을 받은 지역에서 일반적인 것으로 알려져 있으며(e.g., Kawakami, 2001, 2004; Kawakami and Ikeda, 2003) 다음과 같은 반응식으로 표현된다.



위와 같은 전기석의 반응 양상은 Cheong and Na (2007)에 일부 논의되어 있으며 세부적인 내용은 추후에 추가적으로 논의할 예정이다. 백운모는 일부 규선

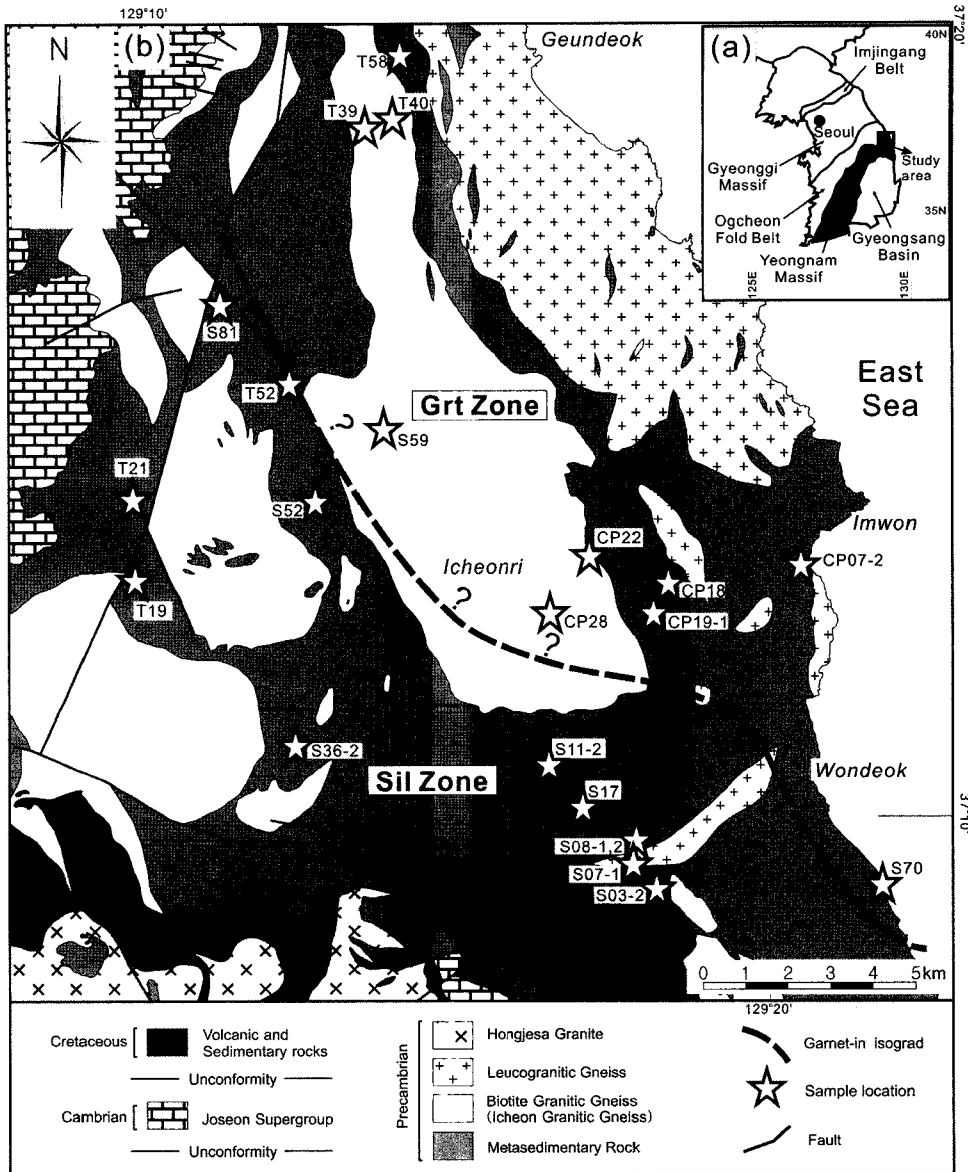


Fig. 1. (a) A schematic tectonic province of the South Korea. (b) Geological map of the study area (Cheong and Na, 2008). Locations of the analyzed samples are also shown.

석대 변성퇴적암류에서 다량으로 존재하지만 대부분 소량 산출하며 붕괴 양상 또는 재결정양상이 모두 나타난다.

흑운모 화강편마암은 연구지역의 중부와 서부에 넓게 분포하며 일부 남부에서도 나타난다(Fig. 1). 흑운모 화강편마암은 엽리의 발달이 미약하며 다량의 흑운모가 포함되어 있는 중-조립의 반상변정 편마암이다. 주구성 광물은 석영+사장석+K-장석+흑운모±석류석±백운모±규선석이며 부구성 광물은 티탄철석, 황철석, 저

어콘, 모나지이트 등이다. 지구화학적 특징은 과알루미늄질의 S-type 화강암이며 주변의 변성퇴적암류의 화학성분과 매우 유사하다(Cheong *et al.*, 2006; Cheong and Na, 2008).

우백질 화강암편마암은 연구지역의 동부 해안선을 따라 넓게 분포하며 변성퇴적암류와 흑운모 화강편마암을 관입한다(Fig. 1). 암체 내부에는 포획암 또는 실리렌(schlieren)들이 나타난다. 주구성 광물은 석영+K-장석+백운모+사장석±전기석±흑운모±규선석이며 부수광

Minerals	Metamorphic zonation	
	Sillimanite zone	Garnet zone
Quartz	████████████████████	████████████████████
Biotite	████████████████████	████████████████████
K-feldspar	████████████████████	████████████████████
Plagioclase	████████████████████	████████████████████
Cordierite	████████████████████	████████████████████
Sillimanite	████████████████████	████████████████████
Andalusite	██	
Garnet		████████████████████
Muscovite	██	
Tourmaline		-----
Graphite	-----	
Monazite / Zircon		

Fig. 2. A simplified mineral-facies chart for metapelites of the study area. Thickness of each gray line is approximately proportional to the mineral.

물로는 저어콘 등이 있다. 우백질 화강편마암의 지구화학적 특징은 백운모 탈수붕괴작용으로 인하여 발생한 용융체가 분화작용을 겪어 형성된 과일루미늄질의 S-type 화강암임을 지시한다(Lee *et al.*, 2007; Cheong and Na, 2008). 상술한 암석들에 대한 세부적인 기재와 광물산출 상태는 Cheong and Na (2008)를 참조 바란다.

### 3. 실험 방법

#### 3.1. 광물 분석

변성퇴적암에 분포하는 흑운모와 전기석의 성분은 서울대학교 전자현미분석기(EPMA; JEOL JXA-8900R)로 분석했다. 분석조건은 15 kV의 가속전압, 20 nA의 전류 그리고 2 μm의 빔직경을 이용했다. 대표적인 흑운모의 분석결과는 Table 1에 나열되어 있다. 전기석의 분석 결과는 Cheong and Na (2007)에 일부 언급하였으나 세부적인 분석 결과는 추후에 언급할 예정이다.

#### 3.2. 전암 지화학 분석

연구지역에서 주원소 분석은 총 123개(변성퇴적암류 57개, 흑운모 화강편마암 43개, 우백질 화강편마암 내지 우백질부 암석 23개), 붕소를 제외한 미량원소 및 희토류원소 분석은 41개(변성퇴적암류 17개, 흑운모 화강편마암 12개, 우백질 화강편마암 내지 우백질부 암석 12개)의 시료를 수행하였다. 전암 붕소 분석을 수행한 시료는 규선석대 변성퇴적암 11개, 석류석대 변성퇴적암 6개 그리고 흑운모 화강편마암 5개이며, 채취 장소는 Fig. 1에 도시되어 있다.

우선 분석대상 시료를 조클러셔(jaw crusher) 및 아게이트밀(agate mill)을 이용하여 200 mash 이상의 분말로 제작하였다. 주원소 분석은 서울대학교 기초과학공동기기의 X선 형광분석기(XRF; Himadzu1700)를 이용했다. 붕소를 제외한 나머지 미량원소 및 희토류원소는 한국기초과학지원연구원에서 암석 분말을 불산, 질산, 염산을 이용한 화학적 전처리를 수행한 후 유도결합플라즈마질량분광기(ICP-MS)를 이용하여 분석하였다.

일반적으로 지질시료의 미량원소 전암 분석은 위와 같이 원소에 따라서 X선 형광분석이나 유도결합플라즈마분석법을 이용하여 분석한다. 그러나 이러한 분석법들은 일정량의 시료를 화학적인 전처리를 수행해야 한다는 불편함과 전처리 도중에 일부 원소의 손실 가능성이 존재한다. 전암 붕소 함량도 정인산(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)을 이용한 화학적 전처리를 이용하면 붕소의 회수율이 높아지기 때문에 ICP-MS를 이용한 정량 분석이 가능하지만 희토류원소와 같은 원소들의 침전이 발생하므로 다양한 원소 측정에는 불리하다. 뿐만 아니라 철, 크롬, 니켈과 같은 다른 원소들의 간섭으로 인하여 붕소의 검출 한계가 5 ppm 이기 때문에 그 이하의 붕소 함량을 갖는 것들은 분석이 매우 어렵다(Xu and Rao, 1986). 따라서 전암 붕소 함량 분석은 한국-원자력연구원의 분석용 원자로인 하나로(Hanaro)의 즉발감마선 방사화분석(PGAA; prompt gamma activation analysis; Byun *et al.*, 2002)을 이용하였다. PGAA는 핵분석 기술의 대표적인 방법으로 미지시료를 원자로의 중성자로 조사하여 시료중의 표적핵(안정핵종)을 방사성핵(불안정한 핵종)으로 변환시키는 과정 및 방사성핵이 붕괴되는 과정에서 방출되는 방사선(감마선)의 에너지와 방사능을 측정하여 미지시료의 정성 및 정량 분석하는 기술이다(Failey *et al.*, 1979). 표준시료로 판단된 하나로 PGAA의 붕소 분석값은 매우 정확하며, 검출한계는 1 ppm 정도이며 분석 오차는 10 ppm B 미만일 경우 10% 미만, 10 ppm B 이상일 경우 5% 미만이다(Byun *et al.*, 2004).

### 4. 변성작용

암석성인격자는 규선석대의 광물조합이 대략 640-760°C, 2.5-4.5 kbar, 석류석대는 760-800°C, 4-6 kbar의 온도 및 압력조건을 지시한다(Cheong and Na, 2008). 변성대 사이의 자세한 변성온도를 비교하기 위하여 Ti-흑운모 지온계를 적용해 보았다. 오래전부터 변성온도의 변화에 따라 흑운모의 Ti 변화는 고온의 변성작용

Table 1. Representative chemical analyses of biotites in metasedimentary rocks

Sample	Garnet zone						Sillimanite zone															
	P-19		P-21		P24		P45		S03-2		S36-2		S82		S70		S40		T19			
	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim		
SiO <sub>2</sub>	35.13	35.50	34.99	34.79	34.19	35.61	35.48	34.58	34.31	34.83	34.99	35.76	33.84	34.57	31.32	35.53	34.99	34.28	34.29	34.52	34.26	34.94
TiO <sub>2</sub>	3.93	3.60	3.57	4.13	4.20	3.52	3.18	2.77	2.10	2.42	2.57	2.59	3.07	2.80	2.35	2.89	3.28	3.21	2.14	2.00	2.67	2.81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.93	20.09	20.28	19.13	18.96	18.19	18.70	20.91	21.01	20.77	20.36	20.95	20.72	20.73	20.24	20.84	20.88	20.61	21.27	21.49	21.05	20.59
FeO	18.77	18.63	19.81	19.66	19.48	16.08	14.77	20.18	19.63	19.68	18.97	17.89	19.78	19.47	23.69	20.22	21.09	20.23	20.90	19.81	18.20	19.90
MgO	7.57	7.55	6.75	7.00	6.90	11.21	11.25	7.81	8.10	8.17	9.22	9.82	7.84	7.69	8.50	6.67	7.77	7.77	7.56	7.27	7.13	7.75
MnO	0.05	0.11	0.03	0.06	0.03	0.08	0.08	0.16	0.09	0.09	0.13	0.08	0.11	0.15	0.17	0.15	0.11	0.04	0.12	0.16	0.14	0.10
CaO	0.03	0.00	0.05	0.00	0.04	0.03	0.07	0.02	0.17	0.22	0.07	0.10	0.00	0.02	0.00	0.05	0.10	0.01	0.05	0.01	0.13	0.08
Na <sub>2</sub> O	0.18	0.23	0.09	0.47	0.17	0.09	0.14	0.09	0.17	0.23	0.22	0.23	0.19	0.13	0.06	0.18	0.10	0.11	0.09	0.09	0.44	0.23
K <sub>2</sub> O	9.85	9.72	10.12	10.29	9.76	10.23	10.12	9.62	9.14	9.34	9.40	9.33	9.76	9.46	6.74	9.52	9.53	9.69	10.14	9.94	9.18	9.58
Total	95.43	95.42	95.69	95.53	93.72	95.05	93.77	96.14	94.71	95.75	95.92	96.74	95.31	95.02	93.06	96.04	97.86	95.95	96.54	95.29	93.20	95.98
Si	5.33	5.38	5.33	5.33	5.33	5.38	5.40	5.24	5.25	5.28	5.28	5.30	5.18	5.28	4.96	5.37	5.22	5.21	5.21	5.27	5.30	5.29
Al <sup>iv</sup>	2.67	2.62	2.67	2.67	2.67	2.62	2.60	2.76	2.75	2.72	2.72	2.70	2.82	2.72	3.04	2.63	2.78	2.79	2.79	2.73	2.70	2.71
Subtotal	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al <sup>vi</sup>	0.90	0.96	0.97	0.79	0.81	0.62	0.75	0.97	1.05	0.99	0.90	0.96	0.92	1.01	0.74	1.08	0.89	0.91	1.02	1.14	1.14	0.97
Ti	0.45	0.41	0.41	0.48	0.49	0.40	0.36	0.32	0.24	0.28	0.29	0.29	0.35	0.32	0.28	0.33	0.37	0.37	0.24	0.23	0.31	0.32
Fe <sup>2+</sup>	2.38	2.36	2.52	2.52	2.54	2.03	1.88	2.56	2.51	2.49	2.39	2.22	2.53	2.49	3.14	2.56	2.63	2.57	2.65	2.53	2.36	2.52
Mg	1.71	1.70	1.53	1.60	1.60	2.53	2.55	1.76	1.85	1.85	2.07	2.17	1.79	1.75	2.01	1.50	1.73	1.76	1.71	1.66	1.64	1.75
Mn	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
Subtotal	5.45	5.45	5.44	5.39	5.44	5.59	5.55	5.63	5.66	5.62	5.67	5.65	5.61	5.59	6.18	5.49	5.64	5.61	5.64	5.58	5.47	5.57
Ca	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	0.04	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01
Na	0.05	0.07	0.03	0.14	0.05	0.03	0.04	0.03	0.05	0.07	0.06	0.06	0.06	0.04	0.02	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.13	0.07
K	1.91	1.88	1.97	2.01	1.94	1.97	1.96	1.86	1.79	1.81	1.81	1.76	1.91	1.84	1.36	1.84	1.81	1.88	1.96	1.94	1.81	1.85
Subtotal	1.96	1.95	2.00	2.15	2.00	2.00	2.02	1.89	1.86	1.91	1.88	1.84	1.96	1.89	1.38	1.90	1.86	1.91	2.00	1.97	1.97	1.93
X <sub>Mg</sub> **	0.42	0.42	0.38	0.39	0.39	0.55	0.58	0.41	0.42	0.43	0.46	0.49	0.41	0.41	0.39	0.37	0.40	0.41	0.39	0.40	0.41	0.41

Cations on the basis of 22 anhydrous oxygen. All Fe given as FeO.

\*Biotite inclusion in cordierite

\*\*X<sub>Mg</sub> = Mg/(Fe+Mg)

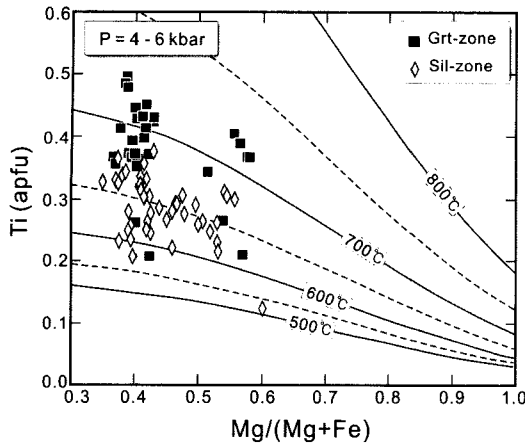


Fig. 3. Biotite compositions in terms of Mg/(Mg+Fe) vs. Ti (apfu; atom per formula unit) calculated on the basis of 22 anhydrous oxygen. Also shown are 500-800°C isotherms based on Ti-in-biotite thermometer (Henry *et al.*, 2005).

을 받은 암석에서 일반적인 현상이며 지온계로서의 가능성이 제시되어왔다(e.g., Robert, 1976; Patiño Douce, 1993). Henry *et al.* (2005)은 변성도의 증가에 따른 흑운모의 Ti 증가 특성을 이용하여, 4-6 kbar 압력 범위에서 고온변성암의 흑운모 Ti-지온계를 제안하였다. 암석성인격자에서 일부 규선석대의 압력조건이 4 kbar 이하이긴 하지만 석류석대는 대체적으로 4-6 kbar의 변성압력조건을 만족하기 때문에 Ti-흑운모 지온계를 적용하는데 무리가 없다고 판단된다.

분석 결과, 변성분대와 관계없이 흑운모의  $X_{Mg}$  [=Mg/(Fe+Mg)] 값은 0.35-0.58 정도로 Fe 함량이 Mg에 비해 약간 많다. 또한 규선석대보다 석류석대에서 상대적으로 높은 Ti 함량을 갖는다(Table 1). Ti-흑운모 지온계(Henry *et al.*, 2005)에 의하면 규선석대의 변성 온도는 553-687°C이며, 석류석대의 변성 온도 범위는 582-722°C이다(Fig. 3). 따라서 석류석대가 규선석대에 비해 상대적으로 높은 변성온도에 노출되었음을 지시한다.

## 5. 붕소 분석 결과 및 고찰

Table 2는 붕소 분석에 이용된 각 암석들을 구성하는 광물들의 모드비와 더불어 주원소, 미량원소 및 희토류원소의 전암 분석결과를 기재한 것이다. 모드비는 편광현미경을 통하여 개략적으로 산출한 값이기 때문에 정확하지는 않으나 대략적인 비교에는 도움이 될 것으로 생각된다. 전체 모드비의 합은 전기석을 제외한 광물의 합을 100%로 맞춘 것이다. 전기석은 소량

존재하기 때문에 전체 합산에서 제외했고 대부분 1% 내지 그 미만으로 추정했다. 그러나 S36-2와 S81, T21은 박편에서 0.5 mm 이상의 전기석이 다수 관찰되어 각각 2, 2, 5-vol.%의 전기석이 산출 되는 것으로 기재했다. 일부 변성퇴적암에서 흑연의 존재가 인지되나 소량으로 산출하는 것들은 다른 불투명광물들과 구별이 힘들어 대량으로 산출하는 시료에 대해서만 기재했다.

### 5.1. 붕소와 변성퇴적암류의 광물조합과의 상관관계

연구지역에서 변성퇴적암류의 전암 붕소함량은 최소 2.63 ppm에서 최대 189 ppm의 변화가 나타났다. 석류석대의 한 시료(T40; 90 ppm B)를 제외하고 규선석대 변성퇴적암류(9.60-189 ppm B)는 석류석대(2.63-16.0 ppm B) 것보다 붕소함량이 비슷하거나 상대적으로 높은 편이다. 석류석 등변성도선(Fig. 1)을 기준으로 각 시료의 거리에 대한 붕소의 함량변화를 표시해보면 규선석대에서 석류석대로 변성도가 증가할수록 붕소의 함량이 감소하는 추세를 개략적으로 볼 수 있다(Fig. 4). 붕소 감소 추세는 붕소를 주구성 원소로 갖고 있는 전기석(33,000-34,000 ppm B)과 미량 원소로 갖고 있는 백운모(10-1,340 ppm B) 및 규선석(9-1,300 ppm B)의 모드비와 관계있어 보인다(Henry and Dutrow, 1996). 왜냐하면 전기석과 백운모는 석류석대에서는 거의 산출하지 않으며, 규선석의 경우 석류석대에서 비율이 줄어들기 때문이다(Fig. 2; Table 2). 그러나 연구지역의 시료에서 백운모와 규선석이 어느 정도의 붕소를 갖고 있는지도 모를 뿐만 아니라 붕소를 다량 함유하고 있더라도 전기석의 붕소함량에 비해 상당히 적기 때문에 변성퇴적암의 주된 전암 붕소 조절광물은 전기석으로 보는 것이 타당하다. 그러나 전기석의 모드비가 작은 T52 시료가 높은 붕소 함량을 갖는 이유는 높은 백운모의 함량일 가능성도 있으나 잠재적인 전기석의 존재 가능성도 배제할 수 없다. 왜냐하면 한 개의 암석에서 만든 하나의 박편에서 부수 광물인 전기석의 모드비를 논한다는 것이 무리가 있기 때문이다.

규선석대 일부 시료(S07-1, S08-2 및 S52)는 전암 붕소 함량이 10 ppm 이하로 매우 낮다. 이 시료들은 다른 규선석대의 시료에 비해서 석영(0.01-30 ppm B; Henry and Dutrow, 1996)의 비율이 높고 붕소를 함유할 가능성이 높은 백운모와 전기석의 비율이 거의 없는 변성퇴적암류들이다(Table 2). 전암 붕소 함량은 원암 주변에 알칼리 유체의 유입하는 경우에도 감소한다(Morgan and London, 1989; Wilke *et al.*, 2002). 따

라서 연구지역의 화강편마암(S08-1)과 접하고 있는 시료들(S07-1, S08-2)도 알칼리 유체의 유입으로 인한 붕소 감소 현상발생 했을 수도 있다(Fig. 1 and 4). 하지만 흑운모 화강편마암체 인근에서 채취한 다른 시료들(e.g., S36-2, T19, T52, T40; Fig. 1)이 붕소 함량이 큰 것을 고려하면 용융체의 유입이 모든 변성퇴

적암의 붕소의 함량을 낮췄다고 보기는 어렵다. 또한 상술 하였듯이 S07-1과 S08-2 시료들은 비록 전기석과 백운모, 규선석이 관찰되기는 하지만 다른 암석에 비해 석영의 비율이 높고 소량이나마 붕소를 포함 할 수 있는 사장석(1-200 ppm B), K-장석(6-30 ppm B), 흑운모(1-53 ppm B) 또는 근청석(1-155 ppm B)의 비율이

**Table 2.** Mineral assemblage and geochemical data of metasedimentary rocks and biotite granitic gneisses. Mineral abbreviations are after Kretz (1983)

Sample	Metasedimentary rocks/Sillimanite zone										
	S03-2	S07-1*	S08-2	S11-2	S17	S36-2*	S52	S81	T19	T21	T52
<i>Mineral assemblage (vol.%)</i>											
Qtz	50	50	45	35	30	20	35	20	20	35	35
Pl	5	10	2	5	10	10	20	15	25	10	10
Kfs			15	10	5	2	1	5		<1	
Bt	30	30	20	20	20	40	20	20	15	20	25
Ms	4		3	5	<1	10	<1	5	10	30	30
Sil	5	5	10	5	20	8	15	15	20	5	
Crd	5	5	5	20	15	10	10	20	10		
Grt											
Gr				1							
Tur	1	<1		<1	1	2		2	<1	5	<1
<i>Major elements (wt.%)</i>											
SiO <sub>2</sub>	68.26	66.86	75.59	62.29	62.65	45.68	63.12	61.71	61.18	55.21	57.74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.67	14.95	11.25	18.69	18.23	24.66	17.88	18.30	19.76	20.56	20.22
TiO <sub>2</sub>	0.55	0.62	0.43	0.65	0.75	1.56	0.62	0.60	0.66	0.63	0.71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.51	6.39	3.77	5.91	6.56	12.73	7.59	6.96	7.19	8.75	8.41
MgO	2.60	1.77	0.96	1.56	1.58	3.26	1.41	1.60	2.57	3.34	2.71
CaO	1.05	1.45	0.79	0.61	0.82	1.43	0.16	0.72	0.64	0.23	0.13
Na <sub>2</sub> O	0.97	1.57	1.81	1.32	1.55	1.84	0.62	1.67	1.73	0.81	0.92
K <sub>2</sub> O	3.68	2.25	2.42	3.53	4.59	5.40	4.78	4.27	4.32	5.63	5.05
MnO	0.06	0.08	0.03	0.04	0.04	0.09	0.05	0.04	0.05	0.06	0.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.07	0.07	0.08	0.06	0.06	0.03	0.11	0.07	0.05	0.06
LOI	1.52	2.40	1.12	3.93	1.33	3.26	2.74	2.53	1.81	4.53	3.91
Total	98.94	98.42	98.23	98.59	98.15	99.97	98.98	98.50	99.98	99.79	99.91
<i>Trace and rare earth elements (ppm)</i>											
B	33.3	9.60	8.28	52.3	14.9	14.8	9.8	40.9	29.7	168	189
Li	42.9	89.2	35.4	n.a.	40.8	181	48.1	54.2	60.2	125	n.a.
Ba	726	498	235	n.a.	841	502	704	541	512	557	n.a.
Sr	106	142	70.2	n.a.	147	133	90.2	95.6	80.1	73.6	n.a.
Cr	71.2	81.5	48.5	n.a.	111	180	109	101	98.7	122	n.a.
Sc	14.2	13.4	7.87	n.a.	14.1	32.9	14.5	16.9	17.3	18.3	n.a.
Co	12.2	14.4	8.41	n.a.	13.7	23.7	14.5	9.49	13.9	16.2	n.a.
Rb	182	149	150	n.a.	200	319	210	159	207	295	n.a.
Y	12.6	15.1	15.7	n.a.	16.2	23.8	9.90	13.2	18.1	18.7	n.a.
Cs	6.37	8.33	5.85	n.a.	8.92	18.5	8.08	11.2	8.65	44.6	n.a.
La	36.8	41.0	43.7	n.a.	48.7	113.9	40.4	40.4	47.2	43.8	n.a.
Ce	74.2	82.7	85.7	n.a.	95.3	225.2	79.7	80.2	93.5	88.3	n.a.
Eu	1.17	1.07	0.97	n.a.	1.56	1.22	1.21	1.27	1.49	1.26	n.a.

Table 2. Continued

Sample	Metasedimentary rocks / Garnet zone						Biotite granitic gneiss				
	S70	CP07-2	CP18	CP19-1*	T40	T58	CP22**	CP28**	S08-1	S59-1	T39
<i>Mineral assemblage (vol.%)</i>											
Qtz	10	65	30	20	30	30	30	25	30	25	25
Pl	5	5	15	10	5		35	35	10	35	40
Kfs	10	5		4			5		40	5	5
Bt	25	20	20	20	15	10	20	20	5	20	20
Ms	<1		4	1	30***	30***	5	10	10	15	10
Sil	10		1	5			<1		5		
Crd	40		30	30							
Grt		5		10		30	5	10			
Gr					20						
Tur	<1										
<i>Major elements (wt.%)</i>											
SiO <sub>2</sub>	56.63	77.27	65.00	59.56	65.77	56.86	62.75	63.62	72.85	64.60	66.31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.15	10.41	16.39	20.85	16.79	19.41	17.92	15.78	14.51	15.67	15.80
TiO <sub>2</sub>	0.72	0.54	0.51	0.39	0.70	0.80	0.53	0.71	0.22	0.79	0.50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.45	4.21	5.09	7.09	4.51	8.32	6.28	6.56	1.43	5.94	5.19
MgO	2.45	0.82	1.39	3.43	1.63	2.91	2.25	2.43	0.26	1.40	1.77
CaO	0.51	1.70	0.79	0.28	1.48	0.85	2.27	3.00	0.49	1.68	1.72
Na <sub>2</sub> O	0.79	2.27	2.09	0.86	3.76	2.36	2.35	2.57	1.84	2.05	1.95
K <sub>2</sub> O	4.39	1.03	3.38	4.14	2.30	4.43	3.68	3.06	6.01	4.30	3.68
MnO	0.07	0.05	0.05	0.05	0.04	0.06	0.09	0.05	0.01	0.05	0.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.10	0.06	0.05	0.25	0.07	0.15	0.19	0.17	0.16	0.05
LOI	1.76	0.51	4.46	3.45	2.47	3.53	2.43	1.33	1.70	2.79	2.54
Total	99.01	98.91	99.21	100.14	99.69	99.59	100.69	99.29	99.50	99.43	99.56
<i>Trace and rare earth elements (ppm)</i>											
B	16.0	2.63	11.3	10.0	90.0	8.63	2.62	7.01	5.81	12.2	8.21
Li	91.9	51.0	37.3	83.5	n.a.	85.3	n.a.	n.a.	16.9	41.8	n.a.
Ba	690	299	757	723	n.a.	926	658	415	212	587	n.a.
Sr	65.3	126	82.0	102	n.a.	121	251	259	49.7	133	n.a.
Cr	131	51.6	139	92.8	n.a.	168	n.a.	n.a.	15.7	68.0	n.a.
Sc	21.2	6.19	21.3	7.98	n.a.	17.8	n.a.	n.a.	1.80	9.55	n.a.
Co	18.2	7.30	20.9	15.6	n.a.	12.3	n.a.	n.a.	0.80	12.13	n.a.
Rb	166	104	207	134	n.a.	179	145	173	256	191	n.a.
Y	19.7	18.1	16.7	20.6	n.a.	21.8	22.3	28.2	8.58	20.4	n.a.
Cs	9.74	7.93	7.47	7.65	n.a.	8.16	n.a.	n.a.	3.51	5.88	n.a.
La	44.9	39.9	37.8	45.0	n.a.	36.7	64.4	84.2	35.5	44.5	n.a.
Ce	91.8	81.3	74.4	94.9	n.a.	70.8	127	166	83.4	92.7	n.a.
Eu	1.19	1.06	0.96	0.91	n.a.	1.24	1.94	1.51	0.39	1.08	n.a.

n.a.: not analyzed

\*Data from Cheong and Na (2008) except boron value

\*\*Data from Cheong *et al.* (2006) except boron value

\*\*\*Almost secondary muscovite

낮은 암석들이기 때문에 붕소 함량이 낮은 것으로 판단된다(Table 2; Henry and Dutrow, 1996).

석류석대의 시료 중에서 T40은 상당히 높은 붕소의 함량(90 ppm B)을 갖고 있다(Table 2). 이 시료는 백

운모뿐만 아니라 흑운모 화강편마암체 가장자리에서 산출되는 편암류로 다량의 흑연을 함유한다(Fig. 5). 이 시료는 백운모의 함량이 높지만 대부분 후기 변질작용으로 생성된 세립질 백운모이다. 비슷한 세립질 백운모



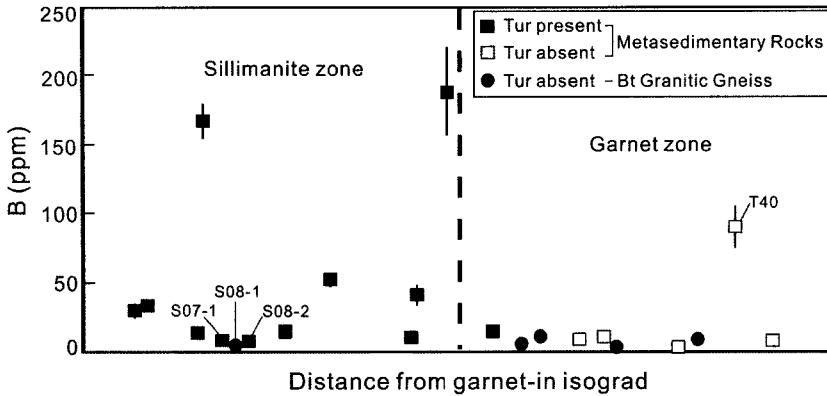


Fig. 4. Relationship between whole-rock boron contents of metasedimentary rocks and biotite granitic gneisses, and metamorphic zones.

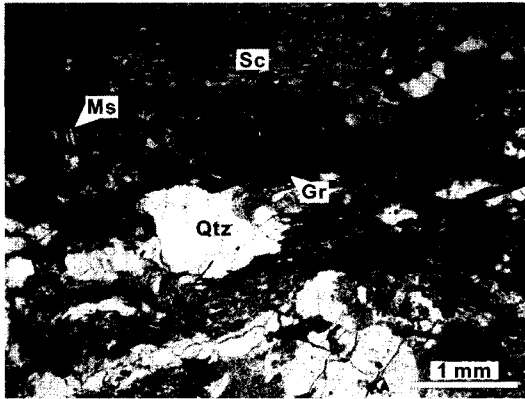


Fig. 5. Photomicrograph of graphite bearing metasedimentary rock (T40; open-polarised light). Sc: sericite.

함량을 보여주는 시료(T58)가 낮은 붕소 함량(8.63 ppm B)을 갖는 것으로 볼 때 후기 변질 작용은 붕소의 함량 변화에 큰 영향을 주지 못한 것으로 판단된다. 비록 흑연에 포함되는 붕소를 정량적으로 측정할 사례는 없지만, 흑연과 유사한 석탄 분진에서 평균 600 ppm의 붕소가 측정된 사례(Mason and Moore, 1982)와 흑연을 가지고 있는 편암이 없는 것보다 붕소 함량이 2 배 이상 높다는 연구결과(Moran *et al.*, 1992)에 비교해 보면, T40번 시료가 석류석대 암석임에도 불구하고 높은 붕소 함량을 갖고 있는 이유는 흑연 때문으로 판단된다.

결론적으로 흑연이 포함된 일부 시료를 제외하고, 북동 영남육괴의 전암 붕소 함량은 전기석의 모드비와 깊은 관련이 있다. 이 결론은 일본의 료케 변성대에서 변성온도가 증가함에 따라 변성퇴적암 내의 전기석이 붕괴되는 양상과 더불어 전암 붕소 함량이 감소한다는

연구결과(Kawakami, 2001, 2004; Kawakami and Ikeda, 2003)와 잘 일치한다. 따라서 이 지역의 변성퇴적암의 붕소 함량을 조절할 주된 요소는 화성작용이 아닌 고온/저압의 광역변성작용이다.

### 5.2. 변성퇴적암류에서 붕소와 주원소 및 미량원소 사이의 상관관계

전기석이 암석의 붕소 함량변화와 관계가 깊은지 판단해 보고자 암석의 붕소와 주원소 및 미량원소 함량을 비교해보았다. 전기석은  $XY_3Z_6T_6O_{18}(BO_3)_3W_4$ 의 복잡한 화학식으로 표기할 수 있으며 다양한 원소들을 함유한다 (e.g.,  $X=Na^{1+}, Ca^{2+}, K^{1+}, vacancy(=\square)$ ;  $Y=Mg^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Al^{3+}, Li^{1+}, Fe^{3+}, Ti^{4+}, Cr^{3+}, V^{3+}$ ;  $Z=Al^{3+}, Mg^{2+}, Fe^{3+}, Cr^{3+}, V^{3+}$ ;  $T=Si^{4+}, Al^{3+}$ ;  $W=(OH), O^2, F$ ; Henry and Dutrow, 1996). 연구지역의 변성퇴적암에 분포하는 전기석은 대체로 드라바이트 [dravite;  $(K_{0.01-0.02}, Na_{0.49-0.67}, Ca_{0.01-0.07}, \square_{0.14-0.47})(Mg_{1.20-1.80}, Fe_{0.76-1.03}, Mn_{0.00-0.01}, Al_{0.12-0.32}, Ti_{0.01-0.18})Al_6(Si_{5.65-5.85}, Al_{0.15-0.35})(BO_3)_3(OH, F)_4$ ]에 속한다(Cheong and Na, 2007; Cheong, unpublished data).

Fig. 6과 7은 각각 변성퇴적암류 시료의 log B 값과 주원소 및 미량원소 함량을 비교한 다이어그램이다. 더불어 붕소 증가에 따른 다른 원소들의 증감 경향성 파악을 돕기 위해 변성퇴적암류들에 대한 추세선도 함께 기입했다. 로그함수를 이용한 이유는 전암 붕소의 변화가 다른 원소에 비해서 매우 커서 정수 다이어그램에서는 경향성이 잘 나타나지 않기 때문이다. 그러나 로그함수를 이용했음에도 불구하고 데이터가 산개되어 있어 붕소의 증가에 따른 뚜렷한 선형 경향성이 관찰되지 않는다. 따라서 붕소의 함량 변화에 따른 주

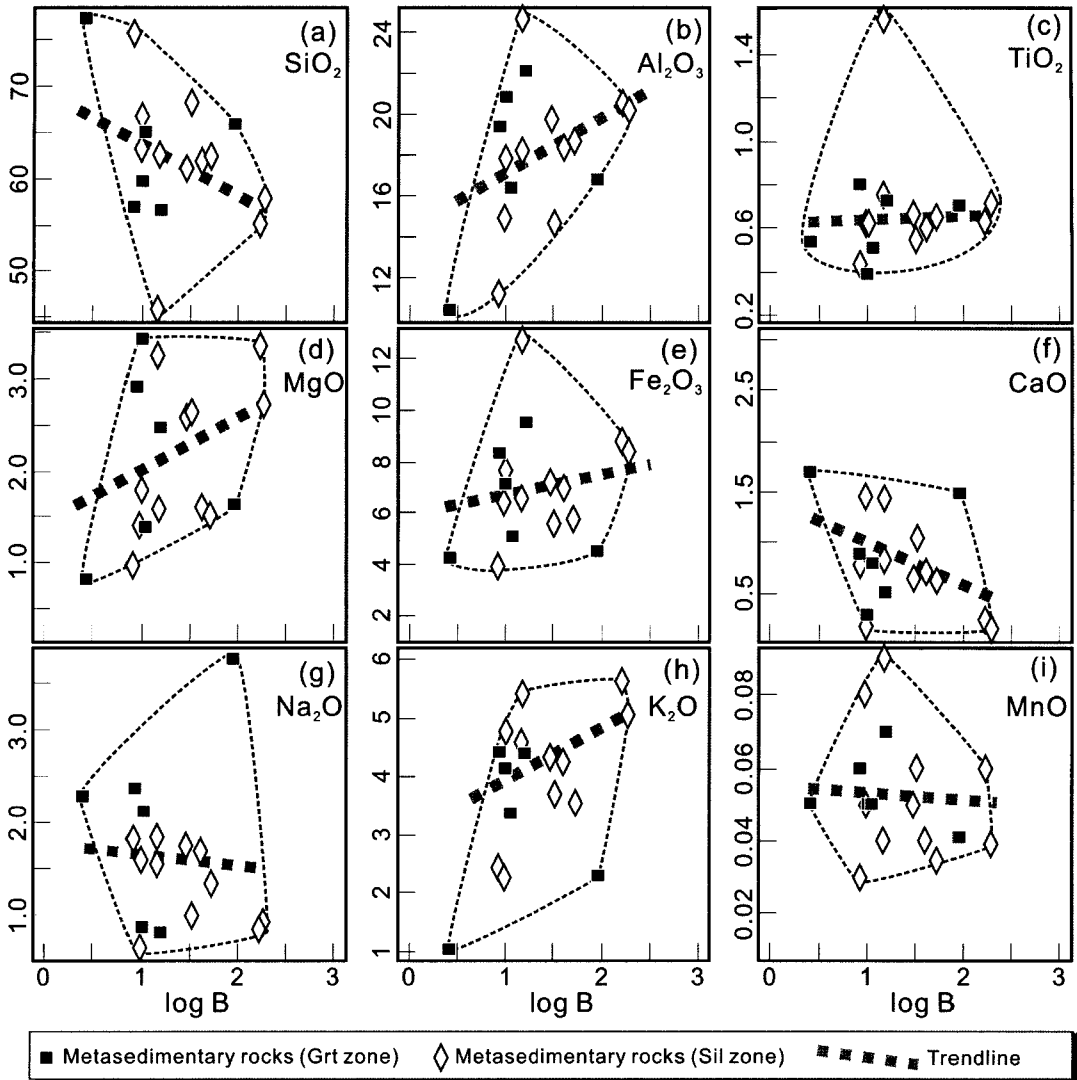


Fig. 6. Log B vs. Major element diagrams of metasedimentary rocks.

원소 및 미량원소들의 변화경향성을 객관적인 판단이 어렵다. 그러나 일부 원소에서 미약하나마 붕소 증감에 따른 원소의 변화 경향성이 나타나기 때문에 이에 대해서 논해보고자 한다.

SiO<sub>2</sub>, CaO는 붕소와 음의 상관관계를 보여주며, 반면에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, K<sub>2</sub>O는 양의 상관관계로 도시된다. Na<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 매우 미약한 양의 상관관계를 이루며, TiO<sub>2</sub>와 MnO는 증감의 경향성이 나타나지 않는다. 붕소와 SiO<sub>2</sub> 사이의 반비례 현상은 붕소 함량이 적은 석영의 비율과 관련이 깊은 것으로 추정된다(Fig. 6a). CaO와 Na<sub>2</sub>O는 붕소함량이 비교적 적은 사장석의 증가가 붕소 함량을 줄일 수 있는 가능성을 보여준다(Fig. 6f

and g). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O의 증가 효과는 이 원소를 주원소로 하고 비교적 붕소 함량이 높은 백운모, 규선석과 관계 있는 것으로 판단된다(Fig. 6b and h). 전기석도 소량의 K(0.05-0.1 wt.% K<sub>2</sub>O)와 다량의 Al(33-36 wt.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Cheong, unpublished data)를 함유하기 때문에 전기석의 모드비도 붕소에 영향을 주었을 것으로 추정된다. 연구지역의 변성퇴적암류에서 Mg와 Fe는 주구성광물 중에서 주로 흑운모(7-11 wt.% MgO, 15-23 wt.% FeO; Table 1), 근청석(6-8 wt.% MgO, 8-11 wt.% FeO), 석류석(2-7 wt.% MgO, 31-36 wt.% FeO)과 부수광물 중에서 전기석(5-7 wt.% MgO, 5-7 wt.% FeO), 황철석, 티탄철석 등에 존재한다(Cheong, unpublished

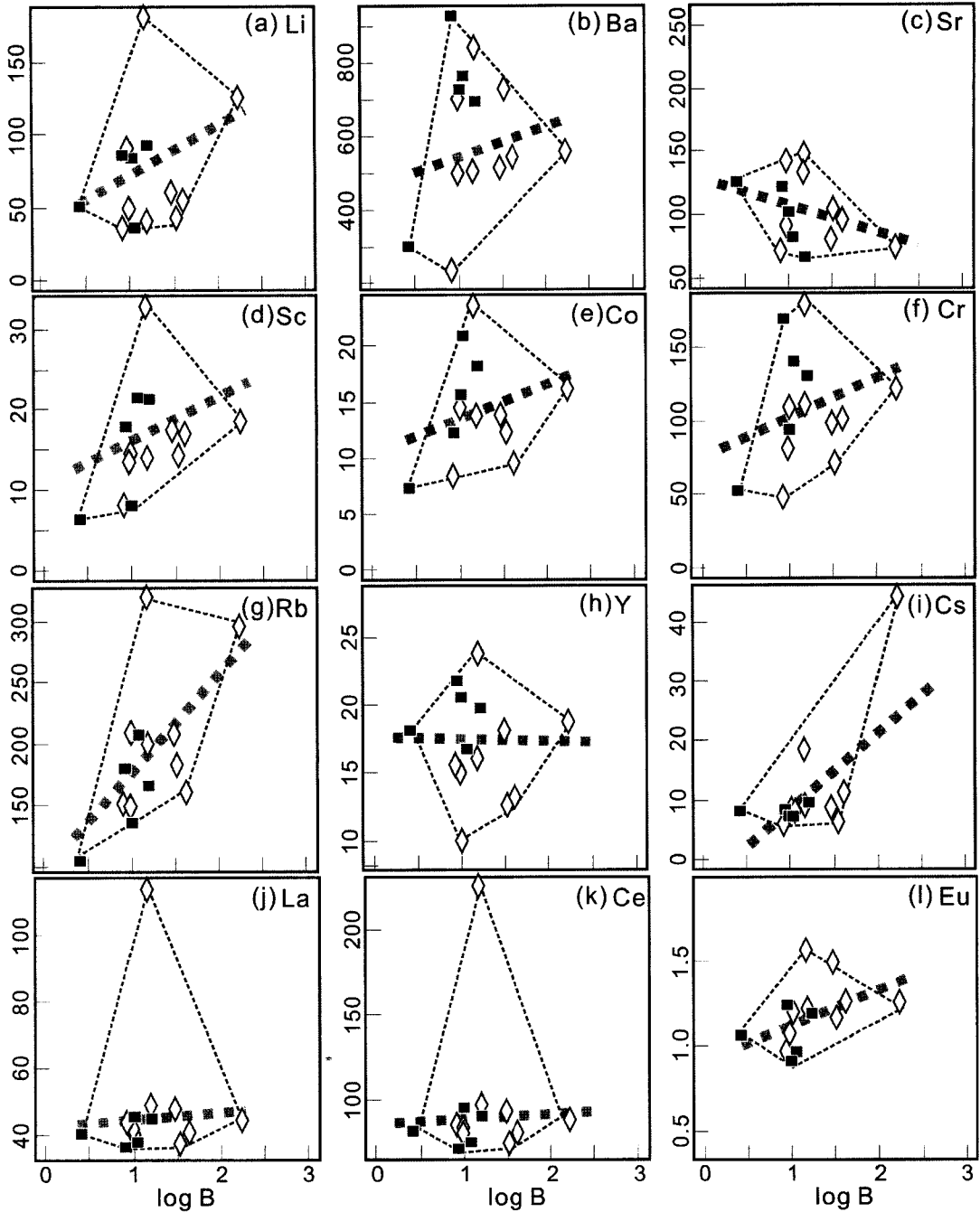


Fig. 7. Log B vs. trace and rare earth element diagrams of metasedimentary rocks. Symbols are the same as Figure 6.

data). 따라서 log B가 증가함에 따라 MgO와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 증가하는 것은 붕소가 다량 함유된 전기석의 영향일 가능성이 있다(Fig. 6d and e). TiO<sub>2</sub>, MnO의 증가의 상관관계가 없는 이유는 Ti 광물인 금홍석, 티탄철석, 흑운모 그리고 Mn 광물인 석류석이나 녹니석이

붕소의 함량에 큰 영향을 미치지 못하는 것과 관련이 있다고 판단된다(Fig. 6c and i).

비록 전기석에서 미량원소를 정량적으로 측정하지는 못했지만 붕소와 미량원소간에 상관관계를 비교해 보았다. 붕소와 미량원소 사이의 상관관계에서는 Li, Rb,

Cs가 상대적으로 뚜렷한 양의 관계를 보여주고, Ba, Sc, Co, Cr은 미약한 양의 관계를 보여준다. 반면에 Sr, Y, La, Ce는 뚜렷한 상관관계가 나타나지 않는다(Fig. 7). 경원소인 Li은 전기석과 백운모에서 주원소로 산출하는 경우가 많다(Mason and Moore, 1982; Henry and Dutrow, 1996). 따라서 전기석이나 백운모의 감소가 붕소 감소에 영향을 주었을 가능성이 있다(Fig. 7a). Ba, Rb, Cs는 K를 치환하는 대표적인 미량원소이다(Mason and Moore, 1982). 따라서 이 원소들은 백운모, 흑운모, K-장석에 많은 원소이다. 그러나 붕소와 양의 관계를 이루기 때문에 전기석이나 백운모가 영향을 주었을 것으로 판단된다(Fig. 7b, g and i). Sc와 Co는 Fe를 치환하는 대표적인 미량원소이고 Cr은 Mg를 치환하는 대표적인 원소이다. 따라서 이는 log B와 미약하지만 양의 관계로 나타나는  $Fe_2O_3$  및 MgO와 각각 관련이 있는 것으로 보인다(Fig. 7d, e and f). 음의 경향성을 갖는 Sr은 Ca를 치환하는 대표적인 원소이기 때문에 Ca의 경향성을 따르는 것으로 보인다(Fig. 7c). 그러나 사장석의 Ca를 잘 치환하는 Eu는 CaO의 경향성과 상반되게 나타나지만 그 함량이 미미하여 뚜렷한 경향성을 논하기에는 어렵다(Fig. 7l). 뚜렷한 경향성이 나타나지 않는 Y, La, Ce는 이들이 들어 있는 광물(e.g., 석류석, 사장석, 모나자이트 등)이 붕소의 함량변화에 큰 영향을 미치지 못했음을 의미한다(Fig. 7h, j, and k).

상술하였듯이 붕소의 증가에 따른 대부분의 주원소 및 미량원소의 증감 경향성이 뚜렷하지 않을 뿐 아니라 암석에 분포하는 전기석의 모드비가 매우 작기 때문에 붕소와 다른 원소와의 상관관계를 논한다는 것은 매우 위험한 경향성이 있다. 그러나 전기석의 매우 높은 붕소함량을 고려하면 참고적인 자료로는 충분히 이용하다고 생각된다. 따라서 붕소와 양의 상관관계를 이루는  $Al_2O_3$ , MgO,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$ , Li, Ba, Sc, Co, Cr, Rb, Cs는 전기석을 구성하는 원소들과 관련성이 있으며, 변성퇴적암에서 전기석이 변성 온도의 증가에 따라서 감소하며 이것이 붕소의 함량에 영향을 주었다는 결론을 어느 정도 보완하는 자료로 활용 할 수도 있다.

### 5.3. 흑운모 화강편마암의 붕소 함량

흑운모 화강편마암의 붕소 함량(2.62-12.2 ppm B)은 화강암의 평균 붕소 함량(1.7 ppm B; Mason and Moore, 1982)보다는 높으나 변성퇴적암에 비해 상대적으로 낮거나 비슷하다. 또한 변성대에 따른 특정한 경향성이 관찰되지 않는다(Fig. 4). 일반적으로 화강암을 형성한 용융체가 분화작용을 겪는 동안 붕소는 결정보

다는 용융체에 남으려는 성질이 강하다(London and Morgan, 1996). 따라서 후기에 정출되는 암석인 페그마타이트에 농집되는 경향성이 강하다. 다섯 개의 시료 중에서 S59-1은 다른 흑운모 화강편마암에 비해서 백운모의 비율이 높기 때문에 상대적으로 붕소 함량이 높은 것으로 추정되나 모드비가 육안으로 판별된 개략적인 것이고 붕소가 분석된 화강편마암 시료의 개수가 적기 때문에 단정하기는 힘들다. 세부적인 사항은 추가적인 연구이후에 논할 예정이다.

## 6. 결 론

변성퇴적암류와 변성화성암류가 복잡하게 분포하는 영남육괴의 북동부에서 붕소의 전함량을 분석하여 변성작용과 화성작용이 변성퇴적암류의 붕소 전함량에 어떤 영향을 주었는지 연구하였다. 변성퇴적암류의 광물 조합에 따라서 규선석대와 석류석대로 나눌 수 있는 연구지역은 Ti-흑운모 지온계를 이용하여 4-6 kbar 사이에서 규선석대가 553-687°C, 석류석대가 582-722°C이다. 붕소의 전함량은 한 개 시료를 제외하고 규선석대 암석보다는 석류석대 암석이 적기 때문에 변성 온도의 증가에 따라 감소하는 경향성을 보여준다. 붕소를 주원소로 하는 전기석이 석류석대에서 상대적으로 드물거나 없기 때문에 광물의 모드비와 붕소의 전함량 비교에서 붕소를 조절하는 주된 광물은 전기석임을 지시한다. 또한, 흑연을 다량 함유하고 있는 석류석대의 변성퇴적암이 높은 붕소 함량을 보이므로 흑연은 전암 붕소함량을 조절하는 또 다른 광물임을 지시한다. 비록 뚜렷한 경향성을 보여주지 않지만, 전암 붕소 함량과 주원소 및 미량원소 상관관계에서 전기석을 구성하는 원소 또는 이와 관련된 원소( $Al_2O_3$ , MgO,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$ , Li, Ba, Sc, Co, Cr, Rb, Cs)들이 붕소와 양의 관계를 이루기 때문에 전기석이 붕소의 조절자로서 역할을 했다는 것을 보조적으로 증명한다. 흑운모 화강편마암은 전반적으로 변성퇴적암보다 붕소 함량이 낮거나 비슷하며 변성 온도의 변화에 따른 붕소의 변화 양상이 관찰되지 않는다.

## 사 사

본 논문을 세심하게 심사를 해주시고 건설적인 비평을 해주신 김현철 박사님과 익명의 심사위원께 깊은 감사를 드린다. 이 연구는 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원으로 수행되었다.

참고문헌

Anovitz, L.M. and Grew, E.S. (1996) Mineralogy, petrology and geochemistry of boron: an introduction. In Grew, E.S. and Anovitz, L.M.(ed.) *Boron-Mineralogy, Petrology and Geochemistry, Reviews in Mineralogy*. v.33, Mineralogical society of America, p.1-40.

Byun, S.H., Sun, G.M. and Choi, H.D., (2002) Development of a prompt gamma activation analysis facility using diffracted polychromatic neutron beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. v.487, p.521-529.

Byun, S.H., Sun, G.M. and Choi, H.D. (2004) Prompt gamma activation analysis of boron in reference materials using diffracted polychromatic neutron beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. v.213, p.535-539.

Cheong, W.S., Cheong, S.W. and Na, K.C. (2006) Petrochemistry and geologic structure of Icheong granitic gneiss around Samcheonk area, Korea. *Journal of Petrology Society of Korea*, v.15, p.25-38.

Cheong, W.S. and Na, K.C. (2007) Tourmaline reaction and metamorphism in the metasedimentary rocks of northeastern Yeongnam massif. *Proceedings of the Annual Joint Conference, Mineralogical and Petrological Society of Korea*, p.47-49.

Cheong, W.S. and Na, K.C. (2008) Origin and evolution of leucogranite of NE Yeongnam massif from Samcheok area, Korea. *Journal of Petrology Society of Korea*, v.17, p.16-35.

Failey, M.P., Anderson, D.L., Zoller, W.H., Gordon, G.E. and Lindstrom, R.M. (1979) Neutron-capture prompt gamma-ray activation analysis for multielement determination in complex samples. *Analytical Chemistry*, v.51, p.2209-2221.

Henry, D.J. and Dutrow, B.L. (1996) Metamorphic tourmaline and its petrologic applications. In *Boron-Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, In Grew, E.S. and Anovitz, L.M.(ed.) *Boron-Mineralogy, Petrology and Geochemistry, Reviews in Mineralogy*. v.33, Mineralogical society of America, p.503-557.

Henry, D.J., Guidotti, C.V. and Thomson, J.A. (2005) The Ti-saturation surface for low-to medium-pressure metapelitic biotites: implications for geothermometry and Ti-substitution mechanism. *American Mineralogist*, v.90, p.316-328.

Kawakami, T. (2001) Tourmaline Breakdown in the migmatite zone of the Ryoke metamorphic belt, SW Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, v.19, p.61-75.

Kawakami, T. (2004) Tourmaline and boron as indicators of the presence, segregation and extraction of melt in pelitic migmatites: examples from the Ryoke metamorphic belt, SW Japan. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh : Earth Sciences*, v.95, p.111-123.

Kawakami, T. and Ikeda, T. (2003) Boron in metapelites controlled by the breakdown of tourmaline and retrograde formation of borosilicates in the Yanai area, Ryoke metamorphic belt, SW Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.145, p.131-150.

Kretz, R. (1983) Symbols for rock forming minerals. *American Mineralogist*, v.68, p.277-279.

Lee, S.M., Kim, H.S. and Oh, I.S. (1986) Metamorphic petrology of Precambrian gneisses in Samcheok-Jukbyeon area. *Journal of Geological Society of Korea*, v.22, p.257-277.

Lee, S.G., Kim, K.H., Song, Y.S., Kim, N.H. and Park, K.H. (2007) Geochemical implication of rare earth element tetrad effect from a leucocratic granite gneiss in the Imweon area, Gangwon province, Korea. *Journal of Petrology Society of Korea*, v.16, p.27-37.

London, D. and Morgan, G.B. VI, (1996) Boron in granitic rocks and their contact aureoles. In *Boron-Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, In Grew, E.S. and Anovitz, L.M.(ed.) *Boron-Mineralogy, Petrology and Geochemistry, Reviews in Mineralogy*. v.33, Mineralogical society of America, p.299-330.

Mason, B. and Moore, C.B. (1982) *Principles of geochemistry*. 4th(ed.), John Wiley & Sons, 344p.

Moran, A.E., Sisson V.B. and Leeman W.P. (1992) Boron depletion during progressive metamorphism: implications for subduction processes. *Earth and Planetary Science Letters*, v.111, p.331-349.

Morgan, G.B. VI and London, D. (1989) Experimental reactions of amphibolite with boron-bearing aqueous fluids at 200 MPa: implications for tourmaline stability and partial melting in mafic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.102, p.281-297.

Nakano, T. and Nakamura, E. (2001) Boron isotope geochemistry of metasedimentary rocks and tourmalines in a subduction zone metamorphic suit. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v.127, p.233-252.

Patiño Douce, A.E. (1993) Titanium substitution in biotite: an empirical model with applications to thermometry, O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O barometries, and consequences for biotite stability. *Chemical Geology*, v.108, p.133-162.

Robert, J.L. (1976) Titanium solubility in synthetic phlogopite solid solutions. *Chemical Geology*, v.17, p.213-227.

Wilke, M., Nabelek, P.I. and Glascock, M.D. (2002) B and Li in Proterozoic metapelites from the Black Hills, U.S.A.: Implications for the origin of leucogranitic magmas. *American Mineralogist*, v.87, p.491-500.

Xu, L. and Rao, Z. (1986) Determination of boron in soils by sequential scanning ICP-AES using side line indexing method. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, v.325, p.534-538.