

Juan de Fuca 해령 Cleft Segment 에서 회수된 황화물 침니: 광물조성 및 유체포유물

허철호¹ · 윤성택^{1*} · 소철섭¹ · 염승준¹ · 이경용²

¹고려대학교 지구환경과학과, ²한국해양연구원 해양자원연구본부

Sulfide Chimney from the Cleft Segment, Juan de Fuca Ridge: Mineralogy and Fluid Inclusion

Chul-Ho Heo¹, Seong-Taek Yun^{1*}, Chil-Sup So¹, Seung-Jun Youm¹ and Kyeong-Yong Lee²

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Korea

²Marine Resource Laboratory, Korea Ocean Reseach & Development Institute, Korea

In order to elucidate the growth mechanism of sulfide chimney formed as a result of seafloor hydrothermal mineralization, we carried out the mineralogical and fluid inclusion studies on the inactive, sulfide- and silica-rich chimney which has been recovered from a hydrothermal field in the Cleft segment of the Juan de Fuca Ridge. According to previous studies, many active and inactive vents are present in the Cleft segment. The sulfide- and silica-rich chimney is composed of amorphous silica, pyrite, sphalerite and wurtzite with minor amounts of chalcopyrite and marcasite. The interior part of the chimney is highly porous and represents a flow channel. Open spaces within chimneys are typically coated with colloform layers of amorphous silica. The FeS content of Zn-sulfides varies widely from 13.9 to 34.3 mole% with Fe-rich core and Fe-poor rims. This variation possibly reflects the change of physicochemical characteristics of hydrothermal fluids. Chemical and mineralogical compositions of the each growth zone are also varied, possibly due to a thermal gradient. Based on the microthermometric measurements of liquid-rich, two-phase inclusions in amorphous silica that was precipitated in the late stage of mineralization, minimum trapping temperatures are estimated to be about 114° to 145°C with the salinities between 3.2 and 4.8 wt.% NaCl equiv. Although the actual fluid temperatures of the vent are not available, this study suggests that the low-temperature conditions were predominant during the mineralization in the hydrothermal field at Cleft segment. Comparing with the previously reported chimney types, the morphology, colloform texture, bulk chemistry, and a characteristic mineral assemblage (pyrite + marcasite + wurtzite + amorphous silica) of this chimney indicate that the chimney have been formed from a relatively low-temperature (<250°C) hydrothermal fluid that was changed by sluggish fluid flow and conductive cooling.

Key words : seafloor hydrothermal mineralization, Cleft segment, sulfide chimney, mineralogy, fluid inclusions

해저 열수 광화작용을 대표할 수 있는 황화물 침니(sulfide chimney)의 성장 메카니즘을 고찰하기 위하여 Juan de Fuca 해령의 최남단에 위치하는 Cleft segment의 열수장(hydrothermal field)에서 회수한 비활동성이고 황화물과 실리카가 풍부한 침니를 대상으로 광물 및 유체포유물 연구를 수행하였다. 기존 연구에 의하면, Cleft segment에는 많은 활동성 및 비활동성의 열수 분출구가 존재하는 것으로 보고되어 있다. 연구 대상 침니는 주로 비정질 실리카, 황철석, 섬아연석 및 섬유아연석(wurtzite)으로 구성되어 있고, 소량의 황동석 및 백철석을 함유하고 있다. 유체통로로 추정되는 침니의 내부는 다공질이며, 비정질의 교질성(colloidal) 실리카로 피복되어 있다. 섬아연석과 섬유아연석으로 구성되어 있는 아연이 풍부한 황화물의 FeS 함량은 13.9~34.3 mole%의 범위를 보이며, 철이 풍부한 중심부와 철이 부족한 연변부를 지닌다. 이는 광화유체의 화학적·물리적 특성들의 변화로부터 기인되었으리라 사료된다. 침니 내부 성장대별 화학조성은 열적구배 및 구성광물의 차이로 인해 다른 특징들을 보여주고 있다. 광화후기에 침전된 비정질 실리카중의 액상이 풍부한 유체포유물을 대상으로 가열 및 냉각 실험을 수행한 결과, 열수유체의 최소 포획 온도는

*Corresponding author: styun@mail.korea.ac.kr

약 114°~145°C이며, 해당 염농도는 3.2~4.8 wt.% NaCl equiv. 이다. 실제 열구에서 배출되는 유체 온도 자료를 입수하지는 못했지만, 본 연구를 통해서 광물의 침전작용 동안 상대적으로 저온의 침전조건이 매우 지배적이었음을 알 수 있다. Juan de Fuca 해령내 Cleft segment에서 회수된 황화물 침니는 산출형태, 교질성 조직, 전(bulk) 화학조성, 광물조합(황철석+백철석+섬유아연석+비정질 실리카) 등으로 볼 때, 기존 보고된 침니 유형보다는 상당히 낮은 온도에서 느린 유체 유동과 전도성 냉각(<250°C)에 의해 생성되었으리라 사료된다.

주요어 : 해저열수광화작용, Juan de Fuca 해령, Cleft segment, 황화물 침니, 생성환경

1. 서 론

1979년에 북위 21°에 위치한 동태평양해령(East Pacific Rise) 정상부에서 블랙 스모커(black smoker)와 괴상 황화물 광상(massive sulfide deposits)이 발견되면서, 해양저 확장으로 인한 새로운 해양지각의 형성은 해양저에서의 금속광상의 형성과 밀접하게 관련되어 있다는 것을 확실하게 되었다. 해저의 블랙 스모커에서 배출되는 350°C의 열수유체는 해수와 혼합되면서 계속해서 금속 황화물을 침전시키며, 따라서 황철석, 섬유아연석, 황동석을 포함한 금속 황화물들은 해양저에 퇴적되어 괴상 황화물 광상을 이루게 된다. 해양지각을 통한 해수의 순환은 이러한 환경에서 주요한 광물침전 메카니즘이라고 보고되었으며, 해양저 확장 중심에서 해양지각으로 침투한 해수는 천부에 위치한 마그마 챔버(chamber) 위에서 암석과의 상호반응을 겪으면서 낮은 pH, 낮은 Eh, 높은 온도를 지닌 열수유체로 전환된다. 이 유체는 해양지각 내에서 금속 및

여러원소들을 용탈하고 운반하면서, 결국은 해양저에 괴상 황화물을 침전시킨다고 보고되었다(Francheteau *et al.*, 1979; Spiess *et al.*, 1980).

금번 연구에서는 해양저의 금속광상을 대변할 수 있는 황화물 침니(sulfide chimney)에 대하여 광물조성 특성 및 생성환경을 고찰하고자 하였다. 연구 대상시료의 회수 장소는 Juan de Fuca 해령의 최남단에 위치한 Cleft segment이다. Cleft segment는 남쪽으로는 Blanco 단열대까지 연장되며 북위 45° 05'에서 Vance segment와 중첩된다(Fig. 1). Cleft segment의 남쪽에는 용암류로 구성되어 있는 해양저 평원의 폭발 위치로 간주되는 폭 50 m, 심도 30 m의 연속적인 열극에 의해 분할되어 있다(U.S. Geological Survey Juan de Fuca Study Group, 1986). 분출후의 열수활동은 축상 열극에 국한되어 있으며, 고온의 열수를 분출하는 분화구와 아연-황화물이 부화된 기둥모양의 침니가 특징적으로 산출되고 있다.

연구지역에서는 1986년과 1987년에 잠수정 앨빈호에 의해 열수유체가 대량 방출됨이 발견되었고(Baker *et al.*, 1987, 1989), 배개용암과 관상 유상용암의 생성 시기가 짧은 사실로부터 화산활동이 활발한 단계임이 제시되었다. 1988년, 1990년, 1991년에는 잠수정 앨빈호에 의해 활동성 및 비활동성 열구에서 침니 시료 채취가 실시되었다.

이 논문에서는 Cleft segment에서 채취된 침니 시료를 대상으로 침니의 화학조성 및 광물조성을 고찰하는 한편, 침니생성시 광화유체의 성질을 파악하여 기존에 보고된 침니의 유형 및 성장 메카니즘과 비교 고찰하였다.

2. 실험방법

연구대상 침니시료는 반사현미경 관찰을 위하여 양면연마박편을 제작하였으며, 동일 시편에 대하여 유도결합플라즈마 방출분광기(ICP-AES)를 이용하여 As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb 및 Zn

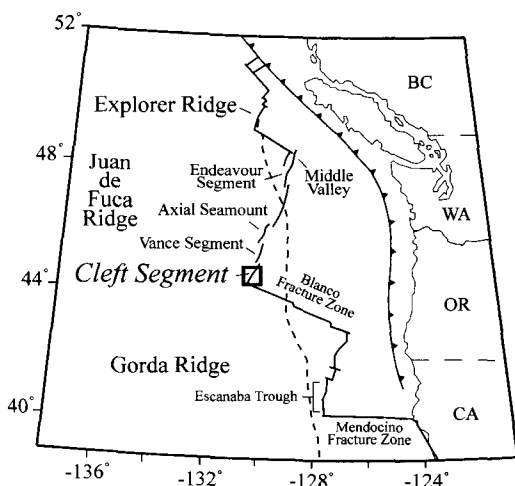


Fig. 1. Map showing the regional plate setting and subdivisions of the Juan de Fuca Ridge. Open rectangle denotes the sampling site for this study. Abbreviations: BC=British Columbia, CA=California, OR=Oregon, WA=Washington.

원소를 대상으로 전암분석(bulk analysis)하였다. 그리고, 산출광물들의 광물학적 및 화학적 특징을 파악하고자 X선 회절분석을 실시하였다. 회절분석기는 MAC SCIENCE 기종이며, 분석조건은 Cu target, CuK α (1.54056Å)를 이용하여 가속전압과 전류를 40 kV/30 mA로 하였으며, 발산슬릿(DS) 1 mm, 산란슬릿(SS) 1 mm, 수광슬릿(RS) 0.15 mm, 주사속도는 4 deg/min 으로 3°~60°까지 분석하였다. 또한, JEOL Superprobe JXA-8600SX 전자현미분석기(EPMA)에 장착된 파장분산형 분광기(WDS)와 에너지분산형분광기(EDS)를 이용하여 섬유아연석과 섬아연석으로 구성되어 있는 아연황화물, 황동석, 황철석의 조성을 분석하였다. 분석 조건의 가속전압 및 전류는 20 kV/10 nA, beam 크기는 1 μ m, 각 원소에 대한 검출시간은 100초, 분석 자료에 대한 표준오차는 1 wt.% 이하이다. 또한, 산출광물들의 공생관계와 미세조직 및 산출상태는 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 해석하였다. 연구에 이용된 ICP-AES, X선 회절분석기, EPMA, SEM은 모두 고려대학교 전략광물자원연구센터(CMR)에 소장된 것이다.

한편, 연구지역 침니 생성시의 광화유체의 성질과 광상 생성 조건을 규명하기 위하여 유체포유물 연구를 실시하였다. 유체포유물 연구는 침니를 구성하고 있는 광물 중 비정질 석영내의 유체포유물을 대상으로 실시하였다. 비정질 석영중에서 관찰되는 유체포유물은 대부분이 액상과 기상의 2상 포유물이며, 형태는 대부분 부정형이 많았으며 크기는 대부분 12~51 μ m 정도였다. 유체포유물의 균일화 온도는 각각의 포유물에 대해 3회 이상의 반복 측정을 하여 평균값으로 취했으며, 재현 오차는 2% 이내였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 광물 및 공생관계

Juan de Fuca Ridge의 Cleft segment에서 채취한

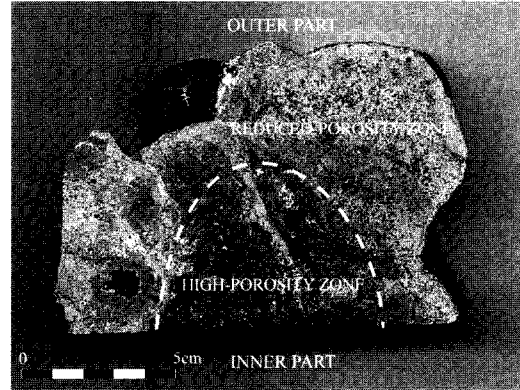


Fig. 2. Cross-sectional view of the studied chimney recovered from the Cleft segment within Juan de Fuca Ridge. Scale bar is 5 cm.

침니의 횡단면을 살펴보면(Fig. 2), 안쪽은 열수가 이동한 것으로 추정되는 매우 다공질인 부분으로 이루어져 있는 반면, 바깥쪽은 비교적 과상으로 이루어져 있음을 알 수 있다. X선 회절 분석결과, 침니의 주 구성광물은 황철석과 아연황화물(섬아연석과 섬유아연석)임이 확인되었다. 전암분석 결과에 의하면, 침니의 안쪽에서 바깥쪽으로 가면서 Ba, Ca, Cr, Fe, Mn, Pb원소는 함량이 증가하는 반면, As, Cd, Co, Cu, Ni, Zn원소는 함량이 감소하였다(Table 1). 반사현미경 관찰 결과, 침니의 안쪽에서는 주로 과상으로 산출하는 아연-황화물과 황동석이 산출되는 반면(Fig. 3A), 침니의 바깥쪽에서는 주로 교질성 황철석이 산출된다(Fig. 3B). 또한, 반사현미경을 이용하여 각 광물종들의 상대적 양을 관찰한 결과에 의하면, 황동석은 침니의 가장 안쪽에서 아연-황화물과 공생관계를 이루며 소량 분포하고 있다. 아연-황화물 역시 침니의 안쪽에 가장 많이 분포하고 있고, 바깥쪽으로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. 입방형의 반자형 황철석은 전반적으로 침니의 중간부위에 많이 분포하고 있으며, 교질성 황철석은 침니의 바깥쪽으로 갈수록 양적으로 더 증가하는 양상을 보여주

Table 1. Bulk chemical composition of inferred growth zones within the chimney from the Cleft segment, Juan de Fuca Ridge.

Zone	Dominant mineralogy	ppm											
		As	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
inner	Cpy, Wtz, Py	279	10.4	593	91.9	6.8	9.7	1,804	224,665	698	10.6	1,181	73,349
intermediate	Sp, Py, Mc, Si	233	7.8	380	104.4	2.3	5.4	1,658	241,401	756	9.4	1,492	96,879
outer	Py, Mc, Fe-oxide, Si	295	21.6	1042	32.9	3.0	10.4	923	326,284	728	9.2	1,631	48,557
	Average	269	13.2	671	76.4	4.1	8.5	1,462	264,117	727	9.7	1,435	72,928

Abbreviations: Cpy=chalcopyrite, Wtz=wurzite, Py=pyrite, Sp=sphalerite, Mc=marcasite, Si=silica.

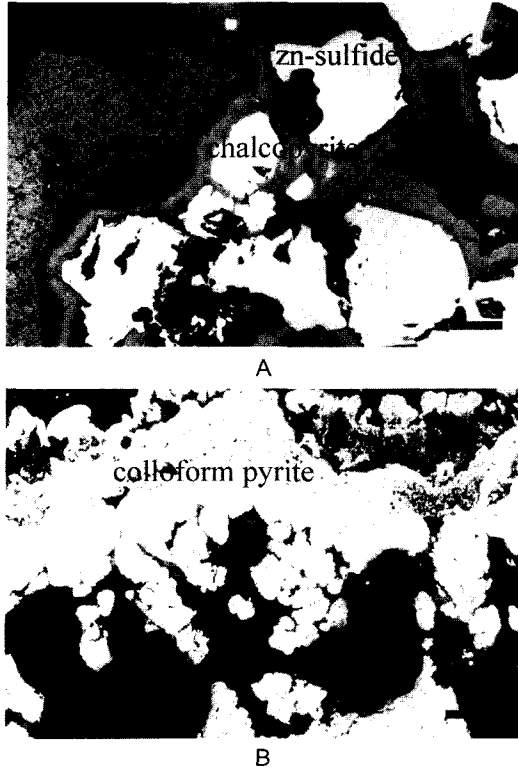


Fig. 3. Photomicrographs of polished sections of the studied chimney. (A) Amorphous silica infilling the interstices between Zn-sulfides and chalcopyrite. Scale bar is 100 μm . (B) Colloform pyrite occurring in exterior part of the chimney. Scale bar is 200 μm .

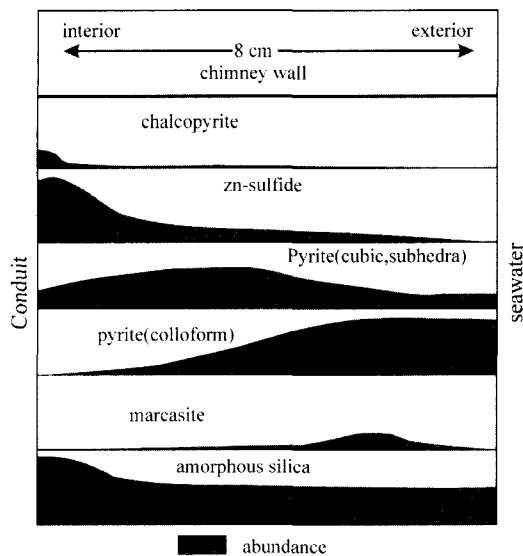


Fig. 4. Variation of the abundance of major minerals within the studied chimney.

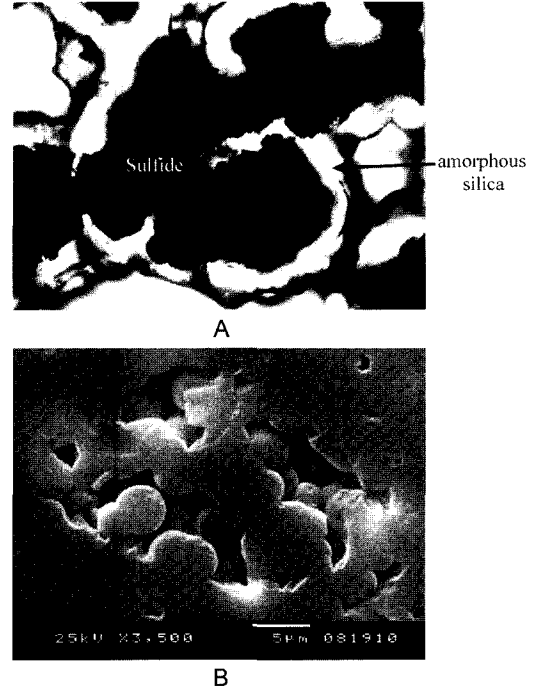


Fig. 5. Scanning electron microscope images of the studied chimney. (A) Amorphous silica with spheroidal form. (B) Amorphous silica coated around sulfides.

고 있다. 백철석은 침니의 외곽지역에 소량 분포하고 있으며, 비정질 실리카는 침니 안쪽의 통로를 괴상으로 피복하고 있으며 전반적으로 균질하게 분포하고 있다(Fig. 4). 주사전자현미경 관찰 결과(Fig. 5), 비정질 실리카는 구형의 형태를 보여주고 있으며(Fig. 5A and B), 주로 유화광물의 주변에 피복된 채로 분포하고 있다(Fig. 5B). 섬아연석 및 섬유아연석으로 구성된 아연-황화물을 대상으로 한 전자현미분석 결과(Table 2), 아연-황화물의 철함량(mole% FeS)은 13.9~34.3%의 범위(평균 25.3%; 총분석수 26점)를 보여주었다(Fig. 6). 또한, 아연-황화물 입자의 중심 부분에는 연변부에 비해 상대적으로 철이 부화되어 있다. 이는 열수의 물리, 화학적 특성이 광물 침전과 더불어 점차 변화하였음을 지시한다.

3.2. 유체포유물

연구대상 침니의 안쪽 유체 통로에서 괴상으로 산출되는 비정질 실리카내에는 I형 포유물 만이 관찰된다(Fig. 7). I형 포유물은 액상과 기상의 2상으로 구성되어 있으며 가열실험시 액상으로 균일화 된다.

포유물내 얼음의 초기 용융온도는 -20.7°C ~ -21.5°C 의

Table 2. Chemical composition of zinc sulfides in the chimney from the Cleft segment, Juan de Fuca Ridge.

Sample no.	Weight Percent						Total	Mole percent					Remarks
	Zn	Fe	Mn	Cd	Cu	S		ZnS	FeS	MnS	CdS	CuS	
1	54.0	11.8	0.6	0.2	0.1	33.4	100.1	78.6	20.2	1.0	0.2	0.1	Rim
1	52.2	14.7	0.1	0.4	0.2	33.5	101.1	74.6	24.6	0.2	0.3	0.2	Rim
1	53.9	13.3	0.1	0.4	0.0	33.2	100.9	77.1	22.3	0.3	0.3	0.1	Rim
1	53.9	13.0	0.1	0.1	0.2	33.8	101.1	77.6	22.0	0.2	0.1	0.2	Rim
1	59.0	8.2	0.1	0.1	0.0	33.8	101.2	85.8	13.9	0.2	0.1	0.0	Rim
1	56.5	9.8	0.1	0.0	0.4	33.2	100.0	82.5	16.8	0.1	0.0	0.6	Rim
1	48.1	18.0	0.1	0.2	0.2	34.4	101.0	69.1	30.3	0.2	0.2	0.3	Core
1	48.3	18.1	0.1	0.0	0.0	33.6	100.1	69.4	30.4	0.2	0.0	0.1	Core
2	51.5	14.2	0.1	0.0	0.1	33.6	99.5	75.3	24.3	0.3	0.0	0.1	Rim
2	49.2	15.6	0.1	0.0	0.9	33.7	99.5	71.9	26.7	0.1	0.0	1.3	Core
2	46.8	18.1	0.1	0.0	0.5	33.9	99.4	68.2	30.8	0.2	0.0	0.8	Core
2	51.1	16.2	0.0	0.3	0.1	34.0	101.7	72.6	27.0	0.0	0.2	0.1	Core
2	49.6	15.8	0.2	0.0	1.0	33.8	100.4	71.5	26.7	0.3	0.0	1.5	Core
3	50.8	14.0	0.0	0.0	0.5	33.4	98.7	75.0	24.2	0.1	0.0	0.7	Rim
3	54.7	12.3	0.1	0.2	0.0	34.0	101.3	78.8	20.8	0.2	0.2	0.0	Rim
3	55.2	10.7	0.1	0.3	0.0	33.4	99.7	81.2	18.5	0.1	0.3	0.0	Rim
3	48.8	17.8	0.0	0.2	0.1	34.0	100.9	69.9	29.8	0.1	0.1	0.1	Core
3	47.7	19.0	0.0	0.0	0.0	34.0	100.7	68.1	31.8	0.0	0.0	0.0	Core
3	47.6	18.8	0.1	0.0	0.3	34.2	101.0	68.0	31.4	0.1	0.0	0.4	Core
3	47.1	19.4	0.0	0.2	0.0	34.4	101.1	67.3	32.5	0.0	0.2	0.1	Core
7	55.3	9.3	0.1	0.0	1.3	33.0	99.0	81.8	16.1	0.1	0.0	2.0	Rim
7	54.6	12.9	0.1	0.2	0.1	33.5	101.4	78.1	21.6	0.1	0.2	0.2	Rim
7	57.3	9.1	0.0	0.1	0.2	33.3	100.0	84.1	15.6	0.0	0.1	0.2	Rim
7	45.8	20.6	0.1	0.1	0.2	34.3	101.1	65.2	34.3	0.2	0.1	0.3	Core
7	45.6	20.1	0.1	0.0	1.0	34.6	101.4	64.8	33.5	0.2	0.0	1.5	Core
7	47.7	19.2	0.1	0.1	0.4	34.4	101.9	67.4	31.8	0.2	0.1	0.5	Core

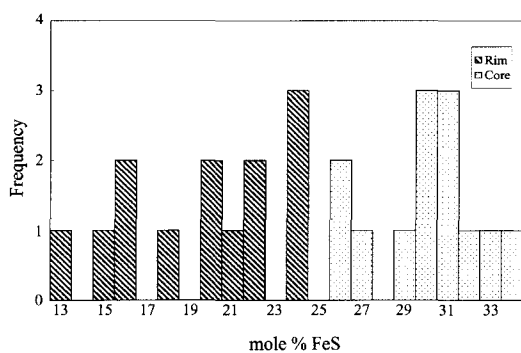


Fig. 6. Histogram of FeS contents (mole %) of Zinc-sulfides from the studied chimney.

범위를 보이나 관찰하기가 매우 어려워서 몇 개만이 측정되었다(Table 3). 이러한 용융온도는 포유물내에 용존되어 있는 염들중 2가 양이온의 부재와 NaCl이 지배적임을 지시하고 있다(Borisenko, 1977; Crawford,

1981). 한편, 액상 CO₂ 또는 가스 수화물이 관찰되지 않는 것으로 보아 CO₂ 함량은 0.85 molal 이하임을 추정할 수 있다(Hedenquist and Henley, 1985).

가열실험에 의한 균일화 온도 범위는 114°~145°C이며, 냉각실험에 의한 염농도 범위는 3.2~4.8 wt.% NaCl이다(Table 3). 황화물 침니시료를 채취한 지역의 수심은 1,400~1,600 m 정도로, 약 150 bars의 정수압(hydrostatic pressure) 조건에 해당된다. Potter(1977)의 자료에 의하면, 약 150 bars에서 H₂O-NaCl(3~5 wt.%)계 유체포유물의 균일화온도에 대한 압력보정(pressure correction)은 최대 약 15°C 미만이다. 따라서, 연구 지역 유체포유물의 실제 포획(trapping) 온도는 압력 보정을 감안한다고 하더라도 160°C미만이었으리라 판단된다.

3.3. 토의

Cleft segment에서 회수된 황화물 침니는 전형적으

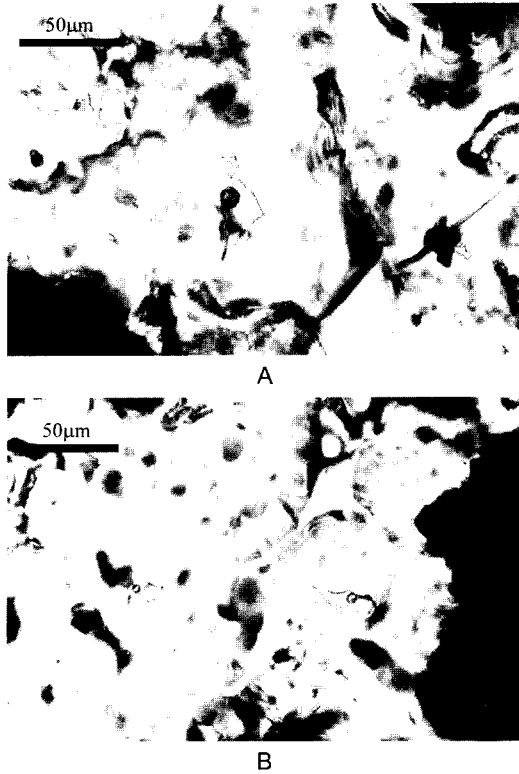


Fig. 7. Photomicrographs of fluid inclusions in amorphous silica of the studied chimney.

로 피상의 두꺼운 벽을 가지고 있으나 공극률은 높은 편이다. 침니 내에서 산출되는 대표적인 유화광물은 교질성 내지 반자형의 황철석 및 백철석이며, 섬유아연석과 섬아연석으로 구성된 조립질 자형의 아연-황화물은 유체 통로 주변에서는 풍부하게 산출되지 않으나 국부적으로 농집되어 있기도 하다. 소량의 황동석은 아

연-황화물 결정의 연변부를 치환하기도 한다. 침니내 공동은 비정질 실리카의 교질성층에 의해 피복되어 있다. 침니는 전체적으로 백철석 + 황철석 + 아연황화물 + 비정질 실리카의 저온성 광물조합을 보여주고 있다. 광물의 풍부도를 비교하여 보면, 황철석 · 백철석 · 비정질 실리카 > 아연황화물(섬아연석 + 섬유아연석) > 황동석 순서이다. 아연-황화물(섬유아연석 및 섬아연석)의 FeS 함량은 13.9~34.3 mole%의 범위를 보인다. 유체포유물 실험 결과에 의하면, 침니를 구성하고 있는 주된 광물들은 114~145°C의 비교적 낮은 온도와 해수의 염농도와 대체적으로 일치하는 3.2~4.8 wt.% NaCl의 낮은 염농도를 지닌 유체로부터 침전되었음을 지시하고 있다.

기존 연구결과에 의하면(Haymon, 1983; Baker *et al.*, 1987; Tivey *et al.*, 1990; Koski *et al.*, 1994), 해저에서 산출되는 침니는 크게 4개 유형으로 분류된다. 첫 번째 유형은 황화물 둔덕위에 누대구조를 이루면서 파이프 모양의 구리가 풍부한 침니가 만들어지는 경우로서, 고온성($\leq 328^{\circ}\text{C}$) 유체의 흐름과 관계가 있다. 두 번째 유형은 구근 모양의 침니로서 확산하는 고온성($\leq 315^{\circ}\text{C}$) 유체의 흐름과 관계가 있다. 열수유체와 해수의 격렬한 혼합은 경석고가 풍부한 각질층을 만든다. 세 번째 유형은 비교적 저온(260°C)의 유체가 하부 현무암층으로부터 직접 배출되는 곳에서 아연-황화물이 풍부한 침니가 좁은 통로를 지닌 주상으로 만들어지는 경우이다. 네 번째 유형은 전(bulk)화학조성($\leq 0.15\% \text{ Cu}$, $< 2.7\% \text{ Pb}$), 광물조합(황철석 + 백철석 + 아연황화물 + 비정질 실리카) 및 교질성 조직을 갖는 것으로서 확산속도가 느린 유체의 흐름과 전도성 냉각이 우세한 저온성($< 250^{\circ}\text{C}$)기원의 침니이다.

이번 연구에서는 연구대상 침니의 화도입구 온도를

Table 3. Microthermometric data of fluid inclusions in amorphous silica from the chimney of Cleft segment.

Sample no.	Th-tot (°C)	Tm-ice (°C)	Salinity (wt.%NaCl equiv.)	Size (µm)		Vapor ratio (%)	Tm-initial (°C)
				X-axis	Y-axis		
1	114	-2.7	4.5	15	6	17	-20.7
1	114	-1.9	3.9	15	9	19	
1	145	-2.9	4.8	51	20	40	-21.4
2	121	-1.9	3.2	12	12	19	-20.9
2	123	-2.2	4.5	24	12	25	
7	127	-2.0	4.2	24	18	15	-21.5
7	133	-2.0	4.2	27	20	20	
7	123	-2.6	4.3	24	18	40	-21.3

Abbreviations: Th-tot=total homogenization temperature, Tm-ice=final ice melting temperature, Tm-initial=initial ice melting temperature.

Table 4. Comparison of the characteristics of four types of chimney (modified after Koski *et al.*, 1994).

	Type I	Type II	Type III	Type IV	This study
Form	columnar-cylindrical	bulbous	columnar-spindle	pinnacle	pinnacle
Substrate	sulfide mound	sulfide mound or chimney	basalt	basalt	basalt
Temperature, °C	310-328	293-312	261	<250	114-145
Fluid flow	focused, rapid	diffuse, slower than type I	focused, slow	diffuse, slow	?
Abundant	chalcopyrite, anhydrite, sphalerite	anhydrite	sphalerite	pyrite, marcasite, amorphous silica	pyrite, marcasite, amorphous silica
Common	pyrite, wurtzite	sphalerite, pyrite	marcasite, pyrite, wurtzite	sphalerite, wurtzite	sphalerite, wurtzite
Minor	bornite, marcasite, covellite, amorphous silica, Fe-Mg silicates, barite	wurtzite, chalcopyrite	isocubanite/ chalcopyrite, pyrrhotite, anhydrite, barite, amorphous silica	anglesite, barite, chalcopyrite, galena	chalcopyrite
Trace	apatite, galena	pyrrhotite	galena, covellite	-	-

직접 측정하지는 못했지만, 침니의 전산화조성(<0.2% Cu, 7.3% Pb), 광물조합(황철석+백철석+아연황화물+비정질 실리카), 교질성 조직의 풍부함 등으로 볼 때 다른 침니 유형에 비해 연구대상의 침니는 더욱 낮은 침전조건에서 생성되었음을 알 수 있다. 침니 관찰결과, 경석고의 침전은 확인되지 않았다. 침니에서 경석고가 확인되지 않았다는 것은 광물침전의 후기단계에서 생성되었을 것으로 추정되는 경석고가 저온성 열수 유체 및 해수에 지속적으로 노출되면서 완전히 용해된 때문인 것으로 사료된다. 산출광물의 상대적 함량을 관찰해보면, 개략적으로 두 개의 광화시기를 추정해 볼 수 있다: 1) 섬유아연석 및 섬아연석으로 구성된 아연-황화물 및 소량의 황동석 침전이 우세한 광화시기; 2) 비정질 실리카의 침전이 우세한 광화시기(Fig. 4).

교질성 및 입자상의 세립질 황철석 및 백철석으로 구성된 뿔족탑 모양의 침니구조 내부는 수많은 꼬여진 유체통로로 구성되어 있다. 이는 광물침전 초기에 천금속(base metals)으로 불포화되었던 유체로부터 비교적 느리게 침전된 환경을 암시한다. Crerar and Barnes(1976)의 황동석 용해도 자료와 연구대상 침니의 매우 낮은 Cu 함량(평균 < 0.2%, Table 1)으로 볼 때 본 유형의 침니를 생성한 유체온도는 약 250°C를 넘지 않았을 것으로 추정된다. 일반적으로, 열수용액으로부터 섬유아연석의 침전은 kinetic 효과에 의존한다고 보고되어 있다(Kojima and Ohmoto, 1991). 따라서, 본 침니에서 섬유아연석은 다공성 침니벽을 통해서 침투한 해수와 느리게 움직이는 열수유체가 반응하면서 침전되었을 것으로 사료된다. 전반적으로, 침니내

고온의 황화물이 먼저 침전되고, 열수 배출량이 감소하고 해수의 혼합량이 커지면서 비정질 실리카를 포함한 저온의 광물들이 침전되는 것으로 사료된다(Fig. 4). 비정질 실리카는 350°C 미만의 온도에서 열수유체와 해수의 혼합과정에서는 침전되지 않기 때문에(Janecky and Seyfried, 1984), 연구지역의 침니에서 비정질 실리카가 풍부하다는 것은 전도성 열전도에 의해서 광화 후기에 좀 더 차가운 유체가 유입되었다는 것을 지지하고 있다. 이러한 냉각작용은 왜곡되어 있는 침니 통로 내에서 유체가 느리게 유동할 때에 보다 효과적이었던 것으로 사료된다.

본 연구대상인 Juan de Fuca 해령내 Cleft segment 에서 회수된 침니시료의 반사현미경, X선 회절분석, 전자현미분석, 주사전자현미경, 유체포유물 실험 결과와 기존의 연구결과(Haymon, 1983; Baker *et al.*, 1987; Tivey *et al.*, 1990; Koski *et al.*, 1994)를 비교하여 보면, 연구대상 침니는 기존 연구결과의 제 4유형과 유사한 특성을 보이는 것으로 추정된다(Table 4). 그러므로, 본 침니는 확산성의 느린 유체유동과 전도성 냉각(<250°C)에 의해 생성되었으리라 사료된다.

4. 결 론

1. Juan de Fuca 해령내 Cleft segment에서 채취된 침니는 주로 비정질 실리카, 황철석, 섬아연석, 섬유아연석으로 구성되어 있으며, 황동석과 백철석은 소량 분포함을 알 수 있다. 섬아연석 및 섬유아연석으로 구성된 아연-황화물의 FeS 함량은 13.9~34.3 mole%

(평균 25.3 mole%, 총분석수 26점)의 범위를 보이며, 철이 풍부한 중심부와 철이 부족한 연변부 특성을 보여주고 있다.

2. 연구대상 침니를 구성하고 있는 비정질 실리카를 대상으로한 유체포유물 실험 결과, 침니를 구성하고 있는 주된 광물들은 114°~145°C의 비교적 낮은 온도와 3.2~4.8 wt.% NaCl의 낮은 염농도를 지닌 유체로부터 생성되었을 것으로 해석된다.

3. 산출형태, 교질성 조직, 전(bulk) 화학조성, 광물조합(황철석+백철석+섬유아연석+비정질 실리카)등을 고려하고 기존 침니 유형과 대비했을 때, 연구대상 침니는 상당히 낮은 온도에서 확산성의 느린 유체 유동과 전도성 냉각(<250°C)에 의해서 생성되었을 것으로 추정된다.

사 사

이 연구는 고려대학교 전략광물자원연구센터(CMR)의 재정적 지원으로 수행되었으며, 세심한 심사와 조언을 해주신 부산대학교 양경희 교수님과 한국지질자원연구원 문상호 박사님에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- Baker, E.T., Massoth, G.J. and Feely, R.A. (1987) Cataclysmic venting on the Juan de Fuca Ridge. *Nature*, v. 329, p. 149-151.
- Baker, E.T., Lavelle, R.A., Feely, R.A., Massoth, G.J. and Walker, S.L. (1989) Episodic venting of hydrothermal fluids from the Juan de Fuca Ridge. *Journal of Geophysical Research*, v. 94, p. 9237-9250.
- Borisenko, A.S. (1977) Study of the salt composition of solutions in gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method. *Soviet Geology and Geophysics*, v. 18, p. 11-19.
- Crawford, M.L. (1981) Phase equilibria in aqueous fluid inclusions. *Mineralogical Association of Canadian Short Coursebook*, v. 6, p. 75-100.
- Crerar, D.A. and Barnes, H.L. (1976) Ore solution chemistry V. Solubilities of chalcopyrite and chalcocite assemblage in hydrothermal solution at 250° to 350°C. *Economic Geology*, v. 71, p. 772-794.
- Francheteau, J. (and 14 others) (1979) Massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. *Nature*, v. 277, p. 523-528.
- Haymon, R.M. (1983) Growth of hydrothermal black smoker chimneys. *Nature*, v. 301, p. 695-698.
- Hedenquist, J. W. and Henley, R.W. (1985) The importance of CO₂ on freezing point measurements of fluid inclusions: Evidence from active geothermal and implications for epithermal ore deposition. *Economic Geology*, v. 80, p. 1370-1406.
- Janecky, D.R. and Seyfried, Jr. W.E. (1984) Formation of massive sulfide deposits on oceanic ridge crusts: Incremental reaction models for mixing between hydrothermal solutions and seawaters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 48, p. 2723-2738.
- Kojima, S. and Ohmoto, H. (1991) Hydrothermal synthesis of wurtzite and sphalerite at T=350° 250°C. *Mining Geology*, v. 41, p. 313-327.
- Koski, R.A., Jonasson, I.R., Kadko, D.C., Smith, V.K. and Wong, F.L. (1994) Compositions, growth mechanism, and temporal relations of hydrothermal sulfide-sulfate-silica chimneys at the northern Cleft segment, Juan de Fuca Ridge. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, p. 4813-4832.
- Potter, R.W. III. (1977) Pressure corrections for fluid inclusion homogenization temperatures based on the volumetric properties of the system NaCl-H₂O. *United States Geological Survey Journal Research*, v. 5, p. 603-607.
- Spiess, F.N. *et al.* (1980) East Pacific Rise: Hot springs and geophysical experiments. *Science*, v. 207, p. 1421-1433.
- Tivey, M.K., Olson, V.W., Miller, V.W. and Light, R.D. (1990) Temperature measurements during initiation and growth of a black smoker chimney. *Nature*, v. 346, p. 51-54.
- U.S. Geological Survey(USGS) Juan de Fuca Study Group (1986) Submarine fissure eruptions and hydrothermal vents on the southern Juan de Fuca Ridge: Preliminary observations from the submersible Alvin. *Geology*, v. 14, p. 823-827.

2002년 3월 15일 원고접수, 2002년 6월 14일 게재승인.