

Juan de Fuca Ridge 의 해저면에서 산출되는
다금속 열수 유화광상 연구

A Study of Polymetallic Hydrothermal Sulfide
Deposits from the Juan de Fuca Ridge

1996. 3.

한국해양연구소

제 출 문

한국해양연구소장 귀하

본 보고서를 “Juan de Fuca Ridge의 해저면서 산출되는 다금속
열수 유화광상 연구”사업의 최종보고서로 제출합니다.

1996년 3월

연구책임자 : 이경용

강정극

문재운

연구원 : 정희수

요 약 문

I. 제 목

Juan de Fuca Ridge의 해저면에서 산출되는 다금속 열수 유화광상 연구

II. 연구개발의 내용 및 결과

열수분출구는 열수물질과 해수의 혼합에 의한 경석고의 침전작용을 시작으로 형성된다. 경석고 침전으로 형성된 벽의 틈바구니를 통해 지속적으로 열수물질이 공급되면 벽 바깥쪽에서는 콜로이드형 황화광물이 침전되어 벽을 보다 두껍게 발달시키며, 열수물질과 해수의 혼합을 저해한다. 벽 안쪽에서는 열수물질이 해수로부터 차단되어 비교적 고온성 광물들인 섬아연석, 워자이트 및 황동석 등이 자형 또는 반자형으로 발달한다. 열수분출구는 열수분출물의 온도 및 분출속도에 의해 열수물질과 해수의 접촉시간 및 혼합율이 상이하어 형태적 특성과 조성의 변화가 생긴다.

유체포유물 연구결과 경석고의 지배적인 정출환경은 192~261 °C,

5.2~6.9 eq. wt.% NaCl인 반면에, 워자이트 경우는 205~253 °C, 7.0~9.7 eq. wt.% NaCl로 경석고에 비해 해수의 유입이 적은 환경에서 정출 되었음을 시사한다. 비정질 규질물의 경우는 온도 하강에 따른 해수 유입량의 증가로 100~182 °C, 5.2~6.7 eq. wt.% NaCl의 정출환경 영역을 보여준다.

SUMMARY

I. Title of the study

A Study of Polymetallic Hydrothermal Sulfide Deposits from the Juan de Fuca Ridge

II. Abstract

Hydrothermal chimneys in the Juan de Fuca Ridge were initially formed by anhydrite precipitation resulting from mixing of hydrothermal fluid and sea water. Subsequent deposition of colloform sulfides thickened the chimney walls and created a physical barrier that inhibited mixing of hydrothermal fluid and sea water within the chimneys. Inside the wall, the intensifying hydrothermal system produced a higher-temperature assemblage of euhedral to subhedral sphalerite, wurtzite and chalcopyrite. Hydrothermal chimneys are characterized by their shapes and compositions depending on

the mixing of hydrothermal fluid and sea water. The mixing is related to temperatures and dynamics of the fluid flow.

Fluid inclusion data indicate that crystallizing temperatures and salinities of anhydrite and wurtzite are 192~261 °C, 205~253 °C and 5.2~6.9 eq. wt.% NaCl, 7.0~9.7 eq. wt.% NaCl, respectively. The condition of amorphous silica precipitation is 100~182 °C and 5.2~6.7 eq. wt.% NaCl.

CONTENTS

List of Tables -----	9
List of Figures -----	10
I. Introduction -----	13
II. Regional setting -----	15
III. Sample and analytical methods -----	18
IV. Results and Discussion -----	20
IV-1. Mineralogy and Paragenesis -----	20
IV-2. Geochemistry of Zn-bearing Minerals -----	28
IV-3. Fluid Inclusion Study -----	35
IV-4. Formation of Hydrothermal Vents -----	43
V. Conclusion and Summary -----	46
VI. Acknowledgements -----	47
VII. References -----	48

목 차

표목차 -----	9
그림목차 -----	10
I. 서론 -----	13
II. 지질개요 -----	15
III. 연구 시료 및 방법 -----	18
IV. 결과 및 토의 -----	20
IV-1. 열수분출구의 광물학적 특성 -----	20
IV-2. 함아연광물의 지화학적 특성 -----	28
IV-3. 유체포유물 특성 -----	35
IV-4. 열수분출구의 형성과정 -----	43
V. 결론 및 요약 -----	46
VI. 감사의 글 -----	47
VII. 참고문헌 -----	48

표 목 차

(List of Tables)

Table 1. Chemical composition of Zn-bearing sulfide minerals from the Juan de Fuca Ridge. -----	30
Table 2. Microthermometric fluid inclusion data from the Juan de Fuca Ridge. -----	37

그림 목차

(List of Figures)

- Fig. 1. Generalized map of the Juan de Fuca Ridge
showing the sampling area. ----- 16
- Fig. 2. Generalized paragenetic diagram of four
hydrothermal chimney types. ----- 21
- Fig. 3. Photomicrographs of typical mineral textures. ----- 24
- Fig. 4. Photomicrographs of typical growing textures of
euhedral wurtzite (a), colloform sphalerite (b)
and subhedral sphalerite (c) in transmitted light. - 29
- Fig. 5. Variation diagram of Fe content (wt.%) of
Zn-bearing sulfides. ----- 32
- Fig. 6. Plots of Cd versus Fe content (wt.%) for
Zn-bearing sulfides. ----- 33
- Fig. 7. Photomicrographs of primary fluid inclusions
in wurtzite (a), anhydrite (b) and amorphous
silica (c). ----- 36

Fig. 8. Frequency histogram of filling temperatures ($^{\circ}\text{C}$)
of fluid inclusions in anhydrite, wurtzite and
amorphous silica. ----- 38

Fig. 9. Frequency histogram of salinities (eq. wt.% NaCl)
of fluid inclusions in anhydrite, wurtzite and
amorphous silica. ----- 39

Fig.10. Plots of filling temperature ($^{\circ}\text{C}$) versus salinity
(eq. wt.% NaCl) of fluid inclusions in anhydrite,
wurtzite and amorphous silica. ----- 42

I. 서론

육상자원의 고갈로 자원위기설이 점차 심화되었던 1970년대 말 해저 다금속 열수황화광상(polymetallic hydrothermal sulfide deposits)의 발견(Francheteau et al., 1979)은 그간의 연구결과를 직접 증명하는 학문적 쾌거로, 그리고 망간단괴 및 망간각에 비교되는 제3의 해저 광물자원 시대를 여는 새로운 역사의 장으로 기록되고 있다. 열수황화광상은 현재 해저에서 생성되고 있는 광체로 기존의 다른 광물자원과는 달리 동일 장소에서 지속적으로 생성됨에 따라 재개발이 가능한 자원으로 각광받고 있다.

무한에 가까운 부존량과 고품위의 유용금속(아연, 구리, 금, 은 등) 함량으로 지질, 해양 및 자원학계에 높은 관심을 불러일으키고 있는 열수황화광상은 배타적 경제수역(Exclusive Economic Zone) 내에서 많이 발견되고 있어 일부 학자들은 망간단괴에 비해 빨리 상업적 생산이 시작될 것으로 예측하고 있다. 그러나 지각변동이 심한 중앙해령(mid-oceanic ridge) 및 해구(oceanic trench) 등의 심해저면에 부존 되어 있으며, 탐사 및 시료채취에 첨단기술 및 막대한 비용이 소요되므로 현재 일부 선진국에서만 연구·탐사 활동이 수행되고 있는 실정이다.

우리 나라는 전략 희유금속의 장기·안정적 공급원 확보를 위해 해저 광물자원의 하나인 망간단괴 개발 사업을 수행하고 있으며,

광물자원 공급원의 다변화를 위해 망간각 및 열수황화광상 개발을 계획하고 있다. 그러나 열수황화광상에 관한 국내 연구기반은 아직 빈약한 실정이다. 따라서 향후 수행될 열수황화광상의 이해와 연구능력의 증진을 위해 기보고된 자료의 수집 및 정리, 시료의 직접적인 분석, 그리고 광상학적 연구 수행 등이 절실히 요구되고 있다.

열수황화광상 탐사의 선두주자인 미국 국립지질조사소(U.S. Geological Survey, USGS)는 근래에는 자국의 배타적 경제수역에 위치한 후안데푸카해령(Juan de Fuca Ridge) 지역에 중점을 두어 열수황화광상 탐사활동을 활발히 전개하고 있다(USGS Juan de Fuca Study Group, 1986; Embley et al., 1991). 특히, 1988, 1990 및 1991년도에는 심해 유인잠수정 엘빈(Alvin)을 이용하여 후안데푸카해령에서 열수황화광상의 열수작용 및 광상 형성과정을 직접 관찰하였고, 활동성 및 비활동성 열수황화광상 시료를 채취하여 그들의 분포, 산출상 및 조성 등을 보고하였다(Koski et al., 1994; Smith and Koski, 1994).

본 연구에서는 미국 국립지질조사소(U.S. Geological Survey, USGS)의 심해 유인잠수정 엘빈(Alvin)을 이용하여 후안데푸카해령에서 채취한 열수황화광상 시료를 제공받아 산출상에 따른 광물학적 특성 및 물리·화학적 침전 환경을 규명하므로써 열수황화광상의 성인을 고찰하고자 한다.

II. 지질개요

북미대륙 서측의 배타적 경제수역에 위치하고 있는 후안데푸카해령(Fig. 1)의 지질학적 특성은 Atwater(1970), Kappel and Ryan (1986), Davis et al.(1987) 및 Embley et al.(1991) 등에 의해 비교적 상세하게 보고되어 있다. 본 연구에서는 열수황화광상 부존과 관련된 지질개요만을 간단하게 언급하고자 한다.

동태평양해령의 북부지역에 속하는 후안데푸카해령은 평균 6 cm/year의 확장속도를 갖는 확장대(spreading center)로 그 길이가 약 500 km 연장·발달되어 있다(Atwater, 1970). 후안데푸카해령의 중심부에는 넓이 1 km 정도의 협곡대가 가파르고 대칭적인 협곡 벽에 둘러싸여 있으며, 지구조적 변형작용을 거의 받지 않은 특성을 보인다(Kappel and Ryan, 1986). 협곡대 내에는 얇은 판상의 현무암질 용암체가 분포되어 있으며, 북부 일부지역에서는 300 m에 달하는 퇴적층이 발달되어 있지만, 퇴적물은 남부지역으로 갈수록 낮아져 남단지역은 신선한 유리질 물질로 덮여 있는 현무암질 암석이 해저면에 노출되어 있다(Davis et al., 1987).

본 연구에 사용된 열수황화광상 시료가 채취된 후안데푸카해령 남단지역의 협곡대에는 열극(fissure) 및 화산성 구조물이 발달되어 있어 다소 복잡한 양상을 보인다(Embley et al., 1991). 수심 2,300~2,400 m의 협곡대 해저면에는 신장된 베개모양의 현무암질

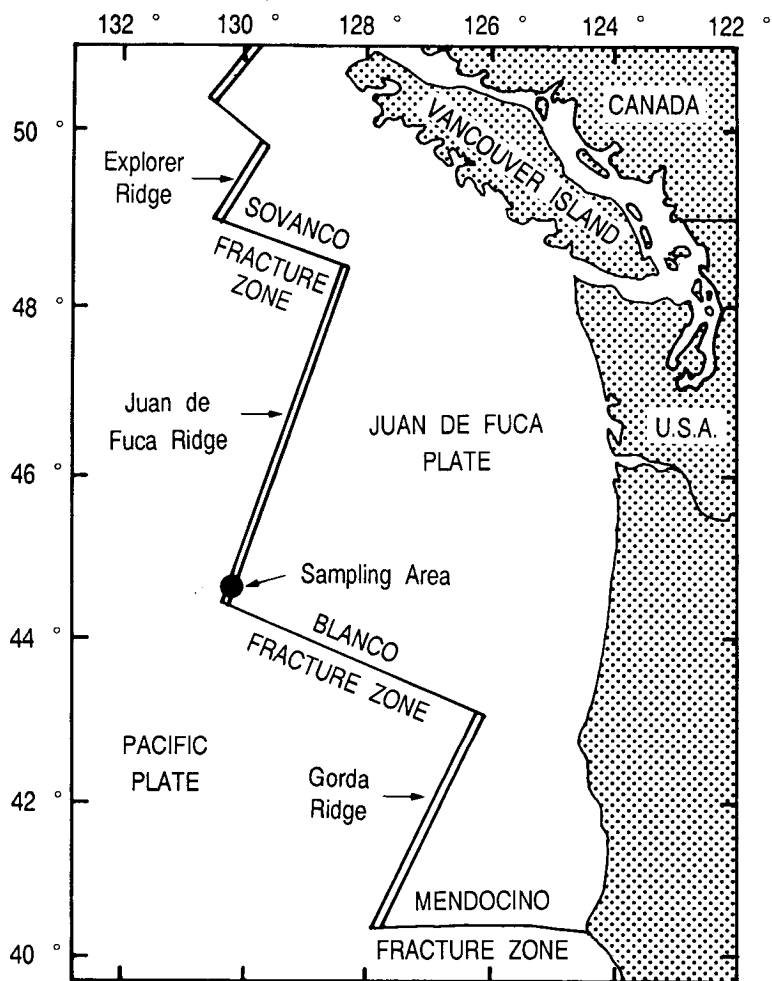


Fig. 1. Generalized map of the Juan de Fuca Ridge showing the sampling area.

용암(elongated pillow lava)이 둔덕(mound)을 이루며 도처에 분포되어 있다. 이러한 기존의 용암둔덕 측면 부에는 새로운 판상 혹은 엽상의 용암이 분출·피복하고 있다. Embley et al.(1991)은 용암 표면이 퇴적물로 피복되어 있지 않고 비교적 신선한 유리질 물질로 구성되어 있는 점을 근거로 불과 수년 전에 분출작용이 있었던 것으로 추론하고 있다.

현재 광화물질을 배출하고 있는 활동성 열수분출구(chimney)는 주로 신선한 판상 용암체내 혹은 측면 부에 발달되어 있는 열극대에 분포하는 경향을 보이며, 활동성 열수분출구 주변에는 과거에 열수물질을 분출했을 것으로 생각되어지는 비교적 오래된 비활동성 열수분출구가 산재되어 있다(Koski et al., 1994). 본 연구 지역에서는 커다란 규모의 열수유체 덩어리의 발산작용(exhalation)에 의해 형성된 것으로 판단되는 온도 및 화학적 조성이 주변과 상이한 거대플루움(megaplume)의 존재가 확인되었다(Baker et al., 1989). 거대플루움의 존재 및 최근의 용암분출 현상을 고려한다면, 후안데푸카해령 남단지역은 현재 활동성 화산 구조물이 발달하고 있는 시기이며, 판상 용암체가 발달되어 있는 협곡축에 평행한 열극들은 확장축의 지구조적 팽창과 간헐적 분출작용에 의해 형성된 것으로 추론된다.

III. 연구 시료 및 방법

USGS는 1988, 1990 및 1991년도에 심해 유인잠수정 엘빈을 이용하여 후안데푸카해령에서 열수황화광상의 열수작용 및 광상형성과정을 직접 관찰하였고, 활동성 및 비활동성 열수황화광상 시료를 채취하여 그들의 분포, 산출상 및 조성 등을 보고하였다(Koski et al., 1994; Smith and Koski, 1994). 또한 Koski et al.(1994)은 열수분출물의 온도 및 분출속도 그리고 열수분출구의 형태 및 조성 등에 근거하여 열수분출구를 Type I, II, III 및 IV의 4가지 유형으로 분류하였다.

본 연구에서는 열수분출구의 각 유형을 대표하는 시료를 USGS로부터 제공받아 각각 외각부에서 내측부까지 일정 간격으로 체계적인 연마박편을 제작하였다. 열수분출구의 광물학적 특성을 규명하고자 편광 반사 및 투과현미경 하에서 구성광물의 조성 및 공생관계를 고찰하였으며, 현미경 하에서 감정이 어려운 광물들은 X선회절분석 및 전자현미경을 이용하여 검증하였다.

함아연황화광물의 지화학적 특성을 규명하고자 Cameca SX50 전자미분석기를 이용 점분석을 수행하였다. 파장분산분석 방법으로는 아연, 철, 카드뮴, 망간, 구리, 은, 납 등을, 그리고 에너지분산 분석방법으로는 황을 분석하여 구성원소의 함량변화를 추적하였다. 분석상의 기술 및 오차는 Hoyt(1992)에 의해 상세히 기술되어

있으며, 분석조건 다음과 같다. accelerating potential=20 keV, beam current=10 nA, beam size=1 cm, counting time=10 sec.

또한 광화작용시 광액의 온도 및 조성 변화를 규명하고자 40여개의 연마박편(두께 약 0.2 mm) 시료를 제작하여 유체포유물(fluid inclusion) 연구를 수행하였다. 유체포유물의 균질화온도(homogenization temperature, T_h) 및 빙점온도(freezing point, T_m)는 USGS-type gas-flow microscope stage에서 각각 가열 및 냉각실험에 의해 획득하였다. 일부 시료에 대한 5회의 반복실험 결과 균질화온도는 $\pm 2\sim 5\text{ }^\circ\text{C}$, 빙점온도는 $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 의 오차범위를 나타내었다. 가열 및 냉각실험을 수행하기 이전에 모든 유체포유물을 광학적으로 관찰하여 Roedder(1984)의 분류기준에 따라 초생(primary) 유체포유물로 여겨지는 것만을 대상으로 삼았다. 또한 미리 기포의 크기를 측정하여 가열실험 동안 누수현상(leakage)이 일어났는지를 판단하였으며, 누수현상의 증거를 보여주지 않는 것들만 자료로 선택하였다.

IV. 결과 및 토의

IV-1. 열수분출구의 광물학적 특성

열수분출구에서 산출되는 구성광물의 조성 및 공생관계는 각 유형별로 상이한 특성을 갖는다(Fig. 2).

IV-1-1. Type I 열수분출구

고온(최고 330 °C)의 열수물질을 빠른 속도로 분출하는 것으로 보고된(Koski et al., 1994) Type I 열수분출구는 원추형의 형태를 갖으며, 직선형의 배출통로(직경 : 약 1~5 cm)와 이를 중심으로 동심원상의 누대구조가 발달되어 있는 벽(두께 : 약 4~8 cm)으로 특징 된다. 벽에 발달되어 있는 동심원상 누대구조는 진한 노란색의 내측부(두께 : 약 1~2 cm)와 갈색의 외각부(두께 : 약 3~6 cm)로 구분된다. 벽의 내측부는 열수분출물과 접하는 부분으로, 대부분이 황동석(chalcopyrite)으로 치밀하게 구성되어 있다. 해수와 접하는 벽의 외각부는 경석고(anhydrite), 황동석, 섬아연석(sphalerite), 워자이트(wurtzite), 황철석(pyrite), 백철석(marcasite), 중정석(barite) 및 비정질 규질물(amorphous silica) 등이 서로 혼합되어

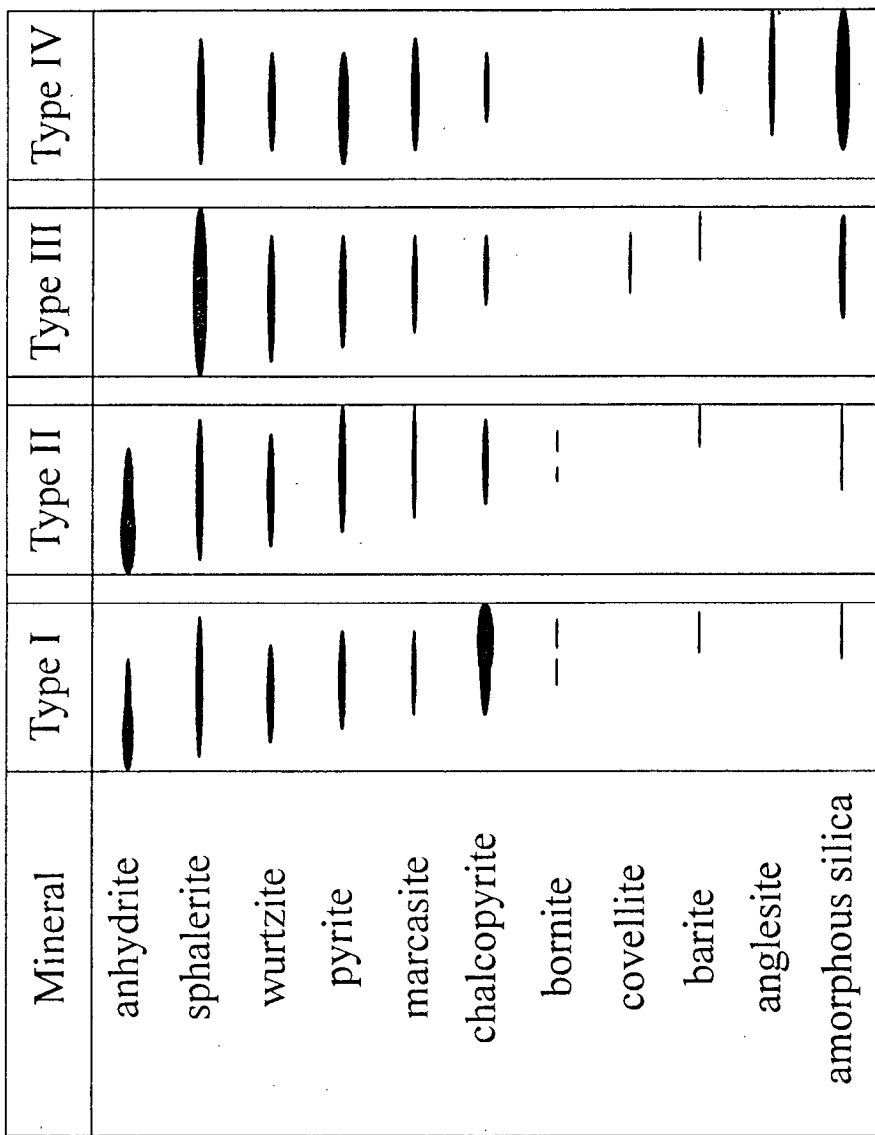


Fig. 2. Generalized paragenetic diagram of four hydrothermal chimney types.

The early stages of deposition are at left and the late stages are at the right in each Type. The thickness of each bar represents the relative abundances of the mineral phases as deposition proceeds.

산출된다(Fig. 2).

각 구성광물의 산출 특성은 다음과 같이 요약된다. 황동석의 경우 벽의 내측부에서 외각부로 갈수록 입도 및 함량이 감소하는 경향을 뚜렷이 보여주며, 벽의 내측부에서는 괴상형으로 산출되는 것이 지배적이지만, 외각부에서는 경석고를 치환하거나 또는 함아연 황화광물에 덧붙어서 성장한 특성을 보여준다. 또한 황동석 결정면은 열수통로를 향해 매끄럽게 발달되어 있어 성장 시 열수 분출물에 의한 마찰 혹은 화학적 해리작용이 지속되었음을 시사한다.

반동석(bornite)은 벽의 내측부와 외각부 접이대 부근에 국한하여 황동석 입자들과 함께 소량 산출된다. 반동석이 산출되는 곳에서는 드물지만 자형 황철석이 황동석 입자 틈바구니에 끼여 발달하기도 한다. 배출통로에 접하는 부분에서는 황동석만이 괴상형으로 산출되고, 일정 거리 이후에 반동석이 황동석 및 황철석과 공존하여 산출될 수 있는 것은 산화력(oxidation)과 황화력(sulfidation)이 증가했음을 시사한다(Haymon, 1983).

경석고는 주로 벽 외각부의 안쪽에서 산출되며, 흔히 황동석, 워자이트, 섬아연석, 황철석 등의 황화광물들에 의해 결정면 일부가 침식되어 있다. 워자이트는 해수에 접하는 바깥 방향으로 함량 및 결정 크기가 감소하는 경향을 보여주며, 대체적으로 철 함량 변화를 시사하는 투명도 및 색 차이에 의한 누대구조를 갖는 조립질

자형으로 산출된다. 워자이트의 일부 혹은 전체는 흔히 황동석에 의해 치환되어져 있다(Fig. 3a). 섬아연석의 경우는 외각부의 바깥쪽으로는 수지상의 콜로이드 형태가 지배적이지만, 외각부 안쪽으로 갈수록 반자형 또는 자형으로 산출되는 경향을 보인다. 해수에 직접 접하고 있는 외각부의 최외각층은 대체적으로 황철석과 백철석이 혼합된 얇은 콜로이드 층으로 구성되어 있으며, 이들 콜로이드 층은 부분적으로 중정석을 소량 함유하는 철수산화물 및 섬유상의 비정질 규질물에 의해 피복되어 산출되기도 한다.

IV-1-2. Type II 열수분출구

구근모양의 다공성인 Type II 열수분출구는 Type I 열수분출구에 비해 열수분출물의 온도가 낮으며(약 300 °C) 분출속도 역시 느린 것으로 보고되고 있다(Koski et al., 1994). Type II 분출구의 벽은 경석고와 소량의 황화광물로 구성되어 있으며(Fig. 2), 약 30 %에 달하는 공극과 망상조직의 발달이 특징적이다.

벽의 약 50 % 함량을 차지하는 경석고는 대체적으로 1~4 mm 크기의 막대형 결정형으로 산출되며, 벽개(cleavage)면에는 치환 작용에 의해 형성된 황화광물들이 흔히 관찰된다(Fig. 3b). 황화광물들은 배출통로를 중심으로 동심원 층을 이루며 산출되기도

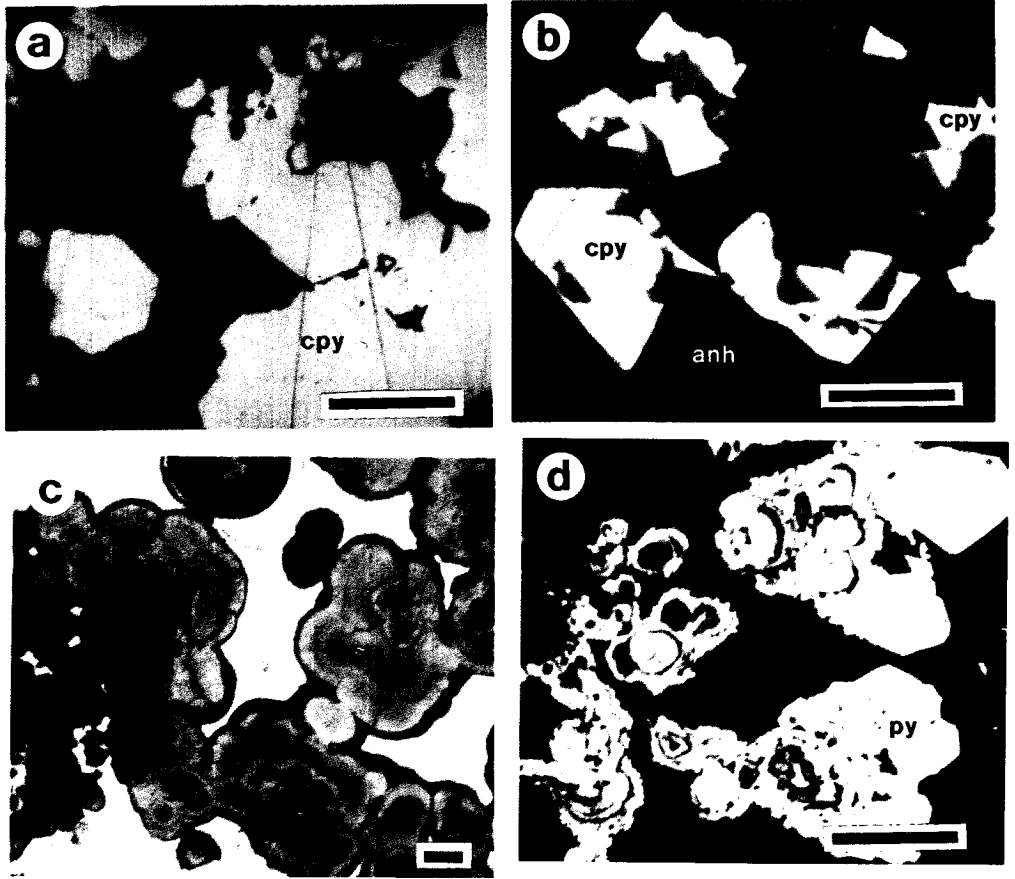


Fig. 3. Photomicrographs of typical mineral textures. Scale bar is 50 μm .

- Ⓐ Encroachment and replacement of wurtzite (wt) by chalcopyrite (cpy) in Type I sample (1-33-2a, reflected light). Ⓑ Incipient replacement along cleavages of anhydrite (anh) by chalcopyrite and wurtzite in Type II sample (2-65-4c, reflected light). Ⓒ Dendritic colloform sphalerite (sp) with opaque cores (dark area, colloform pyrite intergrown with covellite) in Type III sample (3-47-2b, transmitted light) Ⓓ Systematic overgrowth of colloform to euhedral pyrite (py) toward chimney interior (4-94-88a, reflected light)

하는데 내부 중심에서 외각 바깥쪽으로 갈수록 콜로이드형 섬아연석, 황철석 및 백철석 등의 함량이 증가하는 반면에, 반자형 섬아연석 및 자형 위자이트 등의 함량은 감소한다. 소량의 황동석과 함께 성장한 위자이트들은 흔히 배출통로 주변에 농집되어 산출된다. 황동석 결정 내에는 반동석 입자가 포유물로 산출되는 경우가 매우 드물게 관찰되기도 한다. 해수에 직접 접하는 벽 바깥쪽 부분은 황철석과 백철석이 혼합된 콜로이드 층의 발달이 지배적이며, 이들 층은 비정질 규질물, 철수산화물 및 중정석 등의 혼합물에 의해 흔히 피복되어 있다.

IV-1-3. Type III 열수분출구

좁고 휘어진 배출통로와 두꺼운 벽으로 특징 되는 Type III 열수분출구는 비교적 저온성(약 260 °C) 열수물질을 느린 속도로 분출하고 있는 것으로 보고되어 있다(Koski et al., 1994). 벽은 황철석, 백철석, 및 비정질 규질물 등을 포함하는 함아연황화광물로 구성되어 있으며 (Fig. 2), 표면에는 생명체가 서식하고 있거나 또는 서식한 흔적을 보인다.

함아연황화광물은 수지상 콜로이드형 섬아연석이 지배적이며, 반자형 또는 자형 섬아연석 및 자형 위자이트 등은 수지상

콜로이드형 섬아연석에 덧붙여서 성장한 구조로 발달하고 있다. 수지상 콜로이드형 섬아연석 중심부에는 미량의 코벨라이트(covellite)와 함께 타형 또는 콜로이드형 황철석이 전형적으로 산출된다(Fig. 3c). 황화광물들 입자 틈바구니에는 간혹 비정질의 규질물이 충전되어 산출되기도 한다. 벽 바깥쪽 부분에서는 황철석 및 백철석이 콜로이드형으로 얇은 층을 이루며 산출되며, 이들 층을 피복한 비정질의 규질물, 철수산화물 및 중정석 등으로 구성된 암적갈색 물질이 흔히 최외각층을 형성하고 있다.

IV-1-4. Type IV 열수분출구

비활동성의 Type IV 열수분출구(Koski et al., 1994)는 벽이 두껍게 발달되어 있으며, 배출통로는 좁지만 그 수가 많아 공급율이 높다. 외벽은 황화광물, 규질물 및 황산염광물로 구성되어 있으며 (Fig. 2), 생명체의 서식 흔적이 쉽게 관찰된다.

황화광물 중에서는 콜로이드형 또는 반자형 황철석과 백철석이 지배적으로 산출되지만, 조립질 자형의 위자이트와 섬아연석도 쉽게 관찰된다. 특히, 배출통로에 인접하는 곳에서는 위자이트와 섬아연석의 함량이 높아진다. 황철석은 광화물질이 공급되는 방향 즉, 해수에 접하는 외각에서 열수물질을 공급하는 배출통로

방향으로 콜로이드형, 반자형 그리고 자형 결정으로 체계적인 성장구조를 보여주기도 한다(Fig. 3d). 일부 시료에서는 소량의 황동석이 워자이트 주변 부를 치환하는 상태로 산출된다.

황산염광물로는 앵글레사이트(anglesite)가 가장 우세한 광물 종으로 황화광물들의 틈바구니 내에서 반자형 또는 자형으로 산출된다. 또한 앵글레사이트는 간혹 비정질 규질물층 내에서 규질물에 덧붙어서 성장한 조직을 보여주기도 한다. 증정석은 황철석과 백철석의 틈바구니에서 방사상의 칼날형태로 군집을 이루며 드물게 산출된다.

비정질 규질물은 콜로이드형 층으로 빈 공간에서 흔히 산출된다. 배출통로 일부는 이러한 규질 콜로이드 층으로 완전히 채워져 있기도 하며, 경우에 따라서는 미립(2~30 μm)의 섬유상 규질물을 배태하기도 한다. 비정질 규질물은 드물게는 콜로이드형 황철석과 워자이트를 치환하여 산출되기도 한다.

IV-2. 함아연황화광물의 지화학적 특성

전술한 바와 같이 열수분출구의 유형에 따라 전체적인 광물학적 조성 및 공생관계가 상이하지만 각각의 광물상은 발달 경향 및 산출 특성이 거의 유사하다. 따라서 함아연황화광물의 지화학적 특성을 규명하기 위해 열수분출구 유형에 관계 없이 광물의 성장조직을 뚜렷이 보여주는 것을 선택하여 Cameca SX50 전자미분석기를 이용 점분석하였다. 워자이트의 경우는 광학적 누대구조를 보여주는 3개의 자형 결정을 대상으로 대각선을 따라 등간격으로 각각 6, 6, 9개 지점을, 수지상 콜로이드형 섬아연석 2개 입자는 중심부에서 바깥쪽 방향으로 각 8개 지점씩, 그리고 반자형 섬아연석 3개 입자는 장축선을 따라 각 6개 지점씩 분석하였다(Fig. 4). 함아연황화광물들의 분석결과는 Table 1에 기재하였으며, 각 광물입자 내에서의 특징적인 구성원소 변화량과 상관관계는 Fig. 5 및 6에 도시하였다.

자형 워자이트의 철 함량은 1.65~16.01 wt.%로 매우 심한 변화를 보이며, 투과 빛에서 진한 적색으로 보이는 중심부에서 연황색의 바깥쪽으로 갈수록 낮아지는 특성을 보여준다(Fig. 5). 수지상 콜로이드형 섬아연석의 철 함량은 중심부에서는 4.50~4.84 wt.%이지만, 그 이외에서는 0.21~1.08 wt.%로 매우 낮다. 반자형 섬아연석의 철 함량은 1.32~12.65 wt.%로 각 입자별로 상이한

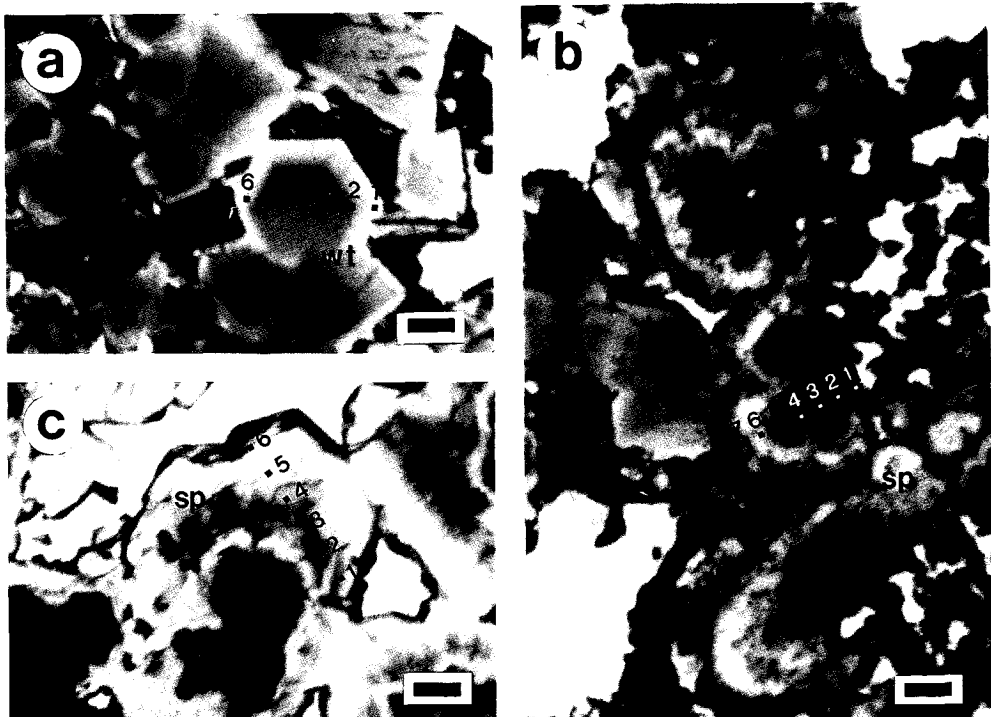


Fig. 4. Photomicrographs of typical growing textures of euhedral wurtzite (a), colloform sphalerite (b) and subhedral sphalerite (c) in transmitted light. Scale bar is 50 μm . Points shown on photomicrographs are keyed to microprobe analysis numbers in Table 1.

Table 1. Chemical composition of Zn-bearing sulfide minerals from the Juan de Fuca Ridge

Sample No.	Mineral	Point No.	Composition (wt. %)									
			S	Mn	Fe	Cu	Zn	Ag	Cd	Pb	Total	
1-33-2d-L5	euhedral wurtzite	1	33.35	0.03	5.54	0.00	60.07	0.07	0.33	0.00	99.39	
		2	33.57	0.03	10.60	0.19	55.17	0.00	0.27	0.02	99.85	
		3	33.19	0.03	10.67	0.14	55.34	0.02	0.36	0.02	99.77	
		4	33.55	0.01	11.44	0.06	54.04	0.00	0.18	0.00	99.28	
		5	33.44	0.08	9.70	0.08	56.49	0.12	0.34	0.00	100.25	
		6	32.62	0.03	4.98	0.13	60.97	0.00	0.16	0.02	98.91	
3-46-1c-L3	euhedral wurtzite	1	32.88	0.05	1.65	0.00	64.96	0.00	0.35	0.00	99.89	
		2	33.80	0.04	14.91	0.07	49.96	0.13	0.56	0.00	99.47	
		3	33.47	0.04	15.63	0.11	49.97	0.00	0.39	0.00	99.61	
		4	33.98	0.01	16.01	0.22	49.62	0.00	0.62	0.00	100.46	
		5	33.38	0.05	15.30	0.33	49.49	0.00	0.49	0.00	99.04	
		6	32.20	0.00	3.43	0.04	62.76	0.11	0.32	0.00	98.86	
4-94-8a-L12	euhedral wurtzite	1	32.28	0.02	4.58	0.10	61.64	0.00	0.27	0.00	98.89	
		2	33.11	0.05	10.15	0.08	55.87	0.05	0.28	0.00	99.59	
		3	33.18	0.00	11.57	0.09	54.08	0.11	0.63	0.00	99.66	
		4	33.32	0.03	11.53	0.04	54.29	0.00	0.50	0.08	99.79	
		5	33.04	0.00	11.55	0.04	54.47	0.16	0.52	0.00	99.78	
		6	32.96	0.04	10.45	0.02	56.57	0.10	0.26	0.03	100.43	
		7	33.30	0.03	9.55	0.09	56.84	0.00	0.34	0.00	100.15	
		8	32.87	0.00	6.74	0.00	59.96	0.00	0.23	0.00	99.80	
		9	32.60	0.01	4.18	0.08	62.40	0.00	0.24	0.00	99.51	
2-65-2d-L1	colloform sphalerite	1	33.15	0.03	4.84	0.33	61.09	0.05	0.69	0.00	100.18	
		2	32.50	0.00	0.56	0.32	65.85	0.16	0.15	0.00	99.54	
		3	31.96	0.00	0.21	0.23	65.02	0.08	0.00	1.61	99.11	
		4	33.81	0.00	0.48	0.15	65.02	0.01	0.13	0.41	100.01	
		5	32.60	0.00	0.84	0.60	65.27	0.10	0.12	0.39	99.92	
		6	32.59	0.04	0.93	1.03	64.49	0.12	0.21	0.08	99.49	
		7	32.35	0.01	0.87	0.75	65.10	0.15	0.00	0.13	99.36	
		8	32.83	0.02	1.08	0.12	64.92	0.12	0.14	0.11	99.34	

Table 1. continued

Sample No.	Mineral	Point No.	Composition (wt. %)										Total
			S	Mn	Fe	Cu	Zn	Ag	Cd	Pb			
3-48-1b-L2	colloform sphalerite	1	33.07	0.03	4.50	0.69	61.11	0.00	0.33	0.05	99.78		
		2	33.04	0.00	1.55	0.76	64.63	0.00	0.01	0.00	99.99		
		3	33.80	0.01	0.60	0.26	66.69	0.00	0.20	0.00	101.56		
		4	32.69	0.05	0.27	0.13	65.01	0.03	0.07	0.49	98.74		
		5	32.62	0.03	0.89	0.17	65.81	0.02	0.16	0.00	99.70		
		6	33.56	0.00	0.71	0.03	65.37	0.00	0.10	0.16	99.93		
		7	33.05	0.01	0.62	0.30	66.19	0.16	0.04	0.51	100.88		
		8	32.88	0.01	1.90	0.11	64.90	0.00	0.00	0.13	99.93		
2-65-4b-L5	subhedral sphalerite	1	32.97	0.00	3.18	0.11	64.41	0.00	0.27	0.02	100.96		
		2	33.11	0.00	1.72	0.52	65.33	0.21	0.12	0.00	101.01		
		3	32.16	0.00	2.00	0.87	63.67	0.06	0.22	0.26	99.24		
		4	32.60	0.01	2.03	0.97	63.49	0.14	0.28	0.41	99.93		
		5	32.26	0.00	1.40	0.77	64.50	0.02	0.20	0.24	99.39		
		6	33.10	0.00	5.83	0.01	60.29	0.00	0.10	0.03	99.36		
3-48-3c-L9	subhedral sphalerite	1	32.16	0.03	1.63	0.78	63.63	0.02	0.08	0.32	98.65		
		2	32.14	0.00	2.85	0.75	63.12	0.01	0.22	0.00	99.09		
		3	32.96	0.00	4.82	0.55	61.01	0.00	0.29	0.00	99.63		
		4	33.11	0.00	6.79	0.48	59.57	0.00	0.55	0.00	100.50		
		5	33.36	0.00	7.79	0.49	58.80	0.05	0.63	0.00	101.12		
		6	32.83	0.09	12.65	0.07	53.72	0.00	0.35	0.00	99.71		
4-94-8a-L10	subhedral sphalerite	1	33.03	0.00	3.70	0.16	62.96	0.00	0.22	0.11	100.18		
		2	33.25	0.04	4.18	0.12	62.84	0.07	0.42	0.00	100.92		
		3	32.69	0.01	5.55	0.34	60.47	0.00	0.51	0.00	99.57		
		4	32.48	0.00	4.52	0.16	61.94	0.04	0.33	0.00	99.47		
		5	32.66	0.00	3.46	0.09	63.25	0.07	0.31	0.00	99.84		
		6	32.79	0.03	1.32	0.12	64.93	0.00	0.18	0.00	99.37		

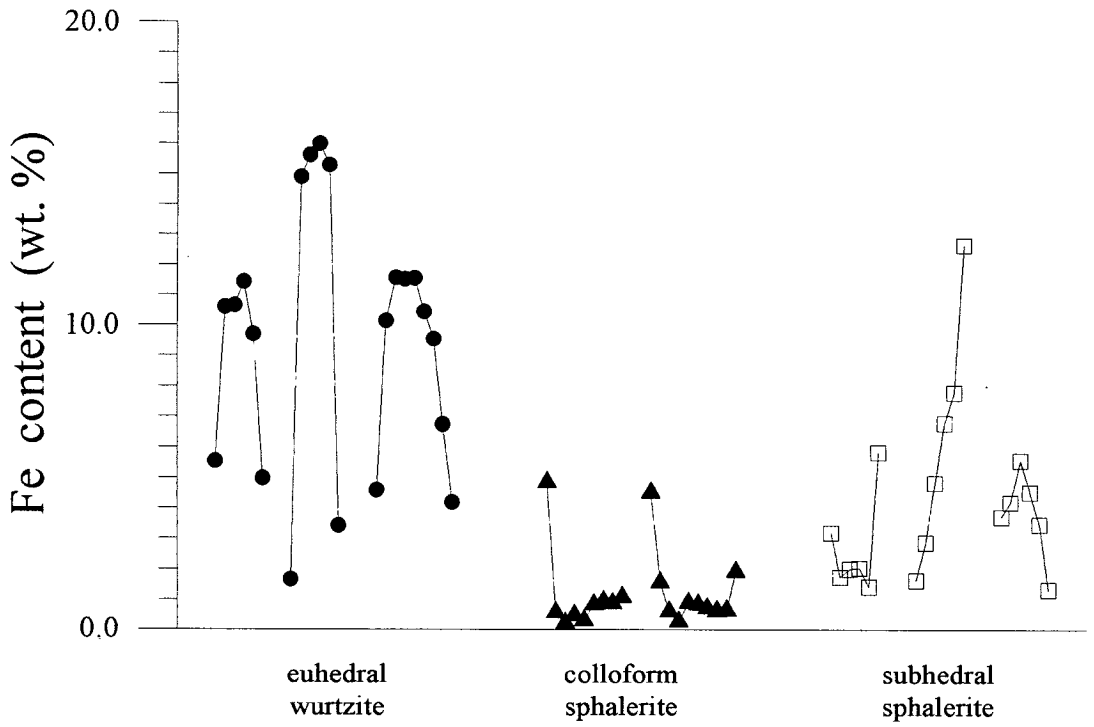


Fig. 5. Variation diagram of Fe content (wt.%) of Zn-bearing sulfides.

특성을 나타낸다. 각 광물입자의 평균적인 철 함량은 자형 위자이트(9.63 wt.%), 반자형 섬아연석(4.19 wt.%), 수지상 콜로이드형 섬아연석(1.31 wt.%)의 순으로 낮아지는 경향을 보인다.

카드뮴 함량은 철 함량과 상관계수 0.68의 정비례 관계를 보여주며, 0.00~0.69 wt.%의 범위 내에서 변화한다(Fig. 6). 이와 같은 철 및 카드뮴 함량의 상관관계는 다른 지역에서 산출되는 열수황화광상 시료에서도 보고된 바 있다(Koski et al., 1984; Paradis et al., 1988). 철 및 카드뮴 이외에 함아연황화광물들에 포함되어 있는 망간, 구리, 은, 납 등의 금속원소는 매우 낮은 함량의 미량성분으로 존재한다(Table 1).

광물을 구성하는 원소의 함량 변화는 정출환경의 변화를 시사하는 것으로, 광액의 조성, 온도, 압력 등과 밀접한 관련을 갖는다. 일반적으로 함아연황화광물에서의 철 함량 변화는 유황분압(sulfur fugacity)과 온도의 함수로 설명되어 진다(Scott and Barnes, 1972; Scott and Kissin, 1973). 즉, 함아연황화광물에서 철 함량의 증가는 정출환경의 온도가 상승되었거나 유황분압이 감소된 또는 두가지 요인이 모두 작용된 것을 의미한다.

열수분출구 벽을 구성하는 광물상은 유형에 관계 없이 모두 해수에 접하는 바깥쪽에서 열수분출물과 접하는 내부로 갈수록 철 및 카드뮴 함량이 높아지는 수지상 콜로이드형 섬아연석, 반자형 섬아연석, 자형 위자이트의 순으로 정출 되어지는 경향을 보인다.

이는 열수분출구 형성시 벽 바깥쪽은 온도가 낮거나 유황분압이 높은 환경에서, 벽 안쪽은 점차 온도가 높아지거나 유황분압이 낮아지는 환경에서 발달되어 광물의 상변화가 초래된 것으로 해석된다.

IV-3. 유체포유물 특성

일반적으로 광물들은 정출시 또는 정출후 교대작용에 의해 유체포유물을 함유하게 되지만, 투명도 및 결정도에 따라 유체포유물의 존재가 확인된다. 본 연구에서 가열 또는 냉각실험이 가능한 유체포유물은 워자이트, 경석고 및 비정질 규질물 등에서 관찰된다(Fig. 7).

각 광물들에서 산출되는 유체포유물은 상온에서 액상 및 기상의 2종류로 구성되어 있으며, 기포의 비율은 약 10 vol.%를 차지한다 (Fig. 7). 자광물(daughter mineral)의 존재는 전혀 관찰되지 않으며, Nash(1976) 분류법에 따르면 Type I에 해당되는 것으로 가열시 액상으로 균질화된다. 대부분의 유체포유물은 20 μm 미만의 다양한 크기로 산출되지만 드물게는 35 μm 에 달하는 것도 관찰된다. 경석고 및 워자이트에서 산출되는 유체포유물은 결정형에 영향을 받아 장방형 또는 삼각형의 형태로 발달되어 있는 반면에, 비정질

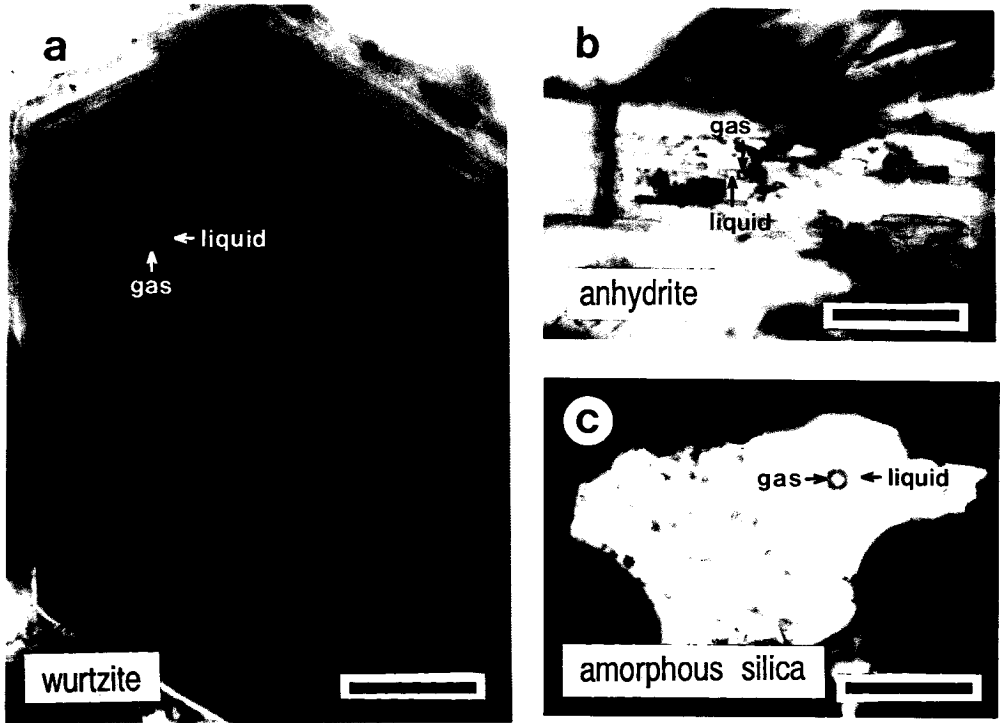


Fig. 7. Photomicrographs of primary fluid inclusions in wurtzite (a), anhydrite (b) and amorphous silica (c). Scale bar is 50 μm .

Table 2. Microthermometric fluid inclusion data from the Juan de Fuca Ridge

Sample No.	Inclusion host	Th (°C)*1	Tf (°C)*2	Tm (°C)*3	eq. wt. % NaCl*4
1-33-3d-3	anhydrite	214 to 238	235 to 257	-3.4	5.5
1-33-3d-7	anhydrite	218 to 225	239 to 245	-3.4	5.5
1-33-3d-12	anhydrite	221 to 242	241 to 261	-3.7	6.0
1-33-3d-14	anhydrite	223	243	-3.2	5.2
1-33-2c-1	anhydrite	222 to 232	242 to 252	-4.3	6.9
1-33-2c-6	anhydrite	235	256		
1-33-2c-14	anhydrite	163 to 166	192 to 194	-3.6	5.8
4-94-8a-2	wurtzite	228	253	-4.4	7.0
4-94-8a-5	wurtzite	215 to 220	242 to 246	-5.2 to -5.5	8.1 to 8.5
4-94-8a-6	wurtzite	215 to 221	242 to 247		
4-94-8a-9	wurtzite	205	234		
4-94-8a-12	wurtzite	196 to 202	226 to 231	-5.4 to -5.6	8.4 to 8.7
4-94-9a-1	wurtzite	177	208	-5.1	8.0
4-94-9a-5	wurtzite	174	205	-6.0	9.2
4-94-9a-7	wurtzite	209	237	-6.4	9.7
4-66-4c-3	amorphous silica	152	182	-4.2	6.7
4-66-4c-4	amorphous silica	76 to 84	111 to 118	-3.9	6.3
4-66-4c-6	amorphous silica	128 to 148	160 to 178	-3.6 to -3.8	5.8 to 6.1
4-66-4c-7	amorphous silica	142	173	-3.3	5.4
4-66-4c-11	amorphous silica	64	100	-3.2	5.2

*1 Th = homogenization temperature

*2 Tf = filling temperature after pressure correction (Potter, 1977)

*3 Tm = melting temperature of ice

*4 Salinity calculated from the Tm using the equation of Potter et al. (1978)

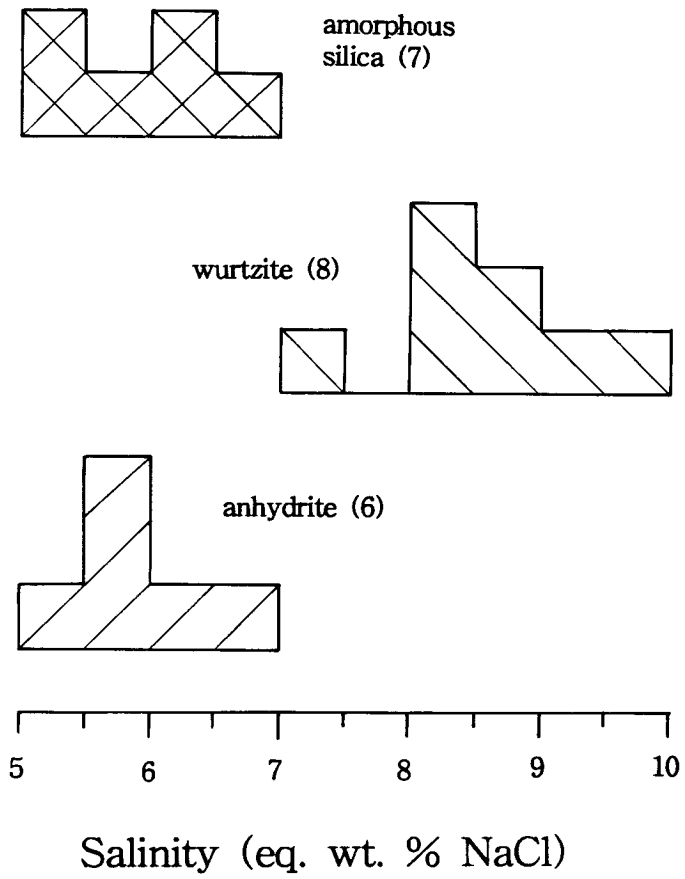


Fig. 8. Frequency histogram of filling temperatures ($^{\circ}\text{C}$) of fluid inclusions in anhydrite, wurtzite and amorphous silica.

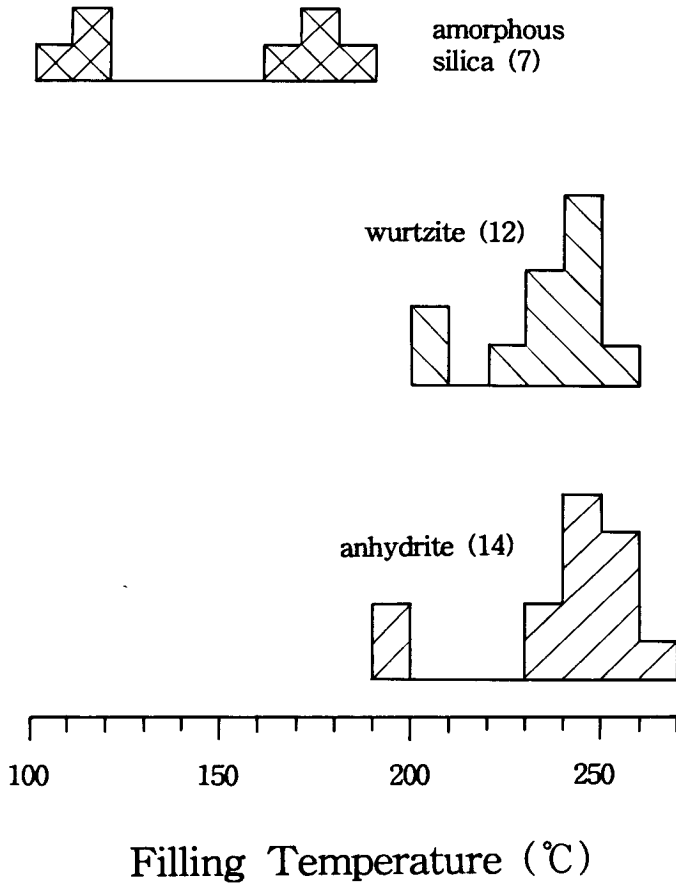


Fig. 9. Frequency histogram of salinities (eq. wt.% NaCl) of fluid inclusions in anhydrite, wurtzite and amorphous silica.

규질물에서는 불규칙한 형태로 산출된다.

본 연구지역에서 산출되는 열수분출구는 수심 2,400 m 내외의 해저면에서 생성된 것이므로 모광물(host mineral) 정출온도를 의미하는 유체포유물의 충전온도(filling temperature)는 균질화 온도에 대해 약 240 기압의 압력보정을 요한다. 따라서 Potter (1977)의 방식에 따라 균질화온도에 대해 압력보정하여 충전온도를 산출하였다. 염농도는 냉각실험을 통해 최종적으로 얼음이 사라지는 온도를 기준으로 Potter et al.(1978)의 방정식을 이용하여 소금용액 기준의 염농도(eq. wt.% NaCl)로 표현하였다.

유체포유물의 충전온도는 100~261 °C(경석고 192~261 °C, 워자이트 205~253 °C, 비정질 규질물 100~182 °C)로 비교적 넓은 온도권 범위에서 광화작용이 진행되었음을 알 수 있다 (Table 2, Fig. 8). 그러나 경석고 및 워자이트는 각각 245 °C 및 235 °C 부근에서 대부분이 정출된 양상을 보여준다. 비정질 규질물은 비교적 낮은 온도권에서 넓은 범위에 걸쳐 형성된 특성을 보인다.

유체포유물의 염농도는 5.2~9.7 eq. wt.% NaCl(경석고 5.2~6.9 eq. wt.% NaCl, 워자이트 7.0~9.7 eq. wt.% NaCl, 비정질 규질물 5.2~6.7 eq. wt.% NaCl)로 해수에 비해 높으며, 열수분출구가 형성되는 동안에 광액의 염농도가 일정치 않았음을 보여준다(Table 2, Fig. 9). 경석고 및 비정질 규질물은 서로 비슷한 염농도를 갖는 광액(평균 약 5.8 eq. wt.% NaCl)에서 정출된 반면에, 워자이트는

이보다 높은 광액(평균 약 8.5 eq. wt.% NaCl)에서 정출 되었다.

Fig. 10은 동일 유체포유물에서 획득한 총진온도와 염농도 사이의 관계를 도시한 것이다. 경석고, 워자이트 및 비정질 규질물 등 각각의 광물 내에서는 특징적인 변화량이 인지되지 않는다. 그러나 워자이트와 비정질 규질물과의 관계에서는 총진온도가 낮아짐에 따라 염농도 또한 낮아지는 정비례의 관계를 보여준다. 그리고 경석고의 경우는 워자이트 및 비정질 규질물과는 달리 총진온도가 높지만 염농도가 낮은 특성을 보여준다. 이는 고온 고염농도의 열수물질과 저온 저염농도의 해수가 서로 섞임으로 인해 광화작용이 진행되었음을 시사한다. 각 광물 내에서의 변화량이 뚜렷하지 않음은 비교적 좁은 범위의 환경영역과 광물정출시 열수물질과 해수의 불규칙한 혼합으로 설명될 수 있다. 경석고는 열수분출구 형성 초기에 열수물질이 직접 해수에 유입되므로써 해수에 녹아있는 유황과 열수물질의 칼슘이 결합하여 정출 되는 것으로 보고되고 있다(Styrt et al., 1981; Haymon, 1983; Koski et al., 1994). 따라서 경석고의 경우 유체포유물의 총진온도가 높지만 염농도가 낮은 것은 경석고가 해수의 유입이 많은 광액에서 용해도 차이에 의한 빠른 정출작용의 결과로 생각된다.

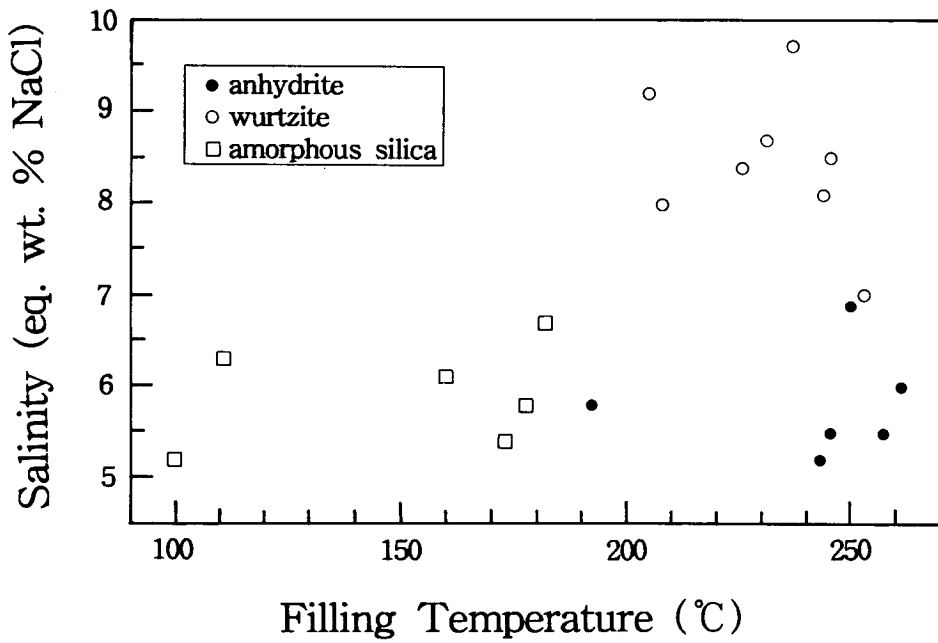


Fig. 10. Plots of filling temperature ($^{\circ}\text{C}$) versus salinity (eq. wt.% NaCl) of fluid inclusions in anhydrite, wurtzite and amorphous silica.

IV-4. 열수분출구의 형성과정

일반적으로 해저 열수황화광상은 해수의 순환 즉, 해수가 고온 고압의 지하 심부로 스며들어감에 따라 주변 모암과의 반응에 의해 유용 금속성분을 다량 함유한 열수물질로 전환된 후 다시 해저면으로 상승하여 유용 금속성분이 침전되므로서 형성된다 (Blount and Dickson, 1969; Rona, 1988). 열수분출구는 이러한 해수 순환과정의 배출통로로 해저면에서 열수물질과 주변 해수와의 반응에 의해 황산염광물, 황화광물 및 규질물 등이 정출 되어 형성된다(Haymon and Kastner, 1981; Tivey et al., 1990).

후안데푸카해령에서 산출되는 열수분출구는 각 유형별로 형태적 특성 및 조성이 상이하지만, 각 구성광물의 산출상 및 분포 경향은 유사하다. 즉, 열수분출구의 벽은 열수물질에 접하는 내측부에서 해수에 접하는 외각부로 갈수록 고온성 광물에서 저온성 광물로, 그리고 광물의 결정형은 자형 또는 반자형에서 콜로이드형으로 점차 변모되는 특성을 보인다. 또한 광물의 정출환경 역시 벽 내측부에서 외각부로 갈수록 광액의 온도 및 염농도가 감소하고, 산화력과 황화력이 증가되는 경향을 보인다. 이는 고온 고염농도의 열수물질과 저온 저염농도의 해수가 혼합되므로서 광물침전이 유도되고, 침전된 광물은 방해막 역할을 하여 점진적으로 열수물질과 해수를 분리시킨 결과로 해석된다.

경석고는 후퇴성 용해도(retrograde solubility)의 특성을 갖고 있으며(Blount and Dickson, 1969), 약선대인 벽개면을 따라 황화광물들에 의해 치환되어 있고(Fig. 3b), 유체포유물의 충전온도가 높지만 염농도가 낮은 특성(Fig. 10)을 생각해 볼 때 아마도 열수분출구 형성 초기에 열수물질과 해수의 혼합으로 빨리 정출된 것으로 추론된다. 열수분출구 형성 초기에는 경석고의 정출로 엉성한 조직의 벽이 형성되었을 것이다. 이러한 벽에 지속적인 열수물질이 공급되어 경석고 틈바구니를 빠져나간 물질은 해수와 직접적인 접촉으로 벽 바깥쪽에 콜로이드형 광물을 침전시키게 되며, 일부는 경석고 틈바구니를 채우기도 한다. 한편 벽 안쪽은 열수물질이 해수로부터 차단되어 고온 고염농도의 광액에서 비교적 안정적인 광물 정출을 유도하게 된다. 따라서 열수분출구의 벽 내측부에서는 황동석, 위자이트, 섬아연석 등이 자형 또는 반자형으로 산출되며, 해수에 접하는 외각부에서는 섬아연석, 황철석, 백철석 등이 콜로이드형으로 발달한다. 또한 외각부에서는 해수의 영향으로 산화력이 증가하여 황산염광물인 중정석 또는 앵글레사이트 그리고 비정질 규질물이 침전되며, 기형성된 황화광물 층이 산화되어 철수산화물로 변화한다.

열수분출구는 열수물질의 온도 및 분출속도에 따라 열수물질과 해수의 접촉시간 및 혼합율이 조절되어 형태 및 조성이 결정된다. Type I의 경우 열수분출물의 온도 및 분출속도가 높아 직선형

배출통로의 발달을 유도하며, 벽 내측부는 열수물질과 해수의 혼합이 차단되어 고온성 광물인 괴상형 황동석이 지배적이지만, 외각부는 해수의 영향에 의해 점차적으로 산화력과 황화력이 증가하여 황화광물, 황산염광물 및 규산염광물 등이 정출된다. Type II의 경우는 Type I에 비해 열수분출물의 온도 및 분출속도가 낮으므로 다공성의 열수분출구를 형성한다. Type I과 달리 Type II의 경우는 벽 내측부에 괴상의 황동석 발달대가 형성되어 있지 않다. 이는 다공성의 영향으로 열수물질과 해수의 혼합을 완전히 차단하지 못했거나, 열수물질의 온도 및 압력이 쇠퇴하여 황동석 발달대가 해지면 지하에서 이루어지므로서 나타난 결과로 생각된다. Type III 및 Type IV의 경우는 열수분출물의 온도 및 분출속도가 가장 낮거나 낮았던 열수분출구로 배출통로가 좁고 휘어져 있으며, 그 수가 많다. 따라서 열수물질이 배출되는 동안에 해수와 접촉할 수 있는 시간적 여유가 많으므로 산화력이 증가하고 온도 및 염농도가 감소한다. 그 결과 중정석, 앵글레사이트 및 비정질 규질물 등의 정출작용이 많이 유도되며, 두꺼운 벽의 발달을 촉진한다. Type III 및 Type IV에서 경석고가 산출되고 있지 않음은 경석고의 후퇴성 용해도의 성격으로 차가운 해수에 다시 용해되었거나, 경석고와 광액과의 재반응에 의한 다른 광물로의 치환작용에 의해 소진된 결과로 생각된다.

V. 결론 및 요약

후안데푸카해령에서 산출되는 열수분출구는 고온 고염농도의 열수 물질이 저온 저염농도의 해수와 혼합되므로서 경석고의 침전을 시초로 다른 광물들의 정출이 유도되어 형성된다. 유체포유물 연구에 의하면 경석고의 지배적인 정출환경은 192~261 °C, 5.2~6.9 eq. wt.% NaCl 이며, 워자이트 경우는 205~253 °C, 7.0~9.7 eq. wt.% NaCl로 경석고에 비해 해수의 유입이 적은 환경에서 정출되었다. 비정질 규질물의 경우는 온도 하강에 따른 해수 유입량의 증가로 100~182 °C, 5.2~6.7 eq. wt.% NaCl의 정출환경 영역을 보여준다. 이와 같은 광물 정출작용은 벽을 형성하고 벽은 열수물질과 해수의 혼합을 저해하는 방해막 역할을 하여 벽 내측부에서는 열수물질의 영향에 의해 고온 고염농의 환경하에서 안정적인 황화광물들의 정출이 유도되며, 벽 외각부에서는 해수의 영향력이 증가되어 산화력과 황화력이 높은 환경하에서 콜로이드형 광물이 침전된다.

열수분출구는 열수물질의 온도 및 분출속도에 따라 열수물질과 해수의 접촉시간 및 혼합율이 조절되어 형태 및 조성이 결정된다. 열수분출물의 온도 및 분출속도가 높으면 배출통로는 직선형으로 발달하며, 열수물질과 해수의 혼합을 저해하는 벽 내측부와 외각부는 각각 상이한 환경하에서 광물 정출을 유도하여 뚜렷한 누대구조가 발달한다. 열수분출물의 온도 및 분출속도가 낮아지면 다공성의 열수

분출구가 형성되며, 다공성의 영향에 의해 벽을 경계로 열수물질과 해수의 혼합이 어느 정도 유지되어 벽 내측부에서 외각부로 갈수록 저온 저염농도 광액으로 그리고 산화력과 황화력이 높은 환경으로 점차 변화되는 광물공생관계가 발달한다. 열수분출물의 온도 및 분출속도가 보다더 낮아지면 곡선형의 좁은 배출통로가 발달하며 열수물질이 배출되는 동안에 해수와 접촉할 수 있는 시간적 여유가 많으므로 황산염 및 규산염 광물의 정출작용이 활발해지며, 두꺼운 벽의 발달을 유도한다.

VI. 감사의 글

본 연구 수행에 결정적 동기가 된 USGS에서의 Post-Doc. 연수를 지원해준 한국과학재단 및 한국해양연구소에 감사드립니다. 또한 연구시료 제공 및 유익한 조언을 해준 USGS의 Randolph A. Koski박사께도 감사드립니다.

VII. 참고문헌

- Atwater, T., 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol.81, pp.3513-3536.
- Baker, E. T., J. W. Lavelle, R. A. Feely, G. J. Massoth and S. L. Walker, 1989. Episodic venting of hydrothermal fluids from the Juan de Fuca Ridge. *J. Geophys. Res.*, Vol.94, pp.9237-9250.
- Blount, C. W., and F. W. Dickson, 1969. The solubility of anhydrite (CaSO_4) in $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ from 100 to 450°C and 1 to 1000 bars. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol.33, pp.227-245.
- Davis, E. E., W. D. Goodfellow, B. D. Bornhold, J. D. Adshead, B. Blaise, H. Villinger and G. M. Le Cheminant, 1987. Massive sulfides in a sedimented rift valley, northern Juan de Fuca Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol.82, pp.49-61.
- Embley, R. W., W. W. Chadwick, M. R. Perfit and E. T. Baker, 1991. Geology of the northern Cleft segment, Juan de Fuca Ridge, Recent lava flows, seafloor spreading, and the formation of megaplumes. *Geology*, Vol.19, pp.771-775.
- Francheteau, J., N. D. Needham, P. Choukroune, T. Juteau, M.

- Seguret, R. D. Ballard, P. J. Fox, W. Normark, A. Carranza, D. Cordoba, J. Guerrero, C. Rangin, H. Bougault, P. Cambon and R. Hekinian, 1979. Massive deep-sea sulfide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. *Nature*, Vol.277, pp.523-528.
- Haymon, R. M., 1983. Growth of hydrothermal black smoker chimneys. *Nature*, Vol.301, pp.695-698.
- Haymon, R. M. and M. Kastner, 1981. Hot spring deposits on the East Pacific Rise at 21 °N: Preliminary description of mineralogy and genesis. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol.53, pp.363-381.
- Hoyt, T. L., 1992. Mineral chemistry of massive sulfide and sulfate samples from Escanaba Trough, southern Gorda Ridge. M.S. thesis, Univ. of Calif., Davis.
- Kappel, E. S. and W. B. F. Ryan, 1986. Volcanic episodicity and a non-steady rift valley along northeast Pacific spreading centers: Evidence from Sea MARC I. *J. Geophys. Res.*, Vol.91, pp.13925-13940.
- Koski, R. A., D. A. Clague and E. Oudin, 1984. Mineralogy and chemistry of massive sulfide deposits from the Juan de Fuca Ridge. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol.95, pp.930-945.

- Koski, R. A., I. R. Jonasson, D. C. Kadko and V. K. Smith, 1994. Compositions, growth mechanisms, and temporal relations of hydrothermal sulfide-sulfate-silica chimneys at the northern Cleft segment, Juan de Fuca Ridge. *J. Geophys. Res.*, Vol. 99, pp.4813-4832.
- Nash, J. T., 1976. Fluid-inclusion petrology-data from porphyry copper deposits and applications to exploration. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 907-D, p.16.
- Paradis, S., I. R. Jonasson, G. M. Le Cheminant and D. H. Watkinson, 1988. Two zinc-rich chimneys from the Plume Site, southern Juan de Fuca Ridge. *Canadian Mineralogist*, Vol.25, pp.637-654.
- Potter, R. W., 1977. Pressure corrections for fluid-inclusion homogenization temperatures based on the volumetric properties of the system NaCl-H₂O. *J. Res. U.S. Geol. Surv.*, Vol.5, pp.603-607.
- Potter, R. W., M. A. Clyne and D. L. Brown, 1978. Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions. *Econ. Geol.*, Vol.73, pp.284-285.
- Roedder, E., 1984. Fluid Inclusions. *Reviews in Mineralogy* 12 (P.H. Ribbe, ed.). *Mineral. Soc. Am.*, p.646.

- Rona, P. A., 1988. Hydrothermal Mineralization at Oceanic Ridges. *Canadian Mineralogist*, Vol.26, pp.431-465.
- Scott, S. D. and H. L. Barnes, 1972. Sphalerite-wurtzite equilibria and stoichiometry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol.36, pp.1275-1295.
- Scott, S. D. and S. A. Kissin, 1973. Sphalerite composition in the Zn-Fe-S system below 300°C. *Econ. Geol.* Vol.68, pp.475-479.
- Smith, V. K. and R. A. Koski, 1994. Descriptive and chemical data for hydrothermal chimney and mound samples from the northern Cleft Segment, Juan de Fuca Ridge. U.S. Geol. Surv. Open File Report, 94-15.
- Styrt, M. M., A. J. Brackmann, H. D. Holland, B. C. Clark, V. Pisutha-Arnond, C. S. Eldridge and H. Ohmoto, 1981. The mineralogy and the isotopic composition of sulfur in hydrothermal sulfide/sulfate deposits on the East Pacific Rise, 21 °N latitude. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol.53, pp.382-390.
- Tivey, M. K., L. O. Olson, V. W. Miller and R. D. Light, 1990. Temperature measurements during initiation and growth of a black smoker chimney, *Nature*, Vol.346, pp.51-54.

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*, Vol.14, pp.823-827.