The Journal of the Oceanological Society of Korea
Vol. 27, No. 1, pp. 55-65, March 1992

황해 남동해역 표층퇴적물 중 수종 금속원소의 분포 특성에 관한 연구

이창복[1] · 정회수[1] · 정갑식[2]
[1]서울대학교 해양학과
[2]한국해양연구소 광물자원연구실

Distribution of Some Metallic Elements in Surface Sediments of the Southeastern Yellow Sea

CHANG-BOK LEE[1], HOI-SOO JUNG[1] AND KAP-SIK JEONG[2]
[1]*Dept. of Oceanography, Seoul National University*
[2]*Marine Mineral Resource Lab., Korea Ocean Research & Development Institute*

황해 남동해역에서 채취한 97개 표층퇴적물을 대상으로 그 지화학적 특성을 규명하기 위하여 철, 망간, 니켈, 구리 및 납의 5가지 금속원소 함량과 아울러 퇴적물의 입도와 탄산염 함량 등이 분석되었다.

분석된 금속원소 중 니켈과 구리는 퇴적물 입도와 밀접한 상관관계를 나타내어 그 공간적 분포는 입도분포와 유사하게 나타났다. 이와는 대조적으로 망간과 납의 경우는 입도와의 관련성이 미약하였으며, 전반적으로 한국 연안에 인접한 시료에서 높은 함량이 나타났다. 한편, R-mode 요인분석 결과도 니켈과 구리의 함량을 조절하는 요인이 망간이나 납의 함량을 조절하는 요인들과 구별됨을 보여주었으며, 금속원소의 행동과 분포에 있어 이렇게 상반된 결과가 나타나는 현상은 퇴적후 속성작용 및 환경오염물질 유입의 영향에 기인한 것으로 해석되었다. 이에 근거하여 이들 금속원소들의 비가 서로 다른 기원의 세립물질들을 구분하는 특징으로 이용될 수 있는 가능성이 제시되었다.

Ninety-seven surface sediment samples, collected from the southeastern part of the Yellow Sea, were analyzed for their contents of five metallic elements, including Fe, Mn, Ni, Cu and Pb, as well as their grain-size and calcium carbonate content.

The result showed a contrasting behaviour among the five metallic elements, with respect to their relationship with the sediment grain-size. Contents of nickel and copper demonstrated a fairly linear relationship with the sediment grain-size whereas those of manganese and lead did not. This different behaviour in these metals was interpreted as being the result of the anthropogenic inputs (for Pb) and modification during the early diagenesis (for Mn). The R-mode factor analysis result also confirmed the different behaviour of manganese and lead from that of copper and nickel. Based on this different behaviour in metals, the (Mn+Pb)/(Cu+Ni) ratio was suggested as a possible criterion for distinguishing the fine sediments in the study area, which originated from two different source areas, China and Korea.

서 론

황해는 중국대륙과 한반도에 의해 둘러싸여 있는 반폐쇄성 대륙붕해로서 평균수심 약 50m 내외의 천해 퇴적환경이다 (Fig. 1). 중국대륙으로부터는 북동쪽의 발해만을 거쳐 황하가 그리고 남서쪽으로는 양자강이 유입되며, 동쪽의 한반도로부터는 압록강, 한강, 금강 등이 유입된다. 황하와 양자강이 운반하는 육성 부유퇴적물은 연간 16억톤 이상에 달하며 (Milliman and Meade, 1983 ; Schubel et al., 1984),

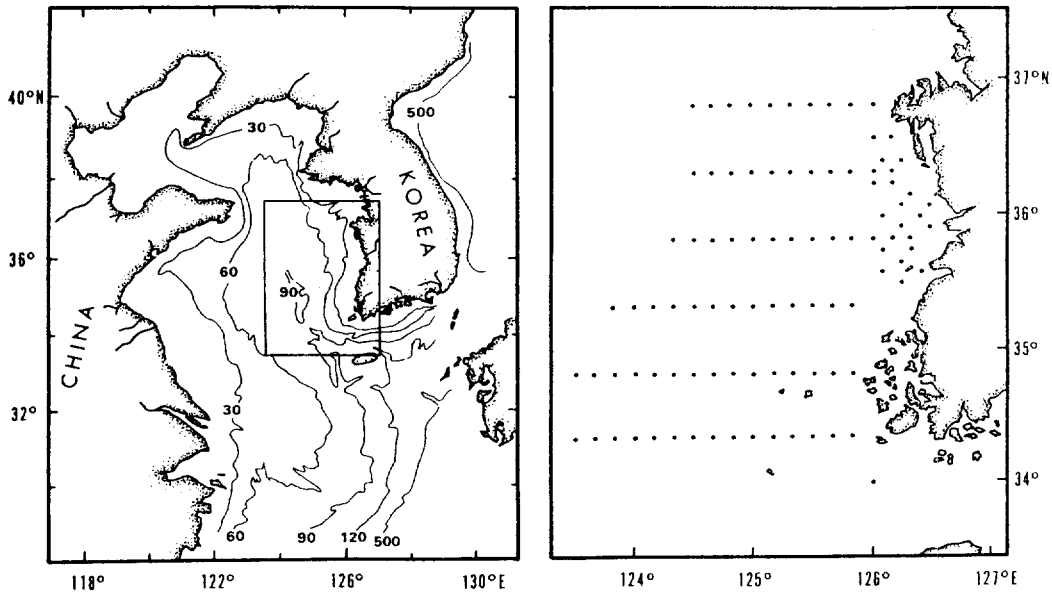

Fig. 1. Map showing the study area and locations of the surface sediment samples. Numbers in the figure of left hand side are depth contours in meter.

따라서 황해는 세계적으로 가장 많은 퇴적물을 공급받는 대륙붕 퇴적환경이다. 한편, 한반도의 강들은 비교적 소규모로서 이들이 운반하는 퇴적물의 양은 중국쪽의 강들에 비해 극히 적어 황해 전체의 퇴적물 수급에 미치는 영향은 무시할만 하다. 그러나 황하 기원 퇴적물이 주로 하구의 델타지역에 퇴적되거나 혹은 중국연안을 따라 남하하는 장수연안해류(Jiangsu Coastal Current)에 의해 남쪽으로 운반되고, 황해의 중앙부에는 황해난류(Yellow Sea Warm Current)가 북상하며, 또한 조류의 유속이 황해의 동측에서 비교적 강한 까닭에 황해 동부의 한반도에 인접한 지역에서는 중국쪽에서 유입된 퇴적물의 퇴적이 크게 제한될 것으로 생각된다 (Beardsley et al., 1985 ; Milliman et al., 1985). 따라서 한반도에 인접한 황해 동부의 해저퇴적물에 있어서는 한반도의 하천에서 유래한 퇴적물의 영향도 상당히 중요할 것이며, 점토광물에는 이러한 영향이 뚜렷이 나타난다고 보고되고 있다 (Park and Khim, 1990 ; Park et al., 1990).

황해 표층퇴적물의 입도특성과 그 지리적 분포양상은 이제까지의 많은 연구 결과로 비교적 상세히 알려져 있으나, 퇴적물의 지화학적 특성에 관한 내용은 아직 매우 부족한 실정이다. 퇴적물의 화학성분은 일차적으로 그 구성광물과 밀접히 연관되며, 퇴적물 근원지의 특징과 함께 이동 및 퇴적과정의 역사에 따른 변화도 아울러 반영한다. 황해 퇴적물의 근원지로서 가장 중요한 황하와 양자강의 부유퇴적물 화학성분과 이들을 식별할 수 있는 지화학적 특성들에 대한 연구는 근래에 들어 비교적 활발하게 이루어져 왔다 (Chen et al., 1983 ; Li et al., 1984 ; Yang and Milliman, 1983 ; Milliman et al., 1985). 그러나 황해에 분포하는 퇴적물의 화학성분에 대한 연구는 거의 이루어지지 못하고 있으며, 더욱이 한반도에서 기원하는 물질들의 지화학적 특성에 대해서는 전혀 알려진 바가 없다 하여도 과언이 아니다.

따라서 이러한 지식의 공백을 부분적으로나마 메우기 위하여, 본 연구에서는 황해 남동부의 표층퇴적물을 대상으로 수종의 중금속원소를 분석하였으며, 그 공간적 분포 특성과 아울러 분포에 영향을 미치는 조절요인을 밝히는 것을 목적으로 수행되었다. 특히 본 연구지역의 세립퇴적물에는 중국대륙과 한반도에서 기원한 물질들이 혼재되어 있는 것으로 알려져 있는 까닭에, 금속원소의 공간적 분포양상으로부터 서로 다른 기원과 퇴적역사를 갖는 세립

퇴적물들을 구분할 수 있는 지화학적 특징도 아울러 도출하고자 시도되어질 것이다.

재료 및 방법

본 연구에 사용된 퇴적물 시료는 한국해양연구소에서 「한국해역 종합 해양자원도 작성 연구」의 일환으로 1982-1985년 사이에 채취한 황해저 표층퇴적물로서, 퇴적물 시료의 채취는 Shipeck 채니기를 이용하여 이루어졌다. 분석된 97개 표층퇴적물은 동경 123°30′-126°30′, 북위 34°-37° 사이에 위치하여, 그 분포지역이 대체로 경·위도 각각 약 3°의 범위를 갖는다 (Fig. 1). 금속원소 분석을 위한 시료는 채니기와 접촉되지 않은 부분의 퇴적물을 취하였으며, 미리 세척된 polyethylene병에 넣어 냉장 보관한 상태에서 실험실로 옮겨졌다.

퇴적물의 입도분석을 위한 시료는 먼저 염산과 과산화수소로 탄산염과 유기물을 각각 제거한 후, 62.5 μm(4φ) 표준체로 물체질하여 사질부분과 니질부분을 구분하였다. 사질부분의 입도분석은 표준체를 이용하여 그리고 니질부분의 분석은 Sedigraph-5000 auto size-analyzer를 이용하여 이루어졌으며, 각종 조직표준치는 Folk and Ward (1957)의 식을 이용하여 계산하였다.

탄산염 함량과 금속원소 함량 분석을 위한 시료는 먼저 110℃로 건조시킨 후 agate mortar를 이용하여 분마하였다. 퇴적물의 탄산염 함량은 이렇게 건조 분마된 시료 1g을 취하여 Bernard calcimeter로 측정하였다. 한편, 퇴적물의 금속원소 함량을 측정하기 위해서는 먼저 건조 분마된 시료 1g을 teflon beaker 내에서 HF-$HClO_4$-HNO_3 혼합용액으로 반응시켜 규산염 광물격자를 파괴시킨 후, 0.1 N 질산용액으로 추출하여 IL-251형 원자흡광분석기로 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 퇴적물 분포와 입도특성

연구지역 내에 분포하는 표층퇴적물의 유형과 그 입도특성은 Fig. 2에 도시되었다. 전체적으로 보아 퇴적물의 평균입도는 연구지역의 북쪽으로부터 남쪽으로 가면서, 그리고 한반도에 연한 동쪽으로부터 황해중앙부를 향하여 서쪽으로 가면서 점차 세립화하는 추세를 보인다. 따라서, 사질퇴적물이 연구지역의 북부와 중앙에 걸쳐 넓게 분포하며, 이것을 세립의 니질 및 사니혼합질 퇴적물이 서쪽과 남쪽에서 둘러싸고 있는 분포양상을 나타낸다. 니질부분(<62.5 μm)이 90% 이상을 차지하는 니질퇴적물은 연구지역의 서부에 주로 분포하며, 또한 연구지역의 동남부에서도 (동경 125°30′ 부근) 한반도 해안을 따라 남북방향으로 띠모양을 이루며 분포하고 있다. 이렇게 동쪽과 서쪽으로 나뉘어진 두개의 니질퇴적물 분포대 사이에는 사니혼합질 퇴적물이 넓게 분포한다. 한편, 연구지역 서부에 분포하는 니질퇴적물은 동경 122° 부근까지 계속 이어져 황해 중앙부를 넓게 덮고 있으며, 북쪽으로는 중국의 산동반도 주변에까지 이어진다.

황해저의 표층퇴적물은 전반적으로 세립퇴적물이 우세한 가운데 조립한 사질퇴적물은 한반도에 연한 황해의 동부에 집중되어 분포한다. Lee et al. (1988)은 퇴적물의 중광물 분석을 통하여 이들 사질퇴적물이 현세 해수면상승 과정에서 형성된 것임을 주장한 바 있다. 동계 북서계절풍의 영향과 조류의 에너지가 모두 황해의 동부에서 강하게 작용하는 사실을 고려할 때 파랑과 조류에 의한 세립물질의 재동이 황해 동부의 사질퇴적물 분포에 큰 영향을 미칠 것이며, 사질퇴적물에서 보여지는 양호한 분급도는 이러한 재동의 결과를 반영한 것으로 판단된다. Wells(1988)는 초겨울 북서계절풍의 영향으로 형성되는 연안 혼탁수괴가 한반도 서남해안을 따라 발달하여 남해로 유입하는 현상을 보고하였으며, 이 혼탁수괴의 외해쪽 경계는 본 연구해역의 동남부에 발달한 니질퇴적물의 분포대와 대체로 일치한다.

한편, 본 연구지역의 서부와 동남부에 두개의 분리된 분포대로 발달한 세립퇴적물은 그 근원과 이동경로에 있어 서로 상당히 다른 것으로 판단된다. 연구지역 서부에 발달하여 황해 중앙부로 이어지는 넓은 분포대의 세립퇴적물은 그 분포의 연속성과 황해 내 세립물질의 수지를 고려할 때 주로 황하 및 고황하에서 기원한 물질들로 구성되었을 것이다 (Milliman and Meade, 1983 ; Schubel et al., 1984 ; Lee and Chough, 1989). 그러나 한반도에 인접하여 발달한 연구지역 동남부의 세립퇴적물에 있어서는 한반도 하천에 의해 공급된 물질들이 매우

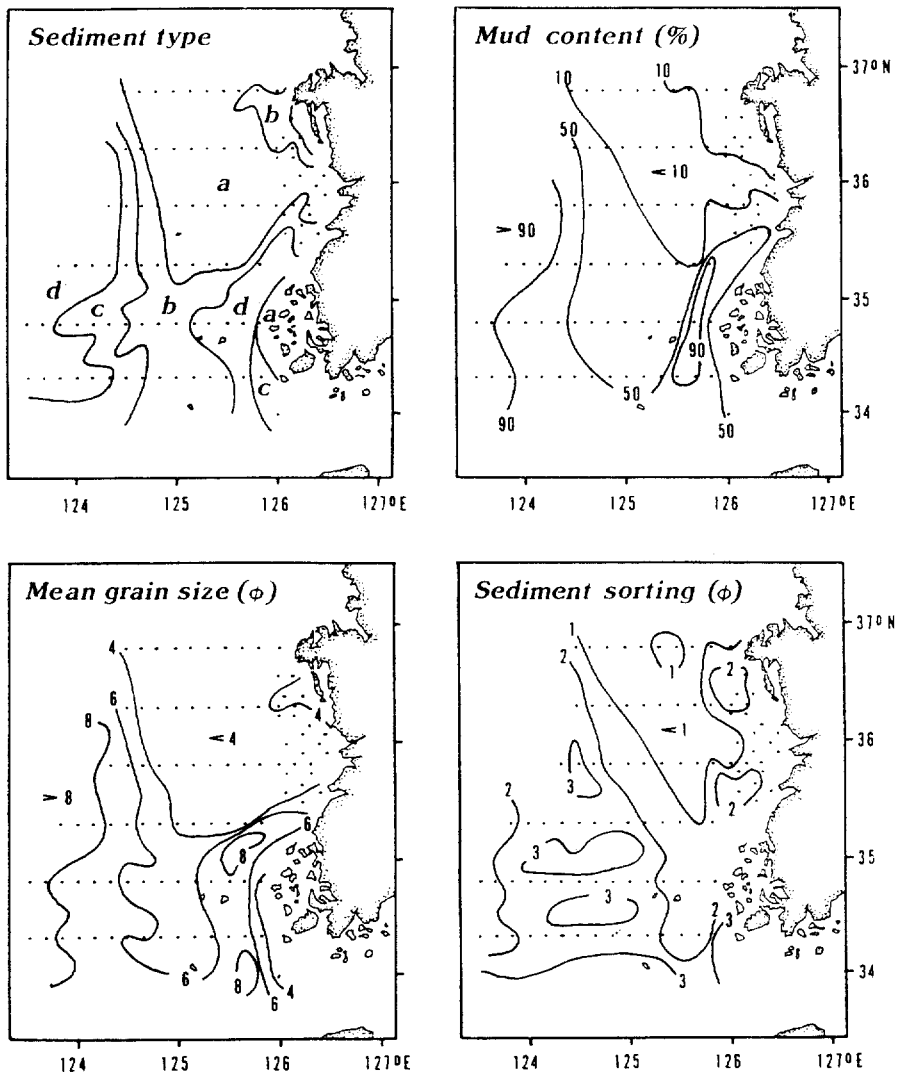

Fig. 2. Areal distributions of the grain-size properties of surface sediments in the southeastern Yellow Sea. The sediment types are classified following the nomenclature scheme of Shepard (1954) and each type in the figure is defined as follows: a=sand, b=silty sand and clayey sand, c=sansicl and sandy clay, d=silt, clay, clayey silt, silty clay, and sandy silt. The mean grain-size (Mz) and sediment sorting (σI) values are calculated by the graphic method of Folk (1968).

중요한 것으로 판단되며, 그 지리적 분포양상과 아울러 황해 동부에서 한국 연안을 따라 남하하는 해수유동의 존재 (Wells and Huh, 1984 ; KORDI, 1987 ; 승, 1990), 점토광물의 조성 (Chough and Kim, 1981 ; Park et al., 1986 ; Park and Khim, 1990) 그리고 이미 언급한 연안 혼탁수괴의 존재 등이 그것을 뒷받침한다.

2. 탄산염 함량

퇴적물의 탄산염 함량은 4.9-26.4%의 넓은 범위를 보이나 특히 높은 값을 나타낸 3개의 시료를 제외하면 5-12% 사이의 비교적 좁은 함량범위로 제한된다. 탄산염 함량은 퇴적물의 입도와는 별다른 관련성을 나타내지 않으며 일반적으로 해안선에 인접한 퇴적물에서 높고, 또한 외해역에서는 연구지역의

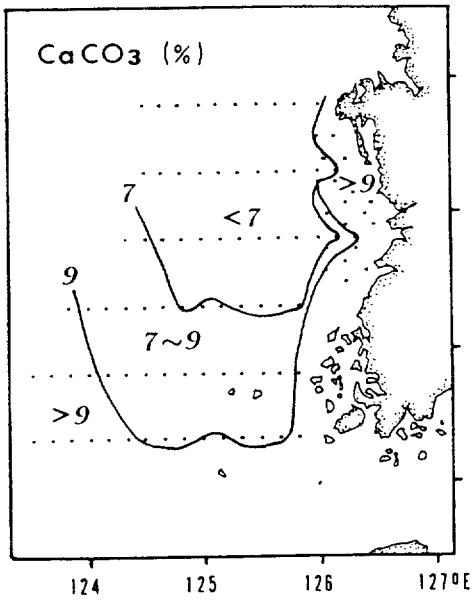

Fig. 3. Areal distribution of the $CaCO_3$ content of surface sediments in the southeastern Yellow Sea.

남쪽과 서쪽으로 가면서 높아지는 경향을 보인다 (Fig. 3). 해안선에 인접하여 높은 탄산염 함량이 나타나는 현상은 아마도 이매패류 패각의 영향이 연안에서 상대적으로 더 큰 데에 기인한 것으로 설명할 수 있을 것이다. 한편, 외해역에 분포하는 퇴적물 중에서는 연구지역 남서부의 니질퇴적물이 연구지역 북부의 사질퇴적물에 비하여 전반적으로 높은 탄산염 함량을 보인다. 이렇게 세립퇴적물이 조립퇴적물보다 높은 탄산염 함량을 나타내는 현상은 이들 외해역의 탄산염물질 구성 성분중에서 조립한 패각편의 중요성이 상대적으로 작음을 시사한다.

황해 퇴적물에서 탄산염 함량이 남쪽으로 증가하는 경향은 Chough (1983)에 의해서도 이미 언급된 바 있으며, Niino and Emery (1961)는 황해 세립질 퇴적물에서 유공충각이 탄산염물질의 중요한 구성 성분임을 보고하였다. 그러나 한편, 황해 중부 및 서부에 분포하는 세립퇴적물의 주 근원으로 알려진 황하의 부유물질이 황토층에서 기원한 다량의 세립 탄산염광물을 함유하는 사실을 고려할 때 (Millimam et al., 1985), 연구지역 남서부 니질퇴적물에서 나타난 비교적 높은 탄산염 함량에 있어서는 이러한 황하기원 물질의 영향도 배제할 수 없을 것이다.

Table 1. Average contents of metallic elements in total sediments, as compared with that in the muddy and sandy sediments, from the southeastern Yellow Sea.

	Fe (%)	Mn (ppm)	Pb (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)
Total samples (n=97)	1.2	220	23	15	11
muddy samples (n=48)	1.6	227	22	22	15
sandy samples (n=49)	0.8	214	23	9	7

3. 금속원소 함량

연구지역의 97개 퇴적물에서 측정된 금속원소의 함량범위와 평균값은 철 0.1-4.3% (평균 1.2%), 망간 75-900 ppm (220 ppm), 니켈 2.5-55.0 ppm (15.3 ppm), 구리 3.0-28.0 ppm (10.7 ppm), 납 11-71 ppm (22.6 ppm) 등으로 나타났다. 따라서, 본 연구지역 퇴적물의 금속원소 함량은 지각물질이나 천해저 퇴적물의 세계적 평균함량과 비교할 때 납을 제외하고는 매우 낮으며 (Turekian and Wedepohl, 1961 ; Wedepohl, 1969), 한반도 주변의 타 환경에서 보고된 값에 비해서도 전반적으로 낮다 (장 등, 1981 ; 석과 박, 1983 ; 조, 1990 ; Lee et al., 1985). 이들 97개의 퇴적물 중에서 평균입도(Mz)가 4 φ보다 조립한 49개 시료에서의 평균값을 4 φ보다 세립한 48개 시료에서의 평균값과 비교하면, 탄산염의 함량과 망간 및 납의 함량은 차이가 별로 없는 반면 철과 니켈 및 구리의 함량은 세립한 퇴적물에서의 평균값이 조립한 퇴적물에서보다 훨씬 크게 나타났다 (Table 1).

Fig. 4에는 분석된 금속원소들의 함량과 퇴적물 입도와의 관계가 도시되었다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 분석된 금속원소들 중에서 니켈과 구리의 함량은 퇴적물 입도와 비교적 양호한 관련성을 보여 입도가 세립화함에 따라 증가하는 경향을 나타내나, 망간과 납은 이러한 입도와의 관련성이 뚜렷하지 않다. 퇴적물 내의 금속원소 함량은 일반적으로 퇴적물의 입도에 따라 크게 변화하는 것으로 알려져 있으며 (Förstner and Wittman, 1979 ; Salomons and Förstner, 1984), 한반도 주변의 퇴적물에서도 이와 같은 입도와의 관련성은 보고되어 왔다 (Lee, 1985 ; Lee et al., 1985 ; Lee et al., 1991). 본 연구지역 퇴적물에서 망간과 납이 퇴적물의 입도와

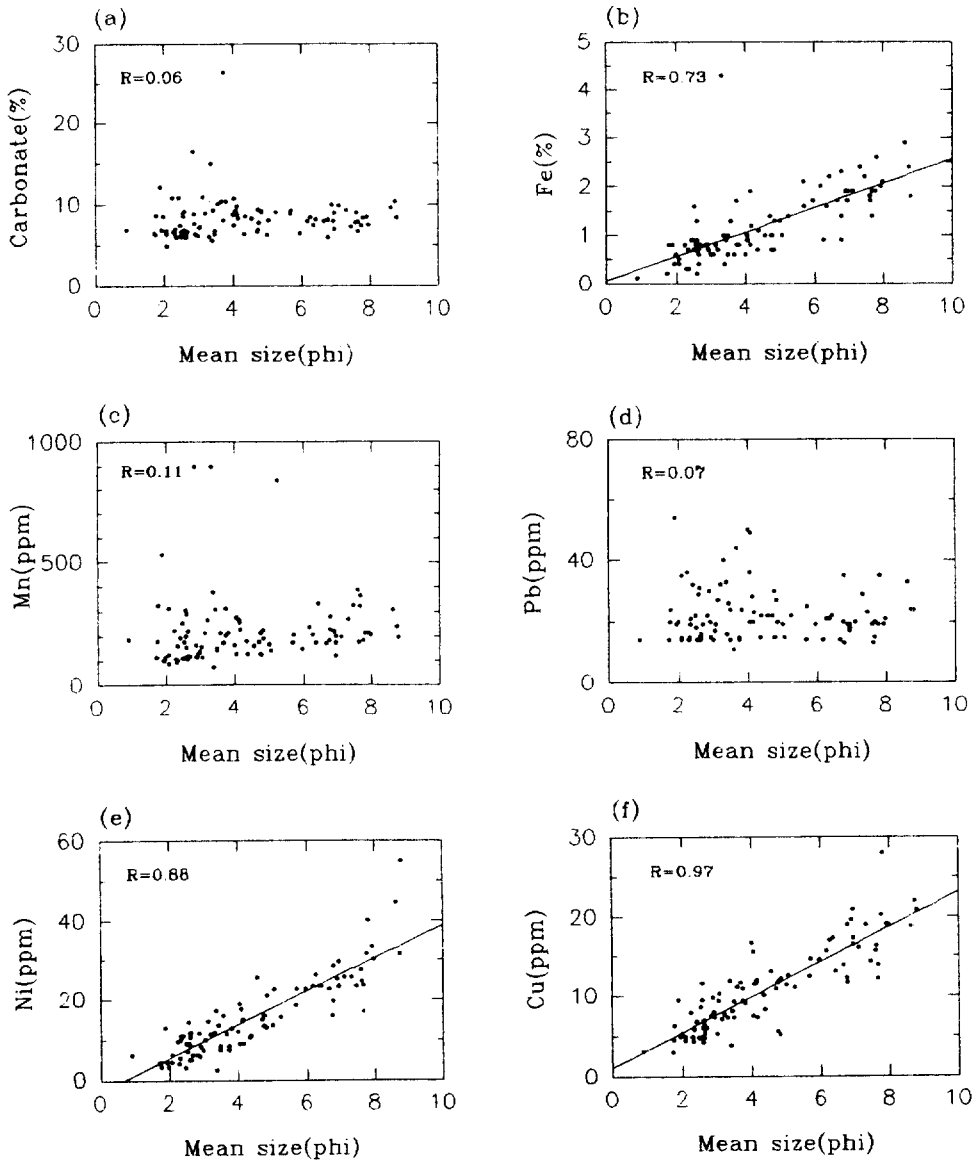

Fig. 4. Pair diagrams relating the contents of (a) $CaCO_3$, (b) Fe, (c) Mn, (d) Pb, (e) Ni and (f) Cu in surface sediments with the mean grain-size (Mz). Lines in (b), (e) and (f) are best fit regression lines.

나타내는 관계가 미약한 것은 입도 이외에 퇴적물의 금속함량을 조절하는 다른 요인이 중요하게 작용함을 지시하며, 또한 이 환경에서 망간과 납의 근원 및 이동양상이 니켈이나 구리와 다름을 시사한다. Fig. 4에서 망간 및 납의 함량이 같은 입도의 다른 퇴적물에 비해 특히 높게 나타난 퇴적물들은 모두 연안에 인접한 시료이며, 근원지로부터의 거리나 혹은 오염물질의 유입 등으로 인한 공간적 변화가 입도의 조절에 의한 영향보다 크게 작용한 결과라고 해석된다.

퇴적물의 금속원소 함량을 조절하는 요인을 보다 객관적으로 분석하기 위해서 분석된 97개 퇴적물의 탄산염, 망간, 철, 니켈, 납, 구리, 및 니질(<62.5 μm)의 함량을 변수로 하여 R-mode 요인분석을 실시하였다. 요인분석의 결과는 Table 2에 나타내었으며, 이 표에 나타난 4개의 요인으로 93.4%의 총분산(to-

Table 2. Varimax-rotated R-mode factor pattern for sediments from the southeastern Yellow Sea (n=97).

Loading Factors on	1	2	3	4	commun-ality
$CaCO_3$	0.07	0.18	0.11	**0.97**	0.99
Mn	0.06	**0.94**	0.17	0.21	0.96
Fe	**0.79**	**0.47**	−0.03	−0.02	0.85
Ni	**0.95**	−0.02	0.09	0.04	0.91
Pb	0.03	0.14	**0.98**	0.11	0.99
Cu	**0.95**	−0.04	0.13	0.11	0.94
% mud	**0.93**	0.10	−0.12	0.03	0.90
variance	47.3	16.7	14.9	14.5	
Cumulative		64.0	78.9	93.4	

tal variance)이 설명되었다. Factor 1은 총분산의 47.3%를 설명하는 요인으로서, 니켈과 구리 및 니질의 함량과 아울러 철 함량에 있어 매우 높은 적재량 값을 나타낸다. 이들 관련된 변수들을 공통적으로 묶는 특징은 앞서 언급된 바와 같이 입도와의 양호한 관련성이며 (Fig. 4), 따라서 이 Factor 1은 퇴적물 입도의 조절요인으로 해석될 수 있겠다. Factor 2는 망간에 특히 높고 또 철에 있어서도 유의한 적재량 값을 나타내며, 이들 두 원소의 지화학적 공통성으로 미루어 (Degens, 1965 ; Burns and Burns, 1981) 산화물의 요인으로 해석하는 것이 합리적이라 판단된다. 이와 같은 해석에 근거할 때 본 연구지역 퇴적물에서 망간의 함량은 산화물(혹은 수산화물)에 의해 조절되는 반면 철의 함량은 퇴적물 입도와 산화물의 공통적 조절을 받는다고 추론할 수 있을 것이다.

한편, Factor 3과 Factor 4는 비록 그 설명되는 분산이 총분산의 각각 14.9%와 14.5%로서 Factor 2의 16.7%에 비할 때 작지 않으나, 이 요인들은 한 변수에만 유의한 적재량을 나타냄으로서 (각각 납 함량과 탄산염함량) 다변량분석에 있어서의 통계적 의미는 매우 제한된다 하겠다. 그러나 납과 탄산염의 함량이 앞서의 두가지 요인에 의해 설명될 수 없고 또 각각 독립적 요인에 의해 조절된다는 사실은 이 환경에서의 금속원소 지화학을 이해하는 데 있어 매우 중요한 의미를 시사한다. 즉, 분석된 5가지 금속원소 중에서 납은 그 근원과 이동 및 퇴적에 관여된 현상이 타 금속원소들과 구별되어진다는 사실이다. 납은 특히 휘발유 첨가제로 쓰여 대기를 통해 환경으로 다량 유입되는 원소로서 (Goldberg, 1976 ; Nriagu, 1978), 비록 측정된 납의 함량은 그리 높지 않으나 이 요인분석으로 나타난 결과와 앞서 살펴 본 퇴적물 입도와의 약한 관련성 등은 모두 납의 분포에 오염물질의 영향이 중요할 것임을 지시한다고 판단된다. 한편, 탄산염과 관련해서는 이 환경에서는 탄산염이 본 연구에서 다룬 5가지 금속원소들의 함량에는 별 영향을 미치지 못함을 나타냄을 반영한다.

4. 금속원소의 분포와 (Mn+Pb)/(Ni+Cu) 비

분석되어진 금속원소들 중에서 철을 제외한 4개 원소의 연구지역 내 공간적 분포는 Fig. 5에 도시되었다. 니켈과 구리의 분포는 전체적으로 퇴적물 입도의 분포와 유사한 유형으로 나타나 사질퇴적물에서 낮고 니질퇴적물에서 높으며, 두 원소 모두 이 지역의 주요 한반도 배수하천인 금강과 영산강 하구 부근에서 뚜렷한 함량 변화를 나타내지 않는다. 반면, 망간의 경우는 금강과 영산강 하구 부근에서 함량이 가장 높고 그곳으로부터 멀어져 갈 수록 점차 감소하여 한반도의 하천이 본 연구지역 퇴적물에 분포하는 망간의 중요한 공급원임을 지시한다. 한편, 납의 경우도 망간 만큼 뚜렷하지는 않으나 한반도 해안에 인접한 퇴적물에서 일반적으로 높고, 특히 금강 하구의 남쪽과 북쪽 지역에서 매우 높은 함량이 나타나 이 원소의 주요 공급원이 한반도 연안에 있음을 시사한다.

이상과 같은 금속원소들의 공간적 분포양상과 아울러 앞서 살펴 본 입도와의 관련성 및 요인분석 결과를 종합하여 고찰할 때, 본 연구지역 퇴적물, 특히 니질의 세립퇴적물에 있어 망간이나 납과 같은 금속원소는 한반도 기원 물질의 추적자로 사용될 수 있음을 시사한다. 한편, 퇴적물 내 금속원소의 함량은 크건 작건 간에 입도의 영향을 받으며, 이러한 영향이 어떠한 형태로든 보정된 후에야 그 공간적 분포에 대한 의미있는 해석이 가능해진다. 입도의 영향을 보정하기 위해서는 그동안 다양한 방법들이 제시되었으며, 그러한 예로서 입도를 외삽하여 보정하는 방법 (Salomons and De Groot, 1978), 퇴적물 입자의 표면적으로 보정하는 방법 (Oliver,

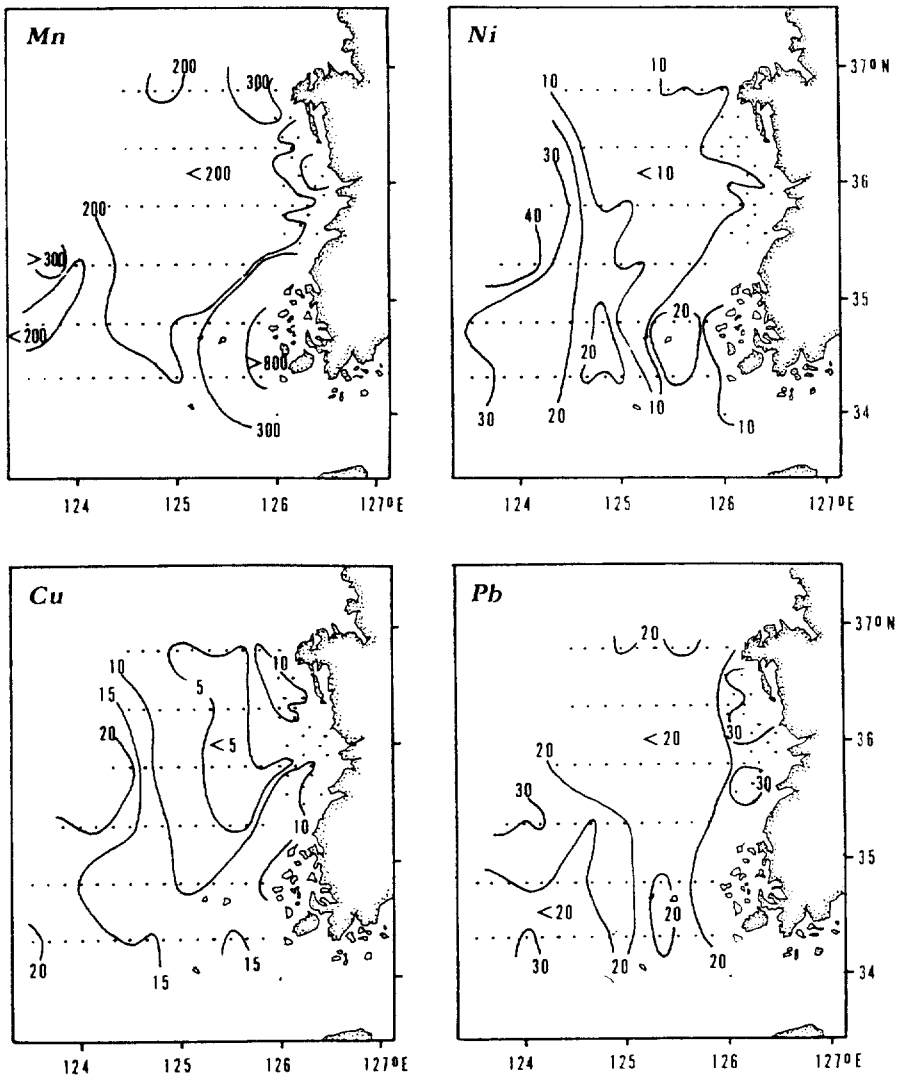

Fig. 5. Areal distributions of the total contents of Mn, Ni, Cu and Pb in surface sediments of the southeastern Yellow Sea. Numbers are in ppm.

1973), Al과 같은 보존성 원소와의 비로서 보정하는 방법 (Bruland et al., 1974) 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 입도영향을 보정하기 위하여 금속원소들 사이의 비율을 이용하였다. 일반적으로 더 널리 쓰이는 Al과의 비를 이용하는 것이 바람직하겠으나 불행히도 본 연구에서는 주성분원소의 분석이 이루어지지 않았으며, 입도외삽이나 입자표면적을 이용하는 보정방법은 그 과정이 복잡할 뿐만 아니라 그 결과의 해석에 있어서도 논란의 여지가 있다. 반면, 금속원소들 사이의 비를 이용하게 되면 다른 분석을 추가하는 번거로움이 덜어질 수 있으며, 실제로 Helz et al. (1985)는 미국 Chesapeake Bay 퇴적물에서 그리고 Williams et al. (1978)은 미국 Hudson River estuary 퇴적물에서 금속원소들 사이의 비율을 이용해 그 근원을 추적할 수 있음을 보여주었다. 한편, 본 연구지역에서 분석된 원소들 중 니켈과 구리의 함량은 퇴적물 입도와 밀접한 관련성을 나타내며, 따라서 한반도 기원의 영향이 비교적 큰 것으로 나타난 망간과 납의 함량을 니켈과 구리의 함량으로 나누어줌으로써 망간과 납의 함량

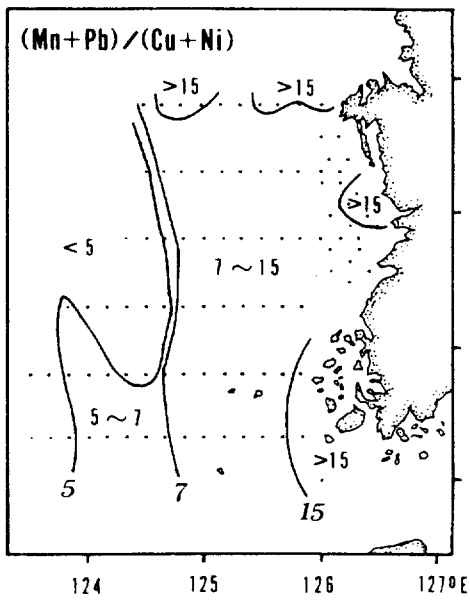

Fig. 6. Areal distribution of the (Mn+Pb)/(Cu+Ni) ratio in surface sediments of the southeastern Yellow Sea.

에 내재된 입도의 영향을 어느 정도 보정할 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 철의 함량도 입도와 양호한 관련성을 나타내나 앞서 요인분석 결과에서 논의된 바와 같이 산화물의 영향을 상당히 받는 까닭에 이러한 금속원소 비의 계산에서 제외시켰다.

연구지역 표층퇴적물에서 계산된 (Mn+Pb)/(Ni+Cu) 비의 공간적 분포는 Fig. 6에 도시되었다. 전체적으로 보아 (Mn+Pb)/(Ni+Cu) 비는 한반도에 인접한 퇴적물에서 높고 황해 중앙부로 향해 감소하는 양상을 나타낸다. 이러한 공간적 분포 경향은 퇴적물에 포함된 망간과 납의 주요 근원이 한반도 쪽에 있다는 앞에서의 논의를 재확인해 준다. 본 연구지역의 97개 전체 퇴적물에서의 (Mn+Pb)/(Ni+Cu) 비 평균값은 9.3이며, 사질퇴적물에서의 평균값이 니질퇴적물에서 보다 높게 나타난다. 니질의 함량이 50% 이상인 퇴적물만을 살펴보면 한반도에 인접한 10개 퇴적물에서의 평균값은 12.0인 반면, 황해 중앙부에 연결된 연구지역 서부의 22개 퇴적물의 평균값은 불과 4.8로서 커다란 차이를 나타낸다.

한편, 퇴적물 내의 (Mn+Pb)/(Ni+Cu) 비는 average shale에서 7.7의 값을 가지며 (Turekian and Wedepohl, 1961), 황하 유역 황토층(loess)에서는 평균 6.4 (Jhang et al., 1990), 황하 부유퇴적물에서는 10.1-11.8 (Yang and Milliman, 1983 ; Li et al., 1984), 그리고 양자강 하구 부유퇴적물에서는 7.5로서 (Yang and Milliman, 1983) 중국 내에서 지역적인 차이를 나타낸다. 또한 한반도 주변에서는 경기만 퇴적물에서 평균 12.8 (장 등, 1981), 남해 대륙붕 퇴적물에서는 9.2 (조, 1990) 등으로 보고되었다. 따라서, 본 연구지역 퇴적물에서 나타난 공간적 (Mn+Pb)/(Ni+Cu) 비의 변화는 퇴적물 근원지에서의 차이를 반영하는 것이라기 보다는 서로 다른 이동과 퇴적과정의 역사에 기인한 이차적 현상으로 해석된다.

망간은 pH나 Eh 등의 환경조건에 민감한 원소로서 에스추어리 혼합과정에서의 침전으로 인하여 연안 부유퇴적물에서의 농도는 일반적으로 높으며 (Duinker et al., 1979), 퇴적 후의 초기속성 과정에서는 유기물 분해에 따른 화학환경의 변화로 말미암아 공극수를 통하여 해수 속으로 유출된다. 황하와 양자강 등 퇴적물의 운반이 많은 강 하구에서는 높은 퇴적율로 인하여 퇴적층 내의 무산소 (anoxic) 혹은 아산소 (suboxic) 환경이 형성되고 따라서 초기속성 과정에서 망간의 일부가 퇴적물에서 유리되어 해수 속으로 유출될 것이 기대되며, 실제로 Chen and Zeng (1983)은 양자강 하구 연안에서 외해쪽으로 가면서 퇴적물 중의 망간 함량이 감소하는 경향을 보고하고 있다. 이에 비하여 한반도를 배수하는 하천은 황하나 양자강에 비해 퇴적물의 운반량이 매우 적을 뿐만아니라, 하구역에서의 강한 조류와 동계 북서계절풍의 영향 등으로 인하여 연안에서의 퇴적물 속성작용이 상대적으로 제한될 것이 예상된다. 따라서, 본 연구지역에 분포하는 세립퇴적물 중에서 한반도 하천을 통해 유출된 세립퇴적물은 중국쪽에서 유래한 것에 비하여 보다 높은 망간의 함량을 가질 것으로 판단된다.

한편, 납은 대기를 통한 해양환경으로의 유입이 특히 중요한 원소로서 중국에 비해 자동차의 운행빈도가 높은 한국 주변에서 높은 함량이 나타나는 현상이 자연스러운 것으로 판단된다. 반면에 구리와 니켈은 입도와의 관련성에서 나타나듯이 퇴적 후의 변화나 오염에 의한 영향을 상대적으로 적게 받는다. 따라서 본 연구지역의 퇴적물에서 나타난 (Mn+Pb)

/(Ni+Cu) 비의 변화는 한반도와 중국쪽에서 기원한 물질들이 겪은 서로 다른 속성작용의 영향과 오염의 영향에 기인하였다고 추론할 수 있겠으며, 결과적으로 이렇게 서로 다른 기원의 세립퇴적물들을 구분하는 지화학적 특징으로 사용될 수 있는 가능성을 제시한다고 하겠다.

결 론

황해 남동해역의 97개 표층퇴적물을 대상으로 수행한 본 연구의 결과로서 얻어진 주요 내용들은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 연구지역의 북부에는 사질퇴적물이, 남부에는 니질 및 사니혼합질 퇴적물이 주로 분포하여 전체적으로 북에서 남으로 그리고 동에서 서로 가면서 퇴적물 입도가 감소하는 경향을 보인다. 연구지역의 서부와 동남부에 분리되어 발달한 니질퇴적물은 그 공간적 분포의 연속성이나 이 해역의 해양학적 특성을 고려할 때 각각 중국기원과 한반도기원 물질의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

2. 퇴적물의 탄산염 함량은 4.9-26.4%의 넓은 범위에서 변화하나, 본 연구에서 분석된 5개 금속원소의 함량에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

3. 퇴적물 내에 포함된 총 금속함량은 철 0.1-4.3%, 망간 75-900 ppm, 니켈 2.5-55.0 ppm, 구리 3.0-28.0 ppm, 납 11-71 ppm 등의 범위를 나타내어 비교적 낮게 나타났다. 이들 중 니켈과 구리는 입도와의 양호한 관련성을 나타낸 반면 망간과 납은 그렇지 않아 서로 대조적인 행동을 보여주었으며, R-mode 요인분석의 결과도 니켈과 구리의 함량을 조절하는 요인이 망간이나 납의 함량을 조절하는 요인들과 구별됨을 나타냈다. 본 연구지역 표층퇴적물에서 망간과 납의 함량이 입도와 미약한 상관관계를 보인 현상은 퇴적물 속성작용과 오염의 영향에 의한 것으로 해석되었다.

4. 퇴적물 내 금속원소들의 공간적 분포와 금속원소들 사이의 비를 이용하여 서로 다른 기원과 퇴적역사를 갖는 세립물질들을 구분하는 방법이 시도되었으며, 본 연구지역 퇴적물에서는 (Mn+Pb)/(Ni+Cu) 비가 유의한 결과를 나타내는 것으로 제시되었다.

감사의 글

본 연구에서 사용된 재료는 한국해양연구소의 한국해역 종합 해양자원도 작성 연구시 채취 분석된 것으로서 저자들은 한국해양연구소에 심심한 감사의 뜻을 표한다. 본 연구결과에 대한 충남대학교 김기현 교수의 허심탄회하고 진지한 지적은 초고의 결점을 보완하는데 많은 도움이 되었기에 감사드리며, 아울러 자료의 통계처리에 대한 자문에 응해주신 서울대학교 박성현 교수께도 감사드린다. 본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구비에 (No. 890629-04) 의해 일부 지원되었다.

참고문헌

석봉출, 박병권, 1983. 제주도주위 및 남해연안 퇴적물중의 중금속함량. 한국해양학회지, **18**: 29-42.

승영호, 1990. 황해의 물리적 특성 고찰. *Yellow Sea Research,* **3**: 1-11.

장순근, 이창복, 석봉출, 정태몽, 유홍룡, 김성렬, 이경신, 1981. 연안환경도 작성연구 (경기만: 해양지질분야). 한국과학기술원 해양연구소, *BSPE* 00029-52-5, 220 pp.

조영길, 1990. 한국 남해 대륙붕 표면퇴적물의 지구화학적 특성에 관한 연구. 석사학위논문, 서울대학교, 106pp.

Beardsley, R.C., R. Limeburner, H. Yu and G.A. Cannon, 1985. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Cont. Shelf Res.,* **4**: 57-76.

Bruland, K.W., K. Bertine, M. Koide and E.D. Goldberg, 1974. History of metal pollution in Southern California coastal zone. *Environ. Sci. Technol.,* **8**: 425-432.

Burns, R.G. and V.M. Burns, 1981. Authigenic oxides. In: The Sea, V. 7, edited by C. Emiliani, Wiley Interscience, 875-914.

Chen, Y., X. Wang, M. Wu and Y. Zhao, 1983. Geochemistry and the material source of sediments in the East China Sea. In: Proc. Int. Symp. Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea, April 12-16, Hangzhou, China, China Ocean Press, Beijing, 763-772.

Chen, Z. and X. Zeng, 1983. Mechanism of iron and manganese transport in the Changjiang River plume. In: Proc. Int. Symp. Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea, April 12-16, Hangzhou, China, China Ocean Press, Beijing, 206-214.

Chough, S.K., 1983. Marine Geology of Korean Seas. IHRDC, Boston.

Chough, S.K. and D.C. Kim, 1981. Dispersal of fine-grained sediments in the southestern Yellow Sea: a steady-state model. *J. Sed. Petrology,* **51**: 721-728.

Degens, E.T., 1965. Geochemistry of sediments. Prentice-

Hall, Englewood Cliff, N.J. (USA).

Duinker, J.C., R. Wollast and G. Billen, 1979. Behaviour of Manganese in the Rhine and Scheldt estuaries. Estuar. *Coastal Shelf Sci.*, **9**: 727-738.

Folk, R.L. and W.C. Ward, 1957. Brazos river; a study in the significance of grain-size parameters. *J. Sed. Petrology*, **27**: 3-27.

Folk, R.L., 1968. Petrology of sedimentary rocks. Hemphill's, Austin, Texas (USA).

Förstner, U. and G. Wittmann, 1979. Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer-Verlag, Berlin.

Goldberg, E.D., 1976. The health of the oceans. The UNESCO Press, Paris.

Helz, G.R., S.A. Sinex, K.L. Ferri and M. Nichols, 1985. Processes controlling Fe, Mn and Zn in sediments of northern Chesapeake Bay. *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, **21**: 1-16.

Jhang, J., W.W. Huang, M.G. Liu, Y.Q. Gu and Z.Y. Gu, 1990. Element concentration and partitioning of loess in the Huanghe (Yellow River) drainage basin, north China. *Chem. Geol.*, **89**: 189-199.

KORDI, 1987. Oceanographic Atlas of Korean Waters, Vol. 1: Yellow Sea.

Lee, C.B., 1985. Sedimentary processes of fine sediments and the behaviour of associated metals in the Keum Estuary, Korea. In: Marine and Estuarine Geochemistry edited by Sigleo, A.C. and A. Hattori Lewis Publishers, Chelsea, 209-225.

Lee, C.B., Y.A. Park and C.H. Koh, 1985. Sedimentology and geochemical properties of intertidal surface sediments of the Banweol area in the southern part of Kyeonggi Bay, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **20**: 20-29.

Lee, C.B., Y.A. Park, H.J. Kang and D.C. Kim, 1991. Geochemical characteristics of the continental shelf and slope sediments off the southeastern coast of Korea. *Korean J. Quat. Res.*, **5**: 15-32.

Lee, H.J. and S.K. Chough, 1989. Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea. *Mar. Geol.*, **87**: 195-205.

Lee, H.J., K.S. Jeong, S.J. Han and K.S. Park, 1988. Heavy minerals indicative of Holocene transgression in the southeastern Yellow Sea. *Cont. Shelf Res.*, **8**: 255-266.

Li, Y.H., H. Teraoka, T.S. Yang and J.S. Chen, 1984. The elemental composition of suspended particles from the Yellow and Yangtze Rivers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**: 1561-1564.

Milliman, J.D., R.C. Beardsley, Z.S. Yang and R. Limeburner, 1985. Modern Huanghe-derived muds on the outer shelf of the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, **4**: 175-188.

Milliman, J.D. and R.H. Meade, 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J. Geol.*, **91**: 1-21.

Niino, H. and K.O. Emery, 1961. Sediments of shallow portions of East China Sea and South China Sea. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **72**: 731-762.

Nriagu, J.O., 1978. The biogeochemistry of lead in the environment. Elsevier, Amsterdam.

Oliver, B.G., 1973. Heavy metals levels of Ottawa and Rideau River sediment. *Environ. Sci. Technol.*, **7**: 135-137.

Park, Y.A. and B.K. Khim, 1990. Clay minerals of the recent fine-grained sediments on the Korean continental shelves. *Cont. Shelf Res.*, **12**: 1179-1191.

Park, Y.A., B.K. Khim and S.C. Park, 1990. Origin and distribution patterns of muddy deposits in the Yellow Sea. In: Proc. 1st Int. Conf. on Asian Marine Geology, Shanghai, Sept. 7-10, 1988. China Ocean Press, Beijing, 335-350.

Park, Y.A., S.C. Kim and J.H. Choi, 1986. The distribution and transportation of fine-grained sediments on the inner continental shelf off the Keum River estuary, Korea. *Cont. Shelf Res.*, **5**: 499-519.

Salomons, W. and A.J. De Groot, 1978. Pollution history of trace metals in sediments, as affected by the Rhine River. In: Environmental Biogeochemistry and Geomicrobiology edited by Krumbein, W.E., vol.1, Ann Arbor Science, 149-162.

Salomons, W. and U. Förstner, 1984. Metals in the Hydrocycle. Springer-Verlag, Berlin.

Schubel, J.R., H. Shen and M. Park, 1984. A comparison of some characteristic sedimentation processes of estuaries entering the Yellow Sea. In: Marine Geology and Physical Processes of the Yellow Sea edited by Park, Y.A., O.H. Pilkey and S.W. Kim, Seoul, 286-308.

Shepard, F.P., 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *J. Sed. Petrology*, **24**: 151-158.

Turekian, K.K. and K.H. Wedepohl, 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **72**: 175-192.

Wedepohl, K.H., 1969. Handbook of Geochemistry. Springer-Verlag, Berlin.

Wells, J.T., 1988. Distribution of suspended sediment in the Korea Strait and southeastern Yellow Sea: onset of winter monsoons. *Mar. Geol.*, **83**: 273-284.

Wells, J.T. and O.K. Huh, 1984. Fall season patterns of turbidity and sediment transport in the Korea Strait and southeastern Yellow Sea. In: Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas, Elsevier, Amsterdam, 387-397.

Williams, S.C., H.J. Simpson, C.R. Olsen and R.F. Bopp, 1978. Sources of heavy metals in sediments of the Hudson River estuary. *Mar. Chem.*, **6**: 195-213.

Yang, Z. and J.D. Milliman, 1983. Fine-grained sedimemts of Changjiang and Huanghe Rivers and sediment sources of East China Sea. In: Proc. Int. Symp. Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea, April 12-16, Hangzhou, China. China Ocean Press, China Ocean Press, Beijing, 405-415.

Accepted March 13, 1992