

## 지화학적 자료에 근거한 광양만 표층퇴적물의 특성과 저서환경

현 상 민\* · 팽 우 현 · 이 태 희

한국해양연구원 남해연구소

### Characteristics of Surficial Sediment and Benthic Environments Based on Geochemical Data in Gwangyang Bay, Korea

Sangmin Hyun\*, Woo-Hyun Paeng and Taehee Lee

South Sea Institute of Korea Ocean Research and Development Institute (KORDI),  
391 Jangmok-ri Jangmok-myon Geoje 656-830, Korea

**Abstract** - A total of 110 surface sediment were analyzed in order to understand the geochemical characteristics of the surface sediments and to evaluate the benthic environmental condition of Gwangyang Bay. The surface sedimentary distribution can be classified by five facies; mud (M), sandy mud (sM), sand (S), muddy sand (mS) and gravely sand mud ((g)sM). However, mud face is the predominant sedimentary feature of the Gwangyang Bay. The benthic environment based on total organic carbon/total nitrogen (C/N) and total organic carbon/total sulfur (C/S) ratios of organic matter showed that anoxic environment is prevailed in some parts of the study area because the C/S ratio of organic matter was higher than 2.8. The hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) content showed extreme variability from site to site. It varies from 367 ppm to 1 ppm (average, 92 ppm). The inter-relationship of redox-sensitive elements (Mn, V, Mo and Cr) showed a relatively strong positive relationship with high accumulation in the sediment at the inner sites of the Bay (left of Myo Island). High content of TOC and hydrogen sulfide, and a high accumulation rate of redox-sensitive element were predominant characteristics in the sediments at the inner sites of the Bay (left of Myo Island), suggesting that this area is in an oxygen deficient, and potentially polluted condition.

**Key words:** Gwangyang Bay, Geochemistry, Benthic environments

### 서 론

광양만 주변 육지에는 광양시와 순천시가 있으며 대표적인 산업시설로는 광양만 북부의 광양제철소(POSCO)와

남부지역의 여천 국가산업단지가 있다. 따라서 광양만 해역은 공단지역에서부터 유출되는 다량의 폐수 및 인근 육지로부터의 생활하수 등이 유입되기 쉬운 지리적 여건을 갖추고 있다. 또한 광양만과 같은 연안지역은 산업화에 따른 환경변화 및 남획에 의한 자원 고갈로 과밀한 연안양식업이 활발하게 진행되어 왔으며 그 결과 육상기원 오염과 결부된 자가오염 (self-induced deterioration)

\*Corresponding author: Sangmin Hyun, Tel. 055-639-8590, Fax. 055-639-8509, E-mail. smhyun@kordi.re.kr

이 가중되고 있는 현실이다. 이런 이유로 경우에 따라서는 식물플랑크톤의 대 증식 등 오염이 되어있지 않은 연안역과는 현저히 다른 수질·저서환경이 지배 할 수도 있다. 특히 광양만은 1982년 특별관리해역으로 지정된 이래 환경보전 장애지역으로 간주되고 있으며, 그 중요성이 인식되어 있는 만큼 현재까지 비교적 많은 기초적인 연구가 이루어졌다(서울대학교 1997; 조 등 2000; 한국해양연구원 2002; 최 등 2003a, b). 따라서 해양환경을 보존하고 연안생태계를 보호하기 위해 보다 효율적인 관리방안을 구축하는 것은 불가결한 것이라 할 수 있으며, 이를 위한 선결과제로 정확한 저서환경을 평가하는 것은 필수적이라 할 수 있다.

일반적으로 저서환경을 평가하는 방법으로는 저서생물을 이용하거나 퇴적물을 이용하여 왔다(Chapman *et al.* 1990; 최 등 2003a, b). 그러나 지화학적 방법에 의한 저서환경 평가는 일부 양식장에 국한하여 수행되고 있으며(Yokoyama 1995, 2000), 광양만과 같은 비교적 넓은 범위에서는 활발한 연구가 진행되고 있지 않고 있다. 이러한 점을 고려하여 이 연구는 남해 특별관리해역으로 지정된 광양만에서 얻어진 표층퇴적물에 대한 조사로 표층퇴적물의 지화학적특성을 파악하기 위해 수행하였다. 또한 기존에 얻어진 여러 연구결과와 비교검토를 함과 동시에 지화학적 자료를 이용하여 연구지역에 대한 종합적인 저서환경을 평가하는데 기초 자료로 이용하고자 하는데 그 목적이 있다.

## 재료 및 방법

광양만 및 여수해만의 표층퇴적물에 대한 퇴적학적, 지화학적 특성을 알아보기 위하여 그랩샘플러(grab sampler)를 이용하여 2001, 2002, 2003년에 총 110개 지점에서 표층퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 채취된 퇴적물은 실험실로 옮긴 후 입도분석, 유기물분석, 황화수소 함량 등을 측정하였다.

퇴적물의 입도분석은 퇴적물에 과산화수소( $H_2O_2$ )와 염산(HCl)을 넣어 유기물과 탄산염을 제거한 후 습식체질(wet sieving)에 의해 4 $\Phi$  이하와 그 이상으로 퇴적물을 분리하였다. 4 $\Phi$  이하 조립질 퇴적물은 sieve shaker로 체질한 후 1 $\Phi$  간격으로 무게 백분율을 구하였고, 4 $\Phi$  이상 세립질 퇴적물은 약 2g 정도를 취한 다음 자동 입도분석기(Sedigraph 5100)로 분석하였다. 퇴적물의 입도 특성을 나타내는 평균입도(Mz), 분급도(sorting), 왜도(skewness) 및 첨도(kurtosis)는 컴퓨터를 이용하여 통계 처리 했으며, 퇴적상 분류는 Folk and Ward (1957)의 방

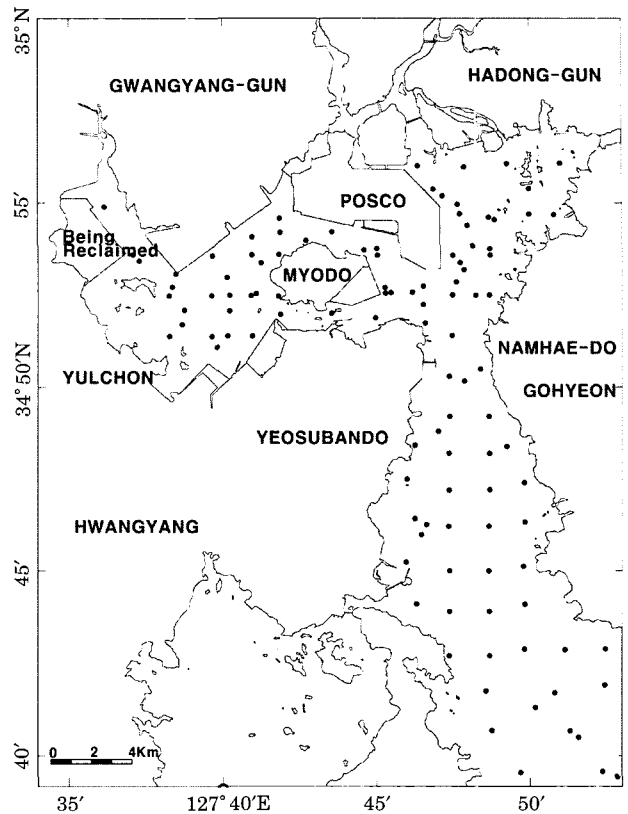


Fig. 1. Map of Gwangyang Bay. Black circles show the sampling points.

법에 따랐다.

표층에서 얻어진 퇴적물 시료는 각각 100°C에서 24시간 이상 건조시킨 후 분말화(powdered) 하였다. 분말화한 시료는 잘 건조시키고 청정한 후 CHNS 분석기(EA1112)를 이용하여 전탄소(total carbon: TC), 전질소(total nitrogen: TN) 및 총황(total sulfur: TS)를 측정하였으며, 같은 시료에 대해 1N 염산으로 무기탄소(inorganic carbon)를 제거한 후 전유기탄소(total organic carbon: TOC) 함량을 측정하였다. 탄산염 함량(carbonate content)은 전탄소와 전유기탄소의 함량차이에 의해 계산하였으며 계산식은 다음과 같다.

$$\text{탄산염 함량 (CaCO}_3\text{ (\%))} = [(\text{TC} (\%) - \text{TOC} (\%)) \times 8.33]$$

채취된 표층퇴적물중에서 다시 일정한 양을 청평하여 검지관법을 이용하여 황화수소 함량( $H_2S$  content; ppm)을 측정하였다(현 등 2002). 일정량의 퇴적물을 황화수소 발생기에 넣고 18N의 황산을 가스발생기에 첨가하여 발생하는 황화수소량을 가스채취기를 이용하여 직접 측정하였다. 이 연구에서는 건조시료와 습식시료에 대해 2번씩 황화수소 함량을 측정한 후 다음과 같은 방법으로 보

정하였다.

퇴적물 중의 황화수소량(ppm):

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

S1: H<sub>2</sub>S 발생용 습식값

S2: 건조용 청평값

S3: 중량측정 값

금속원소에 대한 분석은 퇴적물을 완전히 분말화한 건조시료에 대하여 약 0.2g의 시료를 취한 다음 혼합산(염산, 질산 및 과염소산)으로 용해한 후 유도결합플라즈마 흡광분석기(ICP)에 의하여 대전 기초과학지원 연구원에서 분석되었다. 이 연구에서는 산화-환원에 민감한 원소(redox sensitive element)만을 고려하였다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 표층퇴적물의 특성 및 분포

입도분석결과 나타난 표층퇴적물의 특성을 종합한 결과 광양만 표층퇴적물의 퇴적상을 크게 5개의 퇴적상으로 (M: 니질퇴적상, sM: 사니질퇴적상, mS: 니사질퇴적상, (g)sM: 역이 섞여있는 사니질 퇴적상, (g)mS: 역이 섞여있는 니사질 퇴적상) 나눌 수 있었다(Fig. 2). 표층퇴적물의 평균입도는 사질퇴적물의 입도인 2Φ에서 clay질 퇴적물의 입도인 9Φ까지(평균 7.1Φ) 다양하게 변화하고 있다. 그러나 주로 사질 퇴적물이 차지하는 분포범위는 좁은 반면 실트질 및 니질 퇴적물은 공간적으로 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 연구지역에서 사질 퇴적물이 가장 풍부하게 포함된 지점은 섬진강 하구 지점으로 이 지점의 표층퇴적물에서 사질은 최고 약 97%를 차지하고 있다. 한편 실트질 퇴적물이 가장 많은 곳은 여수해만 외해로 51.48%가 실트질 퇴적물이며 니질 퇴적물은 묘도 서쪽 정점에서 가장 많은 62.17%가 포함하고 있는 것으로 나타났다. 표층퇴적물을 퇴적상별로 살펴보면, 입도분석을 수행한 110개 지점중에서 니질(M)과 사질니(sM)퇴적상은 전체에서 82개 지점을 차지하고 있어 대부분이 니질 퇴적물로 이루어져 있음 나타낸다. 나머지 부분은 니질이 다소 포함된 사질 퇴적물(mS) 및 역질이 다소 포함된 사질((g)mS), 혹은 역질과 사질이 다소 포함된 니질 퇴적물((g)sM)로 구성되어 있음을 알 수 있다(Fig. 2).

공간적으로 표층퇴적물의 입도특성은 사질퇴적물과 니질 퇴적물이 다양하게 분포하고 있으나 주로 니질 퇴적물이 주를 이루고 있으며 사질을 많이 포함하는 퇴적물은 주로 POSCO 오른쪽인 섬진강 하구역과 남해도 사이

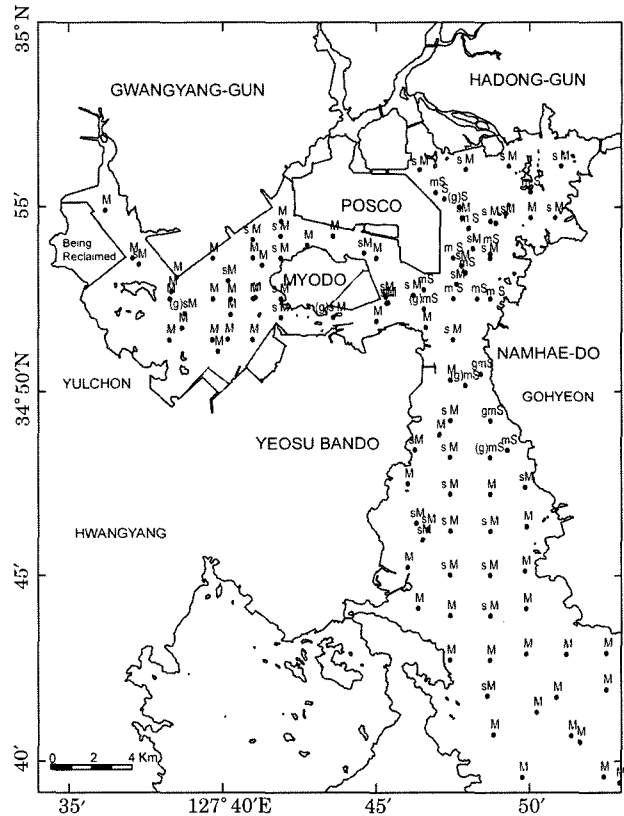


Fig. 2. Distributions of sedimentary facies. M: mud type, sM: sandy mud, S: sand, mS: muddy sand and (g)mS: gravelly muddy sand.

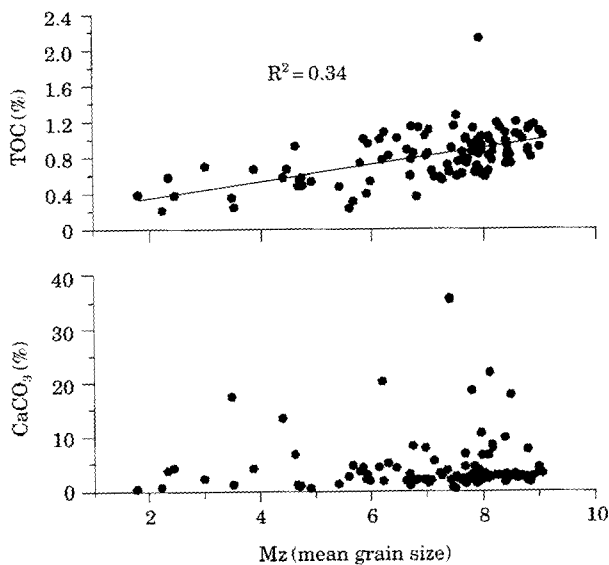
의 수로에 국부적으로 분포하고 있다. 또한 이러한 분포와 이웃하여 사질퇴적물을 소량 포함한 점토질 퇴적물이 분포하고 있으며 점토질 퇴적물은 묘도안쪽(서쪽)과 여수반도 외해 쪽으로 분포하는 경향을 보인다. 그러나 전체적으로는 니질 퇴적물과 약간의 사질이 혼재되어있는 점토질 퇴적물(사니질)이 주를 이루고 있다(Fig. 2). 한편 기존의 연구결과 조 등(2000)은 2000년 이전의 연구결과와 비교하여 광양제철소 건설 이전에 비해 니질 퇴적상이 발달하고 사질 및 역질 퇴적상이 쇠퇴하는 것으로 보고 하였다. 그러나 이 연구의 결과는 조 등(2000) 및 서울대학교(1997)의 연구 결과와는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다(현 등 2003).

#### 2. 유기물의 C/N, C/S ratio 및 탄산염함량 (carbonate contents)

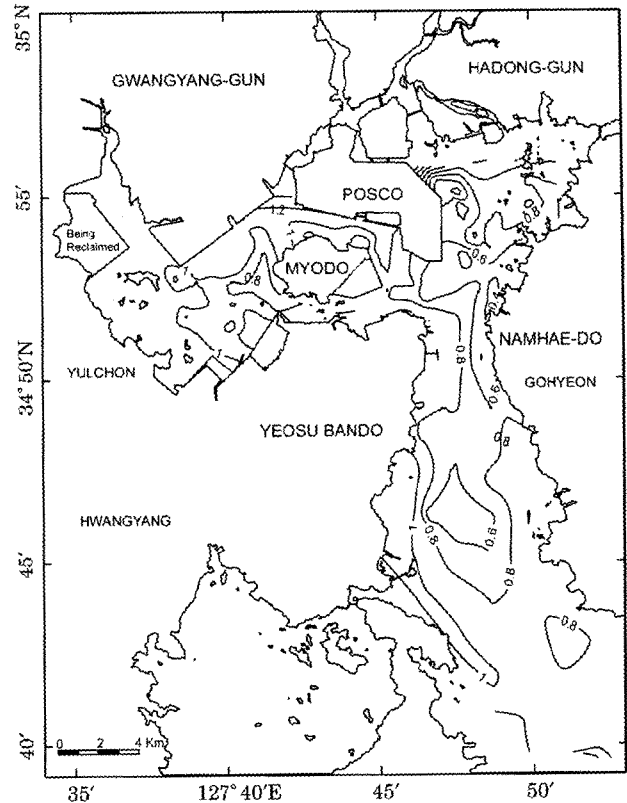
110개의 표층퇴적물에 대해 유기물을 분석한 결과 유기물을 가장 많이 포함하는 퇴적물이 나타나는 지역은 섬진강 하구역으로 전유기탄소(TOC)가 약 2.14%에 달

하며, 가장 적게 나타나는 지점은 남해도에 인접한 사질 퇴적물이 우세한 곳으로 함유량이 0.32%이다(평균 0.84%). 기존의 연구에서 밝혀진 바와 같이 평균입도에 대한 전유기탄소의 함량변화는 대체적으로 양의 상관관계(positive relationship)를 보이는 것으로 알려지고 있다(Forstner and Wittmann 1981; 조 등 1994, 2000). 이 연구에서 유기탄소, 탄산염을 입도와의 관계로 Fig. 3에 표시하였다. 유기탄소 함량은 퇴적물의 입도와 높은 상관성이 있음을 지시하고 있다. 또한 유기탄소 함량의 공간적 분포형태를 Fig. 4에 표시하였다. 기술한 바와 같이 유기물의 공간적 분포는 입도 분포와 유사하게 분포되고 있음을 알 수 있다. 유기물의 공간적 분포에서도 알 수 있듯이 유기물의 함유량이 높은 지역은 세립질 퇴적물이 주를 이루고 있어서 지금까지의 연구결과와 잘 일치하고 있다. 이와 같은 사실은 일차적으로 유기물 함량의 입도상관성을 보이고 있는 것으로 해석된다.

퇴적물중 유기물의 특성을 지시하는 전유기탄소(TOC)에 대한 전질소(TN)의 비(C/N ratio)를 Fig. 5A에 표시하였다. 일반적으로 유기물중 C/N비는 유기물의 특성과 기원을 지시하는 것으로 알려지고 있다. 유기물 중 C/N비가 10 이상인 경우는 유기물이 대륙에서 유입되었음을 지시하고 있으며, 이와 반대로 현장에서 생물생산에 의해 생성된 해양기원성 유기물인 경우는 C/N비가 10보다 적은 5~10 정도의 값을 보인다(Muller 1977; Muller and Suess 1979; Stein 1990, 1991). 이 연구결과에서



**Fig. 3.** Pair diagram between mean grain size variation vs. total organic carbon (TOC) (%) and carbonate content (%). A positive relationship between TOC and mean grain size is observed.



**Fig. 4.** Spatial variation of TOC (%). A relatively high content of TOC is a predominant feature of the sediments at the inner sites of the Bay (left of Myo Island).

C/N 비는 50~2.5사이에서 변하고 있으며, C/N비에 근거한다면 연구지역 표층퇴적물중의 유기물은 육지에서 공급된 것과 현장에서 생성된 유기물이 혼합되어 있음을 지시하고 있다(Fig. 5A). 전체적으로 C/N비가 10 이상을 보이는 지점은 16개 지점으로 인근 육지에서 이차적으로 유입된 유기물이 상당량 함유되어 있음을 지시하고 있다(한국해양연구원 2002; 현 등 2003).

이 연구에서는 저서환경을 평가하기 위해 유기물중의 전유기탄소 (TOC)에 대한 전황량(TS)의 비(C/S ratio)를 검토하였다. 일반적으로 저층환경이 산화적인 해양환경인 경우 퇴적물의 유기물중 유기탄소 함량과 전황의 양은 양의 상관관계(positive relationship)를 가지며 그 비(C/S ratio)는 약 2.8 정도를 보이는 것으로 보고되어 있다(Leventhal 1983; Berner 1984). 따라서 서로 다른 퇴적환경에서는 C/S비가 다르게 나타날 수 있으며, 반대로 이와 같은 사실은 C/S비에 의해 퇴적환경을 평가할 수 있음을 의미한다(Berner and Raiswell 1983; Bottrell *et al.* 1998). 이 연구에서 분석된 퇴적물에 대한 C/S비를 Fig. 5B에 표시하였다. 기술한 바와 같이 C/S비가 2.8인

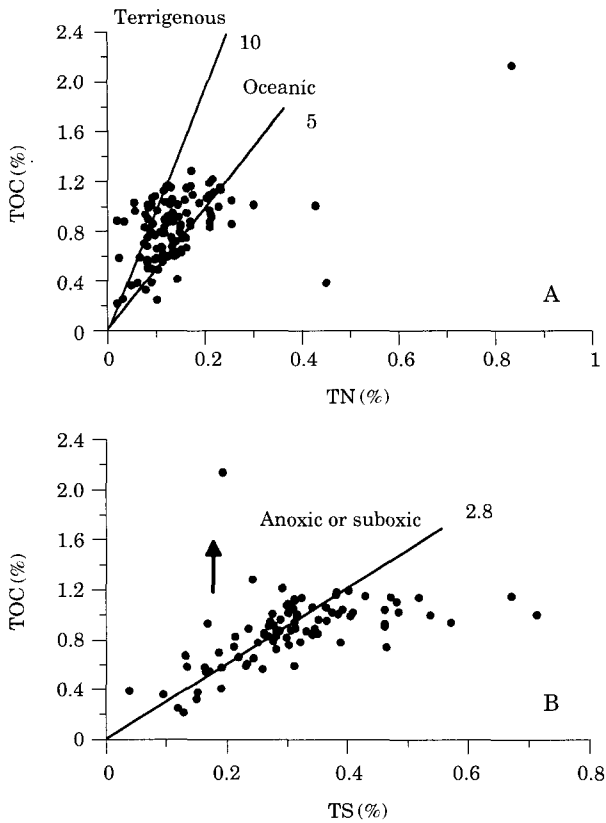


Fig. 5. C/N (5A) and C/S (5B) ratios of organic matter.

경우는 산화된 저층수와 생물교란 (bioturbation)이 가능한 정상적인 해양환경 (normal marine environment)에서 나타나기 쉬운 값이다. C/S 비가 2.8보다 크거나 작은 경우는 C가 S에 비해 선택적으로 빨리 분해된데 그 원인이 있거나 본래의 C/S ratio가 낮은 것으로 설명 가능하다. 또한 C/S 비가 2.8 이상을 보이는 시료는 아마도 저층 환경이 환원적 상태 (suboxic or anoxic)에 달해있어 유기물이 분해가 되기전에 유기물의 급속한 퇴적이 이루어졌을 가능성이 있다. 후술하는 바와 같이 C/S비가 2.8 이상을 보이는 지역에서는 황화수소 함량이 증가하고 있어 무산소 상태에 있는 저서환경상태를 간접적으로 지시하고 있다 (한국해양연구원 2002). 따라서 이 연구에서 나타난 C/S비가 2.8 이상을 보이는 지역은 저서환경이 무산소 혹은 빈산소 상태를 형성하고 있다고 판단된다.

표층퇴적물에 대한 탄산염 함량은 36%에서 최소 0.13%로 그 변화 폭이 상당히 크다 (평균 4.56%). 또한 유기탄소와는 달리 퇴적물중 탄산염 함량은 퇴적물 입도와 뚜렷한 상관성을 보이고 있지 않으며 (Fig. 3), 공간적 분포도 어떤 특징을 보이지 않고 있다 (한국해양연구원 2002). 퇴적물중 탄산염 함량을 조절하는 요인으로는 생

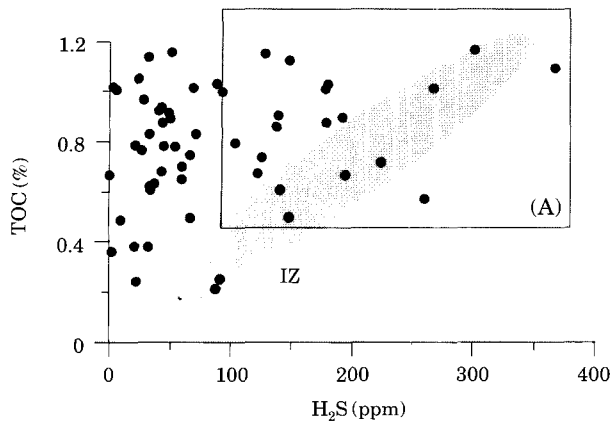
물생산에 의한 생물각 (biogenic tests)이 퇴적물속에 축적되거나 (생물생산의 증가) 육원성 탄산염의 공급요인과 공급된 후에 해양에서 육지기원 물질 (terrigenous materials)의 2차적인 공급에 의한 희석 (dilution)에 의해서, 그리고 유기물의 분해에 의한 용해 (dissolution) 등으로 설명이 가능하다 (Ricken 1993). 이 연구에서는 광양만내의 탄산염의 공간적 분포가 어떤 특징을 보이지 않고 있다.

기술한 바와 같이 유기물의 C/S비에 근거해 볼 때 일부 지역에서 저층이 빈산소 혹은 무산소 상태에 달해 있음을 설명하였다. 외양의 퇴적물인 경우 낮은 양의 탄산염 함량 및 그 원인에 대한 보고가 있다. 예를 들어, 동부 저층해의 퇴적물인 경우 유기물이 풍부한 퇴적층인 sapropel에서는 낮은 양의 탄산염 함량이 퇴적층중에 나타나는 것은 잘 알려진 사실이다. 이와 같이 낮은 양의 탄산염 함량은 미생물활동에 의해 유기물이 분해되면 용존 CO<sub>2</sub>가 방출되게 되고 다시 유산환원 (sulfate reduction) 환경과 결부되어 탄산염 용해를 촉진시키는 것으로 보고되었다 (Hubner et al. 2003). 즉 생물기원 탄산염은 퇴적된 후에도 유기물의 산화와 결부되어 초기속성과정을 거치면서 용해될 가능성이 광양만 지역에서도 일어날 수 있다고 생각된다. 따라서 이번 연구지역에 나타난 낮은 탄산염 함량은 탄산염의 초기 속성과정에서 용해한 결과로 지역에 따라 수십 배의 차이를 보이면서 분포하고 있는 것으로 판단된다. 또한 이와 같은 결과는 탄산염 함량이 적게 나타나는 일부 지역은 저서환경이 무산소 혹은 산소가 결핍된 환경으로 유지되고 있을 가능성이 있다. 퇴적물중의 용존산소를 측정하거나 유기물, 산화-환원 상태와 탄산염과의 정량적인 관계를 보다 심도있게 연구할 필요가 있다.

### 3. 황화수소 함량 (Hydrogen sulfide)

퇴적물 중에 포함된 황화수소 함량은 퇴적물의 건강도를 평가하는 기준으로 자주 이용되고 있다. 특히 천해지역이나 어장환경에서는 퇴적물중 황화수소 함량이 저서생물이나 어장환경에 큰 영향을 미치기 때문에 중요한 지화학적 지시자로 간주된다 (Yokoyama 1995, 2000).

표층퇴적물에 대한 황화수소 함량을 조사한 결과 조사 정점 55개 지역에서 약 1~367 ppm의 범위 (평균 92 ppm)에서 황화수소 값이 나타나고 있다. 퇴적물중 황화수소 함량은 화학적 산소 요구량 (COD)와 더불어 저질의 건강상태를 지시하는 것으로 사용되고 있다. 특히 오염된 환경의 시발점으로서 생물이 정상적인 활동에 제한을 가져오거나 부영양도 기준값으로는 퇴적물중의 황화수소

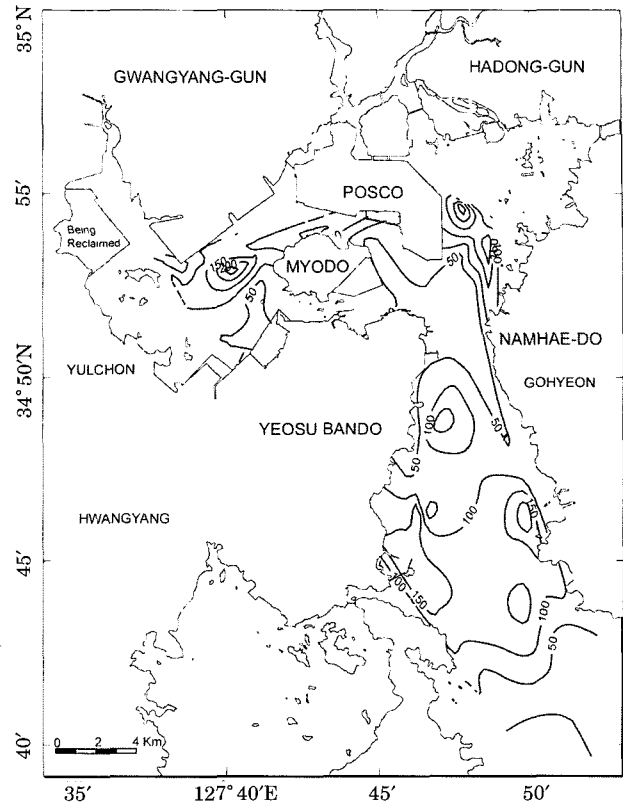


**Fig. 6.** TOC vs  $H_2S$ . An ellipse (IZ: idealized zone) is drawn on the basis of ideal relationship between TOC and  $H_2S$  contents. A box indicate an area which has high content of TOC and hydrogen sulfide.

함량을 200 ppm으로 설정하고 있다(일본 수산자원 보호 협회 1980; Yokoyama 2000). 이번 연구에서 측정된 55개의 시료 중에서 황화수소 함량이 200 ppm 이상으로 나타나는 지역은 묘도안쪽에 위치하는 5개 지역으로 최소한 이들 지역은 저서 환경이 오염되었거나 무산소(anoxic)에 가까운 환경에 있다고 할 수 있다.

일반적으로 퇴적물중에서 TOC와 황화수소 함량과의 관계는 양호한 양의 상관관계를 가지는 것으로 알려졌다. 따라서 퇴적물중의 황화물량을 유기물 부하량의 대응으로 사용하여 퇴적물의 오염상태를 추정하는 방법도 제기되고 있다(Yokoyama 1995). 이번 연구결과 TOC와 황화수소의 관계를 Fig. 6에 표시하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 전체적으로 TOC와 황화수소 함량 사이에는 뚜렷한 경향성이 나타나고 있지 않다. 그러나 황화수소 함량이 200 ppm을 초과하는 지역이나 평균값(92 ppm)보다 높게 나타나는 지역은 유기물함량 또한 평균값 이상으로 나타나고 있어 황화수소 함량과 유기물 함량 사이에는 상관관계가 있는 것으로 해석할 수 있다(A in Fig. 6). 이렇게 황화수소 함량이 높게 나타나는 지역은 유기물 분해에 따른 저층 용존산소가 결핍하게 되어 저서생물의 생장에 영향을 미친다고 할 수 있으며 일반적으로 오염된 환경이라 할 수 있다.

공간적으로는 황화수소 함량이 묘도 안쪽(서쪽)에서 높게 나타나고 있다(Fig. 7). 이러한 농도분포형태는 세립질 퇴적상을 보이는 지역 및 유기물이 높게 나타나는 지역과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편 광양만 전역에 대한 저서생물 조사결과를 살펴보면 일부 저서생물이

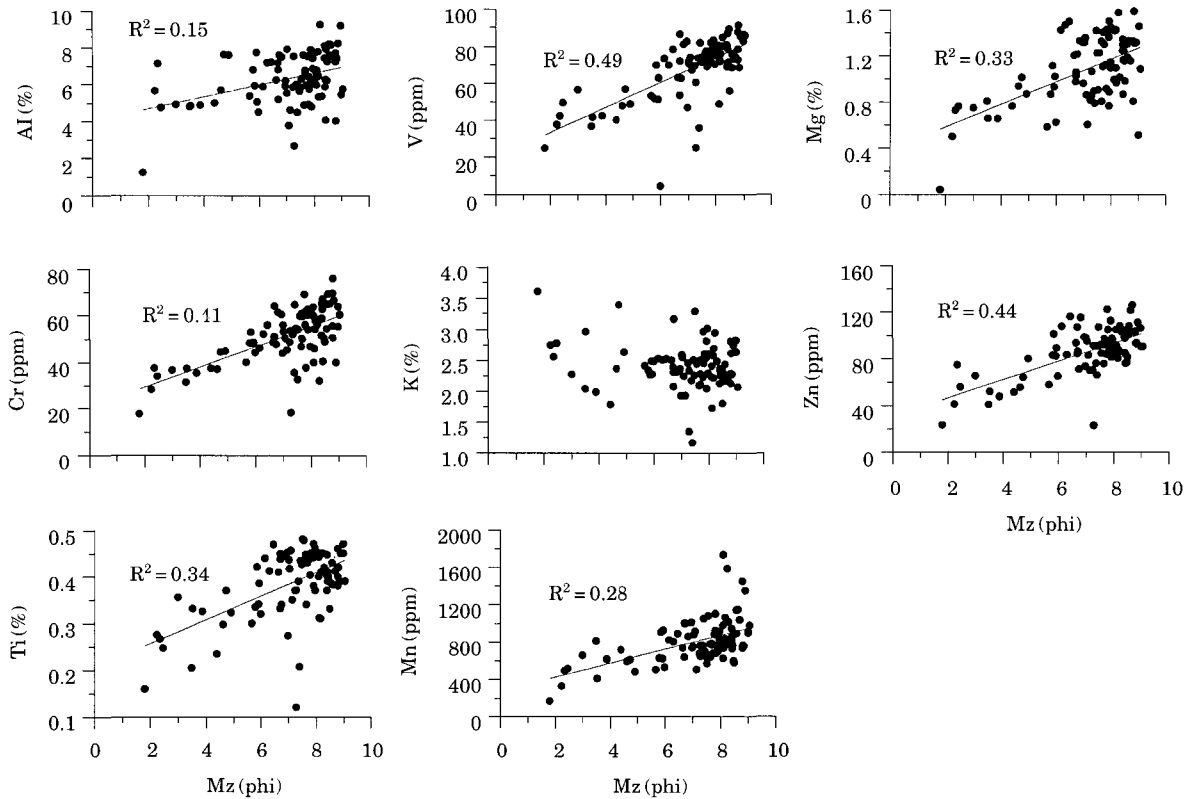


**Fig. 7.** Spatial variations in  $H_2S$  (ppm). Relatively high content of  $H_2S$  (ppm) is predominant at the inner sites of the Bay (left of Myo Island).

광양만 묘도안쪽(서측해역)에서 평균 이하의 출현양을 보이거나 출현종이 극히 제한적으로 나타난다고 보고되었다(최 등 2003b). 이러한 결과로 미루어 보아 퇴적물중 황화수소 함량은 이 연구지역에서 저서생물의 현존량에 영향을 미치고 있다는 것으로 해석할 수 있다. 앞으로 퇴적물중 황화수소 함량변화를 일으키는 요인 및 황화수소 함량이 유기물과 저서생물의 현존량 등과 어떠한 관계를 가지는 지에 대한 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

#### 4. 금속원소에 의한 저서환경 평가

대부분의 금속원소들은 퇴적물 입도 및 유기물과 강한 상관관을 보이는 것으로 보고되었다(Forstner and Wittmann 1981; 조 등 1994). 이 연구에서도 각 원소들과 퇴적물의 입도간에 어떠한 관계를 가지고 있는가를 알아보기 위하여 퇴적물 평균 입도에 대해 각 원소의 함량변화를 도시하였다(Fig. 8). 선택된 원소 중에서 평균입도와 양호한 상관관계를 가지는 원소는 Mg, Ti, V, Cr, Zn, Mn 등으로 나타났고, 무상관이거나 약한 상관관을 보이는 원소는 Ca, Sr, Ba, K, Cd, Pb 등으로 나타났다(한국해양연구원



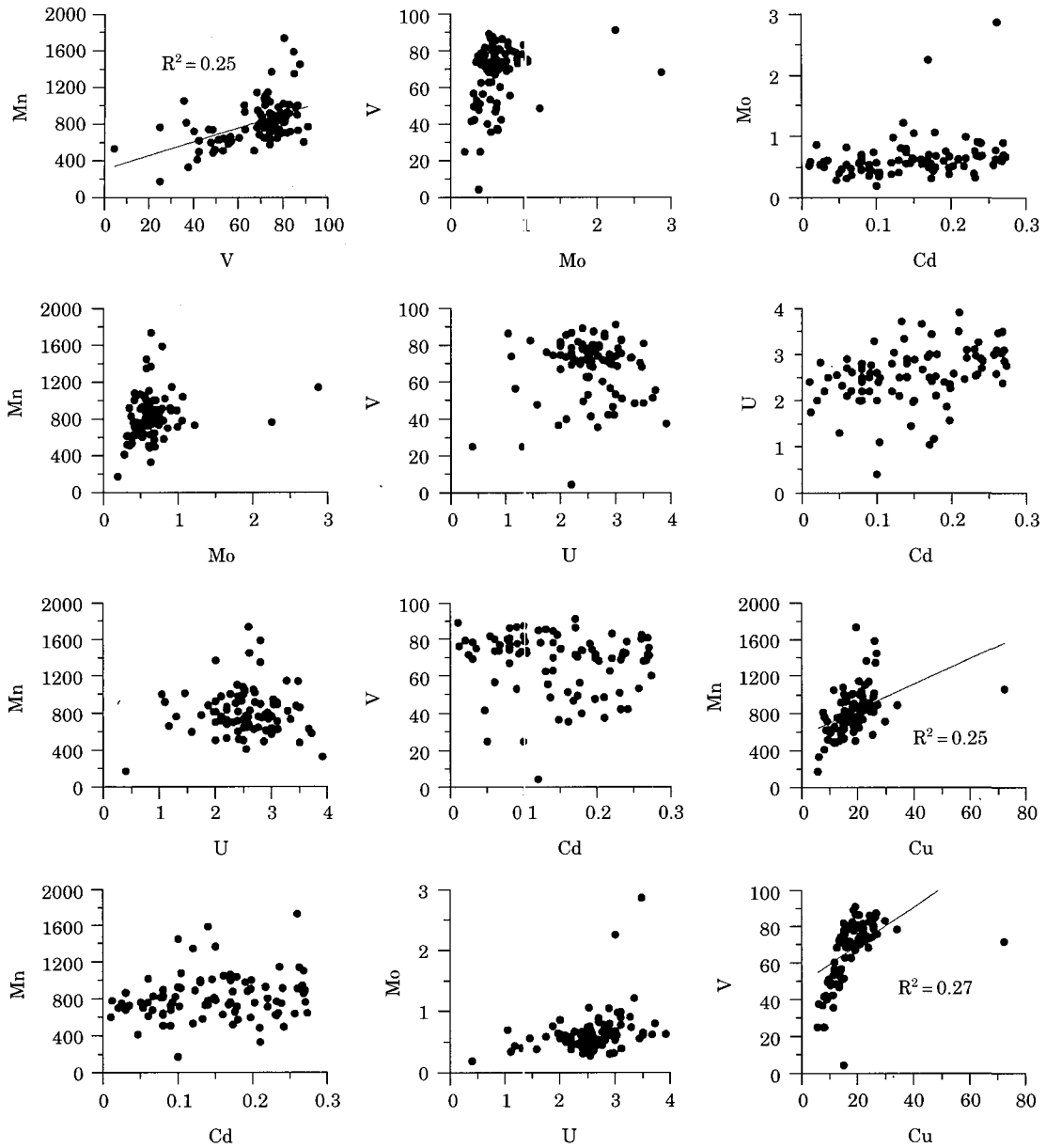
**Fig. 8.** Mean grain size vs. metal concentrations. Relatively strong positive relationship between Mz and Mg, V, Cr, and Zn are observed.

2002). 따라서 일반적으로 친철원소(siderophile element)로 알려진 Cr, Zn 등은 퇴적물 입자의 크기와 관련되어 축적되는 것으로 판단되며 나머지 Cd, Pb 등은 다른 기원을 가지는 것으로 판단된다. 유기물이나 입도와의 상관성이 없다는 것은 다른 기원을 보이는 것으로 이차적으로 공급된 오염의 영향이나 산화-환원 환경하에서 속성 작용을 반영할 수도 있다.

일부 금속원소들은 (e.g., Mn, V, Mo, U, Cd) 산화-환원에 민감한(redox-sensitive) 원소로 알려지고 있으며 (Bertine 1972; Calvert and Pedersen 1993; Morford *et al.* 2001), 특히 Mo, Cu, V 및 Cd와 같은 원소는 무산소 환경에서 우선적으로 침전되어 높은 농도를 보인다 (Sohlenius *et al.* 2001). 또한 이와 유사하게 일부 금속원소는 환원환경(anoxic environment)에서 농축되거나 감소하는 경향을 보이기도 한다(Jung *et al.* 1996). 이 연구에서는 이와 같은 성질을 이용하여 광양만의 저서환경을 평가하고자 한다.

Fig. 9에 표시한 바와 같이 금속원소들간의 상관관계가 높거나 높은 농축을 보이는 원소는 Mn, V, Cu, Mo 등으

로 나타낼 수 있다. 이들 원소들 간에는 비교적 양호한 양의상관을 보이고 있다. 예를 들어, Mn vs. V에서 Mn의 농도가 1,200 ppm 이상인 경우 V의 농도는 평균값보다 훨씬 높은 80~90 ppm 정도로 나타나고 있다. 또한 V vs. Cu, V vs. Mo의 경우에도 V가 증가하는 시료에서는 다소 높은 Cu 및 Mo의 함량을 보이고 있다(Fig. 9). 이들 Mn 및 V가 높게 나타나는 지역은 대체적으로 묘도안쪽(서쪽)에 있는 정점들이다. 이들 지점에 대해서는 다른 정점에서보다 Mn의 경우 약 3배 이상 높게 농축되어 있으며, 유기물 함량을 조사해본 결과도 모두 1% 이상으로 평균보다 높게 나타났다. 또한 기술한 황화수소 함량을 조사해본 결과도 이들 지역에서는 오염기준치인 200 ppm 이상의 높은 값을 보이고 있다. 따라서 결론적으로 이들 시료가 얻어진 묘도 안쪽(서쪽)지역은 다른 지역보다 Mn, V, Mo 등이 비교적 높게 농축되어 있어 저서 환경이 무산소 상태에 있다고 할 수 있다. 또한 기술한 바와 같이 이들 지역에서는 높은 유기물 함량과 높은 황화수소 함량이 나타나고 있으며, 주로 세립질 퇴적물이 분포하고 있는 것으로 나타났다.



**Fig. 9.** Inter-relationship among redox sensitive elements. Relatively strong positive relationships between Mn and V, V and Cu, Mn and Cu indicate potential anoxic bottom environmental conditions.

**요약 및 결론**

광양만에 대한 표층퇴적물의 지화학적 특성과 저서환경을 평가하기 위해 총 110개 정점에 대한 퇴적학적, 지화학적 연구를 수행하였다.

표층퇴적물의 분포특성은 사질퇴적물과 점토질 퇴적물이 다양하게 분포하고 있으며, 주로 점토질 퇴적물이 주를 이루고 있으며 사질 퇴적물은 영산강 하구역과 POSCO와

남해도사이의 수로에 극부적으로 분포하고 있다. 또한 이와 이웃하여 사질을 다소 포함한 점토질 퇴적물이 분포하고 있으며 점토질 퇴적물은 묘도안쪽(서쪽)과 여수반도 외해 쪽으로 분포하고 있다. 표층퇴적물의 유기물 함량은 점토질퇴적물에 비교적 다량으로 포함되어 있으며 조립질 퇴적물에는 상대적으로 소량 함유되어 있다. 지역적으로는 묘도 서쪽에서 1% 이상의 유기탄소함량을 보이고 있으며 수로에서는 0.6~0.8% 정도의 유기탄소 함량을 보이고 있다. 이와 같은 함량변화는 퇴적물의 입도



특성과 조화롭게 변화하고 있다. 유기물의 특성을 지시하는 C/N비에 근거한다면 현장에서 형성된 유기물과 인근 주변대륙에서 유입된 유기물이 혼재된 것으로 나타나고 있다. 또한 유기물의 C/S비는 저층환경이 일부 빈산소 혹은 무산소환경에 있음을 지시하고 있다. 탄산염 함량은 최대 36%까지 나타나고 있어 퇴적물중에 혼재된 패각편의 영향이 큰 것으로 생각된다. 전체적으로 묘도 서쪽의 일부 퇴적물에서 10% 이상의 탄산염함량을 보이고 있으며 수로에서는 이 보다 적은 4~8% 정도의 범위에서 탄산염 함량이 변화하고 있다. TOC와 탄산염함량과의 정량적 관계는 탄산염의 일부가 퇴적 후 저서환경의 영향에 의해 용해되었을 가능성을 지시하고 있다. 금속원소를 분석하여 산화-환원 환경에 민감한 몇몇 원소를 대상으로 조사해본 결과 묘도 안쪽의 일부지역에서는 다른 지역에 비해 3배 정도 더 농축되어 있으며 원소간 양의 상관관계를 보이고 있다. 전체적으로 높은 유기물 함량, 환원환경을 지시하는 C/S비 및 높은 농도를 보이면서 무산소 환경을 지시하는 금속원소들은 묘도안쪽(서쪽)의 니질 퇴적상에서 공통적으로 높게 나타나고 있음이 밝혀졌으며, 이는 묘도안쪽 지점의 저서환경이 환원적인 환경으로 유지되고 있음을 지시하는 것이라 할 수 있다.

적 요

광양만 표층퇴적물의 지화학적 특성 이해와 저서환경을 평가하기 위해 총 110개의 표층퇴적물을 분석하였다. 분석결과 퇴적상은 다섯 개의 퇴적상(니질, 사니질, 사질, 니사질 및 역사질을 포함한 니질 퇴적상)으로 분류할 수 있었다. 그러나 전체적으로 니질 퇴적상이 광양만의 주된 퇴적상으로 나타났다. 유기물의 C/N 및 C/S에 근거한 저서환경은 유기물중의 C/S비가 일부 시료에서 2.8 이상을 보이고 있는 것으로 보아 일부 지역에서는 무산소 환경상태에 있음을 보이고 있다. 퇴적물중 황화수소 함량은 최고 367 ppm에서 최소 약 1 ppm(평균 92 ppm)으로 나타났고 지역에 따라 심한 변동을 보이고 있다. 산화환원에 민감한 원소들(Mn, V, Mo, Cr)간의 상관관계는 조사지역중 묘도 안쪽 지역에서 강한 양의 상관을 보이고 있다. 높은 TOC함량과 높은 황화수소 함량 및 산화환원에 민감한 원소의 높은 농축이 묘도 안쪽의 시료에서 공통적으로 나타나는 특징을 보이고 있는데 이는 묘도안쪽 지역이 부분적으로 무산소 상태로 유지되고 있음과 동시에 잠재적으로 오염되었음을 지시하고 있다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원이 실시하는 “남해 특별관리해역의 관리모델 연구(BSPE819-00-1407-7)” 및 “Geochemical proxies를 이용한 연안 및 어장환경 평가기준 기반연구(E 84400)”에 대한 연구결과의 일부분이다. 시료채취 및 분석에 참여한 연구자들에게 감사드리며 유익한 제언을 주신 익명의 심사위원님에게도 감사의 의를 표한다.

참 고 문 헌

서울대학교. 1997. 연안 저서환경 건강평가 기술. 557pp.  
 일본 수산자원 보호협회. 1980. 수질오탁 조사지침. pp.256-257.  
 조영길, 이창복, 고철환. 2000. 광양만 표층퇴적물의 중금속 함량 및 분포. 한국해양학회지-바다. 5:131-140.  
 조영길, 이창복, 최만식. 1994. 남해 대륙붕 표층 퇴적물중 중금속 원소의 분포특성. 한국해양학회지. 29:338-356.  
 한국해양연구원. 2002. 남해 특별관리해역의 환경오염 관리모델 연구(1) 광양만 중심연구. BSPE 819-00-1407-7. 485 pp.  
 현상민, 최진성, 이태희, 최동림, 우한준. 2003. 광양만 및 여수해만 표층퇴적물의 지화학적 특성과 중금속 오염. 한국해양학회지. 8:380-391.  
 현상민, 최진우, 신경순, 장 만. 2002. 외나로도 주변해역 퇴적물의 지화학적 특성과 저서 생물상. 한국환경과학회지. 11: 215-225.  
 최진우, 유육환, 이우진. 2003a. 광양만에 서식하는 대형저서동물의 하계 공간분포양상. 한국해양학회지-바다. 8:14-28.  
 최진우, 현상민, 장만. 2003b. 저서동물에 의한 여름철 광양만의 저서환경 상태파악. 환경생물. 21:101-113.  
 Berner RA. 1984. Sedimentary pyrite formation: An update. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 48:605-615.  
 Berner RA 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.  
 Bertine KK. 1972. The deposition of molybdenum in anoxic waters. *Mar. Chem.* 1:43-53.  
 Bottrell SH, JA Hannam, JE Andrews and BA Maher. 1998. Diagenesis and remobilization of carbon and sulfur in mid-Pleistocene organic-rich freshwater sediment. *J. Sed. Res.* 68:37-42.  
 Calvert SE and TF Pedersen. 1993. Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: implications for the geological record. *Mar. Geol.* 113:67-88.

- Chapman PM. 1990. The sediment quality triad approach to determining pollution-induced degradation. *Sci. Total Environ.* 97-98:815-825.
- Fork RL and WC Ward. 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *Jour. Sed. Petrol.* 27:3-26.
- Forstner U and GTW Wittmann. 1981. *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag, New York. 486 pp.
- Hubner A, GJ De Lange, J Dittmer and P Halbach. 2003. Geochemistry of an exotic sediment layer above sapropel S-1: mud expulsion from the Urania Basin, eastern Mediterranean. *Mar. Geol.* 197:49-61.
- Jung HS, CB Lee, YG Cho and JK Kang. 1996. A mechanism for the enrichment of Cu and depletion of Mn in anoxic marine sediments, Bonwol intertidal flat, Korea. *Mar. Pollut. Bull.* 32:782-787.
- Leventhal JS. 1983. An interpretation of carbon and sulfur relationship in Black Sea sediments as indicator of environments of deposition. *Geochim. Cosmochimica Acta.* 47:133-137.
- Morford JL, AD Russell and S Emerson. 2001. Trace metal evidence for changes in the redox environment associated with the transition from terrigenous clay to diatomaceous sediment, Saanich Inlet, BC. *Mar. Geol.* 174:355-369.
- Muller PJ. 1977. C/N ratio in Pacific deep-sea sediments: effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 41:765-776.
- Muller PJ and E Suess. 1979. Productivity, sedimentation rate, and sedimentary organic carbon in the ocean - 1. Organic carbon preservation. *Deep-Sea Res.* 26:1347-1362.
- Ricken W. 1993. *Sedimentation as a Three-Component System, Organic carbon, Carbonate Noncarbonate*, Springer-Verlag, Berlin. 211 pp.
- Sohlenius G, KC Emeis, E Andren, T Andren and A Kohly. 2001. Development of anoxic during the Holocene fresh-brackish water transition in the Balic Sea. *Mar. Geol.* 177:221-242.
- Stein R. 1990. Organic carbon content/ sedimentation rate relationship and its paleoenvironmental significance for marine sediments. *Geo-Mar. Let.* 10:37-44.
- 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. 217pp.
- Yokoyama H. 1995. Macrobenthic assemblages in Omura Bay-1. Community parameters versus bottom environmental factors. *Bull. Natl. Res. Inst. Aquacult.* 24:43-53. (in Japanese with English abstract).
- Yokoyama H. 2000. Environmental quality criteria for aquaculture farms in Japanese coastal area - a new policy and its potential problems-. *Bul. Natl. Res. Inst. Aquacult.* 29:123-134. (in Japanese with English abstract).

Manuscript Received: October 17, 2003

Revision Accepted: December 24, 2003

Responsible Editorial Member: Wonchoel Lee  
(Hanyang Univ.)