

제 2 차 년 도  
연 차 보 고 서

BSPN 00228-743-7

심해저 광물자원 탐사기술개발 및  
환경보전연구

A Study on the Development of Deep Seabed  
Mineral Resources Exploration Techniques and  
Protection of Deep-Sea Environment

1994. 10

연 구 기 관  
한 국 해 양 연 구 소

과 학 기 술 처



# 요 약 문

## I. 제 목

### 심해저 광물자원 탐사기술개발 및 환경보전 연구

## II. 연구개발의 목적 및 중요성

이 연구는 심해저에 무진장으로 부존하는 유용 광물자원 중 망간단괴를 개발하기 위하여 1) 망간단괴광상의 성인과 그 분포를 포함한 여러 특성을 파악하여, 2) 그 부존상의 크기, 형태, 개별 망간단괴의 크기 등을 음향탐사 장비의 음파신호의 변형에 따른 지구물리적 방법과 S/W 개발을 통해 새로운 탐사기법을 개발하는 데 있다. 또한 3) 개발시 야기되는 환경파괴를 최소화하기 위한 방안수립을 위한 개발이전의 해양환경의 특성을 파악하고, 향후 개발시 환경과 유사한 여건을 조성하여 환경의 변화를 측정하기 위한 입체적 환경연구기법을 확립하는 데 있다.

심해저 광물자원개발의 중요성은 다음과 같이 요약된다.

1. 우리나라의 경우, 니켈, 구리, 코발트, 망간 등 희소금속은 전략금속이라 할 정도로 첨단산업에 필수 원자재이며 그 수요가 금속에 따라 매년 6-20%씩 증가일로에 있으며, 전량을 수입에 의존하는 실정이다. 이들 금속은 세계 몇 개국에 편중되어 제한된 양으로 부존하며 수 십년이내에 고갈될

것으로 예상된다. 세계 선진국 및 개발도상국들은 이러한 문제점을 극복하기 위하여, 21 세기초에는 심해저 망간단괴 및 망간각 개발을 목표로 탐사와 개발광구 확보를 서두르고 있다.

2. 우리나라는 1989년도부터 태평양 심해저 광물자원에 대한 집중탐사를 실시한 결과, 하와이 남동 C-C 해역에 15만 km<sup>2</sup> 면적의 망간단괴 단독개발광구를 유엔 해양법 협약에 의해 선행투자가 자격으로 1994년 8월 3일에 등록하였다. 유엔 해양법 협약에 의하면 이 등록광구는 향후 8년간의 정밀탐사를 거쳐 유엔 기술전문가그룹의 제심사후 최종적으로 7.5만 km<sup>2</sup> 가 할당된다. 정밀탐사 그리고 향후 개발을 위한 탐사를 위해서는 현재 탐사해역내 정점 및 정선 탐사를 중심으로 개발탐사가 아닌 새로운 탐사기법 개발이 선행되어야 한다. 개발시 채광전 탐사는 채광기의 운항로, 채광면적, 그리고 일일 채광량 등이 1일간 탐사 및 자료분석을 통해 도면화되어야 한다. 채광을 위한 탐사기술은 탐사선에 장착된 모든 음파탐사장비를 동원하여 획득한 음향신호의 분석에 의해서만 가능할 뿐 아니라, 향후 개발하고자 하는 음향탐사기법은 탐사시간과 경비를 최대한 절감할 수 있다.

3. 망간단괴개발광구를 획득한 선행투자가국들의 경우에는 심해저 망간단괴 개발시 야기되는 환경변화를 예측하기 위한 환경연구를 활발히 진행하고 있다 (예, 미-일-러 3 개국의 Benthic Impact Experiment). 공해저 및 EEZ 내 해저광물자원 개발시 환경 오염을 규제하는 해양법 협약 (1991년 뉴욕양해) 뿐만아니라 여러가지 국제법 또는 개별 국가법 등이 시행되고 있거나 입법중에 있어서, 우리나라와 같이 심해저 광물자원 개발이 필수적인 국가에서는 심해환경연구가 망간단괴 개발에 앞서 필수적으로 선행되어야 한다.

### III. 연구개발의 내용 및 범위

#### 1. 지질광상분야

- 망간단괴 광상의 성인을 파악하기 위해 1989과 1990년도 태평양 C-C 해역의 제반 탐사자료 (망간단괴, 지구물리 자료, 퇴적물)를 재검토분석하여, 망간단괴의 분포와 저층해류 및 퇴적층서와 관계, 망간단괴의 성분과 퇴적물 및 지형과의 관계, 망간단괴의 분류와 성분과의 관계를 규명하였다.
- 망간단괴 광상의 형성기작을 밝히기 위해 망간단괴 유형과 퇴적물중의 매물상태, 퇴적물의 지화학적 특성간의 관계를 파악하여 망간단괴 형성에 관한 지화학적인 현상을 규명하였다.
- 태평양 지각판의 이동과 연관하여, 망간단괴 형성과 분포에 대한 표층해수의 생산성과 저층해류의 시·공간적 영향을 분석하여 망간단괴의 형성시기를 밝히고, 그에 따른 망간단괴의 특성(성분, 크기, 분포 등)을 규명하였다.

#### 2. 탐사기술개발 분야

- 온누리호 장착 SeaBeam 2000 수심측정기 및 Side Scan Sonar 발·수신

음파신호의 정성적 분석을 통해 반사음압강도와 후방산란 음압의 분포를 도식화하였다. 이러한 결과는 실제 심해용 카메라에서 획득된 사진자료에 나타난 망간단괴의 부존과 비교하여 SeaBeam 2000의 다중 빔 음파를 이용한 망간단괴의 부존과 분포를 예측할 수 있었다.

- 망간단괴 분포지에 대한 음향신호 (3.5 kHz와 12.4 kHz) 반응의 여러 특성을 분석하여, 다중 음파에 대한 망간단괴의 총합적인 반응을 구해 망간단괴의 부존을 예측하였다. 또한 3.5 kHz 기록지에 나타난 최상부 음파 투명퇴적층의 두께와 음파신호 강도의 변화에 따른 망간단괴 부존량의 변화를 측정하였으며, 실제 심해용 카메라를 이용 계산한 망간단괴 부존량을 파악하여 검증하였다. 또한 퇴적물에 망간단괴들이 피복되어 산출되는 경우의 부존을 계산을 위해 심해저카메라에서 획득한 화상자료 분석의 새로운 기법을 개발하였다.
- 향후, 망간단괴 개발후보지내 해저지형의 정량적 분석을 위한 S/W를 개발하여 각 지형요소를 해저지형을 정량화하도록 하였으며, 사용을 위한 방법을 제시하였다.

#### IV. 연구 결과 및 활용에 대한 건의

##### 1. 지질광상분야

- 북동태평양 적도부근 클라리온-클리퍼톤 균열대 북서부에 위치한 세

개의 한국심해연구(KODOS) 지역에서 망간단괴는 올리고세-마이오세 방산층 함유 점토질이 우세한 KODOS-1 지역의 남부(8°-10°30'N)에서 다량으로 산출한다. 일반적으로 망간단괴는 클리퍼튼 층의 최상부 방산층 연니층이 침식되었거나 얇은 해저구릉 또는 해저산 지역에서 Patchy Pavement 형태로 산출되는 데 이러한 망간단괴의 산출형태는 저층수에 의한 퇴적물의 재분포 작용에 따라 망간단괴가 점진적으로 (재)형성됨으로써 이루어지는 것으로 보인다.

○ 망간단괴의 형성은 적도고생산대의 북부의 하부에서 올리고세-마이오세 시기 이후 방산층연니의 퇴적에 의해 가장 왕성하게 이루어졌다. 저층해류 및 저서동물의 활동에 의한 재퇴적 작용의 영향으로 망간단괴는 동심원상의 구조뿐만 아니라 10Å-manganate 가 풍부한 하부를 갖는 S-, T-, R-형의 세 가지 형이 형성된다. 망간단괴의 유형은 유기물 함유 퇴적물이 재퇴적되어 야기되는 저서동물의 활동에 의해 쌓이는 퇴적층내에 매몰되는 정도에 따라 결정되는 데, 단괴를 포획하는 퇴적층내에서 속성작용에 의해 공급되는 단괴 성장물질의 공급정도가 달라지기 때문이다.

## 2. 탐사기술개발 분야

○ 한국심해연구 (KODOS 94-1) 지역에서 온누리호에 장착되어 있는 12.5 kHz가 주 주파수 대인 SeaBeam 다중 빔 음향탐사장비 수신음의 반사도 (후방산란 강도)를 측정하여 망간단괴의 점유율과 연관하여 분석하였다. 선정된 면적에서 총 620 개의 발신음으로부터 반사된 121 개 음파강도 자료를 분석하여 색상 도면으로 표현된 반사도 분포는 망간단괴의 Patch들과 대

비가 가능하였다. 또한 심해용 카메라 사진자료와 비교한 결과 SeaBeam의 음향반사도만을 이용하여서도 망간단괴의 점유율의 예측이 가능하였다. 이때 망간단괴의 Patch나 Pavement는 20 dB 정도의 반사도를 보이는 주변 해저면보다 2-3 dB 정도 강한 반사도를 보인다. 향후, Chirp Sonnar 시스템과 심해용 카메라, 그리고 실제 좁밀한 간격의 시료채취 등에 의해서 망간단괴의 해저면 분포상황이 밝혀진다면 SeaBeam 2000 시스템의 음향신호만을 이용해서도 망간단괴분포를 예측할 수 있을 것이다.

○ 망간단괴 분포지에 대한 음향신호 반응의 여러 특성을 분석한 결과, 다중 음파에 대한 망간단괴의 총합적인 반응은 후방으로 산란되는 것보다 반사되는 강도가 더 강하였다. 망간단괴의 부존율은 3.5kHz와 12.4 kHz의 비와 좋은 상관관계를 보이며 퇴적물에 의한 단괴의 피복도가 적은 경우 두 주파수의 비로써 부존율의 추정이 가능할 것으로 사료된다. 이러한 가능성은 망간단괴 부존량을 실제 심해용 카메라를 이용 계산한 점유율 그리고 최상부 음파 투명퇴적층과 관계를 파악함으로써 검증된다. 망간단괴들이 대부분 최상부 퇴적층에 의해 피복되어 산출되는 경우, 새로이 개발된 화상분석 기법으로 심해저카메라에서 획득한 화상자료로부터 망간단괴의 부존율은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\text{망간단괴 부존율(kg/m}^3\text{)} = 0.25 \times \text{망간단괴 피복율(\%)}$$

○ 해저지형의 정량적 분석을 위한 S/W 개발시, 지형특성을 구성하는 요인으로 설정한 1) 평균수심, 2) 해저면의 평균경사도, 3) 해저면의 경사각도별 분포, 4) 경사구간별 평균수심, 5) 경사구간별 평균수평거리, 6) 해저면 기록의 평균표고차, 7) 해저면 기록점의 수 등이 해저지형을 정량화 요인으



로 적절히 사용되었다.

이 지형분석 프로그램 사용시에는 분석전에 지형에 따른 대략의 지역구분을 한 후 각 지역별로 분석을 실시해야 하며, 분석하고자 하는 지역의 크기 및 사용하는 수심자료의 분포에 따라 분석조건을 달리 해야한다. 한편, 프로그램을 통해 산출된 지형요인값은 각각으로는 별의미가 없으며, 모든 값들을 종합하여 상호관계를 비교함으로써 정확한 분석결과를 얻을 수 있다. 더구나 최종적으로 산출되는 지형요인값들은 분석조건에 따라 값이 달라질 수 있으므로 분석을 실시하기 전에 이점을 고려하여 분석조건을 설정해야하며, 아울러 분석조건을 달리하여 얻을 결과를 상호 비교함으로써 보다 정확한 분석을 실시할 수 있다.

따라서 대상지역에 대하여 사전에 충분한 검토작업을 거친후 분석을 실행함으로써 본 프로그램이 가지고 있는 취약점을 보완할 수 있으며, 아울러 보다 정확한 분석결과를 얻을 수 있다.

### 3. 환경보전분야

○ 심해저 광구등록 해역에서의 환경요인으로서 기상, 해황, 환경변화에 대한 생태계의 반응에 관한 연구가 자원탐사와 병행하여 수행되었다. 기상은 탐사가능일수 산정 및 채광장비 디자인에 영향을 미친다. 풍향은 북동풍이 지배적이고 풍속은 3-11 knot 내외가 대부분이었다. 8월경에 Hurricane의 영향이 자주 나타나는데 풍속의 증가(14 knot)와 병행하여 풍향의 변화(남풍 또는 남서풍)가 나타났다. 수온은 25.0℃ - 29.5℃ 기온은 24.0℃ - 29.0℃ 로 수온이 기온보다 평균 1℃ 정도 높게 나타나며, 수온의 일변화가

기온의 일변화에 비하여 작은 폭을 보였다. 1개월 단위의 변화는 기압의 변화와 이와 관련된 기상의 변화에 따른 일조량의 변화와 관계를 보였다. 즉, 기압의 강하가 나타날 경우 일조량의 감소와 함께 기온의 하강이 수반되었다. 기압은 1005 - 1018 mbar범위를 보였으며, 기압의 변화는 장기간의 변화와함께 1일 2주기 (semidiurnal)의 atmospheric tide가 매우 뚜렷이 나타났다. 최대기압은 오전, 오후 4시에, 최저치는 오전, 오후 10시에 각각 나타났으며 일일 변화폭은 2-3 mbar를 보였다. 기상의 연간 변화는 탐사기간이 4월말 - 8월에만 한정되어 1년간 변화를 파악하기 위하여는 계류장치에 의한 연속측정이 필요하다.

○ 표층생태계의 생산성을 좌우하는 영양염의 농도, 특히 해양에서 제한요인으로 작용하는 질산염의 농도는 표층혼합대에서 0.1  $\mu\text{M}$  내외로 매우 낮게 나타났다. 질산염:인산염 비는 표층혼합대에서는 1이하의 매우 낮은 값을 보이고 수심의 증가에 따라 10가까이 증가한다. 이는 표층에서 질산염이 인산염에 비하여 제한요인으로 작용할 가능성이 높다는 것을 의미한다. 광합성색소의 수직분포는 영양염의 농도가 증가하기 시작하는 수온약층 부근에서 0.4  $\text{mg m}^{-3}$ 의 subsurface maximum을 보였다. 표층에서는 영양염 농도가 제한요인이 되고 수온약층이하의 수층에서는 빛이 제한요인으로 작용한다.

○ 광업에 따르는 plume에 의한 광투과도 감소는 광합성의 감소를 초래하고, 금속 농도의 증가는 철등 필요한 이온을 공급하여 생산성 증가를 가져올 수 있는 반면, 구리등 독성이 있는 이온의 증가는 생산성의 감소를 수반할 수 있는 양면성을 지닌다. 또한 이러한 금속이온 농도의 증가에 대한 식물플랑크톤의 반응은 독성의 경우 2-3시간 내에 나타나기하나 철이온 증가에 의한 생산성의 증가의 의한 생산성 증가에는 3-4일 이상이 소요되고 균

집변화에 영향을 파악하기 위하여는 1개월 또는 1년 이상의 장기적인 monitoring이 필요하다.

○ 저층생태계의 변화를 파악하기 위하여는 BIE와 유사한 형태의 교란실험이 필요하고, 이를 위하여는 저층생태계 생물량의 90% 이상을 점유하는 박테리아에 대한 연구가 절실하다. Disturber를 이용한 교란실험을 하기전 저층생태계의 baseline study가 현재와 같은 macrofauna의 종 조성위주의 연구에서 박테리아와 meiofauna의 생물량을 정량화하는 방향에서 이루어져야 한다.

○ 1993년 태평양의 클라리온-클라포튼 해역에서 수행된 세 차례의 탐사 항해(KODOS 93-1,2,3)를 통하여 대형 저서동물을 채집하였다. 채집기기는 두 종류의 그랩 PGS(photo grab sampler), FFG(free fall grab)와 박스코어러였으며, 전체 조사정점 258곳 가운데 91곳에서만 저서동물이 채집되었다. 채집된 저서동물은 모두 155개체로 10개 동물군과 미확인 생물군으로 구분되었다. KODOS 93-1 탐사에서는 43개 조사정점에서 43종에 55개체(83.01g)가 채집되었으며, KODOS 93-2 탐사에서는 12개 정점에서 11종 15개체(38.40g)가 그리고 KODOS 93-3 탐사에서는 36개 정점에서 35종에 85개체(106.84g)가 채집되었다. 대형 저서동물의 분포와 서식형태에 대해 개략적으로 설명하고, KODOS 94 탐사에서 채취된 심해 미생물의 배양 과정에 대해서도 보고한다. 한편 채집된 저서생물 중에서 선별된 갯지렁이, 방산충 덩이, 망간단괴에 부착된 생물기원성 물질과 미확인 생물의 전자현미경 사진을 제공한다.



# SUMMARY

## I. Title

A study on the Development of Deep Seabed Mineral Resources  
Exploration Techniques and Protection of Deep-Sea Environment

## II. Objectives and Significance

This study aims at development of multi-purposed exploration techniques for both detailed survey for manganese nodules in the prospective area registered to the U.N and pre-survey for mining activities in the allocated mining area. The study performs the analysis of signals transmitted and received by various kinds of acoustic equipment and the development of operation S/W for the results, with a purpose to delineate the patterns and sizes of nodule patches and pavements and the size distribution of individual nodules. The concept for these researches is based on various characters of nodule deposits which have formed by sedimentary processes. The study also includes the detection of base-line conditions of deep-sea environment prior to the manganese nodule mining activities. The techniques to study the changes

in environmental factors which are caused by artificial disturbance will be established for searching the protection methods minimizing the deterioration of environment.

The significance of this study is summarized as follows:

1. In Korea, strategic metals (nickel, copper, cobalt, and manganese) that are essential to the high-tech industries are totally imported from foreign countries. The domestic demand of the metals is increasing at considerably rapid rates of 6 to 20 % per year depending on the metal species. Furthermore, the metals are produced in a few foreign countries that are expected to be exhausted within a few tens years. Many other developed and developing countries have been or are motivated to develop the deep-sea Mn-nodules, Mn-crusts, hydrothermal deposits to overcome the lack of land rare metal resources.

2. As the fruit of 5 year-period survey for Mn-nodule exploration, the Korean government has registered as the Pioneer Investor its exclusive Mn-nodule development area (150,000 km<sup>2</sup>) within the C-C zones, the northeast equatorial Pacific, to the U.N. on 3 August, 1994 (hereinafter, Registered Pioneer Investor, RPI). Regulated by the U.N Convention of the Law of the Sea, Korea has to survey in detail the registered area for 8 years to have allocated two halves of the area 1) relinquished and 2) allocated mining areas.

It is necessary to examine the survey systems and techniques that have been applied to the general exploration survey for Mn-nodules since

1989, based on new concept of Mn-nodule formation and distribution on the deep-sea floor. The previous systems consist mainly of one-dimensional surveys along track lines and on sites, resulting in inadequate informations on the distributional patterns of Mn-nodules which are characterized by patchness. To decide the amounts of nodule mining in the stage of deep seabed development, operating routes, minable area, nodule abundance and size distribution are mapped in detail one day prior to mining activities. To confirm the claimed area to be prospective and to mine the Mn-nodules efficiently and economically, 2- and 3-dimensional maps of seafloor topography and Mn-nodule distribution are indispensable in estimating the reserve and determining probable mining sites of Mn-nodules. To-be-developed exploration system and techniques could render it possible to survey the regional area within the shorter duration than the conventional systems, providing the detailed informations on the seafloor conditions including the nodule distribution.

4. To fulfill the requirements of the U.N. (Special Commission 3, New York, 1991) and other international regulations on the conservation of global ocean environment, the studies should be carried out to prevent the open seas from serious deterioration that is probably caused by the mining and other activities in the stage of Mn-nodule exploitation. First pioneer investors (U.S.A, Russia, and Japan) have already been studying the deep-sea environment through the water column to the seafloor by creating similar mining conditions in the C-C zones. This study will

enlarge the capability to check the base-line conditions and changes in deep-ocean environmental factors.

### III. Contents and Scope

This study is carried out emphasized on the development of exploration system for deep-sea bed manganese nodules and protection of deep-sea environment for detailed survey and mining activities. The study is based on comprehensive understanding on the processes of manganese nodule formation and distribution which are to be analysed relating to the properties of the underlying sediment, seafloor morphology, and sedimentary sequence. These analyses will reveal the timing and changes in bottom current activities and surface water productivity which have controlled the depositional pattern of sediment in the northeast equatorial Pacific. Geochemical processes of nodule formation is also subjected to the analysis both in nodules and the underlying sediment, expecting that the the growth processes of nodules are different from those proposed earlier.

To develop and advance the technologies of deep-sea mineral resources exploration, the acoustical characters of signals transmitted and received by acoustic exploration equipment (e.g., SeaBeam 2000 multi-beam echosounder, 3.5 kHz subbottom profiler) installed onboard the R/V Onnuri are quantitatively analysed. In these procedures, the analyses of



reflecting and back-scattering acoustic signals are emphasized regarding their relations to nodule coverage (distribution) on the seafloor. The results will be complemented by using ground truth values of nodule coverage and abundance which are evaluated in samplers and on photographs of deep-sea camera system.

The analyses of chemical and biological characters of deep-ocean water column from the sea surface including the air to the seafloor sediments are undertaken to present the base-line conditions in the registered mining area and to find out the alternatives to minimize the deterioration of environment during the future deep seabed mining activities. Conservation of the ocean environment during mining activity is one of the most important requirements in the U.N. Convention on the Law of the Sea. Distributions of nutrients, chlorophyll  $a$ , primary production, trace metals in seawater were studied in the Pacific C-C zone for this purpose. Weather and sea surface conditions were also detected during the survey periods. These background data will be utilized for searching most reliable protection measurements of the environment during the real mining zone.

## **V. Results and Recommendations**

### **1. Geological Environment of Mn-Nodule Formation**

In the Korea Deep Ocean Study (KODOS)-2 area, the northwestern margin of Clarion and Clipperton fracture zones, patchy pavements of manganese nodules are ubiquitous associated with the abyssal hills and seamounts where Oligocene to Miocene radiolarian ooze unit, the uppermost part of Clipperton Formation, is thin or scoured. The nodules occur exposed, partially or embedded within the topmost Quaternary sediment layer. The formation of nodule patchy pavements is attributed to the progressive (re)generation of nodules by sediment redistributive processes of bottom currents since the Oligocene beneath the northern margin of the Pacific equatorial production zone. Resedimentation processes of bottom current and benthic animal activities on nodules form three (S-, T-, and R-) types of nodules with concentric structures but also 10Å-manganate-rich bottoms.

### **2. Development of Exploration Techniques**

In the KODOS 94-1 area, acoustic reflectivity (backscattering strength) was measured with 12.5 kHz SeaBeam multi-beam echosounding system aboard R/V Onnuri and analysed qualitatively relating to nodule coverage. A colored map of intensity (reflectivity) distribution

in a selected area was produced using the 121-intensity of the specular returns from total 620 pings. The patchiness of nodule distribution can be correlated to large variations in reflectivity. Ground truth was carried out near the bottom through photographing with a deep sea camera system, rendering it possible to predict the nodule coverage simply based on the acoustic reflectivity data of SeaBeam. Nodule patches and pavements are delineated by the contour of 20 dB in intensity. The employment of a Chirp sonar system and under-water ground truth (with deep sea camera, free-fall grab, and box corer) will enable it to predict more evidently for the distribution of nodules by complementing the acoustic signal data of SeaBeam 2000 system.

Various characters of acoustic responses to manganese nodule field has been analysed. Aggregate acoustic response of nodules in multi-frequency soundings is to be reflective in signal properties rather than scattered. Ground truth is examined by the analysis and correlation of amplitude ratio (3.5 kHz/12.4 kHz), photographs taken with a deep-tow camera, and the thickness of acoustic transparent uppermost sedimentary layer. The advancement of image analysis techniques can be available for the calculation of nodule abundance in the area where nodules occur largely covered with the topmost sediment layer.

For developing a computer program analysing seafloor topographic characteristics, seven factors were defined in a given distance: 1) average water depth, 2) average slope angle of seabottom, 3) frequency of each slope interval, 4) average water depth of each slope interval, 5) average

horizontal distance of each slope interval, 6) average vertical difference of relief, 7) number of extreme (i.e., top and bottom) points of relief. These topographic factors are effective and useful for quantifying seabottom configurations, although the analysing program has some limits. To valuably use the program, some preanalyses of seabottom topography is recommended.

### **3. Environmental Conservation**

For the baseline study of environmental effect of deep-sea mining, meteorological, sea condition, ecosystem response to environmental changes has been investigated. The meteorological condition is an important factor for the calculation of operation day at sea and should be considered in designing the mining device. The dominant wind direction was NW and the average wind speed was between 3 and 11 knot. The effect of hurricane was observed mostly during August, resulting in the wind speed of up to 14 knot and changes in the direction to S and SW. The sea surface temperature ranged between 25.0 and 29.5°C and air temperature between 25.0 and 29.5°C. The atmospheric pressure ranged between 1005 and 1018 mbar, and showed a relationship with the irradiance. The decrease in atmospheric pressure usually resulted in cloudy weather. The distinct semidiurnal changes in the atmospheric pressure were observed with the amplitude of 2-3 mbar due to the atmospheric tide.

The concentrations of nutrients, especially that of nitrate, were extremely low in the surface mixed layer. N:P ratio in the SML was below 1, suggesting that nitrate could act as the limiting factor in this area. The vertical distribution of chlorophyll *a* show a subsurface maximum around the thermocline, where nutrient concentration starts to increase.

The decrease in light penetration and increase in heavy metal concentration due to the plume formed by mining activity could result in the decrease in photosynthesis. In contrast, the supply of nutrients and essential trace metals (for example, Fe) can have positive effects on primary production. The toxicity due to heavy metal can take as short as a few hours, and the increase in production by nutrient and trace metal enrichment can take at least 3 days. To investigate the changes in pelagic and benthic ecosystem due to mining activity, long term (up to several years) monitoring of planktonic community and benthic meiofauna and bacterial community change needs to be carried out after the disturbance.

The abundance and biomass of deep-sea benthic macrofauna were analyzed for the samples collected by using free-fall grab sampler with camera and box corer during three cruises (KODOS 93-1, 2, 3) in the Clarion-Clipperton fracture zones, the northeast equatorial Pacific. Macrobenthos were sampled at 91 site among 258 sites. A total of 155 individuals were classified into 60 species which belong to 10 phyla. The rest are unidentified: 55 individuals (83.01g) of 43 species at 43



stations in the KODOS 93-1, 15 individuals (38.40g) of 11 species at 12 stations in the KODOS 93-2, and 85 individuals(106.84g) of 35 species at 36 station in the KODOS 93-3 area. The distribution and living patterns of macrobenthos and the result of cultivation of the deep-sea bacteria sampled in KODOS-94 cruise were summarized. SEM photographs of a polychaete worm, a aggregation of radiolarians, biogenic structures and sessile animals were showed.

# Contents

List of Tables -----	33
List of Figures -----	37

## Part I. Geological Processes of Mn-Nodule Formation

Abstract -----	47
Section 1. Introduction -----	49
Section 2. Korea Deep Ocean Study (KODOS) area -----	52
1 Morphology -----	52
2 Seismic Stratigraphy -----	52
Section 3. Sediment -----	55
1 General Characters -----	55
2 Sediment Mixing -----	56
3 Composition -----	57
Section 4. Managanese Nodules -----	58
1 Occurrence -----	58
2 Internal Structures -----	59
3 Composition -----	60
4 Distribution -----	61
Section 5. Discussion -----	64
1 Nodule Growth by Rescdimentation Processes -----	64
2 (Re)generation and Distribution of Nodules -----	69

Section 6. Conclusions -----	71
References -----	75

## Part II Development of Exploration Techniques

Chapter 1. Multi-Beam Acoustic Exploration Technique -----	97
Abstract -----	99
Section 1. Introduction -----	101
Section 2. Exploration Equipment and Data Acquisition -----	105
1    SeaBeam 2000 System -----	105
2    SeaBeam 2000 Side Scan -----	106
Section 3. Data Processes and Result -----	107
1    SeaBeam 2000 Acoustic Exploration -----	107
2    Multi-Beam Data Processes -----	109
Section 4. Conclusions -----	112
Appendix : Introduction of Chirp Sonnar (To Be Developed in '95) --	115
References -----	119
Chapter 2. 3.5 kHz Acoustic Exploration Technique -----	121
Abstract -----	123
Section 1. Intreoduction-----	125
Section 2 Multi-Beam Acoustic Exploration -----	126
1    Acoustic Back-Scattering by A Single Nodule -----	127
2    Acoustic Response to Seafloor Nodules -----	133



3	Analysis of Narrow Beams -----	138
4	Relationship of Reflection Coefficient to Nodule Abundance-----	140
5	Exploration and Data Analysis Equipment-----	146
5.1	Echosounder (GEL-3) -----	146
5.2	3.5 kHz Subbottom Profiler (M-140) -----	147
5.3	Deep-Tow Camera System-----	147
5.4	Image Analyser-----	148
5.5	Methods in Seabottom Photographs-----	149
	Section 3. Result -----	150
	Section 4. Conclusions -----	151
	References -----	153
	Chapter 3. S/W Program for Seafloor Topography -----	155
	Abstract -----	157
	Section 1. Introduction -----	159
	Section 2. Data for Topographic Analysis -----	161
	Section 3. Data Processing -----	162
	1. Intervals Between Data Points of Water Depth -----	162
	2. Filtering Water Depth Anomalies -----	162
	Section 4. Topographic Factors -----	164
	1. Average Water Depth -----	164
	2. Slope Angle of Seafloor -----	165
	3. Seafloor Relief -----	168
	4. Methods -----	171
	Section 5. Conclusions-----	174

References	-----	175
------------	-------	-----

## Part III Environment Conservation

Chapter 1. Marine Environment	-----	239
Abstract	-----	241
Section 1. Introduction	-----	243
Section 2. Sampling and Analytical Methods	-----	248
1 Sea Surface Conditions and Weather	-----	248
2 Environment Factors	-----	249
3 Structures and Variations in Surface Ecosystem	-----	249
Section 3. Results	-----	254
1 Sea Surface Conditions and Weather	-----	254
2 Vertical Distribution of Water Temperature and Salinity	---	257
3 Environment Factors	-----	258
4 Sea Surface Ecosystem	-----	259
Section 4. Discussion	-----	264
1 <u>The State of The Art</u>	-----	264
2 Plans for Mid- and Long-Term Environment Study	-----	268
References	-----	271
 Chapter 2 Benthic Environment	-----	273
Abstract	-----	275

Section 1. Introduction -----	277
Section 2. Historic Review of Deep-Sea Benthic Ecology-----	279
1 History of Deep-Sea Ecology -----	279
2 Spatial Distribution of Benthic Organisms -----	281
3 Transition of Mn in Life Cycle of Deep-Sea Microorganisms-----	285
Section 3. Materials and Methods -----	292
1 Benthic Organisms -----	292
2 Microorganisms-----	293
Section 4. Results -----	295
1 Occurrence and Species of Benthic Organisms -----	295
2 Distribution of Benthic Organisms -----	301
3 Habitat Types of Benthic Organisms -----	302
4 Cultivation of Microorganisms -----	303
Section 5. Discussion -----	304
References -----	307



# 목 차

표 표 차	35
그림목차	37

## Part I. 지질광상 분야

요 약	47
제 1 절 서 론	49
제 2 절 한국심해연구(KODOS) 지역	52
1 지 형	52
2 탄성파 층서	52
제 3 절 퇴 적 물	55
1 일반적 특징	55
2 퇴적물 혼합	56
3 성분 조성	57
제 4 절 망간단괴	58
1 산출상	58
2 망간단괴의 내부구조	59
3 성분 조성	60
4 분 포	61
제 5 절 고 찰	64
1 제퇴적 작용에 의한 망간단괴의 성장	64
2 망간단괴의 (제)형성과 분포	69
제 6 절 결 론	71
참 고 문 헌	75

## Part II 탐사기술 개발 분야

제 1 장	다중 빔 탐사기술개발	97
요 약		99
제 1 절	서    론	101
제 2 절	조사장비 및 자료 획득	105
1	SeaBeam 2000 시스템	105
2	SeaBeam 2000 Side Scan	106
제 3 절	자료 처리 및 결과	107
1	SeaBeam 2000을 이용한 음향탐사	107
2	다중 빔 자료처리	109
제 4 절	결    론	112
부    록	Chirp Sonnar 소개 ('95년도 개발)	115
참 고 문 헌		119
제 2 장	3.5 kHz 음파탐사기술 개발	121
요 약		123
제 1 절	서    론	125
제 2 절	다중주파수 음향탐사	126
1	단일 단파에 의한 산란	127
2	헤저면 단파들의 음파반응	133
3	Narrow Beam에 의한 분석	138
4	반사계수와 부존률과의 관계	140
5	탐사 및 분석 장비	146

5.1 Echosounder (GEL-3)	146
5.2 3.5 kHz Subbottom Profiler (M-140)	147
5.3 심해 예인 카메라 시스템	147
5.4 화상분석기	148
5.5 헤저면 사진 분석 방법	149
제 3 절 결 과	150
제 4 절 결 론	151
참 고 문 헌	153
제 3 장 지형분석을 위한 S/W 개발	155
요 약	157
제 1 절 서 론	159
제 2 절 지형분석에 사용되는 자료	161
제 3 절 자료 처리	162
1 측심위치 간격	162
2 이상치 제거를 위한 수심자료 검정	162
제 4 절 지형요인	164
1 평균 수심	164
2 헤저면의 경사각	165
3 헤저면의 기복	168
4 분석방법	171
제 5 절 결 론	174
참 고 문 헌	175

## Part III 환경보전 분야

제 1 장 해양환경 -----	239
요 약 -----	241
제 1 절 서 론 -----	243
제 2 절 시료채취 및 측정 방법 -----	248
1 해황 및 기상 -----	248
2 환경 요인 -----	249
3 표층 생태계 구조 및 변화 -----	249
제 3 절 결 과 -----	254
1 해황 및 기상 -----	254
2 수온 염분의 수직분포 (CTD) -----	257
3 환경 요인 -----	258
4 표층생태계 -----	259
제 4 절 토 의 -----	264
1 현재까지의 연구결과 고찰 -----	264
2 중장기 환경보전 연구 방향 설정 -----	268
참 고 문 헌 -----	271
제 2 장 저서 생태 -----	273
요 약 -----	275
제 1 절 서 론 -----	277
제 2 절 심해생물 연구 개관 -----	279



1	심해생물연구사	279
2	심해 저서생물의 분포양상	281
3	심해 미생물에 의한 망간의 전이	285
제 3 절	재료와 방법	292
1	저서생물	292
2	미생물	293
제 4 절	결 과	295
1	저서생물의 출현 조성	295
2	저서동물의 분포	301
3	저서동물의 서식형태	302
4	심해 미생물의 배양	303
제 5 절	고 찰	304
	참 고 문 헌	307



## 표 목 차 (List of Tables)

### Part I

Table I-1. Summary of manganese nodule characters (types, occurrence, internal structures, compositions), delineated based the underlying sedimentary formations -----	83
--	----

### Part II

Table II-1. Manganese nodule coverage (%) and abundance ( $\text{kg/m}^2$ ), water depth (m), 12.4 and 3.5 kHz amplitudes, slope ( $^\circ$ ) of seafloor, and thickness of acoustically-transparent uppermost sedimentary layer. -----	181
---	-----

Table II-2. Interval of data points relating to the ship speed and bathymetric data receiving interval. -----	183
---	-----

Table II-3. Results of analysis from three example areas. Out-put data print-outs of area (A), (B), and (C) are listed ---	184
--	-----

Appendix II-1. Program for bathymetric filtering -----	222
--	-----

Appendix II-2. Program for topographic analysis -----	225
---	-----

Appendix II-3. Out-put data print-outs of example area (A), (B), and (C) -----	233
--	-----

### Part III

Table III-1. Species composition of phytoplankton in the KODOS 94-1 area.-----	310
--	-----

Table III-2. New production ( $R_{\text{NO}_3}$ ; $\text{nM h}^{-1}$ ), nitrogen specific nitrate uptake ( $V_{\text{NO}_3}$ ; $\text{h}^{-1}$ ), regenerated production	
--	--

( $R_{NH_4}$ ; $nM\ h^{-1}$ ), nitrogen specific ammonia uptake, and f-ratio in the KODOS 93-1 area.-----	312
Table III-3. Bacterial production using $^3H$ -Thymidine uptake in the KODOS 93-2 area.-----	314
Table III-4. Effect of a chelator (EDTA), Fe, and Cu on phytoplankton in the equatorial Pacific (F; fluorescence before DCMU addition, Fd; fluorescence after the addition of DCMU).-----	315
Table III-5. Concentrations of $^{210}Po$ and $^{210}Pb$ in seawater in the KODOS 93-3 area.-----	316
Table III-6. Some manganese-oxidizing bacteria -----	317
Table III-7. Some Mn(IV)-reducing bacteria -----	318
Table III-8. Manganese budget for the Pacific Ocean -----	319
Table III-9. Total abundance of organisms in the KODOS 93 areas --	319
Table III-10. Benthic fauna collected in the KODOS 93 areas-----	320
Table III-11. Individuals and biomass of benthic animals collected in the KODOS 93-1 area -----	321
Table III-12. Individuals and biomass of benthic animals collected in the KODOS 93-2 area-----	323
Table III-13. Individuals and biomass of benthic animals collected in the KODOS 93-3 area -----	324

## 그림 목차 (List of Figures)

### Part I

- Fig. I-1. Distribution of sedimentary formations and ages of the underlying sediment. The location of KODOS areas is presented in the lower rectangled box ----- 84
- Fig. I-2. Correlation of acoustic (3.5 kHz) stratigraphic units to formations defined in DSDP cores ----- 85
- Fig. I-3. General characters of box core sediment, excess  $Pb^{210}$  activity, clay mineral composition, abundance of micromodules, and transition metal contents ----- 86
- Fig. I-4. X-radiograph showing buried nodules in sediment core (no. K8918) at a seamount site ----- 87
- Fig. I-5. Relationship of nodule types and abundance to bioturbated depth of box sediment cores ----- 88
- Fig. I-6. Internal structures and distribution of metal species in selected T- (Fig. 6-1) and R-type nodules (Fig. 6-2) ----- 89
- Fig. I-7. Ternary relationships of Fe-Mn-10.(Ni+Cu+Zn) in nodules and the underlying sediment in the upper Line Islands (A) and radiolarian ooze unit of Clipperton Fm. (B). ----- 90
- Fig. I-8. Relation of Ni+Cu+Zn/Mn to Mn/Fe ratio in nodules and the underlying sediment in the unper Line Islands Fm. (A) radiolarian ooze unit (B). ----- 91
- Fig. I-9. Latitudinal distribution of nodule sizes (frequency %). ----- 92

Fig. I-10. Distribution of nodule abundance and types -----	93
Fig. I-11. Relation of nodule types and abundance to the thickness of acoustically transparent uppermost layer.-----	94

## Part II

Fig. II-1. Onnuri SeaBeam 2000 system's cross-fan beam geometry -----	185
Fig. II-2. Block diagram of SeaBeam 2000-----	186
Fig. II-3. Athwartship beam pattern of SeaBeam 2000 projector-----	187
Fig. II-4. Track chart of multi-beam SeaBeam 2000 sounding -----	188
Fig. II-5. Tracks of deep-sea camera system running-----	189
Fig. II-6. Variations in amplitude of vertical and off-normal beams. --	190
Fig. II-7. Sample output of FFT beam former in one ping -----	191
Fig. II-8. Sample output of SeaBeam 2000 side scan image -----	192
Fig. II-9. Contoured water depth, based on SeaBeam 2000 data -----	193
Fig. II-10. Selected center beam amplitude from each transmission pings of SeaBeam 2000-----	194
Fig. II-11. Colored map of amplitudes selected from transmission pings -	197
Fig. II-12. Map showing average abundance of manganese nodules---	198

Fig. II-13. Colored map of amplitude selected from transmission pings -	199
Fig. II-14. Colored map of amplitude selected from transmission pings-	202
Fig. II-15. Ground truth of photographs for acoustic amplitude distribution -----	203
Fig. II-16. Proposed sounding system-----	204
Fig. II-17. Plane wave incident upon a single spherical nodule.-----	205
Fig. II-18. Scattering amplitude ( $R_r$ ) versus dimensionless ( $ka$ ) for a rigid sphere-----	206
Fig. II-19. Scattering amplitude ( $R_r$ ) versus dimensionless ( $ka$ ) for a Pacific nodule -----	206
Fig. II-20. Plane wave normally incident upon a planar bottom containing a uniform distribution of nodules.-----	207
Fig. II-21. Bottom reflectivity ( $C_R$ ) versus dimensionless frequency ( $ka$ ) for square close-packed rigid sphere.-----	208
Fig. II-22. Bottom reflectivity ( $C_R$ ) versus dimensionless frequency ( $ka$ ) for close-packed elastic spheres representing Pacific nodules-----	209
Fig. II-23. Bottom coverage geometry-----	210
Fig. II-24. Reflectivity ( $C_R$ ) versus nodule radius ( $a$ ) for three sounding frequencies for close-packed rigid spheres-----	211

Fig. II-25. Synthesized reflectivity ( $R_r$ ) versus nodule radius( $ka$ ) for close-packed rigid spheres.-----	212
Fig. II-26. Reflectivity ratios versus nodule radius (a) for rigid spheres -----	213
Fig. II-27. Flow chart of seabottom image analysis. -----	214
Fig. II-28. Correlation diagram between nodule abundance and coverage from sea-bottom photographs. -----	215
Fig. II-29. Relationships of manganese nodule abundance, acoustic amplitudes, water depth, and thickness of acoustically-transparent layer-----	216
Fig. II-30. Relationships of manganese nodule abundance, acoustic amplitude ratio, water depth, and thickness of acoustically transparent layer -----	217
Fig. II-31. Example of input data. ① year, ② Julian day, ③ time, ④ latitude, ⑤ longitude (west represented in $\ominus$ value), ⑥ water depth (m).-----	218
Fig. II-32. Filtering method for eliminating mechanical error data of water depth.-----	219
Fig. II-33. Example of bathymetric profiles showing (a) before filtering and (b) after filtering.-----	220
Fig. II-34. Bathymetric profiles of three example areas -----	221



### Part III

Fig. III-1. Time series of (a) temperature (air and sea surface),  
(b) 25 hour filtered temperature, (c) atmospheric pressure,  
(d) solar irradiance, (e) wind speed, (f) wind polar diagram,  
and (g) wind vector during the KODOS 92-1 cruise.-----327

Fig. III-2. Time series of (a) temperature (air and sea surface),  
(b) 25 hour filtered temperature, (c) atmospheric pressure,  
(d) solar irradiance, (e) wind speed, (f) wind polar diagram,  
and (g) wind vector during the KODOS 92-2 cruise.-----334

Fig. III-3. Time series of (a) temperature (air and sea surface),  
(b) 25 hour filtered temperature, (c) atmospheric pressure,  
(d) solar irradiance, (e) wind speed, (f) wind polar diagram,  
and (g) wind vector during the KODOS 92-3 cruise.-----341

Fig. III-4. Time series of (a) temperature (air and sea surface),  
(b) 25 hour filtered temperature, (c) atmospheric pressure,  
(d) solar irradiance, (e) wind speed, (f) wind polar diagram,  
and (g) wind vector during the KODOS 92-4 cruise-----348

Fig. III-5. Time series of (a) temperature (air and sea surface),  
(b) 25 hour filtered temperature, (c) atmospheric pressure,  
(d) solar irradiance, (e) wind speed, (f) wind polar diagram,  
and (g) wind vector during the KODOS 93-2 cruise.-----355

Fig. III-6. Vertical distribution of nitrate and phosphate  
during the KODOS 93 cruises-----362

Fig. III-7. Vertical distribution of D.O. (dissolved oxygen)

during the KODOS 93-1 cruise-----	363
Fig. III-8. Vertical distribution of chlorophyll-a concentration during the KODOS 93 cruises-----	364
Fig. III-9. Vertical distribution of bacterial cell number in the KODOS 93-2 area.-----	365
Fig. III-10. Vertical distribution of NO <sub>3</sub> :PO <sub>4</sub> in the KODOS 93 area-----	366
Fig. III-11. Effects of bottom sediment plume and a chelator (EDTA) on chlorophyll concentration during a 4 day incubation during the BIE 93 cruise.-----	367
Plate III-1 and 2. Microscopic observation of phytoplankton species in the KODOS 94-1 area.-----	375
Fig. III-12. Geochemical cycle of manganese in the marine environment -----	368
Fig. III-13. Photograph showing a free living holothuroid at st. 83, KODOS 93-1 area-----	369
Fig. III-14. SEM photographs of polychaete worm, showing the entire body, prostomium, and pysidium. -----	370
Fig. III-15. SEM photographs of aggregated radiolarians showing the body structure.-----	371
Fig. III-16. SEM photographs of biogenic aggregates of bacteria (?) (left) and echinoid organisms (right) on a manganese nodule collected in the KODOS 91 area.-----	372

Fig. III-17. Biogenic structures and sessile animals on manganese  
nodule collected in the KODOS 93 area.-----373

Appendix III-1. Abundance of macrobenthos, sampling depth and density  
of manganese nodules obtained in the KODOS 93 areas-----377



## Part I. 지질광상분야

### 망간단괴 생성과 분포

연구 책임자 : 정 갑 식

참여 연구원 : 강 정 극

김 기 현

이 경 용

정 회 수

지 상 범

박 정 기

장 태 현

안 성 진



## 요 약

북동태평양 적도부근 클라리온-클리퍼튼 균열대 북서부에 위치한 세 개의 한국심해연구(KODOS) 지역에서 망간단괴는 올리고세-마이오세 방산층 함유 점토질이 우세한 KODOS-1 지역의 남부( $8^{\circ}$ - $10^{\circ}30'N$ )에서 다량으로 산출한다. 일반적으로 망간단괴는 클리퍼튼 층의 최상부 방산층 연니층이 침식되었거나 얇은 헤저구릉 또는 헤저산 지역에서 Patchy Pavement 형태로 산출되는 데 이러한 망간단괴의 산출형태는 저층수에 의한 퇴적물의 재분포 작용에 따라 망간단괴가 점진적으로 (재)형성됨으로써 이루어지는 것으로 보인다. 망간단괴의 형성은 적도고생산대의 북부의 하부에서 올리고세-마이오세 시기 이후 방산층연니의 퇴적에 의해 가장 왕성하게 이루어졌다. 저층수 및 저서동물의 활동에 의한 재퇴적 작용의 영향으로 망간단괴는 동심원상의 구조뿐만 아니라  $10\text{\AA}$ -manganate 가 풍부한 하부를 갖는 S-, T-, R-형의 세 가지 형이 형성된다.





## 제 1 절 서 론

클라리온-클리퍼튼 균열대 사이 해저면에는 망간단괴가 균열대를 따라 대상, 즉, 북동태평양 망간단괴 밀집지역, 으로 농집되어 풍부하게 산출된다 (Bischoff and Piper, 1979; McKelvey and others, 1984; Halbach and others, 1988). 이 지역은 적도로부터 북쪽으로 석회질 연니, 규질 연니 및 적(갈)점토의 세 가지 퇴적상이 발달하여 성분이 뚜렷한 세개의 퇴적층 (Line Islands, Marquesas, Clipperton)의 분포와 일치한다 (Horn and others, 1973; Cook, 1975; van Andel and others, 1975). 망간단괴의 성분 및 부존량은 위도에 따라 변하는 퇴적물의 종류, 성분, 연령 및 퇴적률에 따라 변화를 보인다. 이같은 특징은 태평양판이 북서쪽으로 이동함에 따라 북쪽으로 갈수록 표층해수층에서의 생물생산성이 감소하고 저층수의 활동이 활발하여지기 때문으로 보인다 (Skornyakova, 1979; Halbach and others, 1988; von Stackelberg and Beiersdorf, 1991). 망간단괴는 마이오세 초이후부터 적도 고생산대의 북쪽 주변부에서 남극저층수(AABW)의 영향으로 퇴적속도가 느린 지역에서 선택적으로 형성된다. 따라서 망간단괴는 일반적으로 탄산염 보상심도(CCD)보다 깊은 수심지역의 마이오세 방산층 연니 및 점토질 (클리퍼튼 층의 최상부층)에서 풍부하게 발견된다 (Piper and others, 1979; von Stackelberg and Beiersdorf, 1991). 망간단괴는 일반적으로 퇴적물의 재분포작용이 활발한 해저구릉 및 해저산 지역에 Patchy Pavement 형태로 분포한다. 최상부 퇴적층내에서 자주 발견되는 퇴적결층은 망간단괴의 성장이 저층수의 작용으로 침식되어 퇴적층으로부터 들어난 매몰된 망간단괴나 조립의 물질들을 이용하여 점진적으로 이루어졌음을 보여준다 (Menard, 1976; Heath, 1981; Halbach and others, 1988).

망간단괴는 하부의 퇴적물과 저층수의 상호작용에 따라 표면조직, 성분 및 구조 등이 뚜렷이 구별되는 세가지 S-, T-, R-형이 형성된다 (Bonatti and others, 1972; Moere and others, 1981; Reyss and others, 1985). 퇴적물 속성작용의 영향이 커질수록 S-, T-, R-형의 순으로 10 Å-manganate(todorokite)을 풍부히 포함하게 되어 망간단괴내에 Ni, Cu의 함량이 증가한다. 대부분의 망간단괴는 핵을 중심으로 동심원의 구조를 보여주지만 망간단괴의 하부는 상부에 비해 성장속도가 빠르며 10 Å-manganate 함량이 많다 (Moore and others, 1981; Reyss and others, 1985; Halbach and others, 1988). 망간단괴에서 나타나는 이러한 특징은 저층수나 저서동물의 활동에 의한 망간단괴의 굴름 또는 진복보다는 재퇴적 작용, 즉 주기적인 매물 및 노출에 의한 망간단괴의 성장에 기인하는 것으로 보인다 (Halbach and Özkara, 1979; Skornyakova and Murdmaa, 1991; Jeong and others, 1994). 퇴적물의 속성작용에 의한 망간단괴의 성장은 간헐적으로 퇴적물이 집적됨에 따라 유발되는 생물교란에 의한 금속을 다량으로 함유하는 고기퇴적물과 유기물이 혼합 분해되는 과정에서 재동원된 Mn 및 일부 미량금속을 포획함으로써 이루어진다 (Callender and Bowser, 1980; Müller and others, 1988; Jeong and others, 1994). 망간단괴 내부에서 Mn 및 미량금속의 함량은 적도 가까이 갈수록 높아지는 특징을 보이는 데 이는 망간단괴의 성장이 표층해수중 생물생산성에 의한 영향을 많이 받고 있음을 보여준다 (Horn and others, 1973; Geenslate and others, 1979).

클라리온-클리퍼튼 균열대의 북서 주변부에 위치한 한국심해연구 (KODOS)의 세 개지역에서는 망간단괴 탐사를 위해 5 차례에 걸친 종합적인 지질조사가 수행되었다 (Fig. I-1). 탐사측선에 따라 단일 채널 air-gun, 3.5 kHz 탄성파 및 정밀수심 자료 등을 획득한 후, 150 개 정점에서 2-5 개

의 자유낙하식 시료채취기를 사용하여 망간단괴 시료를 채취하였다. 52 정점에서는 상자형 시료채취기를 사용하여 망간단괴와 하부의 퇴적물을 함께 채취하였다. 총 13 개 정점에서 심해용 카메라 시스템을 사용, 해저면에서 망간단괴가 분포하는 형태를 파악하기 위해 사진자료를 획득하였다. 본 연구에서는 퇴적층서, 해저지형 및 하부 퇴적물의 특성과 망간단괴의 특징과의 관계를 파악함으로써 저층수의 작용과 해수중 생물생산성의 변화와 그 작용하는 시간이 망간단괴의 성장과 분포에 어떠한 역할을 하는지 분석한다. 특히, 위도에 따라 확연히 변하는 망간단괴의 특성(매장량, 크기, 조성)은 태평양판이 적도 고생산대를 지나 북서쪽으로 이동함에 따라 망간단괴가 점진적으로 (재)형성됨으로써 이루어지는 것을 시사한다.

## 제 2 절 한국심해연구 (KODOS) 지역

### 1. 지 형

KODOS-1 및 2 지역은 수심이 깊고 (일반적으로 4,700-5,300 m), 북서쪽으로 갈수록 완만한 경사를 보인다. KODOS-2 지역의 북동부에서는 클라리온 균열대가 깊은 (약 6,100 m) U-자 모양의 골을 이룬다(너비 25 km, 깊이 1,000 m). Line Islands 해령의 동쪽 가까이에 위치한 KODOS-3 지역은 다소 얕은 수심을 보인다 (4,700-5,100 m). 탄성파탐사 결과에 의하면 기반암은 불규칙적이고 많은 수의 괴상단층(높이, 30-200 m; 너비, 20-50 m)에 의해 절개되어 있다. 이 단층들은 균열대에 수직한 방향으로 해저기반암의 연대선 분포(48-80 Ma)을 따라 남북방향으로 배열되어 있는 것으로 보인다 (van Andel and others, 1975). 300-1,500 m의 높이를 갖는 소해산과 해저산들이 Line Islands 해령 주위의 도처에서 관측된다. 이들의 정상부 및 사면에는 보통 퇴적물층의 발달을 볼 수 없고, 괴상 및 계단 단층에 의해 복잡한 형태를 띠며, 이 경우에는 두꺼운 퇴적층에 의해 피복되어 있다.

### 2. 탄성파 층서

탄성파 탐사결과에 의하면, 두껍게 발달한 퇴적층은 기반암의 단층에 의해 크게 변형되어 있다. 퇴적층은 Line Islands 해령 부근에서는 두껍게 나타나고 (>400 m) KODOS-1 지역의 북동부에서는 100 m 이하로 얇다. 퇴적층은 확연한 층내 반사층, 음향학적 특성, 서로간의 층서학적 관계 등에

따라 DSDP 시추심의 암상과 해저면으로부터 하부로 대비되는 음파층서단위 I, IIA, IIB 세 가지 층서로 구성되어 있다 (Cook, 1975; van Andel and others, 1975; Peper and others, 1979). 3.5 kHz 천부지층 탐사 결과에 의하면, 최상부의 음파층서단위 I 층은 음향학적으로 투명하며 간혹 뚜렷치 않는 내부 반사층을 포함하며, 클리퍼톤 층의 최상부 방산층 연니 Unit(마이오세 초 - 제 4 기; 두께, < 20 m)에 해당된다. 음파층서 단위 IIA의 상부는 음파반사층에 의해 층리가 발달하고 하부로 갈수록 투명해지는 층으로 층리가 발달한 상부는 방산층 연니층과 미세 탄산질 화석 연니층이 연속적으로 반복되는 클리퍼톤 층의 Cyclic unit(마이오세 초- 중기)에, 하부의 투명층은 Marquesas 층(올리고세 초-마이오세 중기)의 미세 탄산질 화석 연니층에 해당된다 (Fig. I-2A). IIA 층은 수심이 4,950 m 이상인 경우, CCD 하부에서는 경우에 따라 석회질 성분의 용해인 듯한 이유로 인해 표면에 노출된 채 음향학적으로 투명한 특성을 나타내기도 한다. 음향학적으로 층리가 발달한 최하부의 퇴적층(IIB 층)은 방산층 연니와 미소화석 연니 및 이들이 고화된 Line Islands 층(에오세 초 - 중기)에 해당된다. 이층은 3.5 kHz 천부지층 탐사의 경우 투과깊이가 제한되어 나타나지 않는다 (Fig. I-2B).

KODOS-1 및 2 지역 북서부에서 음파층서단위 I 은 음파특성이 쌍곡선형 내부 반사에 의해 교란되어 있으며, 상부 Line Islands 층의 비석질 점토 또는 점토질 방산층 연니(에오세 중기-올리고세 후기)에 대비된다. 이 층은 층리가 발달한 클리퍼톤 층의 Cyclic Unit을 피복하고 있는 방산층 연니층과 잘 구별된다. IIA 층은 처어트 층이 협제된 적갈색 비석질 점토 및 방산층 연니로 구성되는 하부 Line Islands 층(팔레오세-에오세)과 대비된다. 최하부의 IIB 층은 백악기 후기의 미세 탄산질화석 초오크 및 고화된 처어트 층리를 포함하는 대리암로 구성된다(Unnamed Formation, Cook, 1975).

음파층서단위 I은 한 정점의 시료채취 지점 사이의 짧은 거리내에서도 (<200 m) 두께의 변화가 심하며 (0-140 m), 특히 KODOS-2 및 3 지역에 있어서는 넓은 지역에 걸쳐 침식되어 있다. 이 퇴적층은 대칭형 또는 비대칭형의 해저능을 이루며, 탄성과 단면에 의하면 이들 해저능은 기반암 단층에 저층수의 퇴적물 재분포 작용에 의해 형성된다(Johnson, 1972). 해저능들은 폭이 10 km에 달하고(대부분 <5 km), 높이가 75 m에 이르는(대부분 <40 m) 큰 규모를 보인다. 해저산의 양측에서 I 층은 퇴적층의 하부까지 침식한 거대한 비대칭의 해자를 형성한다. 소규모 해저 돌출기반이 발달한 지역에서도 음파층서단위 I은 퇴적물이동에 의한 해자를 형성한다 (Fig. I-2A).

### 체 3 절 퇴 적 물

#### 1. 일반적 특징

Box core 퇴적물은 태평양의 북동 적도주변에서처럼 깊이에 따라 대개 혼합층, 천이층, 고기층으로 구분된다 (Fig. I-3) (Halbach and Özkara, 1979; Berger and Killingley, 1982). 혼합층은 해수에 의해 충진되어 있으며 균질하게 생교란된 층으로 진한 노랑-적갈색을 띠고, KODOS-1 지역에서는 10 cm 이하, KODOS-2 및 3 지역에서는 5 cm 이하의 두께를 나타낸다. 천이층은 밝은 노랑색의 퇴적물에 의해 채워진 커다랗고 불규칙적인 형태의 생물자국(生痕)에 의해 얼룩져 있다. 이들은 때로 코어 길이보다 두꺼운 경우도 있다. 상부의 두 층은 주로 소량(<15%)의 방산층 화석을 포함하는 점토에 의해 이루어진다 (방산층 함유 점토). 최하부의 고기층은 방산층 화석이 드물거나 심하게 침윤된 어두운 갈색의 방산층 함유 smectitic 점토로 구성된다. 어두운 갈색은 미세망간단괴에서 기인되는 데, 미세망간단괴는 특히 상부퇴적물 퇴적물과 생물의 배설물로 채워진 생흔 주위에 농집되어 있다. 간혹 규질 및 석회질 연니가 5,000 m 보다 수심이 얕은 지역에서 나타나기도 한다.

방산층 화석으로부터 추정해 볼때, 최상부 혼합층은 연대상 제 4기에 해당하고, 최하부 고기층은 에오세-플라오세에 해당된다. 제 3기 퇴적물의 연대는 Ryan과 Heezen (1976)이 확인한 것처럼 북서쪽으로 갈수록 점차적으로 오래된 것으로 나타난다 (Fig. I-1). 특히 KODOS-3 지역의 경우에 있어서는 에오세 초-후기 퇴적물이 남서-북동 방향으로 분포하고 이들 주변에는 올리고세-마이오세 퇴적물이 분포한다. 올리고세, 마이오세 중기 및

플라리오세-플레이스트세에 걸친 방산층 화석이 거의 발견되지 않아 태평양의 북동적도 주변에서처럼 오랜 기간 또는 간헐적인 퇴적결층을 나타내고 있다 (van Andel and others, 1975; Mangini and Kühnel, 1987). KODOS-1 지역에서  $\text{Th}^{230}$  및  $\text{Th}^{232}$  동위원소로부터 추정된 혼합층의 퇴적속도는  $0.5\text{-}4.0 \text{ mm}/10^3$  년으로 판단된다 (Moon, 1993). 퇴적속도는 남쪽으로 갈수록 증가하여, 최상부 혼합층내 제 4기 방산층 화석 함량의 증가와 일치한다 (총량 10-80%). 간혹 확연하게 침식된 제 3기 퇴적물을 얇게 덮고 있는 혼합층내부에서는 후제 4기 방산층만이 나타나기도 한다. 이 경우, 많은 양의 3기 방산층 침상골 및 척추골이 경계부에서 발견된다. 제 3기 퇴적층의 퇴적속도는  $0.2 \text{ mm}/10^3 \text{ yrs}$  이하로 나타난다(Moon, 1993; Jeong, 1993).

## 2. 퇴적물 혼합

일부 선정된 퇴적물 코어(K9001, K9025, 및 K9037)에서,  $\text{Pb}^{210}$ 의 여기활동도를 분석하여 혼합계수를 구하였다 (Fig. I-3).  $\text{Pb}^{210}$ 의 여기활동도는 상부의 두 층에서 강하게 나타나는 반면 (20-100 dpm/g), 최하부의 3기 퇴적물에서는 10 dpm/g 이하로 낮게 나타난다. K9025 코어의 혼합층에서 혼합계수는  $3.0 \text{ cm}^2/\text{yr}$ 인 것으로 추정된다. Moon(1993)은 K8915 및 K9036 코어의 혼합층에 대해서 각각  $11.7 \text{ cm}^2/\text{yr}$  및  $21.4 \text{ cm}^2/\text{yr}$ , 천이층에 대해서 각각  $0.79 \text{ cm}^2/\text{yr}$  및  $0.93 \text{ cm}^2/\text{yr}$  등의 값을 산출하였다. 이 값은 퇴적물의 혼합이 태평양의 다른 지역에 비해 수십 배 빠른 속도로 진행되고 있음을 보여주고 있다(Berger and Killingley, 1982; Cochran, 1985). 특히  $\text{Pb}^{210}$ 의 여기활동도가 깊이에 따라 거의 변화가 없는 두 코어(K9001 및 K9037)에서



는  $Pb^{210}$  방사성 동위원소의 반감기(22.3 년)내에 최상층 퇴적물이 완전히 혼합되는 것을 뜻한다.

### 3. 성분 조성

점토질 (입자크기,  $< 2 \mu\text{m}$ ) 성분에서는 illite와 smectite가 우세하고 소량( $< 20\%$ )의 kaolinite와 chlorite가 나타난다 (Fig. I-3). 제 3기 퇴적층에는 smectite의 함량이 대개 50% 이상으로 높고, 특히, 클라리온 균열대내에서는 smectite 함량은 98%(K9134 코어)에 달한다. Smectite의 함량은 혼합층의 두께가 얇을 수록 증가하는 경향을 보인다. 조립질(입자크기,  $> 62 \mu\text{m}$ ) 성분에서 보이는 최상부의 제 4기 혼합퇴적층중에는 주로 방산층 화석과 이들의 파편이, 최하부의 제 3기 고기퇴적층중에는 검은 색을 띤 미세망간단괴 및 갈색의 smectite가 우세하게 나타난다. 미세망간단괴는 가끔 방산층 화석에 피복된 채 발견되는 반면 smectite는 화석 패각내 공극에서 산출된다. 화학분석과 및 EDX 분석(Jeong and others, 1994) 결과에 의하면, 미세망간단괴 입자는 주로 Mn으로 구성되어 소량의 Fe, Ni 및 Cu을 포함하는 반면, smectite는 Si 및 Fe로 구성되어 있다.

천이금속(Mn, Cu, Ni 및 Zn)은 최하부의 제 3기 퇴적층내에서 상부의 두 층에 비해서는 2-3 배, 방산층 및 석회질 미세화석 연니에 비해서는 4-10 배 정도 농축되어 있다 (Fig. I-3). 심하게 생교란된 퇴적물 코어중에서 금속의 함량은 일반적으로 균일하게 나타난다. 금속 함량의 최고치는 미세망간단괴의 분포와 일치한다. 반면, Fe 및 Co 함량은 퇴적물 코어의 깊이에 따라 다소 균일하게 나타난다. 혼합층이 얇은 KODOS-2 및 3 지역에서 금속의 함량은 높게 나타나고 코어의 깊이에 따라 일정한 특징을 보인다.

## 제 4 절 망 간 단 괴

### 1. 산 출 상

표면조직에 따라 세가지 형의 망간단괴가 산출된다. R-형 망간단괴는 거칠고 까끄러운 반면, S-형 망간단괴는 매끄럽고 번드르한 표면 특징을 보인다. T-형 망간단괴의 표면조직은 이들 두 형의 중간에 해당되며 하부가 거칠고 상부가 매끄럽거나 전체적으로 매끄러운 표면중에서 일부분이 거칠게 나타난다. 망간단괴의 상부는 퇴적물 입자가 묻어 있는 하부와 쉽게 구별된다. R-형 망간단괴의 절반(52%) 이상이 단일핵의 원반형 또는 원추형인 반면, 대부분의 S-형 (98%) 및 T-형 (67%) 망간단괴는 여러 개의 핵으로 이루어지며 불규칙한 형태를 띤다. Box-core에서, R-형 망간단괴는 최상부 퇴적층에 의해 부분적으로 또는 전체가 덮여서 산출되는 반면, S-형 망간단괴는 해저면에 노출된 채 산출된다. T-형 망간단괴는 S-형 또는 R-형 망간단괴와 함께 발견되는 특징이 있다. 퇴적물 코어의 X-선 분석 결과에 의하면 지름이 2 cm 이하인 많은 양의 R-형 망간단괴가 최상부의 혼합 퇴적층에 묻힌 채 발견된다. 경우에 따라 S-형 및 T-형의 망간단괴가 해저면에 다량으로 분포하는 해저산 기저부에서는 고기퇴적층중에서 대형 (4 cm 크기) 망간단괴가 발견되기도 한다 (Fig. I-4). 고기 퇴적물중에서 발견되는 망간단괴는 Mn-산화물 입자들이 느슨하게 결합된 최외각층에 의해 완전히 피복되어 있는 반면, 최상부의 혼합층 내부에 매몰되어 발견되는 망간단괴와 상부는 매끄러운 표면조직을 보여 준다. 망간단괴, 특히 S-형 또는 T-형의 경우는 구릉 또는 해저산 지역에서 그 하부 퇴적물의 생고란이 심할 수록 더 많은 양이 산출한다 (Fig. I-5).

## 2. 망간단괴 내부구조

반쪽으로 나누어 연마한 망간단괴의 절단면을 보면 망간단괴의 핵은 주로 오래된 망간단괴 파편이고 (Fig. I-6), 그외 암석 파편, 점토 덩어리 및 생물체 잔류물 등이 소량으로 발견된다. 핵의 모양과 수는 망간단괴의 외부 형태뿐 아니라 내부 구조의 발달특징을 결정한다. 일반적으로 망간단괴는 구조와 수직한 방사상으로의 균열이 발달되어 있다. 철망간층은 주로 2 cm 이하의 두께를 가지며, 이들은 침식면과 쇄설성 퇴적층에 의해 3-5 개의 동심원상 세부층으로 다시 분리된다. 이들 층리(層離)면은 망간단괴의 내부 구조의 성장 형태 및 금속함량의 뚜렷한 변화경계가 된다. 전자 반사 현미경 사진과 EPMA(JEOL, JXA-8600) 분석 결과에 의하면, 화학조성은 핵으로부터 광물층의 분포에 따라 망간단괴표면 방향으로 규칙적으로 변한다. 각 광물층 내부에 있어서는 화학조성이 상대적으로 균질하게 나타난다.

S-형 망간단괴는 Fe 및 Co 함량이 높은  $\delta$ - $MnO_2$ 의 규칙적인 파상의 박막으로 구성되는 주상구조에 의해 특징지어진다. 일부 망간단괴에서는 벗겨져나간 부분에 의해 내부구조상의 급격한 변화가 관측되기도 하는데, 요약하면 망간단괴의 바깥쪽을 향하여 얇은 박막형태로부터 괴상 그리고 주상의 구조대가 나타난다(Fig. I-6B). R-형 망간단괴 내부는 두껍고 (일반적으로, 50-100  $\mu m$ ) 괴상이며, 수지상으로 꽃양배추형태를 보이는 10Å-manganate가 우세하고, 부분적으로  $\delta$ - $MnO_2$  박막 및 쇄설성 퇴적층이 나타나기도 한다(Figs. I-6B 및 C). 10Å-manganate 층은 Mn, Cu, Ni 및 Zn의 높은 함량에 의해 구별된다(Fig. I-6C).

### 3. 성분조성

R-형 망간단괴는 높은 Mn/Fe 비(평균 4.4) 및  $10\text{\AA}$ -manganate/ $\delta$ - $\text{MnO}_2$  비(2.9)를 이루는 Ni, Cu 및 Zn의 높은 함량에 의해 특징지어진다 (Table I-1). 반면, S-형 망간단괴에는 높은 함량의 Fe(10.6%) 및 Co(0.29%)가 포함되어 있다. T-형의 망간단괴는 금속 함량에 있어서 이들 두 종류의 가운데에 해당된다. 쇄설성 광물의 양은 S-형, T-형, R-형 망간단괴의 순으로 비례하여 증가한다. R-형 망간단괴와는 상대적으로 Line Islands 구조의 상부에서 산출되는 S-형 및 T-형 망간단괴에서는 방산층 연니 층에서 나타나는 것보다 소폭의 변화를 보이는 Mn/Fe 및  $10\text{\AA}$ -manganate/ $\delta$ - $\text{MnO}_2$  비와 함께 더 많은 양의 Cu 및 Ni 함량이 나타난다. 매몰된 망간단괴는 조성상에 있어서 해저면에 존재하는 망간단괴와 유사한 특징을 보인다(Jeong, 1993). 망간단괴의 상부는  $\delta$ - $\text{MnO}_2$  내부에 Fe 및 Co 등의 금속이 풍부하며 반면 바닥 부분은  $10\text{\AA}$ -manganate 내부에 더 높은 Mn, Ni, Cu 및 Zn 함량을 나타낸다. 망간단괴 최외각(< 1 mm)의  $\text{Th}^{230}$  및  $\text{Th}^{232}$  분석 결과에 의하면 망간단괴의 종류에 관계없이 바닥부분(2.0-4.0 mm/my)은 상부(1.2-1.5 mm/my)보다 2-3 배 빠른 속도로 성장한 것으로 나타난다 (Moon, 1993).

Mn-Fe-10·(Cu+Ni+Zn)의 삼각 다이어그램에서 (Fig. I-7), Cu, Ni 및 Zn 함량의 합은 하부에 있는 퇴적물로부터 망간단괴로(S-, T-, R-형의 순으로), Mn/Fe 비에 비례하여 증가하는 경향을 보인다. 망간단괴에 있어서 금속 함량 및 Mn/Fe 비는 퇴적물의 경우 보다 수십배 정도 크게 나타난다. 반면, Fe의 경우는 퇴적물중에 높은 함량으로 함유(3-6%)되어 R-형 망간단괴에서와 유사한(평균 5.8%) 함량을 나타낸다. 이러한 삼각 관계는 R-형 망간단괴가 속성기원인 반면 S-형 망간단괴는 기원에 있어서 수성인 것을

나타내고 있다 (Bonatti and others, 1972; Habach and others, 1981).  $(\text{Ni}+\text{Cu}+\text{Zn})/\text{Mn}$ 의 비는  $\text{Mn}/\text{Fe}$  비가 증가함에 따라 다소 일정한 최대값을 향해 증가하는데, Line Islands 구조의 상부에 존재하는 망간단괴에서는 약 0.105의 값을 보이고 방산층 연니 층에 존재하는 망간단괴에서는 약 0.12의 값을 나타낸다 (Fig. I-8). 하부의 퇴적물 특히 방산층 연니 층에서는 두 비가 망간단괴에서와 뚜렷하게 반대 형태를 나타낸다. 즉,  $(\text{Cu}+\text{Ni}+\text{Zn})/\text{Mn}$  비는  $\text{Mn}/\text{Fe}$  비가 북쪽으로 증가함에 따라 최소값(약 0.11)을 향해 감소하는 경향을 보인다 (Fig. I-8B).

#### 4. 분 포

망간단괴는 다양한 수심(4,600-6,100 m)에서 산출된다. R-형의 망간단괴는 해저평원 지역에서 우세하고(시료채취 지점의 82%); S-형의 망간단괴는 해저산 및 구릉 지역의 도처에서(33 - 46%) 발견된다. T-형의 망간단괴는 항상 R-형 (14 - 21%) 또는 S-형 (5 - 25%)의 망간단괴와 함께 발견된다. 세 종류가 함께 산출되는 경우는 해저평원 지역(st. 9028)에서만 나타난다. 때로, S-형 또는 R-형 망간단괴는 해저산 지역에서 망간각과 함께 산출되기도 한다. 지름이 4 cm 보다 작은 망간단괴는 해저평원 지역에서 70%, 구릉 및 해저산 지역에서는 80% 이상을 차지한다. 망간단괴는 구릉 지역보다 해저산 지역에서 큰 형태를 가지는데 이는 여러 개의 핵에 의해 망간단괴가 생성되는 때문이다. 방산층 연니 층(KODOS-1 지역의 남부)에서의 망간단괴는 일반적으로 크기가 큰 반면 (크기 > 2 cm, 62%), 8°N의 남부에 존재하는 상부 Line Islands 구조 및 방산층 연니 층에서 발견되는 망간단괴는 크기가 작다 (< 2 cm, 60-69%) (Fig. I-9). 특히 KODOS-3 지

역과 KODOS-1의 남부 지역에서는 성장이 완전히 진행되지 않은 상태에서 상어의 이빨 및 점토 덩어리로 된 핵 주위를 철망간 산화물 박막이 피복한 작은 크기의 R-형 망간단괴가 다량 산출된다. 망간단괴의 부존량은 구룡 지역 조사정점의 22.5%에서 5.0-28.9 kg/m<sup>2</sup>이고, 해저산 지역에서는 2 kg/m<sup>2</sup> (44% 정점) 이하로부터 10 kg/m<sup>2</sup> (17.5%) 이상에 걸치는 것으로 생각된다. 이 지역에서 망간단괴 부존은 거리상으로 200 m 떨어진 시료채취 지점 사이에서도 커다란 변화를 보이는 곳이 나타남으로써 망간단괴의 점박이 형태 분포상을 보여준다. 해저평원 지역에서 망간단괴의 부존은 희박하여 약 86%의 정점에서 5 kg/m<sup>2</sup> 이하의 분포를 나타낸다.

망간단괴는 석회질 및 방산층 연니 지역에 소량으로 (< 1.5 kg/m<sup>2</sup>) 부존하는 반면, KODOS-1 지역의 남부(8°N-10°30'N)에 존재하는 방산층 함유 점토 지역(올리고세-마이오세)에서 풍부하게 산출된다 (Figs. I-1 및 -10). KODOS-1 및 2 지역의 북서부에서 망간단괴의 부존은 일반적으로 상부 Line Islands 구조의 두께에 관계없이 5 kg/m<sup>2</sup> 이하로 낮게(78.6%) 나타난다 (Fig. 11A). 반면, 망간단괴는 대부분 50 m 보다 두께가 얇은 방산층 연니 층에서 산출됨으로써 망간단괴의 부존과 이 층의 두께와의 역관계를 보여주고 있다 (Fig. 11B). Piper 등(1979)에 따르면 42.4% 조사정점에서 5 kg/m<sup>2</sup> 이상의 망간단괴가 발견되고 부존의 최대값은 이 층이 20 m 두께를 가지는 곳에서 나타난다. 망간단괴 분포의 이러한 특징은 해저면 사진 및 3.5 kHz 천부지층 탐사 기록과 일치된다. 즉, 점박이 형태로 피복된 망간단괴의 분포는 얇고 불규칙적이며 쓸려나간 흔적이 있는 방산층 연니 층의 도처에서 다양한 크기로 (300 m-15 km 이상) 발견된다 (Jeong et al., 1994). 반면, 상부 Line Islands 및 Clipperton 구조의 반복층에서는 망간단괴의 부존이 희박하게 나타남으로써 석회질 및 규질 연니 지역 box-core에서 나타

남은 망간단괴의 낮은 부존과 일치하고 있다. 망간각은 씻겨져나간 구릉의 꼭대기에 Patch Pavement 형태로 존재하는 망간단괴 사이에서 발견되기도 한다.

## 제 5 절 고 찰

### 1. 재퇴적 작용에 의한 망간단괴의 성장

세 개의 KODOS 지역에서, 망간단괴는 부분적으로 4기 퇴적층에 의해 덮여 있는 3기(에오세-플라이오세) 퇴적물 내부에서 결합된 잔류 광상의 형태로 나타난다 (Figs. I-1 및 -10). 망간단괴의 상부와 바닥 사이의 화학 조성 및 구조상의 커다란 차이(Table 1, Fig. I-6)는 재퇴적 작용에 의한 망간단괴 성장에 기인하는 것으로 보이지만 이들의 최외곽층에서 나타나는 일부 방사성 핵종의 분포상의 뚜렷한 차이는 저서동물 및 저층수의 작용에 의해  $10^3$ - $10^5$  년 주기로 망간단괴가 반전됨에 따라 이루어진 결과로 판단되기도 한다 (Moore and others, 1981; Krishnaswami and others, 1982). 오래된 망간단괴나 망간단괴의 파편 등 주위에 존재하는 여러개의 핵을 이용하여 느린 속도로 성장하는 다핵의 S-형 망간단괴가 우세하게 존재하는(98%) 것으로 보아 망간단괴가 수평적으로 이동하였다는 명백한 증거는 없다 (Fig. 6). 이들 망간단괴는 퇴적층을 깎아낼 수 있을 정도로 저층수가 강한 해저 구릉 및 해저산 지역에서 많이 발견된다 (Figs. I-10 및 -11B). 뿐만 아니라, 저서동물의 활동은 수십년 내에 퇴적물을 상당한 깊이까지 뒤섞을 수 있을 정도로 심하게 이루어진다 (Fig. I-3). 재퇴적 작용에 의한 망간단괴의 계속적이고 반복적인 성장은 퇴적물에 접촉되어 있거나 퇴적물 내부에 매몰되어 있는 바닥부분에서 이루어지는 강한 속성작용의 영향을 받아 원반형 및 원추형의 R-형 및 T-형 망간단괴를 형성한다 (Moore and others, 1981; Dymond and others, 1984; Reyss and others, 1985). 이들 망간단괴는 바닥 부분이 상부에 비해 2 - 3 배의 빠른 성장속도를 보이며 해저평원 지역



의 도처에서(52%) 발견된다(Moon, 1993). 망간단괴의 반전에 소요되는 시간 간격은 완전히 혼합되어 있으며(4기 및 3기 화석) 공극수에 의해 포화된 최상부 퇴적층의 재퇴적 주기에 해당할 수 있다. 지속적인 재퇴적 작용은 망간단괴의 바닥면이나 3기 퇴적층 내부에서 흡착되는 Mn-산화물 입자로 된 최외곽층으로 입혀진 망간단괴와는 달리 최상부 퇴적층 내부에 매몰되어 있는 망간단괴 상부의 매끄러운 표면 뿐 아니라(Fig. I-4)(Heye et al., 1979), 퇴적층의 최상층 및 바닥층 사이의 연대상의 커다란 차이 등에 의해 확인된다(Fig. 3). 재퇴적 작용, 반복적인 매몰과 노출 등에 의한 망간단괴의 성장은 여러 학자들에 의해 계속적으로 주장되고 있다(Margolis and Glasby, 1973; Halbach and Özkara, 1979; Skornayakova and Murdmaa, 1992).

망간단괴의 부존, 특히 S-형 및 T-형 망간단괴의 부존은 하부에 존재하는 퇴적물의 교란이 심해질수록 증가하는 것을 확인할 수 있다 (Fig. I-5). 퇴적물의 표면 또는 하부의 3기 퇴적층 내부에서 발견되는 많은 수의 망간단괴는 생물체에 의한 퇴적물의 교란 과정에서 망간단괴가 선택적으로 상부로 이동하는 현상에 의한 것으로 추측된다 (Paul and others, 1978; Piper and Fowler, 1980; McCave, 1988). 퇴적물의 빠른 혼합 계수 (Fig. 4)는 저서동물의 활동이 쌓이는 퇴적물의 층을 뚫고 망간단괴를 퇴적물 표면으로 밀어올릴 만큼 심한 것을 나타낸다. 최상층 퇴적물은 물에 의해 포화되어 있지만, 여기에서는 퇴적물의 응집력과 공극수 압력의 복합작용에 의해 망간단괴가 최상층에 놓일 수 있다(Piper and Fowler, 1980). 생물교란 작용은 최상부의 4기 퇴적층의 두께가 두꺼운 곳일수록 심하게 이루어지는데 (Fig. 3) 이는 유기물 함량이 높은 퇴적물의 퇴적 속도에 의해 결정되는 저서동물의 활동을 나타낸다. 이것은 망간단괴의 부존과 최상부 퇴적층의 두

계 사이에 존재하는 역관계에 의해 추정되는 것처럼 퇴적물의 퇴적 속도가 낮은 지역에서의 선택적인 성장과는 반대된다 (Fig. I-11B). 이러한 불일치는 저층수의 활동이 중지된 동안 저서동물이 망간단괴가 해저표면에 머무르게 하는 역할을 하고 있음을 나타낸다.

Mn-Fe-10·(Ni+Cu+Zn)의 삼각관계에서 나타나는 바와 같이, Cu, Ni, Zn 함량 및 Mn/Fe 비가 퇴적물에서보다 망간단괴에서 증가하는 것은 모든 망간단괴가 퇴적물 속성작용의 영향을 받아 성장하였음을 나타내주고 있다 (Fig. I-7). 속성작용의 영향은 S-, T-, R-형의 순으로 망간단괴의 매몰율이 증가함에 따라 강해지는 특징을 보임으로써 10Å-manganate /  $\delta$ -MnO<sub>2</sub> 및 Mn/Fe 비의 증가를 보여준다 (Dymond and others, 1984). 최근에 침전되어 생성된 표면조직의 형태와 망간단괴의 전체 함량과의 밀접한 관계는 망간단괴가 성장하는 동안 유사한 해저면의 환경 내부에 존재하였음을 확인해 준다. 이러한 환경은 저서생물의 활동을 유발하는 재퇴적 작용에 의해 유지되어 온 것으로 보이며 이는 다시 퇴적층의 최상층 내부에서 망간단괴의 매몰율을 결정하여 준다. R-형 망간단괴의 조성상의 특징은 최상부 퇴적층 내부에 매몰된 채 10Å-manganate를 흡착하여 성장함으로써 이루어진 결과이다 (Bonatti and others, 1972; Halbach and others, 1981; Dymond and others, 1984). 반면, Fe 및 Co의 높은 함량을 나타내는 S-형 망간단괴의 경우는 해저면에 노출된 채 저층수로부터 침전하는  $\delta$ -MnO<sub>2</sub> 및 Fe-oxihydroxide를 주로 사용하여 성장하기 때문으로 보인다. R-형 또는 S-형 망간단괴와 동시에 산출되는 특징과 조성상의 커다란 변화에서 나타나는 바와 같이 (Table I-1), T-형의 망간단괴는 지역적인 재퇴적 작용에 따라 변화를 보이는 상부의 해수와 하부의 퇴적물로부터 동시에 영향을 받아 성장하였다. 상부 Line Islands 층의 오래된(이오세 - 올리고세) 퇴적물에서 발

견되는 S-형 및 T-형 망간단괴일수록 더 많은 양의 Ni과 Cu를 함유하는 것은 더 오랜 기간동안 망간단괴에 작용한 제퇴적 작용의 영향을 나타내주는 것 같다.

망간단괴의 조성과 하부의 퇴적물 사이에 존재하는 위도방향의 역관계는 속성작용에 의한 망간단괴의 성장을 명백하게 반영한다 (Fig. I-8). 이 경우 생물체에 의한 유기물 혼합과 이들의 분해, 오래된 퇴적물 등은 주로 미세망간단괴로부터 Mn과 기타 희유금속의 재이동을 유발하는데 (Callender and Bowser, 1980; Müller and others, 1988) 이 작용은 심하게 생교란된 최상부 퇴적층에서 이들 금속이 심하게 고갈된 현상에 의해 확인된다 (Fig. I-3). 미세망간단괴는 많은 양의 Mn을 함유하며 3기 퇴적층의 최하부에서 많이 발견된다. 오래동안 지속된 속성작용은 유사한 화학조성을 나타내는 10Å- manganate와 미세망간단괴를 각각 망간단괴 및 퇴적물 내부에 부화시키는 역할을 한다 (Marchig and Gundlach, 1981; Jeong, 1993). 10Å-manganate와 미세망간단괴가 미량금속을 포획할 수 있는 제한된 능력 (<16% Mn)으로 인해 (Usui, 1979), Ni, Cu 및 Zn는 Mn에 비해 상대적으로 균질한 함량을 나타낸다. KODOS-1 및 2 지역 북서부의 상부 Line Islands 층에서보다(약 0.105) 10°30'N 남쪽의 방산층 연니층의 망간단괴에서 Mn에 대한 Ni, Cu, Zn의 함량이 높게 나타나는 것은(0.12) (Fig. I-8B) 속성작용에 의한 망간단괴의 성장이 표층의 생물생산성의 변화에 의해 큰 영향을 받는다는 사실을 보여준다 (Horn and others, 1973; Skornyakova, 1979; McKelvey and others, 1984). 표층해수의 생물활동이 남쪽 방향으로 증가하는 것은 퇴적물과 최상부 퇴적층내 제 4기 방산층 화석의 함량 (10-80%) 으로부터 확인된다. Mn 및 기타 희유금속과는 달리 대부분의 철 이온은 용해된 규소를 포함하는 smectite의 급속한 형성으로 인해 퇴적물 내부에

잔류하는 특성을 보인다 (Fig. I-3) (Marchig and Gundlach, 1981). 이러한 퇴적물 내부에서의 반응으로 인해 R-형 망간단괴에서는 하부의 퇴적물에서와 다소 유사하게 나타나는 낮은 철 함량(평균 5.8%)을 보여준다 (Table I-1).

## 2. 망간단괴의 (재)형성과 분포

KODOS-2 지역의 남부( $8^{\circ}$ - $10^{\circ}$ N)에서는 망간단괴의 Patchy Pavement가 자주 발견되는 데 이들은 방산층 연니층이 얇거나 침식된 구릉이나 해저산의 기저부분에 집중되어 나타난다. 이러한 분포특성은 저층해류의 침식작용으로 매몰 망간단괴나 그외 조립질 물질을 점진적으로 이용하여 망간단괴가 그 자리에서 (재)형성되는 결과로 보인다 (von Stackelberg and Beiersdorf, 1991; Jeong, 1993). 이 현상은 3기 퇴적물 내에서 망간단괴들의 연대와 크기가 서로 다른 것으로부터 확인된다 (Menard, 1976). 망간단괴를 형성하는 핵으로서 망간단괴 파편이 많이 발견되는 점과 해저면에서 파쇄된 큰 망간단괴의 조각들이 많이 존재하는 점 등으로 볼 때, 망간단괴의 (재)형성에는 오래된 망간단괴의 파쇄도 중요한 역할을 한다 (von Stackelberg and others, 1987; Halbach and others, 1988; Jeong, 1993). 해저산 지역의 경우는 망간단괴가 드문 지역 및 많이 산출되는 지역이 공존한다. 최하부 3기 퇴적층의 도처에서 발견되는 매몰된 망간단괴로부터 (Fig. I-4) 추정해 볼 때 망간단괴의 국지적인 부화현상은 퇴적물의 함몰현상에 기인한 것이다 (Halbach and Özkara, 1979; Halbach and others, 1988; Skornyakova and Murdmaa, 1992). 이러한 곳의 망간단괴는 대부분 여러 개의 핵을 포함하는데 이것은 해자를 형성하는 저층해류에 의한 퇴적물의 제거작용에 의해 모

아진 망간단괴들 및 하부 퇴적층로부터 노출된 망간단괴 파편들을 이용하여 단괴들이 연결되어 생성된 때문이다. 퇴적물이 쌓이지 않는 일부 구릉 및 해저산 지역에 피복된 망간각 (Fig. I-10)은 망간단괴 Patchy Pavement형성에 재퇴적 작용이 중요한 역할을 함을 확인해 준다.

망간단괴 부존이 높게 나타나는 KODOS-1 지역의 남부(Fig. I-10)는 초기 마이오세 이후 태평양판이 북위 1.5°로부터 9.5°로 이동하는 동안 형성된 태평양의 북동 적도 부근 망간단괴 밀집분포대의 서쪽 경계부에 해당한다 (von Stackelberg and Beiersdorf, 1991). DSDP 코어에서 확인된 바에 의하면, 북동 적도 태평양에서는 올리고세 후기 퇴적물중에서 매몰 망간단괴가 80% 이상이, 전세계 대양에서는 마이오세 이후 퇴적물에서 매몰 망간단괴가 가장 많이 발견된다 (Menard, 1976; Glasby, 1978). KODOS 지역에서 올리고세-마이오세 퇴적물중에서 다량의 망간단괴가 산출하는 것은 망간단괴의 (재)형성이 AABW의 유입이 왕성하고 표층해수에서의 생물생산이 적도 방향으로 밀려난 시기에 가장 활발하게 이루어졌음을 보여주고 있다 (van Andel and others, 1975). KODOS 지역에서 이시기동안에 망간단괴의 (재)형성 작용이 활발해진 현상 역시 8° 및 10°30'N 사이에 존재하는 방산층 연니층에서 산출하는 망간단괴의 큰 크기로부터 확인된다 (Fig. I-9). 50 m 이하의 두께를 가지는 층에서 보이는 망간단괴의 선택적인 산출은 적도 고생산대의 북쪽 경계 하부에서는 퇴적물의 느린 퇴적이 망간단괴의 (재)형성에 좋은 조건을 제공하고 있음을 보여준다(Horn and others, 1973; Heath, 1981). 망간단괴의 형성과 농집에 복합적으로 작용하는 저층해류의 영향과 표층해수에서의 생물생산이 망간단괴의 부존과 방산층 연니층의 두께 사이에 존재하는 역상관 관계를 갖게 하는 것으로 판단된다(Fig. I-11B).

KODOS-1 및 2 지역의 북서부에서 소량으로 발견되는 작은 크기의 망

간단괴는(Figs. I-9 및 -10) 지난 15 - 20 my 동안 태평양 적도대로부터 멀리 떨어진 지역에서 표층수 생물생산이 망간단괴의 성장에 큰 영향을 끼치지 못하였기 때문에 생각할 수 있을 것이다 (von Stackelberg and Beiersdorf, 1991). 이 지역에서 망간단괴가 소량으로 산출하는 것은 하부의 Line Islands 퇴적층 상부(에오세-후기 올리고세)로부터 망간단괴를 이루는 핵의 공급이 부족하여 망간단괴의 (재)형성이 제한되었기 때문으로도 생각할 수 있다. 이 경우에는 망간단괴의 (재)형성은 퇴적층의 두께에 관계없이  $10 \text{ kg/m}^2$  이하로 나타나는 망간단괴의 부존량(Fig. 11A)에서 볼 수 있듯이, 이오세 이후 해저면에 노출된 망간단괴 파편이나 오래된 망간단괴를 사용함으로써 이루어진 것으로 보인다 (McNard, 1976). 반면,  $8^\circ\text{N}$  이남(KODOS-3 지역)에서 망간단괴의 부존이 빈약한 것은, 오래된 퇴적물(초기 에오세-마이오세)이 나타나기는 하지만, 망간단괴 성장기간이 짧았기 때문이다. 이 지역에서 망간단괴는 크기가 작고 성장의 초기 단계에 있다 (Fig. I-9). 태평양판의 이동속도( $9 \text{ cm/yr}$ , van Andel and others, 1975)로 보아,  $5^\circ$ - $8^\circ\text{N}$  사이의 해저면은 적도고생산대의 하부에서 망간단괴의 성장이 제약을 받는 석회질 연니 지역 즉, 퇴적이 급속히 이루어지는 지역( $0$ - $3^\circ\text{N-S}$ )을 벗어나 망간단괴 성장의 호조건인 지역에 단지 3-7 my 동안 위치해 있었다.

## 제 6 절 결 론

북동태평양 적도 부근 클라리온-클리퍼톤 균열대 북서 경계부의 세 KODOS 지역에서 망간단괴 탐사를 위해 5번에 걸친 종합적인 지질조사가 수행되었다. 하부 퇴적물(연령, 조성, 형태, 분포), 퇴적층, 그리고 해저 지형과 관련된 망간단괴의 특성 분석 결과에 따르면 저층해수 및 표층수내의 생물생산이 망간단괴의 형성과 분포에 가장 중요한 역할을 한다는 것을 확인할 수 있다. KODOS-2의 남부 지역( $8^{\circ} - 10^{\circ}30'N$ )에서 망간단괴는 클리퍼톤 층의 방산층 연니층(올리고세-마이오세)이 침식되었거나 얇아진 해저구릉 및 해저산 부근에서 Patch Pavement 형태로 분포한다. 표층해수의 생물생산성과 함께 저층해수의 작용은 Patch Pavement로 존재하는 망간단괴의 부존밀도( $5-28.9 \text{ kg/m}^2$ )를 결정한다. 망간단괴는 저층해수에 의해 퇴적층으로부터 노출된 매물 망간단괴를 사용하여 현지에서 (재)형성된다. 오래된 망간단괴의 파쇄 역시 망간단괴의 (재)형성을 돕는 역할을 한다. 경우에 따라서는 퇴적물의 함몰 역시 해저산 지역에서 망간단괴의 Patch Pavement 분포를 이루는데 기여한다. 퇴적물이 집적되지 않은 일부 해저구릉 지역에서 망간각이 나타나는 것으로 보아 재퇴적 작용은 망간단괴의 (재)형성에 중요한 역할을 한다.

재퇴적 작용에 의한 망간단괴의 현지 성장은 4기 퇴적층에 의해 부분적으로 피복되어 나타나는 3기 퇴적물(에오세-플라이오세)에서 망간단괴가 산출되는 것을 보아도 확인된다. S-, T-, R-형의 순으로 퇴적물 최상층 내에서 망간단괴의 매몰율이 증가함에 따라 망간단괴의 성장은 표면조직, 조성, 구조, 그리고  $10\text{\AA}$ -manganate이 많이 함유하는 하부등에 있어 뚜렷한 차이를 보이는 세가지 형태의 망간단괴를 형성한다. 망간단괴의 매물 정도는

부분적으로 저서동물의 활동에 영향을 받는다. S-형의 망간단괴는 퇴적물의 재분산 작용이 활발한 해저구릉 및 해저산 지역의 심하게 생교란된 퇴적물의 표면에 노출된 채 성장한다. 이 유형의 망간단괴는 해수로부터 침전된  $\delta$ -MnO<sub>2</sub>, Fe-oxihydroxide 등으로 구성되며 Fe, Co의 함량이 높은 주상구조가 특징적이다. 해저평원 지역에서는 R-형의 망간단괴가 최상부의 4기 퇴적층 내부에 부분적으로 매몰된 채 성장한다. 이 경우, 10Å-manganate의 흡착으로 Cu와 Ni 함량이 높은 괴상 및 수석상 구조가 형성된다. T-형의 망간단괴는 S-형 또는 R-형의 망간단괴와 함께 산출되며, 이들 두가지 형태의 중간 조성을 나타낸다. 최상부 퇴적층 내부에서 10Å-manganate의 흡착은 망간단괴 표면의 매몰된 부분에서 주로 산화된 3기 퇴적물 내부의 미세망간단괴로부터 유동된 Mn과 미량금속을 사용하여 이루어진다. 속성 성장에 의한 망간단괴는 적도를 향해 남부로 이동하면서 Mn의 12%에 달하는 Ni, Cu, Zn 함량을 나타내는 데 이것은 표층수중 1 차생물생산성 증가에 의한 영향을 나타낸다.

북서 방향으로 이동할수록 연령이 점차적으로 증가하는 에오세-팔레오세 사이의 방산층 함유 smectite 점토질 퇴적물에서 발견되는 망간단괴 집단에서 알 수 있는 바와 같이 망간단괴의 (재)형성은 점진적으로 진행된다. 올리고세 이후 AABW의 유입에 의해 적도를 따라 수렴된 표층해수 생물 고생산대는 망간단괴의 성장에 중요한 영향을 미쳤다. 이러한 작용은 클리퍼튼층의 방산층 연니층(올리고세-마이오세)에서 망간단괴의 선택적 성장을 유발했다. KODOS-3 지역(8°N의 남부)에서 망간단괴 산출이 빈약한 것은 퇴적율이 높은 적도 부근 지역에서 망간단괴의 성장에 소요되는 시간이 짧은 이유에 기인한다. 그러나, KODOS-1 및 2 지역의 북서부에서 저층해류의 활동이 활발하고 표층해수의 생물생산이 빈약한 영향의 복합적인 효과는 망



간단괴생성을 제한하여 상부 Line Islands 층(에오세-올리고세)에서 망간단괴의 부존이 제한되었다. 여기에서, 해저면에 망간단괴가 드물게 부존하는 것은 퇴적층 내부에 매몰된 망간단괴가 빈약하기 때문이기도 한다.



## 참 고 문 헌

- Berger, W.H. and Killingley, J.S., 1982. Box cores from the equatorial Pacific:  $C^{14}$  sedimentation rates and benthic mixing. *Marine Geology* 45: 93-125.
- Bonatti, E., Kraemer, T., and Rydell, H.S., 1972. Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits. In: Horn, D.R. (Ed.) *Ferromanganese deposits on the ocean floor*. National Science Foundation, Washington, pp 149-166.
- Callender, E. and Bowser, C.J., 1980. Manganese and copper geochemistry of interstitial fluids from manganese nodule rich pleiocene sediments of the northeastern equatorial Pacific Ocean. *American Journal of Science* 280: 1063-1096.
- Cochran, J.K., 1985. Particle mixing rates in sediments of the eastern equatorial Pacific: evidence from  $^{210}Pb$ ,  $^{239, 240}Pu$  and  $^{137}Cs$  distributions at MANOP sites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49: 1195-1210.
- Cook, H.E., 1975. North American stratigraphic principles as applied to deep-sea sediments. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 59(5): 817-837.
- Dymond, J., Lyle, M., Finney, B., Piper, D.Z., Murphy, K., Conard, R., and Pisias, N., 1984. Ferromanganese nodules from MANOP sites H, S, and R. -control of mineralogical and chemical composition by multiple accretionary processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48: 931-950.
- Glasby, G.P., 1978. Deep-sea manganese nodules in the stratigraphic record: evidence from DSDP cores. *Marine Geology* 28: 51-64.
- Greenslate, J.L., Fisk, M.B., and Felix, D., 1979. Systematics in manganese

- concretion composition in the northeastern equatorial Pacific. In: Lalou, C. (Ed.) *La Genese des Nodules de Manganese*. Proc. Colloq. Int. CNRS, No. 289, pp 39-54.
- Halbach, P. and Özkara, M., 1979. Morphological and geochemical classification of deep-sea ferromanganese nodules and its genetic interpretation. In: Lalou, C. (Ed.) *La Genese des Nodules de Manganese*. Proc. Colloq. Int. CNRS, No. 289: pp 77-88.
- Halbach, P., Scherhag, C., Hebisch, U., and Marchig, V., 1981. Geochemical and mineralogical control of different genetic types of deep-sea nodules from the Pacific Ocean. *Mineral Deposita* 16: 59-84.
- Halbach, P., Friedrich, G., and von Stackelberg, U., 1988. The manganese nodule belt of the Pacific Ocean. Geological environment, nodule formation, and mining aspects. Ferdinand Enke, Stuttgart, 254 pp.
- Heath, G.R., 1981. Ferromanganese nodules of the deep-sea. *Economic Geology*, 75th anniversary, 1905/1980: 736-765.
- Heye, D., Marchig, V., and Mayer, H., 1979. The growth of buried manganese nodules. *Deep-Sea Research* 26A: 789-798.
- Horn, D.R., Horn, B.N., and Delach, M.N., 1973. Copper and Nickel content of ocean ferromanganese deposits and their relation to properties of the substrate. In: Morgenstein, M. (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, pp 71-76.
- Jeong, K.S., Kang, J.K., and Chough, S.K., 1994. Sedimentary processes and formation of manganese nodules in the Korea deep ocean study (KODOS) area, western Clarion-Clipperton fracture zones, northeast equatorial Pacific. *Marine Geology*.

- Krishnaswami, S., Mangini, A., Thomas, J.H., Sharma, P., Cochran, J.K., Turekian, K.K., and Parker, P.D., 1982. Be-10 and Th-isotopes in Mn-nodules and adjacent sediments: nodule growth histories and nodule behaviour. *Earth Planetary Science Letters* 59: 217-234.
- Mangini, A. and Kühnel, U., 1987. Depositional history in the Clarion-Clipperton Zones during the last 250,000 years-  $^{230}\text{Th}$  and  $^{231}\text{Th}$  methods. In: von Stackelberg, U. and Beiersdorf, H. (Eds.). *Manganese nodules and sediments in the equatorial north Pacific Ocean SONNE Cruise SO 25, 1982*. Geologisches Jahrbuch Reihe D, Hannover, pp 105-121
- Marchig, V. and Gundlach, H., 1981. Separation of iron from manganese and growth of manganese nodules as a consequence of diagenetic ageing of radiolarians. *Marine Geology* 40: M35-M43.
- Margolis, S.V. and Glasby, G.P., 1973. Microlaminations in marine manganese nodules as revealed by scanning microscopy. *Geological Society of America Bulletin* 84: 3601-3610.
- McCave, I.N., 1988. Biological pumping upwards of the coarse fraction of deep-sea sediments. *Journal of Sedimentary Petrology* 58(1): 148-158.
- McKelvey, V.E., Wright, N.A., and Bowen, R.W., 1983. Analysis of the world distribution of metal-rich subsea manganese nodules. U.S. Geological Survey Circular, 886: 55pp.
- Menard, H.W., 1976. Time, chance, and the origin of manganese nodules. *Scientific America* 64: 519-529.
- Moon, D.S., 1993. Uranium-series geochemistry of Pacific ferromanganese nodules and their associated sediments. Master's thesis, Chungnam National University, 64 pp
- Moore, W.S., Ku, T.L., Macdougall, J.D., Burns, V.M., Burns, R., Dymond,

- J., Lyle, M., and Piper, D.Z., 1981. Fluxes of metals to manganese nodule: radiochemical, chemical, structural, and mineralogical studies. *Earth Planetary Science Letters* 52: 151-171.
- Müller, P.J., Hartmann, M., and Suess, E., 1988. The chemical environment of pelagic sediments. In: Halbach, P., Friedrich, G., and von Stackelberg, U. (Eds.) *The manganese nodule belt of the Pacific Ocean. Geological environment, nodule formation and mining aspects*, Ferdinand Enke, Stuttgart, pp 70-90.
- Piper, D.Z., and Fowler, B., 1980. New constraint on the maintenance of Mn nodules at the sediment surface. *Nature* 286: 880-883.
- Piper, D.Z., Gardner, J.V., and Cook, H.E., 1979. Lithic and acoustic stratigraphy of equatorial north Pacific: DOMES sites A, B, and C. In: Bischoff, J.L. and Piper, D.Z. (Eds.) *Marine geology and oceanography of the Pacific manganese nodule province*. Plenum, New York, pp 309-348.
- Reyss, J.L., Lemaitre, N., Ku, T.L., Marchig, V., Southon, J.R., Nelson, D.E., and Vogel, J.S., 1985. Growth of a manganese nodule from Peru Basin: a radiochemical anatomy. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49: 2401-2408.
- Ryan, W.B.F. and Heezen, B.C., 1976. Smothering of deep-sea benthic communities from natural disasters. Technical Report, Lamont-Doherty Geological Observations, Palisade, 132 pp
- Skornyakova, N.S., 1979. Zonal regularities in occurrence, morphology and chemistry of manganese nodules of the Pacific Ocean. In: Bischoff, J.L. and Piper, D.Z. (Eds.) *Marine geology and oceanography of the Pacific manganese nodule province*. Plenum, New York, pp 699-727.
- Skornyakova, N.S. and Murdmaa, I.O., 1992. Local variations in

distribution and composition of ferromanganese nodules in the Clarion-Clipperton nodule province. *Marine Geology* 103: 381-405.

Usui, A., 1979. Minerals, metal contents and mechanism of formation of manganese nodule from the central Pacific Basin (GH76-1 and GH77-1 areas). In: Bischoff, J.L. and Piper, D.Z. (Eds.) *Marine geology and oceanography of the Pacific manganese nodule province*. Plenum, New York, pp 651-680

van Andel, T.H., Heath, G.R., Moore, Jr. T.C., 1975. Cenozoic history and paleocenography of the central equatorial Pacific Ocean. *Geological Society of America Memoir*, 143: 134pp.

von Stackelberg, U. and Beiersdorf, H., 1991. The formation of manganese nodules between the Clarion and Clipperton fracture zones southeast of Hawaii. *Marine Geology* 98: 411-423.

## Table Caption

Table I-1. Summary of occurrence, dominant internal structures, mineralogical and chemical compositions of nodule types and nodule parts. Compositional characters of each nodule type are delineated depending on sedimentary sequence.

## Figure Captions

Fig. I-1. Distribution of upper Line Islands Fm. and radiolarian ooze unit of Clipperton Fm. (thick line), delineated based on the acoustic stratigraphy as shown in Fig. 2. Sediment ages are also delineated, combined with the datings of 40 box cores (dashed thin lines) and general distribution (solid thin lines) in the northeast equatorial Pacific (Ryan and Heezen, 1976). Nodules were sampled using free-fall grab and box corer; both sediment and nodules, using a box corer. Seismic survey was performed before collection of nodules and sediment. The location of KODOS areas is presented in the lower rectangled box.

Fig. I-2. Correlation of acoustic (3.5 kHz) stratigraphic units with lithology in DSDP cores; a) in the southern part of the KODOS-1 area; b) in the northwestern of the KODOS-2 area where sharp boundary between the upper Line Islands and Clipperton Fms. is delineated.

Fig. I-3. General characters of box core sediment (nos., K9001, 9025, 9037). Excess  $Pb^{210}$  activity is in dpm/g; clay mineral composition in relative %; abundance of micronodules is measured in arbitrary unit; Fe and Mn in %; Ni, Cu, Co, and Zn in ppm.

Fig. I-4. X-radiograph showing buried nodules in sediment core (no. K8918) at a seamount site. In the upper part, a polynucleated nodule



shows smooth surface top within the topmost mixed layer and rough bottom within the transitional layer. The nodule in the lowermost Tertiary sediment is rimmed with loose outermost layer of Mn-oxide grains. On the seafloor, polynucleated S- and T-type nodules are abundant ( $20.0 \text{ kg/m}^2$ ).

Fig. I-5. Relationship of nodule types and abundance to bioturbated depth of box sediment cores. Open circles represent for S-type; filled circles, R-type; barred circles, T-type nodules).

Fig. I-6. Internal structures and distribution of metal species in selected T- (Fig. 6-1) and R-type nodules (Fig. 6-2). Electron-back-scattered microphotograph (bar:  $50 \mu\text{m}$ ) and chemical composition were obtained by using an EPMA (JXA-8600, JEOL) in rectangled part on polished nodule sections (A). Concentration of metals is presented by various symbols at points both cross section of Mn-oxide mineal layers (Figs. 6-1B and -2B) and within individual layers (Figs. 6-1C and -2C).

Fig. I-7. Ternary relationships of Fe-Mn-10.(Ni+Cu+Zn) in nodules and the underlying sediment in the unper Line Islands (A) and the radiolarian ooze unit of Clipperton Fm. (B). Small circles represent the sediment (open circles, unit 1 and unit 2; filled circles, unit 3 sediment). Large circles are for nodules (open circles, S-type; filled circles, R-type; barred circles, T-type nodules).

Fig. I-8. Relation of Ni+Cu+Zn/Mn to Mn/Fe ratio in nodules and the underlying sediment in the radiolarian ooze unit (A) and the unper Line Islands Fm. (B). The data were selected in box core sediment containing nodules (For symbols, see Fig. 8).

Fig. I-9. Latitudinal distribution of nodule sizes (frequency %); a) in the upper Line Islands Fm., the northwestern part of the KODOS-1 and 2

areas, b) in the radiolarian ooze, north of  $10^{\circ} 30' N$ , and c) south of  $8^{\circ} N$ .

Fig. I-10. Distribution of nodule abundance and dominant types of nodules; open circles, S-type nodules; open circles with bars, S-types with subordinate amounts of T-types; filled circles, R-type nodules; rectangle, crusts.

Fig. I-11. Relation of nodule type and abundance to the thickness of acoustically transparent uppermost layer (upper Line Islands (A) and radiolarian ooze unit of Clipperton Fm. (B)) on 3.5 kHz seismic profile.

Table I-1 Summary of occurrence, dominant internal structures, mineralogical and chemical compositions of nodule types and nodule parts. Compositional characters of each nodule type are distinguished depending on sedimentary sequence.

Occurrence	Nodule Types										Nodule Part		
	R-type			T-type			S-type				Top	Core	Bottom
	Entire Nodules	Upper Line Iss. Fm Nodules	Rad. ooze Unit Nodules	Entire Nodules	Upper Line Iss. Fm Nodules	Rad. ooze Unit Nodules	Hill, plain, and seamount	Hill and seamount Exposed on sediment top		Upper Line Iss. Fm Nodules	Rad. ooze Unit Nodules	Dominantly, old nodule fragments.	
Internal structures	Abyssal plain Partially or embedded in sediment Dendritic, massive			Hill, plain, and seamount			Hill and seamount Exposed on sediment top Columnar, laminated						
I <sub>10</sub> /I <sub>24</sub>	0.5-6.9 (2.9)	0.5-5.4 (2.9)	0.5-6.9 (2.8)	0.4-4.9 (2.2)	0.0-3.0 (2.2)	0.0-4.8 (2.1)	0.5-4.7 (1.3)	0.7-1.7 (1.1)	0.0-4.7 (1.3)	0.7-4.9 (2.8)	0.0-4.4 (2.5)	0.9-5.5 (3.6)	
Quartz (x)	0.0-7.0 (2.5)	1.0-5.0 (2.7)	0.0-7.0 (2.2)	1.0-4.0 (2.2)	1.0-4.0 (2.0)	1.0-4.0 (2.2)	0.0-4.0 (1.8)	1.0-3.0 (2.0)	0.0-4.0 (1.8)	1.2-3.4 (2.3)	0.0-9.9 (2.2)	0.9-4.0 (1.9)	
Feldspar (x)	0.0-24.0 (4.8)	0.0-15.0 (5.4)	0.0-24.0 (4.5)	0.0-14.0 (4.1)	0.0-9.0 (4.3)	0.0-14.0 (4.1)	0.0-12.0 (4.0)	0.0-11.0 (4.0)	0.0-31.0 (5.0)	0.0-6.4 (2.7)	0.0-45.6 (9.1)	0.0-5.6 (2.6)	
No. of data	176	45	131	48	15	33	34	8	26	17	30	21	
Mn (x)	6.0-35.0 (23.0)	15.0-29.0 (23.0)	6.0-35.0 (23.0)	9.0-30.0 (22.0)	16.0-28.0 (22.0)	9.0-30.0 (22.0)	10.0-26.0 (20.0)	10.0-25.0 (19.0)	12.0-26.0 (20.0)	20.1-41.5 (26.6)	10.0-48.6 (25.4)	19.1-45.8 (28.9)	
Fe (x)	2.6-15.7 (5.8)	4.1-13.1 (5.7)	2.6-15.7 (5.9)	4.0-16.1 (7.8)	4.8-12.6 (6.8)	4.0-16.1 (8.2)	4.1-18.7 (10.6)	4.1-12.1 (9.6)	4.4-18.7 (10.9)	4.3-12.9 (7.5)	3.6-16.8 (5.9)	2.3-10.5 (4.3)	
Mn/Fe	1.0-9.7 (4.4)	1.2-6.1 (4.3)	1.0-9.7 (4.4)	1.1-7.4 (3.1)	1.3-5.7 (3.5)	1.1-7.4 (3.0)	1.0-5.23 (2.0)	1.7-2.4 (2.0)	1.0-5.2 (2.0)	1.7-7.5 (4.0)	1.4-13.1 (4.9)	2.0-20.1 (7.0)	
Cu (x)	0.23-2.02 (1.13)	0.33-1.56 (1.05)	0.23-2.02 (1.16)	0.27-1.50 (0.83)	0.48-1.50 (0.97)	0.27-1.38 (0.78)	0.11-0.98 (0.52)	0.33-0.63 (0.53)	0.11-0.98 (0.52)	0.26-1.41 (0.84)	0.18-1.72 (0.92)	0.49-1.53 (1.20)	
Ni (x)	0.27-1.25 (1.25)	0.36-1.57 (1.18)	0.27-1.80 (1.27)	0.27-1.53 (1.1)	0.27-1.53 (1.09)	0.50-1.53 (1.05)	0.45-1.28 (0.83)	0.54-1.28 (0.88)	0.45-1.17 (0.82)	0.52-1.32 (0.96)	0.14-1.29 (0.80)	0.71-1.39 (1.16)	
Zn (x)	0.03-0.49 (0.18)	0.05-0.44 (0.18)	0.03-0.49 (0.18)	0.04-0.29 (0.13)	0.04-0.22 (0.11)	0.05-0.29 (0.14)	0.04-0.22 (0.10)	0.04-0.08 (0.06)	0.05-0.22 (0.11)	0.09-0.36 (0.20)	0.10-1.15 (0.31)	0.11-0.99 (0.34)	
Co (x)	0.06-0.49 (0.18)	0.13-0.79 (0.20)	0.06-0.49 (0.19)	0.15-0.39 (0.23)	0.17-0.25 (0.22)	0.15-0.39 (0.23)	0.11-0.53 (0.29)	0.11-0.39 (0.27)	0.16-0.53 (0.29)	0.16-0.29 (0.22)	0.03-0.26 (0.15)	0.09-0.28 (0.16)	
No. of data	231	59	172	62	16	46	43	3	35	26	30	30	

Averages are in parenthesis. Mineralogical constituents were identified based on X-ray diffraction (Phillips, PW-710). I<sub>10</sub>/I<sub>24</sub> represents peak ratio of 10Å-manganese to δ-MnO<sub>2</sub>. Chemical composition was analysed using atomic absorption spectrometer (Perkin Elmer, IL-251) after complete dissolution of nodule powders in mixed solution of HF, HNO<sub>3</sub>, and HCl.

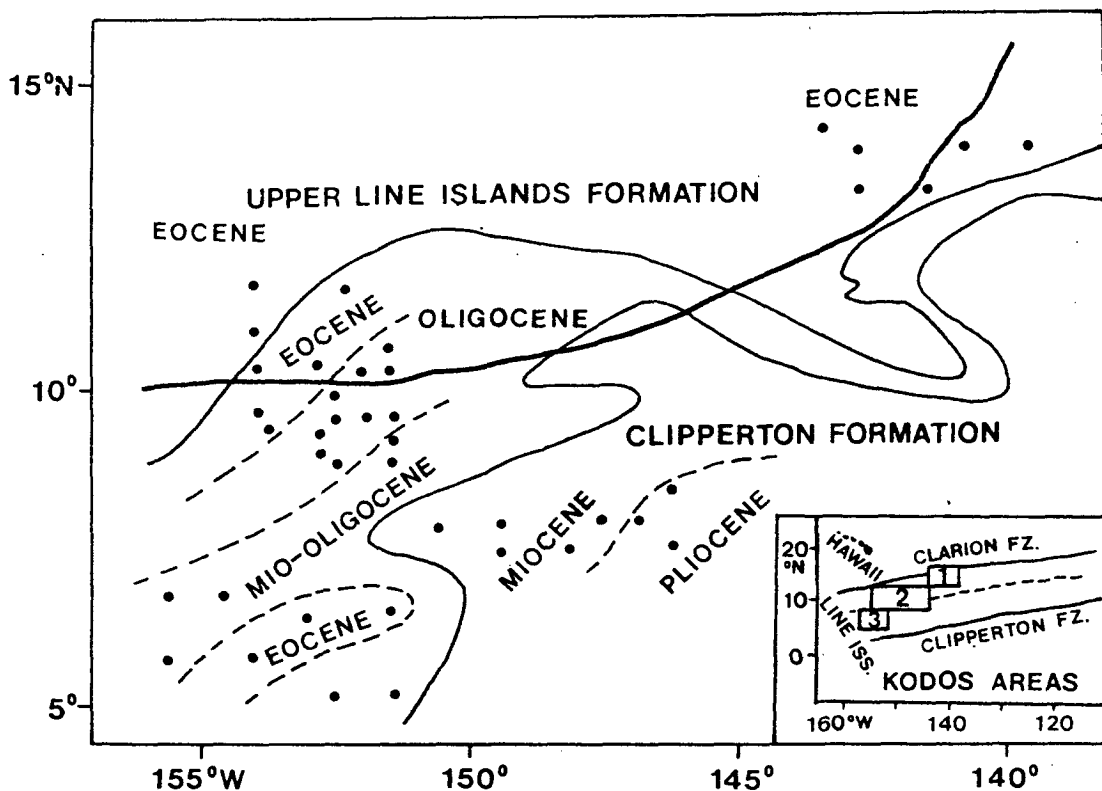


Fig. I-1. Distribution of upper Line Islands Fm. and radiolarian ooze unit of Clipperton Fm. (thick line), delineated based on the acoustic stratigraphy as shown in Fig. 2. Sediment ages were delineated, combined with the datings of 40 box cores (dashed thin lines) and general distribution (solid thin lines) in the northeast equatorial Pacific (Ryan and Heezen, 1976). The location of KODOS areas is presented in the lower rectangled box.

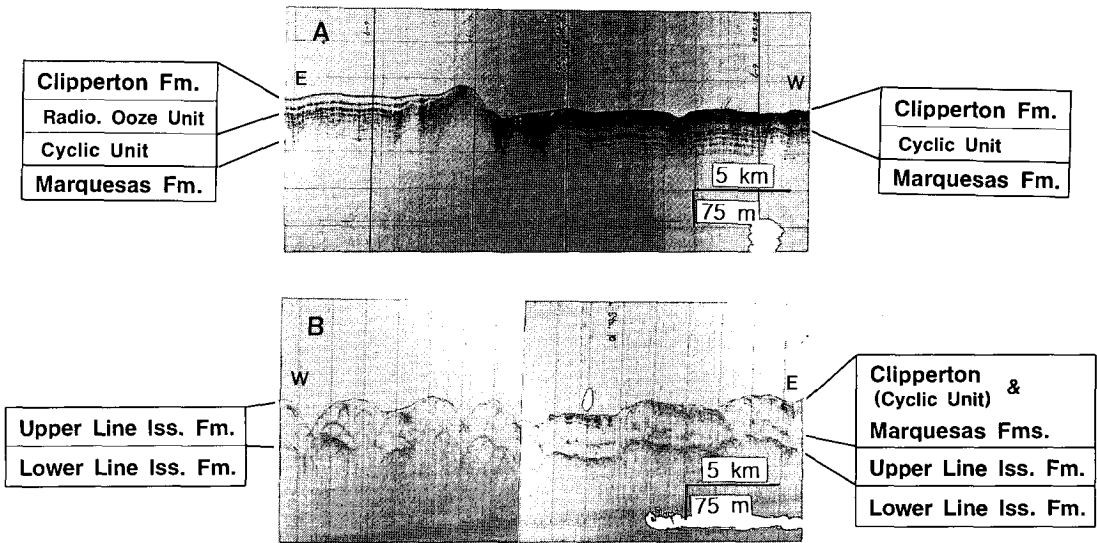


Fig. I-2. Correlation of acoustic (3.5 kHz) stratigraphic units with lithology in DSDP cores; a) in the southern part of the KODOS-1 area; b) in the northwestern of the KODOS-2 area where sharp boundary between the upper Line Islands and Clipperton Fms. is distinctive.

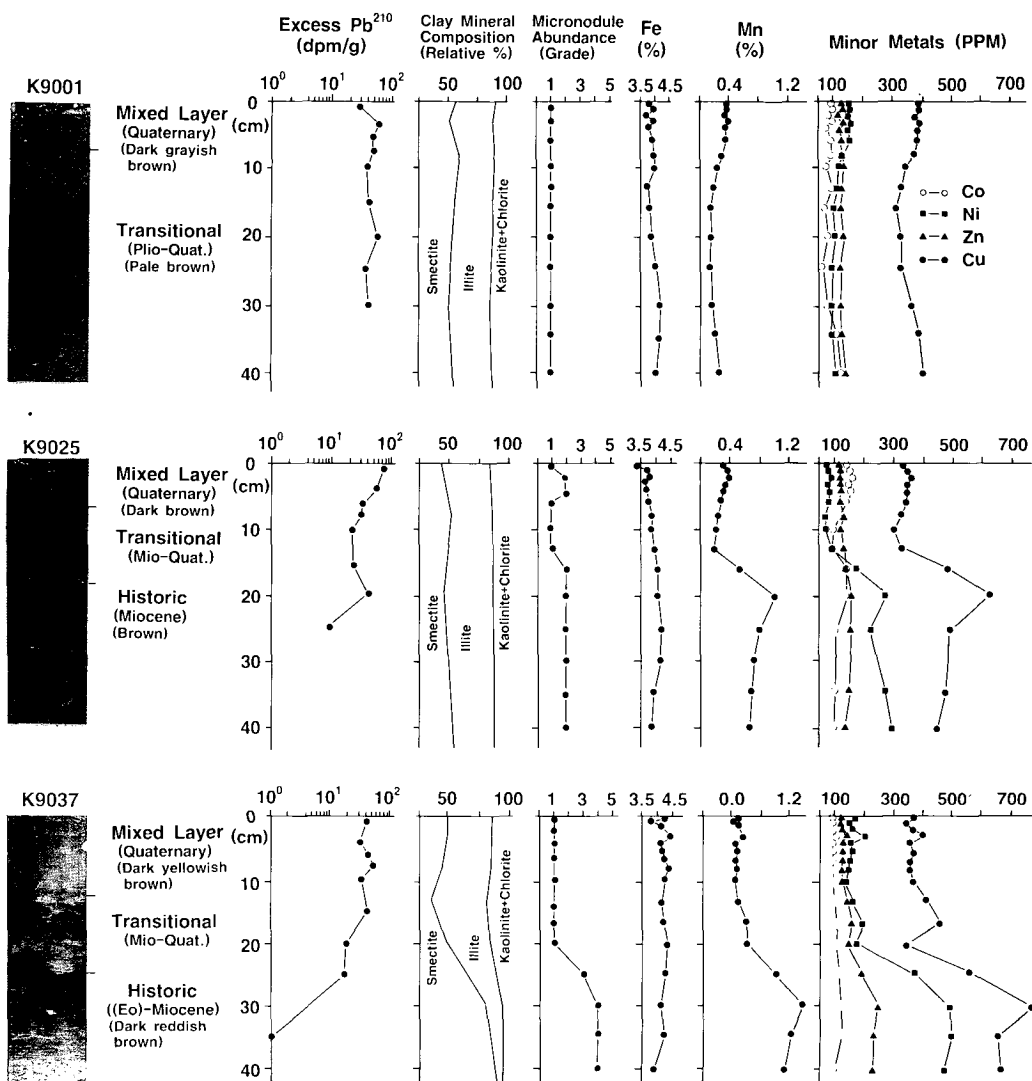


Fig. I-3. General characters of box core sediment (nos., K9001, 9025, 9037). Excess  $Pb^{210}$  activity is in dpm/g; clay mineral composition in relative %; abundance of micronodules is measured in arbitrary unit; Fe and Mn in %; Ni, Cu, Co, and Zn in ppm.

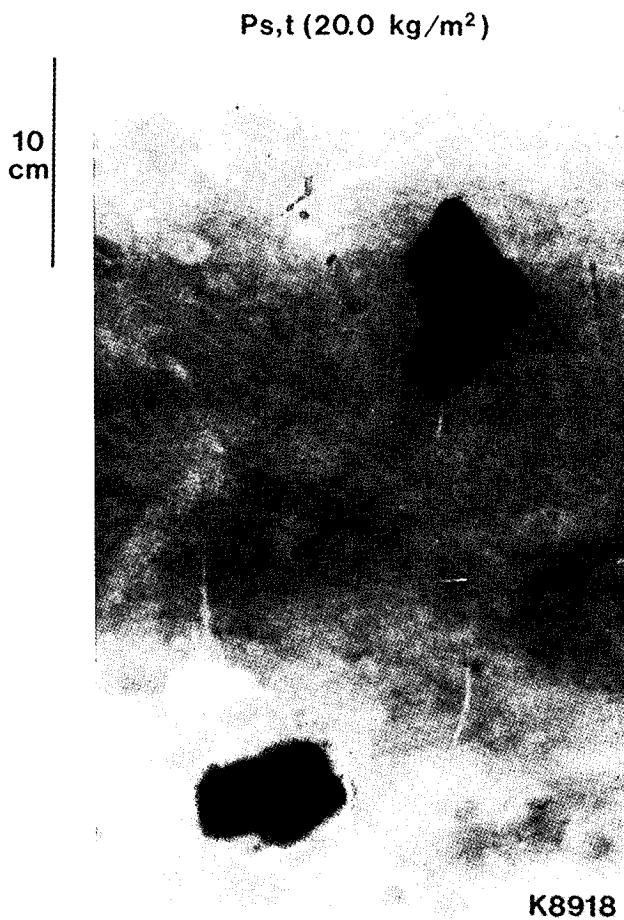


Fig. I-4. X-radiograph showing buried nodules in sediment core (no. K8918) at a seamount site. In the upper part, a polynucleated nodule shows smooth surface top within the topmost mixed layer and rough bottom within the transitional layer. The nodule in the lowermost Tertiary sediment is rimmed with loose outermost layer of Mn-oxide grains. On the seafloor, polynucleated S- and T-type nodules are abundant (20.0 kg/m<sup>2</sup>).





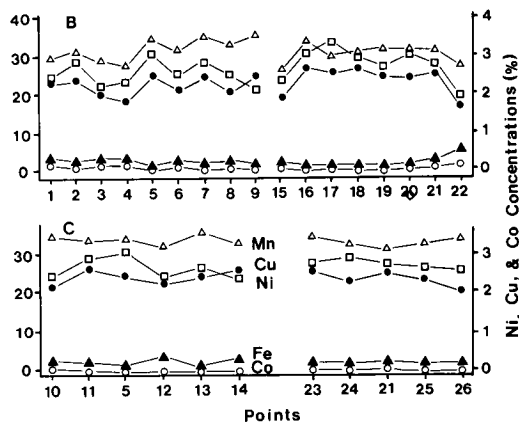
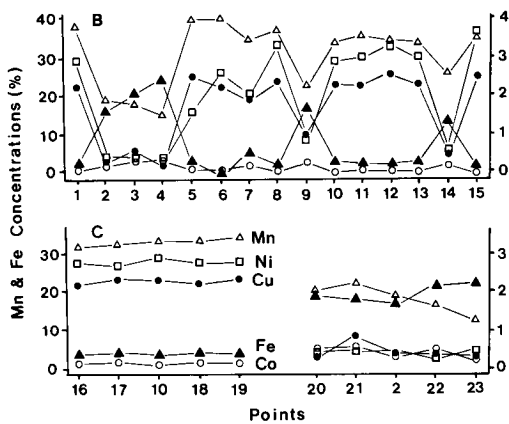
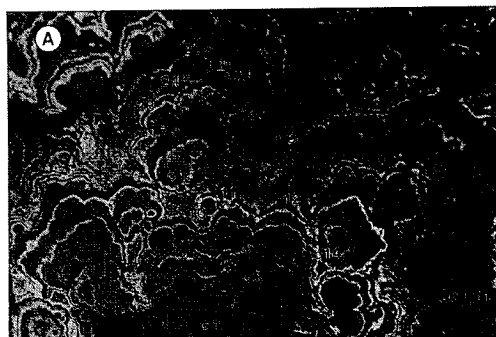
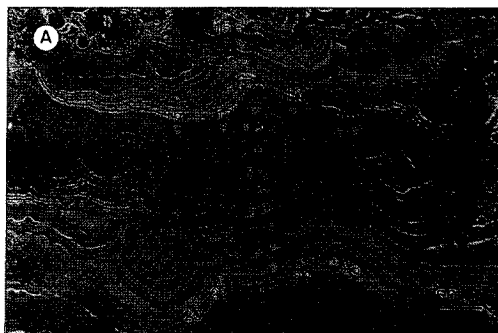
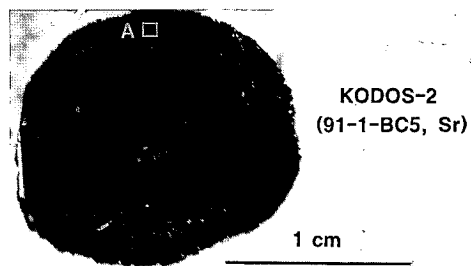
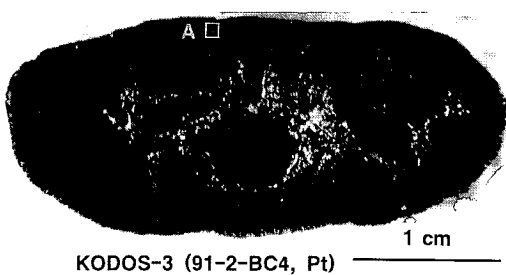


Fig. I-6. Internal structures and distribution of metal species in selected T- (left) and R-type nodules (right). Electron-back-scattered microphotograph (bar: 50  $\mu$ m) and chemical composition were obtained by using an EPMA (JXA-8600, JEOL) in rectangled part on polished nodule sections (A). Concentration of metals is presented by various symbols at points both cross section of Mn-oxide mineal layers (B) and within individual layers (C).

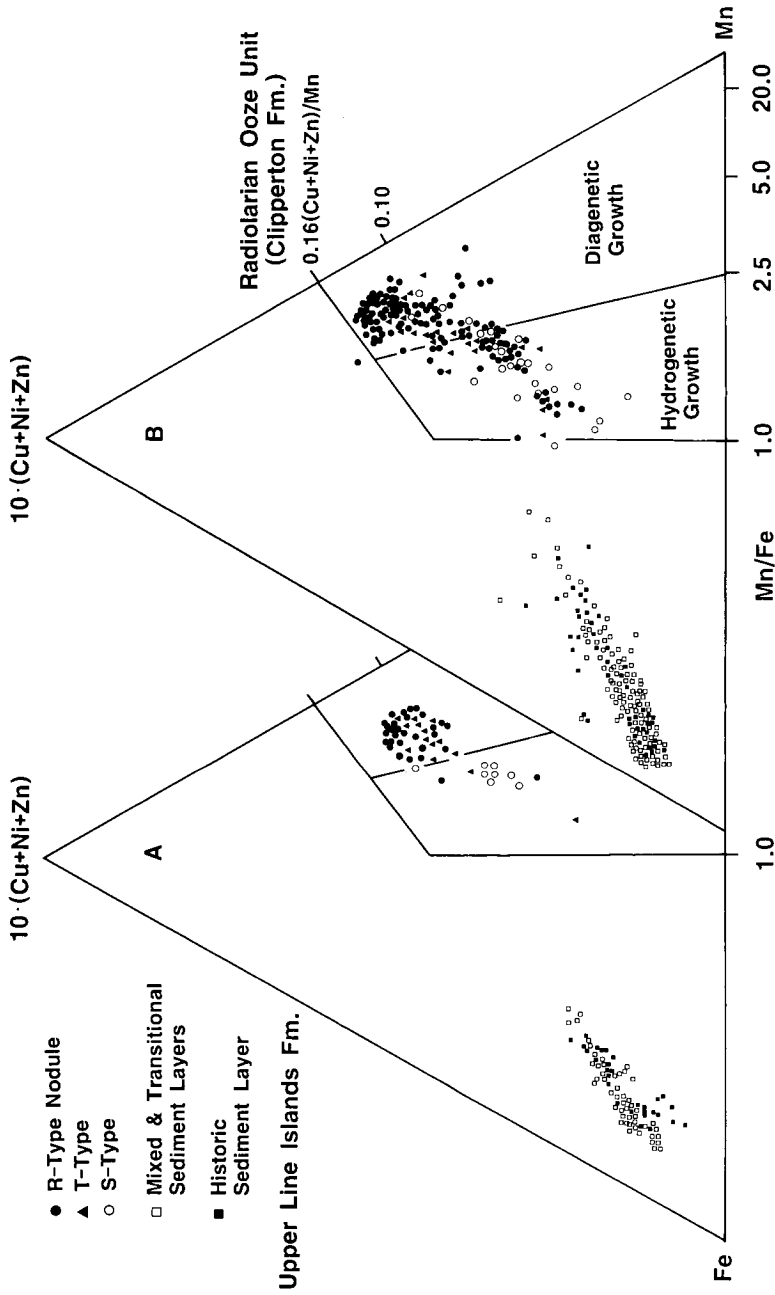


Fig. I-7. Ternary relationships of Fe-Mn-10.(Ni+Cu+Zn) in nodules and the underlying sediment in the upper Line Islands (A) and radiolarian ooze unit of Clipperton Fm. (B).

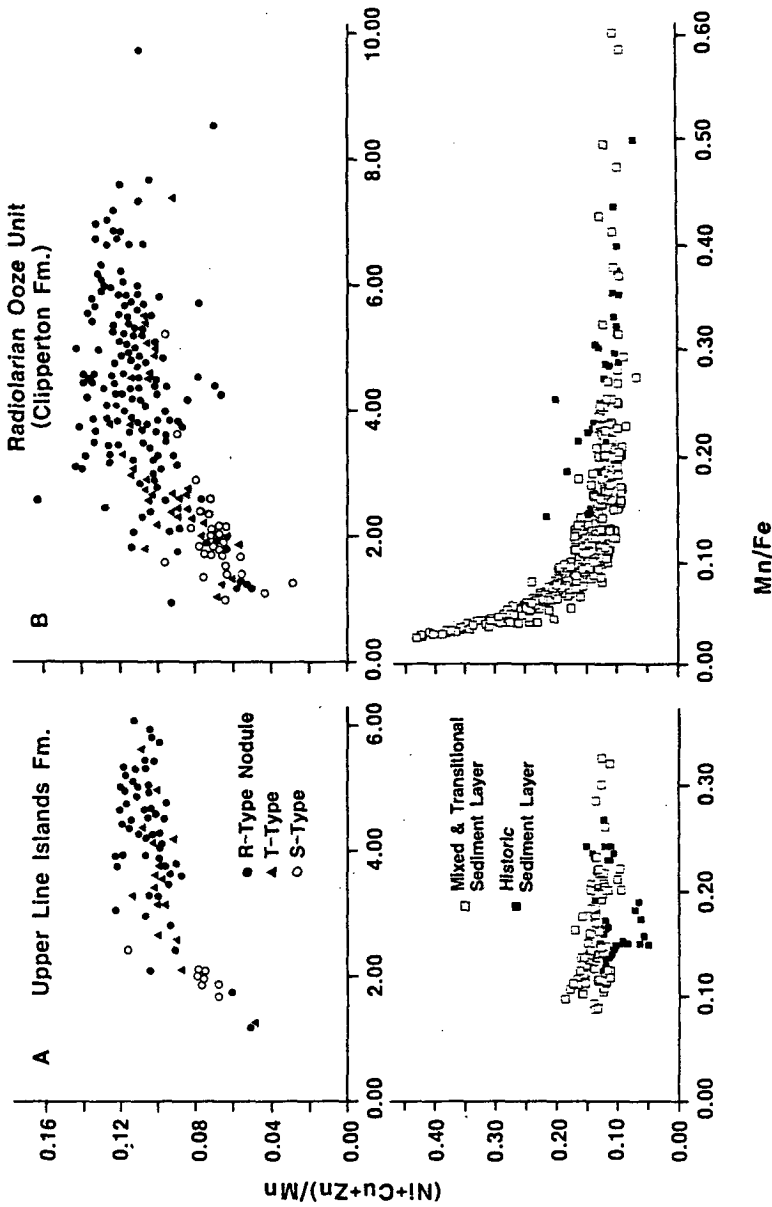


Fig. I-8. Relation of Ni+Cu+Zn/Mn to Mn/Fe ratio in nodules and the underlying sediment in the upper Line Islands Fm. (A) and radiolarian ooze unit (B). The data were selected in box core sediment containing nodules.

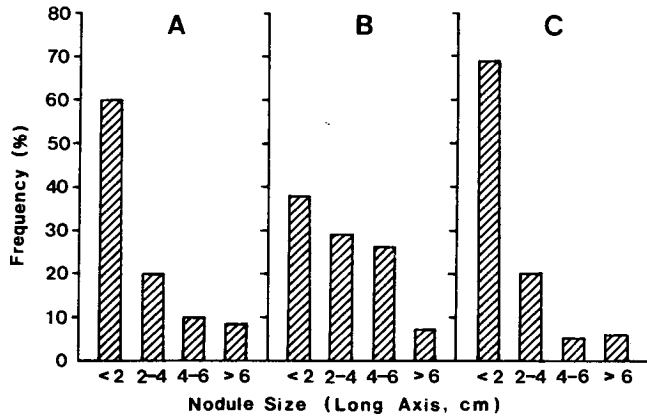


Fig. I-9. Latitudinal distribution of nodule sizes (frequency %); a) in the upper Line Islands Fm., northwestern part of the KODOS-1 and 2 areas, b) in radiolarian ooze, north of 10 ° N, and c) south of 8 ° N.

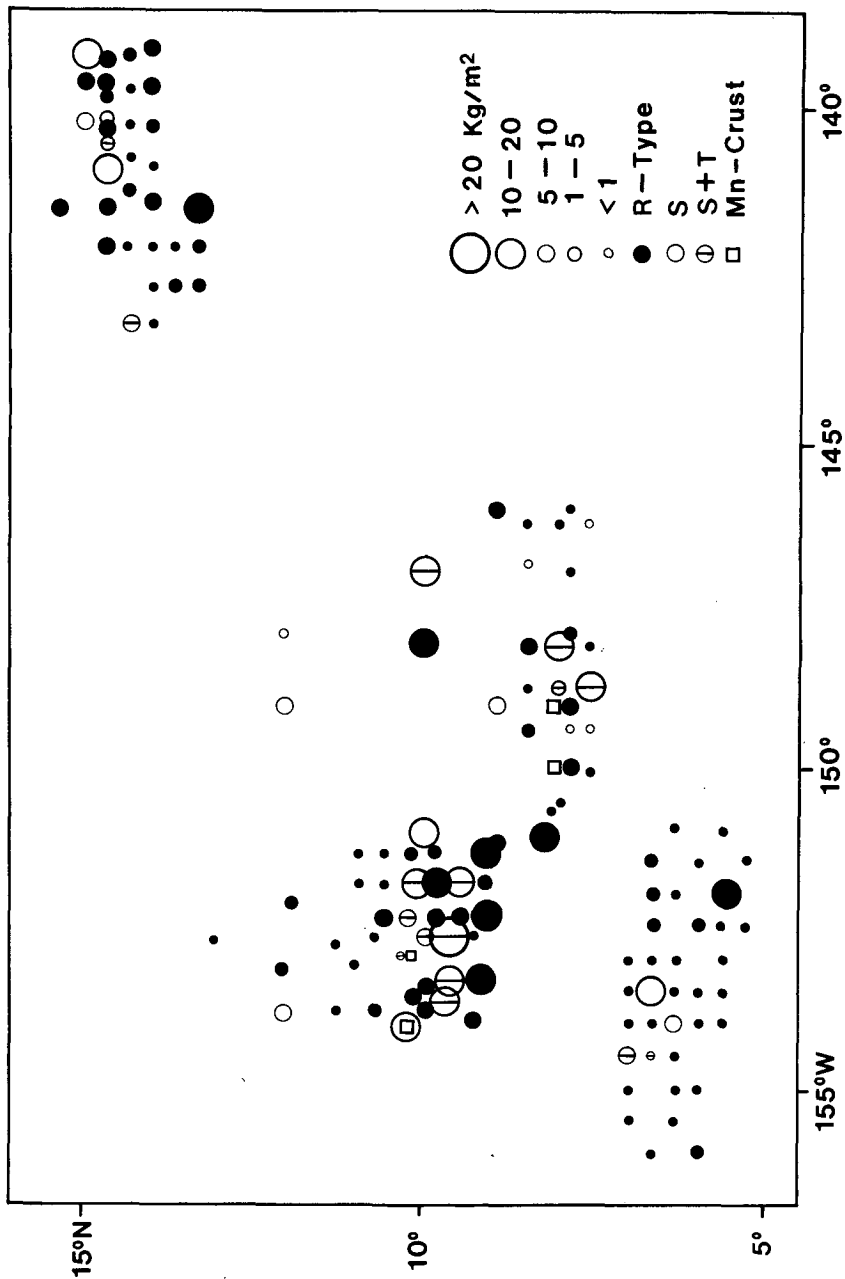


Fig. I-10. Distribution of nodule abundance and dominant types of nodules; open circles, S-type nodules; open circles with bars, S-types with subordinate amounts of T-types; filled circles, R-type nodules; rectangle, crusts.

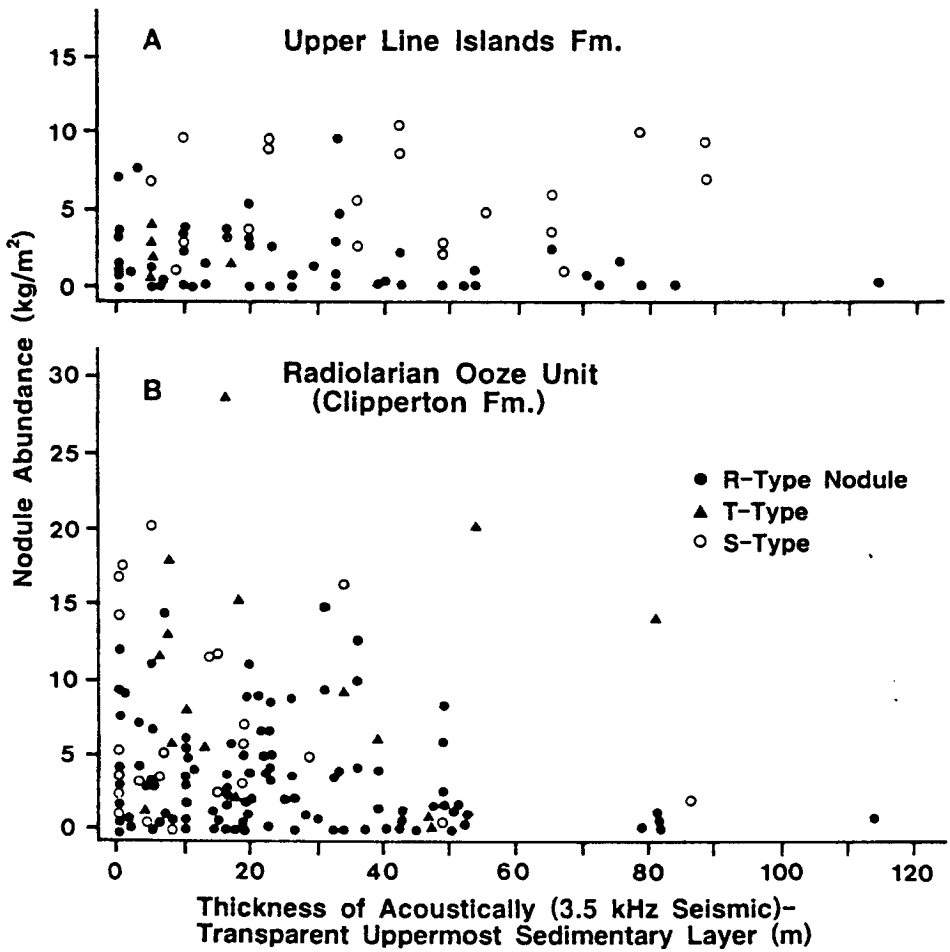


Fig. I-11. Relation of nodule type and abundance to the thickness of acoustically transparent uppermost layer (upper Line Islands (A) and radiolarian ooze unit of Clipperton Fm. (B)) on 3.5 kHz seismic profile.

## Part II 탐사기술개발 분야

다중빔 탐사기술

3.5 kHz 음파 탐사기술

지형분석을 위한 S/W 개발

연구책임자 : 이 용 국  
참여연구원 김 성 렬  
박 건 태  
석 봉 출  
문 재 운  
박 찬 영  
장 재 경  
정 백 훈  
강 해 석  
구 본 관  
김 현 섭  
김 채 수  
홍 재 호





## 제 1 장

### 다중빔 탐사기술 개발



## 요 약

한국심해연구 (KODOS 94-1) 지역에서 온누리호에 장착되어 있는 12.5 kHz가 主 周波數 帶인 SeaBeam 다중 빔 음향탐사장비 수신음의 반사도 (후방산란 강도)를 측정하여 망간단괴의 점유율과 연관하여 분석하였다. 선정된 면적에서 총 620 개의 발신음으로부터 반사된 121 개 음파강도 자료를 분석하여 색상 도면으로 표현된 반사도 분포는 망간단괴의 Patch들과 대비가 가능하였다. 또한 심해용 카메라 사진자료와 비교한 결과 SeaBeam의 음향반사도만을 이용하여서도 망간단괴의 점유율의 예측이 가능하였다. 이때 망간단괴의 Patch나 Pavement는 20 dB 정도의 반사도를 보이는 주변 해저면보다 2-3 dB 정도 강한 반사도를 보인다. 향후, Chirp Sonnar 시스템과 심해용 카메라, 그리고 실제 좁밀한 간격의 시료채취 등에 의해서 망간단괴의 해저면 분포상황이 밝혀진다면 SeaBeam 2000 시스템의 음향신호만을 이용해서도 망간단괴분포를 예측할 수 있을 것이다.



## 제 1 절 서 론

해저면에 대한 음파신호에 대한 지도제작(Mapping)은 크게 기하학적인 것을 고려한 수심도(Bathymetry)와 구성물질을 중심으로 표시하는 물리적인 지도로 구분할 수 있다. 해저면 상태를 결정하는 2가지의 일반적인 물리적량은 해저면을 구성하고 있는 입자의 크기, 형태, 성분(sand, silt, clay, pebble, gravel, cobble, boulder, carbonate, silica 등)과 마모 정도, 해저면 활동(bedform, furrows 등)과 같이 지질학적이고 유체역학적인 과정의 조직적 분류로 나타낼 수 있다. 특히, 해저면 상황에 대한 정보의 전략적 가치의 확대를 수심측정 장비의 개발과 더불어 체계적인 연구가 수행되었는데, 피스톤코어의 발명(Kullenberg, 1947)과 이를 이용한 심해저 탐사에의 이용은 해저면 상부의 약 20m까지의 해저퇴적물의 획득에 성공함으로써 그 유용성이 인정되었고, 최근까지도 이 장비를 이용한 해저면의 구성물질에 대한 분포도를 작성하고 있다.

해저면 정보에 대한 관측방법의 발전은 음향원격탐사(Acoustic Remote Sensing) 분야를 만들게 되었으나, 해양에서의 해저면은 그 면적의 광대함과 전자기파가 수중을 통과하지 못하여 인공위성을 이용할 수 없다는 한계로 인하여 다른 분야에 비해서 그 발전이 매우 늦다. 그러나 음파는 물속에서 큰 감쇄없이 전파되어 나아갈 수 있기 때문에 심해의 해저면까지 탐사할 수 있다. 이러한 장비의 대부분은 10 kHz대의 음파를 이용하게 된다. 해저지형탐사 장비의 경우 대부분은 그 음파의 각 빔에 대한 접속의 불충분으로 인하여 그 분해능이 수 km의 것이었으나, 1960년대말의 Side Scan Sonar의 개발과 함께 고해상도의 해저지형정보를 획득할 수 있게 되었다. 최근의 음향원격탐사에 적용되는 음파탐사장비로는 Cross빔 탐사기, 정밀음향 측심

기(Precision Echo Sounder)와 Side Scan Sonar등이 있으며, 이외에도 해저 지층탐사용의 굴절법 지진탐사기, 수중항법용의 Doppler Sonar Navigator등을 들 수 있다. 목적 대상의 응용여부에 따라 각 장비의 구성은 다를 수 있으나, 기본적으로 수중에서 산란된 음파를 감지하여 전송, 획득 및 분석처리 과정을 거치게 된다. 다양한 변화의 심해저 환경하에서 코어를 이용한 퇴적물의 채취는 그 비용이 많이 들고, 심해역에서의 조사가 어려운 지역에서는 실제적이지 않지만 해저면의 상황과 분포를 결정하는 데에는 최근까지도 정점 관측에 의해서 이루어 진다. 심해용 카메라와 비디오, 잠수정과 같이 혁신적인 해저면 조사는 해저면에 대한 자료를 보완하여 주고 있으나, 저렴한 비용으로 해저면의 물질 분포나 형태등을 빠르게 조사할 수 있는 원격탐사 기술이 요구된다. 그러나 대부분의 심해저 환경은 시각적으로 불투명하게 주어진 음향학적 기술의 적용이 매우 제한적이다.

음향원격탐사에 의한 해저지형도의 작성은 다중빔 수심측정과 후방산란 해저면 영상이 서로 보완적인 자료들로 구성될 경우 완벽한 해저면 탐사 장비가 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 지형자료로 부터의 영상부분을 따로 분리해야하는 큰 어려움이 있다. 예를 들어 영상주사폭은 다중빔에 의한 주사폭에 비해 거의 10 배정도 넓게 나타나기 때문이다. 이러한 이유에서 1991년 이후에 계속된 다중빔에 의한 수심의 계수화 자료와 후방산란 자료를 조합 시키려는 노력이 계속되어 왔고, 그의 결과에의해 개발된 시스템의 대부분은 짧은 시간에 더욱 많은 자료를 획득할 수 있으며, 수심과 음향영상간의 기록이 동시에 획득될 수 있다는 두 가지의 큰 장점을 지닌다.

해저면 상황과 해저 수심에 대한 최초의 조합된 장비로는 SeaMARC II 시스템으로 일반적인 side scan 영상과 진행 조사선의 주변의 지형자료를 함께 제공해 주고 있다. 이 시스템의 특징은 다중빔(SeaBeam 2000 등)의 경우 주사빔의 형태를 유지하기 위하여 송신기 및 수신기의 배열이 서로 수직적인 것에 비해서 세로 방향으로만 구성되어 있기 때문에 입사파에 대한 각도를 측정하기 위한 간섭계(Interferometry)의 이론을 적용한 것이다. 해저면에서 반사된 음파는 해수면에서 반사된 일련의 이중반사파(multiple)를 형성하는데, 지형에 따른 측정의 한계를 최초의 해저면에서의 반사파 도달 시간으로 제한한다는 특징이 있다. 또한 Deep Tow 시스템은 최초의 해저면 반사파 도달 시간이 늦기 때문에 주사폭은 라디오파에 비해서 매우 크다. 또한 SeaMARC II와 같은 시스템은 위상각(phase angle)차이를 이용하기 때문에 다중빔에 비하여 그 주사폭이 훨씬 넓다. 따라서 광역에서의 지형분석에는 용이하나 정밀한 해저면에 대한 정량적인 분석에는 적합하지 않다.

1 차년도에 하드웨어적인 검토가 이루어진 온누리호의 SeaBeam 2000 시스템은 1 차년도에 이어 2 차년도에도 실향역 (1994년 태평양 심해저 망간단괴 조사)에 투입되어 그 분석자료를 획득하였다. SeaBeam 2000 시스템은 해저면에 대한 지형학적인 연구에 매우 유용한 탐사장비이며, 일반적인 해양의 수심조사에 이용되는 선개념의 수심측정장비와 비교하여 면에 대한 음파신호의 주사 및 그 주사신호의 계수화 획득이란 개념에서 많은 차이가 있다(Fig. II-1). 즉, 넓은 지역에 대한 면개념의 조사가 가능하다(Macdonald and Fox, 1983; Losdale, 1983). 이러한 면개념의 조사방법은 투입 인력, 경제적인 측면등을 고려한다면 매우 획기적인 것이며, 특히 획득 주사빔의 갯수를 수심 1,000m 이상 해역에서 121개로 구성되어 있어 음파신

호에 대한 각각의 분석도 가능하다. 이는 해저면의 구성물질과 연관지어 매우 중요한 의미를 가질 것이다. 따라서 본 2차년도에는 현재의 세계적인 추세인 음향원격탐사(Acoustic Remote Sensing) 기법을 적용한 실효역 자료 분석은 물론 그 구성물질에 대한(망간단괴의 분포사항 등) 반사음파신호에 대한 정성적 접근을 시도하였다.



## 제 2 절 조사장비 및 자료획득

### 1. SeaBeam 2000 시스템

Fig. II-2는 현장에서의 수심 및 반사파 자료를 획득하기 위한 온누리호의 SeaBeam 2000 시스템에 대한 개괄적인 구성도면으로 온누리호의 경우 송신기는 28개의 프로젝트와 84 개의 수신 하이드로폰으로 구성되어 있다. 송신파에 대한 수신기는  $0.8^{\circ} \times 0.8^{\circ}$ 의 해상도를 나타낼 수 있으며, 송수부와 수신부는 서로 수직한 방향으로 분리 설치되어 있다. 송신부의 경우 각 송신기는 그 내부에 8개의 세라믹 공진기로 구성되어 있으며, 각 송신기의 송신파는 조사선의 좌우현에 대해서 Fig. II-3과 같은 음파형태를 보인다. 적정 최대의 송신주파수는 12 kHz를 나타내며, 가능한 이용 주파수는 11에서 16 kHz까지이다. 송신파의 경우 수신된 파형의 일정한 형태를 유지하기 위해서 시스템의 내부에 설치되어 있는 계수형 Pitching Compensator를 거치게 된다. 수신부의 경우는 좌현 및 우현의 방향으로 V자형으로 설치되어 있고, 수신부의 각 하이드로폰은 세라믹 라인 엘레먼트로 구성되어 있어 소프트웨어적으로 계수화된 음파의 크기를 신호처리용 컴퓨터로 보낸다.

일반적으로 수중의 음속에 의한 전파속도를 자동으로 처리할 수 있으나, 온누리호의 경우 1 일 1 회의 XBT에 의해서 획득된 수온을 이용한 음속보정을 실시하였다. 현장에서의 획득된 계수화자료는 본 시스템의 Micro VAX 4000-200에 장착된 TK-50 테이프 카트릿지에 수록, 연구소 보유의 미니 컴퓨터(MicroVAX 3200)에서 자료를 읽힌 후 LAN(Local Area Network)을 통하여 분석용 개인용 컴퓨터에 수록하였다. 일반적으로 1항차(약 15일에서 20일의 조사활동)의 획득 자료의 양은 대략 400 메가바이트

정도의 양이며, 자료의 원활한 운용을 위하여 전체 조사구역에 걸친 분석을 하기보다는 몇 개의 소 구역으로 나누어 분석하게 된다. 본 연구의 자료 처리를 위한 자료 지역은 음향원격탐사기법의 적용결과를 정성적으로 검증이 가능한 지역을 택하기 위하여 심해용 카메라의 해저면에 대한 사진 결과가 있는 지역을 택하였다 (Fig. II-4 및 -5).

## 2. SeaBeam 2000 Side Scan

SeaBeam 2000은 실시간 처리를 위하여 어레이 프로세서를 채용하고 있으며, 각 어레이 프로세서는 음파 빔의 형태나 음파의 에너지 정도를 소프트웨어적으로 처리하여 각 빔과 빔사이의 해저지형에 대한 평균지형 경사도를 계산하며, 수신된 음파의 강도를 이용하여 Side Scan의 흑백 영상을 현장에서 만들 수 있다. 특히 각 어레이 프로세서는 조사선의 이동과 음속에 의한 전파속도를 보정한다. 음파빔의 수신에 처리는 Fig. II-6에서와 같이 직하방의 빔 I과 측면의 빔 II를 고려할 때 해저면에 도달되어 반사되는 음파는 음파크기의 증감에 의해서 감지할 수 있으며, 연이은 빔 II의 도달 시간 또한 음파크기의 연속된 증감에 대한 수신 대역폭(Receive Gate)의 조절에 의해서 감지할 수 있다. 특히 정밀 시간의 측정은 수신 대역폭내에 들어오는 음파신호로부터 주어진 임계크기 이상의 신호에 대한 시간을 측정하게 되고 연이은 음파신호에 대해서도 동일하게 연속적으로 적용하며 정밀한 시간을 계산하게 된다. 이렇게 수신된 신호는 어레이 프로세서내에서 고속의 실시간 Fast Fourier Transform을 수신시간 대역폭에 대하여 실시하게 되며, 시간에 대한 FFT를 실시하여 주파수에 대한 음파의 크기 FFT 결과를 산출하게 된다 (Fig. II-7). 이때 음파의 크기는 바로 16단계의 흑백 영상에 의하여 Side Scan의 영상을 나타낸다 (Fig. II-8).

### 제 3 절 자료 처리 및 결과

#### 1. SeaBeam 2000을 이용한 음향원격탐사

해저면에 대한 음파의 수직입사에 따른 지질학적인 해석을 시도한 발표는 많다(Tyce, 1976). 앞절에서의 설명과 같이 다중빔에 의한 후방산란 강도를 측정할 수 있는 SeaBeam 2000의 경우 그 응용도는 매우 높을 것으로 Seabeam 2000의 수직입사파에 대한 반사계수의 산출은 다음과 같다.

음파(평면파)의 강도(I; Intensity)는 해저면을 구성하고 있는 물질에 대해 음향저항특성값(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

$$I = I_0xR^2x(e^{-2ar}/(2r)^2) \quad \text{-----}(2)$$

로 나타낼 수 있으며, 여기서 a는 exponential감쇄상수이고, r은 Rayleigh 반사계수이다. (2)식에서 반사파가 산란보다 크다고 본다면, 평면파에 대한 두 매질 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 기본으로하여 해저면의 표층퇴적물의 음향학적인 분류를 시도할 수 있다. 즉, 해저면의 거침정도(roughness)는 반사파의 평균에 의해서 줄일수 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 첫 번째의 Fresnel Zone보다 반사파의 면적(Ensonify Area)가 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 나타나며, 해저면에 놓여 있는 망간노들의 반사도에 따른 음향저항만이 큰 대조를 보이며 기록된다.

## 2. 다중빔 자료처리

처리에 이용된 다중빔자료는 Fig. II-5의 심해용 카메라 시스템이 약 3시간 동안 운영되어 해저면에 대한 사진자료가 획득된 지역을 중심으로 그 주변자료를 처리하였다. 다중빔에 의한 수심자료는 약 15시간 동안의 자료가 이용되었고 그 대상 면적은 대략  $30 \times 30 \text{ km}^2$ 의 면적을 갖으며 이 지역을 통과하여 수심자료를 중첩하여 이용할 수 있는 조사라인은 5개 라인이었다. 이 지역에 대한 후처리과정(1차년도 보고서 내용 참조)을 거친 2차원의 등수심도는 Fig. II-9에 나타내었다.

Fig. II-9는 자료처리 대상구역에 대한 2차원의 등수심도로 등수심선의 간격은 50 m이며, 수심은 최대 5,100 m에서 최소 4,850 m를 보여 약 250 m의 수심차이를 보이는 전 해역이 비교적 평탄한 지형변화를 보인다. 조사구역의 주변 태평양 해저확산의 방향(spreading direction)에 대해서 지형의 발달이 남북방향의 형태를 보이는 일반적인 지형변화 형태와 잘 일치한다.

해저면에 대한 SeaBeam 2000을 이용한 Side Scan(각빔 음파의 크기로 1개의 동기신호(Ping)에 대하여 각각 121 개의 결과)자료는 Fig. II-9의 등수심도내에 포함되는 심해카메라 운영 지역을 포함하는 지역을 중심으로 약 4시간 동안의 빔 자료를 이용하였는데 조사라인은 3 개의 라인이 80 % 정도 중첩되며, 조사선의 속도는 약 6 노트를 유지하였고 각 조사라인의 송신 및 수신 동기신호회수가 약 140 회 정도의 자료를 이용하였다. 현장에서의 자료획득은 발신동기(Ping)의 간격을 약 14 초를 유지하였는데, 실제 이 해역의 수심 약 5,000 m를 고려한다면 약 8 초의 ping 간격이면 음파의 송신 및 수신이 가능하나, 동시에 이용되는 동일 주파수대의 수심측정장비(EA-500)와의 음파신호에 대한 간섭효과를 줄이기 위해서 각 장비에 대한

송신, 수신 시간대를 서로 분리하여 수집하였다.

각 ping별로 121개씩 확보되는 수심자료(depth)와 그에 따른 반사음파의 크기(amplitude) 자료는 조사선의 운영 속도와 수심을 고려한 주사폭에 대한 간격을 고려할 때 선수-선미 방향과 좌현 및 우현에 대한 각 빔자료의 해상도는  $45 \times 200 \text{ m}^2$ 를 보인다. 현장 자료의 수록시에는 음파신호에 대한 TVG와 롤링 및 피칭등에 의한 효과를 충분히 상쇄하고 음속에 대한 전파 속도의 보정등이 이루어진 보정값이 컴퓨터의 주변 기억장치에 수록되는데, 이 원시자료는 음파수신에 따른 소프트웨어적인 이득(gain)조절이 가해진 것으로 Side Scan의 영상처리를 위해서 후처리 과정에서 최초로 단위 gain(unit-gain)화하는 과정을 수행하게 된다.

다중빔 시스템에 의해서 획득된 중앙의 수심과 그 위치에서의 음파빔의 크기를 Fig. II-0에 나타내었다. Fig. II-10(a)는 대상구역중 가장 남쪽의 조사라인 자료로 대략 후방산란음파의 크기가 20에서 25 dB의 음압분포를 보인다. 수심은 평균 5,000 m로 해저면은 이 조사라인의 북쪽 두개라인에 비해서 평탄하게 나타나나 음파의 크기에 대한 변화폭은 크다. 전체적인 음압 분포의 경향은 수심의 변화와 상관관계가 있음을 보인다. Fig. II-10(b)와 (c)의 음압분포가 20 dB 등압선을 중심으로 나타나는 것과 비교하여 3개의 조사대상 선중 가장 남쪽의 조사선이 약 2에서 3 dB 정도 큼을 알 수 있다. 즉, 심해카메라의 운영지역을 고려한다면 중앙의 빔의 후방산란 음파강도의 크기가 남쪽에서 크게 나타난다 (Fig. II-11). Fig. II-12는 최근 3년간 Free Fall Grab, Box 코아등에 의해서 획득된 자료를 분석한 결과로 평균 부존량의 분포양상이 중앙빔에 의해서 획득된 후방산란 음파의 분포결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 심해카메라의 운영지역내에서는 남쪽지역에 비해서 북쪽 지역에서 단괴의 부존량이 서서히 증가한다 (Fig. II-13a, b, c).

Fig. II-14은 조사대상구역의 음압분포 구별을 뚜렷하게 하기위해서 음압의 레벨을 20 dB씩 높게 나타내었고, 경계면을 확실하게 구분하기 위해서 이동 window 통계(moving window statistics) 처리를 한 결과이다. 일반적으로 SeaBeam 2000의 큰 특징인 음파신호의 발신에 대한 최초의 전기에너지의 포화상태를 10볼트까지 레벨 상승 유지해야 하는데, 각 어레이 증폭기에서 약 7.5볼트까지만 상승시키는 특징 때문에 발생하는 중앙빔 근처에서의 반사음파값이 상대적으로 크게(방출에너지를 최대까지 상승시키기 위하여 소프트웨어적인 신호처리 기법을 이용한다)나타남을 알 수 있다. 다만 중앙빔에 대한 이득의 표준화가 이루어진 상태이기 때문에 중앙빔 근처(약  $\pm 15^\circ$ ) 수신 음압값은 큰 의미를 지닌다.

Fig. II-15는 다중빔에 의해서 획득된 중앙빔을 중심으로 약  $\pm 20^\circ$ 에 해당되는 90 개의 빔자료를 이용하여 표층의 후방산란음압을 표시한 것으로 이동 window 통계를 거쳐서  $200 \times 200 \text{ m}^2$ 의 해상도를 갖는 표층 음압 분포도이다. 후방산란 음파의 구분이 남과북에서 확실하게 할 수 있으며, 자료의 검증에 필요한 심해카메라의 운영결과와 비교하면 그 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

## 제 4 절 결 론

심해저 해저면상에 분포하는 망간단괴의 분포, 크기등의 추정을 위한 조사방법은 여러가지가 있다. 특히 음파를 이용한 원격탐사기법의 활용은 그 응용도나 활용도의 측면에서 매우 유용할 것이다. 따라서 본 연구사업에서도 1차년도의 하드웨어 및 소프트웨어에 의한 자료처리환경의 기본을 구축한데 이어 2 차년도에서는 1차년도의 환경에 맞춘 자료처리와 단괴의 분포와의 정성적인 접근을 시도하였다. 이러한 시도는 음파에 의해서 추정된 지역의 자료가 충분할 뿐만이 아니라 결과의 검증을 위한 심해저 운용의 카메라등의 자료가 풍부해야 할 것이다. 특히 최근까지 심해환경에서의 단괴의 분포상황을 알기 위해서 시도된 MFES(Multi-Frequency Exploration System)도 조사라인상에서의 결과만으로 유추한다는 데에 큰 난점인 것이다. 따라서 본 연구 사업의 1 차, 2 차년도의 결과를 바탕으로 여러 장비에 의한 검증이 충분한 지역을 택하여 SeaBeam에 의한 Side Scan의 음파의 후방산란 강도의 분포도를 작성해야 함은 물론 그 지역에 대한 집중적인 조사를 수행해야 할 것이다. 최근들어 활용되기 시작한 주파수 변조방식의 개념(Chirp)을 이용한 해저면 구성물질의 분포 및 분류등을 이용해야 할 것이다.

SeaBeam Side Scan 영상에 의해서 획득된 결과는 카메라의 운영결과와 비교하여 대략적인 음압의 분포가 20 dB를 중심으로 그 경계를 이루고 있음을 알 수 있다. SeaBeam 시스템의 발신신호에 대한 전기에너지를 장비의 특성상 70에서 80% 유지하며, 이득(Gain)의 조절에 의해서 자료를 획득하고, 20dB를 전후한 지역 분포도를 작성한다면 그 이상의 지역과 그 이하의 지역에 대해서 1차적인 심해저 해저면의 표층에 존재하는 단괴의 분포와



일치 시킬 수 있을 것이다. 이러한 지역에 대한 Chrip Sonar의 운영은 물론 음파를 이용한 조사결과를 검증할 수 있는 여러조사를 장시간 종합적으로 수행, 계수화된 음파값을 이용하게 된다면 정량적인 음향원격탐사분야의 효율성을 더욱 높일 수 있을 것이다.



## 부 록 : Chirp Sonar 소개 ('95년도 개발)

보정(측정)된 광폭의 계수화 주파수 변조방식의 음파탐사로서 정성적, 고정밀도 및 저소음의 퇴적층자료를 획득할 수 있다. 또한 수심에 따른 일정한 정밀도를 유지할 수 있도록 특별한 주파수특성의 가중치(weight)를 지니는 파형을 생성할 수 있다. Chirp(지층탐사장비) 음파탐사장비는 해저면에 분포하는 퇴적물의 음향학적 원격탐사에 의한 분류를 시도하기 위한 목적으로 개발되었고, 고정밀도의 영상출력을 제공한다. 획득자료는 계수화하여 처리하고 퇴적물에 대한 음향파형의 수직입사면에 대한 표층반사계수를 추정할 수 있다. 본 장비에 의해서 획득된 추정된 정성적인 음향반사파는 표층퇴적물에 rigidity, compressibility, porosity와 표층퇴적물의 밀도를 예측할 수 있으며, 음향 impedance를 추론할 수 있다.

미고결의 퇴적물은 퇴적물내에 기공이 많으며, 그 구조에서 치밀하지 못하다. 따라서 그 구조의 틈새로 해수가 침투되어 채워져 있게 된다.

Bulk Density와 Porosity의 관계는  $D_b = D_w \times P + D_g \times (1-P)$ 인데, 여기서  $D_b$ 는 퇴적물의 bulk 밀도,  $D_w$ 는 경계면 해수의 밀도,  $D_g$ 는 경계퇴적물의 밀도와  $P$ 는 퇴적물의 porosity를 나타낸다. 여기서 porosity  $P = (D_g - D_w) / (D_g - D_b)$ 이고, 균등한 매질에서의 음파속도는  $C_b = ((1/B_b + 4u/3)/D_b)^{1/2}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서  $B_b$ 는 해수로 채워진 퇴적물의 총응축율이고,  $u$ 는 rigidity의 총 modulus이다. 특히 압력의 변화가 미미한 심해 해저면의 경우의 총 응축율은 압력변화율에 대한 부피의 변화율로 나타낼 수 있는데, 이는  $B_b = (1/V) \times (dV/dp)$ 로 나타낼 수 있다. 여기서  $V$ 는 체적이며,  $p$ 는 압력을 의미한다.

여기서 총응축율에 대한 식을 전개해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
B_b &= (1/V) \times (dV/dp) \\
&= V_w/V \times ((1/V_w) \times (dV_w/dp)) + V_g/V \times ((1/V_g) \times (dV_g/dp)) \\
&= B_w P + B_g (1 - P)
\end{aligned}$$

다시 음향 Impedence ( $D_b \times C_b$ ) 는 다음식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned}
Z_b &= D_b \times C_b \\
&= Z_w \left( \frac{P + D_R(1-P)}{P + B_R(1-P)} + 4/3 u B_w [P + D_R(1-P)]^{1/2} \right) \\
C_b &= C_w (1/[P + B_R(1-P)]) \times [P + D_R(1-P)] + 4/3 u B_w / [P + D_R(1-P)]^{1/2} \\
u &= u_0 (D_b/D_w - 1)^n
\end{aligned}$$

여기서  $u_0$ 는 rigidity 상수이고, 이후의 항은 퇴적환경에 따른 함수를 의미한다. 각 항의 변수별 상수의 일반적인 값을 보면 다음과 같다.

$$\text{Grain Density}(D_g) = D_w \times D_R = 2,670 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Grain Compressibility}(B_g) = B_w \times B_R = 4.85 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$$

$$\text{Rigidity 상수}(u_0) = 0.0005 \times 10^{11} \text{ N/m}^2 \text{ 이다.}$$

또한 음향저항특성으로부터 밀도 및 porosity와 연관된 음향파의 반사 R은  $(Z_b - Z_w)/(Z_b + Z_w)$ 로 나타낼 수 있고, 통계치에 의해서 정리된 심해저 환경의 대략적인 반사계수 R은  $0.6468 - 0.6456 \times P$ 로 표시할 수 있는데, 이때의 porosity는 0.35에서 0.85의 값사이에서 그 의미를 갖는다. Hamilton의 경우 실험식에 의해서 반사계수와 porosity사이의 관계를 다음식에 의해서

정의 하였다.

$$R = 0.6692 - 0.666 \times P \quad : \quad \text{Continental Terrace}$$

$$R = 0.6199 - 0.607 \times P \quad : \quad \text{Abyssal Hill}$$

$$R = 0.6461 - 0.646 \times P \quad : \quad \text{Abyssal Plain}$$

여기서 P는 0.35에서 0.85의 값을 갖는다. 특히 Hamilton의 경우 porosity에 대한 퇴적물 입자크기와의 관계를 다음과 같이 정의하여 음향원격탐사의 반사계수의 계산에 매우 유용할 것이다.

$$P = 31.05 + 5.52 \times D_i$$

여기서  $D_i$ 는  $-\text{Log}_2(\text{mm단위의 평균입자크기})$ 를 나타낸다.



## 참 고 문 헌

- Clarence S. C., 1972. Acoustical Oceanography : Principles and applications. Wiley-Interscience Publication series 1, 545pp.
- De Moustier, C., and Leinrock, M., 1986. Bathymetry artifacts in SeaBeam data : How to recognize them and what causes them. JGR, v. 91(B3) : 3407-3424.
- 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 echosounders and bathymetric side scan sonar system. MGR, v. 15 : 27-42.
- Farr, H. K., 1980. Multi-beam bathymetric sonar : SeaBeam and Hydro Chart. Marine Geodesy, v. 4(2): 77-90.
- Lester L., Mayer L., Rufino M., Schock S. G., and King J., 1992. Marine sediment classification using the Chirp sonar. J. Acoust. Soc. Am., 91(1) : 107-115.
- Ma Y., Magnuson, A. H., Varadan, V. K., and Varadan, V. V., 1986. Acoustic response of manganese nodule deposits. Geophysics, v. 51(3) : 689-698.
- 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: 95pp.

Shock S. G., LeBlanc L. R., and Mayer L. A., 1989. Chirp subbottom profiler for quantitative sediment analysis. *Geophysics*, v .54(4) : 445-450.

Tyce, R. C., 1976. Near-bottom observations of 4 kHz acoustic reflectivity and attenuation. *Geophysics*, v.41(4) : 673-699.

Tyce, R. C., 1986. Deep seafloor mapping system - a review. *MTS Journal*, v. 20(4) : 4-16.



## 제 2 장

### 3.5 kHz 음파탐사기술 개발



## 요 약

망간단괴 분포지에 대한 음향신호 반응의 여러 특성을 분석한 결과, 다중 음파에 대한 망간단괴의 총합적인 반응은 후방으로 산란되는 것보다 반사되는 강도가 더 강하였다. 망간단괴의 부존율은 3.5kHz와 12.4 kHz의 비와 좋은 상관관계를 보이며 퇴적물에 의한 단괴의 피복도가 적은 경우 두 주파수의 비로써 부존율의 추정이 가능할 것으로 사료된다. 이러한 가능성은 망간단괴 부존량을 실제 심해용 카메라를 이용 계산한 점유율 그리고 최상부 음파 투명퇴적층과 관계를 파악함으로써 검증된다. 망간단괴들이 대부분 최상부 퇴적층에 의해 피복되어 산출되는 경우, 새로이 개발된 화상분석 기법으로 심해저카메라에서 획득한 화상자료로부터 망간단괴의 부존율은 다음과 같은 식으로 표현된다. . .

$$\text{망간단괴 부존율(kg/m}^2\text{)} = 0.25 \times \text{망간단괴 피복율(\%)}$$



## 제 1 절 서 론

망간단괴탐사의 주요한 목표중 하나는 개발할 가치가 있는 잠재적 채광 지역을 결정하는 일이다. 이러한 목적의 탐사방법은 크게 2 개의 부류로 나눌 수 있다. 그 중 하나는 망간단괴와 퇴적물을 채취할 수 있는 시료채취기인 자유낙하식 시료채취기 (free-fall grab), 상자형 시추기 (box corer), 그랩 (grab), 해저면 예인 시료채취기 (dredges) 등에 사진기와 비디오 카메라를 부착하여 해저면 사진과 시료를 얻는 방법이다. 다른 하나는 SeaBeam 2000 과 같은 다중빔 음향측심기(multi-beam echosounder)나 다중주파수 탐사시스템 (multi-frequency exploration system, MFES)과 같은 음향기기를 사용하는 방법이다.

시료채취는 조사활동에서 중요한 방법이지만, 시료를 채취 할 수 있는 면적은 망간 단괴가 분포하는 광대한 영역과 비교하여 볼 때 하나의 점에 지나지 않는다. 따라서 채취한 시료로 부터 얻은 자료를 근간으로 한 통계적 계산결과는 신뢰도가 낮을 수 밖에 없다. 특히, 보다 정교한 통계기법이 사용되어 질 경우 결과의 신뢰도에 대한 의문은 보다 심화된다. 이러한 이유로 망간단괴 탐사가 시작된 이래로 보다 넓은 지역에서의 단괴분포에 관한 정보를 얻기 위하여 해저면 영상기법이 사용되어져 왔다.

또한, 음향기기를 이용하는 방법은 시료채취기를 이용하는 방법에 비해 조사선의 항해속도가 빨라 적은 시간내에 넓은 지역을 탐사할 수 있으며 비용면과 인력면에서 효과적인 방법이다. 그러나, 이러한 방법도 시료채취에서 얻은 망간단괴 시료와 해저퇴적물들의 물리적 특성과 단괴시료의 부존 밀도, 분포특성, 크기분포에 대한 연구가 선행되어 져야 한다.

최근 외국에서는 영상 탐사기법으로 얻어진 망간단괴의 종류, 형태, 크

기, 분포밀도 등의 자료와 지구물리(주로 음향)자료에 의해 얻어진 자료를 이용하여 망간단괴의 부존율과 분포밀도를 알아내려는 연구가 수행되어지고 있다. 그러나, 위에서 언급한 바와 같이 이러한 침단의 연구는 비공개되고 있다.

따라서 당해년도의 보고서에서는 KODOS93-1지역에서 얻은 자료를 이용하여 다중주파수 음향탐사방법과 심해저 카메라를 이용한 해저면 영상기법에 대한 기초연구를 수행하였으며 그 응용가능성을 알아보고자 하였다.

## 제 2 절 다중주파수 음향탐사

탐사항해시 항속을 빠르게 하는 것은 탐사비용을 줄일 수 있다. 항속을 빠르게 하는 방법중 하나는 계측하거나 시료를 채취하는 동안에 사용하는 케이블을 제거하는 방법이다. 이것은 장비를 조사선에 장착하거나 조사선 가까이에서 장비를 운용함으로써 가능할 수 있으며 원격탐사 시스템과 유사하다 (Fig. II-16). 조사선에 장착된 음향탐사장비의 적절한 운용과 해저면에서 반사되어 돌아온 펄스 자료의 적절한 분석과 해석은 해저면에 깔려있는 망간단괴의 존재유무와 그 양을 계산할 수 있게 해준다 (Magnuson et al, 1981, 1982, Magnuson, 1983).

그러나, 이러한 방법이 그랩에 의한 시료채취나 심해예인 시스템의 운용을 완전히 대신할 수는 없다. 적당한 단괴가 부존되어 있는 유망광구와 잠재적 채광지역을 찾기 위한 초기 정밀탐사시에 주로 사용되어질 수 있을 것이다. 이러한 탐사가 수행된 후에 그랩에 의한 시료채취는 단괴의 광물 분석, 화학분석 등을 위해 수행될 수 있으며, 심해 예인 센서들은 해저면의

지형이나 채광시 위험요소나 장애물에 대한 정보를 얻는데 사용할 수 있을 것이다.

다중주파수 음향탐사방법에 의한 망간단괴의 탐사는 일본의 Sumitomo 와 미국 Virginia Tech.을 중심으로 발전되어 왔으며, 주로 단괴의 피복율과 그 크기에 대한 정량적인 정보를 얻는데 이용되어져 왔다.

## 1. 단일 단괴에 의한 산란

단일 단괴에 대해 시간에 따른 조화평면파(time-harmonic plane wave)가 입사 한다고 가정하자(Fig. II-17). 이 입사파에 대한 음압은 다음과 같이 쓸 수 있으며,

$$p_I = p_a e^{-ikz} \quad (1)$$

여기서 파수  $k = \omega/c_0$  이다.

산란파는 구형의 형태로 단괴의 중심에서 밖으로 방사한다. 산란파  $p_s$ 의 경우 ( $ka \gg 1$ )는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p_s = p_a f(ka, \theta) \cdot e^{-ikR}/R \quad (2)$$

여기서  $f(ka, \theta)$ 은 far-field complex scattering function,  $a$ 는 단괴의 반경,  $R$ 은 산란자의 중심으로부터 관측점까지의 거리이다.

산란함수(scattering function)은 산란자에 대한 모델이 정해지면 계산될 수 있으며, 여기서는 구형 탄성체모델(elastic sphere model)이 사용되었다.

또한 이 산란함수는

$$f(ka, \theta) = |f| e^{i\phi} \quad (3)$$

$\phi$ 는 위상 각도이다. 산란 진폭( $R_\theta$ )은 다음과 같이 정의된다.

$$R_\theta \equiv 2|f|/a \quad (4)$$

(4)식을 이용하여 (2)식을 다시 쓰면

$$p_s = p_a a R_\theta e^{-i(kR - \phi)} / (2R) \quad (5)$$

(5)식의 크기는 다음과 같다.

$$|p_s| = p_a a R_\theta / (2R) \quad (6)$$

입사와 산란된 파동에너지의 상대강도(intensity)는 다음과 같다.

$$I_I \equiv p_a^2 / (\rho_0 c_0) \quad (7a)$$

$$I_S \equiv |p_s|^2 / (\rho_0 c_0) \quad (7b)$$



식(7a)를 이용하여 (6)식과 (7b)식에 적용하면 산란강도는 다음과 같다.

$$I_s \equiv I_1 a^2 R_\theta / (4R^2) \quad (8)$$

이 결과는 방사에너지의 역제곱법칙을 나타낸다.

일견해 보면 약 5000m의 깊이에서 구형확산요인 (spherical spreading factor)이 매우 약한 반응을 나타내므로 망간단괴에 관한 음향탐사를 한다는 것이 무의미해 보인다. 그러나 해저면에서 모든 단괴가 반응하여 흡산되므로 구형확산요인은 생각하지 않아도 된다. 이 흡산된 반응은 산란의 경우 대신 반사의 경우로 생각할 수 있다 (Magnuson, 1983).

또한, Fig. II-17에서 보는 바와 같은 반경이  $a$  인 구형 탄성체에 평면 파가 입사하는 경우를 고려하여 보자. 이 산란된 파압  $p_s$  는 스칼라 Helmholtz식을 만족해야만 한다 (Clay와 Medwin, 1977).

$$(\nabla^2 + k^2) p_s = 0 \quad (9)$$

식(1)을 구형좌표계 (spherical coordinates)로 나타내면 다음과 같다.

$$p_I = p_a e^{ikr \cos \theta} \quad (10)$$

또한 이 (10)식은 다음과 같이 쓸 수 있다 (Faran, 1951, Hickling, 1962, Anderson, 1950).

$$P_I = p_a \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) i^n j_n(kr) P_n(\cos \theta) \quad (11)$$

여기서 첨자  $I$ 는 입사파,  $p_a$ 는 파압의 진폭,  $P_n(\cos \theta)$ 는 Legendre polynomial,  $j_n$ 은 구형 Bessel function이다. 산란된 파압은 다음과 같다.

$$p_s = \sum_{n=0}^{\infty} B_n h_n^{(2)}(kr) P_n(\cos \theta) \quad (12)$$

$h_n^{(2)}(kr)$ 은 바깥쪽의 방사를 나타내는 구형 Hankel function이며,  $B_n$ 은 단파의 표면에 적용된 경계조건에 따라 결정되는 계수값이다. 해양의 압력장에서 총 압력은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$p = p_I + p_s \quad (13)$$

단파에는 동탄성 벡터장 방정식(elasto-dynamic vector field equation)이 적용되며 그 식은 다음과 같다 (Love, 1944).

$$-\rho_E \omega^2 \vec{u} + \mu [\nabla \times (\nabla \times \vec{u})] - (\lambda + 2\mu) \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) = 0 \quad (14)$$

여기서  $\rho_E$ 는 탄성체의 밀도,  $\lambda$ 와  $\mu$ 는 Lamé 상수,  $\vec{u}$ 는 위치벡터이다. 이 위치벡터는 다음의 3 성분으로 나눌 수 있다 (Magnuson, 1975a,b).

$$\vec{u} = \vec{u}_L + \vec{u}_{VS} + \vec{u}_{HS} \quad (15)$$

$\vec{u}_L = \nabla \psi_L$ 은 종파성분(longitudinal polarization)이며,  $\vec{u}_{VS}$ 와  $\vec{u}_{HS}$ 는 횡

파성분의 수직, 수평성분이다. 구형좌표를 씀으로써 단파의 경우 수평성분은 고려하지 않아도 된다. 횡파성분은 다음과 같이 쓸 수 있다 (Morse와 Feshbach, 1953).

$$\vec{u}_{VS} = \nabla \times \nabla \times (r \vec{e}_r \psi_{VS}) \quad (16)$$

이 벡터장은 스칼라 포텐셜  $\psi_L$ 과  $\psi_{VS}$ 로 나타낼 수 있으며, 다음의 Helmholtz 방정식을 만족시킨다.

$$(\nabla^2 + k_L^2)\psi_L = 0 \quad (17)$$

$$(\nabla^2 + k_T^2)\psi_{VS} = 0 \quad (18)$$

여기서

$$k_L = \frac{\omega}{c_L}$$

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho_E}}$$

$$k_T = \frac{\omega}{c_T}$$

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_E}}$$

$k_L$  과  $k_T$ 는 종파와 횡파의 파수이다. 이 각각의 스칼라 포텐셜은 (11)식과 (12)식의 음파식으로 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\psi_L &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n j_n(k_L r) P_n(\cos \theta) \\ \psi_{VS} &= \sum_{n=0}^{\infty} b_n j_n(k_T r) P_n(\cos \theta)\end{aligned}\quad (19)$$

여기서  $a_n$ 과  $b_n$  은 단피의 표면에서의 경계조건에 따라 결정되는 계수이다. 식(12)의  $B_n$  과 식(19)의  $a_n$  ,  $b_n$  를 구하는데 사용되는 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}P_I + P_S &= -\sigma_{rr}, \quad r = a \quad \text{일때} \\ u_{I,r} + u_{S,r} &= u_r, \quad r = a \quad \text{일때} \\ \sigma_{r\theta} &= 0, \quad r = a \quad \text{일때}\end{aligned}\quad (20)$$

여기서  $\sigma_{rr}$ 과  $\sigma_{r\theta}$  는 방사응력과 전단응력이다. 이 응력들은 Ma(1982)가 사용한 포텐셜과 연관된다. 산란된 음압  $p_s$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p_s = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{P_a}{1 + iC_n} (2n + 1) i^n h_n^{(2)}(kr) P_n(\cos \theta) \quad (21)$$

$C_n$  은 단피와 유체매질의 물리적성질과 관련된 복합상수이다 (Ma, 1982).

식(12)의 Hankel 함수에 대한 1차 점온선적 근차식을 사용하여 식(2)의 산란함수  $f(ka, \theta)$  를 구하면 다음과 같다.

$$f(ka, \theta) = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n + 1)(-1)^n i}{1 + iC_n} P_n(\cos \theta) \quad (22)$$

식(22)를 이용하여 후방산란 ( $\theta = 0$ )에 대하여  $ka$  와 (4)식의 산란진폭  $R_\theta$ 의 관계도를 구형의 강제인 경우 (Fig. II-18)와 망간단괴의 경우 (Fig. II-19)를 그림으로 나타내었다. 태평양에서 채취한 망간단괴의 음파속도는 Sunkist(1982a) 와 Smith (1981)가 얻은 값을 사용하였다.

## 2. 해저면위 단괴들의 음파반응

해저면을 편평한 무한평면으로 가정하자. 또한, 크기, 조성과 형태가 동일한 단괴들이 이 평면위에 있으며, 단괴들이 단위면적당 일정하게 분포되어  $\rho_n$ 의 수량밀도를 가지고 있다고 가정하자. 평면파는 (1)식과 같은 음압을 가지고 해저면에 입사할 것이다. 해저 퇴적물에서 음파반응은 연구대상 지역(중앙태평양)에서의 해저퇴적물이 음향학적으로 투명층이란 점을 감안하면 무시할 만하다 (Magnuson, 1982). 이 경우 단괴의 피복율이 낮다면 퇴적물에 대한 음파반응은 합하여 질 수 있다.

단괴들에 대한 반응은 평면상의 각각의 단괴에 대한 반응을 합산하여 얻을 수 있다. Fig. II-20와 같이  $r, z, \alpha$  좌표축의 중앙에서 바닥면에서  $z$  축으로  $z$  거리만큼 떨어진 곳에 음향관측점을 위치시키면, 그 점에서의  $j$  번째 단괴에서의 음파반응은 (2)식에 의거 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p_{s_j} = p_a f(ka, \theta_j) e^{-ikR_j} / R_j \quad (23)$$

여기서  $R_j = \sqrt{r_j^2 + z^2}$  이다.  $N$  개의 단괴에 대한 총 반응은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$p_{sr} = \sum_{j=1}^N p_{s_j} = p_a \sum_{j=1}^N f_j e^{-ikR_j} / R_j \quad (24)$$

무한평면상에서 단파의 갯수  $N$  은 무한대가 될 것이다. 각각의 단파에서의 반응은 구형확산(spherical spreading)의 특징을 보인다. 합산된 반응은 반사된 평면파가 되며, 식(10)의 합을 바닥면에 대한 적분꼴로 변환하면 식(26)과 같다. 미소 바닥면( $dA$ )는  $dA = r dr d\alpha$  이고  $dA$ 에서의 단파의 갯수는

$$\rho_n dA = \rho_n d\alpha r dr \quad (25)$$

이다. 적분한 식은 다음과 같다.

$$p_{sr} = p_a \rho_n \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^{\infty} (f(k\alpha, \theta) e^{-ikR} / R) r dr \quad (26)$$

여기서

$$\theta = \sin^{-1}(r/R)$$

$$R = \sqrt{r^2 + z^2}$$

이다. 바닥평면의 동질성과 무한성 때문에 총 산란반응은 단지 바닥면에서 높이  $z$ 에 따라 변화한다. 바닥면에서의 합산된 산란파동은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$P_{S_r} = P_a C_R^{ikz} \quad (27)$$

$C_R$ 은 단파의 존재에 기인된 등반사도(equivalent reflectivity)이다.

정상위상(stationary phase)법을 이용하여 식(26)으로부터 등반사도를 근사적으로 구할 수 있다. 무차원의  $kz$ 를 큰 값으로 취하면 다음과 같다.

$$kz = 2\pi z/\lambda \gg 1. \quad (28)$$

식(26)에서  $\alpha$  방향으로 적분하여 변수와 부호를 위쪽으로 방사하는 방향을 나타내기 위해 바꾸어 다시 쓰면 다음과 같다.

$$P_{S_r} = 2\pi \rho_n \rho_a z \int_0^\infty f(ka, \theta) \frac{e^{ikz g(\xi)}}{\sqrt{1 + \xi^2}} \xi d\xi \quad (29)$$

여기서

$$\xi = r/z, \quad \theta = \tan^{-1}(\xi)$$

$$g(\xi) = \sqrt{1 + \xi^2}$$

정상상태인 경우  $\xi_s = 0$  이므로 식(30)과 같이 쓸 수 있다.

$$g(\xi) \cong g(0) + g''(0) \xi^2/2 = 1 + \xi^2/2 \quad (30)$$

(30)식을 (29)식에 대입하고 적분을 수행하면 다음과 같다.

$$p_{sr} = -2 \pi i \rho_n \rho_a f(ka, \theta) e^{ikz}/k \quad (31)$$

후방산란의 경우 ( $\theta=0$ ), 산란함수는 다음과 같이 쓸 수 있으며,

$$f(ka, \theta) = f_{BS}$$

파수는  $k = 2\pi/\lambda$  로 쓸 수 있다. 따라서 (31)식은 (32)식으로 다시 쓸 수 있다.

$$p_{sr} = -i \rho_a \rho_n f_{BS} \lambda e^{ikz} \quad (32)$$

(27)식의 결과와 비교하면 반사계수의 크기는 다음과 같다.

$$|C_R| = \rho_n |f_{BS}| \lambda \quad (33a)$$

즉, 단파에 기인한 등반사도는 단파의 수량밀도, 후방산란 함수의 진폭과 파장의 곱으로 나타낼 수 있다. 해저퇴적물의 반응과 달리 단파의 반응은 주파수에 따라 크게 변하며, 주파수의 함수로서 파장은 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\lambda = 2\pi c_0/\omega \quad (33b)$$

(33a)식의 결과를 (4)식의 산란 진폭함수  $R_\theta$  를 사용하여 다시 쓰면 다음과 같다.



$$|C_R| = \pi \rho_n R_o / (ka) \quad (34)$$

이 (33a)의 결과는 일본 Sumitomo Metal Mining사에 의해 다중주파수탐사법(MFES)의 개발에 사용되어진 식이다 (Sumotomo, 1981). 이들은 단파의 음향특성 (P-파 속도 및 S-파 속도 등)에 관한 상세한 정보가 부족하여 한 개의 산란자에 대한 강체구형모델을 사용하였다 (Magnuson, 1982). 또한, 단파의 보정계수로써 경험적 감쇄상수 ( $R_p$ )를 사용하였다. 따라서, 단파에 의한 해저면 반사도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$|C_R| = R_p \rho_n |f_{rigid}| \lambda \quad (35)$$

Fig. II-21은  $R_p=1$  일 때 무차원 주파수 ( $ka$ )에 대한 반사계수의 관계를 보여주고 있다. 식(34)와 식(22)를 이용한 Virginia Tech.의 구형 탄성체모델에 대한 결과는 Fig. II-22에 도시했으며, 이 두 그림을 비교해 볼 수 있다. 이 두 가지 모두 Fig. II-23과 같은 조밀하게 채워진(closed-packing) 구형모델의 경우이다.

이 두 그림을 비교하여 보면 Sumimoto의 감쇄상수는 각각의 단파에 대한 특정한 임피던스의 효과를 정확히 반영하지는 못하는 것 같다. 임피던스에 기인한 상당한 주파수왜곡으로 보인다. 두개의 모델에 대한 반사계수는  $ka = 1$ 의 주변에서 특징적인 대역필터의 성격을 보여 주고 있다. Virginia Tech.의 임피던스 특징은 내부의 공진에 의해 발생한 주파수의 영향으로 좀 더 복잡한 양상을 보여 주고 있다.

### 3. Narrow Beam 에 의한 분석

해저면으로 부터 수직으로  $z$  만큼 떨어진 곳에서 수직으로 입사하는 narrow beam 을 생각하여 보자 (Fig. II-20). 해저면에서의 입사 압력은 식 (36)과 같이 쓸 수 있다.

$$p_{IB} = p_I e^{-\alpha \theta^2} e^{-ikR}/R \quad (36)$$

여기서 음원에서의 거리가  $R = 1$  unit 일 때  $p_I = p_1$  이고  $e^{-\alpha \theta^2}$  는 Gaussian beam directivity factor로 간주한다. beam-shape factor  $\alpha$  는  $B_{\frac{1}{2}}$  (one-half power beamwidth)와 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$\alpha = 4nl \sqrt{2}^T / (B_{\frac{1}{2}})^2 \quad (37)$$

빔폭을 1 라디안보다 상대적으로 작게 잡으면 ( $B_{\frac{1}{2}} \ll 1$  radian), 빔폭에 대한 beam factor  $\alpha$ 는 아래의 표와 같다.

Beamwidth ( $B_{\frac{1}{2}}$ )	$\alpha$
2°	1138.00
20°	11.38

빔이 좁고 측정하는 수심이 깊은 경우 전달된 파면은 단곡에 부딪칠 때 평면이라고 가정할 수 있을 것이다. 빔의 원점에서  $j$  번째 단곡에서 산란된 파를 관측할 때 그 파압은 식(23)의  $p_a$  에 (36)식의  $p_{IB}$  를 대입하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$p_{s_i} = p_I e^{-\alpha \theta_j^2} f(ka, \theta_j) e^{-2ikR_j/R_j^2} \quad (38)$$

N 개의 단파에 대한 결과를 합치면 다음과 같다.

$$p_{s_T} = p_I \sum_{j=1}^N e^{-\alpha \theta_j^2} f_j e^{-2ikR_j/R_j^2} \quad (39)$$

식(25)를 사용하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$p_{s_T} = p_I \rho_n \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^\infty f(ka, \theta) e^{-\alpha \theta^2} (e^{-2ikR}/R^2) r dr \quad (40)$$

여기서  $\theta = \sin^{-1}(r/R)$ ,  $R = \sqrt{r^2 + z^2}$  이다.

식(40)은 (29)식과 비교하여 볼 때 directivity factor ( $e^{-\alpha \theta^2}$ ) 와  $R^2$  으로 적분되는 부분을 나눈다는 점이 다르다는 것을 알 수 있다. (29)식과 (30)식에 유사하게 식(40)에 대하여 정상위상에 관한 적분을 수행하면 다음과 같다.

$$p_{s_T} \cong \frac{2\pi \rho_n}{ik} f(0) \left\{ \frac{1}{1 + i\alpha/(kz)} \right\} \cdot \frac{p_I e^{2ikz}}{2z} \quad (41)$$

(33)식을 이용하여 (41)식의 크기를 구하면 다음과 같다.

$$|p_{s_T}| = \left| C_R \left\{ \frac{1}{1 + i\alpha/(kz)} \right\} \right| \frac{p_I}{(2z)} \quad (42)$$

이 결과는 음파반응이 반사파와 같은 행동을 한다는 것을 보여준다. 확산요인은 왕복거리  $2z$ 이며, 평면반사계수 ( $C_R$ ) 는 (41)과 (42)식의 대괄호 안의 1에 가까운 beam-form factor에 의해 수정된다.

#### 4. 반사계수와 부존율과의 관계

망간단괴의 부존율은 음파의 반사계수와 상관관계가 있으므로 해저면상의 단괴 부존율을 나타내기 위한 정량적 표현이 필요하다. 해저면상의 단괴의 분포와 피복율을 심해저 카메라시스템과 그랩에 의한 시료채취를 통해 알아 보고 그 지점의 반사계수와의 관계를 알아보고자 한다. 피복율은 수량밀도, 면적피복율 와 질량피복율로 나타낼 수 있다. 이 각각의 피복율은 단괴의 크기분포와 연관되어 있다.

단괴의 반경이  $a$  이고 격자형으로 조밀하게 채워졌다고 가정하자 (Fig. II-23a). 해저면의 단위 면적당 단괴의 수량을 나타내는 수량밀도를  $\rho$  라 하면, Fig. II-23a 의 경우 이론적인 수량피복율은 다음과 같다.

$$\rho_{nc} = 1 / (4a^2) \quad (43)$$

상대피복율은 식(44)과 같이 실제 피복율을 이론적 수량피복율로 나눈 것과 같다.

$$\rho_n / \rho_{nc} = 4 a^2 \rho_n \quad (44)$$

면적피복율은 해저면에 대한 단괴의 비율로 나타낼 수 있다. 격자형으로 조밀하게 채워진 경우 이론적 면적피복율은 다음과 같다.

$$C_{AC} = \pi / 4 = 0.7854 \quad (45)$$

단피의 반경이  $a$ 로 일정하다고 한다면 면적피복을  $C_A$ 는 (46)식으로 쓸 수 있다.

$$C_A = \rho_n \pi a^2 \quad (46)$$

또한, (45)식과 (46)식을 이용하여 상대피복율을 구하면 (47)식과 같다.

$$C_A / C_{AC} = 4 \rho_n a^2 \quad (47)$$

단피 하나의 질량을  $m_1$ 이라고 하면 (48)식과 같이 구할 수 있다.

$$m_1 = (SG) \rho_w (RF) (4 \pi / 3) a^3 \quad (48)$$

여기서  $SG$ 는 단피의 습윤비중이고,  $\rho_w$ 는 담수의 밀도이다. 또한,  $RF$ 는 Fig. II-23b에서와 같이 구에 대한 단피의 부피 감쇄계수이다. 단위면적당 질량피복율은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_m = \rho_n m_1 \quad (49)$$

상대피복율은 (44)식과 (49)식에 의거 다음과 같이 쓸 수 있으며, 이 결과는 (44)식과 (47)식의 결과와 동일하다.

$$C_m / C_{mc} = \rho_n / \rho_{nc} = 4 \rho_n a^2 \quad (50)$$

단괴의 크기가 위의 경우와 달리 일정하지 않으나 해지면 사진을 분석의 통계처리 결과, 단괴의 크기분포는 Rayleigh 통계분포를 따른다고 알려져 있다 (Magnuson 등, 1981, Sundkvist, 1982b). Rayleigh 통계분포를 따르는 평균반경, 평균반경의 제곱과 평균반경의 삼승을  $\bar{a}$ ,  $\bar{a}^2$ ,  $\bar{a}^3$  으로 표시할 수 있으며, 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \bar{a}^2 &= 1.079 (\bar{a})^2 \\ \bar{a}^3 &= 1.144 \bar{a} \cdot \bar{a}^2 \end{aligned} \quad (51)$$

평균반경의 제곱근은 (52)식과 같이 표기한다. 이 제곱근을 피복율 계산식에 있는 반경의 제곱  $a$  를 대신하여 사용한다.

$$\sqrt{\bar{a}^2} = a_{rms} \quad (52)$$

Magnuson(1982) 이 일본 Sumitomo 사에 의해 제공된 Pacific Basin nodules 의 상대 반사계수자료를 이용하여 얻은 자료를 인용하였다. 망간단괴의 반경이 4.0 cm이고 계산된 최대단괴 부존율은 14.3 kg/m<sup>2</sup> 이었다. 사용된 3개의 음향측심 주파수는 다음의 표와 같다.

Frequency	dB	Reflectivity
f1 = 3.5 kHz (SBP)	-11.8	0.25
f2 = 12 kHz (PDR)	-30.2	0.031
f3 = 27kHz (NBS)	-28.4	0.038

가장 높은 반사도 0.25는 SBP의 transducer 에서 얻은 가장 낮은 주파수인 3.5kHz이다. 계산된 부존율 14.3 kg/m<sup>2</sup> 은 비교적 높은 값이어서 반사도 0.25는 단괴로부터 얻어진 반사도의 상한 값이라는 것을 예상할 수 있다.

단괴가 없는 심해퇴적물의 반사계수는 다음과 같이 구할 수 있다. 수직 입사 평면파의 경우 반사계수는 다음과 같이 쓸 수 있다(Clay 와 Medwin, 1977).

$$C_R = \frac{\frac{\rho_s c_s}{\rho_0 c_0} - 1}{\frac{\rho_s c_s}{\rho_0 c_0} + 1} \quad (53)$$

KODOS93-1 지역의 심해퇴적물의 경우(상공자원부, 1993), 전밀도는 1.25 - 1.35 g/cm<sup>3</sup> 로 다음과 같이 반사계수가 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_s &\cong 1.3 \rho_0 \\ c_s &\cong c_0 \cong 1500 \text{ m/sec} \\ C_R &= 0.13 \end{aligned}$$

초기 Virginia Tech. 의 탐사에서 얻은 Sundkist(1982a)의 자료를 보면 단단한 퇴적물의 음파속도와 전밀도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} c_s &\cong 3500 \text{ m/s} \\ \rho_s / \rho_0 &= 2 \end{aligned}$$

(53)을 이 자료에 적용하면 반사계수는  $C_R = 0.65$  이다. 이 반사계수는 태

평양의 심해저퇴적물의 경우보다 큰 값이다. 단파의 반사도가 0.25가 가장 큰 값이었다는 것을 상기하면 배경값인 퇴적물의 반사도가 단파의 반사도를 덮어 버릴 수도 있을 것이다. 그러나 이 퇴적물의 반사도(배경값)는 1 - 1000 kHz의 범위에서 주파수와 무관한 경향을 보인다 (Clay 와 medwin, 1977). 따라서 주파수에 무관한 배경값 반사도를 전체에서 제거 할 수 있다.

해저면과 단파의 반사도를 다음과 같이 분리 할 수 있다고 가정하자.

$$(C_R)_{tot} = (C_R)_R + (C_R)_n \quad (54)$$

위의 세가지의 음향주파수에서 측정된 반사계수를  $C_{R1}$ ,  $C_{R2}$ ,  $C_{R3}$  라고 하자. 반사도의 배경값은 아래와 같이 세 개의 반사계수중 최소값이 될 것이다.

$$(C_R)_B \approx \text{Min}[C_{R1}, C_{R2}, C_{R3}] = (C_R)_{Min}$$

또한, 단파의 반사도는 다음과 같다.

$$(C_R)_n = (C_R)_{Tot} - (C_R)_{Min} \quad (55)$$

위 표의 3개 주파수중 하나가 단파의 음향이 없었다고 가정하면, 가장 작은 반사도 값인 0.031 이  $(C_R)_{Min}$  이 되며, 이 것은 배경값인 0.65나 위 표의 최대 반사도 0.25 에 비해 무시 할 만한 값이다.

Morita(1982)는 세 주파수  $f_1 = 3.5$  kHz,  $f_2 = 12$  kHz,  $f_3 = 27$  kHz 를 이용하여 다음과 같이 합성 반사계수( $R_i$ )를 구하였다.



$$R_t = \sqrt{C_{R1}^2 + C_{R2}^2 + C_{R3}^2} \quad (56a)$$

또한, 이들의 비를 다음과 같이 구하였다.

$$C_{R1}/R_t \text{ 과 } C_{R1}/C_{R3} \quad (56b)$$

조밀하게 채워진 강체구에 대한 이론적 반사계수곡선(Fig. II-21)과 각 주파수에 대하여 단피의 반경에 따른 반사도가 Fig. II-24에 나타내었다. 또한 단피의 반경에 따른 합성반사계수와 반사계수들의 비가 Fig. II-25 및 26에 도시하였다. 이들 그림은 Virginia Tech. 의 구형 탄성체모델(식(22))을 이용하여 만들어 졌다(Magnuson, 1982).

질량피복율( $C_m$ )은 Fig. II-25에서 계산된 값과 측정된 합성 반사계수로부터 계산될 수 있다. 상대 피복율은 합성 반사계수의 비와 비례하며 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$C_m/C_{mc} = R_t/R_{tc} = 4\rho_n a^2 \quad (57)$$

이 합성 반사계수는 단피의 크기에 무관하게  $R_{tc} = 0.7$  로 볼 수 있다(Magnuson, 1982). 단피의 크기를 알면, 조밀하게 채워진 질량피복율( $C_m$ )은 식(48), (43), (49)에 의해 구할 수 있다. 따라서, 질량피복율은 식(57)로부터 다음과 같이 구한다.

$$C_m = C_{mc}(R_t/R_{tc}) \quad (58)$$

## 5. 탐사 및 분석 장비

KODOS93-1 지역에서는 12.4kHz의 주파수를 가진 음파를 이용한 수심 측정기가 사용되었는데, 러시아에서 제작된 모델 GEL-3의 echo sounder를 선수의 선저에 장착하여 사용하였다. 3.5kHz의 주파수를 가진 음파를 이용한 sub-bottom profiling system 은 천부퇴적층의 퇴적구조와 층서를 구명하는데 사용되며, 미국 EG&G사 모델 M-140의 음파발신 및 수신부를 선저에 장착하여 사용하였다.

Echosounder와 sub-bottom profiler로 부터 들어오는 신호는 EPC-4800 의 기록계를 사용하여 아날로그형태로 기록을 얻었고 디지털기록 장치인 모델 GAK 을 이용하여 시간과 위치정보를 종합하여 0.5ms의 sampling rate로 자기 테이프에 기록하였다.

### 5.1. Echosounder(GEL-3)

12.4kHz의 주파수를 이용하여 EPC-4800 Series Recorder에 아날로그 형태로 기록되고 다시 디지털로 변환되어 시간 및 위치정보와 함께 주컴퓨터의 마그네틱 테이프에 수록된다.

Working Frequency	12.4 kHz
Power	6 kVA
Pulse Length	10-40 ms
Beam Width	10°

## 5.2. 3.5 kHz Subbottom Profiler (M-140)

3.5kHz주파수, 16kw 용량의 tranceiver가 이용되어 EPC-4800급 기록 장치에 아날로그형 기록 및 컴퓨터 마그네틱 테이프에 디지털 자료가 수록된다.

Working Frequency	3.5 kHz
Power	10 kVA
Pulse Length	1-10 m
Beam Width	30°

## 5.3. 심해 예인 카메라 시스템

심해예인 카메라시스템은 해저면의 상황을 실시간(real-time)으로 상세하게 관찰할 수 있으며, 비디오 화상과 정지화상을 얻을 수 있는 장비이다. 이 장비로 부터 획득한 정지화상을 화상분석기기(Image analyzer)를 이용하여 해저면상 단괴의 피복율을 계산하였다.

심해 예인 카메라 시스템은 약 3000장을 촬영할 수 있는 35mm still camera와 실시간으로 관찰할 수 있는 비디오 카메라가 장착되어 있다. 비디오 카메라는 해저 또는 선상에서 해저면면사진을 녹화 할 수 있다. 심해저 카메라는 한번에 24시간 이상 운용할 수 있으며 PAL방식으로 녹화된다.

Maximum Operation Depth	6,000 m
Maximum Towing Speed	12 knots
Shooting Distance	2 ~ 5 m
Maximum Number of Photo Frames	3,000 frames
Field of Shot (2 m distance)	4 m <sup>2</sup>
Dimension	2,105×1,480×1,320 mm

#### 5.4. 화상분석기기

시스템의 구성은 486PC, Targa board, Fotovix IIX-S, CCD camera, RGB 콘트롤 모니터, Image analysis program으로 아래 표와 같이 구성되어 있다. 필름, 사진과 video등의 화상을 CCD camera와 필름스캐너로 입력하여 해석하기 쉬운 화상으로 처리할 수 있다.

Main board	Intel 486-DX2
Frame grabber	Targa 64+
Monitor	14" RGB control monitor 17" S-VGA monitor
Film scanner	Fotovix IIX-S
Camera	CCD camera Hi-Scope video microscope
Software	Mocha for windows
Color video printer	Sony UP-3000
Removable driver	Sony NWP-559

## 5.5. 해저면 사진 분석 방법

KODOS93-1 지역에서 심해저카메라 시스템으로 획득한 정지화상자료를 5분 간격으로 선택하였다. 얻어진 화상은 화상의 질이 떨어져 단괴의 피복율을 계산하기에는 부적합하다. 따라서, 이 화상의 질을 높이기 위하여 여러 단계의 화상개선 방법을 수행하였다. 화상개선을 위한 흐름도를 Fig. II-27에 나타내었다.

35 mm의 흑백필름으로 촬영된 화상의 원판 필름을 필름스캐너에서 positive 영상으로 전환하여 입력하였다. 이 화상을 화상분석 프로그램을 이용하여 24비트 화상으로 전환한 후 CMYB (Cyan-Magenta-Yellow-Black) 화상으로 색 분해과정을 거쳤다. 각각의 화상에 대하여 contrast 조절을 하였다. 단괴와 퇴적물과의 뚜렷한 구별을 위하여 윤곽선 추출 필터와 메디안필터를 사용하였다. 이 보정된 각각의 CMYB 화상을 색조합을 하였다. 합성된 화상을 최대 배경 값을 이용하여 이치화하였다.

이 개선된 이치화 화상에 대하여 분석한 전체화사의 넓이에 대한 단괴의 면적을 나타내는 면적율을 계산하였다. 이러한 면적율은 다음과 같은 식에 대입하여 그 부존율을 구하였다.

$$\text{망간단괴 부존율(kg/m}^2\text{)} = 0.25 \times \text{망간단괴 피복율(\%)}$$

이 식은 KODOS93-1 지역에서 FFG 과 CFG에 의해 채취한 망간단괴의 중량과 면적율을 회귀분석하여 얻은 경험식이다 (Fig. II-28).

### 제 3 절 결 과

KODOS93-1 지역중 심해저카메라를 운용하여 얻은 화상을 분석하고, 3.5 kHz의 SBP, 12.4 kHz의 Echosounder의 진폭값, sampling time, 수심, 위치값, 음파투명층의 두께와 그 위치에 해당하는 정지화상에서 얻은 부존율을 다음의 Table 1.에 나타내었다.

Fig. II-29와 30에서 음파투명층의 두께와 부존율과의 상관관계를 살펴보면 음파투명층이 존재하는 경우 반비례하는 경향을 보이고 있다. 음파투명층이 존재하지 않거나 그 층이 두꺼운 경우 단괴의 피복율이 현저히 떨어지고 있음을 알 수 있다. 부존율과 3.5 kHz의 관계를 살펴보면 두 가지의 양상을 나타낸다. 망가단괴가 퇴적물위로 노출되어 나타나는 지역(Fig. II-29 및 30 의 3.45-5.15 지역)에서의 부존율과 3.5 kHz의 진폭은 좋은 상관관계를 보인다. 그러나 단괴가 퇴적물에 묻혀 있는 정도가 큰 지역(Fig. II-29 와 30의 5.25-7.05)의 경우 단괴가 퇴적물에 묻혀 단괴의 부존량을 정확히 판별되지 않은 영향을 배제할 수 없다.

이러한 관계는 Jeong (1993) 그리고 Usui (1994)의 연구결과와도 일치한다. 음파투명층의 두께가 50 m 이하인 경우 단괴의 부존량은 그 두께와 역비례하며 음파투명층의 두께가 20-40 m인 경우 부존율이 가장 높았다 (Jeong, 1993, Fig. 5-5).

3.5 kHz와 12.4 kHz의 비를 도시하여 보면 각각의 경우와 부존율을 비교한 것보다 좋은 상관관계를 가지며 변화양상이 일치하는 경향을 보인다 (Fig. II-30). 퇴적물에 단괴가 묻혀 있는 경우(Fig. II-30의 5.25-7.05)는 실지 부존량보다 심해저 카메라의 화상에서 단괴의 부존량이 적게 평가된 것으로 생각된다.

## 제 4 절 결 론

망간단괴의 음파특성을 이용한 다중 주파수탐사법의 응용을 위한 기초이론의 고찰하고, 심해저카메라의 화상을 분석하였다. 또한 3.5 kHz 와 12.4 kHz 음파신호의 진폭과 그 비, 음파투명층의 두께, 부존율, 심도와 부존율과의 상관관계를 추정 한 결과는 다음과 같다.

1. 망간단괴의 음향특성은 산란대신 반사의 경우로 생각할 수 있으며 질량피복율은 합성반사계수로 계산될 수 있다.
2. 심해저카메라에서 획득한 화상자료로부터 망간단괴의 부존율을 계산할 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$\text{망간단괴 부존율(kg/m}^3\text{)} = 0.25 \times \text{망간단괴 피복율(\%)}$$

3. 망간단괴의 부존율은 3.5kHz와 12.4 kHz의 비와 좋은 상관관계를 보이며 퇴적물에 의한 단괴의 피복도가 적은 경우 두 주파수의 비로써 부존율의 추정이 가능할 것으로 사료된다.
4. 퇴적물의 단괴 피복도가 큰 경우 심해저카메라의 화상으로 부터 부존율의 추정은 화상분석처리 기술의 개발(단괴의 형태 및 크기 모형화작업)로 가능할 것으로 생각된다.





## 참고 문헌

- 상공자원부, 1993, '93 심해저 광물자원탐사 용역 보고서. I. 실향역 탐사. 496p.
- Anderson, A. L., 1950, Sound scattering from a fluid sphere. *Journal of the Acoustical Society of America*, 22: 426-431.
- Clay, C. S., and H. Medwin, 1977, *Acoustical oceanography : principles and applications*. John Wiley & Sons, New York. 544p.
- Faran, J. J., 1951, Sound scattering by solid cylinders and spheres. *Journal of the Acoustical Society of America*, 23: 426-431.
- Hickling, R., 1962, Analysis of echoes from a solid elastic sphere in water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 34: 1582-1592.
- Jeong, K. S., 1993, Sedimentary processes and formation of manganese nodules in the Korea Deep Ocean Study (KODOS) area, western Clarion-Clipperton zones, northeast equatorial Pacific. Ph.D. Thesis, Seoul National University. 300p.
- Love, A. E. H., 1944, *The Mathematical theory of elasticity*. Dover Publications, Inc., New York. 141p.
- Ma, Y., 1982, Acoustic scattering analysis for remote sensing of manganese nodules. Ph.D. thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- Magnuson, A. H., 1975a, Acoustic response in a liquid layer overlying a multilayered visco-elastic half-space. *Journal of Sound and Vibration*. 43: 659-669.

- Magnuson, A. H., 1975b, Acoustic reponse in a liquid overlying a homogeneous visco-elastic half-space. *Journal of the Acoustical Society of America*, 57: 1017-1024.
- Magnuson, A. H., 1983, Manganese nodule abundance and size bottom : Reflectivity measurements. *Marine Mining*, 4: 265-296.
- Magnuson, A. H., K. Sundkist, Y. Ma., and K. Smith, 1981 Acoustic sounding for manganese nodules. *Offshore Technology Conference (OTC-4133)*. Houston, Texas, 147-161.
- Magnuson, A. H., K. Sundkist, Y. Ma., D. Riggins, and R. Sen, 1982, Remote acoustic sensing of manganese nodule deposits. *Offshore Technology Conference (OTC-4260)*, Houston, Texas, 431-444.
- Morita, J., 1982, Technical information on multi-frequency exploration system (MFES). Sumitomo Metal Mining Co., Ltd., Tokyo, Japan.
- Morse, P. M., and H. Feshbach, 1953, *Methods of theoretical physics, part II*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1766p.
- Smith, K., 1981, Properties of oceanic manganese nodule fields relevant to a remote acoustical sensing system. M.S. Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- Sundkist, K. E., 1982a, Wavespeed measurements in manganese nodules. *Marine Mining*, 4: 297-304
- Sundkist, K. E., 1982b, Size distribution of manganese nodules. *Marine Mining*, 4: 305-316.
- Usui, A., 1994, Manganese nodule facies in the western part of the Penrhyn Basin, south Pacific. *Geological Survey of Japan Cruise Report No. 23*. 87-163.

## 제 3 장

### 지형분석을 위한 S/W 개발



## 요 약

해저지형 분석시 대부분 객관적인 자료없이 프로파일상에 나타나는 지형모습을 상대적으로 비교하는 정성적인 방법을 사용하고 있으며, 정량적분석으로는 경향면 분석과 같은 통계적 방법이 사용되고 있다. 그러나 이같은 방법으로는 지역간의 대략적인 지형경향성의 유사성 유무만을 알 수 있을뿐 지형상태의 특성을 지시하는 요인들에 관한 자료를 얻을 수 없으므로 지역별 지형특성 정량화 및 이를 통한 지역간의 지형비교라는 관점에서 볼 때 적용의 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 수심측정기를 통해 입수되는 수심자료를 사용하여 조사지역의 지형특성을 구성하는 요인들을 정량화하는 프로그램을 작성하고자 하였다.

지형특성을 구성하는 요인들로 1) 평균수심, 2) 해저면의 평균경사도, 3) 해저면의 경사도별 분포, 4) 경사구간 별 평균수심, 5) 경사구간별 평균수평거리, 6) 해저면 기폭의 평균표고차, 및 7) 해저면 기복점의 수를 사용하였으며, 실제 적용시 해저지형을 정량화하는데 이들 요인들이 적절히 사용되어 질 수 있음이 밝혀졌다.

그러나 본 프로그램을 통한 지형분석은 분석조건에 따라 결과가 달라질 수 있으므로 분석지역에 대하여 사전에 충분한 검토작업이 선행되어야 하는 제약이 있으며, 아울러 분석조건을 달리하여 얻은 결과를 상호 비교함으로써 보다 정확한 분석을 수행할 수 있다.



## 제 1 절 서 론

해양탐사를 수행함에 있어 대상지역에서 수집되는 수심자료는 해저지형을 파악하는데 필요한 가장 기본적인 자료라할 수 있다. 따라서 정확한 해저지형의 상태를 규명하기 위하여 많은 정밀한 수심측정기기들이 개발되어 왔다.

한편, 수심측정기기의 발전에도 불구하고 수집된 수심자료들을 사용하여 조사지역의 해저지형을 분석하는데는 단지 기록장치에 기록되는 해저면의 프로파일상에 나타나는 지형의 모습을 정성적으로만 분류, 평가하는데 그치고 있다. 따라서 지역간의 해저지형 비교시에도 객관적인 자료의 비교 없이 프로파일상에서 보여지는 자료만을 사용하는 정성적 방법에 의존하고 있다. 그러나 정량적 비교를 위한 분석기법 개발의 필요성이 대두됨에 따라 지역의 경향면 분석을 통해 얻은 상관계수를 상호 비교함으로써 유사성의 유무를 판정하는 통계적인 방법(Merriam et al., 1966; Davis, 1973)이 개발되었다. 그러나 이와같은 방법으로는 단순히 상대적으로 비슷한 크기를 갖는 지역간의 대략적인 지형경향성의 유사성 유무만을 밝힐 수 있을뿐 해저면의 경사각, 표고차, 해저분지의 크기 등 지형상태의 특성을 지시하는 요인들에 관한 자료를 얻을 수 없으므로 지역별 지형특성의 정량화 및 이를 통한 지역간의 지형비교라는 관점에서 볼때 적용의 한계를 보여주고 있다.

본 연구에서는 현재 흔히 사용되는 수심측정기를 통해 입수되는 수심자료를 이용하여 조사지역의 지형특성을 구성하는 요인들을 정량화하는 프로그램 개발을 시도하였다. 따라서 본 프로그램에서 얻은 지형구성 요인들의 정량화된 값들로서 조사지역의 지형상태를 파악할 수 있도록 하였으며 아울러 비교대상지역에서 산출된 값과의 비교를 통해 차이점을 분석할 수 있도록 하고자 하였다. 그러나 본 프로그램을 통해 얻어지는 지형구성요인들의 정량값은 분석에 사용된 전체 자료지역의 평균값을 나타내는 것이므로 아무

런 사전작업 없이 단순히 임의로 설정한 지역의 자료를 사용하여 분석을 실시하였을 경우 실제의 지형상태와는 상이한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구결과를 적용하기 위해서는 먼저 분석대상지역의 전반적인 지형분포를 기록장치를 통해 기록되는 해저면의 프로파일을 이용하여 지형상태에 따른 대략적인 구역을 설정한 후 본 프로그램을 통해 각 구역별 지형특성을 정량화시켜야하며 또한 대략적인 구역설정 과정에서 발생될 수 있는 오차는 시행착오의 과정(try and error method)을 통해 줄여야하는 분석기법상의 제약을 가지고 있다. 참고로, 본 프로그램은 C-language를 사용하여 작성하였으며 컴파일러로는 Turbo C 2.0을 사용하였음을 밝혀둔다.



## 제 2 절 지형분석에 사용되는 자료

수심측정에 일반적으로 사용되는 장비로는 한방향의 음파를 사용하여 수심을 측정하는 단일빔음향측심기(single-beam echosounder)가 있다. 그러나 이와같은 음향측심기로는 조사측선을 따라 측정된 2차원적인 수심자료만을 얻을 수 있는 관계로 조사해역의 수심도 작성시 측선간의 간격에 따라 정밀도가 달라진다. 따라서 정밀도를 높이기 위해서는 측선간의 간격을 좁혀야 하므로 광역해역조사에는 많은 시간이 소요된다. 이와같은 단점을 보완하기 위하여 다중빔음향측심기(multi-beam echosounder)가 개발되었다. 최근 개발되어 사용되는 Seabeam과 같은 다중빔음향측심기는 측선상의 수심만을 측정하는 단일빔음향측심기의 단점을 보완하여 측선을 따라 일정한 폭(width)내에 포함되는 지역의 수심을 동시에 연속적으로 측정할 수 있도록 함으로서 신속하게 넓은지역을 조사할 수 있으며 관련자료들을 디지털형태로 수신할 뿐아니라 수심자료의 경우 등고선으로 표시된 3차원적인 도면상태로 표시하여준다. 이와같은 결과는 단일빔음향측심기를 사용하였을 때에 비해 보다 정밀하게 지형의 분포상태를 보여주는 관계로 비교적 넓은지역의 지형특성을 쉽게 이해할 수 있도록 한다. 그러나 이와같은 잇점에도 불구하고 고가의 장비가격으로 인하여 일반화되지 않고 있다.

본 연구에서 사용되는 지형분석용 프로그램은 현재 사용되고있는 단일빔 또는 다중빔음향측심기를 통해 입수되는 디지털 수심자료 및 위치정보를 사용하여 지형특성을 이루는 요인(factor)들의 값을 계산하도록 구성되었다(Fig. 1). 한편, Seabeam과 같은 다중빔음향측심기를 통해 입수되는 수심자료는 단일빔음향측심기와는 달리 여러개의 음파수신장치를 통해 복수의 수심자료들이 동시에 입력되므로 본 프로그램을 사용하기 위해서는 이들 가운데서 측선을 따라 수신되는 자료만을 후처리(post-processing)하여 따로 분리해서 사용하여야 한다.

## 제 3 절 자료 처리

해저지형에 관한 정보는 연속적으로 측정된 수심자료 및 측정위치에 관한 자료를 종합함으로써 알 수 있다. 따라서 지형정보의 정확성은 측심위치간격과 수심자료의 정밀도에 따라 차이를 보이게 된다.

### 1. 측심위치 간격

측심위치간격은 Table 1 에서 보여지는 것처럼 측정기기의 자료수신 간격과 선박의 속도에 따라 달라지므로 조사지역의 범위 및 조사목적에 따라 적절히 조절할 수 있다. 그러나 일반적으로 수심측정기는 기기의 상태 및 조사선박의 상태를 고려하여 자료수신간격을 일정하게 고정시켜 사용하고 있으며 조사시 선박의 속도 역시 조사비용 및 수심측정기의 상태를 고려해야 함으로 일정한 범위이내에서만 속도조절이 가능하다.

### 2. 이상치 제거를 위한 수심자료 검정(filtering)

일반적으로 측정장치를 통해 입수되는 수신신호는 기기내에서 제어되나 때로 선체의 흔들림 또는 해황상태 등 수신상태의 불량에 기인하여 수심측정기에 이상값(error data)이 포함되는 경우가 있으므로 정확한 분석을 위해서는 먼저 이와같은 이상값을 제거하는 단계를 거쳐야 한다.

수심측정지점(data point)간의 거리는 Table 1에서 보여지듯이 조사선의 속도 및 자료선택간격에 따라 달라진다. 따라서 먼저 이상값 제거를 위한 자료검색후 조사지역의 특징 및 조사목적에 따라 측정지점간의 거리를 지정하여 이를 기준으로 등간격으로 자료를 취하여 분석에 사용할 수 있도록 프로그램을 작성하였다 (Appendix 1).

Fig. 2는 프로그램의 알고리즘을 보여주는 예로 연속적으로 측정된 수심 자료로 부터 일정한 시간간격으로 자료를 취합하는 과정을 보여주고 있다. 즉, 이상치 제거를 위하여 일정한 수(홀수개)의 연속된 수심값을 취하여 이들값중 중앙값(median)을 대표값으로 설정함으로써 이상치를 제거하고자 하였다. 본 프로그램(Appendix 1)에서는 7개의 연속된 수심값에서 중앙값을 취하도록한바, 이는 자료수신간격이 1초, 선속이 8노트인 경우를 가정할때 첫번째 자료가 수신된 지점에서 부터 일곱번째 자료가 수신된 지점까지의 거리는 약 30 m 이며 각각의 자료간격은 4.12 m 이다. 그러나 중앙값을 얻기위하여 사용하는 연속된 수심자료의 갯수는 앞서 언급한 바와같이 측정 기기의 자료수신 간격과 선박의 속도, 조사지역의 범위 및 조사목적에 따라 달라질 수 있으므로 이를 조정하기 위해서는 실행프로그램에서 다음과 같이 이값을 바꿔주어야 한다.

Input the parameter of filtering?(odd)

7 <- - - - - 7개인 경우

일반적으로 해황 또는 수심측정기기의 이상상태에 기인한 값은 Fig. 3a에서 보여지듯이 주변의 수심과는 전혀 상이한 수심을 보이며 이같은 좁은 범위에서의 급격한 수심변화는 자연상태에서는 기대할 수 없으므로 이와같은 수심값은 위에서 설명한 중앙값을 선택하는 과정에서 제거(Fig. 3b)되어 질 수 있다. 한편, 이상의 과정에서 얻은 중앙값은 연속된 홀수개의 수심값중 가운데 지점의 수심값으로 설정하였다. 즉, 7개의 연속된 수심값을 사용하였을 경우 중앙값은 4번째 자료를 측정된 지점의 수심값으로 사용하게 된다 (Fig. 2).

## 제 4 절 지 형 요 인

해저면상에서 발달하는 해저평원, 해저능, 해저산, 해구 등 해저지형의 특징은 수심, 해저면의 경사도 및 이들의 연속된 상태, 표고차 등 공간적 배열상태를 지시해주는 요인들을 종합함으로써 구분되어질 수 있다. 따라서 해저지형의 정량화를 위하여 지형의 특성을 이루는 요인으로 다음의 7 가지 항목을 설정하여 각 항목별 값을 수심자료로 부터 계산하기위한 프로그램을 작성하였다 (Appendix 2).

- 1) 평균수심
- 2) 해저면의 평균경사도
- 3) 해저면의 경사각도별 분포
- 4) 경사구간별 평균수심
- 5) 경사구간별 평균수평거리
- 6) 해저면 기복의 평균표고차
- 7) 해저면 기복의 발달정도

### 1. 평균수심

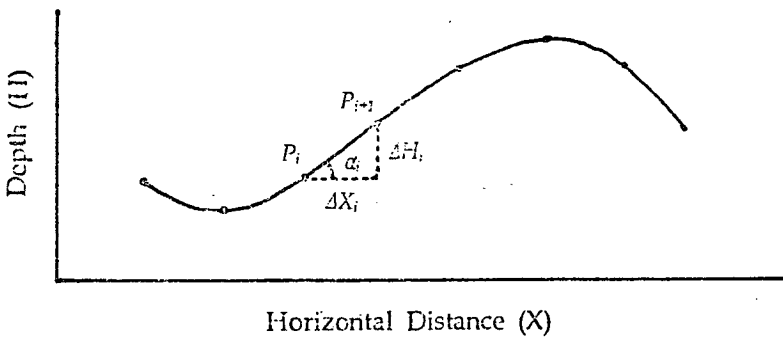
수심은 해저지형 판독에 가장 기본이 되는 자료로 분석하고자 하는 지역에서 측정된 모든 수심자료의 평균한 값을 사용하였다. 평균수심값은 지형의 요철정도, 해저산의 분포, 대상지역의 크기 등 여러가지 주변요인에 따라 계산된 값의 의미정도가 달라질 수 있으므로 지형비교에 있어서 가장 초보적인 자료로 사용된다.

## 2. 해저면의 경사각

해저면상에서 발달하는 해저지형의 특징은 해저면의 경사도 및 이들의 연속된 상태로서 판단할 수 있다. 따라서 이같은 요인들을 측정하기 위하여 연속적으로 측정된 측심위치 및 수심자료를 사용하여 다음과 같은 지형 요인들을 계산하였다.

### (1) 해저면의 평균경사도, 경사각도별 분포 및 평균수심

해저면의 경사구배는 해저지형을 판별하는 기본적인 요인이므로 경사각도별 분포로서 해저면의 상태를 파악할 수 있다. 해저면 경사각계산에는 앞서 설명한 수심자료 검정을 거친 자료를 사용하였으며, 두지점간의 거리는 두지점의 위치좌표(경위도 좌표)로부터 Mercator 도법을 사용하여 계산하였다. 따라서 두지점간의 거리 및 수심차이를 알 수 있으므로 이로부터 평균경사각 및 경사구간별 평균수심을 계산하였으며, 이를 도식화하면 다음과 같다.



$$\Delta H_i = H_{i+1} - H_i$$

$$\Delta X_i = X_{i+1} - X_i$$

$$\alpha_i = \arctan \frac{\Delta H_i}{\Delta X_i}$$

여기서,  $\Delta H_i$  는 두지점간의 수평거리,  $\Delta X_i$  는 두지점간의 수심차이,  $\alpha_i$  는 경사각을 나타낸다.

계산된 경사각자료들은 경사각의 구간간격(step of angle: a)별로 구분 (0-a. a-2a. 2a-3a. 3a-4a. ....) 취합하여 이들의 분포를 백분률로 표시하였다. 한편, 경사각의 구간간격 a는 목적에 따라 아래와 같이 실행프로그램에서 선택할 수 있도록 하였다.

Q> Input interval degree(int)?

3 <- - - - - - - - - - - - - - - - 3° 인 경우

한편, 평균경사도 및 경사구간별 평균수심은 구간별 경사도 계산시 사용된 수심측정지점에서의 경사도 및 수심값을 사용하여 계산하였다.

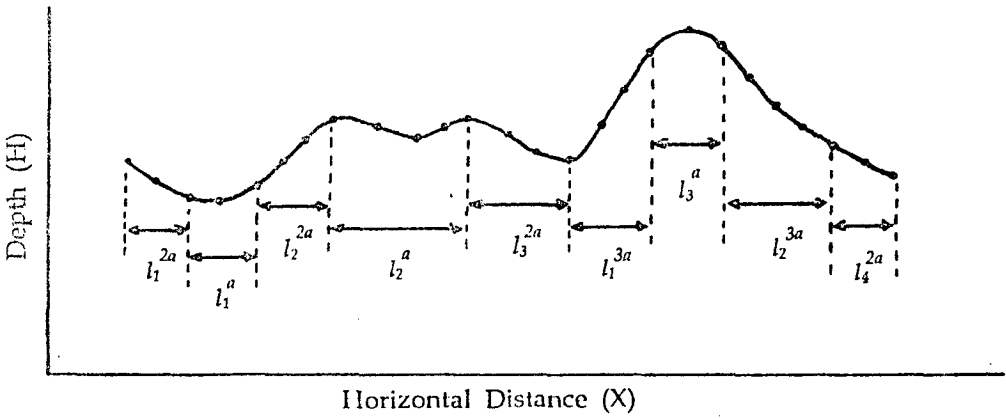
### (2) 경사구간별 평균수평거리

경사구간별 평균수평거리는 그림에서 보여지는 것처럼 연속된 동일한 구간간격에 해당하는 지점간의 거리(l)를 모두 합하여 이를 빈도수로 나누어 평균값을 산출한 것이다. 이를 도식화하면 다음과 같다.

$$0^\circ - a^\circ \text{ 구간의 평균거리, } l^a = \left( \sum_{i=1}^n l_i \frac{a}{i} \right) \frac{1}{n^a}$$

$$a^\circ - 2a^\circ \text{ 구간의 평균거리, } l^{2a} = \left( \sum_{i=1}^n l_i \frac{2a}{i} \right) \frac{1}{n^{2a}}$$

$$2a^\circ - 3a^\circ \text{ 구간의 평균거리, } l^{3a} = \left( \sum_{i=1}^n l_i \frac{3a}{i} \right) \frac{1}{n^{3a}}$$



이와 같이 계산된 경사구간별 평균수평거리는 해저지형별로 이들의 크기를 짐작할 수 있다. 예를들면 해저평원의 경우 경사각이 일반적으로  $3^\circ$  이하이므로  $0^\circ - 3^\circ$  구간의 평균수평거리는 분석하고자하는 축선상의 지역 내에 분포하는 해저평원의 평균크기를 나타내어준다. 한편, 심해저에 분포하는 망간단괴와 관련된 해저지형자료의 경우 일반적으로 경계성이 있는 즉, 채광가능한 지역은 평균경사면이  $6^\circ$  이내인 지역으로 제한되어 있으므로 이같은 지역의 분포를 파악하기 위해서도 이상의 자료는 사용되어질 수 있다.

### 3. 해저면의 기복

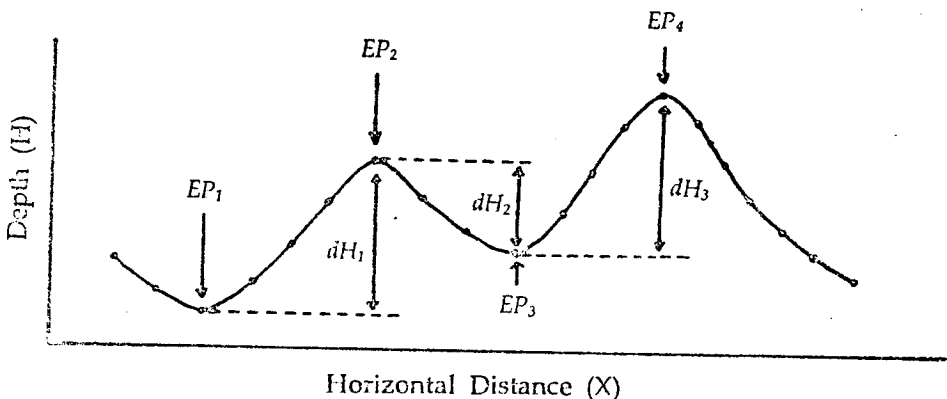
해저면의 기복정도(relief)는 해저면의 경사도와 함께 해저면의 특징을 규정하는 또다른 요인이다. 이와같은 해저면의 기복상태는 일정지역에 분포하는 해저면기복의 수직 및 수평방향으로의 발달정도 즉, 해저면기복의 표고차 및 이들의 발달정도로 특징지워진다. 따라서 본 프로그램에서는 이와같은 해저면기복을 특징지우는 두가지 요인을 아래와 같이 계량화하여 분석에 사용하고자 하였다.

#### (1) 해저면 기복의 평균표고차

연속적으로 측정된 수심자료에서 보여지는 해저면기복의 정점과 곡점은 수심측정지점 사이에서 계산되는 경사각의 변화에서 찾을 수 있다. 즉, 곡점의 경우 경사각이  $\ominus$  값에서  $\oplus$  값으로 변환되는 지점이며, 반대로 정점의 경우 경사각이  $\oplus$  값에서  $\ominus$  값으로 변하는 지점이다. 따라서 기복의 표고차는 이와같은 곡점과 정점에서 측정된 수심의 차이로서 얻을 수 있으며 이를 도식화하면 다음과 같다.

$$dH_i = |H_{EP_{i+1}} - H_{EP_i}|$$

$$VR = \left( \sum_{i=1}^{n-1} dH_i \right) \frac{1}{n-1}$$





여기서,  $dH_i$ 는 기복의 표고차이며,  $H_{Epi}$ 는 첫번째 기복점의 수심,  $H_{Epi+1}$ 은 다음번 기복점에서의 수심,  $VR$ 은 평균표고차,  $n$ 은 기복점의 갯수를 나타낸다.

그러나 해저평원이라 할지라도 실제 해저면은 정도의 차이는 있으나 해저능지역에서처럼 굴곡을 보여주고 있다. 따라서 이같은 점을 고려하여 본 프로그램에서는 일정한 표고차 이상을 보여주는 기복만을 계산에 사용하도록 작성하였으며 이같은 사용하고자 하는 목적에 따라 달리 아래와 같이 실행프로그램에서 설정할 수 있도록 하였다. 아래 예의 경우 10 m 이하의 표고차를 보여주는 요철면은 기복으로 간주하지 않으므로 계산에 포함시키지 않음을 뜻한다.

Q> Input the parameter of extreme points(ex 10 m)?

10 <- - - - - - - - - - - - - - - 10 m인 경우

## (2) 해저면 기복의 발달정도

해저면 기복의 발달정도는 일정한 단위거리내에 분포하는 기복점의 수로서 측정되어 질 수 있으며, 단위거리는 분석하고자 하는 지역의 크기 및 목적에 따라 달라질 수 있으므로 이 역시 실행프로그램에서 아래와 같이 달리 설정할 수 있도록 하였다.

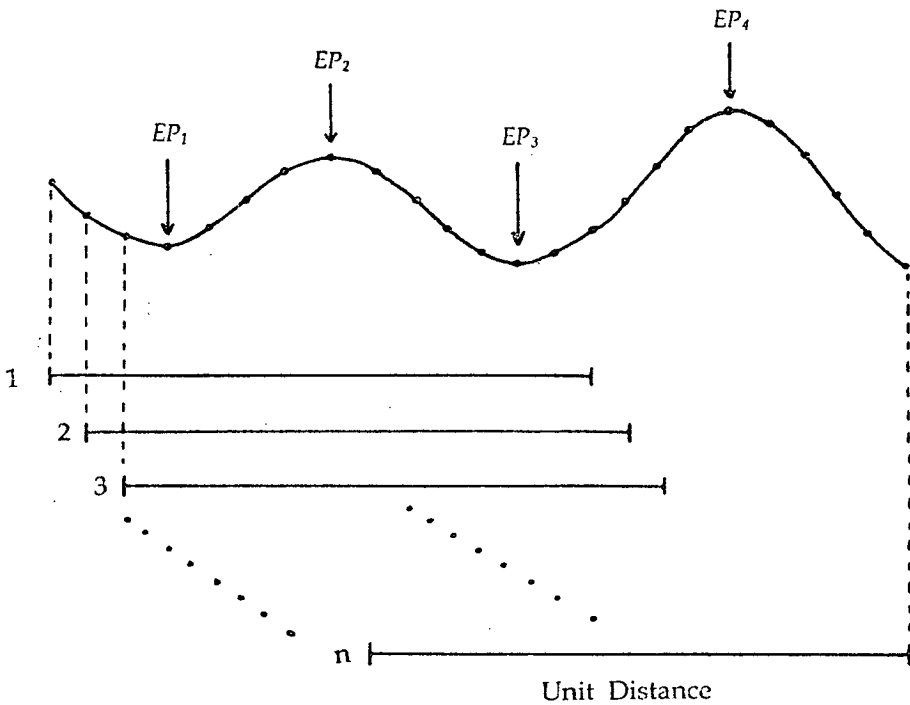
Q> Input the parameter of horizontal difference(ex 10000 m)?

10000 <- - - - - - - - - - - - - - - 10 km인 경우

한편, 기복의 발달정도를 계산하기 위하여 사용방법을 도식화하면 다음과 같다.

$$HR = \left( \sum_{i=0}^n N_i \right) \frac{1}{n}$$

여기서, HR은 단위거리내에 분포하는 기복점의 평균수, n은 계산에 사용된 단위거리의 갯수,  $N_i$ 는 각각의 단위거리내에 분포하는 기복점의 수를 나타낸다.



## 4. 분석방법

### 1) 분석상의 제약

조사지역의 해저지형 분석에 본 프로그램을 적용하는데는 앞서 서언부분에서 언급한 바와 같이 몇가지 제약이 있다.

첫째, 본 프로그램은 먼저 조사지역의 지형을 해저면 프로파일 자료로서 지형상의 특징별로 구분(예: 해저평원, 해저산, 해저능 지역)한 후 각각의 구분된 지역별로 지형특성을 규정하는데만 사용될 수 있도록 작성되었다. 그러나, 지형에 따른 지역구분은 전체지역의 크기, 자료의 수, 분석목적에 따라 달라질 수 있으므로 본 프로그램을 적용하여 분석하기전에 이와같은 점을 충분히 고려하여 지역을 구분함으로써 분석의 효율성을 높일 수 있다.

둘째, 본 프로그램에 사용한 지형분석에는 동일한 방향의 측선에서 입수한 수심자료들을 사용해야 한다. 예를 들면, 분석하고자 하는 지역내에 동서방향 및 남북방향의 측선에서 입수한 자료들이 함께있는 경우, 측선방향별로 동서방향, 남북방향의 자료들을 구분하여 분석해야 하며 이렇게 함으로서 분석의 일관성을 유지할 수 있다. 한편, 이와같이 분석하고자 하는 지역내에 두방향 이상의 측선자료가 있는 경우, 분석결과로서 해저지형의 방향성, 해저분지의 평균크기 등의 지형특성을 알 수 있다. 이점은 지역간 비교시에도 동일하게 적용된다.

### 2) 분석의 예

태평양 심해저면에 발달하는 해저평원 및 해저능지역에서 획득한 자료를 사용하여 얻은 결과(Table 2, Appendix 3)와 이들이 프로파일상에서 나타나는 지형모습(Fig. 4)과의 비교를 통해 실제모습에서의 차이점이 본 프로그램을 사용하여 얻은 지형자료값에 어떻게 반영되는지 보고자 하였다. 참고로 분석에 사용된 수심값은 1분간격으로 측정된 것으로 측심지점간의 간격은

약 250 m 이며, 분석조건으로 경사는 3도 간격, 최저기복값은 10 m, 기복점의 수는 10 km를 기준하여 산출하였다.

Table.2에서 나타나는 바와같이 각기 다른 3 지역에서 얻은 지형값으로부터 서로의 유사성 및 상이점을 유추할 수 있다. (A) 지역과 (C) 지역의 경우 평균경사각이 매우 낮고, 0-3 도의 경사면의 분포율이 매우 높으며, 아울러 평균수심이 비슷한점으로 보아 이지역은 해저평원에 해당하는 지역으로 분류할 수 있다.

그러나, 이와같은 유사성에도 불구하고 지형상의 차이점을 몇몇 다른항목에서 찾을 수 있다. 즉, 0 - 3 도의 경사면지역의 평균연장거리, 해저면기복의 평균표고차, 기복점의 평균갯수에서 보여지는 차이점은 비록 이들지역이 해저평원지역임에도 불구하고 지형의 발달양상에 차이가 있음을 나타내어 준다. (A) 지역의 경우 (C) 지역에 비해 가파른 경사면을 갖는 지역이 분포하고 있으며, 이로 인하여 평균표고차의 값이 높게 나타나는 반면, 기복점의 수는 (C) 지역에 비해 적게 나타난다. 이같은 점으로 미루어 (A) 지역의 경우 대부분이 평탄한 지역이나 부분적으로 몇개의 소규모 해저능이 발달한 지역임을 알 수 있다.

이와는 달리 (C) 지역은 가파른 경사면을 갖는 지역이 거의 분포하지 않고 있으며, 또한 평균표고차의 값이 낮은 사실로 보아 전반적으로 (A) 지역에 비해 평탄한 지역임을 알 수 있다. 그러나 (C) 지역에서 분포하는 기복점의 수가 (A) 지역에 비해 많은점으로 보아 (C) 지역에 발달하는 해저평원은 (A) 지역에 비해 단속적으로 분포하며, 평원과 평원사이는 소규모의 언덕과 같은 경사가 있는 지역으로 연결되어 있음을 알 수 있다. 이같은 점은 0 - 3도 경사지역의 평균거리에서도 알 수 있다. 즉, (C) 지역의 경우 평균거리가 약 774 m 인 반면, (A) 지역의 경우 1,795 m 인 점으로 볼때 (C) 지역에서 분포하는 분지의 크기가 (A) 지역에 비해 훨씬 작다는 사실을 알 수 있다.

한편, 각 경사구간별 평균수심값을 보면 일반적으로 (A), (B) 지역 모두 평균수심값과 큰 차이를 보여 주지 않으므로 이는 두지역 모두 해저평원지역임을 다시한번 확인해 준다. 그러나 (A) 지역의 경우 경사도가 낮은구간이 높은구간에 비해 수심이 깊으며 또한 평균수심값과 거의 비슷한 점은 앞서 언급한 바와같이 소규모의 해저능이 부분적으로 분포하기 때문이라는 해석과 일치하는 결과이다.

(B) 지역의 경우는 위에서 언급한 (A), (C) 지역과는 완전히 다른 지형상태를 보여주고 있다. 즉, 평균경사도, 경사구간별 분포, 평균표고차, 기복점의 수 등 거의 모든 부분에서 (A), (C) 지역에 비해 높은 값을 보여주고 있으며, 이는 (B) 지역이 매우 굴곡이 심한 해저면 즉, 해저능지역임을 나타내어 준다. 한편, (B) 지역의 경사구간별 평균수심값은 전체평균수심값과 비교시 차이가 매우 크며 이런 결과는 앞의 해석과 일치하고 있다.

이상의 결과를 종합하면, (A) 지역은 부분적으로 소규모의 해저능이 분포하는 해저평원지역이며, (C) 지역은 해저능이 거의 전무한 해저평원지역인 반면, (B) 지역은 전반적으로 해저능이 발달한 지역으로 해석된다. 이같은 분석결과는 Fig. 4의 해저면 프로파일과 비교해볼때 서로 잘 일치하고 있다.

이와같이 동일한 분석조건(경사면 분류간격, 최적기복값 등)에서 실시한 분석결과로서도 지형분류가 가능하나, 동일한 범주에 속하는 지형지역간의 비교시 지형특성에 따라 앞서의 분석조건을 달리 설정함으로써 새로운 상이점을 찾을 수 있다.

## 제 5 절 결 론

본 프로그램을 사용하여 해저지형을 분석한 결과, 지형특성을 구성하는 요인으로 설정한 1) 평균수심, 2) 해저면의 평균경사도, 3) 해저면의 경사각도별 분포, 4) 경사구간별 평균수심, 5) 경사구간별 평균수평거리, 6) 해저면 기복의 평균표고차, 7) 해저면 기복점의 수 등이 해저지형을 정량화하는데 적절히 사용되어 질 수 있음이 밝혀졌다.

그러나 본 지형분석 프로그램은 적용시 많은 제약을 가지고 있다. 특히 분석전에 지형에 따른 대략의 지역구분을 한후 각 지역별로 분석을 실시해야 하며, 분석하고자 하는 지역의 크기 및 사용하는 수심자료의 분포에 따라 분석조건을 달리해야한다. 한편, 프로그램을 통해 산출된 지형요인값은 각각으로는 별의미가 없으며, 모든 값들을 종합하여 상호관계를 비교함으로써 정확한 분석결과를 얻을 수 있다. 더구나 최종적으로 산출되는 지형요인값들은 분석조건에 따라 값이 달라질 수 있으므로 분석을 실시하기 전에 이점을 고려하여 분석조건을 설정해야하며, 아울러 분석조건을 달리 하여 얻을 결과를 상호 비교함으로써 보다 정확한 분석을 실시할 수 있다.

따라서 대상지역에 대하여 사전에 충분한 검토작업을 거친후 분석을 실행함으로써 본 프로그램이 가지고 있는 취약점을 보완할 수 있으며, 아울러 보다 정확한 분석결과를 얻을 수 있다.

## 참 고 문 헌

- 유 환 영, 정 성 민, 1993, Turbo C를 이용한 자료구조론. 상조사: 1-496.
- 전 응 섭, 1992, Turbo C 2.0: user's 편. 크라운출판사: 1-353.
- 황 희 응, 1992, Turbo C 2.0 Library Manual. 교학사: 1-1077.
- Davis, J. C., 1973, Statistics and Data Analysis in Geology. Wiley International Edition. 298-411.
- Kernighan, B. W. and D. M. Ritchie, 1978, The C Programming Language. Prentice-Hall: 1-272.
- Merriam, D. F. and P. H. A. Sneath, 1966, Quantitative comparison of contour maps. J. Geophys. Res. 71: 1105-1115.
- SeaBeam Instrument Inc., 1992, SeaBeam 2000 Bathymetric Swath Survey System Operation Manual (Prepared for KORDI). 1-92.
- Simrad Subsea, 1992, SIMRAD EA500 Hydrographic Echo Sounder Instruction Manual. 1.1-1.14, 2.1-2.89.
- Tyce, R. C., 1987, Deep Seafloor Mapping System - A Review. MTS Journal 20(4): 4-16.





Table 1. Interval of data points relating to the ship speed and bathymetric data receiving interval.

Ship Speed	Bathymetric Data Receiving Interval						
	1 sec	2 sec	5 sec	10 sec	15 sec	30 sec	60 sec
5 knot	2.57 m	5.14 m	12.86 m	25.72 m	38.58 m	77.17 m	154.33 m
6 knot	3.09 m	6.17 m	15.43 m	30.87 m	46.30 m	92.60 m	185.20 m
7 knot	3.60 m	7.20 m	18.01 m	36.01 m	54.02 m	108.03 m	216.07 m
8 knot	4.12 m	8.23 m	20.58 m	41.16 m	61.73 m	123.47 m	246.93 m
9 knot	4.63 m	9.26m	23.15 m	46.43 m	69.45 m	138.90 m	277.80 m
10 knot	5.14 m	10.29 m	25.72 m	51.44 m	77.17 m	154.33 m	308.67 m

Table 2. Results of analysis from three example areas. Out-put data print-outs of Area (A), (B), and (C) are listed in Appendix 3.

Area	(A)	(B)	(C)
Avg. slope angle	2.1 °	7.0 °	1.5 °
% of slopes with 0-3 °	81.0 %	42.4 %	79.7 %
Avg. length of slopes with 0-3 °	1,795 m	549 m	774 m
Avg. depth	4,950 m	4,725 m	4,944 m
% of slopes with 3-6 °	13.0 %	17.7 %	16.5 %
Avg. length of slopes with 3-6 °	331 m	284 m	205 m
Avg. depth	4,947 m	4,584 m	4,917 m
% of slopes with 6-9 °	4.2 %	10.1 %	3.8 %
Avg. length of slopes with 6-9 °	282 m	312 m	179 m
Avg. depth	4,913 m	4,461 m	4,984 m
% of slopes with 9-12 °	0.5 %	7.1 %	-
Avg. length of slopes with 9-12 °	233 m	265 m	-
Avg. depth	4,873 m	4,326 m	-
% of slopes with 12-15 °	0.5 %	9.1 %	-
Avg. length of slopes with 12-15 °	260 m	295 m	-
Avg. depth	4,912 m	4,635 m	-
% of slopes with 15-18 °	0.5 %	3.0 %	-
Avg. length of slopes with 15-18 °	260 m	305 m	-
Avg. depth	4,851 m	4,851 m	-
% of slopes with 18-21 °	-	4.0 %	-
Avg. length of slopes with 18-21 °	-	216 m	-
Avg. depth	-	4,738 m	-
% of slopes with 21-24 °	-	2.0 %	-
Avg. length of slopes with 21-24 °	-	219 m	-
Avg. depth	-	4,389 m	-
% of slopes with 24-27 °	0.5 %	1.5 %	-
Avg. length of slopes with 24-27 °	248 m	263 m	-
Avg. depth	4,866 m	4,058 m	-
% of slopes with 27-30 °	-	1.5 %	-
Avg. length of slopes with 27-30 °	-	214 m	-
Avg. depth	-	4,539 m	-
% of slopes with 30-33 °	-	-	-
Avg. length of slopes with 30-33 °	-	-	-
Avg. depth	-	-	-
% of slopes with 33-36 °	-	1.0 %	-
Avg. length of slopes with 33-36 °	-	265 m	-
Avg. depth	-	4,609 m	-
Avg. vertical difference	60 m	99 m	18 m
No. of hills and valleys in 10 km	5.47	11.14	7.42
Avg. depth	4,947 m	4,621 m	4,940 m
Length of lines	50.2 km	45.5 km	28.0 km

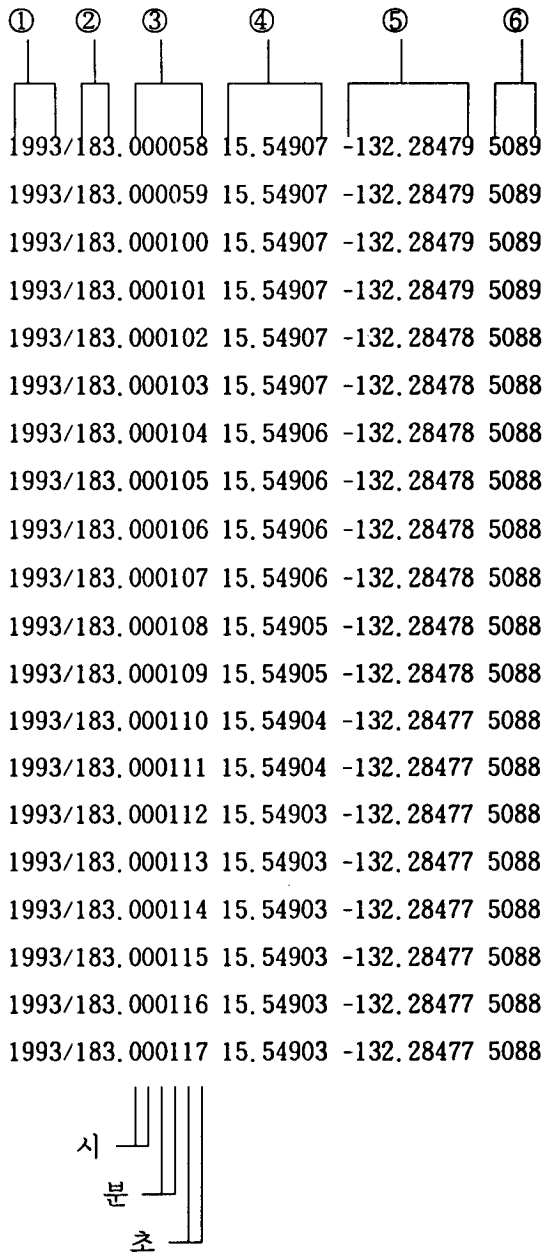


Fig. 1. Example of input data. ① year, ② Julian day, ③ time, ④ latitude, ⑤ longitude (west represented in  $\ominus$  value), ⑥ water depth (m).

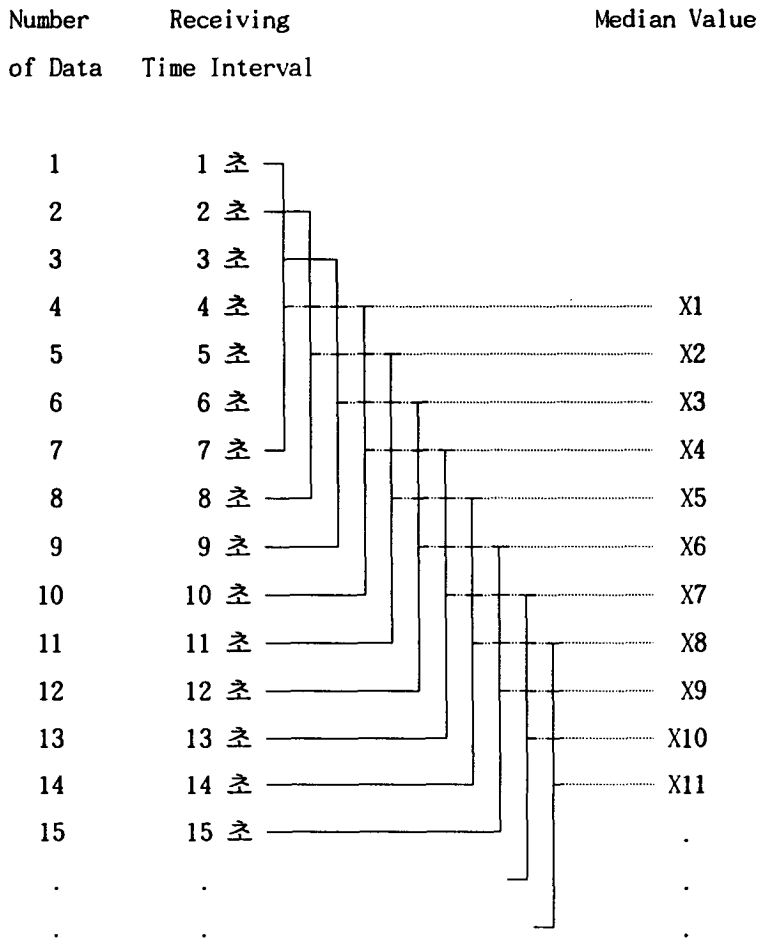


Fig. 2. Filtering method for eliminating mechanical error data of water depth.

Fig. 3. Example of bathymetric profiles showing (a) before filtering and (b) after filtering.

Fig. 4. Bathymetric profiles of three example areas; (A) abyssal plain with hills, (B) abyssal hills, and (C) abyssal plain. Results of analysis of Area (A), (B), and (C) are in Table 2.

Table II-1. Manganese nodule coverage (%) and abundance (kg/m<sup>2</sup>), water depth (m), 12.4 and 3.5 kHz amplitudes, slope (°) of seafloor, and thickness of acoustically-transparent uppermost sedimentary layer.

TIME (H.MM)	Coverage (%)	Abundance (kg/sq. m)	Depth (m)	A_12_4 amplitude	A_3_5 amplitude	Slope (°)	Acoustic trans- parent layer(m)
3.25	24.15	6.04	4909	221	408	1.08	14
3.30	10.43	2.61	4913	274	393	1.60	17
3.35	12.77	3.19	4916	242	473	1.13	20
3.40	22.08	5.52	4915	171	385	-0.32	20
3.45	21.89	5.47	4914	189	450	-0.25	20
3.50	25.99	6.50	4914	165	414	0.00	27
3.55	25.50	6.38	4915	78	345	0.27	24
4.00	20.44	5.11	4918	84	345	0.88	20
4.05	32.15	8.04	4921	93	545	0.96	17
4.10	36.94	9.24	4923	63	620	0.61	14
4.15	31.80	7.95	4925	64	374	0.58	20
4.20	23.29	5.82	4930	73	347	1.56	14
4.25	25.91	6.48	4933	83	434	0.80	10
4.30	26.57	6.64	4935	160	481	0.55	0
4.35	21.71	5.43	4936	66	211	0.26	0
4.40	24.33	6.08	4932	134	539	-0.96	0
4.45	20.68	5.17	4929	82	535	-0.86	7
4.50	27.36	6.84	4923	92	538	-1.31	10
4.55	27.67	6.92	4919	163	485	-1.06	0
5.00	23.66	5.92	4918	195	643	-0.29	0
5.05	23.89	5.97	4912	170	676	-1.46	7
5.10	22.09	5.52	4907	78	447	-1.61	14
5.15	15.25	3.81	4902	79	436	-1.37	20
5.20	10.85	2.71	4900	85	529	-0.49	27
5.25	13.15	3.29	4900	91	523	0.00	27
5.30	20.10	5.03	4899	119	589	-0.30	34
5.35	18.93	4.73	4895	143	658	-1.12	20
5.40	16.07	4.02	4890	104	511	-1.28	20
5.45	13.98	3.49	4884	182	690	-1.69	14
5.50	4.06	1.02	4879	166	584	-1.38	10
5.55	6.89	1.72	4871	113	529	-2.03	17

\* N.D. : Not Detect

Table II-1. (Continued)

TIME (H.MM)	Coverage (%)	Abundance (kg/sq. m)	Depth (m)	A_12_4 amplitude	A_3_5 amplitude	Slope (°)	Acoustic trans- parent zone(m)
6.00	7.22	1.80	4866	136	396	-1.16	15
6.05	4.70	1.17	4864	159	474	-0.57	27
6.10	1.86	0.46	4862	204	612	-0.51	20
6.15	6.31	1.58	4859	286	496	-0.78	20
6.20	8.53	2.13	4853	243	557	-1.53	14
6.25	4.02	1.01	4844	179	446	-1.93	0
6.30	7.32	1.83	4793	87	250	-12.30	0
6.35	2.85	0.71	4783	105	322	-2.04	0
6.40	5.56	1.39	4759	80	240	-4.44	0
6.45	5.86	1.47	4733	133	313	-5.27	0
6.50	5.54	1.38	4721	221	380	-2.79	N.D.
6.55	12.62	3.15	4510	86	133	-37.10	N.D.
7.00	8.55	2.14	4485	95	158	-4.11	N.D.
7.05	12.11	3.03	4470	95	163	-3.58	N.D.
7.10	16.52	4.13	4480	79	133	2.49	N.D.
7.15	14.81	3.70	4532	86	233	11.23	N.D.
7.20	13.93	3.48	4561	126	214	7.31	N.D.
7.25	17.20	4.30	4602	98	194	9.17	N.D.
7.30	18.31	4.58	4640	85	334	9.42	0
7.35	21.76	5.44	4638	164	656	-0.46	0
7.40	13.10	3.28	4638	143	423	0.00	0
7.45	16.94	4.23	4613	70	404	-5.83	0
7.50	7.48	1.87	4601	90	307	-2.82	N.D.
7.55	9.95	2.49	4596	116	430	-1.20	N.D.
8.00	13.30	3.32	4505	97	168	-20.30	N.D.

\* N.D. : Not Detect

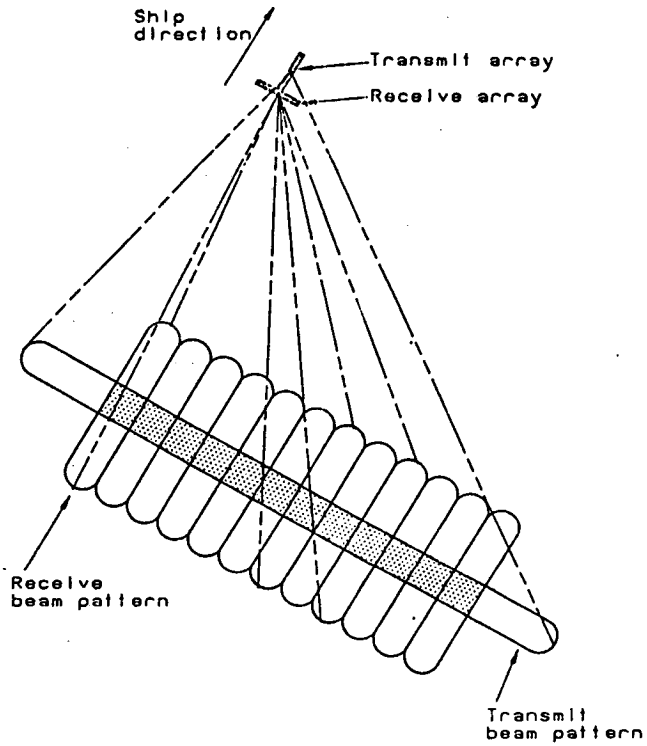
Table II-2. Interval of data points relating to the ship speed and bathymetric data receiving interval.

Ship Speed	Bathymetric Data Receiving Interval						
	1 sec	2 sec	5 sec	10 sec	15 sec	30 sec	60 sec
5 knot	2.57 m	5.14 m	12.86 m	25.72 m	38.58 m	77.17 m	154.33 m
6 knot	3.09 m	6.17 m	15.43 m	30.87 m	46.30 m	92.60 m	185.20 m
7 knot	3.60 m	7.20 m	18.01 m	36.01 m	54.02 m	108.03 m	216.07 m
8 knot	4.12 m	8.23 m	20.58 m	41.16 m	61.73 m	123.47 m	246.93 m
9 knot	4.63 m	9.26m	23.15 m	46.43 m	69.45 m	138.90 m	277.80 m
10 knot	5.14 m	10.29 m	25.72 m	51.44 m	77.17 m	154.33 m	308.67 m

Table II-3. Results of analysis from three example areas. Out-put data print-outs of area (A), (B), and (C) are listed in Appendix II-1.

Area	(A)	(B)	(C)
Avg. slope angle	2.1 °	7.0 °	1.5 °
% of slopes with 0-3 ° Avg. length of slopes with 0-3° Avg. depth	81.0 * 1,795 m 4,950 m	42.4 * 549 m 4,725 m	79.7 * 774 m 4,944 m
% of slopes with 3-6° Avg. length of slopes with 3-6° Avg. depth	13.0 * 331 m 4,947 m	17.7 * 284 m 4,584 m	16.5 * 205 m 4,917 m
% of slopes with 6-9° Avg. length of slopes with 6-9° Avg. depth	4.2 * 282 m 4,913 m	10.1 * 312 m 4,461 m	3.8 * 179 m 4,984 m
% of slopes with 9-12° Avg. length of slopes with 9-12° Avg. depth	0.5 * 233 m 4,873 m	7.1 * 265 m 4,326 m	- - -
% of slopes with 12-15° Avg. length of slopes with 12-15° Avg. depth	0.5 * 260 m 4,912 m	9.1 * 295 m 4,635 m	- - -
% of slopes with 15-18° Avg. length of slopes with 15-18° Avg. depth	0.5 * 260 m 4,851 m	3.0 * 305 m 4,851 m	- - -
% of slopes with 18-21° Avg. length of slopes with 18-21° Avg. depth	- - -	4.0 * 216 m 4,738 m	- - -
% of slopes with 21-24° Avg. length of slopes with 21-24° Avg. depth	- - -	2.0 * 219 m 4,389 m	- - -
% of slopes with 24-27° Avg. length of slopes with 24-27° Avg. depth	0.5 * 248 m 4,866 m	1.5 * 263 m 4,058 m	- - -
% of slopes with 27-30° Avg. length of slopes with 27-30° Avg. depth	- - -	1.5 * 214 m 4,539 m	- - -
% of slopes with 30-33° Avg. length of slopes with 30-33° Avg. depth	- - -	- - -	- - -
% of slopes with 33-36° Avg. length of slopes with 33-36° Avg. depth	- - -	1.0 * 265 m 4,609 m	- - -
Avg. vertical difference	60 m	99 m	18 m
No. of hills and valleys in 10 km	5.47	11.14	7.42
Avg. depth	4,947 m	4,621 m	4,940 m
Length of lines	50.2 km	45.5 km	28.0 km





**Figure 1. Cross-fan beam geometry.**

Fig. II-1. Onnuri SeaBeam 2000 system's cross-fan beam geometry showing that each transmission consists of 121 sonar ranges on a cross track bottom profile. Rho and theta to rectangle conversion of sonar data provides depth, backscattered amplitudes, and cross track distance from ship's track line for each of 121 beam points transmitted from seafloor.

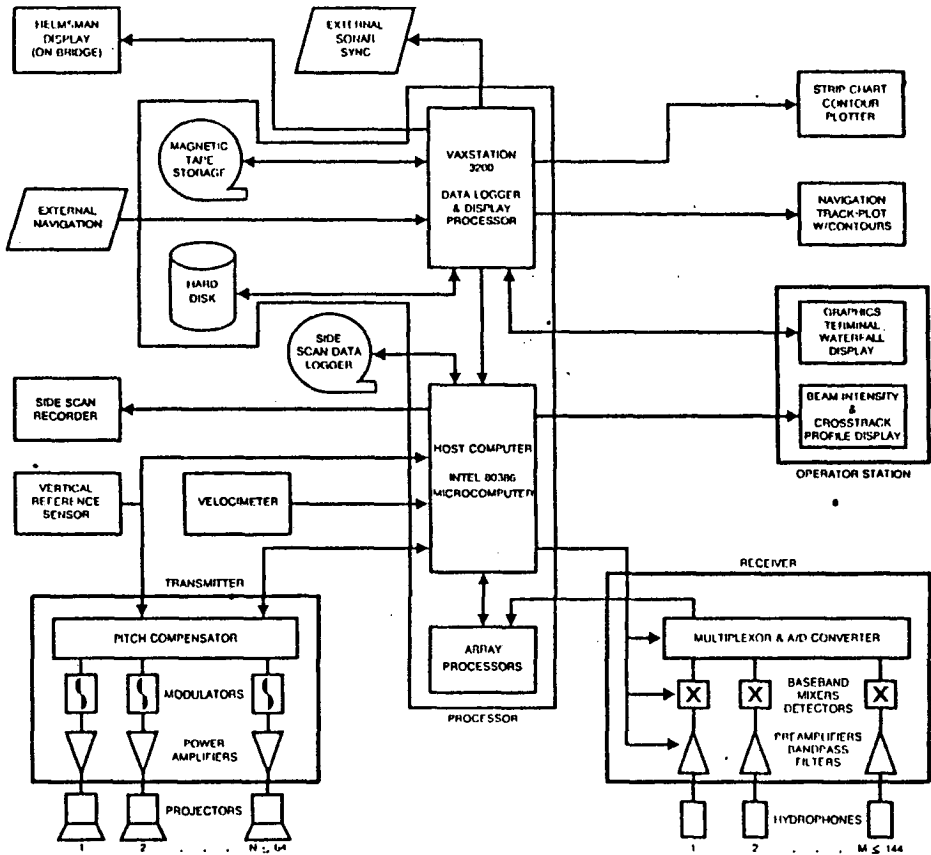
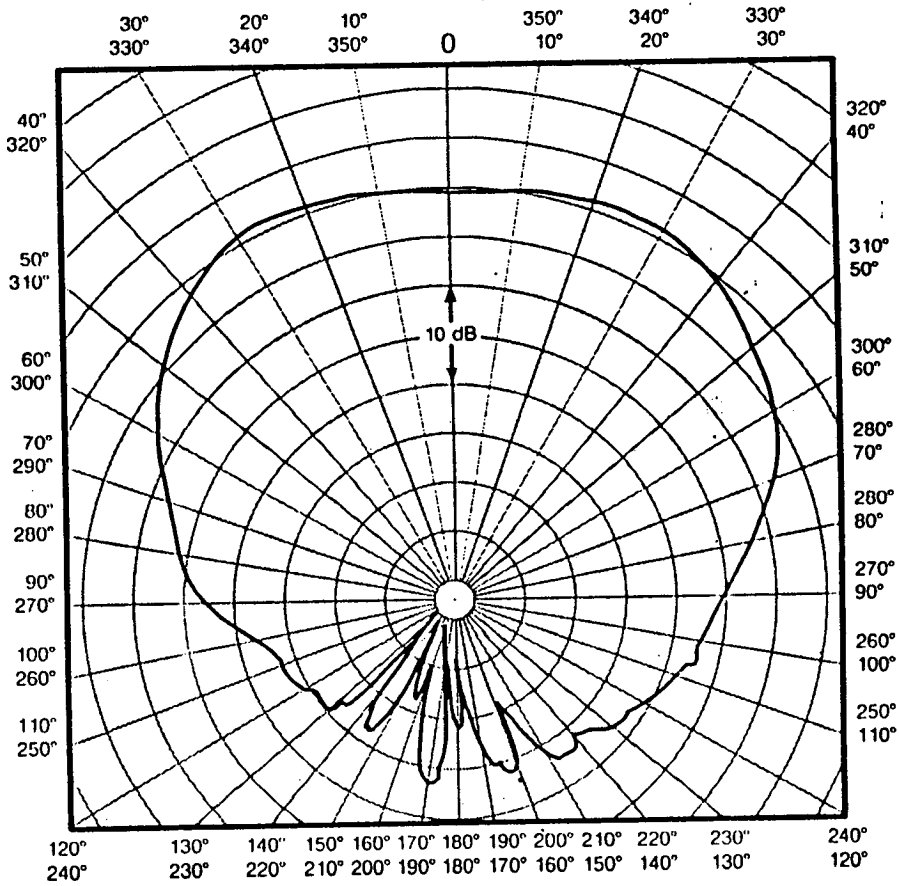


Figure 3. Block diagram of Sea Beam 2000.

Fig. II-2. Block diagram of SeaBeam 2000 elements which consists of 28 projectors and 84 hydrophone arrays. Projector arrays can be enlarged up to 64 units; hydrophone arrays up to 144 units for collecting more precise data with resolution less than  $0.8^{\circ} \times 0.8^{\circ}$ . Both projector and hydrophone units are individually replacetable.



**Figure 4.** Athwartship beam pattern of Sea Beam 2000 projector.

Fig. II-3. Athwartship beam pattern of SeaBeam 2000 projector in which each projector unit contains several ceramic resonators with the radiating surfaces along a convex surface. This curvature creates a slight dip in vertical response due to more powerful projecting in the athwartship direction.

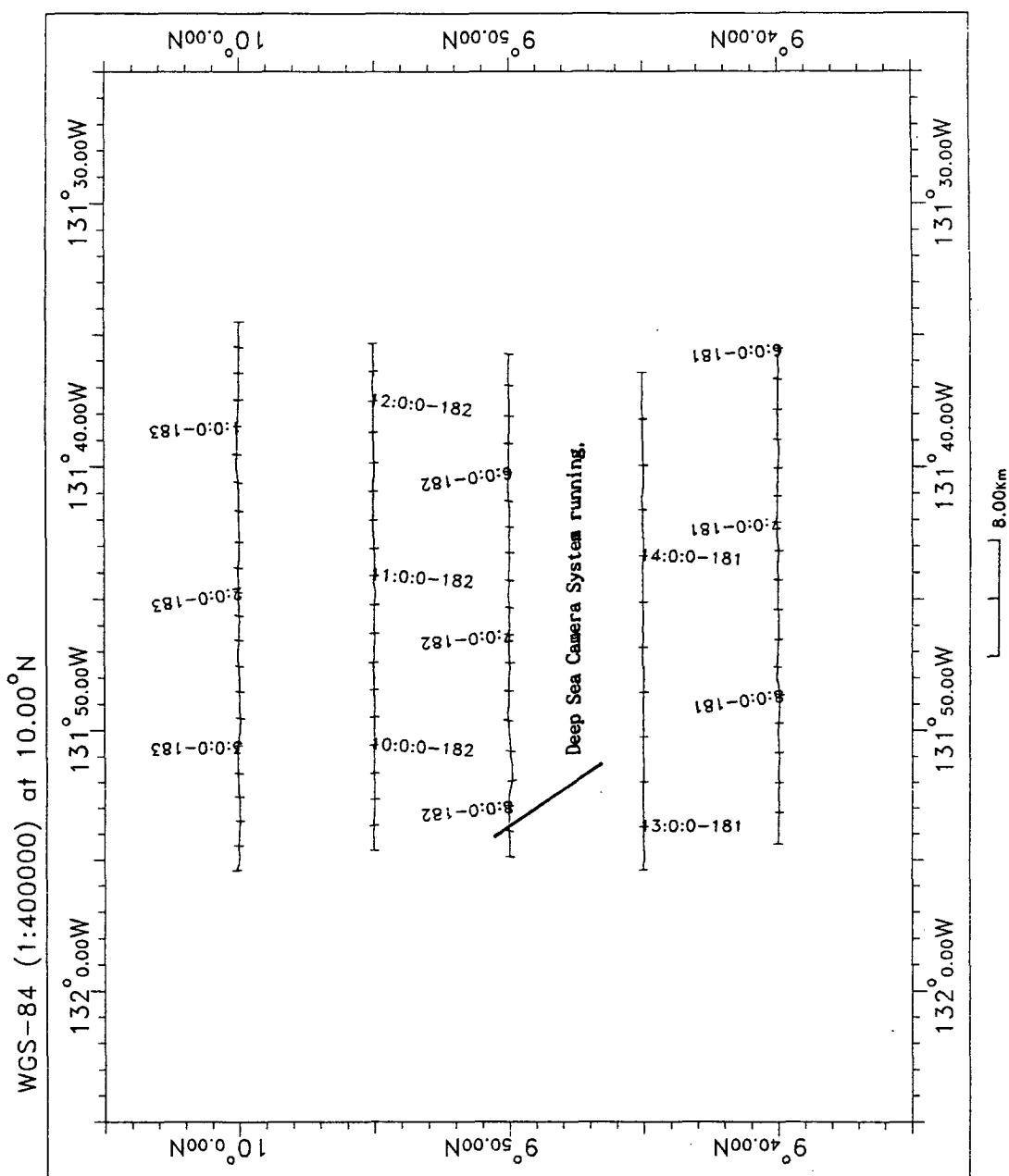


Fig. II-4. Track chart of multi-beam echosounding and SeaBeam 2000. The locations were obtained by using GPS based on World Geodetic System 1984. Coordinates are estimated by Mercator projection scaled at 10° N in northern Hemisphere.

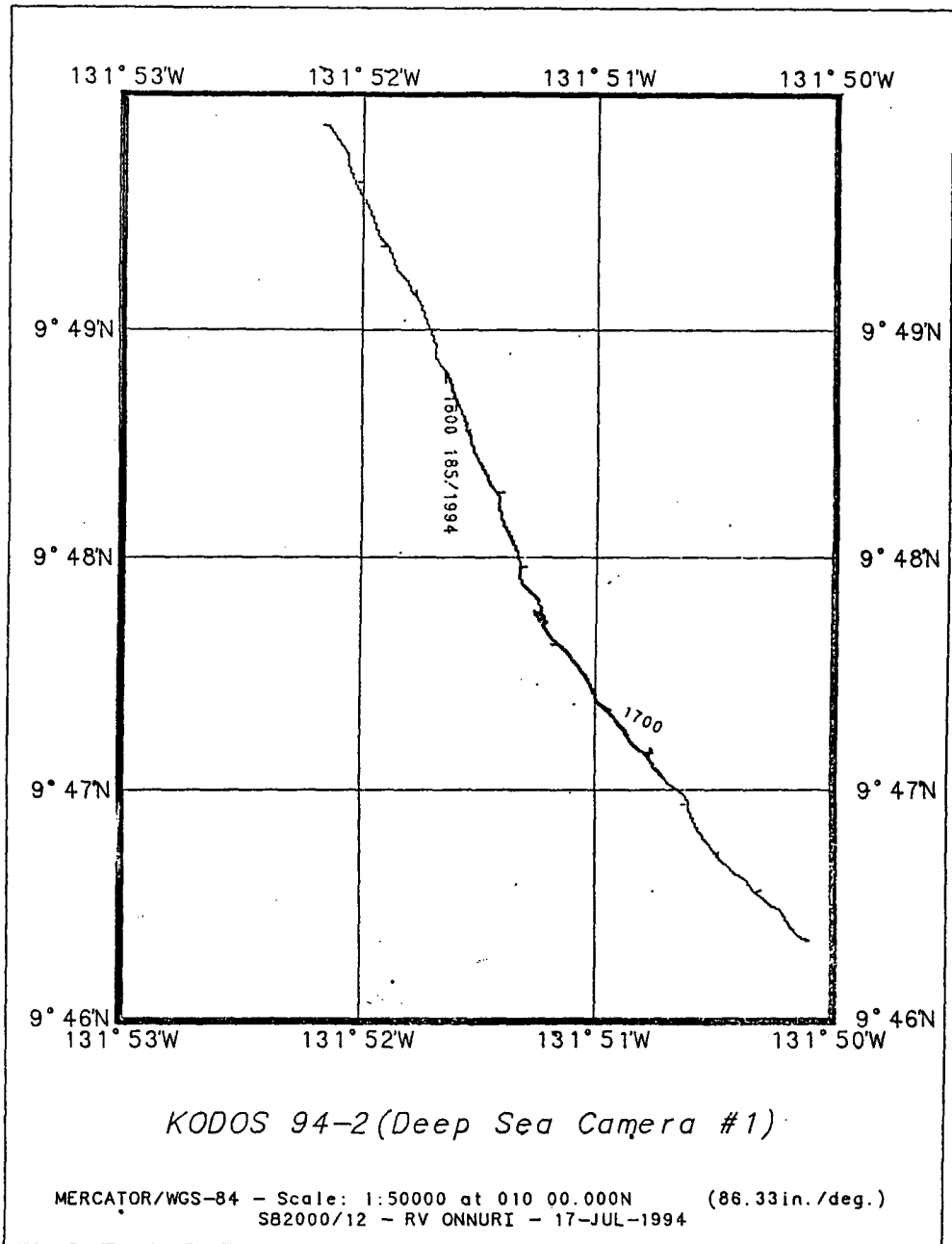
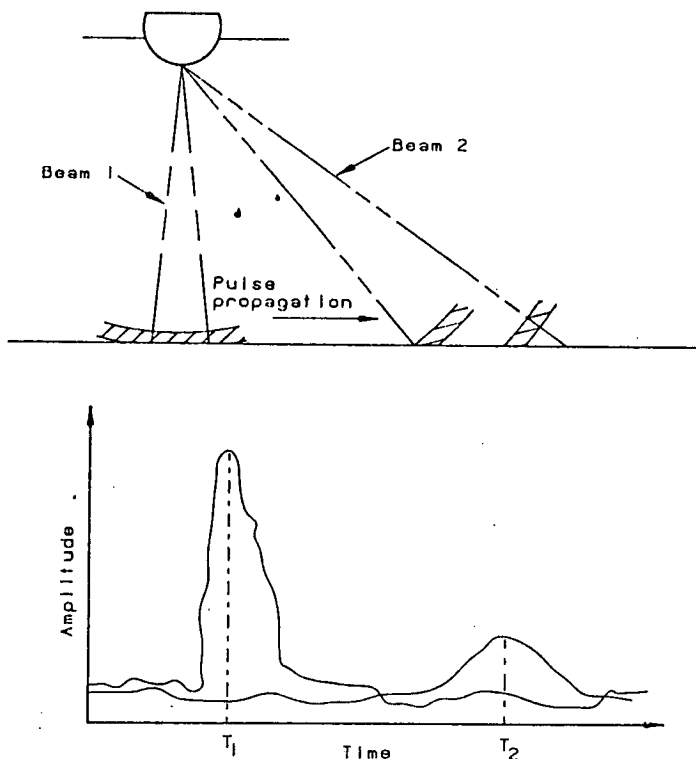


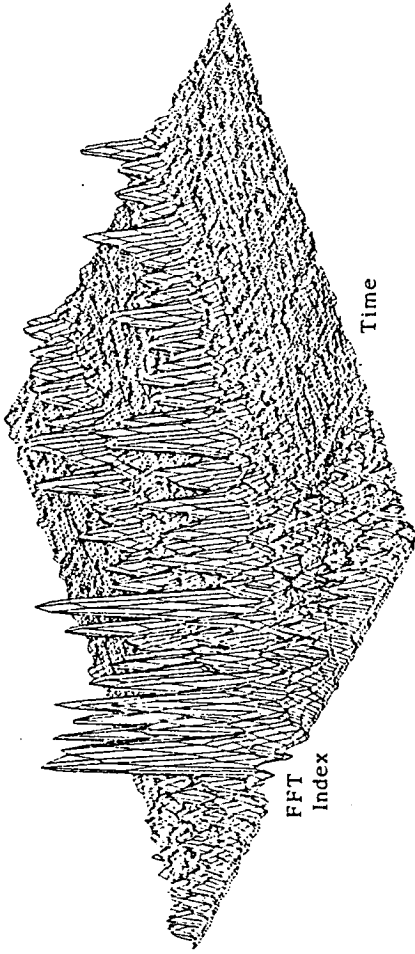
Fig. II-5. Track chart of a deep-sea camera system.

*Sidescan Survey by Sea Beam 2000*



**Figure 5.** Sketch of amplitude variation in vertical and off-normal beams.

Fig. II-6. Amplitude variation in vertical and off-normal beams. SeaBeam 2000 determines the range by an averaging algorithm near the perpendicular to averaged seafloor slope. As sound pulse hits the seafloor and spreads out, it will be detected in the beams formed as rising and falling amplitude modulated by the beam pattern. In order to estimate the arrival times  $T_1$  and  $T_2$  at the centers of beams, amplitudes from the former beam are firstly gated, then samples larger than predetermined threshold level are averaged by a "center of mass" type calculation. In the outer beam, echo wave extends over an interval which may be long as much as many times than transmitted pulse length, making the center of mass calculation progressively be less accurate.



**Figure 6.** Sample output of FFT beam former in one ping.

**Fig. II-7.** Sample output of fast Fourier transform (FFT) beam former in pings. This process exploits the power of high speed digital signal processors and uses a (FFT) on all the hydrophone data at each time sample or snapshot. The FFT, spatial beam former, translates the phase distribution of bottom returns into signal amplitudes from different angles.

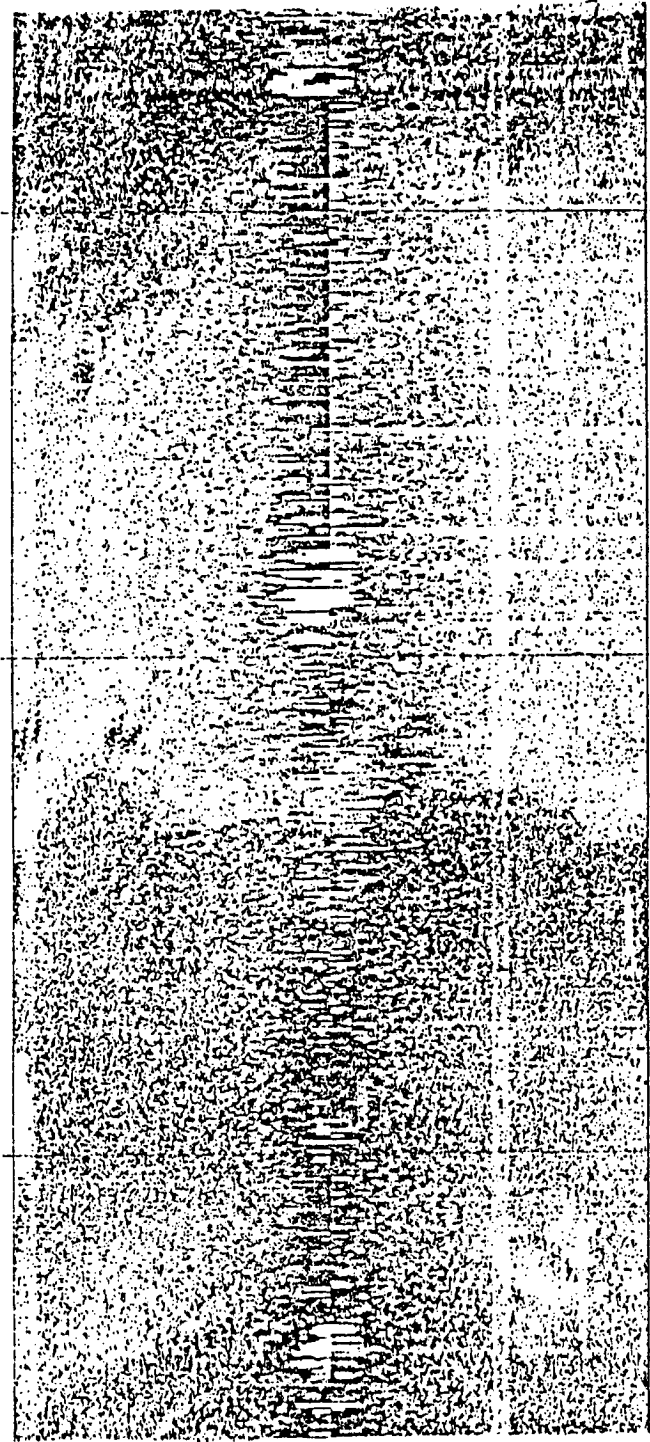


Fig. II-8. Sample output of SeaBeam 2000 side scan image, produced using on-line real-time images generated by a thermal graphic recorder capable of displaying 16 gray scales.



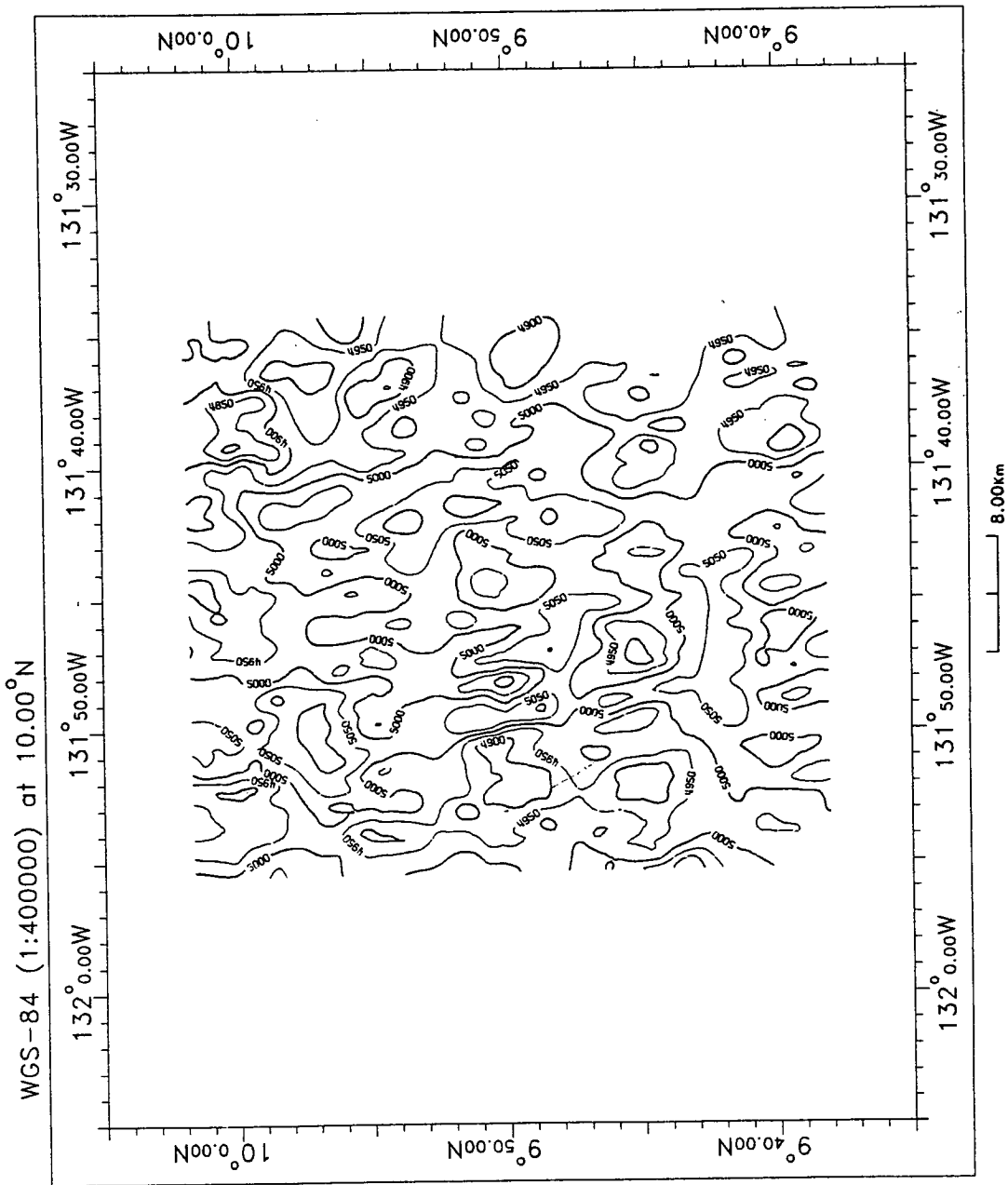


Fig. II-9. Contour map of the survey area, based on the data of SeaBeam 2000 system. The contours are corrected in meters and intervalled at 50 meters.

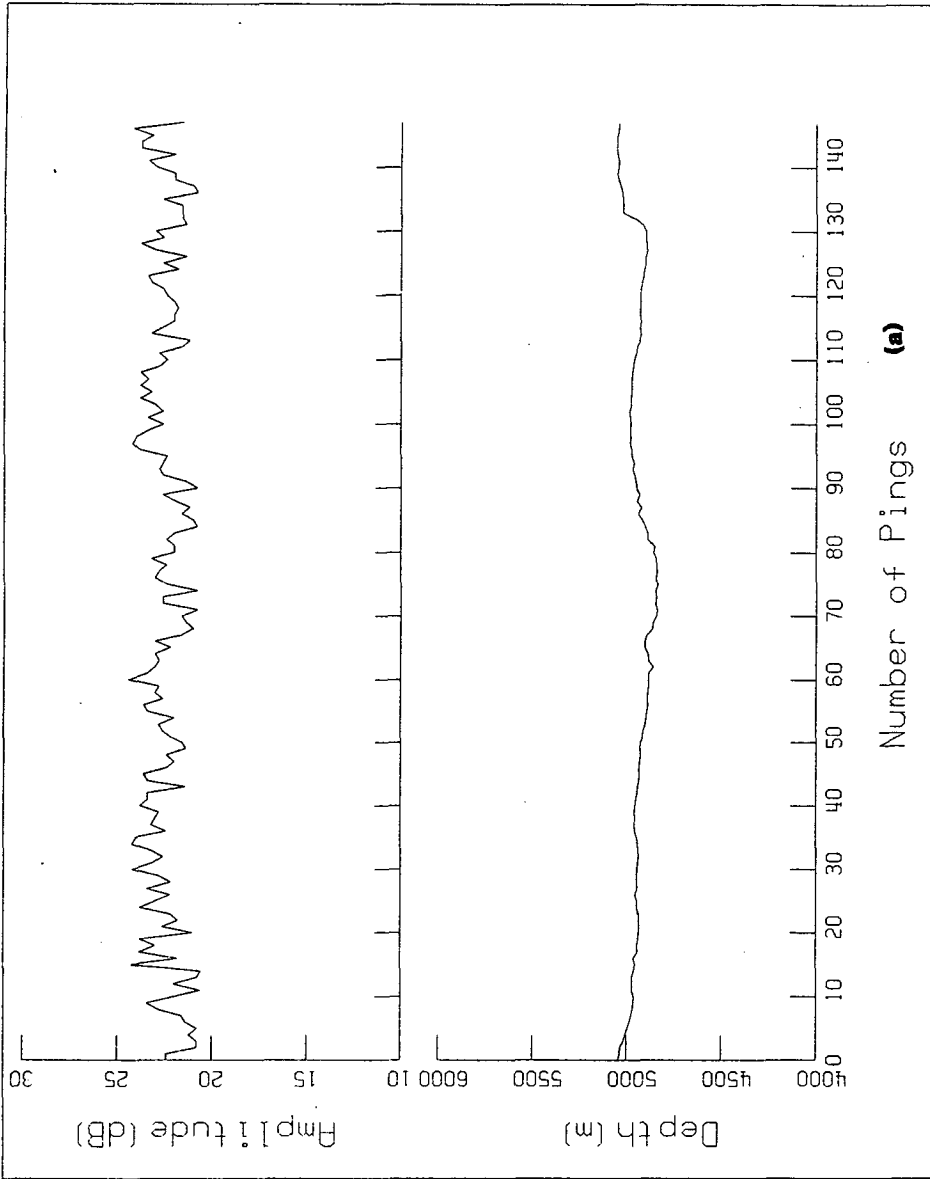


Fig. II-10. Center beam amplitude received by a transmission ping that was low-pass filtered and displayed in decibel normalized to 20 dB of the track chart. The corresponding center beam depth profile is also plotted, and given corrected meters and x-axis are plotted the number of transmitted pings. (a) 9° 45', (b) 9° 50' line, and (c) 9° 55' line respectively.

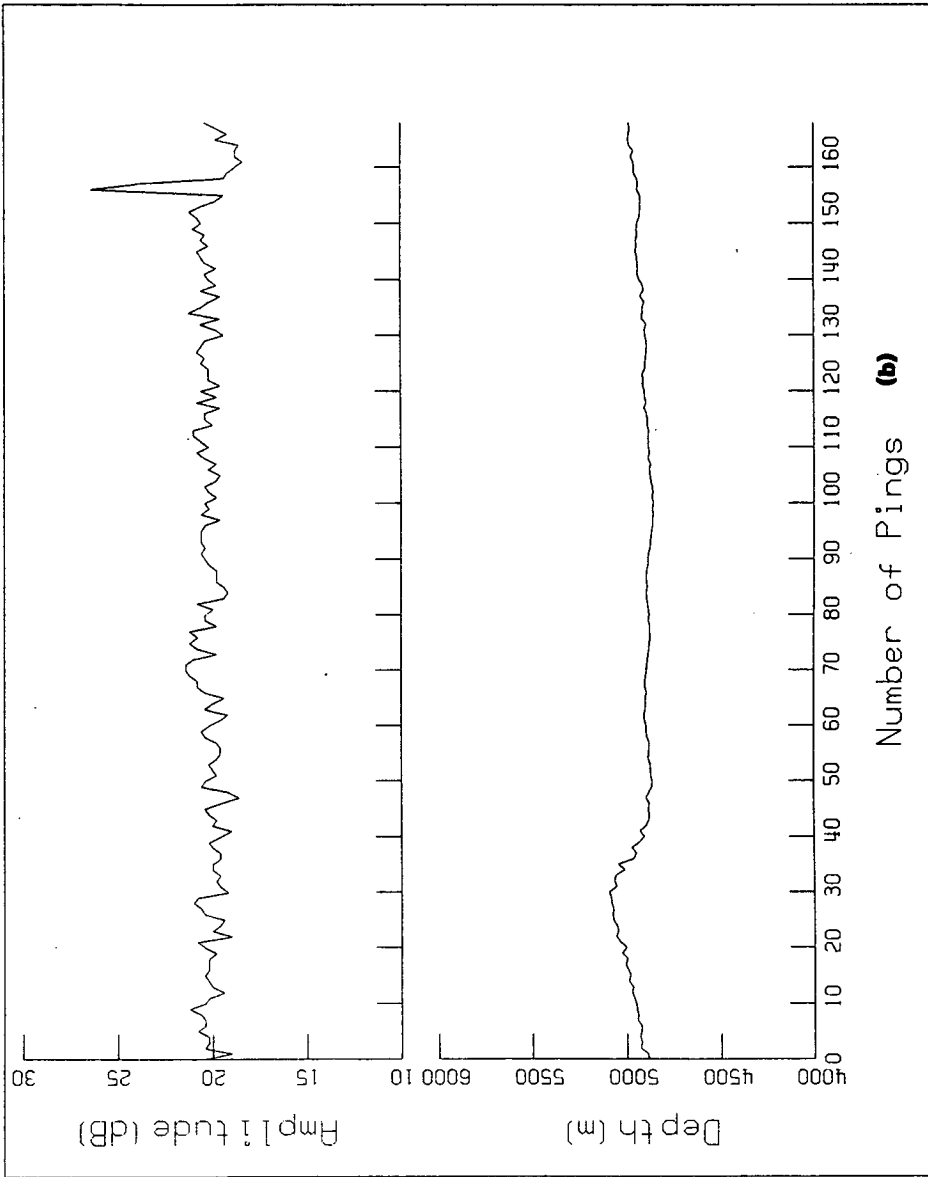


Fig. II-10. (Continued)

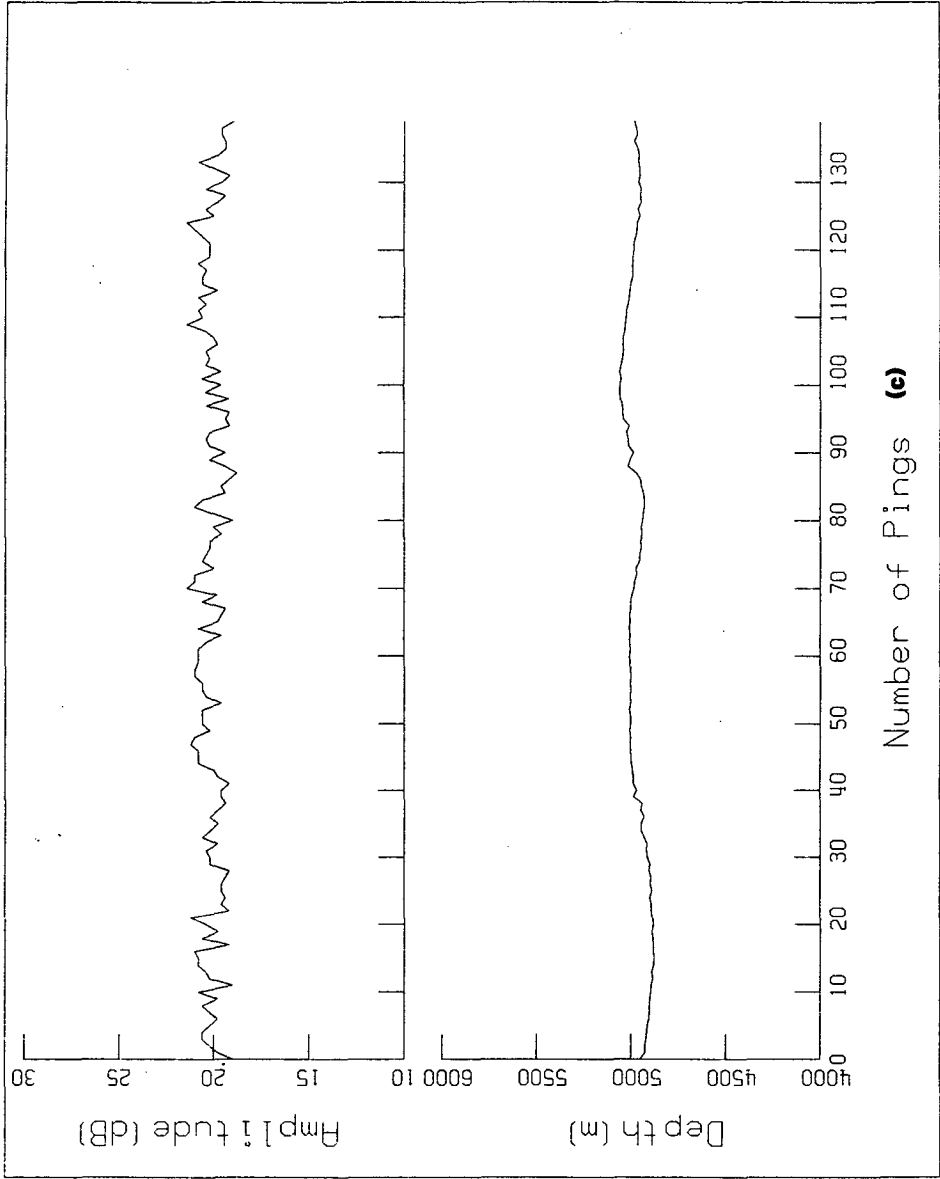


Fig. II-10. (Continued)

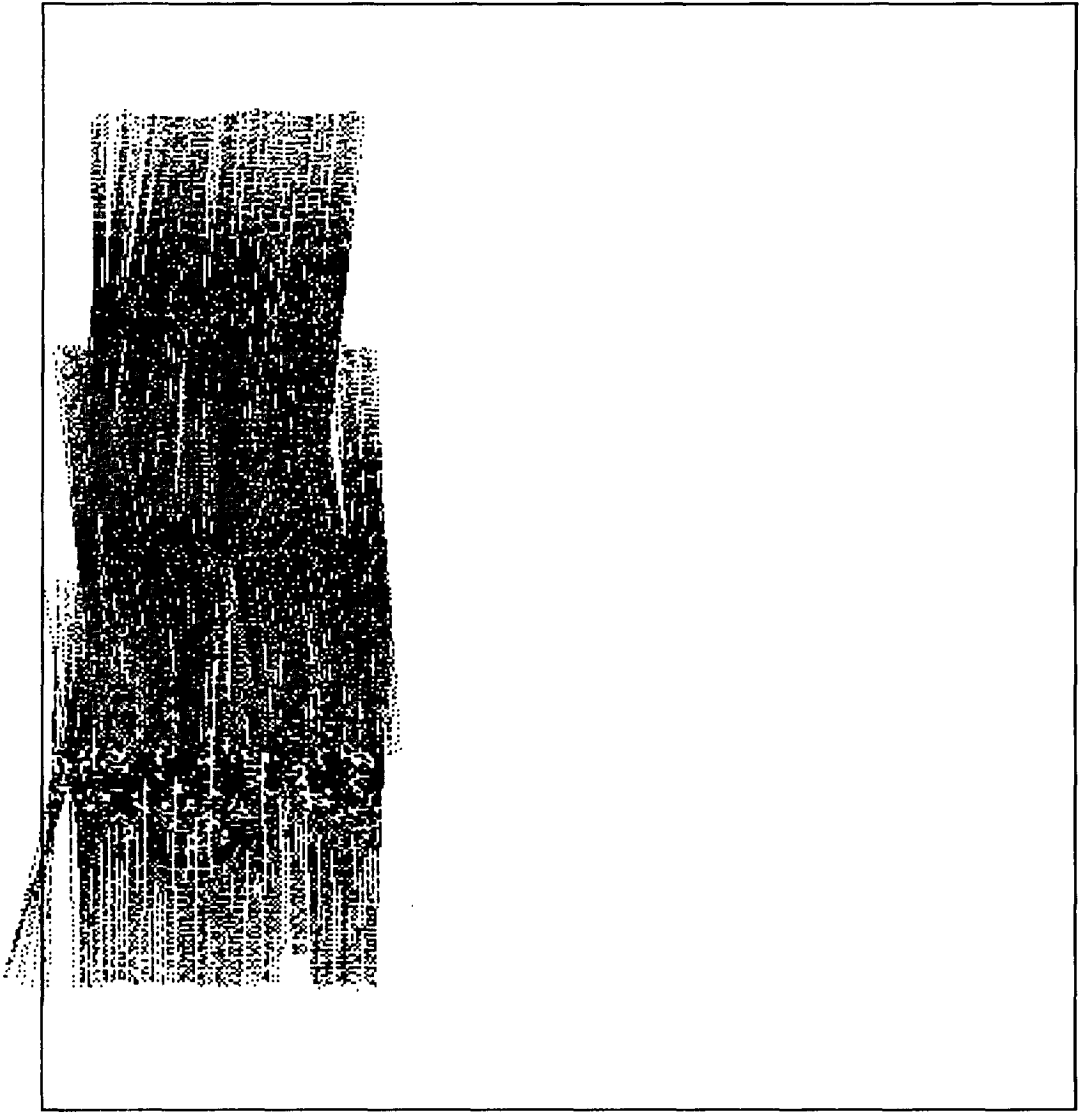


Fig. II-11. Colored map of amplitude distribution based on the data of selected transmission pings. High amplitudes is shown in the southern part of deep-sea camera system runned area.

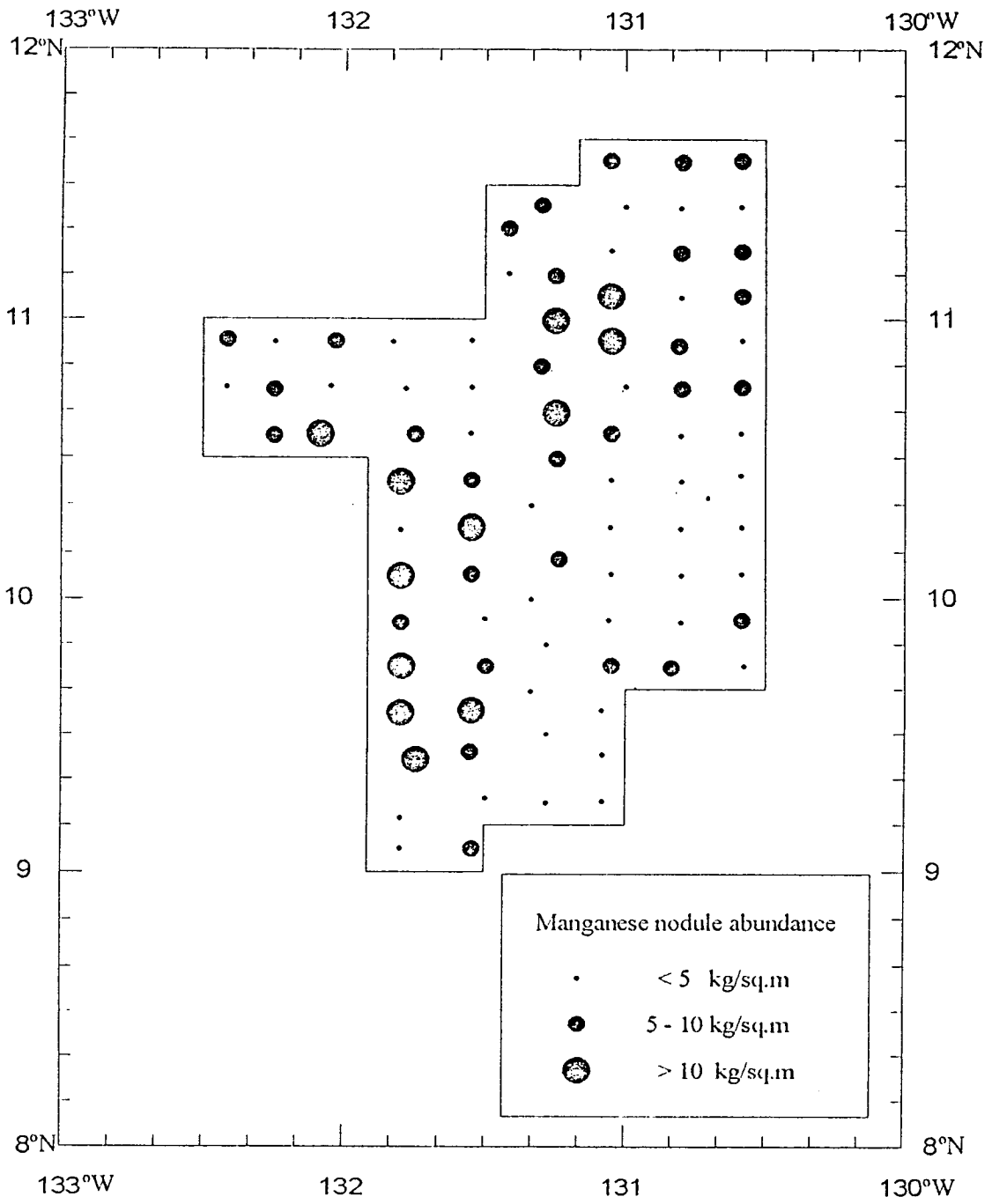
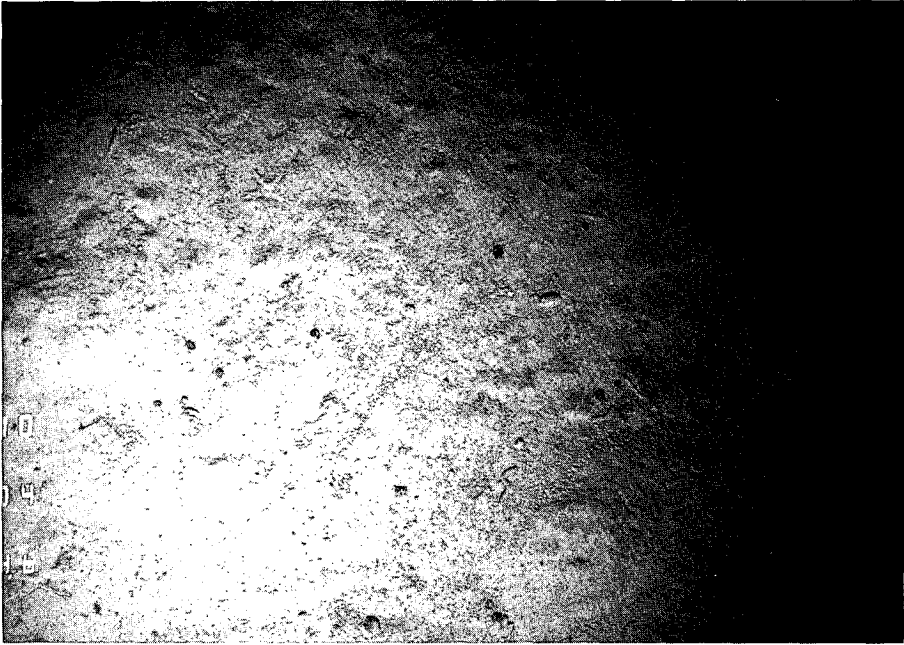
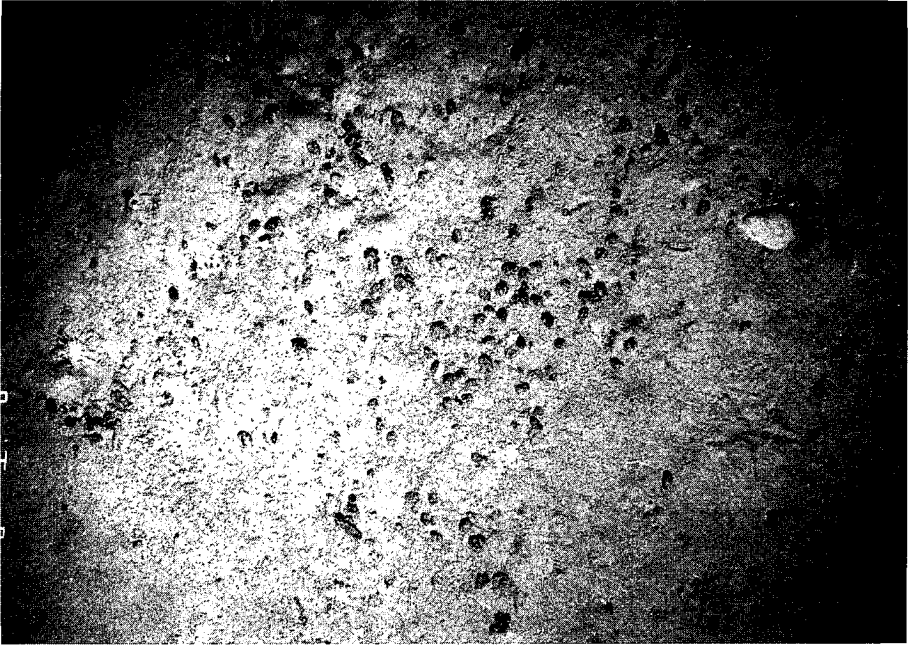


Fig. II-12. Map showing average abundance of manganese nodules.



**(I)**

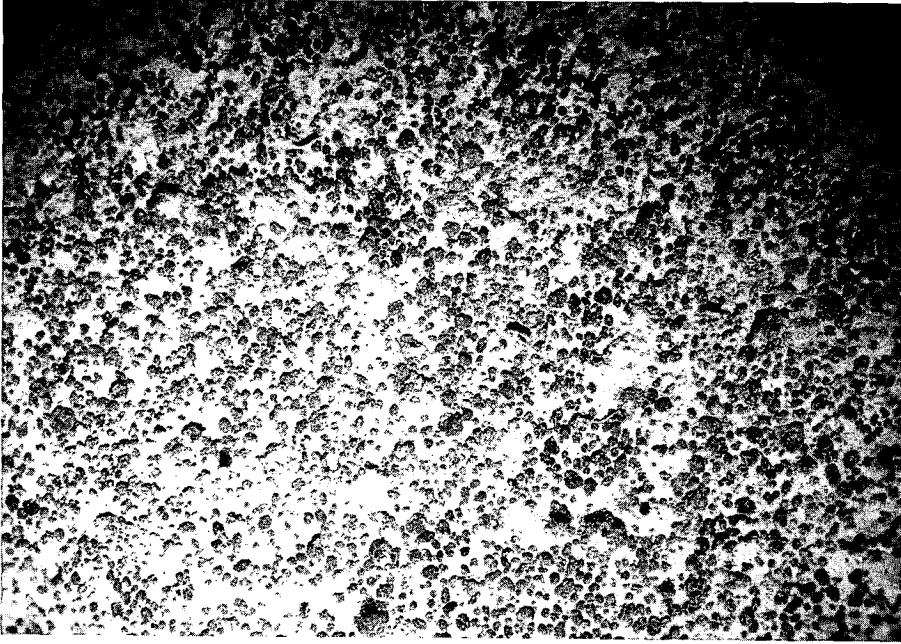
Fig. II-13. Photographic ground truth : (I) manganese nodules-rare muddy seafloor characterized by low amplitude, (II) the seafloor with an intermediate coverage of nodules which comprises the brick and hatched patterns, (III) the seafloor covered with a nodule patch or pavement which is represented by the dotted area.



**(II)**

Fig. II-13II (Continued)





**(III)**

Fig. II-13III (Continued)

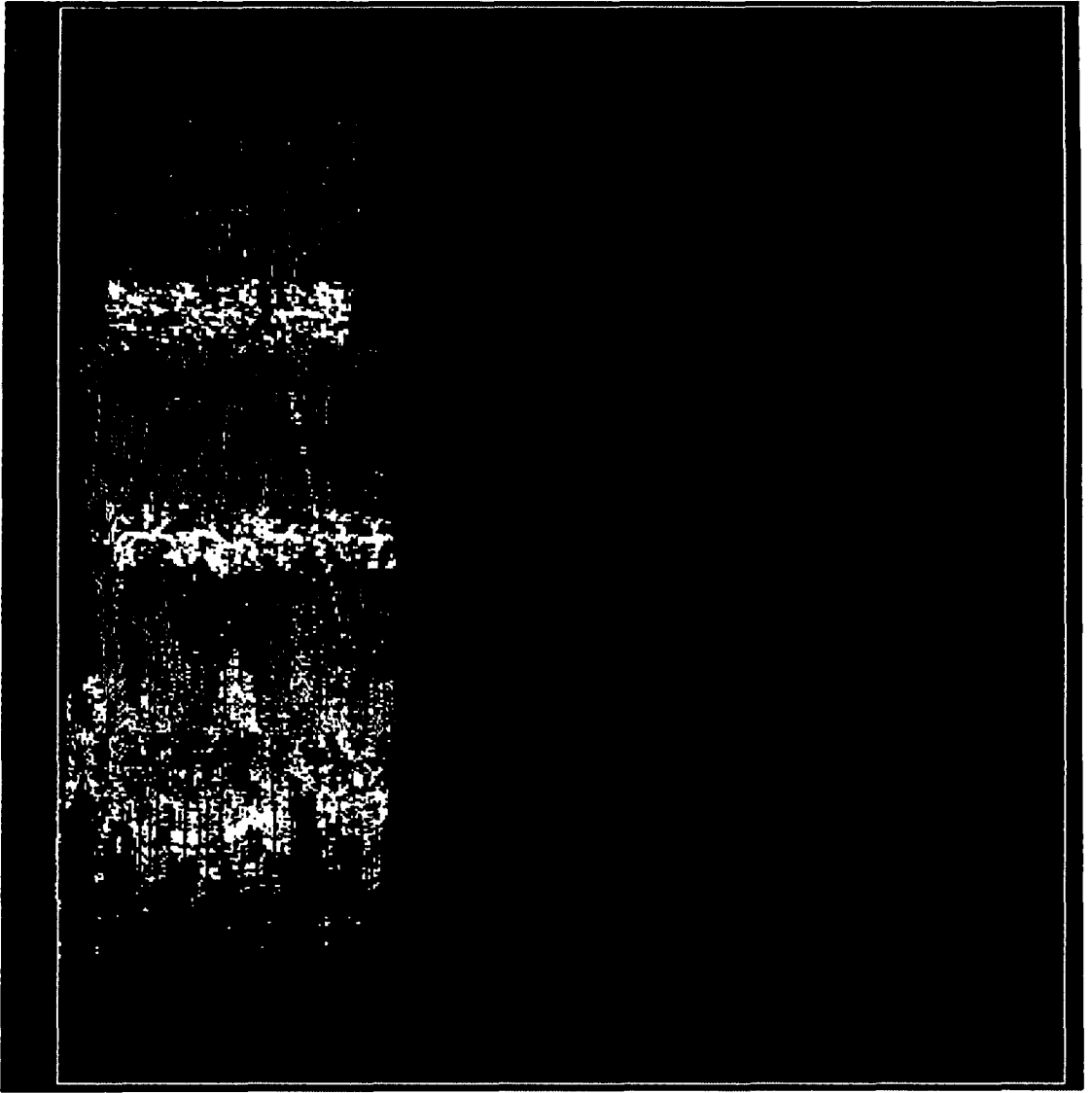


Fig. II-14. Colored map of amplitude distribution based on the data of selected transmission pings. Amplitude is in decibel normalized by the 20 dB.

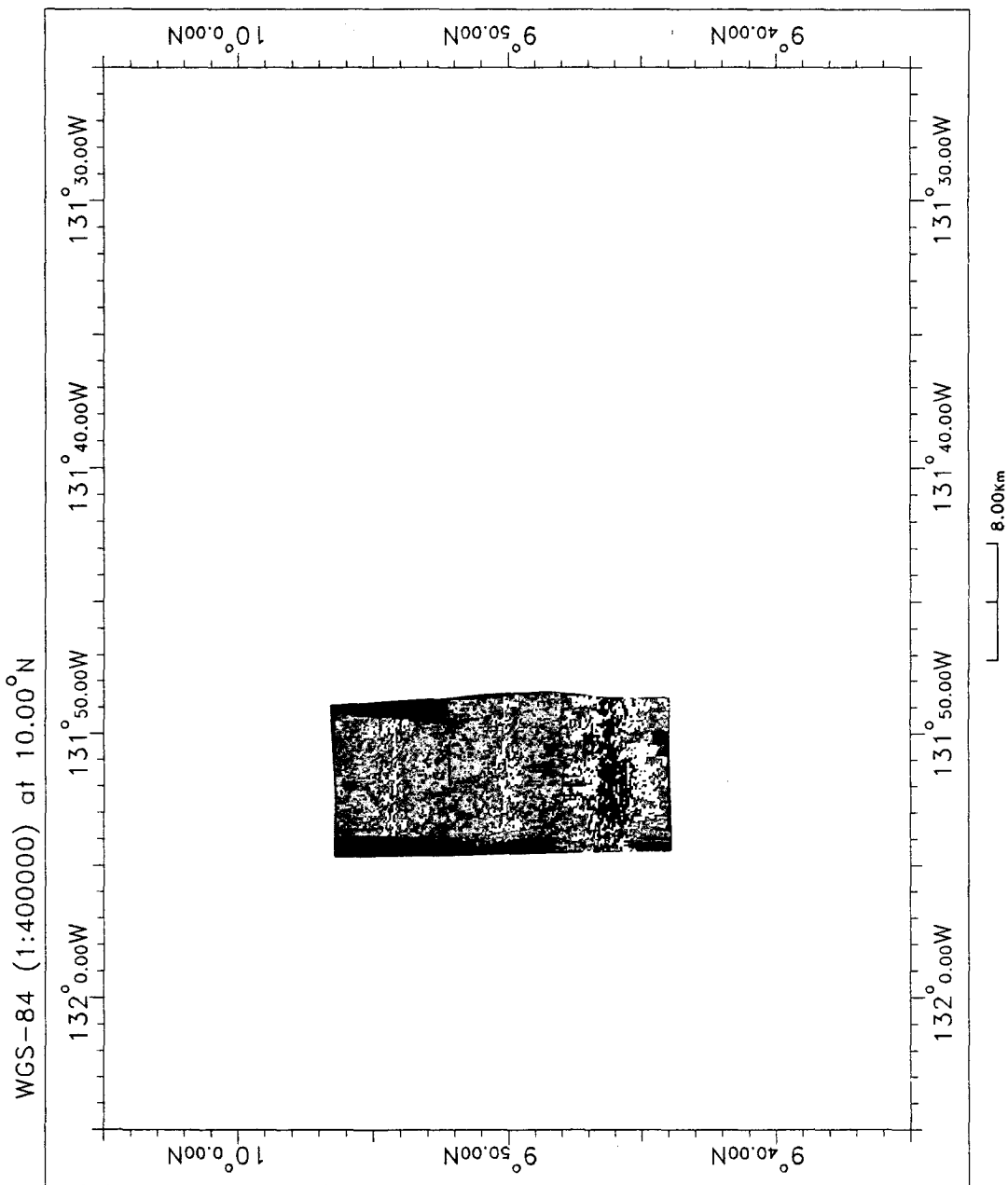


Fig. II-15. Colored map of amplitude distribution based on the data of selected transmission pings. It shows the result of moving window statistics for edge boundary detection. The boundary comprises the area colored with 20 dB amplitude.

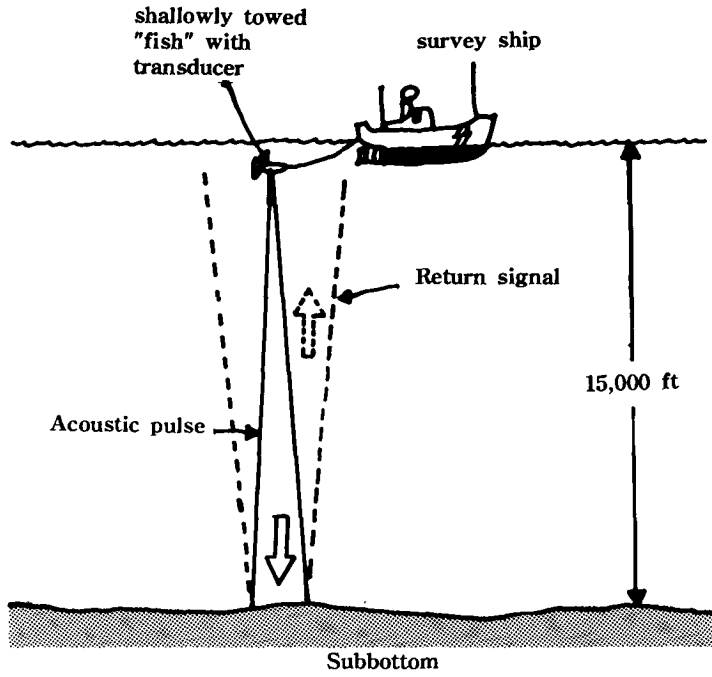


Fig. II-16 Proposed sounding system(not to scale, Magnuson et al, 1981).

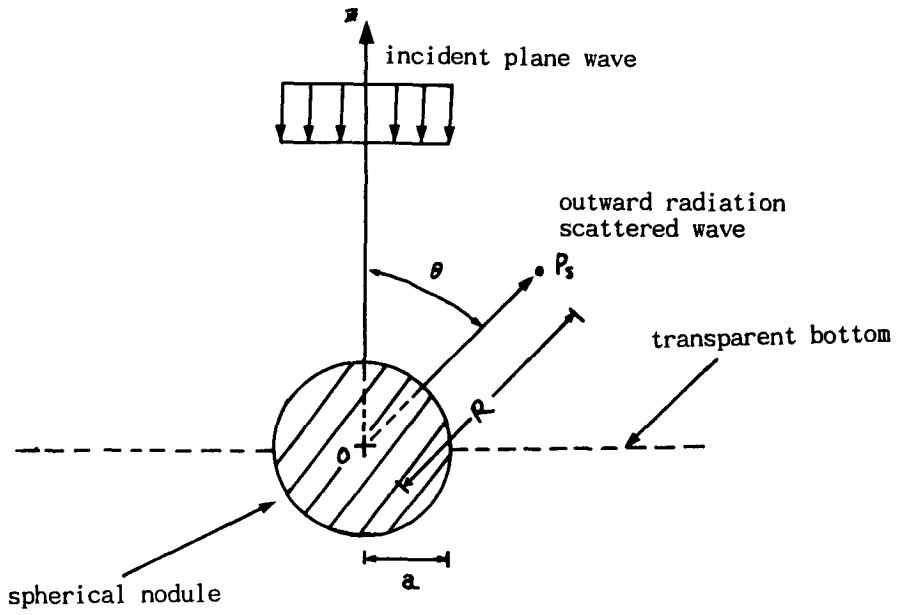


Fig. II-17. Plane wave incident upon a single spherical nodule.

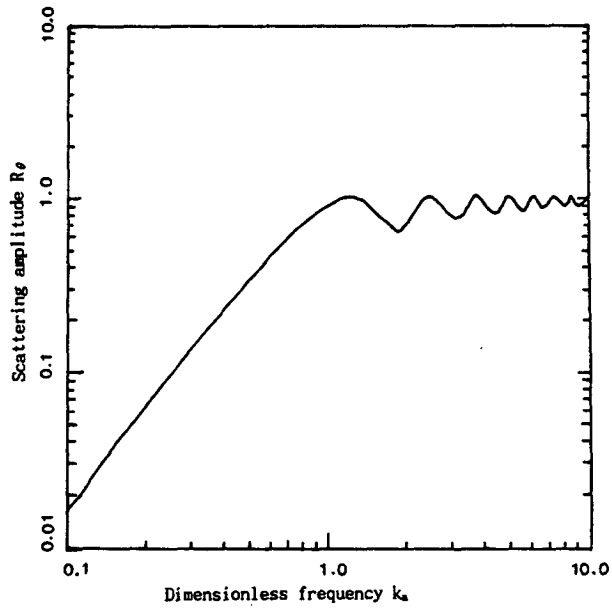


Fig. II-18. Scattering amplitude ( $R_r$ ) versus dimensionless ( $ka$ ) for a rigid sphere (Magnuson, 1982).

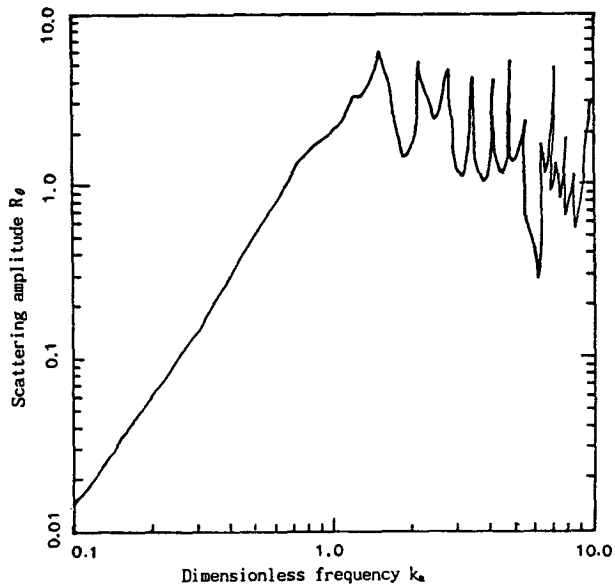


Fig. II-19. Scattering amplitude ( $R_r$ ) versus dimensionless ( $ka$ ) for a Pacific nodule (Magnuson, 1982).  $\rho/\rho_0 = 1.935$ ,  $C_L = 1950$  m/sec,  $C_T = 1615$  m/sec.

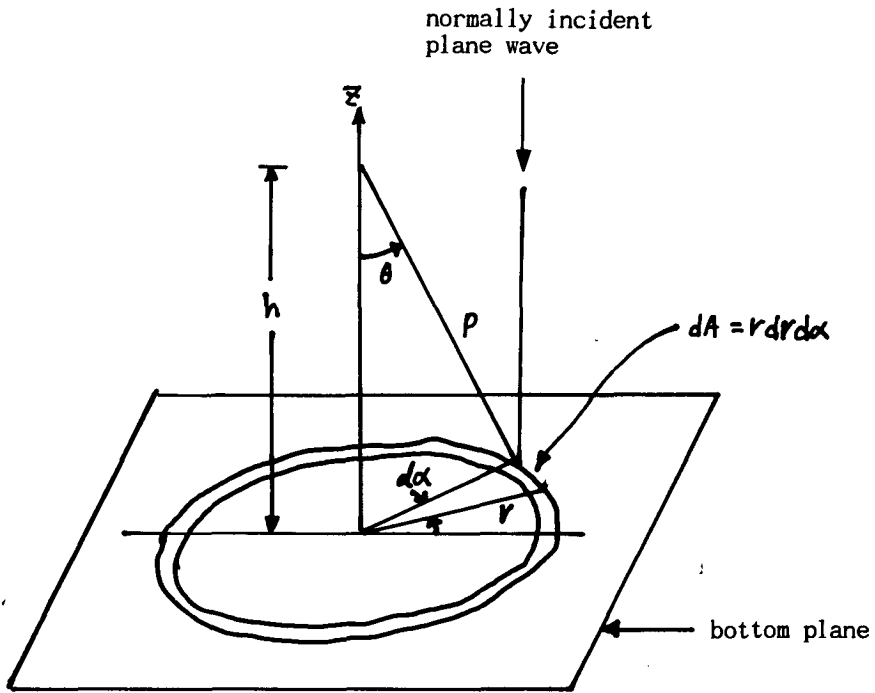


Fig. II-20. Plane wave normally incident upon a planar bottom containing a uniform distribution of nodules.

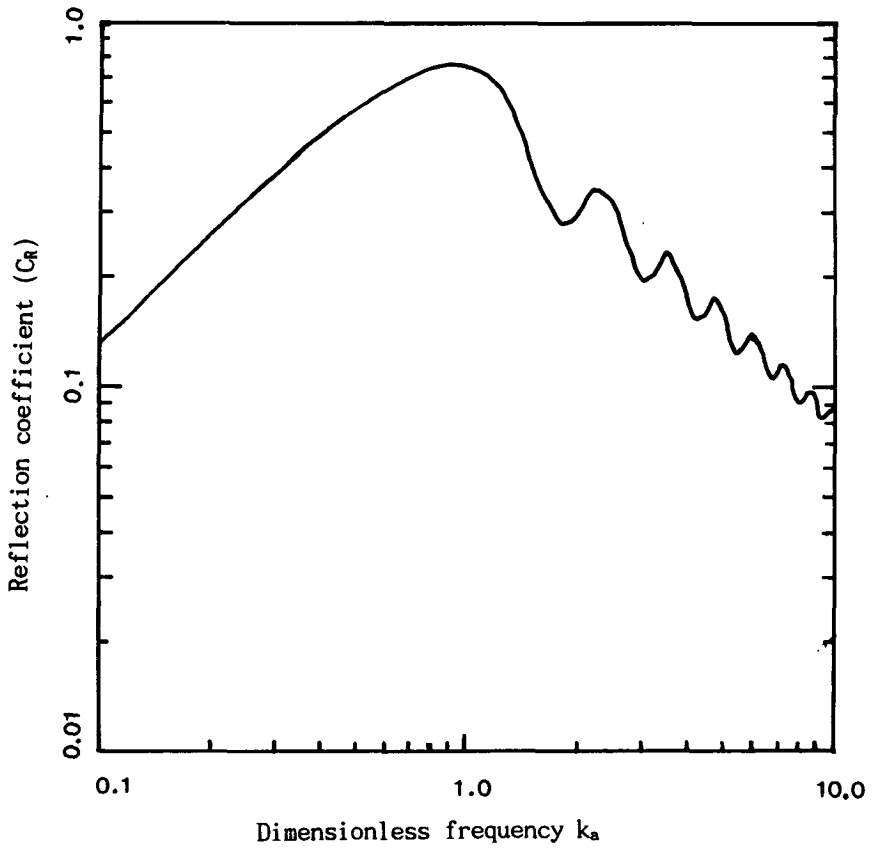


Fig. II-21. Bottom reflectivity ( $C_R$ ) versus dimensionless frequency ( $ka$ ) for square close-packed rigid sphere.



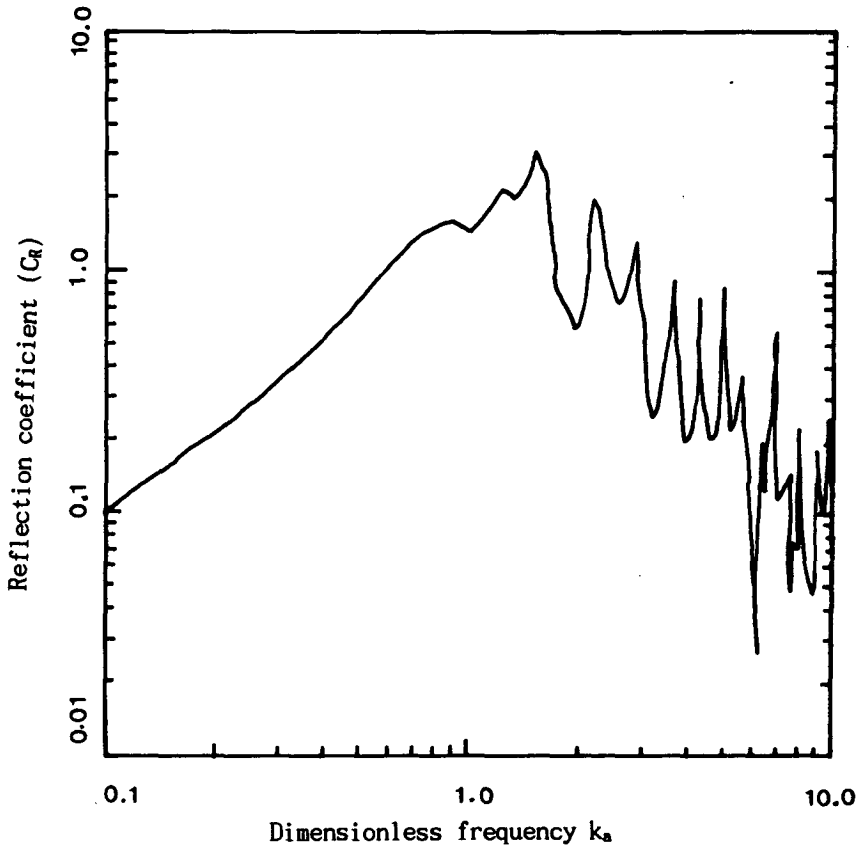


Fig. II-22. Bottom reflectivity ( $C_R$ ) versus dimensionless frequency ( $ka$ ) for close-packed elastic spheres representing Pacific nodules (Magnuson, 1982).  $\rho / \rho_o = 1.935$ ,  $C_L = 1950$  m/sec,  $C_T = 1615$  m/sec.

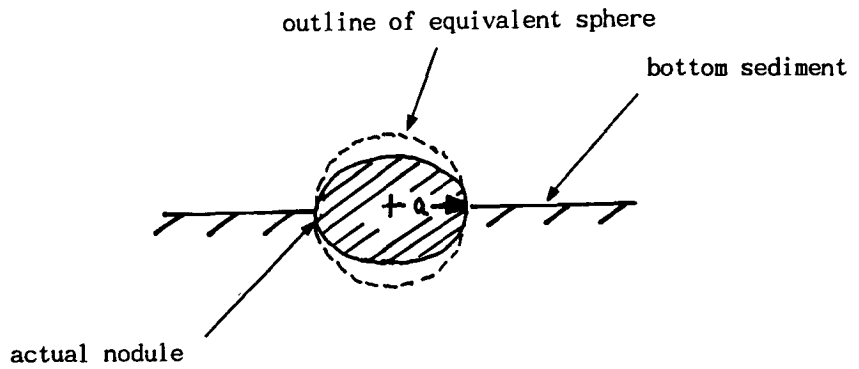
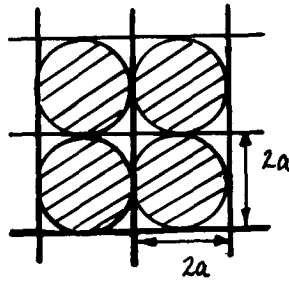


Fig. II-23. Bottom coverage geometry: a) close square pack bottom coverage and b) side view of an equivalent sphere

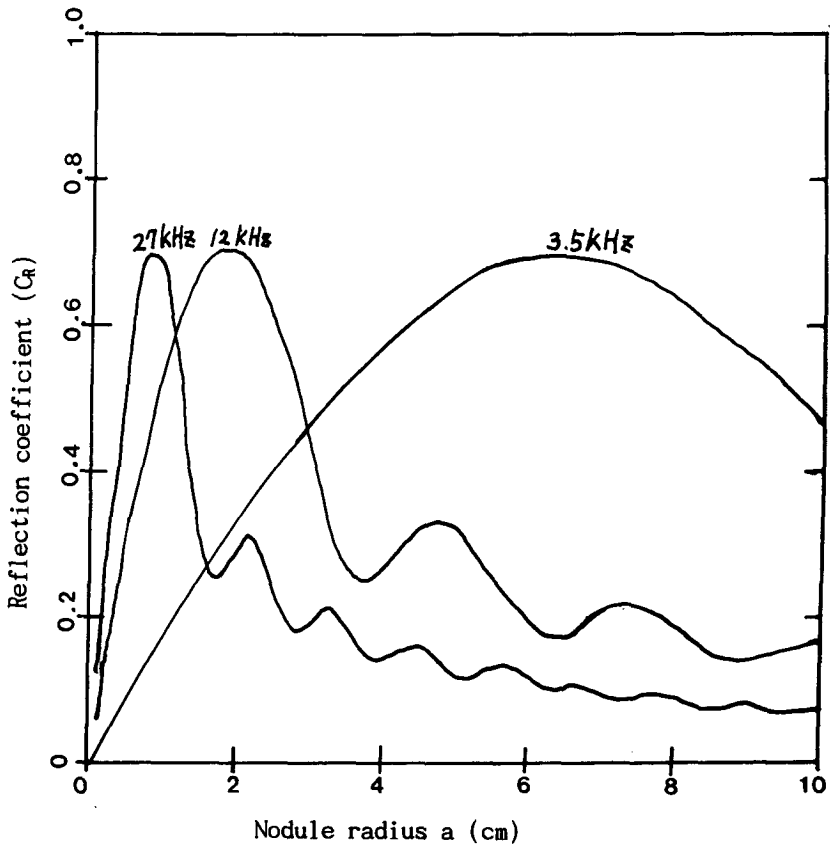


Fig. II-24. Reflectivity ( $C_R$ ) versus nodule radius ( $a$ ) for three sounding frequencies for close-packed rigid spheres (Magnuson, 1982).

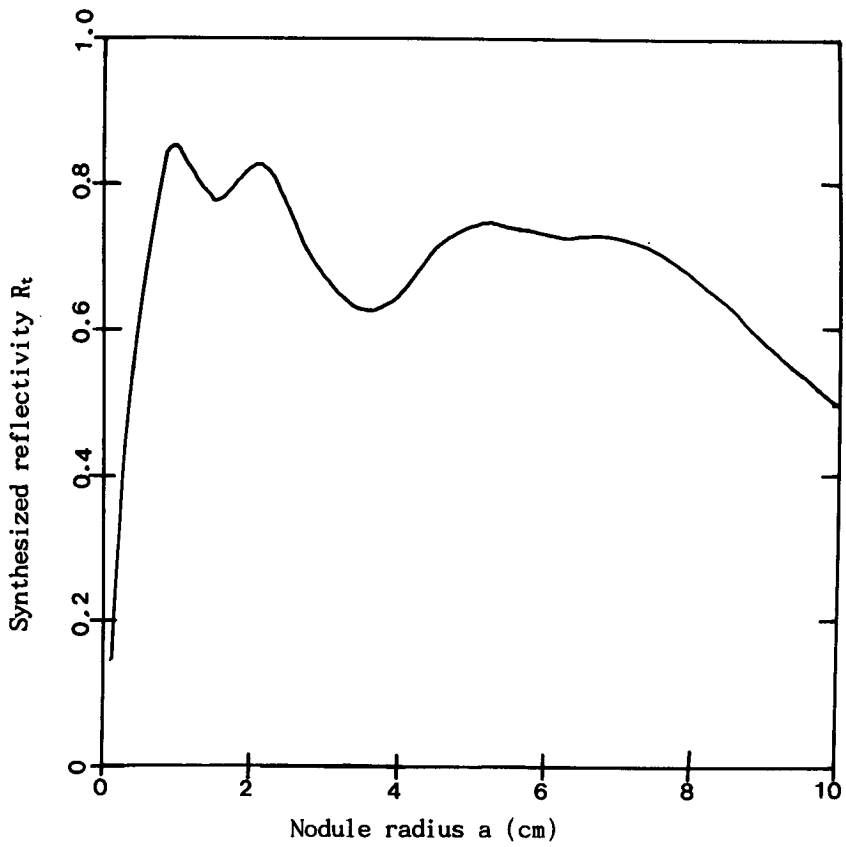


Fig. II-25. Synthesized reflectivity ( $R_r$ ) versus nodule radius ( $ka$ ) for close-packed rigid spheres.

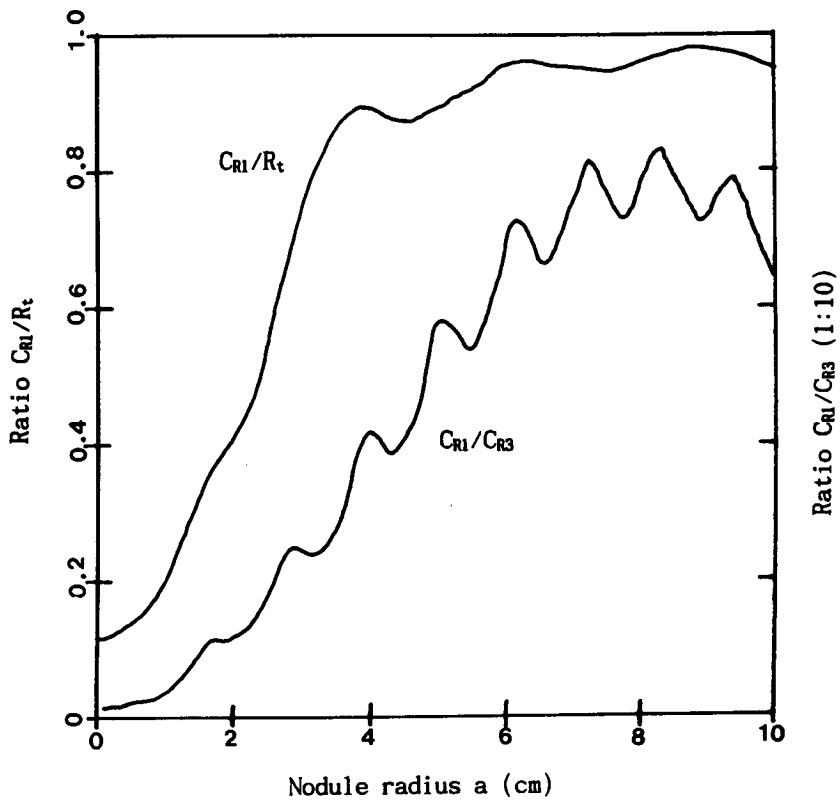


Fig. II-26. Reflectivity ratios versus nodule radius ( $a$ ) for rigid spheres (Magnuson, 1982).

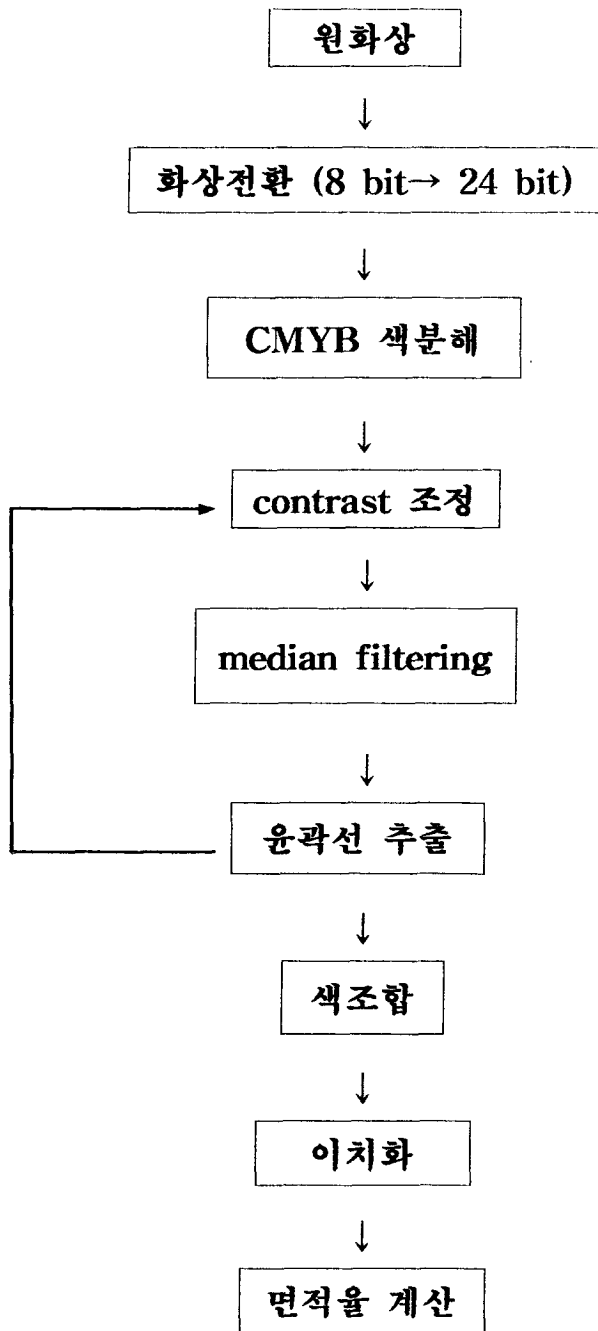


Fig. II-27. Flow chart of seabottom image analysis.

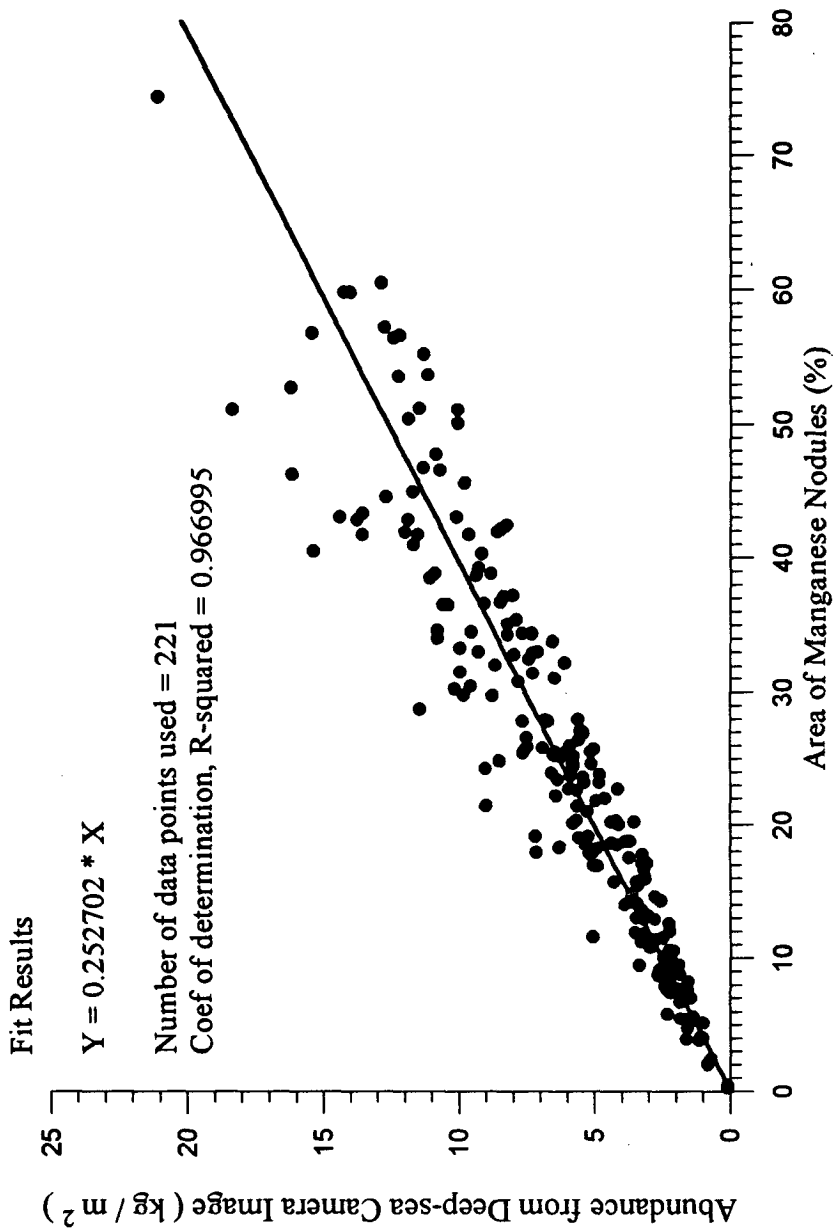


Fig. II-28. Correlation diagram between the nodule abundance and the coverage from sea-bottom photographs.

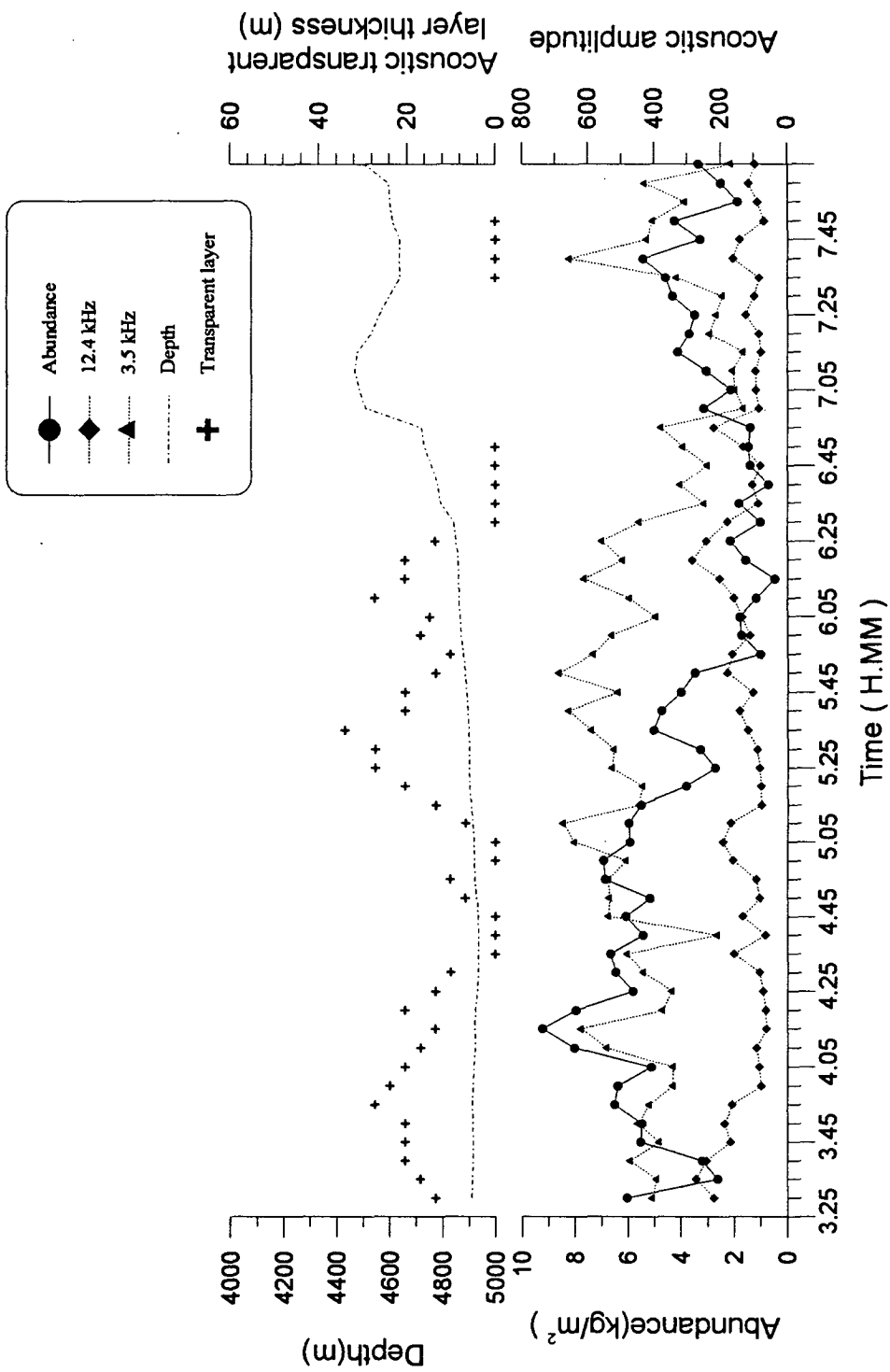


Fig. II-29. Relationships of manganese nodule abundance, acoustic amplitudes, depth and acoustic transparent layer thickness along cruise line of deep-sea camera (KODOS 93-1 area).



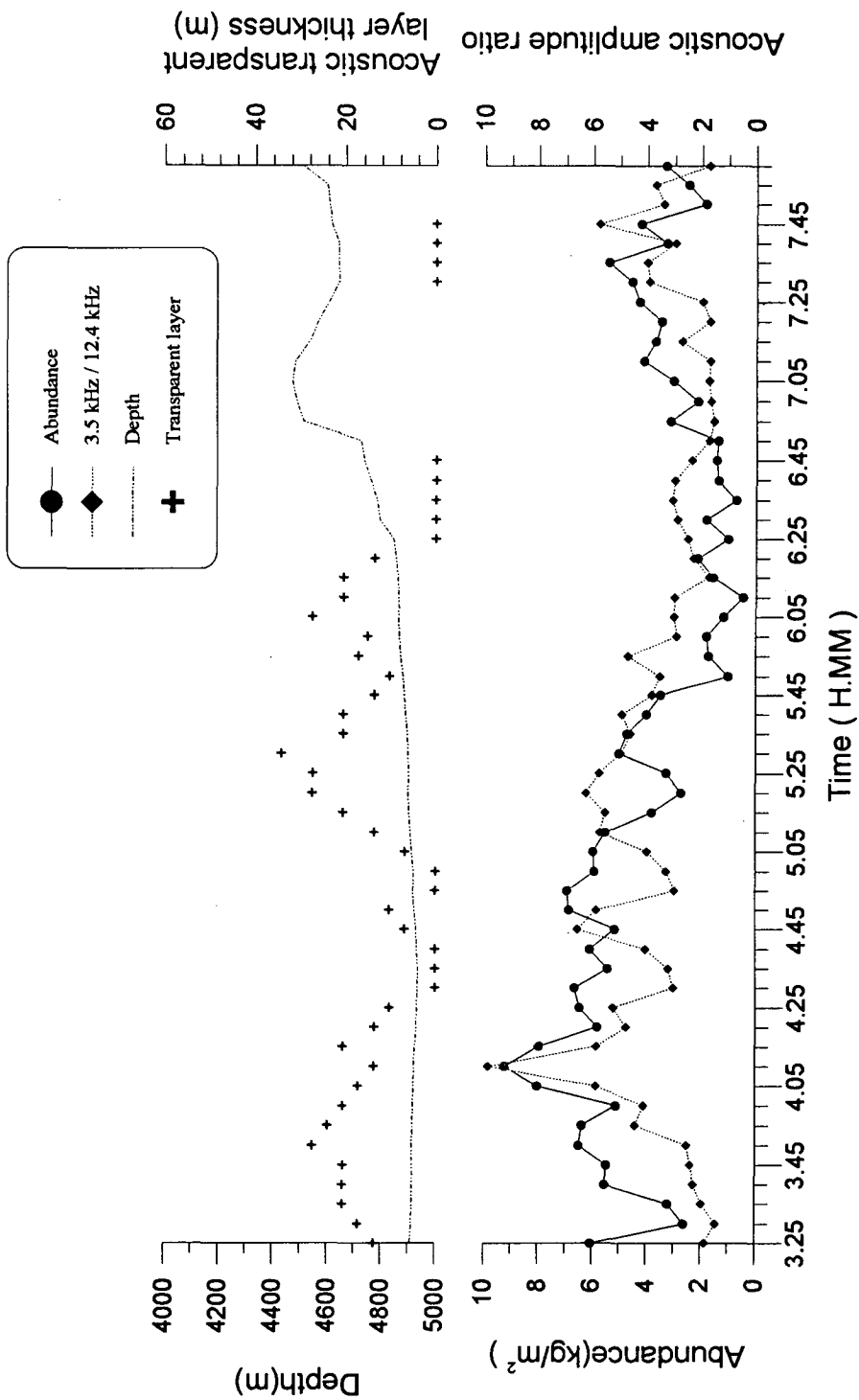


Fig.II-30. Relationships of manganese nodule abundance to acoustic amplitude ratio, water depth and thickness of acoustically (3.5 kHz) transparent layer along the line surveyed with a deep-sea camera (KODOS 93-1 area).

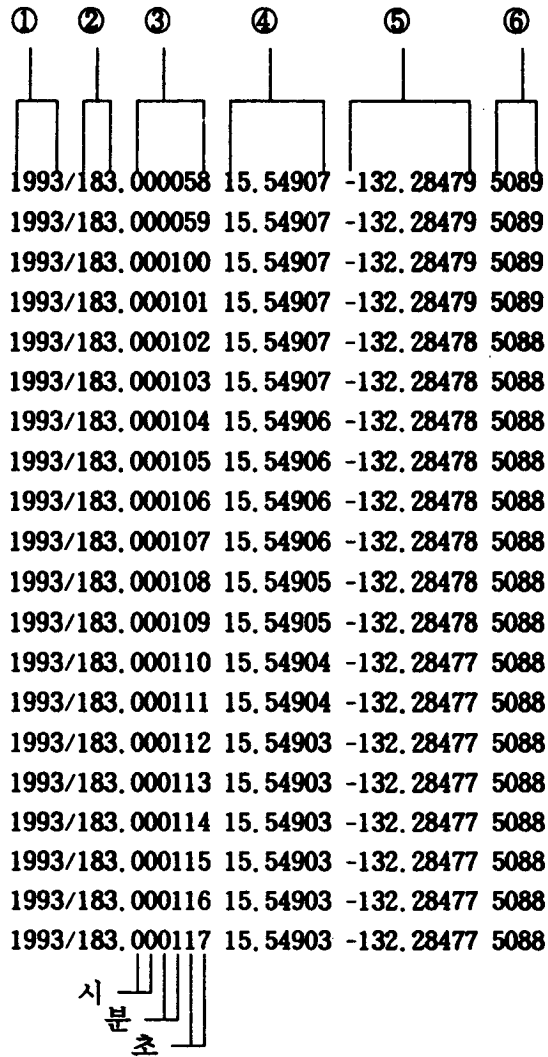


Fig. II-31. Example of input data. ① year, ② Julian day, ③ time, ④ latitude, ⑤ longitude (west represented in  $\ominus$  value), ⑥ water depth (m).

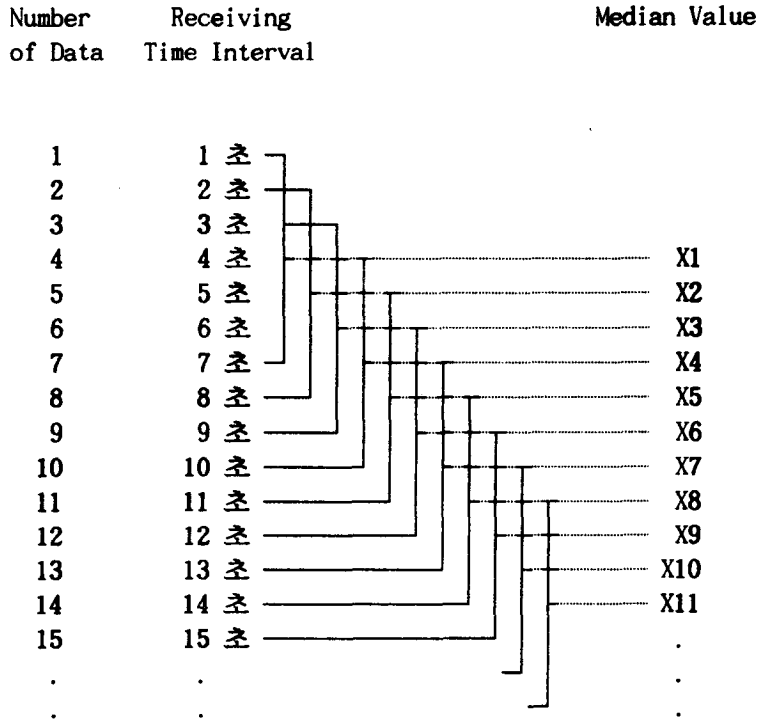


Fig. II-32. Filtering method for eliminating mechanical error data of water depth.

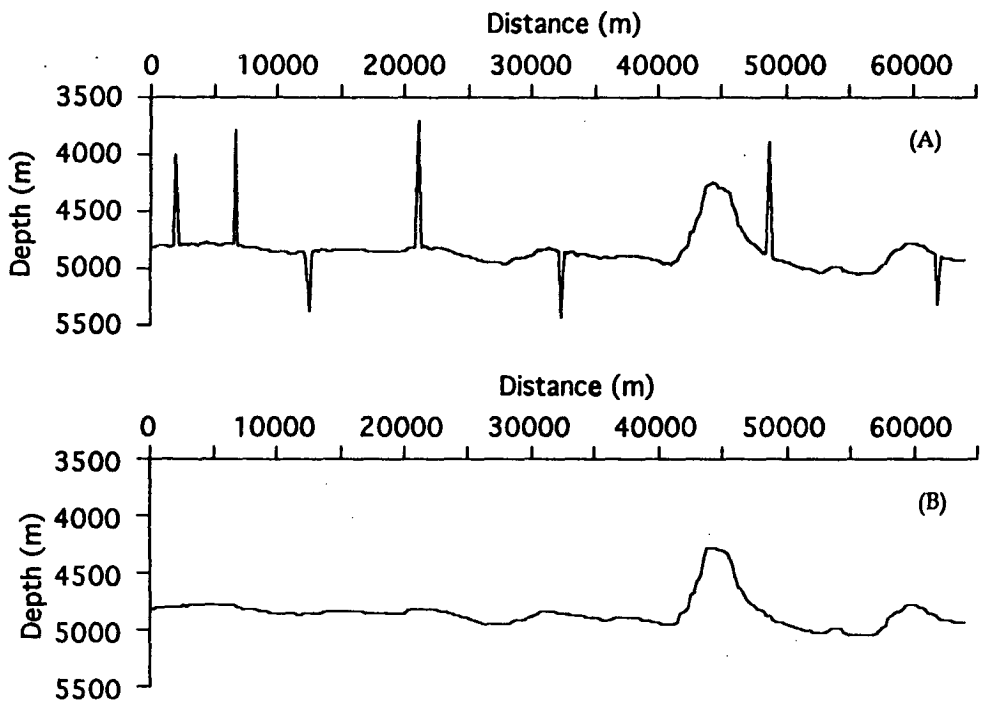


Fig. II-33. Example of bathymetric profiles showing (a) before filtering and (b) after filtering.

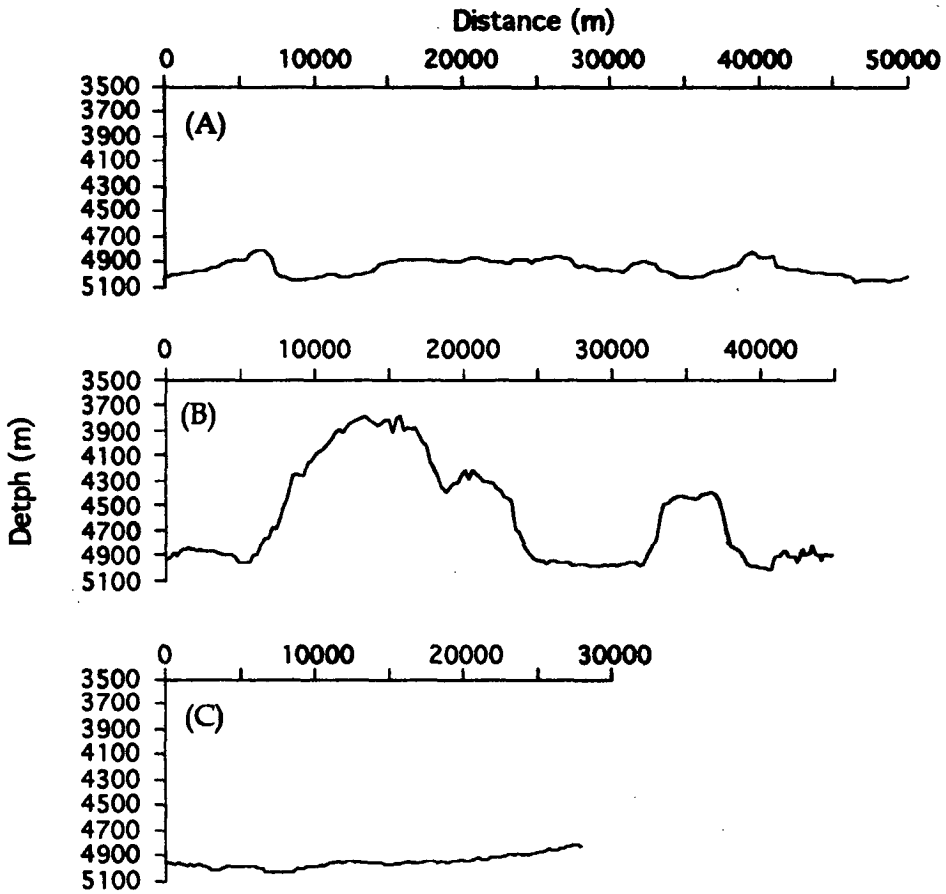


Fig. II-34. Bathymetric profiles of three example areas: (A) abyssal plain with hills, (B) abyssal hills, and (C) abyssal plain. Results of analysis of Area (A), (B), and (C) are in Table 2.

## Appendix II-1 Program for bathymetric data filtering

```
/* Data filtering program for topographical analysis data */
/* 1994. 3. 10. by Hos. Kang. */

#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>

struct scabeam {
    char day[20];
    char lat[15];
    char longi[15];
    int depth;
};

struct scabeam lib;
struct scabeam *queuc;

int rear, front, n, flag=0;

int main(argc,argv)
int argc;
char *argv[];
{
    void add_queuc();
    struct scabeam delete_queuc();
    struct scabeam del;
    FILE *in,*out;
    char waste[100];
    int *maxmin, head, mean;
    int i, j, temp, incre=0;

    front = rear = -1;

    if ( argc != 3 ) {
        printf( "Usage: filter Inputfile Outfile" );
        exit(1);
    }

    printf("Input the parameter of filtering?(odd)\n");
    scanf("%d", &n);
    maxmin = (int *)malloc( sizeof(int)*n );
    queuc = (struct scabeam *)malloc( sizeof(struct scabeam)*n);

    out = fopen (argv[2], "w");
    in = fopen (argv[1], "r");

    for ( i=0; i < n; i++ ) {
```

```

        fscanf( in, "%s %s %s %d", lib.day, lib.lat, lib.longi, &lib.depth);
        fgets(waste, 100, in);
        add_queue( &lib );
    }

while(fscanf( in, "%s %s %s %d", lib.day, lib.lat, lib.longi, &lib.depth) != EOF)
{
    fgets(waste, 100, in);
    for ( i=0; i<n; i++)
        maxmin[i]=queue[i].depth;

    for( i=0; i<n-1; i++) {
        for ( j=i+1; j<n; j++) {
            if ( maxmin[i] < maxmin[j] ) {
                temp = maxmin[j];
                maxmin[i] = maxmin[j];
                maxmin[j] = temp;
            }
        }
    }

    mean = maxmin[n/2];
    head = ( n/2 + incre ) % n;
    fprintf(out, "%s %s %s %d\n", queue[head].day, queue[head].lat, queue[head].longi, mean);
    incre++;
    del = delete_queue();
    add_queue( &lib );

}/* end while */

    fclose(in);
    fclose(out);
    free(maxmin);
return(0);
}

void add_queue( data )
struct scabcam *data;
{
    if( flag == 1 ) {
        printf("queue_full\n");
        exit(0);
    }
    rear=( rear + 1 ) % n;
    if ( front == rear ) flag = 1;
    strcpy(queue[rear].day, data->day);
    strcpy(queue[rear].lat, data->lat);
}

```

```
strcpy(queuc[rear].longi, data->longi);
queuc[rear].dcpth = data->dcpth;
}
```

```
struct scabcam delete_queuc( )
{
    struct scabcam data;

    if( front == rear && flag == 0 ) {
        printf("queuc_empty\n");
        exit(0);
    }

    if( front == rear ) flag = 0;
    front = ( front + 1 ) % n;
    data = queuc[front];
    return(data);
}
```



## Appendix II-2 Program for topographic analysis

```
/* Topographical Analysis program */
/* 1994. 3. 12. by Hos. Kang. */

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#define MAXPART 90

typedef struct {
    double x_dis;
    double x_depth;
    double o_depth;
    int x_mount;
} KODOS;

KODOS *list;

int x_count, x_first, deg_cnt[MAXPART], deg_part[MAXPART];
int p_sign, pb_sign, bong, b_first, p_first, verfirst, vercount;
float para;
long MAXDIS;
double deg_len[MAXPART], deg_dep[MAXPART], bangle, bver, finalver;

double Absf (value)
double value;
{
    if ( value < 0. ) value = -value;
    return (value);
}

void Merell (y_refer, x_refer, y_lat, x_long, y_dis, x_dis)
double y_refer, x_refer, y_lat, x_long, *y_dis, *x_dis;
{
    double a, phi, c, y_re, x_re, y_la, x_lo;
    double rad, cen, y_disre, y_disla;
    void Degtorad();

    a = 6378206.4; /* in m */
    phi = 3.141592654;
    c = 0.0822719;
    rad = 0.017453292;
    cen = 10.; /* in degree, the latitude at which the projection */
                /* is true */

    y_refer += 0.1e-10; /* for truncation */
    x_refer -= 0.1e-10;
```

```

y_lat += 0.1e-10;
x_long -= 0.1e-10;
Degtorad (y_refer, &y_rc); /* min to degree and degree to radian */
Degtorad (x_refer, &x_rc);
Degtorad (y_lat, &y_la);
Degtorad (x_long, &x_lo);

*x_dis = a*(x_lo-x_rc)*cos(ccn*rad); /* in m */

/* distance from reference */
y_disre = a*log(tan(phi/4+y_rc/2)* \
pow( (1-c*sin(y_rc))/(1+c*sin(y_rc)), c/2. ))*cos(ccn*rad);

/* distance from point */
y_disla = a*log(tan(phi/4+y_la/2)* \
pow( (1-c*sin(y_la))/(1+c*sin(y_la)), c/2. ))*cos(ccn*rad);

*y_dis = y_disla-y_disrc; /* in m */
}

void Degtorad (deg, rad)
double deg, *rad;
{
double min, radian;

radian = 0.017453293;
min = deg-(int)deg;
*rad = ((int)deg+min*100/60) * radian;
}

void Calangle (cal_y, cal_x, bdepth, cal_ag)
double cal_y, cal_x, bdepth, *cal_ag;
{
double angle = 57.29577951;

if (cal_y == 0 )
    *cal_ag = 0.;
else
    *cal_ag = atan2 (cal_y, cal_x) * angle;

list[x_count+1].x_dis = cal_x;

if (bangle != 0. || *cal_ag != 0.) {
if ( bangle * (*cal_ag) <= 0. && x_first != 1) {
list[x_count].x_mount = 1;
list[x_count].x_depth = bdepth;

if ( b_first != 1 && Absf(list[x_count].x_depth-list[bong].x_depth)

```

```

                                < para ) {
    list[x_count].x_mount = 0;
    list[x_count].x_depth = 0.;
} else
    bong = x_count;

if (b_first) {
    b_first = 0;
    bong = x_count;
}

} else {
    list[x_count].x_mount = 0;
    list[x_count].x_depth = 0.;
}
} /* end if */

/* calculate vertical difference */
if ( list[x_count].x_mount == 1 ) {
    if ( verfirst == 1 ) {
        bver = list[x_count].x_depth;
        verfirst = 0;
    } else {
        finalver += Absf( bver-list[x_count].x_depth );
        bver = list[x_count].x_depth;
        vercount++;
    }
}
x_first = 0;
x_count++;
bangle = *cal_ag;
}

```

```

void Hori_diff (num, totcount, tothori, totmount, endsign)
int num, totcount, *tothori, *totmount, *endsign;
{
    int i, cmount = 0;
    double h_total = 0.;

    for (i = num; i < totcount; i++) {
        h_total += list[i+1].x_dis;
        if (list[i].x_mount == 1) cmount++;
        if (h_total >= MAXDIS) {
            *totmount += cmount;
            *tothori += 1;
            return;
        } /* end if */
    }
}

```

```

    } /* end for */
    if ( h_total < MAXDIS ) *endsign=1;
}

void Total_angle (cal_ag, totangle)
double cal_ag, *totangle;
{
    *totangle += Absf (cal_ag);
}

void Part_degree (cal_ag, cal_x, inter, factor, bdepth)
int inter, factor;
double cal_ag, cal_x, bdepth;
{
    int i, j;

    for ( i = 0, j = 0; j < factor; i += inter, j++) {
        if ( Absf(cal_ag) >= i && Absf(cal_ag) < inter+i ) {
            deg_cnt[j]++;          /* each degree count */
            deg_dep[j] += bdepth;  /* each depth total */
            deg_len[j] += cal_x;   /* each degree length */

            p_sign = j;
            if ( p_first == 1 ) pb_sign = p_sign;
            if ( p_sign != pb_sign )
                deg_part[pb_sign]++;
            pb_sign = j;
            p_first = 0;
            return;
        } /* end if */
    } /* end for */
}

void Total_length (cal_x, totlen)
double cal_x, *totlen;
{
    *totlen += cal_x;          /* total line depth */
}

void Caldis_y (bdepth, depth, cal_y)
double bdepth, depth, *cal_y;
{
    /* calculate depth length */
    *cal_y = Absf (depth) - Absf (bdepth);
}

void Caldis_x (blat, blongi, lat, longi, cal_x)
double blat, blongi, lat, longi, *cal_x;
{

```

```

double merc_y, merc_x;

Mercell (blat, blongi, lat, longi, &merc_y, &merc_x);
        /* calculate x-distance */
*cal_x = sqrt ( pow (merc_y, 2.) + pow (merc_x, 2.) );
}

void Tot_depth (depth, totdepth)
double depth, *totdepth;
{
    *totdepth += Absf (depth);
}

int Filecnt (infile)
char *infile;
{
    FILE *in;
    int count = 0;
    char string[200];

    if ( (in = fopen (infile, "r")) == NULL ) {
        printf (" %s input file not exist!\n", infile);
        exit(1);
    }

    while ( fgets (string, 200, in) != NULL )
        count+=1;

    fclose (in);
    return (count);
}

main ()
{
    FILE *in, *info, *out, *out2;
    static double f_inter[MAXPART], f_depth[MAXPART], f_avlede[MAXPART];
    static int f_avnum[MAXPART];
    char infofile[15], infile[15], outfile[15], outs[15];
    char time[20], ans, waste;
    double x_refer, y_refer, x_long, y_lat, y_dis, x_dis;
    double cal_x, cal_y, totdepth, blat, blongi, bdepth;
    double totlen, cal_ag, slodepth, totver, totangle;
    double f_verdif = 0., f_hordif = 0., f_adepth = 0., f_totlen = 0.;
    double f_avang = 0., lat, longi, depth;
    int i, j, count, inter, factor, endsign, f_count, number;
    long tothori, totmount;

    printf ( "Q>Input infofile name?\n" );
    scanf ( "%s", infofile );

```

```

info = fopen (infile, "r" );

printf ( "Q>Input interval degree(int)?\n" );
scanf ( "%d", &inter );
factor = 90 / inter;
printf ( "Q>Input the parameter of extreme points(ex 10 m)?\n" );
scanf ( "%f", &para );
printf ( "Q>Input the parameter of horizontal difference(ex 10000 m)?\n" );
scanf ( "%ld", &MAXDIS);

printf ( "Q>Input outfile name?\n" );
scanf ( "%s", outs );

if ( (out2 = fopen (outs, "w")) == NULL ) {
    printf(" %s cannot open!!\n", outs);
    exit(1);
}
fprintf(out2, "#####\n");
fprintf (out2, "## Line files:");
f_count = 0;

while ( fscanf (info, "%s", infile) != EOF ) {
    f_count++;
    number = Filecnt (infile);
    list = ( (KODOS *) malloc (sizeof(KODOS)*(number+1)) );

    if ( ( in = fopen (infile, "r")) == NULL ) {
        printf ( " %s input file not exist!\n", infile);
        exit (1);
    }
    /* parameter initiation */
    totdpeth = 0.;    totden = 0.;    totangle = 0.;
    bangle = 1.;    tothori = 0;    finalver = 0.;
    endsign = 0;    totmount = 0;    x_count = 0;
    x_first = 1;    p_first = 1;    b_first = 1;
    bong = 0;    verfirst = 1;    vercount = 0;

    for ( i = 0; i < number; i++) {
        list[i].x_dis = 0.;
        list[i].x_depth = 0.;
        list[i].o_depth = 0.;
        list[i].x_mount = 0;
    }

    for ( i = 0; i < MAXPART; i++) {
        deg_cnt[i] = 0;
        deg_len[i] = 0.;
    }
}

```

```

        deg_dep[i] = 0.;
        deg_part[i] = 0;
    }

    /* read first data and delete error depth */
    for (;;) {
        fscanf (in, "%s %lf %lf %lf", time, &lat, &longi, &depth);
        if ( depth != 0. ) break;
    }

    Tot_depth (depth, &totdepth);
    blat = lat;      blongi = longi;      bdepth = depth;
    count = 1;      list[0].o_depth = depth;

    while ( fscanf (in, "%s %lf %lf %lf", time, &lat,
                    &longi, &depth) != EOF )
    {
        list[count].o_depth = depth;
        count += 1;

        Tot_depth (depth, &totdepth);
        Caldis_x (blat, blongi, lat, longi, &cal_x);
        Total_length (cal_x, &totlen);
        Caldis_y (bdepth, depth, &cal_y);
        Calangle (cal_y, cal_x, bdepth, &cal_ag);
        Total_angle (cal_ag, &totangle);
        Part_degree (cal_ag, cal_x, inter, factor, bdepth);

        blat = lat;
        blongi = longi;
        bdepth = depth;
    }

    /* end sub while */

    deg_part[pb_sign]++; /* for last data */

    for (i = 0; i < count; i++) {
        Hori_diff (i, count, &tothori, &totmount, &endsign);
        if ( endsign == 1 ) break;
    }

    for (i = 0, j = 0; j < factor; i += inter, j++) {
        f_inter[j] += (double)deg_cnt[j]/(count-1);
        if ( deg_cnt[j] == 0 )
            f_depth[j] = 0.;
        else
            f_depth[j] += deg_dep[j]/(double)deg_cnt[j];
    }

```

```

    }

    for (i = 0, j = 0; j < factor; i += inter, j++) {
        if( deg_part[j] != 0 ) {
            f_avlcdel[j] += deg_len[j] / deg_part[j];
            f_avnum[j] += 1;
        }
    }

    f_avang += totangle / (count-1);
    f_verdif += finalvcr / vercount;
    f_hordif += (double)totmount / tothori;
    f_adepth += totdepth / count;
    f_totlen += totlen;

    fprintf ( out2, " %s ", infile );
    if ( f_count%4 == 0 ) fprintf(out2, "\n\n");
    fclose (in);
    free (list);
} /* end main while */

fprintf (out2, "\n\n\nInterval degree * % average depth(m)\n" );
fprintf(out2, "-----\n");
for (i = 0, j = 0; j < factor; i += inter, j++)
    fprintf(out2, " %2d --- %2d  %10.3lf %10.2lf\n", i, inter+i,
        f_inter[j]/f_count*100., f_depth[j]/f_count);
fprintf (out2, "\n### Average angle of slope degree %lf\n",
    f_avang/f_count);
for (i = 0, j = 0; j < factor; i += inter, j++) {
    if ( f_avnum[j] != 0 )
        fprintf (out2, "## Av. length of bottom part with ang. from\n
%2d to %2d degree %lf m\n", i, inter+i, f_avlcdel[j] / f_avnum[j]);
}

if ( f_verdif == 0.0 )
    fprintf(out2, "\n### Average vertical difference : not find slope\n");
else
    fprintf(out2, "\n### Average vertical difference %lf m\n",
        f_verdif / f_count);

fprintf (out2, "\n### Average horizontal difference %lf extr/10km\n",
        f_hordif / f_count);
fprintf (out2, "### Average depth %lf m\n", f_adepth / f_count);
fprintf (out2, "### Length of lines %lf m\n", f_totlen);
fprintf(out2, "#####\n");
fclose (info);
} /* end main */

```



Appendix II-3 Out-put data print-outs of example area(A), (B), and (C)

1. Area (A)

#####  
 ## Line files: rline.024

Interval	degree	%
0 --- 3	81.018519	%
3 --- 6	12.962963	%
6 --- 9	4.166667	%
9 --- 12	0.462963	%
12 --- 15	0.462963	%
15 --- 18	0.462963	%
18 --- 21	0.000000	%
21 --- 24	0.000000	%
24 --- 27	0.462963	%
27 --- 30	0.000000	%
30 --- 33	0.000000	%
33 --- 36	0.000000	%
36 --- 39	0.000000	%
39 --- 42	0.000000	%
42 --- 45	0.000000	%
45 --- 48	0.000000	%
48 --- 51	0.000000	%
51 --- 54	0.000000	%
54 --- 57	0.000000	%
57 --- 60	0.000000	%
60 --- 63	0.000000	%
63 --- 66	0.000000	%
66 --- 69	0.000000	%
69 --- 72	0.000000	%
72 --- 75	0.000000	%
75 --- 78	0.000000	%
78 --- 81	0.000000	%
81 --- 84	0.000000	%
84 --- 87	0.000000	%
87 --- 90	0.000000	%

### Average angle of slope degree 2.104869

- ## Av. length of bottom part with ang. from 0 to 3 degree 1794.699669 m
- ## Av. length of bottom part with ang. from 3 to 6 degree 330.886036 m
- ## Av. length of bottom part with ang. from 6 to 9 degree 281.863426 m
- ## Av. length of bottom part with ang. from 9 to 12 degree 232.667964 m
- ## Av. length of bottom part with ang. from 12 to 15 degree 259.565906 m
- ## Av. length of bottom part with ang. from 15 to 18 degree 259.627444 m
- ## Av. length of bottom part with ang. from 24 to 27 degree 247.700570 m

### Average vertical difference 60.344828 m

- ### Average horizontal difference 5.470046 extr/10km
- ### Average depth 4946.875576 m
- ### Length of lines 51150.282406 m
- #####

## 2. Area (B)

#####  
 ## Line files: rline.038

Interval	degree	%
0 --- 3	42.424242	%
3 --- 6	17.676768	%
6 --- 9	10.101010	%
9 --- 12	7.070707	%
12 --- 15	9.090909	%
15 --- 18	3.030303	%
18 --- 21	4.040404	%
21 --- 24	2.020202	%
24 --- 27	1.515152	%
27 --- 30	1.515152	%
30 --- 33	0.000000	%
33 --- 36	1.010101	%
36 --- 39	0.000000	%
39 --- 42	0.505051	%
42 --- 45	0.000000	%
45 --- 48	0.000000	%
48 --- 51	0.000000	%
51 --- 54	0.000000	%
54 --- 57	0.000000	%
57 --- 60	0.000000	%
60 --- 63	0.000000	%
63 --- 66	0.000000	%
66 --- 69	0.000000	%
69 --- 72	0.000000	%
72 --- 75	0.000000	%
75 --- 78	0.000000	%
78 --- 81	0.000000	%
81 --- 84	0.000000	%
84 --- 87	0.000000	%
87 --- 90	0.000000	%

### Average angle of slope degree 7.007518

## Av. length of bottom part with ang. from 0 to 3 degree 548.829396 m  
 ## Av. length of bottom part with ang. from 3 to 6 degree 284.164781 m  
 ## Av. length of bottom part with ang. from 6 to 9 degree 311.945134 m  
 ## Av. length of bottom part with ang. from 9 to 12 degree 265.325713 m  
 ## Av. length of bottom part with ang. from 12 to 15 degree 295.493844 m  
 ## Av. length of bottom part with ang. from 15 to 18 degree 305.226620 m  
 ## Av. length of bottom part with ang. from 18 to 21 degree 215.987117 m  
 ## Av. length of bottom part with ang. from 21 to 24 degree 218.924655 m  
 ## Av. length of bottom part with ang. from 24 to 27 degree 262.719230 m  
 ## Av. length of bottom part with ang. from 27 to 30 degree 214.020731 m  
 ## Av. length of bottom part with ang. from 33 to 36 degree 265.209928 m  
 ## Av. length of bottom part with ang. from 39 to 42 degree 270.524771 m

### Average vertical difference 98.807018 m

### Average horizontal difference 11.139860 extr/10km

### Average depth 4620.502513 m

### Length of lines 45513.753632 m

#####

### 3. Area (C)

#####  
 ## Line files: rline.032

Interval	degree	%
0 --- 3	79.746835	%
3 --- 6	16.455696	%
6 --- 9	3.797468	%
9 --- 12	0.000000	%
12 --- 15	0.000000	%
15 --- 18	0.000000	%
18 --- 21	0.000000	%
21 --- 24	0.000000	%
24 --- 27	0.000000	%
27 --- 30	0.000000	%
30 --- 33	0.000000	%
33 --- 36	0.000000	%
36 --- 39	0.000000	%
39 --- 42	0.000000	%
42 --- 45	0.000000	%
45 --- 48	0.000000	%
48 --- 51	0.000000	%
51 --- 54	0.000000	%
54 --- 57	0.000000	%
57 --- 60	0.000000	%
60 --- 63	0.000000	%
63 --- 66	0.000000	%
66 --- 69	0.000000	%
69 --- 72	0.000000	%
72 --- 75	0.000000	%
75 --- 78	0.000000	%
78 --- 81	0.000000	%
81 --- 84	0.000000	%
84 --- 87	0.000000	%
87 --- 90	0.000000	%

### Average angle of slope degree 1.462800

## Av. length of bottom part with ang. from 0 to 3 degree 774.374787 m  
 ## Av. length of bottom part with ang. from 3 to 6 degree 205.174468 m  
 ## Av. length of bottom part with ang. from 6 to 9 degree 179.439481 m

### Average vertical difference 18.464286 m

### Average horizontal difference 7.421384 exts/10km  
 ### Average depth 4940.459119 m  
 ### Length of lines 28047.344000 m  
 #####



## Part III. 해양환경보전분야

### 해 양 환 경 저 서 생 태

연구 책임자 : 오 재 룡, 제 종 길

참여 연구원 : 양 성 렬, 이 홍 금

김 종 근, 박 홍 식

윤 상 선, 이 형 곤

강 호 석, 박 재 석

오 정 순, 이 기 욱



## 제 1 장

### 해 양 환 경





## 요 약

심해저 광구등록 해역에서의 환경요인으로서 기상, 해황, 환경변화에 대한 생태계의 반응에 관한 연구가 자원탐사와 병행하여 수행되었다. 기상은 탐사가능일수 산정 및 채광장비 설계에 영향을 미친다. 풍향은 북동풍이 지배적이고 풍속은 3-11 knot 내외가 대부분이었다. 8월경에 Hurricane의 영향이 자주 나타나는데 풍속의 증가(14 knot)와 병행하여 풍향의 변화(남풍 또는 남서풍)가 나타났다. 수온은 25.0 - 29.5 °C 기온은 24.0 - 29.0 °C로 수온이 기온보다 평균 1 °C 정도 높게 나타나며, 수온의 일변화가 기온의 일변화에 비하여 작은 폭을 보였다. 1개월 단위의 변화는 기압의 변화와 이와 관련된 기상의 변화에 따른 일조량의 변화와 관계를 보였다. 즉, 기압의 강하가 나타날 경우 일조량의 감소와 함께 기온의 하강이 수반되었다. 기압은 1005 - 1018 mbar범위를 보였으며, 기압의 변화는 장기간의 변화와함께 1일 2주기(semidiurnal)의 atmospheric tide가 매우 뚜렷이 나타났다. 최저기압은 오전, 오후 4시에, 최대치는 오전, 오후 10시에 각각 나타났으며 일일 변화폭은 2-3 mbar를 보였다. 기상의 연간 변화는 탐사기간이 4월말 - 8월에만 한정되어 1년간 변화를 파악하기 위하여는 계류장치에 의한 연속측정이 필요하다.

표층생태계의 생산성을 좌우하는 영양염의 농도, 특히 해양에서 제한요인으로 작용하는 질산염의 농도는 표층혼합대에서 0.1  $\mu\text{M}$  내외로 매우 낮게 나타났다. 질산염:인산염 비는 표층혼합대에서는 1이하의 매우 낮은 값을 보이고 수심의 증가에 따라 10 가까이 증가한다. 이는 표층에서 질산염이 인산염에 비하여 제한요인으로 작용할 가능성이 높다는 것을 의미한다. 광합성 색소의 수직분포는 영양염의 농도가 증가하기 시작하는 수온약층 부근에서 0.4  $\text{mg m}^{-3}$ 의 subsurface maximum을 보였다. 표층에서는 영양염 농도가

제한요인이 되고 수온약층 이하의 수층에서는 빛이 제한요인으로 작용한다.

광엽에 따르는 plume에 의한 광투과도 감소는 광합성의 감소를 초래하고, 금속 농도의 증가는 철등 필요한 이온을 공급하여 생산성 증가를 가져올 수 있는 반면, 구리등 독성이 있는 이온의 증가는 생산성의 감소를 수반할 수 있는 양면성을 지닌다. 또한 이러한 금속이온 농도의 증가에 대한 식물플랑크톤의 반응은 독성의 경우 2 - 3시간 내에 나타나기하나 철이온 증가에 의한 생산성의 증가에 의한 생산성 증가에는 3 - 4일 이상이 소요되고 군집변화에 영향을 파악하기 위하여는 1개월 또는 1년 이상의 장기적인 monitoring이 필요하다.

저층생태계의 변화를 파악하기 위하여는 BIE와 유사한 형태의 교란실험이 필요하고, 이를 위하여는 저층생태계 생물량의 90% 이상을 점유하는 박테리아에 대한 연구가 절실하다. Disturber를 이용한 교란실험을 하기전 저층생태계의 baseline study가 현재와 같은 macrofauna의 종 조성위주의 연구에서 박테리아와 meiofauna의 생물량을 정량화하는 방향에서 이루어져야 한다.

## 제 1 절 서 론

심해저 개발 예정지역의 해양환경 변화는 전체 해수층에 서식하고 있는 생물에 대해 직접적이고 단기적인 영향을 미칠 뿐 아니라, 장기적으로 대기와 해양간 상호작용을 통하여 El Nino 등 지구 전체의 기후변화에 영향을 끼칠 수 있다. 환경변화를 주도하는 물리적인 요인중 해류의 수직 및 수평 변화는 광업활동에 따른 부유물질의 확산경로 파악에 필수적인 요소이며, 또한 조사해역의 기상 및 해황의 파악은 채광장비와 채광선의 설계, 그리고 작업가능일 산정에 중요한 고려요인이 된다. 육상이나 연안역과는 달리 탐사해역은 기상관측장비의 설치나 빈번한 조사를 할 수 있는 여건이 불리하여 기상자료나 해황에 관한 연속적인 monitoring 자료가 결여되어 있다. 특히 동부 열대 태평양은 서부 열대 태평양 해역에 비하여 섬이 거의 존재하지 않기때문에 기상자료의 획득이 특히 빈약한 상황이다.

해양물리적 특성중 수온은 일반적으로 수직변화가 수평변화에 비하여 매우 크게 나타난다. 수평변화는 경도(동서방향) 변화보다 위도(남북방향)변화가 크게 나타나는데, 수온과 밀접한 관계를 보이는 영양염 농도에 따라 해양생태계 먹이연쇄망의 기본을 이루는 1차 생산자인 식물플랑크톤의 종조성 및 생산성이 변하게 된다. 이에 따라서 생태계의 구조도 결정되게 된다. 해양생태계를 구성하는 각 요소간의 상호관계를 파악하는 것은 심해저 개발에 따른 환경영향 평가 및 보전대책을 수립하는데 있어서 선결되어야 할 과제이다.

광업활동에 의하여 영향을 받게되리라 예상되는 해양생태계는 다음 두 가지 환경으로 크게 나눌 수 있다. 즉, 채광기운용에 의해 발생하는 퇴적물의 재부유(resuspension)와 확산 등으로 직접 또는 간접적인 영향을 받는 저

층생태계와, 망간단괴 회수시 저층으로부터 함께 유입되는 부유성 퇴적물 등의 부유물질, 심층수, 작업선 폐수의 영향을 받게되는 표층생태계이다. 따라서, 심해저광업에 의한 환경변화 예측 및 오염방지 대책수립을 위하여는 이 두 생태계에 대한 연구를 병행하여 수행하여야 한다.

광업활동에 의한 1차적인 영향을 받게되는 저층생태계는 주로 표층으로부터 광합성에 의하여 형성된 후 침강되는 입자성 유기물(POM, Particulate Organic Matter)에 의하여 유지된다. 그외에 hydrothermal vent의 경우는 환원상태의 황화수소(Hydrogen sulfide; H<sub>2</sub>S)를 에너지원으로 하여 유광층의 광합성 system으로부터 독립된 독특한 생태계가 유지된다. 심해의 저층 생태계를 구성하는 생물체중 박테리아가 생체량의 90% 이상을 차지하며, 나머지 10%중 5% 내외는 40 - 500 μm 크기의 meiofauna가, 그 나머지인 5% 이하를 500 μm 이상의 macrofauna와 megafauna가 차지한다. 개체수의 측면에서는 기하급수적으로 더욱 커다란 차이를 보이게 된다. 박테리아는 생체량에서 뿐만 아니라 생태계에서 차지하는 역할에 있어서도 유기물의 분해 작용과 함께 용존 또는 입자성 형태의 유기물을 소비자가 포식하기 용이한 상태로 변환시켜 저서동물의 가장 중요한 먹이원이 된다. 현재까지 국내에서의 연구는 주로 macrofauna와 megafauna의 종조성과 분포에 관한 연구가 행하여졌으나, 매우 낮은 생물개체수로 인하여 현재의 시료채취 방법으로는 일반적인 분포양상도 밝히지 못하고 있다. 외국에서는 심해 저서생물의 군집특성, 서식경쟁, 에너지 흐름 및 생리적 특성등에 대한 연구가 수행되었거나 진행중이다. 최근들어 1991년부터 미, 일, 러 공동 연구과제인 BIE (Benthic Impact Experiment)에서 채광장비에 의한 심해퇴적물 교란에 의하여 퇴적물이 부유 재퇴적되면서 퇴적물 표층에 포함된 먹이원이 희석되는데 따른 중형저서동물(benthic meiofauna)의 기아(飢餓; starvation)정도를 파악

하기 위하여 지방분 조성(fat content) 변화에 관한 연구가 행하여지고 있다. 저서 박테리아에 대한 연구는 그 중요성에도 불구하고 시료채취 및 연구방법의 어려움으로 인하여 현재까지는 연구가 활발하게 진행되지 않고 있다. 1994년부터 시작된 일본측 심해저 환경연구에서는 박테리아에 관한 연구가 포함되어 있다.

심해 저층생태계의 특성은 생물량이 연안역에 비하여 낮을 뿐 아니라, 성장속도는 에너지원과 세포를 구성하는 물질인 표층으로부터 공급되는 유기물이 침강하는 과정에서 수층에서 박테리아 등의 분해 활동에 의하여 대부분 소비되어 작은 부분만 도달하게 됨에 따라 매우 낮은 성장속도를 보인다. 이에 따라 생태계의 변화나 파괴가 원래 상태나 건강한 상태로 회복되기 위하여는 연안역이나 천해역의 저층생태계에 비하여 장구한 세월이 소요되리라 쉽게 예견할 수 있다. 생태계의 파괴 또는 바람직하지 않은 방향으로의 변화가 예상되는 자원의 개발에 앞서 지구상에서 인류 전체의 마지막 변경인 심해저 생태계의 보존 또는 피해를 최소화할 수 있는 가능한 모든 방안이 강구되어야 한다.

광업활동에 따른 표층해양역에 대한 영향은 표층에 서식하는 생물체에 대한 직접적인 영향과, 생태계를 조성하는 종조성의 변화에 따른 먹이사슬 변화의 2차적이고 중기적인 영향, 이러한 생태계의 변화로부터 대기-해양간의 상호작용에 의한 지구 전반적인 기상변화에 미칠 수 있는 장기적인 영향으로 크게 구별할 수 있다. 표층 생태계를 이해하기 위하여는 먼저 생태계를 구성하는 먹이망(food-web)의 기본이 되고 전체 생물량의 60 - 90%를 차지하는 식물플랑크톤과 1차생산성의 측정이 필수적인 요소이다. 1차생산은 영양염, 특히 해양생태계에서 제한요인으로 작용하는 질소계 영양염의 기원에 따라 신생산(new production)과 재생산(regenerated production)으로

나눌 수 있다 (Dugdale and Goering, 1967). 신생산은 표층생태계의 system 밖에서 유입되는 영양염 즉, 용승(upwelling) 또는 확산(molecular and eddy diffusion)에 의한 유광층 하부로부터의 유입 (주로 질산염), 강우에 의한 유입, 또는 질소고정(dinitrogen fixation)에 의한 질소 영양염원에 의한 생산을 포함하며, 저층으로의 물질 수직침강수지(vertical sinking flux of material)와 밀접한 연관을 가진다. 재생산은 유광층 내에서 순환되는 영양염(암모니아, 요소)에 의한 생산으로, 유광층 내에서 물질순환 속도를 나타낸다. 신생산에 비하여 재생산은 steady state를 가정할 때 저층으로의 수직침강수지에 기여를 하지 못한다. 수직침강수지에 영향을 미치는 신생산은 유기물의 flux와 함께 scavenging된 trace metal을 운반하여 수직적으로 4,000 m 이상 격리된 저층에서의 망간단괴 형성에도 직접적인 영향을 미친다. 심해저 광구등록지역에 대한 1차생산의 측정은 대륙으로부터 멀리 떨어진 관계로 인하여 연안역에 비해 비교적 연구가 많이 되지 않았다. 국내에서는 93년부터 망간단괴 탐사와 병행하여 몇 정점에서 측정이 되었으나 계절적, 지역적 변화를 파악하기 위하여는 지속적인 연구가 필요하다.

표층생태계에서 활동에 따른 생물체에 대한 영향은 plume에 의한 1차생산 변화에 대한 연구가 미국에서 1970년대에 행하여 졌으나 뚜렷한 결론을 내리지 못하였다. 근본적인 이유로는 심해저 광구해역이 영양염 및 용존 금속 이온의 농도가 극히 낮은 빈영양해역(oligotrophic area)으로서 저층수의 유입에 따른 영양염 및 금속이온 농도의 증가가 생물체 더 나아가서 생태계에 미치는 영향을 파악하기가 매우 어려운 데 기인한다. 또한 부유물질의 증가로 인한 광투과도의 감소가 1차생산을 저하시키리라 예상된다. 1차생산 및 1차생산자의 변화는 필연적으로 생태계 전반의 먹이망에 영향을 미쳐 생태계 구조의 변화를 수반하게 되며, 이러한 복합적인 영향을 예측하기 위하

여는 중규모 이상의 인위적인 plume을 일으켜 생태계의 시간에 따른 변화를 수년에 걸쳐 장기간 종합적으로 관찰하여야 한다. 이러한 연구는 어느 한 연구팀이나 한 국가의 노력으로는 연구비와 연구인력자원 면에서 거의 불가능하며, 국제적인 공동 연구가 절실히 필요하다. 환경연구 분야는 자원개발 분야와 달리 국가간 커다란 이해의 상충이 없이 국제적인 협력을 이루어 나야 갈 수 있다.

심해저 광업에 따른 간접적인 영향으로서, 대기-해양간의 상호작용에 의한 기상의 국지적 단기적인 변화과 지구 기후 변화에 대한 대규모 장기적인 영향에 대한 연구는 수행되지 않고 있다. 표층 부유물질의 증가는 태양 입사광의 반사, 흡수 및 산란에 영향을 미쳐 수층의 열 전도 및 흡수율에 변화를 가져와 대양의 heat budget에 변화를 주게 된다. 이에 따라 지구의 열 분포 및 해류의 흐름, 기류에도 영향을 미칠 가능성이 있다. 이러한 변화는 상업적 규모의 개발이 진행되기 전까지는 어느 정도로 변화될지 예측이 불가능하다. 또한 우려가 야기되는 문제는 이산화탄소의 증가이다. 심층수는 표층수에 비하여 용존이산화탄소의 농도가 높기 때문에 광업화동에 따른 심층수의 표층으로의 유입은 해양으로부터 대기로의 이산화탄소 방출을 수반하게 된다. 이에 따른 대기중 이산화탄소 농도의 증가는 온실효과를 통하여 지구온난화를 가속화할 가능성이 있다. 이러한 가능성을 정량화하기 위하여는 해수순환 및 대기-해양간 CO<sub>2</sub> 교환 모델을 통한 접근이 필요하며, 현 단계에서는 가장 효율적이고 유일한 방법이다. 이 방법의 문제점은 현재까지 화석연료 소비에 기인한 이산화탄소 증가가 지구 온도상승에 미치는 정도와, 증가된 이산화탄소의 궁극적인 sink인 해양의 buffer 역할에 관하여 여러 model들의 결과가 상이하다는 것이다.

## 제 2 절 시료채취 및 측정방법

### 1. 해황 및 기상

기상자료의 획득은 항해기간중 해양연구소 조사선 온누리호에 장착된 기상 관측 시스템인 Met-PC와 휴대용 Li-Cor Quantum meter를 이용하여 표층 수온, 기온, 기압, 풍속, 풍향, 일조량을 측정하였다. 10분 간격의 평균값이 기록된 1차 자료를 자료양을 줄이고 자료 처리의 용이성을 위하여 다시 1시간 단위로 평균값을 구하였다. 대기압, 일조량을 제외한 나머지 자료는 1개월간의 항해기간 변화양상을 쉽게 파악하기 위하여, 필요에 따라 25시간 filtering algorithm을 이용하여 짧은 주기의 noise를 제거하였다.

수온, 염분 수직분포로부터 수괴구분 및 수층의 안정성(stability) 파악하기 위하여 일부 정점에서 CTD(Conductivity, Temperature, Depth) 관측을 수행하였다. 표층 해류측정은 조사선에 장착된 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler; 도플러 효과를 이용한 유속측정 장치)를 이용하여 표층(0 - 350 m) 해류의 수직분포를 파악할 수 있다. 94년 1항차 기간중 측정을 하였으나, 자료가 방대하여 처리에 시일이 필요하다. 저층해류는 현재 측정을 하지 않고있으나, 추후 유속계(current meter)를 저층에 계류(mooring)하여 장기간 측정을 할 계획이다.



## 2. 환경 요인

본 조사해역에서 생산성을 조절하는 중요한 요인중의 하나인 영양염은 Rosette sampler에 부착된 Niskin bottle을 이용하여 수층별로 채수하여, 발색반응에 의해 autoanalyzer로 농도를 측정하였다. 측정된 영양염은 질산염( $\text{NO}_3^-$ ), 아질산염( $\text{NO}_2^-$ ), 인산염( $\text{PO}_4^{3-}$ ), 규산염( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ), 암모니아( $\text{NH}_4^+$ )이다. 용존산소량은 일부 정점에서 CTD에 부착된 D.O. meter를 이용하여 수직 profile 측정하였으며, 정확한 값을 구하기위하여 titration에 의해 보정을 하였다. 광합성색소량(Chlorophyll *a*)은 수층내의 1차생산자 농도를 나타내는 지시자로서 Niskin bottle로 각 수층에서 채취한 해수 1 - 4 l를 GF/F glass fiber filter paper에 여과하여 90% acetone으로 -20 °C에서 24시간 이상 추출 후 spectrophotometer를 이용 흡광도 측정하여 Parsons *et al.* (1984)에 의하여 계산하거나 Turner Designs Fluorometer를 이용하여 측정하였다. 중금속이온의 농도는 환경 baseline 설정과 광업활동에 따른 농도증가에 따른 환경용량 산정에 중요한 요인이나, 현재의 채수방법으로는 철(Fe), 구리(Cu) 등 일부 금속원소의 경우 contamination 문제가 심각하여 Kevlar wire 구입 시까지 보류하였다.

## 3. 표층 생태계 구조 및 변화

대양에서의 생태계 먹이연쇄망의 기본이 되는 1차생산자는 광합성을 하는 미세한 식물플랑크톤이다. 식물플랑크톤의 종조성과 현존량 측정을 위하여 20  $\mu\text{m}$  plankton net의 수직 tow와 Niskin bottle로부터 수층별 채수하여

glutaraldehyde로 고정, 냉장 보관하였다. 출현종의 정성분석은 광학현미경과 주사전자현미경(SEM)를 이용하여 동정하고, 정량분석은 HPMA로 반영구적인 slide를 만들어 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 심해저해역의 식물플랑크톤은 빈영양환경에 적응된 극히 미소한 종으로 구성되어 있어 종의 구분이 불가능한 경우가 많고 일부는 속(genus)도 불분명한 경우가 많다.

1차생산의 측정을 위하여 Niskin bottle을 이용하여 6개 광투과수심(LPD; light penetration depth)에서 채수한 해수를 방사성 동위원소인  $^{14}\text{C}$ - $\text{NaHCO}_3$ 를 10  $\mu\text{Ci}$  inoculate하여 자연광하에서 4 - 6시간 배양 후 GF/F filter paper로 여과한 후 여과지를 plastic scintillation vial에 넣어 냉동보관하였다. 실험실에서 scintillation cocktail 10 ml를 넣고 liquid scintillation counter로 유기물에 incorporate된 방사능량을 측정, 1차생산을 계산하였다.

신생산 및 재생산 측정은 안정동위원소인  $^{15}\text{N}$ - $\text{KNO}_3$ 와  $^{15}\text{N}$ - $\text{NH}_4\text{Cl}$ 을 이용하여 측정하였다. 1차생산과 동일하게 100, 50, 30, 15, 3.5 1% LPD에서 채수한 시료를  $^{15}\text{N}$  tracer를 첨가하여 다른 광도하에서 배양 후 GF/F filter로 여과, 60  $^{\circ}\text{C}$ 에서 건조 후 GC-MS(gas chromatography-mass spectrometer)를 이용하여  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  비와 PON(particulate organic nitrogen; 입자성 유기질소)양으로부터 생산성을 계산하였다.

박테리아 개체수 측정을 위한 시료는 Niskin bottle로 채수한 해수 30 ml를 2% 포르말린으로 고정하여 냉장보관 하였다. 실험실에서 10 ml를 0.2  $\mu\text{m}$  polycarbonate 여과지(직경 25 mm)로 여과하여 acridine orange로 염색한 후 형광현미경으로 계수하였다. 박테리아 생산성은  $^3\text{H}$  thymidine (Amersham, specific activity 83 Ci/mmol) uptake를 이용하여 측정하였다 (Fuhrman and Azam, 1982; Robarts and Wick, 1987).

해수중 용존유기물 조성은 Niskin bottle로 채수한 해수를 Sep-Pak C-18 column을 통과시켜 용존유기물을 흡착시킨 후 유기용매로 추출하여 HPLC(high performance liquid chromatography)를 이용하여 성분과 농도를 분석하였다. 용존유기물의 조성은 수층내 생물활동의 결과에 따라 변화하며, 광합활동의 결과에 따른 생물조성의 변화를 추적할 수 있고, 서로 다른 수괴를 구분하는 자료로도 쓰일 수 있다.

광합활동에 따른 광투과, 영양염, 중금속 농도 변화에 따른 생산성 변화를 파악하기 위하여 Niskin bottle이나 clean bucket을 이용 채수한 해수에 영양염(silicate, nitrate) 농도를 변화시켜 생산성의 변화를 측정하고, 다른 광도에서 생산성을 측정하여 변화를 관찰하였다. 금속농도의 변화에 따른 생산성 변화는 금속중 가장 제한요인으로 작용할 수 있는 철이온(Fe)과 독성이 강한 구리(Cu), 인공 chelator 화합물인 EDTA를 가하여 생산성 및 식물플랑크톤의 in vivo fluorescence 변화를 측정하였다 (Rueter and Ades, 1987).

방사성동위원소에 의한 물질 침강수지 측정은  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  동위원소를 이용하였다.

$^{210}\text{Po}$  분석 : 채취한 해수를 미리 산세척한 20 liter 폴리에틸렌 용기에 넣고, 진한 염산을 첨가하여 시료수의 pH를 1 이하로 하여 보관하였다. 해수중  $^{210}\text{Po}$ 의 농측은 수산화철 및 탄산칼슘 공침법 (Harada and Tsunogai, 1985)을 이용하였다. 즉, 산처리한 해수시료 60 liter에 화학적 수율모니터로  $^{209}\text{Po}$  표준용액 적당량 (4.44 dpm),  $\text{Pb}^{2+}$  담체 18 mg 및  $\text{Fe}^{3+}$  담체 30 mg을 첨가하여 잘 혼합한 다음 용액의 평형상태가 되도록 6시간 이상 방치한다. 여기에 (1+2) $\text{NH}_4\text{OH}$  용액을 첨가하여 pH를 약 7로 조절하고, 25% 탄산나트륨 용액 약 700 ml를 서서히 첨가하면서 잘 교반하여 해수중의 Pb와 Po

동위체를 수산화철 및 탄산칼슘 침전물과 함께 공침시켰다. 침전이 형성된 후 1시간 간격으로 5 - 6회 교반하여 침전물을 용집시킨 다음 하룻밤 방치하였다. 상등액을 제거하고 침전을 회수하여 7 M HNO<sub>3</sub> 용액으로 용해시킨 후, 가열판 위에서 30분 이상 가열하여 이산화탄소를 완전히 제거하고, 용액의 부피가 약 150 ml 정도가 될 때까지 가열 증발시켰다. 이 용액을 냉각시킨 다음 암모니아수를 첨가하여 용액중의 Pb와 Po 동위체를 다시 수산화철과 함께 공침시켰다. 원심분리하여 침전물을 모으고, 0.5 M HCl용액 약 50 ml로 침전을 용해시킨 후 100 ml 비이커에 옮겨 Po 동위체를 은판위에 전착시켰다. 여과하지 않은 해수의 경우 용해되지 않은 잔사를 제거하기 위하여 전착시키기 전에 테프론 용기로 옮겨 질산과 불소산으로 녹인 후 전착시켰다.

Po동위체를 함유하고 있는 0.5 M HCl용액에 20% NH<sub>2</sub>OH HCl용액 1 ml와 ascorbic acid 약 50 mg을 첨가하고, 잘 교반하면서 Fe<sup>3+</sup>을 완전히 환원시켰다. 이 용액에 은반(silver disc; 직경 12 mm, 두께 0.2 mm)을 고정시킨 원형자기교반자(round magnetic stirrer)를 넣고, 85-90°C로 약 3시간 이상 서서히 교반하면서 Po동위체를 은반위에 전착하였다. 전착이 완료된 후 은판을 이온교환수와 에탄올로 세척 건조한 다음 알파계수(alpha counting)하였다.

시료수중 <sup>210</sup>Po의 농도는 두 동위체의 계수율(cpm)과 표준용액의 농도 및 시료량으로부터 아래와 같은 식으로 계산하였다(Ivanovich and Harmon, 1982).

$$A_{Po-210}(dpm/l) = [C_{Po-210}(cpm) \times A_{Po-209}(dpm)] / [C_{Po-209}(cpm) \times \text{시료량}(\ell)]$$

<sup>210</sup>Pb 분석 : Po동위체를 전착시키고 난 후의 용액에 깨끗한 은조각을

넣고 약 60 °C로 하룻밤동안 방치하면, 남아있는 Po를 완전히 제거시킬 수 있다 (Cochran et al., 1983). 이 용액에 화학적 수율 모니터인  $^{209}\text{Pb}$  표준용액 적당량(4.44 dpm)을 첨가하고 100 ml로 정용(mass up)한다. 이 용액 1 ml를 취하여 원자흡광 광도계로 Pb의 농도를 측정하여 Pb의 화학적 수율을 계산한다. 나머지 용액 99 ml를 100 ml 폴리에틸렌 용기에 넣고 밀봉한 다음 3개월 이상 보관하여  $^{210}\text{Pb}$ 을 딸핵종인  $^{210}\text{Po}$ 으로 성장시킨다. 이 용액을 중발 건조하고, 0.5 M HCl 용액 약 50 ml에 용해한 후 Po동위체를 은판위에 전착시킨다. 계수는  $^{210}\text{Po}$ 와 동일하게 알파계수한다.

$^{210}\text{Pb}$ 으로부터 성장한  $^{210}\text{Po}$ 의 농도와 Pb의 화학적 수율 및  $^{210}\text{Po}$  계수율로부터  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도를 아래와 같은 식으로 계산한다 (Kaufman et al., 1981).

$$^{210}\text{Pb}(\text{dpm}/100\text{l}) = \{(\lambda_{\text{Po}} - \lambda_{\text{Pb}}) / \lambda_{\text{Po}}\} \times [A_0 / \{1 - (\exp(-\lambda_{\text{Po}}t))\}]$$

## 제 3 절 결과

### 1. 해황 및 기상

Met-PC(자동 기상관측 및 기록 station)에 의하여 수집된 기상자료는 온누리호를 이용한 탐사가 수행되었던 92년 4개항차와 93년 2개항차중 1개항차 모두 5개 항차의 자료가 10분 간격의 평균값으로 기록되었다. 기록된 parameter는 표층수온, 기온, 기압, 태양 일조량, 염분, 풍향 및 풍속이다. 방대한 자료의 처리는 일변화를 보기 위하여 1시간 간격의 평균값을 도표로 나타내었다. 항해기간 동안의 일반적인 변화양상을 보기 위하여 25시간 filtering algorithm을 이용, 일간 변화로 인한 noise를 제거 smoothing하였다.

표층수온(sea surface temperature; SST) 및 기온의 변화를 보면 표층수온은 25.0 - 29.5°C의 범위를 보이고 기온은 24.0 - 29.0°C의 범위를 보인다. 일반적으로 해수의 온도가 기온에 비하여 1°C 정도 높게 나타난다. 대기와 해양의 비열차이에 따라 기온의 일교차가 수온의 일교차에 비해 크게 나타난다.

기압은 1005 - 1018 mbar 범위를 보이고, 일일변화는 하루에 2회 최고(지방시각 오전 10시, 밤 10시), 최저기압(새벽 4시, 오후 4시)이 나타나는 semi-diurnal한 양상을 보인다. 이러한 semi-diurnal한 기압의 변화를 atmospheric tide(대기조석)라하며 이의 원인에 대하여는 토론에서 다시 언급하기로 하겠다.

일조량은 맑은 날의 경우 정오에 최대치가 1,000 Wm<sup>-2</sup>의 값을 보이고 흐린 날은 최대치가 600 Wm<sup>-2</sup> 이하로 감소하였다. 일조량은 기압변화와 높

은 상관관계를 보인다. 이는 기압변화가 기상 특히 구름의 양과 밀접한 관계에 있는데 기인한다. 기압이 하강하는 저기압하에서는 일조량이 감소하고 기압이 높을 때에는 일조량이 높게 나타난다.

풍향은 전반적으로 북동풍이 지배적이며 풍속은 3 - 11 knot의 범위에 주로 분포하고 허리케인의 영향권에 근접하였을 때(KODOS 93-3, 92-4) 풍향의 변화가 뚜렷이 나타나고 최고풍속은  $14 \text{ ms}^{-1}$ 까지 기록되었다.

각 항차별 분포를 보면, 92-1항차에 표층수온과 기온은 25 - 28 °C 범위를 보이고, 수온의 일변화는 없는데 비하여 기온은 24시간 주기의 일변화를 나타낸다 (Fig. III-1a). 25시간 filter를 이용 일일변화에 의한 noise를 제거하면 4-5일 주기의 온도의 변화 경향을 뚜렷이 알 수 있다 (Fig. III-1b). 기압은 1007 - 1015 mbar 범위에서 뚜렷한 semi-diurnal한 양상을 보인다 (Fig. III-1c). 일일 기압차는 2 - 3 mbar 정도이다. 끝부분에서의 기압증가는 탐사지역을 벗어나서 하와이로 귀항하는데 따른 지역적인 차이로 보인다. 이는 온도의 감소에서도 알 수 있다. 일조량은 119, 132, 138 Julian day를 제외하고는 일반적으로 맑은 날씨를 보였음을 알 수 있다 (Fig. III-1d). 풍속은 noise 제거를 위하여 25시간 filter를 이용하여 나타났었다 (Fig. III-1e). 4 - 8 knot의 범위를 나타내며, 온도 변화보다 빠른 2 - 3일 주기의 변화를 보인다. 10분단위 평균 풍향과 풍속의 분포를 보면 북동 또는 동풍이 지배적이고 풍속도 5 - 12 knot의 범위를 보이며, 동남풍으로 방향이 변하면서는 풍속도 5 knot 이하로 감소함을 알 수 있다 (Fig. III-1f). Wind vector diagram을 보면 풍속과 풍향의 시간변화를 도식적으로 알 수 있다 (Fig. III-1g). 동풍 또는 북동풍이 지배적인 것을 한눈에 볼 수있으며, 하와이로 접근하면서 풍향이 남, 남서로 변하는 것을 알 수 있다.

KODOS 92-2 항차의 경우는 Met-PC System의 작동불량으로 인하여

항해 중간에 10 여일간의 자료가 획득되지 못하였다. 온도는 처음과 끝은 탐사해역 북부 하와이 근처의 자료로 탐사해역보다 2 - 3 °C 낮은 값을 보인다 (Fig. III-2a, b). 중간 자료가 미비하지만 92-1항차에 비하여 탐사해역의 온도가 1 °C 정도 상승한 것을 알 수 있다. 이는 두 지역의 위도가 북위 10도 내외이고 경도도 3도 이상 이격되지 않아서 그 차이는 계절적인 요인으로 보인다. 기압변화는 92-1항차에 비하여 크게 나타나는데 이는 주로 지역적인 차이에 기인하는 것으로 보이고, 일일 변화폭은 차이가 없다 (Fig. III-2c). 일조량은 큰 차이를 보이지 않으나 구름의 영향을 받는 날이 약간 증가한 것으로 보인다 (Fig. III-2d). 풍속의 크기는 1항차와 유사하나, 풍향은 동남 또는 남풍의 빈도가 감소하였음을 알 수 있다.

KODOS 92-3 항차의 경우는 191일과 196일 수온과 기온의 차이가 매우 크게 나타났는데 이는 강우를 동반한 구름으로 인하여 일조량이 감소하여 주간 기온의 증가가 수반되지 않은데 주로 기인한 것으로 보여진다 (Fig. III-3a, b, d). 기온의 감소는 기압의 강하와도 관계를 보이거나 (Fig. III-3c), 풍속과는 관계를 보이지 않는다 (Fig. III-3e). 풍향은 1, 2항차와 대조적으로 뚜렷한 방향이 없이 분산되어 있음을 볼 수 있다 (Fig. III-3f). 초기에는 북동풍이 지배적이었으나, 날씨가 흐려지고 기온이 감소한 191일과 196일을 전후하여 풍향이 남동 또는 남풍으로 변화하는 것을 알 수 있다 (Fig. III-3g).

KODOS 92-4 항차의 경우 기온변화의 noise가 심하게 나타나는데 이는 일조량에서 볼 수 있듯이 주간에 구름의 영향으로 인한 변화로 보인다 (Fig. III-4a, d). Filter를 이용 high frequency noise를 제거하면 4 - 5일 주기의 변화를 볼 수 있다 (Fig. III-4b). 기압은 1008 - 1015 mbar 범위를 보였다 (Fig. III-4c). 25시간 filtering한 풍속은 1 - 10 knot의 커다란 변화를 보였



다 (Fig. III-4e). 강한 바람은 북동풍 또는 남서풍을 보이며, 풍속이 감소하는 slack period는 풍향이 변하는 전이기(transition period)로 보인다 (Fig. III-4f). 230일부터 풍속의 증가와 남서풍으로의 풍향의 변화는 당시 주변해역에서 발생하였던 hurricane의 영향에 기인한다 (Fig. III-4g).

KODOS 93-2 항차해역은 북위 16 서경 130 해역으로 KODOS 92 해역에 비하여 북태평양 고기압 주변부에 근접하여있다. 표층수온은 25 - 26.5 °C, 기온은 24 - 25.5°C 범위로 KODOS 92 해역에 비하여 1°C 이상 낮게 나타났다 (Fig. III-5a, b). 탐사기간이 계절적으로 비슷하였기 때문에 지역적인 해류 및 기단의 차이에 기인하는 것으로 보인다. 기압도 1011 - 1015 mbar 사이로 변화의 폭이 KODOS 92 항차에 비하여 작으며, 최저기압은 3 - 4 mbar 이상 높게 나타나 고기압의 영향이 항상 있음을 알 수 있다 (Fig. III-5c). 일조량도 구름의 영향을 받지 않는 맑은 날씨가 계속되었음을 보여 준다 (Fig. III-5d). 풍속은 탐사 초기와 마지막의 2 - 3일동안 7 - 11 knot의 peak를 보인 것을 제외하고는 3 - 5 knot의 약한 바람이 지배적이었다 (Fig. III-5e). 풍향은 북동풍이 지배적이며 풍속의 변화가 풍향의 변화를 수반하지 않고 강도만 변화하는 92-3, 4 항차와 다른 양상을 보였다. 이는 92년도에는 저기압의 영향으로 인하여 풍향과 풍속이 동시에 변화하는데 비하여 93-2 지역은 고기압의 가장자리에 위치해 고기압 세력의 성쇠에 따라 바람의 강도만 영향을 받는데 기인하는 것으로 보인다.

## 2. 수온 염분의 수직 분포 (CTD)

KODOS 93 해역은 북위 13 - 15° 에 위치하여 북태평양 gyre의 영향으로 인하여 수온약층(thermocline)의 깊이가 100 m 이상의 깊은 표층혼합

층 (surface mixed layer)을 보이나, KODOS 92 해역은 북적도해류와 적도 반류가 교차하여 표층수가 발산(diverge)하는 해역으로 중층수의 용승(upwelling)이 일어나므로 인하여 수온약층이 75 m 내외에서 얇게 나타난다. 이러한 수온의 수직분포의 차이는 유광층으로의 영양염 수지에 영향을 미치게되어 생산성의 변화도 가져오리라 예견할 수 있다.

수온의 변화는 수직적인 변화가 수평변화에 비하여 매우 크게 나타난다. 수직변화는 100 m이내에서 수온이 10 °C 이상 변화하는 데 비하여, 수평변화는 수십 km에서도 1 °C 이상 변화하지 않는다. 수평변화는 심해저 지역에서는 동서방향보다는 남북방향의 변화가 중요하다. 이는 해류 구조의 차이에 기인한다.

염분은 33.7 - 34.4 psu의 범위로 커다란 변화가 없다. 최고값은 수심 120 - 190 m에서 나타나며, 수괴의 구분에 이용된다. 표층의 염분은 강우시에는 급격히 감소하는 경우도 나타났다.

### 3. 환경요인

KODOS93해역의 영양염의 수직분포는 질산염과 인산염 자료를 항차별로 평균하여 나타내었다 (Fig. III-6). KODOS 93-3 해역이 1, 2항차에 비하여 얇은 수심에서 증가한다. 표층혼합층 내의 영양염은 유광층 (euphotic layer)에서 식물플랑크톤에 의하여 빠른속도로 소비되어지기때문에 매우 낮은 값으로 두 해역간 차이가 보이지않는다.

KODOS 93-1항차중 용존산소 (Dissolved Oxygen; D.O.)의 수직분포를 4000 m까지 나타내었다 (Fig. III-7). 표층 혼합대에서는 대기와 equilibrium

인  $5 \text{ ml l}^{-1}$ 의 값을 보이며 수온약층 부근에서 광합성에 의한 산소의 발생으로 최대치를 보인다. 수온약층 이하에서는 감소하여 700 - 1000 m에서  $0.5 - 0.7 \text{ ml l}^{-1}$ 의 최소치를 보이며 그 이하에서는 계속 증가하여  $4 \text{ ml l}^{-1}$ 까지 증가한다. 중층에서 용존산소가 감소하는 이유는 침강하는 유기물의 분해에 의한 산소의 소비에 의하는 것이며, 저층에서 다시 증가하는 이유는 북대서양에서 생성된 심층수의 순환에 의한 산소의 공급에 기인한다.

식물플랑크톤의 광합성 색소인 chlorophyll a의 농도는 수층에서의 광도와 함께 광합성 잠재력을 계산하는데 이용된다. Chlorophyll a의 농도는 표층에서  $0.1 \text{ mgm}^{-3}$  이하의 낮은 값을 보이고, 수온약층 부근에서  $0.2 \text{ mgm}^{-3}$  정도의 최대치를 보였다 (Fig. III-8). 영양염의 증가가 얇은 수심에서 나타난 93-3 항차시 chlorophyll a의 증가도 얇은 수심에서 나타났다.

#### 4. 표층생태계

식물플랑크톤의 종조성은 빈영양해역에 적용된 크기가 작은 종들이 우점종을 이룬다. 정성시료는  $20 \mu\text{m}$  mesh를 이용하여 채집하였기 때문에 우점종의 조성은 파악할 수 없으나 지표종을 파악하는 데는 장점이 있다. KODOS 94-1 해역에서 출현한 식물플랑크톤 중 규조류(Class Bacillariophyceae, 珩藻綱) 16종, 와편모조류(Class Dinophyceae, 渦鞭毛藻綱) 75종, 남조류(Class Cyanophyceae, 남조강) 1종이 동정되었다 (Table III-1). 출현한 종중 일부 종들의 현미경 사진을 Plate 에 수록하였다 (Plate III-1, 2). 규조류가 많이 나타나리라는 예상과는 달리 와편모조류의 종조성이 다양하게 나타났다. 크기가 작은 규조류가 대부분 플랑크톤 net를 빠져나간데 일부 원인이 있겠지만 편모조류의 종이 많이 나타나는 것은 부인할 수 없다. 크

기가 작은 많은 개체들은 광학현미경으로 동정이 비하여 동정이 불가능하였으며 이 종들은 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 추후 동정할 계획이다.

KODOS 93-1 항차기간 식물플랑크톤에 의한 1차생산 (신생산, 재생산) 값은 Table III-2에 나타내었다. 신생산 값은  $0.091 - 4.736 \text{ nMh}^{-1}$ 의 값을 보이며 신생산의 최대치는 표층에서보다 30%와 15% 광투과수심에서 주로 나타났다. 이는 표층에서 공급되는 빛보다는 수온약층 이하에서 공급되는 질산염이 신생산을 지배하는 요인임을 나타낸다. 반면 질산염 흡수에 비하여 광의존도가 낮은 암모니아의 경우는 오히려 표층에서 최대치를 나타냈다. 이는 표층에서 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤의 grazing, micro-heteroflagellate와 박테리아에 의한 암모니아성 질소의 순환이 매우 빠른 속도로 일어나고 있음을 시사한다. 각 항차별 생산성의 차이는 KODOS 93-2 해역이 수온약층의 수심이 얕아서 수온약층하에서의 영양염 공급이 활발하여 매우 낮은 생산성과 f-ratio(0.17)을 나타낸 KODOS 93-1 해역에 비하여는 비교적 높은 생산성과 f-ratio를 나타내리라 기대된다.

박테리아 개체수의 분포는 KODOS 93-2 항차중 수심 300 m까지 측정하였다 (Fig. III-9). 125 m 까지의 유광층에서는  $0.5 - 1.4 \times 10^5 \text{ cells/ml}$ 의 값을 보이고 200 m 이하의 수층에서는  $2.5 \times 10^4 \text{ cells/ml}$  이하의 낮은 값을 보였다. 유광층에서 높게 나타나는 원인은 박테리아 성장에 필요한 용존유기물이 광합성을 하는 식물플랑크톤으로부터 침출(exudation)되거나 동물플랑크톤의 sloppy feeding에 의하여 충분히 공급되는데 기인한다. 그러나 이 값은 부영양 해역인 연안역의  $10^6 - 10^9 \text{ cells/ml}$ 에 비하면 10 - 1000배 정도 낮은 값이다.

$^3\text{H}$ -Thymidine 흡수에 의한 박테리아의 2차생산성은  $0.7 - 12.3 \times 10^5 \text{ cells/l/h}$ 의 범위를 보였다 (Table III-3). 성장속도로 환산하면 0.9 -

$9.3 \times 10^{-3} \text{h}^{-1}$ 의 범위를 보이며, 일반적으로 표층에서 성장속도가 빠르고 수심의 증가에 따라 감소하는 양상을 보인다. 성장속도를 생물량이 2배로 증가하는 doubling time으로 환산하면 3 - 30일 사이의 값을 보인다. 수심별로 보면 표층에서 3 - 5일로 비교적 빠른 속도로 성장하고 50 - 70 m에서 10 - 30일의 느린 속도로 성장함을 알 수 있다. 박테리아 군집은 표층에서 극히 낮은 영양염 농도에도 불구하고 빠른 속도로 성장하고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 신생산과 재생산중 재생산의 비율이 높은 것과 잘 일치가 되며, 박테리아 생산성은 heteroflagellate를 통한 microbial loop를 이루어 수층 내 유기물 순환에 중요한 역할을 한다.

N:P ratio는 1차생산에 질소(N)나 인(P)중에서 어떠한 영양염이 제한요인으로 작용할 가능성이 높은 지를 지시한다. 일반적인 해양환경에서 N:P ratio는 16:1의 값을 보인다 (Redfield ratio). 이보다 비율이 높을 경우는 인이 제한요인으로 작용할 가능성이 높고, 낮을 경우는 질소가 제한요인으로 작용할 가능성이 높다. 본 탐사해역의 표층에서는 N:P ratio가 0.2 이하로 극히 낮은 값을 보이며 이는 질소가 제한요인으로 작용할 가능성이 매우 높다는 것을 시사한다 (Fig. III-10).

표층 가까이에서 배출되는 퇴적물 및 단괴 쇄설물의 plume에 의한 직접적인 영향을 받는 생태계 구성인자는 식물플랑크톤이다. 영향은 plume에 의한 광투과도 감소로 인한 광합성 감소, 중금속에 의한 독성으로 생리활동 저하, 저층수의 영양염이 공급되어 생산성 증가, enzyme system에 필요한 철이온 등의 증가로 생산성 증가 등이다. 광투과도 감소에 의한 광합성 감소는 자명하며, 생산성 측정시의 P-I curve (photosynthesis-irradiance curve)로 부터 상관 관계를 알 수 있다. 광합성은 100 m 이내의 유평층에서 일어나며, 광업활동에 의한 표층해수층의 혼탁도 증가는 수층에서 빛의 흡

수를 증가시켜 광합성을 감소시키는 방향으로 작용한다 (Chan and Anderson, 1981). 철 이온 증가로 인한 생산성 증가와 중금속 농도의 증가로 인한 독성으로 인한 식물플랑크톤의 생리도 저하를 보기 위하여 Niskin bottle을 이용하여 채수한 표층수에 인공 chelator인 EDTA (Ethylene-diamine-tetraacetic acid), Fe, Cu를 가하여 시간에 따른 생체형광 (in vivo fluorescence)과 DCMU [3-(3',4'-dichlorophenyl)-1, 1,-dimethyl urea]를 가한 후 fluorescence의 증가를 측정하였다 (Table III-4). DCMU는 광합성 전자전달계의 inhibitor로서 Photosystem II의  $Q_A$ 로부터 PQ (plastoquinone)로의 전자 전달을 차단한다. DCMU를 가하게 되면 Photosystem II로의 광에너지 전달이 불가능하므로 Photosystem I의 fluorescence가 증가하게 된다. DCMU를 가하였을 때 증가하는 fluorescence는 잠재적인 광합성 용량을 나타내며, 증가되는 비율로부터 식물플랑크톤의 생리적 상태를 추정할 수 있다. EDTA를 1  $\mu$ M 가하였을 경우와, EDTA와 함께 철을 가하였을 경우는 control과 유의성 있는 차이를 볼 수 없었다. EDTA와 Cu를 1  $\mu$ M씩 가했을 경우는 2시간 이내에 fluorescence의 감소가 나타나 독성이 단시간에 작용하고 있음을 보여준다. EDTA 1  $\mu$ M과 Cu를 0.2  $\mu$ M 가하였을 경우는 12시간 경과시까지 fluorescence의 감소가 뚜렷하지 않고 36시간 경과후에 control에 비하여 20% 정도 감소하였다. 위와 같이 in vivo fluorescence를 측정함으로써 식물플랑크톤에 대한 중금속 독성을 real-time으로 확인할 수 있다.

방사성 동위원소인  $^{210}\text{Pb}$ 와  $^{210}\text{Po}$ 의 농도가 KODOS 93-3항차 기간 측정되었다 (Table III-5).  $^{210}\text{Pb}$ 는 해수중에서  $^{226}\text{Ra}$ 로부터 형성되며 Ra에 비하여 scavenging되어 표층에서의 화학적 반감기 (방사능 decay에 의한 반감기와는 다른 화학적으로 제거되는 기작)는 20년 이하이다.  $^{210}\text{Po}$ 는 Pb보다 반응성이 더 높아서 주로 생물체의 조직에 높은 enrichment를 보이며 화학

적 반감기 더 Pb보다 짧게 나타난다. Table III-5에서  $^{210}\text{Po}$ 와  $^{210}\text{Pb}$ 의 radioactivity를 보면  $^{210}\text{Po}$ 가  $^{210}\text{Pb}$ 에 비하여 30% - 75%로 1보다 작게 나타난다. 표층 가까이에서 특히 그 차이가 크게 나타나 생물활동에 의한 Po의 제거율이 높다는 것을 알 수 있다.  $A_{Po}/A_{Pb}$  ratio를 1/3로 하였을 때 Po의 화학적 반감기는 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$k_D = ((1 - A_D/A_P)/(A_D/A_P)) \times \lambda_D$$

여기서,  $k_D$ 는 Po의 화학적 scavenging constant이고  $\lambda_D$ 는  $^{210}\text{Po}$ 의 radioactive decay constant ( $1.833 \text{ yr}^{-1}$ )이다.  $A_D/A_P$  를 1/3로 대입하면,  $k_D$ 는  $3.667 \text{ yr}^{-1}$ 이 된다. 반감기  $t_{1/2} = \ln(2)/k_D$  이므로 Po의 화학적 반감기는  $0.189 \text{ yr}$  즉 69일이 된다. Po가 표층에서 제거되는 기간은 약 10주 정도라는 결론이 나온다. 이로부터 표층에서 생물활동에 의한 Po의 순환이 비교적 빠른 속도로 일어나고 있음을 알 수 있다.

## 제 4 절 토의

### 1. 현재까지의 연구 결과 고찰

#### 1) 국내

현재까지 국내 연구진에 의하여 수행된 심해환경에 관한 조사는 심해저 광물탐사 항해에 piggyback 형식으로 참여하여 일반적인 CTD casting, 영양염, 중금속, 식물플랑크톤 광합성 색소, 저층 퇴적물의 지화학적 조성, 저서 대형동물 동정 수준을 크게 벗어나지 않는 매우 미흡한 baseline study에 머물러 있다. 탐사해역의 일반적인 해황, 영양염 자료는 어느정도 파악이 되고 있으나 1년중 4 - 8월의 탐사기간에 국한되어 있고 그외의 자료는 극히 제한되어 있다. 특히 계절변화 및 연간변화를 파악하기에는 매우 미흡하다. 정밀탐사 기간에도 꾸준히 baseline study가 환경변화에 대한 연구와 병행하여 수행되어야 할 것이다.

일반적인 해황은 파고가 3 - 4 m 이내, 풍속은 5 m 정도로 북동풍이 지배적이다. 여름철 가끔 발생하는 hurricane의 영향을 제외하고는 탐사 및 장차 광물개발에 해황이 커다란 장애요인으로 작용하지는 않으리라 생각된다. 해류는 저층해류의 측정을 하지 못하고 있으나, 외국의 연구 결과를 볼 때  $10 \text{ cms}^{-1}$  이상까지 기록되고 방향도 변화가 있어서 채광장비의 정밀한 track 운용에 약간의 영향을 미칠 가능성도 존재한다. 또한 재부유된 퇴적물의 확산과 재퇴적 기작에도 영향을 미치게됨으로 저층 유속계의 계류 측정이 필요하다. 표층해류는 채광 sludge와 배에서 발생하는 폐수의 확산에 영향을 미치므로 이에 대한 조사도 필요하다. 항해기간 중에는 ADCP를 이용하여 측정이 가능하나 탐사기간외의 해류 변화를 파악하기 위하여는 저층해



류와 마찬가지로 계류측정을 하여야 한다.

영양염의 농도는 매우 낮은 빈영양해역의 특성을 보이는 것은 자명한 사실이고, 특히 질산염의 경우 통상적인 발색반응에 의하여 측정할 수 있는 한계보다 낮은 nano-molar 수준이다. 이러한 nano-molar 수준에서의 변화도 생태계를 이해하는 데 중요하며, 광업활동에 의하여 영향을 받게 될 경우저층수의 영양염 농도가 질산염의 경우 40  $\mu\text{M}$ , 규산염의 경우 100  $\mu\text{M}$  이상의 높은 값을 보이거나 표층에서 희석되는 정도를 고려하면 nano-molar 수준에서의 변화가 생태계에 미치는 영향도 고려할 필요성이 있다.

해수중 중금속 농도는 92, 93년에 걸쳐 측정을 하였으나, 극히 낮은 농도로인하여 시료채취, 분석 전 전처리 단계에서의 오염으로 인하여 측정치에 문제가 발견되었다. 오염문제를 최소화할 수 있는 Kevlar wire와 전용 hood의 구입이 필요하다. 개발에 따른 중금속 농도의 변화는 1차생산에 필요한 철이나 다른 이온을 공급하여 생산성의 증가를 가져올 수도 있으나, 독성이 있는 구리, 납 이온들의 증가는 생태계 파괴를 초래할 수도 있기때문에 좀더 깊은 연구가 필요하다.

식물플랑크톤 색소량은 어느 정도 자료 축적이 이루어 졌으나, 마찬가지로 항해기간외의 자료가 없기때문에 인공위성에 의한 remote sensing 자료를 활용할 수 있는 방안을 고려할 필요가 있다. 종조성 및 community structure에 대한 연구는 이제 시작단계이며 꾸준한 연구를 추진할 계획이다.

## 2) 국외

국외의 심해저 광업에 따른 환경변화 연구는 1970년 미국의 Deepsea ventures, Inc. 회사의 "The Blake Plateau Mining Test Study"를 시작으로,

Bermuda Rise Study(미국, 1972), Continuous Line Bucket Mining Test Study(일본, 미국, 프랑스, 1972)등을 거쳐서 1975 - 1980년에 DOMES (Deep Ocean Mining Environmental Study, 미국)가 행하여 졌다. DOMES 의 목적중의 하나는 환경 guideline 설정을 위한 database를 확립하는 것이 었다. 이를 위하여 일조량, 해류 (표층과 저층해류), 식물플랑크톤, 저서생물, 영양염화학, 입자성 부유물질, 퇴적물, 단괴, 음향층서 등이 연구되었다. 80년 대에도 미국측에 의해 ECHO-1 (1983), Acute Mortality Experiment (1987), QUAGMIRE II Expedition 등 저서생태 변화에 대한 연구가 수행되었다. 독 일의 경우, 1989년 초 대규모 퇴적층 교란후 저생물 군집이 재서식되는 기 작을 장기적으로 monitoring하는 DISCOL(Disturbance-Recolonization) 연구 를 수행중에 있고, 러시아도 R/V Yuzhmorgeologiya를 이용 baseline data를 획득하고 1991년부터 미국과 공동으로 BIE(Benthic Impact Experiment)를 수행중에 있다. 프랑스의 경우는 IFREMER를 주축으로 방대한 심해저 사진 과 유인 점수정 Nautille을 이용 megafauna와 퇴적층의 지질공학적 특성 에 대한 연구를 수행하고 있다. 일본은 DORD를 중심으로 1991년부터 형광사진 기법(fluorescence photometry)을 이용하여 대양 식물플랑크톤의 현존량과 생태구조를 파악하고, 표층 가까이에서 형성되는 plume에 의한 식물플랑크 톤에 대한 영향을 선상에서 배양실험을 통하여 연구하였다. 이러한 baseline study를 거쳐 1994년 부터는 미국과 공동으로 disturber를 운용 BIE 연구를 시작하였다. 일본측은 미국측 BIE에서 하지 않았던 bacteria에 관한 연구를 추가로 연구하고 있다. 인도는 인도양에서 제한된 baseline 환경 자료를 획 득하고 있고, 동구권국가 그룹인 IOM에서도 CCFZ (Clarion-Clipperton Fracture Zone)에서 조사를 수행하고 있다.

BIE(Benthic Impact Experiment): 미국, 일본, 러시아 공동으로 심해저

광물자원 개발에 따른 퇴적층 교란이 저층생태계에 미치는 영향에 대한 연구로서 해양연구소에서는 93년, 94년 각 각 2인, 1인의 연구원이 러시아 조사선인 R/V Yuzhmorgeologiya에 동승하여 조사에 참여하였다. 93년 미국, 러시아 공동연구의 작업개요는 benthic sediment resuspension system (일명 disturber)을 작동하기전 baseline study로서 해역의 저층 지형, 저층 해류, 수온, 염분, 광투과도를 조사하고, disturber를 작동하면서 sediment trap, current meter mooring을 실시하여 자료를 획득하는 것이었다.

Current meter의 계류에서는 저층해류의 단기변화가 뚜렷이 나타났다. 이에 따라 부유퇴적물의 확산 및 재퇴적 양상(sediment trap 자료)도 해류의 방향과 깊은 관계를 보였다. Disturber에 부착된 OBS(optical back scattering) 값으로부터 부유되는 퇴적물의 양을 추정하기 위하여 Niskin bottle에 의해 채취된 퇴적물의 양과 calibration을 하였다.

퇴적물 채취를 위한 Box Core는 50 x 50 cm 크기의 box로 25개의 10 x 10 cm vegematics로 나뉘어 subsampe하였다. 이는 meiofauna의 공간분포를 통계적으로 처리하는데 유용하다. Transmissometer가 부착된 CTD를 이용하여 수온, 염분, 광투과도 수직 profile 측정하여 수괴의 변화와, 광투과도로부터 저층 disturber로부터 형성된 부유된 퇴적물 plume의 확산을 추정한다.

시료채취 항목은 sediment trap에서 재부유된 퇴적물의 양을 측정하고, box core로부터 저서 meiofauna 및 meiofauna의 지방분(fat content) 분석을 위한 시료, 퇴적물 계산을 위하여  $^{231}\text{Th}$  isotope 시료를 채취하였다. 퇴적물이 재부유되면서 저서동물의 먹이원인 표층퇴적물내의 유기물이 회석됨에 따른 저서동물의 영양상태를 나타내는 지방함량을 측정하여 기아정도를 파악하려는 것이 생태연구의 주된 목적이다. 이 지방함량의 장기적인

monitoring으로 생태계 영양상태의 변화를 파악할 수 있으리라 기대된다.

### 3) 국내의 연구 결과 요약

광업활동에 따른 표층 부유물 농도 증가는 광투과도를 감소시켜, 광합성에 필요한 수층내의 광량이 감소하여 수층의 1차생산성이 저하되리라 예견된다. 반면에, 영양염 농도가 높은 저층수의 표층유입에 따라 표층의 영양염의 농도가 증가하게 되어 식물플랑크톤의 현존량이 증가하리라 예상된다. 특히 생물체의 spicule이나 각(theca)를 이루는 규산염의 분해는 주로 저층에서 분해가 이루어지기때문에 저층에 규산염의 농도가 다른 영양염에 비하여 높게나타난다. 이러한 높은 규산염의 표층수로의 유입은 식물플랑크톤중 특히 규조류(diatom)의 증가를 가져오리라 예견된다. 이에 따라 생태계의 먹이망 구조에 변화가 오게 되고 수직침강수지(vertical sinking flux)의 증가가 수반되게 되리라 생각된다. 또한 중금속 농도의 증가도 예상되는 데 이의 영향에 대하여는 뚜렷한 결과를 예측하는 것이 현재까지의 연구결과로는 불가능하다.

저층생태계의 변화는 채광장비에 의하여 직접적이고 기계적인 영향을 받기 때문에 파괴가 뚜렷이 관찰된다. 간과하기 쉬운 점은 눈에 보이는 macrofauna보다 생태계의 저층을 이루고 생체량의 대부분을 차지하는 박테리아와 meiofauna에 대한 연구가 중요하지만 이에 대한 결과가 빈약하다는 사실이다.

## 2. 중장기 환경보전 연구 방향 설정

산업발전 및 개발에 필수적으로 수반되는 환경보전 문제는 개발론자의

영향이 강한 경우는 뒷전에 밀리게 되는 사례를 외국의 경우를 들지 않더라도 국내에서 성장주도의 정책을 추진하던 3공화국의 예를 보면 쉽게 알 수 있다. 단기적인 이익과 외형의 성장에 집착하여 환경문제를 소홀히 함으로써 결국 치르게 되는 댓가는 경제적인 손실뿐만 아니라 극단적인 경우는 인류 전체의 생존을 담보로 할 수도 있다. 환경보전에 소요되는 경비와 이로 부터 얻을 수 있는 댓가는 cost-benefit 분석과, 어느 정도까지 개발에 따르는 이익을 투자할 수 있느냐하는 allowance 문제와 함께, 우리가 얼마만큼 깨끗한 환경을 요구하느냐 하는 문제의 절충에서 결정된다고 할 수 있다. “How clean do we want to be?”와 “How clean can we afford to be?” 는 이 상충되는 두 이해를 한마디로 표현한 것이라 할 수 있다.

심해저 환경보전에 관한 연구는 표층과 저층 생태계로 구분하여 주도면밀하고 장기적인 계획하에서 수행되어야 한다. 궁극적으로는 자원탐사 또는 개발 주체와 환경보전연구 수행주체가 구분되어 독자적인 환경연구 programme이 수립되어야 할 것이나, 잠정적으로 현 단계에서는 연구비의 효율적인 집행과 심해환경연구를 전담하여 수행할 수 있는 기관이 국내에는 한국해양연구소가 유일한 기관이기 때문에 자원탐사와 환경보전의 이해가 상충되는 분야의 연구를 동일한 주체가 담당하는 것이 불가피하다.

심해저 환경보전연구는 어느나라의 영해에도 속하지 않음으로 인하여 개발론자의 주장이 강하게 작용할 수도 있으나, 유엔 해양법기구 (UNLOS) 의 구성원의 다수를 차지하는 개도국 및 후진국의 영향을 무시할 수 없기 때문에 자원개발을 위한 경제적, 기술적인 여건이 조성된다 하더라도 환경보전에 대한 완벽한 대비책이 수립되지 않은 상태에서는 개발이 불가능한 국제 여건이 조성될 가능성이 매우 높다. 이에 대비하여 개발을 하려는 주체는 경쟁을 넘어선 국제적인 협력관계에서 환경문제를 접근하여야 한다.

환경분야의 연구 방향 및 범위는 위의 전제가 결정된 후에 구체적으로 설정될 수 있으나, 기본적인 방향은 아래와 같이 요약할 수 있다.

1) 저층생태계: 현재의 대형동물(macrofauna) 위주의 연구에서 탈피하여 전체 생체량의 95% 이상을 점하고 생태적 역할도 더욱 중요한 500  $\mu\text{m}$  이하의 중형동물(meiofauna) 및 저서 박테리아의 생태적, 생화학적인 고찰이 절실하다. 이의 연구를 위하여는 전문가의 양성이 필요한 상황이나 국내의 대학이나 연구기관의 현 연구인력에는 이러한 분야의 전문가가 없기때문에 현실적인 방안으로서 대학과 연계하여 박사 학위과정의 젊은 연구인력의 관심을 유도하여야 한다. 또한 가까운 시일 내에 disturber를 운용, 저층 퇴적물 교란에 대한 연구가 수행되어야한다.

2) 표층생태계: 기초적인 연구및 생태계교란에 대한 연구는 1차생산자 및 1차생산에 관한 연구는 어느정도 진행되고 있으나, 수층 물질 순환에 중요한 역할을 하는 박테리아에 대한 연구가 빈약하고, 특히 생태계 먹이연쇄망의 중간단계를 구성하고 있는 동물플랑크톤의 변화에 대한 연구가 전혀 되지 않고 있다. 또한 며칠 단위의 단기적 변화보다 1년이상 단위의 생태계 변화에 대한 장기적인 연구가 필요하다. 이러한 생태계 전반에 관한 연구는 1개 팀의 연구범위를 넘어서는 것으로, 국내 대학 또는 외국과 연계하여 종합적이고 장기적인 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

- Chan, A.T. and G.C. Anderson. 1981. Environmental investigation of the effects of deep-sea mining on marine phytoplankton and primary productivity in the tropical eastern North Pacific Ocean. *Mar. Min.* 3: 121-149.
- Cochran, J.K., M.P. Bacon, S. Krishnaswami, and K.K. Turekian. 1983.  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  distributions in the central and eastern Indian Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.* 65, 433-452.
- Dugdale, R.C. and J.J. Goering. 1967. Uptake of new and regenerate forms of nitrogen in primary productivity. *Limnol. Oceanogr.* 12: 196-206.
- Fuhrman, J. and F. Azam. 1982. Thymidine incorporation as a measure of heterotrophic bacterioplankton production in marine surface waters: evaluation and field results. *Mar. Biol.* 66: 109-120.
- Harada, K. and S. Tsunogai. 1985. A practical method for the simultaneous determination of  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in seawater. *J. Oceanogr. Soc. Japan* 41, 98-104.
- Ivanovich, M. and R.S. Harmon. 1982. Uranium series disequilibrium: Applications to environmental problems. Oxford Press, p.107-144.
- Kaufman, A., Y.H. Li, and K.K. Turekian. 1981. The removal rates of  $^{234}\text{Th}$  and  $^{228}\text{Th}$  from waters of the New York Bight. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 54, 385-392.
- Parsons, T.R., Y. Maira, and C. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. 173pp.

Robarts, R.D. and R.J. Wicks. 1989. [Methyl-<sup>3</sup>H] thymidine macromolecular incorporation and lipid labeling: their significance to DNA labeling during measurements of aquatic bacteria growth rate. *Limnol. Oceanogr.* 34: 213-222.

Rueter, J.G. and D.R. Ades. 1987. The role of iron nutrition in photosynthesis and nitrogen assimilation in *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyceae). *J. Phycol.* 23: 452-457.



## 제 2 장

### 저서생태



## 요 약

1993년 태평양의 클라리온-클라포튼 해역에서 수행된 세 차례의 탐사 항해(KODOS 93-1,2,3)를 통하여 대형 저서동물을 채집하였다. 채집기기는 두 종류의 그랩 PGS(photo grab sampler), FFG(free fall grab)와 박스코어러였으며, 전체 조사정점 258곳 가운데 91곳에서만 저서동물이 채집되었다. 채집된 저서동물은 모두 155개체로 10개 동물군과 미확인 생물군으로 구분되었다. KODOS 93-1 탐사에서는 43개 조사정점에서 43종에 55개체(83.01g)가 채집되었으며, KODOS 93-2 탐사에서는 12개 정점에서 11종 15 개체(38.40g)가 그리고 KODOS 93-3 탐사에서는 36개 정점에서 35종에 85 개체(106.84g)가 채집되었다. 대형 저서동물의 분포와 서식형태에 대해 개략적으로 설명하고, KODOS 94 탐사에서 채취된 심해 미생물의 배양 과정에 대해서도 보고한다. 한편 채집된 저서생물 중에서 선별된 갯지렁이, 방산충 덩이, 망간단괴에 부착된 생물기원성 물질과 미확인 생물의 전자현미경 사진을 제공한다.



## 제 1 절 서 론

심해저 경계면에 서식하는 심해생물에 관한 연구의 역사는 불과 100여 년에 불과하다. 18세기 중반부터 심해에도 생물의 서식 가능성을 확인하고 19세기 후반에는 심해저를 포함한 대규모의 해양탐사가 수행되면서 본격적인 심해생물의 연구가 이루어졌다. 처음 심해저를 조사하던 시기에는 새로운 심해생물 출현에 만족하면서 주로 생물상이나 분포 연구가 중심이 되었다. 20세기 중반 이후 새로운 채집장비의 개발과 연구선의 기동력이 높아지면서 정량적인 연구에 박차를 가하기 시작하였다. 군집연구를 시작으로 습성, 섭식형태, 영양단계, 생활사 뿐만 아니라 개체군 연구와 심해생태계를 연구할 위한 기능적 연구 등이 병행되어 활발히 이루어지고 있다 (Mills, 1983; Rowe, 1983; Rowe and Pariente, 1992). 이러한 연구 실적은 다양하며, 광범위하고, 많지만 수심이 깊은 대양저의 엄청난 넓이에 비한다면 극히 일부에 불과한 것이므로 아직 미조사된 지역이나 분야가 많다. 또한 지금까지는 대양저의 95% 이상을 차지하는 수심 5,000-6,000 m까지의 해저에서만 활발히 조사되었으나, 최근에는 수심 10,000 m 주변인 초심해저에 까지 연구 영역을 넓혀가고 있다 (Gage and Tyler, 1991). 암흑과 엄청난 수압하의 극한 상황에서 생활하고 대사하는 생물에게는 생존에 필요한 독특한 방식이 있기 마련이고, 이들은 육상이나 천해의 생물과는 다른 유익한 것을 인류에게 제공하리라는 기대가 있다.

일반적으로 해저 서식생물에게 적용되는 몇가지 이론이 있는데 즉, 양극에서 적도쪽으로 갈수록 또는 수심이 얕은 곳에서 깊은 곳으로 갈수록 생물량이 낮아진다는 것이 그중 하나이다. 생물다양성 측면에서 수심이 깊어질수록 점점 높아지다가 수심 2,000-3,000 m 이후부터는 낮아진다 (Rowe, 1983). 중형저서생물(meiofauna)과 미소저서생물(micro and nanofauna)에 대한 연구가 진행되면서 심해에서 매우 높은 서식밀도로 발견되어, 이들 연구의 중요성이 대두되고 있다 (Thiel, 1983; Tietjen, 1992). 상대적으

로 크기가 작은 이들은 퇴적물 내의 수분을 통하여 호흡을 비롯한 대사활동을 하므로 퇴적물과 그위에 놓여 있는 수층과의 상호관계에 대한 연구에 활용된다.

한편 망간단괴, 망간각 등 해저광물의 채취는 해저에 서식하는 생물들에게는 일시적인 서식지의 교란 정도로 생각할 수도 있으나, 심해는 지질사적으로 오랜 시간 동안 독특한 생태계를 유지해왔기 때문에 해당 지역의 저서생태계의 안정에 심각한 영향을 줄 수도 있다. 채광과 채굴 등이 저층환경 특히 생물환경에 미치는 영향을 조사, 파악하고자 하는 BIE(Benthic Impact Experiment)와 같은 국제 공동연구가 계획, 진행되고 있다. 이러한 국제적인 연구방향에 발맞추어 우리나라가 확보한 심해저 광구 지역에서 장차 발생될 수도 있는 광물 채취에 따른 생물환경의 변화와 영향을 조사하고 자 사전에 기초 자료를 확보하고자 함이다.

1993년의 탐사는 심해저 연구사업이 진행되는 동안 부차적으로나마 채취된 퇴적물로부터 저서생물을 직접 채취하기 위해 시도된 최초의 조사이다. 탐사해역은 태평양의 적도해역 주변으로서 지금까지 알려진 바로는 가장 생물량이 낮은 해역 중에 하나이다. 그리고 주 탐사목적이 해저광물 분포조사와 지층 탐사이므로 저서생물 채집 위주로 장비를 직접 운용하지는 않았다. 따라서 정량적인 조사는 불가능하였으며, 생물상의 파악이라는 일차적인 목적을 수행하기에도 생물채집용으로 할당된 퇴적물의 양이 너무 부족하였다. 일차적으로는 채집된 소수의 생물체를 동물군별로 나누고 이 정리하는 것으로 연구 결과를 내고 좀더 자료와 표본을 확보한 후에 구체적인 저서생물 분류를 비롯한 기능적인 연구를 하고자 한다. 또한 망간단괴 및 망간각 주변 저서 생태계의 미생물학적 분석 및 미생물에 의한 생물지질학적 망간괴 생성에 대한 기본 연구를 위하여 망간 순환 관련 미생물의 생리 생화학적 연구가 필요하다. 이를 위하여 우선 1994년의 심해저 탐사시 채취한 시료에서 망간 세균 및 기타 저영양성 해양세균을 분리하고자 하였다.

## 제 2 절 심해생물 연구의 개관

### 1. 심해생물 연구사

19세기 중반, 신학자이자 또한 박물학자였던 노르웨이의 M. Sars 등은 노르웨이 서쪽해안의 심해 피요르드(deep fjords)의 저층 위에 서식하는 생물상을 드래지로 조사하면서 600 m 이상의 수심에 서식하는 무척추 동물 약 100 여종을 발견하였다. 이것이 심해생물에 대한 최초의 조사이며 이보다 앞선 19세기 초반에도 해저 케이블 등에서 생물들이 발견된 바 있어 아주 깊은 수심에도 생물들이 존재할 것으로 추측케 하였다. 당시에는 수심이 깊어져 일정한 깊이에 이르면 무생물대(azoic zone)가 나타난다는 특히 동물이 전혀 살지않는 구역에 대한 개념이 폭넓게 인정받고 있었다. 화석종으로만 알려진 자루가 있는 바다나리(stalked sea lily) 등이 확인되면서 무생물대 또는 생물들의 일시적인 피난처로 정의되었던 심해에 대한 인식이 많이 수정되었다.

마침내 19세기 중반이후 유럽에서는 국가적인 지원을 받아 심해저 탐사를 계획하고 항해를 수행하게 되는데, 영국에서는 영국 해군(British Royal Navy)과 영국왕실학회(Royal Society of London)의 지원 아래 1868년(H.M.S. Lightning)과 각각 1869년과 1870년(H.M.S. Porcupine)의 탐사가 영국과 이베리아 반도(Iberian peninsula) 주변 해역에서 행해졌다. 이와 같은 개척적인 탐사원정에서는 4,289 m 아래의 수심에서 드래지로 채취한 점토질 연니를 세척한 후 남은 새로운 형태의 생물들을 발견하였다. 또한 놀랍게도 채취된 니질 연니는 모두 표층에서 부유생활을 하던 생물들이 군집으로 부터 죽어서 떨어진 수 많은 작은 단세포 생물들의 골격 잔해물(skeletal remains)로 이루어져 있음을 발견하게 되었다. 이들 항해를 통하여, 최대 수심에서도 생물체가 발견될 수 있다는 생각을 품게 되었다. 또한,

심해 수괴 온도의 불연속성에 대한 이들의 관찰은 대양 순환(ocean circulations)에 관한 논쟁의 시발점이 되었다. 탐사에서 얻은 경험과 지식은 연이어 계획된 1872년 부터 1876년 까지 행해진 H.M.S. Challenger의 세계 일주 항해의 수행을 용이하게 해주었다. 이 탐사는 매우 큰 규모로 조직되었으며, 그 탐사 결과는 의심할 여지없이 현재 우리가 갖는 심해저 생물에 관한 지식 뿐만 아니라, 초보 단계였던 해양학을 단숨에 도약시키게 되는 밑바탕을 제공하게 되었다. 동물들은 5,500 m 깊이의 드래지 채집에서 발견되었으나, 살아있는 화석종은 발견되지 않았다. 반면에 전세계적으로 분포하는 것으로 보이는 동물들이 발견되었으며, 이에 따라 심해가 매우 다양화된 상태가 아닐까 하는 추측을 하게 되었다. 이러한 비정상적인 다양성에 대한 적절한 이해는 좁은 망목을 가진 드래지와 걸름체(sieves)의 사용이 일반화되던 시기인 1960년대까지 늦추어졌다.

1950년대에 러시아 생물학자들에 의해 방대한 심해저에 관한 조사가 착수되었는데, 이들은 매우 깊은 해구에서 다양한 저서 동물을 채집하였으며 태평양과 그 외 지역에서 연안 조사에 이용되던 그랩(grab)을 개량한 것을 이용하여 퇴적물을 정량적으로 채집하는 계획을 수행하였다. 결과적으로 넓은 범위에서의 저서 생물량의 지리적 그리고 수직적 분포에 관하여 일반적인 '법칙'을 수립하게 하였다.

1960년대와 1970년대에는 주로 미국이 심해저에 대한 생태학적 연구를 주도하였으며, 특히 Woods Hole 해양연구소를 시초로 한 일련의 연구가 중심이 되었다. 예외적으로 높은 종다양성은 근본적으로 이전에 채집되지 못했던 작은 개체들이 미세한 망목을 가진 스크린를 사용하여 채집한 것에 기인하는 것이다. 이와 같은 사실이 개체군 생태학자들로 하여금 그렇게 먹이가 부족하고 열악한 환경이 어떻게 높은 다양성을 유지할 수 있게 되었는지에 관하여 많은 이론화 작업을 하도록 자극하였다. 아울러, 지질학자들이 사용하던 장비로부터 파생된 박스코어 채집기(box-core samplers)는 연안에서 사용되는 채집기와 질적으로도 비교가 가능한 저층 균집에 관한 편향되



지 않은 시료를 제공하였으며, 이와는 다르게 심해용 잠수정에 의한 관찰은 이전에 저인망(trawl)이나 해저 사진으로만 알려진 근 동물의 생활 방법에 관하여 학자들에게 풍부한 자료를 제공하였을 뿐만 아니라, 해양저에서 직접 생태 실험을 수행할 수 있는 수단이 되어지기도 하였다.

1970년대와 1980년대에는 심해저에 관한 연구프로그램이 국제적으로 증가를 나타낸 시기이다. 당시 다각적인 협력에 의한 국제적인 공동 연구를 통한 관심 지역에 대한 연구가 집중되기도 하였다. 해양학자들은 당시 최초로 표층으로부터의 유기물 수지를 관찰하였으며, 고정 정점에서 수 년간에 걸친 조사가 실시되기도 하였다. 초기에는 예측하지 못했던 생식과 호흡에 있어서의 계절성에 대한 발견이 심해저의 생활 주기가 극히 항상적일 것이라는 가정과 상충하기도 하였다. 표층으로부터의 햇빛에 의한 생산에 의존하지 않고 열수구(hydrothermal vents와 hydrocarbon seeps)에서 나타나는 황산화 및 메탄영양 박테리아에 의한 생산(sulphur oxidizing and methanotrophic bacterial production)에 의존하는 풍부한 심해 생물의 오아시스의 발견, 그리고 함정어구(traps)에 의해 채집된 초대형 단각류(giant amphipods)와 그밖에 부식성 동물의 개체군에 대한 발견은 심해저의 생물세계에 대한 우리의 이해가 아직도 턱없음을 보여준다.

## 2. 심해 저서생물의 분포양상

심해 저서동물 군집이 존재하는 공간구조에 있어서 수 백 m에서 수 mm의 공간 크기에 따른 각각의 분포양상을 설명하는 것은 쉽지 않다. 이러한 양상은 당연히 3차원적인 것이나, 수직과 수평의 평면에서도 관측되어질 수 있다. 천해에 서식하는 저서생물의 공간 분포양상에서의 무작위성(randomness)에 대한 가정은 많은 오류를 낳았다. 무엇이 무작위성으로 나타나는 가는 퇴적물 내의 개체 분포양상에 영향을 미치는 공간 변수의 복합적인 작용에 기인한다.

실제적인 수준에서, 이러한 양상의 정도와 규모에 관한 정보가 심해에서 정량적으로 얻어진 현존량의 측정치에 대한 타당성을 평가함으로써 활발하게 진행되고 있다. 그외에, 개체들의 위치에서 나타난 공간 구조에 대한 조사는 간접적으로 심해저와 그 곳의 생물들간의 상호 작용을 뚜렷하게 나타내주고 있다. 심해저서생물의 서식 분포에 따른 공간적인 패턴에 관한 지식은 생지화학 및 층서 작용(biogeochemical and stratigraphic processes)에 관한 모델링의 중요성이 점점 증가하고 있다. 그럼에도 불구하고 저서 동물에 영향을 미치는 환경인자들을 구체화하는 이러한 모델들의 정밀도와 정확도는 생물 분포에 있어서의 무작위적 양상에 대한 가정이 입증되지 못함에 따라 상당한 제약을 받고 있다.

고착성과 이동성 형태가 함께 존재하는 동물상에서 분포 양상은 흔히 시간상으로 위치가 정지된 스냅식(snapshots)으로 파악되었다. 이러한 스냅식이나 눈으로 보이는 표생동물에 대한 해저사진 또는 잠수정 관찰은 퇴적층 속에 또는 그 표면에 그들의 공간적인 위치를 유지하는 한 정량적인 시료가 될 수 있다. 분명히 스냅식은 방형구형의 채집기에서 채집되기 어려울 정도의 빠른 운동성을 갖는 개체들에서 보다 고착성 또는 정재성 동물군(sedentary fauna)에서 양상을 이해하는데 더욱 유용할 것이다. 운동성을 갖는 해양 동물의 위치를 시간, 공간적으로 추적하는 데에는 어려움이 많으며, 이와 같은 실제적인 문제점은 천해에서는 물론 심해에서는 더욱 말할 것도 없다.

그밖의 문제점으로는 대표성을 갖는 시료를 채집하는 데에서 발생하는 채집기의 효율에 영향을 미치는 편향성과 코어러(corer)의 초기 투입시에 발생하는 교란과 연이은 채집에서 발생하는 문제점이 있으며, 전자는 퇴적물 위 또는 내부에 서식하는 개체의 위치에 관한 자료의 질에 영향을 미칠 것이며, 후자는 운동력이 있는 갑각류가 무리없이 채집될 것인가 그리고 갯지렁이류나 벌벌레류(sipunculids) 등이 퇴적물 내로 깊숙히 잠입함으로 퇴적물내에 수직분포 양상에 관한 자료의 타당성에 의심을 불러 일으킬 수 있

다. 현재까지 가장 정밀하게 행해진 코어 채집에서도 표층 퇴적물식자와 부유물식자의 채집 결과에 의문을 제기하였고(Jumars, 1978; Jumars and Eckman, 1983), 조금 더 크기가 크면서 깊이 잠철하는 일부 종들은 코어러가 주입되는 범위 밖으로 잠입할 것이다.

지금부터는 한 종의 개체군에서 나타난 분포양상을 단순화시켜 보면 다음의 여러 형태로 분류할 수 있다. 첫번째로, 수직분포 양상은 개체 주변환경의 물리화학적인 변수에 의해 영향을 받는다. 이것은 열수구 또는 탄화수소 분출구(hydrothermal vents or hydrocarbon seeps)와 같은 대규모 현상에서 부터 작게는 퇴적물 표면에 있는 분변립(fecal pellets)과 연관된 현상에 이르는 다양한 규모가 있을 수 있다. 매우 밀도높게 부존하는 망간단괴(ferro-manganese nodules)의 지형 또한 각각의 작은 규모로서 개체들의 분산 양상에 지배적인 영향을 미치고 있지는 않을까 하는 고려해 봄직하다. 퇴적물 내에서도 유기 저하작용 과정에서 전자수용체의 이용같은 물리화학적인 급격한 수직 구배가 존재한다 (Reise, 1981). 또 다른 공간분포의 근원으로는 저층 흐름에 따른 미세 지형에 의해 수동적으로 착저하는 유생들에게서 발생할 수 있는 수리역학적인 효과가 있다(Butnam, 1987).

두번째로, 생식에 다른 분포양상은 배우자들간의 마주침 접합 정도와 어린 개체들의 제한된 분산 등으로부터 유추할 수 있다. 비록, 낮은 밀도로 존재하나 운동성이 있고 계절적인 생식 주기를 갖는 종들에 있어서는 가능하긴 하나, 아직 심해 연구에서는 이러한 분포양상이 조사, 보고된 바가 없다. 또한, 포란크기(clutch size)가 작고, 알과 유생의 크기가 비교적 크긴 하나, 심해에서의 지배적인 경향인 유생 분산에서의 난영양성방식(lecithotrophic mode)의 존재는 부모 주위에 집중하는 것을 어느 전도 막기 위해 충분히 분산시키려는 경향이 있음을 나타낸다.

그밖에 사회적 분포양상은 어군형성(schooling) 또는 무리형성(herding)에 의한 집중이나 개체들간의 공간의 증가(이는 중복으로 부터 발생하는 먹이의 약탈을 피하기 위한 축수를 가진 표층퇴적물식성인 갯지렁이류의 서굴

(burrows)사이에서 나타나는 것으로 생각할 수 있다.) 등으로 나타날 수 있다. 상호작용에 의한 분포양상은 포식자와 피식자 또는 공생관계에서 나타날 수 있는 서로 다른 종들의 상호 작용에 의해 발생할 수 있다. 이러한 상호 작용은 심해 군집의 구조를 결정하는데 매우 중요한 역할을 하는 것으로 보인다. 몸이 큰 초대형동물인 커다란 몸체의 초식자에 의한 섭식은 군집 회복에서 천이 단계 과정의 모자이크와 같은 국부적인 공간을 형성할 것으로 가정하고 있다. Jumars and Eckman(1983)은 이에 따라 나타나는 분산양상에 대하여 아무런 의견의 일치를 보지못하였으나, 이러한 과정은 적어도 국부적으로 증가된 풍부성에 영향을 미칠 것으로 보이며, 공간과 자원에 대한 종간 경쟁의 영향 역시 개체들간의 분포에 영향을 미칠 것으로 보인다.

심해 저서동물의 공간 분포양상에 대한 우리들의 빈약했던 지식은 초대형동물(megafauna)를 조사함으로써 발전하게 되었다. 이는 비록 초대형동물들 그랩이나 코어러(corers)로는 잘 채집되지 않으나 크기가 크기 때문에 쉽게 동정이 안되더라도 해저 사진들이나 잠수정의 관찰용 현창(viewing ports)으로 부터 쉽게 관찰할 수 있기 때문이다. 물론 이들이 굴착 능력을 조금이라도 가지고 있다면 이러한 방법으로 획득한 자료에 다소 부정확성이 내포될 수 있다(Jumars and Eckman, 1983). Alvin호에서 촬영되는 사진을 이용하면 우선 분포의 규모(1 m 이하에서 수 백 m에 이르는)에 따른 분석을 할 수 있다. 서로 인접한 방형구법 촬영을 통하여 점차로 넓은 block을 형성할 수 있는 것이다. 일반적으로 자주 출현하는 초대형동물의 분포구역 내에서의 밀집정도는 방형구에 나타나는 개체수에 의한 분산 : 평균의 비율을 계산해서 무작위 기대치와 비교하여 측정할 수 있다. 이러한 작업은 Grassle et al.(1975)에 의해 최초로 수행되었는데, 이들은 New England 연안에서 0.5-1.8 km 떨어진 대륙사면에서 조사하였다. Smith and Hamilton (1983)에 의해 수행된 California Continental Borderland의 Santa Catalina Basin 수심 1.3 km 지점에서의 조사에서도 이와 비슷한 자료가 나왔다. 늘

랄 것도 없이, 극피동물이 가장 우점하는 것으로 나타났다. 이 연구에서는 분포양상의 원인을 이해하는데 도움이 되는 정보를 얻을 수 있었으나, 대체로 완만한 운동성을 갖는 동물들에서도 양상의 복잡성이 드러났다. Santa Catalina Basin에서는 부식성식자인 거미불가사리, *Ophiophthalmus normani*의 밀집된 개체군( $16.5 \text{ m}^{-2}$ )에서, 가장 작은 부분(0.5 m)에서의 분포양상은 규칙적인 경향을 나타내었으나, 직경 1-4 m의 부분에서는 무작위적으로 위치하는 패취(patches)를 형성하였다. New England의 대륙 사면에서는 잡식성으로 보이는 대형 거미불가사리, *Ophiomusium lymani*는 수심 1.8 km (서로 다리의 접촉을 피하려는 경향을 나타낸 곳) 정도에서는  $2.5 \text{ m}^{-2}$ 의 밀도로 규칙적인 분포 경향을 보였으나, 좀 더 드문 드문 나타난 1.3 km 수심의 지점에서는 군거 분산(aggregated dispersion)의 경향을 나타내었다. 이 두 연구에서는 운동성의 퇴적물식자들의 분포에 있어서 군거성을 설명하였다. 고등류인 *Bathybembix bairdii*와 해삼류인 *Scotoplanes globosa*는 조금 느슨한, 25-96 m의 직경 정도의 범위를 가지고 군생하여 생활하였다. *B. bairdii*의 느슨한 군거형태는 방향성 또는 생식적인 과정에 기인하는 것으로 보이며, 상부로부터 공급되는 식물성 먹이에 모여드는 것이 분포양상 생성의 원인일 것으로도 추측이 된다. 그러나, 패취의 내부, 외부에서 규칙적으로 공간을 점유하는 것은 일정한 형태의 습성적인 공간점유가 있음을 나타내는 것으로 생각된다.

### 3. 심해미생물에 의한 망간의 전이

#### 1) 망간 산화-환원 미생물

망간은 미생물, 식물, 동물의 영양분이 필수적으로 함유해야 하는 미량 원소로 isocitric dehydrogenase 와 malic enzyme 등의 효소의 활성제로 요구되기도 하고 oxygenic photosynthesis 의 photosystem II 에서 물을 분해하

여 산소를 발생시키는 과정에 관여하기도 한다 (Table III-6). Mn(II)는 몇몇 세균에 의해 에너지원으로 사용되며, Mn(III)와 Mn(IV)는 혐기성상태에서 몇 세균들에 의해 호흡과정의 최종 전자수용체로 이용되기도 한다. 망간의 생물학적 순환과정은 용해성의 망간이 불용해성의 상태로 침전되어지는 과정과 불용해성의 망간이 용해성의 형태로 전환되는 과정으로 나눌 수 있는데, 두 과정 모두 망간이 산화되거나 환원되는 반응으로 볼 수 있다.

1901년 Jackson이 망간을 산화시킬 수 있는 *Crenothrix manganiifera*를 발견하였고, 1913년 Beijerinck가 mangacarbonate가 세균과 곰팡이에 의해 산화될 수 있다고 보고한 후 망간미생물에 대한 많은 연구가 수행되었다. 효소적 반응에 의해서거나 비효소적반응에 의해서거나 많은 미생물들이 망간을 산화시킬 수 있다고 밝혀졌는데 포자를 형성하는 간균, 비포자성 간균, 구균, 비브리오, 스피릴륨, 점막형성세균, budding bacteria, cyanobacter 등 계통학적으로나 생리학적으로 연관이 별로 없는 다양한 eubacteria그룹의 세균들이 망간산화세균 그룹에 속하고 있다 (Nealson, 1992). 망간은 망간 산화효소(일종의 oxidase)에 의해서나 단백질, glycolyxes, 세포구성물질 등의 망간 결합물들에 의해 직접적으로 산화된다. 간접적으로 미생물에 의해 망간이 산화되는 경우는 hydrogen peroxide, superoxide, hydroxy radical 등 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.

*Sphaerotilus discophorus*(Ali and Stokes, 1971)와 *Pseudomonas sp.* (Kepkay and Nealson, 1987)는 망간을 산화하여 에너지를 얻고 탄수화물은 이산화탄소를 이용하여 자가영양으로 성장할 수 있다고 보고되었다. 그러나 대부분의 망간산화미생물은 mixotroph나 heterptroph로 mixotroph의 경우는 망간을 이용하여 에너지를 얻고 탄소원으로는 유기물을 사용하며 heterotroph의 경우는 망간산화에서 에너지를 얻지 않고 타가영양을 한다. 지금까지 바위표면, 토양, 호소의 수층과 저질층, 시냇물, 해양의 수층, 저질

층, 열수구 및 해저면에서 분리 동정된 망간세균들을 Table III-6에 요약하였다. 망간산화균류는 대부분이 hydroxy acid 계통의 대사산물이나 곰팡이 세포성분에 의해 비효소적으로 망간을 산화시킨다고 보고되었다.

망간환원미생물 그룹은 호흡과정에서 망간을 최종 전자수용체로 사용하며 망간을 Mn(II)로 환원시키는 미생물과 망간을 영양학적으로 이용하기 위해서 수용성의 Mn(II)로 환원시키는 것들이 있다. 대부분 망간산화그룹 처럼 다양한 환경에 서식하며 그 동안 발견된 망간환원 세균은 Table III-7에 요약하였다. 곰팡이의 경우 대부분 대사산물에 의해 망간이 비효소적으로 환원된다고 보고되었다.

몇몇 미생물들은 망간산화물을 세포를 둘러싸고 있는 점질층에 축적하는데 sheathed bacteria 중 *Leptothrix*, *Methallogenium*, *Caulobacter*, *Kusnezovia*, *Pedomicrobium*, *Hyphomicrobium*, *Siderocapsa*, *Naumanneiella*, *Planctomyces* 등이  $Mn^{2+}$  를 산화시킨 후에 점질층에 이를 축적한다 (Ghiorse, 1984). 자연상태에서 이러한 망간의 축적과정은 철이온의 축적과 직접 연관되어 있다.

## 2) 해양에서의 망간의 순환과정

망간은 지구표층을 이루는 금속 중 무게가 0.1%로 그 함량이 다섯번째로 많으며 바위, 토양, 담수, 해수, 저질층 등 널리 다양한 곳에 분포되어 있다. 해양의 경우 그 분포는 균등하지 않고 지역적으로 모여 있는데 한 예로 태평양의 경우 Table III-8과 같이 생체보다는 해수에, 해수보다는 저질층에 집약되어 있으며 상당량이 심해에 특히 망간단괴와 망간각에 분포되어 있다.

망간은 여러가지의 산화상태로 존재하는데 예로 0, +2, +3, +4, +6, +7 등의 상태로 존재하지만 자연상태에서는 +2 와 +4 의 산화상태가 가장 보편적으로 존재한다. +2 가의 경우에는 용액 중에 자유이온 상태로 존재하며 +3 이나 +4 상태는 불용성으로 특히 +4 상태는 ferric ion이나  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ .

$\text{Cu}^{2+}$  과 결합을 잘 하며 oxide류의 광석에 많이 분포되어 있다. +2 가의 상태에서는 Eh와 pH가 낮은 조건에서는 열역학적으로 안정되어 있고 +4 가의 상태는 높은 Eh와 pH 여건에서 안정적이다. 용액 중의 2가의 망간이온은 무기이온이나 유기물과 결합하여 안정화 된다. 해수에서는 Mn(II)가 Mn(IV)로 자연적인 산화반응에 의해 전이되지만 반응속도가 아주 느리다. 해양에서의 망간의 유래, 축적 및 지구화학적 전이과정 중 중요한 기작은 그림 1에 나타난 바와 같다. 혐기성 조건에서 망간은 +2 가 상태로 자유 양이온인  $\text{Mn}^{2+}$ 의 형태로 존재하는데 manganese-sulfide ( $\text{MnS}$ ), manganese phosphate [ $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2$ ]나 manganese-carbonate 혼합물로 존재한다. 산소가 존재하는 호기성 상태에서  $\text{Mn}^{2+}$ 는 manganate ( $\text{MnO}_x$ )로 산화된다. +2와 +4 상태사이의 redox 전이는 일반적으로 oxygen/sulfide 접촉면에서 일어난다. Euphotic zone에서  $\text{Mn}^{2+}$ 는 식물플랑크톤이나 미생물의 중요한 영양소로 요구되며 유기복합물의 형태로 액상에서 안정화 되어 있다. 또한 +4 가로 자연산화되어 다른 희귀금속이나 유기물과 결합하기도 한다. 이러한 manganate는 Eh, pH가 낮고 sulfide가 존재하는 곳에서 다시 환원이 된다. 결론적으로 망간의 순환은 redox전이 및 흡착에 의한 반응과 생물학적 기작에 의해 일어난다고 할 수 있다.

### 3) 해양망간세균의 특성

지구표면의 4분의 3을 덮고 있는 해양에 존재하는 미생물은 토양이나 호소에 존재하는 미생물에 비해 독특한 특성을 갖고 있다. 우선 해양은 영양학적으로 빈곤한 생태계이기 때문에 해양미생물은 저영양의 상태에서도 자랄 수 있으며 저온에서도 생장이 가능하다. 또한 우리가 보통 심해라고 하는 수면 1000 미터 이하에서도 성장할 수 있는 미생물들은 높은 압력에서도 견딜 수 있는 친압성(barophile)인 특성을 지니고 있다.

해양에서 망간 세균은 1963년 Ehrlich가 처음으로 망간단괴를 집적 배양하여 미생물이 망간단괴에 미치는 영향을 조사하고 망간세균을 분리하였



다. 해양에서 망간세균은 저질층에 넓게 분포되어 있고 많은 균주들이 분리 동정되었다. 그후 미생물들이 망간의 전이과정에 관련되리라 추정되었고 Ghiorse, Krumbein, Nealson, Tebo 등의 연구진에 의해 해양망간세균의 분리, 동정 및 생태학적 연구를 위한 방법들이 개발되었고 망간 산화 환원의 생리학적 기작에 대한 연구 등 다방면에서 해양 망간세균에 대한 연구가 수행되어 왔다. 그러나 실험실 안에서의 연구에 비해 현장에서의 망간의 산화 및 환원세균의 활성에 대하여는 많이 보고가 되지 않았다. Tebo (1983)는  $^{54}\text{Mn}^{2+}$ 와 sodium azide, 항생제 등 여러 생물학적 저해제를 이용하여 oxygen/sulfide 사이면에서 세균에 의해  $\text{Mn}^{2+}$  침강속도가 증가된다고 보고하였다.

망간단괴에서 망간은 주로 +4 가인데 Mn(IV) oxide는  $\text{Mn}^{2+}$ 뿐만 아니라 주위의 양이온을 강하게 흡착하고 있다. 이러한 이온은 Mn(II)산화세균에 의해 에너지원으로 사용될 수 있기 때문에 망간 단괴는 이러한 세균들에게 선택적인 서식처의 역할을 한다. Burnett와 Nealson(1981)은 전자현미경으로 관찰하고 배양시험을 통하여 망간단괴의 표면과 내부에 존재하는 세균들의 분포를 조사하였는데 단괴 1 g 당 수 만에서 수 십만개의 세균이 포함되어 있음을 발견하였다. 이는 seawater-nutrient agar에 접종하고 14-18 °C에서 배양한 결과인데 세균들이 망간단괴에서 서로 응집되어 작은 군체를 이루고 있기 때문에 실제로는 더 많은 개체수가 존재하리라 추정되어 진다. Giorse(1980)도 발틱해의 ferromanganese concretion의 표면을 SEM과 TEM으로 관찰한 결과 바깥표면에서 균류의 광이실과 같은 균사체와 단일 세균, 작은 세균군체들을 발견하였고 내부물질에서는 간균, 구균, 점액성 세균들을 관찰하였다.

Greenslate(1974a)에 의하면 단괴의 성장이 시작될 때 플랑크톤, 특히 다이이톰의 사체에서 망간 축적이 시작된다고 가정하였는데, 또한 저서유공충 같은 생물들의 잔존체를 단괴내부에서 발견하였는데, 이러한 잔존 골격이 틀이 되어 미생물의 작용과 함께 망간 단괴나 다른 형태의 단괴가 축적

되었을 것이라고 추정하였다 (Greenslate, 1974b). 망간단괴에서 저서생물인 유공충과 다른 원생동물이 성장하는 것이 발견되었다는 사실은 단괴의 성장에 망간세균의 역할이 아주 중요하다는 것을 시사한다. 왜냐하면 위의 동물들은 망간산화세균을 먹이로 단괴에서 성장을 할 수 있고 이 먹이사슬이 연속이 되기 위하여 계속 증식을 할 것이다. 즉 망간산화세균은 망간이 단괴에 흡착하는데 관여할 뿐만 아니라 식균작용을 하는 원생동물의 먹이로 제공되기도 한다.

심해저의 망간단괴에서 발견된 Mn(IV) 환원세균은 실험실에서 조사한 결과 전자공여체로 유기물인 포도당, 젖산, 초산, 호박산 등을 이용하는 종속 영양체들이다. 혐기성의 thiobacilli나 다른 세균들 중 저질 층에서 FeS 형태 등의 황화수소가 존재할 경우 Mn(IV) oxide를 환원시키는데 이 때 Mn(IV) oxide는 전자수용체로 작용을 하고 황화수소는 황산이온으로 산화된다. 대부분 해양에서 분리되어 연구가 된 세균들은 호기성으로 망간을 호기적으로 또는 혐기적으로 환원시킬 수 있으나 아직 현장에서의 망간환원 세균의 활성도를 조사에 대하여 연구가 미비하다. Mn(IV) oxide는 Cu, Co, Ni등의 금속이온과 잘 결합되어 있는데 실험실에서 조사한 결과 세균에 의해 망간산화물이 환원될 경우 이러한 금속이 용해되는 현상이 발견되었다. 이러한 현상은 미생물에 의한 망간의 환원이 해양생태계에 있어서 영양물의 순환에 중요함을 시사한다.

미생물에 의한 생물지질학적 망간괴 생성에 대한 연구와 망간괴 생태의 연구 및 망간세균의 생물공학적인 이용을 위하여는 망간괴 주위 생태계의 물리, 화학, 미생물학적 분석이 요구된다. 또한 망간세균의 분리, 생리 생화학적 연구와 *in vitro*에서 망간세균 및 침전물의 구조적 분석, *in situ*에서의 망간 침전물의 세균 분포와 활성도 측정, 관련 미생물과 동물의 심해조건에서의 분리 배양기술개발 분야등의 기초연구가 필요하다. 이러한 연구를 통하여 망간단괴에서의 망간 침전 예상 및 촉진에 대한 자료가 축적이 되고, 망간 단괴 시추시 생태계의 변화를 특히 미생물들의 분포 변화에 따른 변이

를 모델링할 수 있는 능력이 축적될 것이다. 또한 망간 세균을 이용하여 저에너지가 소요되며 환경보호적인 방법으로 저급의 망간단괴나 광석에서 코발트, 구리, 니켈등의 희귀금속 및 망간을 효율적으로 회수하기 위한 생물학적 선광기술 개발에 활용될 수 있을 것이다.

## 제 3 절 재료 및 방법

### 1. 저서생물

1993년에 심해저 광물자원 탐사의 목적으로 태평양의 클라리온-클리퍼톤 해역에서 수행된 3회(KODOS 93-1, -2, -3)에 걸친 탐사가 수행되었다. 이 연구는 탐사에서 채집된 저서생물을 대상으로 하였다. KODOS 93-1과 -2의 탐사지역은 동일하나 정점의 위치가 서로 다르고, KODOS 93-3은 탐사지역도 달랐다. 또한 퇴적물 또는 광물의 채취방법도 일정하지 않았다.

#### 1) KODOS 93-1 탐사

KODOS 93-1 탐사에서는 PGS그랩(photo grab sampler)과 박스코어러(box corer)를 사용하여 채집을 실시하였다. PGS그랩은 매 정점 마다 1회 실시하였으며, 채취한 퇴적물 진랑 중에서 퇴적물 분석 시료를 추출하고, 약 30 l 정도의 저질을 1mm와 0.1mm망목의 체로 걸러내어 대형저서생물(macrofauna)과 중형저서생물(meiofauna)을 각각 분리하였다. 박스코어러를 사용한 2개 정점에서는 채집된 퇴적물을 표층에서 20cm와 그 이하 부분을 분리하여 위와 같은 방법으로 생물을 퇴적물로부터 분리하였다.

분리된 시료는 10% 중성 포르말린 해수용액에 고정하였고, 연구소로 운반하여 실험실에서 동물군별로 선별하고 계수 및 습중량을 생물량으로 측정하였으며, 동물군별로 보존하였다.

#### 2) KODOS 93-2, 3 탐사

KODOS 93-2, 3 탐사에서는 KODOS 93-1 탐사와는 다르게 FFG와 박스 코어러를 사용하였다. FFG에 의해 채집된 시료 중에 망간단괴의 표면에 붙어 서식하는 생물의 유무를 관찰하여, 고착성 생물이 출현한 경우에 일부를 추출하였고, 망에 걸려 채집된 저서동물을 골라내었다. 박스코어러에 의

해 채집된 퇴적물은 0.5 mm, 0.3 mm 망목의 체를 이용하여 KODOS 93-1 탐사와 동일한 방법으로 생물을 분리하였다. 실험실에서의 시료 처리과정도 KODOS 93-1 탐사와 동일하였다.

## 2. 미생물

KODOS 94-1 심해저 탐사에서 채취한 15개의 미생물시료를 배지에 접종하여 25℃에서 배양한 후 망간세균 및 저영양성 해양세균을 순수분리하고자 다음과 같은 시료와 배지로 처리하였다.

### 시 료

1. station 17      Piston core 퇴적물 표층
2. Station 17      Piston core 퇴적물 50 cm
3. Station 44      FFG 표층
4. Station 46      Box Core 상층 퇴적물
5. Station 46      Box Core 중층 퇴적물
6. Station 46      Box Core 하층 퇴적물
7. Station 51      FFG 표층 퇴적물
8. Station 62      FFG 표층 퇴적물
9. Station 74      Box Core 상층 퇴적물
10. Station 74      Box Core 상층 퇴적물
11. Station 74      Box Core 상층 퇴적물
12. Station 79      Box Core 상층 퇴적물
13. Station 79      Box Core 상층 퇴적물
14. Station 79      Box Core 상층 퇴적물
15. Station 82      FFG 표층 퇴적물

## 배 지

### 1) 망간 한천배지

MnSO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O	10.0	mg
Agar	15.0	g
Aged sea water	1.0	l
pH	7.5	

### 2) Succinate Minimal Medium

NH <sub>4</sub> Cl	9.0	mM
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.4	mM
NaHCO <sub>3</sub>	2.0	mM
FeSO <sub>4</sub>	5.0	uM
Hepes buffer(pH 7.8)	10	mM
vitamin mix	10	ml
Sodium succinate	10	mM
MnCl <sub>2</sub>	10	uM
Aged sea water	1.0	l

Vitamin mix per 1000 ml, Biotin 2.0 mg, niacin 5.0 mg, thiamine.HCl 5.0 mg, p-aminobenzoic, acid 5.0 mg, Ca-pantothenate 5.0 mg, pyridoxin.HCl 5.0 mg, cyanocobalamin 5.0 mg, riboflavin 5.0 mg, folic acid 2.0 mg, filter sterilized, stored at 5°C in the dark.

## 제 4 절 결 과

### 1. 저서생물의 출현 조성

KODOS 93 전체 조사정점은 모두 258개 였으며 이 가운데 저서생물이 출현한 곳은 91곳이었으며 채집된 전체 저서생물의 개체수(일부 군체는 한 개체로 계수)는 155개체이었으며, 10개 동물군과 미확인 생물군에 속하는 60종으로 구분하였다 (Table III-9).

#### 1) KODOS 93-1 탐사

생물상 : 150개 정점에서 수행한 KODOS 93-1 탐사에서는 조사정점 43곳에서 아홉 동물군의 43종, 55개체의 저서동물이 채집되었다 (Table III-10). 원생동물(Protozoa)은 여덟 정점에서 3종, 해면동물(Porifera)은 세 정점에서 3종, 자포동물(Cnidaria)은 일곱 정점에서 7종, 태형동물(Bryozoa)은 한 정점에서 1 종이 나타났다. 한편 성구동물(Sipunculida)은 1종 1개체, 연체동물(Mollusca)은 세 정점에서 3종 3개체, 절지동물(Arthropoda)은 네 정점에서 4종 4개체, 환형동물(Annelid)은 여덟 정점에서 6종, 6개체, 극피동물은 1종 1개체가 채집되었다. 그밖에 동물군별 선별이 불가능한 생물체가 26개 정점에서 14종류가 처리되었다. 전체 생물량은 총 63.01g으로 이 가운데 자포동물이 27.91g으로 가장 높게 나타났으며, 원생동물은 11.42g이었다.

이들 9개의 동물군 중에 원생동물과 자포동물, 태형동물은 고착성 동물들로 주로 망간단괴에 부착된 상태로 채집되었다. 또한 태형동물이나 자포동물에 속하는 산호충류(Hydrozoa)의 경우에는 군체(群體)를 형성하고 있어 개체수로 파악할 수 없었으며, 원생동물인 방산충(Radiolaria)류의 경우 생물과 퇴적물을 분리하는 체질과정에서 서로 뭉쳐 엉겨서 정확한 개체수

의 파악이 어려웠다 (Table III-10 및 11).

동물군별 채집된 생물의 특성 : 원생동물은 모두 방산충으로 현미경 상에서 3종류로 나누어졌다. 이들은 다섯 정점에서 출현하였는데, 정점 65, 87, 88에서는 단괴에 부착한 상태로 채집되었으며, 정점 23, 57에서는 퇴적물을 걸러낸 후 잔존물에서 발견되었다. 정점 55의 경우 대량으로 출현하여, 퇴적물을 체질(sieving)하여 200 ml의 방산충을 채집하였다.

해면동물 3종은 모두 단괴에 고착된 상태로 채집되었다. 정점 23에서 채집된 종은 영지버섯 모양을 하여 재질이 부드럽고, 표면에 나이테와 같은 무늬가 있었고, 정점 50에서 채집된 종은 반투명한 형태로 약 2 cm의 크기였으며, 정점 93에서 채집된 것은 단괴와 접촉된 부분이 흰색이었고, 나머지 부분은 갈색의 얇은 막으로 덮여있었다.

채집된 7 종의 자포동물은 산호충류(Anthozoa, 2종), 히드로충류(Hydrozoa, 2종), 해파리류(Scyphozoa, 2종), 그밖에 1종 등으로 나눌 수 있었다. 정점 114에서 채집된 산호충류는 단괴에 부착된 상태이었고, 흰색으로 약 3 cm 정도의 크기였다. 히드로충류는 정점 97과 124에서 채집되었는데, 정점 97에서는 단괴에 부착된 상태로 약 2 cm 정도의 크기로 나무모양과 같은 가는 본체에 히드라줄기가 사방으로 뻗어있는 형태였다. 정점 124의 경우에도 역시 단괴에 고착되어 있었으며, 흰색으로 사방으로 히드라줄기가 뻗어 있는 모양이었다. 해파리류는 정점 66과 89에서 채집되었는데, 66의 경우에는 퇴적물을 걸러낸 잔존물에 남아있었으며, 정점 89에서는 파손된 일부분만이 채집되었다. 산호충류의 일종인 말미잘류는 정점 112와 113에서 채집되었는데, 정점 112에서 채집된 것은 약 1 cm의 크기로 단괴에 부착된 상태이며, 몸체는 흰색이며, 투명하고, 촉수의 일부가 노출된 상태였다. 정점 113에서 채집된 것은 약 5 cm 정도의 길이로 몸체가 길고, 투명하였다.

대형동물은 정점 112에서 채집되었으며, 직경 8 cm의 대형 단괴에 부착되어있으며, 색깔은 갈색으로 단괴 표면의 약 10% 정도의 면적에 군체를



형성하고 있었다.

성구동물은 정점 134에서 채집되었는데, 약 2.5 cm의 크기로 퇴적물 속에 서식하고 있었다. 그리고 연체동물은 군부류(Polyplacophora) 1종과 이매패류(Bivalvia) 2종으로 구분되었다. 군부류는 정점 95에서 채집되었는데, 각장이 약 1 cm이며, 표면은 백색이었다. 정점 122에서 채집된 이매패류는 백색이었으며, 각장은 약 0.7 cm 이었다.

절지동물은 등각류(Isopoda) 3종과 새우류(Macrura) 1종이 채집되었다. 등각류의 경우 정점 75에서 채집된 것은 약 3 mm 정도의 체장으로 흰색이었다. 정점 127에서 채집된 것은 약 7 mm의 크기로 촉각(antenna)이 길고, 미지(uropod)가 길게 늘어져 있는 것이 특징이었다. 정점 143에서 채집된 등각류는 흰색으로 체장이 약 7 mm 정도이며, 머리부분이 손상되었고, 미지부분이 짧았다. 정점 150에서 채집된 새우류는 몸의 일부분이 훼손되었으며 체장은 약 1.5 cm였다. 이 종은 눈이 붉고, 갑각이 짧았으며, 복절(abdomenal segment)이 길었다.

환형동물은 모두 6개체가 채집되었다. 또한 7개 정점에서는 갯지렁이의 서관(tube)만이 채집되었다. 극피동물의 경우 불가사리류(Asteroidea)에 속하는 한 종이 채집되었다. 이 종은 체장이 약 5mm 정도이며, 흰색이고, 중심반(disc)이 위로 솟은 것이 특징이었다. KODOS 93-1 탐사 정점 83에서 해저 사진촬영에서 포착된 해삼류(Holothuroidea)는 망간단피의 분포층위를 기어 가면서 섭식하고 있었다 (Fig. III-13). 이종은 표층 퇴적물식자이며, 몸은 매끈하고 작은 돌기 표면에 나있었다.

선별이 불가능한 생물체들은 특이한 외형을 가지거나 훼손된 상태가 심하여 선별이 불가능할 정도인 것이 대부분이었으며, 천해에서 전혀 찾아볼 수 없는 모양을 한 생물도 일부 포함되었다. 미확인종(identified species) 7이라고 기재된 생물은 단피에 고착하여 서식하는 생물로 붉은 색이고, 크기가 약 5 mm 정도였다. 외부는 단단한 물질로 덮혀있고, 수관 형태의 관이 밖으로 돌출되어 있는 모양을 하고 있었다.

## 2) KODOS 93-2 탐사

생물상 : 53개 조사정점에서 실시한 2차 조사에서는 12개 정점에서 11종 15개체의 저서생물이 채집되었다 (Table III-12). 이들의 습중생물량은 38.40g으로 나타났다. 동물군별로 보면, 원생동물이 세 정점에서 2종이 출현하였고, 자포동물은 두 정점에서 2종, 2개체, 연체동물은 한 정점에서 1종, 1개체, 절지동물은 세 정점에서 3종, 4개체, 어류가 다섯 정점에서 2종 5개체가 출현하였다. 동물군별 선별이 불가능한 생물체는 두 정점에서 2종 3개체가 출현하였다. 생체량은 총 38.4g으로 이 중에 절지동물이 13.56g으로 가장 높게 나타났다. 한편 자포동물은 11.27g, 어류는 2.61g으로 나타났다.

동물군별 채집된 생물의 특성 : 원생동물의 경우 모두 방산충으로 현미경 상에서 2종으로 동정되었다. 이들은 모두 박스코어러에 의해 채집되었으며, FFG에서 채집된 시료에서는 나타나지 않았다.

자포동물은 모두 해파리류로서 정점 25와 48에서 각각 1개체씩 채집되었다. 이들이 심해에서 서식하는 종인지 그렇지 않으면 FFG가 심해로 낙하하면서 채집망에 걸린것인지에 대해서는 알 수 없었다. 정점 48에서 채집된 종은 직경이 약 6 cm 정도이며, 생체량이 9.7 g인 상대적으로 큰 개체였다. 몸은 투명하고, 촉수는 매우 짧으며, 촉수 끝에 보라색 점이 있었다.

연체동물은 오징어류 1종이 채집되었는데, 외형이 심하게 훼손되어 정확한 형태 파악이 불가능하였다. 크기는 전장이 약 3 cm 정도이며, 다리가 짧은게 특징이었다.

절지동물은 게류 1종과 새우류 2종이 모두 3종이 출현하였다. 게는 다리 다섯 쌍이 모두 붙어 있는 완전한 상태 그대로 채집되었다. 이 종은 갈색인 수컷으로 갑각의 폭과 높이가 비슷하며, 집게다리는 작았다. 새우류의 경우 두 종 모두 눈이 매우 붉고, 발광능력을 가지고 있었으며, 이마뿔(rostrum)이 짧았다. 정점 36에서 채집된 종은 약 8 cm 정도로 상대적으

로 크고, 다리가 짧았으며, 몸은 연분홍 색을 띠었다.

어류는 몸이 가늘고 긴 종류와 아귀모양으로 납작하고 넓은 종류 두 종류로 나누어졌다. 정점 13, 23, 30에서 채집된 체장이 긴 종류는 투명하여 내장과 뼈가 보였으며, 지느러미가 퇴화되어 있었다. 아귀모양의 종류는 정점 12, 23에서 채집되었는데, 머리부분에 먹이를 유인하는 발광 장치가 있었으며, 입이 크고, 이빨이 많이 나있었다. 체색은 검은 색이고, 비늘이 없었으며, 지느러미는 퇴화되어 있었다.

채집된 저서생물 가운데 자료에 근거한 선별이 불가능한 생물체는 2종류였다. 정점 35에서 출현한 1종은 헤면 모양으로 단피에 단단히 고착되어 있었다. 정점 9와 13에서 채집된 종은 KODOS 93-1 탐사에서도 채집된 종으로 역시 망간단피에 고착되어 있었고, 이 종은 단단하고 두터운 외부 피층을 가지고 있었으며 마치 수관같은 구조가 돌출해 있었다.

### 3) KODOS 93-3 탐사

생물상 : 55개 정점에서 실시한 KODOS 93-3 탐사에서는 36개 정점에서 35종 85개체의 생물이 출현하였다 (Table III-13). 동물군별로 보면 일곱개 무리로 나누어 지는데, 원생동물의 경우 여덟 정점에서 4종, 자포동물은 11개 정점에서 5종, 13개체, 태형동물은 두 정점에서 2종, 성구동물은 한 정점에서 1종, 1개체, 연체동물은 10개 정점에서 8종 11개체가 채집되었다. 그리고 절지동물은 17개 정점에서 11종 20개체, 환형동물은 세 정점에서 3종, 8개체, 극피동물은 아홉 정점에서 3종, 13개체, 척삭동물의 해초류는 한 정점에서 한 종, 1개체, 어류는 다섯 정점에서 2종 7개체가 채집되었으며, 선별이 불가능한 생물체는 아홉 정점에서 8종, 9개체가 출현하였다.

습증생물량은 총 106.84 g으로 두 번의 다른 탐사와 비교해서 상대적으로 높게 나타났으며, 동물군별로 보면 자포동물이 26.03 g으로 가장 많았고, 절지동물과 극피동물은 각각 13.57 g, 12.63 g으로 각각 나타냈다(Table III-13).

동물군별 채집된 생물의 특성 : 원생동물의 경우 모두 방산충으로 동정되었는데, 박스코어러(box corer)를 사용하여 채집한 정점에서만 출현하였다. 그밖에 원생동물이 출현한 정점 1, 25, 52, 55에서는 단괴에 니질이 묻어 있는 부분에서만 관찰되었다. 자포동물의 경우 산호충류(말미잘류 포함)와 해파리류 중에 하나였다. 산호충류는 정점 22-A, 24, 25에서 채집되었는데, 단괴에 고착되어 있었으며, 정점 22-A에서 채집된 종은 흰색이고, 길이가 약 2cm 정도였다. 말미잘류는 정점 25에서 1개체 채집되었는데, 훼손이 심하여 외형적인 구체적 특징을 알아볼 수 없었지만 엷은 갈색의 촉수가 다수 노출되어 있었다. 해파리류는 8개 정점에서 채집되었다. 이들은 심해성이라기보다는 FFG가 낙하하면서 망에 걸린 것으로 판단되었다.

성구동물은 정점 37에서 1개체 출현하였다. FFG에 의해 채집된 저층 퇴적물에서 분리되었다. 그리고 대형동물은 정점 22와 24에서 채집되었다. 이들은 직경이 약 8 cm 정도 되는 망간표면에 군체로 고착하고 있었으며, 군체는 표면적 중 약 10% 정도를 차지하였다. 색은 엷은 갈색을 띠었다.

환형동물(갯지렁이류)의 경우 정점 16에서 확인된 것은 단괴 표면에 서관(tube)이 붙어 있었으며, 서관은 털실과 같이 부드럽고, 표면에 니질 입자나 다른 이물질이 붙어 있지 않았으며, 약 8 cm 정도로 길었다. 정점 29에서 갯지렁이 종도 서관과 생물이 동시에 채집되었는데, 서관은 채집 과정에서 깨어진 것으로 보이며, 서관을 만든 물질은 섬유질 성분으로 매우 질기고, 갈색이었으며, 표면에 니질이 묻어 있었다. 정점 15에서 발견된 두 종은 매우 가늘고, 길이는 약 5 cm 정도였다. 채집 당시 몸이 심하게 훼손되었고 머리부분은 절단되어 있었다.

절지동물로는 대형 단각류(Amphipoda)가 1종, 새우류가 10종이 채집되었다. 정점 14에서 채집된 단각류는 천해에 서식하는 종류에 비해 매우 크고, 부속지가 훼손되지 않은 온전한 상태로 채집되었다. 출현 새우류의 경우 외형에서 차이가 있었으며, 특히 이마뿔의 모양이 서로 달랐기 때문에 다른 종으로 구분하였다. 정점 31에서 채집된 종은 길이가 4.5 cm에 해당

하는 대형종으로 붉은 색이며, 촉각이 짧았다.

극피동물은 성게류(Echinoidea)와 거미불가사리류(Ophiuroidea)에 속하는 두 종이 채집되었다. 성게류의 경우 6개 정점에서 채집되었는데, 채집 중 대부분 깨어져 심하여 정확한 외형을 알아볼 수 없었으나, 동일한 형질을 소유하고 있어 소 모두 동일종으로 파악하였다. 거미불가사리는 중심반의 지름이 약 0.5cm 정도였으며, 다리(arm)는 길고, 몸은 갈색이었다. 척색 동물로는 해초류가 채집되었는데, 피낭이 벗겨진 상태여서 내장이 모두 드러나 보일 정도로 투명하였다.

어류는 2종으로 구분되었으며, 모두 채집 과정에서 심하게 훼손되어 형태 구분이 어려웠다.

동물군별 구분이 불가능한 생물체는 8종류로 나누어졌다. 정점 44와 55에서 출현한 것은 단괴에 고착하고 있는 생물로, KODOS 93-1, 2 탐사에서도 출현한 수관이 있는 종류이었다. 채집된 미확인 생물체들 중에는 심하게 파손되어 외형상 구분이 어려운 것들도 있었다 (Table III-13).

## 2. 저서동물의 분포

대형 저서생물은 전체 조사정점 258개 정점 가운데 약 35.3%인 91개 정점에서 출현하였다. 탐사별로 보면 KODOS 93-1, 2 탐사에서는 정점에 대한 저서동물의 출현율이 각각 28.7%와 22.6%로 매우 낮았던 반면에 KODOS 93-3 탐사에서는 60.4%로 상대적으로 매우 높았다. 탐사해역이 같았던 KODOS 93-1, 2 탐사에서는 134° W을 기준으로 서쪽과 동쪽에서 출현율의 큰 차이가 있었는데, 서쪽의 47개 정점에서 불과 3개 정점(6.4%)에서만 저서생물이 출현하였고, 그 동쪽에서는 156개 정점 가운데 52개 정점(32.9%)에서 출현하고 있어 상당한 차이를 보였다. 한편 KODOS 93-3 탐사해역에서는 위와 같은 차이가 나타나지 않았다. 그리고 KODOS 93-3 탐사해역에서는 저서동물 출현 정점들 가운데 15 곳에서 갑각류가 출현하

고 있어 KODOS 93-1, 2 탐사해역 보다 출현빈도가 훨씬 두드러졌다.

저서생물의 출현밀도와 망간단괴의 분포밀도나 수심에 따른 뚜렷한 분포양상이나 경향성은 보이지 않았다 (Appendix III-1).

### 3. 저서동물의 서식형태

출현 저서동물의 서식형태는 기질에 중심으로 어떻게 생활하는가에 따라 크게 다섯가지로 구분할 수 있었는데, 첫번째는 연성저질인 니질 또는 연니 속을 깊게 굴착 또는 잠입하여 서식하는 종류인데 주로 갯지렁이류 (Fig. III-14), 성구동물이 여기에 해당하였다. 채집된 갯지렁이류 가운데 일부 종은 서관을 가지고 있었다. 두번째는 니질 표면에서 자유생활을 하며 일시적으로 자신의 몸을 덮을 정도로만 잠입하는 종류인데 갑각류(게류, 새우류, 단각류)와 극피동물(불가사리류, 거미불가사리류, 성게류, 해삼류) 등이 해당되었다 (Fig. III-15). 세번째로는 망간단괴나 망간각을 기질로 삼아 표면에 고착 또는 부착생활을 하는 종류로 해면동물, 자포동물(히드로충류, 산호충류), 태형동물, 연체동물, 척색동물(해초류) 등이었으며, 연체동물을 제외한 그외 동물들은 모두 일생 동안 고착생활을 하는 종류들이었다. 네번째는 기질을 가리지 않고 퇴적물이나 망간단괴의 기질 표면에 서식하면서 생활하는 종류로서 원생동물들이 속하였다 (Fig. III-16). 다섯번째는 해저층 또는 퇴적물 표면 위에서 유영 또는 부유생활을 하며 생활의 기반을 해저면에 의지하는 종류로 자포동물의 해파리류와 저서 어류가 채집되었다.

첫번째와 두번째에 해당되는 서식형태를 가진 저서생물들의 섭식형태는 대부분 퇴적물식자였으며, 세번째 형태는 부유물식자였다.

망간단괴를 기질로 하여 고착 또는 부착하는 동물들의 형태는 매우 다양하였으며 수지형, 실털형, 혹형, 밤송이형, 선인장형, 어묵형 등이 있었다 (Fig. III-16 및 17). 생물체는 아니었지만 난괴형으로 생긴 단단한 물질은

미생물에 의해 형성 생물기원성 물질로 파악하였다 (Fig. III-17).

#### 4. 심해미생물 배양

심해저에서 채취한 15개의 시료를 숙성된 해수에 현탁하여 망간한천배지에 도달한 후 3주간 배양한 후 배지 표면 위에 자란 colony를 관찰한 결과 투명하거나 우유빛 또는 노란색을 띤 세균들이 잘 자랐으며, colony의 크기는 직경이 1-3 mm정도였다. 각 조사정점별로 형태가 다른 것들을 순수 분리한 결과 총 50 여개의 균주를 확보하였다. 분리된 균주 모두는 유기물이 별도로 첨가되지 않은 배지에서 성장할 수 있는 저영양성 세균들로 생각되었다. 망간한천배지 위에서 검은색의 colony가 관찰되지 않은 것으로 보아 이 배지로는 망간 산화물을 집적하며, 빠르게 성장하는 망간 산화균을 검출할 수 없었다.

50여주의 순수 분리된 균주는 한천배지에서 배양한 후 benzidinium hydrochloride나 leukoberbelin blue등의 지시약을 사용하여 망간세균인가의 여부를 확인하고 있는 중이다. 또한 망간의 산화활성능 측정은 formal-doxime을 이용하여 colorimetric적으로 분석할 예정이다.

## 제 5 절 고 찰

KODOS 93의 3차 탐사 동안 망간단괴 또는 퇴적물 채취시 사용되었던 기기는 PGS(Photo grab sampler 또는 Okean grab), FFG(Free Fall grab), 박스코어러(Box corer) 등이었다. 이것들은 서로 채취면적이나 양에서 크기가 일치하지 않았을 뿐만 아니라 채취된 퇴적물의 일부분만을 생물 분석용으로 사용하였기 때문에 정량적인 저서생물 조사는 불가능하였다. 특히 FFG은 생물채집용으로는 쓰이지 않으며 퇴적물 표면에 있는 광물채취용 이용되는 기기이므로 퇴적물 내에 서식하는 내생동물(infauna)의 채집은 가능하지 않았다. 또한 박스코어러도 생물채집용으로 쓰이는 대형(coverage 0.25 m<sup>2</sup>)이 아니고 퇴적물 채취용인 소형(coverage 0.1 m<sup>2</sup>)이었다. 따라서 일반적으로 패취(patch)분포 양상을 나타내는 심해 저서생물 분포의 양상은 지질조사용 기기에 채취된 퇴적물의 표면관찰이나 퇴적물 일부분의 분석으로는 파악이 어려웠다. 그러므로 효과적인 생물상의 파악이 정량적인 연구를 위해서는 생물채집에 필요한 퇴적물량을 늘리고 채집방법의 변화를 시도해야 한다. 조사해역은 퇴적상이 비교적 균일한 곳이므로 드렛지(dredge)에 의한 채집으로도 정량분석이 가능하리라 생각되며, 박스코어러도 생물용으로 교체 사용하는 것이 필요하다. 또한 작은 크기의 중형동물 채집용 소형(subcorer)을 제작 퇴적물 내의 수직분포를 관찰한다면 포괄적인 생물상 연구에 기여하고 퇴적물 내 서식생물의 생물교란 현상도 부분적으로 파악할 수 있다.

탐사해역별 저서생물의 출현 양상은 두 탐사해역이 서로 다르나 정량적인 채집 이루어지지 않은 상황에서 단순히 출현비율만으로 차이를 속단하기는 어렵다. 그럼에도 KODOS 93-2와 3은 같은 채취기기 FFG를 사용하였으므로 두 해역 간의 출현비율의 커다란 차이에서 향후 저서생물 군집 간의 차이를 찾아 낼 수 있는 가능성을 발견할 수도 있다. 현재 채집된 종들만이라 하더라도 정확한 종 동정을 마치고 서식 또는 섭식형태 등을 파



약한다면 두 군집의 차이에 대한 훨씬 구체적인 추론이 가능할 것이다.

한편 연성저질의 표생 또는 내생망간단괴에 고착(sessile) 또는 부착 서식하는 저서생물 조사도 병행한다면 저서생물 군집과 망간단괴의 생성과 생성에 미치는 영향 등의 상호관계도 밝혀내게 될 것이다. 즉 고착성의 저서생물들은 대체로 단단한 형태를 하고 있고 설령 죽는다 하더라도 단괴에서 떨어지지 않으므로 단괴의 크기가 증가해 나가는데 어떠한 형태로도 영향을 미칠 것임에 틀림없다. 심해저 미생물에 의해 생성된 것으로 판단되는 생물기원성 물질 같은 경우도 단괴 표면의 굴곡을 일정한 형태를 가지고 단단하게 덮고 있는데 이것 역시 단괴 성장에 있어서 부피를 늘리는 효과를 가질 것이다. 이것들이 단괴로부터 탈락된다고 하더라도 단단한 고형물이기 때문에 새롭게 생성되는 단괴의 핵 역할을 할 수도 있다.

또한 박스코어러와 PGS로 채취된 퇴적상이 석회질 또는 규질 연니(calareous or siliceous ooze)일 경우 생물들이 전혀 출현하지 않았음은 특이한 일이다. KODOS 93-3 탐사에서 FFG에 의한 해저면 사진에 생물활동이 왕성하게 나타난 정점 24에서는 실제 생물시료 분석에서도 동일해역 조사정점 중에 가장 많은 종과 개체수가 출현하고 있음이 나타나, 저서동물이 많은 곳에는 퇴적물에 나타난 다양한 생물교란 형태들이 있음을 반영하였다. 생물의 교란에 의해 생긴 퇴적물의 형태 변화는 단괴의 생성에는 영향을 못 미치더라도 단괴의 위치나 분포양상에는 영향을 줄 것으로 추측된다.

전체 조사정점이 258개이나 생물이 채집된 것은 불과 102 곳에 불과하니 이는 전적으로 채집크기와 방법에 기인한다. 위에서 언급한 종합적인 여러 저서생물의 조사방법을 동시에 수행한다면 이보다는 훨씬 많은 생물의 출현을 예상할 수 있다. 출현한 생물들은 대체로 한 정점에 한 종에 한 개체이나 세번째 조사에서는 한 정점에 두 개체 이상이 나타났다. 생물량에 있어서도 두번째 조사보다는 월등히 많았는데 이는 KODOS 93-3 탐사에서는 저서생물이라고 판단하기 어려운 헤파리류(Scyphozoa)나 두족류(Cephalo-

poda)의 채집이 두드러졌기 때문이다. 이들 종류의 채집은 해저층에서 이루어진 것이 아니고 FFG가 내려가면서 중간 수층이나 해저면 부근의 수층에 서식하는 대형 생물들을 그물질하면서 낙하한 것으로 여겨진다.

세 차례에 걸쳐 채집된 전체 출현종은 모두 89종에 150개체였으며, 이중 상당수가 미확인 생물체였다. 미확인 생물체는 기재된 문헌이 부존하거나 파손되어 동정이 불가능한 것들이었다. 앞으로 심해생물 분류에 관한 문헌이 어느 정도 확보되면 동정이 가능할 것으로 판단되며, 대부분 강(綱: class) 준위까지 동정된 종들도 속(屬: genus) 또는 종(種: species) 단위까지 정리가 가능할 것이다. 그렇게 되면 새로운 분류군이 다수 발견되리라 예상된다. 자료로 제공된 생물군의 목록은 모두 대형생물의 것으로 중형생물은 제외되었다. KODOS 93-1 탐사의 일부 정점에서 중형생물 채집을 위해 두 종류의 채로 생물을 분리하였으나, 현재 실험실내에서의 충분한 선별작업이 이루어지지 않았다. 중형저서동물의 선별, 동정작업이 완료되면 해당 정점의 출현 종수가 상당히 증가할 것이다.

망간단괴의 채광에 따른 저서환경의 오염에 대한 연구가 최근에 활발히 수행되고 있으나 아직 조사방법이 정립되지는 못했다 (Geyer, 1981; Gage and Tyler, 1991; Tilot, 1992). 생물채집을 목적으로 퇴적물 채취가 이루어지지 않으면 정량적인 조사결과 분석이나 채광이나 채굴에 따른 저서환경 영향평거나 광물 생성에 관여하는 생물의 기작에 대한 구체적인 결과를 기대하는 것은 무리이다. 이와 같은 연구 목적을 달성하기 위해서는 일차적으로 대형에서부터 미소저서생물에 이르기까지 종합적이고 정량적인 생물상조사를 실시하고, 서식생물의 생활 습성을 파악하는 것이 우선적이다 (Gage and Tyler, 1991). 이를 토대로 세부적이고 현실적인 조사 계획을 수립하고, 알맞는 조사방법을 개발하여야 한다. 심해 저서생물의 조사방법의 하나로 심해용 카메라나 비디오를 이용한 서식생물의 생태를 직접 확인할 수 있기 때문에 매우 유용하다. 그러므로 이러한 촬영기기의 활용이 반드시 필요하다.

## 참 고 문 헌

- Ali, S.H., and Stokes, J.L., 1971. Stimulation of heterotrophic and autotrophic growth of *Sphaerotilus discophorus* by manganous ions. *Antonie v. Leeuwenhoek*, v. 37: 519-528.
- Bowen, H.J.M., 1966. Trace elements in biogeochemistry. Academic Press, London.
- Burnett, B.R. and Nealson, K.H., 1981. Organic films and microorganisms associated with manganese nodules. *Deep-Sea Res.*, v. 28A: 637-645.
- Butman, C.A., 1987. Laval settlement of soft-sediment invertebrates: the spatial scales of pattern explained by active habitat selection and the emerging role of hydrodynamical processes. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 25: 113-165.
- Ehrlich, H.L., 1990. Geomicrobiology of manganese. *In: Geomicrobiology*" Chap 15 : 347-440.
- Ehrlich, H.L., 1963. Bacteriology of manganese nodules. I Bacterial action on manganese in nodule enrichments. *Appl. Microbiol.*, v. 11: 15-19.
- Gage, J.D. and Tyler, R.A., 1991. Deep-sea biology, a natural history of organisms at the deep-sea floor. 504pp., Cambridge University Press, Cambridge.
- Geyer, R.A.(ed.), 1981. Marine environmental pollution, 2: Dumping and mining. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. 574pp.
- Ghiorse, W.C., 1980. Electron microscopic analysis of metal depositing microorganisms in surface layers of Baltic Sea ferromanganese concretions. *In* P.A.Turdinger et al. (eds.), *Biogeochemistry of ancient*

and modern Environments. Springer-Verlag, Berlin: 345-354.

- Ghiorse, W.C., 1984. Biology of iron- and manganese-depositing bacteria. *Ann.Rev.Microbiol.*, v. 38: 515-550.
- Glenn, J.K., Akileswarm, L., and Gole, M.H., 1986. Mn(II) oxidation is the principal function of the extracellular Mn-peroxidase from *Phanerochaete chrysosporium*. *Arch. Biochem. Biophys.*, v. 251: 688-696.
- Grassle, J.F., Brown-Leger, L.S., Morse-Porteous, L., Petreca, R., and Williams, I., 1985. Deep-sea fauna of sediments in the vicinity of hydrothermal vents. *Bulletin of the Biological Society of Washington*, v. 6: 411-428.
- Greenslate, J., 1974a. Manganese and biotic debris associations in some deep-sea sediments. *Science* v. 186: 529-531.
- Greenslate, J., 1974b. Microorganisms participate in the construction of manganese nodule. *Nature* 249:181-183.
- Jumars, P.A., 1978. Spatial autocorrelation with RUM (Remote Underwater Manipulator): vertical and horizontal structure of a bathyal benthic community. *Deep-Sea Research*, v. 25: 589-604
- Jumars, P.A. and Eckman, J., 1983. Spatial structure within deep-sea benthic communities. In: G.T. Rowe (ed.), *The Sea*, v. 8: 399-451.
- Kepkay, P.E., and Nealson, K.H., 1987. Growth of a manganese oxidizing *Pseudomonas* sp. in continuous culture. *Arch. Microbiol.*, 148:63-67.
- Mills, E., 1983. Problems of deep-sea biology : An historical perspective. In : G.T. Rowe (ed.), *Deep-Sea Biology*: 1-79.

- Nealson, K.H., 1992. The manganese-oxidizing bacteria. In: A. Balows et al. (eds.), *The Prokaryotes*. Springer-Verlag.: 2310-2320.
- Reise, K., 1981. High abundance of small zoobenthos around biogenic structure in tidal sediments of the Waden Sea. *Helgolander Meeresuntersuchungen*, v. 34: 413-425.
- Rowe, G.T., 1983. Biomass and production of the deep-sea macrobenthos. In : G.T. Rowe (ed.), *Deep-Sea Biology*: 97-122.
- Rowe, G.T. and V. Pariente(eds.). 1992. *Deep-sea food chains and the global carbon cycle*. Kluwer Academic Publishers.
- Smith, C.R. and Hamilton, S.C., 1983. Epibenthic megafauna of a bathyal basin off southern California: Patterns of abundance, biomass, and dispersion. *Deep-Sea Research*, v. 30A: 907-928.
- Tebo, B.M., 1983. The ecology and ultrastructure of marine manganese-oxidizing bacteria. Ph.D. Thesis. Univ. of California, San Diego.
- Thiel, H., 1983. Meiobenthos and nannobenthos of the deep-Sea. In : G.T. Rowe (ed.), *Deep-Sea Biology*: 167-230.
- Tietjen, J.H., 1992. Abundance and biomass of metazoan meiobenthos in the deep sea. In: G.T. Rowe and V. Pariente (eds.), *Deep-sea food chains and the global carbon cycle*: 45-62.
- Tilot, V. 1992. Biological activity in a deep sea nodule ecosystem of the tropical north east Pacific. These de Doctorat de L'Universite De Bratagne Occidentale: 357-380.

Table III-1. Species composition of phytoplankton in the KODOS 94-1 area.

1994년 태평양에서 출현한 식물플랑크톤 종조성

---

Diatom(Bacillariophyceae 珪藻綱)

<i>Asteromphalus heptactis</i>	<i>Chaetoceros atlanticum</i>
<i>Chaetoceros castracanei</i>	<i>Chaetoceros dicaeta</i>
<i>Chaetoceros</i> sp.	<i>Coscinodiscus nitidus</i>
<i>Coscinodiscus nodulifer</i>	<i>Lauderia borealis</i>
<i>Mastogloia rostrata</i>	<i>Navicula</i> sp.
<i>Nitzschia</i> sp.	<i>Planktoniella sol</i>
<i>Rhizosolenia alata</i>	<i>Rhizosolenia bergonii</i>
<i>Rhizosolenia hebetata</i> forma <i>semispina</i>	<i>Thalassiothrix frauenfeldii</i>

Dinoflagellates(Dinophyceae 渦鞭毛藻綱)

<i>Amphidinium</i> sp.	<i>Amphisolenia palmata</i>
<i>Amphisolenia thrinax</i>	<i>Aureodinium pigmentosum</i>
<i>Blephalocysta splendor-maris</i>	<i>Ceratium arcuatum</i>
<i>Ceratium arietinum</i>	<i>Ceratium breve</i> var. <i>curvulum</i>
<i>Ceratium candelabrum</i>	<i>Ceratium carriense</i>
<i>Ceratium contortum</i>	<i>Ceratium deflexum</i>
<i>Ceratium extensum</i>	<i>Ceratium furca</i>
<i>Ceratium fusus</i>	<i>Ceratium fusus</i> var. <i>seta</i>
<i>Ceratium gibberum</i>	<i>Ceratium horridum</i>
<i>Ceratium inflexum</i>	<i>Ceratium karstenii</i>
<i>Ceratium kofoidii</i>	<i>Ceratium limulus</i>
<i>Ceratium lineatum</i>	<i>Ceratium macroceros</i>
<i>Ceratium massiliense</i>	<i>Ceratium pentagonum</i>
<i>Ceratium pulchellum</i>	<i>Ceratium reticulatum</i>
<i>Ceratium strictum</i>	<i>Ceratium tripos</i>
<i>Corythodinium michaelsarsi</i>	<i>Dinophysis argus</i>
<i>Dinophysis hastata</i>	<i>Dinophysis nasutum</i>
<i>Dinophysis ovum</i>	<i>Dinophysis rotundata</i>

---

Table III-1 (Continued)

---

<i>Dinophysis rudgei</i>	<i>Dinophysis schröderi</i>
<i>Dinophysis</i> sp.	<i>Diplopsalosis</i> sp.
<i>Gonyaulax alaskensis</i>	<i>Gonyaulax digitale</i>
<i>Gonyaulax heighleii</i>	<i>Gonyaulax polygramma</i>
<i>Gonyaulax spinifera</i>	<i>Gonyaulax turbyneii</i>
<i>Gymnodinium pigmentosum</i>	<i>Heteraulacus polyedricus</i>
<i>Heterocapsa triquetra</i>	<i>Ornithocercus heteroporus</i>
<i>Ornithocercus magnificus</i>	<i>Ornithocercus steinii</i>
<i>Oxytoxum milneri</i>	<i>Oxytoxum tessellatum</i>
<i>Pelagothrix clevei</i>	<i>Peridinium arellana</i>
<i>Peridinium cinctum</i> forma <i>tuberosum</i>	<i>Peridinium mediteranum</i>
<i>Peridinium nux</i>	<i>Peridinium pedunculatum</i>
<i>Peridinium pellucidum</i>	<i>Podolampas bipes</i>
<i>Podolampas palmipes</i>	<i>Preperidinium asymmetricum</i>
<i>Prorocentrum aporum</i>	<i>Prorocentrum balticum</i>
<i>Prorocentrum comprssum</i>	<i>Prorocentrum triestinum</i>
<i>Protoperidinium depressum</i>	<i>Protoperidinium nipponicum</i>
<i>Protoperidinium steinii</i>	<i>Pyrocystis hamulusinaequalis</i>
<i>Pyrocystis robusta</i>	<i>Pyrophacus horologium</i>
<i>Triadinium polyedricus</i>	

Cyanophyceae( 藍藻綱)

*Pelagothrix clevei*

---

Table III-2. New production ( $R_{NO_3}$ ;  $nMh^{-1}$ ), nitrogen specific nitrate uptake ( $V_{NO_3}$ ;  $nMh^{-1}$ ), regenerated production ( $R_{NH_4}$ ;  $nMh^{-1}$ ), nitrogen specific ammonia uptake, and f-ratio in the KODOS 93-1 area.

STN	LIG (%)	$R_{NO_3}$ ( $nMh^{-1}$ )	$V_{NO_3}$ ( $h^{-1}$ )	Int $R_{NO_3}$ hourly	$R_{NH_4}$ ( $nMh^{-1}$ )	$V_{NH_4}$ ( $h^{-1}$ )	Int $R_{NH_4}$ hourly	Int $R(3+4)$ daily	f-ratio daily	Int f daily
22	100	0.121	0.001	3.289	5.023	0.017	42.034	796.07	0.016	
22	49	0.439	0.002	3.002	2.132	0.007	12.895	268.13	0.121	
22	30	0.304	0.002	3.271	1.059	0.007	30.931	596.01	0.161	
22	15	0.269	0.001	4.537	4.359	0.012	58.377	1105.23	0.039	
22	3.5	0.110	0.001	2.628	0.512	0.002	14.109	285.49	0.125	
22	1	0.145	0.001	16.727	0.856	0.003	158.345	3050.94	0.101	0.066
26	100	0.833	0.003	11.695	1.622	0.007	38.276	829.31	0.255	
26	49	1.157	0.005	7.695	4.894	0.018	47.203	942.00	0.136	
26	30	0.747	0.003	9.078	6.789	0.026	53.626	1074.21	0.068	
26	15	0.843	0.003	14.163	2.606	0.010	45.337	986.03	0.177	
26	3.5	0.339	0.001	6.976	1.177	0.005	25.543	543.49	0.161	
26	1	0.337	0.001	49.607	1.299	0.006	209.986	4375.04	0.148	0.136
29	100	1.253	0.004	17.277	2.408	0.007	69.199	1452.91	0.258	
29	49	1.688	0.006	10.186	9.371	0.037	60.616	1213.31	0.107	
29	30	0.833	0.005	15.280	5.631	0.021	63.173	1320.48	0.090	
29	15	1.844	0.008	29.015	5.436	0.021	93.505	2031.28	0.184	
29	3.5	0.577	0.002	11.375	2.366	0.009	40.430	864.23	0.140	
29	1	0.526	0.002	83.133	1.553	0.007	326.923	6882.21	0.184	0.145
39	100	1.487	0.003	12.827	3.462	0.011	38.958	855.17	0.223	
39	49	0.697	0.003	6.041	3.170	0.014	31.397	637.64	0.128	
39	30	0.798	0.003	7.051	4.601	0.015	50.487	993.38	0.104	
39	15	0.437	0.002	7.411	4.244	0.018	68.290	1318.16	0.064	
39	3.5	0.182	0.001	3.627	1.455	0.006	26.929	528.24	0.077	
39	1	0.170	0.001	36.957	1.156	0.004	216.061	4332.59	0.089	0.102
45	100	0.722	0.002	9.886	3.707	0.012	41.718	869.56	0.115	
45	49	0.961	0.005	9.601	3.394	0.014	26.567	593.41	0.159	
45	30	1.415	0.006	14.386	3.181	0.013	32.721	761.60	0.229	
45	15	1.105	0.005	17.713	2.551	0.011	41.942	967.51	0.224	
45	3.5	0.373	0.002	5.515	0.948	0.005	20.603	437.04	0.208	
45	1	0.161	0.001	57.102	1.049	0.005	163.550	3629.11	0.093	0.189
55	100	0.648	0.002	8.566	5.434	0.016	54.731	1087.95	0.074	
55	49	0.810	0.004	4.674	3.883	0.020	26.034	524.69	0.122	
55	30	0.346	0.002	11.856	2.561	0.027	28.787	660.44	0.083	
55	15	1.731	0.007	26.937	2.482	0.010	53.093	1278.90	0.317	
55	3.5	0.517	0.002	10.834	1.948	0.009	28.676	646.18	0.150	
55	1	0.533	0.002	62.866	0.832	0.003	191.321	4198.16	0.299	0.180



Table III-2 (Continued)

STN	LIG (%)	RNO3 (nM h <sup>-1</sup> )	VNO3 (h <sup>-1</sup> )	Int RNO3 hourly	RNH4 (nM h <sup>-1</sup> )	VNH4 (h <sup>-1</sup> )	Int RNH4 hourly	Int R(3+4) daily	f-ratio daily	Int f daily
64	100	0.509	0.002	6.564	2.952	0.010	46.716	919.66	0.103	
64	49	0.608	0.003	7.424	5.000	0.021	37.212	758.90	0.075	
64	30	1.229	0.006	11.167	4.210	0.020	54.062	1107.13	0.163	
64	15	0.727	0.003	13.407	5.261	0.031	69.839	1417.99	0.084	
64	3.5	0.391	0.002	5.960	0.567	0.004	15.067	342.73	0.315	
64	1	0.186	0.001	44.522	0.894	0.004	222.898	4546.42	0.122	0.118
70	100	0.911	0.002	10.978	10.716	0.017	104.311	2009.35	0.054	
70	49	0.958	0.006	8.536	7.040	0.028	62.871	1234.10	0.083	
70	30	1.155	0.005	14.798	8.520	0.035	71.000	1455.58	0.083	
70	15	1.437	0.005	20.922	3.918	0.019	53.593	1215.73	0.197	
70	3.5	0.308	0.001	5.202	0.554	0.003	16.181	353.68	0.271	
70	1	0.196	0.001	60.436	1.015	0.004	307.956	6268.44	0.114	0.116
76	100	1.134	0.003	18.065	4.345	0.017	65.523	1396.21	0.148	
76	49	1.941	0.009	15.557	6.809	0.022	60.924	1283.31	0.160	
76	30	1.910	0.008	37.938	8.270	0.034	54.491	1436.09	0.133	
76	15	4.736	0.019	61.751	1.276	0.004	28.458	1253.25	0.712	
76	3.5	0.416	0.002	7.754	1.098	0.004	24.308	530.60	0.202	
76	1	0.336	0.001	141.066	1.258	0.005	233.704	5899.45	0.151	0.287
100	100	1.257	0.005	12.508	4.323	0.016	68.236	1378.34	0.162	
100	49	0.873	0.004	10.993	7.292	0.024	56.646	1151.54	0.074	
100	30	1.848	0.006	22.339	6.728	0.024	69.464	1518.43	0.155	
100	15	2.065	0.006	28.223	5.441	0.018	79.721	1773.65	0.202	
100	3.5	0.290	0.001	4.711	1.211	0.004	34.873	684.25	0.138	
100	1	0.167	0.001	78.774	2.170	0.009	308.940	6506.21	0.049	0.145
104	100	1.074	0.004	15.312	4.711	0.020	69.207	1429.47	0.132	
104	49	1.532	0.005	13.515	7.069	0.033	62.167	1281.19	0.126	
104	30	1.813	0.007	17.631	8.317	0.026	88.939	1812.47	0.127	
104	15	1.276	0.004	20.468	7.263	0.024	130.763	2599.35	0.105	
104	3.5	0.432	0.002	8.124	3.647	0.013	78.643	1513.06	0.073	
104	1	0.356	0.001	75.051	3.975	0.013	429.718	8635.54	0.056	0.104
110	100	0.663	0.002	13.507	1.609	0.006	40.859	897.54	0.215	
110	49	1.636	0.005	16.913	5.346	0.024	37.326	874.82	0.169	
110	30	2.550	0.011	18.824	3.892	0.017	66.158	1416.72	0.304	
110	15	0.748	0.002	10.064	7.697	0.027	100.878	1936.56	0.061	
110	3.5	0.092	0.000	18.151	0.720	0.003	8.798	376.17	0.078	
110	1	1.668	0.007	77.459	0.133	0.000	254.018	5501.82	0.893	0.169

Table III-3. Bacterial production using  $^3\text{H}$ -Thymidine uptake in the KODOS 93-2 area.

STN #	Depth (m)	Thymidine Incorp. (mmoles/l/h x 1E12)	Growth rate (cells/ml/h)	Growth rate ( $\text{h}^{-1}$ )	Doubling time (d)
K93-2-8	0	613.7	1227.5	0.00863	3.35
	30	303.5	607.0	0.00535	5.40
	50	71.3	142.7	0.00109	26.56
	75	84.8	169.5	0.00139	20.71
K93-2-17	0	291.1	582.3	0.00809	3.57
	30	114.9	229.9	0.00276	10.45
	50	43.6	87.3	0.00094	30.59
	100	183.7	367.3	0.00457	6.32
K93-2-30	0	230.6	461.1	0.00922	3.13
	30	129.3	258.6	0.00383	7.55
	50	58.4	116.7	0.00119	24.30
	75	117.0	234.1	0.00251	11.51
	100	105.2	210.5	0.00246	11.73
K93-2-50	0	219.8	439.7	0.00582	4.97
	30	124.4	248.9	0.00400	7.22
	75	111.8	223.6	0.00278	10.38
	100	109.0	218.0	0.00295	9.81
	200	35.2	70.3	0.00291	9.94

Table III-4. Effect of a chelator (EDTA), Fe, and Cu on phytoplankton in vivo fluorescence with and without DCMU in the equatorial Pacific. Cells were adapted in dark for 30 minutes before fluorescence measurement. (F; fluorescence before DCMU addition, Fd; fluorescence after the addition of DCMU).

	6/18 12:20		6/18 13:10		6/18 14:45		6/18 17:20		6/18 19:15		6/18 22:00		6/18 21:15	
	F	Fd	F	Fd	F	Fd	F	Fd	F	Fd	F	Fd	F	Fd
control	1.35	2.20	1.05	1.45	1.25	1.35	0.85	1.25	0.65	1.50	0.90	1.45	0.75	1.45
control	1.40	2.25	0.95	1.67	0.95	1.53	0.70	1.15	0.85	1.65	0.80	1.65	0.70	1.55
EDTA 1 $\mu$ M	1.35	2.20	0.95	1.30	0.80	1.12	0.50	1.10	0.70	1.53	0.70	1.35	0.75	1.65
EDTA 1 $\mu$ M	1.40	2.25	1.15	1.48	0.85	1.05	0.60	1.15	0.90	1.75	0.80	1.70	0.80	1.70
EDTA+Fe 1+2 $\mu$ M	1.35	2.20	0.70	1.35	0.60	1.00	0.45	1.20	0.60	1.48	0.82	1.30	0.60	
EDTA+Fe 1+2 $\mu$ M	1.40	2.25	0.70	1.40	0.55	1.10	0.65	1.25	0.85	1.50	0.87	1.32	0.75	1.45
EDTA+Fe 1+1 $\mu$ M	1.35	2.20	0.72	1.50	0.55	1.10	0.65	1.30	0.80	1.75	0.90	1.72	0.80	1.50
EDTA+Fe 1+1 $\mu$ M	1.40	2.25	0.87	1.45	0.50	1.25	0.70	1.25	0.95	1.50	0.80	1.55	0.75	1.50
EDTA+Cu 1+2 $\mu$ M	1.35	2.20	0.85	1.30	0.55	0.90	0.70	1.45	0.95	1.38	0.65	1.25	0.65	1.15
EDTA+Cu 1+2 $\mu$ M	1.40	2.25	0.70	1.25	0.40	1.07	0.70	1.40	0.95	1.55	0.60	1.40	0.70	1.25
EDTA+Cu 1+1 $\mu$ M	1.35	2.20	0.52	1.05	0.05	0.45	0.45	0.55	0.48	0.45	0.10	0.60	0.20	0.45
EDTA+Cu 1+1 $\mu$ M	1.40	2.25	0.43	0.78	0.05	0.45	0.20	0.60	0.35	0.30	0.40	0.60	0.15	0.30

EDTA 1  $\mu$ M added to all bottles except controls.  
 Sampled at 11:20. Dark at 19:15

Table III-5. Concentrations of  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in seawater in the KODOS 93-3 area.

Station #	Depth (m)	$^{210}\text{Po}$ (dpm/100 l )	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/100 l )
K93-3-15	20	6±0.29	19±0.35
	50	7±0.25	20±0.25
	75	12±0.34	18±0.28
	125	9±0.22	13±0.25
	200	8±0.22	12±0.32
	300	8±0.29	16±0.26
K93-3-23	20	7±0.28	20±0.26
	50	5±0.27	18±0.28
	75	11±0.26	19±0.26
	125	5±0.31	15±0.33
	200	9±0.31	13±0.32
	300	9±0.25	17±0.28
K93-3-43	20	6±0.26	19±0.29
	50	6±0.26	19±0.22
	75	7±0.22	20±0.31
	125	7±0.28	18±0.35
	200	10±0.25	15±0.24
	300	12±0.33	16±0.33
	Blank	0.09	0.11

Table III-6. Some manganese-oxidizing bacteria (after Ehelich, 1990)

---

A. Attack of dissolved  $Mn^{2+}$  enzymatically

1. Derive useful energy :

*Hyphomicrobium manganoxidans*  
*Pseudomonas* strain S-36

2. Do not derive useful energy:

*Arthrobacter siderocapsulatus*  
*Leptothrix discophora*  
*Leptothrix pseudochracea*  
*Metallogenium*

3. Not known if able to derive useful energy:

*Arthrobacter* B  
*Arthrobacter citreus*  
*Arthrobacter globiformis*  
*Arthrobacter simplex*  
*Citrobacter freundii* E<sub>4</sub>  
*Hyphomicrobium* T37  
*Pedomicrobium*  
*Pseudomonas* E<sub>1</sub>  
*Pseudomonas* spp

B. Attack of  $Mn^{2+}$  prebound to Mn(IV) oxide or some clays enzymatically

1. Derive useful energy:

*Arthrobacter* 37  
*Oceanospirillum*  
*Vibrio*

C. Attack  $Mn^{2+}$  nonenzymatically

*Pseudomonas manganoxidans*  
*Streptomyces* sp.  
*Bacillus*

---

Table III-7. Some Mn(IV)-reducing bacteria (after Ehrlich, 1990)

---

A. Gram-positive bacteria

*Bacillus* 29

*Bacillus* SG-1

*Bacillus circulans*

*Bacillus polymyxa*

*Bacillus mesentericus*

*Bacillus mycoides*

*Bacillus cereus*

*Bacillus centrosporus*

*Bacillus filaris*

*Arthrobacter* strain B

*Bacillus* GJ33

B. Gram-negative bacteria

*Alteromonas putrefaciens*

*Pseudomonas liquefaciens*

*Acinetobacter calcoaceticus*

---

Table III-8. Manganese budget for the Pacific Ocean (after Bowen, 1966)

Total Mn (as MnO) in sediments	1.4 x 10 <sup>15</sup> tons
Total Mn (as MnO) in nodules	3.1 x 10 <sup>11</sup> tons
Total Mn (as MnO) in seawater	1.8 x 10 <sup>9</sup> tons
Total Mn (as MnO) in sediments	1.0 x 10 <sup>7</sup> tons

Table III-9. Total abundance of organisms in the KODOS 93 areas

	KODOS 93-1	KODOS 93-2	KODOS 93-3	Total
No. of stations	150	53	55	258
obtained organisms	43	12	36	91
No. of species	43	11	35	60
No. of individuals(*)	55	15	85	155
Biomass(gWWT)	83.01	38.40	106.84	228.25

\* including some colonial species

Table III-10. Benthic fauna collected in the KODOS 93 areas

Taxon	KODOS-1			KODOS-2			KODOS-3		
	No.sp.	Inds.	Bio.	No.sp.	Inds.	Bio.	No.sp.	Inds.	Bio.
Protozoa	3	9	11.42	2	*	0.14	3	3*	2.10
Porifera	3	2*	23.30						
Cnidaria	7	6*	27.91	2	2	11.27	5	13	26.03
<b>Invertebrate</b>									
Bryozoa	1	1	0.09				2	1*	0.83
Sipunculida	1	1	0.03				1	1	0.86
<b>Animals</b>									
Mollusca	3	3	0.19	1	1	0.38	5	11	5.16
Arthropoda	4	4	0.04	2	4	13.56	4	20	13.57
Annelid	6	6	0.70				3	8	11.00
Echinodermata	1	1	0.01				3	13	12.63
Chordata(Ascidiacea)							1	1	0.48
<b>Fishes</b>	2	5	2.61	2	7	2.23			
Unid.organisms	14	22	19.32	2	3	10.44	7	7*	34.18
<b>Total</b>	<b>43</b>	<b>55</b>	<b>83.01</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>38.40</b>	<b>35</b>	<b>85</b>	<b>106.84</b>

\* present colonial species



Table III-11. Individuals and biomass of benthic animals collected in the KODOS 93-1 area (\* represent a colony; BC, Box corer; FFG, Free-Fall Grab; PR, Protozoa; CN, Cnidaria; MO, Mollusca; AR, Arthropoda; BR, Bryozoa; SI, Sipunculida; AN, Annelid; CH, Chordata; EC, Echinodermata; FI: Fishes; US, Unidentified species)

Station	Taxon	Phylum	No. of Inds.	Biomass(gWWT)	Sampler
15	Unid. species 5	US	1	0.019	BC
17	Bivalvia unid.1	MO	1	0.004	FFG
23	Sponge unid.1	PO	*	0.402	FFG
	Unid. species 14	US	*	1.169	BC
50	Sponge unid.3	PO	1	2.898	FFG
57	Unid. species 2	US	1		FFG
58	Asteroidea unid.1	EC	1	0.003	FFG
65	Radiolaria unid.1	PR	1		FFG
66	Scyphozoa unid.1	CN	1	0.165	FFG
67	Unid. species 14	US	1	0.384	FFG
70	Unid. species 14	US	1	0.074	FFG
73	Unid. species 3	US	1	0.153	FFG
74	Polychaeta unid.1	AN	1	0.111	FFG
	Unid. species 14	US	1	0.027	FFG
75	Polychaeta unid.2	AN	1	0.036	FFG
75	Unid. species 7	US	1	0.290	FFG
75	Isopoda unid.1	AR	1	0.001	FFG
77	Unid. species 1	US	1	0.576	FFG
80	Unid. species 6	US	1	0.044	FFG
86	Unid. species 1	US	1	0.531	FFG
87	Radiolaria unid.1	PR	1	3.224	FFG
	Radiolaria unid.3	PR	1	0.042	FFG
	Unid. species 14	US	1	0.016	FFG
88	Radiolaria unid.1	PR	2		FFG
	Radiolaria unid.1	PR	1	0.012	FFG

Table III-11. (Continued)

Station	Taxon	Phylum	No. of Inds.	Biomass(gWWT)	Sampler
89	Scyphozoa unid.2	CN	1	8.688	FFG
93	Sponge unid.2	PO	1		FFG
95	Polyplacophora unid.1	MO	1	0.020	FFG
97	Hydrozoa unid.1	CN	1	0.011	FFG
98	Unid. species 11	US	1		FFG
99	Unid. species 10	US	*	1.730	FFG
100	Unid. species 9	US	1	0.018	FFG
106	Unid. species 3	US	1	0.157	FFG
107	Unid. species 10	US	1	0.709	FFG
	Unid. species 1	US	1	0.291	FFG
110	Unid. species 1	US	1	0.297	FFG
111	Polychaeta unid.3	AN	1	0.094	FFG
112	Actinaria unid.1	CN	1	0.469	FFG
	Bryozoa unid.1	BR	1	0.088	FFG
113	Actinaria unid.2	CN	1	0.065	FFG
	Unid. species 20	US	1	0.032	FFG
114	Anthozoa unid.1	CN	1	2.818	FFG
122	Bivalvia unid.2	MO	1	0.169	FFG
124	Hydrozoa unid.2	CN	*	15.693	FFG
126-A	Unid. species 12	US	1		FFG
126	Radiolraia unid.2	PR	2	8.142	FFG
	Unid. species 14	US	*	6.821	FFG
126	Polychaeta unid.5	AN	1	0.028	FFG
127	Isopoda unid.2	AR	1	0.004	FFG
131	Unid. species 14	US	*	5.958	FFG
134	Sipunculida unid.1	SI	1	0.028	FFG
	Polychaeta unid.4	AN	1	0.416	FFG
141	Radiolraia unid.1	PR	1		FFG
143	Isopoda unid.3	AR	1	0.007	FFG
149	Unknown unid.17	US	1	0.012	FFG
150	Polychaeta unid.6	AN	1	0.012	FFG
	Macrura unid.3	AR	1	0.030	FFG
	Unid. species 8	US	1	0.010	FFG
	Unid. species 12	US	1		FFG
<b>Total</b>	<b>43 species</b>		<b>55</b>	<b>83.01</b>	

Table III-12. Individuals and biomass of benthic animals collected in the KODOS 93-2 area (For symbol and abbreviations, see table III-11).

Station	Taxon	Phylum	No. of Inds.	Biomass(gWWT)	Sampler
9	Radiolaria unid.3	PR	*	0.031	BC
	Unid. species 14	US	1	0.029	BC
13	Fish unid.2	FI	1	0.239	FFG
	Unid. species 14	US	1		FFG
	Radiolaria unid.4	PR	*	0.029	BC
17	Macrura unid.3	AR	2	0.445	FFG
21	Fish unid.1	FI	1	0.405	FFG
23	Fish unid.1	FI	1	0.973	FFG
	Fish unid.2	FI	1	0.263	FFG
25	Scyphozoa unid.5	CN	1	1.566	FFG
26	Brachyura unid.1	AR	1	0.624	FFG
30	Fish unid.2	FI	1	0.731	FFG
35	Unid. species 1	US	1	10.406	FFG
36	Macrura unid.3	AR	1	12.487	FFG
	Cephalopoda unid.1	MO	1	0.382	FFG
47	Radiolaria unid.3	PR	*	0.076	BC
48	Scyphozoa unid.2	CN	1	9.708	FFG
<b>Total</b>	<b>11 species</b>		<b>15</b>	<b>38.40</b>	

Table III-13. Individuals and biomass of benthic animals collected in the KODOS 93-3 area (For symbol and abbreviations, see table III-11).

Station	Taxon	Phylum	No. of Inds.	Biomass(gWWT)	Sampler
1	Radiolaria unid.1	PR	1	0.009	FFG
	Gastropoda unid.1	MO	2	0.006	FFG
	Echinoidea unid.1	EC	1	1.375	FFG
2	Cephalopoda unid.1	MO	1	1.782	FFG
	Macrura unid.3	AR	1	0.270	FFG
	Ascidiacea unid.1	CH	1	0.478	FFG
3	Scyphozoa unid.1	CN	1	5.926	FFG
5	Polychaeta unid.1	AN	2	0.576	FFG
	Macrura unid.3	AR	1	0.077	FFG
	Echinoidea unid.1	EC	1	1.329	FFG
6	Ophiurida unid.1	EC	1	0.759	FFG
7	Scyphozoa unid.1	CN	1	1.482	FFG
	Ophiurida unid.1	EC	1	0.839	FFG
	Echinodea unid.1	EC	1	4.884	FFG
8	Scyphozoa unid.2	CN	1	10.103	FFG
9	Bivalvia unid.4	MO	1	0.445	FFG
	Macrura unid.3	AR	1	0.294	FFG
	Fish unid.1	FI	1	0.583	FFG
13	Scyphozoa unid.1	CN	1	1.151	FFG
	Macrura unid.3	AR	1	0.404	FFG
	Fish unid.2	FI	1	0.640	FFG
14	Radiolaria unid.1	PR	2	0.071	FFG
	Scyphozoa unid.1	CN	2	3.393	FFG
	Amphipoda unid.1	AR	1	0.449	FFG
	Unid. species 1	US	1	2.395	FFG

Table III-13. (Continued)

Station	Taxon	Phylum	No. of Inds.	Biomass(gWWT)	Sampler
15	Radiolaria unid.3	PR	*	0.330	BC
	Bivalvia unid.4	MO	1	0.035	BC
	Polychaeta unid.6	AN	1		BC
	Polychaeta unid.5	AN	1	0.006	BC
16	Polychaeta unid.1	AN	3	9.241	FFG
	Macrura unid.1	AR	1	0.594	FFG
	Ophiurida unid.2	EC	1	0.114	FFG
18	Macrura unid.3	AR	1	0.079	FFG
21	Unid. species 12	US	1	28.709	FFG
22	Bryozoa unid.1	BR	*	0.318	FFG
	Echinoidea unid.1	EC	1	0.710	FFG
22-1	Scyphozoa unid.1	CN	1	0.435	FFG
	Anthozoa unid.1	CN	1	0.008	FFG
23	Bivalvia unid.2	MO	1	0.606	FFG
	Bivalvia unid.1	MO	1	0.048	FFG
	Macrura unid.3	AR	2	0.737	FFG
24-1	Fish unid.2	FI	3	0.707	FFG
24	Anthozoa unid.2	CN	2	0.455	FFG
	Bryozoa unid.1	BR	1	0.514	FFG
	Polychaeta unid.1	AN	1	0.277	FFG
	Macrura unid.3	AR	2	0.097	FFG
	Ophiurida unid.1	EC	1	0.201	FFG
25	Radiolaria unid.3	PR	*	0.061	BC
	Actinaria unid.3	CN	1	0.032	BC
26	Scyphozoa unid.1	CN	1	2.289	FFG
	Macrura unid.1	AR	1	0.078	FFG
	Echinoidea unid.1	EC	1	0.284	FFG
	Unid. species 14	US	1	0.015	FFG
27	Macrura unid.3	AR	1	0.217	FFG
	Ophiurida unid.2	EC	2	0.044	FFG

Table III-13. (Continued)

Station	Taxon	Phylum	No. of Inds.	Biomass(gWWT)	Sampler
28	Cephalopoda unid.1	MO	1	0.842	FFG
	Ophiuridea unid.2	EC	1	0.053	FFG
29	Macrura unid.1	AR	2	0.264	FFG
30	Macrura unid.3	AR	1	0.193	FFG
31	Macrura unid.1	AR	1	7.154	FFG
36	Unid. species 2	US	1	0.146	FFG
37	Sipunculida unid.1	SI	1	0.863	FFG
	Unid. species 15	US	*		FFG
43	Fish unid.2	FI	1	0.287	FFG
	Unid. species 13	US	1	2.116	FFG
44	Unid. species 3	US	1	0.520	FFG
47	Bivalvia unid.4	MO	1	0.253	FFG
48	Bivalvia unid.2	MO	1	0.661	FFG
49	Scyphozoa unid.1	CN	1	0.758	FFG
	Macrura unid.3	AR	1	0.542	FFG
	Echinoidea unid.1	EC	1	2.043	FFG
	Unid. species 13	US	1	0.278	FFG
50	Macrura unid.1	AR	1	1.934	FFG
50	Radiolaria unid.3	PR	*	0.105	BC
51	Macrura unid.3	AR	1	0.183	FFG
52	Radiolaria unid.3	PR	*	0.326	BC
55	Radiolaria unid.4	PR	*		FFG
	Bivalvia unid.2	MO	1	0.482	FFG
	Unid. species 14	US	*		FFG
	Fish unid.2	FI	1	0.080	FFG
	Radiolaria unid.3	PR	*	1.196	BC
Total	35 species		85	106.97	

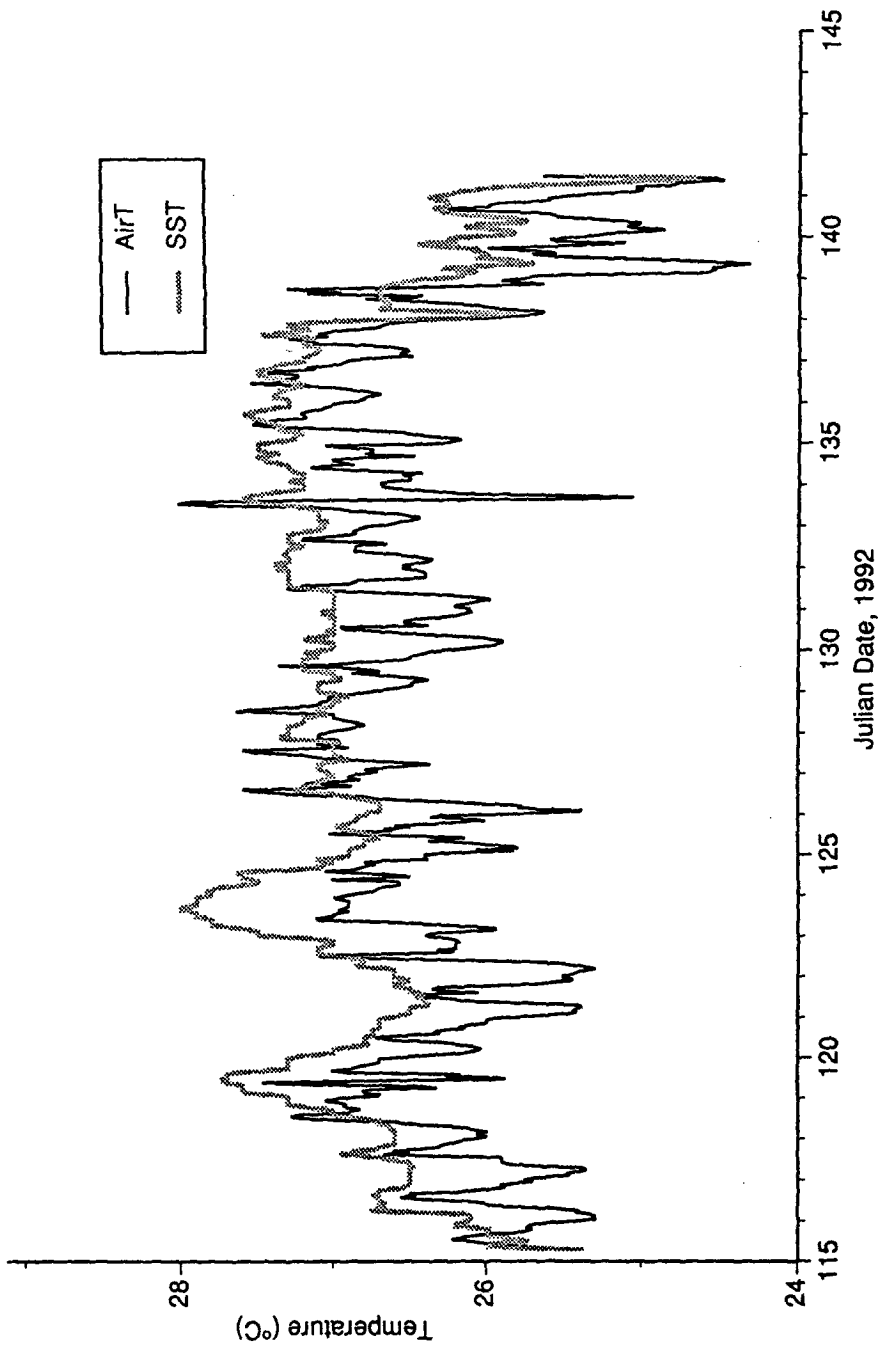


Fig. III-1. Time series of (a) temperature (air temperature and sea surface temperature; hourly average), (b) 25 hour filtered temperature, (c) atmospheric pressure (hourly average), (d) solar irradiance (hourly average), (e) wind speed (25 hour filtered), (f) wind polar diagram (hourly average), and (g) wind vector (25 hour filtered) during the KODOS 92-1 cruise.

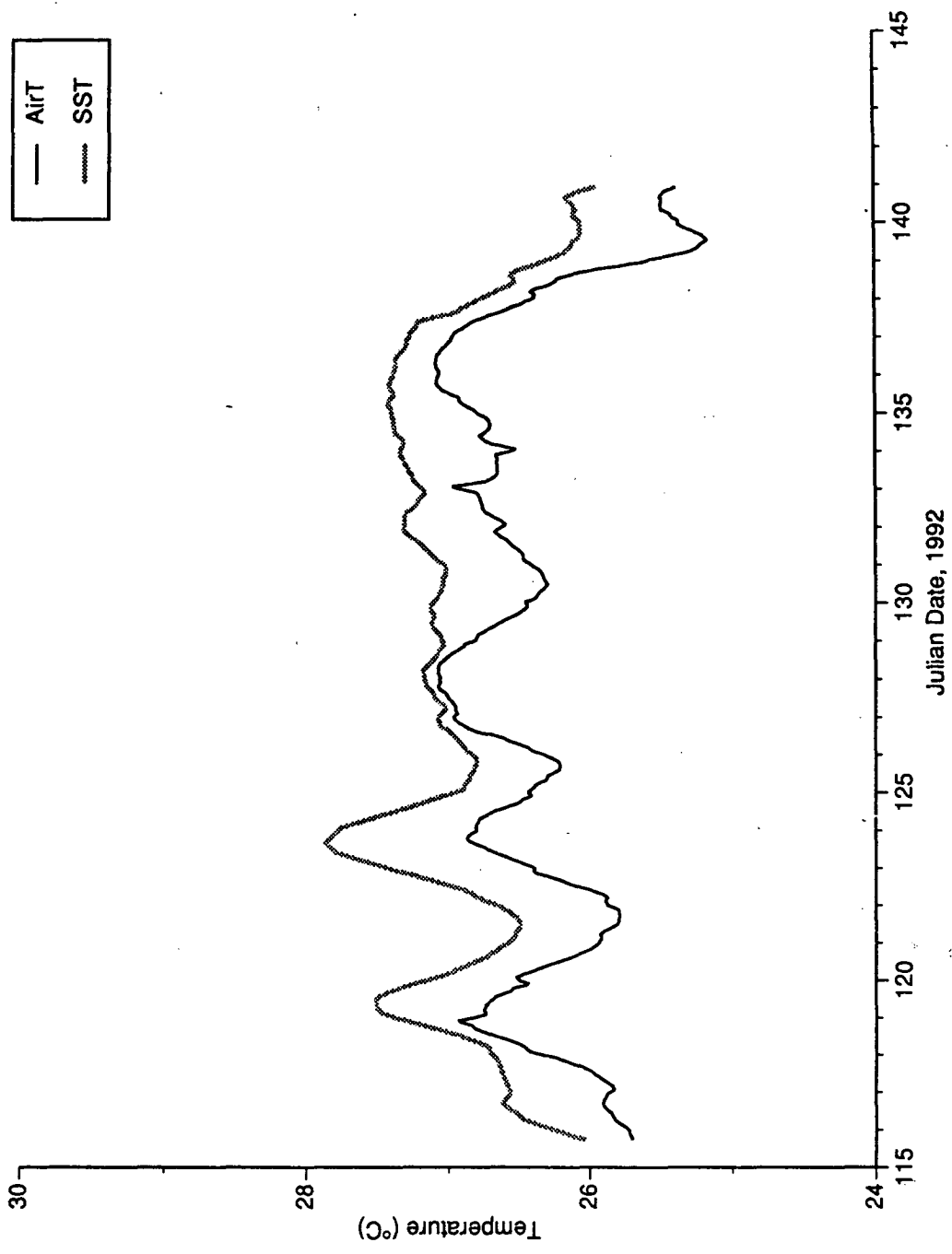


Fig. III-1b (Continued)



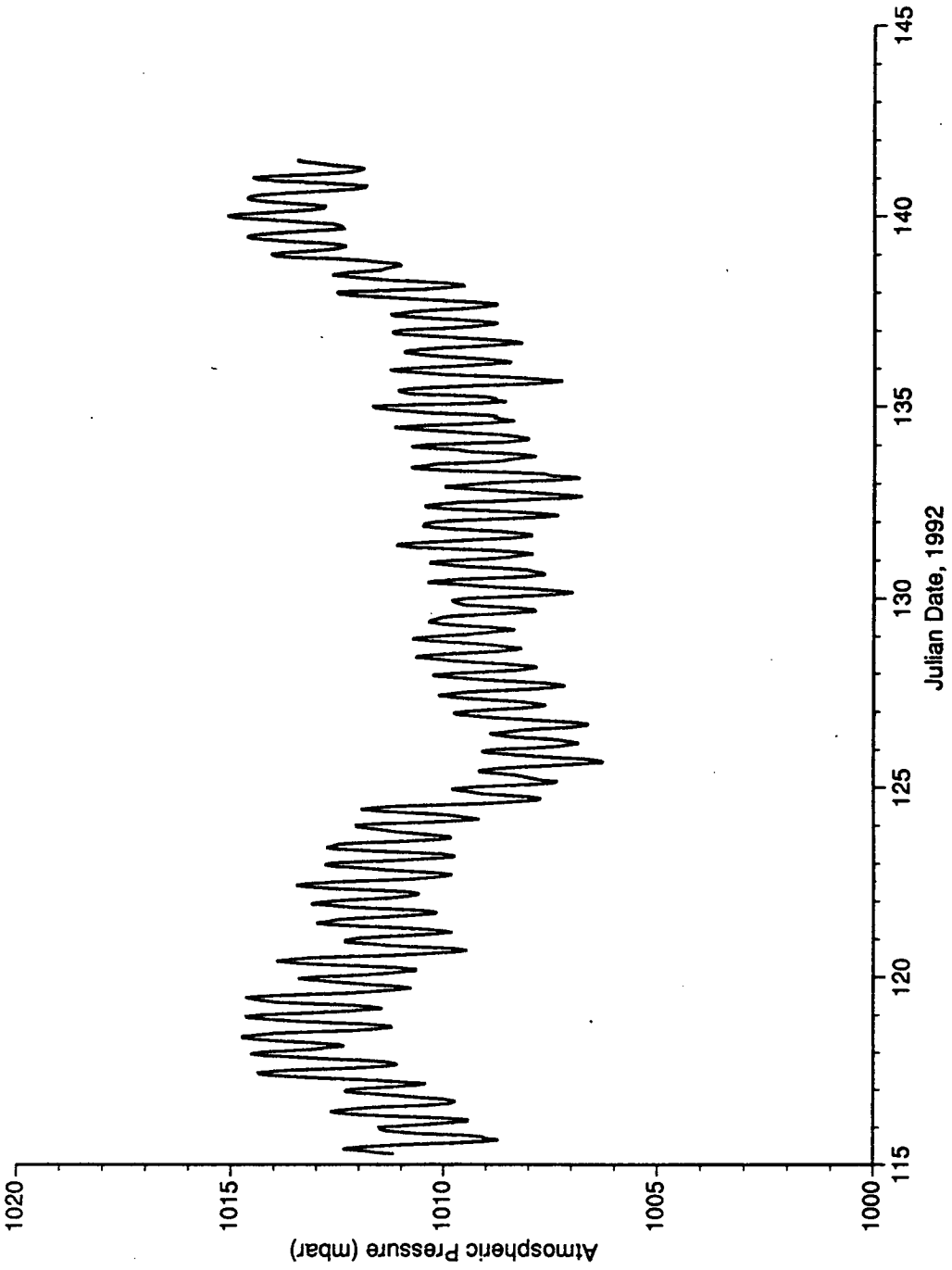


Fig. III-1c (Continued)

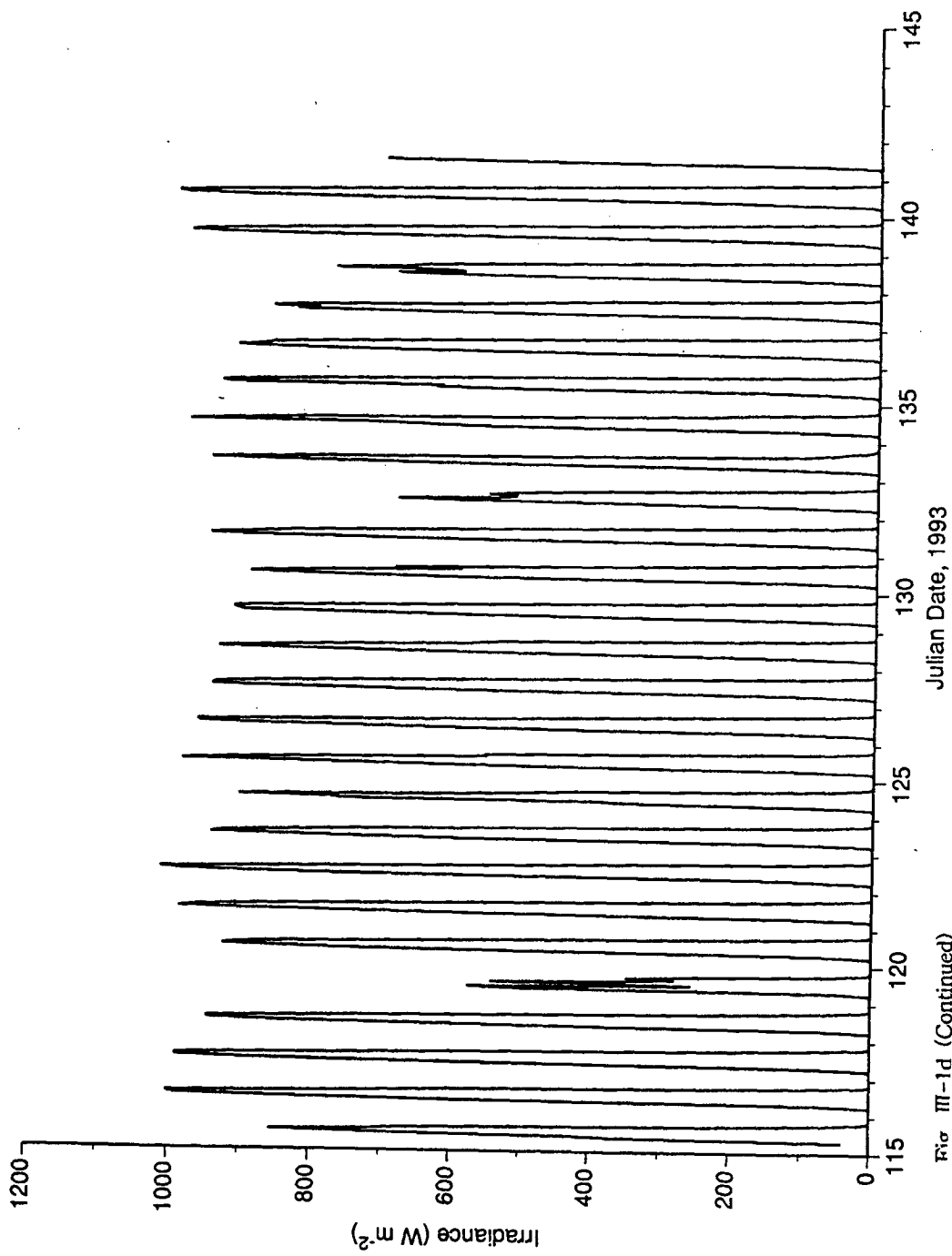


FIG. III-1d (Continued)  
 Fig. III-1d (Continued)

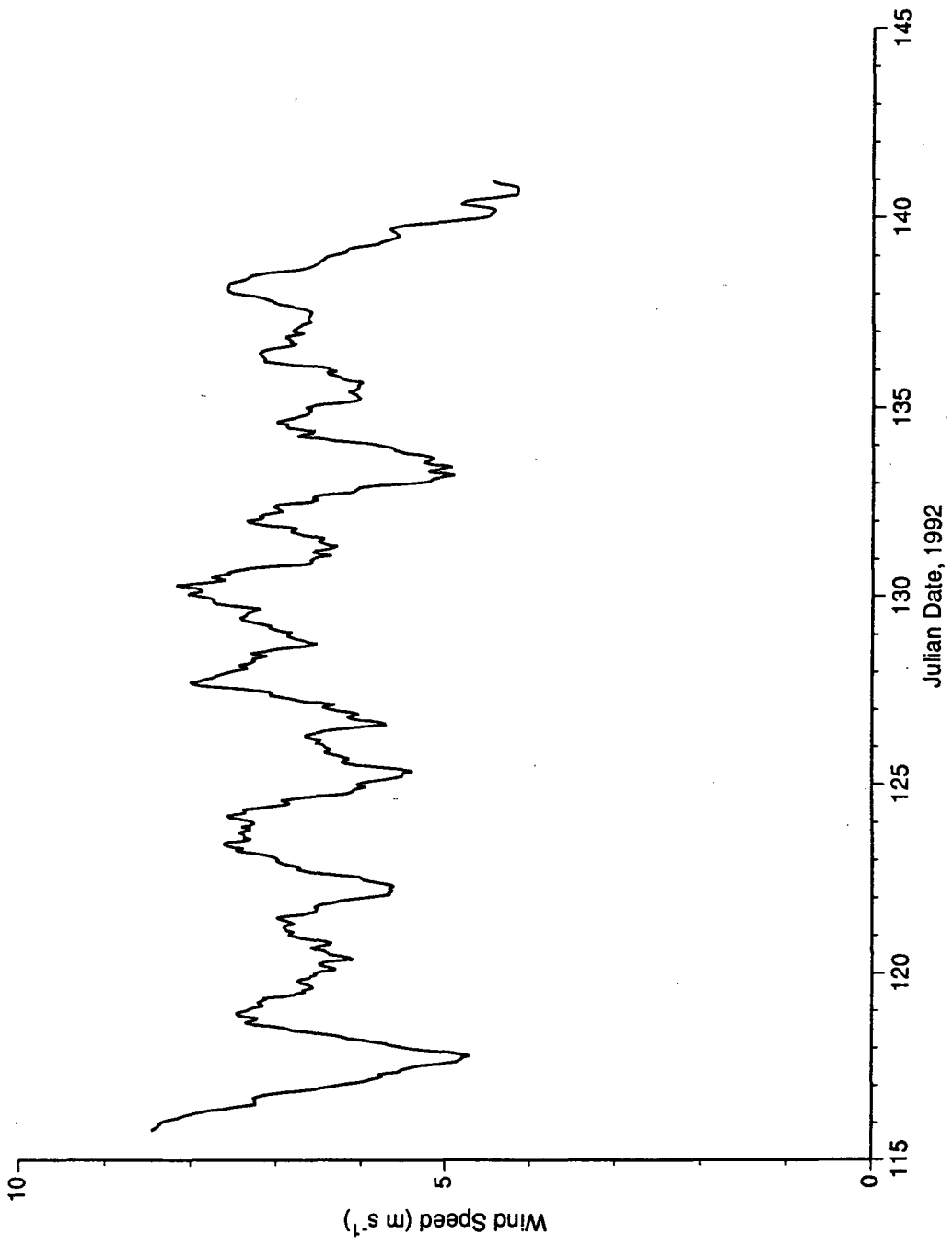


Fig. III-1e (Continued)

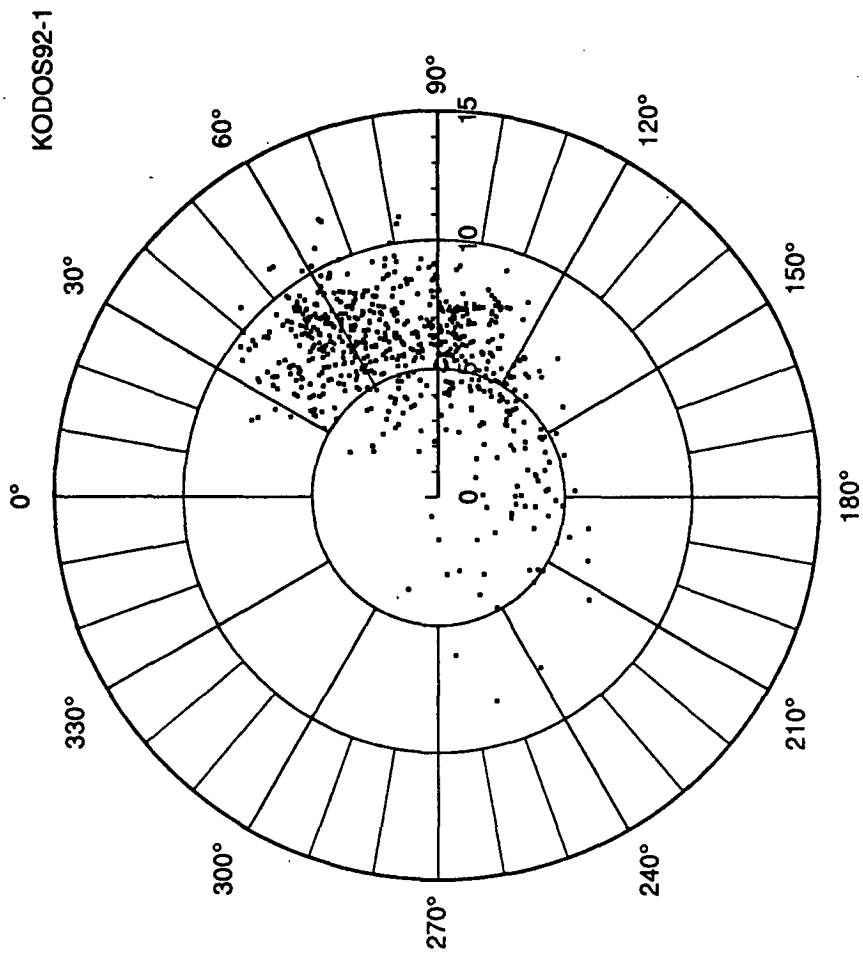


Fig. III-1f (Continued)

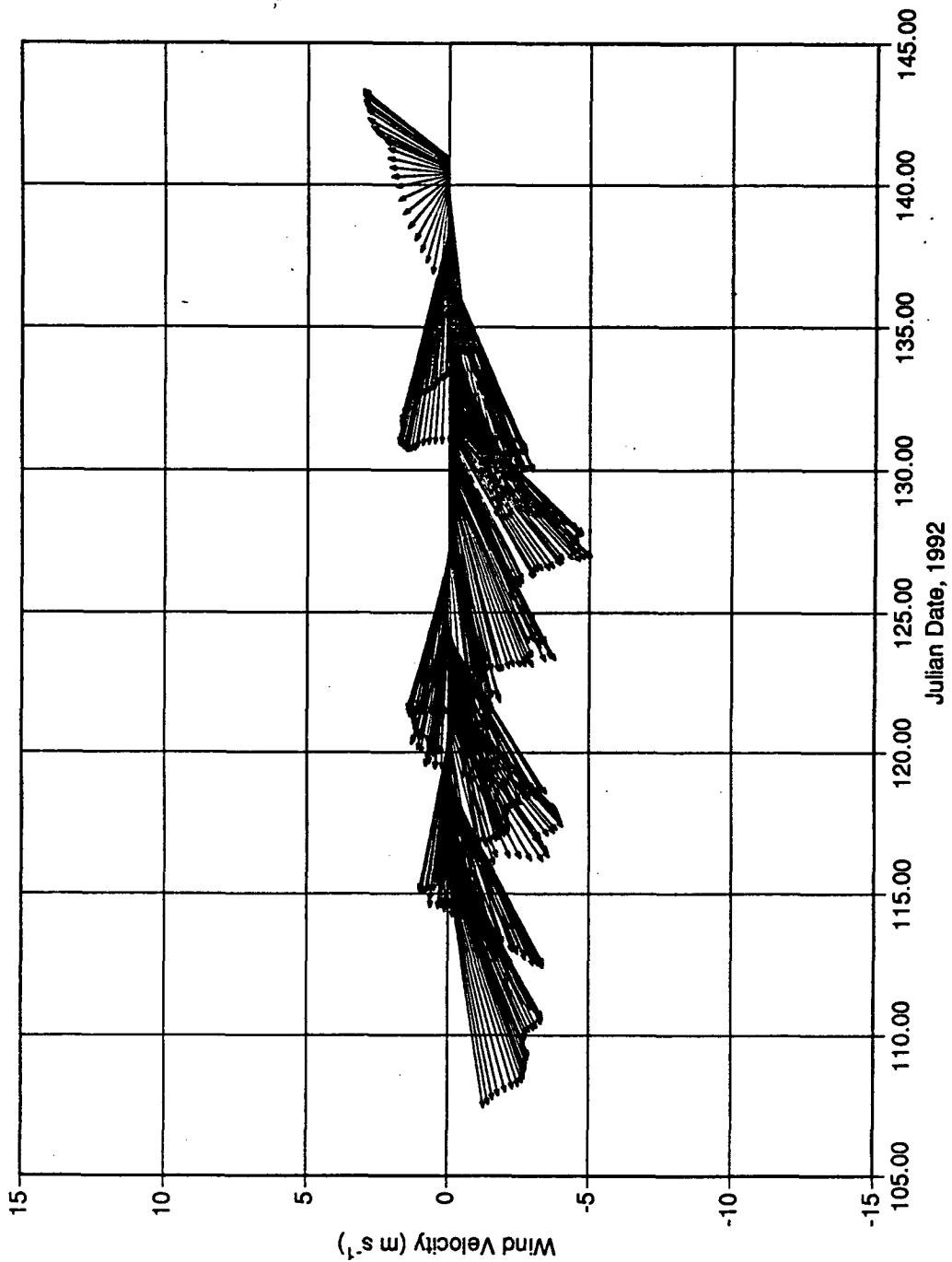


Fig. III-1g (Continued)

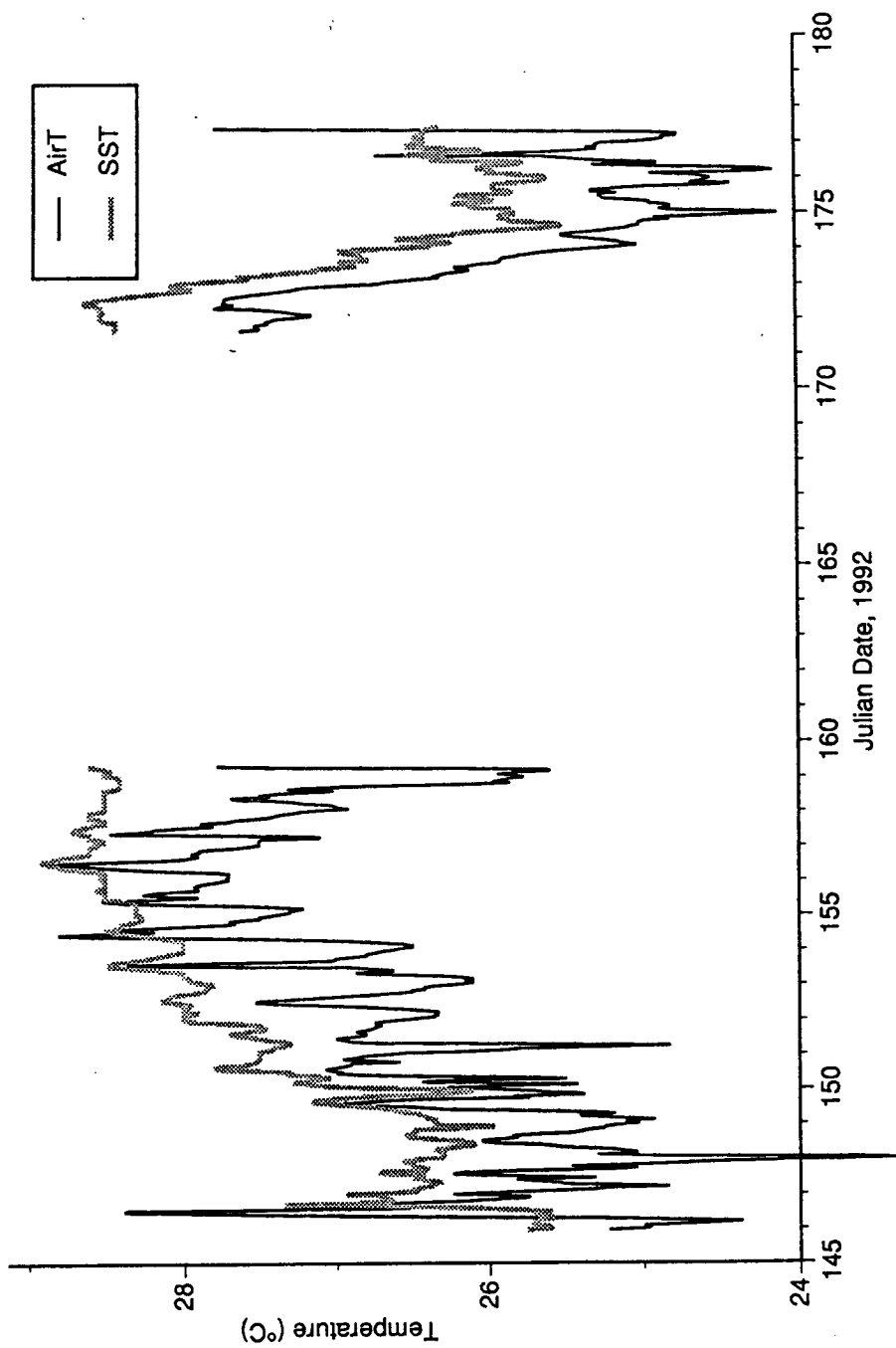


Fig. III-2. Time series of (a) temperature (air temperature and sea surface temperature; hourly average), (b) 25 hour filtered temperature, (c) atmospheric pressure (hourly average), (d) solar irradiance (hourly average), (e) wind speed (25 hour filtered), (f) wind polar diagram (hourly average), and (g) wind vector (25 hour filtered) during the KODOS 92-2 cruise.

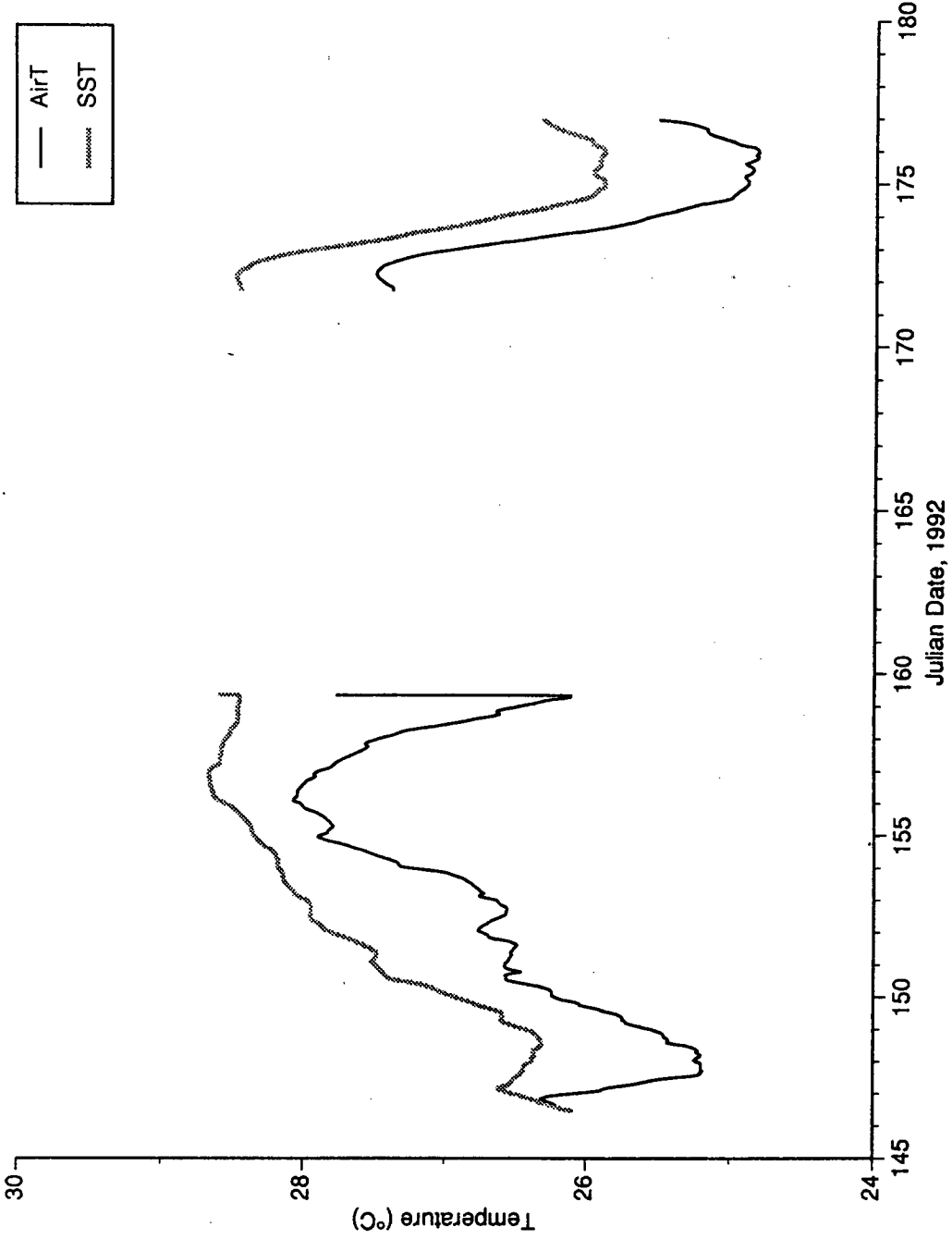


Fig. III-2b (Continued)

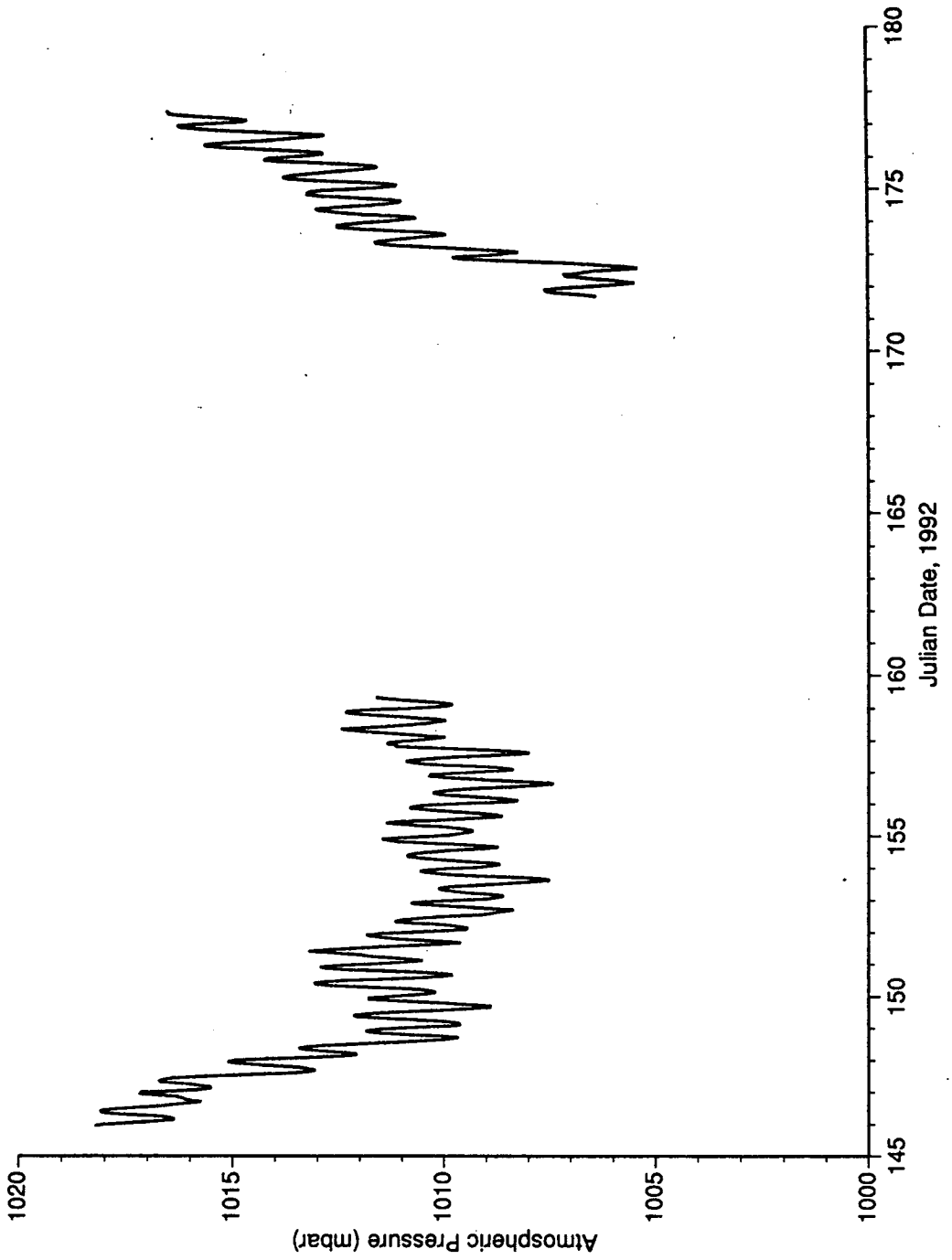


Fig. III-2c (Continued)



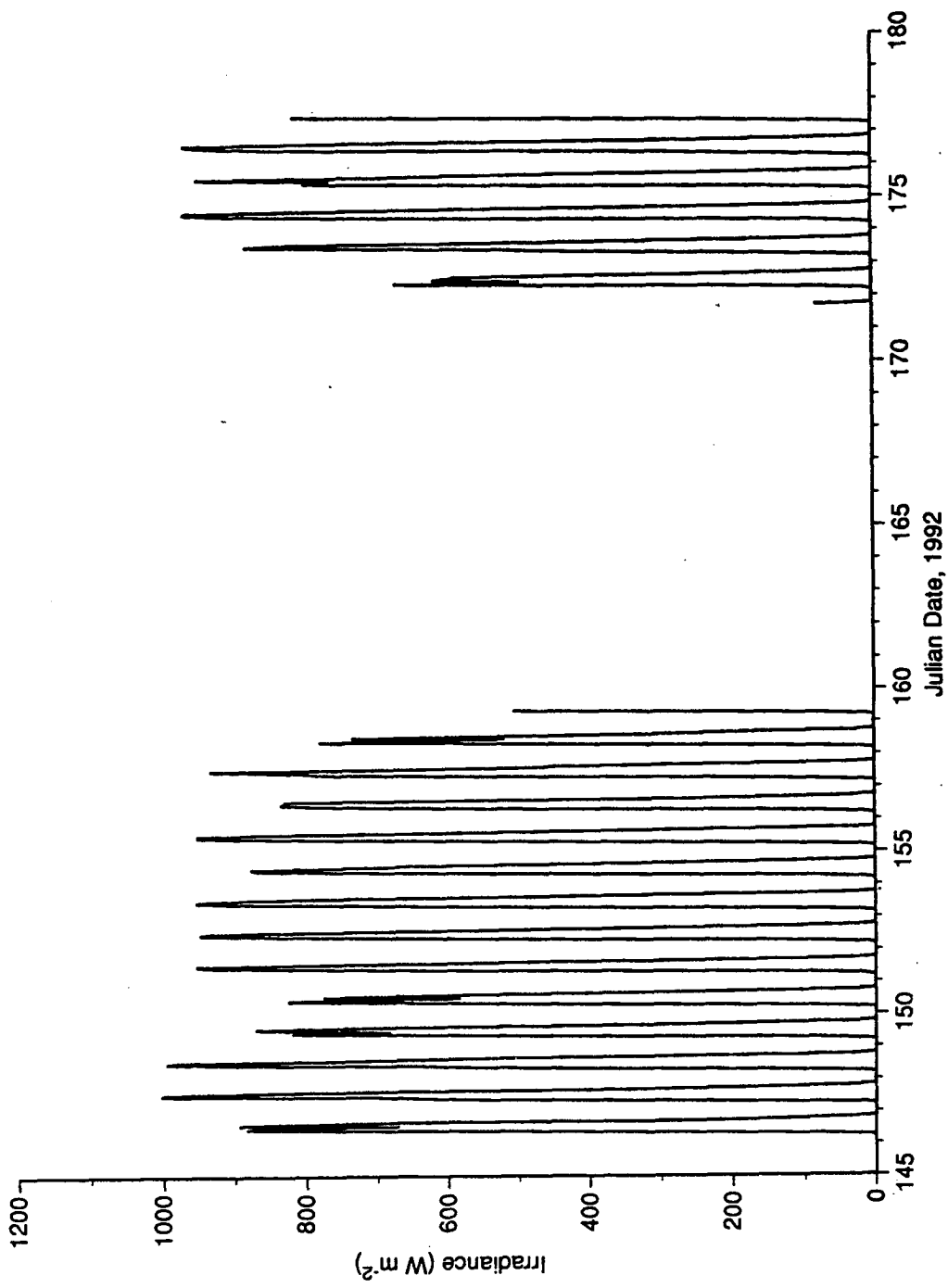


Fig. III-2d (Continued)

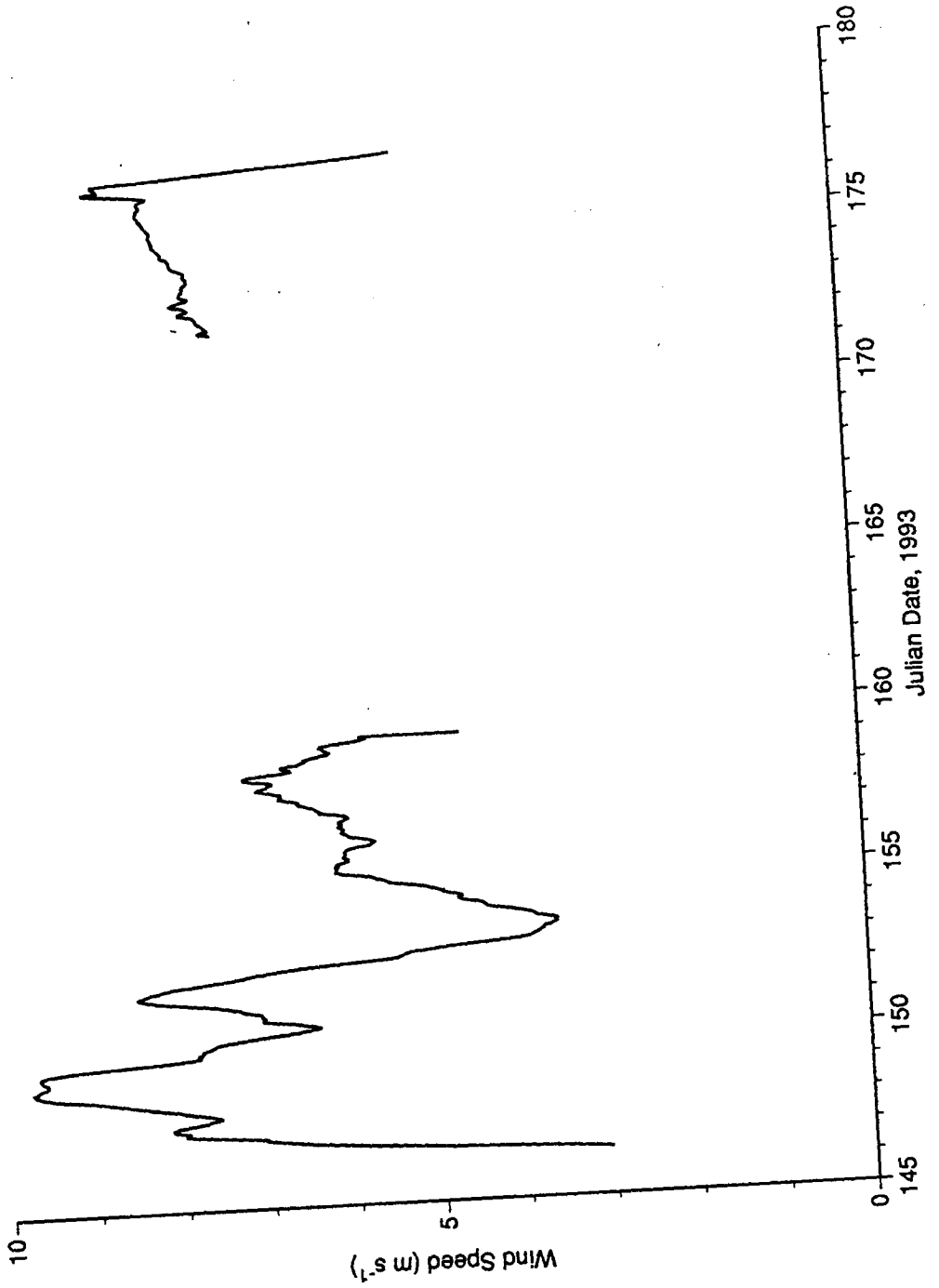


Fig. III-2e (Continued)

KODOS92-2

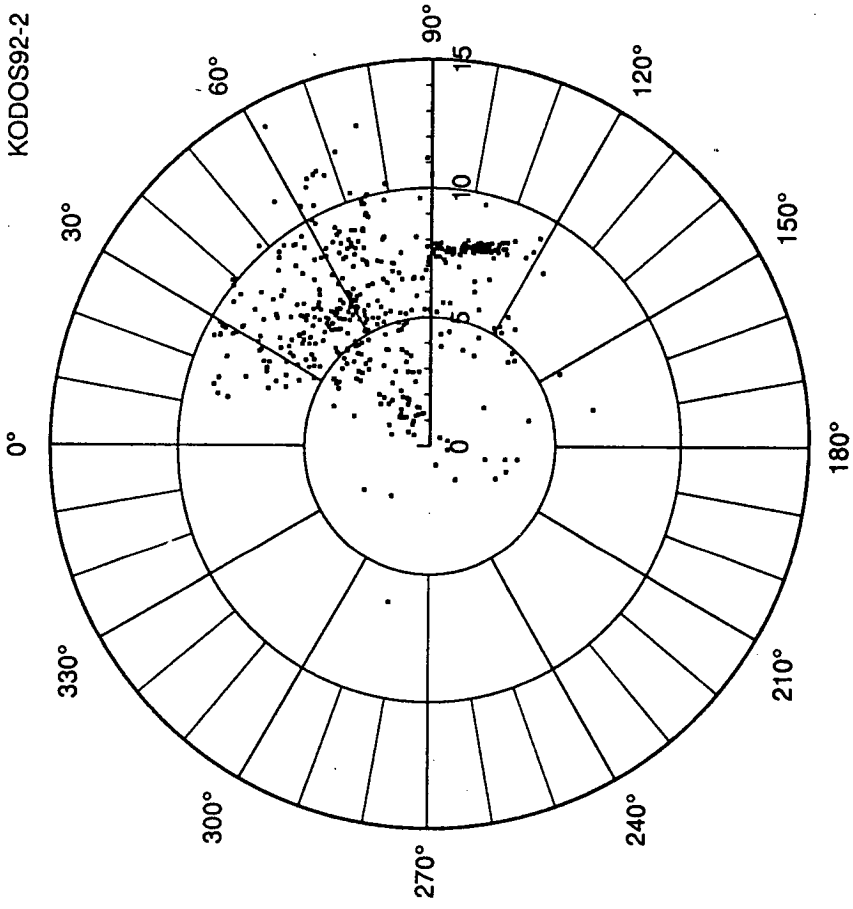


Fig. III-2f (Continued)

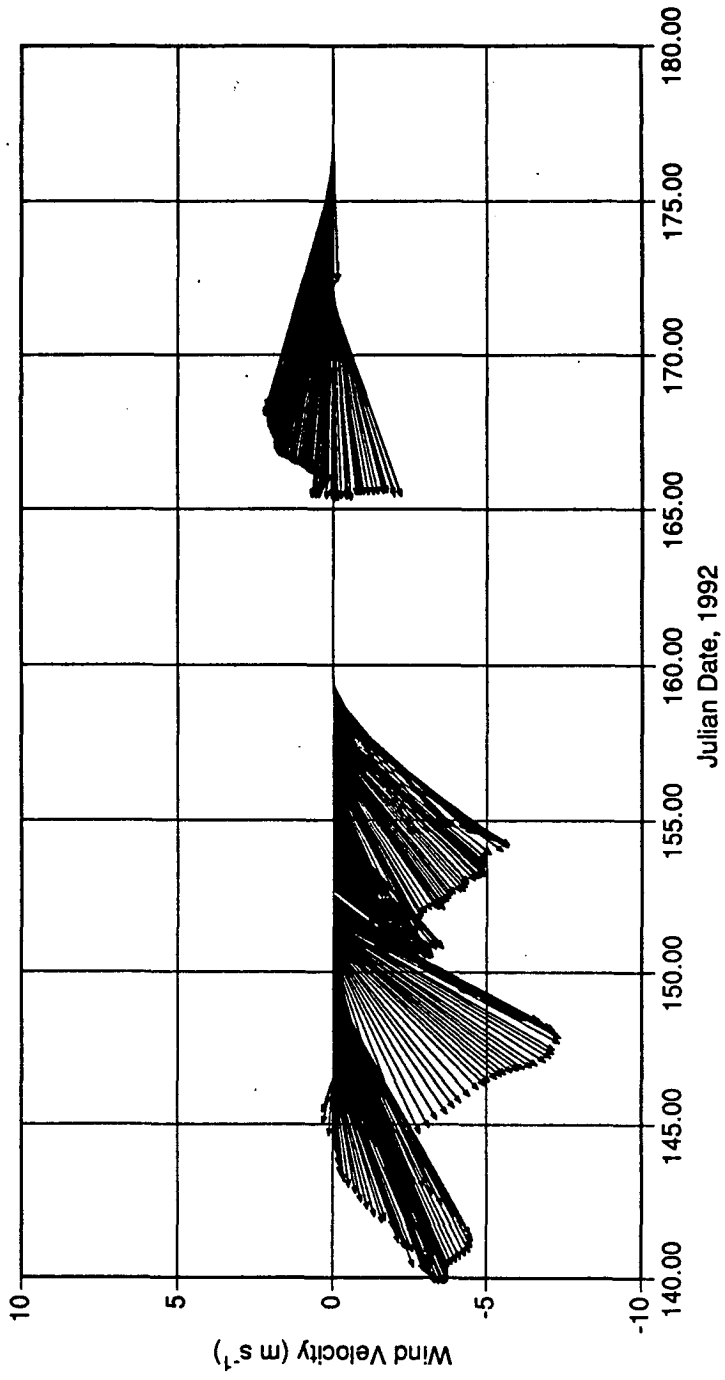


Fig. III-2g (Continued)

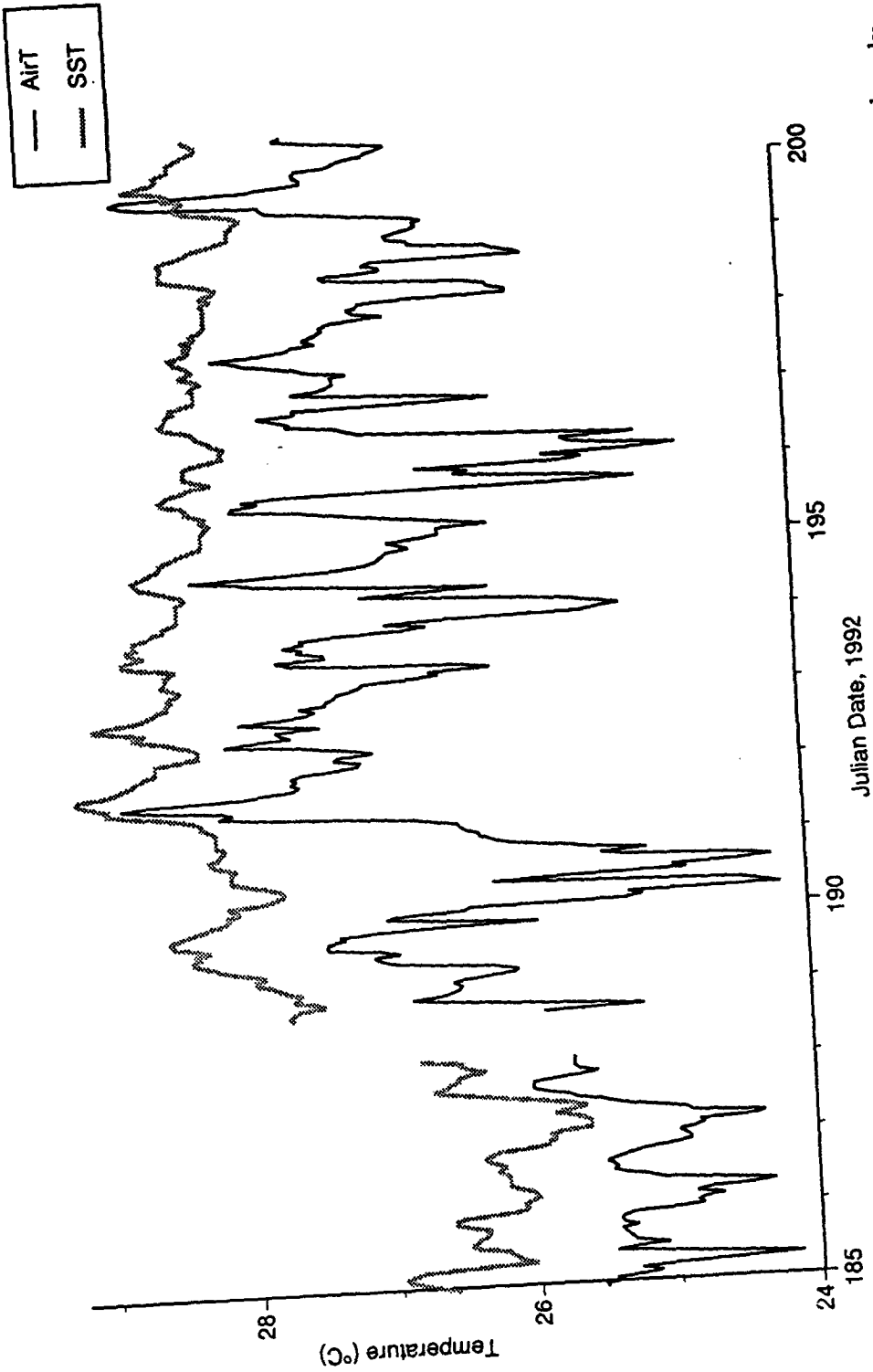


Fig. III-3. Time series of (a) temperature (air temperature and sea surface temperature; hourly average), (b) 25 hour filtered temperature, atmospheric pressure (hourly average), (d) solar irradiance (hourly average), (e) wind speed (25 hour filtered), (f) wind polar diagram (hourly average), and (g) wind vector (25 hour filtered) during the KODOS 92-3 cruise.

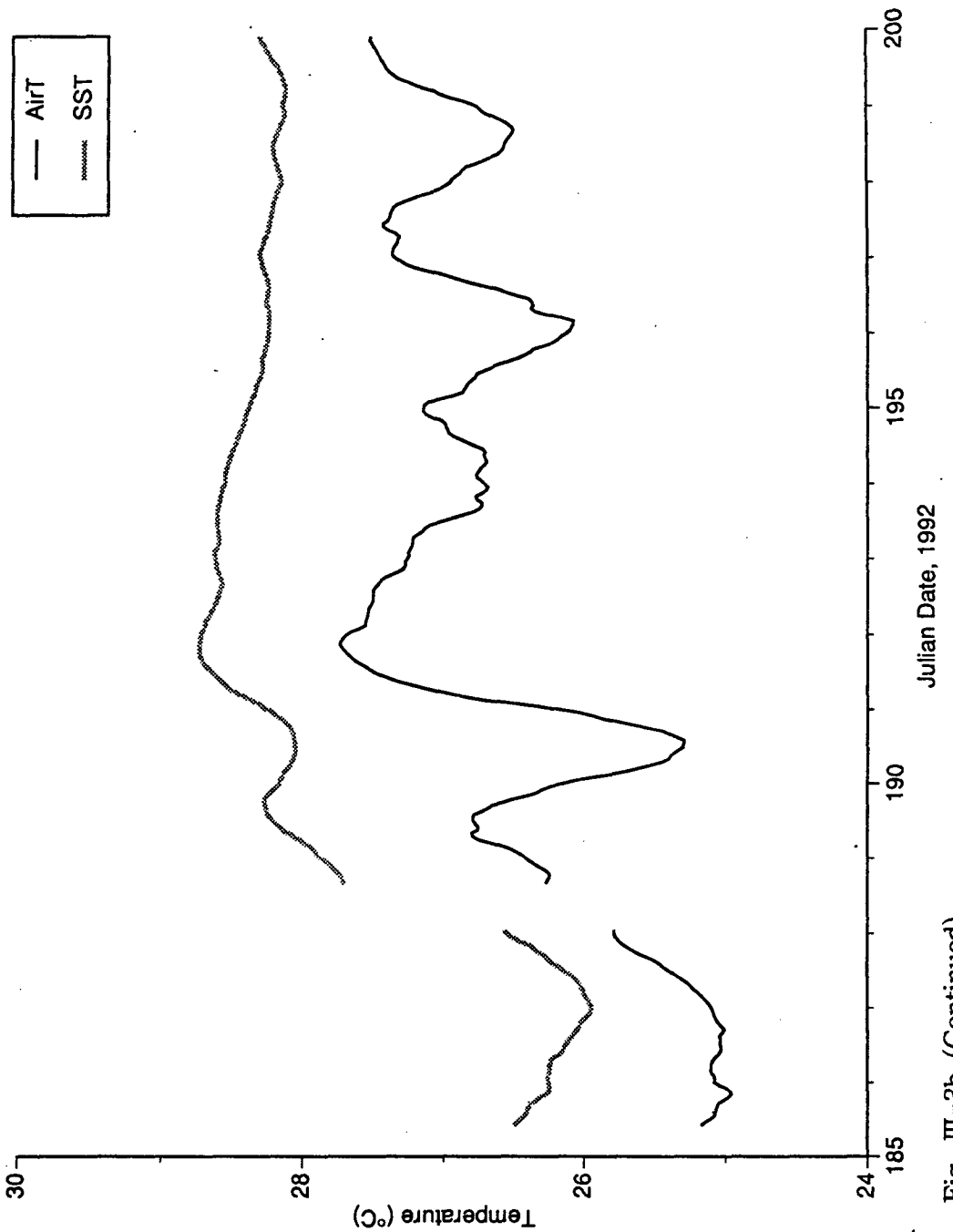


Fig. III-3b (Continued)

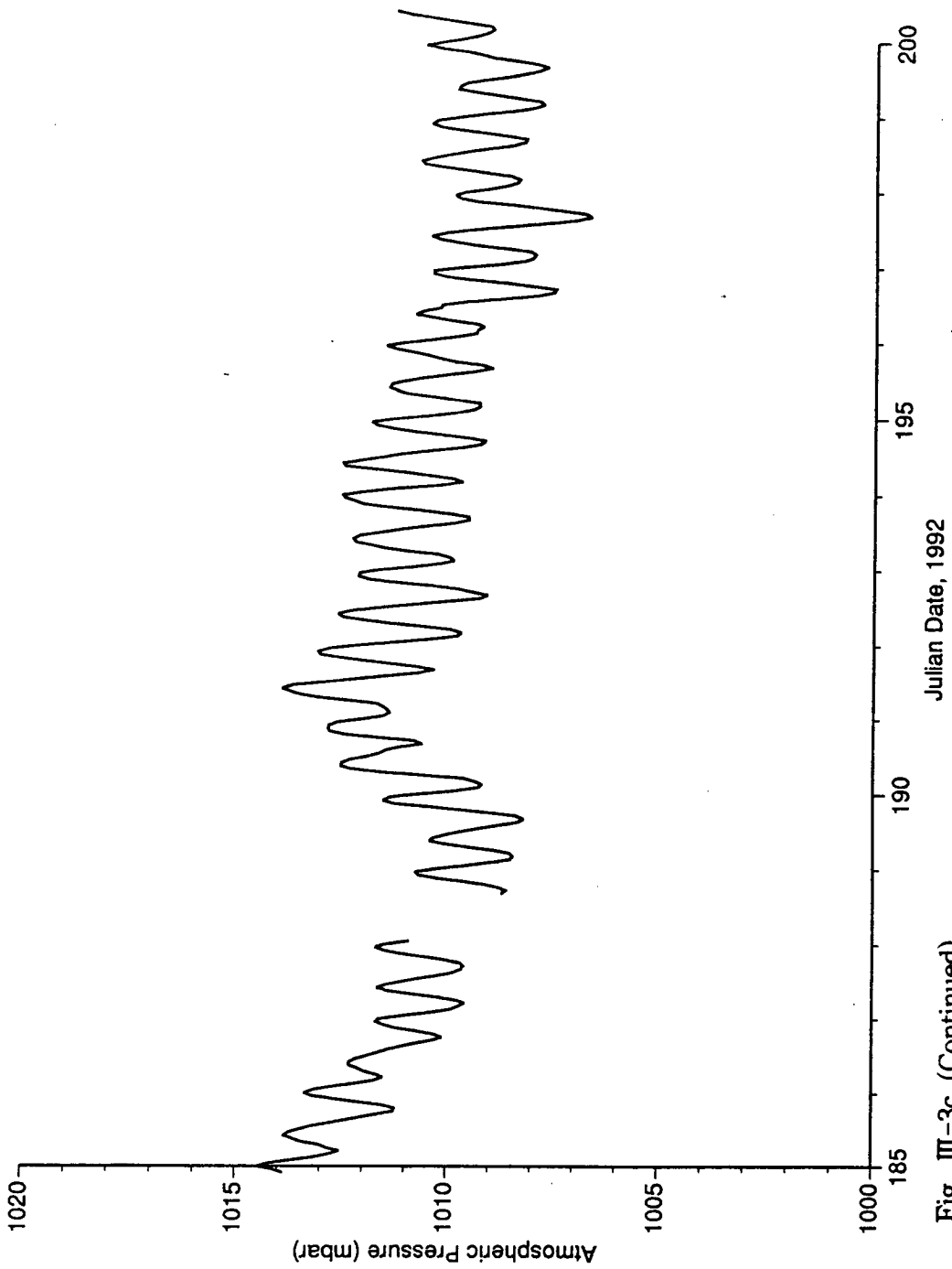


Fig. III-3c (Continued)

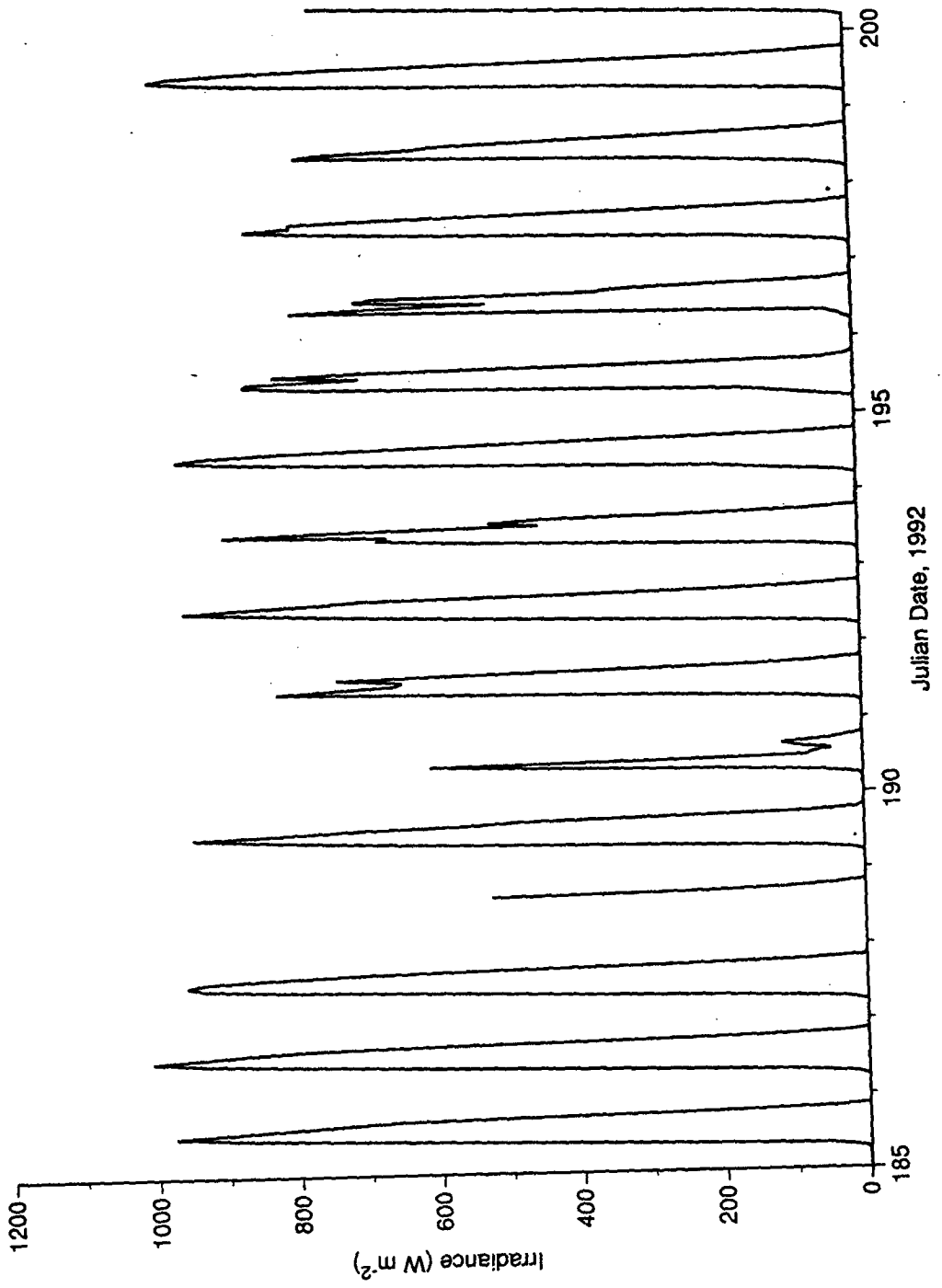


Figure 10-24 (Continued)



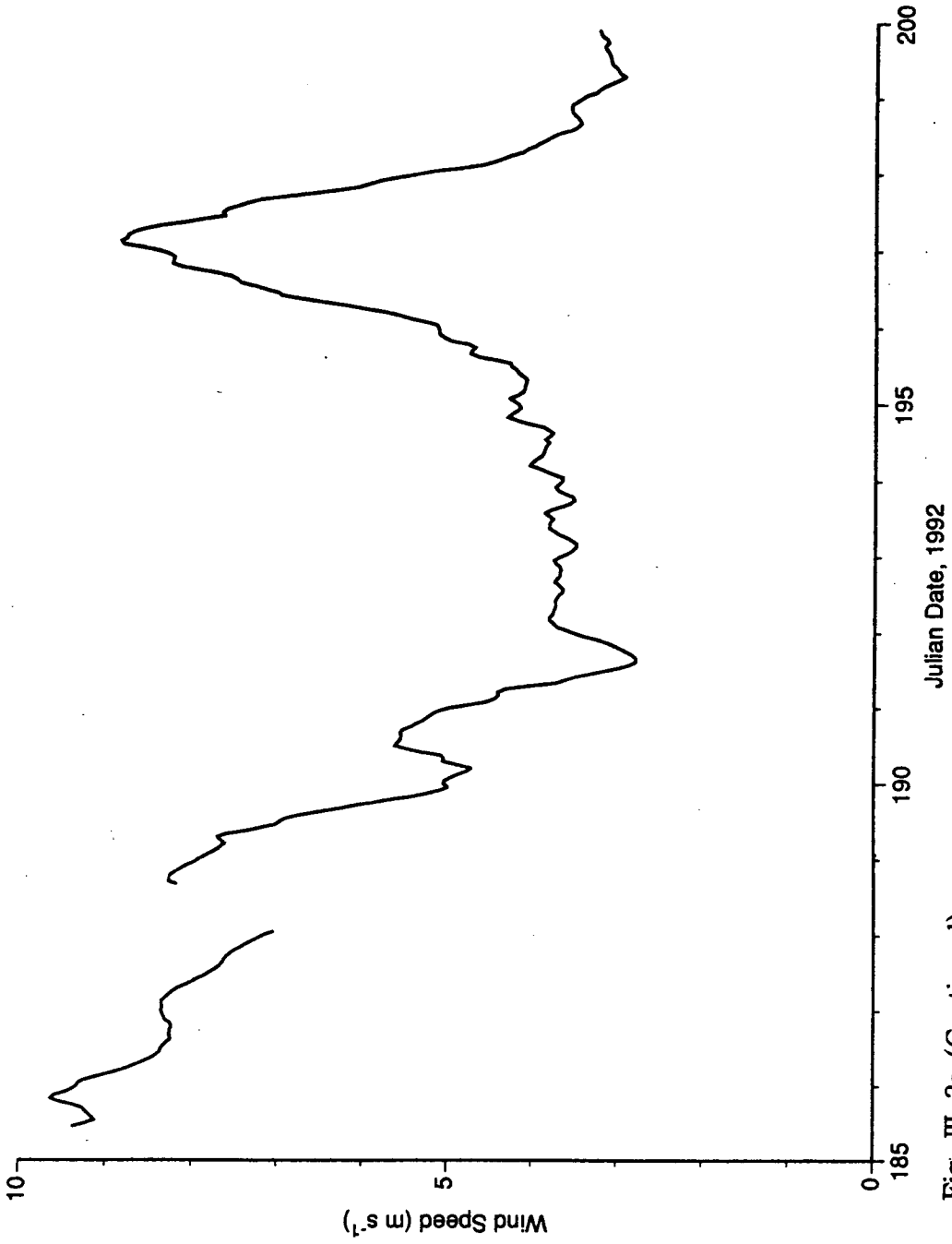


Fig. III-3e (Continued)

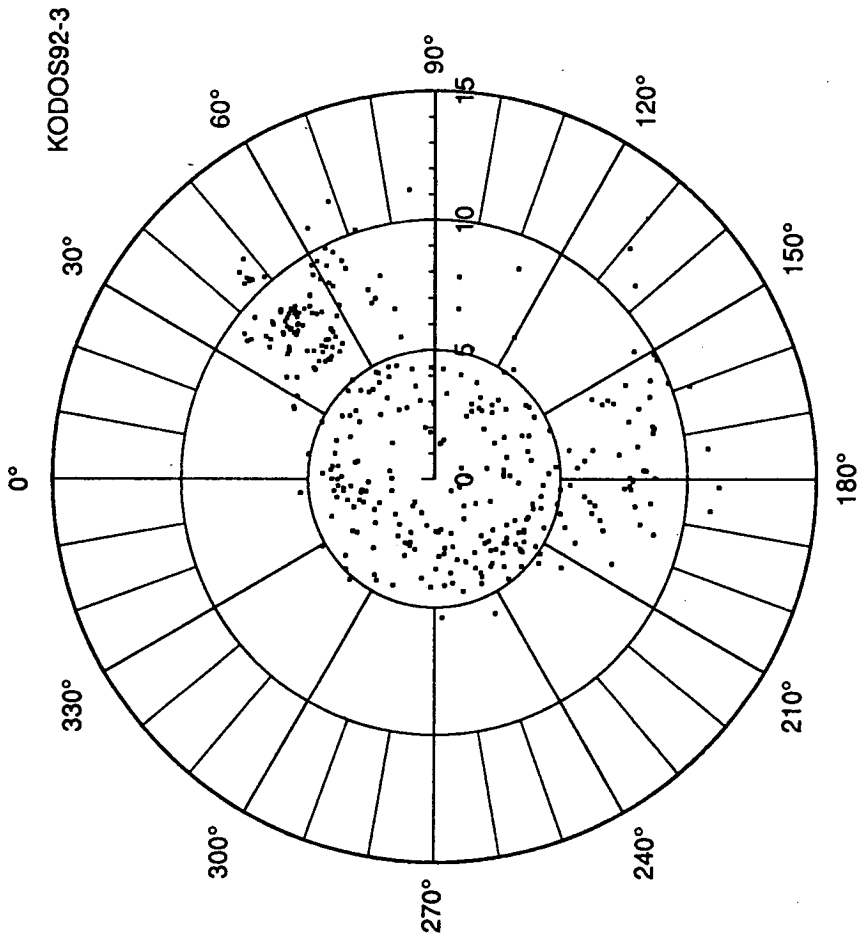


Fig. III-3f (Continued)

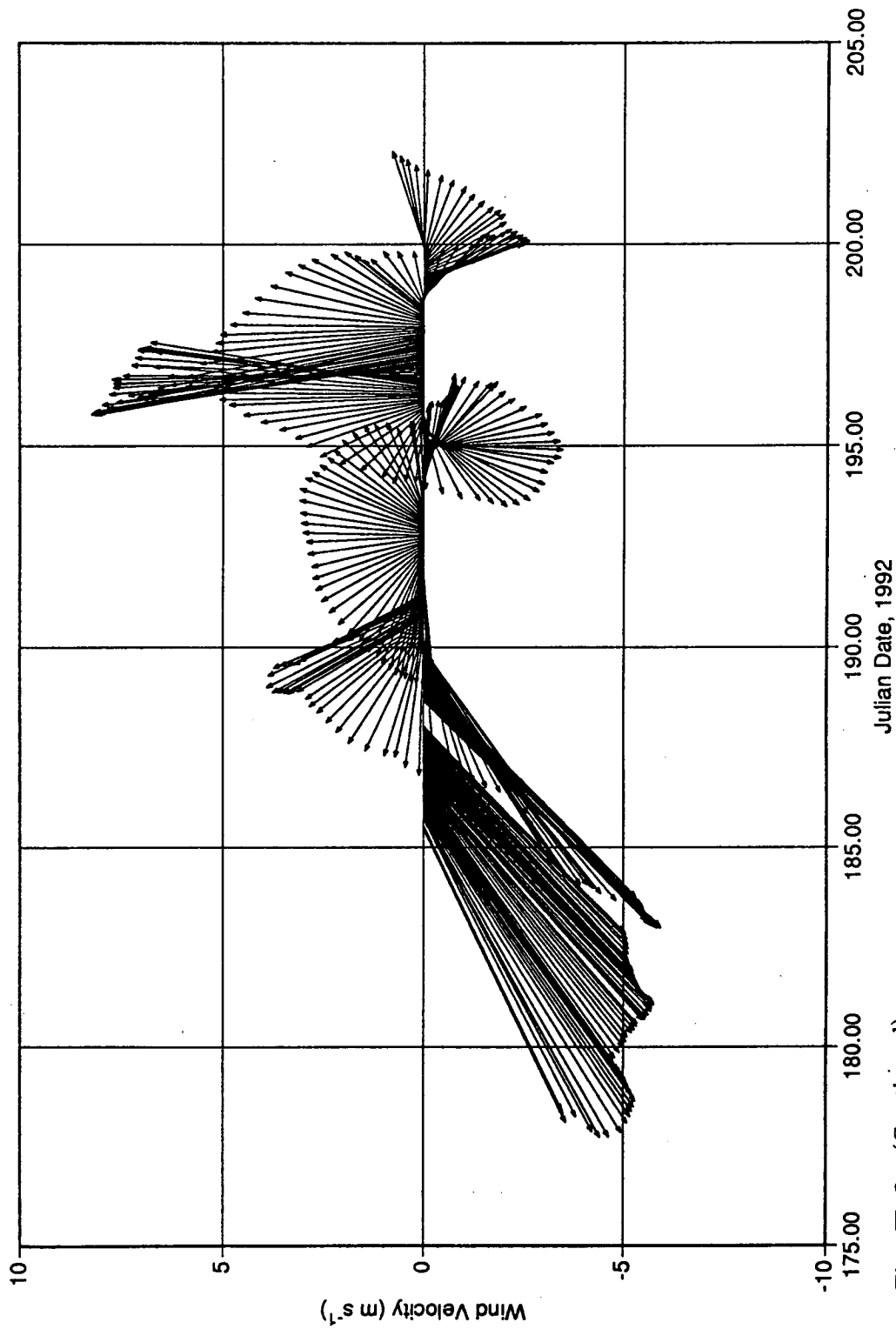


Fig. III-3g (Continued)

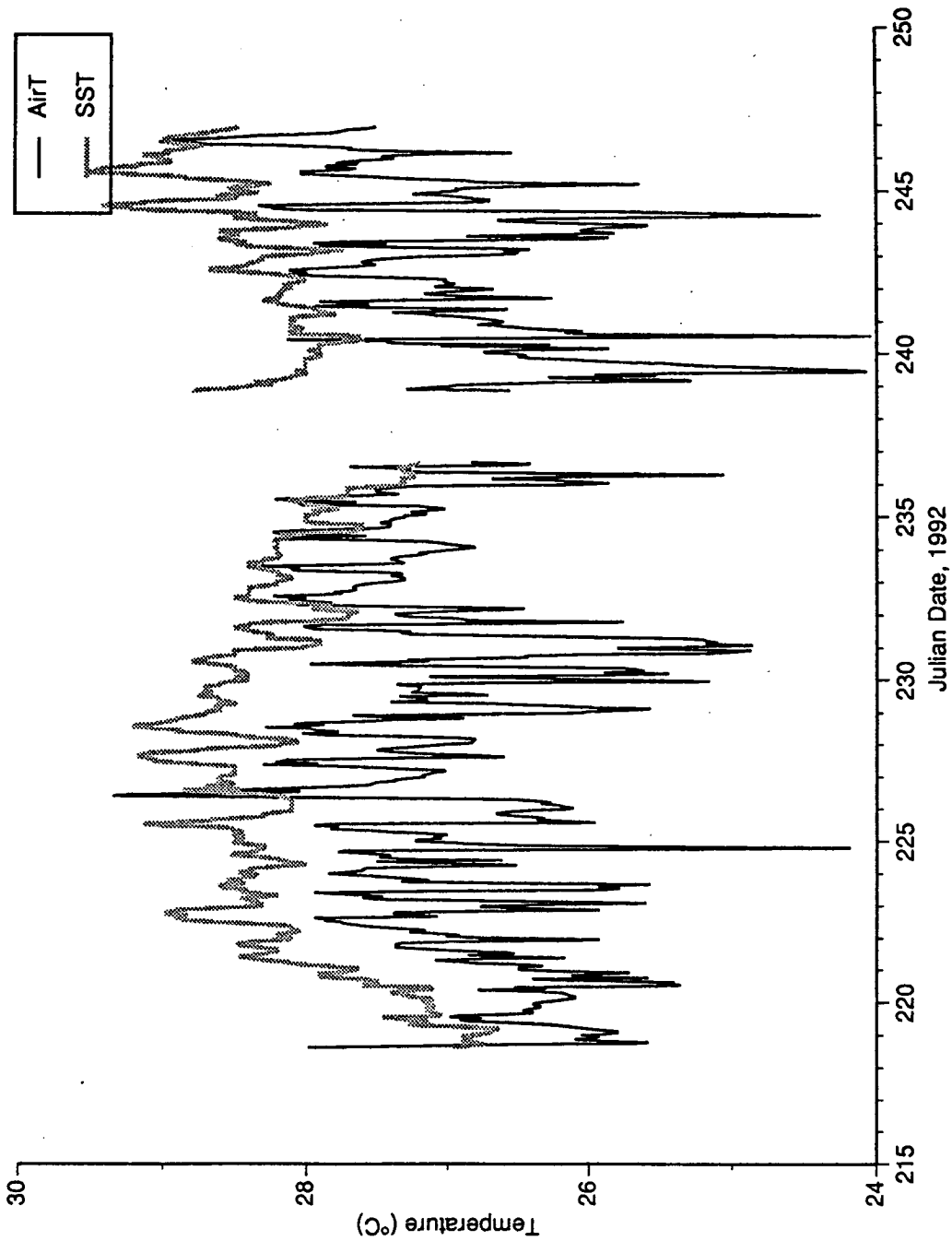


Fig. III-4. Time series of (a) temperature (air temperature and sea surface temperature; hourly average), (b) 25 hour filtered temperature, (c) atmospheric pressure (hourly average), (d) solar irradiance (hourly average), (e) wind speed (25 hour filtered), (f) wind polar diagram

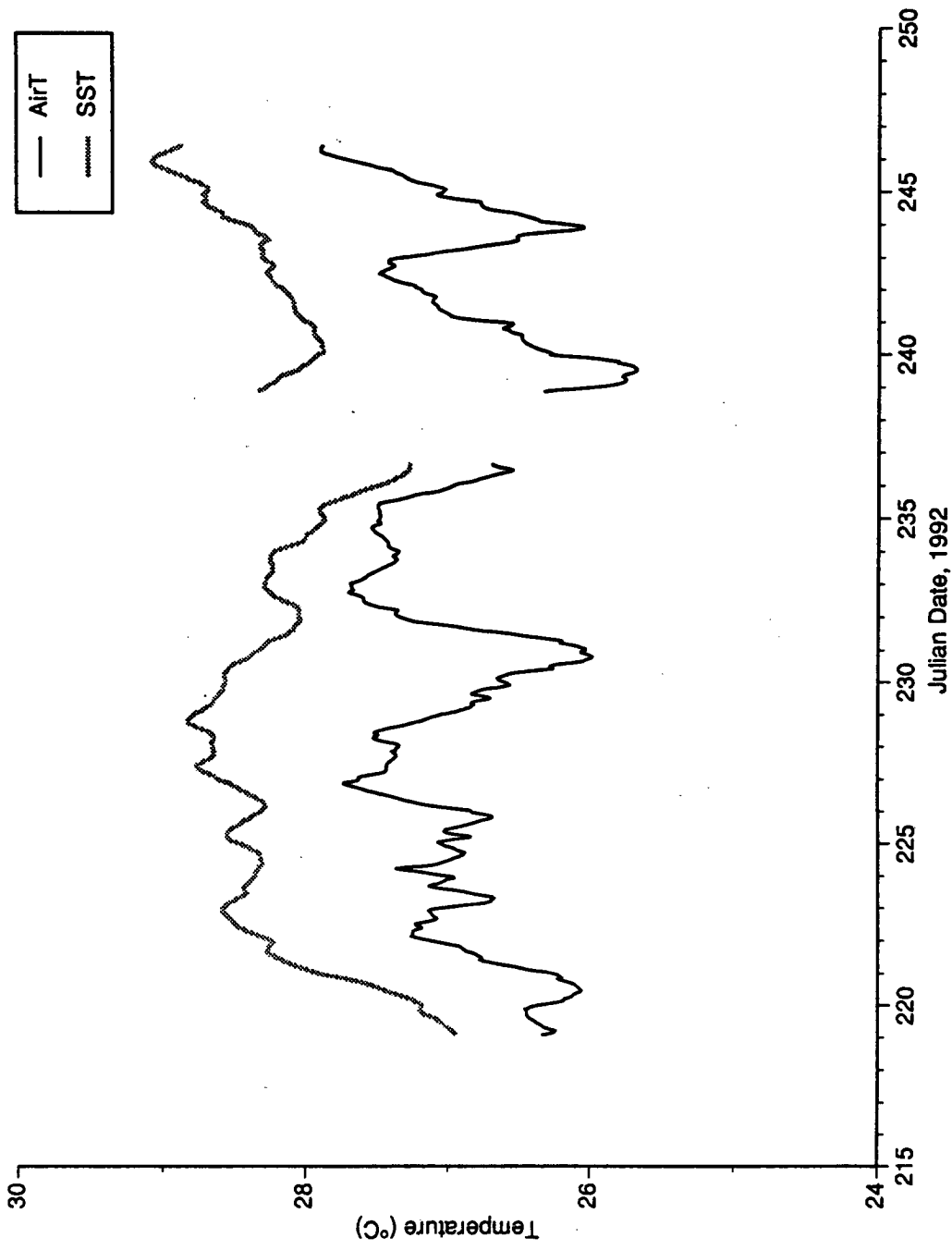


Fig. III-4b (Continued)

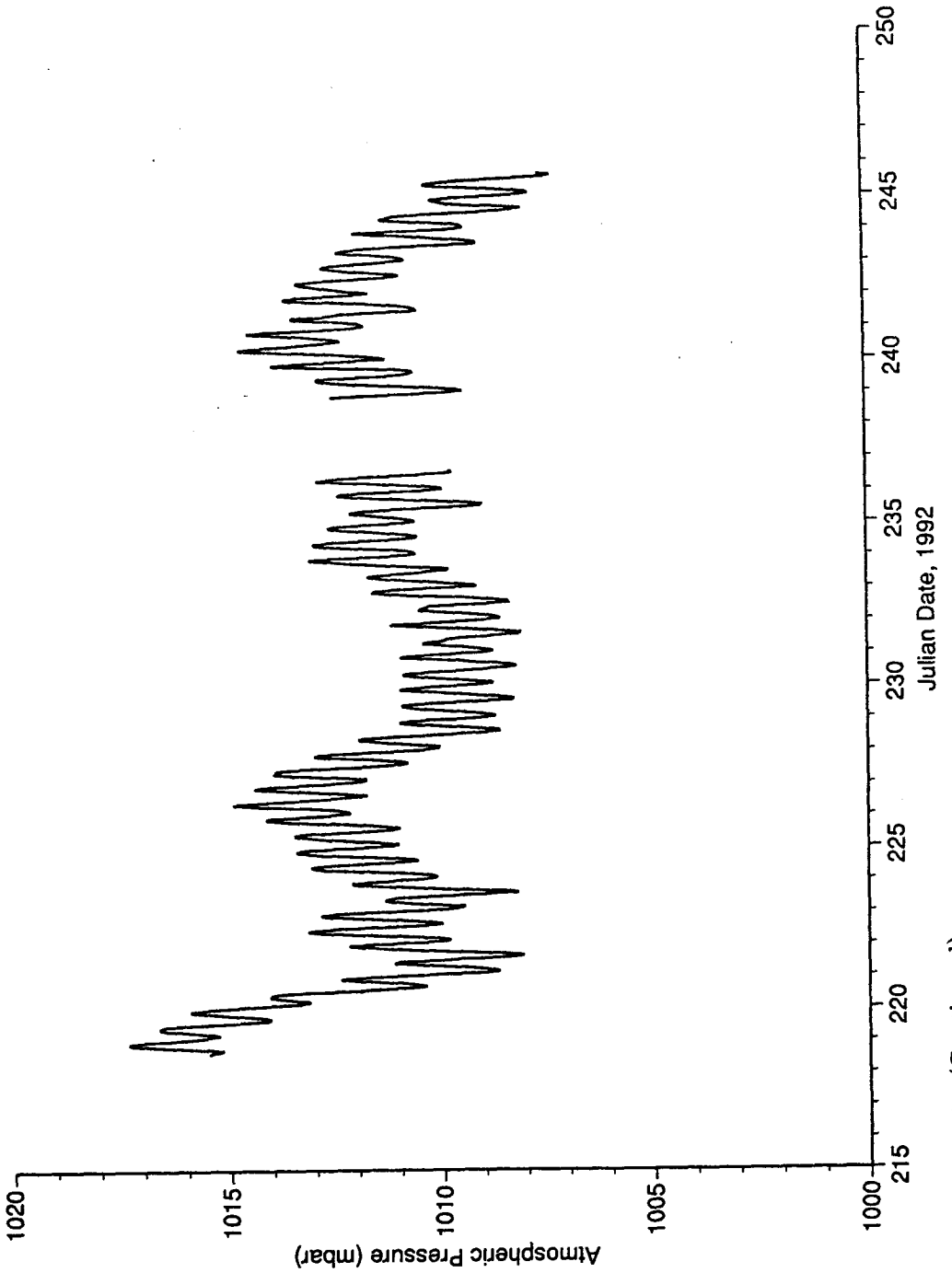


Fig. III-4c (Continued)

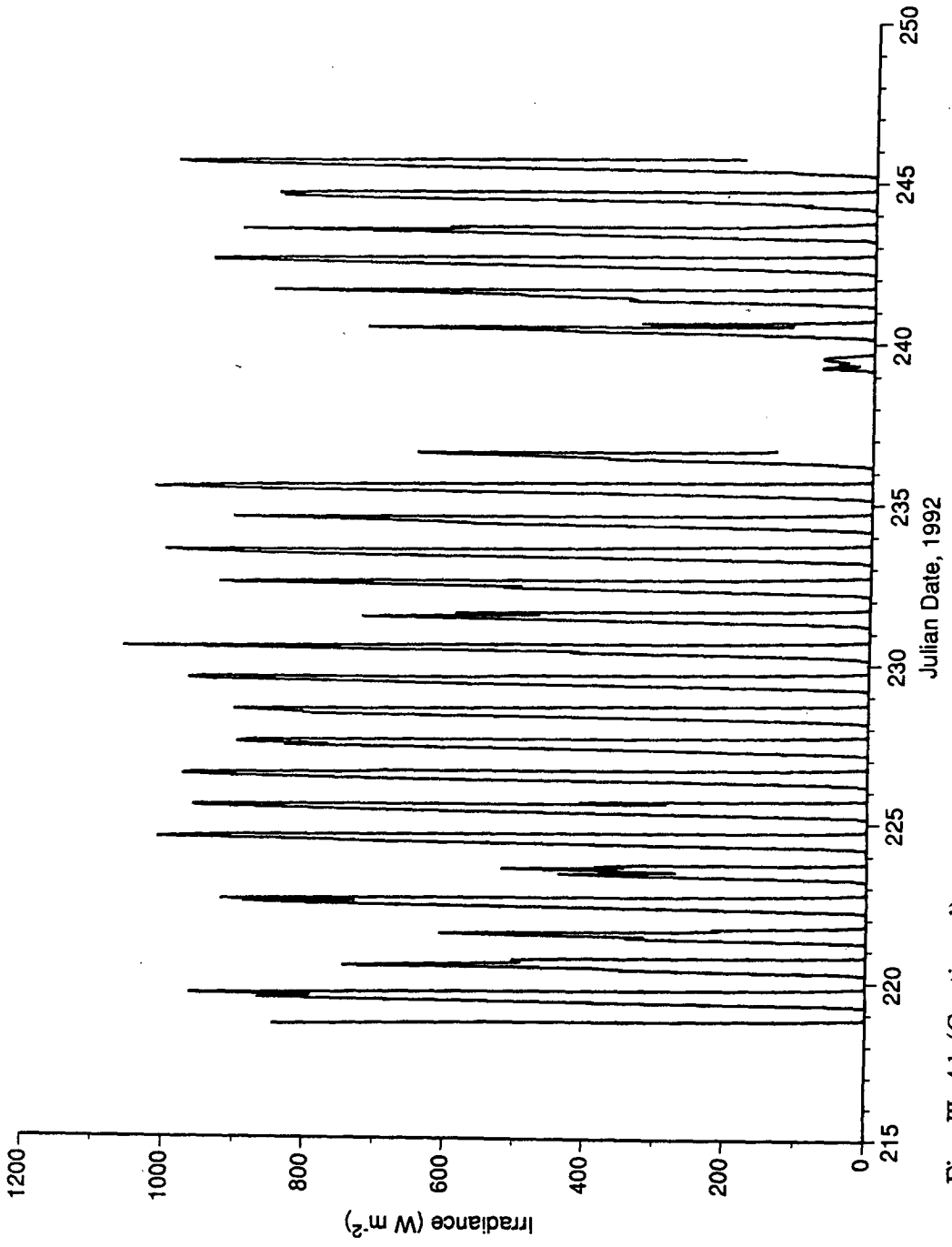


Fig. III-4d (Continued)

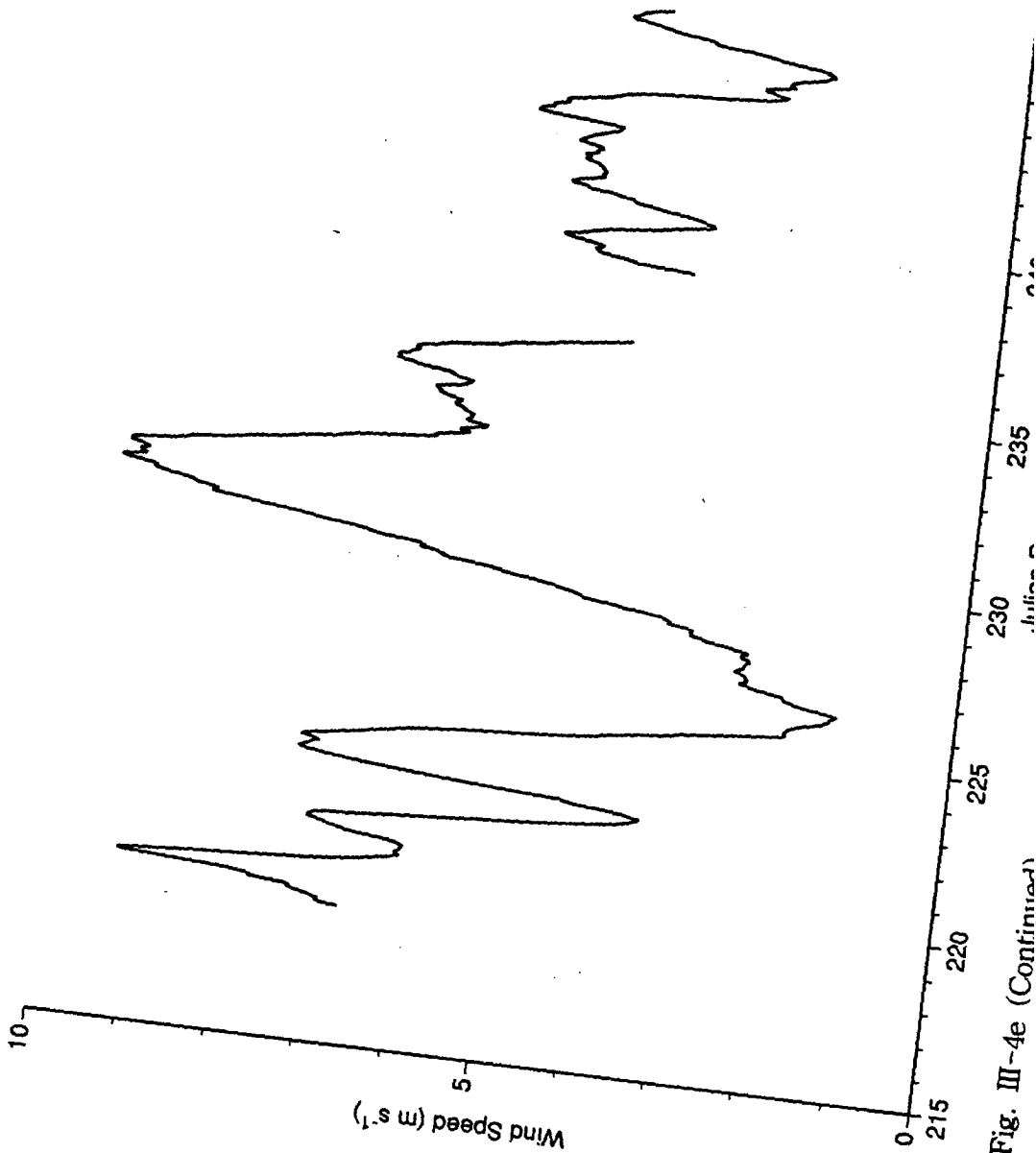


Fig. III-4e (Continued)



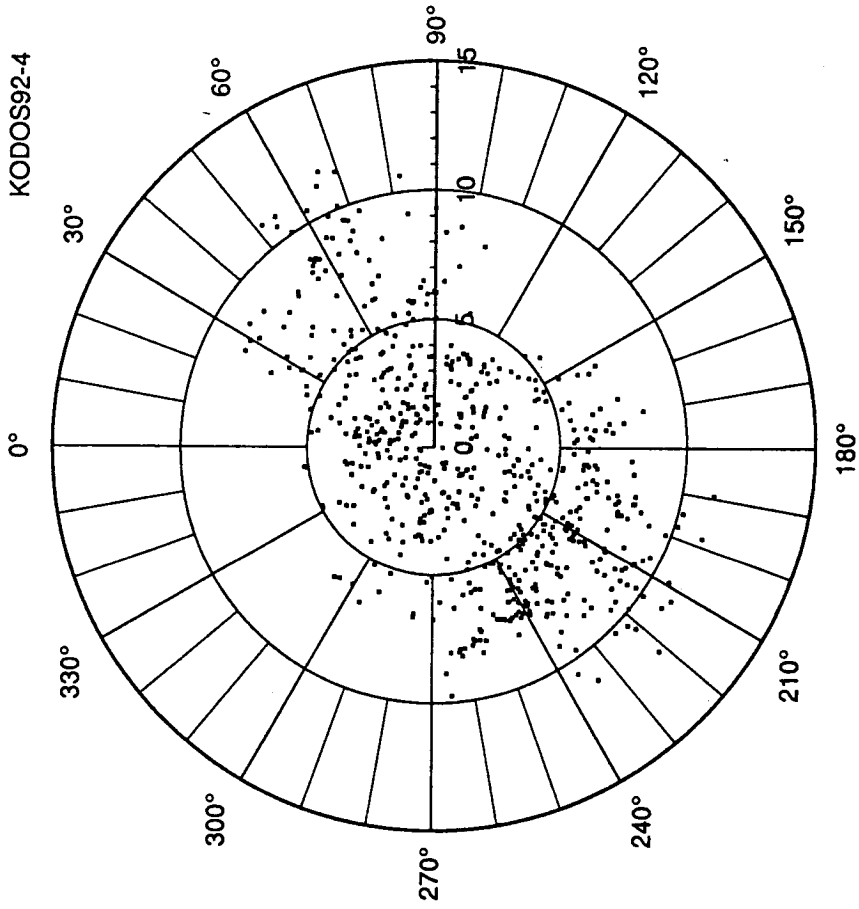


Fig. III-4f (Continued)

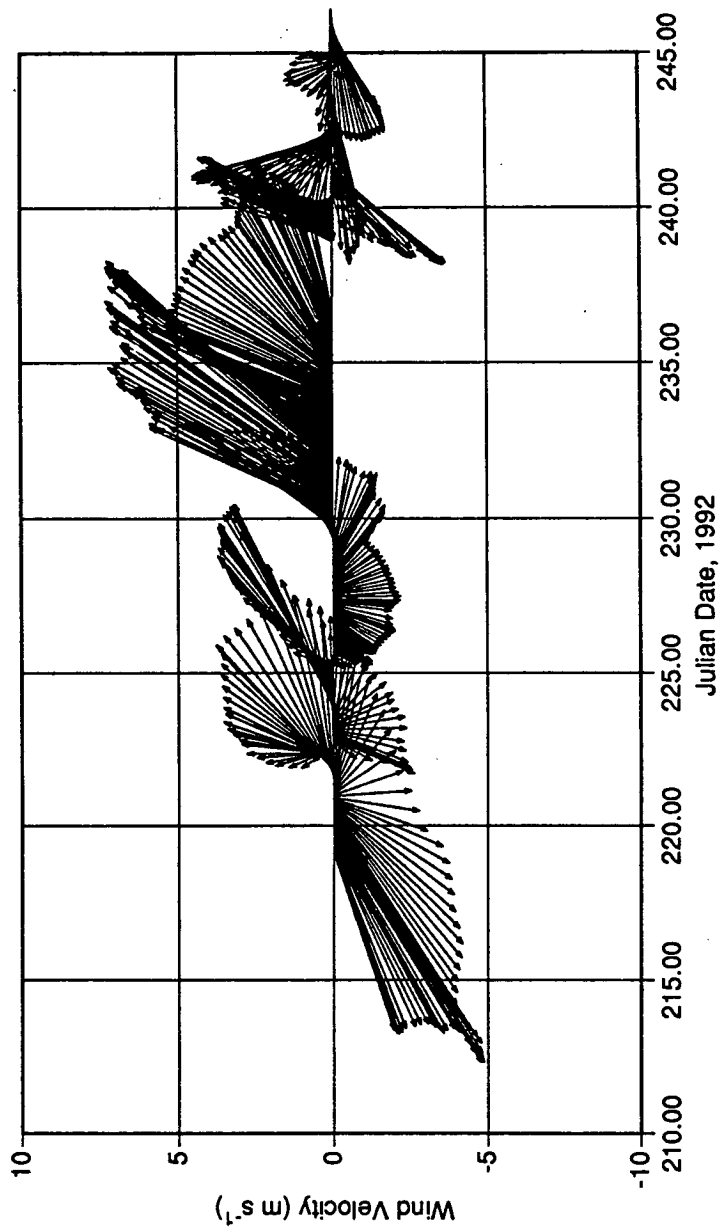


Fig. III-4g (Continued)

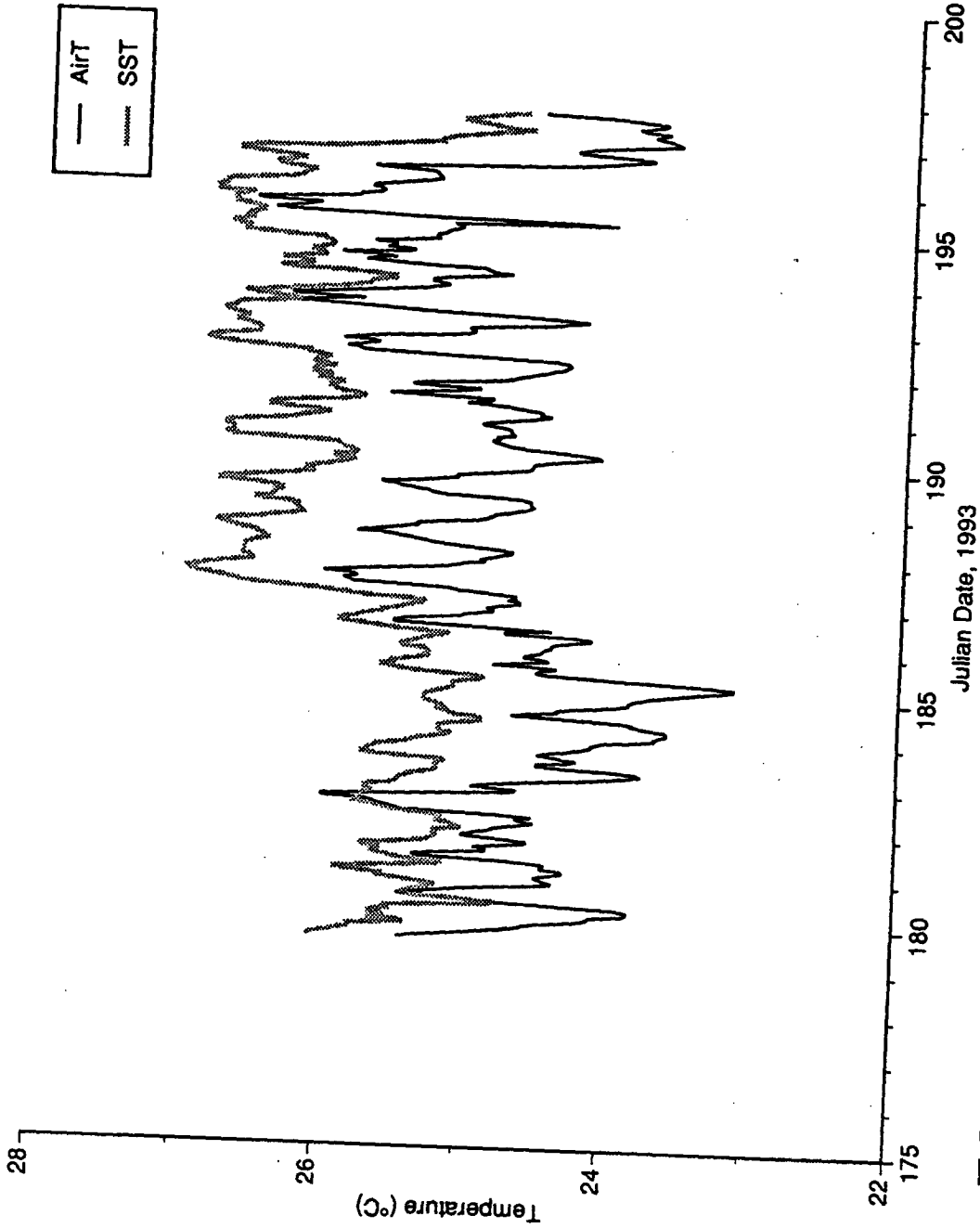


Fig. III-5. Time series of (a) temperature (air temperature and sea surface temperature; hourly average), (b) 25 hour filtered temperature, (c) atmospheric pressure (hourly average), (d) solar irradiance (hourly average), (e) wind speed (25 hour filtered), (f) wind polar diagram (hourly average), and (g) wind vector (25 hour filtered) during the KODOS 93-2 cruise

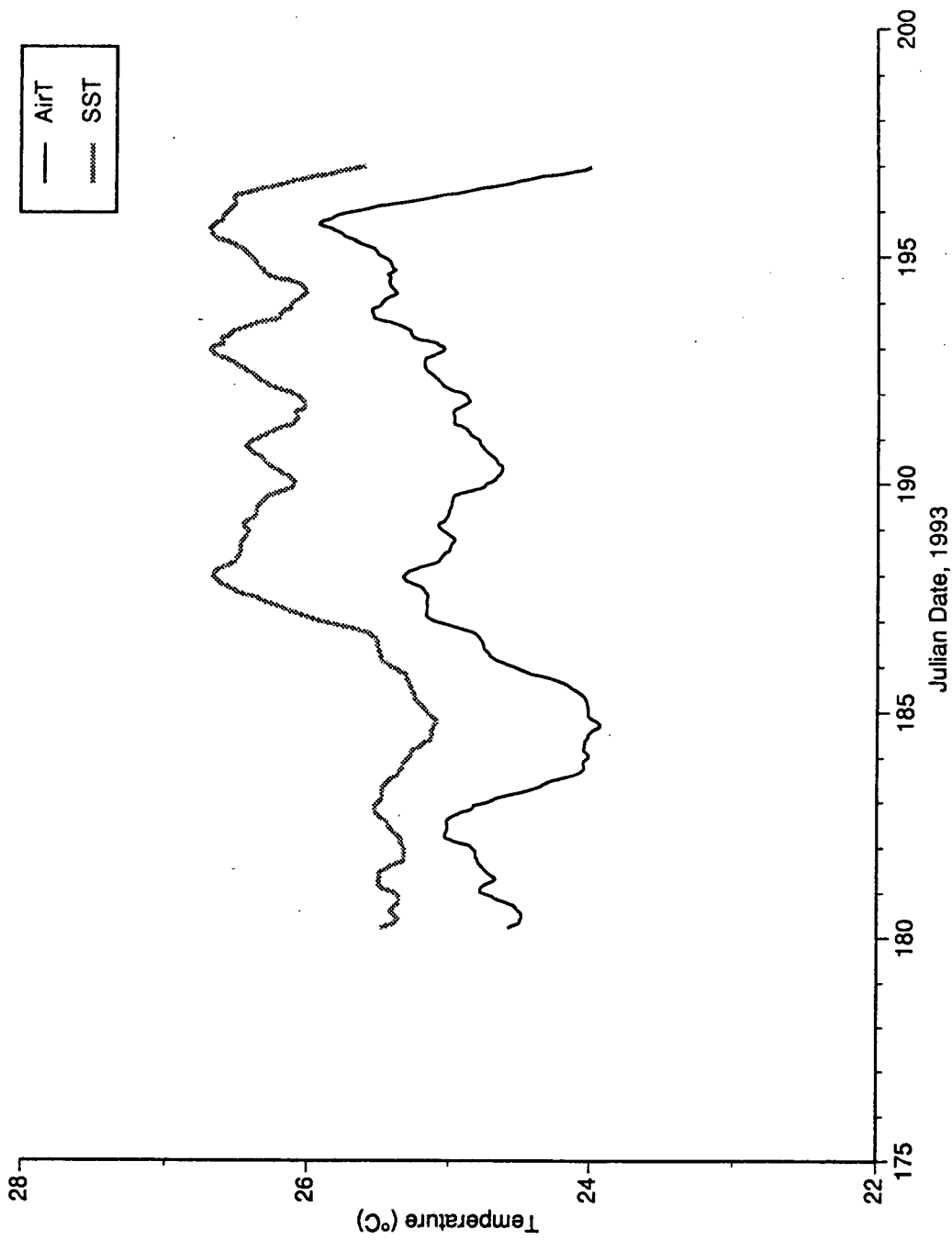


Fig. III-5b (Continued)

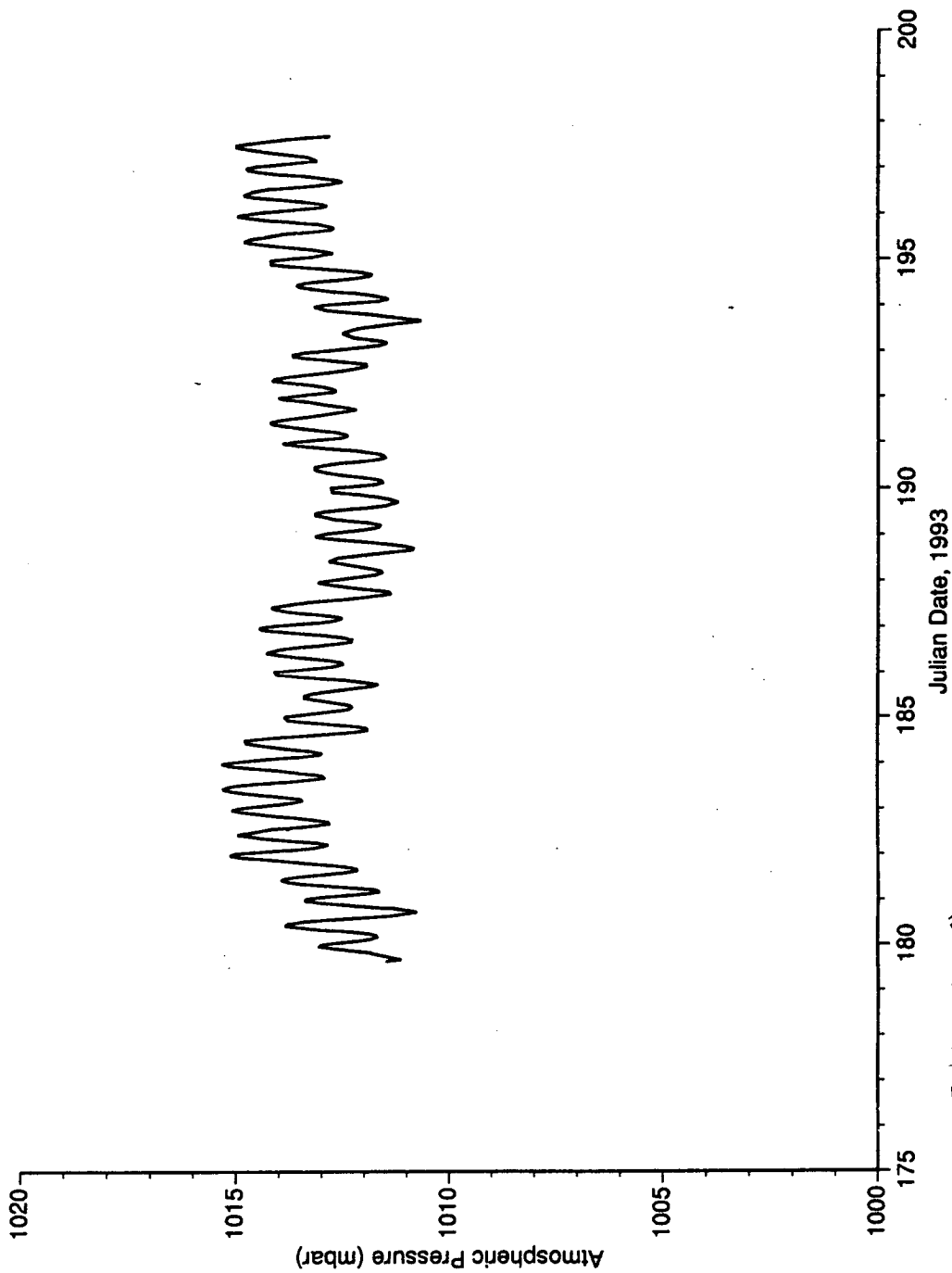


Fig. III-5c' (Continued)

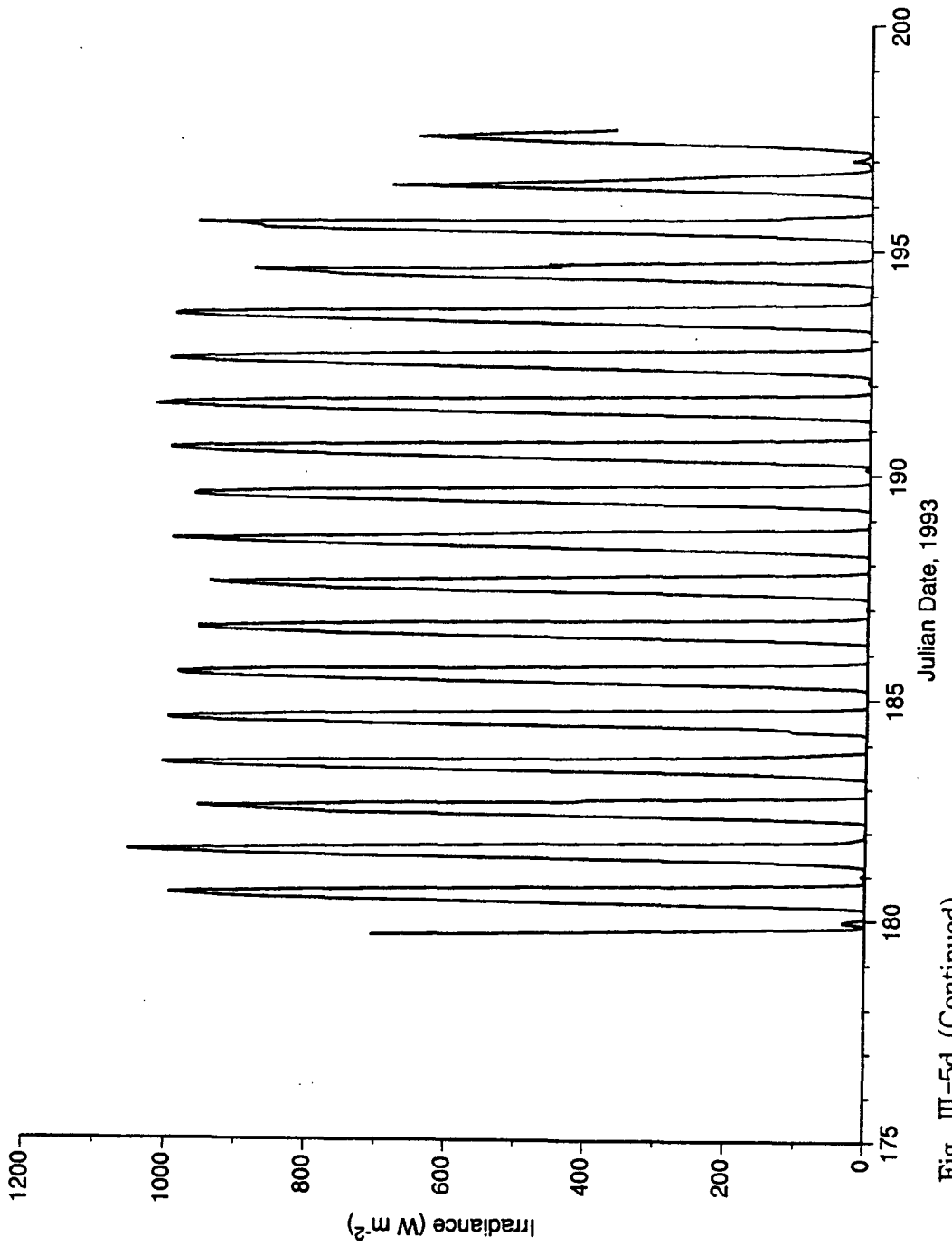


Fig. III-5d (Continued)

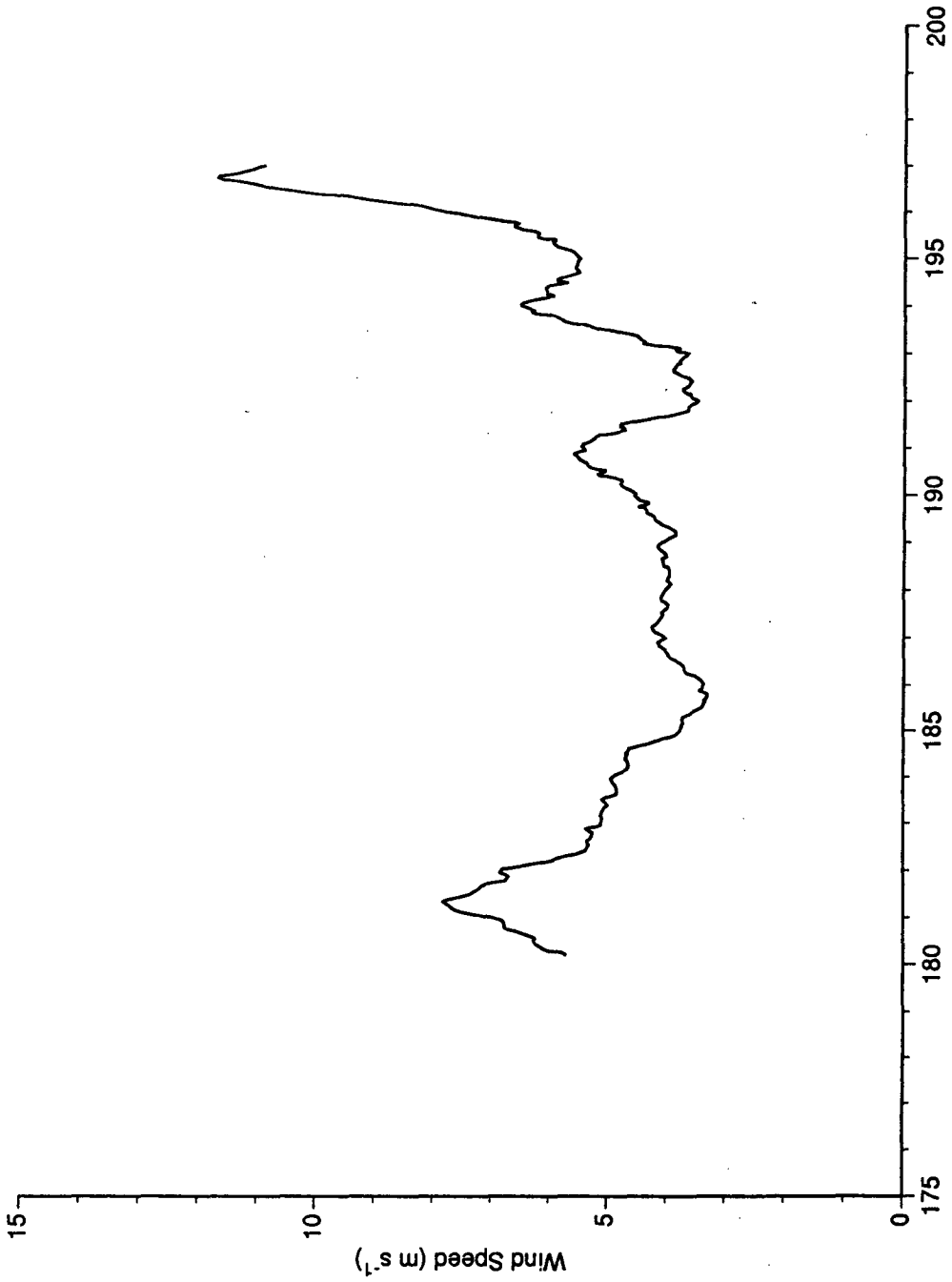


Fig. III-5e (Continued)

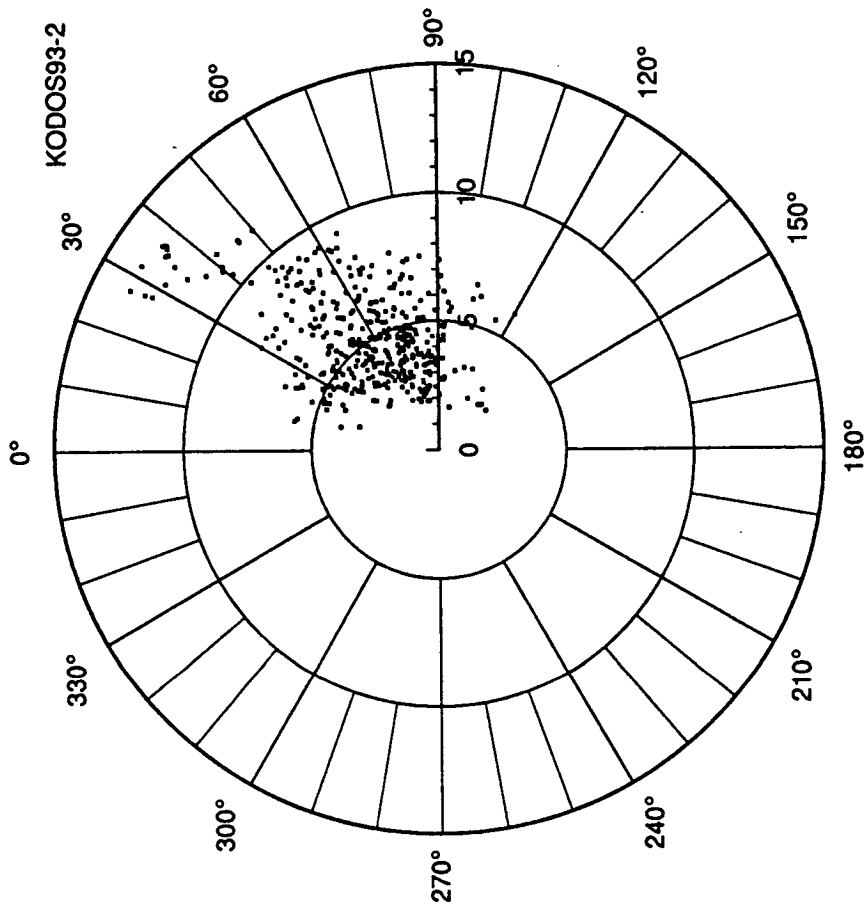


Fig. III-5f (Continued)



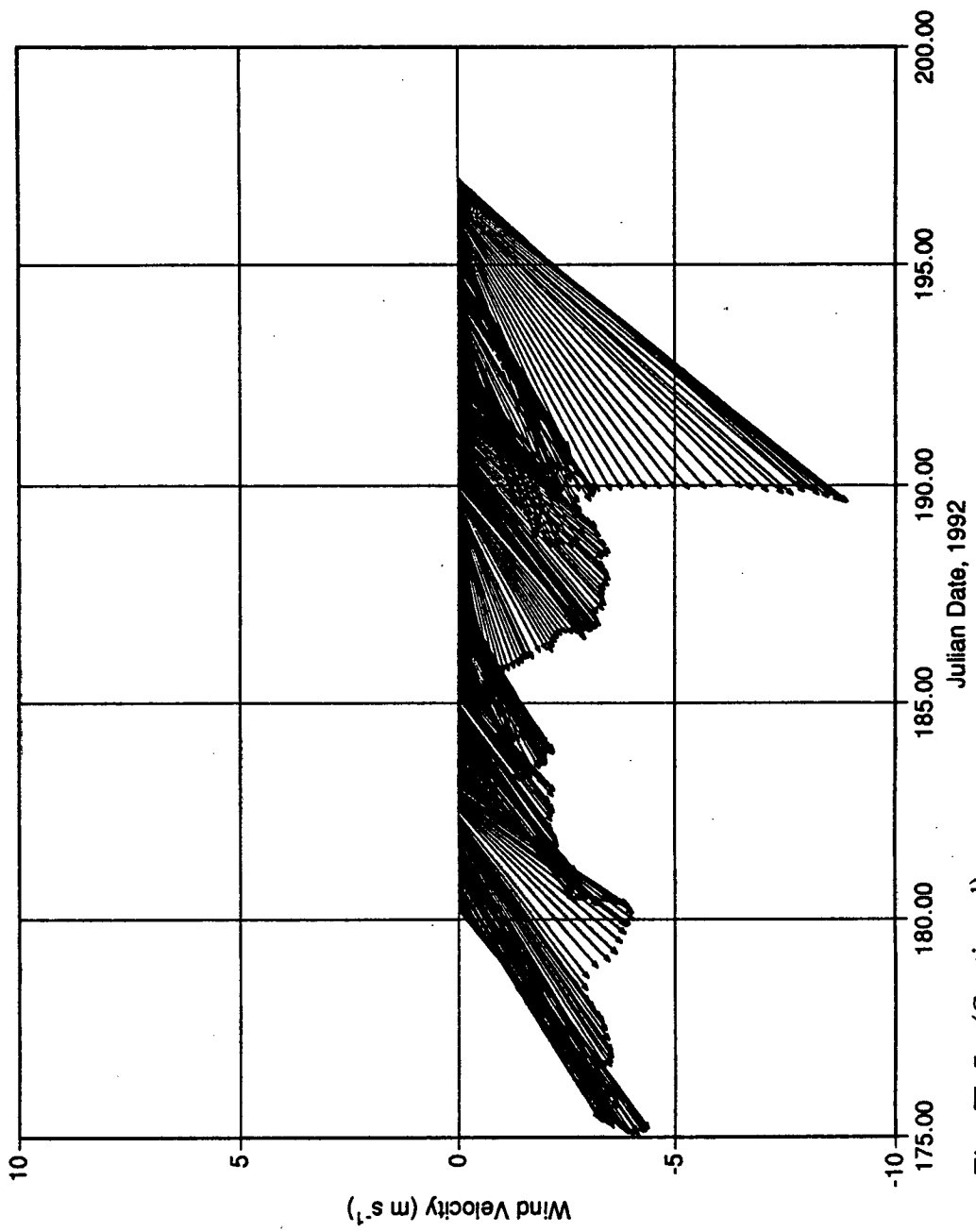


Fig. III-5g (Continued)

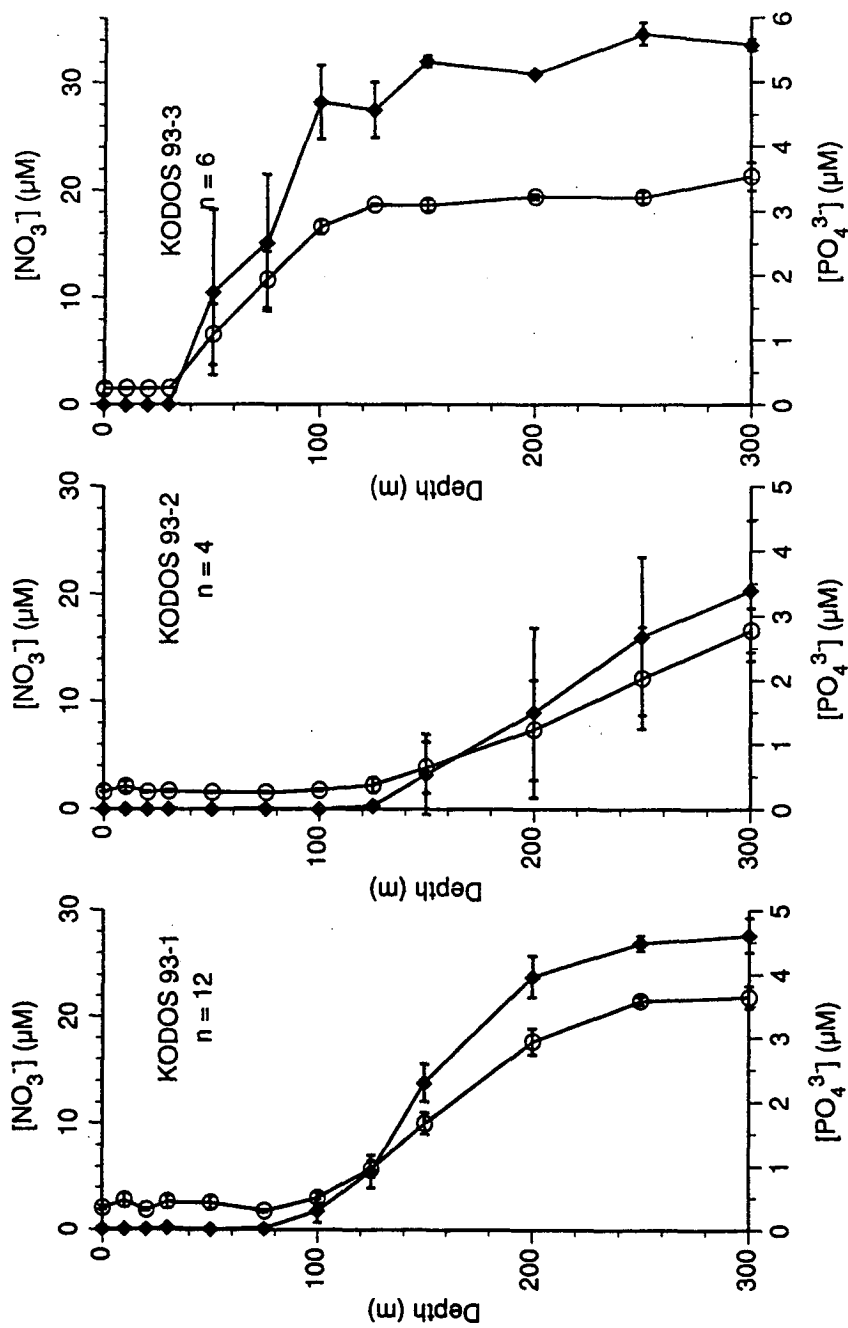


Fig. III-6. Vertical distribution of nitrate and phosphate during the KODOS 93 cruises. Values were averaged for each cruise. Error bars are standard error of the mean.

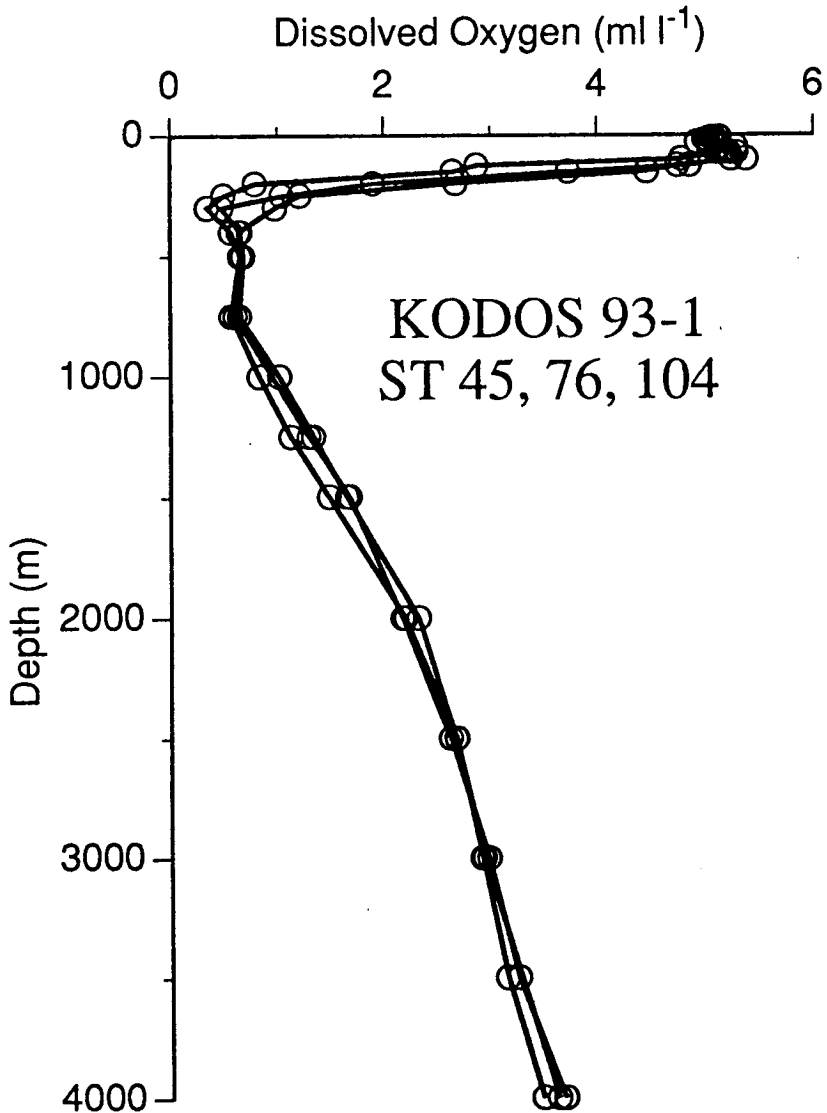


Fig. III-7. Vertical distribution of D.O. (dissolved oxygen) measured with Winkler method during the KODOS 93-1 cruise. Discrete water samples were taken with Niskin bottles attached to a rosette sampler.

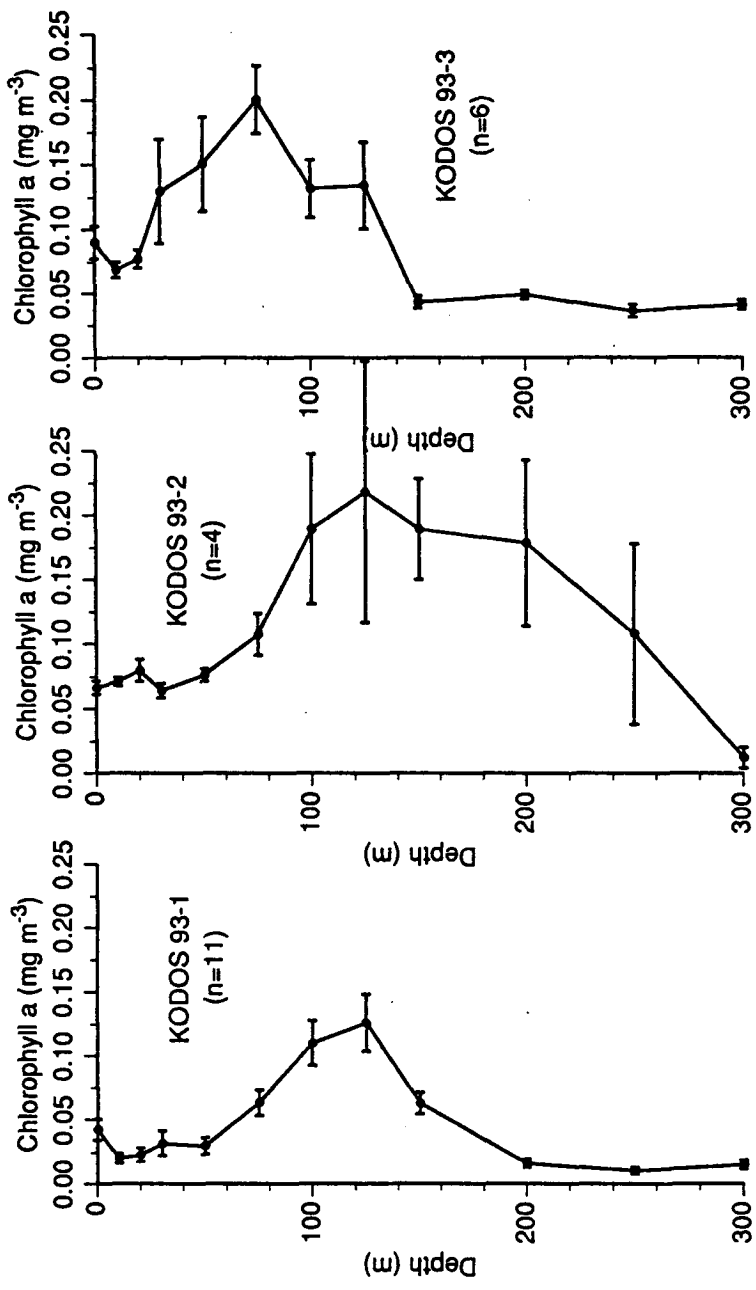


Fig. III-8. Vertical distribution of chlorophyll a concentration during the KODOS 93 cruises. (Same as Fig. III-8).

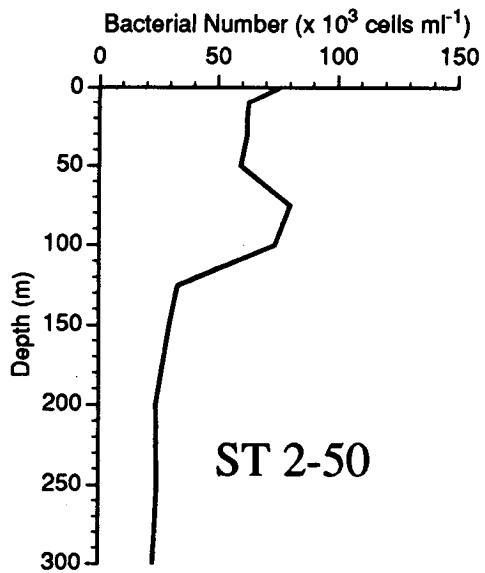
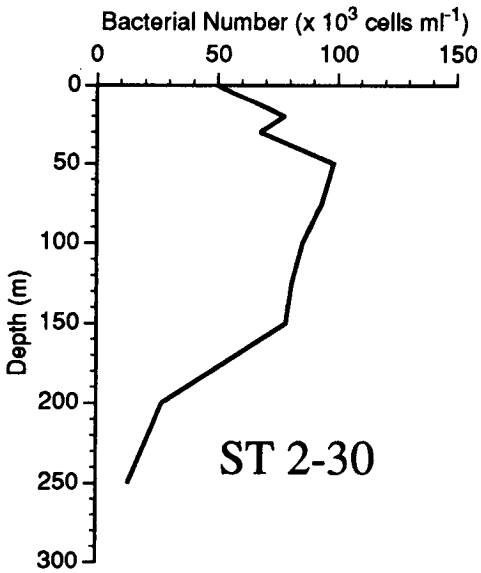
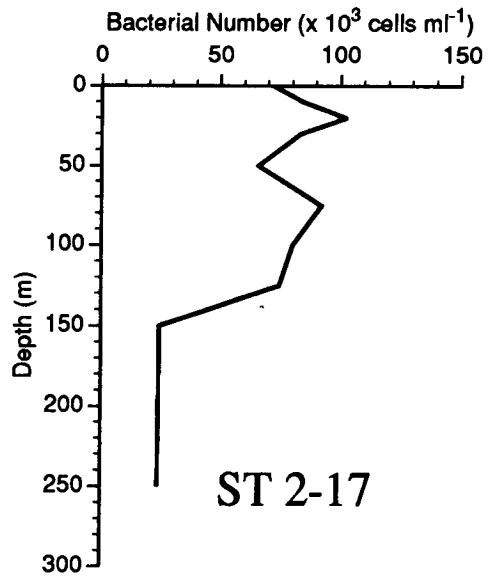
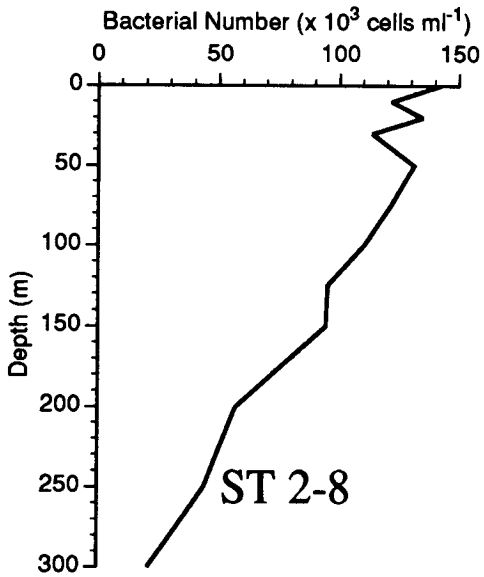


Fig. III-9. Vertical distribution of bacterial cell number in the KODOS 93-2 area.

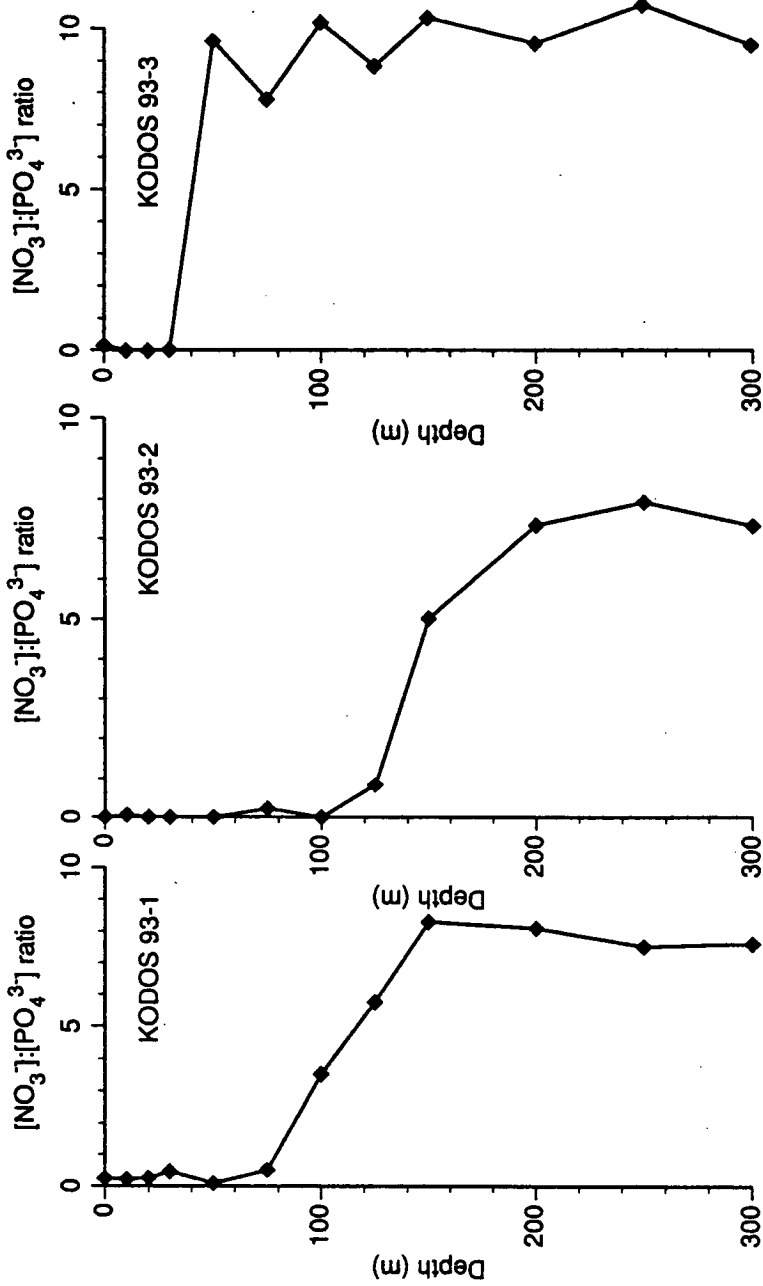


Fig. III Fig. III-10. Vertical distribution of  $\text{NO}_3:\text{PO}_4$  in the KODOS 93 area.

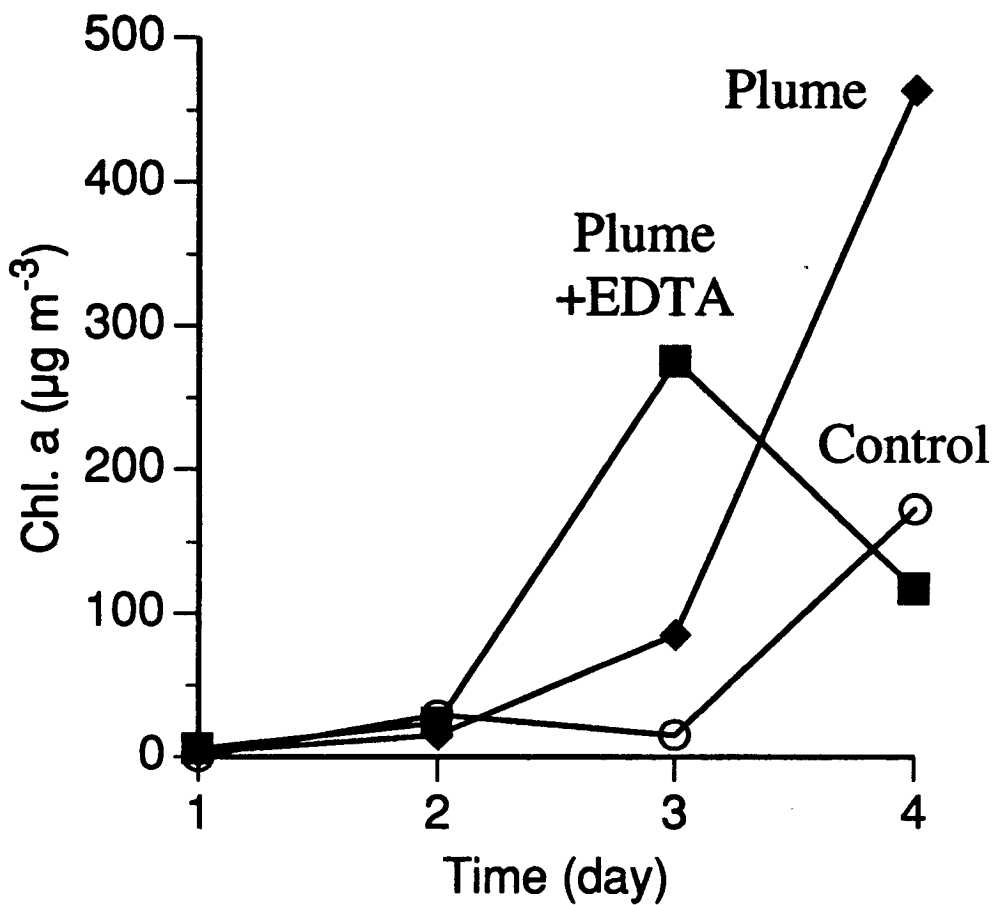


Fig. III-11. Effects of bottom sediment plume and a chelator (EDTA) on chlorophyll concentration during a 4 day incubation during the BIE 93 cruise.

### Geochemical Cycle of Manganese in the Marine Environment

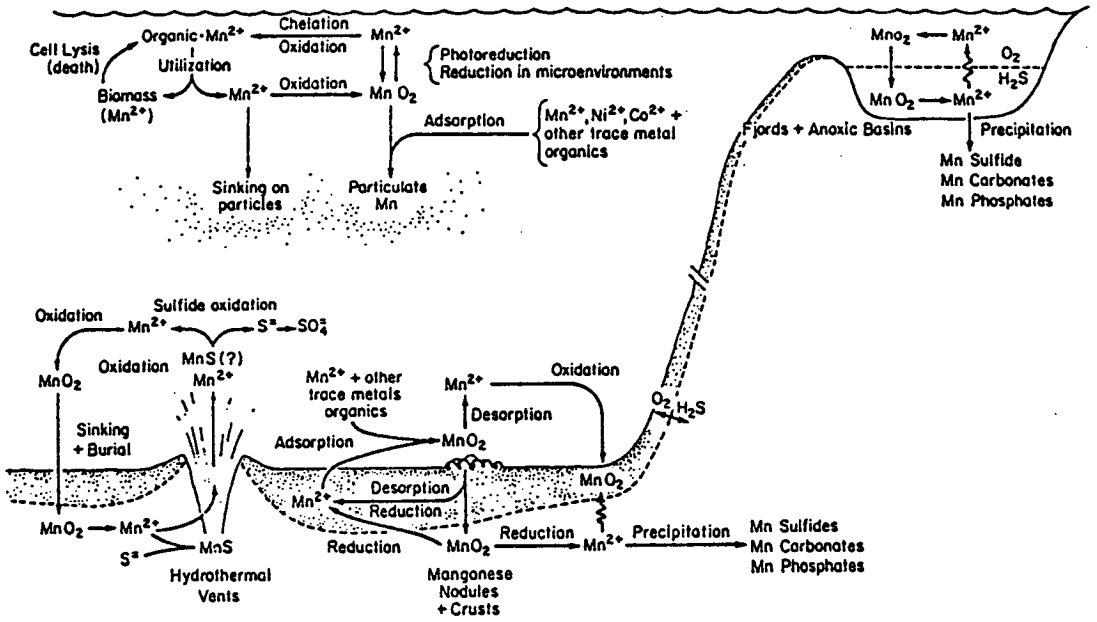


Fig. III-12. The geochemical cycle of manganese in the marine environment (after Tebo, 1983).





Fig. III-13. Photograph showing a free living holothuroid at st. 83, KODOS 93-1 area.

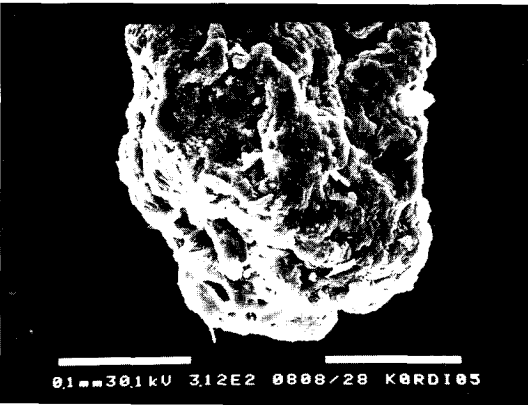
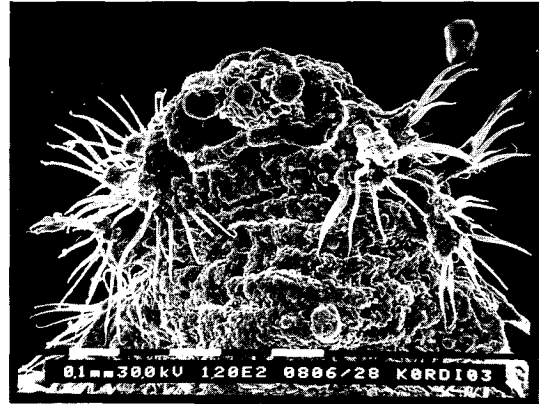
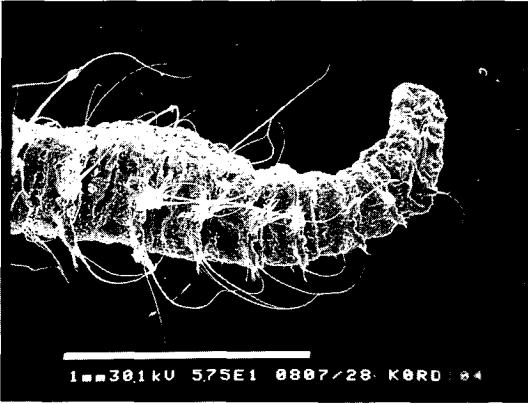
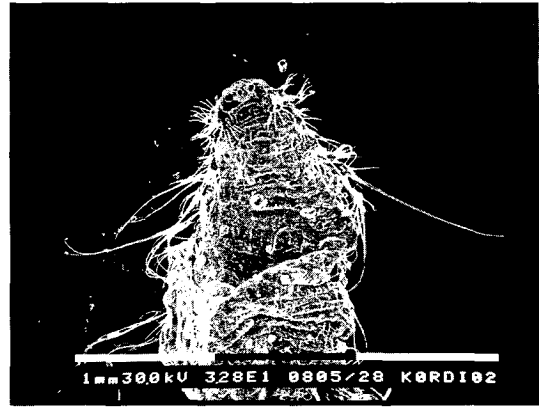
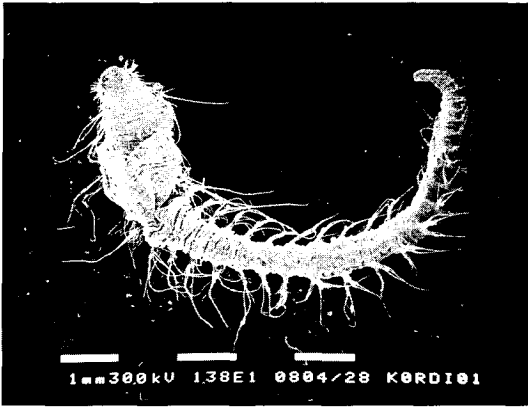


Fig. III-14. SEM photographs of polychaete worm, showing the entire body, prostomium, and pysidium.

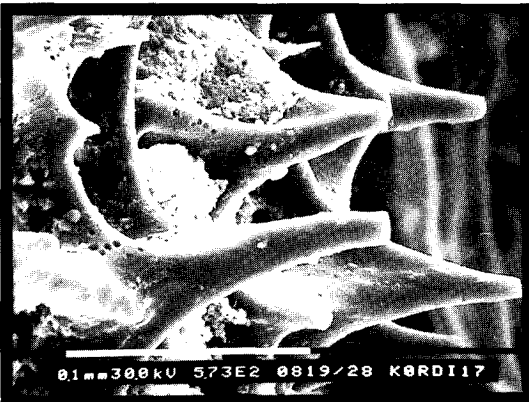
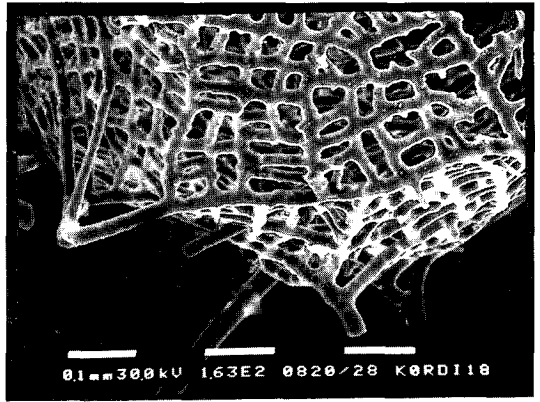
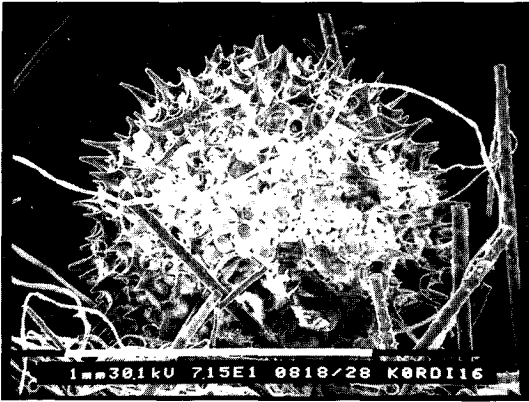
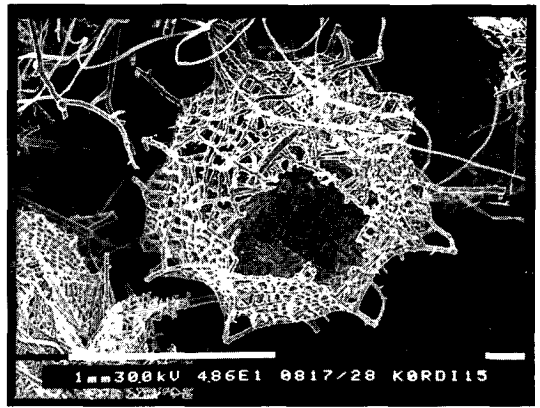
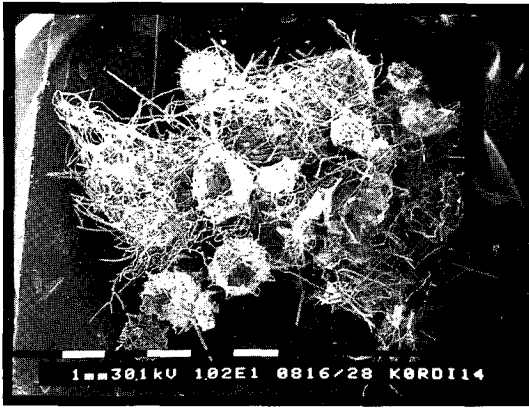


Fig. III-15. SEM photographs of aggregated radiolarians showing the body structure.

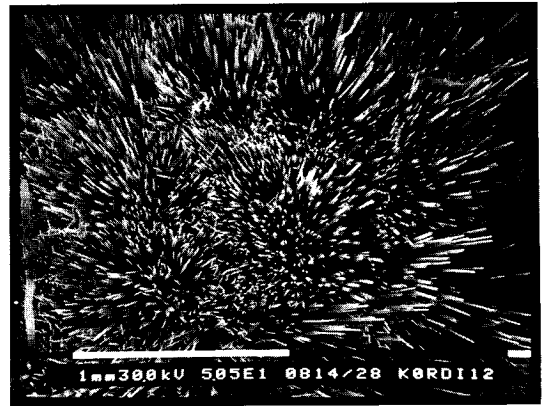
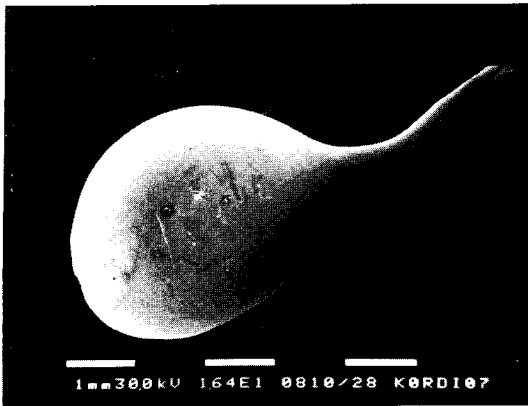


Fig. III-16. SEM photographs of biogenic aggregates of bacteria (?) (left) and echinoid organisms (right) on a manganese nodule collected in the KODOS 91 area.

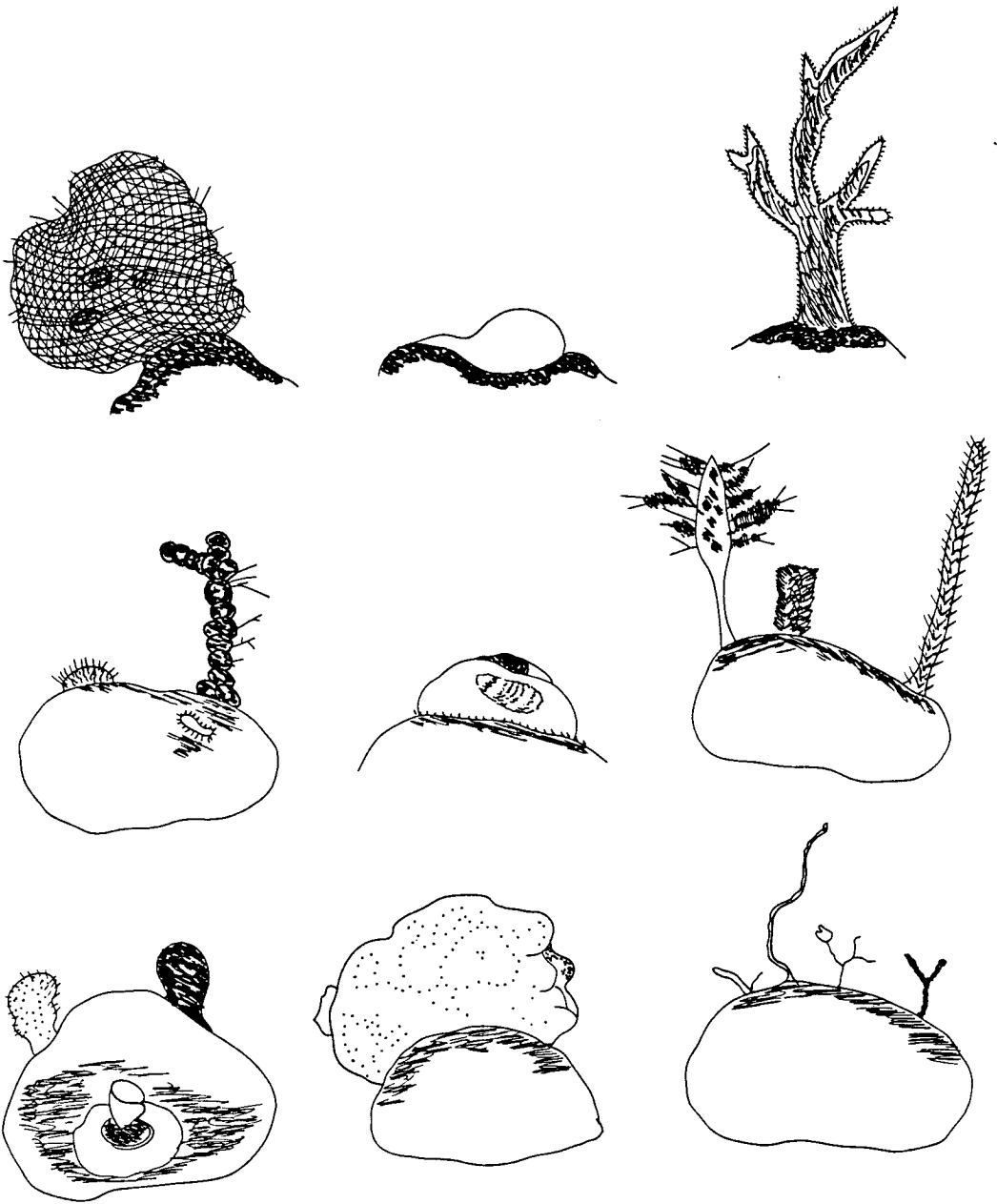


Fig. III-17. Biogenic structures and sessile animals on manganese nodule collected in the KODOS 93 area.

## PLATE I

- a. *Coscinodiscus nodulifer* valve view ×200
- b. *Coscinodiscus nodulifer* girdle view ×200
- c. *Planktoniella sol* × 200
- d. *Planktoniella sol* valve view ×400
- e. *Prorocentrum compressum* ×200
- f. *Gonyaulax heighleii* ×200
- g. *Ceratium limulus* ×400
- h. *Ceratium contortum* ×100

## PLATE II

- i. *Nitzschia* sp. ×200
- j. *Podolampas bipes* ×200
- k. *Ceratium Kofoid* ×200
- l. *Amphisolenia palmata* ×100
- m. *Peridinium pellucidum* ×200
- n. *Dinophysis* sp. ×100
- o. *Podolampas spinifera* ×100
- p. *Heteraulacus polyedricus* ×400
- q. *Gonyaulax* sp. ×100

PLATE I

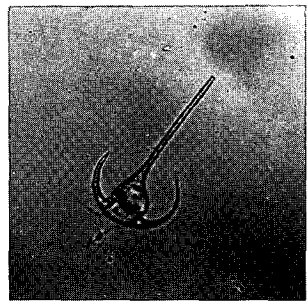
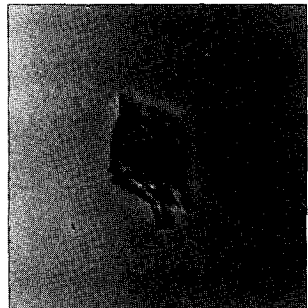
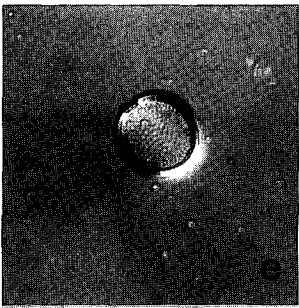
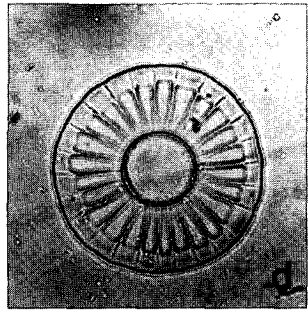
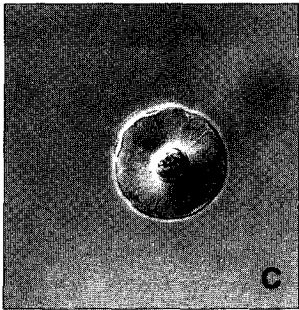
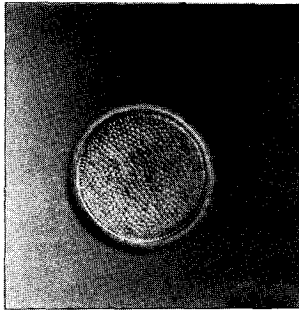


Plate III-1. Microscopic observation of phytoplankton species in the KODOS 94-1 area.

PLATE II

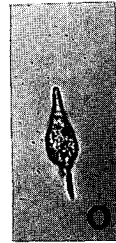
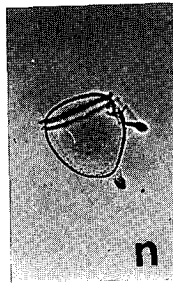
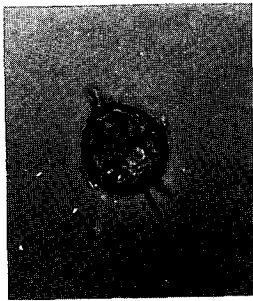
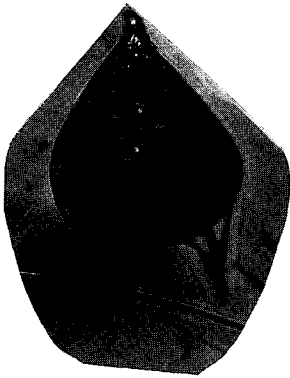


Plate III-2. Microscopic observation of phytoplankton species in the KODOS 94-1 area.



Appendix III-1. Abundance of macrobenthos, sampling depth and density of manganese nodules obtained in the KODOS 93 areas

KODOS 93-1

Station	No. of Sp.	No. of Inds.	Depth(M)	Mn Nodule Density(%)
15	1	1	4829	25.31
17	1	1	4874	11.46
23	2	**	4843	30.94
50	1	1	5153	75.00
57	1	1	5257	82.29
58	1	1	5315	26.56
65	1	1	4825	20.94
66	1	1	4943	29.17
67	1	1	4853	25.52
70	1	1	4888	41.15
73	1	1	4908	15.63
74	2	2	4823	21.88
75	3	3	4915	36.72
77	1	1	4962	50.00
80	1	1	5053	28.13
86	1	1	4962	15.10
87	3	3	4911	11.46
88	1	3	4859	25.48
89	1	1	4803	11.46
93	1	1	4506	43.75
95	1	1	4530	31.77
97	1	1	4550	21.35
98	1	1	4617	27.08
99	1	*	4868	46.35
100	1	1	4793	18.75
106	1	1	4529	40.10
107	2	2	4441	33.33
110	1	1	4324	42.00
111	1	1	4308	28.65
112	2	2	4357	20.83
113	2	2	4434	18.75
114	1	1	4470	42.19
122	1	1	4493	58.89
124	1	*		
126	3	3*	4140	30.21
127	1	1	4232	14.84
131	1	*	3897	22.66
134	2	2	4183	29.69

## KODOS 93-1

Station	No. of Sp.	No. of Inds.	Depth(M)	Mn Nodule Density(%)
141	1	1	4262	27.60
143	1	1	4274	12.50
149	1	1	4093	17.97
150	4	4	4265	39.06
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>15</b>		<b>461.65</b>

## KODOS 93-2

9	2	1*	5015	44.63
13	3	2*	4843	63.92
17	1	3	4836	14.74
21	1	1	5137	31.76
23	2	2	4985	51.61
25	1	1	4874	9.61
26	1	1		50.93
30	1	1	4846	48.88
35	1	1	4899	45.95
36	2	2	4853	13.79
47	1	*	4447	48.00
48	1	1		37.83
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>15</b>		<b>461.65</b>

## KODOS 93-3

1	3	4	4471	
2	3	3	4761	
3	1	1	4486	
5	3	4	4688	
6	1	1	4568	
7	3	3	4530	
8	1	1	4573	
9	3	3	4591	
13	3	3	4559	
14	4	6	4600	
15	4	3*	4558	
16	3	5	4477	
18	1	1	4661	

## KODOS 93-3

Station	No. of Sp.	No. of Inds.	Depth(M)	Mn Nodule Density(%)
21	1	1	4828	
22	4	3*		
23	3	4	4805	
24	6	10	4731	
25	2	1*		
26	4	4	4720	
27	2	3	4760	
28	2	2	4888	
29	1	2	4994	
30	1	1	4955	
31	1	1	5031	
36	1	1		
37	2	1*	5091	
43	2	2	4885	
44	1	1		
47	1	1	4858	
48	1	1		
49	4	4	4900	
50	2	1*	4837	
51	1	1	4821	
52	1	*	4787	
55	4	2***	4794	
Total	35	85		