

한국과 중국의 강 퇴적물의 주성분 원소 함량 특성: 황해 니질 퇴적물의 기원지 연구를 위한 잠재적 추적자

임동일¹ · 신인현^{2,*} · 정희수³

¹한국해양연구원 남해연구소 남해특성연구본부, 656-830 경상남도 거제시 장목면 장목리 391

²조선대학교 사범대학 지구과학교육학과, 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

³한국해양연구원 한중해양과학공동연구소, 266061, 중국 청도시 고과원 선하령로 6호

Major Elemental Compositions of Korean and Chinese River Sediments: Potential Tracers for the Discrimination of Sediment Provenance in the Yellow Sea

Dhong-Il Lim¹, In-Hyun Shin², and Hoi-Soo Jung³

¹South Sea Research Institute, Korea Ocean Research and Development Institute,
391 Jangmok-ri Jangmok-myun, Geoje 656-830, Korea

²Department of Earth Sciences, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

³Korea-China Ocean Research Center, Qingdao 266061, China

Abstract: The Yellow and East China seas received a vast amount of sediment ($>10^9$ ton/yr), which comes mainly from the Changjiang and Huanghe rivers of China and the Korean rivers. However, there are still no direct sedimentological-geochemical indicators, which can distinguish these two end-members (Korean and Chinese river sources) in these seas. The purpose of this study is to provide the potential geochemical-tracers enabling these river materials to be identified within the sediment load of the Yellow and East China seas. The compositions of major elements (Al, Fe, Mg, K, Ca, Na, and Ti) of Chinese and Korean river sediments were analyzed. To minimize the grain-size effect, furthermore, bulk sediments were separated into two groups, silt (60-20 μm) and clay (<20 μm) fractions, and samples of each fraction were analyzed for major and strontium isotope ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) compositions. In this study, Fe/Al and Mg/Al ratios in bulk sediment samples, using a new Al-normalization procedure, are suggested as an excellent tool for distinguishing the source of sediments in the Yellow and East China seas. This result is clearly supported by the concentrations of these elements in silt and clay fraction samples. In silt fraction samples, Korean river sediments have much higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio (0.7229-0.7253) than Chinese river sediments (0.7169-0.7189), which suggests the distribution pattern of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios as a new tracer to discriminate the provenance of shelf sediments in the Yellow and East China seas. On the basis of these geochemical tracers, clay fractions of southeastern Yellow Sea mud (SEYSM) patch may be a mixture of two sediments originated from Korea and China. In contrast, the geochemical compositions of silt fractions are very close to that of Korea river sediments, which indicates that the silty sediments of SEYSM are mainly originated from Korean rivers.

Keywords: Geochemical tracers, Korean and Chinese river sediments, Yellow and East China seas

요약: 황해와 북동중국해에는 중국의 황하와 양쯔강 그리고 한국의 강들로부터 많은 양의 부유물질이 공급되어 대륙붕 해역에 여러 개의 니질 퇴적체가 발달하고 있으나, 이들 퇴적체에서 두 기원을 설명할 수 있는 퇴적-지화학적 요인은 아직까지 명확하게 제시되고 있지 않다. 본 논문에서는 한국과 중국 기원 강 퇴적물의 주성분 원소의 함량 특성을 비교·연구하고, 그 결과를 토대로 황해와 북동중국해 퇴적물에 적용 가능한 기원지 추적자를 제시하였다. 본 연구를 위해 총 102개의 강과 연안 퇴적물에 대한 주성분 원소(Al, Fe, Mg, K, Ca, Na, Ti)들의 함량을 유도결합플라즈마 분석

*Corresponding author: ihshin@chosun.ac.kr

Tel: 82-62-230-7335

Fax: 82-62-232-8834

기를 이용하여 분석하였으며, 이와 함께 입도효과를 최소화하기 위해 원시료를 실트(60~20 µm)와 점토 구간(<20 µm)으로 분리하여 주성분 원소 함량과 스트론튬 동위원소 비($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)를 분석하였다. 연구결과, 새로운 방법의 입도보정을 통한 Fe/Al과 Mg/Al 함량 비는 매우 유용한 잠재적 추적자로 제시되며, 이러한 결과는 입자 분리된 실트와 점토 퇴적물에서 더욱 뚜렷하다. 또한 실트 구간의 퇴적물에서 한국 기원의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 0.7229~0.7253(평균 0.7243) 범위로 중국 기원 퇴적물(0.7169~0.7189, 평균 0.7179)과 뚜렷한 차이를 보여, 황해와 북동중국해에서 한국과 중국 기원의 퇴적물을 구분할 수 있는 중요한 지화학적 성분으로 평가된다. 이러한 잠재적 추적자들에 근거할 때, 한국 서남해에 발달하고 있는 니질 퇴적대의 전퇴적물은 한국과 중국의 혼합 기원으로 해석되나, 실트와 점토 구간의 퇴적물로 나누어 볼 때 그 기원이 각각 다르게 나타났다. 즉, 점토 퇴적물은 한국과 중국의 혼합 기원으로, 실트 퇴적물은 한국 기원이 우세한 것으로 해석된다.

주요어: 지화학적 추적자, 한국 및 중국 강 퇴적물, 황해와 동중국해

서 론

한반도와 중국 대륙 사이에 위치한 황해와 북동중국해는 평균 수심 약 60 m의 반폐쇄형 연해(epicontinental sea)로 주변 대륙의 강, 하천 그리고 대기를 통해 많은 양의 세립 퇴적물이 유입되어 쌓이고 있으며, 지난 100년간의 연간 퇴적물(sediment accumulation rate)은 평균 1~5 mm에 달한다(Lim et al., 2007). 황해와 북동중국해로 유입되는 퇴적물의 대부분은 중국의 양쯔강(Changjinag River)과 황하(Huanghe)로부터 공급되고 있는 것으로 해석되며(Schubel et al., 1984; Milliman et al., 1985; Alexander et al., 1991), 그 양은 약 10^9 ton/yr 이상에 달한다(Milliman and Meade, 1983). 이와 함께 한반도의 한강(Han River), 금강(Geum River), 영산강(Youngsan River) 등도 상당량의 퇴적물($1\sim4 \times 10^7$ ton/yr, Lim et al., 2007)을 황해에 공급하고 있는 것으로 평가되고 있다. 이들 세립 퇴적물은 대부분 중국과 한국의 연안, 황해 중앙부, 그리고 제주도 남서쪽의 북동중국해 대륙붕에 집중적으로 퇴적되어 몇 개의 특징적인 니질대(muddy patch)를 형성하고 있다(Fig. 1). 일반적으로 중국 연안(Chinese coastal mud)과 제주도 남서쪽의 동중국해 대륙붕에 형성된 니질 퇴적물(Southwestern Cheju Island Mud, SWCIM)은 대부분 중국 대륙 기원의 황하와 양쯔강으로부터 공급된 것으로 평가되고 있으나, 황해 중앙부의 니질대(Central Yellow Sea Mud, CYSM)와 한국 서해 연안에 광범위하게 발달하고 있는 니질대(Southeastern Yellow Sea Mud, SEYSM) 퇴적물의 기원은 연구에 따라 그 결과들이 상이하다(Yang et al., 2003).

초기의 연구에서 Park and Khim (1992)은 황해 퇴적물의 기원지를 구분할 수 있는 추적자로서 스멕

타이트(smectite) 함량을 제시하였으며, 이를 근거로 황해 중앙부 니질대(CYSM) 퇴적물은 중국의 황하 기원으로, 한국 서남해 니질대(SEYSM) 퇴적물은 금강(Geum River) 기원으로 해석하였다. Cho et al. (1999)은 황해에서 퇴적물의 기원지를 구분할 수 있는 지화학적 추적자로 바나듐(V)의 함량을 제시하였으며, 중국의 황하와 양쯔강 퇴적물이 황해 중앙의 니질대 형성에 중요한 공급원이 되나 한반도 주변 연안까지는 그 영향을 미치지 못한 것으로 해석하였다. 이외에도, Mn/Al 비, (Mn + Pb)/(Cu + Ni) 비, 방해석(calcite), 탄산염(CaCO_3) 함량, 회토류 원소 등 다양한 광물·지화학적 추적자 등이 보고되었다(Alexander et al., 1991; Lee et al., 1992; 정희수 외, 2006). 그러나 최근 Yang et al.(2003)은 황해와 북동중국해 기원지 연구와 관련된 국내외 기존 논문을 종합·분석한 결과, 기존 연구에서 제시된 여러 다양한 추적자(스멕타이트, 지화학적 성분 특성 등)들이 황해 전 해역에는 적용될 수 없거나 그 결과가 연구자에 따라 서로 일치하지 않는 것으로 보고하였다. 또한 중국과 한국의 주요 강에서 유출되는 퇴적물 양과 확산 패턴 그리고 주요 퇴적 분지에서의 퇴적 속도와 연 퇴적량 등 많은 중요한 지질해양학적 현상들조차도 아직 밝혀지지 않았거나 오차범위가 매우 큰 것으로 평가되고 있다(Park et al., 2000; Lee and Chu, 2001; Lim et al., 2007). 그 결과 Park et al. (2000)과 Lim et al.(2007)은 한국 연안의 광역 니질 퇴적물(특히 SEYSM)을 한국과 중국 기원의 혼합 퇴적체로, 반면 Lee and Chough(1989) 그리고 Lee and Chu(2001)는 한국의 금강 기원으로 해석하는 상반된 견해를 보인다. 아직까지 황해와 북동중국해의 니질 퇴적물에 대한 전반적인 기원지 해석에 대해서는 연구자들 마다 상이한 결과와 해석이 존재하는 것으로

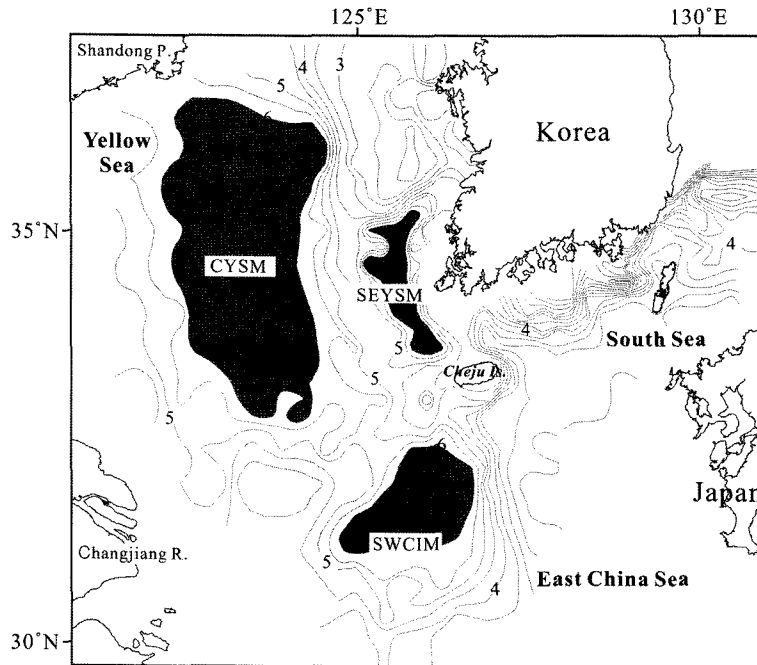


Fig. 1. Mean grain size (ϕ) distribution of surface sediments in the Yellow and East China Seas (After Lim et al., 2007). Note the three different mud patches (shading area). CYSM: central Yellow Sea mud, SEYSM: southeastern Yellow Sea mud, SWCIM: southwestern Cheju Island mud. Contour interval is 0.5 ϕ .

사료된다. 이러한 원인은 크게 황해와 북동중국해의 복잡한 해류순환 시스템 그리고 퇴적물의 주요 공급지로 판단되는 중국과 한국의 강 퇴적물에 대한 퇴적-지화학적 자료와 이해 부족 때문으로 사료된다. 따라서 황해와 북동중국해 전 해역의 퇴적물 기원지 연구에 적용될 수 있는 광물 및 지화학적 추적자 개발을 위해서는 공급지로 추정되는 중국의 황해와 양쯔강 그리고 한국의 주요 강(한강, 금강, 영산강 등) 퇴적물에 대한 체계적이고 종합적인 연구가 반드시 필요하다. 본 연구에서는 이들 주요 강 퇴적물에 대한 지화학적 성분 특성을 파악하고, 이를 토대로 황해와 북동중국해 니질 퇴적물의 기원지 구분에 이용될 수 있는 몇 가지의 가능성 있는 지화학적 추적자 (potential geochemical tracer)를 제시하고, 이를 토대로 한국 서남해 연안에 광범위하게 발달하고 있는 니질대(SEYSM) 퇴적물의 기원을 밝히고자 한다.

시료채취 및 분석방법

본 연구를 위해 황해와 북동중국해 대륙붕 퇴적물의 주요 공급원으로 판단되는 중국 대륙(황하, 양쯔

강)과 한반도(한강, 금강, 영산강)의 주요 강과 하구 그리고 한국 서남해 연안에 발달하고 있는 니질대(SEYSM)로부터 총 102개의 표층 퇴적물을 채취하여, 주성분 원소(Si, Al, Fe, K, Na, Ca, Mg, Ti)의 함량을 분석하였다. 원소의 함량은 테플론 용기(Teflon bomb)에서 약 0.2 g의 분말화된 시료를 혼합산(HF-HNO₃-HClO₄)을 사용하여 2~3회 반복 반응시켜 용액화한 후, ICP-AES를 이용하여 분석하였다. 또한 본 연구에서는 원소들의 함량에 대한 입도의 영향을 최소화하기 총 102개의 시료중 39개의 시료를 대상으로 60 μ m과 20 μ m 나일론(nylon) 체(sieve)를 이용하여 60~20 μ m의 실트 구간과 20 μ m 이하의 점토 구간을 따로 분리한 후, 주성분 원소(major elements)의 함량을 위와 같은 방법으로 분석하였다. 분석 자료의 신뢰도 평가하기 위해 표준물질(MAG-1)이 함께 분석 되었으며, 그 결과 Ti을 제외한 모든 원소 함량의 분석은 95% 이상의 신뢰도를 갖는다 (Table 1). 이와 함께 실트 구간의 퇴적물에 대해 스트론튬 동위원소(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) 비가 측정되었다. 탄산염 기원의 스트론튬 성분을 제거하기 위해 시료를 1 N 염산으로 전처리한 후(Asahara et al., 1995), 용액화

Table 1. Analyses of standard reference material (MAG-1) for the major element concentrations

Elements	Recommended	Measured (n = 17)	2σ	α
SiO ₂ (%)	50.40	50.45	0.29	1
Al ₂ O ₃ (%)	16.40	16.12	0.08	2
Fe ₂ O ₃ (%)	6.80	6.99	0.08	3
MgO (%)	3.00	3.07	0.06	2
CaO (%)	1.37	1.37	0.03	1
Na ₂ O (%)	3.83	3.85	0.18	1
K ₂ O (%)	3.55	3.68	0.16	4
TiO ₂ (%)	0.75	0.69	0.06	8

σ is the standard deviation of measured values; α is accuracy estimated as $\text{accuracy} = 1 - (\text{Element}_{\text{measured}} \text{ in standard} / \text{Element}_{\text{recommended for standard}}) \times 100$.

하여 한국기초과학연구원의 TIMS를 이용하여 분석하였으며, 반복 측정된 표준시료 NBS987의 동위원소비는 0.710245 ± 0.000003 (n=30, 2σ standard error)이었다.

결과 및 토의

한국과 중국 기원 퇴적물의 주성분 원소들의 함량 특성

본 연구에서 분석된 중국의 황하와 양쯔강 그리고 한국의 한강, 금강, 영산강 퇴적물의 주성분 원소들의 함량을 Table 2에 제시하였다. 황하와 양쯔강 그리고 이들 하구역에서 채취한 시료를 중국 기원 퇴적물(Chinese river origin)로, 한국의 한강, 금강, 영산강과 이들의 하구역에서 채취한 시료를 한국 기원 퇴적물(Korean river origin)로 간주하였다. 중국 기원 퇴적물의 주성분 원소의 함량은 알루미늄(Al₂O₃) 9.48~16.94(평균 11.87%), 철(Fe₂O₃) 2.83~7.60%(평균 4.45%), 마그네슘(MgO) 1.33~3.23%(평균 2.24%), 칼슘(CaO) 3.53~8.82%(평균 5.49%), 나트륨(NaO) 0.88~3.04%(평균 2.10%), 칼륨(K₂O) 1.98~3.19%(평균 2.50%), 티타늄(TiO₂) 0.46~1.03%(평균 0.67%) 범위이다. 한국 기원 퇴적물의 주성분 원소의 함량은 알루미늄(Al₂O₃) 12.20~19.65(평균 16.22%), 철(Fe₂O₃) 3.31~7.05%(평균 5.26%), 마그네슘(MgO) 1.17~2.23%(평균 1.76%), 칼슘(CaO) 0.36~1.50%(평균 0.87%), 나트륨(NaO) 0.99~2.49%(평균 1.67%), 칼륨(K₂O) 2.73~3.36%(평균 3.03%), 티타늄(TiO₂) 0.53~0.95%(평균 0.70%) 범위이다. 이들 주요 강 퇴적물의 평균

함량을 비교하면, 알루미늄, 철, 칼륨, 티타늄은 한국 기원 퇴적물에서 높고, 마그네슘, 칼슘, 나트륨은 중국 기원 퇴적물에서 높다(Fig. 2). 특히, 중국 기원 퇴적물에서 한국 기원 퇴적물과 비교하여 알루미늄 함량이 낮음에도 불구하고 상대적으로 높은 마그네슘과 칼슘의 함량은 이례적이다.

일반적으로 두 원소간의 상관분석에서 상관계수(correlation coefficient)가 큰 원소들은 대체로 그 지화학적 성분 특성과 퇴적 환경 내에서의 거동 방식 등에서 서로 밀접한 관련성을 지시한다(Summerhayes, 1972). 따라서 이러한 상관계수 분석은 원소들의 함량과 분포를 조절하는 일차적 요인을 해석하는데 유용하다. Table 3에 제시된 상관계수 분석에 의하면, 한국과 중국 기원 퇴적물 모두, 원소들의 함량은 알루미늄 함량 즉 퇴적물 입도(grain size)와 밀접한 관련성을 나타낸다. 이것은 철, 마그네슘, 티타늄의 함량이 퇴적물의 입자 크기가 세립 할수록 증가하거나, 조립 할수록 감소함을 의미하며, 나트륨의 함량은 이와 상반된 경향을 보인다. 이는 대부분의 지화학적 성분 함량이 퇴적물의 세립 성분(특히, 점토광물)의 영향을 받고 있음을 의미하며, 결과적으로 알루미늄-규산염 광물(alumino-silicate mineral) 요인으로 해석된다(Cho et al., 1999). 한편 칼슘의 경우, 한국의 강 퇴적물은 일차적으로 입도에 의해 조절되는 반면, 중국 기원 퇴적물에서는 입도와 큰 관련성을 보이지 않는다. 이와 같은 차이는 칼슘이 세립질 점토 함량에 의해 조절되는 한국 기원 퇴적물과 다르게, 중국 기원 퇴적물은 황하와 양쯔강의 주요분지를 구성하는 탄산염암과 황토(loess) 층으로부터 공급되어 그 기원이 서로 다르기 때문에 판단된다. 위와 같이 두 대륙의 주요 강 퇴적물의 원소 함량이 일차적으로 입도에 의해 조절되기 때문에 이들의 상대적 함량을 황해와 북동중국해 대륙붕 퇴적물 기원지 구분에 직접 사용하는 것은 잘못된 결과와 해석을 도출할 수 있다. 한편, 칼슘의 경우 그 기원이 서로 다르고, 함량 또한 중국 기원 퇴적물에서 상대적으로 높은 특성을 보여, 가능성 있는 기원지 추적자로 제시될 수 있다(e.g., Milliman et al., 1985; Alexander et al., 1991). 그러나 칼슘, 스트론튬, 나트륨 등의 원소들의 함량은 입도 이외에도 해양 자체에서 공급되는 해양 생물(biogenic carbonate debris) 및 해수 기원 물질 등의 이차적 요인에 의해 조절될 수 있다(Cho et al., 1999; Yang et al., 2003). 결과적으로 주요 강 퇴적

Table 2. Comparison of elemental concentrations between the Chinese and Korean river sediments

Rivers	Sample no.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Rivers	Sample no.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
		(%)										(%)							
Chinese river sediments	HH1	66.97	10.35	3.33	1.82	5.17	2.75	2.30	0.55	Chinese river sediments	CJR10	58.45	12.19	5.72	2.69	4.68	1.19	3.14	0.78
	HH2	65.39	10.92	3.58	1.96	5.60	2.50	2.41	0.56		CJR11	60.25	12.72	5.96	2.67	4.84	1.27	2.52	0.95
	HH3	63.25	11.15	3.75	2.06	5.81	2.45	2.35	0.53		CJR12	57.51	14.77	6.06	2.77	4.18	1.22	2.82	0.75
	HH4	49.18	13.73	5.57	3.03	8.82	2.23	2.89	0.56		CJR13	62.44	12.73	5.10	2.38	4.46	1.51	2.59	0.81
	HH5	68.20	9.67	3.07	1.58	4.77	2.62	2.29	0.61		CJR14	50.56	16.94	7.60	3.18	4.15	0.88	3.18	0.84
	HH6	62.16	11.37	4.05	2.13	6.22	2.31	2.38	0.55		CJR15	56.65	13.77	6.57	2.87	4.90	1.03	2.58	1.03
	HH7	44.49	14.71	6.23	3.23	8.49	2.61	2.89	0.54		CJR16	65.09	11.76	4.95	2.22	4.17	1.54	2.26	0.78
	HH8	59.85	11.78	4.58	2.30	5.69	3.04	2.55	0.56		CJR17	60.07	12.80	5.62	2.52	4.41	1.33	2.84	0.92
	HH9	61.26	11.88	4.29	2.44	5.88	2.45	2.72	0.60		CJR18	61.53	13.40	5.45	2.60	4.52	1.31	2.52	0.91
	HH10	60.11	11.89	4.25	2.43	6.58	2.17	2.27	0.54		CJR19	60.66	13.59	5.35	2.58	4.73	1.43	2.51	0.79
	HH11	66.01	10.39	3.75	1.86	5.04	2.38	2.54	0.76		Avg.	62.16	11.87	4.45	2.24	5.49	2.10	2.50	0.67
	HH12	55.48	12.56	4.76	2.57	7.58	2.41	2.83	0.61		SD	5.80	1.72	1.16	0.49	1.18	0.52	0.30	0.14
	HH13	67.13	10.55	3.39	1.85	5.34	2.59	2.36	0.56		Min.	44.49	9.48	2.83	1.33	3.53	0.88	1.98	0.46
	HH14	69.85	9.96	3.26	1.63	4.88	2.51	2.36	0.61		Max.	71.47	16.94	7.60	3.23	8.82	3.04	3.19	1.03
	HH15	61.15	11.66	4.00	2.35	6.24	2.40	2.73	0.58		HR1	73.08	12.78	3.59	1.31	1.15	2.16	2.89	0.56
	HH16	67.14	10.52	3.23	1.92	5.28	2.67	2.59	0.54		HR2	74.77	12.20	3.31	1.17	1.18	2.35	3.00	0.56
	HH17	70.26	10.22	3.18	1.63	5.08	2.15	2.20	0.56		HR3	71.80	13.19	3.88	1.43	1.10	2.30	2.97	0.54
	HH18	69.49	10.08	3.62	1.64	5.32	2.06	2.02	0.71		HR4	73.10	12.89	3.64	1.36	1.13	2.32	2.80	0.53
	HH19	56.72	12.57	4.82	2.47	7.82	1.58	2.46	0.61		HR5	66.46	14.64	4.79	1.72	1.03	2.26	2.84	0.68
	HH20	64.81	11.07	3.74	2.03	6.26	1.98	2.19	0.57		HR6	58.43	17.70	6.11	1.95	1.50	1.61	3.14	0.77
	HH21	66.06	10.16	3.22	1.84	5.20	3.02	2.13	0.50		HR7	59.32	17.23	5.51	1.94	1.45	1.70	3.11	0.62
	HH22	60.63	11.65	4.21	2.24	6.56	2.05	2.25	0.53		GR1	63.99	16.49	5.16	1.75	0.93	1.47	2.90	0.67
	HH23	58.20	11.23	3.99	2.38	7.82	2.31	2.17	0.51		GR2	63.41	17.09	5.23	1.73	0.83	1.68	3.23	0.73
	HH24	69.48	10.34	3.29	1.71	5.37	2.04	2.06	0.57		GR3	67.40	15.27	4.63	1.53	0.99	1.86	3.36	0.68
	HH25	71.47	10.07	3.03	1.53	4.88	2.08	2.12	0.54		GR4	66.34	15.56	4.99	1.59	0.92	1.75	3.17	0.65
	HH26	57.41	12.56	4.75	2.54	6.91	2.53	2.38	0.56		GR5	61.06	17.24	5.94	1.92	0.75	1.43	3.08	0.70
	HH27	67.88	10.28	3.31	1.75	5.82	2.57	2.26	0.60		GR6	62.29	17.30	5.23	1.79	0.81	1.74	3.18	0.68
HH28	64.28	10.89	3.74	2.00	5.96	2.60	2.42	0.59	GR7	64.12	15.41	5.27	1.74	0.85	2.04	3.21	0.69		
HH29	65.32	10.91	3.58	2.01	5.76	2.70	2.34	0.55	GR8	65.38	14.90	4.62	1.70	0.94	2.49	2.92	0.64		
HH30	70.52	9.48	3.07	1.33	4.54	2.54	2.37	0.46	GR9	68.31	14.83	4.53	1.47	1.00	1.77	2.98	0.64		
HH31	55.75	12.02	4.58	2.66	8.29	1.60	2.47	0.59	GR10	65.47	16.24	4.79	1.65	0.86	1.72	3.06	0.70		
HH32	70.60	9.63	2.83	1.34	4.39	2.30	2.34	0.54	GR11	64.88	16.03	5.03	1.61	0.85	1.52	2.73	0.78		
HH33	67.26	10.74	3.34	1.89	5.30	2.35	2.39	0.49	GR12	63.22	16.49	5.03	1.78	0.82	1.43	2.76	0.74		
HH34	65.22	10.00	3.23	1.83	6.25	2.12	2.67	0.59	GR13	63.64	16.95	4.97	1.61	0.72	1.46	2.73	0.78		
HH35	67.18	10.19	3.35	1.74	5.27	2.51	2.33	0.67	YSR1	62.79	16.68	5.61	1.91	0.75	1.44	3.19	0.72		
HH36	69.00	9.60	3.53	1.49	4.67	2.54	3.07	0.80	YSR2	61.59	17.38	5.69	1.97	0.72	1.57	3.11	0.71		
HH37	65.23	10.45	3.42	1.82	5.45	2.19	2.21	0.59	YSR3	63.61	16.22	6.00	1.60	0.36	1.87	3.09	0.69		
HH38	70.17	10.01	3.16	1.51	4.76	2.40	2.34	0.64	YSR4	60.31	18.01	5.98	1.94	0.64	1.31	3.13	0.75		
HH39	64.19	10.93	4.09	2.07	6.12	1.91	1.98	0.86	YSR5	56.48	19.65	7.05	2.07	0.49	0.99	3.10	0.77		
HH40	63.29	11.70	4.13	2.21	6.46	1.85	2.23	0.73	YSR6	57.87	19.08	6.55	1.85	0.65	1.01	3.03	0.76		
HH41	61.81	12.07	4.33	2.35	6.34	1.82	2.34	0.69	YSR7	58.82	18.70	6.40	2.04	0.61	1.12	2.99	0.76		
HH42	61.29	11.94	4.22	2.32	6.77	1.73	2.16	0.65	YSR8	63.05	16.27	5.68	1.96	1.01	1.65	3.27	0.88		
CJR1	57.75	13.59	6.14	2.81	4.51	1.31	2.74	1.01	YSR9	65.63	15.38	5.08	2.01	0.91	1.71	3.21	0.69		
CJR2	58.70	12.60	5.93	2.92	5.19	1.28	2.53	0.99	YSR10	62.02	16.50	5.75	2.13	0.75	1.40	3.18	0.69		
CJR3	62.16	12.70	5.13	2.39	4.40	1.54	2.53	0.76	YSR11	59.49	18.08	6.30	2.23	0.59	1.22	3.05	0.71		
CJR4	61.49	13.31	5.43	2.52	4.16	1.68	2.62	0.81	YSR12	62.34	16.32	5.50	1.83	0.67	1.35	2.87	0.79		
CJR5	54.99	14.83	6.09	2.83	4.23	2.32	2.90	0.80	YSR13	63.26	16.52	5.69	1.77	0.73	1.31	2.81	0.95		
CJR6	61.06	12.66	5.03	2.47	4.44	2.45	2.52	0.67	Avg.	64.05	16.22	5.26	1.76	0.87	1.67	3.03	0.70		
CJR7	54.34	15.73	6.48	3.07	3.53	2.30	3.11	0.73	SD	4.43	1.75	0.86	0.24	0.25	0.39	0.17	0.09		
CJR8	55.08	14.48	5.80	2.86	4.32	2.54	3.19	0.76	Min	56.48	12.20	3.31	1.17	0.36	0.99	2.73	0.53		
CJR9	52.01	15.57	6.42	3.01	4.38	2.43	2.95	0.70	Max	74.77	19.65	7.05	2.23	1.50	2.49	3.36	0.95		

HH: Modern Hunaghe River, CJR: Changjiang River, HR: Han River, GR: Geum River, YSR: Yeongsan River, Avg.: Average value, SD: Standard deviation, Min.: Minimum value, Max.: Maximum value.

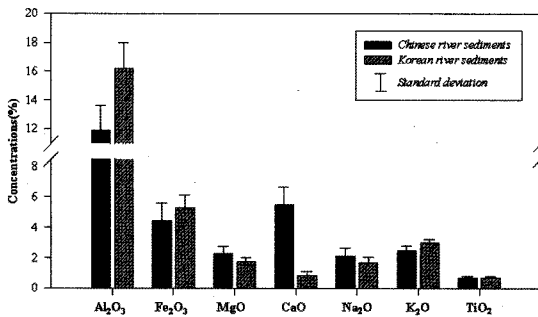


Fig. 2. Average value and standard deviation of elemental concentrations in Korean and Chinese river sediments.

물에서는 특징적으로 크게 구분되는 주성분 원소들의 상대적 함량을 해양에서 퇴적물의 기원지 추적자로 직접 이용하는 것은 어렵다.

Fig. 3에 알루미늄과 다른 원소들과의 함량 관계를 도시하였다. 특징적으로 알루미늄과 철(그리고 마그네슘) 함량의 상관관계 도표에서 한국과 중국 기원의 퇴적물이 두 개의 다른 기울기로 뚜렷이 구분된다. 이러한 결과는 퇴적물의 입도 효과를 고려할 때, 중국 기원 퇴적물이 한국 기원 퇴적물과 비교하여 철과 마그네슘이 크게 부화(enrichment)되어 있음을 의미한다. 즉 동일한 크기의 입도를 갖는 퇴적물에서 중국 기원의 퇴적물이 상대적으로 높은 함량의 철과 마그네슘을 함유한다. 이와 함께, 칼슘의 함량은 퇴적물의 입도와 관계없이 중국 기원 퇴적물에서 항상

높게 나타났다. 따라서 한국과 중국 기원 퇴적물의 주성분 원소들의 함량 특성을 비교·연구한 결과, 철, 마그네슘, 칼슘의 함량은 한국과 중국 기원 퇴적물 사이에서 뚜렷이 구분되며, 이는 두 지역의 암석 조성(rock composition) 차이 때문인 것으로 해석된다. 일반적으로 황하와 양쯔강의 분지(river basin)는 주로 탄산염암(carbonate rock)과 황토(loess) 층으로 구성되어 있는 반면, 한국의 주요 강의 분지는 화성암(igneous rock)이나 변성암(metamorphic rock)의 화강암과 편마암 등이 우세하다.

퇴적물 기원지 구분을 위한 지화학적 추적자

Mg/Al과 Fe/Al 함량 비: 위에서 언급된 바와 같이, 강 퇴적물에서 주성분 원소의 함량은 일차적으로 퇴적물의 입도(quartz dilution effect)에 의해 조절되기 때문에 황해와 동중국해에서 단순히 원소들의 함량 공간 분포에 의한 퇴적물 기원지를 구분하는 것은 사실상 어렵다. 이러한 측면에서 많은 연구자들이 입도 효과를 보정(normalization)하기 위해 보존성 원소(conservative element)인 알루미늄(또는 철)을 이용하는 간접적인 방법을 사용하여왔다. 이러한 기존의 알루미늄과 다른 원소들 사이의 상대적 함량 비는 Fig. 4의 점선과 같이 좌표 상에서 원점 (0,0)을 지나는 직선의 기울기를 이용하여 계산하였으며(Fig. 4), 이것은 알루미늄의 함량이 0%일 때, 다른 원소의 함량이 0%가 된다는 전제조건을 갖는다. 그러나 일반적

Table 3. Correlation coefficients among the elemental concentrations

a) Chinese river sediments

	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti
Al	1						
Fe	0.95	1					
Mg	0.94	0.94	1				
Ca	-0.10	-0.16	0.12	1			
Na	-0.47	-0.60	-0.47	0.19	1		
K	0.68	0.69	0.64	-0.21	-0.19	1	
Ti	0.50	0.67	0.48	-0.46	-0.73	0.38	1

b) Korean river sediments

	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti
Al	1						
Fe	0.94	1					
Mg	0.81	0.86	1				
Ca	-0.52	-0.56	-0.37	1			
Na	-0.87	-0.83	-0.70	0.56	1		
K	0.24	0.30	0.34	0.00	-0.08	1	
Ti	0.65	0.67	0.55	-0.43	-0.69	0.00	1

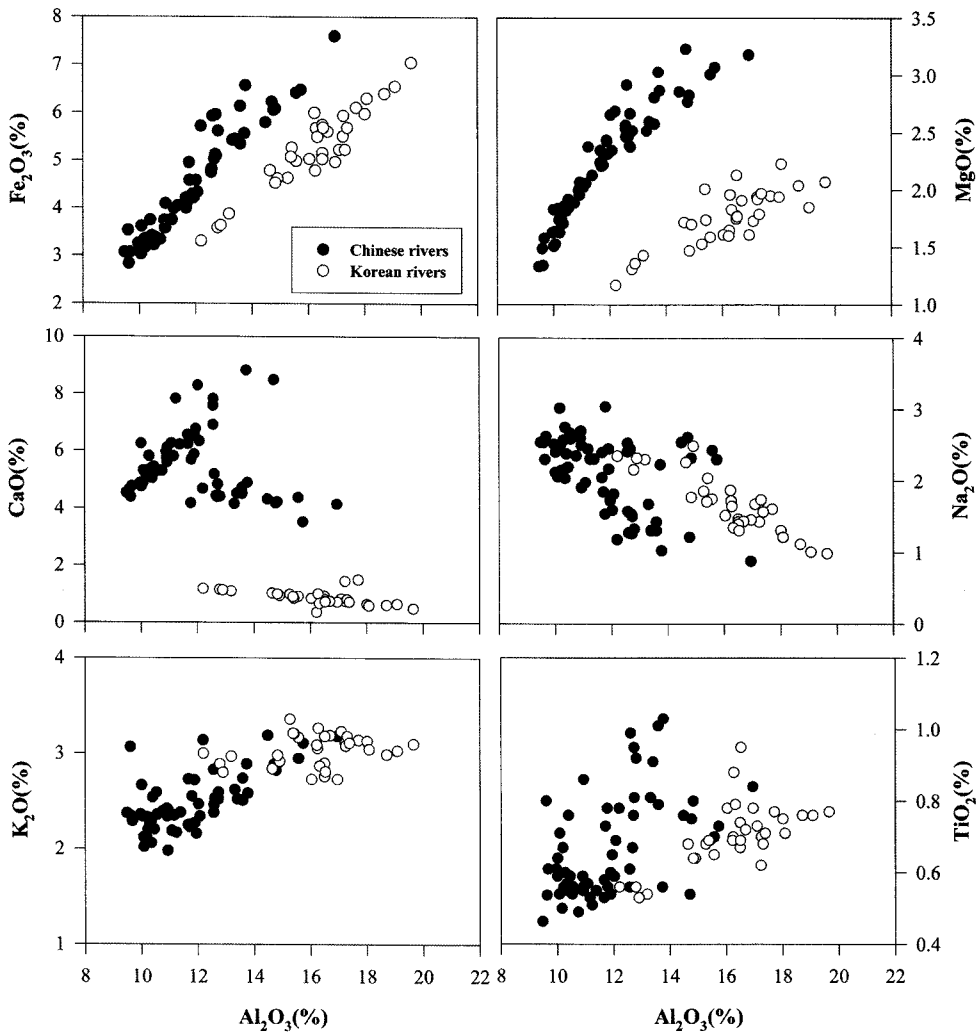


Fig. 3. Pair diagrams of the concentrations of Al and other elements in Korean and Chinese river sediments. Note that the correlations of Fe and Mg with Al show different trends for two groups of river sediments.

으로 암석이나 퇴적물의 성분 조성비에서 이러한 가정은 성립되지 않으며, 또한 이러한 방법은 다른 두 직선(linear regression line)위의 시료들이 같은 함량비(같은 기울기)를 갖는 것으로 잘못 해석될 수 있는 오류를 가지고 있다(Fig. 4). 즉 각각 다른 기원을 갖는 두 그룹의 시료들이 하나의 동일한 기원으로 잘못 해석될 수 있음을 의미한다. 따라서 이러한 경우 두 개의 직선(Fig. 4의 Source A와 B)이 만나는 교차점을 원점으로 하는 함량 비를 계산해야 한다(Lim et al., 2006).

본 연구에서 분석된 알루미늄에 대한 철과 마그네슘의 직선(linear regression line)이 한국과 중국 기원

으로 뚜렷이 구분되며, 또한 두 직선의 교차점이 원점(0,0)을 지나지 않는다(Fig. 5). 이러한 경우, 위에서 언급된 바와 같이 기존의 일반적인 Mg/Al과 Fe/Al 함량 비는 기원지 연구를 위한 입도보정 방법으로 사용할 수 없으며, 따라서 기준점(0,0)을 두 직선이 만나는 교차점으로 보정한 후, 함량 비를 계산해야 한다. 본 연구에서 분석된 자료들을 기존의 일반적인 보정 방법(conventional Al-normalization)과 새롭게 제시된 보정 방법(new Al-normalization)을 이용하여 한국과 중국 기원의 퇴적물을 비교·구분하였다. 그 결과 기존의 방법과 비교할 때, 새로운 방법의 함량 비가 한국과 중국 기원 퇴적물을 구분하는

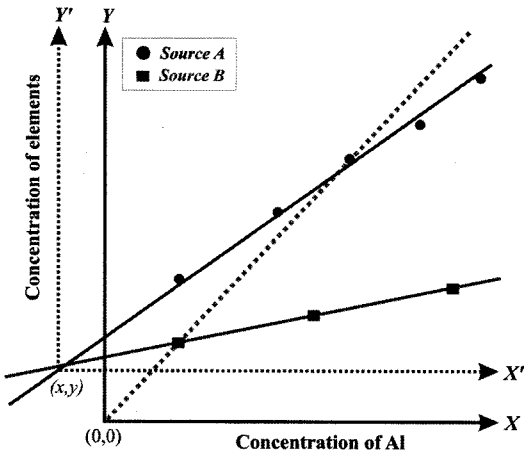


Fig. 4. A schematic diagram showing conventional (dashed line) and new Al-normalization methods. For new Al-normalization, in this study, the intersection point (x, y) of the two regression lines of source A and B is used the point of origin (0,0).

데 더욱 효과적인 것으로 나타났다(Fig. 6). 따라서 새로운 입도보정 방법에 의한 Fe/Al과 Mg/Al 함량 비는 황해와 북동중국해 대륙붕에서 퇴적물의 기원지를 구분하는데 매우 유용한 추적자로 제시된다.

한편, 위에서 언급된 바와 같이 퇴적물중 원소의 함량은 입자가 세질 할수록 증가하기 때문에 보존성 원소인 알루미늄을 이용하여 입도의 영향을 간접적으로 보정하여 왔으나, 이보다 더 효과적인 방법은 직접적으로 퇴적물을 입자의 크기에 따라 분리하여 각각에 대하여 원소의 함량을 분석·비교하는 것이다. 본 연구에서도 입도효과를 최소화하기 위하여 퇴적물의 전시료(bulk sediment)를 실트 퇴적물(60~20 μm)과 점토 퇴적물(20 μm 이하)로 분리하여 주성분 원소 함량을 분석하였다. 중국 기원의 경우 실트 퇴적물의 주성분 원소의 함량은 알루미늄(Al_2O_3) 9.88~12.73(평균 10.89%), 철(Fe_2O_3) 3.08~4.64(평균 3.55%), 마그네슘(MgO) 1.59~2.93(평균 2.24%), 칼슘(CaO) 3.21~5.56(평균 4.72%), 나트륨(NaO) 1.49~2.10(평균 1.91%), 칼륨(K_2O) 1.79~2.36(평균 2.11%), 티타늄(TiO_2) 0.44~1.18(평균 0.63%) 범위이다. 한편, 한국 기원의 실트 퇴적물의 주성분 원소의 함량은 알루미늄(Al_2O_3) 10.85~17.74(평균 13.12%), 철(Fe_2O_3) 2.49~5.72(평균 3.23%), 마그네슘(MgO) 0.89~1.83(평균 1.28%), 칼슘(CaO) 0.39~1.85(평균 0.93%), 나트륨(NaO) 1.15~2.40(평균 1.99%),

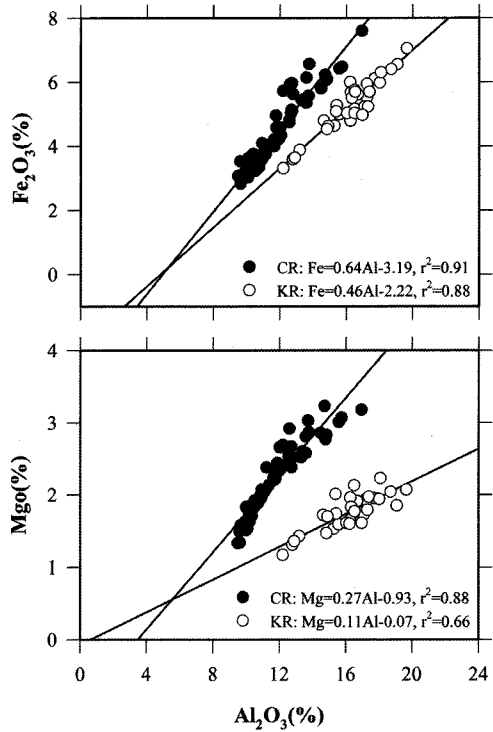


Fig. 5. Correlations between the concentrations of Al and Fe, Mg in Korean and Chinese river sediments. Fe/Al and Mg/Al ratios in this study are calculated based on the intersection point of the two regression lines. CR: Chinese river sediments, KR: Korean river sediments.

칼륨(K_2O) 2.47~3.24(평균 2.87%), 티타늄(TiO_2) 0.33~0.76(평균 0.55%) 범위이다. 실트 퇴적물의 경우, 알루미늄의 함량이 높은 한국 기원 퇴적물에서 칼륨 함량이 높고, 나머지 원소(철, 마그네슘, 칼슘, 티타늄)들은 알루미늄 함량이 낮은 중국 퇴적물에서 상대적으로 높게 나타났다.

20 μm 이하의 점토 퇴적물의 경우, 중국 기원의 주성분 원소의 함량은 알루미늄(Al_2O_3) 11.79~17.27(평균 14.63%), 철(Fe_2O_3) 4.53~7.11(평균 6.02%), 마그네슘(MgO) 2.36~3.35(평균 2.92%), 칼슘(CaO) 2.51~9.77(평균 6.58%), 나트륨(NaO) 0.90~1.68(평균 1.21%), 칼륨(K_2O) 2.22~3.11(평균 2.67%), 티타늄(TiO_2) 0.59~0.89(평균 0.75%) 범위이다. 한국 기원의 점토 퇴적물에서 주성분 원소의 함량은 알루미늄(Al_2O_3) 17.48~20.25(평균 18.78%), 철(Fe_2O_3) 6.18~7.04(평균 6.62%), 마그네슘(MgO) 1.88~2.21(평균 2.04%), 칼슘(CaO) 0.22~1.30(평균 0.61%),

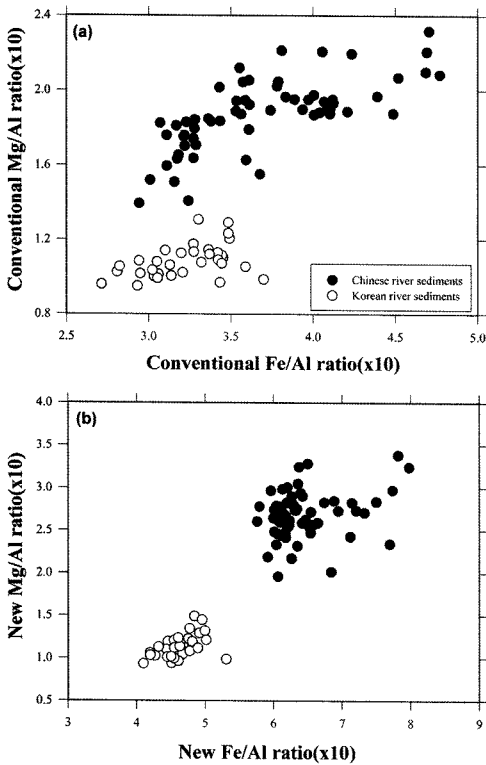


Fig. 6. Comparison of discrimination plots between conventional (a) and new (b) methods for Al-normalization. Note that the new normalization method provides the advanced gradient for better understanding of sediment provenance in the Yellow Sea as well as the rivers.

나트륨(NaO) 0.84~1.35%(평균 1.05%), 칼륨(K₂O) 2.57~3.49%(평균 2.97%), 티타늄(TiO₂) 0.70~1.02%(평균 0.91%) 범위이다. 중국 기원 퇴적물과 비교하여 한국 기원 퇴적물의 알루미늄, 철, 칼륨, 티타늄의 함량은 높은 반면, 마그네슘과 칼슘의 함량은 낮다. 결론적으로 본 연구의 결과에서 마그네슘과 칼슘의 평균 함량은 퇴적물의 입자 크기와 관계없이 항상 중국 기원 퇴적물에서 높게 나타났다. 따라서 황해와 북동중국해에서 마그네슘의 함량은 중국과 한국 기원의 퇴적물을 구분하는 좋은 잠재적 추적자로 제시된다(Fig. 7). 특히 세립한 점토 구간의 퇴적물에서 마그네슘의 함량은 한국과 중국 기원 뿐만 아니라 황해와 양쯔강 퇴적물을 구분하는데도 매우 유용한 원소로 판단된다(Fig. 7b). 그러나 해양에서 칼슘을 추적자로 사용할 경우 이차적으로 첨가되는 생물기원의 효과를 고려해야 할 것으로 사료된다.

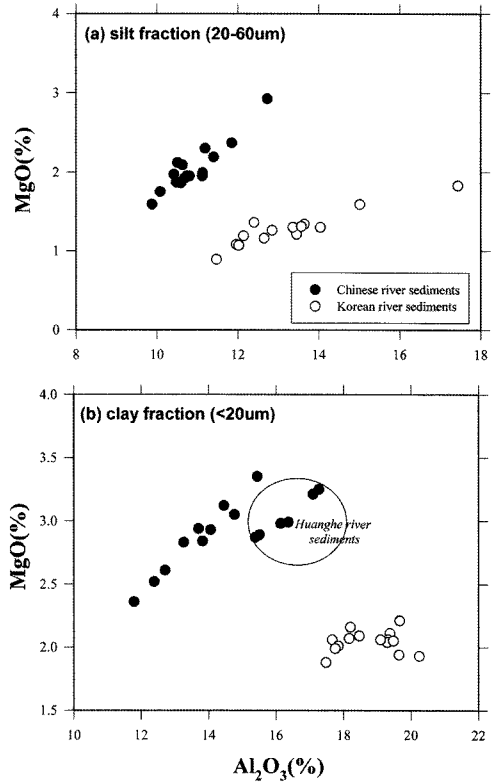


Fig. 7. Pair diagrams of the concentrations of Al and Mg in the silt (a) and clay (b) fractions of Chinese and Korean river sediments.

스트론튬 동위원소(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) 비: 최근에는 퇴적물과 토양의 기원 연구에 다양한 종류(납, 스트론튬, 니오디움 등)의 안정동위원소 활용방법이 이용되고 있다(Douglas et al., 1995; Capo et al., 1998). 본 연구에서도 황해와 북동중국해 퇴적물의 기원지 연구를 위해 일차적으로 한국과 중국 기원의 강 퇴적물을 대상으로 스트론튬 동위원소를 분석하고, 추적자로서의 활용 가능성 여부를 조사하였다. Dasch(1969)의 연구에 따르면 탄산염 물질이 제거된 퇴적물에서도 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 비 또한 퇴적물 입도가 감소함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 따라서 이러한 입도(광물 조성)에 따른 영향을 최소화하기 위하여 본 연구에서는 60~20 μm 구간의 실트 퇴적물 부분만을 대상으로 탄산염을 제거한 후, 스트론튬 동위원소 분석을 실시하였다. 분석 결과에 의하면, 중국 기원인 황해와 양쯔강의 실트 퇴적물의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 비는 전반적으로 0.7169~0.7189(평균 0.7179)의 변화 폭을 갖는다(Fig. 8). 한

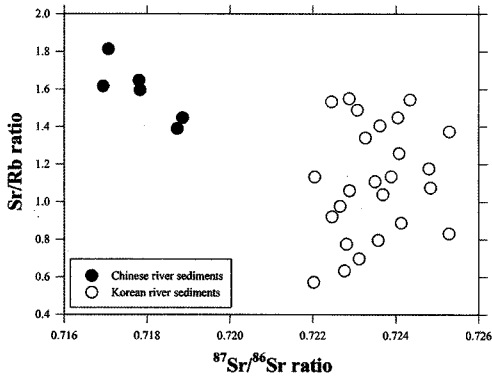


Fig. 8. Discrimination plot Sr/Rb vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of Korean river sediments is much higher than that of Chinese river sediments.

편, 한국 기원의 실트 퇴적물의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 0.7220~0.7253(평균 0.7236)의 범위이며, 이는 중국 기원 퇴적물의 범위보다 크게 높다(Fig. 8). 이러한 일차적인 연구 결과는 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비가 황해와 동중국해 주변 대륙붕에서 한국과 중국 기원 퇴적물을 구분하는데 매우 유용한 지화학적 지시자로 사용될 수 있음을 시사한다.

한국 서남해 니질 퇴적물(SEYSM)의 기원

황해와 북동중국해는 전 세계 강 퇴적물의 약 10%에 달하는 매년 약 10^9 톤 이상의 많은 양의 세립 퇴적물이 한반도와 중국대륙으로부터 유입·집적되고 있는 거대한 퇴적분지로서, 퇴적학적 측면에서 몇 개 독립된 니질 퇴적대(isolated mud patch)의 존재가 매우 특징적이다(Fig. 1). 지금까지 이들 니질대(CYSM, SEYSM, SWCIM)에 대한 형성기작(formation mechanism)과 퇴적물 기원에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. Hu(1984)와 Shi et al.(2003)에 의하면, 이들 세립한 니질 퇴적대는 황해-북동중국해 해류 시스템에 의해 형성된 용승(upwelling) 해역에 발달하고 있는 것으로 해석된다. 또한 해수 순환 패턴, 퇴적물, 점토광물 조성, 방해석(calcite)의 존재 등에 근거할 때, 황해의 중앙부의 니질대(CYSM)와 제주도 남쪽 북동중국해의 니질대(SWCIM) 퇴적물은 중국의 황하와 양쯔강에서 공급된 것으로 보고되고 있다(Nittrouer et al., 1984; DeMaster et al., 1985; Alexander et al., 1991; Park and Khim, 1992; Zhao et al., 2001; 윤정수 외, 2005; Lim et al., 2007). 한

편, 한국 서남해 연안에 발달하고 있는 니질대(SEYSM) 퇴적물의 기원에 대한 해석은 여전히 논란의 대상이 되고 있다(Yang et al., 2003). 몇몇 연구자들은 이들 연안 니질대 퇴적물이 한국의 금강으로부터 공급된 것으로 보고하였으나(Lee and Chough, 1989; Park and Khim, 1990; Lee and Chu, 2001), 최근 연구들에서는 그 기원이 중국과 한국으로부터 공급되어 형성된 혼합 퇴적체로 보고되고 있다(Park et al., 2000; Lim et al., 2007).

본 연구에서는 위에서 제시된 추적자들을 이용하여 한국 서남해에 발달하고 있는 SEYSM 퇴적물의 기원을 살펴보았다. 먼저, 새롭게 제시된 입도보정 방법에 의한 Mg/Al과 Fe/Al 함량 비 자료에 의하면(Fig. 9a and b), 한국 서남해 니질 퇴적물(SEYSM)이 한국과 중국 기원의 퇴적물 사이에 위치하여, 혼합 퇴적물 특성을 보인다. 이러한 결과는 $20\ \mu\text{m}$ 이하의 세립한 점토 퇴적물에서 더욱 뚜렷이 확인되는 바, Fig. 9c에 제시된 것처럼, 점토 퇴적물에서 마그네슘의 함량이 한국과 중국 기원의 강 퇴적물들 사이에서 크게 구분되어 위치하며, 이는 서남해 니질 퇴적물이 한국과 중국 기원 퇴적물의 혼합체로 구성되어 있음을 잘 보여준다. 더욱이 전시료(bulk sediment)에서는 구분되지 않았던(Fig. 9a and b), 중국의 양쯔강과 황하 퇴적물이 $20\ \mu\text{m}$ 이하의 점토 퇴적물의 마그네슘 함량에서는 잘 구분되어 나타난다. 그러나 $20\text{--}60\ \mu\text{m}$ 구간의 실트 퇴적물의 경우 한국 서남해 니질 퇴적물(SEYSM)의 마그네슘 함량이 한국 기원 퇴적물 영역에 도시된다(Fig. 9d). 이러한 결과는 $20\ \mu\text{m}$ 이하의 세립질 퇴적물과 다르게 조립한 $20\text{--}60\ \mu\text{m}$ 의 실트 퇴적물은 한국 기원의 퇴적물임을 지시한다. 더욱이 동일한 실트 퇴적물 시료에서 분석된 스트론튬 동위원소 자료에 의해서도 이러한 결과와 해석이 뒷받침 된다(Fig. 9e). 결론적으로 한국 서남해에 광범위하게 발달하고 있는 니질대(SEYSM)의 퇴적물은 입자의 크기에 따라 그 기원이 다르게 평가되며, 실트 퇴적물은 한국 기원이 우세한 반면, 세립한 점토 퇴적물은 한국과 중국의 혼합 기원으로 해석된다. SEYSM 니질대가 발달하고 있는 한국 서남해 연안에서 중국 기원 퇴적물의 확산과 퇴적과정에 대해서는 Lim et al.(2007)에 의해 자세히 제시된 바 있다.

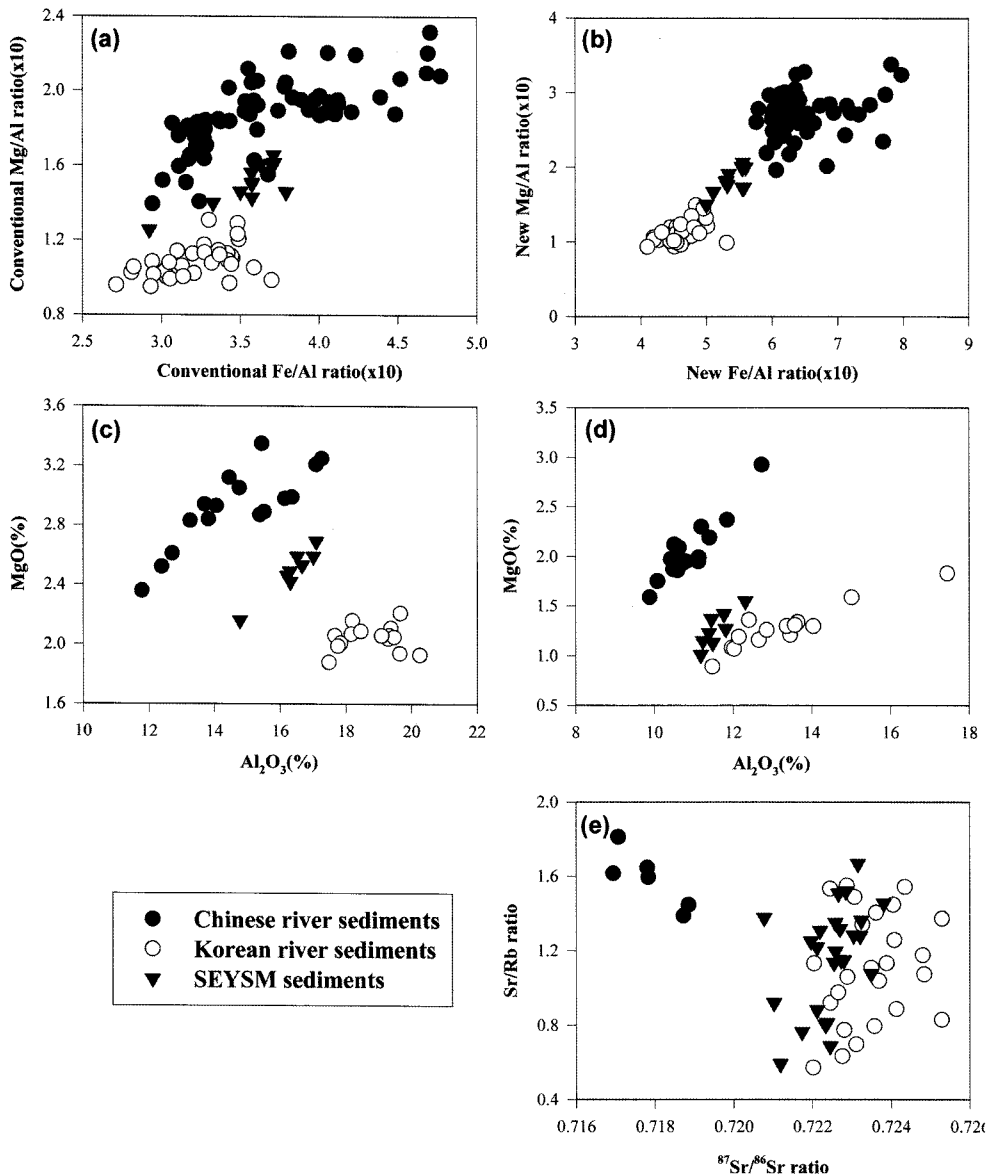


Fig. 9. Comparison of discrimination plots between conventional and new Al-normalizing ratios (a and b), concentrations of Mg in clay (c) and silt fractions (d), and Sr/Rb and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr in silt fraction (e).

결론

한국과 중국의 두 기원지(two end-member system)를 갖는 황해와 북동중국해에서 입도 보정을 위한 원소간의 함량 비를 구할 때 일반적으로 적용되는 원점(0,0)을 지나는 계산은 기원지 판별에 오류가 있는 것으로 판단되며, 새로운 접근의 계산 방법이 필요하다. 따라서 두 직선(한국과 중국 기원)이 만나는 교차점을 원점으로 하는 함량 비를 계산하는 것이

타당하며, 이러한 경우 Fe/Al과 Mg/Al 함량 비는 황해-북동중국에서 퇴적물의 기원을 연구하는데 효과적인 잠재적 추적자로 제시된다. 또한 입도의 영향을 최소화하기 위해 모래를 제거한 실트와 점토 구간으로 입자를 분리한 후 원소들의 함량을 분석한 결과, 마그네슘은 황해와 북동중국해에서 한국과 중국 기원 퇴적물을 구분하는 가장 가능성 있는 지화학적 원소로 판단되며, 특히 한국과 중국 기원 뿐만 아니라 황해와 양쯔강 퇴적물을 구분하는데도 유용하게 이용할

수 있다. 더욱이 실트 퇴적물에서 한국 기원의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 0.7229-0.7253(평균 0.7243)로 중국 기원 퇴적물의 값(0.7169-0.7189, 평균 0.7179)과 크게 다른 범위를 보여, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비 또한 황해와 북동중국해 대륙붕에서 퇴적물 기원지 연구를 위한 잠재적 추적자로 제시된다. 이러한 잠재적 추적자를 이용·분석 결과, 한국 서남해 연안에 발달하고 있는 나질대(SEYSM)의 퇴적물은 한국과 중국 기원 퇴적물의 혼합 기원으로 해석되나, 전체 퇴적물중 실트 퇴적물은 한국 기원이 우세한 것으로 추정된다.

사 사

본 연구는 2005년 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행되었으며, 연구를 지원해준 관계자에게 감사드립니다. 본 연구를 위해 시료 채취와 분석을 도와주신 노경찬 연구원(한국해양연구원)께도 감사드립니다.

참고문헌

- 정희수, 임동일, 유해수, 2006, 북동중국해 코아 퇴적물의 회토류원소 분포 양상과 기원. *자원환경지질*, 39, 39-51.
- 윤정수, 임동일, 변종철, 정희수, 2005, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비를 이용한 동중국해 대륙붕 퇴적물의 기원 연구. *한국해양학회지*[바다], 10, 92-99.
- Alexander, C.X., DeMaster, D.J., and Nittrouer, C.A., 1991, Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting in the Yellow Sea. *Marine Geology*, 98, 51-72.
- Asahara, Y., Tanaka, T., Kamioka, H., and Nishimura, A., 1995, Asian continental nature of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in north central Pacific sediments. *Earth Planetary Science Letter*, 133, 105-116.
- Capo, R.C., Stewart, B.W., and Chadwick, O.A., 1998, Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods. *Geoderma*, 82, 197-225.
- Cho, Y.G., Lee, C.B., and Choi, M.S., 1999, Geochemistry of surface sediments off the southern and western coast of Korea. *Marine Geology*, 159, 111-129.
- Dasch, E.J., 1969, Sr isotope in weathering profiles, deep-sea sediments and sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33, 1521-1552.
- DeMaster, D.J., Mckee, B.A., Nittrouer, C.A., Qian, J.G., and Cheng, G.D., 1985, Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 4, 143-158.
- Douglas, G.B., Gray, C.M., Hart, B.T., and Beckett, R., 1995, A strontium isotopic investigation of the origin of suspended particulate matter (SPM) in the Murray-Darling River system, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 3799-3815.
- Hu, D.X., 1984, Upwelling and sedimentation dynamics I. The role of upwelling in sedimentation in the Huanghe Sea and East China Sea—a description of general features. *Chinese Journal of Oceanological Limnology*, 2, 12-19.
- Lee, C.B., Jung, H.S., and Jeong, K.S., 1992, Distribution of some metallic elements in surface sediments of the southeastern Yellow Sea. *The Journal of the Oceanological Society of Korea*, 27, 55-65.
- Lee, H.J. and Chough, S.K., 1989, Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea. *Marine Geology*, 87, 195-205.
- Lee, H.J. and Chu, Y.S., 2001, Origin of inner-shelf mud deposit in the southeastern Yellow Sea: Huksan Mud Belt. *Journal of Sedimentary Research*, 71, 144-154.
- Lim, D.I., Jung, H.S., Choi, J.Y., Yang, S., and Ahn, K.S., 2006, Geochemical compositions of river and shelf sediments in the Yellow Sea: Grain-size normalization and sediment provenance. *Continental Shelf Research*, 26, 15-24.
- Lim, D.I., Choi, J.Y., Jung, H.S., Rho, K.C., and Ahn, K.S., 2007, Recent sediment accumulation and origin of shelf mud deposits in the Yellow Sea and East China Seas. *Progress in Oceanography*, 73, 145-159.
- Milliman, J.D. and Meade, R.H., 1983, World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology*, 91, 1-21.
- Milliman, J.D., Beardsley, R.C., Yang, Z.S., and Limeburner, R., 1985, Modern Huanghe-derived muds on the outer shelf of the East China Sea: identification and potential transport mechanisms. *Continental Shelf Research*, 4, 175-188.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J., and McKee, B.A., 1984, Fine-scale stratigraphy in proximal and distal deposits of sediment dispersal systems in the East China Sea. *Marine Geology*, 61, 13-24.
- Park, S.C., Lee, H.H., Han, H.S., Lee, G.H., Kim, D.C., and Yoo, D.G., 2000, Evolution of late Quaternary mud deposits and recent sediment budget in the southeastern Yellow Sea. *Marine Geology*, 170, 271-288.
- Park, Y.A. and Khim, B.K., 1990, Clay minerals of the recent fine-grained sediments on the Korean continental shelves. *Continental Shelf Research*, 10, 1179-1191.
- Park, Y.A. and Khim, B.K., 1992, Origin and dispersal of recent clay minerals in the Yellow Sea. *Marine Geology*, 104, 205-213.
- Schubel, J.R., Shen, H.T., and Park, M.J., 1984, A comparison of some characteristic sedimentation processes of estuaries entering the Yellow Sea. In: Park, Y.A., Pilkey,

- O.H., Kim, S.W. (Eds.), Marine geology and physical processes of the Yellow Sea. 286-308.
- Shi, C., Zhang, D.D., and You, L., 2003, Sediment budget of the Yellow River delta, China: the importance of dry bulk density and implications to understanding of sediment dispersal. *Marine Geology*, 199, 13-25.
- Summerhayes, C.P., 1972, Geochemistry of continental margin sediments from northwest Africa. *Chemical Geology*, 10, 137-156.
- Yang, S.Y., Jung, H.S., Lim, D.I., and Li, C.X., 2003, A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea. *Earth-Science Review*, 1289, 1-28.
- Zhao, Y.Y., Park, Y.A., Qin, Y.S., Choi, J.Y., Gao, S., Li, F.Y., Cheng, P., and Jiang, R.H., 2001, Material source for the Eastern Yellow Sea mud: evidence of mineralogy and geochemistry from China-Korea Joint Investigation. *The Yellow Sea*, 7, 22-26.

2007년 4월 4일 접수
2007년 4월 20일 수정원고 접수
2007년 4월 25일 채택