

극동 러시아 프리모리주 보즈네센스카 광화대 특성

이재호* · 김인준

한국지질자원연구원

Review of the Characteristics of Voznesenska Mineralized Zone in the Primorskii Krai, Russian Far East

Jae-Ho Lee* and In-Joon Kim

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 305-350, Korea

1. 서 론

최근까지 프리모리주(Primorskii Krai)는 유라시아 대륙-태평양 전이대의 특정 지질 환경을 반영하는 Sikhote-Alin 지향사계의 일부분이라고 생각되어 왔으나, 판구조론의 현대적 관점에 따르면, 프리모리주와 인근 동해, 쿠릴(Kuril) 및 일본 열도는 유라시아 대륙과 태평양판 사이의 전이대의 일부에 해당하는 것으로 알려져 있다.

프리모리주는 면적이 165,000 km²로, 갈탄을 비롯한 Pb-Zn, Sn, W, F, B, Ag, Au, Ge, graphite, vermiculite, 보석류 및 석재 등 다양한 유망 광물자원들이 분포한다. 프리모리주는 러시아 극동지역 중에서 유망 광물자원의 확보를 위해 높은 탐사비를 지출하고 있으며, 100년 여 동안 1:200,000 도폭기준의 지질 조사가 수행되었고, 1:50,000에 대한 지구물리 및 지화학 탐사가 수행되어 왔다. 이로 인해 기반시설 등은 발전하였으나 광물자원의 고갈 및 환경파괴가 발생하였다.

현재 가행 중인 주요 광물자원은 (1) Bikinsk의 발전용 석탄, Pavlovsk 갈탄 및 Lipovechik vituminous coal 광상 (2) Dalnegorsk borosilicate 광상 (3) Dalnegorsk 광상지역의 skarn은 및 다중금속광상 (4) W광상(Au-Ag와 산출되는 skarn 회중석): Lelmontovsk 및 Vostok-2 광상 (5) Pogranichny 및 Voznesensk complex의 fluorite와 희유금속광상 (6) Spassk와 Dlinnogorsk cement광상 등이다. 그 외에 사금광상, zeolite, 석재, bentonite, 광천지하수 등이 분포한다. 최근에는 Ge정

광, 금광석, vermiculite 및 ilmenite정광에 대한 생산을 계획하고 있다. Sn 광상의 발달로 유명했던 Kavalerovsk지역에 대한 개발은 2001년에 중단된 상태이다.

프리모리주의 광물자원에 대한 개발 구조는 전통적으로 갈탄이 40-45%, 비철금속 및 희유금속이 20-25%, 비금속이 12-15%이다. 금(Au)과 은(Ag)은 10% 미만, 광천수는 7%, 그리고 기타 광물은 3% 정도이다.

프리모리주에서 광물자원의 개발을 통해 매년 얻어지는 수익은 100-120 억 루블(약 35-43백만 달러)로 이는 주 총 생산량의 8-10%에 해당된다. 관련업계에 종사하는 노동자는 약 35,000 명 정도인 것으로 파악되고 있다. 프리모리주의 많은 지역 특히 북부에서는 광업이 주요 경제·사회적 요인이다. 러시아 전체로는 광물자원의 개발사업이 축소되고 있으나 주에서는 아직 높은 비중을 차지하고 있으며, 가장 큰 광업회사인 프리모리 광업회사는 100%의 Boron 광물, 80%의 형석(fluorite), 50%이상의 Pb-Zn과 80%이상의 W를 생산하고 있다.

본 해설에서는 2005 년도에 현장 조사한 프리모리주의 보즈네센스카 광화대에 발달·분포하는 광상의 특성에 대하여 소개하고자 한다.

2. 보즈네센스카 광화대

프리모리주 남서쪽에 위치하는 보즈네센스카 광화대(Fig. 1)의 주요 산출 광물은 형석을 비롯하여 주석과

*Corresponding author: jhlee@kigam.re.kr

희유금속으로, 형식은 Be, Rb, Li, Cs과, 아연광은 Mo, In, Au 및 Ag와, 주석은 W, Be, U과 밀접히 연관되어 산출된다.

2.1. 지질개론

보즈네센스카 광화대는 Paleozoic 비활동형 대륙연변부 및 광역적으로 발달하는 Lower Cambrian의 육성기원암과 탄산염암으로 구성된 혼합지층에서 발달한다. 광화대의 서쪽 경계는 Silurian의 metagranite (Grodekovo Complex)로 구성된 커다란 저반의 접촉부를 따라 연장된다. Ilistaya강 계곡을 따라 나타나는 단층이 동쪽 경계를 이루며, 남북의 경계는 Mesozoic 및 Cenozoic의 분지를 이루는 두꺼운 탄층아래 묻혀있다.

보즈네센스카 광화대의 층서는 교호하는 육성기원암

과 탄산염암으로 특징된다. 퇴적암은 북서 주향의 배사 및 향사구조를 보여주며, 북동 주향으로 역전되어지기도 한다. 발달하는 단층은 3 그룹으로 세분되는데, 조산 활동시 발달한 첫째 그룹은 NW 주향의 드러스트와 역단층으로 구성된다. 둘째 그룹은 조산 활동 이후에 발달한 Paleozoic의 주향이동 단층 및 역단층으로 구성되며, 북동, 남북, 동서의 주향을 갖는다. 이들은 습곡대와 사교하거나 횡단하며 이에 속하는 동 및 서 단층은 광화대의 경계를 이룬다. 광화대 중앙에 위치하는 보즈네센스카 단층은 Silurian기의 반려암, 섬록암, 섬장암 및 화강섬장암질 반암 관입체의 belt를 통제한다(Fig. 1). 세 번째 그룹은 Mesozoic 및 Cenozoic에 발달한 단층군이다. 뚜렷이 나타나는 단층과 달리 발달하는 열극대는 화성암 분포 및 광화작용과 밀접한 관련성이 있는 것으로 알려져 있다(Ryazantev, 1973).

광화대 내에서 알려진 심성암 복합체는 다음과 같다: Cambrian-Ordovician 반려암 및 pyroxenite, 희유금속을 포함하는 화강암과 우백질 화강암으로 구성된 Ordovician의 보즈네센스카 복합체, Silurian의 반려암-몬조니암-섬장암, Grodekovo 화강암 복합체, Late Paleozoic의 Gngorevka 화강암 복합체.

대표적 암석의 화학분석 값은 Table 1과 같다 (Ryazanteva et al., 1994).

Early Paleozoic gabbro-pyroxenite 복합체는 광화대의 남부에서 소규모의 관입체로 구성되며(Fig. 1), Lower Cambrian의 퇴적암내에서 발달하여 Silurian의 Grodekovo 복합체의 화강암에 의해 절단된다. 반려암질 암석은 칼크-알카린 계열이며, pyroxenite는 반려암화되는 소규모 암체로 나타난다.

Silurian gabbro-monzodiorite 관입체는 보즈네센스카 광화대를 다른 두개의 층서로 분리하는 북서 단층에 의해 통제된다(Fig. 1). 관입체의 알카리도(alkalinity)는 북서쪽으로 갈수록 증가되어 관입대의 북쪽 끝에서만 monzodiorite가 발견된다.

*충돌(collision)과 관련된 Silurian 화강암(Grodekovo 저반)*은 광화대 서부에서 나타난다. 수많은 편마암 및 변성 편암의 잔존하는 지괴들이 화강암에서 나타나며, Migmatite와 화강암질 편마암은 화강암과 잔존하는 주변 암석 사이 접이대에서 발달하고, 화강암 자체는 외형상으로 편리를 보여준다. 화강암은 3 종류로 대별된다: (1) 중립 및 조립질 흑운모 화강암, (2) 세립질의 우백질 화강암 (3) 각섬석-흑운모 화강암.

*Ordovician 보즈네센스카 복합체*는 흑운모 화강암과 우백질 화강암으로 구성된다. 흑운모 화강암은 소규모

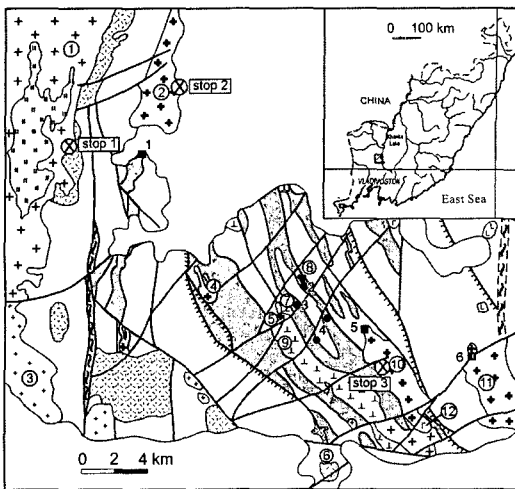


Fig. 1. Geological map of the Voznesenska ore district (from Ryazantseva, 1992). (1) Cenozoic basins; Lower Cambrian (2) terrigenous and (3) carbonate rocks; (4) Precambrian and Cambrian metamorphic rocks in the roof of Silurian (Gro-dekovo) granite; (5) Neogene basalt; (6) Devonian volcanic rocks; (7) Devo-nian(Grigor'evka) granite; (S) Silurian(Grodekovo) granite; (9) Silurian gabbro, diorite, and monzodiorite; (10) Ordovician (Yaroslavsky) granite; (11) Ordovician (Voznesenska) biotite-protolithionite granite; (12) Cambrian gabbro; (13) fault; (14) fluorite (a) and tin (b) deposits (numerals in the figure): 1-Pervomaisky, 2-Pogranichny, 3-Voznesenska, 4-Lagemy, 5-Yaroslavsky, 6-Chapaevsky. Plutons(numerals in circles): (1) Grodekovo, (2) Pervomaisky, (3) Grigor'evka, (4) Pology, (5) Savchenkov, (6) Boikovskiy, (7) Voznesenska, (8) Pogranichny, (9) Moskalenkovskiy, (10) Yaroslavskiy, (11) Chikheza (12) Chapaevskiy.

Table 1. Representative chemical composition (wt %) of granite from the Voznesenska ore district.

	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	74.39	71.69	72.02	73.82	70.79	74.68
TiO ₂	0.11	0.25	0.21	0.16	0.03	0.19
Al ₂ O ₃	13.29	14.49	14.88	13.54	16.30	14.24
Fe ₂ O ₃	0.81	0.71	0.65	0.65	0.58	0.00
FeO	0.64	0.72	0.64	0.64	0.54	0.97
MnO	0.00	0.06	0.05	0.04	0.02	0.02
MgO	0.32	0.52	0.31	0.20	0.49	0.10
CaO	0.89	0.72	0.30	0.42	0.56	0.14
Na ₂ O	2.99	2.98	3.24	3.89	5.43	4.67
K ₂ O	4.83	5.26	4.47	4.56	2.72	4.25
P ₂ O ₅	0.13	0.18	0.17	0.08	0.04	0.02
LOI	-	-	-	-	0.92	-
H ₂ O ⁺	1.22	1.76	1.50	1.82	-	0.43
H ₂ O ⁻	0.10	0.00	0.00	0.00	-	0.06
F	0.01	0.64	0.23	0.08	1.45	0.30
Total	99.73	99.98	99.67	99.90	99.87	100.07
O=F2	-	0.27	0.10	0.03	0.61	0.13
Total	99.73	99.71	99.57	99.87	99.26	99.94

Note : (1) Silurian (Grodekovo) collision-related granite (Stop 1); (2) Ordovician intraplate biotite granite; (3) Ordovician intraplate biotite granite (Yaroslavsky pluton, Stop 2); (4) Ordovician intraplate biotite granite (Chikheza pluton); (5) Ordovician intraplate granite (Voznesenska pluton, Stop 3); (6) Ordovician intraplate granite (Pogranichny pluton, depth of 1,200 m).

(8-12 Km²)로 산출되는 중립질 화강암으로 종종 반상의 전기석을 함유하기도 한다. Lower Cambrian의 육성기원암과 탄산염암은 이들 화강암과의 접촉부에서 변성되며, 석회암은 스카르화되어 형석이 배태되기도 한다. 육성기원암은 전기석을 함유하는 hornfel로 변성된다. 화강암은 거대한 3개의 심성암체(Yaroslavsky, Chikheza, Pervomaisky)와 기타 작은 암체로 구성된다(Fig. 1). 흑운모 화강암의 성분은 다음과 같다: K-feldspar(45%), 석영(30%), 정장석 및 조장석-정장석(25%), 흑운모(2-5%). 전기석은 Yaroslavsky와 Pervomaisky에서만 산출되고, 저어콘, 인회석, 금홍석, 알라나이트(allanite), 모나자이트(monazite), 주석석, 형석, 전기석 및 자철석 등이 부속광물로 산출된다. 화강암은 820-2,600 ppm의 F와 200-300 ppm의 Li를 포함한다.

흑운모-프로토티티오나이트(protolithionite) 우백질 화강암은 강하게 그라이젠(greisen)화된 부분과 함께 소규모 관입체로 지표에서 나타난다. 보즈네센스카 및 Pogranichny 관입체는 레피돌라이트(lepidoilite) 및 항목을 포함하는 Li-F 화강암으로 구성된 거대한 심성암이다. Pogranichny 관입체 암체의 우백질 화강암은 폭 50-300 m, 연장 0.8 Km로 북서쪽에 나타난다. 동쪽 100 m와 서쪽 300 m 심부에서 관입체는 넓어지며 접촉부는 완만한 경사를 갖는다.

접촉교대 변질 작용의 초기 단계는 조장석화 작용,

topaz 그라이젠(greisen)의 형성, 탄탈라이트(tantalite)-콜롬바이트(columbite)-스트루버라이트(striiverite)의 침전 및 초기 주석석 광화작용이 발생하였다. 후기 단계는 세립의 황옥-석영, 백운모-석영 및 형석-황옥-석영 그라이젠이 형성되었다. 지역적으로 주석석과 철망간중석이 부화된다. 육성기원암은 그라이젠화 되었으며, 탄산염 층은 운모-형석 교대암으로 변질되었다.

2.2. Ordovician 화강암과 관련된 광화작용

철망간중석을 함유하는 주석석-석영 및 주석석-규산염-황화광물 백상 광상은 Ordovician 흑운모 화강암과 관련되며, 광화작용은 강력한 황옥화작용과 산재하는 Be 광물 및 형석의 침전을 수반한다.

*Chapaevsky W-Sn 광상*은 공간적으로 Chikheza 심성암과 관련된다. 석영맥에는 주석석, 철망간중석, 베릴 및 그라이젠 작용에 의한 주석석 광화작용이 나타난다.

*Yaroslavsky 주석 광상*은 전기석화된 흑운모 화강암으로 구성된 심성암과 관련된다. 광상은 Lower Cambrian 석회암과 점판암과 교호하는 사암으로 구성된 배사층에 위치한다. 습곡은 광체의 공간적 분포 뿐 아니라 화강암, microdiorite 및 diorite 암맥의 분포를 관장하는 NW, NS, NNE 주향의 단층에 의해 절단된다. 석회암은 광화작용의 주요 모암이다. 광체는 4개의

형태로 발달하는데, (1) 주석-석영-전기석을 함유하는 변질암으로 둘러싸여 있는 급경사의 두꺼운 석영맥과 이를 절단하는 후기 전기석-형석맥, 소량의 황화물을 함유하는 전기석-주석석-석영맥 및 황화물-석영맥, (2) 배사구조의 정부에 위치하는 skarn과 석회암을 모암으로 하는 석영-전기석을 함유하는 완만한 경사의 교대 광체, (3) 사교 열극과 관련되고 석회암, 점판암, 사암을 교대하는 규화된 석영-전기석 교대암으로 구성된 급경사의 맥상 광체 그리고 소량의 황화물을 함유하는 전기석-주석석-석영맥, 그리고 (4) 전기석-주석석-석영 광석이 수반하는 산화된 석영-황화물-주석석 맥으로 구성된다. Al-Si 암석의 강력한 전기석화작용, 탄산염암의 스카르화 그리고 형석에 의한 교대작용이 광물침전에 앞서 발생하였다.

Pervomaisky 주석 광상은 보즈네센스카 광화대의 서쪽부에 위치하며, Ordovician 흑운모 화강암에 의해 관입되는 Lower Cambrian 탄산염암에서 발달한다. 망상구조의 광상은 공간적으로 주석석-전기석-형석 및 주석석-황화물 광화작용으로 대별된다.

Ta-(Nb) 광상은 희유금속이 함유된 보즈네센스카 화강암과 관련된다. Ta 광화작용은 초기 자교대(auto-metasomatic) 단계에 발생하였고, 초기 황옥 그라이젠을 수반한다. 희유금속-형석 광화작용은 화강암내 후기의 선상 그라이젠대(greisen zone)와 석회암을 교대하는 특정 그라이젠과 관련된다.

스트루버라이트(struverite)-탄탈라이트(tantalite)-콜롬바이트(columbite) 형의 Ta-(Nb) 광화작용은 희유금속-황옥-디티오나이트(lithionite)-조장석 화강암으로 구성되는 Pogradichny 및 보즈네센스카 심성암과 관련된다. 조립질(0.03-0.05 mm)의 탄탈라이트(tantalite)-콜롬바이트(columbite), 스트루버라이트(struverite) 및 극히 소량의 미크롤라이트(microlite)는 주석석과 함께 그라이젠화된 우백질 화강암내에 광염상으로 분포한다. 상부에서는 가장 많은 struverite가 산출되고, 가장 높은 Ta/Nb비(1:3내지 1:1)를 보여주는 탄탈라이트(tantalite)-콜롬바이트(columbite)가 산출된다. Tantaloniobate의 분포 특성, 결정질 황옥과의 체계적인 공간 연관성 및 이들 광물의 조합 및 불연속적인 세맥의 발달은 Ta-Nb 광화작용이 교대작용에 의해 발달하였으며, 초기 황옥 그라이젠기에 형성되었음을 지시한다(Rub, 1980).

보즈네센스카 광화대내 형석 광화작용은 화강암에서 교대 광맥 및 망상 형태로 탄산염암(때때로 화강암)을 모암으로 하는 희유금속-형석 형으로 발생한다(Ryazantseva and Shkurko, 1992). 모암은 skarn화,

그라이젠화, 장석화 및 전기석화 작용에 의해 영향 받았다. Be 광화작용은 형석을 수반한다.

Voznesenska 광상지대(ore field)는 Voznesenska, Pogradichny 및 Lagerny 희유금속-형석 광상 그리고, Nagorny와 Ovrzhny 부존유망지역으로 구성된다(Fig. 2). 이 지역은 NW방향으로 연장된 비대칭의 향사에 위치하며, 지표에서 폭이 1.5-2.0 Km로 10 Km까지 확인가능하다. 향사는 Lower Cambrian 석회암과 점판암으로 구성된다. Voznesenska 광상은 향사의 서쪽 급경사의 날개부에 위치하며, Pogradichny 광상은 상대적으로 완만한 동쪽 날개부에 위치한다. Lagerny 광상은 양 날개부에 걸쳐 발달한다. Voznesenska 드러스트 단층과 Pogradichny 역단층은 각각 W와 E에서 광상지대의 경계를 이룬다. 희유금속을 함유하는 화강암은 NW 방향으로 연장된 좁은 관입체로 노출된다. Voznesenska와 Pogradichny 광상의 화강암체는 심부 800-1,200 m에서 단일 암체로 통합되어 넓어진다.

Voznesenska 광상지대의 희유금속-형석 광상과 부존유망지역은 운모-형석형이며, Pogradichny 광상만이 황옥-형석 광맥형이다(Ryazantseva and Shkurko, 1992).

2.3. 주요 광상

2.3.1. 보즈네센스카(VOZNESENSKA) 광상

광상은 Lower Cambrian의 역청을 함유하는 석회암(Volkusha Formation)을 모암으로 Voznesenska 향사의 남서부의 날개부에서 발달한다(Figs. 2 and 3). 광상의 동쪽은 Kovalenkov Formation의 점판암과 석회암의 접촉부를 경계로 한다. 서쪽 경계는 Voznesenska 드러스트 단층을 따라 나타난다.

희유금속을 포함하는 반상 화강암은 광상의 북부 측면에서 좁은 암맥형의 관입체로 나타난다. 중앙부에서의 화강암은 500 m 심부에서 발달하며, 점진적으로 남쪽 측면을 향해 100 m 심부까지 상승 분포한다. 형석을 함유하는 석영-운모와 석영-황옥 그라이젠으로 변성된 수많은 화강암체는 광체내에서 발달한다. 심성암체의 정상부 또한 그라이젠화된 반면, 화강암은 심부에서 조장석화작용을 겪었다. 많은 중성 및 염기성 암맥이 분포한다(Androsova and Ryazantseva, 1992).

광상은 석회암을 모암으로 그 주향과 일치하는 NS 방향으로 1.5 Km의 연장성을 보여주며, 화강암질 심성암체의 상부에서 발달하는 완경사의 성층 광체와 수직의 주상 광체의 혼합형으로 폭은 약 500 m에 이른다. 광상은 역단층과 횡단층에 의해 3 개 블록으로 대별된다. 중앙 블록에는 주 광체가 수직 주상형으로, 평면도

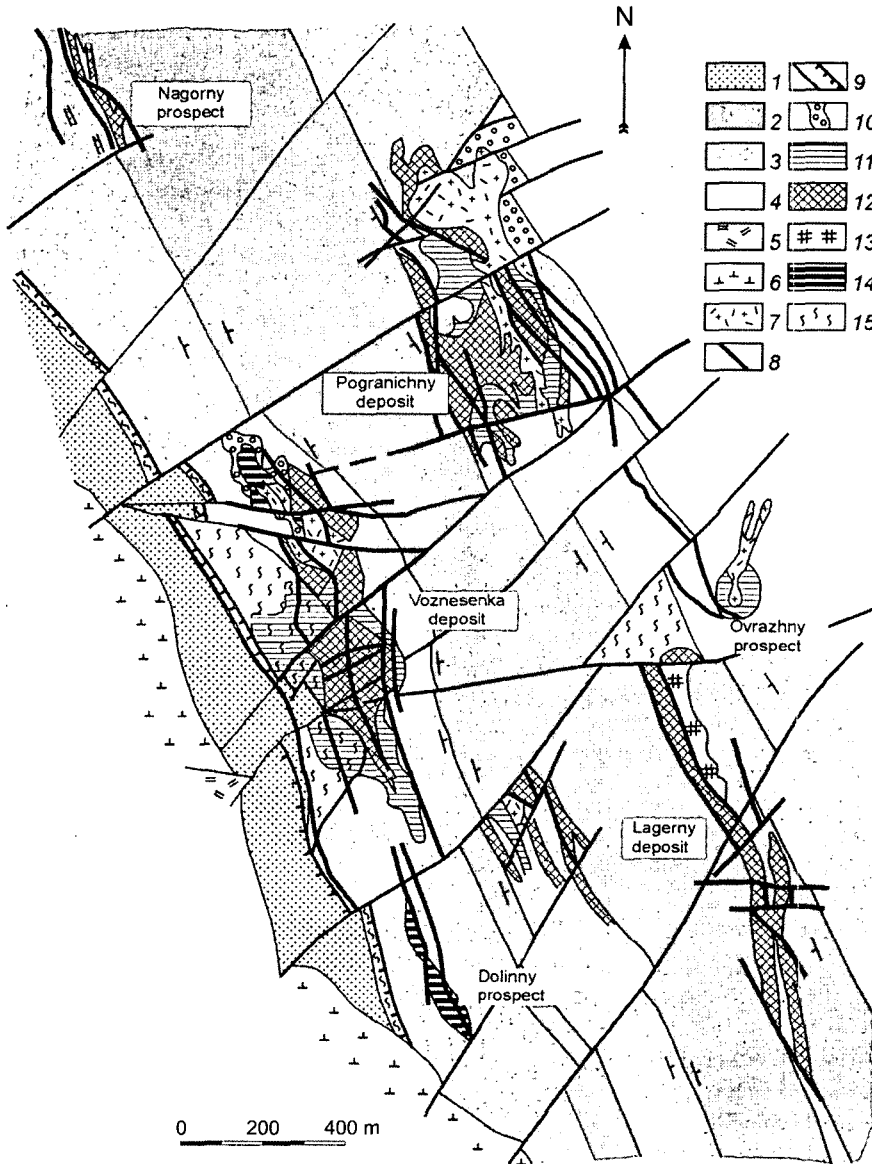


Fig. 2. Schematic geological map of the Voznesenska ore field(from Ryazantseva, 1992). (1) siltstone; (2) quartz-sericite slate; (3) limestone, (4) graphite schist; (5) granite porphyry; (6) Silurian diorite and monzodiorite; (7) Ordovician greisenized granite; (8) basic and intermediate dikes; (9) faults; (10) skarn; (11) fluoritized limestone; (12) fluorite ore; (13) zone of quartz-topaz veinlets with wolframite and cassiterite; (14) base-metal ore; (15) tectonite

에서는 타원형이나 단면상에서는 파이프상으로 발달하고 있다. 동서의 성층 광체는 화강암과의 접촉부에 가까운 북부 블록에 위치한다. 섬아연석 및 자철석 스카른은 화강암으로부터 형성 광체를 분리한다. 남부의 블록에는 수직의 교대 광맥이 존재하지만 뚜렷한 경계를 알 수 없고, 약 20 wt %의 CaF_2 를 포함하는 것으로 알려져 있다.

다양한 조성과 조직을 보여주는 광석들이 존재한다 (Kuprianova and Shpanov, 1997).

광상에는 진한 회색에서 검정색을 띠는 괴상 및 기포상의 변질 탄산염 광물(*apocarbonate ore*)이 우세하게 산출된다. 주요광물로는 형석을 비롯하여 Li-백운모 및 백운모, 조장석, 전기석, 페네카이트(phenakite), 에페사이트(ephesite), 방해석, 돌로마이트 및 셀라이트



Fig. 3. A photograph of the Voznesenska fluorite deposit.

(sellaite) 등이 형석 입자사이를 충전하며 산출된다. 고대작용에 의해 조직의 파괴 없이 성분만이 변화된 skarn 광석(*apokarn ore*)은 광상의 북쪽 측면과 화강암질 심성암체에 가까운 심부에서 산출된다. 황화물을 포함하는 세립의 운모-형석 광석은 연한 회색, 연두색 또는 옅은 자색의 혼펠스 같은 암석 형태로 산출된다. 형석의 평균 품위는 약 35%이며, 황철석, 유비철석과 섬아연석이 세립의 광염상으로 산출된다(Kupriyanova and Shpanov, 1997). 광상의 중앙부에서는 조장석-석영-운모로 충전된 각력형 광석(*breccia-type ore*)이 발달한다. 서로 다른 형태의 형석 광석에 대한 화학 조성은 Table 2와 같다.

광상에는 3 개의 주요 광물군이 인지된다; (1) 형석 세맥 및 광혈(*pocket*)로 이루어진 형석-조장석군, (2) 백운모-조장석-형석군, (3) 백운모-형석군. (2)과 (3)군은 *breccia-type* 및 *apocarbonate* 광석에 풍부하게 산출된다. 전기석, 황옥, 셀라이트(*sellaite*), 방해석, 피네

카이트(*phenakite*) 및 크리소베릴(*chrysoberly*)이 산출된다.

2.3.2. POGRANICHNY 광상

광상은 보즈네센스카 광상의 북동쪽 1 Km에 위치하며, Lower Cambrian 석회암을 모암으로 발달한다(Figs. 2 and 4). 퇴적암은 희유금속을 함유하는 보즈네센스카 화강암에 의해 관입된다. 광상은 향사의 날개부를 교차하는 북동부의 정단층과 주향이동단층계에 의해 통제된다. 광상의 지질 경계는 서쪽은 Volkusha Formation의 석회암과 Kovalenkov Formation의 점판암의 접촉부로, 북쪽은 화강암질 심성암의 종단부로, 동쪽은 Pogradichny 역단층으로, 그리고 남쪽은 남부 주향이동단층으로 규정된다. 우백질 화강암은 약간의 침식을 보이며, 지표상에서 NW방향으로 800 m 정도 확인된다. 화강암의 연장 폭은 광상의 남부에서는 30-50 m이고 북부에서는 150-300 m 이다. 화강암은 100-150 m 하부에서는 그라이젠화되었으며, 이는 200-250 m 하부까지 확인된다. 석영-운모, 석영-황옥, 황옥-형석 및 점이적인 그라이젠이 관찰된다. Diorite porphyry 및 *dolerite* 암맥은 단열대에 의해 통제되는 NW방향의 3개 그룹으로써 다량 발달한다.

Pogradichny 광상에서는 운모-형석 및 황옥-형석 광체가 발달한다(Rub, 1980). 운모-형석 광체는 단층뿐 아니라 화강암과 석회암과의 접촉 및 석회암과 상부의 점판암과의 접촉에 의해 결정된다. 광체는 불규칙한 형태의 복잡한 고대 광맥을 형성한다. 관입체와의 접촉부에서 멀어짐에 따라 광맥은 석회암의 층리와 일치하는 성층형이 된다. 광맥의 내부 구조는 복잡하며, 형석

Table 2. Chemical composition (wt %) of mica-fluorite ore from the Voznesenska deposit.

Component	Apocarbonate ore	Breccia-type ore	Aposkarn ore
CaF ₂	32.19	47.16	36.33
CaCO ₃	21.34	4.43	6.93
SiO ₂	19.19	22.23	25.95
Fe ₂ O ₃	0.78	0.95	2.88
Al ₂ O ₃	8.98	12.45	7.39
MgO	8.80	7.52	8.57
BeO	0.15	0.13	0.10
Li ₂ O	0.243	0.496	0.540
Rb ₂ O	0.233	0.364	0.388
Cs ₂ O	0.019	0.025	0.025
K ₂ O	1.94	2.97	3.42
Na ₂ O	0.62	0.65	1.16
S _{sulfide}	0.080	0.041	0.71
S _{Total}	0.098	0.16	0.79

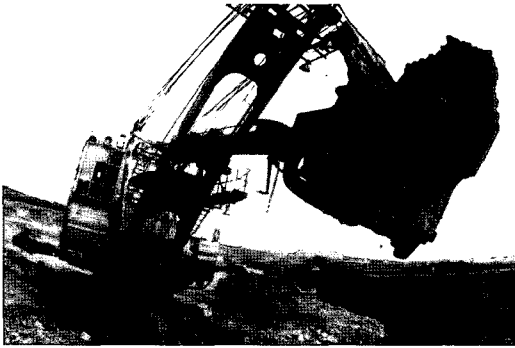


Fig. 4. A photograph of the Pogranichny fluorite deposit.

광석의 교호 발달, 형석이 배태된 석회암 그리고 형석이 배태되지 않은 석회암으로 특징된다. 동쪽 광맥은 얇게, 서쪽 광맥은 두껍게 나타난다. 동쪽 광맥의 형태는 화강암의 접촉 모양에 따라 결정되며, 100 m 하부에서 관입 접촉부는 수직으로 발달하는데 광석은 소멸된다. 서쪽의 교대 광맥은 2 Km 정도 확인되며, 석회암의 층리에 평행한 여러 개의 리본구조를 보여주고, 형석화된 석회암과 형석이 배태되지 않은 석회암이 교호하는 형석 광체로 구성된다. 또한 소규모의 소위 Near-contact 광체와 Substrate 광체가 발달한다.

광상의 운모-형석 광체에는 괴상, 호상, 소규모 안구상 및 각력상 구조가 전형적으로 나타난다.

변질 탄산염 광석은 Voznesenska 광상과 매우 유사하나 주기적인 호상구조와 극세립 조직에서는 차이가 있다. 호상구조는 자색-회색 운모-형석 엽층과 세립의 기포구조를 보이는 크리소베릴(chrysoberyl)-운모 엽층의 교호로 나타난다. 운모는 백운모와 에페사이트(ephesite)이며, 전기석과 유화광물이 산출된다. 각력형 광석은 광상의 대표적 형태로 기포상 및 호상의 운모-형석 광석과 흰색의 화강암의 그라이젠으로 구성된다.

각력들 사이는 세립의 운모-형석으로 충전되어 있다. 조장석화 및 그라이젠화된 화강암에서 산출되는 황옥-형석 그라이젠 광석은 공간적으로 그리고 성인적으로 운모-형석 광석과 밀접히 관련된다. 그라이젠화 작용은 화강암과 주변 암석에 강력한 불소 교대작용을 동반한다. 교대 광맥은 화강암의 정상부에서 치밀하고 불규칙한 형태로 형성되며, NW주향으로 발달하고, 지표에서는 관찰되지 않는다. 황옥-형석 그라이젠은 점진적으로 낮은 품위의 석영-황옥 그라이젠으로 교대된다. 황옥-형석 광석은 흰색으로 자색의 색조를 보인다. 괴상, 호상, 암괴상의 구조로 이루어진 세립 조직이 대표적이다. 형석, 황옥 및 석영이 주요 광물로, 다이아스포어(diaspore)와 엽랍석(pyrophyllite)이 일반적으로 산출되고, 운모는 매우 드물다. 주석석, 철망간중석 및 콜롬바이트(columbite)는 간간이 산출된다. 형석은 불규칙한 광철, 광염 및 세맥으로 산출되고, 황옥과 밀접히 관련되어 산출된다. 형석의 품위는 광맥의 중심에서 가장자리로 갈수록 감소한다.

2.3.3. LAGERNY 광상

광상은 상기의 두 광상의 남쪽에 위치한다. 광체는 보즈네센스카 향사의 양 날개에서 NW 방향으로 석회암과 점판암의 접촉부를 따라 1.5 Km 연장된다. 광체는 성층광체와 망상 광체로 대별된다. 망상의 교대 운모-형석 세맥은 페그마타이트형 석영-사장석 맥, 철망간중석과 주석석을 함유하는 황옥 세맥, 석영-페릴 세맥, 철망간중석과 주석석을 함유하는 전기석-석영 세맥, 석영-형석-전기석, 황화물이 포함된 석영 세맥, 방해석-형석 및 방해석 세맥에 의해 절단된다. 역단층과 주향이동단층은 광상을 여러 블록으로 분리시킨다. 광상에서 발달하는 화강암은 그라이젠화되어 있다.

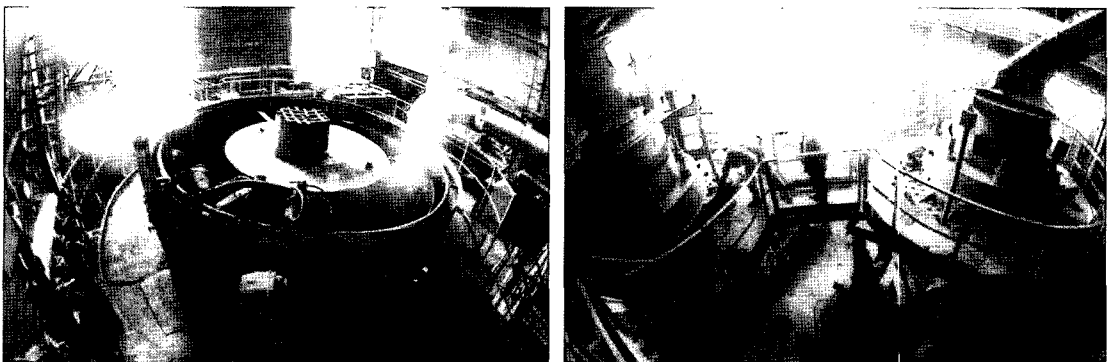


Fig. 5. Photographs of the milling and pneumatic tank flotation machine in the Dressing Complex.

2.3.4. YAROSLAVSKY 광상

2.3.4.1. Yaroslavsky 광업 및 선광단지(Mining and Dressing Complex)

Yaroslavsky MDC는 1950년에 주석공장으로 설립되었다. 그러나 주석의 매장량이 고갈되어 공장이 개조하였고, 1964년에 선광 공장의 첫 생산 공정이 작동하여 형석 정광을 생산하였다. 1989년에 회사는 형석 정광 350,000톤의 최고 생산 실적에 도달하였다. 신기술의 발달, 장비의 현대화 등에 의해 연간 생산량은 1.5 백만톤으로 증가하였다.

Yaroslavsky MDC는 러시아에서 형석 정광의 주요 생산지이다. 생산물은 순도, 습도 및 분급도 등이 세계 표준에 부합한다. MDC에서 생산되는 자원은 러시아 국내 기업의 형석 수요에 50년 이상을 공급할 수 있을 뿐 아니라 수출도 가능하다. MDC는 형석뿐 아니라 아연광, Dachnoye 석회석(2,214 m³), 석재(반려암), 외장재(Tigrovoy 화강섬록암, 7.6 백만 m³), Ta-Nb광 및 희토류-희유금속광(Li, Be, Cs, Rb)을 보유하고 있다.

Yaroslavsky MDC의 광상은 노천채굴로 개발되었다. 암석의 첫 파쇄는 발파에 의해 이루어지고 광석은 1차 분쇄기 및 비축지로 이동되어 300 mm까지의 크기로 분쇄된다. 일일 분쇄량은 약 5,000 톤이다. 이후 광석은 선광공장으로 이동된다. 첫째 공정은 flushing 및 분쇄 공장에서 이루어진다. 광석의 마쇄는 3 단계의 블밀에서 수행된다. 분리기로는 두 대의 나선형 분리기와 hydrocyclone이 이용된다. 또한 러시아 화학기술연구소에서 발명한 flap-type thickener가 사용된다.

Pogranichny와 Voznesenska 광상의 광석은 광물 공생군이 풍부하고 얇은 광염상으로 분포하기 때문에 초미립으로 분쇄되어야 한다. 최대 40 마이크론의 입자 크기를 갖는 광니(pulp)는 20 마이크론 미만의 크기를 갖는 마쇄의 최후 산물이다(70% 중량). 마쇄된 광니는 선광을 위해 부유장으로 이동된다. 교반장에는 많은 시약이 준비되어 있고 형석을 분리하는 가장 효

과적인 분리법이 사용된다. 선광 공정은 부유기에서 수행된다. 92% 및 94% CaF₂를 갖는 부유 형석 정광은 부유정련의 최후 산물이다. 광니의 탈수는 filter drying 공장에서 수행되며, thickening, filtration, thermal drying 등의 3 단계를 걸쳐 1% 미만의 습도를 유지한다.

MDC에서 수행된 형석 정광에 대한 화학 조성은 Table 3과 같다.

2.3.4.2. 형석 광상

광상은 석회암과 점판암을 모암으로 하는 향사에서 발달하며, 노천채굴로 개발되고 있다(Fig. 6). 광상은 이 향사구조를 화강암이 관입함에 따라 화강암 주변에 그라이젠화가 발생하여 광상이 배태된 그라이젠 유형의 광상이다. 광체의 폭은 20-50 m까지 발달하며, 노천채굴 광상이다. 또한, 불소를 함유하는 아연광체도 상당히 발달하고 있으며, 현재 정련을 통한 판매를 계획하고 있다.

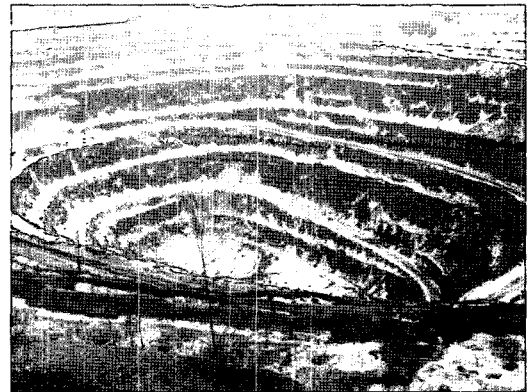


Fig. 6. A Photograph of the Yaroslavsky fluorite deposit.



Fig. 7. A Photograph of representative ore specimens showing occurrence of fluorite (grayish white).

Table 3. Chemical composition of FF-92 fluorite concentrate.

Fluorite(CaF ₂)	min. 92.9%
Silicon Oxide(SiO ₂)	up to 2.5%
Calcium Carbonate(CaCO ₃)	2.5%
Sulfur(S)	0.2%
Lead(Pb)	0.08%
Phosphorous(P)	up to 0.06%
Other Components	2.56%
Moisture	0.1%
Fineness	44 microns

형석은 Late Cambrian(512-475 Ma)의 함 Li-F alaskite granite 관입암체(폭 1.5 km)의 정점부에서 산출된다(Fig. 7). 광상은 Early Cambrian의 교대작용에 의해 형성되었다. 광상 및 맥상 그라이젠은 NS 단층선을 따라 발달한다. Muscovite-fluorite 광물군은 광화대 경계부에서 산출되는 반면 맥상 그라이젠은 중앙부에서 산출된다. 그라이젠은 종종 파쇄되어지며, 두 가지의 성인을 갖는다; (1) 파쇄된 암편은 운모-형석, 형석을 함유하는 석회암, 그라이젠 및 그라이젠화된 화강암으로 구성된다, (2) 암편은 석영-황옥-운모-형석의 광물군에 의해 충전된다. 광상은 러시아에서 가장 생산량이 큰 곳으로 30-35% CaF₂의 평균 품위를 갖는 약 450 million tons 의 매장량이 보고 되어 있다.

2.3.4.3. 주석 광상

Sn 광산은 주로 skarn, limestone 및 schist를 교대하는 그라이젠으로 구성되며, 낮은 정도로 화강암과 화강 반암을 교대하고 있다. 함 Sn 석영 및 석영-전기석 맥은 그라이젠에 의한 skarn 교대작용과 관련되며, 다음과 같이 분류된다; (1) 광화된 단열대, (2) 광맥, (3) 세맥 및 ore pods, and (4) saddle-shaped 및 sheeted ore.

Sn 광석은 광물군에 따라 3 형태로 산출된다: (1) tourmaline-quartz; (2) tourmaline-fluorite; (3) cassiterite-polymetallic 및 chlorite-sulfides의 부속광물군을 함유하는 sulfide-tourmaline-quartz. 유화광물은 주로 황철석, 유비철석, 방연석 및 섬아연석으로 구성된다. 광상은 Lower Cambrian의 shale, siltstone, sandstone 및 limestone을 관입하는 Early Paleozoic의 흑운모 화강암내에서 (약 400 Ma) 발달한다.

3. 결 론

(1) Voznesenska 및 Pogranichny 광상의 형석 매장량은 62.3 백만톤이며, Yaroslavsky 광상의 형석 매장량은 450 백만톤으로 알려져 있다.

(2) Voznesenska 광상에서 한 달에 2,000 톤의 아연 정광을 생산하고 있다.

(3) 형석 정광 생산 후 버려진 광미에는 Be가 600 톤 이상, Li₂O가 4,000 톤 이상이 함유되어있어 광미의 재활용이 가능하다.

(4) Voznesenska 및 Pogranichny 형석 광상 하부에는 산업성이 있는 Ta과 Nb이 약 17.2 백만톤이 매장되어 있다(Ta₂O₅ 0.012%, Nb₂O₅ 0.016%). Pogranichny 광상의 Ta 광체는 심부 50m에 위치하고 있어 노천채굴로 형석과 함께 개발 가능하다. Voznesenska 광상의 Ta 광체는 심부(300-400 m)에 위치하여 형석의 개발이 완료된 후 개발 가능하다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 과학기술부 특정연구사업의 ‘동북아 첨단소재 광물자원 정보화 및 자원기술 개발연구’ 과제에서 지원되었습니다.

참고문헌

Androsoy, D.V. and Ratkin, V.V. (1990) Prefolded Zinc Massive Sulfide Ores at the Voznesensk Greisen Deposit (Primor'e), Geol. Rudn. Mestorozhd., v. 32, pp. 46-58.

Kupriyanova, I.I. and Shpanov, E.P. (1997) Beryllium-Fluorite ores in the Voznesenska ore district, Primorye, Russia, Geol. Rudn. Mestorozhd., v. 39, pp. 442-455.

Rub, A.K. (1980) Typical features of minerals associated with Ta and Sn ores, Moscow: Nedra, 152p.

Ryazantsev, A.A. (1973) Structural, magmatic, and lithological controls of ore mineralization in the Voznesenska ore district, Primorye, Geol.-Mineral. Vladivostok: FEGL.

Ryazantseva, M.D. and Shkurko, E.I. (1992) Fluorite in Primorye, Moscow: Nedra, 158p.

Ryazantseva, M.D., Gerasimov, N.S., and Govorov, I.N. (1994) Rb-Sr isochrons and petrogenesis of igneous rocks of the Voznesenska ore district, Tikhookean. Geol., v. 13, pp. 60-73.