

전남 해남 화원반도에서의 금-은광상 벤처탐사 성과

유봉철¹⁾ · 강홍석²⁾ · 김기중¹⁾ · 전경무¹⁾ · 이현구¹⁾

1. 서론

선진각국들은 과거 채굴했던 광산이나 부존 잠재가능성이 높은 광구에 대해 정밀조사와 시추탐광 등을 통해 적극적인 탐사활동을 전개하므로서 대규모 광상탐사에 성공사례를 높여가고 있다.

국내에서는 과거 광업활동이 활발하였던 시기에는 학계나 국가출연 관계기관에서는 수동적인 탐사활동이나 연구를 수행하는데 그쳤었다. 그러나, 최근 국내의 대부분의 금속광업계는 개발도상국가와의 경쟁력 상실로 인하여 광상개발이나 탐사활동이 거의 중단상태에 이르게 되어 보다 능동적인 탐사활동과 적극적인 지원체계 확립이 절실히 요구되고 있다.

이와 같은 현실을 잘 파악하고 있는 대한광업진흥공사에서는 학계와 공동으로 광상부존 가능성이 높은 미지의 지역을 선택하여 벤처탐사를 실시한 결과 화원반도에서 꽤 규모가 큰 석영맥광상을 발견하게 되었다. 따라서 이 연구는 새로운 광상 발견과정과 광체의 발달상태, 산출광물 및 생성환경 등 현재까지 밝혀진 연구결과를 보고하고자 한다.

2. 주변지질

조사지역의 지질은 선캠브리아기의 변성퇴적암류를 기저로 하여 이를 관입한 중생대의 화강암과 이들을 단층 및 부정합으로 피복한 백악기의 퇴적암류(응회질사암 및 셰일)로 구성된다. 또 이들을 관입한 백악기의 석영반암, 암맥류 및 석영맥이 산출된다.

선캠브리아기의 변성퇴적암류는 조사지역중 매월리와 월호리 일대의 해안가나 매계 마을 및 주광리의 달산 및 내주광 마을 일대에서 NS 또는 NNE 방향으로 분포된다. 이 변성퇴적암류에는 호상편마암, 편암 및 대리암으로 구성된다. 편마암은 유백색내지 회백색을 띠며 우백대와 우흑대가 교호하여 엽리구조를 갖는 것, 엽리구조를 갖지 않는 것 및 반상변정질 구조를 갖는 것이 관찰되나 상호 점이적인 관계를 갖는다. 또한 이 암석은 소습곡구조가 잘 관찰되며 구성광물로는 석영, 정장석, 사장석, 흑운모, 백운모, 견운모, 녹니석 및 불투명광물 등으로 구성된다. 이 암석의 엽리의 주향과 경사는 N20~60°E/50~75° SE, 45° NW이다. 편암은 흑회색을 띠며 편마암과 호상으로 산출된다. 이 암석의 엽리의 주향과 경사는 N50°E/60° NW, 55° SE이며 폭은 5 m 내외이다. 구성광물로는 석영, 장석류, 운모류, 이차

주요어 : 해남 화원반도, 금-은석영맥광상, 벤처탐사, 광석광물, 유체포유물, 안정동위원소

1) 충남대학교 지질환경과학과(phklee@cnu.ac.kr)

2) 대한광업진흥공사

변질광물 및 불투명광물 등이다. 대리암은 화원광산일대, 해안가 일부분 및 매계 마을에서 북서방향 150 m지점 일대에 분포된다. 이 암석은 유백색내지 회백색을 띠며 습곡구조가 잘 관찰된다. 이 암석은 열수교대작용과 변성작용에 의해 스카르화가 진행되어 있으며 주로 석류석, 녹염석 및 규회석 등으로 구성된다. 그러나 스카르화가 진행되지 않는 부분에선 석회암이 산출되며 스카르화대와 경계는 점이적이다. 이 암석의 엽리의 주향과 경사는 N20~40°E/12~30° SE이다.

쥬라기 화강암은 매계 마을 뒷산, 월외리 마을의 해안가와 조사지역의 북부에서 암주형으로 산출되며 유백색 내지 회녹색을 띠며 현정질이다. 이 암석은 해안가에선 편마암과 대리암을 관입하였으며 조사지역의 북부에선 백악기 퇴적암류(응회질 사암 및 셰일)에 단층 또는 부정합으로 접한다. 이 암석은 반암 및 절리, 소단층에 관입한 암맥류에 의해 변질작용을 받은 곳도 부분적으로 관찰된다. 이번 조사에서 발견된 석영맥의 모암이기도 한 화강암은 석영, 정장석, 미사장석, 사장석, 흑운모, 각섬석, 견운모, 녹니석, 방해석 및 불투명광물 등으로 구성된다.

퇴적암류는 조사지역의 가장 많은 부분을 차지하며, 주로 응회질 사암과 셰일로 구성되며 쥬라기 화강암과 접하는 곳에선 역질 사암이 하부에 관찰되기도 한다. 이 암류는 월호리 지역에서 변성퇴적암류와 단층 접촉하며 단층의 주향과 경사는 N30°E/38° SE이다. 이 암석들은 층리발달이 양호하며 주향과 경사는 N10~40°W/20~40° SW방향이 지배적이다. 구성광물로는 석영, 장석류, 흑운모, 방해석 및 점토광물 등이다.

석영반암은 매계마을 뒷산에서 산출되며 조사지역에 따라 석영의 산출빈도가 다르다. 또한 이 암석은 지역에 따라 심하게 변질되어 있다. 변질된 암석은 주로 중성암맥이 관입되는 경계에서 관찰되나 그렇지 않는 곳에서 산출되는 것도 있다. 석영반암은 반정으로 석영 또는 장석이 관찰되며 유백색 내지 회백색을 띤다. 이 암석은 퇴적암류의 경계로 감에 따라 점이적으로 입자가 작아지는 냉각대를 관찰할 수 있다. 구성광물로는 석영, 장석, 흑운모, 견운모, 녹니석, 녹염석 등이다.

암맥은 상기의 암류들을 관입하였으며 산성암맥과 중성암맥으로 구성된다. 산성암맥은 담회백색을 띠는 세립질암으로 구성광물은 석영, 장석 및 견운모 등으로 구성된다. 중성암맥은 방향성과 폭이 다양하고 녹회색을 띠며 세립질암 또는 세립질 각력암으로 산출된다.

석영맥은 해안가를 따라 변성퇴적암류를 모암으로 수개 조 관찰되며, 매계 마을 뒷산에서는 NS 또는 NW 방향으로 최대 폭 6 m, 연장은 150 m정도가 확인된다.

3. 광상의 발견경위

조사지역에서 관찰되는 석영맥중 변성퇴적암류내에서 산출되는 석영맥은 맥폭, 연장성 및 방향성이 다양하고 육안상 황화광물이 관찰되지 않는다. 화원광산 하부 해안가에서 매계 마을 남쪽 약 100m지점까지는 광상에서 유래한 광석의 전석 또는 석영맥(산화광물 포함) 전석이 잘 관찰된다. 이 석영맥 전석들은 인접지역에 석영맥 노두가 있다는 것을 암시한다. 이를 토대로 화원광산에서 매계 마을 주변의 야외노두를 정밀 조사한 결과, 매계 마을 앞밭이나 담장에서도 druse cavity가 잘 발달한 석영맥 전석을 다수 관찰 할 수 있었다. 이들 석영맥 전석시료를 채취하여 광화작용과 품위를 알아보기 위해 EPMA, XRF, ICP-MS분석을 실시한 결과 금-은 광화작용이 있었음을 확인할 수 있었다. 더욱 정확한 야외 노두를 과

악하기 위하여 정밀 지질탐사를 실시한 결과, 매계마을 뒷산에서 대규모 석영맥(주맥, 1맥) 노두와 해안가에서 열수 각력화작용을 받은 석영맥(2맥) 노두를 발견할 수 있었다.

주맥은 편마암, 대리암 및 화강암내 NS-NW 계열의 열극을 충진한 맥상석영맥이다. 이 맥의 주향과 경사는 NS~N34°W, 수직~60° NE이다. 주맥은 매계마을 뒷산 능선(고도 100에서 125m)에서 거의 남북방향으로 화강암과 대리암을 모암으로 산출되며 북쪽 연장방향에 선 대리암을 모암으로 NS 방향의 소규모 광맥이 관찰되나 연장성은 확인할 수 없었다. 야외에서 산출되는 주맥은 풍화에 의해 산화되어 초생 광석광물은 관찰되지 않고 2차 산화물만 관찰된다. 이 맥은 주로 석영 및 방해석등으로 구성되며 정동구조, 각력상구조 및 망상구조가 관찰되고 연장성은 150m정도 확인된다. 맥 주변부의 모암은 주로 건운모화, 녹니석화작용등의 변질작용을 받았다. 폭은 최대 6.0 m정도이며 모암 쪽으로 감에 따라 석영세맥이 망상으로 발달되기도 한다. 황화광물(황철석, 섬아연석, 방연석)의 산출은 모암변질 내에서 주로 산출되며 피상의 석영 및 정동내 석영에서는 거의 산출되지 않는다.

1맥은 주맥의 북측방향 약 120여 m 지점에서 발견되며 대리암내 열극을 충진한 석영맥으로 산출된다. 이 맥은 정동구조, 각력상구조를 보여주며 육안상 황화광물은 거의 확인되지 않는다. 이 맥의 주향과 경사는 N26°E/70°SE, 폭 0.7m 및 연장성 5m이다.

2맥은 주맥의 북서방향 약 500여 m 지점인 해안가에서 발견되며 편마암내 열극을 충진한 hydrothermal breccia 석영맥으로 산출된다. 석영맥은 유백색을 띠며 황화광물은 관찰되지 않는다. 그러나 hydrothermal breccia에서는 산화대가 관찰되며 규화작용을 받아 있다. 이 맥의 주향과 경사는 N70°E/70°SE이며 폭은 5m이나 연장성은 토양의 피복으로 확인할 수 없었다.

4. 산출광물

주맥에선 주로 황철석, 섬아연석, 방연석 및 황동석이 세립으로 산출된다. 이들 황화광물은 녹염석과 방해석이 산출되는 곳에서 주로 산출된다. 현미경 및 전자현미분석을 통해 확인된 황화광물은 황철석, 섬아연석, 방연석, 황동석, 반동석, 규버나이트(cubanite), 함은사면동석, Pb-Ag-S, Pb-Te-S계 광물 등이다. 또한 산화광물로 황철석 산화광물(Fe-Mn-O), 섬아연석 산화광물(Zn-Fe-O) 및 방연석 산화광물(Pb-O) 등이 확인된다. 황철석은 석영내에 단독 또는 방연석과 함께 산출된다. 섬아연석은 석영내에 단독 또는 황동석, 방연석과 함께 산출된다. 방연석은 석영내에 단독 또는 황철석내에 포획되어 산출된다. 황동석, 반동석 및 규버나이트(cubanite)는 석영내에 단독 또는 섬아연석과 함께 산출된다. 함은사면동석은 황동석과 함께 산출되며 Pb-Ag-S 및 Pb-Te-S계 광물은 방연석과 함께 산출된다.

이번조사에서 채취한 시료에 대해 황화광물의 산출빈도와 산출량이 많은 황화광물은 방연석, 섬아연석, 황동석 및 황철석 등이다. 또한 황화광물의 종류, 산출빈도 및 산출량은 주맥과 1맥의 수평적인 연장성이나 폭에 따른 변화가 관찰되지 않는다.

주맥은 주로 석영, 방해석 및 녹염석으로 구성된다. 석영맥은 세립의 백색석영 또는 자형의 투명석영으로 구성되며 정동구조가 잘 관찰된다. 또한 모암과의 접촉부에선 세맥의 망상구조가 관찰된다. 열수변질광물은 녹염석, 건운모, illite가 일반적으로 관찰되며, 녹니석, petedunnite, glossular 및 kaolinite 등이 국부적으로 산출되어 argillic과 propylitic zone으로 구성됨을 알 수 있다. 녹염석, kaolinite 및 illite 등은 석영맥광상이 비교적 중-고온 환경에

서 형성되었음을 암시한다.

5. 유체포유물

주맥에서 산출되는 석영을 대상으로 유체포유물 실험연구를 수행함으로써, 광화작용 시 주요광물들의 침전온도 및 광화작용에 기여한 열수유체의 화학조성에 대한 연구와 더불어 광화작용시의 압력조건 및 광화작용 진행과 함께 작용한 열수유체의 진화과정 등을 고찰하였다.

주맥에서 관찰되는 석영은 조기 모암변질 내 석영, 백색석영(회색석영포함) 및 정동 내 투명석영이 있다. 실온에서 관찰되는 상의 종류, 성분에 의하면, 이들 석영내의 유체포유물은 수용성(aqueous) 포유물로 산출되며 이 포유물은 다시 V_{H_2O} 의 몰체적비와 Th(L-V)에 따라 세분하였다. 여기에 사용된 용어는 Belkin, H.E.(1994)가 제시한 것을 인용하였다.

이들 석영에서 산출되는 유체포유물은 석영의 결정면내에 면상 균집형, 선상 균집형 또는 봉합된 열극을 따라 면상, 선상 균집형 포유물로 산출되며 Roedder(1984)가 제시한 방법에 의하여 포유물을 분류하였다. 이들 석영에서의 유체포유물은 LH_2O-VH_2O 포유물과 LH_2O-VH_2O -foreign mineral 포유물이 산출된다. LH_2O-VH_2O 포유물에 대한 VH_2O 의 몰체적은 Roedder(1984)과 Bodnar(1983)가 제시한 방법에 의해 계산하였으며 50 %이상인 기상포유물과 50 %미안인 액상포유물로 세분할 수 있다. 유체포유물의 형태는 negative form, 반원형, 판형 및 불규칙형이며 크기는 수 μm 에서 75 μm 정도이다.

조기 모암변질 내 석영에서 산출되는 유체포유물은 기상포유물과 액상포유물이 관찰된다. 기상 포유물의 T_m -ice(final melting temperature of ice)는 $-2.1 \sim -0.9$ 로서 염농도(wt.% eq. NaCl)로 환산하면 1.6~3.6이다. 기상포유물은 가열시 모두 액상으로 균일화되며 균일화온도는 $361 \sim 390.2^\circ C$. 액상포유물은 냉각시 VH_2O 의 응축온도는 $-41.9 \sim -34.0^\circ C$ 이며 first melting 온도(T_e -ice)는 $-27.5 \sim -24.5^\circ C$ 이다. 이것은 수용성 용액중에 해리된 염이 주로 NaCl과 KCl로 존재함을 의미한다. 액상포유물의 T_m -ice(final melting temperature of ice)는 $-6.1 \sim 0.0^\circ C$ 로서 염농도(wt.% eq. NaCl)로 환산하면 0.0~9.3이다. 이 포유물은 가열시 모두 액상으로 균일화되며 균일화온도는 $291.2 \sim 384.4^\circ C$ 이다.

백색석영에서 산출되는 유체포유물은 기상포유물과 액상포유물이 관찰된다. 기상포유물의 T_m -ice(final melting temperature of ice)는 $-2.1 \sim -0.9$ 로서 염농도(wt.% eq. NaCl)로 환산하면 1.6~3.6이다. 기상포유물은 가열시 모두 액상으로 균일화되며 균일화온도는 $374.2 \sim 391.2^\circ C$. 액상포유물의 first melting 온도(T_e -ice)가 $-24.5^\circ C$ 로서 수용성 용액중에 해리된 염이 주로 NaCl과 KCl로 존재함을 의미한다. 액상포유물의 T_m -ice(final melting temperature of ice)는 $-1.5 \sim -0.1^\circ C$ 로서 염농도(wt. % eq. NaCl)로 환산하면 0.2~2.6이다. 이 포유물은 가열시 모두 액상으로 균일화되며 균일화온도는 $311 \sim 357.3^\circ C$ 이다.

투명석영에서 산출되는 유체포유물은 액상포유물이 관찰된다. 이 포유물은 냉각시 VH_2O 의 응축온도는 $-36.4 \sim -35.2^\circ C$ 이며 first melting 온도(T_e -ice)는 $-24.5 \sim -19.2^\circ C$ 로서 수용성 용액중에 해리된 염이 주로 NaCl과 KCl로 존재한다. 또한 액상포유물의 T_m -ice(final melting temperature of ice)는 $-2.9 \sim -1.3^\circ C$ 로서 염농도(wt.% eq. NaCl)로 환산하면 2.2~4.8이다. 이 포유물은 가열시 모두 액상으로 균일화되며 균일화온도는 $317.4 \sim 387.2^\circ C$ 이다.

또한 주맥에서 관찰되는 조기모암변질 내 석영, 백색석영(회색석영포함) 및 정동 내 투명

석영에서 산출되는 유체포유물의 균일화온도와 염농도의 관계를 도시하면, 조기모암변질 내 석영, 백색석영 및 투명석영 내 균일화온도와 염농도의 차이는 거의 관찰되지 않지만 이들 포유물은 일반적으로 균일화온도가 감소됨에 따라 염농도도 감소된다. 그리고 이들 포유물에선 비등현상이 관찰된다. 따라서 지하 심부에서 유입된 열수가 보다 온도가 낮은 모암과 만나면서 온도 및 압력의 감소에 의하여 냉각 및 비등현상이 있었다. 이로 인해 황화광물이 침전된 것으로 생각된다.

6. 안정동위원소

산소 및 수소안정동위원소 분석을 위한 시료는 주맥의 석영을 대상으로 하였다. 주맥에서 산출되는 석영의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 4.6~8.8 ‰이다. 주맥에서 산출되는 백색석영과 투명석영의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 각각 4.6~8.8 ‰, 7.7 ‰로서 큰 차이가 없다. 광화시기의 석영 침전 시 평형상태에 있었던 물의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$ 값은 Matsushisa et al.(1979)의 분별식 $1000 \ln a_{\text{Quartz H}_2\text{O}} = 3.34 (10^6/T^2) - 3.31$ 을 이용하여 계산하면, 주맥의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 -0.7~3.5 ‰(백색석영 -0.7~3.5 ‰, 투명석영 2.4 ‰)이다. 주맥의 광상생성 시 물의 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 -70~-55 ‰이다. 주맥에서 산출되는 백색석영과 투명석영의 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 각각 -70~-55 ‰, -62 ‰로서 큰 차이가 없다. 주맥의 석영에 대한 산소 및 수소 동위원소 값은 수평적인 변화가 관찰되지 않는다. $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} - \delta\text{D}$ 의 다이어그램에 주맥의 자료를 도시하면, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$ 및 $\delta\text{D}(\text{‰})$ 값은 석영맥의 광화유체가 순환수에서 기원되었으며 지속적인 순환수 혼입이 있었던 것으로 생각된다. 또한 이들 값은 해남지역의 은산, 모이산 및 가사도광산보다 높은 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값을 갖는다.

7. 결론

가). 조사지역의 지질은 선캠브리아기의 변성퇴적암류(편마암, 편암, 대리암), 중생대의 화강암, 백악기의 퇴적암류(응회질사암 및 셰일), 석영반암, 암맥류 및 석영맥으로 구성된다.

나). 석영맥은 선캠브리아기의 변성퇴적암류 및 유라기 화강암을 모암으로 하여 3개조 확인되며 주맥은 맥폭 6m, 연장성 150m, 주향과 경사 NS~N34°W/수직~60°NE이고, 1맥은 맥폭 0.7m, 연장성 5m, 주향과 경사 N26°E/70°SE 이며 2맥은 맥폭 5m, 주향과 경사 N70°E/70°SE으로 확인된다.

다). 석영맥에서 산출되는 황화광물은 황철석, 섬아연석, 방연석, 황동석, 반동석, 규버나이트(cubanite), 함은사면동석, Pb-Ag-S, Pb-Te-S계 광물과 황철석 산화광물(Fe-Mn-O), 섬아연석 산화광물(Zn-Fe-O) 및 방연석 산화광물(Pb-O)등이 산출된다.

라). 석영맥(주맥)은 주로 석영, 녹염석 및 방해석등이 맥석광물로 구성되며 각력상, 정동 및 망상구조가 관찰된다. 또한 녹염석, 견운모, illite, 녹니석 및 kaolinite등의 열수변질대를 형성하며 이런 열수변질대는 argillic과 prophyllitic 변질대에 해당되고 온도는 moderate~high(>230°C이상)의 환경상태에 해당되는 특징을 보여준다.

마). 석영맥(주맥)의 유체포유물의 연구 결과, 조기모암변질 내 석영 : 염농도=0.0~9.3(1.6~3.6(기상포유물), 0.0~9.3(액상포유물)), 균일화온도=291.2~390.2°C (361~390.2°C(기상포유물), 291.2~384.4°C(액상포유물)), 백색석영 : 염농도=0.2~3.6(1.6~3.6(기상포유물), 0.2~2.6(액상포유물)), 균일화온도=311~391.2°C(374.2~391.2°C(기상포유물), 311~357.3°C(액

상포유물) 및 정동내 투명석영 : 염농도=2.2~4.8(액상포유물), 균일화온도=317.4~387.2°C (액상포유물)이다.

바). 석영맥(주맥)광상에 대한 산소, 수소 안정동위원소 연구결과, 석영의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 4.6~8.8‰(4.6~8.8‰(백색석영), 7.7‰(투명석영)이고 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 값은 -70~-55‰(-70~-55‰(백색석영), -62‰(투명석영)로써 광화유체가 순환수에서 기원되었으며 지속적인 순환수 혼입이 있었던 것으로 생각된다.

8. 참고문헌

- Belkin, H.E., (1994) Microthermometric investigations: Th and Tm. practical and theoretical aspects. Short course of the working group "inclusion in minerals", p.7-23.
- Bodnar, R.J., (1983) A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids. Econ. Geol., v. 78, p.535-542.
- Matsuhisa, Y. Goldsmith, R. and Clayton, R.N. (1979) Oxygen isotope fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 43, p. 1131-1140.
- Roedder, E., (1984) Fluid inclusion. Reviews in mineralogy. Mineral. Soc. America, v.12.