

가막만 표층퇴적물 중 알칼리 및 알칼리 토금속 원소의 생지화학적 특성

김평중*[†] · 박승윤** · 김상수** · 장수정** · 전상백** · 주재식**

*, ** 국립수산과학원 남서해수산연구소

Biogeochemistry of Alkaline and Alkaline Earth Elements in the Surface Sediment of the Gamak Bay

Pyoung-Joong Kim*[†] · Soung-Yun Park** · 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 : 2010년 4월 가막만 전역의 19개 정점에서 표층퇴적물을 채취하여 퇴적물의 입도 분포, 유기물의 기원, 알칼리 원소(Li, Na, K, Rb) 및 알칼리 토금속(Be, Mg, Ca, Sr, Ba)원소의 분포특성을 파악하였다. 조사해역의 퇴적물 유형은 대부분 Mud로 나타났다. Chlorophyll a, TOC, TN, TS 및 LOI의 경우 만의 북부해역과 어류양식장이 산재되어 있는 남측해역에서 높은 농도분포를 보였으며, 만의 중앙부에서 낮은 농도를 보였다. 이들 성분과는 반대로 산화환원전위의 경우 만의 중앙부에서 대체로 (+) 값으로 산화상태를 나타내었으며, 만의 북부해역과 남측해역에서 (-) 상태로 환원환경 특성을 보였다. 유기물의 기원은 대부분 자생기원 유기물질 이었으나, 일부 정점에서 육상 및 박테리아성 유기물 기원 특성을 보였다. 알칼리 및 알칼리 토금속 원소 중 Li, Na, K, Rb, Be, Mg, Ca 및 Sr의 경우 대부분의 정점에서 석영희석 효과에 의해 일차적으로 농도 분포가 결정된다. Ba의 경우 본 조사해역에서 증정석(Barite)가 존재하는 것으로 생각되며, Sr 및 Ba의 경우 이차적으로 탄산염 회석과 산화환원전위에 의한 생지화학적 영향을 직간접적으로 받는 것으로 보인다.

핵심용어 : 가막만, 표층퇴적물, 알칼리 및 알칼리 토금속, 생지화학, 퇴적물 유형, 산화환원전위

Abstract : We measured various geochemical parameters, including the grain size, loss on ignition(LOI), total organic carbon(TOC), total nitrogen(TN), total sulfur(TS) and metallic elements, in surface sediment collected from 19 stations in Gamak Bay in April 2010 in order to understand the sedimentary types, the origin of organic matters, and the distribution patterns of alkali(Li, Na, K, Rb) and alkaline earth(Be, Mg, Ca, Sr, Ba) elements. The surface sediments were mainly composed of mud. The concentrations of Chlorophyll-a, TOC, TN, TS and LOI in sediment were the highest at the cultivation areas of fish and shellfish in the northern and southern parts of the bay. The redox potential(or oxidation-reduction potential) showed the positive value in the middle part of the bay, indicating that the surface sediment is under oxidized condition. The organic materials in sediment at almost all of stations were characterized by the autochthonous origin. Based on the overall distributions of metallic elements, it appears that the concentrations of alkali and alkaline earth elements except Ba in sediment are mainly influenced by the dilution effect of quartz. The concentrations of Sr and Ba are also dependent on the secondary factors such as the effect of calcium carbonate and the redox potential.

Key Words : Gamak Bay, Surface sediment, Alkali and Alkaline earth element, Biogeochemistry, Sediment type, Oxidation-reduction potential

1. 서 론

해양퇴적물중 알칼리 및 알칼리 토금속 원소는 유공충(Foraminifera), 산호(Corals) 및 연체동물(Mollusks)에 의해서 흡수되어지는 관점에서 상당한 주목을 받고 있다. 해수 중에서 칼슘이온은 탄산칼슘(Calcium carbonate)의 외피(껍질)을 형성하기 위해서 패류 및 갑각류에 의해서 사용되어지며 석회석 침적을 형성하여 해양 퇴적물 내에서 지난 지질학적 연대 기간 동안 축적되어졌다(Kim et al., 1999). Mg, Sr 및 Ba와 같은 것은 탄산염과 결합하여

해양환경 내에서 고토석(Magnesite, MgCO₃), Strontianite (SrCO₃) 및 독중석(Witherite, BaCO₃)등을 형성한다. Sr과 Ba은 또한 해양생물과 결합하여 Celestite(SrSO₄) 및 증정석(Barite, BaSO₄)을 형성한다. 또한 Mg, Sr 및 Ba은 방해석(Calcite)과 Aragonite(Sr and Ba) 내의 칼슘과 치환될 것이다(Ebbing and Wrighton, 1990).

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(전라남도, 1982). 해저지형은

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

오목하게 수심이 깊은 북서 내만역, 만 중앙으로부터 남쪽으로 갈수록 차츰 깊어져 수심이 40m까지 이르는 남쪽 만 입구역, 그리고 수심이 얇고, 경사가 완만한 동부 천해역으로 구분된다(Kang and Chough, 1982). 퇴적물 조성은 백야도와 돌산 군내리를 잇는 선을 경계로 내만에는 대부분 니질로 구성되어 있고, 남측에는 패각질이 다소 함유되어 있다. 점토광물은 일라이트 46.4~61.1%(평균: 53.6%), 스펙타이트 13.4~31.8%(평균: 20.4%), 카오리나이트 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, 카오리나이트와 녹니석은 만 중앙부로부터 가장자리로 향하여 점점 높아지는 경향을 보인다(이 등, 1995). 또한 지형특성에 따른 조류 등에 의해 대체로 3개의 수괴가 존재하며 때때로 복잡한 해황을 나타낸다(이와 조, 1990). 가막만은 육지로부터 영양염 유입이 많아 기초생산력이 매우 크며(이 등, 1991) 많은 종류의 어패류가 서식하여 각종 어패류의 중앙식이 행해짐은 물론 산란 및 서식장으로서 천혜의 보고이다. 이러한 여건을 감안하여 이 해역을 환경보전해역으로 지정하여 관리하고 있는 해역이다.

본 연구해역에는 총 36개 어촌계가 있으며 양식면적 현황은 패류 양식이 306건, 2,275 ha로 굴, 진주담치, 바지락 및 새조개 등이 생산되고 있고, 어류양식은 총 58건 190 ha의 해역에서 넙치, 조피볼락, 참돔 및 농어 등이 주로 가두리 양식으로 이루어지고 있으며, 어패류 외에 마을 어업이 107건에 3,093 ha, 해조류양식이 9건 등 40 ha의 어업권이 형성되어 있다(여수시, 2000). 그러나 이들 중 굴 및 진주담치 등의 서식환경에 대한 연구는 다양하게 이루어져 있으나(박과 최, 2002; 김 등, 2008; 오 등, 2008) 표층퇴적물 내에 서식하는 양식생물의 서식환경에 대한 연구는 미미한 실정으로 본 연구에서 표층퇴적물의 생지화학적 특성을 파악하여 양식생물 환경에 대한 과학적 퇴적물 환경정보를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

가막만 표층퇴적물의 생지화학적 분포특성을 파악하기 위하여 2010년 4월 국립수산과학원 남서해수산연구소의 조사선 탐구 11호를 이용하여 가막만 19개 정점에서 현장 조사를 수행하였다(Fig. 1). 표층퇴적물의 채취는 변형된 van Veen grab(50×30×30 cm) 채취기를 사용하여 표층퇴적물의 교란을 최소화 할 수 있도록 채취하였으며, 퇴적물의 얽은 산화층인 상부 0~3 cm층 퇴적물을 채취하기 위하여 그랩 채취 후 5분~10분 정도 거치대에 정지시킨 다음 사이폰을 이용하여 해수 상등액을 제거하였다.

표층퇴적물의 산화환원전위(Oxidation-Reduction Potential; ORP)를 측정하기 위해서 ORP 측정기(Thermo Scientific Co., Orion 3 Star)로 센서 부분을 퇴적물의 2 cm 깊이에 넣어 현장에서 즉시 측정하였다.

이화학적 분석을 위한 시료의 분취(Subsampling)는 알칼리 및 알칼리 토금속 원소 성분분석을 위해 미리 산세척된 플라스틱 주걱을 이용하여 산세척된 폴리에틸렌 병에 표층퇴적물 50 g 정도를

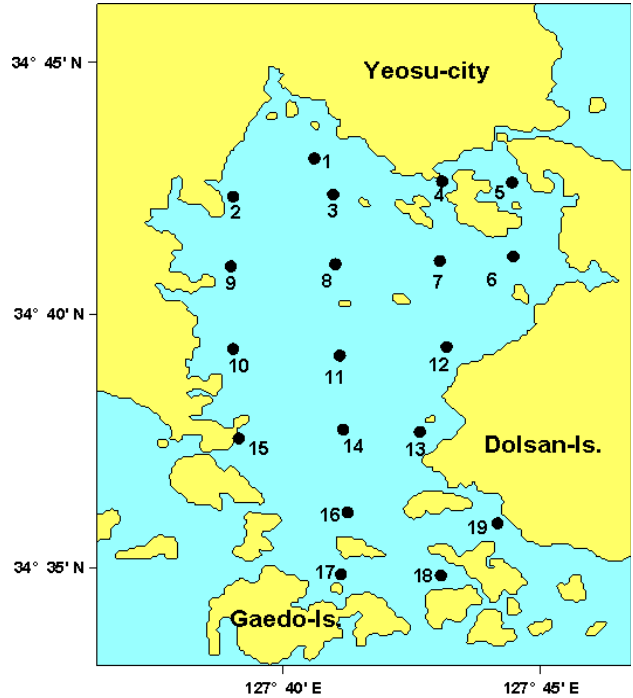


Fig. 1. Sampling station map.

분취하였으며, 이들 시료는 즉시 Dry ice가 채워진 Ice box에 담아 실험실로 옮긴 후 -76 °C에서 시료 전처리 전까지 보관하였다.

Chlorophyll *a* 함수율 및 강열감량(LOI) 분석을 위한 시료 200~300 g 정도를 폴리에틸렌 병에 분취하고 선박의 냉장고에 냉장 보관한 후 실험실로 옮겨 즉시 해양환경공정시험법에 준하여 분석하였다(국토해양부, 2010).

총유기탄소(TOC), 총질소(TN) 및 총황(TS)의 분석을 위해서 퇴적물 대략 10 g을 50 mL 폴리에틸렌 원심분리관에 담아 Supra급 1N HCl 20 mL를 넣어 잘 혼합한 후 1시간동안 50 °C 수욕조에 넣고 방치한 다음 원심분리기를 이용하여 3000 rpm, 15분간 원심분리시켜 상등액을 제거하고 -76 °C로 급속 냉동시킨 후 동결건조하여 막자사발로 미세하게 분쇄한 다음 CHNS 원소분석기(PerkinElmer Co. 2400Plus)로 분석하였다.

퇴적물의 입도분석은 Ingram(1971)의 표준입도분석 방법에 의거하였으며, 그 과정은 요약하면 먼저 채취된 퇴적물 시료는 10%의 과산화수소수(H₂O₂)와 0.1 N의 염산(HCl)을 차례로 넣어 유기물과 탄산염을 완전히 제거하였다. 또한 퇴적물 내에 들어있는 용존염은 유기물과 탄산염을 제거하는 과정에서 잔류하는 과산화수소수와 염산을 제거하기 위해 증류수를 이용하여 따라붙기 과정을 각각 5회와 7회 이상 반복하는 과정에서 제거하였다. 전처리과정이 끝난 쇄설성 퇴적물은 4φ(0.064 mm) 체를 이용한 습식 체질(Wet sieving)에 의해 조립질 시료와 세립질 시료로 분리하였다. 조립질 시료는 건조기에서 건조시킨 후 진탕기(Ro-Tap sieve shaker)를 이용하여 15분 동안 체질을 하여 입도 별로 무게를 구하였고, 세립질 시료는 침전속도를 고려한 피펫방법에 의해 무게를 구하여 조립질 시료 무게와 세립질 시료 무게를 합하여 각 구간에서의 무게 백분율을 구하였다. 이때 입자의 응집현상을 방지하기 위해 확산제로는

칼곤(Calgon)을 사용하였다. 측정된 모든 자료는 그래픽방법에 의해 처리되었고, 평균입도, 분급, 왜도, 첨도 등의 통계적 입도상수는 Folk and Ward(1957)의 계산식에 의해 구하였다. 또한 10 ϕ 보다 세립한 입도의 질량은 외삽법에 의한 균등분배방식을 이용하여 구분하였다.

알칼리 및 알칼리 토금속 원소 분석을 위한 시료는 동결건조기를 이용하여 건조한 다음 막자사발을 이용하여 미세한 분말로 분쇄하여 산분해를 위한 시료로 준비하였다. 퇴적물 시료 약 0.5g을 정확하게 달아 진한 질산 : 과염소산 : 불소산 = 2 : 1 : 2의 혼합된 산을 10 mL를 첨가하고 마개를 하여 Microwave-oven을 이용하여 산분해한 다음 방냉 하고 Open type 테프론 비이커에 옮겨 130 $^{\circ}$ C 청정한 (Clean) Hot plate hood에서 완전 건조 시키고, 진한 질산 2 mL로 2회 반복하여 잔사를 녹인 후 1N 질산 용액으로 테프론 비이커에 침적된 화학적 성분을 용출시켜 미리 산세척된 100 mL 매스 플라스크(Mass flask)에 정용하여 시료로 준비하였다. 분석의 정도관리(QA/QC)를 위하여 Microwave-oven 산분해시 마다 8개의 시료와 금속분석용 해양퇴적물 인증물질인 정도관리 시료 MESS-3(NRC) 2개를 시료와 동일하게 산분해 하여 시료로 준비하였다. 각각의 화학적 성분 분석을 위해서 최적 분석조건에 맞도록 원시료, 10배 및 100배로 희석하여 유도결합질량분석기(Inductively coupled plasma mass; ICP-MS, Model : Elan 9000, Perkin Elmer Co.)를 이용하여 분석하였다. 수은 분석을 위한 시료는 금아말감수은분석기(Model : DMA-80, Milestone ltd., Italy)를 이용하여 분석하였으며 정도관리를 위한 시료는 MESS-3(NRC)를 시료 10개 분석시 마다 1개씩 시료와 동일하게 분석하였으며, 이들 정도관리(QA/QC) 결과를 Table 1에 나타내었으며 분석회수율은 인증값이 제시 되지 않는 Ba과 Rb를 제외한 전 성분이 회수율 95% 이상 107% 이하였으며, 이러한 결과로 보아 Ba과 Rb도 유사한 회수율 일 것으로 생각되어진다.

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

Elements	Certified value	Concentration found (Mean \pm SD, n=4)	Recovery (%)
Sr(ppm)	129 \pm 11	131 \pm 5	103 \pm 4
Ba(ppm)	-	967 \pm 34	-
Li(ppm)	73.6 \pm 5.2	71.2 \pm 2.3	97 \pm 3
Rb(ppm)	-	63.95 \pm 7.93	-
Be(ppm)	2.3 \pm 0.1	2.18 \pm 0.07	95 \pm 3
K(%)	2.6	2.62 \pm 0.089	101 \pm 3
Na(%)	1.6	1.57 \pm 0.59	98 \pm 4
Mg(%)	1.6	1.70 \pm 0.55	107 \pm 3
Ca(%)	1.47 \pm 0.06	1.41 \pm 0.55	96 \pm 4
Fe(%)	4.34 \pm 0.11	4.34 \pm 0.12	100 \pm 3
Al(%)	8.59 \pm 0.23	8.78 \pm 0.59	102 \pm 7
Hg(ppb)	91 \pm 9	87 \pm 3	96 \pm 3

3. 결과 및 고찰

3.1. 퇴적물의 입도조성

가막만 각 정점별 입도분포와 퇴적물 유형을 Table 2와 Fig. 2에 나타내었다.

본 조사 해역에서 자갈(Gravel)의 농도범위는 정점 9에서 0.51%를 보였으며, 그 외 정점에서 자갈은 분포하지 않았다. 모래의 농도는 0.49~15.56%(평균 3.87 \pm 3.84%)로 정점 10에서 최대 농도를 보였으며, 만의 북측해역에서 돌산도 북서측 해역까지 2%미만의 등치선이 존재하며 신월동 부근 해역 및 조사 정점 10주변 해역에서 다른 정점들에 비해 다소 높게 나타났다. 실트(Silt)의 농도는 34.88~70.70%(평균 54.33 \pm 10.99%)의 범위로 정점 10에서 가장 낮고 만의 북측과 돌산도 측으로 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 점토(Clay)의 농도는 28.60~60.81%(평균 41.78 \pm 9.63%)의 범위로 조사정점 3점에서 가장 높은 농도를 보였으며, 만의 북측해역에서 낮고 중앙부에서 다소 높은 농도를 보였다. 표층 퇴적물의 평균입도는 사니질 퇴적물의 입도인 7.00~8.85 ϕ (평균 7.764 ϕ) 범위였다. Folk(1968)의 분류법에 따라 퇴적물 유형(Sediment type)은 정점 10에서 Sandy silt(sZ), 정점 1, 2 및 8에서 Silt(Z)를 제외하면 전 조사정점에서 Mud(M)로 구분되었다. 입도에 대한 통계변수의 변화를 살펴보면, 분급도(Sort)는 2.53~3.37 ϕ (평균 2.83 ϕ) 범위로 매우 불량한 분급(Very poorly sorted)을 보였다. 또한, 왜도는 -0.32~1.41(평균 0.41) 범위로 정점 9, 11, 15 및 18에서 음(Negative skewed, -)의 왜도를 보였으며, 그 외 정점들에서 양의 왜도(Positive skewed, +)를 나타내었다. 첨도는 1.75~4.03(평균 2.44) 범위로 정점 9에서 4.03으로 정규분포에 비해 극단적으로 집중(Extremely leptokurtic) 되었으며, 그 외 정점들에서 정규분포에 비해 중앙으로 매우 집중된(Very leptokurtic)의 형태를 보였다(Table 2). 이러한 결과는 이 등(1995)의 결과와 유사하였다.

Table 2. Sedimentary texture and grain size for each station

St. No.	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Mean (ϕ)	Sort	Skewness	Kurtosis	Sediment type
1	0.00	0.51	70.70	28.78	7.00	2.64	0.53	2.42	Z
2	0.00	0.49	67.68	31.83	7.42	2.62	0.78	2.73	Z
3	0.00	0.51	38.68	60.81	8.85	3.05	1.41	2.67	M
4	0.00	9.12	59.92	30.96	7.18	3.00	0.62	2.40	M
5	0.00	8.64	53.94	37.42	7.17	2.84	0.35	2.37	M
6	0.00	4.52	48.77	46.72	8.16	3.23	0.20	1.75	M
7	0.00	1.80	63.21	34.99	7.54	2.69	0.69	2.67	M
8	0.00	1.17	70.23	28.60	7.14	2.82	0.93	2.69	Z
9	0.51	4.02	41.55	53.92	8.37	2.55	-0.15	4.03	M
10	0.00	15.56	34.88	49.56	7.89	3.37	0.04	1.90	M
11	0.00	6.27	39.12	54.61	8.40	2.81	-0.02	2.34	sZ
12	0.00	1.54	59.46	39.00	7.53	2.81	0.36	2.31	M
13	0.00	2.36	43.89	53.74	8.69	2.58	0.69	2.51	M
14	0.00	4.82	58.67	36.51	7.43	2.89	0.13	2.03	M
15	0.00	3.18	54.73	42.09	7.76	2.81	-0.27	2.16	M
16	0.00	2.24	49.32	48.44	8.07	2.88	0.76	2.44	M
17	0.00	0.70	64.78	34.52	7.40	2.53	0.20	2.36	M
18	0.00	4.44	53.16	42.39	7.75	2.92	-0.32	2.10	M
19	0.00	1.68	59.48	38.84	7.61	2.78	0.67	2.43	M

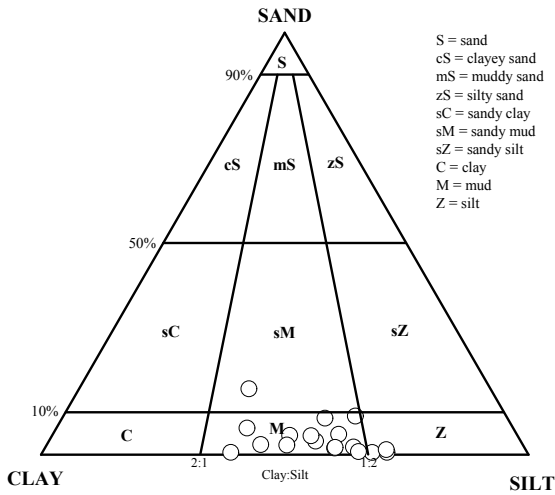


Fig. 2. A ternary diagram of surface sediments in the Gamak Bay.

3.2. 친생물원소

산화환원전위, Chlorophyll *a*, TOC, TN, TS 및 강열감량의 측정점별 농도 및 수평분포를 Table 3 및 Fig. 3에 나타내었다.

표층 퇴적물은 일반적으로 유기물을 함유하고 있고 일차적으로 저층수로부터 공극수(Pore water)를 통하여 산소를 공급받아 유기물을 산화하며, 2차적으로 미생물이나 그 밖의 작용에 의해서 유기물을 분해할 때 주변의 산소를 소비한다. 이때 산소의 공급이 소비를 따라가지 못하면 빈산소상태가 되고 이러한 환경을 무산소환경(Anoxic environment) 또는 환원환경이라 한다. 퇴적물의 이러한 환경상태를 파악하기 위해서 산화환원전위차(Oxidation Reduction Potential; ORP)를 나타내는 Eh의 범위는 -300~+122 mV로 공간적 분포는 만의 북측과 남측의 경우 강한 환원상태를 보이는 (-)값을 보였으며, 만의 중앙부에서 동서방향으로 (+)값인 산화상태를 보였다. 일반적으로 퇴적물 내의 산화환원전위는 Eh 0~-200 mV에서 황화물 환원이 발생되며, Eh -200~-300 mV에서 메탄발효가 일어난다. 따라서 어류양식장이 산재 되어 있는 조사 정점 18에서는 퇴적물 내의 공극수가 다량 용출될 경우 어류 양식에 영향을 미칠 것으로 생각되어진다.

가막만 표층퇴적물 내에 서식하는 살아있는 유기물의 간접적인 지표인 Chlorophyll *a*의 농도는 0.29~6.07 ppm(평균 0.1.07±1.34) ppm 범위로 만의 북측해역에서 높고 중앙부에서는 각 정점 사이에 뚜렷한 농도차가 없이 0.7 ppm 이하의 농도를 보이다 가장 남측해역에 위치하고 어류 양식장이 산재되어 있는 정점 17, 18, 19에서 다시 증가하는 분포 특성을 보였다.

휘발성 유기물의 간접적인 지표로서 강열감량(LOI, loss on ignition)은 4.7~11.1%(평균 6.2±1.6%)의 범위로 가막만 가장 북측 정점 1에서 가장 높고 만의 중앙부에서 가장 낮은 농도분포를 보였다.

TOC, TN 및 TS의 농도는 각각 TOC 0.41~1.78%(평균: 0.76

± 0.35%), TN 0.02~0.35%(평균 0.11±0.09%) 및 TS 0.16~1.84%(평균: 0.47±0.45%)의 범위로 만의 북측해역에서 가장 높고 만의 중앙부에서 가장 낮은 농도분포를 보였다. Kao et al.(2003)은 동중국해에서 TOC 0.07~1.31% 그리고 TN 0.01~0.17%로 본 해역과 유사하였다. Kang et al.(1993)은 한반도 연안역 주변에서 TOC 0.17~3.44%와 TON 0.03~0.26%, Hyun et al.(2003b; Hyun et al., 2004)은 광양만 및 여수해만 부근의 표층 퇴적물중 TOC 0.32~2.14%와 TN 0.03~0.83%로 보고하여 유사한 유기물 농도이었다. 그리고 박 등(1995)은 부영양성 내만인 부산항에서 측정된 유기물 농도를 보고하였는데, TOC의 농도범위는 0.71~6.38% 범위로 본 해역보다 다소 높았으나, TN 범위는 0.03~0.45%로 유사한 농도를 보였다. 따라서 본 연구해역의 퇴적물의 TOC와 TN 농도는 한반도 주변해역에서의 값들과 유사하게 나타났다.

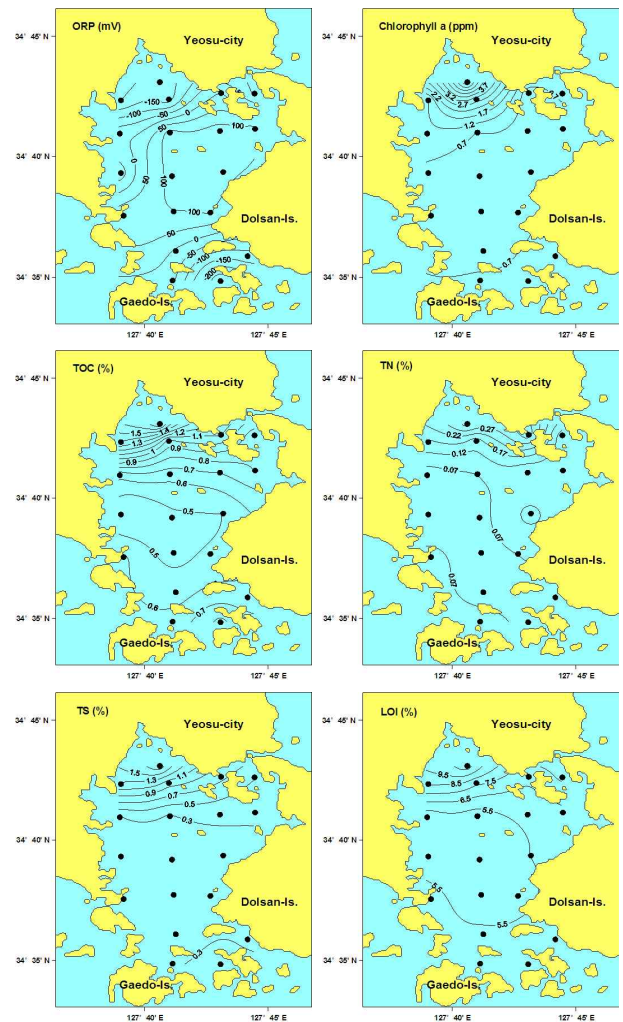


Fig. 3. Horizontal distributions of ORP, chlorophyll *a*, TOC, TN, TS and LOI in surface sediments of the Gamak Bay.

Table 3. ORP, TOC, TN, TS, TOC/TN atomic ratio and LOI concentrations in the surface sediments of the Gamak Bay

Station No.	Chlorophyll a (mg/kg)	TOC (%)	TN (%)	TS (%)	LOI (%)	$\Delta C/N$ Ratio	ORP (mV)
1	6.07	1.78	0.34	1.84	11.1	6.11	-169
2	1.12	1.40	0.16	1.27	8.7	10.21	-204
3	2.96	0.96	0.14	1.00	7.7	8.00	-180
4	0.35	1.11	0.35	0.76	6.7	3.70	2
5	0.82	0.83	0.09	0.51	7.7	10.76	-107
6	0.58	0.80	0.07	0.34	6.2	13.33	116
7	0.51	0.70	0.07	0.37	5.8	11.67	122
8	0.69	0.65	0.07	0.27	5.0	10.83	119
9	1.14	0.63	0.04	0.27	4.7	18.38	-13
10	0.58	0.41	0.02	0.17	5.1	23.92	-79
11	0.46	0.49	0.06	0.16	4.7	10.21	115
12	0.52	0.50	0.14	0.21	5.5	4.17	111
13	0.62	0.52	0.07	0.28	5.2	8.67	104
14	0.35	0.47	0.05	0.22	4.8	10.97	97
15	0.61	0.62	0.09	0.17	5.9	8.04	91
16	0.29	0.54	0.04	0.18	5.7	15.75	-62
17	0.85	0.64	0.10	0.29	5.6	7.47	-34
18	0.97	0.83	0.06	0.37	6.0	16.14	-300
19	0.89	0.63	0.06	0.28	5.9	12.25	-119
min	0.29	0.41	0.02	0.16	4.7	3.70	-300
max	6.07	1.78	0.35	1.84	11.1	23.92	122
avg	1.07	0.76	0.11	0.47	6.2	11.08	-18
Sd	1.34	0.35	0.09	0.45	1.6	4.94	133

가막만 표층퇴적물내의 유기물 기원을 파악하기 위해 C/N 원자비를 Fig. 4에 나타내었다.

일반적으로 연안 및 대륙붕 퇴적물 내 유기물의 주공급원은 하천을 통한 도시하수나, 산업폐수 등의 유입과 해역 내 식물플랑크톤의 대량증식 및 폐사와 관련된 생물기원의 쇠설성 유기물 그리고 고형 유기물의 침강 및 퇴적 등이 있다(Romankevich, 1984; Lim and Hong, 1994; Choi et al., 2005). 유기물 중 12이상의 높은 C/N 원자비는 육상 기원 유기물의 높은 기여를 나타내고(Lignin C/N atomic ratio 1500; Greaves and Schwartz, 1952), 6~9는 식물플랑크톤(Phytoplankton)의 범위이며 5~12 정도 값을 가질 경우 해역 자체 생물에 의한 해양성 기원유기물질을 의미한다(Kukul, 1971; Muller, 1977; Holligan et al., 1984; Stein, 1991; Hyun et al., 2003b; Hyun et al., 2004). 한편 2.6~4.3의 낮은 C/N 비값은 질소가 풍부한 박테리아성 플랑크톤에서 흔히 나타나는 값으로 5이하에 해당하는 낮은 C/N 비값은 퇴적유기물 중 박테리아의 높은 기여를 나타내는 지표로 이용된다(Lee and Fuhrman, 1987).

일반적으로 Polckington and Leonard(1979)의 보고와 같이, 해양퇴적물에서 가장 중요한 유기물 농도조절 요인으로서 유기물의 생산, 공급률 및 해역에서의 보존률, 그리고 입도의 세립한 정도에 따른 표면적 증가 등을 고려할 수 있다. 이와 함께 본 연구에서 나타난 가막만 표층퇴적물의 C/N 비 분포는 연안에 근접한 정점 6, 9, 10, 자봉도에 인접한 정점 16 및 월호도에 인접한 정점 18에서 12 이상 높은 값을 보여 가막만 주변에서 육상기원 유기물의 상당한 기여를 잘 나타내어 주었다. 반면 대경도와 신월도 사이의 수로

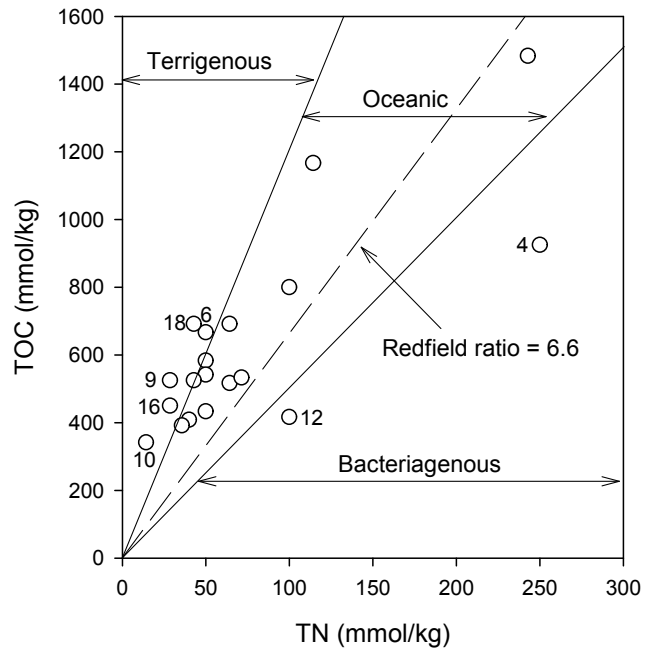


Fig. 4. Plot of TOC versus TN for the surface sediments of the Gamak Bay. The terrigenous and oceanic sources are shown as solid lines, the Redfield ratio is shown as a dashed line.

정점 4와 굴양식어장이 산재되어 있는 돌산읍 금봉리 연안 해역 정점 12에서 C/N 원자비가 각각 3.70 및 4.17로 박테리아성 플랑크톤 기원의 유기물의 기여가 높음을 나타냈다. 한편 위에서 언급한 연안의 몇몇 정점을 제외한 대부분의 정점에서 나타난 C/N 비의 기울기 값은 Redfield ratio 6.6 이상 육상기원 유기물의 기원 12 사이에 놓여지는 것으로 보아 본 연구해역의 대부분 정점들에서 해역 자체의 자생기원 유기물의 높은 기여를 잘 반영하는 듯하였다.

총유기 탄소, 질소 및 황의 분포특성을 파악하기 위하여 AI 과 LOI와의 상관관계를 Fig. 5에 나타내었다. 만의 북측해역 정점 1, 2, 3, 4 및 5의 경우 같은 알루미늄의 농도에서 상대적으로 강열감량의 농도가 높았다. 이들 정점을 제외한 모든 정점에서 알루미늄과 유의한 정의 상관관계($r=0.71, p<0.01$)로 강열감량의 농도는 석영희석효과(Quartz dilution effect)에 의해서 조절된다는 것을 의미한다. 또한, 강열감량은 chlorophyll a와의 상관 계수 $r=0.81(p<0.001)$, TOC와의 상관계수 $r=0.94(p<0.001)$, TN과의 상관계수 $r=0.72(p<0.001)$, TS와의 상관계수 $r=0.95(p<0.001)$ 로 매우 유의한 정의 상관관계를 보였다. 강열감량과 산화환원전위차 사이의 상관관계는 다른 정점들에 비해 강한 환원상태($Eh=-300$ mV)를 보이는 어류양식장 정점 18을 제외한 정점들에서 상관계수 $r=-0.70(p<0.001)$ 로 역 상관관계를 보였다. 이것은 일반적으로 알려져 온 (Cho and Choi, 1994; Cho and Park, 1998; Hyun et al., 2003a; Hyun et al., 2003b) 퇴적물 내 유기물 농도와 입도사이의 밀접한 관련성이 본 연구해역에서도 잘 적용된다는 것을 강하게 시사해 준다.

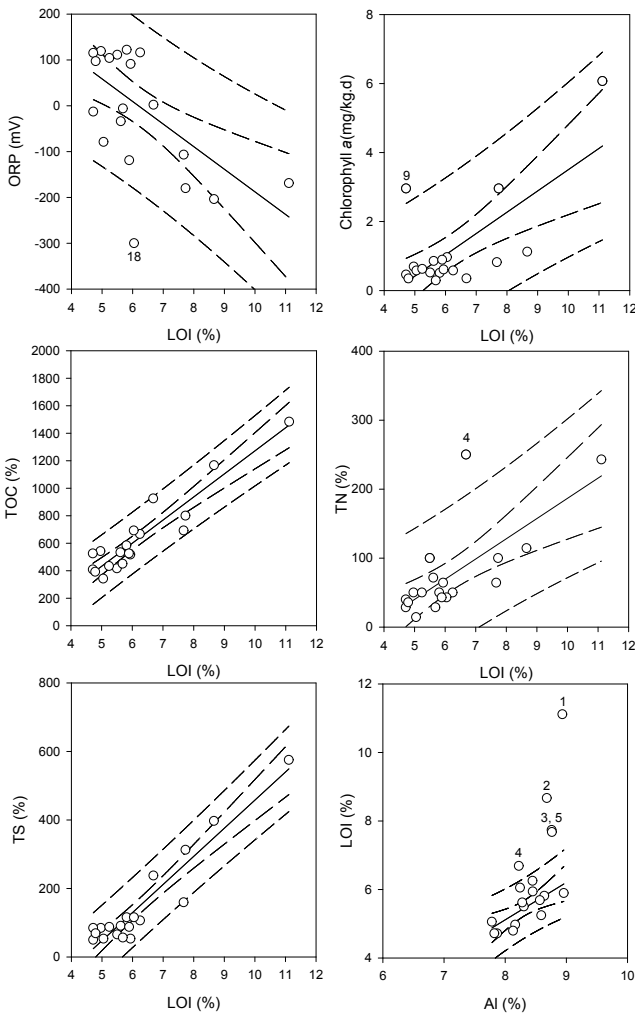


Fig. 5. Plots of ORP, chlorophyll *a*, TOC, TN and TS versus LOI, and LOI versus Al for the surface sediments of the Gamak Bay. The regression lines are shown as solid lines. The 95% confidence limit is shown as a middle dash line, and prediction limit is shown as a long dash line.

3.3. 퇴적물의 표준화(Normalization)

퇴적물 내 원소의 농도는 자연적 혹은 인위적인 요인에 의해서 영향을 받으며, 사질 퇴적물에 의한 희석작용으로 세립한 퇴적물에서 농도가 높고 조립한 퇴적물에서 농도가 낮다. 그러므로 이러한 원소들의 농축정도를 파악하기 위해서 퇴적물 입도와 퇴적물 조성에 영향을 미치는 광물학적인 효과에 대한 보정(표준화)이 필요하다. 세립한 퇴적물 즉 실트(Silt) 및 점토(Clay)와 함께 거동하는 광물 속에는 일반적으로 천연기원의 화학 성분들을 함유하고 있다(Bruland et al., 1974; Stull et al., 1986; Turekian and Wedepohl, 1961; Word and Meams, 1979). 그러므로 퇴적물에서 측정된 금속성분의 농도만으로는 인위적인 증가를 추정 할 수 없기 때문에 원소들 상호간의 상관관계로부터 최적의 표준화 성분을 알아내고, 그 표준화 성분을 이용하여 자연적 혹은 광물학적 농도변화 그리고 인위적

농도 증가를 평가하여 왔다. 이전 연구자들이 이용한 표준화물질로는 입도(Ackerman et al., 1983; Horowitz and Elrick, 1987), TOC(Daskalakis and O'Conner, 1995; Windom et al., 1989), Fe(Daskalakis and O'Conner, 1995; Morse et al., 1993; Trefry et al., 1985), Al(Bertine and Goldberg, 1977; Bruland et al., 1974; Hanson et al., 1993; Schropp et al., 1990), Li(Loring, 1990), 희토류 원소(Rare earth elements; Olmez et al., 1991) 및 방사성 동위원소 추적자(Finney and Huh, 1989; Goldberg et al., 1979) 등이 있다.

세립한 퇴적물에서 금속원소의 거동을 이해하기 위해서 사용되는 표준화 성분들은 다음의 조건을 충족해야만 한다(Luoma, 1990). 첫째, 표준화 성분은 자연 상태에서 목적으로 하는 성분과 같은 비율로 변화해야 한다. 둘째, 표준화 물질은 인위적인 공급원에 의한 영향을 받지 않아야 한다. 그리고 세 번째로, 표준화 성분은 안정적이어야 하며, 산화·환원, 흡착·탈착과 같은 영향을 받지 않아야 한다. 또한, 초기 속성과정에 의해서 퇴적물중의 농도가 변화하지 않아야 한다. 표준화 성분들이 지각을 구성하는 암석기원으로부터 일정한 비로 유입된다는 가정이 충족된다면, 표준화 성분 에 대한 관심원소들의 상관관계 변화로부터 인위적인 증가를 알아 낼 수 있을 것이다.

표준화 성분은 연구 대상해역의 특성을 고려하여 지질학적 분포 특성 등을 주의 깊게 검토한 후 해역에 대한 가장 적합한 보전성 원소(Conservative elements)를 선택해야 한다. 대부분의 지화학 원소들은 일반적으로 세립한 사이즈의 알루미늄 실리케이트(Aluminosilicates)로 구성되어 있기 때문에 표준화 성분으로 알루미늄이 많이 사용되어왔다(Windom et al., 1989). 김 등(2006; 김 등, 2010)에 의하면 본 연구 해역의 북측에서 하계 매년 탄산수소염화물 형성되는 것으로 보고된바 있으므로 유기물 및 철은 퇴적물의 산화환원반응에 의한 농도변화가 다소 높게 나타나므로 이들을 표준화 물질로 유용하지 않을 것으로 판단되며, 퇴적물의 유형에 따른 표준화 물질로 사용은 첨도가 정규분포에 따르기 보다는 극단적으로 집중되거나 매우 집중되는 형태를 보임으로 입도 역시 유용한 표준화물질 사용하는 것은 바람직하지 않을 것으로 생각됨으로 본 연구에서는 알루미늄을 표준화물질로 사용코자 한다.

Al의 수평분포 및 각 정점별 농도를 Table 4에 및 Fig. 6에 나타내었다. Al농도는 7.78~8.96%(평균 8.40±0.36%)의 범위로 공간적 분포는 만의 가장 남측 정점 19에서 8.96%로 최대 농도를 보였으며, 또한 북측해역에서 높은 농도 분포를 보였다. 최소 농도는 중앙부 서측 정점 10에서 7.78%로 가장 낮고 이 정점을 기점으로 남북 및 동측으로 갈수록 증가하는 방사선형의 분포를 보였다. 이러한 농도는 Kim et al.,(1999)에 보고한 황해에서 평균농도(범위) 6.79(3.23~11.19)%에 비해 평균농도는 높고, Cho et al.(1999) 보고한 황해 중앙부 Mud 내에서 평균농도 8.59%와 유사한 값을 보였으며, 황해 남동해역에서 평균농도(범위) 5.75(4.12~8.75)%에 비해 높은 농도로서 Emelyanov and Shimkus(1986)가 보고한 자연 상태의 퇴적물의 Al 농도 0.26~11.64%의 범위에 안에 있었다. 일반적으로 알루미늄은 이토암(Pelite), 육상기원 SiO₂와 점토광물농도가 높아질수록 높은 농도를 보인다.

가막만 표층퇴적물 중 알칼리 및 알칼리 토금속 원소의 생지화학적 특성

Table 4. Al, Li, Na, K, Rb, Be, Mg, Ca, Sr, and Ba concentrations in the surface sediments of the Gamak Bay

St. No.	Al (%)	Li (ppm)	Na (%)	K (%)	Rb (ppm)	Be (ppm)	Mg (%)	Ca (%)	Sr (ppm)	Ba (ppm)
1	8.94	80.8	3.21	2.36	89	2.61	1.49	1.61	118	640
2	8.68	80.7	3.17	2.35	122	2.58	1.51	2.36	186	688
3	8.76	81.5	3.31	2.47	102	2.73	1.50	0.69	117	708
4	8.22	75.0	2.71	2.15	109	2.41	1.34	5.04	234	702
5	8.77	81.4	2.61	2.20	116	2.64	1.44	2.28	1594	790
6	8.45	77.5	3.01	2.21	105	2.65	1.37	1.46	1584	777
7	8.64	73.7	2.94	2.36	118	2.69	1.42	1.30	149	815
8	8.17	65.2	2.70	2.31	113	2.55	1.32	1.38	154	833
9	7.87	62.9	2.74	2.28	109	2.52	1.29	1.28	150	842
10	7.78	59.7	2.69	2.32	107	2.43	1.24	2.45	210	864
11	7.82	61.2	2.87	2.24	110	2.48	1.28	1.79	176	847
12	8.31	68.6	2.90	2.28	116	2.67	1.38	1.89	180	819
13	8.59	66.3	2.97	2.35	117	2.64	1.41	1.65	173	842
14	8.13	64.8	3.02	2.33	116	2.55	1.34	1.81	161	865
15	8.45	68.7	2.95	2.34	120	2.60	1.41	2.00	155	815
16	8.57	69.9	2.84	2.43	123	2.68	1.42	1.74	198	809
17	8.28	70.0	2.86	2.37	122	2.74	1.42	1.50	153	815
18	8.24	68.0	2.85	2.39	120	2.60	1.41	1.49	145	800
19	8.96	71.1	2.99	2.49	126	2.79	1.47	1.59	142	826
Min.	7.78	59.7	2.61	2.15	89	2.41	1.24	0.69	117	640
Max.	8.96	81.5	3.31	2.49	126	2.79	1.51	5.04	234	865
Avg.	8.40	70.9	2.91	2.33	114	2.61	1.39	1.86	164	795
S.d.	0.36	7.0	0.19	0.09	9	0.10	0.08	0.87	29	64

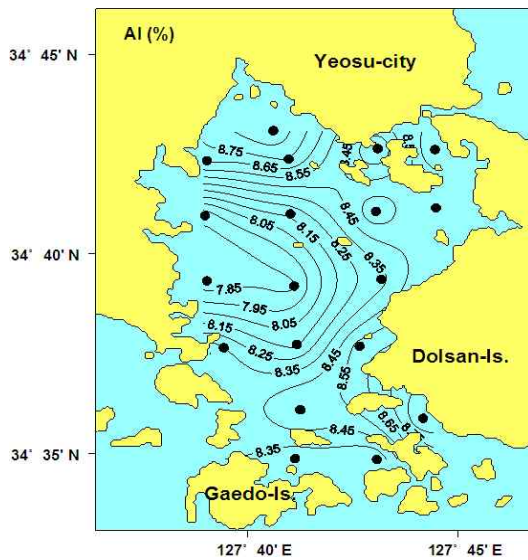


Fig. 6. Horizontal distributions of Al in surface sediments of the Gamak Bay.

3.4. 알칼리 및 알칼리 토금속 원소의 공간적 분포

가막만 표층퇴적물 중 알칼리 및 알칼리 토금속 원소의 농도와 분포도를 Table 4와 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다. 또한, Martin and Meybeck(1979)의 의해 보고된 강과 하천을 통해서 해양으로 유입되는 무기 원소들의 양적 순위를 Table 5에 나타내었다. 알칼리 및 알칼리 토금속 원소 중 Ca>Na>Sr 50~90%, Li>Mg>Ba>K

10~50%, Rb 1~10%가 강과 하천을 통하여 해양으로 유입되어진다.

Na는 해저퇴적물중 농도변화가 비교적 쉽게 변하는 집단에 속하고, 하천을 통해 용존 상태로 이동되며, 고체상으로는 주로 쇄설성 광물인 장석과 각섬석, 휘석 등에 포함되어 유입되는 것으로 알려져 있다(Bowen, 1979). 가막만 표층퇴적물 중 나트륨의 농도는 2.61~3.31%(평균 2.91±0.19%)의 범위로 공간분포는 Sand 농도가 가장 높은 정점 10에서 가장 낮고 만의 북측해역에서 가장 높고 동측과 남측으로 점차 증가하는 방사선형의 농도증가 경향을 보였다. 본 연구해역과 우리나라 주변 해역의 농도 분포 비교를 위해서 Table 6에 이전의 연구자들의 연구결과를 요약하였다. 황해에서 농도범위에 비해 높고, 우리나라 서남해 퇴적물 내에서 농도 범위에 비해 높은 농도를 보였다.

K은 일라이트와 장석 및 운모, 그 밖의 타 알루미늄규산염 광물에 존재하는 전형적인 지각 구성 원소로 알려져 있다(Bowen, 1979). 가막만 표층퇴적물 중 K의 농도는 2.15~2.49%(평균 2.33±0.09%)의 범위로 공간적으로 Li 및 Na과는 달리 정점 4에서 가장 낮은 농도를 보였으며 대체로 만의 중앙부에서 낮고 가장 남측에 위치한 남측 정점 19에서 가장 높은 농도를 보였으나 각 정점간 농도차는 크지 않았다. 본 연구해역과 우리나라 주변 해역의 농도와 비교해서 황해에서 농도범위에 비해 높고, 우리나라 서남해 퇴적물 내에서 농도 범위와는 유사한 농도를 보였다(Table 6). Na과 K은 같은 계열의 알칼리 원소로서 주로 장석류의 분포에 따라 그 농도가 변화하지만 Na은 사장석의 영향을, K은 정장석의 영향을 받는다는 점에서 다르다.

Table 5. The Dissolved Transport Index(DTI) in global river water(Ranked in decreasing order; Martin and Meybeck, 1979)

Percentage(%)	Elements
50~90	Br, I, S, Cl, Ca, Na, Sr
10~50	Li, N, Sb, As, Mg, B, Mo, F, Cu, Zn, Ba, K
1~10	P, Ni, Si, Rb, U, Co, Mn, Cr, Th, Pb, V, Cs
0.1~1	Ga, Tm, Lu, Gd, Ti, Er, Nd, Ho, La, Sm, Tb, Yb, Fe, Eu, Ce, Pr, Al

Table 6. Comparison of elemental concentrations in the Yellow Sea sediments(CYSM: Central Yellow Sea Mud; SEYSM, Southeastern Yellow Sea Mud; SWCIM, Southwestern Cheju Island Mud)

Elements	Yellow Sea Shelf ¹ (n=64)	Yellow Sea Shelf ²	CYSM ³ (n=4)	SEYSM ³ (n=20)	SWCIM ⁴ (n=4)
K%	1.9(1.1-2.9)	-	2.94(0.15)	2.9(2.2-3.5)	-
Na(%)	1.6(0.6-2.2)	-	1.08(0.11)	0.8(0.4-1.4)	0.48(0.47-0.51)
Ca(%)	2.7(0.5-23.5)	2.1(0.2-7.4)	0.95(0.12)	0.7(0.3-2.9)	5.50(3.46-8.66)
Mg(%)	1.2(0.3-1.9)	1.1(0.1-2.2)	1.6(0.05)	0.6(0.2-1.7)	0.69(0.56-0.76)
Al(%)	6.1(3.2-5.5)	6.8(3.2-11.2)	8.59(0.03)	5.8(4.1-8.8)	0.49(0.11-0.77)
Ba(ppm)	512(360-1510)	555(315-816)	447(0.02)	648(436-788)	-
Sr(ppm)	194(134-380)	208(133-488)	140(0.06)	178(134-210)	-

¹ Zhao and Yan, 1994; ² Kim et al., 1998, 1999; ³ Cho et al., 1999; ⁴ Youn and Go, 1987.

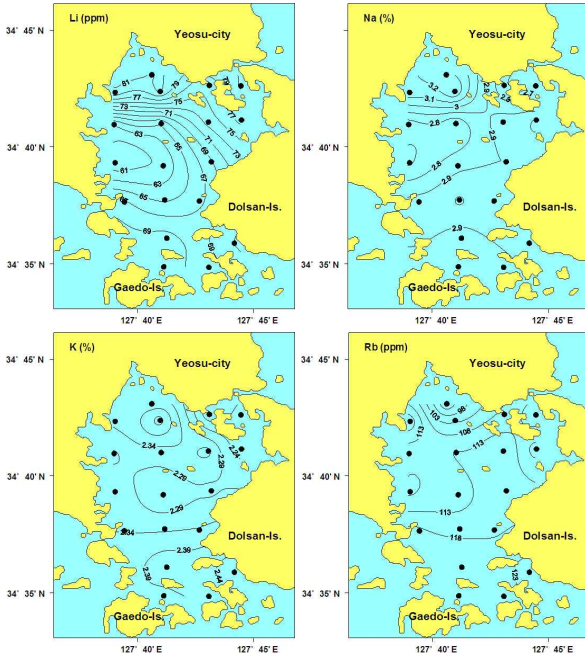


Fig. 7. Horizontal distributions of Li, Na, K and Rb in surface sediments of the Gamak Bay.

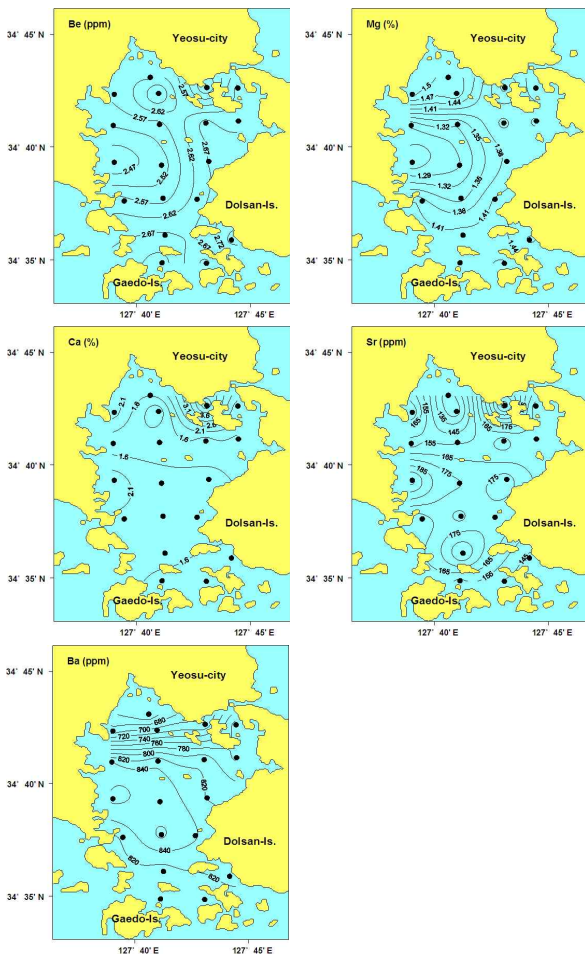


Fig. 8. Horizontal distributions of Be, Mg, Ca, Sr and Ba in surface sediments of the Gamak Bay.

해수중 생물비제한 원소(Biounlimited element)인 Rb의 가막만 표층 퇴적물 내에서 농도는 89~126 ppm(평균 114±9 ppm)의 범위로 대륙 상부 지각 112 ppm의 농도와 유사한 농도였다(Taylor and McLennan, 1995). 공간분포는 만의 가장 북측해역인 조사 정점 1에서 가장 낮고 가장 남측해역인 정점 19에서 가장 높은 농도분포를 보였으며, 북측에서 남측 및 동측 해역으로 갈수록 농도가 증가하는 경향을 보였다.

해수중 영양염류형 원소인 Be의 가막만 표층 퇴적물 내에서 농도는 2.41~2.79 ppm(평균 2.61±0.10 ppm)의 범위로 대륙 상부 지각 3.0 ppm의 농도에 비해 다소 낮지만(Taylor and McLennan, 1995), 중국 대륙 대륙붕 니질 퇴적물(Mud) 평균농도 2.5 ppm와 유사하거나 다소 높은 농도를 보였다(Zhao et al. 1995). 공간분포는 모래의 농도가 가장 높은 정점 10에서 가장 낮고 가장 남측 조사정점 19에서 가장 높은 농도로써 연구해역의 서측해역에서 동남측으로 갈수록 농도가 증가하는 방사형 분포특성을 보였다.

Mg은 스멕타이트에서 특히 농도가 높고, Al과 함께 점토광물을 구성하는 주성분원소로서 퇴적물의 세립성분과 밀접한 관련성을 보인다(Krauskopf, 1982). 본 연구해역의 Mg 농도는 1.24~1.51%(평균 1.39±0.08%)의 범위로 공간분포는 만의 북측 정점 2에서 가장 높고 모래의 농도가 가장 높은 정점 10에서 가장 낮고 이 정점을 기점으로 동측 및 남측 해역으로 갈수록 방사선형적으로 농도가 증가하는 경향을 보였다. 본 연구해역과 우리나라 주변 해역의 농도 비교는 황해에서 농도범위와 유사하였고, 우리나라 서남해 퇴적물 내에서 농도 범위에 비해 높은 농도를 보였다.

Ca은 탄산염의 분포에 따라 그 농도가 지배되는 원소로, 쇄설성광물중 사장석과 각섬석의 영향을 받는다. Na과 마찬가지로 해양으로의 유입은 하천을 통해 총량의 50~90%가 용존 상으로 이동된다(Table 5). 표층 퇴적물중 Ca의 농도는 0.69~5.04%(평균 1.86±0.87%)의 범위로 공간분포는 만의 북동측 대경도 북측 지선 정점 4에서 다른 정점에 비해 월등히 높은 농도를 보였으며, 만의 중앙부 정점들에서 대체로 낮고 만의 해안선을 따라 대체로 높은 경향을 보였다. 본 연구해역과 우리나라 주변 해역의 농도와 비교해서 황해에서 농도범위에 비해 낮고, 우리나라 서남해 퇴적물 내에서 농도 범위에 비해 높은 농도를 보였다(Table 6).

Sr은 Na 및 Ca과 마찬가지로 주로 강과 하천을 통하여 해양으로 유입되며(Table 5) 가막만의 표층 퇴적물에서 농도는 117~234 ppm(평균 164±29 ppm) 범위였다. 공간분포는 만 북측의 조사정점 3에서 가장 낮고 Ca과 마찬가지로 대경도 북측 지선 정점 4에서 가장 높은 농도를 보였다. Sr은 Ca과 이온반경이 유사하여 서로 치환하는 원소로 알려져 있으며, 본 연구에서도 두 성분 상호간에 상관계수($r=0.79$)의 유의한 정의 상관관계를 보이는 것으로 보아 Ca과 함께 탄산염 성분에서 의해서 그 분포가 지배되는 것으로 해석된다. 따라서 공간분포는 Ca과 유사하였다(Fig. 8). 본 연구해역과 우리나라 주변 해역의 농도와 비교해서 황해에서 농도범위에 비해 낮고, 서남해 퇴적물 내에서 농도 범위와 유사한 농도를 보였다(Table 6).

표층퇴적물에서 망간산화물과 결합하거나 혹은 자생 광물인 중

정석(Barite)내에 존재하는 Ba의 농도는 640~865 ppm(평균 795±64 ppm)의 범위로 대륙 지각 445 ppm 및 대륙토양 500 ppm의 평균농도(Martin and Whitfield, 1983)에 비해 다소 높은 농도를 보였다. 공간분포는 만의 가장 북측해역 조사 정점 1에서 가장 낮고 만의 중앙부 남측해역에 위치하는 조사정점 14에서 가장 높은 농도를 보였으며, Rb과 마찬가지로 만의 북측에서 남측으로 갈수록 농도가 증가하는 경향을 보였다. 본 연구해역과 우리나라 주변 해역의 농도와 비교해서 황해에서 농도범위와 우리나라 서남해 퇴적물 내에서 농도 범위와 유사하거나 다소 낮은 농도를 보였다 (Table 6).

3.5. 알칼리 및 알칼리 토금속의 분포 요인

일반적으로 두 원소간의 통계분석에서 상관계수가 큰 원소들은 대체로 그 지화학적 성분 특성과 퇴적 환경 내에서의 거동에서 서로 밀접한 관련성을 지시한다(Summerhayes, 1972). 또한, 퇴적물 입자가 작을수록 물질을 흡착할 수 있는 표면적이 증가하고, 이온교환 용량이 커져서 용존 금속들이 더욱 쉽게 퇴적물에 흡착될 수 있다. 따라서 특정 원소가 농축된 광물의 영향을 제외하고 대부분 오염물질의 분포 및 축적은 퇴적물의 입자크기에 의해 좌우된다 (Grant, 1990).

가막만 표층 퇴적물 내에서 Li, Na, K, Rb, Be, Mg, Ca, Sr, Ba의 분포를 조절하는 요인을 파악하기 위해서 Table 7에 알칼리 및 알칼리 토금속 원소들과 Al과의 상관계수 및 참고 퇴적물 내에서 Al과의 비를 나타내었으며, Fig. 9 및 Fig. 10에 Al 농도와 알칼리 및 알칼리 토금속 농도 사이의 상관관계를 나타내었다.

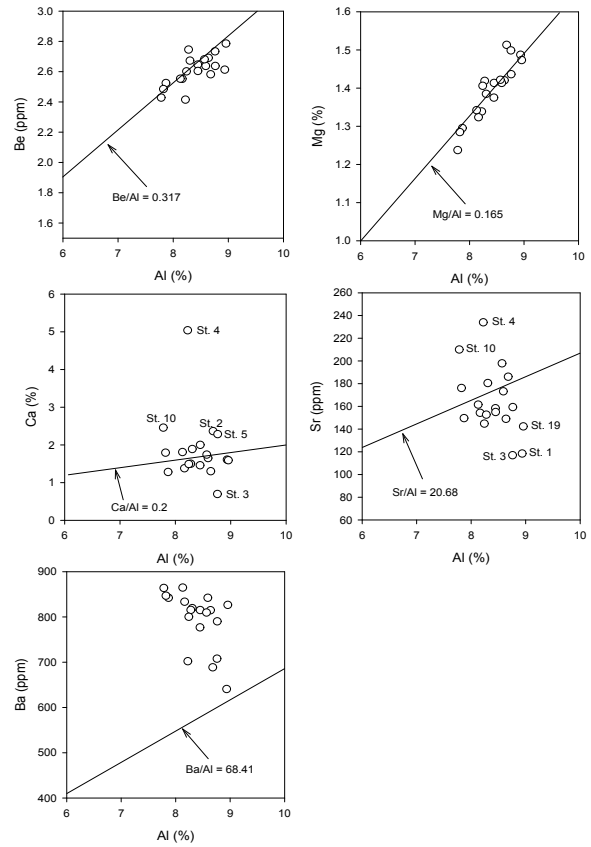


Fig. 10. Plots of Be, Mg, Ca, Sr, Ba versus Al for the surface sediments of the Gamak Bay.

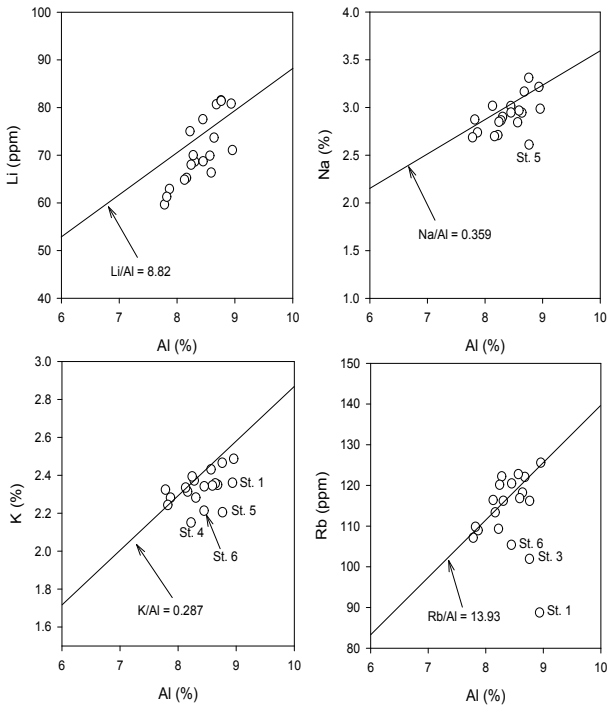


Fig. 9. Plots of Li, Na, K, Rb versus Al for the surface sediments of the Gamak Bay.

가막만 표층퇴적물에서 Li, Na, K, Rb, Be, Mg과 Al 사이의 상관관계는 $r=0.71(p<0.001)$ 이상으로 다소의 분산은 있지만 이들 성분의 분포를 결정하는 일차적인 요인은 퇴적물 입자크기 즉 석영 희석 효과(Quartz dilution effect)로 생각된다. Li/Al 비는 서태평양 갈색점토(West Pacific brown clay) 내에서의 비(Li/Al=8.82)와 매우 유사한 값을 보였다. Na과 Al 사이의 상관관계는 같은 Al 농도에 비해 Na의 농도가 낮은 정점 5를 제외하면 $r=0.73(p<0.001)$ 였으며, Na/Al 비는 상부 대륙 지각(Upper continental crust) 평균 비(Na/Al=0.359)와 매우 유사한 값을 보였다. K과 Al 사이의 상관관계는 같은 Al 농도에 비해 K의 농도가 낮은 정점 1, 4, 5 및 6을 제외하면 $r=0.79(p<0.001)$ 였으며, K/Al 비는 중국 대륙붕 Mud의 평균 비(K/Al=0.287)와 매우 유사한 값을 보였다. Rb과 Al 사이의 상관관계는 같은 Al 농도에 비해 상대적으로 Rb의 농도가 낮은 정점 1, 3 및 6의 3개 정점을 제외하면 $r=0.71(p<0.001)$ 였으며, Rb/Al 비는 상부 대륙 지각(Upper continental crust) 평균 비[Rb(ppm)/Al(%)=13.93]와 유사하였다. Be과 Al 사이의 상관관계는 $r=0.71(p<0.001)$ 였으며, Be/Al 비는 중국 대륙붕 Mud의 퇴적물 평균 비 $(Be/Al) \times 10^5 = 0.317$ 과 매우 유사한 값을 보였다. Mg과 Al 사이의 상관관계는 $r=0.92(p<0.0001)$ 였으며, 상부 대륙 지각(Upper continental crust)의 평균 비 $Mg/Al=0.165$ 와 매우 유사한 값을 보였다(Table 7).

Table 7. Comparison of correlation coefficient and ratio of alkaline and alkaline-earth elements to aluminium of the surface sediment in Gamak bay and reference sediment

Elements	Correlation coefficient to Al	Reference sediment, elements/Al ratio	References
Li	0.79	West Pacific brown clay, Li/Al=8.82	Zhao et al.(1995)
Na	0.73	Upper continental crust, Na/Al=0.359	Taylor and McLennan(1995)
K	0.79	Mud of continental shelf sediment of China, K/Al=0.287	Zhao et al.(1995)
Rb	0.71	Upper continental crust, Rb(ppm)/Al(%)=13.93	Taylor and McLennan(1995)
Be	0.71	Mud of continental shelf sediment of China, Be(ppm)/Al(%)=0.317	Zhao et al.(1995)
Mg	0.92	Upper continental crust, Mg/Al=0.165	Taylor and McLennan(1995)

이와는 반대로 Ca, Sr 및 Ba의 경우 알루미늄과 큰 관련성을 보이지 않는다. 칼슘의 경우 동일한 Al 농도에 비해 높은 농도를 보이는 정점 2, 4, 5 및 10과 동일한 Al 농도에 비해 낮은 농도를 보이는 정점 3을 제외하면 Zhao et al.(1995)이 밝힌 서태평양 갈색 점토(West Pacific brown clay)에서의 Ca/Al 비(Ca/Al=0.2)와 매우 유사한 값을 보였다. 특히 이들 정점은 굴(Oyster) 및 진주담치(Mussel) 등의 패류 양식장이 산재된 정점들로서 생물 생산과 밀접한 관련이 있는 것으로 추측되어진다. 스트론튬(Sr)의 경우 동일한 Al 농도에 비해 Sr의 농도가 높은 정점 4 및 10과 Sr의 농도가 낮은 정점 1, 3 및 19를 제외하면 Zhao et al.(1995)이 밝힌 중국 대륙붕 Mud의 평균 Sr/Al의 비(Sr/Al=20.68)와 매우 밀접한 비를 보였다. 바륨(Ba)의 경우 Taylor and McLennan(1995)에 밝힌 상부 대륙 지각(Upper continental crust)의 평균 비(Ba/Al=68.41)에 비해 전 조사 정점에서 높은 값을 보였으며, Ba과 Al의 상관관계는 다소의 분산은 있지만 상관계수 $r=-0.56(p<0.014)$ 으로 역상관관계를 보였다.

Ca, Sr 및 Ba의 경우 해양생물 및 해수기원 물질 등의 이차적인 요인에 의해서 조절 되어질 수 있다(Cho et al., 1999; Yang et al., 2003). 이 외에도 광물학적으로 탄산염광물 및 장석의 존재가 있을 경우도 높은 농도를 나타낼 수 있다. 이것은 탄산칼슘에 의한 Mg의 회석에 때문이다. Zhao et al.(1989a; Zhao et al., 1989b)은 황해의 북동쪽해역에서 압록강 기원 사질 퇴적물에서 높은 K과 Rb의 증가를 밝혀냈다. 그러나 본 연구해역에서는 위에서 언급한바와 같이 K 및 Rb의 경우 Al에 의한 석영회석직선과 대부분의 정점에서 일치하며, 몇몇 정점에서 석영회석직선보다 아래에 놓이는 것으로 보아 장석은 존재하지 않는 것으로 생각된다. 그러므로 Ca, Sr 및 Ba의 농도 분포는 K장석과는 무관한 것으로 생각된다. Turekian(1964)은 해수 중에서 $(Sr/Ca) \times 10^5$ 비 값은 202, 강은 45~82, 산호는 200, 연체동물은 37.5 그리고 심해 탄산염은 52.5로 심해탄

산염은 주로 유공충(Foraminifera) 및 코콜리드(Coccolith)로 조성되었음을 보고 하였고, Taylor and McLennan(1995)은 상부 대륙 지각 내에서 평균 농도 비 116.7임을 보고하였다. 본 연구에서 조사된 탄산염의 $(Sr/Ca) \times 10^5$ 비 값은 대부분의 정점에서 상부 대륙 지각 116.7과 유사하였으며, Sand의 농도가 8~15%인 정점 5, 10 및 15, 점토의 농도가 낮고 Silt의 농도가 70% 정도인 정점 1과 2에서 상부 대륙 지각 내에서 Sr/Ca 비와 유공충류에서 비 값 중앙에 위치하는 것으로 보아 이들 이들 성분의 혼합 형태를 보여주고 있으며, 조사 정점 4에서 비는 심해탄산염(유공충 및 코콜리드)의 비와 유사한 값을 보였다(Fig. 11).

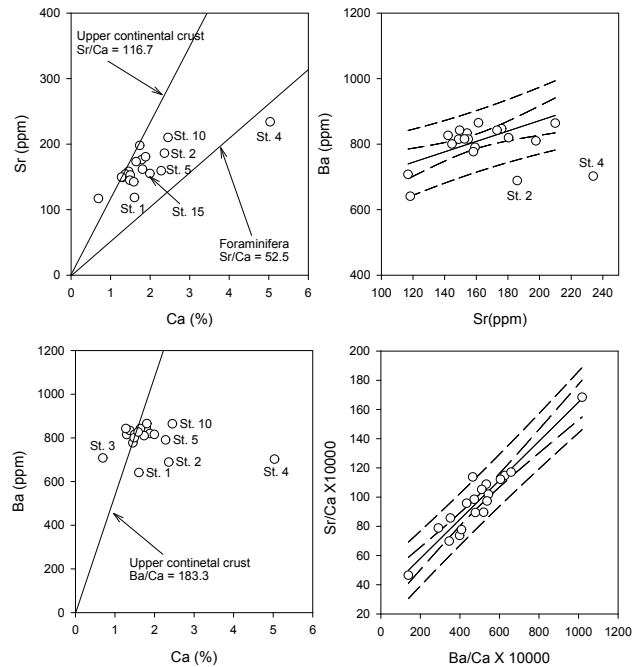


Fig. 11. Plots of Sr versus Ca, Ba versus Sr, Ba versus Ca, $Sr/Ca \times 10^5$ versus $Ba/Ca \times 10^5$ for the surface sediments of the Gamak Bay.

Ba의 경우 유기물 농도가 높은 정점들에서 농도가 높은 경향을 보였으며, 유기물의 지표인 총유기탄소, 질소, 황 및 강열감량과 상관계수 $r=-0.84(p<0.001)$ 이상의 양호한 역상관관계를 보이는 것으로 보아 자생기원 해양 중정석(Barite)의 존재 가능성이 매우 높은 것으로 생각된다. 이를 확인하기 위하여 Ba과 Sr의 상관관계를 확인한 결과 사질 농도가 높은 정점 4, 6 및 10과 강한 환원상태를 보이는 조사 정점 2를 제외하면 Ba과 Sr은 같은 생지화학적 과정에 의해서 농도 분포가 결정될 것이다.

그러므로 Sr의 경우 일부 정점을 제외하고 탄산염에 회석효과에 의해 농도 분포가 결정되는 것으로 생각됨으로 이를 확인하기 위하여 Fig. 11에 Ba과 Ca의 상관관계를 도식한 결과 사질의 농도가 높은 조사 정점 4, 5 및 10점과 만의 북측해역에 산화환원전위가 낮은 강한 환원상태를 보이는 정점 1, 2 및 3을 제외한 정점들에서 Taylor and McLennan(1995)이 밝힌 상부 대륙 지각 내에서 평균 비(Ba/Ca=183.3) 직선에 근접하는 것으로 보아 이들 정점에서 Sr과

마찬가지로 Ba도 탄산염 회석에 의한 농도분포가 일차적인 요인으로 보인다. Guo et al.(1997)에 의하면 퇴적물 내에서 산화상태 일 때 황화물 혹은 고 분자 유기물에 결합되어 분해되지 않으나 산화환원전위(Eh)가 -130mV이하로 감소하면 황화물 및 고분자유기물과 결합된 Ba은 분해되어 탄산염과 결합하게 된다는 것을 밝힌바 있다. 본 연구에서는 조사 정점 1, 2, 3 및 18에서 산화환원전위(Eh) -130 mV이하의 강한 환원상태를 보이는 것으로 보아 이들 정점 내에 존재하는 Ba은 탄산염과 결합되었을 것으로 생각된다. 이를 파악하기 위해서 Fig. 11에 Sr/Ca 및 Ba/Ca의 상관관계는 나타내었으며, 이들 두 비의 상관관계는 매우 유의한 정의 상관성을 보였다($r=0.95$, $p<0.0001$). 따라서 본 연구해역의 표층퇴적물 내에서 Ba과 Sr의 농도는 탄산염 회석 및 퇴적물 초기속성과정에 의한 산화환원의 영향에 의해서 농도가 조절되어진다고 생각된다.

4. 결론

2010년 4월 가막만 전역의 19개 정점에서 0~3cm 사이의 표층퇴적물을 채취하여 퇴적물의 입도분포, 유기물 농도, 알칼리 원소(Li, Na, K, Rb) 및 알칼리 토금속(Be, Mg, Ca, Sr, Ba)원소의 분포특성을 파악하였다.

조사해역의 퇴적물 유형은 만의 북부해역(정점 1 및 2)과 중앙부(정점 8) Silt가 분포하였고, 만의 중앙동부 가장자리 해역에서 Sany silt(정점 10)였고 그 외 정점들에서 Mud를 나타내었다. Chlorophyll a, TOC, TN, TS 및 LOI의 경우만의 북부해역과 어류양식장이 산재되어 있는 남측해역에서 높은 농도분포를 보였으며, 만의 중앙부에서 낮은 농도를 보였다. 산화환원전위의 경우 이와는 반대로 만의 중앙부에서 대체로 (+)값으로 산화상태를 나타내었으며, 만의 북부해역과 남측해역에서 (-)상태로 환원환경 특성을 보였다. 또한, 대분의 정점들에서 C/N 원자 비로 보아 6~12 사이의 자생기원 유기물질 특성을 보였으나, 육상, 도서 가장자리 부근 및 어류양식장 정점들 6, 10 및 16에서 C/N의 원자비가 12를 초과하는 육상기원 유기물기원을 보였으며, 어항 및 만의 중앙부인 조사 정점 4와 12에서 C/N의 원자비가 6 이하로 박테리아성 기원 유기물 분포 특성을 보였다.

알칼리 원소 중 Li, Na, K 및 Rb의 경우 대부분의 정점에서 석영회석 효과에 의해 일차적인 농도 분포가 결정되며, Rb의 경우 환원환경이 강한 정점에서 석영회석 직선 아래에 분포하는 특성을 보였다(정점 1, 5 및 6).

알칼리 토금속 원소 중 $(Be/Al) \times 10^5 = 0.317$ 및 $Mg/Al = 0.165$ 로 각각 중국 대륙붕 퇴적물에서의 비 및 상부 대륙 지각 비와 유사한 값으로 전 조사 정점에서 석영 회석 효과 의한 분포특성을 보였다. Ca 및 Sr의 경우 사질의 농도가 높은 정점들과 환원상태인 정점들을 제외하면 각각 서태평양 갈색점토 및 중국 대륙붕 퇴적물 내에서 비와 유사한 것으로 보아 이들 성분도 석영 회석 효과에 의해서 일차적으로 농도가 분포되는 것으로 보이고, Ba의 경우는 석영 회석 효과와는 무관하며 유기물과 유의한 역의 상관성을 보이는 것으로 보아 자생기원 중정석(Barite)이 존재하는 것으로 보여지며,

이들 원소들의 분포를 결정하는 이차적 요인으로는 Sr/Ca 및 Ba/Ca의 상관관계가 매우 유의한 정의상관성을 보이는 것으로 보아 탄산염 회석 효과(Carbonate dilution effect)와 산화환원전위에 의한 이들 성분의 화학적 결합에 의한 영향에 의해서 농도분포가 결정되는 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 국립수산과학원 R&D과제인 남해 해양환경연구 과제(RP-2012-ME-013)의 일환으로 수행된 것으로 현장조사에 적극 협조해 주신 시험조사선 탐구 11호 직원께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 국토해양부(2010), 해양환경공정시험기준, pp. 201-282.
- [2] 김윤실, 윤호섭, 박일웅, 이우범, 주승용, 최상덕(2008), 가막만의 수질환경과 이매패류(Bivalvia)군집의 연간변동. 한국환경생물학회지, 제26권, 제4호, pp. 279-291.
- [3] 김정배, 이상용, 유준, 최양호, 정창수, 이필용(2006), 가막만 빈산소 수괴의 특성, 한국해양환경공학회지, 제9권, 제4호, pp. 216-224.
- [4] 김정배, 박정임, 정춘구, 최우정, 이원찬, 이용화(2010), 가막만 빈산소 수괴 소멸기의 물리화학적 특성, 한국환경안전학회지, 제16권, 제3호, pp. 241-248.
- [5] 박영철, 최광식(2002), 가막만 양식 참굴의 성장과 환경용량 추정에 관한 연구, 한국환경생물학회지, 제20권, 제4호, pp. 378-385.
- [6] 박영철, 양한섭, 이필용, 김평중(1995), 겨울철 부산항 주변해역의 수질과 표층퇴적물 환경특성, 한국수산학회지, 제28권, 제5호, pp. 577-588.
- [7] 오현택, 이석모, 이원찬, 정래홍, 홍석진, 김남국, Charles Tilburg(2008), 시스템 생태학적 접근법에 의한 가막만 패류생산의 지속성 평가 3. 가막만 패류 양식업의 에너지 모델링, 한국환경과학회지, 제17권, 제9호, pp. 969-980.
- [8] 여수시(2000), 여수시 통계 자료집. pp. 127-132.
- [9] 이규형, 조규대(1990), 가막만의 수온과 염분분포, 한국수산학회지, 제23권, pp. 25-39.
- [10] 이병돈, 강형구, 강용주(1991), 굴 양식장 수역의 기초생산연구, 한국수산학회지, 제24권, 제1호, pp. 39-51.
- [11] 이연규, 황진연, 정규귀(1995), 가막만 표층퇴적물 특성 및 점토 광물, 한국지구과학학회지, 제16권, 제6호, pp. 477-488.
- [12] 전라남도(1982), 전남 동부 연안 양식어장 기초환경 및 저서패류에 관한 조사, pp. 7-39.
- [13] Ackerman, F., M. Bergmann and G. Schleichert(1983), Monitoring heavy metals in coastal and estuarine sediments a question of grain size: $<20 \mu\text{m}$ versus $<60 \mu\text{m}$. Environmental Technology and Letters, Vol. 4, pp. 317-328.

- [14] Bertine, K. and E. Goldberg(1977), History of heavy metal pollution in southern California coastal zone-*Reprise*. *Environmental Science and Technology*, Vol. 11, pp. 297-299.
- [15] Bowen, H. J. M(1979), *Environmental Chemistry of the Elements*. Academic Press, London, p. 333.
- [16] Bruland, K. W., K. Bertine, M. Koide and E. Goldberg(1974), History of metal pollution in the Southern California coastal zone. *Environmental Science and Technology*, Vol. 8, pp. 425-432.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.*, Vol. 159, pp. 111-129.
- [20] Choi, M. G., H. B. Moon, S. S. Kim and J. S. Park(2005), Evaluation of sewage pollution by coprostanol in the sediments from Jinhae Bay, Korea. *J. Kor. Fish. Soc.*, Vol. 38, No. 2, pp. 118-128.
- [21] Daskalakis, K. and T. O'Conner(1995), Normalization and elemental sediment contamination in the coastal United States. *Environmental Science and Technology*, Vol. 29, pp. 470-477.
- [22] Ebbing D. D and M. S. Wrighton(1990), *General Chemistry*, Houghton Mifflin Boston, p. 1035.
- [23] Emelyanov, E. M. and K. M. Shimkus(1986), *Geochemistry and Sedimentology of the Mediterranean Sea*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, p. 553
- [24] Finney, B. and C. Huh(1989), History of metal pollution in the Southern California Bight: An update. *Environmental Science and Technology*, Vol. 23, pp. 294-303.
- [25] Folk, R. L and W. C. Ward(1957), Vrazos River bar. A study in the significance of grain size parameters. *J. Sed. Pet.*, pp. 3-26.
- [26] Folk, R. L.(1968), *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphills's, Austin, pp. 170-184.
- [27] Greaves, C. and H. Schwartz(1952), *The chemical utilization of wood*. Department of Resource Development, Forest Branch, Ottawa, p. 28.
- [28] Goldberg, E., J. Griffin, V. Hodge, M. Koide and H. Windom(1979), Pollution history of the Savannah River Estuary, *Environmental Science and Technology*, Vol. 13, pp. 588-594.
- [29] Grant, A.(1990), Multivariate statistical analyses of sediment analyses of sediment geochemistry. *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 21, pp. 297-299.
- [30] Guo, T., R. D. Delaune 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.
- [31] Hanson, P., D. Evans, D. Colby and V. Zdanowics(1993), Assessment of elemental contamination in estuarine and coastal environments based on geochemical and statistical modeling of sediments. *Marine Environ. Res.*, Vol. 36, pp. 237-266.
- [32] Holligan, S. G., Montoya, J. L. Nevins and J. J. McCarthy (1984), Vertical distribution and partitioning of organic carbon in mixed, frontal and stratified waters of the English Channel. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 14, pp. 111-127.
- [33] Horowitz, A. and K. Elrick(1987), The relation of stream sediment surface area, grain size, and trace element chemistry. *Appl. Geochem.*, Vol. 2, pp. 437-445.
- [34] Hyun, S., J. W. Choi, J. S. Choi and T. Lee(2003a), Surface sediment characteristics and benthic environments in the mouth of Jinhae Bay, Korea. *J. Kor. Fish. Soc.*, Vol 36, No. 6, pp. 700-707.
- [35] Hyun, S., T. Lee, J. S. Choi, D. L. Choi and H. J. Woo (2003b), 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., T. W. H. Paeng and T. Lee(2004), Characteristics of surficial sediment and benthic environments based on geochemical data in Gwangyang Bay, Korea. *Kor. J. Environ. Biol.*, Vol. 22, pp. 93-102.
- [37] Ingram, R. L.(1971). Sieve analysis. In Carver, R. E.(ed.), *Procedures in sedimentary petrology*, Wiley-Inter Science, New York, pp. 49-67.
- [38] Kang, C. K., P. Y. Lee, J. S. Park and P. J. Kim(1993), On the distribution of organic matter in the nearshore surface sediment of Korea. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, Vol. 26, No. 6, pp. 557-566.
- [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] Kao, S. J., F. J. Lin and K. K. Liu(2003), Organic carbon and nitrogen contents and their isotopic composition in surficial sediments from the East China Sea shelf and the southern Okinawa Trough. *Deep-Sea Research II*, Vol. 50, pp. 1203-1217.
- [41] Kim, G. B., H. S. Yang and Y. Kodama(1998), Distributions of transition elements in the surface sediments of the Yellow Sea. *Cont. Shelf Res.*, Vol. 153, No. 1. pp. 1-10.
- [42] Kim, G. B., H. S. Yang and T. M. Church(1999), Geochemistry of alkaline earth elements(Mg, Ca, Sr, Ba) in the surface sediments of the Yellow Sea. *Chem. Geol*, Vol. 153, pp. 1-10.
- [43] Kruaskopf, K. B.(1982), *Introduction to Geochemistry*. McGraw-Hill, p. 617.
- [44] Kukal, Z.(1971), *Geology of recent sediments*. Academic Press, New York, p. 490.

- [45] Lee, S. H. and J. A. Fuhrman(1987), Relationship between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton, *Applies and Environmental Microbiology*, Vol. 53, pp. 1298-1303.
- [46] Lim, H. S. and J. S. Hong(1994), Ecology of the macrozoobenthos in Chinhae Bay, Korea. 1. Benthic environment. *J. Kor. Fish. Soc.*, Vol. 27, No. 2, pp. 200-214.
- [47] Loring, D.(1990), Lithium A new approach for granulometric normalization of trace metal data. *Marine Chemistry*, Vol. 29, pp. 155-168.
- [48] Luoma, S.(1990), Processes affecting metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments. In: Furness, R. and Rainbow, P. Editors(1990), *Heavy metals in the marine environment* CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 51-66.
- [49] Martin, J. M. and M. Meybeck(1979), Elemental mass balance of material carried by major world rivers. *Mar. Chem.*, Vol. 7, pp. 173-206.
- [50] 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 E.D. Goldberg, New York, Plenum, pp. 256-296.
- [51] Morse, J., B. Presley, R. Taylor, G. Benoit and P. Santschi(1993), Trace metal chemistry of Galveston Bay: Water, sediments and biota. *Marine Environmental Research*, Vol. 36, No. 1, pp. 1-37.
- [52] Muller, P. J.(1977), C/N ratio in Pacific deep sea sediments; effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays. *Geochim. Cosmochim Acta*, Vol. 41, pp. 765-776.
- [53] Olmez, I, E. Sholkovitz, D. Hermann and R. Eganhouse(1991), Rare earth elements in sediments off southern California: A new anthropogenic indicator. *Environmental Science and Technology*, Vol. 25, pp. 310-316.
- [54] Pocklington R. and J. D. Leonard(1979), Terrigenous Organic Matter in Sediments of the St. Lawrence Estuary and the Saguenay Fjord. *J. FISH. RES.*, Vol. 30, pp. 1250-1255.
- [55] Romankevich, E. A.(1984), *Geochemistry of Organic Matter in the Ocean*. Springer Verlag, Berlin Germany, pp. 111-150.
- [56] Schropp, S., G. Lewis, H. Windom, J. Ryan, F. Caldner and L. Burney(1990), Interpretation of metal concentrations in estuarine sediments of Florida using aluminum as a reference element. *Estuaries*, Vol. 13, pp. 227-235.
- [57] Stein, R.(1991), *Accumulation of Organic Carbon in Marine Sediments*. Springer Verlag, Berlin, pp. 1-217.
- [58] Stull, J., R. Baird and T. Heeson(1986), Marine sediment core profiles of trace constituents offshore a deep wastewater outfall. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, Vol. 58, pp. 985-991.
- [59] Summerhayes, C. P.(1972), Geochemistry of continental margin sediments from northwest Africa. *Chemical Geology*, Vol. 10, pp. 137-156.
- [60] Taylor, S. R. and S. M. Mclennan(1995), The geochemical evolution of the continental crust. *Rev. Geophys.*, Vol. 33, pp. 241-265.
- [61] Trefry, J., S. Metz, R. Trocine and T. Nelsen(1985), A decline in lead transport by the Mississippi River. *Science*, Vol. 230, pp. 439-441.
- [62] Turekian, K. and K. Wedepohl(1961), Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 72, pp. 175-192.
- [63] Turekian, K. K.(1964), The marine geochemistry of strontium. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, Vol. 28, pp. 1479-1496.
- [64] 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.
- [65] Word, J. and A. Mearns(1979), 60-meter control survey off southern California (SCCWRP Technical Report No.133). El Segundo, CA: Southern California Coastal Water Research Project. pp. 41-56.
- [66] Yang, S. Y., H. S. Jung, D. I. Lim and C. X. Li(2003), A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea. *Earth-Science Review*, Vol. 63, pp. 93-120.
- [67] Youn, J. S. and G. W. Go(1987), Sedimentological characteristics of the surface sediments in the Southern Sea off Cheju Island, Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.* Vol. 22, No. 3, pp. 130-142.
- [68] Zhao, Y., F. Li and G. Han(1989a), Chemical differences among various sediments of the Huanghai Sea Yellow Sea. In *Developments in Geoscience Chinese Academy of Science, Contribution to 28th International Geological Congress*, Washington, DC, USA. Science Press, Beijing, China, pp. 299-307.
- [69] Zhao, Y., L. He and Y. Chen(1989b), On regional distribution patterns of elements in sediments of the Haunghai Sea. *Marine Science(China)*, Vol 1, No. pp. 15-22.
- [70] Zhao, Y. Y., and M. C. Yan(1994), Geochemistry of Sediments of the China Shelf Sea. Science Press, Beijing. pp. 15-130.
- [71] 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 : 2011년 12월 14일

원고수정일 : 2012년 01월 30일 (1차)

: 2012년 02월 09일 (2차)

게재확정일 : 2012년 02월 23일