

## 남해 대륙붕 표층퇴적물 중 중금속 원소의 분포 특성

조영길<sup>1</sup> · 이창복<sup>1</sup> · 최만식<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 해양학과

<sup>2</sup>기초과학지원센터

### Characteristics of Heavy Metal Distribution in Surface Sediments from the South Sea of Korea

YEONG-GIL CHO<sup>1</sup>, CHANG-BOK LEE<sup>1</sup> AND MAN-SIK CHOI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

<sup>2</sup>Korea Basic Science Center, Yuseong P.O.Box 41, Taejeon, 305-600, Korea

퇴적물의 지화학적 특성을 이해하기 위한 연구의 일환으로 남해 대륙붕에서 채취된 표층퇴적물에서 9개 금속(Al, Fe, Mn, Cu, Ni, Zn, Co, Cr, Pb)의 함량을 측정하였고, 선정된 일부 퇴적물에 대해서는 퇴적물내 금속의 화학적 존재형태에 관한 분석을 실시하였다.

퇴적물 중의 금속 함량은 전반적으로 퇴적물의 입도와 밀접한 관련성을 보여 연안해역에서 외해로 갈수록 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 한편, 망간과 코발트의 경우에는 다 금속에 비해 입도와 관련성이 덜 뚜렷하였으며, 이것은 이들 두 금속의 퇴적물내 존재형태별 구성이 타 금속들과 다른 현상에 기인한다. 특히 납의 함량은 지역적인 차이를 볼 수 있을 만큼 공간적으로 증가, 혹은 감소의 경향이 뚜렷하지 않아 퇴적물내 유입경로가 나머지 금속과 다름을 시사한다. 각 금속의 화학적 존재형태별 함량은 망간을 제외한 모든 금속에서 잔류부분이 전체함량의 평균 50% 이상을 차지하여, 미세 광물격자 형태의 존재가 가장 중요한 것으로 나타났다. 잔류부분 외에 구리, 아연, 망간 및 철은 산화물부분에서 다음으로 높은 각각 34.4%, 23.1%, 15.5%, 13.7%의 함량을 보였으며, 카드뮴과 망간, 코발트 및 니켈은 퇴적물의 탄산염부분에서 각각 42.8%, 40.3%, 30.6%, 19.0%로 분포하여 원소별로 다른 존재형태별 함량을 보였다. 따라서, 연구지역 퇴적물내 금속의 분포는 세립한 입도의 광물성분 외에 해수중에서의 침전이나 금속산화물과의 공침 등에 의한 특정 지화학 물질내 존재가능성의 차이에 따라 크게 조절되는 것으로 판단된다.

Sediment samples from the continental shelf of the South Sea of Korea are analysed to determine the concentration of Al, Fe, Mn, Cu, Ni, Zn, Co, Cr and Pb. Among these samples, fine-grained sediments were also analysed by a sequential extraction technique to know geochemical forms of the metals in this environments.

The total concentrations of Al, Fe, Cr, Ni, Cu and Zn in bulk sediments decreased gradually with the increase of distance from the coastal zone. This distribution patterns are well coincide with grain size distribution. However, the patterns of Mn, Co and Pb do not follow such an overall distribution. The concentration of Pb, particularly, did not show any features in areal distribution, which may be result from different pathways to the sediments, compared to the other metals. The speciation data show that a considerable amount of Cd, Mn and Co are bounded in the carbonate fraction, accounting for 42.8%, 40.3% and 30.6%, respectively. Cu, Zn, Mn and Fe are largely associated to oxide fraction with proportions of 34.4%, 23.1%, 15.5% and 13.7%, respectively. However, the metals in residual fraction account for more than 50% of the total metal concentration, except for Mn. These observations emphasize that residual fraction is the dominant component controlling the elemental concentration.

## 서 론

육지에 연한 대륙붕 퇴적물은 대부분이 육성기원 물질로 구성되는 까닭에 배수분지의 지질학적 특성을 포함한 육지환경의 영향을 크게 받으며, 동시에 연안의 복잡한 해수변동에 따라 그 분포가 좌우된다. 따라서, 이 퇴적물의 지화학적 성질은 근원지 물질의 조성은 물론 퇴적물의 운반 및 퇴적과정, 그리고 퇴적지의 제반 환경요인에 따라 조절되고 변화하게 된다.

한반도 남쪽에 위치하는 남해는 반폐쇄적 천해환경인 황해와 심해적 성격의 동해를 잇는 수심 100 m 내외의 전형적인 대륙붕 퇴적환경으로, 황해와 동지나해 및 동해로 연결되는 해류와 수괴가 상존하여 해양학적 현상의 변화가 시·공간적으로 크고 복잡한 해역이다. 육지에서 퇴적물 공급은 한반도 남부를 배수하는 섬진강과 낙동강을 통해서 이루어지며, 인접 해양으로부터 해수유입에 따른 세립물질 운반이 이 지역의 또 다른 퇴적물 공급원으로서 중요하다. 남해로 유입하는 해류는 황해의 연안을 따라 제주해협으로 들어오는 서한연안류(West Korea Coastal Current)와 동지나해로부터 폭 넓게 유입하는 대마난류가 대표적이다. 서한연안류에 의해서 운반되는 퇴적물의 양은 남해연안의 퇴적물 수급에 있어 상당한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며 (Kang and Chough, 1982; Wells, 1988; Lee et al., 1990), 또한 남해저 퇴적물의 일라이트 분포는 대마난류에 의한 양자강 기원의 퇴적물 유입을 시사한다 (Park et al., 1976; Park and Han, 1985). 따라서, 남해 대륙붕 퇴적물은 한반도의 육지에서 기원한 물질과 유입해류에 의해서 운반된 물질로 혼합되어 이 지역의 복잡한 해황조건을 반영하리라 예상된다.

지금까지 남해 대륙붕 퇴적물에 관한 연구는 주로 퇴적물의 분포나 광물성분 및 층서적인 측면에서 비교적 활발히 이루어져 왔으며, 퇴적물의 화학성분에 대한 연구는 상대적으로 부진하였다. 남해의 퇴적물을 대상으로 연구 보고된 지화학관련 논문들은 10여편 정도로서, 연안의 내만이나 육지에 가까운 한정된 범위의 특정해역을 중심으로 이루어진 것들이 대부분을 차지한다 (이 등, 1974; 이와 한, 1978; Hong et al., 1983; Lee and Lee, 1983; 석과 박,

1983; 박 등, 1987; 윤과 고, 1987; Hong et al., 1988; 윤 등, 1989). 남해 대륙붕 전역에 대한 연구는 아직까지 이루어진 바 없으며, 따라서 한정된 범위 내에서 이루어진 기존연구의 보고는 자칫 국지적으로 제한된 현상에 그칠 가능성을 배제할 수 없다. 게다가 원소의 이동 및 퇴적과정을 이해하는데 기초가 되는 화학적 존재형태에 관한 연구는 진해만에서 이루어진 Hong et al. (1983)의 보고를 제외하면 전무한 실정인어서, 대륙붕 퇴적물내 원소의 화학적 존재형태에 관하여는 전혀 알려져 있지 못하다. 이러한 이유로 남해 대륙붕 퇴적물의 전반적인 지화학적 특성을 파악하는 데는 제한된 지식에 의존할 수 밖에 없으며, 이해의 폭 또한 미흡한 현실이다.

따라서, 본 연구는 기존의 연구에서 드러난 문제들을 고려하여 보다 광범위한 지역에서 채취된 퇴적물을 분석함으로써 남해 대륙붕 퇴적물에 대한 더 많은 지화학적 지식을 제공할 목적으로 수행되었다. 이러한 연구의 일환으로 대륙붕의 대부분 지역에 걸쳐서 채취된 89개 퇴적물을 대상으로 중금속원소를 분석하고 아울러 연안에 분포하는 24개 퇴적물에 대해 존재형태별 분석을 병행하였으며, 이를 통해 연구지역 퇴적물내 금속의 함량과 공간적 분포에 영향을 미치는 조절요인들을 파악하였다.

## 재료 및 방법

본 연구에 사용된 퇴적물 시료는 '한바다호'(한국해양대학교, 1986년, 1988년)에 의한 두 차례의 항해기간과 '전남401호'(여수수산대학교, 1991년), '부산4205호'(부산수산대학교, 1992년)의 조사기간 중에 채취된 표층퇴적물로서, 총 89개의 시료가 분석에 선정되었다. 시료를 채취한 정점들의 지리적인 위치는 동경 126°~129°30', 북위 33°~35°에 이르는 해역으로 남해 대륙붕의 대부분 지역을 포함한다 (Fig. 1).

해저의 표층 퇴적물은 Van-Veen 채니기를 이용하여 채취하였으며, 채취된 퇴적물에서 채니기와 접촉된 부분을 피하여 분석을 위한 부시료를 취하였다. 준비된 시료 중 지화학 분석목적의 시료는 먼저 70°C 이하의 건조로에서 충분히 건조시킨 다음, 마노유발(agate mortar)에서 분말화하여 분석에 용

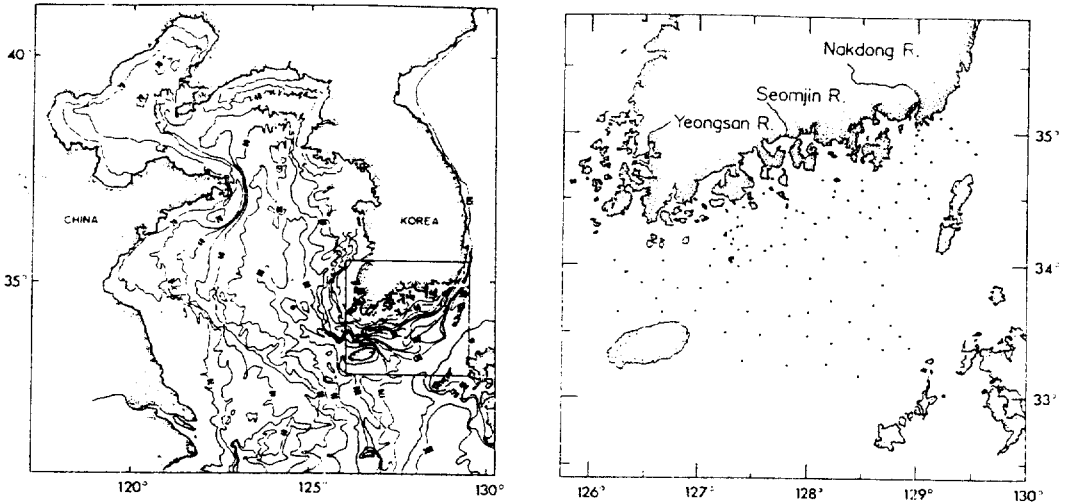


Fig. 1. Map showing the study area and locations of the surface sediment samples. Numbers in the figure of left hand side are depth contours in meter.

이하도록 처리하였다.

시료의 분석은 크게 퇴적물의 입도와 퇴적물 중의 탄산염, 유기탄소(Corg) 및 금속 함량에 대해서 실시하였다. 퇴적물의 입도는 원시료를 Ingram (1971) 과 Galehouse (1971)의 방법으로 분석한 후, 그 결과를 Folk and Ward (1957)의 도식법에 따라 처리하였다. 유기탄소는 분말시료에 일정량의 산화제를 넣어 유기탄소를 산화시키고 남은 잔여 산화제 양을 정량하는 역적정법으로 분석하였으며(Strickland and Parsons, 1972), 탄산염 함량은 Bernard calcimeter로 측정하였다.

퇴적물내 금속의 총량은 먼저 시료를 혼합산 용액(HF+HNO<sub>3</sub>+HClO<sub>4</sub>)으로 반응시키고 이 반응물을 완전히 건조한 다음, 0.1N 질산으로 금속을 용출한 용액을 유도결합 플라즈마 방출분광기(ICP-AES)를 이용하여 정량하였으며, 모두 9개의 금속(Al, Fe, Mn, Cu, Ni, Zn, Cr, Co, Pb)을 측정하였다. 한편, 금속의 화학적 존재형태별 분석은 특정한 시약이 지화학 물질 또는 화학적 결합형태에 대해서 선택적으로 반응한다는 이론에 기초하여 각각의 추출부분에 따라 다음과 같은 반응시약을 사용하였다(Kitano and Hujiyoshi, 1980).

- (1) 흡착부분 (adsorbed) : 1M CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>
- (2) 탄산염부분 (carbonate) : 1M CH<sub>3</sub>COOH

(3) 유기물부분 (organic) : 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

(4) 산화물부분 (oxide) : NH<sub>2</sub>OH·HCl(0.04M) + CH<sub>3</sub>COOH(25% v/v)

(5) 잔류부분 (residual) : HF+HNO<sub>3</sub>+HClO<sub>4</sub>

상기 추출부분별 금속은 8개 항목(Fe, Mn, Cu, Ni, Zn, Cr, Co, Cd)에 대해 불꽃-원자흡광분석기(flame-AAS)를 이용하여 측정하였다.

금속의 분석시에는 분석절차에 따른 측정값의 객관적 검증을 위해 캐나다 NRC의 BCSS-1 및 미국 NIST의 NBS1646 표준물질을 시료와 함께 분석함으로써 자료의 신뢰도를 평가하는 기준으로 삼았다. 그 결과 측정값의 정밀도는 ±5% (반복실험에 대한 상대표준편차), 정확도는 ±10% (공인값에 대한 상대오차) 이내의 범위로 나타났다. 한편, 화학적 존재형태별 분석자료는 총 금속농도와 비교하여 ±15% 이내의 편차를 보였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 퇴적물의 분포와 조성

연구지역 퇴적물의 입도분포는 해안선에 대체로 평행하게 연안에서 멀어질수록 조립해지는 양상을 보이고, 입도성분의 공간적 변화가 매우 큰 모습으로 특징지어진다. 역질(>2 mm)의 함량은 0.0~38.9%

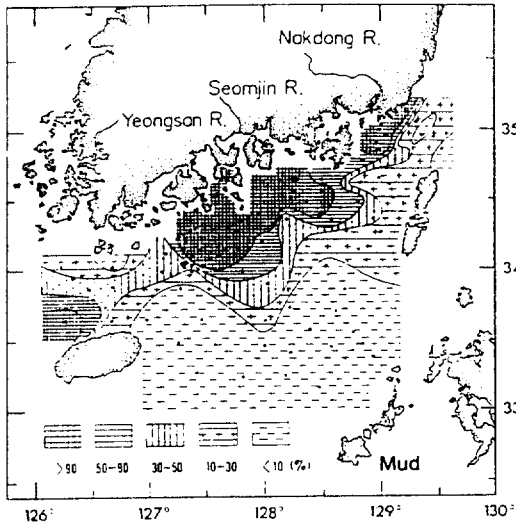


Fig. 2. Distribution of mud (<62.5 μm) contents in surface sediments.

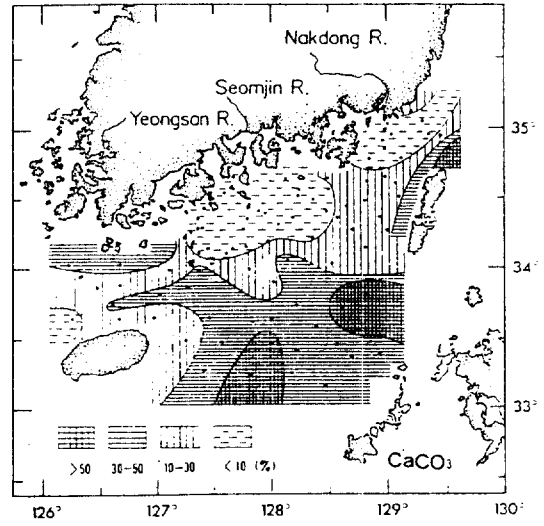


Fig. 3. Distribution of CaCO<sub>3</sub> contents in surface sediments.

범위로 변화하였으며, 사질(2 mm~62.5 μm)은 0.8%에서 98.7%까지 변화하여 전체적으로 함량의 차이가 뚜렷하였다. 62.5 μm 이하의 니질성분 역시 0.2~99.2%의 범위로 지역에 따라 변화가 컸다(Fig. 2).

니질부분이 90% 이상을 차지하는 세립퇴적물은 주로 중부해안에서 낙동강 하구에 이르는 연안해역에 띠모양으로 분포하며, 제주도 서북부 해역에서 국지적으로 우세한 분포를 보인다. 이들 세립퇴적물의 평균입도는 8~10Φ 범위로서, 현격히 높은 니질의 함량에 비해 사질의 함량은 7% 이내에 머무른다. 그러나 퇴적물의 입도는 연안에서 외해로 갈수록 조립해져서 약 80 m 등심선에 이르러 4Φ의 평균입도를 나타낸다. 80 m 등심선을 지난 외해역에서는 평균입도 2Φ 내외의 조립퇴적물이 널리 분포하며, 이 퇴적물 중의 사·역질 함량은 60~97% 범위로 높은 반면 니질은 10% 이하로 제한된다. 이와 같은 퇴적물 분포는 80 m 등심선 부근에 발달해 있는 전선의 (공, 1971; Han and Na, 1989) 영향을 받아 연구지역의 퇴적작용이 지역적으로 서로 다르게 이루어졌기 때문으로 생각된다. 즉, 파형(wave-like)의 연안전선을 중심으로 연안에서의 퇴적작용은 세립퇴적물의 공급과 함께 활발히 진행된 반면 외해에서는 전선으로 인하여 퇴적물의 공급이 제한된 데다가 대마난류에 의해 계속해서 재동을

받은 결과로 해석될 수 있다 (Park, 1985; 박 등, 1989).

퇴적물 중의 탄산염 함량은 지역적으로 차이가 심한 1.5~67.2% 범위로 변화하며, 연안해역에서 낮고 외해역에서 전반적으로 높은 분포를 보인다 (Fig. 3). 시료 전체의 평균함량은 21%로서 동해와 황해 대륙붕 퇴적물 중의 탄산염 함량에 비해 훨씬 높다 (Choi, 1990; 이 등, 1992; 조 등, 1993). 시료별 탄산염 함량의 변화는 퇴적물의 입도가 조립해질수록 증가하는 경향을 나타내며, 니질퇴적물에서 탄산염 함량은 평균 10.6%인데 반해 사·역질 퇴적물에서는 평균 32.7%를 차지한다. 이처럼 세립퇴적물 보다 조립퇴적물에서 탄산염 함량이 높은 현상은 조립한 패각편에 의한 영향을 받은 것으로서, 황해 및 동해와는 다른 남해 대륙붕 퇴적물 만의 뚜렷한 특징이다. 탄산염 함량이 연안에서 멀어질수록 증가하는 경향은 박 등(1989)의 연구에서 언급된 바와 같이, 조립한 연체동물의 패각들이 외해역에 사질 또는 역질 퇴적물과 혼합된 까닭으로 이해된다.

한편, 퇴적물내 유기탄소 함량은 0.1~1.4% 범위로 변화하며 분석시료 전체의 평균함량은 0.6%로 나타났다. 이 값은 연구지역 연안의 진해만 퇴적물 (이 등, 1974) 보다 훨씬 낮으며, 인접한 동해와 황해대륙붕 퇴적물 (이 등, 1989; 조 등, 1993)에 비

Table 1. Analytical results of 89 surface sediments from the continental shelf, off the southern coast of Korea (unit in %, <sup>2</sup>ppm, <sup>3</sup>phi)

STN	<sup>1</sup> Al	<sup>1</sup> Fe	<sup>2</sup> Mn	<sup>2</sup> Co	<sup>2</sup> Cr	<sup>2</sup> Cu	<sup>2</sup> Ni	<sup>2</sup> Zn	<sup>2</sup> Pb	<sup>1</sup> C <sub>org</sub>	<sup>1</sup> CaCO <sub>3</sub>	<sup>3</sup> Mz
8601	8.1	3.9	616	15	89	24	42	116	40	1.4	16.5	8.8
8602	3.2	1.7	308	7	24	5	16	50	20	0.2	10.3	2.2
8603	2.7	0.8	231	6	13	3	14	25	16	0.5	4.3	1.9
8604	3.6	1.7	308	9	32	8	23	52	26	0.7	21.7	3.1
8605	1.8	1.4	308	10	27	5	6	42	32	0.6	65.9	1.3
8608	3.6	1.4	308	9	28	5	15	44	28	0.3	28.5	2.7
8609	4.8	2.0	308	11	40	9	24	69	27	0.7	20.5	3.1
8610	3.3	1.4	231	8	27	6	20	48	21	0.4	11.3	3.1
8611	7.3	3.5	539	15	83	15	42	88	29	1.0	6.3	7.6
8612	8.4	4.3	616	17	102	18	51	106	27	1.1	3.3	9.1
8613	6.8	3.5	462	15	80	15	41	87	29	1.0	11.0	7.0
8614	4.5	1.7	308	9	38	7	21	41	25	0.5	13.0	3.3
8615	4.1	1.3	231	8	25	5	16	39	25	0.4	16.5	2.6
8616	6.3	2.7	385	11	58	11	27	61	24	0.6	4.7	5.6
8617	5.1	1.6	231	8	35	6	20	40	23	0.3	7.1	3.9
8618	7.4	3.8	539	15	93	17	44	94	28	0.8	9.6	8.2
8619	7.1	3.5	462	15	86	15	42	87	30	0.7	33.8	5.2
8621	1.3	0.6	231	3	17	3	1	24	31	0.2	61.4	1.6
8622	1.7	0.9	231	9	22	4	4	33	28	0.3	55.9	2.1
8623	2.5	1.4	231	9	26	5	11	39	28	0.4	42.4	2.1
8624	2.6	1.3	231	9	28	6	12	35	26	0.5	42.1	2.2
8625	2.2	1.1	231	9	23	5	8	32	26	0.3	44.3	2.3
8626	2.7	1.2	231	9	26	6	12	34	26	0.4	38.7	2.6
8627	3.4	1.1	231	8	25	4	16	34	23	0.2	27.2	2.7
8628	3.2	1.3	308	9	27	5	14	35	22	0.3	33.4	2.7
8628	4.6	2.1	385	12	51	11	30	56	29	0.7	27.4	5.0
8630	2.9	1.2	308	9	27	6	15	35	27	0.4	38.4	2.8
8631	2.1	0.9	231	8	20	4	8	22	23	0.5	36.3	1.6
8632	2.3	1.0	231	8	24	4	10	31	26	0.4	37.0	2.3
8801	3.3	1.4	308	9	27	5	16	33	28	0.3	25.6	3.2
8802	5.5	2.5	385	13	61	13	32	59	27	1.1	16.0	5.3
8803	6.3	3.0	462	14	73	14	38	78	27	1.2	13.1	7.7
8804	7.0	3.4	539	15	82	15	41	85	29	1.0	11.1	6.9
8805	2.0	0.9	154	8	19	4	7	24	26	0.2	52.6	2.2
8806	4.0	1.1	231	6	18	4	15	27	22	0.2	15.3	2.6
8807	8.6	4.4	616	16	104	20	48	106	32	1.1	1.5	9.3
8808	5.6	2.7	462	16	69	14	33	70	36	0.8	22.3	7.4
8809	7.8	4.0	616	15	96	18	45	96	32	1.1	3.4	9.7
8810	7.4	3.5	539	14	85	15	41	81	29	0.9	5.2	8.7
8811	7.6	3.8	539	16	94	18	46	95	30	1.2	11.5	9.1
8813	1.9	1.0	231	9	23	5	7	28	28	0.5	46.7	2.7
8814	1.0	1.0	231	10	23	5	2	31	34	0.7	67.2	2.4
8815	2.0	1.1	308	9	23	4	10	30	26	0.3	44.2	2.6
8823	1.3	0.8	231	9	18	4	3	23	28	0.2	62.8	2.1
8824	3.4	1.2	231	8	26	4	16	33	24	0.2	19.7	3.4
8825	2.3	1.1	308	8	23	4	12	32	28	0.3	36.8	2.7
8826	1.6	1.0	385	8	18	3	10	20	27	0.2	32.7	1.6
8827	4.1	2.2	385	11	47	9	23	49	27	0.5	21.6	4.9
8828	1.2	0.9	462	8	15	4	6	16	34	0.1	48.4	1.1
8829	3.2	1.6	539	11	37	7	20	38	30	0.4	30.9	2.0
8830	8.3	4.3	693	17	104	20	52	105	34	1.3	10.1	10.0
8831	5.1	2.6	385	12	59	12	30	60	31	0.5	22.6	5.3
8832	2.5	1.5	308	8	27	5	17	32	26	0.3	16.8	2.5
8833	3.9	2.1	462	12	47	9	23	49	30	0.5	29.5	3.9

Table 1. Continued

STN	<sup>1</sup> Al	<sup>1</sup> Fe	<sup>2</sup> Mn	<sup>2</sup> Co	<sup>2</sup> Cr	<sup>2</sup> Cu	<sup>2</sup> Ni	<sup>2</sup> Zn	<sup>2</sup> Pb	<sup>1</sup> C <sub>org</sub>	<sup>1</sup> CaCO <sub>3</sub>	<sup>1</sup> Mz
8834	2.4	1.6	385	8	19	3	16	23	28	0.3	18.9	2.0
8835	3.4	1.6	385	8	28	4	18	33	23	0.2	16.4	3.1
8836	2.5	1.4	385	12	28	6	9	35	27	0.3	39.1	2.0
9101	7.0	3.3	539	12	84	13	30	78	-	0.5	5.5	7.2
9102	7.2	3.3	616	11	79	13	31	67	-	0.5	8.0	7.3
9103	6.7	2.9	462	11	67	10	29	56	-	0.3	6.4	6.6
9104	6.9	3.2	462	12	72	11	28	61	-	0.4	7.1	6.5
9105	7.0	3.3	462	12	81	14	33	65	-	0.5	4.7	7.1
9106	7.5	3.7	539	14	93	17	37	78	-	0.7	6.0	7.3
9108	3.4	1.8	231	12	48	8	16	38	-	0.4	31.1	3.9
9112	4.2	2.4	462	14	53	11	24	50	-	0.5	30.0	4.2
9113	4.1	2.1	308	13	50	10	18	44	-	0.4	29.2	4.5
9201	8.3	4.1	539	16	79	25	41	120	26	0.9	9.1	8.9
9203	8.3	4.0	539	14	72	28	39	122	34	0.8	7.0	7.9
9204	8.9	3.9	539	12	66	24	30	115	34	0.6	2.1	6.5
9205	8.0	4.1	462	14	62	22	42	111	21	0.8	7.2	8.2
9206	7.7	4.2	539	15	82	21	44	107	24	0.8	8.6	8.9
9207	7.6	3.8	462	16	52	19	44	97	16	0.8	9.3	4.8
9208	3.5	0.9	308	7	10	4	11	16	18	0.1	11.9	1.4
9210	5.5	2.2	462	12	58	9	24	51	24	0.3	21.6	7.5
9211	8.2	4.3	616	16	89	20	44	108	24	0.8	5.7	9.2
9212	8.2	4.4	616	14	87	19	44	106	18	0.7	2.5	8.9
9214	8.0	4.3	616	16	85	18	43	102	23	0.7	5.7	9.1
9215	7.9	4.3	539	15	87	19	45	101	24	0.8	5.4	9.2
9217	7.5	4.0	539	16	82	18	44	95	24	0.9	7.7	8.9
9219	7.7	4.1	539	15	85	19	42	99	24	0.7	6.1	9.2
9220	8.0	4.2	539	15	85	18	43	98	27	0.6	6.3	8.8
9221	8.2	4.3	539	15	86	18	43	99	22	0.7	5.1	8.8
9222	8.0	4.3	616	15	87	21	40	100	29	0.8	6.1	9.1
9224	7.6	4.1	539	15	82	19	43	97	28	0.6	8.0	8.9
9225	7.8	4.1	539	15	84	19	47	97	29	0.6	6.9	7.3
9226	3.0	2.0	308	13	36	8	14	40	17	0.3	36.7	3.2
9227	7.4	3.8	462	16	79	19	44	92	28	0.8	10.0	8.4
9228	6.7	3.3	539	13	63	14	30	71	26	0.4	7.8	7.8
9229	3.8	2.0	308	14	41	9	16	43	19	0.3	33.7	4.0
Mean	5.1	2.5	409	12	53	11	26	62	27	0.6	21.0	5.2
$\sigma_x/\bar{x}$	0.47	0.50	0.34	0.28	0.53	0.59	0.54	0.50	0.17	0.52	0.80	0.54

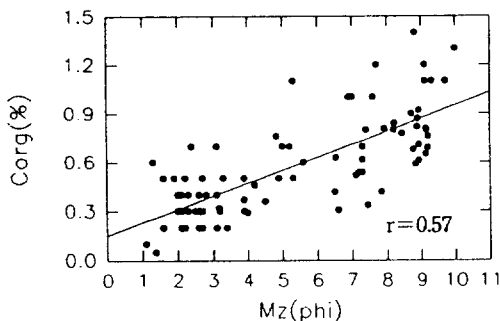


Fig. 4. Pair diagram between the content of particulate organic carbon(Corg) and the mean grain-size (Mz) in sediments. Line in figure is best fit regression line.

해서도 낮다. 연구지역 퇴적물 중의 유기탄소 함량은, 그러나, 입도가 세립해 질수록 증가하는 경향을 보이므로(Fig. 4) 다른 지역 퇴적물과 유사한 입도에서 값을 구하면 0.8~1% 범위로서 인접 대륙붕에서의 유기탄소 함량과 비슷한 수준의 함량을 나타낸다. 본 연구에서 분석된 시료 가운데 사·역질 퇴적물은 전체의 47%를 차지하며, 따라서 앞서 제시된 낮은 유기탄소 함량은 탄산염 물질이 다량 함유된 조립한 퇴적물의 영향으로 이해된다.

## 2. 금속의 함량과 공간분포

분석된 89개 퇴적물에서 나타난 금속의 평균함

Table 2. Average metal contents of sediments from the South Sea of Korea, together with those of other areas for comparison (unit in %, ppm, phi)

Area	<sup>1</sup> Al	<sup>1</sup> Fe	<sup>2</sup> Mn	<sup>2</sup> Cr	<sup>2</sup> Co	<sup>2</sup> Ni	<sup>2</sup> Cu	<sup>2</sup> Zn	<sup>3</sup> Pb	<sup>1</sup> Corg	<sup>3</sup> Mz	n
Keum estuary <sup>d</sup>	7.7	2.9	655	67	13	34	23	79	—	0.7	5.4	12
Kimje tidal flat <sup>e</sup>	6.0	2.2	404	33	7	17	7	40	23	0.1	4.5	12
Kyonggi bay <sup>b</sup>	8.8	3.5	693	—	74	67	33	—	31	0.4	—	7
Jinhai bay <sup>c</sup>	—	3.6	386	59	12	27	30	128	37	—	—	23
Yellow sea <sup>a</sup>	5.8	2.2	360	37	7	17	9	40	22	0.3	3.5	52
East sea <sup>d</sup>	6.6	3.1	365	71	11	33	20	95	31	1.7	7.2	98
Average crust <sup>c</sup>	8.2	5.6	950	100	25	75	55	70	13	—	—	—
South Sea <sup>f</sup>	5.1	2.5	409	53	12	26	11	62	27	0.6	5.2	89

Source of data: <sup>a</sup>조 등(1993); <sup>b</sup>Lee et al.(1985); <sup>c</sup>Lee and Lee(1983); <sup>d</sup>Lee et al.(1991) and 조(1994); <sup>e</sup>Taylor(1964); <sup>f</sup>This study.

망과 그 범위는 알루미늄 5.1%(1.0~8.9%), 철 2.5%(0.6~4.4%), 망간 409 ppm (154~693 ppm), 크롬 53 ppm (10~104 ppm), 코발트 12 ppm (3~17 ppm), 니켈 26 ppm (1~52 ppm), 구리 11 ppm (3~28 ppm), 아연 62 ppm (16~222 ppm), 그리고 납이 27 ppm (16~40 ppm)이었다 (Table 1). 제시된 각 금속의 평균함량은 납을 제외하면 지각물질의 그것보다 훨씬 낮으며, 한반도 주변의 만이나 하구 퇴적물에 비해서도 전반적으로 낮다. 대륙붕 퇴적물에 있어서는 황해의 퇴적물 보다 대체로 함량이 높은 반면 동해 퇴적물에 비해서는 망간과 코발트를 제외한 모든 금속에서 낮은 함량을 보인다(Table 2).

금속의 공간적인 분포는 전반적으로 연안해역에서 함량이 가장 높고 외해로 갈수록 점차 감소하다가 외대륙붕 퇴적물에 이르러 급격히 낮아지는 양상을 보인다. 이러한 형태의 분포는 연안에서 멀어질수록 조립해지는 퇴적물의 입도변화와 유사한 것으로서 알루미늄, 철, 크롬, 니켈, 구리 및 아연 등에서 가장 뚜렷하다. 이들 금속의 함량은 연구지역 중부연안에서 낙동강 하구에 이르는 해역과 제주도 서북부 해역에서 가장 높으며, 100 m 등심선을 지난 외해의 퇴적물에서는 큰 폭으로 감소한다. 그러나, 코발트와 망간은 연안에서 멀어지면서 감소하는 경향이 그다지 뚜렷하지 않고, 비교적 작은 폭의 함량변화를 보인다. 망간의 함량은 거제도과 낙동강 하구에 인접한 해역에서 가장 높고 대마도 남쪽 해역에서 가장 낮으며, 코발트는 제주도 북서부와 대마도 남부 해역에서 함량이 높은 반면 연구지역 남동부와 대한해협 퇴적물에서 가장 낮다. 한편, 납의 함량은 타 금속과 달리 공간적으로 증가 혹은 감소하는 경향이

매우 미약하며, 그 변화의 폭 또한 지역적인 차이를 볼 수 있을 만큼 크지 않다. 따라서, 제시된 각 금속의 공간적 분포는 납을 제외하면 전반적으로 외해 방향으로 조립해지는 퇴적물의 입도변화와 유사한 반면 역으로 함량이 증가하는 탄산염 분포와 상반된 것으로서, 이러한 공간적 변화는 일차적으로 퇴적물의 입도 및 탄산염 성분과 밀접하게 관련되어 있음을 시사한다.

입도에 따른 금속의 함량변화를 살펴보기 위하여 입도와 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 납은 입도와 관계가 뚜렷하지 않으나 나머지 금속들은 크건 작건간에 입도의 영향을 반영하며, 일반적으로 입도가 세립화 함에 따라 점차 함량이 증가하는 관련성을 보여준다. 금속 함량과 입도의 관련성은 여러 연구를 통해 보고되어 온 현상으로 (Förstner and Salomons, 1981; Horowitz and Elrick, 1987; Lee et al., 1991; 조 등, 1993), 연구지역 퇴적물에서 나타난 입도의존적 함량변화 역시 퇴적물의 입도가 금속 함량을 조절하는 주요 요인으로 작용함을 지시한다. 그러나 입도에 따른 금속 함량의 변화는 금속에 따라 달리 나타나는 바, 평균입도 4Φ를 기준으로 코발트와 망간의 함량은 각각 1.5배와 1.8배의 차이를, 그리고 납을 제외한 나머지 금속에 있어서는 2.5~3.4배의 현격한 차이를 보인다. 한편, 사질과 니질 퇴적물 중에서 납의 함량은 그 차이가 1.1배로 매우 작아 퇴적물의 입도가 납의 함량에 큰 영향을 미치지 못함을 지시하며, 또 다른 요인에 의한 조절 가능성을 시사한다.

퇴적물의 탄산염 물질에는 일반적으로 금속 함량이 낮은 것으로 보고되고 있다 (Price, 1976; Salo-

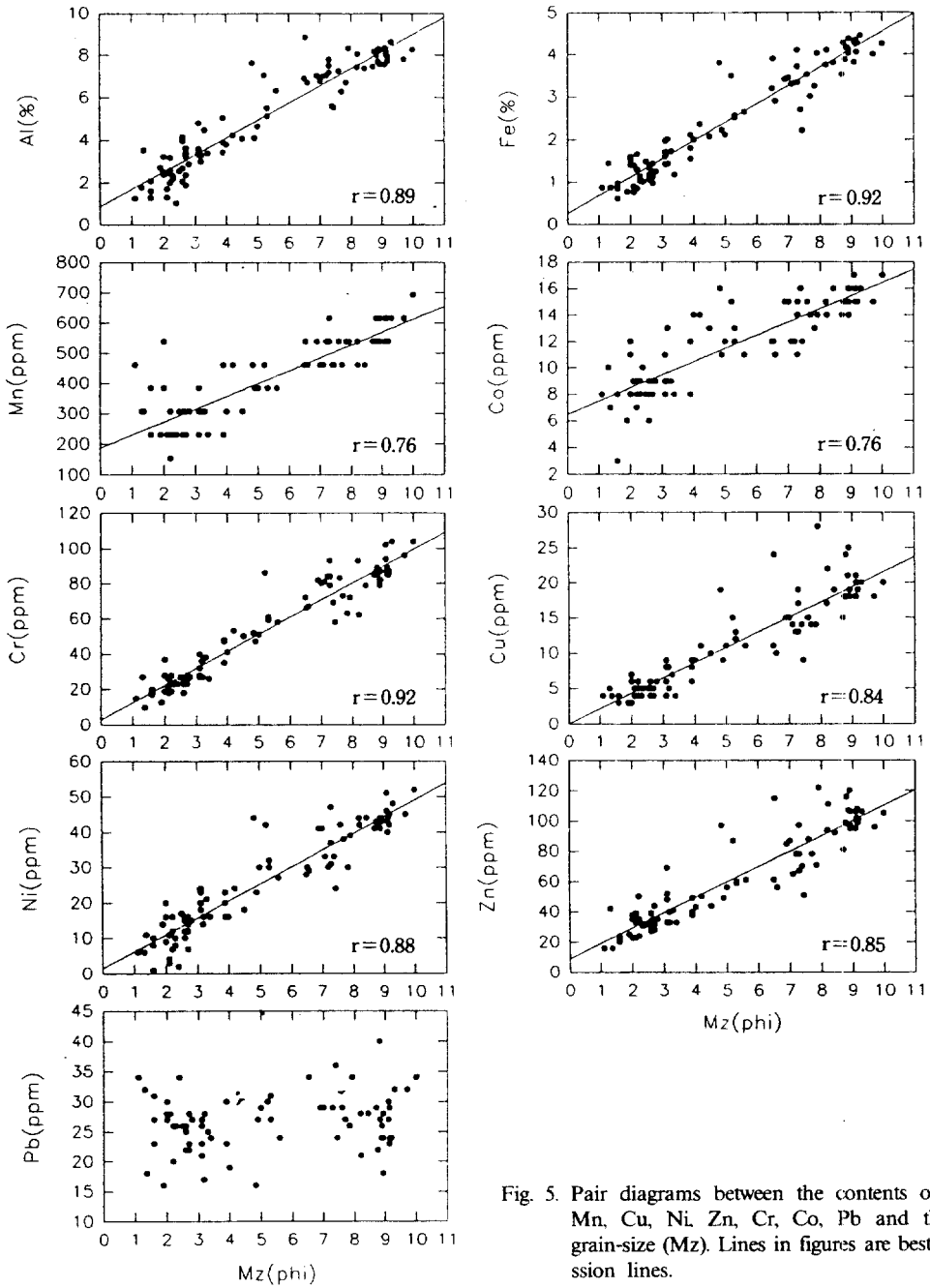


Fig. 5. Pair diagrams between the contents of Al, Fe, Mn, Cu, Ni, Zn, Cr, Co, Pb and the mean grain-size (Mz). Lines in figures are best fit regression lines.

mons and Mook, 1977). 앞서 언급된 것처럼, 연구 지역 퇴적물 중의 탄산염 성분은 넓은 지역에 걸쳐서 풍부히 분포하는 까닭에 금속 함량 역시 탄산염 물질의 영향을 크게 받을 것으로 예상된다. Fig. 6은

퇴적물 중의 탄산염 증가에 따른 금속 함량의 변화를 나타낸 것으로, 탄산염 함량이 높아짐에 따라 전반적으로 금속 함량이 감소하는 역의 관계를 보여준다. 이러한 관계는 알루미늄, 철, 크롬, 니켈, 구리 및



아연의 경우에 가장 뚜렷한 한편, 망간과 코발트의 함량은 탄산염 증가에 대해 상대적으로 작은 폭의 변화를 나타낸다. 반면에 납의 함량은 탄산염 함량이 높은 퇴적물 중에서 오히려 미약한 증가를 보이며 타 금속과는 대조적으로 탄산염 물질에 의한 희석의 영향을 배제한다. 이처럼, 입도와 아울러 탄산염 성분과 관련된 금속 함량의 변화는 퇴적물내 금속 분포가 어떤 형태로든 탄산염과 입도에 의해서 크게 조절된다는 사실을 제시한다.

### 3. 금속 함량에 대한 입도와 탄산염의 영향

퇴적물내 금속의 함량은 앞서 드러난 퇴적물의 입도와 탄산염 물질 외에도 유기물, 산화물 등과 같은 타 지화학 성분에 의해서도 크게 달라질 수 있다. 그러나, 한 요인의 영향이 지배적일 때 타 요인에 따른 영향은 드러나지 않고 묻혀버릴 가능성이 있으며, 따라서 잠재된 타 요인을 세부적으로 해석할 수 있기 위해서는 드러난 요인의 영향을 일차적으로 제거할 필요가 있다.

입도의 영향을 제거하기 위한 방법으로는 입자의 표면적을 이용하는 방법 (Oliver, 1973), 입도를 외삽하는 방법 (Salomons and De Groot, 1978) 등을 비롯하여 지금까지 다양한 방법들이 제안되어 왔다 (Förstner and Salomons, 1981; Salomons and Förstner, 1984). 본 연구에서는 널리 이용되는 간편한 방법으로 금속의 함량을 보존성 원소인 알루미늄의 함량으로 나누어 줌으로써 입도의 영향을 최소화 하였다 (Bruland et al., 1974). 알루미늄은 평균입도와와의 관계가 매우 양호하며( $r=0.89$ ), 또한 입도의존도가 비교적 큰 타 금속들과도 밀접한 관련성을 보여 금속/알루미늄 함량비의 분포는 입도의 영향이 최소화된 각 금속의 공간적 분포를 제시해 줄 것으로 판단된다.

금속/알루미늄 함량비의 공간적 분포는 Fig. 7에 도시되었다. 니켈 및 크롬은 외해의 일부 퇴적물에서 국지적으로 높은 철, 구리와 함께 주로 연안해역에서 함량비가 높은 반면, 망간, 코발트 및 납은 전반적으로 외해역에서 높은 경향을 보인다. 아연은 외해의 일부 퇴적물과 대한해협의 양안에서 그 비가 높아 타 금속들과 다소 다른 유형의 분포를 나타낸다. 망간, 코발트 및 납의 함량비는 연안보다는 외해의 퇴적물에서 높으며, 공간적으로는 탄산염 성분

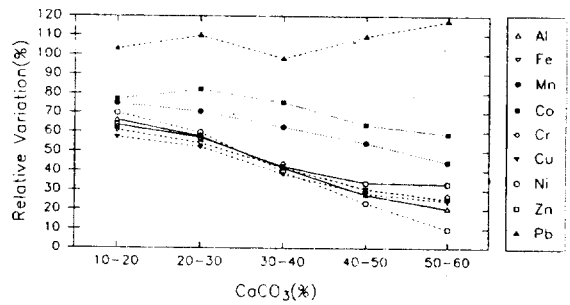


Fig. 6. Relative percentage of sediment fractions of 10~20%  $\text{CaCO}_3$  (n=17), 20~30%  $\text{CaCO}_3$  (n=13), 30~40%  $\text{CaCO}_3$  (n=13), 40~50%  $\text{CaCO}_3$  (n=6) and of 50~60%  $\text{CaCO}_3$  (n=6) over that of <10%  $\text{CaCO}_3$  (n=34).

우세한 사·역질 퇴적물 분포대와 일치한다. 그러나 외해에서 높은 함량비는 퇴적물의 공급 및 이동경로와 관련해 볼 때 인위적인 농축의 결과로 보기 어려우며, 따라서 이들 금속의 함량비 분포는 외부 환경요인에 의한 영향이라기 보다는 일차적으로 탄산염 물질에 의한 영향이 타 금속과 다른 현상에서 비롯된 것으로 판단된다. 한편, 연안의 퇴적물에서 함량비가 높은 철, 구리, 니켈 및 크롬은 지리적으로 육지에 근접한 까닭에 육지의 영향을 무시할 수 없을 것이다. 그러나 연안의 세립물질 공급이 인접한 서해안으로부터 비롯된다는 사실에 비추볼 때 (Wells, 1988; Lee et al., 1990) 인접해에 의한 영향도 중요할 것이며, 따라서 연안해역에서 알루미늄의 함량비가 높은 금속은 육지의 하천으로부터 공급된 물질과 유입해류에 의해 운반된 물질의 영향이 복합적으로 반영된 결과로 믿어진다.

탄산염 물질에 의한 영향을 보정하기 위해서는 원시료에서 탄산염 물질을 물리적으로 분리하여 화학분석을 하는 것이 가장 이상적이겠으나, 이 방법은 매우 까다로운 뿐만 아니라 실험상의 복잡한 절차가 따른다. 본 연구에서는 보다 간편한 탄산염 보정법으로 제안되어진 방법을 따라 탄산염 물질에 금속이 없다고 가정하여 일차적으로 탄산염의 영향을 보정하였으며 (Salomons and Mook, 1977; Horowitz, 1991), 이에 따른 보정결과는 Fig. 8(CASE 1)에 제시하였다. 철, 구리, 니켈, 크롬 및 아연은 육지로부터 일정한 공급을 가정한 보존성원소 알루미늄에 대하여 선형의 관계를 보이며, 입도에 따른 함량변화와

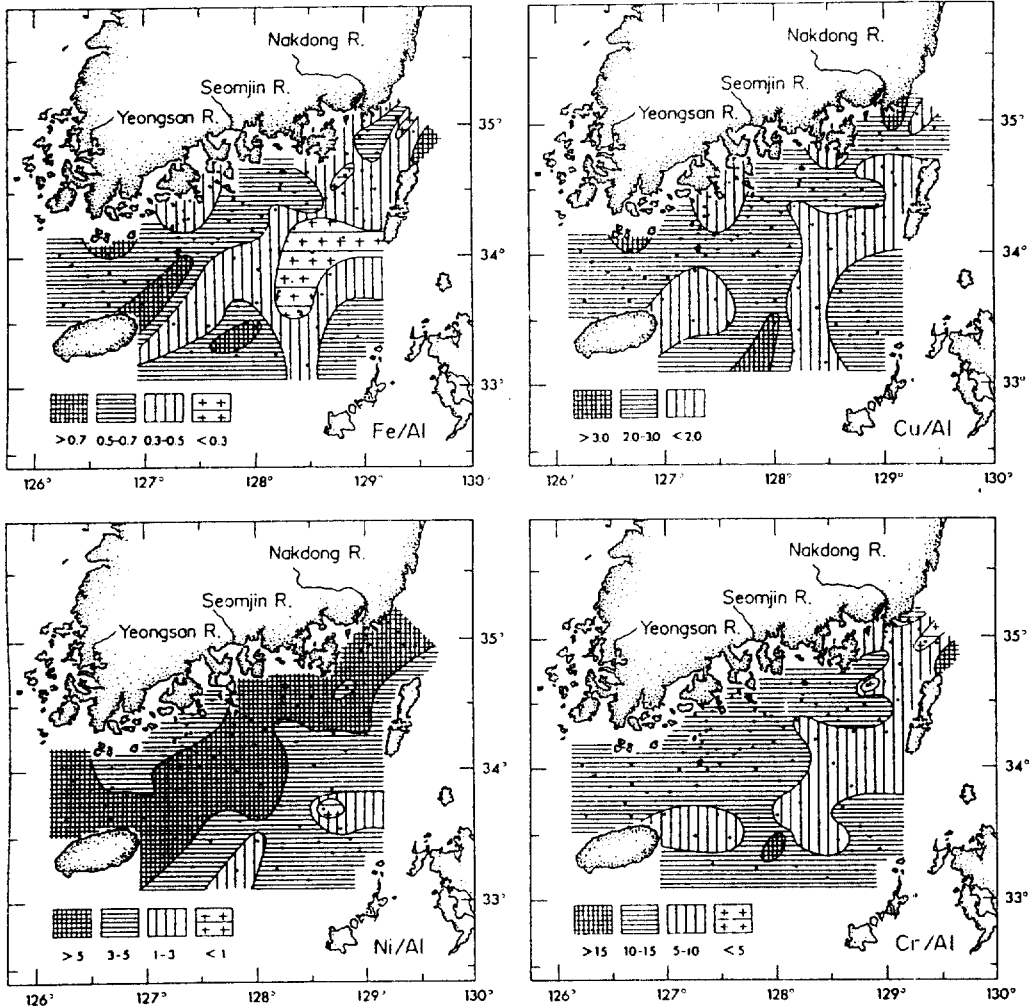


Fig. 7. Distribution of metal/Al ratios (Fe/Al, Cu/Al, Ni/Al, Cr/Al, Zn/Al, Mn/Al, Co/Al and Pb/Al) in surface sediments.

매우 유사한 경향을 나타낸다. 그러나, 망간, 코발트 및 납에 있어서는 알루미늄의 관계가 극히 미약할 뿐만 아니라 일부 시료에서 알루미늄에 비해 매우 높은 함량이 특징적이다. 탄산염의 영향이 제거된 후에 나타난 알루미늄과의 관계는 연구지역 퇴적물에서 알루미늄 함량이 퇴적물의 입도와 밀접히 관련되어 변화하는 까닭에 결국은 입도에 따른 변화로 볼 수 있으며, 따라서 탄산염 보정 전과 같이 여전히 알루미늄과 양호한 관련성을 갖는 금속은 주로 퇴적물의 세립성분에 의존된다고 할 수 있다. 반면에, 알루미늄에 대해 농축을 보이는 금속들은 탄산염

물질 자체에서 해당 금속의 함량이 상대적으로 높거나, 혹은 입도가 아닌 다른 요인에 의한 영향이 반영되어 있음을 시사한다. 그러나 알루미늄에 대한 상대적인 농축현상이 탄산염 함량이 매우 높은 시료에서 나타난 사실은 탄산염 물질에서 금속의 함량이 높을 가능성을 뒷받침 하며, 아울러 망간, 코발트 및 납에 있어서는 탄산염 물질에 금속이 없다는 가정에 문제가 있음을 지시한다.

이에 본 연구에서는 탄산염에 의한 영향을 보다 더 면밀히 파악할 목적으로 연구지역에 분포하는 탄산염 물질의 대부분이 저서생물의 패각으로 이루어

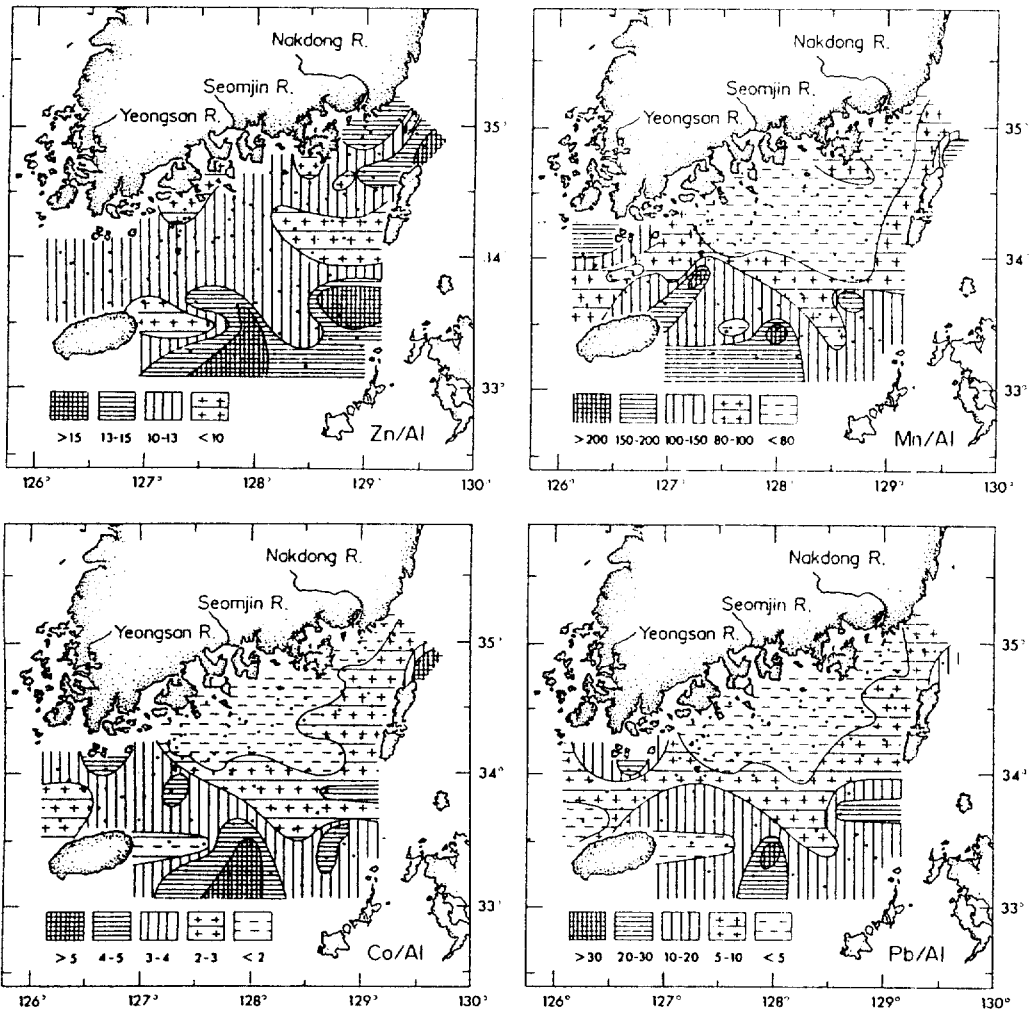


Fig. 7. Continued.

어져 있음을 감안하여 (Choi, 1990) 연안에 분포하는 9종의 패각(완족동물, 가리비, 굴, 돌조개, 삿갓조개, 대수리, 바지락, 고둥, 가리맛조개)을 혼합, 분석하였다. 패각물질에서 나타난 금속의 함량은 알루미늄 0.03%, 철 0.12%, 망간 1065 ppm, 크롬 6ppm, 코발트 8 ppm, 니켈 2 ppm, 구리 4 ppm 그리고 아연이 6 ppm이었다. 이 측정값은 망간을 제외한 모든 금속이 지각물질 중의 함량보다 (Taylor, 1964) 훨씬 낮으며, 특히 알루미늄의 함량이 상대적으로 매우 낮은 것이 특징적이다.

패각의 분석자료에 의한 탄산염 보정결과는 Fig. 8(CASE 2)에 기존의 보정법에 의한 결과와 함께

도시되었다. 철, 크롬, 니켈, 구리 및 아연은 CASE 1의 경우와 거의 유사한 반면, 망간과 코발트는 CASE 1과는 달리 일부 퇴적물에서 나타난 농축을 보이지 않고 알루미늄 함량과 양호한 관련성을 갖는다. CASE 2의 탄산염 보정결과는 타 요인의 영향이 지배적이지 않는한 탄산염 물질에서 특정 금속의 함량이 상대적으로 높을수록 그 금속의 함량은 CASE 1에서 나타난 값보다 작아지게 되며, 따라서 탄산염의 영향이 제거된 금속의 함량이 보존성 원소인 알루미늄의 관계에서 벗어나는 현상은 해당 금속의 함량이 탄산염이나 입도가 아닌 타 요인에 의해서 조절되거나 또는 탄산염의 영향이 제대로

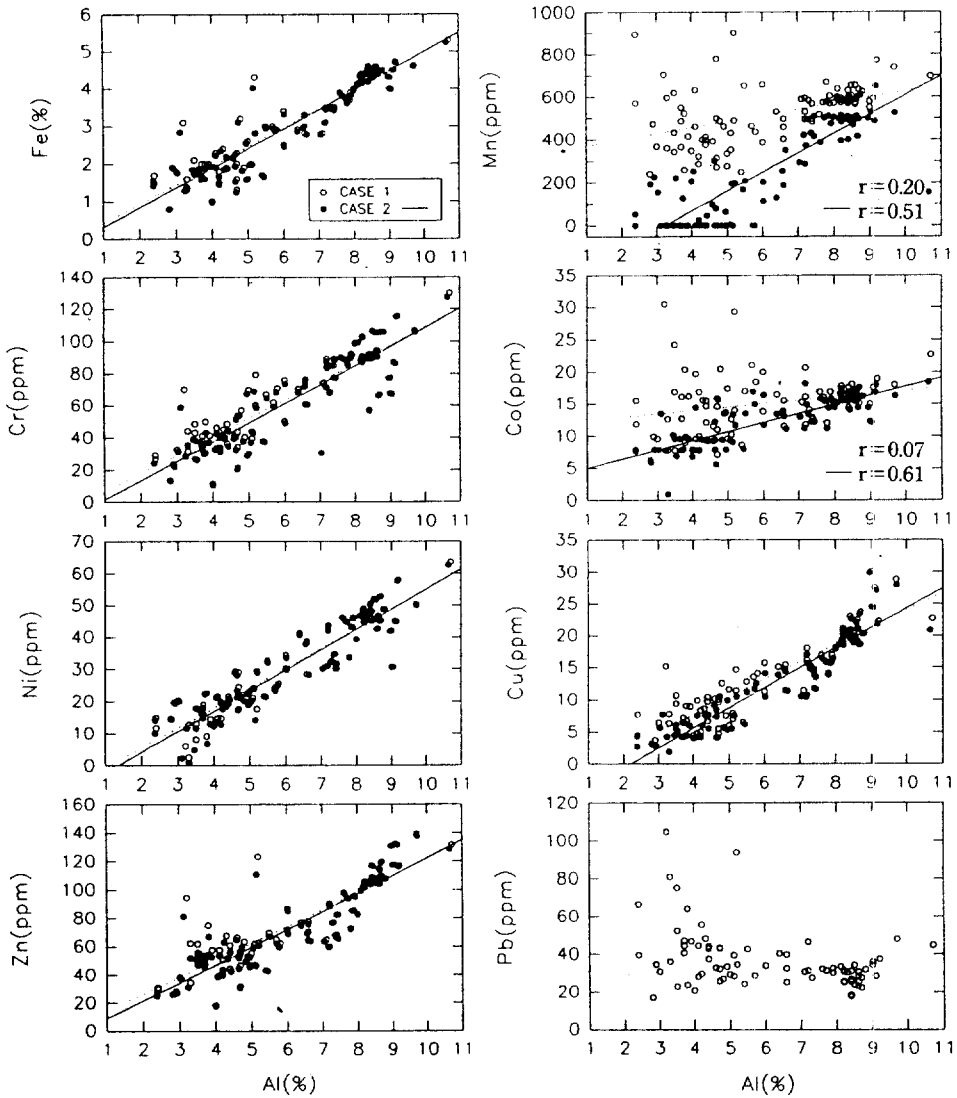


Fig. 8. Pair diagrams between the contents of Fe, Mn, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb and Al content in the  $\text{CaCO}_3$  corrected data. Lines in figures are best fit regression lines.

보정되지 않았을 두 가지 가능성을 생각할 수 있다. 기존의 보정법에 의한 결과는 전자의 가능성으로 해석하기 쉬우며, 이러한 해석상의 오류는 탄산염 물질에 포함된 금속의 함량이 각기 다른 사실을 고려하지 않은데서 기인한다. 반면, CASE 2에서 나타난 결과는 특히 망간과 코발트의 경우 패각의 탄산염 성분에 의해 그 함량이 크게 변화됨을 단적으로 지시하는 것으로서 탄산염의 영향을 최소화하는 기존의 보정법에 문제가 있음을 제기한다. 그

러나 한편, 패각의 분석자료에 의한 탄산염 보정이 있어도 분석된 패각이 실제로 대륙붕에 분포하는 탄산염 물질을 충분히 대표하지 못한데서 오는 오류가 생길 수 있으며, 예컨대 망간의 경우 0 ppm에 근접한 시료들은 그러한 현상에서 기인한 것으로 볼 수 있다.

본 연구에서 시도된 탄산염 보정방법은 탄산염 물질에 금속이 없다는 가정을 전제로 한 기존의 보정결과와는 뚜렷이 구분되는 것으로서 보정결과에

Table 3. Distribution of heavy metals between sequentially extracted fractions in sediments (unit in %)

Area	Fraction	Fe	Mn	Cu	Ni	Zn	Cr	Co	Cd
Amazon river <sup>1</sup>	Adsorbed	0.0	0.9	5.3	3.2		4.0	8.2	
	Oxide	46.8	59.2	8.6	45.1		3.4	28.0	
	Organic	6.7	5.9	6.7	13.2		8.4	19.3	
	Mineral lattice	46.5	34.0	79.7	38.4		84.2	44.4	
Yukon river <sup>1</sup>	Adsorbed	0.0	0.6	2.4	3.1		2.8	4.8	
	Oxide	40.7	51.2	3.8	48.9		8.1	29.6	
	Organic	11.0	7.3	3.4	16.3		15.3	13.3	
	Mineral lattice	48.3	41.0	90.4	31.6		73.7	52.3	
Huanghe estuary <sup>2</sup>	Adsorbed	0.0	1.3	0.9	0.6	0.2	0.3		
	Carbonate	0.9	46.5	7.8	5.1	1.8	2.8		
	Oxide	12.7	15.5	15.1	14.1	10.8	4.2		
	Organic	4.9	4.0	23.5	11.2	11.5	8.6		
Keum estuary <sup>3</sup>	Mineral lattice	81.6	32.7	52.8	68.7	75.7	82.6		
	Adsorbed		3.8	1.2	0.9	—		3.7	
	Oxide		72.4	47.7	18.9	24.5		18.6	
	Organic		5.3	11.9	—	1.5		6.6	
Jinhae bay <sup>4</sup>	Mineral lattice		18.5	39.2	80.2	74.0		71.1	
	Adsorbed			0.5		1.3			70.8
	Oxide			16.0		56.3			25.0
	Organic			54.7		21.5			4.2
South sea	Mineral lattice			28.8		20.9			0.0
	Adsorbed	—	2.8	—	—	—	—	—	—
	Carbonate	0.5	40.3	8.0	19.0	4.5	—	30.6	42.8
	Oxide	13.7	15.5	34.4	7.2	23.1	—	—	—
	Organic	0.6	2.6	2.1	4.0	—	—	—	—
	Mineral lattice	85.1	38.8	55.4	69.7	72.4	100	69.4	57.2

Source of data: <sup>1</sup>Gibbs(1973); <sup>2</sup>Zhang et al.(1988); <sup>3</sup>Lee(1985); <sup>4</sup>Hong et al.(1983)

있어서도 다른 결론을 제시한다. 결국 퇴적물에 탄산염 물질이 다량 포함된 경우 이로 인한 영향을 제대로 보정하지 않은 자료의 해석은 단지 탄산염에 의한 변화만을 제시하는 단계에 머무를 수 밖에 없으며, 더우기 이 요인의 영향이 상대적으로 크게 작용하는 한 타 세부적 잠재요인은 물론 외부 환경적 요인에 의한 영향을 파악하기 어려운 문제로 귀착된다.

#### 4. 금속의 화학적 존재형태별 구성

연안의 24개 표층퇴적물을 대상으로 분석한 금속의 화학적 존재형태별 함량은 Table 3과 Fig. 9에 총금속 함량에 대한 상대비로 제시하였다. 분석결과 나타난 가장 두드러진 특징은 망간을 제외한 모든 금속들이 잔류부분에서 55% 이상으로 가장 높게 나타난 사실과 특히 이 부분에서 85.1%와 100%의 절대적인 함량비를 보인 철 및 크롬의 존재형태를 들 수 있다. 망간은 탄산염 추출부분에서 40.3%로

가장 높고 잔류부분에서 38.8%의 함량비를 보인다. 카드뮴과 코발트는 잔류부분 다음으로 탄산염부분에서 각각 42.8%와 30.6%로 가장 높으며 구리, 아연 및 철은 산화물부분에서 각각 34.4%, 23.1%, 13.7%로 가장 높다. 흡착부분의 금속 함량은 2.8%의 함량을 나타낸 망간을 제외한 모든 금속들이 정량 이하의 값을 나타내었으며, 유기물부분에서는 철, 구리, 니켈 및 망간이 각각 0.6%, 2.1%, 4.0%, 2.6%의 미소한 양으로 추출되었다.

연구지역 퇴적물 중 철의 존재형태비는 황하 하구의 퇴적물과 유사하며 (Zhang et al., 1988), Gibbs (1973)의 연구와 비교하면 산화물부분의 함량이 낮은 반면 잔류부분에서 더 높은 값을 보인다 (Table 3). 그러나, 산화물과 잔류부분에서 철의 함량은 전체의 약 99%를 차지하며, 철이 주로 산화물과 결합하거나 안정된 형태의 광물격자 내에 존재하는 것으로 보고된 타 연구의 결과와 일치한다. 니켈은 특히 산화물부분에서 함량이 높은 아마존 및 유콘

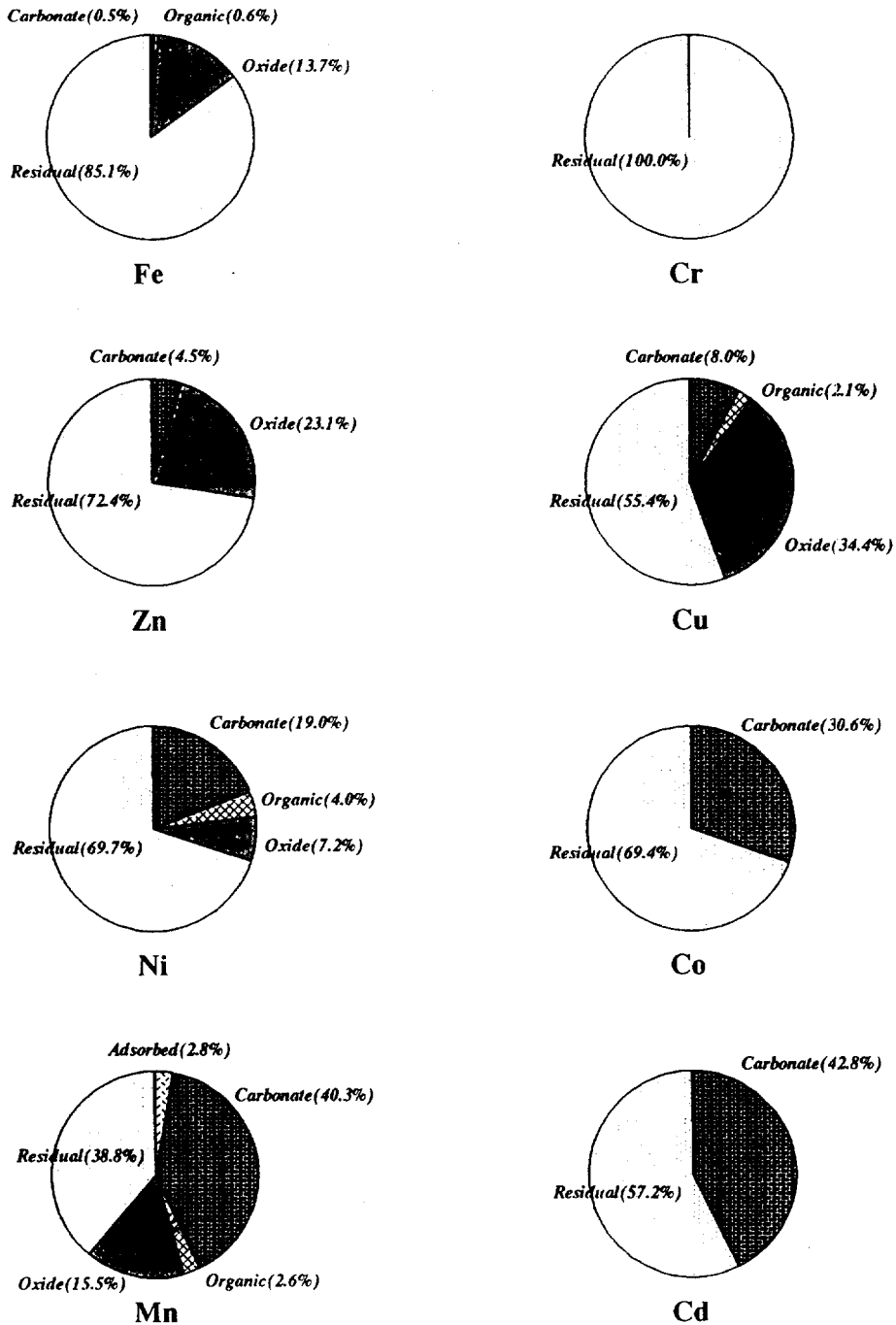


Fig. 9. Average percentage of the different sediment fractions of metals extracted from surface sediments.

강의 경우와는 대조적으로 잔류부분에서 가장 높은 함량을 나타낸다. 황하 하구의 퇴적물에 비해서는 탄산염 부분에서 19%로 다소 높은 반면 잔류부분의

함량은 약 70%로 유사한 값을 보인다. 니켈의 존재형태비는, 따라서, 타 지역 퇴적물에 비해 특히 산화물부분의 함량이 낮고 잔류부분과 탄산염부분

에서 높은 함량이 특징적이다.

구리는 일반적으로 유기물과 잘 결합하는 원소로 알려져 있으나(Montoura et al., 1978), 본 연구에서 유기물부분의 함량은 2.1%로 매우 낮고 산화물부분과 잔류부분에서 각각 34.4%와 55.4%를 차지한다. 이러한 함량비는 Table 3에 비교된 타 연구결과와 다소 상반되며, 특히 만 및 하구 퇴적물의 경우와 대조적인 현상이다. 유기물부분의 금속 함량은 궁극적으로 퇴적물 중의 유기물 함량에 의해 가장 큰 영향을 받을 것으로 믿어지며, 따라서 유기물부분에서 구리의 함량이 낮게 나타난 것은 연구지역 퇴적물에서 낮은 유기물량과 관련된 것으로 해석된다. 구리와 함께 아연은 잔류부분 외에 산화물부분에서 비교적 높은 함량을 보인다. 그러나, 아연의 함량은 연구지역 연안의 진해만 퇴적물에 비하면(Hong et al., 1983) 잔류부분에서 높은 반면 산화물부분에서 상대적으로 매우 낮다. 일반적으로 산화물부분의 중금속은 오염 퇴적물에서 높은 것으로 보고되고 있으며(Förstner and Salomons, 1981; El-baz-Poulichet et al., 1984), 그러한 까닭에 산화물 형태의 금속 함량이 오염의 지표로 제시되기도 한다(Zhang et al., 1988). 이러한 사실에 근거할 때 인위적인 영향에 비교적 민감한 원소로 알려진 아연과 구리의 산화물부분 함량이 육지의 영향을 직접 받는 금강하구와 진해만 퇴적물에 비해 낮은 현상은 인위적인 영향의 차이에서도 일부 기인했을 가능성을 시사한다.

한편, 망간은 탄산염부분과 산화물부분의 추출량을 합하여 타 지역과 비교하면 대체로 유사한 존재형태비를 보이나, 세부적으로는 특히 탄산염부분에서 높은 것이 특징적이다. 탄산염부분의 금속을 추출하기 위하여 본 연구에서 사용한 Acetic acid ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )는 해수나 퇴적층에서 화학반응에 따라 생성된 부분을 용해시키는 시약으로서(Takematsu, 1978) 퇴적지의 조건에 따라 그 추출량이 달라질 수 있다. 앞서 토의된 바와 같이 망간과 코발트는 타 금속에 비해 탄산염의 영향이 상대적으로 큰 것으로 드러났으며, 따라서 이 추출부분에서 함량이 높은 망간, 코발트 및 카드뮴은 칼슘과의 치환에 따른 자생기원의 가능성을 시사한다. 이러한 가능성은 여러 연구에서 제시된 바 있으며(Kitano et al., 1980; Pedersen and Price, 1982; Zhang et al.,

1988), 특히 카드뮴과 납의 경우에 가장 안정된 존재형태로서 탄산염과의 결합을 보고하고 있다(Hem, 1972; Hem and Durum, 1973).

##### 5. 금속 분포의 조절요인

연구지역 퇴적물내 금속 함량은 퇴적물의 입도, 유기물, 산화물 및 탄산염 등과 같은 퇴적물 자체에 내재된 요인의 영향을 받아 변화하며, 그 중 입도의 영향은 그것이 광물성분 및 지화학 성분의 함량을 동시에 조절하는 까닭에 지대한 것으로 나타났다. 그러나 퇴적물의 내적 요인은 물질의 공급원이나 이동경로 등의 외부 환경적 요인에 따라 달라질 수 있으며, 특히 시·공간적으로 변화가 큰 남해의 해양조건을 고려해 볼 때 그러한 가능성은 더욱 크리라 예상된다. 따라서 연구지역 퇴적물 중의 금속 분포를 보다 근원적으로 이해하기 위해서는 퇴적물의 공급지로부터 이동, 퇴적에 이르기까지 영향을 미칠 수 있는 제반 외적 요인들을 동시에 파악할 필요가 있다.

육지의 하천으로부터 연구지역으로 운반되는 육성퇴적물의 양은 연간 약 1,000만톤 규모로서 섬진강과 낙동강을 통해 이루어지며(건설부, 1978; Kim and Lee, 1980), 하천에 의한 공급 외에 연간 1,000만톤에서 1억톤에 달하는 퇴적물이 황해 남부연안에 위치하는 이른바 한국연안이트대에서 재부유되어 유입된다(Wells and Huh, 1984; Wells, 1988). 이로부터 하천기원의 퇴적물은 인접해에서 운반된 퇴적물에 의해 최대 10배까지의 혼합이 가능하며, 따라서 만약 근원지 물질의 화학적 특성이 다르다면 이들이 혼합된 퇴적물에서도 서로 다른 특성의 흔적을 남기게 될 것이다. 그러나 섬진강과 낙동강에 의해 운반된 물질을 대표할 만한 화학적 특성에 대해서는 아직까지 알려져 있지 않으며, 그러한 이유로 퇴적물의 혼합에 따른 화학성분 변화를 직접 유추한다는 것은 쉬운 일이 아니다.

한편, 하구에 인접한 퇴적물 중의 화학성분은 비록 바깥쪽에서 이동된 물질의 영향이 있을지라도 하천에서 공급된 물질의 영향을 가장 많이 받을 것이며, 이들 퇴적물에서는 하천기원 물질의 특성이 반영되어 있을 가능성이 크다. Table 4에는 섬진강이 유입하는 여수해만과 낙동강 하구 주변해역 퇴적물 중의 금속 함량비(금속/알루미늄)가 제시되었으며

Table 4. Comparison of metal to Al ratios (E/Al) between core sediments from the Seomjin river-mouth (Seomjin RM) and Nakdong river-mouth (Nakdong RM) and surface sediments from the southern coast of Korea

Area	Fe/Al	Mn/Al	Cr/Al	Co/Al	Ni/Al	Cu/Al	Zn/Al
South Sea <sup>1</sup>	0.50	71.7	10.9	1.9	5.3	2.4	12.3
Seomjin RM <sup>2</sup>	0.49	60.4	10.5	1.9	5.1	2.3	11.3
Nakdong RM <sup>2</sup>	0.51	67.9	12.4	1.9	5.3	2.1	10.8

Source of data: <sup>1</sup>This study; <sup>2</sup>이(1992).

(이, 1992), 입도에 따른 차이를 최소화하기 위하여 연구지역 퇴적물 가운데 6Φ 보다 세립한 시료 중의 그것과 비교하였다. 표에 수록된 금속의 함량비는 연구지역 퇴적물에서 약간 높은 망간을 제외하면 타 금속 모두 비교된 퇴적물에서 서로 비슷하다. 이러한 사실은 연구지역의 세립퇴적물이 두 하천으로부터 공급된 물질로 구성되어거나, 혹은 외부로부터 유입된 물질 중의 금속 함량이 하천기원 물질 중의 금속 함량과 큰 차이가 없으리라는 추측을 가능케 한다. 그러나 한편, 금강을 통해 운반되는 물질의 조성이 한반도 하천기원 물질의 조성을 대표한다고 가정했을 때 연구지역 6Φ 이상의 세립퇴적물에서 나타난 화학성분의 조성은 하천의 그것과 다르며, 하천기원 물질을 구분할 수 있는 가능성을 갖는 화학성분으로 제시된 바나듐을 지표로 했을 때 최대 86% 가량이 타 기원 물질과의 혼합으로 설명된다 (조 등, 1993; 조, 1994). 그 혼합 정도는 또한 두 하천의 하구와 인접한 해역에서 멀어지면서 증가하여 유입물질의 영향이 공간적으로 다름을 지시하며, 이러한 가능성은 기존의 여러 퇴적학적 연구에서도 제시된 바 있다 (Park et al., 1976; Park and Han, 1985; Wells, 1988; Lee et al., 1990).

연구지역에서 해수유동에 따른 퇴적작용의 지역적 차이는 이미 보고된 바 있으며 (박 등, 1989), 특히 박 등 (1989)의 연구에서 제시된 부유물질 분포는 해류의 흐름과 밀접히 관련되어 약 80 m 등심선 부근에 발달해 있는 연안전선을 경계로 부유물질의 외해쪽 이동이 차단되는 모습을 보여준다. 육지의 하천으로부터 또는 인접해로부터 유입되는 세립퇴적물은 전선의 육지쪽 해역에 쌓이게 되고 전선의 바깥쪽 해역은 부유물질의 공급이 미약한 탓도 있겠지만 흑조의 지류가 통과하는 통로인 까닭에 퇴적작용이 매우 제한된다. 이에 따라 연안해역은 세립한 퇴적물이 분포하고 반면에 외해역에는 조립한

퇴적물이 우세한 입도의 차이를 나타내며, 이러한 입도의 차이는 그것이 광물성분 및 유기물, 산화물 등과 같은 지화학 물질을 조절하는 중요한 요인으로 작용하는 까닭에 원소의 함량이 지역적으로 다르리라는 예상이 자연스러워진다. 뿐만 아니라 입도와외의 관련성이 뚜렷하고 산화물, 유기물 등과 같은 세립성 지화학 물질과 친화도가 큰 원소일수록 연안에서 함량이 높으리라는 것도 예상할 수 있다. 철, 크롬, 니켈, 구리 및 아연은 퇴적물의 세립성분과 친화력이 매우 큰 원소로 알려져 있으며 (Horowitz, 1991), 따라서 이들 금속의 함량이 외해보다는 전반적으로 연안에서 높은 현상은 해수유동으로부터 기인한 입도의 차이가 광물분화는 물론 세립성 지화학 물질의 함량변화를 조절하는 내적요인으로 크게 작용했기 때문으로 판단된다.

한편, 망간, 코발트 및 납의 공간적 분포는 퇴적물의 입도분포와 뚜렷한 관련성을 보이지 않으며, 알루미늄에 대한 함량비의 공간적 분포 또한 탄산염 물질이 다량 함유된 외해의 퇴적물에서 오히려 높아 이들 금속의 함량이 입도 뿐만 아니라 다른 요인에 의해서도 조절되고 있음을 시사한다. 퇴적물내 망간 및 코발트의 화학적 존재형태별 함량은 탄산염부분에서 각각 40.3%와 30.6%로 분석원소 가운데 가장 높으며, 이러한 탄산염 성분과의 관련성은 산화물, 유기물 등의 세립성 지화학 물질이 갖는 강한 흡착력 외에 타 원소와의 치환작용에서 비롯된 특정 지화학 물질내 존재가능성의 차이가 금속의 분포에 영향을 미치는 또 다른 중요한 요인이 될 수 있음을 지시한다. 해양환경에서 망간 및 코발트는 칼슘과 치환됨으로써 탄산염 물질내에 자생적으로 축적될 수 있으며 (Kitano et al., 1980; Pedersen and Price, 1982; Zhang et al., 1988), 이렇게 될 때 이들 금속의 함량은 퇴적물내 탄산염 물질의 존재에 따라 영향을 받을 수 있다고 볼 수 있다. 따라서, 이들 금속이



세립퇴적물이 분포하는 연안과 탄산염 함량이 높고 조립한 외해 퇴적물 간에 분포의 뚜렷한 지역적 차이를 나타내지 않은 현상은 입도의 영향과 아울러 회석에 반하는 탄산염 성분의 또 다른 지화학적 특성에 따른 것으로 해석된다. 특히 분포의 경향이 다른 남 또한 갈슘과의 치환에 따른 탄산염 물질내 존재 가능성이 보고된 바 있으며 (Hem and Durum, 1973; Pedersen and Price, 1982), 탄산염이 우세한 퇴적물에서 높은 남의 함량과 아울러 세립퇴적물의 분포경향과 상반되는 남/알루미늄 함량비의 분포는 그러한 가능성을 뒷받침 한다.

### 요약 및 결론

남해 대륙붕 표층퇴적물을 대상으로 금속의 총량(Al, Fe, Mn, Cu, Ni, Zn, Co, Cr, Pb)과 화학적 존재형태별 분석(Fe, Mn, Cu, Ni, Zn, Co, Cr, Cd)을 통한 연구의 결과, 드러난 주요 내용은 다음과 같다.

1. 금속의 함량은 한반도 주변의 타 해역 퇴적물에서 연구, 보고된 것에 비해 평균적으로 낮은 반면에 공간적으로는 매우 큰 폭의 변화를 보인다. 금속의 공간적 분포는 퇴적물의 입도와 탄산염물질의 영향을 가장 크게 받으며, 그 중 입도의 영향은 그것이 광물성분 및 유기물, 산화물 등의 지화학 성분 변화에도 크게 작용하는 까닭에 퇴적물의 금속 함량을 조절하는데 지대한 것으로 나타났다.

2. 금속의 공간적 분포와 그것을 조절하는 외부 환경적 요인을 해석할 수 있기 위해서는 입도와 같은 퇴적물 자체의 내재적 요인의 영향을 보정하여야 하는 바, 연구지역 퇴적물에서 가장 큰 내적요인으로 입도와 탄산염의 영향을 보정하고 그 공간적 분포를 분석한 결과, 연안에서 높은 함량을 나타내는 금속과 상대적으로 외대륙붕 해역에서 높은 함량을 보이는 금속들의 구분이 이루어 질 수 있었다. 전자에는 철, 구리, 니켈, 크롬 및 아연이, 후자에는 망간, 코발트 및 납이 속하였으며, 이는 특정 지화학 물질과의 친화력 및 퇴적작용의 지역적 차이에서 비롯된 것으로 판단된다.

3. 본 연구에서는 탄산염 물질에 금속이 없다는 가정을 전제로한 기존의 탄산염 보정법에서 나타난

문제점을 제시하고, 보다 합리적인 보정방법으로 저서생물의 패각에서 측정된 자료를 토대로 탄산염의 영향을 보정하였다. 기존의 방법은 탄산염 물질에 대한 친화력의 차이를 원소별로 고려하지 않은데 가장 큰 문제가 있다고 판단되는 바, 이러한 문제는 존재형태별 분석을 통해 재확인 되었다. 따라서, 본 연구에서 시도된 탄산염 보정방법은 기존의 보정법과 뚜렷이 구분되는 것으로서 보정결과에 있어 서로 다른 결론을 제시한다.

4. 화학적 존재형태에 따른 금속 함량은 망간을 제외한 모든 금속에서 잔류부분이 전체함량의 약 55% 이상을 차지하여 연구지역으로 이동, 퇴적되는 금속의 대부분은 주로 세립한 쇄설성 광물질의 공급에 따라 조절되는 것으로 나타났다. 그러나 일부 금속에 있어서는 산화물이나 탄산염 등의 형태로 존재하는 함량비에 따라 크게 영향을 받으며, 대표적으로 잔류부분에 이어 탄산염부분에서 함량이 높은 망간 및 코발트가 해당되었다.

5. 금속의 공간적 분포와 입도분포의 관계, 보존성 원소에 대한 함량비, 패각의 분석자료를 이용한 탄산염 영향의 보정, 금속의 화학적 존재형태별 구성 및 연구해역의 중요한 해양학적 현상 등에 대한 논의에 근거할 때, 연구지역 퇴적물내 금속의 함량 및 분포는 퇴적작용의 차이에 따른 퇴적물 성분의 지역적 분화와 특정 지화학 물질과의 친화도 차이에 따라 가장 크게 조절되는 것으로 판단된다.

### 감사의 글

연구에 사용된 시료의 채취 및 확보에 도움을 주신 '한바다호'(한국해양대학교), '전남401호'(여수수산대학교), '부산4205호'(부산수산대학교) 관계자 여러분과 전남대학교 유환수 교수님, 부산수산대학교 김대철 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 본 논문에 유익한 제언을 해주신 해양연구소의 정희수 박사님과 두 분의 심사위원께도 감사드립니다.

### 참고문헌

- 건설부, 1978. 섬진강연구보고서. 203 pp.  
공영, 1971. 한국 남해안 전선에 관한 연구. 한국해양학

- 회지, 6: 25-36.
- 박용안, 김경렬, 박수철, 박상운, 1987. 한국 대한해협 대륙붕 표층 퇴적물의 특성과 세립퇴적물의 지구화학적 특성. 한국해양학회지, 22: 43-56.
- 박용안, 이창복, 조영길, 최진용, 박상운, 1989. 한국 남해 대륙붕 해저 퇴적물 분포특성과 현세초기의 해수면. 한국제4기학회지, 3: 1-15.
- 석봉출, 박병권, 1983. 제주도주위 및 남해연안 퇴적물층의 중금속 함량. 한국해양학회지, 18: 29-42.
- 윤정수, 고기원, 1987. 제주남방해역 표층퇴적물의 특성. 한국해양학회지, 22: 130-142.
- 윤정수, 김성복, 고기원, 1989. 제주도 서남해역의 해저퇴적물 특성. 한국해양학회지, 24: 132-147.
- 이동수, 한상준, 1978. 한국 남해동부연안 해저퇴적물층의 중금속 함량에 관한 연구. 한국해양학회지, 13: 11-16.
- 이종화, 한상준, 윤용구, 1974. 마산, 진해 연안해역 해저 퇴적물층의 중금속류 함량에 관한 연구. 한국해양학회지, 9: 31-38.
- 이창복, 1992. 연근해저 및 대륙붕 퇴적물의 지화학적 특성과 광물자원에 관한 연구. In: 천해저(한국주변)의 광물자원과 심해저(태평양) 광물자원에 관한 퇴적학적, 지화학적 및 탄성파 층서연구. pp. 223-377. 한국과학재단, 목적기초 보고서 (KOSEF 89-06-29-05).
- 이창복, 박용안, 최진용, 김기범, 1989. 한국 동남해역 대륙붕과 대륙사면 표면퇴적물의 분포와 특성. 한국해양학회지, 24: 39-51.
- 이창복, 정희수, 정갑식, 1992. 황해 남동해역 표층퇴적물 중 수중 금속원소의 분포 특성에 관한 연구. 한국해양학회지, 27: 55-65.
- 조영길, 1994. 한반도 주변해역 퇴적물 중 중금속원소의 분포와 기원에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문, 262 pp.
- 조영길, 이창복, 박용안, 김대철, 강효진, 1993. 황해 동부 대륙붕과 한반도 서해안 표층퇴적물의 지구화학적 특성. 한국제4기학회지, 7: 69-92.
- 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.
- Choi, J. Y., 1990. Depositional environments of the coarse-grained sediments on the continental shelf of Korean Seas. Ph.D. Thesis, Seoul National Univ., 331 pp.
- Elbaz-Pouliche, F., P. Holliger, W. W. Huang and J. M. Martin, 1984. Lead cycling in estuaries, illustrated by the Gironde estuary, France. *Nature*, 308: 409-414.
- Folk, R. L. and W. C. Ward, 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *J. Sed. Pet.*, 27: 3-26.
- Förstner, U. and W. Salomons, 1981. Trace metal analysis on polluted sediments. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, 1: 494-517.
- Galehouse, J. S., 1971. Sedimentation analysis. In: Carver, R. E. ed., *Procedures in sedimentary Petrology*. Wiley-Interscience: pp. 69-94.
- Gibbs, R. J., 1973. Mechanisms of trace metal transport in rivers. *Science*, 180: 71-73.
- Han, S. and J. Na, 1989. The relation between expansion of the coastal cold waters and periodic wind forcing. Fifth JECCS Workshop, 18-22. September 1989, Ka-  
ngnung Korea.
- Hem, J. D., 1972. Chemistry and occurrence of cadmium and zinc in surface water and groundwater. *Water Resour. Res.*, 8: 661-679.
- Hem, J. D. and W. H. Durum, 1973. Solubility and occurrence of lead in surface water. *J. Amer. Wat. Wks Ass.*, 65: 562-568.
- Hong, G. H., D. B. Yang and K. W. Lee, 1988. Nutrient and trace metals in permanently well-mixed coastal waters of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 23: 159-168.
- Hong, G. H., Y. A. Park and K. W. Lee, 1983. Partitioning of heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 18: 180-184.
- Horowitz, A. J., 1991. A primer on sediment-trace element chemistry. Lewis Publishers, 2nd ed., 136 pp.
- Horowitz, A. J. and K. A. Elrick, 1987. The reaction of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry. *Appl. Geochem.*, 2: 437-451.
- Ingram, R. L., 1971. Sieve analysis. In: Carver, R. E. ed., *Procedures in sedimentary Petrology*. Wiley-Interscience: pp. 49-68.
- Kang, H. J. and S. K. Chough, 1982. Gamagyang Bay, southern coast of Korea: sedimentation on the tide-dominated rocky embayment. *Mur. Geol.* 48: 197-214.
- Kim, W. H. and H. H. Lee, 1980. Sediment transport and deposition in the Nakdong estuary, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 16: 180-188.
- Kitano, Y. and R. Fusiyoishi, 1980. Selective chemical leaching of cadmium, copper, manganese and iron in marine sediments. *Geochem. J.*, 14: 113-122.
- Kitano, Y., M. Sakata and E. Matsumoto, 1980. Partitioning of heavy metals into mineral and organic fractions in a sediment core from Tokyo Bay. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44: 1279-1285.
- Lee, C. B., 1985. Sedimentary processes of fine sediments and the behaviour of associated metals in the Keum estuary, Korea. In: Sigleo, A. C. and A. Hattori eds. *Marine and Estuarine Geochemistry*. Lewis Publishers, INC. pp. 209-225.
- Lee, C. B., Y. A. Park and C. H. Koh, 1985. Sedimentology and geochemical properties of intertidal surface sediments of the southeastern 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. Quater. Res.*, 5: 15-32.
- Lee, H. J., S. K. Chough and S. J. Han, 1990. Recent sedimentation in the South Sea, Korea. *Proceedings of the First International Conference on Asian Marine Geology*, Shanghai, September 7-10, 1988. China Ocean Press, Beijing, pp. 367-386.
- Lee, S. H. and K. W. Lee, 1983. Heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 18: 49-54.
- Montoura, R. F. C., A. Dickson and J. P. Riley, 1978. Complexation of metals with humic materials in natu-

- ral waters. *Estuar. Coast. and Mar. Sci.*, **6**: 387-408.
- Oliver, B.G., 1973. Heavy metal levels of Ottawa and Rideau River sediment. *Environ. Sci. Technol.*, **7**: 135-137.
- Park, B.K. and S.J. Han, 1985. The distribution of clay minerals in recent sediments of the Korea Strait. *Sed. Geol.*, **79**: 173-184.
- Park, B.K., Han, S.J. and J.W. Lee, 1976. Clay mineralogy of bottom sediment in the Jinhae Bay, Korea. *J. Oceanographical Soc. Japan*, **32**: 219-227.
- Park, Y.A., 1985. Late Quaternary sedimentation on the continental shelf off the south-east of Korea- A further evidence of relict sediments. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **20**: 55-61.
- Pedersen, T.F. and N.B. Price, 1982. The geochemistry of manganese carbonate in Panama Basin sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**: 59-68.
- Price, N.B., 1976. Chemical diagenesis in sediments. In: Riley, J.P. and R. Chester eds. *Chemical Oceanography*. Academic Press, **6**: 1-58.
- 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, pp. 149-162.
- Salomons, W. and U. Förstner, 1984. *Metals in the Hydrocycle*. Springer-Verlag. 349 pp.
- Salomons, W. and W.G. Mook, 1977. Trace metal concentrations in estuarine sediments: mobilization, mixing or precipitation. *Neth. J. Sea Res.*, **11**: 199-209.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons, 1972. *A practical handbook of seawater analysis*. Fish. Res. Board of Canada, Ottawa, pp. 207-211.
- Takematsu, N., 1978. The chemical forms of transition metals in marine sediments. *J. Oceanographical Soc. of Japan*, **34**: 242-249.
- Taylor, S.R., 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **28**: 1274-1285.
- Wells, J.T., 1988. Distribution of suspended sediment in the Korea Strait and southeastern Yellow Sea: onset of winter monsoon. *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 southern Yellow Sea. In: *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Sea*. Elsevier Sci. Pub., pp. 387-397.
- Zhang, J., W.W. Huang and J.M. Martin, 1988. Trace metals distribution in Huanghe(Yellow river) estuarine sediments. *Estuar. Cost. and Shelf Sci.*, **26**: 499-516.

---

Accepted October 10, 1994