

중국 호남성 시죽원 광상의 W-Sn-Bi-Mo 광화작용

윤경무^{1*} · 김상중² · 이현구² · 이찬희²

¹중국지질대학, ²충남대학교 지질학과

W-Sn-Bi-Mo Mineralization of Shizhuyuan deposit, Hunan Province, China

Yin Jingwu^{1*}, Sang Jung Kim², Hyun Koo Lee² and Chan Hee Lee²

Geosciences University of China (Beijing) No.29 Xue Yuan Road Haidian, Beijing 100083, P.R. China
Dept. of Geology, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea

The Geology of the Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo deposits, situated 16 km southeast of Chengzhou City, Hunan Province, China, consist of Proterozoic metasedimentary rocks, Devonian carbonate rocks, Jurassic granitic rocks, Cretaceous granite porphyry and ultramafic dykes. The Shizhuyuan polymetallic deposits were associated with medium- to coarse-grained biotite granite of stage I. According to occurrences of ore body, ore minerals and assemblages, they might be classified into three stages such as skarn, greisen and hydrothermal stages. The skarn is mainly calcic skarn, which develops around the Qianlishan granite, and consists of garnet, pyroxene, vesuvianite, wollastonite, amphibolite, fluorite, epidote, calcite, scheelite, wolframite, bismuthinite, molybdenite, cassiterite, native bismuth, unidentified Bi-Te-S system mineral, magnetite, and hematite. The greisen was related to residual fluid of medium- to coarse-grained biotite granite, and is classified into planar and vein types. It is composed of quartz, feldspar, muscovite, chlorite, tourmaline, topaz, apatite, beryl, scheelite, wolframite, bismuthinite, molybdenite, cassiterite, native bismuth, unknown uranium mineral, unknown REE mineral, pyrite, magnetite, and chalcopyrite with minor hematite. The hydrothermal stage was related to Cretaceous porphyry, and consist of quartz, pyrite and chalcopyrite. Scheelite shows a zonal texture, and higher MoO₃ content as 9.17% in central part. Wolframite is WO₃; 71.20 to 77.37 wt.%, FeO; 9.37 to 18.40 wt.%, MnO; 8.17 to 15.31 wt.% and CaO; 0.01 to 4.82 wt.%. FeO contents of cassiterite are 0.49 to 4.75 wt.%, and show higher contents (4.17 to 4.75 wt.%) in skarn stage (Stage I). Te and Se contents of native bismuth range from 0.00 to 1.06 wt.% and from 0.00 to 0.57 wt.%, respectively. Unidentified Bi-Te-S system mineral is Bi; 78.62 to 80.75 wt.%, Te; 12.26 to 14.76 wt.%, Cu; 0.00 to 0.42 wt.%, S; 5.68 to 6.84 wt.%, Se; 0.44 to 0.78 wt.%.

Key words : Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo deposits, qianlishan granite complex, skarn, greisen, ore minerals

중국 호남성 침주시에서 북동 16 km 지점에 위치하는 시죽원 다금속 광상의 지질은 원생대의 변성퇴적암류, 데본기 탄산염암, 쥐라기 화강암류, 백악기 반암류 및 초염기성맥암으로 구성된다. 시죽원 다금속 광상은 중-조립질 흑운모화강암과 관련되어 있다. 광체의 산출상태, 광물의 산출상태 및 공생관계를 토대로 광화시기는 스카른, 그라이젠 및 열수시기로 나뉜다. 스카른 시기의 광체는 주로 Ca-스카른으로 천리산 화강암체 주변에 발달되며, 석류석, 휘석, 베수비아나이트, 규회석, 각섬석, 형석, 녹염석, 방해석, 회중석, 철망간중석, 휘창연석, 휘수연석, 석석, 자연창연, 미확인 Bi-Te-S계 광물, 자철석 및 적철석 등이 산출된다. 그라이젠 시기는 중-조립질 흑운모화강암의 잔류용액과 관련되며, 광체는 판상 및 맥상으로 구분된다. 이 시기는 주로 석영, 장석, 백운모, 녹니석, 전기석, 황옥, 녹주석, 인회석, 회중석, 철망간중석, 휘수연석, 휘창연석, 석석, 자연창연, 미확인 우라늄광물, 미확인 희토류광물로 구성되고, 소량의 황철석, 자철석, 황동석, 적철석 등이 산출된다. 회중석은 누대조직을 보이며, 중심부에서 MoO₃ 함량이 9.17%로 외곽보다 높게 나타난다. 철망간중석의 화학조성은 WO₃; 71.20~77.37 wt.%, FeO; 9.37~18.40 wt.%, MnO; 8.17~15.31 wt.% 및 CaO; 0.01~4.82 wt.%이다. 석석의 FeO 함량은 1.30~4.75 wt.%이고, 스카른 시기가 높은 함량을 보인다. 자연창연의 Te 및 Se 함량은 각각 0.00~1.06 wt.%와 0.00~0.57 wt.%이다. 미확인 Bi-Te-S 계 광물은 Bi; 78.62~80.75 wt.%, Te; 12.26~14.76 wt.%, Cu; 0.00~0.42 wt.%, S; 5.68~6.84 wt.%, Se; 0.44~0.78 wt.%이다.

주요어 : 시죽원 W-Sn-Bi-Mo 광상, 천리산 화강암복합체, 스카른, 그라이젠, 광석광물

*Corresponding author: zyjw@hotmail.com

1. 서 언

시죽원(柿竹園) 다금속 광상은 그라이젠 및 스킨형의 W, Sn, Bi, Mo 및 F 광상으로서 중국 호남성 침주시(Hunan Chenzhou) 동남쪽 약 16 km 지점의 시죽원 다금속 광화대에 위치한다(Fig. 1). 이 광화대는 16세기에 발견되어 1910년대부터 연, 아연 및 은을 생산하였으며, 1960년대 중반에 중국 호남성 지질국 408 조사팀에 의해 W, Sn, Bi, Mo 다금속 광상으로 알려지기 시작하였다. 이 광화대는 스킨 및 그라이젠형 W, Sn, Bi, Mo 광상과 열수맥상형 Pb, Zn, Cu 광상으로 나뉜다. 현재 시죽원 광산은 해발 385 m, 490 m, 514 m, 536 m, 558 m의 5개 갱도에서 탐사 및 채굴이 병행되고 있는 광산으로서 중국에서 가행되는 광산중 가장 규모가 큰 광산이다. 시죽원 광산은 주변에 약 10 km²의 분포면적을 갖는 천리산 화강암복합체와 시·공간적으로 밀접하게 관련된 것으로 알려져 있다(毛景文 외, 1995; Yin *et al.*, 2002). 이 지역에 대하여 지금까지 발표된 연구자료를 보면, 천리산 화강암복합체에 대한 연구로는 趙永鑫(1987), 스킨 광상에 대하여는 王昌烈 외(1987), 王書鳳과 張綺玲(1988), Xiao(1989), 陳駿 외(1992), Yin *et al.* (2000) 등이 있다.

아직까지 시죽원광산에서 산출되는 광석광물의 공생관계, 산출상태 및 화학조성에 대한 자세한 연구보고

는 발표되어 있지 않은 상태이다. 따라서 본 시죽원 W, Sn, Mo, Bi, F 다금속 광상의 광화작용에 대한 생성과정 및 물리-화학적 조건을 밝히는 과정에서 먼저 다금속 광산에서 산출되는 광석광물의 공생관계, 산출상태 및 화학조성을 밝히고자 한다.

2. 지질개요

시죽원 광산의 주변지질은 원생대 변성퇴적암류, 데본기 탄산염암, 쥬라기-백악기 천리산(千里山) 화강암 복합체로 구성되며, 이 암석들은 제4기의 하상퇴적물에 의해 부정합으로 부분적으로 피복되어 있다(王昌烈 외, 1987).

원생대의 변성퇴적암류는 주로 회녹색의 변성사암으로 구성되며, 회녹색 점판암, 사질 점판암, 회색 규질암, 돌로마이트 및 돌로마이트질 석회암으로 구성된다. 연구지역에 가장 넓게 분포하고 있는 데본기 탄산염암은 하부에 갈색, 회백색 함력사암과 역암으로 구성되며, 상부에 암회색 석회암, 돌로마이트질 석회암으로 구성된다.

시죽원 광화대의 중앙에 위치하는 천리산 화강암복합체는 쥬라기 화강암질암과 백악기의 반암류 및 열기성암류로 구성된다. 쥬라기의 화강암질암은 산출상태 및 관입시기에 따라서 2종류로 나뉜다. 1시기의 세립질 반상 흑운모 화강암과 중-조립질 흑운모 화강암은

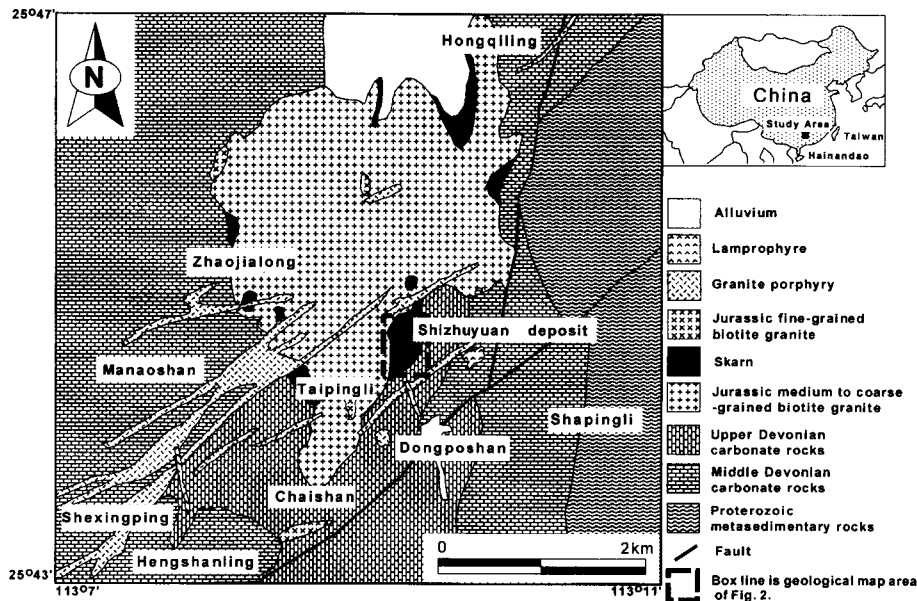


Fig. 1. Geological map of the study area (Xiao, M., 1989).

천리산 화강암 복합체의 주변과 안쪽에 분포하며 전체 면적의 2/3를 차지한다. 야외에서 석영 및 장석반정을 갖는 것이 특징이다. 2기의 세립질 흑운모 화강암은 주로 시죽원 광상의 385 m와 490 m의 수평갱도에서 맥상으로 관찰된다. 주 구성광물은 K-장석, 사장석, 석영, 흑운모, 백운모 등이고 소량의 모나자이트, 저어콘, 인회석 및 자철석 등이 관찰된다. 현미경하에서 등립질 및 반상조직이 관찰되며 반정으로 K-장석, 사장석 및 석영이 존재한다. 반정과 석기의 크기는 각각 약 3 mm와 약 0.5 mm 정도이다.

백악기의 반암류는 화강반암과 석영반암으로서 대부분 맥상으로 나타나며 주향은 N25~65°E이다. 이들은 주로 천리산, 야계미(野鷄尾), 동파산(東坡山)과 시죽원에서 분포하며 맥폭이 수십미터에서 100 m까지 달하는 것도 있다. 현미경하에서 반상조직이 관찰되며 반정으로 K-장석, 사장석, 흑운모, 백운모 및 석영이 관찰된다. 반정은 0.5 mm 이상의 크기를 가지며, 석기는 약 0.5 mm 정도이다. 염기성암류는 맥상으로 화강암과 석회암을 관입하였으며 주향은 주로 NS 혹은 NW이다. 맥폭은 20 cm 정도에서 수 미터까지 달하고 수백미터의 연장성을 갖는다. 염기성암류는 모두 반암을 관입하고 있다. 현미경하에서 반상조직이 관찰되며 반정으로 장석, 휘석이 관찰된다. 반정의 크기는 약 2 mm 정도이고 석기는 약 0.1 mm 정도이다.

3. 광상개요

시죽원 다금속 광상은 중-조립질 흑운모 화강암(부분적으로 세립질 반상 흑운모 화강암)과 관련된 스킨 및 그라이젠 광상이다. 광체의 규모는 NS 방향의 길이 1,200 m, EW 방향의 넓이 600 m, 두께 200~300 m 정도로서 거대한 렌즈상 광체이다(王昌烈 외, 1987). 매장량은 약 3억톤이며, WO₃, Sn, Mo, Bi, CaF₂의 품위는 각각 0.57, 0.10~0.28, 0.09~0.12, 0.07~0.15, 5.72~25.58%이다. 중-조립질 흑운모화강암의 관입부로부터 스킨대를 자철석-휘석-석류석대, 휘석-석류석대, 베수비아나이트-석류석대 및 스킨화 대리암으로 나뉜다(Yin *et al.*, 2000). 이러한 스킨대중에 주로 자철석-휘석-석류석대, 휘석-석류석대에 수반되어 소규모의 W 광체가 형성되어 있다. 이들 스킨대를 관입하는 그라이젠 맥에 W, Sn, Mo 및 Bi 등이 수반되어 맥상광체를 이루고 있다. 시기를 달리하는 백악기의 열수석영맥에 의하여 스킨 및 그라이젠 광체가 절단되어 있다. Yin *et al.*(2002)는 백운모에 대한

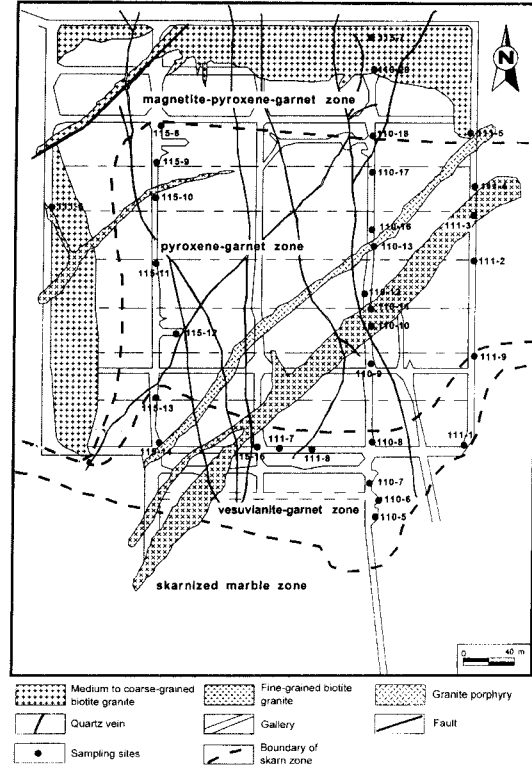


Fig. 2. Underground geological map and sample localities at the Shizhuyuan deposit (From 490m adit above sea level).

K-Ar 연대측정에서 중-조립질 흑운모화강암의 관입시기가 149.3±3.5 Ma, 그라이젠 광화시기가 144.5±2.8~148.0±2.9 Ma로서 시죽원광상의 광화작용은 중-조립질 흑운모화강암과 관련된 것으로 보고하였다. 이 연구에서는 490 m 갱도에서 지질조사와 시료채취가 실시되었으며 갱내지질 상황과 시료위치는 Fig. 2와 같다.

4. 광물공생관계

시죽원 광상에서의 광화시기는 광체의 상호관계, 광물의 산출상태 및 공생관계를 기초로 하여 스킨 시기, 그라이젠 시기 및 열수 시기로 나뉜다(Fig. 3).

스킨 광체는 광물의 조합에 의해 중-조립질 흑운모화강암의 접촉부로부터 자철석-휘석-석류석대, 휘석-석류석대, 베수비아나이트-석류석대 및 스킨화 대리암으로 나뉘고 있다. 광석광물로는 회중석, 휘창연석, 자연창연, 철망간중석, 휘수연석, 석석, 미확인 Bi-Te-S 광물, 황철석, 황동석, 자철석 및 적철석 등이 산출되며, 맥석광물로는 석류석, 휘석, 베수비아나

Minerals	Stage		
	Skarn	Greisen	Hydrothermal
Garnet			
Pyroxene			
Vesuvianite			
Amphibole			
Wollastonite			
Muscovite			
Sericite			
Quartz			
Fluorite			
Epidote			
Calcite			
Scheelite			
Wolframite			
Molybdenite			
Bismuthinite			
Cassiterite			
Magnetite			
Hematite			
Native bismuth			
Bi-Te-S mineral			
Pyrite			
Chalcopyrite			
Uranium mineral			
REE mineral			
Feldspar			
Topaz			
Chlorite			
Beryl			
Apatite			
Tourmaline			

Fig. 3. Paragenetic sequence of minerals from the Shizhuyuan deposit.

이트, 각섬석, 규회석, 형석, 석영, 녹염석 및 방해석 등이 산출된다.

그라이젠 시기는 화강암내의 잔존용액이 증-조립질 흑운모화강암체의 주변부를 변질시키거나 맥상으로 스카른대를 관입한 시기이다. 광석광물로는 회중석, 석석, 철망간중석, 휘수연석, 휘창연석, 자연창연, 황철석, 황동석, 미확인 희토류광물 및 미확인 우라늄광물 등이 있으며, 맥석광물로는 석영, 백운모, 형석, 황옥, 장석류, 녹니석, 녹주석, 인회석 및 전기석 등이 산출된다.

열수 시기는 스카른 및 그라이젠 광체를 절단하며 남북으로 발달되어 있는 석영맥으로서 주로 석영과 함께 소량의 황철석 및 황동석이 산출된다. 이 석영맥의 변질대에서 채취된 견운모의 K-Ar 절대연령은 92.4 ± 1.8 Ma로서 백악기의 연령을 갖는 것으로 보고되었다 (Yin *et al.*, 2002).

4.1. 회중석

회중석은 스카른 및 그라이젠 시기에 산출되며 시죽원 광장에서 가장 경제적 가치가 있는 광물이다. 스카른 시기의 회중석은 타형 입상 및 침투상으로 산출되며 누대구조가 뚜렷하게 관찰되며(Fig. 4A, B), 누대환의 중앙부와 외부에서 일어나는 소광현상은 다르다. 일반적으로 철망간중석을 교대하여 산출되며 휘창연석, 휘수연석 및 석석 등과 공생하여 산출되거나 철망간중석, 휘창연석, 자연창연, 휘수연석 및 황철석 등과 공생하며 산출된다(Fig. 5A). 그라이젠 시기에는 입상과

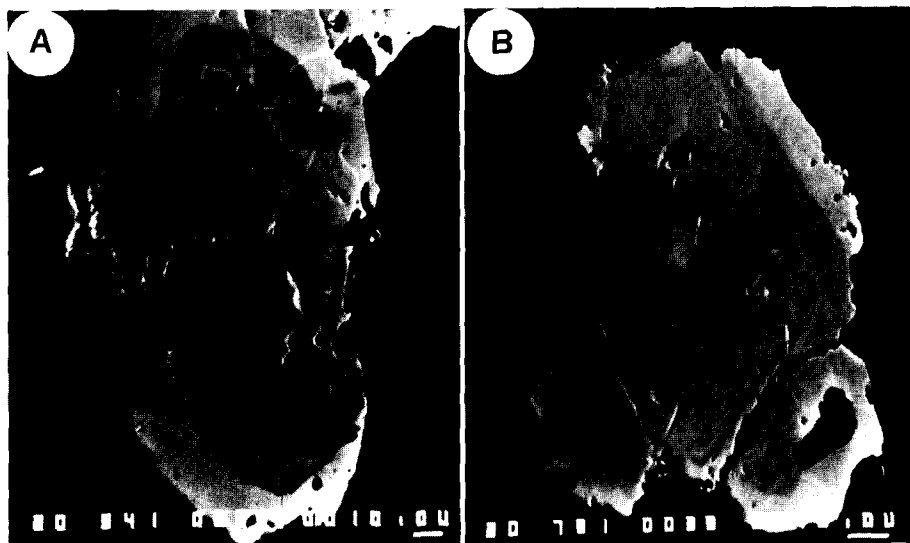


Fig. 4. Photomicrographs showing rim texture of scheelite by back-scattered electron image.

타형 입상으로 가장 많이 산출되며 누대구조가 관찰되지 않는다. 그라이젠 시기의 회중석은 입자의 크기가 스카른 시기의 것보다 크고 석영 및 형석 등이 접촉한 간극을 따라 산출된다.

4.2. 철망간중석

철망간중석은 판상, 침상 및 입상으로 산출되는 광석으로서 그라이젠 시기에 가장 많이 산출된다. 일반

적으로 철망간중석의 크기는 0.01~0.3 mm 정도이다. 스카른 시기의 철망간중석은 대부분 타형 입상의 집합체로 산출된다. 석류석 및 형석의 간극을 따라 정출되며 회중석에 의해 교대된다. 철망간중석은 회중석, 휘창연석, 자연창연, 휘수연석 및 황철석 등과 공생하여 산출되거나 회중석에 의해 교대되어 결정형태로 산출된다(Fig. 5A). 그라이젠 시기의 철망간중석은 판상 및 타형 입상의 집합체 또는 침상으로 산출되며, 형석 및 석영의 간극을 따라 산출되거나 형석 내에서 단독적으로 산출된다.

4.3. 석석

석석은 주로 그라이젠 시기와 스카른 시기의 스카른화 대리암대에서 산출빈도가 높다. 육안으로는 관찰되지 않을 정도로 작고, 입자의 크기는 0.01~0.1 mm이며 주상으로 산출된다. 스카른 시기의 석석은 입자 크기가 작고, 주상의 결정체로 석영, 석류석 및 형석을 따라 산출되며 회중석, 휘수연석 및 휘창연석 등과 공생한다. 회중석, 석영 및 형석과 공생하며 황철석내에 포유되거나, 형석, 석영 및 황철석의 간극을 따라 산출되기도 한다(Fig. 5B). 그라이젠 시기의 석석은 산출빈도가 매우 높으며, 일반적으로 형석, 석영 및 운모류 광물의 간극을 따라 산출된다.

4.4. 휘창연석

휘창연석은 전 광화시기에 걸쳐 흔히 산출되는 광물이며 회백색의 타형 입상 및 주상으로서 입자크기는 0.05 mm의 정도이다. 스카른 시기의 휘창연석은 입자가 크고 자연창연, 철망간중석, 회중석, 휘수연석, 미확인 Bi-Te-S계 광물 및 황철석 등과 공생하여 산출되며(Fig. 5A), 때때로 세립질의 침상으로 산출되기도 한다. 휘창연석은 주로 스카른 시기의 석류석의 맥에서 흔히 산출된다. 그라이젠 시기의 휘창연석은 형석의 간극을 따라 충전되고 대부분 자연창연, 휘수연석과 공생하나 회중석과 공생하기도 한다. 또한 휘창연석은 회중석내에 존재하기도 한다.

4.5. 자연창연

자연창연은 타형 입상, 주상으로 산출되고 크기는 0.03 mm 정도이다. 스카른 시기의 자연창연은 철망간중석, 회중석, 휘창연석, 휘수연석 및 미확인 Bi-Te-S계 광물과 공생하여 산출된다(Fig. 5A). 그중 자연창연은 미확인 Bi-Te-S계 광물과 밀접한 공생관계를 갖고, 휘창연석의 열극을 따라 휘창연석을 교대하여 산출된

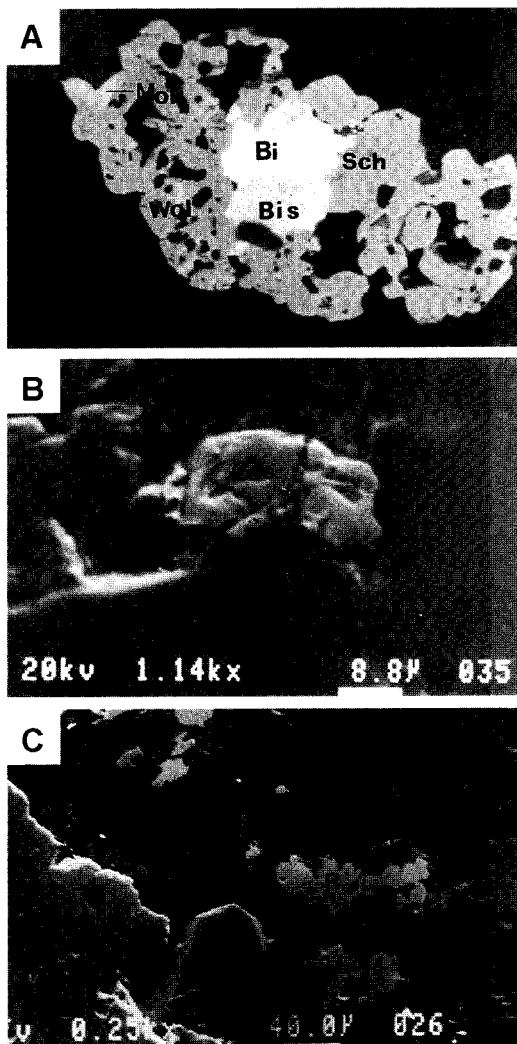


Fig. 5. Photomicrographs of ore minerals by scattered electron image (SEM) and back-scattered electron image (BEI). A: native bismuth (Bi) coexisting with bismuthinite (Bis) in the scheelite (Sch), molybdenite (Mol) and wolframite (Wol). B: cassiterite (Cas) coexisting with fluorite (Flu), pyrite (Py) and quartz (Qz). C: REE mineral (R) associated with pyrite, quartz and fluorite.

다. 그라이젠 시기의 자연창연은 대부분 미세한 입상으로 휘창연석 내에 산출된다.

4.6. 미확인 Bi-Te-S계 광물

미확인 Bi-Te-S계 광물은 스카른 시기에서만 회중석, 철망간중석, 휘창연석 및 자연창연과 공생하며 산출된다. 미세한 입상으로 자연창연, 휘창연석과 공생하며 산출되고 대부분 크기가 0.01 mm 이하이다.

4.7. 휘수연석

휘수연석은 편상으로 산출되나, 산출빈도와 산출량은 그라이젠 시기에서 높고, 입자의 크기는 직경이 0.01 mm 정도이다. 스카른 시기의 휘수연석은 휘창연석, 회중석 및 철망간중석과 공생하며(Fig. 5A), 회중석 내에 산출된다. 그라이젠 시기의 휘수연석은 편상으로 형석과 석영의 접촉부분에 산출되거나, 회중석, 휘창연석 등과 공생광계를 갖으며 석영과 운모류 광물의 열극을 따라 충전되거나 회중석 내에서 산출되기도 한다.

4.8. 미확인 회토류광물

미확인 회토류광물은 그라이젠 시기에 주상, 입상으로 산출된다. 대부분 미확인 회토류광물은 세립질로 입자의 크기는 직경이 0.01~0.1 mm 이다. 미확인 회토류광물은 일반적으로 타형 세립상으로 석영, 형석의 열극을 따라 산출되거나 주상 및 타형 입상으로 형석, 석영, 황철석 등과 함께 산출된다(Fig. 5C). 또한 미확인 회토류광물은 주상으로 회중석과 공생하며, 석영, 운모 등 맥석광물과 밀접한 관계를 갖는다.

4.9. 미확인 우라늄광물

미확인 우라늄광물은 그라이젠 시기에 판상, 주상, 입상으로 산출된다. 입자의 크기는 직경이 0.01~0.05 mm 정도이다. 미확인 우라늄광물은 타형 입상으로 형석 및 석영 등 맥석 광물의 간극을 따라 산출된다. 또한 미확인 우라늄광물은 석영, 황옥, 운모 등 맥석광물과 함께 산출되며, 대부분 타형 입상으로 분포하거나 황철석 내에서 단독으로 산출된다(Fig. 6).

4.10. 자철석

자철석은 광화작용의 전시기에 걸쳐 산출되나 스카른 시기에서 산출빈도와 산출량이 높다. 스카른 시기의 자철석은 입상집합체로 석류석 및 휘석과 같은 스카른 광물과 함께 침상으로 소량 산출된다. 그라이젠 시기의 자철석은 그라이젠 백의 외곽부에 황철석, 황

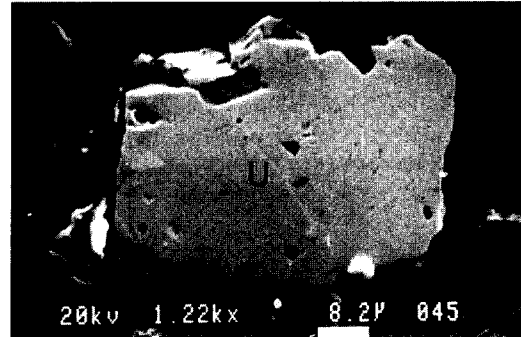


Fig. 6. SEM potmicrograph of an unidentified uranium mineral (U).

동석 등과 함께 산출된다.

4.11. 적철석

광화 전시기에 걸쳐 소량으로 산출되는 적철석은 판상 또는 침상으로 자철석, 황철석, 황동석 등과 함께 산출된다.

4.12. 황철석

황철석은 모든 광화시기에 걸쳐 산출되는 광물로서 자형-타형의 결정을 갖으며 열수시기에 가장 많이 산출된다.

4.13. 황동석

황동석은 모든 시기에 걸쳐 산출되나 그 산출빈도와 양은 황철석보다 낮다. 황동석은 황철석, 자철석 및 적철석 등과 함께 산출된다.

5. 광물화학조성

시죽원 W-Sn-Bi-Mo 다금속 광상에서 산출되는 광석 광물중 회중석, 철망간중석, 석석, 휘창연석, 자연창연 및 미확인 Bi-Te-S계열 광물에 대해 충남대학교 공동 실험실습관에 설치된 JXA-8800형 EPMA를 이용하여 분석하였다.

5.1. 회중석

각 광화 시기에 산출되는 회중석의 WO_3 , CaO, MoO_3 , FeO 및 MnO의 분석값은 스카른 시기가 70.05~80.98, 17.81~20.67, 0.10~9.17, 0.00~0.72 및 0.00~0.09 wt.%, 그라이젠 시기가 71.50~75.70, 19.70~20.45, 4.02~7.99, 0.00 및 0.00~0.06 wt.%이다

Table 1. Electron microprobe analyses of scheelite from the Shizhuyuan deposit.

Sample No.	WO ₃	CaO	MoO ₃	MnO	FeO	Total (wt.%)	Structural formulas	Stage
SJ96115-8(1)	76.31	19.46	1.29	0.05	-	97.11	Ca _{1.02} (W _{0.97} Mo _{0.03}) _{1.00} O ₄	Skarn
	78.05	19.39	0.45	0.01	0.03	97.93	Ca _{1.00} (W _{0.99} Mo _{0.01}) _{1.00} O ₄	
	79.44	19.86	0.59	-	0.18	100.07	Ca _{1.00} (W _{0.98} Mo _{0.01}) _{0.99} O ₄	
SJ96115-8(2)	70.86	20.67	8.24	0.04	-	99.81	Ca _{1.00} (W _{0.84} Mo _{0.16}) _{1.00} O ₄	
	70.05	20.61	9.17	0.04	-	99.87	Ca _{1.00} (W _{0.88} Mo _{0.12}) _{1.00} O ₄	
	78.98	19.85	1.03	0.02	-	99.88	Ca _{1.00} (W _{0.97} Mo _{0.02}) _{0.99} O ₄	
SJ96110-16(1)	77.76	19.81	2.31	0.01	-	99.89	Ca _{1.00} (W _{0.95} Mo _{0.05}) _{1.00} O ₄	
	79.60	19.71	0.55	0.03	-	99.89	Ca _{1.00} (W _{0.99} Mo _{0.01}) _{1.00} O ₄	
	79.61	19.79	0.36	0.06	-	99.82	Ca _{1.00} (W _{0.99} Mo _{0.01}) _{1.00} O ₄	
SJ96110-16(2)	80.32	19.24	0.38	-	-	99.94	Ca _{0.99} (W _{1.00} Mo _{0.01}) _{1.01} O ₄	
	77.05	19.94	2.88	-	-	99.87	Ca _{1.00} (W _{0.94} Mo _{0.06}) _{1.00} O ₄	
	80.01	19.21	0.63	-	-	99.85	Ca _{0.99} (W _{0.99} Mo _{0.01}) _{1.00} O ₄	
SJ96110-12(1)	77.66	20.02	1.97	0.01	0.21	99.87	Ca _{1.02} (W _{0.95} Mo _{0.04}) _{0.99} O ₄	
	79.12	17.81	2.23	-	0.72	99.88	Ca _{0.98} (W _{0.98} Mo _{0.04}) _{1.02} O ₄	
	78.44	19.79	1.57	-	-	99.80	Ca _{1.00} (W _{0.97} Mo _{0.03}) _{1.00} O ₄	
SJ96110-12(2)	80.22	19.12	0.43	-	0.04	99.81	Ca _{0.98} (W _{1.00} Mo _{0.03}) _{1.01} O ₄	
	80.14	19.08	0.42	-	0.05	99.69	Ca _{0.98} (W _{1.00} Mo _{0.03}) _{1.01} O ₄	
	80.98	18.48	0.40	-	-	99.86	Ca _{0.96} (W _{1.00} Mo _{0.01}) _{1.01} O ₄	
SJ96110-8(1)	79.56	19.50	0.59	-	0.21	99.86	Ca _{1.00} (W _{0.99} Mo _{0.01}) _{1.00} O ₄	
	78.71	19.99	1.07	0.02	0.04	99.83	Ca _{1.02} (W _{0.98} Mo _{0.03}) _{0.99} O ₄	
	78.56	20.03	1.16	0.01	0.08	99.84	Ca _{1.02} (W _{0.97} Mo _{0.03}) _{1.00} O ₄	
SJ96110-8(2)	77.80	19.58	2.04	-	-	99.42	Ca _{1.00} (W _{0.96} Mo _{0.04}) _{1.00} O ₄	
	80.05	19.57	0.12	-	-	99.81	Ca _{1.01} (W _{1.00} Mo _{0.00}) _{1.00} O ₄	
	78.61	19.33	1.81	-	0.08	99.83	Ca _{1.00} (W _{0.99} Mo _{0.01}) _{1.00} O ₄	
SJ96111-2(1)	79.76	19.63	0.10	0.05	0.30	99.84	Ca _{1.00} (W _{0.99} Mo _{0.01}) _{1.00} O ₄	
	79.44	19.77	0.27	0.09	0.24	99.81	Ca _{1.02} (W _{0.99} Mo _{0.01}) _{1.00} O ₄	
	79.09	19.69	0.42	0.06	0.58	99.84	Ca _{1.02} (W _{0.99} Mo _{0.01}) _{1.00} O ₄	
SJ96111-2(2)	79.51	19.51	0.68	0.09	0.04	99.83	Ca _{1.00} (W _{0.99} Mo _{0.01}) _{1.00} O ₄	
	77.76	20.07	1.94	-	0.02	99.79	Ca _{1.02} (W _{0.94} Mo _{0.04}) _{0.98} O ₄	
	79.53	19.41	0.90	-	-	99.84	Ca _{0.99} (W _{0.99} Mo _{0.02}) _{1.01} O ₄	
SJ96115-7(1)	74.58	20.42	4.85	0.03	-	99.88	Ca _{1.02} (W _{0.90} Mo _{0.10}) _{1.00} O ₄	Greisen
	75.70	20.06	4.02	0.02	-	99.80	Ca _{1.01} (W _{0.92} Mo _{0.08}) _{1.00} O ₄	
	73.95	20.45	5.39	0.03	-	99.82	Ca _{1.00} (W _{0.89} Mo _{0.10}) _{0.99} O ₄	
	75.28	19.85	4.65	0.03	-	99.81	Ca _{0.99} (W _{0.91} Mo _{0.09}) _{1.00} O ₄	
SJ96115-7(2)	71.50	20.32	7.99	-	-	99.81	Ca _{1.00} (W _{0.85} Mo _{0.15}) _{1.00} O ₄	
	75.43	19.70	4.63	0.06	-	99.82	Ca _{0.99} (W _{0.91} Mo _{0.09}) _{1.00} O ₄	

(Table 1). 분석결과에서 보여주는 바와 같이 그라이젠 시기의 회중석의 WO₃ 함량이 다소 낮은 경향을 갖는다.

스카른 시기의 회중석에서는 누대조적이 관찰된다. 회중석내 MoO₃의 함량은 입자 중심부에서 8.24~9.17 wt.%, 외곽부에서는 1.03 wt.%로서 중심부가 더 높은 함량을 보인다. 이러한 원인으로 스카른 시기의 회중석내 MoO₃의 함량이 그라이젠 시기의 것보다 비교적 높다. 회중석을 구성하는 원소들의 치환관계를 검토하여 보면, WO₃가 증가함에 따라 MoO₃는 감소하는 부

(-)의 상관관계를 보이고 있어서 W와 Mo사이에 양호한 치환관계를 보여주고 있다(Fig. 7).

5.2. 철망간중석

철망간중석의 화학조성은 스카른 시기에 WO₃; 72.85~77.37, FeO; 9.37~15.45, MnO; 7.78~13.05 및 CaO; 0.01~4.82 wt.%이고, 그라이젠 시기에 WO₃; 71.20~76.43, FeO; 13.48~18.40, MnO; 8.17~10.27 및 CaO; 0.13~3.12 wt.%이다(Table 2). 그라

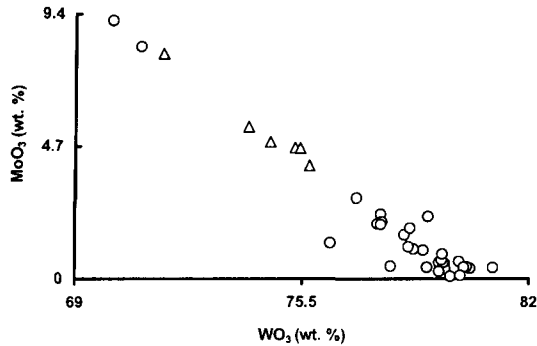


Fig. 7. Diagram of WO_3 versus MoO_3 of scheelite from the Shizhuyuan deposit. circles: Skarn stage, triangles: Greisen stage.

이젠 시기에 비해 스카른 시기의 FeO의 함량은 낮으나 MnO의 함량은 다소 높다. MnO/FeO의 비는 스카른 시기에서 그라이젠 시기로 갈수록 그 비율이 낮아지는 경향을 갖는다. 철망간중석을 구성하는 원소들의

상호관계는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 WO_3 가 증가함에 따라 FeO 및 MnO의 변화는 확인되지 않고 거의 일정한 관계를 보이고 있으나, WO_3 와 FeO+MnO+CaO의 관계에서는 부(-)의 상관관계를 보이고 있다.

5.3. 석석

석석의 화학조성은 스카른 시기에 SnO_2 ; 95.09~96.52 wt.%, FeO; 4.17~4.75 wt.%이고, 그라이젠 시기에 SnO_2 ; 97.44~99.65 wt.%, FeO; 1.30~1.86 wt.%이다(Table 3). 석석에 함유된 FeO의 함량은 스카른 시기가 그라이젠 시기보다 높은 함량을 보인다. 석석을 구성하는 Sn과 Fe의 상호관계를 보면, SnO_2 가 증가함에 따라서 FeO가 감소하는 부(-)의 상관관계를 보여 Sn과 Fe 사이에 좋은 치환관계를 이루고 있다 (Fig. 9).

5.4. 자연창연

자연창연의 화학조성은 스카른 시기에 Bi; 97.48~99.74 wt.%, Te; 0.00~0.47 wt.%, Cu; 0.06~0.48

Table 2. Electron microprobe analyses of wolframite from the Shizhuyuan deposit.

Sample No.	WO_3	FeO	MnO	CaO	Total (wt.%)	Structural formulas	MnO/FeO	Stage
SJ111-4(1)	73.71	14.60	8.27	3.23	99.81	(Fe _{0.63} Mn _{0.36}) _{0.99} W _{1.00} O ₄	0.57	Skarn
	75.25	14.49	8.97	0.61	99.32	(Fe _{0.61} Mn _{0.38}) _{0.99} W _{1.00} O ₄	0.62	
	72.85	14.40	8.49	4.82	100.56	(Fe _{0.62} Mn _{0.37}) _{0.99} W _{1.00} O ₄	0.59	
	77.37	14.28	9.41	0.03	101.09	(Fe _{0.60} Mn _{0.39}) _{0.99} W _{1.00} O ₄	0.66	
SJ111-4(2)	77.26	14.34	9.28	0.05	100.93	(Fe _{0.60} Mn _{0.40}) _{1.00} W _{1.00} O ₄	0.65	
	76.04	14.92	9.07	0.09	100.12	(Fe _{0.62} Mn _{0.38}) _{1.00} W _{1.00} O ₄	0.61	
	75.08	14.37	8.63	0.10	98.18	(Fe _{0.62} Mn _{0.38}) _{1.01} W _{1.00} O ₄	0.60	
SJ111-4(3)	76.03	15.00	8.94	0.09	100.06	(Fe _{0.63} Mn _{0.38}) _{1.01} W _{1.00} O ₄	0.60	
	74.79	14.70	9.06	0.09	98.64	(Fe _{0.63} Mn _{0.39}) _{1.02} W _{1.00} O ₄	0.62	
	75.98	15.45	9.04	0.10	100.57	(Fe _{0.64} Mn _{0.38}) _{1.02} W _{1.00} O ₄	0.59	
SJ96110-12(1)	76.17	14.81	9.37	0.05	100.40	(Fe _{0.62} Mn _{0.39}) _{1.01} W _{1.00} O ₄	0.63	
	76.19	14.35	10.05	0.08	100.67	(Fe _{0.60} Mn _{0.42}) _{1.02} W _{1.00} O ₄	0.70	
	74.21	14.15	9.01	0.11	97.48	(Fe _{0.61} Mn _{0.40}) _{1.01} W _{1.00} O ₄	0.64	
SJ96110-12(2)	75.99	14.87	8.88	0.20	99.94	(Fe _{0.63} Mn _{0.38}) _{1.01} W _{1.00} O ₄	0.60	
	76.96	14.46	8.55	0.08	100.05	(Fe _{0.61} Mn _{0.37}) _{0.98} W _{1.00} O ₄	0.59	
	75.62	15.11	8.27	0.20	99.20	(Fe _{0.64} Mn _{0.36}) _{1.00} W _{1.00} O ₄	0.55	
SJ96110-12(3)	75.32	14.79	8.80	0.34	99.25	(Fe _{0.63} Mn _{0.38}) _{1.01} W _{1.00} O ₄	0.59	
	75.11	14.63	8.63	0.13	98.50	(Fe _{0.63} Mn _{0.38}) _{1.01} W _{1.00} O ₄	0.59	
	74.18	14.92	7.78	0.30	97.18	(Fe _{0.65} Mn _{0.34}) _{0.99} W _{1.00} O ₄	0.52	
SJ96111-2(1)	75.91	14.37	9.23	0.07	99.68	(Fe _{0.61} Mn _{0.40}) _{1.01} W _{1.00} O ₄	0.65	
	75.32	15.00	8.66	0.10	99.08	(Fe _{0.64} Mn _{0.37}) _{1.01} W _{1.00} O ₄	0.58	
	75.83	14.70	8.79	0.32	99.64	(Fe _{0.63} Mn _{0.38}) _{1.01} W _{1.00} O ₄	0.60	
SJ96111-2(2)	76.39	10.37	13.05	0.20	100.01	(Fe _{0.40} Mn _{0.60}) _{1.00} W _{1.00} O ₄	1.26	
	74.55	13.26	10.17	0.88	98.86	(Fe _{0.57} Mn _{0.44}) _{1.01} W _{1.00} O ₄	0.77	
	74.18	13.87	9.20	1.88	99.13	(Fe _{0.58} Mn _{0.41}) _{0.99} W _{1.00} O ₄	0.66	
SJ96111-2(3)	75.58	9.37	15.31	0.01	100.27	(Fe _{0.38} Mn _{0.62}) _{1.00} W _{1.00} O ₄	1.63	

Table 2. Continued.

Sample No.	WO ₃	FeO	MnO	CaO	Total (wt.%)	Structural formulas	MnO/FeO	Stage
SJ96110-18(1)	71.20	18.40	10.27	0.13	100.00	(Fe _{0.64} Mn _{0.36}) _{1.00} W _{1.00} O ₄	0.56	Greisen
	75.45	15.33	8.90	0.33	100.01	(Fe _{0.64} Mn _{0.36}) _{1.00} W _{1.00} O ₄	0.58	
	75.83	14.54	8.89	0.36	99.62	(Fe _{0.61} Mn _{0.38}) _{0.99} W _{1.00} O ₄	0.61	
74.30	13.48	8.53	2.39	98.70	(Fe _{0.59} Mn _{0.41}) _{1.00} W _{1.00} O ₄	0.63		
SJ96110-18(2)	72.00	14.56	8.33	3.12	98.01	(Fe _{0.64} Mn _{0.36}) _{1.00} W _{1.00} O ₄	0.57	
	74.95	14.45	8.90	1.03	99.33	(Fe _{0.61} Mn _{0.38}) _{0.99} W _{1.00} O ₄	0.62	
	76.43	15.26	8.58	0.18	100.45	(Fe _{0.64} Mn _{0.37}) _{1.01} W _{1.00} O ₄	0.56	
SJ96110-18(3)	76.35	14.79	9.53	0.18	100.85	(Fe _{0.61} Mn _{0.39}) _{1.00} W _{1.00} O ₄	0.64	
	74.40	14.35	8.17	0.53	97.45	(Fe _{0.63} Mn _{0.36}) _{0.99} W _{1.00} O ₄	0.57	

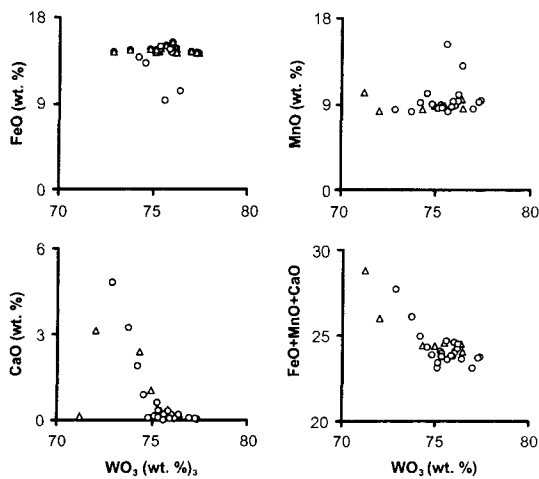


Fig. 8. Diagrams of WO₃ versus FeO, MnO, CaO and FeO+MnO+CaO of wolframite from the Shizhuyuan deposit. circles; Skarn stage, triangles; Greisen stage.

wt.%, S; 0.04~0.93 wt.% 및 Se; 0.04~0.41 wt.% 이고, 그라이젠 시기에 Bi; 98.80~99.07 wt.%, Te;

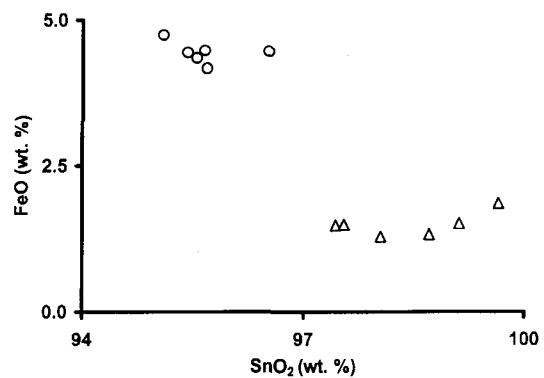


Fig. 9. Diagram of SnO₂ versus FeO of cassiterite from the Shizhuyuan deposit. circles; Skarn stage, triangles; Greisen stage.

0.40~0.66 wt.%, Cu; 0.32~0.36 wt.%, S; 0.09~0.10 wt.% 및 Se; 0.27~0.28 wt.%이다(Table 4). 본 광상에서 산출되는 자연광연은 소량의 Cu, Se 및 Te가 치환되었을 뿐 거의 순수한 자연광연이다.

Table 3. Electron microprobe analyses of cassiterite from the Shizhuyuan deposit.

Sample No.	SnO ₂	FeO	Total (wt.%)	Structural formulas	Stage
SJ96111-2(1)	95.45	4.35	99.89	(Sn _{0.91} Fe _{0.09}) _{1.00} O ₂	Skarn
	96.52	4.46	100.98	(Sn _{0.91} Fe _{0.09}) _{1.00} O ₂	
	95.65	4.48	100.13	(Sn _{0.91} Fe _{0.09}) _{1.00} O ₂	
	95.09	4.75	99.84	(Sn _{0.91} Fe _{0.09}) _{1.00} O ₂	
SJ96111-2(2)	95.68	4.17	99.85	(Sn _{0.92} Fe _{0.08}) _{1.00} O ₂	Greisen
	95.42	4.44	99.86	(Sn _{0.91} Fe _{0.09}) _{1.00} O ₂	
	99.65	1.86	101.51	(Sn _{0.92} Fe _{0.04}) _{0.96} O ₂	
SJ96115-7(1)	97.44	1.49	98.93	(Sn _{0.98} Fe _{0.03}) _{1.01} O ₂	Greisen
	97.55	1.50	99.05	(Sn _{0.98} Fe _{0.03}) _{1.01} O ₂	
	98.05	1.30	99.35	(Sn _{0.99} Fe _{0.03}) _{1.00} O ₂	
SJ96115-7(2)	99.12	1.52	100.64	(Sn _{0.98} Fe _{0.03}) _{1.01} O ₂	Greisen
	98.71	1.34	100.05	(Sn _{0.99} Fe _{0.03}) _{1.00} O ₂	

Table 4. Electron microprobe analyses of native bismuth from the Shizhuyuan deposit.

Sample No.	Bi	Te	Cu	S	Se	Total (wt.%)	Stage
SJ96110-16(1)	99.08	-	0.29	0.93	0.33	100.63	Skarn
	99.74	-	0.06	0.14	0.04	99.98	
	99.29	0.12	0.31	0.04	0.09	99.85	
	97.48	0.34	0.20	0.11	0.24	98.37	
SJ96110-16(2)	98.71	0.29	0.29	0.13	0.41	99.83	Skarn
	97.85	0.47	0.48	0.16	0.22	99.18	
	98.80	0.40	0.36	0.09	0.27	99.92	
SJ96110-18	99.07	0.66	0.32	0.10	0.28	100.43	Greisen

Table 5. Electron microprobe analyses of unidentified Bi-Te-S minerals from the Shizhuyuan deposit.

Sample No.	Bi	Te	Cu	S	Se	Total (wt.%)	Bi+Cu	Te	S+Se	Stage
SJ96110-16	78.62	14.76	0.12	5.68	0.63	99.81	4.35	1.16	1.78	Skarn
	80.75	12.30	-	6.84	0.57	100.46	4.46	0.96	2.14	
	78.89	12.26	0.37	5.80	0.63	97.95	4.37	0.96	1.82	
	79.61	13.43	0.19	6.09	0.44	99.76	4.40	1.05	1.91	
	80.07	12.37	0.42	5.85	0.78	99.49	4.43	0.97	1.83	

5.5. 미확인 Bi-Te-S계열 광물

EPMA의 분석결과에 의한 미확인 Bi-Te-S계열의 화학조성은 Bi; 78.62~80.75 wt.%, Te; 12.26~14.76 wt.%, Cu; 0.00~0.42 wt.%, S; 5.68~6.84 wt.% 및 Se; 0.44~0.78 wt.%이다(Table 5). 이 분석결과를 Bi-Te-S 삼각도표(Fig. 10)에 도시하여 보면 이 광물은 그루엔링자이트(gruenlingite, Bi_4TeS_3)의 주변 영역에 도시되고 있으나, 시죽원 광상에서 산출되는 Bi-Te-S계 광물은 Bi가 다소 부족되고 S가 결여된 상태를 보인

다. 따라서 이 광물은 Bi_2S_3 - Bi_3Te_2 사이의 고용광물인 그루엔링자이트이거나 새로운 광물일 가능성이 있다고 생각된다.

6. 고 찰

시죽원 W-Sn-Bi-Mo 광상은 쥬라기의 중-조립질 혹은 운모 화강암과 관련된 스카른 및 그라이젠 광상으로 알려진 중국의 대표적인 광상이다. 본 광상은 스카른 시기, 그라이젠 시기 및 이를 절단하는 열수시기 등 다양한 시기의 광화작용이 관찰되고 있다. 스카른 광상은 화강암의 관입체 주변부로부터 자철석-휘석-석류석대, 휘석-석류석대, 베수비아나트-석류석대 및 스카른화 대리암으로 나뉘는 스카른대가 형성되어 있고, 이후에 균열대 및 단층대를 따라서 산성의 잔류 광화용액이 관입하여 그라이젠 맥을 형성하고 있다. 특히 이 광상의 W, Sn, Bi 및 Mo 광물은 스카른화작용과 밀접하게 산출되는 것으로 보고되어 있으나 본 조사에 따르면 스카른 시기에도 산출은 되지만 스카른 후기에 관입된 그라이젠과 밀접하게 관련되어 산출되고 있다. 화중석, 철망간중석, 휘창연석, 휘수연석, 석석 등에 대한 산출빈도는 스카른 광화기에도 산출되나 그라이젠 시기에서 높은 빈도를 보이고 있다. 미확인 희토류 광물과 미확인 우라늄 광물은 그라이젠 시기에서만 산출되며 Bi-Te-S계 광물은 스카른 시기에서만 산출된다. 즉 스카른

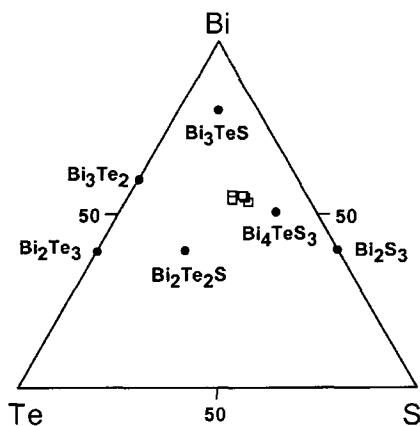


Fig. 10. Triangular diagram of the system Bi-Te-S, showing the compositions of natural and synthetic phase (closed circles), together with that of "unidentified Bi-Te-S series mineral" (open quadrangles) from the Shizhuyuan deposit.

시기에서는 주로 W-Bi 광석이 산출되며 그라이젠 시기에는 W-Sn-Bi-Mo, 미확인 희토류 광물 및 미확인 우라늄 광물의 산출이 많은 특징을 보이고 있다.

회중석의 화학조성을 고찰해 보면, 일반적으로 그라이젠 맥에서 산출되는 것이 WO_3 함량이 낮다. 한편 MoO_3 함량은 그라이젠 시기에서 높게 나타내는데, 이는 이시기에 Mo가 풍부하였을 가능성을 시사하는 것이다. 회중석, 철망간중석 및 석석 등을 분석하여 보면, 이들에 함유된 FeO 함량은 스카른 시기에서 다소 높게 나타나고 있다. 한편, Yin *et al.*(2000)은 스카른 분대를 나누면서 화강암체 주변에는 안드라다이트가 주로 산출되고 외곽부에서는 그로슬라가 주로 산출된다고 보고하고 있다. 일반적으로 염기성환경에서 안드라다이트가 쉽게 형성되고 산-중성환경에서 그로슬라가 형성되는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 광상은 스카른 초기에는 pH가 낮은 조건의 환경에서 광물들이 침전되고, 후기로 갈수록 pH가 다소 높은 조건이었을 것으로 생각된다. 특히 이 지역의 석회암내 철과 알루미늄의 함량이 높지 않기 때문에 스카른 분대와 광물들의 화학조성에 근거로 한다면 회중석, 철망간중석 및 석석내에 함유된 Fe 성분이나 석류석 중에 함유된 Fe 성분은 광화유체 중에 부화되어 있던 Fe가 석회암과 반응하는 동안 스카른 시기에 만들어지는 광물 중에 농축되었을 가능성이 높다.

이 지역의 주 광화작용은 갱내에서 관찰되는 화강암과 스카른대 및 그라이젠 맥과의 접촉대의 상호관계에서 그 관계를 볼 수 있을 뿐만 아니라 Yin 등(2002)이 제시한 연대측정의 결과로도 그 관계화성암을 밝힐 수 있다. 특히 스카른 시기의 광체는 그라이젠맥에 의하여 절단되어 있고, 두 시기의 산출광물이 다소 차이를 보이고 있다. 따라서 갱내지질조사, 광물조합 및 연대측정 등의 결과를 검토하면 149 Ma경에 관입한 중-조립질 흑운모화강암과 관련된 스카른 및 그라이젠 광화작용으로서 그 광종이 W, Sn, Bi, Mo 등 다양하다.

이상의 결과를 토대로 본 광상의 광화작용을 검토하여 보면, 스카른, 그라이젠 및 열수시기로 나뉘며, 이들은 쥬라기 및 백악기의 화강암류와 관련되어 있다. 주된 W-Sn-Mo-Bi 광화작용은 그라이젠 시기와 관련되어 있다.

7. 결 론

1. 시죽원 다금속광상의 주변지질은 원생대의 변성 퇴적암, 테본기의 탄산염암, 쥬라기의 화강암류 및 이

를 관입한 백악기의 화강반암과 염기성암류로 구성되어 있다.

2. 이 광상은 천리산 화강암복합체와 테본기 탄산염암의 접촉대에서 산출되는 스카른 및 그라이젠 광상이다.

3. 이 광상의 광화작용은 3개의 시기로 나뉜다. 스카른 시기는 산출된 광석광물과 스카른 광물은 회중석, 철망간중석, 석석, 휘수연석, 휘창연석, 자연창연, 미확인 Bi-Te-S계 광물, 석류석, 휘석, 베수비아나이트, 규회석, 각섬석, 형석, 석영, 녹염석 등이고, 그라이젠 시기에는 회중석, 철망간중석, 석석, 휘수연석, 휘창연석, 자연창연, 미확인 희토류광물과 우라늄광물, 석영, 운모류 광물, 황옥, 녹니석, 전기석 등이 산출된다. 열수 시기에는 황철석, 황동석, 석영, 장석 등이 산출된다.

사 사

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비(KRF-99-015-DI0108)에 의해 지원되었으며 이에 감사드린다. 논문에 사용된 EPMA 분석자료는 충남대학교 공동실험실습관에 배치된 JEOL사 JXA-8800R로부터 얻어졌으며, 관련기관에 감사드린다.

참고문헌

- 王聿鳳, 張綺玲 (1988) 柿竹園鎳末地質引論. 北京科學技術出版社, p. 27-62.
- 王昌烈, 羅仕徽, 胥友志, 孫一虹, 謝慈國, 張重銘, 徐文光, 任湘眉 (1987) 柿竹園鎳多金屬 鎳末地質. 地質出版社, 147p.
- 趙水鑫 (1987) 湖南千里山花崗岩地質特徵與成因. 現代地質. 1卷, 3, 4期, p. 357-366.
- 陳駿, C. Halls, C.J. Stanley (1992) 湖南柿竹園鎳鎢鉬鎳鎳末中錫石的產狀與成因. 地質論評, 38卷, 2期, p. 164-172.
- 毛景文, 李紅艷, 袁繁富 (1995) 湖南千里山花崗岩體的 Nd-Sm同位素及岩石成因研究. 鎳床地質, 24卷, 3期, p. 225-242.
- Xiao, M (1989) Sulfur isotopic geochemistry of Shizhuyuan deposit. Miner. Resour. Geol., v. 3, p. 67-75 (in Chinese with English Abstract).
- Yin, J.W., Lee, H.K., Choi, K.K., Kim, S.J. (2000) Characteristics of garnet in Shizhuyuan skarn deposit, Hunan Province. Earth Sci., v. 25, p. 163-171 (in Chinese with English Abstract).
- Yin, J.W., Kim, S.J., Lee, H.K., Itaya, T. (2002) K-Ar ages of plutonism and mineralization at the Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo deposit, Hunan Province, China. Journal of Asian Earth Sciences, v. 20, p151-155.