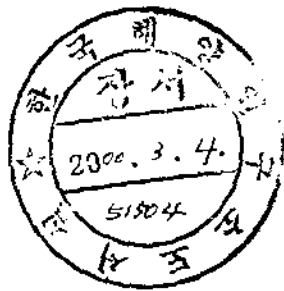


해저 열수광화작용의 지화학적 연구 II

A Geochemical Study for the Submarine
Hydrothermal Mineralization II



제 출 문

한국해양연구소장 귀하

본 보고서를 “해저 열수광화작용의 지화학적 연구” 과제의 제 2 차년도
보고서로 제출합니다.

2000. 2.

연구책임자 : 이 경 용

참 여 연 구 원 : 강정극, 고영탁, 김경홍, 김기현,
김동성, 김병록, 김예동, 김종육,
김종원, 김현섭, 남상헌, 문재운,
박병권, 박승현, 박정기, 박정희,
박찬영, 손승규, 이근창, 이상득,
이태국, 이현복, 정미숙, 정희수,
지상범, 최상훈, 최윤지, 한상준,
현정호

연 구 조 원 : 오주영, 이미진, 조광식



요 약 문

I. 제 목

해저 열수광화작용의 지화학적 연구 II

II. 연구개발의 목적 및 필요성

해저 열수광상은 금, 은, 아연, 구리 등 금속 광물자원의 경제적 가치가 높아 선진국들은 광구 선점을 위해 경쟁적인 탐사 및 개발활동을 수행하고 있으며, 국가 주요 과제로 취급되고 있다. 우리 나라는 금속 광물자원을 거의 전량 해외 수입에 의존하고 있으며 그 수요가 점점증하므로 해저 열수광상 탐사·개발 연구를 통해 개발 가능지역을 선정하고 기득권을 획득하여 광물자원의 장기·안정적인 공급원 확보가 절실한 실정이다. 또한 열수작용이 활발한 지역은 지각의 운동과 진화, 지구 물질순환 및 환경변화, 생명의 기원 등 지구 신비를 밝히는 자연 학습장이므로 이곳에서의 연구활동을 통해 단기간에 효과적으로 해양과학기술 발전을 이룩할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구사업은 남서태평양 해역에 부존된 해저 열수광상 광역탐사를 통해 해저 광물자원 탐사기술 개발, 열수광상 개발 후보지역 선정, 열수광상 분포특성 및 자원 잠재력 평가기술 개발 등을 목표로 한국해양연구소 기관고유사업으로 추진되고 있다. 1차년도인 1998년에는 우리 나라에서는 처음으로 해저 열수광상에 관한 실험해역 탐사가 앞해구지역을 대상으로 수행되었고, 2차년도인 1999년에는 Papua New Guinea 비스마르크 해역에서 Manus Basin의 해저지형 특성 및 지구조 규명과 해저 열수광화작용에 의한 광물정출작용을 밝히고자 수행하였다.

III. 연구개발의 내용 및 결과

실해역 탐사는 지형 및 지층구조 규명을 위해 지구물리 탐사가 선행되었으며, 이를 기초하여 시료채취를 위한 정점조사를 수행하였다. 지구물리 탐사에서는 Simrad EA500 단층 및 Sea Beam 2000 다중음향측심기를 이용 수심 및 해저지형 조사를 수행하였고, 자력측정기를 이용하여 지각의 자기장 조사를 수행하였다. 정점조사에서는 수괴 특성 파악 및 해수 채취를 위하여 CTD-casting을 12정점에서 수행하였으며, 기반암, 퇴적물 및 광석시료 등을 채취하고자 Dredge(10 정점), Piston Corer 및 Multiple Corer(5회) 등을 운영하였다. 또한 열수분출구의 분출 특성을 파악하고자 심해저 카메라 시스템을 운영하여 해저면을 촬영하였다.

지구물리 탐사는 New Britain 해구 지역의 지각운동 특성 규명과 Manus Basin내 대표적인 열수광상 주변에 대한 정밀조사로 구분된다. New Britain 해구, New Ireland 섬, New Britain 섬 그리고 Bougainville 섬 사이 해역에 대한 정밀지형조사 및 주 단층대인 Weitin Fault와 Djaul Fault의 연장성 등을 조사하여 이들 단층대는 New Ireland 섬 동남쪽 Queen Emma Basin에서 끝나고 그 이남으로는 새로운 단층대가 이어짐을 확인하였다. 새로운 단층대는 "Queen Emma Graben"이라 명명하였으며, New Britain 섬 동쪽에 존재하는 분지는 "Saint Georges Basin"으로 명명하였다. Manus Basin의 열수광상 주변에서 획득한 정밀지형자료는 기존에 미국과 일본이 90년대 초에 얻은 지형자료보다 훨씬 정확한 것이어서 2000년 말 계획된 ODP Leg 193의 PACMANUS 시추작업에 중요한 자료가 될 것이다. 또한 처음으로 proton 자력계를 투입하여 열수광상 주변에 대한 총 지자기장 성분을 분석한 결과 Manus Basin의 대표적 열수광상인 PACMANUS, DESMOS, Susu Knolls 지역의 지자기적 성격이 크게 다름을 확인하였다. 현재 이러한 차이가 암석의 자화 강도 차이에서 기인한 것인지 아니면 지각내 자성을 가진 층의 두께 변화에 의한 것인지를 밝히기 위한 연구를 진행 중에 있다. 이상의 연구는 앞으로 열수광상의 자원량을 평가하는데 있어서 중요한 단서가 될 수 있으리라 기대한다.

해저 열수작용에 의해 CO_2 , CH_4 , H_2S , ^3He , Mn, Fe, REE 등의 성분들이 열수분출구(chimney)를 통해 지각에서 해양으로 공급되므로 이들을 이용한 지화학적 추적자 연구는 열수해역의 수괴 특성 규명 및 탐사기술 개발을 위한 중요한 연구분야로 주목받고 있다. H_2S 는 해수 중에서 ^3He , Mn에 비해 제거되는 속도가 매우 빠르기 때문에 분석에 많은 어려움이 있으나, 열수분출구 주변은 3~8 m의 매우 높은 농도를 나타내며, 열수환경에 대한 직접적 증거로 제시된다. 해수 중에서 열수작용에 의한 plume은 분출구의 높이, 분출량의 정도와 분출 속도, 중·저층 해류 그리고 해수밀도차 등 복합적인 환경의 영향을 받으며 수층의 등밀도면(isopycnic surface)을 따라 주변 해수로 확산된다. 따라서 연구 지역의 H_2S 농도 이상치($>1.5 \mu\text{M}$)는 열수작용에 의한 영향으로 판단되며, PACMANUS 해역의 남북방향에 가장 큰 공급원이 있을 것으로 사료된다.

열수광석시료 채취는 탐사지역 서부에 분포하는 Pual Ridge 정상부 Roman Ruins라 명명된 지역과 동부에 분포하는 Susu Knolls 정상부에서 수행하였다. 열수광석은 지역에 따라 Zn(57%, Roman Ruins)과 Cu(60%, Susu Knolls)가 가장 우점하였고, 경제성이 높은 Au와 Ag 또한 높은 함량을 나타냈다. 특히 금의 경우 육상광상에서는 5 ppm 이상만 되어도 경제성이 있다고 평가되는 금속으로서 Roman Ruins(63 ppm)과 Susu Knolls(35 ppm) 모두 높은 함량을 보여 경제성이 매우 밝은 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구결과는 연구해역의 해양광물자원개발 분야에 중요한 정보로 활용될 것으로 기대된다.



SUMMARY

I. Title of the Study

A Geochemical Study for the Submarine Hydrothermal Mineralization II

II. Geochemical Investigation of the deepsea hydrothermal mineralization process

Massive sulfide deposits associated with hydrothermal systems in the deep ocean floor contain economically valuable metal resources such as gold, silver, zinc and copper and are, therefore, sought after by many of the developed countries around the world. Korean economy relies very heavily on the import of these metals from foreign countries. As their demand continues to rise and for the purpose of our national interest, it is important that we need to find ways to guarantee stable supply of these metals. Hydrothermal systems are also natural laboratories for investigating tectonic movements of earth's surface, geochemical recycling of material, environmental changes, and the origin of life. Therefore studies deepsea hydrothermal systems will also expand and improve marine scientific capability.

The purpose of our hydrothermal program is to conduct systematic survey of the hydrothermal systems around the western Pacific island arc and assess their potential as mineral resources. This multi-year program is supported by KORDI. In the first year, 1998, we conducted a survey in the Yap Island.

This report deals with our survey in the second year, which was conducted in the Bismark Sea in the waters of Papua New Guinea, in a place known as Manus Basin. The report summarizes our investigation of the bathymetry, tectonic structures, and mineralization processes of the hydrothermal vent fields of the Manus area.

III. Survey Results

Geophysical survey including bathymetric mapping and sub-bottom profiling comprised the first part of survey. Based on these initial results, sites for sampling and detailed measurements were chosen. Bathymetric survey was conducted using Sea Beam 2000. We also used precision depth recorder, Simrad EA500. For the first time in our program, we conducted magnetic field measurement using proton magnetometer near the sea surface. Ten sites were targeted for dredging and five for piston coring and multiple coring. We also performed twelve CTD castings.

The geophysical aspect of the survey can be divided into two: bathymetric mapping of the New Britain Trench, including the corner of the trench, and detailed survey of area in the eastern Manus Basin where active hydrothermal ventings are occurring. The area surrounded by New Britain, New Ireland, Bougainville and New Britain Trench was surveyed to see if the two major faults within the basin, the Weitin and Djaul Faults, continue in this area. Our survey revealed that the faults terminate just southeast of the New Ireland as they run into Queen Emma Basin. There exist new sets of fault to the south of the Queen Emma Basin and we refer to them as "Queen Emma Graben" (new name). We also identified the extent of a basin to the east of New Britain and named as "Saint Georges Basin". The detailed multibeam

bathymetric map that we obtain during this survey is technically more accurate than previous maps obtained in early 90s by Japan and the United States. In fact, it will be the most up-to-date map and serve as a valuable information for ODP Leg 193 which will drill PACMANUS vent field at the end of year 2000. Magnetic field measurements of the east Manus Basin revealed that the three major vent fields, PACMANUS, DESMOS and Susu Knolls, exhibit contrasting anomaly and distribution. Studies are underway at the moment to find out if the differences are due to variation in the thickness of magnetic source layer and/or its magnetization intensity. The result will help us to better evaluate the mineral potential of these sulfide mounds.

Hydrothermal vents are important source of CO_2 , CH_4 , H_2S , ^3He , Mn, Fe and REE, which are transferred from the crust to the water column in the form of a plume. These elements can serve as important geochemical tracers for investigating the flow and other characteristics of plume as well as in the search for new plume. The decay of H_2S concentration in the water column is much faster than that of ^3He and Mn and therefore it is difficult to use H_2S in the general search and study of plume. However, very near the vent, it is possible to use H_2S and during our survey we measured concentration of H_2S in the range of 3~8 mM. The height, flux and intensity of the plume are generally affected by circulations in the deep water and the spread of plume follows along the isopycnic surface. Therefore the observed H_2S anomaly ($>1.5 \mu\text{M}$) can provide important clue for the source location and it appears that the largest source in the PACMANUS is aligned in the north-south direction.

Chimney samples from the hydrothermal vent fields were obtained at the crest of Pual Ridge in an area called Roman Ruins and at the top of the Susu Knolls. The samples show strong regional characteristics with those from Roman Ruins showing zinc concentrations as high as 57% and those from Susu Knolls 60% of copper. Both sites show high concentrations of gold and

silver. In the terrestrial region, concentrations with even 5 ppm of gold are sometimes considered economical. However, the discovery of 63 ppm of gold at Roman Ruins and 35 ppm at Susu Knolls is very promising. The findings from our survey in the Manus Basin will serve as important information for future developments of massive sulfide deposit in the marine hydrothermal environments.

Contents

Table Captions	19
Figure Captions	21
Chapter 1 Introduction	29
Part I Background	31
Part II Overview	34
Part III General View of the Cruises	35
Chapter 2 Geophysical Survey	37
Part I Background and Previous Cruises	39
Part II First Phase of Geophysical Survey	45
1. Tectonics of the New Britain trench and its forearc region	45
2. Stability of the triple junction	49
3. Methodology	49
4. Summary of Sea Beam bathymetric survey and results	52
Part III Second Phase of Geophysical Survey	62
1. Bathymetric survey and results	62
2. Magnetic field survey and results	62
References	69
Chapter 3 Characteristics of Seawater	71
Part I Materials and Methods	74
1. Measurements of temperature, salinity and transparency	74
2. Measurements of ΣCO_2	74
3. Measurements of inorganic nutrients	74
4. Measurements of H_2S	75

Part II Results and Discussion	75
1. Physico-chemical characteristics of seawater	75
2. Characteristics of ΣCO_2 and inorganic nutrients in seawater	77
3. Characteristics of H_2S	88
Part III Conclusions	94
References	95
Chapter 4 Rock Chemistry of South East Rift (SER), Manus Basin	99
Part I Introduction	101
Part II Geological Setting and Sampling	102
Part III Method	103
Part IV Geochemical Characteristics	112
1. Major elements	112
2. Trace elements	121
Part V Discussion	129
References	132
Chapter 5 Geochemistry of Hydrothermal Chimneys	135
Part I Introduction	137
Part II Sampling and Description	141
Part III Ore Mineralogy and Metal Contents	143
1. Ore mineralogy	143
2. metal contents	145
Part IV Conclusions	154
References	155
Chapter 6 Hydrothermal Vent Communities	157
Part I Manus Basin and Vent communities	159
Part II Survey of the Vent Communities in the Manus Basin	161
Part III Hydrothermal Vent Fields and Vent-Associated Biological Communities in the DESMOS Cauldron	170
1. # 916 dive	174
2. # 924 dive	178

Part IV Microbenthic Community in Hydrothermal Vents	184
Part V TEM Observation of Chemosynthetic Bacteria in Organisms	186
1. <i>Calyptogenia</i> sp. A of the Iheya Ridge	190
2. <i>Calyptogenia</i> sp. B of Miyako	190
3. Vestimentiferan tube worm (<i>Lamellibrachia</i> sp.) of Sagami Bay	191
4. Pogonophoran tube worm of Sagami Bay	192
5. Pogonophoran tube worm of the Iheya Ridge	192
6. <i>Ifremeria nautilei</i> of North Fiji Basin	193
7. <i>Bathymodiolus</i> sp. of the Minami-Ensei Knoll	193
8. <i>Bathymodiolus</i> sp. of the Iheya Ridge	195
References	213
Appendix	221
Appendix 1. Cruise time table	223
Appendix 2. Sampling locations and analytical parameters	228
Appendix 3. Location and description of sediment samples	232
Appendix 4. Location of deepsea camera system	233
Appendix 5. Meteorological information during the cruise	234



목 차

Table Captions	19
Figure Captions	21
제 1 장 서 언	29
제 1 절 서 론	31
제 2 절 탐사개요	34
제 3 절 탐사수행내역	35
제 2 장 지구물리 탐사	37
제 1 절 연구지역의 배경	39
제 2 절 제 1단계 지구물리 탐사	45
1. New Britain Trench와 전호분지의 지구조	45
2. 삼중합점의 안정성	49
3. 연구방법	49
4. Sea Beam 수심측량 결과 및 결론	52
제 3 절 제 2단계 지구물리 탐사	62
1. Manus Basin의 수심측량	62
2. 자기장 분석결과 및 결론	62
참고문헌	69
제 3 장 해수 특성	71
제 1 절 재료 및 방법	74
1. 수온, 염분, ph 및 투명도 분석	74
2. 총 무기탄소량	74
3. 무기 영양염류 분석	74
4. 황화수소 분석	75

제 2 절 결과 및 토의	75
1. 물리-화학적 환경 특성	75
2. 총 무기탄소 및 영양염류 분포 특성	77
3. 황화수소의 분포 특성	88
제 3 절 결 론	94
참고문헌	95
제 4 장 기반암 특성	99
제 1 절 서 론	101
제 2 절 지역개관 및 시료채취	102
제 3 절 실험방법	103
제 4 절 지화학적 특성	112
1. 주원소	112
2. 미량원소	121
제 5 절 토 의	129
참고문헌	132
제 5 장 열수광석 특성	135
제 1 절 서 론	137
제 2 절 시료채취 및 선상기재	141
제 3 절 광석광물과 화학적 특성	143
1. 광석광물	143
2. 금속함량	145
제 4 절 결 론	154
참고문헌	155
제 6 장 열수생물	157
제 1 절 Manus Basin 및 열수생물 군집	159
제 2 절 Manus Basin의 열수군집 탐사 및 발견	161
제 3 절 동부 Manus Basin DESMOS해분의 열수분출역과 생물군집	170
1. # 916잠항	174
2. # 924잠항	178
제 4 절 열수지역의 생물분포 및 생물상	184

제 5 절 열수성 생물군집에 공생하는 화학합성 박테리아의 전자현미경 관찰	186
1. 일본 오키나와 이해야 해분의 <i>Calyptogen</i> sp. A	190
2. 일본 미야코 해역의 <i>Calyptogen</i> sp. B	190
3. 사가미만의 Vestimentiferan tube worm(<i>Lamellibrachia</i> sp.)	191
4. 사가미만의 Pogonophoran tube worm	192
5. 이해야 해분의 Pogonophoran tube worm	192
6. 북위지 해분의 <i>Ifremeria nautili</i>	193
7. Minami-Ensei 언덕의 <i>Bathymodiolus</i> sp.	193
8. 이해야 해령의 <i>Bathymodiolus</i> sp.	195
참고문헌	213
Appendix	221
Appendix 1. Cruise time table	223
Appendix 2. Sampling locations and analytical parameters	228
Appendix 3. Location and description of sediments in the study area	232
Appendix 4. Location of deepsea camera system	233
Appendix 5. Meteorological information during the cruise	234



Table Captions

Table 2-1. List of previous surveys conducted in the Manus Basin since 1990	44
Table 3-1. Hydrological and chemical data in the study area	78
Table 4-1. Location and description of each dredge haul on SER	104
Table 4-2. Chemical compositions of volcanic rock samples dredge in SER ...	113
Table 5-1. Bulk mineralogical composition of seafloor polymetallic sulfides from mid-ocean ridges and back-arc spreading centers	138
Table 5-2. Bulk chemical composition of seafloor polymetallic sulfides from Mid-ocean ridges and back-arc spreading centers	140
Table 5-3. Representative chemical compositions of spherite/wurtzite from the hydrothermal chimney	146
Table 5-4. Chemical composition of the hydrothermal chimneys	147
Table 6-1. List of samples observed by TEM and light microscopy	189



Figure Captions

- Fig. 2-1. Geographic map of the eastern Papua New Guinea and the Solomon Islands showing the Manus Basin, New Ireland, New Britain, and New Britain Trench as well as other major geologic features (adapted from Kroenke *et al.* (1983)). The contours are in meters. 40
- Fig. 2-2. Tectonic map of the eastern Papua New Guinea and the Solomon Islands from Marlow *et al.* (1991) showing major plates and plate boundaries based on Kroenke (1984) and Circum-Pacific map Project (1986). Spreading axes in the Manus and New Guinea Basins are depicted from Taylor (1979) and Cooper and Taylor (1987). 41
- Fig. 2-3. Schematic diagram from Marlow *et al.* (1991) showing the development of West Melanesian Arc from early Tertiary to the present. 42
- Fig. 2-4. Tectonic map of the Manus Basin showing the location of the eastern Manus Basin, spreading segments, Djaul and Weitin Faults, and their extension possibly joining the New Britain Trench, forming a trench-trench-transform triple junction. The circles depict active volcanoes which correspond to the approximate location of the Benioff-Wadati zone (courtesy of R. Binns). 47
- Fig. 2-5. Diagram from Madsen and Lindley (1994) showing the location of spreading segments and transform faults based on interpretation from Sea MARC II sidescan sonar images of the eastern Manus Basin (Taylor *et al.*, 1991). Also shown are major tectonic structures on land for the purpose of detailed comparison. Madsen and Lindley (1994) point to the fact that only the Weitin Fault can be traced on land. Other transform faults do not exactly line up with the structures on land. 48



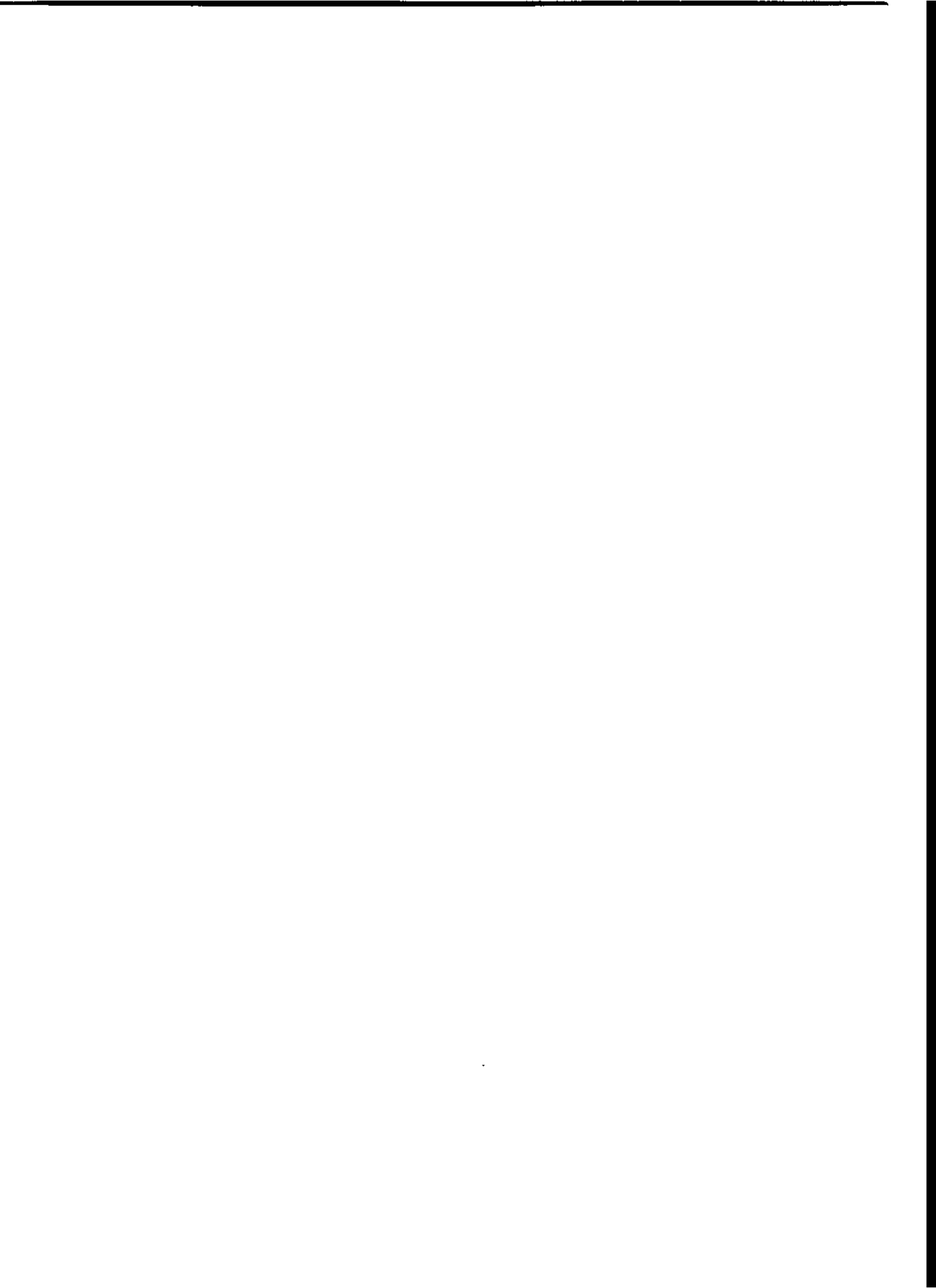


Fig. 2-6. Velocity space diagram of the proposed triple junction. Letters B, P, and S represent the Bismark Sea, Pacific, and Solomon Sea plates, respectively. We consider three cases in which the relative speed between the Bismark Sea and Pacific plates is greater, equal or less than that of between the Bismark Sea and Solomon Sea plates. In all three cases, the plate boundaries (shown as dashed lines) do not meet at one point, suggesting that the trench-trench-transform fault triple junction configuration can not be stable. 50

Fig. 2-7. Plot showing the tracklines of R/V *Onnuri* during our survey. The cross symbols represent hourly mark. Except for one occasion, Sea Beam echo-sounder worked well. The first phase of our geophysical survey was conducted outside the Manus Basin, encompassing a large area from the Saint Georges Channel to the New Britain Trench. Multidisciplinary survey of the Manus Basin comprised the second phase of our geophysical survey. 51

Fig. 2-8. Plot showing the Sea Beam bathymetry that was collected during the first phase of the geophysical survey. The detailed map of the survey area is represented in four plates (Figs. 2-9, 2-10, 2-11 and 2-12). 55

Fig. 2-9. Detailed bathymetric map of an area corresponding to PLATE 1 in Fig. 2-8. The contours are at 100 m interval. 56

Fig. 2-10. Detailed bathymetric map of an area corresponding to PLATE 2 in Fig. 2-8. The contours are at 100 m interval. 57

Fig. 2-11. Detailed bathymetric map of an area corresponding to PLATE 3 in Fig. 2-8. The contours are at 100 m interval. 58

Fig. 2-12. Detailed bathymetric map of an area corresponding to PLATE 4 in Fig. 2-8. The contours are at 100 m interval. 59

Fig. 2-13. Bathymetric chart of the area around the Manus Basin and New Britain Trench based on ETOPO5 regional hydrographic data (National Geophysical Data Center, 1993). Shown in the chart are the names of topographical features discussed in the text. We refer to the western side and eastern side of the New Britain Trench as the New Britain Arm and Solomon Arm, respectively. Two new names are proposed. We refer to the sets of graben to the south of Queen Emma Basin as Queen Emma Graben (QEG). The basin east of the New Britain is given a new name. We refer to it as the Saint Georges Basin (SGB). 60

Fig. 2-14. Tectonic interpretation based on our Sea Beam bathymetric survey, showing the location of QEG and SGB. A series of cross cutting channels are depicted on the upper slope of the New Britain forearc prism. 61

Fig. 2-15. Multibeam bathymetric map of the eastern Manus Basin. The contours are at drawn at 50 m interval. The three well known hydrothermal vent fields are clearly visible; they include: PACMANUS, DESMOS and Susu Knolls. 63

Fig. 2-16. Magnetic field anomaly of the survey area after correcting for the regional field variation (IGRF). The cross symbols represent points of measurement. 64

Fig. 2-17. Bathymetric map used in the forward model of magnetic field. The map was compiled by combining our Sea Beam data and the existing data obtained from the National Geophysical Data Center in Boulder Colorado. 66

Fig. 2-18. Magnetic field anomalies resulting from our forward modeling. 67

Fig. 3-1. Vertical profiles of water temperature in the study area. 76

Fig. 3-2. Vertical profiles of salinity in the study area. 81

Fig. 3-3. Vertical profiles of transparency in the study area,	82
Fig. 3-4. Vertical profiles of pH in the study area,	83
Fig. 3-5. Vertical profiles of total inorganic carbon in the study area, ...	85
Fig. 3-6. Vertical profiles of nitrate and nitrite in the study area,	86
Fig. 3-7. Vertical profiles of phosphate and silicate in the study area, ...	87
Fig. 3-8. Vertical profiles of H ₂ S in the study area,	89
Fig. 3-9. Vertical profiles of water temperature, transparency and H ₂ S at station H01 in the study area,	91
Fig. 3-10. Density versus transparency and H ₂ S in the study area,	92
Fig. 3-11. Vertical cross-section of H ₂ S in the study area,	93
Fig. 4-1. Photographs of selective rock samples,	106
Fig. 4-2. Sampling location map of the SER,	111
Fig. 4-3. The chemical classificaion and nomenclature of volcanic rocks dredged from SER (South east rift) using the total alkalis versus silica diagram (TAS, after Le Maitre <i>et al.</i> , 1989). Dividing curve between alkaline and subalkaline on this diagram from Irvine and Barga (1971),	116
Fig. 4-4. AFM (Alkali, FeO, MgO) diagram for volcanic rock samples of SER to subdivide into tholeiitic series and calc-alkalic series (dividing curve from Irvine and Bargar, 1971),	117
Fig. 4-5. The subdivisions of SER rock samples using K ₂ O versus SiO ₂ diagram (dividing line from Rickwood, 1989)	118
Fig. 4-6. Variation diagram of seven major oxides against MgO for SER rocks .	119
Fig. 4-7. Harker variation diagram for SER rocks	120
Fig. 4-8. The spider diagram of selected 'incompatible elements' nomalized by N-MORB for volcanic rock samples of SER rocks	122
Fig. 4-9. Ti-Zr-Y ternary diagram to discriminate SER rocks from within plate basalt (WPB),	123

Fig. 4-10. Ti-Zr-Sr ternary diagram to discriminate SER rocks against MORB. .	124
Fig. 4-11. Ti-Zr diagram to discriminate SER rocks against MORB.	125
Fig. 4-12. Chondrite normalized REEs patterns for volcanic rocks of SER	127
Fig. 4-13. Element ratio variation diagram showing diverse effect of arc-component.	128
Fig. 5-1. Photographs of hydrothermal vent fields.	142
Fig. 5-2. Back scattered-electron image of pyrite (dark image) and galena (brighter zone) showing concentric overgrowth.	144
Fig. 5-3. Backscattered-electron image of pyrite (dark image) and galena (brighter zone) showing concentric overgrowth.	148
Fig. 5-4. Photographs of cross sections from hydrothermal chimneys showing the position of the chemical analysis	149
Fig. 5-5. Variation diagrams of main elements of the hydrothermal chimneys and circle symbols represent HD-1-3 and HD-8 chimney.	150
Fig. 5-6. Variation diagrams between main elements of the hydrothermal chimneys. Square and circle symbols represent HD-1-3 and HD-8 chimney, respectively.	153
Fig. 6-1. Regional map showing the location of the hydrothermal chimneys found in 1986 and the present survey area in the Manus Basin and the spreading centers and transform faults that constitute the active plate boundary. The quaternary volcanos and trench of the New Britain arc-trench system are also shown.	162
Fig. 6-2. Sea Beam map of the present survey area in the eastern part of the Manus Basin.	163
Fig. 6-3. Location of the sampling and observation stations in the eastern part of the Manus Basin during the KH-90-3.	164
Fig. 6-4. Bird-eye view of the DESMOS Cauldron. Active hydrothermalism and rich biota were found on the NW inner flank of the cauldron.	165

Fig. 6-5. An example of the rack of the DESMOS operation on the fine-scale Sea Beam map. St. AQ34, KH-90-3.	166
Fig. 6-6. The Sea Beam map (after filtering process) of the DESMOS Cauldron depicted during the second leg of the "Hakuho Maru" KH-90-3 Cruise.	175
Fig. 6-7. Track chart of the Dives #916 (segment connecting the points 1 to 3) and #924 (segment connecting 2-3).	180
Fig. 6-8. Detailed topography of the "Onsen Site" reconstructed by route maps of the several dives and calibrated by the many CTF sonar images from the submersible "Shinkai 2000".	181
Photo 6-1. Tangle of slender pogonophoran tube worms with white chemical precipitates and sponges. Near Calyptogena Site.	196
Photo 6-2. Giant clam <i>Calyptogena</i> sp. colonizing on the sediment and a stone crab <i>Paralomis</i> sp. Scalpellids cover the outcropping rocks. Calyptogena Site.	196
Photo 6-3. Voracious bresiliid shrimp <i>Alvinocaris</i> sp. living among vent communities of the Calyptogena Site and Pyramid Site.	197
Photo 6-4. Another voracious hippolytid shrimp <i>Lebbeus washingtonianus</i> living among vent communities of the Calyptogena Site and Pyramid Site.	197
Photo 6-5. Elongated type of medium-size mussel, <i>Bathymodiolus</i> sp. They occur both in Calyptogena Site and Pyramid Site.	198
Photo 6-6. Large vestimentiferan tube worms bearing scalpellids. Full scale of the bar: 15 cm. Calyptogena Site.	198
Photo 6-7. A primitive scalpellid (<i>Neolepas</i> -type sp. A). They dominated in number among the members of the community as seen in Photo 6-2. ..	199
Photo 6-8. Another species of primitive scalpellid (<i>Neolepas</i> sp. B) on a tube of the large vestimentiferan tube worm. Calyptogena Site.	199

Photo 6-9. Pogonophoran tube worms and sponges, Calyptogena Site and Pyramid Site.	200
Photo 6-10. <i>Alvinocaris</i> , <i>Lebbeus</i> and amphipods lured into a baited trap, Pyramid Site.	200
Photo 6-11. Photograph of a mussel <i>Bathymodiolus</i> sp. opened showing the well developed ctenidia.	201
Photo 6-12. Large vestimentiferan tube worms and white chemical precipitates on a sediment-covered flat rock, Calyptogena Site.	201
Photo 6-13. Large vestimentiferan tube worm protruding short gill filaments and obturaculum, Calyptogena Site.	202
Photo 6-14. Large <i>Alvinocaris</i> sp. covered by "bacterial ?" filaments, Pyramid Site.	202
Photo 6-15. Vent polychaete (<i>Paralvinalla hessleri</i>) and their tubes on the polymetallic sulfide block of the Izena black chimney.	203
Photo 6-16. Galatheids (<i>Munidopsis</i> -type gen. sp. B) with broad rostrum aggregate and cover the flank of the chimney of the Pyramid Site.	203
Photo 6-17. TEM micrograph of the bacteriocyte in the gill tissue of <i>Calyptogena</i> sp. from the Iheya Ridge.	204
Photo 6-18. TEM micrograph of the bacteriocyte in the gill tissue of <i>Calyptogena</i> sp. off Miyako, Northeastern Japan.	204
Photo 6-19. TEM micrograph of the trophosome of vestimentiferan tube worm (<i>Lamellibrachia</i> sp.) from Sagami Bay.	205
Photo 6-20. TEM micrograph of the trophosome of the same individual of the vestimentiferan tube worm (<i>Lamellibrachia</i> sp.) from Sagami Bay. ..	205
Photo 6-21. Trophosome of a pogonophore from the Okinoyama Bank, Sagami Bay. ..	206
Photo 6-22. TEM micrograph of the another portion of trophosome of the same individual of Photo 6-21.	206

Photo 6-23. TEM micrograph of the trophosome of a pogonophoran from the <i>Calyptogena</i> Site, Iheya Ridge.	207
Photo 6-24. TEM micrograph of the another portion of trophosome of the same individual of Photo 6-23.	207
Photo 6-25. TEM micrograph of the bacteriocytes in the gill tissue of <i>Ifremeria nautiliei</i> from the North Fiji Basin.	208
Photo 6-26. TEM micrograph of the rods near the surface of the microvilli-fringed bacteriocytes in the gill of <i>Ifremeria</i> <i>nautiliei</i> from the North Fiji Basin.	208
Photo 6-27. High magnification of slender-rod sulfur-oxidizer and membrane-stacked methane-oxidizer of the bacteriocyte of <i>Ifremeria nautiliei</i>	209
Photo 6-28. Gill filaments of <i>Bathymodiolus</i> sp. from the Minami Ensei Knoll. ...	209
Photo 6-29. TEM micrograph of the bacteriocyte in the gill tissue of the same individual of the <i>Bathymodiolus</i> sp. from the Minami Ensei Knoll. ..	210
Photo 6-30. TEM microscoph of transverse section of the bacteriocytes of <i>Bathymodiolus</i> sp. from the Minami Ensei Knoll.	210
Photo 6-31. TEM microscopy of the bacteriocyte of <i>Bathymodiolus</i> sp. from the Minami Ensei Knoll.	211
Photo 6-32. TEM micrograph of the bacteriocyte of the gill tissue of the <i>Bathymodiolus</i> sp. from the Iheya Ridge.	211
Photo 6-33. TEM micrograph of the transverse section of the bacteriocyte of the same individual of <i>Bathymodiolus</i> sp. from the Iheya Ridge. .	212

제 1 장 서 언

제 1 절 서 론

제 2 절 탐사개요

제 3 절 탐사수행내역



지역에 대한 탐사 및 개발 활동이 상업적 차원에서 진행되고 있으므로 공해에 공개하지 않고 있다. 최근 러시아는 국제해저기구에서 해저 열수광상 및 망간각 선진국들은 해저 열수광상 개발 관심을 증폭시켰으며, 핵심적인 탐사자료를 대상으로 탐사활동을 수행해온 미국, 독일, 일본, 러시아, 호주 등 해양개발 예측되고 있다. 자국 또는 남서태평양의 배타적경제수역 및 인근 공해지역을 개발비용이 저감될 수 있어 가장 먼저 상업적 개발이 시작될 수 있을 것으로 많은 부존 수심, 황화를 형태의 금속질함, 단위면적당 높은 금속함량 등으로 기술발전으로 열수광상 탐사 및 채광에 따른 개발조건이 크게 개선되고 있으며, 1980년대까지는 상업성이 낮은 것으로 판단되었다. 그러나 1990년대 후반부터는 평면적으로 분포하는 망간단괴 및 망간각에 비해 탐사 및 개발의 어려움으로 해저 열수광상은 좁은 지역에 인체적으로 밀집·분포하므로, 넓은 지역에 연구되고 있다.

변화를 조절할 수 있고, 지각운동과 밀접한 관련이 있어 광범위한 분야에서 중요한 학문적 관심사가 되고 있다. 근래에는 열수작용은 해수 조성 및 기후 생존하는 원시 생명체의 서식처로 판명되고 있어 생명의 기원 및 생태 연구를 위한 관심을 불러일으키고 있다. 또한 해저 열수광상 분포지역은 화학합성에 의해 금속(금, 은, 아연, 구리 등) 함량 및 막대한 부존량으로 화계 및 산업계에 높은 열수광상은 지속적 채광이 가능한 천연 자원으로 호칭되기도 하며 고품위 중앙해령, 호상분지, 등 여러 지역에서 발견·보고되고 있다. 따라서 해저 해역(Galapagos, 21°N)에서 심해잠수정 Alvin에 의해 직접 관찰되었고, 이후 열수광상이 존재할 것으로 추측해 왔다. 이러한 추측은 1977년 갈라파고스 1970년대 중반까지 해양과학자들은 해저에는 지금 현재 생성되고 있는

제 1 장 서 론

제 1 장 서 론

부존하는 이들 자원에 대해서는 망간단괴와 마찬가지로 규정 제정을 요청하였고, 호주 Natilus Mineral Corporation은 Papua New Guniea로부터 해저 열수광상 개발을 위한 광구를 확보하여 독점적 탐사권을 획득하였다.

우리 나라는 금속 광물자원을 거의 전량 해외 수입에 의존하고 있으며 그 수요가 점증하므로 광물자원의 장기·안정적 공급원 확보가 절실한 실정이다. 또한 열수작용이 활발한 지역은 지각운동, 물질순환, 환경변화, 생명의 기원 등 지구 신비를 밝히는 자연 학습장이므로 이곳에서의 연구활동을 통해 해양과학기술 발전을 이룩할 수 있다. 이러한 배경 하에서 본 연구사업은 남서태평양 해역을 대상으로 해저 열수광상 광역탐사를 통해 광물자원 탐사기술 개발, 열수광상 개발 후보지 선정, 열수광상 분포특성 및 자원 잠재력 평가기술 개발 등을 목표로 한국해양연구소 기관고유사업으로 추진되고 있다. 1차년도인 1998년에는 우리나라에서는 처음으로 해저 열수광상에 관한 실험역 탐사가 Yap 해구지역을 대상으로 수행되었고, 2차년도인 1999년에는 Papua New Guniea 비스마르크 해역에서 Manus Basin의 해저지형 특성 및 지구조 규명과 해저 열수광화작용에 의한 광물정출작용을 밝히고자 수행하였다. 연구지역은 수심이 얇고, 육지에서 가까우며, 해저 열수광상의 금속 품위가 높기 때문에 가장 먼저 상업적 개발이 기대되는 지역으로 평가되고 있으며, Natilus Mineral Corporation이 독점적 탐사권을 획득한 광구지역을 포함한다.

실험역 탐사는 지형 및 지층구조 규명을 위해 지구물리 탐사가 선행되었으며, 이를 기초하여 시료채취를 위한 정점조사를 수행하였다. 지구물리 탐사에서는 Simrad EA500 단층 및 Sea Beam 2000 다중음향측심기를 이용 수심 및 해저지형 조사를 수행하였고, 자력측정기를 이용하여 지각의 자기장 조사를 수행하였다. 정점조사에서는 수괴 특성 파악 및 해수 채취를 위하여 CTD-casting을 12정점에서 수행하였으며, 기반암, 퇴적물 및 광석시료 등을 채취하고자 Dredge(10 정점), Piston Corer 및 Multiple Corer(5회) 등을 운영하였다. 또한 열수분출구의 분출 특성을 파악하고자 심해저 카메라 시스템을 운영하여 해저면을 촬영하였다.

획득된 자료 및 시료는 각각 연구실 및 실험실에서 정밀·분석하여 지구물리 탐사 결과는 2장에 기술하였고, 해수의 물리·화학적 특성은 3장에서

논의하였으며, 기반암 및 광석의 지화학적 특성은 4장 및 5장에서 각각 서술하였다. 또한 향후 연구를 위해 연구지역 생태계 특성을 기존 연구결과에 기초하여 6장에서 소개하였다.

제 2 절 탐사개요

1. 탐사기간

- 1999년 5월 13일 ~ 5월 20일(8일)

2. 탐사지역

- Papua New Guniea 비스마르크 해역(Fig. 2-1)
남위 3° ~ 7°, 동경 151° ~ 152°

3. 탐사인원 및 임무

- 총 20명 (한국해양연구소 17명, 파푸아뉴기니아 참관인 1명,
호주 CSIRO 1명, 노틸러스사 1명)

	성 명	소 속	직 위	탐 사 업 무
1	이 경 용	해양연	책임연구원	탐사팀장 (탐사 계획 및 관리)
2	문 재 운	'	책임연구원	광물, 암석, 퇴적물 처리 및 분석
3	정 회 수	'	선임연구원	광물, 암석, 퇴적물 처리 및 분석
4	박 찬 영	'	선임연구원	지구물리 장비 운영 및 자료처리
5	지 상 범	'	선임연구원	DSC 운영 및 자료처리
6	김 현 섭	'	선임연구원	SBP 및 EA-500 자료처리
7	손 승 규	'	Post-Dr.	CTD 운영 및 해수분석
8	박 정 기	'	Post-Dr.	지구물리 장비 운영 및 자료처리
9	이 근 창	'	기 술 원	DSC 운영 및 자료처리
10	박 승 현	'	연 구 원	광물, 암석, 퇴적물 처리 및 분석
11	김 병 록	'	연 구 원	CTD 운영 및 해수분석
12	최 윤 지	'	연 구 원	광물, 암석, 퇴적물 처리 및 분석
13	남 상 현	'	선임연구원	지구물리 장비 운영 및 자료처리
14	이 덕 기	'	Post-Dr.	지구물리 장비 운영 및 자료처리
15	유 인 성	'	기 능 원	지구물리 장비 운영 및 자료처리
16	김 규 중	'	연 구 원	지구물리 장비 운영 및 자료처리
17	이 상 목	'	선임연구원	지구물리 장비 운영 및 자료처리
18	Terry W. Kilya	PNG	정부 대표	참관인
19	John Waters	CSIRO	선임연구원급	연구지역 소개 및 계획 협의
20	Julian Malinic	Natilus	대표이사	참관인

제 3 절 탐사 수행 내역

1. 탐사기간

- 1999년 5월 13일 ~ 5월 20일(8일)

2. 탐사지역

- Papua New Guniea 비스마르크 해역(Fig. 2-1)
남위 3° ~ 7°, 동경 151° ~ 152°

3. 항해거리 : 2,100.7 km

4. 지구물리조사(측선조사)

- 정밀수심조사 : 2,100.7 km
- 광역수심조사 : 1,480.4 km
- 천부지층조사 : 1,480.4 km
- 지자기장조사 : 1,480.4 km

5. 시료채취(정점조사)

- 광석 및 모암채취(Dredge) : 10정점에서 약 1,400kg 획득(열수분출구 시료획득)
- 퇴적물 채취(PC 및 MC) : 5정점에서 주상 퇴적물 획득(최대 길이 : 2.2 m)
- 해수 채취 및 관측(CTD) : 12정점에서 해수 채취 및 관측(열수분출물 획득)

6. 해저면 촬영(DSC)

- still camera : 556 cut
- B/L video : 276분 촬영
- Color video : 196분 촬영

7. 기상조사

- 기상확인 : 8 일(4시간별 대기온도, 파고, 풍속, 풍향 관측)



제 2 장 지구물리 탐사

제 1 절 연구지역의 배경

제 2 절 제 1단계 지구물리 탐사

제 3 절 제 2단계 지구물리 탐사



제 2 장 지구물리탐사

1999년 5월 Papua New Guinea 일대의 열수광상 지역에 대한 탐사가 연구선 온누리호를 이용하여 8일간 행해졌다. 본 탐사 중 지구물리 분야는 두 단계로 이루어졌다. 첫 번째 탐사에서는 New Britain Trench가 꺾인 부분 주위를 Sea Beam 2000을 이용하여 수심측량을 실시하였고, 두 번째 탐사에서는 Manus Basin의 동쪽부근에서의 시료채취와 함께 종합해양 관측을 실시하였다. 특히 두 번째 탐사는 잘 알려진 열수분출지역(hydrothermal vent-fields)인 Susu Knolls, DESMOS와 PACMANUS 지역을 포함한다. 본 장은 연구지역의 일반적 지구조적인 특성과 본 탐사에서 이루어진 지구물리측면을 기술하고자 한다.

제 1 절 연구지역의 배경

Manus 배호분지는 적도부근의 남서 태평양의 비스마르크해에 위치한다(Fig. 2-1). Manus Basin의 북쪽으로는 New Ireland 섬과 남쪽으로는 New Britain 섬이 놓여 있다. 두 섬을 포함한 이 일대는 Indo-Australian plate와 Pacific plate의 충돌로 생긴 대규모 판경계부로서, 소위 "West Melanesian Island Arc"라고 불리는 지역에 속한다. 제 3기 초 이래로 지금까지 두 개의 큰 해양판의 충돌 및 상호작용으로 이 지역에 호상열도, 전호분지, 해구 등 복잡한 시스템이 형성되었다. Fig. 2-2는 Manus Basin 주위의 주요 판과 판의 경계부, 그리고 지구조적인 특징들을 나타낸다. Marlow *et al.* (1991)은 제 3기 초 이래로 지금까지 West Melanesian Arc의 화산분포 및 지구조적 배경에 대한 개관을 기술하였다(Fig. 2-3). 이를 통해 보면 Miocene 초에 Ontong Java Plateau와 Eauripik Ridge가 Manus Trench와 충돌하므로써 Manus Trench의 섭입활동이 중단되고, New Guinea Trench에서의 새로운 섭입이 시작되는 계기를 만들게 되었다는 일련의 지구조적 변화를 기술한다. 또한, 5~14 Ma에는 New Britain Trench로의 섭입활동으로

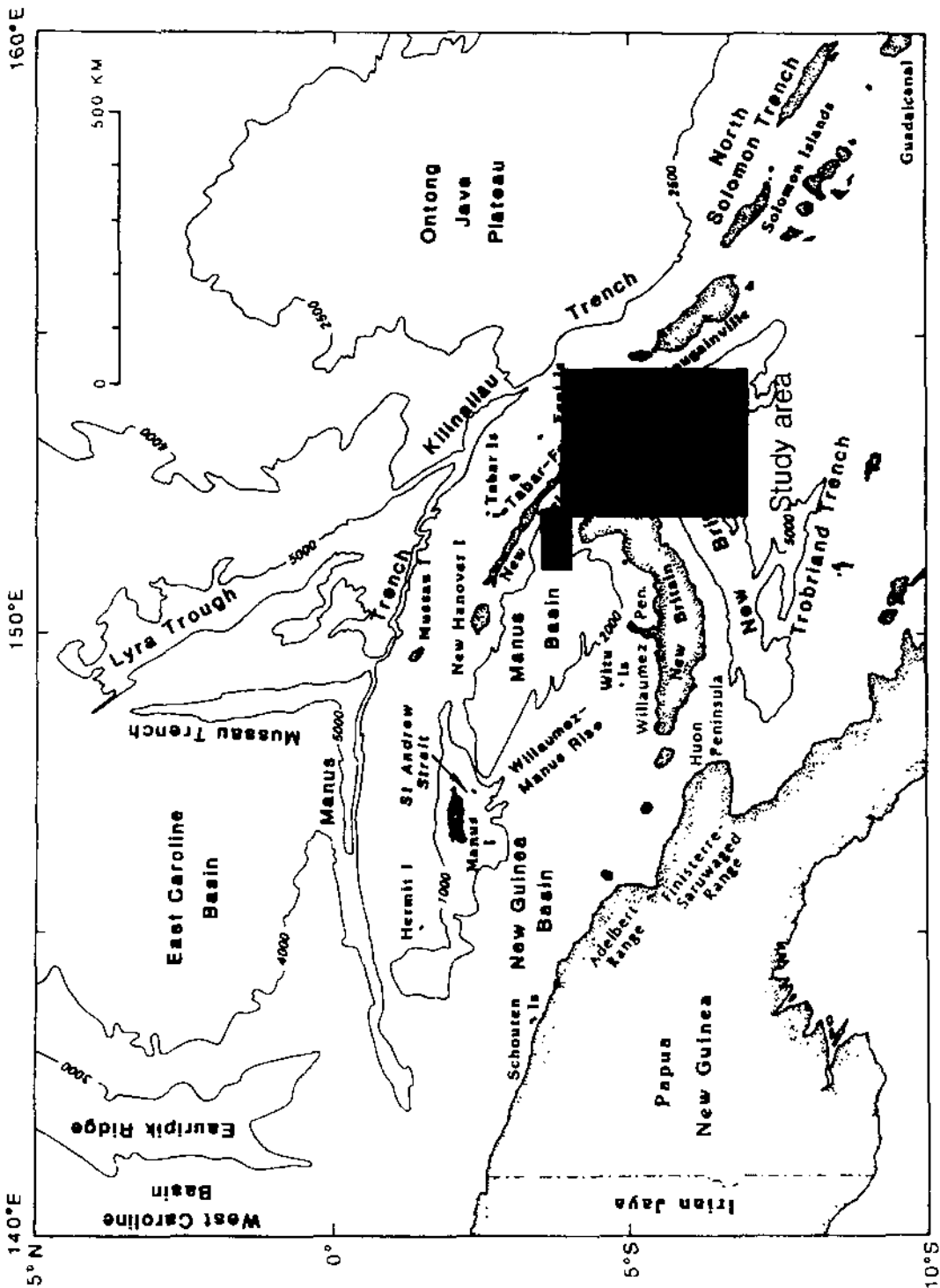
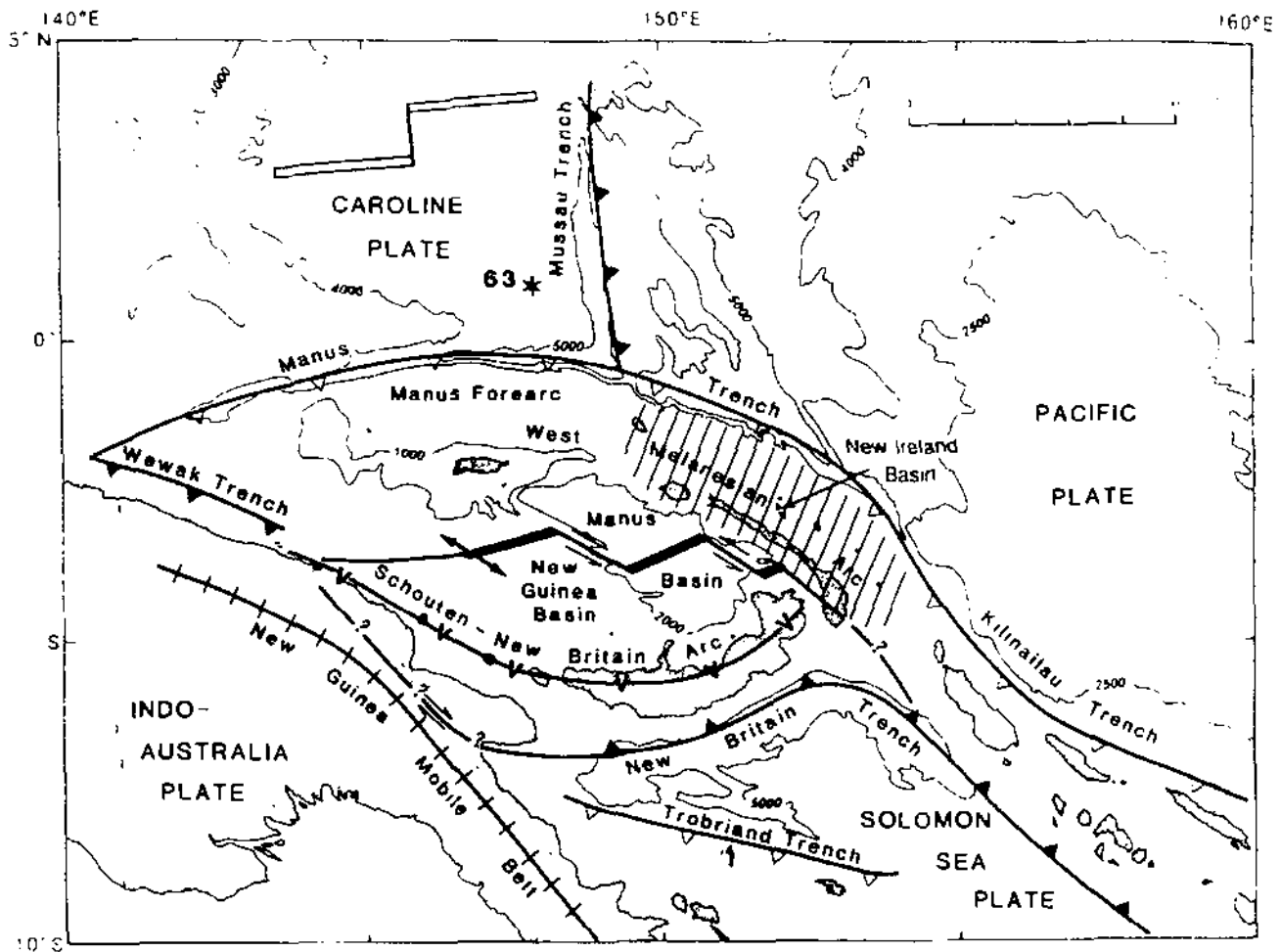


Fig. 2-1. Geographic map of the eastern Papua New Guinea and the Solomon Islands showing the Manus Basin, New Ireland, New Britain, and New Britain Trench as well as other major geologic features (adapted from Kroenke *et al.* (1983)). The contours are in meters.



EXPLANATION

Subduction zone

Active
Inactive

Spreading center

Active (arrow shows relative motion between two plates)

Inactive

Magmatic arc

Transform fault

DSDP site

Fig. 2-2. Tectonic map of the eastern Papua New Guinea and the Solomon Islands from Marlow *et al.* (1991) showing major plates and plate boundaries based on Kroenke [1984] and Circum-Pacific map Project (1986). Spreading axes in the Manus and New Guinea Basins are depicted from Taylor (1979) and Cooper and Taylor [1987].

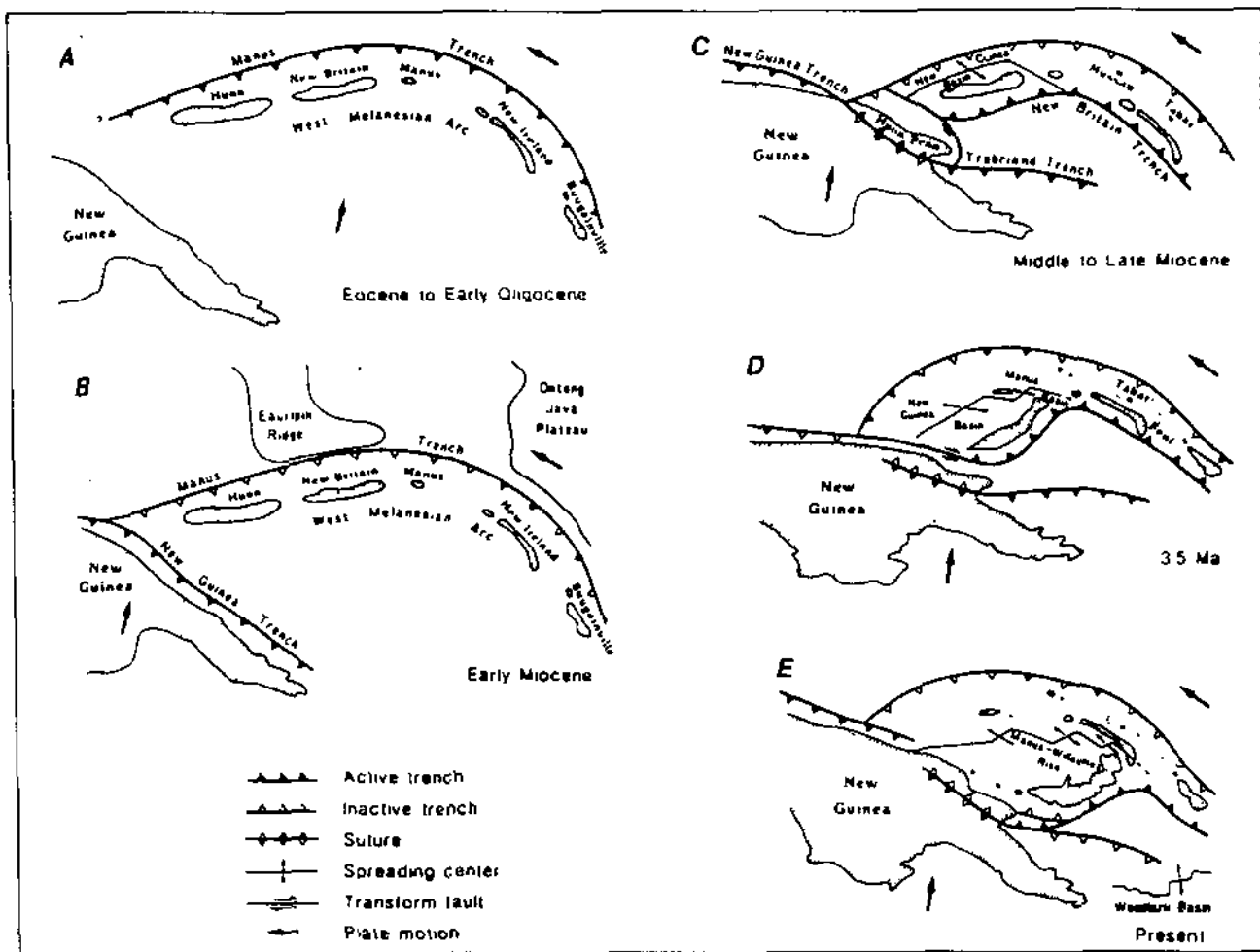


Fig. 2-3. Schematic diagram from Marlow *et al.*, [1991] showing the development of West Melanesian Arc from early Tertiary to the present. (A) West Melanesian Arc is formed as a result of collision between the Pacific and Indo-Australian plates some time between Eocene and early Oligocene (55-28 Ma). This resulted in the underplating of the Pacific plate. (B) By early Miocene (24-16 Ma), two major volcanic provinces, the Ontong Java Plateau and Eauripik Ridge arrives at the Manus Trench. Over-thickened oceanic lithosphere stops the subduction in the north. In the meanwhile, a new subduction begins to the south at the New Guinea Trench. (C) During middle and late Miocene (16-5 Ma), a fragment of the West Melanesian Arc collides with Huron Peninsula and Finisterre Range. This causes the subduction to stop along the New Guinea Trench and initiates new subduction along the New Britain Trench. However, the polarity is reversed. At about 5 Ma, back-arc spreading begins in the New Guinea Basins. (D) By 3.5 Ma the back-arc spreading jumps between Manus and New Britain Islands. With the opening of Manus Basin, New Britain is translated southeast to the New Ireland to the present configuration (E).

전이되었으며, 약 3.5 Ma에는 Manus Basin이 비스듬하게 열리기 시작되었다는 것을 보여준다.

1970년 초 이래로 Manus, New Ireland, New Britain, 그리고 Solomon Islands 주위에 행해진 수많은 해양과학탐사는 이 지역의 개괄적인 지질을 밝히는데 큰 역할을 하였다. 초기 탐사는 일반적으로 잠재성이 있는 탄화수소와 광물자원의 탐사에 초점을 맞추었다. 1970년 Australian Bureau of Mineral Resources, 1970년 Hawaii Institute of Geophysics, 1972년 GULF, 1975년 AUSTRADDEC, 1981년 CCOP/SOPAC, 그리고 1984년 United State Geological Survey에 의해 행해진 탐사가 그 대표적인 것들이다. 특히, 1982년, 1984년, 1986~1987년에는 Australia, New Zealand와 United States가 3국 협약에 의해 이 일대에 대한 체계적이고 대규모적인 해양탐사를 수행하였다. 탐사 결과가 Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources에 보고되었고, 그 밖의 문헌에 보고되었는데, 그 예가 Taylor(1979)이다.

1985년에는 하와이 대학의 조사선 R/V Moana Wave가 SeaMARC II를 이용하여 Manus Basin의 거의 완전한 지도작성을 포함하여 체계적인 지구물리 탐사를 실시하였다(Taylor *et al.*, 1991). 이 조사로 인해 Manus Basin의 중앙에 위치한 microplate와 연관되어 ridge jump와 다른 경계부의 존재를 포함한 분지의 복잡한 확장역사가 밝혀졌다(Taylor *et al.*, 1987; Martinez and Taylor, 1996).

1986년에는 Manus Basin내의 동쪽에서 전개축의 연장선을 따라 촬영된 수중 카메라에 의해 열수침니(hydrothermal chimney)와 vent fauna가 발견되었고(Both *et al.*, 1986), 수중에서 CH₄와 ³He 이상치가 높다는 사실이 나타나면서 분지내의 광범위한 열수활동이 밝혀지게 되었다(Craig and Poreda, 1987). 이러한 발견은 세계적으로 해양 과학 단체들 사이의 큰 관심을 불러일으켰고, 현재 활동하고 있는 열수체계의 형성과 성분 및 광물화 작용에 대한 이해와 새로운 분출 지역의 발견에 특별한 주안점을 두고 수많은 탐사를 실시하였다. Table 2-1에 최근에 실시하고 있는 탐사들을 요약하였다. 적어도 4개의 활동하고 있는 열수 분출 지역(Marmin Knolls, PACMANUS, DESMOS와 Susu Knolls)가 Southeastern Rifts(SER)을 따라 발견되었다.

Table 2-1. List of previous surveys conducted in the Manus Basin since 1990

Year	Chief Scientist	Ship	Type of Survey
1990	Tufar	<i>Sonne</i>	Sea Beam, OFOS, TV-grab, dredge
1990	Lisitzin	<i>Keldysh</i>	MIR submersibles, CTD, cores, grab
1990	Sakai and Tamaki	<i>Hakuho Maru</i>	Sea Beam, magnetic, DESMOS, CTD, dredge
1991	Binns and Scott	<i>Franklin</i>	Bottom camera, CTD, cores, dredge
1992	Date	<i>Hakurei Maru #2</i>	Hydrosweep, cores, dredge, bottom camera, sidescan sonar
1994	Herzig	<i>Sonne</i>	Hydrosweep, OFOS, TV-grab, CTD, dredge
1995	Urabe and Auzende	<i>Yokosuka</i>	Furuno multibeam, Shinkai 6500 submersible

제 2 절 제 1단계 지구물리 탐사

1. New Britain Trench와 권호분지의 지구조

New Britain Trench의 북쪽에 위치한 Manus 권호분지는 과거 지질사에서 풍부했던 규장질 화산암기원의 대규모 다금속 황화물 광상(felsic volcanic-hosted polymetallic massive sulfide deposit)의 현생의 유사한 예로 간주되는 활발한 해저열수 분출 지역 중의 대표적인 예가 된다. 활발하게 확장하는 중앙해령과 같은 확장부에서 발견되는 열수광상에 비해, 이런 형태의 퇴적물은 일반적으로 희귀금속과 기본금속이 높게 농축되어 있고, 대다수가 수백만년의 값어치가 있는 자원을 포함한다(Herzig and Hannington, 1995; Hannington *et al.*, 1995). 그러나 아직까지도 열수광상의 형성과 구조를 이끄는 기본적인 과정에 대해서는 알려진 바가 거의 없다.

2000년 11월부터 2001년 1월 사이에 수행되는 Ocean Drilling Program Leg 193은 Manus Basin 내의 동쪽 열수분출지역과 PACMANUS 열수분출지역 중의 한 곳에 목표를 잡고 있다. 적어도 4개의 지점에서 해저면 700 m의 깊이까지 시추작업을 실시할 예정인데, 해저 확장축을 따라 3지점, 축과 떨어진 곳에 1지점이 될 것이다. 시추작업에서 획득할 자료는 이런 형태의 열수구통의 내부구조를 해석하는데 도움이 되고, 경제적 잠재성을 예측하는데 큰 도움이 될 것이다.

대규모 화산기원의 규장질 열수광상이 다른 지질학적 환경의 열수광상과 비교해 볼 때 매우 큰 경제적 중요성을 가졌다는 사실에는 공감하는 반면, 과학자들은 Manus Basin의 열수광상이 특이한 지구조 및 마그마의 환경에서 형성된 유일한 것인가에 대한 질문에 강한 의구심을 가지고 있다. 만일 그렇다면 arc-trench system 형태를 가지고 있는 다른 지역에서 유사한 형태의 광상을 찾고 평가하는데 있어서 매우 중요한 자료가 될 것이다.

Manus Basin내의 동쪽에 위치한 확장중심지에서의 지구조, 마그마, 열수의 작용은 New Britain Trench의 섭입작용 때문에 단순한 배호의 열림으로 설명될 수 없다는 점에서 특이하다. 예를 들면, Manus Basin 내의 동쪽에 위치한 해저화산의

지화학적인 분석은 배호형태의 화산보다 호상에 더 가깝다는 것을 보여준다(Binns and Scott, 1993). 그러나 이러한 해저화산들은 Benioff-Wadati zone으로부터 너무 멀리 떨어져 있다. Fig. 2-4는 New Britain Trench와 Manus Basin 확장중심지와 관련하여 New Britain Island에서의 현재 호상 화산의 위치를 나타낸다.

이러한 차이를 설명하는 한가지 가설은 이 지역의 마그마활동과 이에 수반된 열수활동이 하부지각과 상부맨틀 구조가 불규칙한 것에 의한 결과이고, Manus Basin 내 지구조적인 작용은 New Britain Trench의 갑자기 꺾이는 굴절에 의해 지배된다는 것이다. 이 가설에 따르면, Manus Basin의 동쪽에 분포하고 남동쪽을 향해 뻗어있는 규모가 큰 두 개의 주향이동 단층인 Djaul 단층과 Weitin 단층이 육지까지 연속되고, 남쪽으로 더욱 연장되어 New Britain Trench와 접해야 한다(Fig. 2-4). 결국 이 가설은 Manus Basin의 경우 주향이동 단층들이 암석권(lithosphere)을 약화시켜 정상적인 배호확장 상태에서의 맨틀 용승보다 효과적으로 상부맨틀 물질을 해저까지 용이하게 노출시켰다는 것을 의미한다.

또 이 가설에 의하면 Manus Basin에서부터 남동쪽으로 New Britain Trench까지 연장된 주향이동 단층이 변환단층의 축을 형성할 것이고, New Britain의 남동쪽과, Bougainville Island의 남서쪽에 접하는 New Britain Trench의 두 축이 형성되어 triple junction을 이루리라 예상된다. 본 연구에서는 New Britain Trench의 두 축을 각각 New Britain Arm과 Solomon Arm으로 명명한다.

Weitin 단층이 육지로 연장된다는 사실은 New Ireland의 지질도면으로부터 명백하다고 판단된다. Fig. 2-5는 Manus Basin 동쪽 확장부의 Sea MARC II side scan 이미지와 New Ireland와 New Britain 지역의 육상 지질구조를 결합시킨 것이다(Madsen and Lindley, 1994). Manus Basin에 분포하는 대부분의 변환단층은 연속성이 불명확하지만, 육지에 분포하는 Weitin 단층으로 연결되는 변환단층이 명백하게 존재한다. 우리의 첫 단계 조사목적은 Weitin 단층이 남동쪽으로 연장되어 해구-해구-변환단층 삼중합점(trench-trench-transform triple junction)을 형성하는 가장자리 주변의 New Britain Trench와 접하는지 조사하는 것이다. 다음 장에서 velocity-space diagram을 이용하여 삼중합점의 안정성을 조사하고자 한다.

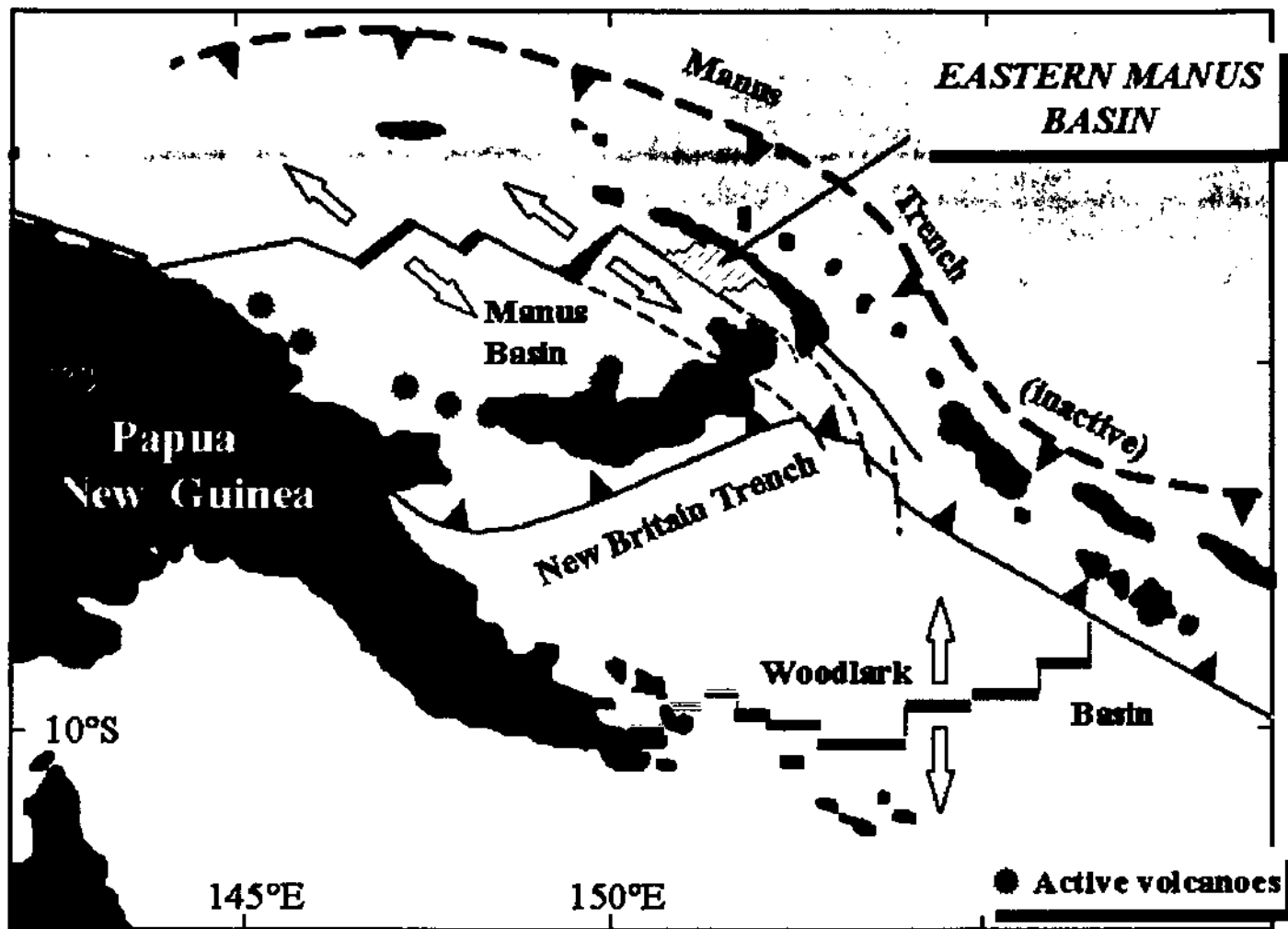


Fig. 2-4. Tectonic map of the Manus Basin showing the location of the eastern Manus Basin, spreading segments, Djaul and Weitin Faults, and their extension possibly joining the New Britain Trench, forming a trench-trench-transform triple junction. The circles depict active volcanoes which correspond to the approximate location of the Benioff-Wadati zone (courtesy of R. Binns).

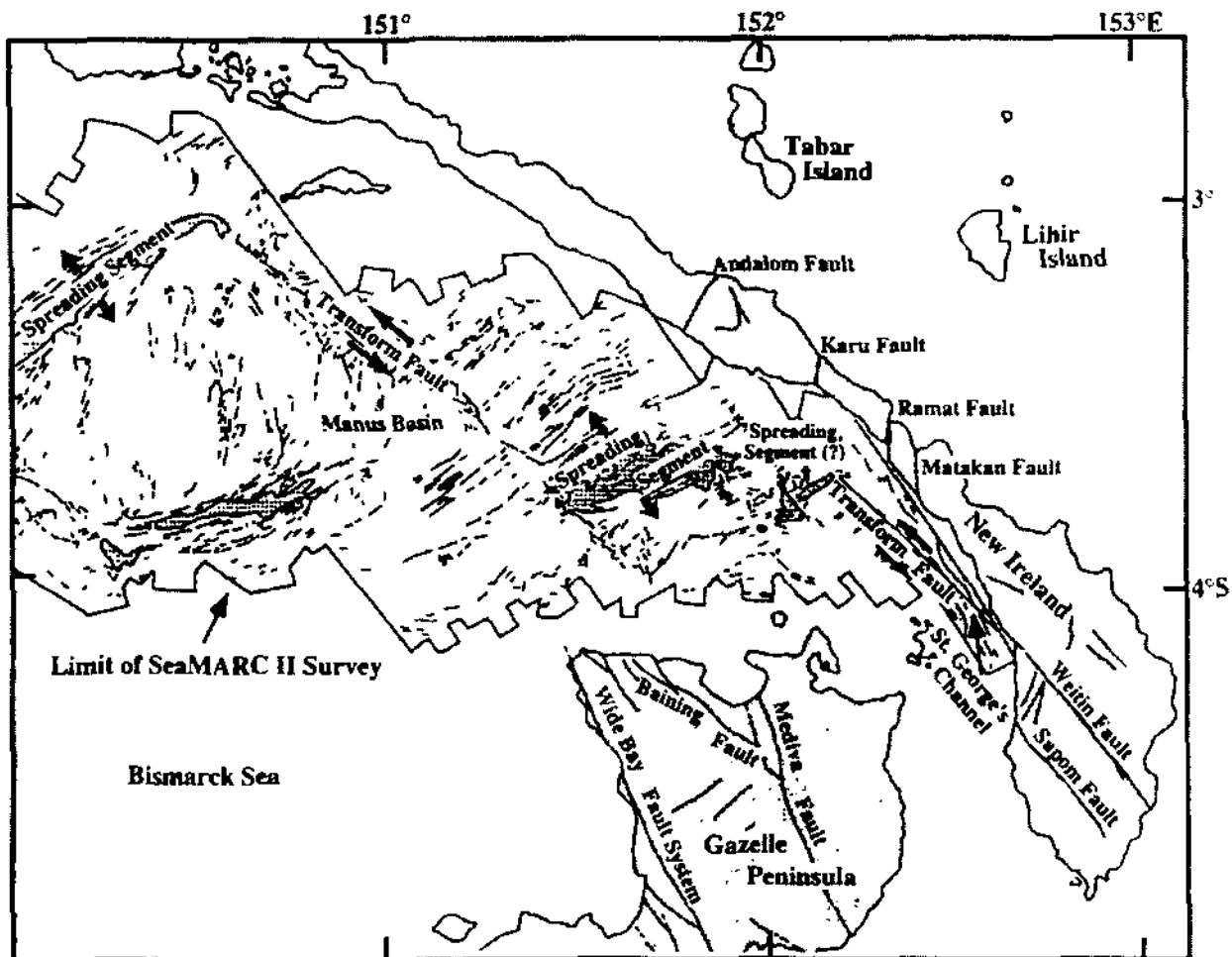


Fig. 2-5. Diagram from Madsen and Lindley (1994) showing the location of spreading segments and transform faults based on interpretation from Sea MARC II sidescan sonar images of the eastern Manus Basin (Taylor *et al.*, 1991). Also shown are major tectonic structures on land for the purpose of detailed comparison. Madsen and Lindley (1994) point to the fact that only the Weitin Fault can be traced on land. Other transform faults do not exactly line up with the structures on land.

2. 삼중합점의 안정성

Velocity space diagram은 삼중합점의 움직임을 이해하는데 유용한 접근방법이다(Cox and Hart, 1986). Bismark Sea plate, Pacific plate, Solomon Sea plate의 경계부로 이루어진 삼중합점이 존재한다고 가정하고, Pacific plate에 상대적인 Bismark Sea plate의 속도($|V|_{BP}$)가 Solomon Sea plate에 상대적인 Bismark Sea palte의 속도($|V|_{SS}$)와 비교하여 같거나, 크거나 작은 세 가지 다른 경우를 고려하였다. 분석 결과 모든 경우에서 해구-해구-변환단층 삼중합점은 불안정한 상태로 판단된다. 이는 세 경계선(Fig. 2-6의 점선)이 velocity space diagram에서 한 점에서 만나지 않는다는 사실에 근거한다. 삼중합점의 불안정성은 판 이동속도의 작은 변화가 판 경계의 배치에 극적인 변화를 이끈다고 예상된다.

삼중합점의 불안정성이 Manus Basin에서의 Weitin, Djaul 변환단층과 주변 육지에서의 다른 단층의 형성과 같은 대규모 지구조적인 변형을 설명한다고 할 수도 있다. 그리고 이를 통해 변환단층에 의해 하부지각과 상부 맨틀의 노출은 Manus Basin의 동쪽 열수광상의 호상형태의 화산활동과 특이한 조성을 설명할 수도 있다.

3. 연구방법

삼중합점이 Manus Basin 내부의 변형을 초래한다는 가정과 삼중합점의 존재를 확인하기 위하여 New Britain Trench의 가장자리 주위를 3 일동안 다중 빔 수심측량 조사(multibeam swath bathymetric survey)를 수행하였다. 특히 Manus Basin의 동쪽지역에서부터 New Britain Trench까지 Djaul, Weitin 단층의 연장성을 조사하였다. 제한된 시간으로 전체지역의 수심측량 조사를 수행할 수 없었다. 따라서 CSIRO의 Ray Binns의 도움으로 그가 제공한 전략적으로 중요한 요충지가 그려진 지역의 상세 지도를 이용하여 탐사를 수행하였다. Fig. 2-7은 본 연구에서 수행된 조사항적을 나타낸 것이다.

수심측량은 12 kHz 음원을 발생시키는 Sea Beam 2000을 이용하여 수행하였다.

TTF Triple Junction

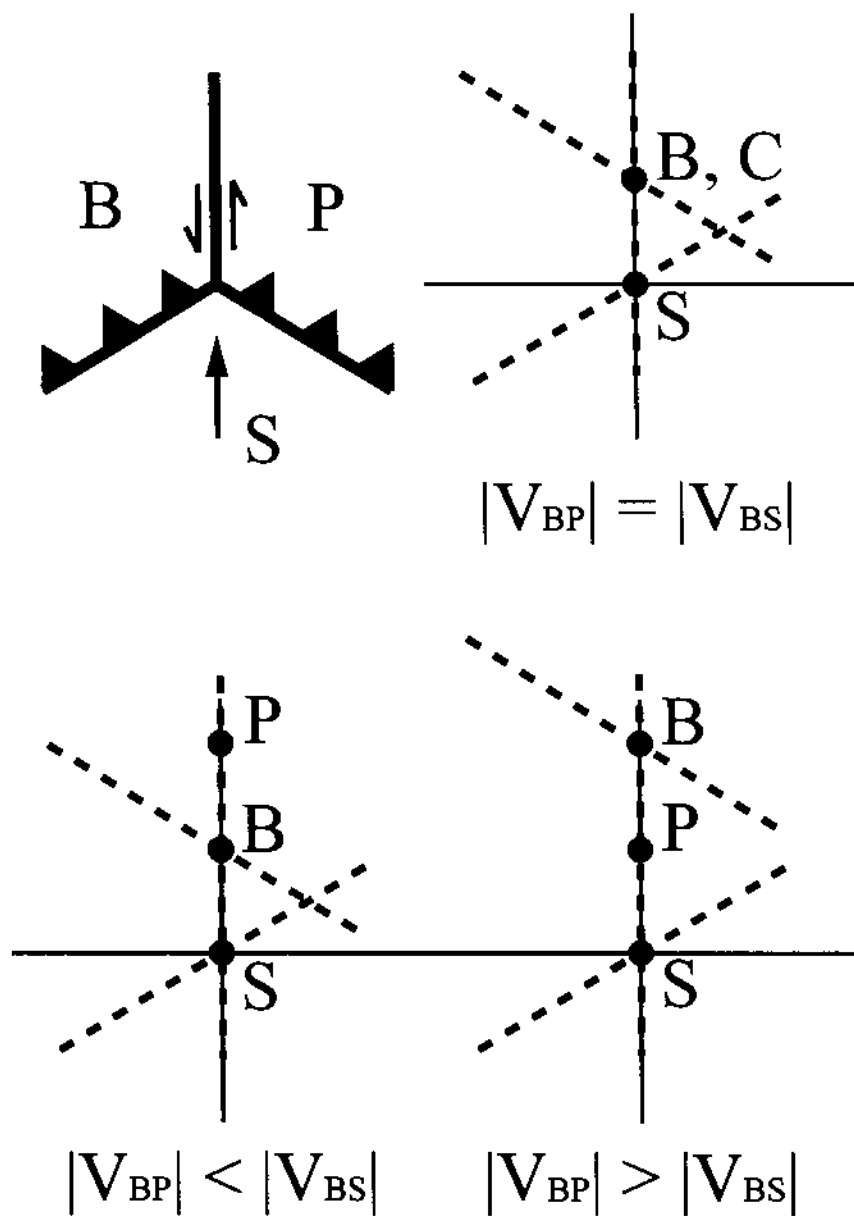


Fig. 2-6. Velocity space diagram of the proposed triple junction. Letters B, P, and S represent the Bismark Sea, Pacific, and Solomon Sea plates, respectively. We consider three cases in which the relative speed between the Bismark Sea and Pacific plates is greater, equal or less than that of between the Bismark Sea and Solomon Sea plates. In all three cases, the plate boundaries (shown as dashed lines) do not meet at one point, suggesting that the trench-trench-transform fault triple junction configuration can not be stable.

Track Line

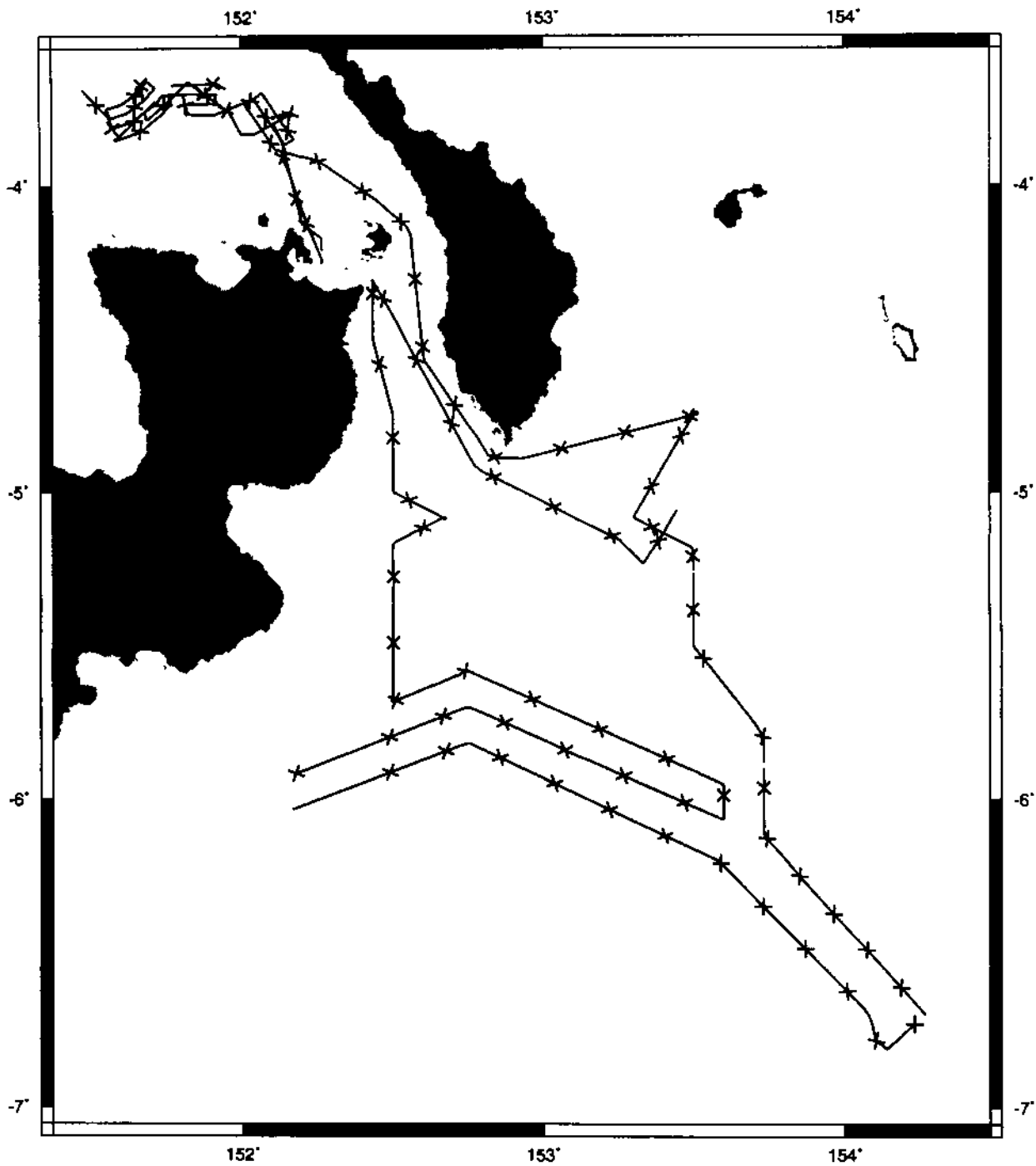


Fig. 2-7. Plot showing the tracklines of R/V *Onnuri* during our survey. The cross symbols represent hourly mark. Except for one occasion, Sea Beam echo-sounder worked well. The first phase of our geophysical survey was conducted outside the Manus Basin, encompassing a large area from the Saint Georges Channel to the New Britain Trench. Multidisciplinary survey of the Manus Basin comprised the second phase of our geophysical survey.

수심정보는 28개로 이루어진 송신기와 84개로 이루어진 수신기 배열로 구성된 121개 빔의 주행시간을 측정하여 획득한다. Sea Beam은 5,000 m 이하의 수심에서 아무런 이상 없이 잘 수행되었다. 수심 5,000 m 이상의 수심에서는 수심측량 자료의 공백을 보이는 핑의 손실이 발생하였다. 이 같은 문제는 앞으로 수심 5000 m 이상되는 지역이나 수심이 급변하는 지역에서는 Sea Beam operation mode를 AUTOMATIC에서 MANUAL로 전환하으로써 피해 갈 수 있다고 판단된다. Sea Beam 2000 자료는 SUN workstation 컴퓨터에서 MBSYSTEM을 이용하여 자료처리되었다. 좋지 못한 자료의 지점은 다중 빔 자료처리 소프트웨어를 이용하여 수동작업으로 일일이 제거하였다. 전체 조사기간동안 항해는 Fugro에 의해 제공된 Seastar 3000L system을 사용하는 DGPS에 의해 이동되었다.

4. Sea Beam 수심측량 결과 및 결론

Fig. 2-8은 본 연구의 첫 단계에서 획득된 Sea Beam 수심 자료를 그린 것이다. 수심의 변화는 New Ireland와 New Britain 사이의 경계주변의 수 백 m에서 New Britain Trench의 Solomon arm에서 9,000 m까지 상당히 심하다. Fig. 2-9, 2-10, 2-11, 2-12은 Fig. 2-8에 각각 Plate 1, 2, 3, 4로 표기된 지역의 상세한 수심도면들이다. 얇은 실선은 100 m간격이고, 굵은 실선은 500 m간격마다 그려진 등고선이다.

본 수심 측량 조사로 몇 가지 새로운 결과를 얻었다.

1. 현재 존재하는 수심 자료에 의해서처럼 Weitin 단층은 해상으로 연속되고, New Ireland의 남동쪽 단층애(escarpment)로 연장된다는 것을 확인할 수 있다. 이 단층애의 수직 낙차는 대략 2,000 m이다(Fig. 2-9). Fig. 2-13은 ETOP 05 수심 자료를 이용하여 연구지역 주변의 해저면을 나타낸 지도이다(National Geophysical Data Center, 1993). Fig. 2-9에서 대략 수심 5,000 m인 New Ireland의 남동쪽 평평한 해저면은 사실 Queen Emma Basin의 한 부분이라는

것을 확인할 수 있다(Vedder *et al.*, 1989).

2. Weitin 단층이 Queen Emma Basin을 지나서까지 확장되는지는 의문이다. 첫째, Weitin 단층을 계속 추적해 보면 얼마 안가서 높은 지형과 만나게 된다. 둘째, Queen Emma Basin의 남쪽경계는 북쪽과 다른 주향을 가진 또 다른 단층애가 나타난다. 이 같은 사실은 Queen Emma Basin이 두 단층애에 의해 능면체의 형태를 지녔음을 제시한다.
3. Weitin 단층이 New Britain Trench로 연장되지 않는다는 것에 대한 결정적인 증거는 Queen Emma Basin의 남쪽에서 일련의 antithetic 지구대가 나타난다는 것이다. 본 조사에서 우리는 적어도 두 개의 지구대가 Queen Emma Basin의 남쪽경계와 New Britain Trench 사이에서 확인될 수 있다. 이 지구대는 2,000 m의 낙차를 가지고 있으며, en echelon 단층처럼 분포하고, 남쪽으로 left-lateral step 하는 형태를 보이고 있다. 우리는 이 지구대를 Queen Emma Graben(new name, QEG)으로 명명한다(Fig. 2-13). 이 지구대는 지각확장과 더불어 QEG를 따라 주향이동을 한 흔적을 보인다. 이는 지구대 중앙에서 나타나는 비스듬한 분지로부터도 확인할 수 있다. 하지만 중요한 점은 이처럼 QEG를 따라 생긴 주향이동 방향이 left-lateral(sinistral)이라는 점이다. 이는 Weitin 단층의 방향과 상반된다는 점에서 매우 특이하다. 또 Weitin 단층 구조의 전반적인 주향은 NW-SE방향인 반면, QEG는 NNW-SSE방향이다.
4. New Britain의 동쪽분지에도 새로운 분지가 나타나는데 이 또한 확장 용력에 의해 형성된 것으로 생각된다(Fig. 2-11). 그리고 Queen Emma Basin처럼 이 분지의 중앙은 평평하고, 단층이나 단층애에 의해 분지가 둘러싸여 있는 형태를 지니고 있다. 우리가 수행한 Sea Beam 관측은 분지 가장 자리 일부분에 해당되지만, 우리는 이를 통해 볼때 이 분지가 Queen Emma Basin에 비해 두드러진 차이를 보인다는 것을 알 수 있다. 이 분지의 수심은 평균 3,700 m이고, Queen Emma Basin보다 수심이 얕다. Queen Emma Basin과는 달리 이 분지를 둘러싼 단층애의 경사는 완만하고, 더 큰 구배를 지닌다. 이러한 사실들은 이 분지가 Queen Emma Basin보다 훨씬 오래전에 형성되었음을

의미한다. 이 분지의 존재가 이미 오래전부터 알려져 왔지만, 이름이 주어지지 않아, 본 탐사에서 우리는 이를 Saint Geroges Basin(SGB)로 명하기로 한다(Fig. 2-13). 이는 이 분지가 Saint Geroges Channel의 남쪽에 위치하기 때문이다.

5. 수심측량의 또 다른 중요한 결과는 New Britain Trench를 따라 수심 10 km 이상 되는 지역을 발견할 수 없었다는 것이다. 수 십 년 전에 실시한 수심측량에서 New Britain Trench를 따라 수심 10 km 이상이 되는 지역을 찾았다는 독일인 보고가 있었다. 그들은 이 지역을 Planet Deep이라 명명하였지만, 본 탐사에서는 Planet Deep에 대한 증거, 즉 수심이 10 km 이상되는 지역을 발견할 수 없었다(Fig. 2-10, 2-11 and 2-12). 본 조사에 의하면 New Britain Trench 주변의 최대 수심은 약 9,000 m이고, 이 같은 최대 수심은 QEG와 New Britain Trench의 교차지점에서 발견되었다.
6. 마지막으로, 본 수심측량 탐사에서 우리는 New Britain Trench의 전호분지는 해구에 수직으로 흐르는 불규칙하게 위치한 협곡을 발견하였다(Fig. 2-10, 2-11, 2-12). 더욱이 이들 협곡들은 거의 규칙적으로 나타나는 것 같이 보인다. 이 같은 일련의 협곡들은 전호분지의 각주의 상부경사면에 마치 해안가에서 나타나는 침점(cusp) 같은 모양을 이룬다. 이런 지형의 기원은 알려지진 않았지만, 해저협곡에서처럼 침식에 의해 형성되었을 가능성이 제기되었다. 그러나 그러기에는 협곡들이 New Ireland 해안가로부터 멀리 떨어져 있어 이 같은 해석에 문제가 있다. 다른 가능성은 전호분지에서 만들어진 확장응력의 강약에 의해 발생한 침식과 사태에 의한 것이다.

결과적으로 본 탐사에서 수행된 Sea Beam 조사에 의해 새롭게 밝혀진 주요 해저 지형 구조들을 Fig. 2-14에 나타내었다.

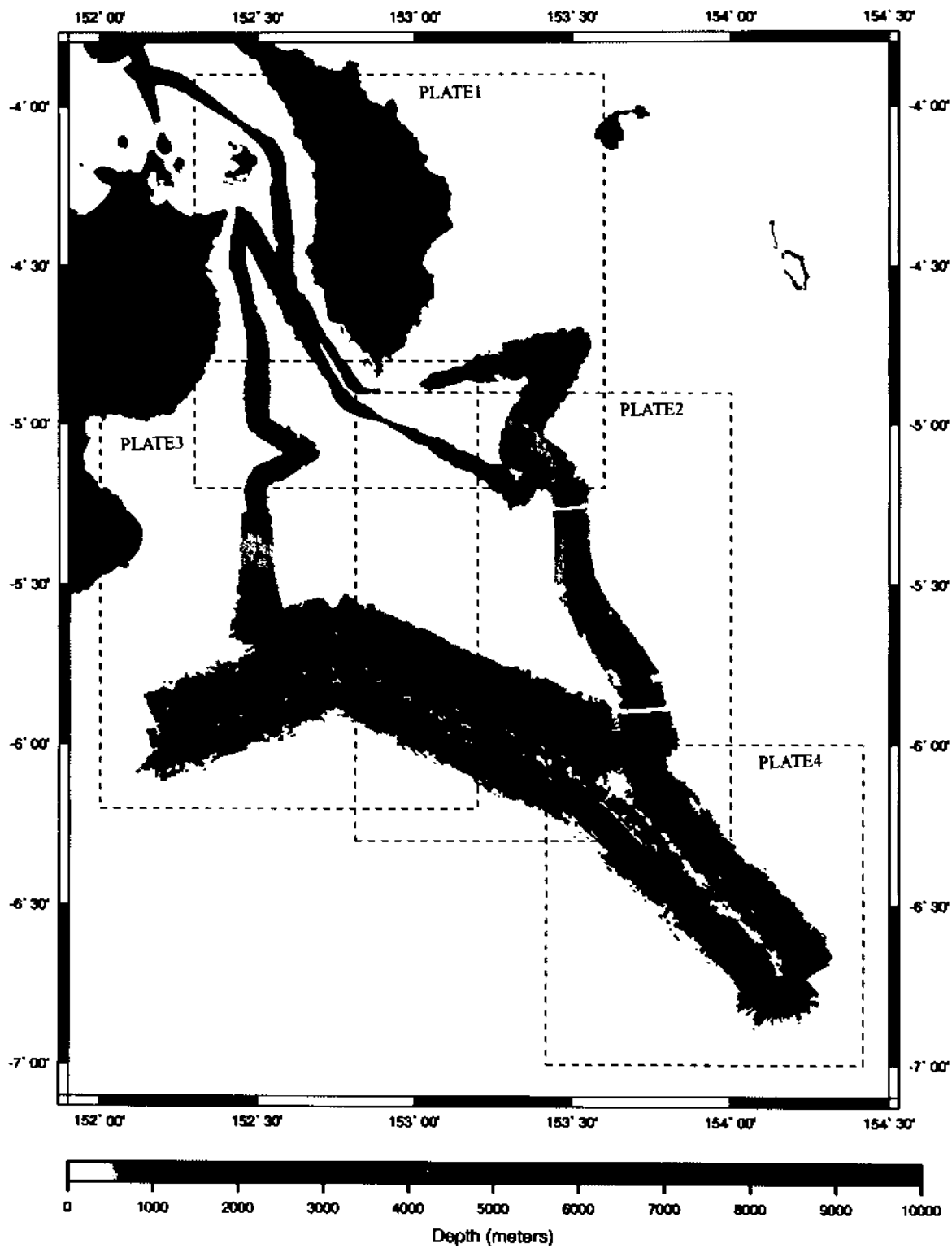


Fig. 2-8. Plot showing the Sea Beam bathymetry that was collected during the first phase of the geophysical survey. The detailed map of the survey area is represented in four plates(Figs. 2-9, 2-10, 2-11 and 2-12).

PLATE 1

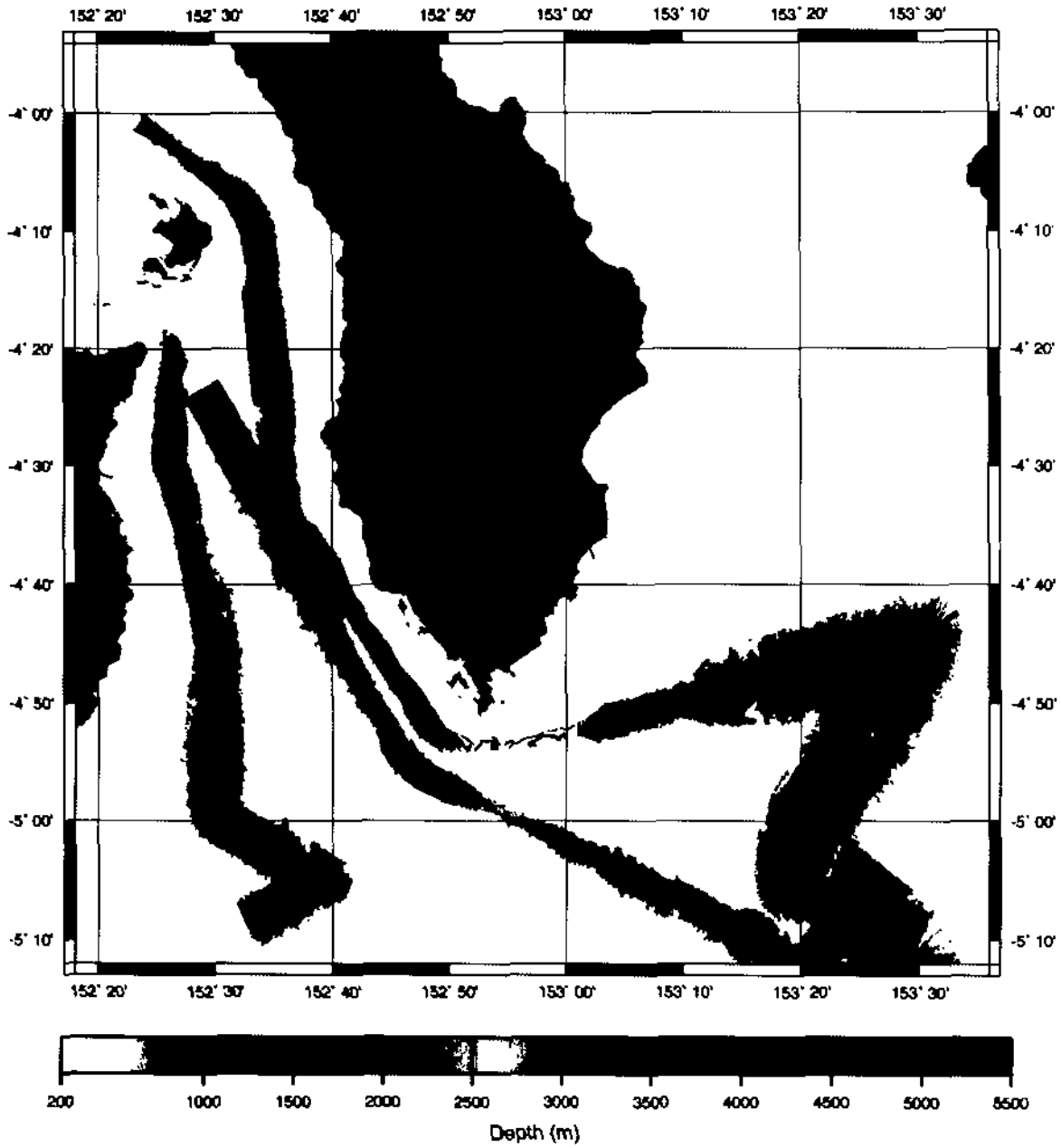


Fig. 2-9. Detailed bathymetric map of an area corresponding to PLATE I in Fig. 2-8. The contours are at 100 m interval.

PLATE 2

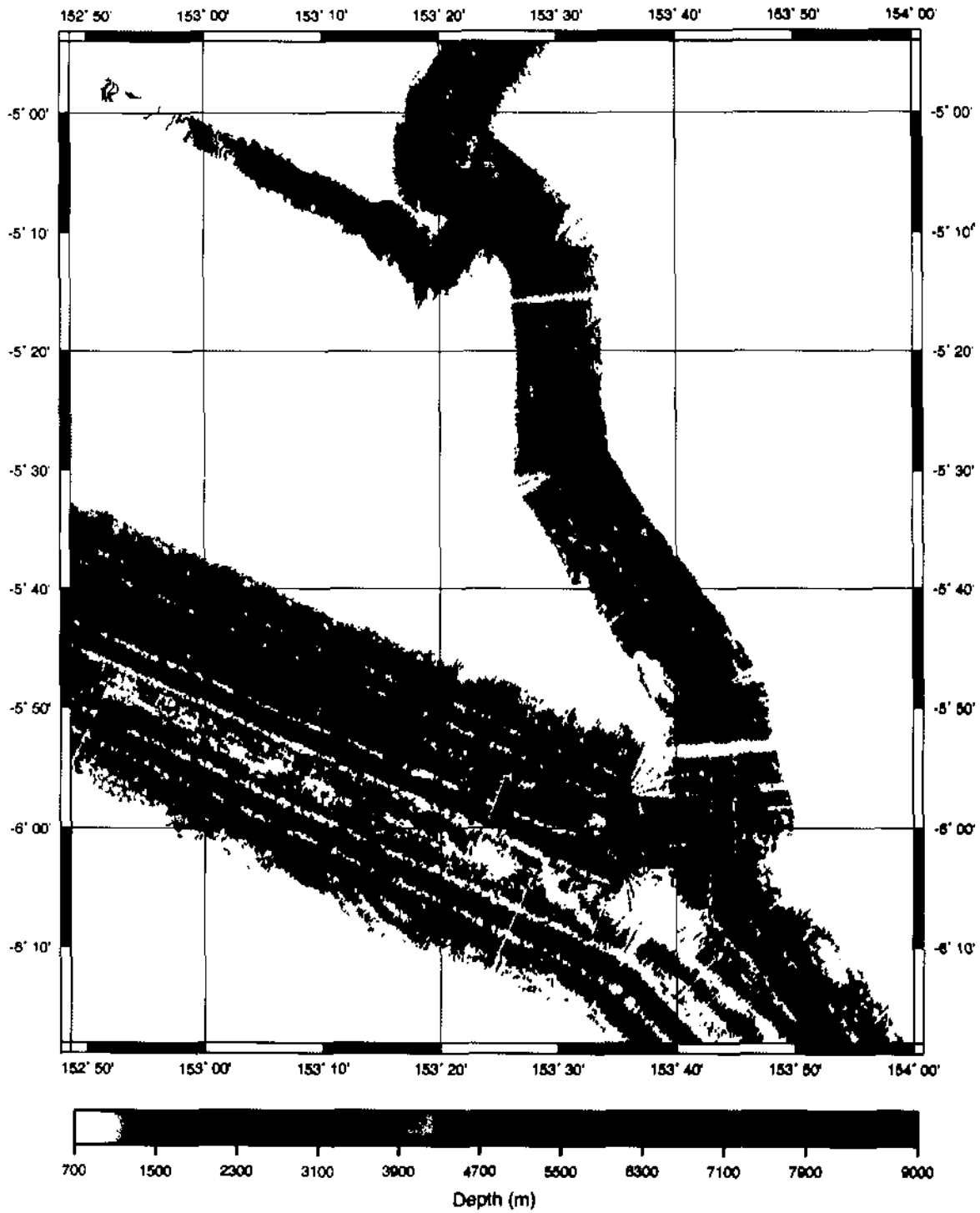


Fig. 2-10. Detailed bathymetric map of an area corresponding to PLATE 2 in Fig. 2-8. The contours are at 100 m interval.

PLATE 3

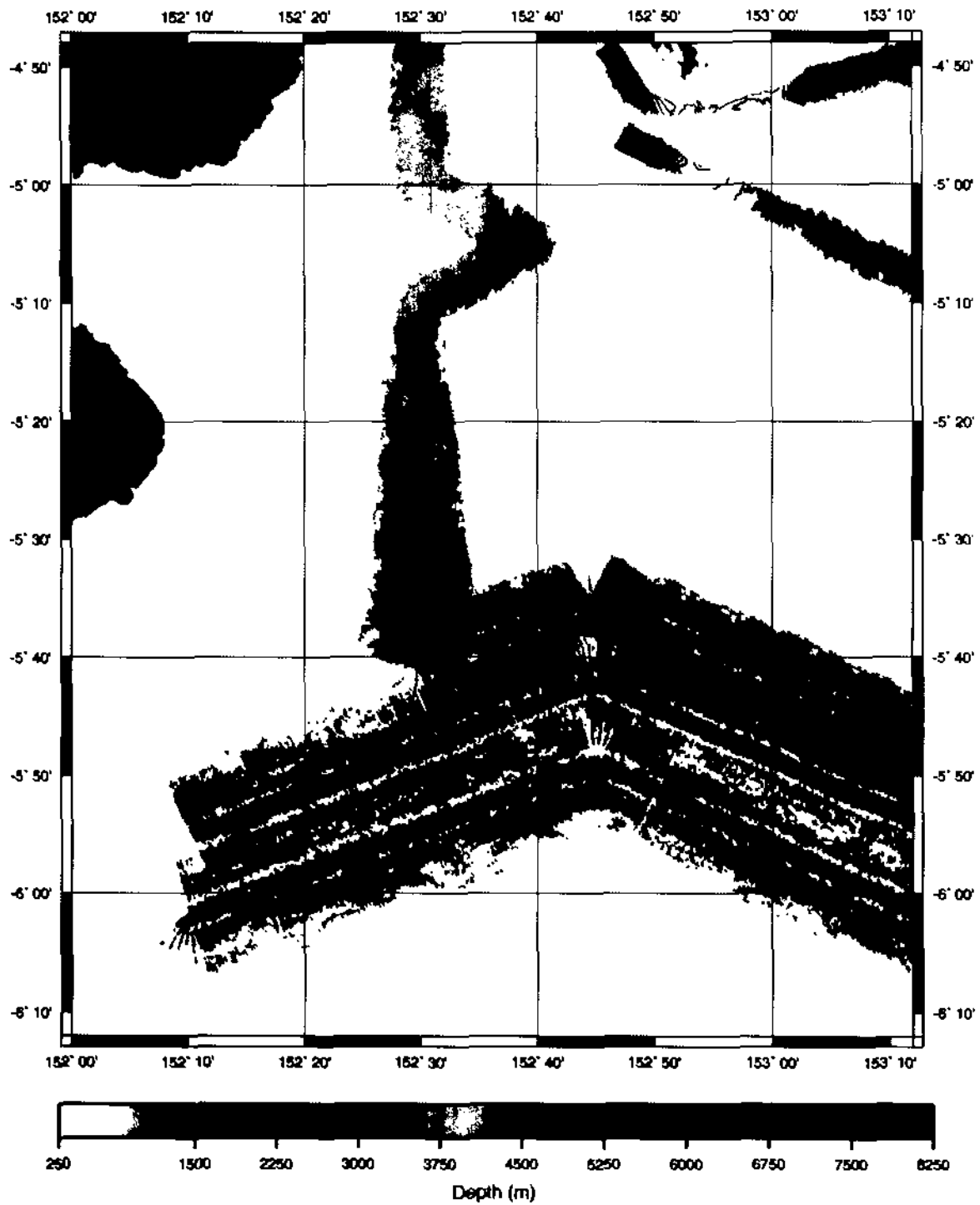


Fig. 2-11. Detailed bathymetric map of an area corresponding to PLATE 3 in Fig. 2-8. The contours are at 100 m interval.

PLATE 4

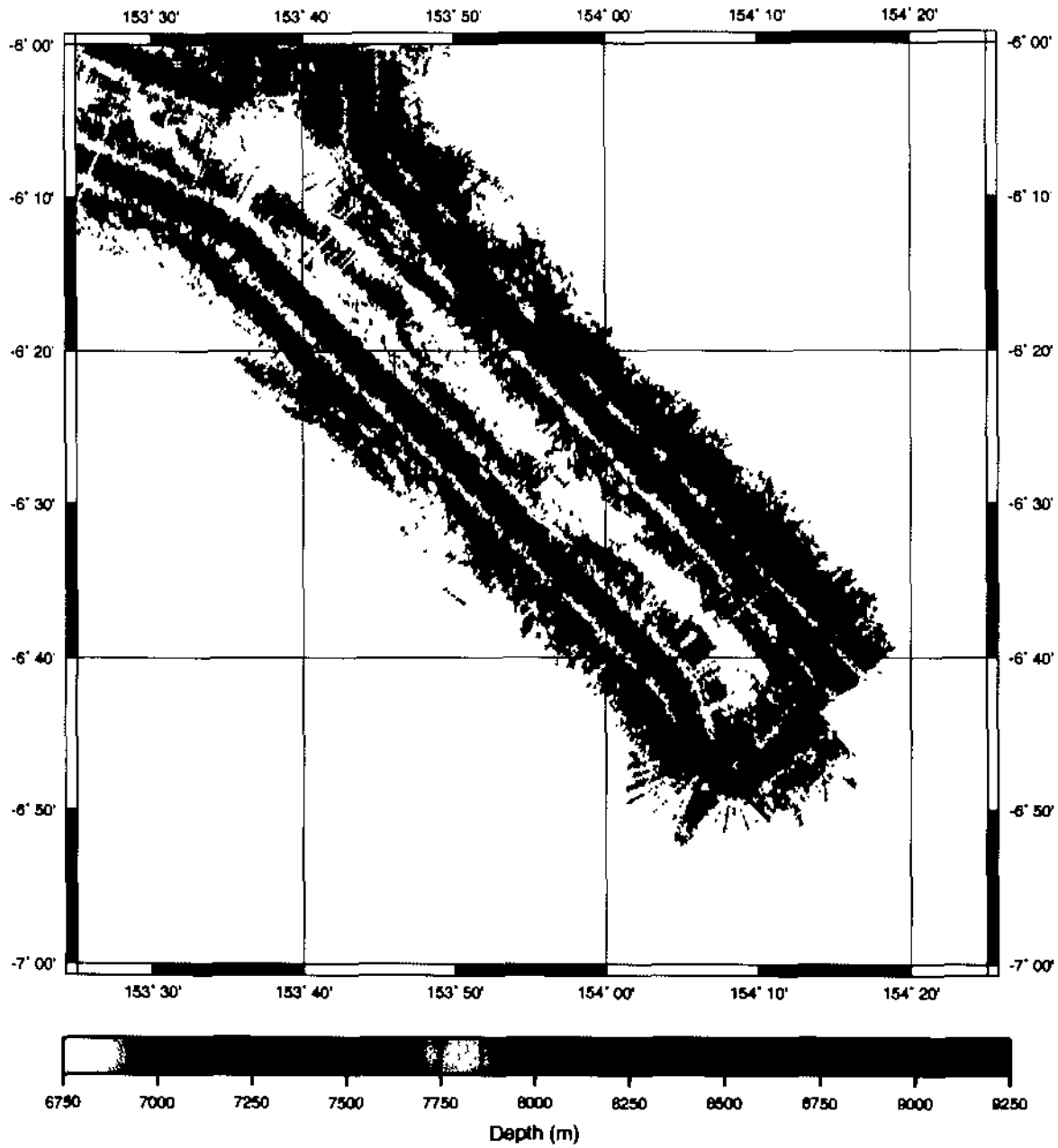


Fig. 2-12. Detailed bathymetric map of an area corresponding to PLATE 4 in Fig. 2-8. The contours are at 100 m interval.

제 3 절 제 2단계 지구물리 탐사

1. Manus Basin의 수심측량

제 2 단계 지구물리 탐사에서 Manus Basin 내에서 얻은 Sea Beam 수심자료와 자기장 자료를 처리 분석하였다. Fig. 2-15는 Manus Basin의 동쪽지역의 다중 빔 수심측량지도이다. Fig. 2-15는 수중 카메라 조사와 시료채취를 수행한 세 열수 분출 지역을 포함한다. 물론 기존의 조사에서도 Sea Beam 지형도를 획득했지만 본 탐사에서 얻은 자료는 이들 보다 훨씬 정확한 것이다. 한 예로 일본의 Sakai와 Tamaki가 조사선 R/V Hakuho Maru에 장착된 16-beam 다중 빔 시스템을 이용하여 1990년대 초 이 지역에 대한 다중 빔 지도를 만들었지만, 우리 시스템이 더 좁은 각도의 빔 폭을 가지고 있고, 항해경로가 DGPS 항법에 의해 측정되었으므로 큰 정확도를 지니고 있다. 본 탐사에서 얻은 PACMANUS 주위에 대한 새로운 수심측량지도는 장차 있을 ODP 굴착 작업 수행에 중요한 자료가 되리라 예상된다.

2. 자기장 분석 결과 및 결론

Fig. 2-16은 Manus Basin 동쪽지역의 자기장 이상을 나타낸 것이다. 이 지역에 대한 자기장 조사가 이전에도 있었지만(Martinez and Taylor, 1996), 과거의 것들은 비교적 축선 간격이 넓고 열수분출지역을 정확히 관통하지 않아 본 탐사에서 얻은 자료에 비해 해석의 정확도가 떨어질 수 밖에 없다. Fig. 2-16에서의 자기장 이상치는 International Geomagnetic Reference Field(IGRF)에 의해 지역 자기장 변화를 제거한 결과이다.

일반적으로 지자기장을 얻은 후 역산을 수행하는 것이 보편화된 분석 방법이다. 그러나 Manus Basin의 경우 해저의 자화 강도를 얻어 자기장의 역산을 포함하여 자기장의 세심한 분석을 수행하는데는 몇 가지 어려움이 있다. 먼저, Manus Basin은 자기적도 근방에 위치한다. 그 결과 자기장의 규모는 39,000에서 40,000 nT로 일반적으로 낮은 값들을 가진다. 참고로 본 연구지역의 지구자기장의

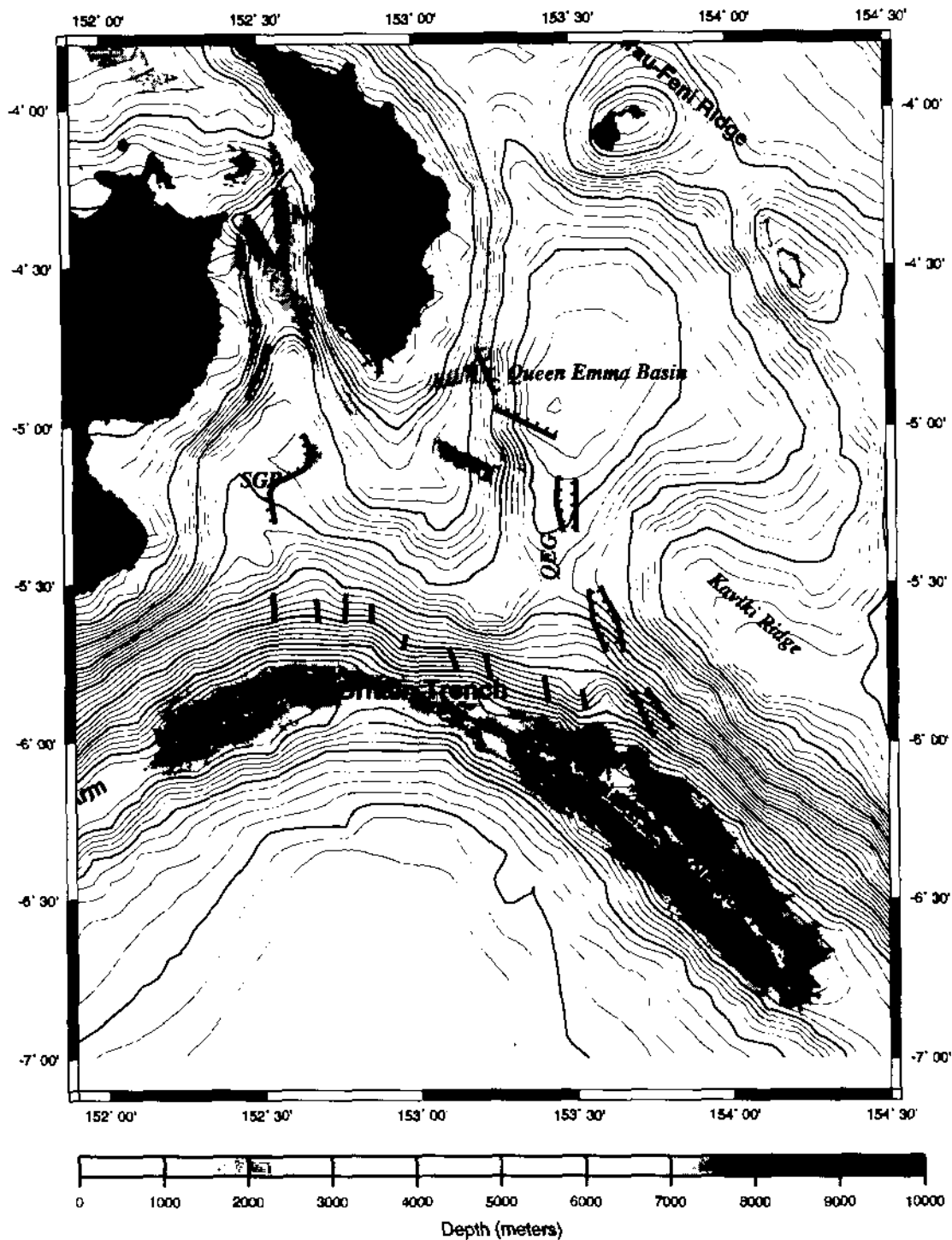


Fig. 2-14. Tectonic interpretation based on our Sea Beam bathymetric survey, showing the location of QEG and SGB. A series of cross cutting channels are depicted on the upper slope of the New Britain forearc prism.

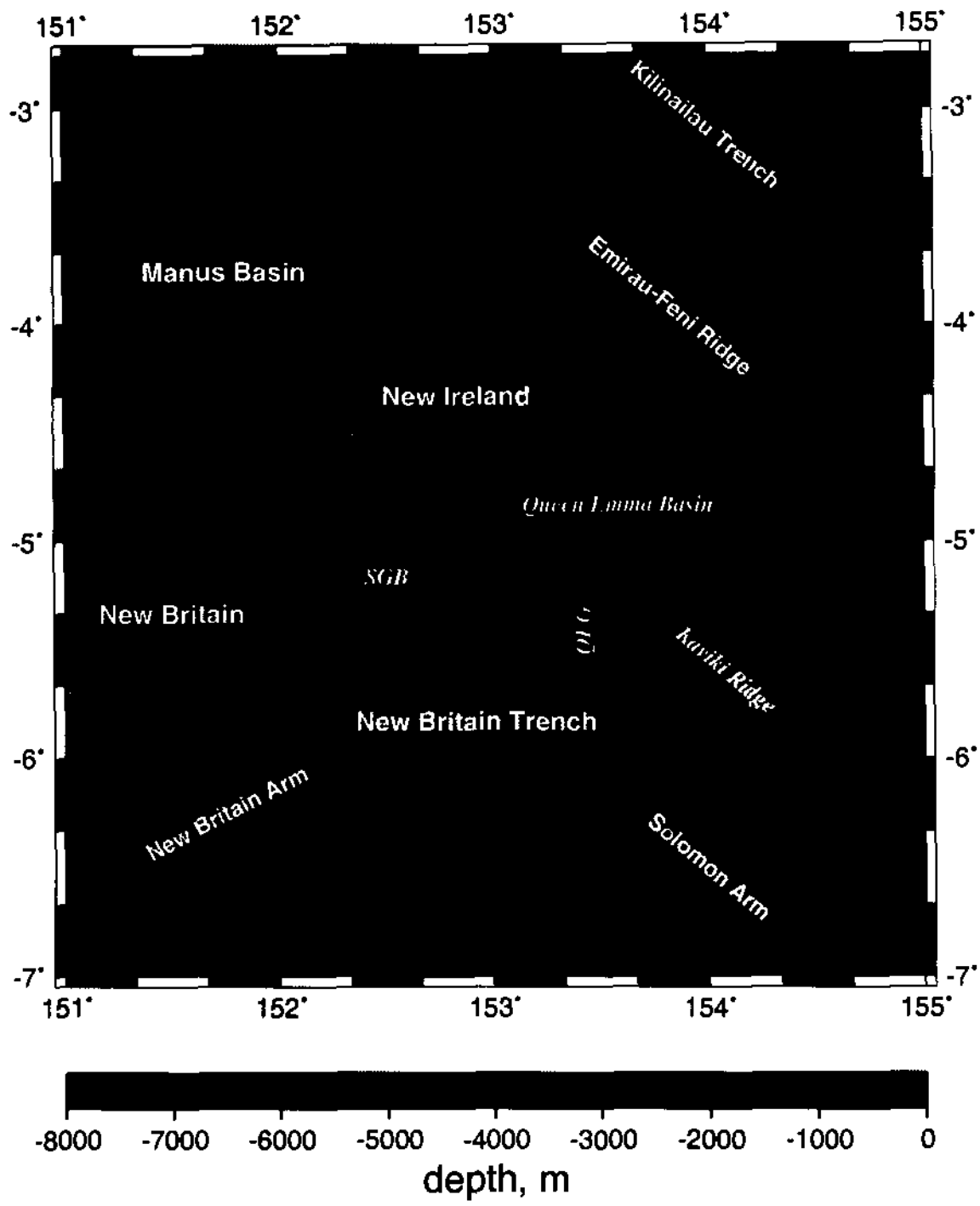


Fig. 2-13. Bathymetric chart of the area around the Manus Basin and New Britain Trench based on ETOPO5 regional hydrographic data (National Geophysical Data Center, 1993). Shown in the chart are the names of topographical features discussed in the text. We refer to the western side and eastern side of the New Britain Trench as the New Britain Arm and Solomon Arm, respectively. Two new names are proposed. We refer to the sets of graben to the south of Queen Emma Basin as Queen Emma Graben(QEG). The basin east of the New Britain is given a new name. We refer to it as the Saint Georges Basin(SGB).

Manus Basin - KORDI 1999

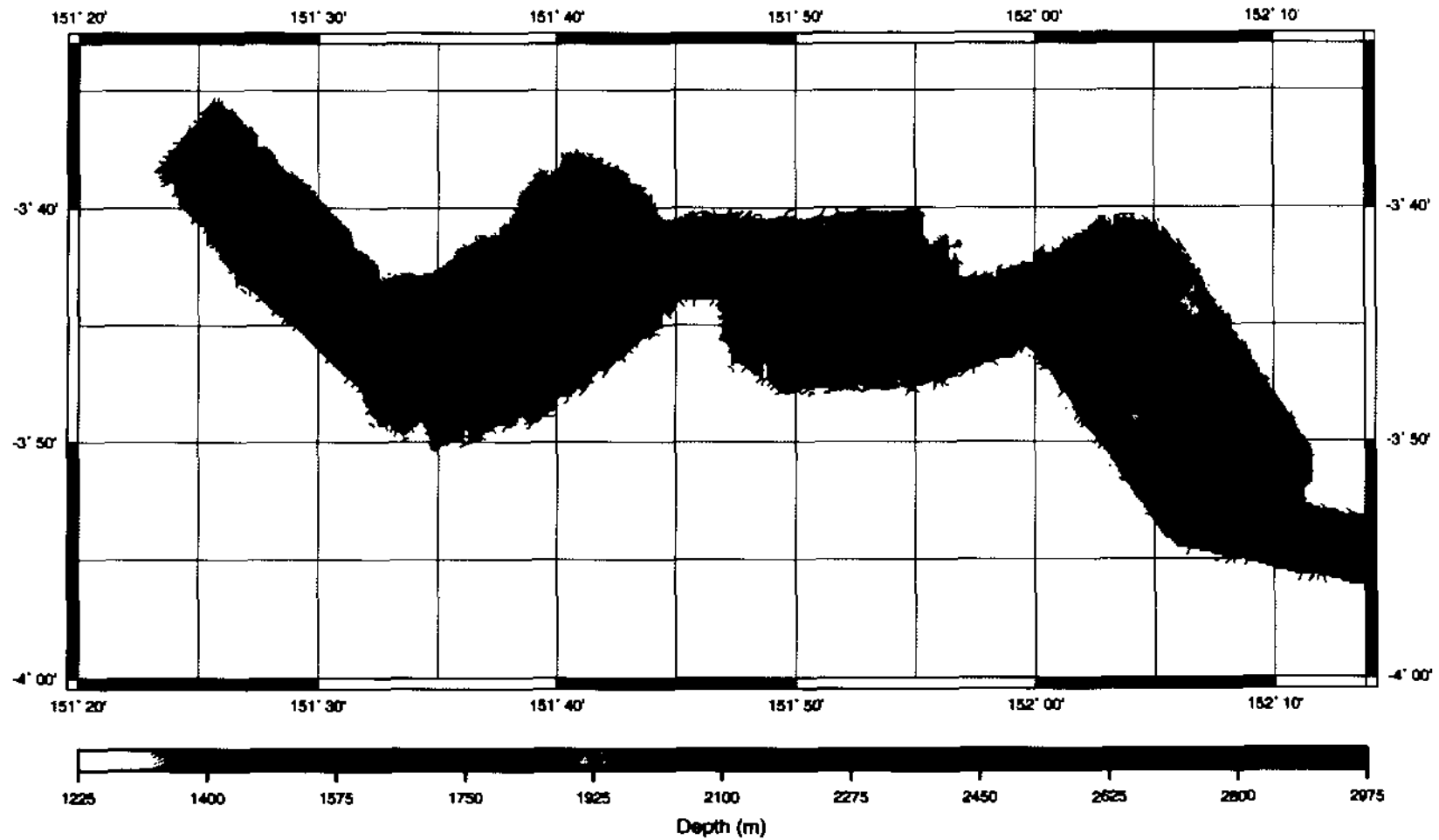


Fig. 2-15. Multibeam bathymetric map of the eastern Manus Basin. The contours are drawn at 50 m interval. The three well known hydrothermal vent fields are clearly visible: they include: PACMANUS, DESMOS and Susu Knolls.

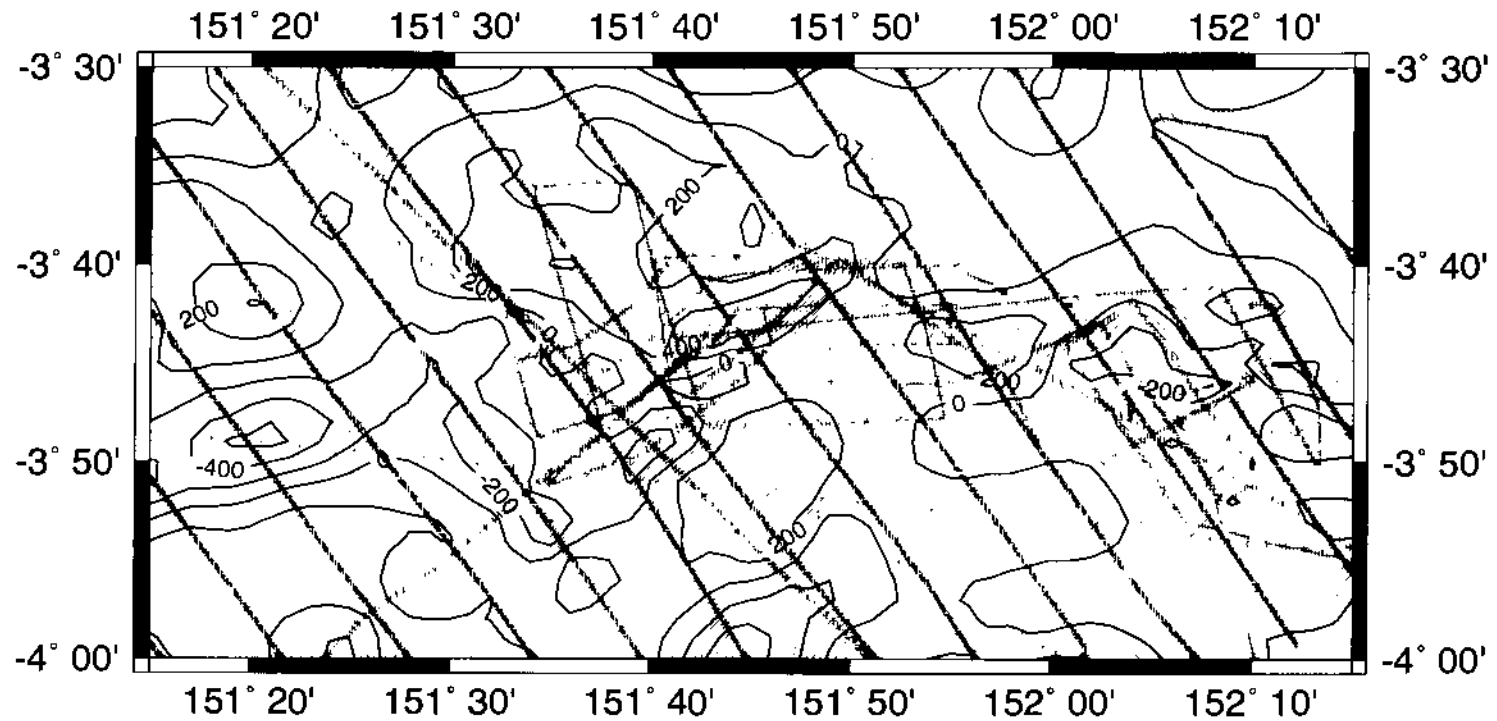


Fig. 2-16. Magnetic field anomaly of the survey area after correcting for the regional field variation(IGRF).
The cross symbols represent points of measurement.

북각, 편각은 각각 -23° , 7° 이다. 둘째로, 중앙해령과 달리 마그마 활동이 한 곳 내지 몇몇 일정한 곳에서 올라오는 근원이 없다. 그러므로 우리가 해저의 이동방향과 지각연령을 측정 또는 유추하는데 어려움이 있다.

이러한 어려움을 안고, 획득된 자기장 이상치와 비교하여 몇 개의 정모델링을 시도하였다. 우리가 사용한 정모델링에서는 자기층의 근원이 일정한 두께를 가지고 지형의 기록을 따른다고 가정하였다. 이를 위해 우리는 Fourier 영역에서 지형을 표시하여 계산한 Parker(1972)의 3-D 정모델링 계산을 이용하였다. 이 방법은 중앙해령에서의 자기 이상도 해석에 폭넓게 이용되는 방법이다(e.g., Lee et al., 1996; Lee and Searle, 2000).

지자기 모델링에 앞서 우리는 Manus Basin 내에 전체적인 지형도를 구축하였다. Fig. 2-17은 National Geophysical Data Center로부터 현재 보유한 자료와 본 연구에서 획득한 Sea Beam 자료를 합성하여 작성한 수심지도이다. 본 연구에서는 두 개의 정모델링 계산을 수행하였다(Fig. 2-18). 두 경우 모두 자기 근원을 120 m 두께로 가정하였고, 자화강도를 1 A/m 으로 일단 가정하였다. 먼저 자화방향이 지구자기장의 방향에 평행하다고 가정하였다. 다시 말해 지구자기장의 편각과 북각을 각각 -23° , 7° 로 사용하였다. 두 번째 예에서는 본 연구지역에서 7° 인 편각과 0° 인 북각과 일치하는 지구중심 축의 이중극(geocentric axial dipole)의 방향에 일치시켜 자화 방향을 가정하였다(Merrill and McElhinny, 1983).

정모델링의 결과는 Manus Basin에서의 지형에 의해 발생하는 자기장 효과를 무시할 수 없음을 볼 수 있다. 자기 이상의 분포가 복잡해 보이지만, 우리는 여기서 앞으로 지자기장을 좀더 자세히 분석하는데 있어서 저온에서의 변질, 자기 근원의 차, 그리고 자성 근원층의 두께의 변화에 의해 자화강도의 변화와 같은 요소를 고려해야 한다는 점을 확인 할 수 있었다.

본 탐사 지역을 중심으로 볼 때 지자기장 값이 가장 높게 나타나는 지역은 PACMANUS 열수분출지역을 포함한 Pual Ridge 부근이고 그 다음이 DESMOS 지역이다 (Fig. 2-16). 특히 Pual Ridge 북쪽이 상당히 높은 지자기장 값을 나타내는데 이 원인에 대해서는 현재 알 수 없다. 반면 Susu Knolls 지역은 의외로 낮은 지자기장 값을 보이는데 이는 아마도 DESMOS 동쪽에서부터 기반암이 달라지기 때문이 아닌가

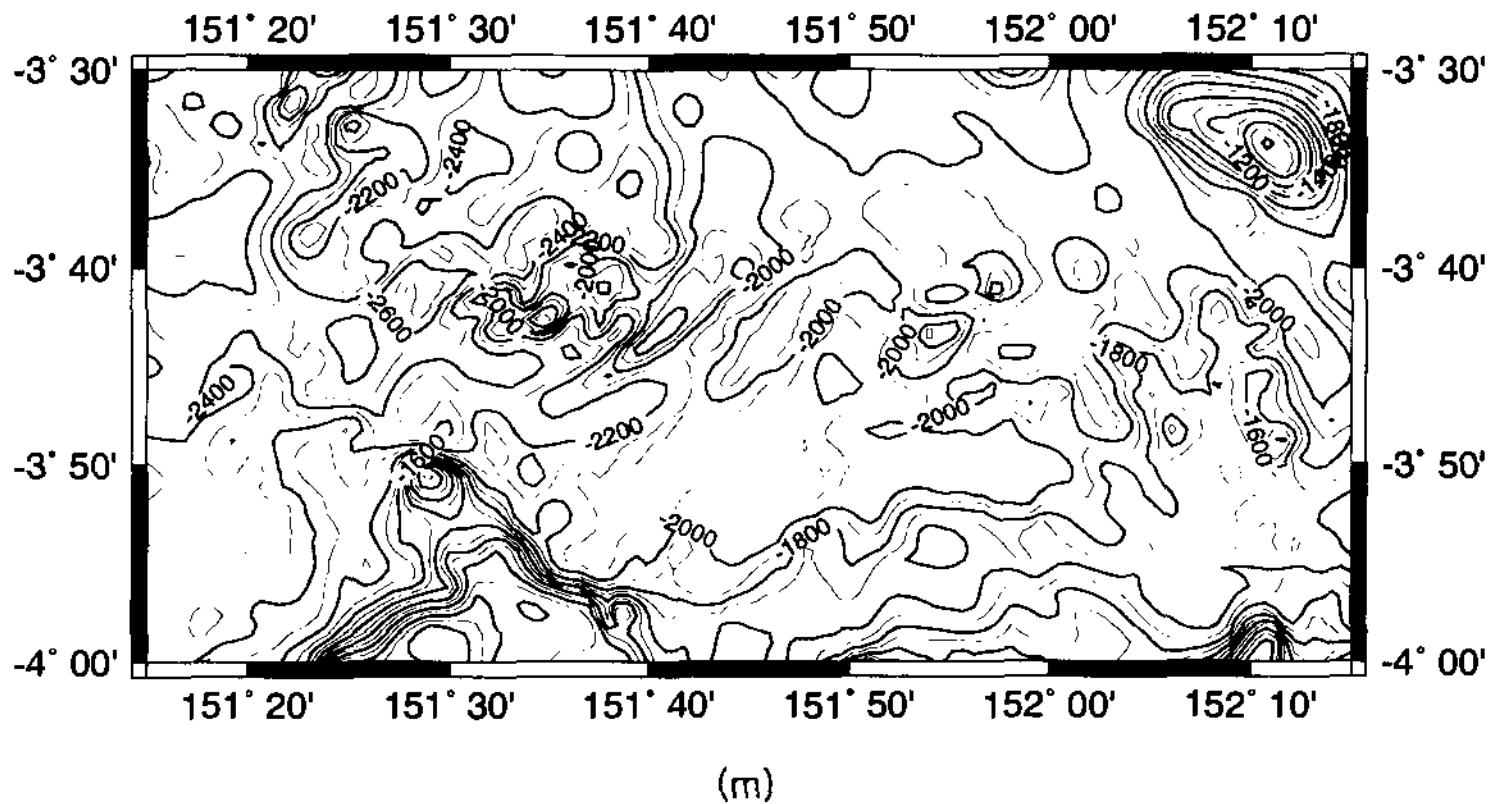


Fig. 2-17. Bathymetric map used in the forward model of magnetic field. The map was compiled by combining our Sea Beam data and the existing data obtained from the National Geophysical Data Center in Boulder Colorado.

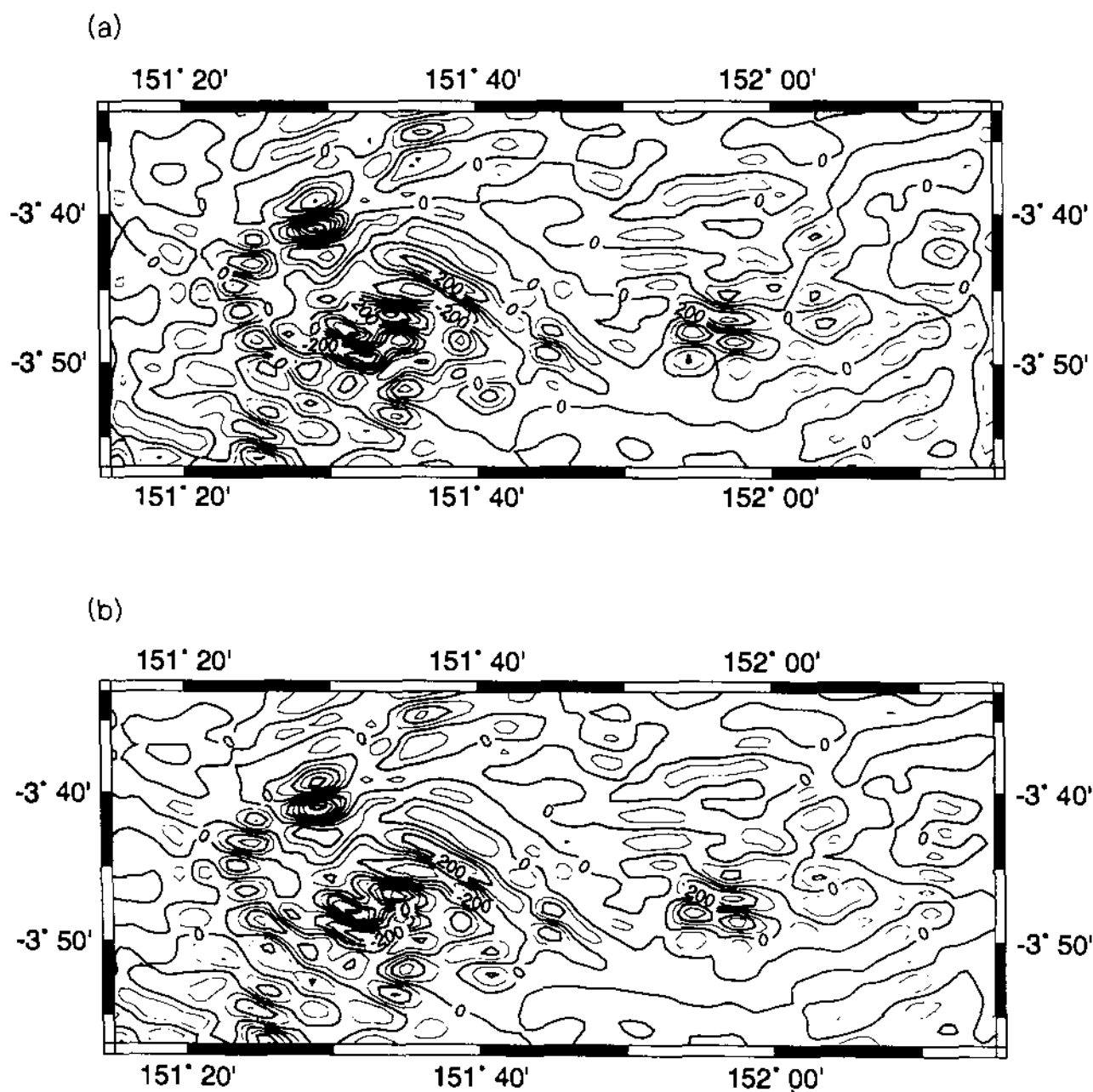


Fig. 2-18. Magnetic field anomalies resulting from our forward modeling. In (a) we assumed that the magnetization direction corresponds to the present Earth field, whereas in (b) we assumed that it corresponds to geocentric axial dipole.

사료된다. 실제 암석 시료의 화학분석 결과를 보면 Susu Knolls 지역 암석이 PACMANUS와 큰 차이가 없다고 나타나지만, Susu Knolls 열수 구릉의 규모가 그 다지 크지 않아 아무리 그 자체의 자화 강도가 높더라도 전반적인 지자기장 값에는 큰 영향을 주지 못하리라 예상된다. 과거 호주 CSIRO 조사에 의하면 실제 Manus Basin 내 어느 지점을 경계로 기반암이 달라지는 것 같다는 연구가 있었는데 이 경계가 대략 DESMOS 동쪽이 아닌가 추측된다.

현재 지자기장 분석은 앞에서도 언급하듯이 암석 자화 방향을 정확히 모르기 때문에 인해 어려움이 있다. 우리가 본 탐사에서 얻은 암석 시료로는 절대값 밖에 얻을 수 없지 방향성(orientation)을 알 수 없다. 2000년 말에 예정된 ODP 굴착이 성공리에 수행될 경우, 우리는 자화 방향을 얻을 수 있어 제대로 된 지자기 이상치 분석과 해석이 가능하다.

참 고 문 헌

- Circum-Pacific Map Project, 1986. Plate-tectonic map of the Circum-Pacific region, southwest quadrant, AAPG, scale 1:10,000,000.
- Cooper, P., and B. Taylor, 1987. Seismotectonics of New Guinea: A model of arc reversals following arc-continent collision, *Tectonics*, 6, 53-67.
- Cox, A., and B. R. Hart, 1986. *Plate Tectonics: How It Works*, 329 pp., Blackwell, Palo Alto, CA.
- Hannington, M. D., I. R. Jonasson, P. M. Herzig, and S. Peterson, 1995. Physical and chemical processes of seafloor mineralization at mid-ocean ridges, in *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions*, Geophys. Monogr. Ser., vol. 91, edited by S. E. Humphris et al., pp. 115-157, AGU, Washington, D.C..
- Herzig, P. M., and M. D. Hannington, 1995. Polymetallic massive sulfides at the modern seafloor: A review, *Ore Geology Reviews*, 10, 95-115.
- Kroenke, L. W., 1984. Cenozoic tectonic development of the southwest Pacific: United Nations, CCOP/SOPAC Technical Bulletin No. 6, 122 pp.
- Kroenke, L. W., C. Jouannic, and P. Woodward, 1983. Bathymetry of the southwest Pacific, Chart 1 of the geophysical atlas of the southwest Pacific: Committee for Coordination of Joint Prospecting for Mineral Resources of South Pacific Offshore Areas, Honiara, Solomon Islands, Mercator Projection, Scale at the Equator 1:64422192, one sheet.
- Lee, S.-M., S. C. Solomon, and M. A. Tivey, 1996. Fine-scale crustal magnetization variations and segmentation of the East Pacific Rise, 910-950N, *J. Geophys. Res.*, 101, 22,033-22,050.
- Lee, S.-M., and R. C. Searle, Crustal magnetization of the Reykjanes Ridge and implications for its along-axis variability and the formation of axial volcanic ridges, *J. Geophys. Res.*, in press, 2000.

- Martinez, F., and B. Taylor, 1996. Backarc spreading, rifting, and microplate rotation between transform faults in the Manus Basin, Mar. Geophys. Res., 18, 203-224.
- Merrill, R. T., and M. W. McElhinny, 1983. The Earth's Magnetic Field: Its History, Origin and Planetary Perspective, 401 pp., Academic, San Diego, Calif.
- National Geophysical Data Center, 1993. GEODAS CD-ROM worldwide marine geophysical data, 2nd edition, Data Announcement 93-MGG-04, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, Boulder, Co.
- Parker, R. L., 1972. The rapid calculation of potential anomalies, Geophys. J. R. astr. Soc., 31, 447-455.
- Taylor, B., 1979. Bismark Sea: Evolution of a back-arc basin, Geology, 7, 171-174.
- Taylor, B., Crook, K. A., Sinton, J. M., Peterson, L., Mallonee, R., Kellog, J. N., and F. Martinez, 1991. Manus Basin, Papua New Guinea, Sea MARC II Sidescan Sonar Imagery, Bathymetry, Magnetic Anomalies, and Free-Air Gravity Anomalies, 1:1,000,000, Pacific Seafloor Atlas, Hawaii Institute of Geophysics, Honolulu.
- Taylor, B., Mallonee, R., Crook, K., and J. Sinton, 1987. The Manus Microplate, Eos, Trans. Am. Geophys. Union, 68, 1476.

제 3 장 해수 특성

제 1 절 재료 및 방법

제 2 절 결과 및 고찰

제 3 절 결 론



제 3 장 해수특성

해수특성 연구는 남서태평양 해역(동경 151° 41' ~ 152° 06', 남위 3° 40' ~ 3° 47')의 12개 정점에서 수온, 염분, 투명도, pH, 무기영양염류 및 황화수소(H₂S) 등을 분석하였다. 연구해역은 해저화산활동이 활발한 해역으로 알려져 있는 Papua New Guinea 비스마르크 해역으로 PACMANUS, DESMOS 그리고 Susu Knolls 등을 포함한다.

해저열수작용(seafloor hydrothermal system)은 1977년 갈라파고스 해역에서 심해잠수정 'Alvin'에 의해 직접적인 증거가 확인된 이후 동태평양 해령(Von Dann *et al.*, 1985; Bowers *et al.*, 1988; Charlou *et al.*, 1991)과 서태평양 해역(Horibe *et al.*, 1986; Pichler *et al.*, 1999) 그리고 중앙 대서양 해령(Hannington *et al.*, 1995) 등 많은 지역에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 또한 열수해역은 열수 분출구를 통하여 CO₂, H₂, 황화수소, 메탄(CH₄), 헬륨, 망간, 철, REE 등의 성분들이 구름처럼 주변의 해수 속으로 공급되는 중요한 경로를 갖고 있으며(Thompson, 1983; Hessler and Kaharl, 1995), 이들을 이용한 지화학적 추적자 연구도 열수해역을 이해하는 중요한 연구분야로 주목받고 있다(Millero and Sohn, 1992; Lilley *et al.*, 1995).

본 연구의 목적은 첫째, 해수의 지화학적 추적자를 이용 열수광상 탐사기법을 개발하고, 둘째, 해양자원개발과 관련 국가적 관심해역인 서태평양 해역 주변의 중·장기 환경지표 마련을 위한 자료 구축에 있다.

제 1 절 재 료 및 방 법

1. 수온, 염분, pH 및 투명도 분석

해수중의 물리화학적 특성파악을 위하여 조사해역에서 CTD(Sea-Bird, 911 Plus) system을 운영하였다. CTD system에 부착된 센서를 사용하여 수온, 염분 및 투명도(transparency) 자료를 실시간으로 선상에서 획득하였다. 투명도는 투광측정계(transmissometer)에 의한 백분율(%)로 나타내었고, 선상에서 pH meter(Orion, 720A)를 이용 수소이온 농도를 측정하였다.

2. 총 무기탄소량

총 무기탄소량은 ΣCO_2 의 농도 총량으로 표현되며, ΣCO_2 의 측정은 해수의 pH 및 0.01N HCl 적정 후 측정된 aH(hydrogen ion activity)를 이용 아래의 관계식에 의하여 계산된다(Parsons *et al.*, 1984). ΣCO_2 는 아래 계산식에서 f, A 및 F_T 는 Parsons *et al.*(1984)이 제시한 온도와 pH에 따른 상수값을 사용하였다.

$$\Sigma\text{alkalinity}(\text{meq/l}) = 2.5 - 1250 * aH/f \quad \dots\dots\dots ①$$

$$\text{pH}(\text{at in situ temp. } t_2) = \text{pH}_{t_1} + 0.0114(t_1 - t_2) \quad \dots\dots\dots ②$$

$$\text{Carbonate alkalinity} = \Sigma\text{alkalinity} - A \quad \dots\dots\dots ③$$

$$\Sigma\text{CO}_2 = \text{carbonate alkalinity} * F_T(\text{mmoles/l}) \quad \dots\dots\dots ④$$

3. 무기영양염류 분석

본 연구에서 분석된 무기영양염류(inorganic nutrients)는 질산염-질소(nitrate), 아질산염-질소(nitrite), 인산염-인(phosphate) 그리고 규산염-규소(silicate) 등이다. 현장에서 냉동 보관된 시료는 실험실로 옮겨진 후 영양염 자동분석기(Alliance, Nutrient-Autoanalyzer) 및 흡광광도계(HP, Spectrophotometer)로 분석하였다(Parsons *et al.*, 1984).

4. 황화수소 분석

황화수소의 분석은 현장에서 공기와의 접촉을 최대한 제거하기 위하여 BOD병에 담아 초산아연용액을 첨가한 뒤 냉·암소에 보관 후 선상에서 흡광광도계를 이용 670 nm 파장에서 측정하였다(Parsons *et al.*, 1984).

제 2 절 결과 및 고찰

1. 물리-화학적 환경 특성

연구해역의 물리-화학적 특성파악을 위하여 수온, 염분, 투광도 및 pH를 측정하였다. 연구해역은 해저화산활동이 활발한 해역으로 알려져 있는 Papua New Guinea 비스마르크 해역에서 동서방향으로 약 50 km이고, 남북으로는 약 15 km의 지역이다. 연구해역의 각 정점들은 해역별로 PACMANUS(St. H04, 06, 07, 08, 12), DESMOS(St.H10), Susu Knolls(St.H01, 11) 그리고 각 해역의 중간(St. H02, 03, 09)으로 구분된다.

연구해역의 수온분포는 29~3 °C의 범위로 나타났으며, 표층의 경우 29±1 °C로 수심 200 m부근에 급격한 감소를 보이는 계절 수온약층이 존재하였다(Fig. 3-1). 최소값은 각 정점의 저층수에서 3±1 °C의 값을 보였다. Fig. 3-1에서와 같이 수온분포는 각 정점별 차이를 크게 구분할 수 없었고, 1998년 조사된 서태평양 마리아나 해구 주변(한국해양연구소, 1998) 및 남서태평양 해역(해양수산부, 1999)과 유사한 분포를 보였다. 열수해역 분출구 주변은 350 °C의 고온수가 방출되지만(Millero and Sohn, 1992; Lupton, 1995) 낮은 온도의 주변 해수와 빠르게 혼합되어 쉽게 온도 이상변화(temperature anomaly)를 감지하기는 쉽지 않다. 제시된 Fig. 3-1에서와 같이 전체 수직 분포 상에서는 확인되기 어려우나 일부 정점의 1,000 m 부근 및 이하의 중·저층에서 약 ±0.02 °C 정도의 변화 폭을 보였다.

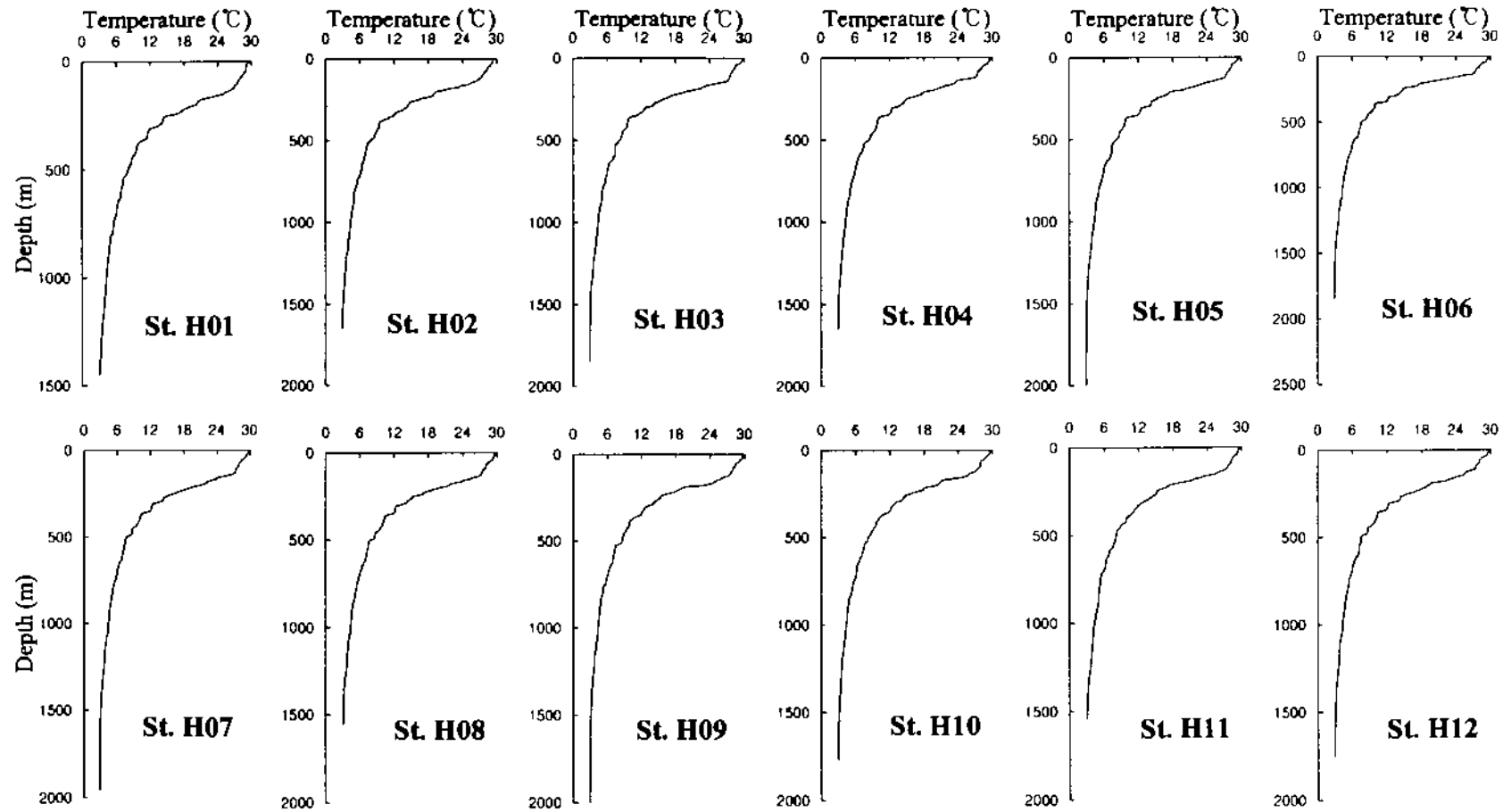


Fig. 3-1. Vertical profiles of water temperature in the study area.

염분은 45.47~35.19 psu 범위로 1 psu이하의 변화 폭을 보였다(Fig. 3-2). 최대 염분은 표층이하 200 m에서 35.6 psu의 값으로 나타났으며, 최소값은 수심 500~1,000 m 사이의 수층에서 34.5 psu를 보였다. 따라서 연구해역의 수괴는 고온 저염의 표층수와 저온 저염의 저층수 사이에 염분최대층이 존재하였다(Table 3-1).

투명도는 부유물질의 양에 따라 백분율(%)로 표시되며, 따라서 부유물질이 많을수록 낮은 값을 나타낸다. 연구해역의 투명도를 Fig. 3-3에 나타내었다. 투명도는 79.2~92.4%의 범위를 보였으며, 최소값은 정점 H01의 1,173 m에서 79.2%로 부유물질 이상농도층이 가장 많이 나타난 것으로 판단된다. 정점 H01의 경우 10%와 2%가 감소된 두개의 층이 확인되었고, 특히 최대 감소치를 보인 수층은 1,165~1,182 m 사이로 폭의 두께가 17 m를 보였다. 이상과 같은 투명도 이상감소층은 연구해역의 다른 정점에서도 확인되었고, 중·저층에서의 이러한 결과는 열수작용에 의한 plume의 영향으로 판단된다. 결과적으로 수온 및 염분의 경우, 열수에 의한 증거는 명확하지 않았으나 투명도의 자료에서는 열수작용의 증거를 일부 확인할 수 있었다.

pH는 7.64~8.35의 범위로 측정되었다(Fig. 3-4). 각 정점별 수직분포는 표층이 높고 수심의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 중층 및 저층수에서는 7.8 ± 0.12 의 값으로 다소 안정된 값을 보였다(Table 3-1). 열수 분출구 주변의 pH는 약 6정도로 낮게 나타나는 것으로 알려져 있으나(Fisher, 1995) 투명도에서의 경우와 같은 연속관측이 아닌 채수기에 의해 관측된 결과로는 열수의 직접적 영향을 확인하기에는 자료가 부족하였다. 그러나 pH 자료는 수층의 산화, 환원 과정, 총 무기탄소계산 및 금속의 지화학적 작용 등의 연구분야에 기초 자료로서 활용된다.

2. 총 무기탄소량 및 영양염류 분포 특성

해수 중 무기탄소(inorganic carbon)는 식물플랑크톤에 의한 광합성작용으로 인하여 유기탄소로 전환되고, 대기와의 상호 교환작용이 지속적으로 진행된다(Millero and Sohn, 1992). 대표적 무기탄소인 CO_2 는 범지구 환경적

Table 3-1. Hydrological and chemical data in the study area.

Station	Depth (m)	Temp. (°C)	Sal. (psu)	Trans. (%)	pH	Nitrate (μM)	Nitrite (μM)	Phosphate (μM)	Silicate (μM)	H ₂ S (μM)	Σ CO ₂ (mM)
H01	0	29.52	34.71	90.5	8.33	1.0	0.05	0.46	1.4	0.31	1.669
	300	13.28	35.02	92.0	8.00	14.5	0.04	1.01	9.5	0.37	2.138
	500	8.14	34.58	92.1	7.92	20.2	0.05	1.48	19.5	0.50	2.144
	750	5.56	34.47	92.1	8.03	14.8	0.05	1.08	9.3	0.00	2.117
	1000	4.30	34.50	92.0	7.82	26.0	0.06	1.92	59.8	0.17	2.226
	1050	4.15	34.51	91.8	7.81	28.0	0.04	1.96	66.8	0.69	2.279
	1100	3.99	34.52	90.5	7.79	27.7	0.10	2.19	70.5	0.19	2.307
	1150	3.86	34.53	87.3	7.77	28.9	0.05	2.04	74.7	1.36	0.071
	1200	3.63	34.54	91.8	7.78	27.6	0.05	1.97	76.1	0.31	2.298
	1300	3.37	34.55	92.0	7.80	29.8	0.08	2.04	84.7	0.32	2.321
	1450	3.08	34.58	91.9	7.74	30.1	0.12	2.05	92.4	0.00	2.326
H02	0	29.44	34.73	90.3	8.30	0.8	0.03	0.50	0.3	1.15	1.727
	100	27.55	35.20	92.2	-	5.3	0.08	0.66	1.2	0.39	-
	300	14.00	35.09	92.0	7.99	15.0	0.04	0.96	7.0	1.05	2.064
	500	7.96	34.56	92.1	7.87	20.5	0.03	1.73	18.2	0.00	2.122
	750	5.53	34.47	92.1	7.81	24.9	0.03	1.71	39.5	0.14	2.224
	900	4.75	34.48	92.1	7.79	27.3	0.03	1.85	49.4	0.80	2.260
	1000	4.33	34.50	92.1	7.78	26.5	0.05	1.87	57.0	0.48	2.243
	1100	4.02	34.51	91.8	7.75	27.9	0.06	1.89	64.3	0.60	2.248
	1200	3.65	34.53	92.0	7.75	20.5	0.09	1.55	46.6	1.01	2.268
	1400	3.24	34.56	92.1	7.74	29.9	0.02	2.12	87.4	0.93	2.358
	1500	3.04	34.58	92.0	7.73	24.3	0.06	2.01	68.7	0.90	2.332
1650	2.95	34.58	92.1	7.72	22.2	0.06	1.56	52.6	0.70	2.308	
H03	0	29.66	34.67	91.1	8.24	0.9	0.03	0.30	0.2	0.67	1.862
	500	8.28	34.58	92.0	7.82	23.3	0.02	1.33	17.4	0.33	2.172
	900	4.83	34.48	92.1	7.73	31.5	0.05	1.74	48.6	-	2.315
	1085	4.18	34.50	92.1	7.71	30.9	0.04	1.61	56.7	0.70	2.291
	1100	4.07	34.51	92.1	7.73	30.6	0.06	1.75	60.5	0.55	2.285
	1186	3.85	34.52	91.9	7.71	34.7	0.03	1.86	69.1	1.01	2.315
	1207	3.74	34.53	92.0	7.69	34.5	0.03	1.83	76.3	0.78	2.328
	1490	3.05	34.58	92.1	7.68	32.6	0.11	1.83	60.7	1.72	2.341
	1700	2.96	34.58	92.0	7.68	33.3	0.07	1.81	54.5	-	2.344
	1770	2.95	34.58	91.8	7.68	32.3	0.06	1.73	51.1	-	2.320
1850	2.95	34.58	92.0	7.65	33.9	0.07	1.90	68.1	1.23	2.313	
H04	0	29.58	34.68	91.0	8.27	1.1	0.04	0.49	0.9	-	1.603
	300	13.23	35.02	91.6	8.00	10.7	0.05	0.87	5.3	-	1.925
	410	9.73	34.70	91.7	-	17.9	0.07	1.21	13.8	-	-
	900	4.62	34.48	91.7	8.32	24.0	0.06	1.73	46.6	-	1.791
	998	4.36	34.50	91.7	7.79	27.3	0.04	1.84	57.9	-	2.122
	1095	3.93	34.52	91.7	7.75	25.2	0.22	1.78	60.4	-	2.112
	1210	3.68	34.54	91.7	7.73	27.9	0.04	2.02	77.3	0.95	2.102
	1362	3.30	34.56	91.7	7.74	27.6	0.08	2.27	75.7	0.42	2.161
	1400	3.13	34.57	91.8	7.64	30.1	0.04	1.85	87.6	0.29	2.145
	1500	3.07	34.57	91.8	7.70	23.5	0.06	1.79	50.5	0.54	2.113
	1602	2.99	34.58	91.6	7.75	27.4	0.05	2.32	77.8	-	2.082
1650	2.97	34.58	91.7	7.72	26.0	0.05	1.69	79.1	0.73	2.201	

Table 3-1. continued

Station	Depth (m)	Temp. (°C)	Sal. (psu)	Trans. (%)	pH	Nitrate (μM)	Nitrite (μM)	Phosphate (μM)	Silicate (μM)	H ₂ S (μM)	ΣCO_2 (mM)
H05	0	29.46	34.71	90.6	8.17	1.1	0.03	0.21	1.1	-	1.734
	900	4.63	34.49	91.7	7.74	25.1	0.03	1.70	52.4	-	2.061
	1218	3.59	34.54	91.7	7.72	28.2	0.04	1.90	74.3	-	2.122
	1390	3.16	34.57	91.7	7.72	21.7	0.17	1.54	53.4	-	2.168
	1476	3.08	34.57	91.7	7.73	25.9	0.09	1.68	73.6	-	2.120
	1500	3.04	34.58	91.7	7.74	32.1	0.04	2.07	97.8	-	2.141
	1630	2.96	34.58	91.7	7.72	31.5	0.06	2.00	97.4	0.04	2.132
	1695	2.95	34.58	91.5	7.69	31.7	0.06	2.00	91.5	0.67	2.124
	1760	2.94	34.58	91.6	7.69	32.1	0.04	2.01	97.5	0.44	2.170
	1819	2.93	34.58	91.6	7.72	30.8	0.05	1.39	90.1	0.73	2.107
	1900	2.93	34.58	91.7	7.72	29.7	0.05	1.92	90.3	0.69	2.132
	2000	2.94	34.58	91.6	7.70	32.3	0.03	2.06	102.3	0.47	2.078
H06	0	29.67	34.67	90.7	8.28	0.9	0.03	0.21	1.5	-	1.587
	485	8.16	34.57	91.7	7.88	16.0	0.10	1.07	14.0	-	1.987
	1000	4.38	34.50	91.8	7.81	19.2	0.09	1.42	39.7	-	2.024
	1283	3.57	34.55	91.8	7.78	21.1	0.08	1.32	50.3	-	2.088
	1402	3.24	34.56	91.7	7.76	30.0	0.07	1.89	89.3	-	2.119
	1500	3.10	34.57	91.8	7.77	33.3	0.05	2.05	97.3	-	2.125
	1578	3.00	34.58	91.6	7.75	24.6	0.07	1.65	77.3	0.41	2.099
	1611	2.98	34.58	91.8	7.77	31.1	0.06	1.95	95.4	0.51	2.093
	1668	2.96	34.58	91.7	7.74	32.5	0.04	2.04	96.1	0.46	2.156
	1700	2.95	34.58	91.5	7.75	32.0	0.04	2.05	95.6	0.38	2.146
	1800	2.93	34.58	91.8	7.74	27.2	0.05	1.59	73.5	0.25	2.110
	1850	2.93	34.59	91.8	7.75	32.3	0.03	2.01	99.2	0.47	2.123
2086	2.93	34.59	-	7.64	23.2	0.09	1.49	48.7	-	2.360	
H07	0	29.71	34.67	90.9	8.12	1.0	0.06	0.18	1.0	-	1.707
	300	13.52	35.04	91.7	7.86	13.5	0.05	0.84	8.9	-	1.854
	500	7.68	34.54	91.8	7.80	22.3	0.04	1.34	19.7	-	1.995
	1000	4.44	34.49	91.8	7.78	27.9	0.04	1.41	54.1	-	2.109
	1100	4.02	34.51	91.8	7.81	23.5	0.06	1.47	46.9	-	2.117
	1210	3.74	34.53	91.8	7.81	22.8	0.06	1.40	46.1	-	2.139
	1270	3.56	34.54	91.8	7.82	31.6	0.04	1.96	82.9	-	2.150
	1550	3.00	34.58	91.8	7.78	28.7	0.13	1.73	75.6	0.90	2.171
	1630	2.96	34.58	91.7	7.78	22.9	0.10	1.62	58.6	0.32	2.177
	1715	2.94	34.58	91.7	7.80	24.1	0.07	1.66	63.2	1.32	2.184
	1800	2.93	34.58	91.8	7.79	32.4	0.05	2.03	97.9	2.97	2.168
	1950	2.94	34.59	91.8	7.80	31.0	0.07	1.90	81.2	2.13	2.124
H08	0	29.66	34.68	90.9	8.31	1.6	0.08	1.19	2.0	-	1.575
	94	27.62	35.18	91.8	8.24	1.8	0.11	0.31	7.3	-	1.670
	300	13.08	35.00	91.6	8.01	13.8	0.05	0.90	7.0	-	1.875
	493	8.35	34.58	91.7	7.92	20.7	0.29	1.27	15.6	-	1.963
	700	5.91	34.47	91.7	7.87	19.6	0.07	1.18	22.8	-	1.950
	800	5.19	34.47	91.7	7.85	29.1	0.05	1.60	43.3	-	1.999
	900	4.62	34.49	91.7	7.84	29.9	0.08	1.76	53.9	3.31	2.014
	1000	4.34	34.50	91.7	7.81	28.6	0.08	1.69	55.1	0.92	2.042
	1350	3.18	34.57	91.6	7.78	25.4	0.41	-	54.9	2.10	2.150
	1450	3.16	34.57	91.7	7.79	31.8	0.05	1.71	92.8	0.00	2.078
	1550	3.05	34.58	91.7	7.78	33.8	0.04	2.07	97.3	1.43	2.114

Table 3-1. continued

Station	Depth (m)	Temp. (°C)	Sal. (psu)	Trans. (‰)	pH	Nitrate (μM)	Nitrite (μM)	Phosphate (μM)	Silicate (μM)	H ₂ S (μM)	Σ CO ₂ (nM)
H09	0	29.65	34.66	90.6	8.28	0.7	0.08	0.19	0.6	-	1.578
	300	13.03	35.00	91.6	7.95	15.5	0.03	0.97	8.4	0.51	1.919
	478	8.68	34.62	91.7	7.85	19.9	0.28	1.23	14.6	-	1.966
	900	4.65	34.48	91.8	7.75	28.7	0.02	1.50	53.4	0.59	2.067
	1100	3.98	34.52	91.7	7.72	27.2	0.47	1.73	59.5	-	2.136
	1330	3.34	34.56	91.7	7.71	29.8	0.03	1.89	78.5	0.91	2.109
	1550	3.03	34.58	91.8	7.70	33.8	0.02	2.05	96.3	0.03	2.087
	1680	2.96	34.58	91.8	7.70	28.5	0.04	1.41	76.6	0.76	2.145
	1770	2.94	34.58	91.7	7.68	26.4	0.05	1.77	57.1	0.49	2.180
	1819	2.94	34.58	91.7	7.70	20.9	0.05	1.54	42.7	0.23	2.236
	1900	2.94	34.59	91.8	7.71	26.0	0.06	1.38	62.7	0.69	2.093
2000	2.94	34.59	91.8	7.69	18.2	0.12	1.21	43.7	0.46	2.140	
H10	0	29.58	34.68	90.3	8.35	0.9	0.05	0.47	2.4	-	1.617
	500	8.31	34.58	91.7	-	-	-	-	-	0.23	-
	850	4.87	34.48	91.7	7.83	22.8	0.29	1.61	42.0	-	2.034
	1100	3.98	34.52	91.6	7.78	27.4	0.15	1.98	66.6	0.23	2.078
	1490	3.10	34.57	91.4	7.77	29.0	0.18	2.12	81.3	-	2.139
	1572	2.99	34.58	91.5	7.74	28.8	0.19	2.11	70.0	0.02	2.110
	1638	2.97	34.58	89.1	7.66	28.0	0.21	1.58	63.5	0.28	2.242
	1680	2.96	34.58	89.7	7.71	28.0	0.18	1.59	59.6	0.21	2.142
	1708	2.96	34.58	89.7	7.70	28.6	0.21	2.13	67.6	0.21	2.129
	1765	2.96	34.58	90.1	-	29.6	0.17	1.86	63.8	0.28	-
	1790	2.96	34.58	-	7.74	28.3	0.17	2.03	71.9	0.44	2.170
1876	2.94	34.59	-	7.90	30.5	0.11	2.14	83.1	-	2.128	
H11	0	29.73	34.71	89.8	8.26	0.9	0.03	0.26	0.6	-	1.718
	100	27.71	35.17	91.9	8.21	3.5	0.06	0.40	1.1	0.68	1.705
	300	13.48	35.05	91.8	7.99	14.1	0.20	0.72	7.1	-	1.936
	500	8.09	34.58	91.9	7.87	13.1	0.20	0.96	9.4	0.62	2.000
	900	4.88	34.48	91.9	7.81	26.7	0.18	1.67	46.6	-	2.121
	1000	4.32	34.50	91.9	7.79	23.7	0.19	1.47	42.6	0.50	2.129
	1150	3.96	34.52	91.9	7.78	26.4	0.20	1.78	65.0	0.35	2.119
	1200	3.76	34.53	91.9	7.77	29.7	0.20	1.88	75.1	0.95	2.130
	1350	3.28	34.56	91.8	7.77	28.7	0.21	1.91	82.6	0.80	2.153
	1400	3.12	34.57	91.9	7.75	31.3	0.20	2.01	89.2	0.46	2.152
	1450	3.06	34.58	91.9	7.76	30.8	0.19	1.97	92.1	0.12	2.207
1550	3.01	34.58	91.9	7.75	31.3	0.20	2.00	92.1	0.00	2.107	
H12	0	29.67	34.66	90.8	8.19	0.8	0.07	0.47	0.3	-	1.705
	300	13.12	35.00	91.6	7.96	13.4	0.08	1.09	7.1	-	1.950
	493	7.53	34.54	91.7	7.92	16.8	0.09	1.37	17.2	-	2.003
	893	4.85	34.48	91.7	7.84	18.0	0.10	1.69	33.3	-	2.058
	1100	3.85	34.52	91.7	7.83	27.4	0.08	1.99	69.5	-	2.056
	1252	3.53	34.54	91.8	7.81	20.2	0.12	1.42	56.9	-	2.104
	1300	3.41	34.55	91.7	7.81	24.1	0.06	1.66	71.8	0.61	2.088
	1400	3.16	34.57	91.8	7.81	27.0	0.07	2.15	83.9	0.51	2.100
	1520	3.04	34.58	91.8	7.80	22.2	0.14	1.56	60.0	0.45	2.145
	1600	2.98	34.58	91.6	7.78	27.8	0.09	1.61	91.0	0.28	2.151
	1650	2.96	34.58	91.6	7.78	16.2	0.15	1.43	35.3	0.50	2.207
1750	2.94	34.58	91.6	7.77	19.0	0.11	1.67	44.9	0.68	2.242	
Min.		2.93	34.47	87.3	7.64	0.7	0.02	0.18	0.2	0.00	0.071
Max		29.73	35.20	92.2	8.35	34.7	0.47	2.32	102.3	3.31	2.360

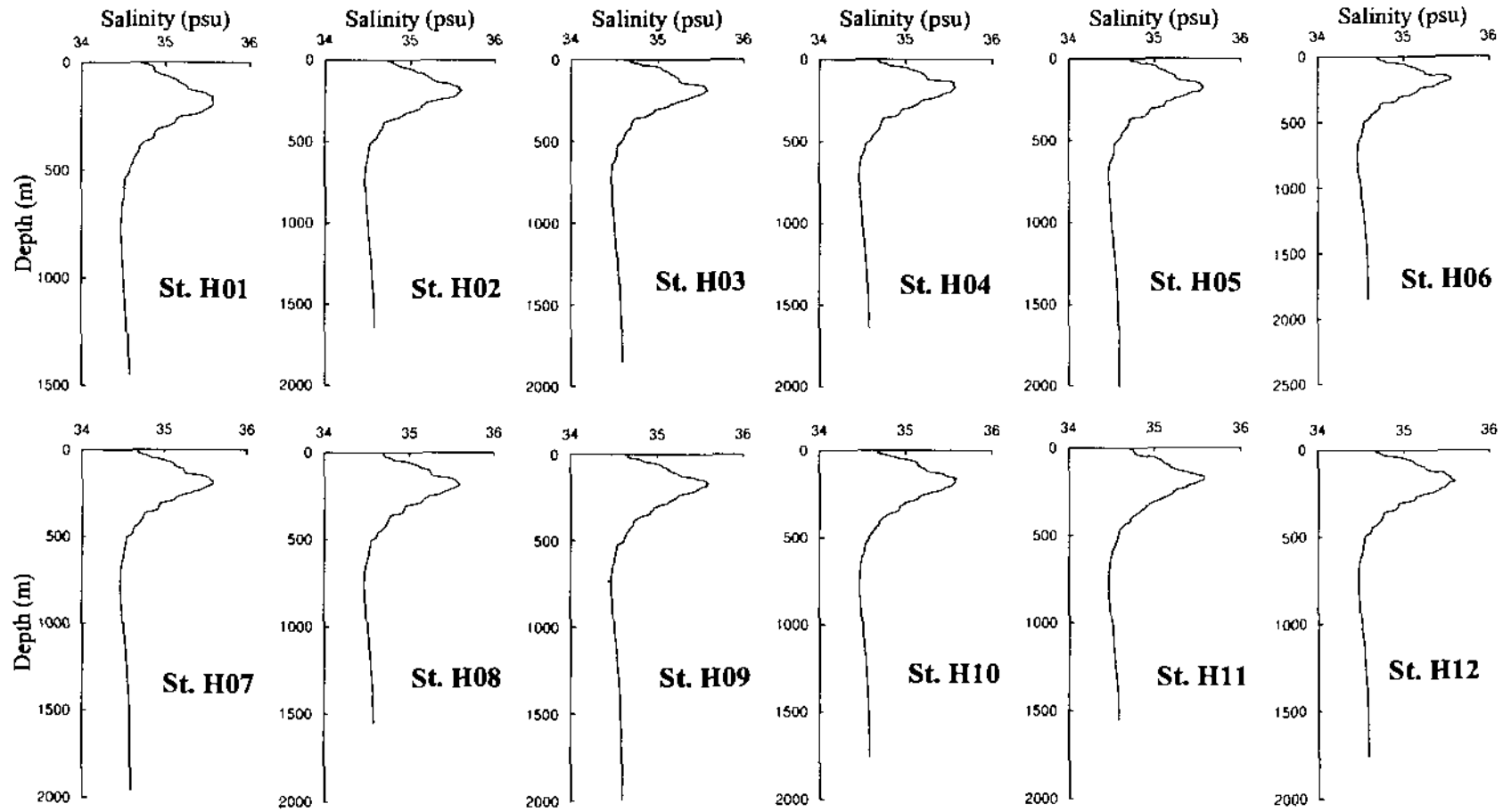


Fig. 3-2. Vertical profiles of salinity in the study area.

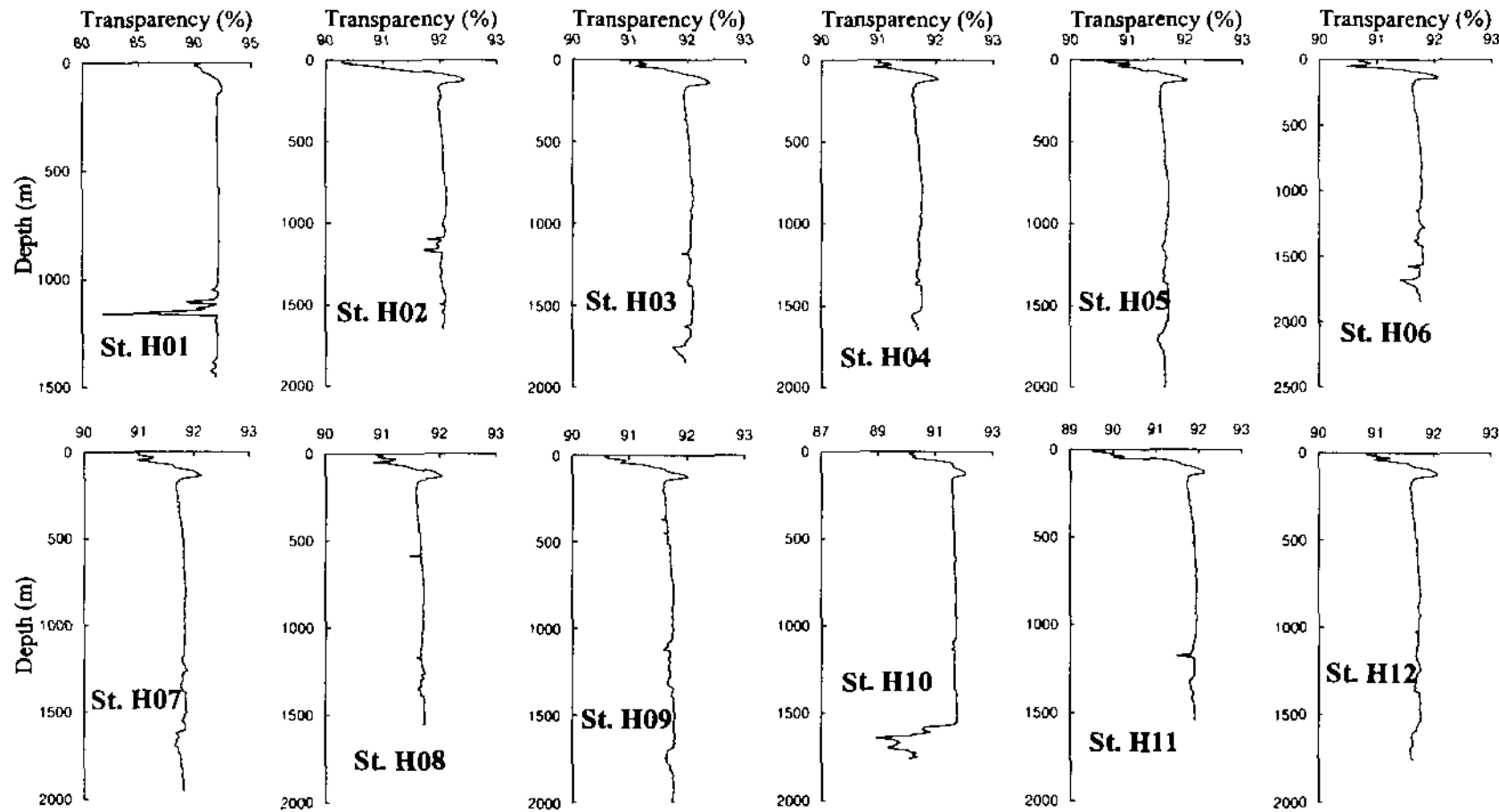


Fig. 3-3. Vertical profiles of transparency in the study area.

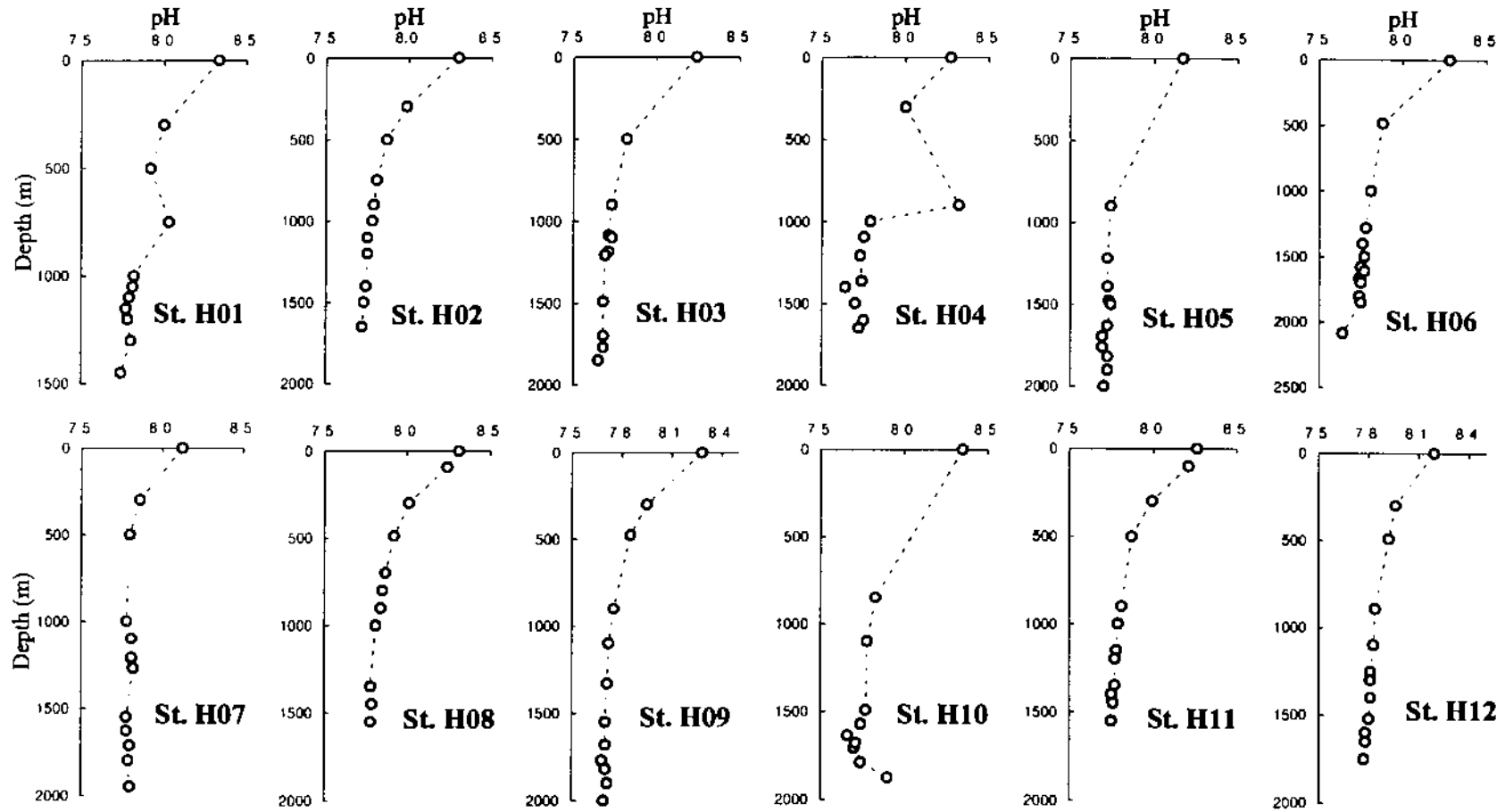


Fig. 3-4. Vertical profiles of pH in the study area.

측면에서 지구 온난화 가스의 하나로 지구 탄소순환 등과 관련되어 JGOFS(the Joint Global Ocean Flux Study) 및 WOCE(the World Ocean Circulation Experiment) 등 국제적 연구 대상이기도 하다(Goyet and Peltzer, 1994; Murray et al., 1995).

본 연구에서의 총 무기탄소량은 ΣCO_2 농도로 나타내었으며, 결과를 Fig. 3-5에 제시하였다. ΣCO_2 는 1.6~2.3 mM의 범위로 표층이 낮고 수심의 증가에 따라 점차 증가된 양상으로 나타났으며, 주변해역의 연구결과와 유사한 값을 보였다(해양연구소, 1998; 해양수산부, 1999). 정점 H01의 1,150 m는 1 mM이하의 낮은 값을 보였는데 이는 부유물질이 매우 높은 영향인지 아니면 실험적 오차인지 현재의 자료로서는 명확하지 않았다.

각 정점별 무기영양염류 수직분포를 Fig. 3-6, 3-7에 나타내었다. 무기영양염류는 식물플랑크톤의 성장 제한요인으로 작용하고(Spencer, 1975; Chester, 1996) 환경을 이해하는 기본 자료로 활용된다. 수직분포의 경우, 각 영양염들은 표층에서 낮은 농도를 보이고 수심에 따라 점차 증가된 대양적 특성을 잘 보여주고 있었다. 무기 질소계 영양염 중 가장 큰 비율을 차지하는 nitrate는 0.71~34.71 μM 의 범위를 보였고, nitrite는 0.02~0.47 μM 의 범위로 낮은 값을 나타내었다(Fig. 3-6, Table 3-1). Phosphate 및 silicate는 0.18~2.30 μM 과 0.2~102.3 μM 의 범위로 측정되었다(Fig. 3-7, Table 3-1). Nitrate와 phosphate의 최대농도는 수심 1,000 m 부근에서 나타났으며, silicate는 상대적으로 더 깊은 약 1,500 m 부근에 형성되었다. Silicate는 nitrate, phosphate와는 다른 규산염의 용해에 의한 등에 의해 재생산되며, N과 P의 생화학적 재생산 속도 보다 빠르지 못하고 완만하기 때문이다(Chester, 1996). 전체적으로 영양염류는 대양적 분포특성을 보이고 있으나, 평균 농도는 북동태평양 보다 낮은 값을 보였다. 아울러 일부 정점의 중·저층에서는 증가와 감소가 반복된 다소 산만한 값의 변화를 보이고 있었으며, 이러한 결과는 지역적으로 해저산들에 의한 해류의 변화가 많고, 열수작용 등에 의해 수위가 불안정한 것을 시사하고 있다. 그러나 중·저층의 해류 자료 및 지속적인 자료의 축적을 통하여 충분한 해석이 가능하리라 판단된다.

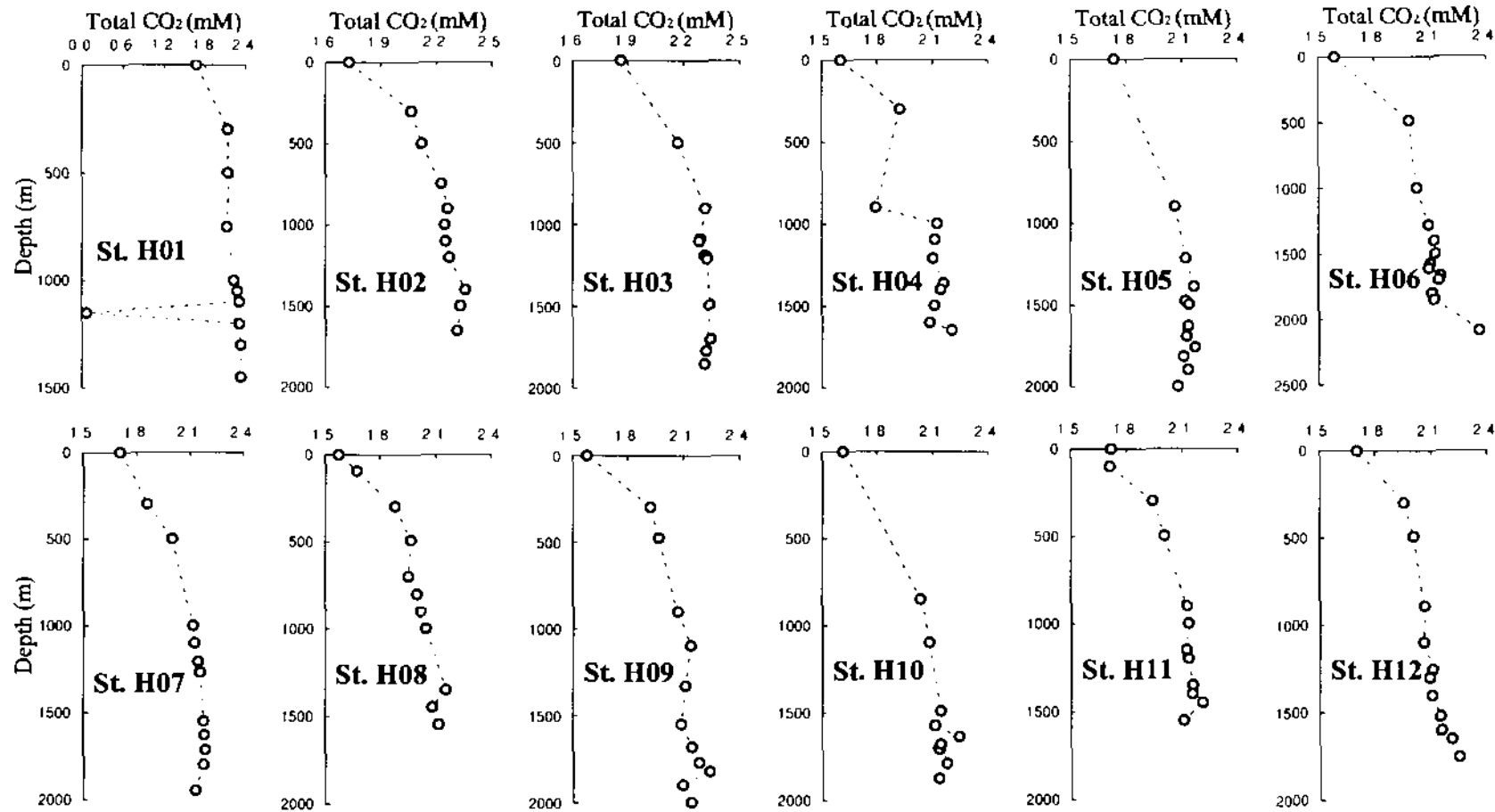


Fig. 3-5. Vertical profiles of total inorganic carbon in the study area.

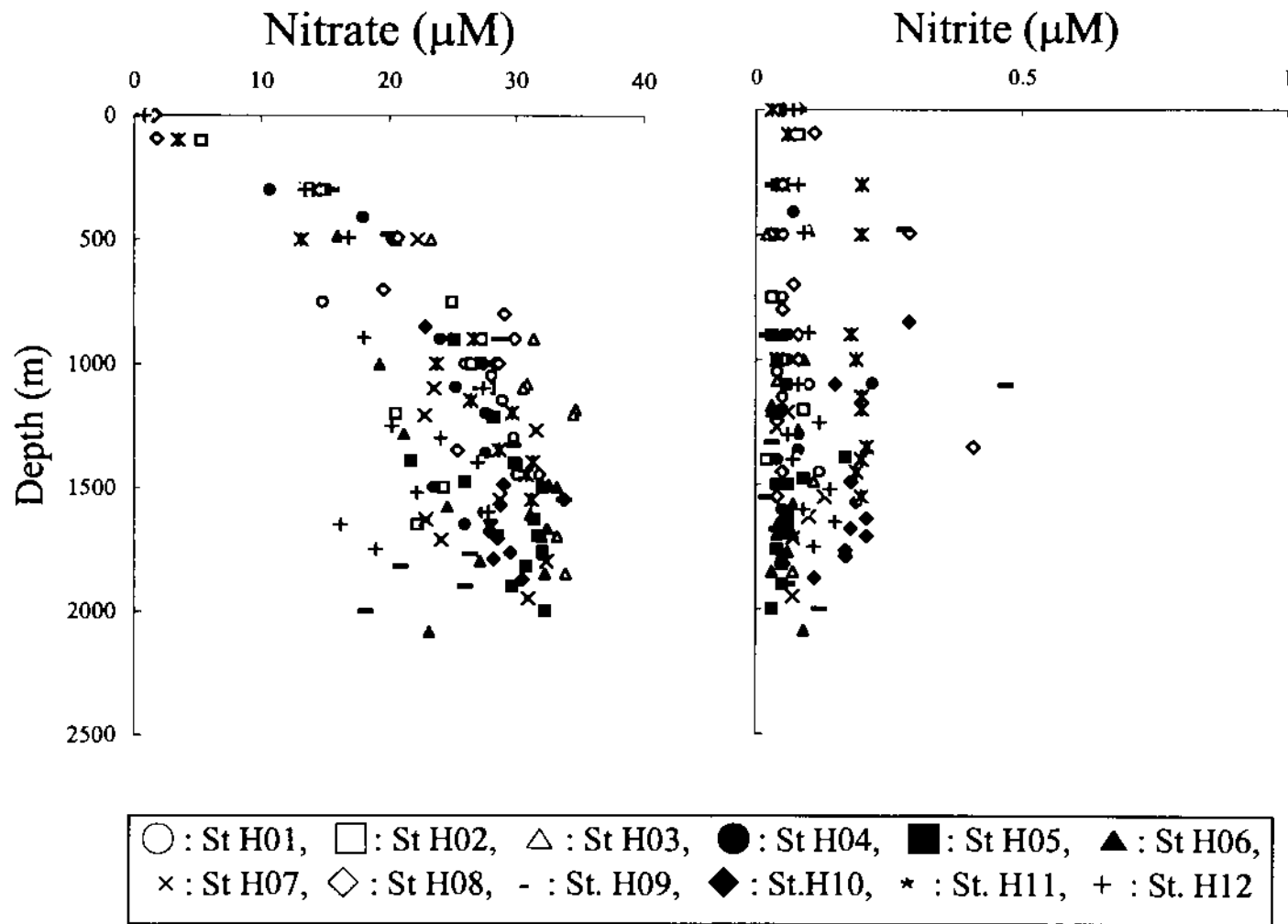


Fig. 3-6. Vertical profiles of nitrate and nitrite in the study area.

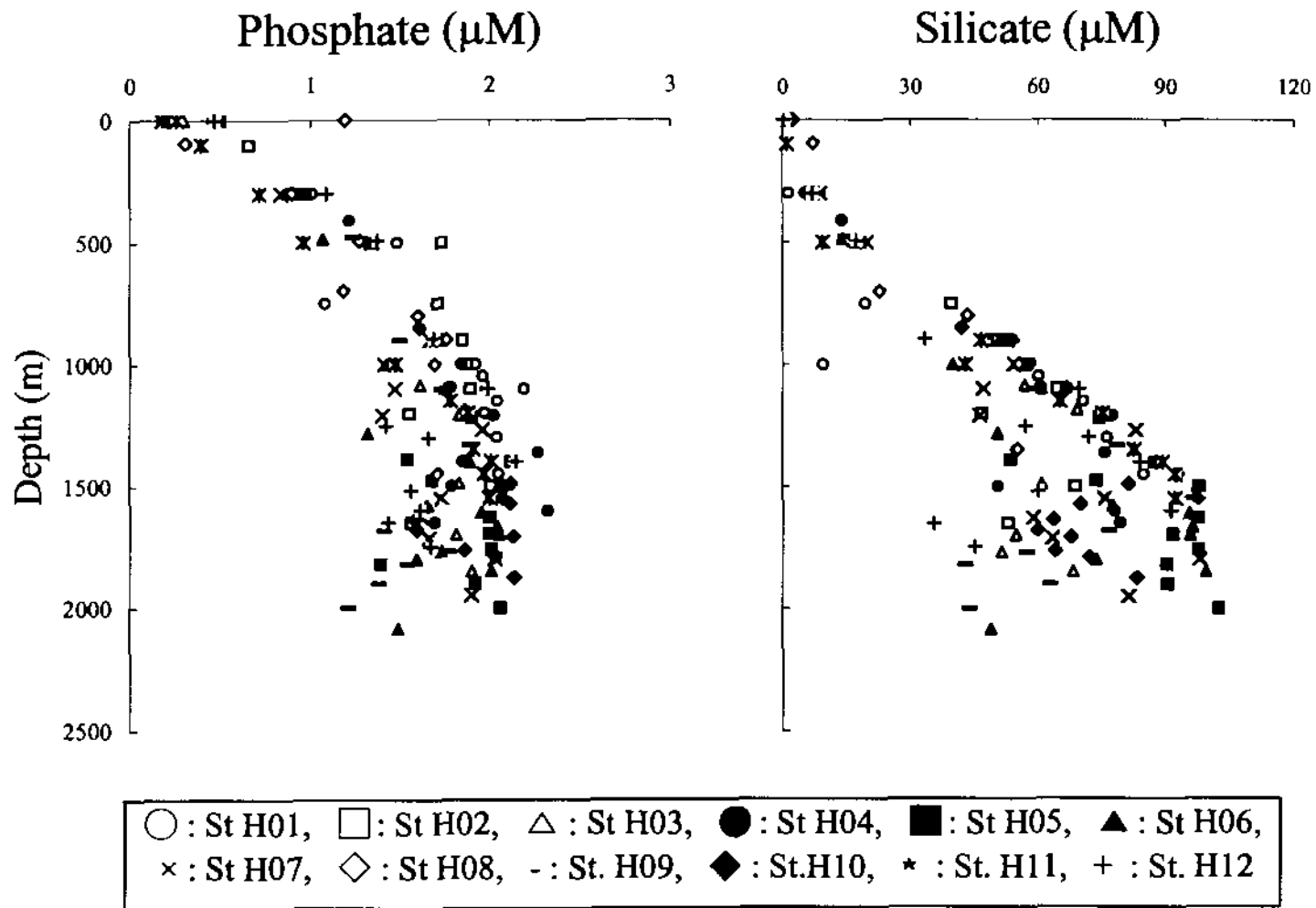
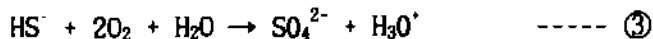
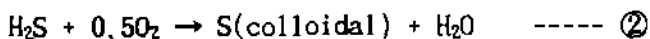
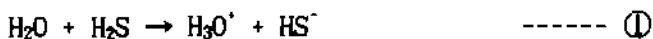


Fig. 3-7. Vertical profiles of phosphate and silicate in the study area.

3. 황화수소의 분포 특성

열수해역은 앞서 언급된 바와 같이 분출구를 통하여 CO₂, H₂, 황화수소, 메탄, 헬륨, 망간, 철, REE 등의 성분들이 구름처럼 주변의 해수 속으로 공급된다(Bowers *et al.*, 1988; Lilley *et al.*, 1995; Pichler *et al.*, 1999). 열수작용에 의해 주변의 해수와 큰 농도 차를 보이는 지화학적 성분들은 열수작용을 확인할 수 있는 중요한 요인으로 활용되고, 특히 대표적인 지화학적 추적자로는 메탄, 헬륨 그리고 망간 등이 많이 이용되고 있으나(Horibe *et al.*, 1986; Belviso *et al.*, 1987; Cowen *et al.*, 1990; Charlou *et al.*, 1991), 본 연구에서는 황화수소를 이용하여 수행하였다. 황화수소는 아래와 같이 해수 중에서 HS⁻ 이온 상태로 존재하며 매우 빠르게 산화된다(Nelson and Fisher, 1995).



따라서, 황화수소는 해수 중에서 메탄, 헬륨 그리고 망간보다 제거되는 속도가 매우 빠르기 때문에 분석 상 많은 어려움이 있으나, 열수환경에 대한 직접적 증거로서 제시된다.

한편, 황화수소 농도는 일반 해양환경의 경우 0 mM인 반면, 열수분출구 주변은 3~8 mM의 매우 높은 농도를 보인다(Von Damm *et al.*, 1985; Campbell *et al.*, 1988; Von Damm, 1988). 따라서 황화수소는 이러한 농도 차를 이용 열수해역의 탐사에 활용된다.

연구해역의 황화수소 분포는 Fig. 3-8에 나타내었다. 특히, 본 연구는 열수작용에 의한 plume의 영향을 파악하기 위하여 중·저층을 중심으로 분석되었다. 선상에서 분석된 황화수소는 0~3.31 μM의 범위와 평균 0.63 μM을 보여 일반해양환경의 농도보다 높게 분석되었다(Table 3-1). 결과적으로 연구해역은 전체적으로 열수작용의 영향을 받은 것으로 사료된다. 특히 1.5 μM

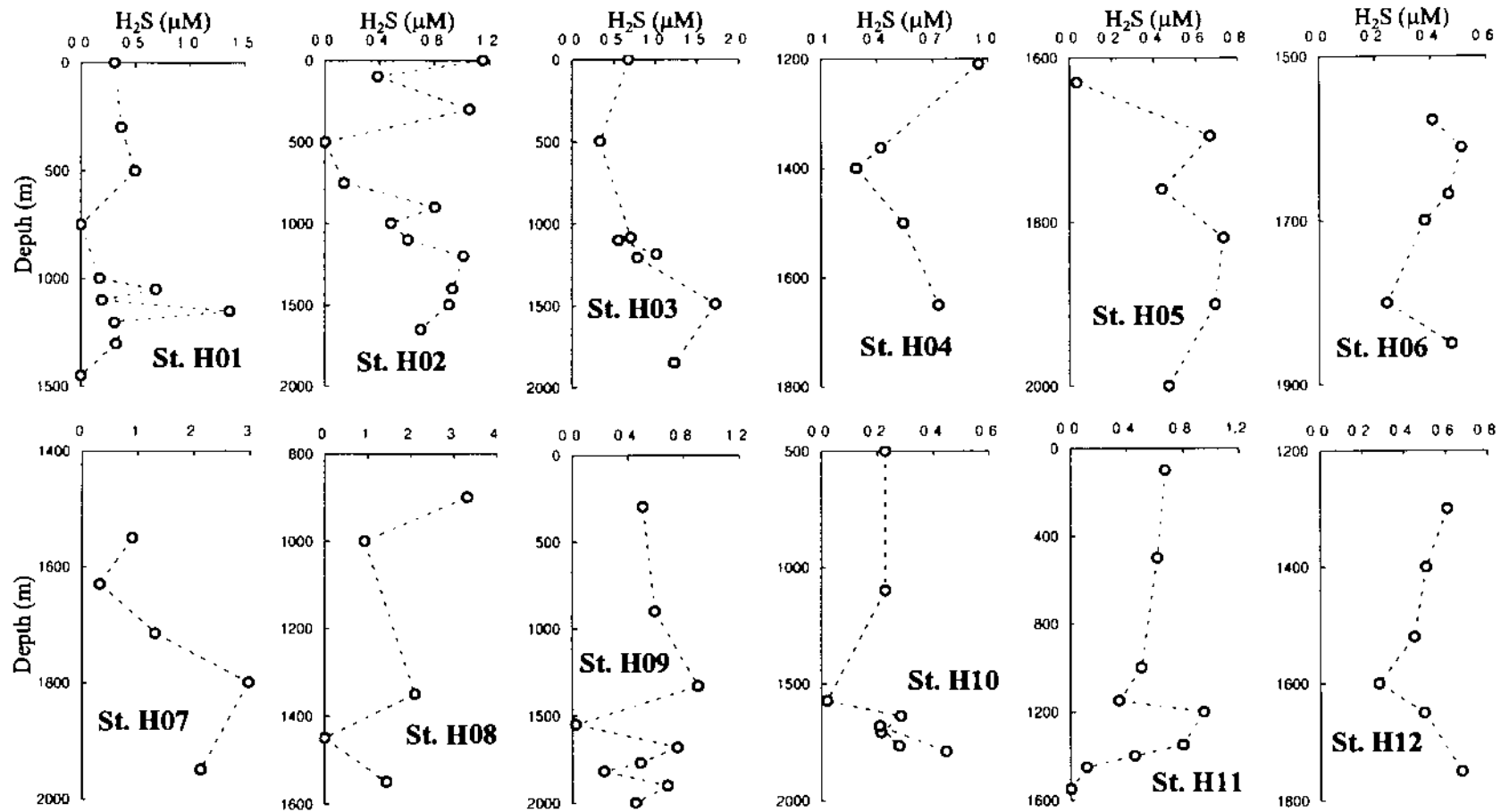


Fig. 3-8. Vertical profiles of H₂S in the study area.

이상의 황화수소 이상농도(sulfide anomaly)를 보인 정점은 총 12개 중 5개 정점(정점 H01, 02, 03, 07, 08)으로 PACMANUS와 Susu Knolls 해역 수심 1,000 m 부근의 수층이었고, 다른 정점에서도 일부 이상 농도층이 확인되었다.

투명도가 높게 관측되었던 정점 H01의 중·저층수에서는 부분적으로 온도의 이상증가($\Delta t \approx 0.02$ °C)가 나타났으며, 황화수소 또한 이상농도를 보였다(Fig. 3-9). 아울러 정점 H01은 2개의 plume에 의해 영향을 받고 있었으며 수심 1170 m 부근이 더 큰 것으로 확인되었다. 열수작용에 의한 투명도와 황화수소의 관계는 연구해역의 다른 정점들에서도 잘 보여주고 있었다. 해수 중에서 열수작용에 의한 plume은 분출구의 높이, 분출량의 정도와 분출 속도, 중·저층 해류 그리고 해수밀도차 등 복합적인 환경의 영향을 받으며 주변 해수로 확산된다(Speer and Rona, 1989; Tivey et al., 1990; Helfrich and Speer, 1995; Lilley et al., 1995). Fig. 3-10은 같은 밀도선상에 투명도와 황화수소의 값들이 수렴하고 있었으며 이러한 사실로부터 확산과정이 수층의 등밀도면(isopycnic surface)을 따라 주변해역으로 진행되고 있음을 잘 보여주고 있다. 따라서 확산모델을 이용한다면 공급원의 위치 및 분출농도를 추정할 수 있으며, 차후 이에 대한 연구를 진행할 예정이다.

한편, 연구해역의 열수 공급원을 찾기 위하여 황화수소 자료를 이용 동서방향의 수직단면도를 작성하였다(Fig. 3-11). Fig. 3-11에서 표시된 바와 같이 각 정점을 2개의 선상에 도시하였다. 선 A는 정점 H04(151° 41.658' W, 3° 41.876' S)에서 H01(152° 06.349' W, 3° 47.765' S)을 잇는 약 45 km의 거리이며, 선 B는 정점 H08(151° 41.264' W, 3° 42.849' S)에서 H09(151° 49.397' W, 3° 43.314' S)로 연결된 약 15 km의 거리이다. 선 A의 경우, 황화수소는 PACMANUS 해역 정점 H07의 수심 1,800 m와 H03의 1,500 m에서 높은 농도를 보였으며, DESMOS에서 Susu Knolls 사이의 정점 H02 및 H01의 1,200 m에서 다소 높은 값을 나타내었다. 이러한 분포에서 볼 때, 해저화산활동이 활발한 해역인 PACMANUS의 경우, 두개 이상의 공급원이 있을 것으로 판단된다. 이러한 사실은 PACMANUS의 남쪽인 선B에서 더욱 잘 보여지고 있는데, 정점 H08의 수심 900 m와 1,400 m 수층에서 이상 고농도층을 확인하였다. 앞서 언급된 바와 같이 열수작용에 의한 plume은 표층으로의 수직적

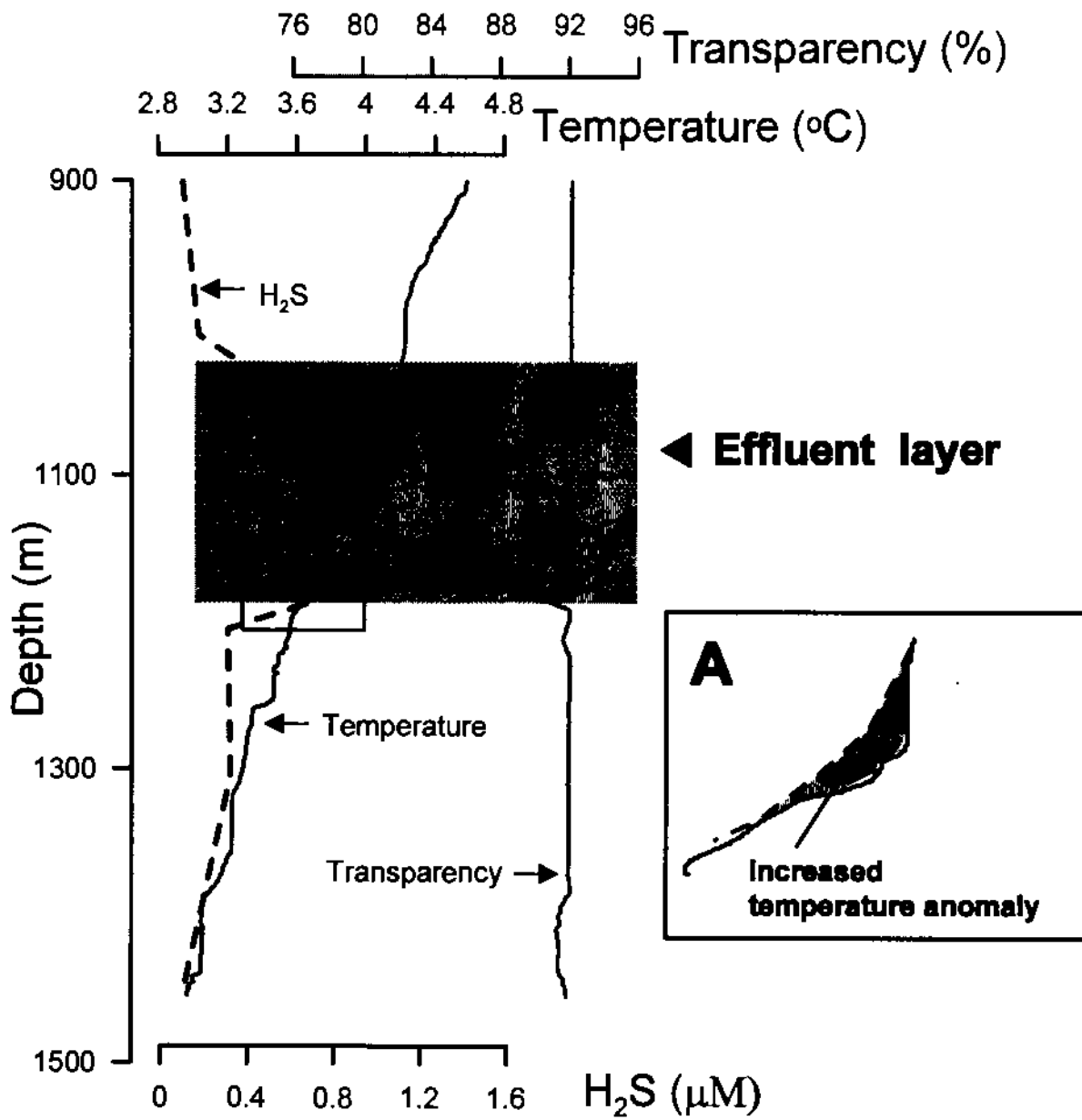


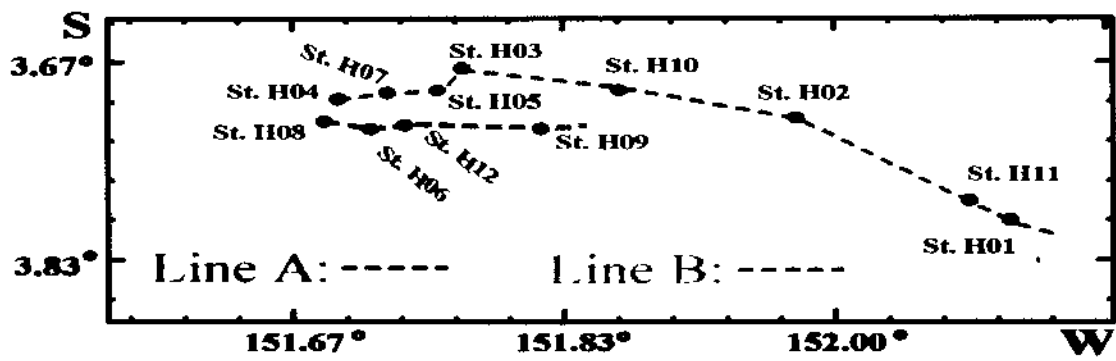
Fig. 3-9. Vertical profiles of water temperature, transparency and H₂S at station H01 in the study area.

확산보다는 등밀도 경계선을 따라 수평적으로 확산되기 때문에 서로 다른 기원의 공급원을 갖고 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 연구결과에서와 같은 이상고농도는 열수작용에 의한 영향이 주 공급원으로 판단되고, 황화수소의 농도가 plume의 규모나 화산활동의 활성도에 비례한다면, 정점 H07의 남북방향에 가장 큰 공급원이 있을 것으로 사료된다.

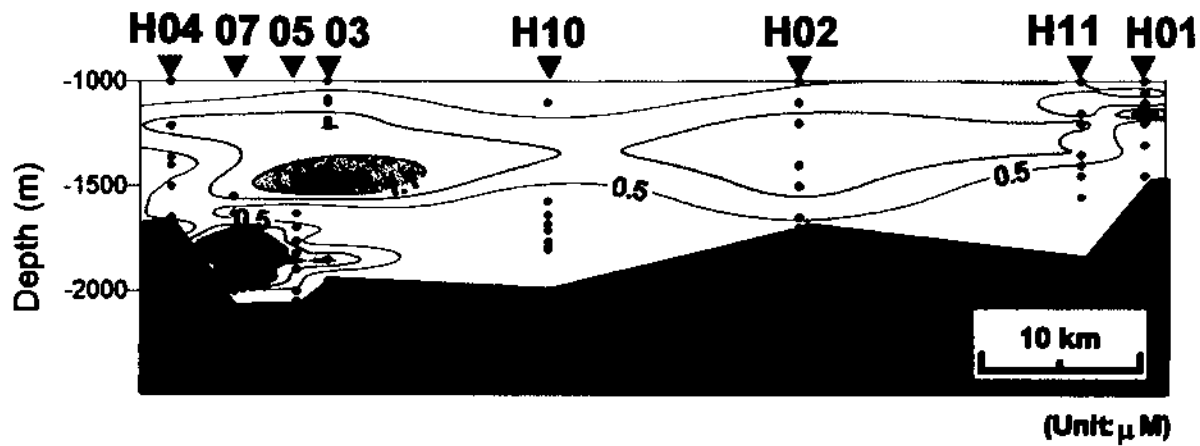
제 3 절 결 론

본 연구는 남서태평양 해역의 12개 정점에서 수온, 염분, 투명도, pH, 영양염류 및 황화수소 등을 연구하였다. 연구해역은 해저화산활동이 활발한 해역으로 알려져 있는 Papua New Guinea 비스마르크 해역으로 PACMANUS, DESMOS 그리고 Susu Knolls 등을 포함한다. 본 연구의 목적은 해수의 지화학적 추적자를 이용 열수광상 탐사기법을 개발하고, 해양자원개발과 관련 국가적 관심해역인 서태평양 해역 주변의 중·장기 환경지표 마련을 위한 자료 구축에 있다.

연구결과 부유물 및 황화수소의 이상농도층을 확인하였다. 특히, 선상에서 분석된 황화수소는 0~3.31 μM 의 범위와 평균 0.63 μM 을 보였고, 1.5 μM 이상의 황화수소 이상농도를 보인 정점은 총 12개 중 5개 정점(정점 H01, 02, 03, 07, 08)으로 PACMANUS와 Susu Knolls 해역 수심 1,000~1,700 m 부근의 수층 들이다. 이러한 이상농도 현상은 열수작용에 기인된 것으로 판단되며, 이들 층에서의 투명도 결과에서도 열수작용에 따른 부유물의 증가 현상을 보였다. 이는 열수분출에 의한 직접적 영향으로 판단되며, 따라서 이상의 결과는 지구물리 자료, 지형구조 및 퇴적물 지화학 분석 등의 자료들과 상호 정보교환을 통하여 열수광상 탐사기법의 효율을 극대화할 수 있을 것으로 사료된다.



Line A



Line B

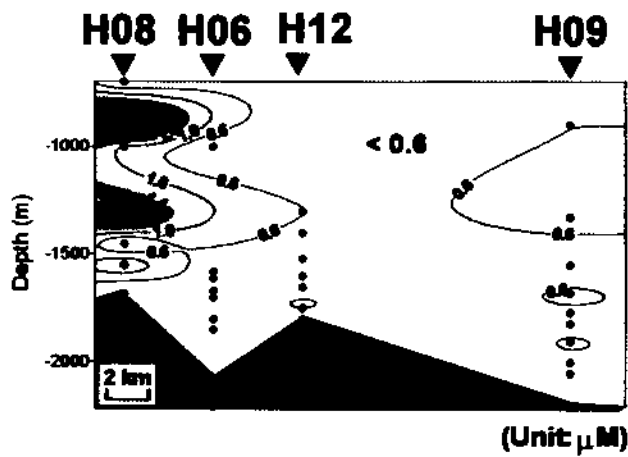
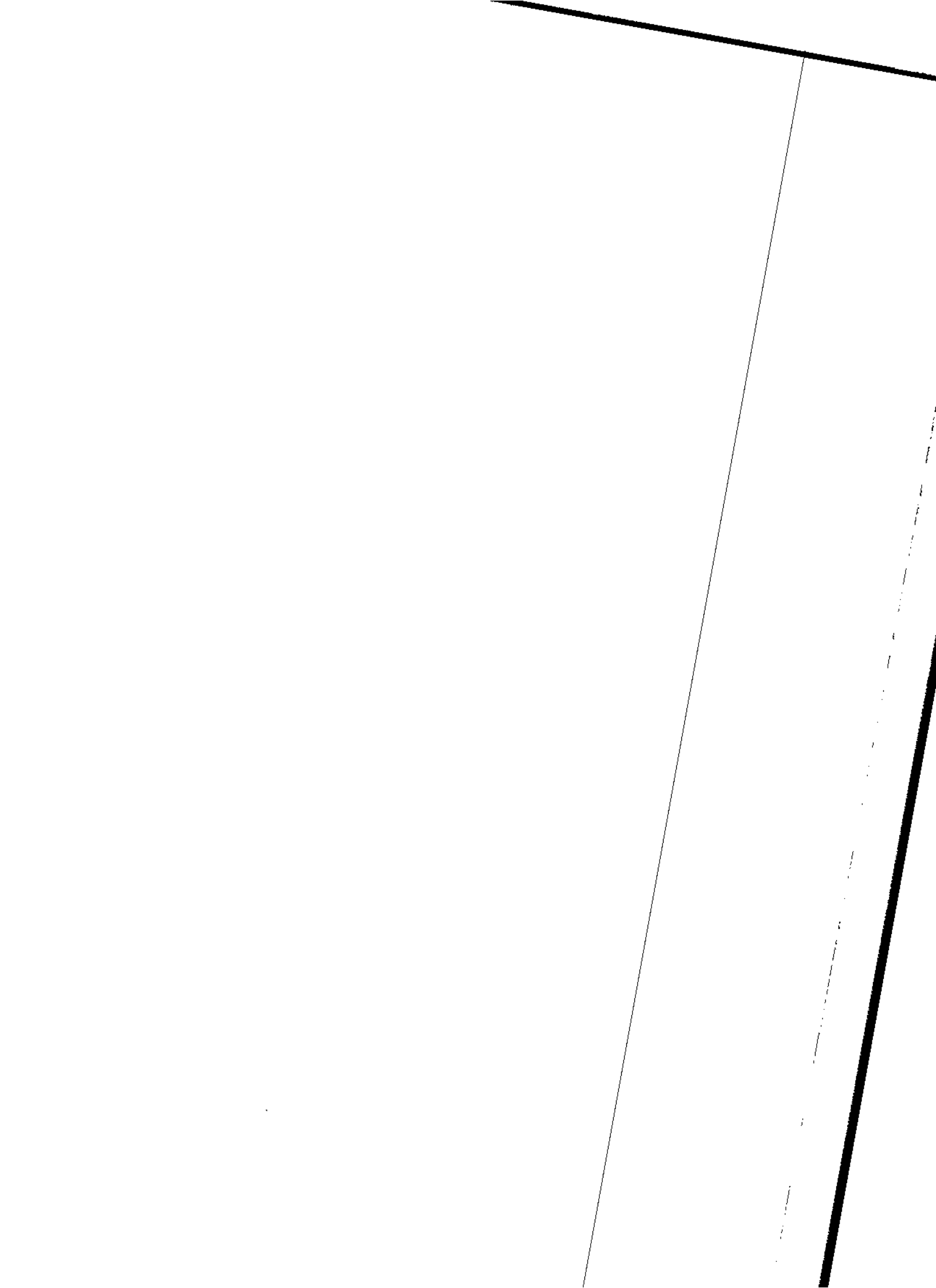


Fig. 3-11. Vertical cross-section of H_2S in the study area.

- Goyet, C. and E.T. Peltzer, 1994. Comparison of August-September 1991 and 1979 surface partial pressure of CO₂ distribution in the equatorial Pacific Ocean near 150° W. *Mar. Chem.*, 45:257-266.
- Hannington, M.D., I.R. Jonasson, P.M. Herzig and S. Petersen, 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, 115-157.
- Helfrich, K.R. and K.G. Speer, 1995. Oceanic Hydrothermal Circulation: Mesoscale and Basin-Scale Flow, In: *Seafloor Hydrothermal system*, edited by Humphris, S.E., R.A. Zierenberg, L.S. Mullineaux and R.E. Thomson, American Geophysical Union, pp. 347-356.
- Hessler, R.R. and V.A. Kaharl, 1995. The deep-sea hydrothermal vent community: An overview, In: *Seafloor Hydrothermal system*, edited by Humphris, S.E., R.A. Zierenberg, L.S. Mullineaux and R.E. Thomson, American Geophysical Union, pp. 72-84.
- Horibe, Y., K.-R. Kim and H. Craig, 1986. Hydrothermal methane plumes in the Mariana back-arc spreading centre. *Nature*, 334:131-133.
- Lilley, M.D., R.A. Feely and J.H. Trefry, 1995. Chemical and biochemical transformations in hydrothermal plumes, In: *Seafloor Hydrothermal system*, edited by Humphris, S.E., R.A. Zierenberg, L.S. Mullineaux and R.E. Thomson, American Geophysical Union, pp. 357-368.
- Lupton, J.E., 1995. Hydrothermal plumes: near and far field. In: *Seafloor Hydrothermal system*, edited by Humphris, S.E., R.A. Zierenberg, L.S. Mullineaux and R.E. Thomson, American Geophysical Union, pp. 317-346.
- Millero, F.J. and M.L. Sohn, 1992. *Chemical Oceanography*. CRC press, Boca Ration, 414pp.

참 고 문 헌

- 한국해양연구소, 1998. 서태평양 고코발트각의 분포 및 성인연구. 한국해양연구소 BSPE 98729-00-1172-7, 168pp.
- 해양수산부, 1999. 남서태평양 망간각 탐사 및 개발사업. 해양수산부 CRPM 99022-00-1207-7, 263pp.
- Belviso, S., P. Jean-Baptiste, B.C. Nguyen, L. Merlivat and L. Labeyrie, 1987. Deep methane maxima and ^3He anomalies across the Pacific entrance to the Celebes Basin. *Geochim. Cosmochim. acta*, 51:2673-2680.
- Bower, T.S., A.C. Campbell, C.I. Measures, A.J. Spivack, M. Kodem and J.M. Edmond, 1988. Chemical controls on the composition of vent fluids at 13°N - 11°N and 21°N , East Pacific Rise. *J. Geophys. Res.*, 93:4522-4536.
- Campbell, A.C., T.S. Bowers, C.I. Measures, K.K. Falkner, M. Khadem and J.M. Edmond, 1988. A time series of vent fluid compositions from 21°N , East Pacific Rise(1979, 1981, 1985), and the Guaymas Basin, Gulf of California (1982, 1985). *J. Geophys. Res.*, 92:4537-4549.
- Charlou, J.L., H. Bougault, P. Appriou, P. Jean-Baptiste, J. Etoubleau and A. Birolleau, 1991. Water column anomalies associated with hydrothermal activity between $11^\circ 40'$ and 13°N on the East Pacific Rise: discrepancies between tracers. *Deep-Sea Research*, 38:569-596.
- Chester, R., 1996. *Marine geochemistry*. Chapman & Hall, London, 698pp.
- Cowen, J.P., G.J. Massoth and R.A. Feely, 1990. Scavenging rates of dissolved manganese in a hydrothermal vent plume. *Deep-Sea Research*, 37:1619-1637.
- Fisher, C.R., 1995. Toward an appreciation of hydrothermal-vent animals: Their environment, physiological ecology, and tissue stable isotope values, In: *Seafloor Hydrothermal system*, edited by Humphris, S.E., R.A. Zierenberg, L.S. Mullineaux and R.E. Thomson, American Geophysical Union, pp. 297-316.



- Murray, J.W., E. Johnson and C. Garside, 1995. A U.S. JGOFS process study in the equatorial Pacific (EqPac): Introduction. *Deep-Sea Res.*, 42:275-293.
- Nelson, D.C. and C.R. Fisher, 1995. Chemoautotrophic and methanotrophic endosymbiotic bacteria at vents and seeps. In: *The Microbiology of Deep-Sea Hydrothermal Vents*, vol. edited by D.M. Karl, CRC Press, Boca Raton, pp. 125-167.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, New York, 173pp.
- Pichler, T., J. Veizer and G.E.M. Hall, 1999. The chemical composition of shallow-water hydrothermal fluids in Tutum Bay, Ambitle Island, Papua New Guinea and their effect on ambient seawater. *Mar. Chem.*, 64:229-252.
- Schlesinger, H.W., 1991. *Biogeochemistry: An analysis of global change*. Academic Press, New York. 443pp.
- Speer, K.G. and P.A. Rona, 1989. A model of an Atlantic and Pacific hydrothermal plume. *J. Geophys. Res.*, 94:6213-6220.
- Spencer, C.P., 1975. The micronutrient elements. In: *Chemical Oceanography*, edited by J.P. Riley and G. Skirrow, Vol. 2, Academic Press, London, 647pp.
- Tivey, M.K. and R.E. McDuff, 1990. Mineral precipitation in the Walls of black smoker chimneys: A Quantitative model of transport and chemical reaction. *J. Geophys. Res.*, 95:12617-12637.
- Thompson, G., 1983. Hydrothermal fluxes in the ocean. In: *Chemical Oceanography*, edited by Riley, J.P. and R. Chester, Academic Press, London, pp. 271-337.
- Von Dam, K.L., 1988. Systematics of and postulated controls on submarine hydrothermal solution chemistry. *J. Geophys. Res.*, 93:4551-4562.

Von ~~Damn~~, K.L., J.M. Edmond, B. Grant, C.I. Measures, B. Walden and R.F. Weiss, 1985. Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21 ° N East Pacific Rise. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49:2197-2220.

제 4 장 기반암 특성

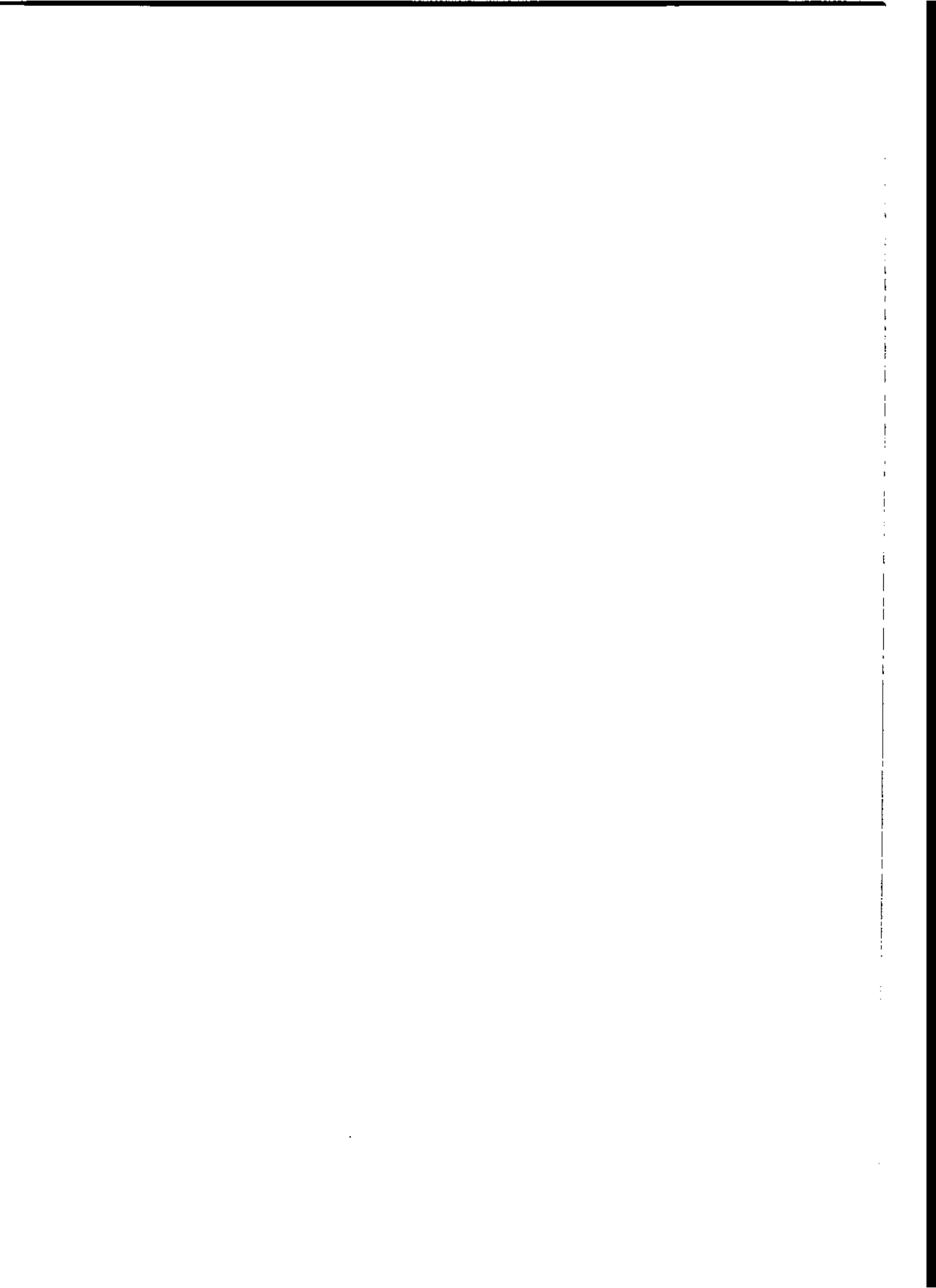
제 1 절 서 론

제 2 절 지역개관 및 시료채취

제 3 절 실험방법

제 4 절 지화학적 특성

제 5 절 토 의



제 4 장 기반암 특성

제 1 절 서 론

Manus Basin은 중앙부가 췌기 형태로 비스듬하게 확장(oblique spreading)되는 독특한 배호분지이다(Taylor, 1976; Taylor *et al.*, 1994; Martinez and Taylor, 1995). Manus Basin의 서쪽과 중앙에는 WSC(West Spreading Center)와 MSC(Mid Spreading Center)로 명명된 2개의 확장대(spreading zone)가 분포하며 남동쪽에는 SER(South East Rift)로 불리우는 1개의 열개대(rifting zone)가 분포하고 있는데 이들은 각각 2개의 단층으로 연결되어 있다(Martinez and Taylor, 1995). Manus Basin는, 태평양 판의 섭입이 ontong java plateau의 관입으로 중단되고 남쪽에서 새로운 섭입대가 성립되면서 형성된, 독특한 조구조 진화 역사(tectonic history)를 갖고 있다(Marlow *et al.*, 1991). 이번 탐사 지역은 Manus Basin 동쪽 중앙에 위치하며 수많은 열수 작용이 관찰되고 보고되고 있는 SER을 대상으로 하여 실시되었다. 이 지역의 기반암은 데사이트 계통의 산성암이며 활발한 열수 작용에 의해 형성된 열수광상이 풍부하게 부존하고 있는 지역이다(Binns and Scott, 1993). 이 지역은 현재 육상에서 풍부한 광량을 보이는 일본의 구로코 타입 광상과 유사한 메커니즘에 의해 열수 광상이 형성되고 있는 지역으로도 알려져 있다.

이 지역의 활발한 열수 작용은 독특한 조구조 환경에서 기인하는 것으로 생각되는데, 이 지역의 조구조 환경과 역사는 이 지역의 지질구조를 형성했고 또 이 지역에 분포하는 암석의 특성에도 반영되어 있을 것이다. 따라서 역으로 암석들에 대한 화학 동역학(chemical geodynamics)적 연구와 지질구조에 대한 종합적인 연구를 통해 이 지역의 조구조 환경과 역사를 보다 구체적으로 이해할 수 있을 것이다. 이러한 종합적인 이해에 도달했을 때 활발한 열수 작용의 원인과 분포, 더 나아가 열수 광상의 존재형태와 부존량을 평가할 수 있는 길이 열릴 수 있을 것이다.

현재까지 Manus Basin의 조구조적인 역사에 대한 연구는 비교적 활발히 진행되었으나 이 지역 기반암에 대한 암석화학적 연구는 매우 부족한 상태이다. 이 보고서에서는 이 지역의 복잡한 조구조 환경에서 기원했으리라고 생각되는 기반암의 지화학적 특성을 밝히고자 한다.

제 2 절 지역개관 및 시료 채취

이번 탐사는 가장 열수작용이 활발하고 열수 광상이 분포하는 것으로 알려져 있는 SER을 대상으로 수행하였다. SER은 지각의 열개와 화산활동에 의해 매우 복잡한 지형을 나타낸다. 지금도 열수 분출이 활발히 진행되고 있고 많은 다량의 열수 침니(chimney)의 분포가 확인된 Pual Ridge를 비롯 Yuam Ridge, Marmin Knoll, 역시 열수와 침니의 분포가 확인된 Susu Knolls, 그리고 강산성의 열수 분출구가 발견된 DESMOS 칼데라 등 해령과 작은 해저산, 칼데라 등이 분포한다(Binns and Scott, 1993). 비교적 오래된 해양 지각이 열개되면서 마그마가 형성되어 지속적인 화산분출이 생기게 되고 소규모의 Ridge, Knoll, Caldera 등이 만들어진 것으로 생각된다.

시료를 채취한 지역의 특성을 간략하게 정리하면 아래와 같다. Pual ridge는 SER의 서쪽에 위치하는 해령으로서 상부에는 호주와 캐나다에 의해 1993년 발견된 PACMANUS 지역이 분포하고 있다. SER 중앙 부분에는 일본에 의해 산성 Plume의 존재가 확인된 DESMOS 칼데라가 분포하고 있으며 동쪽에는 최근 열수 작용이 확인된 SuSu Knolls이 분포하고 있다. 이밖에 Pual Ridge 서쪽에는 Marmin Knoll이 분포하고 있으며 동쪽으로는 Pual Ridge와 평행하게 Yuam Ridge가 분포하고 있다(Binns and Scott, 1993). 시료 채취는 Pual Ridge의 정상부 동쪽 사면, 북동 사면, DESMOS 칼데라, SuSu Knolls 정상부에서 실시했으며 북동 Pual Ridge와 Yuam Ridge 사이의 분지에서 Piston core에 의해 올라온 시료 동쪽 사면에서 Piston core에 의해 채취된 시료 역시 분석했다. Pual Ridge와 DESMOS 지역의 시료는 비정질(aphyric)이었으며 SuSu Knolls 시료에는 매우 작은 사장석 반정들이

분포하고 있다. 드렛지는 모두 10회를 실시했고 각 드렛지의 위치 및 채취된 시료의 특성은 Fig. 4-1, Fig. 4-2와 Table 4-1에 정리되어 있다.

제 3 절 실험방법

각 드렛지 별로 채취된 암석들 중 신선한 시료를 선정한 후 소형 암석 절단기로 암석을 작게 잘랐다. 잘게 잘려진 암석들을 비이커에 옮겨 담고 초음파 세척기(ultra sonicator)로 작은 미세한 점토들이 완전히 없어질 때까지 수회에 걸쳐 세척하였다. 이 시료들을 오븐에서 50℃의 온도로 48시간 건조한 후 Ball mill을 이용해 완전히 분말화 하였다. 분말화된 시료 중 주원소는 XRF와 ICP-AES를 이용했는데 XRF의 경우 $LiBO_4$ 를 flux로 이용해 bead를 제작한 후 분석하였다(Phillips Co). V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Cd, Ba 등의 원소는 ICP-AES(Optima 3300DV, Perkin Elmer Co.)로, Pb, Cs, Nb, U, Th, Hf와 REEs(Rare Earth Elements)는 ICP-MS(PQII, VG element Co.)를 이용하여 분석했다. ICP-AES와 ICP-MS 분석을 위한 분말 시료 용해를 위해 먼저 0.2 g의 시료를 가압형 테프론 용기에 넣고, HF, HNO_3 용액을 각각 6:2의 비율로 넣은 후 뚜껑을 밀폐시키고, 후드 내에 설치된 가열판 위에서 175 ℃ 이하의 온도로 12시간 가열·용해시켰다. 시료들이 용해되었음을 확인한 후 다시 뚜껑을 열고 산들이 충분히 증발할 때까지 가열판 위에서 반응시켰다. 반응이 끝난 시료들은 0.1 N HNO_3 용액으로 20분 이상 용출시켜 30 ml 용기에 옮겨 담았고 최종량을 30 g 이 되도록 맞추었다. 그리고 원소에 따라 이 용액을 적절히 희석·분석하였다.

Table 4-1. Location and description of each dredge haul on SER

Dredge /Location	Latitude	Longitude	Depth (m)	Estimates of volume rock types recovered & descriptions
Pual Ridge				
HDg 1-1 (Roman Ruins)	3° 43.220 S 3° 43.438	151° 40.467 E 151° 40.526	1,694-1,678	60 Kg; 암석(99.9%)- 검은 색의 다공성 유리질 데사이트(dacite), 98%는 신선하며 약 1.9%가 변질되어 있음. 대부분의 데사이트가 열 개되어 있음. 가타(1.9%)- 0.1 % 정도의 철산화물(iron oxide)과 황화물(sulfide)이 관찰됨.
HDg 1-2 (Roman Ruins)	3° 43.214 S 3° 43.459	151° 40.467 E 151° 40.539	1,702-1,690	100 Kg; 침니(5%)- 대부분 작은 조각들로 분출이 멈춘 대형 침니의 외각부분. 경석고(anhydrite)가 외피를 형성하고 있으며 이 위를 Fe-Mn 산화물이 얇게 피복하고 있음. 경석고 층 안쪽으로 약 1cm 두께의 sphalerite 층이 형성, 그 다음 안쪽으로 다공질의 sphalerite 층이 형성되어 있음. 암석(95%)- 검은 색이며 다공성인 유리질 데사이트(HDg 1-1에 비해 덜 열개되어 있음).
HDg 1-3 (Roman Ruins)	3° 43.258 S 3° 43.467	151° 40.548 E 151° 41.162	1,728-1,680	300 Kg; 침니(1%)- 55cm×24cm 크기의 대형 침니와 수많은 침니 조각들이 채취됨. 대형 침니의 외각은 망간각으로 얇게 피복된 경석고이며 다음 sphalerite 층이 접하고 있고, 그 다음 안쪽으로 chalcopyrite 결정이 성장. 침니의 조각들 중 외부에 barite 결정이 성장한 것도 있음. 암석(99%)- 검은 색, 다공성, 유리질의 신선한 데사이트.
HDg 2 (Satanic Mills)	3° 43.725 S 3° 44.162	151° 40.371 E 151° 40.495	1,794-1,698	300 Kg; 암석(100%)- 검은색, 다공성, 유리질의 신선한 데사이트와 약간의 퇴적물.
HDg 3 (Tskushi field)	3° 43.713 S 3° 43.602	151° 39.990 E 151° 40.137	1,645-1,632	80 Kg; 암석(100%)- 검은색, 다공성, 유리질의 신선한 데사이트. 시료들 중 직경 2.5 cm의 매우 큰 기공들이 발달되어 있는 것도 있음. 이 시료들은 기공을 중심으로 동심원상의 조직을 보임.
HDg 4 (Eastern Pual Ridge)	3° 44.150 S 3° 43.849	151° 41.149 E 151° 40.965	1,994-1,759	90 Kg, 암석(100%)-현무암질 안산암(basaltic andesite), 검은색, 다공성이며 유리질 조직. 반정은 관찰되지 않음. 직경 약 6cm의 큰 기공을 중심으로 동심원상의 조직을 보이는 시료도 있음.

Table 4-1. continued

Dredge / Location	Latitude	Longitude	Depth (m)	Estimates of volume rock types recovered & descriptions
HDg 5 (Roman Ruins)	3° 43.232 S 3° 43.184	151° 40.504 E 151° 40.675	1,684-1,666	25 Kg; 암석(100%)- 검은색, 기공이 많으며 유리질인 신선한 데사이트. 일부 데사이트는 열수기원 망간산화물이 약 3mm 피복하고 있음.
HDg 7 (NE Pual Ridge)	3° 40.656 S 3° 40.439	151° 44.501 E 151° 44.664	1,838-1,812	50 Kg; 암석(99.5 %)- 신선한 데사이트(97 %), 부석(Pumice, 2.5%), 퇴적물(0.5%)- 미립의 연근해성 퇴적물(hemipelagic)
DESMOS				
HDg 6	3° 42.013 S 3° 41.408	151° 52.017 E 151° 51.998	2,038-1,808	300 Kg; 암석(100%)- 대부분 시료가 쪼개 형태를 보임(방사상으로 갈라진 radial joint) 둥형 암체 중 일부가 드래지에 의해 채워진 것으로 생각). 암회색, 다공질이며 반정은 관찰되지 않음. 외각으로부터 6개의 층이 관찰되는 시료도 있음(hyaloclastite→greenish gray→gray→vesicular gray→glassy black→yellow gray). 표면에 평행하게 쪼개짐(joint)이 일어난 샘플과 기공이 매우 발달된 시료들도 존재
SuSu Knolls				
HDg 8 (Suzette)	3° 47.202 S 3° 47.527	152° 05.626 E 152° 05.929	1,532-1,506	100 Kg; 침니(30%)- 대형 침니와 침니의 조각들이 채워되었음. 망간산화물이 얇게 부분 부분 피복된 경석고(anhydrite) 외각→sphalerite 층→chalcopyrite 결정 성장 내부에 기공들이 분포하며 기공 내부에는 chalcopyrite가 성장했음. 암석(60%)- 검은색이며 유리질의 데사이트. Pual Ridge나 DESMOS 지역의 암석들과는 달리 반정이 존재함. 퇴적물(10%)- 검은색이며 미립인 열수기원의 다금속 퇴적물(metaliferous sediments).

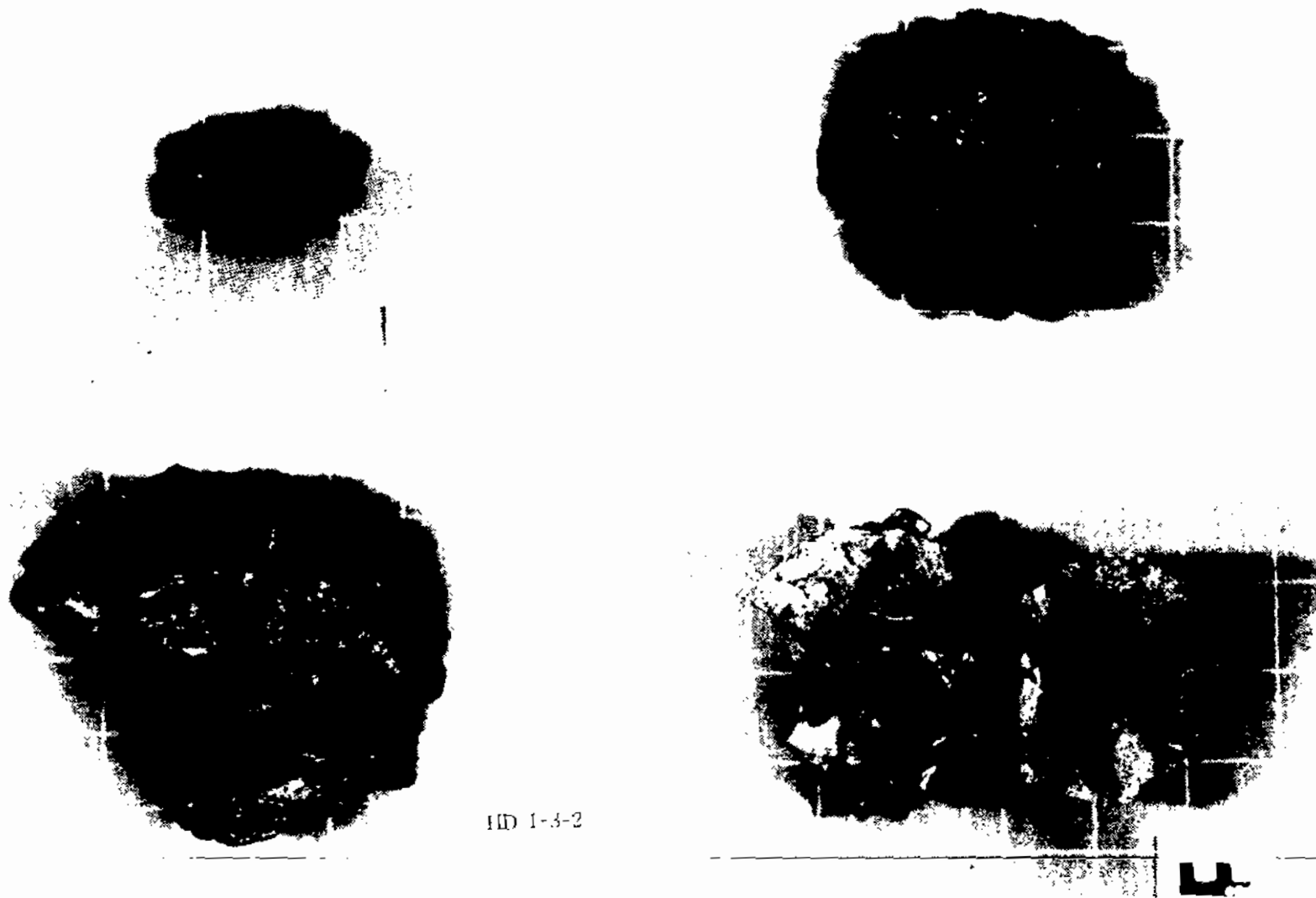
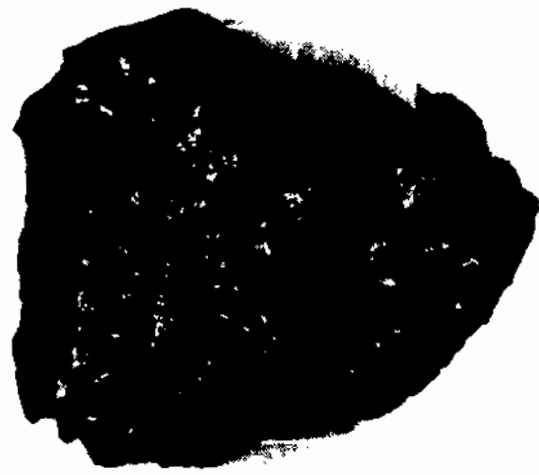


Fig. 4-1. Photographs of selective rock samples.
HD 1- 1 ~ 3 (summit area of Puar Ridge)



HD 2-1-1



HD 3-1-1



HD 3-1-2

Fig. 4-1. continued

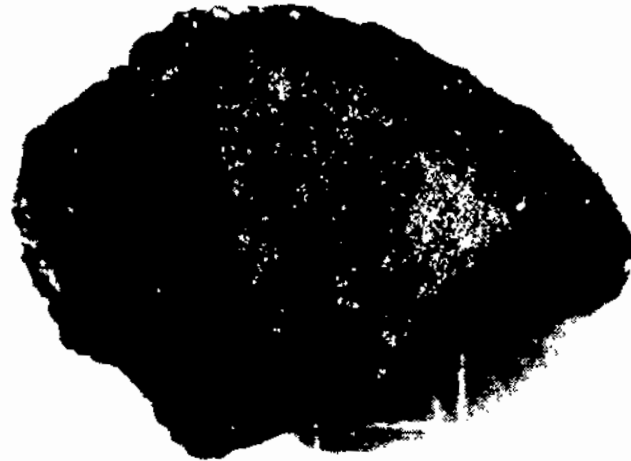
HD 2 ~ 3 (summit area of Puar Ridge)



HD 3-4-2



HD 4-3



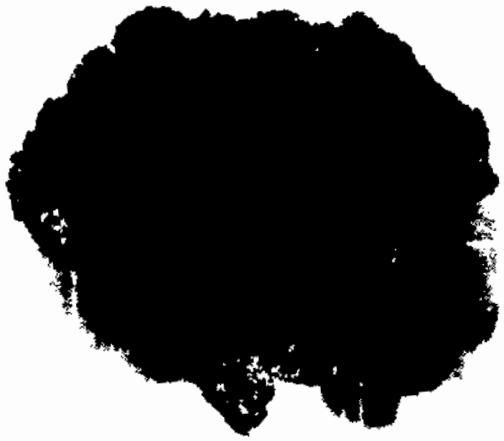
HD 4-4

Fig. 4-1, continued

HD 4 (eastern part of Pual Ridge)



Fig. 4-1, continued
HD 6 (DESMOS)



HD 7-2-1

HD 8-4-1



HD 8-5



Fig. 4-1. continued

HD 7 (north eastern part of Pual Ridge) HD 8 (SuSu Knoll)

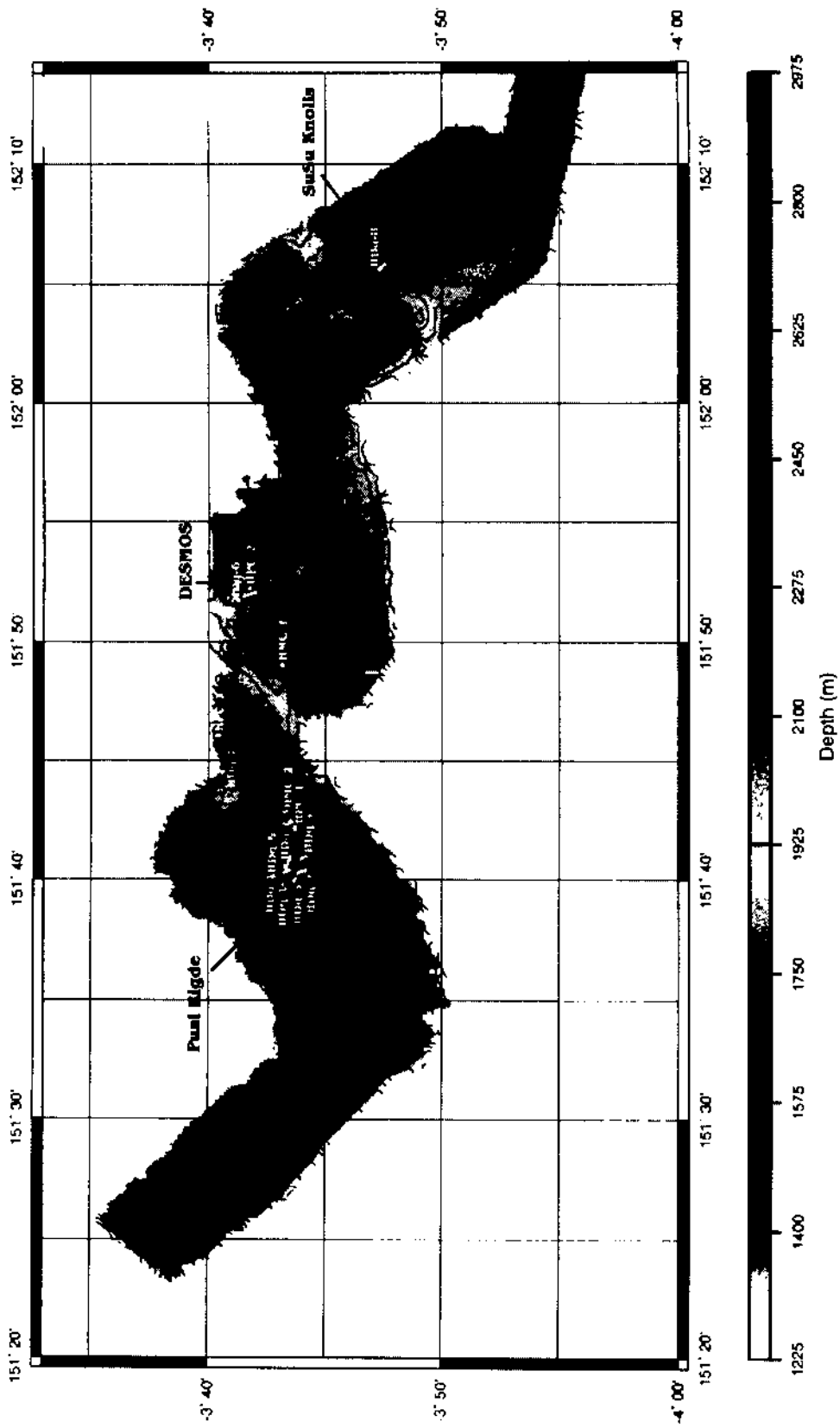


Fig. 4-2. sampling location map of SER.

제 4 절 지화학적 특성

1. 주원소

분석 결과는 Table 4-2에 정리되어 있다. TAS 도표에 의하면 Pual Ridge 정상, 북동 Pual Ridge 및 SuSu Knolls의 암석은 Dacite이며 Pual Ridge의 주변암은 안산암 DESMOS 지역의 암석은 현무암질 안산암으로 분류된다(Fig. 4-3). AFM 도표에 의하면 이 암석들은 모두 Calc-alkali 계열에 속하는데 Pual Ridge 및 그 주변암 그리고 SuSu Knolls의 암석은 정출 분화 작용에 의해 다양화된 같은 계열인 것으로 생각된다(Fig. 4-4). 반면 DESMOS 암석의 경우 Calc-alkali 계열에 속하기는 하지만 Pual Ridge와 그 주변 그리고 SuSu Knolls의 암석과 계열이 구분된다(Fig. 4-4). 그러나 현단계에서 DESMOS 암석이 휘석이 정출분화되기 전 즉 감람석 분화단계로서, 다른 암석들과 같은 계열로 볼 수 있을 지, 또는 근본적으로 다른 계열의 암석인지를 구별하기 힘들다. SiO_2 - K_2O 도표에 의하면 이 지역 암석들은 모두 Medium K의 calc-alkali 계열의 암석으로 분류되고 DESMOS를 포함하여 전체 시료가 같은 계열에서 분화한 것으로 도시된다(Fig. 4-5). 13% 이상의 높은 Al_2O_3 함량 역시 이 지역 암석이 calc-alkali 계열임을 지지한다(Table 4-2). 일반적으로 medium K의 calc-alkali 계열은 섭입되는 지판의 상부 지판(overriding plate)이 대륙 연변부인 호상열도에서 주로 나타난다. MgO 과 다른 주원소 상관관계 도표에 의하면 Pual Ridge와 그 주변 암석, 그리고 Susu Knolls 시료들은 같은 기원의 마그마에서 진화한 것으로 판단된다(Fig. 4-6). 반면 DESMOS 지역 암석의 경우 K_2O , Na_2O , CaO , TiO_2 의 경우는 동일 마그마의 분화과정으로 해석될 수 있는 가능성은 있으나 이 시료들에서 상대적으로 낮은 FeO , P_2O_5 의 농도는 일반적인 분화과정으로는 쉽게 해석되기 어려운 것으로 생각된다(Fig. 4-6).

Harker 도표 상에서 DESMOS 암석과 다른 지역 암석들과는 차이는 더욱 두드러진다(Fig. 4-7). 다른 지역의 암석들은 일반적인 마그마 분화 과정으로

Table 4-2. Chemical compositions of volcanic rock samples dredge in SER

Elements	Pual Ridge												
	HD1-1-1	HD1-1-2	HD1-1-7L	HD1-1-7H	HD1-1-8	HD1-2-2-1	HD1-2-2-2	HD1-3-2-1	HD1-3-2-2	HD1-3-3-1	HD2-1-2	HD2-1-3	HD3-1-1S
SiO ₂	69.89	69.78	64.84	65.63	65.26	69.31	68.29	69.10	68.75	69.16	70.45	69.86	67.57
TiO ₂	0.61	0.60	0.79	0.80	0.81	0.63	0.62	0.61	0.61	0.59	0.61	0.60	0.64
Al ₂ O ₃	13.90	13.86	14.69	14.77	14.63	14.12	13.76	13.63	13.73	13.73	13.83	13.88	13.84
FeO	4.34	5.06	5.73	5.57	5.83	4.43	4.41	4.27	4.24	4.13	4.27	4.24	4.96
MnO	0.13	0.15	0.16	0.15	0.15	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.13	0.15
MgO	0.91	1.04	1.90	1.79	1.92	0.93	0.93	0.88	0.84	0.84	0.87	0.88	1.76
CaO	3.07	3.56	4.57	4.49	4.63	3.12	3.12	3.01	2.97	2.92	3.04	3.01	3.78
Na ₂ O	4.91	4.88	4.45	4.42	4.49	4.84	4.97	4.88	4.89	4.75	4.77	4.93	4.65
K ₂ O	1.72	1.72	1.45	1.29	1.34	1.75	1.76	1.75	1.76	1.82	1.83	1.83	1.64
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.25	0.26	0.25	0.13	0.13	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12	0.15
sum	99.60	100.79	98.81	99.17	99.33	99.38	98.12	98.38	98.04	98.19	99.92	99.48	99.14
LOI	1.43	1.40	1.79	1.78	1.57	1.38	1.30	1.33	1.52	1.50	1.33	1.85	1.53
V	14.72	16.51	68.49	70.25	68.93	17.71	17.33	16.58	15.54	16.77	15.20	16.06	33.59
Cr	5.12	4.38	22.82	23.01	24.30	3.68	3.71	4.66	4.98	4.56	8.83	6.78	53.20
Co	64.83	44.56	214.19	213.87	200.90	37.41	54.55	62.86	82.44	56.73	63.53	177.14	78.42
Ni	18.40	18.35	22.94	23.64	24.15	18.82	19.57	19.46	20.63	19.92	20.67	20.89	29.49
Cu	17.51	19.37	28.37	28.01	27.55	18.75	19.72	19.55	19.17	19.36	19.68	19.86	18.93
Zn	70.40	71.07	80.50	84.05	80.53	74.87	76.39	74.10	76.81	75.48	75.50	74.65	77.68
Rb	44.56	36.56	35.40	29.87	29.55	37.62	25.31	45.53	42.44	35.30	39.95	30.00	42.32
Sr	265.91	252.23	344.47	327.35	338.11	276.33	236.72	267.23	263.61	255.10	251.14	247.86	300.82
Y	26.91	23.79	24.69	23.78	23.57	25.22	20.25	27.76	26.71	23.93	25.61	22.25	27.09
Zr	103.57	101.83	80.33	82.57	82.24	109.48	109.63	108.98	111.73	111.24	114.99	111.39	99.82
Nb	2.15	1.89	1.77	1.67	3.12	1.63	2.05	2.28	2.50	2.15	2.40	2.66	1.60
Cs	0.48	0.48	0.36	0.38	0.39	0.57	0.49	0.48	0.48	0.49	0.50	0.49	0.45
Ba	320.45	314.39	267.80	258.45	268.70	340.05	323.86	330.38	338.96	331.08	342.77	338.28	316.77
Hf	3.48	3.51	2.86	2.76	2.79	3.57	3.56	3.57	3.57	3.54	3.54	3.55	3.20
La	8.59	8.44	7.46	7.87	8.10	11.26	9.00	8.16	8.76	8.69	8.91	8.82	8.16
Ce	20.11	19.71	17.67	17.82	18.78	24.68	20.69	19.62	20.44	20.23	20.23	20.34	18.94
Pr	2.82	2.79	2.49	2.55	2.68	3.47	2.92	2.73	2.84	2.83	2.85	2.85	2.65
Nd	13.72	13.59	12.73	12.80	13.34	16.52	14.23	13.44	13.87	13.75	13.96	13.84	13.10
Sm	3.55	3.48	3.34	3.32	3.46	4.21	3.72	3.53	3.61	3.61	3.61	3.56	3.40
Eu	0.96	1.06	1.09	1.08	1.08	1.16	1.06	1.07	1.18	1.20	1.09	0.99	0.95
Gd	4.20	4.13	3.95	3.99	4.10	4.94	4.33	4.12	4.28	4.29	4.22	4.25	4.04
Tb	0.74	0.71	0.69	0.68	0.70	0.84	0.75	0.72	0.73	0.74	0.74	0.72	0.68
Dy	4.87	4.83	4.47	4.45	4.59	5.50	4.97	4.79	4.91	4.96	4.85	4.88	4.60
Ho	1.07	1.06	0.97	0.96	1.00	1.19	1.09	1.05	1.06	1.07	1.06	1.06	1.01
Er	3.36	3.38	3.00	2.96	3.04	3.72	3.37	3.29	3.26	3.32	3.33	3.32	3.12
Tm	0.52	0.52	0.46	0.46	0.48	0.57	0.53	0.52	0.52	0.53	0.52	0.52	0.49
Yb	3.55	3.49	3.12	3.08	3.17	3.95	3.59	3.58	3.48	3.60	3.56	3.54	3.35
Lu	0.55	0.57	0.49	0.48	0.49	0.61	0.58	0.56	0.56	0.56	0.57	0.56	0.53
Pb	4.87	4.58	3.79	3.92	3.85	4.67	4.83	5.17	4.67	4.55	4.69	4.85	4.36
Th	1.19	1.17	0.94	0.90	0.99	1.37	1.23	1.17	1.18	1.20	1.23	1.20	1.10
U	0.75	0.76	0.63	0.63	0.65	0.90	0.78	0.77	0.77	0.74	0.77	0.77	0.71

Table 4-2. continued

Elements	Puai Ridge											SuSu Knoll		
	HD3-1-11	HD3-2	HD3-4-1	HD3-4-2	HD4-4-1	HD4-4-2	HD4-4-3	HPC1	HD7-1	HD7-2	HPC3	HD8-4-1	HD8-4-2	HD8-5-2
SiO ₂	65.96	70.04	67.98	69.04	56.45	56.25	62.24	69.32	69.88	68.31	60.02	64.90	65.06	65.18
TiO ₂	0.65	0.60	0.74	0.59	0.94	0.95	0.93	0.61	0.55	0.60	1.02	0.75	0.77	0.76
Al ₂ O ₃	13.85	13.86	14.40	13.97	15.23	15.18	14.93	13.53	13.74	13.51	15.03	14.37	14.33	14.33
FeO	4.89	4.27	4.86	4.18	10.01	10.12	7.02	4.30	3.97	4.30	7.79	6.43	6.32	6.36
MnO	0.14	0.12	0.14	0.12	0.17	0.17	0.16	0.18	0.12	0.12	0.17	0.15	0.15	0.16
MgO	1.73	0.89	1.24	0.86	4.18	4.24	2.43	0.71	0.61	0.72	2.66	1.80	1.76	1.78
CaO	3.80	3.05	3.69	2.96	7.85	7.89	5.40	2.69	2.47	2.68	5.89	4.80	4.78	4.89
Na ₂ O	4.52	4.78	4.66	4.81	3.33	3.35	4.09	4.70	4.66	4.87	3.95	4.25	4.28	4.25
K ₂ O	1.63	1.87	1.65	1.78	0.91	0.94	1.55	1.85	2.14	2.08	1.24	1.14	1.15	1.10
P ₂ O ₅	0.15	0.12	0.19	0.12	0.24	0.24	0.39	0.12	0.10	0.12	0.44	0.22	0.22	0.22
sum	97.33	99.62	99.56	98.45	99.30	99.34	99.16	98.01	98.24	97.32	98.20	98.82	98.81	99.05
LOI	1.55	1.28	1.45	1.45	1.15	1.28	2.46	2.22	1.57	1.97	1.35	0.78	0.82	0.87
V	34.17	15.11	43.19	15.47	451.78	453.53	152.02	11.88	10.97	15.40	235.66	168.15	167.98	168.33
Cr	60.46	6.99	5.62	7.18	5.71	4.85	18.05	11.48	2.59	2.87	3.11	4.67	5.47	5.02
Co	99.51	114.17	122.49	94.78	80.02	95.12	168.60	277.85	111.33	109.35	101.79	79.77	67.63	84.42
Ni	30.74	20.90	19.50	20.87	12.07	12.31	17.43	21.60	21.15	20.28	11.84	11.81	12.20	11.97
Cu	19.93	19.81	31.10	19.59	507.49	499.75	23.38	11.16	18.25	18.87	32.88	139.85	140.92	139.36
Zn	79.12	74.59	79.33	74.88	77.84	78.31	86.50	82.13	75.52	77.05	90.35	85.10	86.11	85.62
Rb	38.94	31.84	44.67	42.76	21.73	23.47	35.05	46.91	50.25	37.60	32.64	25.33	24.97	25.84
Sr	289.70	232.37	310.17	269.41	399.62	409.65	407.65	271.85	278.10	277.08	448.53	409.94	409.27	412.79
Y	25.85	22.23	28.28	27.23	15.37	15.67	23.77	29.56	26.94	21.49	23.12	21.18	21.20	20.99
Zr	99.89	115.06	102.94	111.98	41.09	41.01	68.65	118.00	121.37	116.69	63.49	61.77	62.34	63.29
Nb	1.84	2.52	1.98	2.44	1.63	1.71	1.54	6.17	2.42	2.33	2.11	2.19	2.14	2.12
Cs	0.44	0.42	0.46	0.50	0.20	0.20	0.32	0.54	0.58	0.57	0.32	0.46	0.47	0.47
Ba	313.15	332.02	309.50	342.82	147.26	150.55	234.19	375.60	400.14	395.04	213.02	303.67	305.46	305.98
Hf	3.28	3.49	3.16	3.64	1.57	1.56	2.38	3.58	3.70	3.61	2.11	2.04	2.11	2.10
La	7.89	6.13	8.34	9.03	4.46	4.50	7.13	9.31	9.47	8.79	6.61	5.38	5.36	5.22
Ce	18.59	15.38	19.52	20.82	10.64	10.71	16.97	21.65	22.07	20.94	15.83	13.01	12.97	12.76
Pr	2.61	2.07	2.75	2.88	1.50	1.52	2.40	3.11	3.06	2.87	2.31	1.87	1.92	1.84
Nd	12.70	10.47	13.46	14.00	7.94	8.08	12.40	14.93	14.48	13.81	11.84	9.86	9.82	9.75
Sm	3.36	2.77	3.42	3.71	2.20	2.24	3.29	3.84	3.71	3.47	3.13	2.70	2.71	2.69
Eu	0.85	0.73	0.86	1.01	0.64	0.74	0.96	0.51	0.73	0.71	0.65	0.60	0.50	0.49
Gd	4.02	3.43	4.21	4.31	2.80	2.80	3.96	4.50	4.25	4.08	3.77	3.40	3.38	3.31
Tb	0.68	0.60	0.72	0.74	0.46	0.46	0.65	0.77	0.72	0.68	0.64	0.55	0.56	0.55
Dy	4.56	4.10	4.73	5.02	3.07	3.02	4.20	5.08	4.76	4.52	4.10	3.61	3.66	3.61
Ho	1.00	0.91	1.02	1.08	0.66	0.67	0.92	1.13	1.04	1.00	0.88	0.79	0.80	0.78
Er	3.09	2.83	3.12	3.33	1.98	1.98	2.72	3.37	3.22	3.08	2.60	2.36	2.33	2.38
Tm	0.50	0.47	0.51	0.52	0.32	0.32	0.45	0.57	0.54	0.52	0.44	0.39	0.40	0.41
Yb	3.35	3.13	3.42	3.62	1.97	2.03	2.89	3.67	3.57	3.35	2.68	2.46	2.47	2.45
Lu	0.53	0.50	0.53	0.57	0.31	0.31	0.44	0.57	0.55	0.51	0.41	0.38	0.36	0.37
Pb	4.39	4.76	4.38	5.02	2.27	2.31	3.38	6.06	5.83	5.85	3.29	4.29	4.45	4.35
Th	1.09	1.00	1.14	1.24	0.52	0.53	0.83	1.32	1.43	1.34	0.75	0.64	0.63	0.65
U	0.69	0.61	0.72	0.78	0.40	0.40	0.55	0.86	0.86	0.84	0.51	0.44	0.44	0.44

Table 4-2. continued

Elements	DESMOS														
	DESMOS PC	HD6-1-1	HD6-1-2	HD6-1-2*	HD6-1-3	HD6-1-4	HD6-1-6	HD6-1-7	HD6-2-L	HD6-2U	HD6-3S	HD6-3U	HD6-3L	HD6-4L	HD6-4U
SiO ₂	56.36	56.05	55.99	56.08	56.54	56.40	56.85	56.31	56.03	56.39	56.11	56.07	56.37	56.33	56.24
TiO ₂	0.55	0.55	0.54	0.55	0.57	0.54	0.55	0.56	0.57	0.59	0.56	0.57	0.55	0.55	0.56
Al ₂ O ₃	15.76	15.71	15.73	16.02	15.74	15.73	15.81	15.74	15.62	15.73	15.72	15.64	15.62	15.76	15.73
FeO	7.56	7.42	7.37	7.54	7.58	7.21	7.50	7.51	7.52	7.81	7.36	7.48	7.45	7.46	7.65
MnO	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14	0.14	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
MgO	6.09	5.58	5.72	5.90	6.01	5.40	5.92	5.99	5.87	6.20	5.91	5.90	5.85	5.89	5.97
CaO	9.82	9.62	9.54	9.75	9.79	9.27	9.76	9.87	9.70	10.12	9.48	9.65	9.55	9.50	9.90
Na ₂ O	2.88	2.64	2.70	2.68	2.66	2.62	2.62	2.62	2.65	2.65	2.70	2.61	2.61	2.65	2.66
K ₂ O	0.85	0.85	0.79	0.84	0.81	0.82	0.75	0.80	0.83	0.81	0.85	0.83	0.83	0.82	0.81
P ₂ O ₅	0.15	0.14	0.15	0.14	0.14	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.14	0.15
sum	100.16	98.70	98.67	99.64	99.99	98.30	100.03	99.67	99.08	100.60	98.98	99.05	99.11	99.25	99.82
LOI	1.02	1.71	0.93	1.07	1.12	1.25	1.08	1.03	0.97	0.58	1.72	0.83	0.88	0.90	1.13
V	244.68	244.13	246.36	243.20	246.28	244.84	247.27	242.34	244.95	255.21	239.15	245.63	245.87	225.20	241.38
Cr	78.75	73.95	74.21	76.86	73.91	73.42	76.64	78.34	70.44	80.41	77.21	73.64	75.18	69.65	76.68
Co	98.99	119.50	59.44	84.23	81.86	53.18	57.50	60.78	54.86	52.48	157.10	65.16	49.24	62.92	50.12
Ni	34.77	32.53	33.13	33.51	33.25	31.83	33.18	33.50	32.45	34.92	33.66	32.73	34.00	31.60	33.16
Cu	91.75	93.00	96.24	93.26	93.47	91.82	92.96	92.04	91.57	96.01	93.02	92.42	91.70	88.30	90.60
Zn	66.66	63.62	65.86	64.92	65.66	63.78	66.30	64.28	64.81	68.53	64.00	65.19	65.67	58.95	65.23
Rb	19.32	18.46	19.14	19.48	19.83	17.45	18.98	19.13	19.13	19.88	19.50	19.24	18.88	18.72	18.67
Sr	436.65	433.63	440.53	435.22	450.15	414.73	450.73	453.17	441.69	471.59	426.02	442.62	437.29	417.22	431.61
Y	12.70	11.84	12.29	12.19	12.17	11.70	12.44	12.12	12.33	12.94	12.08	12.40	12.45	10.60	12.42
Zr	38.27	36.68	37.72	37.17	36.94	36.53	37.54	36.53	37.24	39.10	36.96	37.39	37.49	35.11	37.48
Nb	2.23	1.88	1.46	1.34	1.64	1.12	1.07	1.22	1.03	1.03	4.06	1.44	1.22	1.52	1.02
Cs	0.24	0.20	0.22	0.23	0.23	0.20	0.23	0.22	0.23	0.24	0.23	0.23	0.22	0.23	0.23
Ba	172.48	174.06	175.80	172.43	178.68	167.58	178.20	176.86	174.85	186.87	169.99	175.58	174.40	165.22	171.03
Hf	1.34	1.37	1.38	1.37	1.37	1.30	1.32	1.34	1.37	1.45	1.32	1.40	1.32	1.31	1.37
La	3.92	3.92	4.05	4.01	4.03	3.75	4.09	3.99	4.06	4.25	4.03	4.05	4.07	3.99	4.04
Ce	9.21	9.31	9.53	9.36	9.52	8.93	9.53	9.34	9.55	9.99	9.42	9.50	9.47	9.27	9.52
Pr	1.28	1.28	1.30	1.28	1.28	1.22	1.30	1.27	1.31	1.37	1.31	1.31	1.31	1.28	1.29
Nd	6.67	6.69	6.89	6.75	6.76	6.47	6.84	6.74	6.85	7.12	6.86	6.80	6.85	6.78	6.75
Sm	1.70	1.72	1.75	1.74	1.77	1.68	1.81	1.75	1.78	1.90	1.76	1.78	1.73	1.75	1.83
Eu	0.27	0.52	0.55	0.54	0.50	0.52	0.56	0.48	0.43	0.50	0.50	0.46	0.48	0.54	0.47
Gd	2.08	2.05	2.04	2.04	2.04	1.93	2.06	2.05	2.12	2.21	2.04	2.06	2.06	2.04	2.13
Tb	0.34	0.33	0.33	0.34	0.34	0.32	0.34	0.33	0.33	0.35	0.33	0.34	0.33	0.33	0.34
Dy	2.20	2.07	2.13	2.14	2.16	2.03	2.11	2.14	2.20	2.25	2.15	2.15	2.16	2.12	2.20
Ho	0.47	0.46	0.47	0.45	0.47	0.44	0.47	0.46	0.48	0.50	0.46	0.47	0.46	0.45	0.47
Er	1.37	1.33	1.37	1.37	1.38	1.31	1.40	1.38	1.38	1.47	1.37	1.43	1.37	1.33	1.41
Tm	0.25	0.23	0.23	0.23	0.24	0.22	0.23	0.24	0.23	0.25	0.24	0.24	0.23	0.23	0.24
Yb	1.40	1.36	1.42	1.42	1.40	1.30	1.43	1.39	1.40	1.50	1.40	1.42	1.39	1.37	1.42
Lu	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21
Pb	2.44	2.32	2.37	2.27	2.40	2.27	2.45	2.45	2.60	2.64	2.58	2.50	2.52	2.62	2.49
Th	0.53	0.50	0.53	0.51	0.52	0.48	0.53	0.53	0.52	0.56	0.53	0.56	0.51	0.50	0.52
U	0.38	0.37	0.38	0.37	0.37	0.35	0.37	0.37	0.37	0.39	0.37	0.37	0.38	0.34	0.36

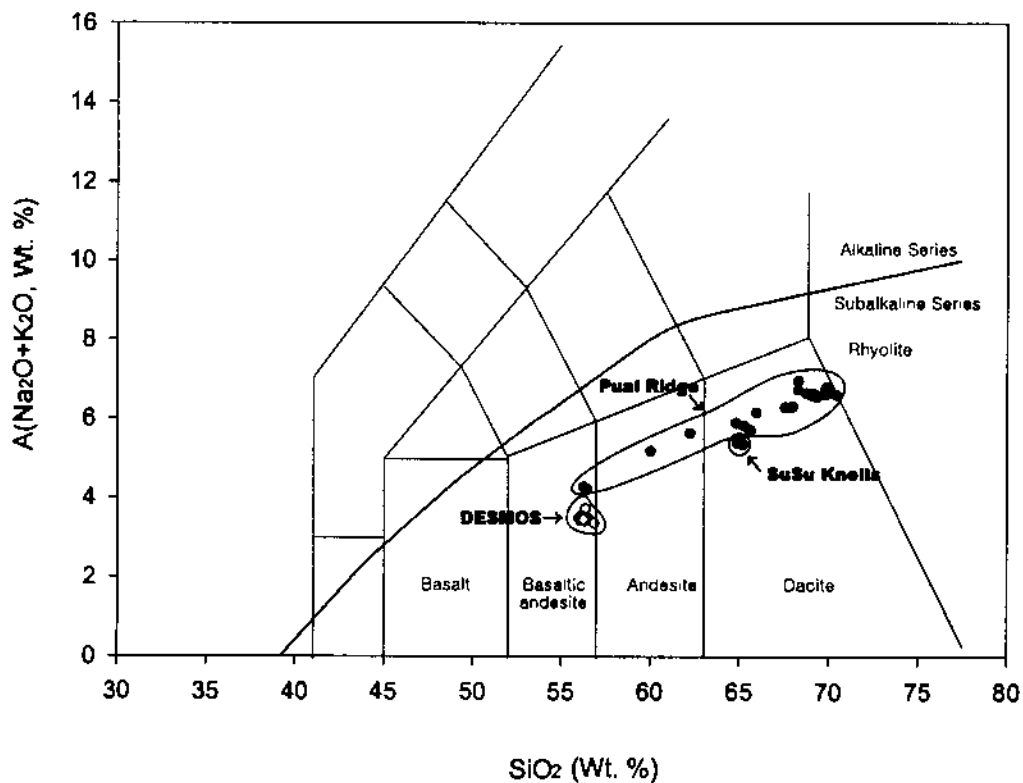


Fig.4-3. The chemical classification and nomenclature of volcanic rocks dredged from SER(South east rift) using the total alkalis versus silica diagram (TAS, after Le Maitre *et al.*, 1989). Dividing curve between alkaline and subalkaline on this diagram from Irvine and Barga (1971).

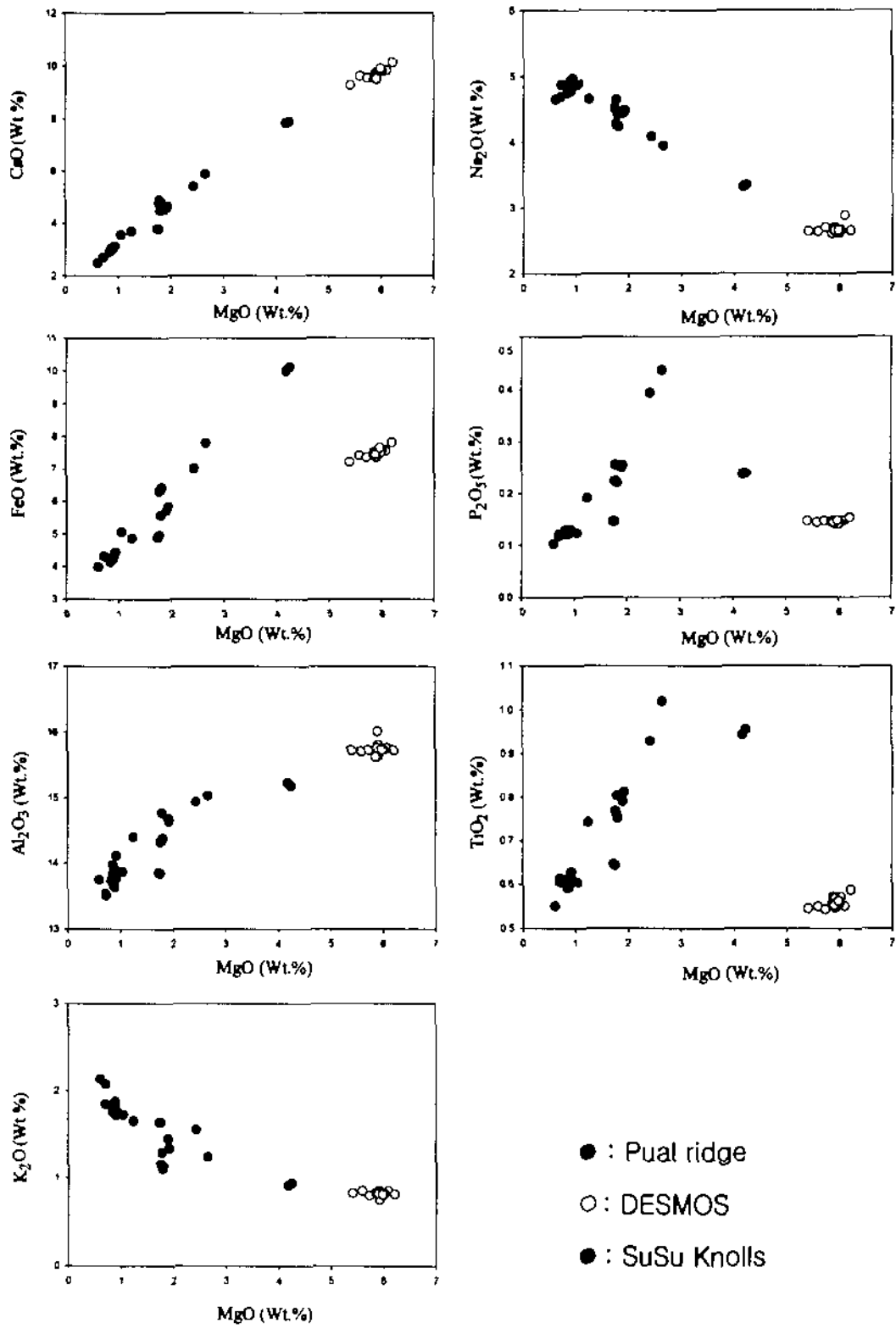


Fig. 4-6. Variation diagram of seven major oxides against MgO for SER rocks.

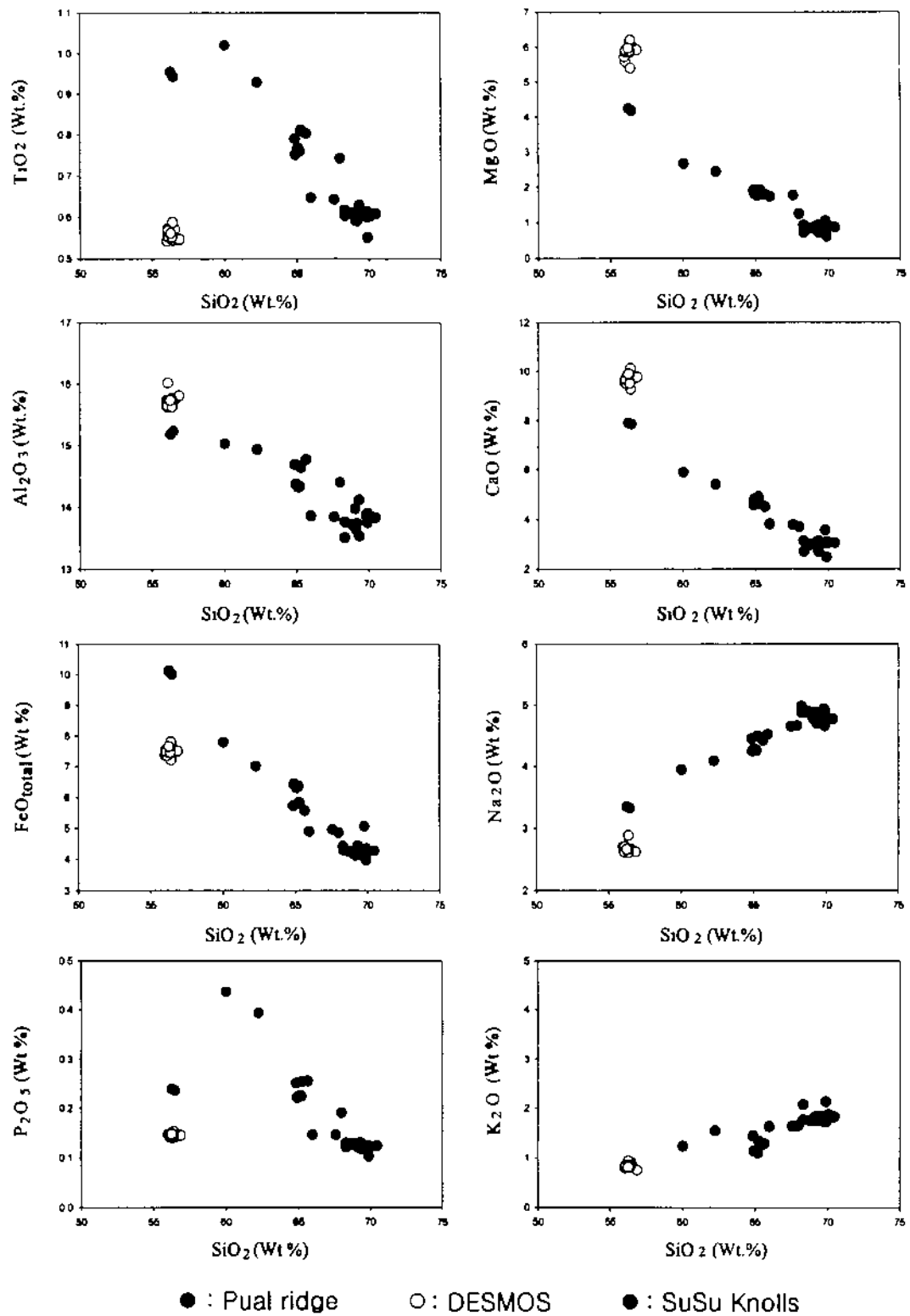


Fig.4-7. Harker variation diagram for SER rocks .

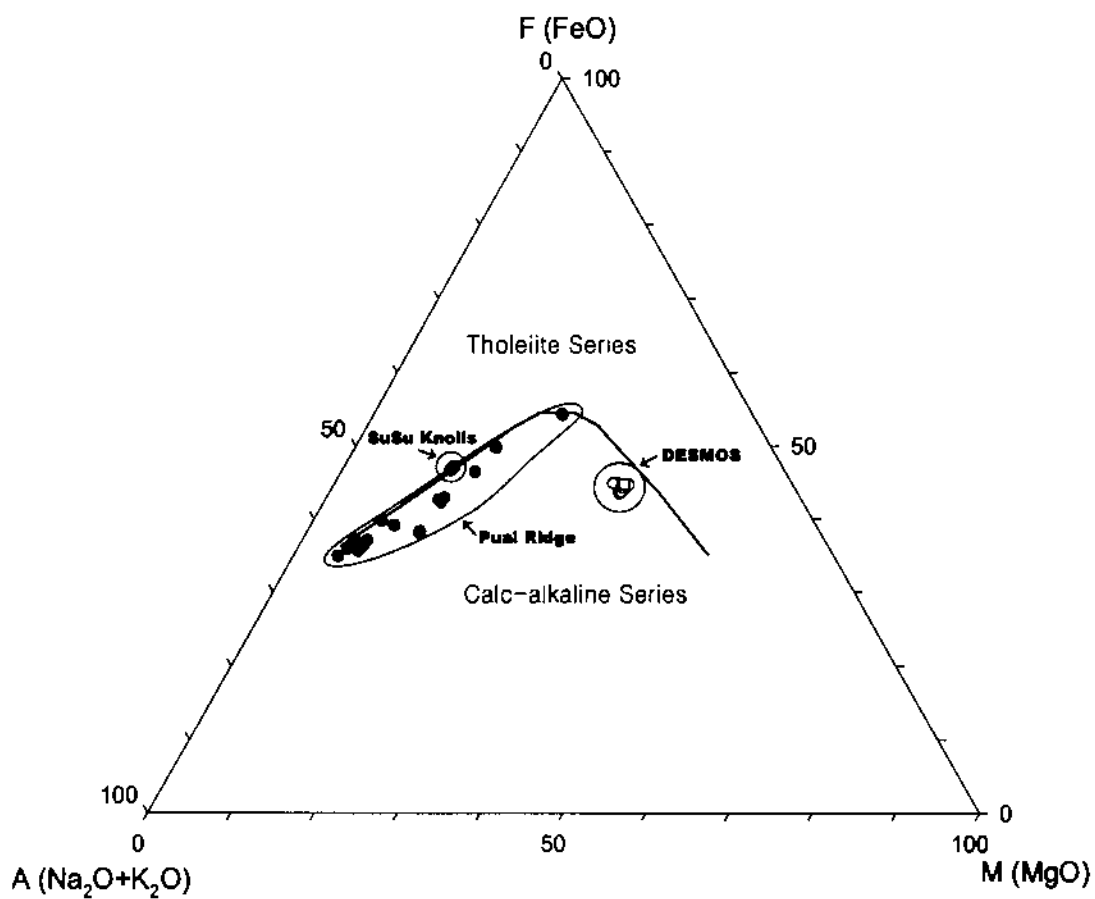


Fig. 4-4. AFM(Alkali, FeO, MgO) diagram for volcanic rock samples of SER to subdivide into tholeiitic series and calc-alkalic series (dividing curve from Irvine and Bargar, 1971).

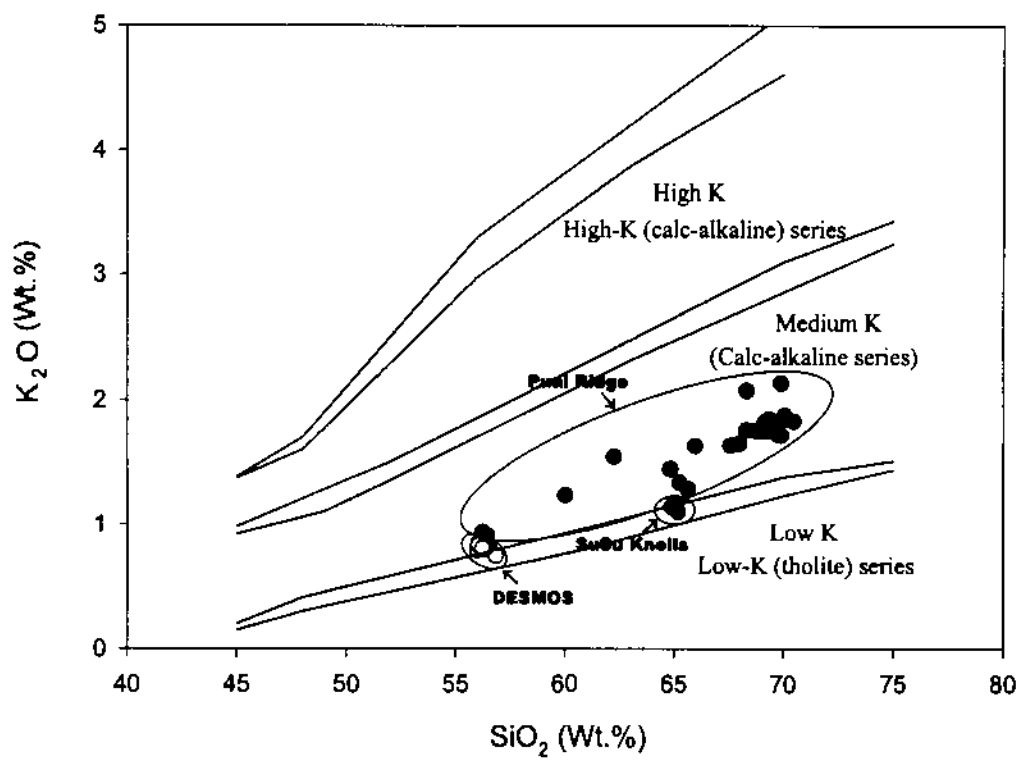


Fig. 4-5. The subdivisions of SER rock samples using K₂O versus SiO₂ diagram (dividing line from Rickwood, 1989).

이해될 수 있는데 반해, DESMOS 시료는 동일한 SiO_2 함량에서 Al_2O_3 , CaO , MgO 등의 함량이 확연히 높으며 Na_2O , FeO , TiO_2 , 그리고 P_2O_5 등의 원소는 그 함량이 확연히 낮다(Fig. 4-7). 일반적으로 Na_2O 의 함량은 맨틀의 용융 정도 및 생성당시의 온도와 관련이 있으며 FeO 는 생성당시 압력 그리고 P_2O_5 와 TiO_2 는 근원 맨틀 성분의 특성과 관련되어 있다(Langmuir *et al.*, 1992). 따라서 Pual Ridge 및 SuSu Knolls과 DESMOS 지역 시료의 주원소에서 나타나는 이러한 차이는 SER이 진화하는 과정에서 일어난 다양한 지구물리적 환경 변화가 마그마의 생성 조건의 변화를 가져왔음을 의미하는 것으로 생각된다. 즉 DESMOS 지역의 상대적으로 낮은 Na_2O 의 함량은 맨틀 부분 용융의 정도가 낮았기 때문으로 생각되고 FeO 함량차이는 맨틀의 부분 용융 당시의 압력에 차이가 있었음을 의미한다. 그리고 DESMOS 시료의 상대적으로 높은 Al_2O_3 의 함량은 마그마 형성당시 참여한 H_2O 의 함량이 상대적으로 높았을 가능성을 의미한다. 그러나 아직 DESMOS와 Susu Knolls 지역의 시료가 부족하기 때문에 모델을 이용한 용융 조건의 분석은 어려운 상태이며 앞으로 더욱더 많은 시료에 대한 분석이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

2. 미량원소

N-MORB로 표준화한 후 도시한 LIL(Large Ion Lithophile) 원소와 HFS(High Field Strength) 원소들의 분포 패턴은 시료별로 큰 차이를 보이지 않는데, 그 패턴은 이 지역의 암석들이 전형적인 호상열도 기원 암석(Island Arc Basalt, IAB)임을 지시한다(Fig. 4-8). LIL 원소들의 함량은 상대적으로 높아진 반면 HFS 원소들의 함량은 상대적으로 결핍되어 있으며 호상열도 암석에서 특징적으로 나타나는 Nb 결핍 현상이 확연히 나타난다(Fig. 4-8). Ti-Zr-Y 삼각도는 이 지역 암석들이 맨틀 Plume의 영향을 받지 않은 전형적인 호상열도 기원임을 나타낸다(Fig. 4-9). 그리고 Ti-Zr-Sr 삼각도 및 Ti-Zr 도표 역시 몇 개의 시료를 제외하고 모두 Calc-alkali 계열임을 나타낸다(Figs. 4-10, 4-11). 이 결과는 주원소에서 나타나는 경향과 대체적으로 일치한다.

Chondrite로 표준화한 REEs(Rare Earth Elements) 분포는 LREEs(Light REEs)가

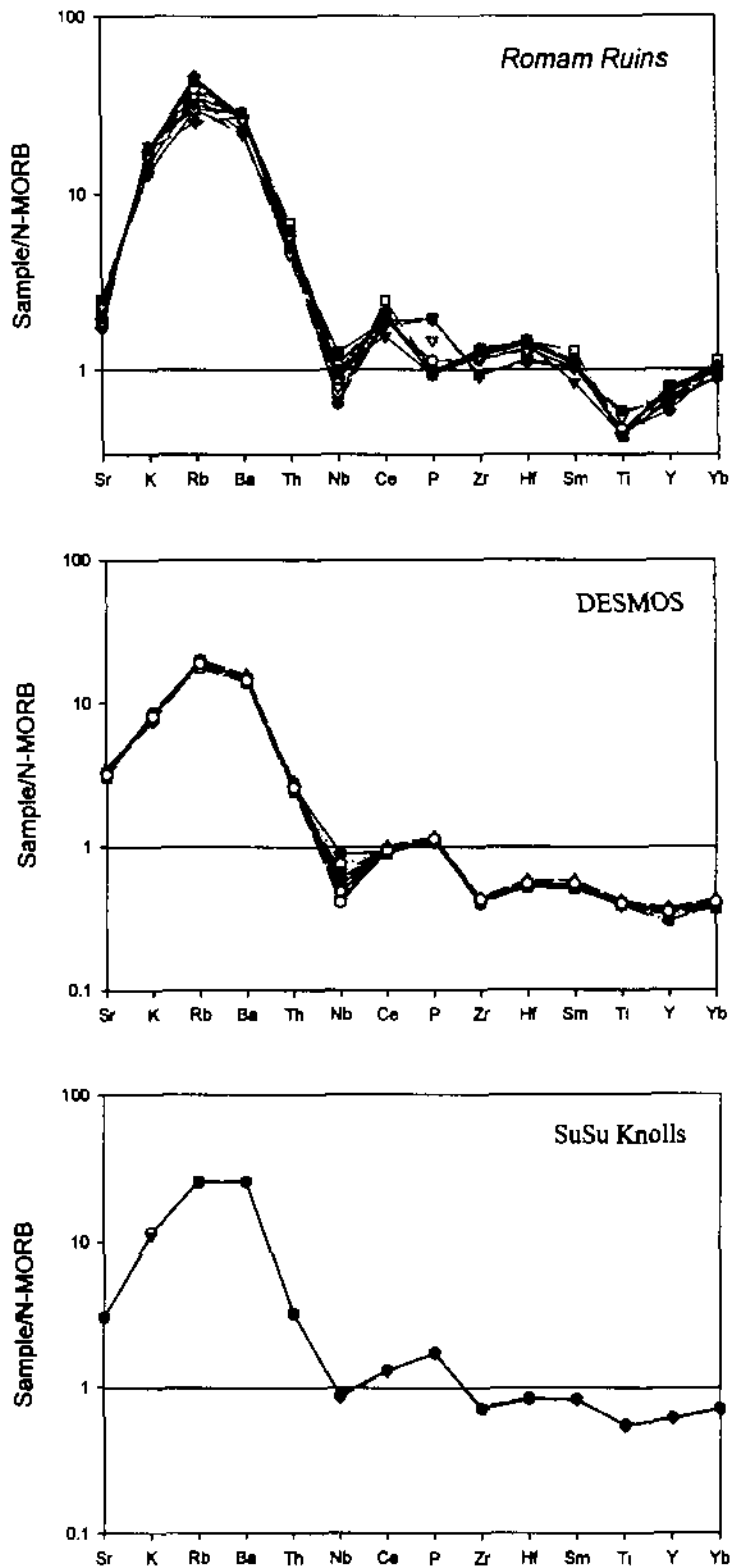


Fig. 4-8. The spider diagram of selected 'incompatible elements' normalized by N-MORB for volcanic rock samples of SER rocks.

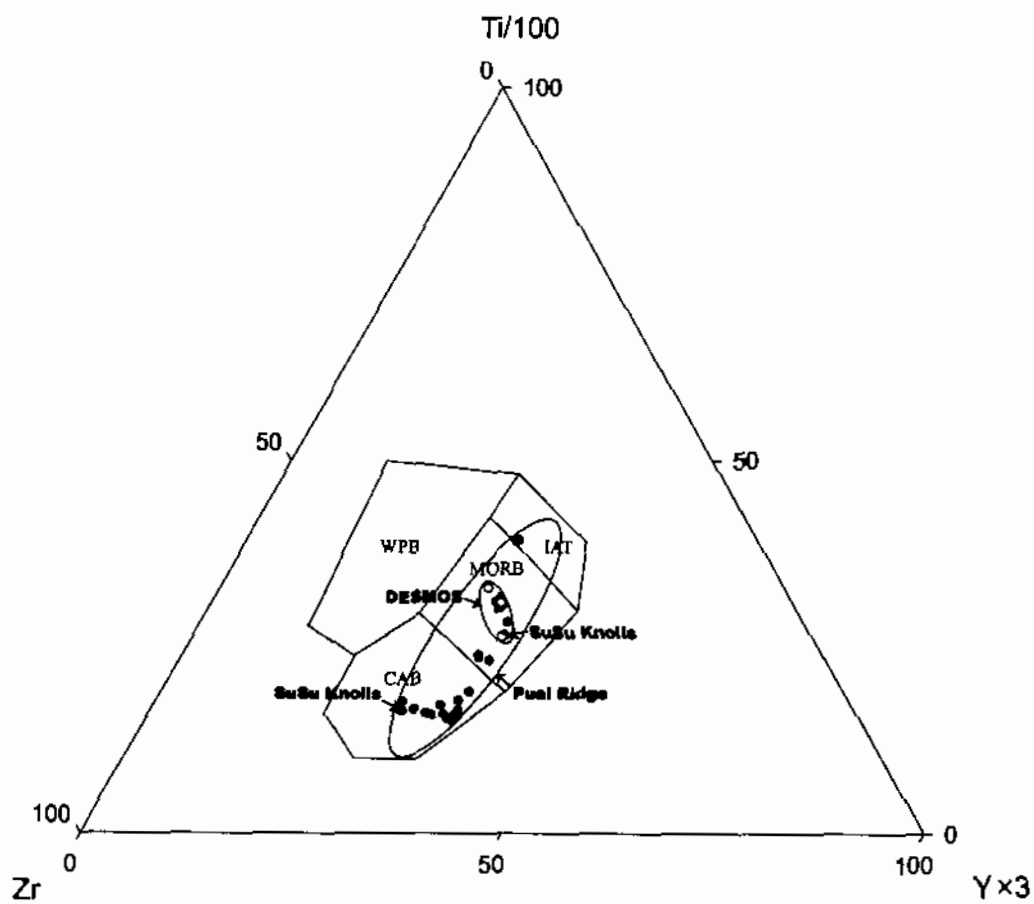


Fig. 4-9. Ti-Zr-Y ternary diagram to discriminate SER rocks from within plate basalt (WPB).

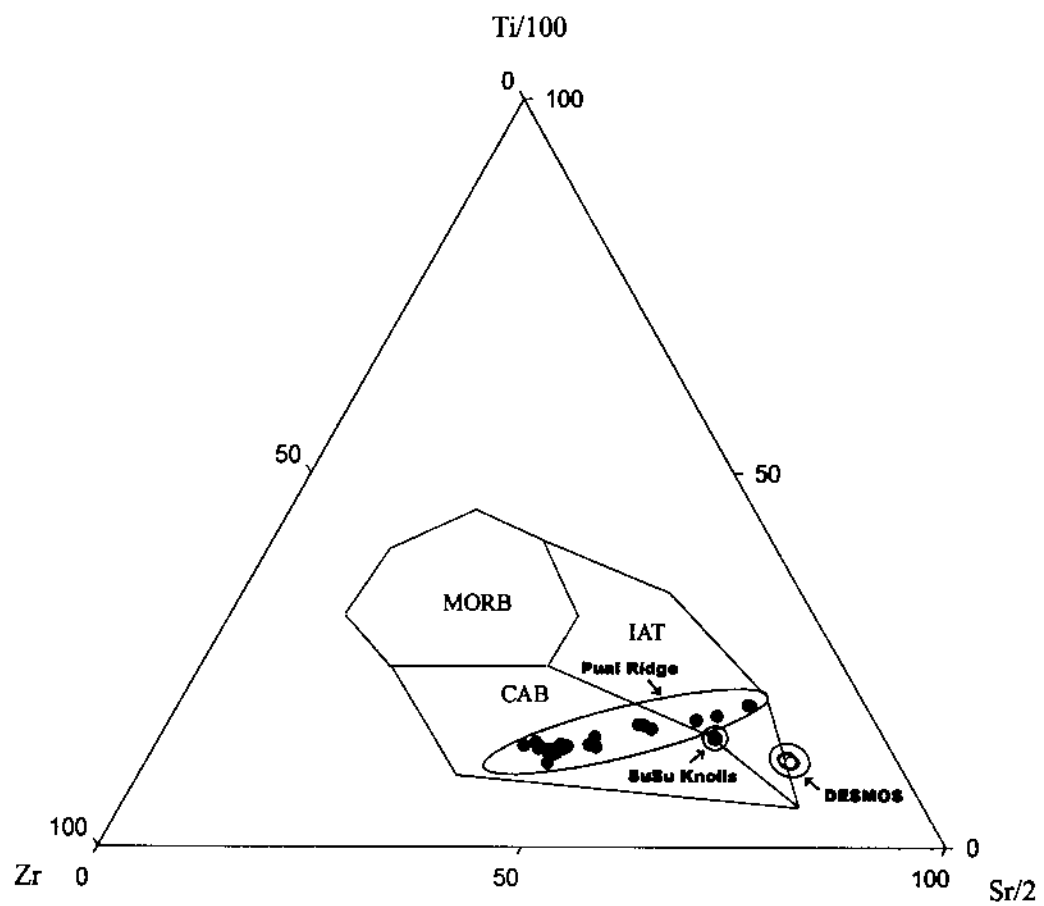


Fig. 4-10. Ti-Zr-Sr ternary diagram to discriminate SER rocks from MORB.

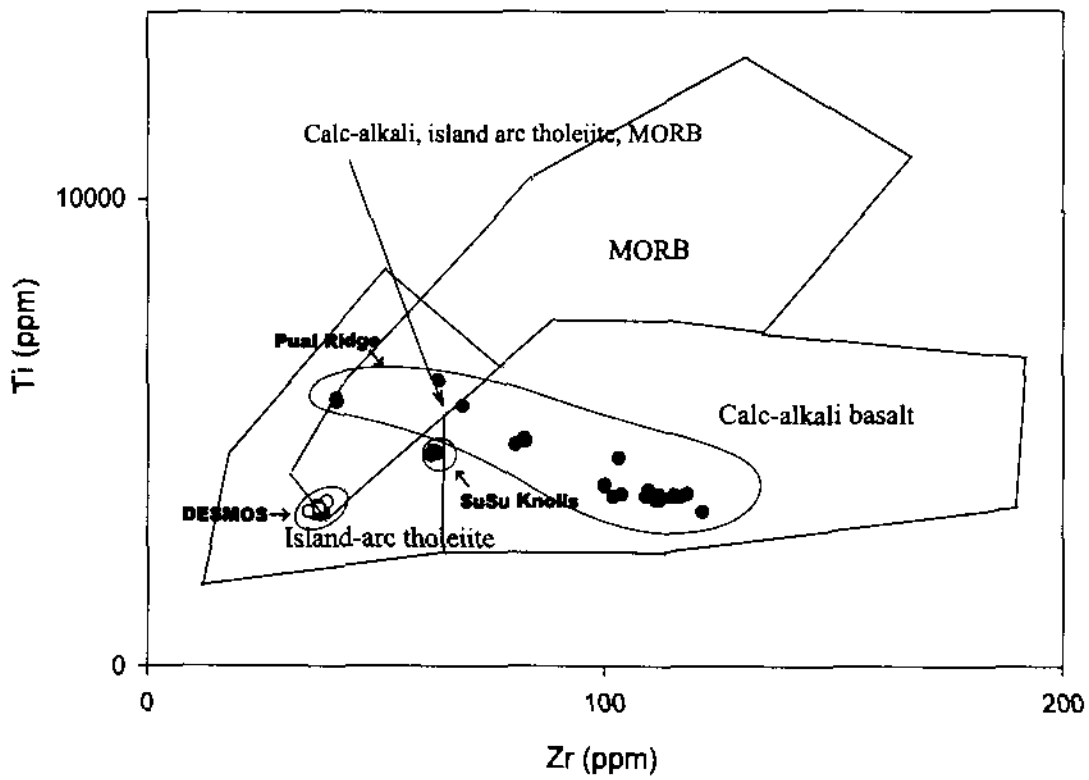


Fig. 4-11. Ti-Zr diagram to discriminate SER rocks from MORB.

HREEs(Heavy REEs)에 비해 상대적으로 부화되어 있는 패턴을 보이며 대부분의 시료에서 음의 Eu 이상치가 나타난다(Fig. 4-12). LREEs가 상대적으로 부화되는 현상은 IAB에서 나타나는 일반적인 특성이지만 음의 Eu 이상치의 경우는 IAB에서 흔히 관찰되는 현상은 아니다. Gena *et al.*(1997)은 DESMOS 지역 암석에 대한 연구에서 이 지역 암석에서 나타나는 음의 Eu 이상치를 열수작용에 의한 것으로 해석했다. 대상 지역 모두 열수 작용이 활발한 지역이므로 이 지역에서 나타나는 Eu 이상치는 열수작용에서 기인한 것으로 판단된다.

한편 전체적인 미량원소의 분포 패턴은 전 시료가 유사하지만 미량원소들의 함량과 원소간의 비는 각 시료별로 차이가 발견된다(Table 4-2, Fig. 4-13) DESMOS 시료는 물론 주원소 조성에서는 큰 차이를 보이지 않았던 Pual Ridge 시료와 Susu Knolls 시료 간에도 미량원소 비는 확연한 차이가 나타난다(Fig. 4-13).

먼저 퇴적물의 영향 정도를 가장 잘 반영한다고 알려져 있는 Pb/Ce의 경우 Susu Knolls 시료가 0.34 ± 0.01 로 가장 높고 DESMOS가 0.26 ± 0.01 Pual Ridge가 0.23 ± 0.03 가장 낮다(Fig. 4-13) 이 원소비는 호상열도 암석 조성에 섭입된 퇴적물이 미친 영향 정도를 가장 잘 반영하는데, 이것은 Pb가 암석에 비해 퇴적물에 농집되는 경향을 나타내며 해양 퇴적물은 많은 경우 음의 Ce 이상치를 나타내기 때문이다(Othman *et al.*, 1989). 즉 이 Pb/Ce 비가 클수록 퇴적물의 영향을 많이 받은 암석으로 생각할 수 있다. 이러한 경향은 역시 유동성 원소에 의한 영향의 정도를 반영하는 Ba/La 비나 Cs/Hf 등의 비에서도 비슷하게 나타난다(Table 2, Fig. 4-13). 그리고 Pb/Ce 등과는 반대로 유동성 원소의 영향을 받을수록 낮아지는 K/Ba 비는 역시 역으로 Pual Ridge에서 가장 높고 DESMOS, Susu Knolls의 순서로 나타난다(Fig. 4-13). 분석된 Susu Knolls 및 DESMOS 시료의 개수가 부족하기 때문에 아직 결론을 내리기는 힘들지만 Susu Knolls이 유동성원소의 영향을 가장 많이 받았고 다음은 DESMOS, 그리고 Pual Ridge가 상대적으로 영향을 적게 받은 것으로 생각된다. 즉 이 지역 암석들은 호상열도 관련 유동성 원소들(arc component)의 영향을 상당히 다양하게 받은 것으로 생각된다.

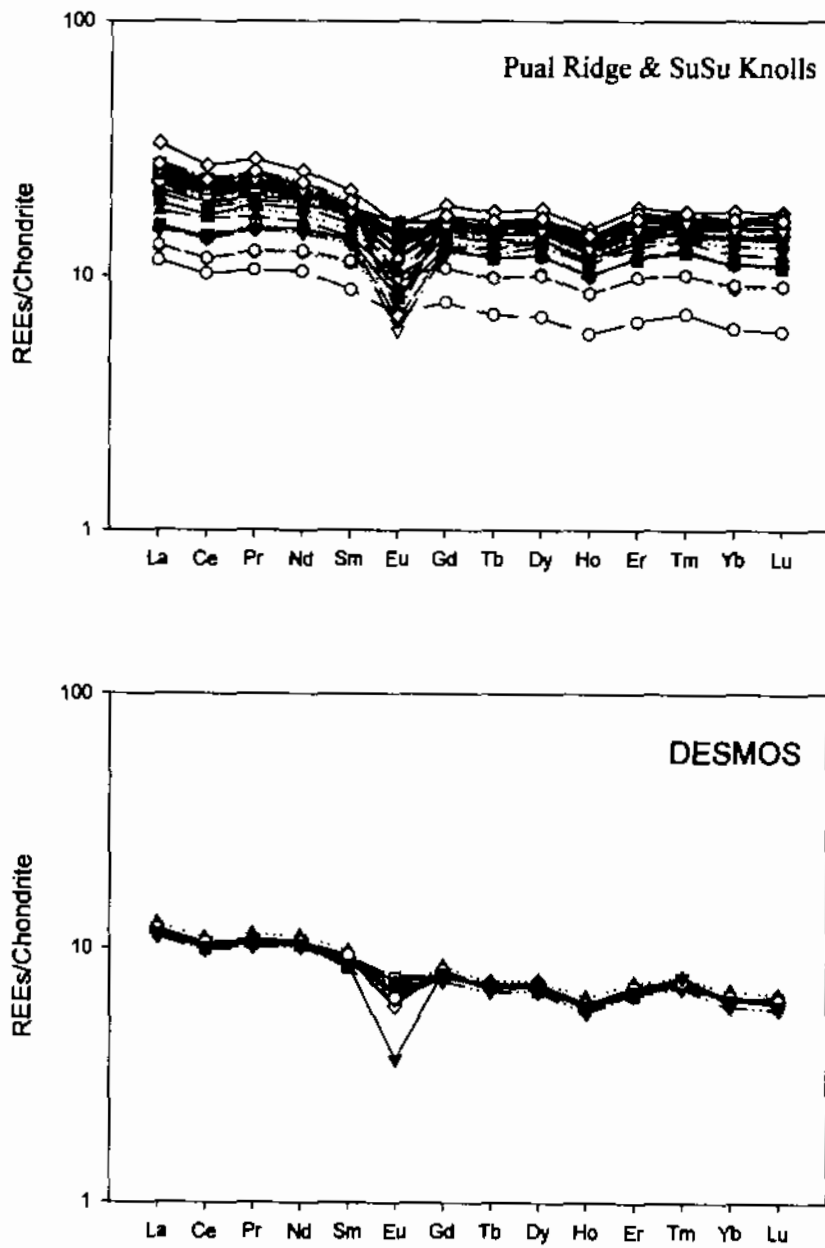


Fig. 4-12. Chondrite nomalized REEs patterns for volcanic rocks of SER,

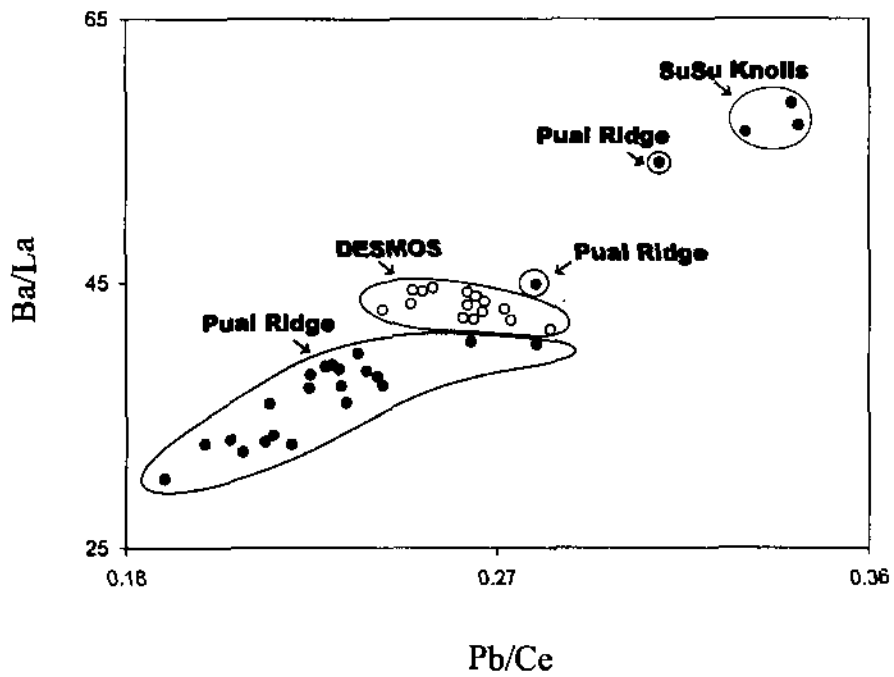
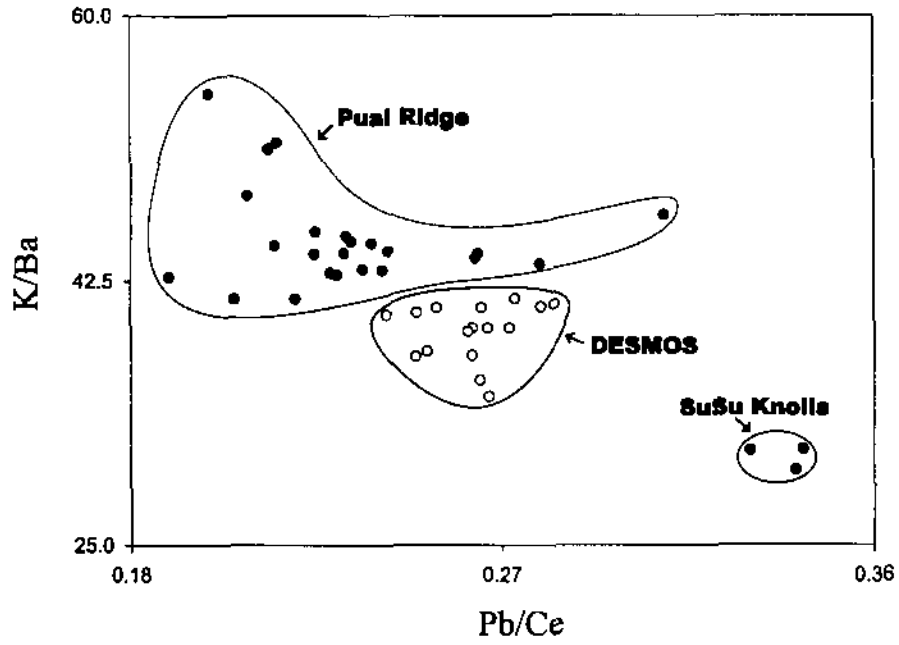


Fig.4-13. Element ratio variation diagram implicating diverse effect of arc-component.

한편 REEs 원소의 경우, $(La/Sm)_N$ 의 경우 상대적으로 편차가 작지만 $(La/Yb)_N$ 의 경우는 DESMOS 암석이 1.85 ± 0.02 로 가장 높고 Pual Ridge가 1.59 ± 0.11 , Susu Knolls이 1.4 ± 0.02 로 상대적으로 큰 차이를 보여준다. 그러나 불호정(incompatible)의 정도가 큰 원소들의 비, Lu/Hf 등 원소 비는 큰 차이를 보이지 않는다(Table 4-2).

제 5 절 토 의

배호분지 현무암(Back arc basin basalt, BABB)의 지화학적인 특성은 N-MORB나 IAV와 같은 정도로 명료하게 정리되지는 못했지만 몇가지 차이점을 제외하고는 일반적으로 MORB에 가까운 특성을 갖는 것으로 알려져 있다(Fryer et al., 1990). 배호 분지 환경은 중앙해령에 의해 형성되는 주요 해양 분지들이 지속적인 확장과 안정적인 구조를 이루고 있는데 반해 비교적 짧은 기간 동안 지속하므로 마그마 진화가 상대적으로 빨리 일어나는 특성을 갖는다(Stern et al. 1990). 배호분지의 형성 초기에는 호상열도와 비교적 가까운 거리에서 형성되기 때문에 형성되는 암석은 초기에 호상열도 암석과 유사한 특성을 갖다가 배호 분지가 점점 더 확장되고 호상열도와의 거리가 멀어지면서 MORB에 가까운 조성으로 진화해가는 것으로 생각되고 있다(Stern et al. 1990).

그러나 SER은 서태평양에 분포하는 일반적인 주변 분지(marginal basin)와는 다른 독특한 환경이기 때문에 위와 같은 일반적인 도식을 적용하는데는 상당한 주의를 필요로 한다. SER의 중요한 특징 중의 하나는 이 지역이 현재 활발하게 열개(rifting)되고 있는 지역이라는 점이다. 그런데 이 지역의 복잡한 조구조 환경 때문에 다른 일반적 marginal basin들과는 달리 SER이 진화되는 과정에서 지각이 맨틀에 미치는 물리적 환경의 변화(axial depth, rifting rate, rifting direction 등)가 발생했고 이 과정에서 맨틀의 용융 조건(condition of melting)에 변화가 발생했을 가능성이 있는 것으로 추측된다. 앞으로 보다 많은 시료의 분석과 연구를 통해 DESMOS 계열의 암석과 Pual Ridge 및 Susu Knolls 계열의 암석 형성의 물리적 환경을 추론해야 할 것이다.

그런데, SER의 조구조 환경에서 가장 독특한 점은 이 지역이 비교적 가까운 거리에서 마주보고 있는 해구들 사이에 존재한다는 사실이다. 현재 SER의 북쪽에는 마누스 해구가 존재하는데 이 지역은 과거 태평양 지판이 인도-호주 지판으로 섭입되었던 지역으로 현재는 섭입이 중단된 상태이다(Marlow *et al*, 1991). 태평양 지판의 섭입 중단은 Ontong Java Plateau의 분출로 인해 발생한 강력한 지지작용에서 기인한 것으로 생각되고 있는데(Marlow *et al*, 1991), 현재 섭입은 중단된 상태이지만 과거 섭입되었던 지판은 아직 맨틀에 남아 있을 것으로 생각된다. 그리고 현재에는 이 지역의 남쪽 방향으로 솔로몬 지판이 뉴브리튼 해구로 섭입하고 있다(Martinez and Taylor, 1995). 현재 뉴브리튼 해구와 마누스 해구 사이의 거리는 SER의 중심을 기준으로 할 때 약 450 Km 정도로서 과거에는 이보다 더 가까운 거리에서 마주보고 있었을 것으로 추측되고 있다(Martinez and Taylor, 1995).

일반적으로 섭입되는 지판은 해구에서 맨틀속으로 깊게 연장되는데 섭입 지판과 상부 지판 사이의 맨틀은 그 모양을 본떠 맨틀 쐐기(mantle wedge)로 불리운다. 호상열도 마그마는 이 맨틀 쐐기에 섭입지판과 더불어 섭입한 퇴적물에서 기원한 용재(fluid)가 공급되어 맨틀의 용융조건이 변화된 결과 형성되는 것으로 생각되고 있다. 그리고 이와같이 형성된 마그마에 역시 퇴적물에서 기원한 Ba, Sr, Pb, LREEs 등 액체 유동성이 비교적 큰 원소(mobile element)가 일부 공급되면서 물질교환작용(metasomatism)이 일어나 호상열도 암석의 지화학적 특성이 형성된다. 요약하면 호상열도 마그마는 맨틀 쐐기에서 형성되고 퇴적물에서 기원한 유동성 원소들에 의해 미량원소 특성이 형성된다는 것이다.

그런데 SER의 경우 지판이 북쪽과 남쪽에서 모두 섭입하고 있으므로 지각 하부는 맨틀 쐐기(mantle wedge)가 마주보고 있는 형태일 것이며, 따라서 이 지역 암석의 모체가 된 마그마가 형성되는 맨틀은 쐐기보다는 삼각형(triangle)의 형태일 것으로 생각된다. 즉 이 맨틀 삼각형(mantle triangle)으로는 마누스 해구로 섭입한 태평양 지판과 뉴브리튼 해구로 섭입하는 솔로몬 지판에서 공급되는 퇴적물 기원 유동성 원소들이 함께 공급되었을 것으로 생각된다. 다시

말해 다른 배호 분지 지역은 공급되는 호상열도 관련 원소들의 공급원이 하나인데 반해 이 지역은 2개이므로 형성되는 마그마에서 나타나는 유동성 원소들의 비도 상대적으로 다양해질 수 있을 것으로 생각된다.

이 지역 시료들에서 Pb/Ce, Ba/La 등 호상열도 관련 원소들의 비가 시료에 따라 다양해진 것은 위에서 설명된 바와 같이 유동성 원소들의 공급원이 많기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 이러한 가설을 입증하기 위해서는 보다 많은 시료를 분석해야 할 것으로 생각한다. 그리고 해양 지판이 양쪽에서 섭입한 상태이기 때문에 공급되는 용제의 량도 상대적으로 많았을 것이고 이것이 이 지역의 열수작용을 상대적으로 활발하게 했을 것으로 추측된다. 이 지역 열수의 특성을 이해하기 위해서는 암석화학적 특성과 열수 침니를 종합하는 보다 진전된 연구가 필요한 것으로 생각된다.



- Othman, D.B., W.W. White, *et al.*, 1989. The Geochemistry of marine sediments, island arc magma genesis, and crust-mantle recycling. *Earth and Planetary Science Letters* 94: 1-21.
- Rollinson, H.R., 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. New York, John Wiley & Son.
- Stern, R.J., P. Lin, *et al.*, 1990. Enriched back-arc basin basalts from the northern Mariana Trough: implications for the magmatic evolution of back-arc basins. *Earth Planetary Science Letters* 100: 210-225.
- Taylor, B., 1979. Bismarck Sea: Evolution of a back-arc basin. *Geology* 7: 171-174.
- Taylor, B., K. Crook, *et al.*, 1994. Extensional transform zones and oblique spreading centers. *Journal of Geophysical Research* 99: 19709-19718.

참 고 문 헌

- Binns, R.A., 1994. Submarine deposits of base and precious metals in Papua New Guinea. PNG Geology, Exploration and Mining Conference.
- Binns, R.A. and S.D. Scott, 1993. Actively Forming Polymetallic Sulfide Deposits Associated with Felsic Volcanic Rocks in the Eastern Manus Back-Arc Basin, Papua New Guinea. *Economic Geology* 88: 2226-2236.
- Fryer, P., B. Taylor, *et al.*, 1990. Petrology and Geochemistry of Lavas from the Sumisu and Torishima backarc rifts. *Earth and Planetary Science Letter* 100: 161-178.
- Gena, K., T. Mizuta, *et al.*, 1997. Geochemical Characteristics of Altered Basaltic Andesite by Sulfuric-Acid Rich Solution from the DESMOS Caldera, Manus Basin, Papua New Guinea. *J. Deep Sea Res* 13: 269-285.
- Langmuir, C.H., E.M. Klein, T. Plank, 1992, Petrological Systematics of Mid-Ocean Ridge Basalts : Constraints on Melt Generation Beneath Ocean Ridges. in *Mantle Flow and Melt Generation at Mid-Ocean Ridge*, J.P. Morgan, D.K. Blackman, J.M. Sinton, ed., Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr. Ser., 71, 361p, 1993.
- Martinez, F. and B. Taylor, 1995. Backarc Spreading, Rifting, and Microplate Rotation, Between Transform Faults in the Manus Basin. *Marine Geophysical Researches* 18: 203-224.
- Marlow, M.S., N.F. Exon, S.V., Dadisman, 1991. Hydrocarbon Potential and Gold Mineralization in the New Ireland Basin, Papua New Guinea. In *Geology and Geophysics of continental margins*(ed. by Watkins, J.S et al) American Association of Petroleum Geologists Memoir No. 53, 119-137)

제 5 장 열수광석 특성

제 1 절 서 론

제 2 절 시료채취 및 선상기재

제 3 절 광석광물과 화학적 특성

제 4 절 결 론



제 5 장 열수광석 특성

제 1 절 서 론

심해잠수정인 'Alvin'에 의하여 1977년 해저열수작용에 대한 직접관찰로부터 그 존재가 확인된 해저열수광상에 대한 연구는 육상광물자원의 고갈에 대비하여 최근 선진각국에서 큰 관심을 갖고 진행되고 있다. 그러나, 해저열수광상의 생성과 관련된 많은 문제들, 즉, 광상을 생성시키는 열수의 기원과 진화, 열수계 내 유용금속등 물질의 근원 및 이들 물질의 농집과 침전기구(mechanism) 등의 규명이 완전히 이루어지지 않아 탐사와 개발 및 경제적 활용성 검토 등에 있어 상당한 어려움이 존재하고 있다. 이러한 해저열수광상에 대한 지질·광상학적 규명은 다양한 연구방법과 함께 광상에 대한 광물학적·지화학적 연구를 수행하여 유용원소의 거동과 침전과정 등을 확인함으로써 이루어질 수 있다.

해저열수광상은 주로 괴상의 다금속 황화광물(polymetallic massive sulfides)과 이에 수반되는 탄산염 광물 및 이들을 충전하여 산출하는 비정질 규소 및 규산염 광물 등으로 구성되어 있으며, 해수면 기준 약 1,500 m 내지 3,700 m 깊이의 심해저에서 다양한 지구조적 배경과 화산활동에 기인한 지질학적 환경차이에 관련되어 다양한 지화학적 특성을 보이며 생성된다(Herzig and Hannington, 1995). 해저열수광상의 주구성광물은 자류철석(pyrrhotite), 황철석(pyrite), 백철석(marcasite), 섬아연석(sphalerite), 섬유아연석(wurtzite), 황동석(chalcopyrite), 반동석(bornite), 경석고(anhydrite), 비정질 규산(amorphous silica) 등이며, 이들 고온성(>300° - 350 °C) 및 저온성(<300 °C) 광물군들이 각 광상에서 그 조성과 양에 있어 다양함을 보이고 있다. 이러한 광물학적 차이는 해저열수광상의 생성과 관련된 지구조적 환경, 주로 호상열도, 배호분지 그리고 중앙해저산맥과 관련된 지질학적 환경특성 및 모암의 지화학적 특성 등 광상의 생성과 관련된 환경 차이에 기인한다(Table 5-1; Herzig and Hannington, 1995). 또한, 각각의 환경에서 생성된 해저열수광상의

Table 5-1. Bulk mineralogical composition of seafloor polymetallic sulfides from mid-ocean ridges and back-arc spreading centers

	po	py/mc	sph/wtz	cpy/iso	SiO ₂	anh	ba	ga	ten	tet	ss	ap/re
Mid-ocean ridges												
volcanic-hosted	+	+	+	+	+	+	+					
sediment-hosted	+	+	+	+	+	+	+	+				
Back-arc ridges												
intraoceanic		+	+	+	+	+	+	+	+			+
intracontinental		+	+	+	+		+	+	+	+	+	+

po=pyrrhotite, py=pyrite, mc=marcasite, sph=sphalerite, wtz=wurtzite, cpy=chalcopyrite, iso=isocubanite, SiO₂=amorphous silica, anh=anhydrite, ba=barite, ga=galenite, ten=tennantite (As), tet=tetrahedrite (Sb), ss=sulfosalts (Pb-As-Sb), ap=orpiment (As), re=realgar (As). Data compiled in Petersen (1992). (After Herzig and Hannington).

chimney와 mound들도 그 내각(interior)과 외각(outer portions)에서 광물학적, 화학적 조성변화를 보여 뚜렷한 조성 상 누대구조가 관찰되기도 한다(Hekinian and Fouguet, 1985). 이러한 chimney와 mound들이 보여주는 조성 상 누대구조 (compositional zoning)는 광상형성과 관련된 해당 열수계 내의 열수의 진화과정과 이에 수반되는 온도, 압력, metal 용해도, pH 등의 변화에 기인하여 나타나게 된다.

해저열수광상은 육상(대륙지각)에서 생성되어 분포하는 여러 형태의 광상들(괴상황화광상 등)과 비교하여 상대적으로 매우 높은 동과 아연 등 금속원소들의 농집이 특징적으로, 그 경제적 잠재성이 매우 높은 것으로 판단되어지고 있다. 또한, 최근에는 그 경제적 부가가치가 높은 금, 은 등 귀금속원소들의 광화작용에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 이러한 금속원소들의 부화 역시 해저열수광상의 생성을 지배하는 지구조적 배경 등의 환경차이에 의하여 그 양적 변화가 확인된다(Table 5-2). Doe(1994)는 이러한 해저열수광상에서의 특정금속원소들의 다양한 농집특성이 화산성 근원암의 지화학적 특성차이에 기인한다고 밝혔다. 상기 금속원소들의 농집을 지배하는 잠재적 근원암으로는 광상생성과 관련한 지구조적 환경차이에 따라 염기성 화산암류인 현무암(basalt; mid-ocean ridges)으로부터 현무암질 안산암(basaltic andesite)내지는 안산암(andesite; intraoceanic back-arcs) 및 산성 화산암류인 석영안산암(dacite), 유문암(rhyolite; intracontinental back-arc rifts)에 이르기까지 매우 다양하다. 해저열수광상의 화학적 특성이 잠재적 근원암의 특성에 기인함은 해저열수광상을 생성시키는 열수의 기원과 진화과정에 대한 정립이 선행되어야 명확해질 수 있다. 해저열수광상을 생성시키는 초기 열수계의 형성은 해수 기원설과 마그마 기원의 초생수 기원설 등에 의하여 설명되고 있다(Rona et al., 1983; Yang and Scott, 1996). 상기의 과정 등에 의하여 형성된 해저열수광상을 생성시키는 초기 열수계 내 열수는 매우 다양한 형태의 암석-물 반응(water-rock interaction)을 수반하며 해저지각부를 순환하게 되고, 이 과정에서 열수의 화학적 특성이 변화하면서, 이에 따라 다양한 화학조성상 특성을 갖는 해저열수광상의 생성에 기여하게 된다.

Table 5-2. Bulk chemical composition of seafloor polymetallic sulfides from Mid-ocean ridges and back-arc spreading centers

	Mid-ocean ridges		Back-arc ridges	
	Volcanic-hosted ¹	Sediment-hosted ²	Intraoceanic ³	Intracontinental ⁴
<i>n</i>	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

¹ Explorer 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

² Escanaba Trough, Guaymas Basin

³ Manana Trough, Manus Basin, North Fiji Basin, Lau Basin: Kings Triple Junction, White Church, Bai Lili, Hine Hina Fields

⁴ Okinawa Trough.

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

본 연구는 연구지역 내에서 채취된 열수 chimney시료를 대상으로 화학조성과 유용원소의 거동을 규명하고, 주 구성 광석광물 및 그 화학성을 검토함으로써 상기 해저열수광상의 생성환경유추와 함께 대상 열수광상의 탐사와 개발 및 경제적 활동성 검토에 기여하고자 한다.

제 2 절 시료채취 및 선상 기재

드렛지를 이용한 시료채취를 위해 먼저 심해저 카메라 시스템을 이용하여 해저면을 실시간으로 관측 및 촬영하였고, 해저면 및 열수분출구의 특성을 파악하였다(Fig. 5-1). 이 지역에서 실시되었던 총 10회의 드렛지 중 HD 1-2, HD 1-3, HD 8 총 3회 침니 시료 채취에 성공하였다. 드렛지를 수행한 위치와 각 드렛지 별 특성은 암석화학적 특성에 기술된 바와 같다(Fig. 4-2, Table 4-1). HD 1-2에서 채취된 침니 시료는 대부분 작은 조각들로, 분출이 멈춘 대형 침니의 외각으로 생각된다. 이 대형 침니는 경석고(anhydrite)가 시료의 외피를 형성하고 있으며 이 위를 Fe-Mn 산화물이 얇게 피복하고 있었던 것으로 생각된다. 그리고 경석고 층 안쪽으로 약 1 cm 두께의 섬아연석(sphalerite) 층이 형성되어 있으며 그 다음 안쪽으로 다공질의 섬아연석 층이 형성되어 있다.

HD 1-3에서는 55cm×24 cm 크기의 대형 침니와 수많은 침니의 조각들이 채취되었다. 대형 침니의 외각은 망간각으로 얇게 피복된 경석고이며 다음 섬아연석(sphalerite) 층이 접하고 있고 그 다음 안쪽으로 황동석(chalcopyrite) 결정이 성장하고 있다. 침니의 조각들 중 외부에 중정석(barite) 결정이 성장한 것도 있었다. HD8에서는 대형 침니와 침니의 조각들이 채취되었는데 망간산화물이 얇게 부분 부분 피복된 경석고(anhydrite)가 외각을 구성하고 있으며 다음은 섬아연석(sphalerite) 층이 형성되어 있고 보다 내부에는 황동석(chalcopyrite) 결정이 성장하고 있다. 침니의 내부에는 기공들이 분포하며 기공 내부에는 역시 황동석이 성장하고 있다.

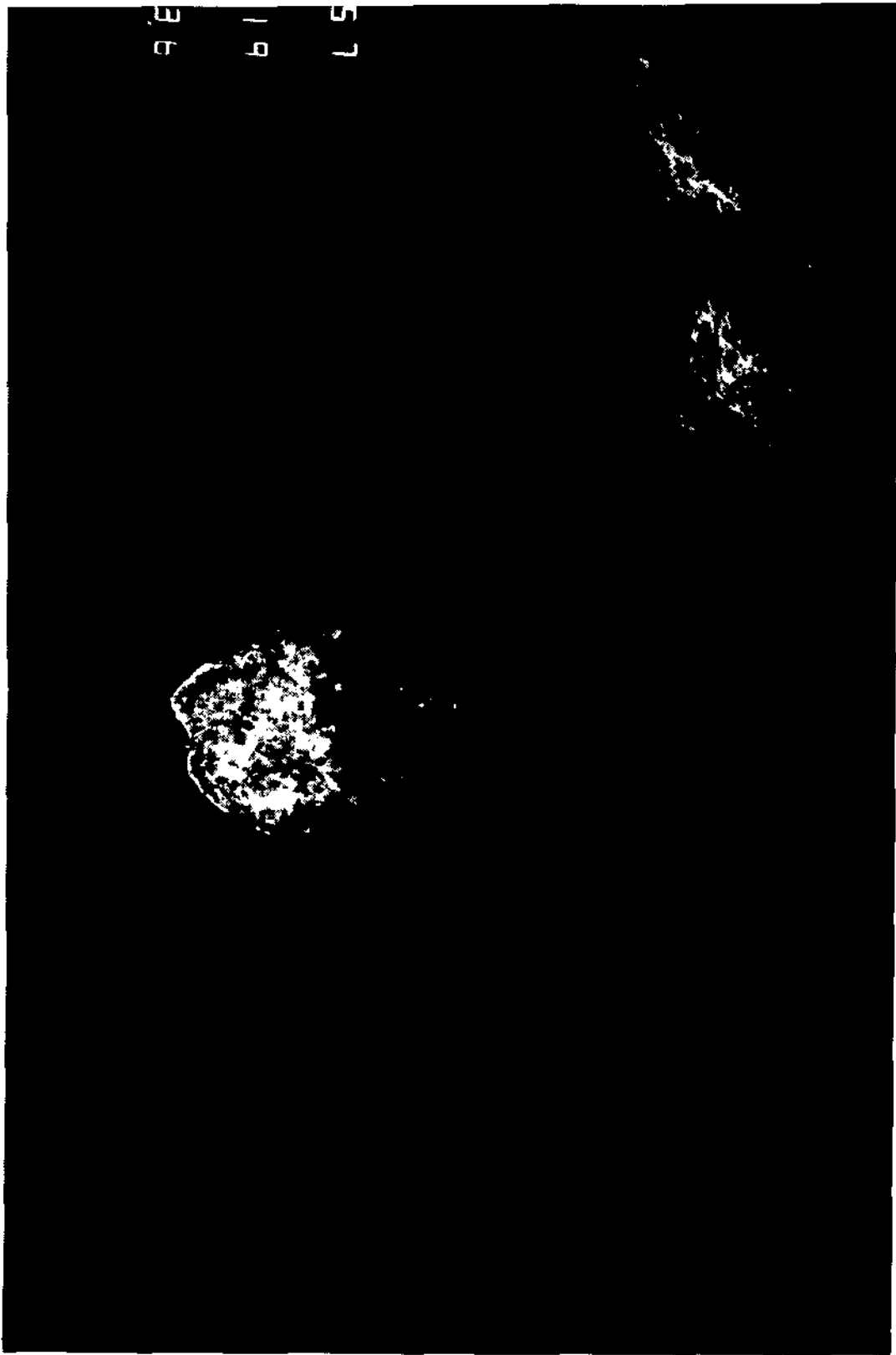


Fig. 5-1. Photographs of hydrothermal vent fields.

제 3 절 광석광물과 화학적 특성

본 연구는 상기 드렛지(dredge)에 의하여 채취된 시료들 중 chimney의 형상이 확인된 대표적 열수 chimney시료들을 대상으로 수행되었다. 대상시료는 HDg-1-3지역과 HDg-8 지역(Fig. 4-1)에서 채취된 HD-1-3 및 HD-8(Fig. 5-2)시료이다. 광물학적연구는 시료의 육안관찰을 기초로 하여 vent로부터 외벽에 이르는 구간별로 양면연마박편(double-polished thin section)을 제작하여 편광현미경과 전자현미분석(EPMA)을 통하여 구성광물과 그 화학조성 상 특징을 확인하였다.

chimney의 화학적 특성 연구는 상기 광물학적 연구 결과를 기초로 각 구간별로 분말시료를 제작하여 각 chimney의 부분별 주요 원소의 함량과 배태 및 거동 특성에 대하여 검토하였다.

1. 광석광물 (ore mineralogy)

Manus Basin에서 채취된 chimney는 주로 황철석, 백철석, 황동석, 섬아연석/섬유아연석, 방연석 등의 광석광물로 구성된다. 그러나 그 양적 분포는 chimney 별로 크게 차이를 보이며, 특히, 함동(Cu)광물인 황동석과 함아연(Zn)황화광물인 섬아연석/섬유아연석의 산출은 크게 대비된다. 즉, 황동석이 괴상으로 다량 산출하는 Cu-rich chimney(HD-8)와 섬아연석/섬유아연석이 괴상으로 다량 산출하는 Zn-rich chimney(HD-1-3)로 구분된다.

Cu-rich chimney(HD-8)는 주상의 원통형(columnar-cylindrical; Fig. 5-2)산상을 보이며, vent로부터 외벽까지의 두께가 5-12 Cm 정도이다. chimney는 내벽(inner wall)으로부터 외벽 쪽으로 황철석 → 황철석이 수반된 괴상의 황동석 → 황동석-황철석(-섬아연석/섬유아연석) → 황철석-백철석-황동석-섬아연석/섬유아연석(-방연석) 등의 광석광물 대상변화를 보여준다. 경석고(anhydrite)는 내벽과 외벽에 이르는 각구간 중 내벽 쪽에 가까운 구간에서 부분적으로 황철석과 괴상의 황

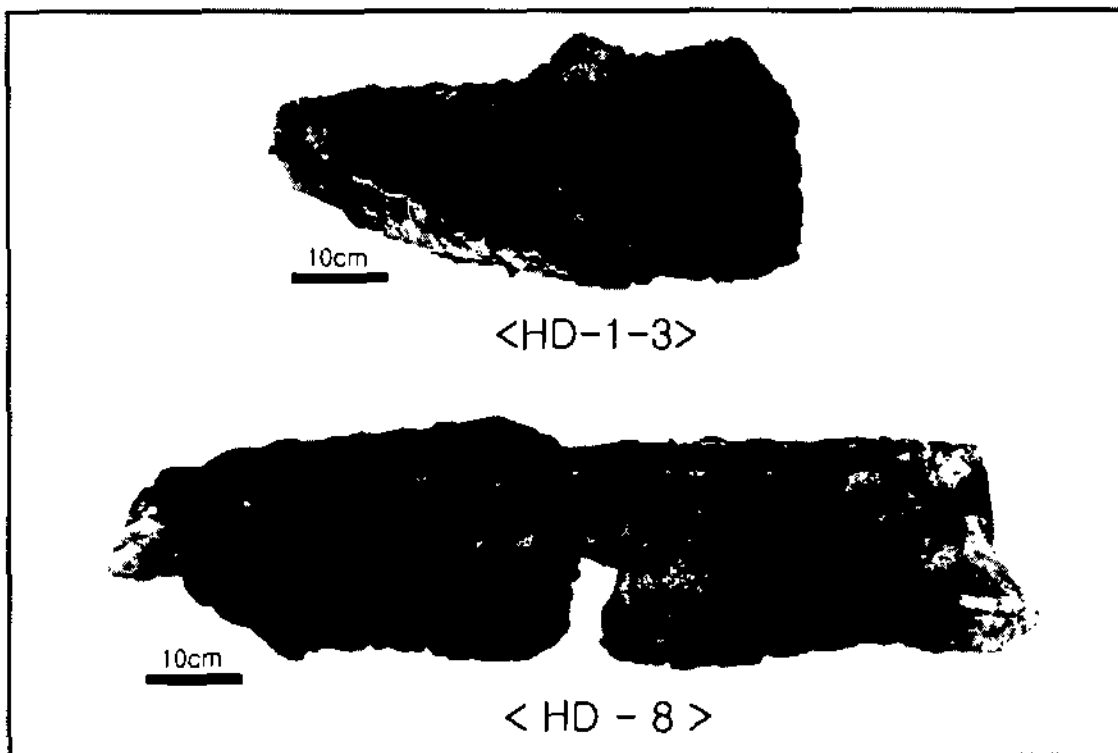


Fig. 5-2. Back scattered-electron image of pyrite(dark image) and galena(brighter zone) showing concentric overgrowth.

동석 등을 치환하여 산출한다. 외벽(outer margin)부에서는 황철석이 백철석화 되거나, 방연석이 포함된 동심원상의 호상구조(Fig. 5-3)를 보여준다. 본 chimney에서 중정석(barite)의 산출은 vent의 벽과 외벽에서만 2차 침전광물로 확인될 뿐 1차적인 chimney 광물로는 확인되지 않는다.

Zn-rich chimney(HD-1-3)는 작은 종형(pinnacle; Fig. 5-2)의 산상을 보여준다. 본 chimney는 Cu-rich chimney에 비하여 비교적 단순한 광석광물의 대상변화를 보여주어, 내각부에서 부분적으로 상당량의 황동석이 수반되는 섬아연석-황동석대가 발달하며 그외 전체적으로 괴상의 섬아연석/섬유아연석에 소량의 황철석과 미량의 황동석이 수반된다. 최외각부에는 부분적으로 방연석의 산출이 확인되며, 미립의 중정석도 산출된다. 괴상의 섬아연석/섬유아연석은 전자현미분석(EPMA)결과 3.28-6.40 mole% FeS의 함량(Table 5-3)을 보여주며, 동일입자 내의 함량변화나 chimney 전체적인 누대구조상의 함량변화를 보여주지 않는다. 황철석과 황동석은 주로 섬아연석/섬유아연석 내에 산점상으로 분산되어 산출된다.

2. 금속함량 (metal contents)

대상 chimney들의 주요 금속원소함량과 그 거동특성을 확인하기 위하여 화학분석을 실시하였다. 분석은 상기 광물학적 연구결과를 기초로 하여 vent 내각벽에서부터 외각 쪽으로 대상구조를 감안하여 시료를 제작하였으며(chimney 별 분석시료 위치는 Fig. 5-4에 표시되어 있음), 주요 원소들(Ag, As, Au, Ba, Cd, Co, Cu, Mn, Mo, Pb, Zn)에 대하여 캐나다의 Activation Lab. 이 보유하고 있는 INAA와 ICP-AES(perkin-elmer optima 3000)를 이용하여 분석하였다.

분석결과는 Table 5-4와 Fig. 5-5에 정리하였다. 대표적인 열수 chimney에서의 주요 금속원소 함량은 전술된 광물학적 연구의 결과와 상당히 일치함을 볼 수 있다. Zn-rich chimney인 HD-1-3 chimney의 경우 상대적으로 높은 아연(Zn)함량(평균 447,667 ppm)을 보여주며, Cu-rich chimney인 HD-8 chimney의 경우 높은 동(Cu)함량을 보여준다(Table 5-4). HD-8 chimney의 동 함량은 기기의

Table 5-3. Representative chemical compositions of spherite/wurtzite from the hydrothermal chimney

sample no.	Weight Percent						Total	Mole percent				
	Zn	Fe	Mn	Cd	Cu	S		ZnS	FeS	MnS	CdS	CuS
HD 3-1-1-1	62.55	3.00	0.02	0.27	0.26	32.77	98.87	94.05	5.28	0.04	0.24	0.40
HD 3-1-1-2	63.30	2.59	0.00	0.03	0.37	33.11	99.40	94.86	4.54	0.00	0.03	0.57
HD 3-1-1-3	63.00	2.68	0.04	0.23	0.27	32.86	99.08	94.60	4.71	0.07	0.20	0.42
HD 3-1-1-4	63.26	2.95	0.01	0.02	0.31	32.92	99.47	94.34	5.15	0.02	0.02	0.48
HD 3-1-1-5	63.30	3.06	0.03	0.10	0.20	32.59	99.28	94.22	5.33	0.05	0.09	0.31
HD 3-1-1-6	62.39	3.26	0.02	0.43	0.41	33.26	99.77	93.26	5.70	0.04	0.37	0.63
HD 3-1-1-8	62.38	3.68	0.00	0.37	0.40	32.91	99.74	92.67	6.40	0.00	0.32	0.61
HD 3-1-1-9	63.36	1.87	0.11	0.49	0.33	32.87	99.03	95.56	3.30	0.20	0.43	0.51
HD 3-1-1-10	63.69	1.94	0.00	0.00	0.27	33.29	99.19	96.15	3.43	0.00	0.00	0.42
HD 3-1-1-11	62.98	1.88	0.00	0.45	0.11	32.95	98.37	96.07	3.36	0.00	0.40	0.17
HD 3-1-1-12	62.21	3.15	0.11	0.15	0.36	33.19	99.17	93.57	5.55	0.20	0.13	0.56
HD 3-1-1-13	63.29	2.60	0.00	0.22	0.04	32.53	98.68	95.17	4.58	0.00	0.19	0.06
HD 3-1-1-14	61.99	3.34	0.01	0.50	0.36	32.92	99.12	93.12	5.87	0.02	0.44	0.56
HD 3-1-3-15	63.45	3.13	0.21	0.19	0.14	32.85	99.97	93.83	5.42	0.37	0.16	0.21
HD 3-1-3-16	64.22	2.07	0.07	0.20	0.08	32.92	99.56	95.96	3.62	0.12	0.17	0.12
HD 3-1-3-17	61.14	3.94	0.09	0.44	0.37	32.73	98.71	91.95	6.94	0.16	0.38	0.57
HD 3-1-3-19	58.41	2.10	0.00	0.66	3.32	32.21	96.70	90.32	3.80	0.00	0.59	5.28
HD 3-1-3-20	57.70	2.09	0.00	0.92	3.66	31.69	96.06	89.53	3.80	0.00	0.83	5.84
HD 3-1-3-21	57.91	2.30	0.00	1.16	3.35	31.89	96.61	89.47	4.16	0.00	1.04	5.33
HD 3-1-4-22	63.71	2.21	0.00	0.24	0.01	32.92	99.09	95.88	3.89	0.00	0.21	0.02
HD 3-1-4-23	63.24	2.81	0.03	0.24	0.19	33.69	100.20	94.53	4.92	0.05	0.21	0.29
HD 3-1-4-24	63.89	2.72	0.22	0.42	0.18	32.87	100.30	94.28	4.70	0.39	0.36	0.27
HD 3-1-4-25	63.53	3.37	0.09	0.44	0.04	32.81	100.28	93.59	5.81	0.16	0.38	0.06
HD 3-1-4-26	63.93	1.86	0.02	0.36	0.00	33.19	99.36	96.37	3.28	0.04	0.32	0.00
HD 3-1-4-27	63.64	2.80	0.00	0.35	0.20	32.98	99.97	94.52	4.87	0.00	0.30	0.31

Table 5-4. Chemical composition of the hydrothermal chimneys

chimney location	sample no.	Ag	As	Au	Ba	Cd	Co	Cu	Mn	Mo	Pb	Sb	Sr	Zn	
		Parts Per Million													
HDg-1-3	HD 3-1-1	293	1300	24.1	34000	1744	9	38212	302	200	1086	822	146	456000	
	HD 3-1-2	377	1850	46.2	2300	1699	8	21081	412	130	2436	878	42	460000	
	HD 3-1-3	426	1320	48.3	0	1922	7	19775	295	78	2292	1300	4	567000	
	HD 3-1-4	260	1080	27.2	37000	1533	8	20861	276	110	1200	869	282	346000	
	HD 3-1-5	507	1540	63.5	8600	1615	5	9839	263	95	2170	978	59	575000	
	HD 3-1-6	346	1520	27.2	59000	1554	7	10060	231	79	1792	1240	158	403000	
	HD 3-1-7	380	5630	4.6	100000	829	5	4567	140	40	1900	891	223	377000	
	HD 3-1-8	215	1690	24.3	8700	1036	7	5296	243	64	2072	716	215	338000	
	HD 3-2-1	425	1930	50.4	15000	1645	9	9715	323	89	2213	1060	81	544000	
	HD 3-2-2	650	2690	28.8	7200	1712	7	6376	203	33	1993	1950	36	572000	
	HD 3-2-3	326	9120	0.4	190000	553	6	3222	161	18	21706	626	209	335000	
	HD 3-2-4	442	12600	2.7	100000	964	7	5551	162	28	23895	1100	202	399000	
		<i>mean</i>	387	3523	29.0	46817	1400	7	12880	251	80	5396	1036	138	447667
HDg-8	HD 8-2-1	43	3170	14.3	300	12	267	>99999	27	2350	1637	287	16	1410	
	HD 8-2-2	49	3560	11.5	220	13	219	>99999	15	510	1811	216	22	1200	
	HD 8-2-3	68	3140	14.5	0	11	172	>99999	1	760	2024	200	7	1110	
	HD 8-2-4	210	5630	35.0	0	108	232	>99999	151	360	4656	456	6	11800	
	HD 8-3-1	93	8290	6.9	190000	192	14	4111	1141	43	2701	888	616	22800	
	HD 8-3-2	37	2490	11.4	0	10	170	>99999	1	1900	1188	230	9	1320	
	HD 8-3-3	58	3720	12.1	420	14	215	>99999	25	215	2129	227	24	1400	
	HD 8-3-4	55	2050	8.1	220	13	125	>99999	96	610	926	138	10	1500	
	HD 8-3-5	280	6450	29.2	46000	269	43	52142	176	270	2868	570	228	43800	
		<i>mean</i>	99	4278	15.9	26351	71	162	>28127	181	780	2216	357	104	9593

0: not detected

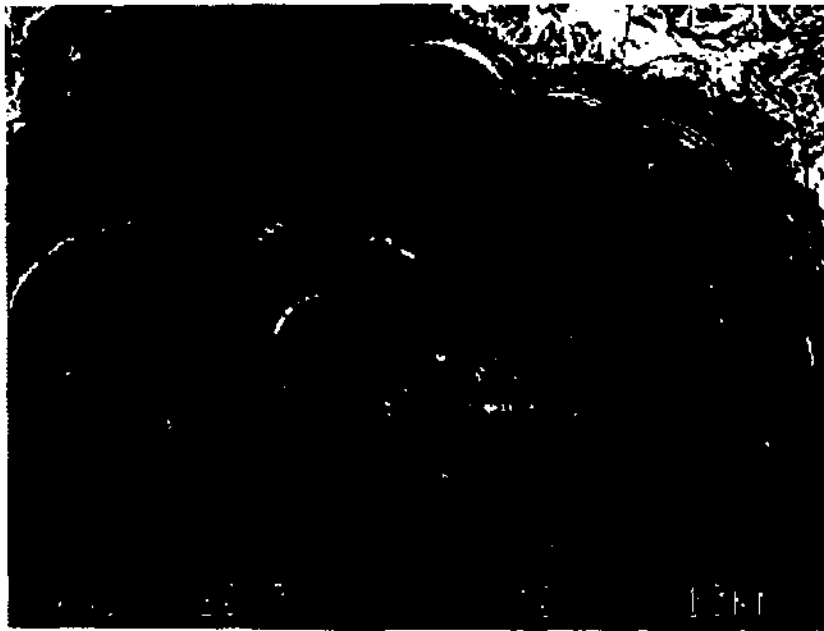


Fig. 5-3. Backscattered-electron image of pyrite(dark image) and galena(brighter zone) showing concentric overgrowth.

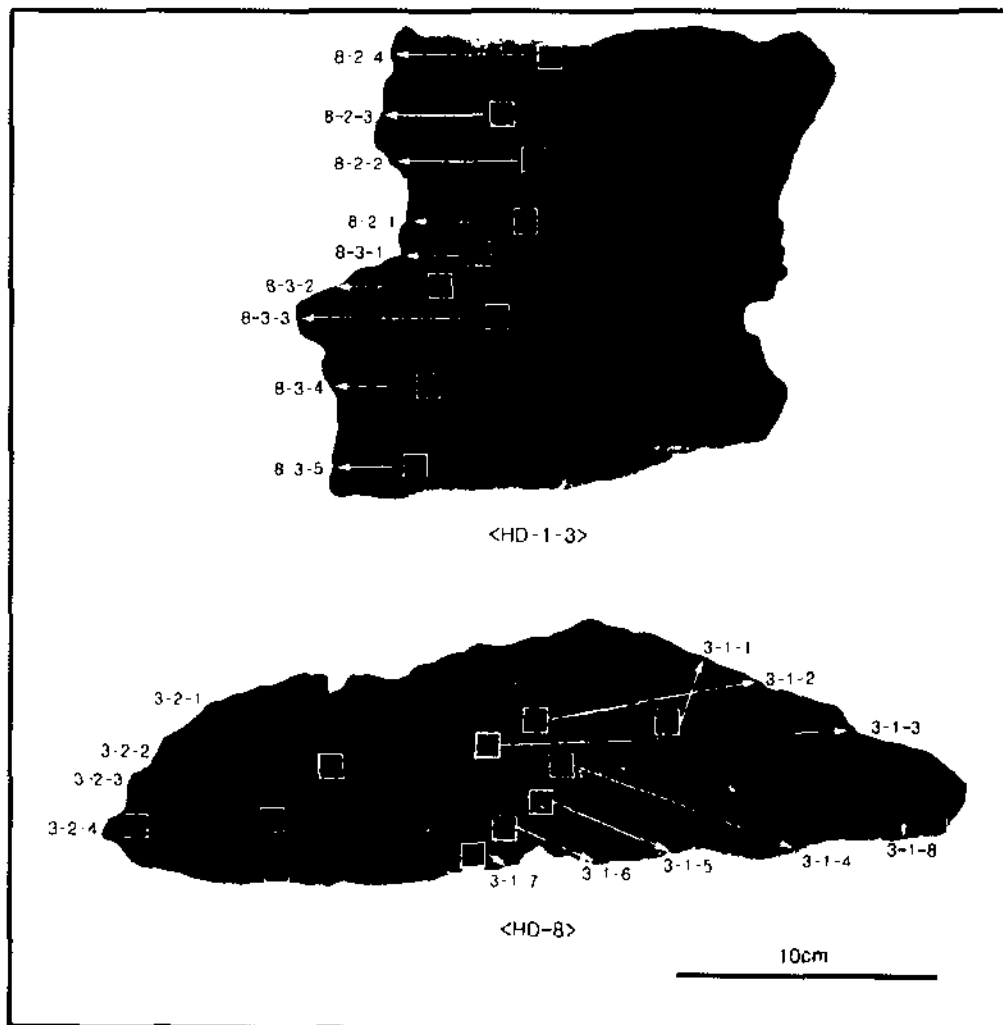


Fig. 5-4. Photographs of cross sections from hydrothermal chimneys showing the position of the chemical analysis

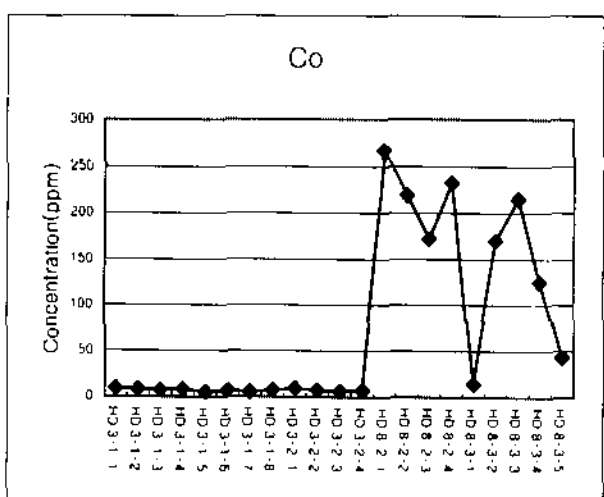
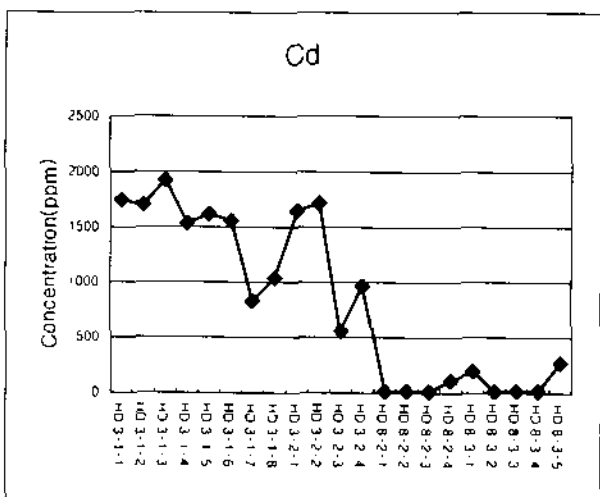
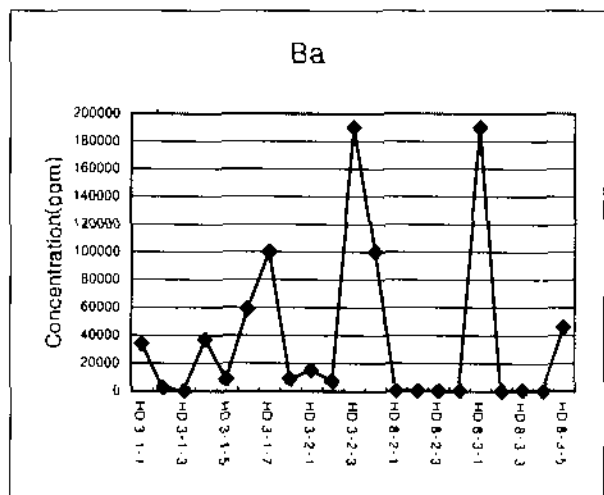
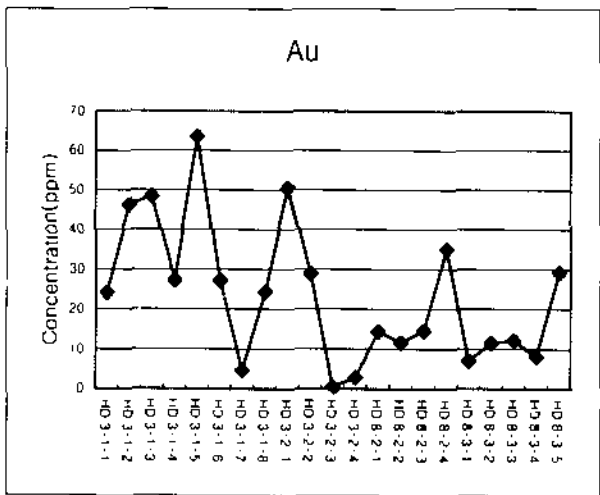
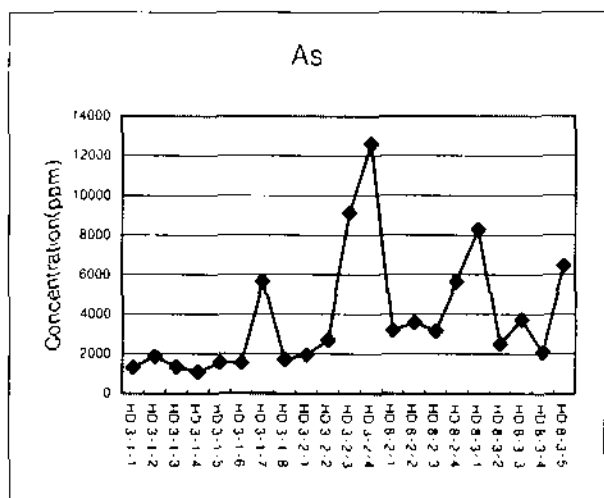
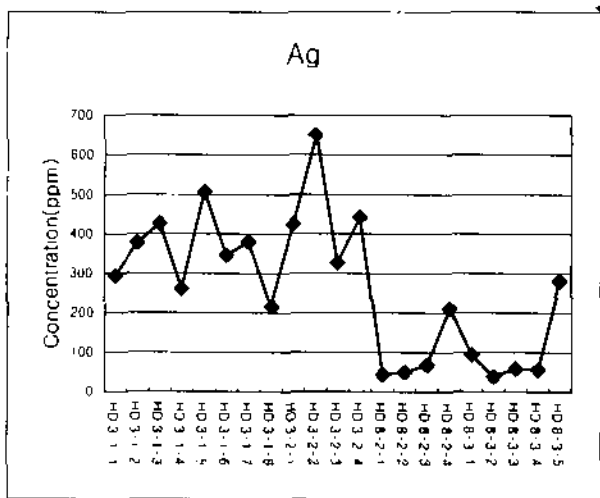


Fig. 5-5. Variation diagrams of main elements of the hydrothermal chimneys and circle symbols represent HD-1-3 and HD-8 chimney, respectively.

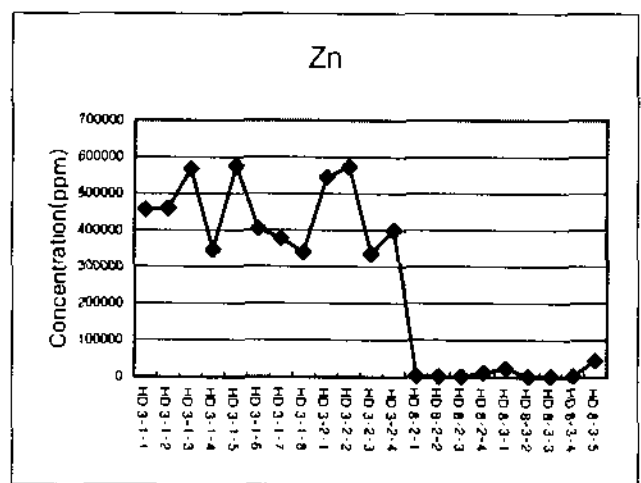
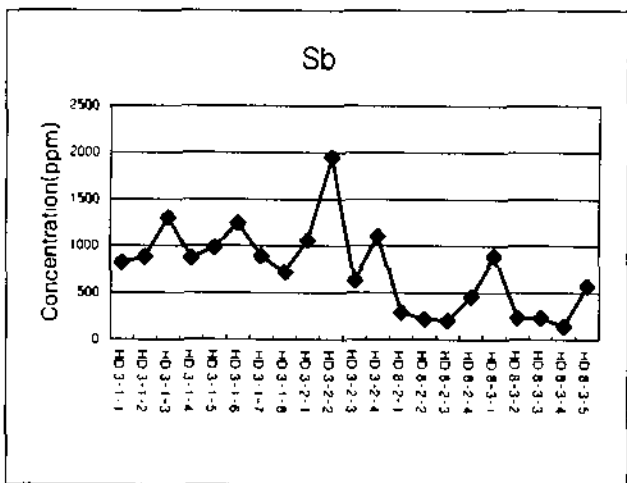
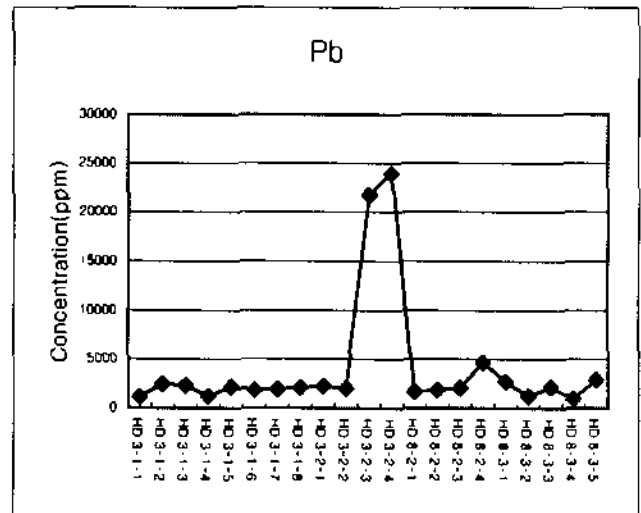
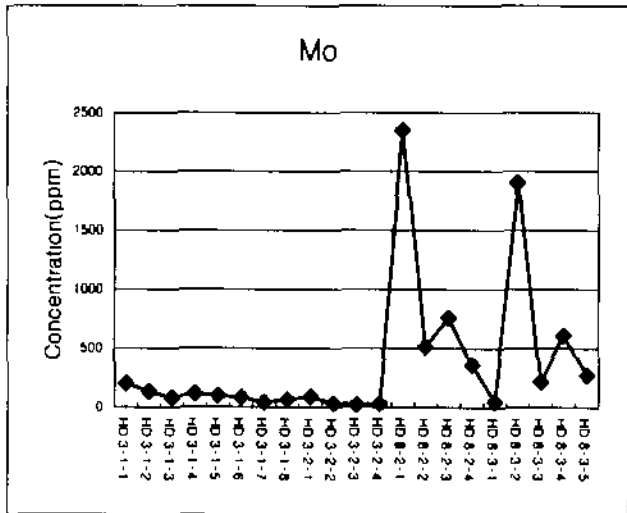
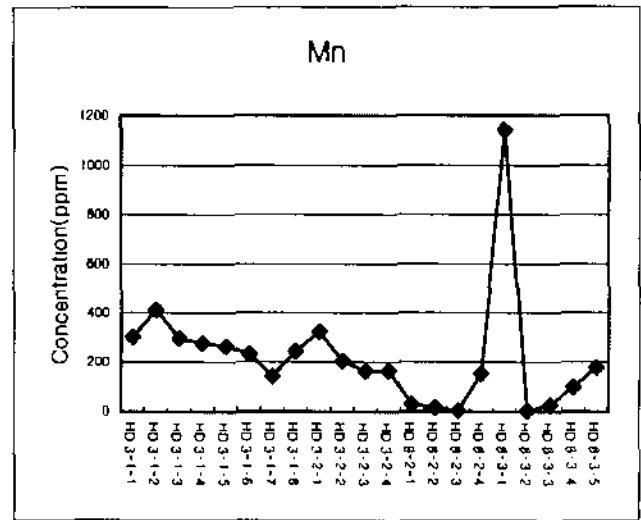
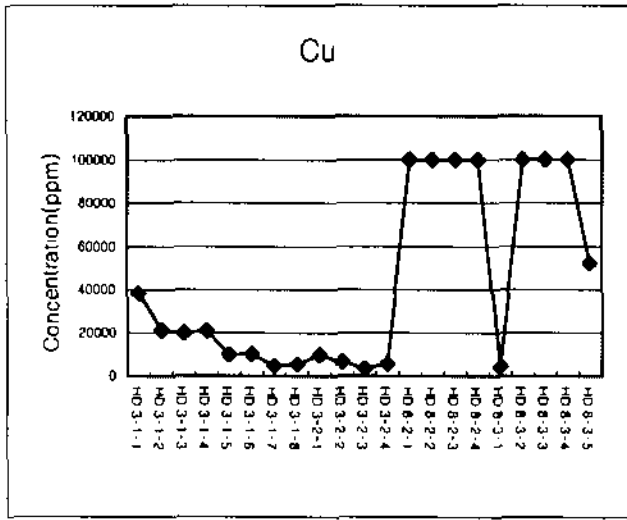


Fig. 5-5. continued

측정 상한값인 99,999 ppm 이상을 보여 정확한 함량측정이 이뤄지지 않았으나 경계성 있는 농집이 이뤄진 것으로 사료된다. 주요 금속원소 중 카드뮴(Cd), 망간(Mn), 안티몬(Sb) 등은 Zn-rich chimney에 상대적으로 부화되는 양상을 보여주며, 코발트(Co), 몰리브덴(Mo), 비소(As) 등의 원소는 Cu-rich chimney에 부화되는 양상을 각각 나타낸다(Fig. 5-5). 이는 비교적 고온의 환경 하에서 주된 침전이 야기되는 원소들인 몰리브덴, 비소, 코발트 등이, Zn-rich chimney에 비하여 상대적으로 고온 환경 하에서 생성된 것으로 인지되는 Cu-rich chimney에 다량 침전되어 부화된 결과로 사료된다.

최근 해저열수광상에서 관심의 초점이 되고 있는 금·은의 품위는 기 보고된 다양한 지구조적 환경에서 생성된 해저열수광상들의 평균품위(Table 5-2참고)를 상회하는 고품위로 확인된다(금의 평균품위: HD-1-3 = 29.0 ppm, HD-8 = 15.9 ppm; 은의 평균품위: HD-1-3 = 387 ppm, HD-8 = 99 ppm; Table 5-4). 본 연구대상 chimney들의 금 평균품위는 기 보고된 여러 환경 하에서 생성된 해저열수광체의 최대품위보다 높은 것으로 확인되어 본 탐사지역 해저열수광체의 경계성이 매우 높게 평가되어 진다. 한편, 금·은의 부화정도는 Cu-rich chimney보다는 Zn-rich chimney에서 높은 것으로 확인된다(Table 5-4). 이는 금-동, 금-아연의 상관관계도(Fig. 5-6)에서와 같이 금의 품위는 아연의 함량 증가와 함께 증가하는 반면, 동의 함량과의 관계에 있어서는 일정량(동함량 약 15,000 ppm)까지는 비례관계를 보여주나 동의 함량이 그 이상으로 증가하면 상대적으로 금의 품위가 감소함이 확인된다. 이는 본 해저열수광체의 chimney 생성시 동의 침전이 상대적으로 고온(약 300 °C 이상)환경에서 주로 야기되는데 이러한 온도조건에서는 금의 침전이 미약해지고 그후 온도의 감소와 더불어 아연의 침전이 시작되면서 금의 주된 침전이 진행된 결과로 해석된다. 또한, 금-은의 품위 상관관계(Fig. 5-6)는 전체적으로 비례관계를 보여주나 금의 품위가 5 ppm 이하일 경우 상대적으로 은의 품위가 높음이 확인된다. 이는 육상에서의 화산성 천열수 광상의 모델과 잘 대비된다.

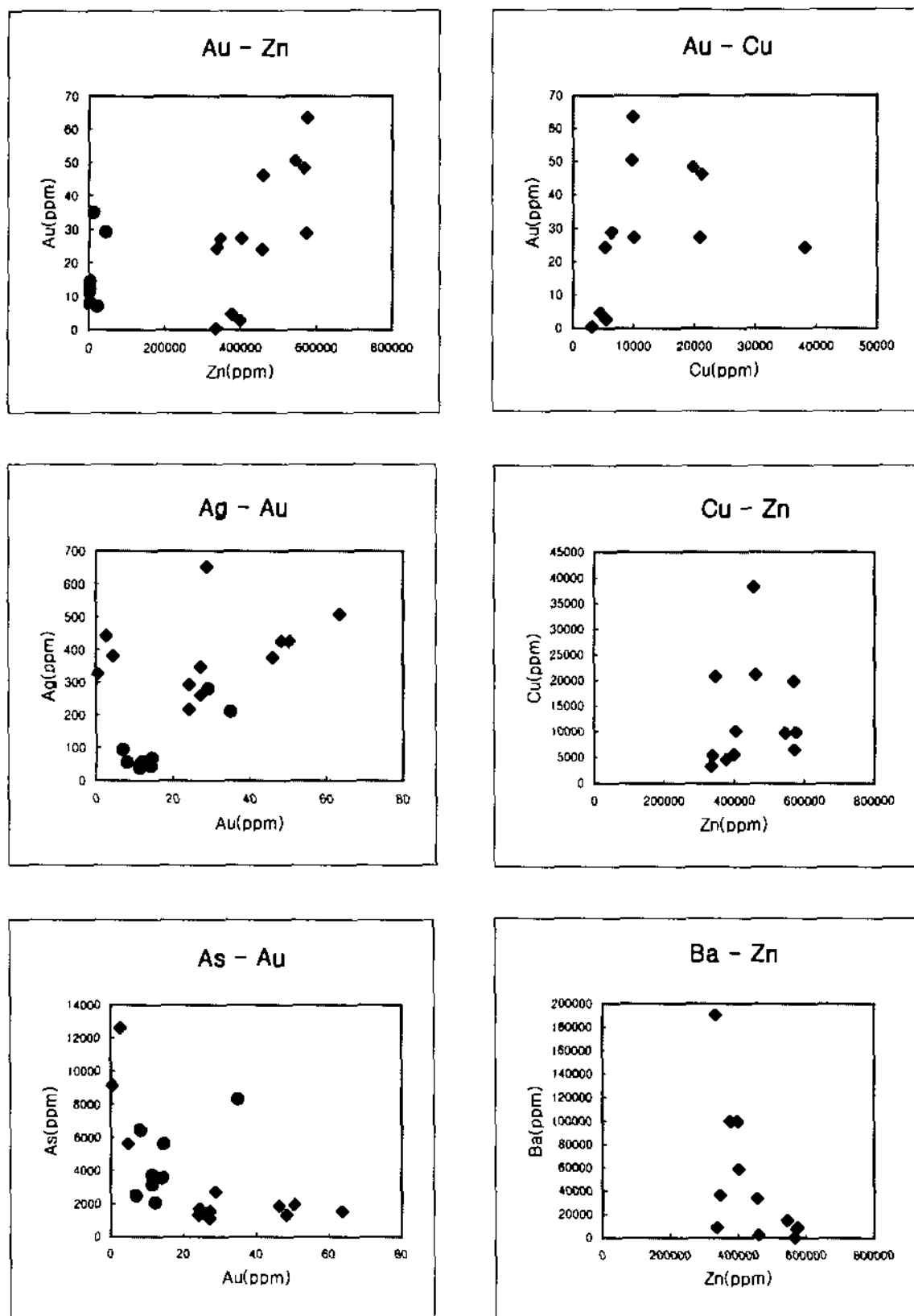


Fig. 5-6. Variation diagrams between main elements of the hydrothermal chimneys. Square and circle symbols represent HD-1-3 and HD-8 chimney, respectively.

제 4 절 결 론

- 탐사지역 내 해저열수광상들의 chimney들은 배호분지(back-arc basin)에서 생성된 괴상의 다금속 황화광상(polymetallic massive sulfide deposit)의 광물학적, 지화학적 특성을 보여준다.
- 광물조성과 금속원소의 부화특성에 의하여 Cu-rich chimney와 Zn-rich chimney로 구분할 수 있으며, Cu-rich chimney는 Zn-rich chimney에 비하여 상대적으로 고온(약 ≥ 300 °C)환경하의 열수계로부터 생성되었음을 알 수 있다.
- 경제적 부가가치가 높은 금의 품위는 기 보고된 해저열수광체에 비하여 상대적으로 높은 것으로 사료되며, 경제적 측면의 정확한 평가를 위하여 추후 보다 정밀한 탐사연구가 요구된다. 금은 상대적으로 고온환경을 지시하는 Cu-rich chimney보다는 Zn-rich chimney에 다량 농집하는 것으로 확인된다.

참 고 문 헌

- 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*, 58, 2215-2223.
- Hekinian, R. and Y. Fouquet, 1985. Volcanism and metallogenesis of axial and off-axis structures on the East Pacific Rise near 13° N. *Econ. Geol.*, 80, 221-249.
- Herzig, P.M. and M.D. Homington, 1995. Polymetallic massive sulfides at the modern seafloor: A review. *Ore Geology Review*, 10, 95-115.
- Rona, P.A., K. Bostrom, L. Laubier and K.L. Smith, 1983. *Hydrothermal Process at Seafloor Spreading Centers*, Plenum Press, New York, pp. 769.
- Rona, P.A., G. Klinkhammer, T.A. Nelsen, J.H. Trefry and H. Elderfield, 1986. Black smokers, massive sulfides and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, 321, 33-37.
- Yang, K. and S.D. Scott, 1996. Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid] to a sea-floor hydrothermal system. *Nature*, 383, 420-423.



제 6 장 열수생물

제 1 절 Manus Basin 및 열수생물 군집

제 2 절 Manus Basin의 열수군집 탐사 및 발견

제 3 절 동부 Manus Basin DESMOS 해분의 열수
분출역과 생물군집

제 4 절 열수지역의 생물분포 및 생물상

제 5 절 열수성 생물군집에 공생하는 화학합성 박테리아의
전자현미경 관찰



제 6 장 열수생물

제 1 절 Manus Basin 및 열수생물군집

최근 20여 년 동안 심해 열수지역에 대한 목록은 점점 증가되고 있다. Galapagos Rift 에서 열수지역 및 열수지역 생물에 대한 첫 발견이후, East Pacific Rise의 많은 축들, 캘리포니아의 걸프만, 동태평양의 Juan de Fuca Ridge, 그리고 대서양 등등의 많은 지역에서 발견되어왔다. 그 후 대 부분의 열수지역과 열수생물들은 중앙 해령의 확대와 관련이 있다는 것을 알게 되었다.

1986년 1월 5일 하와이 연구소의 지질 연구선인 "Moana Wave" 는 열수지역의 chimneys 와 많은 양의 복족류(gastropods)의 사진을 Papua New Guinea의 Manus Basin에서 담아왔다(Both et al., 1986). 이것은 서 태평양의 back-arc 혹은 microplate 형태의 rift구조에서 열수지역이나 열수성 생물군집이 있을 가능성을 보여준 첫 직접적인 증거였다. 같은 해 미국과 일본에 의해 Mariana Back-arc Basin에서 잠수정 'Alvin'을 사용하여 조사되어진 결과, 수심 3,600 m에서 열수지역과 열수성 생물군집이 발견되었다(Hessler et al., 1987; Hessler and Ohta, 1987; Okutani and Ohta, 1987; Hessler and Lonsdale, 1991). 또 일본의 잠수정 'Shinkai 2000'에 의해 일본 오키나와 지역에서 열수지역과 열수생물군집을 발견하였다. 일본과 프랑스의 공동연구과제인 STARMER(1987-1992)에서는 프랑스의 잠수정 'Nautile' 과 일본의 잠수정 'Shinkai 6500'을 사용하여 North Fiji Basin에서 열수지역과 열수성 생물군집을 발견하였다. 이러한 서 태평양의 중앙 해령 확대에 따른 수렴 축 근처에서의 연이은 발견으로 인해 거리적으로 약간의 거리를 갖고있는 이들 각 지역의 연관성에 대한 관심이 깊어졌다. 이러한 깊은 관심으로부터 Manus Basin의 열수지역 및 열수생물군집에 대한 탐사가 1990년도 일본 동경대학교 연구선 'Hakuho Maru'에 의해 본격적인 재조사가 이루어졌다. Manus Back-arc Basin의 열수 활동에 대한 것은 앞에서 서술한바와 같이 1986년이 처음이었다. 'Moana Wave'의 PAPTUA 탐사에서 H. Craig와 그의 동료들에 의해

메탄 이상이 발견되었으나 그 항해는 seabeam mapping등이 이루어지지 않은 항해이었기에 정확한 지점을 확인하기는 무척 어렵게되었다. 그러나 러시아의 연구선 'Sonne'에 의한 1990년 탐사에서 3° 09.8' S, 150° 16.8' E에서 활발한 열수 활동이 있다는 결과가 나와 이를 바탕으로 보다 정밀한 탐사의 수행이 가능하였다. 여기에 본인도 직접 참가한 이 탐사에서의 탐사결과를 간단히 요약하여 나열해 보기로 한다. 이러한 세부적인 지역의 탐사결과는 우리 나라의 첫 걸음에 불과하다 할 수 있는 열수지역의 연구나 금년도에 연구를 수행한 이 지역에서의 보다 정밀한 정보에 도움을 주어, 앞으로의 연구계획이나 탐사계획에 다소나마 도움이 되리라 생각한다. 특히 이 탐사는 잠수정을 사용하지 않고 연구선 만을 가지고 열수 활동의 지역 발견 및 채집이 이루어진 탐사이기에, 우리나라처럼 아직 잠수정을 보유하지 못하고 있는 상태에서는 연구방법 및 수행에 많은 참고가 되어지리라 생각된다.

Manus Basin의 몇 지역에 대해 선행 연구국가들에 의해 열수지역 및 열수성 생물군집에 대한 발견과 조사 그리고 연구가 진행 중에 있지만 아직 그 연구결과가 밝혀진 것은 거의 없는 실정이다. 그래서 이 지역이 다른 지역과 다르게 또는 공통적으로 보일 수 있는 지질학적 특성 및 열수지역 생물들의 분류 및 그들의 생태 또는 생리학적 차이에 대해 참고 또는 분석비교가 불가능하다. 따라서 여기에선 일본의 동경대학교와 일본과학기술연구소가 조사를 실시한 중간 결과 자료를 가능한 한 탐사의 관점에서 서술하여 보기로 한다. 이는 앞의 자료와 더불어 향후 우리 나라의 연구탐사에 지질학적, 화학적, 생물학적 연구접근에 도움을 줄 수 있으리라 본다.

열수성 생물군집이 학자들에게 있어 중요한 이슈가 되었던 것 중의 하나는 이들 생물의 거리가 지금까지 알려져 있지 않은 종들이라는 것과 이 온천의 주변에서 생물의 성장속도나 생물활성이 같은 수심의 심해저와 비교해 높다는 것, 그리고 해저에서 분출하는 온수에 유화수소가 다량으로 포함되어 있어 유화수소를 유황이나 유산으로 산화하거나 메탄을 산화하여 생물에너지를 얻는 화학합성세균이 있다는 것이다. 따라서 이곳에서 이들 각 생물별로 체내에 공생하는 박테리아에 대한 전자현미경 관찰 결과를 밝혀 보기로 한다.

제 2 절 Manus Basin의 열수군집 탐사 및 발견

Manus Basin은 New Britain arc-trench 구조에서의 back arc 위치, 활발한 판(plate) 경계를 포함하고 있는 지역이다(Fig. 6-1: Taylor, 1979; Eguchi *et al.*, 1989). $151^{\circ} 20'$ 에서 $152^{\circ} 10'$ E 에 대한 Sea Beam 지도는 Fig. 6-2와 같다. 일본에 의해 'DESMOS cauldron'이라고 명명되어진 지역은 $3^{\circ} 41.75'$ S, $151^{\circ} 52.3'$ E인 지역으로 Fig. 6-3과 같다. 일본은 이 지역의 탐사 등의 목적으로 심해용 실시간 관찰용 카메라 및 비디오 장치를 활용하였다. 그것이 DESMOS(Deep-Sea Multi-Monitoring System) 이다.

수중 탐사장치는 스테레오 칼라 텔레비전(stereo color TV), 스테레오 스틸 카메라(stereo still camera, 35 mm, 1,700 frame이상, 100-foot의 필름), CTD(Chlorinity-Temperature-Depth Profiler: Sea Bird electronics, Inc.:model SBE 9/11, modified by Tsurumi Seiki Co. Ltd.), 6통형 로제트 수중 채수기(PVC Niskin-type: 각각 2리터용), acoustic altimeter에 의한 releasing clamp, inclinometer, acoustic transponder, pendulum 등. 이미지 영상을 찍기 위해 300와트의 할로겐 램프를 4군데에 장착했으며 6,000 m길이와 14.4 mm phi의 armored 케이블(6 optical fibers, 4 signal wires and 6 power chords)을 사용했다. 사진 촬영, 해수 채취, 생물 시료 채취용 드레워(dredge)는 실시간으로 선상에서 모니터를 보며 목적으로 하는 장소에서 실시하였다. 수직 수평적 CTD 단면도는 CRT 모니터를 통해 관찰하였는데, 이러한 CTD 단면도는 열수지역의 이상 현상을 알아내는데 아주 빠른 수단이기도 하다.

탐사장치의 항해 경로와 정점은 총 8개로 AQ26, AQ30, AQ34, AQ38, AQ44, AQ47, AQ50 및 AQ 54(Fig. 6-4, Fig. 6-5)이었다. 'DESMOS cauldron'은 수심 약 2,000m로, $3^{\circ} 41.75'$ S, $151^{\circ} 52.3'$ E에 위치했다. 여기에서 열수 활동과 열수성 생물군집을 발견했다.

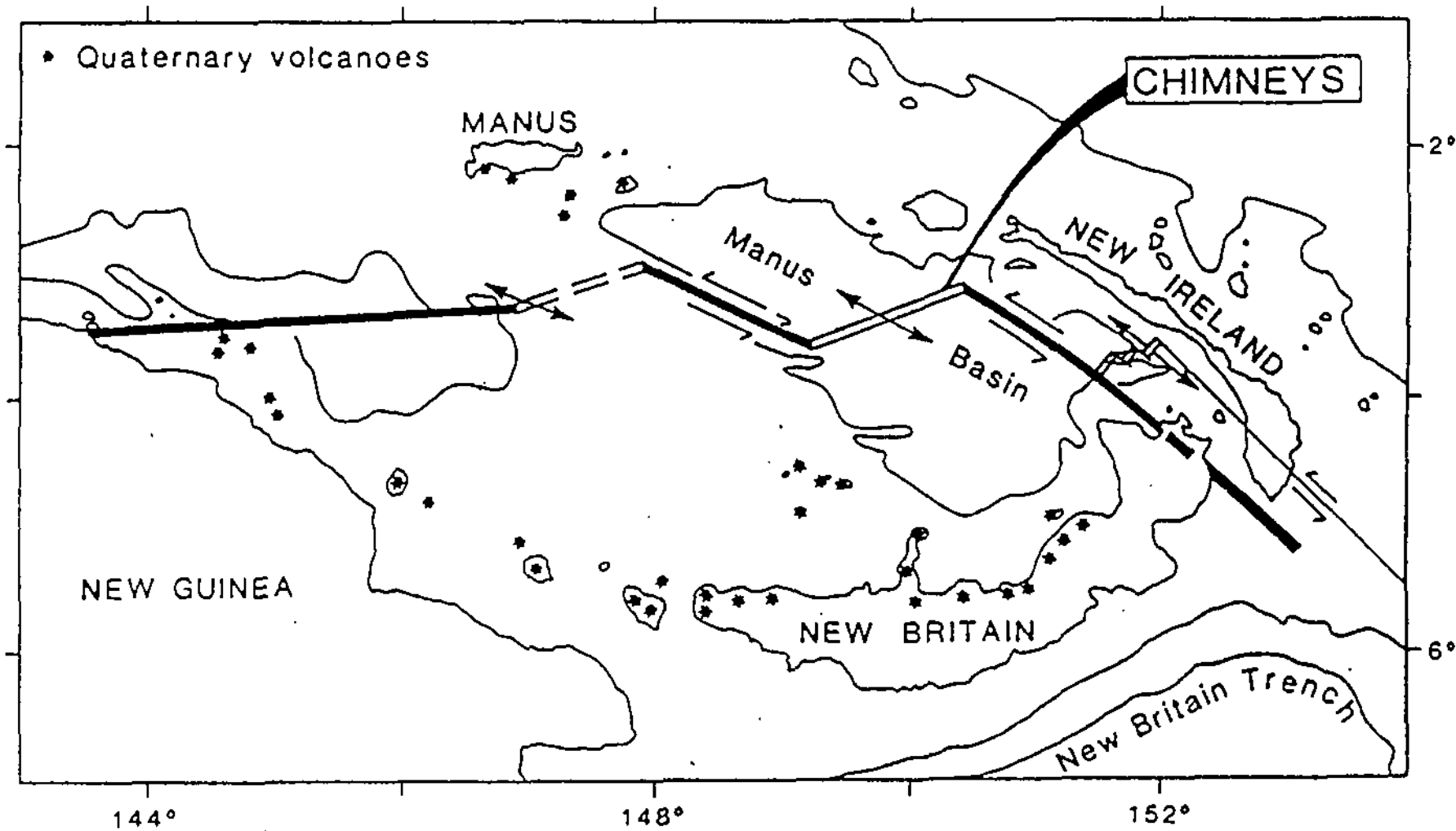


Fig. 6-1. Regional map showing the location of the hydrothermal chimneys found in 1986 and the present survey area in the Manus Basin and the spreading centers and transform faults that constitute the active plate boundary. The quaternary volcanoes and trench of the New Britain arc-trench system are also shown.

KH90-3 EAST MANUS BASIN

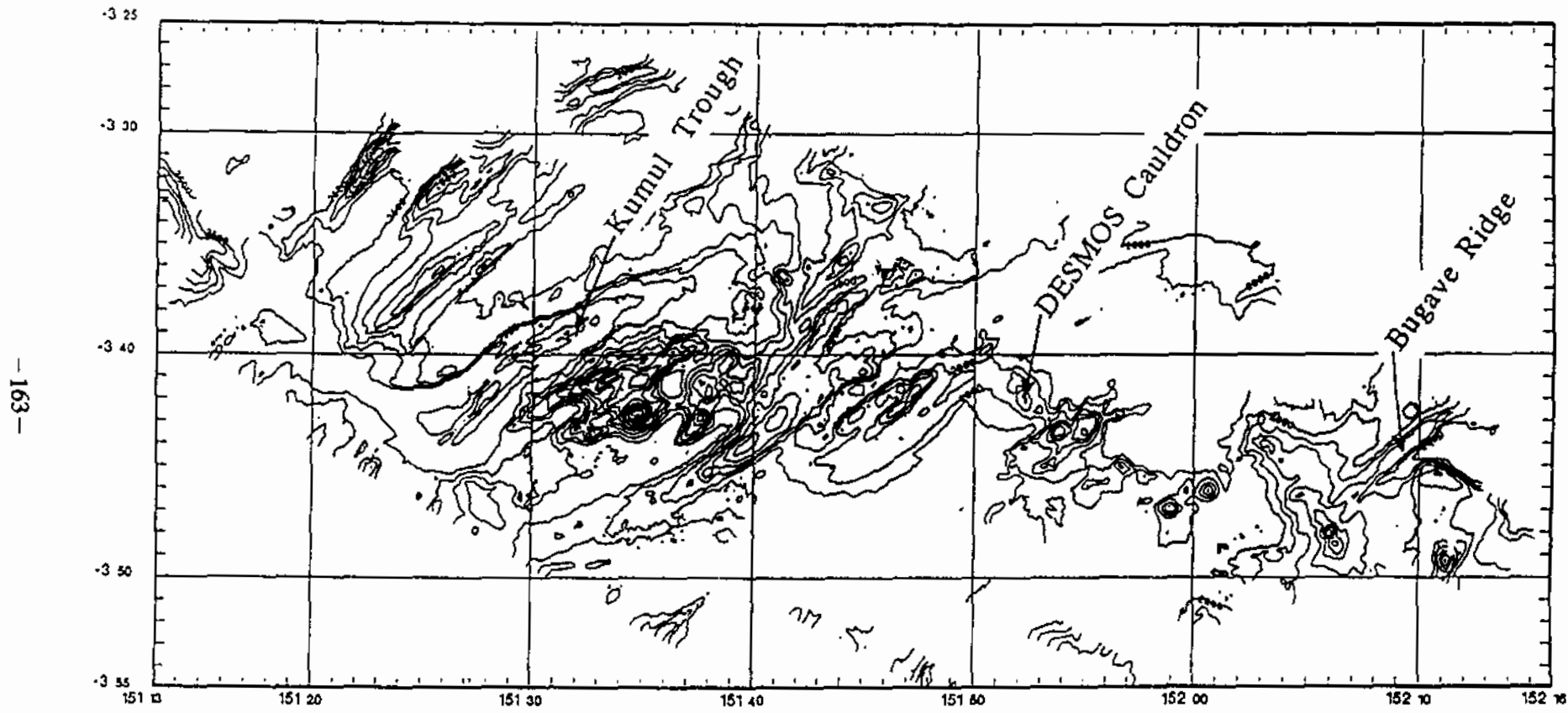


Fig. 6-2. Seabeam map of the present survey area in the eastern part of the Manus Basin.

KH90-3 EAST MANUS BASIN

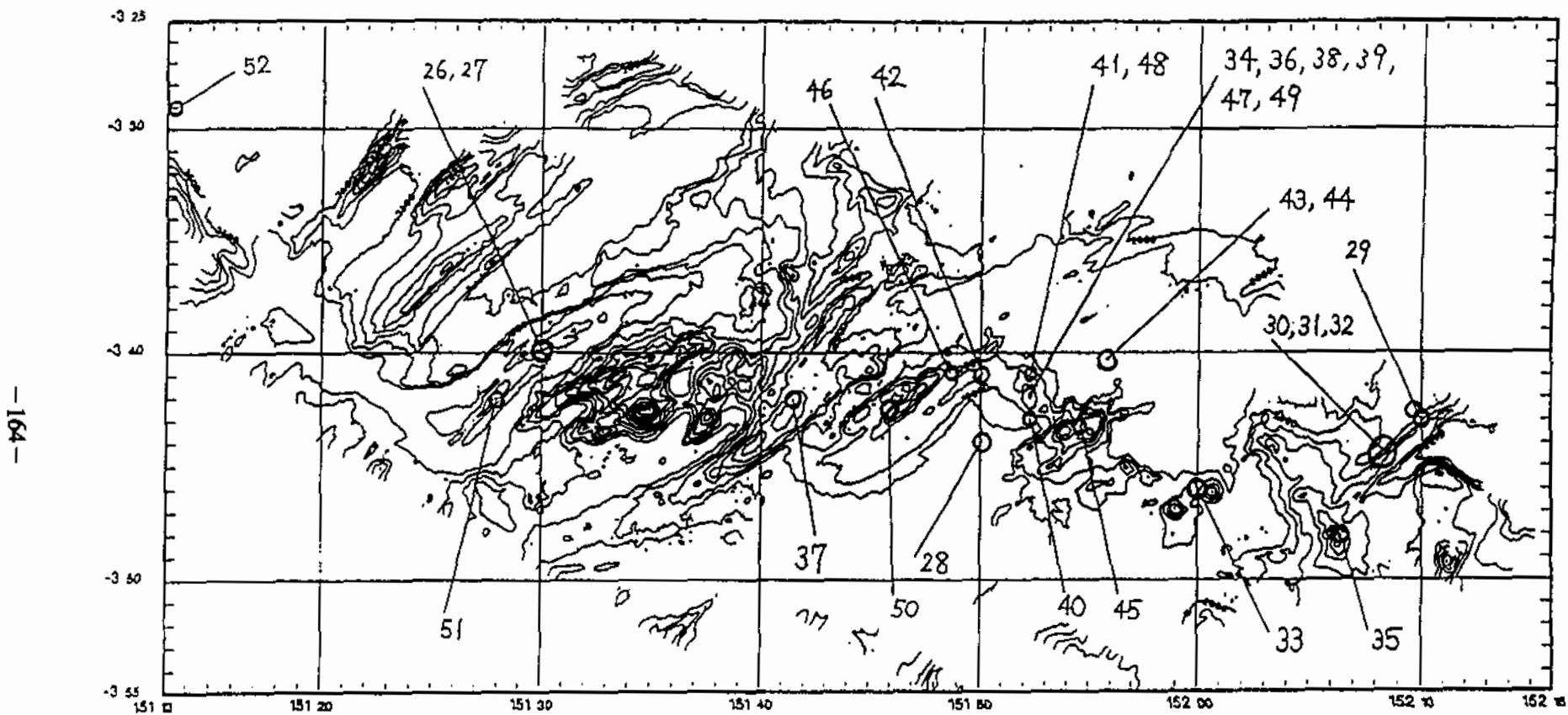


Fig. 6-3. Location of the sampling and observation stations in the eastern part of the Manus Basin during the KH-90-3.

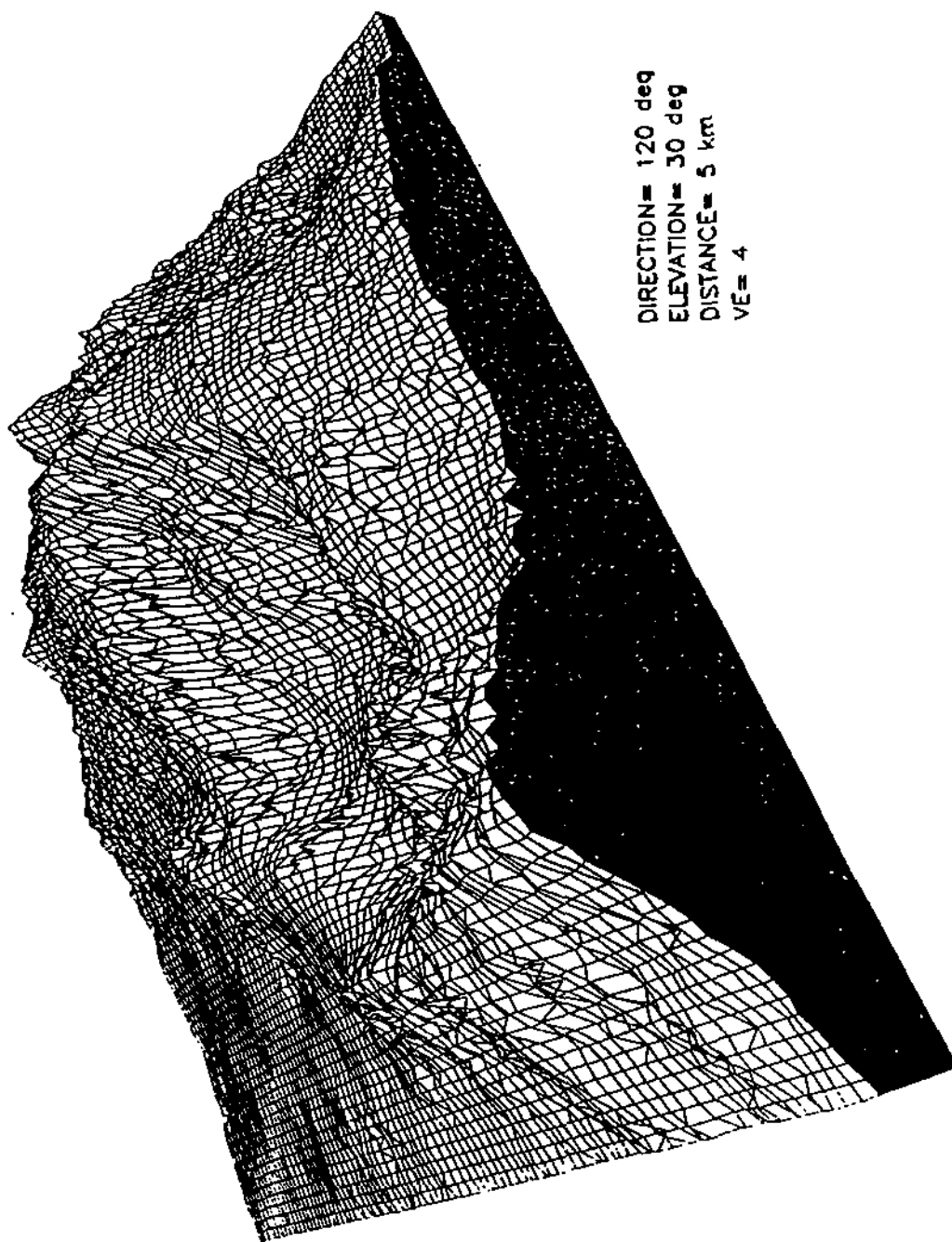


Fig. 6-4. Bird-eye view of the DESMOS Cauldron. Active hydrothermalism and rich biota were found on the NW inner flank of the cauldron.

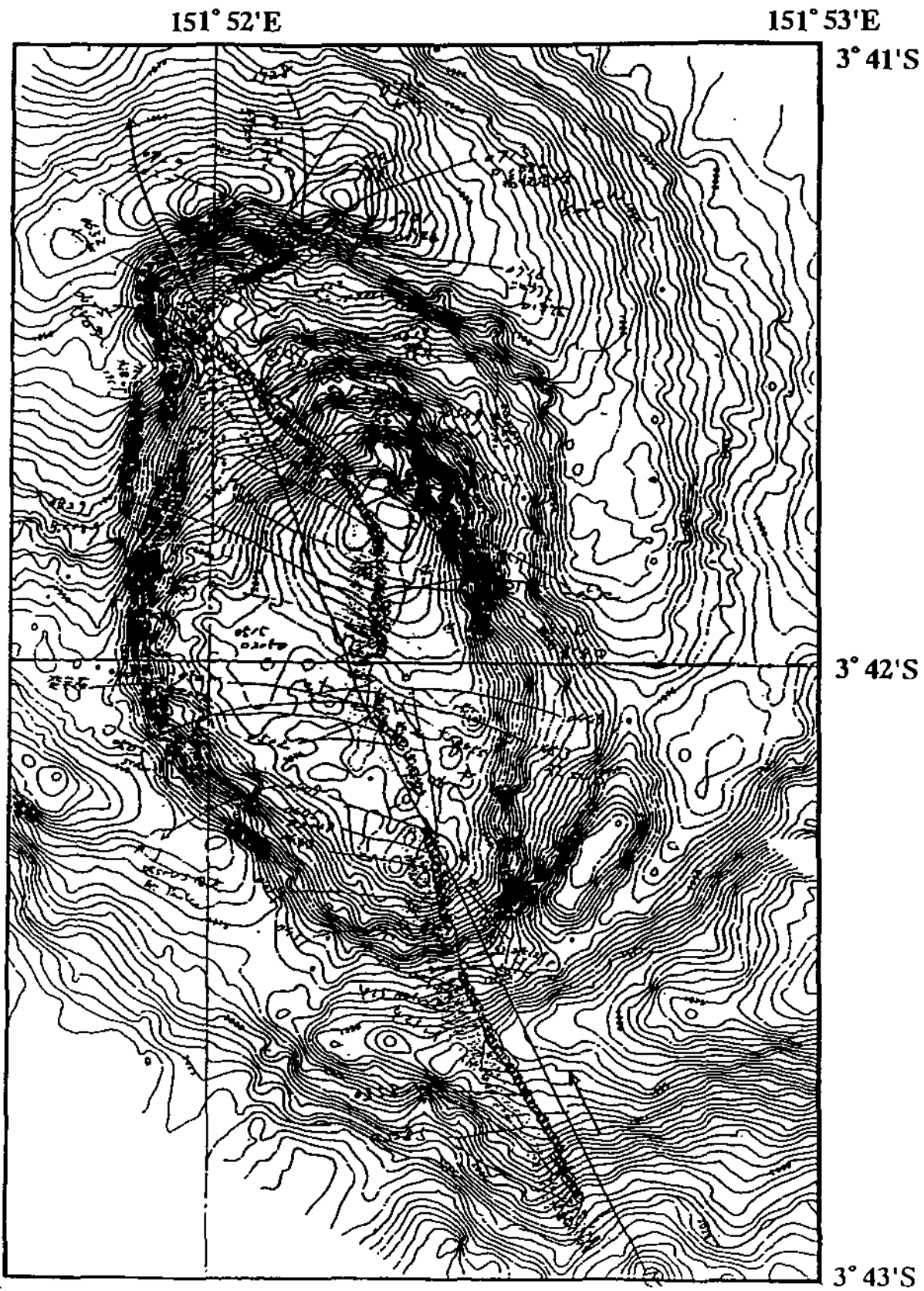


Fig. 6-5. An example of the rack of the DESMOS operation on the fine-scale Seabeam map. St. AQ34, KH-90-3.

St. AQ26: SE ridge in the "Kumul Trough", eastern Manus Basin

Date and time: Nov. 24, 1990: 12:36-17:07 [LT: local time]

Depth range: ca. 2,430-2,640 m

Bottom observations: 03:25-06:12, Nov. 24, 1990[GMT]

정상외 대 부분이나 ridge의 남동 측면은 때때로 각력암의 필로우나 덩어리로 되어있으며 두꺼운 퇴적물로 덮여 있었다. 커다란 생물들이 발견되었는데 새우류인 *Nematocarcinus* sp.가 퇴적물위를 수영하고 있었으며, macrourid(*Squalogadus modificatus*?)와 brotulids, 그리고 holothurians의 분비물이 코일처럼 되어있는 것이 보였다. 때때로 많은 양의 코코넛 껍질과 같은 형태의 산호가 보였다. 작은 구멍과 같은 것이 눈에 띄었지만 특별한 열수지역 특징은 발견할 수 없었다.

St. AQ30: Ridge top and NW and SE flanks of the "Bugave Ridge"

Date and time: Nov. 26, 1990: 12:05-17:39 [LT: local time]

Depth range: ca. 1,710-1,920 m

Bottom observations: 03:20-07:06, Nov. 26, 1990[GMT]

정상과 ridge의 북서, 남동 사면은 두꺼운 퇴적물에 의해 덮여 있었다. 필로우, 용암의 흐름, 현무암 덩어리들이 사면에서 때때로 볼 수 있었다. 커다란 생물체인 Ophiuridae, nematocarcinid shrimps, asteroids, crinoids, *Hyalonema* 형태의 해면, gorgonians과 branching형태의 산호들이 발견되었는데 이는 ridge를 따라 해수의 흐름이 있음을 이야기 해준다. Ridge의 정상에는 *Munidopsis*, *Aldrovandia*, 그리고 holothurians가 밀도 높게 나타났다.

St. AQ34: "DESMOS Cauldron"(Eyespot of Butterfly), E. Manus Basin

Date and time: Nov. 27, 1990: 12:24-18:12 [LT: local time]

Depth range: ca. 1,820-2,120 m

Bottom observations: 03:23-07:24, Nov. 27, 1990[GMT]

Cauldron의 긴 축을 따라서 DESMOS가 이동을 하면서 cauldron의 북쪽 안쪽 벽의 테라스에서 명백한 열수성 생물군집과 열수지역을 발견했다(Fig. 6-5). 거대한 숫자의 심해 galatheid *Mudinopsis* sp., 적어도 두 가지 형태의 Vestimentiferan tube worms. 지역의 해수에선 미약하게나마 열수의 이상 현상을 보여주었다. 열수지역 근처에서는 살아있는 이매패류의 *Calypptogena* sp. 가 두꺼운 퇴적층에 파 묻혀 있는 모습을 발견했다. 그 주변 퇴적물의 표층은 노란색 또는 하얀색의 분말이 뒤 덮여 있었는데 이는 화학적인 침전이나 박테리아 매트라고 생각되어진다. 해수의 시료에서는 현저하게 높은 메탄과 망간이 포함되어 있었고, 온도도 0.01 °C에서 0.2 °C의 이상을 보였다. 그 이외에도 Tadpole 형태의 물고기 *Squalogadus* and/or *Triacanthonus*, chimaeras, brothsids 그리고 nematocarcinid 새우류가 주로 발견되었다.

St. AQ38: "DESMOS Cauldron"(Eyespot of Butterfly), E. Manus Basin

Date and time: Nov. 28, 1990; 14:29-19:53 [LT: local time]

Depth range: ca. 1,940-2,135 m

Bottom observations: 05:40-09:16, Nov. 28, 1990[GMT]

열수지역인 eyespot of butterfly 지역을 같은 목적으로 다시 한번 조사를 했다. 활발한 열수 활동은 cauldron의 깔때기 모양의 저변부에서 일어나고 있는 것처럼 보였다. 퇴적물 표층의 변화는 cauldron의 남쪽의 아주 평탄해지는 면에서 관찰되었고, 이곳에서는 아주 미약한 열수의 징조를 보여 주었다.

St. AQ44: Ridge to the northeast of the "DESMOS Cauldron"

Date and time: Nov. 29, 1990; 22:34-02:24 [LT: local time]

Depth range: ca. 2,150-2,185 m

Bottom observations: 13:24-15:45, Nov. 29, 1990[GMT]

“DESMOS Cauldron”의 북쪽에 위치한 작은 ridge를 향한 방향인 NEE-SWW의 경사면의 꼭대기에는 보다 두꺼운 퇴적물 층이 덮여 있었다. 빨간색의 심해 galatheid 인 *Munidopsis* sp., ophiuroids, holothurians(Benthodytes and Eynpniastes) 그리고 그들로부터 배출된 배설물, hyaline해면류, chimaeras, brotulids 등이 자주 목격되었다. 그러나 명백한 열수성 생물군집 혹은 생물들이나 열수에서 나타나는 이상적인 화학적, 물리학적 반응은 나타나지 않았다.

St. AQ47: Western and the northern rim of the “DESMOS Cauldron”

Date and time: Nov. 30, 1990: 14:11-20:29 [LT: local time]

Depth range: ca. 1,780-2,070 m

Bottom observations: 05:11-09:49, Nov. 30, 1990[GMT]

Cauldron의 남서쪽의 안쪽 벽이나 남쪽의 편평한 테라스에 열수의 이상 현상인 해수의 이상온도인 2/100 °C를 보임에도 불구하고 열수지역이나 열수성 생물군집이 보이지 않았다. 잠시후의 북서 벽의 근처 테라스 지형에서 열수의 이상현상(0.1에서 0.26 °C)이 나타나고 열수성 생물군집이 나타났다. 열수성 생물군집은 아주 높은 밀도의 심해 galatheids인 *Munidopsis* sp., vestimentiferan tube worms 그리고 대표종인 이매패의 *Calypogens* sp. 이었다. 즉 이 지역은 안쪽 벽의 아주 극단인 북쪽에서 이러한 활동이 일어나고 있었음을 확인 할 수 있었다.

St. AQ50: Ridge-trough system west of the “DESMOS Cauldron”

Date and time: Dec. 1, 1990: 11:18-15:56 [LT: local time]

Depth range: ca. 1,620-1,930 m

Bottom observations: 02:09-06:13, Dec. 1, 1990[GMT]

지자기적인 이상 현상을 나타낸 지역임에 기대를 갖게 했지만, 기대와는 다르게 ridge의 위 부분에서 북서, 남동 지역과 “DESMOS Cauldron”의 서쪽부분을 향한 trough에는 아주 두꺼운 퇴적물이 덮여 있었지만, 이 지역이 새롭게 만들어진

확대지역이라는 것은 보이지 않았다. 남동지역의 지형적으로 높은 부분에서 약간의 이상적인 열수 반응을 나타냈다. 약간의 해면류와 crinoids가 발견되어 해저면에서 해류의 흐름이 일어나고 있음을 반영했다.

St. AQ54: "Brian's Spot" in the central Manus Basin

Date and time: Dec. 2, 1990; 11:00-14:12 [LT: local time]

Depth range: ca. 2,365-2,480 m

Bottom observations: 01:51-02:17, Dec. 2, 1990[GMT]

"Brian Spot" 과 "Gothic Forest" 지점은 남쪽 정점으로부터 약 350M정도 떨어진 정점이다. 이 지역에서는 심해 galatheids종류인 *Munidopsis* sp., 수영하고 있는 polychaetes, sea anemones등이 발견되어 열수지역과 아주 근접한 지역임을 말해주었다.

제 3 절 동부 Manus Basin DESMOS 해분의 열수분출역과 생물군집

1996년 10월-11월에 'Natsushima', 'Shinkai 2000' 을 이용하여 생물연구자를 중심으로 한 동부 마누스 Back arc basin의 열수분출공 조사 Bioaccess-Manus 96 연구 항해가 실시되었다. 이 항해의 주요 목적은 1990년도에 발견되어진 통칭 "DESMOS 해분"의 북서 주변 약 1,900 m 수심 지점의 낮은 pH, 고 유화수소, 유산염 분출 온천에 일치하는 열수성 생물군집이었다. 환경의 정밀기재, 분출공 주변에 서식하는 생물의 충분한 채취, 환경의 시간적 변화(천이)를 관찰하는 일이 주된 목표이었다. DESMOS해분 통칭 "온천 site" 는 90-112 °C의 진한 백 타수의 수심 개의 분출공으로 이루어지는 장소로써, 채수와 함께 주변의 mapping, 생물군집의 기재 및 연구용 생물의 채집을 성공적으로 실시하였다. 흰분말조개(*Calyplogena* sp.)류의 채집에 성공하였던 것은 특히 괄목할 만한 것이었다. DESMOS해분의

열수분출공 및 열수성 생물군집은 같은 해령상에 위치한 back manus 해역의 것과는 아주 많은 차이가 있고, 그것과의 비교를 살펴보기로 한다.

배경을 간단히 살펴보면 New-Britain back arc 해구계의 배후에 위치한 Manus Basin은 활동적 열수활동의 후보지로서 지구화학, 지구물리, 지질학자들에 의해 주목을 받아(Craig and Poreda, 1987; Taylor, 1979; Taylor *et al.*, 1994), 그 후의 조사에서 열수분출 굴뚝(Chimney)과 열수분출공 생물군집의 유해군집이 사진화면으로 증명되었다(Both *et al.*, 1986). 또, 동경대학 해양연구소 연구선 "Hakuho Maru"의 KH-90-3차 항해 제 2 leg. (1990년 11월 24일 - 12월 24일)에서 지구물리, 지구화학, 지질학, 생태학 그룹의 혼성팀으로 Manus Basin의 동쪽에 위치한 동남 해령 Southeastern Ridge(SER) 상의 통칭 "DESMOS Site"에서 열수활동과 열수분출공 생물군집을 발견했다.

같은 항해에서 Sea beam에 의한 해저지형의 정밀 mapping, 프로톤 중력계 탐사도 수행하고, 정밀한 CTD-multi rosette 에 의한 hydrocast 로 메탄, 망간, 알루미늄의 중층 plume의 존재를 확인, 암석 드렛지에 의한 자연유황, 현무암 채취 등 탐사범위를 결정해서 시행하였다(Sakai *et al.*, 1990; Ishii *et al.*, 1991; Gamo *et al.*, 1993). 심해탐사용 카메라 및 비디오인 "DESMOS"(DEep-Sea multi MOnitoring System)는 동경대학 해양연구소에서 개발되어진 것으로 back arc basin의 열수분출 활동이나 subduction zone의 냉 용수생물군집의 탐사와, 정밀 mapping, 환경측정을 주목적으로 설계되어진 것이다(Ohta *et al.*, 1990). 이 장비는 스테레오 TV 카메라, 스테레오 스틸 카메라, CTD rosette bottle이 주된 장비로 장착되어 있고, 음향식 multimeter, 경사계, SSBL transponder system을 보조설비로써 갖추고 있다. 6,000 m 길이의 광케이블로 해저에 내려 올리며 300와트의 할로겐 램프 4개가 해저를 비추며 real time으로 선상에서 모니터로의 관찰이 가능하다.

같은 항해에서 8개의 정점에서 관측이 이루어졌지만, 본 측정 장비에 의해 활발한 열수활동과 생물군집이 발견되었다. 조사는 주변부 수심 약 1,800 m 의 칼데라상의 지형, 통칭 "DESMOS Cauldron" 의 북서 내벽($3^{\circ} 41.75' S$, $151^{\circ} 53.3' E$, ca 1,900 m)에서 이루어졌다. 온도의 이상, 흰 탁색의 해수, 노란색의 흔적,

하얀색의 mar. 열수성 변질 현무암, 석영 안산암질 현무암 또는 황화물, 온천수가 흐물흐물 올라오는 것 이외에도 묽음으로 되어있는 vestimentiferan tube worms, 높은 밀도의 넓은 의미에선 계류인 심해새우 *Munidopsis* sp. 등을 확인했다. 근방에는 흰분말조개 *Calyptogena* sp, *Alvinocaris* sp.(Jpn. : Ohara ebi), 짧은 다리 새우류 *Nematocarcinus* sp.(Jpn: Itoashi ebi), 그 위에 그 주변에는 은상어과 *Chimaeridae* sp., *Brotula multibarbata*(Jpn: Itachiuo)가 영상 상으로 확인되었다. 그 후의 암석 드렛지로는 흰분말조개류와 심해 홍합류(mussels)의 파편, 중형 종의 관 벌레류인 *vestimentiferans*류가 채집되었다.

특히, 동부 manus back arc basin에 흰 분말조개류 *Calyptogens* sp. 류가 존재하고 있음이 주목되었다. 이곳의 흰 분말조개류 *Calyptogens* sp.는 비교적 두터운 퇴적물에 패각을 반쯤 묻히고 있고, 또 낮은 pH의 분출공을 피해서 주변부에 서식하고 있는 태평양 서쪽에서의 흰 분말조개류 *Calyptogens* sp.의 특징을 갖추고 있어, 환경전체로 보면 오키나와 back arc basin의 환경을 떠오르게 한다.

거의 같은 시기에 연이어서 이루어진 Manus back arc basin의 조사에서 manus 확대 축 Manus Spreading Center(MSC) 에 연이어 있는 "Vienna Woods Site"(309.8'S, 15016.7'E: Both *et al.*, 1986; Tufar, 1990; Lisitsyn *et al.*, 1993)이나, 마누스 서남 ridge상의 "PACMANUS Site"(Binns and Scott, 1993; Binns *et al.*, 1995) 등이 발견되었다. 1996년 10-11월의 "Yokosuka" "Shinkai 6500"의 Manus flux 항해는 위의 3장소에서 잠항 조사가 이루어져, 특히 지구과학적, 지질학적 성과를 이루었다(Auzende *et al.*, 1996; Manus Flux Cruise Report, Oct. -Nov. 1995(1996); Gamo *et al.*, 1996, 1997).

특히 DESMOS Site는 열수 순환 조직이라기보다는 육상화산의 유산염을 다량으로 포함한 산성온천의 용출에 대비할 수 있는 정도의 특성이 밝혀졌다. 생물학자에게 관심을 불러일으켰던 것은 "Vienna Woods Site"와 "PACMANUS Site"의 열수성 생물 군집이, 알빈 패류, *Alviniconcha*나 *Ifremeria*(Jpn: Yomotsu heguinina 류)등의 권패를 탁월하게 화학합성 세균 공생 종으로 하는 군집이고, "DESMOS Site"가 vestimentiferan tube worms와 흰분말조개 *Calyptogena* sp.를

화학 합성 공생 종으로 하는 군집이기 때문에, 또한 "DESMOS Site" 가 "PACMANUS Site"와 함께 동남 Manus 해령상에 있는 100 km이내의 근방에 있다는 점이였다. 여기서 우리는 100 km 정도의 거리에 떨어져있는 생물군집이 어느 정도 공통적일까 하는 것과 혹은 고유종일까 하는 것을 생물군집조성, 유전자 교류의 면에서 밝혀, 생물군집의 유생분산이나 군집의 전파능력의 검증을 하는 모델 화를 생각했다.

일본 생물계 연구그룹은 이미 서 태평양 해역에서 오키나와 back arc basin, Izu-Otahara 화산 열, Mariana back arc basin, North Fiji 해분, 일본의 Kagoshima만 등을 모델로, 혹은 Chishima 해구에서 Nankai trough에 이르기까지 subduction zone의 냉 용수 생물 군집에 대해서, 수 km에서 수 백 및 수 천 km의 격리된 모델을 쫓아 왔지만 100 km이내의 군집에서 생물군집조성에 있어 이 정도의 차이가 있는 생물계를 보지는 못했다. 1990년의 *Hakuho maru*의 항해, 1995년의 "*Yokosuka*" "*Shinkai2000*" "*Dolphine3K*"에 의한 BIOACCESS-Manus 96 cruise는 해양과학기술센터의 Dr. Hashimoto를 중심으로 조직되어 동경대학 해양연구소의 Dr. Ohta사 제 2 leg를 담당했던 것으로 생물학, 미생물학 그룹에 지구화학, 지질학연구자가 합동으로 이루어진 것이였다. 본 항해는 생태학 적으로는 다음과 같은 연구를 주 된 목적으로 하였다.

- (1) "DESMOS Site"와 "PACMANUS Site"의 두 열수 분출공 해역 및 생물군집의 정밀기재
- (2) 커다란 대조를 보이는 2장소의 생물군집특성의 비교 검토
- (3) 구성 생물 종의 철저한 채집
- (4) 유황 화학합성 대사계의 생리학적, 효소학적, 생태학적 연구
- (5) 낮은 pH, 낮은 알칼리도, 높은 유산염 농도군의 적응기구
- (6) vent cap에 의한 미생물학적 연구
- (7) 중층성 및 근저층 플랑크톤 생물군집의 생태학적 연구
- (8) 기생, 공생 종의 생물학적, 생태학적 연구
- (9) 사육실험에 의한 열수성 생물의 발생학적, 행동학적 연구
- (10) 선행되어진 조사시점과의 비교에 의한 열수 분출공 활동 및 생물군집의 변화(천이)의 연구

출항의 직전인 10월 또한 항해중(11월 26일)에 라바올의 Tavurvur 화산이 격렬하게 분화하였지만 예정대로 연구조사가 진행되었다. DESMOS basin의 'Onsen site' 에 지상화산의 분화에 대응한 현저한 변화는 보이지 않았지만 이전의 항해와 거의 다르지 않은 활발한 열수 활동을 보이고 있었다.

1. # 916잠항(1996. 11. 18)

잠수심도: 1,860 - 1,924 m

잠항의 주목적은 (1) "Onsen-Site"를 주축으로 하는 DESMOS 해분 북서 내연부에 대해서 연이어진 잠항의 조사 후보지의 정찰과 기재(2) manipulator 와 slub gun 에 의한 열수성 생물군집의 주요 구성 종의 채집, 특히 *calyptogena* sp., vestimentiran tube worms, crustaceans, 은상어류 등의 어류의 채집. (3) 생물이나 환경의 고 품질 영상의 기록이었다.

생물채집에 대해서는 전술한 *Calyptogena* sp. 를 충분한 양으로 채집하는 것이었다. Slub gun, RMT 고온형 온도 prob, 생물용 보온기구, 채니관 1개, 부이 2개를 장비로 사용했다. 1990년의 "Hakuho maru"에 의한 DESMOS basin의 sea beam, map(filter처리 후)를 Fig. 6-6에, 또 Dive 916의 track chart를 Fig. 6-7에, 예정 착저 지점은 DESMOS해분의 북북서 내벽에 있는 작은 테라스상의 지형이었다. 기존의 조사 및 앞의 잠항에 의하면 여기에 아주 활발한 분출활동이 집중되어 있었다. 예정 착저 지점으로의 하강 중, 1,600 m 수심에서 진한 백탁수를 만나게 되고, 1,620 m 깊이에서 유백색의 plume에 돌입하였지만, 잠수정의 외측에 부착한 온도계에서 특별한 온도 이상은 보이지 않았다(2.98 °C). 1,700 m 깊이에서 이 plume은 일단 희박해졌다. 1,830 m와 1,840 m 깊이(해저상 65-75 m)에서 다시 plume에 들어갔고, 여기서도 오히려 실을 펼쳐 놓은 것 같은 가시적인 크기의 현탁물질로 구성되어 있었다. 이 시간의 저층류는 WWS에서 EEN으로 향하여 있었다. 예정대로 잠수정은 1,915 m 깊이의 작은 테라스에 착저 했다. 조립질의 모래로 되어있는 퇴적물은 약 20 cm 정도의 두께로 기반암을 덮고 있었고, 길이 직경 5-20 m 정도의 퇴적물 표층에 백색 층이 계속 반복되어 덮여 있었다(bacteria mat가

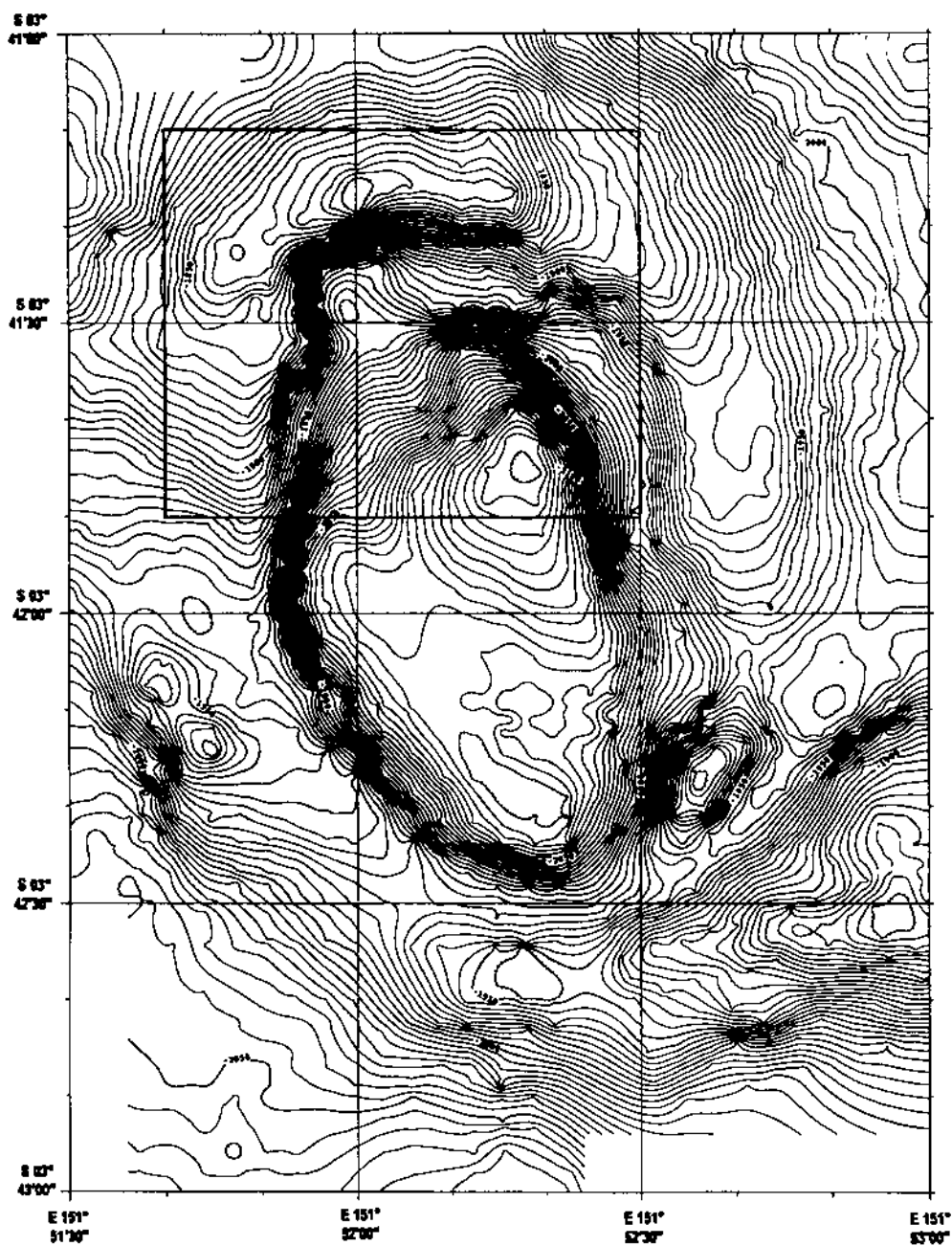


Fig. 6-6. The seabeam map(after filtering process) of the DESMOS Cauldron depicted during the second leg of the "Hakuho Maru" KH-90-3 Cruise. Depth was not corrected(minus 50 m is the rough correction factor). Insert rectangle represents the span of Fig. 6-7(After Ohta *et al.*, 1997).

아닌 분말상의 백색무기물질로 보임). 노출된 암석은 수 m 이상의 거대한 회갈색의 바위로, 산성 현무암으로 생각되어진다. 또 lobate구조를 보이는 분출암도 곳곳에서 보인다. 중간크기의 venstimentiferan tube worms가 곳곳에 군생하고 있었다.

거대한 흰 분말조개류 "*Calyptogena* sp." (장경 15-20 cm 급)가 2, 3개씩, 패각의 1/2에서 2/3을 퇴적물에 묻혀 직립으로 파 묻혀 있었다. 따라서 퇴적물의 두께는 최소한 20 cm 정도 이상으로 보여진다. 흰분말조개 "*Calyptogena* sp." 류의 서식밀도는 10x10 m 범위에 20개체 단위이었다. 흰 분말조개류 "*Calyptogena* sp." bed 로 불려질 정도의 밀도는 아니었다. 8개체의 흰 분말조개류 "*Calyptogena* sp." 를 manipulator로 채취했다. 혼슈(Honshu of Japan) 동쪽 해안의 심해 냉용수 지대의 흰 분말조개류 "*Calyptogena* sp." 군집과는 다르게 여기에서는 manipulator로 퇴적물을 반복해서 파내어도, 퇴적물의 표층 이하에 갈색 환원층은 전혀 보이지 않았다.

거의 조립질의 모래 퇴적물과 실트질 침전물의 혼합물이었다. Corer catcher를 내장한 채니관을, 10회 정도 계속해서 투입했음에도 불구하고 퇴적물은 아주 미량만 채취할 수 있었다. 이러한 상황 증거는 흰 분말조개류 "*Calyptogena* sp."의 생활을 지탱하는 유화수소는 마그마 기원이고, 퇴적물 표층의 유산 환원 층 유래의 것이 아님을 이야기 해준다. 이 흰 분말조개류 "*Calyptogena* sp." 분포 지역은 대형의 짧은 다리 새우류 *Nematocarcinus* sp. 와 *Alvinocaris* sp. 가 양쪽 모두 평균밀도 1 개체/m² 로 많았다. 흰 분말조개류 "*Calyptogena* sp." 채취 중에 그 패각을 부수어 버리면, *Alvinocaris* sp.는 흰 분말조개류 "*Calyptogena* sp."의 연체부를 먹기 위해 모여들지만 짧은 다리 새우류 *Nematocarcinus* sp.는 유인되어지는 적극적인 모습을 보이지 않았다. 이 짧은 다리 새우류 *Nematocarcinus* sp.의 분류와 함께 높은 밀도를 보이고 있는 이유를 파악하기 위한 목적으로 slub gun을 사용했다. 그러나 예상했던 흡인력만큼 출력이 되지 않아 채집에 실패했다. 이 흰 분말조개류 "*Calyptogena* sp. 분포역은 열수 분출공 지역 그 자체가 아니라, 그 근방 수 백 m 이내의 퇴적물 바닥에 있다는 것에 주목할 필요가 있다. 거대한 잠재성 판족류로써 원래의 퇴적물을 요구한다는 것(오히려

EPR의 갈라파고스 흰 분말조개류 "*Calyptogena* sp.가 이상한 상태를 나타냄)과, 흰 분말조개류 "*Calyptogena* sp.의 각피의 회복이 불완전하고, DESMOS 해분 북북서 내벽의 저해 분출 열수에는 견디기 어려운 것이라고 추측된다.

흰 분말조개류 "*Calyptogena* sp.의 채집을 마치고, 여기에 작은 표식 부이 # 916-1을 설치한 후 서남으로 잠수정의 방향을 바꾸었다. 곧, 전년도의 "Shinkai 6500" 잠항에 의한 표식부이 #37을 확인, 이 지점은 북서부에 뻗쳐 올라간 절벽이 부서져버린 곳으로, 평균 직경 20-40 cm의 날카로운 각라이 중첩되어 있었다. 이 뛰어난 바위들의 틈으로부터 약하게 올라오는 온천구의 용출이 보이고, 그 주변의 바위들은 백색 척출물로 뒤 덮여 있었다. 아주 높은 밀도의 심해 새우의 계열인 *Munidopsis lauensis*(30-50 개체/m²), 은상어과 *Chimaeridae* 어류, *Alvinocaris* sp. 류, 길이 직경 1cm 급의 소형 권패(*Provannidae*가 하나의 각진 압초 당 20개체 정도)가 분포했다. 소형의 팔미잘도 부착하고 있었지만 시료의 채취는 어려웠다. 대형으로 직선적인 반투명한 관을 가진 *vestmentiferan tube worms*의 tube가 이 바위의 주변에 밀집되어 분포되어 있었다. 이 #37 표식 부이로부터 탐색을 북쪽으로 전진했다. 뛰어난 바위의 위로 올라가면 높이 약 10 m의 밝은 청백색 물질로 되어진 수직 벽을 만나게 된다. 자연 유황으로 뒤 덮여진 것이라고 생각되어졌다. 이 백색의 벽으로부터는 흐물흐물 뿜어내는 용출수는 보이지 않았고, 백색 벽 주변을 덮고 있는 *vestmentiferan tube worms*, 모두가 총체부(trophosome)를 잃어버린 신선한 유해 군집이었다. 이 백색 면을 포함한 암벽 면에는 국화문장 상의 lobate lava의 단면도 보였고, 분출암체로 생각되어지는 "부패된 퇴적암" 과같이 보이는 회색의 부정형 암석이 보였다. 틀림없이 열수에 격렬하게 leaching되어진 변질암이 붕괴되어 떨어진 것이라고 생각되어진다. 활동적 열수 활동은 보다 상부에 있다고 상상되어, 보다 북쪽(북동쪽)의 낮은 곳으로 탐색을 계속했다. 수심 1,860-1,890 m에서 다시 작은 테라스 구조의 각초대를 만났다(이 지점은 "Onsen Site"에서 겨우 수 십 미터 떨어진 장소였다). 여기에서도 흐물흐물 올라오는 투명 온수의 용출(용출 입구는 백색 척출물로 뒤 덮여있다)을 다수 확인했다. 심해 새우 *Munidopsis* sp., *Alvinocaris* sp. 는 무척 많았고, 특히 잠수정의 일부가 해저에 접촉한 작은

충격만으로도 아주 많은 숫자가 암석의 그늘로부터 튀어 올라와 떼를 이루어 움직였다. 또 은상어과 Chimaeridae 어류의 밀도도 높았다(10 개체/m³). 이 장소의 은상어과 Chimaeridae 어류는 오키나와 back arc basin의 열수 분출공 지역이나 사가미만 냉용수 지대의 것과는 다르게 아주 활동적이었다. 유영종의 개체 비율이 높고, 유영하는 속도도 빠르다. 단, 관찰 중 그들이 심해 새우 *Munidopsis* sp., *Alvinocaris* sp. 새우를 포식하는 것을 목격하는 일은 없었다. Slub-gun으로 1개체를 채취할 수 있었다. 결국 "Onsen site"의 재발견 없이 생물 채취와 bed cap 설치의 point를 찾지 못하고 부상하였다. 또한, 직접 열수 활동에 일치하는 종류는 아니지만 Chimaeridae 어류(실제 꼬리를 포함해서 50-100 cm 정도)와 *Acanthonus armatus*에 탐사 기간 중 여러 곳에서 만날 수 있었다. 틀림없이 열수 분출 고 밀도 생물군집으로 고위 포식자의 위치를 차지하고, 유기 에너지의 주변으로의 분산에 커다란 역할을 하고 있다고 생각되어졌다. 채집되어진 주된 시료는 다음과 같다. 흰분말조개 *Calyptogena* sp. 8개체, 심해새우 *Munidopsis lauensis* 32개체, 은상어과 어류 Chimaeridae 1개체, 새우류 *Alvinocaris* sp. 1개체, *Provannidae* gen-sp. 다수, Stalked barnacles 9개체, Straight, Semi-opaque *vestmentiferan* ca. 20, Sediment core 1개, 각 초 1개 등이었다.

본 dive에 의한 sample의 주된 연구항목과 연구자는 다음과 같다. *Calyptogena* 류의 형태분류(Ohta), DNA해석에 의한 계통학적 연구(Kojima), 기생성 copepoda의 생태학적 연구(Toda), 기생성 다모류의 분류학적 연구(Miura), 유황산화박테리아의 생리학적 연구(Prouski: Paris 6th Univ.), 어류의 형태분류(町田), 십지갑각류(Ohta), 권패류(국립과학박물관), 만각류(Yamaguchi).

2. #924 잠항

DESMOS 해분: "Onsen Site"

심 도: 1,895 - 1,917 m

잠항의 주목적은 (1) 저 pH라 할 수 있는 "Onsen Site" 분출수의 채수와 분출 활동의 년 변화의 모니터, (2) "Onsen Site" 주변의 정밀 지도 작성, (3) DESMOS

해분 북서 연변 열수성 생물군집의 주요 구성종 중, 채집부족의 종에 대해서, manipulator와 slub gun에 의한 채취였다. 은상어과 *Chimaeridae* 류, 십지 갑각류, 심해 홍합류의 추가가 요구되었다. 로타리식의 다중 원통 채수기, 니스킨식 채수기(2개), slub-gun, RMT 고온형 온도 probe, 생물용 보존 용기, 채니관 1개, 소형 표식 부이 2개를 주된 장비로써 사용하였다. 잠수정의 stereo still camera는 25도 전방을 향하여 세팅하였다. 뿐만 아니라, 몇 개의 장소에서 잠수정의 전방 장애물 탐지 SONAR의 영상물, Hand TV촬영기에 남기고, 주된 land mark에 대해서 절대적 위치 관계의 교정에 힘을 기울이기로 했다. 예정 착저 지점은 DESMOS 해분 북북서 내벽에 있는 "Onsen Site"의 남쪽 작은 테라스 상의 지형이었다. 뿐 아니라 dive #924의 track chart는 Fig. 6-7의 제 2점에서 제 3점을 연결하는 곳과 거의 일치한다.

예정 착저 지점에서의 하강 중, 1,559 m 깊이(해저로부터 약 300 m)에서 돌연 아주 진한 백탁 plume을 만났다. 1,860 m 깊이(해저로부터 약 50 m)에서 유백색의 plume에서 벗어났다. 잠수정은 수심 1,906 m의 남쪽에 경사가 있는 각락 위에 착저했다. 많은 수의 심해새우류 *Munidopsis* sp., *Chimaeridae*, *Provannidae* gen. sp. 권패와 만났다. 즉 Dive #916에서 논술한 「Shinkai 6500」 설치의 # 37 부이에 아주 가까운, 산개형 열수 분출지대에 착저, 아주 중요한 과제인 "Onsen Site"에 있어서 열수지역 해수와 분출형태의 년 변화의 monitor에 역점을 둘 필요가 있어, 340° 범위에 선수를 유지하며, 지형을 확인하면서 전진했다. 얼마 안 있어 "Onsen Site"에 도달하기까지 1,890 m ~ 1,910 m의 수심범위에서 4회의 "Spur-groove" 구조의 반복을 확인했다. 이 작은 돌출부를 남에서 북으로 각각 #1, #2, #3, #4 로 변경했다(Fig. 6-8). 이들 돌출부는 각각 약 140° 범위의 trend를 가져, 동남으로 약 60° 정도 내려가는 경사를 가진 전체적으로 계형(enechelon)으로 배열되어있었다. 각각의 작은 돌출부 앞은 황백색의 물질(자연유황이라고 생각)로 덮여있었다. 거의 수직으로 붕괴된 단면(140° 범위에 탁월한 단층암)에는 robe상의 분출암이 증착된 단면을 보였다. #1 및 #2 spur에는 현재의 열수 활동은 보이지 않았다. 현재 격렬하게 백탁수를 분출하는 분출공 군집으로부터 이루어지는 "Onsen Site" 는 #3 및 #4 돌출부의 사이에 위치하는 것이 확인되어졌다. #3 이 가장

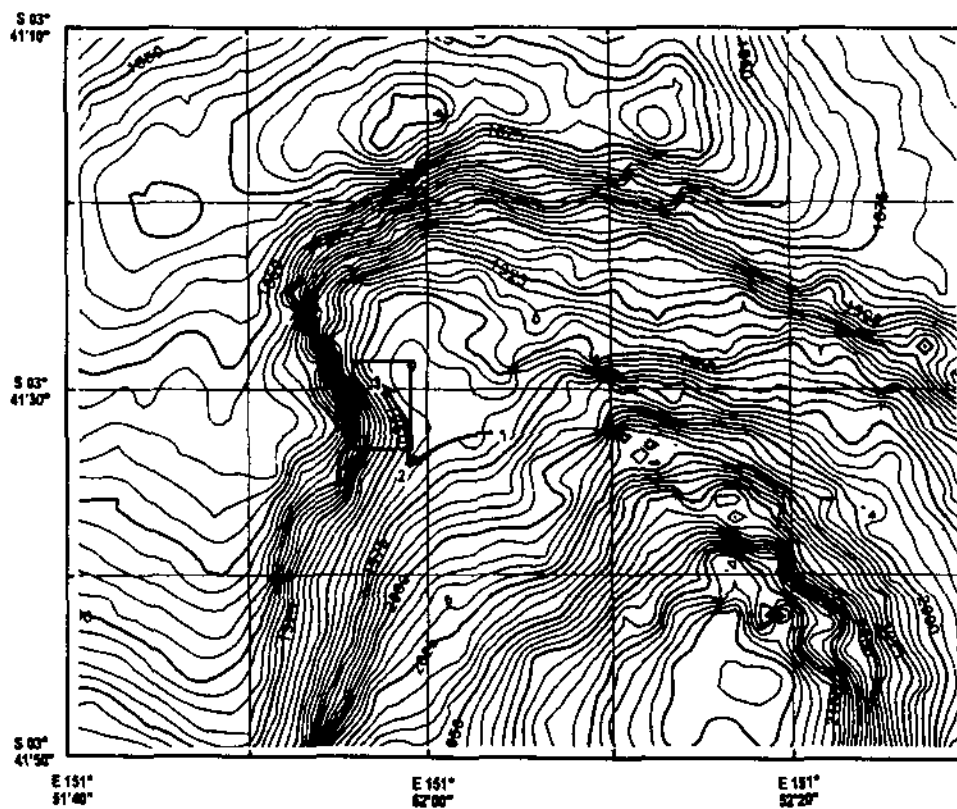


Fig. 6-7. Track chart of the Dives #916(segment connecting the points 1 to 3) and #924(segment connecting 2-3). Depth was not corrected(minus 50 m is the rough correction factor). Insert rectangle represents the span of Fig. 6-8. 1: landing point of # 916 dive = Calyptogena sampling point; 2: Landing point of #924 = diffuse vents; 3: the "Onsen Site".(After Ohta *et al.*, 1997)

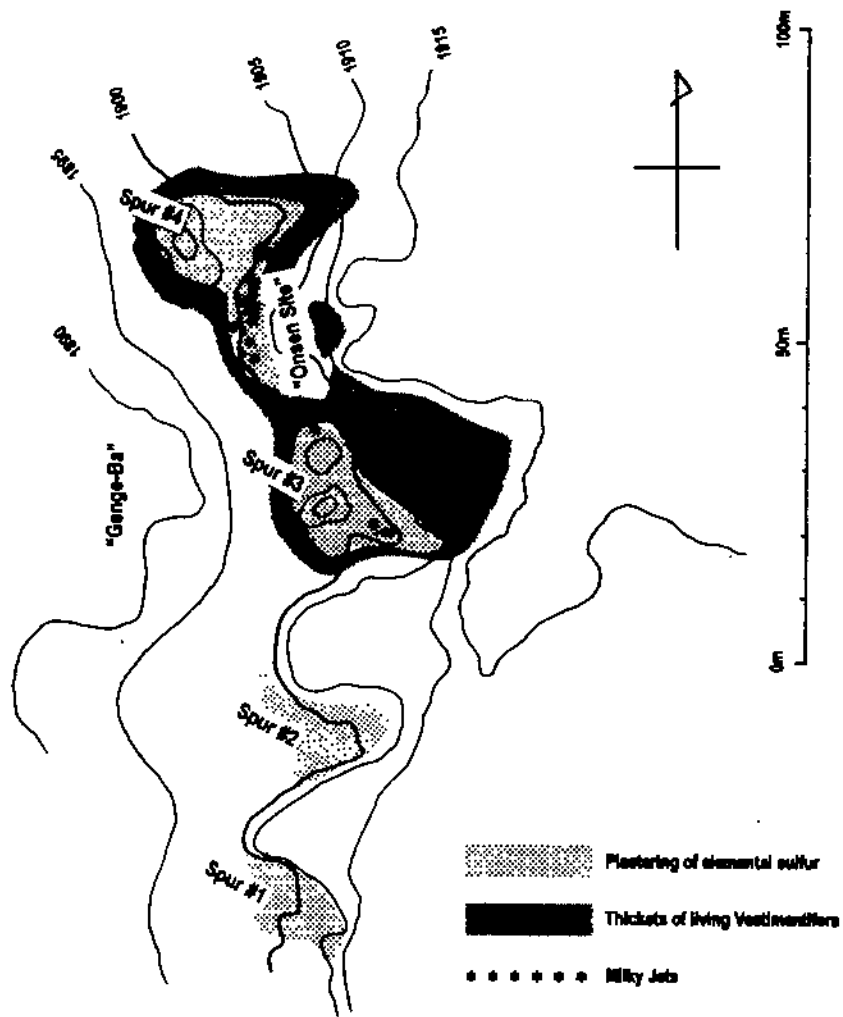


Fig. 6-8. Detailed topography of the "Onsen Site" reconstructed by route maps of the several dives and calibrated by the many CTF sonar images of the submersible "Shinkai 2000". Depth was based on the readings of the depth gauge of the submersible. (After Ohta *et al.*, 1997)

장대한 백색 구축물로 보이고 수심 1,900 m의 기저부에 3개의 백탁 분출 공을 가지고 있다. 그 주변에는 살아있는 vestimentiferan tube worms이 높은 밀도로 서식하고 있었다. 그러나 백탁수의 격렬한 분출 활동은 #3과 #4의 작은 돌출부 사이의 groove 지형사면에 가장 많았다. 단, 그 숫자는 하얀 연기의 그늘에 가려져 확인이 어려웠다. #4 spur는 수심 1,895 m 점에 돛 상의 정상상을 갖고 있고, 이들이 land mark의 일부가 되었다. 가능한 한 좋은 비디오 영상의 기록을 하려했지만, 이들 land mark의 위치관계를 절대 스케줄로 교정하기 위해, 약 5 m 수심 별로 전방 장애물 탐지 SONAR의 부채형 이미지를 Hand TV 촬영기에 입력했다. Fig. 6-8의 original map은 이러한 정밀 작업에 의해 다시 구성되어진 것이다. 진한 유백색의 활발한 열수 분출은 수심 1,900 ~ 1,905 m에 있는 자연 유황이 pluster 되어진 사면의 구멍으로부터 직접 뿜어져 나오는 것으로써, 명확한 침니상의 구조는 인정되어지지 않고, nodule부를 채취하려고 하여도 실제로 부드럽게 흐물거리는 것이었기 때문에 간단히 부서져 버렸다.

열수채취나 온도의 측정은 이 「백색물질」에 절대 접촉하여서는 안 되는데(선행 dive에서는 채수구가 분말로 채워져 버려 실패했었다). 따라서 채수는 잠수정을 45° 정도의 사면에 신중하게 중력을 걸어 계속해서 눌러서, 저충류에도 흔들리지 않는 상태에서 행하지 않으면 안 된다. 잠항 시간이나 잠수정의 중력도 2/3를 줄여서 행하지 않으면 안 된다. 2개의 분출공 부의 백색연기 중에는 어느 것이든 약 90 °C(선행하는 dive에서는 최고 111.9°C)가 기록되어, 전년도의 Manus flux 향해의 실측치 및 분출 영상에서 판단해서(잠수정이 다르기 때문에 심도치는 일치하지 않지만 동일지점)과 거의 같은 활동이라고 판단되어졌다. 라바올 지구의 Tavurvur화산의 분화활동과는 직접 대응을 하기 어렵다. Rotary식 다연 채수기 4통의 채취에 성공, 그 위에 주변환경의 화학적 참고로, 잠수정 각 부의 니스킨 채수기 1통을 작동시켰다. 앞의 dive에서 설치했던 표식 부이는 보이지 않았고, #924에서 표식한 소형 부이를 채수, 온도 측정지점에 설치했다. 이 채수 중에도 잠수정 밖의 카메라에 의한 관찰을 계속했다. 분출공 주변의 사면에 백색의 뱀 혹은 나선상의 구조가 옆으로 지나갔다. 자세히 관찰해 본 결과 이것이 분출수에 대해 유발되는 와류로서 경사면

상에서 흘러내려 쌓인 flesh한 것이 roll up한 것이라고 판단된다. 이 백탁 고온수의 분출은 dive #916 및 이번 dive에서도 다시 방문한 「은상어류장소」나 투명 산개성 분출과는 서로 수 십 m 정도로 아주 근접하면서도 명확하게 차이가 있다고 생각되어졌다.

“Onsen Site”의 최대의 생태학적 특징은 백탁수가 자욱히 낀 분위기 중에는 열수 분출공 생물이 종 수, 밀도 수 모두 아주 낮다는 것이다. 우선 “Onsen site”의 백탁수 분위기 중에는 흰 분말조개류 *Calymene* sp., 심해 홍합류 Mussels 나 *Alvinocaris* sp. 등의 탄산칼슘을 갖고있는 동물이 없다. 이 생물에 있어서는 아주 낮은 pH값(-2.1) 이라고 생각되어진다. 또 낮은 알칼리도, 너무 높은 유산염, 유화수소 농도도 생각할 수 있다(Gamo et al., 1997). 다음에 표면이 딱딱해지지 않은 듯한 분말에 가깝게 덮여 있어 분출공의 아주 근방에 관상의 구조물을 만들어 살고있는 갯지렁이류 Paralvinellids나, 그 위를 걸어 다니는 polynoids류를 제외하고는 많은 생물에 있어서 정착 기반으로는 불리한 조건이라고 본다. 게다가, 현재 백탁 분출 활동중의 “Onsen site”는 30-60도의 급사면에 위치하고, 그것만으로도 붕괴되기 쉽다는 것에 더해서, 암석이 열수에 의한 격렬한 모습을 받아 아주 불안정하다고 할 수 있다. 백탁수에 직접 영향을 받지 않는 주변부나, “은상어류 장소” 등의 투명한 산개성 분출공에 무엇보다도 농밀한 열수 분출공 생물군집이 보인다. 경관적으로 무엇보다 우점하는 것은 여러 종의 vestimentiferan tube worms이고, 각각 암 사이에 사는 심해 새우류 *Munidopsis lauensis*나 *Alvinocaris* sp., 은상어과 어류 Chimaeridae 그리고 소형의 권패 Provannidae gen sp. 이다. 본 다이브 중에도 slub-gun의 출력이 좋지 않아서 어류의 채취는 실패하였고, *Alvinocaris* sp.도 2개체의 채집이 전부였다. manipulator로 대형 vestimentiferan tube worms(Type II)를 채취하였다. 채취된 채집물은 다음과 같다. Vestimentiferan tube worms 류(대형: Type II) 100 개체 이상: 형태분류용(Ohta, Miura), 대사생리학(Fiala-Medioni & Pruski: Paris 6th Univ), 유전자 해석용(Kojima), 심해 새우 *Munidopsis lauensis* 다수: 생리학, 생화학적 분석, 기생성 갑각류 분류용, *Alvinocaris* sp. 2개체: 유전자 해석용(Ohta), “Onsen site” 분출공 해수 3 + 1 개와 주변해수: 지구화학적

분석(Ishibashi), 미생물학(J-L, Birrien: CNRS), "vestimentiferan tube worms 군생지"의 환경해수 2개와 주변해수; 지구화학적 분석용(Ishibashi), 미생물학(J-L, Birrien), "vestimentiferans tube worms" 군생지의 점토광물; 광물 분석용(K.Gena: Akita Univ. PNG), "vestimentiferan tube worms" 군생지의 퇴적물 corer; 유기 분석용(Yamanaka), RMT 온도측정; 환경 기재용.

제 4 절 열수지역의 생물분포 및 생물상

열수 분출공 지역은 지리적으로 많은 차이가 있으나 열수 지역 생물군집은 상위 분류 단계에서는 그리 차이가 나지 않고, '속(genus)'이나 '종(species)' 단위로 내려가면서 보다 차이를 보인다. 따라서 우리 나라에서 가장 가까운 열수 지역인 일본의 오키나와 열수 지역에서 생물 시료를 채취하여 종 분류 및 공생관계 등에 대한 연구를 수행했던 것을, 차 후 우리 나라의 열수 연구의 진전을 위해 여기서 간단히 언급을 하기로 한다. 공생관계에 대해서는 밑에서 자세히 언급되어질 것이다. 오키나와의 이헤야 해분(Iheya Basin)의 열수 분출공 지역에 서식하는 생물들은 photo 6-1에서 photo 6-16과 같다. 이 들 생물에 대한 개략적인 이해를 위하여 열수지역의 대표적인, 갈라파고스(Galapagos, 21° N) 혹은 환 데 후카(Juan de Fuca) 열수공 주변의 생물분포 및 생물상에 대하여 개략적으로 살펴보기로 한다. 열수분출공에 접근함에 따라서 우선 넓은 의미의 집게류인 심해새우(*Munidopsis* spp.: photo 6-16 참조), 말미잘, *Bathograea therydron*라 이름 붙여진 눈이 퇴화된 게, 그리고 *Alvinocaris lusca*(photo 6-3 참조)라는 새우류 등 갑각류의 밀도가 서서히 높아져 간다. 그리고 다모류(Polychaetes)가 열수분출공 주변 10 m 정도 반경을 이루며 분포한다(photo 6-15 참조). 살아있는 화석이라고 말할 수 있는 오래된 형태를 유지하고 있는 만각류(*Neolepas zeviniae*: photo 6-7, photo 6-8 참조)등도 보고되어져 있다. 분출공 근방 수 m에는 *Bathymodiolus thermophilus*("mussels": 홍합과의 황갈색을 한 대형의 이매패류, photo 6-5, photo 6-11 참조), *Calyptogena magnifica*("giant clams": 흰분말조개:

photo 6-2 참조), 그리고 커다란 관 벌레가 침상용암의 틈 사이에 밀집하고 있다. 몸길이 2 m, 직경 3~5 cm에 달하는 이것은 1980년에 *Riftia pachyptila*라고 명명되어져, 더욱이 최근 Pogonophora의 이웃이라 할 수 있는 Vestimentifera라고 하는 새로운 동물문(門)이 되었다(Jones, 1985: photo 6-1, photo 6-6, photo 6-9, Photo 6-12 참조). 이 생물은 황갈색의 관으로부터 아가미의 움직임을 갖는 헤모글로빈을 다량으로 포함한 선흥색을 한 허 모양의 구조를 수중으로 내 놓고 있다. 이 관의 위에는 역시 진화사적으로 오래된 형질을 갖는 *Neomphalus*속의 소형권패류가 떼를 지어 있고, 가끔 *Thermarces*속의 어류가 나타났다 사라졌다 한다. 근방의 해수온도는 약 10 °C 전후이다. 30 °C이상의 고온인 굴뚝(chimney)의 표면에도 갯지렁이(Polychaeta)의 일종인 *Alvinella pompejana*나 *Paralvinella*(photo 6-15 참조)가 서식하고 있다. 또한 이 고온의 분출공의 위라고 할 수 있는 곳에는 포식자가 있어, *Cyanograea praedator*라고 하는 게가 이들 다모류를 섭식하고 있다.

굴뚝 혹은 분출공 자체가 온천수로부터의 석출(析出)물이고 언젠가는 스스로 분출공을 막아버리는 운명이기에, 예를 들면 210Pb 법으로 보면 1개의 열린 분출공이 기껏해야 수 십년 이내라고 판단되어진다(Laubier and Desbruyeres, 1985). 지질학적으로도 단명 및 불안정한 환경이라고 볼 수 있겠다. 분출공에 특이적으로 군(群)을 이루고 있는 *Calyptogena* 나 *Bathymodiolus*가 거의 25년 정도로 굴뚝과 거의 같은 수명을 가지고 있다는 것(Turekian et al., 1983; Rhods et al., 1981; Roux et al., 1985)은 이를 뒷받침한다고 이야기 할 수 있겠다. 환경조건중에서도 생물학적으로 특별히 기재하여야 할 것은 높은 온도차와 분출수의 화학조성이다. 분출형태와 희석의 정도에서 많은 변화가 있지만 주변 저층 수온 약 2 °C에 비교해 분출공의 입구에 사는 생물은 높은 온도와 커다란 온도차에 직면한다. 가시적인 생물이 무엇보다도 고 밀도로 살고있는 온도환경은 2~20 °C이다. 그 중에는 150 °C이상의 고온도의 환경에서만 살고있는 미생물도 보고되고 있다(Baross and Deming, 1983, 1985). 또 black smoker에 관을 부착시켜 밀집하는 갯지렁이의 하나인 *Alvinella pompejana*의 경우 몸의 노출부에서는 20~30 °C, 관이 응집되어진 곳에 온도 센서(sensor)를 12 cm투입시킨 곳에서는

100 °C를 넘고, 20 cm부입한 곳에서는 250 °C가 기록되었다. 최근까지 연구되어진 생물학적 결론을 살펴보면, 서식생물의 연구가 진행됨에 따라, 여러 생물학자들에 의해 태평양이나 대서양의 약 30개의 열수관련지역에서 서식생물의 목차가 만들어져 왔다. Newman(1985)에 의해 85종, Tunnicliffe(1991)에 의해 236종, Desbruyeres and Segonzac(1997)이 그림과 함께 최근까지의 목록을 발표하는 등 활발한 연구결과가 배출되고 있다. 이를 Tunnicliffe(1998)가 모두 집대성하여 가장 최근의 연구목록을 만들어 443종에 이르는 종 목록을 발표하였다. 이와 더불어 이동성이 낮은 무척추동물뿐 아니라 이동성이 강하며, 그 지역에 자주 출현하는 낙지류와 어류의 종 목록도 발표하였다. 또한 앞과 같은 많은 종의 출현에도 불구하고, 세 개의 문(Phylum)에 속하는 생물들이 전체의 90%를 넘는 서식비율을 차지하고 있음을 보여주었다(Van Dover, 1990; Tunnicliffe, 1992). 한편, 이러한 열수성 생물은 세계적으로 아주 넓은 지역에 분포하고 있음에 불구하고, 그 종수는 그것에 비해 많다고 이야기 할 수 없다. 한 열수지역에서 발견되는 모든 종의 약 75%를 차지하고 있으며, 4개의 대표되는 지역 즉 Galapagos, nEPR sites and Guaymas Basin에서 대다수를 차지한다. *Copidognathus papillatus*는 4개의 지역에서, limpet인 *Lepetodrilus elevatus*는 5개의 지역에서 발견되어지는데 이에 비해 polychaete인 *Amphisamytha galapagensis*는 대서양을 제외한 모든 열수 지역에서 발견되어진다. 속(Genus)단위로 보더라도 한 지역에서 전체의 약 40%를 차지하고 있다. Provannidae의 경우는 냉수 용출대나 고래뼈에서도 발견되어지는 그룹이다.

제 5 절 열수성 생물군집에 공생하는 화학합성 박테리아의 전자현미경 관찰

열수분출공 생물군집이나 냉 용수 지역의 군집의 생태학적 큰 특징 중 하나는 유황산화박테리아나 메탄 산화박테리아를 체내에 공생시킴으로써 먹이물을 섭취하지 않고도 산화에서 발생하는 에너지를 근간으로 생물들이 살아가고 있다는

것이다. 즉, 열수 분출공 생물군집의 발견당시에 이들 생물이 심해의 다른 생물들의 서식조건과 같이 표층에서 유래된 유기물이 해류에 의해서 분출공 부근에 모여져 이곳 생물군집을 유지하고 있는 것이 아닐까 하는 가설도 있었지만(Lonsdale, 1977), 그들의 서식밀도가 아주 높다는 것에 착안한 연구과정에서, 화학합성을 하는 세균의 발견이나, 이들 세균과 대형생물의 공생이 발견되는 것으로 보아 이곳 생물군집의 원동력이 분출수에 포함된 화합물을 화학합성하는 세균에 의한 것이라는 생각을 하게 되었다(Childress et al., 1987). 열수 분출공의 경우, 바위의 갈라진 틈으로부터 뿜어 올라오는 온천수는 유백색을 하고 있는데, 이는 유화수소, 금속 유화물 외에도 화학합성을 하는 세균이 섞였기 때문이다(Jannasch and Mottl, 1985). 이러한 현상은 갈라파고스 발견 이후 수많은 분출공이 발견되었는데, 같은 환경을 가지고 있었다. 분출공 주변의 바위나 조개의 표면 등에도 세균이 붙어있다. 심해산 홍합류나 말미잘류, 만각류 등과 같은 현탁식자는 세균을 농축하여 소화하는 것만으로도 생활할 수 있고, 소형권패류는 기질표면의 미생물을 먹는 것만으로도 생활할 수 있다. 이들 기관의 소화관은 퇴화되어 있지 않다. 생물체의 탄소나 질소(Rau, 1985; Saino and Ohta, 1987), 혹은 유황(Fry et al., 1983; Sakai et al., 1987)등의 안정동위체 비로 식물연쇄나 영양단계를 추적하는 연구로부터 이곳의 많은 동물이 화학합성세균의 특징적인 안정 동위체 비에 가까운 값을 갖는다는 것도 밝혀져 있다. De Burgh 와 Singla(1984) 에 의해 열수 limpets의 아가미 조직 안에서 처음으로 식생활 활동을 하고 있다는 것이 밝혀졌다. Galapagos pogonophora인 *Riftia pachyptila*를 시작으로 *Vestimentifera*에 분류되어진 것은 몸 형태의 일반적인 비슷함에 더해 최소한 성체에 소화기 관계가 보이지 않는 것이었다. 이 정도의 거대한 동물체가 및 촉수로부터의 직접영양흡수만으로 유지되어진다고는 생각되어지지 않는다. 그러나 몸길이의 약 70%를 차지하고 혈관계가 발달하는 영양체(trophosome)에는 유황입자가 보이는 것, 투과 전자 현미경의 관찰에 의해서 세포 내에 원핵 세포상이 충만하여 있는 것, 그 위에 화학합성세균에 특징적인 효소계(calvin-benson cycle형의 이산화탄소 고정 효소계, 유황 및 질소cycle 효소계)의 증명되어진 것 등을 종합하여 유화수소산화형의 화학합성독립영양세균을

체내에 공생시키고 있다는 것이 확실하게 되었다(Felbeck *et al.*, 1985; Kim and Ohta, 1991). 같은 연구가 Galapagos *Calypptogena*(흰분말조개)에 대해서도 행하여져 아가미 조직 세포 내에 공생하는 것이 확실하게 밝혀졌다(Felbeck *et al.*, 1981, 1985; Cavanaugh, 1983). 조개의 몸 조직의 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 비는 세균의 값과 잘 대응하고 양자간에 유기물이 왕래하는 것이 명백하다. 생각한대로 이 이때때에서는 siphon이나 소화관이 퇴화되어있어 공생세균에 의한 에너지 섭취에 의존하고 있다는 것이 증명되어졌다(Felbeck *et al.*, 1985). 이들 양방의 동물에는 공통적으로 혈관계가 발달하고 다량의 헤모글로빈을 갖고 있다. 세균의 화학적 유기물 생합성에 필요한 이산화탄소, 질소화합물은 주로 숙주가 공급한다고 하더라도 공생세균에 대해서 에너지원인 분출수로부터의 유화수소와 저층수로부터의 질소를 공급하지 않으면 아니 된다. 그러나 여기에 커다란 모순이 생긴다. 유화수소는 쉽게 헤모글로빈과 안정하게 결합하고 또한 세포호흡 수준에서도 호흡효소 chitochromC의 활성을 저해하는 유해물질이다. 그러나 갈라파고스 *Vestimentifera*에서는 헤모글로빈 자신이 유화수소와 산소에 대한 특이적인 결합부위를 갖는 것(Arp and Childress, 1981; Felbeck *et al.*, 1985; Childress *et al.*, 1987), 갈라파고스 *Calypptogena*에 대해서는 혈액 중에 유화수소 전용의 운반자-고분자 단백질이 증명되어(Felbeck *et al.*, 1985; Childress *et al.*, 1987), 이들이 혈액 중에 있어서 유화수소를 담당하여 또, 독성의 발휘를 저지하는 것으로 생각되어진다. 또 열수분출공 주변에 많은 갑각류는 체표를 통과하여 침입해오는 유화수소를 재빠르게 유산으로 바꾸어 해독하고 유화수소환경에서도 당당하게 고위포식자의 지위를 차지하고 있다(Childress *et al.*, 1987; Ohta and Kim, 1992).

열수성 생물군집에 공생하는 박테리아의 관계를 알아보기 위하여 열수지역 중 환경이 다른 몇 개의 지역과 대표적인 생물에 한하여 전자현미경을 사용한 관찰을 하였다(Table 6-1).

Table 6-1. List of samples observed by TEM and light microscopy

Station or Dive No.	vessel or submersible	Date	Locality	Position	Depth	Specimen
SR.127	R/V Tansei Maru	17.June 1990	E off Miyako	39° 18.73' N	1700m	<i>Calyptogena</i> sp. A
# 381	SHINKAI 2000	05.Nov. 1988	Sanriku	142° 50.3' E	1170m	<i>Lamellibrachia</i> sp.
# 381	SHINKAI 2000	05.Nov. 1988	Hatsushima	35° 00.0' N	1170m	<i>Pogonophora</i> gen. sp.
# 381	SHINKAI 2000	05.Nov. 1988	Sagami Bay	139° 13.5' E	1170m	<i>Pogonophora</i> gen. sp.
# 410.	SHINKAI 2000	11.June 1989	Hatsushima	35° 00.0' N	1170m	<i>Pogonophora</i> gen. sp.
# 410.	SHINKAI 2000	11.June 1989	Sagami Bay	139° 13.5' E	1170m	<i>Pogonophora</i> gen. sp.
# 410.	SHINKAI 2000	11.June 1989	Calypt. Site	27° 32.94' N	1400m	<i>Lamellibrachia</i> sp. B
# 480	SHINKAI 2000	16.May 1990	Iheya Ridge	126° 58.20' E	1400m	<i>Lamellibrachia</i> sp. B
# 480	SHINKAI 2000	16.May 1990	Calypt. Site	27° 32.94' N	1400m	<i>Calyptogena</i> sp. B
# 480	SHINKAI 2000	16.May 1990	Iheya Ridge	126.58.20'E	1400m	<i>Calyptogena</i> sp.
# 480	SHINKAI 2000	16.May 1990	Calypt. Site	27° 32.94' N	1400m	<i>Calyptogena</i> sp.
# 480	SHINKAI 2000	16.May 1990	Iheya Ridge	126.58.20'E	1400m	<i>Calyptogena</i> sp.
# 480	SHINKAI 2000	16.May 1990	Calypt. Site	27° 32.94' N	1400m	<i>Pogonophora</i> gen. sp. sp.
# 480	SHINKAI 2000	16.May 1990	Iheya Ridge	126° 58.20' E	1400m	<i>Pogonophora</i> gen. sp. sp.
# 481	SHINKAI 2000	17.May 1990	Pyramid Site	27° 33.03' N	1400m	<i>Bathymodiolus</i> sp.
# 481	SHINKAI 2000	17.May 1990	Iheya Ridge	126° 58.15' E	1400m	<i>Bathymodiolus</i> sp.
# 515	SHINKAI 2000	06.Nov. 1990	Hatsushima	35° 00.0' N	1170m	<i>Pogonophora</i> gen. sp.
# 515	SHINKAI 2000	06.Nov. 1990	Sagami Bay	139° 15.14' E	1170m	<i>Pogonophora</i> gen. sp.
# 542	SHINKAI 2000	26.May 1991	Minami Ensei	28° 23.5' N	700m	<i>Bathymodiolus</i> sp. B
# 542	SHINKAI 2000	26.May 1991	Okinawa Tr.	127° 38.5' E	700m	<i>Bathymodiolus</i> sp. B
STA10	NAUTILE	05.July 1989	North Fiji B.	16° 58.67' S	1975m	<i>Ifremeria nautilei</i>
#77	SHINKAI 6500	07.Sep. 1991	North Fiji B.	173° 54.96' E	1975m	<i>Ifremeria nautilei</i>
#77	SHINKAI 6500	07.Sep. 1991	North Fiji B.	16° 58.67' S	1975m	<i>Ifremeria nautilei</i>
#77	SHINKAI 6500	07.Sep. 1991	North Fiji B.	173° 54.96' E	1975m	<i>Ifremeria nautilei</i>
#80	SHINKAI 6500	11.Sep. 1991	North Fiji B.	16° 59.46' S	1965m	<i>Ifremeria nautilei</i>
#80	SHINKAI 6500	11.Sep. 1991	North Fiji B.	173° 54.87' E	1965m	<i>Ifremeria nautilei</i>

1. 일본 오키나와 이해야 해변의 *Calyptogena* sp. A

Calyptogena sp. 속에서는 공생 박테리아와 관련이 있는 아가미(gill) 부분이 일반적인 이매패의 모습과는 다르게 상당히 거대해져 있는 것을 알 수 있다. 전자현미경(TEM) 으로 아가미 조직을 살펴보면 전체적인 구조는 *Calyptogena magnifica* 와 아주 유사한 모습을 나타낸다(Fiala - Medioni and Metivier, 1986). *Calyptogena* sp. 의 아가미를 절단한 면을 살펴보면 크게 두 영역으로 나눌 수 있다. 하나는, 양 끝 부분으로 섬모조직과 약간의 점액질 세포로 되어있는 부분이고, 또 하나는 아가미의 주된 부분으로 공생 박테리아를 아주 밀도 높게 보유하고 있는 부분이다. 방추 모양의 아가미 조직의 양끝에는 전형적인 섬모의 분포를 나타내고 이 조직에는 잘 발달된 미토콘드리아나 핵을 볼 수 있다. 아가미의 중앙부분은 잘 발달된 박테리아로 가득 채워져 있음을 볼 수 있다(photo 6-17). 각 박테리아 세포의 박의 표면에는 잘 발달된 융 모양의 돌기가 있다. 박테리아 세포는 높은 밀도의 이중 세포벽을 갖고있는 coccoid Gram-negative type의 박테리아를 갖고 있었다. 이것은 *Calyptogena soyoae*의 유황산화박테리아의 구조와 유사한 형태를 나타냈다(Endow et al., 1987). 박테리아의 긴 직경은 약 0.9에서 4.3 μ m를 나타냈다. 박테리아 세포의 일부는 그들의 주변질이나 세포 안에 액포를 포함하고 있었다.

2. 일본 미야꼬 해변의 *Calyptogena* sp. B

이 종의 아가미 역시 아주 거대하였고, 아가미에는 대 부분 박테리아 세포로 채워져 있었으나 coccoid Gram negative 박테리아의 밀도는 아주 낮았다(photo 6-18). 박테리아의 긴 직경은 0.8에서 3.7 μ m를 나타내고 있었다. 또한 이해야의 *Calyptogens* sp.와는 다르게 이 들의 주변질에서는 액포를 볼 수 없었다. 이들도 전체적으로는 *Calyptogena magnifica*와 유사한 모습을 보여 주었다(Fiala-Medioni and Metivier, 1986).

3. 사가미만의 Vestimentiferan tube worm(*Lamellibrachia* sp.)

영양체(trophosome)은 이들 vestimentiferan 종들의 체강에 가장 핵심적인 부분이며, 재생산기관 역시 이 부분에 있다. 공생박테리아는 막으로 둘러 쌓여 있으며(기본적으로 개체별) 액포와 같은 구조를 가지고 있는 host cell에 의해 생산되어지는 것으로 보인다(photo 6-19). 이들 막은 박테리아 세포벽의 바깥쪽에서 볼 수 있으며, 오키나와 해분의 작은 pogonophorans과는 다른 양상을 보인다. 이 tube worm의 공생자는 Gram-negative 형의 세포벽을 갖는다. 공생 박테리아 세포는 형태적으로 현저하게 두 가지 형태로 나눌 수 있다(photo 6-19, 20). 첫 번째 공생자의 형태는 크고, 기본적으로 둥근 형태를 가지고 있으며, 세균 세포 안에 3개에서 5개의 밀집된 양상을 보이고 있다. coccoid 형태의 직경은 2.5에서 7.3 μ m 이었다. 글리코젠과 같은 입자가 일정하게 흩어져 있는 모습도 볼 수 있었다. 이 종들의 큰 형태는 lysosome들의 정교한 내부 막의 구조를 연상케 했다. 두 번째 공생자의 형태는 앞서 언급한 둥근형의 것들보다 작아서 직경 약 1.0에서 3.8 μ m를 나타낸다. Pale fenestration이 앞의 것들보다는 비교적 넓게 나타난다. 이 작은 새로운 영양체(trophosome) 세포들은 긴 혈관 근처에 있는 lobule들의 중심에서 생산되는 것 같고, 박테리아의 감소와 세포의 커다란 배설 기능을 갖춘 lobule의 바깥쪽을 향하여 크기의 커짐과 액포의 발달과 함께 점차적으로 방사상으로 재분배되어진다고 생각되어졌다(photo 6-21). 공생세균은 글리코젠과 같은 입자의 집중을 보여주고 있으며, 세균세포안의 carboxysomes는 poly-B-hydrobutyrate(PHB)로 구성되어진 지질 저장소를 포함하는 것처럼 보인다(Jensen and Sicko, 1973; Shively, 1974). Vetter(1985)는 유황을 보유한 이매패류의 아가미에서 이와 비슷한 입자를 발견했다. 글리코젠같은 입자의 생산은 주름막 구조와 관련이 있는 것 같다(photo 6-20). 많은 공생자안에 글리코젠은 밀집되어 분포하고 있었다. 커다란 electron-dense bodies를 박테리아 세포의 양쪽 모두에서 발견할 수 있다. photo 6-20에서는 세균세포안의 주름막을 볼 수 있다. 이 electron-dense는 인산의 저장이나 에너지 생산과 관련이 있는 것처럼 보인다(Faure-Fermiet and Rouillier, 1958; de Brugh *et al.*, 1989).

4. 사가미만의 Pogonophoran tube worm

박테리아 세포질은 trunk의 끝인 뒷부분으로부터 opisthosome의 분리된 격막에 이르는 앞 부분에 걸쳐 나타난다. 모든 박테리아는 close-packed 상태의 host cell 막에 둘러 쌓여있다(photo 6-21). 공생 박테리아는 coccoid type으로 범위는 직경 1.3에서 4.1 μm ; 2.5에서 6.3 μm 를 나타냈고, cytoplasm 안에 분산되어진 글리코겐과 같은 입자를 갖고 있었다(photo 6-22). 이들 coccoids는 막의 경계에 의한 진핵세포의 기관과는 현저하게 구별되어지며, 세포질과 핵은 전형적인 원핵세포의 것으로 Gram-negative였다. 이 공생자의 세포질은 비교적 electron-dense하며 때때로 electron-lucent 액포를 보인다(photo 6-22). Electron-lucent 액포는 커다란 공생자보다는 작은 공생자에게서보다 더 잘 발견되어졌다. 원형질막은 세포를 가로지른 내 세포막안을 향하고 있었다(photo 6-21). 박테리아 세포의 밝은 부분은 microvilli나 섬모가 없는 단순막이다. 한 세포당 박테리아의 수를 세기에는 같은 section내에서도 아주 드물거나 많이 분포하고 있는 경향을 보일 정도로 범위가 넓어 곤란했다. photo 6-21은 새로운 영양체(trophosome) 세포는 lobules의 중앙부에서 생산되고 있음을 보여주며, 박테리아가 점점 감소되어지고 배설기능을 갖추고 있는 lobules의 바깥쪽을 향하여 점차로 재분배되어진다. 영양체의 lobules의 안쪽에서 밖으로 갈수록 공생자의 크기는 점차로 커졌다.

5. 이헤야 해분의 Pogonophoran tube worm

세포내 박테리아는 불규칙한 coccoids 형태였으며, 약 1.5-6.0 μm 의 직경을 가지고 있었다(photo 6-23). 전형적인 Gram-negative 박테리아를 갖고 있다. 공생자의 세포질은 적당한 고전자 밀도를 보였으나 lighter core는 약간의 electron-dense strands를 갖고 있었다(Fig. 6-24). 박테리아는 host 세포막에 의해 둘러 쌓여 있었으며, 개별적 혹은 그룹을 형성하고 있었다. 또 lysosome같은 입자도 박테리아를 포함하고 있다. 음작용 액포(pinocytotic vesicles)는 액포를

갖고 있는 박테리아의 안쪽 혹은 밖에 자주 나타난다. 이것은 박테리아와 숙주세포와의 사이에 대사의 교환을 암시해준다 하겠다. 세포질은 적은 수의 미토콘드리아를 갖고 있었다.

6. 북위지 해분의 *Ifremeria nautilei*

Ifremeria nautilei 아가미의 투과전자현미경 관찰에서 가느다란 형태의 공생 박테리아가 높은 밀도를 갖는 상피 조직을 볼 수 있다(photo 6-25). 박테리아는 박테리아세포안에 밀집되어 있었고, 특히 세포의 꼭대기 부분에서 볼 수 있었다(photo 6-26). 커다란 리소소움과 같은 입자는 거의 박테리아세포의 기저 부근에 몰려 있었다(photo 6-25). 두 가지 형태의 공생자가 박테리아 세포 안에서 발견되었다. 하나는, 막대기 형태의 것으로, 약 1.1에서 3.9 μ m 정도의 크기였다(photo 6-26). 두 번째 형태의 것은 첫 번째 것과 크기는 거의 비슷하나 내부에 강한 평행의 막을 포함하고 있었는데, 이는 기존의 보고된 메탄 이용 자유생활형 박테리아의 것과 유사했다(photo 6-27). 이러한 형태의 박테리아들은 기저막 부근에 집중되어 분포하고 있었다. 양쪽 모두 Gram-negative 형태의 세포벽을 가지고 있었다. 두 가지 형태 중 유황산화 박테리아의 수가 더욱 많이 나타났다. 메탄 이용 박테리아는 전체의 약 5% 혹은 그 이하의 비율을 가지고 있었다.

7. Minami-Ensei 언덕의 *Bathymodiolus* sp.

이 지역의 홍합의 아가미 구조는 다른 열수지역이나 냉용수지역의 홍합들이 아가미속에 박테리아를 공생시키고 있는 것과 유사하게 나타나 매우 크고 두꺼우며 육질이 두툼하게 살피워져 있었다(photo 6-28). 형광 현미경이나 전자 현미경에 의한 아가미 filaments의 관찰에서 그들은 중추 혈관을 갖는 얇은 단세포 벽으로 구성되어 있었다. 아가미 섬모벽의 아가미 세포들은 4개의 다른 형태를 가지고 있었다. 1) Ciliated 세포들은 높은 농도의 미토콘드리아와 밀집된 크리스탈

구조를 가지고 있었으며, 앞, 경사지게 또는 옆으로 나열되어 있었다. 그들은 전자현미경용 시료로 절단된 면으로부터 보면 아가미 filament의 끝 부분에 위치했다. 2) Ciliated세포 중의 점액 세포들은 풍부한 세포질 망상구조를 포함하는 점액 방울이 아주 밀도 높게 나타나는 말단 부분에 특히 많이 나타났다. 3) 풍부한 세포들은 농밀한 공생 박테리아를 가지고 있었다. 그들은 아가미 filament의 주된 부분이었다. 박테리아 세포들은 후부에서 아가미 filament의 가까운 부분을 향할수록 농도가 감소되어졌다. 때때로 그들은 그 옆의 세포들과 중첩되기도 하였다. 4) 얇은 중간 섬모세포들(intercalary cells)은 박테리아 세포나 섬모가 없는 뒷부분의 배상 점액 세포에 의해 분리되어 있었다; 이들 세포들은 그들의 가장자리 끝 부분의 microvilli 나 섬모, 커다란 핵에 의해 구성되어있는 기저부근에 풍부하게 존재했다. 미토콘드리아나 소포체도 이들 intercalary cell들 안에서 발견되었다.

박테리아 세포의 전자 현미경 관찰에선 공생 박테리아가 아가미 filament의 중심 부분에서 팽창되어 분포하고 있었고, Gram-negative 이었다(photo 6-28 및 photo 6-29). 공생 박테리아는 초 미세구조이지만 크기별로 셋으로 분류되어졌다. 1) coccoid형태의 세포, 약 0.8에서 1.2 μ m의 긴 직경과 복합 내부 세포질막의 묽음이나 주름을 가지고 있었다. 2) rod형태의 세포, 약 3.2에서 4.4 μ m의 긴 직경, 역시 주름을 가지고 있었다. 3) 일반적이지 않은 매우 긴 형태의 박테리아 세포로 7.6 μ m에 이르렀다. 공생자안에는 여러 개의 박테리아가 보이는데 메탄 산화 박테리아도 보였다(photo 6-29). 일반적으로 박테리아는 아가미의 아주 표층 부분에 위치하고 있었다.

아가미 filaments의 박테리아 세포의 영역 위에서 공생자나 소포체 같은 구조를 포함한 많은 자유 세포들을 볼 수 있었다. Rod 형태의 공생자는 박테리아 세포의 표면에 거의 평행하게 위치하고 있는 것처럼 보인다. 이는 아마도 공생자로의 가스 교환에 유익하게 하기 위한 것으로 생각된다. 자유 세포들의 내부 구조는 아가미 조직 안에 있는 박테리아 세포들과 동시에 발생하는데 이러한 것은 자유 세포들이 박테리아 세포들의 영역으로부터 자유로워지려 하는 것으로 보여진다(photo 6-30, photo 6-31).

8. 이해야 해령의 *Bathymodiolus* sp.

이들 종들의 아가미는 옆과 양 끝 부분에 풍부한 섬모를 갖춘 수많은 filaments로 구성되어 있었다. 아가미 filaments는 그들의 옆면 구조 등으로부터 보면 전형적인 filibranchia이었다. 박테리아를 포함하고 있는 세포들은 기부에서 아가미 filament의 앞부분으로 갈수록 그 두께가 감소하였다. 전자현미경의 관찰에서 박테리아 세포 안의 공생자는 그 숫자에서 적당함을 보여 주었으나 microvilli는 그리 크지 않음을 나타냈다(photo 6-32). EPR 의 13 °N 열수지역의 *Bathymodiolus thermophilus* 에 비해 각 액포 안의 박테리아는 2, 3개 정도로 낮은 수를 나타냈으며(Fiala-Medioni *et al.*, 1986), 그 크기에 있어서도 *Bathymodiolus thermophilus* 보다 작게 나타났다. 공생자는 coccoid나 짧은 rod 형태로 그 크기는 coccoid 형태가 0.7에서 2.5 μ m 정도를, rod형태는 1.8에서 4.0 μ m를 보여 주었다(photo 6-33). 공생자는 박테리아 세포의 끝 부분에 집중되어 있었다. 박테리아대의 밑 부분이나 박테리아 세포의 기저부근에는 소포체나 미토콘드리아에 의해 둘러 싸여진 잘 발달된 핵이 있었다. 이 들 공생자는 막일의 주름진 부분을 볼 때 전형적인 메탄 산화박테리아의 모습을 보여주고 있었다.

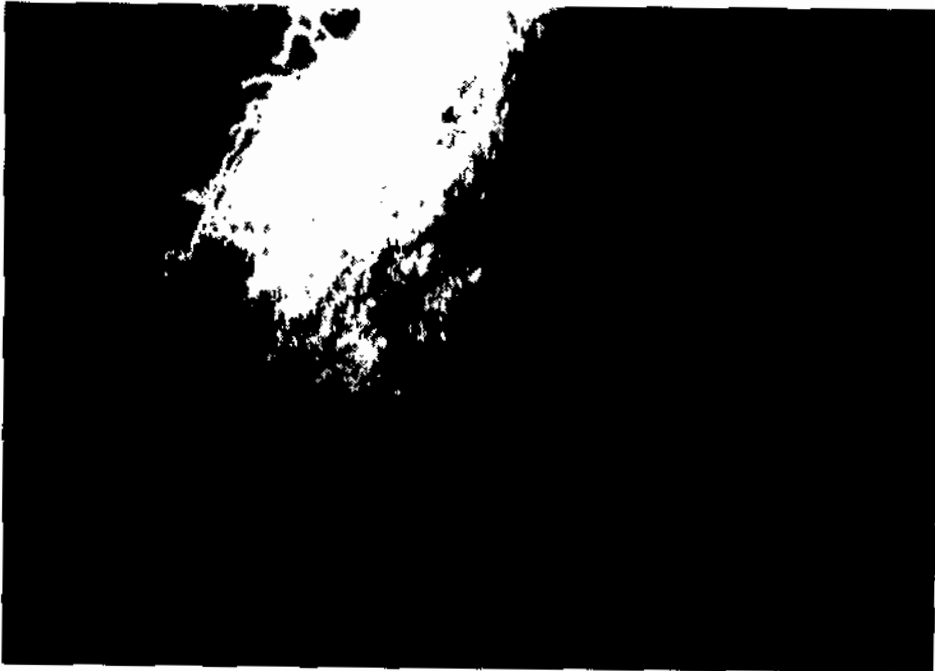


Photo 6-1. Tangle of slender pogonophoran tube worms with white chemical precipitates and sponges. Near Calyptogena Site.



Photo 6-2. Giant clam *Calyptogena* sp. colonizing on the sediment and a stone crab *Paralomis* sp. Scalpellids cover the outcropping rocks, Calyptogena Site.



Photo 6-3. Voracious bresiliid shrimp *Alvinocaris* sp. living among vent communities of the Calyptogena Site and Pyramid Site.

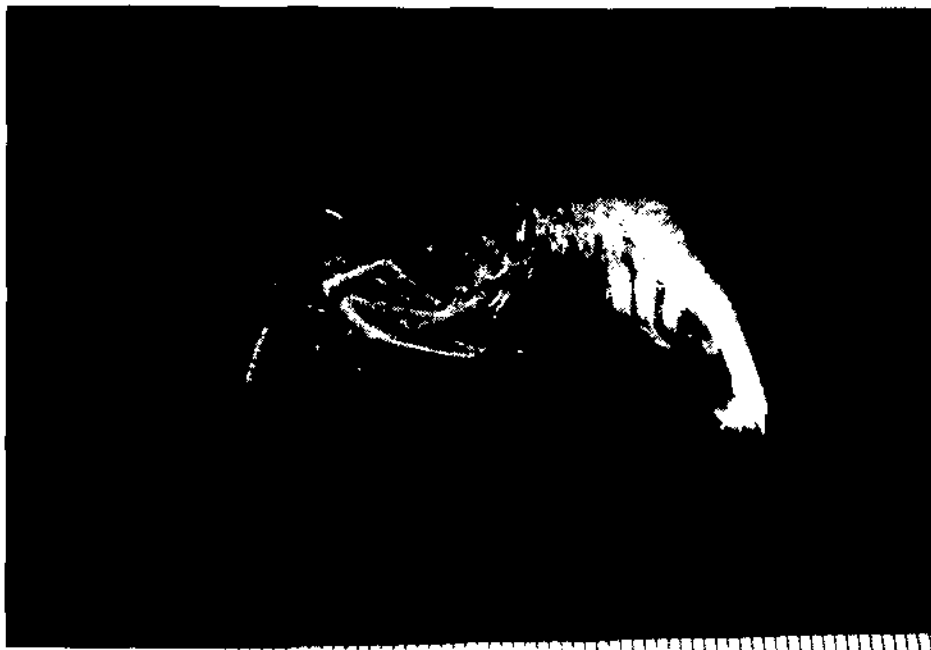


Photo 6-4. Another voracious hippolytid shrimp *Lebbeus washingtonianus* living among vent communities of the Calyptogena Site and Pyramid Site.



Photo 6-5. Elongated type of medium-size mussel, *Bathymodiolus* sp. They occur both in Calyptogena Site and Pyramid Site.



Photo 6-6. Large vestimentiferan tube worms bearing scalpellids. Full scale of the bar: 15 cm. Calyptogena Site.



Photo 6-7. A primitive scalpellid [*Neolepas*-type sp. A]. They dominated in number among the members of the community as seen in Photo 6-2.



Photo 6-8. Another species of primitive scalpellid [*Neolepas* sp. B] on a tube of the large vestimentiferan tube worm. Calyptogena Site.



Photo 6-9. Pogonophoran tube worms and sponges, Calyptogena Site and Pyramid Site.

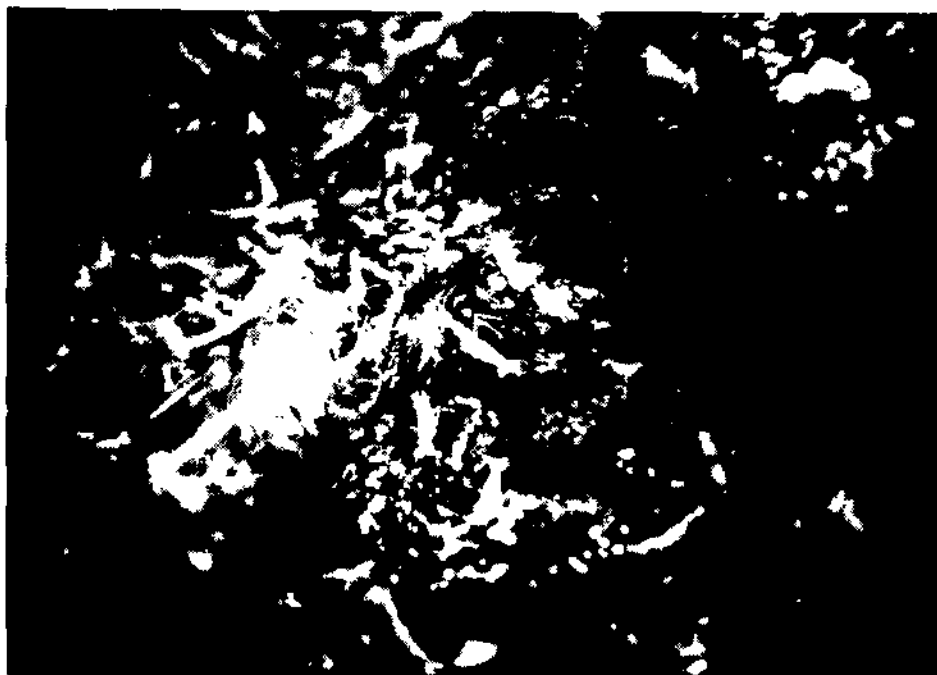


Photo 6-10. *Alvinocaris*, *Lebbeus* and amphipods lured into a baited trap. Pyramid Site.

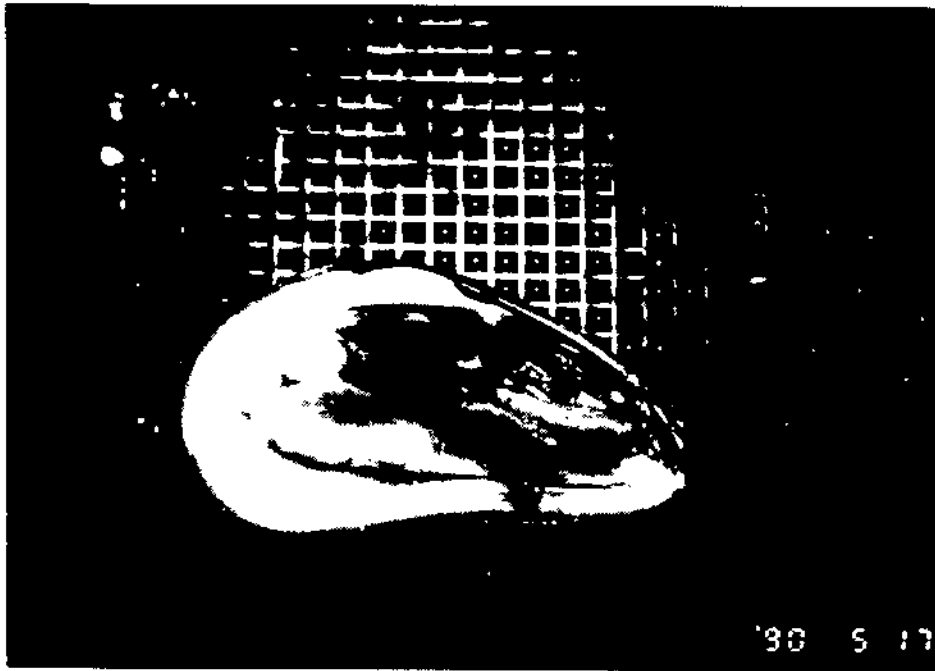


Photo 6-11. Photograph of a mussel *Bathymodiolus* sp. opened showing the well developed ctenidia.

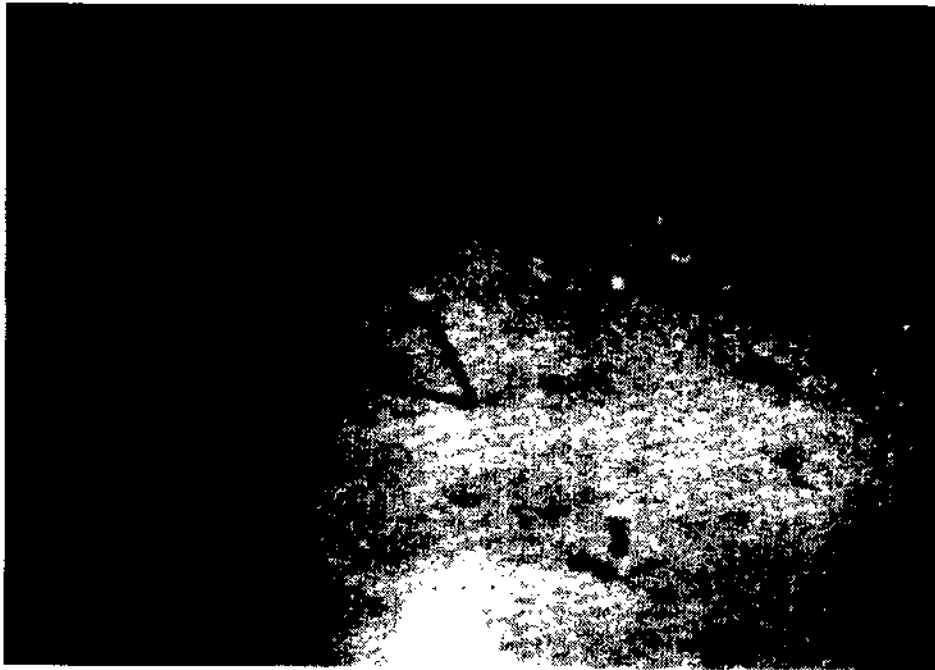


Photo 6-12. Large vestimentiferan tube worms and white chemical precipitates on a sediment-covered flat rock, Calyptogena Site.

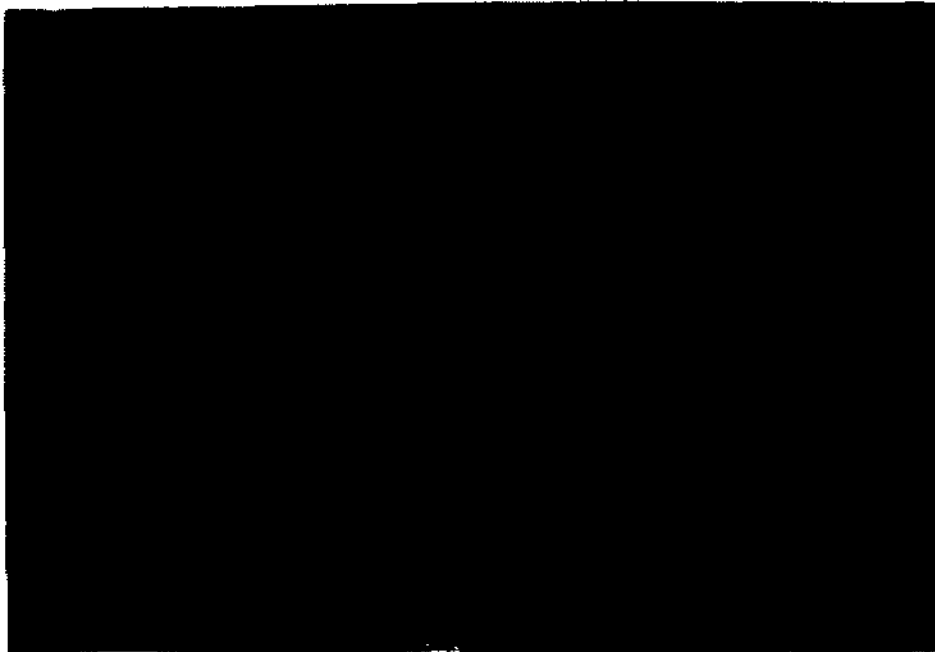


Photo 6-13. Large vestimentiferan tube worm protruding short gill filaments and obturaculum. Calyptogena Site.

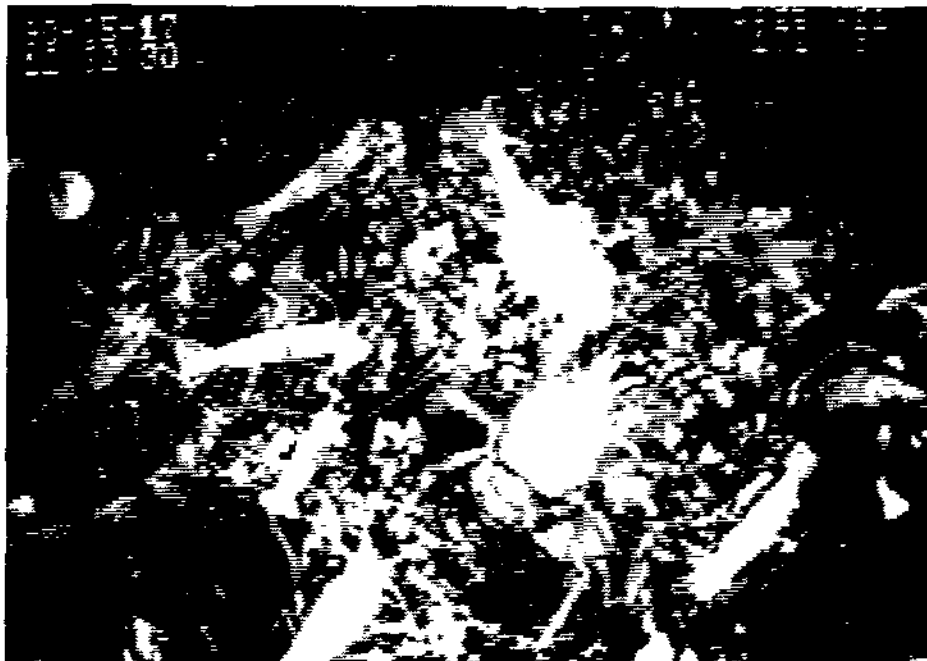


Photo 6-14. Large *Alvinocaris* sp. covered by "bacterial ?" filaments. Pyramid Site.

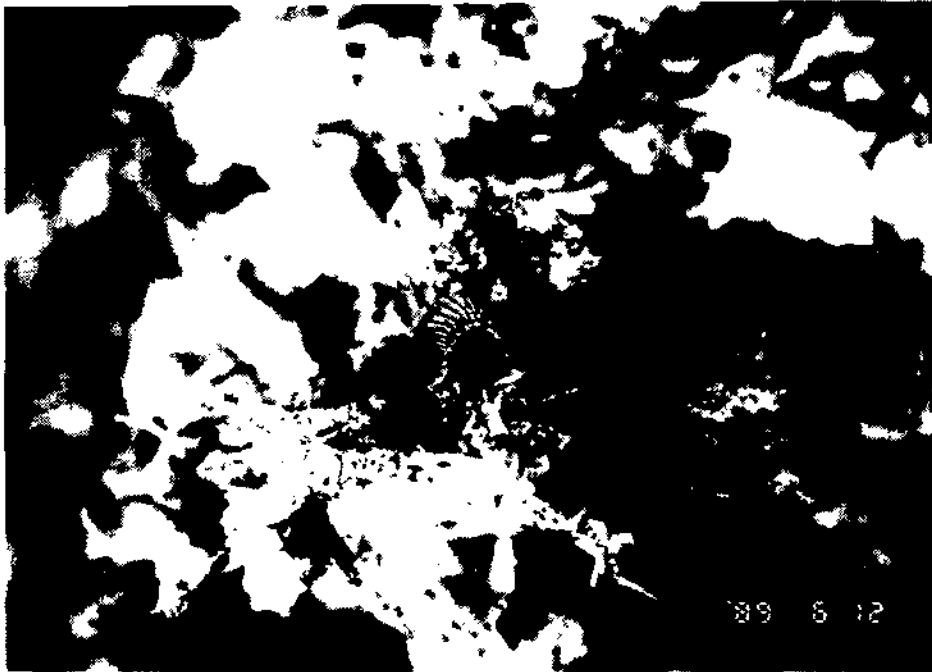


Photo 6-15. Vent polychaete (*Paralvinalla hessleri*) and their tubes on the polymetallic sulfide block of the Izena black chimney.



Photo 6-16. Galatheids (*Munidopsis*-type gen. sp. B) with broad rostrum aggregate and cover the flank of the chimney of the Pyramid Site.



Photo 6-17. TEM micrograph of the bacteriocyte in the gill tissue of *Calyptogena* sp. from the Iheya Ridge. ed: electron-dense material; mv: microvilli; sb: symbiont bacteria; va: vacuole, scale bar: 5 μ m.

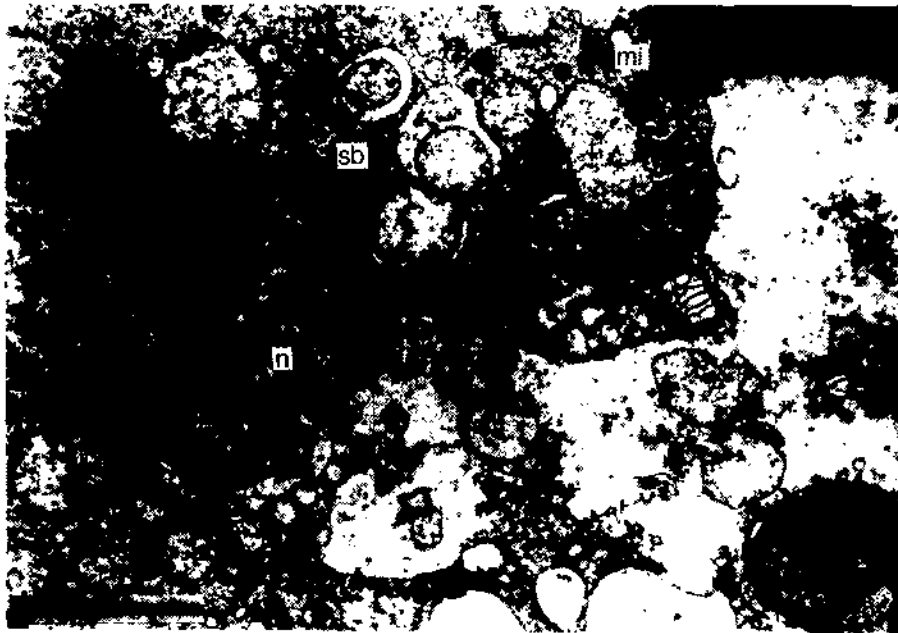


Photo 6-18. TEM micrograph of the bacteriocyte in the gill tissue of *Calyptogena* sp. off Miyako, Northeastern Japan. mi: globular mitochondria; n: nucleus of the bacteriocyte; sb: symbiont bacteria, scale bar: 5 μ m.

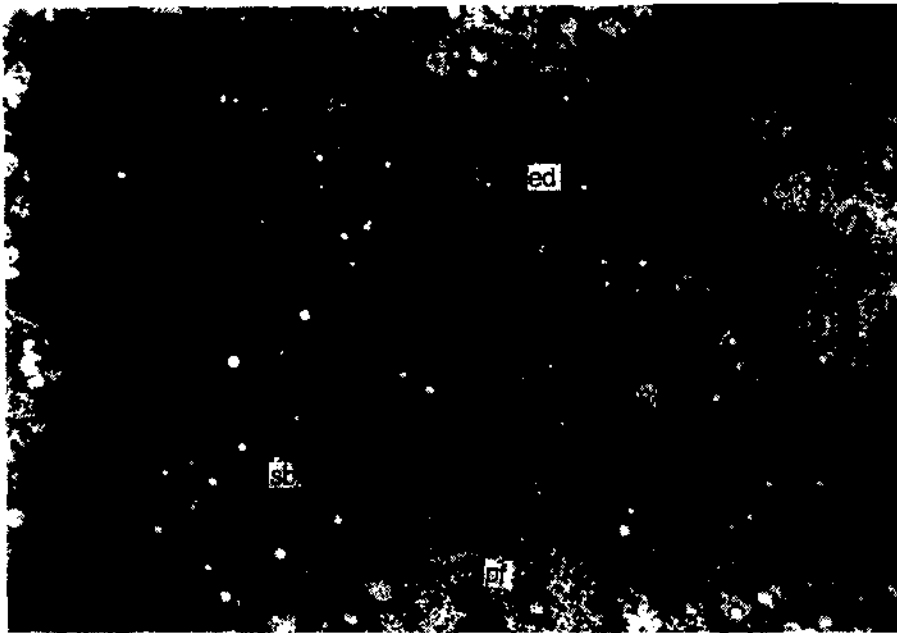


Photo 6-19. TEM micrograph of the trophosome of vestimentiferan tube worm (*Lamellibrachia* sp.) from Sagami Bay. Symbiont bacteria in this photo are round and smaller than those of the following photo. Ed: electron-dense materials; n: nucleus of the bacteriocyte; pf: pale fenestrations; sb: symbiont bacteria. scale bar: 10 μ m.

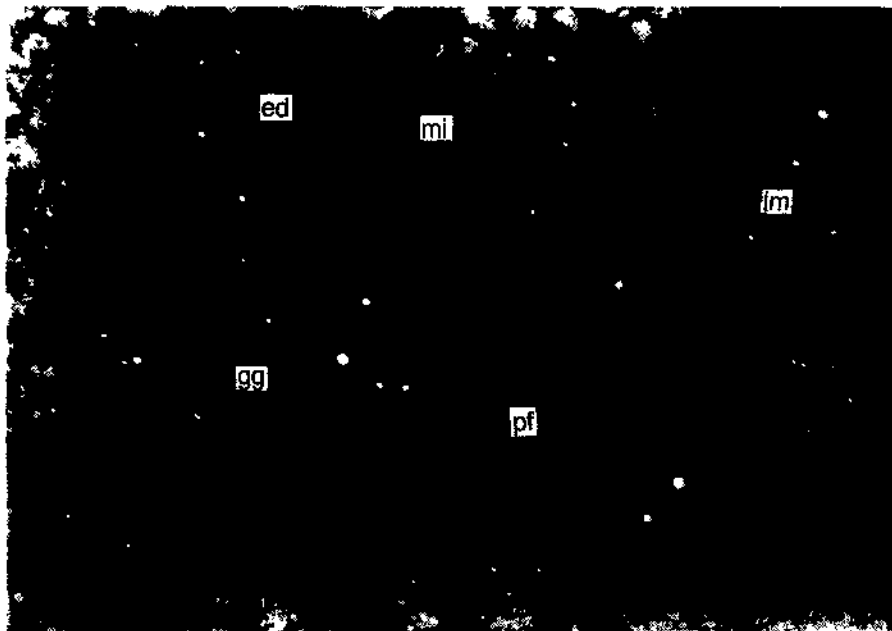


Photo 6-20. TEM micrograph of the trophosome of the same individual of the vestimentiferan tube worm (*Lamellibrachia* sp.) from Sagami Bay. The symbiont bacteria have lamellate membrane structure (lm). Ed: electron-dense material; gg: glycogen-like granules; mi: mitochondria; pf: pale fenestration. scale bar: 10 μ m.

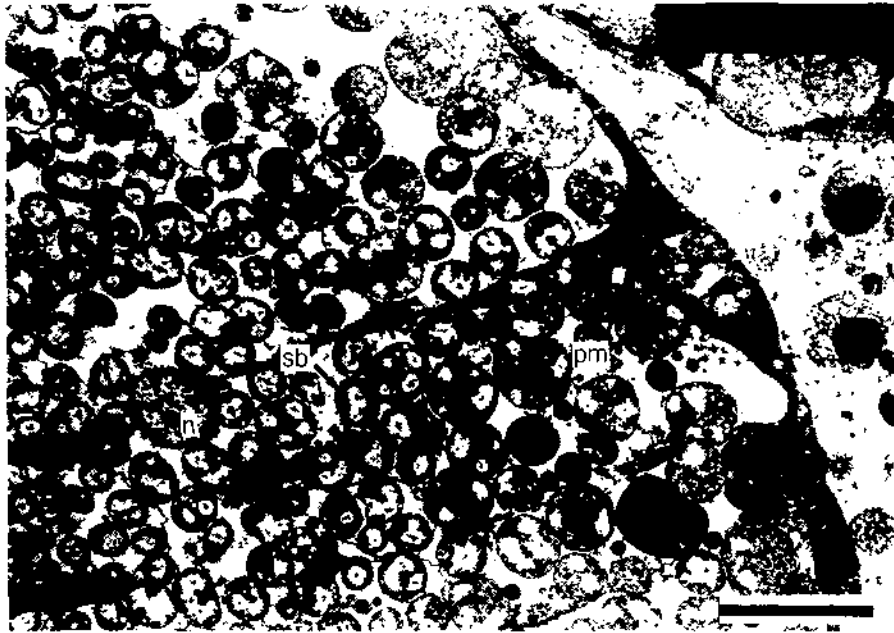


Photo 6-21. Trophosome of a pogonophore from the Okinoyama Bank, Sagami Bay. Note the incremental series of cell size from left bottom to upper right. In the larger symbionts membrane structure(pm) reminiscent of the lamellae of the larger vestimentiferan symbionts. n: nucleus of bacteriocyte; sb: symbionts, scale bar: 10 μ m.

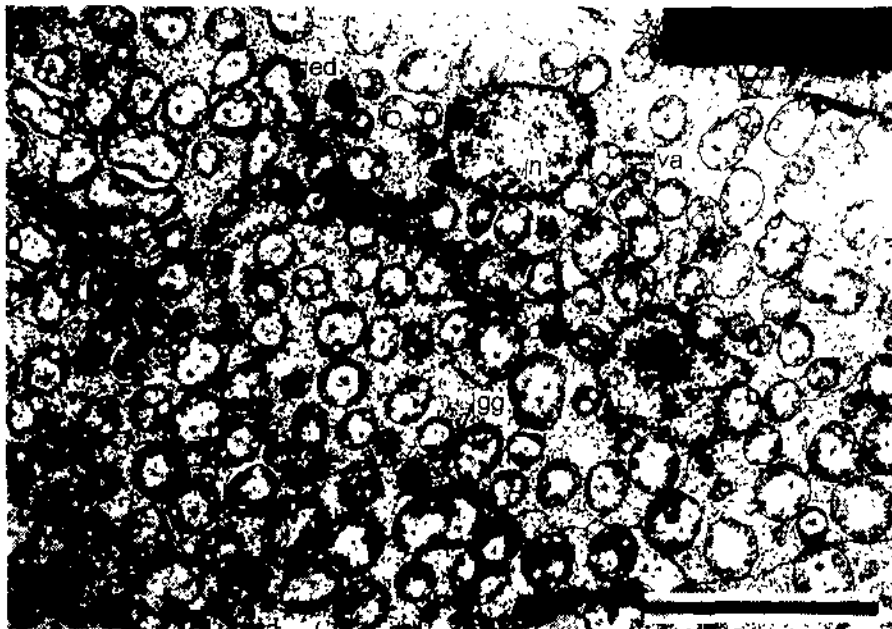


Photo 6-22. TEM micrograph of the another portion of trophosome of the same individual of photo 6-21. Note the occurrence of vacuoles(va) and electron-dense materials(ed) in the symbionts. Glycogen-like granules(gg) are dispersed in the cytoplasm of the bacteriocyte. N: nucleus of bacteriocyte, scale bar: 10 μ m.



Photo 6-23. TEM micrograph of the trophosome of a pogonophoran from the *Calypotgena* Site, Iheya Ridge. Ed: electron dense materials; gg: glycogen-like granules; mi: mitochondria; n: nucleus of bacteriocyte; pf: pale fenestration. scale bar: 10 μ m.

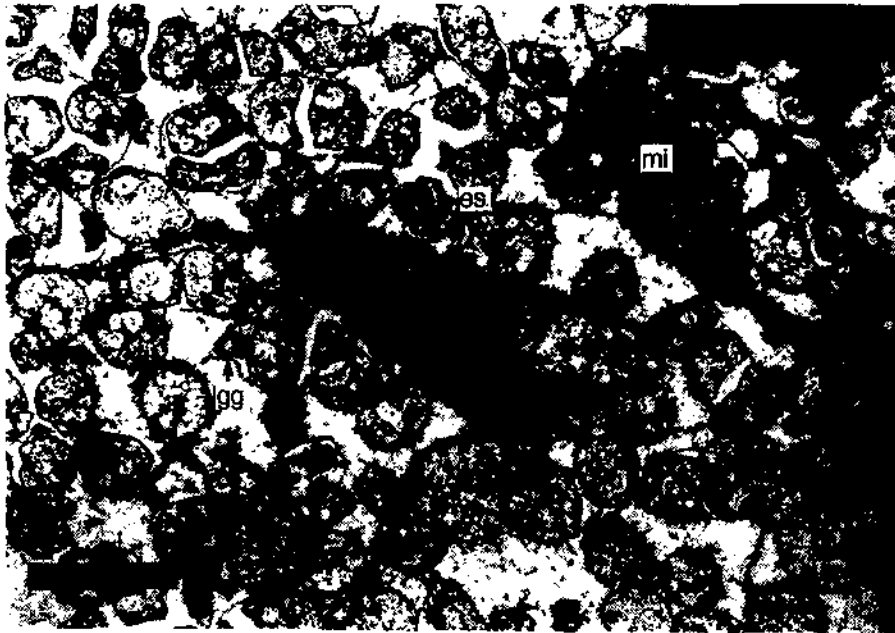


Photo 6-24. TEM micrograph of the another portion of trophosome of the same individual of photo 6-23. Note the occurrence of light cores containing some electron-dense strands(es) in the symbionts. gg: glycogen-like granules; mi: mitochondria. scale bar: 5 μ m.



Photo 6-25. TEM micrograph of the bacteriocytes in the gill tissue of *Ifremeria nautiliei* from the North Fiji Basin. ls: lysosome-like structure; mb: methanotrophs; mi: mitochondria; mv: microvilli; n: nucleus of bacteriocyte; sb: sulfur oxidizing symbionts. scale bar: 10 μ m.

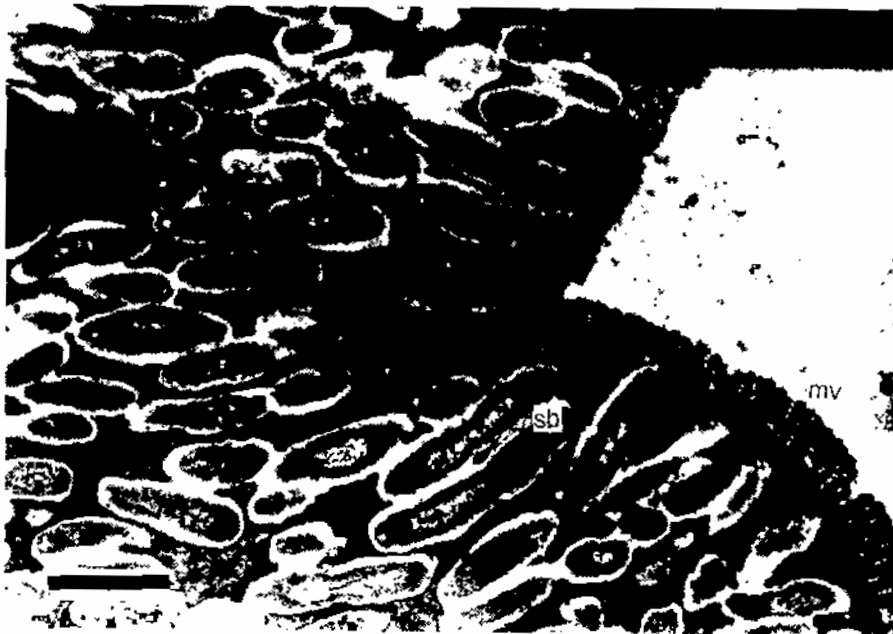


Photo 6-26. TEM micrograph of the rods near the surface of the microvilli-fringed bacteriocytes in the gill of *Ifremeria nautiliei* from the North Fiji Basin. mv: microvilli; sb: sulfur-oxidizing symbiont. scale bar: 2 μ m.



Photo 6-27. High magnification of slender-rod sulfur-oxidizer and membrane-stacked methane-oxidizer of the bacteriocyte of *Ifremeria nautili*. Note the connecting canal to the outside of the cell and dividing stage can be observed. ec: empty cavity; mb: methanotrophs; sb: sulfur-oxidizing symbiont. scale bar: 1 μ m.



Photo 6-28. Gill filaments of *Bathymodiolus* sp. from the Minami Ensei Knoll. Transverse section through one face of gill filament showing bacteriocytes and intercalary cells. Lysosome-like structure with the bacteria are visible (ls). Bn: bacteriocyte nucleus; lc: intercalary cell; ln: intercalary cell nucleus; mv: microvilli; sb: symbionts. scale bar: 10 μ m.

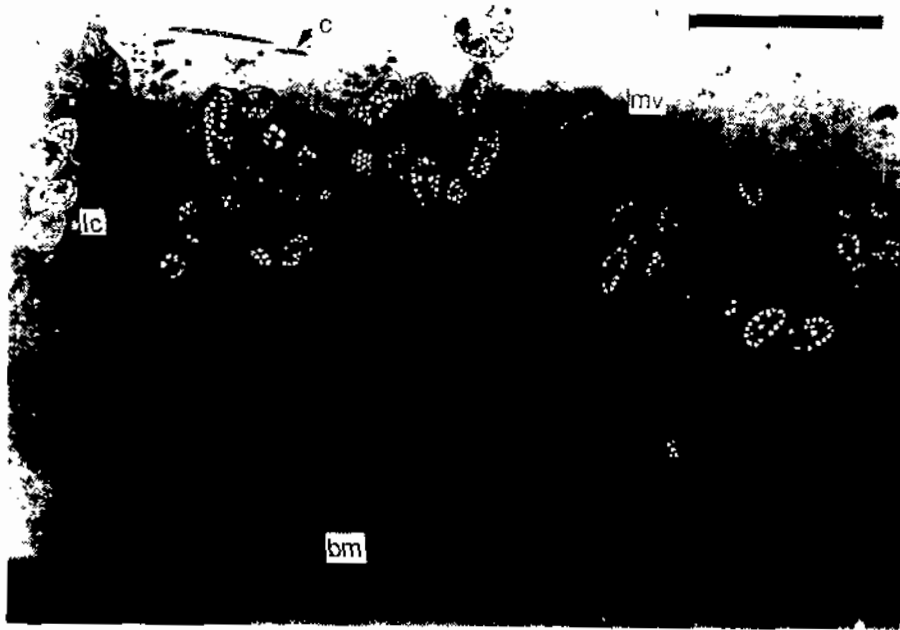


Photo 6-29. TEM micrograph of the bacteriocyte in the gill tissue of the same individual of the *Bathymodiolus* sp. from the Minami Ensei Knoll. bm: basal membrane; c: cilia; mv: microvilli; lc: intercalary cell; mv: microvilli. scale bar: 10 μ m.



Photo 6-30. TEM micrograph of transverse section of the bacteriocytes of *Bathymodiolus* sp. from the Minami Ensei Knoll. Free round cells are seen above the bacteriocyte layer of the gill filaments(Rfc). c: cilia; mv: microvilli, sb: symbiont bacteria. scale bar: 10 μ m.



Photo 6-31. TEM microscopy of the bacteriocyte of *Bathymodiolus* sp. from the Minami Ensei Knoll. Round free cells also visible, c: cilia, ls: lysosome-like structure: mv: microvilli: sb: symbiont bacteria, scale bar: 5 μ m.



Photo 6-32. TEM micrograph of the bacteriocyte of the gill tissue of the *Bathymodiolus* sp. from the Iheya Ridge. Stacked internal membranes are typical of type I methanotroph(Tm). ls: lysosome-like structure: mi: mitochondria: sb: symbiont bacteria: va: vacuoles, scale bar: 1 μ m.

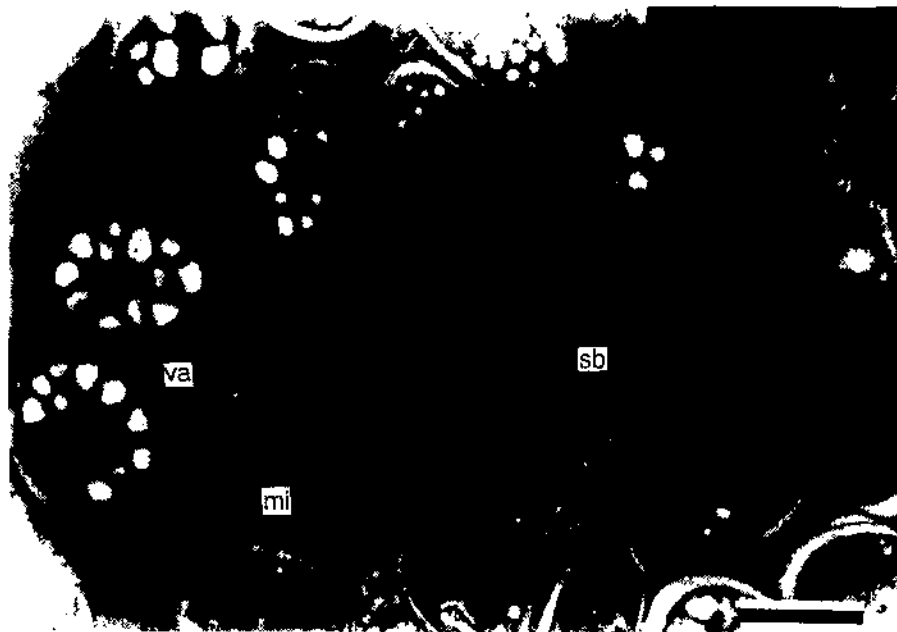


Photo 6-33. TEM micrograph of the transverse section of the bacteriocyte of the same individual of *Bathymodiolus* sp. from the Iheya Ridge. mi: mitochondria; sb: symbiont bacteria; va: vacuoles. scale bar: 1 μ m.

참 고 문 헌

- Arp A. J. and J. J. Childress, 1981. Blood function in the hydrothermal vestimentiferan tube worm. *Science*, N. Y., 213, 342-344.
- Auzende, J. M., T. Urabe and Scientific Party, 1996. Cruise explores hydrothermal vents of the Manus Basin : *Eos*(Transactions, American Geophysical Union), 77(26), 244.
- Baross, J. A. and J. W. Deming, 1983. Growth of black-smoker bacteria at temperatures of at least 250°C. *Nature*, 303, 423-446.
- Baross, J. A. and J. W. Deming, 1985. The role of bacteria in the ecology of black-smoker environments. *Bull. Biol. Soc. Wash.*, 6, 185-197.
- Binns, R. A. and S. D. Scott, 1993. Actively forming polymetallic sulfide deposits associated with felsic volcanic rocks in the eastern Manus back-arc basin, Papua New Guinea : *Economic Geology*, 88, 2226-2236.
- Binns, R. A., J. M. Parr, S. D. Scott, J. B. Gemmell and Herzig P. M., 1995. : PACMANUS : an active seafloor hydrothermal field on siliceous volcanic rocks in the eastern Manus Basin, Papua New Guinea. *Proceedings PACRIM' 95*, Auckland NZ.
- Both, R., K. Crook, B. Taylor, S. Borgan, B. Chappell, E. Frankel, L. Liu, J. Sinton and D. Tiffin, 1986. : Hydrothermal chimneys and associated fauna in the Manus Back-Arc Basin, Papua New Guinea. *Eos*, 67(21), 489-491.
- Cavanaugh C. M., 1983. Symbiotic chemoautotrophic bacteria in marine invertebrates from sulfide-rich habitats. *Nature*, 302, 58-61.
- Childress, J. J., Felbeck, H. and G. N. Somero, 1987. Symbiosis in the deep sea. *Sci. Amer.*, 17, 106-112.
- Childress J. J., A. J. Arp and C. R. Jr. Fisher, 1984. Metabolic and blood characteristics of the hydrothermal vent tube-worm *Riftia pachyptila*. *Marine Biology*, 83, 109-124.

- Childress J. J., C. R. Fisher, J. M. Brooks, M. C. Kennicutt II, R. R. Bidigare and A. E. Anderson, 1986. A methanotrophic marine molluscan (Bivalvia: Mytilidae) symbiosis: mussels fueled by gas. *Science*, N. Y., 233, 1306-1308.
- 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.
- De Burgh M. E., 1989. Evidence for a physiological gradient in the vestimentiferan trophosome: size-frequency analysis of bacterial populations and trophosome chemistry. *Canadian Journal of Zoology*, 64, 1095-1103.
- De Burgh M. E. and C. L. Singla, 1984. Bacterial colonization and endocytosis on the gill of a new limpet species from a hydrothermal vent. *Marine Biology*, 84, 1-6.
- De Bough M. E., S. K. Juniper and C. L. Singla, 1989. Bacterial symbiosis in Northeast Pacific Vestimentifera: a TEM study. *Marine Biology*, 101, 97-105.
- Desbruyeres, D. and Segonzac, M., 1997. "Handbook of Deep-Sea Hydrothermal Vent Fauna". IFREMER, Brest, France.
- Eguchi T., Y. Fujinawa, M. Ukawa and L. Bibot, 1989. Earthquakes associated with the back-arc opening in the eastern Bismarck Sea: activity, mechanisms, and tectonics. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 56, 189-209.
- Endow K., H. Sakai and S. Ohta, 1987. A simple detection method for symbiotic bacteria in epoxy resin-embedded tissues using Acridine Orange staining. *JAMSTECTR Deepsea Research*, (3), 61-68.

- Endow K. and S. Ohta, 1989. The symbiotic relationship between bacteria and a mesogastropod snail, *Alviniconcha hessleri*, collected from hydrothermal vents of the Mariana Back-Arc Basin. *Bulletin of Japanese Society of Microbial Ecology*, 3, 73-82.
- Faure-Fermiet E. and C. Rouiller, 1958. Etude au microscope electronique d'une bacterie sulfureuse, *Thiovulum majus* Hinze. *Experimental Cell Research*, 14, 29-46.
- Felbeck H., J. J. Childress and G. N. Somero, 1981. Calvin-Benson cycle and sulfide oxidation enzymes in animals from sulfide-rich habitats. *Nature*, London, 293, 291-293.
- Felbeck, H., J. J. Childress and G. N. Somero, 1983. Biochemical interactions between molluscs and their algal and bacterial symbionts. In *The Mollusca*, Vol. 2, Environmental biochemistry and Physiology, P. W. Hochachka, Academic Press, N. Y., pp. 331-358.
- Felbeck, H., G. Liebezeit, R. Dawson and O. Giere, 1983. CO₂ fixation in tissues of marine oligochaetes (*Phallodrilus leukodermatus* and *P. planus*) containing symbiotic, chemoautotrophic bacteria. *Marine Biology*, 75, 187-191.
- Felbeck, H., Powell, M. A. Hand, S. C. and G. N. Somero, 1985. Metabolic adaptations of hydrothermal vent animals. *Bull. Biol. Soc. Wash.*, 6: 261-272.
- Fiala-Medioni, A. and C. Metivier, 1986. Ultrastructure of the gill of the hydrothermal vent bivalve *Calyptogena magnifica*, with a discussion of its nutrition. *Marine Biology*, 90, 215-222.
- Fiala-Medioni, A., A.-M. Alayse and G. Cachet, 1986. Evidence of in situ uptake and incorporation of bicarbonate and amino acids by the hydrothermal vent mussel. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 96, 191-198.

- Gamo, T., H. Sakai, J. Ishibashi, E. Nakayama, K. Isshiki, H. Matsuura, K. Shitashima, K. Takeuchi and S. Ohta, 1993. Hydrothermal plumes in the eastern Manus Basin, Bismarck Sea : CH₄, Mn, Al and pH anomalies. *Deep-Sea Research*, 40, 2335-2349.
- Gamo, T., K. Okamura, J. -L. Charlou, T. Urabe, J. -M. Auzende, J. Ishibashi, K. Shitashima, H. Chiba and Shipboard Scientific Party of the Manus Flux Cruise, 1997. Acid and sulfate-rich hydrothermal fluids from the Manus back-arc basin, Papua New Guinea. *Geology*, 25, 139-142.
- Hessler, R. R. and P. F. Lonsdale, 1991. The biogeography of the Mariana Trough hydrothermal vents. In "Marine Biology - Its accomplishment and future prospect", J. Mauchline and T. Nemoto, eds., Hokusensha, Tokyo, pp. 165-182.
- Hessler, R. R., P. Lonsdale and J. Hawkins, 1988a. Patterns on the ocean floor. *New Scientist*, (24), 47-51.
- Hessler, R. R., W. M. Smithey, M. A. Boudrias, C. H. Keller, R. A. Lutz and J. J. Childress, 1988b. Temporal change in megafauna at the Rose Garden hydrothermal vent (Galapagos Rift; Eastern Tropical Pacific). *Deep-Sea Research*, 35(10/11), 1681-1709.
- Ishii, T., T. Omori, I. Bugave, T. Sakamoto, H. Masuda, H. Sakai and S. Ohta, 1991. Dredged rocks from the East Manus Basin during KH 90-3. Leg II. Abstracts for the 1991 Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting, p. 188.
- Jannasch, H. W. and M. J. Mottl, 1985. Geomicrobiology of deep-sea hydrothermal vents. *Science*, 229, 717-725.
- Jensen, T. E. and L. M. Sicko, 1973. The fine structure of *Chlorogloea fritschii* cultured in sodium acetate enriched medium. *Cytologia*, 38, 381-391.

- Kim, D. S. and S. Ohta, 1991. Submersible observations and comparison of the biological communities of the two hydrothermal vents on the Iheya Ridge of the Mid-Okinawa Trough. JAMSTECTR Deepsea Research, (7), pp. 221-234.
- Laubier, L. and D. Desbruyeres, 1985. Oases at the bottom of the ocean. Endeavor, New Series, 9(2), 67-76.
- Lisitsyn, A. P., K. A. W. Crook, Yu. A. Bogdanov, L. P. Zonenshayn, K. G. Murav'yev, W. Tufar, Ye. G. Gurvich, V. V. Gordeyev and G. V. Ivanov, 1993. A hydrothermal field in the rift zone of the Manus Basin, Bismarck Sea. International Geology Review, 35, 105-126.
- Lonsdale, P., 1977. Clustering of suspension-feeding macrobenthos near abyssal hydrothermal vents at oceanic spreading centers. Deep-Sea Research, 24, 857-863.
- Newman, W. A., 1985. The abyssal hydrothermal vent invertebrate fauna: a glimpse of antiquity? Bull. Biol. Soc. Washington, 6, 231-242.
- Ohta, S., M. Watanabe, T. Gamo and D. Kim, 1990. DESMOS (Deep-Sea Multimonitoring System) operations in the eastern and central Manus back-arc basin, pp.31-40. In: Preliminary report of the Hakuho Maru Cruise KH 90-3. Edited by H. Sakai, Ocean Research Institute, 92pp.
- Ohta, S. and D. S. Kim, 1992. Coupling behavior of deep-sea red crab and nutritional ecology of vent mussel observed during the Shinkai 2000 Dive #542 surveying hydrothermal vent fields on the South Ensei Knoll, Okinawa Trough, Japan. Proc. JEMSTES SYMP. Deep Sea Research, 279-285.
- Okutani, T. and S. Ohta, 1988. A new gastropod mollusk associated with hydrothermal vents in the Mariana Back-arc Basin, Western Pacific. Venus (Japanese Journal of Malacology), 47, 1-9.
- Rhoads, D. C., Lutz, R. A., Revelas, E. C. and R. M. Cerrato, 1981. Growth of bivalves at deep-sea hydrothermal vents along the Galapagos Rift. Science, 214, 911-913.

- RISE Project Group(Spiess, F. N., Macdonald, K. C., Atwater, T., Ballard, R., Xarranza, A., Roux, M., Rio, M. and E. Flatton, 1985. Clam growth and thermal spring activity recorded by shells at 21° N. Bull. Biol. Soc. Wash., 6, 211-221.
- Sakai, H., T. Gamo, K. Endow, J. Ishibashi, T. Ishizuka, F. Yanagisawa, M. Kusakabe, T. Akagi, G. Igarashi and S. Ohta, 1987. Geochemical study of the bathyal seep communities at the Hatsushima site, Sagami Bay, Central Japan. *Geochemical Journal*, 21, 227-236.
- Sakai, H. and Shipboard Scientific Party of the KH 90-3, 1990. Onboard Report of the Hakuho-Maru Cruise KH 90-3, Leg 2. University of Tokyo, 92pp.
- Shively, J. M., 1974. Inclusion bodies of prokaryotes. *Annual Review of Microbiology*, 28, 167-187.
- Taylor, B., 1979. Bismarck Sea: evolution of a back-arc basin. *Geology*, 7, 171-174.
- Taylor, B., K. Crook and J. Sinton, 1994. Extensional transform zone and oblique spreading centers. *Journal of Geophysical Research*, 99, 19707-19718.
- Tufar, W., 1990. Modern hydrothermal activity, formation of complex massive sulfide deposits and associated vent communities in the Manus Back Arc Basin(Bismarck Sea, Papua New Guinea) : *Mitteilung der oesterreichen geologischen Gesellschaft*, 82, 183-210.
- Tunnicliff, V., 1991. The biology of hydrothermal vents: ecology and evolution. *Ocean. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 29, 319-407.
- Tunnicliff, V., 1992. The nature and origin of the modern hydrothermal vent fauna. *Palaios*, 7, 338-350.
- Tunnicliff, V., McArthur, A. G. and D. McHugh, 1998. A biogeographical perspective of the deep-sea hydrothermal vent fauna. *Advan. Mar. Biol.*, 34, 353-442.

- Turekian, K. K., Cochrane, J. K. and J. T. Bennett, 1983. Growth rate of a vesicomid clam from the 21° East Pacific Rise hydrothermal area. *Nature*, 303, 55-56.
- Van Dover, C. L., 1990. Biogeography of hydrothermal vent communities along seafloor spreading centers. *Trends in Ecology and Evolution*, 5, 242-246.
- Vetter, R., 1985. Elemental sulfur in the gills of three species of clams containing chemoautotrophic symbiotic bacteria: a possible inorganic energy storage compound. *Marine Biology*, 88, 33-42.

APPENDIX

Appendix 1. Cruise time table

Location			Oper. Item	Dist.	Time	Cum. T	Cum. T	Date
	Lon	Lat		km	hour	hour	day/h	yr. mon. day time
WP.07	15037.7	308.2						1999. 05. 13 00:00
			Transit	90.28	3.90	3.90	00/03	1999. 05. 13 03:53
MP.01	15120	332.5						
			SB/Mag	36.66	2.47	6.37	00/06	1999. 05. 13 06:22
MP.02	15133.75	346.8						
			SB/Mag	6.28	0.34	6.71	00/06	1999. 05. 13 06:42
MP.03	15137	345.83						
			SB/Mag	2.17	0.12	6.83	00/06	1999. 05. 13 06:49
MP.04	15138	345.22						
			SB/Mag	6.90	0.37	7.20	00/07	1999. 05. 13 07:12
MP.05	15141	343						
			SB/Mag	2.31	0.12	7.33	00/07	1999. 05. 13 07:19
MP.06	15141.75	342						
			SB/Mag	2.81	0.15	7.48	00/07	1999. 05. 13 07:28
MP.07	15142.8	340.9						
			SB/Mag	3.70	0.22	7.70	00/07	1999. 05. 13 07:42
MP.08	15141.35	339.52						
			SB/Mag	2.81	0.15	7.85	00/07	1999. 05. 13 07:51
MP.09	15140.3	340.62						
			SB/Mag	2.74	0.13	7.99	00/07	1999. 05. 13 07:59
MP.10	15139.4	341.8						
			SB/Mag	5.84	0.29	8.27	00/08	1999. 05. 13 08:16
MP.11	15136.81	343.61						
			SB/Mag	1.83	0.09	8.36	00/08	1999. 05. 13 08:21
MP.12	15135.96	344.12						
			SB/Mag	5.34	0.26	8.63	00/08	1999. 05. 13 08:37
MP.13	15133.18	344.88						
			SB/Mag	7.39	0.35	8.97	00/08	1999. 05. 13 08:58
MP.14	15134.32	348.72						
			SB/Mag	7.22	0.39	9.36	00/09	1999. 05. 13 09:21
MP.15	15138.04	347.54						
			SB/Mag	2.50	0.13	9.50	00/09	1999. 05. 13 09:29
MP.16	15139.19	346.83						
			SB/Mag	7.96	0.43	9.93	00/09	1999. 05. 13 09:55
MP.17	15142.6	344.2						
			SB/Mag	1.88	0.10	10.03	00/10	1999. 05. 13 10:01
MP.18	15143.2	343.38						
			SB/Mag	2.81	0.15	10.18	00/10	1999. 05. 13 10:10
MP.19	15144.25	342.28						
			SB/Mag	8.81	0.48	10.66	00/10	1999. 05. 13 10:39
MP.20	15149	342						
			SB/Mag	5.56	0.29	10.95	00/10	1999. 05. 13 10:57
MP.21	15152	342						
			SB/Mag	5.56	0.29	11.24	00/11	1999. 05. 13 11:14
MP.22	15155	342						
			SB/Mag	3.69	0.20	11.44	00/11	1999. 05. 13 11:26
MP.23	15155	344						

Appendix 1, continued

			SB/Mag	11.11	0.56	12.00	00/11	1999. 05. 13 11:59
MP.24	15149	344						
			SB/Mag	3.69	0.18	12.18	00/12	1999. 05. 13 12:10
MP.25	15149	346						
			SB/Mag	11.11	0.60	12.78	00/12	1999. 05. 13 12:47
MP.26	15155	346						
			SB/Mag	14.95	0.77	13.55	00/13	1999. 05. 13 13:33
MP.27	15202.5	343						
			SB/Mag	20.08	1.07	14.63	00/14	1999. 05. 13 14:37
MP.28	15208.6	352						
			SB/Mag	3.70	0.20	14.83	00/14	1999. 05. 13 14:49
MP.29	15210.26	350.88						
			SB/Mag	20.08	0.93	15.76	00/15	1999. 05. 13 15:45
MP.30	15204.16	341.88						
			SB/Mag	7.41	0.34	16.10	00/16	1999. 05. 13 16:05
MP.31	15200.84	344.12						
			SB/Mag	20.08	1.08	17.18	00/17	1999. 05. 13 17:10
MP.32	15206.94	353.12						
			SB/Mag	15.32	0.77	17.96	00/17	1999. 05. 13 17:57
MP.33	15215	355						
			SB/Mag	26.67	1.37	19.33	00/19	1999. 05. 13 19:19
WP.08	15227	403						
			Transit	15.60	0.84	20.17	00/20	1999. 05. 13 20:10
WP.09	15233.4	408.5						
			Transit	47.49	2.04	22.21	00/22	1999. 05. 13 22:12
WP.10	15236.2	434.1						
			Transit	43.26	1.86	24.07	01/00	1999. 05. 14 00:04
WP.11	15249.5	453.4						
			Transit	12.39	0.53	24.61	01/00	1999. 05. 14 00:36
WP.12	15256.2	453.4						
			Transit	64.40	2.77	27.38	01/03	1999. 05. 14 03:22
WP.13/DP.01	15330	445						
			SB/Mag	43.04	2.23	29.61	01/05	1999. 05. 14 05:36
DP.02	15318	505						
			SB/Mag	24.79	1.24	30.85	01/06	1999. 05. 14 06:51
DP.03	15330	511						
			SB/Mag	35.04	1.84	32.69	01/08	1999. 05. 14 08:41
DP.04	15330	530						
			SB/Mag	42.07	2.34	35.03	01/11	1999. 05. 14 11:01
DP.05	15344	548						
			SB/Mag	35.04	1.85	36.89	01/12	1999. 05. 14 12:53
DP.06	15344	607						
			SB/Mag	87.46	4.80	41.69	01/17	1999. 05. 14 17:41
DP.06A	15416	642						
			SB/Mag	19.00	1.06	42.75	01/18	1999. 05. 14 18:44
DP.06B	15408	648.5						
			SB/Mag	90.73	4.32	47.06	01/23	1999. 05. 14 23:03
DP.07	15335	612						
			SB/Mag	101.56	4.53	51.60	02/03	1999. 05. 15 03:35
DP.08	15245	549						
			SB/Mag	68.91	4.28	55.87	02/07	1999. 05. 15 07:52

Appendix I. continued

DP.09	15210	602						
			SB/Mag	11.66	0.79	56.66	02/08	1999. 05. 15 08:39
DP.10	15208	556						
			SB/Mag	73.03	3.76	60.42	02/12	1999. 05. 15 12:24
DP.11	15245	542						
			SB/Mag	102.52	4.23	64.64	02/16	1999. 05. 15 16:38
DP.12	15336	604						
			SB/Mag	12.91	0.51	65.15	02/17	1999. 05. 15 17:09
DP.13	15336	557						
			SB/Mag	102.54	3.82	68.97	02/20	1999. 05. 15 20:58
DP.14	15245	535						
			SB/Mag	29.83	1.07	70.05	02/22	1999. 05. 15 22:02
DP.15	15230	541						
			SB/Mag	57.16	2.41	72.46	03/00	1999. 05. 16 00:27
DP.15A	15230	510						
			SB/Mag	20.66	0.91	73.36	03/01	1999. 05. 16 01:21
DP.15B	15240	505						
			SB/Mag	20.66	0.91	74.28	03/02	1999. 05. 16 02:16
DP.15C	15230	500						
			SB/Mag	27.66	1.02	75.29	03/03	1999. 05. 16 03:17
DP.16	15230	445						
			SB/Mag	28.63	1.07	76.36	03/04	1999. 05. 16 04:21
DP.17	15226	430						
			SB/Mag	18.44	0.72	77.08	03/05	1999. 05. 16 05:04
DP.18	15226	420						
			Transit	21.65	1.17	78.25	03/06	1999. 05. 16 06:15
Rabaul	15215	416	Pickup		1.37	79.62	03/07	1999. 05. 16 07:37
			Transit	53.98	2.51	82.13	03/10	1999. 05. 16 10:08
CTD.01	15206.5	348	CTD		1.77	83.90	03/11	1999. 05. 16 11:54
				1.86	0.10	84.00	03/12	1999. 05. 16 12:00
S_DSC1	15205.7	347.39	Start of DSC					
			DSC	0.45	7.37	91.37	03/19	1999. 05. 16 19:22
E_DSC1	15205.6	347.17	End of DSC					
				15.26	0.83	92.21	03/20	1999. 05. 16 20:12
CTD.02/MP.34	15158.6	342.8	CTD		1.35	93.56	03/21	1999. 05. 16 21:33
			SB/Mag	23.25	2.02	95.58	03/23	1999. 05. 16 23:34
CTD.03/MP.36	15146.3	340.28	CTD		1.61	97.19	04/01	1999. 05. 17 01:11
S_DSC2-2	15140.54	343.93	Start of DSC					
			DSC	2.03	4.82	102.01	04/06	1999. 05. 17 06:00
E_DSC2-2	15140.15	342.9	End of DSC					
				3.49	0.42	102.43	04/06	1999. 05. 17 06:25
CTD.04	15141.72	341.85	CTD		1.21	103.64	04/07	1999. 05. 17 07:38
				6.85	0.92	104.56	04/08	1999. 05. 17 08:33
CTD.05	15145.39	341.4	CTD		1.35	105.91	04/09	1999. 05. 17 09:54
			Transit	4.95	0.22	106.14	04/10	1999. 05. 17 10:08
MP.37	15146.06	344						
			SB/Mag	2.84	0.31	106.44	04/10	1999. 05. 17 10:26
MP.38	15145	345.11						
			SB/Mag	1.32	0.07	106.52	04/10	1999. 05. 17 10:30
MP.39	15144.6	345.7						
			SB/Mag	9.29	0.44	106.95	04/10	1999. 05. 17 10:57

Appendix 1, continued

MP.40	15140.68	348.84						
			SB/Mag	2.92	0.14	107.09	04/11	1999. 05. 17 11:05
MP.41	15139.34	349.67						
			SB/Mag	8.39	0.39	107.48	04/11	1999. 05. 17 11:28
MP.42	15135.04	351.11						
			Transit	20.40	1.17	108.65	04/12	1999. 05. 17 12:39
CTD.06	15142.9	343.36	CTD		1.85	110.50	04/14	1999. 05. 17 14:30
				1.07	0.58	111.08	04/15	1999. 05. 17 15:04
PC.1	15142.38	343.61	PC		2.36	113.44	04/17	1999. 05. 17 17:26
				18.56	2.38	115.82	04/19	1999. 05. 17 19:48
PC.2	15152.24	341.8	PC		3.75	119.57	04/23	1999. 05. 17 23:33
				11.60	0.57	120.13	05/00	1999. 05. 18 00:08
PC.3	15146.11	340.5	PC		1.92	122.05	05/02	1999. 05. 18 02:03
				5.14	0.56	122.61	05/02	1999. 05. 18 02:36
CTD.07	15143.53	341.53	CTD		1.60	124.21	05/04	1999. 05. 18 04:12
				5.06	0.52	124.73	05/04	1999. 05. 18 04:43
CTD.08	15141.21	342.98	CTD		1.09	125.82	05/05	1999. 05. 18 05:48
				5.51	0.43	126.24	05/06	1999. 05. 18 06:14
CTD.08-1	15144.18	343.16	CTD		1.34	127.58	05/07	1999. 05. 18 07:34
				9.30	0.72	128.30	05/08	1999. 05. 18 08:17
CTD.09	15149.2	343.34	CTD		1.53	129.83	05/09	1999. 05. 18 09:49
				6.44	0.61	130.44	05/10	1999. 05. 18 10:26
CTD.10	15152.09	341.4	CTD		2.35	132.79	05/12	1999. 05. 18 12:47
				21.72	1.01	133.80	05/13	1999. 05. 18 13:47
DG.1-1	15140.5	343.21	Dredge		2.13	135.93	05/15	1999. 05. 18 15:55
				1.50	0.30	136.23	05/16	1999. 05. 18 16:13
DG.1-2	15139.75	342.9	Dredge		2.57	138.80	05/18	1999. 05. 18 18:47
				0.72	0.53	139.33	05/19	1999. 05. 18 19:19
DG.1-3	15140	342.6	Dredge		2.98	142.31	05/22	1999. 05. 18 22:18
				1.46	0.30	142.61	05/22	1999. 05. 18 22:36
DG.2	15140.5	343.21	Dredge		2.90	145.51	06/01	1999. 05. 19 01:30
				1.40	0.30	145.81	06/01	1999. 05. 19 01:48
DG.3	15139.96	343.74	Dredge		2.76	148.57	06/04	1999. 05. 19 04:34
				2.33	0.43	149.00	06/05	1999. 05. 19 05:00
DG.4	15141.15	344.15	Dredge		2.35	151.35	06/07	1999. 05. 19 07:21
				20.99	1.16	152.51	06/08	1999. 05. 19 08:30
MC1	15152.24	341.8	MC		2.35	154.86	06/10	1999. 05. 19 10:51
				18.56	0.84	155.70	06/11	1999. 05. 19 11:41
MC2	15142.38	343.61	MC		2.31	158.01	06/14	1999. 05. 19 14:00
S_DSC2-1	15142.054	343.26	Start of DSC					
			DSC	1.40	6.62	164.63	06/20	1999. 05. 19 20:37
E_DSC2-1	15141.3	343.27	End of DSC					
				1.75	0.53	165.15	06/21	1999. 05. 19 21:09
DG.5	15140.36	343.37	Dredge		1.72	166.87	06/22	1999. 05. 19 22:52
				21.70	1.79	168.66	07/00	1999. 05. 20 00:39
DG.6	15152	342	Dredge		2.46	171.12	07/03	1999. 05. 20 03:07
				13.09	0.71	171.83	07/03	1999. 05. 20 03:49
DG.7	15145.19	340.11	Dredge		2.60	174.43	07/06	1999. 05. 20 06:25
			Transit	9.36	0.56	174.98	07/06	1999. 05. 20 06:59
SM.1	15140.14	340.326						
			SB/Mag	19.84	0.92	175.90	07/07	1999. 05. 20 07:53

Appendix 1. continued

SM.2	15148.198	347.412						
			SB/Mag	14.46	0.67	176.57	07/08	1999. 05. 20 08:33
SM.3	15149.5	339.68						
			SB/Mag	18.70	0.92	177.48	07/09	1999. 05. 20 09:29
SM.4	15157.661	345.65						
			SB/Mag	9.12	0.48	177.96	07/09	1999. 05. 20 09:57
SM.5	15200	350						
			SB/Mag	4.70	0.27	178.23	07/10	1999. 05. 20 10:13
SM.6	15202.54	349.985						
			SB/Mag	15.77	0.80	179.04	07/11	1999. 05. 20 11:02
SM.7	15210	345.857						
			SB/Mag	9.50	0.45	179.48	07/11	1999. 05. 20 11:28
SM.8/CTD.11	15205	347	CTD		1.53	181.01	07/13	1999. 05. 20 13:00
				1.99	0.11	181.12	07/13	1999. 05. 20 13:07
DG.8	15206	347.4	Dredge		3.00	184.12	07/16	1999. 05. 20 16:07
			Transit	55.31	2.39	186.51	07/18	1999. 05. 20 18:30
Rabaul	15215	416	Unload					
			Transit	20.87	1.16	187.67	07/19	1999. 05. 20 19:40
DP.19	15226	418.5						
			SeaBeam	77.80	3.01	190.68	07/22	1999. 05. 20 22:40
DP.20	15246.52	455.33						
			SeaBeam	54.43	2.26	192.94	08/00	1999. 05. 21 00:56
DP.21	15313.04	508.15						
			SeaBeam	15.95	0.66	193.60	08/01	1999. 05. 21 01:36
DP.22	15320	513.26						
			SeaBeam	23.67	0.98	194.59	08/02	1999. 05. 21 02:35
DP.23	15327.6	502.93						

Appendix 2. Sampling locations and analytical parameters

Cruise No. KODOS 99-1		Station No. : HCTD 01						
Observation Time (Local Time)		5/16/1999 19:42:00						
Observation Location		Longitude		Latitude		Water depth		
		152° 06'		03° 47.28'		3,099 m		
Water Sampling Depth								
0	100	300	500	1,000	1,050	1,100	1,200	1,300
1,450								
Analysis Item : 수온, 염분, pH, DO, Nutrients, Total CO ₂ , H ₂ S								

Cruise No. KODOS 99-1		Station No. : HCTD 02						
Observation Time (Local Time)		5/16/1999 23:10:00						
Observation Location		Longitude		Latitude		Water depth		
		151° 57.850'		03° 41.930'		1,750 m		
Water Sampling Depth								
0	100	300	500	750	900	1,000	1,100	1,200
1,400	1,500	1,650						
Analysis Item : 수온, 염분, pH, DO, Nutrients, Total CO ₂ , H ₂ S								

Cruise No. KODOS 99-1		Station No. : HCTD 03						
Observation Time (Local Time)		5/16/1999 23:10:00						
Observation Location		Longitude		Latitude		Water depth		
		151° 46.271'		03° 40.292'		1,927 m		
Water Sampling Depth								
0	500	900	1,085	1,100	1,186	1,207	1,490	1,700
1,770	1,850							
Analysis Item : 수온, 염분, pH, DO, Nutrients, Total CO ₂ , H ₂ S								

Appendix 2. Continued.

Cruise No. KODOS 99-1		Station No. : HCTD 04							
Observation Time (Local Time)		5/16/1999 23:10:00							
Observation Location		Longitude			Latitude			Water depth	
		151° 41.658'			03° 41.876'			1,743 m	
Water Sampling Depth									
0	300	410	900	998	1,095	1,210	1,362	1,400	
1,500	1,602	1,650							
Analysis Item : 수온, 염분, pH, DO, Nutrients, Total CO ₂ , H ₂ S									

Cruise No. KODOS 99-1		Station No. : HCTD 05							
Observation Time (Local Time)		5/16/1999 23:10:00							
Observation Location		Longitude			Latitude			Water depth	
		151° 45.382'			03° 41.374'			2,163 m	
Water Sampling Depth									
0	900	1,218	1,390	1,476	1,500	1,630	1,695	1,760	
1,819	1,900	2,000							
Analysis Item : 수온, 염분, pH, DO, Nutrients, Total CO ₂ , H ₂ S									

Cruise No. KODOS 99-1		Station No. : HCTD 06							
Observation Time (Local Time)		5/17/1999 23:10:00							
Observation Location		Longitude			Latitude			Water depth	
		151° 43.161'			03° 43.614'			2,086 m	
Water Sampling Depth									
0	485	1,000	1,283	1,402	1,500	1,578	1,611	1,668	
1,700	1,800	1,850							
Analysis Item : 수온, 염분, pH, DO, Nutrients, Total CO ₂ , H ₂ S									

Appendix 2. Continued.

Cruise No. KODOS 99-1		Station No. : HCTD 07						
Observation Time (Local Time)		5/17/1999 23:10:00						
Observation Location		Longitude		Latitude		Water depth		
		151° 43.967'		03° 41.956'		2,114 m		
Water Sampling Depth								
0	300	500	1,000	1,100	1,210	1,270	1,550	1,630
1,715	1,800	1,950						
Analysis Item : 수온, 염분, pH, DO, Nutrients, Total CO ₂ , H ₂ S								

Cruise No. KODOS 99-1		Station No. : HCTD 08						
Observation Time (Local Time)		5/17/1999 23:10:00						
Observation Location		Longitude		Latitude		Water depth		
		151° 41.264'		03° 42.849'		1,673 m		
Water Sampling Depth								
0	94	300	493	700	800	900	1,000	1,150
1,350	1,450	1,550						
Analysis Item : 수온, 염분, pH, DO, Nutrients, Total CO ₂ , H ₂ S								

Cruise No. KODOS 99-1		Station No. : HCTD 09						
Observation Time (Local Time)		5/17/1999 23:10:00						
Observation Location		Longitude		Latitude		Water depth		
		151° 49.397'		03° 43.314'		2,138 m		
Water Sampling Depth								
4	300	478	900	1,100	1,330	1,550	1,680	1,770
1,819	1,900	2,000						
Analysis Item : 수온, 염분, pH, DO, Nutrients, Total CO ₂ , H ₂ S								

Appendix 2. Continued.

Cruise No. KODOS 99-1		Station No. : HCTD 10						
Observation Time (Local Time)		5/17/1999 23:10:00						
Observation Location		Longitude		Latitude		Water depth		
		151° 52.163'		03° 41.325'		2,082 m		
Water Sampling Depth								
0	500	850	1,100	1,490	1,572	1,638	1,708	1,765
1,680	1,796							
Analysis Item : 수온, 염분, pH, DO, Nutrients, Total CO ₂ , H ₂ S								

Cruise No. KODOS 99-1		Station No. : HCTD 11						
Observation Time (Local Time)		5/16/1999 23:10:00						
Observation Location		Longitude		Latitude		Water depth		
		152° 05.008'		03° 46.881'		1,81 m		
Water Sampling Depth								
0	100	300	500	900	1,000	1,150	1,200	1,350
1,400	1,450	1,550						
Analysis Item : 수온, 염분, pH, DO, Nutrients, Total CO ₂ , H ₂ S								

Cruise No. KODOS 99-1		Station No. : HCTD 12						
Observation Time (Local Time)		5/17/1999 23:10:00						
Observation Location		Longitude		Latitude		Water depth		
		151° 44.176'		03° 43.162'		1,839 m		
Water Sampling Depth								
0	300	493	893	1,100	1,252	1,300	1,400	1,520
1,600	1,650	1,750						
Analysis Item : 수온, 염분, pH, DO, Nutrients, Total CO ₂ , H ₂ S								

Appendix 3. Location and description of sediment samples

시료 번호	목 적	위 치	결 과	비 고
HPC 1	· Pual Ridge 주변의 열수 및 화산작용의 변화양상 추적	Satanic Mills 동쪽 (151° 42.38'E, 3° 44.61'S)	· 약 2.2 m 주상 퇴적물 획득 · 흙갈색의 이질 다금속 퇴적물 · 피스톤 코어 하반부에 기반암으로 추정되는 암석 조각들이 존재함	· 코어 끝이 암반에 부딪힌 것으로 추정됨 · 퇴적물이 코어의 중반부와 하반부로 나 누어 분포하며 그 사이에는 해수로 채워 져 있었음 · 퇴적물이 상당히 교란된 것으로 생각됨
HPC 2	· DESMOS 지역의 다금속 퇴적 물의 지화학적 특성 파악	DESMOS (151° 52.24'E, 3° 41.8'S)	· 미량의 퇴적물과 약 50g의 현무암질 암석시료 · 현무암은 다공질이며 상당히 신선한 것으로 생각됨	· 코어가 암반에 부딪힌 것으로 생각됨 · 해류의 영향으로 정확한 위치를 잡는 데 많은 어려움을 겪었음
HPC 3	· Pual Ridge의 열수작용과 화산활동의 역사 규명	North Eastern Pual Ridge (151° 52.24'E, 3° 41.8'S)	· 약 70 cm 주상 퇴적물 및 암석 획득	· 코어가 암반에 부딪힌 것으로 판단되며 퇴적물의 두께가 예상 보다 얇은 것으로 생각됨
HMC 1	· Pual Ridge와 DESMOS 중간 지역에 분포하는 표층 퇴적 물 획득		· 약 13 cm 주상 퇴적물 획득 · 미립 퇴적물	· 열수작용의 흔적은 보이지 않음
HMC 2	· Pual Ridge 동쪽 부분의 표 층 퇴적물 채취		· 약 20 cm 주상 퇴적물 획득 · 표면에서 약 5cm 아래에 약 4 cm 두 께의 연회색 화산재층 존재 · 매우 미립이며 volcanic shard가 주 상 코어 하부에 분포함.	· 최근에 있었던 화산활동 반영 · 열수작용의 흔적은 관찰되지 않음

Appendix 4. Location of deepsea camera system

정점	일 시 (촬영시간/GMT)	위 치 (시작, 종료)	획득자료	비고
HDSC Line 1-1 (SuSu Knoll)	5/16 03:25 - 05:57 (04:11 - 05:34)	03° 47.103, 152° 05.608 03° 47.670, 152° 05.625	still camera 180장 촬영 B/W video 82분 촬영 color video 77분 촬영	열수 분출구 촬영
HDSC Line 1-2 (SuSu Knoll)	5/16 07:15 - 08: 43 (08:44 - 07:48)	03° 47.918, 152° 04.894 03° 46.819, 152° 06.117	still camera 120장 촬영 B/W video 58분 촬영	
HDSC Line 2-1 (Satanic Mills)	5/16 15:45 - 17:35 (16:27 - 17:35)	03° 43.141, 151° 40.211 03° 44.221, 151° 40.513	still camera 126장 촬영 B/W video 68분 촬영 color video 51분 촬영	
HDSC Line 3-1 (Roman Ruins)	5/19 06:25 - 08:10 (07:03 - 08:11)	03° 42.478, 151° 39.595 03° 43.624, 151° 41.181	still camera 130장 촬영 B/W video 68분 촬영 color video 68분 촬영	열수 분출구 촬영

Appendix 5. Meteorological information during the cruise.

DATE : 1999년 5월 4일 맑음(BC) 흐림(C) 아주흐림(O) 비(R) 안개(F)

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00								
08:00								
12:00								
16:00								
20:00	Transit (Papua New Guinea)		E	3	1008	16		BC
24:00	"		SE	3	1010	15		BC

DATE : 1999년 5월 5일

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	Transit (Papua New Guinea)		NW	4	1010	16		O
08:00	"		NW	3	1012	17		BC
12:00	30° 49' N, 129° 52' E		NW	4	1011	22	22	O
16:00	"		NW	4	1010	26		BC
20:00	"		NW	4	1011	22		BC
24:00	"		NW	4	1014	20		O

Appendix 5. Continued.

DATE : 1997년 5월 6일 맑음(BC) 흐림(C) 아주흐림(O) 비(R) 안개(F)

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	Transit (Papua New Guinea)		NW	5	1012	22		C
08:00	"		NW	4	1012	22		C
12:00	25° 47' N, 132° 43' E		NW	3	1013	25	24	O
16:00	"		N	3	1013	24		O
20:00	"		NNE	4	1012	23		C
24:00	"		NE	4	1012	22		BC

DATE : 1999년 5월 7일

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	Transit (Papua New Guinea)		NE	5	1012	23		BC
08:00	"		NE	4	1012	25		BC
12:00	21° 20' N, 135° 24' E		NE	4	1012	27	28	BC
16:00	"		SE	3	1010	32		BC
20:00	"		SE	3	1011	27		BC
24:00	"		SE	3	1014	25		BC

Appendix 5. Continued.

DATE : 1999년 5월 8일

맑음(BC) 흐림(C) 아주흐림(O) 비(R) 안개(F)

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	Transit (Papua New Guinea)		E	3	1012	27		O
08:00	"		SSE	3	1012	28		BC
12:00	16° 38' N, 138° 05' E		ESE	3	1014	30	30	C
16:00	"		SSE	3	1012	31		BC
20:00	"		ESE	3	1013	28		BC
24:00	"		E	4	1013	27		BC

DATE : 1999년 5월 9일

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	Transit (Papua New Guinea)		E	4	1012	28		BC
08:00	"		E	3	1013	28		BC
12:00	11° 58' N, 140° 47' E		E	4	1012	30	30	BC
16:00	"		E	4	1010	33		BC
20:00	"		ENE	3	1011	29		BC
24:00	"		ENE	4	1012	28		BC

Appendix 5. Continued.

DATE : 1999년 5월 10일 맑음(BC) 흐림(C) 아주흐림(O) 비(R) 안개(F)

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	Transit (Papua New Guinea)		E	4	1011	28		BC
08:00	"		ENE	4	1012	28		BC
12:00	7° 37' N, 143° 16' E		ENE	4	1013	30	30	C
16:00	"		E	4	1010	31		BC
20:00	"		E	5	1010	29		BC
24:00	"		E	5	1011	28		C

DATE : 1999년 5월 11일

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	Transit (Papua New Guinea)		NE	5	1010	27		C
08:00	"		E	5	1012	27		R
12:00	03° 12' N, 146° 04' E		E	4	1012	27	30	R
16:00	"		E	4	1010	30		C
20:00	"		ENE	3	1011	28		BC
24:00	"		E	4	1013	27		BC

Appendix 5. Continued.

DATE : 1999년 5월 12일 맑음(BC) 흐림(C) 아주흐림(O) 비(R) 안개(F)

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	Transit (Papua New Guinea)		E	3	1010	28		BC
08:00	"		E	4	1012	28		BC
12:00	1° 13' S,	148° 57' E	E	4	1012	30	30	C
16:00	"		NE	3	1008	31		C
20:00	"		S	2	1011	28		C
24:00	"		E	2	1011	27		C

DATE : 1999년 5월 13일

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	Transit (Papua New Guinea)		E	3	1000	27		C
08:00	3° 44.906' S,	151° 33.167' E	N	3	1012	27		C
12:00	3° 45.878' S,	151° 48.984' E	E	3	1012	30	30	O
16:00	3° 43.401' S,	152° 01.799' E	SE	2	1010	28		O
20:00	4° 03.868' S,	152° 28.031' E	ESE	3	1010	27		C
24:00	4° 49.103' S,	152° 46.726' E	ESE	3	1012	27		C

Appendix 5. Continued.

DATE : 1999년 5월 14일 맑음(BC) 흐림(C) 아주흐림(O) 비(R) 안개(F)

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	4° 49.020' S,	153° 27.549' E	NE	1	1010	28		C
08:00	5° 30.041' S,	153° 30.070' E	S	2	1011	28		BC
12:00	5° 57.634' S,	153° 43.908' E	SSW	3	1010	30	30	O
16:00	6° 29.636' S,	154° 11.336' E	S	2	1008	29		C
20:00	6° 37.454' S,	154° 00.454' E	SE	3	1010	28		C
24:00	6° 07.125' S,	153° 24.340' E	E	3	1011	27		C

DATE : 1999년 5월 15일

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	5° 50.730' S,	152° 40.343' E	NE	2	1009	28		C
08:00	5° 56.603' S,	152° 08.229' E	NE	3	1011	27		BC
12:00	5° 43.783' S,	152° 40.291' E	NW	3	1009	28	30	O
16:00	6° 00.699' S,	153° 28.315' E	N	3	1007	331		BC
20:00	5° 57.594' S,	152° 50.932' E	NNE	3	1010	28		BC
24:00	5° 16.597' S,	152° 30.042' E	NW	3	1011	26		C

Appendix 5. Continued.

DATE : 1999년 5월 16일 맑음(BC) 흐림(C) 아주흐림(O) 비(R) 안개(F)

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	4° 34.528' S,	152° 27.206' E	N	1	1009	27		BC
08:00	4° 14.871' S,	152° 15.999' E	E	2	1011	33		BC
12:00	3° 46.869' S,	152° 06.149' E	SSE	2	1010	30	30	C
16:00	3° 47.280' S,	152° 05.003' E	SSE	2	1010	30		C
20:00	3° 43.417' S,	151° 59.859' E	ESE	2	1010	29		C
24:00	3° 40.270' S,	151° 45.876' E	E	1	1010	28		O

DATE : 1999년 5월 17일

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	3° 43.109' S,	151° 39.179' E	E	2	1010	27		O
08:00	3° 41.646' S,	151° 42.842' E	E	3	1011	26		C
12:00	3° 47.404' S,	151° 38.819' E	ENE	3	1010	30	30	O
16:00	3° 43.469' S,	151° 42.431' E	E	2	1009	30		BC
20:00	3° 41.721' S,	151° 52.232' E	ESE	2	1009	28		BC
24:00	3° 40.446' S,	151° 46.792' E	ESE	4	1010	27		C

Appendix 5. Continued.

DATE : 1999년 5월 18일 맑음(BC) 흐림(C) 아주흐림(O) 비(R) 안개(F)

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (° C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	3° 42.448' S,	151° 43.699' E	E	2	1010	27		O
08:00	3° 43.266' S,	151° 48.113' E	E	3	1011	28		C
12:00	3° 39.925' S,	151° 51.507' E	ENE	3	1010	30	30	O
16:00	3° 43.380' S,	151° 39.786' E	E	2	1009	30		BC
20:00	3° 43.164' S,	151° 40.357' E	ESE	2	1009	28		BC
24:00	3° 44.276' S,	151° 40.541' E	ESE	4	1010	27		C

DATE : 1999년 5월 19일

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (° C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	3° 43.584' N,	151° 39.906' E	E	1	1010	27		C
08:00	3° 43.472' N,	151° 44.925' E	ESE	3	1009	32		BC
12:00	3° 44.555' N,	151° 41.244' E	ESE	2	1009	30	30	C
16:00	3° 42.818' N,	151° 39.324' E	N	2	1008	29		C
20:00	3° 42.683' N,	151° 39.793' E	N	2	1009	29		BC
24:00	3° 42.035' N,	151° 51.485' E	ESE	2	1010	28		O

Appendix 5. Continued.

DATE : 1999년 5월 20일 맑음(BC) 흐림(C) 아주흐림(O) 비(R) 안개(F)

Local Time	Location		Wind		Barometer (mbar)	Temperature (°C)		Weather
	(N)	(W)	Dir.	Force (Class)		Air	Sea	
04:00	3° 41.286' N,	151° 44.226' E	N	2	1009	27		BC
08:00	3° 43.924' N,	151° 44.956' E	N	3	1010	28		BC
12:00	3° 46.917' N,	152° 05.019' E	NNE	3	1010	30	30	O
16:00	3° 54.406' N,	152° 08.197' E	NW	3	1008	31		C
20:00	4° 18.579' N,	152° 26.024' E	NW	3	1010	28		BC
24:00	5° 02.656' N,	153° 01.500' E	NNE	4	1010	28		C