

청양금산금-은광상의 생성환경

유봉철^{1)*}, 이현구¹⁾, 김상중¹⁾, 최선규²⁾

1. 지질 및 광상

청양금산광상(군량맥)의 주변지질은 선캠브리아기의 변성퇴적암류, 중생대의 대동누층군 퇴적암류 및 소규모의 화성암과 맥암류가 분포된다. 선캠브리아기의 변성퇴적암류는 호상편마암, 각섬암질 편암, 사문암, 화강편마암, 미그마타이트질 편마암, 결정질석회암 및 석회규산염암으로 구성된다. 쥬라기 대동누층군 퇴적암류인 조계리층, 백운사층 및 성주리층은 광산의 동쪽에 북북동방향으로 분포되며 함장석각력사암, 사암, 역암, 셰일 및 이암으로 구성된다. 쥬라기 흑운모 화강암은 선캠브리아기의 변성퇴적암류를 관입하였다. 이 화강암의 산상은 세립 또는 조립질이며 유백색을 띤다. 구성광물로는 석영, 정장석, 미사장석, 흑운모, 견운모, 방해석, 규선석 및 불투명광물 등이다. 산성암맥은 NE방향을 갖으며 간혹 NW의 방향성을 갖는 것도 있다.

이 광상은 선캠브리아기의 변성퇴적암류에 발달된 열극을 충진한 합금-은석영맥광상으로 구봉광산으로부터 북동쪽으로 4 km 떨어진 곳에 위치한다. 맥의 주향과 경사는 N70° E, 25° SE, 맥폭은 0.6 ~ 1.5 m, 품위는 ND ~ 79.5 g/ton Au, Tr ~ 102 g/ton Ag이다. 이 맥은 사갱으로 하3번갱까지 개발하였다.

2. 광석 및 광석광물

청양금산광상의 석영맥은 괴상백색석영으로 구성되며 이 괴상백색석영은 동일시기의 회색석영, 백색석영 및 단열작용에 의해 형성된 투명석영으로 구성되어 있다. 괴상백색석영은 리본-호상, 각력상, 망상, 대상구조 및 곳에 따라 정동구조도 관찰되며 현미경하에서 sutured 구조가 관찰된다.

회색석영에서 관찰되는 황화광물은 모암의 유색광물대를 따라 대상, 각력화, 산점 또는 괴상으로 분포된다. 모암으로부터 맥의 중심부로 감에 따라, 석영은 회색석영에서 백색석영으로 점이적으로 변화되며 황화광물의 종류는 유비철석 - 섬아연석 - 방연석으로 변화되며 입자는 증가하고 산출상태는 산점 또는 괴상이다.

이 광상의 광물정출순서는 단일시기(합-황화광물 괴상백색석영)만 관찰되며 조기-중기에 회색석영, 백색석영, 녹니석, 견운모, 유비철석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 에렉트립

주요어 : 금-은광상, 광석광물, 화학조성, 생성환경

1) 충남대학교 지질환경과학과(chbong@cnu.ac.kr)

2) 고려대학교 지구환경과학과

과 말기로 감에 따라 단열작용에 의해 생긴 열극을 따라 증진한 투명석영, 유비철석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 에렉트럼으로 구성된다. 유비철석, 섬아연석 및 에렉트럼의 화학조성은 각각 27.15 ~ 32.08 As atomic%, 11.03 ~ 15.95 FeS mole%, 26.39 ~ 55.96 Au atomic%이다.

3. 유체포유물 및 안정동위원소

이 광상에서 산출되는 유체포유물에 대한 연구결과는 이현구와 유봉철(2000)에서 보고한 바 있어 여기에서는 간략하게 기술하고자 한다. 실온에서 관찰되는 상의 종류, 성분에 따라 I형 포유물(carbonic 포유물), II형 포유물(carbonic+aqueous 포유물), III형 포유물(carbonic+aqueous 포유물) 및 IV형 포유물(aqueous 포유물)으로 분류하였다. 또한 이렇게 분류된 포유물은 40°C에서 관찰되는 carbonic phase와 V_{1120} 의 몰체적비, Th-Carb.(L-V)(I, II, III형 포유물) 및 Th-ToT(L-V)(IV형 포유물)에 따라 세분하였다.

I형 포유물은 냉각시 VCO_2 의 형성온도(T_n)는 -3.5 ~ 4.8°C이며 -98 ~ -113°C에서 VCO_2 가 응축된다. I형 포유물의 Ti-Carb.는 -82.3 ~ -78.6°C이며 Tm-Carb.는 -62.0 ~ -57.0°C로서 CH_4 , N_2 가 포함되어 있음을 알 수 있다. I형 포유물의 Th-Carb.는 -1.3 ~ 28.4°C이며 기상과 액상으로 균일화된다. II형 포유물의 VCO_2 의 형성온도(T_n)는 -5.8 ~ 26.3°C, VCO_2 의 응축온도는 -115 ~ 95°C 및 Ti-Carb.는 -83.5 ~ -76.5°C이다. II형 포유물의 Tm-Carb.는 -63.2 ~ -56.2°C이며 Th-Carb.는 -16.4 ~ 28.4°C(Th-Carb.(L) : -16.4 ~ 28.4°C, Th-Carb.(V) : -1.3 ~ 26.3°C) 및 Tm-Clath.는 3.2 ~ 10.2°C이다. 이 광상에서 산출되는 II형 포유물내에 CH_4 함량과 carbonic phase의 밀도 변화가 폭넓게 존재하였음을 의미한다. carbonic phase의 몰체적이 < 0.5인 II형 포유물은 Tm-Carb.와 Th-Carb.가 몰체적이 > 0.5인 II형 포유물보다 높은 값을 갖는다. 그러므로 몰체적이 < 0.5인 유체포유물이 CH_4 함량과 carbonic phase의 밀도가 높음을 알 수 있고 carbonic phase의 밀도가 증가함에 따라 CH_4 함량도 증가함을 알 수 있다. II형 포유물의 균일화온도는 258.3 ~ 402.4°C(Th(L) : 258.3 ~ 402.4°C, Th(V) : 262.6 ~ 357.9°C, Th(d) : 214.0 ~ 342.0°C)이다.

III형 포유물의 Tm-Carb.는 -57.7 ~ -56.2°C, Th-Carb.는 18.8 ~ 28.4°C(Th-Carb.(L) : 18.8 ~ 28.4°C, Th-Carb.(V) : 25.8 ~ 26.2°C) 및 Tm-Clath.는 4.2 ~ 8.9°C로서 III형 포유물내에 CH_4 함량과 carbonic phase의 밀도의 변화가 II형 포유물에 비해 좁은 범위를 갖는 것을 의미한다. III형 포유물의 균일화온도는 272.0 ~ 349.0°C(Th(L) : 272.0 ~ 349.0°C, Th(V) : 304.6 ~ 336.2°C, Th(d) : 296.0 ~ 342.0°C)이다. IV형 포유물은 냉각시 VH_2O 의 응축이 -29.3 ~ -43.9°C에서 일어나며 가열시 Te-ice는 -25.3 ~ -16.9°C로서 해리된 염들 중에 주로 NaCl과 KCl로 구성되어 있다. IV형 포유물의 Tm-ice과 균일화온도는 각각 -13.1 ~ -0.2°C, 130.2 ~ 272.2°C(Th(L))이다. IV형 포유물은 가열시 초기 액상으로 균일화되었다가 다시 새로운 상이 형성되어 최종적으로 액상으로 균일화되는 현상이 관찰된다. 이것은 200°C 이상으로 가열시 liquid phase의 unmixing에 의해 < 10%의 새로운 불혼용 액상이 형성되어 균일화되는 것으로 해석할 수 있다.

이 광상에서 산출되는 황화광물의 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ 값은 6.3 ~ 8.6이며 각 황화광물의 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ 값은 황철석 : 7.8 ~ 8.6, 섬아연석 : 7.8 ~ 8.4, 황동석 : 8.4, 방연석 : 6.3 ~ 8.6이다. 이들 광산에서 산출되는 섬아연석-방연석, 황동석-방연석쌍에 대한 분별계수를 이용하여 구한 동위원소 평형온도는 258 ~ 319°C이다. 유체포유물의 균일화온도 및 광물공생관계로부터 구한 온도자료에 의거하여 각 황화광물과 평형상태에 있는 H_2S 의 값을 계산하면 광화유체내 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\text{‰})$ 값은 6.8 ~ 10.5이며 각 황화광물의 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\text{‰})$ 값은 황철석 : 6.8 ~ 7.6, 섬아연석 : 7.5 ~ 8.1, 황동석 : 8.6, 방연석 : 8.2 ~ 10.5이다. 이 광상의 $\delta^{34}\text{S}_{\text{fluid}}$ 값은 Ohmoto and Rye(1979)가 제시한 식 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}(\text{‰}) = \delta^{34}\text{S}_{\text{fluid}} - \Delta\text{SO}_4^{2-} (R'/(1+R'))$ 에 이 광상에서 SO_4 성분이 검출되지 않는다는 것과 열역학적 자료(온도, pH, $f\text{O}_2$, αk^+ , αNa^+ , αCa^{2+})를 대입하여 구할 수 있다. 우선 R' ($=\Sigma\text{SO}_4/\Sigma\text{H}_2\text{S}$)값은 온도, pH, $f\text{O}_2$, αk^+ , αNa^+ 및 αCa^{2+} 의 함수로 표현된다. 여기에서 온도 = 350°C, pH = 5.2, $f\text{O}_2 = -33.4$, $\alpha k^+ = 0.04433$, $\alpha \text{Na}^+ = 0.1883$ 및 $\alpha \text{Ca}^{2+} = 2.6756\text{E}-09$ 값을 이용하여 R' 값을 구할 수 있는데, 이 R' 값은 $3.652\text{E}-12$ 이며 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{fluid}}$ 값은 $-3.47\text{E}-10$ 이다. 그러므로 이들 광산의 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 는 $\delta^{34}\text{S}_{\text{fluid}}(\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}})$ 로서 생각할 수 있다. 이 광상에서 산출되는 황화광물의 $\delta^{34}\text{S}_{\text{fluid}}$ 는 6.8 ~ 10.5‰로서 화성기원에서 유래된 것으로 해석된다.

이 광상에서 산출되는 회색석영, 백색석영 및 투명석영의 $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ 값은 12.1 ~ 13.6(회색석영 : 13.0, 백색석영 : 12.1 ~ 13.6)이다. 이들 광산의 광화 초기에 관찰되는 포유물은 $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 계 유체이며 말기에 관찰되는 포유물은 $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ 계 유체지만 소량 CO_2 가 함유된다. 이것은 광화I시기에 광화작용이 진행됨에 따라 $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 계 유체에서 $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ 계 유체로 변화되었음을 의미한다. 이런 유체의 변화 요인은 CO_2 immiscible separation과 기원이 다른 유체의 혼입으로 설명된다. 또한 백색석영내에 산출되는 I, II, III형 포유물내의 XCH_4 함량은 낮다. 이것은 광화유체내 CH_4 가 산화되어 CH_4 가 소실되었으며 그로인해 잔존 유체는 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 감소되어진다. 그러므로 이 광상의 광화시기에 산출되는 석영의 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변화는 CO_2 immiscible separation, CH_4 산화 및 기원이 다른 유체의 혼입으로 설명할 수 있다. 석영내 물의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값을 계산하면, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$ 값은 6.1 ~ 7.6(회색석영 : 6.1, 백색석영 : 6.7 ~ 7.6)이다. 이 광상의 광상생성시 물의 $\delta \text{D}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$ 값은 -54 ~ -21(회색석영 : -46, 백색석영 : -54 ~ -21)이다.

4. 토의

이 광상에서 산출되는 광물조합을 토대로 광물조합의 형성온도와 황분압($f\text{S}_2$)를 구하면, 형성온도와 황분압은 광화시기 초기 = 286 ~ 441°C, -4.8 ~ -11.2atm(유비철석-황철석-섬아연석-에렉트럼), 광화시기 말기 = -11.4 ~ -12.2atm(황철석-황동석-방연석-에렉트럼)이다. 산소분압($f\text{O}_2$)은 유체포유물과 광물조합군으로부터 유추할 수 있으며 계산된 산소분압($f\text{O}_2$) 값(조건 : 350°C, 2kb)은 I형 포유물 : 35.7 ~ -32.7atm, II형 포유물 : -33.7 ~ -31.4atm, III형 포유물 : -33.9 ~ -31.2atm이다.

이 광상에서 열수용액의 pH는 가수분해와 양이온 교환등을 갖는 광물의 공생관계로부터

유추할 수 있으며 계산된 열수용액의 초기 pH는 5.2 ~ 6.3 ($\alpha_{\text{Na}^+} = 0.0485$, 400°C), 5.0 ~ 5.4 ($\alpha_{\text{Na}^+} = 0.2126$, 350°C)으로 약산성이었음을 알 수 있다.

이 광상에서 산출되는 II, III 및 IV형 포유물에 대한 염농도를 살펴보면, II형 포유물 : 1.6 ~ 6.5 wt.%, III형 포유물 : 4.5 ~ 10.2 wt.%, IV형 포유물 : 0.4 ~ 16.5 wt.%이며 광화시기 초기와 말기의 광화작용과 관련된 염농도는 각각 1.6 ~ 10.2 wt.%(H₂O-CO₂-CH₄-NaCl), 7.4 ~ 8.6 wt.%(H₂O-NaCl±CO₂)로서 광화작용이 진행됨에 따라 염농도가 증가하였음을 알 수 있다. 유체포유물의 trapping pressures를 계산하면, I, II 및 III형 포유물의 trapping pressures(bar)는 943 ~ 1954이다. 이들 광산의 광화시기에서 산출되는 백색석영, 투명석영내의 I, II 및 III형 포유물은 Th-Carb.(°C) 변화폭이 넓다. 이는 유체압력의 변화를 시사하며 그때에 상분리가 일어났음을 의미한다. 균일화온도와 염농도의 관계성을 살펴보면, 이들 광산은 광화I시기의 II 및 IV형 포유물이 균일화온도가 감소함에 따라 염농도는 증가한다. 이것은 유체의 unmixing이 있었음을 의미하며 unmixing에 의해 형성된 H₂O-NaCl계 유체는 재 가열(heating)되었으며 지속적인 유체와의 혼입에 의해 냉각작용이 있었다. 그러므로 이들 광산의 광화I시기 백색석영과 투명석영내에 관찰되는 초기 H₂O-CO₂-CH₄-NaCl계 유체는 유체의 유입에 따른 유체압력의 차이에 의해 상분리(CO₂ immiscible separation)가 일어났으며 광화작용이 진행됨에 따라 H₂O-NaCl계 유체로 진화되었다. 또한 여기에 기원이 다른 유체의 유입에 의해 온도 및 염농도의 감소 및 희석작용이 있었다고 생각된다.

광화유체의 기원을 알아보기 위해 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} - \delta\text{D}$ 의 다이어그램에 도시하면, 이 광상의 유체는 마그마수보다 δD 값이 부화된 곳에 해당된다. 이것은 광화유체가 초기 마그마수에서 유체압력의 차에 의해 unmixing, CH₄ 성분의 산화 및 지속적인 고순환수의 유입이 작게 작용하였거나 또는 전혀 다른 유체(δD 값이 부화된 고순환수)에서 기원되었다고 생각된다.

참고문헌

- 이현구, 유봉철, 2000, 충남 청양 구봉광산일대의 중열수 금-은석영맥 광상에서 산출되는 유체포유물의 Chronology와 P-V-T-X 연구. 2000년도 한국자원공학회. 대한자원환경지질학회. 한국지구물리탐사학회 춘계 공동학술발표회, p. 314-316
- Ohmoto, H., and Rye, R.O., 1979, Isotopes of sulfur and carbon. In geochemistry of hydrothermal ore deposits: 2nd ed., Wiley-Interscience, p.509-567