

상동지역 페그마타이트 및 관계 화성암의 전기석 분화 특징

김수영* · 문희수**

The Differential Characteristics of Tourmalines from Pegmatites and Its Associated Rocks, Sangdong Area.

Soo-Young Kim* and Hi-Soo Moon**

ABSTRACT: The tourmalines distributed in the Sangdong area belong to the dravite-schorl series in terms of the cell dimensions and the chemical compositions. Geochemical characteristics of tourmalines indicate that Naedeogni granite and pegmatite appear to be derived from Li-poor and Fe-riched aplite rocks, but Nonggeori granite is derived from Ca-poor or Si-riched pelitic rocks. The Mg+Fe contents of tourmaline in Naedeogni granitoids are decreased from the granites to the pegmatites with the Fe contents increased while Mg contents decreased. It indicates the differentiation during the crystallization of tourmalines. These phenomena are coincided with the chemical variations from cores toward rims of the zonal tourmalines. Such a compositional variations in Nonggeori granite can not be observed

서 론

페그마타이트의 주 구성 광물인 전기석은 Si, Mg, Ca, Fe, Al, Mn 등 주성분과 Li, F, B, (OH) 등의 부 성분으로 구성되어있다. 본 성분들은 페그마타이트 분화작용의 중요한 지시자가 될 뿐만 아니라, 페그마타이트 생성시 규산질 용융액으로부터 전기석이 분결작용이 일어날때 이에 대한 모델을 제시할 수 있다는데 중요성이 있다. 페그마타이트에서 분화작용이 진행될때, 일반적으로 F, B, P, Li 등의 성분이 농집되는데 (Jahns, 1982; London, 1987; Jolliff, 1987) 이와같은 성분은 금속 혼합물과 농집된 양이온을 흡수할 수 있는 용융상태의 규화물 구조를 조정하는데 중요한 역할을 한다고 하였다 (Manning et al., 1984; Jolliff, 1987). 근래에는 이와같은 성분은 페그마타이트 용융액이 물을 함유, 유지하는 능력과 공존하는 성분들을 완전히 혼화하는데 기여 한다는 사실도 밝힌 바 있다 (London, 1986).

전기석이 갖는 색깔과 광학적 성질은 그 화학적 성분을 반영하고 이와같은 성질은 전기석을 함유하고 있는 암석의 상대적인 진화정도와 분결경향을 가르키는 근거가 된다고 하였다 (Jenk, 1935; Carbbi & Pieruccini, 1947; Bradly & Bradly, 1953). Henry (1985) 는 전기석의 성분 치환에 의한 화학적 특성에 의해서 모

암의 암석학적 특징과 그 근원암을 분류 하였다. Power (1968), Neiva (1974), Henry & Guidotti (1985), 그리고 Jollif et al. (1985, 1986) 등에 의하면 전기석은 암석 성인에 따라 체계적인 성분 변화 경향을 보여주며 또한 페그마타이트의 분결작용을 지시하는 효과적인 근거가 된다는 것이다. 전기석의 성분변화는 전기석을 배태하는 모암의 성분과 공존 광물의 화학적 성분 및 P-T-foz 조건에 관계되고, 기계적, 화학적으로 대단히 안정하므로 본 광물을 포함하고 있는 암석의 물리, 화학적 조건을 제공하는 중요한 근거가 될수 있다고 하였다 (Henry & Guidotti, 1985).

따라서 본역에 분포하는 화강암질암의 주 구성 광물이며, 전술한 바의 성분을 주 구성 성분으로하는 전기석의 화학적 특성을 밝히는것은 페그마타이트의 진화과정을 연구하는데 중요한 방법 중 하나가 될 것이다. 본역에 분포하는 동일년대의 암층이며, 공간상 밀집히 분포하는 일련의 내덕리 및 농거리 화강암에서 페그마타이트에 이르는 암석의 주 구성 광물인 전기석의 광물 화학적 연구를 통하여 전기석에 대한 화학적 조성 변화 특성을 밝히고, 특히 상기 화강암류와 페그마타이트와의 상호 화학적 성분 변화 경향과 페그마타이트의 결정화작용과의 관계를 유추하고자한다.

*한국자원연구소 광상연구부 (Korea Institute of Geology, Mining and Materials, P.O. Box 14, Taedok Science Town, Taejon 305-350, Korea)

**연세대학교 지질학과 (Department of Geology, Yonsei University, 134 Shinchondong, Seodaemunku, Seoul 120-749, Korea)

지 질

본역은 영남육괴의 북동부에 해당되는 선캠브리아시대의 태백산소분지에 위치하며 본 분지를 구성하고 있는 평해동, 기성동,

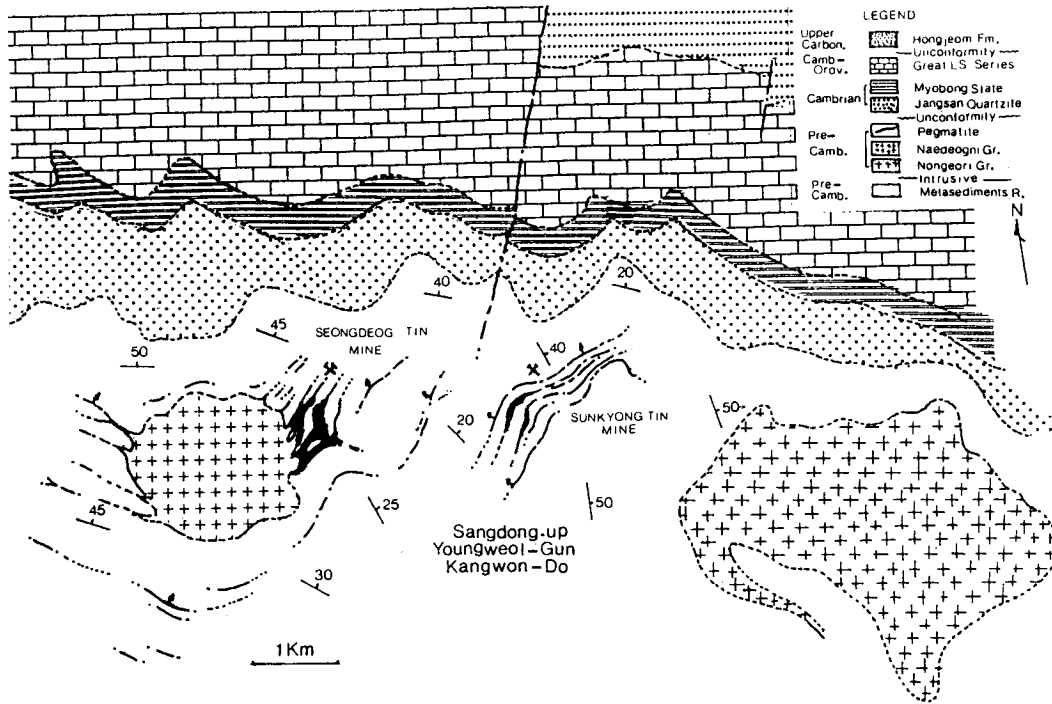


Fig. 1. The regional geologic map of tin mineralized area in Sangdong district.

원남동 그리고 울리동 중 최상부층에 해당되는 울리통이 대부분을 점유 하고있다. 본 울리통은 변성퇴적암으로 구성되어 있으며 백운산향사의 남측 기반암이되며 북으로는 캄브로-오르도비스기의 조선누층군과 경사부정합으로 접하고 있다.

본역의 대부분을 점유하고 있는 울리통은 하부로 부터 각화사층과 고선리층으로 구분되며, 고선리층의 기저암으로 인정되는 운모규암 및 흑운모, 석영편암을 기준으로하여 양분되는데 그 경계는 확실하지 않다. 구성암은 주로 흑운모-백운모-석류석편암, 흑운모-백운모-홍주석편암, 운모질편암, 천매암 그리고 규암 등으로 구성되어 있으며 렌즈상의 석회암층이 박층상으로 협재하기도 한다.

선캄브리아시대의 농거리화강암과 내덕리화강암이 상기한 변성퇴적암을 관입 분포하고 있으며 화강암질 페그마타이트가 도처에 산재하여 발달하고 있다. 특히 전술한 두 화강암 주변부에는 함석석 페그마타이트가 분포된다 (Fig. 1). 서벽리도쪽에 의하면 내덕리화강암을 고선리층의 일부로 보아 편마암류, 편암류 및 화강암으로 구성된 혼성대로 구분하고 내덕리화강암내에 분포하는 편마암류는 본 화강암질 페그마타이트가 관입되면서 고선리층의 변성상으로 편암류와 구분하였다(김동우 와 김상욱, 1965).

농거리화강암과 내덕리화강암 및 페그마타이트의 백운모 K/Ar 절대연령 측정 결과 $1,802 \pm 18 \text{ m.a}$ ~ $1,673 \pm 20 \text{ m.a}$ (Yun, 1985)으로 측정되었으며, 역시 함석석 페그마타이트도 비슷한 연대 ($1,793 \pm 18 \text{ m.a}$)로 밝혀졌다. 농거리화강암의 Rb/Sr법 전암절대 연령측정에 의하면 비교적 높은 초생치 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} : 0.7534 \pm 188$)를 갖는 중기 원생대에 속하는 $1,596 \pm 180 \text{ m.a}$ 로 보고된 바 있다 (이덕원, 1988).

전기석의 산출상태

본역에 분포하는 전기석은 거정에서 세립에 이르는 녹회색 내지 흑회색의 주상결정과 미립의 녹회색 내지 흑갈색의 주상결정으로 구분된다. 이 전기석들은 대부분 일차적인 전기석이나 일부 함석석 페그마타이트의 모암 접촉부 및 빈광 페그마타이트의 후기 변질대에 전기석화 작용에 의한 녹회색의 이차 전기석의 미립 주상결정들이 분포한다. 페그마타이트의 모암인 변성퇴적암류와의 접촉면에 발달되는 이차 전기석은 대부분 접촉면에 수직으로 분포하고 있다. 본 연구에서는 이차적 전기석은 제외 하였으며 비교적 거정에서 중립의 결정들로서 자형의 신

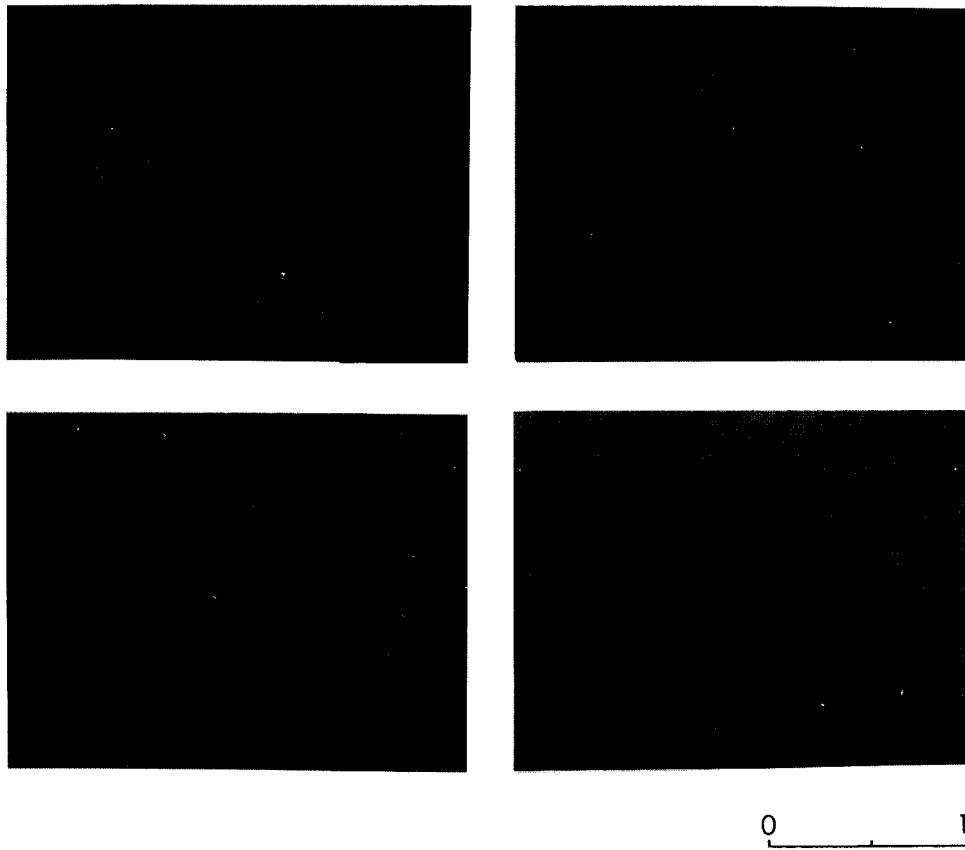


Fig. 2. The occurrences of zonal tourmalines from Sangdong area.

선한 결정들을 선택하였다(Fig.2).

농거리화강암에 분포하는 전기석은 세립 내지 중립의 결정들로서 그 크기가 대부분 일정한 양상을 보이고 있으며, 001 면에 특히 누대조각의 발달이 양호하다. 본 전기석은 내핵에서부터 외각으로 갈수록 점차 담황녹색 내지 올리브갈색에서 올리브회색 또는 회녹색으로 누대되는 경우가 많으며 후기의 석영이나 인회석의 침입을 허용하기도 한다. 결정의 크기는 대부분 0.5~1.5 mm이다. 전기석 결정의 색깔은 내덕리화강암이나 페그마타이트에 비하여 녹색 혹은 올리브색이 우세한 경향이 있다.

내덕리화강암에 내재되는 전기석은 세립에서부터 조립에 이르는 비교적 다양한 입도로 분포하고 있으며, 대부분 공존하고 있는 조암광물과 입도를 같이 하는 경향이 있다. 누대조각은 거정질 전기석에 발달되는 경향이 많으며 내핵에서부터 외각으로 갈수록 그 색깔이 어두어지는 공통 경향이 있으며 누대 조각간의 확실한 경계를 가지고 있다. 누대 구간은 대부분 두개의 구간으로 나누어져 있으나 부분적으로는 세개의 구간으로도 구분되는 경우도 있다. 결정의 크기는 0.5~3.0 mm에 이르고 있

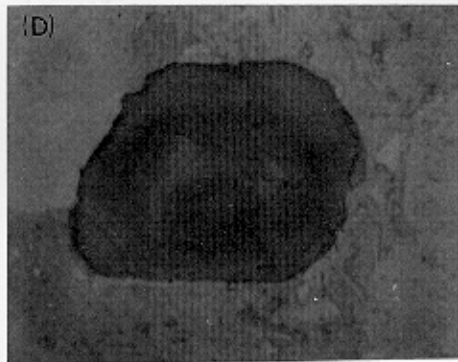
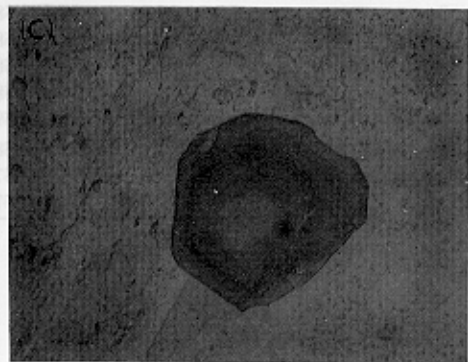
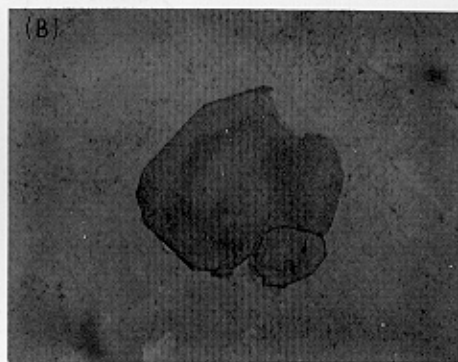
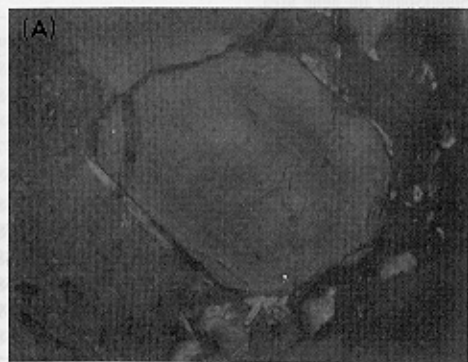
으나 최대 장경이 5 cm에 달하는 것도 있다. 변질작용은 특히 001 면을 따라서 백운모로 변질되어 있는 경우가 많다. 결정의 색깔은 농거리화강암에 비해 보다 갈색 또는 흑색이 우세하다.

빈광 페그마타이트 내에 발달되는 전기석의 누대 조각은 내핵에서부터 외각으로 갈수록 연갈색 내지 담녹색에서부터 암갈색 혹은 암녹색으로 변하고, 누대구간은 2~3개의 구간으로 구분되며 능면체 결정의 성장면을 보여주고 있다. 부분적으로는 전기석의 주변에 세립질의 이차 전기석의 발달이 우세하며 간혹 석류석의 포이킬리틱 조직을 보여 주기도 한다.

함석석 페그마타이트 내에 전기석의 발달은 그 분포 빈도가 일반적으로 적은 편이나 변성 퇴적암류와의 접촉부 혹은 국부적인 양상으로 함석석 페그마타이트 자체 내에 분포하며 대부분 백운모화 되거나 녹리석화되고 혹은 철물질의 심한 오염을 받고 있다.

일반화학적 특성

전기석은 $XY_2Z_6(BO_3)_3Si_6O_{18}(OH)_4$ 의 일반분자식을 가지는 완



0 1

Fig.2. The occurrences of zonal tourmalines from Sangdong area.

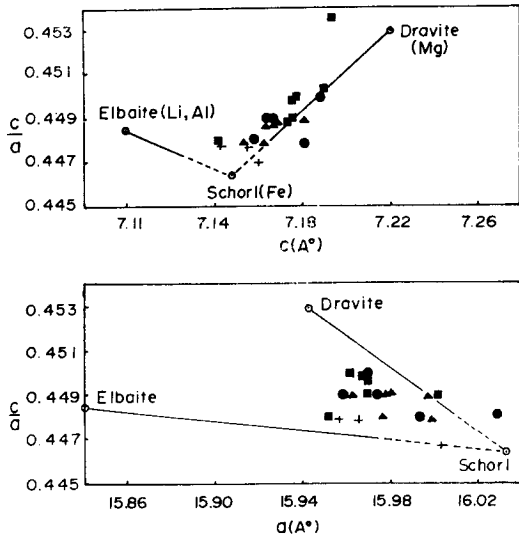


Fig. 3. Axial ratios and cell dimensions of tourmaline from the intrusives, Sangdong tin mineralized area (after Epprecht, 1953). Solid circle; Nonggeori granite, solid square; Naedeogri granite, solid triangle; barren pegmatite, and cross; productive pegmatite.

전한 borosilicate 광물로서 Z 자리와 이보다 약간 크고 왜곡된 Y 자리 등 두 형태의 팔면체 자리를 가지고 있다. Z 자리는 전형적으로 Al이 차지하고 있으나 상당량의 Fe²⁺, Fe³⁺, Ti, Mg, Cr, 그리고 V에 의해 치환된다. Z 자리 보다 큰 Y 자리는 1가, 2가, 3가 그리고 4가의 양이온이 치환된다. X 자리는 흔히 Na를 포함하고 있으나 어느정도 Ca 및 Mg를 수용하고 있으며 빈자리로 남아 있기도 한다. Boron은 규칙적인 삼각 배위 내에 있으며 특히 활발한 치환은 하지 않는다. Al은 사면체 자리의 Si을 다소 교대 할 수 있으며, 수산기는 F⁻, 혹은 O²⁻에 의해 교대되는 수가 있다.

전기석의 분류

본역에 분포하는 전기석을 Epprecht (1953)의 도표에 도시한 결과 (Fig. 3) 대부분 schorl-dravite 계열에 속한다. 단위포는 농거리화강암에 비해서 내덕리화강암과 페그마타이트의 전기석들이 수축되어 있는 현상이 있다. 이것은 각 전기석을 치환하는 성분의 이온반경 차이에 의한 것으로 해석될수 있다 (Table 1).

본역에서 산출된 전기석의 화학 조성을 Y-site의 성분에 대해서 Mg+Ti, Fe+Mn+(Zn), Al+(Li)의 삼각도형에 투영하여 보면 Fig. 4와 같다. 내덕리화강암에서부터 페그마타이트로 향하여 Mg가 감소하고, Fe가 증가하는 분화 경향을 보이며, 함석석 페그마타이트로 갈수록 비교적 Fe와 Al이 치환 증가된 schorl의 단성분에 근접되고 있다. 내덕리화강암에서 빈광 페그마타이트와

Table 1. Unit cell dimensions of tourmaline in various intrusives, Soonkyoung tin mine area.

Rocks	Sample No.	a(Å)	c(Å)	γ	Volume(Å ³)
Nonggeori Granite	NG-1	16.029	7.182	120	1598.194
	NG-2	15.969	7.185	120	1586.828
	NG-4	15.971	7.169	120	1583.624
	NG-8	15.958	7.163	120	1579.797
	NG-9	15.994	7.158	120	1585.558
Naedeogri Granite	T7518	15.966	7.177	120	1584.282
	T7517	15.749	7.192	120	1589.568
	T7513	15.969	7.190	120	1587.931
	T7506	15.961	7.177	120	1583.268
	T7505	16.002	7.176	120	1591.321
Barren Pegmatite	T7502	15.970	7.175	120	1584.280
	T7509	15.951	7.141	120	1573.413
	TM62-12	15.962	7.164	120	1580.498
	TM62-3	15.977	7.166	120	1584.196
	TM69-7	15.999	7.164	120	1588.223
Productive Pegmatite	TM69-4	15.979	7.169	120	1585.269
	TM69-2	15.975	7.154	120	1581.155
	T86016	15.999	7.182	120	1592.122
	TM.7403	16.001	7.160	120	1588.596
	TM.7408	15.963	7.154	120	1578.658
	TM.7409	15.951	7.141	120	1573.413

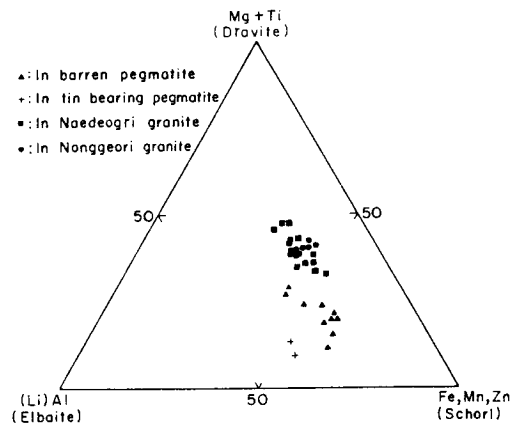


Fig. 4. Y-site occupancy of end-members of tourmaline from the Sangdong tin mineralized area. Symbols are the same as those in Fig. 3.

함석석 페그마타이트로 향하여 Fe 부화작용을 수반하는 페그마타이트의 분화경향을 지시한다. 농거리 화강암의 전기석은 일련의 페그마타이트의 분화경향과는 달리 dravite₍₅₀₎ schorl₍₅₀₎의 성분 치환작용이 없는 일정한 조성을 유지하고 있다.

Henry (1985)가 시도한 Ca-Fe-Mg 세성분에 의한 전기석의 성인 분류에 의하면 Fig. 5와 같이 농거리화강암의 전기석은 Ca이 결핍된 변성 이토암 (Ca-poor metapelite rocks)에서 유래된 전기석의 영역에 점시되고 있다. 그러나 대부분의 내덕리

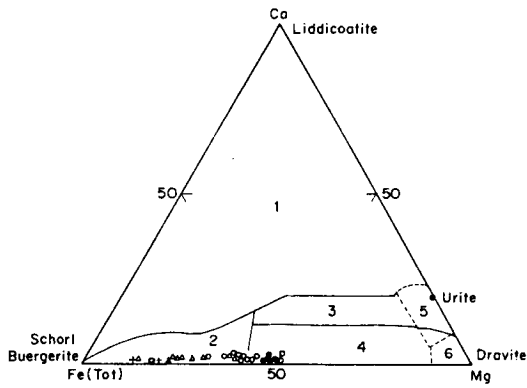


Fig. 5. Ca-Fe*-Mg diagram (Mol. proportions, after Henry, 1985) for tourmaline from Nonggeori granite (solid circle), Naedeogni granite (open circle) and pegmatites (open triangle), and tin bearing pegmatite (cross). 1; Li-rich granitoid pegmatite and aplites, 2; Li-poor granitoids and associated pegmatites and aplites, 3; Ca-rich metapelites, calc-silicates rocks, 4; Ca-poor metapelites, quartz-tourmaline rocks, 5; Meta carbonates, and 6; Meta ultra mafics.

화강암과 페그마타이트에 분포하는 전기석은 Li이 결핍된 화강암질암이나 그와 연관된 페그마타이트 혹은 반화강암 (Li-poor granitoids, pegmatite and associated pegmatite and aplite)에서 유래된 전기석의 영역에 속한다. 따라서 본 전기석의 화학조성의 분류에 의하면 내덕리화강암의 전기석은 화강암 본원 기원의 전기석으로 분류되나 농거리 화강암은 변성 퇴적 기원에 의한 전기석의 특성을 보인다.

전기석의 조성변화

전기석의 화학적 조성 변화에 있어서, 분화작용이 진행될때 점진적으로 전기석내에 Fe⁺와 Mg의 감소를 분화작용의 지표로 전체 할때, 본역에 분포하는 화성암류에 대하여 전기석의 화학 조성 중 Mg와 Fe, Ti 및 Mn 등 전이원소의 변화 경향과 암석의 분화작용과의 상호 관련성을 해석 하고자 한다. Jolliff et al. (1985) 는 S. Dakota의 Bob Ingersoll 페그마타이트를 대상으로 하여 분대구조 페그마타이트를 구성하는 화학조성의 분결 순서를 제시한 바, 이상적인 용융액 (ideal melt)에서 높은 장의 세기 (field strength)를 가진 양이온은 고온에 안정하고 낮은 장의 세기를 가진 양이온은 저온에 안정하게 된다고 하였다. 그 세기를 8면체 배위에 대한 양이온 11장의 세기 (cations field strength)를 계산하여 Ti는 9.8, Mg는 3.7, Fe는 3.1 그리고 Mn은 2.4로 제시하였다 (Tauson, 1965).

Fig. 6는 농거리화강암, 내덕리화강암과 페그마타이트의 전기석에 있어서 Y-site를 차지하고 있는 양이온의 성분 치환 경향을 보여준다. 내덕리 화강암에서부터 페그마타이트로 향하여 전기

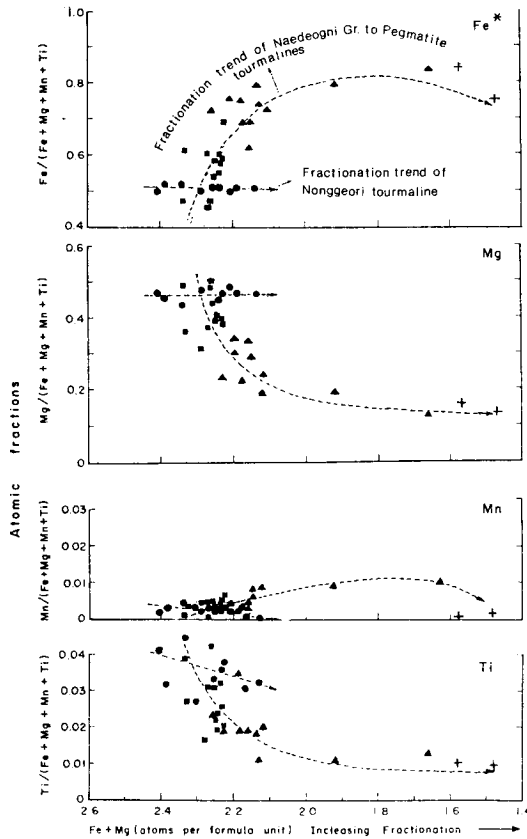


Fig. 6. Compositional trends of tourmalines in granites and pegmatites in terms of atom fractions of Fe, Mg, Ti and Mn versus (Fe+Mg) (atoms per formula unit). Symbols are the same as those of Fig. 3.

석내 Fe+Mg가 감소하는데, 내덕리화강암은 비교적 고온에서 안정하는 Ti와 Mg의 함량이 높으나 페그마타이트와 함석석 페그마타이트로 향하면서 점차적으로 저온 안정성 이온인 Fe와 Mn의 함량이 증가하는 경향을 보이고 있다.

그러나 농거리화강암의 전기석은 Fe+Mg의 감소에 따른 Y-site의 전이원소의 치환작용이 거의 없는 일정한 화학조성을 가지고 있어 내덕리화강암과 페그마타이트와는 상이하게 전기석의 분화작용이 온도 영향에 의한 분화작용이라기 보다는 이차 전기석화작용의 특징을 보인다. 즉 규산질 용융액 (silicate melt)로부터 분리된 수용액 (aqueous fluids)은 전기석의 성분에 여러가지의 영향을 미치게 되는데, Fe나 Mn은 수용액 내에 분배 효과가 크기 때문에 페그마타이트 단계의 전기석에 농집되는 경향을 반영하는것으로 해석된다.

Fig. 7은 공존하고 있는 전기석 (Table 2와 3) 과 백운모의

(1) 양이온의 장의 세기 = Z/r^2 (8 면체 배위에 대한 Z; 양이온의 대전력, r; 이온반경, Zhdanov 8 면체 배위에 대한 이온 반경 이용)

Table 2. Microprobe analyses of tourmalines from Naedeogni and Nonggeoni granite.

	7502	7506	7507	7509	7510	7513	7514	7516	71028	71032	71034	71035	NG-1	NG-2	NG-3	NG-4	NG-5	NG-6	NG-7	NG-8	NG-9
SiO ₂	36.24	36.40	36.18	35.54	35.56	35.71	35.78	35.65	35.90	35.84	36.46	35.95	35.81	36.42	35.90	35.36	35.76	35.81	35.86	35.49	35.80
TiO ₂	0.58	0.48	0.34	0.29	0.52	0.46	0.59	0.74	0.58	0.49	0.37	0.81	0.60	0.69	0.49	0.62	0.42	0.90	0.49	0.80	0.64
Al ₂ O ₃	34.21	33.88	33.35	33.05	32.67	33.02	33.90	33.60	33.15	33.00	33.70	33.65	34.00	34.08	33.70	32.57	33.48	32.56	33.52	32.57	33.30
FeO*	10.07	9.78	9.58	11.05	10.41	9.52	9.04	8.17	7.85	9.50	9.62	7.89	8.28	8.43	7.95	8.94	8.10	9.05	7.95	8.82	8.44
MgO	3.54	3.75	3.68	2.88	3.42	4.35	3.88	4.71	4.67	3.89	3.67	4.65	4.41	4.36	4.12	4.41	4.16	4.30	4.36	4.65	4.24
MnO	0.00	0.08	0.05	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.06	0.05	0.08	0.03	0.04	0.04	0.02	0.05	0.04	0.08	0.03	0.04	0.05
CaO	0.22	0.21	0.18	0.16	0.14	0.29	0.24	0.00	0.38	0.19	0.10	0.31	0.23	0.25	0.19	0.24	0.26	0.32	0.16	0.25	0.20
Na ₂ O	1.88	1.97	1.90	1.89	1.96	1.93	1.91	1.90	1.84	2.05	2.01	1.97	1.92	2.02	1.85	1.97	1.89	2.08	1.98	2.00	1.97
K ₂ O	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.05	0.03
Total	86.79	86.58	85.30	84.97	84.77	85.36	85.41	84.83	84.47	85.05	86.05	85.31	85.34	86.33	84.26	84.20	84.14	85.14	84.37	84.67	84.67
Cations number on basis of 29 oxygens																					
Si	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Al(Z)	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Al(Y)	0.676	0.583	0.519	0.576	0.498	0.540	0.700	0.665	0.530	0.512	0.537	0.620	0.715	0.618	0.669	0.514	0.621	0.431	0.611	0.491	0.579
Ti	0.073	0.059	0.042	0.036	0.066	0.058	0.074	0.093	0.073	0.062	0.046	0.102	0.075	0.085	0.062	0.079	0.053	0.114	0.062	0.102	0.081
Fe(2)	1.394	1.349	1.329	1.560	1.469	1.338	1.268	1.150	1.097	1.330	1.324	1.102	1.160	1.161	1.111	1.269	1.137	1.268	1.113	1.247	1.183
Mg	0.874	0.879	0.910	0.725	0.861	1.090	0.970	1.182	1.164	0.971	0.901	1.158	1.102	1.071	1.026	1.116	1.041	1.074	1.088	1.172	1.059
Mn	0.000	0.011	0.007	0.010	0.007	0.006	0.004	0.003	0.008	0.006	0.011	0.004	0.006	0.006	0.003	0.007	0.006	0.011	0.004	0.006	0.006
Y-site	3.017	2.881	2.807	2.907	2.901	3.032	3.016	3.093	2.872	2.881	2.819	2.986	3.058	2.941	2.871	2.985	2.858	2.898	2.878	3.018	2.908
Ca	0.039	0.037	0.037	0.029	0.025	0.052	0.043	0.000	0.068	0.034	0.018	0.056	0.041	0.044	0.034	0.043	0.047	0.053	0.029	0.045	0.036
Na	0.604	0.629	0.611	0.619	0.641	0.628	0.621	0.620	0.596	0.665	0.641	0.640	0.624	0.645	0.600	0.648	0.615	0.676	0.642	0.655	0.641
K	0.010	0.006	0.008	0.008	0.008	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008	0.008	0.010	0.010	0.009	0.008	0.009	0.007	0.008	0.004	0.011	0.006
X-site	0.653	0.672	0.656	0.656	0.674	0.689	0.673	0.629	0.672	0.707	0.667	0.706	0.675	0.698	0.642	0.700	0.669	0.737	0.675	0.711	0.683
Fe/Fe+Mg	0.614	0.605	0.593	0.682	0.630	0.551	0.566	0.493	0.485	0.578	0.595	0.487	0.512	0.520	0.519	0.532	0.522	0.541	0.505	0.515	0.527

Total FeO* as Fe⁺², Cations formulae normalized to 6 silicons. Naedeogni granite, 7502 to 71035 and Nonggeoni granite, NG-1 to NG-9.

Table 3. Microprobe analyses of tourmalines from barren and tin bearing pegmatite, Sangdong tin mineralized area.

Elements	T2-6	T2-8	T3-5	T4-4	T9-5	T9-6	T9-8	T9-9	S-21	S-30	7402-A	7402-E
SiO ₂	35.50	35.58	35.37	35.27	35.46	35.95	35.75	35.75	35.97	35.76	35.38	34.54
TiO ₂	0.37	0.49	0.63	0.33	0.19	0.37	0.24	0.34	0.41	0.33	0.17	0.16
Al ₂ O ₃	34.05	33.82	34.31	32.86	33.59	33.66	33.64	33.34	35.04	35.08	35.03	34.55
FeO*	12.43	12.07	10.67	11.86	12.19	11.95	11.06	11.35	9.77	9.60	10.15	10.66
MgO	1.13	2.03	2.68	1.95	1.59	2.25	2.50	2.09	3.58	3.26	0.88	1.42
MnO	0.27	0.07	0.03	0.15	0.16	0.99	0.09	0.13	0.05	0.06	0.38	0.11
CaO	0.09	0.15	0.18	0.12	0.06	0.13	0.12	0.12	0.20	0.15	0.03	0.07
Na ₂ O	1.69	1.71	1.67	1.92	1.50	1.82	1.76	1.81	1.74	1.67	1.79	1.64
K ₂ O	0.03	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Total	85.56	85.97	85.59	84.51	84.77	87.16	85.19	84.96	86.79	85.94	83.84	83.18
Cations number on basis of 29 oxygens												
Si	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Al(Z)	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Al(Y)	0.784	0.723	0.861	0.588	0.700	0.622	0.655	0.595	0.889	0.938	1.002	1.074
Ti	0.047	0.062	0.080	0.042	0.025	0.046	0.030	0.043	0.052	0.041	0.022	0.021
Fe(2)	1.757	1.702	1.514	1.687	1.725	1.668	1.552	1.593	1.363	1.347	1.439	1.548
Mg	0.285	0.510	0.678	0.495	0.401	0.560	0.625	0.523	0.890	0.815	0.223	0.368
Mn	0.038	0.010	0.004	0.022	0.023	0.140	0.013	0.019	0.007	0.009	0.054	0.016
Y-site	2.911	3.007	3.137	2.834	2.874	3.036	2.875	2.773	3.201	3.150	2.740	3.027
Ca	0.016	0.027	0.033	0.022	0.011	0.023	0.021	0.022	0.035	0.027	0.005	0.013
Na	0.554	0.559	0.549	0.633	0.492	0.589	0.573	0.589	0.562	0.543	0.589	0.552
K	0.007	0.011	0.011	0.011	0.007	0.009	0.007	0.007	0.006	0.006	0.007	0.007
X-site	0.577	0.597	0.593	0.666	0.510	0.621	0.601	0.618	0.603	0.576	0.601	0.572
Fe/Fe+Mg	0.860	0.769	0.690	0.773	0.811	0.748	0.712	0.752	0.604	0.623	0.865	0.807

Total FeO* as Fe²⁺, Cations formulae normalized to 6 silicons. Barren pegmatite (T2-6 to S-21), tin bearing pegmatites (7402A to 7402E).

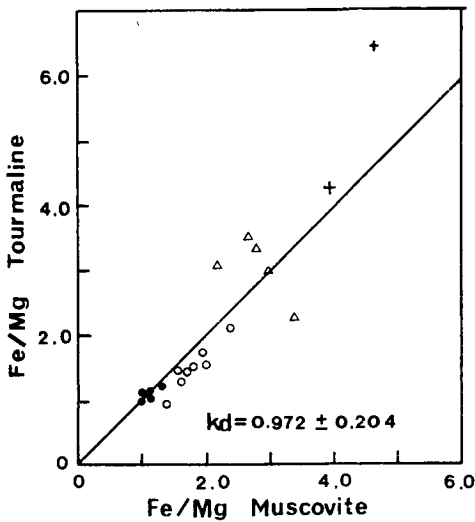


Fig. 7. Mg-Fe partitioning between muscovite and coexisting tourmaline of various intrusives from Sangdong tin mineralized area. Symbols are the same as those of Fig. 3.

Fe/Mg의 원소분배를 도시한것이다. 농거리화강암, 내덕리화강암, 페그마타이트 그리고 함석석 페그마타이트내 공존 전기석과 백운모의 Fe 분배율이 일정하게 증가하고 있다. 이것은 페그마타이트의 분결작용에서 Fe (total) 분배효과가 후기 페그마타이트

단계로 갈수록 증가하였음을 반증한다.

누대결정의 화학적 분결작용

결정내 누대조직이 형성되는 주요한 원인중의 하나는 규산질 용융액내 함유된 특정 성분의 확산속도가 결정화작용의 속도에 보조를 맞추지 못한 상태에서 빠르게 결정이 성장에 됨에 기인하고 있다 (Zoltai and Stout,1984). 이와같은 누대작용은 화강암질 용융액에서 휘발성 물질이 빠르게 감소하고, 이에 따른 온도의 변화가 일어날 경우 누대조직이 발달되게 된다. 누대조직 외각부의 H₂O가 포화된 용융액 하에서 빠르고 규칙적으로 일어나는 휘발성 물질의 감소 현상은 결정화작용을 형성하는 잠재열 (Heat Potentials) 을 제거하게 된다. 이때 부분적인 압력의 저하와 온도의 상승 등이 일어나고, 비평형 상태가 존재하게 되는데 이것이 누대구조를 형성하는 결정화작용의 원인이 된다.

본역에 분포하는 누대 전기석은 일반적으로 내핵에서 외각으로 갈수록 점차 색깔이 어두워지고 누대 경계는 분명하다. 내덕리화강암과 페그마타이트에 배태되는 전기석의 Fe/(Fe+Mg)의 비는 공통적으로 내핵에서 외각으로 향하여 점차 증가한다. 그러나 농거리화강암은 내핵이 0.54~0.48, 외각이 0.52~0.56으로서 거의 변화가 없는 반면, 내덕리화강암은 내핵의 비가 0.42~0.52, 외각의 비가 0.62~0.64로서 증가하고, 페그마타이트

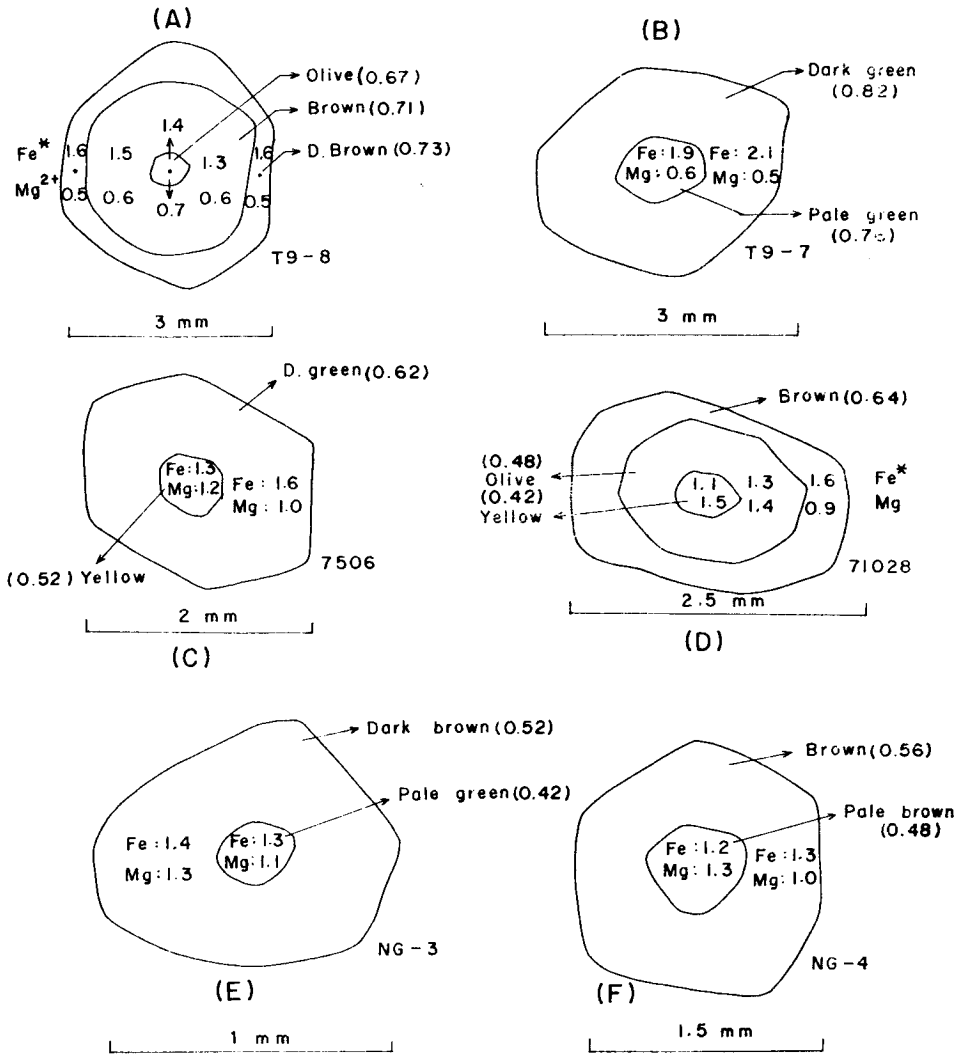


Fig. 8. Compositionally zoned tourmaline from Sangdong tin mineralized area. (A) and (B) are from pegmatite, (C) and (D) are from Naedeogri granite and (E) and (F) are from Nonggeori granite. Tourmaline crystals show the zones with high-Mg, low-Fe core and low-Mg, high-Fe rim. Numerical values are Fe and Mg atoms per formula unit. Number in parenthesis is Fe/(Fe+Mg) ratios.

트는 내핵이 0.67~0.76, 외각이 0.73~0.81로서 외각부에 Fe의 함량이 부화되는 경향이 있다 (Fig. 8).

전기석의 내핵에 비해 외각으로 갈수록 Fe가 증가하는 경향은 결정이 성장 될때 규산질 용융액으로부터 분리된 수용액의 Fe의 분배가 증가되는것을 반영한다. 따라서 내덕리화강암과 페그마타이트는 공히 결정이 성장 할때 분리된 잔유용액의 Fe* 성분 분화작용이 인정되고, 이와같은 현상은 페그마타이트의 분화작용에서 Fe의 분배효과 상승을 반영한다. 그러나 농거리화강암은 전기석의 결정이 성장하는 동안 비교적 완만하고 일정한 성분을

유지하고 있었다고 해석되고 내덕리화강암이나 페그마타이트의 전기석 분결작용과는 달리 화학성분의 분결작용이 없다.

결론

1. 본역에 산출되는 전기석의 화학조성을 Mg+Ti, Fe+Mn+(Zn), Al+(Li)에 의하여 분류하면, 내덕리화강암에서부터 페그마타이트로 향하여 Mg가 감소하고, Fe가 증가하는 경향을 보이며, 비교적 Fe와 Al이 치환 증가된 schorl의 단성분에 근접

되고 있으나, 농거리화강암은 전기 화학 성분의 치환작용이 없는 dravite₍₅₀₎ schorl₍₅₀₎의 일정한 단성분을 보인다.

2. 내덕리화강암과 페그마타이트의 전기석은 Li 함량이 적은 화강암질암이나 페그마타이트 그리고 그와 수반되는 암석 (Li-poor granitoids, pegmatites and its associated rocks) 에서 기원하는 것으로 나타나고, 농거리 화강암의 전기석은 Ca 함량이 적은 변성 이토암 (Ca-poor metapelite) 에서 유래하는 전기석 특성을 반영하고 있다.

3. 내덕리화강암과 페그마타이트에 분포하는 전기석에는 농거리화강암에 비하여 누대구조가 많고 분대구조에 따라 내핵에서 부터 외각으로 갈수록 Mg가 감소하고 Fe가 증가하는 양상을 보인다. 그러나 농거리화강암의 전기석은 Mg와 Fe의 변화가 거의 없는 이차 전기석화 경향을 보여준다.

4. 전기석의 화학조성에서 $\sum Fe+Mg$ 의 감소가 암석의 분화 작용을 전제로 할때, 내덕리화강암-페그마타이트-함석석 페그마타이트로 향하여 Fe + Mg가 감소하며, 이때 Fe와 Mn이 증가하고 Mg와 Ti가 감소하는 Fe, Mn 증가 분화경향을 보여준다. 이는 대표적인 화학적 분결작용이 온도 저하에 의한 일련의 결정화 작용을 지시한다. 그러나 농거리화강암은 Fe + Mg가 감소 할때 Ti와 Mn 등 전이원소가 감소하는 경향을 보여주고 있어 내덕리화강암에서 페그마타이트로 이르는 전기석의 분화 과정과는 상이한 분화경향을 나타낸다.

사 사

이 연구의 일부는 한국과학재단 지원 전략광물자원연구센터의 연구비 지원에 의하여 수행되었다. 이 논문을 읽고 건설적인 제안을 해주신 서울대학교 전효택 교수와 익명의 심사자에게 감사사를 드린다.

참고문헌

김수영, 김선역 (1984) 서벽리도폭 성터 및 순경광산 중심의 주석광 화대 지질 광상연구. 한국동력자원연구소, 금속광상연구, 83-KI-GAM Bulletin, p. 213-263.
 윤현수 (1985) 함백분지 남부 및 기반지역에 분포하는 화강암질암류의 암석화학적 연구. 연세대학교 박사학위논문.
 이동우, 김상욱 (1965) 서벽리 도폭. 국립지질광물연구소.
 이종혁 (1957) 순경 주석광상 조사연구보고. 국립지질조사소, p. 75-88.
 전효택, 이덕원 (1987) 울진지역 주석광화작용과 관련된 화강암류의

다원소 지구화학. 대한광산학회지, v. 24, p. 8-20.
 Bradly, J.E.S. and Bradly, O. (1953) Observation on the coloring of pink and green zoned tourmaline. Mineral. Mag., v. 30, p. 26-38.
 Foit, F.F., Jr. and Rosenberg, P.E. (1977) Coupled substitutions in the tourmaline group. Contrib. Mineral. Petrol., v. 62, p. 109-127.
 Fortier, S. and Donnay, G. (1975) Schorl refinement showing composition dependence of the tourmaline structure. Can. Min., v. 13, p. 173-177.
 Frondel, C., Biedel, A. and Ito, J. (1966) New type of ferric iron tourmaline. Am. Min., v. 51, p. 1501-1505.
 Henry, D.J.F. and Guidotti, C.V. (1985) Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral : An example of the stourolite-grade metapelites of NW Maine. Am. Min., v. 70, p. 1-15.
 Jahns, R.H. and Burn Am, C.W. (1969) Experimental studies of pegmatite genesis : I. A mode for the derivation and crystallization of granitic pegmatites. Econ. Geol., v. 64, p. 843-864.
 Jenks, W.F. (1935) Pegmatites at Collins Hill, Poland, Connecticut. Am. J. Sci., 5th series, v. 30, p. 177-197.
 Jollif, B.L., Pakie, J.J. and Shearer, C.K. (1986) Toumaline as a recorder of pegmatite evolution : Bob Ingersoll pegmatite, Black Hill, south south Dakota. Am. Min., v. 71, p. 472-500.
 Kim, S.Y., Park, N.Y. and Moon, H.S. (1988) Precambrian granites and its related tin mineralization, Sangdong, south Korea. Fifth international symposium on tin/tungsten granites in southeast Asia and the western Pacific-IGCP Project 220-Extended abstracts, p. 75-79.
 London, D. (1986) Magmatic-hydrothermal transition in the Tanco rare element pegmatite: Evidence from fluids inclusions and phase equilibrium experiment. Am. Min., v. 71, p. 376-395.
 London, D. (1987) Internal differentiation of rare-element pegmatites : Effects of baron, phosphorus and fluorine. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 51, p. 403-420.
 Manning, D.A.C. (1984) The effect of F, B and Li on melt structures in the granite system : different mechanism ? in Progress in experimental petrology, p. 36-41.
 Neiva, A.M.R. (1974) Geochemistry of tourmaline (schorlite) from granite, aplites and pegmatites from northern Portugal. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 38, p. 1307-1317.
 Power, G.M. (1968) Chemical variation in tourmaline from southwest England. Min. Mag., v. 36, p. 1078-1098.
 Shearer, C.K., Papike, J.J., Simon, S.B. and Laul, J.C. (1986) Pegmatite/wall rocks interaction. Black Hill, South Dakota : Interaction between pegmatite derived fluids and quartz mica-schist wallrock. Am. Min., v. 71, p. 518-539.
 Taouson, L.V. (1965) Factors in the distribution og magma. Physics and Chemistry of the Earth, v. 6, p. 215-249.
 Zoltai, T., and Stout, J.H. (1984) Mineralogy and concepts and principles. Burgess Publishing Co., Minneapolis p. 135-183.

1994년 9월 3일 원고접수