

BSPE 92500-2078-7

**심해열수 해양환경탐사**

**(DSHEEP)**

**Deep-Sea Hydrothermal Vent Environments  
Exploration Programme**

**한국해양연구원**



BSPE 92500-2078-7

**심해열수 해양환경탐사**

**(DSHEEP)**

**Deep-Sea Hydrothermal Vent Environments  
Exploration Programme**

**한국해양연구원**



# 제 출 문

한국해양연구원장 귀하

본 보고서를 "심해열수 해양환경탐사 (DSHEEP)"의  
최종보고서로 제출합니다.

2006년 2월 10일

연구책임자 : 전동철

연구 원 : 김봉채, 신창용, 황상철  
김석현, 홍기훈, 최기영  
이상목, 박승현, 함도식  
박건태, 이상훈, 김정균



# 요 약 문

## I. 제 목

심해열수 해양환경탐사

## II. 연구개발의 필요성 및 목적

### 1. 필요성

- 국내의 해양연구는 최근까지 대체로 우리나라 주변해역에 한정되어 왔으며, 대양의 심해환경에 관한 본격 해양탐사기술과 지식은 아직도 초보적인 수준에 머물러 있는 형편이므로 우선적으로 해양선진국과 국제공동 협력연구를 통하여 선도기술과 지식을 습득하고 발전시켜 심해환경 탐사기술을 자체적으로 연구개발함으로써 대양의 심해연구 역량을 한층 더 높일 필요가 있음.

- 열수해양환경은 지각의 운동 및 진화, 지구 전체의 물질순환 및 환경변화, 생명의 기원과 진화, 생물학적 유기성 등을 연구할 수 있는 최적의 자연학습장임.

- 심해 열수주변의 해양환경탐사를 통하여 새로운 생명체를 이용한 신물질과 신규 생명공학소재의 원천을 확보하고, 심해 유용생물의 개발 및 산업화와 해양광물자원 개발능력 향상에 기여하게 될 것임.

- 이것은 해양 분야의 학문적 발전에 기여하는 것일 뿐만 아니라, 우리나라가 해양강국으로 도약할 수 있는 가능성을 보여줌으로써 일반 국민들이 자신감을 가지고 우리나라가 선진국 대열에 진입하는 데에 공헌할 것이며, 21세기를 담당할 청소년들에게 세계를 주도할 자부심과 꿈을 심어줌.

### 2. 목표

- 1) 비스마크해 중앙해령의 해저열수분출구 확인탐사
- 2) 헬름동위원소 분포를 통한 열수플룸 확산범위 확인
- 3) 해저 생물시료 및 해저퇴적물 채취 분석
- 4) 북서태평양 이동해역의 해양환경 탐사

### III. 사업내용 및 범위

#### 1. 사업기간: 2005년 1.1 - 12.31. (1년)

##### 1) 비스마크해 중앙해령의 열수분출구 시범탐사

- 정밀해저지형, 중력/자력 정밀탐사
- CTD 집중탐사를 통한 열수플룸 신호 간접 확인
- 해수분석을 통한 분포도 작성

##### 2) 헬름동위원소 분포를 통한 열수플룸 탐사

- 열수주변의 국지적 해수순환 형성, 과정, 혼합, 소멸 연구
- 열수에 의한 해양으로의 물질 유입 Flux 연구
- 탁도 분포와 헬름동위원소 분포 비교분석

##### 3) 해저 생물시료 및 해저퇴적물 채취 분석

- 해저 생물시료 채취 (박스코어링) 및 분석
- 해저퇴적물 채취 및 분석
- 수층별 해수채취 및 분석
- 기존 열수생물 자료와 비교분석

##### 4) 북서태평양 이동해역에서 해양환경 탐사

- 남해-동중국해-열대해역-비스마크해 사이 물리화학 해양조사
- 북서태평양 기존자료와 비교분석

### IV. 사업추진체계 및 전략

#### 1. 사업추진체계

##### 1) 국제협력

- 일본 해양과학기술센터 (JAMSTEC): 국제공동연구, 인력/장비교류
- 비스마크해 동부해역 (마누스 분지) 해저광구를 확보한 기관에 자문협력
- 관련당사국 (파푸아 뉴기니) 전문가 승선탐사 및 국제협력



## 2) 국내협력

- 대학교: 분야별 관련전문가와 협력연구

## 3) 서태평양 활성분지 열수 현장조사

- 비스마크해 (마누스 분지), 에이유 분지 등
- 국내외 관련전문가 공동협력연구
- 열수 모니터링 네트워크 구축

## 4) 2005년 시범탐사를 통한 심해열수탐사의 비교우위 틈새분야 공략

## 2. 연구방향과 문제해결전략

가. 심해열수환경에 관한 분야별 구체적 가설 수립 및 검증에 의하여 목적과 연구방향의 궤도를 끊임없이 수정해 나아가려는 노력을 경주하고 있는가?

나. 심해열수 탐사연구의 후발주자로서 중장기적으로 비교우위를 선점할 수 있는 틈새분야 연구를 위하여 연구추진 체계와 전략은 올바른가 ?

다. 열수환경에서 분석, 모니터링, 채취하는 생물 및 광물자원을 미래 산업에 연계, 응용하기 위해서 어떤 문제를 선행적으로 해결해야 하는가?

라. 열수환경탐사를 원만하게 수행하기 위해서 서태평양 이해당사국 또는 국제협의체와 협조 및 의무사항을 적극적으로 준수하였는가?

## V. 제안

이 보고서는 ‘심해열수 해양환경탐사’에 관한 연구기획을 시범적으로 확인탐사하는 연구사업으로서 미국과 프랑스의 국제공동연구에 의해 약 30년 해저 열수 분출구를 인류 최초로 발견한 이후 축적된 해양 선진국의 열수환경과 과정에 관한 종합지식을 바탕으로 실효역에서 해저열수를 탐사하여 시범적으로 열수분출 확산을 확인함으로써 우리나라가 과학적으로 대처해야 할 방향과 심해 열수환경 종합연구를 위한 대한 장기적인 대안을 제시하고자 한다.

## 1. 열수 분출구 광역탐사 관측

- 열수환경탐사에서 우선적으로 수행되어야 할 연구과제는 활성 단층을 중심으로 열수 분출구가 많이 모여 있는 열수장 (hydrothermal field)을 찾는 일이다. 이미 알려진 활성분지의 중심축을 중심으로 열수구가 모여 있을 가능성이 많지만, 해저 확장에 의하여 중앙해령이나 활성단층의 중심축에서 상당히 떨어진 곳에서 열수구가 발견되기도 한다. 따라서, 대상 활성분지 주변의 광역 해저영상도 작성과 함께 열수유체 플룸 추적을 효과적으로 수행하기 위한 해수의 물리화학적 특성 분포 (정밀 수온분포, 열수유체의 농도분포 등) 와 유체 흐름장 분포, 음향 토모그래피 기법에 의한 플룸 확산 감지, 미지진계에 의한 화산활동 및 단층작용 감지 등이 선행되어야 할 것이다.

## 2. 열수 과정 모니터링

### 1) 지정 분출구 모니터링

- 지정 분출구 환경의 연속 및 반복 관측

정밀 탄성과 탐사와 비디오 촬영, 수중음향 청음기, 미세수온변화, 열수유체의 농도분포 등에 의하여 열수장이 확인되면, 일차탐사 후 GPS, 수중 청음기, 해류계, 지화학 측정용 계류장비 등을 지정대상 열수 분출구 주변에 설치하여 연속관측 및 추후 반복관측에 대비한다.

- 현장 자료측정 및 송수신 기술

모선에서 케이블을 통해서 내린 장비로부터 측정된 자료는 직접 모선의 컴퓨터에 수집되며, 열수주변 해저에 설치된 장비를 통해서 수집되는 자료는 케이블을 통해서 해수면에 계류된 부이로 보내진 후 위성을 통하여 송신되거나, 자동기록장치를 계류하여 일정기간이 지난 후 수거하여 분석된다. 모선에서 내리는 수중진수장치 (launcher)에 연결된 원격조종로봇 (ROV)이나, 모선으로부터 케이블에 의하지 않고 직접 원격조종되는 자동수중관측장비 (AUV)에서 측정된 자료는 모선에 회수된 후에 수집되어 처리, 분석된다. 따라서, 자료부이를 이용한 위성송수신 기술과 원격조종로봇에 의해 채집되는 각종 시료를 알맞게 고정하고 분석, 처리하는 기술의 발달은 수중진수장치, 원격조종로봇, 자동 수중관측 장비의 운영기술과 함께 필수적이다.

## 2) 열수 네트워크 모니터링

### - 현장자료 종합 네트워크 운영

미래는 정보의 실시간 유통 및 쌍방 호환성 정보전달 시스템이 필수적이며, 따라서 현장자료를 실시간으로 원격수집하고 분석, 처리할 수 있는 해저열수 관측망이 기본적으로 구축되어야 할 것이다. 이를 통하여 대양 및 지각 내부의 각종 정보를 모니터링하여 송수신하는 체계를 갖추어 나아가야 한다.

### - 자연재해 연계연구

해저열수현장의 실시간 모니터링 시스템은 지진해일과 같은 자연재해의 감시관측도 부수적으로 가능하게 하며, 주변 관련국의 지진해일 예보센터 구축에 기여할 것이다.

## 3. 시료채취 및 미래 산업적 응용

### 1) 열수 분출구의 활동성, 안정성, 지속성

- 각각의 열수 분출구는 대부분 그 중심축이 되는 중앙해령의 성질과 해저확장 속도에 따라 활동성에 차이가 있으며, 수년 내지 수십 년 사이에 활동성을 잃고 수명을 다하는 불안정한 열수구가 있는 반면, 수십만 년 동안 지속적인 열수 유체의 분출과 상호작용으로 안정된 열수환경과 생태계를 유지하는 분출구도 있다. 따라서, 관측대상 활성분지의 광역탐사를 통하여 열수장 (hydrothermal field) 과 각 열수 분출구 (hydrothermal vent)의 특성과 수명을 규명하기 위하여 상설 감시시스템에 의한 연속관측 및 반복관측이 필요하다.

### 2) 생명공학과와의 연계

- 각각의 다른 특성과 수명을 지닌 열수장 및 분출구의 환경에 따라 열수 주변 생태계의 생물상 및 다양성이 매우 다르게 나타난다. 열수생물을 이용한 생명공학 연구는 지구 생명의 기원을 밝히고, 인류 복지를 추구하는 인간의 염원을 한 단계 더 현실화시켜 줄 것이다.

### 3) 미래 해양산업

- 심해 열수환경에서 얻은 유용한 미생물이나 금속광물 또는 신물질을 이용한 산업적 응용은 생명공학이나 의학, 약학 분야 뿐만 아니라 해저도시건설 등 인류의 미래산업에 기반기술의 역할을 제공할 것이다.

#### 4. 지속가능한 열수환경연구

##### 1) 생물다양성 보존

- 심해열수환경을 회복 불가능한 상태로 파괴하는 것을 방지하기 위하여 유엔해양법 (UNCLOS)이나 생물다양성 헌장 (CBD) 등을 시작으로 해양방지구역 (MPA)을 열수환경에도 적용하려는 국제적인 노력이 진행되고 있다. 이러한 노력에 부응하여 열수생물의 다양성을 보존하려는 해양과학조사 윤리강령을 자발적으로 실천하는 의지를 내외적으로 천명하는 것이 필요하다.

##### 2) 환경보전 대응전략

- 심해열수 환경탐사를 통하여 틈새 분야연구의 비교우위를 선점함으로써 해양선진국으로 도약하기 위해서는 국제적으로 생물다양성 보존을 위한 노력 뿐만 아니라, 탐사자료의 국제적 공유 및 심해환경을 보전하기 위한 적극적인 대응전략이 필수적이다. 이를 통하여 지속가능한 열수환경 연구를 수행함으로써 해양강국의 입지를 다진다.

#### 5. 예측모델의 개발 및 활용

##### 1) 열수플룸 확산이류 모델

- 열수 분출구로부터 플룸 형태로 뿜어져 나오면서 난류확산 및 주변해수와 혼합과정을 거치면서 흐르는 열수유체의 물리화학적 성질을 예측할 모델의 개발은 음향 토모그래피를 이용한 예측모델과 더불어 해수 중 열수유체의 이류 및 확산범위를 추적하는 유용한 도구가 될 것이다.

##### 2) 지각 내 해수-암석 상호작용 모델

- 수많은 관측 노력에도 불구하고, 앞으로도 여전히 현장접근이 어려운 부분이 지각 내부의 변화과정이며, 이를 어느 정도 극복하기 위해서는 제한된 자료와 지식을 바탕으로 지각 내 해수의 공간적 투수성 (permeability) 변화과정과 해수와 암석의 상호작용을 이해할 수 있는 모델의 개발 및 적용이 필요하다.

##### 3) 열수분출구 진화과정 모델

- 위의 두 가지 모델 개발의 노력과 더불어 열수 분출구가 해저확장에 의해서 중앙해령에서 멀어짐에 따라 진화하는 과정을 설명할 모델의 개발은 열수환경 탐사에서 규명할 수 없는 지구와 생명의 진화과정을 밝혀줄 것이며, 지구의 미래 예측에 유용한 정량적 개념을 제시해 줄 수 있을 것이다.

# Summary

## I. Title

Exploration of Deep-Sea Hydrothermal Vent Environments

## II. Necessity and Objectives of the Study

### 1. Necessity

- Since domestic research activities have been mostly focused on the adjacent seas and hence the knowledge and technology about deep-sea hydrothermal vent environments are still in the beginning stage, we'd better take the science and technology of the advanced countries by international cooperation and then improve our capabilities by developing the exploration techniques for ourselves.

- Hydrothermal vent environments are the best field-study sites to examine the crustal movements and evolution, global material fluxes and environmental variation, to research origin of lives and their evolutionary changes, and to examine biological connectivities, etc.

- Deep-sea useful organisms and new biotech-materials can be extracted from the hydrothermal vent environments, and the technology may be improved to industrialize the biotech-materials and mineral resources.

- It may achieve not only the academic advance in oceanographic fields but also our national confidence to be a developed country by showing off the possibility to level up our strength in the ocean, and finally give self-confidence and dream to steer the world to our descendents.

### 2. Objectives

- 1) Find Seafloor Hydrothermal Vents in the Bismarck Sea
- 2) Explore the spatial range of hydrothermal plume with Helium isotope
- 3) Collect Sediments and Organisms around Hydrothermal Vents
- 4) Explore Hydrographic Environments along the Transit Path

### III. Scope of the Study

1. Duration : 2005. 1. 1. - 12. 31. (1 year)

1) Find Hydrothermal Vents in the Western Spreading Ridge of the Bismarck Sea

- exploring precise seafloor topography, gravity/magnetic anomalies
- detecting hydrothermal plumes by high-density casting of CTD
- analyzing seawater analysis such as Dissolved inorganic carbon, alkalinity, major/trace metals, pH, sulfide, methane, nutrients, CO<sub>2</sub> emission

2) Explore the spatial range of hydrothermal plume with Helium isotope

- Explore local hydrothermal circulation, turbulent diffusion & mixing, plume dispersion
- Material fluxes into water column from hydrothermal vents
- Analyze turbidity & helium isotope distributions

3) Collect & Analyze Sediments and Organisms around Hydrothermal Vents

- collect hydrothermal organism
- collect seafloor sediments around hydrothermal vents
- collect seawater samples
- analyze and compare our samples with historical data

4) Explore Hydrographic Environments along the Transit Path

- hydrographic survey along the transit path from the South Sea of Korea to the Bismarck Sea via the East China Sea and N.W. Pacific
- compare them with historical data in the NW. Pacific

## IV. Project Driving and Strategies

### 1. Frame of the Project Driving

#### 1) International Cooperation

- JAMSTEC (Japan) : International Cooperation, Exchange of Manpower
- SOPAC (International): International Advice & Cooperation
- Papua New Guinea : Permit/Cooperation within EEZ of PNG

#### 2) Domestic Co-work

- University : Co-work with Related Experts

#### 3) Survey of Active Spreading Basin in the western Pacific

- Bismarck Sea (Manus Basin), Ayu Trough etc.
- Cooperation with Domestic/Foreign Experts
- Networking hydrothermal vents in the N.W. Pacific

4) Focused Research upon the Potential Fields with Leading Edges through the test cruise in 2005

### 2. Strategies

1) To approach the right direction to the purpose by way of testing hypotheses in each field of the hydrothermal vent environments

2) To focus upon the fields with potentially leading edges as a late research group of hydrothermal vent study

3) To solve *a priori* problems to make it easy for applying to future industries with bio- and mineral resources obtained from hydrothermal vent environments

4) To actively cooperate with the relevant countries or international body to survey hydrothermal vent environments without any trouble

## V. Suggestions

It is intended to suggest the general directions and future strategies for us to achieve the integrated scientific knowledge and monitoring techniques of hydrothermal processes ever since the Franch-U.S. cooperative team found the first hydrothermal vent in human history almost about 30 years ago

### 1. Investigating hydrothermal field

- Find hydrothermal field where there are several or lots of hydrothermal vents. Not only around on-axis areas of spreading centers but also off-axis areas far distant from mid-ocean ridges or active faults, there is a still possibility to find hydrothermal vents. Seafloor mapping, detecting hydrothermal plume by temperature differences, chemical concentration of hydrothermal fluid, acoustic tomography in water column, and

### 2. Monitoring hydrothermal processes

#### 1) Monitoring specified vent sites

- repeated and continuous measurements of specified vents

Once hydrothermal field is confirmed by multi-beam side scan sonar, video taping, acoustic tomography with hydrophone array, thermal distribution, and by the distribution of hydrothermal fluid's chemical concentration, then it should be prepared for continuous and repeated measurements by installing APS (acoustic positioning system), hydrophones, ADCP, geochemical mooring equipments around the specified vent area after finishing the first cruise.

- *In situ* data collecting/processing and transmitting

*In situ* data measured from the launcher or from the ROV are directly collected into the deck computer through signal cable during the cruise, or transmitted from the data buoy to the laboratory computer through a satellite after the data measured at the sea bottom are collected at the data logger of the surface buoy. Self-recorded data measured by moored equipments for a specified time period. or the data obtained by the autonomous underwater vehicle (AUV) remotely operated from the vessel without cable are analyzed after they are recovered from the sea. Hence, operating/sampling techniques of



the deep-sea survey tools are very important as well as fixing bio-samples properly for analyzing/nourishing them in the laboratory.

## 2) Network monitoring

- Operating integrated network

It is inevitable in the near future to communicate informations on a real-time and bi-directional basis, and hence the seafloor network must be constructed to collect/monitor all kinds of informations both in water column and in crustal interior, and to predict the seafloor environments

- research on natural disasters

The real-time network monitoring system around the hydrothermal vent environments may also contribute to monitoring natural disasters by underwater seismic activities and constructing the tsunami warning center at the relevant countries.

## 3. Sampling and future industrial applications

### 1) Activity, stability, persistence of hydrothermal vents

- The activities of each hydrothermal vent are mostly dependent upon the characteristics and spreading rate of the mid-ocean ridge at the central axis. There are a lot of differences in periodicity from an unstable vent lost the activity within several or tens of years, to a very stable vent emitting hydrothermal fluid with stable interaction for more than hundred thousand years. So, real-time continuous monitoring system and repeated surveys are necessary in order to understand the characteristics and periodicity of hydrothermal vents on each hydrothermal field.

### 2) Connecting with biotech-engineering

- Hydrothermal vent community and the biodiversity is very unique depending upon the hydrothermal field and vent environments with different characteristics and cycles. Biotech-engineering using deep-sea hydrothermal organisms will let us know the origin of life on earth and result in the realization of human welfare.

### 3) Future ocean industry

- Industrial application of micro-organisms, metallic resources, and any other useful materials taken from hydrothermal vent environments will contribute not only to biotech-engineering, medicines, but also to constructing future cities at the seafloor, etc.

## 4. Sustainable research

### 1) Keeping biodiversity

- In order to protect deep-sea hydrothermal vent environments against irreversible and unrecoverable state, international effort has been exerted to declare marine protection area (MPA) for deep-sea environments. The primary sources of relevant international treaty law are the United Convention on the Law of the Sea (UNCLOS) (1982) and the Convention on Biological Diversity (CBD) (1992). It is necessary for us to voluntarily declare the code of conduct for the scientific research of hydrothermal vent system.

### 2) Environmental protection strategies

- In order for us to compete with other developed countries in the scientific research of hydrothermal vent environments, it is also necessary to prepare positive strategy for environmental protection of hydrothermal vent system as well as international share of investigated data. Then, it can be found the way to carry out the sustainable research of hydrothermal environments which gives us the opportunity to be an advanced country in ocean research.

## 5. Prediction models

### 1) Diffusion-advection model of hydrothermal plumes

- It could be a useful tool to develop a physico-chemical model to trace the hydrothermal plume by diffusion, advection, and mixing with water column, chemical concentration of hydrothermal fluid, as well as to develop an acoustic tomography model.

2) water-rock interaction model in the upper crust

- Despite lots of attempt for direct measurements, it is still very difficult to look into the interior processes of the crust. Thus, it is necessary to develop a geophysical model to understand the spatial variation process of permeability and the interaction between sea water and rocks in the crust

3) Evolutionary process model of hydrothermal vents

- With the models mentioned above, an evolutionary model along the off-axis region departing from the spreading center of mid-ocean ridge could give us the clue to understand the evolutionary process of life on earth.



# 목 차

요약문(국문) .....	iii
요약문(영문) .....	ix
목차 .....	xvii
제 1 장 총 관 .....	1
1-1. DB관리 항목 .....	3
1-2. 사업 요약설명 .....	4
1-3. 사업 설명자료 .....	5
제 2 장 해양물리학적 특성을 이용한 심해 열수 연구 .....	17
2-1. 해양음향 탐사에 의한 심해열수 활동의 변동특성 연구 .....	19
2-2. 열수 현상과 열, 염 및 추적자 플럭스 연구 .....	26
2-3. 해양대순환 모형을 이용한 열수탐사예정해역의 해양순환과 물리특성 파악 .....	29
2-4. 물리해황특성 관측결과 .....	31
제 3 장 심해열수 해양화학적 연구 .....	55
3-1. 해저열수와 화학체계 .....	57
3-2. 연구목적 .....	66
3-3. 연구내용 및 방법 .....	66
3-4. 외국 선행연구 요약 .....	67
3-5. 총괄적인 논문 .....	70
3-6. 부록 .....	71
제 4 장 비스마르크 해역의 헬륨동위원소 분포 .....	81
4-1. 연구 목적 .....	83
4-2. 탐사 내용 .....	83
4-3. 분석 방법 .....	85

4-4. 분석 결과 및 토의 .....	86
4-5. 요약 .....	89
제 5 장 열수지역 초기선정을 위한 지구물리 탐사방법 연구계획 및 국제협력 .....	91
5-1. 연구개발과제의 개요 .....	93
5-2. 연구 개발 수행 내용 및 결과 .....	101
5-3. 참고문헌 .....	125
제 6 장 부 록 .....	129
6-1. Cruise Report .....	131
6-2. 열수탐사 보도자료 .....	162

# 제 1 장

---

## 총 관

---





# 제 1 장 총괄

(2006)연도 (본예산) 사업 설명자료

사업명 : 심해열수 해양환경 탐사기술 개발 사업 (신규)

## 1. DB관리 항목

### □ 예산과목

회계	소관	계정	관	세항	세세항	세사업
일반회계	과학기술 혁신본부	계정명	연구활동 지원	공공기술계 연구원 운영	한국해양 연구원	심해열수 해양환경 탐사기술 개발사업
11	12	0	461	1260	214	005

### □ 관리항목

예비타당성 실시여부	총사업비 관리대상		총액계상 예산사업	예산점검 관리대상	R&D 사업	
	총사업비	사업기간			해당여부	출연기관코드
					○	607

### □ 사업추진 주체 및 지원대상

사업 수행(대행)기관명	사업지역	지원대상자
한국해양연구원	경기도 안산시	

### □ 예산요구 및 조정

(백만원)

2004결산	2005예산 (A)	2006예산(안)		증 감 (B-A)	%
		부처안	검토안(B)		
		3,000			

## □ 사업 이력 내용

◦ 선진 해양강국 (미국, 프랑스, 일본 등)들은 대양심해 탐사기술을 21세기를 선도할 미래 신기술과 인식하고 기술 선점을 위해 약 30년 전부터 투자해왔으며, 특히 심해 열수구 탐사와 그 주변 환경의 종합해양탐사에 인적, 물적 자원을 집중적으로 투자해왔음

◦ 1967년 제22차 국제연합(UN) 총회에서 심해저에 대하여 인류의 공동유산이라는 개념이 사용되었으며 1973년 국제연합(UN) 해양법회의를 시작으로 한 협상에 의하여 국가관할권이 미치지 않는 공해(公海)의 밑바닥 및 그 지하의 개발 및 이용에 관한 사항들의 정부간 다자협상을 위해 1982년에 체결된 『해양법에 관한 국제연합협약』에 근거하여 1994년에 설치된 독자적 국제해저기구 (ISA)의 전신인 준비위원회에 가입하고 15만km<sup>2</sup>의 선행투자 광구를 확보하였음

◦ 한국해양연구원에서는 지난 10여 년 동안 심해광물자원 (망간단괴 등)의 개발을 중심으로 한 탐사 및 채굴기술을 축적해왔으며, 이러한 기술을 확대하여 열수 환경의 종합해양탐사와 대양에서의 해양과학 연구역량을 제고하며 미래 신기술과의 연계를 모색하여 선진 해양국으로의 진입을 추진할 필요가 있음

## 2. 사업 요약설명

### 3. 사업 설명자료

사업명 : 심해 열수 해양환경 탐사기술 개발 사업 (신규)

<일반회계>

(백만원)

구분	2004예산	2005예산 (A)	2006예산(안)		증 감	
			부처안	검토안(B)	(B-A)	%
계			3,000			
◦심해열수 해양환경 탐사기술 개발사업			3,000			

\* 사업코드 : 11-12-0-461-1260-214-005

\* 담당자 : 원장(변상경), 책임연구원(전동철), 예산팀장(김세용)

#### (1) '05년 사업개요

##### □ 사업목적

- 대양 탐사장비 및 장치의 설계, 운영기술 개발
- 심해열수 해양환경 종합탐사 (형성, 구조, 변화, 주변환경 모니터링) 연구
- 심해열수환경 탐사자료의 실시간 송수신 및 처리기법 고도화

##### □ 사업내용

- 사업 기간 : 2006~2015년 (10년)
- 총 사업비 : 790억원
- 지원 형태 : 출연금
- 사업시행주체 : 한국해양연구원

◦ 사업내용

- 대양 탐사장비 및 장치의 설계, 운영기술 개발
  - 1) 각종 대양심해 탐사장비의 효율적 탐사를 위한 설계, 운영기술 개발
  - 2) 심해 무인, 유인 잠수정 및 원격로봇 운영기술
  
- 심해열수 해양환경 종합탐사연구
  - 1) 해저 열수 분출구 확인탐사
  - 2) 열수 분출구의 형성, 구조, 변화 및 주변 환경 모니터링
  - 3) 생물시료 채취, 생명공학과 연계된 신물질 개발
  
- 심해열수환경 탐사자료의 실시간 송수신 및 처리기법 고도화
  - 1) 해저 열수 분출구 상시 계류시스템 구축
  - 2) 채취시료 및 환경측정자료 해저현장 분석, 처리, 위성 송수신
  - 3) 지구의 진화, 생명현상 등 교육 프로그램 개발 운영

◦ 사업기대효과

가. 기술적 측면

- 심해 정밀탐사 기술, 초정밀 현장분석 기술 개발
- 심해 열수생물 사육 및 배양 기술
- 유용생물자원 개발을 위한 기초지식 및 기술 습득

나. 경제, 산업적 측면

- 심해/열수 탐사 장비 개발을 위한 선진 기술의 확보
- 유용생물 자원 확보 및 개발을 통한 산업적 가치의 창출
- 새로운 연구 분야에 따른 관련연구자 양성 및 고용 창출
- 해양산업의 활성화 및 양식/배양 기술습득에 따른 관련 산업과의 연계

## (2) '06년 예산안

### □ 사업내용

- 1) 해저 열수 분출구 확인탐사
- 2) 열수 분출구의 형성, 구조, 변화 및 주변 환경 모니터링
- 3) 효율적 탐사를 위한 각종 심해 탐사장비의 설계, 운영기술 개발 및 운용
- 4) 해저 위치인식기술 구축 및 열수 분출구 계류, 위성 송수신 시스템 설계
- 5) 시료채취 및 환경측정자료 처리 및 분석

### □ 산출근거 및 지원 필요성

◦ 대양 탐사장비의 부재 - 대양에서의 본격적인 환경탐사는 이제까지 매우 제한적으로 수행되어 왔으므로 고가의 각종 탐사장비가 절대적으로 부재했으며, 특히 해저면 굴곡이 심한 열수주변 환경탐사를 위해서는 광역 해저탐성과 탐사장비 (long-range side scan sonar), 견인 (deep-tow) 카메라, 견인용 (tow-yo) CTD 와 각종 지화학 센서가 장착된 자동수중 측정장비 (예, Gamos system) 이외에도 해저면 자동위치인식 시스템, 원격 시료채취기 (ROV) 등 다양한 종합심해환경 탐사장비가 요구됨.

◦ 분야별 기초장비 구매 비용 - 초기 1단계 (2006-2008)에서의 광역 열수 분출구 확인탐사 작업에 필요한 기초장비 구매비용으로 최소한 매년 약 20억원 정도의 지원이 필요하며, 연구조사선 이용료와 관측경비 등을 포함하여 10억원 이상의 추가 비용이 소요됨.

◦ 이동실험실 및 장비운영 공간 확보 - 위에 언급된 각종 장비들은 대체로 선상 작업공간을 크게 차지하는 장비들이며 현장시료 채취 및 분석을 위한 선상 실험실 공간이 더 요구되므로 1992년 이후 현재까지 사용해 온 1400톤급 연구선 (온누리호)으로는 열수환경 탐사를 제한적으로 수행할 수 밖에 없음. 따라서, 작업 공간과 관측장비가 대양연구에 알맞게 탑재된 6천톤급 연구조사선이 완공되는 2008년까지는 온누리호에 관측장비와 선상실험실을 이동식으로 운영할 필요가 있음.

◦ 대양 심해 극한환경 종합탐사 비용 - 대양의 심해에서 더구나 열수주변 해양생물 등 극한 해저환경을 탐사하는 작업에는 기본적인 장비 구매비용 이외에도 현장관측을 효율적으로 수행하기 위한 부대장비와 시료채취, 저장, 배양 및 분석을 위한 제반 운영비용에도 우리나라 주변해역에서 수행되는 관측에 비해서 훨씬 더 많은 비용이 소요됨.

◦ 미국, 프랑스, 일본 등 해양선진국에서 20~30년 전부터 수행해 온 심해 열수환경탐사에 우리나라가 진입하여 10년 이내에 그들과 비슷하거나 더 나은 수준의 연구결과를 도출하여 해양생명공학이나 금속광물자원과 연계된 연구를 하고 미래 해양산업을 발전시키는 바탕을 마련하기 위해서는 장기적인 집중적인 투자가 필요함.

◦ 심해열수 해양환경탐사를 장기적 집중투자를 통하여 선진국 수준의 연구결과와 미래 해양산업의 틈새시장을 공략하기 위해서는 연구대상해역인 남서태평양의 주변국가와 초기부터 체계적인 우호관계를 설정할 필요가 있음.

◦ 피지(Fiji)에 본부를 둔 ‘남태평양 응용 지구과학 위원회 (SOPAC)’는 자연재해 및 생물, 무생물 자원의 확보와 관리, 에너지, 수자원, 정보통신 등 주변 섬나라들의 이익을 대변하고 총체적인 서비스를 수행하는 국제기구로서 이들 회원국뿐만 아니라 미국, 호주, 프랑스, 영국, EU, UN, 대만 등이 기부금을 지원하고 있으며, 일본은 기부금 이외에도 피지에 남태평양 대학교 (S. Pacific Univ.)를 설립하는 등 SOPAC 회원국에 대한 영향력을 확장하고 있음.

◦ 우리나라가 남서태평양에서 심해 열수환경을 장기적으로 탐사하여 우리의 미래산업과 연계하고 이들 국가에 대한 외교 역량을 강화하기 위해서는 지금부터 SOPAC에 기부금을 지원하는 다른 나라들과 같이 KOICA 등을 통해서 기부금 지원에 동참해야 함.

< 세부 내역 >

(백만원)

구분	'04예산	'05예산 (A)	'06예산 (B)	증 감 (B-A)	%
<b>□심해열수 해양환경 탐사기술 개발</b>			3,000		
◦심해 탐사장비의 운영기술 개발			500		
◦남서태평양 심해 종합현장관측			2,500		
◦현장자료 분석 및 송수신 기술 개발			1,000		
<b>□비목별</b>			3,000		
◦인건비			800		
◦직접비			2,200		
◦간접비			-		

### (3) 협의 · 보완사항

### (4) 중기재정 소요전망 ('06~'15)

#### □ 사업운영 기본방향

##### <선택과 집중>

◦ 해양과학의 모든 분야에서 열수연구에 필요한 기초연구를 수행하면서 동시에 해양선진국에서 아직까지 수행하지 못한 틈새 분야에 집중하여 비교우위를 선점할 수 있는 연구가 진행되어야 하며, 기초연구라고 하더라도 연구결과가 부실한 분야는 과감하게 유보하고 우수한 연구결과를 도출할 수 있는 분야에 선택 투자함.

##### <인프라 활용>

◦ 6천톤급 연구조사선 - 쇄빙 기능을 갖춘 6천톤급 연구조사선이 2008년에 완공되면 대양 심해 열수탐사에 본격적인 2단계 (2009 ~ 2011년) 연구가 가능함.

◦ 무인잠수정 - 2007년에 완공되는 심해 무인잠수정을 이용하여 각종 심해열수탐사 장비센서를 조합한 진수 장치를 제작하여 활용할 예정임.

◦ 원격 시료채취 로봇 (ROV) - 심해 열수환경에서 원격 시료채취 로봇을 운영하는 기술은 아직 습득하지 못한 상태이며, 국제공동연구를 추진할 프랑스와 일본의 전문가로부터 운영기술 전수 후 시범 운영기간을 거쳐 3단계 (2012-2015년) 중에 활용할 예정임.

##### <국제공동연구 전략>

◦ 프랑스와 일본의 유인잠수정 - 프랑스 국립해양연구소 (IFREMER)의 유인잠수정 '노틸(Nautile)'과 '빅터6000', 일본 해양과학기술센터 (JAMSTEC)의 잠수정 '신카이 6500'을 참여시켜 국제공동연구를 수행하고, KOICA를 통하여 SOPAC에 기부금을 지원하며 주변 관련국에서 필요로 하는 자연재해 방재연구 등 동반연구를 통한 협력관계를 도모함.

□ 산출근거

(백만원)

년 도	금 액	산 출 근 거
총사업비	79,000	· 인건비 : 9,400 (510 M/Y) · 직접비 : 69,600(기자재 및 재료비:62,000, 여비 및 기술정보활동비 등:3,600, 위탁개발비 등:4,000)
'05까지	-	
2006	3,000	· 인건비 : 800 (40 M/Y) · 직접비 : 2,200(기자재 및 재료비:2,000, 기타:200)
2007	3,000	· 인건비 : 800 (40 M/Y) · 직접비 : 2,200(기자재 및 재료비:2,000, 위탁개발비 등:200)
2008	3,000	· 인건비 : 800 (40 M/Y) · 직접비 : 2,200(기자재 및 재료비:2,000, 기타:200)
2009	10,000	· 인건비 : 1,000 (50 M/Y) · 직접비 : 9,000(기자재 및 재료비:8,000, 기타:1,000)
2010	10,000	· 인건비 : 1,000 (50 M/Y) · 직접비 : 9,000(기자재 및 재료비:8,000, 기타:1,000)
2011	10,000	· 인건비 : 1,000 (50 M/Y) · 직접비 : 9,000(기자재 및 재료비:8,000, 기타:1,000)
2012	10,000	· 인건비 : 1,000 (50 M/Y) · 직접비 : 9,000(기자재 및 재료비:8,000, 기타:1,000)
2013	10,000	· 인건비 : 1,000 (50 M/Y) · 직접비 : 9,000(기자재 및 재료비:8,000, 기타:1,000)
2014	10,000	· 인건비 : 1,000 (50 M/Y) · 직접비 : 9,000(기자재 및 재료비:8,000, 기타:1,000)
2015	10,000	· 인건비 : 1,000 (50 M/Y) · 직접비 : 9,000(기자재 및 재료비:8,000, 기타:1,000)

(5) 고려사항

1) 지원근거 및 추진경위

◦ 지원근거

- 해양법에 관한 국제연합협약 (1982)에 근거하여 1994년에 설치된 독자적 국제해저기구 (ISA)의 전신인 준비위원회에 가입, 15만km<sup>2</sup>의 선행투자 광구 확보

- 한국해양연구원에서는 지난 10여 년 동안 심해광물자원 (망간단괴 등)의 개발을 중심으로 한 탐사 및 채굴기술을 축적

- 대양에서의 해양과학 연구역량을 제고하며 미래 신기술과의 연계를 모색하여



선진 해양국으로 진입하기 위하여 이러한 기술을 확대하여 열수환경의 종합적인 해양탐사 추진 필요

- 선진 해양강국 (미국, 프랑스, 일본 등)들은 대양심해 탐사기술을 21세기를 선도할 미래 신기술과 인식하고 기술 선점을 위해 약 30년 전부터 투자해왔으며, 우리나라 미래산업의 중요한 일부를 차지할 해양생명공학과 연계한 열수환경의 틈새분야 연구투자 지원 필요

◦추진경위

- 심해열수 환경탐사 정책기획 (2004) : 한국해양연구원  
국제 워크숍 개최 (2004.12.2) : “서태평양 해저열수환경 국제공동연구”
- 심해열수 환경탐사 (2005) : 한국해양연구원 기관고유사업  
남서태평양 비스마크해 마누스 분지에서 현장관측 예정 (2005년 9월)  
SOPAC 34차 연례회의 (사모아) 참석 예정 (2005년 10월)  
열수탐사 국제공동 워크숍 개최예정 (2005년 11월) :  
프랑스 국립해양연구소 (IFREMER), 브레스트
- 심해열수환경 소개서 (단행본) 발간 예정 (2006년)  
사진에세이집 (단행본) 발간 예정 (2006년)

< 예산 반영 추이 >

(억원)

사업명	'00	'01	'02	'03	'04	'05
◦심해열수 해양환경탐사					2.1	10

2) 최근 3년간 이·전용, 이월·불용실적

◦ 해당 사항 없음

(억원)

년도	당초예산 (A)	전년이월 (B)	이·전용 (C)	예산현액 (A+B+C)	집행	차년이월	불용
'02							
'03							
'04	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )

### 3) '05년도 1/4분기 예산집행실적 및 전망

(억원,%)

당초예산	예산현액	예산배정 (1/4분기)	자금배정 (1/4분기)	집행실적(1/4분기)		
				계획(A)	집행(B)	집행율(B/A)
-	-	-	-	-	-	-

◦ 해당 사항 없음

### 4) 외부기관 지적사항 및 평가결과

◦ 해당 사항 없음

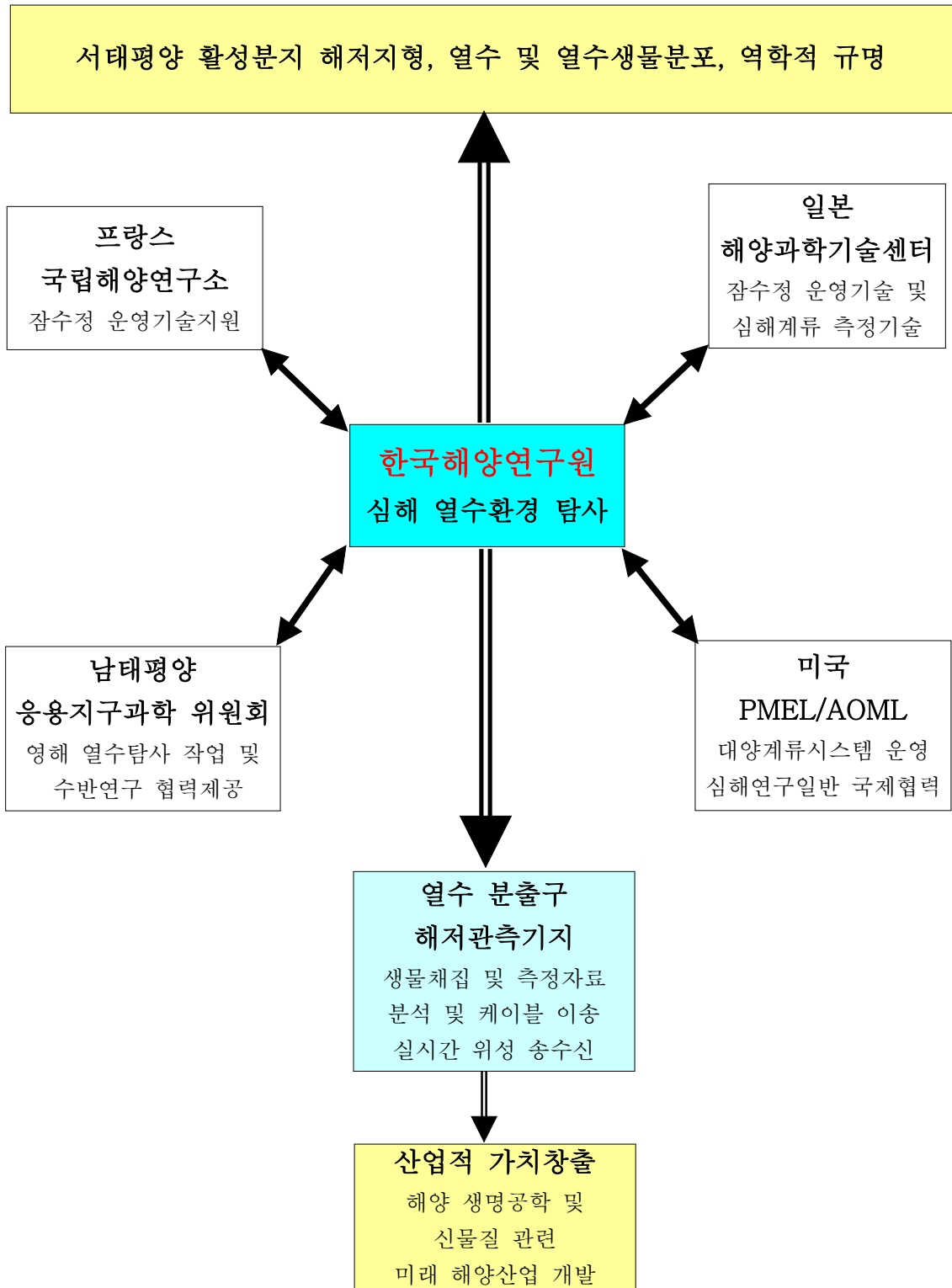
### 5) 외국의 사례

◦ FAMOUS Project (1974~1976) : 프랑스(CNEXO)와 미국 (WHOI) 공동의 중앙해령 유인잠수정 탐사사업을 통하여 프랑스는 잠수정 씨아나를, 미국측은 잠수정 앨빈을 동원하여 최초로 정밀해저영상작업을 수행함. 미국측은 음향측심장비 (SASS)를 이용한 정밀 해저자료 측정 이외에도 LIBEC (light behind camera) 이나 ANGUS (acoustic navigated geological undersea surveyor) 같은 장치를 개발하여 5천장 이상의 해저면 사진을 분석하고 중앙해령 내부탐험 시도함.

◦ Galapagos Rift Expedition (1977, 1979) : FAMOUS 사업을 통해서 개발한 장비와 중앙해령 해저면 영상자료 분석을 바탕으로 갈라파고스 해역에서 잠수정 앨빈을 이용하여 인류 역사상 최초로 다양한 열수 생물을 확인하고, 1979년에는 검은 연기를 내뿜는 열수 분출구를 최초로 확인 탐사함.

◦ STARMER Project (1987~1992), New STARMER Project (1992~1994) : 프랑스와 일본의 공동연구사업으로서 북부 피지분지를 비롯한 남서태평양에서 대규모 탐사가 이루어졌으며, 일본은 이 사업을 통하여 심해 유인잠수정을 포함한 탐사 기술을 프랑스로부터 이전받음.

6) 사업추진절차



## 7) 예비 타당성 조사

- 심해열수탐사사업 사전수행 방문협의(2004.10) : 프랑스 국립해양연구소
  - 열수환경분야 학위과정 학생 및 신진연구자 교환연구 협의
  - 열수탐사장비 운영기술 협력지원 협의
- 한불협력의제 회의 (2004.12.1) : 프랑스 국립해양연구소, 외무부 관계자  
한국해양연구원 내방 협력의제 중 열수환경 탐사사업 공동추진 협의
- 한일 국제공동 연구사업 계획서 제출 협의 (2004.8~2004.12) : 일본해양과학  
기술센터 (JAMSTEC)와 한국해양연구원의 Matching Fund 확보방안
- 한불 국제공동 연구사업 의향서 제출 (2004.12) : 프랑스 국립해양연구소와  
한국해양연구원의 공동발의로 양국의 Matching Fund 확보방안 추진

## 8) 총사업비 관리

(억원)

구분	변경 년도	총사업비		사업기간		변경사유 및 내역
		당초	변경	착수	완료	
최초	2006	790		2006	2015	
( )차 변경						
( )차 변경						
2005 예산안요구						

## 9) 연차별 투자계획

(억원)

구분 (사업기간)	총사업비		'04 까지	'05 예산	연차별 투자계획				
	현행	변경요구			'06	'07	'08	'09	'10이후
◦ 심해열수 해양환경 탐사기술 (2006~2015)	790				30	30	30	100	600
합계	790				30	30	30	100	600
◦ 국 고	790				30	30	30	100	600
·직접수행									
·보조·출연(자)	790				30	30	30	100	600
·용자									
◦ 지방비									
◦ 자부담 등									

## (6) 참고자료

### 세부 예산 요구 내역

(단위: 천원)

구 분	2006 요구	
	금액	산출근거
합 계	3,000,000	
◦직접비	2,200,000	
- 여비	140,000	◦국내여비 20,000 ◦국외여비 120,000
- 기술정보활동비	80,000	◦전문가초청 20,000 ◦해외훈련비 20,000 ◦세미나개최 및 참가비 20,000 ◦문헌정보수집 등 10,000 ◦논문게제료 10,000
- 기자재 및 시설비	1,640,000	◦연구기자재비 - 연구선 사용료 (9,000천원/일 x 60일) 540,000 - 광역 해저영상 측정장비 500,000 - 저층해류측정기 (LADCP) 100,000 - 해저위치 인식시스템 200,000 - 기타 각종 측정장비 300,000
- 재료 및 전산처리비	100,000	- 기계부품, 전자부품 등 500,000 - 시료, 시약 등 400,000 - 현장소모품, 재료 등 100,000
- 수용비 및 수수료	50,000	◦홍보비, 유인물비 30,000 - 보고서인쇄, 자료복사, 홍보물발간 ◦공공요금 10,000 ◦수수료 등 10,000
- 위탁연구개발비	60,000	◦위탁연구개발비 60,000 - 지구물리 및 국제협력 등
- 연구관리비	50,000	◦참여연구원 인센티브 50,000
- 외부인건비	80,000	◦박사후 연수원, 연구생 등 활용 80,000
◦인건비	800,000	◦심해열수 해양환경탐사사업 인건비 (25,000천원×32명) 800,000
◦간접비	-	-



# 제 2 장

---

해양물리학적 특성을  
이용한 심해열수 연구

---





## 제 2 장 해양물리학적 특성을 이용한 심해 열수 연구

해양물리학적 특성을 이용한 심해열수 연구는 주제에 따라 세 분야로 기획하였으며, 2005년도 현장시범관측에서는 CTD/ADCP를 이용한 46개 정점관측 (태평양 이동경로상 10개 정점, 비스마크해 중부해역 36개 정점)과 해류계 3대 및 청음기 (hydrophones) 2대를 한 정점에 약 5일간 계류, 분석하여 기획과제의 방향을 구체화하고 밑그림을 구축하는 데 기여하고자 했다.

### 1. 해양음향 탐사에 의한 심해열수 활동의 변동특성 연구

#### (1) 연구개발의 필요성

- 지구진화와 생명탄생에 관한 수수께끼의 해명, 해양환경 변동과 지구규모 기후 변동의 구명 및 해저자원 개발 등과 관련하여 최근 외국에서는 심해열수에 관한 연구를 활발히 추진하고 있음.
- 심해열수가 분출되는 심해에서 가시광선과 전파는 감쇠가 심하므로 짧은 범위 이내에서만 전달되는 반면 수중음파는 감쇠가 작아 비교적 먼 거리까지 양호하게 전달되리라 예상됨.
- 수중음파는 심해용 음향이탈기 등 음향장비에서 수중통신의 수단으로 사용되고 있을 뿐만 아니라 심해용 음향측심기 등 각종 소나에서 해양계측의 수단으로 널리 활용되고 있음.
- 주로 심해에서 먹이를 구하는 향유고래 등 고래류는 정교한 발성기관과 청각기관으로 구성된 생물소나로부터 수중음파를 교묘히 활용하여 주변환경 파악, 의사소통, 먹이사냥 등을 행하는 것으로 알려져 있음.
- 절멸위기에 처한 고래류를 영구히 보존하고 이들에게 쾌적한 서식환경을 제공하기 위하여 최근 해양잡음에 관한 관심이 고조되고 있으며, 해양잡음을 연속적으로 측정하려는 연구가 시도되고 있음.
- 심해열수는 고온고압으로 다량의 기포와 함께 분출되고 있으므로 심해열수의 분출에는 특이한 해양잡음의 발생이 수반되리라 예상됨.
- 심해열수의 분출구 가까이에서 해양잡음을 연속적으로 측정함과 동시에 심해열수 활동을 모니터링 함으로써 심해열수의 분출에 의한 해양잡음 발생의 특

성을 밝히고 해양잡음과 심해열수 활동과의 관련을 연구하는 것이 필요함.

- 심해열수는 해수중에 많은 양의 에너지를 방출하고 있는 것으로 생각되며, 해양환경 변동과 지구규모 기후변동의 트리거로서 중요한 역할을 하리라는 가설도 제안되어 있음.
- 심해열수가 주변해양에 미치는 영향을 조사하기 위해서는 시공간적인 심해열수 활동의 변동특성을 파악하는 것이 필요함.
- 기존의 관측방법으로 심해열수에 의한 플룸의 시공간적인 분포를 연속적으로 모니터링하기가 매우 곤란하므로 새로운 관측방법의 개발이 필요함.
- 해양음향 토모그래피 또는 소나 등에 의해 심해열수 플룸의 시공간적인 분포를 조사하여 심해열수 용출량을 파악하고 수온 및 유속의 공간분포를 파악하기 위한 새로운 음향탐사법의 개발이 필요함.

## (2) 국내외 연구동향

- 미국, 일본, 프랑스, 호주 등 해양선진국에서는 지구진화와 생명탄생의 해명, 해저자원 개발 등의 목적으로 심해열수에 관한 연구를 활발히 추진하고 있으나, 국내에서는 심해열수에 관한 연구를 체계적으로 추진한 바 없음.
- 미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) 태평양 해양환경연구소(PMEL: Pacific Marine Environmental Laboratory)에서는 “열수 프로그램(Vents Program)”이라는 심해열수에 관한 연구사업을 장기간에 걸쳐 계속하여 수행하고 있으며, 특히 “계류용 자동측정 수중청음기(Moored Autonomous Hydrophone)”을 개발하여 심해의 해양잡음을 연속적으로 측정함으로써 풍속과 강우량 추정, 고래 이동경로 파악뿐만 아니라 해저지진 등 해저 지각운동을 모니터링 하는 데 사용하고 있음.
- 일본 해양연구개발기구에서는 “해저열수 활동의 변동특성에 관한 연구”를 장기간에 걸쳐 추진하고 있으며, 특히 음향 계측기술을 응용한 열수플룸 이미지 소나와 해저 관측장치를 개발하여 열수 플룸의 시공간적인 변동특성을 해명하기 위한 연구를 추진하고 있음.
- 미국 워싱턴대학교(University of Washington) 응용물리연구소(Applied Physics Laboratory)와 루트거스대학교(Rutgers University) 해양 및 연안과학연구소(Institute for Marine and Coastal Sciences)에서는 공동으로 열수 플룸을 연속적으로 모니터링하기 위한 소나의 개발연구를 추진하고 있음.

### (3) 연구개발 목표

해양잡음 측정, 해양음향 토모그래피 기법 응용, 열수 플룸 이미지 소나 운용 등 해양음향 모니터링에 의하여 심해열수의 용출량, 심해열수 플룸의 공간적인 수온분포와 유속분포 파악 등 심해열수 활동의 변동특성을 연구함

### (4) 연구내용

#### ■ 심해열수 해역의 해양잡음 특성 연구

심해열수가 분출되는 해역의 심해에서 장기간에 걸쳐 해양잡음을 연속적으로 측정하고 해양잡음의 주파수 특성을 분석하여 열수활동과 해양잡음과의 관련성을 조사함으로써 해양잡음에 의한 열수활동 모니터링 기법을 연구함.

- 심해열수 해역의 해양잡음 장기간 연속측정
- 해양잡음 주파수 특성 분석
- 해저지진, 열수분출, 선박항행 및 고래활동 등 심해열수 해역의 해수중 음원별 해양잡음 특성 조사
- 열수분출 활동과 해양잡음 특성과의 관련성 조사
- 해양잡음에 의한 열수분출 활동 모니터링 기법 연구

#### ■ 해양음향 토모그래피에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구

심해열수 플룸의 공간적인 수온분포와 유속분포를 연속적으로 파악하기 위하여 해양음향 토모그래피 장치와 기법을 새로이 개발하고 실제로 해양 적용실험을 실시하여 해양음향 토모그래피에 의한 열수활동 모니터링 방법을 연구함.

- 심해열수 해역용 해양음향 토모그래피 시스템 개발
- 해양음향 토모그래피에 의한 심해열수 플룸의 공간적인 수온분포와 유속분포 추정기법 개발
- 해양음향 토모그래피에 의한 열수분출 활동 모니터링 기법개발
- 해양음향 토모그래피의 심해열수 해역 적용실험

#### ■ 소나에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구

심해열수의 용출량을 파악하고 수온의 근거리 공간분포를 조사하기 위하여 열수플룸 이미지 소나를 개발하고 실내 수조실험과 해양 적용실험을 실시하여

소나운용에 의한 열수활동 모니터링 기법을 연구함.

- 열수플룸 이미지 소나 개발
- 이미지 소나의 자료처리 기법 개발
- 이미지 소나의 실내 수조실험
- 소나에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
- 소나의 심해열수 적용실험

## (5) 추진전략 및 방법

- 문헌조사와 인터넷 검색을 통하여 관련자료와 정보를 수집하여 분석함.
- 일본 해양연구개발기구 심해연구부, 미국 NOAA PMEL 등 외국에서 실시하고 있는 심해열수 연구현황을 조사함.
- 일본 해양연구개발기구 심해연구부, 미국 NOAA PMEL 등 외국에서 실시하고 있는 심해열수 조사에 직접 참여할 수 있도록 협력을 요청함.
- 미국 NOAA PMEL에서 녹음한 심해열수 해역 해양잡음에 관한 기존자료를 입수할 수 있도록 협력을 요청하고, 심해열수 해역의 해양잡음 특성을 분석함.
- 심해열수 연구에 사용할 해양음향 장비의 확보에 최선의 노력을 경주함.
- 해양잡음 관측자료 공동활용을 조건으로 미국 NOAA PMEL에서 사용하고 있는 “계류용 자동측정 수중청음기” 장비를 임차할 수 있도록 추진함.
- 심해열수 활동의 변동을 모니터링 하는 데 사용할 해양음향 토모그래피 시스템에 관하여는 일본 히로시마대학 연구팀과 공동으로 개발하는 것을 목표로 추진함. 심해열수 해역에서 사용할 수 있고 또한 열수 플룸의 공간적인 분포를 관측할 수 있는 해양음향 토모그래피 시스템을 새로이 개발함과 동시에 자료처리 소프트웨어를 개발함. 개발된 장비를 실내 수조실험과 해양 적용실험 등을 통하여 보완하고 최종적으로 심해열수 해역에서 실제 현장실험을 실시하여 유효성을 검증함.
- 일본 해양연구개발기구 심해연구부, 미국 워싱턴대학교 응용물리연구소 및 미국 루트거스대학교 해양 및 연안과학연구소에서 개발하고 있는 심해열수 플룸 이미지 소나에 관한 연구개발 현황을 조사함.
- 심해열수의 용출량을 파악하고 수온의 근거리 공간분포를 조사하는 데 사용할 열수플룸 이미지 소나에 관하여는 미국 워싱턴대학교 응용물리연구소 연구팀

과 공동으로 개발하는 것을 목표로 추진함.

## (6) 연도별 추진계획

### ■ 2006년도

- 심해열수 해역의 해양잡음 특성 연구
  - ▶ 관련자료 수집 및 분석
  - ▶ 심해용 해양잡음 측정시스템 선정 및 확보
  - ▶ 해양잡음 장기간 연속측정 및 해양잡음 주파수 특성 분석

### ■ 2007년도

- 심해열수 해역의 해양잡음 특성 연구
  - ▶ 해양잡음 장기간 연속측정 및 해양잡음 주파수 특성 분석
  - ▶ 해저지진, 열수분출, 선박항행 및 고래활동 등 해수중 음원별 해양잡음 특성 조사
  - ▶ 열수분출 활동과 해양잡음 특성과의 관련성 조사

### ■ 2008년도

- 심해열수 해역의 해양잡음 특성 연구
  - ▶ 해양잡음 장기간 연속측정 및 해양잡음 주파수 특성 분석
  - ▶ 해저지진, 열수분출, 선박항행 및 고래활동 등 해수중 음원별 해양잡음 특성 조사
  - ▶ 열수분출 활동과 해양잡음 특성과의 관련성 조사
  - ▶ 해양잡음에 의한 열수분출 활동 모니터링 기법 연구
- 해양음향 토모그래피에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
  - ▶ 관련자료 수집 및 분석

### ■ 2009년도

- 심해열수 해역의 해양잡음 특성 연구
  - ▶ 해양잡음 특성 심해열수 해역 적용 연구
- 해양음향 토모그래피에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
  - ▶ 심해열수 해역용 해양음향 토모그래피 시스템 개발
  - ▶ 해양음향 토모그래피에 의한 심해열수 플룸의 공간적인 수온분포와 유속분포 추정기법 개발

■ 2010년도

- 심해열수 해역의 해양잡음 특성 연구
  - ▶ 해양잡음 특성 심해열수 해역 적용 연구
- 해양음향 토모그래피에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
  - ▶ 해양음향 토모그래피에 의한 열수분출 활동 모니터링 기법개발
  - ▶ 해양음향 토모그래피의 심해열수 해역 적용실험

■ 2011년도

- 심해열수 해역의 해양잡음 특성 연구
  - ▶ 해양잡음 특성 심해열수 해역 적용 연구
- 해양음향 토모그래피에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
  - ▶ 해양음향 토모그래피의 심해열수 해역 적용실험
- 소나에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
  - ▶ 열수플룸 이미지 소나 개발
  - ▶ 이미지 소나의 자료처리 기법 개발

■ 2012년도

- 심해열수 해역의 해양잡음 특성 연구
  - ▶ 해양잡음 특성 심해열수 해역 적용 연구
- 해양음향 토모그래피에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
  - ▶ 해양음향 토모그래피의 심해열수 해역 적용실험
- 소나에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
  - ▶ 이미지 소나의 실내 수조실험
  - ▶ 소나에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구

■ 2013년도

- 심해열수 해역의 해양잡음 특성 연구
  - ▶ 해양잡음 특성 심해열수 해역 적용 연구
- 해양음향 토모그래피에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
  - ▶ 해양음향 토모그래피의 심해열수 해역 적용실험
- 소나에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
  - ▶ 소나의 심해열수 적용실험

■ 2014년도

- 심해열수 해역의 해양잡음 특성 연구

- ▶ 해양잡음 특성 심해열수 해역 적용 연구
- 해양음향 토모그래피에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
  - ▶ 해양음향 토모그래피의 심해열수 해역 적용실험
- 소나에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
  - ▶ 소나의 심해열수 적용실험

■ 2015년도

- 심해열수 해역의 해양잡음 특성 연구
  - ▶ 해양잡음 특성 심해열수 해역 적용 연구
- 해양음향 토모그래피에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
  - ▶ 해양음향 토모그래피의 심해열수 해역 적용실험
- 소나에 의한 열수활동 모니터링 기법 연구
  - ▶ 소나의 심해열수 적용실험

## (7) 기대효과

- 새로이 개발된 음향탐사법에 의하여 심해열수의 분출활동과 분출량을 모니터링하고 심해열수 플룸의 시공간적인 수온분포와 유속분포를 파악하므로 심해열수의 연구에 기여할 것임
- 해양음향 기술의 축적으로 수중음향 장비개발, 수중음향 통신기기 개발 및 해저탐사 기술개발 등에 기여하리라 기대됨.
- 개발된 해양음향 기술을 한반도 주변의 해안에 적용하여 넓은 해역의 해수중 유속분포와 수온분포를 실시간으로 파악하고 해저면으로부터 분출되는 가스를 모니터링 하는 데 활용할 수 있을 것임.
- 새로이 개발된 해양음향 기술은 해양음향 분야의 국제공동 연구사업을 추진하는 데 사용할 수 있을 것으로 기대됨.

## (8) 향후 연구성과 활용방안

- 주요한 연구성과는 국제 학술회의와 국내 학술회의 발표논문의 기초자료로 활용될 것이며, 국제 학술지와 국내 학술지 투고논문의 기초자료로 활용될 것임.
- 해군본부의 학술용역사업인 해양특성조사 사업에 응용함으로써 사업의 확대발

전에 활용할 예정임.

- 새로운 민군겸용기술 과제 개발과 국제공동 연구사업 개발의 기초자료로 활용할 것임.

## (9) 시범 계류관측 실시 및 결과

- 비스마크해 중부해역 CTD 정점 (W05)에서 해류계 3대와 함께 2대의 청음기(hydrophone)를 저층(수심 1250m~1120m 사이)에 계류하였으나, 누수에 의하여 저층 수중소음 자료를 받는 데는 실패하였다.

## 2. 열수 현상과 열, 염 및 추적자 플럭스 연구

### (1) 필요성

○ 열수 현상은 물리, 화학 및 생물학적 과정에 복합적인 영향을 미친다. 그러나 열수현상과 관련된 연구가 25년이 경과하였음에도 불구하고 심해 열수 순환에 대한 이해는 아직 불충분하다.

○ 이러한 분야의 이해를 위하여 열수 현상 발생시 유출되는 열, 염 및 다른 화학적 추적자의 양을 파악하는 것은 필수적이다. 최근의 연구 결과들은 이들의 양이 수주(water column) 상 이상치(anomaly)를 모두 합한 것과 꼭 비례할 필요는 없다는 것을 보여주고 있다 (Backer et al., 1989). 이 분야의 연구들은 많지는 않지만 꾸준히 그 연구 결과들이 발표되고 있는바 (Speer and Rosa, 1987; McDougall, 1990; McDuff, 1995) 대체로 1차원 모델을 이용하여 열수 지점에서의 열속과 보다 상층에서의 수온 이상치 사이 관계 등에 관하여 연구를 하였지만 열수생시 유출되는 전체 열, 염 및 다른 추적자들의 양을 제시하지는 못하였다.

○ 보다 최근에 Lavelle et al, (1998)는 East Pacific Rise 상에서 열수 발생시 유출되는 열, 염 및 추적자 양의 산출 방법을 제시한 바 있으며 이러한 방법이 일반화되기 위하여 보다 많은 현장 자료를 이용하여 검증해야하는 절차가 남아 있다.

○ 본 연구는 열수환경의 과정을 파악하는 단계에 해당되는 것으로 초기 연구에서 열수 현상이 관측되는 경우에 수행하고자 한다.



## (2) 연구 목적

- 열수 발생시 유출되는 열, 염 및 화학적 추적자의 총량을 산출한다.

## (3) 연구 내용

- 배경 상태의 조사 (해수 물성, 화학적 특성 분포)
- 열, 염 및 추적자 유출 총량 산출 모델 개발 (변수 모수화)
- 열수 발생 유출 열, 염 및 추적자 총량 산출 (모수화 개선)
- 열수과정 모델링

## (4) 연구 추진 전략 및 방법

- 기존 연구의 정리 (예, RIDGE 2000)
- 배경 상태 파악을 위한 현장 조사 - CTD, LADCP
- 열수구 수층의 집중 조사 - CTD, LADCP, 화학적 추적자, 해류 장기 측정
- 타분야 공동 조사
- 외국 선진 연구팀과의 공동연구 (프랑스, 미국 등)

## (5) 연차별 추진 전략

	2005	2006	2007	2008이후
해양 물리 조사	CTD, LADCP	CTD, LADCP	CTD, LADCP	CTD, LADCP
해수 유동 조사			해류계 계류	해류계 계류
열, 염 및 추적자 속 산출	기존 모델 분석	변수모수화	모델 적용 및 개선	
열수 과정 모델링		모델링 준비	1차 모델 완성	모델 개선

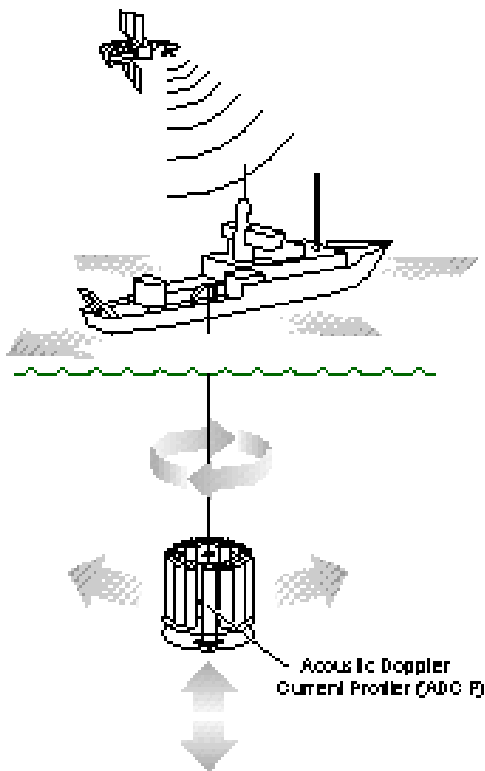


그림 1. CTD와 채수기를 배에서 내리는 모양(좌)과 LADCP를 상하 양방향으로 CTD 시스템에 부착한 사진(우)

## (6) 기대 효과 및 활용

- 열수 과정의 이해
- 열수 조사 관련 환경 조사에 자료 제공

## (7) 참고문헌

- Baker, E.T., J.W. Lavelle, R.A. Feely, G.J. Massoth, S.L. Walker, and J.E. Lupton, 1989, Episode venting of hydrothermal fluids from the Juan de Fuca Ridge, J. Geophys. Res., 94, 9237-9250.
- McDougall, T.J., 1990, Bulk properties "hot smoker" plumes, Earth and Planetary Lett., 99, 185-194.
- McDuff, R.E., 1995, Physical dynamics of deep-sea hydrothermal plumes: In: Humpiris, S.E. et al. (Eds) AGU Geophysical Monography Ser. 91, Sea Floor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological and Geological Interactions, AGU, Washington, D.C., pp. 357-368.
- Lavelle, J.W., E.T. Baker, and G.J. Massoth, 1998, On the calculation of total heat, salt and tracer fluxes from ocean hydrothermal events, Deep-Sea Res. II, 45, 2619-2636.
- Speer, K.G. and P.A. Roma, 1989, A model of an Atlantic and Pacific hydrothermal plume, J. Geophys. Res., 94, 6213-6220.

## 3. 해양대순환 모형을 이용한 열수탐사예정해역의 해양순환과 물리특성 파악

열수에서 방출되는 화학물질이나 열 등이 해양환경에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 열수주변의 해양순환과 물리특성에 대한 이해가 필수적이다. 이는 열수탐사에 있어서도 매우 중요한 기초 자료이다. 이러한 기초 해양자료는 열수 탐사시 주변해양 조사를 통하여 얻을 수도 있지만 수치모델 등을 이용하여 얻을 수 있다. 열수 탐사시 직접 조사를 수행하면 원하는 해역에 대한 그 당시 상황을 정확하게 파악할 수 있으나 시간적 경제적 제약이 심할 수 있다. 모델링을 이용하면 탐사 당시 해황을 정확하게 파악하지 못할 수는 있으나 전체적인 상황을 경제적으로 시공간적 제약없이 파악할 수 있다.

전지구 해양순환모형을 이용하여 열수탐사 예정 해역의 전반적인 해황을 파악하고자 한다. 사용될 모형은 기후연구에 널리 사용되는 NOAA/GFDL MOM (Modular Ocean Omcel) V.3이다. 수평해상도는 1도간격이고 연직방향으로는 23개의 층이 있는데 층간 거리는 수심이 깊어질수록 커진다. (표층에서는 25m 간격

이고 5200m에서는 약 500m 간격임.) 이 모델을 이용하여 분석하고자 하는 주요 내용은 다음과 같다.

- 계절별 그리고 수심별 해양순환과 물성분포
- 주요 해류와 그 변동성
- 기존 관측결과와 비교하여 모델의 성능 검증
- 조사대상해역과 외해간 열 및 물질교환

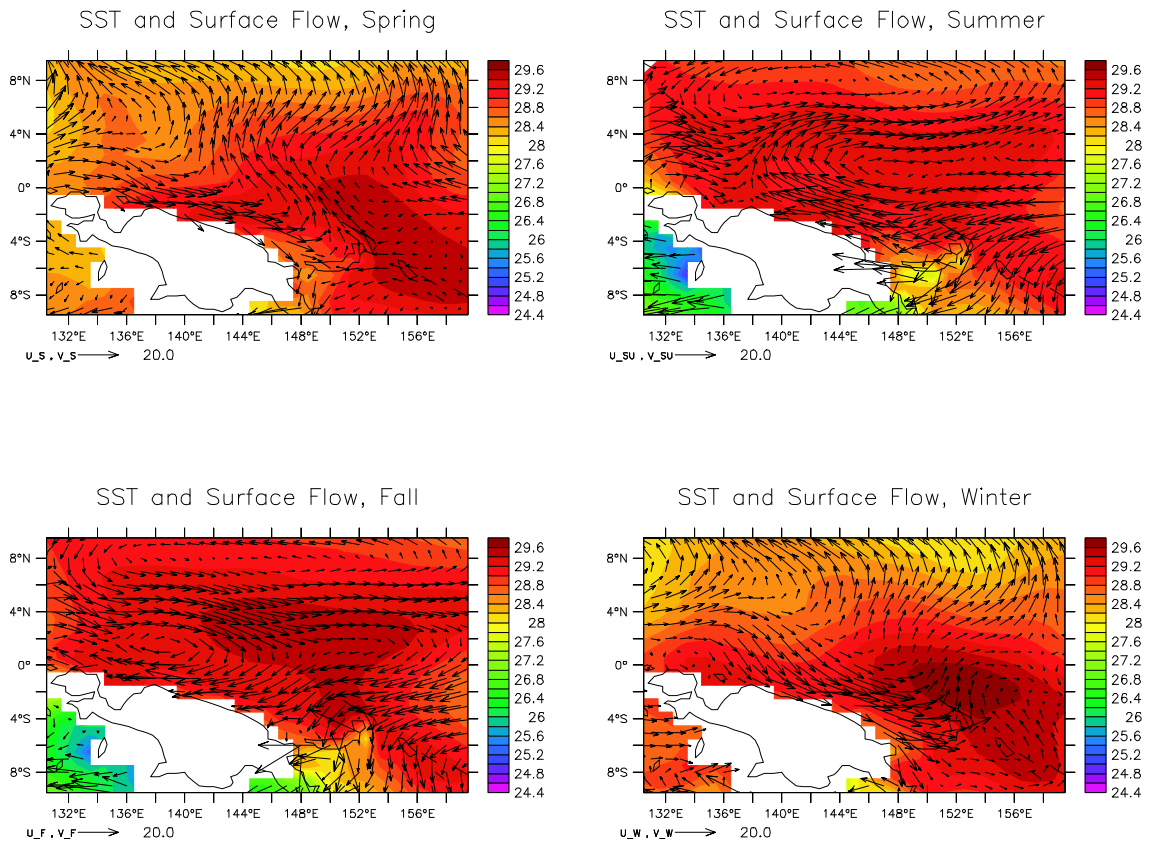


그림 2. 모형에서 얻은 표층수온과 해류

## 4. 물리해양특성 관측결과

### (1) 조사 및 방법

○ 장목에서 출발 (2005년 10월 19일)하여 서태평양을 종단하여 파푸아 뉴기니 마당항에 도착 (2005년 10월 28일)하기까지의 이동 경로 상에서는 각국의 배타적 경제수역 (EEZ) 제약 때문에 공해상의 10개 정점에서만 CTD casting을 실시하였으며, 시범관측 대상해역인 비스마크해 (Bismarck Sea) 중부해역 (Western Spreading Ridge)에서는 2005년 10월 28일부터 11월 3일 사이에 해저화산이나 기타 열수분출구 예상지형을 중심으로 36개 정점에서 수온, 염분, 탁도, 용존산소량 등을 관측하였다 (그림 3).

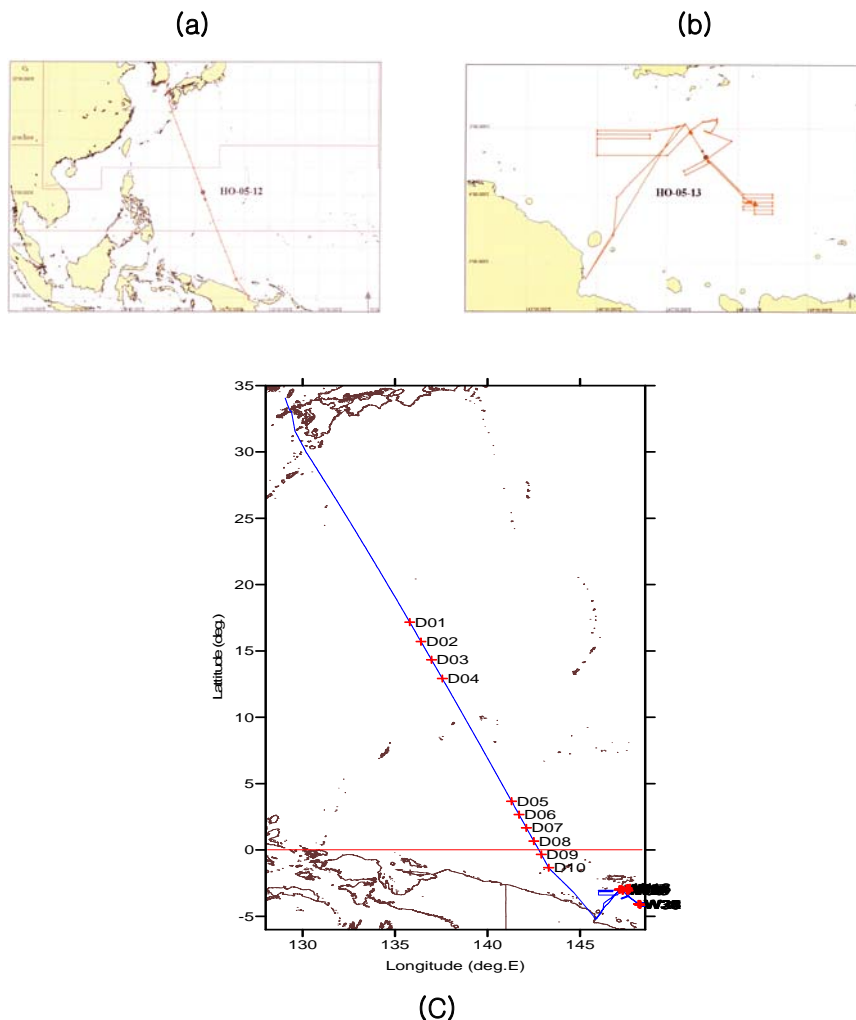


그림 3. (a) ship tracks along the transit path (D01~D10), (b) in the Bismarck Sea (W01~W36), and (c) CTD stations during the cruise.

○ 수온-염분-깊이 센서 (CTD)는 온누리호에 장착된 SeaBird 911을 이용하였으며, 음향도플러유속계(ADCP) 2대 (300kHz)를 CTD frame에 상하방으로 부착하여 CTD와 함께 casting하였으며, 원하는 수심에서 10리터 채수병 (Niskin bottles)을 이용하여 해수를 채집하였다 (그림 4).

○ 해류계와 청음기 계류를 위해서는 정점 W05 (2°56.147'S, 147°14.963'E)에서 저층류의 이동과 수중소음을 5일간 (10월 29일~11월 2일) 계류 관측하였으나, 청음기 내부로 누수되어 수중소음 관측은 실패하였으며, 해류계 자료만 획득하였다 (그림 5).

○ 장목~마당 사이 구간 이동 중에는 CTD자료 이외에 온누리호에 장착된 ADCP (300kHz)자료를 이용하여 이동 단면상의 상층유속 (표면~250m)을 계산하였으며, 비스마크해에서 CTD와 동시에 관측된 LADCP 자료는 이 보고서에서 제외하였다.

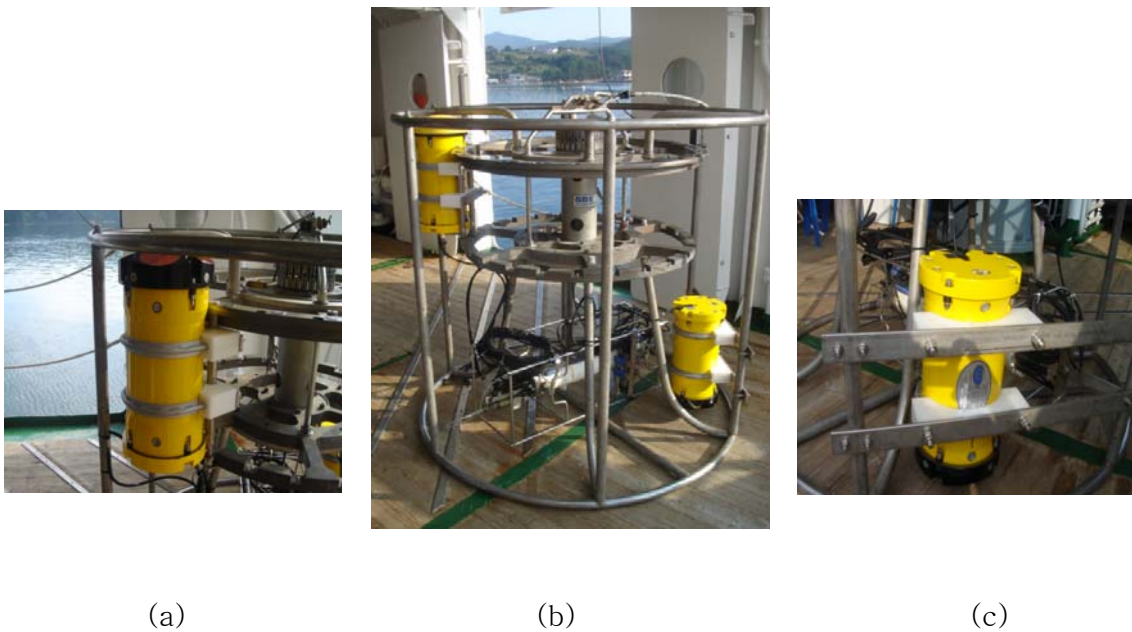


그림 4. (a) upward-looking ADCP (350kHz), (b) CTD (lower center) and 2 ADCP's (up and down) in a frame, (c) downward-looking ADCP (350kHz). (Water samplers are all detached from the frame.)

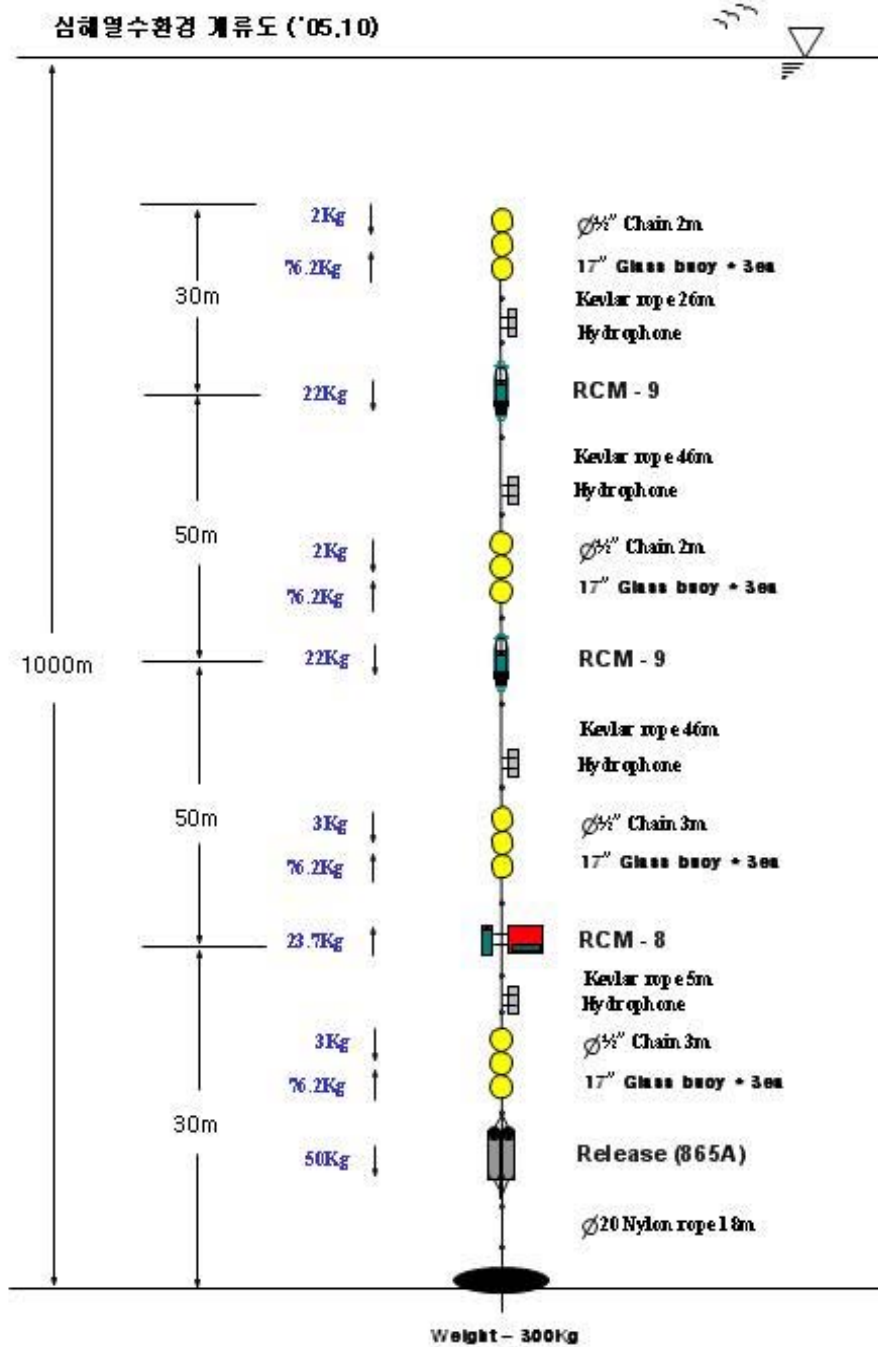


그림 5. Schematic diagram of the mooring line for measuring bottom currents and noise at the St. W05 (2°56.147'S, 147°14.963'E).

## (2) 연구내용

### ○ 장목~마당 이동간 해수특성

#### 1) 수직분포특성

장목~마당 이동 중에 관측된 CTD 정점은 북적도 해류 (NEC; North Equatorial Current) 를 중단하는 4개 정점 (D01~D04)과 북적도반류 (NECC; North Equatorial Counter Current) 및 남적도해류 (SEC; South Equatorial Current) 단면을 통과하는 6개 정점으로 나뉜다 (그림 3 참조).

북적도 해류역에서 해수표면수온 (SST)은  $29^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{C}$ , 표면염분 (SSS)은  $34.1\sim 34.4$ , 용존산소량은  $2.5\sim 3.0\text{ ml/l}$ , 해수의 투명도 (또는 탁도)는 약 93%이며, 표면혼합층의 두께는 50m 이내로 얇다. 이 아래로 수온약층이 약 600미터 주변까지 존재하며, 수심 100~200미터에서 염분 최대층 ( $> 35.0$ ), 수온약층 하단의 바로 위에 해당하는 수심 약 500미터 주변에서 염분 최소층 ( $< 34.3$ )이 자리잡고 있다. 북태평양 중간수 (NPIW)의 영향을 받는 염분 최소층과 거의 비슷한 수심 (또는 수온약층의 하단)에서 용존산소량도 최소치 ( $\sim 1\text{ ml/l}$ )를 나타내며 그 이하 수심에서는 다시 약간 증가한다. 투명도는 수직적으로 표층에서와 같이 거의 일정한 값을 유지하나 북적도해류 (NEC)의 영향을 받는 염분 최대층 수심 바로 아래 ( $\sim 250\text{m}$ )에서 약간 증가 ( $\sim 94\%$ )한다. 밀도는 수직적으로 수온과 거의 반대 패턴을 보여 표층에서  $21.0\sim 21.5$ , 수심 800m 이하에서 약  $27.5$  정도를 보인다 (그림 6).

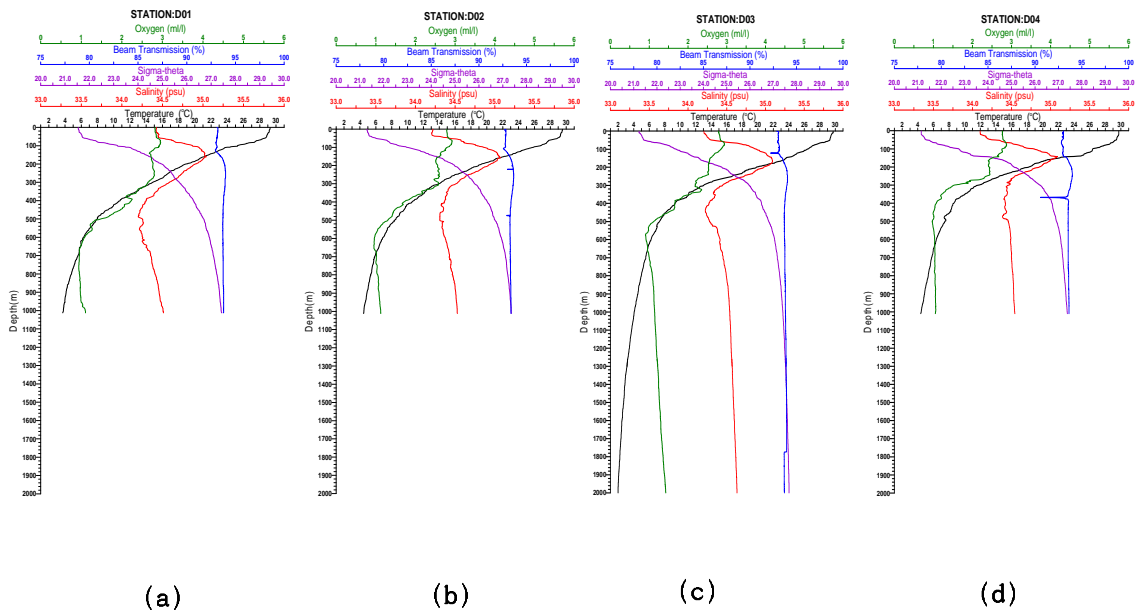


그림 6. Vertical profiles of temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinity (psu), density ( $\sigma_t$ ), beam transmission (%), and dissolved oxygen (ml/l) at the St. (a) D01, (b) D02, (c) D03, and at (d) D04 across the zone of North Equatorial Currents.



북적도반류와 남적도해류에 가까운 6개 정점에서는 북적도 해류역에서의 단조로운 패턴보다는 약간 복잡한 양상을 보인다. 북적도 반류역인 D05~D07 정점에서는 염분 최대층은 수심 200m 정도에서 형성되어 있으나 염분 최소층은 남쪽으로 갈수록 점차 줄어서 D08 정점에서부터는 염분최소층이 사라지며, D05~D07 정점에서는 수온약층도 수심 250~300m에서 9°~10°C의 값에서부터 꺾여 수직적으로 완만하게 변한다. 용존산소량은 전체적으로 큰 차이는 없으나 수온약층 이하 수심에서 1.0~2.0 ml/l의 범위에서 불규칙하게 나타난다. 이러한 불규칙성은 투명도에 나타나는데 약층 부근에서와 1000m 내외의 깊은 수심에서도 2~5% 정도 감소하는 층이 보이기도 한다. 수온-염분 분포에서 보면, D05 정점을 제외하고는 북적도 해류역 (D01~D04 정점)에 비해서 염분 최대층의 염분값이 0.1~0.5 더 정도 높아져 있으며 염분 범위도 더 넓게 나타난다. 이 해역은 남적도해류 (SEC)가 서쪽으로 통과하며 남태평양 고염수 (SPSW)의 영향을 크게 받는 해역임을 알 수 있다 (Pickard & Emery, 1982). 더 깊은 수심에서는 수심 500m 부근에서 보이던 염분 최소층이 여기서는 매우 미약하게 나타나거나 사라진다. 수온과 비슷하게 단조로운 수직구조를 보이는 밀도분포는 수온약층에 해당하는 50~300m 깊이에서 밀도약층을 형성하고 있으며, 600m 이하 수심에서 수온은 5°~7°C, 밀도( $\sigma_t$ ) = 27.0~27.3, 용존산소량은 1.0~1.6 ml/l 정도의 범위를 보인다 (그림 7, 그림 8).

## 2) 상층유속 단면분포

장목에서 파푸아 뉴기니 마당 사이의 이동 항적에서 온누리호에 장착된 음향 도플러 유속계 (ADCP, 300kHz)를 이용하여 관측된 흐름을 해수표면에서부터 수심 250m까지의 단면과 3개층 (17m, 105m, 201m)에서의 유속벡터로 표시하였다 (그림 9). 가장 특징적인 양상은 전체적으로 해수표면 가까이에서보다 수심 약 100m 이하에서 유속이 더 크다는 점이며, 특히 적도 부근해역에서 수심 150m~250m에 중심을 둔 적도잠류 (EUC; Equatorial Under Current)와 그 위에서 반대방향 (서향)으로 흐르는 남적도해류 (SEC), 다시 그 위에 동향류인 남적도반류 (SECC)가 보인다. 또한, 5°N~15°N 사이에서 북적도해류 (NEC)가 흐르며, 그 중간 (~12°N)에 반대방향으로 흐르는 북적도반류 (NECC)가 존재하는 양상을 보인다.

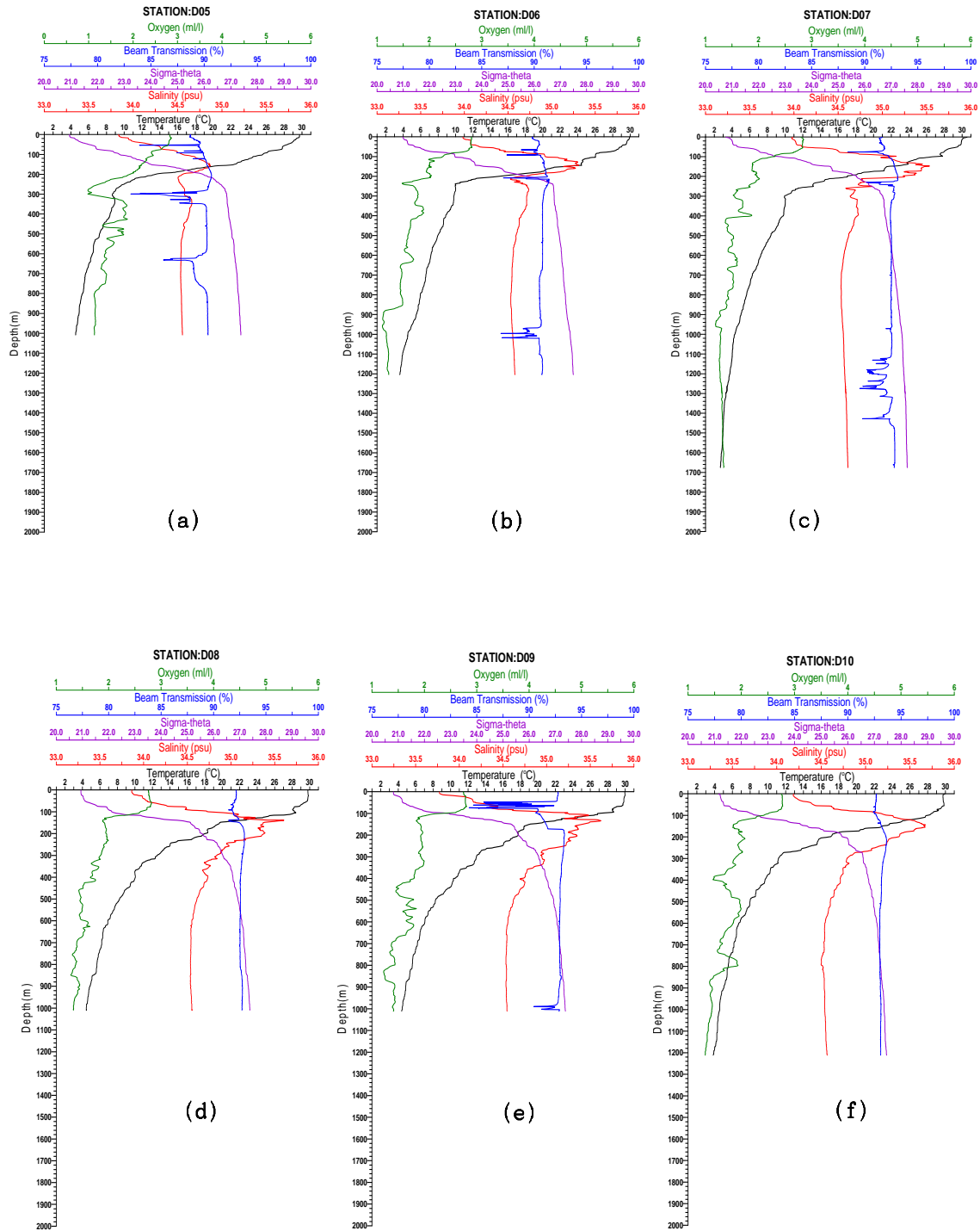


그림 7. Vertical profiles of temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinity (psu), density ( $\sigma_t$ ), beam transmission (%), and dissolved oxygen (ml/l) at the St. (a) D05, (b) D06, (c) D07, (d) D08, (e) D09, and at (f) D10 across the zone of South Equatorial Currents.

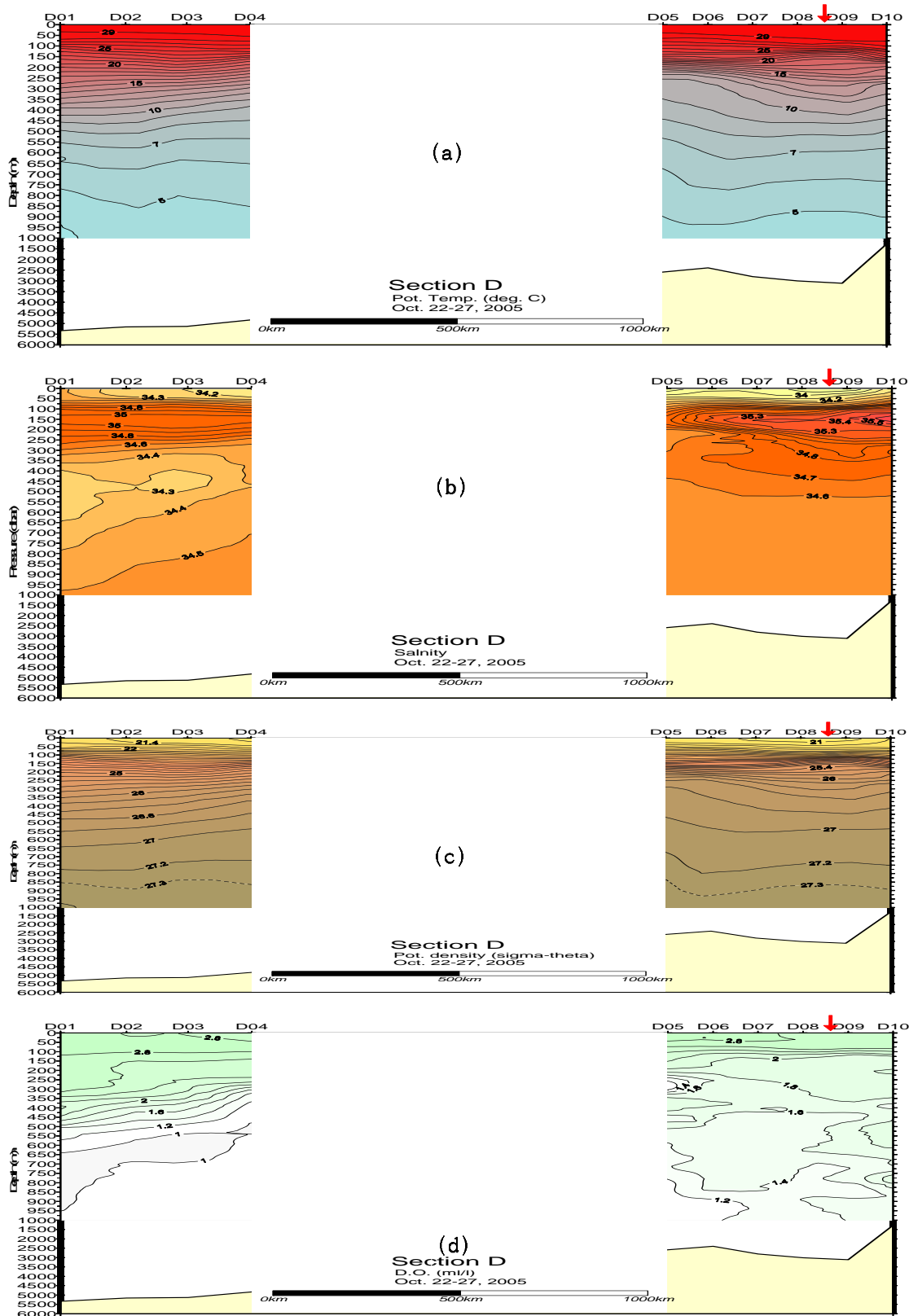


그림 8. Cross-sectional distributions of (a) temperature ( $\theta_t$ ), (b) salinity, (c) density ( $\sigma_t$ ), and of (d) dissolved oxygen (ml/l) in the upper 1,000 meters along the transit path between Jangmok, Korea and Madang, PNG. (The red arrow between the stations D08 and D09 represents the equator.)

그러나, 쿠로시오 중심축이 통과하는 일본 큐슈 남부해역에서 동향류의 유속이 가장 크게 나타나야 함에도 불구하고 오히려 작게 나타나는 것은 이 해역을 이동한 시점이 태풍이 통과한지 약 이틀 후였기 때문에 여전히 높은 파도의 영향으로 오염된 자료가 여전히 제거되지 않았을 가능성을 내포한다 (그림 10).

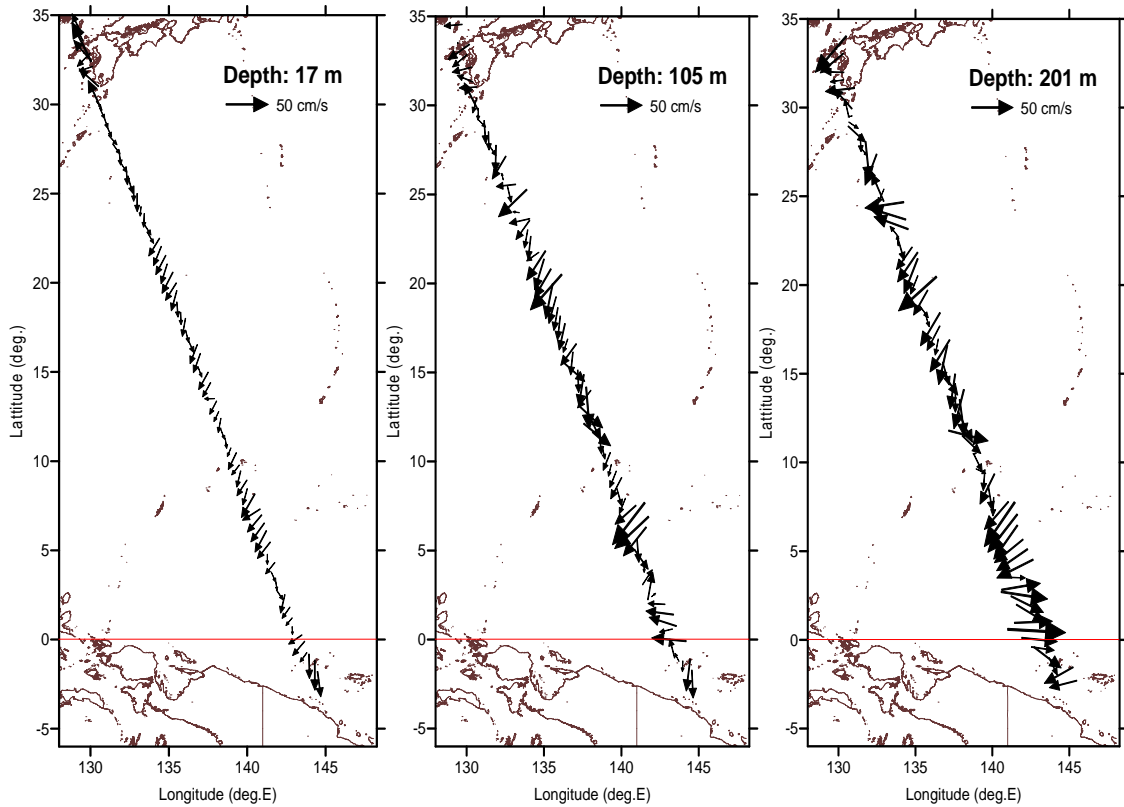


그림 9. Current vectors at the 3 different depths (17m, 105m, and 201m) along the transit path between Jangmok and Madang, Papua New Guinea, measured by ship-mounted ADCP.

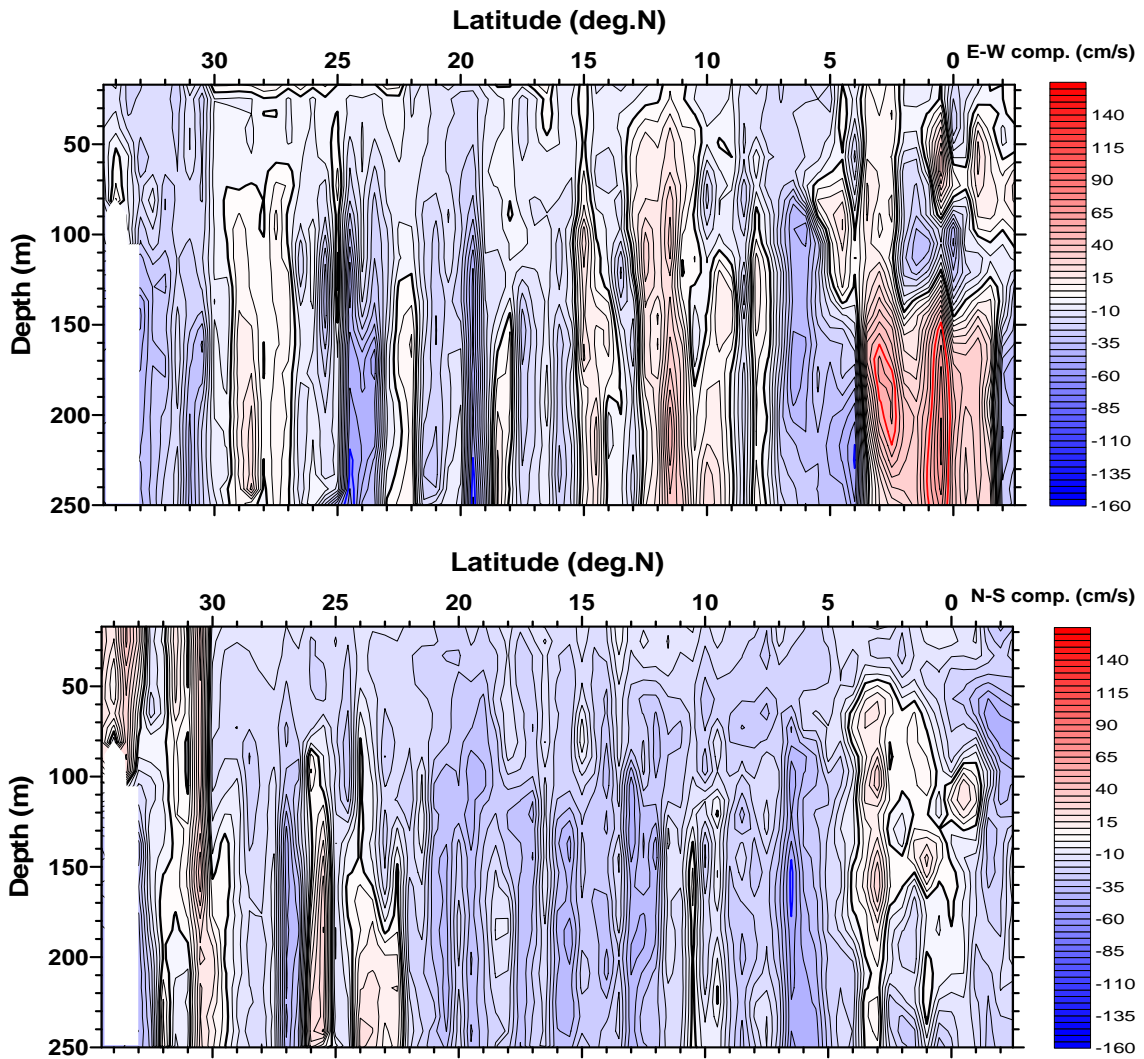


그림 10. Cross-sectional flow vectors of (a) E-W component, and of (b) N-S component along the transit path, measured by ship-mounted ADCP.

○ 비스마크해 중부해역 관측결과

(1) 수직분포특성

비스마크해 중부해역에서는 지자기 이상 (geomagnetic anomaly)이나 기존의 해저지형 자료를 근거로 열수분출구 (hydrothermal vents)가 존재할 가능성이 있는 해저화산 주변을 관측하는 데에 초점을 맞추었기 때문에 CTD 정점 사이의 간격이 해저지형에 따라 매우 불규칙하게 관측되었다. 지역적으로는 크게 2개 구역으로 구분하였고, 1구역을 4개 그룹으로, 2구역을 2개 그룹 다시 나누었다. 1구역의 제1그룹 (1-1그룹; W01~04) 은 이미 알려져 있는 해저화산 (Mata Na Kul) 분화

구 주변 4개 정점이며, 이웃한 지역 (Mata Na Taru)에서 제2그룹 4개 정점 (1-2 그룹; W06~09), 그리고 인근 2개 지역 (Nat Na Vavina & Vat Na Ingiet)에서 각각 제3그룹 6개 정점 (1-3그룹; W10~15)과 제4그룹 5개 정점 (1-4그룹; W16~20)에서 CTD관측이 실시되었다 . 위 4개 그룹이 속한 1구역은 열수구 발견 가능성이 높은 기존의 해저지형을 근거로 관측된 정점들을 포함하며, 전혀 해저지형 영상도가 작성된 적이 없는 2구역에서는 최초로 발견된 2개의 해저화산 주변을 중심으로 제1화산 (Big Coma로 명명)에 속한 12개 정점 (2-1그룹; W21~32)과 제2화산 (Little Coma로 명명)에 속한 4개 정점 (2-2그룹; W33~36)을 포함한다.

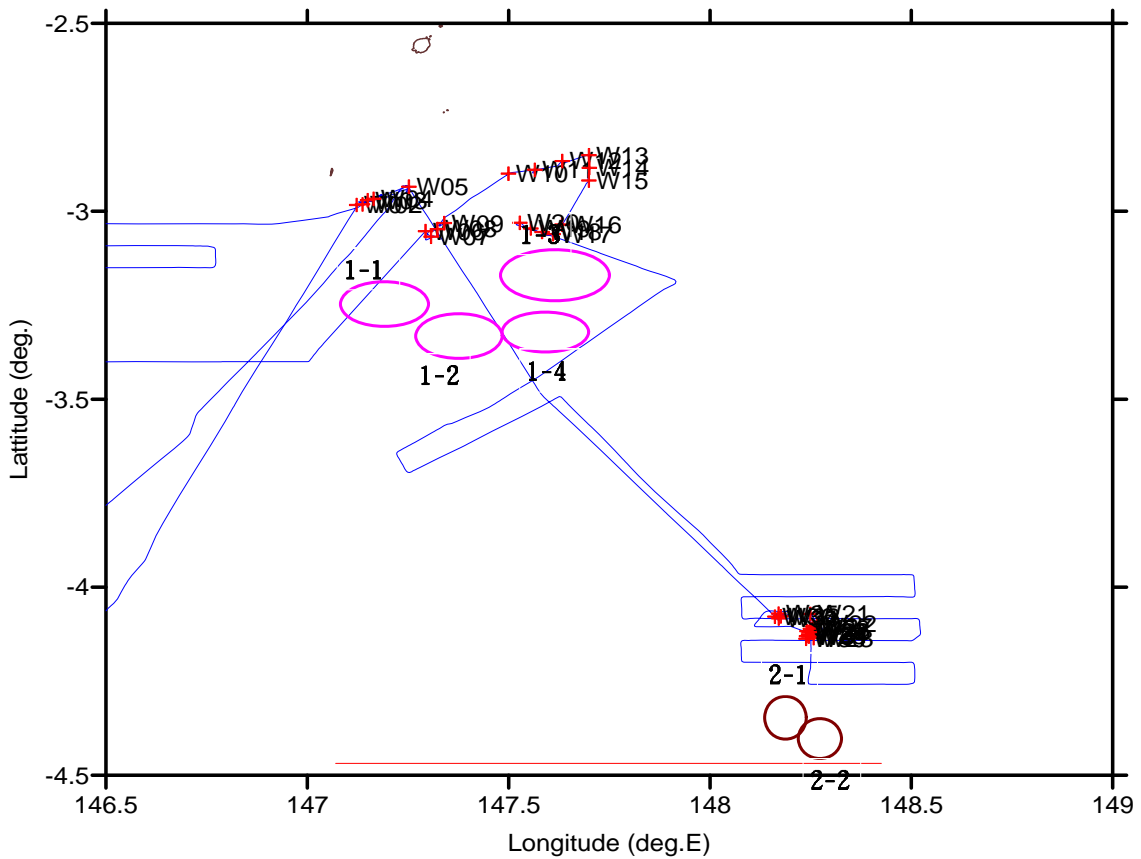


그림 11. CTD stations are arbitrarily classified by two groups; the first group (previously-mapped NW region) is divided into 4 sub-groups and the second group (newly-mapped SE region) into 2 sub-groups, based upon the bottom topography.

해저화산 (Mata Na Kul) 주변인 1-1그룹 정점에서는 칼데라 (caldera) 내부 (W02, W03)와 외부 (W01, W04)의 저층에서 탁도의 수직분포가 극명하게 나뉜다. 칼데라 외부의 거의 일정하게 단조로운 탁도 (또는 투명도)에 비해서 칼데라 내부의 저층 (수심 약 700m 이하~해저면)에서는 탁도가 급격히 증가한다. 이것은 칼데라 내부의 지화학적 성분이나 열수작용에 의한 퇴적물의 재부유 (resuspension) 가 능성을 암시한다. 수심 100m 부근에서 염분최대층 (35.7~35.8)이 나타난다 (그림 12).

이웃한 지형 (Mata Na Taru)의 1-2그룹 정점에서는 기본적으로 1-1그룹의 칼 데라 외부 정점 (W01, W04)와 비슷한 양상을 보인다. 즉, 표면에서 약 50m 내외 의 표면혼합층 (~30oC)과 그 이하 약 400m 수심까지의 수온/밀도약층, 100~150m 수심의 염분최대층, 거의 일정 (2.5~3.0 ml/l)한 표면혼합층의 용존산 소량, 그리고 약 93% 정도의 거의 일정한 투명도를 나타낸다 (그림 13). 1-3그룹 과 1-4그룹 정점에서 이 패턴이 이어지며, 염분최대층이 200m 주변으로 약간 더 깊어진다. 즉, 이웃한 해저지형 사이에서 해수의 물리적 특성은 칼데라 (Mata Na Kul) 내부를 제외하면 거의 같은 양상이다 (그림 14, 그림 15).

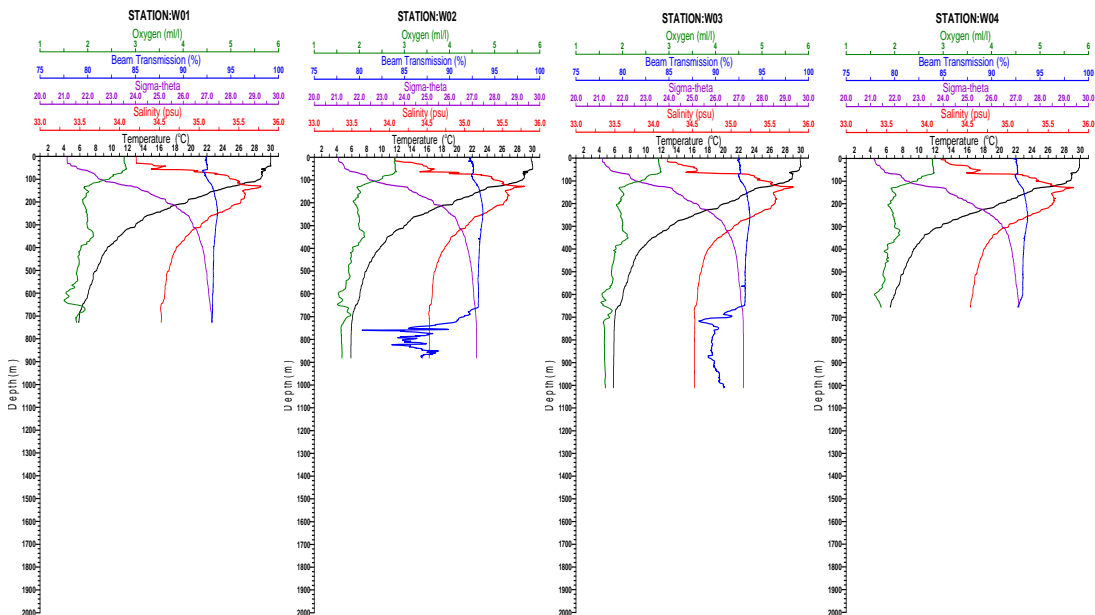


그림 12. Vertical profiles of temperature (°C), salinity (psu), density ( $\sigma_t$ ), transmission (%), and dissolved oxygen (ml/l) at the St. W01~W04 of the sub-group 1-1.

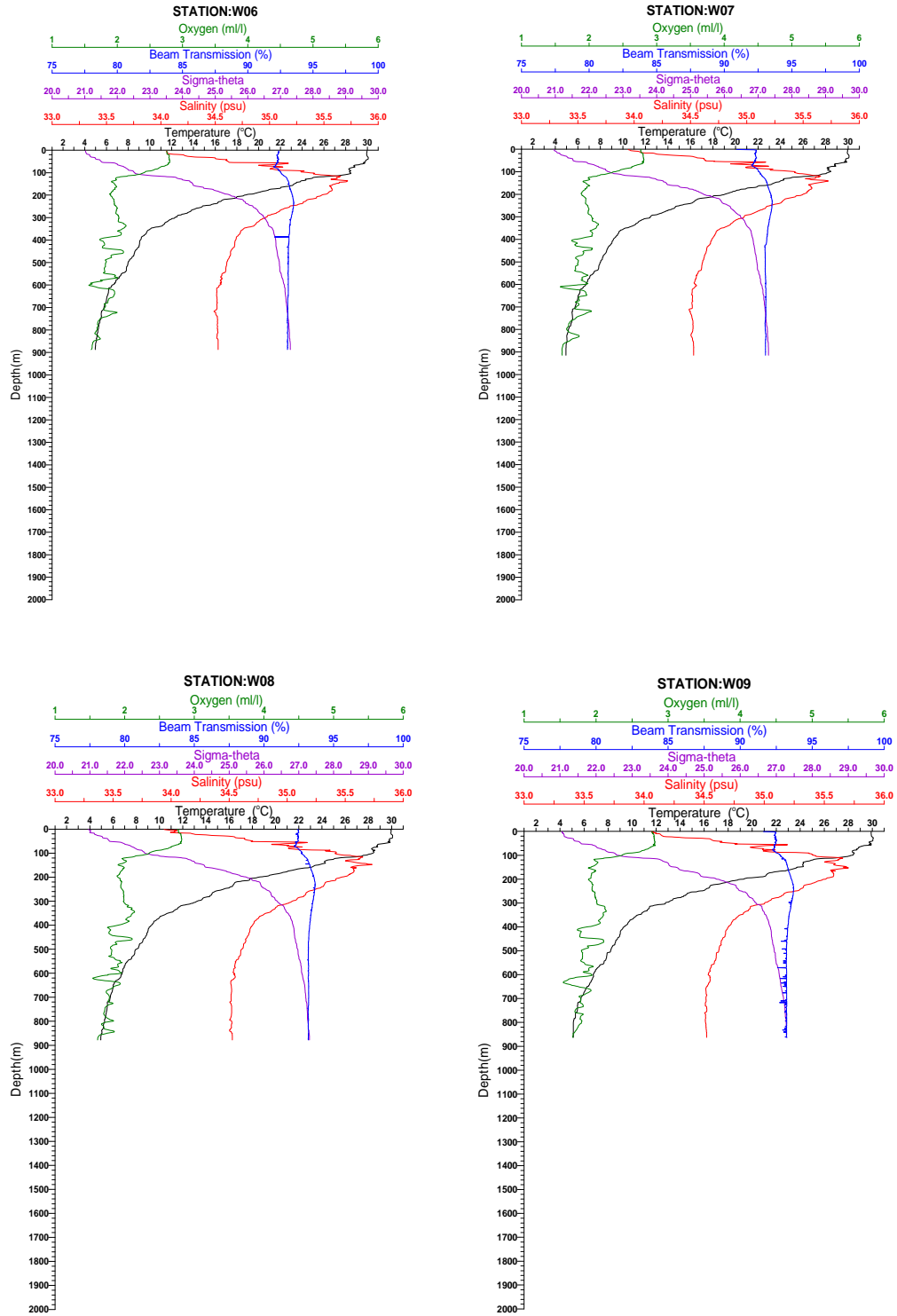


그림 13. Vertical profiles of temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinity (psu), density ( $\sigma_t$ ), transmission (%), and dissolved oxygen (ml/l) at the St. W06~W09 of the sub-group 1-2.



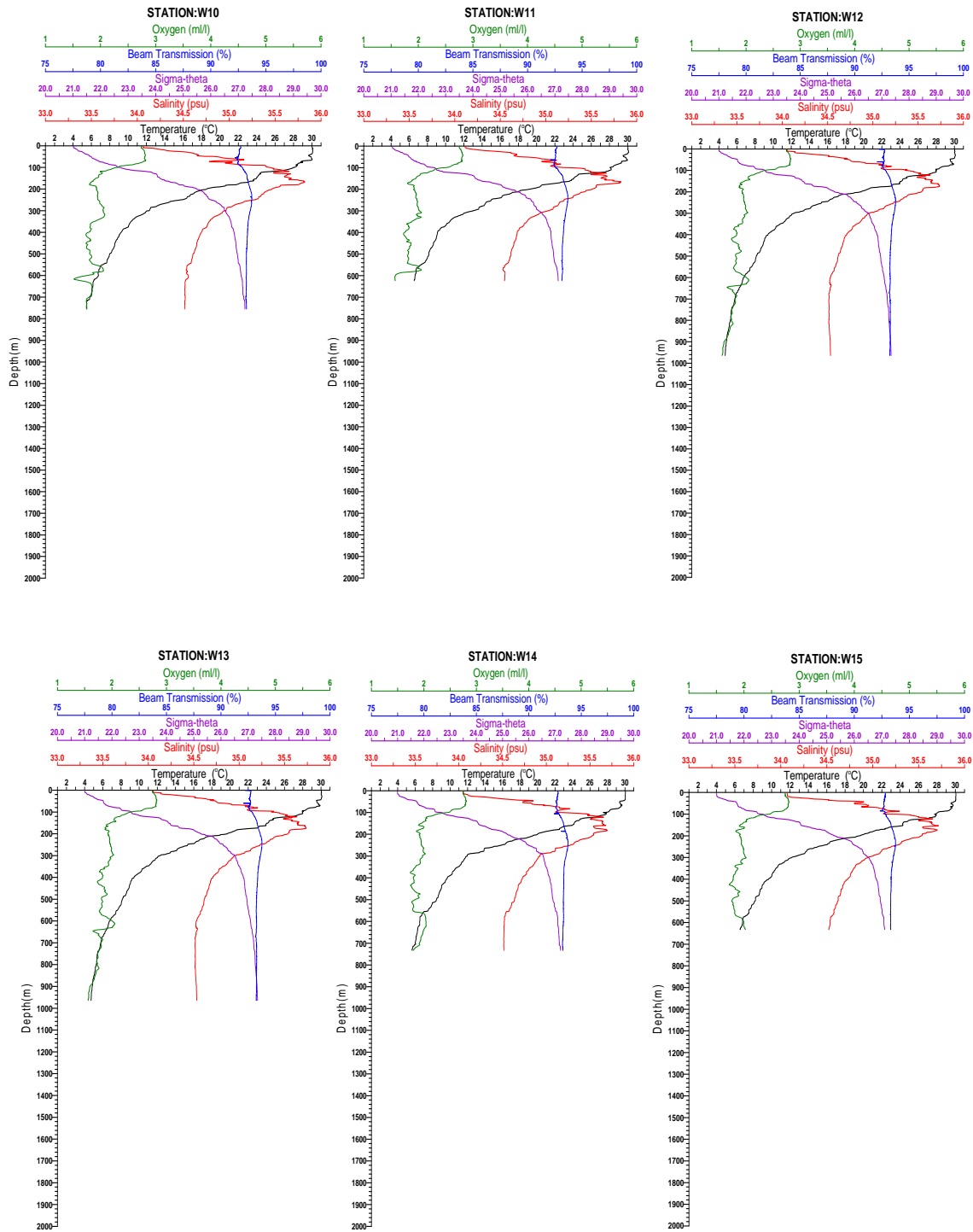


그림 14. Vertical profiles of temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinity (psu), density ( $\sigma_t$ ), transmission (%), and dissolved oxygen (ml/l) at the St. W10~W15 of the sub-group 1-3.

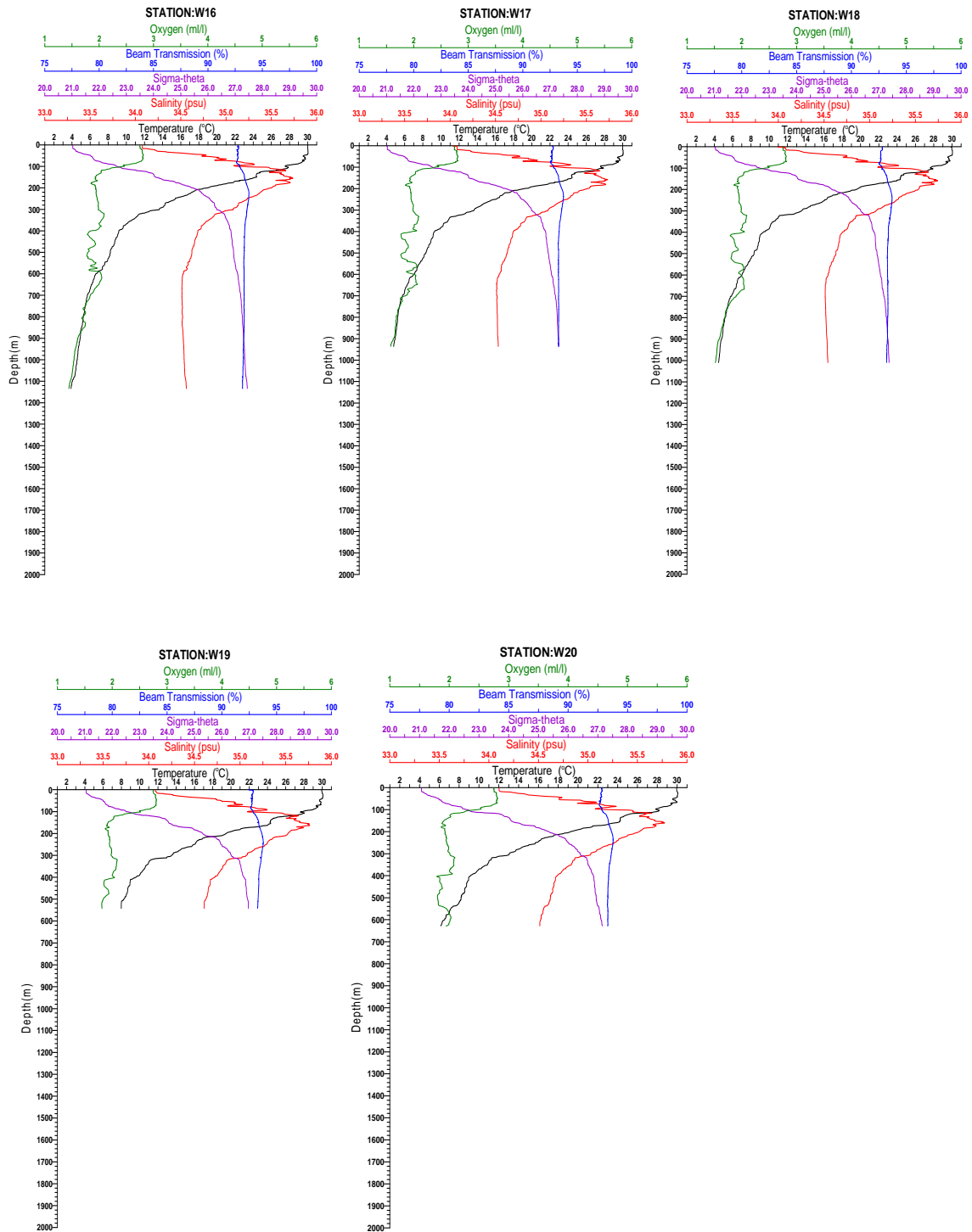
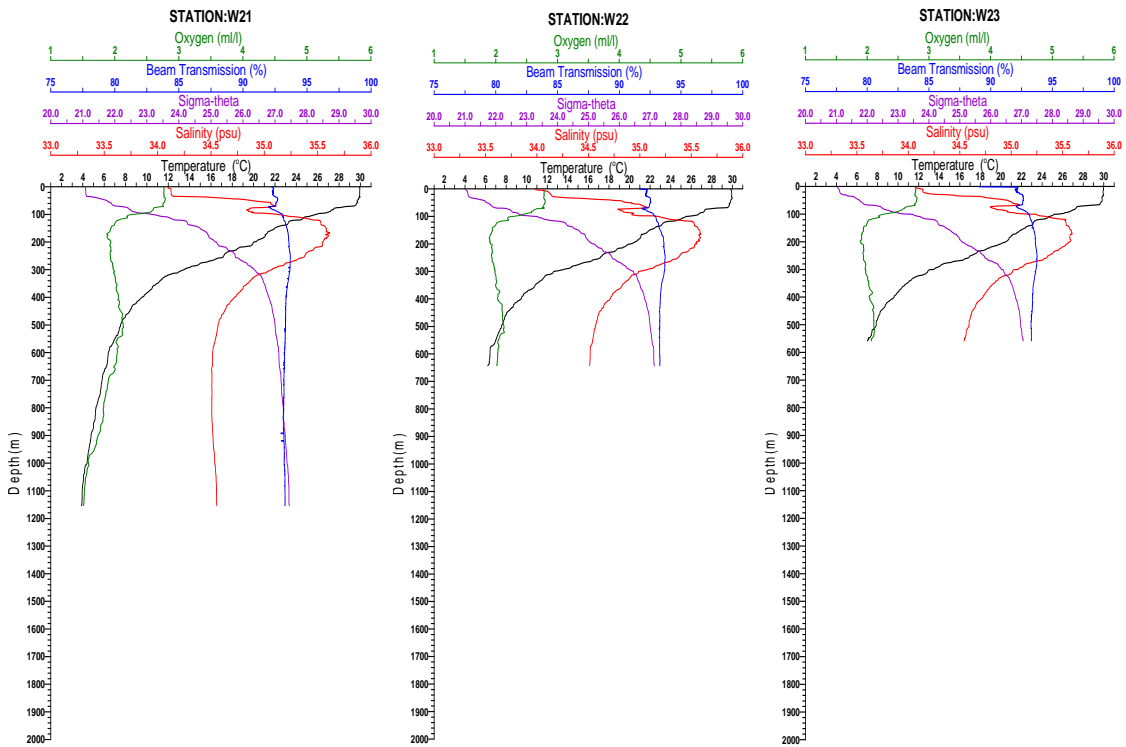
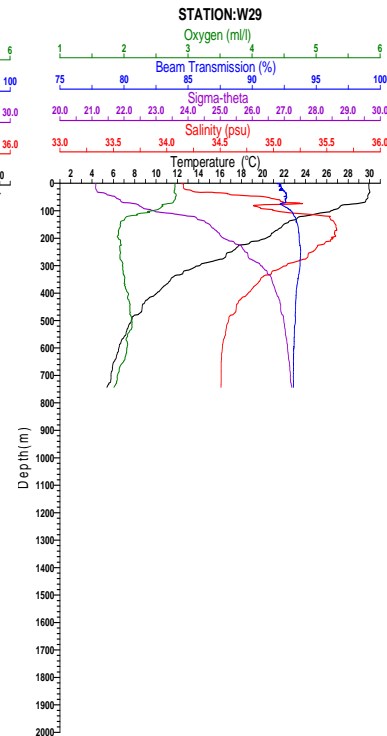
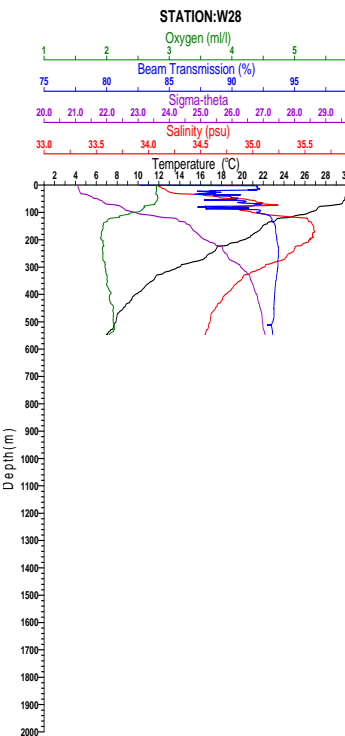
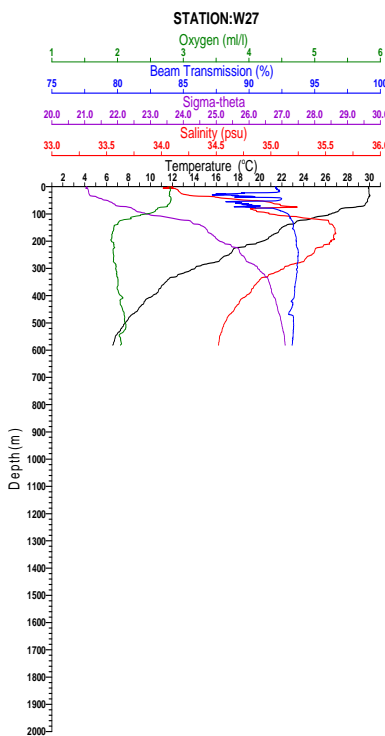
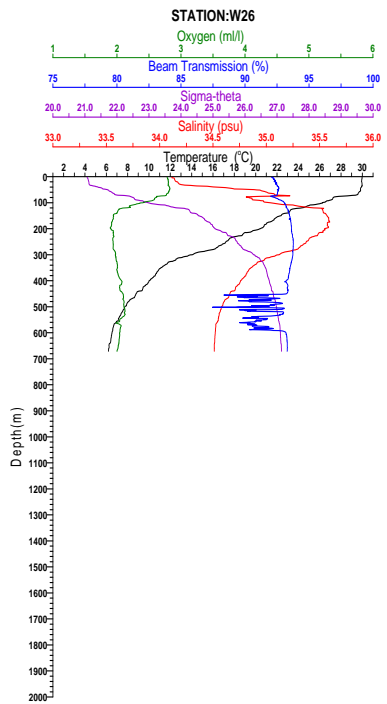
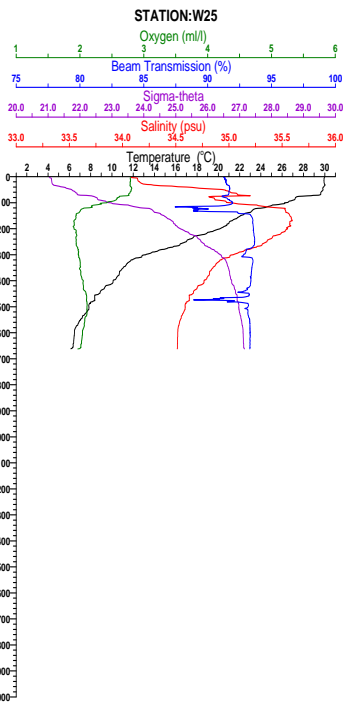
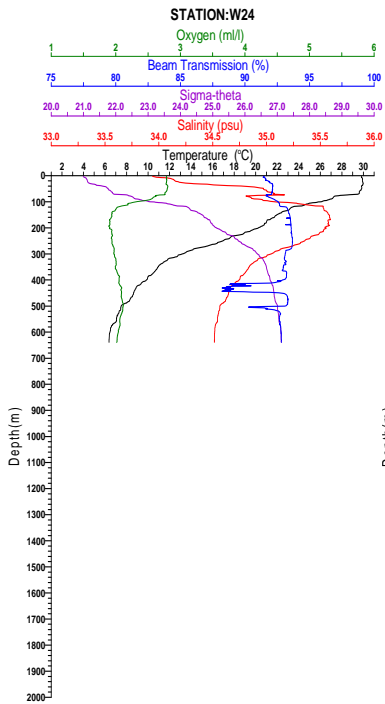


그림 15. Vertical profiles of temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinity (psu), density ( $\sigma_t$ ), transmission (%), and dissolved oxygen (ml/l) at the St. W16~W20 of the sub-group 1-4.

1구역의 남동쪽으로 100km 이상 떨어진 2구역에서는 염분최대층의 두께가 두꺼워지며 염분값 (~35.5)도 약간 낮아진다. 해저화산 (Big Coma) 정상 주변 정점인 W24~26에서는 500m 부근 수심에서 투명도가 급격히 감소하는 층이 보이며, 정점 W25의 경우 100m 수심 부근에서도 이러한 피크가 감지된다 (그림 16). 상층의 이러한 피크는 정점 W27과 W28에서도 나타나는데, 이러한 피크의 원인은 정확한 원인을 알 수 없으며 좀더 정밀한 분석이 요구된다. 정점 W24~26의 저층에 나타난 피크는 열수 플룸의 확산과 관계가 있는 탁도 증가 때문인 것으로 보여진다. 이웃한 해저화산 (Little Coma) 에서도 정점 W34~36에서 중층 (300m~400m) 및 저층 (500m 이하)에 탁도 증가에 의한 피크가 나타나 열수유체 확산과의 상관관계가 의심되었으나, 관측 일정상 퇴적물이나 생물을 채취할 기회를 갖지 못하였다 (그림 17).





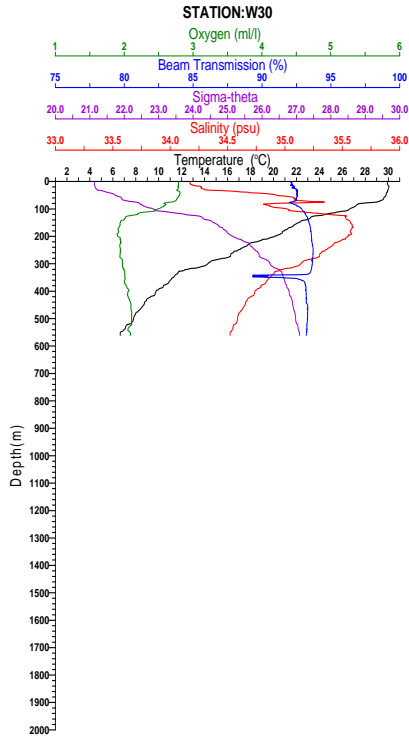
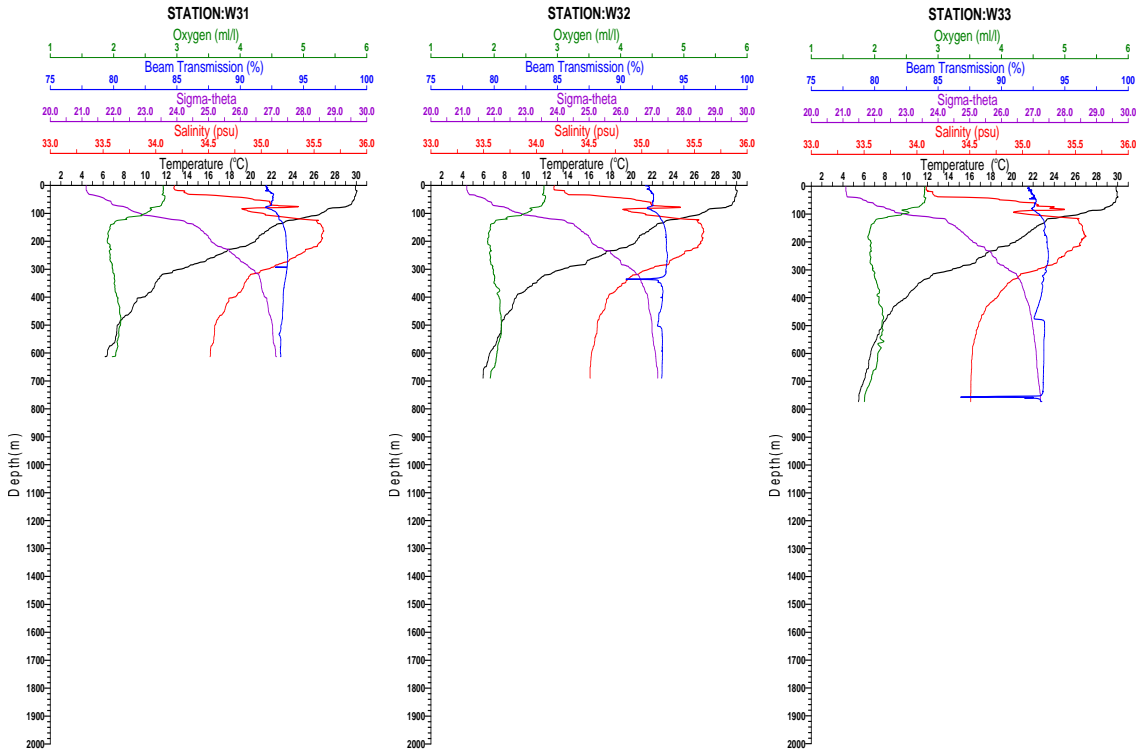


그림16. Vertical profiles of temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinity (psu), density ( $\sigma_t$ ), transmission (%), and dissolved oxygen (ml/l) at the St. W21~W30 of the sub-group 2-1.



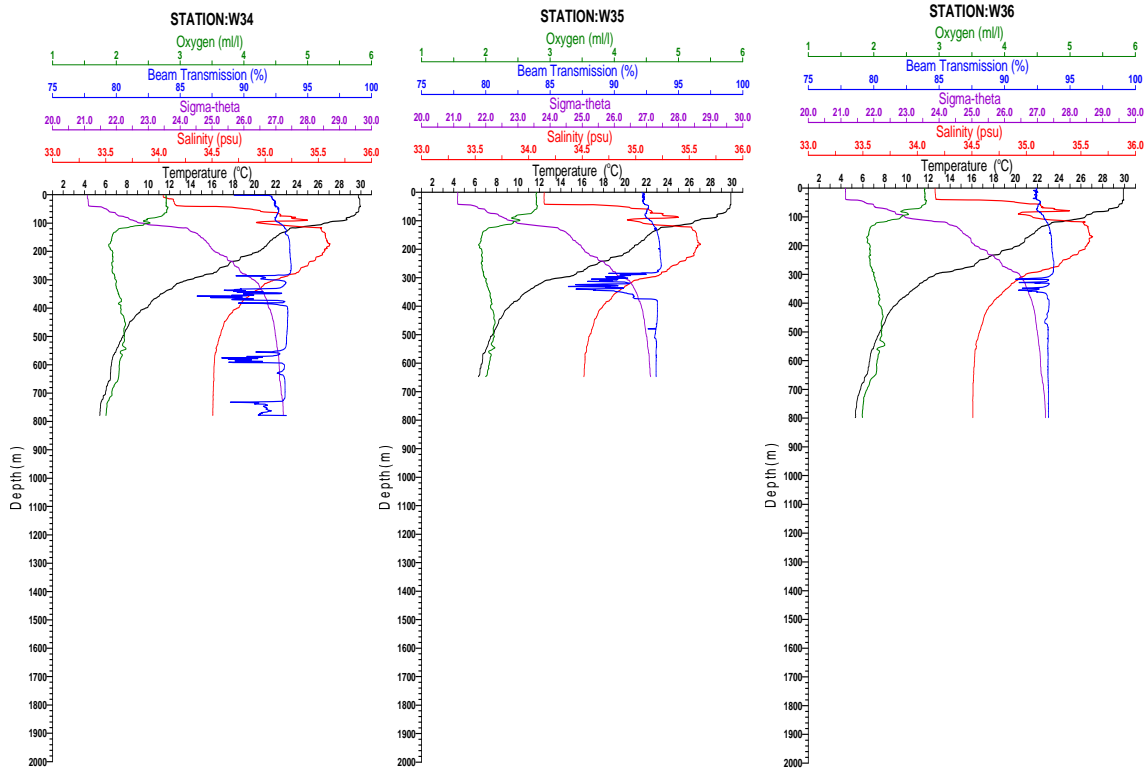


그림 17. Vertical profiles of temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinity (psu), density ( $\sigma_t$ ), transmission (%), and dissolved oxygen (ml/l) at the St. W21~W30 of the sub-group 2-2.

수온-염분 도표 (T-S diagram)에 의한 특성을 보면, 1구역 (W01~W20)에서는 표면에서는 수온이  $30^{\circ}\text{C}$ , 염분이 34.0으로 2구역과 같으나, 표면 이하에서 염분 최대층으로 깊어짐에 따라 성질이 서로 조금씩 다른 물이 섞이며 전이되는 과정이 2구역에서보다 좀더 복잡하게 나타나며, 염분 최대층의 최대 염분값은 35.8로서 2구역의 최대값보다 0.3 정도 높게 나타난다 (그림 18). 2구역에서는 약 100m 수심에서 염분 최대값 (35.2~35.4)이 보이며, 바로 10~20m 아래 수심에서 염분이 0.3~0.6 만큼 줄었다가 수심 120m~200m에서 다시 염분이 35.5로 증가하는 모양을 보여 상층에서 수심에 따라 영향을 주는 수괴가 이 3가지의 염분 특성을 가진 물로 특징 지워진다.

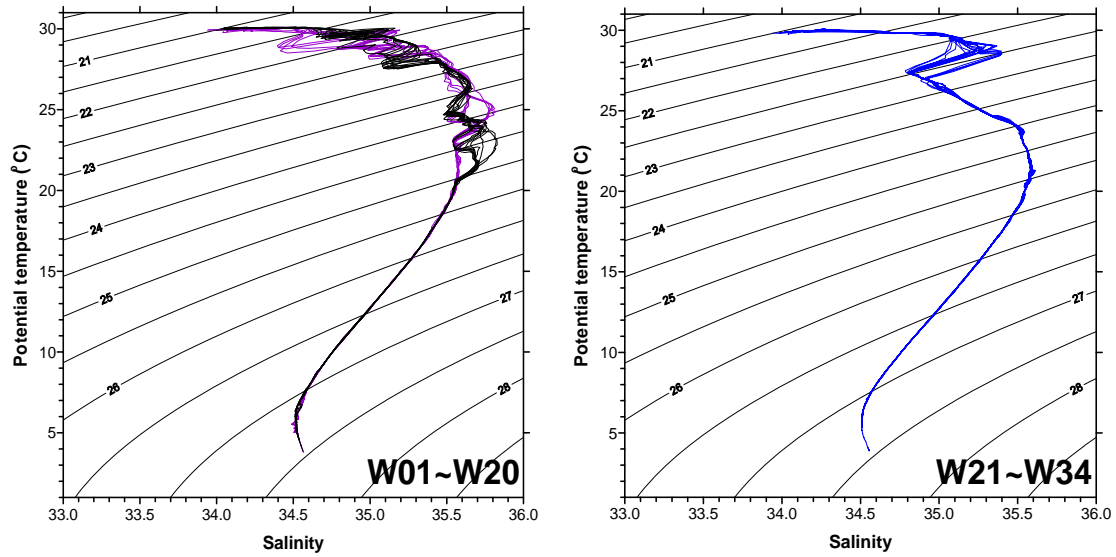


그림 18. Temperature-salinity diagrams at the St. (a) W01~W20 (group 1), and at the St. (b) W21~W36 (group 2).

## (2) 저층유속특성

비스마크해 중부 (Western Spreading Ridge) 해역 칼데라 해저화산 (Mata Na Kul) 부근 CTD 정점 W05에서 5일간 (2006년 10월 29일~11월 2일) 계류한 3대의 유속계 (RCM)에서 얻은 자료로부터 저층해류 특성을 분석하였다.

계류 수심 (1250m)이 원래 설계된 수심보다 다소 깊지만, 해저면 부근의 저층류를 파악하기 위한 기초자료로서 3대의 유속계를 해저면으로부터 각각 30m, 80m, 130m 높이에 계류되어 1220m, 1170m, 1120m 수심에서의 유속과 유향을 얻었다.

계류 수심에서의 수온은 약 4°C로서 거의 일정했으며, 유속의 크기는 최하층 (~30m)과 중간층 (~80m)에서 평균  $2.0\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$  (최대  $\sim 7.8\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 최상층 (~130m)에서 평균  $4.0\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$  (최대  $\sim 10.1\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )를 보였다. 유속 에너지 스펙트럼에서는 최상층과 최하층에서는 반일주조 성분에 가까운 11~14시간과 6~9시간 주기성분이 강하게 나타났지만, 중간층에서는 이와 비슷한 성분 외에도 일주조성분에 가까운 22시간 주기성분의 에너지가 가장 쉐 특징을 보였다. 5일간의 연속벡터도 (progressive vector diagram)에서 최상층 (~130m above bottom)과 중간층 (~80m above bottom)에서는 북서향류로 1~1.5km, 최하층 (~30m above bottom)에서는 남서향류로서 약 2.0km 정도 이동함을 알 수 있다.

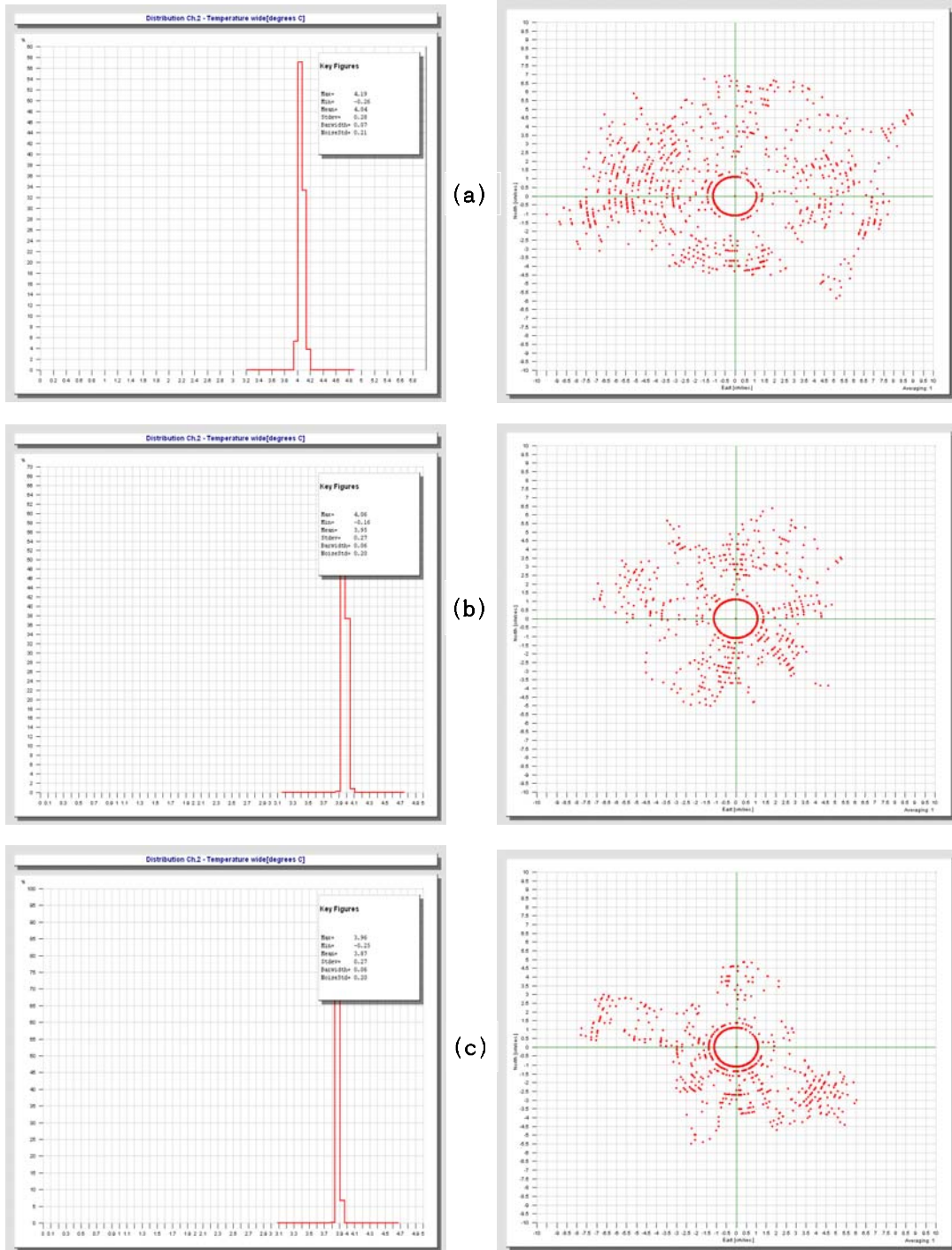


그림 19. Temperature distributions (left) and scatter plots of bottom currents (right) at the sensor depths of (a) 130 mab(=meters above bottom (or 1120m), (b) 80 mab (= 1170m), and of (c) 30 mab (=1220m) (Weak currents less than  $1.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  cannot be resolved with RCM's.)



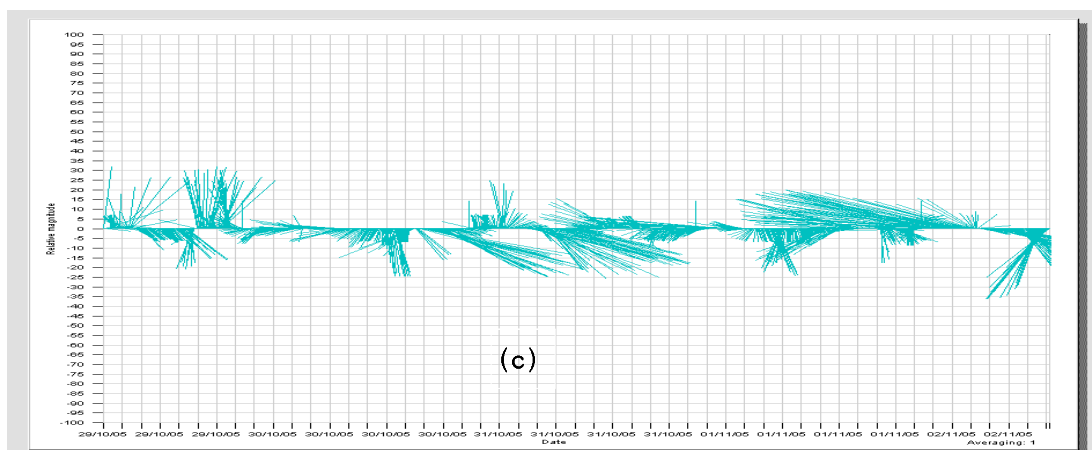
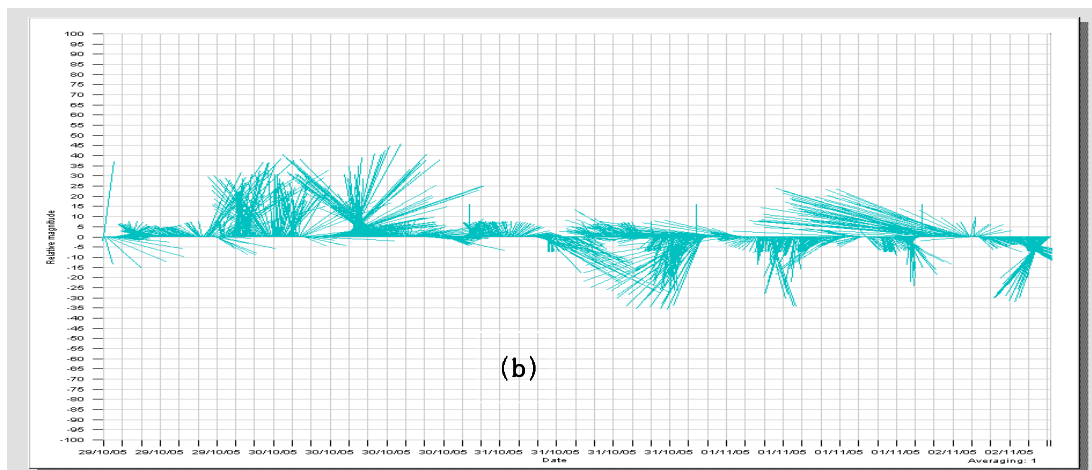
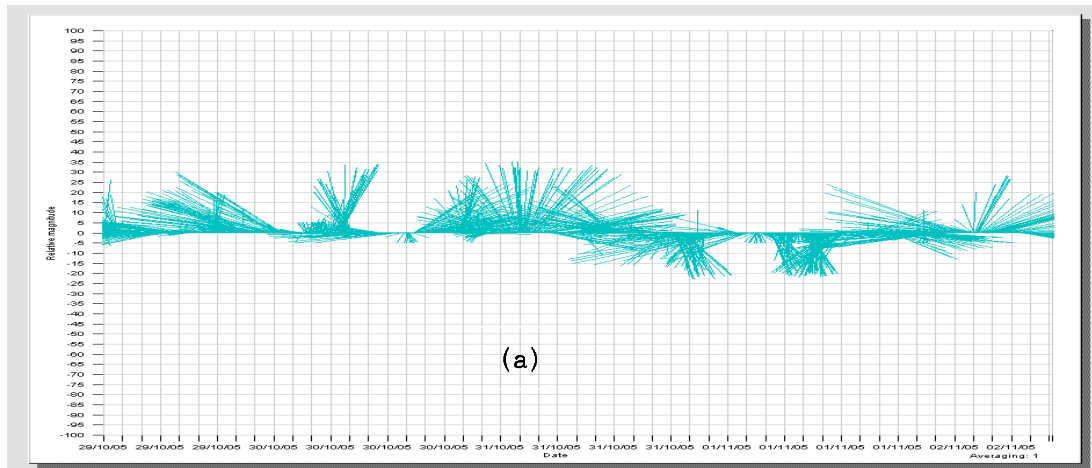


그림 20. Time-series plots of bottom currents at the sensor depths of (a) 130 mab (=1120m), (b) 80 mab (=1170m), and of (c) 30 mab (=1220m) (The magnitudes of currents must be converted, relative to the maximum ones.)

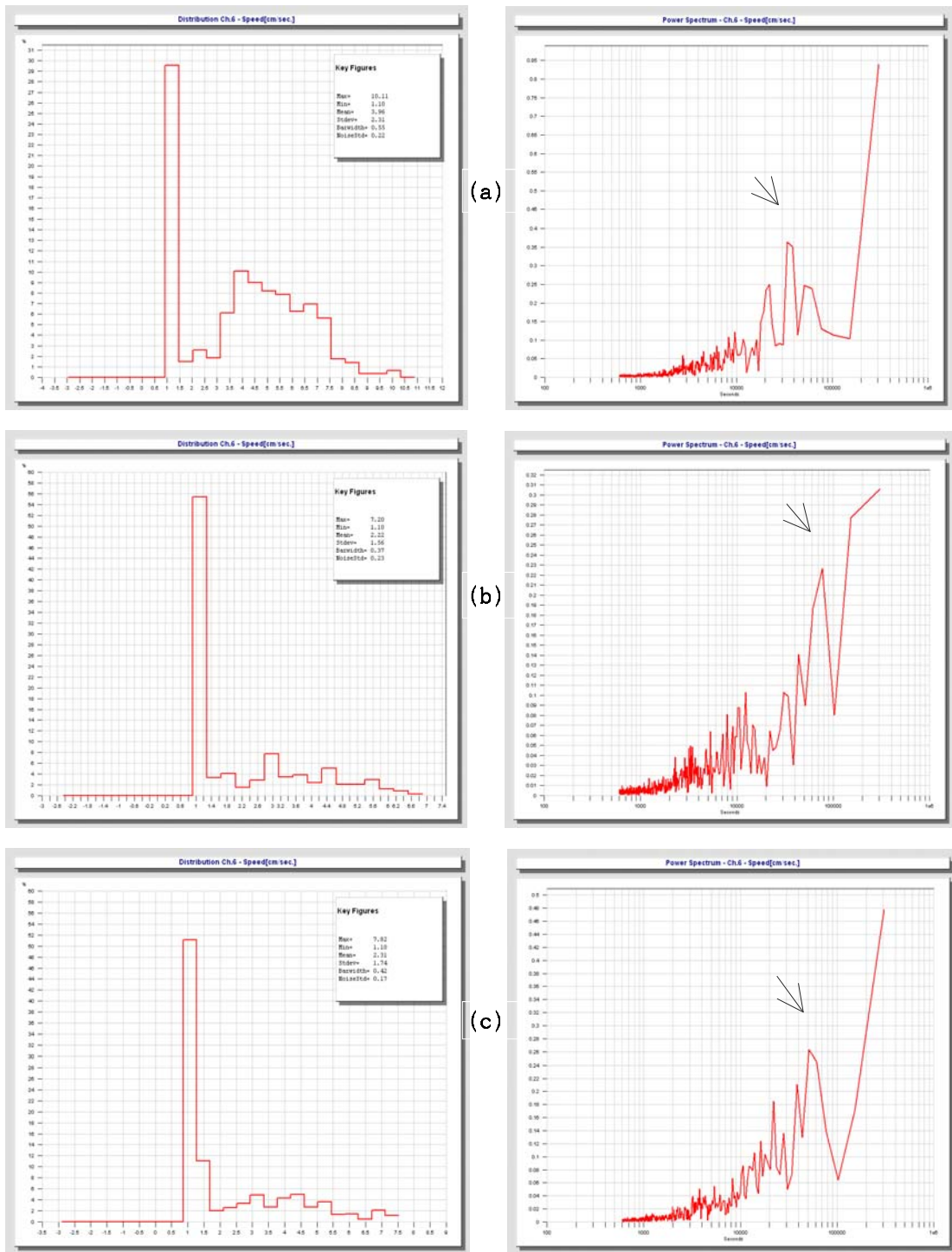
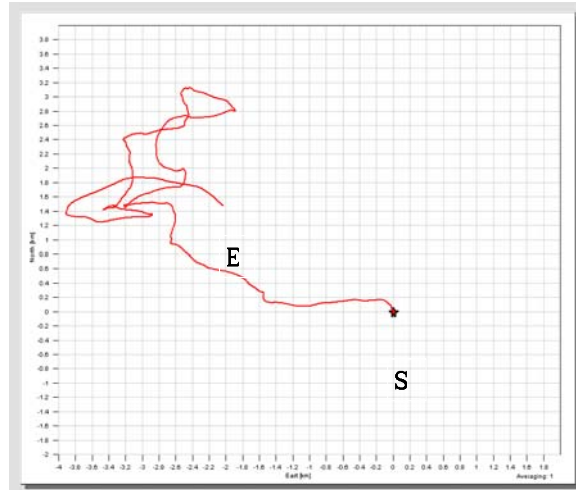
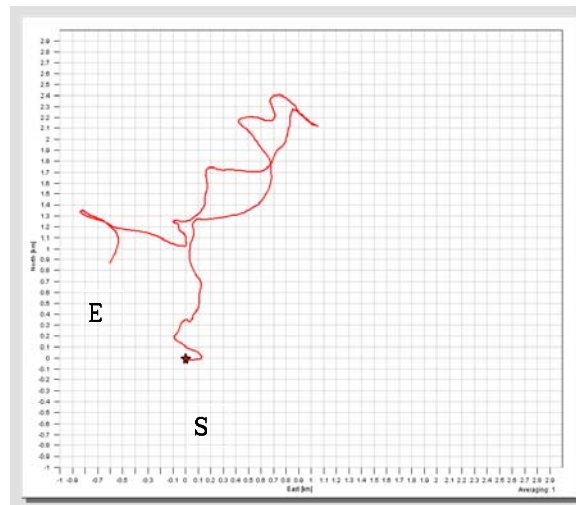


그림 21. Occurrence frequencies of the current magnitude (left) and power spectral density distributions (right) at the depths of (a) 130 mab (=1120m), (b) 80 mab (=1170m), and of (c) 30 mab (=1220m). Weak currents with  $1.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  and less are all allocated within the range of  $0.75 \sim 1.25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , and arrows on the spectrums show the peaks at the periods with maximum energy.

(a)



(b)



(c)

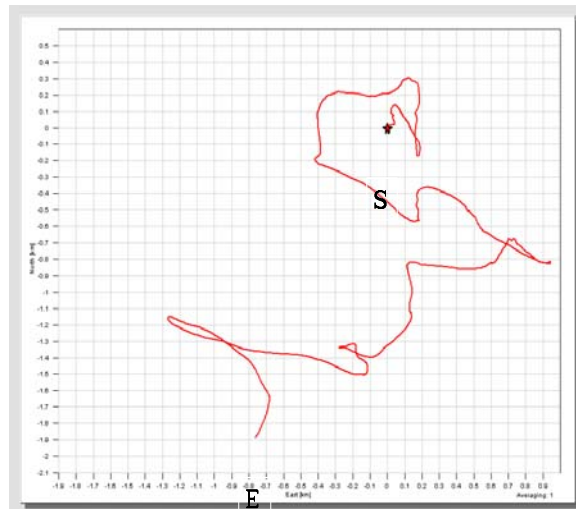


그림 22. Progressive vector diagrams of bottom currents at the sensor depths of (a) 130 mab (=1120m), (b) 80 mab (=1170m), and of (c) 30 mab (=1220m) ('S' and 'E' represent starting and ending points, respectively.)



# 제 3 장

---

## 심해열수 해양화학적 연구

---



# 제 3 장 심해열수 해양화학적 연구

## 1. 해저열수와 화학체계

열수순환은 해수가 해양지각을 관통하여 가열되어 지각의 암반과 반응하여 해저면으로 올라올 때, 일어난다. 해저면 열수시스템은 지역적으로 열수 플룸에서 측정되어질 수 있는 해양의 화학체계에 큰 영향을 가진다. 열수 추적자들 중에 어떤 것들은 (특히, 헬륨) 열수 근원으로부터 수천 km 까지도 감지되며, 이것은 심해의 해양순환을 이해하는데 이용되기도 한다. 열수의 순환은 해수로부터 어떤 화합물들을 (예, Mg, SO<sub>4</sub>) 제거하기도 하고 기타 많은 것들을 (Mn, Fe, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) 첨가하기도 한다, 이것은 해수의 조성을 지배하는 중요 과정이다<sup>1)</sup>.

다음 그림은 NOAA의 "VENTS PROGRAM" 홈페이지에서 인용한 것으로 열수구 체계의 플룸의 형성과정을 보여주고 있다.

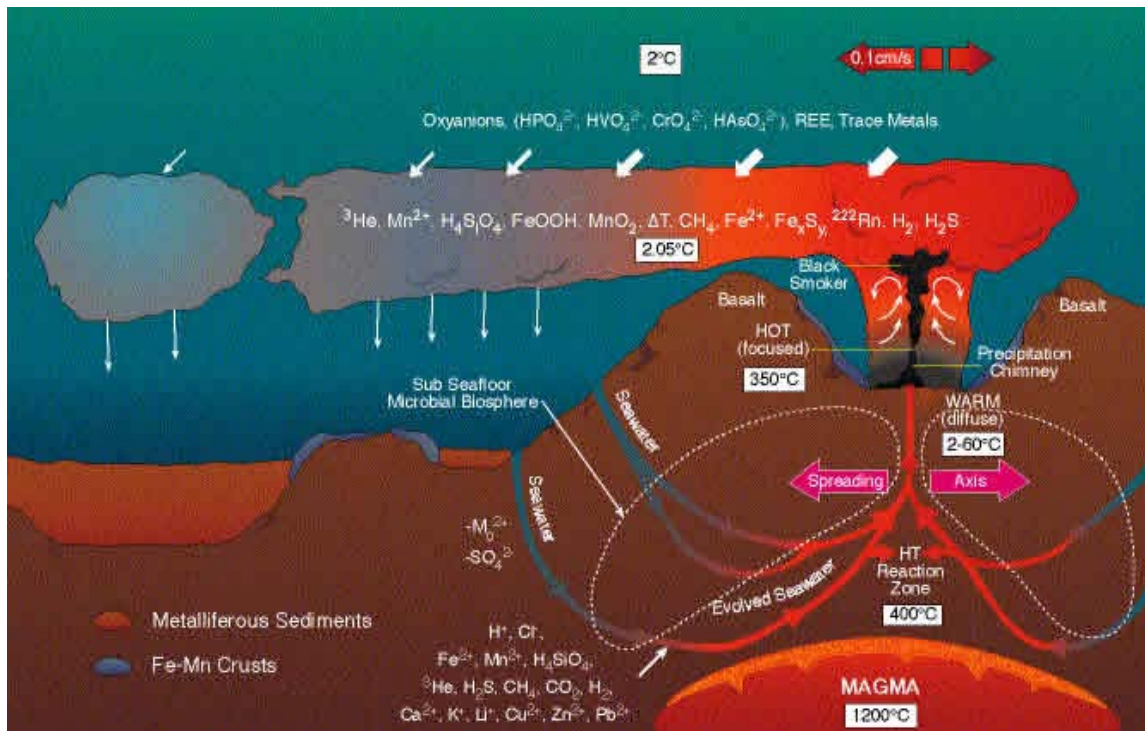


그림 23. Diagram of hydrothermal vent processes.

1) Hydrothermal Vent Geochemistry, <http://www.pmel.noaa.gov/vents/chemocean.html>.

열수유동체는 해수와 빠르게 혼합된다. 주변의 해수는 상승하는 플룸을 희석시키고 플룸내에서 온도와 입자 농도를 분출공으로부터 짧은 거리내에서 감소시킨다. 열수 플룸은 주변 해수보다 밀도가 낮은 한 부력에 의하여 계속하여 해수를 통하여 상승한다. 일단 열수 플룸의 밀도가 주변 해수의 밀도와 같게 되면, 열수 플룸의 상승은 중지되고 수평적으로 확산되기 시작한다. 이 “중성 부력 플룸” 동일한 밀도에서 해류에 의하여 날려감으로써 분포되어진다. 플룸내에서의 열과 입자의 강도에 있어서 가장 큰 변화는 상대적으로 공급원 근처에서 일어난다 (수 km 이내). 상승, 주변 해수와의 혼합 및 공급원 지역으로부터의 이차 이류의 과정을 통하여, 플룸은 변화된다. 분출 유동체와 입자들의 변화는 플룸의 발견과 공급원으로부터의 다양한 시공간적 시료채취에 의하여서만 연구되어질 수 있다.

## VENTS PROGRAM

미국 NOAA의 PMEL (Pacific Marine Environmental Laboratory) 에서 전지구적 해양에서 해저화산과 열수구가 미치는 영향과 그 중요성에 대하여 연구를 수행하고 있는 “VENTS PROGRAM” 에서 화학분야의 연구 주제는 는 플룸화학 (Plume Chemistry); 헬륨 (He); 열수구 유동체 화학 (Vent Fluid Chemistry); 열수구 입자 화학 (Hydrothermal Particle Chemistry) 와 같이 크게 네 분야를 포함하고 있다.

### ○ 플룸화학

열수구에 대한 프로그램이 시작된 이후 매년 수행되고 있으며 연직 관측과 “Tow-yo” 기술을 이용한 CTD 작업, 빛의 감쇠 측정, SUAVE (System Used to Access Vented Emissions) 를 이용한 화학분석용 해수시료채취를 포함한다. 반복된 플룸 관측을 통하여 새로운 열수구를 발견하고, 해저면 배출구의 장기적 변화 연구를 수행한다.

이 연구가 지향하는 목적은 1) 열수 플룸과 열수구 체계의 위치와 분포도를 작성하기 위한 방법 개발; 2) 특히, 화산작용에 반응하는 열수구 체계의 변동성과 진화를 관측; 3) 전지구적 중앙 해령 시스템을 따라 열수, 마그마 및 판구조 사이의 관계 연구 등이다.

특히, SUAVE 는 철, 망간 등, 열수 플룸에 높은 농도를 가지는 화학성분을 현장에서 직접 분석하는 기능과 광, 온도, 염분 등 일련의 물리특성 감지기를 포함하며 이들 자료를 실시간으로 선상에서 확인 가능하게 하는 통합시스템으로 해저 열수구의 탐사에서 중요한 역할을 담당해 오고 있다. 1991년에서 1997년까지 7년동안 총 226 회 사용된 적이 있으며, 이 중에서 CTD 캐스팅에 80 회, CTD-



Tow-yo 관측에 96 회, ROV 에 부착하여 23 회, 잠수정에 22 회, 카메라에 4 회 등 사용되었다(Massoth et al., 1997)<sup>2)</sup>.

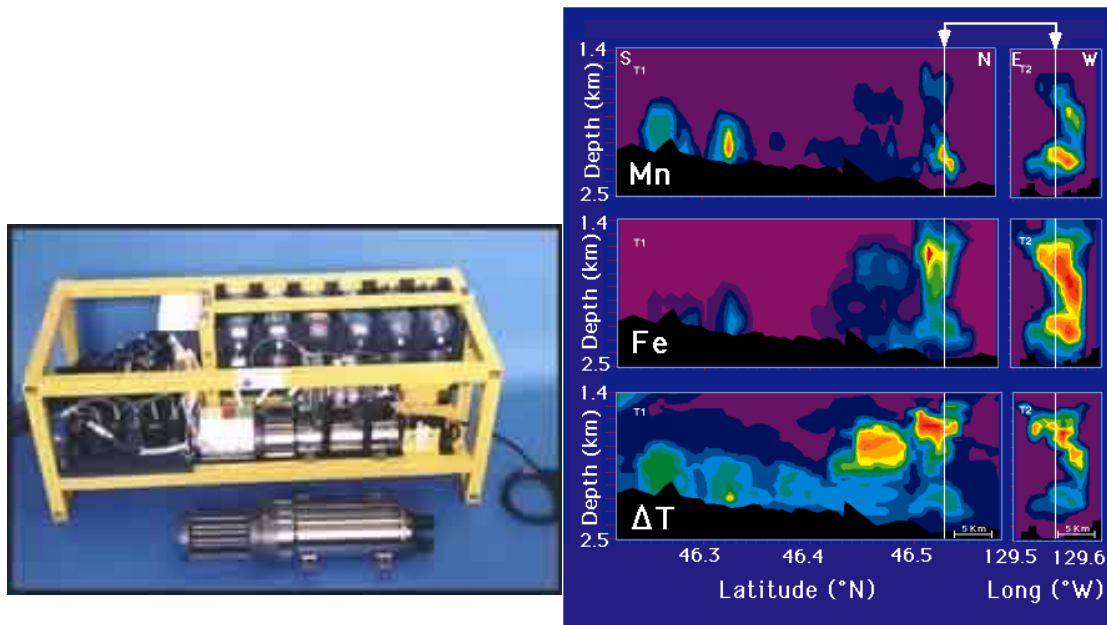


그림 24. Photo of SUAVE and an example of SUAVE data.

### ○ He 동위원소 추적자 연구

He 동위원소 실험실에서 해양에서의 다양한 시·공간적 규모의 열수분출 영향을 연구해 오고 있다. 전지구적으로 해저중양해령의 축을 따라, 그리고, 어떤 해저화산에서 분출하는 열수는 순환하는 해수에 비하여 상대적으로 높은 농도의  $^3\text{He}$ 을 함유한 열수 플룸을 생성한다. 이들 플룸은 지역적으로 국한된 공급원을 가지기 때문에, 그 분포는 순환과 혼합의 경향을 추적하는데 이용되어질 수 있다.

화산해령의 확장율이 아주 큰 태평양에서는 이에 상응하는 과량의 헬륨이 주입된다.

가장 광범위한 규모의 연구는, 태평양의 심층수와 중층수의 순환으로, 해양순환과 열수 플룸의 혼합 경향을 그리기 위하여 불활성 가스 추적자,  $^3\text{He}$ 을 이용한다.

WOCE (World Ocean Circulation Experiment) 프로그램에서 해양의  $^3\text{He}$  측정은 심해 태평양에서 열수 플룸의 분포를 파악하는데 큰 도움이 된다.

2) Gary J. Massoth, Hugh B. Milburn, Chris Meinig, Mike Stapp, Joseph A. Resing, Stacy M. Maenner, Kenneth S. Johnson and Kenneth H. Coale. 1997. SUAVE (Submersible System Used to Assess Vented Emissions): A diverse tool to probe the submarine hydrothermal environment. International Workshop Marc'h Mor: Marine Analytical Chemistry for Monitoring and Oceanographic Research, Brest, France.

관련 연구로는:

- Lupton, J.E., Hydrothermal plumes: near and far field, in Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions, Edited by S. Humphris, R. Zierenberg, L. Mullineaux, and R. Thomson, Geophysical Monograph 91, American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 317-346, 1995.

- Lupton, J.E., A far-field hydrothermal plume from Loihi Seamount, Science 272, 976-979, 1996.

- Lupton, J.E., Hydrothermal helium plumes in the Pacific Ocean, J. Geophys. Res., 103(C8), 15,853-15,868

등이 있다.

## ○ Vent Fluid Chemistry

열수구 플룸 화학을 조절하는 과정으로는 해수가 관입통로로 흘러 들어가 열원을 만나 가열하여 상승하고, 이 과정에서 암석과 반응하고 분화가 일어나는 과정들을 포함한다.

### - 순환대 (Circulation zone)

해양지각의 투수성 구조와 열원의 위치는 열수 유동체가 어떻게 순환할 지를 결정한다. 개념적으로, 세가지 단계로 나누어 질 수 있다.

충전대 (Recharge zone)에서는, 차가운 해수가 해양지각을 관입하고 점차 그 흐름의 통로를 따라 가열된다. 유동체로부터 암석으로 마그네슘 (Mg) 이 제거되는 강한 열역학적 구동력이 있다. 이 과정에서 산(Acid) 이 형성되며, 이것은 여타 주요 원소와 전이 금속을 암석으로부터 열수 유동체로 용출시키게 된다 (Seyfried, 1987). 해수의 황산염이 무수화물과 같은 침전물과 황화수소로 환원됨으로써 용액에서 제거된다.

열원 근처의 고온 반응대 (high-temperature reaction zone) 에서 유동체는 최고온도에 달한다. 고온 유동체 조성을 결정짓는 중요한 항목들로는 압력, 온도, 물/암석 비, 암석 조성, 충전 유동체 조성, 반응시간 (체류시간) 등이 있다. 반응은 높은 온도에서 매우 빠르며, 유동체는 일련의 변성 광물암과 평형에 이르기도 한다.

뜨거운 열수 유동체는 부력이 있어 상승대 (upflow zone)에서 해저면을 향하여 상승한다. 이 지역에서의 체류시간은 아마 매우 짧을 것이나, 유동체는 흘러가는 동안 암석과 계속하여 반응한다. 유동체는 감압 (단열 냉각) 으로 약간 냉각되고 주변의 암석에 열을 잃고 (전도 냉각) 혹은 해저면 아래의 차가운 해수와 같은 유동체와 혼합되어 크게 냉각될지 모른다. 냉각은 열수 유동체를 과포화시키게 되고 이

차 광물의 침전을 가져 오게 된다 (금속 황화물, quartz, 등), 그리하여, 유동체의 화학적 특성은 반응대를 떠날 때와 해저면에 도착하였을 때 사이에 약간의 변화를 가진다.

열수구 (Hydrothermal vents) 는 고열, 무산소 상승대와 차갑고 산화된 해수 사이의 경계면이다. 고온의 유동체가 차가운 해수와 혼합될 때, 많은 열수광물들이 빠르게 침전하여 black smokers 의 과밀한 입자 플룸 특성을 형성한다. 입자들은 주로 황화물 (예, pyrrhotite FeS, sphalerite ZnS, chalcopyrite CuFeS<sub>2</sub>, etc.) 와 황산염 (anhydrite CaSO<sub>4</sub>, barite BaSO<sub>4</sub>) 혼합체 들이다. 이러한 광물들의 일부는 해저면에 형성되는 굴뚝 구조의 부분으로 되고, 기타는 플룸내에서 형성되어 물로 분산된다.

열수구의 또 다른 형태는 발산구로, 저온의 유동체가 고온의 smoker 주변의 갈라진 틈을 통하여 희미하게, 혹은 현무암에서 직접 분출하는 고립지역에서 해저면으로 방출되는 것이다. 저온 유동체는 일반적으로 충분히 용존금속과 smoker를 형성하기 위한 황화물을 포함하지 않는다. 더 차가운 확산 분출 유동액은 대부분의 경우, 뜨거운 smoker와 같은 유동체가 차가운 해수와 같은 유동액과 해저면 아래에서 혼합됨으로써 형성된다는 증거가 있으며, 많은 경우, 해저면 아래에서 광물들이 침전되게 된다.

#### - 유동체와 암석의 반응과 평형

반응속도는 온도에 따라 증가하고, 평형은 중앙해령에서 고온의 반응대에서 도달된다는 가설이 만들어진 적이 있다 (Bowers et al., 1988). 열수 시스템은 단순하지만, 열역학적 자료는 완전하고 아주 확실하다. 관입되는 유동액과 암석 조성 정련된 반응 통로로부터 약간의 정확도를 가지는 평형 유동체 조성을 예측할 수도 있다. 이것은 복잡한 문제이며, 미네소타 대학과 워싱턴 대학의 W.E. Seyfried Jr., Everett Shock 과 같은 선구적 실험실에서 착수되고 있다. 지금까지, 열역학 모델과 물/암석 실험 접근법을 통하여 열수화학에서 중요한 해석과 예측을 만들었다. PMEL과 기타 실험실들에서 수행된 현장 및 분석 화학 작업의 역할은 실제 열수 유동체가 새로운 혹은 기존의 열수 시스템의 모델에 적합한 지를 결정하는 것이다. 현장 및 실험실 작업과 이론적 작업 사이의 상호 작용이 있으며, 열수화학을 이해하는데 꾸준한 진전을 가져오고 있다.

#### - 상 분화 (Phase separation)

상의 분화 과정은 초임계 압력하에서 정상적인 비등 혹은 염수 증진으로 발생하며 열수구 유동체 조성을 결정하는데 중대한 역할을 한다. 원소들은 액체와 증기 페이스 사이에서 분화되며, 액체 페이스로 분배된 이온종들과 증기페이스로 분화된 휘발성 종들과 함께, 상의 변화는 다양한 환경하에서 일어난다. 액상의 염 용액에서, 정상적인 비등 (낮은 염분도 증기)은 유체가 임계 압력과 온도 이하에서 두가지

상의 곡선을 가로지를 때, 일어나며, 유체가 임계점보다 높은 압력과 온도에서 두가지 상의 곡선을 가로지를 때, 유체로부터 높은 염분도의 염이 응축된다. 상 분화의 이러한 두 형태는 매우 다른 화학 조성을 초래한다.

열수시스템의 임계점 아래의 상 분화에 대한 완벽한 예는 Axial Volcano에서 일어난다. 화학적 분류 계통학에 기초하여 (Butterfield et al., 1990), 분화구 경계의 단층을 따라 upflow zone 으로 상승하는 단일 열수 종말점은 감압되어 두 상의 곡면을 가로지르면서 높은 염분과 잔류 액체상으로부터 이동하여 기체상으로 된다.

액체상에서 분화되어 기체상으로 결과 할 수 있는 다양한 기작들이 있는데, 이러한 것들이 많은 열수체계에서 일어나고 있다.

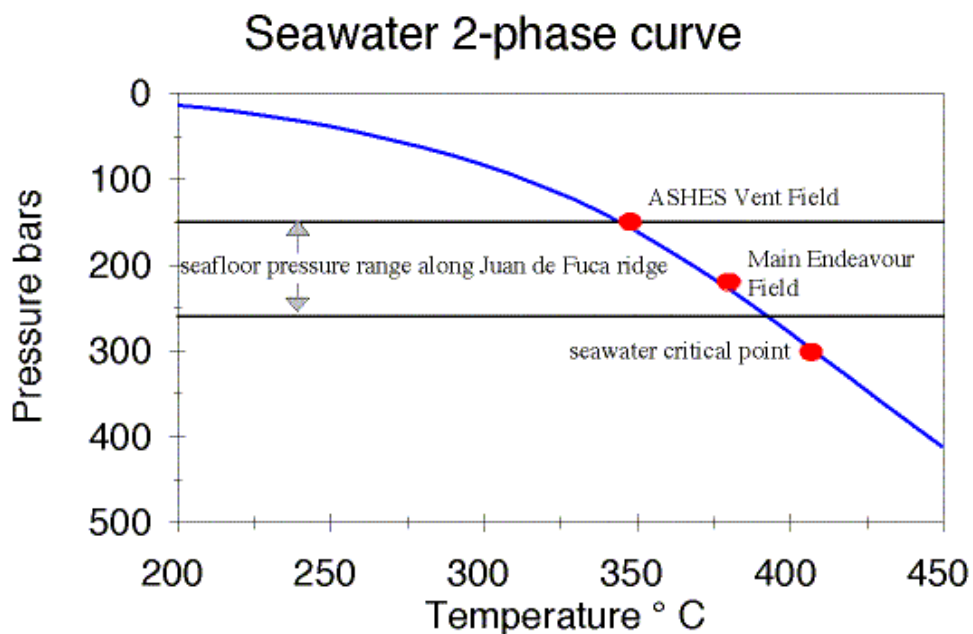


그림 25. Seawater phase curve between temperature and pressure.

- 열수 유동체 화학의 시간 변화

오랜기간에 걸쳐서 아주 안정된 유동체 조성을 유지하고 있는 고온의 해저 열수 체계는 열수구 유동체 조성의 평형 조절에 대한 증거로 해석된다. 배출구 유동체의 화학 조성의 시간에 따른 큰 변화는 1990년까지는 발견되지 않았다. 그 이후, 화산활동에 의하여 영향받는 열수 시스템의 시료채취가 처음으로 이루어지고, 이러한 관측을 통하여 분출 유형과 유동체 조성에 빠르고 큰 변화는 분출을 수반하면서 즉각 나타난다는 것이 명확하게 되었다 (Haymond et al., 1993; Butterfield & Massoth 1994; Von Damm et al., 1995). 해저 화산 분출은 아주 극적으로 일어나고 megaplumes (event plumes) 형성, 미생물번성 및 배출 유동체의 온도와 조성의 빠른 변화를 포함하는 결과들과 상호 연결되어 있다.

North Cleft, East Pacific Rise 등에서의 해저 분출 사건으로부터 축적된 증거

로, 열수 체계가 화산활동을 따라 임의로 어떻게 변화하는지 묘사하고, 열수 수지가 어떤 영향을 받는지를 예측하는 것이 가능하게 됐다. Juan de Fuca에서의 관측과 자료는 열수 반응과 화산작용에 수반되는 유동체의 화학 변화의 일반모델을 만들기도 하였다.

아래 그림은 화산작용에 대한 열수체계의 시간에 따른 반응을 보여 주고 있다. 열수지의 상대적 강도(빨간선), 염소이온의 농도(파란선), 철(점선), 황화수소(굵은 선). 열수 시스템은 상의 분화에 따라, 증기 위주의 고열 수지 단계에서, 점이단계를 거쳐 염수 위주의 배출에서 궁극적으로 열수지가 없고 해수조성으로 돌아가는 단계로 진화한다

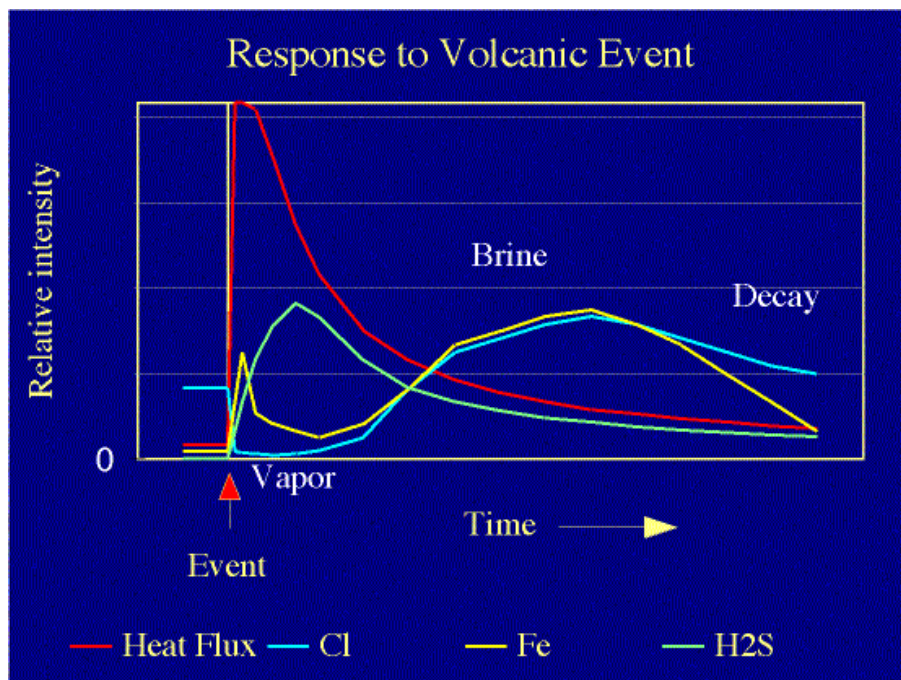


그림 26. Time responses of vent fluids to volcanic event.

- 열수 유동체 화학과 미생물 서식처

1970년대 Galapagos 해령에서 심해 열수계의 발견은 동화 에너지가 태양이 아닌 지구 내부의 열로부터 적어도 부분적으로 유래하는 전혀 새로운 생태계의 탐사의 장을 열게 해 주었다. 이 시스템에서의 일차생산자는 6만 km 길이의 중앙해령 시스템과 기타 해저화산 아래의 마그마와 해수와의 반응에 의하여 방출된 황, 수소, 메탄 및 기타 화합물을 이용하는 아주 다양한 박테리아와 Archaea 이다. 이들 미생물들의 가장 흥미있는 몇가지는 열친화적이고 고열친화적인 Archaea, 그들 중 일부는 섭씨 100 도 이상의 온도에서 적절한 성장률을 가진다. Archaea 는 이런 극심한 온도와 압력의 영역에서 대처하여 번성하는 특별한 효소를 가진다. 이들

“extremozymes”은 많은 상업적 응용 때문에 생명공학 집단에 큰 흥미를 준다, 그리고, 심해 열수구 생물체들은 높은 압력/높은 온도 환경 때문에 특별한 관심거리이다.

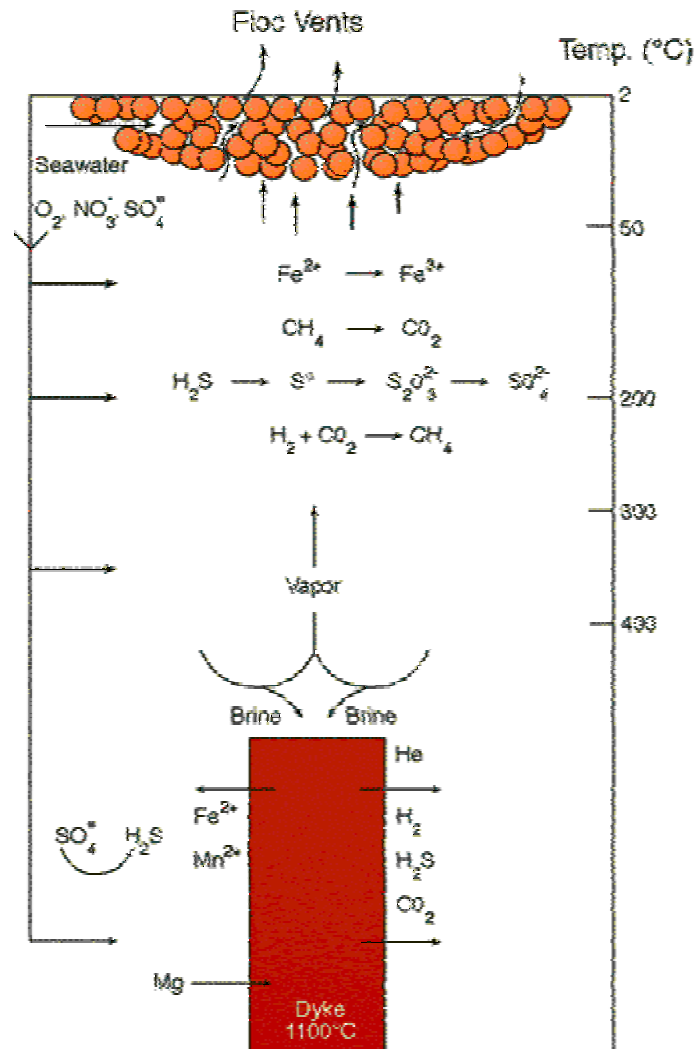


그림 27. Redox reactions and temperature in deep-sea hydrothermal systems.

## Ridge 2000

이 프로그램은 미국 NSF 의 지원을 받는 중앙해령에서의 지질 및 생물의 통합적 연구에 초점을 맞추고 있다. 2001년 11월 발간된 "Ridge 2000 science plan"에 의하면, 이 프로그램 이전의 약 10여 년간에 걸친 중앙해령의 연구를 통하여 다음과 같은 성과가 있었음을 이야기 하고 있다:

- 전지구적으로 광대한 중앙해령시스템에 대하여 이전에 알려져 있지 않은 부분들에 대한 탐사, 도표화 및 기초지질시료채취;
- 지구물리 및 지화학기술을 이용한 맨틀흐름의 경향 추정과 마그마의 기원 조사;
- 지구물리 및 암석연구로부터 상부와 하부지각에서의 마그마의 시공간적 분포 조사;
- 활발한 화산, 열수 및 생물 시스템을 발견하고 기록;
- 태양광이 없는 심해저에 변성하고 있는 대형 및 미소생물군집을 발견하고 그 특성을 조사;
- 열수 미소 대형생물에서의 새로운 생리 경로와 생화학적 능력 규명;
- 해저 분출지역 다수 감지와 분출지역에 대한 신속한 반응 방문장치 설치;
- 현장장비를 이용한 해저면의 활발한 변형 측정;
- 다수의 현존하는 가장 원시적인 생물체를 포함하여 박테리아와 Archaea 로 구성된 이전에 알려지지 않은 해저면하의 미생물군집 발견.

그리고, 이러한 연구 탐사를 통하여 다음과 같은 괄목할만한 기술의 진보가 있었다:

- 육상에서 가용한 해상도를 가지는 도표 및 도면을 심해에서 작성 가능;
- 선상, 해저면 지진 기술로 해양지각에서의 마그마 저장고의 도면작성에 사용;
- 물리, 화학, 생물 센서로 활성인 열수구 시스템과 해저면의 변형에 대한 시계열 기록 제공;
- 해안선과 연결된 실시간 자료의 장기 해저면 관측시스템 확립중;
- 다양한 열수구 동물 및 미생물을 자연서식환경을 모사한 조건하의 실험실에서 배양 유지가능

해저열수작용에 의한 생지화학적 과정에 대하여 이 프로그램에서 제기하는 과학적 가설들은 다음과 같다:

- 맨틀의 흐름, 맨틀조성, 해령의 모양과 분절사이의 관련성은 ?;
- 용융물질의 이동이 맨틀과 지각 내에서 어떻게 상호 관련되어 있는가 ?;
- 열수 순환이 용융지역의 특성, 지각의 구조와 조성 및 해령의 모양에 어떤 영향을 미치는가 ?;
- 생물활동이 열수구의 화학과 열수 순환에 어떤 영향을 미치는가 ?;
- 열수 생물권의 구조와 범위를 결정짓는 힘과 연결고리는 무엇인가 ?;
- 해저면하의 깊은 곳에서부터 상부의 수층까지 생물권의 특성과 시/공간적 범위는 ?;
- 열수 수지가 상부 해양의 물리, 화학, 생물의 특성에 어떻게 얼마만큼 영향을

미치는가?

## 2. 연구목적

- 열수플룸과 열수구의 위치를 확인하고 분포도를 작성하기 위한 화학적 접근방법 개발
- 전지구적 화학물질수지에서 열수의 역할을 평가
- 열수체계의 화학적 변이와 해저면하에서 미소생물권을 유지시키는 역할의 정량화

## 3. 연구내용 및 방법

기 간	내 용	방 법
1단계 (2006-2008)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 연구기반 구축</li> <li>- 열수플룸 추적 (플룸위치 확인 및 mapping)</li> <li>- 열수플룸 변화 관측 (시공간적 변화)</li> <li>- 열수플룸의 화학 특성 정량 (화학 수지 분석)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 선진국 자료 수집 및 전문가 활용</li> <li>- 플룸 추적 화학센서 시스템 운용 : 국제 공동협력 및 센서 확보</li> <li>- CTD 부착 화학센서 운용</li> <li>- 화학 관측기 및 시계열 시료 채취기 계류</li> <li>- 해수층의 용존, 입자 성분, 퇴적물, 암석 시료 채취 및 분석</li> <li>- 방사성 동위원소를 이용한 확산계수, 방출속도, 성장률 계산</li> </ul>
2단계 (2009-2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 연구능력 확충</li> <li>- 열수플룸과 해수의 상호작용 연구</li> <li>- 열수플룸과 암석 및 퇴적물과의 상호작용 연구</li> <li>- 열수구와 생물과의 상호작용 연구</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 국제공조 및 연구장비 개발 및 확보</li> <li>- 열수구 인접 시료 채취 및 거리에 따른 열수플룸의 화학적 변화 분석</li> <li>- 열수구 및 주변의 암석 및 퇴적물 시료 채취 및 분석</li> <li>- 생물군집, 개체, 생물량, 생물생산력과 열수의 물리·화학적 특성비교</li> </ul>



기 간	내 용	방 법
3단계 (20012-2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 연구심화 및 독자연구 능력 확보</li> <li>- 열수구의 화학변이 모델 개발</li> <li>- 열수구 화학일차생산력 측정 및 화학합성 환경 실험실 재현</li> <li>- 열수구 화학물질 생물전이 연구</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 독자 열수구 접근 화학시료채취 시스템 완비</li> <li>- 열수구 화학물질의 열역학 수치 관련 항목 측정 (고열관측 센서 및 시추)</li> <li>- 화학일차생산력 제한 요인 및 핵심 항목의 역할 이해</li> <li>- 화학에너지의 전이 단계별 구성성분 변화 분석</li> </ul>

#### 4. 외국 선행연구 요약

chronic-style hydrothermal plume

megaplume transient -style hydrothermal plume

가장 많이 연구된 sites: East Pacific Rise, Galapagos Spreading Center, Guaymas Basin, Southern Juan de Fuca Ridge

##### A. 태평양

##### Juan de Fuca Ridge

Coaxial seafloor eruption site defined by the seismic events 46o12'N-36'N

Events plumes, characterized by unusual height (centers ~ 600-700m above the seafloor) symmetry, and volume were observed only in July.

**참고문헌** Massoth et al. 1995. Observations of manganese and iron at the CoAxial seafloor eruption site, Juan de Fuca Ridge. GRL 22, 151-154

\* 알려진 열수 주변 산맥의 사면을 통한 물질 교환 조사

**참고문헌** Wheat et al. 1997. Chemical plumes from low-temperature hydrothermal venting on the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge. JGR 102, B7, 15433-15446.

### 오키나와 해구 열수구

장소: 타이완 인근 : 수심 약 1000m? Shinkai 65000, 굴뚝높이 1-10m, 온도 >170°C, pH = 4.5, 생물 (Shinkaia crosnieri)

- echo sounder: imaged bubble like signals rising from the seafloor

참고문헌: Hsu et al. 2003. Hydrothermal signatures in the southern Okinawa Trough detected by the sequential extraction of settling particles. Marine Chemistry 84, 49-66.

### Suruga Trough -cold seepage, CH<sub>4</sub>

34°40'N 138°36'E, 수심 2000~3000m

참고문헌: Tsunogai U et al. 1998. Methane-rich plumes in the Suruga Trough (Japan) and their carbon isotopic characterization. Earth and Planetary Science Letters 160, 97-105.

### Eastern Manus Basin, Bismarck Sea

참고문헌: Gamo et al. 1993. Hydrothermal plumes in the eastern Manus Basin, Bismarck Sea: CH<sub>4</sub>, Mn, Al and pH anomalies. Deep-Sea Research I, 40, 2335-2349.

**Mariana Arc volcanos:** Territory of Guam and the common wealth of the Northern Mariana Islands.

-8 sites: West Rota, Northwest Rota, E. Diamante, Zeelandia Bank, Maug Caldera, Ahyi, Diakoku, Northwest Eifuku

참고 문헌: Embley et al. 2004. Explorations of Mariana Arc volcanoes reveal new hydrothermal systems.

## B. 인도양

휴대용 수온, 탁도 관측기를 이미 화산활동이 높을 것이라고 알고 있는 대양저산맥에 집중 투입

a portable Miniature Autonomous Plume Recorder (MAPR) attached to the

dredges and waxcore wires for all the 90+ lowerings.

참고문헌: Scheirer et al. 1998. Detection of hydrothermal plumes along the Southeast Indian Ridge near the Amsterdam-St. Paul Plateau. GRL 25, 97-100.

#### **Rodriguez Triple Junction, Central Indian Ridge, black smoker (25°S, 70°E)**

- 1993 상황 증거

- 1998 Shinkai 6500 투입 - 발견 실패

- 2000, 정밀 조사 (two-ye and deep sea camera) 대상 해역 축소

deep towed camera equipped with a CTD, a transmissometer, acoustic transponder for SSBL (super short base line) positioning

Kaiko 투입 - black smoker 확인

참고문헌: Gamo et al. 2001. Chemical characteristics of newly discovered black smoker fluids and associated hydrothermal plumes at the Rodriguez Triple Junction, Central Indian Ridge. EPSL 193, 371-379.

### **C. East Pacific Rise, North**

이미 아는 장소에 대한 화학물질교환 조사: 수온과 탁도가 초기 조사 항목이 될 수 있음

참고문헌: Mottel M et al., Manganese and methane in hydrothermal plumes along the East Pacific Rise, 8o40' to 11o50'N GCA 59, 4147-4165.

### **D. East Pacific Rise (Southern, ~19°S)**

two-yos and 30 vertical casts

참고문헌: Feely et al. 1996. Hydrothermal plume particles and dissolved phosphate over the superfast-spreading southern East Pacific Rise. GCA 60, 2297-2323.

Ishibashi et al. 1997. Hydrothermal methane and manganese variation in the plume over the superfast-spreading southern East Pacific Rise. GCA 61, 485-500.

## E. Bransfield Strait, Hook Ridge

기존 조사결과: 수중 고 Mn 함량 (~7 nM), 고  $\delta^3\text{He}$ , hydrothermal alteration of sedimentary organic matter (presence of Fe sulfide, Fe-Zn sulfide, Fe-Zn-Cu sulfide etc.) high heat flow (150~600 mW/m<sup>2</sup>)  
정밀조사: dissolved Mn and Fe 측정, camera laden sled -ocean floor observation system (OFOS), TV-guided grab sampler (TVG)  
참고문헌: Klinkhammer et al. 2001. Discovery of new hydrothermal vent sites in Bransfield Strait, Antarctica. *EPSL* 193, 395-407.

## F. Mid-Atlantic Ridge

a. Rainbow site (36°14'N)

수중  $\delta^3\text{He}$  이상 측정

참고문헌: Jean-Baptiste et al. 2004. Helium isotopes at the Rainbow hydrothermal site (Mid-Atlantic Ridge, 36°14'N). *EPSL* 221, 325-335.

b. 백금족 원소

Cave et al. 2003. Deposition of osmium and other platinum-group elements beneath the ultramafic-hosted Rainbow hydrothermal plume. *Earth and Planetary Science Letters* 210, 65-79.

c. 망간, 메탄, 헬륨시그널

Bougault et al 1998. FAMOUS and AMAR segments on the Mid-Atlantic Ridge: ubiquitous hydrothermal Mn, CH<sub>4</sub>,  $\delta^3\text{He}$  signals along the rift valley walls and rift offsets. *EPSL* 161, 1-17.

## 5. 총괄적인 논문

Rubin K. 1997. Degassing of metals and metalloids from erupting seamount and mid-ocean ridge volcanoes: Observations and predictions. *GCA* 61, 3525-3542.

White SN and Chave AD. 1998. Imaging ambient light at deep-sea hydrothermal vents. *Oceanus* 42, 12-17

Desbruyeres et al. 2000. A review of the distribution of hydrothermal vent communities along the northern Mid-Atlantic Ridge: dispersal vs. environmental controls. *Hydrobiologia* 440, 201-216.

## 6. 부록

### (1) 열수계의 열수의 기원, 혼합, 해저면 변천 과정연구

가설 1: 열수용액의 지각 내 체류 시간

해수 및 입자의  $^{210}\text{Pb}/\text{Pb}$ ,  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  측정

해저 지각 화학 조성

해수  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{222}\text{Rn}$

Sub-vent geochemistry and biology/ deep-sea subterranean chemistry and biology : A high-temperature deep-sea hydrothermal system related to dacitic arc-volcanism was drilled using a tethered, submarine rock-drill system as a part of the Archaean Park Project. The benthic multi-coring system (BMS) employed allowed for direct sampling of microorganisms, rocks and fluids beneath hydrothermal vents. Based on the vertical distribution of samples derived from this vigorous sub-vent environment, a model of deep-sea subterranean chemistry and biology was determined detailing optimal microbial activities(Takano et al., 2005).

가설 2: 열수 굴뚝의 연령과 성장속도, 존재 기간

Ingrowth of  $^{228}\text{Th}$  from  $^{226}\text{Ra}$

$^{210}\text{Pb}/\text{Pb}$ ,  $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$

가설 3: 열수구 발견 도구 탁도계(nephelometer) CTD mounted or deep-towed vehicle mounted, in situ methane sensor, bio-acoustic survey, dissolved phosphate depletion

가설4: 열수가 해양에서 이산화 탄소의 주요 근원이다.

가설 5: W 등의 원소들의 해수 조성은 열수 플럭스로 결정된다.

가설 6: 열수의 부력수플룸이 열수 배출 화학물질의 운반 거리와 화학형태를 결정한다.

가설 7: 지진활동은 열수 화학물질 분출 플럭스를 증가시킨다.

가설 8: 화학물질 플럭스 중 열수 (vent) 구 보다는 열수사면(flanks) 의 기여가 더 크

다.

가설 9: 황화물 화학과 생물 생리간의 연구

T(oC), pH, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, Fe 열수구에서 생물 서식지간의 농도 경사에 따른 생물 독성

가설 10: 금속이온이 많은 환경에서의 생물의 금속 농축과 독성 연구

생물 (패류): Cd, Cu, Fe, Hg, Pb, Zn

-패각 연대 측정: <sup>210</sup>Pb/<sup>226</sup>Ra 비평형 이용

가설 11. 열수시스템과 해저암반과의 상호작용이 백금족 원소들의 열수인근 해저퇴적물의 백금족 원소 (Pd, Ir, Pt, Os)들의 함량을 결정한다.

ultramafic-hosted hydrothermal systems may expel fluids with significantly higher Platinum Group Element (PGE) concentrations

- heat flow

- 퇴적물 시추, PGE 금속 함량 분석

가설 12. 열수화학조성은 온도, 압력 (임계조건)과 인근 해저 기반암이 결정한다.

열수구 근접 해수시료채취

평형이론 개발

가설 13: 화학합성생태계의 공간적 범위 판단 추적자 개발

- metal sulfide particles in the oxic surface sediment?, enrichment in Mn, Al, Pb, Ag, Co, Zn in the bottom sediments

- 탄소, 질소, 산소, 황, 안정 동위원소 ,

가설 14. 열수생물의 영양원 추적 화학합성 유기물 대 광합성 유기물

방법: 열수, 해수 화학 조성: Ca, As, Hg, Mn, Ba, HCO<sub>3</sub>, Li, Sr, B, I, Cs, Fe, Si, Cl, Na, SO<sub>4</sub>, Br, REE 을 포함한 모든 해수 화학 물질 , W, Mo, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, Cl 가스

1차년도: 기체 밀봉 등압, 청정, 고온 산성 열수 채취기 (WHOI + 유형 도입 제작)

열수계 입자 화학 연구: 입자성 Fe, Mg, U, Cd, Zn, Co, Cu, REE, 지방산, 탄화수소 분자적조성

3차년도: pH, CO<sub>2</sub> 열수 배출 플럭스 추정- C14O2

안정 및 방사성 동위원소 추적자 이용

열수 온도 추정: 화학적 지구온도계 (Na/Li, Na/KCa, Si, KMg, Na/Li 등)

## 참고 문헌

1. Pichler T. 2004. Stable and radiogenic isotopes as tracers for the origin, mixing and subsurface history of fluids in submarine shallow water hydrothermal systems. *J. Volcanology and Geothermal Research* 139, 211-226.

### Abstract

The shallow-water hydrothermal system in Tutum Bay on the west side of Ambitle Island, Papua New Guinea provides us with an exceptional opportunity to study isotope systematics in a near shore setting. Compared to seawater, the hydrothermal fluids in Tutum Bay have lower values for D, <sup>18</sup>O, <sup>13</sup>C, and <sup>87</sup>Sr and higher values for <sup>3</sup>H, <sup>34</sup>S(SO<sub>4</sub>) and <sup>18</sup>O(SO<sub>4</sub>). The <sup>18</sup>O and D records for vents 1 and 4 indicate that fluid compositions remained stable over an extended period. Interpretation of isotope data clearly demonstrates the predominantly meteoric origin of Tutum Bay hydrothermal fluids, despite their location in a marine environment. <sup>18</sup>O and D values are identical to mean average annual precipitation in eastern Papua New Guinea. The hypothesis that these fluids are a simple product of mixing between seawater and onshore hydrothermal fluids from the Waramung (W-1) and Kapkai (W-2) thermal areas has been rejected, because the observed <sup>37</sup>Cl, <sup>3</sup>H, <sup>34</sup>S(SO<sub>4</sub>) and <sup>18</sup>O(SO<sub>4</sub>) values cannot be explained by a simple mixing model. The application of <sup>18</sup>O(SO<sub>4</sub>) and <sup>13</sup>C thermometers in combination with <sup>3</sup>H values corroborates the three-step model of Pichler et al. [Pichler, T., Veizer, J., Hall, G.E.M., 1999. The chemical composition of shallow-water hydrothermal fluids in Tutum Bay, Ambitle Island, Papua New Guinea and their effect on ambient seawater. *Marine Chemistry* 64 (3) 229-252], where (1) phase separation in the deep reservoir beneath Ambitle Island produces a high temperature vapor that rises upward and subsequently reacts with cooler ground water to form a low pH, CO<sub>2</sub>-rich water of approximately 150-160 C, (2) caused by the steep topography, this CO<sub>2</sub>-rich fluid moves laterally towards the margin of the hydrothermal system where it mixes with the marginal upflow of the deep reservoir fluid. This produces a dilute chloride water of approximately 165 C, and (3) possibly the entrainment of minor amounts of ground or seawater during its final ascent.

2. Prol-ledesam RM, Camet C, Torres-Vera MA, Forrest MJ, Armienta MA. 2004. Vent fluid chemistry in Bahia Concepcion coastal submarine hydrothermal system, Baja California Sur, Mexico. *J. of Volcanology and Geothermal Research* 137, 311-328.

## Abstract

Shallow submarine hydrothermal activity has been observed in the Baha Concepcin bay, located at the Gulf coast of the Baja California Peninsula, along faults probably related to the extensional tectonics of the Gulf of California region. Diffuse and focused venting of hydrothermal water and gas occurs in the intertidal and shallow subtidal areas down to 15 m along a NWSE-trending onshoreoffshore fault. Temperatures in the fluid discharge area vary from 50 C at the sea bottom up to 87 C at a depth of 10 cm in the sediments.

Chemical analyses revealed that thermal water is enriched in Ca, As, Hg, Mn, Ba, HCO<sub>3</sub>, Li, Sr, B, I, Cs, Fe and Si, and it has lower concentrations of Cl, Na, SO<sub>4</sub> and Br than seawater. The chemical characteristics of the water samples indicate the occurrence of mixing between seawater and a thermal end-member. Stable isotopic oxygen and hydrogen composition of thermal samples plot close to the Local Meteoric Water Line on a mixing trend between a thermal end-member and seawater. The composition of the thermal end-member was calculated from the chemistry of the submarine samples data by assuming a negligible amount of Mg for the thermal end-member. The results of the mixing model based on the chemical and isotopic composition indicate a maximum of 40% of the thermal end-member in the submarine vent fluid.

Chemical geothermometers (Na/Li, Na/KCa and Si) were applied to the thermal end-member concentration and indicate a reservoir temperature of approximately 200 C. The application of K/Mg and Na/Li geothermometers for vent fluids points to a shallow equilibrium temperature of about 120 C.

Results were integrated in a hydrogeological conceptual model that describes formation of thermal fluids by infiltration and subsequent heating of meteoric water. Vent fluid is generated by further mixing with seawater.

3. Takano Y, Edazawa Y, Kobayashi K, Urabe T, Marumo K. 2004. Evidence of sub-vent biosphere: enzymatic activities in 308oC deep-sea hydrothermal systems at Suiyo seamount, Izu-Bonin Arc, Western Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*. (in press).
4. Resing JA, Lupton JE, Feely RA, Lilley MD. 2004. CO<sub>2</sub> and <sup>3</sup>He in hydrothermal plumes: implications for mid-ocean ridge CO<sub>2</sub> flux. *Earth and Planetary Science Letters* 226, 449-464
5. Proskurowski G, Lilley MD, and Brown TA. 2004. Isotopic evidence of magnetism and seawater bicarbonate removal at the endeavour hydrothermal system. *Earth and Planetary Science Letters* 225, 53-61.
6. Kishida K, Sohrin Y, Okamura K, Ishibashi J. 2004. Tungsten enriched in submarine hydrothermal fluids. *Earth and Planetary Science Letters* 222, 819-827.



7. Particle geochemistry in the Rainbow hydrothermal plume, Mid-Atlantic Ridge, *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 68, 759-772.
8. Phillips H, Wells LE, Johnson RV II, Elliot S, Deming JW. 2003. LAREDO: a new instrument for sampling and in situ incubation of deep-sea hydrothermal vent fluids. *Deep-Sea Research* 50, 1375-1387.
9. Seewald J, Cruse A, Saccocia P. 2003. Aqueous volatiles in hydrothermal fluids from the Main Endeavour Field, northern Juan de Fuca Ridge: temporal variability following earthquake activity. *Earth and Planetary Science Letters* 216, 575-590.
10. Alt JC. 2003. Hydrothermal fluxes at mid-ocean ridges and on ridge flanks. *Comptes Rendus Geosciences* 335, 10-11.
11. LeBris N, Sarradin P.-M. Caprais J.C. 2003. Contrasted sulphide chemistries in the environment of 13oN EPR vent fauna. *Deep-Sea Research Part I* 50, 737-747.
12. Ruelas-Inzunza J, Soto LA, Paez-Osuna F. 2003. Heavy-metal accumulation in the hydrothermal vent clam *Vesicomya gigas* from Guaymas basin, Gulf of California. *Deep-Sea Research I*, 50, 757-761.
13. Deposition of osmium and other platinum-group elements beneath the ultramafic-hosted Rainbow hydrothermal plume. *Earth and Planetary Science Letters* 210, 65-79.
14. Allen DE, Seyfried WE Jr. 2003. Compositional controls on vent fluids from ultramafic-hosted hydrothermal systems at mid-ocean ridges: An experimental study at 400oC, 500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67, 1531-1542.
15. Von Damm KL, Lilley MD, Shanks WC III, Brockington M, Bray AM, O'Grady KM, Olson E, Graha, A, Proskurowski G, SouEPR Science Party. Extraordinary phase separation and segregation in vent fluids from the southern East Pacific Rise. *Earth and Planetary Science Letters* 206, 365-378.
16. von Damm, KL, Buttermore LG, Oosting SE, Bray AM, Fornari DJ, Shanks WC III. 1997. Direct observation of the evolution of a seafloor 'black smoker' from vapor to brine, *Earth and Planetary Science Letters* 149, 101-112.
17. von Damm, 1988. Systematics of and postulated controls on submarine hydrothermal solution chemistry. *J. Geophysical Research* 93, 4551-4561.
18. Tyler PA. 2003. Understanding the biogeography of chemosynthetic ecosystems. *Oceanologica Acta* 25, 227-241.
19. Weber A, Jorgenson BB. 2002. Bacterial sulfate reduction in hydrothermal sediments of the Guaymas Basin, Gulf of California, Mexico. *Deep-Sea Research* 49, 827-841.
20. Geochemistry of diffuse low-temperature hydrothermal fluids in the North Fiji Basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66, 1409-1427.
21. Colaco A, Dehairs F, Desbruyeres D. 2002. Nutritional relations of deep-sea

- hydrothermal fields at the Mid-Atlantic Ridge: a stable isotope approach. *Deep-Sea Research* 49, 395-412.
22. Seewald JS, Doherty K, Hammar T, Liberatore SP. 2001. A new gas-tight isobaric sampler for hydrothermal fluids. *Deep-Sea Research I* 49, 189-196.
  23. Klinkhammer GP, Chin CS, Keller RA, Dahlmann A, Sahling H, Sarthou G, Petersen S, Smith F, Wilson C. 2001. Discovery of new hydrothermal vent sites in Bransfield Strait, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters* 193, 395-407.
  24. Hannington M, Herzig P, Stoffers P, Scholten J, Botz R, Garbe-Schonberg D, Jonasson IR, Roest W, Shipboard Scientific Party. 2001. First observation of high-temperature submarine hydrothermal vents and massive anhydrite deposits off the north coast of Iceland. *Marine Geology* 177, 199-220.
  25. Cowen JP, Bertram MA, Wakeham SG, Thomson RE, Lavelle JW, Baker ET, Feely RA. 2001. Ascending and descending particle flux from hydrothermal plumes at Endeavour Segment, Juan de Fuca Ridge. *Deep-Sea Research I* 48, 1093-1120.
  26. Wakeham SG, Cowen JP, Burd BA, Thomson RE. 2001. Lipid-rich ascending particles from the hydrothermal plume at Endeavour Segment, Juan de Fuca Ridge. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65, 923-939.
  27. Larsen EH, Quétel CR, Munoz R, Fiala-Medioni A, Donard O.F.X. 1999. Arsenic speciation in shrimp and mussel from the Mid-Atlantic hydrothermal vents. *Marine Chemistry* 57, 341-346.
  28. Direct observation of the evolution of a seafloor 'black smoker' from vapor to brine. *Earth and Planetary Science Letters* 149, 101-111.
  29. Feely RA, Baker ET, Marumo K, Urabe T, Gendron J, Lebon GT, Okamura K. 1996. Hydrothermal plume particles and dissolved phosphate over the superfast-spreading southern East Pacific Rise. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 2297-2323.
  30. Kadko D, Moore W. 1988. Radiochemical constraints on the crustal residence time of submarine hydrothermal fluids: Endeavour Ridge. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52, 659-668.

### **Abstract**

The  $^{210}\text{Pb}/\text{Pb}$  and  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  ratios measured in fluids and particles venting from the Endeavour Ridge are used to constrain the crustal residence time of the converting hydrothermal fluid from the initiation of basalt alteration where  $\text{Mg}^{+2}$  loss from seawater results in rapidly falling pH conditions, to termination at seafloor venting. The  $^{210}\text{Pb}/\text{Pb}$  ratios of hot, low Mg fluids are close to that of the basalts, suggesting a residence time of no greater than ten years. Particles associated with these vents have slightly higher ratios which may in part be due to scavenging of seawater  $^{210}\text{Pb}$ . The  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  ratios of the fluids and an

associated Ba-rich particle sample were also close to the basalt ratio, further constraining the residence time to 3 years or less. These estimates indicate that the mass of fluid interacting with newly formed crust at any one time is less than  $9 \times 10^{13}$  kg, if the axial heat flux is to be no greater than 30% of the total advective heat loss from the oceanic crust

31. Dymond J, Cobler R, Gordon L, Biscaye P, Mathieu G.. 1993.  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{222}\text{Rn}$  contents of Galapagos Rift hydrothermal waters: the importance of low-temperature interactions with crustal rocks. *Earth and Planetary Science Letters* 64, 417-429.

Hydrothermal waters collected by "Alvin" from the Galapagos Spreading Center are enriched in  $^{222}\text{Rn}$  by factors of 50-200 over bottom waters. The  $^{226}\text{Ra}$  in the same samples, however, is enriched by less than a factor of four over bottom waters. Enrichments of  $^{222}\text{Rn}$  result primarily from  $\alpha$ -recoil from rock surfaces while  $^{226}\text{Ra}$  enrichments are dominantly produced by high-temperature alteration of cooling ridge volcanics. The abundances of both nuclides exhibit positive correlations with temperature. The data extrapolate to bottom water temperatures and compositions, demonstrating the importance of seawater mixing. Different vents, however, have different mixing lines, and vents with high  $^{222}\text{Rn}$  have low  $^{226}\text{Ra}$ . We propose these patterns result from variations in the extent of low-temperature crustal interaction with the hydrothermal fluids. Low-temperature crustal waters can maintain high steady state  $^{222}\text{Rn}$  contents due to the  $\alpha$ -recoil additions to the fluids. The  $^{226}\text{Ra}$ , however, is strongly adsorbed at low-temperatures resulting in low concentrations of this nuclide in low-temperature crustal waters. Thus, physical mixing of a crustal water component with hydrothermal waters or variable crustal path lengths of the hydrothermal fluids can account for the variable mixing lines and  $^{222}\text{Rn}/^{226}\text{Ra}$  values of the hot springs.

The  $^{222}\text{Rn}/^{226}\text{Ra}$  value appears to be a sensitive indicator of low-temperature crustal interaction. Values  $> 100$  have experienced extensive crustal interaction and are indicative of diffuse hydrothermal flow. Values between 1 and 10 are indicative of primary hydrothermal fluids which have not experienced significant interaction with the crust. Values of  $^{222}\text{Rn}/^{226}\text{Ra}$  between 10<sup>3</sup> and 10<sup>4</sup> are indicative of interaction of the hydrothermal fluids with sediments. Such values are observed in water samples from the Galapagos hydrothermal mounds.

32. Reyes AO, Moore WS, Stakes D. 1995.  $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$  ages of a barite-rich chimney from the Endeavour Segment of the Juan de Fuca Ridge. *Earth and Planetary Science Letters* 131, 99-113.
33. Takano Y, Edazawa Y, Kobayashi K., Urabe T, Marumo K. 2005. Evidence of sub-vent biosphere: enzymatic activities in 308°C deep-sea hydrothermal systems at Suiyo seamount, Izu-Bonin Arc, Western Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letters* 229, 193-203.

## (2) 열수 찾기를 위한 심해관측장비(분야별)의 개념적 설계 및 운영

### 1) 추적자 검출 기술 개발

- $^{210}\text{Po}$  측정 장치(?)
- Mn 연속 분석 장치 개발- colorimetry(?)

black smoker

해저 화산 분출물	average	maximum	reference
CO <sub>2</sub>	20 mmol/kg	200 mmol/kg	1
H <sub>2</sub> S	7 mmol/kg	110 mmol/kg	1
H <sub>2</sub>	2 mmol/kg	40 mmol/kg	1
CH <sub>4</sub>	<1 mmol/kg		1
$^3\text{He}/^4\text{He}$	7.51		2
$^3\text{He}$	25 pmol/kg		2
CO <sub>2</sub>			
NH <sub>3</sub>			
Mg			
Mn		14.3 nmol/l	6
Cl			
$^{210}\text{Po}$		45~55 dpm/100L	5

The extent of Po degassing during these submarine eruptions (its volatility) is very similar to that at subaerial volcanoes:  $^{210}\text{Po}$  is essentially completely (>95%) degassed from erupting magmas of basaltic to andesite composition in all locales. This result is expected since Po is moderately volatile, such that in volcanic emissions it is completely gaseous at temperatures of ~400°C or greater. Polonium has been suggested to volatilize as a halogen species, which is reasonable considering that the di and tetra halogen compounds of Po boil or sublime at temperatures of 110~390°C.

Unlike the earlier observation,  $^{210}\text{Po}$  activities, observed in Loihi seawater samples, is 45 and 55 dpm/100L and these are five to ten times greater than earlier measurements, and the particulate/dissolved ratio is also much greater than that typically found in the open ocean.

## 2) 후보지의 법적 지위 검토

- 타국의 EEZ와의 관계, 공해라면 어디에? 국제법상 연구 (Marine Science Research, MSR)의 허용 범위

## 3) 국제동향 검토

- 열수 역에 대한 생물다양성 보호를 위한 국제적인 동향 예의 주시 필요

- 열수 생태계 조사에 대한 국제적인 Code of Conduct 발표 주시 필요

(참고 자료: UN Division of Ocean and Law of the Sea 의 Informal Consultative Process 회의 보고서나 UN General Assembly 자료 살펴 볼 것.

## 4) 찾은 다음에 무엇을 할 것인가?

연구 대 주제 선정 후에 관련 소 과제를 개발하고 이 소과제를 학제적으로 망라하는 방안이 바람직함.

## References

Alt JC. 2003. Hydrothermal fluxes at mid-ocean ridges and on ridge flanks. *Comptes Rendus Geosciences* 335, 853-864.

Bougault H, Aballea M, Radford-Knoery J, Charlou JL, Baptiste PJ, Appriou P, Needham HD, German C, Miranda M. 1998. FAMOUS and AMAT segments on the Mid-Atlantic Ridge: ubiquitous hydrothermal Mn, CH<sub>4</sub>, d<sup>13</sup>He signals along the rift valley walls and rift offsets. *Earth and Planetary Science Letters* 161, 1-17.

Gary J. Massoth, Hugh B. Milburn, Chris Meinig, Mike Stapp, Joseph A. Resing, Stacy M. Maenner, Kenneth S. Johnson and Kenneth H. Coale. 1997. SUAVE (Submersible System Used to Assess Vented Emissions): A diverse tool to probe the submarine hydrothermal environment. *International Workshop March Mor: Marine Analytical Chemistry for Monitoring and Oceanographic Research, Brest, France.*

- Glowka L. 2003. Putting marine scientific research on a sustainable footing at hydrothermal vents. *Maine Policy* 27, 303-312.
- Holland HD. 2002. Volcanic gases, black smokers and the great oxidation event. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66, 3811-3862.
- Jean-Baptiste P, Foure E, Charlou J.-L., German C.R., Radford-Knoery J. 2004. Helium isotopes at the rainbow hydrothermal site (Mid-Atlantic Ridge, 36°14'N). *Earth and Planetary Science Letters*. 221, 325-335.
- Kadko D, Bacon MP, Hudson A. 1987. Enhanced scavenging of <sup>210</sup>Pb and <sup>210</sup>Po by processes associated with the East Pacific Rise near 8045'N. *Earth and Planetary Science Letters* 81, 349-357.
- Rubin K. 1997. Degassing of metals from erupting seamount and mid-ocean ridge volcanoes: Observations and predictions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 3525-3542.
- Su C.-C, Huh C.-A. 2002. Atmospheric <sup>210</sup>Po anomaly as a precursor of volcano. *Geophysical research letters* 29, GLO13856.

# 제 4 장

---

비스마르크 해역의  
헬륨동위원소 분포

---





## 제 4 장 비스마르크 해역의 헬륨동위원소 분포

### 1. 연구 목적

헬륨 동위원소는 다른 원소와의 반응에 거의 참여하지 않아 자연계에서 일어나는 많은 화학, 생물학적 현상에 영향을 받지 않는다. 그래서 해양에서 헬륨동위원소의 분포는 순전히 이류와 확산 등의 물리적 현상에 의해서만 결정된다. 이러한 보존성 때문에 해양 상층에서는 해수의 이동과 환기(ventilation), 산소, 질소 등의 물질 수지 연구에 추적자로 활용되고 있다. 또, 헬륨은 공급원이 대기, 방사능 붕괴, 맨틀 등으로 잘 규명되어 있어 해저 열수의 존재와 각 열수계의 화학적 특성 등을 규명하는 도구로 활용되고 있다.

이 연구는 파푸아 뉴기니아 비스마르크 해역의 서쪽의 확장하고 있는 해령(Western Spreading Ridge) 주위에서 일어나고 있는 여러 열수계의 존재를 확인하고, 헬륨 및 여러 화학 추적자와의 상호 비교를 통해 각 열수계의 특성도 함께 파악하고자 하였다.

### 2. 탐사 내용

모두 19개 CTD 정점에서 100여 개의 시료를 채취하였다(그림 28). 시료 채취 지역은 크게 두 지역으로 나눌 수 있다. Mata Na Kul 해역과 이번 탐사에서 처음으로 발견되어 Little & Big Coma로 명명된 해저화산 해역이 그곳이다. 이 가운데 Mata Na Kul 해역은 2000년 프랑스 연구자들에 의해 상당한 투과도 이상치가 발견된 곳이다. 이 지역에 이루어진 시료채취는 화학추적자에 대한 분석이 이루어지지 않은 2000년의 연구를 보완하는 목적과 함께, 비스마르크 해역에서 새로운 열수 탐사의 비교점으로 삼기 위한 것이었다.

한편 Coma은 수심 700-800미터 내외의 비교적 얕은 수심에서 발견된 해저 지형물로 해저화산활동과 관련하여 열수작용이 존재할 가능성이 높은 곳으로 여겨졌다. 이를 확인하기 위해 Little Coma와 Big Coma의 해저화산 정상부에서 각각 몇 번의 시료 채취를 수행하였다.

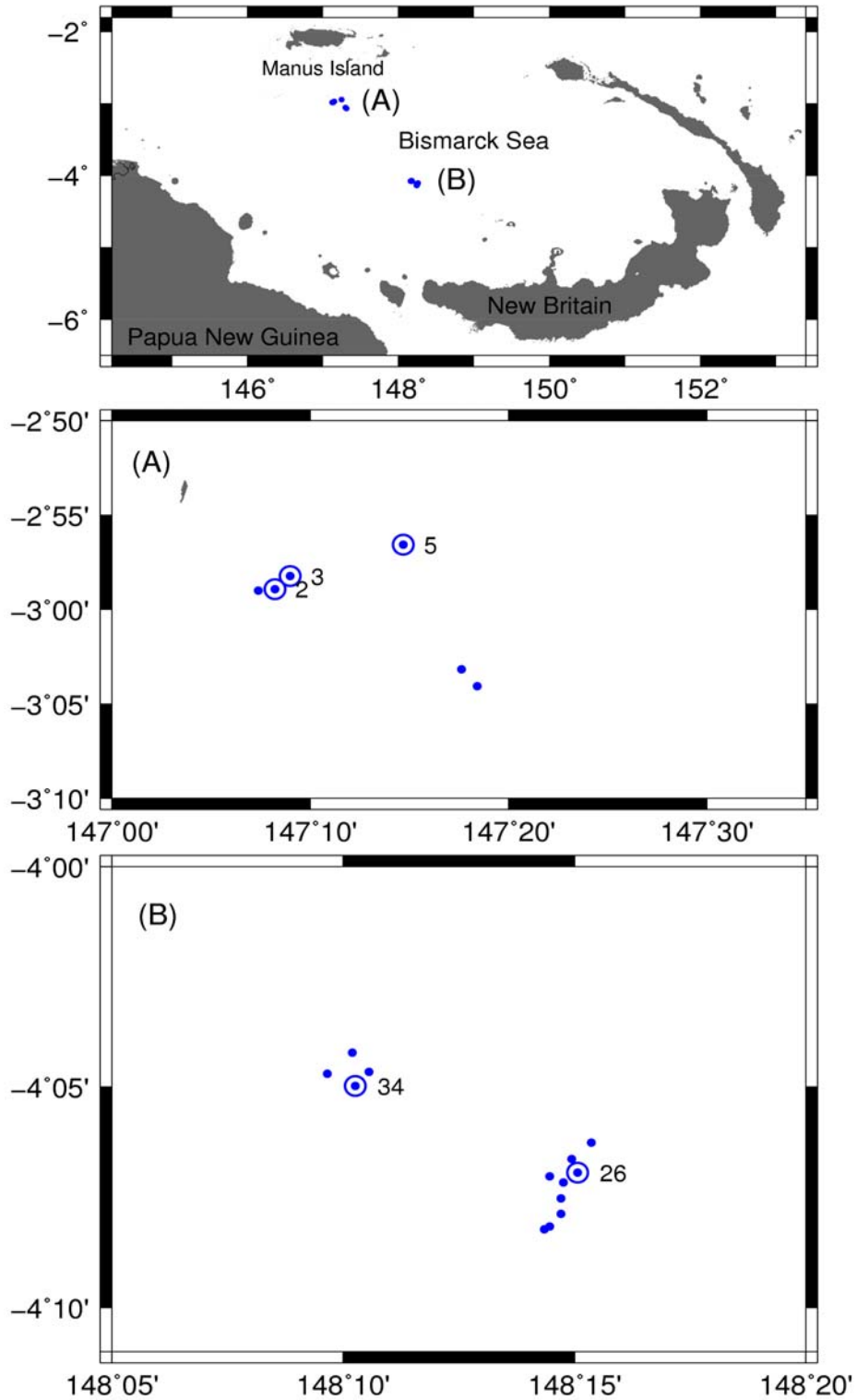


그림 28. 헬륨동위원소 시료 채취 지역. (Mata Na Kul (A)과 Little & Big Comas (B) 인근 해역에서 집중적인 시료채취가 이루어졌다. 숫자로 표시한 곳은 실제 분석을 수행한 정점)

### 3. 분석 방법

선상에서 약 40g의 해수 시료를 구리관에 채운 후 cold welding press를 이용하여 양 끝을 봉해 보관하였다. 각 구리관 안의 시료에 녹아있는 기체들은 실험실에서 진공장치를 이용하여 추출하였고, 헬륨의 투과도가 낮은 유리관 (aluminosilicate glass ampoule)에 채집하였다. 유리관 속의 추출 기체들은 두 개의 초저온 냉각장치에 연결되어 있는 세 개의 트랩을 이용하여 정제하였다. 트랩의 온도는 각각 150K, 24K, 10K까지 온도를 낮출 수 있다. 헬륨과 네온을 제외한 모든 기체들은 각각의 액화점에 따라 150K, 24K 트랩에 분리되고 10K 트랩에는 헬륨과 네온만 부착된다. 10K 트랩의 온도를 40K로 올림으로써 헬륨을 네온과 분리시키고 이를 질량분석기(Micromass 5400)로 주입하여 He-3, He-4를 각각 electron multiplier, Faraday cup 검출기로 측정하였다. 대기 표준기체를 분석한 결과를 이용하여 He-3, He-4를 정량하였다.

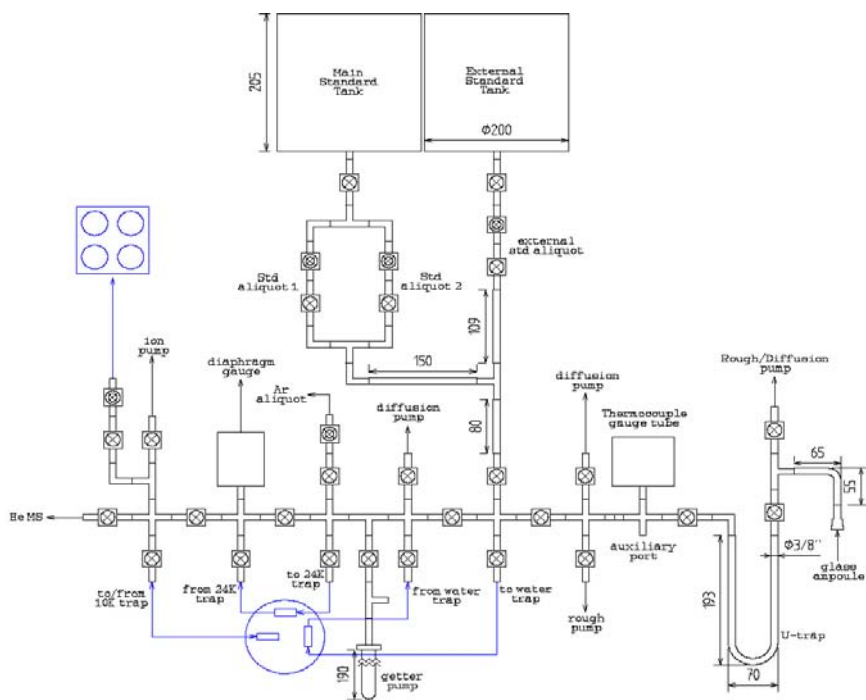


그림 29. 기체시료 전처리 장치. (유리튜브에 담겨 있는 추출 시료에서 헬륨과 네온을 분리해 질량분석기로 주입한다. 아래쪽 파란색 원은 초저온 냉각분리장치를 나타낸다.)

## 4. 분석 결과 및 토의

시료 채취 정점 중 실제 분석을 수행한 곳은 Mata Na Kul 인근의 2, 3, 5번 정점, Coma 해역의 26, 34번 정점 등 모두 5개 정점이다(그림 28). 이 가운데 5번 정점을 제외한 모든 곳에서 6% 이상의 투과도 감소가 CTD를 통해 관측되어 열수 혹은 유사 작용이 있는 곳으로 예상하였다. 특별한 이상 현상이 발견되지 않은 5번 정점은 열수 작용의 직접적인 영향을 받지 않는 주변 해역의 특성을 파악하기 위해 다른 정점과 함께 분석을 수행하였다.

그림 28에 A, B로 표시한 위 시료채취 해역은 모두 투과도 이상치가 발견되었지만 헬륨동위원소 분포에 있어서는 상당한 차이를 보이고 있었다. 아래에 그 분석 결과를 지역별로 토의한다.

### Mata Na Kul (A)

2000년 프랑스 연구자들에 의해 투과도 이상치가 발견된 곳이다. 이번 탐사에서 정점 2와 3의 650 미터보다 깊은 수심에서 6-10%가량의 이상치가 발견되어 일찍이 헬륨동위원소의 이상치( $\delta^3\text{He}$ )가 예상되었다. 실제 분석 결과는 이런 예상을 잘 뒷받침하며 투과도 이상치와 좋은 거울상을 보여주고 있다(그림 30).

위 분석 결과에서 나타나는 헬륨 동위원소의 이상치는 400-500%에 이르는 것으로, 경계판의 확장 속도가 매우 빠른 East Pacific Rise의 경우에도 그 값이 30-40%인 점을 감안하며 매우 이례적으로 높은 값이라 하겠다. 이는 Mata Na Kul 해역에 비스마르크해의 서쪽 확장 해령의 속도만으로 설명할 수 없는 거대한 규모의 열수작용이 존재할 수 있음을 의미한다. 실제 이와 유사한 규모의 헬륨동위원소 이상치는 Juan de Fuca Ridge에서 해저화산 활동이 있던 직후에나 관측되었다(Lupton et al., 1999). 과연 Mata Na Kul 해역에서도 유사한 해저화산 활동의 영향에 의해 위와 같은 큰 이상치가 발견되었는가, 아니면 이 지역만의 독특한 현상에 의한 것인가에 대해 알기 위해서는 이번 관측을 통해 얻어진 지구물리, 지구 화학적인 관측 결과들을 종합하는 노력이 필요하다.

정점 5는 선상의 CTD 관측 결과에서 열수 작용을 암시하는 어떤 이상 징후도 발견되지 않은 곳이다. 이번 탐사에서 열수 현상의 존재 유무를 판정하는데 필요한 비교값의 획득을 위해 분석을 실시한 곳으로, 헬륨동위원소비가 50% 미만으로 현저히 낮은 값을 보였다.

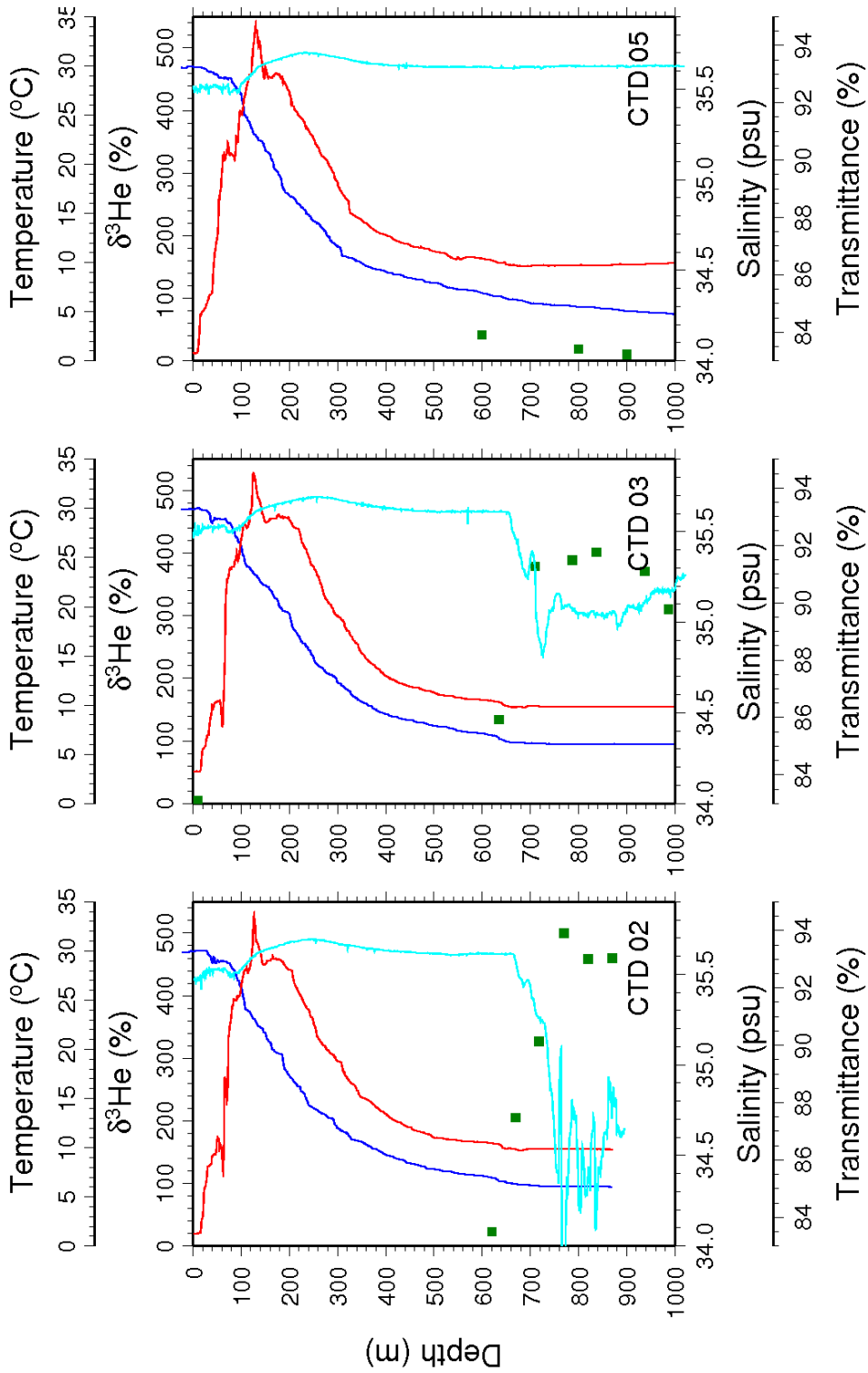


그림 30. Mata Na Kul 해역의 헬륨 동위원소 분포. (CTD 02, 03 정점의  $\delta^3\text{He}$ 은 400~500%로 East Pacific Rise의 30~40%에 비해 현저히 높은 값이다. 정점 05는 열수작용이 없는 것으로 추정되는 지역)

Little & Big Comas (B)

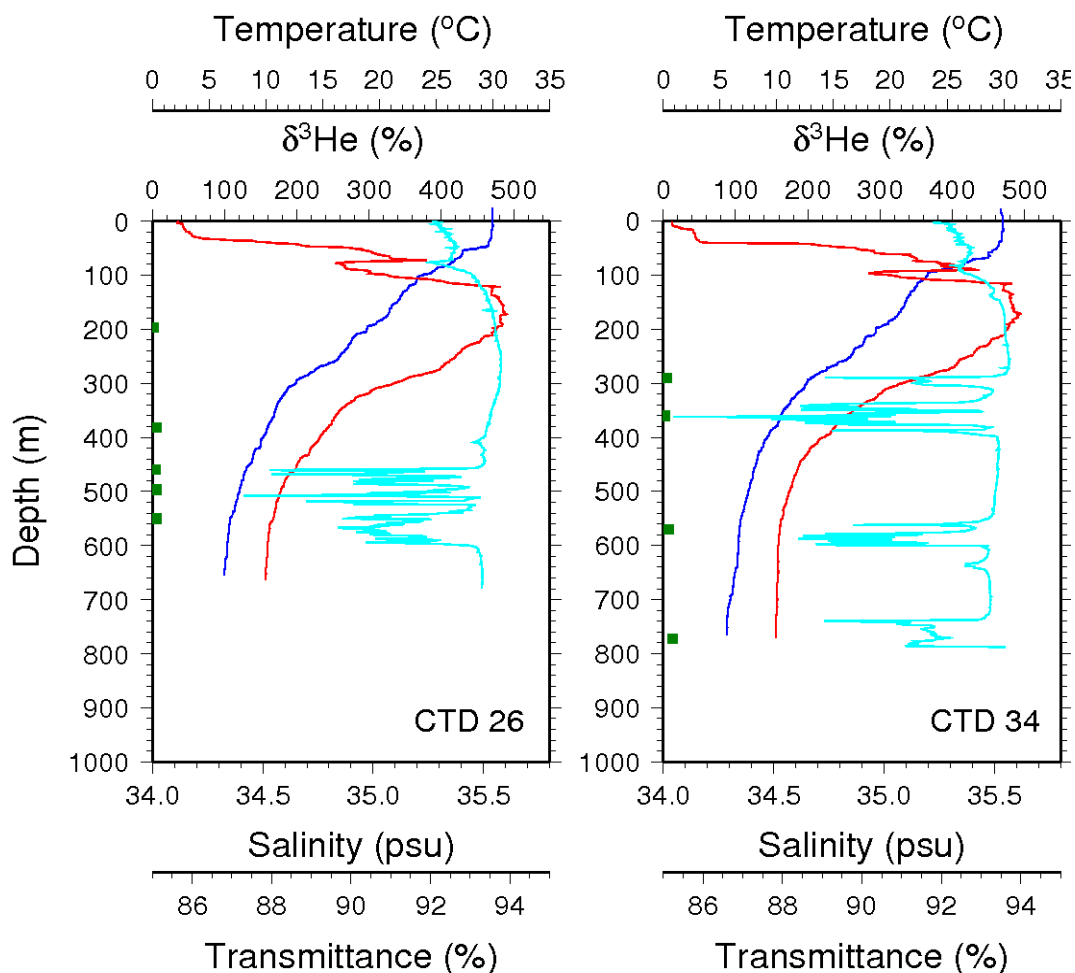


그림 31. Coma 해역의 헬륨동위원소 분포도 (두 정점 모두 투과도 이상치와 무관한 양상을 보이고 있다.)

이번 탐사에서 수심 800 미터 안팎의 비교적 얕은 수심에서 발견된 두 개의 해저 화산을 각각 Little & Big Coma라고 명명하였다. 그림 4에서 알 수 있듯이 선상 CTD 관측에서 수심, 300-400미터, 600미터, 700-800미터의 여러 수층에서 4-6%에 이르는 투과도 이상치가 발견되어 해저화산 주변에서 열수 작용의 영향이 있을 가능성이 높은 것으로 예상하였다. 하지만 헬륨동위원소비( $\delta^3\text{He}$ )는 20%미만으로 앞서 살펴본 Mata Na Kul의 500%에 이르는 거대한 이상치와는 분명한 차이를 보이고 있다. 그뿐만 아니라 정점 5의 배경 농도값보다도 크지 않은 작은 값이

었다. 이를 통해 해저화산 주변에 헬륨동위원소 분포에 영향을 줄 만큼의 강력한 열수작용이 존재하지 않거나, 열수 작용의 존재 범위가 매우 좁은 지역으로 국한되어 있는 것으로 추정할 수 있다. CTD를 관측 지역에 내릴 때 관측되었던 투과도 이상치가 올릴 때는 사려진 점은 열수 작용의 범위가 매우 적을 수 있음을 시사한다.

## 5. 요약

이번 탐사에서 헬륨동위원소 분포에 대한 조사는 Mata Na Kul과 Coma 두 해역을 중심으로 이루어졌다. 이중 Mata Na Kul 해역은 기존에 열수작용의 존재가 알려 있었지만, 헬륨 동위원소와 메탄 등의 화학 분석은 처음 이루어졌다. 게다가 헬륨 동위원소 이상치( $\delta^3\text{He}$ )가 500%에 이르러 이 지역의 열수작용이 다른 해역에 비해 매우 강력한 것으로 나타났다. 이런 높은 이상치를 나타내는 지질학적 요인이 무엇인가를 규명하는 것은 매우 흥미로운 주제가 될 수 있을 것이다. 이를 위해 이번 탐사의 지구물리, 지구화적 결과들을 종합하는 노력이 필요하겠다.

당초 Coma 해역에서 관측한 CTD의 투과도 이상치 자료는 열수작용의 존재를 시사하는 것이었다. 하지만 헬륨동위원소 분석 결과는 예상과 달리 뚜렷한 열수 작용의 영향을 보여주지 않았다(그림 31). 이 지역의 열수 작용이 헬륨동위원소의 이상치를 수반하지 않는 형태의 것이거나, 열수 작용의 범위가 매우 좁아 유효한 해수 시료의 채취가 이루어지지 않았을 가능성도 존재한다. 헬륨동위원소의 이상치를 수반하지 않는 메탄의 이상치가 대서양 중앙해령 근처에서 종종 발견되고 있는 점을 고려할 때 메탄이나 여타 화학자료와의 비교 토의가 필요할 것으로 판단된다.





# 제 5 장

---

열수지역 초기선정을 위한  
지구물리 탐사방법  
연구계획 및 국제협력

---



# 제 5 장 열수지역 초기선정을 위한 지구물리 탐사 방법 연구계획 및 국제협력

## 1. 연구개발과제의 개요

### (1) 연구개발의 목적

향후 수행하고자 하는 서태평양 분지의 해저열수분출 주변 환경에 대해 필요한 지구물리 연구 방향을 기획하고 필요한 부분에 대해 국제협력 방안을 제시하는 것을 목적으로 한다.

### (2) 연구추진 배경

먼저 선진 외국들이 과거에 수행한 서태평양 활성 분지 연구들과 이들의 주요 프로그램에 대해 살펴본 후 뒤늦게 출발하는 우리나라가 앞으로 나아갈 방향과 선진 외국들과 차별화될 수 있는 방안 등에 대해 언급하기로 한다.

#### 1) 서태평양 활성분지 연구의 전반적 개요 및 선진국의 활동

서태평양은 많은 활성분지들이 존재하며 많은 해저 열수 분출구가 이들 분지의 확장축(spreading axis) 주변으로 존재한다. 해저 열수 분출구가 존재하는 대부분의 분지들은 지질학적 관점에서 볼 때 해양판의 섭입(subduction)과 관련하여 형성되는 후열도 분지(backarc basin)에 속한다. 일반적으로 지구과학자들은 섭입대-호상열도-후열도분지를 하나의 시스템, 즉 trench-arc-backarc system으로 구분하는데 우리 지구상의 주요한 섭입대-호상열도-후열도 시스템 대부분이 서태평양에 존재한다(그림 32). 그림 32에서 보는 바와 같이 그 대표적인 섭입대-호상열도-후열도 시스템이 북서태평양의 Izu-Bonin-Mariana 시스템과 남서태평양의 Tonga-Kermadec 시스템이다. 이들 두 시스템은 미국과 일본을 비롯한 선진국들에 의해 그 동안 지속적으로 연구가 되어왔다. 서태평양 적도 부근을 따라 또 하나의 섭입대-호상열도-후열도 시스템이 존재하는데 이 일대가 소위 멜라네시아 열도(Melanesian Arc)에 해당된다. 멜라네시아 열도는 판구조론적인 관점에서 볼 때 북쪽으로 이동하는 인도-호주판(Indo-Australian Plate)이 서쪽으로 이동하는 태평양판(Pacific Plate)과 비스듬하게 충돌하는 거대한 해양판간의 충돌대에 해당된다. 본 연구에서 멜라네시아 열도 부근을 연구대상 해

역으로 잡고자 하는 이유는 비교적 Izu-Bonin-Mariana나 Tonga-Kermadec 섭입대-호상열도-후열도분지 시스템에 비해 지금까지 덜 체계적으로 연구되어 왔고 또 선진국들이 현재 이 지역에 큰 연구 프로그램을 운영하고 있지 않다는 점이 큰 이유 가운데 하나이다. 또한 적도 부근에 위치해 있어 해황이 비교적 다른 지역에 비해 좋다. 동태평양 중앙해령(East Pacific Rise)(그림 32)은 우리나라에서 멀고 또 해황이 그다지 좋은 편이 아니다.

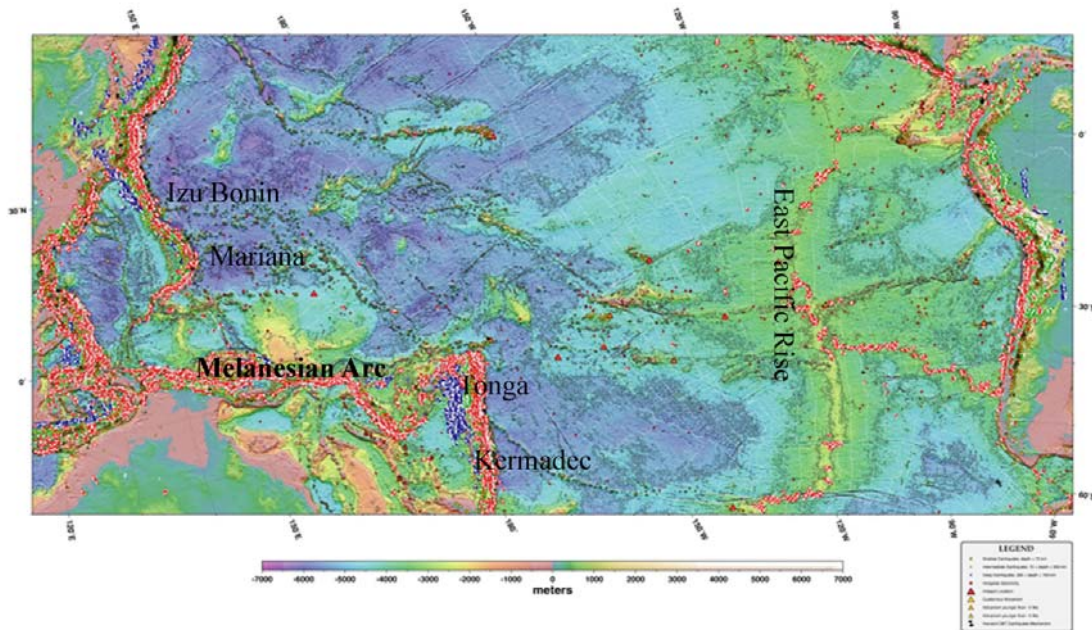


그림 32. 태평양의 해저 지형도 및 멜라네시아 열도(Melanesian Arc)의 위치. 빨강, 초록, 파란 원들은 진원 깊이에 따른 5.5도 이상의 지진을 표시한 것임.

멜라네시아 열도는 해양판들 간의 비스듬한 충돌로 인해 Izu-Bonin-Mariana나 Tonga-Kermadec 섭입대-호상열도-후열도분지 시스템과 비교해 볼 때 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 이 열도의 서쪽은 파푸아 뉴기니아(Papua New Guinea; PNG)가 자리 잡고 있고 여기서부터 동쪽으로 솔로몬 군도(Solomon Islands), New Hebrides의 바누아투(Vanuatu), 피지(Fiji), 통가(Tonga) 등으로 이어진다(그림 33). 우리가 관심 대상은 이들 섬 주변에 자리 잡고 있는 분지들이다. 분지는 그 크기에 따라 세분할 수 있지만 큰 것들을 중심으로 열거하면 PNG 비스마르크해(Bismarck Sea)를 구성하고 있는 크고 작은 분지들, Solomon Basin, Woodlark Basin, New Hebrides Basin, Fiji Basin, Lau Basin 등이 있다. 이 밖에 멜라네시아 열도에는 속하지 않지만 새로운 열수분출구 탐사가 가능한 곳이 에이유 분지(Ayu Trough)이다. Ayu Trough는 필리핀 해 남부에 자리 잡고 있으며 판구조론으로 볼 때 필리핀 해 판(Philippine Sea Plate)과 캐롤라인 판(Caroline Plate)의 경계부에 해당된다. 이 해역에 대한 탐사는 한국해양연구원이 2000년과 2001년 온누리호를 이용해 세계 처음으로 수행한 바가 있다. 현재 Ayu Trough는 인도네시아와 팔라우 공화국이 남쪽과 북

쪽을 각각 EEZ로 주장하고 있다 (그림 33).

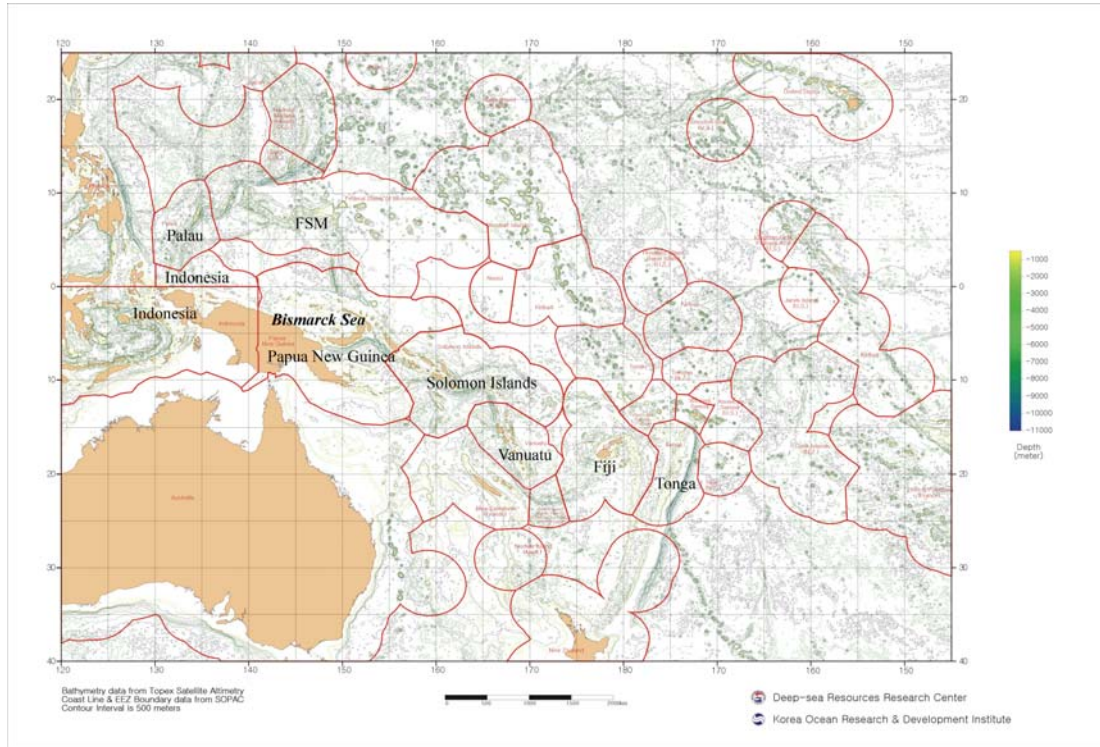


그림 33. 서태평양 적도 부근 멜라네시아 열도 주변 도서 국가들의 EEZ. 비스마르크해 (Bismarck Sea)는 파푸아 뉴기니아의 내해에 속해 있음.

앞에서 언급한 도서 국가들 대부분은 경제적으로 낙후되어 있는 반면 광활한 해역들을 EEZ로 가지고 있다. 그러나 이러한 도서 국가들은 자체적으로 주변해역에 대한 자원탐사를 할 수 없다(그림 33). 넓은 EEZ를 가진 도서 국가와 탐사능력을 가진 선진국을 연결시켜주기 위해 1972년 UNDP(United Nations Development Programme)는 Committee for Coordination of Joint Prospecting for Mineral Resources in South Pacific Offshore Areas(CCOP/SOPAC)을 만들었는데 이를 통해 남서태평양 연구의 중요한 전기가 마련되었다. CCOP/SOPAC은 1980년대에 수많은 활동을 했다. 1990년대에 들어 CCOP/SOPAC은 South Pacific Applied Geoscience Commission(SOPAC)으로 탈바꿈했으며 처음에는 10개의 도서 국가들이 참여했지만 현재 20개국(Australia, Cook Island, Fiji, Guam, Federated States of Micronesia, Kiribati, Marshall Islands, Nauru, New Zealand, Niue, Palau, Papua New Guinea, Samoa, Solomon Islands, Tonga, Tuvalu, Vanuatu)으로 늘었으며 몇몇의 준회원국들(American Samoa, French Polynesia, New Caledonia)도 있다. (SOPAC에 관한 자세한 사항은 [www.sopac.org](http://www.sopac.org)을 참조)

이 지역은 지구과학적으로 몇 가지 주요 현안 문제를 가지고 있는데 그 가운데 주요한 것들이 EEZ내의 자원탐사(석유/광물자원), 지진해일(tsunami)과 같은 지질재해 그리고 지구 온난화에 따른 해수면 상승 등이다. 특히 Kiribati 같이 작은 섬나라는 해수면 상승에 의해 해수면 아래로 없어질 위기에 놓여있다. EEZ내의 자원탐사에 대해서는 몇 가지 우여곡절을 겪어왔다. CCOP/SOPAC이 창설된 이후 1970년대 몇 차례 해양탐사가 있었지만 당초 선진국들의 약속과는 달리 활발하게 진행되지는 않았고 도서 국가들은 이에 대해 많은 불만을 가지게 되었다. 그러자 월남 공산화 이후 태평양으로의 진출의 기회를 엿보던 소련이 이들 도서 국가들에게 연간 60일간의 탐사를 제공하겠다고 UN에 제의했고 이것이 결국 서방선진국들의 즉각적인 대응을 불러 일으켰다. 미국은 호주, 뉴질랜드와 3국 동맹을 체결하고 소련의 진출을 막기 위해 본격적으로 탐사와 연구에 나섰다. 이렇게 하여 만들어진 것이 1982년 Tripartite Marine Geoscience Programme in the South Pacific(일명 Tripartite Programme)이다.

미국-호주-뉴질랜드의 Tripartite Programme은 1982년과 1987년 사이에 15차례의 대규모 종합 해양탐사를 남서태평양에서 수행했는데 이를 통해 얻어진 많은 좋은 연구 성과가 AGU 학회를 비롯한 국제학회에서 발표되면서 전 세계 과학계에 주목을 받기 시작했다. 반면 소련은 1980년과 1981년 서태평양으로 진출을 시도했으나 미국의 외교적 방해로 좌절되었고 1990년대에 이르러 심해 잠수정 Mir 1과 Mir 2를 이용해 Woodlark 분지와 Manus 분지에서 해저 열수 분출구에 대한 탐사를 수행할 수 있었다.

미국-호주-뉴질랜드에 의한 Tripartite Programme을 서태평양에 대한 1차 조직적인 대규모 연구라고 한다면 2차 대규모 연구는 일본과 프랑스에 의한 STARMER 프로젝트라고 볼 수 있다. STARMER는 일본 과기부인 Science and Technology Agency(STA)의 앞자와 프랑스 해양연구소인 IFREMER의 뒷자를 따서 만든 공동연구 프로젝트로 1987에서부터 1992년까지 주로 North Fiji Basin에 중점을 두고 수행되어졌다. 이를 이어 New STARMER 프로젝트는 1992년에서부터 1994년 사이에 이루어졌으며 이 두개의 대규모 연구사업을 통해 North Fiji Basin 상당부분에 대한 해저지질과 해저 열수 분출구에 대해 정보가 얻어졌다. 특히 일본과 프랑스 모두 SOPAC과 기밀하게 연구를 추진함으로써 도서 국가들과의 외교적 관계 개선에도 크게 이바지하였다. 앞에서 언급한 것 이외에도 학술적으로 중요한 대규모 탐사들(예: Ocean Drilling Program)과 수많은 탐사가 남서태평양에서 이루어졌지만 생략하기로 한다.

미국은 1989년부터 1999년까지 약 12년에 걸쳐 중앙해령에 대한 연구를 대규모로 수행했다. 이것이 바로 RIDGE 프로그램이다. 미국의 RIDGE 프로그램은 전세계적으로 비슷한 프로그램을 불러일으켰고 이러한 각국들의 중앙해령 연구관련 프로그램을 조율하기 위해 InterRidge가 만들어졌다. 1980년대와 90년대 중앙해령연구의 핵심은 지구과학적인 것들이었다. 그러나 2000년에 들어 열수분출구 주변에서의 생명과학 연구의 중요성이 크게 부각되면 새롭게 만들어진 Ridge 2000 프로그램에서는 지구과학과 함께 주요 테마가 되었다. Ridge 2000은 3곳을 주요연구 지역으로 선정해 집중적인 연구를 수행하고 있는데 그 가운데 하나가 East Lau Basin으로 남서태평양 Tonga 해역에 속하는 활성 후열도 분지이다. 따

라서 미국은 이곳에 향후 5-7년간 매년 30-40억원 이상의 대규모 연구투자를 할 것이다.

이 처럼 간략하나마 지금까지 남서태평양에서 수행된 선진국들의 주요 연구 프로그램을 언급하는 것은 이 같은 정보가 앞으로 우리가 나아갈 방향을 선정하는데 있어서 매우 중요하기 때문이다.

## 2) 국내 사업 추진 배경

최근 5-6년 사이 우리나라에서도 해저 열수 분출구에 대한 연구가 한국해양연구원을 중심으로 시작되었다. 미국이 1976년 갈라파고스 제도에서 해저 열수 분출구를 처음 발견한 것을 기준으로 삼을 경우 우리나라의 시작이 서방 선진국들에 비해 25년 가까이 뒤늦었지만 비로소 우리나라도 해양의 첨단과학 분야로 손꼽히는 열수분출구에 대한 연구를 시작했다는 점에서 매우 큰 의미를 지니고 있다. 그 동안 해저열수분출구 관련 연구를 수행하면서 몇 가지 성과도 있었지만 앞으로 이 분야가 발전하기 위해선 반드시 해결해야 할 문제점들도 들어났다. 본 기획과제는 이 같은 상황 속에서 앞으로 추진 열수분출구 환경에 대한 연구가 제대로 수행되기 위해선 어떠한 점들을 개선해야 하고 새롭게 갖추어야 하는가를 모색하기 위해 시작되었다. 특히 이 가운데 본 위탁과제에서는 해저열수분출구 주변에 대한 연구를 제대로 하기 위해 현재의 지구물리 탐사 방법을 어떻게 개선하느냐 하는 점과 국제 협력을 어떻게 도출하고 성공적으로 추진하느냐에 초점을 맞추고자 한다.

## 3) 현 국내기술 및 제도의 취약점

우리가 지금까지 추진한 해저 열수 분출구에 대한 탐사와 연구는 많은 취약점을 지니고 있다. 향후 이 같은 취약점을 극복하기 위해 먼저 이들이 무엇인지 하나씩 짚어보기로 한다. 기술적인 취약점들의 언급에 앞서 시스템적인 문제점들에 대해 먼저 언급해 보기로 한다.

### 가. 중복성 문제

향후 일반사업으로 추진하고자 하는 열수분출구에 대한 연구는 얼핏 보기에 중복성의 문제가 있는 듯해 보인다. 왜냐하면 해양수산부가 지원하는 열수광상에 대한 연구사업이 해저 열수 분출구를 대상으로 하기 때문이다. 앞서서도 언급했듯이 1970년대 선진국들의 남서태평양에 대한 관심은 지하자원(석유/광물자원)이 주된 원인이었다. 하지만 이것은 초기의 형태이고 1980-1990년대 들어 선진국들의 주 관심 대상은 광물자원이 아니라 새로운 지구과학적 그리고 생명과학적인 현상을 밝히는 것으로 바뀌어졌다. 따라서 이것은 중복성의 문제라고 하기보다 실용적인 접근과 학문적인 접근 중 어디에 초점을 맞추느냐에 따른 차이라고 볼 수 있고 이 두 가지 접근 모두가 국가적으로 필요하고 상호보완적으로 진행될 수 있다.

현재 일본의 사례를 들어보기로 한다. 일본의 해저 열수 분출구에 대한 연구는 경제적인

차원에서 상업적인 개발 가능성에 대한 연구를 수행하는 그룹과 과학적인 차원에서 지구/생명 과학적 현상을 탐구하는 그룹으로 구분되어져 왔다. 전자는 주로 지질조사소가 중심이 되어 수행되어졌고 후자는 대학과 연구소를 통해 수행되어져 왔다. 상업적인 개발에 관점을 둔 연구는 Metal Mining Agency of Japan(MMAJ)에서 추진되어 왔으며 그렇지 않은 학술적인 분야에 대한 연구는 일본의 우수 대학들과 해양연구소인 JAMSTEC이 추진하고 있다.

#### 나. 해저면 근접 탐사장비의 확보

1992년 온누리호가 도입되면서 대양을 탐사할 수 있는 기반이 어느 정도 갖추어졌다. 하지만 해저 열수 분출구를 연구하기 위해선 깊은 바다의 해저면 가까이 접근할 수 있는 능력을 필요로 한다. 즉 심해 유인/무인 잠수정이 있어야 한다는 것이다. 대부분의 열수분출구가 2000-3000m 깊이에 존재한다. 물론 해저화산에 형성된 것들은 더 낮은 수심에서도 발견될 수도 있다. 현재 우리나라에서도 한국해양연구원 대덕분소에서 자체적으로 6000m 급 무인 잠수정(ROV)을 개발하고 있다. 2006년에 개발 완료를 목표로 하고 있다. 하지만 가장 큰 문제는 모선(support vessel)의 부재이다. 온누리호를 모선으로 사용하는 것은 현실적으로 어렵다. 첫째, 작업을 위한 갑판과 선내 연구실 공간이 절대적으로 부족하다. 더욱이 가까운 우리나라 해안이 아니라 먼 남서태평양에서 작업을 하다고 생각할 때 이는 매우 심각한 문제가 될 수 있다. 둘째, ROV 작업에 있어서 필수적인 dynamic positioning을 하기 위해서는 온누리호의 thruster가 너무 약하다. 해저 열수 분출구에 대한 탐사를 하기 위해선 모선이 한 지점에 고정해서 정지해야 하는데 대양에서 이렇게 하기 위해선 상당히 강한 thruster가 필요한데 현재 온누리호는 이를 갖추지 못하고 있다. 셋째, ROV 사용에 대한 경험 부족을 들 수 있다. 운영 기술은 시간이 지나면서 나아질 수 있으나 당장 2006년부터 시작되는 열수탐사에 ROV가 투입되어 좋은 성과를 얻으리라는 것은 기대하기 어렵다.

자체 개발된 ROV를 활용한 본격적인 탐사는 6000톤급 연구선(쇄빙선)이 만들어지는 2008년 이후에나 가능하리라 예상된다. 따라서 생물/미생물 연구와 같이 해저면에서 시료를 가져와야 하는 연구는 첫 3년(2006-2008년)은 외국 선박을 이용한 무인잠수정 탐사에 의존할 수밖에 없다. 그리고 이를 위해 국제공동연구 개발이 불가피하다.

해저 열수 분출구에 대한 연구를 위해선 유인/무인 잠수정 이외에도 다양한 탐사 장비가 필요하다. 이 가운데 지구물리 탐사와 관련된 것들을 열거하면 아래와 같다. 앞으로 사업을 추진하는 과정에서 이들을 제대로 확보하는 것에 사업의 성공여부가 달려있다. 대부분의 장비들은 열수탐사 이외에 다른 연구사업에서도 활용이 가능하다.

- 넓은 지역에 걸친 해저지형 탐사를 위한 광역 사이드스캔 소나(long-range side-scan sonar) (12kHz)
- 해저면에 근접해 정밀 해저지형 탐사를 위한 심해 견인 사이드스캔 소나(deep-tow side-scan sonar with 3.5kHz sub-bottom profiler) (>100kHz)
- 심해 견인 실시간 카메라 시스템(deep-tow real-time camera system)



- 심해 견인 실시간 자력계(deep-tow magnetometer)
- 심해 위치 추적을 위한 long-baseline transponder network/array (12kHz) 및 ultra-short baseline transponders
- TV-grab sampler
- 심해 지열 탐침(deep-sea heat probe)
- 해저면 지진계(ocean bottom seismometers) (20기 이상)
- 다중채널 탄성과 스트리머 및 에어건(multi-channel seismic streamer and air-gun array)
- 다중빔 음향측심기를 비롯한 선상관측 장비(multi-beam echosounder and various ship-board underway geophysics instruments)

#### 다. 대상 해역 국가들에 대한 외교적 노력

지금까지 우리나라가 수행한 열수탐사는 매년 탐사지역을 크게 바꾸어 갔기 때문에 연속성이 없었다. 본 과제가 기획하는 열수탐사 사업은 장기적인 것으로 이것이 제대로 수행되기 위해선 그전에 비해 훨씬 많은 노력을 대상 해역 국가들의 협조를 이끌어 내는데 기울어야 한다. 이것은 과거에 단순히 해당국가 관계자를 탐사에 참여시켜 주고 탐사 후 자료를 제공하는 수준을 넘어서는 것을 의미한다.

1980년대 Tripartite Programme과 1990년대의 STARMER 프로젝트에서 선진국들은 해당국가와 뿐만 아니라 SOPAC과 제휴를 맺고 대규모 탐사를 진행했다. 앞으로 우리나라의 탐사도 이래야 할 것으로 예상된다. 일본의 경우 상당한 원조를 SOPAC과 도서 국가들에게 하고 있는 것은 잘 알려진 사실이다. 피지 South Pacific 대학 설립에 막대한 지원을 했으며 1998년 7월 파푸아 뉴기니아 비스마르크해 서부에 대규모 지진해일이 났을 때 앞장을 서 신속히 피해 지역에 대한 탐사를 하였다.

#### 라. 선진국들과의 교류 확대

해저 열수 분출구 연구에 관한 우리의 경험과 지식은 선진국에 비해 크게 뒤떨어져 있다. 짧은 시간에 선진국 수준에 오르기 위해선 국내 투자 못지않게 선진국들과의 학술적 교류의 확대가 매우 중요하다. 일본의 경우 1980년대까지만 해도 서방 선진국들에 비해 장비, 기술, 인력 면에서 모두 크게 뒤졌다. 이러했던 일본이 오늘날 해저탐사에 있어서 세계 최강국 자리에 오를 수 있었던 것은 STARMER와 New STARMER 프로젝트를 통해 프랑스의 선진 해양기술을 빨리 배울 수 있었기 때문이다. 이제 일본은 독자적으로 심해 탐사를 수행할 수 있는 기술과 능력을 하고 있다. 우리나라도 해저 열수 분출구 탐사에 있어서 파트너가 될 국가 또는 연구팀을 잡아야 한다. 현재 서태평양 연구에 있어서 우리와 동반자적 관계를 맺을 수 있는 나라로는 일본과 프랑스가 있다.

해저 열수 분출구 연구를 자원에 초점을 맞출 경우 그렇지 않은 경우에 비해 선진국들과의 학술적인 교류가 제한될 수밖에 없다. 예를 들어 일본의 MMAJ 같은 경우 자원탐사라는 성격상 많은 자료가 공개 되지 않고 독점적 소유(proprietary)로 되어 있어 JAMSTEC 등 일본의 다른 기관들과 비교할 때 다른 선진국들의 기관들과의 협력이 제대로 이루어지지 않고 있다. 이것이 우리가 자원에만 초점을 맞추어 해저 열수 분출구 연구를 할 수 없고 기초 해양과학기술에 맞추어야 하는 또 하나의 이유이다.

현재 심해저 연구의 세계적인 추세는 지구과학과 생명과학을 융합한 geo-biology와 같은 새로운 학문분야인데 이 같은 흐름을 가장 잘 반영하는 것이 해저 열수 분출구에 대한 연구이다. 미국의 Ridge 2000 프로그램, 일본의 Archaean Park 프로젝트 등이 좋은 사례들이다. 우리가 앞으로 이런 앞선 분야로 진출하고 세계와 경쟁하기 위해선 선진국과의 활발한 교류가 필수적이다.

### (3) 연구 추진의 필요성

#### 1) 사회경제적, 과학기술적 필요성

- 남서태평양은 지구상에서 매우 지질학적으로 활발한 지역으로 해구의 섭입과 판들 간의 충돌로 인한 마그마 분출, 지각운동을 포함해 다양한 지질학적 현상이 생명과학 현상과 어우러져 일어나는 중요한 지역이다. 이 지역은 학문적으로 뿐만 아니라 우리 인류에게 중요한 자원 및 생명공학 연구에 필요한 새로운 유용 물질이 다양하게 존재하는 곳이다.
- 미국, 일본을 비롯한 선진국들은 남서태평양에 많은 연구를 수행해 향후 개발을 위한 기초 해양과학자료를 확보한 상태이다. 반면 우리나라는 이 지역에까지 눈을 돌리지 못하고 있고 한반도 주변해역에 대해서만 연구 관측을 수행하고 있어 향후 남서태평양 개발에 뒤쳐질 가능성이 높다.

#### 2) 연구사업의 필요성

- 한국해양연구원이 향후 남서태평양 진출에 따른 종합 대양연구를 위해 필요한 장기 기획을 수립하기 위해 필요하다.

## 2. 연구 개발 수행 내용 및 결과

우리는 앞에서 먼저 서태평양 멜라네시아 열도 주변 여러 활성분지들에 대해 간략하게 기술하였다. 그리고 이들 여러 활성분지들 가운데 연구대상 해역으로 파푸아 뉴기니아 비스마르크해(Bismarck Sea)를 선택했는가에 대해 설명하였다. 이를 위해 우리가 장기적으로 어떻게 연구를 추진해야 하는가에 대해 연도별/단계별로 정리해 보았다. 특히 지구물리부분에 대해 중점적으로 기술하였다.

본 연구과제는 기획연구이므로 이론적, 실험적 접근은 수행하지 않았다.

### (1) 멜라네시아 열도 주변 주요 활성 분지들에 대한 개괄

그림 1에서와 같이 멜라네시아 열도는 인도-호주판과 태평양판이 비스듬하게 만나 만들어진 거대한 지판들의 충돌대(collision zone)이다. 특히 이 지역은 밀도가 크게 다르지 않은 두 해양지판이 충돌하였기 때문에 지각구조가 더욱 복잡하게 나타난다. 지역에 따라 해구섭입 방향(polarity of subduction)이 역전되고 다시 반전된 지역도 있을 정도로 매우 복잡하다. 이러한 복잡한 지형 사이로 여러 개의 활성분지들이 발달되어 있다. 이들 분지들은 그동안 선진국들에 의해 대부분 1차적으로 조사가 되었고 이를 통해 알려진 지질학적 특성들을 중심으로 기술하고자 한다. 에이유 분지(Ayu Trough), 비스마르크해의 마누스 분지(Manus Basin), 우드락 분지(Woodlark Basin), 북 피지 분지(North Fiji Basin), 그리고 라우 분지(Lau Basin)들에 대해 차례로 기술한다.

#### 1) 에이유 분지(Ayu Trough)

Ayu Trough는 인도네시아 이리안자야(Irian Jaya)의 북쪽에 분포하는 중앙 해령으로서, 확장축의 길이는 남북으로 약 500km 정도의 규모이다. 판구조론의 관점에서 Ayu Trough는 필리핀해판(Philippine Sea Plate)과 캐롤라인판(Caroline Plate)의 경계이며, 대부분 해구로 경계가 이루어진 필리핀 판의 유일한 확장축이기도 하다. 이 지역은 2000-2001 년에 걸쳐 한국해양연구원에서 탐사하였으며, 지구물리, 암석화학, 해양물리 등에 대한 기초적인 조사가 이루어졌다 (그림 34). 그림 34는 이 당시 얻어진 멀티 빔 자료와 기존의 지형 자료를 합성해 만든 해저 지형도이다.

Ayu Trough는 그동안 많은 탐사가 진행되지 않았던 관계로, 확장 속도, 지형 등 확장축의 여러 가지 특성에 큰 영향을 주는 기초적인 요인들이 상세히 밝혀지지 않았다. 한국해양연구원이 수행한 서태평양 종합대양 탐사사업의 탐사 결과 지형은 비교적 상세히 파악되었으나 확장속도는 여전히 밝혀지지 않았다. 확장 속도의 경우 확장축 주변 지각의 자기이상의 변화를 정밀히 측정해야 하는데, Ayu Trough

가 지구자기의 적도에 위치하기 때문에 단순한 해상 자력 탐사로는 해양 지각의 자기와 자화방향을 정확히 측정할 수 없다. 따라서 현재까지도 Ayu Trough 이상치의 정확한 확장속도는 알려져 있지 않은 상황이다.

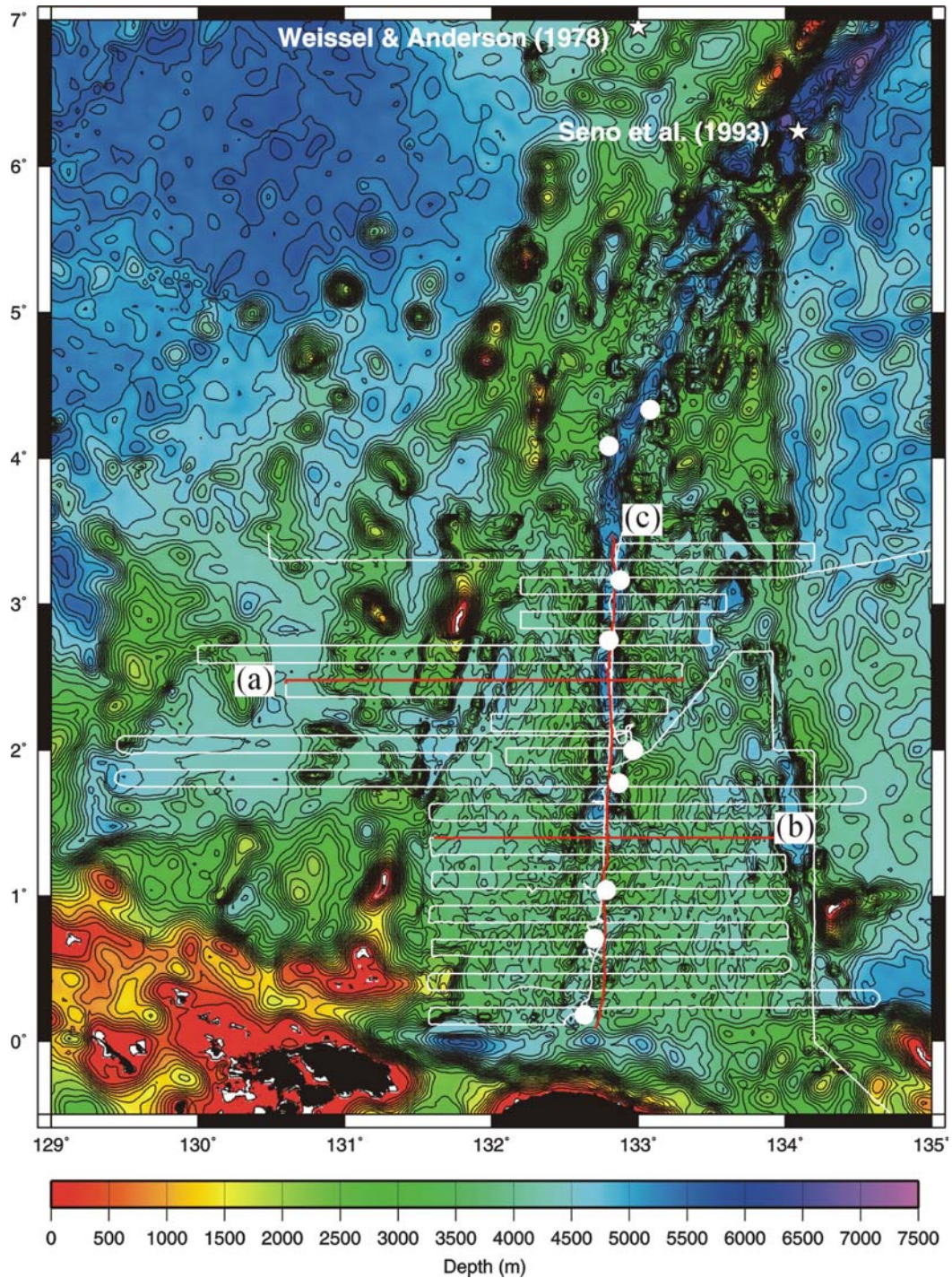


그림 34. 에이유 분지의 해저 지형도와 과거 탐사측선 및 시료 채취지점.

Ayu Trough는 중심축의 주향과 지형에 따라 크게 3개의 부분으로 나뉘어 질 수 있다(그림 34). 먼저 북쪽 지역은 계곡형태의 지형을 나타내며 북동 방향의 주향을 나타내고 있다. 중앙 지역은 북쪽 지역과 같이 계곡 형태의 중심축 형태를 유지하고 있으나 축의 방향은 남북 방향을 나타내고 있다. 그러나 남쪽 지역은 북쪽 및 중앙 지역과 다른 특성을 나타낸다. 우선 계곡모양의 중심축 지형이 두드러지지 않으며 중심축이 물결모양으로 변이를 나타낸다.

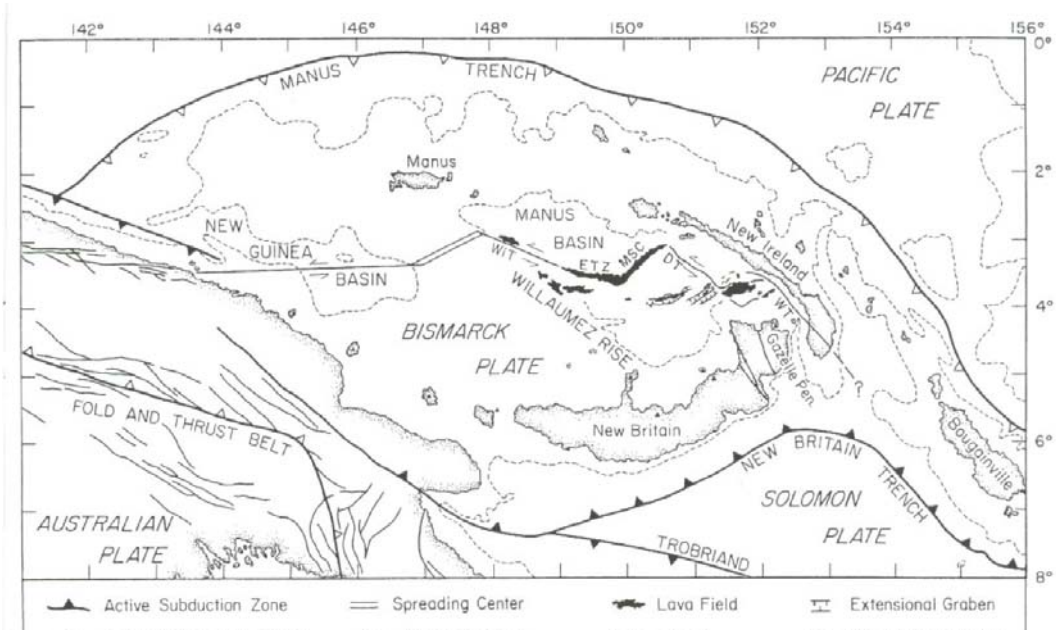
Ayu Trough의 지형에서 확인할 수 있는 가장 중요한 사실은, Ayu Trough가 비스듬하게 확장했다는 점이다. 중심축 주변의 지형을 자세히 관찰하면 해저면 조적이 중심축의 방향과 어긋나있는 것을 발견할 수 있는데, 해저면의 조적의 방향과 해저 확장 방향이 일치한다는 사실을 고려하면, Ayu Trough가 과거 비스듬히 확장했다는 것을 추측해볼 수 있다. 이러한 사실은 필리핀판과 캐롤라인 판, 더 나아가 태평양판과의 상대 운동을 해명하는 데 중요한 열쇠를 제공해 줄 수 있을 것으로 사료된다.

Ayu Trough의 지형은, 특히 북쪽 지역과 중앙 지역의 경우 느린 속도를 나타내는 확장축에서 나타내는 전형적인 지형을 나타내고 있다. 예를 들어 느린 확장축의 전형적인 특성인 계곡 형태의 지형이 잘 관찰된다. 그러나 남쪽 지역의 경우에는 이러한 특성이 나타나지 않으므로 Ayu Trough는 일반적인 느린 확장 축과는 다른 특성을 갖고 있는 것으로 보인다. 더 나아가 자력과 탄성과 탐사 결과에 의하면 Ayu Trough는 현재 확장이 중단되었을 가능성이 큰 것으로 보인다. 첫째, 자력 탐사 결과에 의하면 자력의 강도가 가장 강한 지역과 지형학적 중심축이 일치하지 않는다(Lee and Kim, 2004). 둘째, 탄성과 탐사 결과에 의하면 지형학적인 중심축에 퇴적물이 70m 이상으로 두껍게 쌓여 있다(Hong and Lee, 2002).

지구 화학적 탐사 결과 Ayu Trough 하부의 맨틀의 조성이 태평양의 것과는 다른 인디언 타입이며 전체적으로 불균질하다는 것이 밝혀졌다. 이 지역에 대한 열수 탐사 결과 뚜렷한 열수 활동의 징후는 발견하지 못했다. 그러나 현재까지 알려진 가장 느린 확장축인 북극해의 Gakkel 해령의 경우에도 활발한 열수 작용이 발견된 것으로 보아 이 지역에서 열수 활동이 다시 발견될 가능성이 없는 것은 아닌 것으로 보인다.

## 2) 비스마르크해(Bismarck Sea)와 마누스 분지(Manus Basin)

비스마르크해는 파푸아 뉴기니아와 인도네시아 이리안 자야 북쪽에 분포하는 내해이다. 파푸아 뉴기니아 북쪽 해변을 따라 호상열도들이 분포하고 있으며 북동쪽에는 활발한 확장과 열개(rifting)가 일어나고 있는 마누스 분지가 있다. 그리고 북서쪽에는 샤우튼 해령(Schouten Ridge)을 포함한 아직 많은 탐사가 진행되지 않은 지역이 분포하고 있다(그림 35).



(Willaumez, WIT; Djaul, DT; Weitin, WT) bound four extensional zones in the Manus Basin: a pull-apart basin with axial volcanic ridges in the east, a rifted zone with two overlapping graben with lava flows in the south, the Manus spreading center (MSC) and the extensional transform zone (ETZ). (Figure from Taylor *et al.*, 1994).

그림 35. 비스마르크해에서 나타나는 주요 지질구조 (Martinez and Taylor, 1995)

마누스 분지는 중앙부가 썩기 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 불리는 1개의 열개대(rifting zone)가 있는데 이들은 각각 2개의 단층으로 연결되어 있다(Martinez and Taylor, 1995)(그림 35).

Manus Basin는 태평양판의 섭입이 Ontong Java Plateau의 분출로 인해 중단되고 남쪽에서 새로운 섭입대가 성립되면서 형성된 독특한 지구조 진화 역사(tectonic history)를 갖고 있다(Marlow *et al.*, 1991).

기존의 연구결과에 따르면 썩기 형으로 확장되고 있는 중앙 확장축(Mid Spreading Center)에서는 중앙해령 타입의 현무암이 분출하고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 지판의 섭입에 의해 맨틀에 공급되는 육원성 물질들의 영향을 다양한 정도로 받은 것으로 보고 되었다. SER은 지각의 열개와 화산활동에 의해 매우 복잡한 지형을 나타낸다. 지금도 열수 분출이 활발히 진행되고 있고 많은 다량의 해저열수 침니(chimney)의 분포가 확인된 Pual Ridge를 비롯해 Yuam Ridge,

Marmin Knoll, 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 호상열도 기원의 지각이 열개되면서 마그마가 형성되어 지속적인 화산분출이 생기게 되고 소규모의 Ridge, Knoll, Caldera 등이 만들어진 것으로 생각된다. 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).

지금까지 언급한 바와 같이 비스마르크해에 대한 연구는 주로 동쪽에 자리잡은 마누스 분지를 중심으로 많이 수행되었다. 반면 비스마르크해 중앙에 있는 Western Spreading Ridge(WSR) 지역과 이보다 더 서쪽에 자리 잡은 Schouten Ridge부분은 아직 연구가 비교적 덜된 편이다. Western Spreading Ridge 부근은 지난 10년간 두 차례에 걸쳐 프랑스와 일본이 개괄적인 탐사를 수행한 바가 있을 뿐 아직 이 지역의 열수분출구의 특성들은 아직 잘 알려져 있지 않다. 그림 5는 프랑스와 일본이 공동으로 획득한 멀티빔을 합성한 해저지도이다. 보는 바와 같이 이 지역은 두개의 확장축이 서로 overlap된 형태를 띠고 있으며 수많은 해저화산이 분포해 있다. 향후 연구에서 1차적으로 탐사를 수행하고자 하는 곳이 바로 중앙과 서부 비스마르크해 부근이다. 이 지역에 대해서는 추후에 보다 자세히 언급하기로 한다.

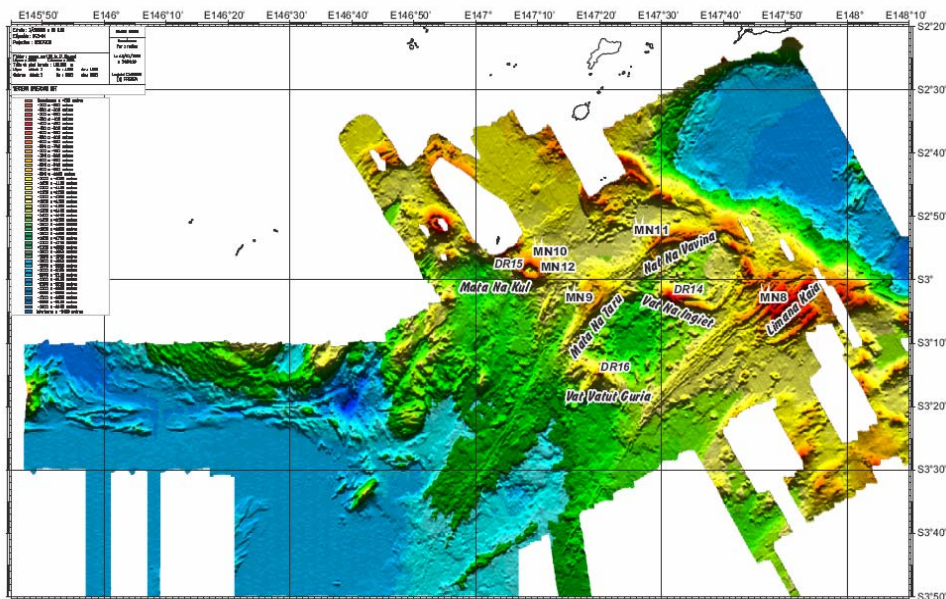


그림 36. Western Spreading Ridge 부근의 해저면 지형도 (Dr. E. Ruellen 제공)

### 3) 우드락 분지(Woodlark Basin)

우드락 분지는 동편에서 중앙해령이 섭입하고 있기 때문에 이와 유사한 환경인 칠레 중앙해령과 더불어 일찍부터 많은 주목을 받아왔다(Taylor and Exxon, 1987). 판의 생성과 소멸을 나타내는 윌슨 사이클에 의하면 과거 수많은 중앙해령이 섭입(subduction)한 것으로 추정되지만 현재 중앙해령의 섭입이 일어나고 있는 곳은 이 두 곳만이 보고 되고 있을 뿐이기 때문이다. 그리고 우드락 분지는 해양지각에서 일어나는 배호 확장(back arc spreading)과는 달리, 두꺼운 대륙지각에서 열개(rifting)가 시작되어 해저 확장(seafloor spreading)으로 진행되어 왔다. 따라서 수동적 연변부(passive margin)의 형성과 진화 과정을 체계적으로 연구할 수 있는 중요한 지역으로서 관심이 집중되어 왔다(Taylor *et al.*, 1995, 1999)(그림 37).

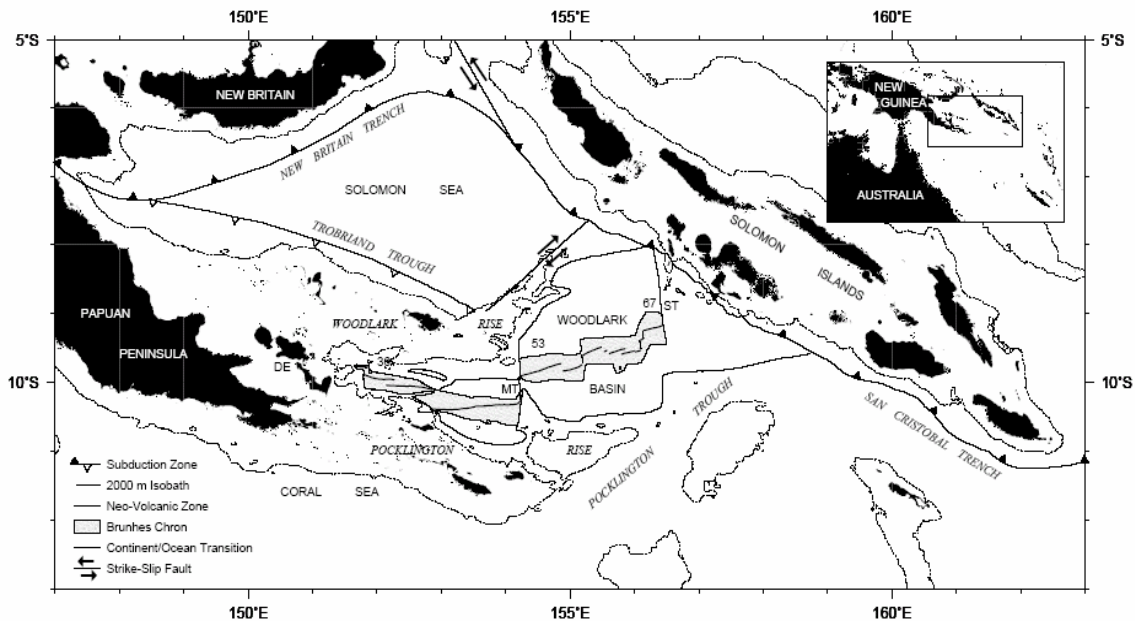


그림 37. 우드락 분지의 주요 지질구조

우드락 분지의 해저 확장은 약 6 Ma에 시작된 것으로 알려져 있다(Taylor *et al.*, 1995; Weissel *et al.*, 1982). 그리고 확장축의 서편 끝 부분은 기존의 대륙 지각이었던 우드락 해평(Woodlark Rise)과 포클링턴 해평 (Pocklington Rise)을 가르면서 현재 계속해서 진행(propagating)되고 있다. 우드락 분지의 전체 중심축 길이는 약 500km에 달하는데, 주향이동 단층인 모레스비(Moresby) 단층을 기준으로 동편과 서편으로 구분될 수 있다(그림 37). 그런데 모레스비 단층을 기준으로 구분된 동편과 서편의 확장축의 확장 속도, 지형 및 지구 물리적 특성은 서로 뚜렷하게 대조되는 특징을 갖고 있다(Martinez *et al.* 1999). 모레스비 단층 동편 확장



축의 경우, 정밀한 자력탐사 결과 실제적으로는 서편에 비해 빠른 확장 속도를 나타냄에도 불구하고 지형 및 지구물리적 특성은 상대적으로 서편보다 느린 확장 속도의 중앙해령에서 나타내는 특성을 보이고 있다. 그리고 서편 확장축의 경우는 이와 반대로 상대적으로 느린 확장속도이면서도 지형 및 지구물리적 특성에 있어서는 빠른 확장 속도를 갖는 중앙해령의 특성을 갖고 있는 것으로 밝혀졌다.

일반적으로 확장축의 지형과 해저면의 조직은 중앙해령에서의 확장 속도와 밀접하게 관련되어 있다. 느리게 확장(slow spreading)하는 중앙해령(10-50 mm/yr)에서는 확장축(axial depth)의 새로운 마그마가 분출하는 골의 깊이가 매우 깊은 것(1.5-3km)이 일반적인 특징이며 중간정도의 확장 속도(intermediate spreading)를 가진 중앙해령(50-90mm)의 경우는 이 골의 깊이가 상대적으로 덜 깊으며 빠른 속도(fast spreading)로 확장하는 중심축(> 90mm)의 경우는 오히려 높이 올라온 형태를 띤다(Macdonald, 1982). 그리고 중앙 해령 사면에 나타나는 해저 언덕(abysal hill)의 굴곡도 확장속도가 빠를수록 줄어드는 것이 일반적인 경향이다(e.g., Small, 1994). 그리고 중앙 해령 확장축의 단절(offsets)들 역시 확장속도와 밀접한 관련이 있는데 확장속도가 빠를수록 이러한 단절대들은 비변환단층(non-transform fault)적인 특징을 갖게 되는 것으로 알려져 있다(Macdonald *et al.*, 1984). 그 이유는 빠르게 확장하는 중앙해령의 경우 지각의 두께가 매우 얇고 약하기 때문에 단절대의 규모가 크더라도(~100km) 변환단층의 상태를 유지할 수 없기 때문인 것으로 생각되고 있다(Macdonald, 1982). 그런데 우드락 분지에서는 동편이 서쪽에 비해 빠른 확장 속도를 보임에도 불구하고 중심축 깊이(axial depth)의 경우 동편이 상대적으로 깊으며, 중력이상(Bouguer anomaly)치 역시 동편이 상대적으로 높다(Martinez *et al.*, 1999). 그리고 서편 확장축은 동편에 비해 중앙해령의 단절대(offsets)가 비교적 적게 나타난다. 즉 위에 요약되어 있는 확장 속도와 관련된 일반적인 경향과 우드락 분지 확장축에서 나타나는 현상에는 뚜렷한 차이가 있는 것으로 보인다.

동-서 확장축에서 나타나는 이러한 지형 및 지구물리적 특성의 원인에 대해서는 다양한 해석이 가능할 수 있다. 우선 중앙해령의 확장속도에 의해 좌우되는 것으로 보이는 이러한 지형 및 지구물리적 특성들은 확장속도 외에도 지각내 온도분포(thermal structure), 지각의 두께(crustal thickness), 마그마 체임버의 깊이와 존재 여부 등 보다 근본적인 원인들에 의해서도 영향을 받는 것으로 생각되고 있다(e.g., Carbotte *et al.*, 1998). 따라서 확장 속도와 관련된 특성들은 모두 예외를 갖고 있는데 북대서양의 레키야네스 해령(Reykjanes Ridge)과 호주-남극 부정합점(Australian Antarctic Discordance) 근처 남동 인도 해령(Southeast Indian Ridge) 등이 그 대표적인 예이다. 한편 Martinez 등(1999)은 지각 두께와 암권(lithosphere) 구조의 차이가 우드락 분지의 독특한 특성을 가져왔다는 가설을 제시

했다. 그들에 따르면 우드락 분지 서편의 경우, 상대적으로 차가운 대륙지각이 호상열도 지각 밑으로 삽입되어(underthrusting) 분포하고 있기 때문에 단순히 호상열도 지각만으로 구성된 동편에 비해 열개되기 전의 지각 두께가 두꺼웠고, 이에 따라 열개와 해저확장에 대해 맨틀 대류가 반응하는 양식에 차이가 발생되어, 관찰되는 바와 같이 대조되는 지형 및 지구물리적 특성이 나타나게 되었다는 것이다. 즉 열개(rifting)가 일어날 때 이것을 보상하기 위해 맨틀 대류(mantle convection)가 유도되게 되는데, 확장이 일어나면서 상대적으로 차갑고 두꺼운 대륙 지각에 의한 경계면을 가지게 되는 서편의 경우, 상승된 연약권(asthenosphere) 맨틀이 대륙 지각 경계면을 따라 다시 하강하기 때문에 서편 분지 전체에 2차적인 맨틀대류가 발생하게 된다는 것이다. 즉 부분용융이 일어나는 지역에 더 많은 맨틀이 흘러가게 되므로 상대적으로 해양지각의 두께는 두꺼워지는 반면 맨틀 암권(mantle lithosphere)의 두께는 얇아진다는 것이다. 반면 이러한 두꺼운 지각 경계면이 없는 동편의 경우 이러한 대류가 발생하지 않고 지판이 분리되어 가면서 수동적으로 상승하게 된다. 이러한 모델이 현재 관찰되는 지형 및 지구물리적 특성을 가장 근사하게 설명할 수 있는 것으로 생각되고 있다. 그러나 이 지역에 대한 암석화학이나 탄성과 등 필수적인 자료가 아직 획득되어 있지 않기 때문에 이러한 특성의 원인에 대한 결정적인 해석은 아직 이루어지고 있지 않다.

위와 같이 독특한 지구조 및 지형적 특성을 갖고 있는 우드락 분지의 확장축은 진화 역시 독특한 양상을 띠고 있는 것으로 알려져 있다(Goodliffe *et al.*, 1997). 이 지역의 확장축은 5개의 구간(segment)으로 나뉘어 있는데 각 구간 역시 더 소규모의 구간으로 구분되어 있다(Goodliffe *et al.*, 1997). 이 중 동편에는 3개의 구간이 속하고 서편에는 2개의 구간이 속하는데, Goodliffe *et al.* (1997)은 서편부터 구간 1로 시작해서 구간 5까지 차례로 명명하였다. 그런데 정밀한 자력 탐사결과 각 구간의 확장축은 80ka 이후에는 기존 확장축과 약 22.5 도의 각도를 보이고 있는데, 이것은 거의 동시에 재배열된 것(synchronously reorientation)으로 생각되고 있다. 이것은 확장축의 위치 변화(ridge jump)로 볼 수 있는데 현재까지 확장축의 위치 변화에 대해서는 2개의 모델이 제시되어 왔다. 그 중 하나는 축 진행(ridge propagation) 모델이고 다른 하나는 축 회전(ridge rotation) 모델이다. 현재 이 두 가지 모델 중 일반적으로 받아들여지고 있는 모델은 축 진행(ridge propagation) 모델이다. 축 진행(ridge propagation)은 새로운 확장축이 형성되고 진행하면서 기존의 확장축을 점차 소멸시켜 간다는 모델인데, 그 과정에서 새로 확장되는 영역과 기존의 확장축의 경계면이 가단층(pseudofault)을 형성하는 특징을 갖고 있다(Hey *et al.*, 1980). 그런데 우드락 분지 확장축의 경우 서쪽 끝에서는 진행이 계속되고 있고, 국부적으로 축 진행의 증거가 약간 발견되기는 하지만, 각 구간들에서 가단층 등 축 진행의 증거가 전체적으로 관찰되지 않는다(Goodliffe *et al.*, 1997; Taylor *et al.*, 1995). 즉 확장축이 부분적으로 진행하면서 형성된 것

이 아니라 각 부분이 쪼개지면서 동시에 재배열된 것으로 보이는 것이다. 이러한 동시적 재배열은 중앙 해령의 이동(ridge jump)을 설명하기 위해 기존에 제시되었던 두 가지 모델과 구분되는 새로운 모델로서 제시되고 있다(Goodliffe *et al.*, 1997). 확장축이 동시에 재배열 되었는지 여부를 확인하기 위해서는 매우 정밀한 자력 및 지형탐사가 필수적이지만, 일반적으로 두꺼운 퇴적층의 영향으로 확인이 매우 어렵기 때문에 우드락 분지 외에는 아직 발견되지 않았다. 그러나 우드락 분지 북서쪽에 분포하는 마누스 분지에서도 소규모 지판의 형성 등 확장축의 급격한 변화가 관찰되고 있기 때문에 향후 정밀한 탐사가 수행된다면 다른 지역에서도 발견될 가능성이 높은 것으로 보여진다. 일반적으로 확장축의 변화는 지판의 이동방향 변화에 의해 발생하는 것으로 생각되고 있는데, 우드락 분지에서 발견된 것과 같은 확장축의 동시적 재배열은 축 진행 등 다른 변화에 비해 지판의 이동방향의 변화 폭이 매우 클 경우에 일어나는 것으로 생각되고 있다. 태평양 판과 인도 호주 판이 충돌하는 완충지대에 분포하는 소규모 지판으로 구성되어 있는 우드락 분지의 경우 지판의 이동 방향이 큰 폭으로 비교적 쉽게 변할 수 있고, 이것이 이 지역 확장축 재배열의 가장 큰 원인일 것으로 생각된다.

#### 4) 북 피지 분지(North Fiji Basin)

북 피지 분지(North Fiji Basin, NFB) 확장축에 대한 암석화학적 자료 및 지형 등 지구물리 자료는 주로, 프랑스, 미국, 일본 등에 의해 획득되고 해석되었다(Auzende *et al.*, 1995)(그림 38). 특히 STARMER 프로젝트와 New STARMER 프로젝트에서 일본과 프랑스에 의해 수많은 탐사가 이루어진 해역이다. 한국해양연구원에서도 2002-2003년에 걸쳐 탐사를 수행한 바 있으며, 암석 시료와 칩시 시료들이 채취되었다. 북 피지 분지의 확장축(Central Spreading Ridge)은 지구조적 특징에 따라 4개의 구간으로 나뉘어 질 수 있고, 각 구간마다 지화학적 특성이 체계적인 차이를 보이는 것으로 보고되고 있다(Auzende *et al.*, 1995). Auzende (1995) 등에 의해 파악된 각구간의 지형 및 지구조적 특징은 아래와 같다(그림 38).

첫 번째 구간은 21°40'S-20°30'S 사이의, 확장축 최남단에 위치하고 있는 남단 구간(southernmost segment)이다. 이 구간은 120km의 길이이며 N-S 방향의 주향을 나타내는데, 수심 약 2,500m의 상호 얽혀 있어 복잡한 지형을 나타내는 해령들과 수심 3,000m 이하의 함몰대가 분포한다. 자력 탐사(magnetic lineation analysis) 결과 남쪽 구간 중 174°05'E에 활성 확장축의 존재가 확인되었는데, 횡단면도를 관찰하면 이 확장축이 빠른 확장축과 느린 확장축이 각각 나타내는 전형적인 지형의 중간적인 특성을 나타냄을 확인할 수 있다.

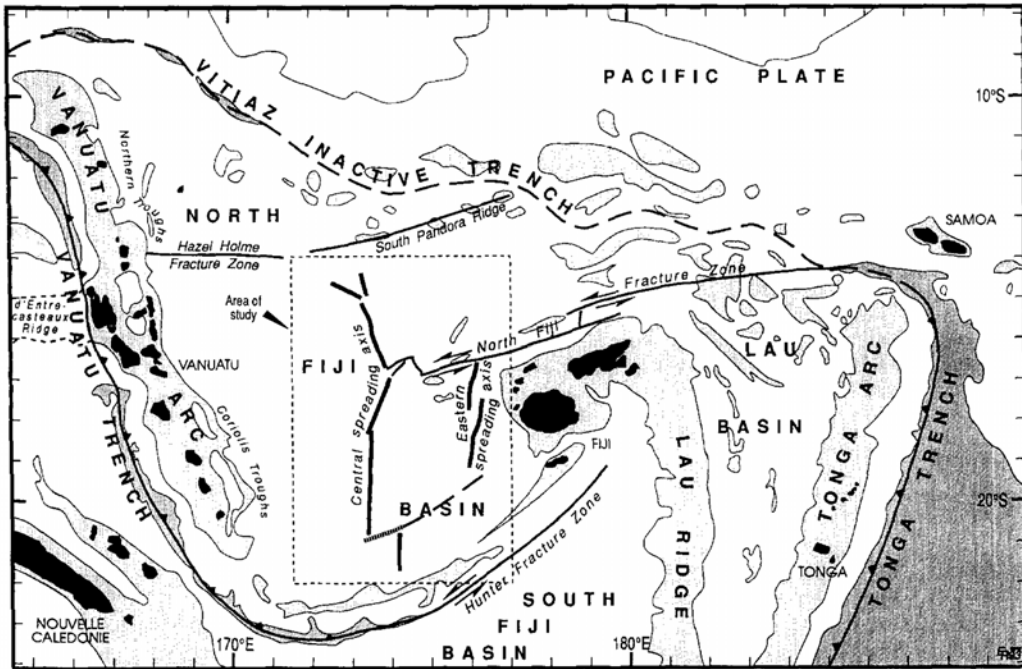


그림 38. North Fiji Basin의 주요 지질구조

남단 구간의 북쪽에는 남쪽 구간의 확장축과 단층을 경계로 남북방향의 주향을 보이며 확장축이 발달하는데, 이를 N-S 구간 (north-south segment)라 부른다. 이 확장축은 21°S-18°10'S 사이에 위치하며 길이는 310 km로 전체 구간들 중 가장 길고, 북쪽으로 진행되고(propagating) 있다. 이 구간은 겉보기에는 가장 단순한 형태적 특성을 갖는데, 2,800m 정도의 평평한 돔(dome) 형태의 지형 중앙에 폭 수백 m 깊이 수십 m의 골(graben)이 지나가는 것과 같은 형태를 나타낸다.

N-S 구간의 북쪽, 18°10'-17°55'S에 위치에는 N15°의 주향을 나타내어 N15° 구간 (N15° segment)이라 명명된 약 120km 길이의 확장축이 발달하고 있다. 여기에는 넓은 지역에 걸쳐 소규모의 화산들이 수없이 분포하고 있으며, N-S에서 N15°로 확장축의 방향이 변화하는 것을 보여준다. N15° 구간의 북쪽 끝은 16°50' S에 있는 삼중합점(triple junction)이다. 이 구간의 중심축은 수심 1,900m보다 얕은 지구의 정상부에 위치하며, 중앙에 500m-2km의 폭과 2,000m의 깊이를 갖는 골이 지나고 있다. 이 지역은 프랑스의 Nautile과 일본의 Shinkai 6500 잠수정에 탐사에 의해 활발한 열수 분출이 확인된 지역이다.

이 N15° 구간의 북쪽에 N-S구간의 확장축과 160°의 각을 유지하며 발달하는 N160° 구간(N160° segment)이라 명명된 확장축이 존재한다. 이들 확장축 중에

N15° 구간과 N160° 구간의 확장축은 북 피지 파쇄대 (North Fiji Fracture Zone) 와 함께 삼중합점(triple junction)을 형성한다. 이 구간의 길이는 200km에 달하며, 3개의 부분으로 나누어 기술될 수 있다. 16°50' ~ 15°30'S 사이의 확장축은 두개의 거의 수직한 벽 사이, 4,000-4,500m 깊이의 골(valley)에 위치하는데, 이 골의 평균 폭은 약 8km에 이른다. 중심 축 부분에서는 2-3km 폭과 400-500m 높이의 소규모 능(ridge)이 분포한다. 이러한 지형은 대서양 중앙해령과 같은 느린 확장 해령 (40mm/yr보다 느린 확장축)에서 나타나는 지형과 매우 유사하다. 15°30'-15°00'S 지역은 중심축이 4000m 깊이의 작은 골들로 분리되어 있는데, 좁은 확장축을 따라 마그마 공급이 집중된다. 세 번째 15°00'S 이상의 북쪽 구간에서 확장 축은 보다 복잡한 형태를 띠며 두개의 뚜렷한 분기축 사이에 위치한다. 서쪽 분기축은 N120°의 방향을 나타내는 4km의 폭과 4,000m 깊이를 갖는 골이며, 북쪽 분기축은 깊이는 2,400m, 주향은 N140°로 14°50'에서 4,000m 깊이의 N160° 구간과 연결된다.

중앙 확장해령에서 채취된 현무암류들에 대한 전반적인 암석학적 특성은 Auzende 등(1995)에 의해 보고되었다. 이 연구에 의하면 중앙 확장 해령 현무암류들은 단순히 감람석(olivine) 분화만이 진행된 것에서부터 사장석(plagioclase) + 감람석 + 단사회석(clinopyroxene)의 분화가 진행된 것까지 다양하게 나타난다. 그리고 미량원소와 동위원소 조성 역시 다양한 것으로 보고되고 있는데, 전형적인 N-MORB(Normal Mid-Ocean-Ridge Basalt) 기원 물질, E-MORB(Enriched Mid Ocean Ridge Basalt) 혹은 OIB(Ocean Island Basalt) 기원물질, 그리고 섭입관련 물질 등, 3개 정도의 기원물질이 혼합되어 피지 분지 확장축 현무암을 형성한 것으로 보인다.

가장 긴 확장대인 N-S 구간은 지구조적으로 중앙해령과 유사한 특성을 갖는 구간인데, 암석화학적으로도 N-MORB와 매우 유사하다. 한편 N15° 구간은 앞서 이야기한 3개의 기원물질이 공존하고 있어 광범위한 지화학적 조성의 변화를 나타내고 있는 것으로 보고 되고 있는데, 전반적으로 북쪽으로 갈수록 OIB 기원 물질 (Enriched component)의 영향이 증가하는 경향이 나타난다. 따라서 북쪽에 분포하는 N160° 구간은 3개의 기원물질이 아직 공존하고는 있지만 OIB의 영향은 북쪽으로 가면서 현저하게 커지고 섭입관련 물질의 영향은 급격하게 줄어드는 현상이 관찰되고 있으며 최북단에 분포하는 Pandora-Rotuma 해령의 경우 거의 순수한 OIB 기원 물질의 영향만을 받은 것으로 밝혀져 있다.

결론적으로 NFB(북 피지 분지) 중앙확장 해령의 기원 맨틀은 주변의 활성 및 비활성 섭입대와 OIB의 영향을 동시에 받았고, 새로운 지각이 해저 확장에 의하여 형성되고 있다. 확장대 북쪽은 전반적으로 N-MORB와 OIB 기원 물질의 혼합으로 볼 수 있으며 남쪽은 N-MORB와 섭입관련 물질들이 혼합되어 형성된 것으로 볼 수 있다.

## 5) 라우 분지(Lau Basin)

라우 분지는 피지 공화국과 통가 왕국 사이에 위치하는 배호 분지로서 여러 가지 중요한 지구물리/지구화학적 특성을 갖고 있어 많은 과학자들의 관심의 대상이 되어왔다. 역삼각형 형태를 보이고 있는 라우 분지에는 여러 개의 확장축이 분포하고 있다(그림 39). 남에서 북의 순서로 ELSC(Eastern Lau Spreading Center), ILSC(Intermediate Lau Spreading Center), CLSC(Central Lau Spreading Center) 그리고 북쪽 지역에는 NWLSC(North Western Lau Spreading Center), NELSC(North Eastern Lau Spreading Center), NLSC(Northern Lau Spreading Center)이 각각 분포하고 있다. 이들 확장축들은 태평양판이 섭입하는 Tonga 해구 상부 지판의 Tofua Arc 서편에 분포하고 있다. 이 중 CLSC(Central Lau Spreading Center)와 ELSC(Eastern Lau Spreading Center) 등 2개의 확장축이 가장 잘 발달되어 있고 탐사가 가장 많이 진행된 지역들인데, 특히 Valu Fa Ridge를 포함하고 있는 ELSC에서 가장 열수 작용이 활발한 것으로 알려져 있다. ELSC는 미국 과학재단의 장기 프로그램 중의 하나인 Ridge 2000의 종합 탐사 지역(ISS, Integrated Study Site) 중의 하나이기도 하다. 한국해양연구원에서도 2004년 말 현재 Lau 분지에 대한 열수광상 탐사를 수행한바 있다.

라우 분지내의 ELSC에 대한 탐사는 미국을 중심으로 현재 활발히 진행 중이며 다양한 과학적 문제들이 제기되고 있다. 많은 문제들이 있으나, 예를 들어 Lau 분지는 Tonga 해구에서의 섭입작용을 통해 공급되는 호상열도 성분과 북쪽에서 흘러들어오는 기원이 다른 맨틀(인도양 타입 맨틀)의 작용이 많은 관심을 끌고 있다. ELSC 남쪽에 분포하는 Valu Fa Ridge는 호상열도 성분의 영향을 많이 받았으며 북으로 갈수록 인도양 타입 맨틀의 영향이 증가되는 것으로 생각되고 있다(Project Summary, Ridge 2000 Office).

Ridge 2000 프로그램이 진행됨에 따라, 이 지역이 향후 배호분지의 맨틀역학, 암석화학, 지구물리, 열수작용 그리고 열수 생태계에 대한 연구의 하나의 준거 틀을 제시할 것으로 기대된다. 2004년 말 현재 2회의 탐사가 성공적으로 수행되었는데, 1차 탐사에서는 정밀 지구물리 조사가 이루어 졌으며, 2차 탐사에서는 ABE를 이용한 열수 분출구 탐사와 광범위한 암석 시료 채취가 수행되었다. 향후 열수 분출구 탐사와 생물 시료 채취를 위한 탐사가 계속적으로 진행될 예정으로 있다.

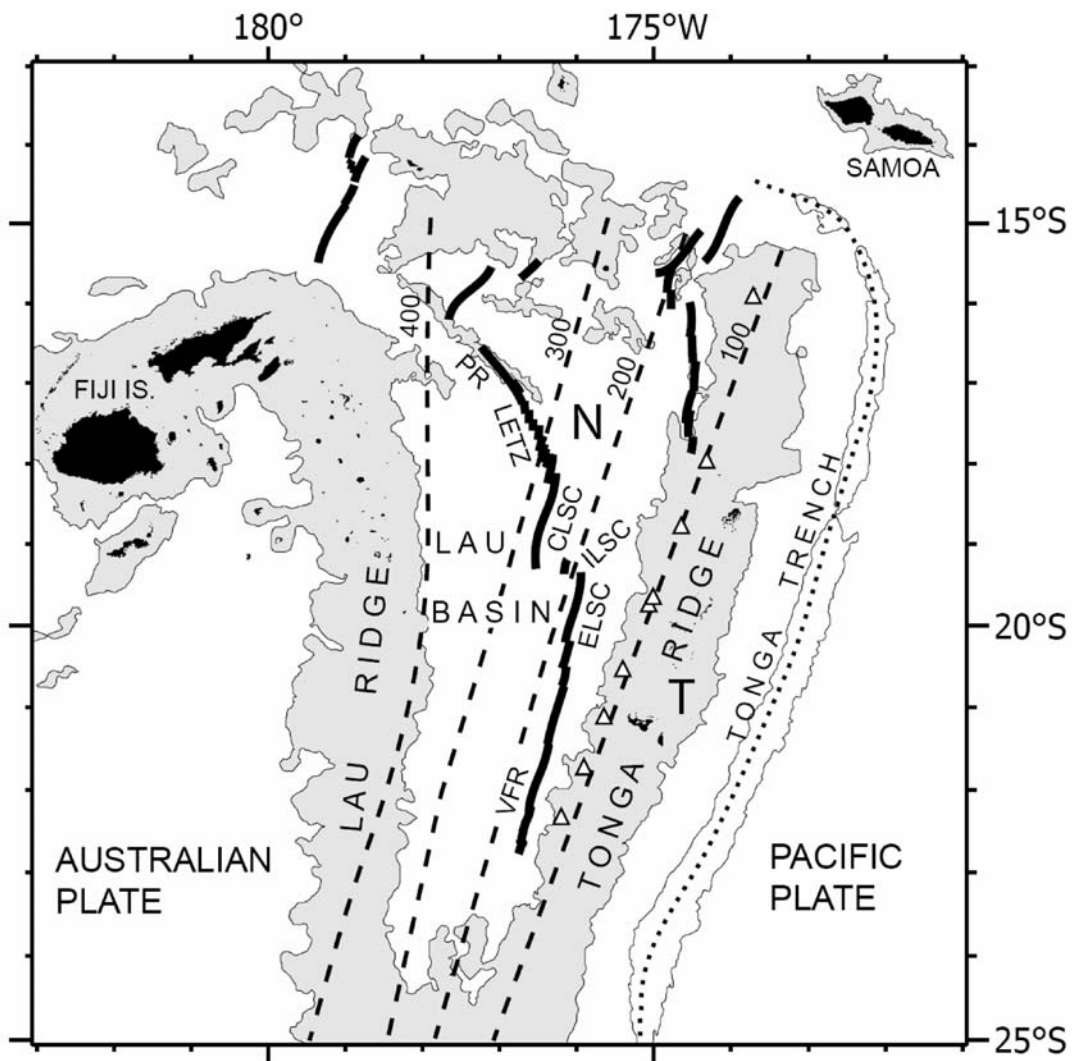


그림 39. Lau Basin의 주요 지질구조.

## (2) 탐사 해역의 선정

앞에서 언급했듯이 본 연구과제는 일차적으로 해저광물자원개발이라는 실용적인 문제보다는 우리나라 연구역량을 선진국 수준으로 끌어 올리는데 그 초점이 맞춰져 있다. 하지만 우리나라의 현실상 생물/무생물/공간 자원의 개발 가능성과 기대효과를 완전히 배제할 수는 없다. 따라서 학문적인 요소와 개발 가능성 두 요소를 모두 고려하였다. 이러한 관점에서 미국, 일본, 호주, 뉴질랜드, 프랑스 등 선진국 EEZ에 포함된 해역은 우리나라에서 개발할 수 없기에 후보 해역에서 제외하였다. 그 결과 비교적 우리나라와 가까운 필리핀해 주변의 활성분지들(예: Mariana Trough)이 모두 제외된다. 그러나 필리핀 해 주변 해역 중 Ayu Trough는 우리가 탐사할 수 있는 곳으로 남는다. Ayu Trough는 팔라우 공화국과 인도네시아 사이에 위치해 있으며 활성분지에 해당되기 때문이다. 이러한 맥락에서 Lau Basin를 제외한 Tonga-Kermadec 해구-열도-후열도분지 지역 또한 뉴질랜드 EEZ에 속해 있기 때문에 대부분이 제외된다.

Lau Basin과 Fiji Basin의 경우 남반구에 위치해 우리나라에서부터의 거리가 비교적 멀다. 그러나 더욱 중요한 것은 이곳이 무역풍대로서 해황이 그다지 좋지 않다는 점이다. 일본, 프랑스, 미국의 경우, 연구선이 우리나라의 온누리호 보다 훨씬 커서 가능했지만 최소한 2008년까지는 온누리호를 가지고 이들 해역에 대한 탐사를 원활히 수행한다는 것은 쉽지 않을 듯하다. 해상상태를 고려할 때 초기 단계에 우리가 쉽게 접근할 곳은 그다지 많은 편이 아니다. 무풍지대인 적도를 중심으로 북위로 남위로 5도-10도 이내의 구간을 잡을 때 가장 용이하게 접근할 수 있는 곳이 우선순위 순으로 볼 때 (1) 비스마르크해(Bismarck Sea)이고 (2) 에이유 분지(Ayu Trough) 그리고 (3) 우드락 분지(Woodlark Basin)이다. 인도네시아 내해에 존재하는 작은 분지와 해저화산들도 대상해역으로 삼을 수 있다.

연구대상 해역 (우선순위)

- 1) 파푸아 뉴기니아, 비스마르크 해
- 2) 인도네시아-팔라우 공화국, 에이유 분지
- 3) 파푸아 뉴기니아-솔로몬 군도, 우드락 분지
- 4) 인도네시아 내해의 작은 분지들

앞에서 언급했듯이 우리가 유념해야 할 점은 최소한 2008년까지는 탐사에 있어서 온누리호가 중점적으로 사용된다는 것이다. 따라서 해지면 근접 탐사를 수행하는데 많은 제약이 따를 것이다.



초기 단계에도 유무인 잠수정을 활용한 해저면 근접탐사가 필요하다. 잠수정을 위한 모선이 없는 상황에서 해저면 근접 탐사를 하기 위해서는 외국과의 공동연구를 수행할 수밖에 없다. 물론 우리나라에서 개발된 무인잠수정도 활용해 볼 수 있겠지만 이것에 100% 의존해 탐사계획을 잡기에는 불확실성이 너무 크다. 만약 우리가 비스마르크해를 선정해 체계적인 연구를 수행할 경우 두가지 관점에서 외국과의 교류가 더욱 용이해 질수 있다. 첫째, 최근 미국과 일본은 Mariana Trough 주변에 대해 많은 탐사를 수행했는데 앞으로도 당분간 그곳에 대한 연구를 계속할 것으로 예상된다. 미국 Ridge 2000 프로그램의 경우, 앞서서도 언급했듯이 East Lau Basin을 중점탐사 해역으로 선정해 향후 최소 5년간 중점적으로 연구할 것이다. 따라서 선진국과 상호교환을 통해 이 해역들에 대한 연구에도 참여가 가능할 것이다. 이럴 경우 아쉽게나마 우리로서는 해저면 근접탐사를 통한 시료확보와 근접탐사 기술과 경험을 습득할 수 있을 것이다.

또한 미국과 일본이 중점으로 선정한 해역에 중복적인 연구투자를 하지 않고 독자적인 해역을 선정해 연구할 경우 Mariana Trough나 Lau Basin 이외의 해역에 관심을 가지고 있는 선진국의 다른 연구팀과 공동연구를 개발해 이들의 심해 유인/무인 잠수정을 끌어올 수도 있다. 비스마르크해의 경우 미국, 일본, 프랑스의 여러 연구팀들이 과거에 많은 연구를 수행한 바가 있어 추가적인 탐사와 연구에 많은 관심을 가지고 있다. 이들과 함께 새로운 국제공동연구를 추진할 수 있고 이럴 경우 프랑스의 Nautilie이나 일본의 Shinkai 잠수정의 활용도 가능해진다.

우리가 비스마르크해를 대상해역으로 선정하는 데는 전략적인 것 이외에 중요한 학문적인 이유가 있다. 이 가운데 대표적인 세 가지만 언급하기로 한다.

1) 지금까지 활성후열도 분지 가운데 많은 연구가 된 곳이 Mariana Trough와 Lau Basin이다. 이곳들에 대한 연구를 통해 밝혀진 사실이 후열도 분지의 경우 중앙해령과 달리 확장속도가 지각구조 및 관련된 지질현상들을 결정짓는 것이 아니라는 것이다. Martinez와 Taylor 등은 후열도 분지에 있어서 지각구조를 결정짓는 가장 중요한 요인이 호상열도로부터의 거리라고 주장했다. 이들의 주장은 Mariana Trough나 Lau Basin에는 비교적 잘 맞는다. 하지만 비스마르크해의 경우 그렇지 않은 것으로 보인다. 그 원인에 대해 많은 과학자들이 지대한 관심을 가지고 있는데 보다 체계적이고 종합적인 탐사를 통해 이것을 우리가 밝힐 수 있을 것으로 기대한다.

2) 비스마르크해는 다른 후열도 분지와 달리 최소한 2번의 섭입작용(subduction)에 의해 형성되었다. 먼저 북쪽 Manus Trench로부터 태평양판이 섭입을 했었고 Ontong Java Plateau가 Manus Trench에 도달해 막히면서 남쪽의 New Britain

Trench로 해구의 섭입방향이 바뀌었다. 이처럼 두 번에 걸쳐 후열도 분지가 만들어질 경우 맨틀이 용융에 의해 상당히 결핍(depleted) 되었을 것으로 예상된다. 또한 결핍된 맨틀에 어떻게 다시 수분이 공급되어 해양지각이 만들어졌는지 하는 과정 등이 비스마르크해에 있어서 중요한 연구테마가 된다.

3) 현재 서태평양 후열도 분지 하부의 맨틀은 대부분 인도양 타입의 맨틀과 비슷한 특성 즉 DUPAL Anomaly를 나타내는 것으로 알려져 있다. 그러나 기존의 분석 결과에 따르면 비스마르크해는 태평양 타입의 맨틀 조성을 가지고 있는 것으로 보인다. 즉 태평양-인도양 맨틀의 경계가 비스마르크해에 존재할 가능성이 높을 것이다. 이것이 사실인지 여부를 확인하는 것은 매우 중요한 과학적 연구 대상이다.

### (3) 사업의 단계별 구분

향후 수행될 해저 열수 분출구 주변 환경에 대한 연구를 11년간 3단계로 구분하였다. 편 의상 2005년 수행될 시범연구를 제1단계에 포함시킨다.

- 제1단계 (2005년-2008년) 4년
- 제2단계 (2009년-2011년) 3년
- 제3단계 (2012년-2015년) 4년

그리고 2-3주간의 시범탐사가 수행되는 2005년을 제외하고 나머지 년도들에 대해서는 매년 2회의 30일씩 총 60일의 실패역탐사가 수행된다는 것으로 가정하였다.

각각의 단계에 대해 다음과 같은 목표를 설정하였다.

- 제1단계 (2005년-2008년)

광역적인 탐사를 통한 분지의 전체적인 모습 및 열수분출구들의 특성 파악  
Understanding the overall structure and evolution of the Bismarck Sea and the characteristics of hydrothermal vent fields therein through basin-wide surveys

- 제2단계 (2009년-2011년)

선정된 열수분출구들에 대해 종합 근거리 관측을 통한 해저환경 및 생물학적 특성 및 상호관계 파악  
Acquiring in-depth knowledge of the selected hydrothermal vent systems

and vent organisms through employment of integrated near-bottom observations and sampling and understanding the mutual relationships

● 제3단계 (2012년-2015년)

열수분출구 주변지역들에 대해 장기 및 실시간 모니터링을 위한 해저 관측 네트워크 구축과 활용

Deployment of seafloor observatories and cabled network for long-term and real-time monitoring of underwater hydrothermal vent systems and application of acquired information

(4) 단계별 추진계획

1) 탐사해역의 권역별 구분

추진계획을 설명하기에 앞서 먼저 비스마르크 해를 세 지역(동부, 중부, 서부)으로 구분하기로 한다(그림 40). 그리고 비스마르크 해에서 추진해야할 연구항목을 나열하고 추진계획을 기술하기로 한다.

지구물리적인 관점에서 이 해역에 대해 우리가 관심을 가지고 있는 연구 분야는 해저표면과 지구내부의 구조이다. 이 구조는 열수분출구 침니와 같이 작은 규모에서부터 지각두께, 맨틀의 특성과 같이 큰 규모를 포함한다. 또한 단순히 지각구조뿐 아니라 이 같은 구조가 만들어진 과정과 원인을 밝히는 것이 주요 연구테마이다. 이를 위해선 다음과 같은 연구항목이 수행되어야 한다고 판단된다.

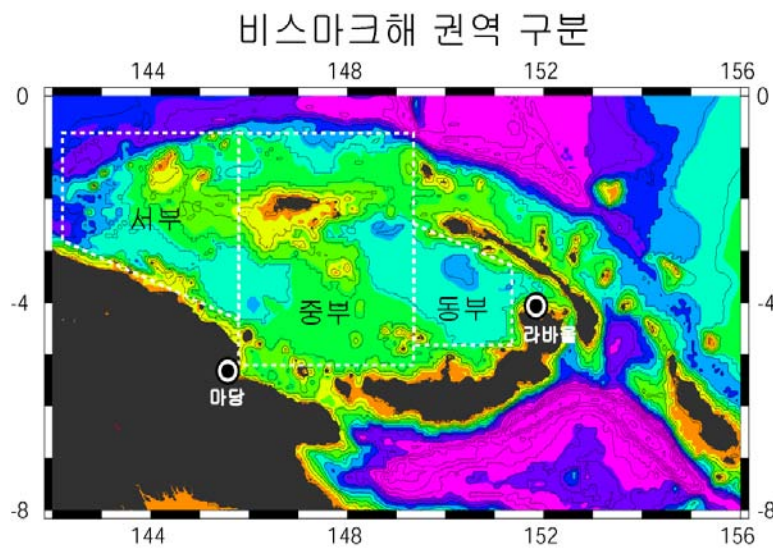


그림 40. 비스마르크해의 지형도와 권역별 구분(서부, 중부, 동부)

## 비스마르크해 판경계부

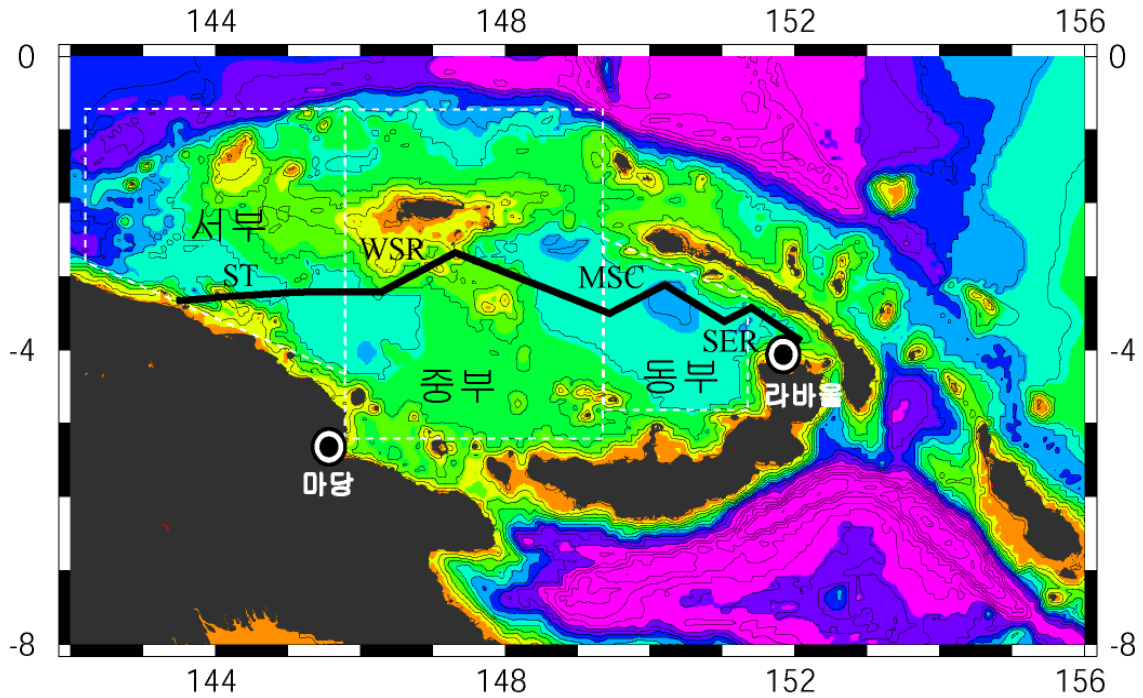


그림 41. 비스마르크해를 북부와 남부로 구분하는 판 경계부의 모습. (ST는 Schouten Transform으로 left-lateral transform이다. WSR(Western Spreading Ridges), MSC(Manus Spreading Center)와 SER(South-Eastern Rifts)는 주요 분지 확장축으로 열수분출구의 존재 가능성이 매우 높은 곳들이다.

### 2) 제 1단계에서 추진 되어 할 지구물리탐사 항목

- 비스마르크해 전반에 대한 해저지형도 작성

비스마르크해 전반에 대한 해저지형 조사는 가장 먼저 수행되어야 할 매우 중요한 작업이다. 현재 비스마르크해 많은 부분에 대한 정확한 해저지형도가 아직 없는 실정이다. 그동안 선진외국들이 열수탐사를 하면서 얻은 다중빔 음향측심자료가 있으나 이들 대부분은 확장축 주변에 국한되어 있다. 무엇보다 해저지형은 파푸아 뉴기니아 정부가 향후 지진해일 가능성을 진단하고 대책을 마련하는데 있어서 반드시 필요한 자료이다. 이들이 가장 관심을 가지고 우리나라가 해주길 기대하는 분야이기도 하다. 이외에 이미 탐사된 지역도 지형의 정확도가 많이 떨어져 다중빔을 이용한 새로운 탐사가 필요하다. 앞으로 조사해야 할 면적이 약 200,000 km<sup>2</sup> 정도로 추산되는데 만약 이를 온누리호를 이용해 지형탐사를 한다고 할 경우 약 90일 정도가 소요되리라 예상된다. 따라서 매년 최소 25일 정도를 지형 및 지구물리 탐사에 소요해야 한다는 계산이 나온다. 3.5 kHz sub-bottom profiler(SBP)를 이용한 천부지층 탐사도 해저지형도 조사와 함께 수행 가능하다.

- 해저 열수 분출구 주변에 대한 해저면 근접 지형 탐사

새로 발견되는 열수분출구 또는 자세한 연구가 필요한 열수분출구 주변에 대한 해저면 근접 deep-tow 사이드스캔 소나(sidescan sonar) 탐사가 필요하다. 열수분출구 주변 지형을 정확히 파악하는 것은 향후 있을 유인/무인 잠수정 탐사를 위해서 매우 중요하다. 현재 한국해양연구원은 해저면 근접 지형탐사를 위한 소나 장비를 보유하고 있지 않고 있어 임차 또는 개발을 통해 이 같은 탐사가 가능하다. 미국 우즈홀 해양연구소(Woods Hole Oceanographic Institution)가 보유하고 있는 DSL-120가 이 같은 탐사에 적합한 사이드스캔 소나 장비이다. 정밀 지형탐사는 오랜 시간이 요구되는 것으로 3년에 걸쳐 약 50일 정도의 탐사가 요구된다.

- 비스마르크해 전반에 대한 해상 중력 및 자력탐사

중력과 자력 탐사는 지형탐사와 동시에 수행할 수 있는 작업이다. 따라서 추가의 탐사 시간이 소요되지 않는다. 이 가운데 자력탐사의 경우 선상에 부착된 삼성분 자력탐사도 함께 수행하면 일반 해수면에서 건인하는 총성분 자력계와는 별도의 정보를 얻을 수 있다.

- 확장 축 주변과 주요 지역에 대한 해저면 근접 자력탐사

해수면 근처에서 건인하면서 얻어지는 자력탐사(sea-surface magnetic survey)의 경우 해저면에서부터의 거리 때문에 약 2-3km 이상 되지 않은 구조를 밝히는 데 사용하기가 어렵다. 일반적으로 열수분출구의 경우 수백 미터이내의 비교적 좁은 영역의 지각을 변질시키는데 이를 탐사하기 위해선 가능한 해저면 가까이 자력계를 내려서 탐사하는 방법밖에 없다. 일반적으로 이러한 탐사를 해저면 근접 자력탐사(near-bottom magnetic survey) 또는 deep-tow magnetic survey로 지칭한다. 해저면 근접자력탐사는 해수면 근처에서 얻을 수 없는 수십 미터 또는 백 미터 이내의 작은 구조를 밝히는데 도움을 줄 수 있는 장점이 있지만 탐사 시간이 오래 걸린다는 단점 역시 지니고 있다. 따라서 비스마르크해 전반에 대한 적용은 어렵고 몇몇 지역에서만 선택적으로 해저면 근접 자력탐사를 수행해야 한다. 특히 해저면 근접 자력탐사가 현재는 분출을 멈추었으나 과거에는 활발했던 해저 열수광상을 찾는 데 매우 중요한 도구가 된다는 점은 잘 알려져 있다. 제1단계 1차년도 이후(2006년-2008년)에 주요 활성 열수분출구 주변과 확장축에서 떨어진 off-axis 지역을 선정해 10-15일 가량의 해저면 근접 자력탐사를 총 3회 정도 실시할 필요가 있다.

- 비스마르크해 주요 지역에 대한 다중채널 탄성과 탐사

탄성과 탐사를 통해 지각의 두께 및 그 변화 양상을 파악하는 것은 매우 중요하며 해저 열수 분출구 주변 환경을 이해하는데 가장 기본적인 자료가 된다. 지금까지 비스마르크해 심부 지각에 대한 탄성과 탐사는 수행된 적이 없다. 호주 BMR 등이 Tripartite Program과 관련하여 비스마르크해 전반에 대한 탄성과 탐사를 수행했으나 이는 천부지각에 대한 탐사였다. 2002년 한국해양연구원이 동마누스 분지에서 수행한 탄성과 탐사는 PACMANUS 열수 분출구 지역 아래에서 마그마 체임버(magma chamber)라고 여기어질 수 있는 깊이에서 미

약하나마 반사파를 관측하였다. 그러나 당시 탐사는 에어건 소스의 크기도 작았고 스트리머의 길이도 12채널 밖에 되지 않아 이것이 진짜 마그마 체임버인지 여부는 확인할 수 없었다. 따라서 동마누스 분지와 같이 열수분출구가 여러 지역에 나타나는 곳을 포함해 마그마 활동이 활발한 지역들에 대한 심부 탄성과 탐사를 수행해야 한다. 이를 위해선 먼저 현재 한국해양연구원이 보유한 에어건 어레이(airgun array)의 총 부피를 현격히 키워야 한다. 또한 다중채널탄성과 탐사 이외에 해저면 지진계(ocean bottom seismometer; OBS)를 활용한 토모그래피 연구가 필요하다. 이를 위해 20기의 OBS가 필요하며 약 2차례에 걸쳐 총 20일 정도의 탐사가 요구된다.

- 해상과 육상 지질 구조대와의 연속성 분석

해양지각에 나타나는 지구구조대가 육상으로 연장되는지의 여부를 밝히는 것은 매우 중요하다. 파푸아 뉴기니아 육상에는 많은 단층과 습곡들이 나타나는데 해양지각에 나타나는 것들과의 비교를 통해 지구구조대의 발달과정에 대한 정보를 얻을 수 있다. 예를 들어 동마누스 분지에 나타나는 Weitin Fault와 Djaul Fault가 계속하여 New Ireland 육지까지 연장되는지를 밝히는 것은 이 두 단층대 사이에 나타나는 분지와 열수분출구의 기원을 이해하는데 매우 중요하다. 서부 비스마르크해의 경우 바다에서 나타나는 섭입대(subduction zone)가 육상에 어떻게 연결되는지를 밝히는 것은 이 지역의 지반안정도 및 지진대 분포를 규명하는데 있어서 매우 중요하다. 지질구조대의 연속성을 밝히기 위해선 해저지향 탐사와 함께 다중채널탄성과 탐사가 육지와 바다의 경계부에 이루어져야 한다. 이를 위해선 48채널 탄성과 탐사를 제1단계에서 수행할 필요가 있다. 서부 비스마르크해 주변의 경우 탐사에 필요한 기간은 약 20일 정도로 추산된다.

- 비스마르크해 확장축에서의 암석시료 채취

암석 시료는 지구물리 탐사만으로는 얻을 수 없는 보다 구체적인 정보를 제공해 준다. 예를 들어 암석 시료를 통해 맨틀의 조성, 맨틀의 온도, 맨틀의 순환, 연속적인 마그마 체임버의 존재 여부 등 지각 형성과 관련된 중요한 정보를 얻을 수 있다. 그동안 비스마르크해 확장축을 따라 상당한 암석시료가 채취되었지만 전 지역을 포괄하지 못하고 몇몇 지역에서만 집중적으로 채취되었다. 최근 하와이대학의 Sinton 교수 등이 1986년 얻어진 시료를 분석하고 그 결과를 논문에 발표했지만, 여기에는 중부와 서부 비스마르크해, New Britain을 따라 발달한 호상열도 화산들은 포함되어 있지 않다. 따라서 제1단계에서 비스마르크해 확장축을 따라 일정한 간격으로 암석시료를 채취하는 것이 필요하다. 암석뿐 아니라 열수분출구의 침니도 가능한 채취해 화학분석을 할 필요가 있다. 암석 시료를 효율적으로 채취하기 위해서도 정확한 해저지형도는 필수적이다. 확장축을 따라 드렛징을 한다고 가정할 때 총 500km 정도의 연장선에 걸쳐 암석/침니 시료가 채취되어야 하며 이를 위해 약 100회 정도의 드렛징이 3-4년에 걸쳐 수행될 것으로 예상된다.

### 3) 제1단계 사업계획

#### 2005년 (총 9일 소요)

- 비스마르크해 중부 해역 확장축인 WSR(Western Spreading Ridges) (146.25-148.25°E)에 대한 지형탐사와 지구물리탐사 (3일 소요)
- WSR에서의 드래지틀 이용한 암석시료 채취 (3일 소요)
- 비스마르크해 서부(144-146°E) Schouten Transform 지역에 대한 지형탐사와 지구물리탐사 (3일 소요)

#### 2006년 (총 50일 소요 + 30일 국제공동 연구)

- 비스마르크해 서부해역 전반(지진해일 발생지역 포함)에 대한 지형/지구물리 탐사 및 다중채널 탄성과 탐사 (25일 소요)
- 비스마르크해 중부 WSR에서의 추가 해저지형 조사 및 해저면 근접 자력탐사(deep-tow magnetic survey) (15일 소요)
- WSR에서의 추가 암석시료 채취 (10일)
- 비스마르크해 동부 동마누스 분지(East Manus Basin)에서 미국과 공동으로 무인잠수정(ROV)을 활용한 해저면 근접 지구물리 탐사 (30일 - 미국 조사선 활용)

#### 2007년 (총 50일 소요 + 20일 국제공동 연구)

- 비스마르크해 중부 off-axis 부분에 대한 지형/지구물리 탐사 (25일 소요)
- WSR에 대한 해저면 근접 사이드스캔 소나(deep-tow sidescan sonar) 탐사 (15일 소요)
- 마그마 체임버 존재 판단을 위해 WSR 심부지각에 대한 굴절과 탐사(해저면 지진계 활용) (10일 소요)
- WSR에 대한 유인잠수정(manned submersible) 탐사 (20일 - 프랑스/일본 조사선 활용)

#### 2008년 (총 50일 소요 + 20일 국제공동 연구)

- 마그마 체임버 존재 여부의 판단을 위해 동마누스 분지 심부지각에 대한 굴절과 탐사(해저면 지진계 활용) (10일 소요)
- 비스마르크해 동부 off-axis 지역에 대한 지형/지구물리 탐사 (15일 소요)
- 비스마르크해 동부에 대한 해저면 근접 사이드스캔 소나(deep-tow sidescan sonar) 탐사 (15일 소요)
- 비스마르크해 동부 지역에서의 암석 시료 채취 (10일)
- 비스마르크해 동부 확장축에서의 유인잠수정(manned submersible) 탐사 (20일 - 프랑스/일본 조사선 활용)

#### 4) 제2단계 사업계획

2 단계 사업에서는 앞에서의 1단계 사업을 통해 얻어진 정보를 바탕으로 집중적으로 연구할 열수분출구를 선정한다. 그리고 이렇게 선정된 열수분출구들에 대해 종합적이고 집중적인 관측을 실시하고 각종 시료를 채취함으로써 열수분출구들에 대한 상세한 정보를 얻는다. 예를 들어 비스마르크해의 3개의 대표 확장축인 SER(South-Eastern Rift), MSC(Manus Spreading Center), WSR(West Spreading Ridges) 각각에 있어서 하나의 열수분출구를 선택해 집중적으로 조사하고 또 열수 지역간의 상호비교 연구를 수행한다. 제2단계에서는 6천 톤급 연구선이 확보되어 있을 예정이므로 이를 기반으로 한 ROV/AUV 탐사가 우리 자체적으로도 가능하리라 판단된다. 해저면 근접 탐사를 외국에 의존하지 않기 때문에 생물/미생물 시료 채집이 훨씬 용이해질 것이다.

지구물리 부분이 제2단계 사업에서 기여할 부분은 선정된 열수분출 지역에 대한 보다 자세한 지형과 지각내부 구조에 관한 정보를 제공하는 것이다. 이를 위해 다음과 같은 탐사와 연구가 진행되어야 한다고 생각된다.

##### 2009년 (총 45일)

- 3개의 선정된 열수분출구 주변에 대한 정밀 지형 조사 (AUV 활용) (30일)
- 해저면 근접 탄성과 탐사 (15일)

##### 2010년 (총 45일)

- 해저면 안착 굴착기(seafloor drill)를 이용한 열수분출구 내부에 대한 시료 채취 (30일)
- 열수분출구 주변에 대한 지열 및 열류량 측정 (15일)

##### 2011년 (총 30일)

- 해저면 전기/자기 탐사(magneto-telluric investigation)를 통한 열수분출구 주변 및 지각내부에 대한 비저항도(resistivity) 탐사 (30일)

#### 5) 제3단계 사업계획

제 3단계 사업에서는 제1단계와 제2단계 연구를 통해 얻어진 정보를 기초로 하여 열수분출 지역을 연결하는 해저 케이블 네트워크를 구성하는 것을 주요 골자로 한다. 현재 가능한 관측 방법은 부이 mooring을 통한 장기 관측과 해저 광케이블을 활용한 실시간 관측인데 이 기술이 제3단계 사업이 시작되는 2012년 이전까지는 어느 정도 완속해질 것으로 예상된다. 해저 관측망(observation network) 구축을 위해 별도의 커다란 지구물리 탐사 항목이 요구되지는 않을 것으로 판단된다. 현장탐사가 전 단계에 비해 크게 줄어들 것으로 예상된다.



다. 반면 해저면 지진계를 비롯한 각종 지구물리 관측기기들의 개발이 필요하고 이들이 관측망에 적절하게 연결되어야 할 것이다. 또한 관측망의 설치 이외에 보수/유지를 위해 정기적인 현장 답사가 요구될 것이다. 아울러 실시간으로 많은 양의 데이터가 수집되면서 이를 기록하고 저장하는 새로운 기술이 개발되어야 할 것이다. 이 같은 내용을 바탕으로 하여 제3 단계 사업계획을 아래와 같이 구상해 보았다.

#### 2012년 (총 10일)

- 해저면 지진계를 비롯한 지구물리 관측기기 개발
- 해저면 지진계 및 관측기기 현장 테스트 (10일)

#### 2013년 (총 10일)

- 해저면 관측기기 현장 투입 (10일)
- 실시간 관측 자료 분석기술 개발 및 archiving 기술 개발

#### 2014년 (총 10일)

- 해저면 관측기기 추가 현장 투입 및 교체 (10일)
- 실시간 관측 자료 분석기술 개발 및 archiving 기술 개발

#### 2015년 (총 10일)

- 해저면 관측기기 추가 현장 투입 및 교체 (10일)
- 실시간 관측 자료를 활용한 모델링 기법 연구

### **(5) 국제공동연구 추진계획**

앞에서 언급했듯이 사업 초기에는 우리가 만든 유인/무인 잠수정의 효과적인 활용이 어려울 것으로 기대한다. 자체적인 해저면 근접탐사에 대한 시도는 제1단계에도 수행되었지만 본격적으로 국산 유무인 잠수정이 활용되는 시기는 제2단계가 될 것이다. 국제공동 연구의 필요성은 해저면 근접 관측을 위해서 뿐만 아니라 선진 기술과 학문적인 지식/경험을 습득하기 위해서도 필요하다.

제1단계 해저면 근접 탐사를 위해 우리가 파트너로 생각하고 있는 곳들은 아래와 같다.

- 일본 JAMSTEC  
Shinkai 6500과 2000 유인 잠수정을 비롯해 ROV/AUV 활용 가능

- 프랑스 IFREMER

Nautille 유인 잠수정 및 Victor (ROV) 활용 가능

- 미국 Woods Hole 해양연구소

ABE(AUV) 및 JASON2 (ROV) 활용 가능

지금까지 이들 기관과 접촉해 본 바로는 학술적인 연구를 위해선 국제공동연구에 매우 호의적이다.

이밖에 우리가 염두해 두어야 할 곳이 파푸아 뉴기니아 내의 기관들이다. 대표적으로 지질 조사소(Geological Survey, PNG)와 PNG 대학을 들 수 있다. 이들과의 MOU 및 협력체계의 구축이 필요하다.

현재 파푸아 뉴기니아 해역 일부에 대해서는 호주에 있는 Nautilus 라는 광업회사가 광구 개발권을 가지고 있다. 과거 Nautilus는 특별한 탐사 활동 없이 투자자를 찾는데 몰두했으나 최근 Placer Dome이라는 광업회사와 손잡고 PACMANUS를 비롯한 일부 열수분출구 및 그 주변지역(off-axis region)에 대해 지구물리 탐사를 수행하고 있다. 다행히 우리의 초기 사업 계획이 서부와 중부 비스마르크해에 맞추어져 있어 큰 마찰은 예상되지 않으나 장기적인 관점에서 이들과 협력을 해야 할 것으로 판단된다.

앞에서도 언급했듯이 우리가 앞으로 많은 협조를 얻어내야 할 곳은 바로 SOPAC이다. 따라서 SOPAC의 정기 연례회의 참석은 물론 이들과의 보다 심도 있는 협력체제 구축이 필요하다.

미국의 Ridge 2000 프로그램을 비롯해 프랑스, 일본의 해저열수 과학 프로그램과의 인력 교류 또한 매우 중요한 사항이다. 상호 승선자 교환을 통해 우리가 미국 Ridge 2000 프로그램의 집중연구 지역인 East Lau Basin 탐사에 참가할 수도 있고 East Pacific Rise 탐사에도 참가 할 수 있다.

현재 우리나라는 InterRidge에 준회원으로 있는데 사업 시작과 동시에 정회원으로 지위를 승격시킬 필요가 있다. 이렇게 함으로써 선진 외국의 과학 동향에 대한 정보를 보다 자세히 얻을 수 있고 국제적인 신뢰도도 높일 수 있다.

### 3. 참고문헌

#### 에이유 분지(Ayu Trough)

J.K. Hong and S.M. Lee, Reflection seismology in the southern Ayu Trough, a slow spreading divergent boundary, *Ocean and Polar Research* 24 (2003), 189-196.

M.S. Jung and S.M. Lee, Bathymetry and marine geophysical observations of the Ayu Trough, Southern Philippine Sea: Implications for crustal extension and structure, *Ocean and Polar Research* 24 (2002), 179-187.

S.M. Lee and S.S. Kim, Vector magnetic analysis within the southern Ayu Trough, equatorial western Pacific, *Geophys. J. Int.* 2004.

#### 비스마르크 해 (마누스 분지)

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.

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.

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)

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.

### 우드락 분지(Woodlark Basin)

Carbotte, S., C. Mutter, J. Mutter, and G. Ponce-Correa, Influence of magma supply and spreading rate on crustal magma bodies and emplacement of the extrusive layer: Insights from the East Pacific Rise at lat 16°N, *Geology*, 26, 455-458, 1998.

Goodliffe, A.M., B. Taylor, F. Martinez, R.N. Hey, K. Maeda, and K. Ohno, 1997, Synchronous reorientation of the Woodlark Basin spreading center, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 146, 233-242.

Hey, R.N., F.K. Duennebie, and W.J. Morgan, Propagating rifts on mid-ocean ridges, *J. Geophys. Res.*, 85, 2647-2658, 1980.

Macdonald, K.C., J.C. Sempere, and P.J. Fox, East Pacific Rise from Siqueiros to Orozco Fracture Zones: Along-strike continuity of axial neovolcanic zone and structure and evolution of overlapping spreading centers, *J. Geophys. Res.*, 89, 6049-6069, 1984.

Martinez, F., B. Taylor, and A.M. Goodliffe, 1999, Contrasting styles of seafloor spreading in the Woodlark Basin: Indications of rift-induced secondary mantle convection, *J. Geophys. Res.*, 104, 12,909-12,926.

Taylor, B. and N.F. Exon, An investigation of ridge subduction in the Woodlark-Solomon Region: Introduction and overview, in *Marine geology, geophysics, and geochemistry of the Woodlark basin-Solomon Islands*, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series, V.7: Houston, Texas, 1-24, 1987

Taylor, B., A. Goodliffe, F. Martinez and R. Hey, Continental rifting and initial sea-floor spreading in the Woodlark basin, *Nature*, 374 (6522),

534-537, 1995.

Taylor, B., A.M. Goodliffe, and F. Martinez, How continents break up: insights from Papua New Guinea. *J. Geophys. Res.*, 104, 7497-7512, 1999.

Weissel, J.K., B. Taylor, and G.D. Karner, The opening of the Woodlark Basin, subduction of the Woodlark spreading system and the evolution of northern Melanesia since mid-Pliocene time, *Tectonophysics*, 87, 253-277, 1982.

#### **북 피지 분지(North Fiji Basin)**

Auzende, J.M., B. Pelletier, and J.P. Eissen (1995) The North Fiji Basin Geology, Structure, and Geodynamic Evolution. In *Backarc Basins Tectonics and Magmatism* (ed. by B. Taylor) 524pp.

#### **라우 분지(Lau Basin)**

Hawkins, J. W. (1995). The Geology of the Lau Basin. *Backarc Basins Tectonism and Magmatism*. B. Taylor. New York and London, Plenum Press: 63-138.

Project Summary, Ridge office ([www.ridge2000.org](http://www.ridge2000.org))



# 제 6 장

---

## 부 록

---





2005 CRUISE  
**DSHEEP**  
Bismarck Sea



**KORDI**

*D. Jara*

## Scope of the Cruise

This cruise is a part of the project 'DSHEEP (Deep-Sea Hydrothermal vent Environments Exploration Programme)' which was originally planned for multi-disciplinary long-term survey (2005-2015) for hydrothermal vent environments in the back-arc basin of the western Pacific. The purpose of the cruise is to find promising sites to study hydrothermal vent environments as part of the first year plan which is in the first phase with r/v Onnuri (2005-2008). West Spreading Ridge in the Bismarck Sea is the first target area to find vent systems during the cruise.

Mapping of seafloor structure is the prerequisite information to find them. CTD/LADCP castings with seawater samplings are the essential tools to catch the evidence of the dispersion of hydrothermal plumes. Turbidity and thermal peaks of the vertical profiles by CTD castings are the indicators of the plume, and chemical analysis from water samples proves the second indirect evidence of the plume. Rock and sediment sampling could be the third but concrete and direct evidence of the chimneys of a vent system. Biological component is not included because it is out of the primary goal of the 2005 cruise as well as of limited survey schedule.

Domestic and foreign experts are joined for this cruise; 13 Koreans (10 from KORDI and 3 from SNU), 1 Japanese (Kyushu University), and 2 PNG experts (PNG Geological Survey and University of PNG) among 16 researchers. More experts from various institutions are expected to be joined for the future cruises. International collaborations with French and Japanese scientists as well as SOPAC countries will be the key factor for the prospective of the long-term project 'DSHEEP'.

## Cruise Schedule

Oct. 19 09:00 depart Jangmok, Korea  
(delayed 2 days due to the typhoon)

Oct. 23 1st CTD station

Oct. 28 10:00 arrived at Madang, PNG (anchored)  
13:00 depart Madang, PNG

Oct. 29 01:00 CTD/LADCP/water sampling at the 1st station  
(Mata Na Kul)  
06:00 mooring of 3 current-meters & 2 hydrophones  
(CTD Stn. WSR05)  
dredging

Oct. 30 08:00 mapping  
20:00 CTD/LADCP castings

Oct. 31 08:00 mapping

Nov. 1 00:00 CTD/LADCP castings  
box-coring

Nov. 2 18:00 recover the moored line

Nov. 3 08:00 arrive at Madang, PNG

## 연구선 온누리호 다중측심기(Multibeam Echosounder) 개요

연구선 운항팀 박건태

연구선 온누리호에 장착된 다중측심기는 SIMRAD사에서 제작된 EM120과 Seapath200, MRU 5, SV Profiler(Sound Velocity Profiler), SV Smart Sensor(Sound Velocity Smart Sensor)등으로 구성되어있다.

다중측심기의 주 장비인 EM120 시스템의 구성은 그림 1과 같이 송수파기(Transducer), TX Junction Box, Preamplifier Unit, Transceiver Unit, Remote Control, Operator Station 등이고, 주요 성능은 표 1과 같다.

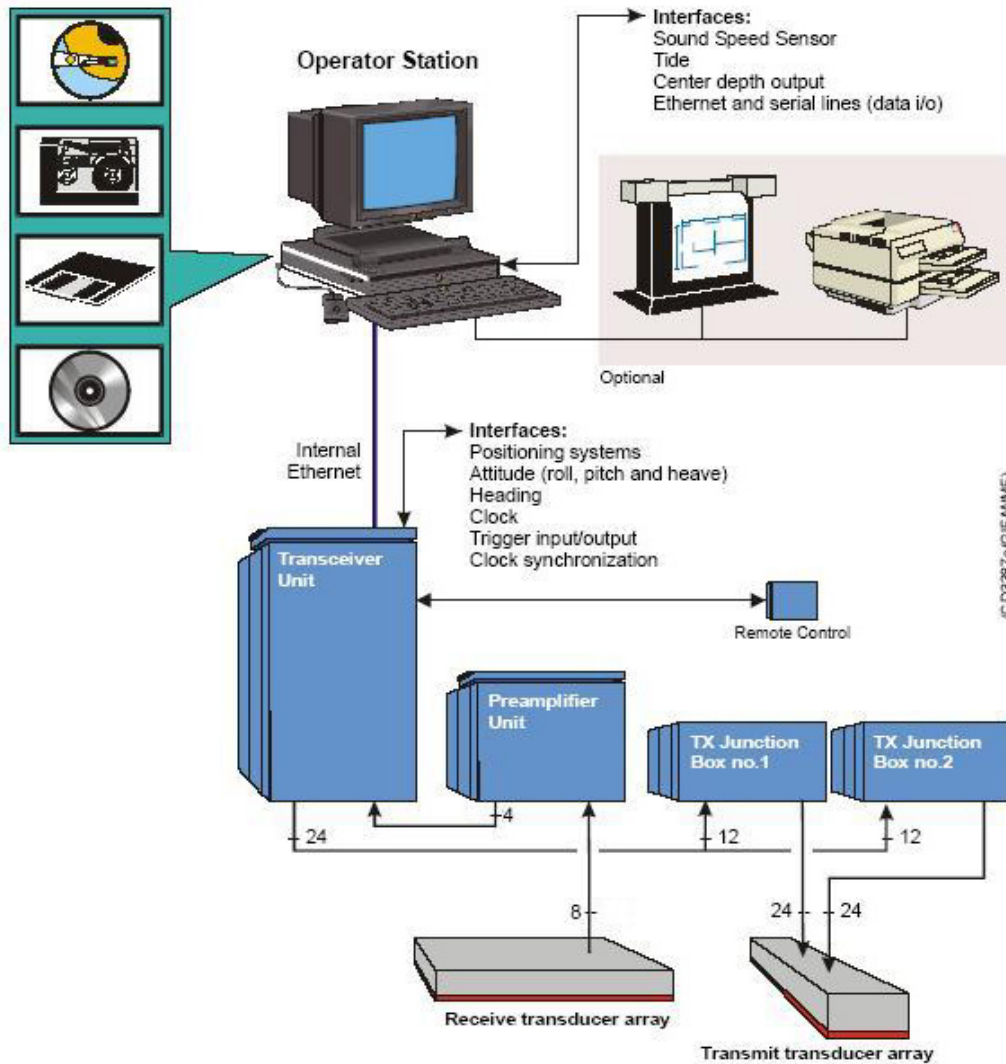


그림 1 . 연구선 온누리호 다중측심기 시스템 구성도

표 1. EM120 시스템 성능

Main Operational Frequency	11.25 KHz to 12.60 KHz
Maximum Ping Rate	5 Hz
Number of Beams for Each Ping	191
Beamwidth	1 x 2 Degree
Beam Spacing	Equidistance or Equiangle
Coverage Sector	Up to 150 Degrees
Transmit Beam Steering	Stabilized for roll, pitch and yaw
Receive Beam Steering	Stabilized for roll
Depth Range for Transducers	20 to 11,000 meters
Depth Resolution	10 to 40 cm
Pulse Length	2, 5 and 15 ms
Range Sampling Rate	2 KHz

1. 송수파기(Transducer)

송수파기는 송파기와 수파기로 나누어져있다.

송파기는 48개 모듈이 연구선과 같은 방향(선수 선미 방향), 수파기는 8개 모듈이 연구선에 수직방향(좌현 우현 방향)으로 선저에 수평으로 설치되어있다.

설치된 송수파기의 개수는 송수파기의 빔폭(Beamwidth)을 결정하고, 시스템의 정밀 정확도 및 한번에 측정할 수 있는 폭(Swath Width) 등 시스템 성능을 결정하는 주요한 요소이다. 한번에 측정할 수 있는 폭은 평탄한 지역에서 보통 좌우 각각 탐사지역 수심의 3배 까지 할 수 있으며 빔폭이 1x2 도인 경우 그림 2와 같다.

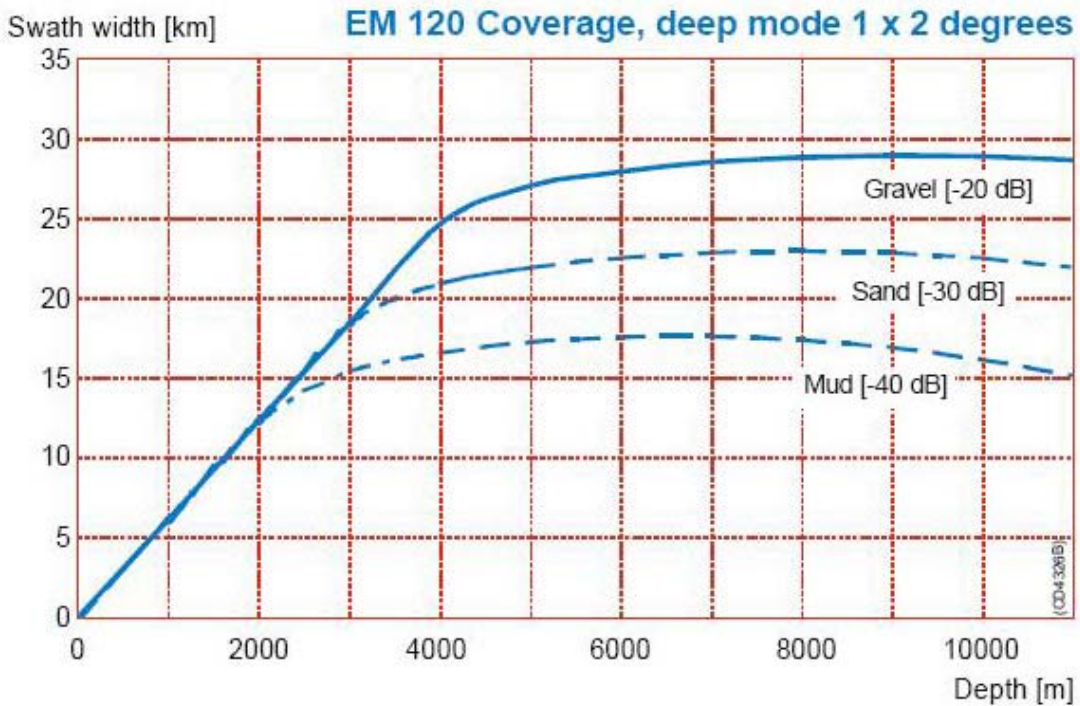


그림 2. EM120 Coverage, Deep Mode 1x2 Degrees

## 2. 송수신기(Transceiver Unit)

송수신기는 EM120의 주된 기능을 하며, 송신신호가 항상 송수파기에서 수직으로 전파되도록 송수파기의 자세(Attitude)가 보정된 신호를 만들어내며, 해저면에서 반사된 신호를 정확히 검출하기 위하여 수신 신호의 진폭과 위상을 비교 분석하는 기능을 한다. 그 외 송수파기의 정밀한 위치 측정 및 자세 보정, 동기 신호, 시간 정보 등 외부 장비에서 측정된 자료를 획득한다.

## 3. Operator Station

Operator Station은 Windows XP를 OS로 가지는 PC이며, 자료 수집, 기록, 전시 기능, 음속 보정 기능, 수집된 자료를 외부로 보내는 기능을 가지고 있다.

## 4. 보조 장비

Seapath 200은 송수파기의 위치 및 자세를 보정하는 장비로 그림3와 같이 구성되어 있다. SV Profiler 와 SV Smart Sensor는 음속 보정을 위한 장비이다. SV Profiler는 12,000 m 까지 깊이에 따라 음속을 보정하고, SV Smart Sensor는 송수파기 설치 위치에서 실시간으로 음속을 보정하는 장비이다.

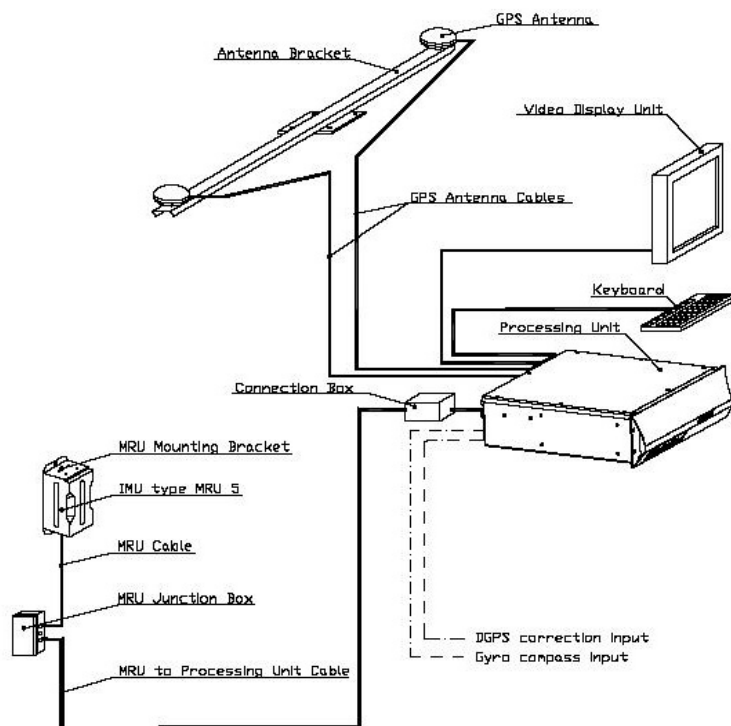


그림 3. Seapath 200 시스템 구성도

\*\*\* DSHEEP 2005 CTD Stations (Oct. 22 ~ Nov. 1) \*\*\*

Station	latitude	longitude	depth	survey time	remarks
DT01	17°10.324'N	135°47.717'E	5337m	Oct.22, 15:46-16:26	
DT02	15°42.308'N	136°24.056'E	5158m	Oct.23, 00:27-01:02	
DT03	14°20.196'N	136°58.175'E	5134m	Oct.23, 08:29-09:49	
DT04	12°55.311'N	137°33.277'E	4833m	Oct.23, 17:58-18:41	
DT05	3°40.312'N	141°17.891'E	2585m	Oct.25, 17:37-18:25	
DT06	2°40.003'N	141°42.049'E	2394m	Oct.25, 23:32-23:51	
DT07	1°40.145'N	142°05.870'E	2804m	Oct.26, 05:45-07:01	
DT08	0°40.078'N	142°30.235'E	3006m	Oct.26, 12:09-12:49	
DT09	0°20.162'S	142°54.319'E	3112m	Oct.26, 18:06-18:45	
DT10	1°20.029'S	143°18.134'E	1273m	Oct.27, 00:01-00:49	
WSR01	2°58.998'S	147°07.354'E	711m	Oct.28, 15:46-16:28	
WSR02	2°58.907'S	147°08.235'E	927m	Oct.28, 17:01-17:48	
WSR03	2°58.239'S	147°08.996'E	1017m	Oct.28, 18:43-19:40	
WSR04	2°58.013'S	147°09.881'E	591m	Oct.28, 20:50-21:23	
WSR05	2°56.077'S	147°15.144'E	1277m	Oct.28, 23:32-04:32	
WSR06	3°03.179'S	147°17.619'E	893m	Oct.30, 04:43-05:21	
WSR07	3°04.057'S	147°18.448'E	963m	Oct.30, 05:51-06:35	
WSR08	3°02.847'S	147°19.383'E	928m	Oct.30, 07:02-07:42	
WSR09	3°01.895'S	147°20.411'E	861m	Oct.30, 08:06-08:44	
WSR10	2°53.989'S	147°29.971'E	765m	Oct.30, 10:17-10:46	
WSR11	2°53.387'S	147°33.903'E	592m	Oct.30, 11:21-11:49	
WSR12	2°51.989'S	147°37.988'E	957m	Oct.30, 12:31-13:08	
WSR13	2°51.057'S	147°41.964'E	830m	Oct.30, 13:45-14:24	
WSR14	2°53.082'S	147°42.023'E	743m	Oct.30, 14:48-15:26	
WSR15	2°55.093'S	147°41.959'E	624m	Oct.30, 15:49-16:23	
WSR16	3°02.127'S	147°37.966'E	1038m	Oct.30, 17:11-18:08	
WSR17	3°03.659'S	147°36.620'E	996m	Oct.30, 18:25-19:09	
WSR18	3°03.313'S	147°34.979'E	1058m	Oct.30, 19:22-20:03	
WSR19	3°02.745'S	147°33.305'E	559m	Oct.30, 20:28-20:43	
WSR20	3°01.845'S	147°31.671'E	760m	Oct.30, 20:58-21:27	
WSR21	4°04.259'S	148°14.949'E	1196m	Oct.31, 22:53-23:43	
WSR22	4°05.823'S	148°15.956'E	596m	Nov.1, 00:00-00:33	
WSR23	4°08.142'S	148°15.442'E	471m	Nov.1, 01:04-01:33	
WSR24	4°07.528'S	148°14.686'E	640m	Nov.1, 01:52-02:32	
WSR25	4°07.805'S	148°14.388'E	659m	Nov.1, 02:45-03:35	
WSR26	4°07.038'S	148°15.013'E	716m	Nov.1, 04:33-05:21	
WSR27	4°06.264'S	148°15.337'E	579m	Nov.1, 06:23-06:52	
WSR28	4°06.633S,	148°14.961'E	743m	Nov.1, 07:15-17:47	
WSR29	4°07.027S,	148°14.451'E	754m	Nov.1, 08:12-08:45	
WSR30	4°08.223S,	148°14.315'E	603m	Nov.1, 09:12-09:39	
WSR31	4°07.879S,	148°14.729'E	644m	Nov.1, 10:05-10:33	
WSR32	4°07.164S,	148°14.761'E	647m	Nov.1, 10:50-11:35	
WSR33	4°04.658S,	148°10.549'E	739m	Nov.1, 16:27-17:13	
WSR34	4°04.658S,	148°10.549'E	808m	Nov.1, 17:47-18:29	
WSR35	4°04.215S,	148°10.224'E	659m	Nov.1, 19:29-20:07	
WSR36	4°04.698S,	148°09.673'E	836m	Nov.1, 20:49-21:33	

(DT's along the transit path, WSR's in the Bismarck Sea)

## Mooring and Recovery of Current Meters

해양환경연구본부 황 상 철

해저열수환경을 파악하기 위한 일환으로 2005년 10월 29일부터 동년 11월 2일까지 5일간 서 태평양 정점 WSR05(2°56.147'S, 147°14.963'E)에서 유속계 계류에 의한 해류관측을 실시하였다. 계류선에는 수중소음 관측 장비인 Hydrophone 2대가 함께 부착됨으로서 Hydrophone 계류가능 수심 내인 1,250m에서 행하였다. 계류순서는 최상층 Buoy를 먼저 선미로 내려 일렬로 펼치고 계류하고자 하는 지점을 확인한 후 Anchor를 마지막으로 떨어뜨리는 방식을 채택하였다.

유속계 계류형태는 심해에 적합한 "I" Type으로 Design하여 계류하였으며 해류관측 장비는 노르웨이 Aanderaa사 제품인 자기기록유속계(RCM; Self-Recording Current Meter) Model-7, 1대와 Model-8, 2대가 사용되었다(그림 1참조). 유속계는 그림 1에서와 같이 표층에서 1,120m 수심에 RCM-7을, 1,170m와 1,220m 수심에 RCM-8을 부착하였다. RCM-7이나 RCM-8은 자료수집 항목기능은 동일하나 계류 가능수심이 RCM-7은 천해용(2,000m), RCM-8은 심해용(6,000m)이다. 전체 계류일자가 길지 않았기에 내장된 자료기록장치(Data Storage Unit) 및 전원(Lithium Battery: 7.2v, 14A) 용량이 충분하여 자료 수집은 5분 간격으로 하였다. 관측을 마친 후에는 계류선에 부착된 모든 장비를 안전하게 회수하기 위하여 미국 Benthos사 제품인 심해용(6,000m) 음파분리기(AR: Acoustic Release Transponder, Model 865A)를 계류선 하단에 2대 나란히 부착하였다. 2대중 1대만 작동하더라도 계류 Anchor와 분리될 수 있도록 하기 위해서다. 관측이 끝난 후 AR 2대 모두 잘 작동되었고 계류하였던 장비는 안전하게 회수되었다. 이번 계류에 사용하였던 계류선은 미국 듀폰사에서 제작 판매하는 8mm의 Kevlar Rope로 인장력이 매우 강하고 질길 뿐 아니라 가늘어 저항도 적게 받도록 고안된 것이다. 계류선을 연결하는 Sling ring, Shackle 및 Chain 등은 모두 국산제품으로 부식을 방지하기 위하여 우리연구원에서 특별 주문하여 용융도금(Hot Dip Galvanized)하였다. 계류선을 직립하게 하기 위한 부력재로는 미국 Benthos사 제품인 심해용 17" Glass buoy 12개가 사용되었는데 3개씩 4부분으로 나누어 1/2" Chain에 Bolt Nut로 고정하였다. 이런 방법은 계류 및 회수를 용이하게 하고 어느 부분이 절단되더라도 장비가 가라앉지 않게 하기 위해서이다. 계류선을 해저면에 고정하는 계류 Anchor는 약 300kg 무게의 폐 기차바퀴를 사용하였고, 관측이 종료된 후에 음파분리기에 신호를 보내어 계류선과 계류 Anchor를 분리함으로써 장비가 부착된 계류선은 부상하고 Anchor인 기차바퀴는 회수 할 수가 없게 된다.



## Measurement of Oceanic Ambient Noise

해양기후·환경연구사업단 김 봉채

해양의 주위잡음은 해양에서 수중음향 장비인 소나 등을 사용하는 경우 신호의 수신을 방해하는 역할을 하지만, 주변 해양환경에 관한 정보를 포함하고 있으므로 주변 해양환경을 모니터링하는 수단으로 활용되고 있다. 심해의 경우 주파수 대역에 따라 해수중 주위잡음의 음원은 대략 구분되는 것으로 보고되고 있다. 즉, 주파수 대역 약 100 Hz 이하의 잡음은 해저지진 등의 지각운동에 의하여 주로 발생되고 있고, 주파수 대역 약 80~500 Hz 잡음은 원거리 항행선박에 의하여 발생되고 있으며, 주파수 대역 약 400 Hz~30 kHz 잡음은 해표면 위에서 부는 바람에 의하여 발생되고 있다. 특히 심해열수는 해저지진과 밀접한 관련이 있으므로 해저지진의 진앙지를 모니터링하기 위하여 해저지진에 의하여 발생되어 해수중으로 전파하는 주위잡음인 T-파(tertiary wave)를 측정하여 진앙지를 추정하고 있을 뿐만 아니라 주위잡음으로부터 열수활동을 모니터링하려는 연구도 관심을 모으고 있다.

심해열수 해역에서 해양의 주위잡음을 측정할 목적으로 유속계를 계류하기 위한 심해열수 환경 계류시스템에 자기기록형 수중청음기(self-recording hydrophone) 2대를 부착하여 계류하였다. 심해열수 환경 계류시스템에 부착된 수중청음기의 사진을 그림 1에 나타내었다. 여기에 사용된 자기기록형 수중청음기의 주요한 사양은 표 1과 같다. 수중청음기의 계류위치는 비스마르크 해(Bismarck Sea)의 2° 56.035'S, 147° 15.118'E이었고, 이곳의 수심은 약 1,277 m이었다. 2대의 수중청음기를 해저면으로부터 각각 129 m 및 29 m 만큼 위쪽인 1,148 m 및 1,248 m의 수심에 위치하게 하였다. 미리 설정한 프로그램에 의하여 10월 29일 00시(UTC)부터 80시간에 걸쳐 매 10분당 64초 동안 해수중 주위잡음을 수신하여 증폭한 다음 디지털화하여 스마트 미디어 플래시 메모리에 저장하도록 하고 있다.



그림 1. Photographs of the self-recording hydrophone attached to the mooring line.

표1. Main specifications of the self-recording hydrophone.

receiving sensitivity	-203 dB re 1 V/ $\mu$ Pa
frequency band	24~4,000 Hz
digitizing frequency	16 kHz
digitizing bit	16 bit
dynamic range	80 dB
tolerable maximum water depth	2,000 m
data record time	80 hours

## Dredge (기반암 채취)

서울대학교 지구환경과학부 박승현

윌라우메즈 해팽 (Willaumez Rise)의 기반암 특성을 파악하기 위해 드렛지를 통한 암석 채취를 시도하였다. 윌라우메즈 해팽은 서쪽의 마누스 분지(Manus Basin)과 동쪽의 뉴기니아 분지(New Guinea Basin)의 경계에 분포한다. 윌라우메즈 해팽의 기원은 아직 명확하지 않으나 맨틀 플룸(plume)에 의해 형성되었을 가능성이 제기되고 있다. 이 지역을 주목할만한 다른 이유는 1999년 프랑스에 의해 이 지역에 분포하는 Mata Na Kul 칼데라에서 열수 분출구가 발견되었다는 점에 있다.

기반암의 특성은 판구조론과 맨틀의 특성 등 기초 과학적인 주제 외에도 열수작용과도 밀접한 연관을 갖고 있기에 매우 중요하다. 열수 작용은 단계적으로 다음과 같은 과정을 포괄적으로 지칭한다. 첫 번째, 해수가 해양지각의 깨진 틈을 타고 스며드는 과정이다. 두 번째, 해수가 마그마와 반응하여 열수가 형성되는 과정이다. 세 번째, 마그마와의 반응 또는 마그마에서 직접적으로 기원한 열수가 순환되면서 주변암과 일으키는 반응이다. 네 번째, 마그마 및 주변암과 반응 후 조성이 변화한 열수가 다시 해수로 분출되는 과정으로서 이 과정에서 검은 연기 굴뚝(black smoker chimney)과 하얀 연기 굴뚝(white smoker chimney)이 형성된다. 이 과정을 통해 알 수 있듯이 열수 작용은 매우 복잡한 암석-물 반응 체계(water-rock interaction)로 이루어져 있다.

열수의 순환과정에서 알 수 있듯이 열수의 형성과 조성은 마그마와 밀접하게 관련되어 있으므로 마그마의 형성 및 분화과정에 대한 연구가 선행되어야 한다. 그런데 마그마 형성과 분화 과정은 기반암에 반영되므로 역으로 기반암을 통해 마그마의 형성과 분화과정을 연구할 수 있다. 그리고 마그마와의 상호작용을 통해 형성된 열수는 기반암과의 이온교환반응을 통해 조성이 변화하게 되므로 열수의 조성에 기반암 역시 중요한 영향을 미치게 되고 역으로 이 과정을 통해 기반암의 조성이 변화하게 된다. 암석의 깨진 틈을 타고 순환하던 열수가 순환과정에서 재침전하여 기반암 내부에 맥상의 광체를 형성하기도 하므로 기반암 연구는 열수 광상의 분포 파악에도 매우 중요한 수단이다.

이번 2005 대양 탐사에서는 드렛지를 통해 이 지역 기반암의 특성을 파악하고자 했으나, 드렛지가 Mata Na Kul 지역 드렛징 과정에서 유실되어 시료 채취가 불가능하였다. 이 지역 열수 연구를 위해 향후 드렛지를 개량, 반드시 재수행되어야 할 것으로 판단된다.

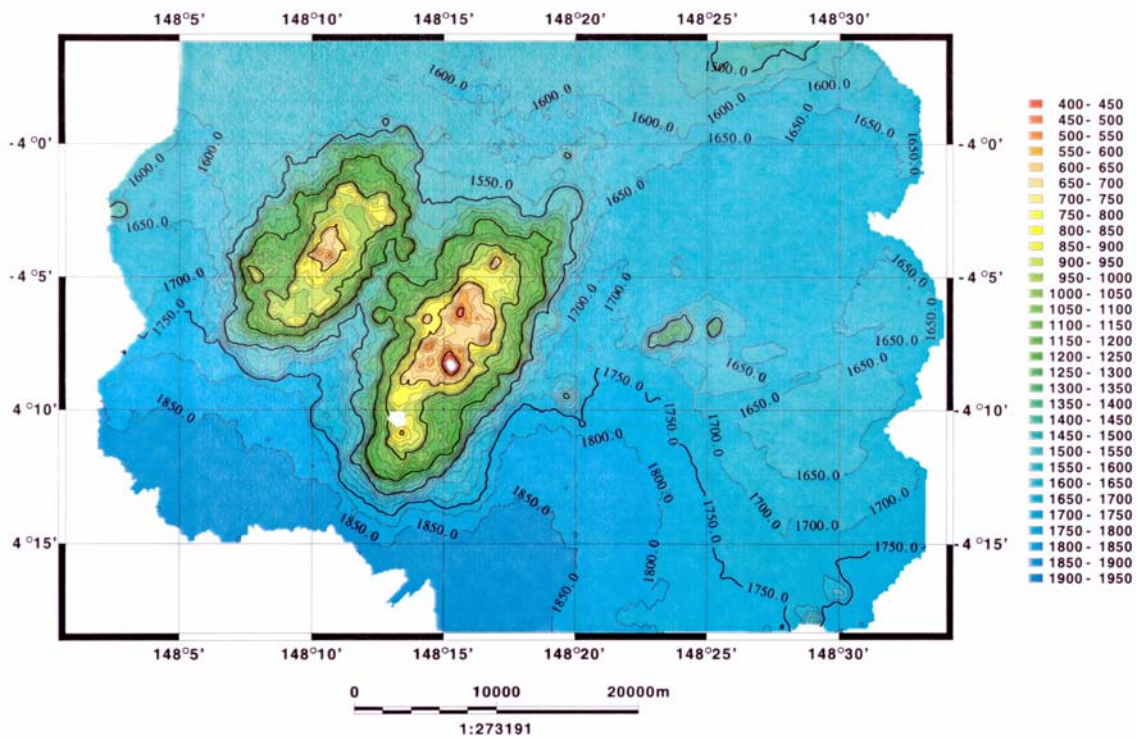
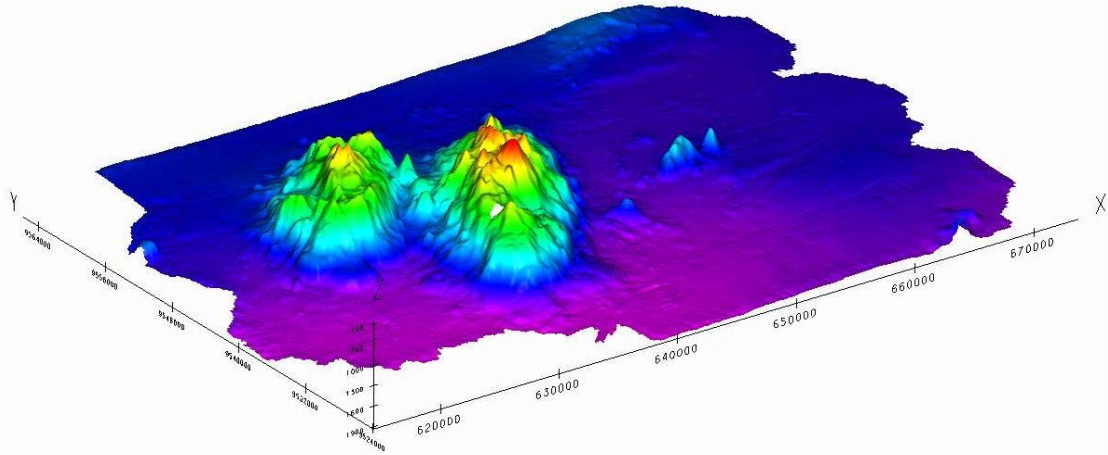


Dredge Deployment



Dredge Lost

New Discovery!  
 Little Coma and Big Coma  
 Mapped by R/V Onnuri



비스마르크해 중부해역 (Western Spreading Ridge)에서 처음으로 탐사팀이  
 찾아낸 한 쌍의 해저화산체 (탐사팀이 'Big Coma' & 'Little Coma'로 명명함)와  
 Big Coma 정상부근에서 간접 확인된 열수플룸 확산범위)

## Chemistry

### Sampling and analysis of sea water

Sea water samples were collected in General Oceanic 10 liters of Niskin bottles mounted on a rosette attached to a SEA-BIRD Model 911 CTD probe measuring water pressure, temperature, conductivity and transmission in situ.

Silicate and phosphate measurements were carried out using a Technicon AA II Model, two-channel autoanalyzer on board; the methods followed were very similar to those described in Strickland and Parsons 1972 and Grasshof et al. (1983).

Hydrogen sulfide was determined using methylene blue spectrophotometric method on board. The detection limit of sulfide achieved using 5 cm length of cell was 0.17  $\mu\text{mole/l}$  in this cruise.

The water samples for the analysis of helium isotopes were stored in sealedcopper tubes and will be determined to the laboratory by the subsequent gas extraction and mass spectrometry measurement using routine analysis procedures.

Radon gas analysis was done using Rad7 Rad H<sub>2</sub>O of the DURRIDGE company on board. The results will be reported after correction.

pH was determined with pH meter on board

Sub-samples for the determination of trace metals were collected in the 1liter of pre- acid cleaned HDPE bottles and filtered through 0.4  $\mu\text{m}$  pre-acid cleaned Nucleopore membranes. Filtration was performed under a Class-100 laminar flow clean bench on board. The filtered samples were stored in pre-acid cleaned HDPE bottles after acidification by adding 4ml of 6 N ultrapure grade of HCl per liter of seawater. Filtering membranes for the determination of particulate trace metals were stored acid cleaned plastic Petri-dish after removing salt by doubly deionized water.

The determined of methane will be done in KORDI and Japan. The results of methane will be cross checked. The next is the scheme of methane analysis written by Dr. Jun-ichiro Ishibashi who is the professor in Kyushu University:

Methane concentration is analyzed in shore based laboratory in Kyushu University (for quick look and/or cross check). The sub-sample was transferred to a 35-ml serum glass vial from a Niskin bottle. After an overflow to prevent air contamination, 0.3 ml of saturated HgCl<sub>2</sub> solution was slowly added as a preservative. The vial was then capped with a butyl rubberstopper and sealed with an aluminum cap. The bottle was stored in a refrigerator until analysis.

In the lab. in Kyushu Univ., methane analysis will be conducted with a semi-automated system GS-1061 (DKK Corp.). Since it employs so-called "purge and trap" technique, and has high reproducibility for operation steps, this system has advantage of reducing the sample volume, although the precision is not so good as 5%. Detailed description of the systems is written in Ishibashi et al. (1997). It takes 35 minutes to analyzed one sample, and the samples in one cast are analyzed in one day (probably with help of a student in Kyushu Univ.).

### **Sampling of sediment**

Sediment samples were collected in two stations of WSR-BC1 (148°14.319'E, 4°07.644' S, 524 m) and WSR-BC2 (148°14.800' E, 4°07.433' S, 687 m) using box core. Two sub core samples were taken using the 7 cm diameter of PC liner in each station. The end caps of core liners were sealed using vinyl tape. And collected surface and sub-surface bulk sediment samples and core samples are stored at 4°C until the pretreatment in laboratory on land.

Volcanic rock of approximately 10 and 15 cm of lengths and several small rock fragments were obtained in the sample of box core which was collected in WSR-BC1. Black color volcanic rock contains the rusty orange iron oxide coated layer and traces of numerous small white tubes which tube worms were dwelled.

Log\_ DSHEEP05

Station No.	WSR1	(hh:mm)	Longitude	Latitude								
Date (dd/mm/yy)	28/10/05	15:45	147°07.409' E	2°59.006' S								
Depth(m)	695	Arrival	Departure									
Remark: crest of caldera, no variation of temperature between 500 - 520 m												
Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH)4 (mM)	NO3+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Rn	CH4	Metals
WSR1-1	727	5.94	93						●			
WSR1-2	727	5.94	93	40.99		2.32	ND	7.85			●	●
WSR1-5	727	5.94	93									
WSR1-7	677	6.07	93						●			
WSR1-8	677	6.07	93	38.44		1.96	ND	7.88			●	●
WSR1-9	677	6.07	93									
WSR1-17	677	6.07	93						●			
WSR1-18	677	6.07	93	24.89		2.05	ND	7.89			●	●
WSR1-19	677	6.07	93									

Log\_ DSHEEP05

Station No.	WSR2				(hh:mm)	Longitude	Latitude					
Date (dd/mm/yy)	28/10/05		Arrival		17:00	147°08.233' E	2°58.917' S					
Depth(m)	887		Departure		17:50	147°08.291' E	2°59.068' S					
Remark: Inside of caldera												
Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH)4 (mM)	NO3+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Rn	CH4	Metals
WSR2-1	870								●			
WSR2-2	870			44.44		1.90	ND	7.58		●	●	●
WSR2-5	820	5.95	85.9						●			
WSR2-6	820			44.87		1.65	ND	7.54		●	●	●
WSR2-7	770	5.98	84.5						●			
WSR2-8	770			45.01		1.49	ND	7.46		●	●	●
WSR2-9	718	6.07	90.3						●			
WSR2-10	718			41.58		2.04	ND	7.75		●	●	●
WSR2-11	670	6.3	92.1						●			
WSR2-17	670			36.66		2.25	ND	7.87		●	●	●
WSR2-18	620	7	96						●			
WSR2-19	620			32.49		1.98	ND	7.96			●	●



Log\_DSHEEP05

Station No.	WSR3				(hh:mm)	Longitude		Latitude				
Date (dd/mm/yy)	28/10/05		Arrival		18:43	147°08.998' E		2°58.241' S				
Depth(m)	1017		Bottom		19:08	147°08.752' E		2°58.692' S				
Rem ark: Center of caldera, leak in the bottles of #7 and #21.												
Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH) <sub>4</sub> (mM)	NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> (mM)	PO <sub>4</sub> (mM)	H <sub>2</sub> S (mM)	pH	He	Rn	CH <sub>4</sub>	Metals
WSR3-1	987	5.91	90.7						●			
WSR3-2	987	5.91	90.7	43.81		2.41	0.24	7.70			●	●
WSR3-5	937	5.98	90.3						●			
WSR3-6	937	5.98	90.3	44.04		2.10	ND	7.70			●	●
WSR3-7	887	5.94	90.2									
WSR3-8	887	5.94	90.2	44.65		2.13	ND	7.72			●	●
WSR3-9	837	5.95	89.8						●			
WSR3-10	837	5.95	89.8	44.97		2.01	ND	7.69			●	●
WSR3-11	787	5.98	89.6						●			
WSR3-17	787	5.98	89.6	44.03		2.07	ND	7.69			●	●
WSR3-18	710	6.06	89.8						●			
WSR3-19	710	6.06	89.8	43.96		2.04	ND	7.69			●	●
WSR3-20	635	6.61	93						●			
WSR3-21	635	6.61	93	35.14		2.27	ND	7.90			●	●
WSR3-22	10								●			
WSR3-23	10			0.31		0.30	ND	8.41				●

Log\_ DSHEEP05

Station No.	WSR5				(hh:mm)		Longitude		Latitude			
Date (dd/mm/yy)	10/28/05		Arrival		23:31		147° 15.144' E		2° 56.077' S			
Depth(m)	1270		Bottom		23:57		147° 14.698' E		2° 56.581' S			
Rem ark: Leak in bottle #11												
Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH)4 (mM)	NOS+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Rn	CH4	Metals
WSR5-1	1216	3.93							●			
WSR5-2	1216	3.93		80.58		2.77	0.24	7.66			●	●
WSR5-5	1160	4.02							●			
WSR5-6	1160	4.02		79.24		2.30	ND	7.84			●	●
WSR5-7	1105	4.27							●			
WSR5-8	1105	4.27		73.08		2.66	ND	7.87			●	●
WSR5-9	1005	4.63							●			
WSR5-10	1005	4.63		63.86		2.58	ND	7.90			●	●
WSR5-11	900	5.01										
WSR5-17	900	5.01		57.08		2.56	ND	7.91	●		●	●
WSR5-18	800	5.42							●			
WSR5-19	800	5.42		50.75		2.44	ND	7.93			●	●
WSR5-20	700	6.02							●			
WSR5-21	700	6.02		39.21		2.29	ND	7.96			●	●
WSR5-22	600	7.09							●			
WSR5-23	600	7.09		31.74		2.24	ND	7.96			●	●
WSR5-24	10	29.9		0.34		0.34	ND	8.46	●			

Log\_ DSHEEP05

Station No.	WSR24			(hh:mm)	Longitude	Latitude						
Date (dd/mm/yy)	01/11/05	Arrival										
Depth(m)	643	Departure										
Remark: Transmission anomaly in the layer of 400 – 500 m depth in downward casting, but that signal disappeared during upward casting												
Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH)4 (mM)	NO3+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Rn	CH4	Metals
WSR24-1	633	7.37	92.8	31.54		2.09	ND	7.97		●	●	●
WSR24-2	633	7.37	92.8						●			

Log\_DSHEEP05

Station No.	WSR25 (or WSR24R)		(hh:mm)		Longitude	Latitude						
Date (dd/mm/yy)	01/11/05	Arrival	02:45	148° 14.388' E	4° 07.805' S							
Depth(m)	672	Bottom	03:06	148° 14.463' E	4° 08.162' S							
Rem ark:												
Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH)4 (mM)	NO3+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Rn	CH4	Metals
WSR25-1	661	6.19	93.3	33.85		2.14	7.87	ND			●	●
WSR25-2	661	6.19	93.3						●			
WSR25-5	600	6.53	93.3						●			
WSR25-6	600	6.53	93.3	30.80		2.09	7.94	ND			●	●
WSR25-7	504	7.81	93.2						●			
WSR25-8	504	7.81	93.2	21.21		1.88	7.98	ND			●	●
WSR25-9	471	8.25	93.2						●			
WSR25-10	471	8.25	93.2	19.56		1.82	8.00	ND			●	●
WSR25-11	445	8.86	93.2						●			
WSR25-17	445	8.86	93.2	17.00		1.76	8.02	ND			●	●
WSR25-18	362	10.8	93.2						●			
WSR25-19	362	10.8	93.2	12.36		1.56	8.01	ND			●	●
WSR25-20	292	13.7	93.2						●			
WSR25-21	292	13.7	93.2	1.31		0.67	8.08	ND			●	●
WSR25-22	127	23.3	93.2						●			
WSR25-23	127	23.3	93.2	7.97		1.25	8.23	ND				

Log\_DSHEEP05

Station No.	WSR26		Longitude	Latitude
Date (dd/mm/yy)	01/11/05	Arrival	148°15.013' E	4°07.038' S
Depth(m)	716	Departure	148°15.051' E	4°06.938' S
			04:33	
			05:21	

Remark:

Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH)4 (mM)	NO3+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Pn	CH4	Metals
WSR26-1	670	6.26	93.3	33.07		2.12	ND	7.77		●	●	●
WSR26-2	670	6.26	93.3						●			
WSR26-5	570	6.76	93.3									
WSR26-6	570	6.76	93.3	28.20		2.04	ND	7.87		●	●	●
WSR26-7	550		93.2						●			
WSR26-8	550		93.2	25.90		2.00	ND	7.91		●	●	●
WSR26-9	497	7.72	93.2						●			
WSR26-10	497	7.72	93.2	21.15		1.88	ND	7.93		●	●	●
WSR26-11	460	8.48	93.1						●			
WSR26-17	460	8.48	93.1	18.56		1.59	ND	7.96			●	●
WSR26-18	382	10.47	93.1						●			
WSR26-19	382	10.47	93.1	13.02		1.51	ND	8.00			●	●
WSR26-20	323	11.79	93.1						●			
WSR26-21	323	11.79	93.1	10.50		1.42	ND	8.02			●	●
WSR26-22	197	20.22	93.3						●			
WSR26-23	197	20.22	93.3	2.54		0.79	ND	8.16			●	●

Log\_ DSHEEP05

Station No.	WSR27	(hh:mm)	Longitude	Latitude
Date (dd/mm/yy)	01/11/05	06:23	148°15.337' E	4°06.264' S
Depth(m)	579	06:52	148°15.804' E	4°06.456' S
	Arrival			
	Departure			

Remarks:

Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH)4 (mM)	NO3+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Rn	CH4	Metals
WSR27-1	460	8.38	93.2	18.63		1.78	ND	7.94			●	
WSR27-2	460	8.38	93.2						●			

## Log\_DSHEEP05

Station No.	WSR28	(hh:mm)		Longitude	148°14.961' E	Latitude	4°06.633' S
Date (dd/mm/yy)	01/11/05	Arrival	07:15		148°15.536' E		4°06.368' S
Depth(m)	743	Departure	07:47				

Remarks:

Sample ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH) <sub>4</sub> (mM)	NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> (mM)	PO <sub>4</sub> (mM)	H <sub>2</sub> S (mM)	pH	He	Rn	CH <sub>4</sub>	Metals
WSR28-17	500			22.09		1.89	ND	7.96			●	
WSR28-18	500								●			

Log\_ DSHEEP05

Station No.	WSR29	(hh:mm)		Longitude	Latitude
Date (dd/mm/yy)	01/11/05	Arrival	08:12	148°14.451' E	4°07.027' S
Depth(m)	754	Departure	08:45	148°14.600' E	4°06.797' S

Remark:

Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	SI(OH)4 (mM)	NO3+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Rn	CH4	Metals
WSR29-17	500			21.55		1.88	ND	7.95			●	
WSR29-18	500								●			



Log\_DSHEEP05

Station No.	WSR30													
Date (dd/mm/yy)	01/11/05	Arrival	09:12	(hh:mm)	148° 14.315' E	Longitude	4° 08.223' S	Latitude						
Depth(m)	603	Departure	09:39		148° 14.637' E		4° 08.023' S							

Remarks:

Sample ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH)4 (mM)	NO3+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Rn	CH4	Metals
WSR30-1	557	6.69	93.1	27.82		2.03	ND	7.85			●	
WSR30-2	557	6.69	93.1						●			
WSR30-5	350	11.12	93.1						●			
WSR30-6	350	11.12	93.1	12.23		1.54	ND	7.98			●	

Log\_ DSHEEP05

Station No.		WSR31										
Date (dd/mm/yy)		01/11/05	Arrival	10:05	(hh:mm)	148°14.729' E	Longitude	4°07.879' S	Latitude	148°14.919' E	4°08.055' S	
Depth(m)		644	Departure	10:33								
Rem ark:												
Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH)4 (mM)	NO3+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Rn	CH4	Metals
WSR31-17	557	6.69	93.1	32.93		2.11	ND	7.91			●	
WSR31-18	557	6.69	93.1						●			
WSR31-19	350	11.12	93.1	24.15		1.97	ND	7.95			●	
WSR31-20	350	11.12	93.1						●			

Log\_DSHEEP05

Station No.	WSR32	(hh:mm)	Longitude	Latitude
Date (dd/mm/yy)	01/11/05	Arrival	148°14.761' E	4°07.164' S
Depth(m)	684	Bottom	148°14.950' E	4°07.476' S

Remark:

Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH)4 (mM)	NO3+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Rn	CH4	Metals
WSR32-17	682	6.01	93.2	37.13		1.94	ND	7.82			●	●
WSR32-18	682	6.01	93.2						●			
WSR32-19	487	7.78	93.1	22.98		1.89	ND	7.91			●	●
WSR32-20	487	7.78	93.1						●			
WSR32-21	430	8.65	93.1	18.89		1.79	ND	7.92			●	●
WSR32-22	430	8.65	93.1						●			
WSR32-23	330	11.57	96	11.42		1.48	ND	7.97			●	●
WSR32-24	330	11.57	96						●			

Log\_DSHEEP05

Station No.	WSR33	(hh:mm)	Longitude	Latitude								
Date (dd/mm/yy)	01/11/05	Arrival	16:27	148°10.549' E 4°04.658' S								
Depth(m)	739	Bottom	16:47	148°10.833' E 4°04.527' S								
Remark: Weak transmission anomalies in the layers near bottom and 350-450 m depth												
Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH)4 (mM)	NO3+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Rn	CH4	Metals
WSR33-17	750	5.57	93.2	43.97		2.12	ND	7.80			●	●
WSR33-18	750	5.57	93.2						●			
WSR33-19	600	6.64	93.2	30.03		2.07	ND	7.87			●	●
WSR33-20	600	6.64	93.2						●			
WSR33-21	470			19.66		1.84	ND	7.91			●	●
WSR33-22	470								●			
WSR33-23	400	9.69	93.1	14.93		1.67	ND	7.94			●	●
WSR33-24	400	9.69	93.1						●			

Log\_DSHEEP05

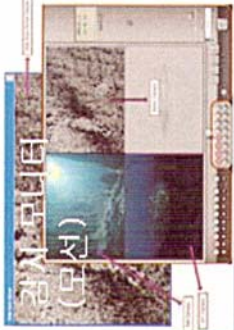
Station No.	WSR34				(hh:mm)	Longitude	Latitude					
Date (dd/mm/yy)	01/11/05		Arrival		17:50	148°10.246' E	4°04.976' S					
Depth(m)	808		Bottom		18:04	148°10.427' E	4°04.878' S					
Remark: Three layers with transmission anomaly												
Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH)4 (mM)	NO3+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Pn	CH4	Metals
WSR34-1	772	5.51	93.2	45.30		2.31	ND	7.85			●	●
WSR34-2	772	5.51	93.2						●			
WSR34-5	650	6.37	93.2						●			
WSR34-6	650	6.37	93.2	32.83		2.14	ND	7.88			●	●
WSR34-7	570	6.67	93.2						●			
WSR34-8	570	6.67	93.2	29.16		2.07	ND	7.90			●	●
WSR34-9	450	8.24	93.2						●			
WSR34-10	450	8.24	93.2	19.04		1.80	ND	7.94			●	●
WSR34-11	360	10.84	93.1						●			
WSR34-17	360	10.84	93.1	12.06		1.52	ND	7.97			●	●
WSR34-18	290	14.4	92.9						●			
WSR34-19	290	14.4	92.9	6.96		1.20	ND	8.05			●	●

Log\_DSHEEP05

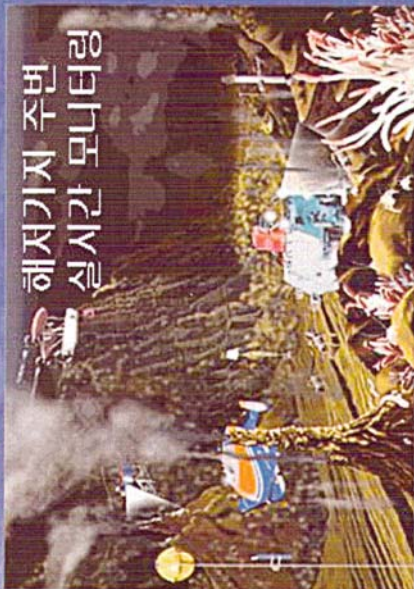
Station No.	WSR35	(hh:mm)	Longitude	Latitude								
Date (dd/mm/yy)	01/11/05	Arrival	148°10.224' E	4°04.215' S								
Depth(m)	659	Bottom	148°10.380' E	4°04.163' S								
Remark: Bottle NO. WSR35-1 and WSR35-2 were triggered in downward casting												
Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH) <sub>4</sub> (mM)	NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> (mM)	PO <sub>4</sub> (mM)	H <sub>2</sub> S (mM)	pH	He	Rn	CH <sub>4</sub>	Metals
WSR35-1	342	11.08	89.2	11.54		1.46	ND	7.96			●	●
WSR35-2	342	5.51	89.2						●			
WSR35-5	642	6.33	93.2						●			
WSR35-6	642	6.33	93.2	33.38		2.12	ND	7.94			●	●
WSR35-7	450	8.26	93.2						●			
WSR35-8	450	8.26	93.2	18.70		1.79	ND	7.96			●	●
WSR35-9	313	12.69	93.2						●			
WSR35-10	313	12.69	93.2	9.63		1.37	ND	8.06			●	●
WSR35-11	200	20.4	93.5						●			
WSR35-17	200	20.4	93.5	2.44		0.79	ND	8.15			●	●

Log\_ DSHEEP05

Station No.	WSR36				(hh:mm)		Longitude	Latitude				
Date (dd/mm/yy)	01/11/05		Arrival		20:49		148°09.673' E	4°04.698' S				
Depth(m)	836		Bottom		21:09		148°09.803' E	4°04.915' S				
Remark: Thin layer ( 300 – 370 m ) with transmission anomaly.												
Bottle ID	Depth (m)	Temp. (°C)	Tr. (%)	Si(OH)4 (mM)	NO3+NO2 (mM)	PO4 (mM)	H2S (mM)	pH	He	Rn	CH4	Metals
WSR36-1	791	5.39	93.3	46.68		2.29	ND	7.63			●	●
WSR36-2	791	5.39	93.3						●			
WSR36-5	700	5.81	93.3						●			
WSR36-6	700	5.81	93.3	41.18		2.27	ND	7.8			●	●
WSR36-7	600	6.66	93.2						●			
WSR36-8	600	6.66	93.2	29.82		2.06	ND	7.84			●	●
WSR36-9	500	7.56	93.2						●			
WSR36-10	500	7.56	93.2	22.70		1.86	ND	7.86			●	●
WSR36-11	400	9.02	93.2						●			
WSR36-17	400	9.02	93.2	16.61		1.70	ND	7.91			●	●
WSR36-18	350	10.61	93.1						●			
WSR36-19	350	10.61	93.1	13.65		1.59	ND	7.96			●	●
WSR36-20	317	11.59	93.1						●			
WSR36-21	317	11.59	93.1	11.15		1.46	ND	7.96			●	●
WSR36-22	250	16.7	92.8						●			
WSR36-23	250	16.7	92.8	5.13		1.04	ND	8.03			●	●
WSR36-24	10			0.04		0.20		8.28	●			



해양 열수 환경 탐사 종합탐사







▶ 종이신문보기



해양연구원 연구진이 국내에서는 처음으로 심해(深海) 화산지대에서 열수(熱水)분출구를 발견했다. 열수분출구는 해저 지각판이 충돌하는 지역에서 바닷물이 지각 속으로 스며들었다가 화산 마그마에 의해 데워져 분출되는 구멍으로 지구 변화에 대한 연구에서 매우 중요한 지형이다. 한국해양연구원 심해환경연구팀은 2일 “연구선 ‘온누리’에서 각종 첨단 해양 탐사장비를 이용해 태평양 파푸아뉴기니 앞바다 해저 1200m를 탐사한 결과, 2일 새벽 5시쯤 해저 화산 주변에서 열수분출구가 존재한다는 사실을 최종 확인했다”고 밝혔다.

해양연구원은 “해저 열수분출구 발견에 성공한 나라는 아시아에서는 일본이 유일하며, 전 세계적으로도 미국을 비롯하여 프랑스·독일 등 6개국에 불과하다”며 “우리나라의 해양 탐사 기술이 세계적 수준에 도달했음을 입증했다”고 밝혔다.

(이영완기자 (블로그) [ywlee.chosun.com](#))

[조선일보 11월 3일자 기사]

국내 연구진 '해저 열수 분출구' 탐사 성공

해양연구원 탐사팀, 해저 1천200m 지점에서 발견  
이어 아시아 두번째..첨단 해양탐사기술 개가

국내 연구진이 해저 1천200m지점에서 솟아오른 화산체 주변에서 '해저 열수 분출구'를 발견했다. 해저 열수 분출구는 화산활동으로 인해 해저에 섭씨 300도 정도의 뜨거운 물과 검은 연기를 뿜어내는 구멍을 말하는 것으로, 학계에서는 지구 진화와 생명의 신비를 푸는 열쇠로 인식하고 있으며 최근 문제가 되고 있는 전 지구 해양순환 현상이나 해수면 상승과도 연관지어 매우 중요한 지역으로 취급하고 있다.

한국해양연구원 심해환경연구팀은 해저탐사 연구선 은누리호를 이용, 해저 1천200m 지점에서 솟아오른 화산체 주변에서 해저 열수분출구를 발견하는 데 성공했다고 2일 밝혔다.

그 동안 해저 열수 분출구 발견에 성공한 나라는 아시아에서 일본에 이어 우리나라가 두번째이며 세계적으로도 미국을 비롯해 프랑스, 독일 등 5~6개국에 불과하다.

이번에 발견한 열수분출구는 태평양 지각판과 호주 지각판이 충돌하는 지진대 경계에서 남쪽으로 약 100km 내려온 지점에서 발견됐다. 정확한 위치는 남위 4도 07분~4도 08분, 동경 148도 14분 ~148도 15분이며 주변의 평균 수심은 700m내외다.

해저 열수 분출구는 지각판이 충돌하는 심해 화산지대에서 주로 발견되는 데 마치 굴뚝처럼 생긴 구멍을 통해 검은 연기가 솟구치는 모양을 하고 있다.

특히 이 곳에서 연기처럼 뿜어져 나오는 금, 철, 구리, 아연, 황 등 광상 자원과 주변에 서식하는 생물자원은 의약 품 및 첨단 산업의 신소재로 사용할 수 있어 학계는 물론 산업계에서도 이 지역의 무궁무진한 가치에 주목하고 있다.

그러나 로켓발사에 버금가는 기술적 어려움과 막대한 연구개발 비용으로 인해 열수 분출구에 대한 탐사가 제대로 이뤄지지 않고 있다.

연구팀은 열수 분출구를 둘러싼 2개의 새로운 화산을 발견해 발견지점인 'Corea-Madang'의 앞 글자를 따서 각각 '빅 코마(Cmoa, 9Km×20Km)와 '리틀 코마'(7Km×15Km)로 명명했다.

연구팀이 명명한 이 화산의 이름은 세계 해양학계에 보고되는 즉시 각종 해양지도에 공식 명칭으로 사용된다.

'코마'(Coma)라는 이름은 우리나라를 일컫는 스페인어 'Corea'와 열수 분출구 발견지역인 'Madang'의 앞 글자를 딴 것이며, 영어로는 '흔수상태'를 의미한다.

그동안 '흔수상태'로 잠들어 있던 심해 생명체의 비밀을 벗기게 되었다는 의미를 지니고 있다. 한국말로 '꼬마'라는 발음과도 비슷해 친근한 이미지를 준다고 해양연구원은 설명했다.

이번 열수분출구 발견에 성공한 해양연구원의 심해열수환경 탐사팀에는 전동철, 황상철, 박건태, 김봉채, 김석현, 신창웅 박사과 서울대 지구환경과학부 이상욱 박사 등이 참여하고 있다.

이들은 3일 오전 6시께 파푸아뉴기니의 마당항에 입항, 입국 절차를 마친 뒤 도쿄를 거쳐 오는 6일 오후 12시10

분께 아시아나 항공편으로 인천국제공항을 통해 입국할 예정이다.

# 중앙일보

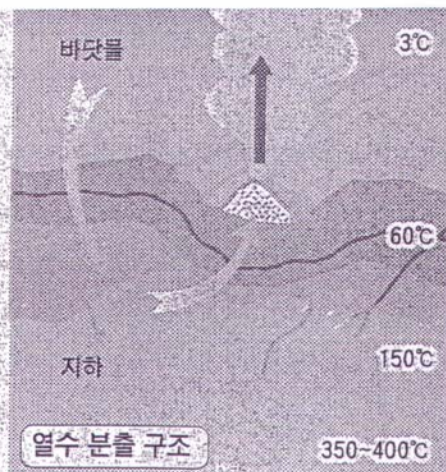
JoongAng Ilbo

2005년 11월 4일 금요일 33

## 바다 속 열수 분출구 발견 해양연구원, 파푸아뉴기니서

한국해양연구원 심해환경연구팀은 탐사선 은누리호를 이용해 파푸아뉴기니 북동쪽 300km 지점 해저 1200m에 있는 화산체 주변에서 해저 열수분출구를 발견했다고 2일 발표했다.

열수분출구는 지각관이 충돌하는 심해 화산 지대에서 주로 발견되는 것으로, 뜨거운 물이 검은 굴뚝처럼 솟아 오른다. 열수분출구는 지구 진화와 생명의 신비를 푸는 열쇠로 인식되고 있기도 하다. 그동안 해저 열수분출구 발견에 성공한 나라는 아시아에서는 일본이 유일하며, 세계적으로도 미국을 비롯한 프랑스·독일 등 5~6개국에 불



바닷물이 지하로 스며들어 뜨거워진 뒤, 다시 바다로 분출한다

과하다. 한국해양연구원은 자체 기술로 개발한 6000m급 심해 무인잠수정 '해미래'를 투입해 이 지역에 대한 본격적인 개발 탐사에 나설 예정이다.

김필규 기자 phil9@joongang.co.kr

<국내 연구진 `해저 열수 분출구' 탐사 성공>

## 해양연구원 탐사팀, 해저 1천200m 지점서 발견

다이어 아시아 두번째..첨단 해양탐사기술 개가

(서울=연합뉴스) 이정내 기자 = 국내 연구진이 해저 1천200m 지점에서 솟아오른 화산체 주변에서 `해저 열수 분출구'를 발견했다.

해저 열수 분출구는 화산활동으로 인해 해저에 섭씨 300도 정도의 뜨거운 물과 검은 연기를 뿜어내는 구멍을 말하는 것으로, 학계에서는 지구 진화와 생명의 신비를 푸는 열쇠로 인식하고 있으며 최근 문제가 되고 있는 전 지구 해양순환 현상이나 해수면 상승과도 연관지어 매우 중요한 지역으로 취급하고 있다.

한국해양연구원 심해환경연구팀은 해저탐사 연구선 온누리호를 이용, 해저 1천200m 지점에서 솟아오른 화산체 주변에서 해저 열수분출구를 발견하는 데 성공했다고 2일 밝혔다.

그 동안 해저 열수 분출구 발견에 성공한 나라는 아시아에서 일본에 이어 우리나라가 두 번째이며 세계적으로도 미국을 비롯해 프랑스, 독일 등 5~6개국에 불과하다.

이번에 발견한 열수분출구는 태평양 지각판과 호주 지각판이 충돌하는 지진대 경계에서 남쪽으로 약 100km 내려온 지점에서 발견됐다. 정확한 위치는 남위 4도 07분~4도 08분, 동경 148도 14분 ~148도 15분이며 주변의 평균 수심은 700m내외다.

해저 열수 분출구는 지각판이 충돌하는 심해 화산지대에서 주로 발견되는 데 마치 굴뚝처럼 생긴 구멍을 통해 검은 연기가 솟구치는 모양을 하고 있다.

특히 이 곳에서 연기처럼 뿜어져 나오는 금, 철, 구리, 아연, 황 등 광상 자원과 주변에 서식하는 생물자원은 의약품 및 첨단 산업의 신소재로 사용할 수 있어 학계는 물론 산업계에서도 이 지역의 무궁무진한 가치에 주목하고 있다.

그러나 로켓발사에 버금가는 기술적인 어려움과 막대한 연구개발 비용으로 인해 열수 분출구에 대한 탐사가 제대로 이뤄지지 않고 있다.

연구팀은 열수 분출구를 둘러싼 2개의 새로운 화산을 발견해 발견지점인 `Corea-Madang'의 앞 글자를 따서 각각 `빅 코마(Coma, 9Km×20Km)와 `리틀 코마'(7Km×15Km)로 명명했다.

연구팀이 명명한 이 화산의 이름은 세계 해양학계에 보고되는 즉시 각종 해양지도에 공식 명칭으로 사용된다.

`코마'(Coma)라는 이름은 우리나라를 일컫는 스페인어 `Corea'와 열수 분출구 발견지역인 `Madang'의 앞 글자를 딴 것이며, 영어로는 `혼수상태'를 의미한다.

그동안 `혼수상태'로 잠들어 있던 심해 생명체의 비밀을 벗기게 되었다는 의미를 지니고 있다. 한국말로로는 `꼬마'라는 발음과도 비슷해 친근한 이미지를 준다고 해양연구원은 설명했다.

이번 열수분출구 발견에 성공한 해양연구원의 심해열수환경 탐사팀에는 전동철, 황상철, 박건태, 김봉채, 김석현, 신창웅 박사와 서울대 지구환경과학부 이상목 박사 등이 참여하고 있다.

이들은 3일 오전 6시께 파푸아뉴기니의 마당항에 입항, 입국 절차를 마친 뒤 도쿄를 거쳐 오는 6일 오후 12시10분께 아시아나 항공편으로 [인천국제공항](#)을 통해 입국할 예정이다.

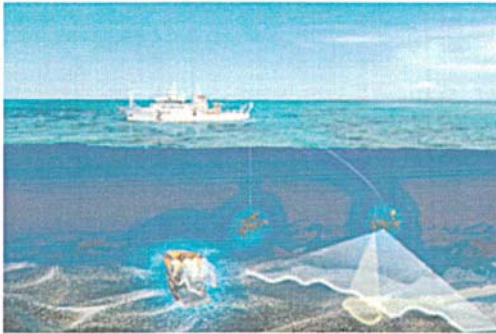
jnlee@yna.co.kr

(끝)

<저 작 권 자(c)연 합 뉴 스. 무단전재-재배포 금지.>

## 매일경제

### [국내 과학뉴스] 해저 1200m서 '열수 분출구' 발견



국내 연구진이 해저 1200m 지점에서 솟아오른 화산체 주변에서 '해저 열수 분출구'를 발견했다.

해저 열수 분출구는 화산활동으로 인해 해저에 섭씨 300도 정도의 뜨거운 물과 검은 연기를 뿜어내는 구멍을 말하는 것. 학계에서는 지구 진화와 생명의 신비를 푸는 열쇠로 인식하고 있으며 최근 문제가 되고 있는 전 지구 해양순환 현상이나 해수면 상승과도 연관지어 매우 중요한 지역으로 취급하고 있다.

한국 해양연구원 심해환경연구팀은 해저탐사 연구선 온누리호를 이용해 해저 1200m 지점에서 솟아오른 화산체 주변에서 해저 열수 분출구를 발견하는 데 성공했다. 그 동안 해저 열수 분출구 발견에 성공한 나라는 아시아에서 일본에 이어 한국이 두 번째. 세계적으로도 미국을 비롯해 프랑스, 독일 등 5~6개국에 불과하다.

이번에 발견한 열수 분출구는 태평양 지각판과 호주 지각판이 충돌하는 지진대 경계에서 남쪽으로 약 100km 내려온 지점이다.

정확한 위치는 남위 4도 07분~ 4도 08분, 동경 148도 14분~148도 15분이며 주변의 평균 수심은 700m 내외다. 해저 열수 분출구는 지각판이 충돌하는 심해 화산지대에서 주로 발견되는데 마치 굴뚝처럼 생긴 구멍을 통해 검은 연기가 솟구치는 모양을 하고 있다.

특히 이곳에서 연기처럼 뿜어져 나오는 금, 철, 구리, 아연, 황 등 광상 자원과 주변에 서식하는 생물자원은 의약품과 첨단산업의 신소재로 사용할 수 있어 학계는 물론 산업계에서도 이 지역의 무궁무진한 가치에 주목하고 있다.

그러나 로켓 발사에 버금가는 기술적 어려움과 막대한 연구개발 비용으로 인해 열수 분출구에 대한 탐사가 제대로 이뤄지지 않고 있다.

연구팀은 열수 분출구를 둘러싼 2개의 새로운 화산을 발견해 발견지점인 'Core a-Madang'의 앞글자를 따서 각각 '빅 코마'(Cmoa·9km×20km)와 '리틀 코마'(7km×15km)로 명명했다.

연구팀이 명명한 이 화산의 이름은 세계 해양학계에 보고되는 즉시 각종 해양 지도에 공식 명칭으로 사용된다.

'코마(Coma)'라는 이름은 우리나라를 일컫는 스페인어 'Corea'와 열수 분출구 발견지역인 'Madang'의 앞 글자를 딴 것이며 영어로는 '혼수상태'를 의미한다.

그 동안 '혼수상태'로 잠들어 있던 심해 생명체의 비밀을 벗기게 되었다는 의미를 지니고 있다.

이번 열수 분출구 발견에 성공한 해양연구원의 심해열수환경탐사팀에는 전동철 · 황상철 · 박건태 · 김봉채 · 김석현 · 신창웅 박사와 서울대 지구환경과학부 이상욱 박사 등이 참여하고 있다.

< Copyright © 매일경제. 무단전재 및 재배포 금지 >

2005.11.16 13:56 입력





음향·해류 측정 장비를 설치하는 한국해양연구원 탐사대.

대한민국 해저 탐사대가 심해 화산 2개를 확인하고 심해 생물이 살았음을 입증하는 암석을 발굴했다. 시험항해에서 '대박'을 터뜨린 탐사대의 놀라운 활약상.

# '에덴 동산'에 한 발짝 들여놓다

해양 연구자들에게 1977년 2월17일은 잊을 수 없는 날이다. 다윈이 진화론을 굳힌 갈라파고스 해역에서 심해 화산이 뿜어내는 뜨거운 물(열수) 분출구를 찾는 공동 프로젝트(FAMOUS)를 진행하던 미국과 프랑스의 과학자들이 그 때까지는 상상도 못했던 광경을 목격하게 되었던 것이다. 무인 잠수정에 장착되어 있던 첨단 카메라가 전송해온 사진 10만장 속에는 2,500m 바다 밑 열수구 근처에서 누구도 본 적이 없었던 수많은 생명체가 번성해 군집을 이루고 있는 모습이 찍힌 사진도 끼어 있었다.

연구팀은 부랴부랴 유인 잠수정을 내려보냈는데, 잠수정에 탑승한 과학자들은 열수구 근처 생태계의 아름다운 모습에 넋을 잃었다. 그때까지만 해도 과학자들은 바다 밑에는 위에

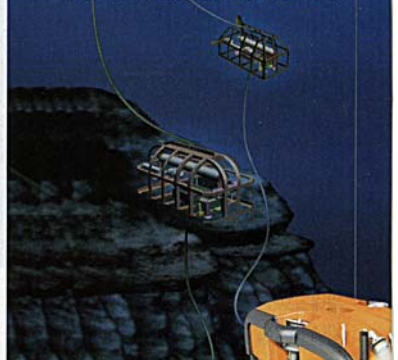
서 죽어 가라앉은 물고기 시체만 먹고 사는 아주 작은 생명체만 있을 것이라고 철석같이 믿어왔다. 오죽했으면 탐사팀에 생물학자가 한 명도 끼어 있지 않았을까. 탐사선에 생체를 보존할 약품을 싣고 가지 않아 잠수정이 채취한 진귀한 표본들을 파나마에서 사간 러시아산 보드카에 담가놓아야 할 지경이었다. 과학자들은 갈라파고스 해역에서 발견한 이 우아한 심해 생태계에 '에덴 동산'이라는 이름을 붙여 주었다.

미국과 프랑스 공동 연구팀이 심해의 생태계를 발견한 지 28년 만에 한국 과학자들도 에덴동산에 한 발짝 들어섰다. 지난 11월1일 새벽 한국해양연구원 건동철 박사팀은 1500t급 탐사선 온누리호를 타고 남태평양 파푸아뉴기니 동쪽 비스마르크 해역에 있었다. 그 근처 해역

## 심해 탐사 무엇으로 하나



수중진수장치 각종 수중 관측 센서를 탑재한 구조물을 모선에서 케이블을 내려 관측하며, 원격 채집로봇(ROV)을 연결·통제하는 장치.



원격채집로봇 열수 주변에 서식하는 생물 및 해저 퇴적물, 암석 등을 채집하기 위한 원격조종 로봇.



생물군집 열수 분출구 주변에 서식하는 관벌레·조개류·새우류·게 따위의 생물 군집은 지역적으로 매우 다르게 나타나며, 열수 유체화학 및 해저 지각이 확장되는 비율 등에 크게 좌우된다.



이 부분은 분출구 지점의 해저면에서 관측된 현장 자료 데이터를 케이블을 통해 해수 표면의 부이에 축적해 실용적으로 전송이 가능하도록 설계한 계류장비.

**자동수중관측장비**  
케이블에 연결하지 않고 모선으로부터 원격 조종으로 수중을 자동으로 배회하며 관측하는 장치.



**검은 연기 분출구**  
해저면 아래 마그마가 주변 해수와 섞이면서 굴뚝 모양의 구멍을 통해 집중적으로 검은 연기를 뿜어내는 고온(~400°C) 분출구.



**마그마 공극원**  
주분출구를 통한 '고온의 집중 분출'과 주변의 '저온 분산 흐름'의 열 및 물질 공극원.

마누스 분지에는 프랑스 탐사팀이 예전에 발견한 유명한 열수 분출구 3개가 있다. 전박사팀은 심해 생태계에 대한 본격적인 탐사와 연구에 앞서 시험 항해에 나선 길이었다. 그런데 이날 온누리호에는 첫 항해에서 어찌면 대어를 낚을지도 모른다는 기대감과 긴장감이 흐르고 있었다.

전박사팀은 모두 16명. 7명은 10월19일 해양연구원 거제도 작목기지에서부터 출발했고, 9명은 현지에서 합류했다. 해양연구원과 서울대에서 각 3명씩, 그리고 일본 규슈 대학의 열수화학자 준이치로 이시바시, 파푸아뉴기니 대학 지구물리학자 시오니, 파푸아뉴기니 지질연구소장 존 블레커 씨가 참여했다. 탐사팀은 전날 멀티텀 수심측정기로 맵핑(지도화)을 해 이미 새로운 심해 화산 2개 찾아내 사기가 드높은 상태였다. 존 블레커 소장으로부터 지금까지 발견되지 않은 화산이라고 확인받은 뒤 탐사팀은 이름을 공모해 이 화산에 리틀코마와 빅코마라는 이름을 붙여주었다. 코리아와 파푸아뉴기니 마당 항의 첫 글자를 딴 것이었다. 미국 지구물리학회가 발표하면 이 이름은 국제적으로 공인을 받게 된다.

탐사팀은 지리산의 절반만한 리틀코마와 빅코마 해역의 어디에 코어박스를 내려보낼까 고심했다. 코어박스란 해저에 자유 낙하시켜 바닥에 박히게 만들어 암석을 채취하는 기구이다. 염분·수심·수온·밀도·탁도를 측정하는 기구인 CTD를 통해 열수 플룸(plume·

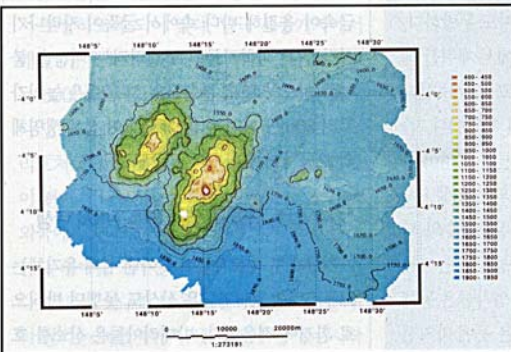
화산 분출구에서 나오는 검은 그을음)의 존재를 거의 확신하고 있는 지역이 있었기 때문에 기대가 컸다. 작업은 새벽부터 오후까지 계속 되었는데 어느 순간 탐사팀 사이에서 환호성이 터졌다. 코어박스로 끌어올린 암석에서 대표적인 심해 생명체 중 하나인 관 벌레(tube worm)가 살았던 흔적이 발견된 것이다. 일반인들에게는 대수롭게 보이지 않는 돌덩어리였지만 연구자들은 감격했다.

프랑스와 미국 공동연구팀이 심해 생물을 발견한 것은 프로젝트를 본격 가동한 지 5년이나 지나서였다. 1960년대부터 과학자들이 심해 열수 분출구의 존재를 확신하고 찾아나섰으므로 심해 열수 분출구 발견에 20년 가까운 세월이 걸린 셈이다. 따라서 한국 탐사팀이 시험 항해에서 새로운 화산 2개의 존재를 확인하고 심해 생물이 살았던 흔적이 새겨진 암석을 발굴한 것은 엄청난 행운이다.

#### 해저 생물 연구에 큰 획 긋다

더군다나 갈라파고스 열수 분출구의 수심이 2500m나 된 데 비해 탐사대가 암석을 파낸 지역의 수심은 700m였다. 이것은 앞으로 탐사를 하기가 매우 쉬우려하는 것을 뜻한다. 보통 2000m 이하 수심에서 온누리호 정도의 탐사선이 운 좋게 열수 분출구를 찾아낸다 해도 나중에 다시 가서 똑같은 지점을 탐사하기란 불가능하다. 배를 고정할 수가 없어 암석을 파낸 지점을 정확하게 기록할 수 없기 때문이

다. 하지만 이번에 온누리호는 수심 700m 지점에 있었기 때문에 다음에 바로 똑같은 지점에 실험 기구를 내릴 수 있게 되었다. 현재 우리나라의 해저 생물 연구는 미국·프랑스·일본과 같은 선발 주자들에 비해 30년 정도 뒤져 있다. 이번 시험 항해의 성과는 앞으로 15년 안에 이들 선발 주자를 따라잡아 이 분야의



한국해양연구원 탐사대가 발견한 심해 화산에는 리틀 코마(왼쪽)와 빅 코마(오른쪽)라는 이름을 붙였다.

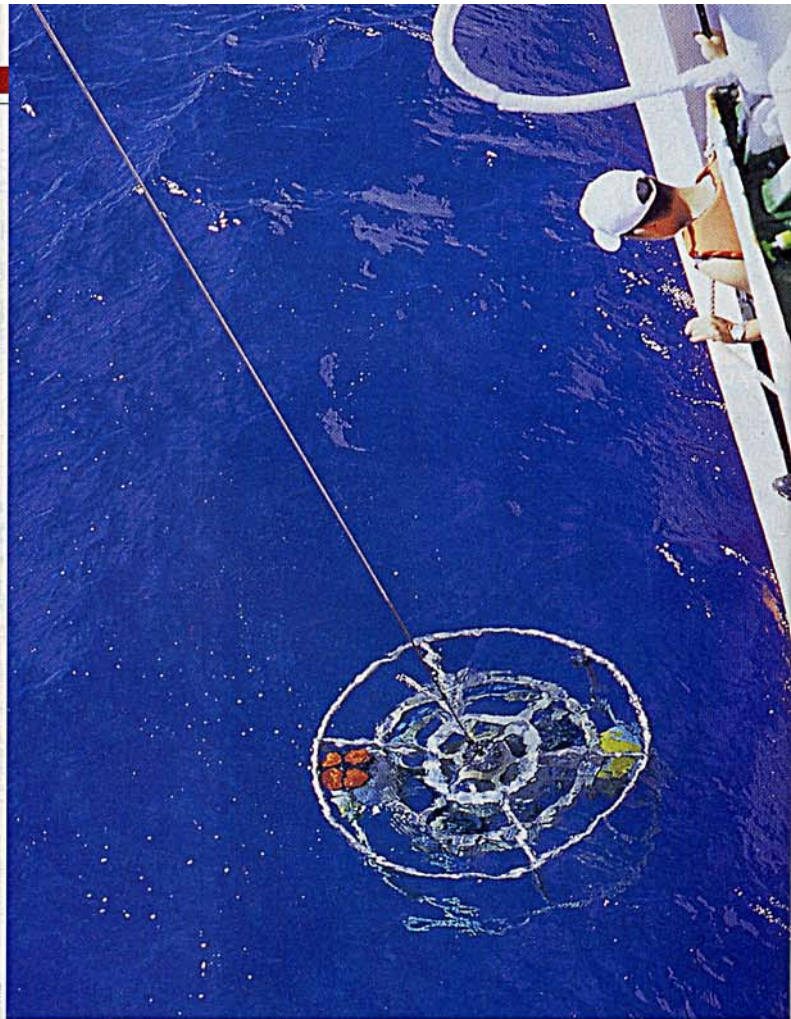
선두에 서겠다는 한국 탐사대의 다소 무모해 보이는 야심에 서광이 비친 일대 사건이었다.

과학자들이 왜 이토록 심해 생명체에 열광하는지 의아해 할 수도 있다. 하지만 심해 생명체를 발견하기 전에 사람들이 어떻게 생각해왔는지 떠올린다면 쉽게 이해할 수 있을 것이다. 예전에 사람들은 지구상의 모든 동식물에 생명을 불어넣은 것은 당연히 태양 에너지라고 생각했다. 하지만 지구 내부로부터 에너지를 받아 화학 합성을 통해 번성하는 심해 생명체의 존재가 확인된 뒤부터는 그같은 믿음은 깨져버렸다. 심해 생명체 발견은, 도대체 생명은 어디에서 왔으며, 바닷물은 왜 짠가와 같은 오래된 질문을 다시 하게 만든다. 과학자들은 심해 생명체가 어찌면 이같은 본질적인 의문에 대한 해답을 줄 수 있으리라고 기대하는 듯하다.

지구의 판과 판이 맞부딪치는 심해의 약한 곳을 마그마가 뚫고 나와 산소가 풍부한 차가운 바닷물을 때리면 마그마에 용해되어 있던 금속이 응결해 바다 속에서 굴뚝이 자라나기 시작한다. 과학자들이 고질라라는 이름을 붙여준 인도양 열수 분출구의 한 굴뚝은 높이가 무려 30m에 가까운데, 이 굴뚝이 심해 생명체의 보금자리이다.

#### “지구 최초 생명체, 열수 분출구에서 탄생”

지금까지 과학자들이 찾아낸 심해 유기체는 모두 5백여 종. 이들은 상상도 못했던 방식으로 환경에 적응했다. 박테리아들은 산소를 호흡하는 생명체에게는 치명적인 독이 될 수 있는 유황과 메탄을 이용해 에너지를 얻는다. 과



학자들이 ‘ancient ones’라는 별명을 붙여준 아르카에아라는 박테리아는 완벽하게 독립된 생명체체를 유지하고 있다. 110℃가 넘는 물에서도 살 수 있는 초호열성인 이 박테리아가 가장 오래된 생명의 원시 형태가 아닌지 과학자들은 연구하고 있다.

키가 2m 넘게 자라나는 관 벌레는 입도 장(腸)도 없다. 박테리아에게 자기 몸을 내주어 키운 뒤 다시 그 박테리아를 잡아먹고 에너지를 얻는 매우 특이한 방식의 공생을 하는 것으로 추정된다. 대서양에서 발견된 열수 분출구 근처에서는 빛을 감지할 수 있는 눈이 달린 새우가 떼 지어 살고 있는 것이 발견되었다. 일부 과학자들은 지구 최초의 생명체는 열수 분출구 안에서 탄생했고, 빛을 감지할 수 있는 일부 생명체가 얇은 바다로 이동해 광합성 생물로 진화한 덕분에 지상의 모든 생명체가 생겨나게 되었다고까지 주장하고 있다.

심해 생물의 상업적 가치도 무궁무진한 것



도 · 수온 · 수심 · 염도를 조사하는 장비인 CTD(왼쪽)를 내려줄 점을 상의하는 전동철 박사(위 왼쪽)와 이도복 박사(위 오른쪽). 탐사팀이 수심 700m 정에서 채취한 암석은 심해 생물인 관벌레가 붙어 있던 흔적이 보인다(오른쪽).



으로 추정된다. 열과 독성에 강한 심해 박테리아를 활용해 산업 폐수를 처리하는 방안이나, 심해 생명체로부터 신약 성분을 얻어내는 연구도 활발하다. 일본의 해양과학기술센터에서는 이미 오래 전부터 심해 생물을 육상 실험실에서 자연 상태 그대로 배양하는 기술을 축적해왔다. 일본의 사가미 만에서 서식하는 관벌레의 경우는 수온 4~5℃의 냉장실에서 기르는데 배양하기가 무척 까다롭다. 심해 생물 중에서는 게 종류가 비교적 기르기 쉽다. 국토가 가라앉을지 모른다는 강박 관념에 시달리는 일본이 심해 생물 연구에 가장 열심이고 투자도 많이 하는 편이다. 바다 밑 8000m까지 유인 잠수정을 보낼 수 있는 일본은 해저 도시를 건설할 계획을 세우고 있는 것으로 알려졌다. 열수 분출구 주변은 지구 광물체 원석의 보고이기도 하다. 황 · 철 · 니켈 · 코발트 · 아연 · 금 따위가 주변 암석에 많이 포함되어 있다. 특히 최근에는 세계 각국이 금을 추출하려

어든 셈이다.

하지만 심해 연구자들의 표정이 밝은 것만은 아니다. 이번 실험 항해 예산이 3억5천만원이었으나 온누리호 배상으로 2억원을 지불하고 순수한 탐사에는 1억5천만원밖에 쓸 수 없었다. 온누리호의 운영비와 인건비는 정부가 지급하지 않고 탐사팀이 내놓는 사업 예산에서 조달하도록 되어 있다. 남극 세종기지에서도 대원 1명이 장비가 열악해 참변을 당한 뒤 정부는 6000t급 쇠방선 겸 탐사선을 짓기로 했으나 연구자들은 걱정부터 앞선다. 그 배도 온누리호처럼 사업 예산을 떼어내 운영해야 할 것이 뻔하기 때문이다. 해양연구원측은 그 배를 외국에 잠깐씩 빌려주고 임대료를 받아 부족한 운영비를 채우는 방안까지도 고려하고 있다. 앞으로 연구를 더욱 진행하려면 어려운 점이 많기는 하겠지만 심해 생명체 탐사는 시작이 좋았다. ■

문정우 대기자 mjw21@sisapress.com

## “꿈은 이루어진다” 해양연구원 전동철 박사 인터뷰

어떻게 심해 생태계 탐사에 나서게 되었나? 연안에서 벗어나 대양에서 연구하고 싶은 것이 해양연구원 전임 원장 변상경 박사의 오래된 꿈이었고, 그것은 모든 해양학자가 마찬가지였다. 따라서 물리·음향·지질·생물 등 해양 연구의 각 분야가 모두 참여할 수 있고, 선진국에 비해 크게 처지지 않는 이 분야를 연구하기로 하고 변박사가 계획을 밀어붙였다.

수중 카메라를 가져가지 않아 열수 분출구를 발견했다는

증거를 남기지 못했는데.

시험 항해였기 때문에 수중 카메라를 가져가지 않았다. 하지만 학자의 양심을 걸고 열수구의 존재를 알려주는 물리적 시그널과 암석 흔적을 분명히 발견했다는 점을 말씀드린다.

시험 항해에서 이와 같은 성과를 올린 것은 드문 일 아닌가?

굉장히 력리한 일이다. 상상해 보라. 지리산의 반 정도 되는 지역에서 10m 정도의 굴뚝과 그 주변 지역을 찾아내는 일이다. CTD의 케이블이 끊기고, 암석 채취 쇠발톱이 떨어져나가는 등 예기치 못한 어려움이 많았으나 결과가 좋았다.

앞으로 연구를 어떻게 진행할 생각인가?

국회에서 25억원 정도의 예산을 배정받은 상태인데 10년 동안 3단계로 연구를 진행할 생각이다. 3단계에 이르면 달 탐사 장면을 지상에서 관찰할 수 있듯이 열수 분출구 주변의 생태계 변화를 연구할 수 있을 것이다. ■



전동철 박사

**'해저 열수 분출구' 발견 성공**  
한국해양연구원, 발견 지점 '빅코마·리틀코마' 명명

☞ 기사프린트

국내 연구진이 지구 진화와 생명의 신비를 풀어줄 해저 화산 구멍인 '해저 열수 분출구'를 발견했다.

한국해양연구원 심해환경연구팀은 3일 해저탐사 연구선 온누리호를 이용, 파푸아뉴기니에서 북동쪽으로 300여km 떨어진 해저 1천200m 지점의 솟아오른 화산체 주변에서 해저 열수 분출구를 발견하는데 성공했다고 밝혔다.

해저 열수 분출구는 해저 지각판이 충돌하는 지역에서 바닷물이 지각 속으로 스며들었다가 화산 마그마에 의해 섭씨 300도 정도로 데워져 분출되는 구멍을 말한다.

이번에 발견한 열수분출구도 태평양 지각판과 호주 지각판이 충돌하는 지진대 경계지역이다.

학계에서는 지구 진화와 생명의 신비를 푸는 열쇠로 인식하고 있으며 최근 문제가 되고 있는 전 지구 해양순환 현상이나 해수면 상승과도 연관지어 매우 중요한 지역으로 취급하고 있다. 특히 이곳에서 연기처럼 뿜어져 나오는 금 철 구리 아연 황 등 광상 자원과 주변에 서식하는 생물자원을 의약품 및 첨단 산업의 신소재로 사용할 수 있어 학계는 물론 산업계에서도 주목하고 있다.

그러나 로켓발사에 버금가는 기술적인 어려움과 막대한 연구개발 비용으로 인해 열수 분출구에 대한 탐사가 제대로 이뤄지지 않고 있다.

연구팀은 열수 분출구를 둘러싼 2개의 새로운 화산을 발견해 발견지점인 '코리아-마당(Corea-Madang)'의 앞 글자를 따서 각각 '빅 코마'와 '리틀 코마'로 명명했다.

/ 입력시간: 2005. 11.03. 11:21

배동진기자 [djbae@busanilbo.com](mailto:djbae@busanilbo.com)

## 해저 1,200미터 화산체 주변에서 “해저 열수분출구”

지구진화와 생명의 신비를 푸는 첨단 해양탐사기술의 개가

조수경 기자 [camus0211@nate.com](mailto:camus0211@nate.com)

우리나라 해양탐사의 역사에 새로운 전기가 마련되었다. 한국해양연구원(원장 염기대) 심해환경연구팀 (탐사단장 전동철 박사)은 온누리호를 이용하여 해저 1,200m 지점으로부터 솟아오른 화산체 주변에서 해저 열수분출구를 발견하는 데 성공했다.

이번에 발견한 열수분출구는 태평양판과 호주판이 충돌하는 지진대 경계에서 남쪽으로 약 100Km 내려온 지점에 위치하고 있는데, 정확한 위치는 남위 4도 07분 ~ 4도 08분, 동경 148도 14분 ~ 148도 15분이며, 열수분출구 주변의 평균 수심은 700미터 내외이다.

그 동안 해저 열수분출구 발견에 성공한 나라는 아시아에서는 일본이 유일하며, 세계적으로도 미국을 비롯하여 프랑스 독일 등 5~6개국에 불과하다. 이로써 우리나라는 그 동안 불모지로 여겨졌던 해양탐사기술 분야에서도 세계적 수준에 도달하였음을 입증하게 되었다.

연구팀의 열수분출구 발견은 매우 극적으로 이루어졌다. 예정된 심해열수탐사 종료 하루 전인 1일 오전 11시경(이하 한국 시각) 파푸아뉴기니에서 북동쪽으로 300여 Km 떨어진 지점의 해저에서 첫 징후를 포착하고, 그로부터 18시간 뒤인 2일 새벽 5시경 화학, 생물, 지질 분야에서 각종 증거자료를 최종적으로 확보한 것이다. 이 사실은 탐사에 동행한 일본 규슈 대학 열수화학 전문가 이시바시(Ishibashi) 교수, 파푸아뉴기니 정부 지질조사소 소장 조 블레카 (Joe Buleka), 파푸아뉴기니 대학 지질학과 시오니 시오니 (Sioni Sioni) 박사에 의해서도 확인됐다.

연구팀은 열수분출구를 둘러싼 2개의 새로운 화산을 발견해 Corea-Madang의 앞 글자를 따서 각각 **Big Coma** (9Km x 20Km)와 **Little Coma** (7Km x 15Km)로 명명했는데, 연구팀이 명명한 이 화산의 이름은 세계 해양학계에 보고 되는 즉시 각종 해양지도에 공식 명칭으로 사용하게 된다.

이번 탐사에는 한국해양연구원이 보유하고 있는 연구선 온누리호(1,420톤급, 선장 이찬우)가 이용되었으며, 음향 도플러 유속계(ADCP), 자기기록 유속계(RCM), 음파분리기(AR), 멀티빔 에코사운더(Multibeam Echosounder), 수온-염분 측정기(CTD), 드렛지(Dredge), 박스코어(Box Core) 등 첨단 해양탐사장비가 동원되었다. 특히, 조만간 한국해양연구원에서 자체 기술로 개발한 6,000m급 심해무인잠수정 “해미래”를 투입하여 이 지역에 대한 본격적인 개발 탐사에 나설 예정이다.

기사입력 : 2005-11-05 오후 12:12:27

## 주 의

1. 이 보고서는 한국해양연구원에서 수행한 기관고유과제의 연구보고서입니다.
2. 모든 그림과 표를 포함한 이 보고서의 독창적인 내용은 한국해양연구원의 사전 허가 없이 발췌할 수 없으며, 허가 시 한국해양연구원에서 수행한 결과임을 명시하여야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.