

단 보

호주 캔닝턴 Ag-Pb-Zn 광상의 지질구조적 규제

김 형 수

호주, 제임스 쿡 대학교 지구과학학교

캔닝턴(Cannington) 은-납-아연 광상은(동경 140 55', 남위 21 52') 호주 퀸즈랜드 주 마운트 아이자(Mount Ias) 지역 남동 가장자리에 위치한다. 이 광상은 1989년에 'BHP Mineral' 사의 광역 자력 이상 측정과 시추 코아(diamond drilling) 탐사를 이용해 발견되었다(그림 1). 이 광상은 1998년에 상업화를 시작하였고, 총 45.3백만 톤에 평균 납은 11.6%, 아연은 4.4%, 은은 538g/ton으로 단일 광상으

로 은과 납의 함유량은 세계 최대 이다(Walter & Bailey, 1998).

캔닝턴 광상은 호주 뉴사우스 웨일즈(New South Wales) 주에 위치한 'Broken Hill' 광상과 많은 유사성을 보인다. 이 광상은 은-납-아연의 대표적인 광상으로, 독자적인 'BHT'의 광상으로 알려져 있다. 이 광상 유형은 기존의 은-납-아연 광상 유형과는 구별되며, 그 분포는 그림 2에서 보여주고 있다. 주요 'BHT' 광상의

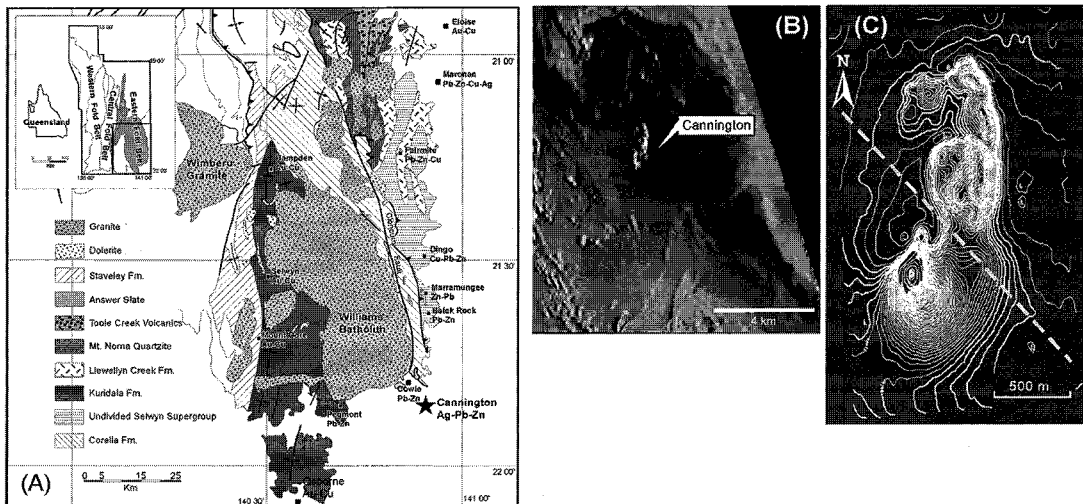


그림 1. (A) 호주 마운트 아이자 지역에서 주요 광산의 분포와 캔닝턴 광상의 위치를 광역 지질도. (B) 캔닝턴 광상의 항공 자력 이상 지도. (C) 자력 극 지도. 점선은 Trepell 단층을 지시한다.

분포 지역은 남아프리카의 'Namaqua Mobile belt'의 'Aggeneys -Gamsberg' 지역과, 남부 스웨덴의 'Bergslagen', 호주 마운트 아이자 동부 구조대(Pegmont 광상) 그리고 북부 퀴즈랜드의 조지타운(Georgetown) 지역 (Mount Misery 광상)이 있다(그림 2).

'BHT' 광상은 주변암이 엽상 세일인 형태(SEDEX 유형)이나, 탄산염암의 치환 형태(Irish 유형)와는 다른 다음과 같은 특징들을 보인다(Walters, 1998).

- a. 흔치 않은 Fe-Mn-Ca-F-Si가 풍부한 스퀴라이트와 유사한 광물조합을 보이는 광화작용
- b. 규산염광물과 산화광물 내 금속광물 산출
- c. 후기 변성교대작용과 최고 변성광물 조합을 보여주는 복잡한 공생 관계
- d. 국부적으로 자류철석 풍부하나, 황철석은 결여
- e. 광역적으로 발달한 지시 단위층(예, 석영-gahnite, 페그마타이트 광맥 그리고 얇은 철층)
- f. 광화작용은 변성퇴적암 내에서 발생하지만,

- 각섬석과 공간적으로 밀접한 관계
- g. 상부 앰피블라이트상과 백립암상에 해당되는 고변성작용과 다변형작용
- h. 고품위의 Sb-Cu-As-(Bi-Au) 성분

개발 역사

마운트 아이자 지역은 세계적으로 경제적인 금속 광상이 밀집되어 있는 지역 중 하나이다. 이 지역은 3가지 주요 암층서학적, 지질구조학적 암군으로 나뉜다.

가장 오래된 중부 'Kalkadoon-Leichharte Belt'는 서부와 동부 습곡대 중간에 위치하며(Fig 1), 이 지역들은 다변형/다변성된 초기-중기 원생대 암석으로 특징 지워진다. 동부 습곡대의 동남쪽에 위치하는 캔닝턴 광상은 20-60m 두께의 백악기 퇴적암으로 덮여져 있기 때문에 야외에서 선캠브리아기 암석 내에 부존하는 광체를 발견할 수 없었다. 그러나 1989년 고해상도의 항공 자력 이상 측정 방법과 시추 코아로부터 얻은 암석들의 암석 화학 분석치를

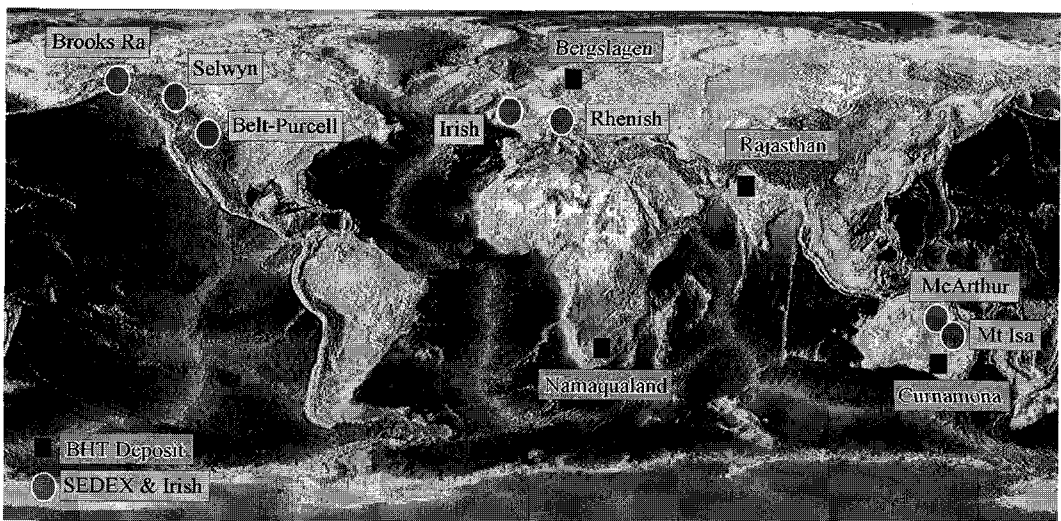


그림 2. 주요 Broken Hill Type (BHT), SEDEX, 그리고 Irish 유형의 광상 분포도.

통해 백악기 퇴적층 아래에서 납 15%, 아연 0.6%, 그리고 은 870ppm/톤을 함유한 광체를 발견하였다. 1990-1991년 동안 계속된 시추 코아를 통해서 불규칙한 렌즈상 광체, 습곡 구조 또는 부단구조를 보이는 은-납 광체, 그리고 'BHT' 의 아연 광화작용 등을 확인하였다. 캔닝턴광상은 1996년에 연간 생산을 1.5Mt을 예상하며 1998년 8월에 공식적으로 개발하기 시작했다.

알려져 있다 (Gray, 1994). D1 변형작용은 규선석 엽리의 발달과 부분 용융으로 특징 지워지고, D2 동안에 남-북으로 배열된 등사 습곡과 습곡측 면에 평행한 엽리가 발달했다. D3의 특징은 개방 습곡의 형성과 D2 엽리의 파랑 엽리화이고, D4는 취성 변형작용으로(단층 형성) 특징 지워진다. 은-납-아연 광체는 등사 습곡의 상반과 하반에서 반복적으로 산출되며, 하반의 최하부는 전단대와 '해밀튼(Hamilton)단층'에 의해 잘려져 있다(그림 3).

광산 주변 지질 및 지질 구조

캔닝턴 광상의 주변암은 '마로난(Maronan) 누층군'에(1.67Ga) 속하는 미그마타이트, 흑운모-규선석-석류석을 함유한 석영-장석질 편마암, 흑운모-규선석 편암, 그리고 각섬암으로 구성되어 있다(Beardsmore et al., 1988; 그림 3). 미그마타이트 그리고 호상 편마암은 우흑대와 우백대로 구성된 분화된 성분층리를 보인다.

각섬석은 석류석 반상 변정과 흑운모를 함유하고 있으며, 부분적으로 엽리가 발달해 있다. 각섬석은 광화된 암석에 의해 잘려져 있거나 전단 접촉 관계를 보인다.

캔닝턴 지역의 최고 변성작용은 규선석-K장석, 각섬석-사장석 광물조합과 부분용융을 근거로 상부-엠피블라이트 변성상을 나타내며, 변성 온도-압력은 650-690°C and 4±1 kbar 이다 (Mark et al., 1998).

캔닝턴 광산은 중간을 자르는 '트라펠(Trepell) 단층'에 의해 남부대와 북부대로 나뉘진다(그림 3). 광상의 전체적인 지질구조는 서남서 방향으로 기울어진 향사성 등사 습곡이다. 습곡의 핵에는 각섬암이 분포하고, 이 광상은 적어도 4번의 변형작용에 영향을 받은 것으로

광체 유형 및 분포

캔닝턴 광상 남부대에서 광체의 두께와 품위는 지질구조의 반복과 불규칙하고 복잡한 변성 교대작용과 변질작용에 의해 큰 변화를 보인다 (표 1; 그림 4).

1. 하반의 납 광맥

하반의 납 광맥은 남부대의 경제적 자원 중 약 13%를 차지하며, 두가지의 광화작용 형태로 나타난다.

1-1. '니스데일(Nithsdale) 광화작용' 형태

- 고품위 은-납 광화작용
- 전형적인 광물조합: 방연석, 회철회석 (hedenbergite), pyroxmangite, 자철석, 감람석, 자류철석, 형석, 석영, 유비철석.
- 철 함량이 높고(≈20%), 높은 은/납 비율(≈60), 납/아연 비율(≈6).

1-2. '와렌다(Warenda) 광화작용' 형태

- 석영은 주요 불순 광물
- 자철석과 형석의 결여

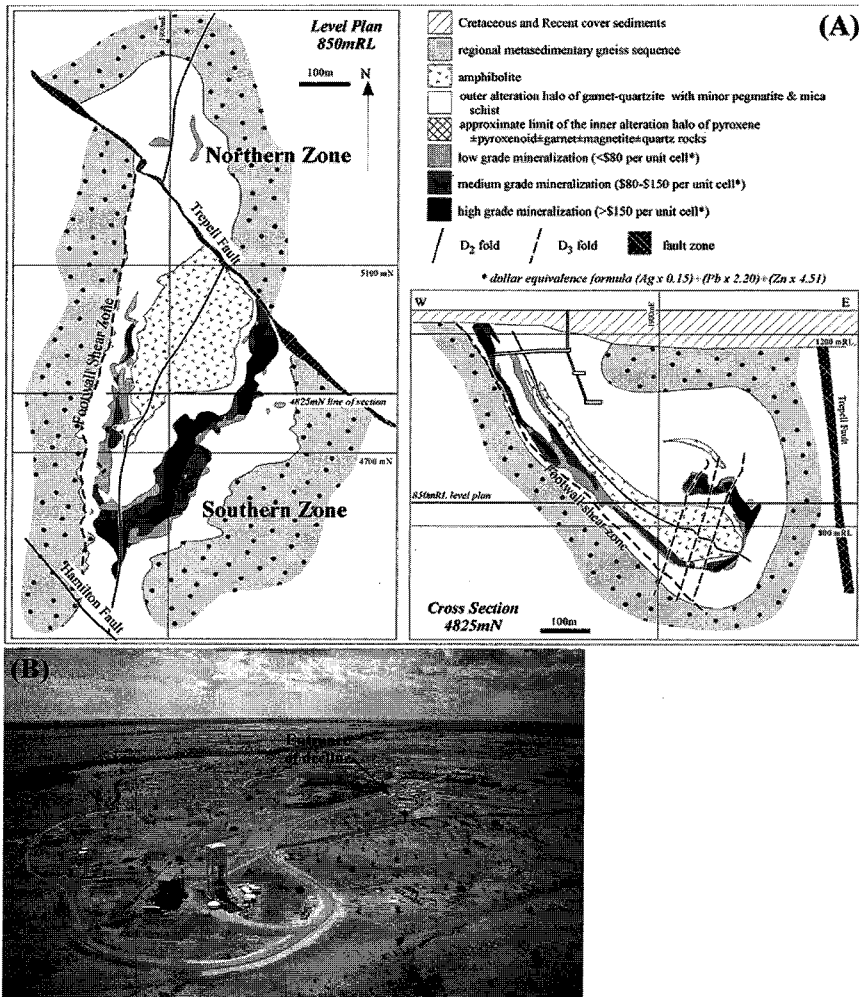


그림 3. (A) 캔닝턴 광상의 지질분포를 보여주는 지질 평면도와 단면도. 광화작용의 품위는 달러 (\$) 단위
(B) 캔닝턴 광산의 전경.

- 석류석과 회철회석에 의해 중첩된 불규칙한 형태의 pyroxmangite

2. 하반의 아연 광맥

하반의 아연 광맥은 남부대의 경제적 자원 중 약 20%를 차지하며, 세 개의 중요한 광화작용 형태로 산출된다. 이들은 황화광물과 불순광물 간에 복잡한 누대구조를 보인다

2-1. '쿠카두(Cukadoo) 광화작용' 형태

- 우유색-푸른색 석영의 풍부 그리고 낮은 철 함량 (5%)
- 취성 변형작용의 광범위한 중첩
- 섬아연석은 주요 황화광물이고 자유철석과 유비철석은 국부적으로 풍부
- 우세한 아연 광화작용/ 매우 낮은 은과 납의 광화작용

2-2. '코웰(Colwell) 광화작용' 형태

- 높은 철 함량 그리고 아연 풍부(아연)납)
- 전형적인 광물조합: 회철취석, 자류철석, 자철석, 형석, 석영, Fe-감람석
- 고품위 광화작용대는 국한되어 있고 규산질 광물의 중첩작용과 연관되어 있다.
- 해밀턴 단층과 하반 전단대에 의해 잘려져 있다.
- 방연석의 증가, 규산질 광물의 중첩, 단층 각력은 고품위 광화대의 특징이다.

• 주요 황화광물은 방연석, 섬아연석

3. 'Glenholme Breccia' 광맥

이 광맥은 고품위 그렌홈 형태의 광화대가 연속적으로 신장된 포드 형태로 '브로가(Brolga) 단층대' 주변에서 산출되며(그림 4), 이 광맥은 남부대의 경제적 자원 중 약 11 %를 차지한다.

이 그렌홈 광맥은 그렌홈 광화작용 유형 광물 조성상의 차이는 없으나, 보다 고품위 광체를 보인다(납 26.6%, 아연 10.4%, 은 1321ppm/톤)

2-3. '그렌홈(Glenholme) 광화작용' 형태

- 최고품위 광화대(Pb, Zn, Ag)
- 규산염과 탄산염 광물이 풍부함
- 자류철석, 자철석, 유비철석, 형석의 결여/ 낮은 Fe-As-Cu-F

4. 상반의 아연 광맥

상반의 아연 광맥은 남부대의 경제적 자원 중 약 0.5%를 차지하며, '케리(Kheri) 광화 작용'

표 1. 캔닝턴 광산 남부대에서 발달한 광화작용의 종류 및 특징. N.B. Mineral Abbreviations: Qtz=석영, Hed=회철취석, Pxm=pyroxmangite, Grt=석류석, Gal=방연석, Fl=형석, Mag=자철석, Po-자류철석, Sphal=섬아연석, Asp=유비철석 Cpy=황동석, Fay=fe 감람석, Amph=각섬석, Carb=탄산염암.

광 맥 위치	광화작용 형태	특 징	주요 광물조합	광석 품위									
				Pb %	Zn %	Ag ppm	Sb ppm	Fe %	Mn %	As ppm	Cu ppm	Au ppm	
상반납	브로드랜드	Pb-Ag 우세, Fe-풍부, 규산질 띠, Sub-economic	Qtz-Hed-Pxm-Grt-Gal	11.5	1.7	430	505	6.2	0.8	210	180	0.03	
	번합	Pb-Ag 우세, Fe-풍부, 경제성이 있는 광석	Gal-F1-Hed-Pxm-Mag-Po-Sphal-Fay-Qtz-Asp	16.7	2.5	820	630	21.9	2.3	610	510	0.09	
상반아연	케리	Fe풍부, 저품위 Zn. 일반적으로 비경제성	Hed-Amph-Mag-F1-Qtz-Po-Asp-Cpy-Py	1.0	10.8	96	48	26.2	0.2	820	3100	0.05	
하반아연	코웰	Fe풍부, 저품위 Zn. 국부적으로 경제성	Hed-Amph-Mag-F1-Qtz-Po-Asp-Cpy-Py	2.0	12.4	84	58	15.0	0.3	2600	1100	0.27	
	그렌홈과 그렌홈각력 화대	규산질, Zn-Pb 우세. 중요한 광석 형태	Qtz-Sphal-Carb-Gal	18.3	10.5	695	920	3.5	0.2	1300	400	0.10	
	쿠바두	규산질 Zn 우세. 국부적으로 경제성	Qtz-Sphal-Gal-Asp	2.4	12.3	82	80	5.9	0.1	2300	900	0.35	
하반납	니스데일	Pb-Ag 우세, Fe-풍부, 경제성이 있는 광석	Gal-F1-Hed-Pxm-Mag-Po-Sphal-Fay-Qtz-Asp	12.8	2.0	820	730	19.7	1.6	540	95	0.06	
	와렌다	규산질, Fe이 풍부한 띠 Pb-Ag 우세, 비경제성	Qtz-Hed-Pxm-Amph-Gal	Not Economic									

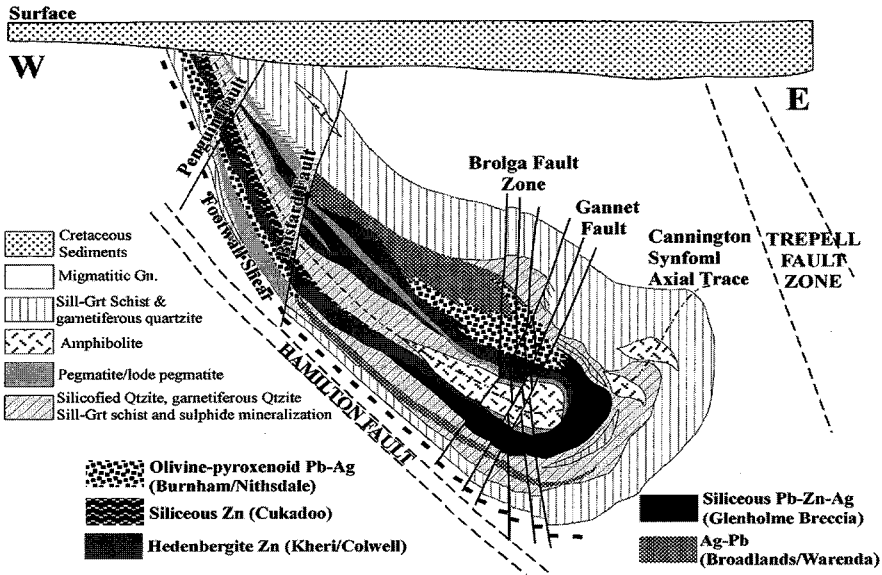


그림 4. 캔닝턴 광상의 주요 광화 작용대의 분포와 주요 단층대들을 보여주는 E-W 방향으로 자른 지질 단면도(after Walter and Bailey, 1998).

형태를 보인다.

4-1. '케리(kheri) 광화작용' 형태

- 등립질 회철회석과 각섬석-석류석 변성교대 작용
- 자류철석, 유비철석, 자철석, 인회석 광물조합/ 높은 Fe-As-Cu-P 함량
- 섬아연석의(1-2 % Zn) 광범위한 산출

5. 상반의 남 광맥

상반의 남 광맥은 남부대의 경제적 자원 중 약 54%를 차지하며, 철이 풍부한 '번함(Burnham) 광화작용' 과 Si가 풍부한 '브로드랜드(Broad-lands) 광화작용' 으로 구성되어 있다.

5-1. '번함(Burnham) 광화작용' 형태

- 회철회석, 'pyroxmangite', Fe-감람석, 자철석로 구성된 높은 철 함량의 광물조합

- 주요 황화광물: 방연석, 자류철석, 섬아연석, 유비철석
- 높은 Cu-As-Bi 함량
- 하반의 니스데일 광화작용과 같은 유형을 보이며, 이는 D2 동안에 일어난 습곡작용에 의함

5-2. '브로드랜드(Broadlands) 광화작용 형태

- 자철석, 자류철석, 유비철석의 결여/낮은 As-Cu-Fe 함량
- 석영-형석-석류석 그리고 회철회석 'pyroxmangite' 대

광상의 성인

캔닝턴 광상의 성인은 광화작용의 형성 양상과 시간에 대해 2가지 모델이 발표 되었다: (1) 변성 교대 작용에 의한 스카른 유형의 모델

(Champman & Williams, 1998); 그리고 (2) 퇴적 기원의 모델, 즉 기존의 광체는 변성작용 이전에 형성 되었고 이 후 변형작용과 변성교대작용에 의해 현재의 형태를 보이게 되었다 (Walter & Bailey, 1998). 현재도 그 성인에 대해서는 의견이 분분한 실정이며, 이들 모델의 증거들은 다음과 같다.

모델 (1)의 증거들은: (a) Zn, Pb, Mn, Fe 함량이 높은 유체 포유물의 존재, (b) Ag-Pb이 풍부하고 아연이 풍부한 광화대의 분포 양상 - 이것은 전형적인 아연 스카른 광상의 형태이다, (c) 고품위 은과 납이 아연 광화작용대의 가장 자리에서 준휘석이(pyroxenoids) 같이 산출되며, 이것은 최고 변성작용 이후 아연으로부터 납의 분별작용을 의미한다(Champman & Williams, 1998; Pollard et al., 2004).

모델 (2)의 증거들은: (a) 최고 변성광물 내에 존재하는 준구형의 황화포유물, (b) 황화광물과 (방연석, 섬아연석, 자류철석) 규산염광물 간의 입상 변정질 구조 (c) 광맥에서 산출되는 흑연의 C14 값이 -22.0% 에서 -27.0%를 보이며, 이것은 변성작용 이전 생물 기원임을 지시한다 (Bodon, 2001; Giles, 2000).

개발 현황

앞에서 언급한 바와 같이, 캔닝턴 광상은 지하 광산이고 지표면에는 노두가 없기 때문에, 정향 시추 코아에서 얻은 정향 시료를 이용하여 암상의 변화, 지질구조의 분석 및 광맥 분포의 형태를 밝혀냈다. 이 분석방법은 자체 제작한 시추 코아 방향 측정 기구를 이용한다.

이 기구는 시추 코아 받침대로 구성되어 있고 이 받침대는 수평면에서 시추 코아 경사 방향에 맞게 회전할 수 있고, 수직면에서 경사각에 맞

게 회전할 수 있다(그림 5). 시추 코아는 실제 방향과 동일하게 이 기구에 고정시킨 후, 다양한 지질 요소들을(예, 성분층리, 엽리, 습곡 축, 단층, 맥) 측정한다(그림 5). 시추 코아의 경사 방향과 각도를 이용하여 관찰 가능한 연성/취성의 지질구조의 방향을 측정하고 그들의 이동 방향과 응력방향을 판단한다(그림 5). 이 분석방법은 야외에서도 측정 가능하며 비교적 빠른 시간 내에 지질 구조에 대한 결과를 얻을 수 있으며, 관심 대상 지역의 지질 단면도 작성에 필요한 기본 자료들 즉, 암상 변화, 구조선의 연속성과 방향을 얻어 낼 수 있기 때문에 현재 북부대와 남부대에서 하반 전단대에 의해 잘려나간 광맥을 탐사하는데 이용하고 있다.

광맥의 탐사하는데 사용하는 다른 방법은 주요 광물의(예: 가나이트(gahnite), 전기석, 석류석, 규선석) 이용이다. 스피넬(spinel) 광물군에 속하는 가나이트(gahnite)는, 아연-스피넬(Zn,Fe,Mg,Mn) (Al,Fe³)₂O₄, 화학적 풍화작용에 강하고, 아연 광화작용의 지시자로 사용하고 있다.

또한 이 광물은 'BHT'의 광화작용을 지시하는 중요한 광물 중 하나이다. 규선석은 캔닝턴 광산 주변암에서 흔히 산출되는 광물로 마름모, 주상, 그리고 섬유상 형태로 다양하게 나타난다. 이들을 이용하여 취성 변형작용 전까지 적어도 3번의 수직 엽리와 3번의 수평 엽리의 발달을 확인하였다(Kim & Bell, 2004). Kim(2003)는 미세구조와 주요 광물간의 관계를 이용하여 아연 광화작용은 수평 엽리 형성 시 기존 엽리의 재활성화작용과 탈광엽리화 과정에 의해 형성 되었음을 밝혀냈다.

현재 수평 엽리의 방향성은 광산 주변에서 아직 발견되지 않은 광체를 탐광 하는데 이용하고 있다.

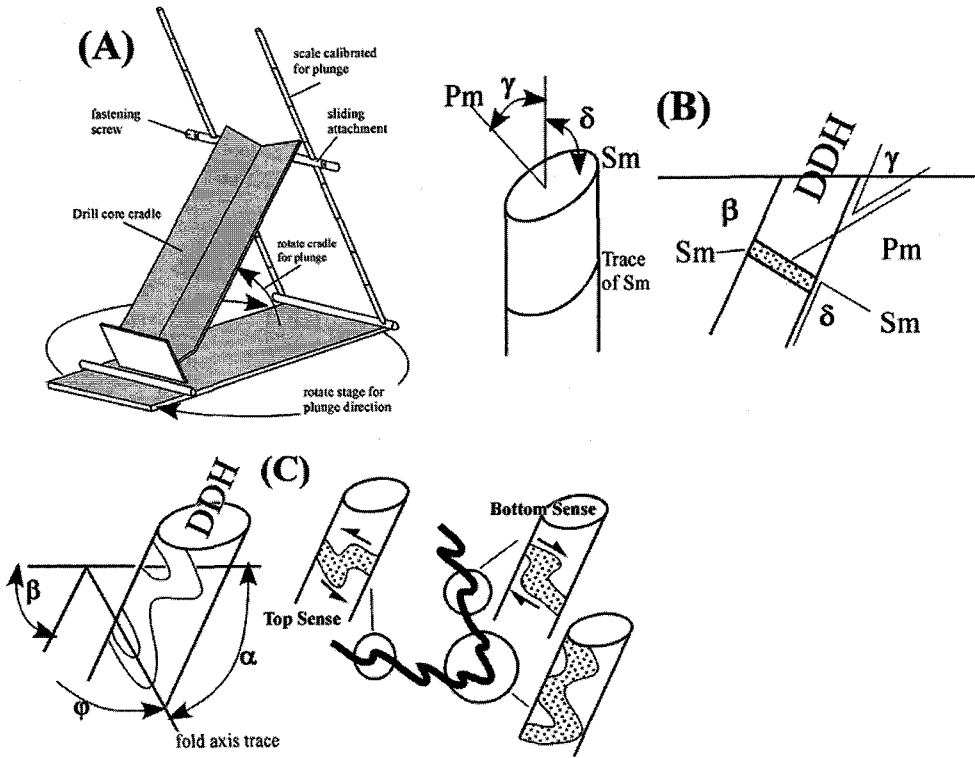


그림 5. (A) 시추 코아 방향 측정 기구. (B) 정향 시추 코아에서 측정 하는 요소. Sm; 주 엽리, Pm; 엽리의 극, δ ; 시추 코아의 장축과 엽리 사이각, β ; 시추 코아의 경사각, γ ; 시추 코아의 장축과 엽리의 pole 사이각. DDH; 다이아몬드시추공. (C) 시추 코아에서 습곡 결정. top 그리고 시추공의 위 또는 아래 아래 방향을 지시한다. 시추 코아의 습곡 축, 시추 코아 축(ϕ) 사이각을 보여주는 그림. 시추 코아 면에서 습곡 경사.

향후 개발 방향

현재 은 생산량은 500-540 ppm/톤으로 단일 광상으로서 세계 최대이다. 또한 납과 아연은 총 45.3 백만톤의 광체 중 약 15.5wt%으로 대략 7.2 백만톤 매장량을 보인다(그림 6). 이러한 은, 납, 아연의 농도와 매장량은 다른 유사한 광상과 비교해 볼 때, 캔닝턴 광상은 고품위의 광상으로 분류되며, 이 광상의 지질학적 특징들은 다른 유사광상 개발에 기본적인 자료로 활용할 수 있을 것이다.

캔닝턴 광상에 대한 지질 구조와 광화작용 간의 중요한 특징은 습곡 작용에 의한 반복과 수평 전단 응력에 의한 재활성화작용과 탈파랑엽리화 작용에 의한 광체(예, 번함 광화작용) 형성이다(Kim, 2003; Guy, 2003). 따라서 수평 엽리의 분포 방향성에 대한 정확한 분석은 주변에 미 발견된 광체 탐광에 중요한 역할을 할 것이다. 또한, 광상 지체 구조 환경, 광상 유체의 기원과 화학, 주변암석과 광상에 대한 지질 구조를 기초로 한 종합적이 지질학적 모델링 개발은 'BHT' 납-아연-은 광상에 대한 보다 더 구

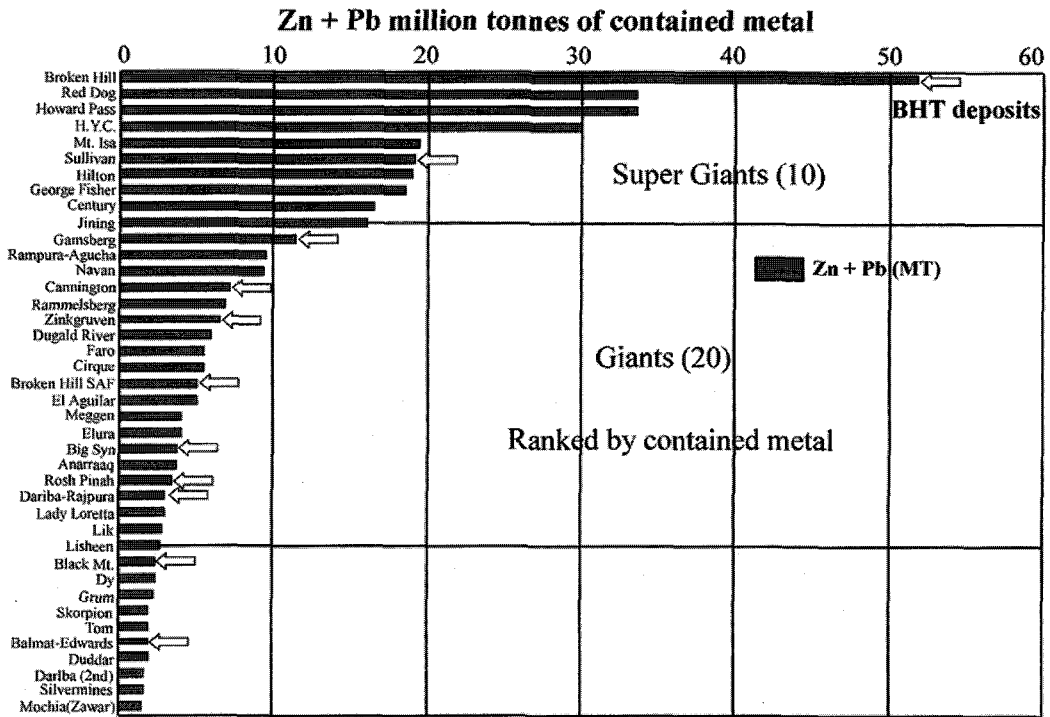


그림 6. 세계 Top 40위에 해당되는 Straitform Sedimentary Zn-Pb 광상들과 Broken Hill Type (BHT) 광상들의 Zn+Pb 함량 비교 (data from Large, 2003)

체적인 이론 정립 뿐 만 아니라, 이를 이용하여 호주 및 다른 지역에서 아직 발견 되지 않은 이 유형의 광상 개발에 큰 역할을 할 것이다.

참고문헌

Beardsmore, T.J., Newbery, S.P. & Laing, W.P., 1988. The Maronan Supergroup - An inferred early volcanosedimentary rift sequence in the Mt Isa Inlier, and its implications for ensialic rifting in the middle Proterozoic of northwest Queensland. *Precambrian Research*, 40, 487-508.

Bodon, S.B., 2001. chapter 6 Geochemistry and Carbon Isotopes of unpublished PhD thesis, University of Tasmania.

Chapman, L.H. & Williams, P.J., 1998. Evolution of pyroxene-pyroxenoid-garnet alteration at the Cannington Ag-Pb-Zn deposit, Cloncurry district, Queensland, Australia. *Economic Geology*, 93, 1390-1405.

Giles, D 2000 Geodynamic setting of Broken Hill Type Mineralisation: the Cannington perspective, unpublished PhD thesis, Monash University

Gray, D.R., 1994. Structural report on the Cannington Pb-Zn-Ag deposit,

- Mount Isa Inlier, unpublished report to BHP Minerals
- Guy, S., 2003. Structural control on high grade Burnham mineralization at Cannington, Meeting for Broken Hill-type deposit: recent research, Brisbane, Queensland, Australia.
- Kim, H.S., and Bell, T.H., 2004. Integrated microstructure and diamond drilling approach to exploration for silive-lead-zinc ore bodies in unexposed portion of the eastern Mount Isa Block, in preperation.
- Kim, H.S., 2003. Fold development and shear movement in the southern zone of the Cannington deposit, Meeting for Broken Hill-type deposit: recent research, Brisbane, Queensland, Australia.
- Large, 2003. BHT Deposit: Part of spectrum of stratiform sediment hosted Zn-Pb-Ag deposit. Meeting for Broken Hill-type deposit: recent research, Brisbane, Queensland, Australia.
- Mark, G., Phillips, G.N., and Pollard, P.J., 1998. Highly selective partial melting of pelitic gneiss at Cannington, Cloncurry district, Queensland. Australia Journal of Earth Sciences, v. 45, 169-176.
- Pollard, P.J., Williams, P.J., Dong, G., Blake, K.L., Ryan, C.G., Win, T.T., Mernagh, T.P., 2004. Fluid inclusion and stableisotope constraints on postmetamorphic hydrothermal activity at the Cannington (Broken Hill-Type) Ag-Pb-Zn deposit, Cloncurry district, northwest Queensland, Economic Geology, in press.
- Walters, S.G., 1998. Broken Hill-type deposits: Australian Geological Survey Organisation Journal of Geology and Geophysics, v. 17, 229-237.
- Walters, S.G. & Bailey, A., 1998. Geology and mineralization of the Cannington Ag-Pb-Zn deposit: an example of Broken Hill-type mineralization in the Eastern succession, Mount Isa Inlier. Economic Geology, 93, 1307-1329.