

## 무주 페그마타이트 내 Nb-Ta 광화대의 산출상태

### Occurrence of the Nb-Ta Ore Bodies in Pegmatites, Mujoo

강민우(Min Woo Kang) · 김지현(Ji Hyun Kim) · 최진범(Jin Beom Choi)\*

경상대학교 지구환경과학과, 경상대학교 기초과학연구소  
(Department of Earth and Environmental Sciences and Research Institute of Natural Sciences,  
Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea)

**요약** : 무주군 적상면 사산리에는 선캠브리아기 화강암질 편마암 복합체가 분포하고 이를 주라기 편암질 화강암과 페그마타이트가 관입하고 있으며, 페그마타이트 내 Nb-Ta 광화대가 발달하고 있다. 페그마타이트의 구성광물은 거정질의 석영, 장석류, 및 백운모가 우세하며 장석류는 정장석과 알바이트의 단종성분을 보여준다. Nb-Ta 광물로는 콜럼바이트가 우세하며 백운모는 후기 마그마 기원으로 콜럼바이트와 밀접히 수반되어 산출한다. 조립의 콜럼바이트는 석영, 장석과 함께 산출하는 반면, 미립의 콜럼바이트는 백운모와 함께 산출하는데 조립질에 비해 미립의 콜럼바이트는 상대적으로 낮은 Nb 함량을 보여준다. 조사지역에 발달한 페그마타이트 맥은 폭 4~15 m, 길이가 각각 120 및 250 m인데, 5개 공 총 600 m 시추 결과 맥의 지하 연장은 별로 좋지 못하며 콜럼바이트는 미량으로 산출하고 있다. 따라서 조사지역에서 희유금속에 대한 광산개발가능성은 적다고 판단된다.

**주요어** : 화강암질 편마암, 페그마타이트, Nb-Ta 광화대, 콜럼바이트, 시추코어

**ABSTRACT** : In Mujoo area, the granitic pegmatites are developed in the granitic gneiss complex with Jurassic gneissic granites, where Nb-Ta mineralization were reported. Pegmatites are mainly composed of large crystals of quartz, feldspars of end-member orthoclase and albite, and muscovite. Nb-Ta minerals in study area are columbite (Nb > Ta) in composition. Chemistry of muscovites shows post-magmatic in origin and they are closely related with columbite. Large columbite in pegmatites occurred with quartz and feldspars, while microcrystalline columbite is associated with muscovite. The Nb contents in large columbite are relatively higher than those in microcrystalline ones. Two pegmatites, 4~15 m in width and 120 m, 250 m in extension respectively, are developed. Five drilling cores with total 600 m in length are finally obtained and revealed no possible potential for economic rare metals of Na-Ta deposits.

**Key words** : Granitic gneiss, pegmatite, Na-Ta mineralization, columbite, drilling core

## 서론

희유금속자원은 일본-중국간 희토류자원 전쟁에서 보듯이 수요에 비해 공급이 부족하고 중국에 편중되어 있어 중장기적 관점에서 자원공급의 불확실

성이 예상되는 자원이다. 현재의 상태에서 희유금속자원의 안정적인 확보를 위해서 국내 부존 희유금속 광화대를 찾는 것이 한 해결책이 될 수 있다. 희유금속자원 중 니오비움(Nb)과 탄탈륨(Ta)은 주요 IT 산업의 소재이자 철강원료로서 자동차, 항공기의 제조와 초경공구, 절삭공구 등의 특수강의 제

\*교신저자: jbchoi@gnu.ac.kr



Fig. 1. Geological map of the study area and location of pegmatites (the square box), shown in Fig. 8 in details.

료이다. Na, Ta의 원료광물은 각각 콜럼바이트(columbite)와 탄라이트(tantalite)이며, 이들의 화학식은  $(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$ 으로 Nb과 Ta이 서로 밀접히 치환되면서 고용체를 이루며 산출되는데 Nb의 함유량이 많은 경우 콜럼바이트, Ta의 함유량이 많은 경우 탄탈라이트라 부른다.

화강암질 페그마타이트(granitic pegmatite)는 Li, Nb-Ta, REE 등 많은 희유금속광물을 배태하는 주요 모암으로 알려져 있다(Černý, 1989; Černý, 1991a, b; Linnen, 1998; Llorens and Moro, 2010; Pieczka, 2010; Stilling *et al.*, 2006). 국내에서는 울진, 단양, 및 무주 등이 반화강암(aplite) 내지 페그마타이트와 관련된 희유금속의 광화대가 알려져 있다(김수영과 서정률, 1989; 문상호와 박희인, 1994). 이번 연구는 국내 부존이 확인된 광화대를 재평가하여 희유금속자원에 대한 경제적 유망 광화대를 확보하는 것이며 조사 대상은 무주지역의 함 Nb-Ta 페그마타이트이다.

조사지역은 전북 무주군 적상면 사산리에 위치하며 면적은 7.5 km<sup>2</sup> (동서 3 km, 남북 2.5 km) 정도이다. 탐사 결과 페그마타이트의 맥은 4조가 발달되어 있으며, 거정의 우백질 화강암질암으로 구성되어 있다. 이번 조사의 목적은 페그마타이트에

함유된 콜럼바이트와 탄탈라이트의 산출상태를 규명하고 Nb-Ta 광화대의 규모와 경제성을 파악하기 위한 기초탐사를 실시하는 것이다.

### 연구 방법

본 연구는 선캠브리아기의 우백 화강암질 편마암 내에 있는 페그마타이트 맥의 광석광물을 대상으로 지질조사 및 시료 채취를 수행하였으며, 지하맥의 연장을 확인하고 광화대의 양상을 파악하기 위하여 5개 공(drilling hole) 총 600 m의 시추를 실시하였다. 맥 주변의 노두 및 시추 코어에 대해 박편 및 연마편을 제작하였다. 시추코어에 대해서는 모암, 변질대, 그리고 페그마타이트 맥으로 구분하여 상세히 기재하고 페그마타이트를 장석류 페그마타이트와 운모류 페그마타이트로 구분하였다.

실제 노두에서의 Na-Ta 광화대 관찰은 여의치가 않았으며, 풍화에 의해 산출상태가 좋지 않았다. Nb-Ta을 함유한 토양에 대해서는 SiroQuant V3.0을 이용하여 Rietveld법으로 XRD 정량분석을 실시하였고, 페그마타이트 내의 장석류, 백운모, 그리고 Nb-Ta 광석광물에 대한 EPMA 정량분석을 실시하였으며, 특히 광석광물의 산출상태를 파악하기 위

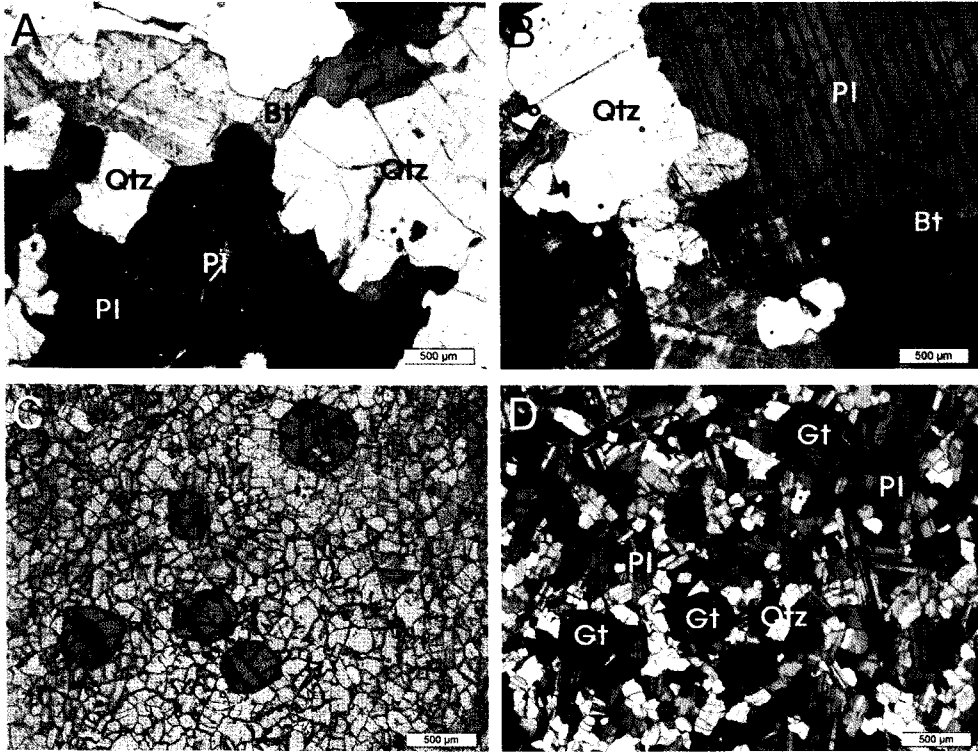


Fig. 2. Photomicrographs of leucocratic granitic gneiss (A & B) and altered zone between granitic gneiss and pegmatite (C & D). Qtz: quartz, Pl: plagioclase, K-f: K-feldspar, Bt: biotite, Gt: almandine.

해 SEM/EDX 분석을 실시하였다. 페그마타이트를 구성하는 광물들을 대상으로 ICP-MS와 LA-ICP-MS를 이용하여 미량성분과 희토류원소에 대한 정량분석을 실시하였다.

### 일반 지질

조사지역의 지질은 선캠브리아기에 해당되는 반상변성질 편암류, 화강암질 편마암, 우백 화강암질 편마암류로 구성된 원남통을 기반으로 주라기의 편암질 화강암과 페그마타이트가 관입하고 있다(이대성과 남기상, 1969). 백악기에 해당하는 퇴적암인 북창리층이 조사지역의 북동지역에 분포하고 적상산층이 그 위를 정합적으로 피복하고 있다. 결정질 편암류는 지역에 따라 변성도를 달리하며 결정질 석회암(조사지역의 남동쪽에 큰 규모의 대상분포), 각섬석 편암(사산리 일대 대상분포), 규암 등을 협재한다. 화강암질 편마암류는 조직과 구성광물에 따라 호상 화강암질 편마암, 반상변성 화강암질 편마암, 그리고 우백 화강암질 편마암으로 구분되며

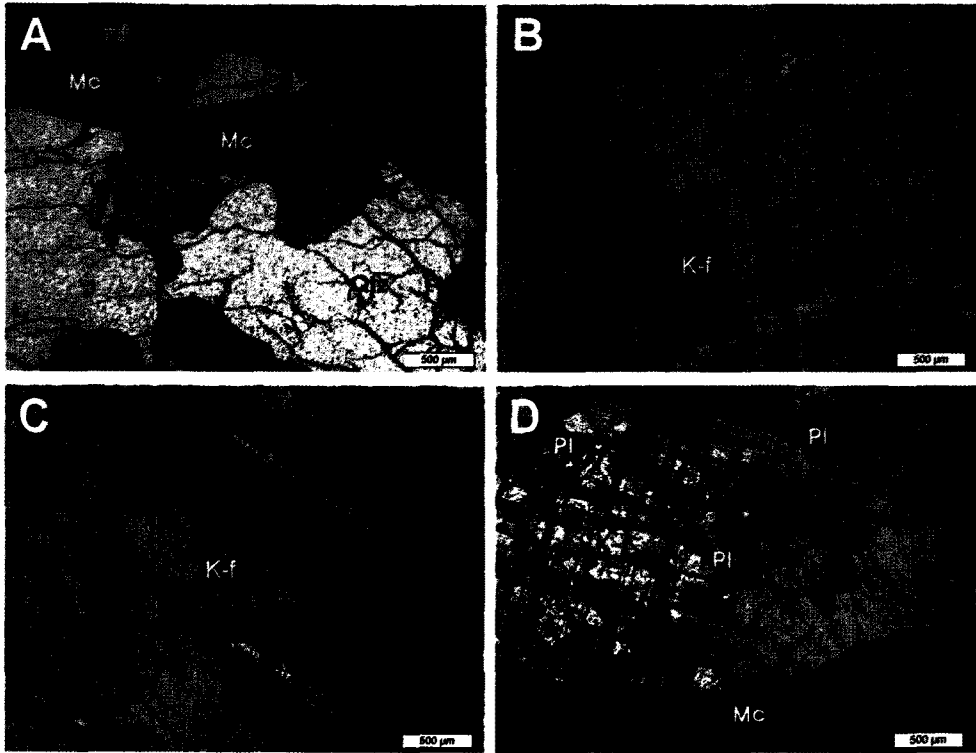
그 경계는 점이적이다(그림 1).

### 화강암질 편마암

우백화강암질 편마암은 조사지역에 가장 넓게 분포하며 페그마타이트가 관입하고 있는 모양이다. 암상은 전형적인 우백질로서 유색광물은 많지 않으나 변성의 정도에 따라 유색광물의 양이 변하는데 유색광물이 많아질수록 편리가 잘 발달하고 있다. 현미경 하에서 조립질로 입자들의 경계가 뚜렷하고 구성광물은 석영, 장석, 미사장석이 우세하고 사장석, 흑운모, 녹니석 등이 관찰된다(그림 2A, B). 페그마타이트가 관입한 경계부에서는 변질작용을 받아 입자가 작아지고 주상의 형태를 띠며 석류석이 생성된다(그림 2C, D).

### 페그마타이트

그림 1에서 보듯이, 확인된 페그마타이트 암맥은 사산리 일대에 4개 정도 발달하고 있으며, 최상부



**Fig. 3.** Photomicrographs of pegmatites. (A) Quartz and muscovite. (B) Fine plagioclase intergrowth in megacryst of microcline. (C) Perthite texture of fine plagioclase in K-feldspar. (D) Microcline and muscovites. Qtz: quartz, Pl: plagioclase, K-f: K-feldspar, Mc: muscovite.

능선에 발달한 맥과 하부 골짜기에 놓인 맥은 연장이 좋지 못하다. 주향은 N40~45°E로서 모암인 화강암질 편마암의 구조선과 일치하는 방향을 보여주며, 대부분 북서측으로 15~45°NW 방향으로 경사하고 있다. 가운데 2맥은 대촌교쪽 마을 후부로 연장되어 있으며, 맥 폭이 4~15 m, 연장이 각각 상부맥은 120 m, 하부맥은 250 m 정도 이른다.

페그마타이트는 거정의 우백질 화강암질암으로서 구성광물은 석영, 사장석, 정장석 및 백운모이며, 국부적으로 탄탈라이트와 콜럼바이트가 수반된다(그림 3). 페그마타이트 주변부에 발달한 변질대에서는 석류석(알만딘)과 녹염석이 관찰되고 북동부쪽에서 광물질의 오염현상이 심하게 관찰된다. 페그마타이트의 관입 양상은 수평 연장의 중심부로 판단되는 부분(시추공 MJ-3 주변)은 최대 14 m 정도로 두꺼우며 남서쪽으로 갈수록 폭이 줄어드는 경향이 있으며, 북동쪽으로 가면서 4~5개의 평행 맥으로 발달하는 경향을 보여준다.

### 구성광물

연구지역에서 산출되는 페그마타이트의 주구성광물로는 장석류와 백운모뿐만 아니라 미량의 황철석, 섬아연석, 휘수연석 등이 수반된다(그림 3).

### 장석류

페그마타이트에는 거정의 알칼리장석과 사장석이 산출된다. 알칼리 장석은 주로 자형 또는 반자형을 띠며, 부분적으로 견운모화되었다. 피사이트로 산출되기도 하고(그림 3C), 거정의 알칼리 장석이 사장석을 포획하기도 한다(그림 3B). 사장석은 알칼리 장석에 비해 입자가 매우 작으며 현미경 하에서 알바이트 쌍정을 보인다. 장석류의 화학조성과 미량성분을 각각 표 1과 표 2에 나타내었다.

표 1에서 보듯이, 페그마타이트에서 산출되는 장석류는 대부분 극단적인 단성분을 보여주는데, 알칼리 장석은 Or가 평균 90.2%, Ab가 평균 10.1%으

**Table 1.** EPMA analyses of feldspars in pegmatites

Sample#	MJ-K01	MJ-K02	MJ-K03	MJ-K04	MJ-K05	MJ-P01	MJ-P02	MJ-P03	MJ-P04	MJ-P05
SiO <sub>2</sub>	64.37	64.99	64.71	63.77	64.55	67.52	67.72	68.28	67.55	68.44
TiO <sub>2</sub>	0.04	-	0.01	0.01	-	0.02	-	0.04	0.06	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.46	18.20	18.66	18.47	18.50	20.20	20.00	19.91	19.73	19.58
FeO	0.01	0.02	-	0.02	-	0.01	0.02	-	0.05	0.02
MgO	-	-	-	-	-	-	0.02	-	0.01	-
MnO	-	0.01	0.05	0.03	-	0.01	0.01	-	-	-
CaO	0.01	0.02	0.09	0.04	0.02	0.49	0.39	0.52	0.44	0.29
Na <sub>2</sub> O	0.78	1.07	1.56	1.02	1.21	11.60	11.58	11.59	11.75	12.05
K <sub>2</sub> O	15.76	15.44	14.82	15.43	15.01	0.10	0.12	0.12	0.16	0.12
Total	99.44	99.75	99.80	98.77	96.43	99.44	99.75	99.80	98.77	96.43
Cations per 8 O										
Si	2.989	3.003	2.983	2.981	2.992	2.957	2.967	2.973	2.969	2.982
Ti	0.001	-	-	-	-	0.001	-	0.001	0.002	-
Al	1.010	0.992	1.014	1.018	1.010	1.011	1.033	1.022	1.020	1.006
Fe <sup>2+</sup>	-	0.001	-	0.001	-	-	-	-	-	0.001
Mg	-	-	-	-	-	-	0.001	-	0.001	-
Mn	-	-	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-
Ca	0.001	0.001	0.004	0.002	0.001	0.023	0.018	0.024	0.020	0.013
Na	0.070	0.096	0.139	0.092	0.109	0.986	0.984	0.979	1.000	1.018
K	0.934	0.910	0.871	0.920	0.888	0.006	0.006	0.007	0.009	0.006
%An	0.1	0.1	0.4	0.2	0.1	2.3	1.8	2.4	1.9	1.3
%Ab	7.0	9.5	13.7	9.3	10.9	97.1	97.6	96.9	97.2	98.2
%Or	92.9	90.4	85.9	92.6	89.0	0.6	0.6	0.7	0.9	0.6

로 정상석 단종을 보여주며, 사장석은 Ab가 평균 97.4%로서 알바이트 단종이다. 알바이트는 거정의 콜럼바이트를 수반하기도 한다. 표 2에서 미량성분과 희토류원소 조성을 살펴보면 장석 내에는 Li나 Nb-Ta 등 모두 미량으로 존재한다.

**백운모**

페그마타이트 내에는 거정의 백운모가 풍부하게 발달하고 있으며 주로 석영과 장석류와 수반된다(그림 3A, D). 백운모는 미립 또는 세립의 콜럼바이트와 밀접히 공생하고 있다. 백운모의 화학조성과 미량성분을 각각 표 3과 표 2에 나타내었다.

북미 화강암질암에 대한 연구(Miller *et al.*, 1981)에 따르면 1차 기원의 백운모에 비해 2차 기원의 백운모는 Ti, Al, Na의 함량이 적은 반면 Mg, Si의 함량은 상대적으로 많다고 하였다. 표 3에서 보듯이, 조사지역의 백운모는 2차 기원의 백운모에 해당되고 후기 마그마 기원임을 지시한다. 한편, 백운

모를 구성하는 층간 양이온의 비(Na/Na+K)는 0.07~0.08로서 역시 후기 마그마 기원의 화학조성을 보여준다. 이와 같은 화학조성의 특징은 백운모가 마그마 후기, 즉 페그마타이트 단계에서 형성된 것을 지시하는 것으로 백운모가 콜럼바이트의 산출과 밀접히 관련되었음을 의미한다. 표 2의 백운모의 미량성분 조성을 보더라도 Nb이 389~402 ppm, Ta이 15.9~16.5 ppm의 범위를 보여주며, 특히 Nb의 이상이 확인된다. 다른 미량성분으로 Li이 72~126 ppm, Ba이 16.8~28.4 ppm 함유하며, Li의 높은 함량도 특징적이다.

**광석 광물**

무주 지역에서 페그마타이트 내 분포하는 광석 광물은 콜럼바이트와 탄탈라이트 광물이며, 미량의 황철석, 섬아연석, 및 휘수연석이 수반된다.

콜럼바이트와 탄탈라이트는 Nb-Ta 고용체 광물의 단종으로써 대부분 철이나 망간을 함유하며, 화

**Table 2.** Trace elements and REE analyses of feldspars and muscovite in pegmatites (ppm)

Elem.	Plagioclase					K-feldspar					Muscovite				
	Kf-1	Kf-2	Kf-3	Kf-4	Kf-5	Pl-1	Pl-2	Pl-3	Pl-4	Pl-5	Mt-1	Mt-2	Mt-3	Mt-4	Mt-5
Li	3.7	3.4	2.3	2.3	4.2	1.9	1.1	1.6	1.5	2.3	104.9	72.0	90.3	98.6	126.3
Ba	7.7	6.1	5.4	4.6	6.4	13.8	6.7	10.5	12.2	11.6	26.4	19.3	28.4	22.1	16.8
Pb	1.0	1.1	1.7	1.3	1.1	4.2	1.9	4.9	5.3	3.7	13.9	7.7	11.0	10.2	9.9
U	3.4	3.4	1.0	0.5	3.3	4.3	1.3	-	1.1	1.1	5.4	4.6	1.0	5.4	6.7
Nb*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	401.8	400.9	388.7	393.1	397.1
Hf*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3	0.2	0.4	0.2	0.2
Ta*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.5	15.9	16.2	16.0	16.0
La	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	2.4	0.1	0.3	0.4	0.3	0.4	0.2	0.6	1.0	0.3
Ce	0.5	0.4	0.8	0.7	1.1	4.1	0.2	0.2	0.5	0.5	0.6	0.5	0.7	1.5	0.5
Pr	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	tr.	tr.	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1
Nd	0.3	0.3	0.6	0.6	0.5	1.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.2	0.6	0.6	0.3
Sm	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	tr.	tr.	tr.	tr.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Eu	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.
Gd	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	tr.	-	tr.	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Tb	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	-	-	-	-	-	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.
Dy	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	tr.	tr.	tr.	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
Ho	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	-	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.
Er	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	tr.	tr.	tr.	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
Yb	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	0.1	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.
Lu	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6	tr.	tr.	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.4	0.3

All elements except \* are determined by ICP-MS and Nb-Hf-Ta by LA-ICP-MS

화석은  $(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$ 이다. 김수영과 서정물 (1989)은 무주 시추탐사 보고서에서 페그마타이트 내 부산물로서 Nb-Ta 광물의 회수 가능성을 시사 하였다. 이번 연구에서 페그마타이트 노두에서 콜럼바이트 광물을 발견하기 위해 노력하였으나 한 곳을 제외하곤 실패를 하였다. 이는 콜럼바이트가 미립 내지 세립으로 존재하거나 풍화되어 관찰이 어려웠던 것으로 생각된다. 5곳의 흙을 채취하여 분말 X-선 회절 데이터를 이용한 리트벨트법으로 정량분석을 실시하여 콜럼바이트의 존재 유무를 확인하였다(표 4). 표 4에서 보듯이, 풍화된 페그마타이트 내 저품위의 콜럼바이트가 존재하며 최대 3%에 이르는 품위를 보여주기도 한다.

시추 코어에서 채취한 페그마타이트 내에서 일부 콜럼바이트-탄탈라이트 광석광물이 관찰된다. 연구 지역의 콜럼바이트는 크게 두 가지 양상으로 산출 되는데, 조립의 콜럼바이트는 장석류 및 석영과 함께 수반되고 있는 반면, 미립의 콜럼바이트는 주로 백운모 및 석영과 함께 산출되고 있으나 그 양은 미미하다. 이는 앞서 지적하였듯이, 연구지역의 백운모는 마그마 정출 후기에 산출되어 페그마타이트

와 동일한 시기에 생성된 것이며 백운모 내 구조자리에 Nb 이온과 Ta 이온이 치환해 들어감으로써 Nb-Ta 광물의 생성은 상대적으로 줄어들게 된다 (표 2 참조).

그림 4와 5는 시추공에서 채취한 페그마타이트 내의 콜럼바이트 산출상태를 나타낸다. 그림 4는 거정질 석영의 가장자리를 따라 주변의 알칼리 장석과 경계를 이루고 있으며, 같은 입자 내에서도 지점에 따라서 Nb-Ta의 조성변화를 관찰할 수 있다(그림 4B-E). 그림 5는 석영과 정장석과 경계를 이루며 산출되는 약 2 mm 크기 자형의 조립질 콜럼바이트 산출을 보여준다. Nb의 조성이 우세한 콜럼바이트임을 알 수 있다.

그림 6과 7은 백운모가 많아지면서 함께 수반되는 미립의 콜럼바이트를 보여주고 있다. 그림 6과 7은 각각 시추공 MJ-2와 MJ-4에서 채취한 것이며 콜럼바이트는 석영이나 백운모의 입자 사이를 충전하는 형태를 보여준다. 콜럼바이트 입자는 타형이며 100  $\mu$ m 이하의 크기를 보여준다.

조립질 및 미립의 콜럼바이트에 대한 EPMA 분석 결과를 표 5와 6에 각각 나타내었다. 조립질의

시추 분석

**Table 3.** EPMA analyses of muscovite in pegmatites

Sample#	MJ-M01	MJ-M02	MJ-M03	MJ-M04	MJ-M05
SiO <sub>2</sub>	46.78	47.20	46.94	47.79	47.17
TiO <sub>2</sub>	0.06	0.27	0.06	0.08	0.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34.67	34.33	34.45	33.92	33.73
FeO	1.96	1.98	1.93	2.17	2.12
MgO	0.53	0.63	0.59	0.58	0.54
MnO	0.03	-	0.02	-	-
CaO	-	-	0.01	-	-
Na <sub>2</sub> O	0.65	0.57	0.55	0.53	0.55
K <sub>2</sub> O	11.06	10.61	10.89	10.80	11.17
Total	95.76	95.59	95.44	95.87	95.34
Cations per 22 O					
Si	6.234	6.277	6.262	6.342	6.316
Ti	0.005	0.026	0.006	0.008	0.005
Al	5.445	5.381	5.418	5.306	5.323
Fe <sup>2+</sup>	0.218	0.220	0.215	0.240	0.237
Mg	0.104	0.124	0.118	0.115	0.106
Mn	0.002	-	0.002	-	-
Ca	-	-	0.001	-	-
Na	0.167	0.145	0.141	0.137	0.143
K	1.880	1.800	1.853	1.829	1.907
Na/Na+K	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07

경우(표 5) 전체적으로 Nb (87~94%)이 Ta (5~12%)보다 우세한 조성을 보여주며, 콜럼바이트가 장석류와 공생(MJ-3B)하는 경우보다 석영과 공생(MJ-3A)할 경우 Nb의 함량이 상대적으로 높아지는 경향이 있다. 미립질의 경우(표 6)도 Nb (83~96%)의 함량이 높게 나타나지만, 조립질에 비해 Nb의 함량은 상대적으로 낮은 경향을 보여준다. 한편, 조립질 콜럼바이트와는 달리 미립질 상호간에 함량 변화의 일관성은 없는 것으로 보인다(표 6).

무주군 적상면 사산리 일대에 발달하는 페그마타이트에 대해 Nb-Ta 광상의 부존 가능성을 파악하기 위해 총 5개 공의 시추탐사가 진행되었다. MJ-5를 제외하고 모두 수직방향으로 굴진하였으며, MJ-5의 경우는 80도의 경사로 굴진하였다. 맥이 발달한 북쪽에서부터 MJ-1은 150 m, 남서쪽으로 약 10 m 떨어져 MJ-2는 120 m를 굴진하였다. MJ-3과 MJ-4는 각각 120 m씩 맥폭이 가장 두꺼운 지역에서 진행되었고 MJ-5는 90 m 굴진하였다(그림 8).

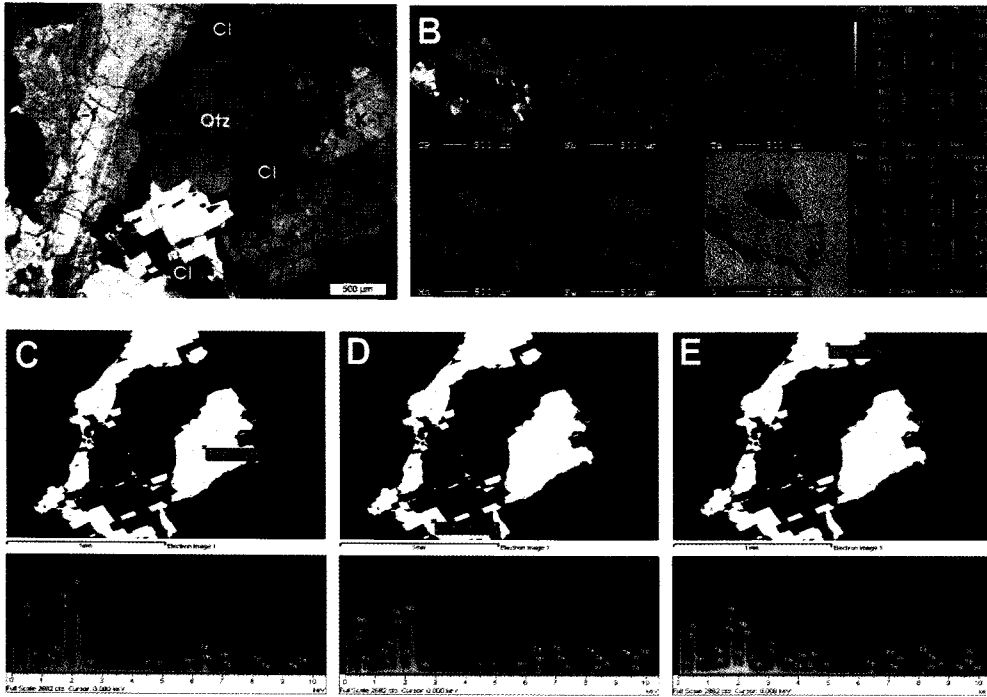
그림 8의 오른쪽에서 보듯이, 코어에서 어둡게 보이는 부분이 조사지역에 넓게 분포하는 모암인 화강암질 편마암이며 아래쪽 밝고 큰 결정이 보이는 부분이 페그마타이트이며 그 주변부로 모암보다 약간 밝은색의 변질대가 놓여 있다.

MJ-1은 전체적으로 변질대의 발달이 두드러지고 페그마타이트 맥은 세맥화된 평행맥이 관찰된다. MJ-2는 지표에서 약 10 m 정도 페그마타이트 맥이 발달하고 있으나 그 아래로는 맥의 발달이 불량하여 MJ-1과의 연장성이 좋지 않다. 약 90 m 하부 이하로 변질대가 넓게 발달하고 있어 보다 심부에 제3의 페그마타이트 맥이 존재할 가능성을 지시하고 있다. MJ-3와 MJ-4는 지표에서 약 10~14 m 정도의 맥폭을 관찰한 후 그 지하 연장을 확인하기 위한 수직공이다. 지하에서도 연장이 좋은 두께 14 m 정도의 맥이 두 수직공에서 관찰된다. 변질대의 발달은 북측보다 현저히 떨어지나 MJ-4호에서는 페그마타이트 맥 경계 상하부에 잘 관찰되며, 지표 약 11 m부터 2조의 평행맥이 발달하고 있다. MJ-5는 MJ-3로부터 북서쪽 5 m 정도 떨어진 곳에서 경사 80도로 시추하였다. 양상은 MJ-3와 거의 유사한 모습이다.

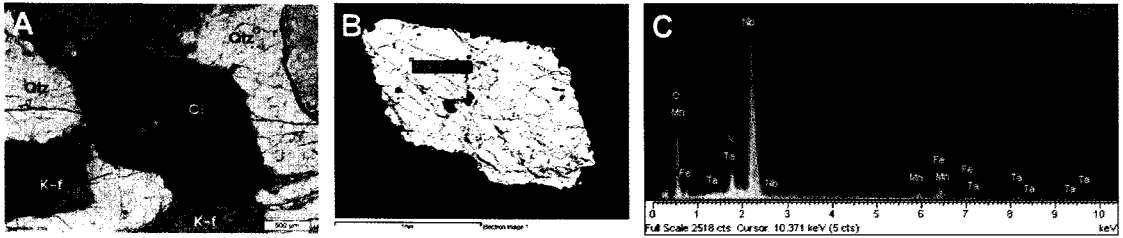
MJ-5를 제외한 4개 공을 각각 MJ-1과 MJ-2, MJ-3과 MJ-4을 연결하는 단면도를 작성하여 지하

**Table 4.** Quantitative analyses of pegmatite by Rietveld method using SiroQuant V3.0

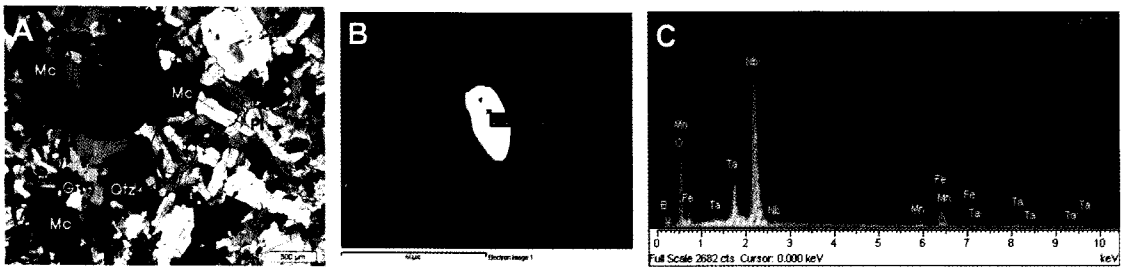
No	Sample#	Quartz	Plagioclase	Muscovite	Garnet	K-feldspar	Columbite	$\chi^2$	R
1	MJ-1	49.6(2)	42.7(2)	3.4(1)	4.2(3)	-	<b>0.5(0)</b>	3.06	0.279
2	MJ-2	46.3(3)	18.7(2)	16.3(5)	11.5(1)	6.8(0.1)	<b>0.4(1)</b>	3.68	0.349
3	MJ-3	24.4(1)	61.0(2)	11.1(3)	0.3(1)	-	<b>3.2(1)</b>	3.40	0.266
4	MJ-4	23.0(1)	28.9(1)	20.0(3)	25.0(1)	-	<b>3.1(1)</b>	2.65	0.351
5	MJ-5	17.3(1)	56.7(3)	11.5(5)	8.9(2)	2.7(1)	<b>2.9(1)</b>	3.41	0.303



**Fig. 4.** Large columbite in association with K-feldspar. (A) Photomicrographs, (B) SEM element mapping. (C, D, E) SEM EDX (Core MJ-3). Qtz: quartz, K-f: K-feldspar, Cl: columbite.



**Fig. 5.** Large euhedral columbite with quartz and K-feldspar. (A) Photomicrographs. (B) SEM BSI. (C) SEM EDX (Core MJ-3). Qtz: quartz, K-f: K-feldspar.



**Fig. 6.** Microcrystalline columbite with muscovite. (A) Photomicrographs. (B) SEM BSI. (C) SEM EDX (Core MJ-2). Mc: muscovite.

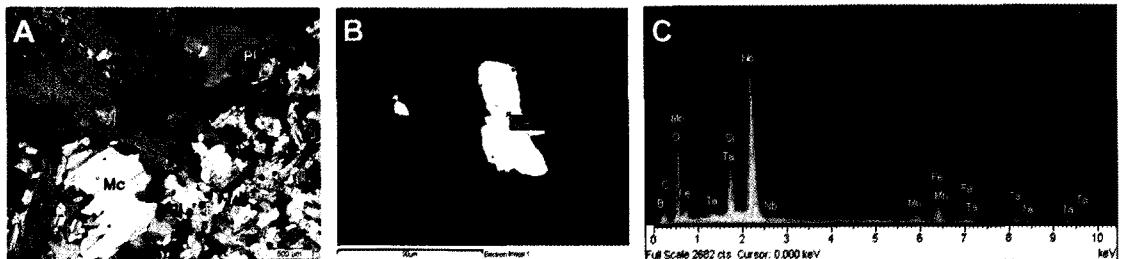


**Table 5.** EPMA analyses of coarse-grained columbite in pegmatites

Sample	MJ-3A					MJ-3B				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	71.59	71.69	67.72	70.88	71.53	64.23	64.29	64.17	63.41	62.88
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7.98	7.59	10.54	7.37	7.51	14.76	13.91	14.17	15.00	15.40
FeO	13.93	11.75	12.65	13.34	11.86	9.97	10.52	10.29	10.27	9.79
MnO	6.89	8.95	7.93	7.46	9.12	10.13	10.35	9.98	9.94	10.25
TiO <sub>2</sub>	0.48	0.41	0.78	0.44	0.36	0.68	0.67	0.60	0.73	0.80
Total	100.87	100.39	99.54	99.49	100.38	99.77	99.74	99.21	99.35	99.12
Cations per 6 oxygens										
Nb	1.857	1.866	1.798	1.862	1.863	1.732	1.732	1.739	1.721	1.712
Ta	0.125	0.119	0.168	0.116	0.118	0.239	0.225	0.231	0.245	0.252
Fe	0.669	0.566	0.621	0.648	0.572	0.497	0.524	0.516	0.516	0.493
Mn	0.335	0.436	0.395	0.367	0.445	0.512	0.522	0.507	0.506	0.523
Ti	0.021	0.018	0.035	0.019	0.016	0.031	0.030	0.027	0.033	0.036
Total	3.007	3.005	3.017	3.012	3.014	3.061	3.033	3.020	3.021	3.016
%Nb	93.7	94.0	91.5	94.2	94.0	87.9	88.5	88.3	87.5	87.2
%Ta	6.3	6.0	8.5	5.8	6.0	12.1	11.5	11.7	12.5	12.8

**Table 6.** EPMA analyses of microcrystalline columbite in pegmatites

	MJ-2					MJ-4				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	63.90	63.46	62.99	62.16	65.64	71.15	73.00	60.18	71.84	62.46
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	15.07	15.89	16.34	16.63	13.04	8.23	6.26	19.67	6.86	16.34
FeO	15.58	14.82	16.14	15.53	15.07	13.53	11.43	14.09	11.62	14.37
MnO	4.49	6.03	4.54	5.11	5.71	6.43	9.32	5.95	9.21	6.12
TiO <sub>2</sub>	0.55	0.53	0.42	0.35	0.31	0.19	0.33	0.44	0.31	0.68
Total	99.59	100.73	100.43	99.78	99.77	99.53	100.28	100.33	99.84	99.97
Cations per 6 oxygens										
Nb	1.731	1.707	1.704	1.697	1.764	1.853	1.891	1.651	1.877	1.696
Ta	0.246	0.257	0.266	0.273	0.211	0.132	0.098	0.325	0.108	0.267
Fe	0.781	0.738	0.808	0.784	0.749	0.689	0.548	0.715	0.562	0.722
Mn	0.228	0.304	0.230	0.261	0.287	0.331	0.452	0.306	0.451	0.311
Ti	0.026	0.024	0.019	0.016	0.014	0.009	0.014	0.020	0.013	0.031
Total	3.012	3.030	3.027	3.015	3.025	3.014	3.003	3.017	3.011	3.027
%Nb	87.6	86.9	86.5	86.1	89.3	93.4	95.1	83.6	94.6	86.4
%Ta	12.4	13.1	13.5	13.9	10.7	6.6	4.9	16.4	5.4	13.6



**Fig. 7.** Microcrystalline columbite with muscovite. (A) Photomicrographs. (B) SEM BSI. (C) SEM EDX (Core MJ-4). Mc: muscovite.

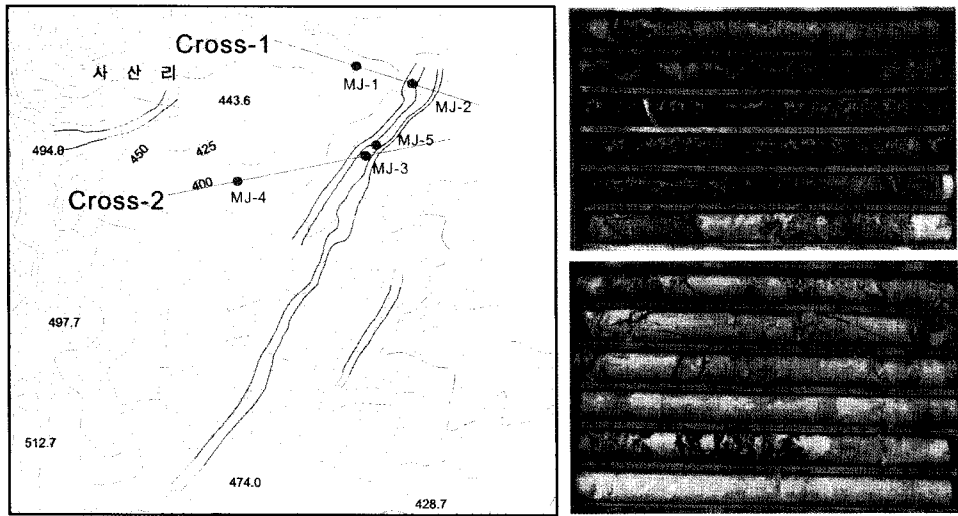


Fig. 8. Drilling holes in pegmatites (left), and drill cores in wooden box (right).

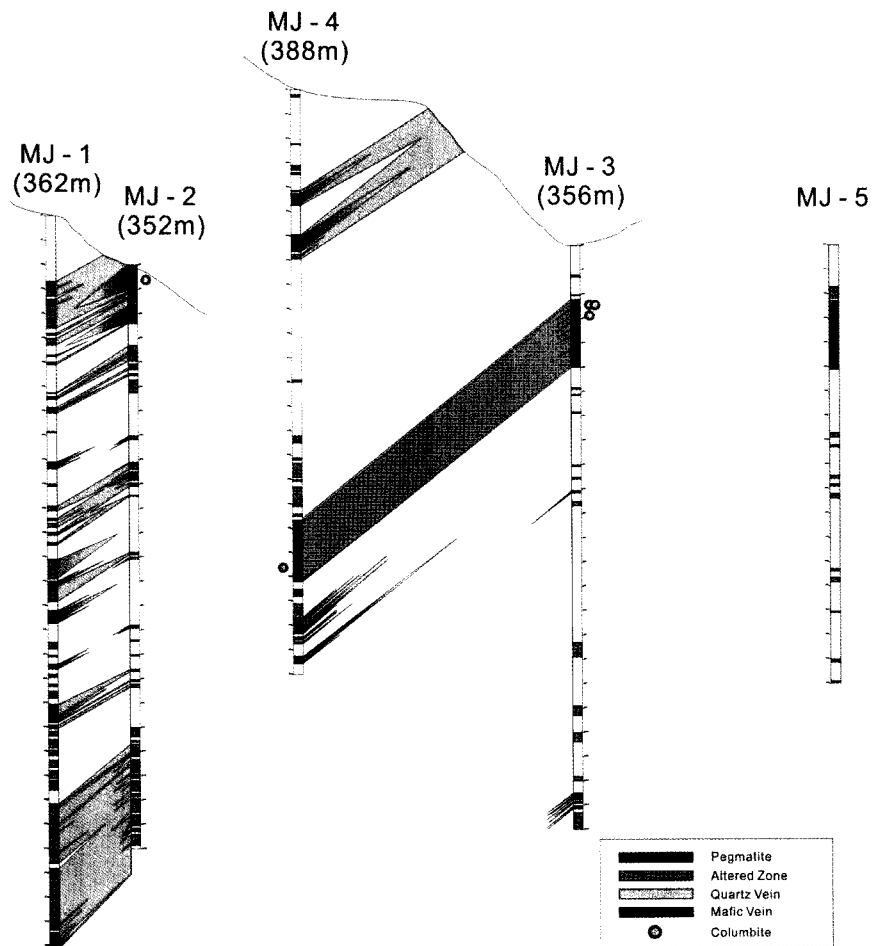


Fig. 9. Detailed description of vertical sections obtained from core-logging in Fig. 8.

맥의 발달 양상을 확인하였다(그림 9). 약 14 m 두께의 페그마타이트 맥의 발달을 확인하였으나 전체적으로 맥의 연장은 좋은 편이 아니다. 특히, 페그마타이트 맥에서 콜럼바이트 산출은 겨우 5지점에서 확인될 정도로 양이 많지 않다. 한편, MJ-1과 MJ-2 심부에 넓게 변질대의 존재를 확인하였는데, 이는 제 3의 맥이 존재할 가능성을 시사하고 있다. 비록 5개 공의 시험시추이긴 하지만 Na-Ta 희유금속의 경제성을 지시할 정도의 유망 광화대 확보는 어려울 것으로 판단된다.

### 결론

조사지역의 지질은 선캄브리아기의 화강암질 편마암, 우백 화강암질 편마암에 주라기의 편암질 화강암, 석영맥, 페그마타이트, 규장암이 관입하고 있다. 가장 넓게 분포하는 우백 화강암질 편마암 내에 우백의 페그마타이트 맥이 관입하고 있으며, Nb-Ta 광화대를 형성하고 있다.

페그마타이트의 구성광물로는 거정질의 석영, 장석류, 백운모가 우세하며, 광물분석 결과 장석류의 경우 정장석과 알바이트의 단종성분을 보여준다. 백운모는 Ti, Al, Na의 함량이 적은 반면 Mg, Si의 함량은 상대적으로 높고 Na/Na+K는 0.07~0.08로서 후기 마그마 기원의 조성을 보여주는데, 이는 백운모가 페그마타이트 단계에 형성된 것으로 콜럼바이트와 밀접히 수반되어 산출하였음을 알 수 있다.

콜럼바이트의 산출상태를 보면 조립의 콜럼바이트는 석영, 장석과 수반되어 산출하며, 미립의 콜럼바이트는 백운모와 함께 산출하는데, 조립질에 비해 미립의 콜럼바이트는 상대적으로 낮은 Nb의 함량을 보여준다.

무주 사산리에 발달한 페그마타이트는 모두 4개 조로 중앙 2개는 확인된 지표 연장이 폭 4~15 m, 길이가 각각 120 m, 250 m 정도이다. 시추코어에서 확인한 5개 지점의 콜럼바이트도 현미경 하에서 발견될 정도로 미량 산출되며, 경제성이 있다고 생각되지 않는다. 따라서 심부에 페그마타이트의 존재 가능성을 배제하긴 어렵지만, 페그마타이트의 개수, 폭과 연장, 그리고 미량의 Nb-Ta 광물, 및 세계적 산출 경향 등을 고려할 때 조사지역에 대한 희유금속광상 개발가능성은 희박하다고 판단된다.

### 사 사

이 연구는 에너지기술평가원이 수행하는 에너지·자원

기술개발사업-전략융합기술 사업 중 ‘국내 희유금속 광화대 광상탐사 및 자원확보’(과제번호: 2010T100200202) 과제(1단계: 2010. 6. 1~2015. 5. 30)의 1차년도 사업의 일부로서 수행되었다. 원고를 심사해주고 교열해 주신 심사위원에게 감사드린다.

### 참고문헌

- 김수영, 서정률 (1989) 희유금속광물 자원조사연구: 단양 및 무주지역, Ta-Nb-Li 페그마타이트에 대한 광상 및 시추탐사 연구. 한국동력자원연구소, 연구보고서 KR-89-7A-1, 107p.
- 문상호, 박희인 (1994) 울진지역 석 광화작용에 수반된 화강편마암의 변질. 지질학회지, 30, 125-139.
- 이대성, 남기상 (1969) 지질도폭 설명서: 장기리(Sheet-6721-IV) 1:50,000. 국립지질조사소(과학기술처).
- Černý, P. (1989) Mineralogy of niobium and tantalum: crystal chemical relationships, paragenetic aspects and their economic implications. In: Lanthanides, Tantalum and Niobium (P. Moller, P. Černý, & F. Saupe, eds.). Springer-Verlag, Berlin, Germany, 27-79.
- Černý, P. (1991a) Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. Geosci. Canada, 18, 49-67.
- Černý, P. (1991b) Rare-element granitic pegmatites. Part II: Regional to global environments and petrogenesis. Geosci. Canada, 18, 68-82.
- Linnen, R.L. (1998) The solubility of Nb-Ta-Zr-Hf-W in granitic melts with Li and Li + F: Constraints for mineralization in rare metal gneisses and pegmatites. Economic Geology, 93, 1013-1025.
- Llorens, T. and Moro, M.C. (2010) Microlite and tantalite in the LCT granitic pegmatites of La Canalita Navasfrias Sn-W District, Salamanca, Spain. Can. Mineral., 48, 375-390.
- Miller, C.F., Stoddard, E.F., Bradfish, L.J., and Dollase, W.A. (1981) Composition of plutonic muscovite: Genetic implication. Can. Mineral., 19, 25-34.
- Pieczka, A. (2010) Primary Nb-Ta minerals in the Szklary pegmatite, Poland: New insights into controls of crystal chemistry and crystallization sequences. Am. Mineral., 95, 1478-1492.
- Stilling, A., Černý, P., and Vanstone, P.J. (2006) The Tango pegmatite at Bernic Lake, Manitoba. XVI. Zonal and bulk compositions and their petrogenetic significance. Can. Mineral., 44, 563-598.

접수일(2010년 6월 8일), 수정일(1차 : 2011년 6월 28일), 게재확정일(2011년 6월 28일)