

가막만 표층퇴적물 중의 금속 및 비금속 원소의 생지화학적 분포특성

김평중* · 손상규** · 박승윤** · 김상수** · 장수정** · 전상백** · 주재식**

*, ** 국립수산물과학원 남서해수산연구소

Biogeochemistry of Metal and Nonmetal Elements in the Surface Sediment of the Gamak Bay

Pyoung-Joong Kim* · Sang-Gyu Shon** · Soung-Yun Park** · Sang-Soo Kim** · Su-Jeong Jang** · Sang-Baek Jeon** · Jae-Sik Ju**

*, ** Southwest Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research and Development Institute, Yeosu, 556-823, Korea

요 약 : 양식활동이 활발한 반폐쇄적인 내만에서 퇴적물의 지화학적 특성을 파악하기 위하여 2010년 4월 가막만 전역의 19개 정점에서 표층 퇴적물을 채취하여 퇴적물 중의 금속(V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Hg, Pb, As), 비금속(P, Se) 및 악티늄족 중 U원소의 분포특성을 파악하였다. 또한, 퇴적물기준 및 농축계수를 이용하여 금속원소의 오염도를 평가하였다. V, Cr, Fe, Co 및 Ni 등은 석영희석 효과, Cd 및 U은 유기물 희석효과, Mn, Ag, As 및 Se는 만의 북부 및 남부해역 정점들에서 표층퇴적물의 강한 환원환경하에서 이산화망간 및 황산염이 유기물 분해의 산화제로 이용되면서 화학적 재분배에 의해 농도분포가 결정되어지는 것으로 보여진다. 미국 퇴적물 오염 기준(SQGs)에 의한 오염 평가는 As의 경우 만의 중앙부를 제외한 대부분의 정점, Ni은 전 조사정점에서 ERL을 초과하였다. 농축계수(EF)를 이용한 평가는 Ni, Ag, Cd 및 As가 평균 EF가 1을 약간 초과하는 단계를 보였으며, 이외의 성분은 1과 유사하거나 혹은 그 이하 양호한 수준을 나타내었다.

핵심용어 : 가막만, 표층퇴적물, 전이원소, 금속, 악티늄족, 비금속, 산화환원전위, 유기물, 인위적 오염

Abstract : In order to evaluate the geochemical characteristics of sediment in a semi-enclosed bay used as shellfish and fish farming area, the concentrations of metallic(V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Hg, Pb, As) and non-metallic(P, Se) elements and uranium were measured in the surface sediment samples collected from 19 stations of Gamak Bay in April 2010. Metal contamination status in the sediments were also evaluated using the sediment quality guidelines(SQGs) proposed by the National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA) and the enrichment factor(EF). The concentrations of elements in sediment were mainly controlled by quartz-dilution effect(V, Cr, Fe, Co and Ni), the dilution effect of organic matter(Cd and U), and metal redistribution by the decomposition of organic matter(Mn, Ag, As, and Se). The concentrations of metals, except As and Ni, in sediments from all sampling stations were lower than ERL values of NOAA. Conclusively, the surface sediment of Gamak Bay was slightly polluted with Ni, Ag, Cd, and Cd but was not polluted with other elements on the basis of EF results. Our results suggest that the surface sediment in Gamak Bay is not polluted by metallic elements.

Key Words : Gamak Bay, Surface sediment, Biogeochemistry, Oxidation-reduction potential, Transition elements, Metal, Actinide, Nonmetal, Organic mater, Anthropogenic pollution

1. 서론

가막만은 북쪽에 여수반도, 동쪽에 돌산도, 서쪽에 고돌산반도, 남쪽에는 개도 등 몇몇 섬들로 둘러싸인 전형적인 반폐쇄성 해역으로 남북 방향의 길이가 15km, 동서 방향을 길이가 약 9km인 타원형 내만이며, 평균 수심은 약 9m인 천해로 총면적은 112.0 km²이고, 용적은 7.1×10⁸ m³으로 알려져 있다(전라남

도, 1982). 해저지형은 오목하게 수심이 깊은 북서 내만역, 만 중앙으로부터 남쪽으로 갈수록 차츰 깊어져 수심이 40m까지 이르는 남쪽 만 입구역, 그리고 수심이 얕고, 경사가 완만한 동부 천해역으로 구분된다(Kang and Chough, 1982). 또한 지형 특성에 따른 조류 등에 의해 대체로 3개의 수괴가 존재하며 때때로 복잡한 해황을 나타낸다. 퇴적물 조성은 백야도와 돌산 군 내리를 잇는 선을 경계로 내만에는 대부분 니질로 조성되어 있고, 남측에는 패각질이 다소 함유되어 있다. 점토광물은 일라이트 46.4~61.1%(평균: 53.6%), 스�멕타이트 13.4~31.8%(평균:

* 대표저자 : 종신회원, pjkim@nfrdi.go.kr, 061-690-8955

20.4%), 카올리나이트 9.4~16.9%(평균 : 12.4%) 그리고 녹니석 10.5~17.4%(평균 : 13.6%)의 농도분포를 보인다. 일라이트의 농도분포는 만 중앙부에서 북동지역으로 향하여 점점 낮아지는 경향을 보이는 반면, 카올리나이트와 녹니석은 만 중앙부로부터 가장자리로 향하여 점점 높아지는 경향을 보인다(이 등, 1995).

가막만은 육지로부터 영양염 유입이 많아 기초생산력이 매우 크며 많은 종류의 어패류가 서식하여 각종 어패류의 증양식이 행해짐은 물론 산란 및 서식장으로서 천혜의 보고로써 이 해역을 환경보전해역으로 지정하여 관리하고 있는 해역이다(김, 2005). 특히 굴 수하식 양식에 의한 생산량은 전국 생산량의 30%에 달하는 수산업적으로 매우 중요한 어장이다(이와 권, 2007), 그러나 최근 주변의 인구증가에 의한 하·폐수의 유입증대, 수하식 폐류양식 자가오염 등에 의한 퇴적물 환경이 악화되고 있는 실정이며, 매년 하계에 저층에서 빈산소수괴가 발생되어 해양 동식물의 성장 산란 서식 등에 많은 영향을 미치고 있다(김 등, 2006; 김 등, 2010). 이러한 빈산소수괴 발생 등의 현상은 일반적으로 폐쇄성이 강한 해역에서 저층퇴적물의 유기오염 물질의 생지화학적 여러 요인들에 의해서 일어난다. 그러므로 가막만 표층 퇴적물의 환경특성에 관한 연구는 가막만에서 유기물 오염 및 영양염류 플럭스 산정에 관한 연구(김, 2005; 이 등, 2008; 김 등, 2011), 알칼리 및 알칼리 토금속의 분포 특성(김 등, 2012)에 관한 연구 등으로 다양한 연구가 필요하지만 다소 부족한 실정이며, 특히 저서생물의 성장과 산란에 필수원소이거나 생물독성을 유발하는 금속 및 비금속원소에 관한 연구는 미비한 실정으로써 본 연구에서 이들 원소들의 생지화학적 분포특성을 파악하여 어장환경 보전 및 양식어장 환경개선을 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료 채취 및 분석

가막만 표층퇴적물의 금속 및 비금속 원소의 분포특성을 파악하기 위하여 2010년 4월 국립수산물과학원 남서해수산연구소의 조사선 탐구 11호를 이용하여 가막만 19개 정점에서 현장 조사를 수행하였다(Fig. 1).

표층퇴적물의 채취는 변형된 van Veen grab(약 50×30×30 m) 채취기를 사용하여 표층퇴적물의 교란을 최소화 할 수 있도록 채취하였으며, 퇴적물의 얇은 산화층인 상부 0~3 cm층 퇴적물을 채취하기 위하여 그림 채취 후 5분~10분 정도 거치대에 정지시킨 다음 사이폰을 이용하여 해수 상등액을 제거하였다.

이화학적 분석을 위한 시료의 분취(Subsampling)는 미리 산세척된 플라스틱 주걱을 이용하여 산세척된 폴리에틸렌 병에 표층퇴적물 50 g 정도를 분취하였으며, 이들 시료는 즉시 Dry ice가 채워진 Ice box에 담아 실험실로 옮긴 후 -76 °C에서 시료 전처리 전까지 보관하였다.

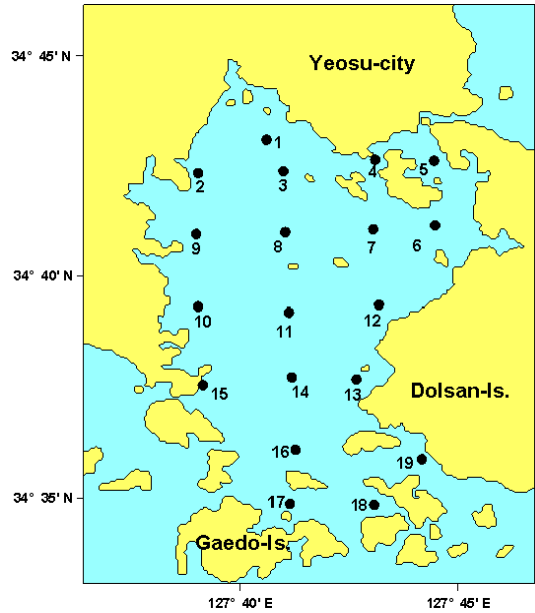


Fig. 1. Sampling station map.

전이원소, 금속 및 악티늄족의 우라늄(U) 원소 분석을 위한 시료는 동결건조기를 이용하여 퇴적물을 건조한 다음 막자사발을 이용하여 미세한 분말로 분쇄하여 산분해를 위한 시료로 준비하였다. 퇴적물의 산분해 및 분석에 관한 사항을 김 등(2012)의 보고에 상세하게 기술되어 있으며, 수은(Hg) 분석은 금아말감 수은분석기(Model : DMA-80, Milestone Ltd., Italy)를 이용하여 분석하였다. 분석의 정도관리를 위한 시료는 인증표준물질 MESS-3(NRC)를 시료 8개 분석시 마다 2개씩 시료와 동일하게 전 처리하여 분석하였고 분석 회수율은 93.7~102.5% 사이였다(Table 1).

Table 1. Analysis results of certified reference materials (MESS-3, NRC)

Elements	Certified value	Recovered concentration (Mean, n=4)	Recovery (%)
Al(%)	8.59	8.62	100.3
V(ppm)	243	242	99.5
Cr(ppm)	105	100	95.4
Mn(ppm)	324	314.3	97.0
Fe%	4.34	4.34	100.0
Co(ppm)	14.4	14.3	99.5
Ni(ppm)	47	47	99.5
Cu(ppm)	33.9	31.8	93.7
Zn(ppm)	159	158	99.2
Ag(ppm)	0.18	0.18	99.9
Cd(ppm)	0.24	0.24	100.0
Hg(ppb)	91	86	95.1
Pb(ppm)	21.1	21.0	99.6
P(ppm)	1200	1230	102.5
As(ppm)	21.2	21.2	99.8
Se(ppm)	0.72	0.70	97.7
U(ppm)	4.00	3.99	99.8

2.2 금속 및 비금속의 오염평가

연안해역 퇴적물 내 화학적 성분은 생지화학적 환경변화를 반영하고, 해수와 달리 주변의 금속에 대한 오염의 기록을 장기간 보존하는 특성을 가지고 있어서 그 해역에 대한 화학적 성분의 오염 지표로 사용될 수 있을 뿐만 아니라 오염물질의 유입과정과 오염역사를 추적하는 단서로 사용된다(Choi et al., 1999; Hwang et al., 2010; Hwang et al., 2011). 이러한 퇴적물 내 화학적 성분의 오염에 대한 평가는 주로 분석된 금속원소의 농도를 오염되지 않은 지역에서의 자연적인 농도와 비교하는 방법이 이용되며, 그 방법으로는 농축계수(Enrichment Factor, EF), 농집지수(Geoaccumulation index, Igeo), 농축비(Concentration enrichment ratio), 오염지수(Metal pollution index) 등 다양한 방법이 있다. 또한, 최근에는 퇴적물내 미량 금속의 농도에 따른 생물의 영향을 고려한 각 나라별로 설정해 놓은 금속원소의 오염기준(Sediment Quality Guidelines; SQGs)을 적용하여 평가하기도 한다(Hwang et al., 2010; Hwang et al., 2011).

본 연구에서는 가막만 표층 퇴적물내 금속 및 비금속원소의 오염의 정도를 파악하기 위해 먼저, 연구해역내 퇴적물중 금속원소의 농도와 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 권고하고 있는 ERL (Effect Range Low) - ERM(Effect Range Median) 값(Buchman, 2008)을 비교하였으며, 표층 퇴적물에 있어서는 오염기준 외에 농축계수(EF)를 계산하여 오염정도를 파악하였다. 여기서, EF는 측정된 퇴적물중 Al 혹은 Fe에 대한 각 금속원소의 농도비 $[(Me/Al \text{ or } Me/Fe)_{observed}]$ 를 지각물질 중 Al 혹은 Fe에 대한

각 금속원소의 평균농도비 $[(Me/Al \text{ or } Me/Fe)_{crust}]$ 로 나누어 준 값을 말하며, 이 연구에서는 연구해역내 Al에 대한 금속의 비값을 기초로 다음의 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$Enrichment\ Factor = \frac{(Me/Fe)_{observed}}{(Me/Fe)_{crust}} \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 금속원소의 공간적 농도 분포특성

가막만 표층퇴적물 중의 전이 원소(Transition elements) 및 금속 원소의 분포 특성을 파악하기 위해서 V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg Pb 및 As 등을 측정하여 그 결과를 Table 2와 Fig 2, Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다.

가막만 표층퇴적물 중 조사성분의 농도범위(평균±편차)는 V 101.3~128.2 ppm(114.7±7.3 ppm), Cr 69.1~85.6 ppm(78.2 ± 5.0 ppm), Mn 416.6~977.5 ppm(717.4 ± 166.2 ppm), Fe 3.21~4.35%(3.76 ± 0.31%), Co 12.96~16.09 ppm(14.53 ± 0.84 ppm), Ni 27.8~37.3 ppm(32.6 ± 2.7 ppm), Cu 14.1~92.0 ppm(27.7 ± 18.5 ppm), Zn 86~164 ppm(114 ± 20 ppm), Ag 0.086~0.135 ppm(0.104 ± 0.015 ppm), Cd 0.068~0.406 ppm(0.141 ± 0.103 ppm), Hg 13.06~53.61 ppb(23.24 ± 10.30 ppb) 및 Pb 24.9~35.0 ppm(28.3 ± 2.4 ppm)으로 대체적으로 V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Hg, Pb 등은 연구해역의 북부 해역 및 남부해역에서 높고 만의 중앙 서측 모래함량이 가장 높은 조사정점 10에서 가장 낮고 이 정점을 기점으로 방사선형으로 동측 및 남북방향으로 농도

Table 2. The metallic and nonmetallic elements concentrations in the surface sediments of Gamak Bay

St. No.	Al	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ag	Cd	Hg	Pb	P	As	Se	U
	(%)	(ppm)			(%)	(ppm)					(ppb)	(ppm)					
1	8.94	123.3	79.0	543	4.35	15.5	36.4	29.4	134	0.128	0.353	31.3	29.0	653	16.9	0.420	2.90
2	8.68	128.2	82.2	416	4.12	15.5	37.2	28.4	136	0.120	0.406	28.0	29.8	545	13.4	0.581	2.88
3	8.76	124.2	84.9	503	4.23	16.1	37.2	28.7	133	0.135	0.284	30.1	29.3	570	12.9	0.442	2.50
4	8.22	110.3	71.6	803	3.74	13.7	30.7	32.3	126	0.108	0.195	53.6	29.7	596	9.4	0.362	2.57
5	8.77	117.2	79.2	977	4.04	15.1	32.5	56.3	164	0.120	0.206	37.6	35.0	685	13.1	0.355	2.55
6	8.45	108.5	71.2	927	3.81	14.1	29.8	33.2	129	0.118	0.117	35.1	32.2	579	11.0	0.342	2.37
7	8.64	115.8	79.5	948	3.81	14.7	32.6	25.7	114	0.116	0.090	22.1	28.9	608	11.5	0.166	2.29
8	8.17	110.2	76.1	852	3.49	13.9	30.7	16.4	100	0.107	0.086	16.4	27.3	544	6.0	0.363	2.19
9	7.87	104.5	71.6	749	3.37	13.3	29.2	15.5	94	0.105	0.094	17.0	26.4	511	8.3	0.235	2.15
10	7.78	101.3	69.1	603	3.21	13.0	27.8	14.1	86	0.094	0.074	13.1	24.9	450	7.1	0.308	2.12
11	7.82	105.3	73.3	789	3.38	13.4	29.5	15.3	90	0.093	0.073	15.3	25.6	491	10.0	0.179	2.04
12	8.31	110.1	76.8	720	3.54	14.4	31.7	18.3	104	0.099	0.068	18.4	27.2	522	11.5	0.213	2.22
13	8.59	114.2	79.3	893	3.71	14.9	32.8	18.2	104	0.096	0.068	17.4	27.4	550	11.7	0.186	2.14
14	8.13	112.4	78.0	721	3.50	14.0	30.9	17.0	96	0.092	0.068	16.6	27.7	537	9.5	0.304	2.09
15	8.45	116.8	81.3	755	3.74	14.8	33.4	16.9	101	0.092	0.079	17.0	27.0	530	4.4	0.316	2.17
16	8.57	119.3	83.6	641	3.82	15.2	34.5	19.1	107	0.089	0.069	17.5	26.8	501	6.8	0.284	2.23
17	8.28	120.2	83.8	750	3.83	14.9	34.1	23.7	107	0.090	0.081	17.8	27.5	581	9.9	0.368	2.19
18	8.24	115.3	80.2	484	3.66	14.3	33.1	26.0	111	0.087	0.175	17.2	26.6	659	6.5	0.310	2.24
19	8.96	122.9	85.5	555	4.05	15.3	35.4	92.0	127	0.086	0.090	20.0	28.8	706	6.0	0.248	2.26
Min	7.78	101.3	69.1	416	3.21	13.0	27.8	14.1	86	0.086	0.068	13.1	24.9	450	4.4	0.166	2.04
Max	8.96	128.2	85.5	977	4.35	16.1	37.2	92.0	164	0.135	0.406	53.6	35.0	706	16.9	0.581	2.90
Avg	8.40	114.7	78.2	717	3.76	14.5	32.6	27.7	114	0.104	0.141	23.2	28.3	569	9.8	0.315	2.32
Sd	0.36	7.3	4.9	166	0.31	0.8	2.7	18.5	20	0.015	0.103	10.3	2.4	68	3.2	0.102	0.25

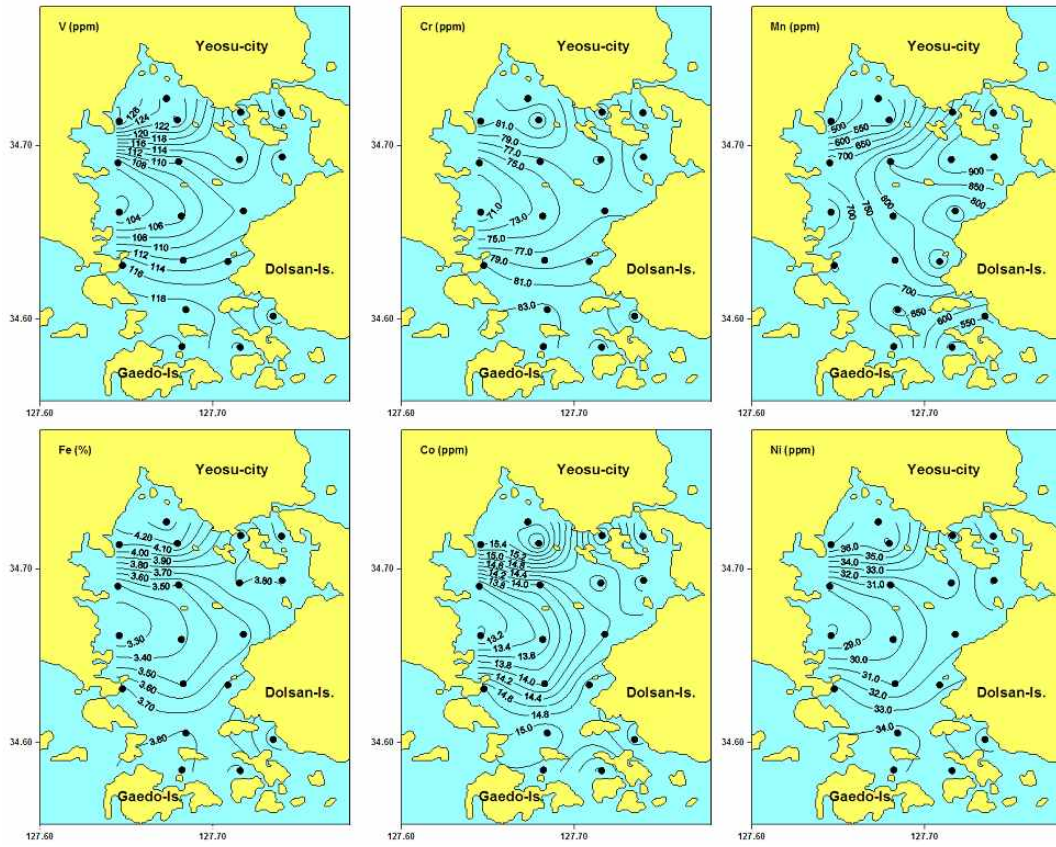


Fig. 2. Horizontal distributions of V, Cr, Mn, Fe, Co and Ni in surface sediments of Gamak Bay.

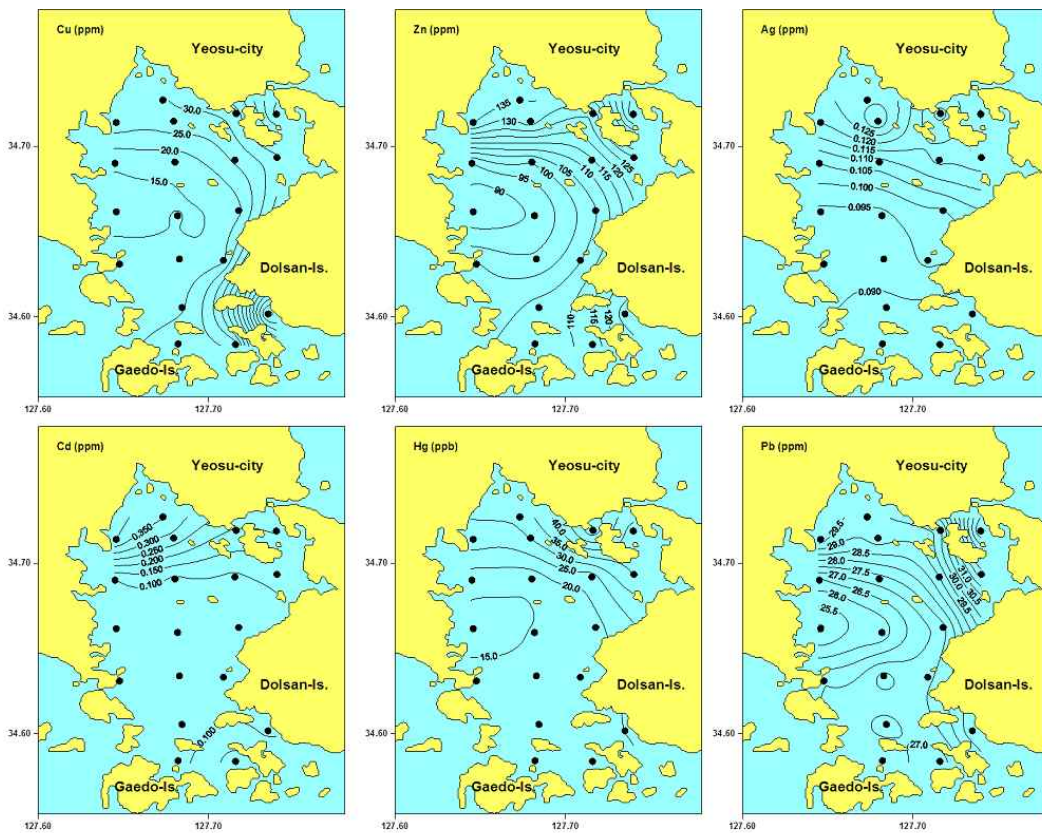


Fig. 3. Horizontal distributions of Cu, Zn, Ag, Cd, Hg and Pb in surface sediments of Gamak Bay.

가 증가하는 경향을 보였다(Fig. 2 와 Fig. 3). 이와는 반대로 Mn의 경우 연구해역의 북동쪽에서 서쪽 및 남북방향으로 멀어질수록 농도가 감소하는 공간적 분포특성을 보였다(Fig. 2 와 Fig. 3). Ag 및 Cd의 경우 다른 조사 성분들과는 달리 연구해역의 북쪽에서 높고 남쪽으로 갈수록 농도가 감소하며 등치선은 동서방향으로 놓이는 공간적 분포특성을 보였다. V은 알루미늄 규산염 광물(Al-silicate mineral)에서 Fe, Mg 또는 Al과 치환되는 원소로서, 점토광물과 휘석, 각섬석, 운모류 등에서 상대적으로 높은 함량을 보인다(Krauskopf, 1982). V은 단독으로 존재하기 보다는 주로 광상에서 다른 금속원소와 결합된 특정 광물의 형태로 존재하는 것이 특징적이다(Merian, 1991). Cr, Mn, Co, Ni는 모두 철그룹에 속하는 전이 금속원소로서 조암광물 격자 내에서 Fe 및 Mg과 치환하는 것으로 알려져 있으며, 일반적으로 화성암보다는 초염기성암에서 100~1000배 정도 농축되어 있는 원소이며, Mn은 쇄설성 광물 중 점토광물을 비롯하여 각섬석, 휘석, 운모 등에서 비교적 높은 함량을 나타낸다(Bowen, 1979). 구리(Cu)와 아연(Zn)은 카드뮴(Cd) 및 납(Pb)과 함께 대표적인 오염형 전이원소 및 금속 원소로서 규산염 광물 가운데 감람석, 휘석, 각섬석, 흑운모 등에서 함량이 높은 것으로 알려져 있다. 이들 원소는 특히 규산염 광물의 격자구조에 편입될 경우 특정 격자구조에 대한 선택성이 서로 달라서 Cu는 감람석과 휘석에서, 그리고 Zn는 각섬석과 흑운모에서 농축을 보이는 것이 특징적이다(Wedepohl, 1969). 그러므로 V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Hg 및 Pb 성분 등은 본 연구에서도 대체적으로 Fe 및 Al(김 등, 2012)의 공간적 분포와 매우 유사한 분포를 보였다.

본 연구해역 표층퇴적물 중에서 조사 성분 평균농도, 지각 평균농도(Taylor, 1964), 상부 대륙지각(Upper continental crust)

(Taylor and McLennan, 1995), 중국대륙붕 퇴적물 평균 값(Zhao et al., 1995) 및 우리나라 연안 주변해역에서 농도를 Table 3에 나타내었다. 조사된 평균농도는 대체로 지각 내의 농도 범위였으며, 전위원소 및 금속성분 중에서 Ag 및 Pb의 농도가 이들 지각 내의 성분보다 다소 높게 나타났다. 우리나라 연안해역의 경우 대체로 Fe은 진해만, Cu는 진해만과 경기만, Pb은 광양만, 영산강 하구, 시화호 외측, Zn은 만경강, Cd은 광양만, Mn은 마산만의 평균농도와 유사하였다(Table 3).

3.2 금속, 비금속 원소 및 U의 공간적 농도 분포특성

본 연구에서 조사 되어진 금속 및 비금속 원소는 P, As 및 Se, 악티늄족 원소로 U의 각 정점별 농도 및 수평분포를 Table 2 및 Fig. 4에 나타냈다.

가막만 표층퇴적물에 측정된 P의 농도는 449.9~706.3 ppm(569.4 ± 68.5 ppm)이었으며 연구해역의 최남측 어류양식장 정점 19에서 최대 농도를 보였다. 공간적 분포는 다른 성분들과 마찬가지로 정점 10에서 가장 낮고 이 정점을 기점으로 방사선 형태로 북, 동 및 남측으로 갈수록 농도가 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 농도는 발해만의 농도범위 310~610 ppm(Liu et al., 2004)보다 다소 높고, 세토 내해(Seto Inland Sea)의 농도범위 496~682 ppm와는 유사한 농도분포를 보였다(Table 4). 또한, Cho et al.(1999)이 보고한 남해 표층퇴적물의 범위 220~1100 ppm(평균 617 ppm)에 비해 다소 낮은 농도였으며, 이와 같이 남해 대륙붕 역에서 높은 P의 농도는 탄산칼슘의 영향 때문인 것으로 보고하였다. 그리고 Yang et al.(1998)이 보고한 황하의 1,100 ppm, 양자강의 1,150 ppm, Zhujiang River의 873 ppm, Malan 황토 및 세계 하구의 평균농도 1,150 ppm에 비해 다소 낮은 농도였다. 퇴적물 중의 P는 일반적으로 인회석과 칼

Table 3. Comparison of average concentrations of each elements in various coastal sediments

Region	Metals(%)		Metals(mg/kg)														Reference	
	Al	Fe	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Mn	As	Hg	P	Co	Ni	V	U	Se		Ag
Crustal average	8.2	5.6	55	12.5	70	0.2	100	950	1.8	0.08	1050	25	75	135	2.7	0.05	0.07	Taylor(1964)
Continental crust	6.9	3.5	32	16	127	0.2	71	720	7.9	-	610	13	49	97	3.0	0.05	0.07	Chester(2000)
Upper continental crust	8.0	3.5	25	20	71	0.1	35	600	1.5	-	700	10	20	60	2.8	0.05	0.05	Taylor & McLennan(1995)
China shelf sea sediment	5.9	3.1	15	20	65	0.07	60	530	7.7	0.03	500	12	24	70	1.9	0.15	0.06	Zhao et al.(1995)
Youngil Bay	6.0	2.4	49	36	202	1.5	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Lee et al.(2004)
Ulsan Bay	-	-	60	63	46	2.2	237	570	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kang and Lee(1996)
Nakdong River Estuary	6.4	1.9	9	27	31	-	17	320	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kim et al.(2000)
Gwangyang Bay	6.2	3.3	18	28	86	0.2	51	812	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Hyun et al.(2003)
Jinhea Bay	-	3.6	30	37	128	-	59	386	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Lee and Lee(1983)
Masan Harbor	6.4	4.5	73	74	321	1.4	79	716	11	0.14	-	-	-	-	-	-	-	Hwang et al.(2006)
Masan Bay	-	-	43	44	206	1.2	67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Hyun et al.(2007)
Continental Shelf	5.1	2.5	11	27	62	-	53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Cho et al.(1994)
Youngsan River Estuary	8.3	4.1	23	28	96	-	77	673	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Cho and Park(1998)
Hampyeong Bay	6.1	2.2	12	20	45	-	34	321	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Youn et al.(1999)
Southwest coast(Mokpo-Wando)	6.3	2.6	22	33	66	-	51	600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Shin et al.(2002)
Saemangeum(inner part)	7.1	2.7	21	26	85	-	47	610	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kim et al.(2003)
Shihwa(outer part)	6.9	3.2	55	29	122	0.5	81	494	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Choi et al.(1999)
Kyounggi Bay	6.2	2.4	25	-	92	-	70	532	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Lee et al.(1998)
Southwest coast(Yeonggwang-Muan)	5.2	2.3	10	25	70	0.05	51	448	5.6	0.01	-	-	-	-	-	-	-	Hwang et al.(2010)
Aphae Island	-	2.8	13	22	84	0.06	63	476	7.1	0.01	-	-	-	-	-	-	-	Hwang et al.(2011)
Chunsu Bay	6.7	3.4	10.9	-	60	0.09	46	691	6	-	437	8	18	57	-	-	-	Song et al.(2011)
Keum River	7.4	2.8	17	-	72	-	54	562	-	-	-	11	19	-	-	-	-	Choi et al.(1996)
Mankyeong River	-	3.3	32	-	112	-	63	922	-	-	-	12	30	-	-	-	-	cho(2007)
Gwangyang Bay	6.2	3.3	18	-	86	0.15	51	812	-	-	-	11	24	-	-	-	-	Hyun et al.(2003)
Yellow Sea	5.8	2.2	9	-	40	-	37	360	-	-	349	7	17	45	-	-	-	Cho et al.(1999)
Gamak Bay	8.4	3.8	28	28	114	0.14	98	717	9.8	0.02	569	15	33	115	2.3	0.32	0.10	This study

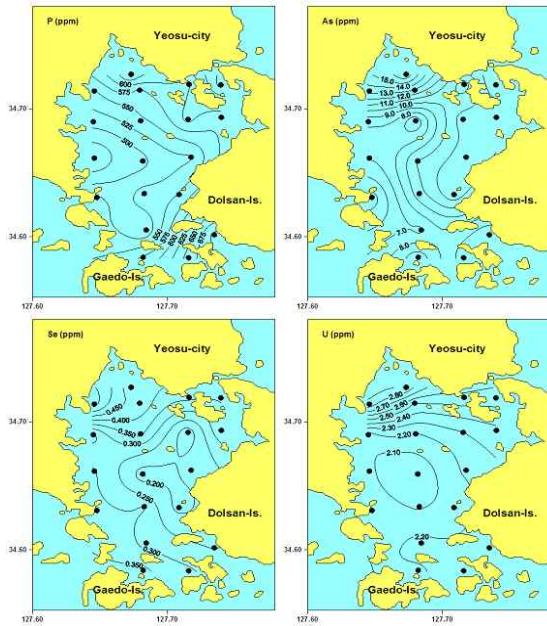


Fig. 4. Horizontal distributions of P, As, Se and U in surface sediments of Gamak Bay.

Table 4. Comparison of concentrations of P in the sediments from various marginal and coastal seas(ppm)

Study area	Sediment Type	P	Reference
Wadden Sea	Silt	93-155	De Jonge et al., 1993
Seto Inland Sea(Japan)	Silty clay	496-682	Yamada and Kayama, 1987
Kieler Bucht, Western Baltic	Clayey sand-clay	310-1240	Balzer, 1986
Adriatic Sea	Silt to clay	155-217	Giordani and Astorri, 1986
Aarhus Bay	Silt	1550-1628	Jensen and Thamdrup, 1993
Gulf of St. Laurent		1627.5	Sundby et al., 1992
Bay of Seine	Sand	155-651	Andrieux and Aminot, 1997
North Sea	Sand-silt	93-806	Slomp et al., 1998
Bohai Sea	Silt-clay	310-620	Liu et al., 2004
Gamak Bay	Silt-clay	450-706	This study

습질의 패각, 점토광물의 영향을 가장 크게 받으며, 모나즈석(Monazite), 해록석(Glaucanite)과 유기물 등의 영향은 이차적인 것으로 알려져 있다(Emelyanov and Shimkus, 1986).

As 및 Se 농도범위(평균 ± 편차)는 As 4.4~16.9 ppm(9.8 ± 3.2 ppm) 및 0.166~0.581 ppm(0.315 ± 0.102 ppm)의 범위이었다. 공간적인 농도분포는 As의 경우 정점 1에서 가장 높은 농도를 보였으며, 만의 중앙부와 서측 해역에서 낮고 만의 북측, 동측 및 남측의 해안선을 따라 농도가 높게 나타났다. Mud 함량이 높은 정점들에서 비소의 농도는 8.0 ppm 이상으로 Chester(2000)가 보고한 지각(7.9 ppm) 및 토양(6.0 ppm)과 비교해서 유사하거나 다소 높은 농도를 보였다. Zhao and Yan(1994)이 중국 주변해역의 퇴적물에서 조사 한 결과는 모래 퇴적물 내

서 6.7 ppm, Silt 7.7 ppm, 점토 퇴적물 11.2 ppm, 발해, 황해 및 동중국해의 일부 사질(Sand) 퇴적물 내에서 27~49 ppm으로 Mud에 비해 매우 높은 함량으로 분포한다고 보고하였다. 그리고 발해에서 10.6 ppm, 동중국해에서 10.7 ppm, 남중국해에서 11.2 ppm, 중국 연안퇴적물 내에서 11.2 ppm으로 보고하였다. 그리고 Se의 경우 정점 2에서 가장 높고 돌산도 북서쪽 정점 7, 11 및 13에서 0.21 ppm 이하의 낮은 농도를 보였으며 이들 정점을 기점으로 북측과 서측으로 갈수록 농도가 증가하는 경향을 보였다. Martin and Whitfield(1983)는 Se의 지각 내 평균 농도는 0.05 ppm, 대륙의 토양 내 평균농도는 0.01 ppm, 심해 점토광물은 4.5 ppm, 심해 탄산염 내에서 0.5 ppm으로 보고하였으며, 본 연구 결과는 심해 탄산염 내에서 보다 낮거나 유사한 농도를 보였다.

악티늄족 원소인 U는 2.04~2.90 ppm(평균 2.32 ± 0.25 ppm)의 범위로 지각 내 평균농도 3.0 ppm과 비교해 유사하거나 다소 낮은 농도를 보였으며, 대부분의 전이원소와 마찬가지로 만의 북부에서 높고 중앙에서 낮은 공간적 농도분포 특성을 보였다.

3.3 퇴적물의 표준화(Normalization)

일반적으로 점토광물의 분포는 수심에 의존하기 때문에 수심과 입도 사이에는 좋은 상관관계를 갖는다(Yin et al., 1989). 이에 반해 가막만에서는 수심과 금속성분 사이에 유의한 상관관계를 보이지 않았다. 이는 아마도 점토 기원의 지리적 위치, 저층 지형학, 해류와 같은 가막만의 독특한 환경 때문일 것이다.

표준화 성분은 연구 대상해역의 특성을 고려하여 지질학적 분포특성 등을 주의 깊게 검토한 후 해역에 대한 가장 적합한 보전성 원소(Conservative elements)를 선택해야 한다. 대부분의 지화학 원소들은 일반적으로 세립한 크기의 알루미늄 실리케이트(Aluminosilicates)로 구성되어져 있기 때문에 표준화 성분으로 알루미늄이 많이 이용되어 왔다(Windom et al., 1989). 김 등(2006; 김 등, 2010)에 의하면 본 연구 해역의 북측에서 하계 매년 빈산소수괴가 형성되는 것으로 보고된 바 있음으로 유기물 및 철은 퇴적물 내에서 유기물의 분해와 산화환원반응에 의한 계절적 농도변화가 다소 높게 나타남으로 이들을 표준화 성분으로 유용하지 않을 것으로 판단되며, 퇴적물의 유형에 따른 표준화 성분으로 사용은 침도가 정규분포에 따르기 보다는 극단적으로 집중되거나 매우 집중되는 형태를 보임으로(김 등, 2012) 입도 역시 유용한 표준화 물질로 사용하는 것은 바람직하지 않을 것으로 생각됨으로 본 연구에서는 알루미늄을 표준화물질로 사용코자 한다.

Al, ORP 및 LOI 등의 수평분포 및 각 정점별 농도를 김 등(2012)이 가막만에서 알칼리 및 알칼리 토금속의 생지화학적 분포특성에서 보고한 자료를 사용하였다.

3.4 전이원소, 금속 및 비금속원소의 분포 요인

3.4.1 석영 희석 효과(Quartz dilution effect)

일반적으로 연안 해역에서 퇴적물중 금속원소의 농도는 퇴적물의 입도와 유기물 함량과 같이 특정 요인에 의해 조절되

가막만 표층퇴적물 중의 금속 및 비금속 원소의 생지화학적 분포특성

기는 하나, 대부분 다양한 요인들이 복합적으로 작용함으로써 그 농도를 달리한다(Choi et al., 2010; Hwang et al., 2011). 따라서, 본 연구해역내 퇴적물중 금속원소의 농도는 김 등(2012)이 보고한 것과 같이 유기물 함량 등 또 다른 농도 조절 요인이 있으며, 그 요인으로는 저서생물의 수직 활동에 의한 생물교란(Bioturbation) 혹은 조석작용에 의한 퇴적물의 재부유(Resuspension), 산화환원전위(Oxidation reduction potential)

그리고 연구해역 인근의 인위적인 오염원으로부터의 영향 등과 같은 이차적인 요인에 의해 그 차이를 보이는 것으로 생각된다. 전이원소 및 금속원소의 분포를 결정하는 주요인을 파악하기 위하여 AI에 대한 전이원소, 금속 및 비금속 성분의 지각 내 및 중국 대륙 퇴적물 평균비들의 석영 희석 효과 직선과 비는 Table 5와 같았으며 본 연구해역에서 조사된 이들 성분과 AI과의 상관관계를 Fig. 5에 나타내었다.

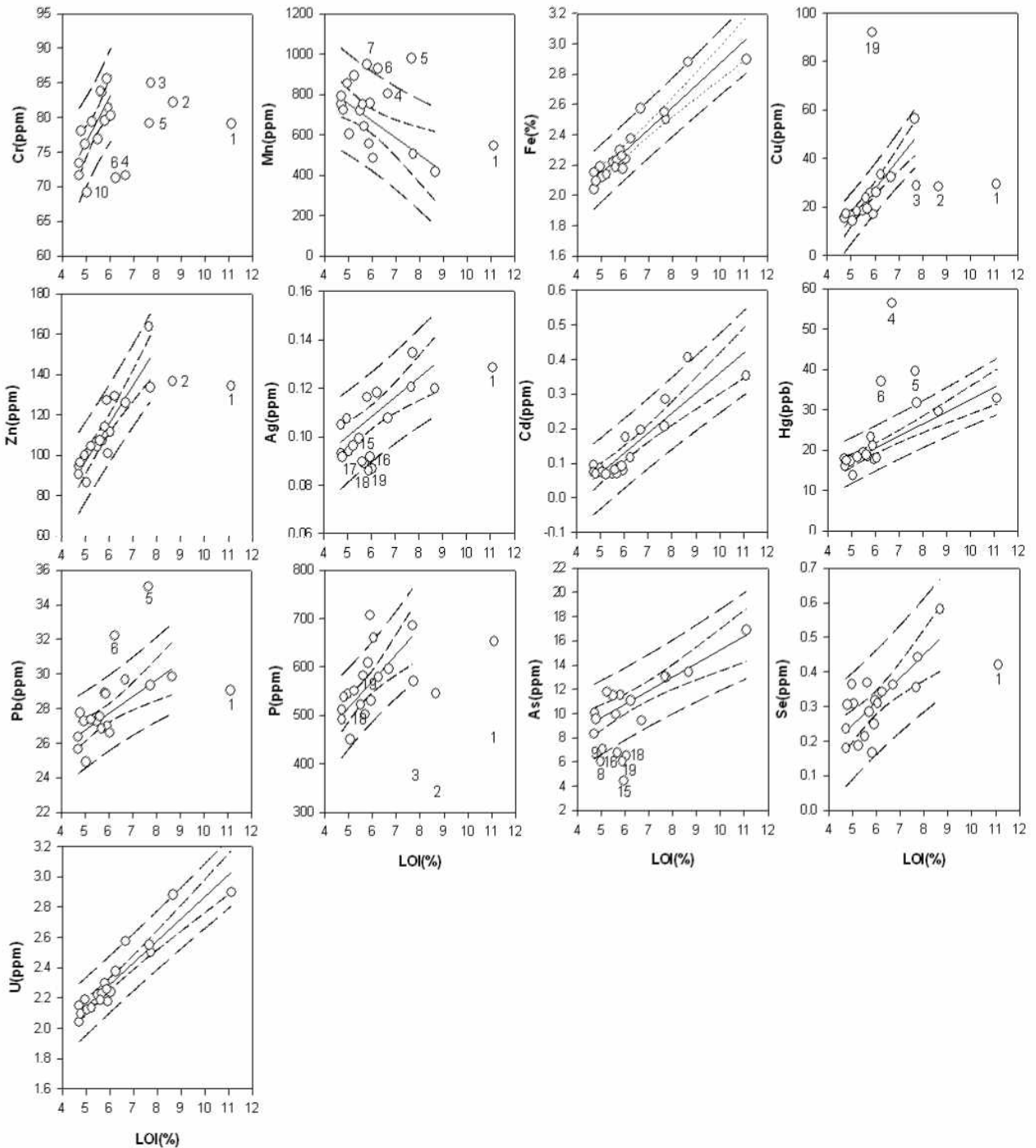


Fig. 5. Plots of metallic and nonmetallic elements versus Loss-On-Ignition(LOI) for the surface sediments of the Gamak Bay. The regression lines are shown as solid lines. The 95% confidence limit is shown as a short dash line, and prediction limit is shown as a long dash line.

Table 5. Comparison of correlation coefficient and ratio of metallic and nonmetallic elements to aluminium of the surface sediment in Gamak Bay and reference sediment(*: No correlation, -: No sampling stations are excluded)

Elements	Correlation coefficient to Al	Excepted sampling stations	Reference sediment, elements/Al ratio	References
V	0.84	-	China continental sediment, V(ppm)/Al(%)=13.75	Zhao et al.(1995)
Cr	0.71	-	Mud of continental shelf sediment of China, Cr(ppm)/Al(%)=9.77	Zhao et al.(1995)
Mn	*	All	China continental sediment, Mn(ppm)/Al(%)=90.29	Zhao et al.(1995)
Fe	0.92	-	Upper continental crust, Fe(%) /Al(%)=0.435	Taylor and McLennan(1995)
Co	0.90	-	Mud of continental shelf sediment of China, Co(ppm)/Al(%)=1.78	Zhao et al.(1995)
Ni	0.82	-	China continental sediment, Ni(ppm)/Al(%)=4.09	Zhao et al.(1995)
Cu	0.77	4, 5, 6, 19	China continental sediment, Cu(ppm)/Al(%)=2.56	Zhao et al.(1995)
Zn	0.84	1, 2, 3, 4, 5, 6, 19	China continental sediment, Zn(ppm)/Al(%)=11.34	Zhao et al.(1995)
Ag	*	-	Continental crust, Ag(ppm)/Al(%)=0.012	Martin and Whitfield(1983)
Cd	*	1, 2, 3, 4, 5, 18	China continental sediment, Cd(ppm)/Al(%)=0.011	Zhao et al.(1995)
Hg	0.78	1, 2, 3, 4, 5, 6,	Gamak Bay, Hg(ppb)/Al(%)=2.09	This study
Pb	0.85	4, 5, 6	China continental sediment, Pb(ppm)/Al(%)=3.41	Zhao et al.(1995)
P	0.60	1, 5, 18, 19	Near shore mud, P(ppm)/Al(%)=62.48	Wedepohl(1960)
As	*	All	Continental crust, As(ppm)/Al(%)=1.14	Martin and Whitfield(1983)
Se	*	All	China continental sediment, Se(ppm)/Al(%)=0.026	Zhao et al.(1995)
U	0.69	1, 2, 4	China continental sediment, U(ppm)/Al(%)=0.28	Zhao et al.(1995)

본 연구해역에서 V, Cr, Fe, Co, Ni 등은 Al과 상관관계수가 0.7이상의 유의한 상관관계를 보이며, 지각 혹은 중국대륙 퇴적물 내에서 평균 비와 유사하거나 혹은 이들 직선에 근접하는 것으로 보아 전 조사 정점에서 석영희석 효과(Quartz dilution effect)에 의해 일차적으로 농도가 조절되어지는 것으로 생각된다. Cu, Zn, Cd, Hg 및 Pb의 경우 대체로 만의 북부 혹은 남부 어류양식 활동이 활발한 조사 정점들에서 동일한 Al의 농도에서도 다른 정점에 비해 높은 농도를 보이는 정점을 제외하고 지각 및 중국 대륙 퇴적물 평균비들과 유사하거나 혹은 이들 직선에 근접하는 것으로 보아 전 조사 정점에서 석영 희석 효과(Quartz dilution effect)에 의해 일차적으로 농도가 조절되어지는 것으로 생각된다. 이와 같이 Cu, Zn, Cd, Hg 및 Pb의 경우 일부정점들에서 대륙 지각 및 중국 대륙퇴적물의 석영희석

효과 직선을 기준으로 상부와 하부에 Plot 되며 이 직선의 상부는 이들 농도의 축적(Accumulation)을 의미하며, 하부는 용출(Release)을 의미한다. 이와 같이 이들 성분의 축적과 용출의 경우 인위적인 오염, 생물활동에 의한 축적 및 초기속성과정에 따른 화학적 재분배(Redistribution) 등의 원인이 있을 수 있을 것이다. 특히, Hg의 경우 두 원소사이의 평균농도 비는 Hg(ppb)/Al(%) = 2.09로서 Taylor(1964)가 보고한 지각내 평균농도는 Hg(ppb)/Al(%) = 9.7, Zhao et al.(1995)이 보고한 중국 대륙붕 퇴적물 평균 농도비 Hg(ppb)/Al(%) = 4.26에 비해 낮은 비 값으로써 본 연구해역의 특징적인 비로 볼 수 있을 것이다. 이들 성분과는 달리 금속 및 비금속성분 중 Mn, Ag, As 및 U의 경우 Al과 유의한 상관성을 보이지 않는 것으로 보아 석영 희석 효과(Quartz dilution effect)에 의해 농도 분포가 결정되지 않는 것으로 생각된다.

연안역에서 독특하게 높은 Mn/Al 비는 연안역에서 저염수가 고염수와 접촉하여 망간산화물이 형성되기 때문으로 알려져 있다(Francois, 1988; Presley et al., 1992). 본 연구에서 만의 중앙부에서의 비가 중국 대륙 퇴적물 내 Mn/Al의 비 값과 유사하였고, Mud가 우세한 만의 북측해역 및 남측 어류양식장 주변 정점에서 그 보다 낮은 비를 나타내었다. 김 등(2012)은 본 연구해역의 중앙부에서 잔류 사질이 분포하는 해역에서 산화환원전위는 -79 mV에서 122 mV로 보고하였으며 만의 중앙부에서는 산화환원전위차가 대체로 산화상태인 (+)의 값을 보였다. 따라서 산화환원전위차가 대체로 산화상태인 (+)의 값을 보였다. 따라서 산화환원전위차가 대체로 산화상태인 (+)의 값을 보였다. 따라서 산화환원전위차가 대체로 산화상태인 (+)의 값을 보였다.

반대로 만의 북부해역 및 남부 어류양식 양식 활동이 활발한 정점들에서 산화환원전위는 대체로 -300 mV~0 mV 사이로 강한 환원환경을 나타내었으며, Mn/Al 비가 낮게 나타난 것은 유기물이 분해되면서 환원환경이 되어 망간 산화물이 용출되는 것으로 보인다.

준금속(As), 비금속 원소(P 및 Se) 및 악티늄족(U) 원소의 농도분포 특성을 파악하기 위하여 이들 원소들과 Al과의 상관관계를 살펴보면(Table 5 및 Fig. 5), P의 경우 정점 1, 5, 18 및 19, U의 경우 정점 1, 2 및 4, Se의 경우 7, 9, 11, 12, 13, 19에서 동일한 Al 농도에서도 다른 정점에 비해 높은 농도를 보이는 정점을 제외하면 각각 세계 연안 Mud 평균 비, 대륙 지각 및 중국대륙 퇴적물 비와 유사한 것으로 보아 대부분의 전위원소와 마찬가지로 석영 희석 효과(Quartz dilution effect)에 의해 일차적으로 농도가 조절되어지는 것으로 생각된다.

3.4.2 유기물희석효과(Organic matter dilution effect)

Table 5에서 나타낸 바와 같이 전위원소 및 비금속 원소들 중 Mn, Cd, Ag, As, Se, P 및 U의 경우 Al과 유의한 상관성 보이지 않거나 혹은 상관성이 낮았다.

본 연구해역은 패류 및 어류양식장 등의 활발한 생물생산 활동에 의해 유기물의 다량 농축되었음을 이미 여러 연구에서 밝혀진바 있다(김 2005; 이 등, 2008; 김 등, 2011; 김 등, 2012). 그러므로 본 연구해역의 표층 퇴적물이 초기속성과정(Early

diagenesis process)을 거치는 동안 유기물의 분해 등에 의한 퇴적물의 화학적 성분 변화가 있을 것으로 예상된다. 이를 파악하기 위해서 김 등(2012)이 보고한 유기물의 지표인 강열감량(Loss-On-Ignition; LOI)과 이들 농도 사이의 상관관계를 Table 6 및 Fig. 6에 나타내었다. 조사된 금속원소 및 비금속 원소 중 Cd 및 U의 경우 LOI 사이에 상관계수가 각각 $r=0.9$ 이상으로 매우 유의한 정의 상관성을 보이는 것으로 보아 이들 성분의 농도분포를 결정하는 일차적인 요인은 유기물 희석 효과(Organic matter dilution effect)에서 의해서 결정되어짐을 알 수 있었다.

Table 6. Comparison of correlation coefficient and ratio of metallic and nonmetallic elements to Loss-On-Ignition(LOI) of the surface sediment in Gamak Bay and reference sediment(Significance $p<0.001$)

Elements	Coefficients	Excepted sampling stations
Cr	0.78	1, 2, 3, 4, 5, 6, 10
Fe	0.84	None
Mn	-0.76	1, 4, 6, 5, 7
Cu	0.92	1, 2, 3, 19
Zn	0.85	1, 2, 5
Ag	0.80	1, 15, 16, 17, 18, 19
CD	0.90	None
Hg	0.89	1, 3, 4, 5
Pb	0.74	1, 5, 6
P	0.80	1, 2, 3, 18, 19
As	0.85	8, 9, 15, 16, 18, 19
Se	0.76	1
U	0.93	None

그 외 조사된 성분 중 Cr, Fe, Cu, Ag, Hg, Pb, P, As 및 Se의 경우 일부정점을 제외하고(Table 6) 상관계수 $r=0.7$ 이상의 유의한 상관관계를 보이고 있으며, Mn의 경우 다소의 분산은 있지만 LOI와 유의한 역상관관계($r=-0.76$, $p<0.001$)를 보이는 것이 특징적이었다. 대체적으로 LOI 8%를 기준으로 이하에서는 이들 성분과 유의한 상관관계를 보이지만 그 이상의 농도에서는 상관성을 보이지 않았다. 그러므로 대체적으로 LOI 8%이하의 농도에서 이들 성분들의 분포는 일차적으로 석영희석 효과에 더하여 유기물 희석효과에 의해서 영향을 받는다는 것을 의미한다.

3.4.3 산화환원전위(Oxidation-reduction potential)

일반적으로 해양에서 퇴적물 내에서 P, S, Se, Te, As, B, Sn, I, Br, F, U, Pb 및 Hg 등은 점토 광물의 철산화 음이온형(Iron oxide anions form) 및 산화 음이온(Oxyanions) 또는 Ti, Ge, Zr, Hf, Th, Y, In, Pd 및 Cr은 3가 및 4가의 양이온 수산화착화합물들과 결합하는 원소이며, 1가 혹은 2가 양이온(Mg,

Ca, Ba, Tl, Co, Ni, Cu, Zn, Bi, Ag 및 Cd) 혹은 산화음이온(Mo, W, Sn)은 이산화망간 결합되어지는 원소로 퇴적물 내의 산화환원반응에 민감한 원소이다(Seby et al., 2001; Belzile et al., 2000; Balistrieri and Chao, 1990). 일반적으로 표층퇴적물의 초기 숙성과정에서 유기탄소의 분해를 위해 이용되는 산화제는 산소 > 질산염 \approx 망간산화물 > 철산화물 > 황산염의 순으로 알려져 있다(Chester, 2000). 해저 퇴적물에서 Mn의 함량을 지배하는 요인은 1) 잔류 광물 중 Mn의 함량, 2) 표층 퇴적물층의 철, 망간 광물의 분포, 3) 생물기원 물질에 의한 희석 그리고 4) 퇴적물 중의 화학적 재분배 등을 들 수 있다. 이와 같이 퇴적물 내 Mn은 유기물이 산화되면서 해수 중으로 용출되어 재순환 한다. Libes(1992)는 망간산화물 및 철수산화물은 퇴적물의 환원환경 하에서 유기물 분해의 산화제 역할을 한다고 보고하였다. 이를 입증하기 위해서 산화환원전위(ORP)와 금속과 비금속 사이의 상관관계를 Fig. 7에 나타내었다. 조사된 금속 성분 중 V, Mn, Fe, Co, Ni, Ag, Cd, 비금속 원소중 Se 및 U의 경우 ORP가 가장 낮은 -300 mV이하인 조사 정점 18을 제외하면 대체로 역상관관계를 보였다. 반면에 Mn의 경우 Ca 성분이 다른 정점에 비해 극단적으로 높은 농도를 보였던 조사 정점 5(김 등, 2012)를 제외하면 ORP와 유의한 정의 상관관계를 보이는 것으로 보아 표층퇴적물의 초기숙성과정 동안 유기물 분해의 산화제로 망간산화물과 결합되어 있던 산소가 이용되며, Mn은 공극수를 통하여 직상수(Overlying water)로 공급되어질 것으로 생각된다. 특히, ORP 0 mV에서 -200 mV의 환원환경 하에서 ORP와 역상관계를 보이 것으로 보아 본 연구해역에서 산화환경을 보이는 만의 중앙부를 제외하고 Mud의 함량이 높은 정점들에서 유기물 분해에 따른 환원환경 하에서 화학적 재분배가 일어나는 것으로 생각된다. As의 경우 ORP와 정의 상관관계와 역상관관계가 공존하고 있으나 ORP와의 상관성만으로는 이를 판단하기에 어려움이 있다(Table 7).

Table 7. Comparison of correlation coefficient and ratio of metallic and nonmetallic elements to Oxidation-Reduction Potential(ORP) of the surface sediment in Gamak Bay(Significance $p<0.001$)

Elements	Coefficients	Excepted sampling stations
V	-0.85	9, 10, 18
Mn	0.89	5
Fe	-0.88	9, 10, 18
Co	-0.88	4, 9, 10, 11, 18
Ni	-0.84	9, 10, 18
Ag	-0.79	6, 7, 8, 18, 19
Cd	-0.89	10, 18, 19
As	0.82	1, 2, 3, 4, 5, 8, 15
	-0.86	6, 7, 11, 12, 13, 14, 18, 19
Se	-0.85	6, 8, 18
U	-0.78	18

본 연구해역에서 금속 및 비금속 성분이 산화환원에 의한 농도의 재분배인지를 파악하기 위해서 Mn과 금속 및 비금속 성분들과의 상관관계를 Table 8 및 Fig. 8에 나타내었다. 금속 중의 Ag과 비금속 중의 P, As 및 Se의 경우 가막만 북부 해역 및 어류양식장에서 일부 정점을 제외한 대부분의 정점에서 Mn과

정의 상관성을 보이는 것으로 보아 유기물이 산화되면서 이산화망간, 수산화철, 탄산칼슘, 탄산마그네슘 및 탄산바륨 등에 치환되는 화학적 재분배가 일어나는 것이라기보다는 공극수 중으로 용출되어 직상수로 혼합확산되는 것으로 보인다. 그러나 V, Fe, Co 및 Ni 등과 Mn과의 상관관계는 Sand 함량이 높은 만의

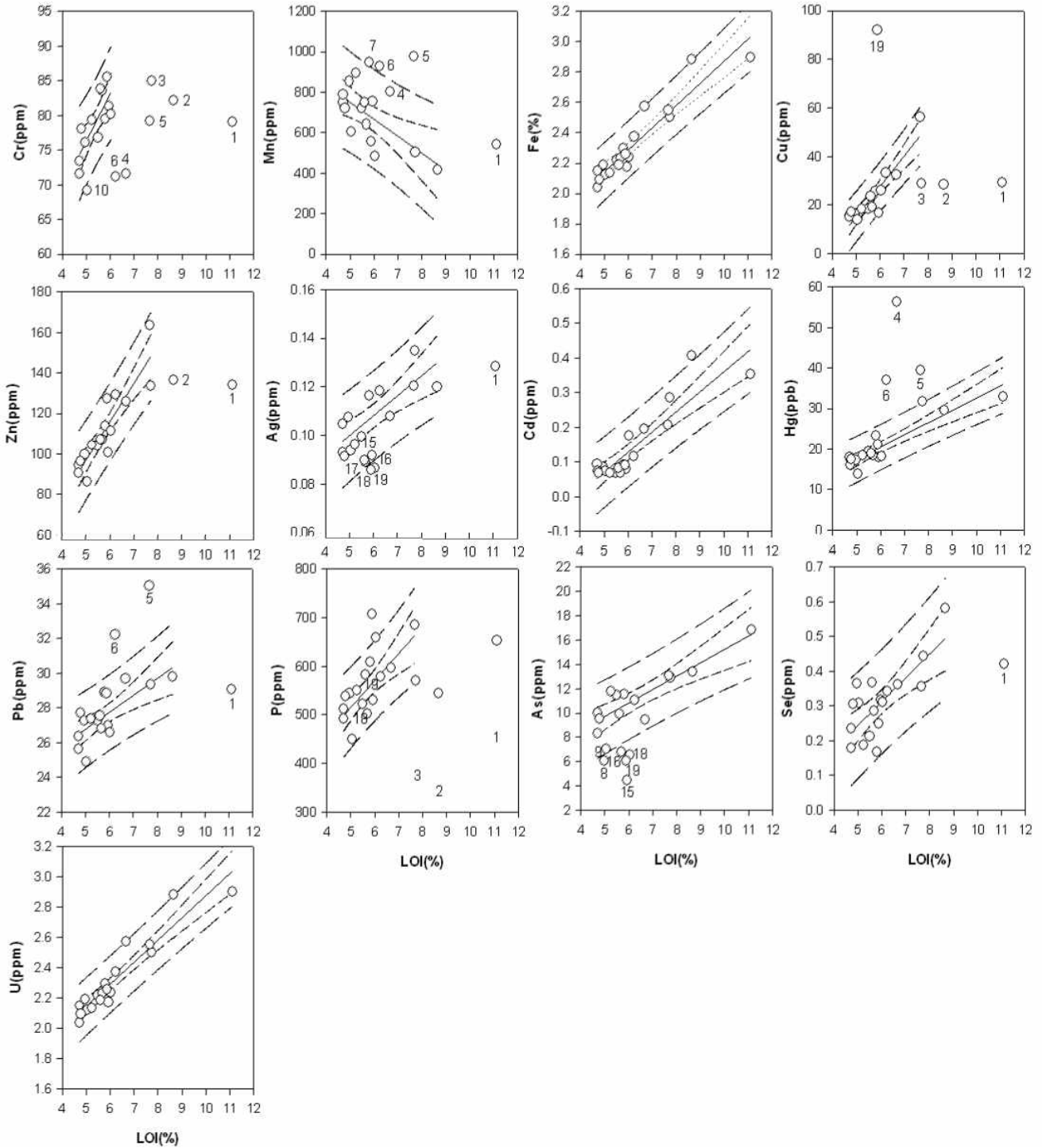


Fig. 6. Plots of metallic and nonmetallic elements versus Loss-On-Ignition(LOI) for the surface sediments of the Gamak Bay. The regression lines are shown as solid lines. The 95% confidence limit is shown as a short dash line, and prediction limit is shown as a long dash line.

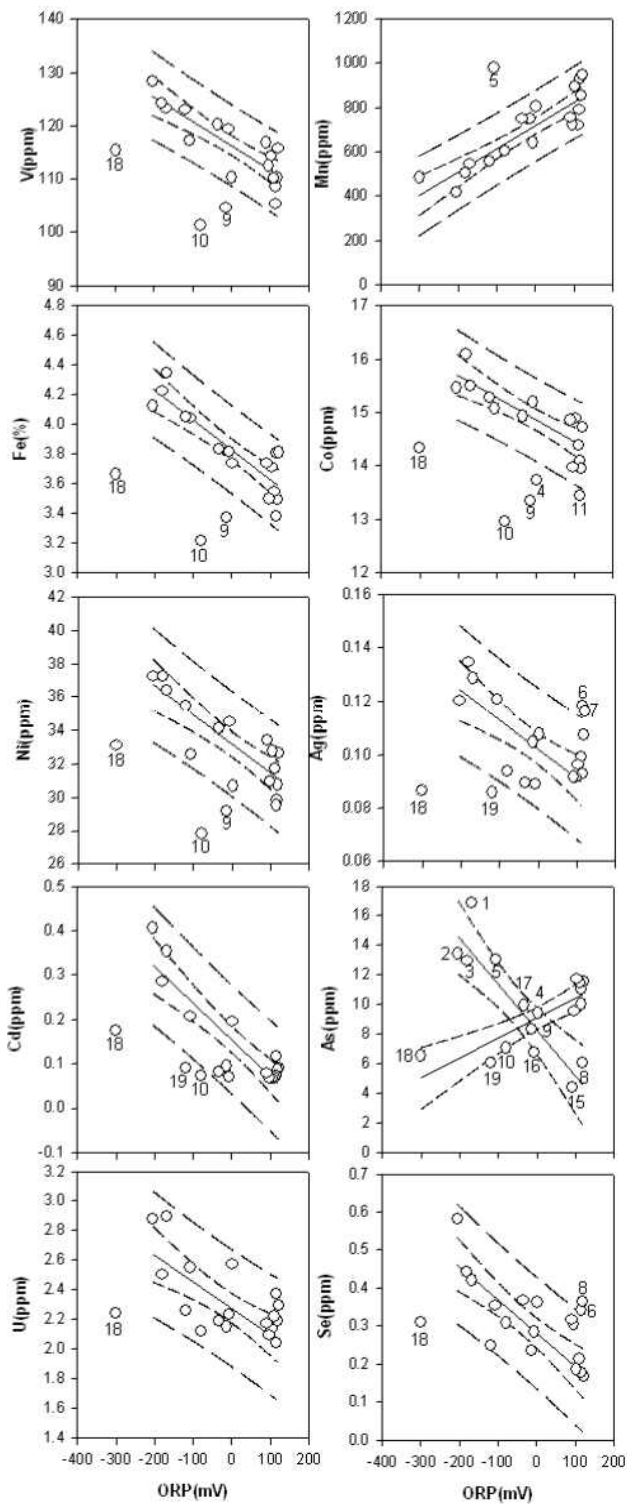


Fig. 7. Plots of metallic and nonmetallic elements versus Oxidation-Reduction Potential(ORP) for the surface sediments of the Gamak Bay. The regression lines are shown as solid lines. The 95% confidence limit is shown as a short dash line, and prediction limit is shown as a long dash line.

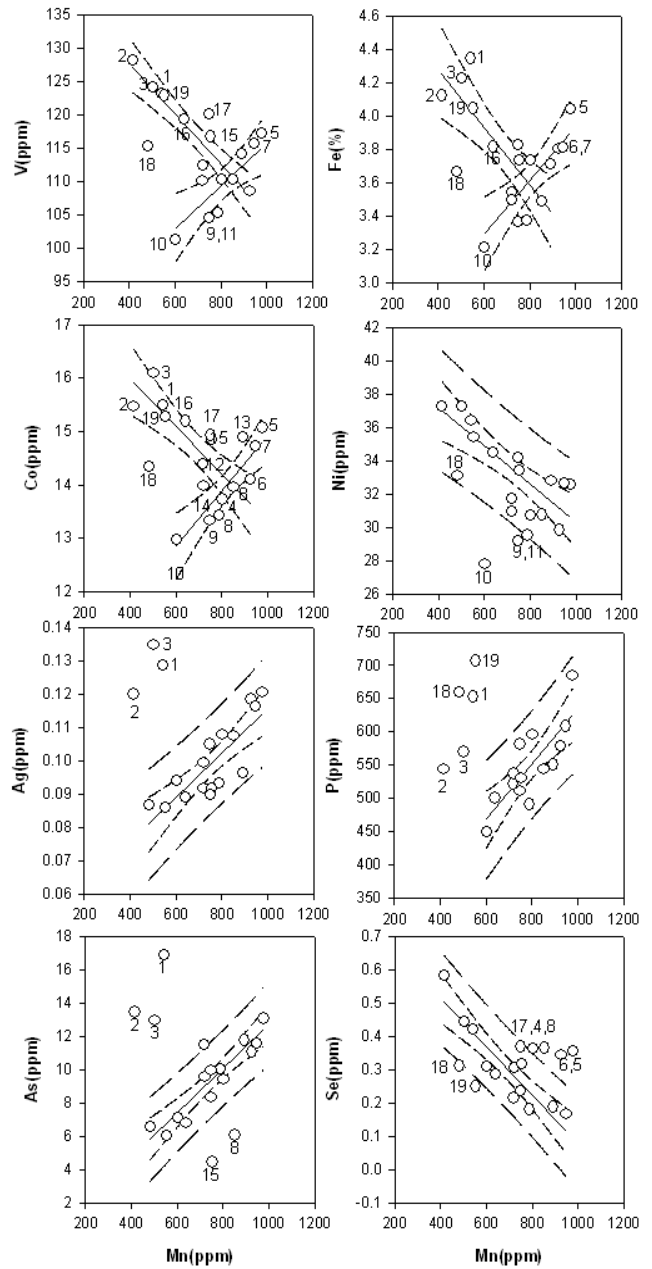


Fig. 8. Plots of metallic and nonmetallic elements versus Oxidation-Reduction Potential(ORP) for the surface sediments of the Gamak Bay. The regression lines are shown as solid lines. The 95% confidence limit is shown as a short dash line, and prediction limit is shown as a long dash line.

중앙부 정점들에서 Mn과 정의 상관성을 보이며, 점토(Clay)의 함량이 높거나 유기물 함량이 높은 만의 북부 해역 및 남측 어패류 양식장 주변 해역의 정점들에서 역상관관계를 보이는 것으로 보아 이들 성분은 또 다른 화학적 요인에 의해서 농도분포가 결정 될 것으로 생각된다.

김 등(2012)이 발표한 결과에 따르면 가막만 표층퇴적물 중에서 LOI와 총황(TS) 사이에 유의한 정의 상관관계($r=0.95$)로

Table 8. Comparison of correlation coefficient and ratio of metallic and nonmetallic elements to Mn of the surface sediment Gamak Bay(Significance $p < 0.001$)

Elements	Coefficients	Excepted sampling stations
V	-0.91	5, 7, 9, 10, 11, 18
	0.75	1, 2, 3, 16, 17, 18
Fe	-0.78	5, 6, 7, 10, 18
	0.74	1, 2, 3, 16, 18, 19
Co	-0.74	5, 7, 9, 10, 13, 18
	0.77	1, 2, 3, 15, 16, 17, 18, 19
Ni	-0.81	9, 10, 11, 18
Ag	0.82	1, 2, 3
P	0.81	1, 2, 3, 18, 19
Cd	-0.89	10, 18, 19
As	0.90	1, 2, 3, 8, 15
Se	-0.91	4, 5, 6, 8, 17, 18, 19
U	-0.75	4, 5, 6, 7, 18

유기물 농도가 높으면 TS 농도도 높은 경향을 보였으며, LOI와 Ba 및 TS와 Ba 사이에 각각 상관계수가 $r = -0.91$ ($p < 0.0001$) 및 $r = -0.93$ ($p < 0.0001$)의 유의한 역상관관계를 보이는 것으로 보아 유기물 산화에 황산바륨 같은 중정석 내의 산소가 유기물 산화에 이용되고 바륨은 탄산염과 결합되어지는 것으로 생각되어진다(Table 9 및 Fig. 9). Guo et al.(1997)에 의하면 Ba은 퇴적물 내에서 산화상태 일 때 황화물 혹은 고분자 유기물에 결합되어 분해되지 않으나 산화환원전위(Eh)가 -130 mV이하로 감소하면 황화물 및 고분자유기물과 결합된 Ba은 분해되어 탄산염과 결합하게 된다는 것을 밝힌바 있다. 본 연구해역에서 Ba과 금속(V, Fe, Co, Ni, Zn, Ag, Cd, Hg 및 Pb) 및 비금속(P, As, Se, U)의 상관관계는 일부 정점(Table 9)을 제외하면 유의한 역상관관계를 보이는 것으로 보아 유기물이 분해되면서 해양 자생기원 광물인 중정석 중의 산소가 산화제로 이용되며 이때 Ba은 Ca 등과 재결합하거나 혹은 V, Fe, Co, Ni, Zn, Ag, Cd, Hg, Pb, P, As, Se 및 U들과도 치환되어지는 것으로 생각되어진다.

Table 9. Comparison of correlation coefficient and ratio of metallic and nonmetallic elements to Ba of the surface sediment Gamak Bay(Significance $p < 0.001$)

Elements	Coefficients	Excepted sampling stations
V	-0.77	1, 4, 19
Co	-0.82	1, 4, 5, 13, 19
Fe	-0.89	None
Ni	-0.84	4, 6, 19
Cu	-0.83	1, 2, 3, 4, 19
Zn	-0.92	1, 5, 19
Ag	-0.72	None
Cd	-0.92	None
Pb	-0.74	5, 6
P	-0.68	1, 2, 3, 4, 19
As	-0.86	4, 8, 15, 16, 18, 19
Se	-0.93	1, 4, 8, 10, 14, 17
U	-0.94	None

3.4.4 퇴적물 오염도 평가

가막만 표층 퇴적물내 금속원소의 오염도를 알아보기 위하여 앞서 본문 2.2에서 제시한 다양한 오염도 평가방법(SQGs, EF)을 이용하여 평가하였다. 먼저 최근에 미국 NOAA에서 권고하는 수생생물 보전을 위한 퇴적물 오염 기준은 As, Cd, Cr, Co, Pb, Hg, Ni, Ag 및 Zn 등의 9개 성분에 대해서 기준을 Table 10과 같이 설정하고 있으며, 각 원소별 수생생물 10%에 영향을 미치는 농도기준(Effect Range-Low; ERL)과 수생생물 50%에 영향을 미치는 농도 기준(Effect Range-Medium; ERM)을 본 연구해역에서 각 정점별로 적용해 보면 Cd, Pb, Ag, Cr, Hg의 경우 전 조사 정점에서 하위농도기준인 ERL 보다 낮았으나, As, Zn 및 Cu는 일부정점에서, Ni의 경우에는 거의 모든 정점에서 ERL 기준을 초과하였다(Fig. 10).

Table 10. ERL and ERM guideline values for trace metals(ppm, dry wt) and incidence of biological effects in concentration ranges defined by the two values(NOAA, 2008)

Chemical	Guidelines	
	ERL	ERM
Arsenic	8.2	70
Cadmium	1.2	9.6
Chromium	81	370
Copper	34	270
Lead	46.7	218
Mercury	0.15	0.71
Nickel	20.9	51.6
Silver	1.0	3.7
Zinc	150	410

가막만 표층 퇴적물의 오염도를 평가하기 위하여 계산한 농축계수(EF) 평균값을 Fig. 11에 나타내었다. 최근에 Chen et al.(2007)은 본 연구와 같이 지각물질중의 Al에 대한 시료 중의 금속원소의 EF 값을 기준으로, $EF < 1$ 일 때 오염이 되지 않은 상태(No enrichment), $EF = 1 \sim 3$ 일 때 약간 오염상태(Minor enrichment), $EF = 3 \sim 5$ 일 때 적당한 오염상태(Moderate enrichment), $EF = 5 \sim 10$ 일 때 적당히 심한 오염상태(Moderately severe enrichment), $EF = 10 \sim 25$ 일 때 심한 오염상태(Severe enrichment), $EF = 25 \sim 50$ 일 때 매우 심한 오염 상태(Very severe enrichment), 그리고 $EF > 50$ 일 때 극히 심한 오염 상태(Extremely severe enrichment) 라고 분류하였다.

이를 바탕으로 연구해역 내 금속원소의 오염도를 살펴보면, 앞서 미국 수생생물 보전을 위한 퇴적물기준(SQGs)를 이용한 결과와 유사하게, 연구해역 내 퇴적물의 경우 V, Cr, Mn, Fe, Co, Zn, Hg, Pb, P, Se 및 U은 EF값이 1 이하로 오염되어 있지 않은 자연적인 지각 중 미량금속이 퇴적물 내에 그대로 보존되어 있는 것으로 나타났으나, Ni, Cu, Ag, Cd, 및 As는 EF값이 1~3 사이로 약간 오염된 상태를 나타내었다.

이상의 가막만에서 표층 퇴적물의 금속원소에 대한 오염도

가막만 표층퇴적물 중의 금속 및 비금속 원소의 생지화학적 분포특성

평가 결과를 종합해 보면, 연구해역 내 퇴적물중 금속 및 비금속 원소 Cr, Mn, Fe, Co, Zn, Hg, Pb, P, Se 및 U은 모든 지역에서 오염되지 않은 반면, As과 Ag은 약간 오염된 수준이며, 다른 성분에 비해 As가 만의 중앙부 모래의 함량이 높은 몇몇 정점을 제외하고 대체로 약간 오염된 것으로 나타나는 것은 가막만 주변 여수반도와 고돌산 반도의 경우 백악기 중생대 화산

암류, 돌산도는 주로 백악기 불국사 화강암류로 구성되어 있고, 섬 남단과 동측해안에서는 백악기 중생 화산암류, 섬 북측에는 백악기 퇴적암류가 일부 분포한다. 그리고 만 입구에 분포하는 작은 섬들은 백악기 중생 화산암류로 구성되어 있다(이 등, 1995). 주로 우리나라의 경우 옥천대 변성퇴적암과 경상분지를 중심으로 한 백악기 화산암 분포지역을 중심으로 광물중 비소

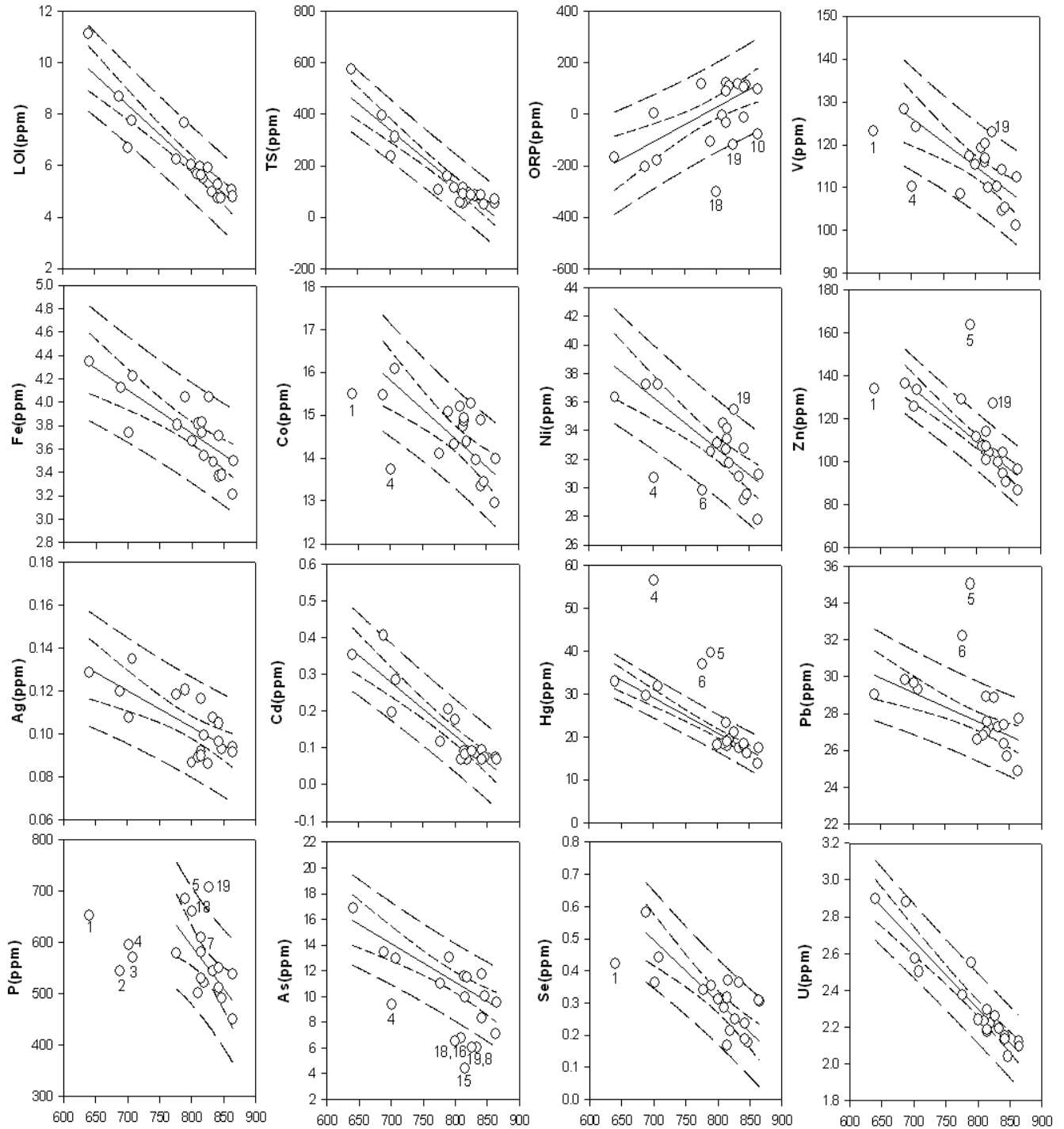


Fig. 9. Plots of metallic and nonmetallic elements versus Ba for the surface sediments of the Gamak Bay. The regression lines are shown as solid lines. The 95% confidence limit is shown as a short dash line, and prediction limit is shown as a long dash line.

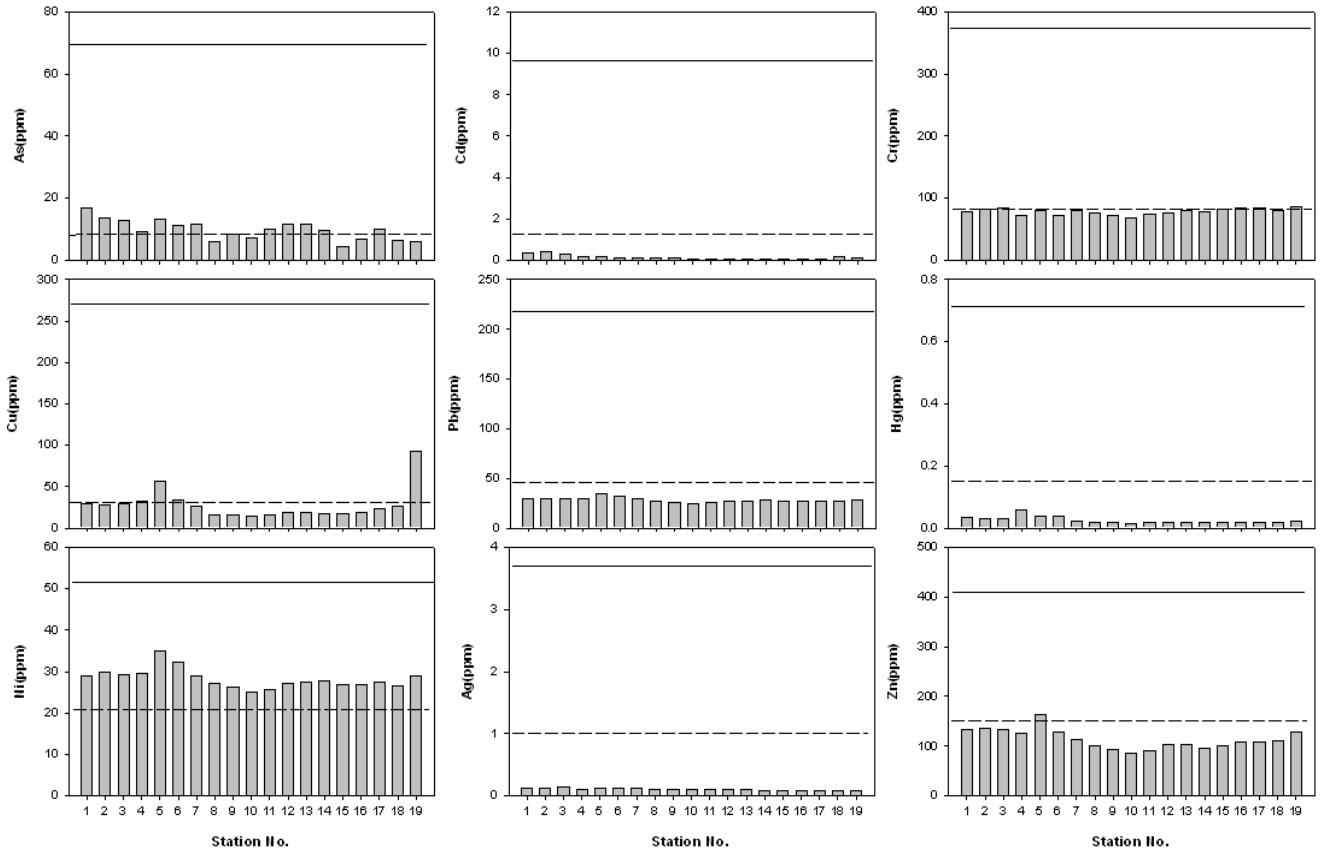


Fig. 10. The concentrations of metallic elements(As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Ag, Zn) with each station in surface sediment of Gamak Bay. The dotted and solid lines represent the values of ERL(Effect Range Low) and ERM(Effect Range Median) proposed by NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) as the sediment quality guidelines, respectively.

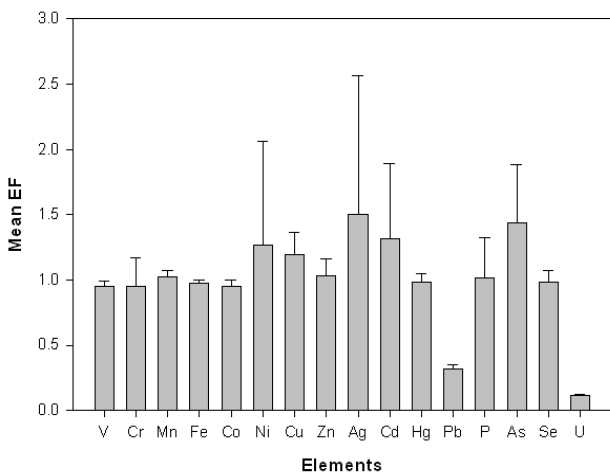


Fig. 11. Plots of mean Enrichment Factor(EF) in surface sediment of Gamak Bay.

함량이 높고 연구해역을 비롯하여 해남, 진도, 완도 등 전남 남서부 지역은 우리나라의 대표적인 백악기 화산암 분포지역 중에 하나임이 보고되었다(Shin et al., 2002; Hwang et al., 2011). 또한, 이러한 비소함량이 높은 지역에서 지표수 유입에 의한 산

화과정에서 광물로부터 비소가 용출되어 지하수중에 As 농도가 높은 것을 밝힌바 있다(An et al., 2007; Hwang et al., 2011). 또한, 오폐수 슬러지 유입의 지시자인(Papakostidis et al., 1975; Ravizza and Bothner, 1996) Ag의 경우 비록 SQGs의 이내의 양호한 값이라 할지라도 인구가 밀집되어 있는 도심가와 가장 인접한 만의 북부해역 조사 정점 1, 2, 3, 4 및 5에서 EF 값이 2.1~4.3으로 다른 성분에 비해 높게 나타나는 것은 인위적인 요인에 의해 Ag 등 인위적 오염 물질들이 지천 등을 통하여 만의 북부해역에 국부적으로 영향을 미치는 것으로 판단됨으로 본 연구해역으로 Ag 유입경로에 대해 체계적이고 집중적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

4. 결론

2010년 4월 가막만 전역의 19개 정점에서 0~3cm 사이의 표층퇴적물을 채취하여 퇴적물의 금속(V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Hg, Pb), 준금속(As), 비금속(P 및 Se) 및 악티늄족(U) 원소의 분포특성 및 오염도를 파악하였다.

가막만 표층퇴적물중 조사 성분의 평균±편차는 V 114.7 ± 7.3 ppm, Cr 78.2 ± 5.0 ppm, Mn 717.4 ± 166.2 ppm, Fe 3.76 ±

0.31 %, Co 14.53 ± 0.84 ppm, Ni 32.6 ± 2.7 ppm, Cu 27.7 ± 18.5 ppm, Zn 114 ± 20 ppm, Ag 0.104 ± 0.015 ppm, Cd 0.141 ± 0.103 ppm, Hg 23.24 ± 10.30 ppb, Pb 28.3 ± 2.4 ppm, As 9.8 ± 3.2 ppm, Se 0.315 ± 0.102 ppm, P 569.4 ± 68.5 ppm 및 U $2.04 \sim 2.90$ 2.32 ± 0.25 ppm으로 공간적으로 대부분의 조사 성분이 만의 북부해역 및 어류양식장이 산재 되어있는 남측만 가막만 표층퇴적물의 분포특성은 V, Cr, Fe, Co 및 Ni 등은 석영회석 효과, Cd 및 U은 유기물 회석효과, Mn, Ag, As 및 Se는 만의 북부 및 남부해역 정점들에서 표층퇴적물의 강 한 환원환경경하에서 이산화망간 및 황산염이 유기물 분해의 산화제로 이용되면서 화학적 재분배에 의해 농도분포가 결정되며, Cu, Zn, Hg Pb, 및 P 성분 등은 석영회석효과 및 산화환원전위에 의한 복합적인 요인에 의해서 농도분포가 결정되어지는 것으로 생각된다.

가막만 표층퇴적의 오염 평가 결과 미국 퇴적물 오염 기준 (SQGs)에 의한 오염 평가는 As는 만의 중앙부를 제외한 대부분의 정점, Ni은 전 조사정점에서 ERL을 초과하였다. 농축계수 (EF)를 이용한 평가는 Ni, Ag, Cd 및 As가 평균 EF가 1을 약간 초과하는 단계를 보였으며, 이외의 성분은 1과 유사하거나 혹은 그 이하 양호한 수준을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 국립수산물과학원 R&D과제인 남해 해양환경연구 과제(RP-2012-ME-018)의 일환으로 수행된 것으로 현장조사에 적극 협조해 주신 시협조사선 탐구 11호 직원께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 김동명(2005), 가막만의 COD 거동 및 분포특성 평가를 위한 생태계 모델링, 한국환경과학회지, 제14권, 9호, pp. 835-842.

[2] 김숙양, 전상호, 이영식, 이용화, 김병만(2011), 가막만 빈산소 발생 시 해수-퇴적물 경계면에서 인산염플러스 특성, 한국환경과학회지, 20(9), pp. 1069-1078.

[3] 김윤철, 윤호섭, 박일웅, 이우범, 주승용, 최상덕(2008), 가막만의 수질환경과 이매패류(Bivalvia)군집의 연간변동, 한국환경생물학회지, 제26권, 제4호, pp. 279-291.

[4] 김정배, 이상용, 유준, 최양호, 정창수, 이필용(2006), 가막만 빈산소 수괴의 특성, 한국해양환경공학회지, 제9권, 제4호, pp. 216-224.

[5] 김정배, 박정임, 정춘규, 최우정, 이원찬, 이용화(2010), 가막만 빈산소 수괴 소멸기의 물리화학적 특성, 한국환경안전학회지, 제16권, 제3호, pp. 241-248.

[6] 김평중, 박승윤, 김상수, 장수정, 전상백, 주재식(2012), 가막만 표층퇴적물 중 알칼리 및 알칼리 토금속 원소의 생지화학적 특성, 한국해양환경안전학회지, 제18권 1호, pp. 1-14.

[7] 이문옥, 권영아(2007), 해양환경이 굴양식에 미치는 영향 II, 2007년 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집, pp. 77-81.

[8] 이대성, 김윤숙, 정성윤, 강창근, 이원재(2008), 동·하계 가막만 표층 퇴적물의 환경특성과 해양미생물의 분포. 한국환경과학회지, 17(7), pp. 755-765.

[9] 이미경, 배우근, 엄인권, 정희수(2004), 영일만 해역 표층퇴적물의 금속 분포 특성, 대한환경공학회지, Vol. 26, No. 5, pp. 543-551.

[10] 이연규, 황진연, 정규귀(1995), 가막만 표층퇴적물 특성 및 점토광물, 한국지구과학회지, 제16권, 제6호, pp. 477-488.

[11] 전라남도(1982), 전남 동부 연안 양식어장 기초환경 및 저서패류에 관한 조사, pp. 7-39.

[12] 조영길(2007), 만경강 퇴적물의 중금속 함량 및 분포. 한국환경과학회지, 16(5), pp. 657-664.

[13] 최만식, 이석훈, 이창복, 조영길(1996), 금강 퇴적물 중 미량금속의 분포특성. The Korean Journal of Quaternary Research, 10(1), pp. 27-52.

[14] An J. S., K. S. Ko and C. M. Chon(2007), Arsenic occurrence in groundwater of Korea. J Kor Soc Soil Ground Environ, Vol. 12, pp. 64-72.

[15] Andrieux, F. and A. Aminot(1997), A two-year survey of phosphorus speciation in the sediments of the Bay of Seine. Continental Shelf Research Vol. 17, pp. 1229-1245.

[16] Balistrieri, L. S and T. T Chao(1990). Adsorption of selenium by amorphous iron oxyhydroxide and manganese dioxide, Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 54, Issue 3, pp. 739-751.

[17] Balzer, W.(1986), Forms of phosphorus and its accumulation in coastal sediments of Kieler Bucht. Ophelia, Vol. 26, pp. 19-35.

[18] Belzile N., Y.-W. Chen and R. Xu(2000), Early diagenetic behavior of selenium in freshwater sediments. Appl. Geochem, Vol. 15, pp. 1439-1454.

[19] Bowen, H. J. M(1979), Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press, London, p. 333.

[20] Buchman, M. F.(2008), NOAA screening quick reference tables, NOAA OR&R Report 08-1, Seattle WA, Office of response and restoration division, National Oceanic and Atmospheric Administration, p. 34.

[21] Chester, R.(2000), Marine Geochemistry, 2nd ed. Blackwell Science Ltd., p. 698.

[22] Cho, Y. G., C. B. Lee and M. S. Choi(1994), Characteristics of heavy metal distribution on surface sediments from the South Sea of Korea. J. Kor. Soc. Oceanogr, Vol. 29, pp. 338-356.

[23] Cho, Y. K., and K. Y. Park(1998), Heavy metals in

- surface sediments of the Younsan Estuary, west coast of Korea. *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, Vol. 7, No. 4, pp. 549-557.
- [24] Cho, Y.-G., C.-B. Lee and M.-S. Choi(1999), Geochemistry of surface sediments off the southern and western coasts of Korea. *Marine Geology*, Vol. 159, pp. 111-129.
- [25] Choi, M. S., J. H. Chun, H. J. Woo and H. I. Yi(1999), Change of heavy metals and sediment facies in surface sediments of the Shihwa Lake. *J Kor Environ Sci Soc* 8, pp. 593-600.
- [26] Choi, S. W., K. H. Oh, S. T. Youn, H. G. Kim and Y. K. Koh(2010), Sedimentary environments and geochemistry characteristics of tidal flat sediments in semi-enclosed Cheonggye Bay, Korea. *J Kor Island*, Vol. 22, pp. 175-187.
- [27] De Jonge, V. N., M. M. Engelkes and J. F. Bakker(1993), Bio-availability of phosphorus in sediments of the western Dutch Wadden Sea. *Hydrobiologia* Vol. 253, pp. 151-163.
- [28] Emelyanov, E. M. and K. M. Shimkus(1986), *Geochemistry and Sedimentology of the Mediterranean Sea*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, p. 553.
- [29] Francois, R.(1988), A study on the regulation of the concentration of some trace metals(Rb, Sr, Zn, Pb, Cu, V, Cr, Ni, Mn, and Mo) in Saanich Inlet sediments, British Columbia, Canada. *Marine Geology* Vol. 83, pp. 285-308.
- [30] Giordani, P. and M. Astorri(1986), Phosphate analysis of marine sediments. *Chemistry and Ecology* Vol. 2, pp. 103-112.
- [31] Guo, T., Delaune, R. D. and W. H. Patrick Jr.(1997), The effect of sediment redox chemistry on solubility/chemically active forms of selected metals in bottom sediment receiving produced water discharge. Vol. 4, No. 3, pp. 165-175.
- [32] Hwang, D. W, H. G. Jin, S. S. Kim, J. D. Kim, J. S. Park and S. G. Kim(2006), Distribution of organic matters and metallic elements in the surface sediments of Masan Harbor, Korea. *J Kor Fish Soc.*, Vol 39, pp. 106-117.
- [33] Hwang, D. W, S. O. Ryu, S. G. Kim, O. I. Choi, S. S. Kim and B. S. Koh(2010), Geochemical characteristics of intertidal surface sediments along the southwestern coast of Korea. *Kor J Fish Aquat Sci* 43, pp. 146-158.
- [34] Hwang, D-W, S-E Park, P-J Kim, B-S K and H-G Choi(2011). Assessment of the Pollution Levels of Organic Matter and Metallic Elements in the Intertidal Surface Sediments of Aphae Island, *Kor J Fish Aquat Sci*, Vol. 44, No. 6, pp. 759-771
- [35] Hyun, S., T. Lee, J. S. Choi, D. L. Choi and H. J. Woo (2003), Geochemical characteristics and heavy metal pollutions in the surface sediments of Gwangyang and Yeosu Bay, South coast of Korea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 8, pp. 380-391.
- [36] Hyun S, C. H. Lee, T. Lee and J. W. Choi(2007), Anthropogenic contributions to heavy metal distributions in the surface sediments of Masan Bay, Korea. *Mar Pollut Bull*, Vol. 54, pp. 1031-1071.
- [37] Jensen, H. and B. Thamdrup(1993). Iron-bound phosphorus in marine sediments as measured by bicarbonate-dithionite extraction. *Hydrobiologia*, Vol. 253, pp. 47-59.
- [38] Kang H. S. and K. W. Lee(1996). Trace metal concentrations and sedimentation rates of Kwangyang, Masan and Ulsan Bay sediments. *J Kor Soc Water Qual*, Vol. 12, pp. 455-461.
- [39] Kang, H. J. and S. K. Chough(1982), Gamagyang Bay, Southern Coast of Korea: Sedimentation on a Tide Dominated Rocky Embayment. *Marine Geology*, Vol. 48, pp. 197-214.
- [40] Kim, K. H, J. H. Cho and N. J. Park(2000), Distributions and pollution history of heavy metals in Nakdong Estuary sediments. *J Kor Soc Oceanogr*, Vol. 5, pp. 285-294.
- [41] Kim, J. G, S. J. You, E. I. Cho and W. S. Ahn(2003), Distribution characteristics of heavy metals for tidal flat sediments in the Saemankeum area. *J Kor Fish Soc* 36, pp. 55-61.
- [42] Krauskopf, K. B.(1982), *Introduction to Geochemistry*. McGraw-Hill, p. 617.
- [43] Lee, S. H. and K. W. Lee(1983), Heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea. *J Oceanol Soc Korea*, Vol. 18, pp. 49-54.
- [44] Lee, J. H, J. S. Yi, B. S. Kim, C. B. Lee and C. H. Koh(1998), Characteristics of metal distribution in the sediment in Kyeonggi Bay, Korea. *J Kor Soc Oceanogr*, Vol. 3, pp. 103-111.
- [45] Libes, S. M.(1992), *An introduction to marine biogeochemistry*, New York · Chichester Brisbane Toronto · Singapore, John Wiley Sons, Inc., pp. 193-197.
- [46] Liu, Su Mei, Jing Zhang and Ji Li Dao(2004), Phosphorus cycling in sediments of the Bohai and Yellow Seas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 59, pp. 209-218.
- [47] Martin, J. M. and M. Whitfield(1983), The significance of the river input of chemical elements to the ocean. In:

- Trace Metals in Wea Water edited by Wong, C.S., E.A. Boyle, K.W. Bruland, J.D. Burton and and E.D. Goldberg, New York, Plenum, pp. 256-296.
- [48] Merian, E.(1991). Metals and Their Compounds in the Environment. VCH Verlagsgesellschaft mbH, D-6940 Weinheim, p. 1488.
- [49] Papakostidis, G., A. P. Grimanis, D. Zafiroopoulos, G. B. Griggs and T. S. Hopkins(1975), Heavy metals in sediments from the Athens sewage outfall area. Mar. Pollut. Bull. 6, pp. 136 - 39.
- [50] Presley, B. J., R. J. Taylor and P. N. Boothe(1992), Trace metal concentration sediments of the eastern Mississippi Bight. Mar. Environ. Res., Vol. 33, pp. 267-282.
- [51] Ravizza, G. E. and M. H. Bothner(1996), Osmium isotopes and silver as tracers of anthropogenic metals in sediments from Massachusetts and Cape Cod bays. Geochim. Cosmochim. Acta 60, pp. 2753 - 763.
- [52] Shin, S. E., S. B. Kang, Y. K. Koh, B. Y. Park, S. T. Youn, J. Y Kim and K. H. Oh(2002), Sedimentary facies and geochemical characteristics of upper intertidal zone, southwestern coast, Korea. J Kor Earth Sci Soc., Vol. 23, pp. 722-735.
- [53] Slomp, C. P., J. F. P. Malschaert and Van W. Raaphorst (1998). The role of adsorption in sedimentewater exchange of phosphate in North Sea continental margin sediments. Limnology and Oceanography Vol. 43, pp. 832-846.
- [54] Song Y. H., M. S. Choi and Y. W. Ahn(2011), Trace metal in Chun-su Bay sediments, Journal of the Korean society of Oceanography, Vol. 16, No. 4, pp. 169-179.
- [55] Sundby, B., C. Gobeil and N. Silverberg(1992), The phosphorus cycle incoastal marine sediments. Limnology and Oceanography, Vol. 37, pp. 1129-1145.
- [56] Seby, F., M. Potin-Gautier, E. Giffaut, G. Borge, and O. F. X. Donard(2001), A critical review of thermodynamic data for selenium species at 25 °C. Chem Geol, Vol. 171, pp. 173-194.
- [57] Taylor, S. R. and S. M. Mclennan(1995), The geochemical evolution of the continental crust. Rev. Geophys., Vol. 33, pp. 241-265.
- [58] Taylor, S. R.(1964), Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol 28, pp. 1273-1285.
- [59] Wedepohl, K. H.(1960), Spurenanalytische Untersuchungen an Tiefseetonen aus dem Atlantik. Geochim. Cosmochim. Acta Vol. 18, pp. 200-231.
- [60] Wedepohl, K. H.(1969), Handbook of Geochemistry. Springer-Verlag, Berlin, p. 442.
- [61] Windom, H., S. Schropp, F. Chalder, J. Ryan, R. Smith Jr., L. Burney, F. Lewis and C. Rawlinson(1989), Natural trace metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments of the southeastern United States. Environmental Science and Technology, Vol. 23, pp. 314-320.
- [62] Yamada, H., and M. Kayama(1987), Distribution and dissolution of several forms of phosphorus in coastal marine sediments. Oceanologica Acta, Vol. 10, pp. 311-321.
- [63] Yang, Z. S., X. G. Sun, Z. R. Chen and C. G. Pang(1998), Sediment discharge of the Yellow River to the Sea: its past, present, future and human impact on it. In: Hong, G. H., Zhang, J., Park, B. K.(Eds.), Health of the Yellow Sea. The Earth Love Publication Association, Seoul, pp. 109-127.
- [64] Yin, J. H., Y. Kajiwara and T. Fujii(1989) Distribution of transition elements in surface sediments of the southwestern margin of Japan Sea. Geochemical Journal Vol. 23, pp. 161-180.
- [65] Youn S. T, Y. K. Koh and S. O. Ryu(1999), Distribution characteristics of surface sediments and metal elements in Hampyong Bay, the southwestern coast of Korea. J Kor Environ Sci Soc., Vol. 8, pp. 677-684.
- [66] Zhao, Y. Y. and M. C. Yan(1994), Geochemistry of Sediments of the China Shelf Sea. Science Press, Beijing. pp. 15-130.
- [67] Zhao, Y. Y., M. C. Yan and R. H. Jiang(1995), Abundance of chemical elements in continental shelf sediments of China. Geo-Mar. Lett. Vol. 15, pp. 71-76.

원고접수일 : 2012년 03월 12일

원고수정일 : 2012년 04월 16일

게재확정일 : 2012년 04월 23일