

## 안동 초염기성암 복합체의 함금운모 사방휘석암

### Phlogopite-Bearing Orthopyroxenite in Andong Ultramafic Complex

정 기 영(Gi Young Jeong)<sup>1</sup> · 이 승 렬(Seung Ryeol Lee)<sup>2</sup> · 권 석 기(Seok-Ki Kwon)<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

<sup>2</sup>한국지질자원연구원

(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea)

**요약** : 안동 초염기성암 복합체에서 발견된 함금운모 사방휘석암의 산출과 광물학적 특성을 보고한다. 사방휘석암은 복합체 내에서 1 m 내의 두께의 층상암체로 산출되며, 대부분 조립 자형-반자형 사방휘석으로 구성되어 있다. 소량광물로서 단사휘석, 금운모, 사장석이 미량의 크롬 스피넬, 펜틀란다이트, 인회석, 저어콘과 함께 수반된다. 단사휘석은 사방휘석 내에 용리되어 있거나, 후기에 사방휘석 간극을 충전한다. 전자현미분석에 의하면 사방휘석과 단사휘석은 각각 엔스테타이트와 투회석이며, 시료별 조성 차이가 거의 없다. 금운모와 사장석도 사방휘석의 간극을 충전하며 거의 일정한 조성을 보인다. 후기변질작용으로 사방휘석, 단사휘석, 사장석이 각각 활석, 각섬석, 사문석으로 변질되었다. 사방휘석암은 초염기성 마그마로부터 분별결정작용으로 생성된 것으로 보인다. 현재 미상인 안동 초염기성암 복합체의 지질시대가 사방휘석암의 금운모와 저어콘에 대한 연대측정으로 규명될 것으로 기대된다.

**주요어** : 초염기성암, 사방휘석암, 안동, 금운모, 저어콘

**ABSTRACT** : Phlogopite-bearing orthopyroxenite occurs in Andong ultramafic complex in a planar body of about 1 meter thick, and consists mostly of coarse subhedral to euhedral orthopyroxene crystals. Minor minerals are clinopyroxene, phlogopite, and plagioclase with trace chromian spinel, pentlandite, apatite, and zircon. Clinopyroxene occurs as either exsolution lamella or interstitial fillings with phlogopite and plagioclase. Electron microprobe analysis showed that orthopyroxenes are entatite, while clinopyroxenes are diopside with little chemical variation through samples. Hydrous alteration resulted in the formation of talc, amphibole, and serpentine from orthopyroxene, clinopyroxene, and plagioclase, respectively. The orthopyroxenite was probably formed by the fractional crystallization of the ultramafic magma. Radiogenic dating of phlogopite and zircon of the orthopyroxenite would reveal the age of the Andong ultramafic complex.

**Key words** : Ultramafic, orthopyroxenite, Andong, phlogopite, zircon

\*Corresponding author: +82-42-868-3282, E-mail: [ksk@kigam.re.kr](mailto:ksk@kigam.re.kr)

## 서 론

국내에 분포하는 초염기성암은 한반도와 그 주변 지각의 하부를 구성하는 암석질 맨틀에 대한 정보를 제공하거나, 지체구조 진화에 대한 단서를 제공하므로 암석학적으로 활발히 연구되고 있다(Park, 2010). 그러나 초염기성암의 산출규모는 매우 빈약하며, 안동, 홍성, 청양, 울산 일원에 수 km 이하의 소규모암체로 분포하며(Hwang *et al.*, 1993; Song *et al.*, 1997; Woo and Suh, 2000; Song *et al.*, 2004; Park *et al.*, 2012; Oh *et al.*, 2010, 2012), 제주도, 백령도, 간성, 보은 등에서 신생대 현무암 내에 작은 포획체로 산출된다(Lee, 1984; Lee, 1995; Yang and Hwang, 2005; Choi *et al.*, 2005; Lee and Walker, 2006; Shin *et al.*, 2006; Choi *et al.*, 2008; Kil *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2010; Choi, 2012). 암체규모로 분포하는 초염기성암은 대부분 심한 사문암화작용을 받아서 원암의 광물 조성, 화학조성, 조직을 판별하기 어렵지만, 현무암 내 포획암으로 산출되는 경우에는 비교적 신선한 상태로 보존되어 있어서 여러 가지 암석학적 및 지화학적 연구들이 이루어진 바 있다. 초염기성 포획암의 연구결과를 종합하면(Choi, 2012), 초염기성암의 암종은 대부분 광물조성상 감람석(40~83%), 사방회석(14~32%), 단사회석(2~23%), 철정석(0.4~6%) 등으로 구성된 레졸라이트(lherzolite)에서 하즈버가이트(harzburgite) 조성의 페리도타이트(peridotite)이다. 그러나 최근 제주도 초염기성 포획암 연구는 단사회석암 등 맨틀교대로 인한 것으로 보이는 암종들과 금운모나 각섬석 등의 함수광물도 보고하고 있다(Heo *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2012). 따라서 한반도 지각 하부 맨틀에는 부분적으로 불균질한 부분들이 있는 것으로 보이나, 작은 포획암만으로는 맨틀암의 전모에 대한 연구가 쉽지 않은 것으로 보인다.

국내의 사문암체 중, 안동시 풍천면에 분포하는 안동 사문암체는 심한 사문암화 작용에도 불구하고, 사문암 원암으로 추정되는 페리도타이트 외에, 감람석 반려암과 휘석암 등의 다양한 초염기성암이 산출되고 있다. 안동 사문암체에 관한 연구로서 1:50,000 안동지질도(Kim *et al.*, 1988), 광물학적 연구(Hwang *et al.*, 1993), 암석학적 연구(Whattam *et al.*, 2011), 인접 안동단층계에 대한 구조지질학적 연구(Choi *et al.*, 2002; Kang and Lee, 2008)가 있다. 1:50,000 안동지질도에는 반려암으로 기

재되었고, 그 후 여러 논문들에서 인용되었으나, 저자들의 최근 조사에 의하면 사문암의 주요 모암은 감람석과 휘석이 주구성 광물인 페리도타이트이다. 안동 사문암체에 대한 광물학적 분석 결과, 감람석이 심하게 극미립 사문석화되었으나, 단사회석은 잔류하거나 투각섬석-양기석으로 변질되었다. 따라서 사문암의 단사회석 또는 이를 교대한 각섬석 유사 반정의 함량으로부터 원암인 페리도타이트의 상세한 암종 구분도 가능할 것으로 보인다. 저자들의 현재까지 분석 결과에 의하면 안동 사문암체의 원암인 페리도타이트은 다양한 비율의 감람석과 휘석으로 구성되어 있으며, 소규모이지만, 감람석 반려암이나 휘석암도 발견되었다.

흔히 이와 같은 사문암은 판의 충돌 과정에서 융기한 최상부 해양암권인 오피올라이트(ophiolite)의 일부로 알려져 있다. 그러나 Whattam *et al.* (2011)은 안동 사문암체의 모암인 초염기성암체가 supra-subduction zone 환경에서 생성된 마그마 기원이라고 해석하였다. 흔히 안동 초염기성암체가 사문암으로 언급되고 있으나 다양한 초염기성암상들이 산출되고 있고 변질 정도가 미약한 부분도 있으므로 여기서는 Whattam *et al.* (2011)의 제안을 따라 안동 초염기성암 복합체(Andong Ultramafic Complex)라는 용어를 사용하기로 한다. 안동 초염기성암 복합체는 우리나라 동측에 트라이아스기에서 백악기 동안 형성된 고기 태평양판의 섭입환경과 관련된 맨틀 wedge의 특성 이해에서 중요한 의미를 갖는다. 그렇지만 안동 초염기성암 복합체의 형성 시기가 아직 규명되지 않아서, 지체구조적 해석이 현재 매우 제한적이다. 저자들은 연대미상인 안동 초염기성암 복합체의 광물학적 연구를 수행 중이며, 이 과정에서 대부분 사방회석으로 구성되어 있고 연대측정이 가능한 광물들을 함유한 사방회석암(orthopyroxenite)을 발견하여 그 산상 및 광물학적 특성을 보고자 한다.

## 사방회석암의 산출

안동 초염기성암 복합체 주변 일반지질과 구조지질은 Kim *et al.* (1988), Choi *et al.* (2002), Kang and Lee (2008)에 자세하게 소개되어 있다. 안동 단층계에 위치한 초염기성암체는 역단층인 광덕단층의 상반으로서 남쪽으로 하반인 경상계 백악기 퇴적암층과 접한다. 그러나 북쪽으로는 낙동강의 층적층으로 피복되어 있어서 관계를 확인하기 어



**Fig. 1.** Distribution of Andong ultramafic complex and location of orthopyroxenite outcrops in two serpentinite quarries.

럽다(그림 1). 초염기성암체에서 사문암화가 심한 부분을 대상으로 현재 두 곳(신립 및 풍산)에서 사문암 채광작업이 이루어지고 있다.

신립 사문암 광산 노두에서 발견된 사방휘석암은 사문암체 내에 약 1~1.5 m 두께의 층상 암체(N28°E, 45°NW)로 분포한다(그림 2a-b). 이 암체는 두께가 매우 얇지만 연장성이 있으며 인접 풍산 광산 노두에서도 유사한 형태로 발견된다. 사방휘석암의 하부 경계는 사문암과 상당히 뚜렷한 경계를 보이고 있으나, 상부는 사문암 쪽으로 점이적 경계를 보인다. 사방휘석암의 인접부에는 소규모 감람석 반려암이 렌즈상으로 사문암 내에 분포한다.

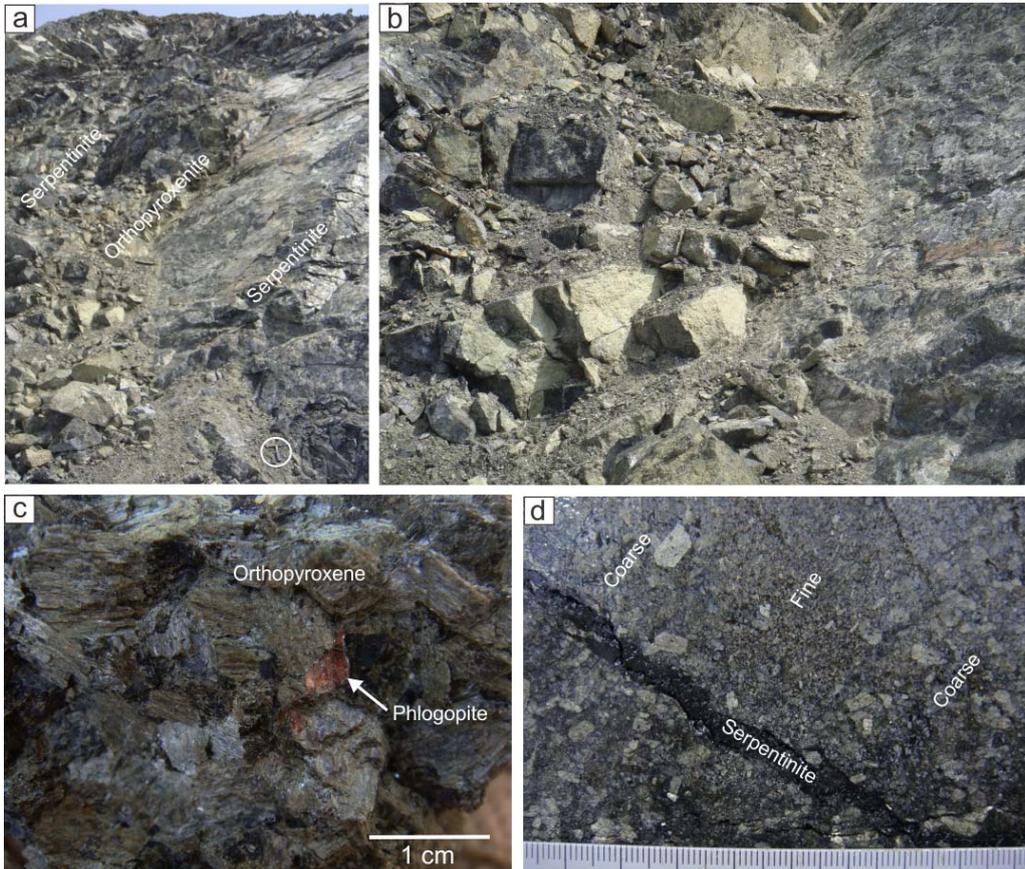
초염기성암 복합체는 고결된 후, 현위치에 정착하기까지 반복적인 변형작용을 받아서 내부적으로 많은 소규모 단층, 파쇄대, 절리들이 발달되어 있다. 채굴장(신립 및 풍산) 노두는 매우 신선하긴 하지만, 거의 수직인 경사, 그리고 절리를 따라 떨어지는 각력 낙석으로 인하여 소규모 암체의 연속 추적이 어려운 형편이다.

무너져 내린 암괴들의 관찰에 의하면, 사방휘석암은 거의 변질되지 않은 암괴, 이차변질 산물인 각섬석, 녹니석, 사문석, 활석 함량이 높아서 청록색조를 띠는 암괴들이 있다. 변질도가 약한 암괴는

거의 대부분 조립의 등립상 휘석으로 구성되어 있으며 드문드문 적갈색 운모들이 산점상으로 함유되어 있다(그림 2c). 크기가 1 cm 내외의 큰 사방휘석 결정들로 구성된 사방휘석암이 흔하며, 5 mm 이하 휘석들로 구성된 사방휘석암도 관찰되었다. 사방휘석암은 조립질이고 암녹황색을 띠지만, 표면이 지하수에 노출된 절리면은 미약하게 풍화되어 황록색을 띠므로 주변 흑색 사문암과 구분된다(그림 2b). 절단면에서 조립의 사방휘석과 세립의 사방휘석이 점이적으로 교호하는 현상도 관찰할 수 있으며, 원물질이 감람석인 흑색의 사문암이 사방휘석암의 균열을 따라 관입되어 있다(그림 2d). 다수의 사방휘석암을 사문암 채굴장에서 채취하였으나, 그 중 변질 정도가 낮은 풍산 채굴장의 PS103A 및 신립 채굴장의 SRP100B를 분석시편으로 선정하였다.

### 분석방법

시편의 연마박편을 제작하여 광학현미경과 주사전자현미경으로 광물들의 산출 상태를 관찰하였으며, 주요 광물인 휘석 및 금운모와 변질광물들에 대하여 전자현미분석기(EPMA)를 이용한 광물화학분석을 실시하였다. 주사전자현미경은 TESCAN



**Fig. 2.** Outcrop of orthopyroxenite in the Shinlip serpentinite quarry. (a) Orthopyroxenite layer (N28°E, 45°NW) in the serpentinite body. Note geological hammer in the circle. (b) Orthopyroxenite collapsing readily to angular blocks of light greenish yellow color. (c) Coarse granular orthopyroxenite including reddish brown phlogiopite flakes. (d) Alternating layers of coarse and fine orthopyroxene crystals cut by black serpentinite.

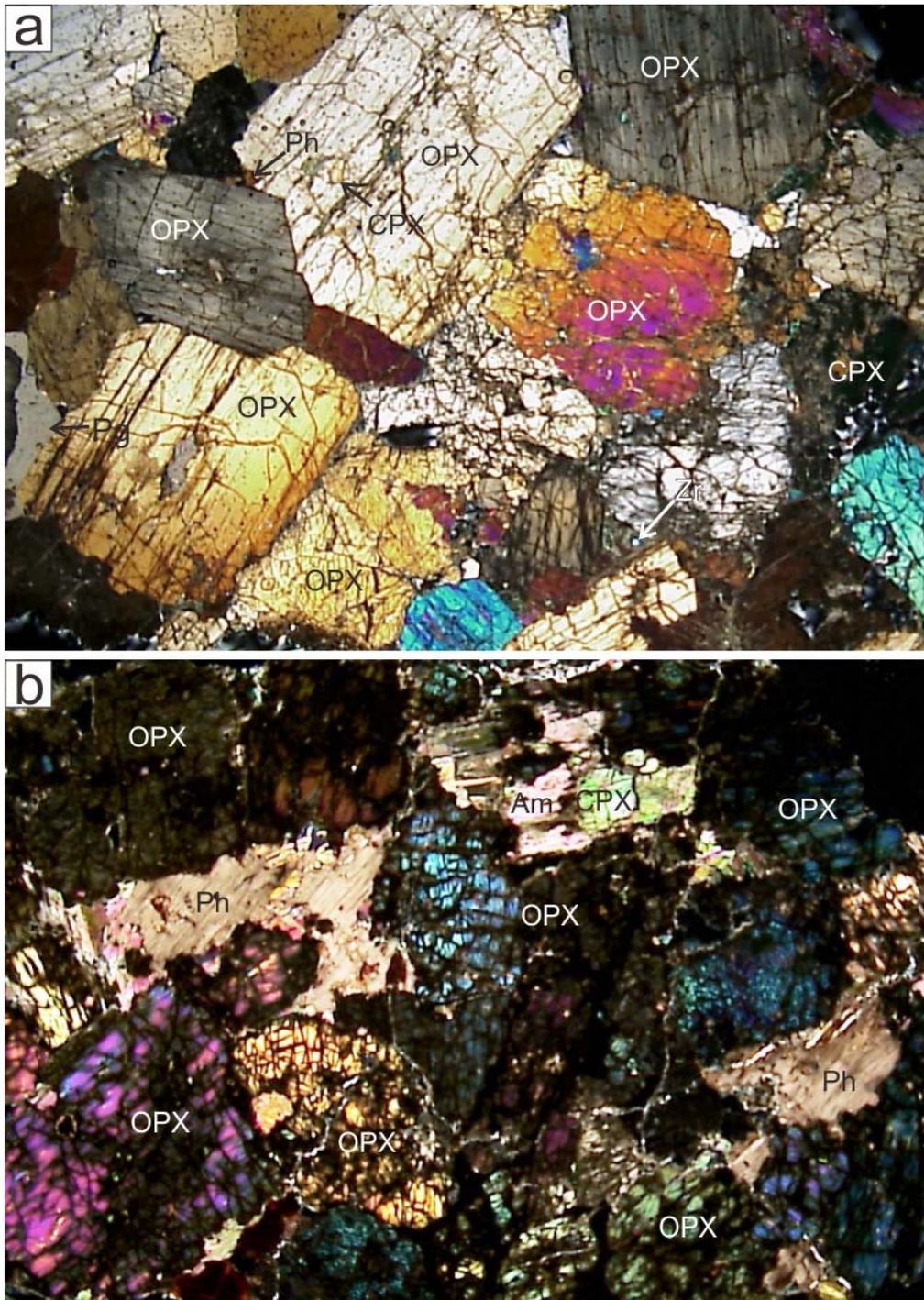
VEGA LMU 기종을 이용하였고, 광물화학분석은 경상대학교 공동실험실습관의 JXA-8100을 이용하여 실시하였다. 박편상에서 광물조성 결정은 광학 현미경 디지털 영상을 촬영한 후, 이미지분석법으로 각 광물의 면적을 측정하는 방법으로 실시하였다. 원광물들이 부분적으로 변질되어 있지만, 가상 형태로 가장자리만 교대되어 있기 때문에 원광물의 면적을 측정하는 것은 어렵지 않았다. 전암화학분석은 약 300 g의 시료를 분쇄하여, 주원소 및 미량원소 화학분석을 실시하였다. 전암화학분석은 Activation Laboratories에 의뢰하여 유도결합플라즈마 방출 분광분석, 유도결합플라즈마 질량 분광분석, 중성자활성분석,  $Fe^{2+}$  적정 등의 분석법을 복합적으로 적용하여 실시하였다. 그 외 극미립 변질

광물의 동정을 위하여 RIGAKU Ultima 기종을 사용하여 분말 X선 회절분석을 실시하였다.

## 결 과

### 현미경 관찰

사방휘석암은 현미경 관찰에 의하면, 대부분 사방휘석으로 구성되어 있으며, 소량의 단사휘석이 함유되어 있으나, 감람석은 관찰되지 않았다(그림 3). 단사휘석은 사방휘석 내에 용리 산물로 산출하지만, 사방휘석 사이의 큰 타형 결정으로도 산출된다. 반면에 사방휘석은 대체로 자형-반자형의 결정형을 갖는다. 단사휘석 외에 사장석과 금운모가 사



**Fig. 3.** Photomicrographs of orthopyroxenite. (a) Shinlip orthopyroxenite. (b) Pungsan orthopyroxenite. Am = amphibole, CPX = clinopyroxene, OPX = orthopyroxene, Pg = plagioclase, Ph = phlogopite, Zr = zircon. Cross-polarized light. Width of photographs : 25 mm.

**Table 1.** Chemical compositions of orthopyroxenite and serpentinite from the Andong ultramafic complex.

Oxide (wt%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI*	Total
Opx rock** (PS103)	50.42	3.63	1.55	8.2	0.176	27.22	2.67	0.17	0.26	0.343	0.05	3.57	98.26
Opx rock (SRP100A)	53.13	2.8	0.45	9.0	0.184	29.07	2.09	0.19	0.13	0.242	0.03	0.57	97.89
Serp rock (SR6B)	36.64	1.16	6.39	5.2	0.154	37.31	2.74	0.14	0.02	0.094	0.05	9.85	99.75
Serp rock (SR120)	34.45	0.73	8.67	3.0	0.137	37.78	1.59	0.03	< 0.01	0.052	0.03	14.1	100.57
Metal (ppm)	Ba	Sr	Co	Cr	Cu	Ni	V	Zn	Sc	Th	U	Zr	Y
Opx rock (PS103)	70	69	89	1950	295	879	109	116	23.9	0.94	0.24	19	5
Opx rock (SRP100A)	34	24	77	1990	15	519	93	72	23.8	0.51	0.15	10	3
Serp rock (SR6B)	4	15	131	2880	85	1370	42	76	11.2	< 0.05	0.02	4	2
Serp rock (SR120)	5	18	127	2730	61	1310	31	72	7.09	< 0.05	0.02	1	< 1

\* LOI = loss on ignition. \*\* Opx rock = orthopyroxenite, Serp rock = serpentinite.

방휘석결정 간극을 충전하는 소량 광물로서 산출된다. 대체로 3개의 사방휘석결정 사이의 삼각형 모양 간극을 충전한다. 사방휘석암은 생성된 후에 부분적으로 변질 작용을 받았으며, 변질유형은 모광물의 화학조성에 지배되는 것으로 보인다. 사방휘석은 열극이나 벽개를 따라 활석으로 변질되며, 단사휘석은 각섬석으로 변질되었다. 그러나 사장석은 내부가 견운모로 변질되거나, 연변부를 따라 사문석으로 변질되었다. 변질 정도는 시료에 따라 차이가 커서, 신립 시료의 변질 정도는 미약하였으나(그림 3a), 풍산 시료는 입자경계, 미세열극, 벽개를 따른 변질 정도가 상대적으로 심하다(그림 3b).

박편상에서 두 시료의 원광물조성을 정량한 결과, 신립시편(SRP100B)의 경우 사방휘석 94.3%, 단사휘석 5.4%, 사장석, 1.8%, 금운모 0.2%였으며, 풍산시편(PS103A)은 사방휘석 89.0%, 단사휘석 5.6%, 금운모 5.4%이었다. 풍산시편에도 원래 사장석이 신립시편처럼 간극에 존재했던 것으로 보이지만 녹니석계열의 점토광물로 완전히 교대되어 있어서 계산에서 제외하였다. 그러나 그 함량은 1% 내외로 작을 것으로 추정된다. 사장석-사방휘석-단사휘석 3성분계에서 신립 및 풍산 휘석암의 사방휘석 함량은 각각 92.9% 및 94.1%, 감람석-사방휘석-단사휘석 3성분계에서 함량은 각각 94.1%와 94.6%이다. 따라서 이 두 휘석암은 Streckeisen (1973)의 초염기성암 분류에 의하면 사방휘석암이며, 금운모가 특징적으로 함유되어 있으므로 합금

운모 사방휘석암(phlogopite-bearing orthopyroxenite)으로 명명할 수 있다.

#### 전암화학

SiO<sub>2</sub>/(MgO+CaO) 분자비가 1.16으로서 휘석의 1에 가깝다(표 1). 초과 SiO<sub>2</sub>는 사장석, 금운모, 이차변질 광물들에 기인하는 것으로 보인다. 함께 분석된 사문암에서는 이 분자비가 0.6 정도였다. 철은 대부분 Fe<sup>2+</sup>이다. 풍산 시료(PS103A)는 작열감량(LOI) 값이 3.57% 정도로 신립시료(SRP100B)보다 크며, 이는 현미경에서 관찰된 바와 같이 활석 등의 수화 광물 함량이 높기 때문이다. 미량원소로 Cr, Ni, Co가 다량 함유되어 초염기성암의 특성을 보인다.

#### 광물화학

사방휘석암의 주구성광물인 사방휘석의 화학조성은 산출위치별, 입자별, 입자내 분석지점별 변화가 거의 없다(표 2). 분석값에서 계산한 휘석 3성분계 단성분 조성은 En = 81.4(± 1.2)%, Fs = 16.0(± 0.9)%, Wo = 2.5(± 1.0)%로서, 분석된 휘석은 모두 사방휘석인 엔스타타이트(enstatite)이다. 단사휘석의 조성도 조성의 변화가 작으며, 단성분 조성은 En = 46.7(± 1.4)%, Fs = 7.5(± 1.4)%, Wo = 45.8(± 2.6)%로서 투휘석(diopside)이다(표 3). 미량성

**Table 2.** Chemical compositions of orthopyroxenes (enstatite) determined by electron microprobe analysis

Sample	PS*	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS
No.	2	8	12	15	27	35	36	62	64	65	70
SiO <sub>2</sub>	55.63	55.56	55.33	55.71	55.13	55.75	55.37	55.64	55.39	55.21	55.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.44	1.84	1.71	1.55	1.80	1.48	1.55	1.70	1.68	1.60	2.15
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.21	0.38	0.33	0.37	0.38	0.22	0.40	0.37	0.32	0.36	0.48
TiO <sub>2</sub>	0.25	0.16	0.34	0.13	0.18	0.14	0.09	0.16	0.22	0.15	0.18
MgO	29.83	29.66	29.28	30.28	30.36	29.58	30.23	30.14	29.74	30.30	30.08
FeO	10.23	10.61	10.61	10.53	10.83	11.88	10.59	10.61	10.74	10.92	10.33
MnO	0.24	0.21	0.23	0.25	0.27	0.25	0.25	0.20	0.20	0.18	0.28
NiO	0.06	0.03	0.03	0.09	0.04	0.05	0.04	0.06	0.03	0.06	0.04
CaO	1.49	1.48	1.89	1.24	0.80	0.76	1.62	0.97	1.45	0.80	1.44
Na <sub>2</sub> O	0.05	0.03	0.06	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.41	99.97	99.81	100.21	99.79	100.12	100.15	99.82	99.76	99.63	100.34
Number of ions on the basis of 6 O											
Si	1.971	1.961	1.960	1.962	1.950	1.971	1.954	1.964	1.961	1.957	1.946
Al <sup>IV</sup>	0.029	0.039	0.040	0.038	0.050	0.029	0.046	0.036	0.039	0.043	0.054
Sum	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al <sup>VI</sup>	0.031	0.038	0.031	0.026	0.026	0.033	0.019	0.034	0.031	0.023	0.035
Cr	0.006	0.011	0.009	0.010	0.011	0.006	0.011	0.010	0.009	0.010	0.013
Ti	0.007	0.004	0.009	0.003	0.005	0.004	0.002	0.004	0.006	0.004	0.005
Mg	1.576	1.561	1.546	1.589	1.601	1.559	1.591	1.586	1.569	1.601	1.577
Fe <sup>2+</sup>	0.303	0.313	0.314	0.310	0.320	0.351	0.313	0.313	0.318	0.324	0.304
Mn	0.007	0.006	0.007	0.007	0.008	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005	0.008
Ni	0.002	0.001	0.001	0.003	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001
Ca	0.057	0.056	0.072	0.047	0.030	0.029	0.061	0.037	0.055	0.030	0.054
Na	0.003	0.002	0.004	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.003	0.002
K	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sum	1.991	1.992	1.993	1.999	2.002	1.992	2.006	1.992	1.994	2.002	1.999
En	81.11	80.61	79.73	81.35	81.69	80.10	80.67	81.68	80.55	81.66	81.14
Fs	15.97	16.49	16.57	16.25	16.77	18.43	16.23	16.43	16.64	16.78	16.07
Wo	2.92	2.90	3.70	2.40	1.54	1.48	3.10	1.89	2.81	1.55	2.79

\* PS = Pungsan, SRP = Shinlip

분인 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 사방휘석과 단사휘석에 각각 평균 0.33%와 0.21% 정도 함유되어 있다.

금운모도 조성의 변화가 적으며, 팔면체자리의 75%가 Mg이다(표 4). Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 NiO가 각각 평균 1.01% 및 0.14% 정도 함유되어 있다. 사장석은

Ab%가 45~48% 정도로서 라브라도라이트이다. 그 외 소량 변질광물들의 분석결과, 활석에 FeO가 7.3~10.1% 정도 함유되어 있었고, 각섬석은 양기석이며, 사장석을 교대하는 백운모는 층간양이온인 Na:K의 비율이 거의 1:1로서 Na가 풍부하였다.

Table 2. Continued.

Sample	PS	PS	SRP	SRP	SRP	SRP	SRP	SRP	SRP	SRP	Average	stdev
No.	72	75	43	48	55	58	81	84	88	90		
SiO <sub>2</sub>	54.54	55.39	56.00	55.34	55.88	55.22	55.76	55.84	56.17	56.16	55.63	0.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.13	2.06	2.22	2.16	0.92	1.94	1.95	2.03	1.91	2.03	2.03	0.53
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.32	0.36	0.32	0.35	0.12	0.29	0.41	0.38	0.30	0.29	0.31	0.08
TiO <sub>2</sub>	0.39	0.18	0.13	0.22	0.08	0.14	0.10	0.27	0.15	0.20	0.19	0.09
MgO	28.10	29.79	30.90	30.51	30.70	30.62	30.98	30.55	30.87	30.53	30.35	0.86
FeO	9.67	10.81	9.59	10.10	10.18	10.29	9.76	9.54	10.13	9.12	9.92	0.48
MnO	0.24	0.27	0.22	0.20	0.26	0.30	0.20	0.14	0.28	0.12	0.22	0.06
NiO	0.05	0.06	0.10	0.08	0.02	0.11	0.09	0.06	0.06	0.10	0.07	0.03
CaO	2.47	1.91	0.79	0.81	0.95	0.67	1.06	1.55	1.10	2.25	1.36	0.65
Na <sub>2</sub> O	0.41	0.01	0.02	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	0.07	0.06	0.12
K <sub>2</sub> O	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01
Total	99.36	100.85	100.32	99.77	99.13	99.60	100.32	100.39	101.00	100.87	100.16	0.66
Number of ions on the basis of 6 O												
Si	1.938	1.945	1.957	1.950	1.982	1.952	1.953	1.954	1.956	1.955	1.95	0.01
Al <sup>IV</sup>	0.062	0.055	0.044	0.050	0.019	0.048	0.047	0.046	0.044	0.045	0.05	0.01
Sum	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.00	0.00
Al <sup>VI</sup>	0.069	0.030	0.048	0.040	0.020	0.033	0.033	0.037	0.035	0.038	0.04	0.01
Cr	0.009	0.010	0.009	0.010	0.003	0.008	0.011	0.010	0.008	0.008	0.01	0.00
Ti	0.010	0.005	0.004	0.006	0.002	0.004	0.003	0.007	0.004	0.005	0.00	0.00
Mg	1.488	1.559	1.609	1.603	1.623	1.613	1.617	1.594	1.603	1.584	1.59	0.04
Fe <sup>2+</sup>	0.287	0.317	0.280	0.298	0.302	0.304	0.286	0.279	0.295	0.266	0.29	0.01
Mn	0.007	0.008	0.007	0.006	0.008	0.009	0.006	0.004	0.008	0.003	0.01	0.00
Ni	0.002	0.002	0.003	0.002	0.001	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	0.00	0.00
Ca	0.094	0.072	0.030	0.030	0.036	0.025	0.040	0.058	0.041	0.084	0.05	0.02
Na	0.028	0.001	0.002	0.000	0.001	0.002	0.001	0.000	0.002	0.004	0.00	0.01
K	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.00	0.00
Sum	1.996	2.004	1.991	1.994	1.996	2.001	1.999	1.993	1.997	1.996	2.00	0.00
En**	79.28	79.70	83.56	82.75	82.43	82.67	82.98	82.36	82.30	81.78	82.0	1.4
Fs	15.70	16.64	14.89	15.68	15.74	16.04	14.97	14.64	15.59	13.89	15.4	0.8
Wo	5.02	3.66	1.54	1.57	1.84	1.29	2.04	3.00	2.11	4.33	2.6	1.3

\* PS = Pungsan, SRP = Shinlip. \*\* En = enstatite, Fs = ferrosilite, Wo = wollastonite.

각섬석에는 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 0.3~0.5% 정도 함유되어 있었다. 풍산 시료에서 많이 관찰되는 녹니석은 Si 함량이 조금 높아서 녹니석-질석 혼합층광물로 추정된다.

X-선 회절분석

전자현미분석에서 확인된 바와 같이 주광물인 사방휘석(엔스테타이트) 외에 투휘석, 금운모, 활석, 양기석, 녹니석, 방해석 등이 확인된다(그림 4).

**Table 3.** Chemical composition of clinopyroxene (diopside) determined by electron microprobe analysis.

Sample	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	SRP	SRP	SRP	SRP	Average	stdev
No.	10	20	32	59	60	63	71	80	41	56	89	91		
SiO <sub>2</sub>	53.62	52.87	52.17	52.59	52.40	53.61	52.17	53.80	51.89	53.83	52.85	51.96	52.81	0.73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.46	2.64	3.22	2.57	3.38	2.64	3.20	2.65	3.17	1.30	3.15	3.62	2.75	0.72
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.46	0.34	0.23	0.41	0.49	0.35	0.43	0.51	0.84	0.45	0.98	0.59	0.51	0.21
TiO <sub>2</sub>	0.35	0.45	0.60	0.42	0.55	0.56	0.57	0.49	0.34	0.18	0.47	0.73	0.47	0.14
MgO	15.49	15.73	15.73	16.43	16.13	17.44	15.80	16.01	15.76	16.30	15.42	15.68	15.99	0.55
FeO	4.07	4.61	5.23	5.23	4.66	6.42	4.31	3.37	3.60	3.79	3.88	4.37	4.46	0.85
MnO	0.15	0.11	0.15	0.16	0.10	0.18	0.11	0.07	0.14	0.10	0.12	0.11	0.12	0.03
NiO	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.10	0.00	0.11	0.05	0.01	0.03	0.04
CaO	23.26	21.82	21.17	21.01	21.09	18.64	21.93	22.56	22.85	22.56	22.67	21.86	21.78	1.23
Na <sub>2</sub> O	0.45	0.59	0.60	0.40	0.48	0.42	0.49	0.64	0.51	0.38	0.63	0.49	0.51	0.09
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.01	0.03	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02	0.00	0.02	0.01
Total	99.31	99.20	99.10	99.25	99.30	100.27	99.10	100.22	99.11	99.02	100.23	99.41	99.46	0.48
Number of ions on the basis of 6 O														
Si	1.975	1.948	1.927	1.939	1.925	1.949	1.924	1.953	1.916	1.982	1.929	1.911	1.94	0.02
Al <sup>IV</sup>	0.025	0.052	0.073	0.061	0.075	0.051	0.076	0.047	0.084	0.018	0.071	0.089	0.06	0.02
Sum	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.00	0.00
Al <sup>VI</sup>	0.039	0.062	0.068	0.051	0.072	0.062	0.064	0.067	0.054	0.038	0.064	0.068	0.06	0.01
Cr	0.013	0.010	0.007	0.012	0.014	0.010	0.013	0.015	0.024	0.013	0.028	0.017	0.01	0.01
Ti	0.010	0.013	0.017	0.012	0.015	0.015	0.016	0.013	0.009	0.005	0.013	0.020	0.01	0.00
Mg	0.851	0.864	0.866	0.903	0.883	0.945	0.869	0.867	0.867	0.895	0.839	0.860	0.88	0.03
Fe <sup>2+</sup>	0.125	0.142	0.162	0.161	0.143	0.195	0.133	0.102	0.111	0.117	0.118	0.134	0.14	0.03
Mn	0.005	0.004	0.005	0.005	0.003	0.006	0.004	0.002	0.004	0.003	0.004	0.003	0.00	0.00
Ni	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.000	0.003	0.001	0.000	0.00	0.00
Ca	0.918	0.861	0.838	0.830	0.830	0.726	0.867	0.878	0.904	0.890	0.886	0.861	0.86	0.05
Na	0.032	0.042	0.043	0.029	0.034	0.029	0.035	0.045	0.036	0.027	0.045	0.035	0.04	0.01
K	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.00	0.00
Sum	1.993	1.999	2.004	2.003	1.997	1.989	2.002	1.992	2.012	1.992	1.999	1.999	2.00	0.01
En	44.80	46.18	46.31	47.55	47.49	50.48	46.41	46.87	45.97	46.98	45.42	46.25	46.73	1.42
Fs	6.84	7.78	8.89	8.74	7.87	10.73	7.28	5.65	6.12	6.28	6.60	7.41	7.52	1.42
Wo	48.36	46.04	44.80	43.71	44.64	38.79	46.31	47.48	47.91	46.73	47.98	46.34	45.76	2.63

14Å 부근에서 관찰되는 폭이 넓고 강한 점토광물의 회절선은 질석 또는 질석녹니석 혼합층 광물에 기인한 것으로 보인다. 이 광물은 풍산(PS103A) 시료에 특히 많이 함유되어 있는 주요 변질산물이다.

주사전자현미경 관찰

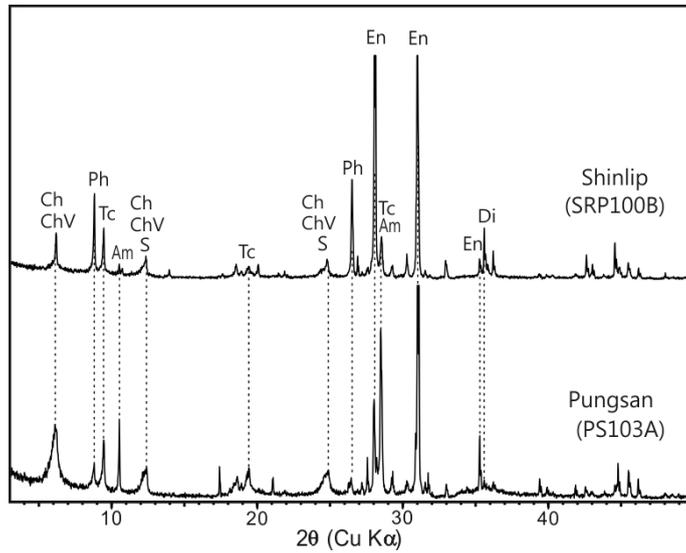
연마편의 후방산란 주사전자현미경 관찰로 광물의 미세구조 및 변질현상과 미량 광물의 산출상태를 확인할 수 있었다. 사방휘석 내에 용리된 단사 휘석이 얇고 긴 렌즈모양으로 결정학적 방향을 따

**Table 4.** Chemical composition of phlogopite determined by electron microprobe analysis.

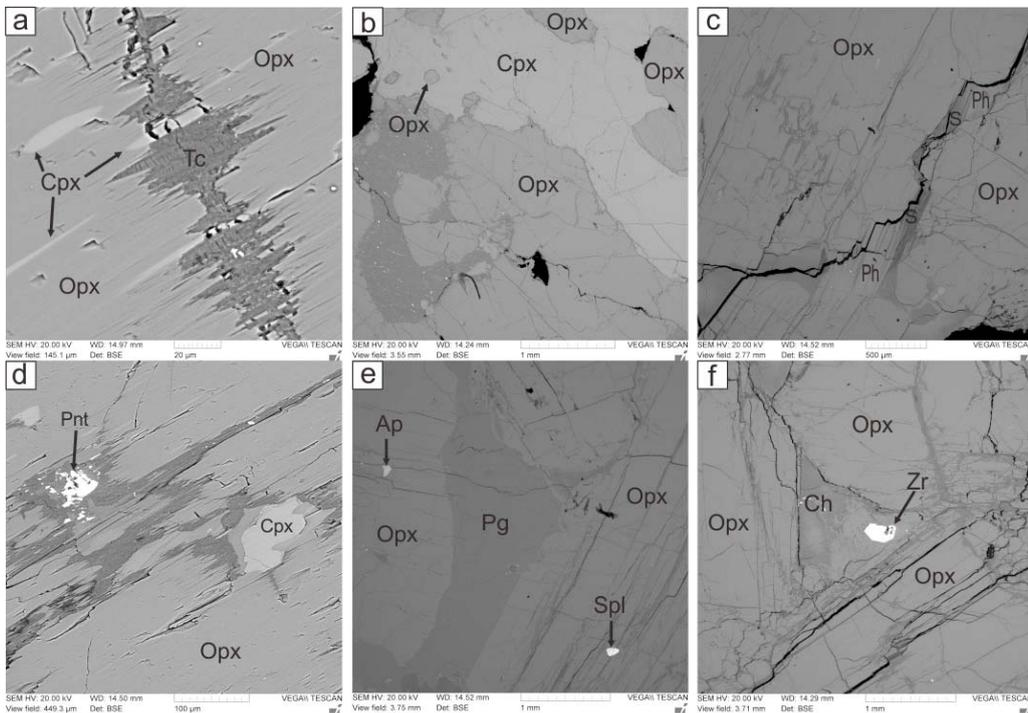
Sample	PS	PS	PS	PS	PS	SRP	PS	PS	Average	stdev
No.	3	5	26	30	40	51	69	79		
SiO <sub>2</sub>	39.21	38.46	38.90	39.02	39.14	38.80	39.33	40.23	39.13	0.52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.25	14.15	14.17	14.08	14.40	15.05	14.38	14.78	14.41	0.34
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.98	1.06	0.93	0.76	1.55	1.10	0.71	0.98	1.01	0.26
TiO <sub>2</sub>	3.97	4.66	4.20	4.41	3.26	4.02	3.89	3.27	3.96	0.50
MgO	19.30	19.02	19.83	19.31	21.32	20.06	19.42	21.20	19.93	0.88
FeO	7.22	7.72	6.84	7.40	4.11	5.94	7.53	5.45	6.53	1.26
MnO	0.00	0.04	0.00	0.03	0.06	0.04	0.00	0.02	0.02	0.02
NiO	0.20	0.14	0.10	0.09	0.23	0.13	0.15	0.09	0.14	0.05
CaO	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	0.00	0.03	0.01	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.52	0.45	0.62	0.49	0.80	0.34	0.90	0.81	0.62	0.20
K <sub>2</sub> O	9.13	9.38	8.65	9.21	8.87	9.26	8.39	8.51	8.93	0.38
Total	94.78	95.07	94.23	94.81	93.74	94.79	94.70	95.39	94.69	0.50
Number of ions on the basis of O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>										
Si	2.836	2.791	2.820	2.825	2.825	2.792	2.839	2.852	2.82	0.02
Al <sup>IV</sup>	1.164	1.209	1.180	1.175	1.175	1.208	1.161	1.148	1.18	0.02
Sum <sub>tet</sub>	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.00	0.00
Al <sup>VI</sup>	0.052	0.002	0.031	0.027	0.051	0.069	0.063	0.087	0.05	0.03
Cr	0.056	0.061	0.054	0.043	0.088	0.063	0.040	0.055	0.06	0.01
Ti	0.216	0.254	0.229	0.240	0.177	0.218	0.211	0.175	0.21	0.03
Mg	2.082	2.058	2.143	2.085	2.295	2.152	2.090	2.240	2.14	0.08
Fe <sup>2+</sup>	0.437	0.468	0.414	0.448	0.248	0.358	0.455	0.323	0.39	0.08
Mn	0.000	0.002	0.000	0.002	0.003	0.002	0.000	0.001	0.00	0.00
Ni	0.011	0.008	0.006	0.005	0.013	0.008	0.009	0.005	0.01	0.00
Sum <sub>oct</sub>	2.854	2.853	2.876	2.850	2.875	2.869	2.868	2.886	2.87	0.01
Ca	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.002	0.000	0.002	0.00	0.00
Na	0.073	0.063	0.088	0.069	0.113	0.048	0.126	0.112	0.09	0.03
K	0.843	0.869	0.800	0.851	0.817	0.850	0.772	0.770	0.82	0.04
Sum <sub>int</sub>	0.916	0.932	0.887	0.922	0.931	0.900	0.899	0.884	0.91	0.02

라 배열되어 있다(그림 5a). 사방휘석의 주요 변질 산물인 활석이 사방휘석의 미세열극과 벽개를 따라서 생성되었는데, 단사휘석이 아닌 사방휘석을 선택적으로 교대한다(그림 5a). 단사휘석이 사방휘석 내에 용리산물로 존재하기도 하지만, 큰 단사휘석은 사방휘석 사이를 타형 결정으로 충전하거나 작은 사방휘석 입자를 포획한다(그림 5b). 사방 휘석의 간극을 충전하는 금운모는 부분적으로 사문

석으로 변질되었다(그림 5c). 미량 광물로서 Fe-Ni 황화물인 펜틀란드이트(pentlandite)(그림 5d), 인회석(그림 5e), 크롬 스피넬(chromian spinel)(그림 5e), 저어콘(zircon)(그림 5f)이 사방휘석 내에 포획물로 산포되어 있다.



**Fig. 4.** X-ray diffraction pattern of orthopyroxenite. Am = amphibole, Ch = chlorite, ChV = chlorite-vermiculite mixed-layer, Di = diopside, En = enstatite, Ph = phlogopite, S = serpentine, Tc = talc.



**Fig. 5.** Scanning electron micrographs of the polished thin sections of orthopyroxenite. (a) Clinopyroxene exsolution lamella in orthopyroxene. Talc selectively replacing orthopyroxene. (b) Orthopyroxene islands in clinopyroxene. (c) Phlogopite in the interstices of orthopyroxene crystals. (d) Pentlandite inclusion in orthopyroxene. (e) Plagioclase filling the interstice of orthopyroxene crystals. Spinel inclusion in orthopyroxene. (f) Zircon inclusion in orthopyroxene. Ap = apatite, Ch = chlorite, CPX = clinopyroxene, OPX = orthopyroxene, Ph = phlogopite, S = serpentine, Spl = spinel, Tc = talc, Zr = zircon.

## 토 의

Whattam *et al.* (2011)은 안동 초염기성암 복합체에서 사방휘석암의 산출을 기재한 바 있다. 그러나 이들이 보고한 사방휘석암에는 감람석이 많이 함유되어 있어서 초염기성암의 감람석-사방휘석-단사회석 분류도(Streckeisen, 1973)에 의하면 감람석 사방휘석암에 해당한다. 따라서 본 연구에서 기재한 사방휘석암은 감람석이 없는 진정한 의미의 사방휘석암이라 할 수 있으며, 금운모가 특징적으로 함유되어 있으므로 함금운모 사방휘석암이라 할 수 있다. 사방휘석암은 초염기성 마그마 내에서의 분별결정작용에 의하여 생성된 것으로 보인다(Whattam *et al.*, 2011). Whattam *et al.* (2011)은 다양한 암상의 안동 초염기성암복합체는 암석권 맨틀의 일부가 아니라 하부 호(arc) 환경의 supra-subduction zone system에서 형성된 마그마의 분별 결정 과정과 멜트-페리도타이트 상호작용을 통하여 생성되었다고 해석하였다. 그러나 연대 측정 자료가 없어서 안동 초염기성암복합체가 어느 지질 시기의 호 환경에서 생성되었는지는 규명하지 못하였다.

이번 사방휘석암 발견 의미 중의 하나는 안동 초염기성암 복합체의 관입연대를 결정할 광물들이 함유되어 있기 때문이다. 사방휘석암에는 방사성연대측정이 가능한 광물로 저어콘과 금운모가 함유되어 있다. 저어콘은 사방휘석 거정의 포획물 또는 간극에서 수십  $\mu\text{m}$  크기의 결정면이 발달된 반자형 결정으로 산출된다. 전암분석에서 사방휘석암의 Zr 함량이 19 ppm (PS103A) 및 10 ppm (SRP100B)에 불과하다. 비록 Zr 함량은 매우 작지만 주광물인 사방휘석 내에 함유되지 못한 Zr이 자체 결정을 형성할 수 있었던 것으로 판단된다. 금운모는 사장석과 함께 사방휘석 거정의 간극을 충전하며 산출된다. 금운모의 함량은 PS103과 SRP100A에서 각각 5.4%, 0.2% 함유되어 있고, 조립질이어서 쉽게 분리 및 농집이 가능하다. 현재 이 두 개 시료에 대한 저어콘의 이차이온질량분석(SHRIMP) U-Th-Pb 연대측정 및 금운모의 Ar-Ar 연대측정 연구가 진행 중이다.

## 결 론

다양한 암상으로 구성된 안동 초염기성암 복합체 내에 얇은 층상의 조립질 사방휘석암이 산출된

다. 특히 이 암체에는 연대측정이 가능한 금운모와 저어콘이 함유되어 있어서 주목된다. 사방휘석암은 부분적으로 활석, 녹니석, 각섬석 변질작용을 받았으나 원암의 광물조성을 잘 반영하고 있다. 사방휘석암의 대부분을 차지하는 사방휘석은 산출위치에 관계없이 거의 일정한 조성의 자형-반자형의 엔스태타이트이다. 단사회석은 조성이 거의 일정한 투휘석이며 사방휘석 내에 용리되어 있거나, 사방휘석의 간극을 타형 결정으로 충전한다. 금운모와 사장석(라브라도라이트)도 사방휘석의 간극을 충전하며 거의 일정한 조성을 보인다. 그외 미량광물로서, Cr 스피넬, 펜틀란다이트, 인회석, 저어콘이 사방휘석 내포물로 산출된다. 사방휘석암은 초염기성암 마그마로부터 분별결정작용으로 생성된 것으로 보인다. 현재 사방휘석암의 금운모와 저어콘에 대한 연대측정이 수행중이며, 그동안 미상이었던 안동 초염기성암 복합체의 형성시기가 규명될 것으로 기대된다.

## 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 “행성자원 지화학 분석용 표준물질, 계측기 및 모사도 개발”과제의 일환으로 수행되었다. 원고의 심사를 맡아주신 두심사위원회도 감사를 드린다.

## 참고문헌

- Choi, P.-Y., Lee, S.R., Choi, H.-I., Hwang, J.-H., Kwon, S.-K., Ko, I.-S., and An, G.-O. (2002) Movement history of the Andong Fault System: Geometric and tectonic approaches. *Geosciences Journal*, 6, 91-102.
- Choi, S.H. (2012) Lithospheric mantle beneath the Korean Peninsula: Implications from peridotite xenoliths in alkali basalts. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 235-247 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.H., Kwon, S.-T., Mukasa, S.B., and Sagong, H. (2005) Sr-Nd-Pb isotope and trace element systematics of mantle xenoliths from Late Cenozoic alkaline lavas, South Korea. *Chemical Geology*, 221, 40-64.
- Choi, S.H., Mukasa, S.B., Zhou, X.-H., Xian, X.H., and Andronikov, A.V. (2008) Mantle dynamics beneath East Asia constrained by Sr, Nd, Pb and Hf isotopic systematics of ultramafic xenoliths and their host basalts from Hannuoba, North China. *Chemical Geology*, 248, 40-61.

- Heo, S., Yang, K., and Jeong, H. (2012) Hydrous minerals (phlogopite and amphibole) from basaltic rocks, Jeju Island: Evidences for modal metasomatism. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 13-20 (in Korean with English abstract).
- Hwang, J.Y., Kim, J.J., and Ock, S.S. (1993) Genesis and mineralogy of the serpentinite deposits. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 26, 1-10 (in Korean with English abstract).
- Kang, J.-H., and Lee, D.-S. (2008) Geological structure around Andong Fault System, Pungcheon-myeon, Andong, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 17, 83-94 (in Korean with English abstract).
- Kil, Y.W., Shin, H.J., Yun, S.H., Koh, J.-S., and Ahn, U.-S. (2008) Geochemical characteristics of mineral phases in the mantle xenoliths from Sunheul-ri, Jeju Island. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 21, 373-382 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.K., Lee, H.Y., Kim, S.J., and Jeong, J.G. (1988) Geological map of the Andong sheet (1: 50,000). Korea Institute of Energy and Resources, Seoul, Korea, 20p.
- Lee, H.Y. (1995) Petrochemical study on the mantle xenoliths in alkali basalts from S. Korea: P-T regime of upper mantle. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 4, 104-123 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.W. (1984) Petrology of mafic inclusion in Jeju volcanic rocks. *Journal of the Geological Society of Korea*, 20, 306-313 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.R. and Walker, R.J. (2006) Re-Os isotope systematics of mantle xenoliths from South Korea: Evidence for complex growth and loss of lithospheric mantle beneath East Asia. *Chemical Geology*, 231, 90-101.
- Oh, C.W., Rajesh, V.J., Seo, J., Choi, S.G., and Lee, J.H. (2010) Spinel composition and tectonic relevance of the Bibong ultramafic bodies in the Hongseong collision belt, South Korea. *Lithos* 117, 198-208.
- Oh, C.W., Seo, J., Choi, S.G., Rajesh, V.J., and Lee, J.H. (2012) U-Pb SHRIMP zircon geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of the Neoproterozoic Baekdong ultramafic rocks in the Hongseong Collision Belt, South Korea. *Lithos*, 128-131, 100-112.
- Park, G., Hwang, J., Oh, J., and Lee, H. (2012) Occurrence and mineralogy of serpentinite from Bibong mine in Chungyang area, Korea. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 25, 9-21 (in Korean with English abstract).
- Park, K.-H. (2010) Evolution of the subcontinental lithospheric mantle of Korean Peninsula: Partial loss and its timing. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 19, 199-208 (in Korean with English abstract).
- Shin, H.-J., Kil, Y.-W., Jin, M.-S., and Lee, S.-H. (2006) Petrological study on upper mantle xenoliths from Asan and Pyeongtaek area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 95-113 (in Korean with English abstract).
- Song, S., Choi, S.G., Oh, C.H., Seo, J.E., and Choi, S. (2004) Petrography and geochemistry of the ultramafic rocks from the Hongseong and Kwangcheon areas, Chungcheongnam-Do. *Economic and Environmental Geology*, 37, 477-497 (in Korean with English abstract).
- Song, S.H., Choi, S.G., and Woo, J.G. (1997) Genetic implications of ultramafic rocks from the Bibong area in the Kyeonggi gneiss complex. *Economic and Environmental Geology*, 30, 477-491.
- Streckeisen, A. (1973) Plutonic rocks. Classification and nomenclature recommended by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geotimes*, 63, 773-785.
- Whattam, S.A., Cho, M., and Smith, I.E.M. (2011) Magmatic peridotites and pyroxenites, Andong Ultramafic Complex, Korea: Geochemical evidence for supra-subduction zone formation and extensive melt - rock interaction. *Lithos*, 127, 599-618.
- Woo, Y.-K. and Suh, M.-C. (2000) Petrological society on the ultramafic rocks in Choongnam area. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 21, 323-336 (in Korean with English abstract).
- Yang, K. and Hwang, B.-H. (2005) Origins of clinopyroxenes in alkaline basalt from Jeju Island. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 18, 33-43 (in Korean with English abstract).
- Yu, J.-E., Yang, K., and Kim, J. (2010) Textural and geochemical characteristics and their relation of spinel peridotite xenoliths from Jeju Island. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 2010, 227-244 (in Korean with English abstract).

---

접수일(2012년 12월 3일), 수정일(1차 : 2012년 12월 23일),  
 게재확정일(2012년 12월 23일), 책임편집위원 : 이수정