

해저열수다금속광상의 특성과 이에 따른 탐사 및 개발

박 상 준

한국해양연구원 심해·해저자원연구부

현재 인류가 생활에 이용하고 있는 광물자원의 대부분이 육상에서 개발되고 있다. 에너지자원 및 극소량의 금속 및 골재 또는 보석류만이 해안 또는 대륙붕 등 천해 및 근해에서 개발되고 있다. 동, 망간, 코발트, 니켈 등의 다량의 금속광물자원이 육상 뿐 아닌 심해 해저에도 부존하는데, 이들의 생성시기 및 성인 등에 관련 없이 모두 해저광물자원이라 통칭한다. 가스하이드레이트와 같은 에너지자원을 제외하면 성인적으로 망간단괴, 망간각, 해저열수광상 등은 심해에 부존하는 해저광물자원 중 전 세계적으로 가장 관심을 많이 받는 해저자원들이다. 최근 들어 북미의 광산개발업체를 중심으로 해저열수광상개발이 가속화되고 있다. 이는 육상광물자원 개발환경이 과거에 비해 심부화, 오지화 되고 있어 광산개발비용이 해저광물자원 개발비에 근접하고 있고, BRICs 및 개발도상국의 개발경쟁으로 인한 광물자원 수요가 급증하면서 광물자원 가격이 급변하고 있기 때문이다 (KORDI, 2008)

해저열수광상은 해저로 상승하는 광화유체에 의해 다양한 광종 및 산상을 보이며 다양한 심도에 배태된다(Lydon, 1988, Scott, 1997). 현재까지 해저열수활동과 관련되어 철산화광상, 망간산화광상, 논트로나이트광상, 다금속괴상화광체, 함금속퇴적광상 등 100개 이상의 다양

한 광종의 해저광체가 확인되었다.

이 중 다금속괴상화광상은 열수가 해저로 분출하여 해수와 급격하게 반응하면서 주상의 침니(chimney) 즉 블랙스모커(black smoker) 또는 화이트스모커(white smoker)를 형성된다. 침니를 형성하는 열수는 기반암 또는 그 위의 퇴적물과 지속적으로 반응하여 천금속(base metal)과 귀금속(precious metal)을 광범위하게 침전시켜 광체를 형성한다. 이는 성인적으로 육상의 다금속 화산성괴상화광상(VMS)과 유사한 특징을 보인다. 따라서 경제성을 고려한 해저열수광상이라는 것은 침니 또는 블랙스모커 뿐 아니라 함께 배태되는 괴상화광체를 포함하여 지칭한다.

지난 30년간 전 세계 대양저를 대상으로 해저열수광상(다금속괴상화광상)에 대한 연구 및 탐사가 수행되었다. 현재까지 약 30개의 해저다금속괴상화광상이 확인되었으며, 주로 3,500~1,500m 수심에 분포한다 (Hannington et al., 1994, Hannington and Moneke, 2009). 지구조적으로 이 광상들은 중앙해령의 축 또는 축 주변부의 해저화산에 분포하거나, 섭입대 배호 분지의 신생 해령 및 주변부에 배태된다(그림 1). 그러나 해저열수광체가 부존 할 것으로 생각되는 전 세계 해령의 약 10% 정도로 극히 일부만 탐사되었을 뿐이다.

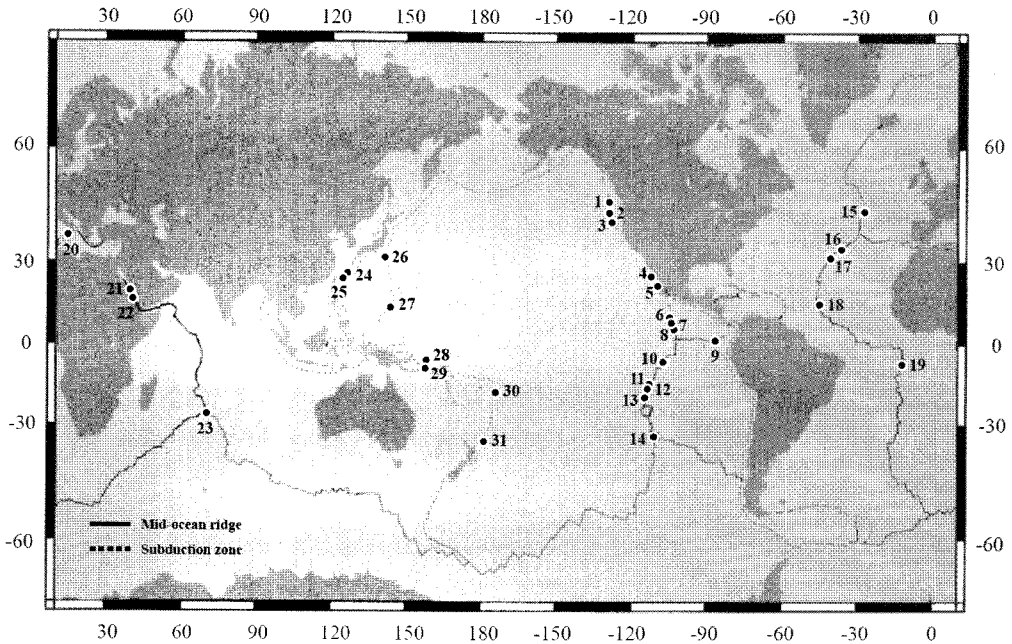


그림 1. Location of hydrothermal systems and polymetallic massive sulfide deposits at the modern seafloor (modified from Herzig and Hannington, 1995; Hannington and Monecke, 2009). 1=Explorer Ridge, 2=Middle Valley, 3=S. Juan de Fuca, 4=Salton Sea, 5=Guaymas Basin, 6=21° N EPR, 7=13° N EPR, 8=9° N EPR, 9=Galapagos, 10=17° S EPR, 11=18° S EPR, 12=20° S EPR, 13=21° S EPR, 14=37° S EPR, 15=Lucky Strike, 16=Broken Spur, 17=TAG, 18=Snakepit, 19=5° S MAR, 20=Pallnuro Seamount, 21=N. Red Sea, 22=S. Red Sea, 23=Sonne Field, 24=N. Okinawa Trough, 25=S. Okinawa Trough, 26=Izu-Ogasawara Arc, 27=Mariana Trough, 28=Manus Basin, 29=Woodlark Basin, 30=N. Fiji Basin, 31=Lau Basin.

육상에 부존하는 괴상황화광상과 해저에 분포하는 다금속괴상황화광체는 근본적으로 동일한 지질학적, 지구화학적 과정을 통해 형성되었다. 따라서 육상광상의 성인연구를 통해 현생 해저 열수광체의 성인을 연구할 수 있으며 반대로 현생 해저열수광상연구를 통해 육상광상 성인 연구에 기여 할 수 있다. 육상과 해저 열수광상에 대한 상호비교연구는 궁극적으로 해저열수광상 탐사·개발을 위한 보다 상세한 성인모델을 제시할 수 있다.

본문에서는 현재까지의 연구를 바탕으로 해저

광물자원 중 경제적으로 가장 높은 잠재성을 갖는 해저다금속괴상황화광상(이하 해저다금속광상이라 칭함)의 산상, 분포 및 지구조 환경에 따른 성인 등을 살펴보고 탐사 및 개발 특성을 논의하고자 한다.

해저열수광상의 시·공간적 분포

해저다금속광상은 육상광상과 유사하게 천부 화성활동과 밀접한 관련성을 보인다. 해저에서

천부화성활동은 크게 중앙해령, 섭입대의 호(arc)지역, 배호분지(back-arc basin) 및 배호의 신생 해령 그리고 판 내부의 열점(hot spot)과 같은 지구조대에 집중된다. 해저열수광상 탐사 초기에는 발산속도(spreading rate)가 빠른 동태평양해령(EPR)을 중심으로 탐사가 집중되었으나, 탐사가 수행됨에 따라 발산속도가 느린 해령(Trans-Atlantic Geotraverse -TAG, 인도양해령)에 대하여서도 많은 탐사가 수행되어져 왔다. 비교적 최근에는 발산형 경계이외에도 태평양판이 현재 섭입하고 있는 남서태평양(Mariana, Maunu, Woodlark 등)을 중심으로 많은 해저열수광상 탐사가 진행되고 있다. 다양한 지구조대에 분포하는 해저다금속광상들의 성인은 유사하나, 천부화성활동 및 퇴적활동 차이에 기인한 모암 특성 및 유용원소의 분산과 농집 기작에 따라 상이한 특징을 보인다. 이로 인해 해저다금속광상은 지구조환경에 따른 서로 다른 광물조합과 광종을 보인다. 특히 도호(island arc)와 같은 지역에서 알칼린 화산암체와 관련된 열수광체는 육상에서 관찰되는 천열수 광상과 매우 유사한 특징을 보인다.

해저다금속광상이 주로 분포하는 중앙해령은 지각이 생성되는 곳으로, 매우 높은 지열류량을 보인다. 중앙해령에서 분출되는 열수의 양은 초당 약 5×10^6 l 를 보인다(Wolery and Sleep, 1976). 확산에 의한 해저로의 열전달을 무시한다면, 전 세계 중앙해령에서 매년 분출되는 열수의 양과 에너지는 1kg/S 와 1.5 MW/S을 보인다(Converse, 1984). 열출입이 균형을 이룬다면 이는 열수분출공이 중앙해령을 따라 적어도 매 50m 마다 (전체 해령 길이는 55,000km) 하나 이상은 존재해야 함을 의미한다. 그러나 현재까지 발견된 중앙해령의 열수분출공의 수는 극소수로, 해령 축 주변에서의 확산에 의한 열전달이 추가로 고려되어야 한다. 비교적 저온으로 열을 전달하는 확산은 해령축에서 떨어진 지

역에서 분출하는 열수에 의해 일어나는 것으로 판단되며, 해령 부근에서 발생하는 열의 약 80%를 확산을 통해 전달하는 것으로 추정된다(Morton and Sleep, 1985; Wheat and Mottl, 1994). 따라서 해령의 열수활동이 해령 축을 중심으로 고르게 분포하는 것이 아니라 해령 축과 축주변부에 편재할 가능성이 높은 것을 시사한다. 고온성 열수활동은 변환단층사이의 해저고산지대(수심이 낮은 곳)에 집중되는 경향을 보이는데, 이는 하부에 대규모의 마그마 챔버가 존재하기 때문인 것으로 해석된다(Francheteau and Ballard, 1983).

대규모 해저다금속광상화광체는 기반암 상위에 퇴적물이 우세하게 분포하는 곳에서 더욱 부화되는 경향을 보인다. 이는 퇴적물내의 공극을 통과하는 광화유체가 지속적으로 공극수와 반응 할 수 있게 하는 덮개암 역할을 하면서 보다 많은 유용광물이 침전될 수 있는 환경을 조성하기 때문인 것으로 생각된다(Cann and Strens, 1982).

다금속광체가 발견되는 곳은 주로 수심 1,500m 보다 깊은 곳에 분포하는 것으로 보고되고 있다. 수심이 이 보다 낮은 경우 광화작용을 야기하는 비등이 해저로 분출되기 전에 지각하부에서 선행되기 때문이다. 약 350℃의 광화유체는 약 160bar 정도에서 비등하는데, 이는 정수압으로 1,600m 수심의 압력과 동일하다. 따라서 해저지표로 상승하는 350℃의 광화유체가 수심 1,600m 보다 얕은 곳까지 상승하면 광화유체는 해저 지표면 하부에서 비등하면서 광화작용이 집중되게 된다. 따라서 이후 해저면으로 분출되는 유체는 상대적으로 빈화된 광화유체로 해저면에서 침니를 형성하지 못 한다. 반면, 동일한 조건의 광화유체가 수심 1600m 보다 깊은 곳에서 분출하면 광화용액은 지각하부에서 비등하지 않고 해저면으로 분출된 이후에 비등하게 되며 유용성분을 해저면에 침전시켜

침니와 같은 광체를 형성한다(그림 2). 비등은 온도 및 압력 이외에도 염농도, 휘발성분의 함량 등에 의해 영향을 받으며 이들 인자간의 복합적인 반응에 따라 달라지므로 실제 해저면으로 분출되어 비등 할 수 있는 수심은 수백 미터 혹은 그 이상이 될 것으로 추정된다(Bischoff and Pitzer, 1985; Ishibashi et al., 1994).

대서양의 TAG 지역의 초기 열수활동은 130Ka에 있었으며, 저온성 Mn 산화물 침전이 우세하게 일어났다. 이후 과산화광체를 형성시킨 고온성 열수활동은 약 40~50Ka에 집중적으로 진행된 것으로 해석된다. 현재 열수활동은 약 20Ka 시작되어 매 5~6천년마다 반복적으로 진행되어 약 4천간의 휴지기를 거친 후 약

50년 전부터 열수활동을 다시 시작한 것으로 판단된다. 이러한 단속적 열수활동은 상부맨틀에서 해령 축 하부로의 주기적인 마그마 공급에 기인한 것으로 해석된다. 마리아나 해구에서 채취된 활동성 및 비활동성 중정석-황화물 침니는 그 형성시기가 시료 채취 당시로부터 0.5~2.5년전을 보여 매우 최근에 형성된 것으로 생각된다(Moore and Stakes, 1990). 그러나 동태평양에서 발견된 비활동성 황화 침니형 광체는 대서양 TAB지역에서 현재 활동중인 침니와 유사하게 약 60~80년 전에 형성된 것으로 이들 광체 모두는 최근까지 열수활동이 지속되고 있음을 지시한다.

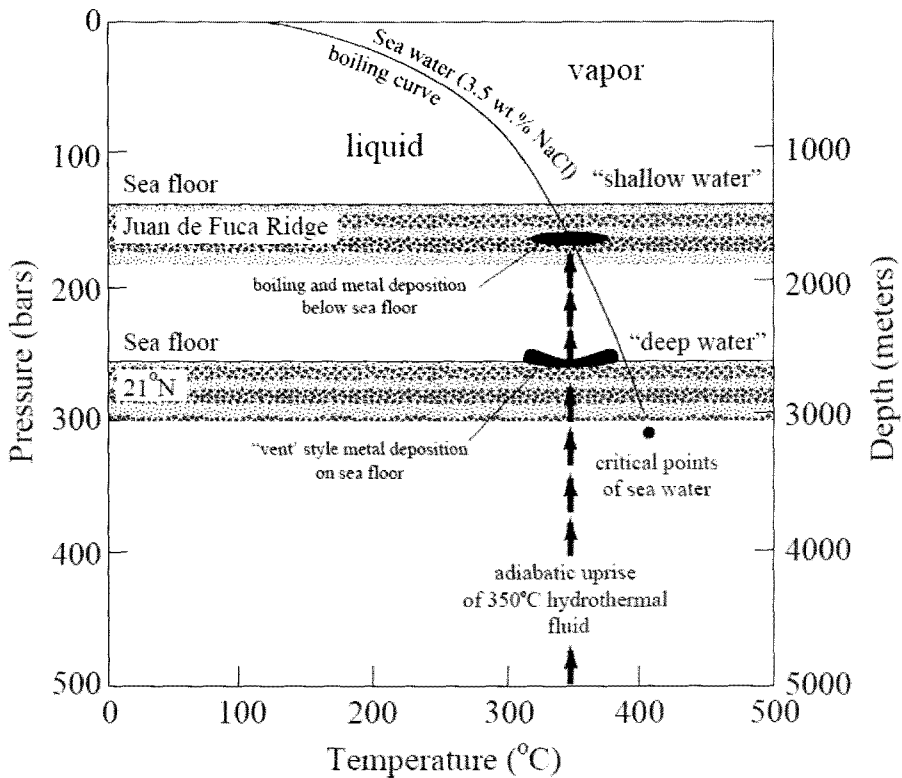


그림 2. Pressure(or depth) versus temperature plot showing the sea water boiling curve relative to deep and shallow sea floor(After Delaney and Cosens, 1982).

광상 구조 및 유형

해저다금속광체의 대체적인 하부 연장성은 알려져 있으나, 연장성이 정밀하게 탐사된 광상은 소수이다. TAG지역 열수괴상광체는 약 100~500만톤 규모를 보이는 것으로 보고되어 있다. 이들 중 광체 규모가 큰 것은 퇴적물이 다량으로 분포하는 곳에서 지속적으로 열수 분출이 일어나는 광체이다. 홍해지역에서 발견된 아틀란티스 II 딥 (Atlantis II Deep) 광상은 직경 10km를 보이는 퇴적분지에 배대되며 광량은 9,400만톤 규모(품위 2 wt.% Zn, 0.5 wt.% Cu, 39g/t Ag, 0.5g/t Au)로 현재까지 알려진 해저열수광상 중 가장 큰 규모를 보인다 (Mustafa et al., 1984). 상기 광체를 대상으로 한 시험채광 결과 2,000m 수심으로부터 함금속퇴적물을 성공적으로 양광하였다(Amann, 1985). 동태평양의 후안 드 푸카 해령(Juan de Fuca Ridge)의 북쪽에 위치하는 미들벨리(Middle valley)지역의 다금속괴상광상은 96m 이상 하부로 연장되는 것으로 파악됐으며 5,000만~1억톤 이상의 규모를 보일 것으로 파악된다(Davis et al., 1992).

현재까지 알려진 해저열수광체의 규모는 다소 과소평가되어 있을 것으로 판단된다. 이는 이들 광체들에 대한 정밀조사가 부족한 점도 있지만, 과거 연구가 주로 열수 침전에 의한 광체에만 국한되었기 때문이기도 하다. 실제로 육상에서 개발되는 VMS형 광상들은 열수의 직접 침전에 의해 생성된 광체 뿐 아니라 열수변질작용과 교대작용에 의해 광범위하게 형성된 광체를 대상으로 대규모 개발이 진행된다.

현재 활동중인 블랙스모커는 연간 250톤의 괴상광체를 형성하는 것으로 알려져 있다(Scott, 1992). 따라서 몇 개의 블랙스모커가 모여 형성된 지역은 소규모 광상으로 분류될 수 있다. 규모면에서 해저다금속괴상광상 중 100만톤에서

1억톤 규모는 육상의 전형적인 화산성괴상광상에 해당한다. 그러나 현재 알려진 해저다금속괴상광상의 대부분은 이 보다 작은 수천톤 규모를 보인다. 남부 익스플로러해령(Southern Explorer ridge)중 길이 약 8km 정도 되는 지역에 분포하는 60여개 이상의 개별 노두들은 대개 250m×200m 영역 두 개 안에 집중적으로 분포한다(Scott et al., 1991). 시추자료 부족으로 많은 광상의 규모가 과소평가되기도 하지만 반대로 일부 광상들의 규모가 과장되기도 한다. 집합적 침니 및 황화물 광체구(鑛體邱, sulfide mound, 이하 광체구) 규모 이상을 파악하고자 할 때에는, 고해상도 심해견인측면주사소나(deep-tow side scan sonar)와 같은 지구물리적인 탐사가 좀 더 효과적일 수 있으나 광체구 규모의 연장성 확인에는 여타의 지구물리탐사뿐 아니라 심해카메라와 같은 시각적 탐사에 의한 연장성 확인이 가장 효과적일 것으로 판단된다.

해저다금속광체는 집합적 침니와 다금속황화물로 구성되는 광체구로 구성된다. 광체구 하부로는 육상광상에서 흔히 관찰되는 망상맥상(stockwork vein)의 광체가 형성되는 것이 일반적이다(그림 3). 광체구에 형성되는 침니는 크게 고온성 블랙스모커와 저온성 화이트스모커로 분류된다. 침니형태의 광체는 해저열수광화작용에서 최상부분을 지시하는 것으로 광체가 하부로 연장되는 광체구에 그 뿌리를 두고 있다. 광체구도 계속되는 열수유체의 순환에 의해 지속적으로 두꺼워지며 기정출한 광물의 재결정작용이 반복적으로 일어난다. 광체구 위에 형성된 침니는 높이가 약30m 까지 성장하기도 하는데, 궁극적으로는 붕괴되어 재결정화 되면서 광체구의 일부가 된다. 이렇게 하여 일부 광체구는 하루에 약 10cm 이상 두꺼워지기도 한다(Hekinian et al., 1983). TAG에 분포하는 집합적 침니와 광체구는 비교적 규모가 큰 광체를 이루고 있다. 광체구의 직경은 약 250~300m

를 보이며 높이는 약 50m를 보인다. 광체구 중앙부의 침니에서는 고온성 열수가 분출되며 광체구 외각부의 침니는 저온성 광화유체가 분출되는 화이트스모커의 특징을 보인다. 일부에서는 높은 실리카 함량과 고투명도의 저온성 유체(20~30℃)가 분출되기도 한다(Hannington et al., 1990). 이런 저온성 유체는 광체구 표층부에서 국부적으로 분출되어 규질화된 산화철각을 형성하기도 한다.

일부 광체구는 정단층에 의해 이들의 하부의 망상세맥 구조가 노출되기도 한다. 노출된 광체구의 중심부에서는 고온성 황화광물들(황동석, 아이소큐바나이트, 황철석)이 우세하며 광체구 외각부로 갈수록 저온성 광물들(섬아연석, 경석고, 비정질석영)이 우세하게 산출되는 특징을 보인다. 이러한 광물분대는 육상의 화산성괴상

황화광체의 광물분대와 유사한 특징을 보인다.

열수분출공을 통해 광화유체가 바로 해수와 반응 할 때에는 유체의 온도변화, pH 변화, redox 변화 등에 기인하여 유체 내 유용성분이 미립자로 결정화되며 이들 중 97%이상은 비산된다(Converse, 1984). 이렇게 분산된 미립자들은 해저류를 타고 넓게 퍼져나가 분출공으로부터 먼 곳까지 이동하여 퇴적된다. 해저열수에 의해 형성된 괴상황화광상 중 저품위 대규모는 이러한 퇴적기원의 광체가 우세한 경향을 보인다. 함금속퇴적물의 분포를 통해 광화유체 분출지역을 탐사하는 기법이 시도되었으나, 퇴적물 내 금속함량은 넓은 범위에서 다수의 요인에 의해 변화하기 때문에 공간적으로 불규칙한 함량을 보인다. 따라서 해저열수광상을 탐사하는 지화학탐사에 이용하기에는 어려운 점이 많다.

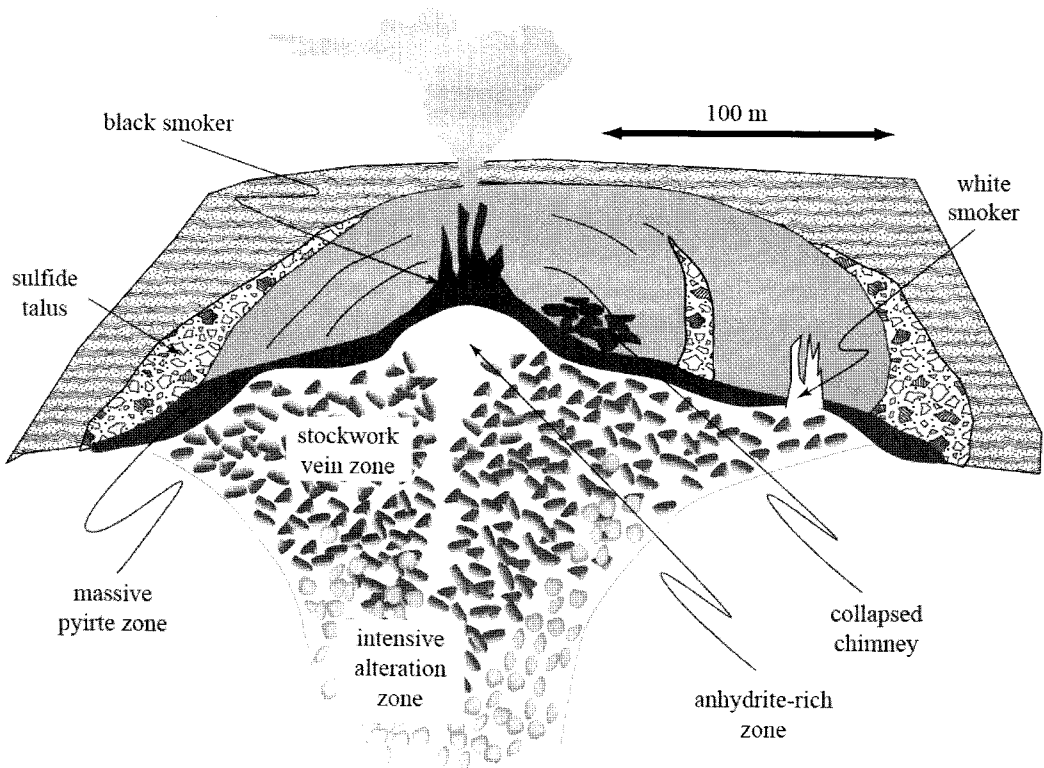


그림 3. Cross-section showing the principal components of a sea floor hydrothermal system.

해수로 직접 분출되는 열수에서 유용금속성분이 보다 효율적으로 농집되기 위해서는 열수가 좀 더 지속적으로 반응하여 다량의 금속광물이 침전 할 수 있는 일종의 덮개암이 필요하다. 육상의 과거 해저열수광상들의 덮개암 역할은 주로 광화초기에 성장하고 붕괴했던 침니의 잔해가 그 역할을 담당했던 것으로 생각된다. 광화초기에 형성된 침니 집합체의 잔해 및 광체구의 간극을 충전하며 분출되는 광화후기의 열수는 광화초기의 것 보다 지속적인 반응이 유도됨으로써 보다 대규모의 해저다금속괴상광체를 형성하게 된다. 황화물 광체구 뿐 아니라 베개용암(pillow lava)류 또한 열수와의 반응을 유지해주는 덮개암 역할을 할 수 있다. 또한 쇄설성 퇴적물이 이러한 덮개암의 역할을 할 수도 있다. 만약 열수가 분출되는 곳에 두꺼운 양의 퇴적물이 쌓이면 광화유체가 공극수와 반응하여 금속 침전을 우세하게 진행시키는 역할을 하기 때문에 육상의 VMS 또는 SEDEX (SEDimentary EXhalative) 유형의 황화광체가 형성될 수 있다.

홍해의 아틀란티스 II 딥(Atlantis II Deep) 광상은 성인적으로 상기한 유형과 상이한 특징을 보인다. 홍해에서는 마이오세기 증발암층을 순환하는 해수로 인해 일반적인 열수보다 수배 강한 염농도를 갖는다. 고염농도의 열수는 주변 해수에 비해 높은 밀도를 가지므로 기저부에 모이게 된다. 따라서 고염농도 열수는 분지 기저부에 모여 유용성분이 침전 되므로 여타의 해저열수광상보다 제한적 범위에서 고품위의 광상이 형성되는 특징을 보인다. 광화작용은 주로 퇴적물의 박층리를 따라 우세하게 진행되는데 합금속퇴적물의 분포가 40km에 이르기도 한다. 몇몇 경우에는 이런 곳에서 침니가 발견되기도 하여 국부적으로 간헐천과 같은 형태의 열수 분출이 있었음을 시사하기도 한다.

광상 품위 및 규모

해저다금속괴상광체에 대한 품위는 대체로 잠수정에 의해 회수된 침니로부터 분석된 것이다. 이 경우 금속품위는 침니와 광체구를 포함한 전체 광상 중에서 침니만의 품위를 지시할 뿐 채광대상이 되는 광체구 전체에 대한 광량 파악은 부정확하다. 또한 침니간 광체구의 연속성, 광체구 하부 연장성 및 하부 망상맥에 대한 품위 등이 거의 보고되어 있지 않다. 따라서 좀 더 정확한 하부광체의 품위와 연장성을 파악하기 위해서는 해저시추와 같은 3차원적인 시료채취와 연구가 필요할 것으로 생각된다.

다양한 지구조환경에 배태되는 해저다금속광상은 천부화성활동 및 관련 열수계 특성에 영향을 받는다. 광상의 모암은 중앙해령현무암(MORB), 중성암질의 분출암(현물암질 안산암, 안산암), 산성암질 화산암류(유문암, 석영안산암)에서 쇄설성퇴적물까지 지구조와 관련되어 다양하게 산출되는 특징을 보인다. 다량의 퇴적물을 모암으로 한 해저열수광체는 상부 퇴적물이 거의 없는 기반암을 모암으로 배태되는 광상에 비해 규모가 비교적 크고 금속 품위(4.7wt.% Zn, 1.3wt.% Cu, 1.1wt.% Pb)는 낮은 특징을 보인다(Herzig and Hannington, 1995). 이 유형의 광상은 퇴적물과 광화용액의 반응에 의해 생성되며 방해석, 경석고, 중정석, 비정질 석영 등이 맥석광물 산출되어 이 유형 광상의 품위를 낮추는 주요 원인이 된다.

퇴적물이 거의 없고 주로 기반암을 모암으로 배태되는 해저다금속광상은 퇴적물을 모암으로 하는 광체에 비해 그 규모가 제한적인 반면 품위(11.7wt.% Zn, 4.3wt.% Cu, 0.2wt.% Pb)는 비교적 높은 특징을 보인다(Herzig and Hannington, 1995). 맥석광물은 침니 외각부에서 주로 경석고와 중정석이 산출되나 구성 빈도는 20% 이하를 보인다. 중앙해령 지역에서

현무암을 모암으로 배태되는 해저다금속광상은 대체로 녹색편암상을 보이며 고온성 열수와의 단순한 반응에 의해 형성된 특징을 보인다. 광체의 금속 분대 및 품위 변화는 주로 광화유체의 진화 특성에 기인하는 것으로 고온성(>300℃)열수 유체에서는 주로 Cu가 우세한 광체가 형성되는 반면, 보다 저온성(<300℃)유체에서는 Zn, Pb가 우세한 광체가 형성된다.

배호분지의 다금속과상광체는 현무암에서 안산암이르는 다양한 암상을 모암으로 배태된다. 광상의 품위는 15.1wt.% Zn, 1.2wt.% Pb, 13.0wt.% Ba, 13.3wt.% Fe 등을 보인다. 오키나와 트러프에서 산출되는 일부 광체는 석영 안산암, 유문암 등을 모암으로 하여 산출되며 18.4wt.% Zn, 11.5wt.% Pb, 2766ppm~1.1wt.% Ag, 1.5wt.% As, 0.3wt.% Sb 등의 품위를 보인다(Herzig and Hannington, 1995). 높은 Sb와 As 함량은 주로 사면동석, 스티브나이트, 합As황화광물 등과 같은 광물의 산출에 기인한다.

라우분지 Vail lilli Hydothermal Field (VLHF) 지역에서 관찰되는 열수는 중앙해령의 것에 비해 낮은 pH와 높은 Zn, Pb, As을 보인다. 나아가 오키나와 트러프에 분포하는 해저다금속광체의 Pb함량은 라우분지의 것에 보다 더 높은 특징을 보인다. 유체의 특성상 유문암, 안산암 및 퇴적암류에서 형성되는 열수광상은 높은 Pb함량을 보이는데, 오키나와트러프의 것이 더 높은 납함량을 보이는 것은 광상이 배태되는 부근에서 20km의 두꺼운 퇴적물이 분포하기 때문이다.

일부에서는 20~30m 층후의 퇴적물이 존재해도 위와 같이 높은 Pb함량을 보이기도 하므로 다량의 퇴적물이 기반암 상부에 퇴적되어 있는 곳에 배태되는 광체는 퇴적물내의 Pb와 Ba를 함유한 광물(예, 장석류)과 반응한 결과로 해석된다. 이와 같은 특징은 육상의 화산성과상

황화광상에서 보고되기도 한다(Fouquet et al., 1993).

광물학적 특성

중앙해령 및 섭입대 등의 지구조적 특성과 모암의 종류 또는 퇴적물의 양 등에 의해 해저열수광상에서 산출되는 유용금속광물들은 서로 상이한 광물조합을 보인다. 특히 관련 화산암류 및 퇴적물의 빈부가 열수광체의 구성광물의 특성을 크게 좌우하는 것으로 생각되고있다(Herzig and Hannington, 1995).

해령의 퇴적물이 빈약한 지역에 배태되는 열수광체는 주로 고온성(300°~400℃) 광물조합을 보인다. 고온성 열수 분출공 주변과 광체구 내부에서는 고온성 황화광물인 아이소큐바나이트와 황동석이 공생하며 경석고, 자류철석, 황철석 및 소량의 반동석이 산출된다. 저온성 광물인 Mg-수산화광물, 황산염광물, 수화물 등은 침니와 광체구 외각부에서만 산출된다. 침니와 광체구 최외각부에서는 섭아연석, 백철석, 황철석과 같은 비교적 저온성 황화물들이 산출되며 국부적으로 비정질 실리카가 산출되기도 한다. 상기한 바와 같이 광체구 가장자리에 위치하는 화이트스모커는 저온성 광물로 구성된다. 전형적인 침니 및 광체구에서는 열수의 조성변화와 유체간 온도차에 기인하여 광물분대가 형성된다. 고온성 광물과 공생하는 경석고는 광화후기의 황화광물, 비정질 석영, 중정석 등에 의해 치환된다. 수압이 높고 열수의 온도가 150℃이하가 되면 기 정출한 경석고가 해수로 다시 용해된다. 침니 형성시 경석고는 주로 황화물과 변질광물의 입자경계부를 따라 정출하여 침니 구조를 지지하는 기질역할을 한다. 열수 온도가 낮아지면 경석고가 재용해되면서 침니가 붕괴되어 광체구에 부가되게 되면서 두꺼운 해저열수

광체가 형성된다(그림 3).

해령지역에서 퇴적물 층후가 두터운 곳에서 형성된 해저열수광상은 퇴적물과 반응하여 현무암, 안산암 등의 기반암에 배태되는 광상에 비해 비교적 넓은 광체를 형성한다. 이들 광체는 특히 퇴적물에서 유래하였을 것으로 생각되는 Pb 또는 Ba의 함량이 높은 특징을 보인다. 따라서 퇴적물 층후가 두꺼운 곳에 배태되는 열수 광상들은 방연석이 비교적 우세하게 산출되는 특징을 보인다. 또한 국부적으로 유비철석, 사면동석, 비독사석, 보울란자이트, 스텐나이트, 조단나이트, 자연 비스무스 및 비정질 중정석 또는 비정질 석영이 공생하는 광물조합을 보인다. 일부에서는 광화유체가 퇴적물내 유기물과 반응하며 환원되어 상기한 광물조합에 자류철석이 공생하기도 한다. 섭입대 부근 도호에 분포하는 열수광상 중 대륙연변부에 분포하는 광체들은 지구조환경이 상기한 광상과 유사한 성인 환경을 보이며 따라서 구성 광물조합 역시 유사한 특징을 보인다(Herzig and Hannington, 1995; Scott, 1997).

배호분지에서 위치하는 해령은 지구조적으로 매우 미성숙한 신생 해령으로 퇴적물의 양과 관련하여 중앙해령의 퇴적물이 빈화된 지역과 유사한 지구조적 환경을 보인다. 따라서 다양한 양의 방연석과 공생하는 테난타이트 및 국부적으로 산출되는 비정질 Pb-As 황산염광물들(예, 그라토나이트, 다이프레노사이트, 조다나이트), 중정석, 비정질 석영 및 자연황 등이 특징적으로 산출된다. 남서태평양 라우분지의 화이트스모커에서는 특징적으로 다량의 금이 산출되기도 한다(Herzig and Hannington, 1997).

일본의 오키나와 트러프와 같은 배호분지에서 확장과 관련되어 생성되는 해저다금속광상에서는 특징적으로 합금방연석, As-Ag, Sb-Ag, Ag-Sb-Pb 황산염광물, 자연황, 진사, 계관석등이 산출되기도 한다.

금의 산상

일부 해저다금속광체에서는 특징적으로 금이 산출되기도 한다. 특히 배호분지의 신생 해령 부근에 배태되는 광상에서 높은 함량을 보인다. 중앙해령 광체에서는 ~0.2ppm에서 2.6ppm Au를 보이며(평균 1.2ppm Au), 특히 소량의 퇴적물이 분포하며 고온성 열수에 의해 형성된 Cu-Fe 침니(블랙스모커)에서는 <0.2ppm Au의 낮은 함량을 보인다(Hannington et al., 1991a and b). 반면 침니에서 분출되는 고온성(>350℃) 열수에는 약 100~200 ppt Au가 함유되어 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 고온성 블랙스모커에서 금광화작용은 미약하게 진행된 것으로 생각되며, 광화용액 중 금은 대부분 해수로 비산되는 것으로 판단된다. 광체구 및 하부 망상맥에서 회수된 시료의 함금량 역시 블랙스모커와 유사한 함량을 보인다. 중앙해령 저온성 광체 중 금 품위는 광화후기에서 가장 높은 함량(~6.7ppm)을 보인다(Hannington et al., 1991a and b). TAG지역에서 산출되는 광체의 일부는 40ppm 이상의 금 품위를 보이기도 한다. 중앙해령 광체에서 이와 같이 높은 함금량을 보이는 것은 광화작용 동안 침전된 금이 재이동 되거나 재침전하면서 품위가 높아졌기 때문으로 판단된다.

다량의 퇴적물로 덮힌 해령에 분포하는 광체에서는 0.2ppm 이하의 매우 적은 금품위를 보이는데 이는 열수가 퇴적물내의 유기물과 반응하여 환원되면서 금의 침전이 어려운 환경으로 유도되었기 때문으로 해석된다. 한편으로 이런 환원환경에서도 동이 우세한 광상에서는 약 10ppm정도의 금이 수반된다(평균 1.5ppm Au). 홍해에서 발견된 해저다금속광체의 함금속퇴적물내에는 약 0.5ppm 정도의 금이 함유되어 있으며, 특히 합황화광물층준에서는 ~0.5ppm에서 4.6ppm 정도까지의 금이 산출

되기도 한다(평균 2ppm Au). 광체 규모를 고려한 이 광상의 금 매장량은 약 45t에 이를 것으로 판단된다(Mustafa et al., 1984).

배호의 미성숙한 해령에 분포하는 다수의 다금속황화광체는 특징적으로 3~30ppm의 금을 함유한다. 이 광체는 대체로 안산암, 석영안산암, 유문암과 같은 칼크-알칼라인 계열의 화산암을 모암으로 배태된다. 라우분지의 Valu Fa Ridge에 분포하는 해저다금속광상은 약 29ppm Au의 품위를 보이기도 한다.

배호분지에서 비교적 성숙한 해령은 MORB와 유사한 조성을 보이는 화산암류로 구성된다. 이 지역에 배태되는 광상의 금품위는 중앙해령 것과 유사하여 비교적 낮은 0.1~4.3ppm Au를 보인다. 배호에서 산출되는 용암류의 금품위는 MORB의 금함량과 거의 차이를 보이지 않아 이들 용암류들이 해저다금속광상의 근원암일 가능성은 희박하다. 그러나 이들 모암은 수암반응을 통해 금의 농집과 침전에 영향을 주는 것으로 판단된다. 즉 중앙해령 부근에서 분출되는 광화유체의 산화도는 기반암내의 FeO광물과 반응하여 쉽게 완충(buffering)된다. 반면 해수 및 산성질암과의 고온 반응에 의해 발생하는 열수분출용액은 좀더 산화된 특성을 보이며 모암내의 FeO광물이 상대적으로 빈화되어 있어 산화환원 완충력이 감소한다. 좀 더 산화된 광화유체는 좀 더 많은 금을 운반하며 냉각, 혼입, H₂S의 산화 등에 의해 효율적으로 금을 침전시키게 된다(Herzig et al., 1993; Scott, 1997).

해저에서 산화도가 높은 해수에 의해 형성되는 산화피상황화광상은 국부적이지만 매우 효율적인 금의 침전, 즉 이차부화작용을 야기한다. TAG 열수지역의 일부 광체에서는 이차부화작용으로 금이 이차적으로 침전하는 산상을 보인다. 해저의 이러한 이차부화대에서는 비정질 산화물, 자로사이트, 아타카마이트 등과 소량의 침철석 및 비정질석영이 산출된다. 이들 광체의

1차 광석광물 및 2차 광석광물의 산상은 육상의 이차부화광상과 유사한 특징을 보인다.

선광을 고려한 물리적 특성

해저다금속광체의 물리적 특성에 대한 자료는 광상성인 및 탐사 뿐 아니라 채광, 선광 및 정광시 경제성을 높일 수 있는 유용한 자료로 이용된다.

광체의 밀도 분포를 보면, 침니 및 열수각, 광상구의 외각부분에서의 건조 밀도는 1~2g/cm³이며 함수량은 25~50%로 매우 낮은 수치를 보인다(Crawford et al., 1984). 반면 다짐현상, 공극충진, 열수치환으로 인한 고밀도 광체는 광상구 내부에 더 많이 존재할 것으로 예상된다. 회수된 시료 대부분은 미립자로 황화광물과 맥석광물이 복잡하게 공생한다. 광석광물과 맥석광물 입자가 미립인 것은 열수로부터 광물 침전시의 급속한 환경변화에 기인한 것으로 해석된다. EPR21°N에서 회수된 침니의 구성광물 입자의 93%가 10 μ m~1mm의 크기를 보인다. 다른 곳에서 산출되는 침니의 황화광물(황철석, 섬아연석, 황동석)의 입자 크기는 1~600 μ m를 보이며 400mesh이하에 크기를 보이는 입자가 90~95%를 보인다(Alton et al., 1989). 일부 침니 및 광체구 최외각에서는 중첩되는 열수광화작용에 의한 재결정작용으로 구성입자가 커지는 현상도 관찰된다.

해저열수광상에서 산출되는 이러한 미립의 광석광물에 대한 선광기술은 앞으로 지속적으로 연구가 필요한 분야이다. 대부분의 해저열수광상에서 산출되는 황화광물들은 집합체를 형성하고 있는데 이들을 개개의 구성입자로 파쇄하는 것으로 인해 선광비용이 증가하게 된다. 또한 육상광산의 선광 효율로 보아 10 μ m이하의 극미립자의 미회수율도 클 것을 예상된다. 이런 상

황에서 재결정 작용에 의해 유용성분의 농집도가 커진 광체가 경제성이 있는 광상으로 평가받을 수 있다. 육상광상에서는 부유선광이 가장 중요한 선광기법으로 알려져 있지만 10 μ m이하의 극미립자를 선광하는데는 한계가 있다. 또한 육상에서는 담수를 이용한 부유선광이 시행되지만 해저열수광상 개발에서는 해수를 이용한 부유선광이 고려되므로 이에 대한 연구가 진행 중이다. 유도자기분리법에 의한 해저열수괴상광체에 대한 시험선광이 실시되어 동과 아연의 회수율이 81%로 보고된 바 있다. 복잡한 산상을 보이는 해저열수괴상광체에 대한 회수율을 높이기 위해서는 적당한 방법으로 광석을 미리 처리하는 방법이 개발되어야 할 것으로 판단된다.

육상의 화산성괴상황화광상에서 회수되는 금·은은 대체로 천금속을 회수하는 과정에서 발생하는 부산물의 형태로 얻어진다. 그러나 많은 수의 괴상황화물 광체의 금이 황철석과 밀접히 공생하며 산출되어 천금속 선광시 귀금속은 회수되지 않는다. 또한 은의 회수는 일반적으로 공생관계에 따라 달라진다. 은은 대체로 방연석, 황동석, 또는 사면동석계열의 황은염광물내의 미립 포유물로 산출된다. 금은 자연금 또는 에렉트럼의 단독 입자로 회수되며 부유선광시 동과 함께 회수되는 게 보통이나 현재의 파쇄작업으로는 괴상광체에 포함된 금의 60%이하만을 회수할 수 있다. 금의 60%회수율은 매우 낮은 것으로 이는 흔히 사용하는 선광법으로는 균일한 미립(<10 μ m)의 금만을 회수하기 때문이다. 해저열수광상에서 합리적 비용으로 금 미립자를 회수하는 것이 선광에 있어서는 가장 필요한 요건이 될 것이다. 육상광상의 이차부화광상(gossan)처럼 이차부화작용에 의해 귀금속의 입자가 조립질로 바뀌면 보다 좋은 경제성을 확보할 것으로 생각되며 따라서 단기적으로는 이러한 이차부화광상형태의 해저열수광상을 대상으로 탐사하는 것도 좋은 전략이 될 것이다.

탐사를 위한 육상광상과의 비교

중앙해령과 배호지역 해령 및 분지에 배태되는 해저열수광상의 성인모델은 육상광상이 성인 연구를 기본으로 한다. 특히 중앙해령에서 발견되는 해저열수황화광체는 압등암을 모암으로 하는 사이프러스형 Cu-Zn 괴상황화광상과 유사한 성인적 모델을 가진다(그림 4). 사이프러스형 광체는 현재 중앙해령의 광체와 유사하게 광체 중앙부에 광체구가 두껍게 자리하고 있으며 현재 채광의 대상이 되는 곳은 두꺼운 층후의 괴상 황철석 및 황동석 광체이다. 이외에 중요한 채광대상이 되는 곳은 광체구 하부 망상맥이 발달하는 구간으로 수 백만톤의 광량을 보이는 곳이다(Constantinou and Govett, 1973).

남서태평양 또는 서태평양 배호에 배태되는 해저열수광체는 현생이연의 구로코 또는 이베리안 황철석대형의 Zn-Pb-Cu 광상과 유사한 특징을 보인다. 마우너스분지 동측에서 확인된 해저다금속광체는 주로 산성화산암 또는 석영안산암질 암석을 모암으로 배태되며 시생대 Zn-Cu 괴상황화광상과 성인적으로 유사하다. 전 세계적으로 약 25%이하의 화산성괴상황화광상만이 현무암을 모암으로 하고 있으며 55%이상의 광체가 산성암질 암체를 모암으로 하고 있다(Rona, 1988). 이런 관점에서 보면 배호 및 배호의 신생해령 부근이 보다 양질의 해저다금속광체가 형성될 수 있는 지구조환경인 것으로 판단된다.

육상에서 발견되는 괴상황화광체를 고려하면, 경제성 있는 광체는 침니, 광체구 및 그 하부의 망상맥 모두가 채광의 대상이 된다. 따라서 해저열수광상의 매장량을 평가할 때에는 개별 광체구 또는 침니 하나만을 고려하기 보다는 광화대 전체에 대한 분포를 최대한 고려해야 한다.

전 세계에 분포하는 사이프러스형 동광상 중 15%이하의 광산만이 1,000만톤 이상의 매장량을 보이며 50%는 100만톤 정도의 소규모 매장

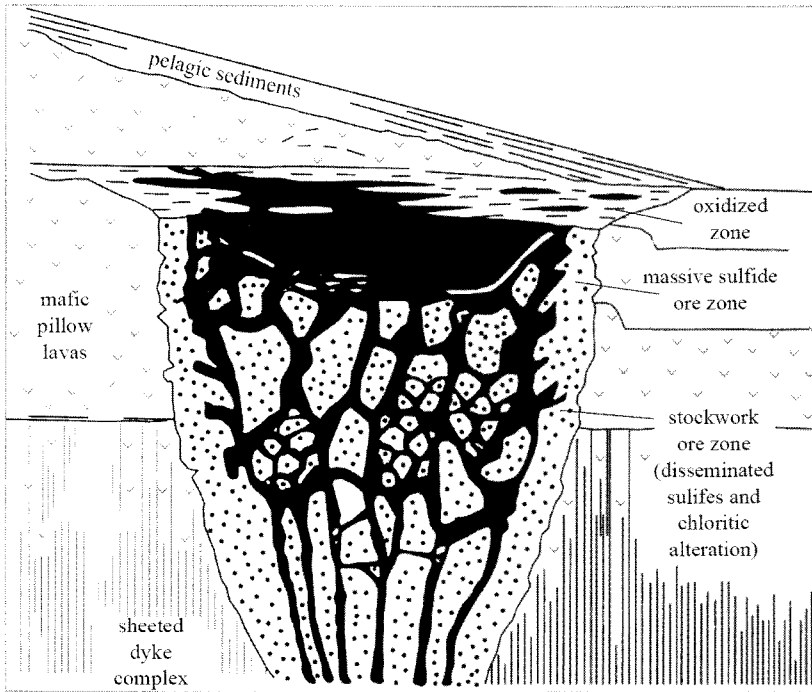


그림 4. Section through a typical ophiolite-hosted, Cyprus-type VMS deposit(After Hutchinson and Searle, 1971).

량을 보인다. 캐나다에 분포하는 화산성피상황화광상(VMS) 광산들도 사이프러스형 광산 유사한 매장량-품위 관계를 보인다. 또한 하나의 대규모 광상이 그 지역 매장량의 60~70%를 차지하며 두 번째 규모의 광산이 전체 매장량의 10~20%를 보이는 특징을 보인다(Sangster, 1980). 캐나다에서 가행되는 VMS광산의 평균 크기는 약 100만톤이지만 통계적으로 대규모 매장량이 보고된 광산은 실제 몇 개에 지나지 않는다. 해저열수광상의 침니처럼 모두 규모의 소규모 광체는 매우 많이 분포하지만, “광상”으로서 유의미하게 취급되기에는 충분치 않은 광상들이 많이 분포함을 의미한다.

약 7억5천만톤의 매장량이 확인된 Iberian Pyrite Belt와 유사한 광화대는 해저에서 아직 발견되지 않았다. 육상광상의 성인을 살펴보면 세계적 규모의 광상은 퇴적물 층후가 비교적 두

꺼운 지역에 부존 할 가능성이 있다.

전 세계적으로 VMS 유형의 광상에는 약 3000톤의 금이 매장되어 있는 것으로 추정된다. 이들의 금품위는 평균 1.2ppm을 보이며 약 500만톤에서 1,000만톤에 이르는 광석량을 보인다. 이들 중 약 10ppm 이상의 금함량을 보이는 광상들은 주로 산성암류를 모암으로 하거나 성인적으로 이들과 밀접한 관련을 보인다. 지구 조적으로는 비교적 높은 금품위를 보이는 육상 광상들은 대부분 배호 또는 도호 환경에서 생성된 것으로 해석된다.

TAG지역에서 발견된 함금 고산(gossan) 광체는 이차부화광산이 지표에서 생성된다는 통념과는 다를 수 있음을 시사하며 오히려 육상광상에서 발견된 이차부화광상 중 일부는 성인적으로 지표가 아닌 해저에서 생성되었을 수도 있음을 시사한다.

종합 전망

지난 30년간 해저다금속괴상화광상에 대한 탐사는 주로 연구의 관점에서 수행되어왔다. 해저다금속광상 연구는 주로 현생 해저 열수계를 이해하는데 집중되었으며, 열수계 모델링을 위한 열수 초기 조건 획득이 주요 목적이었다. 또한 각 대양의 주요 지구조환경에따른 해저열수광상의 특성을 통합적으로 파악하여 해저열수광상의 성인 차이를 인지하려는 연구가 수행되어왔다. 최근 들어 북미 광업회사를 중심으로 남서태평양에 부존하는 해저열수광상에 대한 상업적개발이 고려되면서 개발의 관점에서 탐사가 수행되어왔으며 차후에도 많은 탐사가 개발을 전제로 수행될 것이다(KORDI, 2008). 상기한 연구 활동의 결과는 결국 잠재성 있는 해저열수광상을 찾는데 기여 할 뿐 아니라, 육상에서 발견된 광상의 모델링을 근거로 정확한 해저열수광상의 부존 위치를 결정하는데도 도움을 줄 것으로 생각된다.

해저열수광상은 육상광상에서 추론된 모델링을 현재, 그 위치에서 확인 할 수 있는 좋은 실험실 역할을 한다. 육상광상 연구를 통하여서만 확인 할 수 있었던 하부구조를 최근에는 해저열수광상에 대한 직접적인 시추 및 3차원적인 연구를 통해 해저열수광상 자체에서 확인 할 수 있게 되었다. 이런 연구·탐사 자료는 다시 육상광상 연구에 적용 되는 등 상호 보완적 연구·탐사가 진행되고 있다.

탐사지역도 초기에는 주로 중앙해령에 집중되었으나, 최근에는 배호 및 배호분지 해령 등으로 지역이 다양하게 확대되고 있다. 따라서 앞으로는 중앙해령에 대한 연구·탐사 뿐만아니라, 섭입대 부근을 중심으로 한 다양한 화산암류가 분포하는 활동성 화산암지대를 중심으로 한 해저열수괴상광상에 대한 탐사가 진행 될 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 한국해양연구원 2009년 신진연구자 지원 연구과제의 지원에 의해 진행되었습니다.

참고문헌

- Alton, M.C., Hobby, G.S. and Scott, S.D. (1989) Potential for processing sea floor massive sulfides by magnetic separation. *Mar. Min.*, 8, 163-172.
- Amann, H. (1985) Development of ocean mining in the Red Sea. *Mar. Min.*, 5, 103-116.
- Bischoff, J.L. and Pitzer, K.S. (1985) Phase relations and adiabats in boiling seafloor geothermal systems. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 75: 327-338.
- Cann, J.R. and Strens, M.R. (1982) Black smokers fuelled by freezing magma. *Nature*, 298: 147-149.
- Constantinou, G. and Govett, G.J.S. (1973) Geology, geochemistry and genesis of Cyprus sulfide deposits. *Econ. Geol.*, 68, 843-858.
- Converse, D.R., Holland, H.D. and Bdmond, J.M. (1984) Flow rates in the axial hot springs of the East Pacific Rise (21°N) : implications for the heat budget and the formation of massive sulphides. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 69, 159-175.
- Crawford, A.M., Hollingshead, S.C. and Scott, S.D. (1984) Geotechnical engineering properties of deep-ocean polymetallic sulfides from 21°N, East

- Pacific Rise. *Mar. Min.*, 4, 337-354.
- Davis, E.E., Mottl, M.L. and Fisher, A.T. et al. (1992) *Proc. ODP, Initial Reports, Vol. 139*. College Station, Tex. (Ocean Drilling Program), 1026p.
- Delaney, J.R. and Cosens, B.A. (1982) Boiling and metal deposition in submarine hydrothermal systems. *Marine Tech. Soc. Jour.*, 16, 62-66.
- Fouquet, Y., Von Stackelberg, U., Charlou, J. L., Erzinger, J., Herzig, P.M., Miihe, R. and Wiedicke, M. (1993) Metallogenesis in back-arc environments: The Lau Basin Example. *Econ. Geol.*, 88, 2154-2181.
- Francheteau, J. and Ballard, R.D. (1983) The East Pacific Rise near 21° S: inferences for along-strike variability of axial processes of the mid ocean ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 64, 93.
- Hannington, M.D., Herzig, P.M., Thompson, G. and Rona, P.A. (1990) Metalliferous sulphide-oxide sediments from the TAC hydrothermal field (26° N), Mid-Atlantic Ridge (abstr.). *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 71, 1653.
- Hannington, M.D., Herzig, P.M. and Scott, S.D. (1991) Auriferous hydrothermal precipitates on the modern seafloor. In: R.P. Foster(ed), *Gold Metallogeny and Exploration*. Blackie and Son Ltd., Glasgow, 249-282.
- Hannington, M.D., Herzig, P.M., Scott, S.D. Thompson, G. and Rona, P.A. (1991) Comparative mineralogy and geochemistry of gold-bearing deposits on the mid-ocean ridges. *Mar. Geol.*, 101, 217-248.
- Hannington, M.D., Petersen S., Jonasson, I.R. and Franklin, J.M. (1994) Hydrothermal activity and associated mineral deposits on the seafloor. Generalized Geological Map of the World. *Geol. Surv. Can., Open File Rep.2915c, Map 1:35,000,000 and CD-ROM*.
- Hannington, M.D., Monecke, T. (2009) Global exploration models for polymetallic sulphides in the area: An assessment of Lease Block selection under the draft regulations on prospecting and exploration for polymetallic sulphides. *Mar. Geores. Geotec.*, 27, 132-159.
- Hekinian, R., Fevrier, M., Avedik, F., Cambon, P., Charlou, H.D., Needham, H.D., Raillard, J., Boulegue, J., Merlivat, L., Moinot, A., Manganini, S. and Lange, J. (1983) East Pacific Rise near 13° N: Geology of new hydrothermal fields. *Science*, 219, 1321-1324.
- Herzig, P.M., Hannington, M.D., Fouquet, Y., Von Stackelberg, U. and Petersen, S. (1993) Gold-rich polymetallic sulfides from the Lau Back Arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems of the Southwest Pacific. *Econ. Geol.*, 85, 2182-2209.
- Herzig, P.M. and Hannington, M.D. (1995) Polymetallic massive sulfides at the modern seafloor: A review. *Ore Geo. Rev.*, 10, 95-115.

- Herzig, P.M. and Hannington, M.D. (1997) Polymetallic massive sulfides and gold mineralization at the mid-ocean ridges and in subduction-related environments. In: David S. Cronan (ed), Handbook of marine mineral deposits, CRC press, 347-368.
- Hutchison, R.W. and Searle, D.S. (1971) Stratabound pyrite deposits in Cyprus and relation to other sulphide ores. Mining Geol. Soc. Japan. Spe. Pub. 3. 198-205.
- Ishibashi, J., Wakita, H., Nojiri, Y., Grimaud, D., Jean-Baptiset, p., Gamo, T., Auzende, J.M., and Urabe, T. (1994) Helium and carbon geochemistry of hydrothermal fluids from the North Fiji Basin spreading ridge, Southern Pacific, Earth Planet. Sci. Lett., 128, 183-197.
- KORDI (2008) Exploration for seafloor hydrothermal deposits and Fe-Mn crusts in the Southwestern Pacific. KORDI Report CRPM 553101-2076-5, 255 p.
- Lydon, J.W. (1988) Volcanogenic massive sulphide deposits. Part2: Genetic models. Geoscience Canada, 15, 43-65.
- Moore, W.S. and Stakes, D. (1990) Ages of barite-sulfide chimneys from the Mariana Trough. Earth Planet. Sci. Lett., 100, 265-274.
- Morton, J.L. and Sleep, N.H. (1985) Seismic reflections from a Lau Basin magma chamber. In: D.W. Scholl and T.L. Vallier (eds), Geology and Offshore Resources of Pacific Island Arcs-Tonga Region. Circum Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series, 441-453.
- Mustafa, H.E., Nawab, Z., Horn, R. and Le Mann, F. (1984) Economic interest of hydrothermal deposits Atlantis II project. Proc. 2nd Int. Seminar Offshore Mineral Resources. Brest, France, 509-539.
- Rona, P.A. (1988) Hydrothermal mineralization at oceanic ridges. Can. Mineral., 26, 431-465.
- Sangster, D.F. (1980) Quantitative characteristics of volcanogenic massive sulphide deposits. Bull. Can. Inst. Min. Metall., 73, 74-81.
- Scott, S.D. (1992) Polymetallic sulphide riches from the deep: Fact or fallacy? In: K.J. Hsu and J. Thiede (eds), Use and Misuse of the Sea Floor. Wiley, New York, N.Y., 87-115.
- Scott, S.D. (1997) Submarine hydrothermal systems and deposits. In L.L. Barnes (ed.), Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 3rd edn John Wiley, 797-875.
- Wheat, G.C. and Mottl, M.J. (1994) Hydrothermal circulation, Juan de Fuca Ridge eastern flank: factors controlling basement water composition. J. Geophys. Res., 99, 3067-3080.
- Wolery, T.J. and Sleep, N.H. (1976) Hydrothermal circulation and geochemical flux at mid-ocean ridges. J. Geol., 84, 249-275.