

외나로도 주변해역 퇴적물의 지화학적 특성과 저서 생물상

현 상 민 · 최 진 우 · 신 경 순 · 장 만

한국해양연구원 장목분원

(2001년 12월 10일 접수; 2002년 1월 28일 채택)

Geochemical characteristics and benthic faunal facies in the sediments around the Oenaro Island, southern part of Korea

Sang-min Hyun, Jin-Woo Choi, Kyong-soon Shin and Man Chang

Jangmok Marine Station, Korea Ocean Research and Development

Institute (KORDI), Koje 656-830, KOREA

(Manuscript received 10 December, 2001; accepted 28 January, 2002)

In order to evaluate the relationship between geochemical characteristics and benthic facies of the sediments from the Oenaro Island where red tide proliferation is first observed every year including this year, surface and short multiple core sediment samples were analyzed in terms of geochemical and benthic facies variation.

The contents of organic carbon, carbonate, and sulfide gas were relatively low. The variation in C/N ratios, which indicate nature of organic carbon, suggested that the organic carbon recorded in the study area is composed of mixtures of marine and terrigenous organic matters. The concentration of minor elements found at the surface and multiple core sediment samples were also low as well as the enrichment factors(Ef) for the seven heavy metals indicated that the sediment of this area is not polluted significantly.

The macrobenthic faunal community comprised 61 species, and their mean density was 708 ind./m². Polychaete worms were major taxa of this benthic community. A crustacean amphipod, *Melita* sp. was the most abundant species accounted for 20.7% of total abundance, and the small polychaetes such as *Heteromastus filiformis*, *Paralacydonia poradoxa*, *Magelona japonica*, and *Sigambra tentaculata* were the next dominant species. The macrobenthos around the Oenaro Island were more diverse and abundant than that in Gamak Bay. The benthic communities in the study area sustained somewhat different species composition based on the cluster analysis and the MDS ordination. The benthic community health condition at three stations seemed to be unbalanced, and slightly polluted based on the biological index such as BPI and BC.

There was no clear relationship between the geochemistry characteristic and the benthic faunal facies attributed by the micro-algal blooms in this coastal area.

Key word : Oenaro Island, red tide, geochemical, benthic faunal facies

1. 서 론

전라남도 고흥군 남해연안에 위치하는 나로도 주변해역은 1995년 이후 매년 유해성 적조가 가장 먼저 발생하는 지역으로 보고되고 있다.^{1,2)} 이 지역이

유해성 적조가 가장 먼저 나타나는지 그 이유에 대한 연구결과는 현재까지 나오지 않았지만, 한번 적조가 발생하면 그 피해가 인근어민이나 어장에 막대한 경제적 손실을 가져오기 때문에 적조의 발생과 확산 및 소멸 등에 관한 사항은 매년 관심의 대상이 되고 있다. 이러한 이유로 인하여 적조발생시기를 기점으로 현장관측이 수시로 진행되고 있으며, 이 연구가 수행된 외나로도 주변 지역에 대해서도

Corresponding Author : Sang-min Hyun, Jangmok Marine Station, Korea Ocean Research and Development Institute (KORDI), Koje 656-830, Korea
Phone : +82-55-639-8737
E-mail : smhyun@kordi.re.kr

그 중요성이 인식되어 이미 몇 개의 연구가 수행되었다.³⁻⁵⁾

유기물 및 중금속 등에 의한 해양오염은 저서생물을 포함한 해양생태 뿐만 아니라 크게는 인간의 생활과 직·간접적으로 연결되는 중요한 사항으로 받아들여지고 있다. 해양환경을 지배하는 인자 중에서 물리·화학적 요인은 계절변화와 같이 유동적이어서 정기적인 관측이나 계속적인 모니터링을 필요로 한다. 반면, 퇴적물은 저질환경과 수질오염 및 그 저질에 서식하는 저서생물 뿐만 아니라 환경변화를 포함하여 만약 어떤 지역이 오염이 되었다면 그에 상응하는 오염의 정도를 최종적으로 기록하고 있으며, 또한 과거의 변화를 포함하고 있다는 점에서 매우 중요하다. 이 연구가 수행된 외나로도 지역에 대한 기존의 연구는 물리·화학적 측면³⁾과 식물플랑크톤인 유해성 적조생물의 시공간적 변화^{4,5)}가 있을 뿐 지화학적인 연구나 퇴적물에 서식하는 저서생물상의 변화와 관련된 연구는 이루어지지 않았다.

따라서 이 연구에서는 외나로도 지역에 대한 표층퇴적물 및 주상시료를 이용하여 먼저 퇴적물속의 지화학적 특성을 밝히고, 대형 저서동물의 군집구조 특성을 밝히는 목적으로 수행되었다. 또한 저서환경을 평가하기 위하여 지화학적 특성과 benthic pollution index(BPI)등을 조사하고 양자간의 관계 및 적조발생과의 상관관계를 조사하고자 이 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2001년 8월말에서 9월 초순에 거쳐 남해역에 광범위한 적조가 발생하였다. 이 연구의 재료는 적조가 발생하여 소멸하기 직전인 동년 9월 7일에 남해 외나로도 지역에서의 현장조사를 통하여 시료를 채취하였다(Fig. 1). 3개의 정점에 대한 표층퇴적물을 그랩 채니기로 채취하고, 한 개의 정점(St 1)에 대해서는 다중 주상시료채취기(multiple core)를 이용하여 주상시료를 채취하였다(Fig. 2). 표층퇴적물과 주상시료를 채취하기 전에 현장에서 수온, 염분 및 용존산소 등 각종 기초자료도 얻어졌다(Table 1). 채취된 퇴적물에 대한 자세한 육안관찰 결과 이 퇴적물은 점토질의 세립질 퇴적물로 판단되었다. 표층시료와 주상시료는 냉동 보관하여 실험실로 옮긴 후 2cm 간격으로 절개하여 유기물, 탄산염, 황화 수소량 및 주요원소와 미량원소를 분석하였다.

유기물 분석은 한국해양연구원의 장목분원이 보유하고 있는 CHNS 분석기(EA1112)로 분석하였다. 퇴적물 내에 포함된 유기물 측정은 퇴적물을 100°C에서 24시간 이상 건조시킨 다음 곱게 분말화 하여

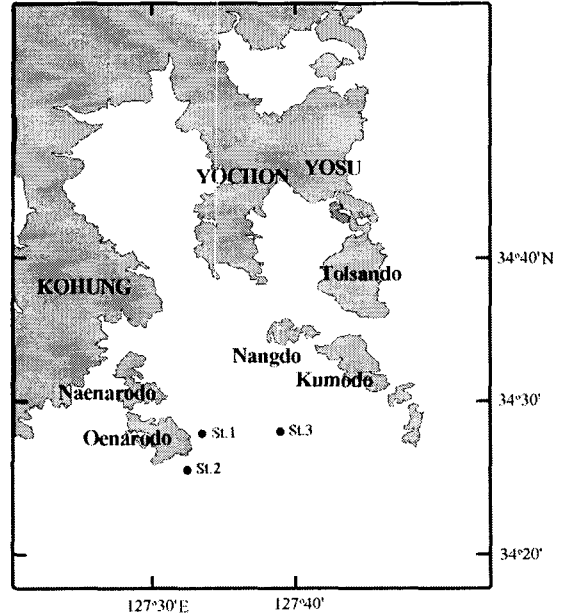


Fig. 1. Map showing study area and sampling sites in the south coast of Korea.

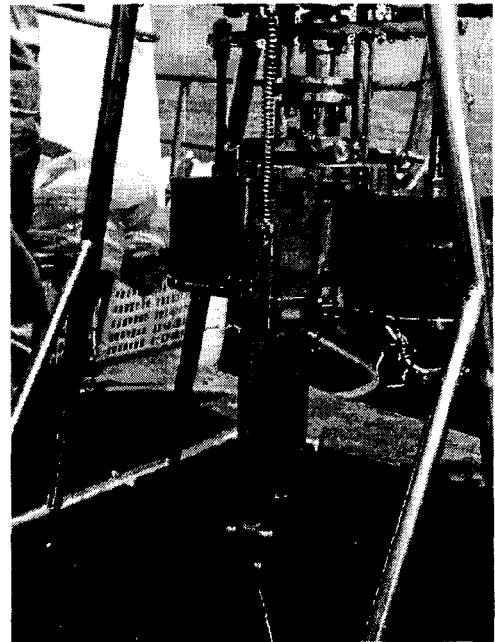


Fig. 2. Multiple core and caught sediment.

총 탄소함량(TC)을 측정하였다. 총 유기탄소함량(TOC)은 총 탄소를 측정한 다음, 같은 시료에 대하여 1N의 염산으로 무기탄소를 용해시킨 후 측정하였다. 탄산염 함량은 총 탄소와 총 유기탄소와의 함

량차이로 계산하였으며 계산식은 다음과 같다.

$$\text{탄산염함량(\%)} = (\text{총 탄소(\%)} - \text{총 유기탄소(\%)}) \times 8.33$$

Table 1. Sample location and their water depth

	Latitude	Longitude	Water depth (m)
Station 1	34° 28'308	127° 31'989	10
Station 2	34° 24'248	127° 31'949	25
Station 3	34° 28'084	127° 37'047	16
Multiple core	34° 28'308	127° 31'989	

Table 1. (Continued) dissolved oxygen and their saturations

	Depth (m)	D.O (mg/L)	Sat. (%)
Station 1	0	7.00	103.70
	2	7.02	103.90
	5	6.83	100.50
	7	6.78	98.80
	10	6.67	98.80
Station 2	0	7.00	103.60
	5	6.98	102.80
	10	6.80	99.90
	15	6.82	100.00
	20	6.78	99.80
Station 3	0	7.40	109.70
	5	7.24	106.40
	10	6.69	102.10
	15	6.87	100.70

퇴적물속에 포함된 황화수소량(H₂S)의 함량은 검지관법을 이용하여 측정하였다. 일정량의 퇴적물을 황화수소 발생기에 넣고 18 N의 황산을 가스발생기에 첨가하여 발생하는 황화수소량을 가스채취기를 이용하여 직접 측정하였다. 이 연구에서는 건조시료와 습식시료에 대해 2번씩 황화수소량을 측정한 후, 다음과 같은 보정법으로 계산하였다.

퇴적물중의 황화수소량 (ppm or mg/g):

$$S(\text{mg}) = \text{검지관에 검출된 양(환산값)} \times S2 / (S1 \times S3)$$

S1: H₂S 발생용 습식값, S2: 건조용 청평값,

S3: 중량측정 값

주상시료 및 표층퇴적물에 대한 주요원소 및 미량원소는 한국기초과학지원 연구원 부산 분소에서 유도결합 플라즈마 질량분석기 (Inductively Coupled Plasma, ICP)를 이용하여 분석되었다. 이들 주요원소 및 중금속에 대한 분석오차는 약 ±10% 정도,

유기물에 대한 분석오차는 약 ±5% 이내인 것으로 나타났다.

저서생물의 채집은 van Veen grab(채집면적이 0.1m²)을 사용하여 정점당 2회씩 퇴적물을 채취한 후 망목크기가 1mm인 체에 걸러 남은 것을 해수로 중화된 10% 포르말린에 고정하였다. 고정된 저서생물시료는 실험실에서 주요 분류군으로 선별한 후 습중량을 측정하였고, 각 분류군별로 가능한 중수준까지 동정하고 계수하였다.^{6,7)}

군집지수의 계산식은 다음과 같다.

$$\text{종다양성지수}^{8)}: H' = - \sum_{i=1}^S P_i \times \ln(P_i)$$

P_i : i번째 종의 점유율 (n_i/N), S : 출현종수,

n_i : i번째 종의 개체수, N : 전체군집의 개체수

$$\text{종풍부도지수}^{9)}: R = (S-1)/\ln(N)$$

$$\text{균등도지수}^{10)}: J = \frac{H'}{\ln(S)}$$

$$\text{우점도지수}: D = \frac{n_1 + n_2}{N}$$

n₁, n₂ : 첫 번째 및 두 번째 우점종의 개체수

N : 총 개체수

집괴분석에는 Bray-Curtis의 유사도지수를 구하여 가중평균결합법으로 정점에 대한 수지도를 작성하였다. 또한 출현 개체 수 자료를 이용하여 MDS (Non-metric multidimensional scaling) 배열법으로 군집분석을 하였다.

유기물 오염에 반응하는 정도는 섭식유형에 따른다는 가정하에 우점종을 중심으로 저서동물을 4개군으로 나누고 섭식형 구조를 0~100사이의 지수로 나타내어 정점간, 지역간, 시공간적인 비교가 가능하도록 식성지수(Infaunal trophic index : ITI)를 구하였다. 식성지수에 사용되는 종은 지수생물이라 하는데, 주로 각 지역의 1~3% 이상 차지하는 우점종을 선택하였다.¹¹⁾ 선택된 지수생물은 섭식형과 유기물에 대한 반응정도를 가지고 4개군의 하나에 할당시켰다. 유기물오염의 영향으로 환경에 저해가 생긴 후에는 군집의 조성이 달라지고 천이가 일어나게 되는데, 섭식형과 무관하게 기회종이 출현하게 된다. 기회종은 유기물 오염에 따른 환경교란의 지시종으로서 역할을 한다. 따라서 이 연구에서는 Word¹¹⁾의 섭식형 구분에 지시종으로 선택된 우점종의 섭식형과 천이형으로 고려하여 다음과 같이 각 그룹별 구성원에 할당하였다. 즉, 제1군에는 여과식자와 육식자를, 제2군에는 표층퇴적물식자를, 제3군에는 표층하퇴적물식자를, 제4군에는 오염지시종 또는 기회종을 할당하였다. 이렇게 구해진 지수를 서서오염지수

로 불린다.¹²⁾

$$\text{저서오염지수(BPI)} = \left[1 - \frac{a \times n_1 + b \times n_2 + c \times n_3 + d \times n_4}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} \right] \times 100$$

(n_1 = 여과식자 및 육식자의 출현량 (오염부하에 민감하게 반응하여 감소하는 종들); n_2 = 표층퇴적물식자의 출현량 (유기물오염에 약간의 증가를 보이는 종들); n_3 = 표층하퇴적물식자의 출현량 (유기물오염에 다소 높은 개체군 증가를 보이는 종들); n_4 = 오염지시종 또는 기회종의 출현량 (유기물오염이 심하여 다른 종들이 감소하거나 없어져도 잘 적응하여 매우 높은 개체군 밀도를 보이는 종); a, b, c, d = 섭식군의 가중치로서 대개 등차수열로 부여되며, 본 연구에서는 $a=0, b=1, c=2, d=3$ 을 적용하였다.

저서오염지수(BPI)값의 범위는 다음과 같으며, BPI = 0이면 저서균집이 모두 오염지시종 또는 기회종으로 구성되었음을 나타내며, BPI = 100이면 저서동물군집이 모두 여과식자와 육식자만으로 구성되었음을 나타낸다. 따라서 저서오염지수(BPI) 값이 작을수록 유기물의 공급이 많음을 나타내고, 그것을 이용하는 표층하퇴적물식자나 유기물오염에 적응한 오염지시종이나 기회종이 우점함을 시사한다.

한편 생물계수 (Biotic coefficient, BC)를 구하는 식은 다음과 같으며, 저서동물을 증가하는 stress구배에 반응하는 민감도에 따라 반응하는 5개의 기능군 (functional group)으로 구분하였다. BC값을 계산하는 과정에서 각 기능군에 0에서 6.0까지 1.5씩 증가하는 등차수열의 가산치를 주었다. 따라서 높은 값을 가질수록 유기물오염에 민감하게 반응하는 군이 많음을, 0에 가까운 값일수록 유기물 오염에 민감하게 반응하여 개체군 감소를 보이는 정상환경에서 서식하는 동물이 많음을 나타내도록 하였다. 한편 저서환경이 무생물을 보일 경우에는 BC값을 7.0으로 할당하였다.

$$BC = [(0 \times \% GI) + (1.5 \times \% GII) + (3 \times \% GIII) + (4.5 \times \% GIV) + (6 \times \% GV)] / 100$$

(여기서 BC = 0~6 ; BC = 7(azoic))

각 그룹의 특징은 다음과 같다.

group 1 (GI) : 유기물 증가에 매우 민감한 종으로 정상환경에서만 출현 (특정 육식자, 서관을 가진 퇴적물 식자)

group 2 (GII) : 유기물 증가에 둔감한 종으로 정상상태에서 낮은 밀도를 가진

종, 여과식자, 일반적인 육식자, 부식자

group 3 (GIII) : 유기물 증가에 내성이 강한 종, 표층퇴적물 식자 (특히, 서관을 가진 spionids)

group 4 (GIV) : 2차 기회종, 주로 소형 갯지렁이류, 표층하퇴적물식자 cirratulidae

group 5 (GV) : 1차 기회종 (pronounced unbalanced 환경의 종) 환원상태의 퇴적물에서 번성하는 퇴적물 식자

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 분석 (TOC, CaCO₃ 및 C/N ratios)

3개의 정점에서 얻어진 표층퇴적물과 1개의 정점에서 얻어진 주상시료 퇴적물에 대한 유기물 분석 결과는 Fig. 3에 표시하였다. 표층퇴적물과 주상시료 퇴적물에 대한 총 유기탄소(TOC)를 측정된 결과 유기탄소의 최고값은 주상시료의 심도 25 cm에서 약 0.93%로 나타나고 최저값은 주상시료 최상부에서 0.67%로 나타났다(평균 0.77%). 또한 탄산염 함량의 최고값은 주상시료 최상부에서 3.29%, 최소값은 심도 11cm에서 약 0.16%로 zms 폭의 함량변화를 보이고 있다. 3개의 정점에 대한 표층퇴적물의 TOC는 0.6~0.8%로 주상시료에서 얻어진 값의 중간 정도를 나타내고 있으며 표층퇴적물의 탄산염 함량도 주상시료의 중간값을 보이기는 하나 St 1에서 1.15%, St 2에서 2.63%, St 3에서 2.09%를 보이고 있어 표층퇴적물에 대한 탄산염 함량이 주상시료에서보다 높게 나타나는 특징을 보이고 있다(Fig. 3).

해저퇴적물중에 포함된 유기탄소의 양을 조절하는 요인으로는 표층에서의 생물생산 정도, 유기탄소의 보존증가 또는 인근 대륙에서부터의 대륙기원 유기탄소 공급 등을 들 수 있다. 또한 퇴적물 속에 보존된 유기물의 특성을 지시하는 총 유기탄소에 대한 총 질소(TN)의 비(C/N ratio)는 여러 형태의 유기물의 특성을 밝힐 뿐만 아니라 유기물의 기원을 구분하는데 이용된다.^{13~16)} 일반적으로 해양환경에서 생물생산에 의해 생성된 유기물은 C/N비가 10 이하를 보이고, 인근 대륙에서 유입된 유기물인 경우에는 C/N비가 10이상 높게 나타난다.^{14~15)} 이 연구결과 나타난 유기물의 특성에서 C/N비는 약 5-12 사이에서 변화하고 있으며 몇 개의 심도에서 10 이상을 보이고 있다. 따라서 이 연구결과 나타난 C/N비로 유기물의 특성을 판단한다면 이 연구지역의 퇴적물중의 유기물은 해양환경에서 해양생물에 의해 생성된 유기물과 인근 육지에서 유입된 유기물이 혼재되어 있는 것으로 해석 할 수 있다(Fig. 3).

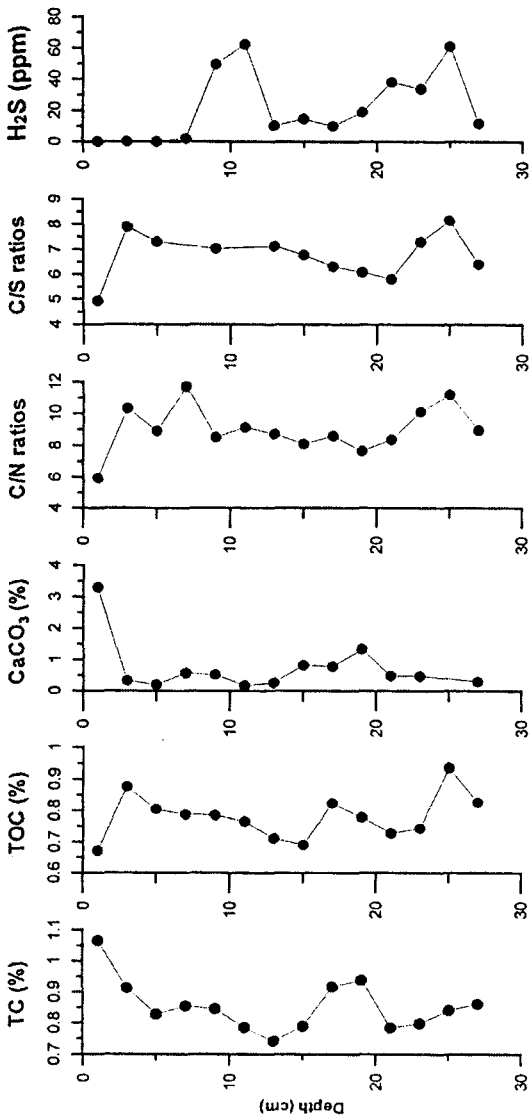


Fig. 3. Vertical profiles of total carbon, total organic carbon, calcium carbonate, C/N ratio, C/S ratio and H₂S gas contents.

외나로도 주변 해역은 수심이 얕고, 인근 주변으로부터 무기물과 유기물 등 여러 종류의 영양염이 공급되기 쉬운 지역으로 높은 퇴적물과 높은 생물생산이 기대되는 지역이며, 따라서 퇴적물 중에는 높은 유기탄소의 값이 예상되는 지역이다. 이 연구에 이용된 퇴적물이 점토질 퇴적물임을 감안한다면 연구결과 나타난 유기탄소의 함량은 우리나라 주변의 다른 해역에서 나타나는 유기탄소의 함량과 비교해 볼 때 많이 나타나고 있지는 않다고 생각된다.²⁴⁾ 비록 C/N비에 의한다면 간헐적인 대륙기원

유기물이 공급되고 있음은 확인되었으나 유기물 오염 등과 같이 심각하게 오염된 것으로는 판단하기 어렵다. 앞으로 이 지역에서 퇴적물중의 유기탄소 함량이 어떠한 해양학적 혹은 지구과학적 요인에 의해 조절되고 있는지는 좀 더 자세한 조사를 필요로 한다.

3.2. C/S ratios 및 퇴적물중의 황화수소(H₂S) 양
총 유기탄소에 대한 총 황량 (C/S ratio)은 퇴적환경을 지시하는 것으로 보고되어 있다. 따라서 C/S 비가 수직적으로 혹은 공간적으로 다르다는 것은 퇴적환경이 서로 다르다는 것을 의미한다. 일반적인 해양환경에서는 유기탄소함량과 총황의 함량은 정의 상관관계 (positive relationship)를 가지며 거의 일정한 C/S비 (약 2.8)를 보인다.¹⁷⁻²⁰⁾

이 연구에서의 C/S 값은 Fig. 3에 나타내었듯이 일반적인 해양환경에서 퇴적된 퇴적물에서 나타나는 C/S 값 (약 2.8) 보다 훨씬 큰 약 5-8의 범위에서 나타나고 있다. 퇴적물 중에서 C/S 비가 크게 나타난다는 것은 첫째로, 높은 TOC가 공급되어 축적되었거나 pyrite형성이 극히 제한되었다는 것으로 설명이 가능하다.¹⁷⁾ Fig. 3에서 C/S비가 8정도로 높게 나타나는 것은 같은 지점에서 TOC값이 상대적으로 높기 때문이다. 둘째로, 육원성 TOC가 갑자기 유입되었고, 상응하여 박테리아 효소가 부족하게 되어 해양성 박테리아에 의해 유기물이 충분히 분해되지 않았을 것으로 생각된다.¹⁸⁾ 간단히 설명하면 박테리아에 의한 유기탄소의 섭식 또는 혐기성 환경에서의 pyrite의 형성 등으로 C/S비의 변화를 설명할 수 있다. C/S비의 변화는 수계내에서 황화수소가 존재하느냐에 따라서도 영향받는 것으로 해석되며, 담수의 유입 즉, 염분도(salinity)에 의해서도 C/S값이 변화하게 된다. 즉, 수계내에 황화수소가 존재하게되면 잉여의 sulfide가 iron sulfide를 형성하게 되고 이러한 이유에 의해서 C/S값의 변화가 일어난다.

C/S값의 변화에 의해 퇴적환경 혹은 저질의 건강상태를 보다 정확하게 검토하기 위해서 퇴적물중의 황화수소양(H₂S)을 측정하였다. 퇴적물중의 황화수소량은 유기물 함량 및 화학적 산소요구량(COD) 등과 더불어 퇴적물의 건강상태를 평가할 수 있는 가장 대표적인 요소로서 자주 사용되고 있다. 표층 퇴적물 및 주상시료 퇴적물에 대한 황화수소양을 측정한 결과 최고값은 주상시료 심도 25cm에서 62ppm으로 나타났고 3개의 정점에 대한 표층퇴적물(St. 1, St. 2, St. 3)에서는 검출되지 않았거나 3ppm 이하로 나타났다. 주상시료 중에서도 표층에서 심도 7cm까지는 황화수소가 검출되지 않았다

(Fig. 3). 화학적 산소요구량(COD)값과 더불어 저질의 건강상태를 지시하는 황화수소량은 부영양도 기준값이 0.2mg/g으로 보고되었다.²¹⁾ 부영양화 기준값과 황화수소값을 비교해 볼 때, 이 연구결과 표층퇴적물이나 표층직하 퇴적물에 나타나는 황화수소값은 부영양도 기준값을 훨씬 밑도는 값이라 할 수 있다. 표층퇴적물이 채취된 지점에서 수층별 용존산소가 과포화 혹은 포화상태에 도달해 있어(Table 1) 표층퇴적물이나 표층직하 퇴적물에서 황화수소가 검출되지 않은 것에 대한 좋은 설명이다. 일반적으로 해양퇴적물에서는 박테리아의 섭이로서 유기탄소가 사용되고, 유기탄소가 모자라면 유산환원(sulfate reduction)상태에 이르기 때문에 퇴적물중의 유기탄소와 총황양은 좋은 상관관계를 가진다.¹⁸⁻¹⁹⁾ 그러나 이 연구결과 황화수소와 TOC, TC의 상관관계 및 탄산염과 TC의 관계가 무상관을 가지는 것은 특징적인 현상이다(Fig. 4).

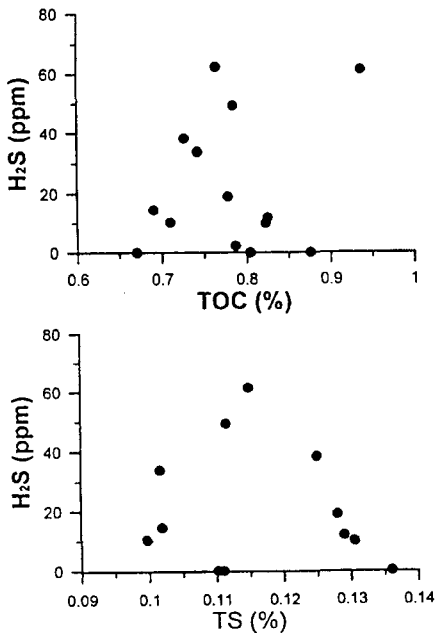


Fig. 4. Relationship among H₂S, TOC and TS.

3.3. 주성분원소 및 미량원소

표층퇴적물 및 주상시료에 대한 주요원소와 미량원소가 분석되었으며, 각각의 농도는 보존성 원소인 알루미늄(Al₂O₃(%))과의 상관관계로 표시하였다(Fig. 5 ; Fig. 6). 주요원소중 Al₂O₃ 및 TiO₂ 등은 대륙기원 원소이며 보존성 원소로 간주된다.^{22,23)} 이들 원소들은 이동중에 함량이 거의 변화하지 않으며 한반도 주변에서는 입도 의존성을 보이기 때문에²⁴⁾ 입도의 영향을 보정하는 원소로 자주 이용된

다. 여기서 SiO₂, TiO₂, Fe₂O₃, MgO는 Al₂O₃와 양호한 상관관계를 보이고 있어 이들 원소들 간에 거동특성이 서로 유사하다는 것을 알 수 있다. SiO₂를 제외하면 이들 원소들은 Al₂O₃가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉, 주요원소들의 뚜렷한 상관관계를 보이는 것은 퇴적물이 잘 혼합되었거나 동일기원을 가지는 것으로 해석 가능하다. 반면, 알카리 원소인 CaO, K₂O와 MnO 및 P₂O₅는 뚜렷한 상관관계를 보이고 있지 않다. 이러한 원소들은 아마도 다른 오염경로나 혹은 다른 기원을 가지는 물질의 공급으로 보존성원소인 Al₂O₃과 혼합되어 무상관을 보이는 것으로 해석할 수 있다. 또한 초기속성과정의 결과일 가능성도 배제하지는 못한다.

일반적으로 퇴적물내의 미량원소의 거동은 퇴적물의 입자크기 및 그 외 유기물 함량, 산화물의 영향 등과 같은 여러 조건에 따라 결정되며, 특히 미량원소의 농축은 세립질의 퇴적물일수록, 유기물이 많이 존재할수록 농축되기 쉽다고 알려졌다.²⁵⁻²⁶⁾ 이와 유사하게 한반도 주변 해역에서 미량원소의 농축과 입도 및 유기물과의 강한 상관성이 잘 알려져 있다.²⁴⁾ 이 연구에서는 퇴적물 입도에 대한 조사는 이루어지지 않았지만 미량원소의 농도에 대한 알루미늄과의 상관관계는 뚜렷한 관계를 보이지 않는다(Fig. 5). 그러므로 이 연구에서 분석된 미량원소들은 여러 기원을 가지고 있거나 다른 경로를 통해서 유입된 것으로 해석 가능하다. 이들 미량원소들의 동일 퇴적물중에 어느 정도 농축되었는가는 부화지수(Enrichment Factor ; Ef)로 조사하였다(Table 2). 부화지수란 연구시료 원소들을 보존성 원소인 Al으로 평준화하고 다시 이 값을 지각평균 혹은 평균 퇴적물값으로 나누어주는 것으로 계산식은 다음과 같다. 본 연구에서는 평균퇴적물 값을 기준으로 하였다.²⁷⁾

$$\text{부화지수(Enrichment Factors)} = \frac{(X/Al)_{\text{sediment}}}{(X/Al)_{\text{mean sediments}}}$$

이 연구결과 평균부화지수(Table 2)를 살펴보면, 주상시료에 대한 7개의 미량원소(Cu, Zn, Pb, Cr, Co, Li, Mo)중에서 Pb와 Mo를 제외하면 Ef는 1 이하를 보이고 있다. Ef가 1에 근접하면 평균퇴적물 농도와 비슷하기 때문에 오염되었다고 할 수 없으며, 1 이상이면 오염되었다고 할 수 있다. 이 연구에서는 Pb 및 Mo가 1을 중심으로 해서 분산하고 있어 약한 오염의 경우를 생각해 볼 수 있다. 하지만 이 두 원소에 대해서도 동 연구지역 퇴적물이 크게 오염되었다고는 할 수 없으며 전체적으로 오염형 중금속들(Cu, Zn, Pb)이 농축된 것은 오염과는 무관한 것으로 생각된다.

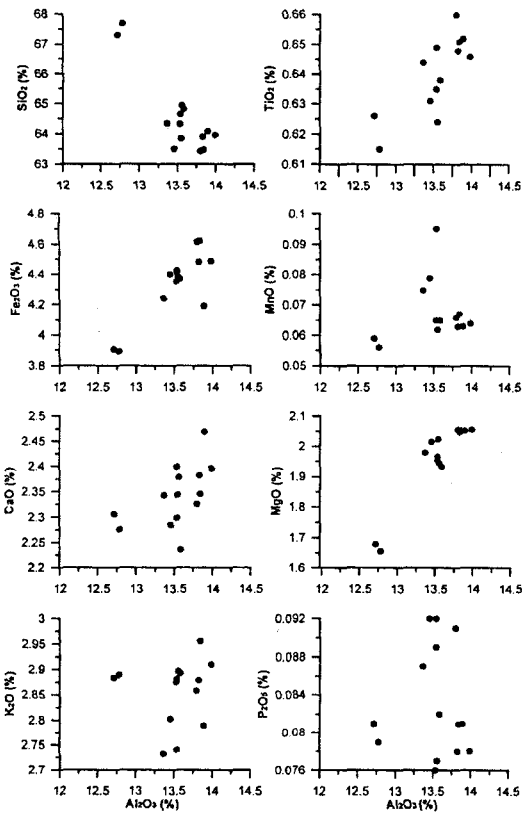


Fig. 5. Variation of oxides vs Al_2O_3 of the core samples.

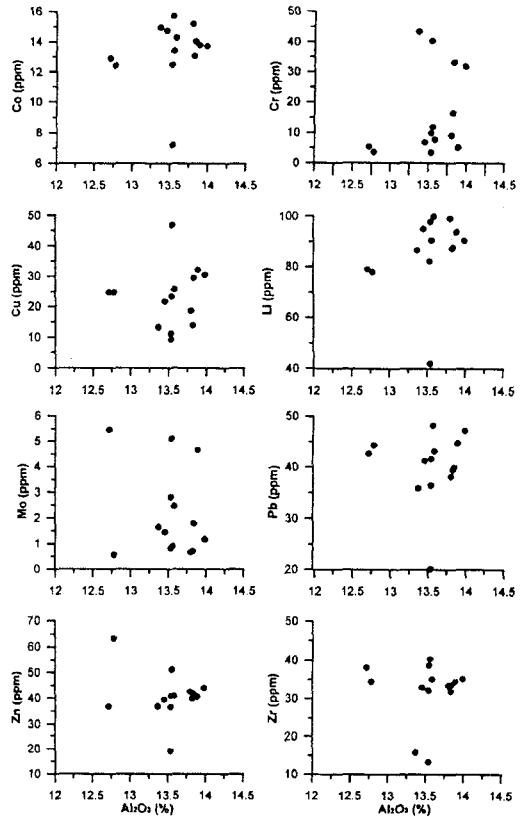


Fig. 6. Variation diagram of minor elements vs Al_2O_3 for the core samples.

Table 2. Enrichment factor (EF) with respect to mean sediments²⁷⁾ based on mean concentration determined by vertical core

Depth (cm)	Cu	Zn	Pb	Cr	Co	Li	Mo
1	0.21	0.21	1.02	0.33	0.58	0.83	0.44
3	0.38	0.23	1.16	0.30	0.60	0.93	1.36
5	0.35	0.22	1.16	0.05	0.56	0.91	0.39
7	0.15	0.11	0.57	0.03	0.27	0.40	0.75
9	0.30	0.23	1.05	0.07	0.57	0.92	0.17
11	0.41	0.23	1.20	0.06	0.54	0.95	0.65
13	0.43	0.22	1.27	0.04	0.52	0.80	1.55
15	0.42	0.37	1.31	0.03	0.50	0.78	0.16
17	0.47	0.23	1.09	0.24	0.52	0.82	0.47
19	0.50	0.22	1.22	0.04	0.51	0.87	1.21
21	0.18	0.21	1.02	0.07	0.47	0.78	0.22
23	0.75	0.29	1.35	0.09	0.51	0.86	0.24
25	0.48	0.24	1.28	0.23	0.51	0.83	0.30
27	0.22	0.22	1.08	0.12	0.49	0.81	0.19

3.4. 저서생물상 조사

1) 저서동물군집의 종조성

3개 정점에서 출현한 대형저서동물은 61종이었고, 425개체가 출현하여 평균 서식밀도는 708개체/m²였다(Table 3). 가장 많은 출현종수를 보인 분류군은 환형동물의 다모류로서 33종이 출현하였고, 갑각류에서는 13종이, 연체동물에서는 9종이, 극피동물에서는 3종이 출현하였다. 출현 개체수에 있어서는 다모류에서 전체의 49%를, 갑각류에서 36%를, 연체동물에서 11%를 차지하여 3개 분류군에서 전체의 96%를 차지하였다.

가장 많은 출현개체수를 보인 종은 갑각류의 *Melita* sp. (전체의 20.7%)였으며, 그 다음으로는 다모류의 *Heteromastus filiformis* (7.1%), *Paralacydonia paradoxa* (7.1%), *Magelona japonica* (5.2%)와 단각류의 *Corophium sinense* (5.2%), 다모류의 *Sigambra tentaculata* (4.0%), *Glycera chirori* (3.8%) 등이었다.

2) 정점간 출현양상

외나로도 주변의 2개 정점과 가막만내의 1개 정점에서 출현한 대형저서동물의 정점간 출현조성을 비교하면 출현종수에 있어서는 외나로도 주변에서 평균 25종이 출현하여 가막만의 19종에 비해 더 다양한 저서동물이 출현하였고, 출현개체수에 있어서도 외나로도 부근의 정점에서는 441개체/m²의 서식 밀도를 보인 반면에 가막만에서는 180개체/m²에 불과하여 큰 차이를 보였다. 생물량에 있어서는 외나로도의 전면에 위치한 정점 2에서 가장 많았고, 외나로도의 후측에 위치한 정점 1에서 가장 적었다. 정점 2에서는 양식 중인 개불의 출현으로 생물량이 많았고, 가막만에서는 염통성개의 출현으로 생물량이 많았다.

3) 군집분석

조사정점간 군집지수를 비교하면 종다양성 지수 값은 2.3에서 2.9의 범위에 있어서 정점간 큰 차이를 보이지 않았으나, 균등도지수는 정점 1에서 낮았고 정점 3에서 높았다(Fig. 7). 우점도지수도 정점 1에서 가장 높은 값을 보였다. 종풍부도는 각 정점의 시료간 변이를 보였으며, 정점간에는 큰 차이를 보이지 않았다. 한편 출현종의 개체수자료에 의거한 각 정점간 유사도지수를 구하여 수지도를 그린 결

Taxa / St.	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2	total
Mesochaetopterus sp.	4						4
Micropodarke sp.						1	1
Nephtys oligobranchia			2	1			5
Nereidae unid.		1					1
Nereis longior				1			1
Notomastus sp.					2	2	4
Paralacydonia paradoxo	5	3	4	14	2	2	30
Paraprionospio pinnata			1			1	2
Phylo felix asiaticus				1			1
Poecilochaetus johnson	1	2			1	2	6
Praxillella affinis				1			1
Prionospio japonicus		1	1	4		4	10
Prionospio steenstrupi							1
Sigambra tentaculata	2	1	3	3	3	5	17
Spiophanes bombyx						1	1
Sternaspis scutata			1	2		4	7
Terebellides horikoshii		1					1
Thalenessa digitata				1			1
Tharyx sp.		1	1	1	1		4
Crustacea							
Ampelisca sp1.	2	2					4
Ampelisca sp2.	1	3				2	6
Corophium sinence	12	5	3	1	1		22
Gitanopsis sp.	1	6		1			8
Grandidierella sp.			1				1
Melita sp.	18	48	14	2	5	1	88
Iphinoe sp.						1	1
Rocinela sp.	1	2					3
Alpheus digitalis	2		1				3
Alpheus japonicus				1			1
Alpheus spp.				6			6
Chasmagnathus convex	1		4	5			10
Gaetice depressus				1			1
Echinodermata							
Ophiura kinberg		1					1
Echinocardium costatum					1	1	2
Holothuroidea unid.	1	1					2
Spp.	22	25	24	28	14	23	61
Ind	75	104	81	93	24	48	425

Table 3. The macrobenthic fauna occurred at the coastal area near the Oenaro Island in September, 2001

Taxa / St.	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2	total
Nmerteia unid.	1	1			1	2	5
Echiura							
Urechis unicinctus			4	2			6
Mollusca							
Gastropoda							
Siphonalis sp.	4		1				5
Pracilathrella gracilentia		3					3
Bivalvia							
Arcidae unid.	2						2
Macoma sp.			7	3			10
Megangulus venulosus	4				2		6
Moerella iridescens						3	3
Paphia undulata		2					2
Theora fragilis		3	1	11			15
Yoldia johani			1				1
Polychaeta							
Amaeana sp.					1		1
Amage sp.			1				1
Ampharete arctica	1					1	2
Amphismytha japonica				1			1
Aricidea pacifica		1			1		2
Brada villosa		2	2				4
Chaetozone setosa	1		1	1			3
Eteone longa			1				1
Glycera chirori	1	1	6	8			16
Glycinde sp.			1	6		1	8
Goniada maculata				1			1
Heteromastus filiformis			20	10			30
Inermonephtys inermis					1	1	2
Lumbrineris longifolia	1	4		1	1	5	12
Magelona japonica	9	7		3	2	1	22

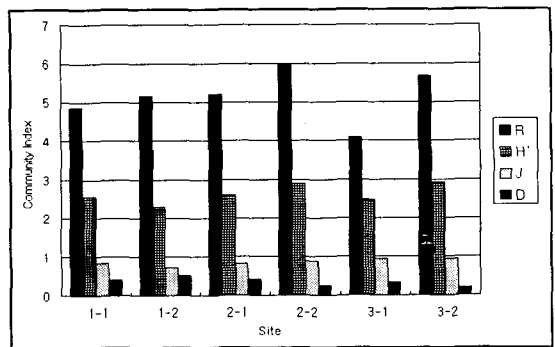


Fig. 7. The community indices of macrobenthic animals at each samples of three sites (R= species richness; H'=Shannon's diversity index; J=Pielou's evenness; D= dominance index).

과 각 정점의 시료간에 더 높은 유사도를 보였고, 정점간에는 St 1과 St 3이 St 2와는 좀 더 다른 종조성을 보였다(Fig. 8). 이러한 출현종의 유사정도를 MDS배열법으로 2차원 평면상에 나타내면 각 정점의 두 시료간에는 매우 유사한 종조성을 가지고 있으나 정점간에는 종조성에 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 9). 본 연구에서는 집괴분석

결과 나타난 수지도에 비해서 MDS배열법에 의한 배치도가 각 정점간 저서동물군집의 조성을 보다 잘 반영하는 것으로 보인다.

4) 저서오염지수 및 생물계수

저서환경을 평가하는데 유용하게 사용되는 군집 지수로서 benthic pollution index (BPI)와 biotic coefficient (BC)값을 구한 결과 두 지수간에 잘 일

료에서 BC값이 2.4에서 3.2의 범위에 있었고, 정점 2에서는 BC값이 3.0 이상으로 나타났다(Fig. 10).

유럽의 연안해역에서 출현한 대형저서동물을 서식환경과 관련지어서 도출한 BC값과 저서환경과의 관계를 보면 BC값이 $0.0 \leq BC \leq 1.2$ 이면 정상(unpolluted) 환경 하에 있어서 group 1의 저서동물이 우점하는 저서군집을 나타내고, $1.2 \leq BC \leq 3.3$ 이면 약간 오염(slightly polluted)된 환경하에 있어서 group 3의 저서동물이 우점하여 군집의 건강도가 unbalanced

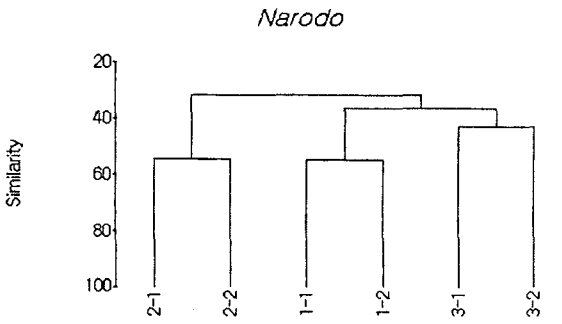


Fig. 8. Dendrogram showing the clustering of 3 sites, using group-average linking of Bray-Curtis similarities calculated on square root transformed abundance data.

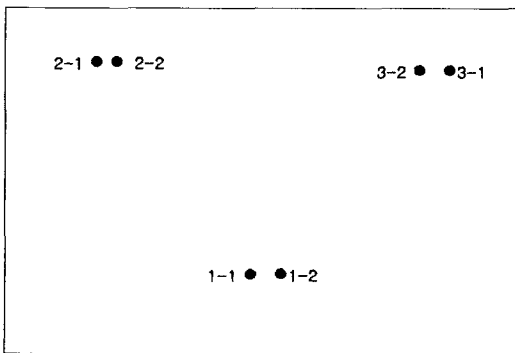


Fig. 9. MDS ordination of 3 sites based on square root transformed abundance data and Bray-Curtis similarity (stress = 0.01).

치되는 경향을 보였다. 일반적으로 BPI값이 60 이상이면 정상적인 저서환경에 있는 저서동물군집인 것으로 평가되고 있다.^{12), 28)} 외나로도 주변해역의 저서동물군집은 정점 2를 제외하면 정상적인 환경조건 하에 있음을 나타내었다(Fig. 10). 정점 2의 경우에도 평균 BPI값이 55 정도이므로 정상에 가까운 저서환경에 있는 군집임을 나타내었다. 한편 생물지수(BC)에 의한 저서동물군집의 평가에서는 모든 시

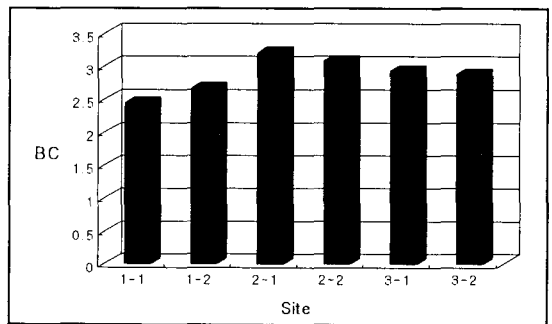
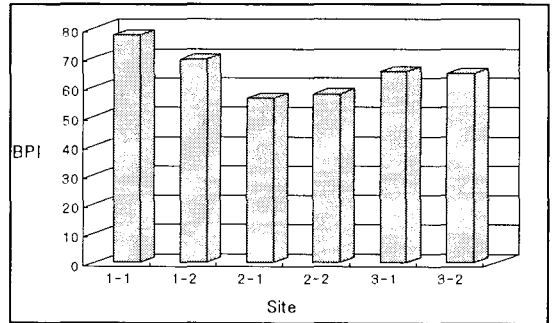


Fig. 10. The values of benthic pollution index (BPI) and biotic coefficient (BC) at each sample of three sites.

상태에 있음을 나타낸다. 이 후 오염이 진행되어 $3.3 \leq BC \leq 5.0$ 이면 보통 오염(meanly polluted)된 환경하에 있는 group 4와 group5에 속하는 저서동물이 우점하고 있음을, $5.0 \leq BC \leq 6.0$ 이면 매우 오염(heavily polluted)된 환경으로 group5에 속하는 저서동물만이 서식하는 저서군집을 나타내며, $BC=7.0$ 에서는 무생물 환경을 나타내는 것으로 알려져 있다.²⁹⁾ 따라서 이러한 기준에서 볼 때 연구해역의 3개 정점은 모두 정점간 작은 차이는 있지만 약간 오염된 환경에 살고 있어서 저서군집의 건강도는 unbalanced 상태에 있는 저서동물군집임을 나타내었다.

4. 결론

표층퇴적물 및 주상시료에 대한 유기물과 탄산염을 분석한 결과 유기물 함량은 0.67-0.93%의 범위에서 변화하며 전체적으로 1% 미만의 낮은 값을 보이고 있다. 반면 탄산염 함량은 표층퇴적물에서 최대 3.29%에서 주상시료 심도 11cm에서는 최소값 0.16%로 그 변화폭이 매우 크다. 유기물의 성질을 지시하는 C/N 비는 10을 기준으로 변화하고 있어 해양환경에서 생성된 유기물과 인근 대륙에서 유입된 유기물이 혼재되어 있음을 지시하고 있다. C/S ratio는 약 5-8의 범위에서 변화하고 있으며 이와 같은 사실은 최소한 본 조사지역 퇴적물이 극적인 환경변동을 겪었음을 지시하고 있다. 황화 수소량은 최고 약 60ppm에서 검출되지 않은 시료도 나타나고 있어 이 지역 퇴적물은 부영양도 기준값을 초과하고 있지 않고 있음을 알 수 있다.

퇴적물에 대한 주요원소 및 중금속의 농도를 측정하여 본 결과, 보존성원소에 대한 상관관계가 뚜렷하지 않아 여러 기원을 가지는 퇴적물이 유입되었을 가능성을 지시하고 있으며 부화지수(Ef)을 조사한 결과도 미량원소들의 여러 공급원을 가지고 공급되었음을 지시하고 있다. 하지만 이러한 공급원이 이 지역에 주요하게 오염원으로 작용하고 있지는 않고 있다.

저서생물에 의한 연구지역의 건강도를 조사해본 결과, 정점간에 작은 차이를 보이고 있기는 하나 전체적인 저서생물의 건강도가 unbalanced상태에 있고 약간 오염된 (slightly polluted)상태에 있는 저서동물의 군집구조를 보이고 있다. 퇴적물의 지화학적 특성에서도 일부 원소에 대해 미약한 오염의 징후가 나타나기는 하나 양자간의 상관성은 뚜렷하지 않다. 적조의 발생과 그 결과 나타나는 지화학적 특성과 저서생물 군집구조간의 상관관계는 이 연구에서 밝혀내지 못했다. 이 부분에 대한 보다 상세한 연구를 필요로 한다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 장목분원 연구원들에 의해 수행되었다. 연구수행에 도움을 준 실험실 동료들에게 깊은 감사를 표한다. 또한 심도있는 지적을 주신 익명의 심사위원들에게도 심심한 감사를 표한다.

참고 문헌

1) 김학균, 이삼근, 안경호, 윤성화, 이필용, 조은섭, 김정배, 최희구, 김평중, 1998, 한국연안의 적조, 국립수산진흥원. 85 pp.

2) 국립수산진흥원, 1997, 한국연안의 적조, 280 pp.

3) 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규, 2000, 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구: 1. 물리·화학적 특성, 한국해양학회지-바다, 5, 16-26.

4) 정해진, 박종규, 최현용, 양재삼, 심재형, 신윤근, 이원호, 김형섭, 조경재, 2000, 전남 고흥해역의 유해성 적조의 발생연구 2. 1997년도 식물 플랑크톤의 시공간적 변화, 한국해양학회지-바다, 5, 27-36.

5) 정해진, 박종규, 김재성, 김성택, 윤주이, 김수경, 박용민, 2000, 전남 고흥해역의 유해성 적조의 발생연구 3. 1997년도 종속영양성 와편모류와 섬모류의 시공간적 변화, 한국해양학회지-바다, 5, 37-46.

6) 김훈수, 1973, 한국동식물도감 - 제 14권 동물편 (집게, 게류) -, 문교부, 694 pp.

7) 백의인, 1989, 한국동식물도감 - 제 31권 동물편 (갯지렁이) -, 문교부, 764 pp.

8) Shannon, C.E. and W. Weaver, 1963, Diversity indices. In Ludwig, J.A., and J.F. Reynolds. 1988, Statistical ecology, John Wiley & Sons, 89-92.

9) Margalef, R., 1958, Information theory in ecology, General Systematics, 3, 36-71.

10) Pielou, E.C., 1966, The measurement of diversity in different types of biological collections, Journal of Theoretical Biology, 13, 131-144.

11) Word, J.Q., 1978, The infaunal trophic index. In: Coastal water research Project, Annual Report, 19-39 pp.

12) 한국해양연구소, 1994, 해양 저서생물상에 의한 환경평가, 환경저/과기처 9-4-1, 244 pp.

13) Muller, P.J., 1977, C/N ratio in Pacific deep-sea sediments: effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays, *Geochem. Cosmochim. Acta*, 41, 765-776.

14) Muller, P.J. and E. Suess, 1979, Productivity, sedimentation rate, and sedimentary organic carbon in the ocean - 1. Organic carbon preservation, *Deep-Sea Res.*, 26, 1347-1362.

15) Stein, R., 1990, Organic carbon content/ sedimentation rate relationship and its paleoenvironmental significance for marine sediments, *Geo-Mar. Lett.*, 10, 37-44.

16) Stein, R., 1991, Accumulation of organic carbon in marine sediments. In: Lecture Notes

- in Earth Science, edited by Somdev, B. et al., Springer Verlag, Berlin, 217 pp.
- 17) Leventhal, J.S., 1983, An interpretation of carbon and sulfur relationship in Black Sea sediments as indicator of environments of deposition, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 133-137.
 - 18) Berner, R.A. and R. Raiswell, 1983, Burial of organic carbon and pyrite sulfur in sediments over Phanerozoic time: a new theory, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 855-862.
 - 19) Berner, R.A., 1984, Sedimentary pyrite formation: An update, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 605-615.
 - 20) Bottrell, S.H., J.A. Hannam, J.E. Andrews, and B.A. Maher, 1998, Diagenesis and remobilization of carbon and sulfur in mid-Pleistocene organic-rich freshwater sediment, *J. Sed. Res.*, 68, 37-42.
 - 21) 일본 수산자원 보호협회, 1980, 수질오탁 조사지침, 256-257 pp.
 - 22) Goldberg, E.D. and G.O.S. Arrhenius, 1958, Chemistry of Pelagic sediments, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 13, 153-212.
 - 23) Moorby, S.A., 1983, The geochemistry of transitional sediments recovered from the Galapagos hydrothermal mounds field during DSDP Leg 70-implication for mound formation, *Earth Plan. Sci. Lett.*, 62, 367-376.
 - 24) 조영길, 1994, 한반도 주변해역 퇴적물중 금속원소의 분포와 기원에 관한 연구, 이학박사 학위논문, 서울대학교, 262 pp.
 - 25) 현상민, 최영찬, 1997, 해수중 화학원소의 거동과 생물활동. 제주대학교 연구논문집, 21, 187-198.
 - 26) Adriano, D.C., 1986, Trace Elements in the Terrestrial Environment, Springer-Verlag, 533 pp.
 - 27) Forstner, U. and G.T.W. Wittmann, 1981, Metal pollution in the Aquatic Environment, Springer-Verlag, New York, 486 pp.
 - 28) 한국해양연구소, 1999, 연안어장 환경모니터링기법 개발에 관한 연구, BSPG 98292-00-1196-3, 63-253.
 - 29) Borja, A., J. Franco, and V. Perez, 2000, A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments, *Mar. Pollut. Bull.*, 40(12), 1100-1114.