

경상남도 일광의 각력파이프형 구리(Cu)광상에서 산출되는 전기석의 지구화학

양경희* · 장주연

부산대학교 자연과학대학 지질환경과학전공

Geochemistry of tourmalines in the Ilgwang Cu-W breccia-pipe deposit, Southeastern Gyeongsang Basin

Kyounghee Yang* and Ju-Yeon Jang

Geological Environmental Science Major, College of Science, Busan National University,
Busan 609-735, South Korea

요약: 경상남도 일광지역의 각력파이프형 구리(Cu)광상은 화강암질암 성분의 암주내에 배태되어 있으며, 모암인 화강암질암은 변질되어 있다. 암흑색의 전기석은 각력파이프를 중심으로 교대 후광을 형성하면서, 석영, 황동석, 유비철석, 자류철석, 방연석, 반동석등과 함께 각력파이프내의 모암인 화강암질암 각력들사이의 기질 부를 충전하면서 광맥을 형성하거나, 모암인 장석, 흑운모를 치환교대하면서 산출된다. 각력내(광맥)에서 형성된 전기석은 조립에서 세립질의 자형으로, 침상 내지 깃털 모양으로 산출되며, 다색성 체계는 대체로 짙은 청색과 녹색을 나타낸다. 변질된 모암에서 산출되는 전기석은 타형이며, 독립질의 이차 (secondary) 석영과 함께 방사상의 연정을 이루는 것이 특징적으로 관찰된다. 전기석은 Fe성분이 풍부한, 흑색의 스크올(schorl)(80 mol% schorl relative)이며, 비교적 단순한 화학조성을 갖는다. 전기석의 누대구조에 따른 조성 변화는 전기석 결정 후기단계에 Fe와 Ca 성분이 증가했음을 나타낸다. 이러한 화학성분의 변화는 Ca에 의한 Na치환, Fe³⁺에 의해 Al이 치환되어진 우바이트(uvite)치환(Ca(Fe,Mg)NaAl₃)과 페리스크올(ferrischorl)치환 (Fe³⁺Al₃)에 의한 것으로 해석된다. 페리스크올치환이 있었다는 것은 전기석을 침전시킨 열수의 산화상태(oxidation state)가 높아진 것을 반영한다. 이러한 높아진 산화환경은 열수의 비중에 의해 H₂ 성분이 열수에서 제거되어져 형성되어졌다. 또한 열수의 비중에 의한 산성(acidic) 휘발성성분 제거는 열수의 pH를 높여 경제성 있는 황화광물의 형성을 용이하게 했다. 일광전기석의 산출상태와 지구화학적 특성은 이곳의 전기석은 마그마에서 용리되어진 열수가 각력파이프를 통해 대규모로 이동되어 형성된 생산물이며, 마그마에서 산성성분의 유체가 용리되어 산성열수체계를 형성하고 난 후, 전기석의 침전이 시작되었음을 보여준다. 광화대와 변질대를 형성한 일광의 열수체계는 마그마(orthomagmatic), 심부(hypogene) 기원의 열수에 의해 형성되어졌음을 나타낸다.

핵심어: 각력파이프형광화대, 전기석(schorl), 누대구조, 안정도, 심부기원

Abstract: A small granodiorite-quartz monzonitic stock containing sericitic and propylitic alteration assemblages hosts a Cu-W breccia-pipe deposit in the southeastern Gyeongsang basin. The mineralized breccia-pipe contains angular to subangular brecciated fragments of granitic rocks showing clast-supported textures. An assemblage of quartz, tourmalines, sulfide minerals (mainly chalcopyrite, arsenopyrite and pyrrhotite) and calcite was precipitated as a hydrothermal cement between the brecciated fragments. A tourmaline aureole surrounds the breccia pipe. Extensive tourmalinization of the granitic rocks near and within the pipe and no tourmalinization in the sedimentary and volcanic rocks. The tourmalines are marked by Fe-rich, black charcoal-like schorl (80 mol% schorl relative) nearer the schorl-davite solid solution. The chemical changes in the hydrothermal fluid are reflected by variations in compositional zoning from cores to rims. They generally contain cores with low values of Fe/(Fe+Mg) and high values of Na/(Na+Ca) relative to rims. This is because of an increase Fe and Ca contents toward rims. The main trend of these variations is a combination of the exchange vectors Ca(Fe, Mg)(NaAl)₁ and Fe³⁺Al₁. It is thought that

*Corresponding author: Tel. 82-51-510-2247, E-mail. yangkyhe@pusan.ac.kr

boiling causes the loss of H_2 into the vapor phase resulting in the oxidation of Fe in the aqueous phase. pH of the melt would be one of important controlling factors for the tourmaline stability. The tourmalines could be precipitated when the system evolved to the acidic hydrothermal regime as most hydrothermal brines and acidic gases exsolved from the magma. The Ilgwang tourmaline crystallization is products of hypogene orthomagmatic hydrothermal processes that were strongly pipe-controlled.

Key words: breccia-pipe deposit, tourmalines (black schorl), zoning, stability, hypogene

서 론

전기석은 거의 모든 암석 종류에서 산출되는, 복잡한 화학식을 갖는 붕산규산염 광물이다. 화성암(Wolf and London, 1997; Trumbell *et al.*, 1999; Williams *et al.*, 1999)에서 산출되거나 퇴적암의 속성작용 후기 단계에서 형성되고(Henry and Dutrow, 1992), 페그마타이트(Jolliff *et al.*, 1986; Slack *et al.*, 1993; 김수영과 문희수, 1994; 전효택과 손창일, 1995), 변성암(Henry and Guidotti, 1985)에서 산출되기도 하며, 열수광상(Shearer *et al.*, 1984; London and Manning, 1995; Williamson *et al.*, 2000)에서도 나타나는 다양한 성분을 가진 광물로 산출된다. 전기석이 가지는 다양한 화학성분은 마그마의 지화학적 특성, 열수의 기원과 성분, 열수의 물리화학적 환경 압력-온도-산소분압(f_{O_2})과 체계적인 관련성을 가지고 변화하기 때문에 암석성인에 대해, 그리고 열수광상의 진화와 기원에 대한 정보를 제공하고, 광물자원의 탐사 및 채광에 대한 중요한 지시자로 사용되고 있다(Taylor and Slack, 1984; Slack *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1996; Jiang *et al.*, 1998).

일광광상(Fig. 1)은 1940년대 우리나라 최대 구리광상이었으며, 화강암내의 독특한 각력파이프형의 광상을 이루고 있는 곳으로 국내외로 지질학적 주목을 받았던 곳이다(Jin, 1975; 강주명 외, 1976; Fletcher, 1977; So and Shelton, 1983). 일광광상에 대한 이전의 연구는 주로 야외산출상태, 지화학적 연구, 황화광물과 맥석광물인 석영에 관한 유체포유물과 안정동위원소연구에 대한 것이었으며(Jin, 1975; 강주명 외, 1976; Fletcher, 1977; So and Shelton, 1983; Yang and Lee, 1997), 이 광상에서 풍부하게 산출되고 있는 전기석에 대한 연구는 수행되어져 있지 않다. 본 연구는 경상남도 일광에 위치하고 있는 각력파이프형 구리광화대와 관계화강암으로 알려진 화강암질암에 풍부하게 산출되고 있는 전기석에 대한 지화학적 연구를 통해 전기석과 이 지역의 광화작용과 변질대를 발달시킨 열수의 기원과 진화 및 물리화학적 환경을 규명하는 것이다. 그리고 본 연구로부터 획득되어진 정보와 이미 보고된 이 분야의 선행연구를 종합하여, 경제적으로 관

심의 대상이 되는 반암 구리광상등이 분포 되어있는 환태평양대와 일광광상의 지질학적배경에 대한 유사성이 비교 분석되었다.

일반지질

일광광산은 부산에서 북동쪽으로 대략 25 km 떨어진 지점에 위치하고 있으며, 이 부근의 지질은 백악기 중기-말기의 화산암과 육성퇴적층을 포함한 타원형의 화강암질암의 암주, 그리고 이 암주 내에 발달하는 함구리-중석-전기석 각력파이프형 광상으로 구성되어 있다(Fig. 1). 퇴적암류는 이암, 사암, 역암으로 이루어져 있으며, 암주와의 접촉부에서는 접촉변성작용을 받아 호운펠스화 되어있다. 암주의 서쪽에는 분포하는 화산암은 결정질응회암으로 지형적으로 높은 산을 이루고 있다. 암주의 각섬석과 파이프내의 각력파편의 견운모에 의한 K-Ar 연대는 각각 81 ± 3 Ma, 69 ± 3 Ma이다(Fletcher, 1977).

이곳의 암주는 비교적 뚜렷한 두 성분상인 화강섬록암 내지 석영문조니암으로 이루어져 있다. 이러한 성분의 암주는 분화상의 결과(Jin, 1975)로 혹은 각각 별개의 관입암체로 관입되어진 것(Fletcher, 1977)으로 해석되어져 있다. 암주는 메타아루미너스에서 약한 퍼아루미너스의 성분을 나타내고 있으며(Jin, 1975). 암주는 파이프에 근접할수록 변질의 강도가 증가하고 있다. 파이프내부와 근접 지역에는 견운모변질대(sericitic alteration)가, 여기에서 암주의 주변부까지는 프로필리틱변질대(propylitic alteration)가 형성되어져 있다(Fig. 1). 퇴적암과 암주와의 접촉부는 쉽게 관찰되지 않지만, 주변암상(marginal phase)으로 여겨지는 부분은 암주의 중앙부에 비해 좀더 어두운 암회색을 띠며, 중립에서 세립의 등립질 내지 세리에이트 조직을 나타내고 있다.

프로필리틱변질대의 주요광물은 녹립석, 녹니석, 견운모, 전기석, 석류석, 그리고 석영 등이지만, 변질은 주로 장석과 흑운모에 집중되어있다. 견운모변질대에서는 구성광물의 일차조직이 거의 파괴되었으며, 견운모화 되어있고, 핑크색의 석류석이 풍부하게 산출되고 있는 것이 프로필리틱변질대와 큰 차이점이다. 또한 견

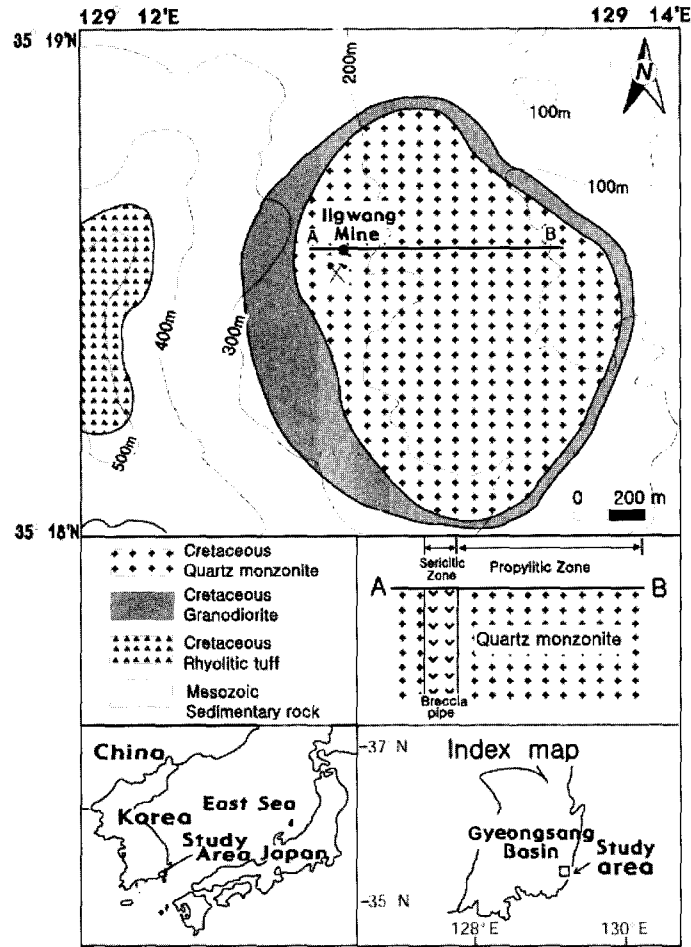


Fig. 1. Geologic map of the Ilgwang Cu-W mine area (after Fletcher, 1977). Topographic contours are also shown.

운모변질대에는 열수기원의 세립 내지 중립의 석영이 모자이크조직의 모습으로 분포되어 있다. 이러한 변질대에 풍부하게 산출되는 흑색의 전기석에 대해서는 다음 장에서 자세히 논할 것이다.

암주 내에 배태하고 있는 수직의 원통형의 파이프는 각력화된 각상(angular)에서 아각상의 화강암질암으로 구성되어 있으며, 역지지성(clast-supported) 조직을 보여준다. 파편들 사이를 충전하고 있는 기질부는 주로 석영, 전기석, 황동석, 흑중석, 회중석, 유비철석, 자류철석, 섬아연석, 방연석등으로 이루어진 광화대를 형성하고 있다. 이들의 공생관계는 노두관찰와 현미경관찰에 의해 세 단계로 나뉘어 진다(Fig. 2).

전기석의 산출상태

일광광상의 전기석은 파이프를 중심으로 교대 후광(metasomatic aureole) 형태로 산출된다(Fig. 3). 암주의 외곽으로 갈수록 함량이 감소하며, 주변의 퇴적암이나 화산암에서는 관찰되지 않는다. 파이프를 중심으로 전기석의 기재적, 지화학적 특징의 변화를 파악하기 위해, 파이프로부터의 거리와 모양의 변질의 정도에 따라 전기석을 나누어 살펴 보았다(Table 1): (1) 파이프 내의 건운모변질대에서 채취된 시료(SE), (2) 파이프에서 50~100 m 정도 떨어진 프로필리틱변질대에서 채취된 시료(PR), (3) 파이프에서 400~600 m 정도 떨어진

Mineral	alteration phase	open-space filling phase	replacement phase
quartz			
tourmaline	—	—	—
garnet	—	—	—
native copper	—	—	—
pyrrhotite	—	—	—
arsenopyrite	—	—	—
scheelite		—	—
wolframite		—	—
chalcopyrite		—	—
sphalerite		—	—
galena		—	—
calcite		—	—
bismuthinite			—
marcasite			—
covellite			—

Fig. 2. Mineral paragenesis at the Ilgwang mine (after Kang *et al.*, 1976).

외곽(marginal zone)에서 채취된 시료(MT)들이다. 전기석의 산출이 상대적으로 풍부한 견운모변질대에서 더욱 많이 채취되어졌다.

견운모변질대(SE)에서의 전기석은 파이프내의 각력암 사이의 기질부인 광맥의 열린공간(open-space fillings)을 채우거나(Fig. 3a), 혹은 각력화된 모암의 광물을 교대한 모습으로 산출된다(Fig. 3b, c). 광맥에서는 암흑색의 전기석이 석영이나 광석광물들과 함께 주상, 침상, 깃털모양의 괴상으로 산출되며, 조립에서 세립질의 자형으로 관찰되며, 주로 c축에 수직으로 파쇄되어 있다(Fig. 4a, b, c). 다색성체계는 대체로 짙은 청색과 녹색을 나타내며, 내핵(core)에 속하는 중앙부는 녹색이며 외곽(rim)부분은 황갈색에서 올리브색인 누대구조가 관찰된다. 일종의 진동 누대구조(oscillatory fine-scale zoning)가 관찰되기도 하며, c축에 수직으로 잘려진 전기석은 특유의 커브진(curved) 삼각형형태를 보여준다(Fig. 4c). 변질된 모암에서는 사장석이나 흑운모가 치환 교대되어 전기석을 형성하는 것이 일반적이며(Fig. 4d, e), 석류석과 등립질의 이차(secondary) 석영과 함께 방사상(네트워크상)의 연정을 이루는 것이 관찰된다.

프로필리틱변질대(PR)에서의 전기석은 주로 균상(patchy) 혹은 작은 불규칙한 장미형으로 산출된다. 전기석의 함량은 파이프에서 멀어질수록 현저히 감소하지만, 그 조직은 세리사이트변질대에서의 전기석과 유사한 누대구조, 방사상(네트워크상)의 연정, 입자 크기와 형태, 광학적 성질을 나타낸다. 조립의 전기석이 산출되는 부분에서는 흑운모와 각섬석이 노두에서 거의 관찰되지 않으며, 파이프에서 멀어질수록 누대구조의 발달 정도는 감소하는 경향이 있다. 사장석의 알바이

트 쌍정과 유사한 누대구조를 나타내는 전기석은 사장석이 전기석으로 치환되어진 것으로 여겨진다(Fig. 4f, g). 이차석영입자들이 타형의 전기석을 둘러싸고 있는 것이 관찰되며(Fig. 4f, g), 장석이 전기석으로 변질되면서 동시에 석영이 형성되고 있음을 보여주고 있다.

외곽(marginal zone)에서의 전기석은 거의 산출되지 않으며, 대부분 세립질에서 중립질이고, 정장석이 전기석으로 치환되거나(Fig. 4h) 흑운모와 전기석이 서로 교호하며 맞물려 있는(interfingered) 것이 관찰된다. 이곳에서의 전기석은 누대구조가 드물게 관찰되며, 구상형의 고철질 포획체(enclave) 주변에 전기석이 발달하고 있는 것이 때때로 관찰된다.

일광 전기석의 지화학적 특성

일광광산에 분포하는 전기석의 지화학적 특성을 파악하기 위해 8군데의 노두에서 23개의 전기석 결정을 대상으로 전자현미분석을 수행하였다. 서울대학교 기초과학연구소의 JXA-8900R 전자현미분석기를 사용하여 정량분석을 실시하였다. 전자빔 직경은 5m, 분석 가속전압은 15 kV, 시료전류값은 10 nA로 설정되어 분석하고 ZAF 보정을 하였다(Table 1). 분석된 값은 산소 24.5 원자로 정규화시켜 각 양이온의 수를 계산하였다.

전기석은 다양한 치환에 의해 복잡한 화학식을 갖는 붕산규산염(borosilicates) 광물이다. 전기석의 일반적인 화학식은 많은 논문에 기재되어 있으며(Henry and Guidotti, 1985; Jolliff *et al.*, 1986; London and Manning, 1995; Jiang *et al.*, 1998), 이번 연구에서는 London and Manning (1995)에 의해 표현된 화학식 “ $XY_3Z_6(BO_3)_3Si_6O_{18}(OH, F)_4$ ”을 참고하였다. 여기에서 X자리에는 주로 Na와 Ca가 들어가거나, 빈자리로 남아 있으며, Y자리에는 Mg, Fe^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} , Al, Li이, Z자리에는 Al, Fe^{3+} , Mg, Ti가 치환되어진다. 이와 같이 각 자리마다 치환되는 양이온의 치환체계가 광범위하기 때문에 전기석은 화학조성변화가 심하여, 단성분(end-member)을 가지고 전기석의 성분을 나타내는 것이 일반적이다(Henry and Guidotti, 1985; Jolliff *et al.*, 1986; Burt, 1989; London and Manning, 1995; Jiang *et al.*, 1998). 또한 원소들이 치환되어진 모습을 표현할 때 교환벡터(exchange vector)로 나타내는 것이 일반적이며, 본 연구에서도 이를 이용하여 스크롤-드라비트(schorl-dravite) 고용체 계열의 $FeMg_{-1}$ 벡터, $Ca(Fe, Mg)(NaAl)_{-1}$ 의 우바이트(uvite) 치환벡터, $Fe^{3+}Al_{-1}$ (Z자리에 Al 대신 Fe^{3+} 가 치환된 구조)의 페리스코울



Fig. 3. Tourmalines at the Ilgwang mine showing characteristic occurrences. (a) Prismatic or acicular tourmalines filling the open spaces between brecciated granitic fragments from the pipe. (b) Abundant tourmaline rosettes immediate adjacent the pipe and (c) A decreasing amount of tourmaline about 200 m away from the pipe.

(ferrischorl) 치환벡터, $([X]AlNa(Fe,Mg)_1)$ 의 알칼리 결핍(alkali-deficient)벡터, $[Z]O(Y)OH_1$ 의 수소-결핍(proton-deficient) 벡터등의 교환벡터를 표시하여 양이온들의 치환특성을 도시하였다(Fig. 5). 또한, 하나의 전기석 결정 내에서 성분변화의 특성을 알아내기 위해 전기석 결정입자에서 누대조직을 보이는 입자를 내핵(core)과 가장자리(rim)로 구분하고, 그에 따른 전기석의 화학성분을 분석하여 도시하였다.

본 연구지역에 산출되는 전기석은 양이온인 K, Mn, Ti, Cr, V등의 함량이 매우 적거나 분석오차 이하의 함량을 지니고 있어, 지화학적으로 비교적 단순한 편이다(Table 1). SiO_2 함량은 대부분 35 wt%(32.54~35.85) 정도의 유사한 범위 내에 속하며, Al_2O_3 함량은 24.20~31.66 wt%로 상대적으로 좁은 범위를 보이고 있다. Fe/(Fe+Mg)의 평균 비율은 0.50~0.71, Na/(Na+Ca)는 0.63~0.82를 나타내고 있다. 그러나 평균값이 아닌 전체 분석값을 도시한 경우 Fe/(Fe+Mg)은 0.80까지, Na/(Na+Ca)는 0.94까지의 변이를 보이고 있다(Fig. 5a, b). 일광의 전기석은 스코올-드라바이트 고용체 계열에서

스코올성분이 상대적으로 풍부한 전기석으로 도시되어진다(Fig. 5c, d). 이는 Fe성분이 Mg성분에 비해 상대적으로 풍부한 모암인 화강암류의 영향으로 여겨지며, 전기석 입자 주위에 흑운모나 각섬석이 결핍되어진 것이 관찰되는 일종의 후광이 형성되어있는 것이 일반적이다.

전기석을 형성한 열수의 화학적 변화는 전기석의 누대구조에 따른 내핵과 가장자리에서 관찰되어진다. 비록 외곽대에서는 전기석의 내핵과 가장자리 사이의 지화학적 차이는 뚜렷하지 않지만, 대체로 전기석의 가장자리 부분은 내핵부분에 비해 Fe/(Fe+Mg)이 높고, Na/(Na+Ca)이 낮게 나타난다. 이는 Fe와 Ca가 증가하고 있음을 의미하며, 이러한 화학성분의 변화는 전기석의 외핵 형성시기에 Na → Ca로, Al → Fe로 치환하는 우바이트치환 $[Ca(Fe,Mg)NaAl-1]$ 과 페리스코올치환 $(Fe^{3+}Al_1)$ 이 이루어진 것으로 보인다(Fig. 5c, d). 가장자리로 갈수록 증가된 Fe는 Z자리에 Al대신에 Fe^{3+} 로 치환되는 $Fe^{3+}Al_1$ (London and Manning, 1995)을 수행하게 되며, Z자리에 Al성분의 결핍으로 표시된다(Fig.

Table 1. Average values of microprobe analyses of tourmaline from the Ilgwang Mine.

Sample (No. of analysis)	SE-7(3)		SE-18(3)		SE-20(4)		PR-4(4)		PR-9(3)		PR-17(4)		MT-16(2)	
	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim
SiO ₂	35.00	34.50	35.64	35.16	35.85	35.51	35.05	34.51	35.09	34.90	35.52	32.54	34.87	35.28
TiO ₂	0.30	1.36	0.29	1.25	0.48	0.52	0.69	0.80	0.21	1.17	0.74	0.29	3.64	0.55
Al ₂ O ₃	31.03	27.95	31.04	28.07	30.58	30.08	30.66	28.58	31.66	28.72	29.22	31.65	24.20	27.34
Cr ₂ O ₃	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02
FeO ¹⁾	11.63	12.87	11.29	13.74	11.29	12.40	13.73	15.27	10.52	12.01	11.68	9.90	16.49	16.29
MnO	0.04	0.04	0.03	0.06	0.04	0.04	0.06	0.08	0.17	0.08	0.02	0.05	0.09	0.12
MgO	5.06	5.71	5.21	5.07	5.32	4.97	3.73	3.61	5.24	5.72	5.73	5.64	4.87	4.15
CaO	1.22	1.88	1.00	1.68	0.82	1.22	0.97	1.66	1.06	1.71	1.62	1.08	1.28	1.42
Na ₂ O	2.22	1.78	2.14	1.97	2.27	1.96	2.11	1.98	2.06	1.74	2.30	2.08	2.30	2.15
K ₂ O	0.03	0.03	0.01	0.04	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.05	0.03
Total	86.54	86.13	86.66	87.05	86.74	86.74	87.03	86.53	86.04	86.07	86.57	86.25	87.79	87.41
Numbers of cations on the basis of 24.5 oxygens														
Si	5.87	5.89	5.94	5.95	5.97	6.00	5.90	5.29	5.87	5.92	5.97	5.91	5.98	6.04
Al	6.13	5.62	6.09	5.60	6.00	5.94	6.08	5.78	6.24	5.73	5.77	6.19	4.89	5.50
Al in Y ²⁾	0.05	-0.26	0.08	-0.24	0.05	-0.02	0.09	-0.16	0.15	-0.15	-0.13	0.14	-0.50	-0.37
Ti	0.04	0.17	0.04	0.16	0.06	0.07	0.09	0.10	0.15	0.15	0.09	0.04	0.47	0.07
Ca	0.22	0.34	0.18	0.31	0.16	0.22	0.18	0.31	0.19	0.31	0.29	0.20	0.23	0.28
Na	0.72	0.59	0.69	0.65	0.73	0.64	0.69	0.66	0.67	0.57	0.66	0.67	0.77	0.71
Na/(Na+Ca)	0.77	0.63	0.80	0.68	0.82	0.75	0.80	0.68	0.77	0.65	0.70	0.79	0.77	0.73
K	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
Fe	1.63	1.84	1.57	1.95	1.57	1.74	1.93	2.19	1.47	1.71	1.64	1.38	2.37	2.33
Mg	1.26	1.45	1.30	1.28	1.32	1.25	0.94	0.92	1.31	1.45	1.44	1.40	1.25	1.06
Fe/(Fe+Mg)	0.56	0.56	0.55	0.60	0.55	0.59	0.68	0.71	0.53	0.54	0.53	0.50	0.66	0.69
Mn	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02
X-site ³⁾	0.95	0.94	0.87	0.96	0.90	0.87	0.87	0.97	0.86	0.89	0.96	0.87	1.01	0.98
Y-site ³⁾	2.90	3.30	2.88	3.24	2.90	2.99	2.88	3.13	2.80	3.16	3.08	2.79	3.63	3.40
Z-site ³⁾	6.18	5.85	6.14	5.81	6.08	6.03	6.19	5.92	6.28	5.93	5.90	6.24	5.52	5.59

Values are expressed as wt% and per formula unit (p.f.u) following the calculation method in London and Manning (1995):

¹⁾Total Fe as FeO.

²⁾Al in Y(site) = Al+1.33 Ti+Si - 12.

³⁾X = Na+Ca; Y = Fe+Mg+Mn; Z = Al+1.33 Ti.

5c).

보통 Y 자리에 들어가는 Fe-Mg 함량은 최대로 3 p.f.u(per formula unit)인데, 내핵의 경우 Y 자리에 이보다 적은 Fe + Mg p.f.u.을 나타내고 있다(Fig. 5c). 이는 Y 자리에 Al 성분이 치환되었음을 의미하며, Al이 치환되어 Y 자리에 들어가면 전하균형(charge balances)에 의해 다른 자리(i.e., in the X site)에 알칼리원소나 수소가 결핍되어진다(Fig. 5c, d). 이는 알칼리-결핍 치환백터인 ($[X]AlNa(Fe,Mg)_-$)로 표현된다. 이것은 전기석을 형성 초기에는 후반부에 비해 Al 성분이 열수에 풍부했음을 의미한다. 이러한 변이는 마그마 기원의 열수에서 형성된 전기석에 흔하게 나타난다고 보고되었다(London and Manning, 1995; Williamson *et al.*,

2000). 즉, 가장자리 부분은 내핵에 비해 상대적으로 X 자리가 채워지고 알칼리원소나 수소원소가 결핍되는 화학적 특성에서 멀어지는 경향을 보이고 있다.

가장자리부분의 산화 제2철(ferric) 치환($Fe^{3+}Al_{-1}$)은 전기의 가장자리이 만들어지던 후기에 열수의 산화상태(oxidation state)가 증가된 것을 의미하며, 이러한 산화상태의 증가는 열수가 기상수(supergene water)와 같은 산화된 유체(more oxidizing fluids)와 혼합되었거나 열수의 비등(boiling)에 의해 형성될 수 있다(Jolliff *et al.*, 1986; London and Manning, 1995; Jiang *et al.*, 1998). 안정동위원소 연구(So and Shelton, 1983; 김정진 외, 1998)와 유체포유물연구(Yang and Lee, 1997) 결과는 이곳의 열수체계에는 기상수의 혼합이 미비했

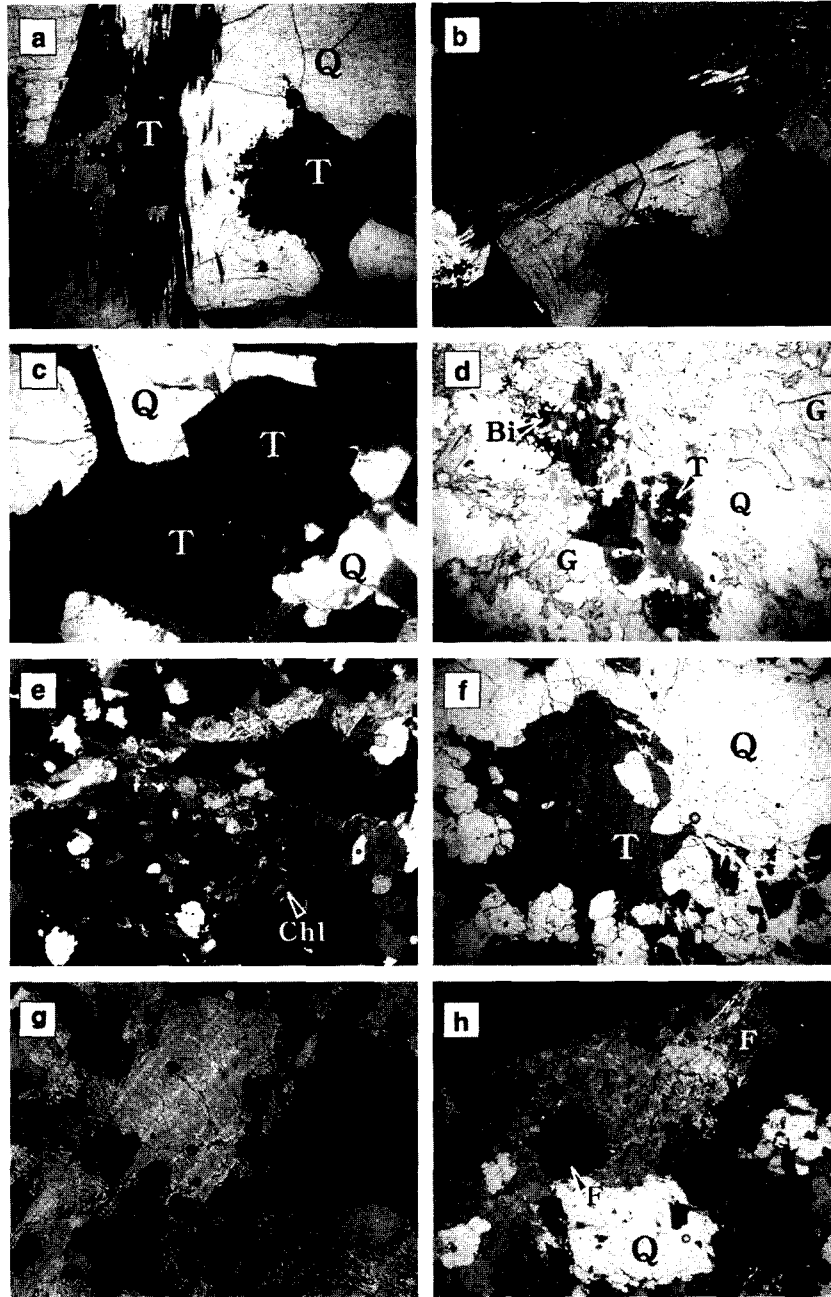


Fig. 4. Tourmalines at the Ilgwang mine showing characteristic textures and various pleochroism. (a) acicular aggregates of tourmalines intergrowing with quartz in the open-space filling in plane-polarized light. They are cut parallel (left T) or perpendicular (right T) to c-axis of tourmalines showing dark bluish pleochroism and (b) the same picture under crossed polars. (c) The curved trigonal cross-sectional outline of the tourmaline crystals showing zoning of the dark greenish to yellowish colors. (d) Tourmalines with biotite, garnet, quartz and chlorite in plane-polarized light and (e) the same picture under crossed polars, which is enlarged to show chlorite closer. (f) Anhedral tourmaline with zoning in plane-polarized light and (g) the same picture under crossed polars. (h) tourmaline replacing feldspars. Q = quartz, T = tourmaline, Bi = biotite, G = garnet, Chl = chlorite, F = feldspar.

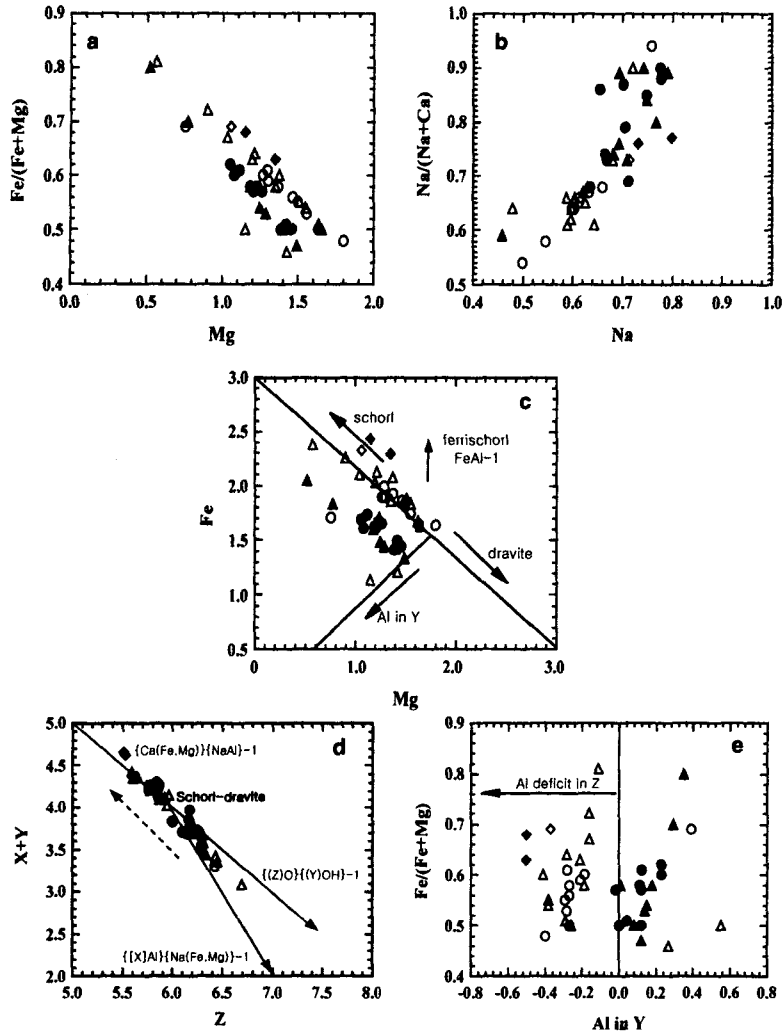


Fig. 5. Plots of cation occupancies of tourmaline from the Igwang Cu-mine, southeastern Gyeongsang basin using the same symbols presented by Jiang *et al.* (1998). All analyzed data (not average values in the Table 1) are plotted. (a) Fe/(Fe + Mg) vs. Mg. (b) Na/(Na + Ca) vs. Na. (c) Fe/Mg ratio; schorl-dravite plot along the line Σ (Fe + Mg) = 3; values of (Fe + Mg) < 3 correspond to Al substitution in Y; values of Σ (Fe + Mg) > 3 would plot in the ferrischorl region. (d) The sum of sites X + Y vs. Z. (e) Variations of Fe/(Fe + Mg) vs. Al in Y. Solid and open symbols indicate the core and rim parts, respectively; diamonds = "MT", circles = sericitic, triangles = propylitic.

음을 제시하고 있으며, 기상수에 의해 형성되는 아질릭(argillic) 변질(Beane and Bodnar, 1995)이 결핍되어진 것으로 보아 기상수의 혼합은 없었거나 미비했던 것으로 여겨진다. 한편, 유체포유물자료에 의하면 열수 비등이 이곳의 열수체계에 중요한 역할을 담당한 것으로 보고했다(Yang and Lee, 1997). 일광광상의 유체는 열수의 비등에 의해 수소(H₂)는 기체상인 수증기 속으로 분리되어 들어가고 그 결과 액체내의 Fe는 산화상태가 높아진 것으로 여겨진다. 더욱이 비등은 CO₂와

같은 산성휘발성성분을 기체상으로 분리하게 되어 열수의 pH를 높여 황화광물의 형성을 용이하게 한다(Drummond and Ohmoto, 1985). 전기석 가장자리의 성분 및 광물공생관계(Fig. 2)와 비등하는 유체포유물(Yang and Lee, 1997)의 존재 등은 전기석의 가장자리가 만들어지던 시기에 황화광물이 침전하였음을 시사한다. 그러나 산화광물이 흔하게 발견되지 않는 것으로 보아 열수는 그렇게 강한 산화환경을 유지하고 있었던 것은 아닌 것으로 여겨진다.

토의 및 결론

모암인 화강암질암과 각력파이프내에는 전기석결정화 작용이 활발하였지만, 반면에 인접한 퇴적암과 화산암에는 전기석이 발견되지 않는 것은 전기석화작용이 파이프에 의해 강하게 제어되었고, 전기석을 침전시킨 열수는 화강암의 관입과 연관되었으며, 여기서 형성된 열수활동은 비교적 폐쇄계를 이루었음을 알 수 있다. 그러나 전기석이 모암인 화강암과 시공간적인 밀접한 관련성을 보이고 있지만, 일광의 화강암질암을 형성한 마그마는 마그마기원의 일차 전기석을 침전시키지는 못했다. 흑색의 전기석 즉 스코올-드라바이트성분의 전기석의 안정도를 좌우하는 요인은 압력과 온도, H_2O , Al, Fe-Mg와 붕소(B) 성분의 함량 그리고 열수나 용융체의 pH가 중요한 역할을 한다(London and Manning, 1995; Jiang *et al.*, 1998). 지질학적 환경에서 극단적인 특수한 경우를 제외하고서는 전기석은 속성단계에서 마그마의 액상선 범위의 광범위한 압력-온도에서 안정한 광물로서 온도-압력은 그다지 중요한 일차 제어요인이 되지 않는다(Jiang *et al.*, 1998). 일광의 화강암질암과 같이 물을 함유한 Al성분이 비교적 풍부한 메타아루미너스-피아루미너스 마그마인 경우 H_2O 와 Al성분도 그렇게 중요한 요인이 되지 않는다(London and Manning, 1995). FeO + MgO성분이 1~2 wt% 정도 되는 화강암질 용융체인 경우, 외부에서 Fe + Mg 성분 공급이 없어도 전기석의 결정작용이 일어난다(London and Manning, 1995). 일광의 용융체는 3.1~4.7 wt% FeO와 0.9~2.5 wt% MgO(Jin, 1975)를 포함하고 있어서 충분히 전기석을 만들 수 있는 Fe + Mg성분을 지닌 마그마이다.

그렇다면, 용융체 내에 붕소함량과 pH 상태가 전기석의 안정도에 중요한 제어요인이 될 것이다. 일광의 경우, 붕소의 근원으로는 모암을 형성한 화강암질 마그마와 주변의 퇴적암이라는 두 가지의 가능성을 제기할 수 있다. 퇴적암은 일반적으로 최고 300 ppm까지 붕소를 함유할 수 있다(Taylor and Slack, 1984). 마그마 관입에 의해 형성된 열 엔진에 의해 대류하는 열수가 퇴적암의 붕소를 채집하고, 화강암질암의 Fe-Mg 성분과 결합될 수도 있다(London and Manning, 1995). 그러나 퇴적암과 화강암질암과의 접촉부나 퇴적암내에 전기석이 형성되지 않은 것은 퇴적암에서의 기여도가 없었던 것을 의미한다. 이것은 안정동위원소 자료(So and Shelton, 1983; 김정진 외, 1998)에서도 잘 나타나고 있다. 비록 붕소에 대한 직접적인 증거인 붕소동위원소분석은 없지만 이곳의 붕소는 마그마 기원일 가능

성이 높다.

붕소가 마그마기원이고 충분한 Fe-Mg 함량을 가진 마그마가 일차적인 마그마기원의 전기석을 형성하지 못한 것은 화강암질암 마그마의 알칼리도가 전기석의 안정도를 좌우한 것으로 여겨진다. 일광의 화강암질암을 형성한 마그마는 결정화작용이 진행되면서 Fe-Mg 원소는 결정 속으로 들어가면서 제거되어지고, 붕소는 불호정성원소로 거동하면서 잔류용융체속에 부화되어졌을 것이다. 결정화 최후기 단계에서는 Fe-Mg 원소는 거의 소모되어 전기석을 형성할 만큼 충분하지 못했을 것이며, 그리고 마그마가 충분한 성분을 함유하고 있더라도 마그마가 알칼리상태(pH > 6.5)라면, 전기석은 안정하지 못하며, 이때 Fe-Mg 성분은 각섬석류나 휘석류를 형성하는 곳으로 소모된다(London and Manning, 1995). 물에 포화된 마그마가 고상선 온도에 접근하면서 산성의 가스성분을 포함한 소금물(brines)을 용리하면서, 이곳의 환경은 알칼리성의 마그마계에서 산성의 열수체계로 전환되어지고 난 후 모암의 Fe-Mg 성분과 함께 열수기원의 전기석이 형성된 것으로 여겨진다.

일광 전기석 형성에 관한 시나리오는 다음과 같이 엮어볼 수 있다. 현재 위치에 정착한 마그마는 외곽부에서 결정화를 시작하면서 흑운모와 각섬석을 상대적으로 많이 가진 염기성성분의 결정화된 껍질(a crystalline rind)을 형성하면서 마그마의 Fe-Mg 성분을 소모했을 것이다. 잔류용융체는 상대적으로 산성화(felsic) 되고 붕소에 부화되다가, 마침내 고상선 환경의 마그마에서 붕소가 풍부한 열수를 용리하였다. 이 용리된 열수는 일광의 마그마-열수계가 알칼리에서 산성(acidic)으로 변화되었을 때 모암변질과 함께 모암에서 Fe-Mg 성분을 공급받아 전기석을 침전하기 시작한다. 붕소가 풍부한 산성(acidic)열수는 알루미늄성분을 풍부하게 용해시켰을 것이며(Morgan and London, 1989), 이 알루미늄 성분은 전기석의 형성을 가속화 시켰을 것이다. 결론적으로, 전기석의 산출상태와 지화학적 특성은 이곳의 전기석은 마그마에서 용리된 열수의 생산물이며, 이 열수는 각력파이프를 통로로 대규모로 이루어진 마그마(orthomagmatic), 심부(hypogene)기원의 열수에 의해 형성되었음을 나타내고 있다.

세계의 환태평양 지역의 반암형동광상의 지질과 경상분지의 지질, 일광광상을 비교해보면 상당히 많은 유사한 점을 보여준다. 섭입대라는 조구조적환경과 심성암체의 성분(Jin *et al.*, 1981; Jin, 1986; 이상만 외, 1987), 관입암체와 활동과 금속광상 사이의 성인적 관계(Sillitoe, 1980; 민경덕 외, 1982; Choi and Wee, 1994), 그리고 유체포유물자료(Sillitoe and Sawkins,

1971; Carson and Sawkins, 1980; Cline and Bodnar, 1991, 1994; Yang and Bodnar, 1994; Slack, 1996; Yang, 1996) 등은 환태평양지역의 그것과 매우 유사하다. 그러나 경상분지의 대부분의 화강암류에는 경제성이 있는 반암동광상이 발견되고 있지 않은 상황이다. 일반적으로 널리 알려진 환태평양대 반암동광상지역과 일광광상을 비교하면, 모암의 성분, 각력파이프형의 파쇄대의 존재, 모암변질, 전기석의 산출과 성분, 유체의 특성(Sillitoe and Sawkins, 1971; Carson and Sawkins, 1980; Guilbert and Park, 1986; Cline and Bodnar, 1991, 1994; Beane and Bodnar, 1995; Yang and Lee, 1997) 등등이 매우 유사한 지질환경을 보여준다. 단지 다른점이 있다면, 일광 화강암질암에는 포타식(potassic) 변질이 없다는 것이다. 반암동광상지역에는 광화대를 중심으로 증앙에서부터 포타식변질대, 건운모변질대, 프로필리틱변질대로 배열되어진다(Beane, 1982). 건운모변질이 가장 후기이며, 대체로 이전에 형성된 포타식변질, 프로필리틱변질 위에 겹치지는 것이 일반적인 모습이다(Guilbert and Park, 1986; Beane and Bodnar, 1995). 일광광상에 포타식변질이 없는 것은 이곳의 초기유체는 일반적인 반암동광상지역에 비해 K^*/H^* 이 낮았음을 의미한다(Beane and Bodnar, 1995). 전기석의 화학성분에서도 K함량이 매우 적게 포함되어 있으며, 유체포유물자료에서도 반암동광상지역에 흔하게 관찰되는 칼리염(KCl)이 관찰되지 않는 것과 잘 일치하고 있다(Yang and Lee, 1997).

그렇다면, 일광의 모암인 화강암류는 경제성이 없는 경상분지의 다른 화강암류에 비해 경제성이 있는 구리광상을 배태할 수 있었던 것은 비교적 천처에 형성된 마그마-열수계이거나 열수의 활동이 매우 강력해서 위에 놓인 암석의 압력(lithostatic pressure)을 극복할 만큼 충분한 에너지를 제공할 수 있었던 것으로 여겨진다. 즉, 경상분지의 경제성이 없는 화강암류는 전형적인 반암동광상에 비해 높은 압력환경하에서 형성되었으며, 최후기에 물에 포화되었기 때문에 마그마에 있던 구리원소는 조암광물 속으로 분산되어진 것으로 해석되었다(Yang and Bodnar, 1994). 저자의 경험에 의한 경상분지의 화강암류는 관상절리를 제외하고는 대체로 괴상으로 산출되며, 정동(miarolitic cavities)이 풍부하게 산출되는 것이 특징이다 (Jin, 1986; Yang and Bodnar, 1994; Koh, 2001). 이 정동은 비교적 깊은 곳에서 형성되어지며, 좀더 천처로 올라오면 각력 파이프종류의 파쇄대가 형성되어진다(Burnham, 1997). 일광의 경우 정동이나 페그마타이트는 관찰되지 않지만 각력 파쇄대를 형성하고 있으며, 이는 마그마에서 용리된 열수의

압력(hydrostatic pressure)이 위에 놓여있는 암석의 압력보다 높았기 때문에 각력파이프를 성공적으로 형성할 수 있었던 것으로 해석된다.

사 사

논문심사과정에서 여러 문제점을 지적하고 논문전개에 많은 유익한 도움을 주신 박계현 교수님과 익명의 심사자님께 감사의 뜻을 전합니다. 본 연구는 부산대학교 학술연구조성비(4년과제)에 의해 수행된 연구입니다.

참고문헌

- 강주명, 전효택, 전용원, 1976, 일광중석, 동광상의 광화작용과 각력파이프의 성인에 관한 연구. 대한광산학회지, 13, 218-228.
- 김수영, 문희수, 1994, 상동지역 페그마타이트 및 관계 화성암의 전기석 분화 특징. 자원환경학회지, 27, 441-449.
- 김정진, 이준동, 김인수, 양경희, 백인성, 1998, 경상남도 일광 식력 파이프형 구리-중석 광상을 형성한 열수의 기원: 안정동위원소 증거. 지구과학회지, 19, 294-301.
- 민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 주승환, 1982, 한국남부의 백악기말 이후의 화성활동과 광화작용에 대한 판구조론의 적용성 연구(I), 광산지질, 15, 123-54.
- 이상만, 김상욱, 진명식, 1987, 남한의 백악기~제3기 화성활동과 지구조적 의의. 지질학회지, 23, 338-359.
- 전효택, 손창일, 1995, 상동 및 울진지역 화강암질암과 페그마타이트의 광물화학. 자원환경학회지, 28, 33-41.
- Beane, R.E., 1982, Hydrothermal alteration in silicate rocks. In *Advances in geology of the porphyry copper deposits* (ed. S.R. Titley), The University of Arizona press, 117-137.
- Beane, R.E., and Bodnar, R.J., 1995, Hydrothermal fluids and hydrothermal alteration in porphyry copper deposits. In *Porphyry copper deposits of the American cordillera* (Pierce, F.W. and Bohm, J.G., eds.), Arizona Geological Society Digest, 20, 83-93.
- Burnham, C.W., 1997, Magmas and hydrothermal fluids. In *geochemistry of hydrothermal ore deposits 2nd ed.* (H. L. Barnes, ed), John Wiley & Sons, 71-136.
- Burt, D., 1989, Vector representation of tourmaline compositions. *Am. Mineral.*, 74, 826-839.
- Carson, S.R., and Sawkins, F.J., 1980, Mineralogic and fluid inclusion studies of the Turmalina Cu-Mo-bearing breccia pipe, Northern Peru. *Econ. Geol.*, 72, 1233-1237.
- Choi, S., Wee, S., 1994, Petrochemical study of the gadaeri granite in Ulsan area, Kyeongsang Province. *Econ. Environ. Geol.* 27, 459-467.
- Cline, J.S., and Bodnar, R.J., 1991, Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt?. *Jour. Geophys. Res.* 96, 8113-8126.

- Cline, J.S., and Bodnar, R.J., 1994, Direct evolution of brine from a crystallizing silicic melt at the Questa, New Mexico, Molybdenum deposit. *Econ. Geol.* 89, 1780-1802.
- Drummond, S.E., and Ohmoto, H., 1985, Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Econ. Geol.*, 80, 126-147.
- Fletcher, C.J.N., 1977, The geology, mineralization, and alteration of Ilkwang mine, Republic of Korea. A Cu-W-bearing tourmaline breccia pipe. *Econ. Geol.*, 72, 753-768.
- Griffin, W.L., Slack, J.F., Ramsden, A.R., Win. T.T., and Ryan, C.G., 1996, Trace element in tourmaline from massive sulfide deposits and tourmalinites: Geochemical controls and exploration applications. *Econ. Geol.* 91, 657-675.
- Guilbert, J.M. and Park, F.F., Jr, 1986, *The geology of ore deposits*. W.H. Freeman and company, New York, 985 p.
- Henry, D.J. and Dutrow, B.L., 1992, Tourmaline in low grade clastic metasedimentary rock: an example of the petrogenetic potential of tourmaline. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 112, 203-218.
- Henry, D.J., and Guidotti, C.V., 1985, Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral, An example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *Am. Mineral.* 70, 1-15.
- Jiang, S.Y., Slack, J.F., and Shaw, D.R., 1998, Paragenesis and Chemistry of Multistage Tourmaline Formation in the Sullivan Pb - Zn -Ag Deposit, British Columbia. *Econ. Geol.*, 93, 47-67.
- Jin, M.S., 1975, Geochemistry and copper mineralization of the granodiorite at Ilkwang Mine Gyeongsang-Namdo, Korea. M.S. thesis, Seoul National University, Seoul, 61p.
- Jin, M.S., 1986, Geochemistry of the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in southern Korea. *J. Geol. Soc. Korea* 21, 297-316.
- Jin, M.S., Kim, S.Y. and Lee, J.S., 1981, Granitic magmatism and associated mineralization in the Gyeongsang Basin, Korea. *Mining Geol.* 31, 245-60.
- Jolliff B.L., Papike, J.J., and Shearer C.K., 1986, Tourmaline as recorder of pegmatite evolution: Bob Ingersoll pegmatite, Black Hills, South Dakota. *Am. Mineral.* 71, 472-500.
- Koh, J. S., 2001, Mineralogical, geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of the Namsan A-type and Gyeongju I-type granitic rocks in the Kyongsang basin, Korea. PhD. thesis, Pusan National University, 173p.
- London, D. and Manning D.A., 1995, Chemical variation and significance of tourmaline from southwest England. *Econ. Geol.*, 90, 495-519.
- Lowell, J.D., and Guilbert, J.M., 1970, Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ. Geol.*, 65, 373-408.
- Morgan, G.B. 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. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 102, 281-297.
- Shearer, C.K., Papike, J.J., Simon, S.B., Laul, J.C., and Christian, R.P., 1984, Pegmatite/wallrock interactions, Black Hills, South Dakota: Progressive boron metasomatism adjacent to the Tip Top pegmatite. *Geochim. Cosmo., Acta*, 48, 2563-2579.
- Sillitoe, R.H., 1980, Evidence for porphyry-type mineralization in southern Korea. *Mining Geology Special Issue*, 8, 205-214.
- Sillitoe, R.H., and Sawkins, F.J., 1971, Geologic, mineralogic and fluid inclusion studies relating to the origin of copper-bearing tourmaline breccia pipes, Chile. *Econ. Geol.* 66, 1028-1041.
- Slack, J.F., 1996, Tourmaline associations with hydrothermal ore deposits. *Reviews in Mineralogy*, 33, 559-643.
- Slack, J.F., Palmer, M.R., Stevens, B.P.J., and Barnes, R.G., 1993, Origin and significance of tourmaline - rich rocks in the Broken Hill district, Australia. *Econ. Geol.* 88, 505-541.
- So, C.S., and Shelton, K.L., 1983, A sulfur isotopic and fluid inclusion study of the Cu-W-bearing tourmaline breccia pipe, Ilkwang mine, Republic of Korea. *Econ. Geol.*, 72, 326-332.
- Taylor, B.E., and Slack, J.F., 1984, Tourmalines from Appalachian-Caledonian massive sulfide deposit, Textual, chemical, and isotopic relationships. *Econ. Geol.*, 79, 1703-1726.
- Trumbull, R. and Chaussidon, M., 1999, Chemical and boron composition of magmatic and hydrothermal tourmalines from Sinceni granite-pegmatite system in Swaziland. *Chem. Geol.*, 153, 125-137.
- Williams, W.C., Meissl, E., Madrid, J., and Machuca, B.C., 1999, The san Jorge porphyry copper deposit, Meddoza, Argentina: a combination of orthomagmatic and hydrothermal mineralization. *Ore Geol. Rev.*, 14, 185-201.
- Williamson, B.J., Spratt, J., Adams, J.T., Tindle, A.G., Stanley, C.J., 2000, Geochemical constraints from zoned hydrothermal tourmalines on fluid evolution and Sn mineralization: an Example from fault breccias at Roche, SW England. *J. Petrol.*, 4, 1439-1453.
- Wolf, M.B. and London, D., 1997, Boron in granitic magmas: stability of tourmaline in equilibrium with biotite and cordierite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 130, 12-30.
- Yang, K, 1996, Fluid inclusions trapped in quartz veins and granitic rocks from Pusan- Kyeongju area. *J. Geol. Korea*, 32, 431-446.
- Yang, K, and Bodnar, R.J., 1994, Magmatic-hydrothermal evolution in the bottoms of porphyry copper systems: evidence from the silicate melt and aqueous fluid inclusions in the Gyeongsang Basin, South Korea. *Int. Geol. Rev.*,

36, 608-628.

Yang, K, and Lee, J., 1997, Fluid inclusions of the Ilkwang
Cu-W-bearing breccia-pipe deposit, Kyongsang Basin"

Geosci. J., 1, 15-25.

(2002년 6월 19일 접수, 2002년 8월 20일 채택)