

제 1 차년도  
연차 보고서

BSPN 00267-854-7

# 심해저 광물자원 개발기술 및 환경보전 연구

— 제 1 권 —

심해저 광물자원 탐사기술 개발 및 환경보전 연구

A Study on the Technological Development  
for the Deep Seabed Mining  
and the Protection of the Deepsea Environment

— Volume 1 —

Exploration Technology and Deepsea Environment

1995. 10.

주관연구기관 : 한국해양연구소  
협동연구기관 : 한국기계연구원  
한국자원연구소

과 학 기 술 처

# 제 출 문

과학기술처장관 귀하

본 보고서를 “심해저 광물자원 개발기술 및 환경보전연구” 사업의 세부 과제인 “심해저 광물자원 탐사기술 개발 및 환경보전 연구” 부문의 1차년도 보고서로 제출합니다.

1995. 10.

총괄연구책임자 : 강 정 극  
주관연구기관명 : 한국해양연구소

세부과제 연구책임자

지질광상분야 : 문 재 운  
음향탐사분야 : 이 용 국  
저서생물분야 : 최 진 우  
기술확보전략분야 : 황 기 형  
정책분야 : 권 문 상

위탁과제연구책임자

해양환경분야 : 박 용 철 (인하대학교)  
퇴적환경분야 : 김 기 현 (충남대학교)  
한 명 우 (인하대학교)

# 요 약 문

## I. 제 목

심해저 광물자원 탐사기술개발 및 환경보전연구

## II. 연구개발의 목적 및 중요성

육상광물자원의 빈국인 우리나라는 지속적인 경제성장을 위해 필요한 금속자원의 안정적인 확보가 요구되어왔다. 그러나 육상부존 광물자원의 지속적인 채광매장량 감소 및 이들 자원의 지역적인 편재성으로 인해 우리나라는 전략금속자원의 장기·안정적 확보에 대한 대비책을 수립하게 되었다. 이의 일환으로 심해저에 부존하는 광물자원개발을 추진하게 되었으며, 마침내 1994년 8월 프랑스, 일본 등 기술선진국에 이어 세계 7번째로 유엔으로부터 선행투자가 자격과 함께 태평양의 클라리온-클리퍼튼 해역(C-C 해역)에 위치한 우리나라의 개발광구를 확보하게 되었다.

심해저 광물자원 개발에 필요한 기술분야는 탐사, 채광, 및 제련분야로 나눌 수 있다. 이중 본 연구에서는 최적 채광지역 선정에 위한 탐사분야의 기술과 향후 채광시 야기되는 해양환경파괴를 최소화 할 수 있는 환경보전에 관한 기술개발을 목표로 하고 있다.

우리나라의 경우 C-C 해역에 망간단괴 개발을 위한 광구 설정을 위해 1989년 부터 1994년 까지 탐사를 실시해 왔다. 그러나 현재까지 사용한 탐사기술은 개괄탐사에 필요한 광역탐사기술로서 향후 개발을 위한 최종 채광지 선정에 위해서는 보다 정밀한 탐사기법 개발이 요구된다. 향후

정밀탐사에 사용될 탐사기법은 기존의 1차원적인 탐사기법을 탈피하여 2차원 내지 3차원적으로 지형 및 해저면 상태를 파악하며, 망간단괴의 부존상태를 동시·광역적으로 파악할 수 있는 것으로 개발시 최종채광지역 선정, 매장량 파악, 채광기 운영도작성 등 심해저 광물자원의 상업생산을 위해 필수적인 자료를 제공할 수 있다. 이와함께 망간단괴를 비롯하여 망간각, 열수유화광상 등 여러 심해저부존 광물자원들의 분포특성에 대한 연구를 지속적으로 수행함으로써 향후 개발시 기초자료로서 활용할 수 있다.

최근 해양환경에 대한 세계적인 관심은 심해저 광물자원개발분야에도 예외가 없으며, 미국, 독일, 일본 등 기존 선행투자국에서는 이미 이에대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 현재 심해저 광물자원 개발과 관련하여 유엔해양법협약의 의무이행사항으로 명시되어 있는 심해저 환경연구는 심해저 개발로 인해 야기되는 부유퇴적물의 확산과 이에따른 심해 저서생태계의 영향을 파악하기 위한 것으로 연구결과는 향후 심해저 개발에 따른 환경영향을 최소화하기위한 기술개발에 필수적인 기반자료로 사용되어질 것이다.

### III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구의 최종목표는 심해저 광물자원 개발에 필요한 탐사기법 개발 및 심해저 광업으로 예상되는 환경영향을 파악하므로서 이를통해 환경보전방안을 수립하는데 있다. 이를 위하여 1994년 부터 2003년 까지 향후 10년간에 걸쳐 연구를 수행할 예정이다.

1차년도의 연구목표는 탐사기술분야의 경우 망간단괴 부존율 측정을 위한 1단계 연구로 다중빔 음향측심기 (Seabeam 2000)를 이용한 음향탐



사기법을 위한 기반연구를 수행하였으며, 망간단괴에 이어 차세대 광물자원으로 부각되고있는 서태평양 일대의 심해저 망간각 자원을 대상으로 분포성인에 대한 연구를 수행하였다. 환경분야의 경우 우리나라는 심해환경분야의 연구경험이 거의 없는 관계로 가능한 여러분야에서의 기반자료 수집을 목표로 추진하였으며 이를 기반으로 향후 연구추진방향을 설정하고자 하였다. 연구수행분야는 해수의 생화학 및 저서생물의 연구를 포함한 해양환경분야와 퇴적물의 혼합현상 및 공극수 연구를 포함한 심해퇴적물분야로 2개분야로 나누어 추진되었다.

이와 병행하여 심해저 자원개발 및 관련기술개발에 대한 정책적 연구가 수행되었다. 세부내용은 심해저 자원개발의 다변화를 위한 방안으로 남태평양 도서국가들의 관할수역(EEZ)내에 부존하는 자원개발을 위한 정책수립 및 심해저 광업기술의 분류, 특성 및 기술분석을 통하여 필요기술 확보를 위한 전략제시로 이같은 분야의 연구를 1차년도 사업에 포함하여 수행하므로써 연구결과를 기반으로 향후 탐사, 채광, 제련기술 개발분야에 대한 연구추진방향을 설정하는데 기여할 수 있도록 하였다.

## IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

### 1. 탐사기술분야

우리나라는 '94년 8월 유엔에 15만 Km<sup>2</sup>의 광구를 등록하였으며, 향후 8년간에 걸쳐 정밀탐사를 통해 최종개발지역 7.5만 Km<sup>2</sup> 지역을 선정해야 한다. 따라서 이와같은 정밀탐사 계획에 의거하여 정밀지형도 작성 및 음향탐사기법을 이용한 자원분포 측정기술 등 관련기술을 개발함으로써 최종개발지역 선정에 활용할 수 있도록 하였다. 이와 병행하여 망간단괴

에 이어 차세대 광물자원으로 부각되고 있는 서태평양 일대의 망간각자원의 성인에 대한 연구를 수행함으로써 향후 개발시 기본자료로 사용할 수 있도록 하였다.

### 1) 망간각 성인

서태평양의 마샬군도, 마이크로네시아, 및 팔라우 일원에 분포하고 있는 망간각의 성장, 연령, 성장률, 구조, 및 성분에 미치는 영향을 저층수 순환과 표층생산력과 관련하여 파악하고자 하였다. 광물학적, 지화학적 연구결과 이들 망간각들은 각기다른 2 기간동안 성장하였으며 이동한 형성된 망간각은 성장율, 성분, 및 구조에 있어 뚜렷한 차이를 보여주었다. 한편으로, 망간각 표면에 존재하는 생물기원 실리카의 초기속성작용이 철-망간 산화물로 이루어진 미세층리의 성장초기에 중요한 역할을 하고 있음이 밝혀졌다.

### 2) 다중빔 음향탐사

심해저 탐사시 수심측정에 사용되는 다중빔 음향측심기인 Seabeam 2000을 이용하여 해저면에서의 반사파와 망간단괴의 분포와의 상관관계를 조사하기 위하여 연구를 수행하였다. 1차로 심해에서의 Seabeam 2000 빔형태의 특징에 맞추어 획득되는 121개 빔의 특성분석과 그에 따른 수신 후방산란 음압강도를 영상처리 기법을 이용하여 재배열하여 처리하였다. 재배열된 후방산란강도를 EA500자료와 일치시켜 화소값에 대한 분포도를 구성하였으며, 이를 이용하여 1차적으로 표층에 분포하는 망간단괴의 분포자료와 비교할 수 있는 개략적인 방법을 수립하였다.

## 2. 해양환경분야

심해저 망간단괴 채광에 따라 발생될 수 있는 여러가지 환경교란이 생태계에 미치는 영향을 파악하기위하여 우리나라 광구지역에서의 기본환경자료를 수집·분석하였다. 이같은 기본자료를 광범위한 지역에 걸쳐 축적함으로써 채광이전 단계의 환경상태를 정밀하게 파악할 수 있으며, 이는 차후 해저면 교란실험을 통해 채광에 의해 야기될 수 있는 영향을 파악하는데 귀중한 지표로 사용된다. 이같은 과정을 통해 수집되는 모든 환경자료 및 평가자료는 최종적으로 환경영향을 최소화하는 방향으로 채광기를 설계하고 또 채광방법을 개발하는데 중요하게 활용될 것이다.

### 1) 저서생물

망간단괴 채광이전의 심해저 환경상태를 파악하기 위하여 KODOS 95-2 탐사지역의 10개 정점에서 채집된 저서생물에 대한 분석을 수행하였다. 조사된 항목은 미생물의 경우 미생물 생체량 측정의 매개변수인 ATP 양의 측정방법, 적합배지의 선정, 생균수 분석방법을 확립하는데 중점을 두었다. 저서동물의 경우에는 중형저서동물과 대형저서동물의 종조성과 퇴적물내 수직분포, Box core내의 소규모 수평분포 및 현존량 분포 등을 분석하였다.

### 2) 해수의 생화학적 특성

KODOS 지역의 해양화학적 특성을 파악하기 위하여 영양염류, 형광유기물 및 용존 아미노산 조성에관한 연구를 수행하였다. 영양염의 수직분포는 표층에서는 낮고 심해에서는 높은 대양의 전형적인 특성을 보여준다. 형광유기물의 경우 생거대유기물질과 지구거대유기물질로 구분되었

으며 생거대물질의 경우 표층이 높고 수심의 증가에 따라 점차 감소하고 있으며, 반면에 지구거대물질은 이와는 상반된 수직분포를 나타내었다. 조사지역에서의 용존 아미노산 농도는 0.17~1.17 $\mu$ M로 최대농도는 수심 100~1,000m 사이에 존재하고 있음이 밝혀졌다.

### 3) 공극수 특성

퇴적물함유 전이금속 원소의 단계적 추출분석과 공극수 용존 전이금속의 분석을 수행한 결과 흡착에 의한 망간단괴의 형성기작이 확인 되었다. 연구에 의하면, 퇴적표층부에 풍부한 유기물 입자체와 금속산화광물 입자체의 표면은 금속원소들이 흡착되기에 양호한 환경을 제공하고 있으며, 퇴적하층부 공극수에 풍부하게 용존된 금속원소들은 생물교란작용 등과 같은 이류작용에 의해 표층부로 이동되면서 흡착이 진행됨이 밝혀졌다. 이는 곧 금속산화광물 표면에 금속원소들의 흡착이 계속되는 것으로 단괴의 성장을 의미한다.

### 4) 퇴적물 혼합현상

비파괴 감마선 계측법과 동위원소 회석법을 이용한 알파선 분석법을 사용하여 표층퇴적물의 퇴적속도와 입자혼합율을 측정하였다. 연구결과 조사지역내에서의 퇴적속도는 0.22~0.27 mm/ky 이었으며, 입자혼합율은 1.38~4.64  $\text{cm}^2/\text{y}$ 로 나타났다. 입자혼합율이 낮다는 것은 저서생물의 활동이 미약하고 퇴적환경이 안정된 상태에 있는 것을 의미한다. 한편, 입자혼합율을 측정하기 위해 사용되는  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 수직분포상에 불연속면이 존재하는 경우 이는 생물교란작용에 의한 혼합이라기 보다는 슬럼프와 같은 불안정한 퇴적작용에 기인한 것으로 추정되었다.

### 3. 정책분야

60년대 부터 연구개발 되어온 심해저 광업기술은 국가별로 종류 및 수준에 있어 많은 다양성을 보이고 있다. 따라서 우리나라와 같은 후발참여국의 경우 국가별 보유기술 및 기술수준 현황을 분석하여 우리나라의 심해저 광업기술 확보방안을 제시함으로써 연구·개발을 추진하는데 중복으로 인한 과잉투자를 피하고 효율적인 투자를 할 수 있을 것이다. 한편으로 현재 개발중인 태평양 공해상의 망간단괴자원 이외에 서태평양 도서국가들의 관할수역내에 부존된 망간단괴, 망간각, 열수유화광상 등 심해저 자원의 개발 가능성 및 개발참여방안에 대한 정책적 방안 제시는 심해저 광물자원확보의 다변화라는 측면에서 중요하게 활용될 것이다.

#### 1) 심해저 광업기술 분석

후발주자인 우리나라가 심해저 광업에 필요한 기술을 효율적으로 확보하기 위해 지향할 방향을 제시하는데 목적을 두고 수행되었다. 연구체제는 먼저 심해저광업 관련기술의 특성을 분석하고 요소기술을 분류 하였으며, 아울러 우리에게 주어진 여건을 파악하기 위하여 세계 각국의 기술개발현황을 조사하였다. 이같은 기술의 특성 및 분류, 각국의 기술개발현황을 바탕으로 효율적인 기술확보 방안을 제시하고자 하였다.

#### 2) 심해저 광물자원 개발참여 방안

서태평양지역의 대부분이 도서국가들의 관할수역내에 포함되어 있으므로 동지역에서의 광물자원개발 참여는 이들 도서국가 관할지역내의 무생물자원에 대한 조사를 관장하고있는 남태평양 응용지구과학위원회(SOPAC, South Pacific Applied Geoscience Commission)의 활동에의 참

여와 깊이 연관되어 있다. 따라서 현재 SOPAC의 역할과 동 위원회에 참여하고 있는 선진국들의 활동상을 분석하여 우리나라의 참여 가능성을 조사하였다. 이외에 예상되는 참여방법 및 소요되는 비용확보에 관한 정책적인 방안을 제시하였다.

# SUMMARY

## I. Title

A Study on the Development of Deep Seabed Exploration and Environmental Protection Technology

## II. Objectives and Significance

Because of the poor reserve of the land-based mineral resources, Korea has been sought the stable supplementary source of the strategic mineral resources which are essential for the continuous growth of Korean economy. However, continual decrease of the mineable resources on land and their local maldistribution lead Korea to prepare a long-term plan for developing deep seabed mineral resources as one of the alternative plan for stable supplement of the strategic mineral resources. At last, Korea became the 7th pioneer investor country and secured registered mining site in the Clarion-Clipperton area of the central Pacific in August of 1994.

Deep seabed mining technology can be largely divided into three fields: exploration, mining, and processing technology. Among them, this study aims developing exploration technologies for searching best mining site and environmental protection technologies for minimize the negative environmental effect which is expected to be caused by deep seabed mining.

Korea has carried out exploration in the C-C area for deepsea manganese nodule exploitation since 1989 using technologies fitted for regional survey. Therefore, at present, it is required to develop new technologies

which will be applied to the detailed survey for selecting the best mining area. Such new technologies enable us to make detailed analysis for seabed morphology and continuous measuring of manganese nodule abundance in two- or three-dimensional chart using acoustic method. Together with these technologies, studies on the genesis and distributional characteristics of various deep seabed minerals including manganese nodule, Co-rich manganese crust, and hydrothermal deposit provide us fundamental data for the future deep seabed mineral exploration.

The deep seabed mining field can not be an exception in the world-wide concern to the preservation of marine environment. Technology advanced pioneer investor countries such as United States, Germany, France, Japan have already carried out environmental impact experiment and accumulated many useful data and technologies for the environmental assessment of their own mining sites. The deepsea environmental assessment relating to the deep seabed mining is now one of the duties required by the provisions of the United Nations' Convention of the Law of the Sea. Results and collected data from the deepsea environmental research will be used as a basis for designing and developing deep seabed mining technologies which will minimize the negative effect to the marine ecosystem.

### **III. Contents and Scopes**

The final objectives of this study are developing necessary technologies for detailed survey of the manganese nodule exploration and evaluating environmental impact which is expected to be caused by deep seabed mining. This research will be carried out for 10 years from 1994 to 2003. In this year, research on the background measurement of acoustic signature acquired



from multi-beam echosounder Seabeam 2000 was performed as a research subject of the first stage development of exploration technology. Besides this subject, research on the genesis and distributional characteristics of Co-rich manganese crust in the western Pacific area was also carried out. On the other hand, due to our lack of experience in the field of deepsea environmental research, we attempted to collect basic information from various parts. Such information will be fundamental basis for establishing future research scope. This year's environmental research subject was divided into two fields; 1) deepsea biochemical environment including research on the benthic organism and biochemical characteristics of sea water, and 2) deepsea sediment including research on the pore water sediment mixing.

In addition, policy research for deep seabed mineral and technology development was carried out in this study. The research includes policy establishment for deep seabed mineral development in the Exclusive Economic Zone (EEZ) of island countries in western Pacific and strategy establishment for developing deep seabed mining technologies. The results of such policy research will be contributed to establishing our future research plan for developing technologies in exploration, mining, and processing of deep seabed minerals.

## **IV. Results and Recommendations**

### **1. Exploration Technology**

In August 1994, Korea registered 150,000 km<sup>2</sup> to the United Nations for the manganese nodule exploitation and hereafter in 8 years, 75,000 km<sup>2</sup> of the area should be relinquished. In this vein, in order to select the final mining

area of 75,000 km<sup>2</sup>, research was focused on the development of technologies related to: 1) the construction of detailed sea bottom topography and 2) the assessment of resource distribution using acoustic method. In addition to the manganese nodule, the origin of manganese crust that is regarded as a mineable resources of next generation and is abundant in the countries of the South Pacific island was also studied for future exploration.

### 1) Genesis of Co-rich Manganese Crust

This study examined the influence of surface water productivity and deep water circulation on the ages, growth rates, structures, and compositions of manganese crusts distributed in the Marshall Island, Palau, and Micronesian islands of the western Pacific. Mineralogical and geochemical studies revealed that the growth of manganese crust occurred in two different period, and each part of crust shows different patterns of growth rate, composition, and structure. Meantime, the early diagenetic reactions caused by the biogenetic silica existing on the surface of manganese crust play an important role in the early growth stage of the microlayers that are composed of the Fe-Mn oxides.

### 2) Multi-beam Acoustic Survey

Acoustic reflectivity was measured with 12.5 kHz Seabeam 2000 multi-beam echosounding system installed in R/V Onnuri and analysed qualitatively relating to the manganese nodule coverage. Image processing method was applied to the rearrangement of backscattered amplitude using spectral analysis on the beam pattern of 121 intensity Seabeam 2000 projector. A map of intensity distribution in a selected area was produced using rearranged backscattered amplitude adjusted relative to the data acquired by precision depth recorder EA 500.

## 2. Marine Environmental Research

In order to study the potential environmental impacts on the marine ecosystem that are expected to be accompanied by the mining of deep seabed manganese nodule, we collected and analyzed the physico-chemical, and biological environmental parameters in the KODOS area. By accumulating the data from those environmental baseline studies, we can understand the pre-mining conditions of the open ocean (from surface water column to the bottom of the sea), which are essential in assessing the effect of future benthic impact experiment. Finally, all the information acquired during the environmental research will be used in both designing the nodule collector and developing mining system to minimize the environmental impact.

### 1) Benthic Organism

During the cruise of KODOS 95-2, benthic organisms were studied to investigate the pre-mining conditions of deep seabed. The studies of microorganisms were focused on: (1) the establishment of method for measuring ATP and living cell number; and (2) the selection of culture media. As for the benthic fauna, species composition, vertical & horizontal distribution, and the abundance of meiofauna, and megafauna were analyzed.

### 2) Biochemical Characteristics of Sea Water

Nutrients, organic fluorescence, and dissolved free amino acids (DFAA) were analyzed to understand the chemical characteristics of sea water in the KODOS area. Typically, nutrients were depleted at surface, and appeared to increase with depth. Organic molecules were composed of two components: (1) biomacromolecules were high at surface, and (2) geomacromolecules

showed increase with depth. The concentration of DFAA ranged from 0.17 to 1.17  $\mu\text{M}$ , and was maximum between 100–1000m depth.

### 3) Pore Water

It is concluded that the major forming mechanism of manganese nodule is 'adsorption process' based on the results of sequential leaching on sediments and of dissolved metals in pore water. Abundant organic materials and metal oxides in bottom sediments are suitable for the adsorption, and enriched metals in pore water are probably remobilized from the sediment column, moving upward by advection process, and adsorbed onto manganese nodules on sediment surface.

### 4) Sediment Mixing

Sediment mixing rates are calculated from the results of alpha and gamma ray spectrometry. Sedimentation and sediment mixing rates are estimated to be 0.22~0.23 mm/ky and 1.38~4.64  $\text{cm}^2/\text{yr}$ , respectively. The low mixing rate indicates that deep sea floor is stable sedimentary environments with low bioturbation activity. Meanwhile, a discontinuous layers in the 10Pb depth profiles seem to be due to unstable sedimentation mechanism such as the slumping of bottom sediments.

## 3. Policy Research

Deep seabed mining technologies which have been developed since 1960 are various in different countries. Therefore, it is effective procedure for Korea as a late participant to establish a plan for acquisition of deep seabed mining technology based on the evaluation of the existing different technologies in different countries. On the other hand, establishing

alternatives for development of deepsea mineral resources within the EEZ of island countries in the South Pacific region where many deep seabed minerals such as manganese nodule, manganese crust, and hydrothermal deposits are regionally preserved. Therefore, the suggested policy for developing deep seabed mineral resources will be considered as a multilateral policy for securing such mineral resources.

#### 1) Technology Acquisition Strategy

In this chapter, the objectives and strategies of technology acquisition are established, which the Korean entity for the deep seabed mining venture is supposed to adopt and follow.

For this purpose, technologies for commercial mining are analyzed and classified. International status of deep seabed mining is also explored.

#### 2) Alternatives for Development of Deepsea Mineral Resources in the South Pacific Region

Most of the South Pacific region is included in the EEZ of the island countries in South Pacific. Therefore, our participation to this region for exploration of deep seabed mineral resources is closely related to the activities of the South Pacific Applied Geoscience Commission (SOPAC) which manages all the survey for marine geology and non-living resources in the EEZ of island countries. In this study, the role of SOPAC and activities of both SOPAC and supporting countries were analyzed for evaluating the possibility and conditions of our participation to the SOPAC.



# CONTENTS

List of Table .....	29
List of Figure .....	33
Chapter 1. Genesis of Manganese crust .....	41
Section 1. Introduction .....	43
Section 2. Materials and Analytical Methods .....	45
Section 3. Geologic Setting .....	46
Section 4. Results .....	49
1. Growth Structures of Mn-Crusts .....	49
2. Ages and Growth Rates of Mn-Crusts .....	64
3. Compositions .....	69
4. Interelement Relations .....	74
5. Regional Characters .....	80
Section 5. Discussion .....	84
1. Accretional Processes of Crusts .....	84
2. Oceanographic Conditions for Accretion of Crusts .....	87
3. Paleooceanographic Conditions for Accretion of Crusts .....	89
Section 6. Conclusions .....	93
Section 7. Recommendations .....	95
References .....	98
Appendix .....	109

Chapter 2. Process of Multi-Beam Echo Sounding Data .....	127
Section 1. Introduction .....	129
Section 2. Multi-Beam Side Scan and Data Processing .....	130
1. Backscattering Amplitude from EA-500 (Precise Echo Sounder) .....	132
2. Backscattering amplitude from SeaBeam 2000 (Multi-Beam Echo Sounder) .....	138
3. Data Processing of Backscattering Amplitude .....	139
Section 3. Conclusion .....	149
References .....	151
 Chapter 3. Benthos .....	 153
Section 1. Introduction .....	155
Section 2. Methods and Materials .....	156
Section 3. Results .....	160
1. Benthic Animal .....	160
2. Benthic Microbiology .....	171
Section 4. Discussion .....	176
 Chapter 4. Chemical Characteristics in Water Column .....	 185
Section 1. Introduction .....	187
Section 2. Methods and Materials .....	188
Section 3. Results and discussion .....	189
References .....	206



Chapter 5. Interaction between Sediment and Pore Water .....	209
Section 1. Introduction .....	211
Section 2. Method .....	212
1. Samples .....	212
2. Sampling Method .....	213
3. Analytical Method .....	213
Section 3. Results and Discussion .....	214
1. Nutrients .....	214
2. Organic Carbon .....	219
3. Dissolved Metals in Pore Water .....	223
4. Metals in Sediments .....	228
5. Relationship between Sediments and Pore Water .....	230
Section 4. Conclusion .....	247
References .....	250
 Chapter 6. Rates of Sedimentation and Sediment Mixing .....	 257
Section 1. Introduction .....	259
Section 2. Analytical Methods .....	260
1. $\gamma$ -ray Spectrometry .....	260
2. $\alpha$ spectrometry .....	261
3. Introduction to One and Two Box Models .....	261
Section 3. Results and Discussion .....	266
1. Sediment Rate .....	266
2. Sediment Mixing Rate .....	270
3. Discontinuous Sedimentation Environments : Slump and Hiatus .....	283
References .....	288

Chapter 7. Technology Acquisition Strategy .....	291
Section 1. Overview .....	293
Section 2. Characteristics and Classification of Deep Seabed Mining Technology .....	295
1. Characteristics of Deep Seabed Mining Technologies .....	295
2. Technology Tree .....	296
Section 3. New Technologies Applicable to Deep Seabed Mining .....	301
1. Material Technology .....	303
2. Machinery and Equipment .....	304
3. Fiberoptics .....	304
4. Automation .....	305
Section 4. International Status Deep Seabed Mining .....	305
1. Europe .....	307
2. North America .....	316
3. Asia .....	321
Section 5. Means and Factors for Technology Transfer .....	324
1. Definition of Technology Transfer .....	325
2. Characteristics of Technology Transfer .....	326
Section 6. Technology Acquisition Strategy for Deep Seabed Mining .....	335
1. Objectives .....	335
2. Strategies .....	337
References .....	339

Chapter 8. The Alternatives for Development of Deepsea	
Mineral Resources in the South Pacific Region .....	341
Section 1. Introduction .....	343
Section 2. The South Pacific Island States's Maritime Jurisdictions and Legislations concerned .....	346
1. Characteristic of the South Pacific States .....	346
2. Current Status of Maritime Jurisdictions of the South Pacific States .....	350
Section 3. Deepsea Mineral Resources Development System of the South Pacific States .....	352
1. Structure and Management of the SOPAC .....	352
2. Participating Procedures in the SOPAC Region by Non-Member State .....	359
Section 4. Conclusions Recommendation .....	362



# 목 차

표 목 차 .....	29
그림목차 .....	33
제 1 장 망간각 성인 연구 .....	41
제 1 절 서    론 .....	43
제 2 절 시료채취 및 연구방법 .....	45
제 3 절 지질환경 .....	46
제 4 절 결    과 .....	49
1. 망간각의 내부 성장구조 .....	49
2. 망간각의 연령과 성장을 .....	64
3. 조    성 .....	69
4. 상관관계 .....	74
5. 지역적인 특성 .....	80
제 5 절 토    의 .....	84
1. 망간각의 성장과정 .....	84
2. 망간각의 성장에 대한 해양환경조건 .....	87
3. 망간각의 성장을 위한 고해양학적인 조건들 .....	89
제 6 절 결    론 .....	93
제 7 절 제    언 .....	95
참고문헌 .....	98
부    록 .....	109

제 2 장 다중빔 음향탐사기술 .....	127
제 1 절 서  론 .....	129
제 2 절 후방산란 자료획득 및 자료처리 결과 .....	130
1. EA-500의 해저면 후방산란 수치자료 획득 .....	132
2. SeaBeam 2000의 후방산란 수치자료 획득 .....	138
3. SeaBeam 2000의 후방산란 수치자료 처리 결과 .....	139
제 3 절 결  론 .....	149
참고문헌 .....	151
제 3 장 저서생물 .....	153
제 1 절 서  론 .....	155
제 2 절 재  료 및 방  법 .....	156
제 3 절 결  과 .....	160
1. 저서동물 .....	160
2. 해양 저서미생물 .....	171
제 4 절 토  의 .....	176
참고문헌 .....	181
제 4 장 수괴의 화학적 환경 특성 .....	185
제 1 절 서  론 .....	187
제 2 절 재  료 및 방  법 .....	188
제 3 절 결  과 및 토  의 .....	189
참고문헌 .....	206

제 5 장 퇴적물-공극수간 물질순환 .....	209
제 1 절 서 론 .....	211
제 2 절 연구방법 .....	212
1. 사용시료 .....	212
2. 시료채취 .....	213
3. 화학분석 .....	213
제 3 절 .....	214
1. 영양염 .....	214
2. 유기탄소 .....	219
3. 공극수 용존 금속원소 .....	223
4. 퇴적물 함유 금속원소 .....	228
5. 퇴적물-공극수 간의 상호관계 .....	230
제 4 절 결 론 .....	247
참고문헌 .....	250
제 6 장 퇴적물의 퇴적율과 입자혼합율 .....	257
제 1 절 서 론 .....	259
제 2 절 실험 및 방법 .....	260
1. 비파괴 감마선 계측 .....	260
2. 동위원소 회석 알파분석법 .....	261
3. 입자혼합율 추정을 위한 수리적 모델: “1-상” medel과 “2-상자” medel .	261
제 3 절 결과 및 고찰 .....	266
1. 퇴적속도 .....	266
2. 입자교란 속도 .....	270
3. 불연속적인 퇴적환경 : Slump와 Hiatus .....	283
참고문헌 .....	288

제 7 장 심해저 광업기술 확보 전략 .....	291
제 1 절 총 론 .....	293
제 2 절 심해저 광업 관련기술의 특성 및 분류 .....	295
1. 심해저 광업의 기술적 특성 .....	295
2. 심해저 광업의 기술 계통도 .....	296
제 3 절 심해저 광업에 적용 가능한 새로운 요소기술 .....	301
1. 소재기술 .....	303
2. 기계 및 장비기술 .....	304
3. 광섬유기술 .....	304
4. 자동화기술 .....	305
제 4 절 세계 각국의 심해저 광업 관련 연구개발 동향 .....	305
1. 유 럽 .....	307
2. 북 미 .....	316
3. 아시아 .....	321
제 5 절 기술이전의 방법 및 요인 .....	324
1. 기술이전의 개념과 분류 .....	325
2. 기술이전의 대상, 특징 및 경로 .....	326
제 6 절 심해저 광업기술 확보 전략 .....	335
1. 기본방향 .....	335
2. 기술확보 전략 .....	337
참고문헌 .....	339



제 8 장 남태평양 심해광물자원 개발 참여 방안 .....	341
제 1 절 서 론 .....	343
제 2 절 남태평양 도서국가의 해양관할권 선포와 관련입법현황 .....	346
1. 남태평양 도서국가의 특성 .....	346
2. 남태평양 도서국가의 해양관할권 선포현황 .....	350
제 3 절 남태평양 도서국가의 심해광물자원 개발체제 .....	352
1. 남태평양응용지구과학위원회의 설치 및 운영형태 .....	352
2. 비회원국의 SOPAC지역 참여절차 및 현황 .....	359
제 4 절 결론 및 건의사항 .....	362



# 표 목 차

(List of Tables)

Table 1-1. Sampling sites and visual description of Mn-crusts. ....	51
Table 1-2. Summary of metal concentrations in Fe-mn oxide texture, intertextural silicates and phosphorite, and substrate rocks of Mn-crusts in the north central and western Pacific .....	70
Table 1-3. Correlation matrix of elements in older and younger crusts. ....	75
Table 2-1. Regression analysis results of 121 Beams Multi-Beam Data .....	143
Table 2-2. Regression analysis results of 61 Beams Multi-Beam Data .....	145
Table 3-1. The sampling scheme for benthos at each station in KODOS 95-2 .....	159
Table 3-2. The individual number of macrofauna occurred at each station of the study area. ....	161
Table 3-3. The individuals of meiofauna occurred at each station of the study area .....	168
Table 3-4. Benthic fauna in the crevice and on the surface of manganese nodules collected at St. 36. ....	170
Table 3-5. Comparison of abundance estimates for meiobenthos and macrobenthos from deep sea sites. ....	174
Table 3-6. Comparison of cell number of Box core sample 8 by MPN test with ZoBell medium. ....	175
Table 3-7. Number of colony forming unit of Box core sample 8 by viable counts test with ZoBell medium. ....	175
Table 3-8. Wet weight and dry weight of Box core samples. ....	177

Table 4-1. Concentration of nutrients in the study area. ....	192
Table 4-2. Concentration of dissolved free amino acids in the study area. ....	202
Table 5-1. Porewater nutrient data. ....	251
Table 5-2. Sedimentary organic carbon content data. ....	252
Table 5-3. Porewater metal data. ....	253
Table 5-4. Sedimentary metal data. ....	254
Table 6-1. Results of radiochemical determination of U and Th nuclides in sediment sample 94-1-79. Ratios are activity ratios and errors quoted are $1\sigma$ errors based on counting statistics. ....	268
Table 6-2. Results of radiochemical determination of U and Th nuclides in sediment sample 94-2-15. Ratios are activity ratios and errors quoted are $1\sigma$ errors based on counting statistics. ....	268
Table 6-3. Activities of radionuclides, $^{210}\text{Pb}$ , $^{226}\text{Ra}$ and excess $^{210}\text{Pb}$ , from the sediment core 94-1-79. Errors quoted are $1\sigma$ errors based on counting statistics. ....	273
Table 6-4. Activities of radionuclides, $^{210}\text{Pb}$ , $^{226}\text{Ra}$ and excess $^{210}\text{Pb}$ , from the sediment core F11-89-CP-8. Errors quoted are $1\sigma$ errors based on counting statistics. ....	273
Table 6-5. Activities of radionuclides, $^{210}\text{Pb}$ , $^{226}\text{Ra}$ and excess $^{210}\text{Pb}$ , from the sediment core F9-90-CP-34. Errors quoted are $1\sigma$ errors based on counting statistics. ....	274
Table 6-6. Activities of radionuclides, $^{210}\text{Pb}$ , $^{226}\text{Ra}$ and excess $^{210}\text{Pb}$ , from the sediment core F4-91-CP-24. Errors quoted are $1\sigma$ errors based on counting statistics. ....	274

Table 6-7. Activities of radionuclides, $^{210}\text{Pb}$ , $^{226}\text{Ra}$ and excess $^{210}\text{Pb}$ , from the sediment core 94-2-15. Errors quoted are $1\sigma$ errors based on counting statistics. ....	281
Table 6-8. Activities of radionuclides, $^{210}\text{Pb}$ , $^{226}\text{Ra}$ and excess $^{210}\text{Pb}$ , from the sediment core F8-91-CP-38. Errors quoted are $1\sigma$ errors based on counting statistics. ....	281
Table 6-9. Activities of radionuclides, $^{210}\text{Pb}$ , $^{226}\text{Ra}$ and excess $^{210}\text{Pb}$ , from the sediment core F11-89-CP-18. Errors quoted are $1\sigma$ errors based on counting statistics. ....	281
Table 6-10. Deep-sea sediment mixing data based on $^{210}\text{Pb}$ measurements and sedimentation rates. ....	282
Table 7-1. Technology Tree of Deep Seabed Mining .....	297
Table 7-2. Technology Tree of Manganese Nodule Processing .....	300
Table 7-3. Comparison of Various Techno-Economic Models for Deep Seabed Mining .....	302
Table 7-4. Trends in R & D activities .....	307
Table 7-5. R & D Investment for Deep Seabed Mining by Country .....	308
Table 8-1. The SOPAC Member Countries and their Exclusive Economic Zones .....	347
Table 8-2. Resources Potential of the SOPAC Member Countries .....	348
Table 8-3. Maritime Jurisdiction Claims of the SOPAC Member Countries .....	351
Table 8-4. Enactment for Maritime Jurisdiction Claims of the SOPAC Member Countries. ....	353



# 그림 목 차

(List of Figures)

Fig. 1- 1. Sampling sites and seafloor morphology of north central and western Pacific. ....	47
Fig. 1- 2. Relation of Fe-Mn crust thickness to water depth of sampling sites. ....	50
Fig. 1- 3. Substrate rocks of crusts; basalt and phosphatic limestone. ....	53
Fig. 1- 4. A crack dividing sharply the crust. ....	54
Fig. 1- 5. Vug hole partially filled with euhedral phosphorite grains. ....	55
Fig. 1- 6. Growth structures of Fe-Mn oxide aggregates; botryoidal structures. ....	56
Fig. 1- 7. Growth structures of Fe-Mn oxide aggregates; columnar structures. ....	58
Fig. 1- 8. Growth structures of Fe-Mn oxide aggregates; mottled structures. ....	59
Fig. 1- 9. Microphotograph showing phosphorite grains in a large void. ....	60
Fig. 1-10. Planktonic siliceous tests and amorphous silicate layers. ....	63
Fig. 1-11. Ages and vertical distributions of internal structures and chemical composition of crusts. ....	65
Fig. 1-12. X-ray diffraction patterns of Mn-crust components. ....	72
Fig. 1-13. Relation of Mn, Fe and Mn+Fe concentrations to the abundance of Ca+P in intertextural phosphorite grains and silicate materials. ....	77
Fig. 1-14. Relation of Mn, Fe and Mn+Fe concentrations to the abundance of Ca+P and biogenic silica in Fe-Mn oxide aggregates. ....	78

Fig. 1-15. Distribution of factors controlling the variations in chemical composition of the older and younger generation crusts .....	81
Fig. 1-16. Relations of averaged concentrations of Mn, Fe and minor elements in the older and younger crusts to water depth .....	82
Fig. 2- 1. SeaBeam 2000 Cross-Fan Beam Geometry .....	131
Fig. 2- 2. EA-500/SeaBeam 2000 Survey Area .....	133
Fig. 2- 3. EA-500 Received Beam Pattern. ....	134
Fig. 2- 4. EA-500 Received Backscattering Amplitude. ....	136
Fig. 2- 5. EA-500 Water Depth Record. ....	137
Fig. 2- 6. EA-500 Water Depth Profile (After Noise filtering). ....	137
Fig. 2- 7. SeaBeam 2000 Side Scan Image with Center Beam's Vertical Profile. ....	140
Fig. 2- 8. SeaBeam 2000 Center Beam's Backscattering Amplitude. ....	141
Fig. 2- 9. 121 Beams Distribution of SeaBeam 2000. ....	142
Fig. 2-10. Regression Pattern of SeaBeam 2000 121 Beams. ....	142
Fig. 2-11. Regression Pattern of SeaBeam 2000 Port 61 Beams. ....	144
Fig. 2-12. Raw Image of SeaBeam 2000 Backscattering Amplitude. ....	146
Fig. 2-13. SeaBeam 2000 Backscattering Amplitude Image after filtering with port side 61 Beam Regression curve .....	146
Fig. 2-14. SeaBeam 2000 Backscattering Amplitude Image after filtering with 121 Beam Regression curve .....	147
Fig. 2-15. 3-dimensional map of surveyed area .....	148
Fig. 3- 1. The study area and sampling sites for benthos during the cruise of KODOS 95-2 .....	157
Fig. 3- 2. The species number of macrofauna taxa in the study area .....	162
Fig. 3- 3. The abundance of macrofauna in the study area .....	163



Fig. 3- 4. The relative distribution of macrofauna taxa among vertical fractions pooled in the study area .....	165
Fig. 3- 5. Spatial distribution of macrofauna within 9 subcores of a large box core sample at St. 40 .....	166
Fig. 4- 1. Vertical profile of temperature and salinity in the study area .....	191
Fig. 4- 2. Vertical profiles of nutrients in the study area .....	194
Fig. 4- 3. Nitrate versus Phosphate concentrations in the study area .....	195
Fig. 4- 4. Typical characteristics of fluorescence of biomacromolecules and geomacromolecules in the study area .....	197
Fig. 4- 5. Vertical profiles of fluorescence intensity in the study area .....	198
Fig. 4- 6. Plots of fluorescence intensity vs. nitrate, phosphate and Silicate in the study area .....	199
Fig. 4- 7. Vertical profiles of nutrients and fluorescence intensity in the study area .....	200
Fig. 4- 8. Typical HPLC chromatograms of amino acid standard and representive sample of DFAA in the study area .....	201
Fig. 5- 1. Concentrations of porewater ammonia with depth .....	215
Fig. 5- 2. Concentrations of porewater phosphate with depth .....	216
Fig. 5- 3. Concentrations of porewater silica with depth .....	217
Fig. 5- 4. Concentrations of porewater nitrite+nitrate with depth .....	218
Fig. 5- 5. Contents of sedimentary total carbon with depth .....	220
Fig. 5- 6. Contents of sedimentary organic carbon with depth .....	221
Fig. 5- 7. Curves of 1st order decay model fitted to the contents of sedimentary organic carbon with depth .....	222
Fig. 5- 8. Concentrations of porewater manganese with depth .....	224

Fig. 5- 9. Concentrations of porewater iron with depth ..... 225

Fig. 5-10. Concentrations of porewater copper with depth ..... 226

Fig. 5-11. Concentrations of porewater nickel with depth ..... 227

Fig. 5-12. Correlation between sedimentary organic carbon content and  
manganese in acetic acid leachant ..... 229

Fig. 5-13. Depth profiles of sedimentary manganese, at St. 51, in sequential  
leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid,  
and hydroxylamine hydrochloric acid. .... 231

Fig. 5-14. Depth profiles of sedimentary iron, at St. 51, in sequential  
leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid,  
and hydroxylamine hydrochloric acid. .... 232

Fig. 5-15. Depth profiles of sedimentary copper, at St. 51, in sequential  
leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid,  
and hydroxylamine hydrochloric acid. .... 233

Fig. 5-16. Depth profiles of sedimentary nickel, at St. 51, in sequential  
leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid,  
and hydroxylamine hydrochloric acid. .... 234

Fig. 5-17. Depth profiles of sedimentary manganese, at St. 54, in sequential  
leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid,  
and hydroxylamine hydrochloric acid. .... 235

Fig. 5-18. Depth profiles of sedimentary iron, at St. 54, in sequential  
leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid,  
and hydroxylamine hydrochloric acid. .... 236

Fig. 5-19. Depth profiles of sedimentary copper, at St. 54, in sequential  
leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid,  
and hydroxylamine hydrochloric acid. .... 237

Fig. 5-20. Depth profiles of sedimentary nickel, at St. 54, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid. .... 238

Fig. 5-21. Depth profiles of sedimentary manganese, at St. 15, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, , and hydroxylamine hydrochloric acid. .... 239

Fig. 5-22. Depth profiles of sedimentary iron, at St. 15, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid. .... 240

Fig. 5-23. Depth profiles of sedimentary copper, at St. 15, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid. .... 241

Fig. 5-24. Depth profiles of sedimentary nickel, at St. 15, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid. .... 242

Fig. 5-25. Depth profiles of the fractions of the metal contents in acetic acid leachants to the total sedimentary metal contents, at St. 51 ..... 243

Fig. 5-26. Depth profiles of the fractions of the metal contents in acetic acid leachants to the total sedimentary metal contents, at St. 54. .... 244

Fig. 5-27. Depth profiles of the fractions of the metal contents in acetic acid leachants to the total sedimentary metal contents, at St. 15. .... 245

Fig. 5-28. Correlation between porewater copper and sedimentary copper in the acetic acid leachant at St. 51. .... 246

Fig. 5-29. Depth profiles of the ratios of sedimentary manganese to nickel both in the acetic acid leachant and in the hydroxylamine hydrochloric acid leachant, at St. 15. ....	248
Fig. 6- 1. Separation scheme of uranium and thorium in sediment samples. ....	262
Fig. 6- 2. Plots of $^{230}\text{Th}_{\text{xs}}$ activity and $^{230}\text{Th}_{\text{xs}}/^{232}\text{Th}$ activity ratio as a function of depth at 94-1-79 core. $S_{\text{real}}$ =real sedimentation rate calculated from data points below the first mixed layer. ....	269
Fig. 6- 3. Plots of $^{230}\text{Th}_{\text{xs}}$ activity and $^{230}\text{Th}_{\text{xs}}/^{232}\text{Th}$ activity ratio as a function of depth at 94-2-15 core. $^{230}\text{Th}_{\text{xs}}=^{230}\text{Th}_{\text{total}}-^{234}\text{U}$ . $S_{\text{real}}$ =real sedimentation rate calculated from data points below the first mixed layer, $R^2$ =goodness-of fit. Error bars refer to $1-\sigma$ counting statistics and depth intervals .....	271
Fig. 6- 4. Excess $^{210}\text{Pb}$ profile for 94-1-79. Data points represented by circles were not considered in the estimation of particle mixing rates. ....	275
Fig. 6- 5. Excess $^{210}\text{Pb}$ profile for F11-89-CP-8. Error bars refer to $1-\sigma$ counting statistics and depth intervals. ....	277
Fig. 6- 6. Excess $^{210}\text{Pb}$ profile for 91-CP-90-34. Error bars refer to $1-\sigma$ counting statistics and depth intervals. ....	279
Fig. 6- 7. Excess $^{210}\text{Pb}$ profile for F4-91-CP-24. Error bars refer to $1-\sigma$ counting statistics and depth intervals. ....	280
Fig. 6- 8. Excess $^{210}\text{Pb}$ profile for 94-2-15. Data points represented by circles were not considered in the estimation of particle mixing rates. Line represents the equation of regression fitted for excess $^{210}\text{Pb}$ data. ....	284

Fig. 6- 9. Excess $^{210}\text{Pb}$ profile for F8-91-CP-38. Data points represented by circles were not considered in the estimation of particle mixing rates. Line represents the equation of regression fitted for excess $^{210}\text{Pb}$ data. ....	286
Fig. 6-10. Excess $^{210}\text{Pb}$ profile for F11-89-CP-18. Data points represented by circles were not considered in the estimation of particle mixing rates. Line represents the equation of regression fitted for excess $^{210}\text{Pb}$ data. ....	287
Fig. 7- 1. Flow sheet of Manganese Nodule Processing .....	299
Fig. 7- 2. Metal-Equivalent Values of a ton of Manganese Nodules .....	303
Fig. 8- 1. Maritime Jurisdiction Claims in the SOPAC Area .....	349
Fig. 8- 2. Implementing Procedure of an Exploration Program in the SOPAC Area .....	361



## 제 1 장

### 망간각 성인 연구

연구책임자 : 문 재 운

연구원 : 김 기 현

이 경 용

정 회 수

정 갑 식

지 상 범

김 현 섭

최 원 석

김 채 수

안 성 진

연구조원 : 김 연 주





## 제 1 절 서 론

태평양에는 막대한 양의 망간각이 용기된 심해평원이나 해저산 또는 저층해류의 영향으로 퇴적물이 쌓이지 않은 구릉지역을 부분적으로 혹은 전체적으로 덮고 있다 (Friedrich and Wiechowski, 1980; Hein et al., 1985; De Carlo et al., 1987a, b). 태평양 중·서부 지역에 산재하는 많은 해저산과 해저산맥에서 산출되는 망간각은 함유된 코발트와 백금 등의 경제적 가치로 인해 이들에 대한 자원잠재력 탐사가 이루어져 왔다 (Halbach and Manheim, 1984; Manheim, 1986; Hein et al., 1988).

망간각은 주변의 해수나 열수로부터 공급되는 콜로이드형태의 입자성 금속산화물이 부착되어 성장하며, 그 성장률은 1~15mm/백만년으로 매우 느린 성장속도를 보인다 (Segl et al., 1984; 1989; Fute et al., 1988; Hein et al., 1992). 망간각의 조성과 구조는 수심에 따라 다양하며, 망간각의 성장을 조절하는 표층 생산력과 저층수 흐름 등 주변의 수괴특성에 영향을 받는다 (Pichocki and Hoffert, 1987; Puteanus et al., 1989; Neumann and Stüben, 1991; Hein et al., 1992).

적도 태평양 생산대에서 산출되는 망간각은 코발트, 니켈, 구리를 다량 함유하고 있다 (Aplin and Cronan, 1989; Croman et al., 1991). 비교적 얕은 수심에서 산출되는 망간각의 경우 망간, 코발트, 니켈 함량이 높은 반면, 철 함량은 심해로 유입되는 쇄설성 물질의 양에 비례하는 특징을 보인다 (Halbach et al., 1983; DeCarlo et al., 1987a; Aplin and Cronan, 1985). 특히, 코발트와 니켈 함량은 대륙과 열수작용지역으로부터 철, 망간의 유입이 제한되어진 지역에서 높게 나타난다 (Halbach et al., 1983; Manheim and Laneb-Bostwick, 1988). 이와같은 금속함량의 분포특성은 망간각의 형성 초기 동안 해수내 금속성분의 생지화학적 현상과 관계가 있다 (Halbach and Puteanus, 1985; Landing and Bruland, 1987; Alberz et al., 1990).

최근 들어, 고해양학적 조건들과 지질학적 요인들이 망간각내의 철-망간 미세산화층의 연속적인 성장을 조절하는 것으로 밝혀지고있으며 이 분야에 대한 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 망간단괴와 퇴적층리의 변화 그리고 망간각의 성장구조와 조성변화에 영향을 미치는 고해양학적 현상들은  $Be^{10}$ 과  $Sr^{86}/Sr^{87}$  동위원소를 이용한 연대측정을 통해 밝힐 수 있다 (Segl et al., 1984; 1989; Futa et al., 1988; Hein et al., 1992). 일반적으로 태평양에 존재하는 망간각은 표층생산력과 남극저층수(AABW) 순환의 변화로 인해 야기된 두번 이상의 성장변화양상을 보인다 (Halbach and Puteamus, 1984; De Carlo et al., 1987b; Pichocki and Hoffert, 1987). 성장 초기단계의 망간각은 괴상구조와 인산염암 입자들이 협재된 층상구조 특징을 보이며, 이는 태평양 해수순환이 느린 활동을 시작하는 마이오세 초기에서 중기 동안에 망간각이 형성되기 시작하였음을 시사한다 (Hein et al., 1993). 반면에 성장 후기단계의 망간각은 많은 육성쇄설물을 함유한 주상 및 포도상의 철-망간 구조를 보여준다. 이는 보다 빠른 저층수 순환과 거친 기후환경조건에서 망간각이 성장하였음을 나타낸다 (von Stackelberg et al., 1984; Hein et al., 1992). 자세한 분석에 의하면, 망간각의 성분변화는 주기적이며 (Segl et al., 1989; Neumann and Stüben, 1991; Hein et al., 1992), 이는 고해양환경의 장·단기적인 변화와 관계되어진다.

본 연구에서는 망간각의 성장, 연령, 성장률, 구조, 그리고 성분에 영향을 미치는 저층수 순환과 표층생산력을 연구하기 위하여 태평양 중·서부 지역에 분포하는 해저산들로부터 채취된 각기 다른 7개 정점의 망간각을 사용하였다. 연구결과 이들 망간각들은 성장율, 성분, 구조에 있어 뚜렷한 차이를 보여주는 두개의 각기 다른 기간동안 성장하였음을 보여준다. 망간각의 점분석결과 망간과 철 함량은 주기적으로 서로 역상관관계를 보이며 변하고 있는 현상을 보여주며, 이는 생물기원의 실리카의 양과 밀접하게 연관되어있다. 본 연구에서는 망간각 표면에 존재하는 생물기원 실리카의 초기속성작용이 철-망간산화물로 이루어진 미세층리

의 성장초기에 중요한 역할을 하고 있음을 규명하였다. 이러한 결과들로 볼 때 신제 3기 동안에 망간각 성장에 주기적인 표층생물생산성 변화가 영향을 미침을 알 수 있다.

## 제 2 절 시료채취 및 연구방법

한국해양연구소 (KORDI)는 1989에서 1991년 동안 3차례에 걸쳐 미국지질연구소와 공동으로 R/V Farnella호를 이용하여 중·서부 태평양에 위치한 Marshall, Caroline, Palau 군도 주변 해저산에서 망간각 탐사를 실시하였다. 시료는 퇴적작용이 활발하지 않은 해저산 정상부와 사면지역에서 드릿지 (dredge)를 이용하여 채취하였다. 탐사정점은 탄성파 (air-gun 및 3.5 kHz)를 이용한 해저산 지형자료와 수심자료 (KORDI, 1990; 1991; 1992)를 참고하여 설정하였다. 망간각 시료는 북위 6° - 12° 사이의 마샬군도와 팔라우군도 서쪽 해저산 주변에서 채취하였다.

본 연구지역에서는 수심 1,250 - 3,400m에서 채취된 7개의 망간각 시료를 분석하였으며, 시료를 채취한 해저산들은 백악기말에서 중기 마이오세에 형성되었다. 시료는 성장구조를 볼 수 있도록 단면을 절단하였다. 내부성장구조와 화학적 점성분 분석을 위해 절단된 한쪽 부분면을 레진으로 처리한 후, 연마하였다. 철-망간산화물의 미세층으로 이루어진 내부구조를 관찰하기 위해 고려대학교부설 전략광물연구소의 EPMA (Superprobe JEOL JX-8600S)를 이용하여 40배율로 촬영 후, 산란전자사진 (back-scattered electron microphotograph)촬영을 하였다. 철-망간미세산화층의 점분석을 위해 전자빔을 5 $\mu$ m 이하로 조정하였고, 1mm 간격으로 13개 원소를 측정하였다. 한편, 다른 한쪽 시료는 광물조성 및 Sr 동위원소 분석을 위해 2mm 간격으로 시료를 채취하여 분말화 하였다. 광물조성분석을 위하여 Phillips사의 PW-710 X-선 회절분석기 (XRD)를 이용하였다. 그리고, 망간각

의 연령과 성장률을 측정하기 위해 기초과학센터의 Thermal Ionizing Mass Spectrometer (TIMS)를 사용하여  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 를 측정하였다. 측정시료는 teflon bomb에 넣은 후 HCl,  $\text{HNO}_3$ , HF 혼합용액을 첨가하여 완전용해시킨 다음, 시료가 거의 건조되도록 가열판에서 가열하였다. 완전용해건조된 시료는 6N HCl를 첨가하여 용해시킨 후 원심분리기를 이용하여 상부용액을 취하였다. 이 용액을 이온교환수지로 충전된 column를 통과시켜 동위원소를 추출하였다. 망간각의 연령측정은 신생대 해수중  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  그래프 (Hodell et al., 1994)자료를 근거로 하여 측정하였다.

### 제 3 절 지질환경

중·서부 태평양에는 일련의 해저산과 섬들이 산재되어 있으며, Marshall, Micronesia, Caroline, Palau 군도들은 Philippines Basin 남쪽에서 서쪽방향으로 발달되어있다 (Fig. 1-1). Marshall 군도는 북서-남동방향으로 발달한 백여개의 해저산군으로 이루어져 있으며, 이들은 평균 수심이 4,500m인 해저평원에 기묘 (guyot)형태의 해저산과 산호섬의 일종인 환초(atoll)로 이루어져 있다. 이와 같은 도서들과 해저산들은 북서방향으로 이동하는 쥐라기 후기 (135-155Ma)에 만들어진 태평양판 상에 발달한 단열대 (fracture zone)에서 백악기말 (88-79Ma)과 플라이오신에서 에오세초 (51-59Ma)에 걸쳐 열점의 점진적인 분출작용에 의해 형성되어졌다 (Larson and Hilde, 1975; Cande et al., 1978; Rea and Nallier, 1983). K-Ar 방사선 동위원소를 이용한 연대측정에 의하면 이 군도들은 여러 열점에서의 분출 활동에 의해 형성되었음이 밝혀졌다 (Davis et al., 1989). 해저산의 정상부는 생물쇄설성 석회암이나 현무암편, 응회질니로 교절된 각력암과 석회질 인회사암들로 이루어진 퇴적층이 두껍게 (일반적으로 150m 이상) 덮여있다 (Swab et al., 1986; Davis et al., 1986; Hein et al., 1988). 해저산의 사면과 기

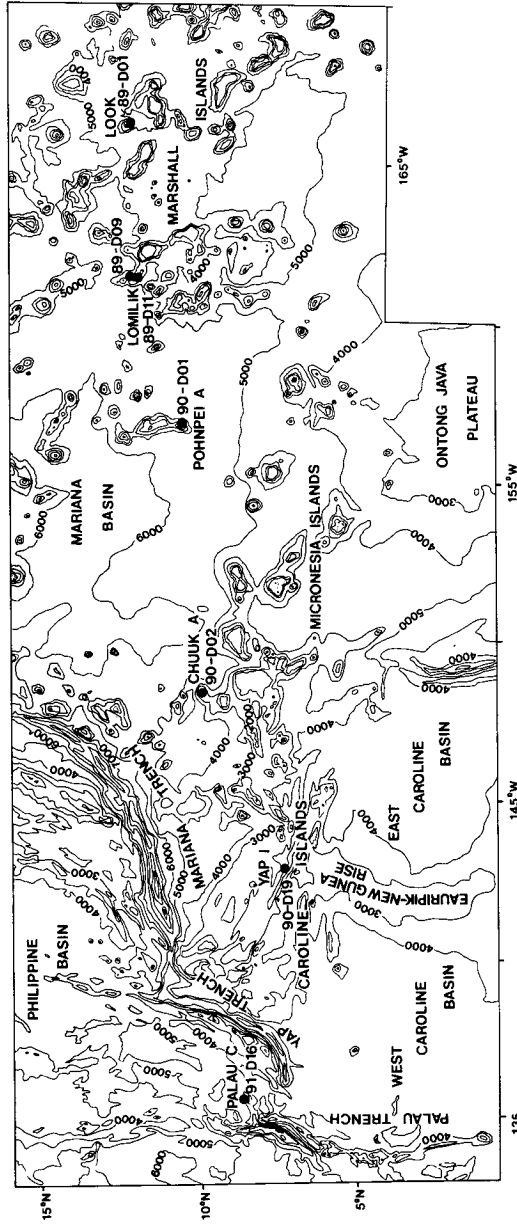


Fig. 1-1. Sampling sites and seafloor morphology of north central and western Pacific. Water depth is contoured at 500m interval.

저부에는 중력류에 의해 퇴적된 퇴적층 (mass-flow deposition)이 산재되어 있으며 (KORDI, 1990), 이곳에 5-180mm 두께의 망간각이 존재한다.

Caroline 군도에는 약 900여개의 해저산과 환초형 섬들이 있다. 이 섬들은 태평양판이 함몰되는 마리아나 해구 동서쪽에 위치한 Yap 해구쪽으로 3,000 km에 걸쳐 나열되어져 있다 (Acharya, 1979). 주변의 해저 수심은 4,500m 보다 깊지 않으며, 섬들은 형태상 이들로부터 직각으로 나열된 Eauripik-NewGuinea 해령을 기준으로 동쪽과 서쪽부분으로 형태적으로 구분되어진다. E-W 방향을 띠는 Caroline 군도의 서쪽 끝은 NW-SE 방향으로 나열된 마이크로네시아 군도의 북서쪽과 연결되어진다. 마이크로네시아 군도의 섬들과 해저산들은 12.4Ma에 적도대에서 형성된 열점에서 분출작용으로 형성되었으며, 이들은 북서쪽으로 갈수록 점진적으로 그 연령이 오래되었음을 보여주고 있다 (Mattey, 1982; Keating et al., 1984). 한편, Caroline군도는 올리고세 말기에서 마이오세 초 (30-24Ma)동안에 활발하였던 맨틀의 상승으로 인한 해저 화산작용으로 백악기에 형성된 기반암층 위에 형성되었다 (Fisher et al., 1971). 이와같은 화산작용은 간헐적으로 일어났으며, 섬들과 해저산 사면에 퇴적물의 함몰사태를 일으켰다. Eauripik-New Guinea 해령은 100-340m 두께의 석회질 퇴적물로 덮여져 있고, 수심은 2,500m 보다 얕다. 이 해령은 28-31Ma 사이에 normal faults 혹은 strike-slip faults에 의해 형성된 주상해분 (troughs)과 해구 (trench)에 의해 둘러싸인 고립된 호상열도 (islands arc)로 이루어져 있다 (Duncan and Clague, 1985; Keating et al., 1984). 서부 Caroline 군도에 분포하는 해저산에 형성된 망간각은 두께가 30mm 이하로 대부분 patina 상태로 산출되는 반면, 마이크로네시아의 망간각은 두께가 10-70mm로 두껍게 나타난다 (KORDI, 1991).

Mariana 해구 남쪽 끝부분과 Palau 해구 북쪽 끝사이에 위치하는 Palau 섬들은 대부분 Yap군도로 이루어진 호상열도를 형성한다. 이들은 마이오세 말기 ( $10.8 \pm 0.4$  My)동안에 서쪽으로 이동하는 태평양판위로 Philippine판이 놓여지게

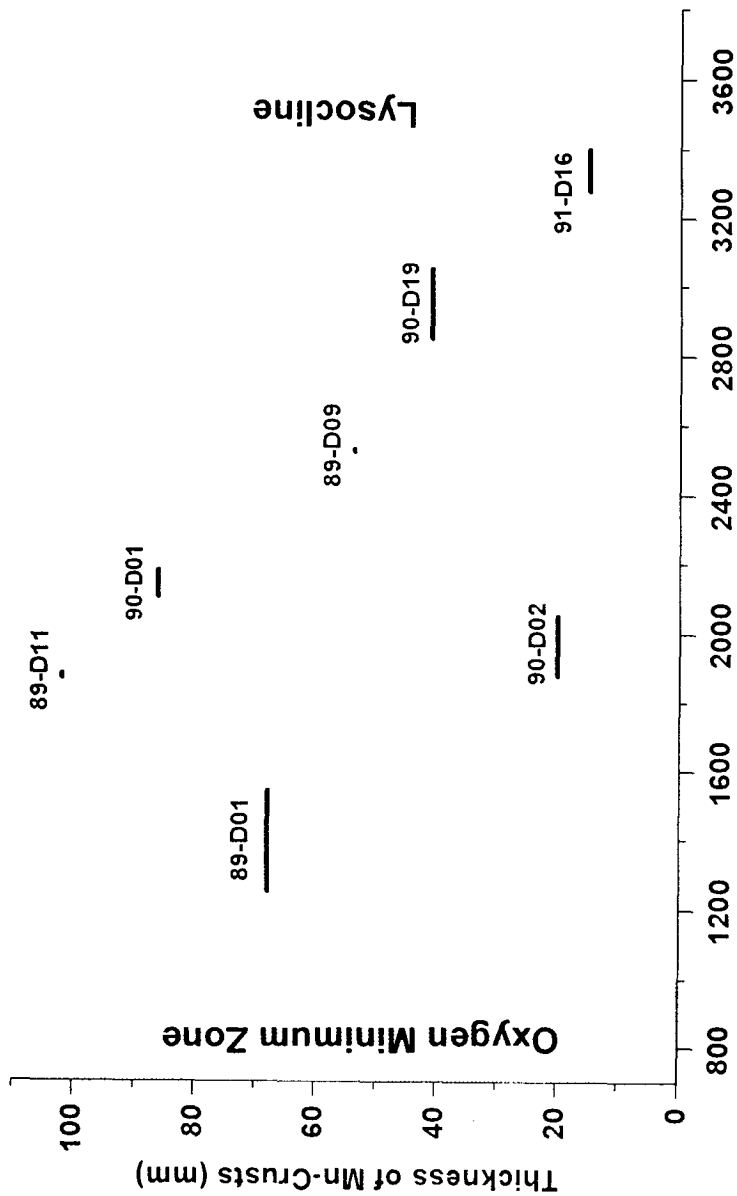
됨으로써 형성되었으며(Crawford et al., 1986), 최근에도 이러한 활동은 계속되고 있으나 그 정도는 미약한 편이다 (Acharya, 1979). 이들 섬들은 주로 변성암과 초염기성암으로 이루어져 있으며 석회질이 함유된 규암, 돌로마이트 및 녹편암이 부수적으로 나타난다. 이 지역에서의 망간각 분포는 그 두께가 10mm 이하로 기반암을 피복하고 있다 (KORDI, 1992).

## 제 4 절 결 과

### 1. 망간각의 내부 성장구조

#### 가. 일반적 특징

연구지역에서 산출된 망간각은 Marshall 군도지역의 Look 해저산 (시료번호 89-D01)과 북부 마이크로네시아 군도의 Chuuk A 해저산 (시료번호 90-D02) 사면에서 채취된 두 시료를 제외하고는 서쪽으로 갈수록 수심이 깊어지고 해저산의 연령이 젊어짐에 따라 두께가 점차적으로 얇게 (104~15 mm) 나타난다 (Fig. 1-2). 일반적으로, 망간각들은 괴상 (M), 괴상 다공질 (M(sp)), 다공질 (P)로 표현되는 부분 (zone)으로 나누어지고, 두꺼운 망간각에서는 이들이 서로 교호되어 나타난다 (Table 1-1). 최하부에서 나타나는 괴상 부분은 특정한 구조를 보여주지 않은 채 조밀한 상태로 나타나며 검은 색을 띠고 있다. 다공질층은 Puteanus 등 (1989)에 의해 제안되었던 것처럼 붉은 색의 침상모양으로 산출되는 침철석 (goethite)과 같이 철을 포함하고 있는 광물들을 함유하는 것으로 보인다. 상층부로 갈수록 이들 다공질층은 뚜렷한 구조적 변화를 보이지 않은 채 점이적으로 전이되나 패인자국 (scours)에 의해 경계부가 뚜렷이 구분되어지기도 한다. 망간각을 덮고 있는 하부의 기반암은 석회암, 현무암, 및 망간철 (ferromanganese)과 인



**Water Depth Range of Sampling Sites (m)**

Fig. 1-2. Relation of Fe-Mn crust thickness(mm) to water depth(m) of sampling sites. Oxygen minimum zone lies between 500 to 1,000m water depth (KORDI, 1990). The depth of lysocline was delineated after that (3,400 to 3,600m) on the Ontong Java Plateau, south of Micronesia (Wu and Berger, 1991).



Table 1-1. Sampling sites and visual description of Mn-crusts in the north central and western Pacific seamounts.

Sample No. /Seamount (age)	Location (°N/°W)	Water Depth (m)	Visual Description				
			Substrate	Thickness (mm)	Internal Structures	Surface Texture	
<b>Marshall Islands</b>							
89-D01 Look (87 Ma)	12 07.00/166 13.90 12 07.30/166 13.40	1250-1540	Basalt Breccia	69	M-P-M	Botryoidal	
89-D09 Lomilik (~80 Ma)	11 45.10/161 33.60 11 45.40/161 33.60	2525-2530	Packstone	54	M-P(sM)- M(sP)-M	Slightly Gritty	
89-D11 Lomilik (~80 Ma)	11 37.00/161 41.10 11 40.00/161 39.80	1690-1870	Basalt breccia	104	M(sP)-P(sM) -P-M	Botryoidal	
90-D01 Pohnpei A (?)	10 27.29/156 40.93 10 27.02/156 41.80	2105-2180	Not sampled	85	M-P-M(sP) -M	Botryoidal	
<b>Caroline Islands</b>							
90-D02 Chuuk A (10.9 Ma)	9 50.99/148 27.02 9 50.99/148 27.13	1980-2050	Limestone	20	M-P	Porous, Gritty	
90-D19 Yap I (10 Ma)	6 35.95/142 16.48 6 36.52/142 18.05	2850-3050	Basalt	42	M-P-M-sP -M	Compact, Gritty	
<b>Palau Back-Arc Islands</b>							
91-D16 Palau C (10 Ma)	8 33.49/135 36.33 8 33.65/135 36.79	3260-3400	Basalt	15	M-sP	Porous, Gritty	

Note: Internal structures were described from bottom to surface: M, Massive; P, Porous; sM, slightly Massive; sP, slightly Porous.

산염암 (phosphorite)을 맥상으로 함유한 현무암질 각력암으로 이루어져 있다 (Fig. 1-3). 망간각과 기반암사이의 경계는 기반암의 종류에 상관없이 뚜렷하게 나타난다.

태평양 해저산에서 형성된 두꺼운 망간각은 일반적으로 두부분으로 나누어지며 하부층에서는 인산염암이 포함되어져 있다 (De Carlo et al., 1989b; Pichocki and Hoffert, 1987; Neuman and Stüben, 1991). 망간각의 내부 구조는 일반적으로 점이적으로 변하는 경우와 균열에 의해 뚜렷이 구분되는 경우로 나누어진다. 후자의 경우 균열부분은 일반적으로 철-망간 산화물질들로 채워져 있고 주위 망간각층과는 다른 화학적 성분을 나타낸다 (Fig. 1-4). 한편 전자의 경우 서로 혼합되어 나타나며 화학적성분에서 뚜렷한 변화를 보여주지 않는다. 경우에 따라 지름이 5mm 정도의 탄산염 광물 (Fig. 1-4) 또는 석회질 화석들로 이루어진 덩어리들이 발견되기도 한다. 다양한 크기 (~20  $\mu\text{m}$ 의 지름)의 공극 (vugs)들이 널리 나타나며, 이들은 석회질 화석들이 용해되고 남은 흔적들이다 (Fig. 1-5). 이 공극들은 인산염암광상 (phosphorite deposit)에서 처럼 다량의 칼슘과 인을 함유하는 자형의 인회석 (apatite) 결정들로 채워져 있다 (Cullen and Burnett, 1986).

한편, 망간각의 내부구조는 철-망간산화물 입자들의 성장률, 모양, 및 크기를 기준으로 하여 포도상 (botryoid), 주상 (columnar, pillar), 괴상 (massive), 및 점상 (mottled) 구조 (Fig. 1-6)등 4가지로 분류할 수 있다 (Friedrich and Schmitz-Wiechowski, 1980; von Stackelberg et al., 1984; Hein et al., 1990). 이들 각기 다른 조직은 여러개의 규칙적이고 연속적으로 반복해서 나타나는 형태의 변형인 밝은 회색과 검은 색을 띠는 미세엽리들로 구성되어 있다. Microprobe 점 분석에 의하며 밝은 회색층에는 망간이 풍부한 반면, 보다 어두운 색을 띠는 부분은 철을 많이 함유하는 것으로 나타난다 (Friedrich and Schmitz-Wiechowski, 1980; Neuman and Stüben, 1991; Hein et al., 1992).

뚜렷한 핵물질이 없는 포도상 구조는 연속적인 철-망간산화물 cuspat층

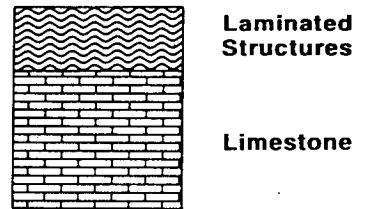
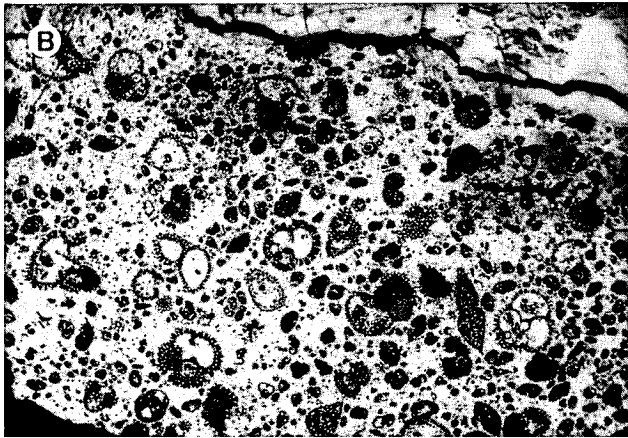
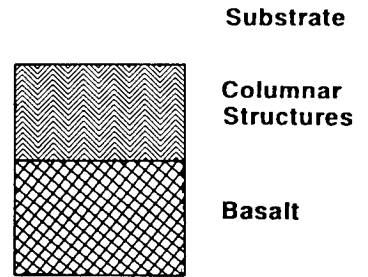
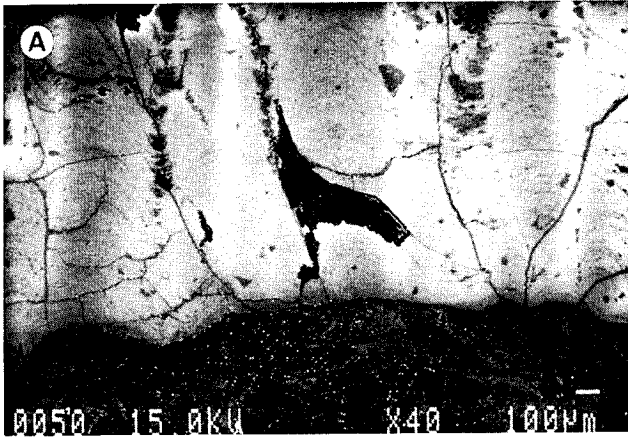


Fig. 1-3. Substrate rocks of crusts; a) basalt consisted of acicular textures and b) phosphatic limestone containing abundant calcareous fossils. Especially, the boundary between the crusts and underlying substrates is sharp. Bar is  $100\mu\text{m}$  on all microphotographs presented in the figures. Symbolic presentation is shown in the right.

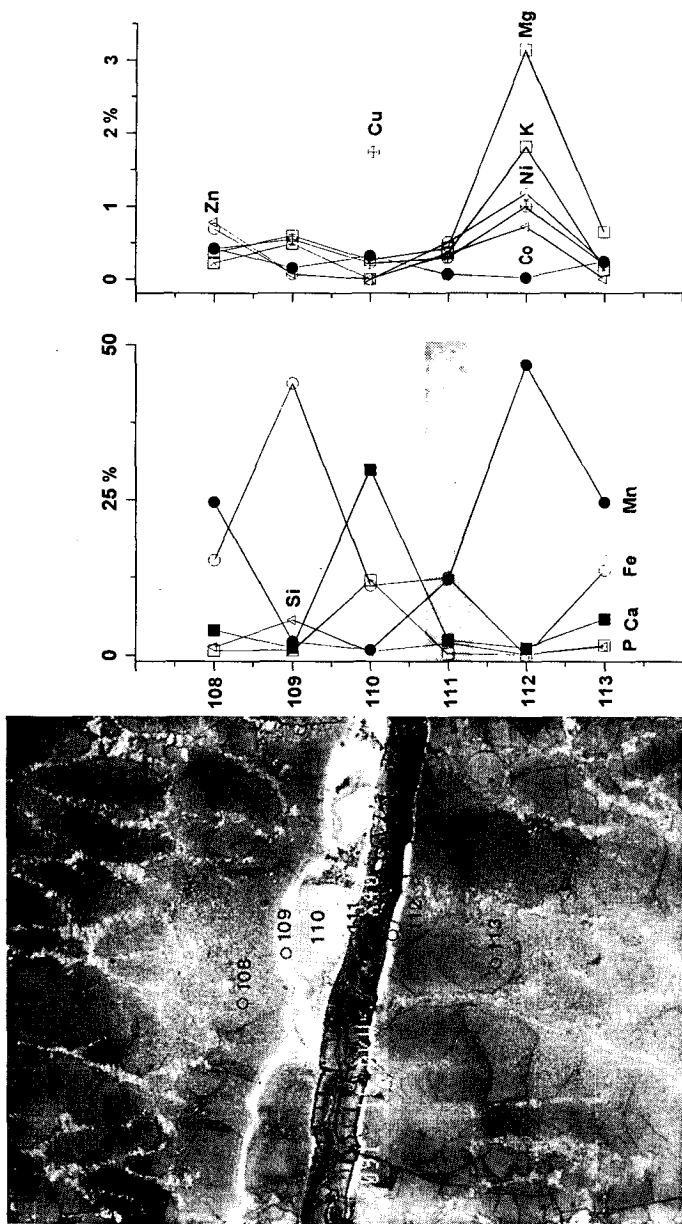


Fig. 1-4. A crack divides sharply the crust (a) that is filled with Fe-Mn oxide aggregates with low Mn and Fe concentrations, different from the adjacent crust layers (b). A phosphatic lump overlies the crack, containing large amounts of Ca and P.

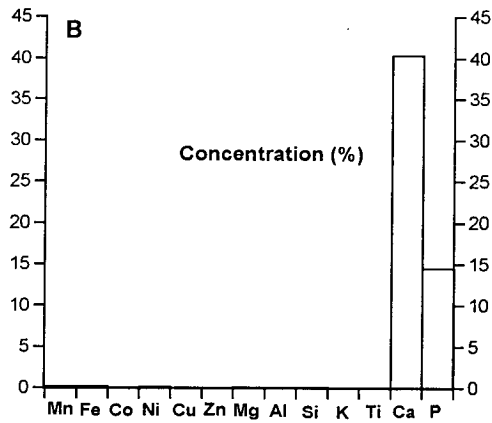
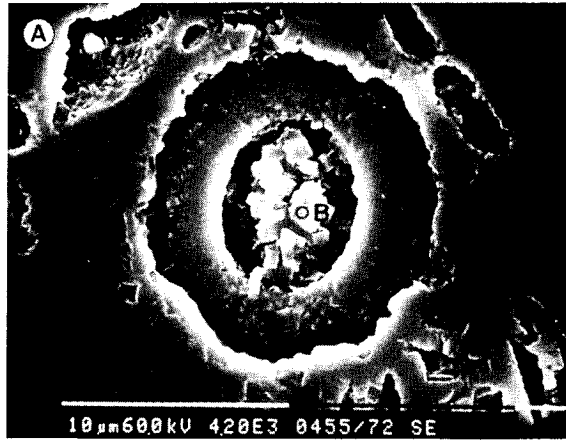
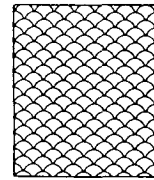
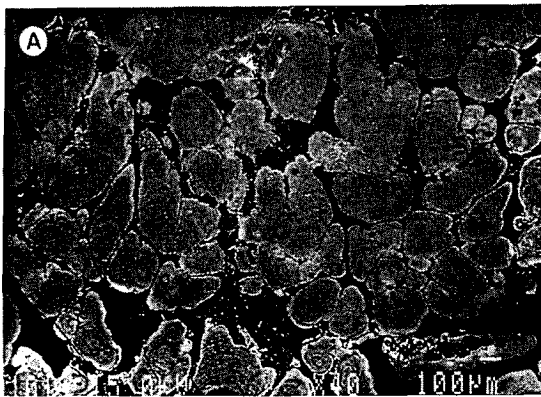
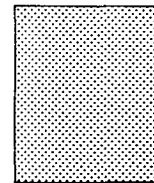
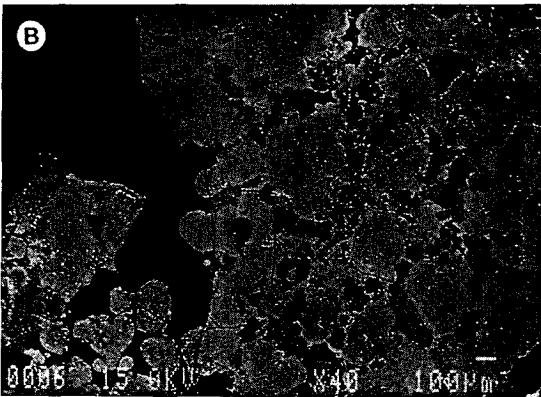


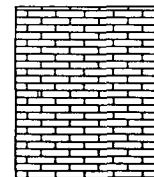
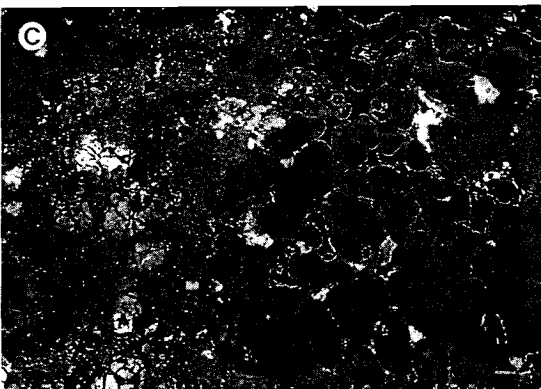
Fig. 1-5. A vug hole partially filled with euhedral phosphorite grains. The shapes of vug indicate that vugs have formed by dissolution of a foraminifera fossil.



**Botryoidal Structures**



**Intertextural Silicates**



**Intertextural Phosphorite**

Fig. 1-6. Growth structures of Fe-Mn oxide aggregates classified on microphotograph. Symbolic presentation is shown on the right side. Botryoidal structures are most distinctive in voids (a), often filled with amorphous silicates (b) and phosphorite grains (c).

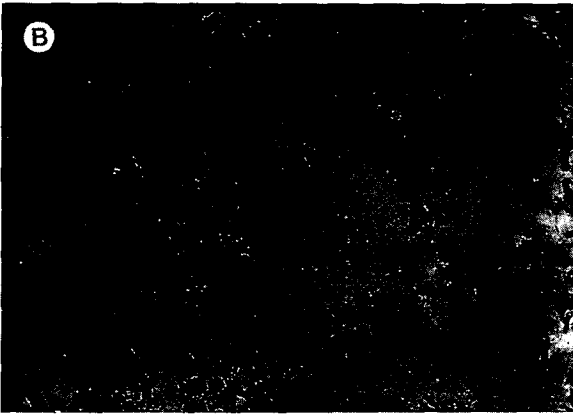
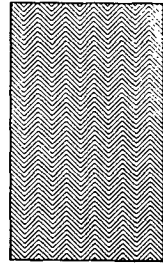
(두께가 10  $\mu\text{m}$  이상)의 특성을 보이는 동심원상의 층을 보인다. 이들은 크기 (지름 200  $\mu\text{m}$  미만)가 비슷하고 공극이 개별적으로 나타난다. Column은 철-망간산화물 입자가 나비에 비해 높이비(나비가 수 100에서 1,000  $\mu\text{m}$ ; 높이가 최고 5 mm)가 큰 특징을 보인다 (Fig. 1-7).

주상구조는 매우 흔하게 나타나며 각각의 층들이 다양하게 조합되어 복잡한 성장형태를 가진다. 큰 공극내에서 이들은 아래쪽에서 위쪽으로 성장되면서 연속적인 층의 결합에 의해 수지상 (dendritic)구조를 형성한다.

괴상(massive)구조는 파형의 얇은 층을 보이거나, 주상구조와 포도상 구조들이 얽혀지는 특징을 보이기도한다 (Fig. 1-8). 점상 (mottled)대는 부분적으로는 불규칙한 형태의 포도상들이 뭉쳐져 있지만 확실한 성장형태가 발견되지 않는다 (Fig. 1-8). 두께가 60 mm 이상 되는 망간각의 경우 하부는 내부조직에 인산염암 입자가 존재하고 있다 (Fig. 1-6c, 1-7c). Microprobe 분석결과, 인산염암 입자들은 칼슘과 인으로만 구성되어 있음이 밝혀졌다 (Fig. 9). 망간각 상부에 플랑크톤기원의 규질화석과 함께 존재하는 무정질의 규소가 주를 이루고 약간의 알루미늄을 함유하고 있다 (Fig. 1-6b, 1-8). 망간각의 구조와 화학적 성분들의 수직변화는 연대를 기준으로 그림 9에 도시하였다. 89-D1 망간각 시료 (두께 65 mm)의 표면은 포도상구조를 보이거나 하부로 갈수록 괴상구조를 보이고, 다공성 현무암기저에는 다공질 괴상구조를 보인다. 현미경사진하에서 보면 이 구조들은 조직층들의 다양한 조합에 의해 복잡한 구조를 보이고, 뾰족하게 침식되어진 표면이 마모되어져 있다. 괴상의 최상부층 (0-8 mm 깊이)은 큰 공극안에서 상호성장하는 철-망간산화물 column의 특징이 보여진다. 이 주상들은 대부분 공극 공간에 철-망간산화물층으로 연결되어 있다. 상부의 뚜렷한 틈과 하부의 amalgated된 표면의 의해 구분되어지는 중간 다공층 (8-25 mm)에서 주상들은 불규칙한 형태의 작은 botryoids와 함께 개개적으로 나타난다. 하부로 갈수록 크고 작은 Vugs들이 보이며 뚜렷한 성장형태를 보이지 않는 다공적이고 얼룩져 있는 특징을 보인다. 큰 석회질 화석껍질은 얇은 철-망간산화물층으로 피복되어 산재하여 있고 종종 작은



**Columnar Structures**



**Intertextural Phosphorite**

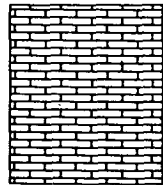
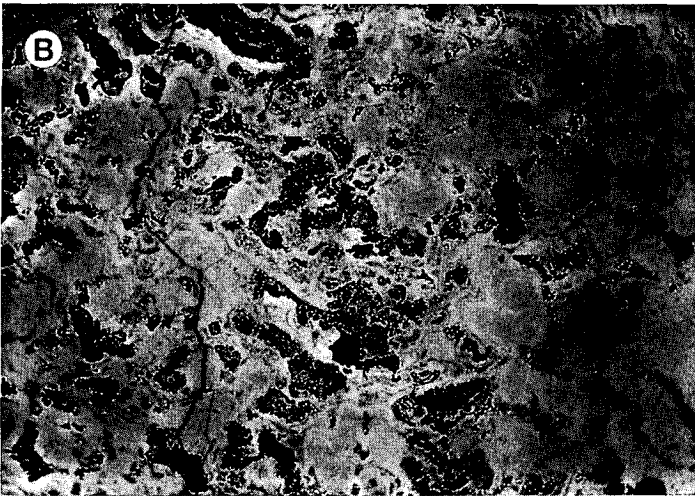
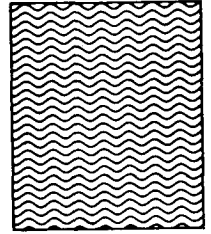


Fig. 1-7. Growth structures consist of compacted and large columns (a), vugged dendritic columns (b), and impregnated phosphorite grains (white veins) (c).





**Laminated  
Structures**



**Mottled  
Structures**

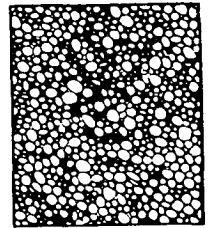


Fig. 1-8. Laminated (a) and mottled structures (b). The former consist generally of compacted columns or botryoids, whereas the latter shows no distinct growth patterns.

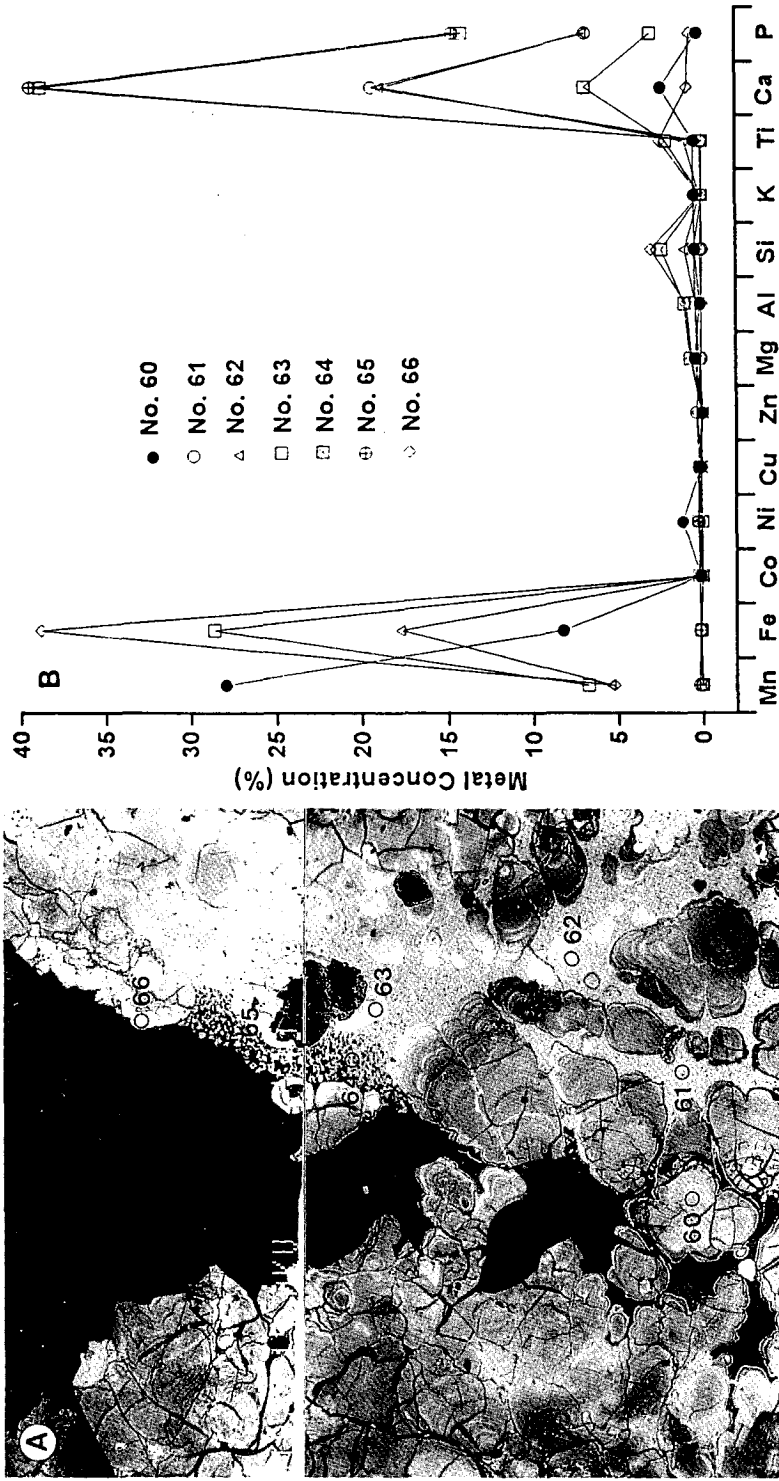


Fig. 1-9. Microphotograph showing phosphorite grains in a large void at the boundary between the younger and older crusts that are progressively compacted to depth (a).

Chemical composition is distinguished by large amounts of Ca and P from the adjacent Fe-Mn oxide aggregates (b).

포도상으로 채워져 있다. 최하부 괴상층은 큰 주상들과 포도상들이 묶여져 있어 상부층과 뚜렷하게 구별된다. 중간 조직공극은 인산염암 입자들로 채워져 있다. 공극들은 4에서 12 mm와 45에서 65 mm깊이에서 주로 관찰되고 그 외의 층에서는 드물다.

#### 나. 시료별 특징

89-D9 망간각 시료는 두께가 54 mm이고, 인산염암 광맥으로 틈새가 채워진 현무암 기저위에 분포한다. 최상부는 철-망간산화물층위에 나타나는 주상 성장구조가 잘려져 나가 침식된 표면같이 마모되어있다. 최상부 (2-6 mm)는 잘 발달되어 있고 서로 연관되어 성장하는 주상구조가 나타난다. 이 주상구조들은 작은 주상과 포도상 (6-10 mm)들로 구성된 부분 위에 놓여 있고, 큰 공극에서 수지상형태의 잘 발달된 큰 주상들의 하부에 나타난다. 중간부분 (27-32 mm)에는 인산염암 입자들로 채워져 있는 공극에 불분명한 동심원 판상을 보이는 작은 포도상이 나타난다. 최하부에는 큰 주상들과 인산염암에 의해 구분되어지는 포도상이 나타난다. 특히 39에서 40 mm 부분에는 철-망간산화물 판상과 얇은 포도상이 자라는 틈이 나타난다 (Fig. 1-4). 이 틈에서는, 철-망간산화물 판상이 소량의 미량금속을 함유하면서 같은 양 (12%)의 철과 망간을 함유하고 있다. 틈 바로 밑에서는, 망간이 풍부 (48%) 하지만 철은 고갈 (2%) 되어 있다. 한편, 틈의 윗 부분은 철이 풍부 (40%)하고, 망간이 고갈 (2%)된 층으로 덮여진 인산염암 쇄설물이 특징적으로 나타난다. 공극들은 흔히 나타나며 특히, 12에서 20 mm와 30에서 40 mm깊이에서 주로 나타난다.

89-D11 망간각 시료는 두께가 104 mm이며, 인산염암이 충전된 현무암질 각력암위에 분포한다. 표면구조들은 하부로 가면서 괴상, 다공질, 그리고 괴상과 포도상으로 변화한다. 최상부 (0-4 mm)는 괴상의 상부층과 조밀하게 충전된 포도상구조로 구성되어 있다. 35에서 40 mm층 사이에는 망간각이 mottled된 구조를

보인다. 큰 공극 (최대지름; 100  $\mu\text{m}$ )들이 산재해 있고 특히, 표면 (0-20 mm)부와 최하부에 주로 나타난다.

90-D1 망간각시료는 두께가 85 mm이며, 기반암은 채취되지 않았다. 최상부는 부유성 규질생물 껍질들이 산재된 포도상구조로 구성 되어있다. 1에서 10 mm층은 크고 불규칙한 주상들이 조밀하게 성장한 흔적들로 형성된 *crenulating lamination*을 보이는 괴상구조를 보인다. column의 흔적들은 column들로 구성된 10에서 27 mm층에서 확실하게 나타난다. 27-33 mm층 상부에는 큰 공극들이 산재하고 있다. 33에서 63 mm 부분은 최상부와 비슷한 괴상구조를 보인다. 하부 (63-80 mm)는 인산염암으로 조밀하게 충전된 column으로 구성되어 있고, column의 최하부 위에 덮여있다. 공극들은 2에서 60 mm 사이에 산재되어 있는 반면 하부에서 매우 드물게 관찰된다.

90-D2 망간각시료는 주로 석회질 화석 (Ca, 약 40%)으로 이루어진 석회암기저 위에 약 20 mm의 두께로 존재한다. 이 망간각시료는 18 mm층에서 두 부분으로 구분되어 성장형태가 뚜렷하게 변화한다. 이 경계는 수평의 압력을 받은 공극에 의해 구분된다. 불규칙한 표면위에는 철-망간 산화물층으로 부분적으로 덮여져 있는 방산층 껍질이 풍부하고 이들은 깊이에 따라 비정질 규질 층으로 변한다 (Fig. 1-10). 최상부는 주로 주상구조로 구성되어 있다. 8에서 12 mm 부분에는 큰 (300  $\mu\text{m}$  이상) 포도상 구조 (종종 column)가 보이고 작은 *botryoids*와 *opaline*물질로 채워져 얼룩져 있으며, 최하부는 주상구조로 되어 있다.

90-D19 망간각시료는 두께가 42 mm이고, 하부로 가면서 괴상, 다공질, 괴상, 다공질에서 괴상으로 변하는 구조를 보인다. 기저부는 대부분 인산염암으로 충전된 현무암으로 이루어져 있다. 현미경상에서 보면 조성변화가 분명하게 관찰되고 경계부는 점이적 변화가 관찰된다. 최상부층의 괴상대 (0~8 mm)는 매우 밀집해 있어 판상으로 보이는 큰 주상구조로 구성되어 있다. 8~12 mm

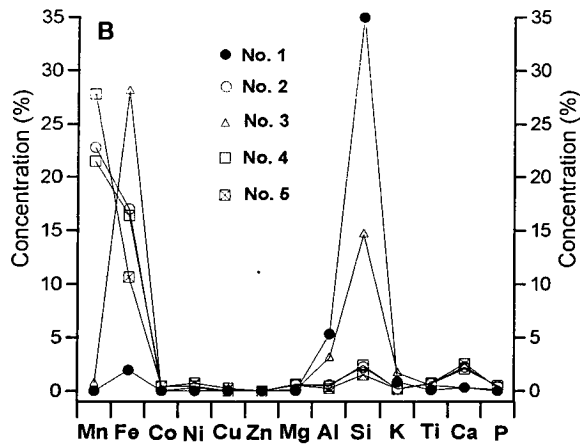


Fig. 1-10. Planktonic siliceous tests partially coated with Fe-Mn oxide micro-layers and amorphous silicate layers intercalated in interstitial spaces of Fe-Mn oxide aggregates (a). The former contain exclusively Si and Al, whereas the latter are characterized by the abundance of Si and often Fe (b).

부분은 비정질 opaline 물질로 경계가 구분되는 포도상구조가 주로 나타나며, 내부의 성장구조나 하향성장의 특성은 보이지 않는다. 12~34 mm 부분은 큰 주상구조 (최고 나비가 600  $\mu\text{m}$ 이고 길이가 4 mm이하)들이 보이고 수지상 층이 보인다. 34~38 mm까지의 부분은 공극이 많으며 공극내에는 각기 분리된 포도상으로 구성되어 있다. 최하부 (38~42 mm)는 주상의 경계가 불분명하고 조밀하게 밀집해 있는 주상구조를 이룬다. 공극은 최상층과 몇몇 깊이 (23, 24, 31 mm)에서 발견된다.

91-D16 망간각시료는 현무암 위에 15 mm 두께로 피복되어 있고 다공질을 보인다. 상부로 갈수록 크기가 작아지는 주상으로 구성되어 있다. 최하부 (8~15 mm)의 주상들은 크기가 500  $\mu\text{m}$ , 높이가 최고 6 mm이며 기반암쪽으로 조밀하게 들어차 있다. 중간부분 (3-8 mm)의 큰 공극에서 주상은 보다 작고 최상부 (0-3 mm)에 밀접히 내부에서 성장한 주상으로 변하는 수지상 구조를 형성한다. 공극들은 최하부를 제외하고 망간각 전체에 걸쳐 산재한다.

## 2. 망간각의 연령과 성장을

망간각의 연령과 성장율은 후기 올리고세에서 현세까지의 지자기 시간으로 연대가 입증된 Hodell et al. (1994)의 신 제3기 (neogene)해수의  $\text{Sr}^{86}/\text{Sr}^{87}$ 곡선에 준하여 측정된  $\text{Sr}^{86}/\text{Sr}^{87}$ 비를 계산하였다. 연대와 충전된 인산염암을 근거로 망간각의 성장시기는 두 단계로 나누어진다. 전기 세대는 마이오세 초기와 후기를 포함하고 (20-5 Ma), 후기 세대는 플라이오세에서 현재까지 (5-0 Ma) 동안 성장한 것이다 (Fig. 1-11). 이 성장단계의 연령은 Horizon Guyot의 망간각에서 측정된  $\text{Sr}^{86}/\text{Sr}^{87}$ 비에 의해 측정된 시기에 해당한다 (Hein et al., 1992). 한편 초기 올리고세와 중기 마이오세동안 성장한 중앙태평양의 망간각의 성장을 (5 mm/Myr)과는 매우 상이하다. 인접한 층간의 연령차에 의해 계산할 수 있는 성

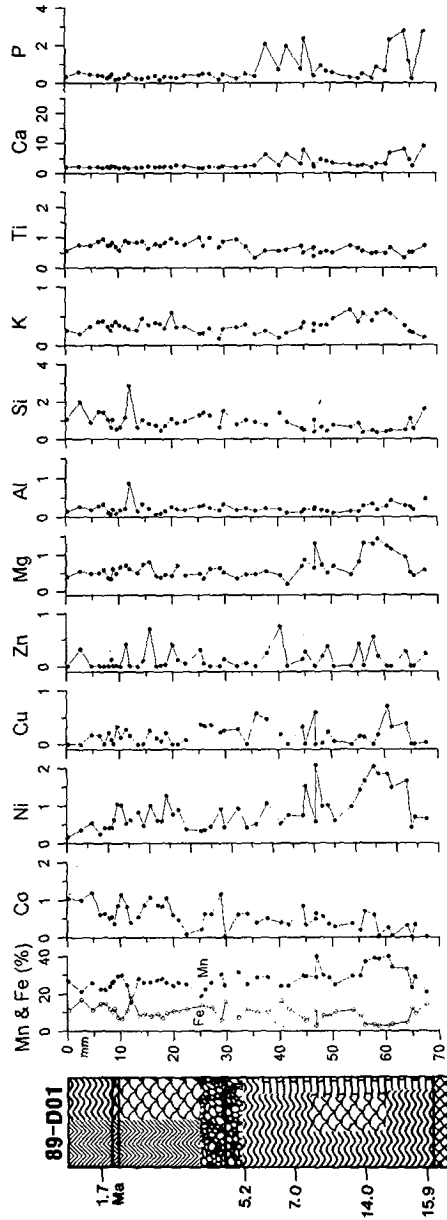


Fig. 1-11. Ages and vertical distributions of internal structures and chemical composition of 89-D01, -D09, -D11, 90-D01, -D02, -D19, and 91-D16. Ages were determined by plotting isotope Sr86/Sr87 ratios on the Cenozoic seawater curve (Hodell, 1992). Internal structures were delineated based on the classified units in Fig. 6. Chemical composition was determined at points by using a microprobe.

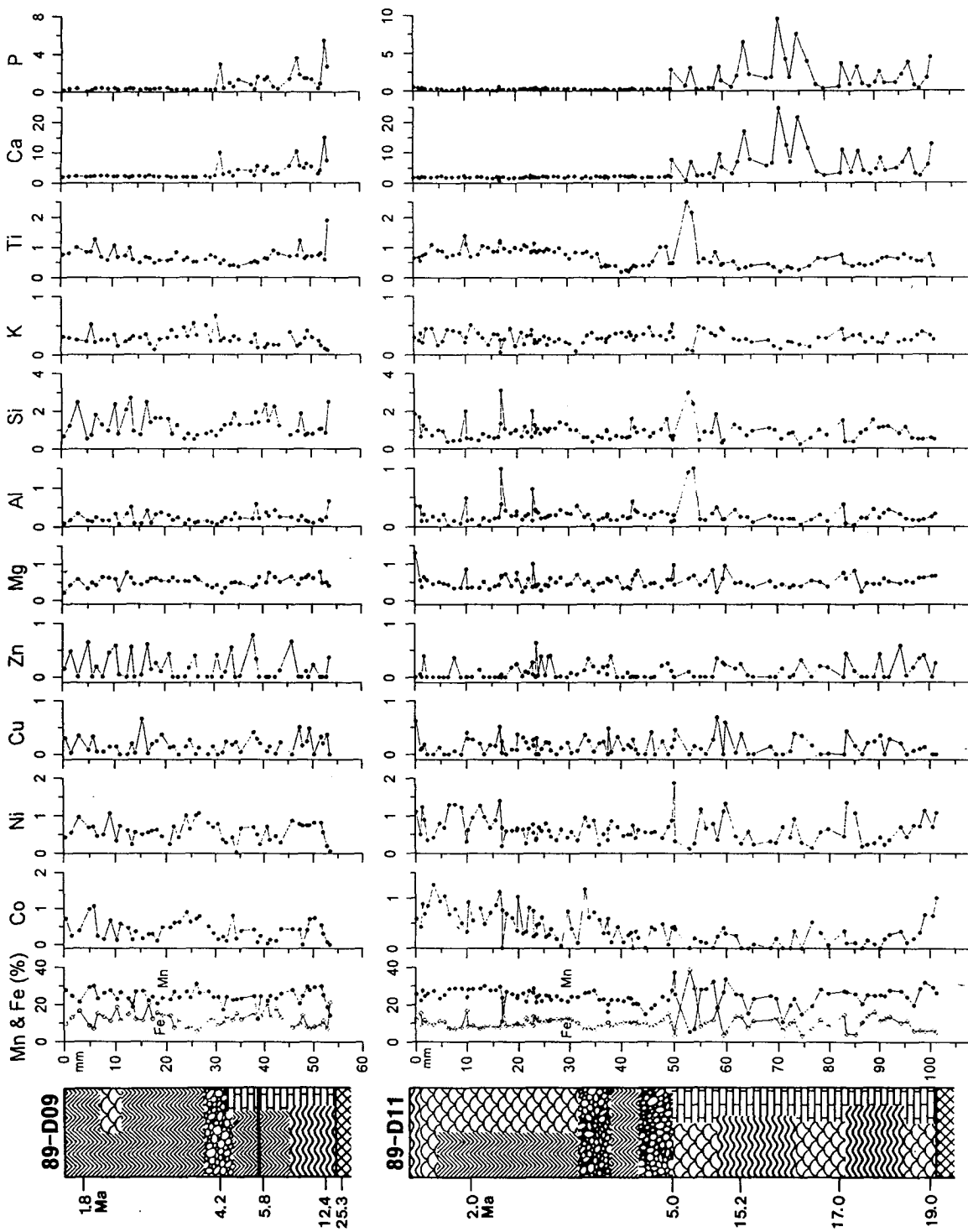


Fig. 1-11. Continued.



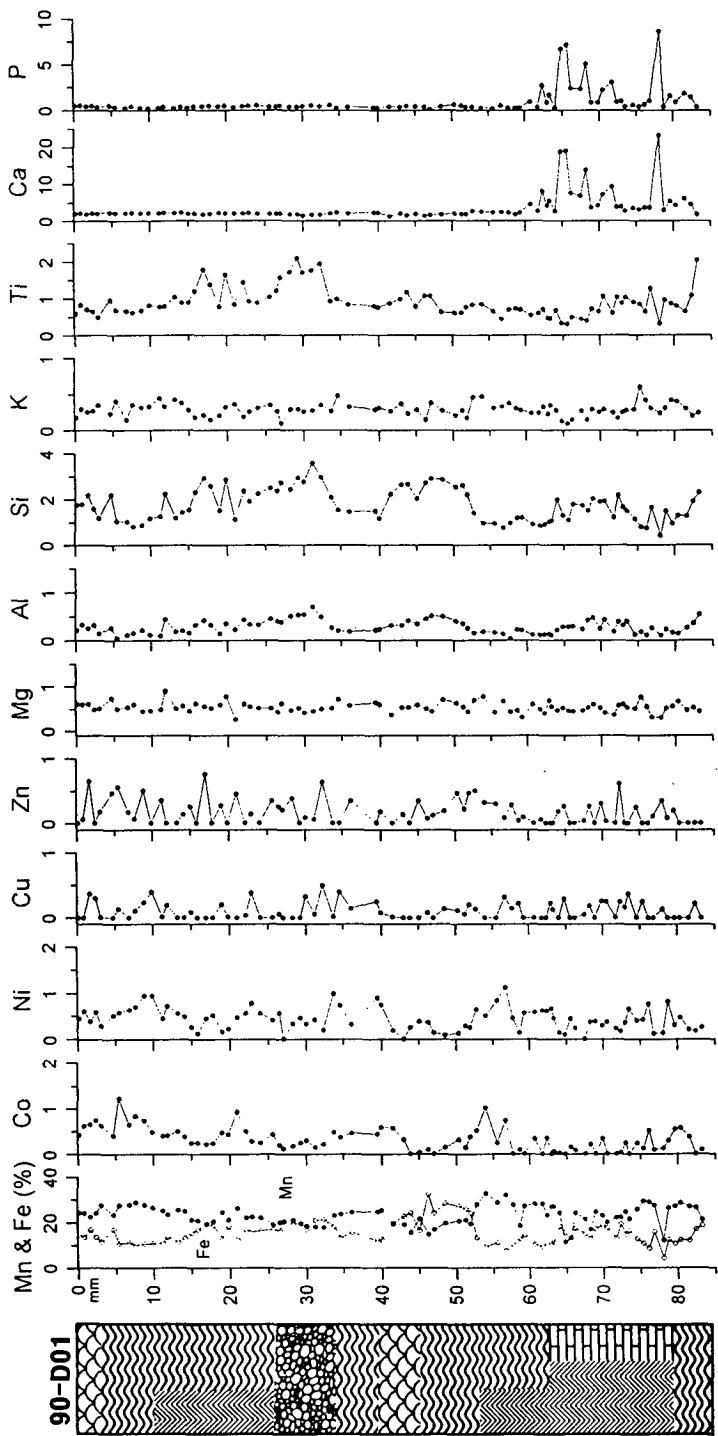


Fig. 1-11. Continued.

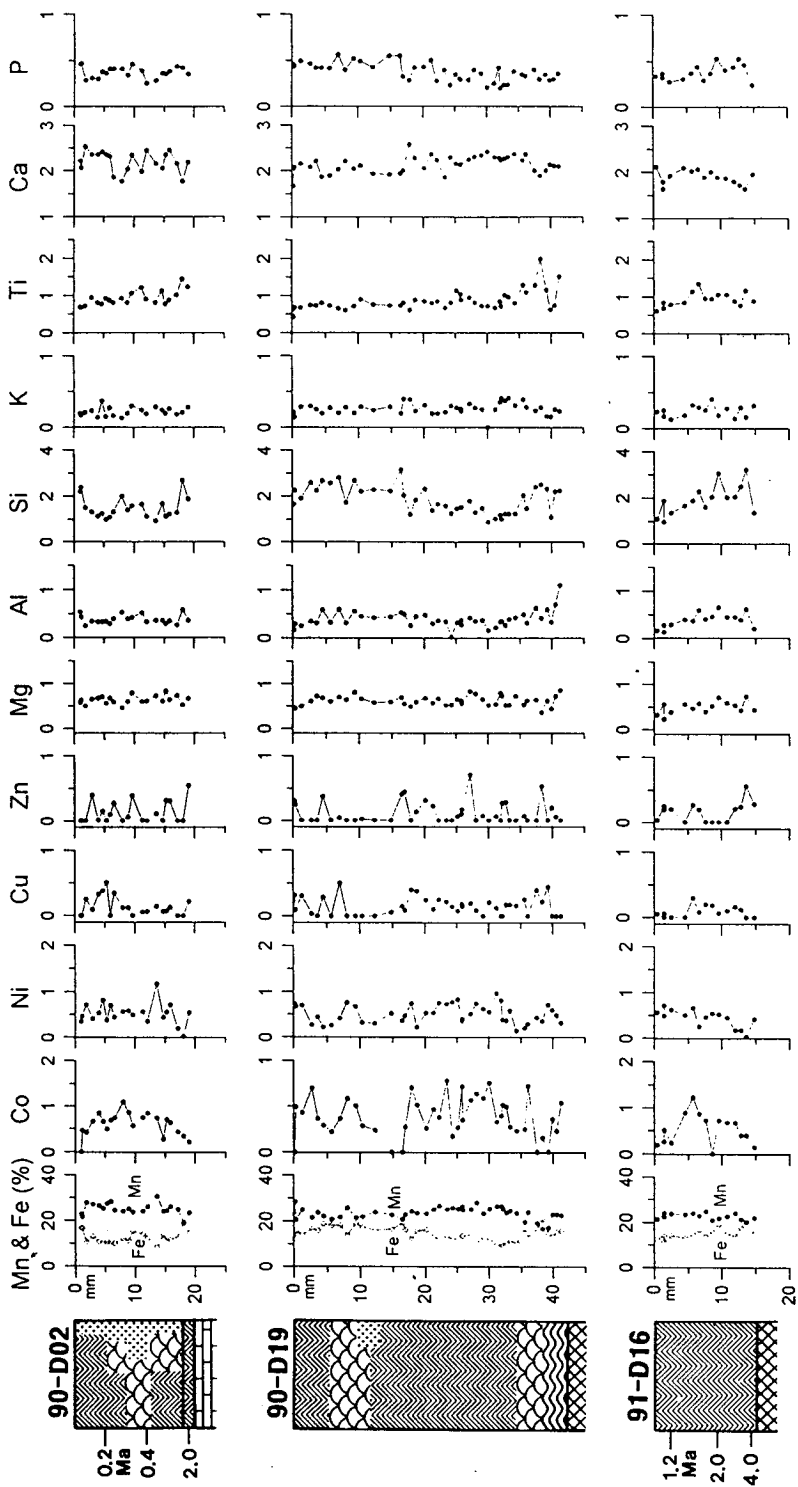


Fig. 1-11. Continued.

장율은 망간각 내에서 다르게 나타난다. 팔라우섬 해산의 서부지역에의 91-D16 망간각 시료 (4.1 mm/My)를 제외하고, 후기 망간각의 성장속도는 전기 망간각의 성장속도 (2.5-3.6 mm/My)보다 2-4배 빠른 (6-10 mm/My)특성을 보인다. 후기 망간각의 빠른 성장은 성장율이 느린 태평양 해산의 성장율과는 대조적이다 (Segl et al., 1984; Futa et al., 1988; Ingram et al., 1990). 두 층간의 경계는 항상 mottled structure의 상부에서 구분된다 (Fig. 1-11). 전기 망간각의 미세층리에는 포도상과 주상구조가 드문 반면, 후기 망간각은 주상과 포도상구조가 주를 이룬다.

### 3. 조 성

X선 회절분석 결과, 망간각은 주로 비정질의 철과 망간의 산화 광물로 구성되어 있다 (Fig. 1-12). 두꺼운 망간각 (89-D1, -D9, D11, 90-D1 시료)내에서, 후기 망간각 부분은 결정화된 탄산염-인회석, 인회석, 방해석으로 구성된 인산염암을 함유하고 있다. 일부 망간각의 중심부에서 공극들이 보이나, 침철석은 발견되지 않는다. 이러한 광물학적 특성들은 순수하게 수성기원의 망간각 특성과 일치한다 (Puteanus et al., 1989; Hein et al., 1992). 인산염암 입자들은 주로 칼슘 (평균 24.2~37.5%)과 인 (9.1~14.2%)를 포함하고, Ca/P의 비가 2.6~2.7 (Table 1-2)이다 (Manheim and Gulbrandsen, 1979, Hein et al., 1993). 성장시기의 차이를 보이는 두 층 (89-D11망간각시료) 경계부의 큰 공극내에서 입자가 다져짐으로 인하여 인산염암 입자의 칼슘과 인의 농도는 감소한다 (Fig. 1-9).

철-망간 산화물입자물질들은 망간과 철이 주요 화학조성을 이루며, 농도는 각각 평균 23.5~27.6%, 9.8~15.5%이다 (Table 1-2; Fig. 1-11). 망간각 내부에서 망간과 철 농도는 반비례하게 분포한다. 망간 함량은 철 함량에 비해 변화폭이 3배 정도 적다 (89-D11망간각의 하단부는 제외). 망간과 철 농도는 생물기원의 실

Table 1-2. Summary of metal concentrations in Fe-Mn oxide texture, intertextural silicates and phosphorite, and substrate rocks of Mn-crusts in the north central and western Pacific.

	89-D01						89-D09						89-D11					
	Fe-Mn Oxide		Inter- textural		Sub- strate		Fe-Mn Oxide		Inter- textural		Substrate		Fe-Mn Oxide		Inter- textural		Substrate	
	Younger Crust	Older Crust	Phos.	Phos.	Basalt	Basalt	Younger Crust	Older Crust	Phos.	Phos.	Basalt	Basalt	Younger Crust	Older Crust	Phos.	Phos.	Basalt	Basalt
Mn	15.3-31.6 (25.5)	20.7-39.9 (30.6)	0.1-0.3 (0.2)	0.1-0.3 (0.2)	0.1	0.1	18.9-31.2 (25.0)	12.1-30.1 (23.5)	0.0-18.7 (3.9)	0.0-0.8 (0.4)	0.0-0.0	0.0-0.0	11.0-37.4 (24.3)	5.2-33.8 (23.6)	0.0-26.7 (6.3)	0.0-0.7 (0.3)	0.0-0.9 (0.2)	
Fe	6.0-19.2 (11.1)	2.7-16.1 (8.0)	0.2-1.4 (0.8)	0.2-1.4 (0.8)	10.5	10.5	5.5-21.1 (12.2)	7.1-21.1 (12.4)	0.4-11.1 (5.0)	9.0-9.4 (9.3)	0.1-31.0 (10.5)	0.1-31.0 (10.5)	3.3-21.7 (10.2)	3.3-38.8 (10.8)	0.1-25.5 (4.5)	0.0-8.1 (5.5)	0.1-0.4 (0.2)	
Mn/Fe	0.8-5.1 (2.6)	1.5-14.5 (5.8)	0.1-1.0 (0.4)	0.1-1.0 (0.4)	0.01	0.01	0.9-5.7 (2.4)	0.7-4.0 (2.1)	0.0-2.7 (0.6)	0.0-0.1 (0.04)	0.0-0.0	0.0-0.0	0.5-11.5 (2.6)	1.1-7.7 (3.0)	0.0-6.4 (1.3)	0.0-0.10 (0.04)	0.0-2.6 (0.7)	
Co	0.00-1.19 (0.68)	0.00-0.83 (0.36)	0.00-0.00 (0.00)	0.00-0.00 (0.00)	0.17	0.17	0.11-1.07 (0.45)	0.00-0.81 (0.31)	0.00-0.32 (0.12)	0.00-0.00 (0.06)	0.01-0.09 (0.06)	0.01-0.09 (0.06)	0.00-1.26 (0.50)	0.00-1.00 (0.21)	0.00-1.00 (0.12)	0.00-0.01 (0.00)	0.00-0.09 (0.02)	
Ni	0.15-1.26 (0.60)	0.41-2.08 (1.16)	0.00-0.12 (0.08)	0.00-0.12 (0.08)	0.06	0.06	0.24-1.07 (0.64)	0.03-0.87 (0.52)	0.00-0.25 (0.12)	0.00-0.32 (0.11)	0.00-0.15 (0.08)	0.00-0.15 (0.08)	0.20-1.90 (0.66)	0.12-1.35 (0.57)	0.00-1.35 (0.25)	0.00-0.59 (0.20)	0.00-0.51 (0.12)	
Cu	0.00-0.57 (0.15)	0.00-0.71 (0.18)	0.00-0.16 (0.06)	0.00-0.16 (0.06)	0.06	0.06	0.00-0.66 (0.15)	0.00-0.50 (0.20)	0.00-0.51 (0.24)	0.00-0.31 (0.15)	0.00-0.22 (0.14)	0.00-0.22 (0.14)	0.00-0.62 (0.16)	0.00-0.69 (0.16)	0.00-0.43 (0.11)	0.00-0.62 (0.17)	0.00-0.34 (0.08)	
Zn	0.00-0.70 (0.10)	0.00-0.75 (0.17)	0.00-0.00 (0.00)	0.00-0.00 (0.00)	0.19	0.19	0.00-0.61 (0.19)	0.00-0.78 (0.15)	0.00-0.43 (0.10)	0.29-0.49 (0.38)	0.00-0.02 (0.01)	0.00-0.02 (0.01)	0.00-0.64 (0.10)	0.00-0.58 (0.13)	0.00-0.51 (0.12)	0.00-0.31 (0.17)	0.00-0.53 (0.12)	
Mg	0.33-0.77 (0.51)	0.19-1.43 (0.79)	0.05-0.28 (0.19)	0.05-0.28 (0.19)	1.68	1.68	0.21-0.76 (0.51)	0.21-0.78 (0.53)	0.04-0.50 (0.21)	1.27-1.93 (1.59)	0.00-0.84 (0.30)	0.00-0.84 (0.30)	0.24-1.30 (0.52)	0.22-0.94 (0.52)	0.02-0.67 (0.28)	0.00-1.71 (0.87)	0.00-0.10 (0.05)	
Al	0.06-0.86 (0.22)	0.10-0.46 (0.23)	0.04-0.59 (0.31)	0.04-0.59 (0.31)	7.46	7.46	0.07-0.52 (0.21)	0.09-0.67 (0.27)	0.00-0.61 (0.28)	4.63-7.13 (5.74)	0.00-1.52 (0.51)	0.00-1.52 (0.51)	0.04-1.00 (0.22)	0.04-1.00 (0.21)	0.00-1.59 (0.36)	2.8-11.40 (6.6)	0.13-0.75 (0.41)	
Si	0.43-2.83 (1.05)	0.34-1.58 (0.69)	0.00-1.32 (0.65)	0.00-1.32 (0.65)	23.05	23.05	0.49-2.72 (1.29)	0.73-2.51 (1.37)	0.00-1.90 (0.76)	17.0-22.4 (19.2)	0.02-1.75 (0.63)	0.02-1.75 (0.63)	0.36-3.14 (0.96)	0.22-3.01 (0.93)	0.00-5.03 (0.91)	8.7-29.1 (18.4)	0.00-1.10 (0.66)	
K	0.12-0.56 (0.32)	0.13-0.62 (0.37)	0.00-0.24 (0.09)	0.00-0.24 (0.09)	3.10	3.10	0.09-0.68 (0.33)	0.09-0.42 (0.23)	0.00-0.26 (0.10)	1.74-2.99 (2.46)	0.00-0.00 (0.00)	0.00-0.00 (0.00)	0.00-0.53 (0.30)	0.06-0.48 (0.28)	0.00-0.61 (0.16)	1.41-4.43 (2.24)	0.03-0.20 (0.09)	
Ti	0.33-1.00 (0.78)	0.33-0.74 (0.55)	0.00-0.35 (0.12)	0.00-0.35 (0.12)	0.62	0.62	0.48-1.28 (0.71)	0.36-1.90 (0.70)	0.00-0.60 (0.25)	0.23-5.78 (2.09)	0.02-0.56 (0.63)	0.02-0.56 (0.63)	0.19-1.39 (0.77)	0.19-2.49 (0.59)	0.00-1.00 (0.21)	0.02-0.69 (0.24)	0.00-0.04 (0.01)	
Ca	1.49-2.63 (2.05)	1.92-9.00 (4.25)	36.3-40.4 (37.5)	36.3-40.4 (37.5)	4.09	4.09	1.77-2.53 (2.12)	2.36-15.12 (5.44)	15.1-36.61 (30.5)	0.58-5.39 (2.23)	14.0-40.6 (31.7)	14.0-40.6 (31.7)	0.95-2.58 (2.03)	0.87-24.66 (7.15)	10.6-39.6 (27.6)	0.35-12.12 (5.29)	37.4-38.7 (38.1)	
P	0.17-0.58 (0.34)	0.23-2.75 (1.08)	13.6-15.0 (14.2)	13.6-15.0 (14.2)	1.87	1.87	0.14-0.44 (0.30)	0.25-5.47 (1.49)	5.5-15.6 (11.9)	0.05-2.02 (0.72)	0.3-14.9 (6.9)	0.3-14.9 (6.9)	0.12-0.59 (0.29)	0.24-9.54 (2.24)	3.2-14.8 (10.4)	0.00-4.40 (1.14)	14.5-15.0 (14.8)	
Ca/P	3.2-13.3 (6.7)	2.8-10.1 (5.4)	2.4-2.8 (2.7)	2.4-2.8 (2.7)	2.19	2.19	4.4-13.9 (7.7)	2.8-9.3 (4.6)	2.2-2.8 (2.6)	2.7-10.9 (6.9)	2.7-161.2 (55.5)	2.7-161.2 (55.5)	1.6-16.6 (7.7)	1.3-11.5 (4.2)	2.3-3.3 (2.7)	2.8-122.1 (4.7)	2.5-2.6 (2.6)	
Data	29	21	4	4	1	1	27	22	7	3	3	3	62	38	33	4	6	

\* Phos. represents phosphorite particles.

Table 1-2. Continued.

	90-D01		90-D02		90-D19		90-D16		(Younger Crust)		
	Fe-Mn Younger Crust	Oxide Texture	Inter- textural Phos.	Fe-Mn Oxide Texture	Inter- textural Silicate	Substrate Basalt	Fe-Mn Oxide Texture	Inter- textural Silicate	Substrate Basalt	Fe-Mn Oxide Texture	Substrate Basalt
Mn	14.6-32.8 (22.6)	11.1-29.2 (23.4)	0.1-16.6 (7.3)	18.9-30.6 (25.0)	0.0-0.7 (0.4)	0.1-0.1 (0.1)	16.6-28.5 (23.5)	0.3-1.0 (0.6)	0.0-3.4 (0.7)	20.1-24.8 (22.6)	0.08
Fe	7.3-32.2 (16.4)	4.2-19.1 (13.5)	4.2-22.9 (11.5)	8.3-19.4 (12.6)	1.9-31.0 (22.2)	0.0-0.2 (0.1)	9.2-21.0 (14.4)	30.4-30.8 (30.6)	0.1-15.5 (5.42)	11.2-21.1 (15.1)	0.64
Mn/Fe	0.5-4.4 (1.6)	0.7-3.4 (1.9)	0.0-2.9 (0.8)	1.0-3.7 (2.1)	0.00-0.02 (0.02)	0.4-	0.8-2.8 (1.7)	0.01-0.03 (0.02)	0.0-1.3 (0.5)	1.0-2.0 (1.5)	
Co	0.00-1.02 (0.39)	0.00-0.56 (0.17)	0.00-0.22 (0.06)	0.00-1.08 (0.59)	0.00-0.35 (0.05)	0.00-0.04 (0.01)	0.00-0.78 (0.38)	0.00-0.00 (0.17)	0.00-0.08 (0.17)	0.00-1.23 (0.53)	0.11
Ni	0.00-1.12 (0.46)	0.00-0.82 (0.37)	0.00-0.44 (0.17)	0.03-1.17 (0.52)	0.00-0.22 (0.03)	0.00-0.44 (0.15)	0.13-0.97 (0.51)	0.00-0.42 (0.16)	0.00-0.38 (0.11)	0.03-0.71 (0.44)	0.13
Cu	0.00-0.49 (0.10)	0.00-0.37 (0.10)	0.00-0.29 (0.14)	0.00-0.50 (0.13)	0.00-0.23 (0.08)	0.00-0.02 (0.01)	0.00-0.50 (0.15)	0.00-0.34 (0.17)	0.00-0.41 (0.17)	0.00-0.30 (0.09)	0.05
Zn	0.00-0.76 (0.20)	0.00-0.61 (0.09)	0.00-0.35 (0.13)	0.00-0.55 (0.13)	0.00-0.22 (0.04)	0.00-0.23 (0.08)	0.00-0.71 (0.12)	0.00-0.61 (0.29)	0.00-0.05 (0.01)	0.00-0.56 (0.17)	0.64
Mg	0.25-0.90 (0.55)	0.30-0.77 (0.51)	0.11-0.54 (0.37)	0.46-0.83 (0.64)	0.00-0.22 (0.07)	0.00-0.03 (0.01)	0.35-0.85 (0.62)	0.00-0.10 (0.06)	0.00-1.65 (0.52)	0.23-0.74 (0.50)	0.00
Al	0.10-0.70 (0.31)	0.11-0.54 (0.25)	0.11-0.71 (0.30)	0.25-0.59 (0.38)	1.75-5.31 (3.01)	0.02-0.07 (0.04)	0.03-1.10 (0.40)	2.63-2.80 (2.71)	0.5-11.1 (6.8)	0.14-0.66 (0.39)	14.58
Si	0.77-3.59 (1.97)	0.40-2.30 (1.40)	0.08-1.52 (0.80)	0.93-2.70 (1.52)	8.5-35.0 (15.9)	0.04-0.16 (0.09)	0.90-3.15 (1.85)	15.1-15.4 (15.2)	5.3-27.3 (19.5)	0.96-3.22 (1.93)	24.39
K	0.10-0.48 (0.29)	0.10-0.61 (0.28)	0.00-0.24 (0.07)	0.13-0.37 (0.22)	0.52-1.78 (1.27)	0.02-0.05 (0.04)	0.00-0.41 (0.26)	1.69-1.82 (1.77)	0.19-4.81 (3.72)	0.13-0.41 (0.24)	0.42
Ti	0.45-2.10 (0.99)	0.30-2.05 (0.75)	0.09-0.81 (0.38)	0.68-1.44 (0.92)	0.08-0.81 (0.54)	0.00-0.08 (0.03)	0.43-1.99 (0.85)	0.47-0.66 (0.53)	0.00-1.60 (0.49)	0.61-1.35 (0.94)	0.04
Ca	1.33-2.63 (2.00)	1.79-23.2 (6.60)	13.9-37.1 (24.2)	1.77-2.54 (2.20)	0.14-0.93 (0.36)	11.6-40.5 (30.8)	1.67-2.57 (2.14)	0.15-0.25 (0.21)	0.02-0.98 (0.32)	1.62-2.12 (1.89)	8.61
P	0.15-0.57 (0.40)	0.30-8.65 (2.00)	5.1-13.6 (9.1)	0.25-0.47 (0.37)	0.00-0.10 (0.05)	4.6-15.5 (11.6)	0.20-0.56 (0.37)	0.01-0.05 (0.03)	0.00-0.09 (0.04)	0.24-0.53 (0.38)	0.05
Ca/P	3.0-10.9 (5.4)	2.7-8.9 (4.5)	2.5-2.8 (2.7)	4.2-9.8 (6.1)	1.7-	2.5-2.8 (2.6)	3.5-12.1 (6.3)	0.01-0.03 (0.02)	2.7-	3.3-8.3 (5.3)	
Data	53	29	9	21	7	3	43	3	5	15	1

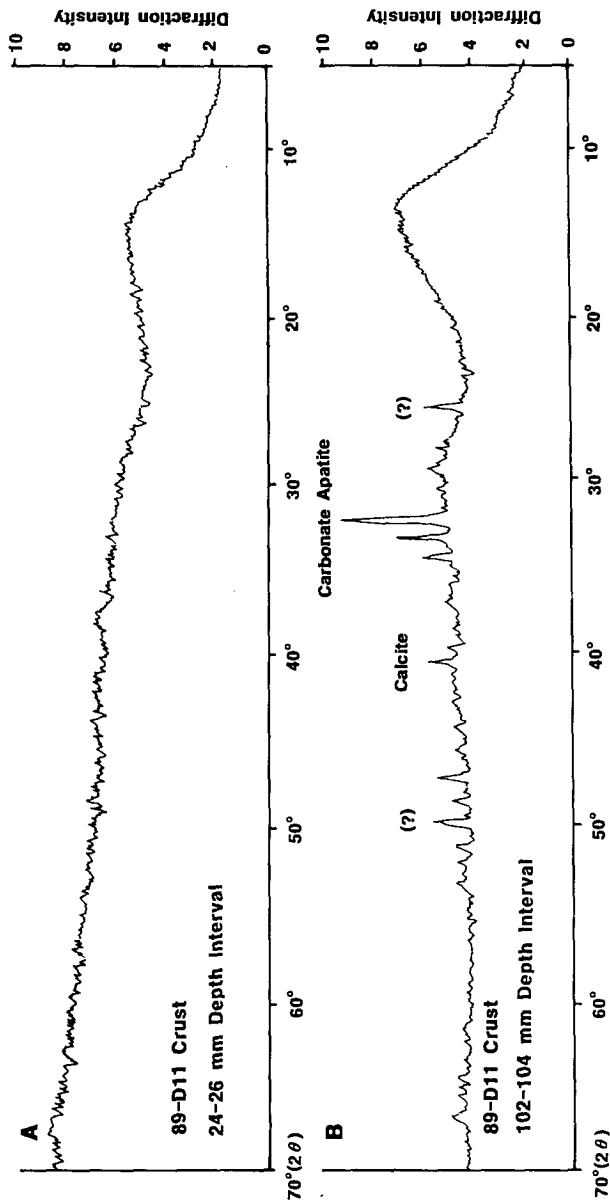


Fig. 1-12. X-ray diffraction patterns of Mn-crust components, showing no peaks of Fe- and Mn-oxide and other mineral species in the younger crust (a, 24-26 mm depth interval of 89-D11 crust) except for calcite, apatite, and carbonate apatite in the older crust (b, 100-102 mm depth interval of 89-D11 crust).

리카의 양과 밀접한 관계를 보인다 (Fig. 1-14). 생물기원의 실리카의 양은 적도 북동부의 태평양과 하와이 섬의 남쪽에서 생물기원의 오팔과 쇠설성 점토의 비가 5:1인 것으로 추정된다 (Honjo et al., 1982). 소량의 실리카 (<4%)는, 두 층에서 모두 그 합이 40%이며 서로 보상효과를 보인다. 코발트함량은 높은 Mn/Fe 비 (평균 3.9)를 보이는 89-D01망간각 시료에서 가장 풍부 (평균 0.54%)하며, 철 함량이 제일 많은 (15.4%) 90-D01망간각 시료에서 가장 적다 (0.31%) (Table 1-2). 후기 망간각의 코발트 함량은 전기 망간각 보다 두 배 가량 많다. 각각의 망간각에서, 코발트 농도는 대체로 상부로 갈수록 증가하거나 (89-D01망간각), 감소하다가 다시 증가하는 (89-D01망간각) 망간함량에 의해 좌우된다 (Fig. 1-11). 니켈은 89-D01망간각시료의 하단부에서 가장 풍부 (1.16%)한데, 이는 다른 망간각에서보다 두 배 정도의 양이다. 니켈 농도는 망간각의 깊이와 상관 관계를 보이고, 코발트 보다는 망간과 더 밀접한 관계가 있다. 특히 89-D11의 망간각 시료의 경우, 니켈 농도는 망간각의 상부쪽으로 갈수록 감소하는데 반해, 91-D16 망간각에서는 상반된 경향을 나타낸다. 구리와 아연은 비슷한 함량을 보이는데, 평균 0.09~0.20% 정도이다. 마그네슘은 89-D01 망간각시료의 성장전기 부분에서 가장 풍부 (0.79%)하며, Mn/Fe의 비 (5.8) 또한 가장 크다. 이 망간각시료의 알루미늄과 칼륨의 함량은 0.20~0.40%이다. 실리카 농도는 시료채취 지역의 수심에 따라 크게 좌우된다 (89-D01 망간각의 성장전기 부분에서는 0.69% ; 91-D16 망간각에서는 1.93%). 오팔 물질로 코팅된 철-망간 산화물은 규소를 많이 함유하고 있다. 칼슘과 인 농도는 특이한데, 후기 망간각 보다 전기 망간각에서 함량이 2-5배 많다 (4.25~7.15% Ca, 1.08~2.24% P) (Fig. 1-11). 인산염은 Ca/P의 비 (5.4~7.7)가 높은 후기 망간각 보다 Ca/P의 비 (2.6~2.7)가 낮은 전기 망간각에 더 농집되어 있다. 이러한 농도 특징은 microprobe에 의한 분석결과와 비슷하지만 (Neumann and Stüben, 1991; Hein et al., 1992), 전체 화학분석의 결과와는 상이하다. 전체 화학분석 결과에서는 망간, 코발트, 니켈과 기타 미량의 금속이 후기 망간각에서

보다 풍부하게 존재한다. (Halbach and Puteanus, 1984; von Stackelberg et al., 1984; Hein et al., 1988).

#### 4. 상관 관계

##### 가. 전기망간각

전기 망간각의 구성 원소는 통계학적으로 상관계수가 0.4보다 큰 것을 기준으로 3가지 군(group)으로 분류된다; 1) Mn-Ni-Co-K-Mg, 2) Fe-Si-Al-Ti, 3) Ca-P, (Table 3a). 제 1군은 다른 두 군과는 반비례 관계를 보인다. 제 2군과 Ca와 P의 관계는 무시할 만하다.

자료의 70%이상의 분산에서, 각 원소의 농도 변화는 4가지 변수에 의해 좌우된다. 변수 1은 Mn, Co, Ni, Cu, Mg, K 함량의 경우에서 양의 값 (0.20~0.88)을 갖는 반면, Fe, Al, Si, Ti, Ca, P 함량의 경우에는 음의 값 (-0.34~-0.87)을 갖는다 (Fig. 1-15a). 이는 특히 제 1군과 제 2군의 원소 농도의 분산이 33%임을 암시하는 것이다 (Fig. 1-15a). 변수 2는 Ca와 P에서만 두드러지게 음의 값 (-0.85~-0.87)을 갖는다. 변수 3은 Mg와 Al에서 우세 (0.56~0.65)한데, Mn, Fe, Co 함량과는 무시할만한 값이거나 음의 값이다. 변수 4는 Co, Cu, Zn에서 구별된다 (0.38~0.87).

##### 나. 후기망간각

후기 망간각은 전기 망간각 경우와 달리 2가지 군으로 분류된다; 1) Mn-Ni-Co-(Ca), 2) Fe-Si-Al-P-Ti. 1군의 경우, 칼슘은 망간과 관계 ( $r$ , 0.45)가 있는 반면, 2군의 경우 인은 티타늄에 대해서만 약간의 관계를 갖는다 ( $r$ , 0.22). 일반적으로, 니켈과 망간의 상관 관계는 다른 미량금속들의 경우보다 우세하게



Table 1-3 a. Correlation matrix of elements in the older and younger crusts.

	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca
Fe	-0.63											
Co	0.43	-0.45										
Ni	0.73	-0.74	0.37									
Cu	0.16	-0.10	0.05	0.16								
Zn	-0.08	0.03	0.20	0.13	0.11							
Mg	0.71	-0.58	0.24	0.77	0.17	-0.04						
Al	-0.40	0.55	-0.32	-0.20	-0.06	0.05	0.01					
Si	-0.61	0.92	-0.44	-0.65	-0.12	-0.03	-0.41	0.73				
K	0.65	-0.57	0.29	0.57	0.12	-0.09	0.53	-0.24	-0.51			
Ti	-0.12	0.46	-0.12	-0.24	-0.10	-0.05	-0.12	0.49	0.54	-0.06		
Ca	-0.55	-0.06	-0.19	-0.22	-0.10	0.02	-0.21	-0.00	-0.07	-0.39	-0.29	
P	-0.55	-0.04	-0.21	-0.21	-0.10	0.02	-0.20	-0.04	-0.04	-0.40	-0.27	0.99

No. of Data : 100

Table 1-3 b. Correlation matrix of elements in the older and younger crusts.

	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca
Fe	-0.71											
Co	0.51	-0.48										
Ni	0.60	-0.61	0.33									
Cu	0.08	-0.14	0.07	0.17								
Zn	-0.07	0.18	-0.04	-0.12	0.00							
Mg	0.01	0.14	-0.03	0.00	0.03	-0.01						
Al	-0.55	0.64	-0.28	-0.41	-0.01	0.00	0.43					
Si	-0.67	0.90	-0.42	-0.53	-0.10	0.13	0.31	0.78				
K	0.32	-0.34	0.12	0.29	-0.03	0.04	-0.07	-0.33	-0.33			
Ti	-0.31	0.43	-0.11	-0.31	-0.10	0.12	0.05	0.46	0.51	-0.15		
Ca	0.48	-0.30	0.04	0.18	-0.02	-0.04	0.27	-0.26	-0.31	0.16	-0.24	
P	-0.40	0.64	-0.26	-0.39	-0.05	0.02	0.33	0.52	0.68	0.33	0.22	-0.09

No. of Data : 256

나타난다. 특히, 구리와 아연 농도는, 종종 Fe 산화물이나 쇠철성 규산알루미늄과의 관계외에는 다른 원소들과 거의 상관 관계없이 독립적이다 (Friedrich and Schmitz-Wiechowski, 1980; Aplin and Cronan, 1985; De Carlo et al., 1987a; Hein et al., 1986). 후기 망간각에서 변수의 분포는 전기망간각에서의 경우와는 크게 다른 양상을 보이고 있다 (Fig. 1-15b). 변수 1은 Fe, Al, Si, Ti, P 함량의 경우에는 큰 양의 값 (0.55~0.94)을 갖는 반면, Mn, Co, Ni, K, Ca 함량과는 음의 값을 갖는다. 변수 2는 Mg와 Ca에서 두드러지게 큰 (0.85, 0.60) 양의 값을 갖는데, 예외적으로 Fe, Zn, K, Ti 함량하에서는 음의 값을 갖는다. 변수 3은 Zn, Ti, Ca의 변화가 양의 값으로 비슷한 값 (0.43~0.44)을 보이고, Co, Ni, Cu에서는 음의 값을 갖는다. 변수 4는 Co, Zn, Ti에서 큰 값을 나타내고, Ca, P에서는 음의 값이다.

이들 상관 관계와 변수의 분포는 망간각들이 망간-산화물, 철-산화물, 인산염암의 2개 혹은 3개의 우세한 성분들로 구성되어 있음을 암시하는데, 이는 중앙 태평양 해저산 망간각에서의 경우와 같다 (Aplin and Cronan, 1985; Manheim, 1986; De Carlo et al., 1987a; Hein et al., 1992). 전기 망간각에서, 변수 1은 비정질의 철-망간 산화 광물과 생물기원 물질의 두 우세 성분의 혼합 비율에 의한 원소 농도 변화와 관련되어 있는데 (Fig. 1-15a), 이는 생물기원 비결정질 실리카의 양에 따른 철과 망간의 함량 변화관계에서 보여진 바와 같다 (Fig. 1-10, 1-12b). 변수 2는, 칼슘과 인의 감소에 따라 망간과 철이 점진적으로 증가하는 것에서와 같이, 석회질 성분의 선택적인 용해가 망간과 철의 규산알루미늄과 화합하는 비율에 영향을 끼치는 것으로 볼 수 있다 (Fig. 1-14a). 그러나, 부유성 석회질 껍질이 망간보다 철을 1~2 배 더 함유하고 있음에도 불구하고, 비결정질 실리카보다 이 두 금속의 농도에 대한 영향이 더 적다 (Martin and Knauer, 1973; Halbach and Puteanus, 1983). 알루미늄과 인에 대한 실리카와 칼슘과의 높은 친화성 (Table 1-3a)을 보이는 것으로 보아 인산염암과 규산염 광물이 순수하게 생물기원에 의한 것임을 알 수 있다 (Hein et al., 1993). 미량 원소의 특정 비율은

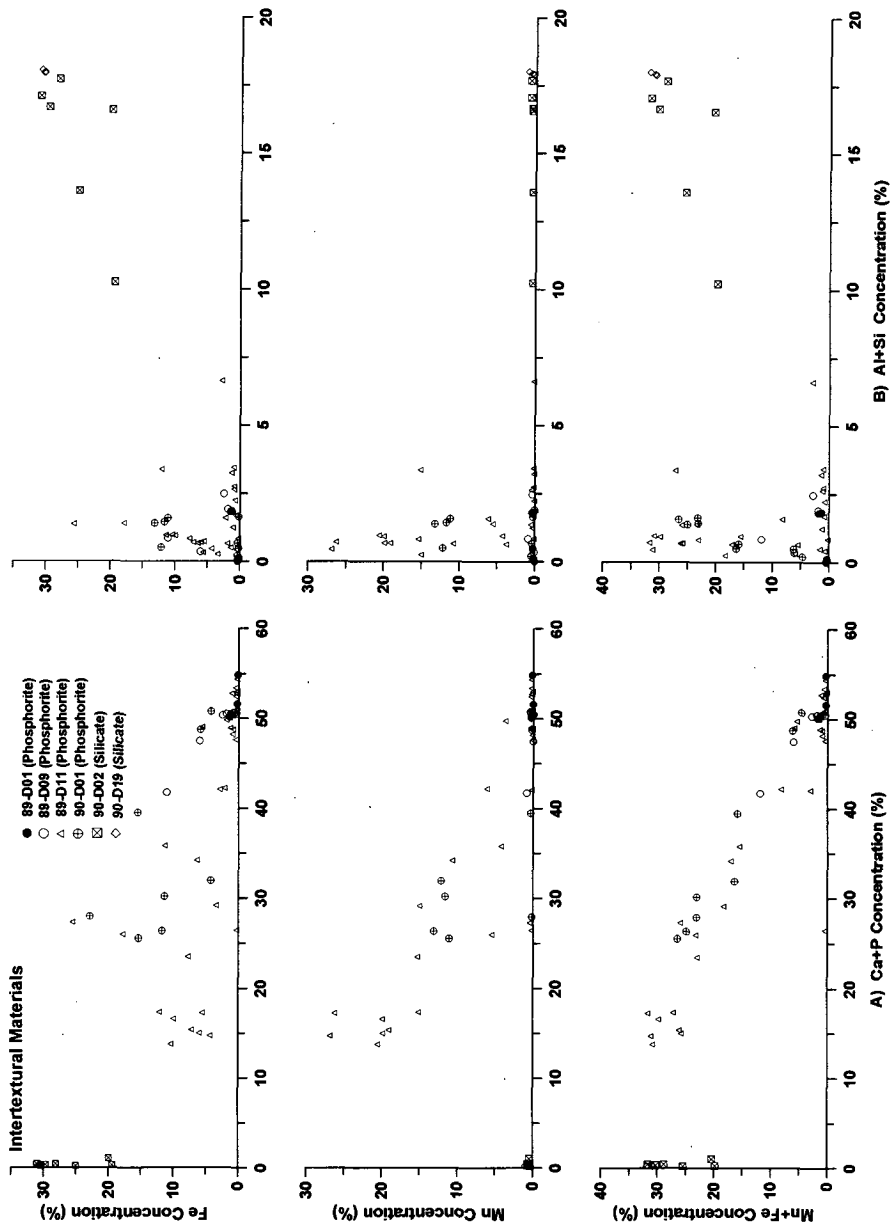


Fig. 1-13. Relation of Mn, Fe and Mn+Fe concentrations to the abundance of

Ca+P in intertextural phosphorite grains (a) and silicate materials

(b). Often symbols represent for metal concentrations in the

younger crust; crossed ones, the older crusts.

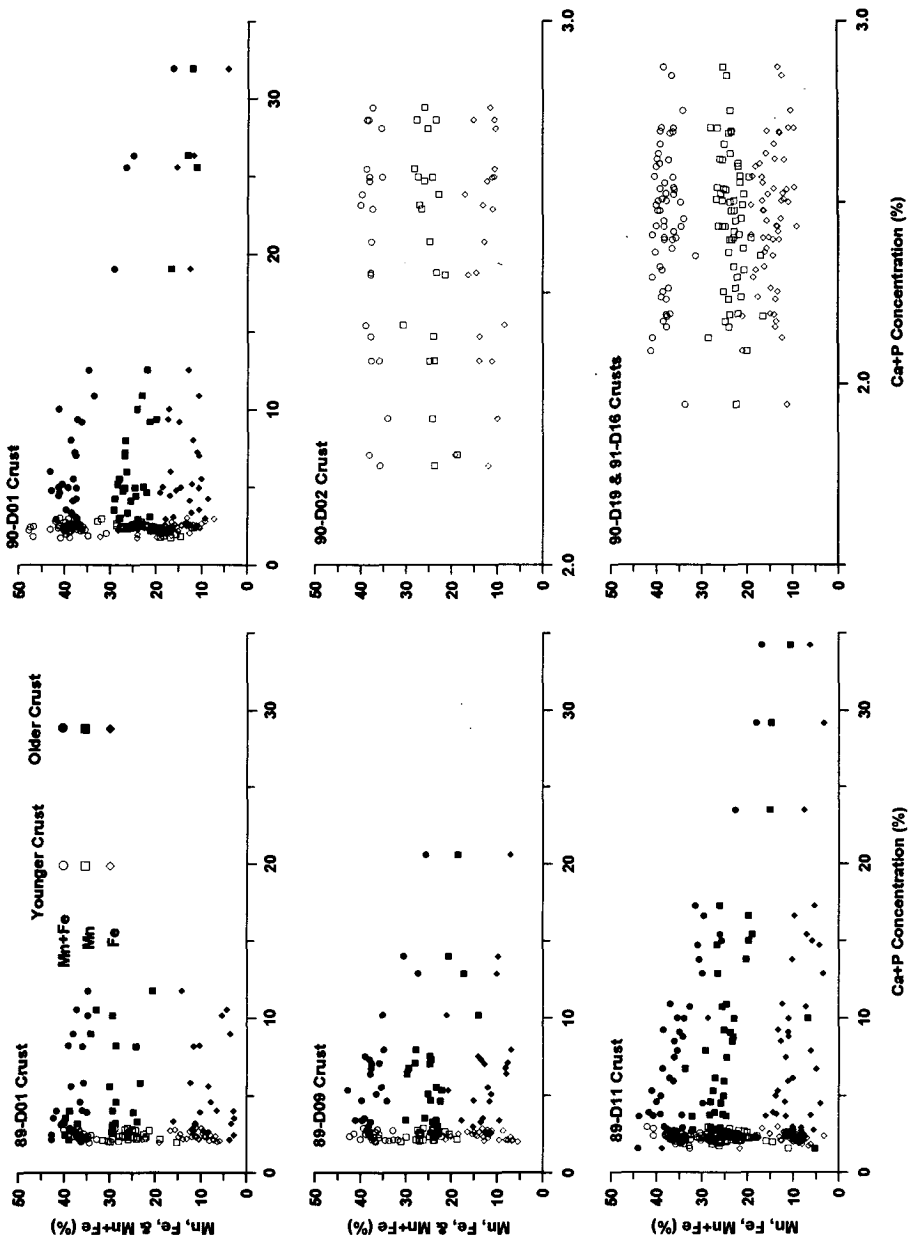


Fig. 1-14. Relation of Mn, Fe and Mn+Fe concentrations to the abundance of

Ca+P (a) and biogenic silicas in Fe-Mn oxide aggregates (b). The amounts of biogenic silicas was estimated by substrating detrital proportions from measured values, based on 5:1 ratio of biogenic siliceous materials and detrital caly (after Honjo et al., 1982).

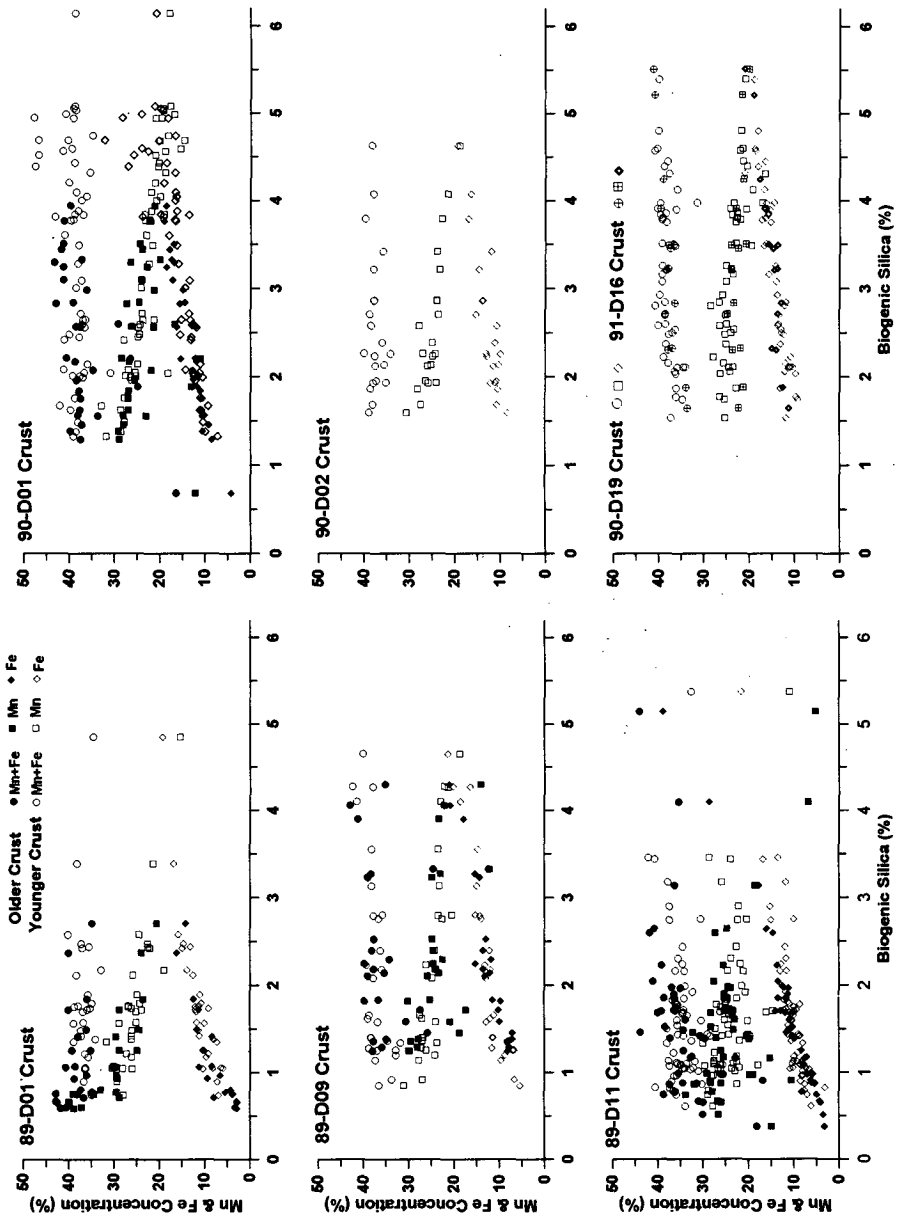


Fig. 1-14b. Continued.

생물기원 물질에 의한 이동 혹은 해지면의 탄산염 껍질의 용해에 의해 이동되어진 것으로 보인다. 코발트 함량과 관계되는 변수들은 항상 칼슘과 인의 경우와는 반대인데, 이는 생물기원 물질의 유입이 제한되었을 때, 코발트가 철-망간 산화물 입자속으로 쉽게 친화함을 의미한다. 후기 망간각에서, 변수 1의 분포는 전기 망간각에서와 정확히 반대로 분포하는데 (Fig. 1-15b), 이는 플라이오세 이후 망간각의 성장이 다른 형성과정을 통해 이루어졌음을 나타낸다. 철-산화물 내에서 Zn, Mg, Ti, P이 일정 비율로 존재하는 것으로 보인다. 변수 2에 의해 알 수 있듯이, 생물기원 물질은 Fe, Zn, K, Ti를 망간각의 성장부에 수반하지 않는데, 이는 수괴에서 탄산염 성분의 완전 분해에 의한 결과로 추정된다. Ca와 P는 두 농집의 합이 3%이하로 감소하는데, 이는 다른 원소들과 중요한 관계가 없음을 보여주는 것이다 (Table 1-3b; Fig. 1-15b). Zn의 생화학적인 양상은 다른 미량 금속들과는 크게 다른 형태이며, 이는 망간각내 두 층의 복잡한 변수들의 분포에서 알 수 있다.

## 5. 지역적인 특성

망간각 내에서, 철-망간 산화물중 원소들의 평균 함량은 수심에 좌우되지만, 시료채취 지역의 위치와도 밀접한 관계를 보인다 (Fig. 1-16). 전기 망간각 내에서, 철 함량이 수심이 깊어질수록 점진적으로 증가 (8.0%에서 13.5%)함에 따라, 망간 함량은 30.8%에서 23.5%로 감소하게 된다 (Fig. 1-16a). 이 두 금속의 합은 거의 일정하다 (37.4~38.0%). 수심 2,000 m 부근에서 이러한 특징은 약간의 변화를 보이는데, 철의 상대적인 함량이 급격히 증가하기 때문에, 망간과 철 함량의 합이 90-D01 망간각 (수심 1,800 m)에서는 작고, 90-D01 망간각 (수심 2,200 m)에서는 커진다. 코발트, 니켈, 구리, 아연, 마그네슘 농도는 수심 2,500 m에서 증가되는 양상을 보이며, Mn/Fe 비와 관계를 보이며 감소한다. 칼슘과 인은 수심

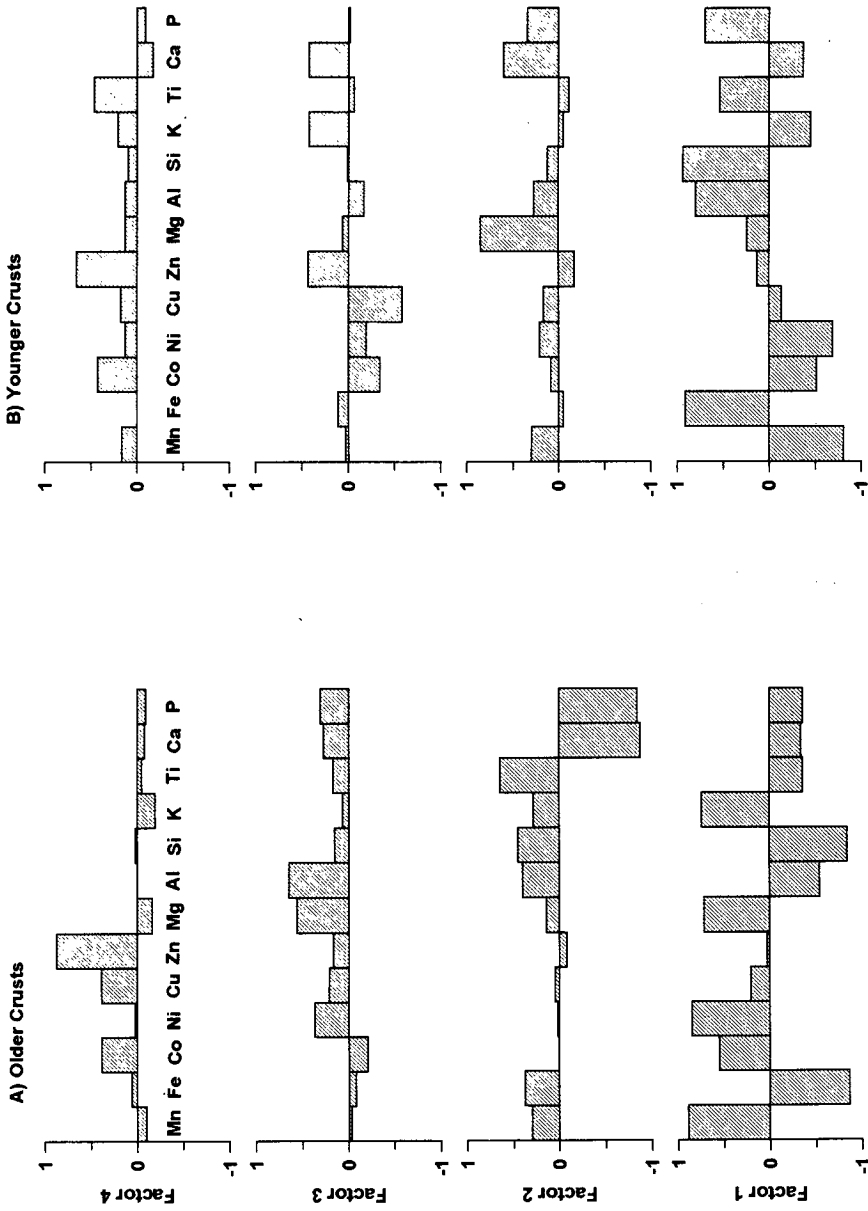


Fig. 1-15. Distribution of factors controlling the variations in chemical composition of the older (a) and younger generation crusts (b). The factors that are larger than unit of eigen value are selected.

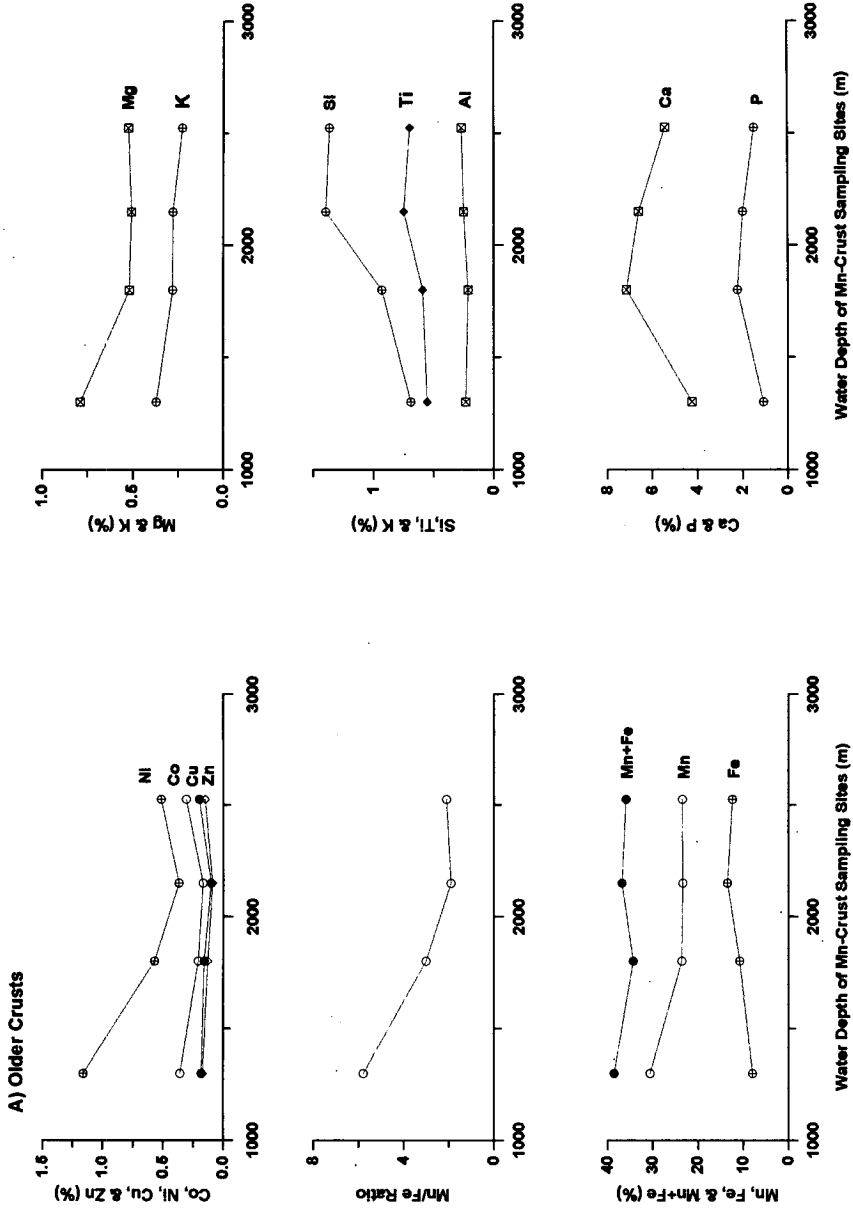


Fig. 1-16. Distribution of averaged concentrations of Mn, Fe and minor elements in the older (a) and younger crusts to water depth (b).



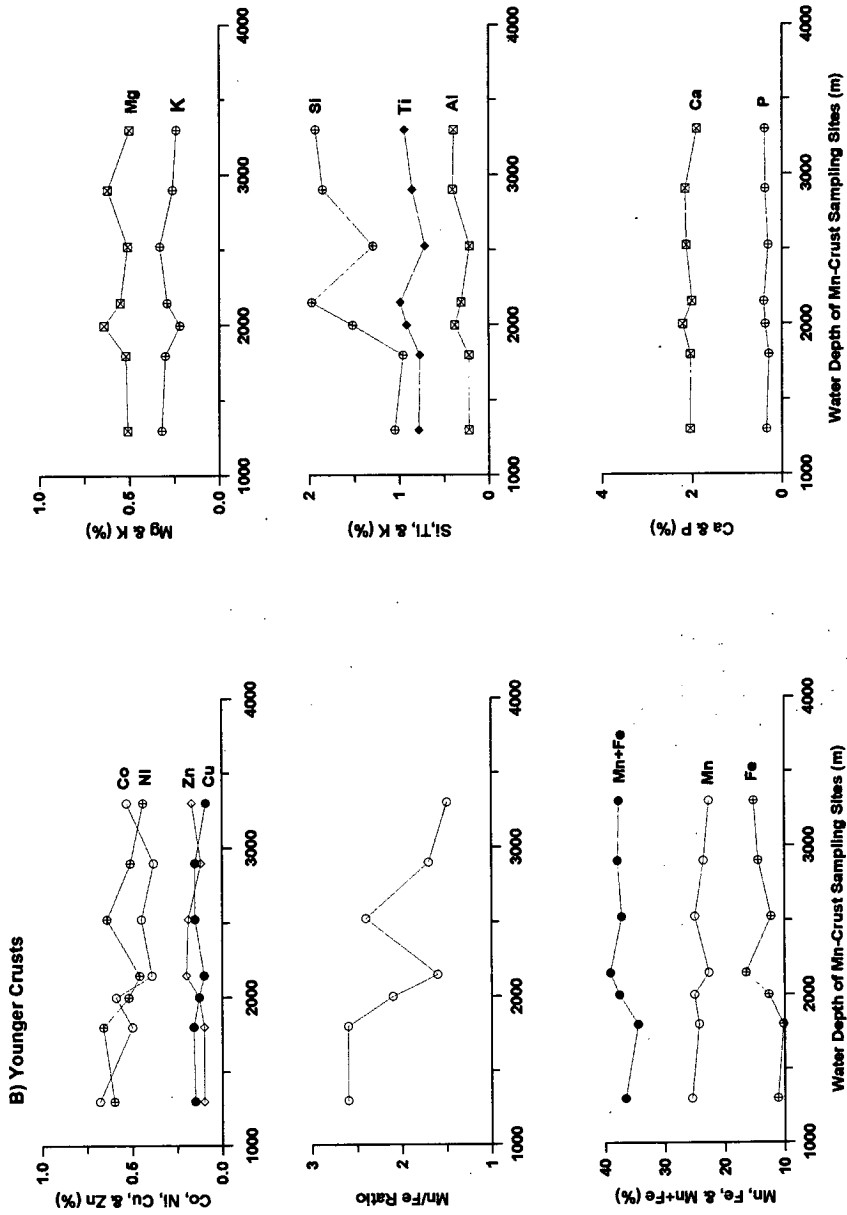


Fig. 1-16b. Continued.

1,800m에서 최고값 (각각 7.15%, 2.24%)을 보이고, 수심에 따라 감소한다. 실리카와 티타늄은 점차로 증가하는 반면, 알루미늄은 변화가 거의 없다. 후기 망간각에서는 원소들의 분포특성은 뚜렷하지 않다 (Fig. 1-16b). 구리와 아연은 수심 2,000 m 이상에서 변화의 폭이 크다. 예외적으로, 실리카는 전기 부분에서와 비슷하게 분포되어 있지만 수심 2,200 m에서 최대치 (1.8%)를 나타낸다. 반면에, 칼슘 (1.89~2.12%)과 인 (0.29~0.40%) 함량은 매우 낮으며 수심에 상관없이 분포한다.

## 제 5 절 토 의

### 1. 망간각의 성장과정

통계학적 분석에 의하면 망간각의 구성성분은 주요 3가지 구성물 즉, 망간산화물, 철산화물, 인산염암의 혼합물에 의해 결정되어진다 (Table 1-3; Figs. 1-9, 1-13). 특히, 망간과 철 함량은 망간각의 성장시기의 차이를 보이는 부분의 생물기원 실리카의 함량과 밀접한 관계를 보인다. 철 함량에 주요한 영향을 미치는 것으로 여겨지는 쇄설성 물질들은 현미경과 XRD분석결과 매우 작은 함량을 보인다 (Fig. 1-12). 망간각 표면에 산재되어있는 부유생물의 실리카 껍질들은 알루미늄실리케이트가 주로 생물기원임을 시사한다 (Fig. 1-10). 북동 적도태평양에서의 부유퇴적물 채집기를 이용한 실험에서 생물기원 오팔의 양이 육원성 점토양에 비해 5배 이상 높다고 밝혀졌다 (Honjo et al., 1982). 비결정질 실리카층이나 다른 부분에서 철함량의 급격한 증가와 알루미늄과 실리카 함량이 감소하는 경향은 망간각 생성 초기에 철-망간 산화물을 형성시키는 생물기원 오팔의 속성작용이 있었음을 시사한다 (Fig. 1-10, 1-12b). 이러한 속성작용기간 동안 산화된 규질 화석이 풍부한 퇴적층에서 철이 알루미늄과 실리카와 빠른 속도로 반응하여 스멕타이트를 형성하였다 (Jeong et al., 1994).

실리카와 철의 결합이 평형상태에 이른 후 망간이온은 철-망간산화층의 형성에 기여하며 이는 망간함량의 점진적 상승과 철과 실리카함량이 감소에 의해 입증된다 (Fig. 1-14b). 알루미늄실리케이트로 형성된 미세구조는 철-망간산화물 입자들의 성장을 촉진시킨다 (Alvarez et al., 1990). 하지만, 망간각내에 장식이나 석영이 잘 보존되어진 것으로 보아 쇄설성 파편들로부터 알루미늄실리케이트가 용존되어 미세구조를 만들지는 않는다 (Le Suave et al., 1989; Puteanus et al., 1989). 이런 과정에서 주변해수로부터 철수산화 입자들의 활동은 2가 망간을 산화시키고 망간-철 산화물의 성장에 영향을 미친다 (Sung and Morgan, 1981; Ballistreri and Murray, 1982; Dillard and Crowther, 1982). 망간단괴와 망간각의 Mossbauer 광학특성 실험에 의하면 산화성 2가 망간은 27%이상으로 풍부한 반면 철은 완전히 산화되어져 있다 (Pattan and Mudholdkar, 1991). 이러한 산화상태의 차이는 망간에 앞서 철의 빠른 침전을 일으킨다 (Moorby and Cronan, 1981; Murray et al., 1985) 방사성동위원소와 금속함량 분석에 의하면 이러한 광물의 재결정과 변이는 망간각의 표면에 한하여 일어난다 (Kusakabe and Ku, 1984).

일반적으로 철-망간 산화 입자의 성장은 부유성생물 석회질 껍질과 유기물의 분해로 인해 형성되는 산소고갈층 주변의 아산화 환경에서 원소들의 용출에 의해 촉진된다 (Halbach and Puteanus, 1983). 특히 전기 망간각의 경우, 이러한 과정들은  $Ca^{+P}$ 의 농도가 감소함에 따라서 망간함량이 점진적으로 증가한다 (Fig. 1-13a, 1-12a). 전기 망간각이 느린 성장을 보이는 것은 인산염암 성분이 영향을 미치기 때문이고 (Fig. 1-14a), 또한 산화성 망간이 쉽게 용출되기 때문이다 (Ballistreri and Murray, 1982; Pattan and Mudholkar, 1991). 이러한 차이는 화학분석에 의해 밝혀지고 (von Stackelberg et al., 1984; Hein et al., 1988; Grau and Kudrass, 1991), 이 원소 농도들은 철-망간산화물 입자에 인산염암이 영향을 미치지 않는 두 세대에는 비슷하다. 이는 철-망간 산화물 입자가 성장한 이후에

인산염암 입자가 존재하는 공간에 부분적으로 채워지거나 점진적으로 부착하는 것으로 사료된다 (Fig. 1-9). 또한 통계학적 분석에서 볼 때 인산염암 성분은 다른 원소들의 농도와 관계없다 (Table 1-3a). 이런 현상은 인산염암 입자들이 해수중이나 간극수내에서 형성되며 (Piper and Codispoti), 이 입자들은 주변 해수에서 공급된 인과 해수로 포화된 인회석의 반응에 의해 형성됨을 시사한다 (Manheim and Gulbrandsen, 1979; Cullen and Burnett, 1986; Hein et al., 1993).

후기 망간각에는 코발트 함량이 전기 망간각에 비해 2배 이상 높은 반면, 니켈 함량은 수심이 낮은 지역에서 산출된 전기 망간각 (89-D)에서 최대 값을 보인다 (Table 1-2; Fig. 1-16a). 특히 전기 망간각의 경우 태평양 해저산 망간각에서 일반적으로 나타나는 현상과 유사하게 수심이 깊어짐에 따라 구리, 아연, 마그네슘 함량이 감소하는 경향을 보인다 (Halbach et al., 1983; Aplin and Cronan, 1985; Manheim and Lane-Bostwick, 1988). 코발트와 망간 함량은 이 원소들의 산화반응에 있어 열역학적인 화학특성에 의해 결정되어진다 (Malistrieri and Murray, 1981). 하지만  $\delta$ -MnO<sub>2</sub> 표면의 과잉 Mn<sup>+2</sup>과 Co<sup>+3</sup>, Ni<sup>+3</sup>의 치환은 철수산화 콜로이드의 접촉반응에 기인한 산화조건하에서 일어나는 현상으로 생각된다 (Sung and Morgan, 1981; Balistrieri and Murray, 1982; Dillard and Crowther, 1982). 이런 과정들은 종종 칼륨, 마그네슘, 구리, 아연 등의 이온들과 관계하여 이루어진다. 통계적 분석에 의하면 (Table 1-3, Fig. 1-15), 망간에 대한 니켈의 높은 친화력은 낮은 수심에서의 유기물의 분해와 관계됨이 보여진다. 한편 코발트는 생물성 물질들이 제한되어진 지역에서 보다 높은 농도를 보인다. 이런 니켈과 코발트의 상이한 현상은 망간의 공급이 제한되어져 각의 성장이 느린 경우에 자주 일어난다 (Halbach et al., 1983; Segl et al., 1989; Manheim and Lane-Bostwick, 1988). 다공질의 후기 망간각은 그 성장속도가 전기 망간각에 비해 2 내지 4배 정도 빠르다 (Fig. 1-11) 이러한 원인은 해수중의 생물성 물질의 빠른 분해가 철-망간 산화물들의 형성에 기여한 까닭으로 생각된다.

## 2. 망간각 성장에 대한 해양환경조건

망간과 철 그리고 다른 미량원소의 함량이 심도에 따라 변화하는 현상 (Fig. 1-16)은 망간각 조성이 수괴내에서 망간과 철의 생지화학적(biogeochemical) 특성의 영향을 받았음을 의미한다. (Halbach and Puteanus, 1984; Aplin and Cronan, 1985; De Carlo et al., 1987). 후기 망간각과 전기 망간각 모두는, 수심 2000m 부근에서 구성요소의 함량변화가 크게 나타나는데, 이는 구성원소의 공급과 화학적 성향이 OMZ 준위의 큰 영향을 받는 것을 암시한다 (Halbach and Manheim, 1984; Manheim, 1986; pinchcock and Hoffert, 1987). 위와 같은 특징의 원인으로서는, 북태평양 적도류에 의한 해수의 확산과 이류작용으로 구성요소(특히 Mn 이온)들이 미국으로부터 서쪽으로 수평적인 이동을 하기 때문일 것이다 (Knauer et al., 1982; Aplin and Cronan, 1985; Landing and Bruland, 1987). 이러한 경우, 금속의 일정량이 동태평양 균열대에서의 열수 용출에 의해 추가된 것인데 (Jones and Murray, 1985), 일반 망간각에서 발견되지 않는 특정 금속의 농집의 원인이기도 하다 (Fig. 1-11). 특히 전기 망간각에서, 망간, 코발트, 니켈, 구리, 아연, 마그네슘의 평균 함량이 칼슘, 인과 달리 수심에 반비례하는데 (Fig. 1-16a), 이는 망간각의 성장이 표층수의 생산물에 상당한 영향을 받은 것이라 하겠다. OMZ는 탐사지역내에서 수심 500-1000m에 걸쳐 분포하는데 (Fig. 1-2), 적도태평양에서의 경우보다 수심이 얕다(800-1500m) (Piper and Codispoti, 1975; Klinkhammer and Bender, 1979). 칼슘과 인 함량의 급격한 감소는 후기 망간각이 생산력이 낮은 표층수하에서 성장했기 때문이다 (Fig. 1-11, 1-14b).

수심에 반비례하는 망간과 철 함량 분포(Fig. 1-16)는, 북동 태평양의 수괴에서 수직적인 분포상황이라 할 수 있다. 플랑크톤 유기체의 선택적인 유입에 의해, 철의 분포는 표층수에서는 크게 감소하고 OMZ에서 해저면에 걸쳐 일정하게 많

은데, 망간의 경우는 이와 반대다 (Gordon et al., 1982; landing and Bruland, 1987). 수심이 얇은 지역에서의 전기 망간각내에 다량의 망간, 코발트, 니켈이 존재 (Fig. 1-16a)하는 것은 OMZ내에서 생물기원 물질의 환원과정에서 형성된 망간-산화물의 선택적인 침전에 의한 것이다 (Knauer et al., 1982; Martin and Knauer, 1984; Aplin and Cronan, 1985). 그러나 OMZ내에서 철의 실제적인 감소의 증후가 보이지 않는데, 그 이유는 분해가 잘 되지 않는 생물기원의 파편과 상당 부분 관련되어 있기 때문일 것이다 (Halbach and Puteanus, 1983; Landing and Bruland, 1987). 수괴중 금속원소의 분포는 코발트와 망간이 비슷하고 또한 니켈과 철이 비슷하다 (Knauer et al., 1982). 니켈 이온이 철-산화물이나 망간-산화물로 이동, 흡착되는 과정이 망간각 형성과정과 크게 다르다는 것을 입증한다. 수심에 따른 철의 점진적인 증가 (Fig. 1-16)는 OMZ 하부의 석회질 껍질과 쇄설성물질(detrital materials)의 용해로 인해 분리된 산화 철 이온을 통해 형성된 철-수산화물 콜로이드의 농집이 증가된 것에 기인한다 (Aplin and Cronan, 1985; De Carlo et al., 1986; Manheim, 1986). 플랑크톤 석회질 껍질은 망간보다 철을 1-2배 가량 함유하고 있다 (Martin and Knauer, 1973; Halbach and Puteanus, 1983). OMZ의 직하부에 화학적인 여과가 가능한 철이 가장 많은데, 이는 철 이온이 쉽게 분리되어 심층수에서 입자상태로 환원될 수 있음을 의미한다 (Klinkhammer and Bender, 1979; Knauer et al., 1982; Gordon et al., 1982; Murray and Leinen, 1983; Landing and Bruland, 1987).

철-망간 산화물에서 망간과 철의 상대적인 함량은, 망간각 표면에서 생물기원 오팔의 속성작용 과정에서 선택적이고 연속적인 철과 망간 이온의 흡수에 기인하는 규산질 껍질의 축적률에 영향을 받는다 (Fig. 1-10). 생물기원 오팔 껍질은 수괴내 탄산성분보다 2배 가량 용해되기 어렵고 해저면에서는 잘 용해된다 (Edmond, 1974; Honjo et al., 1982). 망간과 철 농도의 주기적인 반비례 분포는 생물기원 실리카의 함량과 밀접한 관련이 있는데 (Fig. 1-14b), 이는 표층수의 생

산성 변화에 따라 망간각의 성장이 크게 영향받는다라는 것을 의미한다. 적도태평양에서, 표층수의 생산성은 북태평양의 영양분이 많은 Intermediate Pacific Deep Water(IPDW)의 분출에 크게 영향을 받는다. IPDW의 분출은 적도를 따라 표층수로 분산되는 North Equatorial Counter Current와 North and South Equatorial Current의 상호작용에 의해 발생된다 (Wright et al., 1991). 이 과정은 서태평양 쪽으로 갈수록 현저하게 나타나는데, Marshall, Micronesia, Caroline 군도를 가로질러 필리핀 해분 쪽으로 흐르는 서향의 deep western boundary current(DWBC)에 의해 운반된다. 중앙 남태평양의 Manihik 해저산맥의 돌출된 지형구조로 인해 분화된 또 하나의 DWBC는 Marshall-Gilbert 해령의 동쪽 면을 따라 시계방향으로 이동하며, Line 군도 해령의 틈을 따라 동태평양 해구쪽으로 이동한다. 심해저 망간각에 Si와 Fe의 함량이 증가하는 것은 실리카가 많은 IPDW의 영향으로 보인다 (Mantyla, 1975). DWBCs는 수온과 염분, 실리카 농도는 낮은 반면, 용존산소량은 높다.

중앙태평양에 있어서, 후자 역시 용존 철이 풍부하고 1,000 m와 3,500 m사이의 중간수괴 (intermediate water column)를 구성할 것이다. (Le Sauve et al., 1989; Neuman and Stüben, 1991). 수심 약 2,500 m 이하의 망간각에서 실리카와 철의 양이 급격히 증가하는 것은 이 수괴에서 상대적으로 포화된 실리카와 풍부한 양의 용존철 이온들 때문으로 생각된다 (Fig. 1-16).

### 3. 망간각의 성장을 위한 고해양학적인 조건들

신생대(Cenozoic) 해수중  $Sr^{86}/Sr^{87}$ 곡선에 의해 얻은 망간각들의 연령에 의하면, 망간각 성장은 두번의 다른 시대 즉 마이오세와, 플라이오세에서 현세까지 일어났음을 보여주며 성장구조와 성장율, 구성들 (인산염암)에 있어 급작스런 변화를 나타낸다 (Fig. 1-11). 전기 망간각 (마이오세)들은 일반적으로 치밀하고 인산

염암이 섞인 엽리구조를 가지는 반면, 후기 망간각 (플라이오세에서 현세)들은 다공질의 주상구조와 포도상 구조를 보인다. 후기 망간각들은 전기 망간각보다 2-4배의 빠른 성장율을 가진다 (4.1-10mm/My). 마샬군도의 백악기 해저산의 전기 망간각들은 중앙 태평양에서 나타난바와 같이 초기 마이오세부터 성장이 시작되었는데 (Futa et al., 1988; Ingram et al., 1990; Hein et al., 1992) 이는 중앙 태평양과 같다. 한편 캐롤라인과 팔라우제도의 후기 마이오세 해저산들의 망간각들은 플라이오세 동안 형성되었다. 이런 망간각과 하부에 놓인 해저산의 연령의 큰 차이는 망간각의 성장이 이전에 형성된 망간각의 제거에 의해 우연적으로 시작되었음을 시사해 준다 (Manheim, 1986; Futa et al., 1988; Puteanus et al., 1989). 에오세 이전의 망간각들은 종종 남태평양의 해저산에서 탄산염 퇴적층이나 화산 쇄설암으로 덮여진 상태로 발견된다 (De Carlo, 1987b; Pichocki and Hoffert, 1987; Grau and Kundrass, 1991). 망간각의 내부구조에 산재하는 급격한 절단면과, 해저산 기저와 경사면에서 나타나는 중력류들에 의하면 망간각은 퇴적물이 경사면을 따라 끌려 내려간 후에 형성되었음을 나타내 준다. 해저면 가까운 지역에서 보여지는 망간각성장 최초시기의 차이 또한 퇴적물 함몰이 마이오세 동안 간헐적으로 일어났음을 나타내 준다. 태평양의 서쪽 가장자리에서 간헐적인 활동을 벌이는 지구조 운동과 관련시켜 보면 (Acharya, 1979; Keating et al., 1984), 캐롤라인과 팔라우 제도의 중력류 작용 또한 후기 마이오세에서 초기 플라이오세 동안의 망간각의 제한된 성장을 나타내 준다.

망간각의 성장은 일반적으로 표층생산력과 화학등의 고해양학적인 조건들이 변하는 동안에 시작된다고 여겨지고 올리고세 동안의 태평양에서 AABW의 심층순환에 의해 조절된다 (Halbach, 1984; Hein et al., 1992; 1993). 지질연대를 통해 볼 때 인산염암이 OMZ내에서 형성되는 것을 고려하면 인산염암이 관입된 입자들은 명백히 마이오세 동안 생산성이 높은 표층수괴 하에서 형성된 전기 망간각임을 지시해 준다. 태평양 판의 북서쪽으로의 이동율에 근거하면, 망간각들이 집



적되는 해저산은 7Ma 이전에 적도 생산층 (4°N-S) 밑으로 이동해 왔다. 태평양 해저판의 침강율 (35 m/My)에 근거하면 초기 마이오세 동안 망간각이 형성되기 시작했을 때의 해저산이 있던 곳의 고해양의 수심은 현재보다 최소한 500 m에서 700 m는 낮았을 것으로 계산되었다 (e.b., ancient water depth of 89-D01 crust, 800 m; 89-D09, 2,000 m; 89-D11, 1000 m). 고해양 수심이 가장 깊은 곳인 89-D09 망간각시료의 오래된 부분의 인산염암에 의하면 OMZ는 현재보다 최소 약 500 m는 더 깊은 2,000 m 까지 확장되었던 것으로 계산되었다 (Piper and Codispoti, 1975; Klinkhammer and Bender, 1979). 현재는, 수괴내에서 인산염암 입자의 형성은 망간각의 내부공간에 관입될 만큼 충분히 활발하다 (Fig. 1-9). Sr 동위원소율에 의해 밝혀진 바와 같이 인산염암 입자는 전지구적인 기후변화와 심층해류의 변화를 수반하는, 중기에서 후기 마이오세 동안 형성되었다 (Kennett, 1977; Shackleton and Opdyke, 1977; Segl et al., 1989). 완만하고 층이진 중간수층에서, 용존 칼슘은 해저산의 경사면을 따라 흐르는 영양염이 풍부한 용승류나 후기 에오세/전기 올리고세와 후기 올리고세/전기 마이오세 동안 적도지역 밑에서 집적된 오래된 인산염암 퇴적물에 의해 공급되어진 인 (phosphorous)과 결합되어 나타난다 ( Neumann and Stüben, 1991; Hein et al., 1993). 마이오세 망간각의 늦은 성장율은 수층내에서의 활발한 인산염암 형성과 철-망간 산화입자의 코발트농도로 설명할 수 있는데 이는 철보다 망간을 더 효과적으로 농축하는 철-망간 oxide floccs의 결집에 의해 제한된다 (Fig. 1-13a, 1-12b). 이러한 경우들은 또한 적도 태평양 생산층 밑에 있는 심해평원의 망간각에서도 나타나는데 이곳에서는 높은 퇴적율이 망간각의 형성과 성장을 억제한다 (Horn et al., 1973; McKelvey et al., 1979). 한편, 철-망간산화물과 생물기원 오팔의 선택적 집적에 의한 후기 망간각의 빠른 성장은 적도지역 밑에서 플라이오세 동안에 일어났다 (Fig. 1-10, Fig. 1-14b).

전기 망간각과 후기 망간각의 구조성장의 급격한 변화는 약 15Ma경에 일어났

고, 그것은 위에 놓인 mottled zone에 의해 알 수 있다 (Fig. 1-11). 후기 망간각에 우세한 주상과 포도상구조는 저층수의 영향을 강하게 받는 철-망간산화입자의 성장에 의해 설명되어지는 반면, 저층수의 약한 순환하에 있는 전기 망간각들은 엽리구조를 가진다 (Neuman and Stüben, 1991; Hein et al., 1992). Mottled 구조는 적도지역에서 멀리 떨어진 저층수의 작용이 가장 활발한 환경하에서 탄산염 성분들의 활발한 용해에 의해 형성되어진다고 생각된다. 이러한 특징들은 마이오세와 플라이오세의 경계에서 심층수 순환에 급격한 변화가 있었음을 시사한다. 태평양에서 심해순환의 양상은 현재와 비슷하고 후기 마이오세 동안 완전히 시작되었다 (Woodruff et al., 1981; Keller and Barron, 1983). AABW의 유입은 남극 전체가 빙하작용의 영향을 받아 빙하의 양이 현재보다 많은 초기 플라이오세 (5 Ma) 동안 가장 왕성했다. 이 빙하작용은 점진적으로 계속되어서 중기 마이오세 동안 서쪽과 동쪽에 빙판 실드를 형성하였다 (Kennett and Brunner, 1973; Shackleton and Kennett, 1980). 이 시기동안 태평양에서의 더욱 활발해진 AABW의 순환에 의한 파나마 지협을 지판상승은 CCD를 알아지게 하고 OMZ를 구성했다 (Shackleton and Opdyke, 1977; Dunn, 1982). 중간수의 활발한 순환은 전 세계 해양에서 OMZ의 영역에 큰 변화를 가져왔다 (Dickens, 1991). 후기 플라이오세 (3.0-3.5Ma) 동안 파나마 제도의 완전한 폐쇄와 북반구에 빙상이 형성되면서 심층수 순환이 오늘날과 같은 체계로 형성되었다 (Kennett, 1977; Shackleton and Opdyke, 1977; Segl et al., 1989). 망간각의 경우, 다른 형태의 조직들이 함께 산출됨에 의해 나타나는 몇몇의 변형은 해저산의 지형 때문에 지역적으로 변하는 해류체계의 영향을 받아 형성되었기 때문인 것으로 보인다.

망간각에서 망간과 철농도의 주기적인 변화는 망간각 성장에서 생물생산성의 주기적인 영향을 반영해주는 생물기원 실리카의 양과 밀접한 관계가 있다 (Fig. 1-11, Fig. 1-14b). 망간과 철의 농도의 합계는 수심에 따라 일정한데, 각각의 망간각 내에서도 이런 금속물질들과 그 외의 다른 미량요소들이 코발트를 통해

밝혀진 바에 의하면 최소한 망간각이 형성하는 동안의 지질연대에서는 그 양이 일정했다 (Halbach et al., 1983; Aplin and Cronan, 1985; Manheim and Lane-Bostwick, 1988; Segl et al., 1989). 망간과 철 농도의 주기적인 변화는 밀란코비치 편심궤도 주기인 4,000년보다, 해양과 기후조건에서 더 긴 변화주기를 가지는 것처럼 보인다 (Neumann and Stüben, 1991; Hein et al., 1992). 증가된 생물기원 실리카의 퇴적은, AABW의 유입에 의해 북태평양과 미국경계부에서 형성된 PIW의 강한 용승류로 인한 증가된 생물생산성을 의미한다 (Thunell, 1981). 망간각에서 증가된 철과 감소된 망간의 농도는, 태평양 퇴적층에서 생물기원 오팔의 집적이 최대일 때인 표층수 생산성이 최고인 쪽으로 증가 또는 감소하는 점이적인 기간동안 형성되었을 것이다 (Lyle et al., 1988; Rea et al., 1991).

## 제 6 절 결 론

북태평양 중·서부 해저산에서 채취된 7개의 망간각에 대해 다양한 분석을 한 결과 망간각들은 고해양학적인 조건의 광역적 지역적 변화를 받고 성장하였다. 망간각 구성성분의 변화는 해저산의 침강과 북서쪽에서의 이동과 관련있다. 마살제도의 후기 백악기 해저산에서 망간각들은 초기 마이오세 동안 성장하였는데 두개의 두드러진 성장단계의 차이를 보여준다. 즉 전기 (마이오세) 망간각들은 인산염암이 관입한 철-망간 산화물의 괴상구조를 보이는 반면, 후기 (플라이오세에서 현세)망간각들은 다공질 주상과 포도상 구조를 가지는데 종종 생물기원 오팔층이 관입되어 있다. 캐롤라인과 팔라우 제도의 후기 올리고세에서 중기 마이오세의 해저산에서 망간각들은 플라이오세 동안에 형성되었다. 후기 망간각들은 전기 망간각들보다 2배에서 4배의 빠른 성장율을 보인다 (4.1-10.0 mm/My). 망간각들은 주로 순수한 수성기원 Fe-와 Mn-산화물, 생물기원 실리카,

결정 인산염암로 구성되어 있다. 화학 점분석과 현미경 관찰결과에 의하면 생물기원 오팔의 속성작용과 관계되어 망간각의 표면에서 철과 망간 산화이온의 연속적인 치환에 의해 철-망간산화층이 형성되기 시작하였다. 이러한 과정들은 역전이 되었지만, 망간각뿐만 아니라 넓은 수심범위에서, 합계가 약 40%내에서 일정하도록 철과 망간 농도가 보충된다. 생물기원 실리카의 양이 증가함에 따라 망간은 감소되는 반면 철은 증가한다. 이러한 특징들은 태평양에서 금속의 양은 적어도 망간각의 성장기간 동안에는 일정했음을 나타내준다. 망간각 내에서, 주기적인 금속의 변화 특히 철과 망간의 변화가 두드러지는데, 이는 표층수의 생산성을 의미하는 생물기원 오팔의 퇴적을 또한 주기적으로 변해왔음을 나타낸다.

기저의 해저산과 망간각의 연령에 큰 차이가 생기는 것은 올리고세 동안 중력류의 사퇴작용 (slope sedimentary process) 때문에 이전에 형성된 망간각과 퇴적물의 소실에 기인한 것으로 여겨진다.

망간각 내에서 편재하는 날카로운 절단면과 아말감화된 경계층들은 망간각의 이러한 침식작용이 강한 저층해류의 작용을 받았음을 나타낸다. 마이오세 망간각에 관입된 인산염암은, 해저산이 침강되고 북서쪽으로 이동하는 동안 태평양 적도 생산대에서 수심 약 2,000 m까지 확장되는 산소극소층 내에서 형성되었음을 나타낸다. 여기에서 Drake Passage의 개방과 태평양과 대서양 사이의 수로가 개방됨에 의해 태평양에서 AABW가 유입되고 순환이 활발해짐에 따라 망간각의 성장은 촉진된다. 표층수의 생산성에도 크게 영향을 받고, 수층내에서 철-망간산화물 플럭의 선택적인 형성때문에 망간각의 성장율은 낮게 (<3.6 mm/My) 제한된다. 전기 망간각에서 Co, Ni, Cu, Zn 과 Mn의 농도는 수심이 깊어질수록 감소하고, Mn과 유사하게 Fe, Si, Ca와 P로 치환되어 분포한다. 수층내에서 형성되어, 인산염암입자들이 내부 공간에 협재되어 나타나고, 현세에서 플라이오세까지, 두 시대 망간각의 철-망간 산화 집괴들의 화학적 구성성분이 약간 변화한다.

후기 망간각은 해저산들이 북서쪽으로 이동함에 따라 적도 태평양 생산대를 지나 빈영양 상태의 표층수 밑에서 AABW의 강한 순환에 영향을 받아 형성되었다. 후기 망간각의 얼룩지고 다공질 구조는 AABW의 순환이 극지방의 빙하량이 증가함에 따라 5Ma동안 가장 강했음을 나타내준다. 후기 망간각들에서, 망간각 원소들의 수심에 역전되는 분포는 망간, 철, 실리카를 제외하고는 덜 두드러진다. 특히 후기 망간각에서 코발트는 전기 망간각보다 2배정도 더 많이 농축되어 있는 반면 다른 미량금속원소들은 농도가 비슷하다. 망간각의 빠른 성장율과 (4.1-10.0 mm/My) 풍부한 코발트의 양은, 생물기원 물질들 특히 탄산염 성분들이 수중에 완전히 용해된 곳에서 철과 망간 산화물 입자의 형성이 용이하여 망간각의 성장이 증가되었기 때문이다.

## 제 7 절 제 인

태평양에서 철-망간 망간각에 대한 탐사활동의 대부분은 서태평양과 중앙태평양에서 이루어졌다. 이 지역은 고령의 해저산과 해저령이 다수 분포되어 있는 지역으로서 약 6,600개의 해저산이 존재한다. 해저산 한 개당 망간각의 잠재 보유량은 약 3백만 톤 (Manheim, 1986)으로서, 이러한 양은 클라리온-클리퍼톤 균열대의 심해저면에서 채취가 가능한 망간단괴의 1년간의 생산량과 비교될 수 있다. 본 연구에서 규명한 망간각에 대한 특성은 심해지역 특히 태평양상에서 미래 세대의 광물자원에 대한 탐사 및 연구활동을 계획하고 수립하는데 많은 도움이 될 것이다.

우선, 적어도 마이오세 중기이후로 화산활동을 포함한 지각구조운동이 활발했던 해저산과 섬에서의 시료 채취를 피해야한다. 섬들에 인접한 서태평양 지역에서 태평양판이 해구로 침강함으로써 생긴 해저산들은 지구조적으로 활동이 활발했었을 것이다. 해저구조의 일시적인 진동은 경사면에서 괴상체의 낙하를

유도하므로써 망간각의 지속적인 성장을 방해한다. 이러한 진행과정을 이해하기 위해서는, 해양에서의 탐사활동을 계획하기 이전에 태평양에서의 지각구조운동에 대한 방대한 문헌조사 및 연구가 수행되어야한다.

오래된 해저산에서 망간각 시료를 채취하는 것이 더 이상적이다. 더 오래된 해저산과 섬일수록 Fig. 1-2에서 보는 바와 같이 더 두꺼운 망간각이 분포한다. 그러나 피상으로 흘러내린 퇴적물이 쌓인 지역의 주변을 피해 채취하는 것이 잠재적인 망간각을 얻기 위험뿐만 아니라 장래에 망간각을 개발하는 데에도 훨씬 유리하다. 같은 생성시기 (백악기 후기)를 가진 두 개의 인접한 해저산에서 더 두께가 얇은 망간각 (89-D09)은 경사면 위의 퇴적물과 망간각이 휩쓸려 내려온 뒤 더 후에 성장을 시작했기 때문으로 사료된다 (Fig. 1-11). 적당한 시료채취 지역을 선정하기 위해서, 지구조적, 지구물리적 그리고 퇴적학적인 배경에 기본을 두고 퇴적과정이 정확히 해석되어야 한다.

북태평양에서 코발트와 니켈 같은 희유금속을 다량 함유하고 있는 잠재적 망간각을 얻기 위하여 적도 태평양 생산대의 북쪽 가장부 밑에 올리고세 이후로 오랜 기간동안 현재와 같은 형태를 유지하고 있는 해저산과 섬들 주위에서 시료를 채취해야한다. 이러한 고찰은 Table 1-2에서 보는 바와 같이 후기 망간각 (89-D01)이 보통 다른 지역의 망간각에 비해 2배의 코발트와 니켈을 풍부하게 함유하고 있다는 사실에서 뒷받침될 수 있다. 그 지역내에서 인산염암 입자가 관입된 더 전기 망간각에 의해 알 수 있듯이, 높은 생물 생산성은 망간각의 성장과 전략 금속의 농축을 의미한다 (Fig. 1-11).

위에서 언급한 권장사항과 관계되어 고해양환경과 현재의 해양환경에 대한 이해가 필수적이다. 왜냐하면 망간각의 성분은 표층수의 생산성과 심해수 순환에 의해 크게 영향받은 해수의 화학조성의 광역적이고 국지적인 변화에 크게 영향을 받기 때문이다. 고해양연구에 있어서 Sr-동위원소에 의한 연대 측정은 Nd와 Be

같은 다른 동위원소에 의해서도 세밀하게 검증되어야한다. 특히 생성연대가 공극성의 후기 망간각에서 예상보다 생성연령이 더 어리게 나타나는 것은 증가하는  $Sr^{86/87}$  비를 갖는 더 많은 양의 후기 해수에 의해 혼합되었기 때문이다. 또한 인산염암 입자를 함유하면  $Sr^{86/87}$  비가 증가된다는 사실은 의심할 만하다. 통상적으로 해양 퇴적물에서 사용되었듯이 철-망간 산화물 분류에서만 Sr 동위원소를 얻기 위해서는 0.04M  $NH_4OH+CH_3COOH$  (25% v/v) 용액을 이용한 분별 추출법이 권장할 만하다 (Kitano and Hujiyoshi, 1980; Tessier et al., 1980).

## 참 고 문 헌

- Acharya, H.K. 1979. Seismicity of the southern Philippine Sea. *Mar. Geol.*, 29: M25-M32
- Alverz, R. De Carlo, E.H., Cowen, J., and Andermann, 1990. Micromorphological characteristics of a marine ferromanganese crust. *Mar. Geol.*, 94: 239-249.
- Aplin, A. and Cronan, D.S., 1985. Ferromanganese oxide deposits from the Central Pacific Ocean, I. Encrustations from the Islands Achipelago . *Geochim. Cosmochim. Acta.* 49: 427-436.
- Balistreri, L.S. and Murray, J.W., 1982. The surface chemistry of  $\delta$ -MnO<sub>2</sub> in major ion seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46: 1041-1052.
- Cande, S.C., Larson, R.L., and Lsbreeque, J.L., 1978. Magnetic lineations in the Pacific Jurassic quiet zone. *Earth and Plant. Sci. Letts.*, 41: 434-440.
- Crawford, A. J., Beccaluva, L., Serri, G., and Dostal, J., 1986. Petrology, geochemistry and tectonic implicatons fo volcanics dredged from the intersecion of the Yap and Mariana trenches. *Earth Plant. Sci. Letts.*, 80: 265-280.
- Crough, S.T., 1978. Thermal origin of mid-plate hot-spot swells. *Geophys. J.R. Atron. SOc.*, 55: 451-469.
- Cullen, D.J., 1986. Submarine phosphatic sediments of the SW Pacific. In: D.S. Cronan (Ed.), *Sedimentation and mineral deposits in the southwestern Pacific Ocean.* p.183-236.
- Cullen, D.J. and Burnett, W., 1986. Phosphorite associations on seamounts in the tropical southwest Pacific Ocean. *Mar. Geol.*, 71: 215-236.



- Davis, A.S., Pringle, M.S., Pickthorn, L.G., Clague, D.A., and Schwab, W.C., 1989. Petrology and age of alkalic lava from the Ratak chain of the Marshall Islands. *J. Geophys. Res.*, 94: 5757-5774.
- Davis, A.S., Schwab, W.C., and Haggerty, J.A., 1986. Geochemistry and petrology of basaltic rocks from the Marshall Islands. U.S. Geological Survey, Open File Report, 86-273:24pp.
- De Carlo, E.H., McMurtry, G.M., and Kim, K.H., 1987a. Geochemistry of ferromanganese crusts from the Hawaiian Archipelago - I. Northern survey areas. *Deep-Sea Res.*, 34(3): 441-467.
- De Carlo, E.H., Pennywell, P.A., and Kim, K.H., 1987a. Geochemistry of ferromanganese crusts from the Hawaiian Archipelago - I. Northern survey areas. *Deep-Sea Res.*, 34(3): 441-467.
- Dickens, G.R. and Owen, R.M., 1994. Late Miocene-early Pliocene manganese redirection in the central Indian Ocean: Expansion of the intermediate water oxygen minimum zone. *Paleoceanography*, 9(1): 169-181.
- Dillard, J.G. and Crowther, D.L., 1982. The oxidation states of cobalt and selected metals in Pacific ferromanganese nodules. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46: 755-759.
- Duncan, R.A. and Clague, D.A., 1985. Pacific plate motion recorded by linear volcanic chains. In: A.E.M. Nairn, F.G. Stehli, and S. Uyeda(Eds.), *The ocean basins and margins. v. 7, The Pacific Ocean*, Plenum Press, New York and London: p89-121.
- Edmond, J.M., 1974. On the dissolution of carbonate and silicate in the deep ocean. *Deep-Sea Res.*, 22: 455-480.

- Fisher, K., Dymond, J., and Lyle, M., 1986. The benthic cycle of copper: Evidence from sediment trap experiments in the eastern tropical North Pacific Ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50: 1535-1543.
- Flower, B.P. and Kennett, J.P., 1994. The middle Miocene climatic transition: East Antarctic ice sheet development, deep ocean circulation and global carbon cycling. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 108: 537-555.
- Friedrich, G. and Schmitz-Wiechowski, S.A., 1980. Mineralogy and chemistry of a ferromanganese crusts from the deep-sea hills, central Pacific, "Valdivia" cruise VA 13/2. *Mar. Geol.*, 37: 71-90.
- Futa, K., Peterman, Z.E., and Hein, J.R., 1988. Sr and Nd isotopic variations in ferromanganese crusts from the Central Pacific: Implications for age and source provenance. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52: 2229-2233.
- Gordon, R.M., Martin, J.H., and Knauer, G.A., 1982. Iron in north-east Pacific waters. *Nature*, 299: 611-612.
- Grau, R. and Kudrass, H.R., 1991. Pre-Eocene and younger manganese crusts from the Manihiki Plateau, southwest Pacific Ocean. *Mar. Mining*, 10:231-246.
- Halbach, P. and Manheim, F.T., 1984. Potential of cobalt and other metals in ferromanganese crusts on seamounts of the central Pacific Basin. *Mar. Mining*, 4(4): 319-336.
- Halbach, P. and Puteanus, D., 1983. The influence of the carbonate dissolution rate on the growth and composition of Co-rich ferromanganese crusts from central seamount areas. *Earth Planet Sci. Letts.*, 68: 73-87.

- Halbach, P. Segl, M., Puteanus, D., and Mangini, A., 1983. Co-fluxes and growth rates in ferromanganese deposits from central Pacific seamount areas. *Nature*, 304: 716-719.
- Hein, J.R., Bohrson, W.A., Schulz M.S., Noble, M., and Clague, D.A., 1992. Variations in the fine-scale composition of a central Pacific ferromanganese crust: paleocene implications *Paleoceanography*, 7(1)63-77.
- Hein, J.R., Manheim, F.T., and Schwab, W.C., 1986. Cobalt-rich ferromanganese crusts from the central Pacific. 18th annual OTC, Houston, Texas, OTC 5234: 119-123.
- Hein, J.R., Manheim, F.T., and Schwab, W.C., and Davis, A., 1985. Ferromanganese crusts from Necker Ridge, Horizon Guyot and S.P. Lee Guyot: Geological considerations. *Mar. Geol.*, 69: 25-54.
- Hein, J.R., Schulz, M.S., Kang, J.K., 1990. Insular and submarine ferromanganese mineralization of the Tonga-Lau region. *Mar. Mining*, 9: 305-354.
- Hein, J.R., Schwab, W.C., and Davis, A., 1988. Cobalt- and platinum-rich ferromanganese crusts and associated substrate rocks from the Marshall Islands. *Mar. Geol.*, 78: 255-283.
- Hein, J.R., Yeh, H.W., Gunn, S.H., Silter, W.V., Benninger, L.M., and Wang, C.H., 1993. Two major Cenozoic episodes of phosphogenesis recorded in equatorial Pacific seamount deposits. *Paleoceanog.*, 8(20): 293-311.
- Hodell, D.A., 1994. Editorial: Progress and paradox in strontium isotope stratigraphy. *Paleoceanography*, 9(3): 395-398.
- Honjo, S., Mangani, S.J., and Cole, J.J., 1982. Sedimentation of biogenic matter in the deep ocean. *DSR*. 29(5A): 609-625.

- Horn, D.R., Horn, B.M., and Delach, M.N., 1973. Copper and Nickel content of ocean ferromanganese deposits and their relation to properties of the substrate. In: M. Morgenstein (Ed.), The origin and distribution of manganese nodules in the Pacific and prospects for exploration. Valdivia Manganese Exploration Group, Univ. of Hawaii and IDOE/NSF, Honolulu, p71-76.
- Ingram, B.L., Hein, J.R., and Framer, G.L., 1990. Age determinations and growth rates of Pacific ferromanganese deposits using strontium isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54: 1709-1721.
- Jeong, K.S., Kang, J.K., and Chough, S.K., 1994. Sedimentary processes and manganese nodule formation in the Korea Deep Ocean Study (KODOS) area, western part of Clarion-Clipperton fracture zones, northeast equatorial Pacific. *Mar. Geol.*, 122.
- Johnson, G.C. and Toole, J.M., 1993. Flow of deep and bottom water in the Pacific at 10N. *Deep-Sea Res.*, 40(2): 371-394.
- Jones, C.J. and Murray, J.W., 1985. The geochemistry of manganese in the northeast Pacific Ocean off Washington. *Limnol. Oceanogr.*, 30(1): 81-92.
- Keating, B.H., Matthey, D.P., Helsley, C.E., Naughton, J.J., and Epp, D., 1984. Evidence for a hot spot origin of the Caroline Islands. *Jour. Geophys. Res.*, 89(B12): 9937-9948.
- Keller, G.K. and Barron, J.A., 1983. Paleoceanographic implicatons of Miocene deep-sea hiatuses. *Geol. Soc. Am.Bull.*, 94: 590-613.
- Kennett, J.P., 1977. Cenozoic evolution of Antarctic late glaciation, the circum-Antarctic Ocean, and their impact on global paleoceanography. *J. Geophys. Res.*, 82(27): 3843-3960.

- Kennett, J.P. and Brunner, C.A., 1973. Antarctic late Cenozoic glaciation: Evidence for initiation of ice rafting and inferred increased bottom-water activity. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84: 2043-2052.
- Kitano, Y. and Hujiyoshi, R., 1980. Selective chemical leaching of Cadmium, Copper, Manganese, and Iron in marine sediments. *Geochem. J.*, 14: 113-122.
- Klinkhammer, G.P. and Bender, M.L., 1980. The distribution of manganese in the Pacific Ocean. *Earth Plant. Sci. Letts.*, 46: 361-384.
- Knauer, G.A., Martin, J.H. and Gordon, R.M., 1982. Cobalt in north-east Pacific waters. *Nature*, 297: 49-51.
- KORDI, 1990. A study on the strategy for the development of deep seabed mineral resources (II). Cruise Report, 1093pp.
- KORDI, 1991. A study on the strategy for the development of deep seabed mineral resources. Cruise Report, 1101pp.
- KORDI, 1992. A study on the strategy for the development of deep seabed mineral resources. Cruise Report, 720pp.
- Kusakabe, M. and Ku, T.L., 1984. Incorporation of Be isotopes and other trace metals into marine ferromanganese deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48: 2187-2193.
- Landing, W.M. and Bruland, K.W., 1987. The contrasting biogeochemistry of iron and manganese in the Pacific Ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 51: 29-43.
- Larson, R.L. and Hilde, T.W.C., 1975. A revised time scale of magnetic reversals for the early Cretaceous and late Jurassic. *J. Geophys. Res.*, 80: 2586-2594.

- Le Suave, R., Pichocki, C., Pautot, G., Hoffert, M., Morel, Y., Voisset, M., Monti, S., Amossé, J., and Kosakevitch, A., 1989. Geological and mineralogical study of Co-rich ferromanganese crusts from a submarine atoll in the Tuamotu Archipelago (French Polynesia). *Mar. Geol.*, 87: 227-247.
- Lyle, M., Murray, D.W., Finney, B.P., Dymond, J., Robbins, J.M., and Brooksforce, K., 1988. The record of late Pleistocene biogenic sedimentation in the eastern equatorial Pacific Ocean. *Paleoceanography*, 3: 39-59.
- MacKelvey, V.E., Wright, N.A., and Rowland, R.W., 1979. Manganese nodule resources in the northeastern equatorial Pacific. In: J.L. Bischoff and D.Z. Piper (Eds.), *Marine geology and oceanography of the Pacific manganese nodule province*. Plenum Press, New York, p.747-762.
- Mangini, A., Segl, M., Glasby, G.P., Stoffers, P., and Pluger, W.L., 1990. Element accumulation rates in and growth histories of manganese nodules from the southwestern Pacific Basin. *Mar. Geol.*, 94: 97-107.
- Manheim, F.T., 1986. Marine cobalt resources. *Science*, 232: 600-608.
- Manheim, F.T. and C.M. Lane-Bostwick, 1988. Cobalt in ferromanganese crusts as a monitor of hydrothermal discharge on the Pacific sea floor. *Nature*, 335: 59-62.
- Manheim, F.T. and Gulbrandsen, R.A., 1979. Marine phosphorites. In R.G. Burns (Ed.), *Marine minerals, Reviews in mineralogy*, Mineral. Soc. Am., v. 6: 151-173.
- Mantyla, A.W., 1975. On the potential temperature in the abyssal Pacific Ocean. *J. Mar. Res.*, 33: 341-354.

- Martin, J.H. and Knauer, G.A., 1973. The elemental composition of plankton. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37: 1639-1653.
- Martin, J.H. and Knauer, G.A., 1985. Lateral transport of Mn in the north-east Pacific Gyre oxygen minimum. *Nature*, 314: 524-526.
- Mattey, D.P., 1982. The minor and trace element geochemistry of volcanic rocks from Truk, Ponape and Kusaie, eastern Caroline Islands: The evolution of a young hotspot trace across old Pacific Ocean crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80:1-13.
- Mooby, S.A. and Cronan, D.S., 1981. The distribution of elements between co-existing phases in some marine ferromanganese-oxide deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43: 781-787.
- Murray, J.W., Dillard, J.G., Giovanoli, R., Moers, H., and Stumm, W., 1985. Oxidation of Mn(II): Initial mineralogy, oxidation state and ageing. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49: 463-470.
- Murray, J.W. and Dillard, J.G., 1979. The oxidation of cobalt(II) adsorbed on manganese dioxide. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43: 781-787.
- Murray, R.W., Leinen, M., 1993. Chemical transport to the seafloor of the equatorial Pacific ocean across a latitudinal transect at 135 ° W: Tracking sedimentary major, trace, and rare earth element fluxes at the equator and the intertropical convergence zone. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57: 4141-4163.
- Neumann, T.I. and Stüben, D., 1991. Detailed geochemical study and growth history of some ferromanganese crusts from the Tuamotu archipelago. *Mar. Mining*, 10: 29-40.

- Pattan, J.N. and Mudholkar, A.V., 1991. Mössbauer studies and oxidized manganese ratio in ferromanganese nodules and crusts from the central Indian Ocean. *Geo-Mar. Letts.*, 11: 51-55.
- Pichocki, C. and Hoffert, M., 1987. Characteristics of Co-rich ferromanganese nodules and crusts and sampled in French Polynesia. *Mar. Geol.*, 77: 109-119.
- Piper, D.Z., Basler, J.R., and Bischoff, J.I., 1984. The oxidation state of marine manganese nodules. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48: 2347-2355.
- Piper, D.Z. and Codispoti, L.A., 1975. Marine phosphorite deposits and the nitrogen cycle. *Science*, 188: 15-18.
- Puteanus, D., Glasby, G.P., Stoffers, P., Mangini, A., and Kunzendorf, H., 1989. Distribution, internal structure, and composition of manganese crusts from seamounts east of the Teahitia-Mehetia hot spot, southwest Pacific. *Mar. Mining*, 8: 245-266.
- Rea, D.K., Piasias, N.G., and Newberry, T., 1991. Late Pleistocene paleoclimatology of the equatorial Pacific: Flux patterns of biogenic sediments. *Paleoceanography*, 6(2): 227-244.
- Rea, D.K. and Vallier, T.L., 1983. Two Cretaceous volcanic episodes in the western Pacific Ocean. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94: 1430-1437.
- Schlanger, S.O. and I.P. Silva, 1986. Oligocene sea-level falls recorded in mid-Pacific atoll and archipelagic apron settings. *Geology*, 14: 392-395.
- Schwab, W.C., Davis, A., Haggerty, J., Ling, T., and Commeau, J., 1985. Geologic reconnaissance and geological analysis of ferromanganese crusts of the Radak Chain, Marshall Islands. U.S. Geological Survey, Open File Rpt., 85-18., 9pp.



- Sclater, J.G., R.N. Anderson, and M.L. Bell, 1971. Elevation of ridges and evolution of the central eastern Pacific. *J. Geophys. Res.*, 76: 7888-7915.
- Segl, M., Mangini, A., Beer, J., Bonani, G., Suter, M., and Wölfli, W., 1989. Growth rate variations of manganese nodules and crusts induced by paleoceanographic events. *Paleoceanography*, 4(5): 511-530.
- Segl, M., Mangini, A., Bonani, G., Hofmann, H.J., Nessi, M., Suter, M., Wölfli, W., Friedrich, G., Plüger, W.L., Wiechowski, A., and Beer, J., 1984. <sup>10</sup>Be-dating of a manganese crust from Central North Pacific and implications for ocean paleocirculation. *Nature*, 209: 540-543.
- Shackleton, N.J. and Opdyke, N.D., 1977. Oxygen isotope and paleomagnetic evidence for early northern Hemisphere glaciation. *Nature*, 270: 216-219.
- Sung, W. and Morgan, J.J., 1981. Oxidative removal of Mn(II) solution catalysed by the  $\gamma$ -FeOOH (lepidocrocite) surface. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45: 2377-2383.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M., 1980. trace metal speciation in Yamaska and Francois River. *Canadian J. Earth Sci.*, 17: 90-151.
- Thunell, R.C., 1981. Cenozoic paleotemperature changes and planktonic foraminifera speciation. *Nature*, 289: 670-672.
- van Andel, T.H., Heath, G.R., and Moore, T.C., Jr., 1975. Cenozoic history and paleoceanography of the central equatorial Pacific Ocean. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 143: 134p.
- von Stackelberg, U., Kunzendorf, H., Marching, V., and Gwozdz, R., 1984. Growth history of a large ferromanganese crust from the equatorial north Pacific nodule belt. *Geol. Jb. A75*: 213-235.

- Wang, L., 1994. Sea surface temperature history of the low latitude western Pacific during the last 5.3 million years. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 108: 379-436.
- Woodruff, F., savin, S.M., and Douglas, R.G., 1981. Miocene stable isotope record: a detailed deep Pacific study and its paleoclimatic implications. *Science*, 212: 665-668.
- Wu, G. and Berger, W.H., 1991. Pleistocene  $\delta^{18}\text{O}$  records from Ontong-Java Plateau: Effects of winnowing and dissolution. *Mar. Geol.*, 96: 193-209.

# 부 록

## 점화학 분석결과

## 89-DO1 Crust

Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
0.3	26.69	11.14	1.04	0.15	0.00	-0.00	0.40	0.14	1.03	0.26	0.56	2.01	0.31
2.6	21.34	16.79	1.00	0.36	0.00	0.32	0.55	0.27	1.98	0.20	0.74	2.14	0.58
4.8	25.97	11.37	1.19	0.53	0.16	0.00	0.49	0.18	0.87	0.32	0.72	1.90	0.46
6.3	22.55	14.63	0.61	0.25	0.16	0.01	0.50	0.29	1.45	0.41	0.87	2.09	0.40
7.1	22.05	14.93	0.62	0.40	0.00	0.00	0.59	0.34	1.42	0.42	0.95	1.91	0.38
8.0	23.85	12.04	0.51	0.40	0.20	0.00	0.36	0.12	1.01	0.32	0.72	2.05	0.25
8.5	26.00	10.44	0.55	0.41	0.08	0.13	0.33	0.07	0.61	0.26	0.74	1.81	0.34
8.9	26.72	12.04	0.36	0.62	0.00	0.00	0.61	0.20	1.03	0.35	0.81	2.34	0.46
9.5	29.43	7.34	0.85	1.04	0.32	0.01	0.47	0.09	0.52	0.41	0.69	2.01	0.17
10.3	29.91	6.44	1.14	1.02	0.12	0.00	0.66	0.18	0.62	0.35	0.58	1.77	0.22
11.3	24.78	10.96	0.81	0.51	0.26	0.41	0.70	0.22	1.11	0.32	0.88	2.02	0.31
12.0	15.34	19.22	0.39	0.61	0.15	0.00	0.61	0.86	2.83	0.27	0.81	1.49	0.47
13.5	28.03	8.23	0.54	0.82	0.00	0.00	0.49	0.15	0.61	0.26	0.84	1.84	0.22
14.5	26.08	9.11	0.85	0.45	0.00	0.10	0.74	0.35	1.02	0.46	0.88	2.08	0.23
15.8	26.12	8.02	1.07	1.01	0.25	0.70	0.79	0.22	0.81	0.35	0.63	2.17	0.27
17.0	27.24	9.21	0.85	0.60	0.11	0.00	0.41	0.06	0.71	0.39	0.79	2.02	0.36
17.9	27.93	6.90	0.82	0.59	0.06	0.01	0.39	0.11	0.43	0.38	0.74	2.19	0.17
18.8	26.08	9.67	1.05	1.26	0.20	0.03	0.44	0.15	0.69	0.29	0.81	2.20	0.33
20.0	24.19	10.67	0.59	0.77	0.00	0.40	0.41	0.26	1.05	0.56	0.96	1.90	0.28
21.0	26.10	11.12	0.46	0.89	0.00	0.13	0.70	0.21	0.83	0.31	0.83	2.63	0.28
22.5	25.03	11.68	0.07	0.36	0.07	0.05	0.42	0.18	0.92	0.32	0.75	2.30	0.39
23.1	0.06	0.26	0.00	0.12	0.16	0.00	0.21	0.04	0.00	0.03	0.00	36.59	14.99
25.3	18.97	13.91	0.22	0.33	0.36	0.31	0.49	0.28	1.27	0.20	1.00	1.76	0.41
26.0	22.44	13.12	0.62	0.34	0.32	0.05	0.34	0.30	1.43	0.22	0.72	1.71	0.49
27.3	25.79	12.51	0.61	0.44	0.36	0.00	0.62	0.23	1.24	0.30	0.98	2.21	0.46
29.0	30.41	5.96	1.16	0.91	0.21	0.00	0.65	0.18	0.62	0.12	0.67	1.88	0.18
29.8	24.39	15.74	0.00	0.42	0.25	0.12	0.51	0.32	1.51	0.28	0.86	2.31	0.47
32.3	31.62	7.29	0.62	0.92	0.28	0.00	0.35	0.19	0.79	0.32	0.92	1.87	0.24
34.0	25.06	11.79	0.62	0.41	0.00	0.06	0.46	0.22	0.99	0.36	0.70	2.33	0.47

Depth	Mn	Re	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
35.8	28.88	10.01	0.40	0.51	0.57	0.00	0.46	0.17	0.92	0.19	0.33	2.52	0.36
37.8	28.81	10.42	0.50	1.06	0.47	0.25	0.54	0.22	0.74	0.25	0.55	6.17	2.04
40.4	23.95	16.11	0.39	0.53	0.18	0.75	0.44	0.21	1.39	0.13	0.57	2.63	0.70
41.8	24.38	11.74	0.33	0.73	0.00	0.00	0.19	0.11	0.88	0.21	0.59	6.20	1.93
44.5	29.48	6.61	0.83	0.72	0.32	0.13	0.68	0.13	0.57	0.31	0.74	3.26	0.75
45.0	29.47	5.44	0.32	1.50	0.00	0.27	0.85	0.19	0.45	0.39	0.50	7.76	2.38
46.9	28.78	11.27	0.49	0.57	0.00	0.00	0.63	0.20	1.01	0.25	0.68	2.82	0.38
47.0	39.94	2.86	0.64	2.08	-0.01	0.00	1.30	0.24	0.39	0.38	0.39	2.06	0.38
48.3	30.14	8.44	0.55	0.98	0.02	0.19	0.72	0.19	0.63	0.35	0.50	4.65	0.95
48.8	0.06	1.25	0.00	0.12	0.07	0.00	0.28	0.52	1.32	0.10	0.35	36.84	13.57
49.4	28.71	7.91	0.36	1.01	0.22	0.37	0.50	0.15	0.42	0.35	0.54	3.96	0.63
50.5	24.86	10.24	0.28	0.61	0.06	0.00	0.68	0.10	0.73	0.46	0.50	3.37	0.55
50.6	0.34	1.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.59	1.23	0.24	0.13	36.32	13.67
52.4	0.16	0.16	0.00	0.09	0.00	0.00	0.05	0.08	0.04	0.00	0.00	40.35	14.47
53.8	29.45	11.27	0.37	0.98	0.00	0.00	0.44	0.15	0.62	0.62	0.74	2.81	0.28
55.3	29.59	8.33	0.18	1.41	0.14	0.43	0.81	0.15	0.83	0.40	0.64	2.37	0.26
56.1	37.13	3.38	0.70	1.65	0.12	0.00	1.31	0.28	0.35	0.55	0.54	2.68	0.50
57.9	39.02	3.77	0.59	2.04	0.00	0.56	1.28	0.33	0.44	0.42	0.47	1.92	0.23
58.8	38.84	2.90	0.04	1.85	0.17	0.19	1.43	0.20	0.34	0.55	0.50	3.13	0.86
60.5	39.74	2.73	0.25	1.84	0.71	0.00	1.23	0.27	0.38	0.60	0.49	2.92	0.62
61.3	34.38	3.78	0.04	1.48	0.32	0.00	1.15	0.43	0.44	0.54	0.66	6.69	2.26
64.0	32.99	4.41	0.30	1.66	0.37	0.28	0.93	0.29	0.47	0.34	0.33	7.80	2.75
65.0	23.46	12.43	0.00	0.41	0.00	0.00	0.52	0.27	1.08	0.23	0.50	4.63	1.18
65.5	29.32	9.47	0.35	0.69	0.00	0.00	0.42	0.20	0.54	0.21	0.51	2.47	0.25
67.8	20.67	14.27	0.00	0.64	0.03	0.24	0.57	0.46	1.58	0.13	0.72	9.00	2.73
68.1	0.08	10.54	0.17	0.06	0.06	0.19	1.68	7.46	23.05	3.10	0.62	4.09	1.87

89-D11 Crust

Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
0.1	25.91	11.77	0.59	1.11	0.62	0.00	1.30	0.37	1.86	0.30	0.65	1.97	0.55
1.0	22.23	15.25	0.42	0.50	0.08	0.05	0.55	0.35	1.70	0.25	0.69	2.04	0.48
1.7	24.56	11.57	0.68	0.88	0.18	0.39	0.64	0.22	1.27	0.21	0.74	2.18	0.46
1.3	27.59	8.29	0.88	1.23	0.11	0.00	0.37	0.10	0.65	0.37	0.55	1.76	0.24
2.3	26.04	9.87	0.84	0.35	0.00	0.00	0.56	0.11	1.03	0.45	0.79	2.08	0.37
3.5	27.44	9.09	1.26	0.42	0.00	0.00	0.46	0.18	0.72	0.45	1.10	1.91	0.27
4.7	23.43	10.93	0.93	0.80	0.12	0.00	0.51	0.11	0.99	0.16	0.91	2.13	0.36
5.6	25.27	10.48	1.04	0.68	0.00	0.00	0.46	0.22	0.94	0.23	0.88	2.39	0.31
6.5	28.39	7.08	0.67	1.29	0.00	0.00	0.44	0.02	0.37	0.43	0.69	1.89	0.14
7.7	28.88	7.01	0.78	1.30	0.06	0.36	0.34	0.11	0.43	0.42	0.76	2.02	0.23
8.9	28.90	7.71	0.51	1.23	0.00	0.00	0.36	0.06	0.46	0.39	0.80	2.17	0.29
10.0	23.92	16.77	0.33	0.31	0.40	0.00	0.85	0.49	2.01	0.21	1.39	2.39	0.46
10.2	28.13	8.31	0.92	0.61	0.29	0.00	0.35	0.10	0.56	0.30	1.10	1.89	0.19
11.1	28.47	8.54	0.55	0.95	0.28	0.00	0.36	0.13	0.52	0.51	0.69	1.89	0.25
12.5	28.71	7.01	0.79	1.27	0.20	0.14	0.35	0.02	0.45	0.37	0.77	2.13	0.12
13.4	30.04	7.99	0.49	0.97	0.00	0.00	0.51	0.15	0.78	0.30	1.06	2.13	0.25
14.5	27.64	7.98	0.70	0.67	0.17	0.00	0.31	0.11	0.64	0.17	0.99	1.79	0.24
15.6	27.79	8.02	0.86	0.88	0.15	0.01	0.39	0.15	0.56	0.36	0.88	1.71	0.12
16.8	11.02	21.70	0.00	0.20	0.24	0.00	0.64	1.26	3.14	0.05	1.17	0.95	0.59
16.8	23.83	11.65	0.76	0.67	0.02	0.05	0.68	0.39	1.35	0.26	1.23	2.05	0.27
16.4	29.61	7.80	1.12	1.40	0.51	0.00	0.43	0.16	0.63	0.35	0.89	2.13	0.13
17.7	26.96	8.56	0.68	0.59	0.00	0.00	0.73	0.28	1.04	0.27	0.97	2.18	0.26
18.8	25.75	8.58	0.60	0.60	0.09	0.18	0.40	0.19	0.83	0.45	0.87	1.67	0.27
19.8	23.56	9.96	0.36	0.61	0.08	0.24	0.57	0.20	0.97	0.15	1.02	1.83	0.33
19.8	24.92	9.29	1.03	0.67	0.38	0.25	0.77	0.27	1.00	0.15	0.98	1.84	0.25
20.9	26.12	8.79	0.30	0.63	0.31	0.02	0.24	0.12	0.64	0.39	0.92	1.62	0.26
21.5	21.44	12.58	0.33	0.26	0.22	0.11	0.37	0.19	1.16	0.18	1.08	1.74	0.31
22.0	27.32	10.70	0.80	0.66	0.11	0.08	0.59	0.22	0.88	0.33	1.03	2.16	0.31
22.9	26.31	8.56	0.74	0.77	0.27	0.28	0.37	0.11	0.64	0.34	0.84	1.81	0.20
23.0	28.65	13.47	0.23	0.54	0.16	0.06	1.00	0.64	2.02	0.43	0.87	2.58	0.39

Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
23.5	21.14	13.01	0.28	0.35	0.00	0.00	0.42	0.30	1.26	0.20	1.13	1.92	0.37
23.6	24.26	11.30	0.46	0.39	0.30	0.64	0.38	0.27	0.84	0.25	0.90	2.11	0.27
24.0	24.93	11.19	0.48	0.68	0.00	0.03	0.45	0.25	1.06	0.21	0.85	1.97	0.44
24.6	21.94	10.60	0.61	0.59	0.10	0.38	0.28	0.14	0.80	0.26	0.92	1.87	0.26
25.4	24.99	10.90	0.22	0.79	0.23	0.04	0.43	0.16	1.05	0.32	0.87	2.27	0.35
26.0	24.52	11.19	0.27	0.60	0.21	0.38	0.40	0.19	0.90	0.17	0.96	2.17	0.46
26.4	22.50	11.68	0.38	0.44	0.07	0.40	0.61	0.20	1.08	0.28	0.94	2.04	0.30
27.5	24.64	12.06	0.19	0.35	0.00	0.00	0.49	0.20	1.07	0.23	0.86	2.35	0.29
28.3	22.60	11.84	0.05	0.64	0.12	0.02	0.64	0.29	1.42	0.27	0.99	2.13	0.36
29.6	21.74	12.82	0.73	0.42	0.22	0.00	0.43	0.23	1.31	0.22	0.79	1.76	0.32
30.4	24.32	12.09	0.39	0.57	0.03	0.08	0.46	0.22	1.01	0.19	0.64	2.27	0.37
31.6	24.26	10.28	0.11	0.35	0.07	0.05	0.71	0.36	0.98	0.06	0.83	2.20	0.33
33.0	26.18	6.61	1.17	0.95	0.36	0.13	0.43	0.17	0.60	0.20	0.81	1.59	0.14
33.8	26.70	7.38	0.61	0.70	0.25	0.34	0.50	0.21	0.61	0.33	0.86	2.15	0.20
34.8	27.74	6.15	0.71	0.87	0.04	0.20	0.27	0.04	0.36	0.38	0.68	1.65	0.19
35.8	22.55	9.24	0.56	0.23	0.21	0.09	0.46	0.12	0.66	0.28	0.79	2.24	0.22
36.6	22.94	8.15	0.30	0.51	0.23	0.19	0.48	0.15	0.59	0.29	0.35	2.09	0.19
37.5	16.02	10.18	0.59	0.35	0.00	0.06	0.60	0.18	0.99	0.22	0.41	1.78	0.26
37.5	20.11	10.30	0.31	0.64	0.48	0.21	0.57	0.21	0.93	0.27	0.36	2.23	0.34
38.1	22.58	7.68	0.12	0.86	0.04	0.39	0.53	0.12	0.50	0.32	0.39	1.93	0.14
39.3	22.57	9.94	0.42	0.70	0.33	0.00	0.64	0.12	0.69	0.36	0.39	2.21	0.24
40.5	22.01	10.16	0.12	0.46	0.09	0.00	0.34	0.18	0.62	0.39	0.19	2.37	0.34
41.4	23.75	10.79	0.26	0.50	0.18	0.09	0.38	0.15	0.61	0.31	0.25	2.27	0.27
41.9	23.31	10.37	0.32	0.51	0.13	0.00	0.33	0.17	0.64	0.39	0.21	2.18	0.20
42.3	20.46	10.09	0.00	0.75	0.29	0.02	0.57	0.44	1.61	0.33	0.29	2.04	0.17
42.8	20.65	11.67	0.34	0.40	0.08	0.00	0.69	0.28	1.13	0.25	0.39	2.28	0.38
43.3	20.07	8.92	0.20	0.61	0.00	0.00	0.81	0.25	0.84	0.32	0.36	2.05	0.24
44.6	14.55	9.93	0.00	0.55	0.00	0.00	0.38	0.20	1.00	0.35	0.39	1.73	0.24
45.8	17.94	7.72	0.42	0.54	0.41	0.00	0.47	0.15	0.64	0.47	0.40	2.06	0.30
46.4	19.59	8.83	0.37	0.57	0.00	0.00	0.47	0.21	0.83	0.32	0.54	1.99	0.20
47.9	24.24	11.56	0.48	0.40	0.24	0.21	0.36	0.26	1.01	0.33	1.01	2.09	0.31

Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
49.0	22.43	15.05	0.07	0.69	0.00	0.25	0.57	0.22	1.60	0.25	1.03	2.17	0.32
49.7	27.60	10.04	0.41	0.86	0.14	0.12	0.57	0.09	0.66	0.39	0.46	2.54	0.26
50.1	37.41	3.26	0.43	1.88	0.27	0.01	0.96	0.20	0.48	0.53	0.48	2.10	0.29
50.2	25.56	7.19	0.37	0.31	0.45	0.00	0.44	0.10	0.69	0.30	0.48	7.85	2.87
53.0	5.24	38.82	0.00	0.12	0.00	0.10	0.60	0.93	3.01	0.08	2.49	0.87	0.70
53.3	0.17	0.14	0.19	0.21	0.24	0.00	0.05	0.04	0.00	0.02	0.00	39.59	14.75
53.9	0.00	0.09	0.00	0.00	0.05	0.00	0.18	0.38	0.47	0.00	0.00	38.76	14.23
53.9	6.76	28.63	0.20	0.24	0.15	0.00	0.67	1.02	2.40	0.06	2.14	6.96	3.04
54.7	5.37	17.68	0.05	0.21	0.02	0.32	0.27	0.39	1.00	0.13	1.00	18.95	7.00
55.0	0.11	0.15	0.00	0.27	0.17	0.34	0.02	0.02	0.11	0.00	0.09	19.50	6.90
55.1	27.94	8.24	0.13	1.17	0.10	0.00	0.42	0.13	0.45	0.48	0.48	2.46	0.25
56.1	28.21	10.17	0.11	0.65	0.00	0.00	0.52	0.11	0.89	0.45	0.62	2.72	0.24
56.3	0.13	1.25	0.00	0.00	0.07	0.00	0.12	0.14	0.34	0.00	0.00	37.47	12.55
57.1	0.19	0.35	0.09	0.00	0.00	0.00	0.18	0.16	0.27	0.03	0.02	38.62	13.80
57.4	32.26	11.62	0.01	0.78	0.27	0.00	0.83	0.22	0.86	0.37	0.49	3.23	0.41
58.3	18.51	17.69	0.23	0.34	0.69	0.35	0.22	0.34	1.83	0.33	0.85	1.85	0.40
58.8	0.18	0.14	0.00	0.11	0.26	0.18	0.06	0.04	0.00	0.00	0.01	37.07	13.83
59.4	26.53	3.47	0.41	1.12	0.00	0.27	0.59	0.12	0.30	0.46	0.41	9.62	3.26
59.5	3.59	1.75	0.14	0.00	0.00	0.51	0.13	0.17	0.48	0.10	0.16	31.70	12.03
59.8	33.77	4.92	0.29	1.32	0.59	0.23	0.94	0.13	0.43	0.42	0.45	5.36	1.38
61.8	25.50	13.69	0.26	0.45	0.03	0.16	0.48	0.30	1.30	0.27	0.53	3.23	0.55
62.5	0.00	1.21	0.37	0.00	0.31	0.11	0.24	0.82	2.41	0.27	0.05	35.39	13.48
62.9	25.22	13.39	0.00	0.26	0.38	0.25	0.50	0.17	1.08	0.25	0.28	7.15	2.06
64.2	15.23	7.64	0.00	0.57	0.00	0.03	0.41	0.16	0.68	0.26	0.31	17.03	6.46
65.3	22.92	10.95	0.07	0.22	0.00	0.00	0.36	0.08	0.94	0.21	0.38	7.79	2.18
68.5	24.61	11.60	0.00	0.31	0.14	0.00	0.52	0.18	1.09	0.25	0.44	5.75	1.68
69.0	0.30	0.76	0.16	0.00	0.16	0.04	0.16	0.75	1.89	0.33	0.08	36.46	13.81
69.6	23.36	12.78	0.20	0.28	0.00	0.00	0.37	0.14	1.00	0.15	0.34	6.64	1.84
70.8	10.59	6.31	0.00	0.69	0.00	0.16	0.44	0.13	0.53	0.10	0.19	24.66	9.54
71.5	0.03	2.79	0.15	0.13	0.00	0.00	0.50	1.59	5.03	0.61	0.07	30.15	11.92
72.3	19.83	9.79	0.00	0.42	0.05	0.00	0.36	0.14	0.81	0.23	0.35	12.38	4.22



Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
73.0	23.22	11.09	0.35	0.91	0.39	0.04	0.42	0.14	0.87	0.22	0.30	6.93	1.85
73.6	0.06	0.79	0.00	0.03	0.38	0.34	0.35	0.88	1.87	0.35	0.03	35.13	13.59
74.1	0.03	0.83	0.28	0.08	0.00	0.00	0.10	0.98	2.45	0.43	0.05	34.89	13.28
74.6	14.85	3.26	0.00	0.29	0.35	0.32	0.39	0.04	0.22	0.17	0.24	21.64	7.53
76.1	0.08	0.54	0.15	0.07	0.22	0.04	0.08	0.54	1.16	0.16	0.03	36.51	14.05
76.6	18.99	7.03	0.52	0.14	0.16	0.00	0.54	0.12	0.57	0.13	0.37	11.46	3.92
78.4	28.20	11.80	0.31	0.56	0.00	0.20	0.51	0.20	0.98	0.30	0.63	3.71	0.87
79.8	26.05	8.26	0.07	0.65	0.01	0.18	0.38	0.10	0.73	0.28	0.61	2.56	0.35
80.2	0.13	0.12	0.21	0.16	0.00	0.41	0.03	0.10	0.07	0.00	0.05	38.90	13.80
81.0	5.97	2.05	0.06	0.62	0.00	0.00	0.54	0.56	1.02	0.11	0.08	30.34	11.83
81.3	4.09	11.27	0.00	0.14	0.00	0.00	0.33	0.30	0.66	0.00	0.50	25.62	10.15
82.3	0.00	0.33	0.20	0.15	0.03	0.00	0.12	0.02	0.00	0.10	0.00	33.55	14.50
82.9	27.25	14.47	0.34	0.45	0.00	0.00	0.75	0.39	1.52	0.45	0.76	3.29	0.59
83.4	26.73	4.21	0.10	1.35	0.43	0.44	0.60	0.06	0.39	0.26	0.46	10.98	3.73
83.9	0.16	0.35	0.19	0.24	0.13	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00	0.00	38.79	14.60
84.9	15.00	12.01	0.00	0.26	0.01	0.00	0.61	0.82	2.55	0.29	0.56	12.85	4.50
85.1	25.90	4.03	0.11	1.07	0.16	0.12	0.82	0.04	0.38	0.34	0.37	3.59	0.90
86.5	20.41	10.30	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24	0.15	0.83	0.34	0.43	10.56	3.21
87.1	0.32	25.47	0.00	0.13	0.32	0.01	0.54	0.56	0.81	0.04	0.38	19.23	8.05
87.6	25.25	13.90	0.16	0.23	0.21	0.00	0.47	0.15	1.00	0.21	0.38	4.00	0.96
89.0	24.70	16.06	0.08	0.27	0.24	0.00	0.46	0.31	1.54	0.29	0.43	3.04	0.63
90.2	25.21	11.17	0.00	0.42	0.35	0.43	0.45	0.15	1.11	0.21	0.52	4.74	1.17
91.1	24.62	12.36	0.18	0.23	0.00	0.00	0.60	0.23	1.16	0.19	0.63	8.30	2.58
92.1	27.63	13.47	0.27	0.34	0.28	0.00	0.52	0.29	1.20	0.36	0.67	4.20	1.09
94.3	27.14	10.09	0.34	0.70	0.21	0.58	0.47	0.22	0.82	0.22	0.62	4.96	1.15
95.5	23.86	11.19	0.11	0.43	0.00	0.03	0.53	0.14	1.15	0.25	0.77	6.88	2.20
95.9	0.27	5.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.19	0.12	0.08	0.27	35.23	13.78
96.9	19.76	5.85	0.19	0.73	0.07	0.18	0.50	0.12	0.57	0.25	0.63	11.17	3.82
98.1	28.38	6.15	0.31	0.70	0.10	0.35	0.61	0.10	0.51	0.33	0.53	3.02	0.72
98.1	32.03	10.45	0.14	0.92	0.67	0.00	0.87	0.16	0.93	0.30	0.94	3.13	0.32
98.2	20.63	13.99	0.04	0.33	0.00	0.00	0.50	0.60	2.21	0.24	1.10	3.10	0.57

Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
98.4	0.00	0.64	0.00	0.14	0.00	0.14	0.15	0.80	1.45	0.19	0.00	36.72	14.13
99.0	32.00	5.49	0.67	1.14	0.13	0.41	0.63	0.13	0.50	0.39	0.53	2.40	0.35
99.8	0.09	0.91	0.07	0.00	0.36	0.08	0.13	0.40	0.84	0.17	0.02	37.96	14.75
100.6	29.32	6.19	0.64	0.69	0.00	0.00	0.66	0.17	0.58	0.34	0.77	6.14	1.74
101.3	26.11	5.36	1.00	1.08	0.00	0.26	0.67	0.22	0.51	0.26	0.38	12.75	4.50
101.8	0.71	7.30	0.00	0.00	0.19	0.19	0.77	4.25	11.55	2.10	0.26	12.12	4.40
101.9	0.22	5.46	0.01	0.32	0.05	0.00	1.36	7.04	20.14	1.41	0.02	1.71	0.01
103.1	0.89	0.34	0.00	0.08	0.00	0.11	0.08	0.13	0.00	0.05	0.00	37.44	14.52
103.6	0.14	0.14	0.00	0.01	0.07	0.53	0.00	0.32	0.51	0.15	0.04	38.70	14.89
103.9	0.00	0.18	0.09	0.51	0.34	0.00	0.06	0.75	1.10	0.20	0.02	37.70	14.60
104.8	0.23	6.43	0.00	0.59	0.62	0.31	0.51	2.80	8.67	1.55	0.69	11.26	1.28
105.5	0.00	0.36	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01	0.45	0.80	0.03	0.00	37.63	14.86
105.7	0.07	0.24	0.04	0.00	0.03	0.00	0.04	0.33	0.65	0.05	0.00	38.59	14.80
106.5	0.06	8.11	0.00	0.10	0.00	0.07	1.71	7.60	22.57	1.69	0.13	1.01	0.00
107.3	0.00	0.14	0.00	0.10	0.00	0.08	0.10	0.48	0.91	0.07	0.03	38.68	14.99
107.4	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.26	0.00	11.43	29.09	4.43	0.08	0.35	0.00
107.6	24.26	13.60	0.05	0.79	0.00	0.00	0.65	0.23	1.46	0.20	0.45	4.77	1.11

## 89-D09 Crust

Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
0.4	27.83	9.61	0.71	0.43	0.30	0.16	0.21	0.09	0.67	0.32	0.78	1.99	0.17
1.5	24.84	12.98	0.25	0.55	0.03	0.47	0.41	0.17	1.22	0.29	0.80	2.04	0.31
3.0	21.41	16.51	0.38	0.96	0.35	0.00	0.58	0.35	2.50	0.26	1.01	2.28	0.39
4.9	29.26	8.50	0.98	0.68	0.08	0.64	0.32	0.16	0.54	0.23	0.86	2.06	0.08
5.8	30.06	6.99	1.07	0.70	0.33	0.00	0.49	0.14	0.73	0.53	0.87	2.16	0.17
6.5	23.22	14.98	0.23	0.46	0.05	0.19	0.41	0.25	1.83	0.22	1.28	2.25	0.39
7.8	26.23	13.22	0.15	0.51	0.05	0.00	0.64	0.17	1.31	0.26	0.68	2.47	0.42
9.0	27.52	11.16	0.67	1.07	0.14	0.45	0.62	0.17	0.97	0.26	0.58	2.41	0.33
10.3	22.92	18.54	0.13	0.34	0.15	0.58	0.59	0.34	2.40	0.35	1.07	2.12	0.42
11.0	26.71	11.48	0.59	0.74	0.00	0.05	0.27	0.08	0.82	0.15	0.68	2.28	0.26
12.5	23.43	14.72	0.47	0.61	0.00	0.00	0.76	0.33	2.08	0.23	0.72	2.19	0.28
13.4	18.75	21.34	0.14	0.24	0.20	0.56	0.62	0.52	2.72	0.27	1.00	1.77	0.40
14.0	27.03	11.93	0.36	0.56	0.02	0.00	0.46	0.09	0.95	0.32	0.60	2.18	0.35
15.4	27.21	11.64	0.17	0.50	0.66	0.04	0.43	0.09	0.75	0.29	0.49	2.26	0.25
16.5	22.25	20.22	0.28	0.55	0.01	0.61	0.51	0.42	2.50	0.35	0.68	2.00	0.36
17.3	24.17	12.13	0.30	0.60	0.19	0.14	0.60	0.10	1.40	0.19	0.65	2.53	0.28
18.3	20.52	15.39	0.11	0.62	0.25	0.26	0.61	0.32	1.64	0.09	0.48	2.18	0.33
19.3	23.54	14.32	0.47	0.45	0.37	0.11	0.54	0.38	1.63	0.27	0.57	1.99	0.39
20.8	22.72	14.02	0.48	0.25	0.13	0.43	0.53	0.31	1.61	0.29	0.57	2.22	0.43
21.5	27.03	7.60	0.61	0.72	0.15	0.00	0.63	0.18	0.80	0.43	0.60	1.84	0.25
22.5	23.99	12.01	0.62	0.43	0.00	0.00	0.53	0.25	1.27	0.31	0.85	2.02	0.28
24.0	27.07	6.73	0.89	1.01	0.14	0.00	0.53	0.09	0.54	0.47	0.57	1.84	0.22
24.8	23.73	8.09	0.63	0.65	0.27	0.17	0.51	0.17	0.78	0.32	0.65	1.88	0.22
26.0	31.17	5.49	0.71	1.00	0.00	0.40	0.64	0.10	0.49	0.55	0.52	1.87	0.14
26.6	26.22	6.64	0.79	1.06	0.12	0.00	0.57	0.13	0.74	0.33	0.52	1.89	0.22
28.5	26.98	11.35	0.50	0.81	0.00	0.00	0.41	0.15	0.82	0.51	0.59	2.34	0.27
29.5	24.02	12.82	0.32	0.69	0.15	0.00	0.35	0.11	0.92	0.23	0.75	1.87	0.24
30.5	24.19	8.73	0.15	0.79	0.00	0.41	0.43	0.07	0.70	0.68	0.69	2.45	0.27
31.5	17.38	10.08	0.23	0.37	0.03	0.00	0.21	0.14	1.00	0.24	0.47	9.99	2.90
32.3	24.17	13.60	0.11	0.29	0.24	0.10	0.35	0.23	1.28	0.29	0.59	2.89	0.40
33.3	0.00	0.38	0.15	0.14	0.13	0.26	0.04	0.00	0.00	0.06	0.00	34.91	15.55
33.5	22.49	11.76	0.81	0.43	0.19	0.55	0.49	0.19	1.34	0.24	0.41	3.72	0.94

Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
34.3	23.00	15.30	0.18	0.03	0.23	0.00	0.50	0.36	1.91	0.33	0.42	2.44	0.57
35.3	23.38	12.07	0.38	0.66	0.04	0.02	0.46	0.22	1.25	0.26	0.36	4.31	1.24
35.5	0.03	6.05	0.00	0.00	0.24	0.04	0.18	0.17	0.18	0.04	0.01	34.48	12.96
37.9	24.61	15.21	0.42	0.69	0.41	0.78	0.36	0.36	1.31	0.22	0.49	3.93	0.76
38.3	2.14	43.72	0.15	0.07	0.54	0.07	0.59	0.86	5.54	0.48	1.59	1.15	0.82
38.5	0.83	11.06	0.32	0.00	0.22	0.00	0.26	0.28	0.57	0.00	0.38	29.75	11.96
38.6	12.13	12.45	0.07	0.50	0.29	0.33	0.42	0.59	1.95	0.36	0.54	2.36	0.25
38.8	46.74	0.00	0.02	1.17	1.00	0.72	3.14	0.09	0.09	1.81	0.06	1.17	0.11
39.3	24.55	13.58	0.24	0.24	0.20	0.00	0.64	0.22	1.40	0.13	0.49	5.71	1.59
40.8	22.14	20.77	0.03	0.71	0.05	0.00	0.49	0.38	2.37	0.13	0.65	4.06	1.30
41.3	24.77	12.90	0.14	0.36	0.15	0.00	0.76	0.28	1.48	0.19	0.62	5.48	1.55
42.5	23.37	17.85	0.11	0.46	0.01	0.00	0.64	0.43	2.28	0.18	0.89	2.88	0.54
43.5	25.94	13.16	0.44	0.29	0.23	0.13	0.51	0.26	1.23	0.18	0.79	3.20	0.35
45.8	28.10	7.80	0.44	0.87	0.00	0.66	0.66	0.26	0.75	0.40	0.71	5.75	1.35
46.6	0.33	2.51	0.00	0.18	0.00	0.43	0.18	0.58	1.90	0.26	0.14	36.33	13.97
47.3	20.78	9.84	0.42	0.77	0.50	0.00	0.44	0.16	0.93	0.15	0.72	10.41	3.60
47.9	24.81	14.29	0.00	0.74	0.16	0.00	0.60	0.28	1.89	0.19	1.23	5.69	1.83
48.8	29.85	8.06	0.40	0.74	0.24	0.11	0.64	0.15	0.73	0.29	0.64	4.98	1.43
49.3	27.91	7.07	0.71	0.75	0.49	0.00	0.70	0.13	0.81	0.42	0.71	6.48	1.46
50.3	29.53	8.23	0.73	0.81	0.00	0.22	0.61	0.09	0.79	0.30	0.70	5.44	1.33
51.6	30.13	9.59	0.54	0.82	0.33	0.00	0.78	0.18	1.06	0.24	0.75	3.00	0.40
52.0	25.24	11.36	0.31	0.56	0.20	0.00	0.49	0.16	1.07	0.16	0.82	4.24	0.89
52.9	18.72	7.01	0.07	0.19	0.37	0.00	0.50	0.25	0.85	0.11	0.60	15.12	5.47
53.3	7.50	6.04	0.27	0.25	0.51	0.00	0.22	0.06	0.49	0.01	0.48	26.21	9.25
53.4	14.12	21.10	0.00	0.05	0.00	0.37	0.40	0.67	2.51	0.09	1.90	7.53	2.67
53.5	0.03	1.92	0.00	0.09	0.21	0.00	0.12	0.61	1.30	0.19	0.16	36.56	13.90
53.8	0.82	9.30	0.00	0.32	0.31	0.29	1.27	4.63	16.96	2.65	0.23	5.39	2.02
54.3	14.79	19.19	0.23	0.22	0.00	0.24	0.64	0.78	2.62	0.21	0.97	3.82	1.09
54.8	0.00	31.02	0.01	0.00	0.22	0.02	0.84	1.52	1.75	0.00	0.56	13.98	5.52
55.5	0.20	9.43	0.00	0.00	0.00	0.49	1.93	7.13	22.36	2.99	0.27	0.58	0.05
56.3	0.04	0.08	0.09	0.15	0.19	0.00	0.08	0.00	0.13	0.00	0.04	40.47	0.25
56.8	0.00	0.45	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02	40.63	14.93
33.3	0.06	9.02	0.00	0.00	0.14	0.36	1.56	5.46	18.33	1.74	5.78	0.71	0.10

## 90-D01 Crust

Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
0.1	24.09	14.44	0.42	0.44	0.00	0.00	0.61	0.22	1.76	0.18	0.60	2.07	0.49
0.8	23.96	13.37	0.63	0.60	0.00	0.06	0.60	0.34	1.81	0.30	0.84	2.19	0.55
1.6	22.31	16.74	0.66	0.38	0.37	0.66	0.61	0.26	2.21	0.26	0.71	1.96	0.46
2.3	23.86	13.49	0.74	0.58	0.30	0.00	0.49	0.33	1.59	0.27	0.66	2.19	0.49
3.0	27.66	11.66	0.63	0.28	0.01	0.18	0.51	0.15	1.17	0.35	0.49	2.00	0.34
4.7	23.17	16.56	0.40	0.50	0.00	0.47	0.74	0.26	2.20	0.23	0.97	2.27	0.50
5.5	27.36	10.53	1.22	0.57	0.13	0.56	0.49	0.05	1.06	0.41	0.69	2.16	0.32
6.8	27.69	10.99	0.64	0.63	0.00	0.18	0.54	0.12	1.03	0.15	0.67	2.15	0.30
7.6	28.59	9.94	0.84	0.69	0.10	0.07	0.60	0.16	0.81	0.36	0.61	2.26	0.42
8.8	27.73	10.36	0.73	0.94	0.23	0.50	0.45	0.21	0.87	0.32	0.67	2.11	0.28
9.9	26.45	10.55	0.48	0.94	0.40	0.00	0.46	0.12	1.16	0.34	0.81	2.18	0.25
11.2	24.92	11.05	0.40	0.44	0.02	0.35	0.49	0.10	1.25	0.45	0.77	2.17	0.27
11.9	23.29	13.59	0.41	0.71	0.19	0.00	0.90	0.44	2.24	0.33	0.79	2.25	0.40
13.3	25.45	11.24	0.50	0.55	0.00	0.00	0.51	0.19	1.20	0.43	1.04	2.13	0.24
14.1	24.81	13.00	0.38	0.48	0.00	0.14	0.57	0.21	1.43	0.39	0.88	2.27	0.38
15.0	21.21	15.17	0.25	0.26	0.08	0.26	0.45	0.16	1.55	0.28	0.88	1.87	0.30
15.8	20.75	16.58	0.24	0.12	0.00	0.00	0.63	0.32	2.34	0.18	1.18	1.89	0.40
16.9	19.11	19.44	0.21	0.44	0.00	0.76	0.56	0.42	2.94	0.21	1.79	1.77	0.41
17.9	20.29	18.59	0.23	0.51	0.00	0.00	0.52	0.33	2.59	0.15	1.38	1.95	0.47
19.8	20.90	18.19	0.43	0.22	0.01	0.00	0.78	0.35	2.89	0.32	1.65	2.00	0.49
19.0	24.36	12.80	0.47	0.16	0.20	0.28	0.59	0.15	1.51	0.21	0.78	2.12	0.43
21.1	25.21	12.48	0.59	0.74	0.07	0.18	0.60	0.23	1.17	0.31	0.76	2.29	0.29
23.1	24.69	11.87	0.44	0.90	0.24	0.00	0.64	0.22	1.50	0.29	0.79	2.26	0.33
25.2	24.45	15.46	0.45	0.31	0.14	0.35	0.57	0.19	1.45	0.33	0.84	2.05	0.38
26.7	23.66	13.24	0.37	0.73	0.40	0.00	0.71	0.21	1.55	0.48	0.99	2.22	0.30
27.6	23.00	18.02	0.48	0.99	0.02	0.00	0.51	0.27	2.11	0.27	0.92	1.99	0.57
29.0	17.64	21.11	0.21	0.18	0.49	0.64	0.49	0.49	2.97	0.35	1.95	1.71	0.42
30.1	17.85	20.76	0.15	0.40	0.05	0.06	0.44	0.70	3.59	0.27	1.77	1.67	0.54
31.4	18.22	16.59	0.30	0.32	0.33	0.09	0.41	0.54	2.77	0.26	1.71	1.43	0.45
32.1	19.25	19.75	0.24	0.45	0.00	0.00	0.52	0.53	2.95	0.29	2.10	1.73	0.40
33.1	21.00	19.02	0.17	0.33	0.00	0.38	0.47	0.51	2.45	0.29	1.72	1.78	0.40

Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
34.1	20.06	20.26	0.11	0.00	0.00	0.20	0.62	0.39	2.74	0.10	1.55	1.91	0.45
35.0	19.85	16.29	0.19	0.56	0.05	0.26	0.43	0.40	2.36	0.26	1.20	1.91	0.39
35.7	18.81	16.68	0.43	0.40	0.00	0.35	0.52	0.45	2.52	0.36	1.04	1.90	0.36
37.5	21.86	16.25	0.24	0.55	0.00	0.00	0.51	0.33	2.27	0.32	0.89	1.96	0.52
38.5	22.29	15.81	0.28	0.77	0.38	0.15	0.54	0.34	1.92	0.26	0.92	2.10	0.47
39.3	21.92	16.48	0.50	0.55	0.03	0.00	0.61	0.43	2.39	0.19	1.44	2.02	0.44
40.4	26.21	12.21	0.93	0.46	0.00	0.46	0.25	0.23	1.14	0.36	0.84	1.98	0.35
41.6	19.04	19.76	0.57	0.18	0.02	0.00	0.36	0.32	2.24	0.27	0.87	1.33	0.44
43.0	18.83	22.60	0.32	0.00	0.00	0.14	0.54	0.32	2.66	0.38	0.98	1.98	0.40
43.9	15.49	24.01	0.00	0.25	0.00	0.00	0.54	0.41	2.68	0.23	1.17	1.48	0.49
45.1	21.65	16.27	0.03	0.38	0.00	0.35	0.59	0.35	2.04	0.28	0.79	1.96	0.47
46.3	14.64	32.19	0.09	0.36	0.07	0.08	0.51	0.45	2.74	0.15	1.08	1.44	0.38
47.0	16.75	24.06	0.00	0.14	0.00	0.12	0.44	0.51	2.91	0.38	1.08	1.61	0.15
48.5	19.53	28.23	0.14	0.09	0.13	0.19	0.70	0.50	2.89	0.27	0.64	1.78	0.47
50.3	20.47	27.04	0.32	0.13	0.11	0.47	0.63	0.40	2.56	0.21	0.61	1.86	0.57
51.3	21.00	25.80	0.14	0.29	0.06	0.22	0.55	0.35	2.64	0.28	0.62	1.97	0.53
51.9	19.23	23.86	0.38	0.25	0.20	0.47	0.43	0.26	2.23	0.17	0.77	1.91	0.39
52.8	27.88	13.16	0.52	0.64	0.13	0.50	0.69	0.16	1.41	0.47	0.83	2.64	0.39
54.0	32.76	9.24	1.02	0.50	0.00	0.32	0.78	0.19	0.98	0.48	0.85	2.56	0.26
55.6	28.57	11.07	0.24	0.83	0.00	0.30	0.43	0.17	0.95	0.32	0.65	2.29	0.24
56.7	31.87	7.25	0.74	1.12	0.32	0.08	0.67	0.14	0.78	0.33	0.45	2.45	0.54
57.8	27.71	10.21	0.00	0.45	0.14	0.28	0.44	0.04	0.98	0.38	0.69	2.26	0.31
58.7	18.20	12.66	0.10	0.14	0.22	0.04	0.47	0.22	1.19	0.31	0.73	1.76	0.28
59.3	26.95	14.31	0.00	0.56	0.00	0.10	0.29	0.21	1.21	0.28	0.69	2.22	0.30
67.7	0.14	22.94	0.00	0.09	0.06	0.01	0.54	0.71	0.94	0.00	0.81	20.04	7.88
68.3	27.99	10.11	0.34	0.58	0.00	0.00	0.60	0.12	0.91	0.24	0.55	4.55	0.97
69.2	28.01	9.19	0.00	0.62	0.00	0.06	0.49	0.12	0.85	0.24	0.60	2.68	0.32
69.9	23.04	10.59	0.36	0.61	0.00	0.00	0.40	0.13	0.91	0.34	0.71	8.18	2.69
70.5	26.85	10.59	0.00	0.67	0.23	0.00	0.69	0.14	1.02	0.23	0.47	4.12	0.84
70.8	26.82	11.02	0.06	0.45	0.13	0.00	0.55	0.11	1.07	0.36	0.45	5.55	1.69
71.6	23.95	17.91	0.02	0.14	0.00	0.18	0.47	0.22	2.01	0.28	0.69	2.67	0.30
72.3	11.08	15.41	0.00	0.09	0.29	0.26	0.52	0.29	1.29	0.13	0.33	18.83	6.73
73.1	13.11	11.77	0.15	0.44	0.00	0.00	0.46	0.29	1.10	0.10	0.30	19.15	7.17

Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
73.7	24.07	17.16	0.08	0.23	0.00	0.00	0.45	0.30	1.81	0.15	0.49	7.64	2.40
74.5	11.61	11.37	0.00	0.42	0.00	0.11	0.46	0.32	1.13	0.00	0.24	21.45	8.74
75.0	21.29	14.90	0.00	0.00	0.05	0.04	0.46	0.23	1.74	0.27	0.44	6.89	2.33
75.8	16.60	12.54	0.22	0.37	0.18	0.26	0.53	0.42	1.52	0.15	0.39	13.91	5.11
76.5	24.39	16.94	0.00	0.38	0.00	0.00	0.60	0.47	2.05	0.29	0.72	3.62	0.85
77.4	22.77	18.52	0.34	0.29	0.25	0.30	0.52	0.25	1.89	0.26	0.65	4.17	0.85
78.0	19.85	17.33	0.00	0.37	0.24	0.03	0.42	0.44	1.95	0.29	1.06	7.15	2.22
78.7	0.23	5.96	0.00	0.02	0.18	0.00	0.11	0.22	0.27	0.00	0.09	35.51	13.22
79.3	21.92	12.87	0.00	0.23	0.00	0.00	0.36	0.19	1.21	0.25	0.61	9.43	3.09
79.9	22.04	19.09	0.03	0.16	0.25	0.61	0.58	0.39	2.20	0.17	1.04	3.76	0.90
80.5	24.64	14.58	0.26	0.36	0.17	0.00	0.60	0.32	1.66	0.25	0.87	3.99	0.99
81.0	21.32	16.21	0.00	0.66	0.37	0.00	0.54	0.40	1.50	0.27	1.03	2.73	0.37
81.6	0.30	15.52	0.00	0.00	0.15	0.22	0.31	0.20	0.48	0.01	0.76	28.41	11.02
82.1	25.54	12.65	0.24	0.40	0.01	0.25	0.51	0.13	1.15	0.29	0.89	3.54	0.58
82.9	29.15	10.57	0.12	0.42	0.26	0.00	0.77	0.18	0.81	0.61	0.84	3.15	0.41
83.6	28.93	8.53	0.52	0.76	0.00	0.00	0.55	0.12	0.76	0.42	0.65	3.62	0.64
84.4	27.32	15.61	0.10	0.11	0.00	0.11	0.31	0.26	1.65	0.31	1.28	3.72	1.07
85.2	0.41	4.26	0.00	0.00	0.23	0.00	0.12	0.12	0.08	0.01	0.22	37.10	13.64
85.6	12.10	4.21	0.13	0.14	0.13	0.35	0.30	0.11	0.40	0.24	0.31	23.28	8.65
86.3	26.24	12.22	0.30	0.82	0.00	0.08	0.51	0.24	1.50	0.32	0.96	2.94	0.41
87.2	26.90	10.65	0.55	0.30	0.00	0.20	0.56	0.17	0.95	0.42	0.87	5.45	1.59
87.9	28.46	12.14	0.58	0.47	0.00	0.00	0.66	0.14	1.29	0.41	0.80	4.27	0.92
89.1	26.76	11.95	0.38	0.21	0.00	0.00	0.48	0.27	1.27	0.31	0.64	6.20	1.84
90.0	26.38	16.82	0.00	0.18	0.22	0.00	0.53	0.35	1.93	0.20	1.07	4.56	1.44
90.8	21.15	18.57	0.10	0.26	0.00	0.00	0.45	0.54	2.30	0.25	2.05	1.79	0.39
90.8	27.56	12.23	0.07	0.46	0.00	0.00	0.54	0.25	1.19	0.39	1.27	2.90	0.25

## 90-D19 Crust

Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
0.2	28.50	12.28	0.00	0.73	0.32	0.31	0.46	0.17	1.64	0.22	0.43	1.67	0.46
0.3	20.62	15.43	0.50	0.68	0.09	0.26	0.44	0.30	2.28	0.15	0.69	2.08	0.44
1.3	24.99	14.11	0.43	0.70	0.31	0.00	0.50	0.26	1.91	0.29	0.68	2.16	0.50
2.7	21.49	16.54	0.69	0.27	0.03	0.00	0.61	0.35	2.60	0.30	0.75	2.09	0.47
3.6	23.69	15.82	0.36	0.45	0.00	0.00	0.73	0.31	2.24	0.25	0.73	2.21	0.42
4.4	22.14	18.71	0.29	0.21	0.29	0.38	0.69	0.59	2.67	0.20	0.81	1.87	0.42
5.7	20.63	18.12	0.21	0.26	0.00	0.00	0.60	0.32	2.57	0.28	0.74	1.90	0.41
7.0	21.84	18.15	0.36	0.41	0.50	0.04	0.71	0.60	2.81	0.20	0.67	2.03	0.56
8.1	25.88	13.86	0.58	0.76	0.00	0.00	0.64	0.32	1.71	0.28	0.60	2.22	0.40
9.1	0.97	30.83	0.00	0.00	0.34	0.25	0.00	2.63	15.38	1.80	0.47	0.23	0.01
9.3	21.50	18.81	0.50	0.67	0.00	0.00	0.81	0.56	2.69	0.21	0.72	2.05	0.52
10.3	21.97	17.23	0.28	0.31	0.00	0.02	0.67	0.45	2.21	0.29	0.89	2.11	0.49
10.6	0.25	30.49	0.00	0.42	0.17	0.61	0.09	2.80	15.10	1.82	0.66	0.15	0.03
11.6	0.54	30.44	0.00	0.08	0.00	0.00	0.10	2.71	15.23	1.69	0.47	0.25	0.05
12.3	24.07	16.14	0.24	0.30	0.00	0.00	0.58	0.43	2.29	0.24	0.75	1.94	0.42
14.8	22.72	16.38	0.00	0.52	0.06	0.00	0.59	0.44	2.23	0.29	0.73	1.93	0.55
16.5	20.95	19.03	0.00	0.36	0.15	0.41	0.69	0.53	3.15	0.20	0.73	1.94	0.55
16.9	22.98	16.25	0.27	0.47	0.08	0.45	0.54	0.50	2.05	0.40	0.81	2.00	0.32
17.9	24.28	12.16	0.71	0.75	0.40	0.00	0.49	0.25	1.21	0.39	0.61	2.57	0.28
18.7	23.50	15.64	0.51	0.22	0.37	0.14	0.59	0.46	1.85	0.23	0.89	2.28	0.42
20.2	23.36	16.22	0.26	0.54	0.24	0.32	0.69	0.49	2.32	0.32	0.85	2.05	0.42
21.3	25.15	13.12	0.47	0.53	0.09	0.23	0.57	0.30	1.39	0.20	0.79	2.37	0.50
22.2	26.66	11.92	0.38	0.76	0.24	0.00	0.68	0.36	1.66	0.20	0.85	2.23	0.27
23.4	25.15	13.37	0.78	0.74	0.21	0.00	0.51	0.34	1.58	0.22	0.67	1.86	0.39
24.3	25.72	12.07	0.17	0.78	0.14	0.00	0.52	0.03	1.26	0.30	0.81	2.30	0.22
25.1	25.31	12.34	0.27	0.83	0.08	0.07	0.65	0.32	1.45	0.28	1.14	2.16	0.34
25.8	26.40	13.60	0.72	0.36	0.18	0.11	0.62	0.38	1.51	0.26	1.04	2.13	0.30
25.9	24.91	13.43	0.35	0.40	0.14	0.17	0.56	0.28	1.52	0.23	0.88	2.15	0.29
27.1	25.07	14.08	0.57	0.52	0.19	0.71	0.82	0.43	1.80	0.33	0.95	2.25	0.28
28.1	27.99	10.85	0.64	0.75	0.08	0.00	0.78	0.36	1.30	0.28	0.81	2.31	0.40
29.1	23.34	12.92	0.59	0.63	0.00	0.08	0.65	0.37	1.48	0.25	0.72	2.34	0.36



Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
30.0	25.32	11.87	0.76	0.55	0.20	0.00	0.52	0.16	0.90	0.00	0.72	2.42	0.20
31.2	26.48	9.56	0.33	0.97	0.12	0.07	0.54	0.22	1.04	0.25	0.68	2.29	0.25
31.9	26.47	9.75	0.39	0.81	0.00	0.00	0.79	0.35	1.19	0.35	0.84	2.29	0.42
32.1	25.44	9.19	0.52	0.37	0.00	0.27	0.74	0.36	1.02	0.41	0.71	2.24	0.20
32.7	23.67	10.91	0.49	0.36	0.17	0.29	0.52	0.26	1.24	0.37	1.01	2.27	0.23
33.3	24.61	11.25	0.27	0.58	0.17	0.00	0.52	0.39	1.23	0.41	0.96	2.30	0.23
34.3	23.66	10.43	0.23	0.13	0.15	0.00	0.73	0.42	1.24	0.31	0.79	2.37	0.38
35.6	19.57	16.74	0.25	0.20	0.25	0.08	0.53	0.49	2.04	0.39	1.29	2.23	0.34
36.1	24.04	12.88	0.72	0.29	0.00	0.00	0.62	0.32	1.46	0.28	1.09	2.36	0.33
37.5	19.17	16.57	0.00	0.43	0.39	0.00	0.64	0.63	2.42	0.24	1.28	2.00	0.40
38.4	16.57	21.04	0.15	0.34	0.21	0.53	0.35	0.41	2.52	0.28	1.99	1.89	0.29
39.3	17.05	14.38	0.00	0.71	0.44	0.00	0.62	0.60	2.33	0.15	1.16	2.01	0.34
40.0	22.96	13.18	0.36	0.59	0.00	0.21	0.44	0.34	1.09	0.15	0.62	2.14	0.28
40.6	22.95	15.27	0.23	0.48	0.00	0.06	0.72	0.70	2.20	0.26	0.74	2.11	0.29
41.4	22.58	15.73	0.54	0.31	0.00	0.00	0.85	1.10	2.26	0.23	1.52	2.10	0.35
41.6	0.23	15.54	0.00	0.00	0.00	0.00	1.65	6.26	19.62	4.81	1.05	0.20	0.08
41.7	0.38	0.39	0.06	0.14	0.00	0.05	0.00	11.12	27.34	4.76	0.00	0.25	0.00
42.3	0.06	13.58	0.00	0.03	0.41	0.00	1.28	6.06	17.65	4.34	1.60	0.28	0.08
42.4	39.00	3.85	2.19	1.45	0.10	0.36	1.69	0.30	0.55	0.57	0.61	2.35	0.02
42.1	0.16	0.26	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00	8.19	22.97	4.32	0.07	0.02	0.00
43.1	3.37	2.62	0.09	0.12	0.33	0.00	0.17	0.45	5.34	0.19	0.23	0.99	0.09
42.7	0.00	0.09	0.08	0.00	0.31	0.00	0.00	8.80	23.90	3.91	0.00	0.18	0.00
43.3	0.01	0.23	0.04	0.00	0.00	1.43	0.19	28.62	0.00	0.08	0.00	0.22	0.21

## 90-D02 Crust

Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
0.8	0.00	1.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.31	34.98	0.86	0.08	0.31	0.00
1.0	22.77	16.96	0.00	0.34	0.00	0.00	0.58	0.55	2.21	0.19	0.69	2.22	0.47
1.1	21.46	16.38	0.46	0.46	0.00	0.00	0.63	0.44	2.38	0.17	0.68	2.06	0.47
1.8	27.78	10.63	0.42	0.72	0.25	0.00	0.50	0.25	1.51	0.21	0.72	2.54	0.28
2.9	26.99	13.01	0.66	0.41	0.09	0.40	0.65	0.35	1.32	0.23	0.95	2.36	0.31
3.4	0.44	19.93	0.00	0.00	0.07	0.22	0.07	3.42	13.14	1.38	0.57	0.93	0.10
4.0	26.51	10.87	0.84	0.54	0.33	0.01	0.68	0.33	1.14	0.14	0.82	2.36	0.30
4.7	25.27	10.33	0.65	0.81	0.37	0.15	0.70	0.33	1.25	0.37	0.77	2.42	0.38
5.3	27.41	10.63	0.49	0.38	0.50	0.00	0.56	0.35	0.99	0.15	0.93	2.36	0.36
5.9	28.24	10.50	0.68	0.71	0.00	0.10	0.67	0.30	1.09	0.28	0.88	2.32	0.41
6.6	24.28	9.91	0.74	0.44	0.34	0.28	0.59	0.40	1.32	0.16	0.81	1.86	0.41
7.2	0.67	30.99	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	2.77	14.29	1.78	0.69	0.36	0.06
7.9	23.91	12.00	1.08	0.56	0.12	0.00	0.46	0.53	2.00	0.13	0.92	1.77	0.41
8.9	24.90	11.11	0.85	0.58	0.11	0.06	0.60	0.39	1.39	0.20	0.81	2.03	0.34
9.6	23.51	15.20	0.56	0.49	0.00	0.39	0.79	0.42	1.58	0.30	1.06	2.35	0.46
10.2	0.50	29.71	0.35	0.00	0.07	0.00	0.03	2.60	14.05	1.76	0.81	0.30	0.00
11.3	23.88	13.95	0.74	0.56	0.05	0.01	0.60	0.52	1.67	0.24	1.21	1.99	0.39
12.1	25.94	12.12	0.84	0.35	0.06	0.00	0.61	0.33	1.13	0.19	0.89	2.45	0.25
12.4	0.32	25.05	0.00	0.00	0.00	0.07	0.22	2.17	11.41	0.90	0.49	0.14	0.03
13.6	30.63	8.30	0.73	1.17	0.14	0.12	0.73	0.36	0.93	0.28	0.81	2.16	0.28
14.7	24.00	13.80	0.28	0.44	0.06	0.00	0.61	0.36	1.68	0.24	1.13	2.05	0.37
15.3	24.14	11.09	0.71	0.55	0.07	0.32	0.83	0.30	1.13	0.20	0.78	2.36	0.36
15.9	26.02	11.50	0.64	0.72	0.13	0.31	0.64	0.35	1.24	0.26	0.88	2.46	0.38
16.7	0.68	28.10	0.00	0.00	0.16	0.00	0.10	3.06	14.63	1.67	0.52	0.33	0.10
17.1	24.82	12.87	0.42	0.19	0.00	0.00	0.73	0.26	1.31	0.18	1.01	2.15	0.44
18.1	18.91	19.36	0.34	0.03	0.00	0.00	0.53	0.59	2.70	0.21	1.44	1.78	0.43
19.0	23.28	14.58	0.22	0.54	0.21	0.55	0.67	0.37	1.88	0.28	1.23	2.19	0.35
19.2	0.33	19.41	0.00	0.00	0.23	0.00	0.05	1.75	8.49	0.52	0.66	0.16	0.09
19.9	0.10	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07	0.04	0.04	0.00	40.30	15.54
20.5	0.10	0.00	0.04	0.00	0.00	0.23	0.00	0.03	0.05	0.02	0.00	40.54	14.67
21.1	0.08	0.19	0.00	0.44	0.02	0.00	0.01	0.02	0.16	0.05	0.08	11.58	4.64
21.4	0.02	0.00	0.06	0.08	0.13	0.00	0.00	0.03	0.11	0.01	0.06	0.09	0.00

## 91-D16 Crust

Depth	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	P
0.4	21.36	12.62	0.20	0.56	0.05	0.03	0.32	0.17	1.10	0.23	0.61	2.12	0.34
1.5	23.94	13.79	0.27	0.71	0.00	0.25	0.56	0.28	1.89	0.25	0.85	1.79	0.36
1.4	22.36	11.24	0.51	0.49	0.06	0.20	0.23	0.14	0.96	0.17	0.69	1.62	0.32
2.5	23.75	14.04	0.24	0.62	0.00	0.21	0.38	0.29	1.35	0.13	0.80	1.92	0.27
4.5	23.40	13.04	0.88	0.50	0.00	0.00	0.56	0.40	1.66	0.18	0.85	2.09	0.30
5.7	23.88	14.36	1.23	0.66	0.30	0.27	0.47	0.38	1.88	0.32	1.15	2.03	0.37
6.6	22.85	16.60	0.87	0.26	0.07	0.20	0.58	0.60	2.29	0.29	1.35	2.07	0.44
7.6	24.78	13.62	0.73	0.46	0.20	0.00	0.39	0.42	1.59	0.25	0.96	1.88	0.29
8.6	20.82	15.78	0.00	0.55	0.18	0.00	0.52	0.46	2.05	0.41	0.95	2.01	0.37
9.6	21.79	19.13	0.73	0.52	0.06	0.00	0.72	0.66	3.05	0.18	1.06	1.88	0.53
10.8	22.53	14.80	0.68	0.45	0.10	0.00	0.59	0.46	2.02	0.28	1.07	1.86	0.40
12.0	24.00	13.77	0.67	0.18	0.16	0.22	0.54	0.45	2.04	0.14	0.88	1.80	0.44
12.8	21.30	17.62	0.40	0.18	0.12	0.25	0.42	0.40	2.48	0.30	0.78	1.71	0.53
13.6	20.10	21.12	0.40	0.03	0.00	0.56	0.74	0.62	3.22	0.16	1.18	1.63	0.46
14.8	21.94	14.96	0.14	0.42	0.00	0.29	0.43	0.21	1.36	0.32	0.89	1.96	0.24
15.2	0.08	0.64	0.11	0.13	0.05	0.64	0.00	14.58	24.39	0.42	0.04	8.61	0.05



## 제 2 장

### 다중빔 음향탐사기술

연구 책임자 : 이 용 국

연구 원 : 김 성 렬

박 건 태

석 봉 출

장 재 경



## 제 1 절 서 론

해저면의 정보 즉 수심에 따른 해저지형의 변화 및 해저표면을 구성하고 있는 퇴적물의 종류 또는 해저표면에 분포하는 광물등에 의해서 구분되는 해저면의 특성을 파악하기 위한 조사방법은 일반적으로 음파를 이용한 지구물리학적 방법을 이용하고 있다. 지구물리 탐사기법중 음파를 이용한 음향원격탐사 방법의 응용은 해저면에 대한 음향반사파의 이용으로 해저면 구성물질의 성질에서 표면에 구성되어 있는 망간단괴와 같은 광물의 크기까지도 가늠할 수 있는 수단으로 이용될 수 있다(de Moustier, 1985). 해저면으로부터의 반사파 성격을 분석하고, 구성물질에 대한 정량적인 해석을 시도할 수 있으며 음파에 의한 환경과 관련한 해석이 가능하다(de Moustier and Matsumoto, 1993).

해저면 정보의 획득에 대한 음향원격탐사(Acoustic Remote Sensing)분야는 조사대상 해저면의 광대함과 인공위성에서 이용하는 전자기파가 수중을 통과하지 못하는 한계로 인하여 해양에서의 응용이 다른 분야에 비해서 그 발전이 매우 늦다. 그러나 음파는 물속에서 큰 감쇄없이 전파되어 나아갈 수 있고, 주사 및 수신기의 적절한 배열에 의한 신호획득은 심해의 해저면을 넓게 탐사할 수 있는 이점이 있다. 최근의 음향원격탐사에 적용되는 음파탐사장비로는 Cross빔 탐사기, 정밀음향 측심기(Precision Echo Sounder)와 Side Scan Sonar등으로 분류되어 목적 대상의 응용여부에 따라 각 장비를 이용할 수 있다. 다양한 변화의 심해저 환경하에서 코아를 이용한 퇴적물의 채취는 그 비용이 많이 들고, 실해역에서의 많은 조사가 어려워 해저면의 상황과 분포를 결정하는 데에는 어려운 점이 많다. 최근에는 심해용카메라와 비디오, 잠수정과 같은 혁신적인 해저면 조사가 이루어지는 하나 주변자료로서의 보완(Ground Truth)에 이용될 자료를 제공할 뿐 많은 자료를 제공해 주지는 못하는 실정이다.

음향원격탐사에 의한 해저면 상황도의 작성은 다중빔 수심측정과 후방산란 해저면 영상이 서로 보완적인 자료들로 구성될 경우 완벽한 해저면 탐사장비가 될 수 있다. 특히 후방산란에 의한 해저지형 영상은 지형의 경사나 해저면의 질 상태에 따라 다양하게 나타나므로 조합된 영상에서 지형적 요소를 분리시키는 것이나, 해저면에 대한 수치화된 지형자료로부터의 영상부분을 따로 분리해야하는 큰 어려움이 있다.

SeaBeam 2000 시스템은 해저면에 대한 지형화적인 연구에 매우 유용한 탐사 장비이며, 일반적인 해양의 수심조사에 이용되는 선(Line Survey) 개념의 수심측정 장비와 비교하여 면(Swath Area)에 대한 음파신호의 주사 및 그 주사신호의 수치화 획득이란 개념에서 많은 차이가 있어 넓은 지역에 대한 면개념의 조사자료 획득이 가능하다(Fig. 2-1). 이러한 면개념의 조사방법은 투입 인력, 경제적인 측면등을 고려한다면 매우 획기적인 것이며, 특히 획득 주시빔의 갯수를 수심 3,000m 이상 해역에서 121개로 구성되어 있어 음파신호에 대한 각각의 분석도 가능하다. 따라서 본 연구에서는 “음향원격탐사(Acoustic Remote Sensing)” 기법을 적용한 실해역 자료분석을 영상처리 기법을 도입하여 다중빔 수심측정장비의 기계적인 특성을 고려한 처리기법으로 확대하여, 해저면으로부터의 후방산란 강도를 분석하여 그에 따른 해저면의 상황도를 재 구성해보며, 화소값과 연관된 후방산란 강도의 상관관계를 이용한 반사음파 후방산란 신호에 대한 해저면과의 정성적 접근을 시도하였다.

## 제 2 절 후방산란 자료획득 및 자료처리 결과

심해저 해저면에 구성되어 있는 망간단괴의 분포와 관련된 후방산란 수치자료의 획득은 한국해양연구소의 종합 해양조사선에 장착 운영되고 있는 정밀음향측심기인 EA-500을 이용한 조사선의 직하방 후방산란 자료와 다중빔 수심측정장비



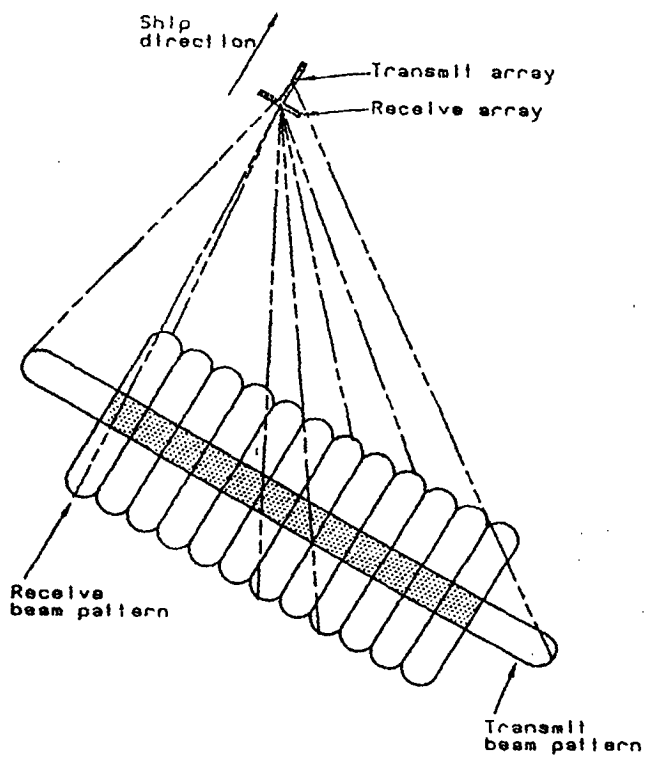


Fig. 2-1. SeaBeam 2000 Cross-Fan Beam Geometry.

인 SeaBeam 2000을 이용하여 1995년 6월중 수행된 심해저 자원개발 정밀탐사 조사(KODOS95-1)중 6월 18일 태평양의 C-C 지역의 9° 47'N, 132° 43'W를 중심으로 6km X 6km의 해역을 선정하여 후방산란 수치자료(Side Scan Amplitude)를 획득하였다(Fig. 2-2). 수심은 약 4,900m로 해저면은 매우 평탄하여 SeaBeam 2000의 경우 수심에 약 300%에 해당되는 약 15km의 주사면이 조사되었다. 획득된 수치 후방산란 자료는 조사선의 좌현 및 우현에 대해서 각 60개의 자료로 중앙을 포함하여 121개(조사선 진행방향에 대한 수직방향의 해상도 약 124m, 진행속도 5노트, 송신신호 간격 약 18초를 고려하여 진행방향의 해상도 약 47m)의 자료가 획득되었고, 본 연구의 분석을 위하여 GMT 시간으로 6월19일 01시 10분에서 02시 10분까지의 1시간 후방산란 자료를 획득, 분석하였다(Fig. 2-1 참조).

### 1. EA-500의 해저면 후방산란 수치자료 획득

정밀음향측심기인 EA-500은 12kHz의 주파수 특성을 갖는 하나의 송신기와 수신기로 구성되어 있고, 음파빔의 형태는 Fig 2-3과 같이 16+/-2°의 빔폭을 보인다. EA-500의 운영과 관련된 개괄적인 운영은 다음과 같다.

Transducer -----> Tranceiver/Digitizer -----> Signal Processor

EA-500으로부터의 후방산란 음파신호의 획득은 다음과 같이 이루어진다.

입출력에 대한 유효 입력신호는 -160dBW에서 0dBW의 범위를 보이며, 출력 에너지의 입력에너지에 대한 비를 빔의 입력에 대한 유효각(directionality)를 고려하여 다음식으로 나타낸다.

$$G(a,b) = N D(a,b)$$

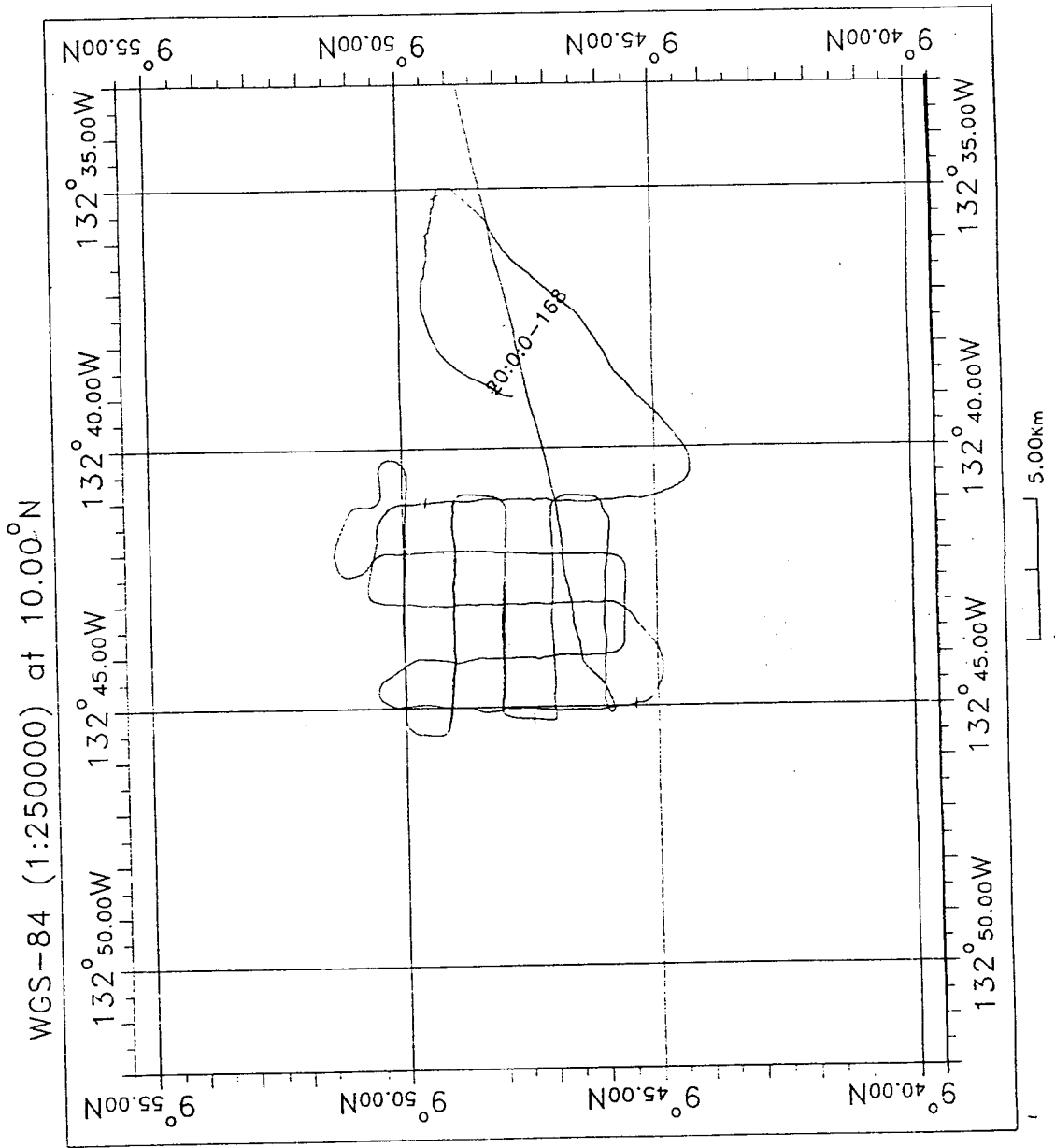


Fig. 2-2. EA-500/SeaBeam 2000 Survey Area

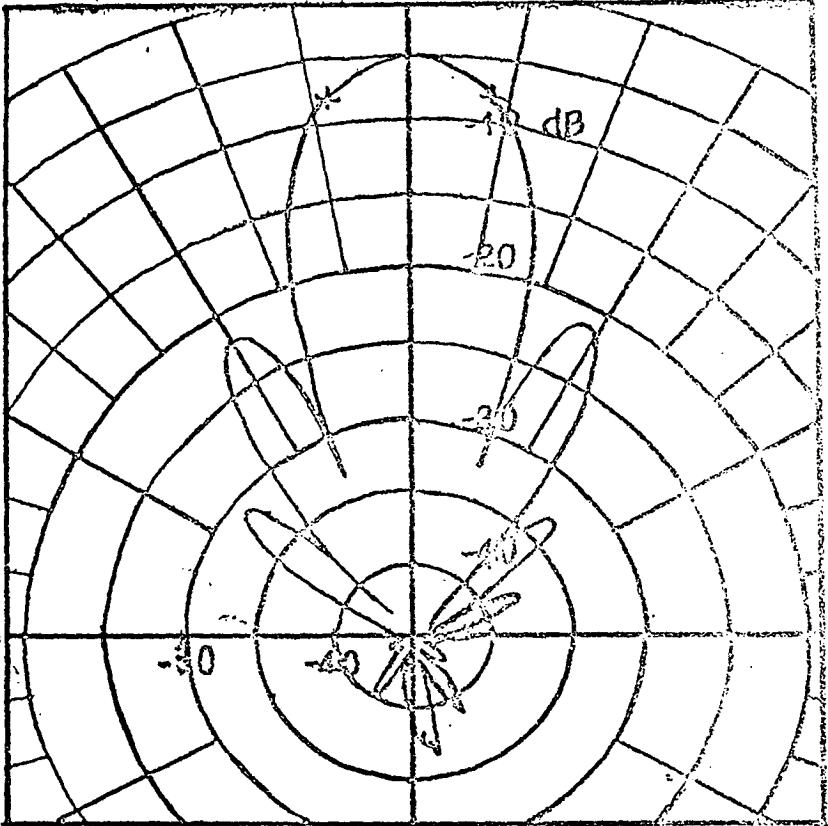


Fig. 2-3. EA-500 Received Beam Pattern.

여기서 a와 b는 방향에 대한 각도이고, N은 송신기측의 efficiency, G는 신호 이득이다. 음파빔의 해저면 입사면적(A)을 고려한다면 면적 A는

$$A = R^2 / 4 \text{ phi} \times G \text{ 로 나타낼 수 있다.}$$

여기서 R은 파장이고 A는 유효 수신면적을 표시한다. 따라서 해저면으로부터의 송신 및 수신에 따른 반사파의 강도  $P_r = P_t G_1 10^{-ar} / 4 \text{ phi} \text{ r}^2 \text{ D}_e \text{ } 10^{-ar} / 4 \text{ phi} \text{ r}^2 \text{ R}^2 / 4 \text{ phi} \text{ G}$ 로 표시할 수 있다. 여기서  $P_r$   $P_t$  는 송신 및 수신에 따른 에너지의 강도이고, G는 신호이득, r은 해저면과 송수신기간의 거리(수심 산출을 위한 신호 값으로부터 이용됨), a는 거리에 따른 음파의 감쇄,  $D_e$ 는 해저면으로부터의 후방 산란 강도이고, R은 이용음파의 파장이다.

위의 식을 다시 후방산란 강도의 산출식으로 정리하면

$10\log(S_s) = 10\log(P_r) + 10\log(r^2 10^{2ar}) - 10\log(P_t G_1^2 R^2 r_0^2 \text{ phi} / 16 \text{ phi}^2)$ 로 정리 된다. 즉 위의 식에 의한 입력 및 출력에너지의 비에 따른 해저면으로부터의 후방산란 강도를 구할 수 있으며, 획득된 후방산란 자료는 Fig. 2-4와 같고 Fig. 2-5는 수심자료와 함께 후방산란 강도를 색상으로 표현 투과 깊이에 따른 반사파 강도를 나타낸다.

조사선의 운영 항적에 따른 직하방의 후방산란 강도는 최고 -5dB에서 최저 -37dB의 값으로 분포하고, 평균적으로 -31dB의 분포를 보인다(Fig. 2-4). 특히 조사구역의 중앙에서는 지형이 평탄함에도 불구하고 후방산란 강도가 -25에서 -27dB의 상대적으로 높은 반사파 강도를 보인다. Fig. 2-6는 Fig. 2-4 기록의 반사파 강도에 대한 표층반사파에 대한 잡음을 선형(linear regression)식에 의해서 제거한 결과로 경사면의 표층 반사파와 평탄한 해저면의 반사파를 1차로 분리하여, 평탄면에 대한 임계 반사파 강도(-25dB)에 대한 색상으로 표시하였다. 중앙의 일부 지역에서 높은 반사파 강도를 알 수 있다.

Day : 1995-169

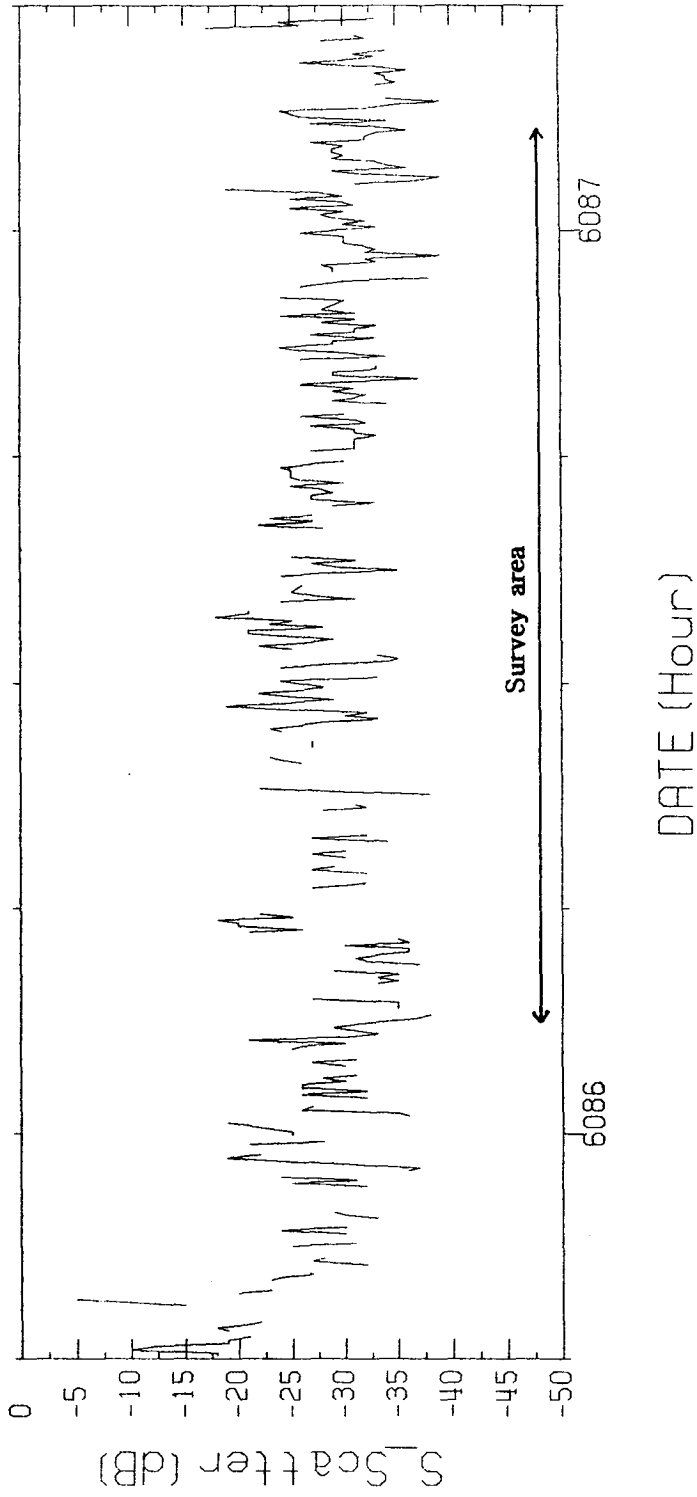


Fig. 2-4. EA-500 Received Backscattering Amplitude.

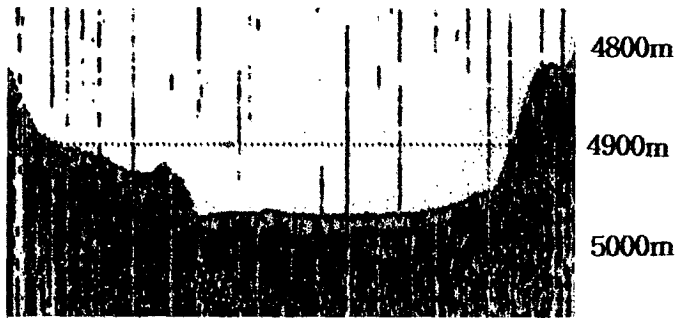


Fig. 2-5. EA-500 Water Depth Record.

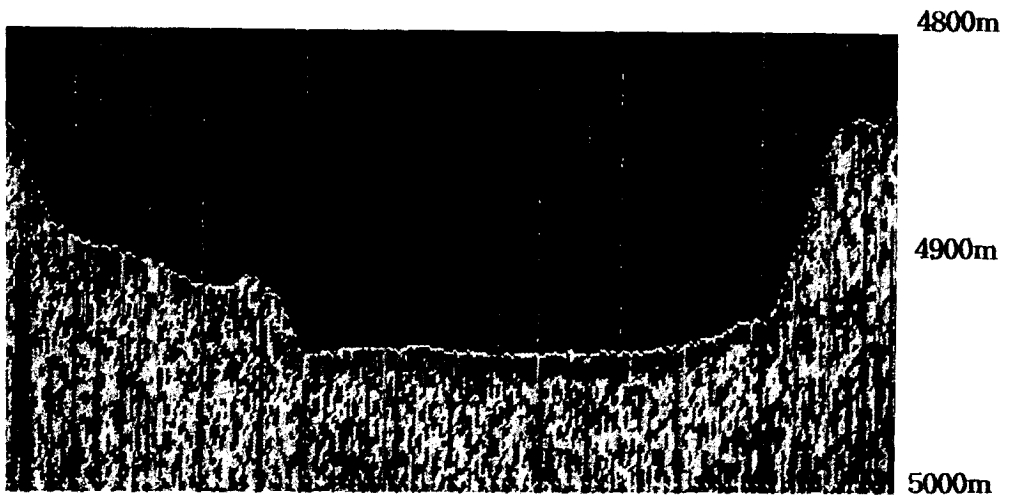


Fig. 2-6. EA-500 Water Depth Profile (After Noise filtering).

## 2. SeaBeam 2000의 후방산란 수치자료 획득

Seabeam 2000의 송신 음파에 대한 후방산란의 반사파 강도에 대한 획득은 음파(평면파)의 강도(I: Intensity)와 해저면을 구성하고 있는 물질에 대해 음향저항 특성값(Acoustic Impedence)으로 나타낼 수 있다

$$I = P^2/DxC \quad \text{-----(1)}$$

여기서 P는 음압의 평균을 나타내며, D는 매질의 밀도, C는 매질내의 음파전달속도를 나타내며, DxC는 해저면 구성물질의 음향저항특성을 의미한다. 음원으로부터의 단위길이에 위치하는 음의 강도(Intensity of Sound)는

$$I = I_0 R^2 x (e^{-2ar}/(2r)^2) \quad \text{------(2)}$$

로 나타낼 수 있으며, 여기서 a는 exponential감쇄상수이고, r은 Rayleigh 반사계수이다. (2)식에서 반사파가 산란보다 크다고 본다면, 평면파에 대한 두매질 사이의 수직입사파에 대한 레이라이 반사계수 R은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{D_2 C_2 - D_1 C_1}{D_2 C_2 + D_1 C_1} \quad \text{------(3)}$$

여기서 D와 C는 두매질의 밀도와 음파속도를 의미한다. 또한 해저손실은

$$B = -20\text{LOG}(R) \quad \text{------(4)}$$

이므로 (3)식과 (4)식을 기본으로 하여 해저면의 표층퇴적물의 음향학적 분류를 시도할 수 있다. 즉, 해저면의 거침정도(roughness)는 반사파의 평균에 의해서 줄일 수 있으며(SeaBeam 2000의 FFT Beam Former의 역할), 평균값의 의미는 반사파의 파장 및 파고의 변화율(Variance)은 퇴적물의 형태를 나타낸다.

기존에 알려진 해저면의 퇴적물 및 그 구성물질에 의한 거침도(Rn)와 Wave Number(K)와의 사이에는  $K \times R_n \ll 1$  : smooth bottom,  $K \times R_n > 1$  : rough bottom,  $K \times R_n = 1$  인 경우는 smooth와 rough의 중간인데, SeaBeam 2000의 이용 주파수의 특성에 따라  $K \times R_n = 1$  인 경우에는 첫번째의 Fresnel Zone보



다 반사파의 면적(Ensonify Area)이 충분히 작아서 대부분의 반사파의 성분은 입사파에 대한 제곱의 합으로 그 표현이 가능하다. 해저면의 퇴적물특성과 해저손실의 대부분은 입사면에 의해서 결정되며 수신파를 고려한 입사파의 대역대(Bandwidth)에 의해서 결정된다. 즉, 해저면의 구성이 충분히 smooth하여 음향저항과 거의 유사하게 나타난다는 가정하에서 해저면상에 놓여 있는 망간단괴은 그 후방산란파의 강도(반사파의 강도)에 따른 음향저항만으로 표현할 수 있어 그에 대한 저항값의 큰 대조를 보인다.

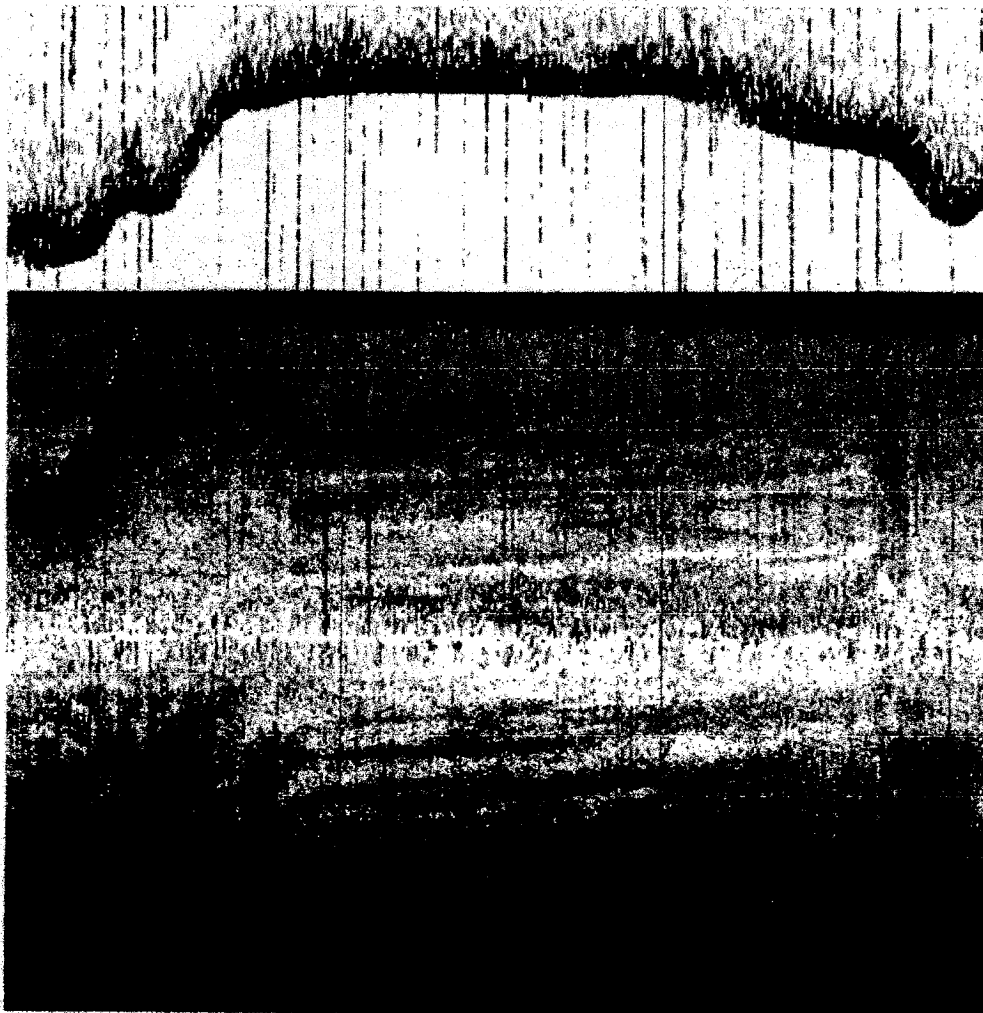
Fig. 2-7은 현장에서 획득된 SeaBeam2000의 해저면 후방산란 주사자료의 결과로 자료 획득시의 ping 이득은 45dB로 고정하였고, 음속에 의한 파의 전달시간에 대한 오차와 수중에서의 전달 손실은 1차로 보정되었다. 그림에서 좌측은 폭 약 15km 해저면 후방산란에 대한 기록이고, 우측은 SeaBeam 2000의 직하방에 대한 수직신호(반사파 신호)의 기록이다. 좌측의 그림에서 반사파 강도가 센 경우 흰색으로 표현되며, 상대적으로 약한 경우는 검은 색으로 표현된다. SeaBeam 2000의 자료 획득 구간의 중앙빔에 대한 후방산란 강도는 수신신호의 이득에 대한 보정 처리 후 -60dB에서 -70dB의 분포를 보여 약 10dB의 범위를 보이는 반면(Fig. 2-8), EA-500에서는 약 30dB의 분포를 보인다. 이는 SeaBeam 2000의 경우 송신 후 다음 송신 신호를 발생시키기 위한 에너지 출력의 포화율이 송신기 효율의 90%를 유지함으로 인해서 발생되며, 이는 입력 에너지에 대한 최대, 최소값의 분포를 배제시킬 수 있기 때문이다. 그러나 수신된 후방산란강도의 강약 분포특성은 잃지 않는다.

### 3. SeaBeam 2000의 후방산란 수치자료 처리 결과

Fig. 2-9는 획득자료 전체에 대한 빔값별 분포도로(원시자료값에 +90dB의 offset값을 유지; 이는 수치처리를 위함) 중앙의 빔값과 좌현의 끝과 우현의 끝값과는 약 5dB의 차이를 보인다. 이는 2절에서 설명한 바와 같이 기계적인 음파빔

5000m

4900m



Heading 170.6  
 Ship Speed 5.6 Knots  
 Lat 09 46.259N  
 Lon 132 42.990W  
 Time 2:00:04

Heading 174.3  
 Ship Speed 5.7 Knots  
 Lat 09 48.917N  
 Lon 132 43.015W  
 Time 1:30:11

Heading 276.8  
 Ship Speed 5.1 Knots  
 Lat 09 50.565N  
 Lon 132 41.938W  
 Time 1:00:00

← 15000 m →

Fig. 2-7. SeaBeam 2000 Side Scan Image with Center Beam's Vertical Profile.

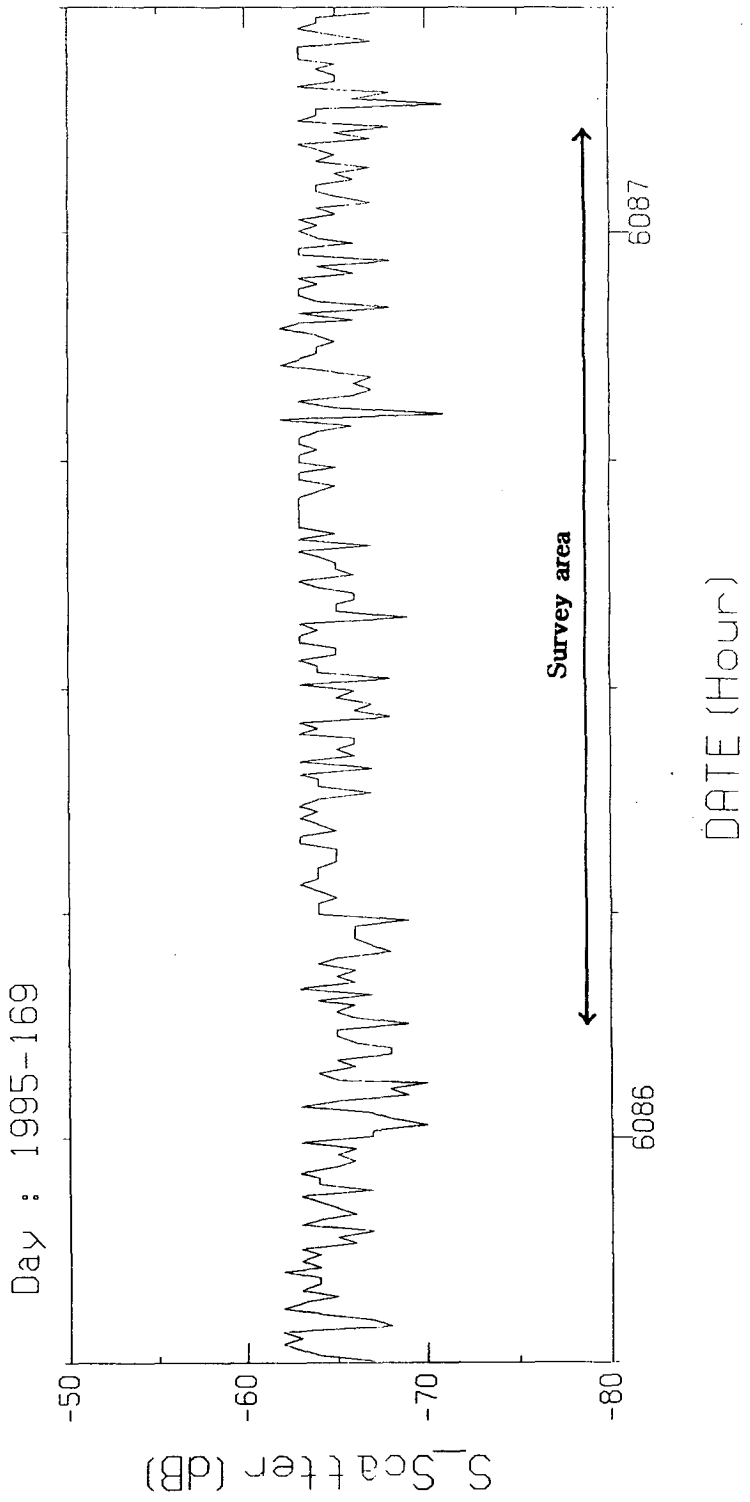


Fig. 2-8. SeaBeam 2000 Center Beam's Backscattering Amplitude.

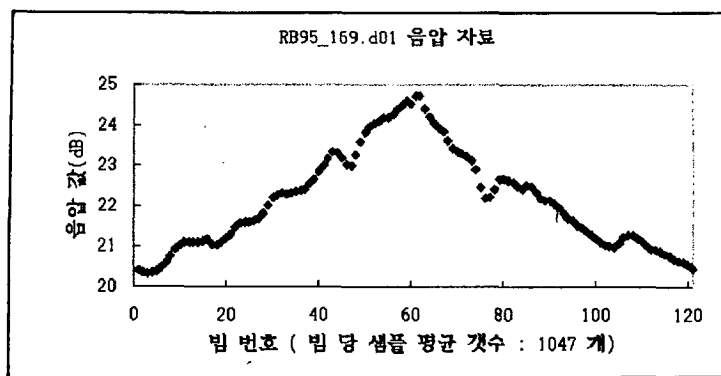


Fig. 2-9. 121 Beams Distribution of SeaBeam 2000.

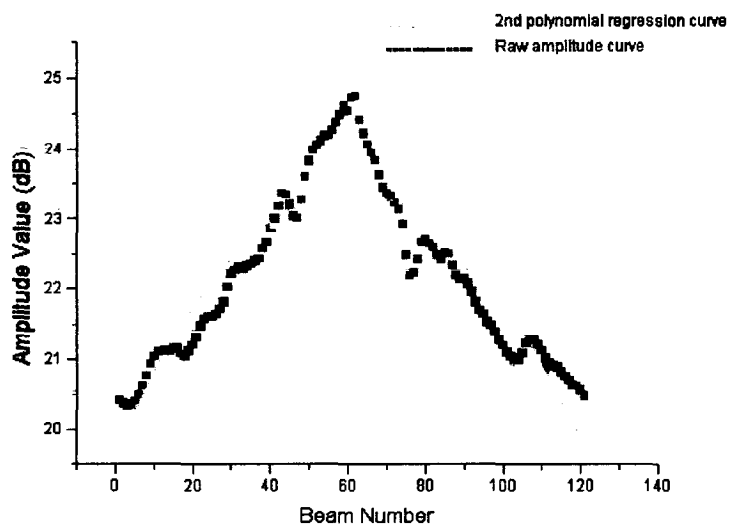


Fig. 2-10. Regression Pattern of SeaBeam 2000 121 Beams.

의 분포특성으로 본 연구의 자료처리는 이에 대한 표준화를 우선적으로 수행하였다. 좌현의 최대주사수평거리는 약 7,682m 이고, 우현의 최대주사수평거리는 약 7,545m 이다. 획득자료에 의한 평균 수심은 4,796m로 전체지역이 거의 평탄하고, +90dB의 이득을 고려하여 최대음압은 24.78dB이고, 최소값은 20.33dB 이고 평균 후방산란 음압은 전체지역에서 22.15dB(표준편차 1.21dB)이다. Fig. 2-9에 대한 121개 빔자료 형태의 수신신호에 대한 모델링을 위하여 빔별 분포곡선에 대한 다중회귀 분석을 실시하였다. 즉 Fig. 2-10은 Fig. 2-9에 대한 다중회귀 분석에 의한 수렴곡선을 나타내며, 이 곡선은 수신신호에 대한 특성곡선으로 간주할 수 있다. 위의 다중회귀분석식은 다음과 같으며 그 결과는 Table 2-1과 같다.

다중회귀 분석식 :

$$\text{Amplitude(Beam\#)} = A_0 + A_1 \times \text{Beam\#} + A_2 \times \text{Beam\#}^2 + A_3 \times \text{Beam\#}^3 + \dots$$

Table 2-1. Regression analysis results of 121 Beams Multi-Beam Data

변수	값	표준편차
A <sub>0</sub>	19.699799	0.14609
A <sub>1</sub>	0.121600	0.00553
A <sub>2</sub>	- 0.001004	0.00004

Fig. 2-11은 좌현의 빔별 후방산란 강도값만을 이용하였는데, 이는 조사구역이 충분히 평탄하며, 수신신호의 분포에서와 같이 좌현과 우현의 빔별 후방산란강도의 분포가 거의 대칭으로 분포하므로 이를 기본으로 전체곡선을 추정하여 수신신호에 대한 모델링을 추정하였다. 회귀분석식은 위의 식과 같으며 그 결과는 Table 2-2와 같다.

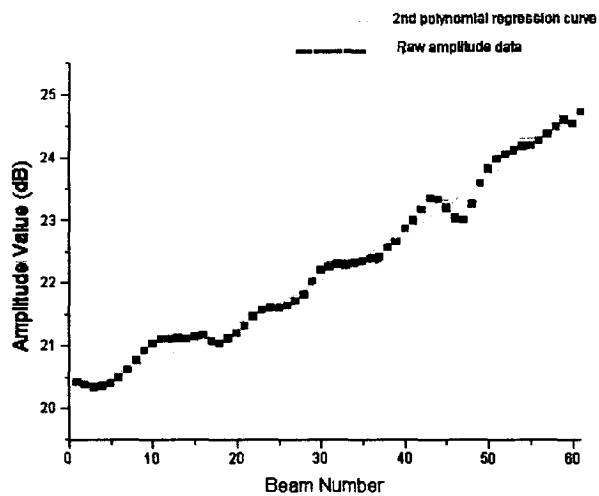


Fig. 2-11. Regression Pattern of SeaBeam 2000 Port 61 Beams.

Table 2-2. Regression analysis results of 61 Beams Multi-Beam Data

변수	값	표준편차
A <sub>0</sub>	20.335673	0.05764
A <sub>1</sub>	0.040965	0.00429
A <sub>2</sub>	- 0.000524	0.00007

Table 2-1과 2-2에서와 같이 각 변수의 값에서 수신 후방산란 신호는 좌우 대칭의 분포 경향이 뚜렷하게 나타난다. Fig. 2-12는 획득된 원시 후방산란의 영상으로 290개의 ping자료를 이용하여 100mX100m의 격자 크기로 재배열한 것으로 영상의 화소값에 의한 표준편차는 42.77이다. 중앙빔의 상대적 강한 후방산란 강도가 질게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 2-13은 Table 2-2의 회귀식에 의해서 1차로 재배열한 영상으로 원시자료로부터 좌우현의 후방반사파가 비교적 표준화된 경향을 보이거나 중앙의 강한 반사파에 대한 경향은 남아있음을 알 수 있다. Fig. 2-14는 Table 2-1의 121개 빔을 이용한 회귀식의 변수를 이용한 재배열의 영상으로 전체 구역에 대한 표준화가 비교적 잘 이루어져 있음을 알 수 있다. 특히 Fig. 2-12에서는 좌우현의 끝쪽에 분포하는 후방산란 강도가 상대적으로 낮을 것으로 판단되었으나, 이 영상에서는 오히려 상대적으로 강한 후방산란 강도를 보인다. 특히 3차원으로 표현한 조사구역의 해저 수심분포도(Fig. 2-15)에서도 보듯이 완곡한 경사면에서의 후방산란 강도를 잘 표현해 주고 있으며, 주사위치와 비교하여 반대편경사면 지역에 대한 후방산란 강도가 잘 표현된다.

**Ship's Track**

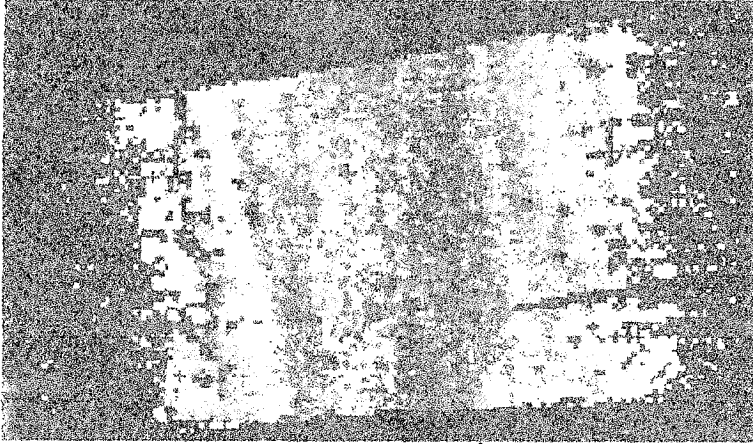


Fig. 2-12. Raw Image of SeaBeam 2000 Backscattering Amplitude.

**Ship's Track**

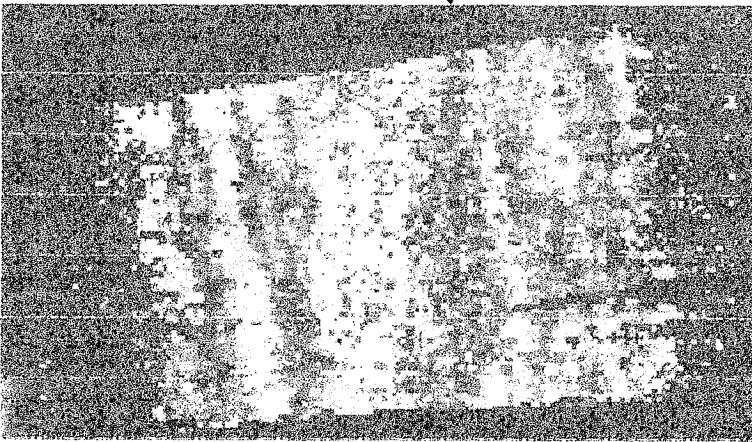


Fig. 2-13. SeaBeam 2000 Backscattering Amplitude Image after filtering with port side 61 Beam Regression curve.



**Ship's Track**

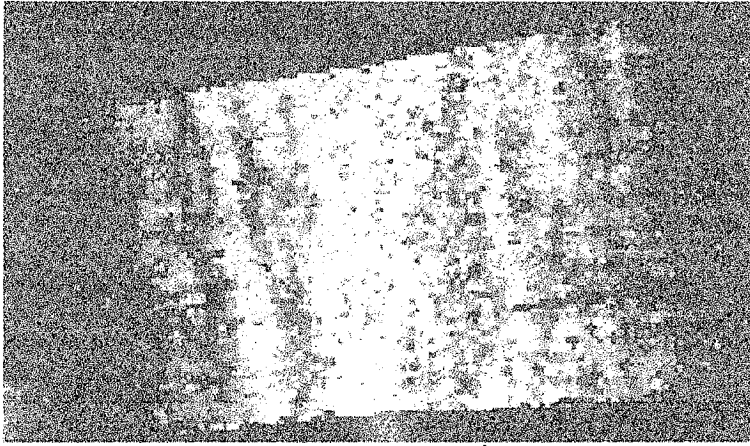


Fig. 2-14. SeaBeam 2000 Backscattering Amplitude Image after filtering with port side 121 Beam Regression curve.

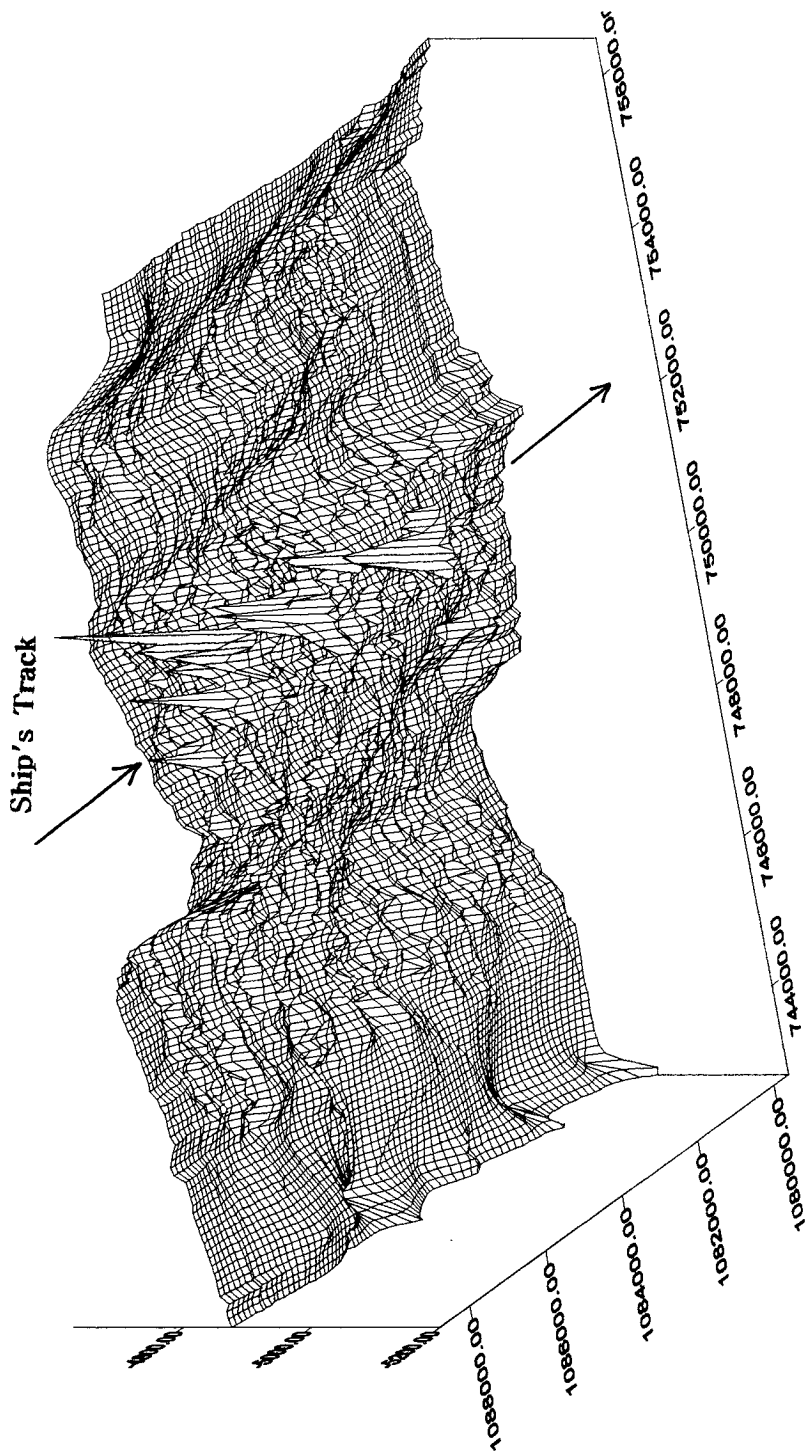


Fig. 2-15. 3-dimensional map of surveyed area.

### 제 3 절 결 론

구형의 SeaBeam(16빔)을 이용한 심해저 해저면에서의 반사파와 망간단괴의 분포와의 상관관계는 1985년 스크립스 해양연구소의 Christian de Moustier에 의해서 1차로 시도되었다. 즉, 조사선의 중앙 15°빔내의 후방산란 자료만을 이용한 결과는 주사면에 대한 약 30%의 면만을 포함하였다. 특히 당시의 연구결과는 SeaBeam의 수신음파(Fig. 2-9)에 대한 장비의 에너지 특성을 고려하여 중앙의 일부 빔 자료만을 이용하였기 때문에 좌우현에 대한 충분한 적용이 이루어지지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 SeaBeam 2000의 심해에서의 빔형태의 특징(120° 주사)에 맞추어 획득되는 121개의 자료 전체를 이용하기 위하여 1차로 수신빔의 특성분석과 그에 따른 수신 후방산란 음압 강도를 영상처리 기법을 이용하여 재배열하여 처리하였다.

재배열된 후방산란 강도는 조사구역내에서(+90dB의 offset를 포함한 값으로) 화소값의 편차가 약 40의 범위를 보인다. 이는 EA-500에서 획득된 수신 후방산란 강도의 분포 약 30dB의 범위와 일치시켜 화소값에 대한 분포도를 구성할 수 있었다(Fig. 2-14). 이에 따른 결과는 상대적으로 강한 최소값(34에서 37의 분포)의 분포가 조사구역의 중앙에 분포하며, 이는 특징적으로 EA-500의 후방산란 강도가 -35dB 이상의 값에 해당되는 화소값으로 상대적인 표현이 될 수 있다(Fig. 2-14의 좌측 상단 및 우측 상단을 포함하는 지역). 이는 후방산란의 강도에 의한 음파의 저항만을 고려한다면 해저면 상에 후방산란 강도를 강하게 하는 원인이 존재할 것으로 이러한 지역은 망간단괴가 상대적으로 많이 분포되어 있을 것으로 추정된다. 따라서 본 연구의 처리방법에 의한 영상의 개선 및 그에 따른 통계처리를 감안하여, EA-500의 후방산란 강도를 고려한 SeaBeam 2000의 영상처리 결과 중 -35dB에 해당되는 화소의 재배열에 의해서 개략적인 후방산란 음압의 분포도 작성은 지역적인 분포상황에 대한 개괄적인 표층존재의 망간분포와 1

차적으로 표층에 분포하는 단괴와 일치 시킬 수 있다. 특히 음파를 이용하는 음향원격탐사법의 검증을 위한 여러가지(심해 카메라 시스템, 상대적 고주파의 Deep Towed Side Scan Sonar 등)조사를 장시간 종합적으로 수행, 계수화된 후 방산란 값에 대한 정량적인 자료의 축적이 필요하다.

## 참 고 문 헌

- 박요섭, 박성익, 김학일, 이용국, 석봉출, 1994. " 영상처리기법을 이용한 해저 수  
치자료의 후처리시스템 개발 ", 제 7 회 신호처리합동학술대회 논문집.
- 박요섭, 김학일, 이용국, 석봉출, 심태보, 1995. " SeaBeam 2000의 빔특성 및 해저  
면 후방산란 영상처리 ", 제 8 회 신호처리합동학술대회 논문집.
- De Moustier, C., 1985. Inference of manganese nodule coverage from SeaBeam  
acoustic backscattering data, GEOPHYSICS, V.50(6), 989:1001.
- De Moustier, C., and Matsumoto, H., 1993. Seafloor Acoustic Remote sensing  
with MultiBeam Echo-Sounders and Bathymetric Side Scan Sonar  
System, MGR, V.15, 27:42.
- Magnuson A. H., 1983. Manganese Nodule Abundance and Size from Bottom :  
Reflectivity Measurements, Marine Mining, V.4(2-3), 265:296.
- SeaBeam Instrument Inc., 1992. SeaBeam 2000 Bathymetric Swath Survey  
System Hardware Technical Manual(Prepared for KORDI), 1:95.
- SimRad SubSea, 1991. EA-500 Hydrographic Echo Sounder Operation Manual,  
Chap.1 - Chap.6.
- Steven Harrington, 1987. " Computer Graphics ", 2nd Ed., McGraw-Hill.



## 제 3 장

### 저 서 생 물

연구 책임자 : 최 진 우

연구원 : 이 홍 금

이 재 학

제 종 길

강 래 선

박 홍 식

박 자 양

고 병 설

연구조원 : 이 종 수

이 형 곤





## 제 1 절 서 론

심해저 망간단괴를 채광하는 과정에서 야기될 퇴적물의 교란이나 부유물의 재퇴적등의 저서환경변화가 저서생태계에 미치게될 영향정도를 파악하기 위한 기초단계로서 채광이 수행되기 전에 현재 자연상태의 저서환경조건을 먼저 파악하는 채광이전의 환경평가는 우선적으로 선행되어야 할 중요과제이다 (Thiel, 1992). 이러한 관점에서 본 연구는 한국이 채광 가능지역으로 유엔에 등록된 북태평양의 클라리온-클리퍼톤 해역내에서 저서환경요인 중에서 저서생물분야를 중심으로한 기초조사로서 수행되었다.

저서생태계의 일반적인 생체량 및 개체수의 구성비율을 보면 생체량의 90% 이상을 bacteria가 차지하고 있고, 5~10%를 40~500 $\mu\text{m}$  크기의 중형동물 (meiofauna)이, 나머지 5%이하를 500 $\mu\text{m}$  이상의 대형동물 (macrofauna) 또는 거대형동물 (megafauna)이 차지한다. 서식밀도를 보면 거대형 저서동물은 2~300 개체/1,000  $\text{m}^2$  (0.002~0.3개체/ $\text{m}^2$ )이고 대형저서동물의 경우에는 95~2215개체/ $\text{m}^2$ , 중형저서동물은 80~500개체/10 $\text{cm}^2$  (80,000~500,000개체/ $\text{m}^2$ )이고, bacteria는  $1.2\sim 7.2\times 10^{13}$  inds./ $\text{m}^2$ 에 이른다 (Rowe and Pariente, 1992).

현재로서는 망간단괴에 대한 정밀탐사작업이 우선되어서 추진되고 있지만 과거에 없었던 환경분야에 대한 종합적인 조사가 이번에 시작된 것이 매우 의미 있는 일이다. 지금까지는 심해저의 저서생물에 대한 자료는 대부분 망간단괴 채집 과정에서 자유낙하식 채집기에 의해 채집된 생물을 중심으로 한 정성적인 면에 치중되어 있었으나 본 조사에서는 비록 조사정점수나 시료량이 절대적으로 부족하지만 정량적인 자료 획득에 치중하고자 하였으며, 자료의 종류도 점차 늘려 megafauna와 저서성 어류에 대한 자료 획득을 추진해 나갈 계획이다.

현재까지 국내에서의 연구는 주로 megafauna와 macrofauna의 종조성과 대략적인 현존량 분포에 관한 연구가 수행되었으나, 매우 적은 생물시료수로 인하여 일반적인 분포양상도 밝히지 못하고 있다. 최근의 선진국의 심해저 생태계에 대

한 주요 연구동향으로는 (1) 채광이 저서환경이나 생물군집에 어떠한 영향을 미칠 것인가, (2) 환경이나 군집이 어떻게 재형성될 것인가, (3) 이러한 문제점을 알아내기 위해 어떠한 연구방법으로 접근해 나갈 것인가 등 세가지 문제로 집약되어 있으며, 이를 위해 DISCOL이나 BIE와 같은 project를 통하여 심해저서생물의 군집특성, 서식지경쟁, 에너지흐름, 생리적 특성 등에 관한 연구가 수행되었거나 현재 진행중에 있다. 예로서 1991년부터 미, 일, 러 공동연구과제로 BIE (Benthic Impact Experiment)에서 채광장비에 의한 심해저 퇴적물의 교란에 의한 퇴적물 제거와 부유된 퇴적물의 재퇴적작용에 의해 표층퇴적물에 포함된 먹이원이 희석되는데 이것이 중형동물의 기아정도에 어떠한 영향을 주는가를 보기 위해 생체의 지방불조성변화를 조사하고 있는 것으로 들 수 있다.

연구 방법상의 경향은 서식밀도가 낮은 거대형 또는 대형저서동물 분야는 자료획득이 유리하고 환경변화에 재빨리 반응하는 bacteria와 중형저서동물을 대상으로 하고 있다는 것이다. 따라서 국내 연구는 이러한 잇점을 살릴 수 있도록 연구방향을 설정하고 인력이나 장비의 보완이 요구된다.

이번조사에서는 저서생물의 종류와 개괄적인 현존량 파악에 중점을 두고서 미생물의 현존량, 중형 및 대형저서동물의 종류와 현존량, 지역적 및 수직적인 분포양상등을 조사하였다.

## 제 2 절 재 료 및 방 법

조사지역은 북태평양의 Clarion - Clipperton Fracture Zone 중남부 해역으로 북위 9 30' - 10 30', 서경 131 50' - 133 20'에 위치하며 (Fig. 3-1), 조사기간은 1995년 7월 1일부터 8월 1일까지이다. 조사선은 한국해양연구소가 보유한 조사선 은누리호를 이용하였고, 총 14개 정점에서 Box corer를 사용하여 실제 채집이 가능한 곳은 10개 정점이었다.

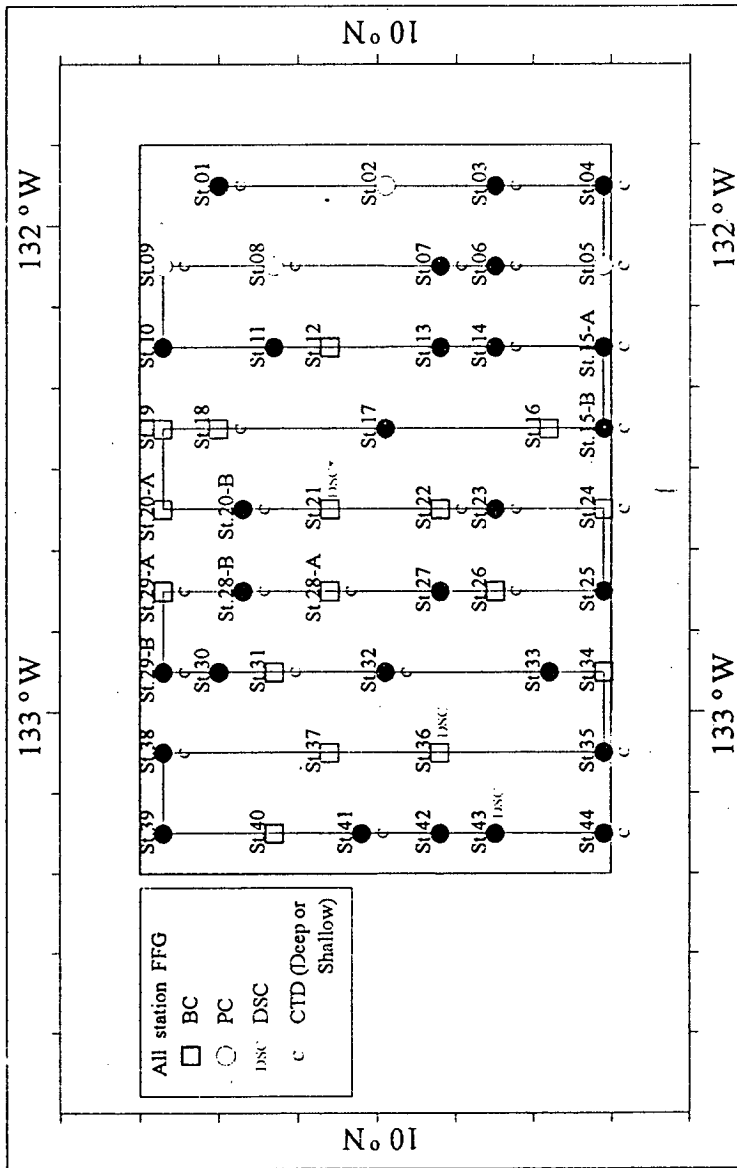


Fig. 3-1. The study area and sampling sites for benthos during the cruise of KODOS 95-2.

퇴적물에 서식하는 미생물과 저서동물을 채집하기 위해서 Box corers (50cm × 50cm 및 20cm × 30cm 크기의 core)를 사용하여, 총 14개 정점에서 시도하였으나, 실제로 퇴적물 채집이 가능한 것은 9개 정점이며 1개 정점에서는 망간단괴만 채집되었다. 각 정점별 사용한 Box corer의 종류와 subcore 시료의 갯수는 Table 3-1과 같으며, 3개 정점에서 대형 Box corer를 사용하였고 7개 정점에서 소형 Box corer를 사용하였다.

미생물 시료 채집은 퇴적물 깊이별로 4개 층 (0~1cm 층, 1~2cm 층, 2~5cm 층, 5~10cm 층)으로 나누고 각 퇴적층에서, 호기성 및 혐기성 균주를 위해 퇴적물 50ml를 채취하였다. 또한 ATP 추출을 위해 퇴적물 2ml를 각 층별로 취하였고, 시료의 중량을 측정하기 위해 1~2개씩 별도의 퇴적물 시료 2ml씩을 채집하여 냉동 보관하였다. ATP 추출은 0.5M 인산을 퇴적물 시료에 첨가하여 주사기에 넣고 200 $\mu$ m 망목의 체로 거른 후 4°C에서 약 20분 동안 반응시킨 후 냉동보관하였다.

저서동물의 경우에는 직경 9.4cm의 subcore를 사용하여 20cm까지의 퇴적물 시료를 1~3개 취하고 각 시료별로 5개 층, 즉 0~1cm 층, 1~2cm 층, 2~4cm 층, 4~6cm 층, 6~10cm 층으로 나누어서 채취한 후 10% 포르말린에 고정하였다. 이어서 특별히 고안된 저서동물 분리기(extractor)에 넣고 분리되어 나오는 것들을 100 $\mu$ m mesh체와 300 $\mu$ m mesh체를 한 set로 된 체에 받아서 70% 에탄올에 보관하였다. 중형저서동물의 현존량 조사는 시료량이 많기 때문에 20 ml 병에 에탄올로 가득 채운 후 시료를 잘 섞은 후 피펫으로 2 ml를 취하여 해부 현미경하에서 관찰하였다. 또한 정점 36에서 채취된 망간단괴의 틈바구니에 서식하는 저서동물을 조사하기 위해 망간단괴를 10% 포르말린에 고정하였다. 이외에도 망간단괴 조사에 사용된 Free-fall grab에 의해 간혹 채집된 생물도 10% 포르말린에 고정하였다.

Table 3-1. The sampling scheme for benthos at each station in KODOS 95-2 (July, 1995).

Station	Water depth	Box Corer size	No. of subcores	Sampling items
12(BC1)	4800	50×50cm	3	bacteria, benthos
21(BC2)	4658	20×30cm	1	"
22(BC3)	4860	"	1	"
26(BC4)	4841	"	1	"
28A(BC5)	4789	"	1	"
29A(BC6)	4830	"	1	"
31(BC7)	4818	"	1	"
34(BC8)	4970	"	1	"
40(BC9)	4825	50×50cm	9	"
36(BC10)	4749	50×50cm	0	manganese nodules

## 제 3 절 결 과

### 1. 저서동물

#### 가. 대형저서동물

##### (1) 대형저서동물의 종조성

9개 정점에서 출현한 저서동물은 11개 동물군으로 전체적으로 볼 때 절지동물의 갑각류(crustaceans)속하는 저서동물(Ostracoda, Copepoda, Amphipoda, Tanaidacea)이 가장 많이 출현하였고, 선형동물(Nematoda, 전체의 27%)과 Nemathelminthes (11 %), 환형동물문의 다모류(polychaeta, 전체의 10 %)순으로 우점하였다 (Table 3-2). 갑각류 내에서는 단연 copepods가 가장 많은 비중을 차지하였고(전체의 38%), ostracods가 두번째로 많은 개체수를 보였다(전체의 9%).

##### (2) 분포양상

###### (가)지역적인 분포

본 조사해역에서 각 정점에서 출현한 저서동물의 종류와 개체수를 보면 St.21에서 7개 동물군이 출현하여 가장 다양한 종조성을 보였고 그 외의 정점에서 3~5개 동물군이 출현하였다 (Fig. 3-2). St.26와 St.29A에서 각각 13개체씩 출현하였고 (서식밀도 473개체/m<sup>2</sup>), St.28A에서 3개체 (서식밀도 109개체/m<sup>2</sup>)로 가장 적었다. 조사해역 전체의 평균 서식밀도는 약 364개체/m<sup>2</sup>로 추정되었다. 한편 가장 출현 개체수가 많은 곳은 St.26과 St.29A로서 각각 13개체 (473 ind/m<sup>2</sup>)씩 출현하였고, 그 다음은 St.21이며 가장 적은 개체수를 보인 곳은 St.28A로서 3개체 (109 ind/m<sup>2</sup>)였다 (Fig. 3-3). St.12에서는 3개 subcores에서 9~11개체의 출현개체수를

Table 3-2. The individual number of macrofauna occurred at each station of the study area.

Station	12	21	22	26	28A	29A	31	34	40	Freq.	Sum	%
	Box corer B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9			
Turbellaria	1									1	1	1.2
Nematoda		4	6	7		2	2	1	1	7	23	28.0
Nemertea		1								1	1	1.2
Nemathelminthes		1			1		6		1	4	9	11.0
Sipunculida		2								1	2	2.4
Echiura	1									1	1	1.2
Polychaeta	2	1	1	1	1			1	1	7	8	9.8
Ostracoda			1	2	1	2			1	5	7	8.5
Tanaidacea		1								1	1	1.2
Copepoda	5	2	2	3		9	1	6	2	8	30	36.6
Amphipoda	1									1	1	1.2
No. of Ind.	10	12	10	13	3	13	9	8	6		82	
No. of Taxa.	5	7	4	4	3	3	3	3	5	11		

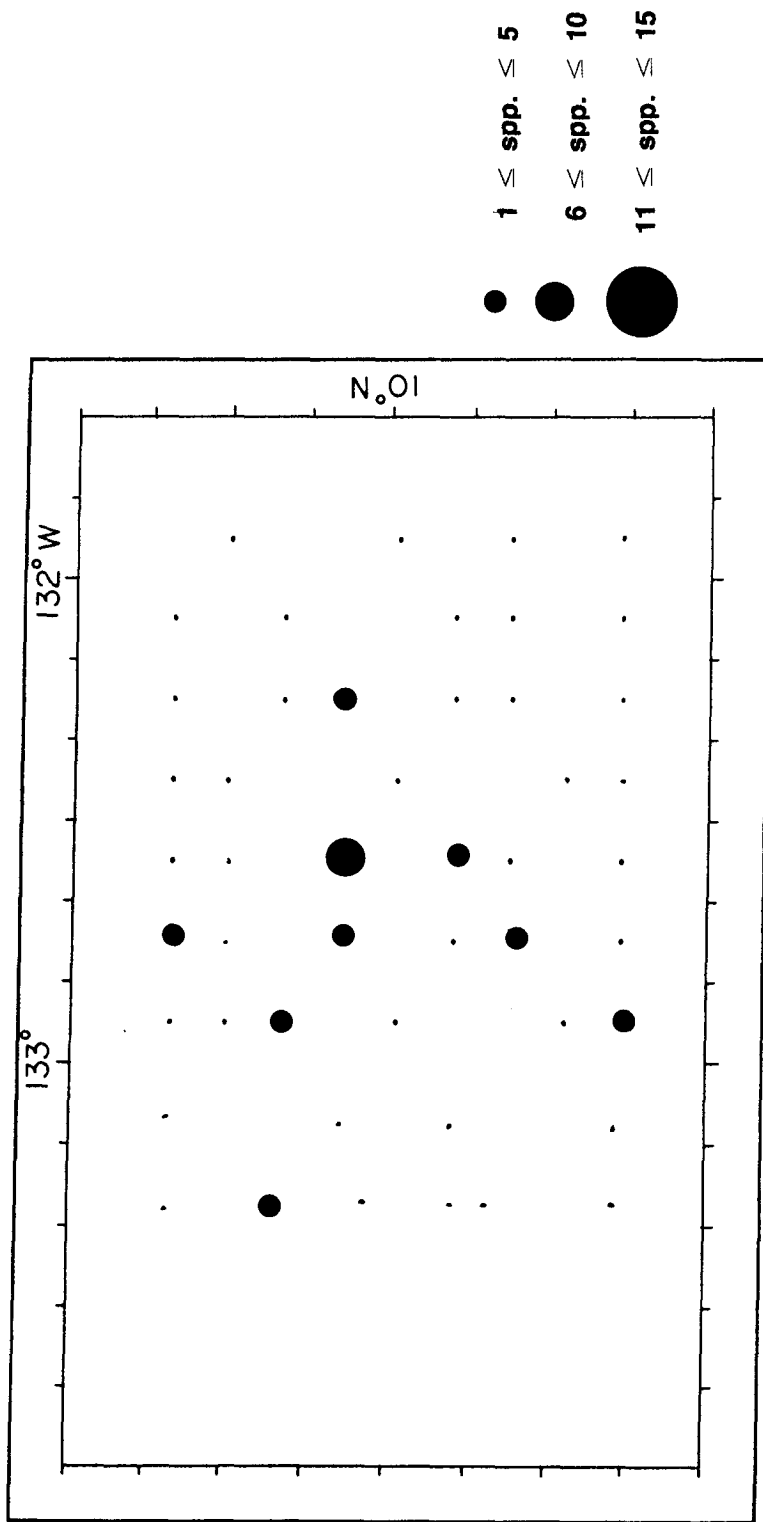


Fig. 3-2. The species number of macrofauna taxa in the study area (July, 1995).



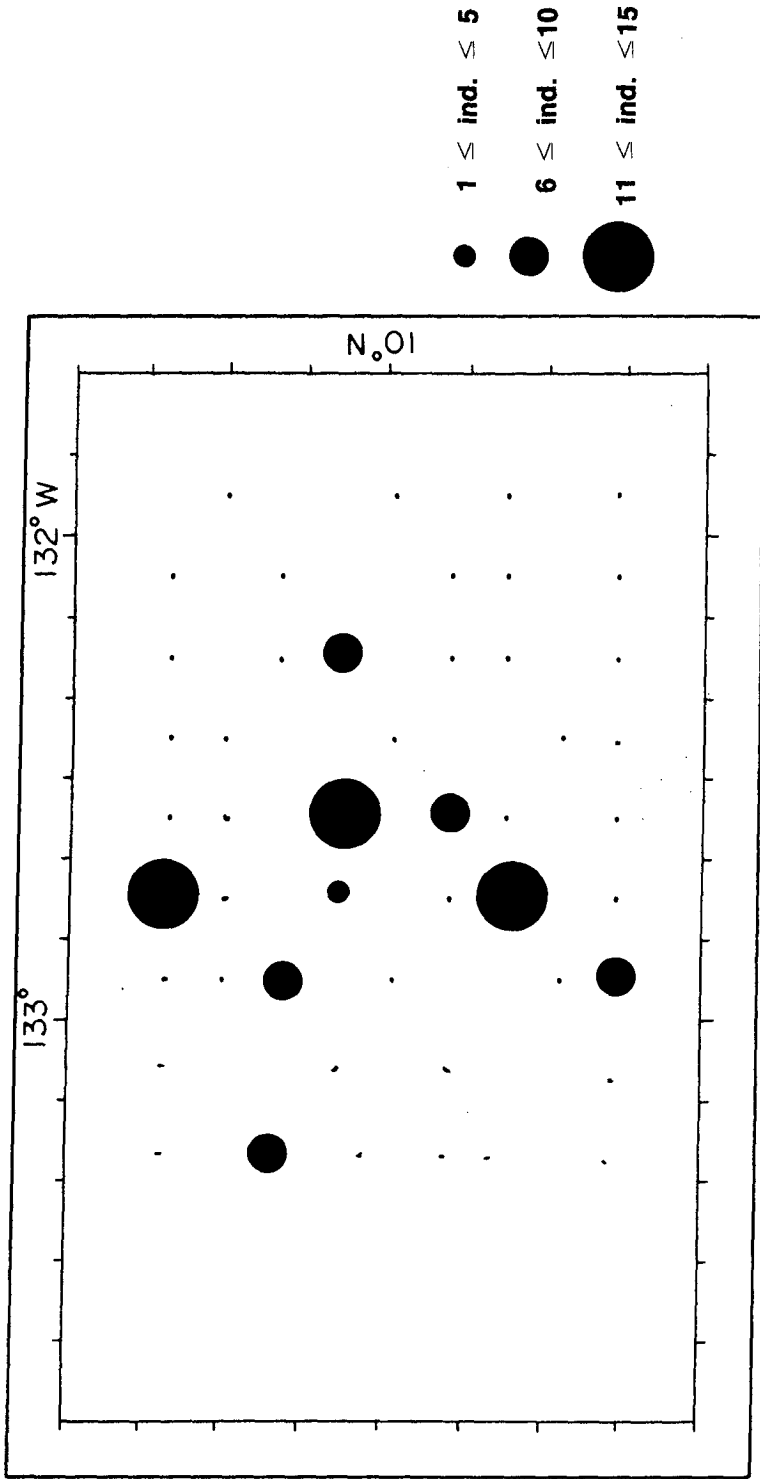


Fig. 3-3. The abundance of macrofauna in the study area (July, 1995).

보여 평균값이 10개체 ( $364 \text{ ind/m}^2$ )였고, St.40에서는 8개 subcores에서는 4~13 개체가 출현하여 평균값은 6개체 ( $216 \text{ ind/m}^2$ )였다.

Box corer내에서의 소규모 분포양상을 보기 위해 subcores간에 유사도를 Bray-Curtis의 유사도지수값을 구하였다. St.12에서의 3개 subcore간 출현 동물군의 유사도지수를 보면 0.46으로서 그다지 높은 편은 아니다. 이는 subcore간에 동물군별로 출현여부나 개체수에 있어서 차이가 있음을 나타낸 것이다. 그러나 시료수가 절대적으로 부족한 상황이기 때문에 어떤 결론을 짓기는 어려운 실전이다. 한편 St.40에서 9개 subcore간에 출현한 동물군의 종류와 개체수를 도식하면 Fig. 3-5이 나타났다. 서로 인접한 subcores들간에 높은 유사도지수값을 보였다. 예로서 subcore 1과 4, subcore 2와 3에서는 유사도지수값이 0.8로 높았고, subcore 5에서는 다른 subcore들과의 전체적인 유사도 지수값이 0.2 수준으로 낮았다.

St.40에서 해황이 불량하여 Box corer의 시료가 심하게 교란되었고 한쪽면으로 퇴적물 시료가 유실되었기 때문에 Box core 내부에서의 소규모 분포양상을 파악함에는 본 자료의 신뢰성이 매우 낮다. 단지 인접한 subcore들 간에는 유사도지수값이 0.6이상으로 나타나 유사한 종조성을 보인 것으로 볼 때 대체로 교란이 적었다고 간주되는 저서동물의 수평분포양상은 patchy 분포가 아닌 대략적으로 임의 분포를 하고 있는 것으로 생각된다. 이 소규모적인 분포양상은 차후 신뢰도 높은 자료의 축적이 있어야 파악될 수 있을 것이다.

#### (나) 수직분포

퇴적물내 저서동물의 수직적인 분포양상을 보기 위해 Box core내의 저층수와 퇴적물 시료를 5개층으로 나누었고, 퇴적물 위의 저층수에 포함된 저서동물도 함께 채집하였다. 주요 우점 5개 동물군이 각 퇴적물층에서 출현한 개체수를 합하여 전체에 대한 백분율로 구한 결과는 Fig. 3-4와 같다. 주요 우점동물군 전체

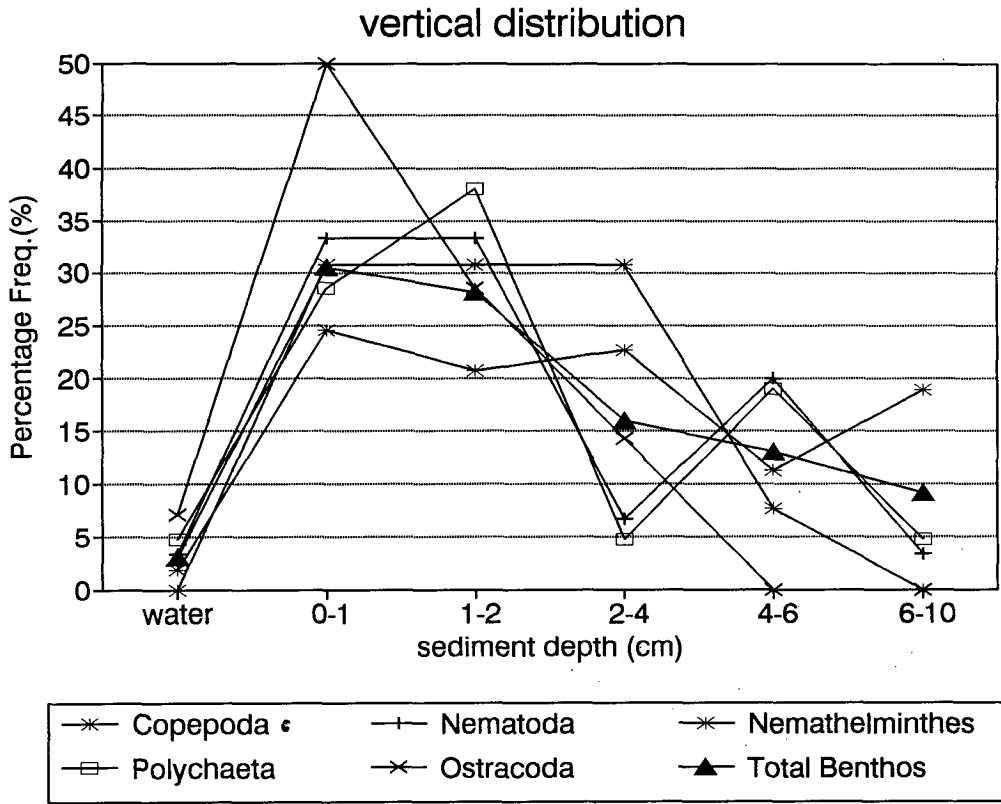


Fig. 3-4. The relative distribution (percentage of total) of macrofauna taxa (>300 μm) among vertical fractions pooled (from 9 station) in the study area (July, 1995).

(1) 6 13 Ne- ● ● ● Os- ● ● Co- ● ● ● Po- ● Na- ● ● ● Ta- ●	(2) 4 7 Ne- ● Os- Co- ● ● ● Po- ● ● Na- ● Ta-	(3) 2 4 Ne- Os- Co- ● ● ● Po- ● Na- Ta-
(4) 3 6 Ne- ● Os- ● ● Co- ● ● ● Po- Na- Ta-	(5) 2 4 Ne- Os- ● ● ● Co- ● Po- Na- Ta-	(6) 3 8 Ne- ● ● ● Os- Co- ● Po- ● ● ● ● Na- Ta-
(7) 3 3 Ne- Os- Co- ● Po- ● Na- ● Ta-	(8) 2 2 Ne- ● Os- Co- Po- ● Na- Ta-	(9) 0 0 Ne- Os- Co- Po- Na- Ta-

Total	6	47
Ne-	9	
Os-	7	
Co-	15	
Po-	10	
Na-	5	
Ta-	1	

\* Ne: Nematoda  
Os: Ostracoda  
Co: Copepoda  
Po: Polychaeta  
Na: Nematelminthes,  
Ta: Tanaidacea

Fig. 3-5. Spatial distribution of macrofauna within 9 subcores of a large box core sample(50cm x 50cm) at St. 40 (July, 1995). (Left figure shows the number of taxa.: Right one, individual number)

의 수직적인 분포양상은 0 - 1 cm 표층에서 가장 많고, 하부층으로 갈수록 감소하였다. 특히 2cm층을 경계로 출현율이 급격히 감소함을 보였다. 동물군별 수직 분포를 보면 먼저 저층수와 0-1cm 표층에서 주로 출현한 저서동물로는 Ostracoda였고, Nematelminthes는 4cm이내의 상부층에서 출현하였다. 이들 외에 Nemertea와 Tanaidacea 등도 2cm이내의 상층부에서 주로 출현하였다. 한편 polychaeta, copepoda, Nematoda등은 0~10cm에 이르는 전 퇴적물층에서 출현하였다. 그러나 몸체가 작아서 주로 중형동물에 속하는 Nematoda의 경우 80% 이상이 2cm이내의 상층부에서 출현하였다., Copepoda와 Polychaeta는 수직적인 분포양상이 서로 유사함을 보였으며 전체의 50 % 이상이 4cm이하에서 출현함을 보였다. 다모류는 퇴적물내로 파고드는 굴착성이고 식성유형도 표층하퇴적물식자가 우점하므로 그들의 서식지는 표층보다는 하부 퇴적물에 더 많이 분포할 것으로 생각된다. Amphipoda의 경우에는 0~1cm층과 6~10cm층에서만 출현하였는데, 이는 채집과 Box corer 시료가 교란되어 나타난 현상으로 간주된다. 저층수에 포함된 저서동물들은 실제로는 표층의 퇴적물에 Box Corer 인양시에 해수와 표층퇴적물이 서로 뒤 섞였음을 반증하는 자료이다. 본 조사 결과는 비록 매우 빈약한 자료임에도 불구하고 저서동물의 퇴적물내 수직적 분포는 서식유형과 몸체의 크기에 따라 결정됨을 보여준다. 주요 taxa별 수직적인 분포양상을 파악하기 위해서는 좀더 많은 시료의 획득이 요구된다.

#### 나. 중형동물

중형동물의 시료는 표층퇴적물시료만 먼저 조사하였는데 9개 정점에서 채집된 중형동물의 개체수와 종류를 보면 매우 빈약함을 알 수 있다 (Table 3-3). St.29A, St.31과 같은 일부 정점에서는 전혀 출현하지 않았고, St.12와 St.40의 subcore에서도 출현이 없는 경우도 있었다. 중형저서동물의 출현밀도가

Table 3-3. The individuals of meiofauna occurred at each station of the study area. (abundance data were based on the surface sediment sample (0-1 cm layer)).

Stations	12	21	22	26	28A	29A	31	34	40									
Box core	1	2	3	4	5	6	7	8	9									
Taxa.\Samples	1 2 3	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 2 3	4 5 6	7 8 9						
Nematoda		1 1 1	2 2 2	4				1		2						2 1		
Copepoda		1	1	2						5 1				1				
No. of Taxa.		2 1 2	2 2 2	1				1 1 1		1 2				1 1 1				
No. of Ind.		2 1 3	4 4 4					1 5 3		1 5 3				1 2 1				

subsample당 최대 5개체에 불과한데 이는 서식밀도 1800 개체/m<sup>2</sup>에 해당된다.

이와 같이 생물량이 빈약한 것으로 나타난 원인으로는 첫째 표층퇴적물의 교란으로 중형저서동물이 대부분 소실되었을 것이라는 가정, 둘째로는 채집시에 많은 퇴적물과 함께 섞인 채로 고정되었기 때문에 고정액의 부족으로 생물시료가 많이 부패되어 소실되었을 가능성, 셋째로는 subsampling의 양이 너무 적어서 관찰되지 않았을 가능성, 넷째로는 중형저서동물의 서식밀도가 실제로 이 정도로 낮을 것이라는 가정등을 들 수 있겠으나, 여러가지 사항을 고려할 때 상기 첫 3가지 가정들이 상호 복합적으로 작용하여 나타난 결과라고 생각된다. 따라서 현재로서는 이 자료의 신빙성이 매우 낮기 때문에 차후 좀더 정확하고 신뢰성 있는 자료획득이 있기까지는 중형저서동물의 분포양상이나 종조성에 관한 설명을 하기가 곤란하다.

#### 다. 망간단괴내의 저서동물상

St.36에서 인양된 망간단괴의 틈바구니에 서식하는 저서동물을 정성적으로 조사한 결과 Table 3-4와 같은 종조성을 보였다. 300 $\mu$ m 이상에서는 harpacticoid copepods가 가장 많이 출현하였고, Nematoda가 그 다음 동물군으로 나타났다. 100 $\mu$ m~300 $\mu$ m에서는 Nematoda와 harpacticoid copepods가 단연 우점하였고 Tanaidacea, Polychaeta, Insecta가 1개체씩 출현하였다. 망간단괴에 부착하고 있는 고착성 저서동물로는 300 $\mu$ m mesh 체에 걸린 미동정의 worm이 3개체 발견되었다. 이들은 세관을 가지며 기부에 부착한 흔적을 보였다.

St. 36에서 퇴적물 시료가 채취되지 않았기 때문에 현재로서는 망간단괴 내부의 저서동물과 퇴적물내의 저서동물간에 종조성이 같은지 다른지를 비교할 수가 없지만 Thiel et al.(1993)에 의하면 망간단괴 내부의 저서동물은 ooze 퇴적물의 저서동물과 종조성이 크게 다르다고 보고하였다. 그러나 주요 우점 동물군은

Table 3-4. Benthic fauna in the crevice and on the surface of manganese nodules collected at St. 36.

Taxa.\ Mesh-size	> 300 $\mu\text{m}$ (No. of Ind.)	> 100 $\mu\text{m}$ (No. of Ind.)
Nematoda	● ● (2)	● ● ● ● ● ● ● (7)
Copepoda	● ● ● ● (4)	● ● ● ● ● ● ● (7)
Tanaidacea	● (1)	● (1)
Polychaeta	● (1)	● (1)
Amphipoda	● (1)	
Insecta		● (1)
Nemertea	● (1)	
Worm 1(unid.)	● ● ● ● ● (5)	
Worm 2(unid.)	● (1)	
Unknown	● (1)	



nematodes, harpacticoid copepods 등이었고 polychaetes, tanaids 등도 소량 출현하는 것으로 보고하였다. 차후 이에 대한 비교분석이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

## 2. 해양 저서 미생물

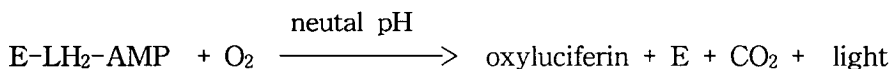
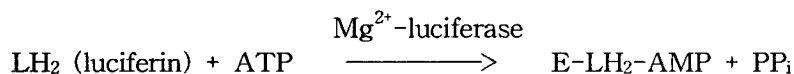
심해저질층은 높은 기압의 광합성이 불가능한 해양환경으로 오랜세월에 걸쳐 독특한 생태계를 유지해왔기 때문에 망간단괴, 망간각 등 해저광물 채광과 채굴 등이 저층 환경 특히 생물환경에 미치는 영향이 있을 수 있다. 심해환경의 변화에 대한 BIE (Benthic Impact Experiment)와 같은 국제 공동연구에 발맞추어 우리나라가 확보한 심해저 광구 지역에서 장차 발생될 수도 있는 광물 채취에 따른 생물환경의 변화와 영향을 조사하기 위한 분석방법의 확립 및 기초자료를 확보가 필요하다.

1994년의 태평양의 적도해역주변 탐사시 채취한 미생물 분리용 시료는 심해저 연구사업이 진행되는 동안 부차적으로나마 채취된 퇴적물로 망간 세균 및 해양 세균 분리를 위한 실험을 시도하였다. 시료의 보관 상태 등 미생물 분리, 분석용 시료가 아니라 분리하는데 어려움이 있었으나 약 50 주의 해양일반세균과 저영양성 세균을 분리하였다. 일반세균인 경우 ZoBell 배지에서 분리한 것은 계대배양이 가능하였으나 해수한천배지에서 분리한 저영양성 해양세균의 경우 계대배양이 불가능하여 그의 지속적인 연구가 불가능하였으며 새로운 배지의 선택이 필요하다고 사료되었었다. 망간단괴 및 망간각 주변 저서 생태계의 미생물학적 분석 및 미생물에 의한 생물지질학적 망간단괴 생성에 대한 기본 연구를 위하여 망간 순환 관련 미생물의 생리 생화학적 연구가 필요하다. 이를 위하여 우선 1995년의 심해저 탐사시 채취한 시료에서 총세균량 측정 방법 및 생균수 측정방법을 확립하고자 하였다.

본 연구에서는 총 미생물 생산량으로는 시료의 ATP양의 조사방법 및 대표적인 미생물 그룹들의 선정과 이를 실험실내에서 분석할 수 있는 적합배지의 선정 및 각 그룹의 분포도 분석을 위한 생균수 분석을 확립하였다.

#### 가. 총미생물 생체량 측정방법

현장에서 인산으로 추출하여 particulate-ATP(P-ATP)로 냉동보관된 시료를 실험실내에서 아래와 같은 기작의 생발광현상을 이용하여 ATP농도를 측정한다.



시료 2ml를 0.5 M phosphoric acid와 반응시킨 후 4°C에서 20분간 반응하여 ATP를 추출한 후 냉동보관하여 실험실로 운반한다. 냉동운반된 시료는 실험실내에서 녹여 glass filter로 여과한 후 그 여과액을 Sigma사의 ATP bioluminescent assay kit를 사용하여 반응시킨 후 빛은 luminometer로 측정한다. 매 실험 중간 시점에 분석한 ATP standard용액의 calibration curve의 발광도와 비교하여 시료의 ATP 농도를 계산한다. 저질층의 건조량과 탄소량을 측정하여 C:ATP 관계 지수 조사한다. (현재 방법으로 ATP농도가 1nM 이하인 경우 발광검출이 용이하지 않아 추출된 시료를 농축하여 반응시켜야 함).

#### 나. 일반세균 측정방법

중속영양세균은 MPN test로 ZoBell 배지(Marine Broth, Difco사)를 사용하여 현장 선상에서 접종한 수치와 실험실로 운반한 후 분석한 값을 비교하여 현장과 냉장보관된 시료의 분석치의 변화를 조사하고자 하였다. 이 시료의 세균수 측정은 실험실에서 ZoBell 한천배지상에서 군락을 형성할 수 있는 미생물의 분석치로 측정하였다. 자가영양세균으로는 광합성세균을 제외한, 무기물을 에너지원으로 이용 성장할 수 있는 세균그룹으로 최소무기물 배지에 황, 철, 암모니움 등 무기물 첨가 조사한다. 망간산화세균의 경우 망간을 에너지원으로 사용하여 증식할 수 있는 자가영양인 종류와 중속영양인 것을 분리하여 분석한다. 망간환원세균의 경우 중속영양세균중 혐기성 상태에서 망간을 환원시킬 수 있는 세균그룹을 분석한다. 포자생성세균의 경우 저질층에 다수의 포자생성미생물이 발견되나 그 역할은 아직 불분명으로 보고되었다. 이 그룹의 분포 및 그 기능 조사를 위해 *Bacillus* 그룹의 포자생성세균의 분리작업이 요구된다. 진균류는 중속영양 진핵세포인 곰팡이와 효모를 sabourode-maltose agar배지를 이용하여 분석한다.

#### 다. 분석결과

시료 Boxcore 8을 MPN test로 분석한 결과 Table 3-6에 나타난 것처럼 현장에서는 시료 1ml 당  $10^9$  이상의 세균수가 분석된 반면 냉장 운반된 시료의 경우 그 분석치는  $1.0 \times 10^8$ /ml 정도로 현장에서 처리한 시료의 분석치 보다 다소 낮았다. 이는 한 장소의 시료를 예로 분석한 값이지만 가능하면 현장에서 미생물 시료를 분석하는 것이 보다 정확한 분석을 위해 필요할 것으로 사료된다. 세균수 분석의 경우 시료 Boxcore 8 1ml 당  $3 \times 10^7$  정도의 세균수가 분석되었고

Table 3-5. Comparison of abundance estimates for meiobenthos and macrobenthos from deep sea sites.

Area and water depth (m)	Number per square meter		source
	Meiobenthos	Macrobenthos	
Venezuela Basin			
3450	13.1 X 10 <sup>4</sup>	678	
3950	8.1 X 10 <sup>4</sup>	263	1,2
5050	4.9 X 10 <sup>4</sup>	238	
Demerara Abyssal plain			
4420	27.8 X 10 <sup>4</sup>	493	
4850	14.5 X 10 <sup>4</sup>	236	3,4
Bay of Biscay (3000 m)	39.0 X 10 <sup>4</sup>	1180	3
Coral & Solomon Seas			
2426	18.0 X 10 <sup>4</sup>	273	
3264	14.1 X 10 <sup>4</sup>	134	5
4350	9.8 X 10 <sup>4</sup>	163	
Cape Verde Basin			
4950	6.2 X 10 <sup>4</sup>	95	
5190	8.7 X 10 <sup>4</sup>	100	4
Porcupine Seabight			
2650	54.5 X 10 <sup>4</sup>	1180	
4820	50.0 X 10 <sup>4</sup>	420	4
Vema Fracture Zone (5100 m)	13.0 X 10 <sup>4</sup>	200	4
Norwegian Sea (2600~3600 m)	71.0 X 10 <sup>4</sup>	740	4
Scotian Rise (4600 m)	23.5 X 10 <sup>4</sup>	2215	6
Clarion-Clipperton Fracture Zone (4600~5000 m)	1.8 X 10 <sup>3</sup> (Max)	364	this study

(1), woods & Tietjen, 1985; (2), Richardson & Young, 1987; (3), Sibuet et al., 1094;  
(4), Sibuet et al., 1989; (5), Alongi & Pichon, 1988; (6), Thistle et al., 1985

Table 3-6. Comparison of cell number of Box core sample 8 by MPN test with ZoBell medium (Marine broth, Difco).

Sample (BC8)	on board (cell/ml)	in lab (cell/ml)
0-1 cm	$> 10^9$	$10^8$
1-2 cm	$> 10^9$	$10^8$
2-5 cm	$> 10^9$	$10^8$

Table 3-7. Number of colony forming unit of Box core sample 8 by viable counts test with ZoBell medium (Marine broth, Difco).

Sample(BC8)	CFU/ml
0-1 cm	$3.1 \times 10^7$
1-2 cm	$3.0 \times 10^7$
2-5 cm	$2.8 \times 10^7$

(Table 3-7), 이는 Table 3-8에서와 같이 건조 시료량으로 환산하면 건조 시료 1 g당  $1.0 - 1.5 \times 10^8$  의 분석치로 ZoBell 배지에서 균락을 잘 형성할 수 있음을 알 수 있다.

총세균량의 분석에 있어서 ATP 정량시 시료여과 및 적정 반응농도를 위한 농축등 시간 소요가 필요하여 생체 크기에 따른 분석의 어려움이 있으므로 독일에서는 현장에서 시료를 고정하여 형광현미경으로 분석하는 방법을 채용하고 있는데 (Schriever, 1990), 이러한 방법을 현재의 ATP측정방법과 병행하여 비교함이 필요할 것으로 사료된다.

## 제 4 절 토 의

### 1. 저서동물

조사지역 전체를 두고 볼 때 저서동물의 종조성은 94년도까지의 box corer에서 채집된 저서동물 자료와 비교하면 절지동물의 갑각류, 환형동물의 다모류 순으로 우점하여 이번 조사결과와 매우 유사하다 (상공자원부, 1994). 그러나 과거에는  $500\mu\text{m}$  mesh 체를 사용하였기 때문에 Nematodes의 출현이 없었지만 본 조사의 경우  $300\mu\text{m}$  mesh 체를 사용하였기 때문에 Nematodes의 출현이 많아 우점동물군으로 나타났다. 연안역에서는 Nematoda, harpacticoid copepoda 등은 전형적인 중형저서동물로 취급되지만 심해에서는 대형저서동물의 크기가  $300\mu\text{m}$  이상인 것으로 많이 간주하기 때문에 (Hessler and Jumars, 1974; Smith, 1978; Khripounoff et al., 1980), 전형적인 중형동물군에 속하는 종들이 대형동물에 포함되었다. 일반적으로 심해 대형 저서동물의 종조성에 있어서 다모류 (Polychaetes)가 가장 우점하는 동물군으로 보고되었고 (Alongi, 1992; Thistle et al., 1985; Khripounoff et al., 1980; Parulekar et al., 1982) 중형동물의 경우에는

Table 3-8. Wet weight and dry weight of Box core samples.

Box core	sampling depth (cm)	wet weight (g/ml)	dry weight (g/ml)
BC-1	0 - 1	1.426	0.314
	1 - 2	1.271	0.308
	2 - 5	1.173	0.323
	5 -10	1.328	0.210
BC-7	0 - 1	1.291	0.358
	1 - 2	1.165	0.383
	2 - 5	1.245	0.332
	5 -10	1.270	0.384
BC-8	0 - 1	1.253	0.367
	1 - 2	1.313	0.386
	2 - 5	1.274	0.428
	5 -10	1.328	0.578
BC-9	0 - 1	1.246	0.408
	1 - 2	1.214	0.366
	2 - 5	1.183	0.536
	5 -10	1.316	0.428

Nematodes가 가장 우점하는 것으로 보고되었다 (Woods and Tietjen, 1985; Alongi and Pichon, 1988; Richard and Young, 1987).

대형 조소동물의 경우 본 조사 결과에서는 다모류의 비중이 다소 낮은 편이며, 오히려 Copepods 와 Nematodes 의 비중이 더 높았다. 그러나 중형동물과 망간단괴에 서식하는 저서동물의 경우에는 Nematoda 와 Copepoda가 우점하고 있었다.

대형저서동물의 서식밀도에 있어서는 수심이 유사한 다른 심해지역과 비교하여 비교적 유사한 수준에 있음을 보였다 (Table 3-5). 한편 1994년도 수행한 KODOS 94-1의 box corer 시료의 대형저서동물의 최대 출현개체수가 19개체 (316개체/m<sup>2</sup>)였던 것과 비교하면 매우 유사한 값이다. 이것으로 볼 때 대형저서동물의 채집에는 box corer가 대체로 효과적인 채집장비임을 시사한다. 그러나 소규모적인 수평분포양상을 조사하기 위해서는 적어도 0.25 m<sup>2</sup> 이상의 box corer 사용이 필수적이며, 채집시의 시료안정에 많은 주의가 요구됨을 알 수 있었다. 또한 저서생물시료의 양이 절대적으로 부족한 실정이므로 한번 운용에 많은 시간이 소요되는 box corer 외에도 free-fall corer나 free-fall box corer를 고안하여 한번에 많은 양의 생물시료를 얻을 수 있어야 할 것으로 생각된다. 이러한 free-fall type의 채집기들은 중량이나 크기가 작기 때문에 해황이 나쁜 경우에도 운용이 가능하고 시료의 안정도도 기존의 box corer에 비해 더 높은 것으로 생각된다.

중형저서동물의 경우에는 채집에 문제가 있어서 많은 손실이 있었던 것으로 판단되어 직접 비교할 수는 없지만 최고치가 50개체/core로서 대략 1,800개체/m<sup>2</sup>에 불과하여 다른 지역의 100분의 1에도 못 미치는 매우 낮은 값이다 (Table 3-5).

심해저의 퇴적물에 서식하는 중형저서동물의 현존량과 종조성을 정확하게 파악하기 위해서는 현재 사용하고 있는 Box corer로서는 채집상의 문제를 안고 있어서 부적합한 것으로 판단되며, 영국, 독일등의 선진국에서 최근에 사용하고 있



는 multiple corer (Barnett et al., 1984)나 독일의 Schriever와 Borowski가 개량시킨 multiple corer (Schriever, G., 1990)가 심해저 중형동물 조사에는 필수적인 장비인 것으로 생각된다.

## 2. 저서 미생물

망간단괴 주변 미생물의 분포연구에 있어서 주요한 인자들을 보면 우선 저서생물의 먹이로 사용될 수 있는 미생물의 총생체량이다. 망간단괴의 표면과 내부에 존재하는 세균들이 단괴 1 그램에서도 수만 내지 수십만 개가 존재함이 밝혀졌고 (Burnett and Nealson, 1981), 표면에는 진균류의 균사체를 비롯한 세균균체와 내부에는 내부물질에서는 간균, 구균, 점액성 세균들이 관찰되었다(Ghiorse, 1980). Greenslate (1974)는 단괴의 성장이 시작될 때 플랑크톤, 특히 다이이툼의 사체에서 망간 축적이 시작된다고 가정하였는데, benthic foraminifera 같은 생물들의 잔존체를 단괴내부에서 발견하였으며 이러한 잔존 골격이 틀이 되어 미생물의 작용과 함께 망간 단괴나 다른 형태의 단괴가 축적되었을 것이라고 추정하였다. Ferromanganese nodule에서 저서 생물인 Foraminifera와 다른 원생동물이 성장하는 것이 발견되었다는 사실은 단괴의 성장에 망간세균의 역할이 아주 중요하다는 것을 시사한다. 왜냐하면 위의 동물들은 미생물을 먹이로 단괴에서 성장을 할 수 있었음을 시사하기 때문이다. 망간단괴주위 미생물들은 망간이 단괴에 흡착하는데 관여할 뿐만 아니라 식균작용을 하는 원생동물의 먹이로 제공되기도 한다. 따라서 망간단괴 주위에 서식하는 미생물의 총량은 이를 포식하는 저서동물을 위한 1차 생산량의 지표로 그 의미가 크다.

여러 종류의 미생물들이 망간 단괴가 존재하는 저질층에 서식할 수 있다고 추정되는데 우선 심해저의 망간단괴에서 발견된 망간 산화세균, 망간환원세균을 들 수 있다. 망간의 생물학적 순환과정은 용해성의 망간이 불용해성의 상태로

침전되어지는 과정과 (immobilization) 불용해성의 망간이 용해성의 형태로 전환되는 과정으로 나눌 수 있는데, 두 과정 모두 망간이 산화되거나 환원되는 반응으로 볼 수 있다. 망간은 망간 산화효소(일종의 oxidase)에 의해서나 단백질, glyocalyxes, 세포구성물질 등의 망간 결합물들에 의해 직접적으로 산화된다. 간접적으로 미생물에 의해 망간이 산화되는 경우는 자유 라디칼이나 oxidant 생성에 의한 경우와 이산화탄소, 유기산의 소모, 암모니아의 배출등에 의한 산도증가 및 산소발생 등에 따른 주위환경의 전위의 변화, Mn(II) chelator의 형성에 기인한다. 대부분의 망간산화미생물은 mixotroph나 heterptroph로 mixotroph의 경우는 망간을 이용하여 에너지를 얻고 탄소원으로는 유기물을 사용하며 heterotroph의 경우는 망간산화에서 에너지를 얻지 않고 타가영양을 한다. Mn(IV) 환원세균은 실험실에서 조사한 결과 전자공여체로 유기물인 포도당, 젖산, 초산, 호박산 등을 이용하는 종속영양체들이다. 대부분 해양에서 분리되어 연구가 된 세균들은 호기성으로 망간을 호기적으로 또는 혐기적으로 환원시킬 수 있다. Mn(IV) oxide는 Cu, Co, Ni등의 금속이온과 잘 결합되어 있는데 실험실에서 조사한 결과 세균에 의해 망간산화물이 환원될 경우 이러한 금속이 용해(mobilization)되는 현상이 발견되었다. 이러한 현상은 미생물에 의한 망간의 환원이 해양생태계에 있어서 영양물의 순환에 중요함을 시사한다. 종속영양 망간산화, 환원세균이 증식하기 위해서는 유기물의 존재가 요구되는데 이러한 유기물은 자가영양 또는 빈영양 미생물에 의해 생산되거나 미생물과 저서생물 등의 사체가 그 제공자가 되는데 이러한 먹이순환에 의한 저질층의 생물량의 변화를 분석하기 위해서는 앞서 기술한 미생물 총생산량외에 망간 산화, 환원 세균, 종속영양 일반세균, 자가영양세균, 빈영양세균 등의 분포 및 그 기능에 대한 기초자료가 필요하다. 이러한 연구를 통하여 망간단괴에서의 망간 침전 예상 및 촉진에 대한 자료가 축적이 되고, 망간 단괴 시추 시 생태계의 변화를 특히 미생물들의 분포 변화에 따른 변이를 모델링 할 수 있는 능력이 축적될 것이다.

## 참 고 문 헌

- 상공자원부, 1994. '94 심해저 광물자원조사 보고서. I. 광구탐사. pp. 609-708.
- Richardson, M.D. and D.K. Young, 1987. Abyssal benthos of the Venezuela Basin, Caribbean Sea: standing stock associations. *Deep-Sea Res.*, 24:145-164.
- Sibuet, M., C. Mpnniot, D. Desbruyers, A. Dinet, A. Khripounoff, G. Rowe, and M. Segonzac, 1984. Peuplement benthique et caracteristiques trophiques du milieu dans la plaine abyssale de Demerara dans l'océan Atlantique. *Oceanologica Acta*, 7:345-358.
- Sibuet, M., C.E. Lambert, R. Chesselet, L. Laubfer, 1989. Density of the major size groups of benthic fauna and trophic input in deep basins of the Atlantic Ocean. *J. Mar. Res.*, 47:851-867.
- Alongi, D.M. and M. Pichon, 1988. Bathyal meiobenthos of the western Coral Sea: distribution and abundance in relation to microbial standing stocks and environmental factors. *Deep-Sea Res.*, 35:491-503.
- Thistle, D., J.Y. Yingst, and K. Fauchald, 1985. A deep-sea benthic community exposed to strong near-bottom currents on the Scotian Rise (Western Atlantic). *Mar. Geol.*, 66:91-112.
- Woods, D.R. and J.H. Tietjen, 1985. Horizontal and vertical distribution of meiofauna in the Venezuela Basin. *Mar. Geol.*, 68:233-241.
- Thiel, H., G. Schriever, C. Bussau, and C. Borowski, 1993. Manganese nodule crevice fauna. *Deep-Sea Res.*, 40(2):419-423.
- Hessler, R.R. and P.A. Jumars, 1974. Abyssal community analyses from replicate box cores in the central North Pacific. *Deep-Sea Res.*, 21:185-209.

- Smith, K.L., Jr., 1978. benthic community respiration in the N.W. Atlantic Ocean: in situ measurements from 40 to 5200 m. *Mar. Biol.*, 47:337-347.
- Khripounoff, A., D. Desbruyeres, and P. Chardy, 1980. Les peuplements benthiques de la faille VEMA: donnees quantitatives et bilan d'energie en milieu abyssal. *Oceanologica Acta*, 3:187-198.
- Parulekar, A.H., S.N. Harkantra, Z.A. Ansari, and S.G.P. Matondkar, 1982. Abyssal benthos of the Central Indian Ocean. *Deep-Sea Res.*, 29:1531-1537.
- Barnett, P.R.O., J. Watson, D. Connelly, 1984. A multiple corer for taking virtually undisturbed samples from shelf bathyal and abyssal sediments. *Oceanologica Acta*, 7:399-408.
- Schriever, G., 1990. Cruise report DISCOL 2, Sonne cruise 64, Callo/Peru-Valparaiso/Chile, Sept. 2 - Oct. 2, 1989, Berichte aus dem Zentrum fur Meeres-und Klimaforschung der Universitat Hamburg, Nr. 6, 59 pp.
- Burnett, B.R. and K.H. Nealson, 1981. Organic films and microorganisms associated with manganese nodules. *Deep-Sea Res.*, 28:637-645.
- Ghiorse, W.C., 1980. Electron microscopic analysis of metal depositing microorganisms in surface layer of Baltic Sea ferromanganese concretions. In: P.A. Turdinger et al. (eds.), *Biogeochemistry of ancient and modern Environments*. Springer-Verlag, Berlin, p.345-354.
- Greenslate, J., 1974. Microorganisms participate in the construction of manganese nodule. *Nature*, 349:181-183.
- Thiel, H., 1992. From Meseda to DISCOL : a new approach to deep-sea mining risk assessment. *Mar. Mining*. 10:369-386.

Tietjen, J. H., 1992. Abundance and biomass of metazoan meiobenthos in the deep sea. In: Deep-sea Food chains and the Global Carbon cycle, Rowe, G. T. and V. Pariente (eds.), Kluwer Academic Publishers, pp. 45-62.



## 제 4 장

### 수괴의 화학적 환경 특성

연구 책임자 : 박 용 철(인하대학교)

연구 원 : 손 승 규(인하대학교)





## 제 1 절 서 론

KODOS94 연구해역은 태평양중심 해역의 대표적인 해양화학적 환경으로서 수온약층 상부의 표층혼합층은 빈영양의 낮은 기초생산력과 외부로부터의 환경변화의 요인이 거의 없는 해양환경을 유지하고 있다. 최근 심해저 망간채취를 위한 탐사 및 개발의 단계에서 장래 본격적인 상업적 광업 활동시에 일어날 수 있는 환경교란 및 이에 따른 해양생태계의 변화를 예측하고 이를 최소화하기 위하여 환경변화에 대비한 환경보존을 위한 기초연구가 반드시 필요하며 이는 이미 UN해양법협약 제12장에 규정되어 있는 바와 같다. 망간채취광업 활동시 해양환경에 일어날 수 있는 가장 중요한 현상으로는 채취 후 발생하는 부유물질과 심해저 퇴적물 간극수내에 고농도로 축적되어 있는 영양염류와 유기물질 그리고 중금속 등의 재방출에 따른 표층 생태계의 교란 등을 들 수 있다. 기실 현재 대양의 수직적인 원소분포는 오랜 지질화적인 기간동안 생물권(biosphere)과 수권(hydrosphere) 그리고 암석권(lithosphere) 사이의 생성 및 제거작용의 균형을 통하여 일정상태에 놓여 있다. 이중 우리가 KODOS94 해역에서 중점적으로 감시하고 연구개발 해야할 제1차적인 화학종은 플랑크톤 및 해양미생물에 영향을 주거나 영향을 받는 생물친화성분인 영양염류들과 유기물들이다. 이러한 성분은 Broecker (1974)에 의해 생물제한원소(biolimited elements)로 규정되어 있는데, 대부분 표층혼합층에 고갈되어 있고 저층해수에서 입자유기 성분의 분해에 따른 재생산에 의해 축적되어 높게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 광업활동에 따른 환경변화요인을 파악하고 환경보존연구에 기초자료를 제공하기 위하여 심해저 및 퇴적물 간극수 그리고 표층에 존재하는 화학종 간의 농도차가 크게 나타나는 성분을 위주로 수괴특성을 파악하였다. 이러한 노력은 우리나라도 외국의 경우 1970년대부터 수행되어온 미국, 서독, 일본, 프랑스 그리고 중국등 여러 관련 국가들과 대등한 국제적인 기초연구결과를 기여할 수 있고 KODOS94해역의 오염방지에 대한 대비책과 지속가능한 환경보존을 유지하는데 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 제 2 절 재 료 및 방 법

분석에 필요한 시료는 Rosette에 Niskin sampler를 이용하여 채수 하였으며, 채취된 해수중 영양염류 분석을 위한 시료는 염산(10% HCl) 처리된 plastic vials에 보관하였다. 용존 유기물과 관련된 시료는 질산(10% HNO<sub>3</sub>) 처리된 20 ml glass vials(teflon liner bottles)에 보관하였다. 각각의 시료는 -20 °C 이하에서 보관되어 실험실로 옮겨져 분석하였다.

1) 수온 및 염분 : CTD meter를 이용하여 측정하였다.

2) 무기영양염류분석 : 냉동보관된 시료는 실험실로 옮겨진 후 영양염 자동분석기(SKALAR)를 이용 분석하였으며 분석 결과는 A/D converter를 통하여 IBM XT/AT로 전송된 후 AutoStar 프로그램에 의해 처리되었다.

3) 유기물 추출 및 3차원 형광분석 : 해수 11를 C-18 Sep-Pak cartridge로 추출하였으며 추출된 유기물의 고유 형광측정은 spectrofluorophotometer(Shimadzu, M/D:RF-540)로 실시하였다. Mopper and Park(1993)에 의하여 구분된 생거대 물질과 지구거대 물질을 각각의 파장 Ex280/Em330, Ex330/Em430(band width: 5 nm)에서 측정하였다. 표준형광의 계산은 생거대 물질의 경우 Ex280/Em330에서 tryptophan(Sigma, T-0254) 1 ppb 형광을 1 TU로 계산하였으며, 지구거대물질은 Ex330/Em430에서 0.01N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, quinine sulfate(Fluka, 22640) 1ppb 형광을 1 QSU로 하였다. 용존 유기물의 3차원 형광분석은 동일한 기기(M/D:RF-540)를 이용하여 excitation파장 범위 220 에서 520 nm, 그리고 emission 파장 범위 260 에서 560 nm 까지, excitation 20 nm 간격으로 반복 scan 하였다. 반복된 scan자료는 A/D converter를 통하여 IBM XT/AT로 전달된 후 ScanStar 프로그램에 의해 자료처리 되었다.

4) 용존 자유 및 복합 아미노산의 HPLC 분석 : 해수의 용존 자유 아미노산 (DFAA)중 primary amine과 amino sugar 분석은 pH 9.5로 조절된 boric

acid(Sigma, B-0252)에 o-phth-aldehyde(Sigma, P-1378)와 N-acetyl-L-cysteine (Sigma, A-7250)를 용해시켜 precolumn fluorescence derivatization을 형성한 후 binary gradient ChromaStar HPLC system(OROM, Vintage 2000)을 이용하여 분리 분석하였다. 이 때 사용된 column은 reversed phased ODS HPLC column(Rexchrom 250 X 4.6 mm, 10 m)을 사용하였다. 용존 복합아미노산의 분석은 추출된 시료의 일정량을 취하여 freezer dryer로 건조시킨 후 vapor-phase hydrolysis방법을 이용 가수분해시킨다. 가수분해된 시료는 자유아미노산의 분석과 동일한 방법으로 분석되었다.

### 제 3 절 결과 및 토의

본 연구는 해수중의 영양염류 및 용존 아미노산 등의 분석자료를 통하여 조사해역의 화학적 환경특성을 파악하고, 각 수층에 존재하는 유기물을 추출 그 형광특성에 따른 수직분포 및 세부 유기물의 조성을 HPLC를 이용하여 분리 분석하였다. 한편 본 연구에서 중점적으로 진행된 유기 화합물 자료는 해양의 유기 탄소 생산 및 이용에 따른 에너지 흐름, 미량 금속 원소의 화학적 종분화, 해수중의 탄소 순환, 광화학적 변환, 그리고 수괴 파악을 위한 지화학적 추적자로서의 응용 등과 관련하여 다양한 연구 분야에서 주된 관심의 대상이 되어 오고 있다. 해수중의 유기물 농도는 매우 가변적이며 특히 식물성플랑크톤 성장 및 수괴의 수리적 환경 등에 의존하고 지역 및 계절에 따른 시.공간적 변화를 보이므로 많은 연구에도 불구하고 자료 비교가 쉽지 않은 편이다(Rashid, 1985). 실제 최근까지의 발표된 자료들에 의하면 해양의 전체 유기물 중 약 30% 정도만이 분리되었으며 상당부분이 아직 밝혀지지 않았다(Williams and Druffel, 1987; Hayase and Shinozuka, 1995). 한편 생물 사체(dead organisms)의 분해에 기인한 유기물들은 화학적으로 불활성하며 비활동적인 것으로 알려져 있고 거의 모든 유기화합물의 환경에 화학

적 지화학적 영향을 주며, 특히 금속의 킬레이트화 용해도, 침전, 이동, 재순환 및 축적에 관여한다. 이러한 humic substance는 고유 형광특성을 이용하여 측정되며, 본 연구에서는 형광특성에 따라 생거대 물질과 지구거대 물질로 구분하여 측정되었다(Park et al., 1994). 질소계 유기물인 아미노산은 전체 용존유기물 중 낮은 농도(<0.5%)로 해수중에 존재하지만 식물성 플랑크톤의 질소 공급원 및 해양미생물의 에너지 공급원으로 중요하다(Fuhrman and Ferguson, 1986; Fuhrman, 1990; Suttle et al., 1991). 한편 아미노산은 생물적 활성도가 높고 해수중에서 생화학적으로 불안정하여 분리 분석에는 고도의 측정기술을 필요로 한다.

조사해역에서의 수온 및 염분도의 수직분포를 Fig. 4-1에 나타내었다. 측정결과 수심 50-150m 사이에 뚜렷한 수온약층이 존재하며 고온저염의 상층 혼합수괴와 저온고염의 심층수괴로 분리되는 대양의 대표적인 수괴특성을 보이고 있다. 각 정점에서 측정된 수층별 영양염의 농도는 Table 4-1과 같이 조사되었다. 질소계 영양염인 nitrate + nitrite은 53.53 - 0.11  $\mu\text{M}$ 의 범위로 측정되었다. 농도의 수직분포는 수심 50 - 100m에서 뚜렷한 nutricline이 형성되어 있으며 수온약층 상층수는 낮은 농도 값(<1.5 $\mu\text{M}$ )을 보이는 반면 저층수는 높은 값을 보이는 데 이는 상층수에서 생물적 이용에 의해 고갈된 것으로 판단된다. 한편 수심 1000m 부근에서 nitrate농도의 최대치를 보이고, 저층까지 다소 감소하는 것으로 나타나는데 이는 부분적으로 일부의 nitrate농도가 환원되어 감소하는 것으로 사료된다. Phosphate 및 silicate의 농도는 각각 0.05 - 2.60  $\mu\text{M}$ , 3.11 - 175.37  $\mu\text{M}$ 의 농도 범위로 측정되었다. 농도의 수직분포특성은 nitrate의 분포경향과 유사한 분포로 조사되었으며 silicate의 경우 nitrate나 phosphate 보다 nutricline이 완만하게 형성되는 데 이는 규산염(silicic acid)의 용해에 의한 재생산 속도가 N과 P의 경우에서처럼 생화학적 재생산속도보다 빠르지 못하고 완만하기 때문인 것으로 사료된다(Fig. 4-2). 조사해역의 N/P비는 Fig. 4-3에 나타난 바와 같이 표층은 다소 산만하게 나타났으나 심층에서는 약 16으로 안정된 값을 보이고 있다.

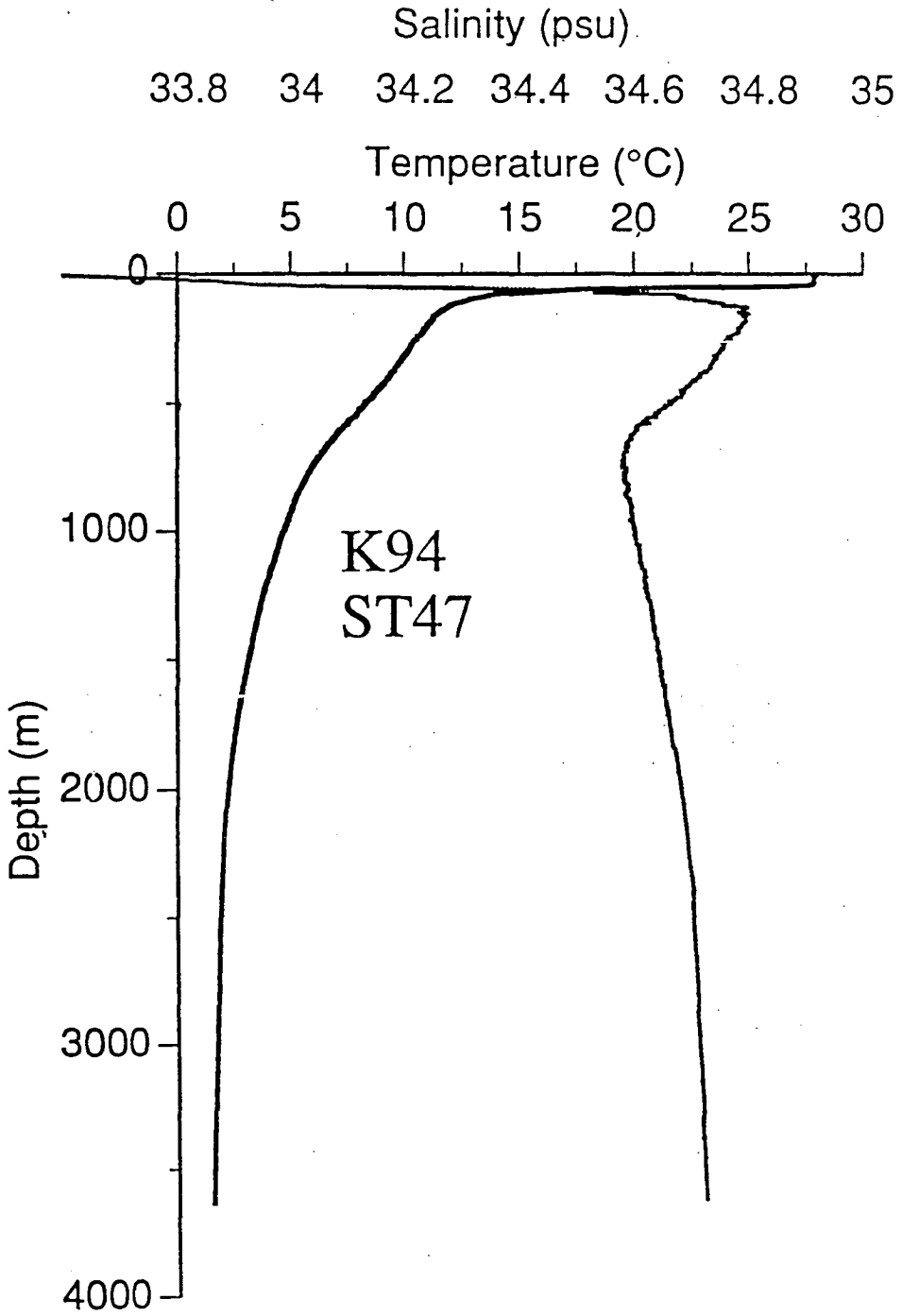


Fig. 4-1. Vertical profile of temperature and salinity in the study area.

Table 4-1. Concentration of nutrients in the study area.

St.	Depth (m)	NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub>	Phosphate	Silicate
		(uM)		
6	50	37.02	1.46	24.40
	75	29.82	0.99	19.25
	100	40.71	1.91	29.55
	200	32.03	1.38	39.98
	300	44.43	2.15	50.47
	500	53.51	2.60	83.36
	750	45.54	2.22	103.69
	1000	49.09	2.39	173.38
	2000	46.78	2.25	174.27
3000	42.27	2.12	173.86	
13	0	1.18	0.16	3.46
	10	0.96	0.17	3.57
	30	1.21	0.16	3.49
	50	11.34	0.89	9.74
	75	28.53	1.38	19.38
	100	37.37	1.74	23.88
	150	38.88	1.69	23.91
	200	34.10	1.43	22.81
	300	41.62	1.68	28.20
30	10	1.50	0.21	4.57
	20	1.30	0.21	4.53
	30	1.43	0.21	4.67
	50	1.98	0.79	7.13
	75	28.10	1.66	18.64
	100	37.64	1.46	21.63
	150	35.27	1.72	25.94
	200	35.72	1.77	31.07
32	10	1.27	0.21	3.30
	20	1.43	0.11	3.11
	30	1.21	0.05	3.26
	75	23.42	1.05	13.66
	100	35.38	1.56	22.01
	200	39.28	1.68	26.09
	300	40.92	1.77	30.22
	500	42.73	2.44	47.47
	750	51.21	2.27	83.19
	1000	53.53	2.29	99.90
2000	52.13	2.19	107.74	

Table 4-1. Continued.

St.	Depth (m)	NO2+NO3	Phosphate	Silicate
			(uM)	
41	10	0.78	0.22	4.33
	20	0.74	0.22	4.29
	30	0.79	0.22	4.12
	50	0.75	0.76	6.83
	75	24.20	1.22	17.59
	100	36.13	1.80	25.02
	150	38.22	1.77	28.45
	200	35.20	1.77	28.00
	300	37.32	1.79	31.95
47	50	9.04	0.86	9.80
	100	36.89	1.76	24.66
	125	36.24	1.70	25.85
	150	37.24	1.71	26.57
	200	39.03	1.92	27.16
	300	40.45	1.85	31.67
	500	43.91	2.27	48.51
	750	51.87	2.48	76.79
	2000	47.15	2.27	170.97
	3000	45.71	2.31	172.51
	3642	44.64	2.15	172.32
52	10	1.50	0.23	5.09
	20	1.13	0.21	4.95
	50	4.70	0.88	8.79
	75	18.85	0.41	11.52
	100	31.37	1.27	21.56
	125	33.01	1.45	23.07
	150	38.82	1.95	27.66
	200	37.91	1.84	29.64
	300	31.89	1.55	30.26
	500	41.92	2.21	47.49
	750	43.37	2.06	74.87
	1000	51.72	2.51	103.36
	1500	48.94	2.56	167.06
	2000	48.04	2.44	174.12
	2400	45.77	2.37	175.37
86	0	0.81	0.25	5.43
84	5	0.65	0.23	4.96
77	0	0.55	0.23	4.67
74	0	0.11	0.17	3.50
	Max.	53.53	2.60	175.37
	Min	0.11	0.05	3.11
	Avg.	28.32	1.41	44.12

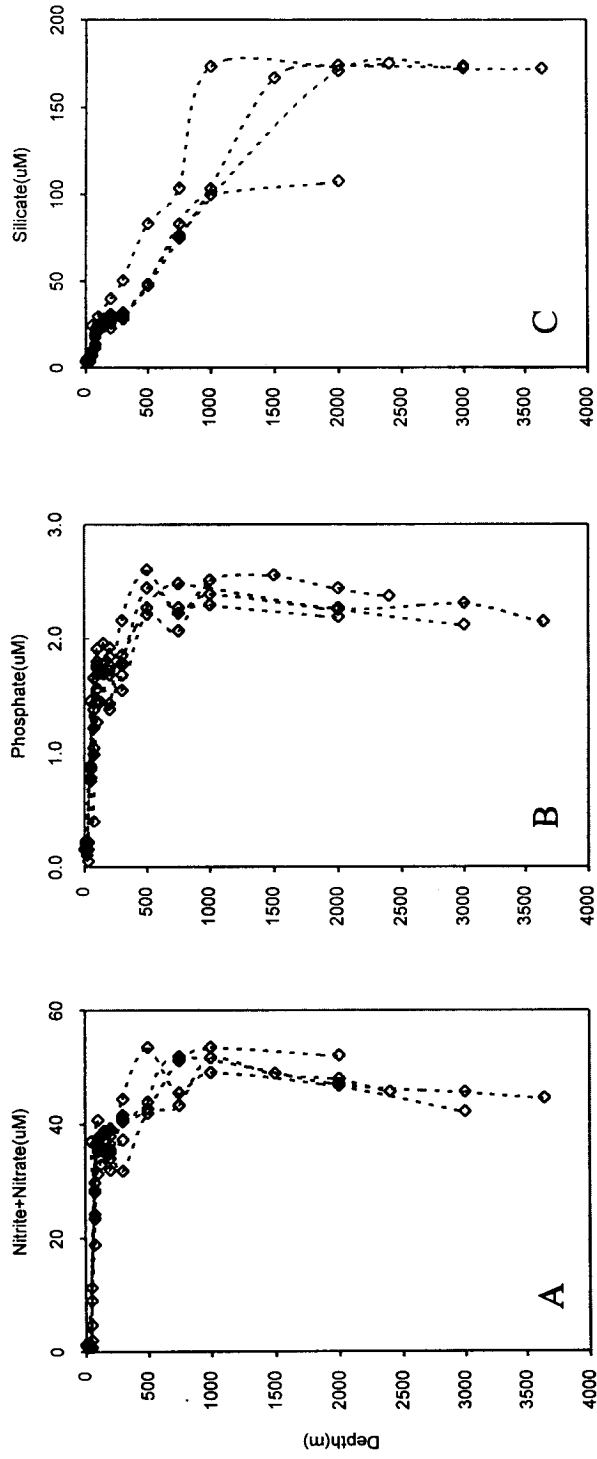


Fig. 4-2. Vertical profiles of nutrients in the study area. (A: Nitrite+Nitrate, B: Phosphate, C: Silicate).



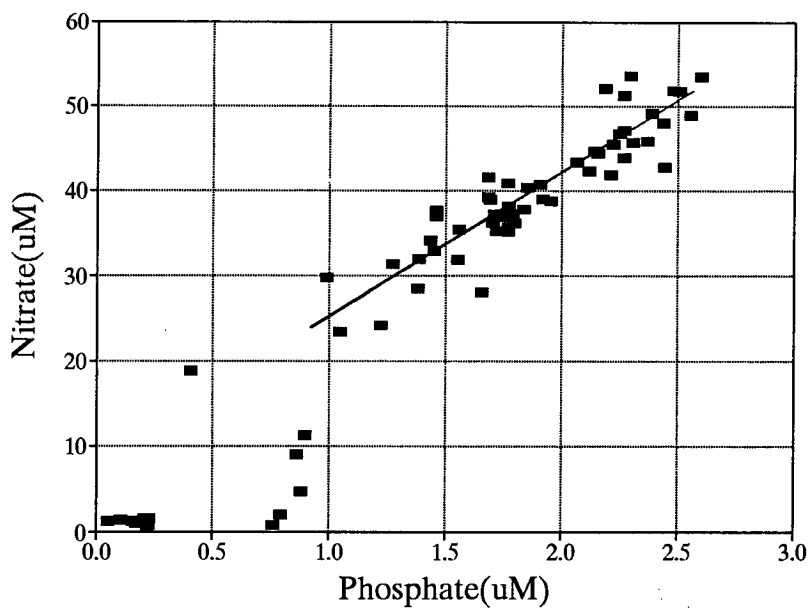


Fig. 4-3. Nitrate versus Phosphate concentrations in the study area.

해수중 용존유기물은 특정한 파장에서 고유의 형광소를 지니고 있으며 이러한 광물리적 특성을 이용하여 물질에 대한 여러가지 정보를 제공받을 수 있다 (Lanne, 1982; Sierra et al., 1994). 본 연구에서 실시된 유기물추출에 의한 3차원 형광측정 결과 Fig. 4-4와 같이 Ex280 nm/Em330 nm에서 최대 형광세기를 나타내는 생거대유기물질(biomacromolecule)과 Ex330 nm/Em430 nm에서 최대 형광세기를 나타내는 지구거대유기물질(geomacromolecule)로 구분되었다(Park et al, 1994). 표층에서의 식물성플랑크톤에 의한 광합성 및 생물대사물질이 주공급원으로 생각되는 생거대물질은 표층이 높고 수심의 증가에 따라 미생물분해 및 광분해에 의해 점차 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 4-5). 그러나 지구거대물질은 상반된 수직분포를 보이며 표층이 낮고 수심의 증가에 따라 점차 증가하여 일정한 값을 나타내는 데 이는 생화학적으로 분해가능한 성분이 제거된 후 난분해성으로 존재하게 되어 해수 중 체류시간이 매우 길어지기 때문이다(Chen and Bada, 1992; Park et al., 1994). 이러한 지구거대물질 수직분포는 Fig. 4-6에서와 같이 영양염류(특히 nitrate, phosphate)의 수직분포와 상호관계를 갖고 있으며(Hayase et al., 1988; Chen and Bada, 1992; Park et al., 1995), Fig. 4-6, 4-7과 같이 표층에 최대치를 보이는 생거대물질은 유광층내에서 미생물분해과정을 통하여 이용된 후 대부분 무광층 상부인 수온약층 이심부근에서 대부분 불활성 유기물인 지구거대물질로 바뀌어 심해저에서 높은 농도로 존재하게 되는 것으로 사료된다 (Hayase, 1988, Park et al., 1995).

본 연구에서 수행된 용존 자유 아미노산은 Fig. 4-8에 나타내었다. 각 기단의 특성에 따라 acidic group(Asp, Glu), amidic group(Asn, Gln), aliphatic hydroxy group(Ser, Thr), aliphatic neutral group(Gly, Ala, Val, Ile, Leu, a-Aba), aromatic group(Tyr, Trp, Phe), basic group(His, Arg, Orn, Lys) sulfur group(Met) 등으로 구분되어지며 분석 결과는 Table 4-2에 나타내었다. 전 조사 정점의 농도는 0.17 - 1.71  $\mu$ M의 범위를 보였으며 각 기단별 아미노산의 상대적

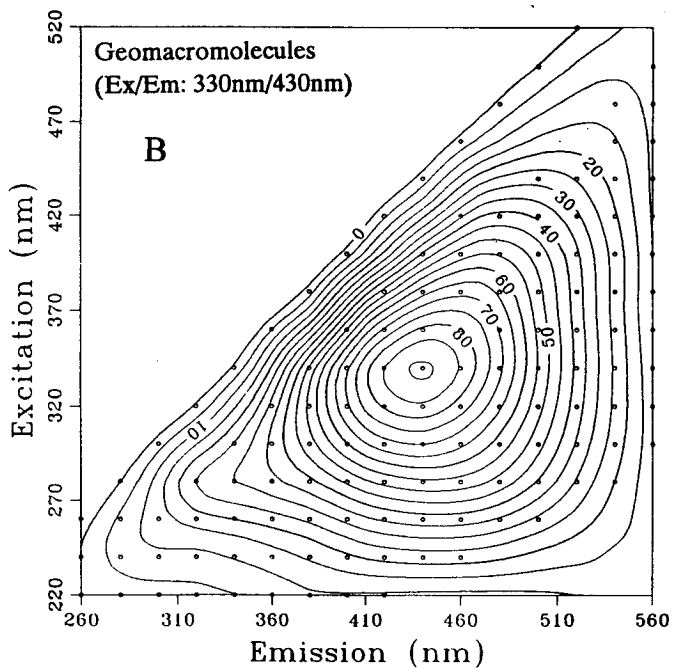
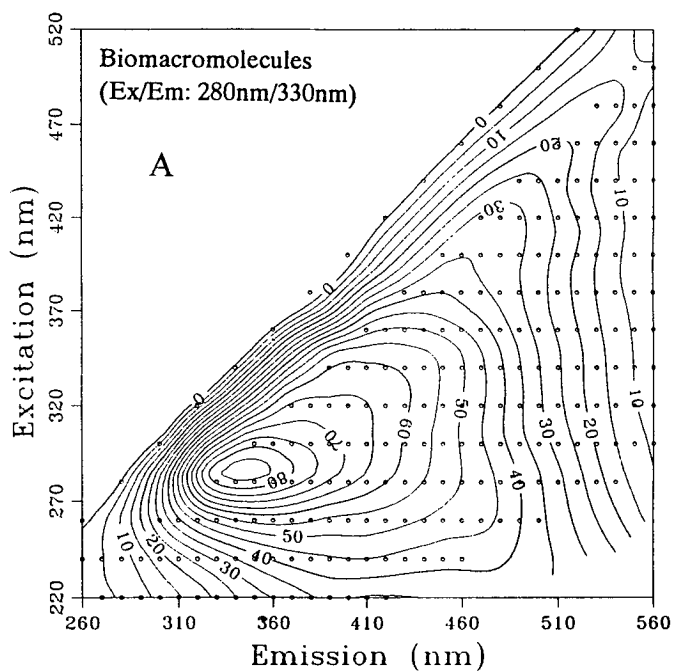


Fig. 4-4. Typical characteristics of fluorescence of biomacromolecules (A) and geomacromolecules (B) in the study area.

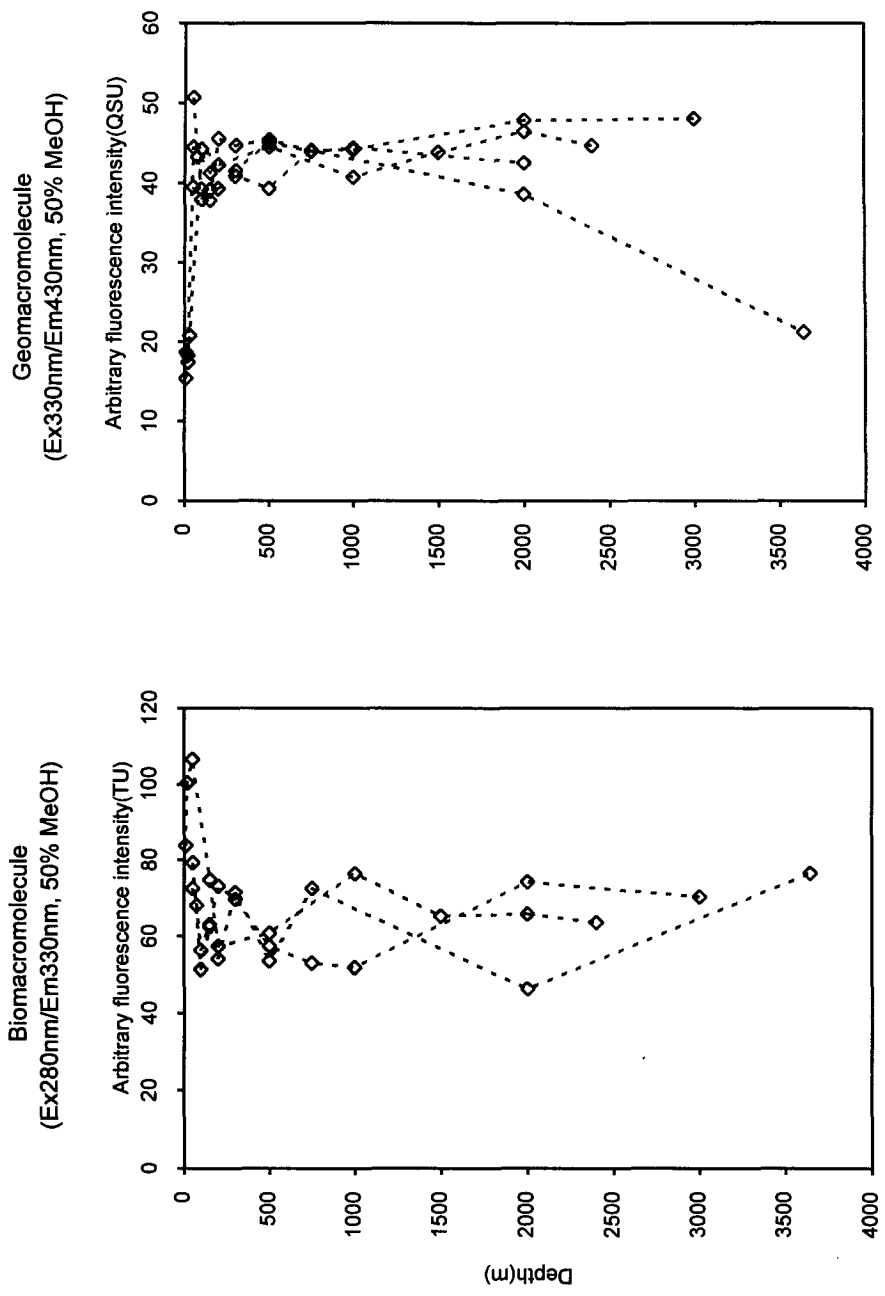


Fig. 4-5. Vertical profiles of fluorescence intensity in the study area.

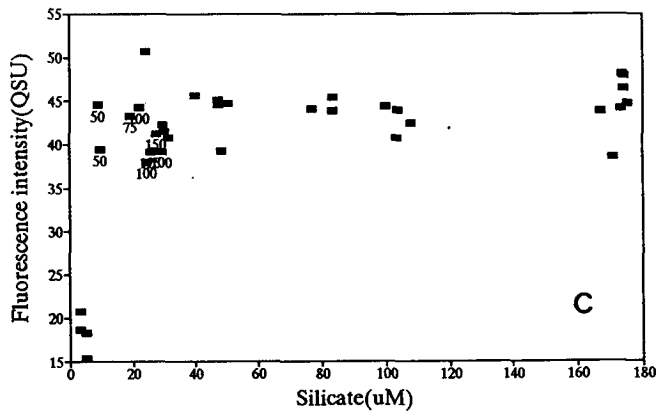
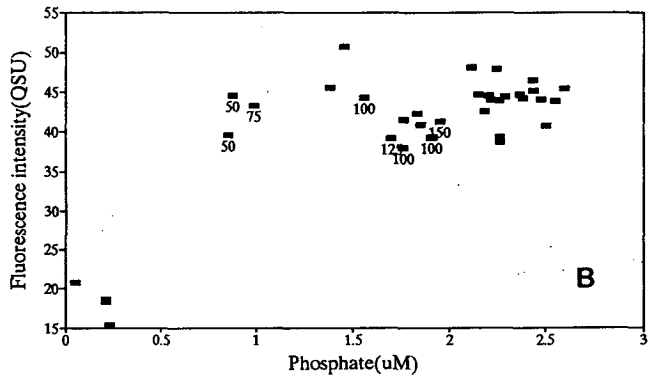
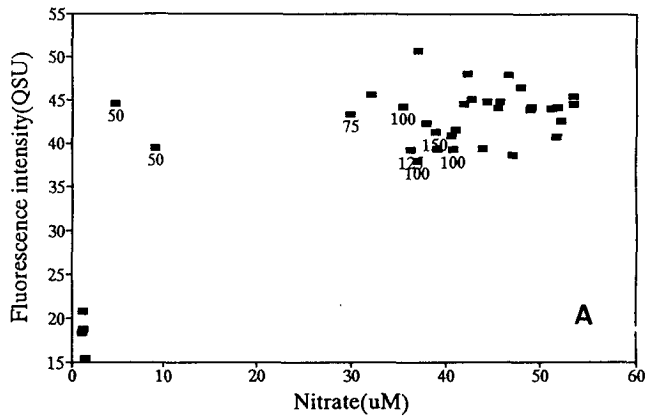


Fig. 4-6. Plots of fluorescence intensity (Geomacromolecule:Ex330/Em430) vs. nitrate (A), phosphate (B) and silicate (C) in the study area.

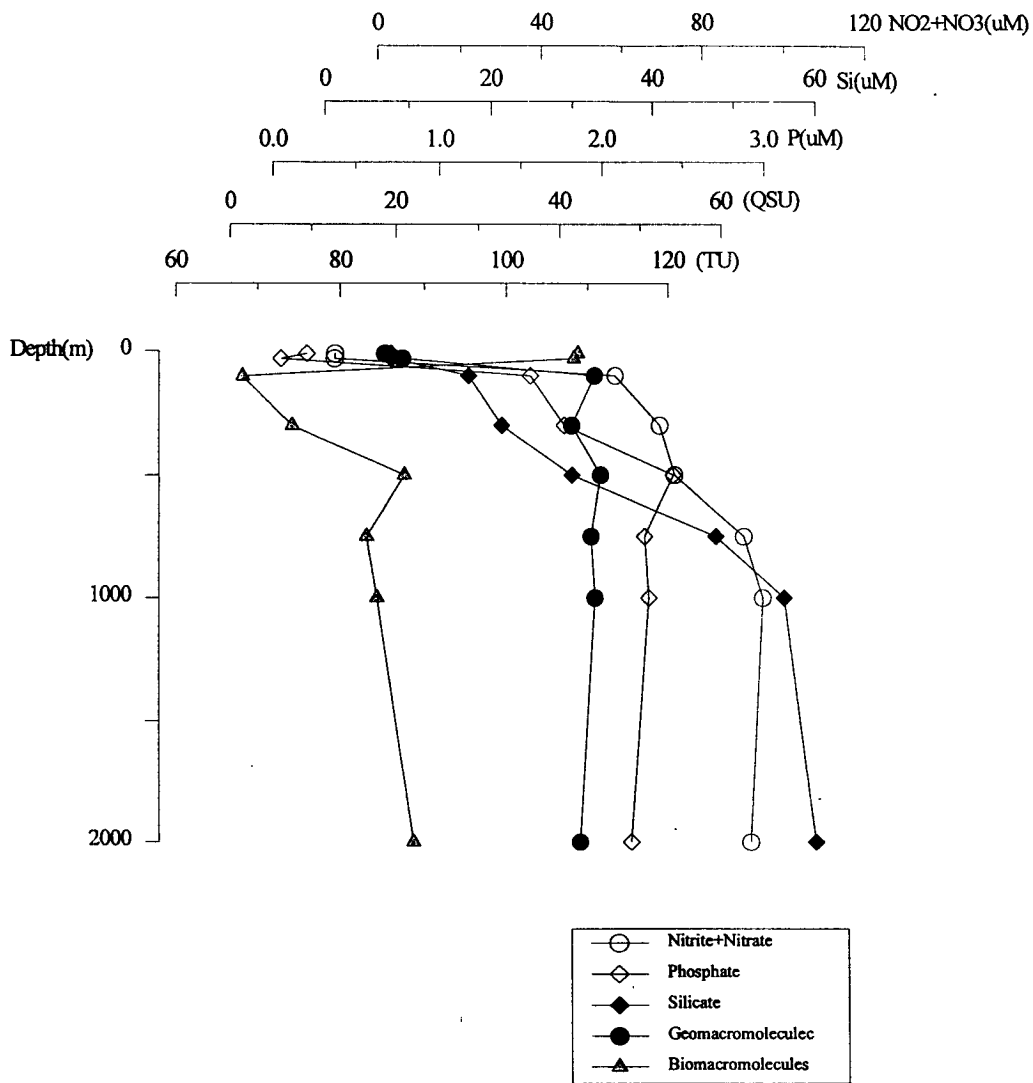


Fig. 4-7. Vertical profiles of nutrients and fluorescence intensity in the study area

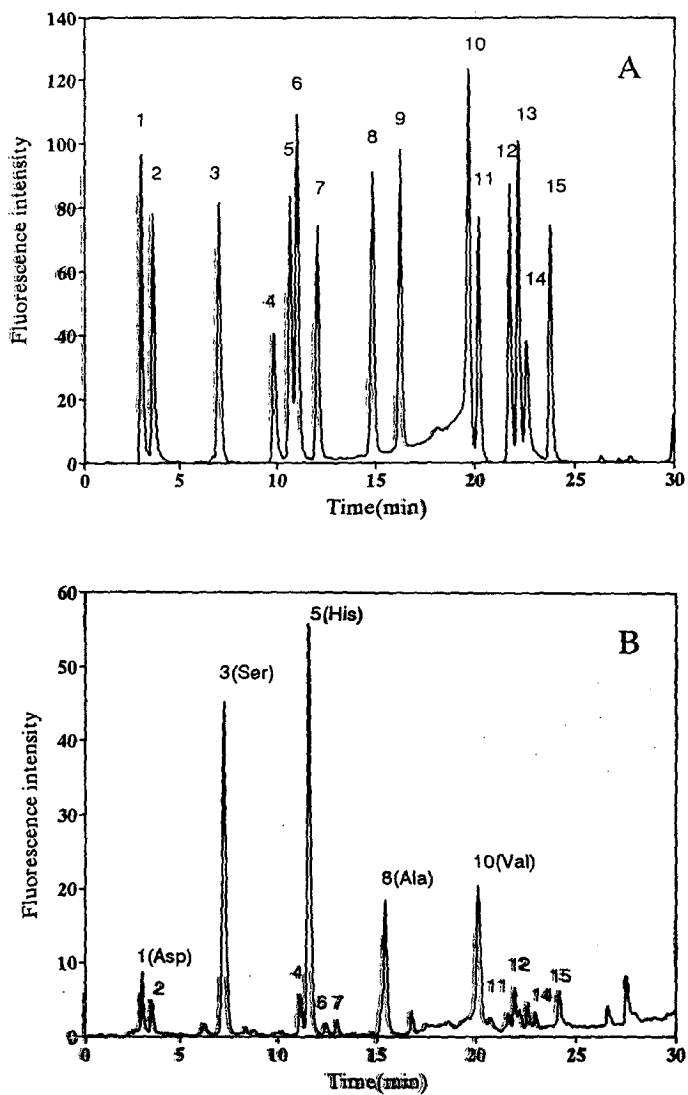


Fig. 4-8. Typical HPLC chromatograms of amino acid standard (A) and representative sample (B) of DFAA in the study area (1:aspartic acid, 2:glutamic acid, 3:serine, 4:threonine, 5:histidine, 6:glycine, 7:arginine, 8:alanine, 9:tyrosine, 10:valine, 11:methionine, 12:phenylalanine, 13:isoleucine, 14:leucine, 15:lysine)

Table 4-2. Concentration of dissolved free amino acids in the study area.

		6										32				
		100m	150m	500m	1000m	10m	75m	300m	500m	750m						
Acidic	Asp	11.6	14.7	13.4	22.7	110.5	8.1	5.5	20.4	5.2						
	Glu	63.7	20.3	39.1	34.3	39.0	35.9	19.2	13.0	10.0						
Aliphatic hydroxy	Ser	-	42.5	-	127.5	422.5	64.0	313.6	37.7	41.9						
	Thr	113.3	83.2	-	-	40.5	-	224.7	252.0	-						
Aliphatic neutral	Val	705.8	78.4	38.2	840.9	111.3	47.6	349.5	17.7	13.2						
	Gly	-	49.7	16.0	118.3	207.9	42.6	303.4	31.6	47.7						
	Ala	24.8	76.7	-	55.6	123.5	28.7	115.5	209.1	-						
	Ile	-	103.5	-	-	31.2	7.0	50.7	16.9	3.5						
	Leu	41.9	175.8	20.8	-	43.2	8.4	-	-	7.4						
	Tyr	-	78.5	-	-	28.8	-	33.2	-	-						
Aromatic +Sulfur	Met	-	127.1	-	-	15.5	-	-	-	-						
	Phe	-	114.6	-	-	-	-	-	-	-						
	Lys	-	164.2	34.2	25.2	38.8	12.0	11.6	-	8.3						
Basic	His	245.9	48.9	-	-	77.7	10.2	166.2	246.3	3.4						
	Arg	66.0	90.3	-	36.8	30.2	-	119.1	42.4	29.5						
	Total(nM)	1272.9	1268.6	161.8	1261.3	1320.6	264.4	1712.2	887.2	170.1						



Table 4-2. Continued.

		47							
		50m	100m	150m	200m	500m	2000m	3642m	
Acidic	Asp	-	43.3	33.6	10.4	18.5	17.5	23.6	
	Glu	22.1	551.2	240.2	133.7	293.2	740.9	292.6	
Aliphatic hydroxy	Ser	15.6	35.1	64.9	333.2	390.7	-	24.7	
	Thr	-	72.5	-	125.9	60.6	-	-	
Aliphatic neutral	Val	210.9	42.3	543.5	61.9	53.0	47.0	36.1	
	Gly	-	34.9	-	186.3	171.8	22.0	37.9	
	Ala	17.3	30.2	34.7	77.2	113.0	19.7	37.4	
	Ile	-	-	20.8	50.2	47.9	-	69.8	
	Leu	-	-	36.9	117.2	41.6	-	-	
Aromatic + Sulfur	Tyr	-	19.1	-	53.9	31.3	-	-	
	Met	-	118.6	-	30.2	17.7	-	42.0	
	Phe	-	44.6	-	89.8	39.3	-	64.0	
Basic	Lys	-	-	57.8	109.3	91.9	-	96.0	
	His	23.0	108.9	19.4	122.3	82.1	-	83.3	
	Arg	51.9	-	-	14.0	9.6	27.4	24.8	
Total(nM)		341.0	1100.8	1051.9	1515.6	1462.1	874.5	832.3	

인 평균 mole 점유율(%)은 aliphatic neutral(38 %), acidic(27 %), aliphatic hydroxy(22 %) 그리고 basic(13 %)의 순으로 분리 분석되었다. 각 조사정점에서의 최대농도는 수심 100 - 1000 m사이에 존재하였으며 이는 수온약층 상부 혼합 수괴에서의 활발한 생물대사 활동에 기인한 것으로 추정된다. 용존 자유 아미노산은 해양에서 해양미생물의 분포와 상호 관련되어 미생물대사와 성장에 필요한 탄소와 질소의 20% 이상을 차지하는 것으로 알려져 있다(Fuhrman and Ferguson, 1986; Fuhrman, 1990; Suttle et al., 1991).

흥미로운 것은 용존 자유 아미노산의 총농도는 표층에서 활발한 미생물 흡수에 의해 낮게 나타나고 약 200 - 500m의 제2차 수온약층 부근에서 최대로 나타났다가 다시 심해저에서는 감소되어 나타났다는 점이다(Table 4-2). 용존 자유 아미노산이 가장 높게 나타난 200 - 500m 수심에서는 질산염 또한 최대로 높게 증가되는 점을 고려해 볼 때 이 부근에서 해양미생물에 의한 가장 활발한 질산화 과정과 유기물분해 그리고 이와 관련된 용존 자유 아미노산의 입자유기물로부터의 재생산이 매우 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다.

추출된 유기물의 가수분해에 의하여 분리 분석되는 용존 가수분해 아미노산은 자유 아미노산보다 평균 10배 이상의 농도를 보이며 해양의 질소계 순환에 중요한 역할을 한다(Bada and Hoopes, 1979). 한편 이러한 가수분해결과에 의해 자유 아미노산의 분석에서는 거의 측정되지 않는 D-amino acid가 분리 분석된다. 아미노산(glycine은 제외)은 1개 이상의 chiral center인 탄소원자를 포함하므로 D, L-form(enantiomers)을 갖게 되며 시간의 경과에 따라 racemization과정을 거치게 된다(Lehninger, 1982; Carey and Sundberg, 1983). 따라서 이러한 D/L form 간의 racemic ratio에 따라 해수 중 유기물의 상대적 연령을 추정할 수 있다. 본 연구실에서 수행된 바 있는 황해(Park et al., 1994) 및 동해(Park et al., 1995)의 자료를 보면 수층별로 alanine의 D/L racemic ratio에 의해 수괴의 연령 비교가 되며, 태평양의 경우 지구거대물질의 D/L racemic ratio는 표층에서 저층으로 갈

수륙 증가하여 저층의 수괴가 상대적으로 오래된 것임을 시사하고 있다(Bada and Hoopes, 1979). 현재 D/L racemic ratio와 관련하여 세부 분석 중이며 차후 humic substance를 많이 내포하고 있는 심해저의 퇴적물 및 간극수 등에 적용하여 퇴적환경 및 수괴특성을 밝히는 중요한 자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

한편 차후 KODOS해역에서 연간 500만톤의 망간채취 후 발생하는 높은 농도의 부유물질과 간극수 내의 영양염류 및 유기물 그리고 중금속 등은 표층수로 재방출 되었을 때 표층생태계에 심각한 환경교란(environment stress)를 줄 수 있다. 따라서 망간선별 작업 후 발생하는 재방출수는 기초생산력을 생산하는 표층생태계와 질산화과정 및 유기물분해를 활발히 진행하고 있는 수심 200 - 500m부근의 미생물 생태계에 영향을 주지 않는 수심(최소한 500m 이심)에서 방출관을 통하여 방출되어야 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- Bada, J. L. and E. A. Hoopes, 1979. Alanine enantiomeric ration in the combined amino acid fraction in seawater. *Nature*, 282:822-823.
- Broecker W. S., 1974. *Chemical Oceanography*. Harcourt Brace Jovanovich Inc. 214.
- Carey, F.A. and R.J. Sundberg, 1983. *Advanced organic chemistry*. 2nd Ed., Part A, A Division of Plenum Publishing Corporation, New York, 61-97.
- Chen, R. F. and J. L. Bada, 1992. The fluorescence of dissolved organic matter in seawater. *Mar. Chem.*, 37:191-221.
- Fuhrman, J.A., 1990. Dissolved free amino acid cycling in an estuarine outflow plume. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 66:197-203.
- Fuhrman, J. A., and R. L. Ferguson, 1986. Nanomolar concentrations and rapid turnover of dissolved free amino acids in seawater: agreement between chemical and microbiological measurement. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 33:237-242.
- Hayase, K., H. Tsubota, I. Sunada, S. Goda and H. Yamazaki, 1988. Vertical distribution of fluorescent organic matter in the North Pacific. *Mar. Chem.*, 25:373-381.
- Hayase, K. and N. Shinozuka, 1995. Vertical distribution of fluorescent organic matter along with AOU and nutrients in the equatorial Central Pacific. *Mar. Chem.*, 48:283-290.
- Lanne R. W. P. M., 1982. Influence of pH on the fluorescence of dissolved organic matter. *Mar. Chem.*, 11:395-401.
- Lehninger, 1982. *Principles of biochemistry*. Worth, New York, 95-120.

- Mopper, K. and Y. C. Park, 1993. Origins of marine organic matter as revealed by fluorescence and amino acid racemization: Insights into the "New " DOC, humic substances and the oxygen minimum. *Deep-Sea Res.*, In press.
- Park, Y. C., C. H. Yoon and K. H. Chung, 1994. Amino Acid Composition and Characteristic of Dissolved Organic Compounds in the Yellow Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 29:171-182.
- Park, Y. C., S. K. Son, K. H. Chung and K. H. Kim, 1995. Characteristics of fluorescent organic matter and amino acids composition in the East Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, In press.
- Rashid M. A., 1985. *Geochemistry of marine humic compounds*. Springer-Verlag. 300pp.
- Sierra, M. M. De Souza, O. F. X. Donard, M. Lamotte, C. Belin and M. Ewald, 1994. Fluorescence spectroscopy of coastal and marine waters. *Mar. Chem.*, 47:127-144.
- Suttle, C. A., A. M. Chan and J.A. Fuhrman, 1991. Dissolved free amino acids in the Sargasso Sea: Uptake and respiration rates, turnover times, and concentration. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 70: 189-199.



## 제 5 장

### 퇴적물-공극수간 물질순환 연구

연구 책임자 : 한 명 우

(인하대학교)





## 제 1 절 서 론

전이금속 원소들이 어떤 경로를 거쳐 망간단괴의 구성원이 되는 지에 관한 지금까지의 연구 결과는 두 가지 이론으로 대표되고 있다. 두 이론 모두 전이금속 원소들이 망간단괴로 flux되는 경우로 설명된다는 점에서 크게 공통점이 있다고 볼 수 있으나, 그 각각의 구체적인 내용에는 차이가 있다. 첫 번째 이론은 전이금속 원소들이 용존상태하에서 망간단괴로 이동된다는 내용이고 (Klinkhammer, 1980; Callender and Bowser, 1980; Klinkhammer et al., 1982), 두 번째 이론은 이들 원소들이 고체상으로 이동된다는 내용이다. 즉, 표면에 흡착되는 양상으로 이동된다는 내용이다 (Fischer, 1984).

망간과 니켈에 경우, 첫 번째 이론은 잘 적용되지 않고 있다. 그 이유는 공극수로부터 확산될 수 있는 망간이나 니켈의 양이 망간단괴에 있는 이들의 양에 비해 훨씬 적기 때문이다. Oxic한 퇴적물의 공극수로부터 유래되는 이들 금속원소들의 확산율도 이들이 망간단괴에 부착되는 집적율에 비해 훨씬 느리게 계산되고 있다. 이런 공급량 부족을 해수로부터 망간단괴로의 직접적인 공급으로 설명해 보려는 시도도 있었다 (Boudreau and Scott, 1978). 그러나, 해수에서 망간단괴로 직접 공급되는 양은 매우 적은 것으로 판명되었다. 퇴적물에 묻혀있지 않고 해수와 접하고 있는 망간단괴 상단에서의 망간과 니켈의 함량이 퇴적물에 묻혀있는 부분의 망간과 니켈의 함량에 비해 훨씬 적게 나타나고 있다. 따라서, 해수에서 망간단괴로 직접 공급되는 것보다는, 어떤 방법으로든지 퇴적물 내에서 이들 금속원소들과의 상호작용이 반드시 내재되어 있을 것으로 사료되었다 (Calvert and Price, 1977; Lyle et al., 1977).

망간단괴 형성에 있어 퇴적물 내에서의 상호작용이 중요하게 인식됨에 따라 망간단괴를 형성하는 전이금속 원소들의 공급경로에 대해 중대한 모순이 대두되게 되었다. 즉, 망간단괴를 구성하는 원소들이 어떤 방식으로든지 퇴적물과의 상

호작용에 의해 단괴로 공급된 것으로 보이는데, 공극수 확산에 의한 공급량은 충분치 못하다는 모순이다. 이런 모순이 해결되려면 공극수 확산이외에 다른 기작이 추가로 고려되어야 할 것이다. 이 다른 기작에 해당되는 것으로 퇴적물 표면에 흡착되어 있던 전이금속 원소들이 탈착되면서 망간단괴로 이동되는 기작을 본 보고서에서 제시하고자 한다.

퇴적물 표면이라는 용어는 다소 총체적인 개념으로 퇴적물을 구성하는 다양한 물질들의 표면을 총칭하는 용어이다. 입자체 유기물, 쇠설성 퇴적물, 탄산염 광물등의 모든 표면이 퇴적물 표면에 해당될 것이다. 이들 표면에 흡착된 상태로 존재하는 전이금속들이 퇴적물 내의 지화화적인 환경변화로 (산화환원 환경 변화가 주된 변화임) 탈착되어 망간단괴로 이동될 때, 단괴 성장에 추가적인 공급경로가 될 것으로 사료된다. 저층 해수로부터 공급되는 다양한 입자체 퇴적물의 표면에는 이미 상당량의 전이금속 원소들이 흡착되어 있으므로, 입자체들이 퇴적된 후 퇴적환경의 변화로 금속원소들이 단괴로 재동될 가능성은 매우 높은 것으로 사료된다.

## 제 2 절 연구방법

### 1. 사용 시료

KODOS-94 현장조사 기간에 확보된 정점중 세 정점의 Box-Core를 선정하여 분석대상 시료로 사용하였다. 세 정점은 모두 KODOS-94 조사해역의 남서단에 위치하고 있으며, 정점의 명칭은 각각 St 51, St 54, St 15 이다. 이들 정점의 위치와 수심등에 관한 자료와 KODOS-94 조사해역의 위치는 전체 보고서의 총괄 자료를 참고하기 바란다.

## 2. 시료 채취

각 정점에서 획득된 Box-core에 PVC 파이프를 삽입시켜 퇴적물과 공극수 시료 확보를 위한 subsampling을 하였다. PVC 파이프에 옮겨진 시료는 2-5 cm 간격으로 절단하여 공극수 추출 준비상태로 냉장 보관하였다. 일반적으로 화학종의 농도변화가 크게 나타나는 표층에서 10 cm 깊이까지는 2cm 간격으로 세밀히 절단하였고, 그 이하의 깊이에서는 5 cm 간격으로 절단하였다.

냉장 보관된 각각의 시료는 선상 실험실에서 공극수 채취기에 옮겨 담겨진 후, 질소압력에 의해 공극수와 퇴적물 덩이로 각각 분리되었다. 추출된 공극수는 50 - 75 ml 정도이었으며, 추출된 각각의 공극수 시료는 영양염 및 전이금속 원소 분석을 위해 각각 1/3 및 2/3 부분으로 분배하였다. 영양염 분석용 공극수 시료는 냉장 보관하였고, 금속원소 분석용 시료는 진한 질산 0.1 ml로 처리한 후 냉동 보관하였다. 공극수 추출후 남은 퇴적물 덩이는 비닐 백에 넣어 냉장 보관하였다.

## 3. 화학분석

조사현장에서 국내 실험실로 운반된 세 정점의 공극수와 퇴적물 시료에 대해 영양염, 금속원소 (Mn, Fe, Ni, Cu), 유기탄소 및 질소 등의 분석이 수행되었다. 분석된 영양염은 Ammonia, Nitrate, Nitrite, Silica, Phosphate 등이었다. 퇴적물 덩이에 대한 분석은 순차적인 추출제 사용에 의한 추출물에 대해 Atomic Absorption Spectroscopy를 사용하여 네 가지 금속원소의 분석을 수행하였다. 사용된 추출제는 Ammonium Acetic Acid, Acetic Acid, Hydrogen Peroxide, Hydroxylamine Hydrochloric Acid의 네 가지였다. 공극수에 대한 네 가지 금속

원소는 총 농도 값만 역시 AAS를 이용하여 분석하였다. 순차적인 추출법의 근본 이유는 고체상과 결합된 금속원소의 양을 결합된 상태별로 구분하여 파악하려는데 있으므로, 공극수라는 액상 시료에 대해 순차적인 추출법을 적용할 필요는 없었다.

퇴적물 덩이에서 50 mg 정도는 별도로 떼어내어 유기탄소 및 질소 분석에 사용되었다. 냉동 건조된 50 mg 정도의 퇴적분말 시료에서 10 mg 정도를 CNS Carlo Erba 1500 기기에 넣어 총 탄소량을 측정하였고, 또 다른 10 mg 정도의 분말 시료에 sulfite 용액을 첨가시켜 무기탄소를 제거한 후 (Verardo et al., 1992) Carlo Erba 분석기에 넣어 유기탄소량을 측정하였다.

### 제 3 절 결과 및 토의

#### 1. 영양염

세 정점 St 51, St 54, St 15에서 공통적으로 유기물 분해에 의한 영양염 재생으로 암모니아, 인산염, 규산염 등의 농도가 깊이에 따라 전반적으로 증가하는 양상을 보여준다 (Figs. 5-1, 5-2, 5-3). St 51의 암모니아 농도자료의 분산이 크게 나타나는 것은 분석상의 오염에 따른 것으로 사료된다. Blank값 이하의 값으로 측정된 극 표층부의 자료를 고려하더라도 St 51의 암모니아 자료는 문제가 있어 보인다. 이 경우를 제외하면 모든 정점에서 암모니아, 인산염, 규산염의 농도 변화는 전반적으로 깊이에 따라 증가하는 양상을 보임에 이의가 없다.

유기물분해에 의한 이들 영양염의 증가형태는 분해자로 소모되는 처지에 놓여 있는 질산염 및 아질산염의 깊이에 따른 농도 감소형태와 잘 부합되고 있다. 특히 St 15의 질산염 감소형태는 전형적인 질산염 환원에 의한 유기물 분해를 보여

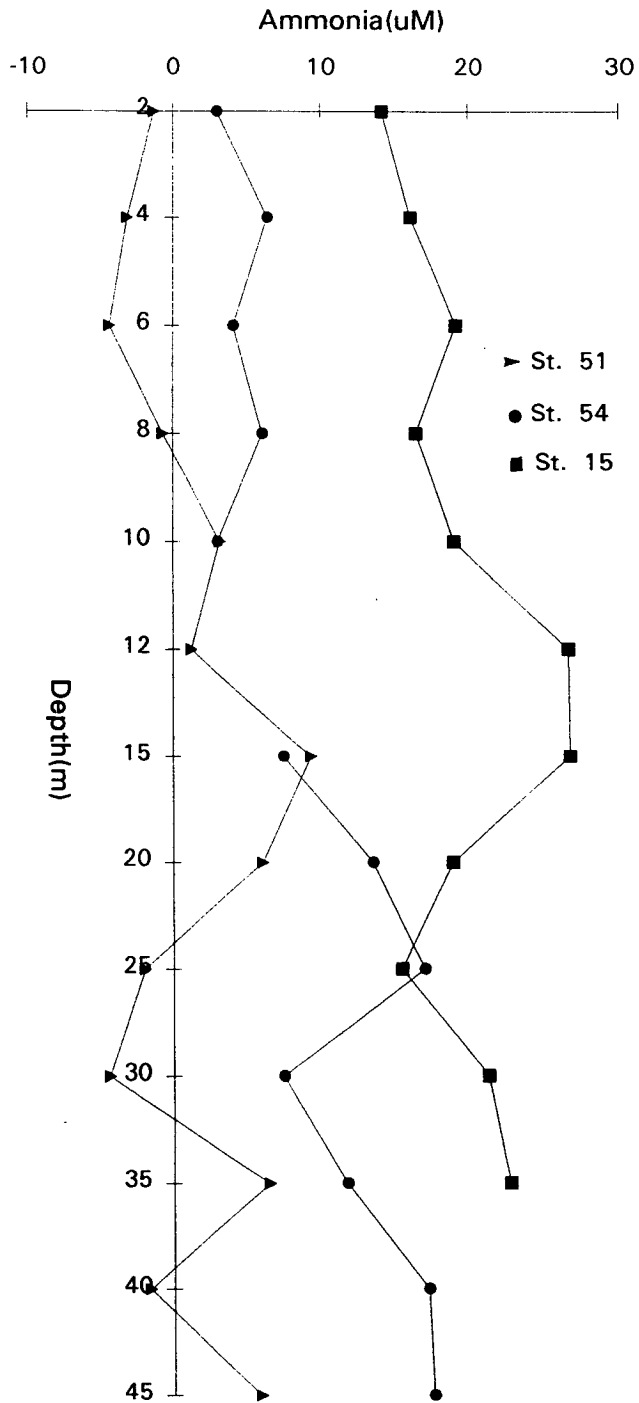


Fig. 5-1. Concentrations of porewater ammonia with depth.

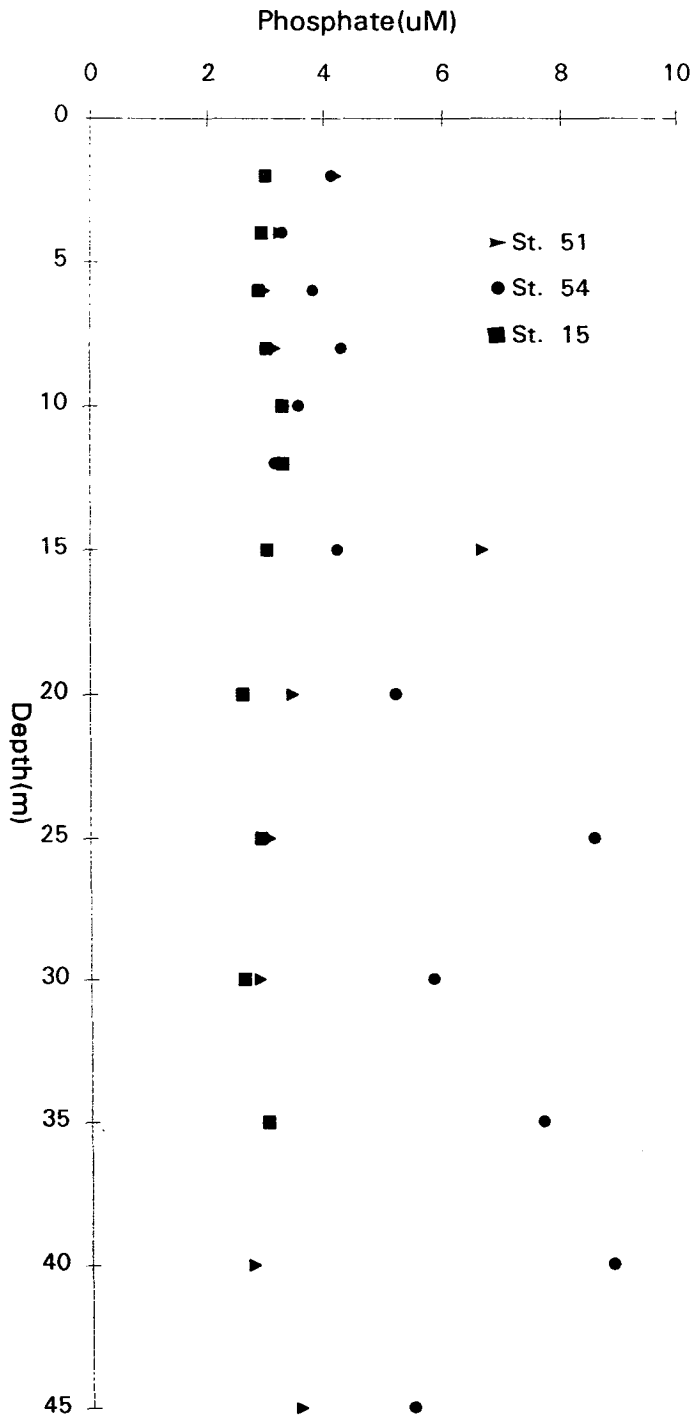


Fig. 5-2. Concentrations of porewater phosphate with depth.

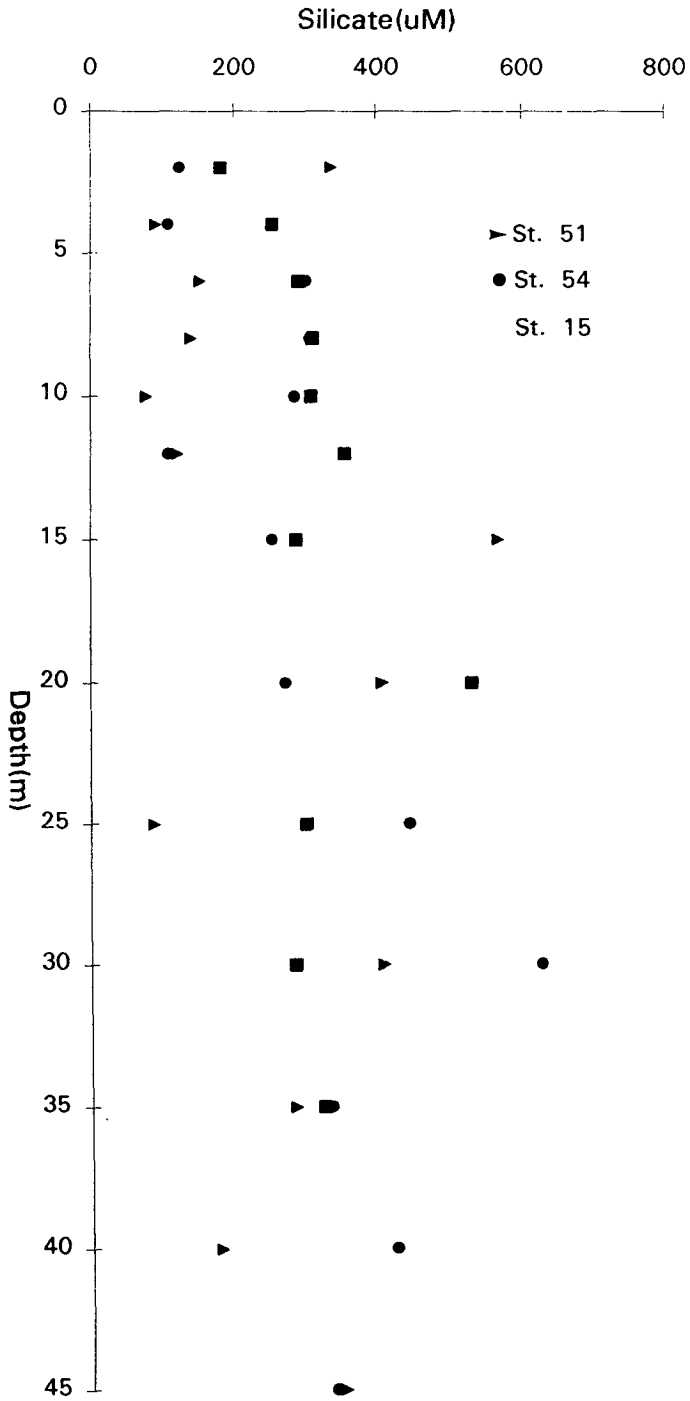


Fig. 5-3. Concentrations of porewater silica with depth.

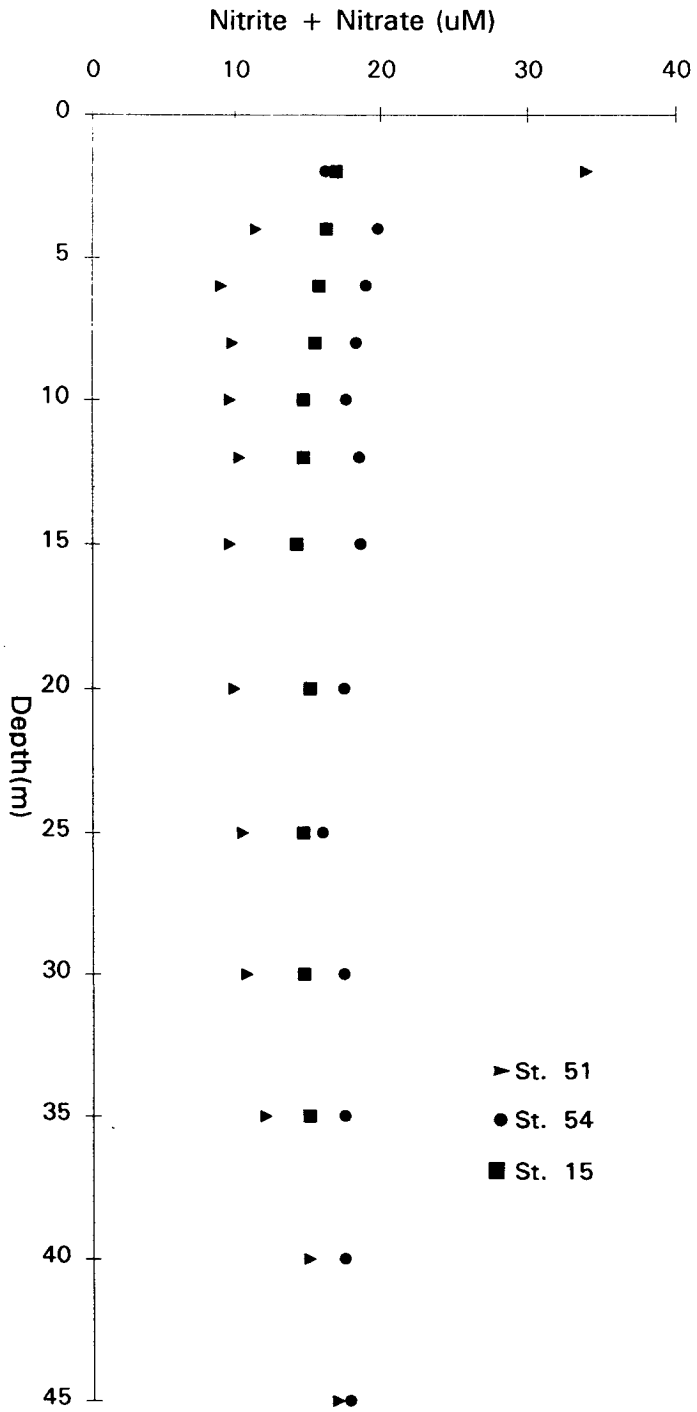


Fig. 5-4. Concentrations of porewater nitrite+nitrate with depth.



준다 (Fig. 5-4). 아질산염의 농도는 질산염 농도의 10%를 하회하는 값에 불과하였으므로 질산염과 아질산염의 합으로 표현된 그림은 실제로 질산염의 농도분포를 나타낸다고 보아도 무방하다. 질산염의 농도가 최소값으로 나타나는 10 - 15 cm 근방이 St 15에서는 산화환원 경계면에 해당되는 것으로 사료된다. 정확한 산화환원 경계면의 위치는 현장에서 기록된 퇴적상에 대한 야장 자료와 비교하여 파악될 수 있을 것이다. St 15 만큼 선명하지는 않지만 St 51 및 St 54의 경우 질산염의 농도 분포 양상에 근거할 때, 5-10 cm 근방에서 산화환원 경계면이 나타나는 것으로 사료된다. 세 정점 모두 공극수에 용존된 질산염과 아질산염의 농도 변화가 깊이 증가에 따라 증가하다 감소하는 경향을 보이는데, 이것은 oxic 및 suboxic한 퇴적환경에서 볼 수 있는 전형적인 농도변화 양상이다.

## 2. 유기탄소

유기탄소 함량과 탄소 총 함량 모두 깊이에 따라 감소하는 분포를 보인다 (Figs. 5-5, 5-6). 탄소 총 함량의 90 % 이상을 유기탄소가 차지하므로 탄소 총 함량 분포 양상도 결국은 유기탄소의 분포 양상을 반영하는 것으로 파악된다. 유기탄소의 깊이에 따른 감소는 대단히 선명하게 나타나고 있으며, 앞서 살펴본 영양염의 증가 양상과 잘 부합되고 있다. 다만, 전체적으로 함량 값 자체가 조금 낮은 경향을 보이는데, 그 원인이 Carlo Erba Column의 packing material의 노후에 있었던 것인지, 아니면 세 정점 지역인 KODOS-94 남서단 해역 퇴적물에 집적되는 유기탄소의 함량이 실제로 이렇게 낮은 지는 한번 더 점검할 필요가 있다.

유기탄소 함량 분포 1st-order reaction kinetic 모델 방정식을 적용하여 curve fitting 해보면 St 15에서 유기탄소 분해율이 가장 빠른 것을 알 수 있다 (Fig.

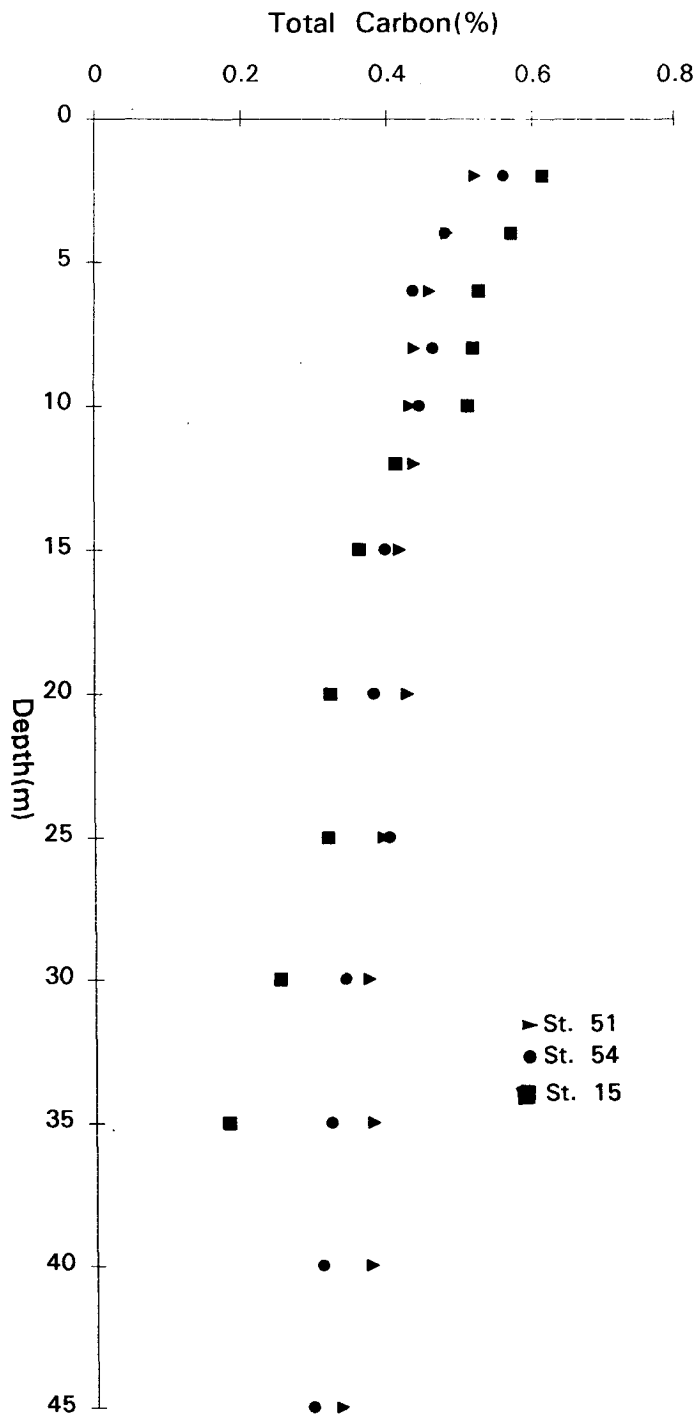


Fig. 5-5. Contents of sedimentary total carbon with depth.

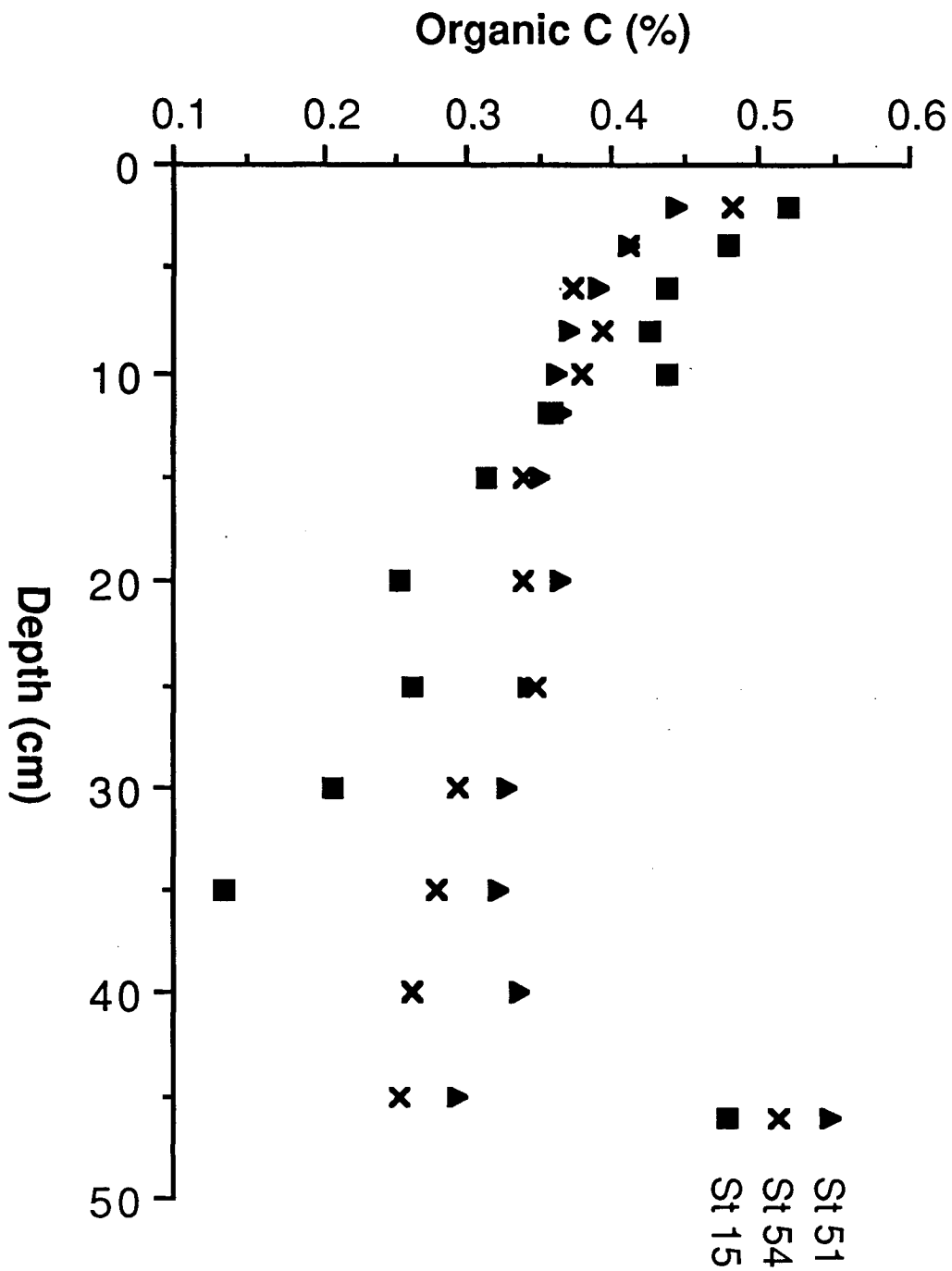


Fig. 5-6. Contents of sedimentary organic carbon with depth.

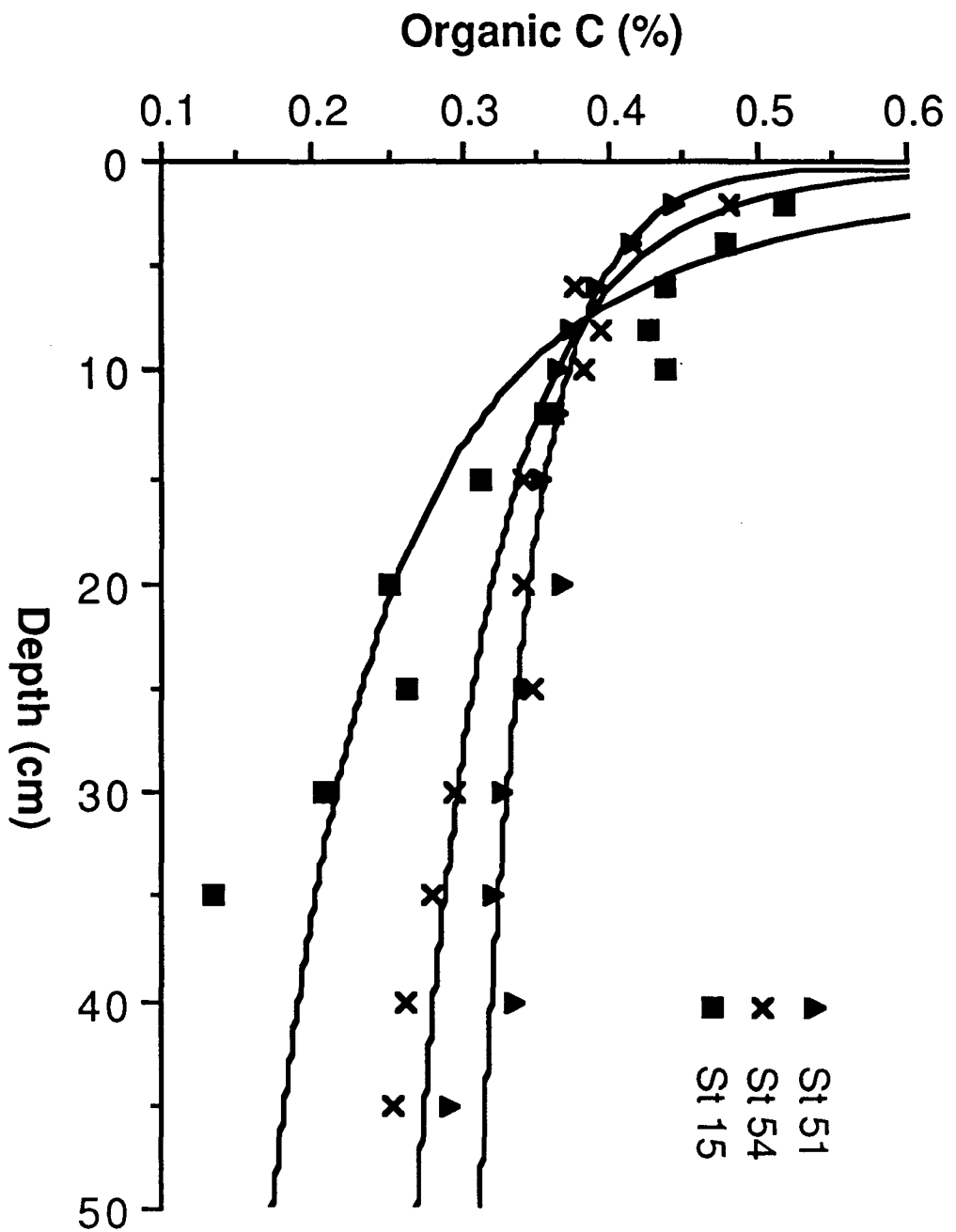


Fig. 5-7. Curves of 1st order decay model fitted to the contents of sedimentary organic carbon with depth.

5-7). 파악된 모델 방정식에 퇴적속도 자료가 추가된다면 유기탄소의 분해속도를 정량적으로 파악하는 것이 가능하며, 이것은 유기탄소의 분해 산물로서의 영양염의 재생속도를 결정해줄 것이다. 이와 같은 내용은 본 과제의 목적과는 부합되지 않으므로 가능성만 언급한 채 별도의 기회에서 다룰 계획이다.

### 3. 공극수 용존 금속원소

공극수에 용존된 Mn, Fe, Cu, Ni의 총 농도는 전반적으로 깊이에 따라 증가하는 양상을 보인다 (Fig. 5-8~11). 망간의 경우는 표층에서 심층으로 일방적으로 증가하며 (Fig. 5-8), 구리와 니켈은 표층에서 처음에 증가하였다가 감소하고 다시 증가하는 양상을 보인다 (Fig. 5-10, 5-11). 철은 깊이에 따라 큰 변화를 보이지 않는 것으로 해석되나 (Fig. 5-9), 낮은 농도 값과 분석상의 난제로 자료 자체의 신뢰성을 유보하고 싶다. 구리의 경우는 전반적으로 농도 값이 order 하나 정도 높게 나왔는데, 이것도 분석상에 체계적인 오류가 있었던 것으로 사료된다. 그러나, 구리의 경우 깊이에 따른 농도 변화 양상이 세 정점 모두 공통적이라는 점에서 변화 양상 자체는 실제의 상황을 나타내는 자료로 사료된다. 전반적으로 시료의 분량이 제한될 수밖에 없는 공극수 화학분석의 현실을 고려할 때, 차 후에는 공극수 금속원소 분석을 위해 공극수 추출 대상 퇴적물의 분량을 더 많이 하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

공극수 구리와 니켈의 농도가 감소하다가 반전하여 증가하는 양상을 보이는 5 - 10 cm 근방이 산화환원의 경계면으로 파악되며 (Figs. 5-10, 5-11), 공극수 망간도 이 근방의 깊이 이하에서 그 농도 값의 증가가 가장 크게 나타나고 있는 것으로 보아 (Fig. 5-8) 산화환원의 경계면이 5 - 10 cm 근방에서 나타나고 있는 것이 더욱 확연해진다. 그리고 이와 같은 판단은 앞서 질산염 자료에서 파악한 산화환원 경계면의 위치와 크게 차이나지 않는다.

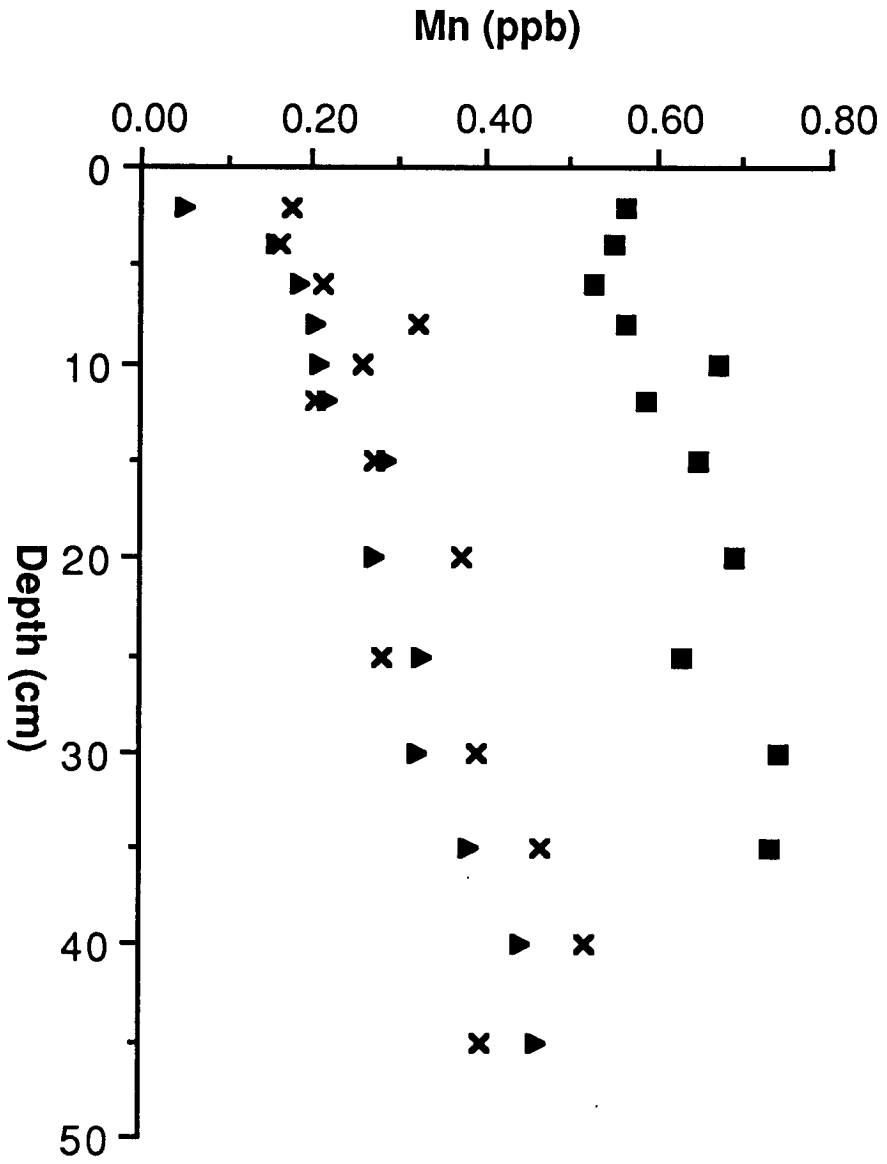


Fig. 5-8. Concentrations of porewater manganese with depth.

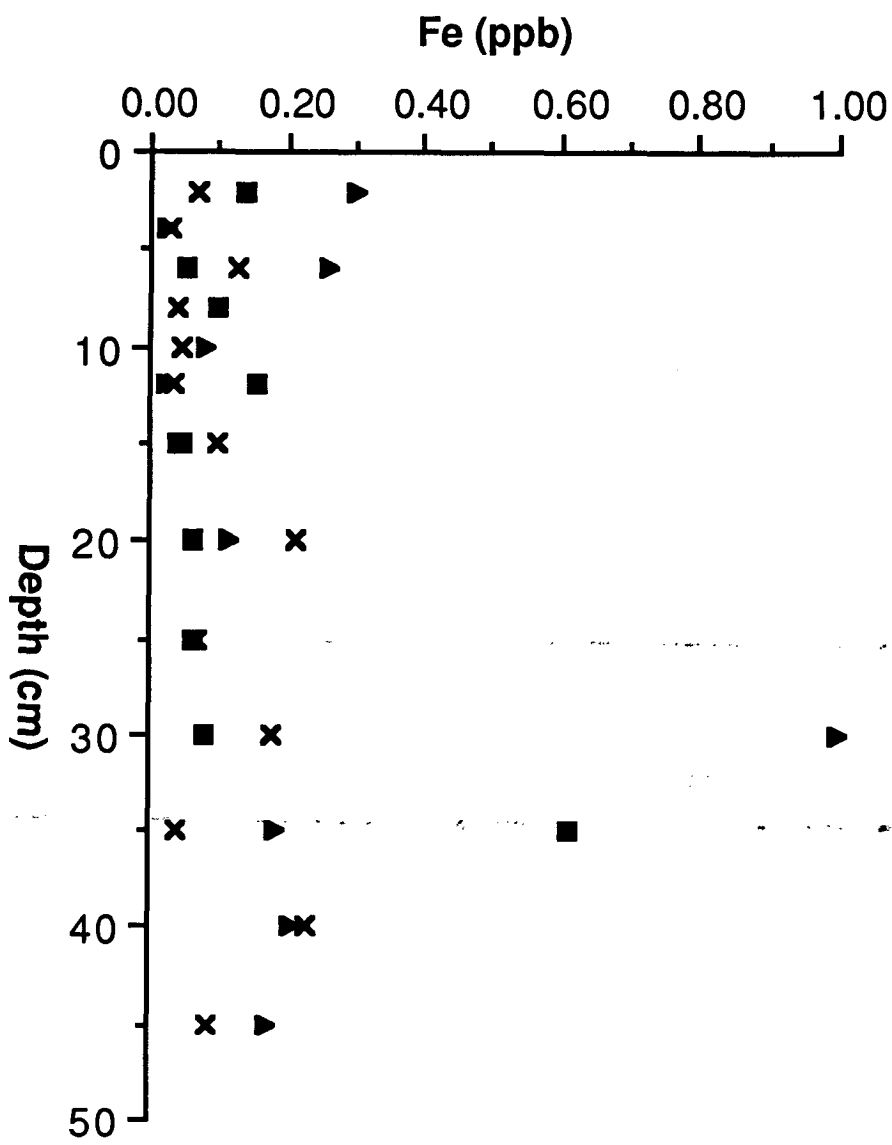


Fig. 5-9. Concentrations of porewater iron with depth.

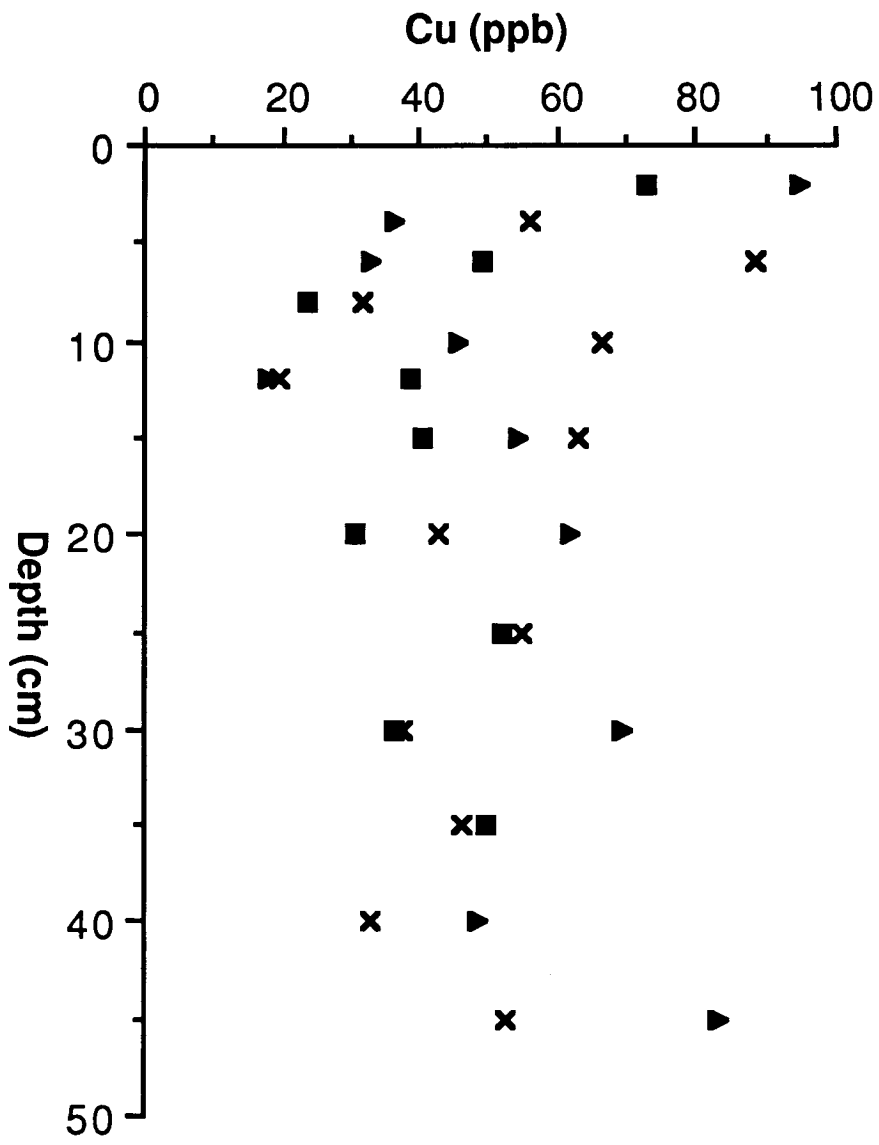


Fig. 5-10. Concentrations of porewater copper with depth.



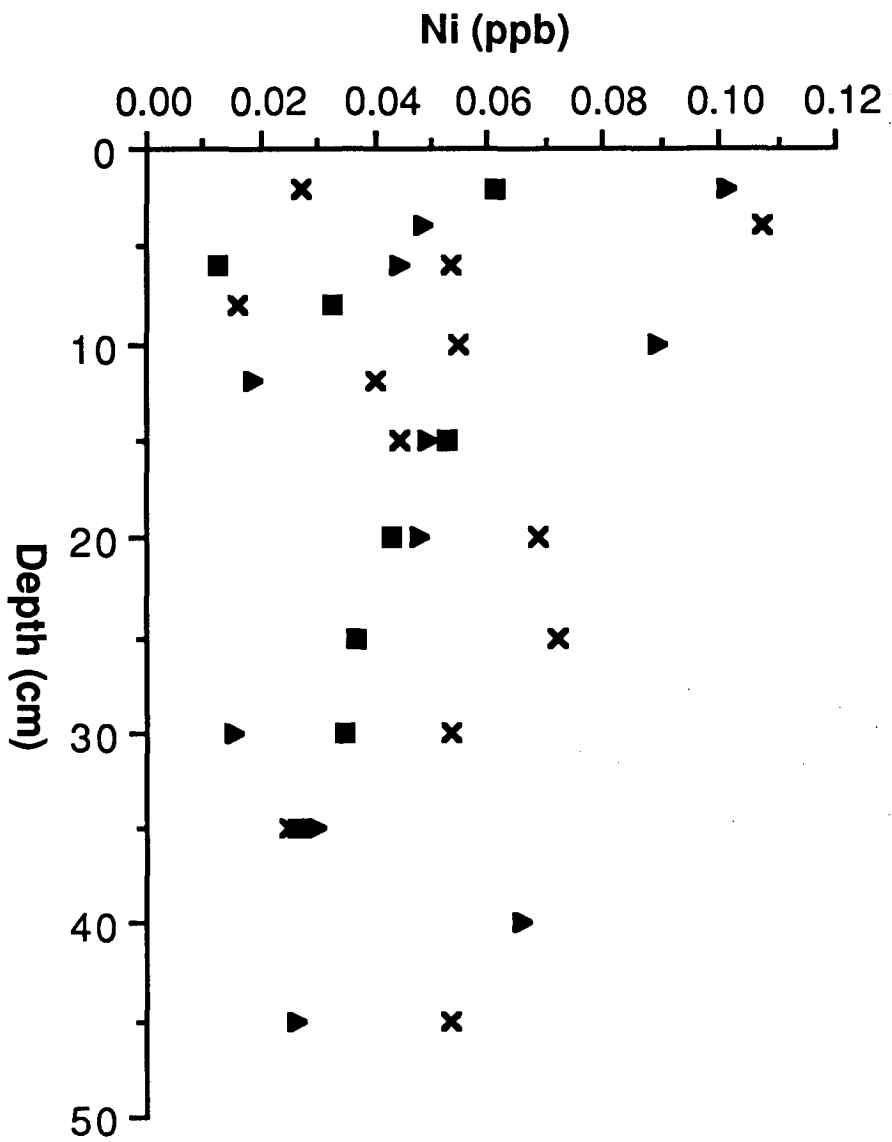


Fig. 5-11. Concentrations of porewater nickel with depth.

#### 4. 퇴적물 함유 금속원소

Ammonium Acetic Acid, Acetic Acid, Hydrogen Peroxide, Hydroxylamine Hydrochloric Acid 등의 네 가지 추출제를 순차적으로 사용하여 추출된 시료에 대해 Mn, Fe, Cu, Ni 등의 원소 함량을 측정한 결과 Acetic Acid 와 Hydroxylamine Hydrochloric Acid를 사용하여 추출한 추출제에서만 이들 금속 원소의 농도가 상당량 추출되었을 뿐, 그 나머지 추출제를 사용한 경우에는 농도가 무시할 정도로 미량 추출되었다.

아세트 산은 입자체 표면에 흡착되어 있는 금속원소들을 추출하는 경우로써, 유기물 표면, 탄산염 광물 표면, 점토광물, 금속산화광물 등이 표면을 제공한다 (Callender and Bowser, 1980). 세 조사 정점의 유기탄소 함량과 아세트 산 추출물의 망간 농도간의 상관관계는 정비례 관계로 나타나고 있어 (Fig. 5-12), 유기물 표면이 금속원소가 흡착되는데 좋은 환경임을 알 수 있다. 본 조사 정점에서 무기탄소의 함량은 매우 적게 나타났으므로 (Figs. 5-5, 5-6), 탄산염 광물 표면에 흡착된 금속원소들의 양은 적을 것으로 사료된다.

Acetic Acid 와 Hydroxylamine Hydrochloric Acid 추출제를 사용한 경우에만 상당량의 금속원소가 측정되었다고 앞서 언급하였지만, 이 두가지의 추출제 중에서도 Hydroxylamine Hydrochloric Acid 의 경우가 퇴적물내 금속원소 총 함량의 95 % 이상을 차지하고 있었다. Acetic Acid 추출에 의한 금속원소의 양은 5 % 미만의 낮은 값이었다. Hydroxylamine Hydrochloric Acid는 망간산화물, 철산화물 등의 금속산화물의 결정구조 내부에 자리잡고 있는 금속원소들을 추출해내는 것으로 알려져 있다 (Callender and Bowser, 1980). 따라서, 금속원소들이 Hydroxylamine Hydrochloric Acid 추출물에 거의 대부분 존재한다는 것은 이들 원소가 대부분 금속 산화물에서 유래되었음을 지시한다. 본 조사지역의 풍부한 망간단괴의 분포를 고려할 때, 이와 같은 결과는 쉽게 예상할 수 있다.

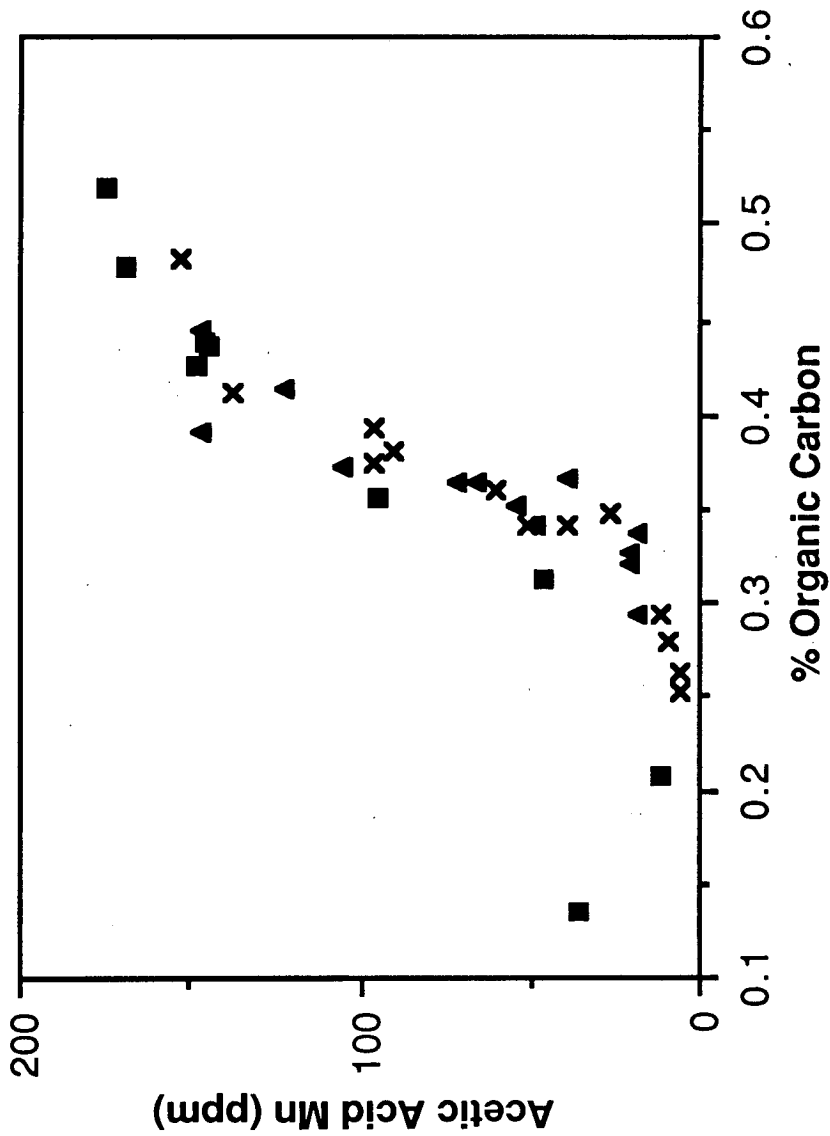


Fig. 5-12. Correlation between sedimentary organic carbon content and manganese in acetic acid leachant.

흥미로운 사실은 Acetic Acid 추출물에 존재하는 금속원소의 함량이 표층에서 많고 하층으로 갈수록 감소하는 현상이다 (Fig. 5-13~24). 퇴적물에 존재하는 금속원소 총량에 대한 Acetic Acid 추출 기원의 금속원소의 부분을 퇴적 깊이에 따라 plot해보면 이와같은 양상은 더욱 극명하게 드러난다 (Fig. 5-25, 5-26, 5-27).

## 5. 퇴적물-공극수간의 상호관계

Acetic Acid 추출 기원의 금속원소 함량이 퇴적깊이 증가에 따라 감소하는 양상은 결국 흡착기원의 금속원소가 깊이 증가에 따라 감소하고 있음을 의미한다. 금속원소들이 유기탄소 함량과 정비례 관계를 보였던 결과를 상기하면 (Fig. 5-12), 유기물 분해로 입자 유기물체의 표면적이 줄어들면서 금속원소가 흡착될 공간도 그 만큼 줄어들었고, 따라서, 깊이 증가에 따라 흡착기원의 금속원소 함량이 감소하는 것으로 사료된다. 흡착되는 몫이 줄어든 만큼의 금속원소는 대신 공극수로 이동되었을 것으로 추정된다. 즉, 유기물 분해가 진행되면서 유기물체 표면에 흡착되어 있던 금속원소들이 공극수 쪽으로 이동되었을 것으로 추정되는 것이다. 공극수에 용존된 금속원소들의 총 농도값이 전반적으로 깊이 증가에 따라 증가하였던 결과는 (Fig. 5-8~11) 놀랍게도 이와같은 추정과 잘 일치한다.

따라서, 공극수에 용존된 금속원소들의 총 농도 값과 아세트 산 추출물 기원의 금속원소 농도 값 사이에 역비례 관계를 예상해볼 수 있으며, 구리의 경우 이와같은 관계가 가장 극명하게 나타나고 있다 (Fig. 5-28). 결국, 퇴적환경 내에서 전이금속 원소들의 형태는 퇴적표층에서 흡착된 형태로 많이 존재하고, 유기물 분해가 많이 진행된 퇴적하층에서는 탈착되어 공극수에 용존된 형태로 많이 존재하는 것으로 요약해볼 수 있겠다.

퇴적표층에서 흡착된 형태로 존재하는 금속원소들 중에는 유기물체 표면에 흡

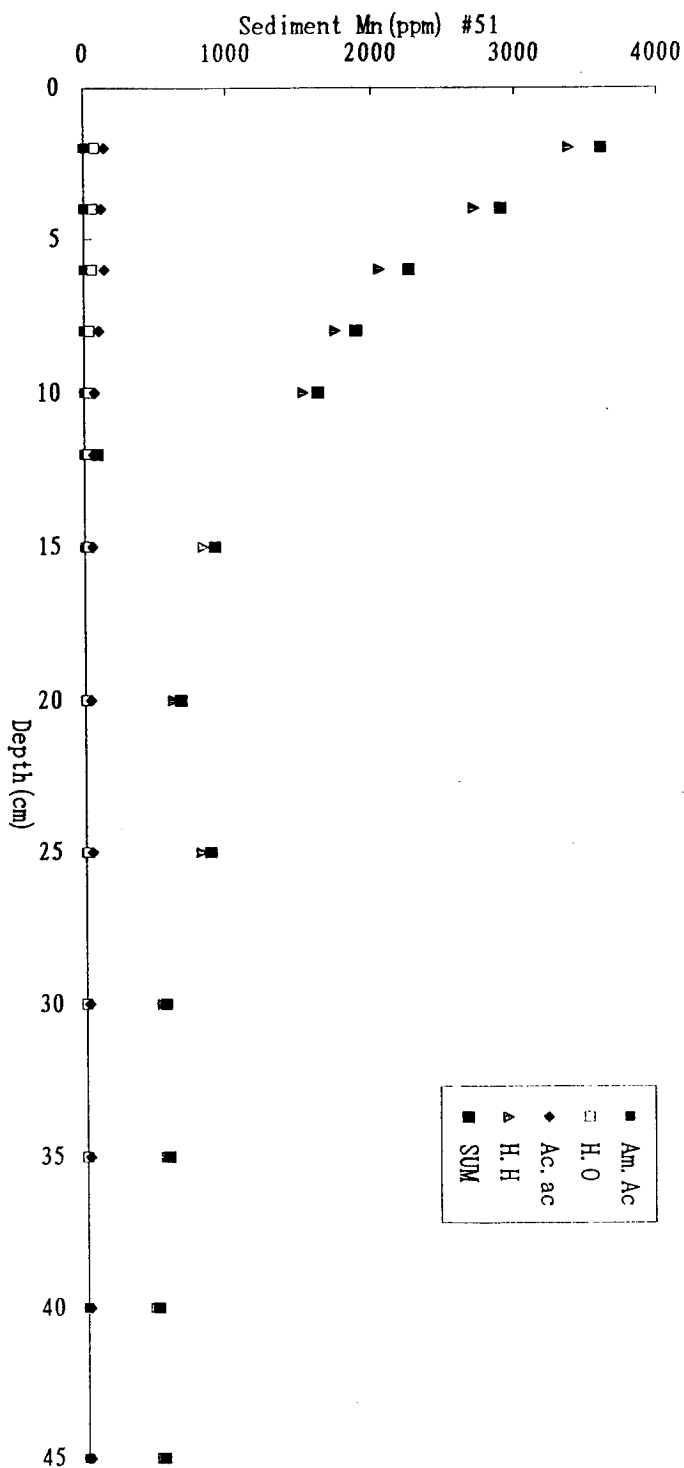


Fig. 5-13. Depth profiles of sedimentary manganese, at St. 51, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid.

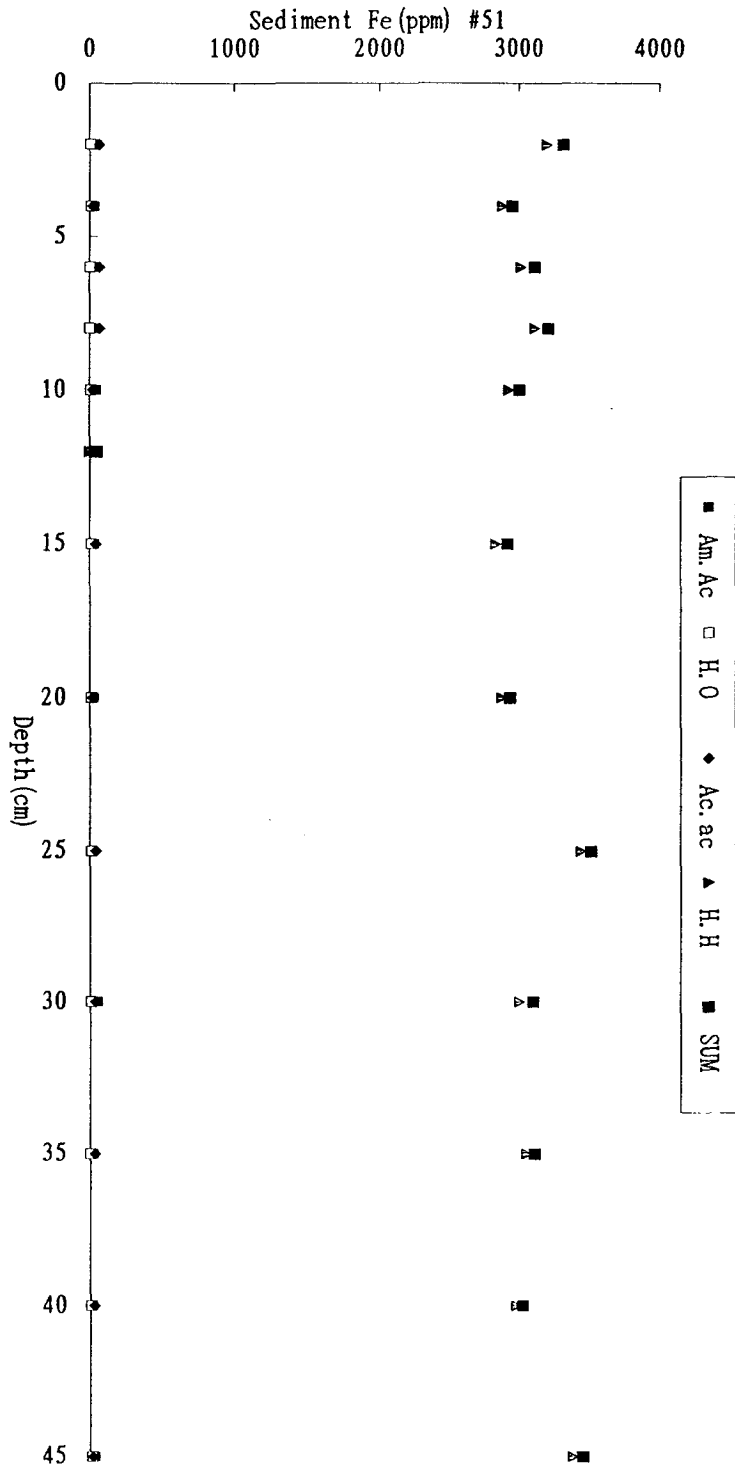


Fig. 5-14. Depth profiles of sedimentary iron, at St. 51, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid.

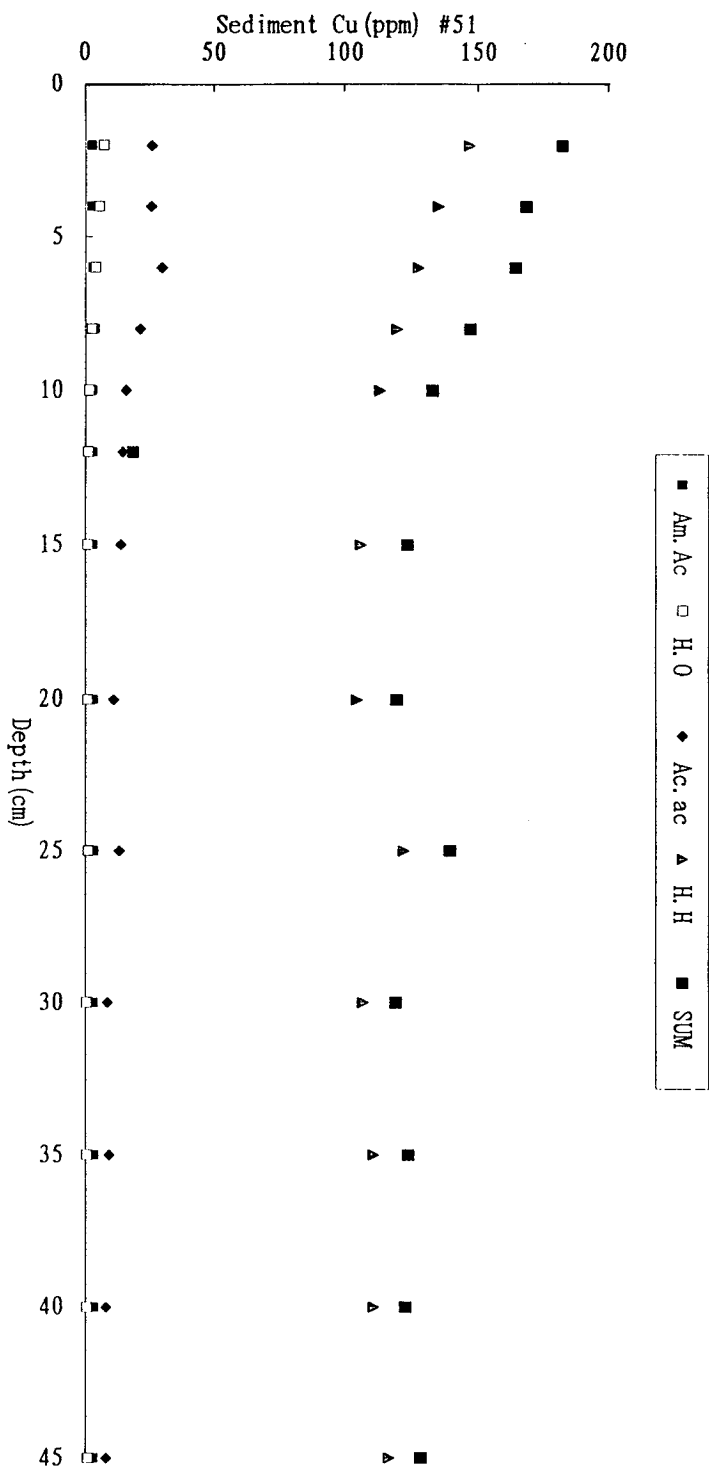


Fig. 5-15. Depth profiles of sedimentary copper, at St. 51, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid.

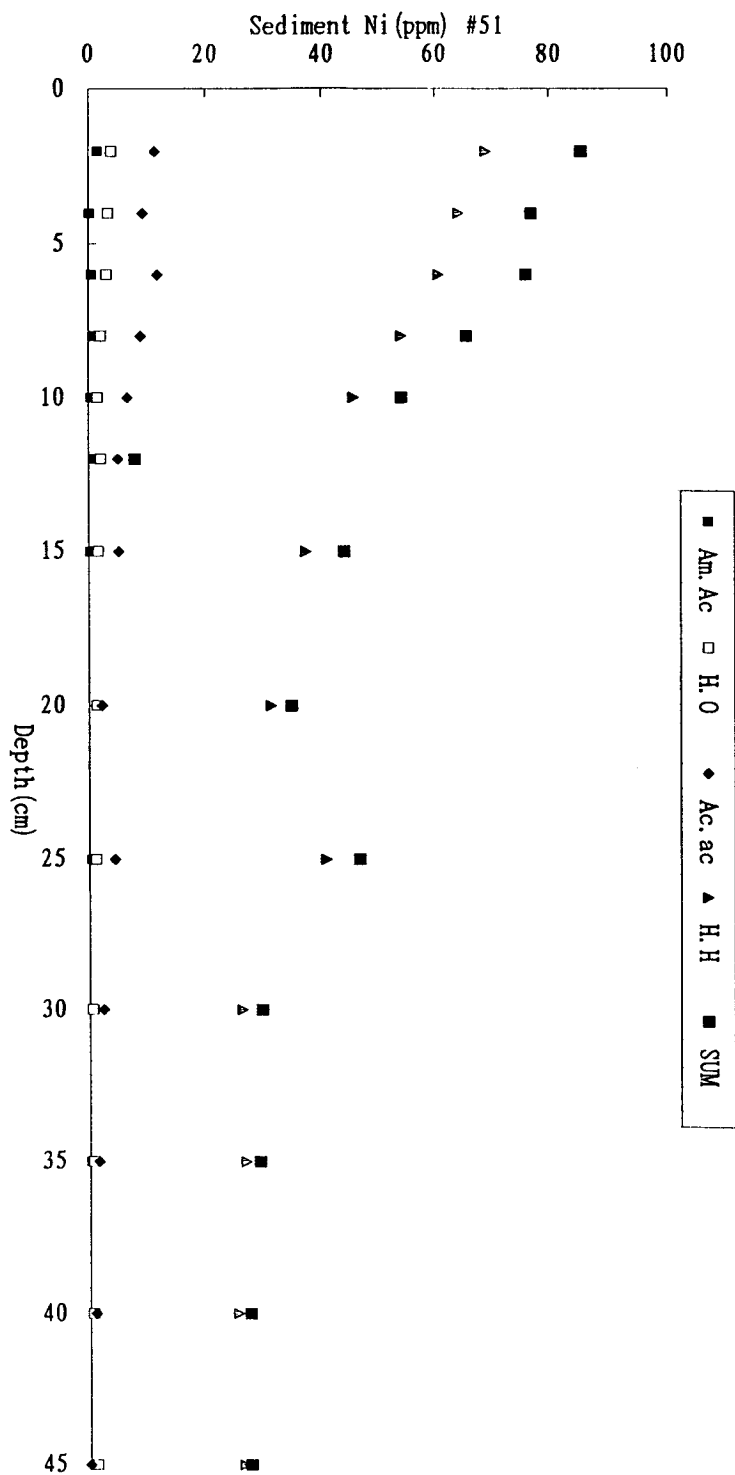


Fig. 5-16. Depth profiles of sedimentary nickel, at St. 51, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid.



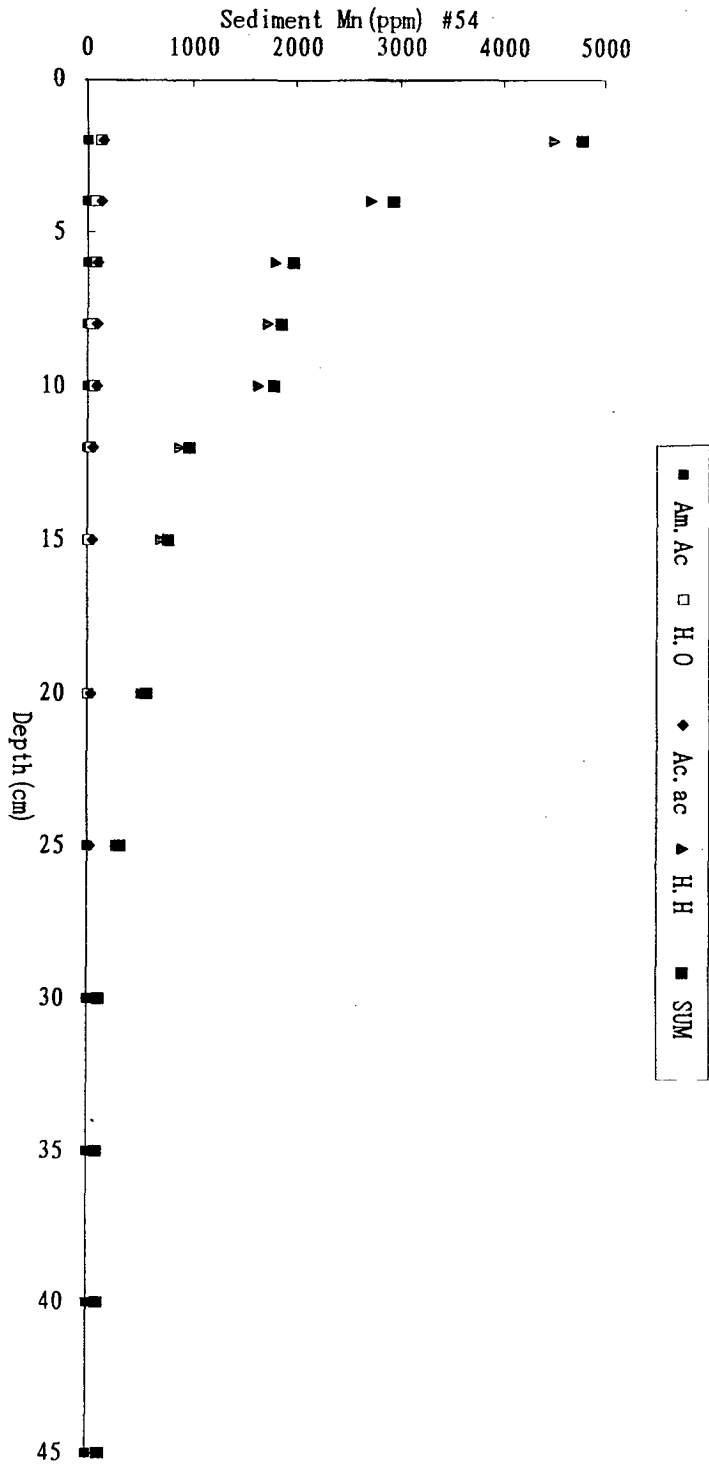


Fig. 5-17. Depth profiles of sedimentary manganese, at St. 54, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid.

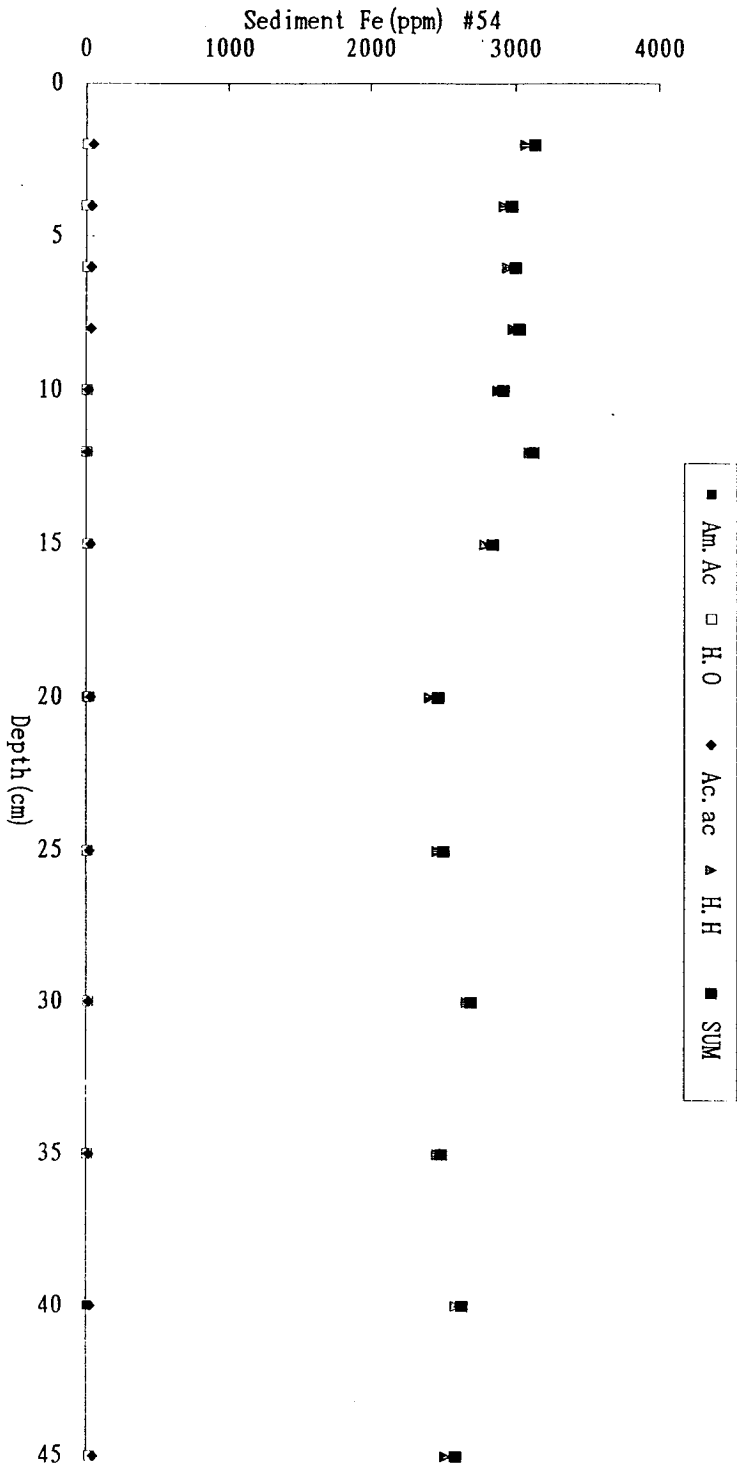


Fig. 5-18. Depth profiles of sedimentary iron, at St. 54, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid.

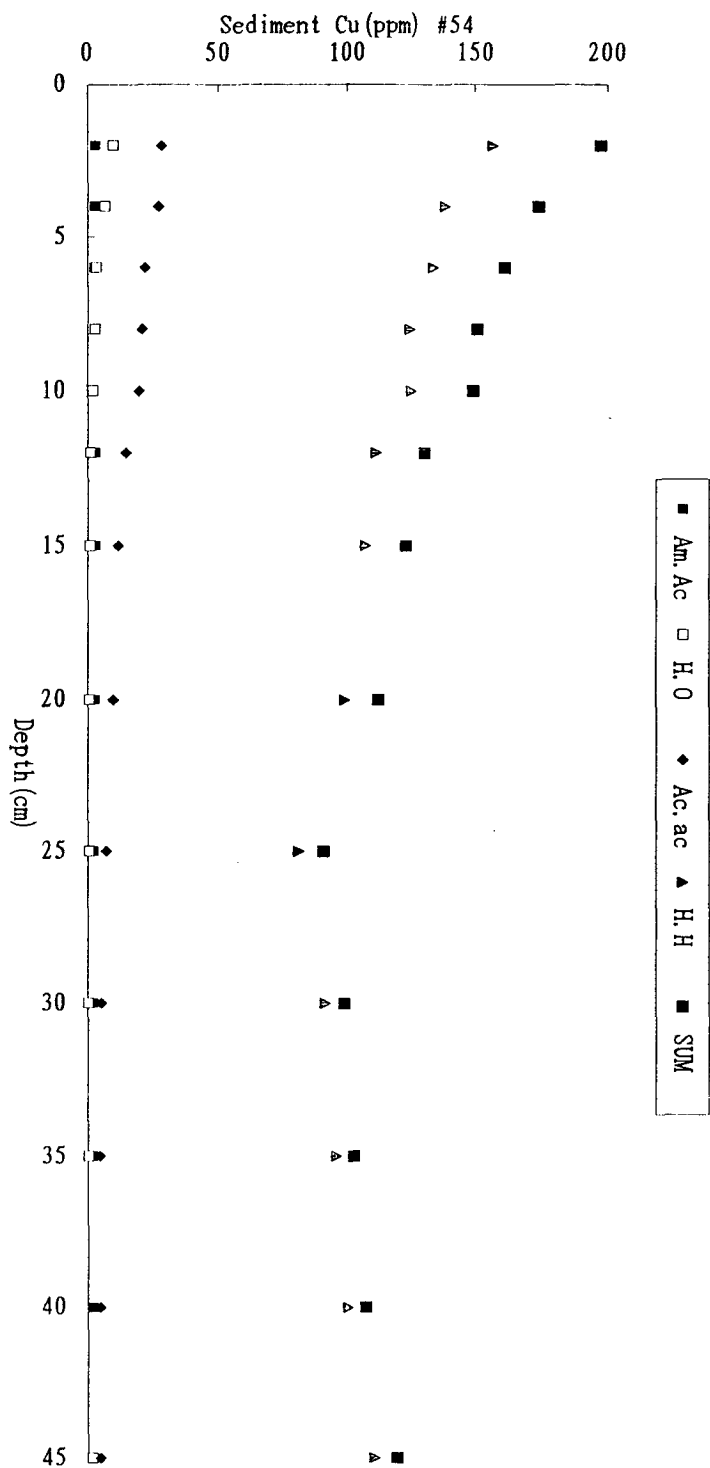


Fig. 5-19. Depth profiles of sedimentary copper, at St. 54, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid.

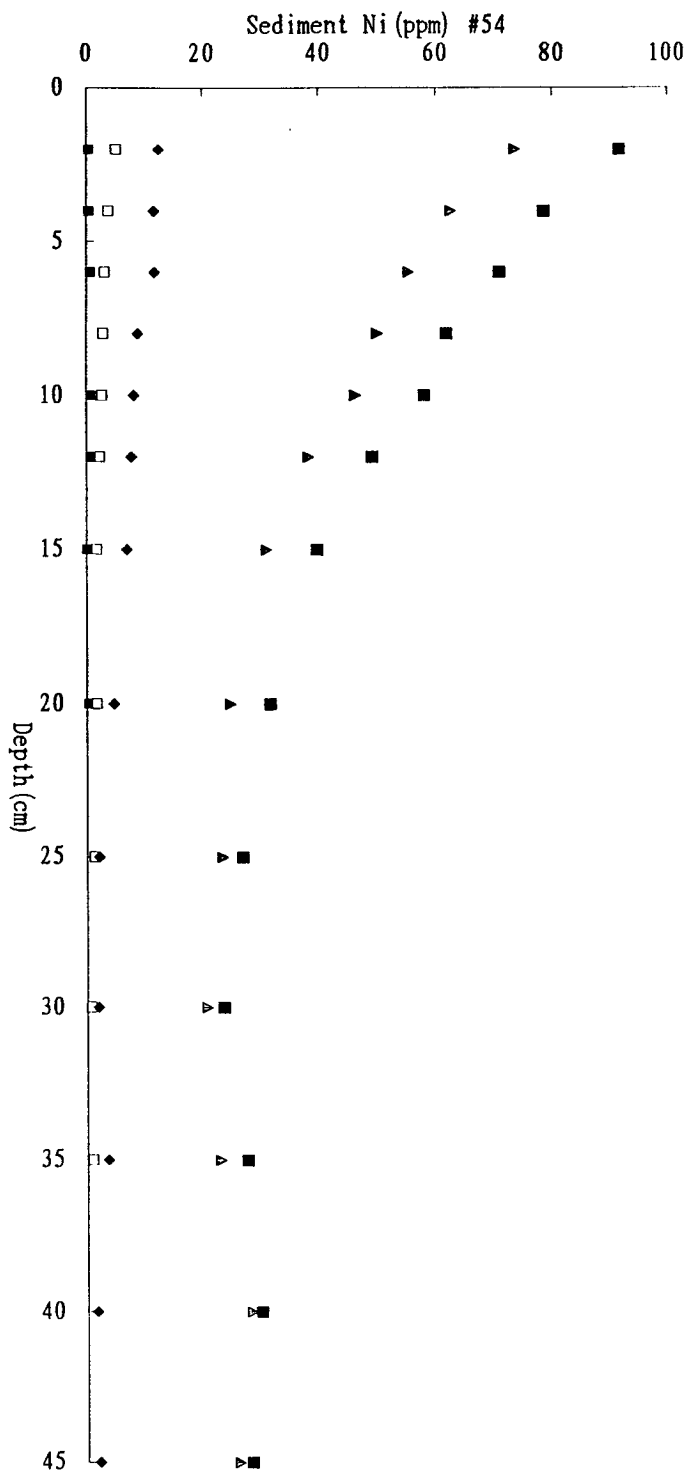


Fig. 5-20. Depth profiles of sedimentary nickel, at St. 54, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid.

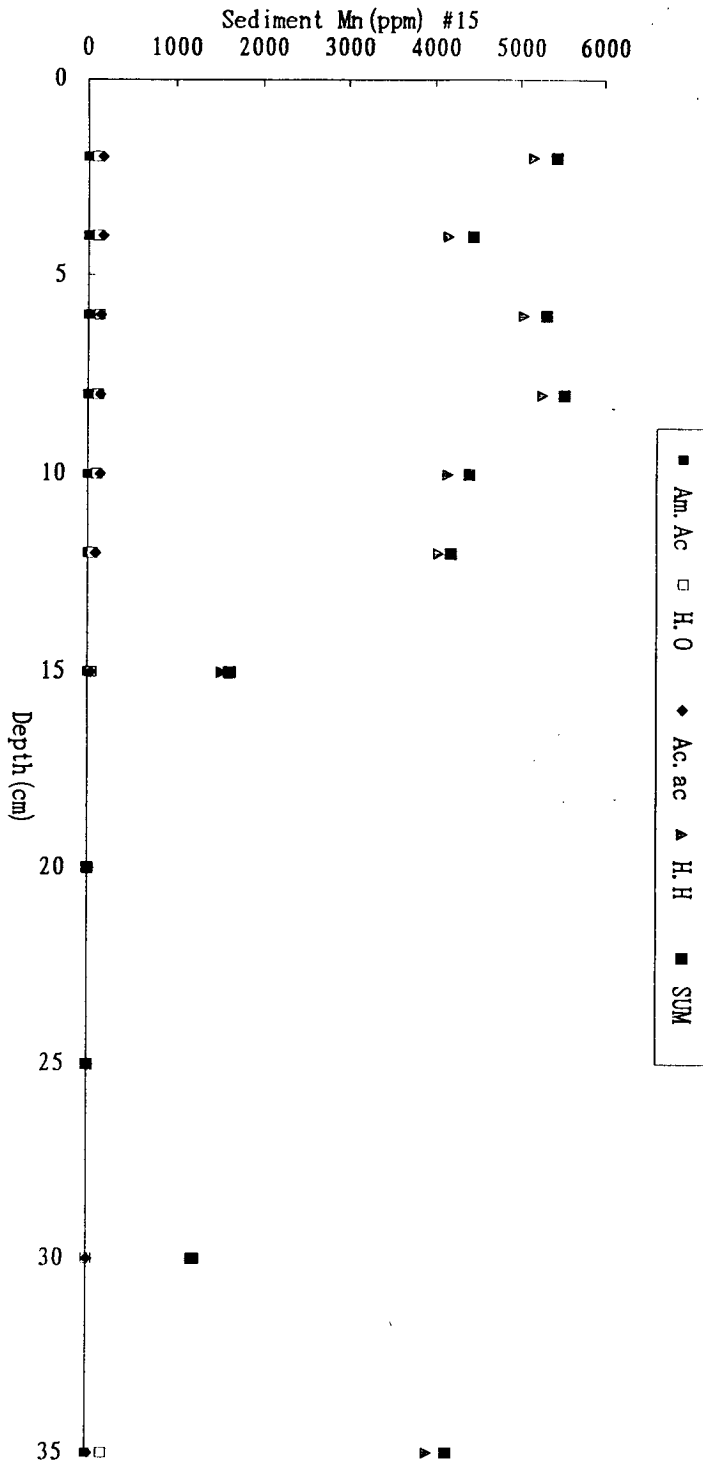


Fig. 5-21. Depth profiles of sedimentary manganese, at St. 15, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid.

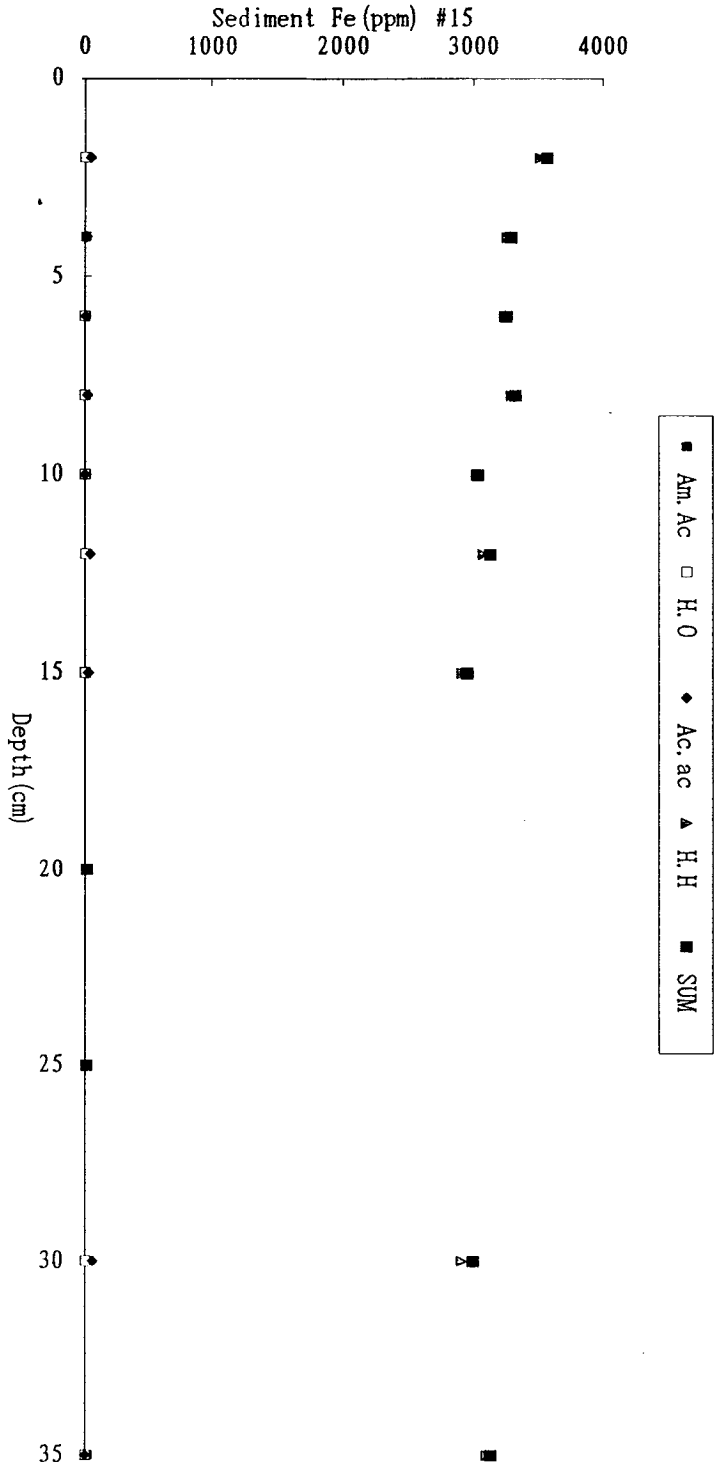


Fig. 5-22. Depth profiles of sedimentary iron, at St. 15, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid.

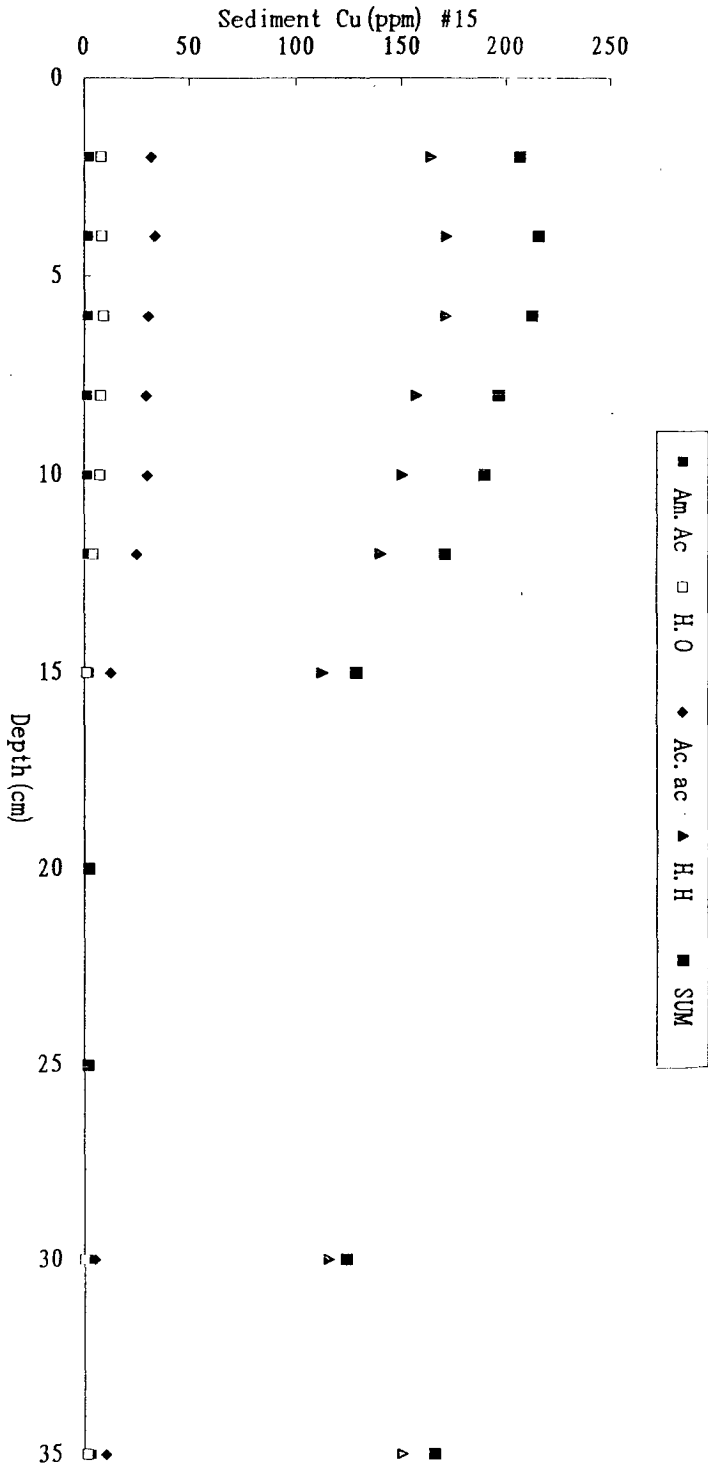


Fig. 5-23. Depth profiles of sedimentary copper, at St. 15, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid.

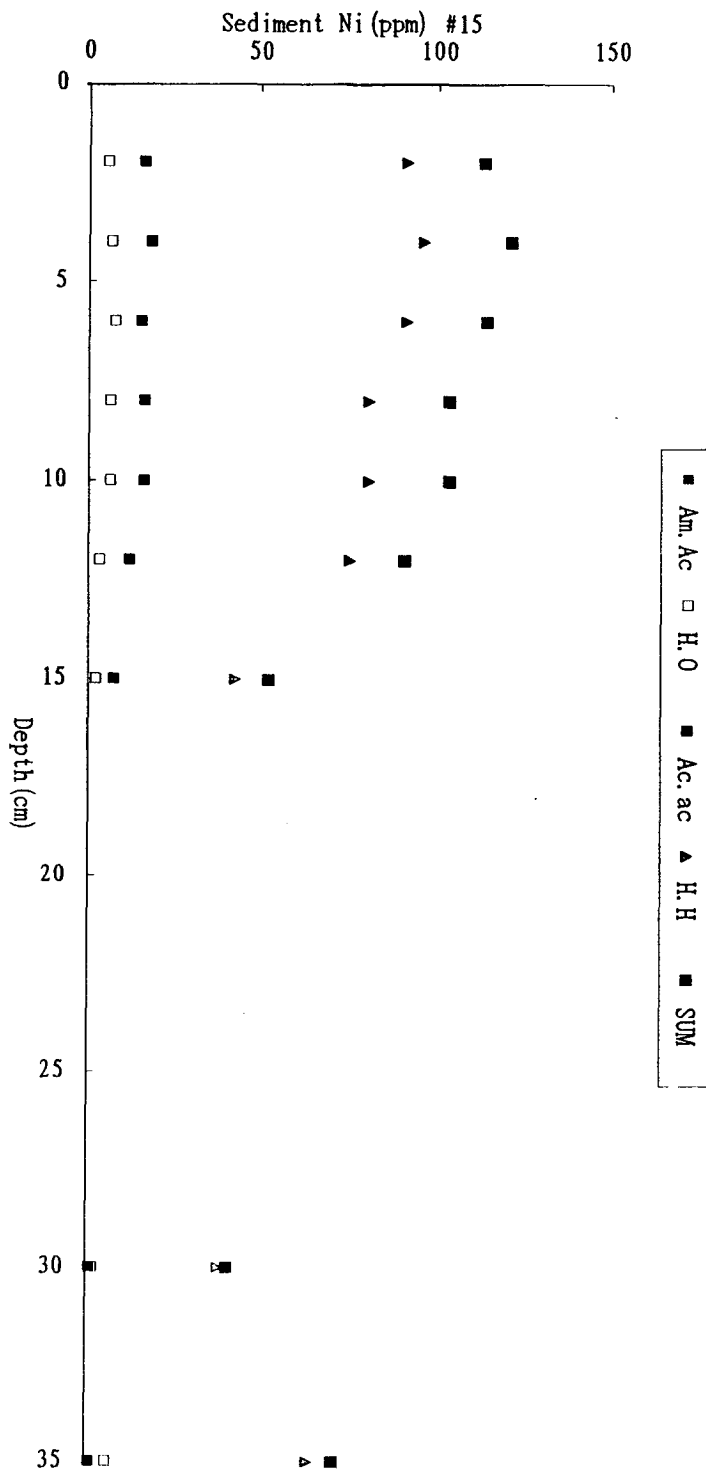


Fig. 5-24. Depth profiles of sedimentary nickel, at St. 15, in sequential leachants of ammonium acetate, hydrogen peroxide, acetic acid, and hydroxylamine hydrochloric acid.



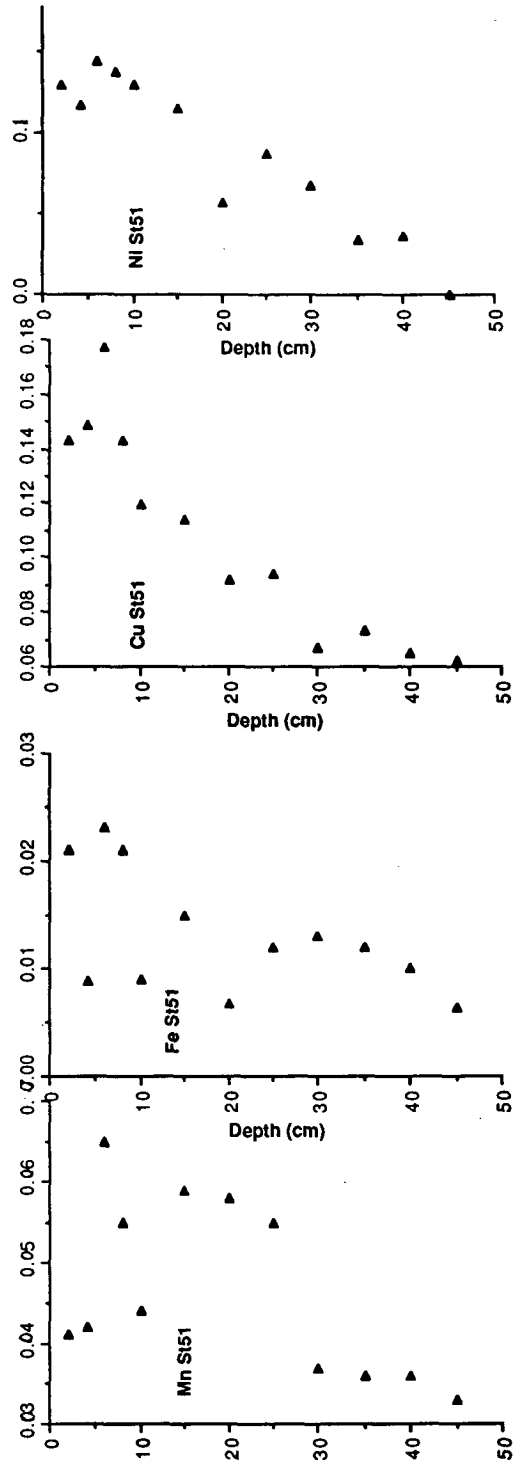


Fig. 5-25. Depth profiles of the fractions of the metal contents in acetic acid leachants to the total sedimentary metal contents, at St. 51.

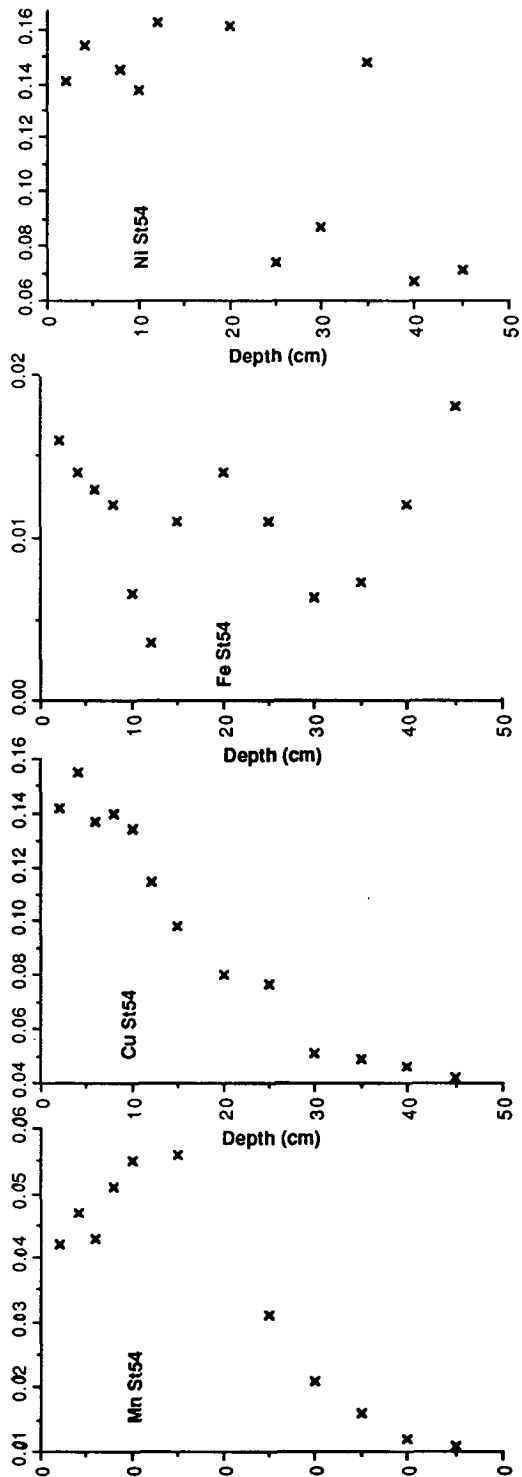


Fig. 5-26. Depth profiles of the fractions of the metal contents in acetic acid leachants to the total sedimentary metal contents, at St. 54.

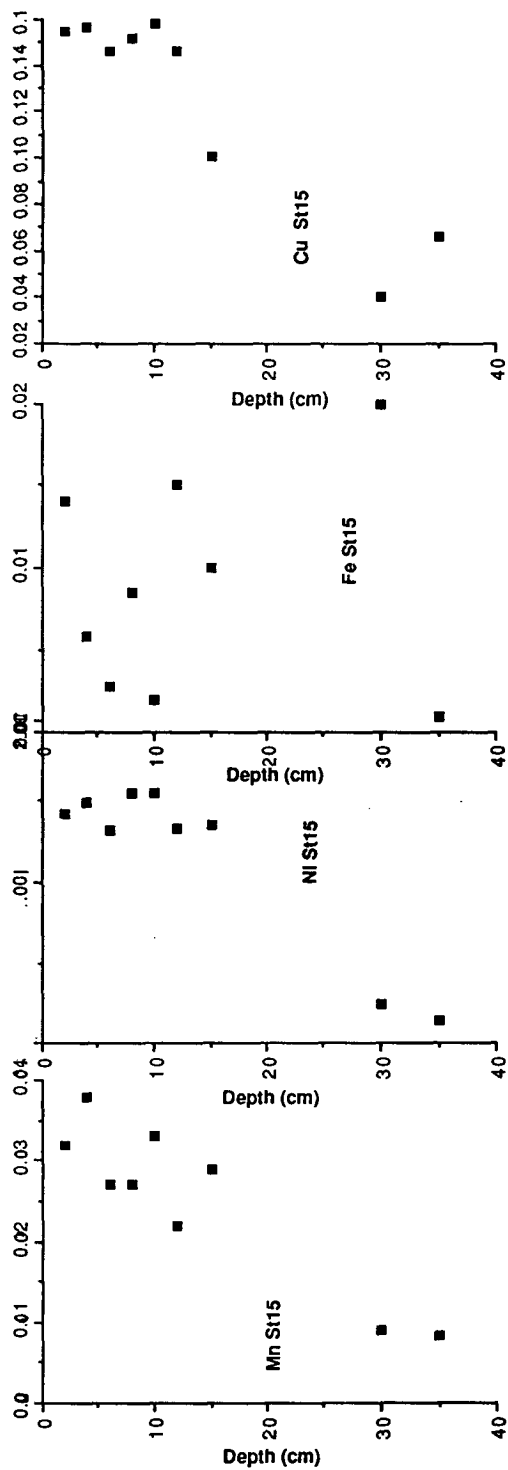


Fig. 5-27. Depth profiles of the fractions of the metal contents in acetic acid leachants to the total sedimentary metal contents, at St. 15.

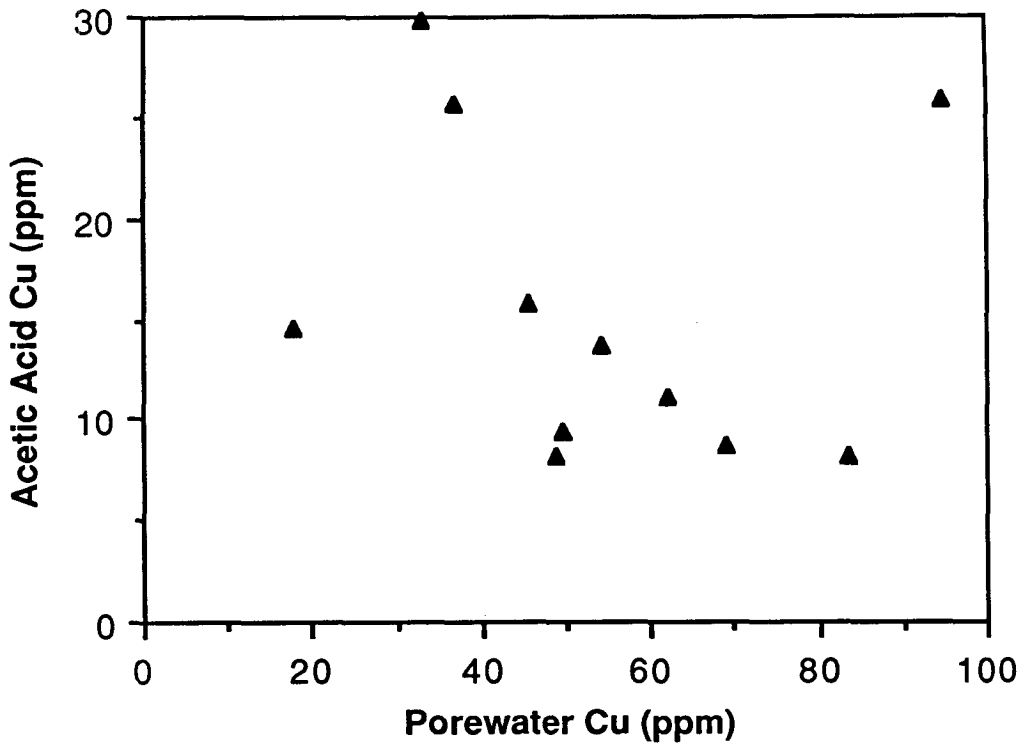


Fig. 5-28. Correlation between porewater copper and sedimentary copper in the acetic acid leachant at St. 51.

착되어 있는 것 외에 금속산화물체 표면에 흡착되어 존재하는 것도 고려해볼 수 있다. 후자의 경우는 흡착에 의한 단괴의 성장기작 가능성과 직결되는 경우이므로 대단히 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 금속 산화물중 가장 대표적인 산화광물인 망간산화물이 이 가능성을 가장 효과적으로 타진해볼 수 있는 대상이 될 것이므로, 망간 원소에 대해 파악해 보았다. 만일 Hydroxylamine Hydrochloric Acid 추출 기원의 망간 농도와 Acetic Acid 추출기원의 망간 농도사이에 정비례 관계가 성립된다면, 흡착된 망간의 주요 기원은 망간 산화물 표면에 흡착되었던 망간이 될 것임을 의미한다. Fig. 5-29는 이 가능성을 강력히 시사한다. Hydroxylamine Hydrochloric Acid 추출 기원과 Acetic Acid 추출기원이 거의 정비례 관계를 보여준다. 다만 망간원소 함량 단독에 대해 정비례 관계가 파악되지 못하고 Mn/Ni에 대해 정비례 관계가 파악되었음이 유감이다. 아마도, Ni은 금속산화광물 표면에 잘 흡착되지 않는 것을 의미한다고 볼 수 있을 것이다.

결국, 유기물체와 금속산화물체 표면 환경이 풍부하게 제공되는 퇴적물 표층부에서는 금속 원소들이 흡착된 상태로 많이 존재하며, 이들 표면 환경이 상대적으로 부족한 퇴적물 하층부에서는 금속원소들이 대부분 공극수에 흡착된 상태로 존재한다. 이와같은 금속원소의 대칭적 농도분포 상황하에서 생물교란작용 등의 퇴적공간 변화는 하층부 공극수에 풍부히 용존되어 있는 공극수를 표층부로 이동시키고 (분자확산이 아니고 이류에 의해서), 새롭게 공급된 용존상의 금속 원소들은 다시 유기물체나 금속산화물체 표면에 흡착되면서 단괴 성장이 진행되는 것으로 사료된다.

## 제 4 절 결 론

퇴적물 함유 전이금속 원소의 단계적 추출 분석과 공극수 용존 전이금속의 분석을 동시에 수행한 본 연구를 통해서 흡착에 의한 망간단괴 형성기작이 확인될 수 있었다.

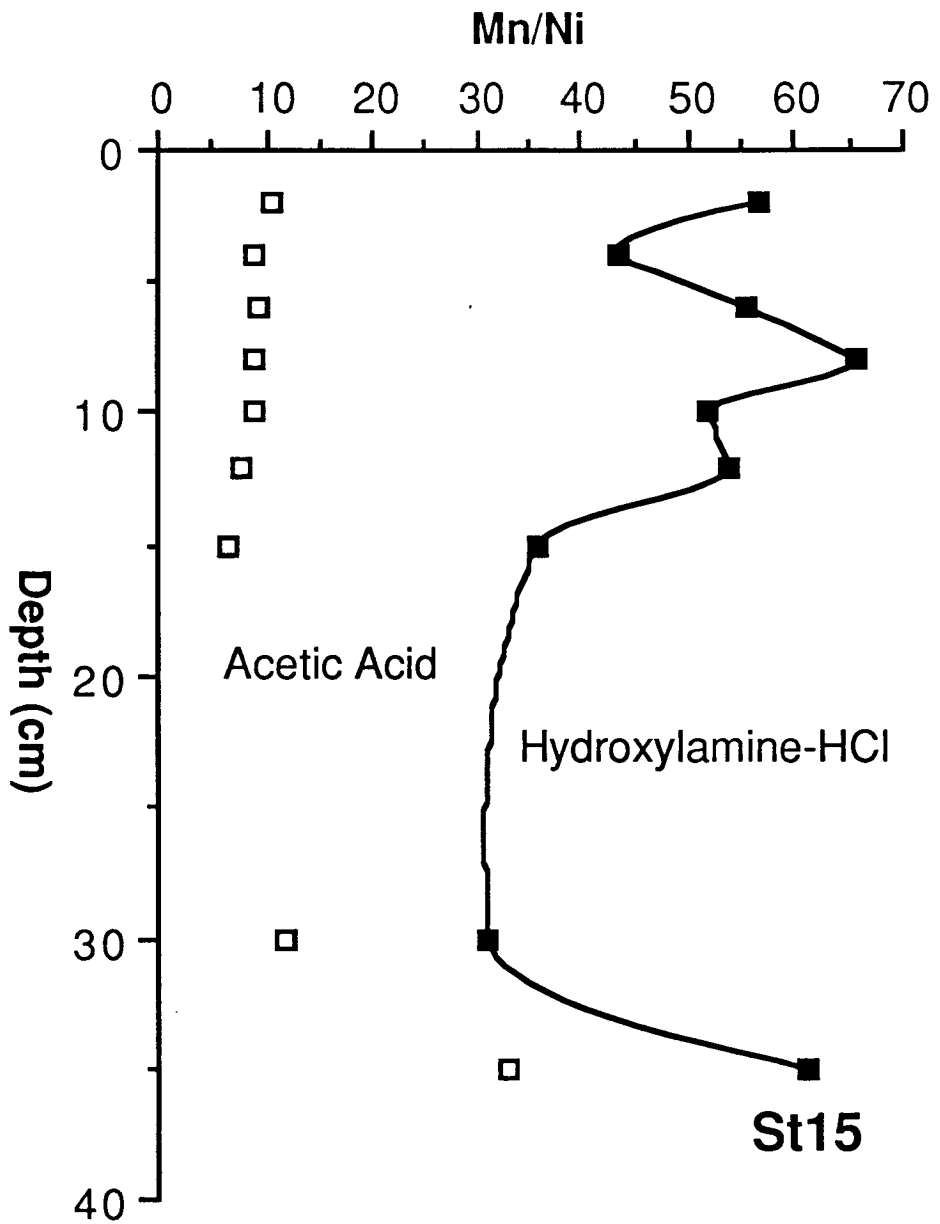


Fig. 5-29. Depth profiles of the ratios of sedimentary manganese to nickel both in the acetic acid leachant and in the hydroxylamine hydrochloric acid leachant, at St. 15.

퇴적물내 공극수에 용존된 금속원소들의 분자확산만으로는 단괴성장을 위한 충분한 공급원이 될 수 없다는 기존의 연구결과에 대한 대안으로, 퇴적표층부에서의 활발한 흡착반응이 단괴성장에 중요한 기작이 될 수 있음을 본 연구에서 제시하였다.

퇴적 표층부에 풍부한 유기물 입자체와 금속산화광물 입자체의 표면은 금속 원소들이 흡착되기에 양호한 환경을 제공하고 있으며, 퇴적 하층부 공극수에 풍부히 용존된 금속 원소들은 생물교란작용 등과 같은 이류작용에 의해 표층부로 이동되면서 흡착은 계속적으로 진행된다. 금속산화광물 표면에 금속원소들의 흡착이 계속적으로 진행되는 것은 곧 단괴의 성장을 의미한다.

## 참 고 문 헌

- Boudreau, B.P. and Scott, M.R. 1978, A model for the diffusion-controlled growth of deep-sea manganese nodules, *Am. J. Sci.*, 248:903-929.
- Callender, E. and Bowser, C.J. 1980, Manganese and copper geochemistry of interstitial fluids from manganese nodule-rich pelagic sediments of the northeastern equatorial Pacific ocean, *Am. J. Sci.* 280:1063-1096.
- Calvert, S.E. and Price, N.B. 1977, Geochemical variation in ferromanganese nodules and associated sediments from the Pacific Ocean, *Mar. Chem.*, 5:43-75.
- Fischer, K. 1984, Particle fluxes to the eastern tropical Pacific Ocean- sources and processes, Corvallis, Oregon State Univ. Ph.D. thesis, 225 pp.
- Klinkhammer, G.P. 1980, Early diagenesis in sediments from the eastern equatorial Pacific, II. Pore water metal results, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 49:81-101.
- Klinkhammer, G.P., Heggie, D.T. and Graham, D.W. 1982, Metal diagenesis in oxic marine sediments, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 61:211-219.
- Lyle, M., Dymond, J. and Heath, G.R. 1977, Copper-nickel-enriched ferromanganese nodules and associated crusts from the Bauer Basin, northwest Nazca Plate, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 35:55-64.
- Verardo, D.J., Froelich, P.N. and McIntyre, A. 1990, Determination of organic carbon and nitrogen in marine sediments using the Carlo Erba NA-1500 Analyzer, *Deep Sea Res.*, 37(1):157-165.



Table 5-1. Porewater nutrient data.

St. 51						
depth (cm)	pH	Temp (C)	NO2 (uM)	SiO2 (uM)	Ammonia (uM)	PO4 (uM)
2	8.13	14.00	1.62	337.70	-1.31	4.22
4	7.92	14.00	1.98	90.64	-3.13	3.24
6	7.87	14.60	1.17	153.00	-4.38	2.99
8	7.81	15.40	1.48	140.00	-0.68	3.16
10	7.97	14.60	1.02	77.64	3.30	3.31
12	8.17	13.80	1.24	121.16	1.28	3.30
15	7.93	13.20	0.85	566.85	9.44	6.65
20	7.94	13.50	0.68	407.76	6.18	3.46
25	7.85	13.10	0.83	87.59	-1.98	3.06
30	7.93	13.10	0.25	408.69	-4.43	2.88
35	7.99	13.10	0.23	285.69	6.61	3.02
40	7.96	14.60	0.17	179.28	-1.64	2.76
45	8.11	15.10	0.38	353.62	6.03	3.55

St. 54						
depth (cm)	pH	Temp (C)	NO2 (uM)	SiO2 (uM)	Ammonia (uM)	PO4 (uM)
2	7.94	15.50	0.96	123.81	3.11	4.13
4	7.91	16.10	1.43	107.49	6.51	3.28
6	8.36	16.00	0.47	302.54	4.21	3.81
8	7.90	15.90	0.83	307.18	6.18	4.30
10	8.35	15.40	0.44	285.69	3.15	3.55
12	8.04	16.20	0.88	107.63	153.49	3.15
15	8.22	15.70	0.33	253.71	7.57	4.22
20	8.28	16.00	0.88	272.02	13.56	5.20
25	8.28	15.90	0.25	444.64	17.07	8.52
30	8.07	15.70	0.75	626.69	7.57	5.82
35	8.34	15.90	0.27	336.11	11.79	7.65
40	7.95	15.80	0.35	424.61	17.31	8.82
45	8.25	16.40	0.20	341.42	17.64	5.45

St. 15						
depth (cm)	pH	Temp (C)	NO2 (uM)	SiO2 (uM)	Ammonia (uM)	PO4 (uM)
2	8.38	17.00	0.59	181.13	14.19	3.00
4	8.39	17.00	0.54	255.04	16.15	2.92
6	8.46	17.10	0.83	292.32	19.18	2.88
8	8.30	17.00	0.80	312.49	16.54	3.02
10	8.40	17.40	0.36	309.57	19.08	3.28
12	8.43	17.20	0.25	357.21	26.76	3.30
15	8.11	17.10	0.25	288.21	26.85	3.02
20	8.50	17.00	0.23	529.83	18.98	2.59
25	8.37	17.00	0.24	302.14	15.53	2.91
30	8.34	17.40	0.21	285.95	21.38	2.60
35	8.23	18.00	0.26	325.76	22.87	3.02

Table 5-2. Sedimentary organic carbon content data.

Depth (cm)	St. 51		St. 54		St. 15	
	tot C (%)	org C (%)	tot C (%)	org C (%)	tot C (%)	org C (%)
2	0.52	0.44	0.56	0.48	0.61	0.52
4	0.48	0.41	0.48	0.41	0.57	0.48
6	0.46	0.39	0.43	0.38	0.52	0.44
8	0.44	0.37	0.46	0.39	0.52	0.43
10	0.43	0.36	0.44	0.38	0.51	0.44
12	0.44	0.36	0.41	0.36	0.41	0.36
15	0.42	0.35	0.40	0.34	0.36	0.31
20	0.43	0.37	0.38	0.34	0.32	0.25
25	0.39	0.34	0.40	0.35	0.32	0.26
30	0.37	0.33	0.34	0.29	0.25	0.21
35	0.38	0.32	0.32	0.28	0.18	0.13
40	0.38	0.34	0.31	0.26		
45	0.33	0.29	0.29	0.25		

Table 5-3. Porewater metal data.

St. 51				
Depth (cm)	Fe (ppb)	Mn (ppb)	Ni (ppb)	Cu (ppb)
2	0.30	0.05	0.10	94.72
4	0.02	0.16	0.05	36.62
6	0.26	0.19	0.04	33.15
8		0.21		
10	0.08	0.21	0.09	45.47
12	0.03	0.22	0.02	17.79
15	0.04	0.29	0.05	54.05
20	0.12	0.27	0.05	62.11
25		0.33		
30	1.00	0.32	0.02	69.17
35	0.18	0.38	0.03	49.63
40	0.21	0.44	0.07	48.68
45	0.17	0.46	0.03	83.28

St. 54				
Depth (cm)	Fe (ppb)	Mn (ppb)	Ni (ppb)	Cu (ppb)
2	0.18	0.07	0.03	
4	0.16	0.03	0.11	55.89
6	0.22	0.13	0.05	88.73
8	0.32	0.04	0.02	31.51
10	0.26	0.05	0.06	66.39
12	0.20	0.04	0.04	19.77
15	0.27	0.10	0.04	62.95
20	0.37	0.21	0.07	43.03
25	0.28	0.07	0.07	54.81
30	0.39	0.18	0.05	37.49
35	0.47	0.04	0.02	46.28
40	0.52	0.23		32.96
45	0.40	0.09	0.05	52.34

St. 15				
Depth (cm)	Fe (ppb)	Mn (ppb)	Ni (ppb)	Cu (ppb)
2	0.57	0.14	0.06	73.05
4	0.55			
6	0.53	0.05	0.01	49.09
8	0.57	0.10	0.03	23.84
10	0.67			
12	0.59	0.16		38.78
15	0.65	0.05	0.05	40.33
20	0.69	0.06	0.04	30.77
25	0.63	0.06	0.04	51.92
30	0.74	0.08	0.03	36.66
35	0.73	0.61	0.03	49.81

Table 5-4. Sedimentary metal data.

St. 51		Mn (4 fractions)						Fe (4 fractions)					
Depth (cm)	Am.	Ac.	Ac.	H. 0	H. H	SUM	Am.	Ac.	Ac.	H. 0	H. H	SUM	
	Ac.	Ac.	Ac.	H. 0	H. H	SUM	Am.	Ac.	Ac.	H. 0	H. H	SUM	
2	0.77	147.00	76.00	3384.40	3608.17	35.70	68.34	8.56	3204.40	3317.00			
4	1.01	123.00	62.00	2720.40	2906.41	29.04	25.89	12.95	2877.60	2945.48			
6	0.94	147.00	53.00	2056.80	2257.74	27.36	69.81	3.45	3006.00	3106.62			
8	1.12	105.00	35.00	1755.20	1896.32	23.10	67.86	1.64	3103.60	3196.20			
10	0.90	72.00	31.00	1534.00	1637.90	42.42	27.18	7.03	2912.80	2989.43			
12	1.05	66.00	22.00	0.00	89.05	18.54	29.43	0.00	0.00	47.97			
15	0.84	54.00	26.00	831.60	912.44	29.08	44.25	12.31	2818.00	2903.64			
20	1.04	39.00	9.10	623.60	672.74	27.66	20.37	10.29	2862.80	2921.12			
25	1.04	48.00	11.80	815.60	876.44	13.50	42.54	12.78	3428.00	3496.82			
30	1.23	21.00	0.30	538.00	560.53	52.36	40.41	8.37	2984.00	3085.14			
35	1.18	21.00	0.40	557.60	580.18	16.82	38.28	1.36	3036.00	3092.46			
40	1.21	18.00	0.00	480.00	499.21	12.06	30.15	4.45	2956.00	3002.66			
45	1.35	18.00	0.00	521.60	540.95	31.92	22.35	14.70	3368.00	3436.97			

St. 51		Ni (4 fractions)						Cu (4 fractions)					
Depth (cm)	Am.	Ac.	Ac.	H. 0	H. H	SUM	Am.	Ac.	Ac.	H. 0	H. H	SUM	
	Ac.	Ac.	Ac.	H. 0	H. H	SUM	Am.	Ac.	Ac.	H. 0	H. H	SUM	
2	1.48	11.25	3.79	68.96	85.48	2.48	25.92	7.14	146.76	182.30			
4	0.10	9.24	3.21	64.20	76.75	2.50	25.65	5.25	135.04	168.44			
6	0.50	11.76	2.93	60.60	75.79	2.90	29.85	3.95	127.76	164.46			
8	0.72	8.85	1.95	53.84	65.36	3.52	21.48	2.46	119.64	147.10			
10	0.34	6.57	1.47	45.48	53.86	2.54	15.81	1.47	113.12	132.94			
12	0.96	4.89	1.99	37.12	43.79	7.84	14.64	1.18	18.58				
15	0.18	4.98	1.51	31.16	34.59	2.58	13.77	0.99	106.20	123.54			
20	2.19	4.35	1.06	40.64	46.45	3.00	13.20	102.00	122.16	240.36			
25	0.40	2.34	0.48	26.12	29.54	2.80	8.70	0.53	107.08	119.11			
30	0.60	1.53	0.55	26.76	29.04	3.00	9.30	0.54	110.84	123.68			
35	0.20	1.02	0.50	25.40	27.52	3.00	8.10	0.55	111.00	122.65			
40	0.60	1.10	26.48	27.58	2.80	8.10	0.90	116.72	128.52				

Table 5-4. Continued.

St. 54		Mn (4 fractions)						Fe (4 fractions)										
Depth (cm)	Am. Ac	Ac. ac	H. O	H. H	SUM		Am. Ac	Ac. ac	H. O	H. H	SUM		Am. Ac	Ac. ac	H. O	H. H	SUM	
	2	0.81	153.00	127.10	4490.40	4771.31		9.38	49.92	6.54	3064.00	3129.84		7.84	41.79	1.03	2916.00	2966.66
4	0.52	138.00	70.70	2720.40	2929.62		5.30	37.56	8.22	2940.00	2991.08		8.32	19.08	6.16	2872.00	2905.56	
6	0.85	96.00	76.80	1794.80	1968.45		9.26	10.89	5.63	3084.00	3109.78		9.38	31.77	10.19	2784.00	2835.34	
8	0.67	96.00	37.90	1723.60	1858.17		2.90	34.05	19.15	2408.00	2464.10		6.64	26.76	9.12	2460.00	2502.52	
10	0.66	90.00	62.90	1628.80	1782.36		17.04	17.04	12.88	2660.00	2689.92		17.85	17.85	8.35	2460.00	2486.20	
12	1.03	60.00	27.80	878.80	967.63		9.62	31.53	8.35	2588.00	2629.15		46.11	46.11	22.52	2520.00	2588.63	
15	1.09	51.00	13.70	698.40	764.19													
20	1.13	39.00	5.60	517.20	562.93													
25	0.76	27.00		283.20	310.96													
30	1.07	12.00		100.40	113.47													
35	0.98	9.00		81.20	91.18													
40	0.91	6.00		94.00	100.91													
45	0.93	6.00		120.00	126.93													

		Ni (4 fractions)						Cu (4 fractions)										
Depth (cm)	Am. Ac	Ac. ac	H. O	H. H	SUM		Am. Ac	Ac. ac	H. O	H. H	SUM		Am. Ac	Ac. ac	H. O	H. H	SUM	
	2	0.40	12.57	5.10	73.52	91.59		2.80	28.20	9.66	156.88	197.54		2.60	27.00	6.37	138.20	174.17
4	0.40	11.76	3.75	62.56	78.47		2.40	21.90	3.38	133.56	161.24		2.80	20.70	2.69	124.52	150.71	
6	0.60	11.85	3.10	55.24	70.79		2.18	19.77	2.10	125.04	149.09		2.96	14.64	1.10	111.44	130.14	
8		8.91	2.85	49.88	61.64		2.94	11.61	0.80	107.32	122.67		2.72	9.78	0.60	99.16	112.26	
10	0.70	8.25	2.71	46.16	57.82		2.10	7.05	0.50	81.00	90.65		2.10	7.05	0.50	81.00	90.65	
12	0.78	7.77	2.22	38.20	48.97		2.10	5.25	0.30	91.28	98.93		2.08	4.62	0.30	95.52	102.52	
15	0.08	7.02	1.73	30.84	39.67		2.06	4.89		100.60	107.55		2.04	4.86	1.60	110.84	119.34	
20	0.36	4.74	1.74	24.64	31.48													
25		2.19	1.25	23.28	26.72													
30		2.01	0.75	20.68	23.44													
35		3.66	0.86	22.92	27.44													
40		1.68		28.32	30.00													
45		2.13		26.16	28.29													

Table 5-4. Continued.

St. 15		Mn (4 fractions)					Fe (4 fractions)				
Depth (cm)	Am. Ac	Ac. ac	H. O	H. H	SUM	Am. Ac	Ac. ac	H. O	H. H	SUM	
2	0.65	174.30	107.40	5154.40	5436.75	50.22	0.77	3516.00	3566.99		
4	0.65	168.60	119.60	4158.80	4447.65	10.40	19.26	3252.00	3281.66		
6	0.48	144.90	126.90	5043.60	5315.88	5.20	8.85	0.60	3228.00	3242.65	
8	0.35	148.20	116.20	5264.80	5529.55	4.40	27.81	1.10	3280.00	3308.91	
10	0.74	145.50	103.50	4158.80	4408.54	0.80	5.97	0.10	3012.00	3022.47	
12	0.68	94.50	51.00	4048.00	4194.18	0.80	46.86	5.70	3064.00	3116.56	
15	0.73	46.80	43.00	1526.40	1616.93	0.80	30.42	4.10	2904.00	2939.32	
20	1.07				1.07	16.20				16.20	
25	1.60				1.60	13.60				13.60	
30	2.18	11.10	6.00	1194.80	1214.08	18.20	61.08	6.00	2900.00	2985.28	
35	2.07	35.40	185.40	3937.20	4160.07	20.00	2.94	3.60	3092.00	3118.54	
		Ni (4 fractions)					Cu (4 fractions)				
Depth (cm)	Am. Ac	Ac. ac	H. O	H. H	SUM	Am. Ac	Ac. ac	H. O	H. H	SUM	
2	16.35	5.48	91.16	112.99	2.24	32.13	8.10	164.28	206.75		
4	18.42	6.59	95.80	120.81	1.80	33.90	8.20	171.76	215.66		
6	15.24	7.48	90.80	113.52	1.60	30.60	9.00	171.20	212.40		
8	16.29	6.15	80.40	102.84	1.60	30.00	8.10	157.20	196.90		
10	16.11	6.23	80.40	102.74	1.60	30.30	7.60	150.40	189.90		
12	12.06	3.20	75.20	90.46	1.60	25.20	4.00	140.00	170.80		
15	7.41	2.18	42.80	52.39	2.20	12.90	1.00	112.40	128.50		
20				0.00	2.40					2.40	
25				0.00	2.20					2.20	
30	0.93	1.75	38.40	41.08	2.40	5.40	0.50	115.60	123.90		
35	1.08	5.86	64.40	71.34	3.40	10.50	1.60	150.40	165.90		

## 제 6 장

### 퇴적물의 퇴적율과 입자혼합율

연구 책임자 : 김 기 현

(충남대학교)





## 제 1 절 서 론

해수에 녹아 있는 미량금속이나 토륨의 동위원소( $^{230}\text{Th}$  과  $^{232}\text{Th}$ )들은 흡착성이 강하므로 해수중 쇄설기원 및 생물기원 입자의 표면에 흡착되어 입자의 침강에 따라 퇴적층으로 제거된다. 이런 현상을 포괄적으로 스카벤징이라 한다. 대륙지각에 다량 함유된  $^{232}\text{Th}$ 은 암석풍화에 따라 쇄설성 입자와 함께 해양에 유입되어 퇴적층에 축적된다. 그러나 해수중에 용존대로 존재하는  $^{234}\text{U}$ 의 방사능붕괴로 끊임없이 생성되는  $^{230}\text{Th}$ 은 스카벤징의 결과로 해수로부터 제거되고 퇴적물에 과잉  $^{230}\text{Th}$ 으로 존재하여 퇴적물추정에 이용된다.

해수중  $^{210}\text{Pb}$ 은 용존 $^{226}\text{Ra}$ 의 방사붕괴로 생성되며 또 대기중  $^{222}\text{Rn}$ 의 붕괴로 생성되어 해수면으로 유입된다. 이  $^{210}\text{Pb}$ 도 해수중에서 스카벤징되어 해저퇴적물로 제거되어 과잉 $^{210}\text{Pb}$ 로 존재한다.  $^{210}\text{Pb}$ 은 반감기( $t_{1/2}=22.3\text{년}$ )가 짧기 때문에 생물교란속도를 결정할 때 효과적인 방사성 추적자로 이용된다(DeMaster and Cochran, 1982; Kim and Burnett, 1988).

퇴적물표층에 서식하는 저서생물들의 활동은 퇴적물을 교란시킨다. 퇴적층에서 생물의 활동은 표층으로부터 깊어짐에 따라 감소하는 것으로 알려져 있다. 물론 생물의 활동이 일정한 속도를 가지지도 않으며 골고루 퇴적물에 영향을 나타내는 것은 아니다. 그러나 오랜 시간동안의 활동은 확률적으로 퇴적물의 혼합에 균일하게 영향을 줄 것이다.

표층퇴적물에서 관심의 대상중 하나는 퇴적속도의 결정과 생물교란속도의 결정이다. 퇴적속도와 생물교란속도를 결정하기 위하여 추적자로서 방사성 동위원소를 이용하는데 깊이에 따른 방사능의 분포는 퇴적속도뿐만 아니라 생물교란 행위에 의한 영향을 받는다. 생물교란을 생각하지 않을 경우 과추산된 퇴적속도를 얻게된다. 퇴적속도와 생물교란속도를 추정하기 위하여 1-상자 모델(Goldberg and Koide, 1962; Nittrour et al., 1983/1984), 2-상자 모델 (Kim and Burnett, 1988)과 다상자 모델 (Guinasso and Schink, 1975; Peng et al., 1979)등 많은 모

형이 제안되었다. 그러나 생물에 의한 교란활동이 불규칙적으로 일어나며 내부 파와 해류등 물리적 현상이 퇴적층을 불규칙적으로 혼합시키기 때문에 이를 모식화하는 것은 매우 어려우며 실제 연구에 적용시키는데에도 많은 주의를 요한다.

본 연구의 목적은 KODOS지역내의 퇴적환경을 이해하기 위하여 퇴적속도를 추정하고 심해저 저서 생태계의 활성도를 파악하기 위하여 생물군에 의한 퇴적율과 입자교란율을 추정하는 것이다. 이런 연구결과는 이지역의 퇴적환경을 파악하는데 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

## 제 2 절 실험 및 방법

본 연구에 사용된 주상시료는 퇴적물표층이 교란되지 않도록 "상자형" 주상채니기를 사용하여 채취되었다. 채니기가 갑판으로 올라온 후 지름 8cm의 투명한 아크릴 파이프를 퇴적층에 조심스럽게 집어넣어 부시료를 채취하였다. 채취된 부시료는 냉장보관하여 실험실로 운반했다. 1 cm 간격으로 절단된 퇴적물은 건조기에서 60도로 수일간 건조시킨 후에 막자사발을 이용하여 분말화 시켰다.

### 1. 비파괴 감마선 계측

분말화된 시료는 무게를 측정하고 플라스틱 계측병에 넣어 완전밀봉하여  $^{226}\text{Ra}$ 과  $^{222}\text{Rn}$ 이 평형을 이루도록 4주동안 보관하여 "숙성(aging)" 시켰다 (Kim and Burnett, 1983). 평형이 이루어진 시료는 MCA을 장착한 우물형 겔마늄 검색기로  $^{210}\text{Pb}$ 의 방사능량은 46.5 keV의 감마선을 이용하였고  $^{226}\text{Ra}$ 의 방사능량은 295.2 keV, 351.9 keV에서  $^{214}\text{Pb}$ 의 감마선과 609.3 keV의  $^{214}\text{Bi}$  감마선을 이용하여 계측하였다. 과잉  $^{210}\text{Pb}$ 의 방사능량은 총  $^{210}\text{Pb}$ 의 방사능량으로부터  $^{226}\text{Ra}$ 의 방사능량을 빼준 값을 의미한다.

## 2. 동위원소 회석 알파분석법

퇴적물의 우라늄과 토륨 동위원소 분석법은 Anderson and Fleer (1982)과 Huh (1982) 방법을 수정하여 사용하였다. 본 연구에서 사용한 U과 Th 동위원소들의 분석방법을 보여주는 개략적인 흐름도이다 (Fig. 6-1). 건조된 퇴적물 시료 약 0.5g을 칭량하고 전기로에서 550°C로 12시간 동안 유기물을 산화시켰다. 태운 시료는 무게를 잰후 테프론 비이커로 옮기고  $^{232}\text{U}/^{228}\text{Th}$  Yield Tracer (11.66 dpm/ml) 1 ml을 가하고 HCl, HNO<sub>3</sub>, HClO<sub>4</sub>을 가하여 시료를 용해하고, Filter paper (Pore size: 0.45  $\mu\text{m}$ )을 이용하여 잔존물과 거른액을 분리한다. 우라늄과 토륨은 Dowex AG1-X8 이온 교환 수지를 이용하여 음이온 교환법으로 다른 원소들로부터 분리시킨다. 우라늄과 토륨을 정제하기 위하여 2가지 유형의 이온교환 수지 (Chloride 형과 nitrate 형) 가 사용되었다. 정제된 우라늄과 토륨은 각각 9V에서 90분동안 스테인레스 원판에 전기전착시켰다. 우라늄과 토륨 동위원소들에 대한 계측은 SSB (Silicon Surface Barrier) 검색기를 장착한 알파선 측정기로 측정하였다.

## 3. 입자혼합을 추정을 위한 수리적 모델 : "1-상자" model 과 2-상자"model

저서생물들은 구멍을 파고 살거나, 퇴적층내의 유기물을 먹고 산다. 이런 활동은 퇴적물을 재배치시키는 역할을 한다. 방사능의 수직분포에 생물활동의 영향이 나타나는데 생물활동의 정도에 따라 그 기울기가 다르게 나타난다. 1차원 모형은 퇴적층 내에서 퇴적물입자의 확산은 3차원적으로 발생하나 수직적으로 확산하는 것만 고려한 모형이다. 이 모형은 수평적 변동보다 수직적 변동에 관심이 많기 때문에 대부분의 연구자에 의해 적용되어진다.

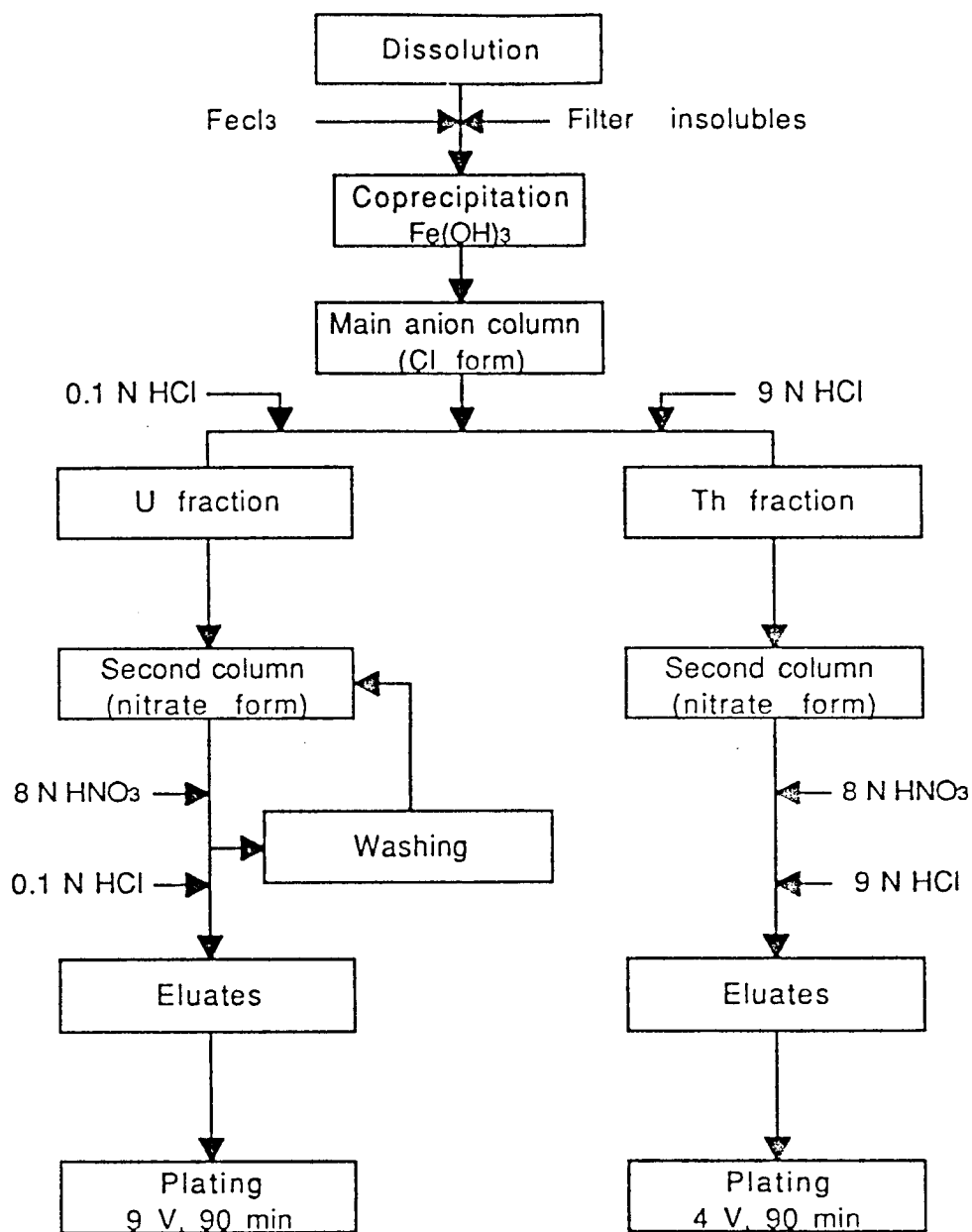


Fig. 6-1. Separation scheme of uranium and thorium in sediment samples (Anderson and Fleer, 1982).

Nirrouer et al. (1983/84)은 생물에 의한 혼합, 퇴적작용, 방사성 동위원소의 붕괴와 방사능의 수직분포가 정상상태를 유지한다고 가정하고 수직이류-와확산 모형을 이용하여 방사능의 수직분포를 나타내었다.

가. "1 상자" 모델

Goldberg와 Koide (1962)의 1-상자 모델은 해수-퇴적층 경계에서 일정한 깊이까지 생물교란이 일어나고 그 이하에서는 생물교란이 없다고 가정한 모델이다. 수직이류-와확산모형은 입자의 이동이 이류와 확산에 의해 이루어진다고 보는 모형이다. 여기서 확산은 퇴적물 입자가 스스로 이동할 수 없기 때문에 생물에 의한 혼합 (Bioturbation)을 의미하며 이류는 입자가 퇴적됨에 의하여 해수퇴적층 경계에서 퇴적층 하부로 좌표계가 이동하는 것을 나타낸다. 입자가 이동할 때 시간에 따라 붕괴하는 현상을 고려하여 수직적 방사능 분포를 나타내면,

$$\frac{dC}{dt} = D_B \left( \partial^2 \frac{C}{\partial z^2} \right) - S \left( \partial \frac{C}{\partial z} \right) - \lambda C \quad (1)$$

여기서, C=방사성 원소의 과잉농도(dpm/g) ,  $D_B$ =혼합계수 (mixing coefficient;  $cm^2/y$ ), S=퇴적율(Sedimentation rate;  $cm/y$ ), Z=퇴적물 깊이(cm),  $\lambda$ =방사성 원소의 붕괴상수( $y^{-1}$ )를 나타낸다. 정상상태 (Steady state)에서 일반해는

$$C = P e^{Az} + Q e^{Bz} \quad (2)$$

여기서,  $A = \left( S + \frac{\sqrt{S^2 + 4D_B \lambda}}{2D_B} \right)$ ,  $B = \left( S - \frac{\sqrt{S^2 + 4D_B \lambda}}{2D_B} \right)$  이며 P와 Q는 상수

를 나타낸다.

이때의 경계조건 (Boundary condition)은 다음과 같다.

1) 초기값 :  $Z = 0, C = C_0$

2) 무한깊이에서의 방사성 핵종의 수렴값 :  $Z \rightarrow \infty, C \rightarrow 0$  경계조건으로부터 식(2)을 풀면 식(1)에 대한 특수해를 얻고 이를 퇴적속도(S)에 대하여 풀면 식(3)을 얻는다.

$$S = \frac{D_B}{A} \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) - \frac{\lambda z}{\ln C/C_0} \quad (3)$$

식(3)에서  $m$  은 기울기(m)를 나타내므로,식(3)은

$$S = mD_B - \frac{\lambda}{m} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 식(4)을 입자교란 계수( $D_B$ ) 로 정리하면 식(5)와 같다.

$$D_B = \frac{1}{m} \left( S + \frac{\lambda}{m} \right) \quad (5)$$

#### 나. "2 상자"모델

생물교란 작용이 깊은 퇴적물까지 나타나는 경우, 교란작용을 연구하는데 "2 상자" 모델이 적당하다. 2상자 모형은 위층은 심한 생물교란이 일어나고 아래층은 위층보다 작은 생물교란이 일어난다고 가정한 모형이다. 따라서 퇴적물 주상시료에서 과잉  $^{210}\text{Pb}$ 의 수직농도 분포는 회귀직선 기울기가 다른 2개의 층으로 구분된다. 표층에서 회귀직선 기울기의 변화가 일어나는 퇴적층까지를 표면 교란층(Surface mixed layer:SML)라 하고 이 층에서는 생물교란작용이 활발하여 과잉  $^{210}\text{Pb}$ 의 수직농도가 깊이에 따라 일정하게 나타난다. 첫번째 상자에서 과잉  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도를 지배하는 방정식은

$$\frac{dC_1}{dt} = D_1 \left( \partial^2 \frac{C_1}{\partial z^2} \right) - S \left( \partial \frac{C_1}{\partial z} \right) - \lambda C_1 \quad (1)$$

이고, 두번째 상자에서는

$$\frac{dC_2}{dt} = D_2 \left( \partial^2 \frac{C_2}{\partial z^2} \right) - S \left( \partial \frac{C_2}{\partial z} \right) - \lambda C_2 \quad (2)$$

이다. 여기서 밑첨자 1과 2는 첫번째 상자와 두번째 상자를 나타낸다. 식 (1)과 (2)의 일반해는

$$C = P_i e^{A_i z} + Q_i e^{B_i z} \quad (3)$$

여기서,  $A_i = (S + \sqrt{S^2 + 4D_i \lambda}) / 2D_i$ ,  $B_i = (S - \sqrt{S^2 + 4D_i \lambda}) / 2D_i$  을 나타내며

밑첨자 (i=1 또는 2)는 첫번째 상자와 두번째 상자를 나타낸다. 경계조건은 다음과 같다.

1) 초기 농도값 :  $Z = 0, C_1 = C_0$

2) 농도 연속성 :  $Z = L, C_1 = C_2$

3) Flux 연속성 :  $Z=L, -D_1 \left( \partial^2 \frac{C_1}{\partial z^2} \right) = -D_2 \left( \partial^2 \frac{C_2}{\partial z^2} \right)$

4)무한깊이에서의 방사성 핵종의 수렴값 :  $Z \rightarrow \infty \quad C \rightarrow 0$  여기서  $L$ =첫번째 상자와 두번째 상자의 경계면을 의미한다. 위의 경계조건을 이용하여, 우리는 식 (1)과 (2)에 대한 특수해를 Kim and Burnett (1988)의 방법에 따라 얻었다. "겉보기" 퇴적율( $S_{app}$ )와 "실질" 퇴적율( $S_{real}$ ) 그리고  $D_2$ 의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$-\left( \frac{\lambda}{S_{app}} \right) = S - \sqrt{S^2 + 4D_2 \lambda} / 2D_2$$

위 식 (3)을  $D_2$ 에 대하여 풀면, 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$D_2 = (S_{app}(S_{app} - S))/\lambda \quad (4)$$

$D_2$ 가 얻어지고 난 후, 주상시료에서 과잉 $^{210}\text{Pb}$ 의 수직농도분포에 대하여 회귀 직선을 구하고 Sum of the Squared deviation (SS)이 최소가 될 때까지  $C_0$ 와  $D_1$ 을 조금씩 변화시키면서 그 값을 구한다.

### 제 3 절 결과 및 고찰

#### 1. 퇴적속도

해수중 우라늄의 붕괴로 생성된  $^{230}\text{Th}$ 은 해저퇴적물로 급속히 스카벤징되어 제거되고 퇴적물에서 과잉 $^{230}\text{Th}$ 으로 존재한다. 퇴적물에서  $^{230}\text{Th}_{ex}$  방사능량과  $^{230}\text{Th}_{ex}/^{232}\text{Th}$ 비는  $^{230}\text{Th}$ 의 반감기( $t_{1/2} = 75,200$ 년)에 따라 퇴적물 깊이에 따라 지수함수적으로 감소한다. 과잉  $^{230}\text{Th}_{ex}$ 을 얻기 위해서는 총  $^{230}\text{Th}$ 방사능량으로부터  $^{234}\text{U}$ 으로부터 공급되는  $^{230}\text{Th}$ 을 빼준다 ( $^{230}\text{Th}_{ex} = \text{총}^{230}\text{Th} - ^{234}\text{U}$ ). 주상시료의  $^{230}\text{Th}_{ex}$ 방사능량과  $^{230}\text{Th}_{ex}/^{232}\text{Th}$ 비의 지수함수적인 감소는 퇴적속도를 추정하는데 사용된다. 퇴적속도는 다음식에 의해  $^{230}\text{Th}_{ex}$  방사능량의 수직농도분포에 대해 최소자승법에 의한 회귀직선의 기울기로부터 추정된다.

$$(^{230}\text{Th}_{ex})_z = (^{230}\text{Th}_{ex})_{z=0} * e^{(-\lambda/s)z}$$

$$S = -\frac{\lambda}{a}$$

여기서  $S$ =퇴적속도(mm/ky),  $a = ^{230}\text{Th}_{ex}$  방사능량과  $^{230}\text{Th}_{ex}/^{232}\text{Th}$ 비의 기울기,  $\lambda_{230}$ =  $^{230}\text{Th}$ 의 붕괴상수( $9.22 \times 10^{-6} \text{ y}^{-1}$ ),  $Z$ =퇴적물의 깊이(cm)를 나타낸다. 유사하게,  $^{230}\text{Th}_{ex}/^{232}\text{Th}$ 비의 기울기로부터 같은 방법으로 퇴적속도를 추정할 수 있다.



$$\left( \frac{^{230}\text{Th}_{\text{ex}}}{^{232}\text{Th}} \right)_z = \left( \frac{^{230}\text{Th}_{\text{ex}}}{^{232}\text{Th}} \right)_{z=0} * e^{(-\lambda/s)z}$$

표면퇴적물에서 활발한 입자교란작용으로 인하여  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 와  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$  비는 수직적으로 일정한 농도분포를 보이고 있다. 이런 입자교란작용은 퇴적속도에 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 생물교란작용이 적은 표면교란층 이하의  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 와  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 비에 대하여 퇴적속도를 구하고 이를 "실질"퇴적속도라 하였다.

#### 가. Core 94-1-79

주상시료 94-1-79에서의  $^{230}\text{Th}$ 와  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 비는 전체적으로 지수함수적 감소하는 분포를 보여준다 (Table 6-1). 그러나 퇴적물 표층 약 20cm까지는  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 와  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 비가 수직적으로 일정한 표면혼합층(SML)이 나타난다 (Fig. 6-2). 이 표면혼합층은 저서생물의 활동에 의해서 퇴적물이 심하게 교란되었다는 것을 의미한다. 생물교란 작용은 단시간내에 일어나는 과정이기 때문에 표면혼합층내에서 반감기가 긴  $^{230}\text{Th}$ 의 방사능 붕괴의 효과는 나타나지 않고 수직적으로 일정한 농도분포를 보이는 것으로 사료된다.

20cm 이하의 퇴적물에서  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 와  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 비는 지수함수적으로 감소하는 경향을 보인다. 표면퇴적층에서는 퇴적물의 교란작용이 활발한 반면, 그 이하의 퇴적물에서는 교란작용이 미약하거나 존재하지 않기 때문에  $^{230}\text{Th}$ 이 방사능 붕괴에 의한 감소효과가 나타나 지수함수적으로 감소한다. 따라서 "실질"퇴적속도는 표면혼합층 이하의  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 와  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 의 수직분포에 대하여 회귀직선으로 구한 기울기로부터 구했다.  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 의 수직분포로부터 구한 주상시료 94-1-79의 퇴적율은  $0.32 \pm 0.07$  mm/ky 이었고,  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 의 수직분포로부터 추정된 퇴적율은  $0.38 \pm 0.07$  mm/ky 이었다. 두가지 연대측정 방법으로 추정된 퇴적속도는 오차범위내에서 일치하였다. 이런 퇴적율은 KODOS 90-36 주상시료의 퇴적율( $0.28$  mm/ky; table 6-10)과 유사한 값을 보여준다 (Moon and Kim, 1995).

Table 6-1. Results of radiochemical determination of U and Th nuclides in sediment sample 94-1-79. Ratios are activity ratios and errors quoted are  $1\sigma$  errors based on counting statistics.

94-1-79

Depth (cm)	$^{238}\text{U}$ (dpm/g)	$^{232}\text{Th}$ (dpm/g)	$^{230}\text{Th}$ (dpm/g)	$^{230}\text{Th}$ (dpm/g)
1 - 2	$0.77 \pm 0.13$	$4.26 \pm 0.24$	$110 \pm 3.11$	$107 \pm$
5 - 6	$0.55 \pm 0.10$	$8.72 \pm 0.43$	$136 \pm 4.48$	$134 \pm$
9 - 10	$0.75 \pm 0.08$	$2.49 \pm 0.18$	$105 \pm 2.82$	$103 \pm$
15 - 16	$0.75 \pm 0.10$	$5.81 \pm 0.50$	$57.2 \pm 3.07$	$55.6 \pm$
19 - 20	$0.69 \pm 0.06$	$2.58 \pm 0.19$	$55.8 \pm 1.76$	$54.5 \pm$
24 - 25	$0.79 \pm 0.12$	$6.58 \pm 0.31$	$24.5 \pm 0.86$	$21.8 \pm$
29 - 30	$1.08 \pm 0.15$	$2.09 \pm 0.14$	$10.3 \pm 0.37$	$9.38 \pm$
34 - 35	$1.54 \pm 0.14$	$1.78 \pm 0.10$	$2.90 \pm 0.13$	$0.59 \pm$

Table 6-2. Results of radiochemical determination of U and Th nuclides in sediment sample 94-2-15. Ratios are activity ratios and errors quoted are  $1\sigma$  errors based on counting statistics.

94-2-15

Depth (cm)	$^{238}\text{U}$ (dpm/g)	$^{232}\text{Th}$ (dpm/g)	$^{230}\text{Th}$ (dpm/g)	$^{230}\text{Th}$ (dpm/g)
1 - 2	$1.13 \pm 0.20$	$3.68 \pm 0.26$	$141 \pm 4.44$	$140 \pm$
3 - 4	$1.51 \pm 0.17$	$3.53 \pm 0.21$	$148 \pm 3.81$	$143 \pm$
9 - 10	$0.81 \pm 0.09$	$5.51 \pm 0.30$	$137 \pm 4.09$	$136 \pm$
15 - 16	$0.91 \pm 0.09$	$2.98 \pm 0.16$	$91.9 \pm 2.18$	$89.9 \pm$
19 - 20	$0.95 \pm 0.16$	$3.81 \pm 0.20$	$73.0 \pm 1.85$	$70.9 \pm$
24 - 25	$1.29 \pm 0.13$	$2.51 \pm 0.18$	$18.0 \pm 0.66$	$16.1 \pm$
29 - 30	$1.90 \pm 0.14$	$1.66 \pm 0.15$	$3.42 \pm 0.22$	$0.99 \pm$

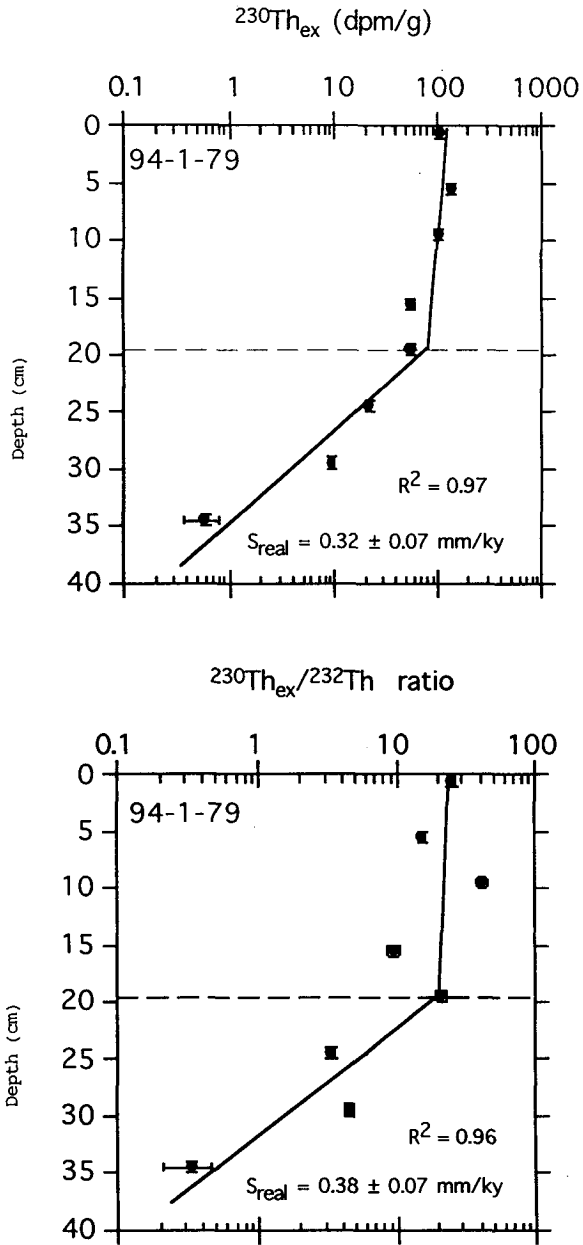


Fig. 6-2. Plots of  $^{230}\text{Th}_{\text{xs}}$  activity and  $^{230}\text{Th}_{\text{xs}}/^{232}\text{Th}$  activity ratio as a function of depth at 94-1-79 core.  $S_{\text{real}}$ =real sedimentation rate calculated from data points below the first mixed layer (20 cm).

## 나. Core 94-2-15

주상시료 94-2-15에서의  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$  와  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 의 수직분포는 (Table 6-2) 표층 약 20cm까지는 농도가 거의 일정한 분포를 보여주고 있고, 그이하의 깊이에서는 지수함수적인 농도의 감소를 보여준다 (Fig. 6-3). 주상시료 94-1-79와 같이 표층퇴적물에서  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$  와  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 의 수직분포가 일정한 것은 퇴적물의 교란이 활발히 일어나고 있음을 추정할 수 있다. 따라서 주상시료 94-2-15에서의 표면혼합층(SML)은 약 20cm이고 이 깊이를 경계로 위층과 아래층의  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$  와  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 의 수직농도 기울기의 변화가 관찰된다. 표면혼합층 이하의  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$  와  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 의 수직분포로부터 추정된 퇴적속도는 각각  $0.22 \pm 0.08$  mm/ky 과  $0.27 \pm 0.07$  mm/ky 이었다. 두가지 연대측정법을 이용하여 추정된 퇴적속도는 오차범위내에서 일치하였다.

## 2. 입자교란 속도

심해퇴적물에서 표면교란층의 깊이는 입자교란에 관한 이전의 연구에서 표층 퇴적물 약 10cm이하에서 관측되었다 (Goldberg and Koide, 1962; DeMaster and Cochran, 1982; Aller and DeMaster, 1984; Cochran, 1985). 본 연구에서 사용된 주상시료의  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$  와  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$  분포에서는 표면교란층이 약 20cm에서 관측되었다. 입자교란의 증거는 과잉  $^{210}\text{Pb}$ 의 수직분포에서 나타난다.  $^{210}\text{Pb}$ 의 반감기 ( $t_{1/2}=22.3$  년)는  $^{230}\text{Th}$ 의 반감기( $t_{1/2}=75,200$ )보다 짧기 때문에, 천년당 1mm이하의 퇴적속도를 가지는 심해퇴적물에서는 과잉 $^{210}\text{Pb}$ 이 퇴적물 표층 수mm이내에 한정되어 있어야 한다. 그러나 본 연구에서 사용한 주상시료에서는 30cm 이하에서도 과잉 $^{210}\text{Pb}$ 이 존재하는 것은 연구지역의 표층퇴적물에서 저서생물에 의한 교란작용이 활발히 진행되고 있음을 나타낸다. 반감기가 긴 방사성 핵종( $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ )은

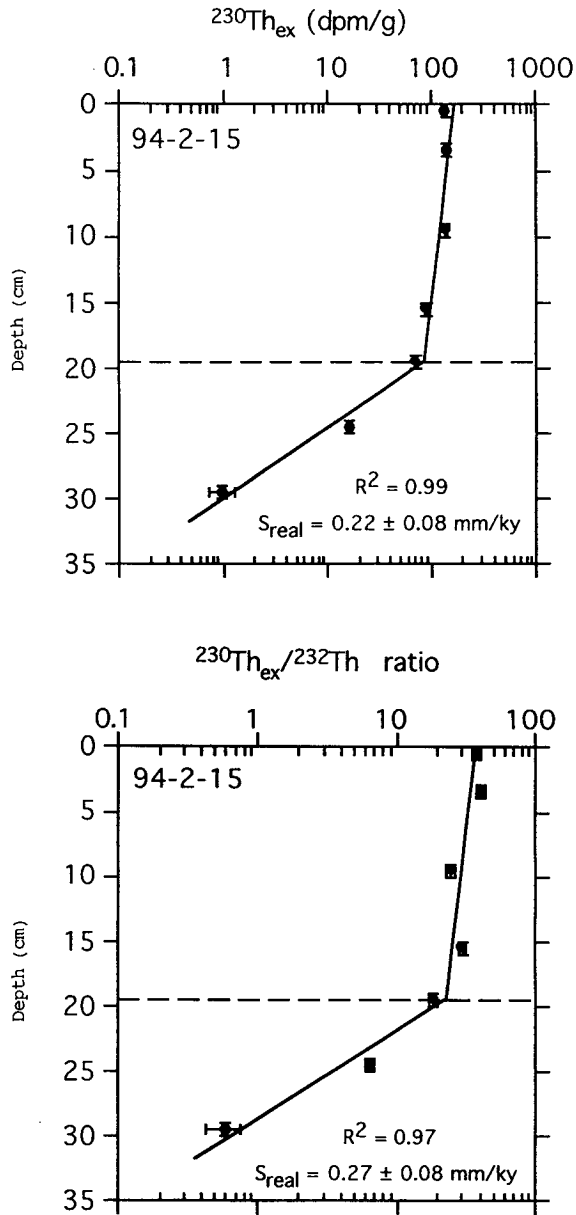


Fig. 6-3. Plots of  $^{230}\text{Th}_{\text{xs}}$  activity and  $^{230}\text{Th}_{\text{xs}}/^{232}\text{Th}$  activity ratio as a function of depth at 94-2-15 core.  $^{230}\text{Th}_{\text{xs}} = ^{230}\text{Th}_{\text{total}} - ^{234}\text{U}$ .  $S_{\text{real}}$  = real sedimentation rate calculated from data points below the first mixed layer (20 cm),  $R^2$  = goodness-of fit. Error bars refer to  $1-\sigma$  counting statistics (horizontal) and depth intervals (vertical).

짧은 시간동안에 일어나는 퇴적물 혼합과정 중에는 방사능 붕괴에 의한 농도 감소가 나타나지 않기 때문에 안정된 추적자처럼 행동한다. 따라서 퇴적물 혼합이 활발히 일어나는 표층퇴적물에서의  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 의 방사능량은 수직적으로 일정한 분포를 보인다. 반감기가 긴 방사성 핵종의 이런 성질을 이용해서 퇴적물의 표면교란층을 결정한다 (Cochran, 1982).

#### 가. Core 94-1-79

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 수직농도 분포는 주상시료에서 전체적으로 지수함수적 감소를 보여주고 있다 (Table 6-3). 또한 과잉  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량은 주상시료에서 40cm 깊이까지 존재하였다 (Fig. 6-4). 원양성 퇴적물에서 과잉  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량은 보통 표층 수 cm이내에 국한되어 있는 것에 비해 깊은 퇴적물에서  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량이 존재한다는 사실은 94-1-79 주상시료에서 활발한 퇴적물 교란작용이 존재한다는 사실을 의미한다. 또한 표층퇴적물에서 과잉  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량이 비이상적으로 높은 값을 보여주고 있는데 (Fig. 6-4) 이는  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 으로부터 붕괴되어 생성된  $^{226}\text{Ra}$ 이 퇴적물에서 해수로 확산되어 빠져나갔기 때문이라 사료된다 (Cochran, 1981). 따라서  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 회귀직선을 구할 때 표층의 2점은 제외하였다.

$^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 의 수직농도 분포에서 회귀직선의 기울기가 변하는 깊이가 20cm에서 나타났고 이 깊이까지를 표면혼합층(SML)으로 정하였다 (Fig. 6-2). 퇴적물 표층과 저층의 입자교란 계수를 구하기 위하여 "2상자"모델을 이용하였다 (Kim and Burnett, 1988). 표면혼합층(SML)이하에 존재하는  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 수직농도분포로부터 회귀직선을 구하고 그 기울기에서 "겉보기"퇴적율을 구한다. 이때 "겉보기"퇴적율은  $0.38 \pm 0.012$  cm/y로 추정되었다. 겉보기 퇴적속도와 표면혼합층의 깊이를 "2상자"모델에 적용하여 첫번째 상자와 두번째 상자에서의 입자교란 속도를

Table 6-3. Activities of radionuclides,  $^{210}\text{Pb}$  (total),  $^{226}\text{Ra}$  and excess  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}} = ^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra}$ ), from the sediment core 94-1-79. Errors quoted are  $1\sigma$  errors based on counting statistics.

94-1-79

Depth (cm)	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/g)	$^{226}\text{Ra}$ (dpm/g)	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (dpm/g)
0 - 1	$68.2 \pm 1.49$	$38.8 \pm 0.45$	$29.4 \pm 1.56$
1 - 2	$66.1 \pm 1.13$	$43.5 \pm 0.36$	$22.6 \pm 1.19$
2 - 3	$60.8 \pm 1.36$	$45.2 \pm 0.46$	$15.6 \pm 1.43$
3 - 4	$54.7 \pm 1.41$	$39.6 \pm 0.46$	$15.0 \pm 1.48$
5 - 6	$62.3 \pm 1.77$	$47.3 \pm 0.60$	$15.1 \pm 1.87$
7 - 8	$62.2 \pm 1.15$	$49.1 \pm 0.40$	$13.2 \pm 1.22$
9 - 10	$53.5 \pm 1.26$	$42.1 \pm 0.43$	$11.4 \pm 1.33$
12 - 13	$36.2 \pm 1.53$	$27.0 \pm 0.51$	$9.21 \pm 1.61$
15 - 16	$33.7 \pm 1.33$	$25.1 \pm 0.44$	$8.62 \pm 1.40$
19 - 20	$28.8 \pm 1.06$	$22.9 \pm 0.36$	$5.90 \pm 1.12$
24 - 25	$20.8 \pm 0.78$	$17.5 \pm 0.27$	$3.32 \pm 0.82$
29 - 30	$16.8 \pm 0.79$	$14.0 \pm 0.27$	$2.86 \pm 0.84$
34 - 35	$23.2 \pm 0.82$	$21.1 \pm 0.30$	$2.17 \pm 0.87$
39 - 40	$10.2 \pm 0.59$	$9.22 \pm 0.21$	$0.97 \pm 0.63$

Table 6-4. Activities of radionuclides,  $^{210}\text{Pb}$  (total),  $^{226}\text{Ra}$  and excess  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}} = ^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra}$ ), from the sediment core F11-89-CP-8. Errors quoted are  $1\sigma$  errors based on counting statistics.

F11-89-CP-8

Depth (cm)	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/g)	$^{226}\text{Ra}$ (dpm/g)	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (dpm/g)
1 - 2	$82.5 \pm 1.33$	$36.2 \pm 0.43$	$46.3 \pm 1.37$
5 - 6	$69.3 \pm 3.22$	$37.0 \pm 0.84$	$32.3 \pm 3.33$
9 - 10	$37.6 \pm 0.99$	$15.9 \pm 0.24$	$21.7 \pm 1.02$
19 - 20	$12.0 \pm 0.69$	$8.69 \pm 0.20$	$3.30 \pm 0.71$

Table 6-5. Activities of radionuclides,  $^{210}\text{Pb}$  (total),  $^{226}\text{Ra}$  and excess  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}} = ^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra}$ ), from the sediment core F9-90-CP-34. Errors quoted are  $1\sigma$  errors based on counting statistics.

F9-90-CP-34

Depth (cm)	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/g)	$^{226}\text{Ra}$ (dpm/g)	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (dpm/g)
3 - 4	$65.9 \pm 9.32$	$44.5 \pm 0.30$	$21.3 \pm 0.98$
15 - 16	$64.2 \pm 1.23$	$46.5 \pm 0.41$	$17.7 \pm 1.30$
24 - 25	$25.3 \pm 0.81$	$16.9 \pm 0.26$	$8.40 \pm 0.85$
34 - 35	$6.17 \pm 0.70$	$4.56 \pm 0.20$	$1.61 \pm 0.73$

Table 6-6. Activities of radionuclides,  $^{210}\text{Pb}$  (total),  $^{226}\text{Ra}$  and excess  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}} = ^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra}$ ), from the sediment core F4-91-CP-24. Errors quoted are  $1\sigma$  errors based on counting statistics.

F4-91-CP-24

Depth (cm)	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/g)	$^{226}\text{Ra}$ (dpm/g)	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (dpm/g)
1 - 2	$66.7 \pm 0.88$	$33.8 \pm 0.25$	$32.9 \pm 0.92$
3 - 4	$48.1 \pm 1.09$	$37.8 \pm 0.37$	$10.3 \pm 1.16$
15 - 16	$21.9 \pm 0.90$	$12.9 \pm 0.26$	$9.00 \pm 0.93$
24 - 25	$8.86 \pm 0.58$	$5.88 \pm 0.18$	$2.48 \pm 0.60$



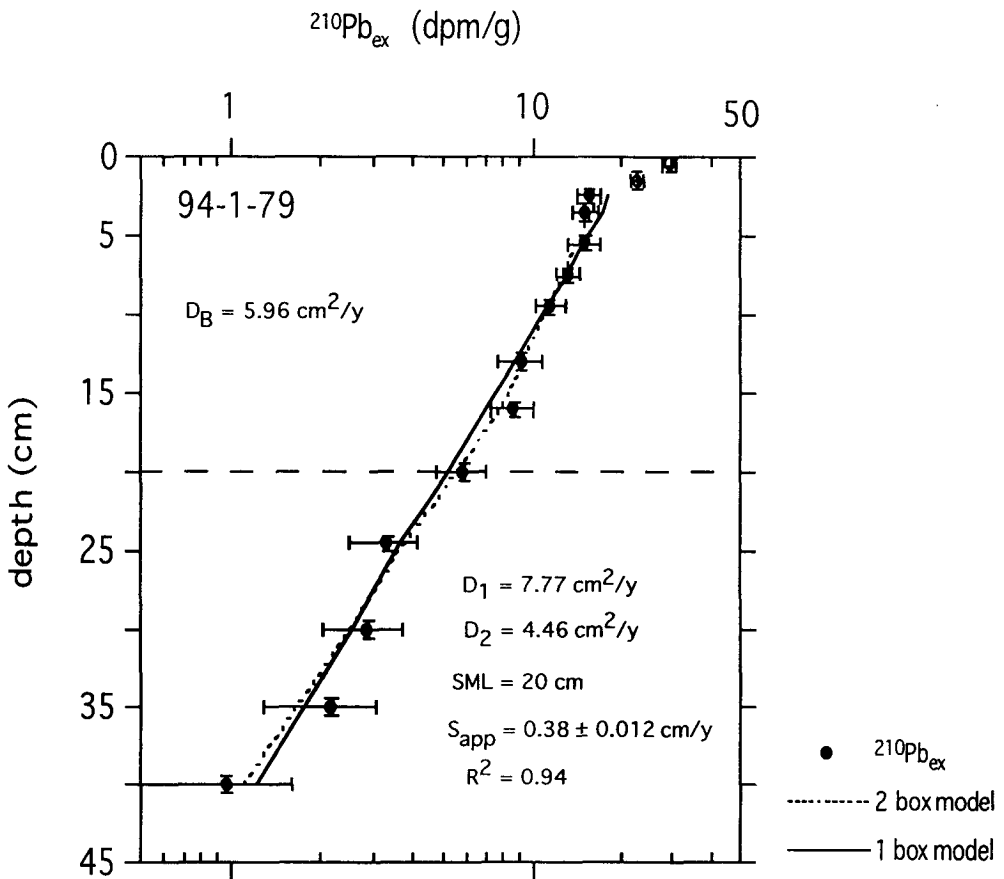


Fig. 6-4. Excess  $^{210}\text{Pb}$  profile for 94-1-79.  $D_B$  = particle mixing coefficient estimated by 1 box model (line),  $D_1$  and  $D_2$  = particle mixing coefficient in the 1st box and 2nd box estimated by 2 box model (dotted line),  $L$  = thickness of the first mixed layer,  $S_{\text{app}}$  = apparent sedimentation rates estimated by excess  $^{210}\text{Pb}$  profile in lower layer than the first mixed layer. Data points represented by circles were not considered in the estimation of particle mixing rates.

추정하였다. 첫번째 상자에서의 입자교란 속도( $D_1$ )는  $7.77 \text{ cm}^2/\text{y}$  이고 두번째 상자에서의 입자교란 속도( $D_2$ )는  $4.66 \text{ cm}^2/\text{y}$ 으로 추정되었다. 두층사이의 입자교란 속도의 차이는 크지 않다. 이는 퇴적물 표층과 저층에서 퇴적물의 교란작용이 비교적 균일한 속도로 일어나고 있다는 것을 의미한다. 따라서 이 주상시료에서 입자교란 속도를 파악하기 위하여 "1상자" 모델을 적용하여도 무리가 없을 것으로 사료된다. 이때의 퇴적속도는  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 로 추정된 "실질"퇴적속도를 사용하였다. "1상자"모델로 추정된 입자교란계수( $D_B$ )는  $5.96 \text{ cm}^2/\text{y}$ 로 2상자 모델의 상부층과 하부층의 입자교란 속도의 중간값을 보여준다.

이 주상시료에서의 입자교란 속도는 같은 KODOS지역 내에서도 Seamount에서의 입자교란 속도(약  $20 \text{ cm}^2/\text{y}$ )보다는 낮게 나타났으며 (Table 6-10) 심해저평원에서의 입자혼합율과는 비슷한 값(약  $10 \text{ cm}^2/\text{y}$ )을 보여 주었다 (Moon, 1993; Moon and Kim, 1995).

#### 나. F11-89-CP-8

주상시료에서  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량은 깊이에 따라 지수함수적으로 일정하게 감소한다 (Fig. 6-5). 특히 표층에서는  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량은  $46.3 \text{ dpm/g}$ 으로 다른 지역의 표층퇴적물보다 높다 (Table 6-4). 이는 표층퇴적물의 교란이 적어서 방사능량이 적은 저층퇴적물과의 혼합이 적기 때문에 표층에서 높은  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량을 보여준다. 또한 20cm 퇴적층에서  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량은  $3.3 \text{ dpm/g}$ 으로  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량이 급격히 감소하는 것이 나타나는데, 이는 퇴적물의 교란효과는 적고 상대적으로 방사능 붕괴에 의한  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  방사능량의 감소효과가 크게 나타나기 때문이다.

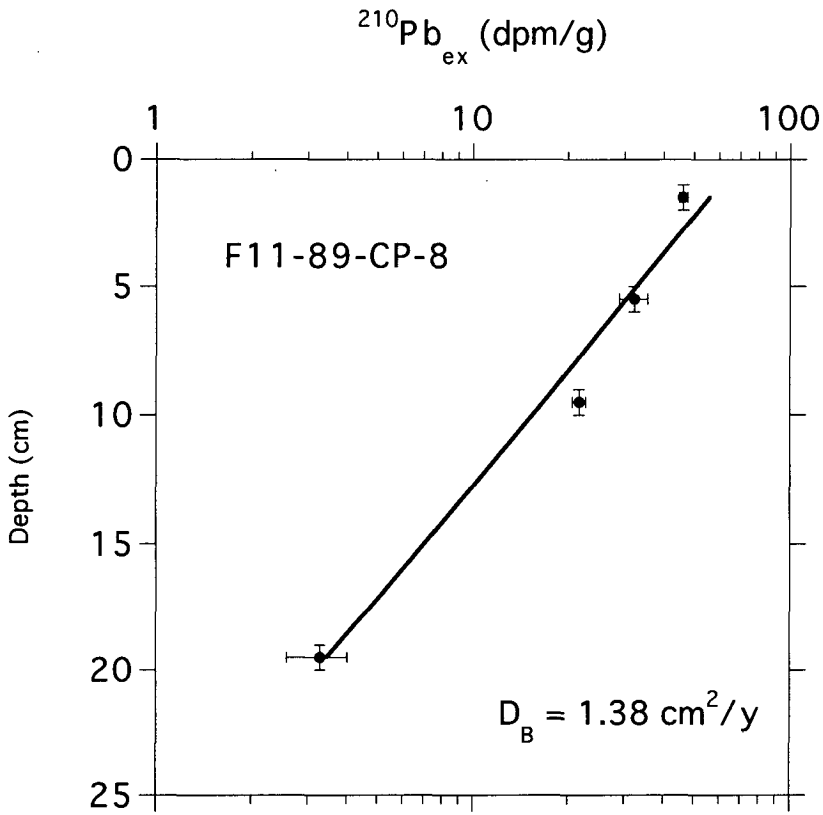


Fig. 6-5. Excess  $^{210}\text{Pb}$  profile for F11-89-CP-8. Error bars refer to  $1-\sigma$  counting statistics (horizontal) and depth intervals (vertical).  $D_B$  = particle mixing coefficient estimated by 1 box model.

94-1-79 와 94-2-15의 주상시료에서 추정된 평균 퇴적율 0.29 mm/ky을 "1상자"모델에 적용하여 입자교란 속도 ( $D_B$ )을 추정하였다. 입자혼합율은  $1.38 \text{ cm}^2/\text{y}$ 로 추정되었다. 이런 입자교란 속도는 KODOS 90-36과 KODOS 89-15에서 "2상자"모델로 추정된 표면혼합층 이하의 입자혼합율 ( $0.9 \sim 0.8 \text{ cm}^2/\text{y}$ )와 유사한 값 (Table 6-10)을 보여주고 있다 (Moon and Kim, 1995). 이 주상시료에서의 입자교란 속도는 다른 퇴적물보다는 적은 퇴적물 교란작용이 일어나고 있다.

#### 다. F9-CP-90-34

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 수직적 방사능량은 지수함수적으로 감소한다 (Fig. 6-6). 표층퇴적물에서의  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량은  $21.3 \text{ dpm/g}$ 으로 입자교란 속도가 적은 F11-89-CP-8 표층퇴적물에서  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량보다 적다 (Table 6-5). 이런 적은  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량은 퇴적물 교란작용으로 인해 저층퇴적물과의 혼합작용 때문이라 사료된다. 또한 주상시료의 35cm깊이에서  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량이 주상시료 94-1-79와 비슷하다.

평균퇴적율  $0.29 \text{ mm/ky}$ 의 값을 "1상자"모델에 적용하여 입자혼합율( $D_B$ )이  $4.64 \text{ cm}^2/\text{y}$ 로 추정되었다. 이 값은 주상시료 94-1-79에서 추정한 입자혼합율( $D_B=5.64 \text{ cm}^2/\text{y}$ )과 비슷하다.

#### 라. F4-91-CP-24

주상시료중 표층퇴적물의  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 방사능량이  $32 \text{ dpm/g}$ 에서  $24.5 \text{ cm}$ 에서  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 방사능량은  $2.48 \text{ dpm/g}$ 로 지수함수적으로 감소한다 (Table 6-6; Fig. 6-7). 평균퇴적율( $0.29 \text{ mm/ky}$ )의 값을 "1상자"모델에 적용하여 입자혼합율을 추정하였다. 추정된 입자혼합율은  $4.35 \text{ cm}^2/\text{y}$ 로 주상시료 94-1-79와 F9-CP-90-34의 입자혼합율과 유사한 값을 보여준다 (Table 6-10).

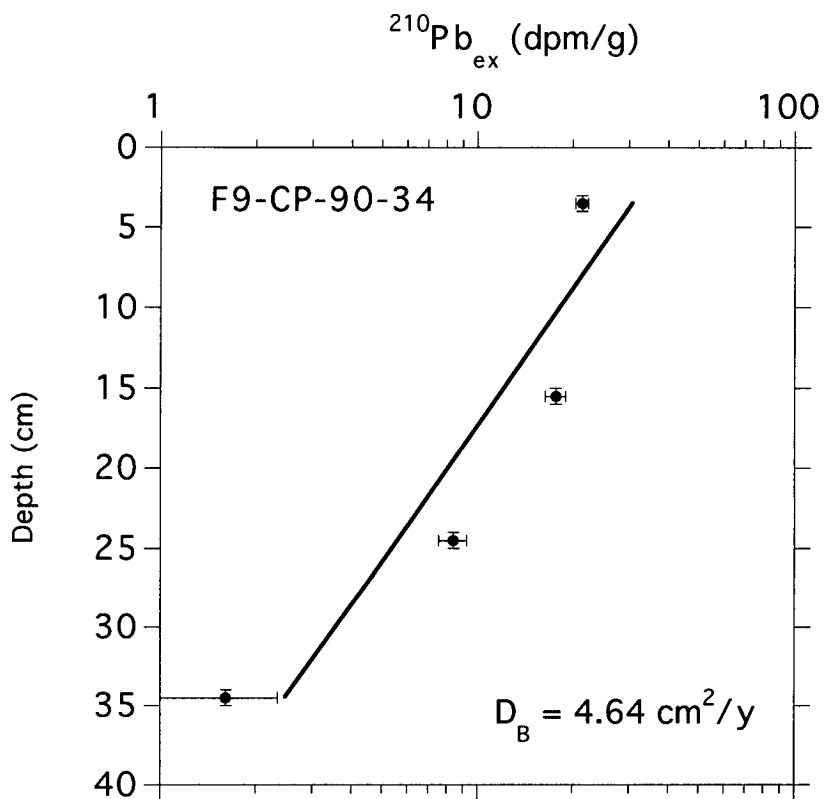


Fig. 6-6. Excess  $^{210}\text{Pb}$  profile for 91-CP-90-34. Error bars refer to  $1-\sigma$  counting statistics (horizontal) and depth intervals (vertical).  $D_B$  = particle mixing coefficient estimated by 1 box model.

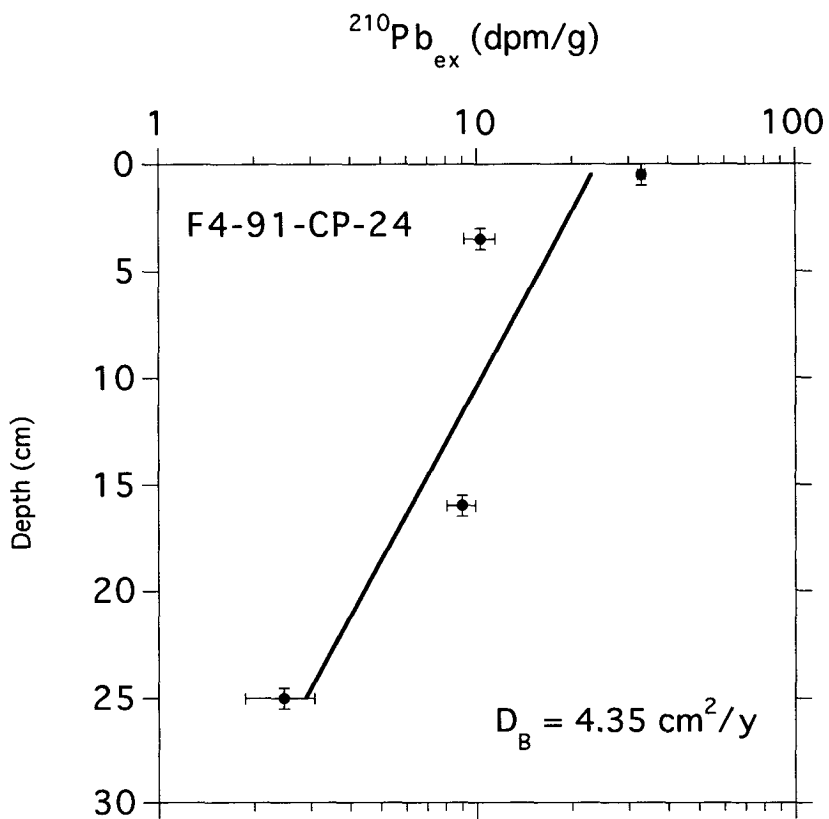


Fig. 6-7. Excess  $^{210}\text{Pb}$  profile for F4-91-CP-24. Error bars refer to  $1-\sigma$  counting statistics (horizontal) and depth intervals (vertical).  $D_B$  = particle mixing coefficient estimated by 1 box model.

Table 6-7. Activities of radionuclides,  $^{210}\text{Pb}$  (total),  $^{226}\text{Ra}$  and excess  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}} = ^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra}$ ), from the sediment core 94-2-15. Errors quoted are  $1\sigma$  errors based on counting statistics.

Depth (cm)	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/g)	$^{226}\text{Ra}$ (dpm/g)	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (dpm/g)
0 - 1	$63.7 \pm 0.90$	$27.4 \pm 0.24$	$36.3 \pm 0.94$
1 - 2	$58.0 \pm 1.48$	$33.3 \pm 0.44$	$24.8 \pm 1.54$
3 - 4	$56.3 \pm 0.84$	$38.1 \pm 0.27$	$18.1 \pm 0.88$
5 - 6	$65.3 \pm 1.53$	$45.4 \pm 0.50$	$19.9 \pm 1.60$
7 - 8	$63.2 \pm 1.30$	$46.1 \pm 0.43$	$17.1 \pm 1.37$
9 - 10	$56.7 \pm 1.57$	$41.0 \pm 0.52$	$15.7 \pm 1.65$
12 - 13	$51.4 \pm 1.66$	$34.6 \pm 0.53$	$16.8 \pm 1.74$
15 - 16	$38.4 \pm 1.25$	$22.0 \pm 0.63$	$15.3 \pm 1.30$
19 - 20	$26.0 \pm 0.88$	$17.3 \pm 0.28$	$8.65 \pm 0.93$
24 - 25	$23.3 \pm 0.91$	$15.3 \pm 0.29$	$7.95 \pm 0.96$
29 - 30	$29.9 \pm 0.70$	$21.7 \pm 0.23$	$8.23 \pm 0.74$
31 - 32	$25.8 \pm 0.63$	$17.9 \pm 0.20$	$7.88 \pm 0.66$

Table 6-8. Activities of radionuclides,  $^{210}\text{Pb}$  (total),  $^{226}\text{Ra}$  and excess  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}} = ^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra}$ ), from the sediment core F8-91-CP-38. Errors quoted are  $1\sigma$  errors based on counting statistics.

F8-91-CP-38

Depth (cm)	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/g)	$^{226}\text{Ra}$ (dpm/g)	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (dpm/g)
3 - 4	$76.0 \pm 2.13$	$38.9 \pm 0.57$	$37.1 \pm 2.20$
15 - 16	$78.3 \pm 2.24$	$37.8 \pm 0.59$	$40.5 \pm 2.32$
24 - 25	$77.2 \pm 1.14$	$46.5 \pm 0.35$	$30.7 \pm 1.19$
34 - 35	$63.7 \pm 1.13$	$36.7 \pm 0.34$	$27.0 \pm 1.18$

Table 6-9. Activities of radionuclides,  $^{210}\text{Pb}$  (total),  $^{226}\text{Ra}$  and excess  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}} = ^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra}$ ), from the sediment core F11-89-CP-18. Errors quoted are  $1\sigma$  errors based on counting statistics.

F11-89-CP-18

Depth (cm)	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/g)	$^{226}\text{Ra}$ (dpm/g)	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (dpm/g)
3 - 4	$50.2 \pm 1.10$	$24.4 \pm 0.28$	$25.8 \pm 1.14$
13 - 16	$48.5 \pm 0.93$	$23.3 \pm 0.24$	$25.1 \pm 0.96$
20 - 25	$48.4 \pm 1.32$	$23.4 \pm 0.33$	$25.1 \pm 1.36$
25 - 30	$43.7 \pm 1.59$	$23.8 \pm 0.43$	$19.8 \pm 1.65$

Table 6-10. Deep-sea sediment mixing data based on  $^{210}\text{Pb}$  measurements and sedimentation rates.

Core	Surface Mixing Layer (cm)	Sedimentation rates (mm/ky)	Mixing rate ( $\text{cm}^2$ ,	
			$D_B$	$D_1$
BX-90-36	21	0.29	-	21.4
BX-89-15	18.5	0.98	-	11.7
94-1-79	19.5	0.38	5.96	7.77
F11-89-CP-8	-	-	1.38	-
F9-CP-90-34	-	-	4.64	-
F9-91-CP-24	-	-	4.35	-
94-2-15	19.5	0.27	-	108.9
F8-91-CP-38	-	-	231.2	-
F11-89-CP-18	-	-	405.3	-



### 3. 불연속적인 퇴적환경 : Slump 와 Hiatus

가. 94-2-15

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  수직적인 방사능량은 일정한 분포를 보이고 있다. 또한  $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 의 수직 농도분포로 결정한 표면혼합층(SML=20 cm)을 경계로  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  수직농도의 불연속면이 존재한다 (Fig. 6-8). 여기서 해수와 접하고 있는 퇴적층(0-2 cm)에서 비정상적으로 높은  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = \text{총}^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra}$ ) 방사능량이 관찰되는데, 이는  $^{230}\text{Th}$ 으로부터 방사능붕괴로 공급되는  $^{226}\text{Ra}$ 이 확산에 의해 해수중으로 빠져나간 것을 반영한다 (Table 6-7). 따라서  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  수직방사능량 분포에 대한 회귀직선을 구할 때 해수와 접하고 있는 퇴적층(0-2 cm)의 2점은 제외시켰다.

이 주상시료에 평균퇴적율(0.29 mm/ky)을 "1상자"모델에 적용하여 입자혼합율을 추정하였다. 표면퇴적층(SML)내의  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  수직방사능량 분포에 대하여 추정된 입자혼합율( $D_B$ )은  $108.8 \text{ cm}^2/\text{y}$ 이고, 표면퇴적층(SML)이하에서는  $880.4 \text{ cm}^2/\text{y}$ 이다. 이런 비정상적으로 큰 입자혼합율은 생물에 의한 것이라기 보다는 퇴적물의 "사태"(Slump)로 해석되어 진다. 여기에 대한 해석은 퇴적물에 대한 특성에 관한 자료와 연관지어져야 될 것이다.

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  수직방사능량에 대한 회귀직선이 표면혼합층(SML)경계에서 불연속면이 나타난다 (Fig. 6-8). 이런  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  방사능량의 불연속은 "퇴적결층 (Hiatus)"으로 사료된다.  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 반감기 ( $t_{1/2} = 22.3$  년)을 이용하여 퇴적결층된 시간은 약 20년으로 계산된다. 이런 퇴적결층을 확인하기 위해서는 이 주상시료에 대한 여러 퇴적학적 자료와 탄성파 자료가 연관지어져야 할 것이다.

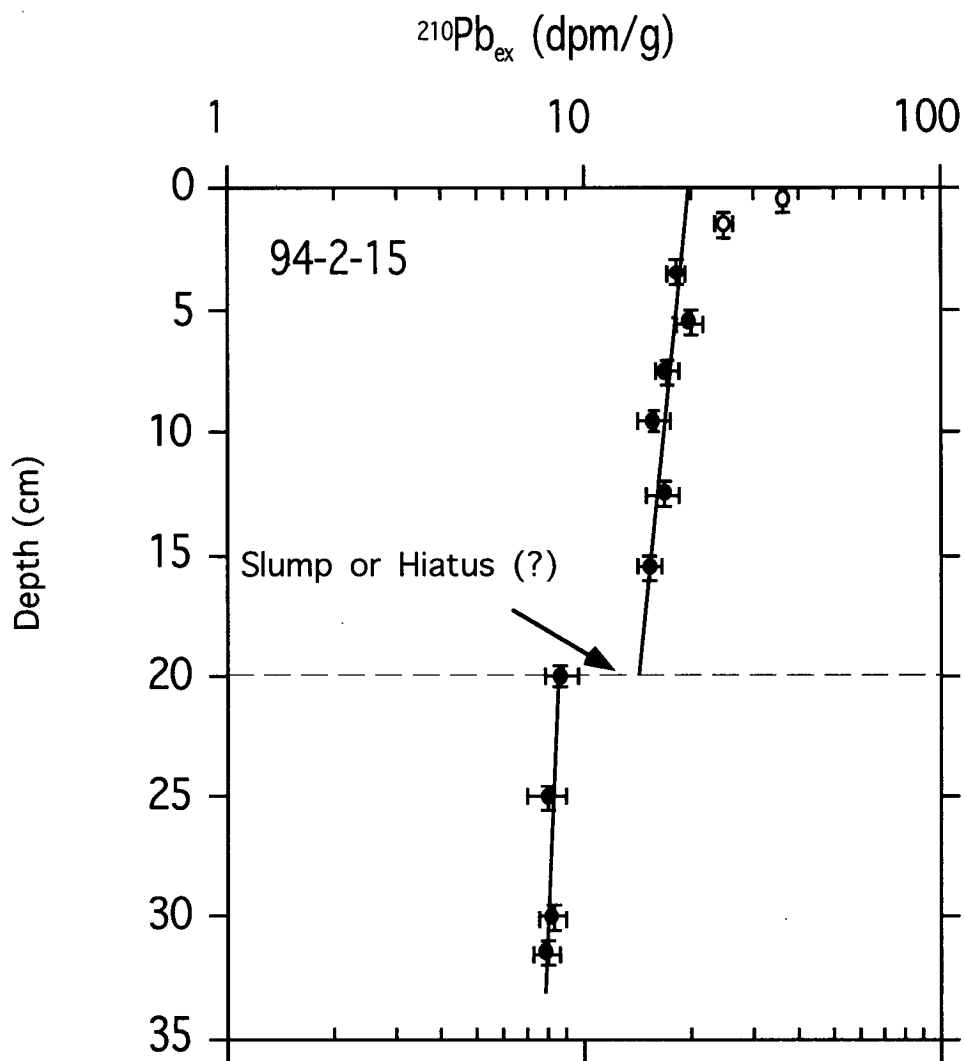


Fig. 6-8. Excess  $^{210}\text{Pb}$  profile for 94-2-15. Data points represented by circles were not considered in the estimation of particle mixing rates. Line represents the equation of regression fitted for excess  $^{210}\text{Pb}$  data.

나. F8-91-CP-38 과 F11-89-CP-18

F8-91-CP-38 주상시료의  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  방사능량은 퇴적물 깊이에 따라 일정한 수직 분포가 관찰되며 저층퇴적물에서도  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  방사능량이 높게 나타난다 (Table 6-8 ~9; Fig. 6-9~10).  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  방사능량 분포에 대해 "1상자" 모델을 적용하여 입자혼합율이 F8-91-CP-38에서는  $231.2 \text{ cm}^2/\text{y}$ 로 추정되었고 F11-89-CP-18에서는  $405.3 \text{ cm}^2/\text{y}$ 로 계산되었다. 이런 극심한 입자혼합율은 퇴적층의 slump에 의해 생성된 것으로 사료된다.

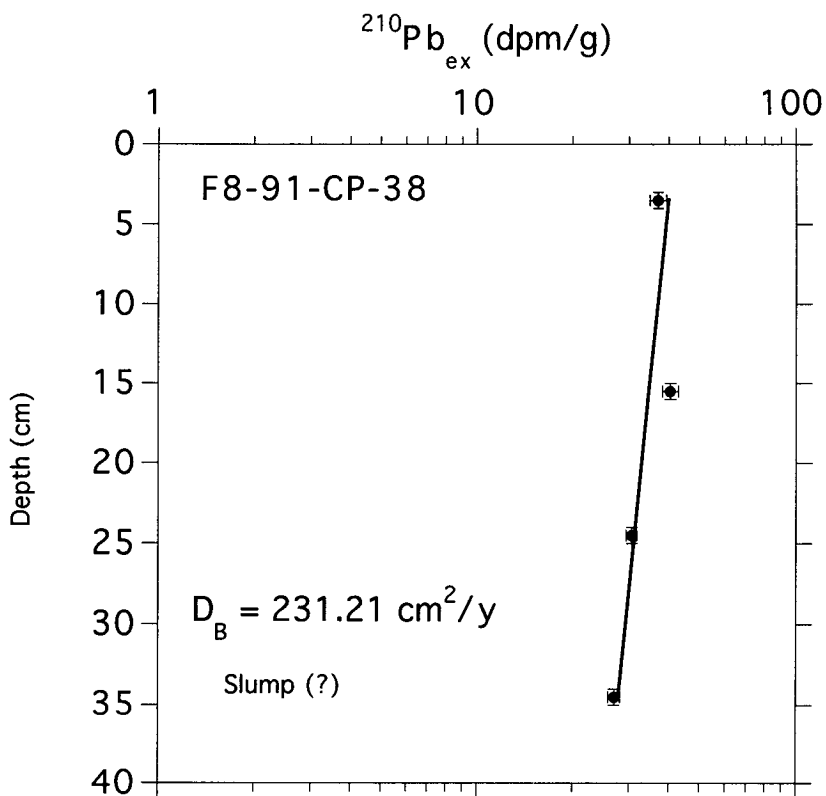


Fig. 6-9. Excess  $^{210}\text{Pb}$  profile for F8-91-CP-38. Data points represented by circles were not considered in the estimation of particle mixing rates. Line represents the equation of regression fitted for excess  $^{210}\text{Pb}$  data.

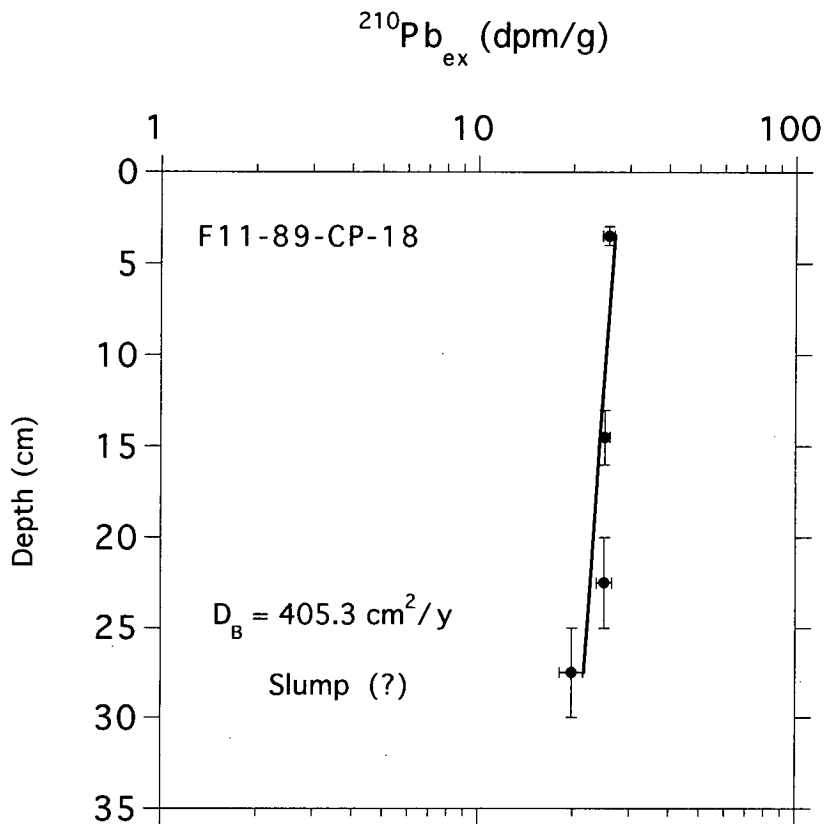


Fig. 6-10. Excess  $^{210}\text{Pb}$  profile for F11-89-CP-18. Data points represented by circles were not considered in the estimation of particle mixing rates. Line represents the equation of regression fitted for excess  $^{210}\text{Pb}$  data.

## 참 고 문 헌

- Aller R.C. and DeMaster, D.J., 1984. Estimates of particle flux at the deep-sea floor using  $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$  disequilibrium, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 67: 308-318.
- Anderson R. F. and Fleer A. P., 1982. Determination of natural actinides and plutonium in marine particulate material, *Anal. Chem.*, 54: 1142-1147.
- Cochran J.K., 1980, The flux of  $^{226}\text{Ra}$  from deep-sea sediments, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 49: 381-392
- Cochran J. K., 1982. The oceanic chemistry of U- and Th-series nuclides, in: *Uranium Series Disequilibrium, Applications to Environmental Problems*, (ed. M. Ivanovich and R. S. Harmon ), Clarendon Press, Oxford: 459-496.
- Cochran J. K., 1985. Particle mixing rates in sediments of the eastern equatorial Pacific: evidence from  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  and  $^{137}\text{Cs}$  distribution of MANOP sites. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 99: 1195-1210
- DeMaster D. J. and Cochran J. K., 1982. Particle mixing rates in deep-sea sediments determined from excess  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{32}\text{Si}$  profiles, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 61: 257-271.
- Goldberg E.D. and Koide M., 1962. Geochronological studies of deep sea sediments by the thorium-ionium method. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 26: 417-450.
- Guinasso N.L. and Schink, D.R., 1975, Quantitive estimates of biological mixing rates in abyssal sediments. *J. Geophys. Res.* 80; 3032-3043
- Huh C. A., 1982. Radiochemical and chemical studies of manganese nodules from three sedimentary regimes in the North Pacific. Ph.D. Thesis, University of Southern California, Los Angeles, 305 pp.

- Kim and Burnett, 1983, Gamma-ray spectrometric determination of uranium series nuclides in marine phosphorites, *Anal. Chem.* 55, 1796-1800
- Kim K. H. and Burnett W. C., 1988. Accumulation and biological mixing of Peru margin sediments. In: *The Origin of Marine Phosphorites. The Result of the R. V. Robert D. Conrad Cruise 23-06 to the Peru Shelf*, (ed. W. C. Burnett and P. N. Froelich), *Mar. Geol.*, 80: 181-194.
- Moon D.S and Kim K. H, 1995, Rates of sediment accumulation and particle mixing in the KODOS site of the Clarion-Clipperton fracture zones, *J. Kor. Soc. Oceano.* v30, N4, (in press)
- Moon D.S., 1993, Uranium-series geochemistry of Pacific ferromanganese nodules and their associated sediments, Master. Thesis, Chungnam University, Taejon, 66 pp.
- Nittrour C.A., DeMaster D.J., McKee B.A., Cutshall N.H and Larsen I.L., 1983/1984, The effects of sediment mixing on  $^{210}\text{Pb}$  accumulation rates for the Washington, Continental shelf, 54, 201-221
- Peng T.H., Broecker W.S., and Berger W.H., 1979, Rates of benthic mixing in deep-sea sediments as determined by radioactive tracers, *Quaternary Research*, v.11, 141-149





## 제 7 장

### 심해저 광업기술 확보 전략

연구책임자 : 황 기 형

연구 원 : 유 시 읍

연구 조 원 : 장 유 진



## 제 1 절 총 론

1993년 12월에 개최된 경제장관 회의에서 의결된 심해저 광물자원 개발사업(이하 '심해저 광업'이라 함.)의 추진계획에 따르면, 심해저 망간단괴에 대한 광구 등록 준비과정이 사업의 1단계로서, 우리나라가 1993년 8월 8일에 개최된 국제해저기구 및 국제해양법재판소 설립 준비위원회(이하 '준비위'라 함.)에서 심해저 망간단괴 광구에 대한 선행투자가 등록을 마침으로서 종료되었다. 그리고, 광구등록 이후 망간단괴 상업생산을 위한 기초 및 실용기술의 개발과정이 사업의 2단계, 실용기술의 개발 이후 상업생산을 위한 시설건설과 상업생산 과정이 사업의 3단계로 설정되어 있다. 2단계 사업은 1994년에 시작되어 2003년에 종료되는 것으로 계획되어 있으며, 상업생산을 위한 실용기술의 확보를 목표로 하고 있다. 따라서 선행투자가 등록을 목표로 했던 1단계 사업 때와는 달리, 2단계 사업에서는 활동의 범위가 탐사뿐만 아니라 채광, 제련, 환경 등 심해저 광업의 전 기술분야로 확대되었다.

북미와 서유럽, 일본, 러시아 등의 주요 선진 산업국이 1970년대 초부터 심해저 광업에 대한 투자를 시작한 점을 고려할 때, 1980년대 중반부터 활동을 시작한 우리나라는 심해저 광업에 있어서 가장 후발국가(late starter)라 할 수 있다. 사업 타당성에 관한 논의는 일단 차치하고라도, 정부의 의사결정 과정을 거쳐 하나의 국가사업으로 이미 추진되고 있는 심해저 광업의 현 단계에서 후발주자인 우리가 기술을 확보함에 있어서 중요하게 고려하여야 할 사항은 다음과 같다.

첫째, 심해저 광업의 생산시스템에 대한 기술적인 개념은 1980년대 초까지 선진 투자국의 연구개발 활동에 의해 이미 확립되어 있다. 일부 전문가 중에는 '80년대 이후 첨단 요소기술의 발전성과를 반영하여 새로운 개념의 생산시스템에 대해 연구할 필요가 있다는 주장을 하기도 하지만, 이는 대체적으로 새로운 가능성에 대한 주의 환기 차원에서 이루어지는 것이라 할 수 있다. 반면, 미국

OMCO의 Conrad Welling, 불란서 AFERNOD의 Jean P. Lenoble, 독일 THETIS의 Hans Amann 등 이름이 널리 알려진 심해저 광업 전문가들은 심해저 광업의 생산시스템에 대한 기술적 개념은 확립되어 있고 생산시스템의 구축을 위한 요소기술의 대부분(95% 정도)이 이미 개발되어 있다고 주장하고 있다. 즉, 심해저 광업의 기술능력 확보에 장애가 되고 있는 요인은 요소기술의 미비가 아니라 기술의 상용화를 위한 투자가 부진하다는 것이다.

둘째, 우리나라는 후발주자로서 주어진 모든 기회를 최대한 활용하여 가장 비용효과적인 기술확보 경로를 추구하여야 한다는 점이다. 후발주자인 우리나라는 선발주자들이 이루어 놓은 기술개발의 성과를 부정하고 독자적인 기술개발만을 고집할 필요는 없다. 기술 도입이나 다른 심해저 광업 투자국과의 기술협력 가능성은 필요에 따라 우리가 활용할 수 있는 중요한 기회로 인식하여야 한다.

셋째, 생산시스템의 개발과 실용화 과정에서 독자적인 학습곡선의 구축이 필요하다. 요소기술은 외부로부터의 도입이 가능하나, 시스템 운용능력의 확립이나 생산공정의 실용화에는 독자적인 노력이 수반되어야 한다. 그러나, 이 경우에도 선발투자국이 시험생산에 이르기까지의 축적한 지식(know how)과 시행착오의 경험을 효율적으로 활용할 수 있다.

넷째, 본격적인 심해개입은 심해환경에 미치는 영향이 수용 가능한(acceptable) 범위 내에서 이루어져야 하며, 이를 위해서는 심해의 물리적, 생태적 환경에 대한 이해가 필요하다. 망간단괴의 상업생산에는 환경에 미치는 영향 최소화 방안의 확보가 관건이 될 것으로 예상되고 있으나, 아직 심해환경에 대한 연구가 세계적으로 충분히 이루어지지 못하였다. 현재 일본, 북미, 서유럽의 선발투자 국가들은 주로 심해환경 연구에 치중하고 있다.

본 장은 상기한 고려사항을 바탕으로 후발주자인 우리나라가 심해저광업에 필요한 기술을 효율적으로 확보하기 위하여 지향하여야 할 방향을 제시하는 데에 그 목적을 두고 있다. 연구체제를 보면, 먼저 심해저광업 관련기술의 특

성을 분석하고 요소기술을 분류하였으며, 아울러 우리에게 주어진 여건을 하락하기 위하여 세계 각국의 기술개발 현황을 조사하였다. 이같은 기술의 특성 및 분류, 각국의 기술개발현황을 바탕으로 효율적인 기술확보 방안을 제시하고자 하였다.

## 제 2 절 심해저광업 관련 기술의 특성 및 분류

### 1. 심해저 광업의 기술적 특성

심해저 광업의 기술적 특성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째, 심해저 광업은 정밀전자, 통신, 소재, 기계, 소프트웨어 등 많은 분야의 다양한 요소기술을 필요로 하므로, 기술개발에는 다학제적(multidisciplinary) 접근이 요구된다.

둘째, 심해저라는 극한의 작업환경을 극복하기 위하여 각 분야의 첨단 요소기술의 적용을 요구한다. 이러한 요소기술은 관련분야의 산업기술의 발전과 밀접한 관련을 맺고 있으므로, 기술확보 과정에서 산업기술 발전에 파급효과를 가져올 수 있다(단기적인 기술 파급효과).

셋째, 심해저 광업을 위해서는 심해개입기술(deep-sea intervention technology)의 확립이 요구되므로, 심해저 광업의 추진은 해양 개발에 커다란 영향을 미칠 것으로 예상된다.(장기적인 기술 파급효과). 인류 역사상 심해저 자원이 본격적으로 개발된 예는 없으나, 인구의 급격한 증가가 예상되는 가까운 미래에는 심해저 자원의 개발가치가 크게 증가할 것으로 기대된다.

## 2. 심해저 광업의 기술계통도

심해저 광업의 기술분야를 탐사, 채광, 수송, 제련, 환경연구 등의 다섯개 분야로 분류할 때, 실용기술의 확보에 가장 많은 투자가 요구되는 분야는 채광과 제련분야이다. Table 1-1과 Table 1-2는 이 두 분야의 기술계통도를 나타내고 있다.

### 가. 채광분야 기술계통도

심해저 망간단괴 채광기술의 종합시스템 구성은 각각 독립적 기능을 갖는 하부시스템(sub-system)들과 각 하부시스템들의 최적운용을 총괄하는 통합운용시스템(integrated operating system)으로 이루어진다. 심해저 망간단괴 채광에 있어서 단괴흐름(nodule flow)의 통과지점으로서의 각 하부시스템은 해저면의 집광시스템(collecting system)과 해저면과 해수면간의 양광시스템(lifting system), 그리고 해상플랫폼으로 대별된다. 망간단괴의 상업생산을 위하여는 채광시스템의 각 요소기술의 개발·확보와 더불어 전체 시스템의 최적운용기술의 확보가 중요하다. 채광시스템의 최적운용(optimal operation)이란 ‘단괴흐름의 최적화 및 최적조건의 유지’를 의미한다. 이를 위해서는 집광기, 양광시스템, 해상플랫폼 등의 구성에 필수적인 요소기술의 확보와 함께 집광기의 이동속도 및 집광속도, 양광펌프의 구동과 단괴 운송밀도(transportation concentration)의 조절, 해상플랫폼의 위치제어 및 상대운동제어 등등을 총괄하는 통합운용시스템의 중요성이 강조되고 있다.

1980년대 중반이후 컴퓨터기술과 정보·통신기술 분야의 획기적인 발전은 21세기 심해저 광구의 상용개발의 가능성을 제시해주고 있다. 한편, 각 하부시스템의 하드웨어의 개발은 기초과학 및 응용과학분야의 발전과 소재의 발달 등에 힘입어 새로운 전기를 맞고 있으며, 컴퓨터 및 소프트웨어기술의 응용으로 극지환경에 적용될 수 있는 종합시스템의 개발이 기대되고 있다.

Table 7-1. Technology Tree of Deep Seabed Mining

심 해 저 체 광 시 스 템 기 술	기계.설비 기술	조선·해양장비	해양부유구조물 설계·건조기술	채광플랫폼 설계기술 환경하중추정기술 양광관 거동해석 기술	
			해양탐사·작업장비 개발기술	심해저 집광로봇 심해 ROV	
	단위기계.부품.설 비분야		기계요소부품	동력전달부품, 밸브, 내압·수밀용 기, 금형 및 스프링, 체결용 부품	
			열·유체기계	열기관, 펌프, 압축기, 전기유압 모터, 노즐, 밸브, 신소재	
			추진기계	무한궤도차	
			정밀기계	정밀광학	
	생산가공기술		생산기술	설계기술 및 소프트웨어, 가공기 술, 조립기술	
			자동화기술	CAD, CAM, CAE, CIM	
	표준.측정시험/검 사기술		정밀측정·계측기기	구조안전 정밀측정기기 작업상태 정밀계측기기	
			시험해석·평가기술	(모형)성능시험·평가	
			검사·품질보증기술	비파괴검사기술	
	극한기술		초고압	내압기술, 방식기술	
	전기기계 및 전기변환 장치기술		발전기.전동기.변 압기		
			전기공급 및 제어장치	전기회로 개폐장치 전기접속장치	전력차단기, 자동차단기, 퓨즈 방수, 내압설계, 고강도 합금
			피복절연케이블	생산자동화	전기선, 유압선, 관통신선, 피복 재료
			전구 및 조명장비 비 기술		내압구조
	소재·공정 기술	금속소재	기계기능재료	제철, 제강, 강판 및 강관제조, 주물·주조, 열처리, 표면처리, 내 마모 및 내식성 신소재	
			전자기기능재료	초전도, 비자성	
		세라믹소재		내마모성, 내식성, 부력재 활용	
		기타소재		유리섬유, 폴리우레탄	
정보.전자. 통신기술	컴퓨터응용기술	제어시스템기술	DSP		
		전송.통신기술	RS232, RS422, VME Bus		
		교환기술	광교환기술		
		위성통신	GIS		
	전자제품기술		고성능 TV 및 VCR/ VTR, 신호증폭 기, 신호변환기, 다중채널변환기		
	정보산업소요기술	반도체 기술	CPU, Transputer, Chips		
광기술		광기능소자, 광학부품, 광통신, 광계측, 광정보통신			

자료 : 기계연구원

채광부문 기술계통도에 나타난 요소기술들은 기존기술과에 대한 비교우위에 따라 심해저 광업이라는 특수 목적에 의해 개발된 고유기술은 아니며, 세계적으로는 이미 대부분 개발되어 있다. <Table 7-1>에 나타난 채광부문 기술계통도는 기계·설비, 소재·공정, 정보·통신 분야의 첨단 요소기술을 많이 포함함으로써, 채광분야 기술의 첨단성을 보여주고 있다. 이 분야에 있어서 독자적인 기술개발 가능성은 국내 관련 과학기술분야의 발전정도에 달려 있다. ‘실용기술의 확보’라는 목표에 입각하여 생각할 때, 독자적인 기술개발에 과도한 의미를 부여할 필요는 없다. 채광분야에 있어서 기술확보의 핵심은, 그것이 외부로부터 도입되었던 자체적으로 개발되었던, 부분 기술들을 효과적으로 연계하여 심해저라는 새로운 작업조건을 극복하는 데에 있기 때문이다.

#### 나. 제련분야 기술계통도

망간단괴 제련기술은 육상의 laterite 광석 제련기술과 유사한 점이 많다. 망간단괴는 미세한 철-망간산화물의 집합체로서, 니켈, 코발트, 동 등의 유용금속이 철-망간 산화광물 격자상 내에 혼입되어 있기 때문에 분쇄 및 부유선광과 같은 전통적 제련기술만으로는 효과적으로 금속을 회수할 수 없다. 따라서, laterite 광석 제련에 이용되는 방법과 다소 유사하게 선광되지 않은 망간단괴를 직접 처리하는 건식 및 습식 제련법이 개발되었다. 침출법에 따라 현재 다섯 가지 정도의 제련법이 개발되고 있는 것으로 알려져 있는데, 이러한 방법상의 상이점을 포괄하여 망간단괴의 제련 공정을 제시하면 Fig. 7-1와 같다. 그리고, Fig. 7-1에 나타난 망간단괴 제련의 주요 공정을 바탕으로 기술계통도를 작성하면 Table 7-2와 같다.



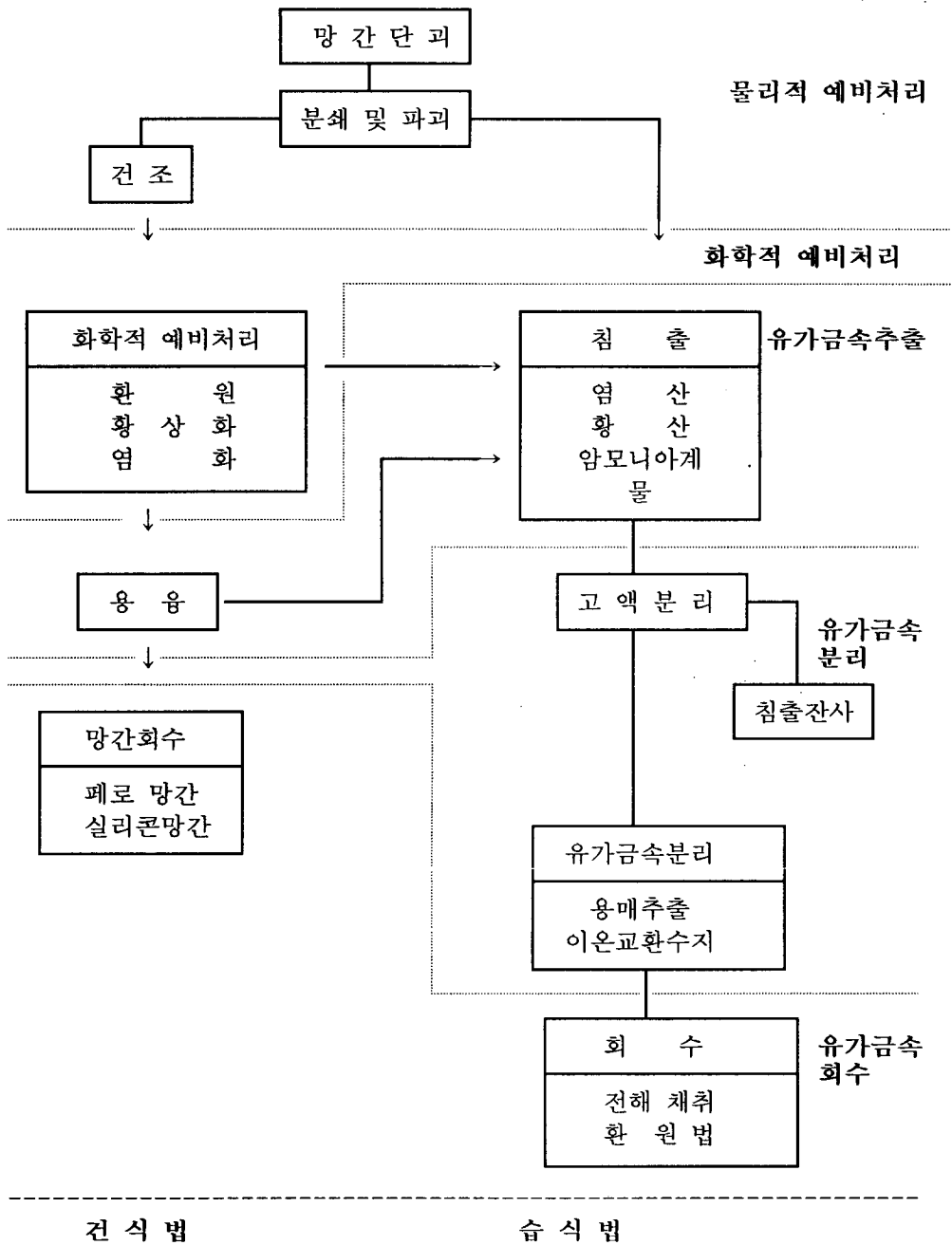


Fig. 7-1. Flow sheet of Manganese Nodule Processing

Table 7-2. Technology Tree of Manganese Nodule Processing

망	물리적 예비처리	파쇄 및 분쇄기술
		자력선별기술
		건조기술
		단광 및 소결기술
간	화학적 예비처리	배소기술
단	유가금속 추출	용융제련
		침출
		박테리아 침출
		고액분리기술
		세정기술
제	유가금속 분리	용매추출기술
		이온교환수지기술
		막분리기술
		제련잔사처리기술
련	유가금속 회수	전기분해
		결정화기술
		시멘테이션 (cementation)
		가스에 의한 금속환원
기	설 비	공정자동화기술
		소재관련기술
		프랜트 설계 및 설비기술
		환경방지기술
술		

자료 : 자원연구소

### 제 3 절 심해저광업에 적용 가능한 새로운 요소기술

심해저 광업의 기술개념은 1980년대 초까지 국제 컨소시엄의 연구개발활동에 의해 제시되었는데, 그 개념은 앞으로도 유효할 것이다. 심해저광업에 대한 경제성 분석은 '70년대와 '80년대 중반까지 주로 이루어졌는데, 이때 적용된 망간단괴 생산비용과 총수입은 연구 당시의 기술수준과 금속시세를 바탕으로 추정된 것이다(Table 7-3). 그러나, '80년대 이후의 금속가격 추세를 살펴보면 경제성 분석에 적용된 금속의 기준가격이 현시점에서 볼 때에는 약간 높게 설정된 감이 없지 않다(<Fig. 7-2>). 만일, 현재의 국제 금속가격 수준을 적용한다면 기존의 경제성분석모델에 의해 산출되는 자본수익률이 연구 당시에 제시된 것보다 다소 떨어질 것으로 예상할 수 있다.

반면, 기존의 경제성분석 연구가 이루어진 이후 심해저광업의 경제성을 크게 향상시킬 수 있는 요인 또한 발생하였는데, 그것은 바로 요소기술의 발전이다. '80년대 중반 이후 '90년대 초반까지 전자, 통신, 기계, 소재, 소프트웨어 분야에서 심해저 광업에 응용되어 망간단괴의 생산효율을 증가시킬 수 있는 첨단 기술들이 활발하게 개발되었다. 이러한 기술이 심해저 광업에 응용될 경우 망간단괴 생산의 연간 운영비용(operating cost)은 당초 예상보다 크게 감소할 것으로 예상된다. 일부 전문가들은 첨단 요소기술의 적용율이 높은 채광분야에서 최근에 개발된 첨단 요소기술이 응용된다면 채광분야의 운영비용은 MIT모델과 TAMU모델이 추정한 것의 1/2 수준으로 감소할 것으로 예상하고 있다.

현재의 전반적인 기술발전 추이로 볼 때, 심해저 광업에 있어서 신기술의 응용과 이에 따른 운영비용의 절감 가능성은 앞으로도 계속 커질 것이다. '80년대 이후 개발되어 심해저 광업에 적용될 경우 운영비용 및 투자비용의 절감에 크게 기여할 것으로 예상되는 신기술들을 소개하면 다음과 같다.

Table 7-3. Comparison of Various Techno-Economic Models for Deep Seabed Mining

(단위 : 백만불, '90년도 불변가격)

	MIT 모형	TAMU 모형	GEMONOD모형	KORDI 모형
연구시점	1982	1984	1988	1992
연간광석생산량	300만 ST	300만 MT	150만 MT	300만 MT
자본투자				
- 채광	417.9 (23)	401.2 (17)	282.0 (30)	338.2 (18)
- 수송	328.6 (18)	245.0 (10)	188.0 (20)	382.6 (20)
- 제련	593.5 (33)	583.7 (25)	470.0 (50)	933.7 (48)
- 기타	459.1 (26)	796.5 (33)	--	275.6 (14)
- 4개금속 생산시	--	350.0 (15)	--	--
합 계	1,799.1 (100)	2,376.4 (100)	940.0 (100)	1,930.1 (100)
연간운영비				
- 채광	84.1 (29)	95.7 (14)	48.0 (20)	95.7 (18)
- 수송	47.8 (17)	47.7 (7)	36.0 (15)	105.2 (20)
- 제련	129.7 (45)	136.0 (20)	156.0 (65)	301.1 (58)
- 기타	27.3 (9)	17.6 (3)	--	17.6 (4)
- 4개금속 생산시		364.0 (55)	--	--
합 계	288.9 (100)	661.0 (100)	240.0 (100)	519.6 (100)
연간 수입	516.5	1,221.2	495.0	1,008.0
금속 가격				
- (페로)망간	--	\$0.47/lb	\$0.30/lb	\$0.33/lb
- 니켈	\$4.86/lb	\$4.36/lb	\$3.65/lb	\$3.50/lb
- 코발트	\$7.32/lb	\$6.40/lb	\$6.80/lb	\$12.00/lb
- 동	\$1.62/lb	\$1.44/lb	\$0.95/lb	\$1.03/lb
내부수익율(%)				
- 3개금속 생산시	9.21	3.89	--	--
- 4개금속 생산시	--	12.35	14.00	16.3

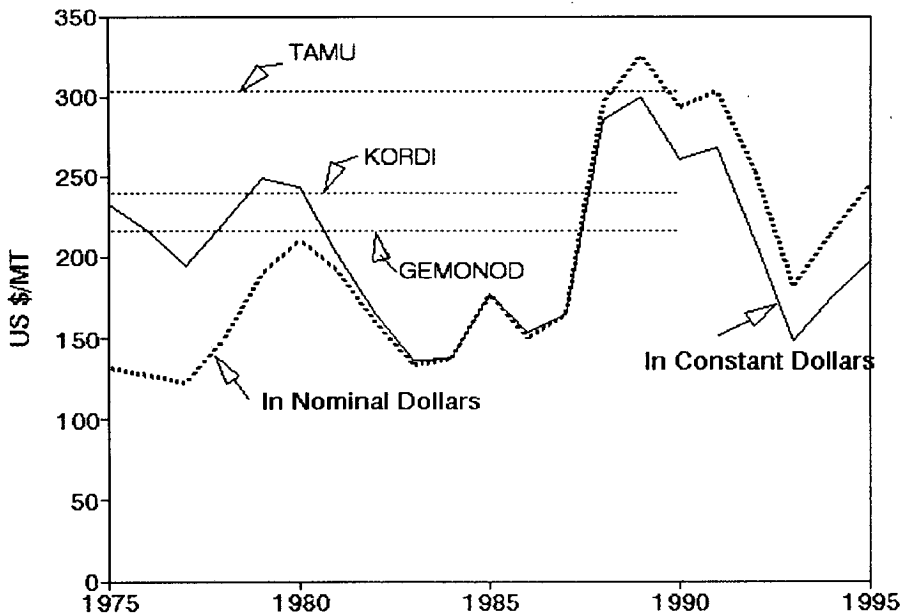


Fig. 7-2. Metal-Equivalent Values of a ton of Manganese Nodules

### 1. 소재기술

심해저 광업에 이용될 수 있는 신소재는 크게 나누어 고기능재(high-performance materials)와 경량구조재(lightweight structural materials)가 있다.

고기능 신소재로는 고 내식성 및 내마모성 금속합금, 니켈-몰리브덴 합금강과 같은 특수강, 그리고 금속산화물, 금속질화물, 금속붕화물(borides)과 같은 금속 복합소재(compounds) 등이 있다. 이러한 신소재의 적용은 기계류의 중요부품의 내구성을 향상시켜 심해저 채광작업을 중단없이 2,000 ~ 3,000 시간 지속시킬 수 있을 것이다. 심해저 망간단괴채광부문의 경제적 조업을 위해서는 연간 한차례의 보수작업만으로 작업이 가능하도록 채광작업 지속시간을 6,000 ~ 7,000 시간

으로 향상시켜야 한다.

유리섬유강화 플라스틱 혹은 탄소섬유강화 플라스틱과 같은 가벼우면서도 고강도를 갖는 복합소재기술을 응용하여 파이프스트링을 만들 경우, 기존의 철강 파이프 스트링의 무게를 50% 정도 줄일 수 있을 것으로 기대되고 있다. 파이프 스트링의 경량화는 채광선 혹은 채광 플랫폼의 규모와 각종 취급장비의 규격도 감소시켜 채광부문의 연간 운영비용뿐만 아니라 초기투자 규모를 크게 줄일 수 있을 것이다.

## 2. 기계 및 장비기술

수중 펌프, 공기양광 컴프레서, 심해작업용 유압모터시스템 등에 대한 설계기술의 향상은 채광부문의 조업 효율을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다. 향상된 설계기술과 신소재를 적용할 경우, 유압펌프의 성능, 에너지효율, 그리고 내구성을 크게 향상시킬 수 있다. 최근 개발된 터보 컴프레서는 고압, 대용량의 압축공기를 발생시킬 수 있고 5,000 ~ 10,000시간 지속적으로 작동할 수 있으므로, 기존의 펌프 시스템을 대체할 수도 있다. 최근 관심을 끌고 있는 brushless DC motor의 기술을 적용하면 전기모터 자체의 크기를 대폭 감소시킬 수 있어서 기존의 수압식 시스템(hydraulic system)을 적용하는 경우에 비해 집광시스템의 크기를 소형화시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다.

## 3. 광섬유 기술

광섬유 자료전송은 주파수 대역이 넓은 신호전송 작업에 널리 이용되고 있으며, 심해작업에 매우 유용하게 응용될 수 있다. 1/2  $\mu\text{m}$ 의 직경을 갖는 광섬유가 초당  $10^9$  비트의 자료를 전송할 수 있으므로, 각종 고해상도의 계측장비로부터의 자료를 동시에 전송할 수 있다. '매우 작은 직경의 광섬유는 동력공급선, 유압선,

광통신선을 동축으로 묶는 피복절연 케이블(umbilical cable)의 부피를 작게 하므로 집광시스템의 경량화에 기여하며, 전기선으로부터의 교란도 받지 않으므로 보다 양질의 자료를 전달할 수 있다. 광섬유 및 광전자(optoelectric) 계측(sensing) 기술 역시 심해저 작업의 실시간 통제에 크게 기여할 것이다.

#### 4. 자동화 기술

현재 '70년대의 선박에 비해 고도로 자동화된 선박이 건조되고 있다. 자동화 기술 및 인공지능 기술은 심해저 채광의 안정성과 효율에 크게 기여할 것이다. 현재 개발되고 있는 전문가시스템이 심해저 광업에 적용된다면 망간단괴의 밀도, 심해저 퇴적층의 조건, 기상조건에 따라 채광작업이 자동조절될 수 있을 것이다. 그 뿐만 아니라 시스템의 이상작동과 고장을 자가 진단하고 교정하는 집광시스템을 개발할 수도 있을 것이다. 그리고, 채광선의 자동화는 작업인원의 수를 크게 줄임으로써 운영비용의 절감에 크게 기여할 것이다.

### 제 4 절 세계 각국의 심해저 광업 관련 연구개발 동향

심해저 광물자원을 개발하기 위한 노력은 미국, 러시아, 불란서 등의 국가가 대양에서 망간단괴에 대한 탐사활동을 시작한 '60년대 중반으로 거슬러 올라간다. 이후 '70년대 초에 일어난 석유파동의 영향으로 국제금속시세가 급등하자 미국과 캐나다, 유럽의 민간기업을 중심으로 심해저 망간단괴를 개발하기 위한 국제컨소시엄이 결성된다. 이때 결성된 KCON, OMA, OMI, OMCO 등의 4대 컨소시엄이 '70년대를 통해 막대한 자금을 투자하며 활발한 연구개발 활동을 전개하였다. 4대 컨소시엄 중 OMA, OMI, OMCO는 독자적인 채광시스템을 개발하여 '78년도와 '79년도에 태평양 심해저에서 채광시험생산(pilot mining test)을 수행하였으며, 4

대 컨소시엄은 망간단괴로부터 망간, 니켈, 코발트, 동 등의 4대금속을 회수하기 위한 제련공정의 개발에도 많은 투자를 하였다. 이때 확립된 채광과 제련분야의 기술 개념은 오늘날까지 통용되고 있다. 오늘에 이르기까지 심해저 광업을 위한 연구개발활동이 가장 활발하게 이루어지던 시기는 4대 컨소시엄이 적극적인 투자에 나섰던 '70년대라고 할 수 있을 것이다. 그러나, '80년대 초에 불어닥친 국제금속시장의 침체현상이 장기화될 조짐을 보이자 4대 컨소시엄의 연구개발활동은 오랜 침체국면에 접어들게 되었다.

4대 컨소시엄의 연구개발이 중단된 이후에도 유럽에서는 불란서와 독일을 중심으로 망간단괴의 상업생산을 위한 연구개발이 한동안 계속되었다. 불란서에서는 '80년대 초반에 국내 심해저 광업 컨소시엄인 AFERNOD의 주도로 보다 진보적인 채광시스템의 개발을 위하여 대규모 투자를 감행하였다. 이러한 시도가 성과없이 끝나자 불란서는 '84년도부터 4년간 심해저 광업 생산시스템에 관한 종합적인 연구를 수행하였다. 불란서와 독일은 '80년대 후반부터는 환경연구에 중점을 두고 있다.

'90년대에 접어들어서는 아시아의 후발국가인 인도와 중국에서 정부 주도로 활발한 연구개발활동이 전개되고 있다. 반면, 미국, 일본, 독일, 불란서 등의 선발국가들은 생산시스템에 관한 연구개발활동을 일단 종료하고 심해저 광업에 따른 환경영향연구에 치중하는 경향을 보이고 있다.

'95년도 초에 개최된 국제해저기구 제 1차 총회에서 제시된 각국의 연구개발 투자실적 자료에 의하면, 최근까지 세계적으로 총 26억불이 넘는 자금이 심해저 광업을 위한 기술개발에 투자되었다. 독일이 올해 초까지 약 435 백만불을 투자하여 세계 최대투자국이 되었으며, 그 뒤로 미국, 일본, 러시아가 뒤따르고 있다. 심해저 광업은 투자한 국가들은 모두 세계 경제력 순위에서 상위에 올라 있는 국가들이며, 한국의 경우에는 연구개발 투자액 순위(이태리 포함시 11위)와 경제력 순위('95년 말 11위 예상)가 거의 일치하고 있다.



Table 7-4. Trends in R & D activities

지 역	연구개발 주력 시기	최근 활동	추진방식
북 미	'70년대	환경영향에 관한 연구, 금속시장 및 요소기술 발전 동향의 관측 및 평가	민간기업
유럽 및 일본	'70년대 ~ '80년대	환경영향에 관한 연구	민·관합동
아시아	'90년대	채광, 제련분야 연구개발, 정밀탐사	정부주도

## 1. 유 럽

### 가. 불란서

불란서의 심해저 광업과 관련한 활동은 1969년 국립해양개발센터(CNEXO)가 불란서령 폴리네시아에 부존하는 망간단괴에 대한 조사를 함으로써 시작되었다. 1971년도에 국립해양개발센터는 Societe Le Nickel(SLN)사와 함께 망간단괴 개발 타당성 조사에 착수하였다. 초기 망간단괴 탐사는 불란서령 폴리네시아를 중심으로 한 남태평양 지역을 대상으로 하였으나, 상업적으로 개발이 가능한 망간단괴 광상을 찾는 데에는 실패하였다. 그 후 남태평양과 인도양을 대상으로 한 추가적인 탐사가 있었으나, 1975년에 이르러서는 탐사대상지역이 북태평양 Clarion-Clipperton지역(C-C 지역)으로 한정되었다.

Table 7-5. R & D Investment for Deep Seabed Mining by Country

순 위	국 가	투 자 액
1	독일	435
2	미국	390
3	일본	381
4	러시아	343
5	중국	196
6	인도	191
7	불란서	149
8	화란	108
9	영국	95
10	한국	83
11	벨지움	65
12	캐나다	64
13	폴란드	63

1974년도에는 기존의 SLN과 CNEXO가 원자력 에너지 센터(CEA) 및 조선회사인NORMED(Chantiers du Nord et de la Mediterranee)와 함께 망간단괴 개발 연구를 위한 컨소시엄 AFERNOD를 결성하였는데, 불란서의 지질광업국도 1977년부터 1980년까지 AFERNOD에 참여하였다. 이 무렵 AFERNOD는 탐사활동과 함께 채광시스템의 개발에도 착수하여 당시 일본을 주축으로 구성된 연속버켓식 채광기술조합(Continuous Line Bucket Syndicate)에 참여하기도 하였다. 1977년도에는 두대의 선박을 이용한 연속버켓식 채광법에 대한 시험생산이 예정되기도 하였으나, 조합의 예산부족으로 무산되었다.

CLB에 대한 연구개발과 동시에 새로운 채광 시스템에 대한 연구도 수행되었다. '78년과 '79년에 있었던 국제 컨소시엄의 채광시험생산에서 심해저면의 연속

적인 채광작업에 장애가 되는 대규모 단애(cliff), 구혈(pothole) 등이 발견됨에 따라 집광기의 보다 효율적인 운행 필요성이 제기되었다. 이에 따라 불란서 정부는 자유이동식 로봇 셔틀의 개발을 위한 4년간의 연구사업을 시작하였다. 이 시스템은 무인잠수선이 해저면에서 망간단괴를 집광하고 수면 위로 운송하는 것을 그 내용으로 하고 있다. 망간단괴의 상업생산에 이 시스템을 이용하기 위해서는 1회 작업에 1,200톤의 집광능력을 갖는 셔틀 16대가 동시에 작업하여야 한다. 불란서 정부가 4년간 1억 프랑에 이르는 막대한 자금을 쏟아 부어 셔틀의 원형(prototype)까지 개발하였음에도 불구하고, 1983년도에 이르러서는 이 시스템이 기술적으로는 운용 가능하나 엄청난 투자비용과 운영비용으로 인해 적어도 수십 년이 경과하기까지는 상업적 이용이 불가능하다는 결론에 도달하였다. 그러나, 불란서 전문가들은 셔틀시스템이 비록 경제성 문제로 당장은 개발이 어려우나, 이 시스템이 갖는 고도의 작업 유연성을 고려할 때 2 ~ 3 세대 채광시스템에 대한 유력한 모델이 될 것으로 보고 있다. 불란서 정부가 셔틀 시스템의 개발을 추진한 동기 중에는 개발된 시스템을 군사적으로 응용하고자 하는 목적도 있었으나, 셔틀시스템에 대한 막대한 투자가 아무런 성과없이 끝남으로써 향후의 연구개발 활동 전반에 악영향을 미친 것으로 알려지고 있다.

그 후 1984년에는 심해저채광기술 개발을 위한 정부사업을 수행하기 위하여 불란서 해양 연구소, CEA, 그리고 CEA의 자회사인 TECHNICATOME이 함께 GEMONOD(Groupement pour la mise au point des moyens necessaries a l'exploitation des nodules polymetalliques; 다금속단괴 개발에 필요한 방법을 결정하기 위한 그룹)를 결성하였다. GEMONOD는 이전에 개발된 기술들을 재평가하고 채광시스템을 최적화하기 위한 연구를 하였다. 1984년부터 1988년까지의 연구를 바탕으로 GEMONOD가 제시한 심해저 광업 시스템의 개념은 다음과 같다.

- 자주식 집광기 (길이 18 m, 높이 5 m, 폭 15m, 무게 330 톤, 부력 78 톤, 시간당 집광량 600 톤, 공급전력 3MW)
- 유연 케이블 (600m 길이, 15" 직경) 및 경성(rigid)의 파이프스트링 (길이 4,800m, 내벽 직경 40 ~ 50cm, 공기인양 혹은 수압식 펌프인양)
- 반 잠수식 채광플랫폼 (Catamaran type, 길이 110 m, 폭 70 m, 높이 40m)
- 제련방식 : 암모니아 침출법, 황산 침출법 혹은 직접용융법(direct smelting)

GEMONOD의 연구는 전체 생산시스템에 관한 가장 최근에 이루어진 연구라는 데에 의미가 있다.

1988년도부터 불란서의 심해저 광업을 위한 모든 연구개발은 불란서 해양연구소(IFREMER; CNEXO의 후신)에 의해 관장되고 있다.

불란서는 1988년도 유인 잠수정 Nautille을 이용한 탐사작업 이후 심해저 광업을 위한 기술개발 활동을 거의 중단한 것으로 알려지고 있다. 1988년도에 불란서, 독일, 일본 간에 채광시스템에 대한 공동개발사업이 추진되기도 하였으나, 정부의 반대로 불란서는 참여하지 못하였고 독일, 일본 간에 미약한 협조관계로 사업이 유지되어 오다가 1993년도에 완전히 중단된 것으로 알려지고 있다.

불란서는 현재 심해저 광업과 직접적인 관련은 없지만, 심해저 환경 연구를 수행하고 있으며, 이를 위해 대서양 해저 2,000 m에 관측장비를 설치해놓고 있다 (프로젝트 명: NEREIS). 이 관측 장비는 해저 수심 최고 6,000m까지 설치가 가능하다고 한다. 이 밖에 IFREMER에는 심해 환경연구팀이 구성되어 일본을 비롯한 몇개 국가와 공동 연구를 하고 있다고 한다.

불란서는 1995년도 3월 현재 심해저 광업을 위한 탐사와 기술개발에 총 1억 5천만불을 투자하였다. 이 중 90% 정도의 자금을 정부가 직·간접적으로 투자하였으며, 나머지 10% 정도를 민간기업이 투자하였다. 불란서는 심해저 광업을 추진함에 있어서 민간기업의 참여보다는 국가기관에 의존함으로써 사업의 추진이 상

업적인 동기보다는 정책적인 의도에 영향을 많이 받았으며, 서틀시스템의 개발에서 나타난 커다란 시행착오는 바로 이러한 정부주도에 의한 사업체계 때문이었을 것으로 분석되고 있다.

심해저 광업을 위한 기술개발에 참여하였던 불란서의 민간기업으로는 탐사장비 분야의 Thompson사, 플랫폼 설계 및 채광시스템 분야에 Doris사, 제련 분야에 있어서 Metaleurop Recherche와 Kresb사가 있다.

#### 나. 독 일

1969년도에 당시 독일의 연방 과학연구부(Federal Ministry of Scientific Research)에 의해 해양광물자원의 평가에 관한 연구 프로그램이 시작되었다. 이러한 초기 활동은 주로 기초자료의 수집에 중점을 두었으며, 다수의 독일 민간기업 및 연구기관이 '70 ~ '71년도 기간 중 이루어진 심해 탐사용 조사선 Propector의 4차례 항해에 승선하여 현장 작업을 처음으로 경험하였다.

1972년도에는 트롤선을 개조한 조사선 Valdiva가 망간단괴 및 기타 해양광물자원의 평가를 위한 탐사사업에 투입되었다. 같은 해 5월, Metallgesellschaft AG, Preussag AG, 그리고 Salzgitter AG에 의해 독일의 심해저 광업 컨소시엄인 AMR이 구성되었으며, 1973년도에는 Rheinische Braunkohlen-Werke AG가 AMR에 참여하기도 하였으나 Salzgitter와 Rheinische Braunkohlen-Werke AG는 이후에 탈퇴하였다. 이후 AMR은 태평양과 인도양에서 집중적인 탐사활동을 수행하였다.

1975년도에 AMR은 OMI 컨소시엄에 참여하였으며, 이후 OMI의 탐사사업에 주도적인 역할을 담당하였다. OMI는 1978년 3월에 태평양에서 실험채광시험생산에 성공하였다. OMI는 시험생산에서 45일간 약 1,500톤의 망간단괴가 회수된 것으로 알려지고 있으며, 시험생산을 위해 일본의 수압식 집광기와 독일

Preussag이 제작한 기계식 집광기가 투입되었는데 독일의 기계식 집광기는 시험 중 없었다.

1978년도에는 역시 트롤선에서 개조된 2,500톤 규모의 조사선 Sonne가 Valdiva를 대체하였으며, 이후 Preussag사의 주도 하에 다수의 민간기업, 연구기관, 대학이 참여하여 각종 장비의 개발, 망간단괴의 분포 및 조성에 관한 연구, 그리고 채광시스템의 개발을 추진하였다. Preussag사는 이때 무한케도차(caterpillar) 타입의 자주식 집광기에 대한 육상시험을 많이 하였다. 1980년대 초에는 사우디아라비아와 수단 정부의 요청에 따라 Preussag사는 해저 약 2,200m에 부존하는 홍해의 금속함유 진흙광상에 대한 시험생산을 수행하여 성공하였다.

또한, Preussag사는 캐나다의 INCO사와 함께 제련공정에 관한 연구에도 관여하였는데, 이때 개발한 제련방식은 건식제련법이었다. 제련공정 연구에는 독일 Duisburg에 소재한 KHD사와 아헨공대, 함부르크대학도 관여했다. INCO사와 Preussag사의 연구결과에 의하면 건식제련법이 에너지 소비량은 크지만 잔사처리 문제를 고려할 때 환경보호 측면에서 가장 적합한 방법이라는 결론에 도달하였다고 한다. 1981년부터 1983년까지 2년간 캐나다 Colburn에서 시험생산도 하였다. 이 방법의 문제점으로는 지적된 것은 용광로의 cladding현상이었던 것으로 알려져 있다.

독일의 연구개발을 위한 주된 활동은 '80년대 중반까지 이루어졌으며, 그 이후로는 투자 규모가 급격히 감소하였다고 한다. '90년대에 들어서는 통일에 따른 재정압박으로 연구개발 투자가 거의 중단 상태에 접어들었다. 현재는 AMR이 자국법에 의해 망간단괴 광구 등록을 한 남태평양의 갈라파고스섬 부근의 페루해분에서, 환경영향에 관한 연구만 이루어지고 있다(연구사업명: TUSCH). '89년도부터 시작된 이 연구사업에 93년도까지 총 1,700만마르크가 투입되었으며, '96년도까지 연구사업이 계속될 예정이다. AMR의 광구는 수심 4,000m정도로 깊이는 알지만, 단괴의 크기가 불규칙하며 퇴적층에 너무 깊이 박혀 있어서 부존자원의 상업적 가치가 다소 떨어지는 것으로 알려져 있다.

Preussag은 현재 채광부문과 제련부문에 관련한 OMI의 모든 지분을 METALEUROPE에 양도한 상태이며, Metallgesellschaft 역시 '93 ~ '94 년도 경에 석유선물시장에서 30억 마르크의 손해를 본 이후 OMI 지분을 캐나다의 INCO에게 넘긴 상태이다. 따라서, 현재 독일은 OMI의 지분을 전혀 갖고 있지 않다

독일은 1995년도 3월 현재 총 435백만불을 심해저 광업을 위한 탐사 및 기술 개발에 투자한 이 분야의 세계 최대 투자국이다. 정부는 '80년대 말까지 연구개발비의 2/3를 부담하다가 그 이후 1/2로 낮췄다고 한다. 독일의 기술개발 활동은 민간기업인 Preussag사가 주도하여 불란서보다는 상업적 동기에 보다 충실했던 것으로 알려지고 있다. 독일의 전문가들은 심해저 광업에 필요한 전분야의 기술을 이미 마스터했다고 생각하고 있으며, 통일에 따른 재정압박으로 당분간 기술개발에 투자하기는 힘들 것으로 전망하고 있다.

#### 다. 노르웨이

노르웨이는 연해 석유가스산업(offshore oil and gas industry)에 우수한 기술적 기반을 보유하고 있으며, 경제활동의 90%이상이 해양과 관련되어 있다. 최근 노르웨이 경제는 매우 양호한 편으로 '94년도 경제성장률이 5%에 달했으며, 실업률도 3%정도로 매우 안정되어 있고, 채권국으로서 양호한 재정상태를 보이고 있다. 해양산업과 근해 석유가스개발에 특화된 기술기반을 갖추고 있는 노르웨이는 심해저 광업에 직접적인 이해는 가지고 있지 않으나, 심해저 광업이 자국에 커다란 기술시장을 제공할 것으로 기대하고 있다.

노르웨이에는 해양광물자원(석유가스포함)의 개발을 위한 유기적 협조체제로서, 국내 20개 관련기업이 참여한 노르웨이 광업그룹(the Norwegian Mining Group)이 형성되어 있다. 노르웨이의 광업그룹에는 해양장비 업체인 Simrad사를 비롯하여, Aker, Frank Mohn, Seatex/Oceanor 등이 참여하고 있으며, 광업그룹

의 조정역할은 Fridtjof Nansen Institute이 수행하고 있다. 즉, 노르웨이는 광업그룹을 통해, 규모가 크지 않으나 기술적으로 특화된 노르웨이 내의 해양관련 회사들 간의 공조체제를 형성하고, 이를 바탕으로 해외진출 및 외국과의 협력사업을 추진하고 있다. 그 한 예가 노르웨이 광업그룹과 인도의 해양개발부가 파트너가 되어 진행하고 있는 인도-노르웨이 간 기술협력사업을 들 수 있다.

인도-노르웨이 간 기술협력은 1981년으로 거슬러 올라가나, 1980년대 중반부터 본격화되었다. 인도양 망간단괴 탐사에 노르웨이의 조사선이 투입되고, 노르웨이의 장비의 구입, 전문가 초청 및 고용, 공동 연구사업의 수행 등의 방법으로 기술협력이 이루어졌다.

1993년도부터는 인도-노르웨이간 2단계 협력사업에 대한 논의를 시작되었으며, 양국은 1995년 10월부터 1년 6개월 동안 3개 과제를 수행하기로 합의하였다. 2단계 협력사업으로 추진될 3개 과제는 ① 양광(riser) 시스템에 대한 공학적 설계 개념수립 ② 집광기의 2차 원형제작 ③ 원격조정작업선(Remoted Operated Vehicle)의 개발 등이다.

노르웨이 광업그룹의 심해저 광업에 대한 일차적 관심사는 가장 최근에 개발된 연해 석유가스개발기술을 심해저 광업의 탐사와 채광부문의 시스템 개발에 적절히 접목시키는 것이다.

## 라. 러시아

러시아(구 소련)의 심해저 광업에 대한 관심은 소련 과학원(Soviet Academy of Science)에 의하여 조사선 Vityaz가 탐사를 시작한 1960년대로 거슬러 올라간다. 그 이후 탐사활동은 소련 지질성(Ministry of Geology) 내의 Yuzhmorgeologiya(Southern Production Association for Marine Geological Operations)에 의해 주도되었다.



러시아의 채광시스템은 주로 천해의 사금광상 개발기술을 응용한 것으로 보인다. 그러나 이러한 기술이 심해저에서도 그대로 적용될 수 있을지 의문이다. 구 소련의 심해저 광업 기술개발에 참여한 기관으로는 모스크바 광업연구소(Moscow Mining Institute), 레닌그라드 광업연구소(Leningrad Mining Institute), 우스트 카메노고르스크에 위치한 국립비철금속연구소(National Nonferrous Research Institute at Ust-Kamenogorsk), 금광업 연구소(Gold Mining Institute) 등이 있다.

또한, 구 소련은 핀란드의 최대 국영회사인 Rauma-Repola사와의 공동 개발프로그램을 통해 1980년대 초의 OMCO기술을 사들였다는 설이 있다. 당시 미국법은 안보상의 이유로 핀란드로의 기술수출을 엄격히 제한하고 있었다. 따라서, 핀란드의 OMCO기술 도입은 불법이었다고 한다.

구 소련은 핀란드와의 공동사업을 통해 무한케도차 방식의 집광기와 기계식-수압식 혼합방식의 집광장치(collecting device)를 개발하였다고 한다. 그리고, 집광시스템에 대한 시험을 독일 칼스루헤 근해와 갯벌에서 수행하였다. 연구개발의 일부는 독일의 Preussag사와 독일의 엔지니어링회사인 THETIS가 담당하였으나, 기술의 소유권은 Rauma-Repola가 소유하고 있다. 공기인양방식과 수압인양 방식에 대한 시험도 이루어졌으며, 독자 기술에 의해 복합재료로 만든 파이프, 수중 펌프시스템, 부력재 등이 개발되었던 것으로 알려지고 있다.

#### 마. 동구국가들

1987년도에 동구권국가들을 주축으로 한 심해저 광업 콘소시엄 IOM(Inter Ocean Metal)이 설립되었다. 설립 당시의 참여국가는 불가리아, 쿠바, 체코슬로바키아, 동독, 폴란드, 소련, 베트남 등이었으나, 베트남은 그 이후 탈퇴하였고, 동독은 서독에 통합됨에 따라 지분을 포기하였다.

현재 폴란드(Szczecin)에 본부를 두고 있는 IOM은 소련의 조사선을 임대하여 북태평양에서의 탐사활동에 주력한 결과, 1991년에 개최된 준비위에서 북태평양 C-C 지역 내의 망간단괴 광구에 대한 선행투자가 등록에 성공하였다. '94년도에는 미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)와 공동으로 환경연구(Benthic Impact Experiments; 해저면 교란실험)에 착수하여 첫해에 해저면의 교란전 상태에 대한 연구를 수행하였고, '95년도 여름에 러시아 조사선 Yuzhmorgeologiya와 NOAA의 해저면 교란기(Benthic Sediment Resuspension System; 일명 Disturber)를 임대하여 해저면 교란실험을 수행하였다.

IOM은 독일의 통일과 구 소련의 체제 붕괴로 인해 한때 큰 타격을 받았으나, 현재 대 유엔 의무이행사항을 중심으로 꾸준히 활동을 하고 있다. 채광부문과 제련부문의 기술을 개발하기 위한 독자적인 노력은 별로 없었던 것으로 보인다. 아마도 이 부문의 기술은 회원국인 러시아에 의지할 계획으로 보이나, 러시아의 경제 악화로 기술개발에 큰 어려움을 겪을 것으로 예상된다.

## 2. 북 미

앞에서 기술한 바와 같이, 미국에서는 '60대 중반부터 주로 민간기업의 순수한 상업적 동기에 의해 탐사 및 실용기술의 개발이 시작되어 '80년대 초까지 가장 활발한 투자가 이루어졌다. 이 기간 중 미국과 캐나다의 기업이 주도하는 4대 국제 컨소시엄인 KCON, OMA, OMI, OMCO의 활동에 의해 오늘날까지 통용되는 심해저 광업의 기술 개념이 확립되었다. 그러나, 기술개발이 가장 활발하게 이루어지던 '70년대 중반부터 광물자원에 대한 수요가 세계적으로 감퇴하기 시작하였고, '80년대에 접어들어서는 국제 광물시장이 구조적인 침체에 접어들게 되었다. 이에 따라 4대 컨소시엄의 활동도 오랜 침체기에 접어들게 되었다. '94년도에는 KCON이 해체되었으며, 나머지 3개 컨소시엄도 명맥만 유지할 뿐 현재는 활동이 거의 없는 실정이다.

이 밖에 미국에서는 지질조사국(US Geological Survey)과 하와이 동서센터(East-West Center)가 중심이 되어 태평양 도서국가와 자국의 배타적 경제수역 내에 분포하는 코발트각과 다금속 유화광상에 대한 탐사활동을 '70년대부터' 수행해 왔으며, '70년대 중반부터 NOAA가 심해저 광업에 따른 환경영향 연구를 수행해오고 있다. 특히 '80년대 초반에는 NOAA의 오스트루구트(Ozturgut) 박사에 의해 해저면 교란실험(Benthic Impact Experiment: BIE)이 제창되었다. 이에 따라 교란 이전의 심해 환경에 대한 연구가 수행되어 오다가, 1991년에는 교란기(disturber)를 제작하여 시험하였으나 케이블 불량으로 실패하였다. 1993년도에는 보다 개선된 교란기를 제작하여 교란실험에 성공하였으며, '94년도에는 교란 후의 변화가 관측되었다. 같은 해 NOAA는 일본의 BIE 사업에 참여하였으며, '95년 여름에는 IOM의 BIE사업에도 참여하였다.

심해저 광업의 기술개념 확립에는 미국과 캐나다 기업이 주도한 4대 컨소시엄의 역할이 결정적이었으므로 과거 4개 컨소시엄의 기술개발 활동을 살펴보기로 한다

#### 가. KCON

KCON의 기원은 그 당시 미국기업이었던 Kennecott사가 그 자회사인 Bear Creek Mining 사를 통해 해양탐사를 시작한 '60년대 초로 거슬러 올라간다. 그 당시의 주된 활동은 연구기관들에 의해 회수된 망간단괴의 조성 분석, 채광시스템 개발의 타당성 조사, 실험실 규모(bench-scale)의 제련연구 등에 중점을 두었다. 62년 말부터 Kennecott사는 해양 연구기관의 탐사항해를 지원하다가 1967년도부터 조사선을 임대하고 탐사 및 시료채취 장비를 개발하여 자체적인 탐사체제를 갖추었다. 그 후 제련연구를 위한 충분한 양의 망간단괴가 회수됨으로써 Kennecott사는 큐프리콘 암모니아 침출법을 개발하는 데에 성공하였다. 큐프리콘

암모니아 침출법은 기본적으로 니켈, 코발트, 동 등 3개 금속의 회수를 목표로 하나, 잔사로부터 망간의 추가적인 회수도 가능한 공법이다.

1974년 1월, Kennecott사는 영국의 광업회사인 Rio Tinto Zinc사와 Consolidated Gold Fields, 캐나다의 광업회사인 Noranda사, 일본의 미쓰비시사와 함께 심해저 광업 컨소시엄 KCON을 구성하였다. 그 후 KCON은 그 후 '76년도까지 근해역과 신험역 실험을 위한 채광시스템 개발을 추진하였으나, 시험생산은 수행한 바 없다. KCON은 '76년도까지 총 50백만불을 탐사 및 기술개발에 투자한 것으로 알려지고 있다. 1984년도에는 C-C 지역 내의 망간단괴 광구에 대한 탐광권(exploration license)을 미국의 NOAA로부터 인정받았으며, 또한, C-C 동단에 위치한 또 다른 광구에 대한 탐광권도 영국 국내법에 의해 인가받았다. 이 후 KCON은 명맥만 이어오다가 1994년에 해체되었고, KCON의 광구는 OMCO에 양도되었다.

#### 나. OMA(Ocean Mining Associates)

OMA의 기원은 1968년도에 미국기업 Tenneco사가 '62년도부터 대서양에서 망간단괴에 대한 탐사를 해오던 미국의 Newport News and Shipbuilding and Dry Dock사를 인수하여 Deepest Venture 사를 설립한 때로부터 시작된다. 그 후 Deepest Venture사는 탐사 및 자원평가, 장비 개발에 노력하였으며, 특히 4대 금속의 회수를 위한 제련공정의 개발에 많은 투자를 하여 염화수소법(hydrochlorination process)을 개발하였다. 1970년에는 미국 조지아주와 플로리다주 해안 부근에 있는 대서양 Blake Plateau에서 화물선을 개조한 Deepsea Miner 호를 채광플랫폼으로 하여 해저 750m에 부존하는 망간단괴를 공기인양방식으로 회수하는 시험생산에 성공하였다. 그 후 탐사대상지역을 태평양으로 옮겼으며, '60년대 초에 여객선을 개조한 조사선 Prospector 호를 탐사활동에 투입하였다.

그 이후 탐사활동과 채광시스템 개발에 주력하여 상업생산 1/5규모의 시험생산을 수행하기에 이르렀다. 1978년 11월에 OMA는 공기인양 방식으로 태평양 해저 4,500m에 부존한 망간단괴를 회수하는 데에 성공하였다. 1984년도에는 NOAA로부터 C-C 지역 내 150,300 km<sup>2</sup> 에 달하는 광구에 대한 탐광권을 인가받았다.

다. OMI(Ocean Management Inc.)

OMI의 기원은 세계의 니켈시장을 지배하고 있는 캐나다의 Inco 사가 심해저 광업에 관심을 갖고 기초적인 타당성 조사에 착수한 '60년대 중반으로 거슬러 올라간다. Inco 사는 1970년부터 OMA의 조사선 Prospector호를 임대하여 본격적인 탐사활동을 시작하였으나, 다른 컨소시엄에 비해 그다지 적극적이지는 않았던 것 같다. 그대신 Inco 사는 공학적 문제의 해결에 더 많은 노력을 기울였으며, 집광장비의 설계(dredge head design)와 망간단괴 회수의 타당성 조사를 다른 기관에 의뢰하기도 하였다. 또한 '70년대 초에는 일본이 주도한 연속버켓식 채광기술조합에 참여하기도 하였으며, 망간단괴 제련을 위한 건식제련법(용융 후 황산침출)을 개발하여 이에 대한 시험생산을 하기도 하였다.

Inco 사는 1975년 5월에 독일의 AMR과, 스미토모 그룹 주도 하에 일본의 19개 기업이 참여하여 구성한 DOMCO(Deep Ocean Mining Company)와 함께 OMI를 설립하였다. 이후 미국의 시추회사인 SEDCO(Southeastern Commonwealth Drilling Co.)도 OMI에 참여하였다.

OMI는 태평양 심해로부터 망간단괴 시험채광에 성공한 최초의 컨소시엄이다. OMI는 시추선 SEDCO-445와 견인식 집광선을 사용하여 1978년 3월에 시간당 약 60톤의 망간단괴를 회수하는데에 성공하였다.

탐사활동은 독일의 AMR사가 주도하였으며, 독일의 조사선 Valdiva(1971 ~ 1978)와 Sonne(1978년 이후)가 투입되었다. OMI는 84년 8월에 C-C 지역 내

135,100 km<sup>2</sup> 넓이의 광구에 대한 탐사허가권을 NOAA로부터 인가받았다. OMI는 심해저광업을 위한 탐사와 기술개발에 50 ~ 100 백만불 정도를 투자한 것으로 알려지고 있는데 대부분의 투자는 1980년 이전에 이루어졌다. '90년대에 들어 독일의 AMR은 OMI로부터 철수하였다.

라. OMCO(Ocean Minerals Co.)

록히드 그룹의 Lockheed Missiles and Space Co.(현재는 Lockheed and Martin Co.로 바뀌었음.)는 자사가 보유하고 있는 군수산업의 첨단기술을 상업적 목적의 기술로 전환·활용하기 위한 정책의 일환으로 60년대 중반부터 망간단괴 개발에 관심을 두고 타당성 조사를 해왔다. 1970년대 초에는 미국 CIA가 지원하고 하워드 휴즈의 Summa사가 주도하였던 해양광물자원 개발사업에 참여하였다. Summa 사의 해양광물자원 개발은 위장사업이었으며, 실제로는 해저에 침몰한 러시아 잠수함을 인양하여 암호와 잠수함 건조기술에 관한 정보를 획득하기 위한 것이었다. 이때 조사선 Glomar Explorer 호가 건조되었다. 또한 록히드의 지원하에 미국의 콜로라도광산대학(Colorado School of Mines)에서 망간단괴 제련연구가 수행되었는데, 이때 가장 중점적으로 연구된 공정은 황산침출법이었다.

OMCO 컨소시엄은 1977년 11월에 미국의 록히드그룹과 석유회사 Amoco 사, 그리고 네덜란드의 Royal Dutch Shell사의 자회사인 Billiton B.V.와 해양 엔지니어링 회사인 Bas Kalis가 참여하여 설립되었다. OMCO는 1978년도 말에 Glomar Explorer 호를 채광선으로 하고 아키메디안 스크류 방식의 집광기를 사용하여 망간단괴 채광에 대한 시험생산을 시도하였으나, 망간단괴를 회수하는 데에는 실패하였다. 그 후 OMCO는 C-C 지역 내의 165,533 km<sup>2</sup> 넓이의 광구에 대한 탐사허가권을 NOAA로부터 인가받았다. OMCO는 심해저 광물자원 개발에 약 120 백만불을 투자한 것으로 알려지고 있다.

네덜란드의 지분 참여사는 네덜란드가 유엔해양법 협약국인 반면 미국은 협약에 서명하지 않았다는 점과 심해저 광업의 경제성 전망이 어둡다는 점을 들어 OMCO로부터의 지분을 철수하였다. OMCO의 현재 지분 구성은 미국의 록히드 그룹이 50%, Cyprus Metal 사 50%로 되어 있다.

OMCO는 KCON이 '94년도에 해체됨에 따라 KCON의 광구에 대한 권리를 양도받았다. 이에 따라 OMCO는 세계에서 가장 넓은, 양질의 망간단괴 광구에 대한 권리를 보유하게 되었다.

### 3. 아시아

#### 가. 일본

일본에서는 1975년도부터 통상산업성 산하의 금속광업사업단이 심해저광물에 대한 탐사활동을 수행하기 시작하였으며, 이를 위해 '74년도와 '80년도에 각각 건조된 조사선 백령환호와 백령환 2호가 투입되었다.

'82년도에는 심해저 광업을 위한 국내 컨소시엄으로 해양자원개발주식회사(Deep Ocean Resources Development Co., Ltd.; DORD)가 구성되었다. DORD는 상법상 주식회사 형태를 취하고 있으나, 자본 구성은 국가기관인 금속광업사업단이 80%, 48개 민간기업이 20%로 되어 있다. DORD는 '87년도에 개최된 준비위에서 C-C지역 망간단괴 광구에 대한 등록주체가 됨으로써, 심해저 광업에 있어서 일본을 대표하는 기관이 되었다. 이와 별도로 일본의 민간기업들은 OMI와 '94년도에 해체된 KCON에도 참여하여 기술개발에 있어서 미국, 캐나다, 독일 등의 선진국가들과 공동 보조를 취하기도 하였다.

채광시스템의 개발을 위한 활동은 초기에는 '74년도에 설립된 심해저광물자원개발협회를 중심으로 수행되어 오다가 '82년도부터 기술연구조합 해저자원개발시

스텝연구소(Technology Research Association of Ocean Mineral Resources Mining System; TRAM)에 이관되었다. 채광시스템에 대한 연구개발비용은 통상 산업성의 산하기관인 공업기술원(Agency of Industrial Science and Technology; AIST)으로부터 지원받고 있으며, 연구내용에는 견인식 집광시스템, 유압식 인양 장비(유압펌프의 개발), 공기압식 인양시스템의 개발, 인양파이프 개발, 심해저 작업용 각종 기계장비의 개발, 계측제어시스템 개발 등이 포함되어 있다. TRAM은 '86년도부터 시험용 채광시스템에 대한 정밀설계 작업에 착수하여 '90년도까지 집광시스템의 원형(prototype) 제작을 끝마쳤다. 일본은 당초 집광시스템의 운용에 필요한 각종 보조장비 및 부력재의 개발과 장착을 마친 후 '90년대 중반까지 해저 5,000m에서 채광시험생산(pilot mining test)을 수행할 계획이었으나, 시험생산 계획을 계속 연기, 축소하여 현재로서는 '97년도에 예정되어 있는 해저 2,000m에서의 예비시험생산(Pre-Pilot Test; PPT)의 수행 여부도 확실한 것은 아니다.

일본의 연구개발활동에 있어서 특징적인 점은 견인식 집광시스템을 고수하고 있다는 점이다. 일본의 연구개발팀은 견인식 집광시스템의 집광효율이 자주식 집광시스템의 25 ~ 30%에 불과하다는 점은 인정하나 견인식 집광기가 자본회수 면에서 유리하므로 1세대 채광장비로는 적합하다는 입장을 견지하고 있다.

일본은 현재 환경영향연구를 중점적으로 수행하고 있으나, 엔고불황에 따른 예산압박으로 연구개발활동이 전반적으로 위축되는 양상을 보이고 있다. 일본의 심해저광업 추진체제는 외형적으로는 민·관합동방식을 취하고 있으나, 연구개발자금의 원천(source)과 출자비율로 볼 때 정부주도의 성격이 강하다고 할 수 있다.

## 나. 인 도

인도는 1977년부터 정부의 지원을 받은 국립해양연구소의 주도로 인도양에서 망간단괴에 대한 탐사활동을 수행해오고 있으며, 최근에는 환경연구도 병행하고



있다. 인도의 연구개발은 1981년도에 설립된 해양개발부가 관장하고 있으며, 연구개발비의 전액이 정부로부터 지원되고 있다.

인도는 '84년도부터 건식제련공정과 암모니아 침출공정에 대한 연구개발 활동을 수행해 왔으며, '90년대에 들어서는 Bhubaneswer에 위치한 Reginal Research Laboratory(RRL)에서 암모니아 침출 후 용액추출 공정에 대한 망간단괴 200 kg 처리규모의 준 시험생산 시설을 건설하였다. 인도는 육상부존 망간자원이 풍부하므로, 망간을 제외한 3개 전략금속의 추출에 중점을 두고 있다.

채광시스템에 관한 연구는 '89년도부터 중앙기계공학연구소(Central Mechanical Engineering Research Institute: CMERI)에 의해 수행되고 있는데, 현재까지 집광시스템의 원형제작 및 모형분지(test basin)에서의 시험작업, 제 1단계 원격조정작업선(Remoted Operated Vehicle)의 원형제작 및 모형분지에서의 시험작동, 버켓식, 공기압식, 그리고 유압식 인양에 대한 육상시험 등이 이루어졌다. 인도의 집광시스템은 자주식 집광선과 기계식 집광기로 이루어져 있으며, 이에 대한 시험이 '96년에 인도 연안 수심 30m에서 실시될 예정이라고 한다.

인도는 현재 중국과 더불어 심해저광업 분야의 연구개발에 가장 적극적인 국가이다.

인도는 '87년도에 인도양 망간단괴 광구에 대한 선행투자가 등록을 함으로써 유엔해양법 협약체제에 따른 첫번째 선행투자국이 되었다.

#### 다. 중 국

중국은 '70년대 중반부터 심해저 광물자원에 대한 탐사활동을 국가사업으로 수행하여 왔으며, '80년대 중반까지 태평양에서 총 200km<sup>2</sup>에 이르는 지역에 대한 예비탐사를 마치고 '86년도부터 '90년도까지 등록 광구의 선정을 위한 탐사활동을 C-C지역에서 전개하였다. 중국은 1991년도에 개최된 준비위에서 광구 등록에 성공함으로써 인도, 프랑스, 일본, 러시아에 이은 5번째 선행투자국이 되었다.

‘91년도에는 심해저 광업을 위한 연구개발의 기획 및 조정, 선행투자자로서의 대유엔 의무사항 수행을 목적으로 중국대양광산자원연구개발협회(China Ocean Mineral Resources R&D Association; COMRA)가 설립하였다. COMRA는 순수한 국가기관으로 국가해양국(State Ocean Administration)의 감독을 받으며, 국가해양국, 지질광업성(Ministry of Geology and Mineral Resources), 금속산업성(Ministry of Metallurgical Industry), 유색금속공업총공사(China Nonferrous Metal Industry Corp.) 등으로부터 연구개발자금을 출연받아 참여 연구기관에 분배한다. COMRA는 망간단괴 상업생산을 위한 장기 연구개발계획을 수립하고, 탐사, 채광, 제련, 환경, 그리고 기타 포괄적 연구 분야 등에 대한 5개 연구개발 프로그램을 관장하고 있다.

중국은 광구등록 이후 광구포기를 위한 탐사활동을 수행해 왔으며, ‘96에는 등록광구의 30%를 포기할 예정이라고 한다. 채광분야에서는 현재까지 육상에서의 유압식 및 공기압식 인양시험, 집광선의 추진 및 조정 시험을 위한 모형분지의 조성, 유압식 집광기에 대한 시험탱크(test tank)에서의 성능시험, 계측제어시스템에 대한 개념연구 등이 수행되었다. 제련분야에서는 건식 및 습식제련 공정들에 대한 실험실 규모의 시험을 해오고 있다.

## 제 5 절 기술이전의 방법 및 요인

후발주자인 우리나라로서는, 외국으로부터의 기술도입이 비용효과적 기술확보를 위한 중요한 기회를 형성하므로, 본 절에서는 기술이전의 방법 및 요인에 대해 탐구하였다.

## 1. 기술이전의 개념과 분류

### 가. 기술이전의 정의

기업이 경영활동에 필수적인 기술을 습득하는 데에는 '자체 내의 기술개발'과 '외부로부터의 기술도입'이라는 두 가지 방법이 있다. 그러나 기술수준은 일반적으로 한 나라의 교육 및 경제수준에 비례하므로 특정기업의 입장에서는 이러한 구분방법보다도 '자국 내의 기술능력 활용'과 '외국기술의 도입'이라는 두 가지로 나누는 것이 더욱 적절하다고 볼 수 있다. 이 때 기술도입국 입장에서의 '외국기술의 도입'을 기술제공국가의 입장에서 보면 '자국기술의 제공'이 되고, 이러한 기술의 국가간 흐름을 객관적 입장에서 보면 '기술이전'이 된다.

한편, 기술이전이란 용어는 보는 관점에 따라 여러가지로 정의되고 있다. Brooks는 "기술이전은 과학과 기술이 인간의 활동을 통하여 확산되어 가는 과정"으로 정의하고 실질적으로 생산에 체화된다는 점에서 일반적인 기술정보의 이전과 구별하고 있다.<sup>1)</sup> Köhler 등은 "국가간의 기술이전이란 타국에서 과거 또는 현재에 성취한 기술적 성과를 도입국에 이익되게 재현하거나 유용하게 복제할 수 있는 능력을 창출하는 것"이라고 정의하여<sup>2)</sup> 기술이전이 단순히 이전된 기술을 사용할 수 있는 능력의 이전이라고 규명하고 있으며, 국제연합 무역개발회의(UNCTAD)에서는 "새로운 생산시설과 현재 가동중인 설비의 확장을 위하여 설계 또는 공정관리에 정상적으로 필요한 기술지식요소의 이전이 선진국과 개발도상국사이에서 이루어질 때 이를 국가간 기술이전"이라고 정의하고 있다.<sup>3)</sup>

### 나. 기술이전의 구성요소

기술이전과정은 매우 복잡한 양상을 내포하고 있으나 어떠한 과정을 막론하고 다음의 6개 요소로 구성되어 있다.<sup>4)</sup>

첫째, 이전대상물로서 무엇이 이전되었는가의 문제이다. 즉 구체적인 반도체 등 생산물인가 또는 반도체 부식방법인 공정인가 또는 노하우인가 또는 이들의 집합인가 등이다.

둘째, 기술제공자로서 누가 이전할 기술의 독점권을 갖는가? 또한 타인에 이전할 의사가 있는가?

셋째, 기술도입자로서 누가 기술제공자로부터 이전대상물을 수취하는가?

넷째, 이전방법으로서 이전대상물이 정확히 어떤 방식으로 제공자로부터 취득자에게 전달되는가? 기술도입계약에 의해서인가 또는 직접구입 형태인가?

다섯째, 기술확산속도로서 확산속도는 두가지 측면에서 검토될 수 있는 바 우선 한 국가가 새로운 제품을 개발한 후에 다른 국가가 그 제품을 생산하기 위해 생산능력을 갖추는데 걸리는 '모방에 소요되는 기간(imitation lag)'과 둘째로는 신제품이 개발국가의 시장을 점유한 후에 타국에서 수용되는 데 필요한 '수요창출에 소요되는 기간(demand lag)'이 있다.

여섯째, 마지막 요소는 도입자의 흡수능력이다. 이는 기술을 효과적으로 흡수하기 위한 도입자의 능력을 말하는 것으로 개도국은 과학기술 기반의 취약으로 신기술 흡수능력이 미약하며 따라서 개발수요에 부합되는 적정기술을 선택함에 있어서 상당히 제한을 받게 된다.<sup>5)</sup>

## 2. 기술이전의 대상, 특징 및 경로

### 가. 기술이전의 대상

국제기업이 기술을 이전하는 데는 대금수수여부에 따라 무상의 기술이전과 유상의 기술이전이 있으며 무상의 기술이전은 ① 정부간 베이스의 공적 기술이전, ② 플랜트 수출상의 pre-care와 after-care로 나눌 수 있으며 after-care는 구입플

랜트의 애프터 서비스, 플랜트 노우-하우의 제공, 플랜트 현장에서의 기술지도 및 현지인의 본사초청훈련 등을 포함하고 있다. 유상의 기술이전은 일반적으로 협의의 라이선싱을 의미하며 또한 법적 보호를 받고 있는 공업소유권과 법적 보호를 받지 못하고 있는 노우-하우 등이 있다. 법적 보호를 받는 공업소유권은 특허권·실용신안권·의장권·상표권·저작권이 있으며 법적 보호를 받지 못하는 것으로는 노우-하우·기술지도·산업임대차계약·엔지니어링 서어비스·프랜차이즈·공장운용분야 지도 등이 있다.

이러한 기술이전의 대상은 기술적 차원의 분류와 관리적 차원의 분류로 나누어지는데, 기술적 차원의 분류로서 국제연합무역개발회의(UNCTAD)에서는 이전되는 기술의 내용을 기준으로 하여 ① 가능성 연구, ② 이전대상 기술의 범위와 기술의 선정, ③ 제조공정, ④ 엔지니어링 설계, ⑤ 생산설비의 건설, ⑥ 기술과 관리인력의 훈련, ⑦ 생산설비의 운영과 경영, ⑧ 시장정보, ⑨ 공정과 제품설계의 향상 등 아홉가지로 분류하고 있다.<sup>6)</sup> 그리고 관리적 차원의 분류로서 Baranson은 기술이전의 대상을 관리적인 차원에서 ① 생산설계, ② 생산기법, ③ 생산계획을 조직하고 수행하기 위한 관리시스템 등 세가지로 분류하였다.<sup>7)</sup>

한편, Davis는 기술이전에 포함되는 기술요소들을 기술정보자료와 설계도, 제품의 견본, 부분품, 생산설비, 경영자, 기술용역의 6가지로 분류하였으며<sup>8)</sup> 김인수 교수와 이진주 교수는 기술적 차원과 관리적 차원의 두 가지 체계를 종합하여 도입기술을 11가지로 분류하고, 1977년 3월부터 1978년 6월까지 한국에 도입된 306건을 분석대상으로 삼아 우리 나라의 기술도입 상황을 파악하였다.<sup>9)</sup> 그 11가지 기술은 1) 특허, 실용신안 실시권, 2) 기술정보자료, 설계도, 3) 생산설비, 4) 원재료·부분품 5) 기술제공측의 기술용역 6) 기술도입자의 기술교육훈련 7) 품질검사 기술 8) 경영관리 기술 9) 마케팅 기술 10) 상표사용권 11) 건설관리 등이다.

기술포괄형태는 Davis(1977)를 제외한 기존 연구들에서는 단순히 포괄형태, 비포괄형태로만 언급하였을 뿐 자세한 내용은 거의 찾아 볼 수 없다. Davis는 포

팔기술은 생산설비와 기술용역을 포함한 기술로서, 중간팔기술은 생산설비와 기술용역을 포함하지 않고 단순히 기술정보나 제품의 견본 그리고 부분품중 어느 하나만이라도 포함하는 기술로 정의하였다.<sup>10)</sup>

따라서 국제연합무역개발회의(UNCTAD)와 Baranson, Davis 등에 의해 분류된 기술요소들을 볼 때 이전대상기술은 기술의 발전단계면에서 대부분 기초과학 기술이나 응용기술이 아닌 산업기술이며, 기술의 특화정도면에서는 체계 및 기업 특유기술로서 기업 내에 내재된 전유기술이다. 또한 제품 및 공정기술이 포함되어 있으며 경기술 뿐만 아니라 운영 및 관리와 관련된 연기술이 포함되어 있다.<sup>11)</sup>

#### 나. 기술이전의 경로

기술은 여러 경로를 통하여 이전될 수 있으며 어느 상황에서나 최적으로 통하는 기술이전의 경로는 없다. 그러므로 특정 기술이전경로의 적합성은 한나라가 처한 기술경제적인 환경에 비추어 판단될 수 있다.<sup>12)</sup>

기술이전의 경로는 학자에 따라 여러가지로 분류되나, 객관적으로 연구할 수 있는 형태의 것은 정부간의 기술이전과 상업적 계약에 의한 기술이전이다.<sup>13)</sup>

##### (1) 정부간의 기술이전

정부간의 기술이전은 일반적으로 공적 개발원조(official development assistance)의 일환으로 이루어지며, 그 중에서도 특히 기술부문의 원조를 기술원조(technical assistance)라고 한다.

##### ① 공적 개발원조

공적 개발원조는 정부차원에서의 금융지원을 통한 기술이전의 형태로서<sup>14)</sup> 주로 공공재부문에서 프로젝트별로 광범위하게 진행된다. 일반적으로 후발개도국이 기술도입국이 되며, 이들의 기술흡수 능력이 미약한 까닭에 대개는 프로젝트

를 조정·감독하는 감리단이 선진국으로부터 파견된다. 이 경로는 재원의 규모가 아주 크고, 비교적 장기적인 개발계획이 존재하며, 연구시설 또는 대규모설비의 설치를 통한 비교적 종합적인 기술이전이 요구되는 경우에 적합하다.

## ② 기술원조

이것은 기술협력(technical cooperation)이라고도 하며, 대개 공적개발원조의 한 형태로서 기술도입국의 인력양성 및 관리·기술능력을 배양시키기 위한 방법이다. 기술원조는 단순히 개별적인 생산기술의 증대에만 그 목적이 있는 것이 아니고 보다 광범위하고 장기간에 걸쳐서 진행되며, 각종 연구센터의 설립 등을 포함한다. 대상업종은 주로 농업·수산업 그리고 초보적인 공업분야인 경우가 많고, 사회간접자본도 그 대상이 되며, 피원조국 내지 기업의 기술수준은 상당히 미약한 상태인 경우가 일반적이다.

## (2) 상업적 계약에 의한 기술이전

여기에는 기술이라는 단일생산요소만을 이전시키는 라이선싱과, 기술뿐 아니라 자본, 경영 등을 포함한 복합생산요소를 이전시키는 해외직접투자의 두 가지 기본경로가 있으며, 그 외에도 국제공동기술연구, 자본재교역, 선진공업국 내에 현지공장 설치, 기술인력의 파견, 기술용역기업 등의 경우가 있다.

### ① 라이선싱 계약 (Licensing Agreement)

라이선싱은 기술제공자(licensor)가 소유하고 있는 특허, 제조공정, 상표, 노하우 등과 같은 공업소유권에 대한 사용권을 사용료(royalty)를 받고 기술도입자(licensee)에게 제공하는 기술이전계약을 말한다.

라이선싱 계약을 통한 기술이전은 단기적 또는 장기적인 의미에서 기업의 생존과 성장에 매우 중요한 부분이다. 그러나 어느 기업의 기술혁신전략도 전적으로 라이선싱에 의존하거나 또는 전적으로 라이선싱을 배제하는 경우는 없다. 항

상 자체기술 연구 개발활동과 이전기술간의 상관관계가 존재하며 그러한 상관관계는 기업의 규모, 생산품목 그리고 기술수준에 따라 상이하게 나타난다.<sup>15)</sup>

라이센싱 계약에 따른 로열티(royalty)는 라이센싱계약이 함유하는 기술의 수준, 기술도입자의 기술능력, 기술공급자간의 경쟁의 정도에 따라 결정된다.<sup>16)</sup> Teece의 연구에 따르면 국제기술이전의 가격은 기술공급자의 기술이전경험, 기술도입자의 제조경험이나 기술의 연령(vintage)과 반비례한다고 주장한다.<sup>17)</sup>

라이센싱을 통한 기술이전방법에는 특허권과 노우하우를 대상으로 하는 기술계약(technology licensing), 상표권을 대상으로 하는 상표계약(brand licensing), 기업경영 일반에 관한 연기술을 대상으로 하는 경영관리계약(management contract)과 프랜차이징(franchising)계약 등으로 구분된다.<sup>18)</sup>

## ② 해외직접투자

해외직접투자는 자본투자와 동반하거나 혹은 동반하지 않는 관리기술(managerial skills), 기술(technology) 그리고 시장지식(marketing knowledge)의 흐름을 포괄하는 개념이다.<sup>19)</sup>

최근 해외직접투자에 의한 기술이전은 선진국과 개도국에서 각각 서로 다른 이유로 제한되는 경향이 있다. 거의 모든 다국적기업(MNC)의 본사가 있는 서방 선진국가에서는 자국의 이익을 보호하기 위하여 다국적기업을 통한 기술유출에 민감한 반응을 보이고 있으며, 개도국에서는 다국적기업에 의한 직접투자가 지역경제의 독자성을 저해하고 이들 기업에 의해 지역경제가 장악될 가능성에 대하여 깊은 반감과 회의를 가지고 있다.<sup>20)</sup>

그러나 우리는 해외직접투자가 관리기술의 향상, 시장판매기술, 지역노동자의 훈련 등을 통하여 지역경제 발전에 커다란 공헌을 한다는 점을 부인할 수는 없으며, 경쟁력을 강화시킬 수 있다는 점을 간과해서는 안된다. 많은 경우 해외직접투자는 고용을 창출하고 국내의 임금수준을 향상시키는 역할을 하고 있다.<sup>21)</sup>



### ③ 전략적 제휴

전략이란 변화되어 가는 기업경영환경에의 대응방안으로서, 전략적 제휴는 국제경쟁환경의 부산물(by-product)이다. 최근의 급격한 국제환경의 변화는 거의 모든 첨단산업에 참여하고 있는 기업들로 하여금 세계적 경쟁하에서의 생존전략 방안으로 타기업과의 협력관계 구축을 적극 추구하게 하고 있다. 전략적 제휴의 동인이 된 국제 경쟁환경의 주요변화로서는 제품수명주기의 단축과 신기술의 신속한 상업화, 그리고 세계경제의

개방화, 국제화를 들 수 있다. 이외에도 소비자의 욕구 및 기호의 범세계적 균질화에 따른 시장의 글로벌화, 연구개발, 신제품 개발 등 고정비용의 급격한 상승, 국가간 및 기업간 기술격차의 해소가 기업간 전략적 제휴를 더욱 촉진시키고 있다.

기업들이 전략적 제휴를 통해 달성하고자 하는 구체적인 목적은 다음과 같다.

첫째, 자원과 위험의 공유가 전략적 제휴의 본원적 목적으로서, 신기술, 신공정, 신제품 개발에 따른 높은 투자비용, 기술장벽 및 환경규제에 따른 부가비용, 시장성숙으로 인해 증가된 마케팅 비용 등은 기업으로 하여금 비용분담이 목적으로 상호보완적인 제품, 유통망, 생산시설, 기술 및 노하우 등을 제공하는 제휴선을 찾아 나서게 만든다. 둘째, 치열한 세계적 경쟁의 현실은 기업들로 하여금 특정사업을 포기하거나 아니면 생존을 위해 여타 경쟁자와 제휴하게 만든다. 셋째, 기술과 시장의 급속한 통합에의 대응전략 수단으로 제휴가 부각된다. 기술과 시장통합의 대표적인 예로서는 컴퓨터,통신, 방송 등 각종 미디어가 통합된 멀티미디어 분야를 들 수 있다. 넷째, 주요 시장에 대한 접근과 입지 확보를 위해 기업들은 전략적 제휴를 적극 활용한다. 다섯째, 시장의 글로벌화는 기술 및 제품표준 확립의 필요성을 더욱 가속시키고 있어 이에 대한 대응방안으로 전략적 제휴가 부각된다.

제휴의 형태를 보면, 과거에는 합작투자 등 자본참여를 통한 장기적 계약에 의거해 기업간 협력관계를 맺어 왔으나, 최근의 전략적 제휴는 지분참여없이 제

휴당사자들이 경영상의 독립성을 최대한 유지하면서 다양한 업무분야(연구개발, 생산, 마케팅, 자재 등)에 걸쳐 단기적으로 협력관계를 맺는 것을 특징으로 한다. 구체적으로 제휴의 형태를 보면 첫째, 기업들에 의해 가장 많이 활용되는 제휴 형태인 기술제휴로서, 공동연구개발, 교차 라이선싱, 특허공유 등이 기술제휴 범주에 속한다. 공동연구개발이란 신제품이나 신기술의 개발을 위해 둘 이상의 파트너가 협력관계를 맺는 것을 말한다. 이 동맹의 범주는 단지 연구개발에 국한되며, 연구결과물인 신제품의 생산과 판매는 파트너 각자가 독자적으로 수행하는 것이 보통이다. 교차 라이선싱과 특허공유도 주요기술제휴 수단으로서 국내에서 금성사와 삼성전관이 TV브라운관 액정화면(LCD)분야에서 교차 라이선싱협약을 체결한 바 있다. 둘째, 생산제휴로서 전략적 제휴는 생산분야에서도 가능한데, 기업들은 종종 공동생산 협약을 통해 규모의 경제를 이루어 생산비용의 절감을 꾀하고자 한다.

특히 신기술이나 신제품을 개발한 기업이 이를 대량 생산해 내기에는 자사의 생산시설로는 역부족일 경우, 기존의 대형 생산업체와 손을 잡을 수 있다.

셋째, 지분참여제휴로서 유망한 파트너의 지분 일부를 취득하는 것도 제휴전략의 일환이다. 포트폴리오 투자(portfolio investment)와는 달리 지분참여의 제휴에는 파트너들이 서로의 강점을 최대한 살리기 위해 다양한 업무제휴(교차 마케팅, 공동 연구개발 등)가 수반되는 것이 보통이다. 넷째, 컨소시엄으로서 기술개발비용과 사업착수비용이 막대하여 기업혼자의 힘만으로 감당해내기 어려운 경우 자금조달과 위험분산의 목적으로 여러 업체가 참여하는 컨소시엄이 결성될 때도 있다. 다섯째, 복합제휴로서 사실 전략적 제휴는 어느 한 업무분야에만 국한해서 이루어진다고 보다는 연구개발, 조달, 생산, 판매 등

여러 업무 분야에 걸쳐 복합적으로 이루어지는 것이 일반적이다. 그리고 처음에 특정분야에 국한해서 협력관계가 이루어졌더라도, 점차적으로 폭넓은 제휴관계로 발전해 나가는 양상을 보인다.

#### ④ 턴키(Turn-key)프로젝트

턴키 프로젝트는 자본재(capital goods)와 생산설비(production facilities), 장비(equipment)와 기계류(machinery), 기술적 지식(technical know-how), 자문(consultants)과 관리(management)등의 기술의 패키지라고 볼 수 있다.

턴키프로젝트의 가장 큰 단점중의 하나는 비용(cost)이 비싸다는 것이다. 그렇지만 엄밀하게 선정하여 도입하게 되는 경우에는 기술도입자는 이미 시험가동된, 경쟁력있는 고급 첨단기술을 고도의 숙련된 엔지니어 없이도 가동할 수 있는 장점을 가지고 있다.<sup>22)</sup> 하지만 그러한 공정이나 장비나 설비가 모든 국가의 환경에 맞는 것은 아니다. 예를 들어 대부분의 미국 산업의 생산체제는 비교적 풍부하고 값이 싼 석유나 천연가스를 제한없이 사용한다는 가정하에 설계가 된 경우가 많으므로 이러한 기술의 상당수가 원유값이 상승함에 따라 개도국의 환경에는 맞지 않게 되었다. 한편 대부분의 서구기술은 고산출량·저생산단가(high-volume low-unit cost)설비인 경우가 많으므로 이러한 기술들은 대량생산과 대규모 시장을 전제로 하는 경우가 많다.<sup>23)</sup>

학자에 따라서는 Turn-Key프로젝트를 기술이전의 중요한 수단으로 인식하지 않는 경우가 많지만, 미국의 다국적기업이 수행한 26개의 턴키프로젝트를 연구·분석한 결과에 의하면 평균적으로 전기·기계 부문에서는 36%, 화학·정유부문에서는 10%의 비용이 전체 프로젝트의 비용중에 기술이전을 하는데 따른 비용으로 분석되었다.<sup>24)</sup> 이러한 기술이전에 따른 비용은 기술이 비교적 새로울수록, 기술도입자의 경험이 일천할수록 높아진다고 볼 수 있다.<sup>25)</sup>

#### ⑤ 국제산업협력

국제산업협력(international joint technical research)은 주로 선진공업국 내지는 첨단산업분야의 기업간의 기술이전채널로서 오늘날 선진공업국(미·일·독·

영·이·가·불)간에는 우주항공산업, 해양산업, 원자력산업 등에 관하여 산업기술협력 프로그램이 진행중인 바,<sup>26)</sup> 이는 참여국가 내지는 기업의 풍부한 재정적인 능력이 필수 요건이며, 참여국 내지는 기업의 기술흡수능력이 비슷하여야 플러스(+)의 시너지(synergy)효과를 기대할 수 있을 것이다.

#### ⑥ 자본재교역(플랜트수출)

전세계의 교역물품중에서 자본재(capital goods)는 그 자체가 고도의 기술을 내포하고 있기 때문에 자본재의 이동은 기술이전과 밀접한 관계에 있으며 개발도상국은 비록 일시적인 외환상의 압박은 있지만, 자국의 장기적인 목표, 즉 수입대체산업의 육성 내지는 초기 수출단계로의 지향(export-oriented)의 추구를 위하여 자본재의 수입을 강행하는 것이다.

#### ⑦ 선진공업국내의 현지연구소유치

하나의 전통적인 해외직접투자의 방향, 즉, 선진공업국에서 개발도상국으로의 방향과는 역으로 공업생산기술이 상당한 정도로 성숙된 국가 내지는 어느 특정의 기업은 선진공업국내에 현지연구소를 설치하여 기술의 흡수에 보다 적극적으로 기여할 수 있다.

이는 기존의 채널로는 만족할 만한 이전효과를 거두기가 어렵다고 판단될 때 현지에 직접 진출하는 성격을 지니고 있는바, 우리나라 기업이 미국 전자산업의 본산지인 California의 Silicon Valley에 직접 진출한 사례는 동 채널의 하나의 예가 될 수 있다.

#### ⑧ 기술인력의 파견

Michalet의 주장<sup>27)</sup> 이나 OECD보고서에 따르면 기술인력의 파견도 하나의 훌륭한 이전채널이 된다고 하는 바 이는 주로 첨단기술에서 내구성이 어느 정도 지나간 비교적 광범위하게 표준화된 기술일 경우가 많다.

### ⑨ 기술용역기업

기술용역기업(Consulting Engineering Firm)은 공장설비의 설계 및 이에 필요한 인력의 양성에 관한 가능성의 탐색 및 그 세부계획을 작성하는 기업인데 일반 건축물, 석유화학설비, 정유공장 등과 같은 표준화된 기술이전에 중요한 역할을 하고 있다.<sup>28)</sup>

## 제 6 절 심해저광업기술 확보전략

### 1. 기본방향

심해저광업을 상업적 차원으로 추진하기 위해서는 우리의 역량과 자원을 국내·외 여건변화에 맞추어 효율적으로 결집·활용해 나아가야 할 것이다. 이를 위해서는 심해저광업 기술개발 전략에 대한 국민적 합의를 형성하고 관련 정책수단을 체계화하여 조화와 균형에 입각한 총체적 접근(total approach)으로 기술혁신을 가속화시켜 나가도록 해야 할 것이다.

이와 같은 기본전제에서 기술개발을 추진함에 있어서 우리가 지향하여야 할 방향을 다음과 같이 제시하고자 한다.

#### 가. 세계화 - 국내 연구개발 능력의 한계 극복을 위한 국제적 연구전개

우리나라 심해저광업의 기술개발자원은 전세계 기술개발자원의 1% 미만에 불과하며, 이러한 국내 기술개발 능력의 한계를 극복하기 위하여 등록선행투자가 및 잠재적 선행투자가들인 선진국의 기술개발활동을 추적하기 위하여 세계화를 보다 심도있게 추진해야 한다.

특히 향후의 세계경제질서는 95년부터 세계무역기구(WTO)체제의 가동에 따라 세계화와 개방화가 더욱 본격화되어 갈 것임에 비추어 주요 선진국과의 기술 협력을 강화하고 현지 진출을 확대함으로써 선진기술의 이전과 현지 원천기술의 확보를 지원·추진토록 하여야 할 것이다.

이러한 차원에서 해외 선진기술 정보의 획득 및 국내이전을 추진하기 위해 국제공동연구사업을 적극 추진하여야 한다. 외국 전문가의 국내유치 및 국내전문가의 해외파견을 활발히 하면서, 그 기간도 단기보다는 2년 이상의 장기간 사업으로 하는 것이 보다 바람직하다.

한편 심해저광업기술 외교의 적극적인 전개를 통하여 협력대상국별로 특성에 따라 필요한 협력사업을 보다 확대시켜 실리있는 기술획득을 위한 여건을 조성해 나가야 할 것이다.

심해저 채광기술 및 탐사기술이 군사기술이나 첨단기술과 직결되어 있기 때문에, 서방선진국들은 상업생산의 착수시기가 비록 먼 훗날로 전망되고 아직은 기술경쟁이 가시화되지 않은 현재에도 개방적 협력을 추진하고 있지 않다. 그러나 세계화의 추세는 심해저 채광기술 및 탐사기술의 공동개발에도 확산되리라 예측되며, 우리나라는 관심있는 선행투자자국의 기업과 공동합작(Co-Enterprise)으로 기술개발 전략을 전개시켜 나아가야 할 것이다.

#### 나. 협동화 - 산·학·연 협동연구체계 구축으로 연구개발능력 조직화

한정된 자원으로 최대의 연구성과를 거두기 위해서는 기술개발주체간의 협동적 기술개발이 절실히 요망되고 있고, 선진국들이 R&D 콘소시엄을 형성하여 협동연구를 추진하고 있음을 주목해야 한다. 특히 기술개발의 결과를 공동으로 활용할 수 있는 공유성기술(generic technology)이나 다분야 기술이 관련되는 기반성 기술의 경우에는 협동체제를 최대한 활용하여 기술개발자원의 효율극대화를

도모해야 할 것이다. 특정제품 또는 공정에 특화되고 이윤에 직결되는 전용성 기술(proprietary technology)의 경우는 경쟁원리를 적용하는 것이 바람직 할 것이다.

이에 따라 기존의 심해저광업 개발협의회의 기능을 활성화시켜 심해저광업의 산·학·연 협동체제 가동의 시발로 삼을 수 있다고 본다.

다. 전문화 - 한정된 가용자원으로 승산있는 전략분야에 특화

70년대 이후 오랫동안 심해저광업 기술을 축적하여 온 서방선진국과 기술경쟁에 대응하기 위해서는 우리의 여건과 능력에 비추어 비교우위가 있는 전략분야를 중심으로 한정된 가용자원을 집중투입, 개발해 나아가야 한다.

이를 위하여 일정한 기준에 따라 합목적적인 우선 순위를 정하여 심해저광업 중 우리나라가 승산이 있는 특화부문과 이미 상당한 대외경쟁력을 갖추고 세계시장 전망에 비추어 유망한 분야로 선정하여 중점 추진하여야 할 것이다.

## 2. 기술확보전략

이상과 같은 세계화·협동화·전문화의 기본 방향 하에서, 우리의 한정된 연구개발 능력을 감안하여 개발대상 분야별로 최적정 개발전략을 선정·차별화하여 기술개발의 성과를 극대화시켜야 할 것이다. 우리가 선택할 수 있는 기술개발전략으로 다음의 전략들을 고려할 수 있다.

① 선두개척전략(leading-edge strategy 또는 pioneer strategy) : 특정분야 기술(예: 수송선 및 채광선 건조기술)의 최첨단 수준을 항시 확보·유지하는 전략이다.

② 후발활용전략(Buy-It Strategy 혹은 Commercial Strategy) : 기술의 실용화와 성숙화가 완전히 진행된 후에 필요기술을 도입·소화하여 활용하는 전략을 의미한다.

③ 속성추적전략(deferred-action strategy 또는 intermediate strategy) : 채광 기술 분야와 같이 첨단기술의 동향을 예의 주시한 후 그 성공가능성이 어느 정도 입증되어 가면 단기간에 집중 개발하여 선진수준을 확보하는 전략이다.

따라서, 대상기술분야의 특성에 따라 우리가 특화와 전문화의 강점을 최대한 발현해야 할 분야는 『선두개척전략』을, 기술이 이미 표준화되고 공업화되어 기술독점이나 기술보호가 없이 획득이 쉬운 분야와, 기초연구 또는 국제공동의 공유성 기술 분야는 『후발활용전략』을, 그리고 상업화에 핵심적 기술이나 상업생산시점에 따라 기술개발시기가 집중되는 기술분야는 자체개발능력의 확충, 동향분석의 강화 및 관련 인력양성과 여건 조성 등에 주력하다가 적정시점에 『속성추적전략』을 채택하도록 하여야 할 것이다.

심해저 광업과 관련된 채광기술과 제련기술 개발 전략에서 우리나라는 독자적인 학습곡선(learning curve)을 설정하기 위하여 제1단계부터 막대한 자본을 투자하기보다는 제2단계 이후 선진국의 기술개발 결과를 비교 검토하여 가장 바람직한 모델을 선정하고 이들의 경험을 이전받는 방안이 훨씬 더 비용효과적일 수 있다는 점에서 후발 활용전략과 속성추적 전략은 충분히 고려되어야 할 것이다.

그러나 후발활용전략과 속성추적전략을 채택하는 기술분야의 경우에도 선진국의 기술보호주의에 대응하며, 우리나라가 후발자로서 기술도입 추진시 협상능력(bargaining power)을 확보하고, 기술도입시 즉각 응용하기 위해서는 최소필수의 연구능력과 기술기반을 확충해 나가는 것이 매우 중요하다.



이와 같이 대상기술분야별로 차별화된 기술개발전략을 우리의 여건에 맞추고 조화롭고 균형있게 추진함으로써 기술혁신을 가속화시켜 21세기 심해저광업 추진에 만전을 기해야 할 것이다.

- 1) Harvey Brooks, *National Science Policy and Technology Transfer*, Proceedings of a Conference on Technology Transfer and Innovation (Washington, D.C. : National Science Foundation, 1966).
- 2) B.M. K hler, A.H.Rubenstein and C.F. Douds, "A Behavioral Study of International Technology Transfer Between the United states and West Germany", *Research Policy*, Vol, 2.No.3. Oct. 1973, pp.160-185.
- 3) UNCTAD, *The Chanel and Mechanism for the Transfer of Technology from Developed to Developing Countries*, UNCTAD, TD/B/AC, 11/5, 1971.
- 4) J. Davidson Frame, *International Business and Global Technology* (Washington D.C.: Lexington Books, 1983), p.73.
- 5) 李泳時 등, 『우리나라 技術移轉情報流通體制 構築方案』(서울: 産業研究院, 1990), pp.11-16.
- 6) UNCTAD, "Major Issues Arising from the Transfer of Technology to Developing Countries", TD/B/AC, 11/10, Dec. 1972.
- 7) J.Baranson, "Technology Transfer through the International Firms", *American Economic Review*, May 1970, pp.436-437.
- 8) H.Davis, "Technology Transfer through Commercial Transactions", *Journal of Industrial Economics*, Vol.25, No.20, Dec. 1977.
- 9) 金仁秀李軫周, 「技術革新의 過程과 政策」(서울:韓國開發研究院, 1982), p.269.
- 10) 金昊哲, "技術導入의 行態와 導入技術의 習得에 관한 研究" (碩士學位論文, 서울大學校 大學院, 1988), p.10.
- 11) 박규서, 前揭論文, P.26
- 12) Davidson J. Frame, *International Business and Global Technology* (Lexington, Massachusetts : Lexington Books, 1982) pp.55-60.
- 13) 趙東成, 前揭書, p.179.
- 14) Stephen P. Magee, "Information and the Multinational Corporation : An Appropriability Theory of Direct Foreign Investment," *The North-South Debate*(Cambridge : MIT Press, 1981), pp.333-335.
- 15) Julian Lowe and Nick Crawford, *Innovation & Technology Transfer for the Growing Firm: Text and Case* (Oxford, England : Pergamon Press Ltd., 1984).
- 16) William Finan, *The International Transfer of Semi-conductor Technology Through U.S. Based Firms* (New York : National Bureau of Economic Research, 1975).
- 17) William Finan, *The International Transfer of Semi-conductor Technology Through U.S. Based Firms* (New York : National Bureau of Economic

- 18) 金基永, “生産技術의 導入과 蓄積이 經營管理 시스템의 效率化에 미치는 波及 效果에 관한 연구,” 『産業과 經營』 제 16권 제2호, (1978,8), pp.62-63.
- 19) Stephen Jay Kobrin, *Foreign Direct Investment, Industrialization and Change* (Greenwich, Conn.: JAI Press, 1977), p.30.
- 20) Moonsong David Oh, “Technology as a Major Limiting Factor in Economic Development”, *Journal of Economic Development*, 1976, pp 175-196.
- 21) P.P. Streeten, “The Theory of Development Policy”, in J.H.Dunning, ed., *Economic Analysis and the Multinational Enterprise* (London : George Allen and Urwin, 1974), p.256.
- 22) Davidson J. Frame, op.cit., pp. 7-9 and pp.55-60.
- 23) Philip H. Abelson and Irene Tinker, “Technology Transfer”, *Science*, Januaray 28, 1977, p. 869.  
李鍾郁 等, 「技術移轉의 環境과 戰略에 관한 韓·日 比較研究」, (韓國科學技術研究院 科學技術政策研究·評價센터 研究報告, 1990), p.44에서 再引用.
- 24) Edwin Mansfield, “International Technology Transfer : Forms, Resources, Requirements, Polices,” *American Economic Review*, LXV-2, May 1975, pp.372-376.
- 25) Ka-Jong Lee, *Comparative Analysis of Financial Institution for Technology Development in Korea*, International Development Research Center, Canada, 1987.  
李鍾郁 等, 「技術移轉의 環境과 戰略에 관한 韓·日 比較研究」, (韓國科學技術研究院 科學技術政策研究·評價센터 研究報告, 1990), p.44에서 再引用.
- 26) Krishna.D.N. Singh, “Import of Capital Goods”, Paper presented at the Sixth Pacific Trade & Development Conference, Mexico-city, July, 1974.  
Bo S dersten, “Import-substitution and export-push,” *International Economics* (New York: St. Martin's Press, 1980), pp.216-218.
- 27) C.A. Michalet, “Transfer of Technology by TNCs: Traditional versus New Forms,” *Paper*, Korea-France Joint Symposium (Seoul: September, 1981), pp.9-12  
許 倫, “技術移轉채널로서의 海外直接投資에 관한 研究” (碩士學位論文, 서울大學校 大學院, 1984), p.20 에서 再引用.
- 28) Shiro Kurihara, “A Preliminary Summary of Technology Transfer in the Pacific Community,” *Task Force Report* (May, 1983), pp.6-7.  
許 倫, “技術移轉채널로서의 海外直接投資에 관한 研究” (碩士學位論文, 서울大學校 大學院, 1984), p.20 에서 再引用.

## 제 8 장

### 남태평양 심해광물자원 개발 참여 방안

연구 책임자 : 권 문 상

연구 원 : 이 원 갑

이 용 희

연구 조 원 : 이 연 정



## 제 1 절 서 론

1994년 11월 16일에 발효된 1982년 유엔해양법협약(1995.8. 현재 비준국 77개국)은 일개국가가 자국 해양관할권 외측의 해역에서 해양에 부존된 광물자원개발을 탐사·개발할 수 있는 두가지 제도를 새로이 제정하고 있다. 즉, 외국의 국가관할권하에서의 해양광물자원 개발과 관련하여서는 배타적 경제수역(Exclusive Economic Zone)제도를 신설하였으며, 연안국 국가해양관할권 외측해역에서의 해양광물자원 개발과 관련하여서는 심해저제도를 신설한 바 있다.

협약 제5장에 규정된 배타적 경제수역제도는 연안국이 영해측정기선으로부터 최대 200해리의 범위 내에서 동 수역을 선포할 수 있는 권한을 부여하고 있으며, 공간적 범위는 해저 및 그 하층토와 상부수역을 포괄하도록 규정하고 있다.

연안국의 동 수역에 대한 협약상 권리의 내용을 살펴보면, 먼저 동 해역에 부존하는 생물 및 무생물자원의 탐사, 개발, 보존 및 관리와 해수, 해류 및 해풍을 이용한 에너지 생산과 같은 그 수역의 경제적 개발과 탐사를 목적으로 하는 기타 활동에 관한 주권적 권리(sovareign right)를 부여하고 있으며, 동 해역에서의 해양과학조사, 해양환경보호와 보존, 인공섬·시설 및 구조물의 설치·운영에 관한 연안국의 관할권(jurisdiction)을 명시적으로 규정하고 있다.

동 제도에 따라서 일개 연안국의 배타적 경제수역내에 부존하는 해양광물자원을 탐사하거나 개발하기 위한 구체적인 절차는 명시적으로 규정되지 않고 있으며 개별 연안국의 국내법 절차에 일임하고 있는 태도를 보이고 있는 바, 일반적으로 당해 연안국의 국내법에 따라 명시적인 허가에 해당하는 계약등을 체결하고 그에 부가되는 조건 또는 부담을 수용하여야 하는 것으로 해석된다.

1994년 4월 현재 전세계적으로 92개국이 이와같은 배타적 경제수역을 선포하고 있으며, 11개국이 200해리 영해를 선포하여 주변해역의 자원에 대하여 권리를 행사하고 있는 실정이다.

한편, 협약 제11장에 규정된 심해저제도는 국가관할권 외측의 해저 및 그 하층토에 부존하는 해저광물자원을 ‘인류공동의 유산(common heritage of mankind)’으로 규정하고, 이러한 원칙하에서의 개발을 의도하고 있다. 동 제도는 자원의 개발체제로서, 인류전체의 이익을 위하여 국제해저기구(International Seabed Authority)가 심해저기업(Enterprise)을 통하여 독자적으로 개발하거나 일정한 요건을 갖춘 개발참여자로 하여금 국제해저기구와 계약을 체결하고 동 기구의 감독하에 일정한 재정적·기술적 의무 부담을 조건으로 개발토록 하는 병행개발체제(Parallel system)를 채택하고 있으며, 또한 개발참여자의 계약체결 신청시 자국에 할당되기를 원하는 면적의 광구와 동일한 상업적 가치와 면적을 가진 광구를 동시에 제출하여 향후 해저기구의 개발을 위하여 유보할 수 있도록 하는 광구유보제도(Banking system)를 규정하고 있다.

또한 동 제도는 협약 채택전에 심해저광물자원개발에 선행적인 투자를 행한 투자자(300만불의 실해역 탐사비를 포함한 300만불 이상의 투자, 협약 서명국 또는 협약 서명국의 인증, 유망광구 확보등의 기준 충족시 인정: 인도, 프랑스, 일본, 러시아 등 4개국, 미국등 7개 선진국으로 구성된 4개 다국적 컨소시엄, 협약 발효전 위의 요건을 충족한 개도국이 이에 해당됨)의 이익을 보호하기 위한 선행투자자제도(Pioneer Investor Regime)를 채택하고 있다.

이러한 선행투자자제도에 의거하여 동 제도의 시한인 협약 발효시까지 우리나라를 비롯한 7개 주체(인도, 일본, 프랑스, 러시아, 중국, IOM, 대한민국)가 선행투자자로서 유엔에 광구를 등록하여 동 광구에 대한 배타적 탐사 및 개발권을 확보하고 있다. 우리나라는 해외수입에 전량 의존하고 있는 망간, 니켈, 코발트, 구리 등 전략희귀금속광물의 장기·안정적 공급원 확보라는 국가적 목적을 달성하기 위하여 1983년이래 과학기술처와 통상산업부의 사업비를 바탕으로 한국해양연구소를 주관으로 하여 태평양 심해저에 대한 탐사를 수행하였으며, 그 결과를 바탕

으로 1994년 8월 2일 정부를 등록주체로 하여 선행투자자로서 등록하고 15만 km<sup>2</sup>의 선행투자광구를 확보한 바 있다.

그러나, 비록 우리나라가 정부의 확고한 의지와 유관기관의 헌신적인 노력으로 심해저에 15만 평방킬로미터의 광구를 확보하였지만, 동 심해저제도가 다양한 이해관계가 복잡하게 혼재되어 있는 다자간 국제협약 및 국제기구에 의해 운영되는 까닭에 복잡하며 비효율적이고, 우리나라의 의지에 반한 절차를 따라야 하는 경우가 발생할 수 있는 단점이 있으므로, 일단 심해저에 광구를 확보함으로써 향후 개발이 보장된 현시점에서는 보다 단순하며 우리의 의사가 충분히 반영될 수 있는 심해저이외의 지역에 부존하는 해양광물자원 개발가능성을 타진해보아야 하는 필요성이 차후의 과제로서 대두되고 있다.

이하에서는 위의 필요성에 따라 자원빈국으로서 지속적이고 안정적인 광물자원의 공급원 확보라는 중대한 과제를 안고 있는 우리나라의 입장을 고려하여 심해저제도에 비교하여 제도적으로 비교적 단순하며 신속하게 추진될 수 있는 타국 해양관할권 내에 부존하는 광물자원의 제도적 차원의 개발가능성에 대하여 고찰해보자 한다.

특히 광물자원 탐사 및 개발에 관한 지역적 체제가 구축되어 있으며 망간단괴 및 망간각의 자원분포량이 상당한 것으로 알려지고 있고, 미국, 일본, 캐나다, 프랑스, 노르웨이, 중국 등 세계의 주요 심해저 참여국이 자원개발의 관심을 표명하고 탐사활동을 수행하고 있는 남태평양지역을 중심으로 동 지역국가의 배타적 경제수역내에 부존하는 해양광물자원에 대한 우리나라의 탐사 및 개발 참여가능성을 살펴보기로 한다.

## 제 2 절 남태평양 도서국가의 해양관할권 선포와 관련입법현황

### 1. 남태평양 도서국가의 특성

남태평양 도서국가들의 지역적 특성으로는 작은 국토면적, 적은 인구, 광대한 해양관할권, 빈약한 자본 및 열악한 해양과학기술능력 등을 들 수 있다.

즉, 남태평양 도서국가들은 유엔해양법협약상 신설된 새로운 해양질서를 적극적으로 수용하여 배타적 경제수역의 선포를 통하여 육지영토면적(8,517,081km<sup>2</sup>) 보다 4배이상의 해양경제수역(35,706,000km<sup>2</sup>)을 확보하게 되었으며, 투발루의 경우에는 육지면적 26km<sup>2</sup> 의 34,615배 이상이 되는 900,000km<sup>2</sup>의 광대한 배타적 경제수역을 보유하고 있었다. 그러나 이들 국가는 열악한 과학기술능력 및 훈련된 인력의 부족으로 말미암아 확대된 자국 관할해역내에 부존하는 자원의 확인 또는 개발뿐만 아니라 자원의 탐사·개발에 관한 외국의 제안에 대해서도 이를 적절히 분석하여 대처할 능력마저 보유하고 있지 않다.

이러한 특징에 기인하여, 남태평양 도서국가들은 200해리 배타적 경제수역의 선포를 통하여 확보하게된 광대한 자국 해양관할해역의 개발을 통하여 열악한 자국 경제를 개선시키고자 노력하고 있으나, 자본 및 과학기술능력이 빈약하여 독자적인 개발 대신 외국과의 협력을 통하여 개발을 추진하고 있으며, 그 매개수단으로서 어업과 광물자원에 관한 지역기구를 설립하여 빈약한 과학기술능력을 보완하는 집단적 자원관리체제를 구축하고 있다.

해양광물자원의 개발과 관련하여서는 후술하는 남태평양 응용지구과학위원회(South Pacific Applied Geoscience Commission : SOPAC)를 설립하여 운영하고 있는 바, SOPAC은 Table 8-1에서 보는 바와 같이 15개 회원국(호주, 뉴질랜드, 쿡제도, 마이크로네시아, 피지, 괌, 키리바티, 마셜공화국, 니우, 파푸아 뉴기니아, 솔로몬제도, 통가, 투발루, 바누아투, 서사모아) 및 2개 준회원국(프렌치 폴리네시아, 뉴칼레도니아)이 참여하고 있다.



Table 8-1. The SOPAC Member Countries and their Exclusive Economic Zones

국 가 명	육지 면적(km <sup>2</sup> )	EEZ 면적(km <sup>2</sup> )	인 구
Australia	7,680,000	4,496,000	17,000,000
Cook Islands	240	1,830,000	18,000
FSM	700	2,978,000	95,000
Fiji	18,376	1,290,000	737,000
French Polynesia※	4,000	5,030,000	181,000
Guam	541	218,000	140,000
Kiribati	822	3,550,000	72,000
Marshall Islands	181	2,131,000	48,000
New Caledonia※	19,103	2,100,000	152,000
New Zealand	268,105	4,833,000	3,494,300
Nieu	258	390,000	3,000
Papua New Guinea	476,500	3,120,000	3,600,000
Solomon Islands	29,785	1,340,000	325,000
Tonga	747	700,000	101,000
Tuvalu	26	900,000	9,250
Vanuatu	14,763	680,000	150,000
Western Samoa	2,934	120,000	163,000

※ 는 준회원국임.

Table 8-2. Resources Potential of the SOPAC Member Countries

국 명	육상 및 연안광물	심해광물	석 유	해양에너지	열수에너지
Cook Islands	매우빈약	우수	부존재	보통	부존재
FSM	매우빈약	빈약	매우빈약	보통	부존재
Fiji	매우우수	보통	우수	보통	우수
French Polynesia	빈약	보통	부존재	보통	부존재
Guam	매우빈약	매우 빈약	매우빈약	보통	부존재
Kiribati	부존재	빈약	부존재	보통	부존재
Marshall Islands	부존재	보통	부존재	보통	부존재
New Caledonia	매우우수	매우빈약	보통	보통	부존재
Niue	매우빈약	미확인	부존재	보통	부존재
Papua New Guinea	매우우수	보통	매우우수	보통	보통
Solomon Islands	매우우수	빈약	보통	보통	보통
Tonga	매우빈약	보통	우수	보통	매우빈약
Tuvalu	부존재	빈약	빈약	보통	부존재
Vanautu	보통	빈약	보통	보통	우수
Western Samoa	매우우수	매우빈약	부존재	보통	매우빈약

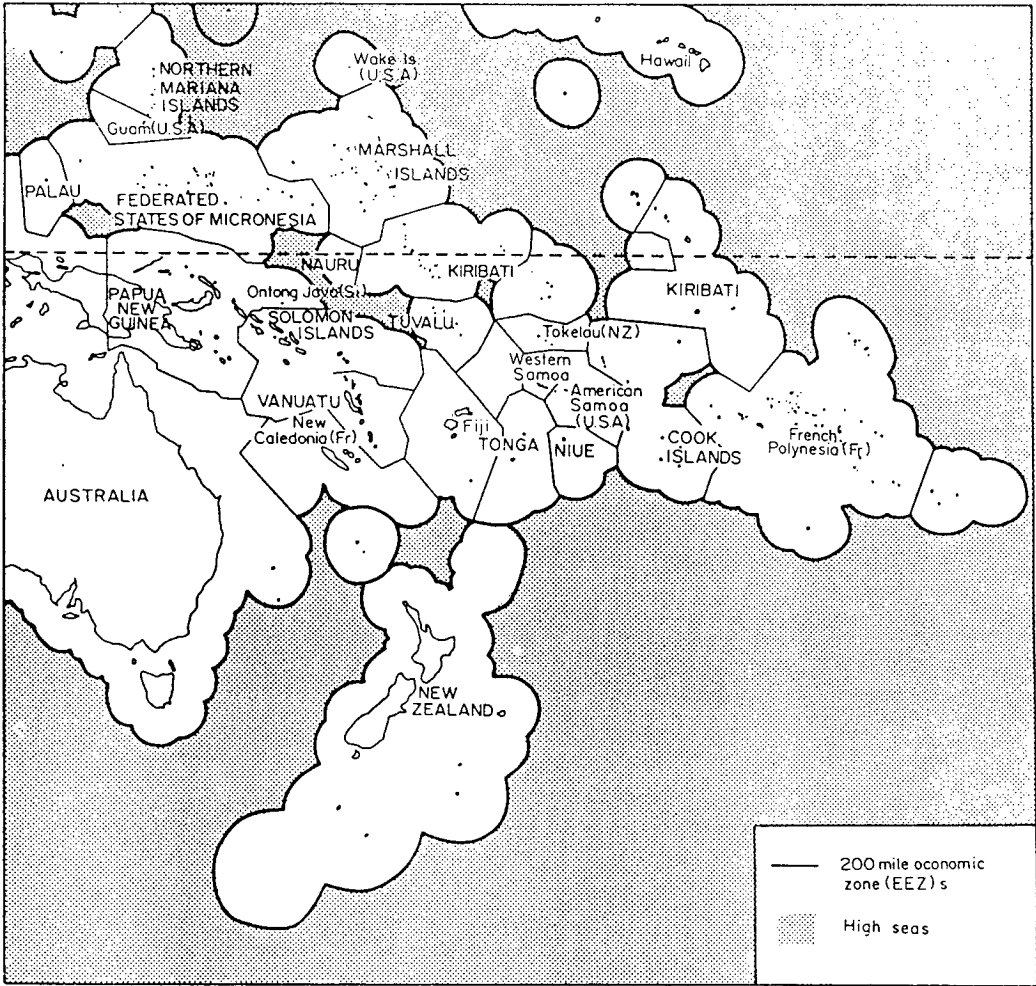


Fig. 8-1. Maritime Jurisdiction Claims in the SOPAC Area.

## 2. 남태평양 도서국가의 해양관할권 선포현황

SOPAC의 회원국중 국가중 피지, 마이크로네시아, 팔라우, 솔로몬제도 및 통가만이 1958년 제네바해양법협약중 영해협약과 대륙붕협약에 가입하고 있다.

1982년 유엔해양법협약에는 Table 8-3에서 보는 바와 같이 호주, 뉴질랜드, 쿡제도, 피지, 프렌치 폴리네시아, 파푸아 뉴기니아, 솔로몬제도, 투발루, 바누아투, 서사모아, 뉴칼레도니아 등 11개국이 서명하였고, 호주, 쿡제도, 마이크로네시아, 피지, 마셜공화국, 니우 등 6개국이 협약에 비준 또는 가입하고 있다. 서명과 비준의 추세를 살펴보면, 서명은 대부분 협약 채택 당시에 이루어 졌음을 알 수 있으며, 비준의 경우에는 피지와 니우를 제외하고는 1990년 이후에 집중되고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 남태평양 도서국가는 협약의 채택으로 인하여 해양관할권의 확대 및 자원에 대한 권리를 취득하였으므로 협약을 지지하는 태도를 보이고 있다. 다만, 이 지역에서의 협약에 대한 비준추세는 독립적으로 고려하기 보다는 이 지역의 많은 국가가 미국, 프랑스, 뉴질랜드의 식민지이었거나 속령의 지위를 지속하고 있는 예가 있으므로 그러한 국가의 경우 특별한 외교관계를 지닌 국가의 해양법에 대한 태도에 직접적으로 영향을 받고 있음을 고려하여야 한다.

해양관할권 선포측면에서 살펴보면, 영해제도와 관련하여서는 17개 국가 모두가 12해리 영해를 선포하고 있으며, 마셜공화국, 투발루, 바누아투, 뉴질랜드, 프렌치 폴리네시아, 뉴칼레도니아 등 6개국은 24해리 접속수역을 선포하고 있다.

200해리 배타적 경제수역과 관련하여서는 호주와 파푸아 뉴기니아를 제외한 모든 국가가 200해리 배타적 경제수역을 선포하고 있으며, 호주와 파푸아 뉴기니아는 200해리 배타적 어업수역을 선포한 바 있다.

대륙붕제도와 관련하여서는, 호주, 뉴질랜드, 쿡제도, 피지, 괌, 솔로몬제도, 통가, 바누아투, 프렌치 폴리네시아, 뉴칼레도니아 등 10개국이 명시적으로 대륙붕

을 주장하고 있다. 이중 호주, 피지, 괌, 통가, 프렌치 폴리네시아, 뉴칼레도니아 등 6개국은 1958년 대륙붕협약상 대륙붕의 기준인 200m 수심 및 개발가능지역 기준을 수용하고 있으며, 쿡제도, 뉴질랜드, 바누아투는 1982년 유엔해양법협약상의 기준인 200해리 또는 대륙의 자연연장기준을 따르고 있고, 솔로몬제도는 단순히 200해리 거리기준만을 채용하고 있다. 다만, 대륙붕의 경우에는 명시적으로 선포하지 않는다 하여도 연안국에게 원천적으로 인정되는 것이므로 기타 국가의 경우에도 대륙붕을 보유하고 있음은 물론이다.

Table 8-3. Maritime Jurisdiction Claims of the SOPAC Member Countries

국 명	영해	접속수역	EEZ	EFZ	대륙붕	유엔해양법협약	
						서 명	비 준
Australia	12	×	×	200('78)	200m/EXP	10 Dec. 1982	5 Oct. 1994
Cook Islands	12	×	200('77)	×	200/CM	10 Dec. 1982	15 Feb. 1995
Federal States of Micronesia	12	×	200('88)	×	×	×	29 Apr. 1991
Fiji	12	×	200('77)	×	200m/EXP	10 Dec. 1982	10 Dec. 1982
French Polynesia (France)	12	24	200('78)	×	200m/EXP	10 Dec. 1982	×
Guam	12	×	200('84)	×	200m/EXP	×	×
Kiribati	12	×	200('83)	×	×	×	×
Marshall Islands	12	24	200('84)	×	×	×	9 Aug. 1991
New Caledonia (France)	12	24	200('78)	×	200m/EXP	10 Dec. 1982	×
New Zealand	12	24	200('77)	×	200/CM	10 Dec. 1982	×
Nieu	12	×	200('78)	×	×	×	5 Dec. 1984
Papua New Guinea	12	×	×	200('78)	×	10 Dec. 1982	×
Solomon Islands	12	×	200('78)	×	200	10 Dec. 1982	×
Tonga	12	×	200('79)	×	200m/EXP	×	×
Tuvalu	12	24	200('84)	×	×	10 Dec. 1982	×
Vanuatu	12	24	200('82)	×	200/CM	10 Dec. 1982	×
Western Samoa	12	×	200('77)	×	×	28 Sep. 1984	×

이상의 해양관할권중 이 연구의 관심대상인 배타적 경제수역과 관련하여 보다 살펴보면, 대부분의 선포국들이 배타적 경제수역제도가 제3차 유엔해양법회의에서 제도화되는 것이 가시화 되었으며, 미국·러시아 등 해양강대국이 동 제도를 국내적으로 수용한 시점인 1970년대 후반에 집중되어 있음을 알 수 있다.

각국의 배타적 경제수역 선포는 Table 8-3에서 보는 바와 같은 국내입법을 통하여 이루어 졌으며, 입법의 내용은 공통적으로 유엔해양법협약상 배타적 경제수역에 관한 연안국의 권리를 수용하고 있으나, 그 내용에 있어서는 외국에 의한 동 수역내의 광물자원의 탐사 또는 개발에 관하여는 자국에 관할권이 있음을 명시적으로 언급하였을 뿐 구체적인 절차에 대하여는 하위입법에 위임하는 형식을 취하고 있다.

### 제 3 절 남태평양 도서국가의 심해광물자원 개발체제

#### 1. 남태평양응용지구과학위원회의 설치 및 운영형태

##### 가. SOPAC의 설치목적 및 기능

SOPAC(South Pacific Applied Geoscience Commission)은 남태평양 도서국가의 국가관할권내에 부존하는 무생물자원의 관리 및 지속가능한 개발에 지구과학의 지식을 응용함으로써 남태평양도서국가의 경제적 이익을 증진시키고자 함을 설립목적으로 하고 있다.

이와같은 설립목적을 달성하기 위하여 SOPAC은 다음과 같은 기능을 수행하고 있다.

- 무생물자원에 대한 조사 및 평가
- 지구과학 데이터베이스의 구축

- 회원국의 정책결정 지원
- 지구과학정보의 배포
- 회원국의 지구과학분야능력의 배양

Table 8-4. Enactment for Maritime Jurisdiction Claims of the SOPAC Member Countries

국 명	관 련 입 법
Australia	Fisheries Amendment Act No. 99 of 24 August 1978 Fishing Legislation Amendment Act of 22 May 1985
Cook Islands	Territorial Sea and Exclusive Economic Zone Act No.16 of 14 Nov. 1977
Federal States of Micronesia	Proclamation on Exclusive Economic Zone of 11 May 1988
Fiji	Marine Spaces Act No.18 of 15 December 1977 Marine Spaces Act No.15 of 6 October 1978
French Polynesia (France)	Decree establishing, in implementing of the Law of 16 July 1976, the economic zones along the coasts of French overseas departments and dependencies in 1978
Guam	Presidential Proclamation No.5030 on the Exclusive Economic Zone of 10 March 1983
Kiribati	Marine Zones(declaration) Act No.7 of 16 May 1983
Marshall Islands	Presidential Proclamation No.5030 on the Exclusive Economic Zone of 10 March 1983
New Caledonia (France)	Decree establishing, in implementing of the Law of 16 July 1976, the economic zones along the coasts of French overseas departments and dependencies in 1978
New Zealand	Territorial Sea and Exclusive Economic Zone Act No.28 of 26 Sep. 1977
Nieu	Territorial Sea and Exclusive Economic Zone Act No.38 of 30 Mar. 1978
Papua New Guinea	Declaration of Fishing Zone of 17 March 1978
Solomon Islands	Delimitation of Marine Waters Act No. 32 of 21 December 1978
Tonga	Territorial Sea and Exclusive Economic Zone Act No.30 of 23 Oct 1978
Tuvalu	Marine Zones Declaration Ordinance in 1983
Vanuatu	Maritime Zones Act No.23 of 1981
Western Samoa	Exclusive Economic Zone Act No.3 of 25 Aug. 1977(amended in 1980)

#### 나. SOPAC의 연혁과 설립배경

SOPAC은 1972년 유엔 아·태 경제사회위원회의 후원아래 ‘남태평양 근해해양 광물자원 공동탐사 협력위원회 (the Committee for Co-ordination of Joint Prospecting for Minerals Resources in South Pacific Offshore Areas : CCOP/SOPAC)’로 출범하였고, 1984년 유엔의 후원을 벗어나 독립적인 정부간 지역기구로 그 법적 지위를 공고히 하였으며, 1989년 SOPAC으로 명칭을 변경하였다.

SOPAC은 전술한 바와 같이 현재 15개 회원국과 2개의 준회원국으로 구성되어 있으며, 이들 모두는 유엔해양법협약에 의거하여 광대한 면적의 배타적 경제 수역을 보유하고 있고 동시에 막대한 양의 무생물자원을 보유하고 있는 것으로 알려지고 있다.

그러나 호주와 뉴질랜드를 제외한 대부분의 국가는 자국이 보유하고 있는 자원을 자체적으로 조사·평가·개발할 능력이 없을 뿐만 아니라 외국의 조사요청에 대하여도 적절히 대처할 수 있는 과학적 능력을 보유하고 있지 않다.

반면에 동 국가들은 국가재정의 대부분을 사탕수수, 목재의 수출, 관광 및 외국의 입어료에 의존하고 있는 만큼 열악한 재정상태를 극복하기 위하여 자국해역의 무생물자원개발에 큰 기대를 하고 있다.

이와같은 필요성에 입각하여 남태평양 도서국가들은 동 국가의 배타적 경제수역내에 부존하는 무생물자원 즉 해양광물자원의 개발에 공동으로 대처하고 지구 과학 전문가의 조력을 받아 무생물자원을 관리 및 개발하고자 SOPAC을 설치한 것이다.

#### 다. SOPAC의 조직

SOPAC은 회원국 대표로 구성되는 집행이사회(Governing Council), 50명의 행정관리자 및 과학기술전문가로 구성되는 기술사무국, 회원국 및 후원국과 사무



국이 추천하는 전문가로 구성되는 기술자문그룹으로 이루어져 있다.

집행이사회는 최고의사결정기구로서 매년 1회 소집되어 사무국이 제출한 사업계획을 심의·인준하고 예산을 결정한다.

사무국은 휘지의 수도인 수바에 위치하고 있으며, SOPAC지역내 무생물자원에 대한 외국의 해양과학조사를 조장하고 촉진하며, 그 결과를 수집분석하여 해당 회원국에 제공하는 역할을 수행하고, 연차별 사업계획과 예산안의 작성·중기계획의 수립·뉴스레터 등 각종 인쇄물의 발간 등의 역할을 수행하고 있다.

이 점에서 주목할 것은 SOPAC이 비록 정부간 국제기구라고는 하지만 본질적으로 회원국의 무생물자원 개발 및 관리를 조력해 주는 차원의 업무만을 수행할 뿐이므로, 회원국을 대신하여 광물자원의 탐사를 허가하거나 개발권을 양여해 줄 아무런 권한이 없다는 점이다.

#### 라. SOPAC의 재정

SOPAC의 예산은 일반목적의 예산(general purpose fund)과 특별목적의 예산(special purpose fund)으로 구분되는 바, 1995년도 SOPAC의 예산은 F\$ 628만불(U\$ 491만불)으로 예상되고 있다.

일반목적의 예산은 전체 예산의 16%에 해당하는 것으로서 사무국의 운영 및 기본적인 지구과학사업 수행에 소요되는 비용이며, 약 F\$ 100만불(U\$ 79만불)정도이며 회원국의 회비로 충당하고 있으나 대부분을 호주와 뉴질랜드가 부담하고 있는 실정이다.

특별목적의 예산은 사업수행의 관리와 외부기부자에 의해 수행되는 사업의 이행에 소요되는 비용으로서 비회원국의 기부에 의해 충당되고 있다.

비회원국으로서 기부국의 역할을 수행하고 있는 국가는 캐나다, 일본, 노르웨이, 프랑스, 중국, 미국, UNDP, EU등이 있으며, 기부의 형태는 현물과 현금으로 나누어서 이행되는데 현물이 전체의 약 80%를 차지하고 있다.

현물의 형태는 SOPAC 사무국에 자국 전문가를 프로그램 관리자 또는 지도제작 및 전산전문가로 파견하고 그에 따른 급료, 여비를 지급하는 것이 주종이며, 전산기 등 하드웨어의 제공도 포함되고 있다.

#### 마. SOPAC의 추진사업

SOPAC의 설립 당시부터 주된 관심분야는 심해광물자원의 평가, 도면 작성 및 석유 부존 잠재력의 평가이며, 이는 여전히 많은 회원국의 우선적 관심분야로 다루어지고 있다. 다만, 최근에는 심해에 비하여 접근이 용이하고 훼손되기 쉬운 연안역의 관리 및 개발에 관심이 모아지고 있다. 이와같은 변화는 연안국들이 좀더 실용적으로 자국의 자원에 대한 접근을 시도하고 있음을 나타내는 것으로서, 연안국들이 자국의 건설분야에 필요한 골재자원의 수요에 대처하고 연안침식 등과 같은 자연적 상황에 위기의식을 느낀 것이 그러한 변화의 동기로 해석된다.

또한 환경의 중요성에도 관심을 갖기 시작하였으나, 아직 개발지향적인 정책이 압도적으로 우세한 상태에 있다.

SOPAC 사무국이 수립한 1995년부터 1999년까지의 중기계획에 의거한 향후 사업의 분야와 분야별 세부과제는 다음과 같다.

#### (1) 광물 및 에너지분야(Mineral & Energy Resources)

- 광물자원
  - 육상광물자원의 평가
  - 연안광물자원의 평가
  - 모래 및 골재자원의 평가
  - 심해광물자원의 평가
  - 광물 잠재력의 개발 진흥
  - 광물자원 관련 입법 및 정책 수립

- 석유자원
  - 석유자원의 평가
  - 석유관련 입법 및 정책 수립
  - 석유 잠재력의 개발 진흥
  - 석유자료의 관리
- 해양에너지자원
  - 파력에너지자원의 평가 및 개발 진흥
  - 해수온도차발전 및 기타 해양에너지연구
- 지열에너지자원
  - 자원 평가

(2) 환경지구과학분야(Environmental Geosciences)

- 연안관리
  - 연안 및 해양환경 모니터링
  - 연안 자연생태계 현상연구
  - 연안관리에 관한 자문
  - 연안 보호 및 공학에 관한 자문
  - 지질적 재해의 평가
- 연안지도 작성
  - 수심도 작성
  - 원격탐사도 작성
  - 지질도 작성
  - 항공도 작성
  - 자원도 작성

- 근해지도 작성
  - 해저도면 작성
  - 조사항해 조정 및 자료 수집
  - 배타적 경제수역 정보 제공
- 해수자원 및 위생처리
  - 물의 공급 및 위생처리

### (3) 능력배양분야(Capacity Building)

- 인적 자원의 개발
  - 각각의 학과과정 및 학위과정 연구
  - 워크숍 및 세미나 개최
  - 실무훈련
  - 인적 자원 개발에 관한 자문

### (4) 기술용역분야(Technical Services)

- 지역자료센터의 설치·운영
  - 컴퓨터 서비스 및 훈련 제공
  - 지역국가간 의견 교환 및 자료 이전
  - 데이터베이스 관리
  - 지리정보시스템 개발
- 정보 제공
  - 출판사업 실시
  - 도서관 운영
  - 도면 제작

- 현장지원 제공
  - 워크숍 개최 지원
  - 장비의 제공

(5) 회원국간 협력분야(Cooperative Services)

- 사업의 관리
- 재정 및 행정
- 각종사업의 조정

이들 각분야의 중요도를 1995년 예산에 대비하여 살펴보면, 광물 및 에너지분야가 20%, 환경지구과학분야가 26%, 능력배양분야가 17%, 기술용역분야가 16%, 회원국간 협력분야가 21%로 나타나 있다.

2. 비회원국의 SOPAC지역 참여절차 및 현황

SOPAC지역의 해양광물자원탐사 및 개발을 위한 외국의 참여 절차는 크게 두 가지로 분류될 수 있다.

첫째는 SOPAC을 거치지 아니하고 직접 SOPAC의 회원국 정부와 협상을 하여 동 국가의 배타적 경제수역에 대한 해양과학조사 또는 광물자원 조사 등을 실시하는 방법이다. 이 방법은 국제법적으로 아무런 절차상의 어려움이 없으며 당사국만을 상대하는 절차의 단순함이 장점으로 부각될 수 있으나, 협상당사국이 외국의 제안내용에 대하여 과학적 협상능력이 없는 경우 SOPAC에 다시 의존한다는 점을 고려할 때 큰 의미는 없을 것으로 보인다.

둘째는 SOPAC 사무국과의 접촉을 통하여 조사를 추진하는 방법이다. 이 경우 우리나라는 SOPAC 사무국에 SOPAC 회원국의 관할해역에서 탐사 또는 개발 활동을 하고자 하는 의사를 전달하고, SOPAC과 구체적인 조사지역 및 조사범위에 대하여 협의한 후 포괄적인 내용의 일반협정을 작성하여 집행이사회에 상정하게 된다. 상정된 일반협정안은 동 협정이 대상으로 하는 SOPAC 회원국과 SOPAC 사무국 및 우리나라가 공동서명하여 채택하고, 매년 구체적인 실행계획을 작성하여 추진하게 된다.

구체적인 실행계획은 탐사방법, 탐사인원, 탐사기간, 탐사지역을 명시하여 작성하고 이를 집행이사회에 상정하여 심의를 거친 후, 동 계획이 당해년도에 목적으로 하는 지역의 회원국과 우리나라 및 SOPAC 사무국이 공동 합의하여 추진하는 절차를 따르게 된다.

이와같은 절차는, 전술한 바와 같이 SOPAC은 회원국의 지구과학적 사안에 대한 단순한 조정 또는 자문기구일 뿐 회원국의 주권 또는 관할권을 대행할 아무런 권한이 없으므로 실질적인 조사에 대한 인준은 당사국간에 이루어지게 된다는 점을 나타내고 있는 것이다.

한편, 우리나라가 SOPAC지역 조사에 따라서 부담하여야 할 의무는 구체적인 실행계획의 내용에 따라 결정되지만, 일반적으로 유엔해양법협약상 해양과학조사의 예에 따라 감독관의 승선 허용, 조사자료의 이전 및 조사결과의 제공, 당해국 국민의 훈련정도로 예상된다.

조사자료의 이전 및 조사결과의 제출은 기존의 예에 비추어 보면 SOPAC 사무국에 하게 되며, 동 사무국에서 이를 종합관리하고, 조사대상국 정부에 제공하게 된다.

1982년부터 1990년까지 비회원국이 SOPAC지역내의 활동을 위하여 체결한 합의문의 수는 21개에 달하며, 그 형태도 협정(agreement), 합의각서(memorandum of agreement), 관리계획(management plan), 승인서한(letter of approval), 용역계약(service of contract)등 국가에 따라 다양한 모습을 보이고 있다.

일본(MMAJ, JAICA)이 1995년 3월 통가, 마셜공화국, 마이크로네시아, 휘지 및 SOPAC과 체결한 작업범위(scope of work)의 구조를 살펴보면, 서문, 조사의 목적, 조사의 개요, 자료의 제출 및 처리, 보고서, SOPAC 및 대상국의 의무, 일본의 의무, 협의의 형태로 되어 있다. 이 문서에 따라 일본이 부담하는 의무는 자료 및 보고서의 제출, 백령환2호의 조사시 사용 보장, 조사비용의 부담, 적절하고 능력있는 과학자와 기술자의 참여 보장 및 비용 부담, SOPAC의 조정기구적 지위 인정, 사안에 대한 협의 의무 등이다.

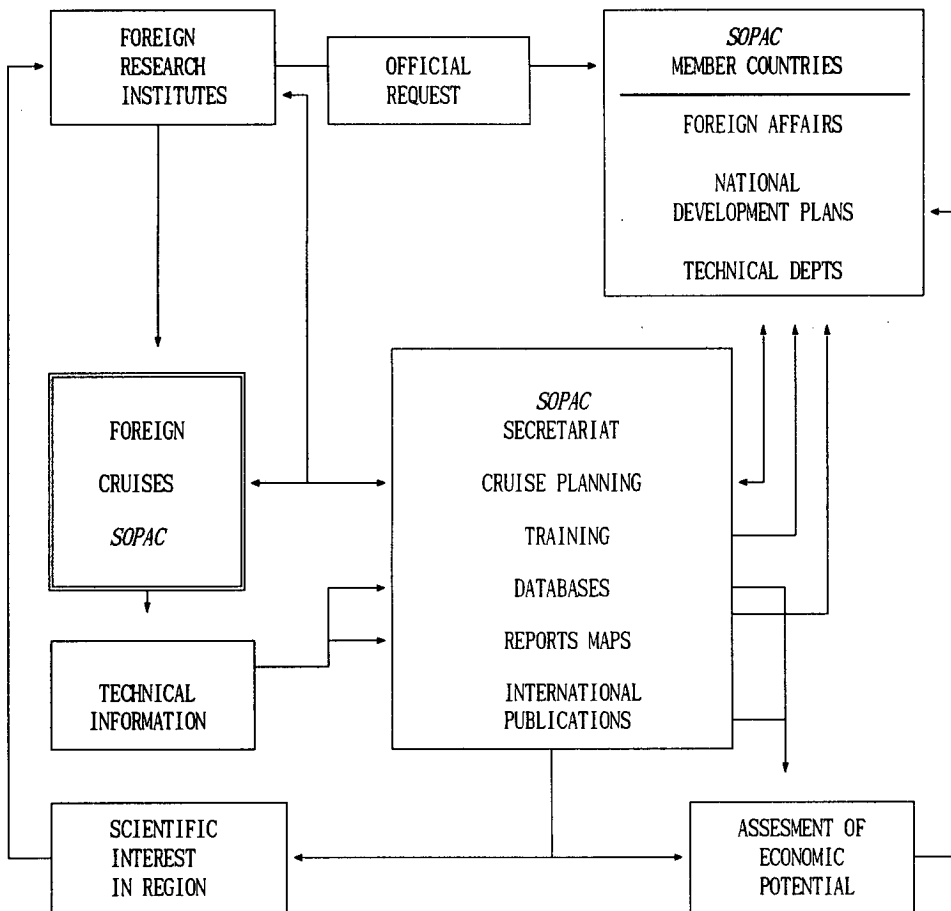


Fig. 8-2. Implementing Procedure of an Exploration Program in the SOPAC Area

주요국의 참여현황을 살펴보면, 일본의 경우 1985년부터 5년씩 2단계에 걸쳐 심해광물자원분야에 참여하여 SOPAC지역의 자원분포를 조사하여 오고 있으며, 1995년부터는 제3단계 SOPAC-JAPAN Cooperative Program (1995~1999) 수행 계획을 확정하고 1995년 Tonga 해역, 1996년 Marshall Island 해역, 1997년 Micronesia 해역, 1998년 Micronesia 해역, 1999년 Fiji 해역을 탐사할 계획인 것으로 알려지고 있다.

일본의 경우 1995년을 기준으로 SOPAC에 총 135,000 F\$(US\$ 101,250 : 약 76,000,000원)을 기부하고 있으며 이중 125,000 F\$는 일본이 SOPAC사무국에 일본이 수행하는 조사계획의 조정자 역할을 수행하게 하기 위하여 파견한 지질전문가의 급료와 여행경비이며, 현금 기부는 10,000 F\$(약 5,600,000원)에 불과하다.

프랑스의 경우는 연안과 근해의 지도작성사업에 참여하고 있으며, 382,000 F\$(US\$ 286,500 : 약 215,000,000원)을 기부하고 있는데 이중 230,000 F\$는 지도제작분야에 파견한 전문가의 비용으로 충당하고 있다.

EU는 SOPAC의 최대기여국으로서 SOPAC의 전사업에 걸쳐 참여하고 1,412,500 F\$를 기부하고 있으며, 캐나다는 광물자원사업, 연안역관리사업, 인적자원의 개발 및 해수처리사업에 참여하고 있으며 557,000 F\$를 현금으로 기부하고 있다.

이밖에도 미국, 중국, 노르웨이, 영국 등이 자국 기관을 통하여 SOPAC사업에 참여하고 있다.

#### 제 4 절 결 론 및 건 의 사 항

SOPAC지역은 광대한 해양관할권과 그에 부존된 석유, 망간단괴, 망간각의 잠재력에 비하여 연안국의 능력이 열악한 관계로 외국자본의 유치를 통한 자원개발이라는 정책을 유지하고 있다. 따라서 자본과 기술력이 존재하는 경우 동 자원에



의 접근은 심해저자원의 개발보다 더욱 용이하게 이루어 질 수 있는 가능성이 있을 것으로 생각된다.

이러한 여건을 배경으로 유엔해양법협약에 따라 심해저자원 개발에 참여한 바 있는 미국, 일본, 프랑스 등 선진국이 이미 10여년 이상 동 지역에 자원개발의 잠재력 평가 및 기득권 확보를 위하여 과학기술투자를 하여 오고 있으며, 최근에는 중국등 개도국도 참여를 하고 있는 실정이다.

또한 동 지역의 국가들은 전통적으로 아시아국가 특히 우리나라에 대하여 매우 우호적인 태도를 취하고 있으므로, 개도국 지원차원에서 동 지역에 진출하는 것은 외교적으로도 매우 긴요한 사안이라고 판단되며, 현지 대사관측도 이에 공감하고 있다.

SOPAC의 상황도 커다란 재정 기여국인 캐나다와 유럽연합의 사업이 1995년도로 종료되고 1997년 중반에나 재개될 것으로 예상되어 커다란 재정적 압박을 받고 있는 상황이다. 따라서 적은 규모의 투자로서 외교적 실리와 자원개발의 가능성을 타진할 수 있다는 효과를 고려할 때 SOPAC지역에의 참여는 적극적으로 검토되어야 할 것으로 판단된다.

다만, 망간각 등 해저광물자원의 금속가격 및 금속시장이 불안정하고, 상업적 개발에 필요한 기술수준이 초기수준에 머물러 있는 현실을 감안할 때 상업적 개발을 현시점에서 추진하는 것은 부적절하다고 판단되며, 향후의 상업적 개발에 대비하여 자원부존량 및 지구과학적 지식을 축적하고 기존의 자료에 대한 접근의 용이성을 확보한다는 차원에서 SOPAC지역에의 참여가 고려되어야 할 것이다.

참여방법으로서는 참여목적이 과학적 조사 또는 자원의 탐사수준에 국한될 것이므로 SOPAC의 개별 회원국과 직접 접촉하는 것보다는 기존의 지역기구인 SOPAC을 통하여 동 지역에 진출하는 것이 바람직하다고 판단된다.

따라서, 동 지역에 대한 탐사계획을 수립하고 탐사비 및 SOPAC 사무국에의 전문가 파견에 소요되는 비용의 확보가 예상되는 경우, SOPAC 사무국에 우리나라

라의 참여의사를 밝히고 일반협정을 체결한 후 구체적인 사업계획을 작성하여 SOPAC 정기총회에서 인준받는 절차를 택하는 것이 적절할 것으로 생각된다.

이에 소요되는 비용의 확보는 통산부 또는 과기처의 연구비로서 충당하거나 현재 수행되고 있는 심해저탐사사업을 이용하여 우리나라로의 귀항시 SOPAC지역을 동시 탐사하여 비용의 절감효과를 기대하는 것이 고려될 수 있으며, SOPAC지역에 대한 지원문제는 최근 확대되고 있는 외무부 국제협력단의 ODA 자금을 이용하여 전문가 파견에 따른 비용을 현물출자하는 방안을 그 대안으로 생각할 수 있다.

한편, SOPAC 지역에 대한 참여는 SOPAC 회원국의 200해리 배타적 경제수역내에 부존하고 있는 해저광물자원 특히 고코발트 망간각의 개발가능성을 타진하기 위한 전초적인 활동이라 할 수 있으나, 고코발트 망간각의 개발은 아직 전 세계적으로 타당성 조사단계에 머물러 있는 관계로 실질적인 개발에 선행되어야 할 경제적 평가가 아직 구체적으로 이루어진 바가 없으므로 우리나라의 구체적인 장기정책수립을 위하여는 자원개발의 경제적 가치평가에 관한 연구와 개발대상지역국가의 광물자원 개발에 관한 국내법체계에 대한 연구가 이번 수행된 연구사업의 후속조치로 이루어져야 할 것으로 판단된다.