

남서태평양 Manus Basin에서 산출되는 열수 분출구에 대한 지화학적 연구

이경용¹ · 최상훈^{2*} · 박승현¹

¹한국해양연구원 해양자원연구본부, ²충북대학교 지구환경과학과

Geochemistry of the Hydrothermal Chimneys in the Manus Basin, Southwestern Pacific Ocean

Kyeong-Yong Lee¹, Sang-Hoon Choi^{2*} and Sung-Hyun Park¹

¹Marine Resource Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Korea

²Dept. of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Korea

Manus Basin, located in the equatorial western Pacific, is a back arc basin formed by collision between the Indo-Australian and the Pacific Plates. The basin is host to numerous hydrothermal vent fields and ore deposits. The basement rocks of the Manus Basin consist primarily of dacite and basaltic andesite. Some of the minerals that form the hydrothermal chimneys that were dredged on the Manus basin include pyrite, chalcopyrite, marcasite, sphalerite and galena. The chimneys can be classified into chalcopyrite dominant Cu-rich type and sphalerite dominant Zn-rich type. The concentration of Zn shows good positive correlation with that of Sb, Cd and Ag. The content of Cu, on the other hand, positively correlates with that of Mo, Mn and Co. For samples that were taken from Zn-rich chimney, a strong positive correlation is found between Au and Zn contents. The chimney also shows enrichments of Cd, Mn and Sb. On the other hand, the samples from Cu-rich chimney exhibit strong correlation among Au, Zn and Pb, and are enriched in Mo and Co concentration. Average contents of Au in Cu-rich and Zn-rich chimneys were 15.9 ppm and 29.0 ppm, respectively. Because of high concentration of Au with Ag and Cu, the ore deposit have high economic potential. Homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions in anhydrite and amorphous silica from Zn-rich chimney are estimated to be 174~220°C and 2.7~3.6 equiv. wt. % NaCl, respectively. These value suggest that ore forming processes were occurred at around 200°C and that the oxygen fugacity changed from $\geq 10^{-39.5}$ bar to $\leq 10^{-40.8}$ bar and the sulfur fugacity from $\leq 10^{-14.7}$ bar to $\geq 10^{-13.4}$ bar during the process. It appears that the temperature at which the ores formed on Cu-rich chimney was higher than that on Zn-rich chimney.

Key words: back arc basin, hydrothermal chimney, metal chimney, metal contents, fluid inclusion

남서태평양 Manus Basin은 인도-호주판과 태평양판이 충돌하여 형성된 배호분지로 열수분출작용이 활발하며, 석영, 안산암 및 현무암질 안산암 계열의 산성 화산암류를 기반으로 발달한 열수분출구 등 열수광체가 산재되어 있다. 열수분출구는 주로 황철석, 황동석, 백철석, 섬아연석, 방연석 등의 광석광물과 이에 수반되는 경석고, 중정석, 비정질 규소 등으로 구성되어 있으며, 황동석이 괴상으로 다량 산출되는 Cu-rich chimney와 섬아연석이 괴상으로 다량 산출되는 Zn-rich chimney로 구분된다. 열수분출구를 구성하는 금속원소들의 전체적인 상관관계에서 Zn은 Sb, Cd, Ag, 등과 그리고 Cu는 Mo, Mn, Co 등과 좋은 정의 상관관계가 인지된다. 또한, 열수분출구에 따라 Zn-rich chimney에서는 Au가 Zn과 대단히 높은 정의 상관관계를 보여주며 Cd, Mn, Sb 등이 부화되어 있는 반면에, Cu-rich chimney에서는 Au가 Zn 및 Pb와 좋은 정의 상관관계를 보여주며 Mo, Co 등이 부화되어 있는 특성을 보여준다. 연구지역 Cu-rich chimney 및 Zn-rich chimney의 Au 평균품위는 각각 15.9 ppm 및 29.0 ppm이며, Ag, Cu, Zn 등 유용금속도 상당량 부화되어 있어 경제성이 높은 것으로 평가된다. Zn-rich chimney에 산출하는 경석고 및 비정질규소의 유체포유물 균일화 온도 및 염농도는 174~220°C 및 2.7~3.6 equiv. wt. % NaCl로 섬아연석 등 광석광물의 주 광화작용이 약 200°C를 전후한 범위에서 진행되었으며, 이때 산소분압은 $10^{-40.8}$ bar이하에서 $10^{-39.5}$ 이상으로 황분압은

*Corresponding author: cshoon@chungbuk.ac.kr

$10^{-14.7}$ bar이하에서 $10^{-13.4}$ 이상으로 각각 증가 전이되는 것으로 추론된다. 한편, Cu-rich chimney는 Zn-rich chimney의 주 광화온도조건보다 높은 온도에서 광화작용이 진행되었을 것으로 판단된다.

주요어 : 배호분지, 열수분출구, 금속함량, 유체포유물

1. 서 론

1977년 심해잠수정 'Alvin'에 의해 처음으로 실체가 드러난 해저열수광상(submarine hydrothermal massive sulfide deposits)은 금(Au), 은(Ag), 구리(Cu), 아연(Zn) 등 유용금속의 함량이 높고 매장량이 막대하여 경제적 잠재성이 매우 큰 것으로 인지되고 있다. 선진국들은 이미 1980년대부터 해저열수광상의 탐사 및 개발에 관한 연구사업을 추진해왔으며, 최근에는 상업적 개발에 박차를 가하고 있다. 우리나라도 2000년 7월 '국가과학기술위원회'에서 '심해저 광물자원 개발사업 추진계획'을 의결하여 해저열수광상 개발을 위한 연구사업이 국가 주요사업으로 수행되고 있다. 그러나, 해저열수광상의 생성과 관련된 많은 문제들 즉, 광상을 생성시키는 열수의 기원 및 진화, 열수계 내 유용금속들의 근원 및 농집과정, 수반관계 등에 관한 규명이 완전히 이루어지지 않아 탐사, 개발, 경제성 검토 등에 있어 상당한 어려움을 겪고있다.

해저열수광상은 괴상의 황화광물과 이에 수반되는 탄산염광물 그리고 이들을 충전하는 규산염광물 등으로 구성되어 있으며, 지각운동이 활발한 중앙해령(mid ocean ridge) 및 배호(back arc) 지역 등에서 흔히 발견된다. 주 구성광물은 자류철석(pyrrhotite), 황철석(pyrite), 백철석(marcasite), 섬아연석(sphalerite), 섬아연석(wurtzite), 황동석(chalcopyrite), 반동석(bornite), 경석고(anhydrite), 중정석(barite), 비정질 규소(amorphous silica) 등이지만, 광상의 생성에 관련된 지구구조적 배경과 화산활동 등의 환경차이에 관련되어 고온성($300\sim 350^{\circ}\text{C}$) 및 저온성($<300^{\circ}\text{C}$) 광물군들이 각 광상에서 그 조성과 양이 조절되며 다양한 특성을 갖는다(Herzig and Hannington, 1995). Doe(1994)는 각 광상에서 특정 금속원소들이 다양하게 농집되는 것은 화산성 근원암의 지화학적 특성 차이에 기인한다고 밝혔다. 금속원소들의 농집을 지배하는 잠재적 근원암으로는 광상생성과 관련한 지구구조적 환경차이에 따라 중앙해령 지역의 염기성 화산암류인 현무암(basalt), 대양성 배호(intraoceanic back arc)지역의 현무암질 안산암(basaltic andesite) 및 안산암(andesite), 대륙성 배호

융기대(intracontinental back arc rift) 지역의 산성 화산암류인 석영안산암(dacite) 및 유분암(rhyolite) 등 매우 다양하다.

또한, 동일 지역에서도 각각의 열수분출구(chimney) 및 둔덕(mound) 등은 내·외각에서 광물학적 및 화학적 조성변화가 뚜렷한 조성 상 누대구조(compositional zoning)가 흔히 관찰된다. 이는 광상 생성에 관련된 해당 열수계 내 열수의 진화과정과 이에 수반되는 온도, 압력, 용해도, pH 및 지화학요인들의 변화에 기인한 것으로 알려져 있다(Hekinian and Fouguet, 1985). 해저열수광상을 생성시키는 초기 열수계의 형성은 해수기원설과 마그마 기원의 초생수기원설 등에 의하여 설명되고 있다(Rona *et al.*, 1986, 1983; Yang and Scott, 1996). 초기 열수계 내 열수는 매우 다양한 형태의 암석-물 반응(water-rock interaction)을 수반하며, 해저지각 내부를 순환한다. 이러한 열수의 순환과정에서 화학성이 변화되어 다양한 특성을 갖는 해저열수광상의 생성에 기여하게 된다.

본 연구는 남서태평양 적도 부근에 위치하는 Manus Basin(Fig. 1)내에서 채취된 열수분출구 시료를 대상으로 광석광물, 화학조성, 유용원소의 거동 특성 등을 규명함으로써 해저열수광상의 생성환경 유추와 함께 탐사, 개발, 경제적 활용성 검토 등에 기여하고자 한다.

2. 지질 및 광상 개요

Manus Basin은 인도-호주판과 태평양판 측, 두 개의 해양지판이 충돌하는 대규모 판 경계 일부인 "West Melanesian Island Arc" 지역에 위치한다(Fig. 1). 이 지역에는 제 3기 초 이후 지금까지 두 개의 큰 해양판의 충돌과 상호작용에 의해 해구(trench), 전호분지(fore arc basin), 호상열도(island arc), 배호분지(back arc basin) 등이 형성되고 재배열되었다(Marlow *et al.*, 1991). Manus Basin은 중앙부가 썩어 형태로 비스듬하게 확장되는 독특한 배호분지로, 서쪽과 중앙에는 West Spreading Center와 Mid Spreading Center로 명명된 2개의 확장대가 분포하며, 남동쪽에는 South East Rift(SER)로 불리는 열개대가 분포하고

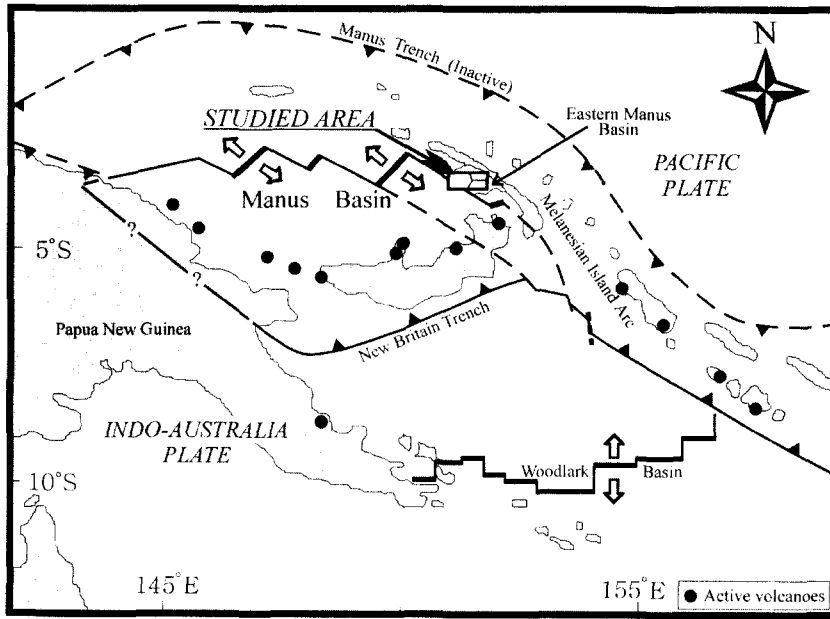


Fig. 1. Simplified tectonic map of the Manus Basin (after KORDI, 2000).

있다(Martinez and Taylor, 1995). Manus Basin은 태평양판의 섭입이 Ontong Java Plateau의 관입으로 중단되고 남쪽에서 새로운 섭입대가 성립되면서 형성된 지구조 진화 역사를 갖고 있다(Marlow *et al.*, 1991).

연구 지역은 Manus Basin 남동쪽 중앙에 위치하는 SER 지역으로, 기반암은 석영안산암 계열의 산성암이며 일부 안산암 계열의 암석도 확인된다(Binns and Scott, 1993; 한국해양연구소, 2000). 이 지역은 현재 육상에서 풍부한 매장량을 보이는 일본의 구로코형(Kuroko type) 광상과 유사한 메커니즘에 의해 열수광상이 형성되고 있는 지역으로도 알려져 있다(Binns and Scott, 1993). SER 지역은 해수의 CH₄ 및 ³He 이상치의 확인으로부터 열수작용이 밝혀지게 되었으며(Craig and Poreda, 1987), 지금까지 PACMANUS, DESMOS, SuSu Knolls 등 3곳에서 열수분출작용이 확인되었다(Binns *et al.*, 1997). 본 연구는 이들 지역을 대상으로 1999년 5월 해양탐사를 수행한 한국해양연구원 심해저자원연구센터 연구팀이 Pual Ridge와 SuSu Knolls에서 직접 채취한 열수분출구를 대상으로 수행되었다(Fig. 2).

Pual Ridge 지역은 SER 서부에 위치하며, NE 주향을 갖고 약 10 km 정도의 연장을 보이는 수심 약 1,655~1,740 m의 열수활동 지역이다(Fig. 2). 특히 이

Pual Ridge의 정상부에는 호주와 캐나다가 발견한 열수분출지역인 PACMANUS가 분포하고 있으며, 열수분출구를 비롯한 열수광체는 화산성 용기대(volcanic ridge)의 정상부를 따라 산재한다(Binns *et al.*, 1997). 기반암은 모두 비정질이며, 석영안산암 및 현무암질 안산암 계열에 속한다.

SuSu Knolls은 SER의 동부에 위치하며, 수심 약 1,160~1,550 m의 열수활동지역이다(Fig. 2). 열수광체는 Pliocene 시기에 퇴적된 단상(platform) 위에 발달한 소규모 화산성 해저산 측면부에서 산출되고 있으며, 변질된 석영안산암을 기반암으로 하는 열수분출구와 둔덕 등으로 구성된다(Binns *et al.*, 1997; 해양연구소, 2000).

3. 열수분출구의 광석광물과 지화학적 특성

열수분출구 시료 채취를 위해 먼저 심해저 카메라 시스템을 이용하여 해저면을 실시간으로 관측·촬영하였다(Fig. 3). 해저면 및 열수분출구 등의 특성을 파악한 후 드래지를 실시하여 총 10회의 드래지 중 3회에 걸쳐 열수분출구 시료가 채취되었다. 채취된 시료들 중 광물학적 및 지화학적 연구 수행을 위해 열수분출구의 형상이 확인된 대표적 시료들을 선정하였다. 대상시료는 Pual Ridge 및 Susu Knolls에서 각각 채취된

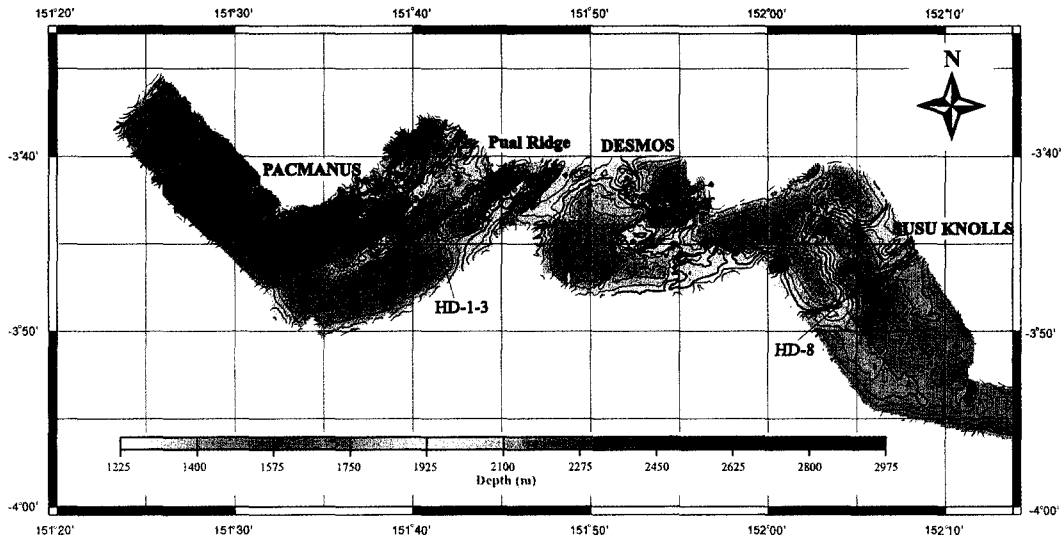


Fig. 2. Bathymetric map of the South East Rift (SER) in the southeastern Manus Basin. The contours are drawn at 50 m interval. The three well known hydrothermal vent fields and the sample location are shown (after KORDI, 2000).

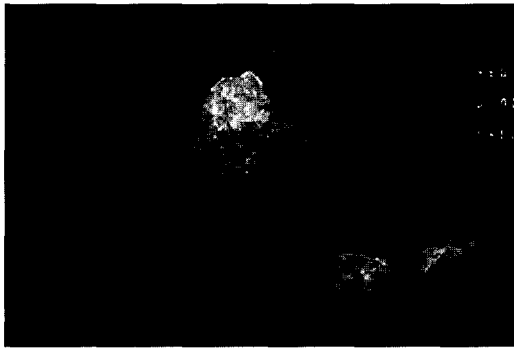


Fig. 3. Deep sea photograph of hydrothermal vent field at the Pual Ridge.



HD-1-3

HD-8

Fig. 4. Photographs of the hydrothermal chimneys from the Pual Ridge (HD-1-3) and the Susu Knolls (HD-8). Scale bar is 10 cm.

HD-1-3 및 HD-8 열수분출구(Fig. 4)이며, Fig. 5는 이들의 단면을 보여준다.

열수분출구의 광물학적 연구는 육안관찰을 기초로 하여 열수분출구의 분출공(vent) 내벽으로부터 외벽에 이르는 구간별로 양면연마박편(double-polished thin section)을 제작하여 편광현미경과 전자현미분석(EPMA)을 통하여 구성광물과 화학조성 상 특징을 확인하였다. 화학성 연구는 광물학적 연구결과를 기초로 각 구간별(Fig. 5)로 분말시료를 제작하여, INAA 및 ICP-AES(Perkin-Elmer optima 3000)를 이용 Ag, As, Au, Ba, Cd, Co, Cu, Mn, Mo, Pb, Zn, 등을 분석하여 각 부분별 주요 원소의 함량 및 거동 특성에 대하여 검토하였다.

3.1. 광석광물의 특성

본 역의 열수분출구는 주로 황철석, 황동석, 백철석, 섬아연석, 방연석, 등의 광석광물과 이에 수반되는 경석고, 중정석, 비정질 규소, 등으로 구성되며, 이들 광물의 공생관계(paragenetic sequence)는 Fig. 6과 같다. 열수분출구별로 산출되는 광물의 양적 분포는 크게 차이를 보인다. 특히, 황동석과 섬아연석의 산출이 크게 대비되어, Cu-rich chimney 및 Zn-rich chimney

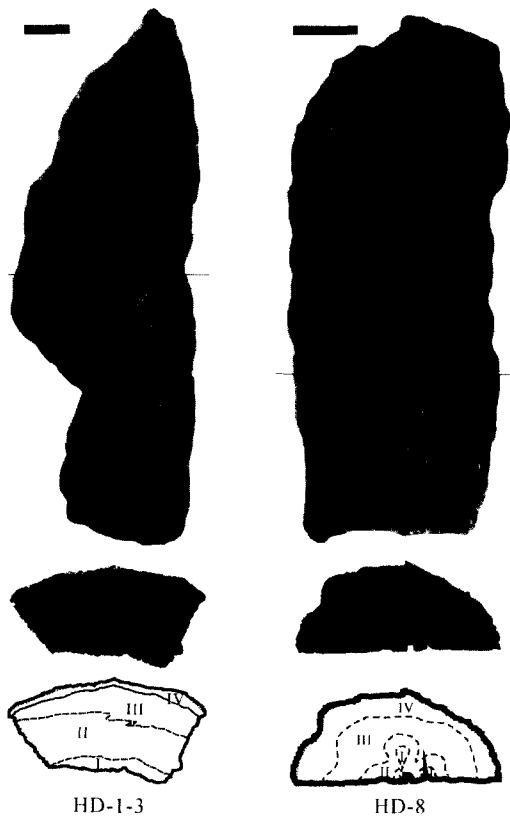


Fig. 5. Photographs and simplified drawings of the cross sections of the hydrothermal chimneys, showing the zones of chemical analysis. Scale bars are 10 cm.

로 구분할 수 있다. SuSu Knolls에서 채취된 HD-8 열수분출구는 황동석이 피상으로 다량 산출되는 Cu-rich chimney이며, Pual Ridge에서 채취된 HD-1-3 열수분출구는 섬아연석이 피상으로 다량 산출되는 Zn-rich chimney이다.

HD-8 열수분출구(Cu-rich chimney)는 주상의 원통형(columnar-cylindrical) 산상을 보이며, 분출공 내벽으로부터 외벽까지의 두께가 5~12 cm 정도이다(Fig. 4). 광석광물은 분출공을 중심으로 내벽에서 외벽으로 이르는 순서에 따라 황철석(zone I; Fig. 5)→황철석이 수반된 피상의 황동석(zone II)→황동석+황철석+섬아연석(zone III)→황철석+백철석+황동석+섬아연석±방연석(zone IV) 등이 산출되는 대상변화를 보여준다. 경석고는 내벽과 외벽에 이르는 각 구간 중 내벽 쪽에 가까운 구간에서 부분적으로 황철석과 피상의 황동석을 치환하여 산출한다. 외벽부에서는 황철석이 백철석화 되거나, 방연석이 포함된 동심원상의 호상구조를

| Mineral | 200°C |
|------------------|---------------|
| Anhydrite | |
| Barite | |
| Amorphous Silica | |
| Pyrite | |
| Chalcopyrite | |
| Marcasite | |
| Sphalerite | |
| Argentite | |
| Galena | |
| CHIMNEY | |
| | <i>HD-8</i> |
| | <i>HD-1-3</i> |

Fig. 6. Generalized paragenetic sequence of minerals from the hydrothermal chimneys HD-1-3 and HD-8 chimneys.



Fig. 7. Back scattered electron image of pyrite (dark image) and galena (brighter zone) showing concentric overgrowth.

보여준다(Fig. 7). 중정석은 분출공 주변과 외벽에서 2차 침전광물로 산출된다.

HD-1-3 열수분출구(Zn-rich chimney)는 작은 종형(pinnacle)의 산상을 보여준다(Fig. 4). 광석광물은 HD-8 열수분출구에 비해 단순한 대상변화를 나타내어 내각부에서 부분적으로 상당량의 황동석이 수반되는 섬아연석-황동석대(zone I; Fig. 5)가 발달하며, 그 외부에는 전체적으로 피상의 섬아연석에 소량의 황철석과 미량의 황동석이 수반되며, 중정석이 관찰되지 않는 zone II와 경석고, 비정질규소 및 미립의 중정석이 관

찰되는 zone III로 구분된다. 최외각부에는 다량의 미립 중정석과 함께 방연석의 산출이 확인(zone IV)된다. 괴상의 섬아연석은 전자현미분석(EPMA) 결과 3.28~6.40 mole % FeS의 함량을 보여주며, 동일입자 내의 함량 변화나 열수분출구 전체적인 누대구조상의 함량 변화를 보여주지 않는다. 이러한 섬아연석내 화학조성 특성은 섬아연석의 침전이 거의 유사한 환경조건에서 이루어 졌음을 지시한다. 황철석과 황동석은 주로 섬아연석 내에 산점상으로 분산되어 산출된다.

3.2. 주요 원소의 함량 변화

본 연구지역의 열수분출구에 함유된 Ag, As, Au, Ba, Cd, Co, Cu, Mn, Mo, Pb, Sb, Sr, Zn, 등 주요 원소들의 함량을 Table 1에 정리하였다. 각 열수분출구에서의 주요 원소들의 함량 특성은 전술된 광물학적 연구결과와 잘 일치한다. HD-1-3 열수분출구는 Zn 함량이 평균 약 44.7%로 HD-8 열수분출구보다 약 47배 높은 부화정도를 보여준다(Table 1). HD-8 열수분출구는 Cu 함량이 기기의 측정 한계인 9.9% 이상을 보여 정확한 함량을 측정할 수 없었으나, HD-1-3 열수분출구보다 2배 이상으로 경제성 있는 농집이 이뤄진 것으로 판단된다(Table 1).

주요 원소 중 Cd, Mn, Sb 등은 HD-1-3 열수분출구에, Mo, Co 등은 HD-8 열수분출구에 각각 서로 다른 열수분출구에 비하여 최소 2배 이상 부화되는 양상을 보여준다(Table 1). 이는 비교적 고온의 환경 하에서 주된 침전이 야기되는 원소들인 Mo, Co 등이 HD-1-3 열수분출구에 비해 상대적으로 고온 환경 하에서 생성된 것으로 인지되는 HD-8 열수분출구에 다량 침전되어 부화된 결과로 사료된다. 또한, 고온 환경 하에서 주된 침전이 이뤄지는 원소들인 Cu, Mo, Co 등의 원소들은 열수분출구의 내벽으로부터 외벽에 이르면서 점진적으로 그 함량이 감소함을 보여준다(Fig. 8). 특히, 저온형 열수분출구로 여겨지는 HD-1-3 열수분출구에서 그 경향성이 뚜렷하여 이들의 침전이 온도의 구배 조건에 크게 영향을 받고 이뤄진 것으로 사료된다.

최근 해저열수광상에서 관심의 초점이 되고있는 Au의 대상시료 내 평균품위는 23.4 ppm(HD-8 열수분출구: 15.9 ppm, HD-1-3 열수분출구: 29.0 ppm)이다(Table 1). 이러한 Au 평균품위는 기 보고된 다양한 지구조적 환경에서 생성된 해저열수광상들의 평균품위(Table 2)를 훨씬 상회하는 고품위이다. 따라서, 본 탐사지역 해저열수광체는 Au의 고품위와 더불어 Ag, Cu, Zn 등 유용금속이 상당량 부화되어 있어 경제성이

매우 높은 것으로 평가되어 진다. 한편, Au 및 Ag의 부화정도는 Cu-rich chimney보다는 Zn-rich chimney에서 약 2배 이상 높은 것으로 확인된다(Table 1).

3.3. 주요 원소의 상관관계

이미 보고된 타 지역 열수유체(vent fluids)에 대한 연구결과, 심해저 열수유체에는 Ag, As, Cd, Co, Se, Au 등의 미량 원소들이 농집되어 있음이 확인된바 있다(Campbell *et al.*, 1988a,b; Trefry *et al.*, 1994; Von Damm, 1990). 또한, Cu, Co, Mo 등의 금속원소들은 고온의 열수분출구에서 산출하는 황화광물 내에 강한 정의 온도-함량 상관관계를 갖으며 농집되고, Zn, Ag, Cd, Sb, Pb 등의 원소들은 상대적으로 저온의 열수유체 내에 농집되는 특성을 보인다(Hannington *et al.*, 1995; Trefry *et al.*, 1994).

본 연구 대상 열수분출구의 광물학적 특성과 주요 원소의 함량 특성 및 경제성 등을 고려하여 Cu, Zn, Au, Ag에 대한 주요 원소들의 상관관계를 확인하였다(Fig. 9). Cu는 Mo, Mn, Co, 등과 그리고 Zn은 Sb, Cd, Ag, 등과 좋은 정의 상관관계를 보여준다(Fig. 9). 따라서, HD-8 열수분출구는 HD-1-3 열수분출구에 비하여 상대적으로 고온에서 생성되었음을 알 수 있다.

광상의 부가가치를 높여주는 Au의 경우 각 열수분출구의 주 구성원소인 Zn, Cu, Pb 등과의 상관관계를 확인하였다(Fig. 9). 그 결과 어느 정도의 상관관계가 인지되나, 각 열수분출구별 상관관계에서는 보다 확연하게 인지된다. 즉, Zn-rich chimney의 경우, Zn과 Au는 대단히 높은 정의 상관관계를 갖으나, Pb와 Au는 정의 상관관계를 갖지 않는다. Cu-rich chimney의 경우, Zn과 Au는 어느 정도 정의 상관관계를 보여주는 반면에, Pb와 Au는 대단히 높은 정의 상관관계를 보여준다. 또한, Cu와 Au는 높지는 않으나 일반적인 상관관계가 확인된다. 이러한 결과로 미루어, Au의 침전은 주로 Zn 광화작용에 수반되어 진행되었을 것으로 판단된다. 즉, Au는 상대적으로 고온의 침전환경인 Cu의 침전온도 조건에서 초기 침전이 시작되었으며, 상기 주된 Au 광화시기를 거쳐, 저온 환경인 Pb의 침전 시에 후기 침전이 진행된 것으로 사료된다. 이는 본 해저 열수광체 생성 시 Cu의 침전이 상대적 고온 환경에서 주로 야기되며, 이러한 온도조건에서는 Au의 침전이 미약하지만, 그 후 온도의 감소와 함께 Zn의 침전이 시작되면서 Au의 주된 침전이 진행된 결과로 해석된다. 따라서, 연구 지역 열수분출구에서의 Au의 탐사는 Zn-rich chimney 또는 Zn-rich zone으로의 접근이 이

Table 1. Chemical composition of the hydrothermal chimneys.

| Chimney no. | Zone | Sample no. | Ag (ppm) | As (ppm) | Au (ppm) | Cd (ppm) | Co (ppm) | Mn (ppm) | Mo (ppm) | Sb (ppm) | Sr (ppm) | Zn (%) | Ba (%) | Cu (%) | Pb (%) |
|-------------|------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|
| I | | HD 3-1-1 | 293.0 | 1,300.0 | 24.1 | 1,743.9 | 9.0 | 302.0 | 200.0 | 822.0 | 146.0 | 45.600 | 3.400 | 3.821 | 0.109 |
| | | HD 3-1-4 | 260.0 | 1,080.0 | 27.2 | 1,533.3 | 8.0 | 276.0 | 110.0 | 869.0 | 282.0 | 34.600 | 3.700 | 2.086 | 0.120 |
| | | mean | 276.5 | 1,190.0 | 25.7 | 1,638.6 | 8.5 | 289.0 | 155.0 | 845.5 | 214.0 | 40.100 | 3.550 | 2.954 | 0.114 |
| II | | HD 3-1-2 | 377.0 | 1,850.0 | 46.2 | 1,699.2 | 8.0 | 412.0 | 130.0 | 878.0 | 42.0 | 46.000 | 0.230 | 2.108 | 0.244 |
| | | HD 3-1-3 | 426.0 | 1,320.0 | 48.3 | 1,921.7 | 7.0 | 295.0 | 78.0 | 1,300.0 | 4.0 | 56.700 | 0.000 | 1.978 | 0.229 |
| | | HD 3-1-5 | 507.0 | 1,540.0 | 63.5 | 1,614.8 | 5.0 | 263.0 | 95.0 | 978.0 | 59.0 | 57.500 | 0.860 | 0.984 | 0.217 |
| | | HD 3-2-1 | 425.0 | 1,930.0 | 50.4 | 1,644.5 | 9.0 | 323.0 | 89.0 | 1,060.0 | 81.0 | 54.400 | 1.500 | 0.972 | 0.221 |
| | | mean | 433.8 | 1,660.0 | 52.1 | 1,720.1 | 7.3 | 323.3 | 98.0 | 1,054.0 | 46.5 | 53.650 | 0.648 | 1.510 | 0.228 |
| III | | HD 3-1-6 | 346.0 | 1,520.0 | 27.2 | 1,554.4 | 7.0 | 231.0 | 79.0 | 1,240.0 | 158.0 | 40.300 | 5.900 | 1.006 | 0.179 |
| | | HD 3-1-8 | 215.0 | 1,690.0 | 24.3 | 1,036.0 | 7.0 | 243.0 | 64.0 | 716.0 | 215.0 | 33.800 | 0.870 | 0.530 | 0.207 |
| | | HD 3-2-2 | 650.0 | 2,690.0 | 28.8 | 1,712.0 | 7.0 | 203.0 | 33.0 | 1,950.0 | 36.0 | 57.200 | 0.720 | 0.638 | 0.199 |
| IV | | mean | 403.7 | 1,966.7 | 26.8 | 1,434.1 | 7.0 | 225.7 | 58.7 | 1,302.0 | 136.3 | 43.767 | 2.497 | 0.724 | 0.195 |
| | | HD 3-2-3 | 326.0 | 9,120.0 | 0.4 | 552.8 | 6.0 | 161.0 | 18.0 | 626.0 | 209.0 | 33.500 | 19.000 | 0.322 | 2.171 |
| | | HD 3-2-4 | 442.0 | 12,600.0 | 2.7 | 964.1 | 7.0 | 162.0 | 28.0 | 1,100.0 | 202.0 | 39.900 | 10.000 | 0.555 | 2.390 |
| | | HD 3-1-7 | 380.0 | 5,630.0 | 4.6 | 829.2 | 5.0 | 140.0 | 40.0 | 891.0 | 223.0 | 37.700 | 10.000 | 0.457 | 0.190 |
| | | mean | 382.7 | 9,116.7 | 2.6 | 782.0 | 6.0 | 154.3 | 28.7 | 872.3 | 211.3 | 37.033 | 13.000 | 0.445 | 1.583 |
| I | | mean | 387.3 | 3,522.5 | 29.0 | 1,400.5 | 7.1 | 250.9 | 80.3 | 1,035.8 | 138.1 | 44.767 | 4.682 | 1.288 | 0.540 |
| | | HD 8-3-1 | 93.0 | 8,290.0 | 6.9 | 191.9 | 14.0 | 1,141.0 | 43.0 | 888.0 | 616.0 | 2.280 | 19.000 | 0.411 | 0.270 |
| | | mean | 93.0 | 8,290.0 | 6.9 | 191.9 | 14.0 | 1,141.0 | 43.0 | 888.0 | 616.0 | 2.280 | 19.000 | 0.411 | 0.270 |
| II | | HD 8-2-1 | 43.0 | 3,170.0 | 14.3 | 12.1 | 267.0 | 27.0 | 2,350.0 | 287.0 | 16.0 | 0.141 | 0.030 | >9.99 | 0.164 |
| | | HD 8-3-2 | 37.0 | 2,490.0 | 11.4 | 10.2 | 170.0 | 1.0 | 1,900.0 | 230.0 | 9.0 | 0.132 | 0.000 | >9.99 | 0.119 |
| | | mean | 40.0 | 2,830.0 | 12.9 | 11.2 | 218.5 | 14.0 | 2,125.0 | 258.5 | 12.5 | 0.137 | 0.015 | >9.99 | 0.141 |
| III | | HD 8-2-2 | 49.0 | 3,560.0 | 11.5 | 13.2 | 219.0 | 15.0 | 510.0 | 216.0 | 22.0 | 0.120 | 0.022 | >9.99 | 0.181 |
| | | HD 8-2-3 | 68.0 | 3,140.0 | 14.5 | 11.3 | 172.0 | 1.0 | 760.0 | 200.0 | 7.0 | 0.111 | 0.000 | >9.99 | 0.202 |
| | | HD 8-3-3 | 58.0 | 3,720.0 | 12.1 | 13.8 | 215.0 | 25.0 | 215.0 | 227.0 | 24.0 | 0.140 | 0.042 | >9.99 | 0.213 |
| | | HD 8-3-4 | 55.0 | 2,050.0 | 8.1 | 13.0 | 125.0 | 96.0 | 610.0 | 138.0 | 10.0 | 0.150 | 0.022 | >9.99 | 0.093 |
| | | mean | 57.5 | 3,117.5 | 11.5 | 12.8 | 182.8 | 34.3 | 523.8 | 195.3 | 15.8 | 0.130 | 0.022 | >9.99 | 0.172 |
| IV | | HD 8-2-4 | 210.0 | 5,630.0 | 35.0 | 107.9 | 232.0 | 151.0 | 360.0 | 456.0 | 6.0 | 1.180 | 0.000 | >9.99 | 0.466 |
| | | HD 8-3-5 | 280.0 | 6,450.0 | 29.2 | 268.8 | 43.0 | 176.0 | 270.0 | 570.0 | 228.0 | 4.380 | 4.600 | 5.214 | 0.287 |
| | | mean | 245.0 | 6,040.0 | 32.1 | 188.4 | 137.5 | 163.5 | 315.0 | 513.0 | 117.0 | 2.780 | 2.300 | >7.607 | 0.376 |
| mean | 99.2 | 4,277.8 | 15.9 | 71.4 | 161.9 | 181.4 | 779.8 | 356.9 | 104.2 | 0.959 | 2.635 | >8.403 | 0.222 | | |

*0.0: not detected.

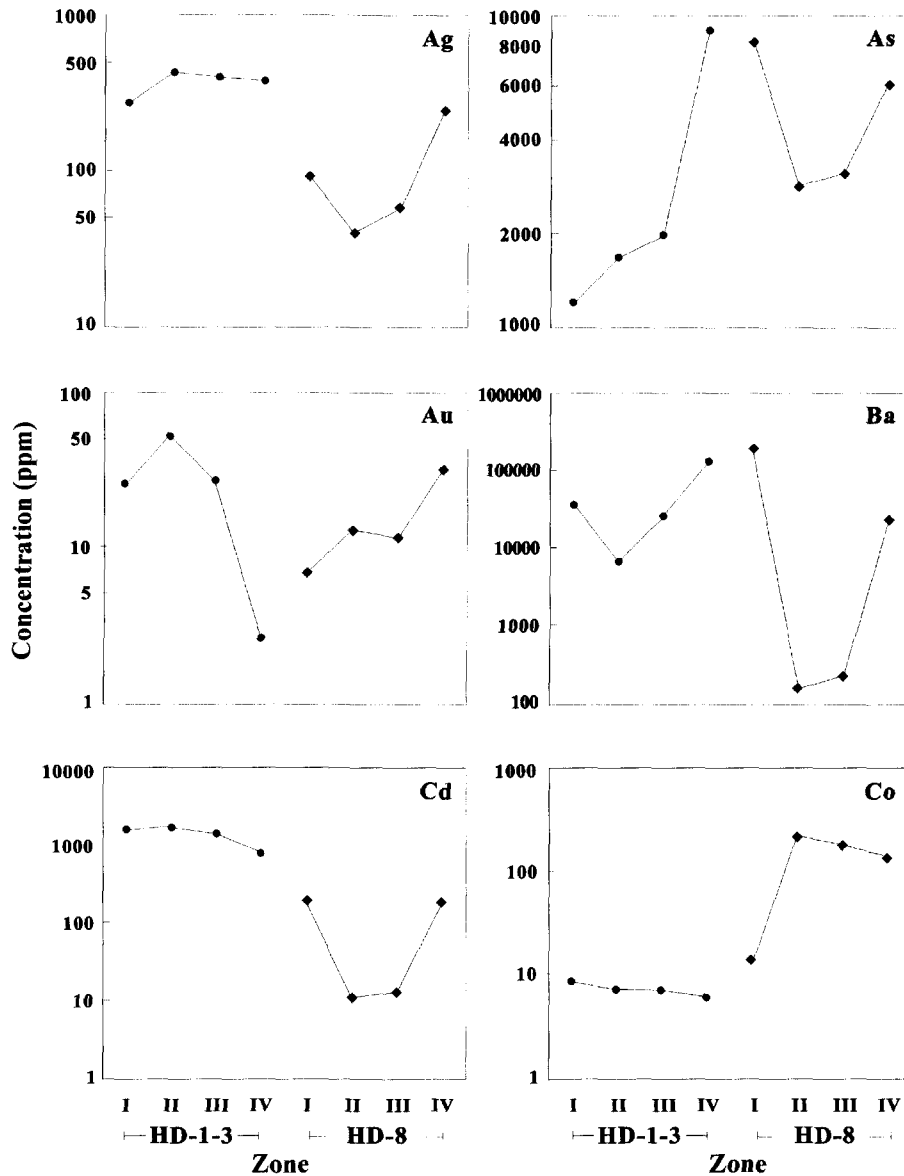


Fig. 8. Variation diagrams of main elements in the each zone of the hydrothermal chimneys. Circle and square symbols represent HD-1-3 and HD-8 chimney, respectively.

뤄져야 할 것으로 사료된다. Au와 Ag의 품위 상관관계는 전체적으로 높은 정의 상관관계를 보여주나, Au의 품위가 매우 낮은(5 ppm 이하) 경우 상대적으로 Ag의 품위가 높음이 확인된다(Fig. 10).

3.4. 유체포유물 연구

생성 온도 규명을 위한 유체포유물 연구는 대상 열수분출구의 주 광석광물 조합에 의한 대상 변화를 고

려하여 총 20개의 양면연마박편을 제작하여 Linkam Scientific Instruments의 THMS 600 Heating/Freezing stage를 활용하여 가열·냉각실험을 수행하였다. Zn-rich chimney인 HD-1-3 시료에서 산출하는 경석고와 비정질규소의 일부시료 내에서만 유체포유물이 관찰되었다. 가열실험에서 측정되는 균일화 온도(Th °C)의 측정오차는 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 이다. 상온(20°C)에서 액상이 우세하고, 가열실험 시 액상으로 균일화되는 유체포유물만

Table 2. Bulk chemical composition of seafloor polymetallic sulfides from Mid-ocean ridges and back-arc spreading centers.

| | Mid-ocean ridges | | Back-arc ridges | |
|---------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| | Volcanic-hosted ^a | Sediment-hosted ^b | Intraoceanic ^c | Intracontinental ^d |
| n | 890 | 57 | 317 | 28 |
| Fe(wt%) | 23.6 | 24.0 | 13.3 | 7.0 |
| Zn | 11.7 | 4.7 | 15.1 | 18.4 |
| Cu | 4.3 | 1.3 | 5.1 | 2.0 |
| Pb | 0.2 | 1.1 | 1.2 | 11.5 |
| As | 0.03 | 0.3 | 0.1 | 1.5 |
| Sb | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0.3 |
| Ba | 1.7 | 7.0 | 13.0 | 7.2 |
| Ag(ppm) | 143 | 142 | 195 | 2766 |
| Au | 1.2 | 0.8 | 2.9 | 3.8 |

^aExplorer Ridge, Endeavour Ridge: Main Vent and High Rise Fields, Axial Seamount: ASHES and CASAM, Cleft Segment : N and S Fields, East Pacific Rise: 11°N, 13°N, 21°N, 7°30'S, 16°45'S, 18°30'S, 21°S, Galapagos Rift, TAG: Active Mound, Mir and Alvin Zones, Snake Pit, Mid-Atlantic Ridge 24.5°N

^bEscanaba Trough, Guaymas Basin.

^cMariana Trough, Manus Basin, North Fiji Basin, Lau Basin: Kings Triple Junction, White Church, Bai Lili, Hine Hina Fields.

^dOkinawa Trough.

Data compiled by Geological survey of Canada and Freiberg University of Mining and Technology, Germany. (After Herzig and Hannington).

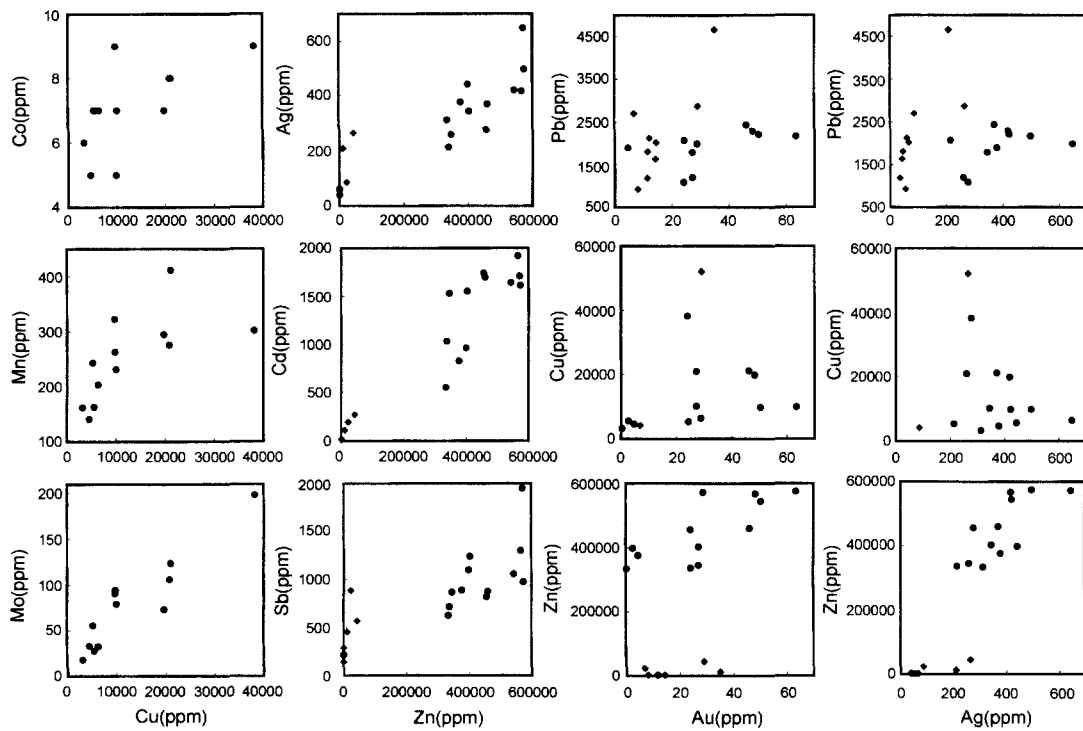


Fig. 9. Variation diagrams between main elements of the hydrothermal chimneys. Circle and square symbols represent HD-1-3 and HD-8 chimney, respectively.

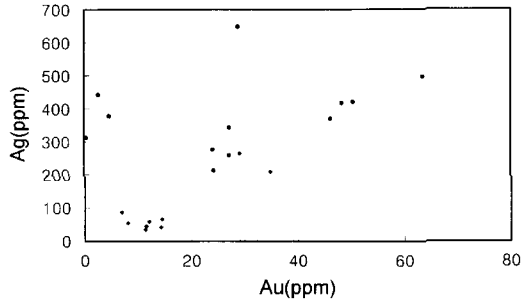


Fig. 10. Variation diagram between gold and silver of the hydrothermal chimneys. Circle and square symbols represent HD-1-3 and HD-8 chimney, respectively.

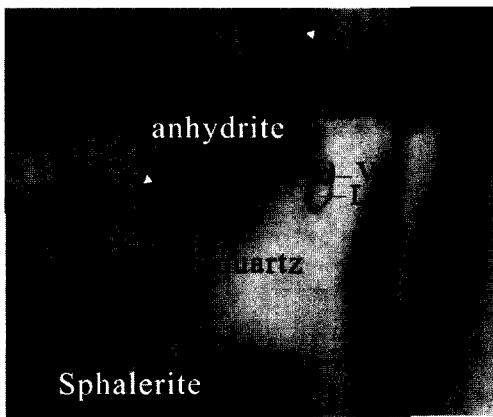


Fig. 11. Photograph of the fluid inclusion in minerals from HD-1-3 chimney. abbreviations: L=liquid, V=vapor.

이 확인되었다(Fig. 11).

가열실험 결과 Zn-rich chimney의 경석고 및 비정질규소에서 관찰되는 유체포유물의 균일화 온도는 174~220°C의 범위를 보여주며, 주된 균일화 온도 범위는 약 195~210°C로 확인된다(Fig. 12). 냉각실험은 유체포유물 크기의 문제로 5개의 유체포유물만 실험이 가능했으며, 그 결과로 확인된 염농도는 2.7~3.6 wt.% 상당 염농도 범위가 확인되었다.

본 열수분출구 시료를 채취한 Pual Ridge의 수심은 1,600~1,800 m 정도로, 약 150 bar의 압력조건을 고려할 때, 가열실험 결과인 균일화 온도를 압력보정 없이 침전온도로 추정할 수 있다. Zn-rich chimney에 있어 경석고가 주된 광석광물인 점아연석보다 주로 약간 후기에 정출된 공생관계로 미루어, 본 열수분출구의 생성은 약 $\geq 220^\circ\text{C}$ 부터 시작되었음을 알 수 있다. 또한, Zn-rich chimney에 비해 고온에서 안정되는 원소들의 함량이 높은 Cu-rich chimney의 생성은 Zn-

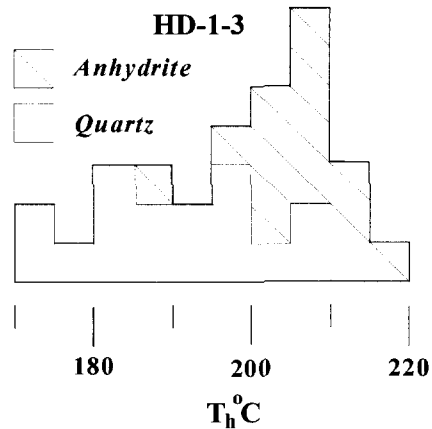


Fig. 12. Frequency diagram of homogenization temperatures of fluid inclusions in minerals from HD-1-3 chimney.

rich chimney의 주 생성온도 보다 높은 온도 조건(약 $\geq 300^\circ\text{C}$)에서 시작되었을 것으로 사료된다.

3.5. 열수분출구의 생성 환경

Fig. 13은 광물의 공생관계, 유체포유물 가열실험 결과 및 점아연석의 화학조성 등을 활용한 열역학적 접근을 수행하여, Zn-rich chimney의 주 광화작용과 관련된 주요 환경조건(f_{S_2} , f_{O_2})을 추정한 결과를 보여주고 있다.

유체포유물 연구결과 Zn-rich chimney의 주된 생성 온도조건은 약 200°C를 전후한 범위로 확인되었므로

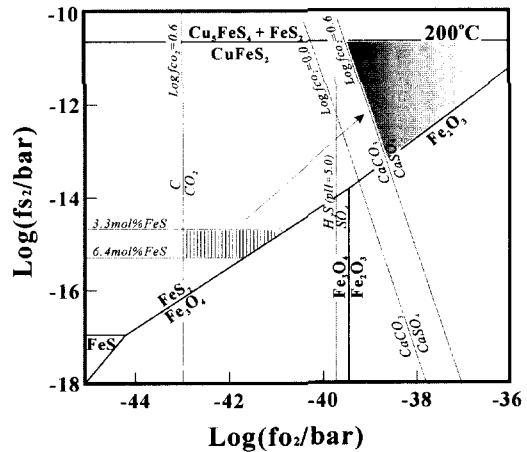


Fig. 13. Log f_{S_2} versus log f_{O_2} diagram showing the stability fields for sphalerite (line shaded area) and anhydrite (gray shaded area) in HD-1-3 chimney.

200°C를 기준으로 열역학적 접근을 시도하였다. Zn-rich chimney의 경우 200°C를 전후하여 초기 황철석-섬아연석의 광물조합에서 경석고-황철석의 광물조합으로 전이되는 경향성을 알 수 있다(Fig. 6). 또한, 유체 포유물 관찰·실험 시 액상 CO₂ 또는 CO₂ hydrate 등의 함유가 확인되지 않으므로, 본 열수분출구 생성 시 열수 내 CO₂ 분압조건은 매우 낮은 것(log_fCO₂ ≤ 0.6; Ellis and Goldig, 1963)으로 확인된다. 광물 공생 관계에서 적철석, 자철석, 자류철석 등의 산출이 인지되지 않으며, 섬아연석 내 FeS 함량이 3.3~6.4 mol %로 생성시기 또는 광물조합과 관련된 뚜렷한 조성 변화를 보여주지 않는다. 이상의 결과들을 고려할 때, 경석고-황철석 광물조합의 산출은 약 200°C의 온도조건에서 황동석-황철석-섬아연석 등 황화광물들의 광화작용이 주로 진행된 상대적으로 낮은 산소분압(≤10^{-40.8} bar) 및 황분압(≤10^{-14.7} bar) 조건에서 상대적으로 높은 산소분압(≥10^{-39.5} bar) 및 황분압(≥10^{-13.4} bar) 조건으로 전이되며 진행되었을 것으로 사료된다(Fig. 13). 이는 본 열수분출구의 초기 생성 광물의 침전시 열수계에 용존하던 상대적으로 많은 양의 환원황종(sulfur species)이 점차 해수와의 혼합에 의한 상대적 산화환경으로의 전환에 의하여 산화황종(sulfate, SO₄²⁻)이 우세해지며 경석고 등의 황산염광물들의 침전이 수반되는 후기 광화작용을 야기한 것으로 사료된다.

4. 결 론

1. Manus Basin에서 채취된 열수분출구들은 배호분지에서 생성된 괴상의 다금속 황화광상의 광물학적 및 지화학적 특성을 보여주며, 광물조성과 금속원소의 부화특성에 의하여 황동석이 괴상으로 다량 산출되는 Susu Knolls에서 채취된 Cu-rich chimney와 섬아연석이 괴상으로 다량 산출되는 Pual Ridge의 Zn-rich chimney로 대분된다.

2. 광물 조성과 주요원소 들의 산출 상관관계에서, Cu와 Mo, Mn, Co 등이 대단히 높은 정의 상관관계를 보여주며 부화된 Susu Knolls 지역의 HD-8 chimney는 Zn과 Sb, Cd, Ag 등이 대단히 높은 정의 상관관계를 갖으며 높은 함량을 보여주는 Pual ridge 지역의 HD-1-3 chimney에 비하여 상대적으로 고온 환경 하에서 생성되었음을 알 수 있다.

3. 유체포유물 연구 결과, Zn-rich chimney의 생성은 약 200°C를 전후한 온도조건에서 진행된 것으로 확인되며, Cu-rich chimney의 경우 Zn-rich chimney

의 생성온도보다 높은 온도조건에서 초기 생성이 진행되었을 것으로 판단된다.

4. Zn-rich chimney의 생성은 약 200°C의 온도조건에서 황동석-황철석-섬아연석 등 황화광물들의 광화작용이 주로 진행된 상대적으로 낮은 산소분압(≤10^{-40.8} bar) 및 황분압(≤10^{-14.7} bar) 조건에서 상대적으로 높은 산소분압(≥10^{-39.5} bar) 및 황분압(≥10^{-13.4} bar) 조건으로 전이되며 진행되었으며, 이는 열수분출구의 초기 생성 광물의 침전 시 열수계에 용존하던 상대적으로 많은 양의 환원황종이 점차 해수와의 혼합에 의한 상대적 산화환경으로의 전환에 의하여 산화황종이 우세해지는 경향성이 반영된 결과로 사료된다.

5. 경제적 부가가치가 높은 Au의 침전은 고온의 침전환경인 Cu의 침전온도(약 ≥300°C) 조건에서 초기 침전이 미약하게 시작된 후, 온도 감소와 함께 Zn 침전이 활발한 시기(약 200°C)에 주된 침전이 진행되었으며, 후기 저온 환경(약 ≤170°C)인 Pb 침전 시까지 지속된 것으로 판단된다.

6. Cu-rich chimney 및 Zn-rich chimney의 Au 평균품위는 각각 15.9 ppm 및 29.0 ppm으로 기 보고된 타 지역 해저열수광체에 비해 상당히 높으며, Ag, Cu, Zn 등 유용금속도 상당량 부화되어 있으므로 본 역의 열수광체는 경제성이 높은 것으로 평가되어지며, 향후 본 역의 탐사는 Zn-rich chimney 또는 Zn-rich zone으로의 접근이 바람직하다.

사 사

본 연구를 수행하는데 도움을 주신 한국해양연구원 심해저자원연구센터 연구원 및 온누리호 승조원분들에게 감사를 드립니다. 그리고 진지한 비평과 조언을 해주신 부경대 박맹언 교수님과 대전대 황정 교수님에게도 감사를 드립니다. 본 연구는 한국해양연구원 “해저 열수광화작용의 지화학적 연구” 및 해양수산부 “남서태평양 해저열수광상 자료분석 및 정보수집” 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 한국해양연구소, 2000, 해저열수광화작용의 지화학적 연구 II. 한국해양연구소, 연구보고서, BSPE 99758-00-1240-7, 242P
- Binns, R.A., and Scott, S.D. (1993) Actively forming poly-metallic sulfide deposits associated with felsic volcanic rocks in the eastern Manus back-arc basin, Papua New Guinea, *Economic Geology*, v. 88, p. 2226-2236.

- Binns, R.A., Scott, S.D. and Gemmel, J.B. (1997) Modern Analogue of a Mineral Field: Sea-Floor Hydrothermal Activity Hosted by Felsic Volcanic Rocks in the Eastern Manus Basin, Papua New Guinea. Abstract from the Society of Economic Geologists Neves Corvo Field Conference, Lisbon, Portugal.
- Campbell, A.C., Bowers, T.S. and Edmond, J.M. (1988)a A time-series of vent fluid compositions from 21°N EPR (1979, 1981, 1985), and the Guaymas Basin Gulf of California (1982, 1985), *J. Geophysical Research*, v. 93, p. 4537-4539.
- Campbell, A.C., Palmer, M.R., Klinkhammer, G.P., Bowser, T.S., Edmond, J.M., Lawrence, J.R., Casey, J.F., Thompson, G., Humphris, S., Rona, P., and Karson, J.A., (1988)b Chemistry of hot springs on the Mid-Atlantic Ridge, *Nature*, v. 335, p. 514-519.
- Craig, H. and Poreda, R. (1987) Studies of methane and helium in hydrothermal vent plumes, spreading-axis basalts, and volcanic island lavas and gases in southwest Pacific marginal basins. SIO Reference 87-14, Scripps Institution of Oceanography, 60pp
- Doe, B.R. (1994) Zinc, copper, and lead in mid-ocean ridge basalts and the source rock control on Zn/Pb in ocean-ridge hydrothermal deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 58, p. 2215-2223.
- Ellis, A.J. and Golding, R.M. (1963) The solubility of carbon dioxide above 100°C in water and in sodium chloride solutions: *Am. Jour. Sci.*, v. 271, p. 481-489.
- Hekinian, R. and Fouquet, Y. (1985) Volcanism and Metallogenesis of axial and off-axial structures on the East Pacific Rise near 13 °N, *Economic Geology* v. 80 p. 221-249.
- Hannington, M.D., Jonasson, I.R., Herzig, P.M. and Petersen, S. (1995) Physical and chemical processes of seafloor mineralization at Mid-Ocean Ridges, In: Seafloor Hydrothermal system, edited by Humphris, S.E., R.A. Zierenberg, L.S. Mullineaux and R.E. Thomson, American Geophysical Union, v. 115-157.
- Herzig, P.M. and Hannington, M.D. (1995) Polymetallic massive sulfides at the modern seafloor: A review. *Ore Geology Review*, v. 10, p. 95-115.
- Marlow, M.S., Exon, N.F. and Dadisman S.V. (1991) Hydrocarbon Potential and Gold Mineralization in the New Ireland Basin, Papua New Guinea. In *Geology and Geophysics of Continental Margins*(edited by Watkins, J.S. et al.) American Association of Petroleum Geologists Memoir n. 53, p. 119-137.
- Martinez, F. and Taylor B. (1995) Backarc Spreading, Rifting, and Microplate Rotation, Between Transform Faults in the Manus Basin. *Marine Geophysical Researches* v. 18, p. 203-224.
- Rona, P.A., Bostrom, K., Laubier, L. and Smith, K.L. (1983) *Hydrothermal Process at Seafloor Spreading Centers*, Plenum Press, New York, 769p.
- Rona, P.A., Klinkhammer, G., Nelsen, T.A., Trefry, J.H. and Elderfield, H. (1986) Black smokers, massive sulfides and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, v. 321, p. 33-37.
- Trefry, J.H., Butterfield, D.B., Metz, S., Massoth, G.J., Trocine, R.P., and Feely, R.A. (1994) Trace metals in the hydrothermal solutions from Cleft segment on the southern Juan de Fuca Ridge, *J. Geophysical Research*, v. 99, p. 4925-4936.
- Von Damm, K.L., (1990) Seafloor hydrothermal activity: Black smoker chemistry and chimneys, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, v. 18, p. 173-204.
- Yang, K. and Scott, S.D. (1996) Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a sea-floor hydrothermal system. *Nature*, v. 383, p. 420-423.