

## 새만금 조간대 표층퇴적물의 성분원소 함량과 지화학적 특성

조영길 · 류상옥<sup>1</sup> · 구영경<sup>1</sup> · 김주용<sup>1\*</sup>  
목포대학교 해양자원학과, 전남대학교 지구환경과학부

### Geochemical Composition of Surface Sediments from the Saemangeum Tidal Flat, West Coast of Korea

YEONG-GIL CHO, SANG-OCK RYU<sup>1</sup>, YEONG-KYEONG KHU<sup>1</sup> AND JOO-YONG KIM<sup>1\*</sup>

*Department of Marine Resources, Mokpo Nat'l University, Chonnam 534-729, Korea*

*<sup>1</sup>Faculty of Earth Systems & Environmental Sciences, Chonnam Nat'l University, Kwangju 500-757, Korea*

전라북도 서해안의 새만금 조간대에서 채취한 38개 표층퇴적물에서 주성분 원소(Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Ti)와 미량원소(P, Mn, Ba, Sr, V, Cr, Co, Cu, Ni, Zn, Pb)를 분석하였다. 분석된 원소의 함량은 우리나라 타 조간대 퇴적물에서 보고된 값보다 전반적으로 낮았으며, Ba와 Pb를 제외한 모든 원소가 지각물질의 평균함량에 미달하였다. 함량의 변화는 대부분의 원소에서 <math><20\%(\sigma/\bar{x})</math>로 비교적 작았으며, 주성분 원소의 Ca와 미량금속의 Ba, Cu 및 Mn 이 각각 81%, 62%, 43% 및 33%로 가장 컸다. 공간적으로는 상부조간대에서 함량이 높은 원소와 지역간 차이가 뚜렷하지 않은 원소로 구분되었으며, 이러한 분포를 결정짓는 가장 중요한 요인은 입도와 관련된 것이었다. 입도의 존재를 나타낸 Al, Fe, Mg, Ti, P, Mn, V, Co, Cr, Cu, Ni 및 Zn의 함량은 조간대의 상부로 갈수록 증가하였으며, 따라서 이들 원소의 분포는 조수 퇴적작용에 따른 퇴적물의 입도 분화에 의해 조절되는 것으로 판단된다. 한편, 입도와 관련된성이 미약한 Ca와 Sr, Na, K, Ba 및 Pb의 분포는 조립한 입도의 퇴적물에 많이 포함된 탄산염 및 규산염 광물의 영향을 반영하는 것으로 파악되었다.

To investigate the processes governing the distribution of elements in the tidal flat, thirty-eight sediment samples collected from the Saemangeum tidal flat of the Korean west coast were analyzed for their contents of major (Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Ti) and trace (P, Mn, Ba, Sr, V, Cr, Co, Cu, Ni, Zn, Pb) elements. Most elements showed generally lower contents compared to data published for other tidal flats of Korea, and the effect of anthropogenic input could not be recognized in the sediments. The relative abundance and distribution of most of the elements varied significantly with the grain size of sediments. High contents of Al, Fe, Mg, Ti, P, Mn, V, Co, Cr, Cu, Ni and Zn were found in the finer sediments in the upper tidal flat of the study area, suggesting that tidal sedimentation processes play an important role in controlling the distribution of these elements. However, sediment grain size does not impose any significant effect on the abundance and distribution of Ca, Na, K, Ba, Sr and Pb. It appears that the clastic mineralogy in the coarse-grained fractions is the dominant factor determining the distribution of these elements in the study area.

### 서 론

전라북도 서해안의 옥구, 김제 및 부안에는 북쪽의 금강하구와 남쪽의 계화조간대로 이어지는 약 208 km<sup>2</sup>의 넓은 조간대가 발달해 있다(해양수산부, 1998). 조간대의 북부와 남부에 각각 만경강과 동진강이 유입하는 이른바 새만금 조간대는 약 1/50,000의 구배로 경사가 매우 완만하며, 육지로 함입된 강 하구 주변의 일부 지역을 제외하면 고군산군도 해역의 외해와 직접 연결되는 개방된 지형을 나타낸다. 따라서 조간대의 대부분 지역은 외해로부터 조석과 파랑의 영향을 직접 받아 조간대의 곳곳에 사주와 조수로

가 산재해 있고, 서해안의 다른 조간대에 비해 모래의 함량이 비교적 높은 퇴적물로 구성되어 있다(농림수산부 농어촌진흥공사, 1990; Park *et al.*, 1991). 그러나 이 지역에는 서남해안 간척 개발사업의 일환으로 총 420 km<sup>2</sup>의 면적을 조성하는 새만금 간척사업이 1991년부터 2003년 완공을 목표로 진행 중이며, 개발 이후 이 지역의 퇴적환경은 급속히 달라질 것으로 예상된다. 2001년 변산에서 고군산군도, 신시도 및 비응도를 잇는 방조제가 완공되면 기존의 갯벌은 완전히 상실되고, 소위 새만금호의 퇴적환경은 하천에서 공급되는 육상 물질의 영향을 점차 크게 받을 것이다. 최근 우리나라의 대표적 환경문제로 대두된 시화호 오염의 선례는 개발사업의 성격 및 주변 환경 여건이 새만금 간척사업과 비슷한 까닭에 여러 가지 면에서 시사하는 바가 크다. 무엇보다 우려되는

\*Corresponding author: jykim@chonnam.ac.kr

것은 시화호의 오염이 방조제 건설 이후 가속화 되었다는 점이다 (정 등, 1997).

새만금 간척사업은 개발의 혜택 이면에 근본적으로 담수계와 인근 해양 생태계의 변화를 야기하여 환경을 악화시킬 수 있는 가능성이 내재되어 있다. 그렇기 때문에 개발로 인한 환경의 변화를 예측하고 추후 변화에 따른 대책을 세우는 일은 무엇보다 중요하며, 이것은 결국 축적된 자료의 분석을 통한 때 보다 정확하게 제시되어질 수 있을 것이다. 지금까지 새만금 지역에서 이루어진 연구는 주로 생물학적인 현상과(안과 고, 1992; 심 등, 1993, 1994, 1995a, 1995b) 퇴적학적 특성에 관한(이 등, 1995; 오와 최, 1999) 일부 제한된 연구결과가 있을 뿐 물리적인 또는 화학적인 현상을 다룬 연구는 아직까지 보고된 바 없다. 본 연구는 퇴적물의 화학성분을 분석함으로써 성분원소의 함량과 분포를 파악하고 이를 통해 이 지역 퇴적물의 지화학적 특성을 이해할 목적으로 시도되었다. 연구 결과는 연안개발에 따른 새만금 해역 저서환경의 중·장기적 변화를 파악하는데 필요한 기초자료가 될 것으로 기대된다.

**재료 및 방법**

본 연구에 사용된 시료는 1993년 7월 서해안의 새만금 조간대에서 채취한 표층퇴적물로 간조시간에 해당 지점까지 도보로 이동하여 직접 채취하였다(Fig. 1). 채취된 퇴적물은 실험실에서 분석 항목에 따라 분석에 필요한 처리를 추가하였으며, 특히 화학분석을 위한 시료는 일정량의 원시료를 건조시킨 다음 마노(agate) 유발에서 약 200 mesh 이하로 연마하였다. 시료의 분석은 입도, 유기탄소, 주성분 및 미량원소에 대해서 이루어졌으며, 총 38개 시료를 분석하였다.

퇴적물의 입도는 입자의 확산을 위해 시료에 포함된 유기물과 염분을 제거한 후 표준체를 이용한 체질방법과 Stokes의 침전속도를 적용한 피펫방법으로 분석하였으며(Folk, 1968), 그 결과는 Folk(1968)와 McBride(1971)의 방법에 따라 처리하였다. 유기탄소는 중크롬산칼륨(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)과 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)을 혼합한 용액을 산화제로 하여 퇴적물 내의 유기물을 산화시키고 남은 산화제 양을 황산암모늄 제2철[Fe(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>]로 역적정하는 습식산화법으로 분석하였다(Strickland and Parsons, 1972). 한편, 퇴적물의 성분원소는 분말시료를 테프론 용기에 넣고 고온의 혼합산(HF/HClO<sub>4</sub>)으로 분해한 다음 0.1 N 질산으로 원소를 용출하여 유도결합플라

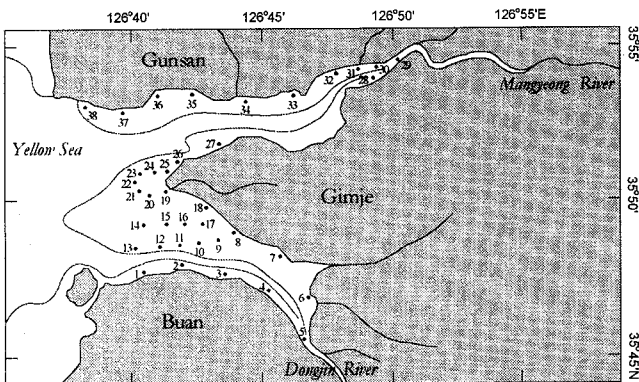


Fig. 1. Map showing the study area and the sample sites.

즈마 방출분광기(ICP-AES)로 측정하였다(Totland, 1992; 최 등, 1994). 원소의 분석시에는 자료의 신뢰도를 검증하기 위해 중복분석과 아울러 표준시료를 병행분석 하였으며, 그 결과 측정값의 정밀도는 ±5%(반복측정의 상대표준편차), 정확도는 ±10%(표준시료 NRC의 BCSS-1 및 MESS-1에 대한 상대오차) 이내로 나타났다.

**결과 및 고찰**

**퇴적물의 입도**

연구지역 표층퇴적물의 평균입도는 2.8~6.7 φ 범위로 24%(σ<sub>x</sub>/x) 이내의 비교적 작은 변화를 보였으며, 4 φ (63.5 μm) 보다 세립한 퇴적물이 전체의 약 61%를 차지하였다. 모래의 함량은 6~100%(평균 47%), 실트와 점토는 각각 ~82%(평균 45%) 및 ~21%(평균 7%)로서 모래 및 실트에 비해 점토의 함량이 낮았다.

퇴적물의 입도성분을 Folk(1968)의 삼각좌표에 도시하면 연구지역 퇴적물은 실트, 모래질실트, 실트질모래 및 모래퇴적상으로 구분된다(Fig. 2). 이 가운데 모래의 함량이 50% 이상인 실트질모래 및 모래퇴적상은 하부조간대에 위치한 시료에 해당되며, 반면에 상부조간대의 시료는 모래질실트 및 실트퇴적상에 속한다. 따라서 연구지역 퇴적물의 입도는 간조선에서 만조선 방향으로 가면서 모래의 함량이 점차 감소하여 세립해지는 경향을 나타낸다. 이러한 모습의 입도 분포는 조수 퇴적환경에서 나타나는 전형적인 퇴적물 분포로 조류에 의한 퇴적작용에서 해안선 쪽으로 입도가 세립해지는 현상을 van Straaten and Kuenen(1985)은 조류 유속분포의 비대칭성과 조류 퇴적작용의 지연효과 등으로 설명한 바 있다.

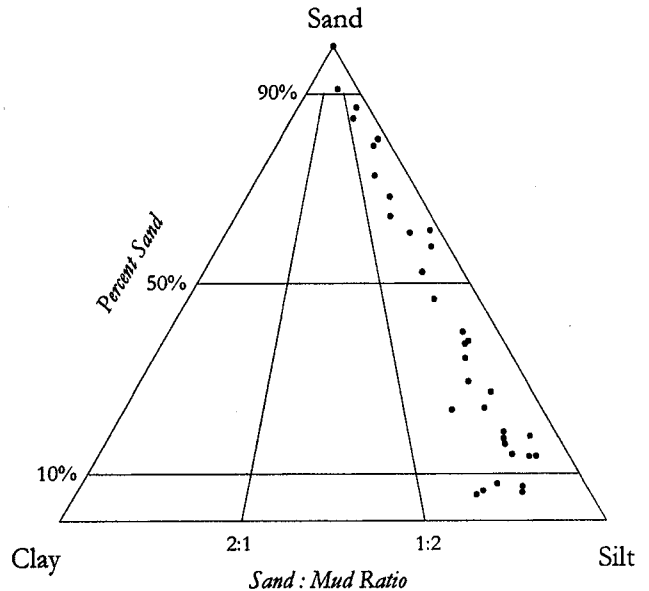


Fig. 2. Folk's ternary diagram showing the grain-size composition of surface sediments of the study area.

**주성분 원소**

분석된 38개 퇴적물에서 나타난 주성분 원소의 함량은 Al 4.85~7.90%(평균 6.58%), Fe 1.86~3.88%(2.68%), Mg 0.37~1.15%

**Table 1.** Elementary composition of 38 surface sediments from the Saemangeum tidal flat (unit in %, \*ppm, \*\* $\phi$ ).

St	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti	*P	*Mn	*Ba	*Sr	*V	*Co	*Cr	*Cu	*Ni	*Zn	*Pb	C <sub>org</sub>	**Mz
1	6.60	2.62	0.73	0.68	0.76	2.46	0.31	440	462	594	191	53	8	48	12	19	41	22	0.37	3.6
2	5.85	2.14	0.57	0.73	0.75	2.50	0.31	396	462	645	196	43	6	37	8	15	29	22	0.23	3.4
3	6.90	2.84	0.79	0.62	0.68	2.32	0.34	484	616	547	174	59	9	55	13	23	46	25	0.43	4.6
4	6.86	2.78	0.76	0.60	0.74	2.37	0.29	440	539	566	179	55	9	52	12	22	46	24	0.34	4.7
5	6.82	2.64	0.73	0.64	0.74	2.45	0.29	440	462	597	192	53	8	48	11	20	42	21	0.29	4.6
6	7.43	3.15	0.85	0.58	0.62	2.27	0.35	572	539	520	163	66	10	59	16	24	55	26	0.45	4.9
7	7.12	2.97	0.83	0.62	0.70	2.27	0.34	484	616	518	167	64	10	57	14	25	49	27	0.41	5.4
8	7.41	3.09	0.89	0.61	0.72	2.37	0.35	572	693	545	173	67	10	59	16	26	52	26	0.37	5.5
9	4.85	1.86	0.37	0.53	0.54	2.61	0.16	308	308	676	176	32	6	25	4	11	21	18	0.10	2.8
10	6.31	2.36	0.68	4.37	0.73	2.39	0.26	572	539	564	368	48	10	43	10	19	42	16	0.31	4.5
11	6.51	2.54	0.66	0.70	0.77	2.65	0.29	440	385	663	206	49	8	44	9	18	37	19	0.14	3.9
12	5.89	2.26	0.42	0.53	0.64	3.18	0.16	352	385	811	213	36	7	27	5	12	31	24	0.05	2.9
13	6.46	2.59	0.64	0.72	0.72	2.71	0.31	440	462	680	210	48	8	41	8	17	41	21	0.15	3.6
14	5.67	1.89	0.45	2.03	0.70	2.81	0.19	484	308	3128	264	34	8	29	5	12	24	53	0.16	3.1
15	5.58	1.99	0.43	0.63	0.67	2.76	0.20	352	308	720	205	35	6	28	5	10	25	17	0.04	2.9
16	5.74	2.08	0.46	0.62	0.66	2.76	0.21	352	308	709	204	37	6	33	5	13	33	19	0.07	2.9
17	5.25	2.03	0.41	0.62	0.60	2.71	0.22	308	385	703	194	36	6	28	4	10	22	18	0.14	2.9
18	6.81	2.56	0.73	0.69	0.75	2.43	0.32	440	539	593	192	54	9	50	12	20	41	22	0.42	5.2
19	6.64	2.61	0.70	0.72	0.74	2.56	0.29	484	616	627	201	52	8	47	11	20	37	19	0.29	4.1
20	5.85	2.31	0.58	0.71	0.67	2.39	0.29	484	385	599	192	45	8	40	7	17	33	17	0.14	3.9
21	6.50	2.57	0.65	0.77	0.71	2.63	0.29	484	462	661	210	49	8	44	8	19	39	17	0.14	4.0
22	6.24	2.50	0.63	0.68	0.69	2.54	0.27	440	385	629	196	47	9	42	10	18	36	19	0.19	3.9
23	6.28	2.50	0.66	1.52	0.67	2.49	0.27	484	385	601	217	50	9	45	11	18	38	23	0.27	3.8
24	6.77	2.89	0.76	0.65	0.65	2.54	0.29	440	539	635	190	56	10	51	13	21	46	23	0.35	4.6
25	5.47	2.16	0.44	0.70	0.57	2.82	0.20	352	385	732	196	37	7	30	6	13	27	22	0.12	3.0
26	6.55	2.75	0.73	0.66	0.68	2.45	0.29	484	462	592	188	53	10	49	12	22	44	24	0.32	4.4
27	6.98	2.81	0.78	0.62	0.65	2.67	0.32	484	539	666	171	58	10	52	15	25	48	28	0.47	5.2
28	6.66	2.74	0.79	0.67	0.71	2.22	0.35	528	616	529	173	59	10	56	15	23	51	22	0.53	4.6
29	6.49	2.61	0.75	0.67	0.71	2.21	0.32	528	616	530	175	55	10	52	14	22	44	22	0.50	5.1
30	7.41	3.19	0.92	0.65	0.70	2.41	0.38	616	693	553	177	69	10	63	18	27	54	29	0.54	5.4
31	7.55	3.32	0.94	0.60	0.66	2.41	0.37	528	770	541	167	72	11	69	19	27	56	27	0.38	5.4
32	6.91	3.32	0.88	0.67	0.67	2.37	0.33	572	539	556	172	64	10	64	19	27	56	23	0.46	6.2
33	7.55	3.41	0.98	0.61	0.66	2.32	0.37	616	693	522	163	73	11	68	20	28	63	27	0.61	5.1
34	7.25	3.23	0.94	0.60	0.71	2.31	0.35	572	770	527	166	68	11	64	18	29	55	27	0.62	5.6
35	7.90	3.88	1.15	0.49	0.65	2.23	0.37	616	1155	461	136	83	14	77	24	36	71	38	0.95	6.7
36	7.39	3.36	1.02	0.82	0.86	2.36	0.36	616	847	516	172	71	12	65	19	29	62	29	0.82	6.1
37	6.97	2.89	0.80	0.66	0.74	2.47	0.32	440	693	581	186	57	10	63	12	24	45	24	0.44	5.7
38	6.68	2.56	0.71	0.71	0.84	2.51	0.32	440	462	612	199	52	8	48	10	19	39	22	0.34	4.2
Min	4.85	1.86	0.37	0.49	0.54	2.21	0.16	308	308	461	136	32	6	25	4	10	21	16	0.04	2.8
Max	7.90	3.88	1.15	4.37	0.86	3.18	0.38	616	1155	3128	368	83	14	77	24	36	71	53	0.95	6.7
Mean	6.58	2.68	0.72	0.81	0.70	2.50	0.30	476	535	670	192	54	9	49	12	21	43	24	0.34	4.4
Std	0.70	0.47	0.18	0.65	0.06	0.20	0.06	86	174	416	36	12	2	13	5	6	12	7	0.21	1.0
CV%	11	17	26	81	9	8	20	18	33	62	19	23	20	27	43	29	28	28	61	24

C<sub>org</sub> = organic carbon; Mz = mean grain-size; Std = standard deviation; CV% = coefficient of variation ( $\sigma_x/\bar{x} \times 100$ ).

(0.72%), Ca 0.49~4.37%(0.81%), Na 0.54~0.86%(0.70%), K 2.21~3.18%(2.50%), Ti 0.16~0.38%(0.30%) 이었고, 유기탄소 함량은 0.04~0.95%(0.34%) 범위로 나타났다(Table 1). 따라서 이들 화학성분 함량은 서해안의 남양만 조간대나 경기만 사각 및 반월 조간대 퇴적물에 비해 낮은 값이며(Table 2), 지각 물질이나 셰일(Martin and Whitfield, 1983)에 비해서도 낮다. 시료간 함량은 그다지 큰 차이를 나타내지 않고 Ca( $\sigma_x/\bar{x}=0.81$ )와 Mg( $\sigma_x/\bar{x}=0.26$ )를 제외한 나머지 원소 모두 20% 내에서 변화하였다.

각 원소의 공간적인 분포는 분석된 시료의 수가 제한된 까닭에 세부적으로 파악할 수는 없지만 변화가 뚜렷하지 않은 Ca, Na 및 K를 제외하면 퇴적물의 입도가 세립한 상부조간대에서 함량이 높고 입도가 조립한 하부조간대에서 비교적 낮은 경향을 나타낸다.

연구지역에서 대부분의 화학성분 분포는 입도와 관련되어 변화하며, 이러한 입도 의존성은 Fig. 3에 나타난 것처럼 원소에 따라 약간 다른 모습을 보여준다. Ca 및 Na의 함량은 입도와 관련성이 없으며, K는 입도가 세립 해집에 따라 약간 감소하는 반면 Al, Fe, Mg 및 Ti는 전체적으로 뚜렷한 증가를 나타낸다.

퇴적물내 주성분 원소의 함량은 환경변화에 민감한 미량금속과는 달리 무엇보다 퇴적물의 광물조성에 따라 큰 영향을 받으며, 광물 조성은 또한 퇴적물의 입도에 따라 크게 변화한다는 사실이 기존의 여러 연구를 통해서 제시되어 왔다(Calvert, 1976; Argast and Donnelly, 1987; 이, 1992; Cho *et al.*, 1999). Fig. 3에 나타난 주성분 원소의 입도 관련성은, 따라서, 일차적으로 입도에 따른 광물 조성의 차이에서 기인할 수 있으며, Fig. 4에 제시된 입도

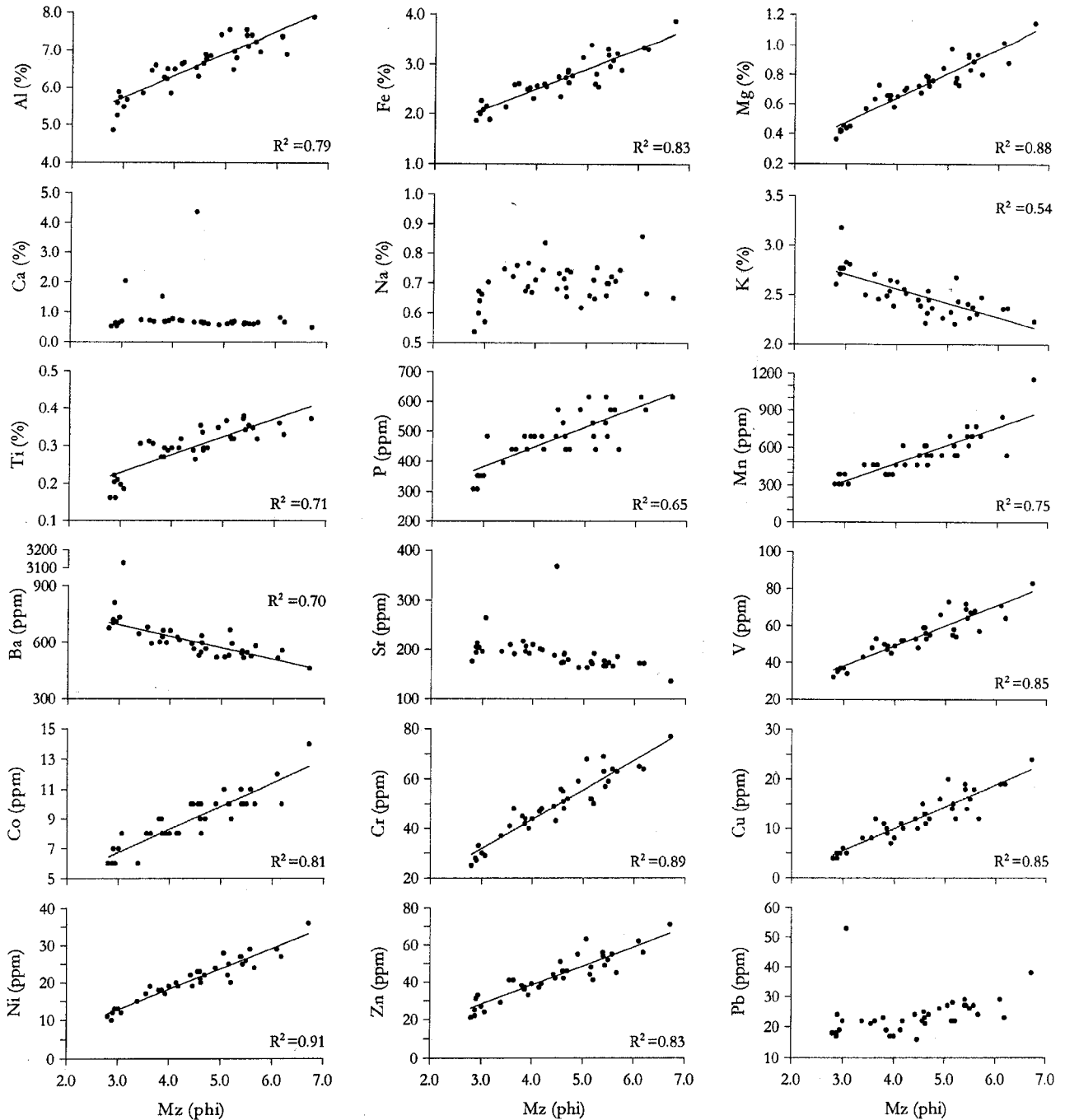


Fig. 3. Relationship between the content of geochemical elements and the mean grain-size (Mz) of sediments. Lines in figures are best fit regression line.

와 원소/Al 함량비의 관계에서 나타난 몇 가지 변화 경향은 그러한 가능성을 뒷받침한다. 특히 K의 경우 Al에 대한 함량비는 퇴적물의 입도가 세립 해집에 따라 점차 감소하는 경향을 보여 일반적으로 조립한 퇴적물에서 함량이 높은 장석류의 영향을 지시한다. 또한 퇴적물 입도에 따른 Fe/Al 및 Mg/Al 함량비의 뚜렷한 증가는 이들 원소의 함량이 세립질 퇴적물에서 함량이 높은 점토 광물에 의해서 크게 영향을 받고 있음을 시사한다. Na/Al 및 Ti/Al의 비는 앞의 원소와는 달리 비록 입도에 따른 감소 혹은 증가

의 경향이 그다지 뚜렷하진 않으나 Ti의 경우 Al 함량과는 비교적 양호한 관련성을 갖는다(Table 3). 이들 두 원소는 점토광물 외에 Na은 장석, 각섬석 및 휘석의 영향을, 그리고 Ti은 모래나 실트질 퇴적물에서 함량이 높은 ilmenite, anatase 등의 영향을 동시에 받는 것으로 알려져 있으므로(Bowen, 1979), 이러한 광물들이 퇴적물의 특정 입도에 편중되지 않고 분산되어 있을 경우 입도에 따른 이들 원소의 함량은 다소 폭 넓게 변화할 가능성이 있다. 한편, Ca/Al의 비는 입도와 아무런 관련성 없이 변화하며(Fig. 4) Al

**Table 2.** Average elementary composition of sediments from the Saemangeum tidal flat, together with those of other areas for comparison (unit in %, \*ppm, \*\*φ).

	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti	*P	*Mn	*Ba	*Sr	*V	*Co	*Cr	*Cu	*Ni	*Zn	*Pb	**Mz	n
SMK <sup>1</sup>	6.58	2.68	0.72	0.81	0.70	2.50	0.30	476	535	670	192	54	9	49	12	21	43	24	4.4	38
SG <sup>2</sup>	6.57	2.32	0.86	0.87	1.10	2.35	0.34	438	455	586	191	59	9	56	22	28	66	-	5.1	22
BW <sup>3</sup>	7.20	3.52	1.09	0.63	1.23	3.49	0.39	594	520	482	159	75	11	126	149	37	161	35	6.8	16
KE <sup>4</sup>	7.66	2.87	0.87	0.70	0.79	2.43	0.34	495	655	623	169	67	13	67	23	34	79	-	5.4	12
YSE <sup>5</sup>	8.30	4.10	1.39	0.85	0.89	2.42	0.41	601	672	475	150	95	13	76	22	37	95	28	9.0	40
Crust <sup>6</sup>	6.93	3.59	1.64	4.50	1.42	2.44	0.38	610	720	445	278	97	13	71	32	49	127	16	-	-

<sup>1</sup>Saemangeum tidal flat (This study); <sup>2</sup>Sagang tidal flat (Lee, 1992); <sup>3</sup>Banweol tidal flat (Lee, 1992); <sup>4</sup>Keum estuary (Cho *et al.*, 1999); <sup>5</sup>Yongsan estuary (Cho and Park, 1998; Unpublished data); <sup>6</sup>Average crust (Martin and Whitfield, 1983)

**Table 3.** Correlation coefficients among the textural and elementary composition.

	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti	P	Mn	Ba	Sr	V	Co	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	C <sub>org</sub>	Sand	Mud
Al	1.00																				
Fe	0.95	1.00																			
Mg	0.96	0.97	1.00																		
Ca	-0.16	-0.24	-0.13	1.00																	
Na	0.37	0.19	0.34	0.14	1.00																
K	-0.65	-0.66	-0.76	0.00	-0.26	1.00															
Ti	0.90	0.86	0.92	-0.19	0.42	-0.80	1.00														
P	0.82	0.81	0.86	0.19	0.30	-0.70	0.79	1.00													
Mn	0.83	0.88	0.89	-0.12	0.23	-0.64	0.78	0.74	1.00												
Ba	-0.35	-0.41	-0.39	0.29	-0.04	0.41	-0.45	-0.13	-0.35	1.00											
Sr	-0.42	-0.53	-0.45	0.91	0.15	0.34	-0.46	-0.14	-0.43	0.38	1.00										
V	0.96	0.98	0.99	-0.18	0.25	-0.75	0.92	0.85	0.90	-0.41	-0.51	1.00									
Co	0.86	0.90	0.92	0.05	0.20	-0.68	0.76	0.86	0.87	-0.23	-0.30	0.90	1.00								
Cr	0.95	0.97	0.99	-0.17	0.29	-0.77	0.92	0.83	0.88	-0.40	-0.49	0.98	0.90	1.00							
Cu	0.92	0.96	0.97	-0.15	0.19	-0.74	0.87	0.86	0.88	-0.37	-0.50	0.98	0.92	0.97	1.00						
Ni	0.94	0.97	0.99	-0.15	0.25	-0.74	0.88	0.86	0.90	-0.38	-0.48	0.98	0.93	0.98	0.97	1.00					
Zn	0.95	0.98	0.97	-0.13	0.24	-0.70	0.87	0.86	0.87	-0.40	-0.45	0.97	0.92	0.96	0.97	0.97	1.00				
Pb	0.33	0.32	0.33	0.05	0.03	-0.07	0.16	0.41	0.37	0.67	-0.13	0.32	0.44	0.31	0.36	0.35	0.32	1.00			
C <sub>org</sub>	0.81	0.86	0.91	-0.10	0.27	-0.73	0.79	0.79	0.91	-0.29	-0.45	0.89	0.89	0.89	0.92	0.91	0.89	0.42	1.00		
Sand	-0.88	-0.87	-0.91	0.06	-0.25	0.77	-0.84	-0.81	-0.80	0.41	0.38	-0.90	-0.87	-0.91	-0.89	-0.92	-0.89	-0.21	-0.82	1.00	
Mud	0.88	0.87	0.91	-0.06	0.25	-0.77	0.84	0.81	0.80	-0.41	-0.38	0.90	0.87	0.91	0.89	0.92	0.89	0.21	0.82	-1.00	1.00

의 함량과도 무관한 변화를 나타낸다(Table 3). 이러한 현상은 해양환경에서 쇄설성 광물 외에 칼슘질의 패각 및 인회석 등의 영향에 따라 함량이 변하는(Calvert, 1976; Emelyanov and Shimkus, 1986) Ca의 특성이 반영된 것으로 판단된다.

**미량원소**

미량원소 함량의 범위와 평균은 P 308~616 ppm(476 ppm) Mn 308~1155 ppm(평균 535 ppm), Ba 461~3128 ppm(670 ppm), Sr 136~368 ppm(192 ppm), V 32~83 ppm(54 ppm), Cr 25~77 ppm(49 ppm), Co 6~14 ppm(9 ppm), Cu 4~24 ppm(12 ppm), Ni 10~36 ppm(21 ppm), Zn 21~71 ppm(43 ppm), 그리고 Pb 16~53 ppm(24 ppm) 이었다(Table 1). 각 원소의 평균함량은 지각물질(Martin and Whitfield, 1983) 및 연구지역과 인접한 서해안 조간대, 하구 및 해안 퇴적물에 비해 전체적으로 그 값이 낮으며(Table 2), 따라서 대체로 오염되지 않은 서해안 조간대 퇴적물을 대표한다고 볼 수 있다. 원소의 공간적인 분포는 Ba, Sr 및 Pb를 제외한 모든 원소의 함량이 비교적 입도가 세립한 상부조간대에서 높은 경향을 나타내며, 하구로부터 거리에 따른 함량변화는 보이지 않는다. 공간적으로 가장 크게 변화하는 원소는 Ba( $\sigma_r/\bar{x}=0.62$ )으로 연구지

역 남부의 주수로쪽에 위치한 1개 시료에서 특히 함량이 높으며, Cu ( $\sigma_r/\bar{x}=0.43$ ), Mn( $\sigma_r/\bar{x}=0.33$ ), Ni, Zn, Pb, Cr, V, Co, P 순으로 변화의 폭이 감소한다.

Fig. 3에는 미량원소와 평균입도의 관계를 도시하였다. Sr, Ba 및 Pb를 제외하면 제시된 원소 모두 퇴적물의 입도와 매우 밀접하게 관련되어 그 함량이 변화한다. 이러한 변화 경향은 대부분의 원소 함량이 퇴적물의 입도와 퇴적물의 세립성분, 특히 점토광물에 의해서 조절되고 있음을 시사한다. 한편 Sr은 단지 Ca에 대해 서만 밀접한 관련성( $r=0.91$ , see Table 3)을 보여 주로 탄산염 물질에 의해 함량이 조절되는 것으로 판단되며, Ba의 함량은 조립한 입도의 시료에서 함량이 높아 사질 퇴적물에 포함된 장석 및 운모의 영향을 지시한다. 퇴적물에서 Pb 또한 조암광물 중 운모와 칼리장석에 농축되는 것으로 알려져 있으며(Wedepohl, 1969), 금강하구 퇴적물에서 납 총량의 50% 정도가 모래에 포함된 사실을 고려할 때(최 등, 1996) 연구지역 퇴적물에서도 Pb 함량이 광물에 의한 영향을 반영한 것으로 추론된다.

비록 퇴적물 중의 금속 함량은 특히 육지에 인접한 연근해저의 경우 입도와 쇄설성 광물질의 영향을 가장 크게 받는 것으로 보고되고 있으나(Calvert, 1976; Cho *et al.*, 1999) 환경에 따라서는

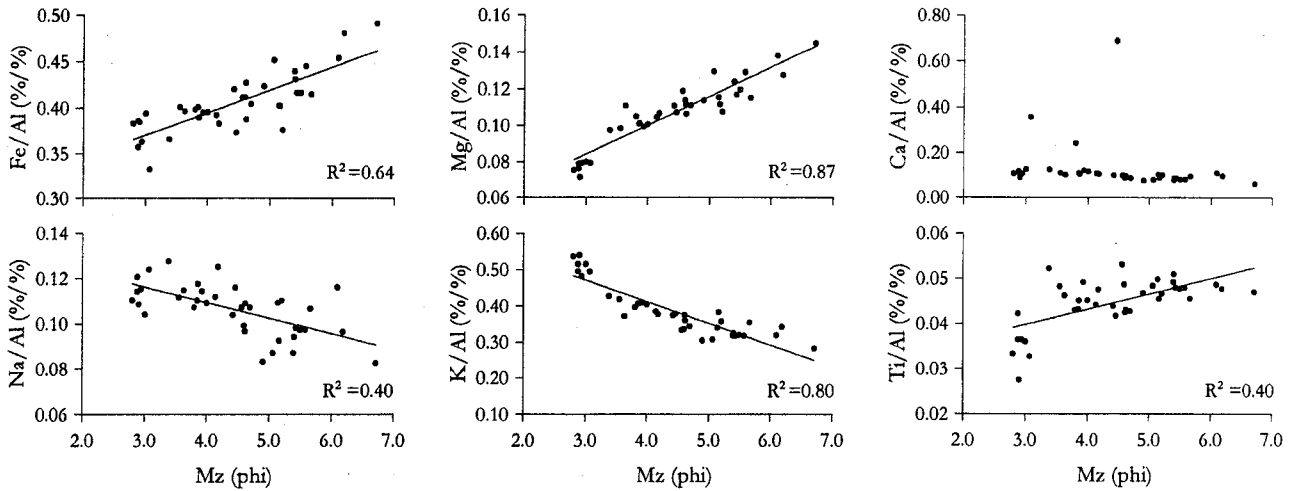


Fig. 4. Relationship between the ratio of element/Al and the mean grain-size (Mz) of sediments. Lines in figures are best fit regression line.

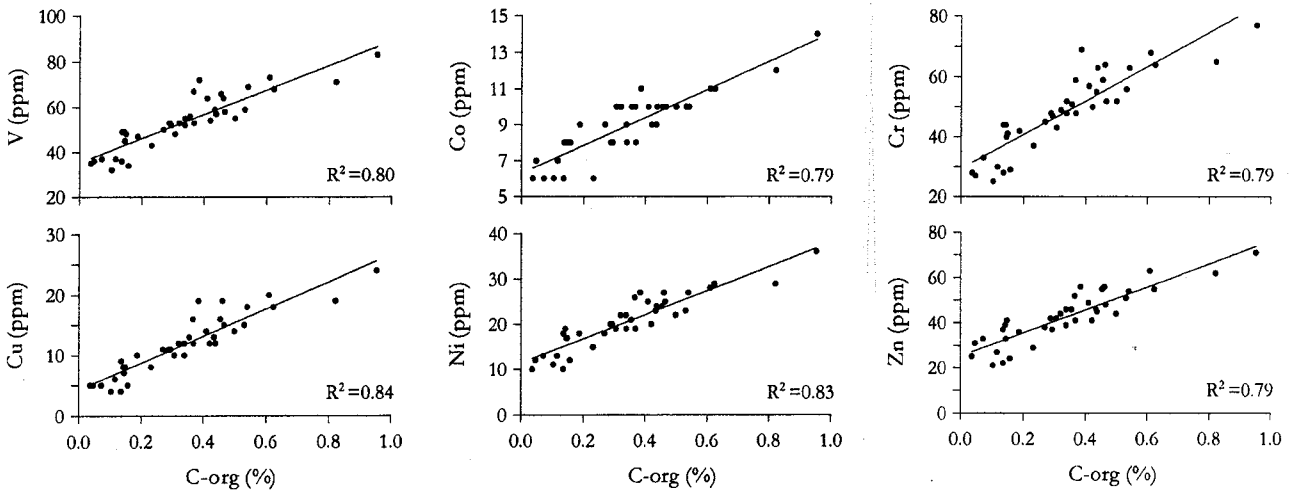


Fig. 5. Relationship between the content of minor elements and that of organic carbon (C-org). Lines in figures are best fit regression line.

자생광물 혹은 생물기원의 물질, 그리고 인위적 요인에 의해서도 큰 영향을 받을 수 있다. 이 가운데 생물기원의 물질, 특히 유기물은 세립질 퇴적물과 친화력이 커서 입도가 세립해짐에 따라 그 함량이 증가하는 경향을 나타내며, 또한 표면적이 매우 넓은 까닭에 금속원소의 흡착능력이 큰 것으로 알려져 왔다(Horowitz, 1991). 본 연구에서는 미량금속에 대한 유기물의 영향을 파악하기 위하여 퇴적물 중의 유기탄소를 분석하였으며(Table 1), Fig. 5에는 특히 유기물과 친화력이 큰 금속과 유기탄소의 관계를 도시하였다. 그림에 제시된 미량금속의 함량은 금속과 유기탄소 함량이 공통적으로 낮은 일부 조립질 퇴적물을 제외하면 유기탄소 함량이 증가할수록 전반적으로 높아지는 경향을 보이며, 따라서 세립질 퇴적물에서는 이들 원소의 상당부분이 유기물과 결합되어 있을 가능성을 시사한다. 그러나 유기탄소 또한 세립한 입도성분과 밀접한 관계에 있기 때문에(Table 3) 그림에 보이는 금속과의 관련성은 유기탄소 함량에 내재된 입도의존성을 반영할 수도 있으며, 이것의 명확한 규명을 위해서는 금속의 화학종 분석과 같은 추가적인 연구가 필요하다.

#### 화학성분의 거동 및 조절요인

퇴적물의 입도성분을 포함한 19개 화학성분들 사이의 상관계수를 Table 3에 수록하였다. Al, Fe, Mg, Ti, P, Mn, V, Cr, Co, Cu, Ni, Zn 및 유기탄소는 서로 상관관계가 양호하며, 퇴적물의 입도 성분 중 이토의 함량과 밀접한 관계를 나타낸다. 반면에 Ca, Na, K, Ba, Sr 및 Pb는 Ca와 Sr, Ba과 Pb의 관련성을 제외하면 타 원소와의 관계가 불량하며, 다만 K의 경우 모래와 양호한 상관성을 보인다. 결국 분석된 원소는 상호 관련성에 근거하여 크게 점토광물을 비롯한 퇴적물의 세립성분과 친화도가 큰 원소와 조립한 입도의 장석류 및 탄산염에서 함량이 높은 원소를 포함하는 두 그룹으로 나누어 볼 수 있다.

상관분석에서 상관계수가 큰 원소들은 대체로 그 지화학적 특성이나 환경 내에서의 거동이 서로 밀접하게 관련되어 있으며, 따라서 상호 연관된 기원 및 이동의 역사를 반영하는 측면이 있다(Harman, 1967; Summerhayes, 1972). 앞서 토의한 바와 같이 연구지역에서 각 원소의 함량 및 분포 경향은 무엇보다 퇴적물의 입도와 매우 밀접한 관련이 있으며, 이것은 구분된 두 그룹의 원소

**Table 4.** Eigenvalues, variance, and cumulative variance of geochemical factors.

Eigenvalue	Factor	Percent of Variance	Cumulative % of total variance explained
14.7452	1	70.2	70.2
2.2159	2	10.6	80.8
1.6164	3	7.7	88.5
0.9052	4	4.3	92.8
0.4670			
0.3423			
0.2362			
0.1258			
0.1000			
0.0703			
0.0464			
0.0380			
0.0265			
0.0197			
0.0160			
0.0111			
0.0099			
0.0058			
0.0016			
0.0007			
0.0000			
Sum			21.0000

**Table 5.** The Varimax-rotated R-mode factor pattern.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Communality
Al	<b>0.92</b>	-0.17	0.03	0.21	0.9203
Fe	<b>0.94</b>	-0.24	0.00	0.02	0.9521
Mg	<b>0.97</b>	-0.14	0.00	0.16	0.9919
Ca	0.01	<b>0.99</b>	0.09	0.02	0.9853
Na	0.21	0.13	0.00	<b>0.96</b>	0.9822
K	-0.78	-0.01	0.24	-0.13	0.6805
Ti	<b>0.87</b>	-0.20	-0.15	0.31	0.9118
P	<b>0.90</b>	0.19	0.14	0.11	0.8849
Mn	<b>0.89</b>	-0.15	0.07	0.04	0.8249
Ba	-0.36	0.24	<b>0.87</b>	0.03	0.9478
Sr	-0.36	<b>0.91</b>	0.05	0.12	0.9747
V	<b>0.97</b>	-0.20	-0.01	0.08	0.9847
Co	<b>0.95</b>	0.04	0.14	-0.03	0.9317
Cr	<b>0.96</b>	-0.18	-0.02	0.12	0.9745
Cu	<b>0.97</b>	-0.17	0.03	0.01	0.9700
Ni	<b>0.98</b>	-0.16	0.02	0.06	0.9816
Zn	<b>0.97</b>	-0.13	-0.01	0.05	0.9537
Pb	0.34	-0.05	<b>0.93</b>	-0.03	0.9787
C <sub>org</sub>	<b>0.91</b>	-0.14	0.11	0.08	0.8649
Sand	-0.94	0.04	0.11	-0.06	0.8928
Mud	<b>0.94</b>	-0.04	-0.11	0.06	0.8940

에 가장 크게 적용된 현상으로 볼 수 있다. 그러나 일부 원소들 사이의 제한된 관련성은 입도 외에도 특정 원소에 대해서 더 큰 영향을 미치는 또 다른 요인이 내재되어 있음을 시사한다. 본 연구에서는 각 원소의 함량과 분포에 영향을 미치는 조절요인을 객관적으로 추정하기 위하여 21개 분석항목에 대해 R-mode 요인분석을 실시하였으며, 그 결과 총 분산의 92.8%를 설명하는 4개 factor를 취하였다(Table 4, 5).

Factor 1은 총 분산의 70.2%를 설명하는 요인으로 Al, Fe, Mg,

Ti, P, Mn, V, Cr, Co, Cu, Ni 및 Zn이 높은 적재값(loadings)을 보인다. 이 요인에 포함된 변수들의 공통된 특징은 Fig. 3 및 Table 3에 제시된 것처럼 퇴적물의 입도 및 점토광물의 주성분 원소와 밀접한 관련성이며, 아울러 Factor 1에서 특히 낮은 음의 적재값을 나타낸 K 및 모래와의 불량한 관계이다. 앞서 토의한 바와 같이 K 함량이 모래 입도에 많이 포함된 장석류에 의해서 조절된다는 사실은 Factor 1이 퇴적물의 세립성분, 특히 점토광물에 의해서 영향을 받고 있음을 지시하며, 따라서 Factor 1은 알루미늄-규산염 광물요인으로 해석된다. 총 분산의 10.6%를 설명하는 Factor 2는 특히 Ca와 Sr 두 원소에 대해서만 적재값이 높았다. Ca와 Sr은 탄산염 물질에서 서로 치환이 가능한 원소로(Bowen, 1979; Krauskopf, 1982) 타 원소와는 아무런 관련성을 보이지 않으며, 이와 같은 두 원소의 공통된 지화학적 특징으로 미루어 볼 때 Factor 2는 탄산염에 의해 지배되는 요인으로 판단된다.

Factor 3은 Ba 및 Pb의 적재값이 높은 요인으로 총 분산의 7.7%를 설명한다. Ba은 퇴적물의 구성광물 중 사질 퇴적물에 많이 포함된 장석과 운모의 함량에 따라 영향을 받는 원소로 알려져 있다(Bowen, 1979). 연구지역 퇴적물에서 Ba의 함량은 평균입도 4 φ를 기준으로 4 φ 보다 조립한 퇴적물에서 837 ppm으로 세립 퇴적물(558 ppm)에 비해 1.5배 더 높으며, 우리나라 서해안의 사질 퇴적물에 장석, 운모 등이 비교적 풍부히 포함된 사실은(해양연구소, 1986) Ba에 대한 광물의 영향을 뒷받침한다. Pb 또한 조암광물 중 운모(7~95 ppm)나 사장석(2~700 ppm), 정장석(1~70 ppm) 등에 상당량 존재하는 원소로 인식되고 있다(Salomons and Förstner, 1984). 그러나 Pb와 K의 불량한 관계는 정장석이 Pb의 함량에 영향을 미치지 못함을 지시하며, 아마도 운모나 사장석의 영향을 받고 있는 것으로 추측된다. Factor 4는 총 분산의 4.3%를 설명하는 요인으로 단지 Na에 대해서만 높은 적재값을 나타낸다. 본 연구에서 Na의 분포에 영향을 미치는 뚜렷한 외적요인은 찾기 어려웠다. 그러나 Na가 비록 제한적이지만 하나의 독립된 요인으로 설명되어지고 또한 일반적으로 사장석, 각섬석 및 휘석에서 함량이 높다는 사실은(Bowen, 1979) 이 환경에서 Na의 함량에 영향을 미치는 요인이 타 원소와 구분되고 있음을 시사한다.

## 결론

새만금 조간대의 38개 표층퇴적물에서 Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Ti, P, Mn, Ba, Sr, V, Cr, Co, Cu, Ni, Zn 및 Pb를 분석하여 각 원소의 함량과 분포를 파악하였다.

분석된 원소의 함량은 평균 Al 6.58%, Fe 2.68%, Mg 0.72%, Ca 0.81%, Na 0.70%, K 2.50%, Ti 0.30%, P 476 ppm, Mn 535 ppm, Ba 670 ppm, Sr 192 ppm, V 54 ppm, Cr 49 ppm, Co 9 ppm, Cu 12 ppm, Ni 21 ppm, Zn 43 ppm, Pb 24 ppm으로 세계의 지각물질이나 우리나라 서·남해안 조간대 퇴적물에 비해 전반적으로 낮았다. 시료간 함량의 변화는 미량금속에서 비교적 컸으며, Ca 및 Ba는 >50%(σ<sub>x</sub>/x̄), Mn 및 Cu는 50~30%(σ<sub>x</sub>/x̄), Mg와 V, Cr, Ni, Zn 및 Pb는 30~20%(σ<sub>x</sub>/x̄), 그 밖의 원소는 <20%(σ<sub>x</sub>/x̄)로 Ti <Co<Sr<P<Fe<Al<Na<K 순으로 감소하였다.

정점간 함량 차이를 토대로 각 원소의 공간적 분포를 검토한 결과 상부조간대에서 높은 함량을 나타낸 원소와 공간적으로 함량

의 차이가 뚜렷하지 않은 원소로 구분되었으며, 전자에는 Al, Fe, Mg, Ti, P, Mn, V, Co, Cr, Cu, Ni 및 Zn이, 후자에는 Ca, Na, K, Ba, Sr 및 Pb가 해당되었다. 이렇게 구분된 원소는 퇴적물의 입도 관련성에 있어서도 서로 상반된 결과를 보여 공간적 분포에 입도의 영향이 크게 적용된 것으로 드러났다.

퇴적물의 입도와 각 원소들 사이의 관련성, Al 함량비, 특정지역으로부터 유입 가능성 등, 본 연구에서 논의된 여러 사실에 근거할 때 분석된 원소 중 공간적으로 변화경향이 뚜렷하지 않고 퇴적물의 입도 관련성이 미약한 Na, K, Ca, Sr, Ba 및 Pb의 경우 조립질 퇴적물에 포함된 특정 광물의 영향을 반영한 것으로 해석된다. 그러나 입도 관련성이 양호하고 전반적으로 상부조간대에서 함량이 높은 나머지 원소들은 조간대의 상부로 갈수록 입도가 세립해지는 조수 퇴적환경의 퇴적작용에 의해서 그 분포가 조절되는 것으로 파악되었다.

## 사 사

본문의 세심한 부분까지 살펴주시고 건설적인 제언을 해주신 부산대학교 이동섭 교수님과 또 한 분의 심사위원께 감사 드립니다. 본 연구는 1996년도 전남대학교 학술연구비에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 농림수산부 농어촌진흥공사, 1990. 새만금지구 예정방조제 내·외 해역의 사퇴이동 및 부유물질의 분포와 이동에 관한 연구. 농림수산부 농어촌진흥공사, 331 pp.
- 심재형, 박수영, 조병철, 이원호, 1995b. 만경·동진강 염하구에서 섬모충류에 의한 박테리아 섭식에 관하여. 한국해양학회지, **30**: 426-435.
- 심재형, 신윤근, 조병철, 1993. 만경·동진강 하구에서의 박테리아 및 식물플랑크톤의 역할과 상호관계. 한국해양학회지, **28**: 107-113.
- 심재형, 윤성화, 윤상선, 최동한, 조병철, 1995a. 만경·동진강 염하구에서 종속영양성 및 혼합영양성 미소편모류의 수도와 박테리아 섭식. 한국해양학회지, **30**: 413-425.
- 심재형, 조병철, 박명길, 1994. 만경·동진강 하구계에서 요소와 요소 분해속도의 분포. 한국해양학회지, **29**: 402-413.
- 안순모, 고철환, 1992. 서해 만경·동진 조간대의 환경과 저서동물 분포. 한국해양학회지, **27**: 78-90.
- 오재경, 최규홍, 1999. 변산반도 연근해 표층 퇴적물의 특성과 퇴적환경. 한국해양학회지 바다, **4**: 107-116.
- 이영길, 박용안, 최진용, 1995. 한국 서해 만경·동진강 하구역 및 연안역 조간대 퇴적층의 퇴적상과 미고생물학적 연구. 한국해양학회지, **30**: 77-90.
- 이창복, 1992. 연근해저 및 대륙붕 퇴적물의 지구화학적 특성과 광물자원에 관한 연구. In: 천혜저(한국주변)의 광물자원과 심해저(태평양) 광물자원에 관한 퇴적학적, 지화학적 및 탄성파층서연구. 한국과학재단 목적기초 보고서(KOSEF 89-06-29-05), 223-377 pp.
- 정희수, 최강원, 김동선, 김채수, 1997. 한국 서해안 시화호의 오염현황과 환경개선 방안. 해양정책연구, **12**: 123-163.
- 조영길, 박경양, 1998. 영산강 하구 표층 퇴적물의 중금속 함량 및 분포. 한국환경과학회지, **7**: 549-557.
- 최만식, 이석훈, 이창복, 조영길, 1996. 금강 퇴적물 중 미량금속의 분포 특성. 한국 제4기학회지, **10**: 27-52.
- 최만식, 정창식, 박계현, 1994. 암석 용해방법에 따른 미량원소 분석결과 비교. 암석학회지, **3**: 41-48.
- 해양수산부, 1998. 우리나라의 갯벌. 해양수산부, 28 pp.
- 해양연구소, 1986. 한국해역 종합 해양자원도 작성연구 -황해: 봄·가을·겨울철-. 한국과학기술원 해양연구소, BSPG00030-119-7, 337-445 pp.
- Argast, S. and T.W. Donnelly, 1987. The chemical discrimination of clastic sedimentary components. *J. Sed. Pet.*, **57**: 813-823.
- Bowen, H.J.M., 1979. Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press, London, 333 pp.
- Calvert, S.E., 1976. The mineralogy and geochemistry of near-shore sediments. In: Chemical Oceanography, Vol. 6 edited by Riley, J.P. and R. Cheater, Academic Press, London, 187-280 pp.
- Cho, Y.G., C.B. Lee and M.S. Choi, 1999. Geochemistry of surface sediments off the southern and western coasts of Korea. *Mar. Geol.*, **159**: 111-129.
- Emelyanov, E.M. and K.M. Shimkus, 1986. Geochemistry and Sedimentology of the Mediterranean Sea. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 553 pp.
- Folk, R.L., 1968. Petrology of Sedimentary Rock. Hemphill's, 170 pp.
- Harman, H.N., 1967. Modern Factor Analysis. Univ. Chicago Press, 2nd ed., 469 pp.
- Horowitz, A.J., 1991. A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry. Lewis Publishers, INC., 136 pp.
- Krauskopf, K.B., 1982. Introduction to Geochemistry. McGraw-Hill, 617 pp.
- Martin, J.M. and M. Whitfield, 1983. The significance of the river input of chemical elements to the ocean. In: Trace Metals in Sea Water edited by Wong, C.S., E.A. Boyle, K.W. Bruland, J.D. Burton and E.D. Goldberg, New York: Plenum, 265-296 pp.
- McBride, E.F., 1971. Mathematical treatment of size distribution data. In: Procedures in Sedimentary Petrology edited by Carver, R.E., Wiley-Interscience, 109-127 pp.
- Park, Y.A., H.J. Kang and Y.I. Song, 1991. Sandy sediment transport mechanism on tidal sandy bodies, west coast of Korea. *Korean J. Quat. Res.*, **5**: 33-45.
- Salomons, W. and U. Förstner, 1984. Metals in the Hydrocycle. Springer-Verlag, Berlin, 349 pp.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons, 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. Fish. Res. Board of Canada, Ottawa, 207-211 pp.
- Summerhayes, C.P., 1972. Geochemistry of continental margin sediments from northwest Africa. *Chem. Geol.*, **10**: 137-156.
- Totland, M., I. Jarvis and K.E. Jarvis, 1992. An assessment of dissolution techniques for the analysis of geologic samples by plasma spectrometry. *Chem. Geol.*, **95**: 35-62.
- van Straaten, L.M.J.U. and P.H. Kuenen, 1958. Tidal action as a cause of clay accumulation. *J. Sed. Pet.*, **28**: 406-403.
- Wedepohl, K.H., 1969. Handbook of Geochemistry. Springer-Verlag, Berlin.

2000년 9월 8일 원고접수

2001년 1월 4일 수정본 채택

담당편집위원: 한명우