

## 북동중국해 코아 퇴적물의 희토류원소 분포양상과 기원

정희수<sup>1\*</sup> · 임동일<sup>2</sup> · Shou Ye Yang<sup>3</sup> · 유해수<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국해양연구원 해양환경연구사업단, <sup>2</sup>한국해양연구원 해양환경위해성연구사업단

<sup>3</sup>Department of Marine Geology and Geophysics, Lab. of Marine Geology, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, PR China

## Constraints of REE Distribution Patterns in Core Sediments and their Provenance, Northern East China Sea

Hoi-Soo Jung<sup>1\*</sup>, Dhong-il Lim<sup>2</sup>, Shou Ye Yang<sup>3</sup> and Hai-Soo Yoo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Marine Environment Research Department, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

<sup>2</sup>Southern Coastal Environment Research Department, Korea Ocean Research and Development Institute, 391 Jangmok-ri, Jjangmok-myun, Geoje 656-830, Korea

<sup>3</sup>Department of Marine Geology and Geophysics, Lab. of Marine Geology, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, PR China

Rare earth elements (REEs) in transgressive shelf core sediments were analysed to identify constraints of REE distribution patterns and sediment provenances in the northern East China Sea (ECS). Sediments of Chinese and Korean rivers, such as Huanghe and Yangtz rivers, Keum and Yeongsan rivers that supply sediments to the northern ECS, were also analysed to figure out their typical REE distribution patterns. The distribution patterns of Chinese and Korean river sediments, which are normalized with upper continental crust (UCC) REE values, appear to be enriched in middle rare earth elements (MREEs) in Chinese river sediments, whereas in light rare earth elements (LREEs) in Korean river sediments. We assign the MREE-enriched convex-type distribution pattern in Chinese river sediments as “C-type”, and the LREE-enriched linearly decreasing pattern in Korean river sediments as “D-type”. A major constraint of the REE concentration in northern ECS core sediments is interpreted to be LREE-enriched monazite ((Ce, La)PO<sub>4</sub>) that is ubiquitous in and around the study area. Meanwhile, the distribution pattern of northern ECS sediments appears to be between the C-type and the D-type. We suggest that the northern ECS sediments are the mixture of China and Korea riverine sediments that have been accumulated in paleo-river mouth, paleo-coast, and present-day shelf environment as well.

**Key words** : transgressive shelf sediments, rare earth elements, monazite

북동중국해 코아 퇴적물중 희토류 원소(REE)의 함량을 분석하여 REE 함량의 분포양상을 파악하고 퇴적물 기원지를 추적하였다. 북동중국해로 퇴적물을 공급하는 한국 강(금강, 영산강 등)과 중국 강(황하, 양자강 등)에서 유출된 퇴적물 중 REE 함량도 분석되어 한국/중국 강에서 유출되는 퇴적물 중 REE 함량의 전형적인 분포양상이 구해졌다. 상부지각 중 REE 함량으로 정규화 된 중국 강과 한국 강 퇴적물 중 REE 함량의 분포양상은 각각 중간 희토류 원소(MREE)와 가벼운 희토류 원소(LREE)가 부화된 형태로 나타났다. 중국 강 퇴적물에서 나타나는 REE 함량의 분포양상은 “C-type” 즉 MREE가 부화되어 가운데가 볼록한 형태이고, 한국 강 퇴적물에서 나타나는 REE 함량의 분포양상은 “D-type” 즉 LREE가 부화되어 원자번호가 증가함에 따라 직선적으로 감소하는 형태를 보인다. 북동중국해 코아 퇴적물중 REE 함량의 주요 제한인자는 LREE가 부화되어 있고 연구해역 인근 어디에나 분포하는 모나자이트((Ce, La)PO<sub>4</sub>)로 해석된다. 한편, 북동중국해 퇴적물 중 REE 함량의 분포양상은 C-type과 D-type의 중간 형태를 보인다. 이러한 중간 형태에 근거할 때, 현재는 대륙붕 환경이지만 과거에는 강 하구였던 북동중국해의 퇴적물은 한국 강과 중국 강에서 유출된 퇴적물의 혼합체로 판단된다.

**주요어** : 희토류 원소, 동중국해, 모나자이트, 황하, 양자강

\*Corresponding author: hsjung@kordi.re.kr

## 1. 서 론

중국-한국-일본의 배타적 경제수역(Economic Exclusive Zone, EEZ)이 상호 접해있는 동중국해의 북부지역(northern East China Sea, 한국의 남해, 이하 “북동중국해”)은 최근 각국의 해양영토 관리 및 환경보전을 위한 해양조사연구 활동이 활발히 이루어지는 해역이다. 현재 쿠로시오가 흐르는 북동중국해로는 양쯔강(Changjiang river)에서 유출된 막대한 양의 물과 퇴적물이 유입되고, 일부 한반도 기원의 강에서 유출된 물질도 공급될 수 있다(Yang *et al.*, 2002). 그러나 과거 해수면이 낮았을 시기에 북동중국해는 수심이 낮은 대륙붕 환경인 까닭에 대부분 육지로 드러나 있었고, 따라서 이 지역으로 유입되었던 고 하천(paleo-river)과 쿠로시오의 특성이 현재와는 전혀 달랐을 것이다. 그 결과 이 지역에 수십 미터 두께로 쌓여 있는 퇴적물(Yoo and Park, 2000; Yoo *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2003)의 기원은 퇴적물 코어 깊이 즉 시대에 따라 다를 수 있다. 한편, 북동중국해 퇴적물의 기원에 관한 연구는 아직 찾기 어렵고(Yang *et al.*, 2003), 다만 인접한 황해의 퇴적물 기원에 관한 연구는 일부 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 1992; Park and Khim, 1992; Park *et al.*, 2000; Lee and Chu, 2001). 다행히, 북동중국해와 인접한 제주도 연안 퇴적물의 기원에 관한 연구가 있었으나(Lim, 2003; Yang *et al.*, 2004), 두 연구에 사용된 시료와 자료가 동일함에도 불구하고, 결론은 서로 다르다. 즉 Lim (2003)은 제주도 연안 세립 퇴적물중 Nb과 Rb 함량이 중국기원 퇴적물과 유사하게 각각 비교적 높고 낮음에 근거할 때 이들 세립 퇴적물이 양쯔강에서 상당부분 기원했다고 주장한 반면, Yang *et al.* (2004)은 Rb, Ti, Nb, REE, 점토광물 함량특성 등에서 이들 세립 퇴적물이 양쯔강에서 기원했다는 증거가 분명하지 않다고 보고했다.

물리화학적 특성이 안정되어 퇴적물 기원 연구에 널리 활용되는 희토류 원소(Rare Earth Element, REE)가 최근 황하와 양쯔강에서 공급된 퇴적물에서 분석되어 중국 강 퇴적물 중 REE 함량의 분포양상(distribution pattern)이 최근 도출되었다(Yang *et al.*, 2002; Lim, 2003; Yang *et al.*, 2004). 중국 기원 퇴적물 중 REE 분포양상과 비교될 수 있는 한반도 기원 퇴적물의 REE 분포양상도 도출될 수 있다면, 연구지역인 북동중국해 퇴적물 중 REE 분포양상과 한국/중국 강 퇴적물 중 REE 분포양상이 서로 비교-검토되어 북동중국해 퇴적물의 기원을 밝히는데 기여할 수 있을 것으

로 기대된다. 그러나 한국 강에서 배출되는 퇴적물과 북동중국해 퇴적물 중 REE 분포양상에 관한 보고는 아직까지 찾기 어렵다.

본 연구에서는 1) 중국과 한국 강에서 배출되는 퇴적물의 중 REE 분포양상을 제시하고, 2) REE 함량 특성 변화의 주요 조절요인을 도출하며, 3) 북동중국해에서 채취된 코어 퇴적물 중 REE 분포양상을 근거로 연구지역 퇴적물의 기원을 밝히고자 한다.

## 2. 시료 채취 및 분석 방법

중국 대륙과 한반도에서 황해와 북동중국해로 유입되는 퇴적물의 조성을 파악하기 위하여 강 하구 주변(bank) 퇴적물을 채취하였다. 중국 대륙에서 유입되는 퇴적물을 대표할 수 있도록 양쯔강과 황하 및 고 황하(paleo-Huanghe river)의 여러 지점에서 총 28개 시료를 채취하였다. 즉, Baguazhou, Nanchangmen, Zhengjiang, Sanjiagang, Gaodong, Chaoyang Farm, Luchao gang, Nantong, Wusongkou, Jiangyin, Baozheng, Nanmengang, Beigang, Changxindao 등 양쯔강의 다양한 지점에서 14개 시료, 고 황하에서 2개 시료, 그리고 황하에서 12개 시료를 채취하였다. 그리고 한반도 하천인 금강(5개)과 영산강(4개)에서도 총 9개의 시료를 채취하여 코어시료와 동일한 방법으로 분석하였다.

북동중국해역은 최대간빙기(Last Glacial Maximum, LGM) 이후 해수면이 상승하면서 퇴적물이 쌓인 전형적인 해침 대륙붕환경(transgressive shelf environment)으로(Yoo *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2003) 현재 쿠로시오가 강하게 흐르고 있는 수심 45~130 m 해역이다(Fig. 1). 한국과 일본 사이의 대한해협은 동해(East sea)와 동중국해를 연결하는 좁은 해역으로 주로 모래와 자갈로 덮여있고, 낙동강 하구 남부 연안에는 니질 퇴적물이 분포한다(Chough *et al.*, 1991; Chough *et al.*, 2000; KORDI, 2002). 코어가 채취된 북동중국해역은 LGM 동안 대부분 육지로 드러나 있었고, 중국 대륙과 한반도에서 기원된 고 황하와 낙동강 등의 고수로(paleo-channel)가 분포한다(Fig. 1; Park and Gong, 2001; Yoo *et al.*, 2003).

코어시료(core sample)는 126~129.5°E, 31.5~35°N 해역, 즉 대한해협(Korea Strait)을 포함한 한반도 남동 연안해역 그리고 제주도 동남부에 위치한 북동중국해에서 채취되었다(Fig. 2). 한국해양연구원 소속의 R/V 온누리와 이어도 호에 장착된 피스톤식 코어시료 채취기(piston corer, PC) 그리고 중력식 코어시료 채취

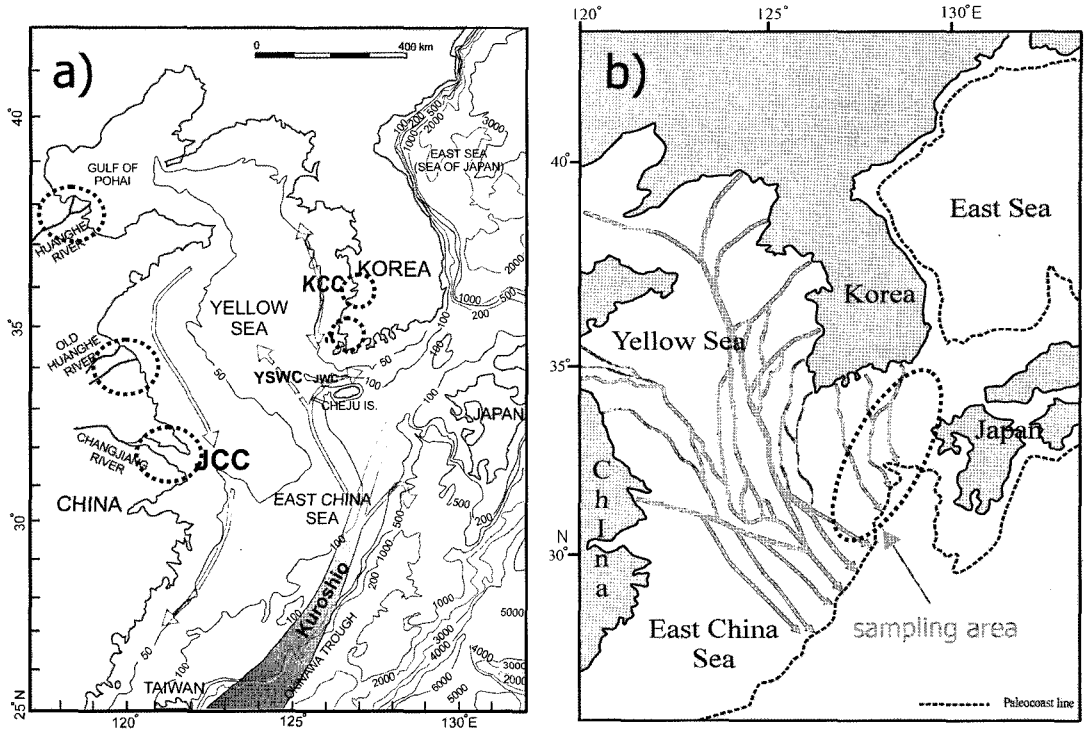


Fig. 1. Two maps showing a) bathymetry and major currents in the northern East China and Yellow seas, and b) paleo-river channels and paleo-shorelines therein during the LGM (after Park and Gong, 2001). Dotted circles in the figures represent the sampling sites of 5 rivers and a shelf (mouth of paleo-rivers). JCC; Jiangsu coastal current, YSWC; Yellow sea warm current (intermittent flow), JWC; Jeju warm current.

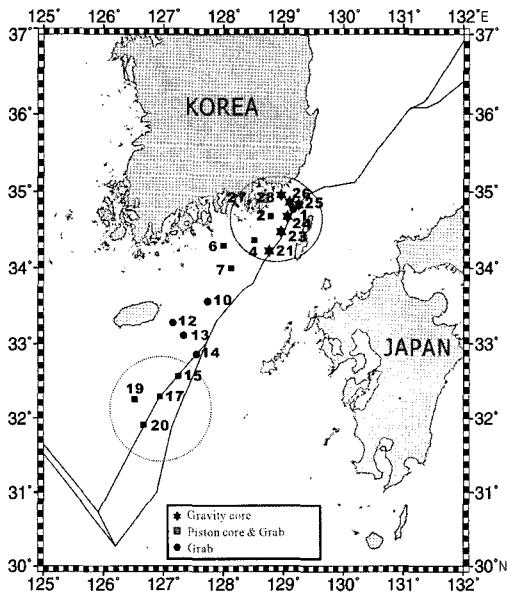


Fig. 2. A map showing the study area and sediment coring sites in the northern East China Sea. One group of the sampling sites (dashed circle) is close from the Korea Peninsula, while the other in the outer shelf environment (dotted circle).

기(gravity corer, GC)를 이용해 각각 2002년 3~4월 그리고 2002년 5월에 코어가 채취되었고(Fig. 2), 채취된 시료 가운데 7개의 코어가 분석되었다(Table 1). 채취된 코어시료는 육상 실험실로 운반-절개되었고, 절개 단면상의 퇴적물 색상과 구조 등이 자세히 관찰-기재되었다. 퇴적물의 구조와 물성을 판단하기 위해 코어시료 절개 단면에서 퇴적판(slab)을 채취한 후 Softex M-1005 모델 X선 촬영기로 촬영하였다. 퇴적물의 입도, 지화학 및 광물 성분 분석을 위해 깊이별로 부시료(subsample)가 채취되었으며, 지화학 분석을 위한 일부 부시료는 80°C 이하로 건조한 후 마노유발(agate mortar)에서 분쇄하였다.

퇴적물 중 원소들의 총 함량을 분석하기 위해 먼저 분말화된 퇴적물 시료 0.2 g을 평량하여 저압용 테플론 반응조(Teflon (FEP) vessel)에 넣고, 여기에 질산(HNO<sub>3</sub>)과 과염소산(HClO<sub>4</sub>) 혼합 용액 5 ml를 넣어 반응시켰다. 뚜껑이 꼭 닫힌 반응조를 120~150°C의 가열판 위에서 12시간 동안 가열-반응시킨 후, 여기에 불산(HF)과 과염소산(HClO<sub>4</sub>)을 각각 1 ml 씩 넣고 다

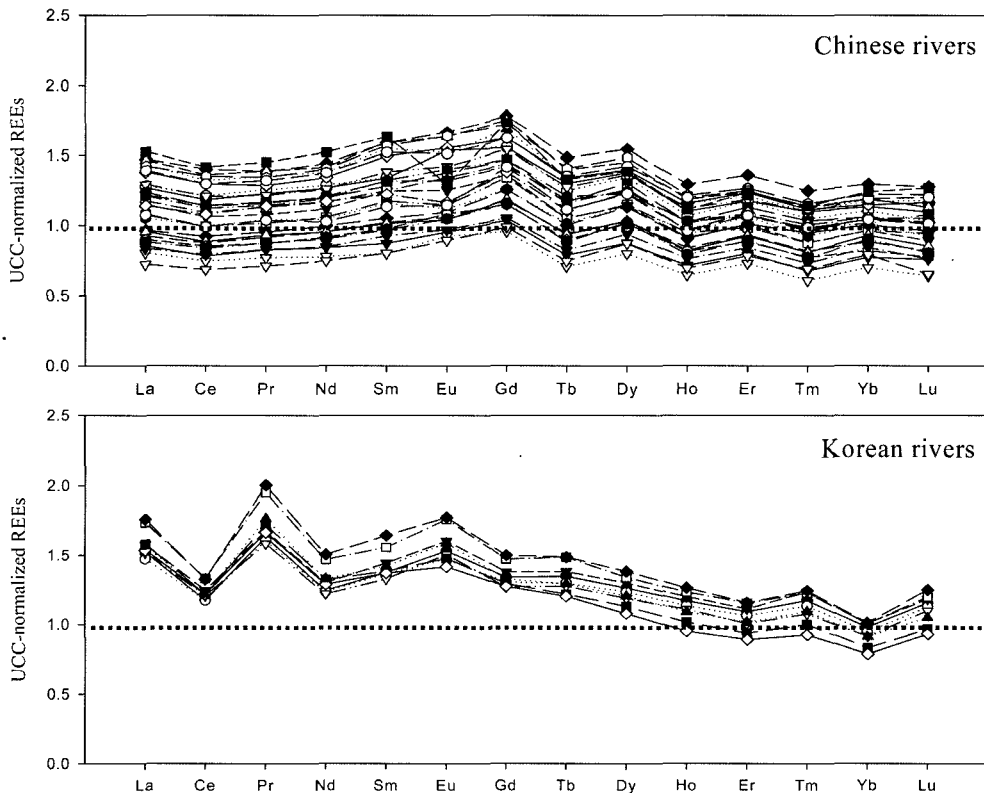
시 가열시켰다. 그런 후 반응조의 뚜껑을 열고 잔류 산을 휘발시키고 반응조에 1N 질산( $\text{HNO}_3$ ) 20 ml을 넣어 10분 동안 원소를 용출(elution)시켰다. 용출 용액을 적절히 희석하여 원소 농도를 한국기초과학지원연구원 동위원소분석실에서 VG Plasma Quad 모델의 유도결합플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, ICP-MS)로 측정하였다. 퇴적물 분석의 정확도를 확인·보정하기 위해 표준퇴적

물(standard raw material)인 MAG-1 (USGS)을 시료와 함께 분석하였다.

퇴적물의 조직과 입도를 분석하기 위해 부시료 중 유기물과 탄산염을 과산화수소( $\text{H}_2\text{O}_2$ )와 염산(HCl)으로 처리·제거한 후 63  $\mu\text{m}$  표준체(standard sieve)를 이용하여 조립질과 세립질 퇴적물로 분리하였다. 조립질과 세립질 퇴적물을 각각 건식체질법(standard dry sieving method)과 피펫법(pipetting method)을 사용

**Table 1.** Location, water depth, core length and corer type in each sampling stations in the study area (northern East China Sea). PC : piston corer, GC : gravity corer.

Station number	Location		Water depth (m)	Core length (cm)	Corer type
	Latitude ( $^{\circ}\text{N}$ )	Longitude ( $^{\circ}\text{E}$ )			
4	34 $^{\circ}$ 26'	128 $^{\circ}$ 30'	77	561	PC
15	32 $^{\circ}$ 40'	127 $^{\circ}$ 08'	130	460	PC
19	32 $^{\circ}$ 16'	126 $^{\circ}$ 30'	107	495	PC
20	31 $^{\circ}$ 55'	126 $^{\circ}$ 42'	107	560	PC
24	34 $^{\circ}$ 40'	129 $^{\circ}$ 03'	109	260	GC
25	34 $^{\circ}$ 50'	129 $^{\circ}$ 13'	133	350	GC
27	35 $^{\circ}$ 00'	129 $^{\circ}$ 00'	45	390	GC



**Fig. 3.** Pair diagrams showing UCC-normalized REE distribution patterns in Chinese and Korean river sediments. Chinese river sediments are sampled from Changjiang river estuary (14 samples), Old Huanghe (2), Huanghe Estuaries (12), and Korean sediments are from Keum (5) and Yeongsan (4) rivers. Note the enriched MREEs in Chinese sediments (C-type, see text), while enriched LREEs in Korean rivers (D-type).

해 1 $\mu$  간격으로 분석하였다. 분석된 자료의 입도조직 상수는 도표 계산법으로 계산하였다(Carver, 1971).

### 3. 결 과

#### 3.1. 중국과 한국 강 퇴적물 중 REE 함량특성

상부대륙지각(Upper Continental Crust, UCC)의 REE 함량(Taylor and McLennan, 1985)으로 정규화(normalize)된 강 퇴적물의 REE 분포양상을 그림 3에 도시하였다. 전반적으로 중국 강 시료 중 REE 함량은 UCC 함량보다 약간 높거나 비슷하고(UCC normalized REEs $\geq$ 1), 중간 희토류 원소들(middle rare earth elements, MREEs)이 가벼운 희토류 원소들(light rare earth elements, LREEs)과 무거운 희토류 원소들(heavy rare earth elements, HREEs)에 비해 약간 부화(enriched)된 형태를 보인다(convex-type distribution pattern, 이하 “C-type”; Fig. 3). 각 시료의 REE 분포양상은, 2개의 시료가 Eu에서 교차되는 것을 제외하면, 서로 평행하게 나타난다. 또한 Ce과 Eu의

함량이 주변 다른 원소들의 함량에 비해 결핍된 즉 음의 이상치(negative anomaly)를 보이지 않는다. 각 시료 중 LREEs와 MREEs, HREEs 간 함량변화 폭은 뚜렷하지 않다.

한국 강 기원 퇴적물의 REE 분포양상은 중국 강의 분포양상과 분명히 구분된다(Fig. 3). 전반적으로 한국 강 퇴적물의 REE 함량은 UCC 함량 보다 높고(UCC normalized REEs $>$ 1), 특히 LREEs 함량이 HREEs에 비해 높은 분포양상을 보인다(linearly decreasing pattern, 이하 “D-type”). 중국 강 기원 퇴적물의 특징인 MREEs의 부화 양상은 관찰되지 않는다. 한편, Ce은 음의 이상치를 보이는 반면 Eu는 특별한 이상치를 보이지 않거나 미약한 양의 이상치를 보인다(Fig. 3).

#### 3.2. 북동중국해 코아 퇴적물 중 REE 함량특성

북동중국해 대륙붕에서 채취된 총 7개의 코어시료에서 깊이별로 채취된 123개의 부시료 중 REE 함량은 대부분 UCC의 REE 함량과 비슷하다(UCC normalized REEs $\approx$ 1). 그러나 정점 15의 423cm 깊이 퇴적물의

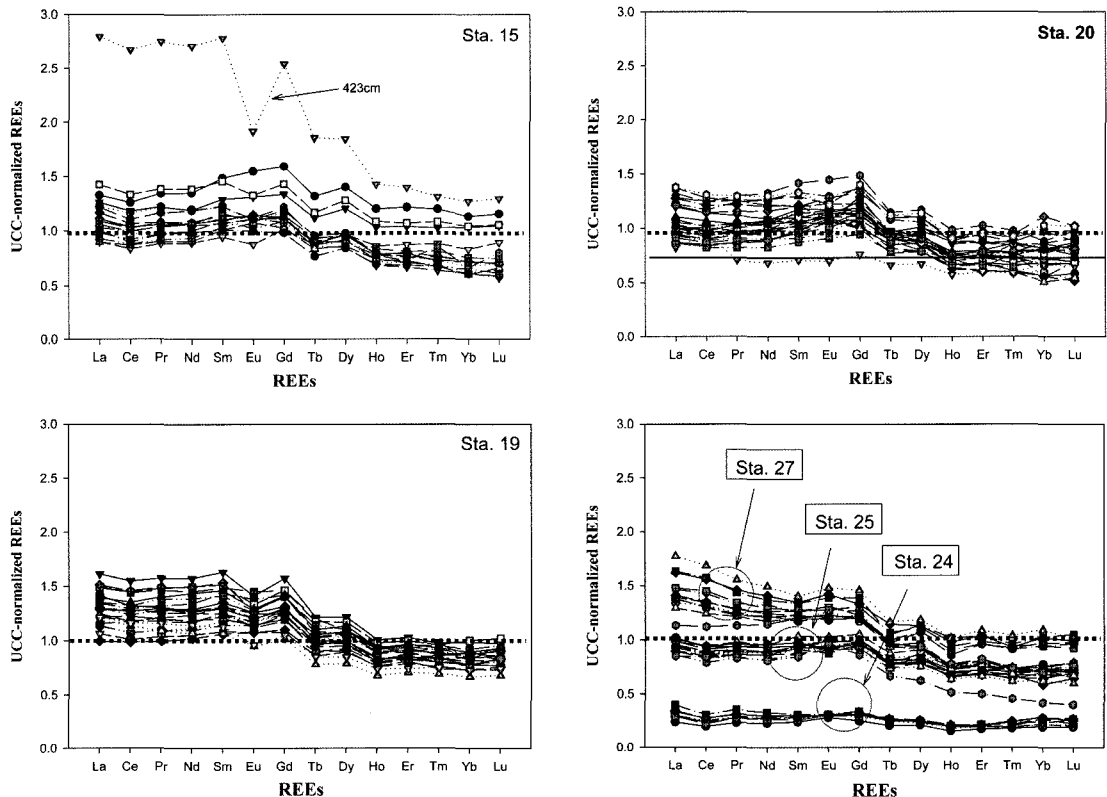


Fig. 4. Upper continental crust (UCC)-normalized rare earth elements (REE) distribution patterns in the core sediments from the northern East China Sea. Light REE (LREE) appear to be enriched than the heavy REE (HREE) in the distribution patterns.

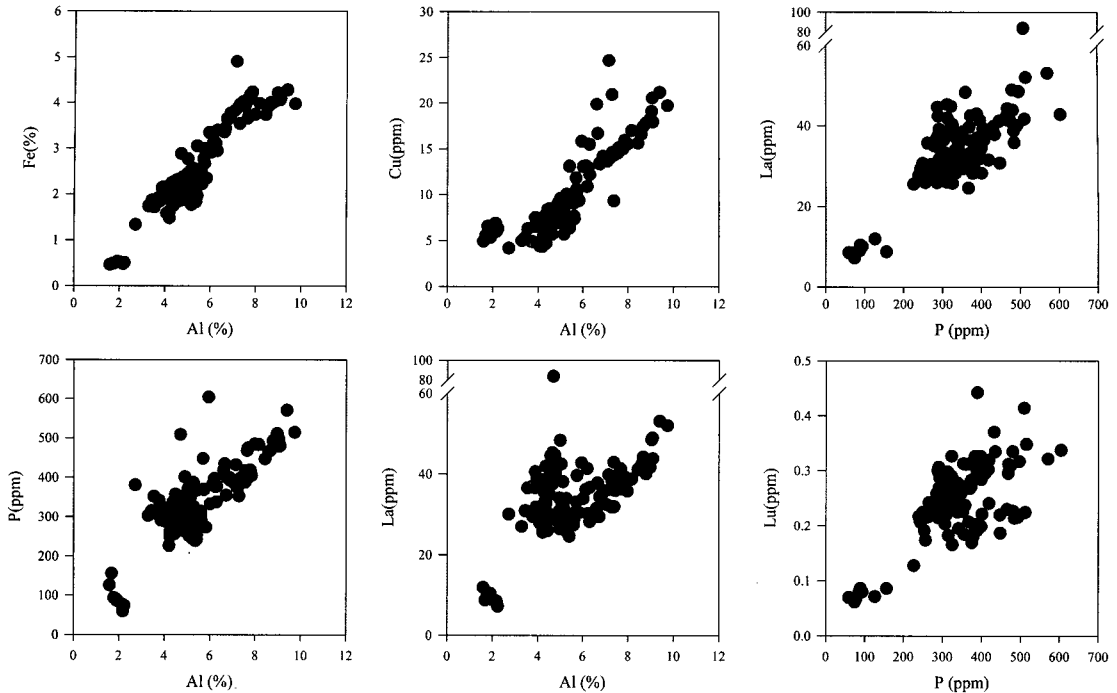


Fig. 5. Pair diagrams showing relationships between Al and (Fe, Cu, P, La) and between P and (La, Lu) in sediments from the northern East China Sea. Although there are many scattered data points in the diagrams, especially for La, linear relationships between the elements are obvious.

REE 함량은 UCC보다 월등히 높고, 정점 25 퇴적물에서는 약간 낮으며, 정점 24 퇴적물에서는 현저히 낮다(Fig. 4). 그런데 정점 24 퇴적물 중  $\text{CaCO}_3$  함량은 20~40%로 다른 정점의 함량(<10%)에 비해 훨씬 높다(KORDI, 2002). 따라서 정점 24 퇴적물에서 REE 함량이 낮은 현상은 REE 함량이 매우 낮은 탄산염이 다량 함유된 까닭으로 생각된다.

정점 20의 경우 뚜렷하지는 않지만 MREEs가 약간 부화된 것으로 나타나고, 정점 15 시료에서도 일부 MREEs가 부화된 경향이 보인다(Fig. 3). 정점 19 퇴적물에서는 전반적으로 LREEs가 HREEs에 비해 약간 부화된 경향을 보인다. 특히 한반도 인근 해역에서 채취된 정점 27의 경우 HREEs에 비해 LREEs 함량이 뚜렷이 높게 나타나 한국 강 퇴적물에서 보여지는 분포양상과 유사하다. 한편, 모든 REE 함량 분포양상에서 Ce과 Eu의 이상치는 뚜렷하지 않다(Fig. 4).

### 3.3. REE 원소간 상관관계 특성

퇴적물 중 금속원소의 함량은 일반적으로 입도의 영향을 강하게 받고, 그 결과 입도를 반영하는 Al 함량과 다른 원소간 상관관계가 통상 직선으로 나타난다.

본 연구결과에서도 Al과 Fe, Al과 Cu, Al과 P, Al과 La간 상관관계가 직선으로 나타난다(Fig. 5). 한편, P와 La, P와 Lu간에도 상관관계가 보이고, 분산 양상도 비슷하게 나타난다. 또한 회토류 원소간 상관계수가 모두 0.8 이상으로 매우 높다(Table 2). 이는 회토류 원소간 물리화학적 특성이 매우 유사하기 때문에 나타난 결과로 보인다. 그러나 Al과 La간 상관관계에서 많은 시료가 벗어나고(Fig. 5), Al과 회토류 원소간 상관계수 또한 0.5~0.6 정도로 크지 않은데(Table 2), 이는 입도 이외에 REE 함량을 조절하는 다른 요인이 있음을 시사한다.

## 4. 토 의

### 4.1 REE 함량변화의 주요 조절요인

한국 강 퇴적물의 REE 분포양상이, 중국 강 퇴적물과 다르게, LREE가 부화된 D-type으로 나타나는 원인은 1) 분석 과정상의 오류로 인해 LRREs에 비해 HREEs가 과소평가되었거나, 2) 한반도 기원 퇴적물 중 LREEs가 풍부한 증광물이 많이 함유되어 있을 가능성 등이 있다. 그런데 중국 강, 한국 강, 그리고 북

**Table 2.** A matrix map of correlation coefficients ( $R^2$ ) between elements in sediments from the northern East China Sea. Note the very high values between REEs, while not between Al and REEs.

	Al	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Al	1.00	0.58	0.58	0.52	0.50	0.49	0.64	0.55	0.59	0.57	0.57	0.60	0.57	0.60	0.57
La		1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.91	0.94	0.92	0.90	0.86	0.87	0.83	0.82	0.81
Ce			1.00	0.99	0.98	0.96	0.91	0.94	0.91	0.89	0.86	0.86	0.83	0.82	0.81
Pr				1.00	1.00	0.98	0.92	0.96	0.93	0.91	0.87	0.87	0.83	0.81	0.81
Nd					1.00	0.99	0.93	0.97	0.94	0.92	0.88	0.87	0.84	0.81	0.81
Sm						1.00	0.95	0.98	0.96	0.93	0.90	0.88	0.86	0.82	0.82
Eu							1.00	0.96	0.96	0.95	0.93	0.92	0.89	0.85	0.85
Gd								1.00	0.99	0.97	0.94	0.93	0.91	0.88	0.88
Tb									1.00	0.99	0.97	0.96	0.95	0.92	0.93
Dy										1.00	0.99	0.98	0.97	0.94	0.94
Ho											1.00	0.99	0.98	0.95	0.96
Er												1.00	0.98	0.97	0.97
Tm													1.00	0.97	0.98
Yb														1.00	0.98
Lu															1.00

동중국해의 퇴적물은 동일한 분석기관에서 동일한 방법으로 그리고 동시에 분석되었기 때문에 분석 과정상의 오류 특히 상대적 오차의 가능성은 크지 않다. 즉 퇴적물의 불충분한 용해에 의한 오류(Condie, 1991)가 한반도 기원 퇴적물에서만 선택적으로 발생했을 가능성은 거의 없기 때문에 D-type 분포양상이 분석상 오류 때문이라고 보기는 어렵다.

대부분의 암석에서 REE는 주요 원소가 아닌 미량으로 존재하는데, 암석을 구성하는 광물들은 REE의 총 함량에 따라 세 개의 그룹 즉 1) 매우 낮은 REE 함량을 보이고 대부분의 암석을 구성하는 석영, 장석 등의 광물들, 2) 필수적이지는 않지만 약 0.01wt.% 이상 미량으로 REE를 함유하는 약 200종의 광물 군, 3) 아파타이트, 알라나이트, 모나자이트 등 REE를 주요 원소로 함유하는 약 70종의 광물 군 등으로 나뉜다(Henderson, 1984). 이러한 함량 차이는 결정 구조의 차이와 광물이 형성될 당시의 물리·화학적 조건 등 여러 가지 원인에 의해 발생한다(Henderson, 1984). 화강암 중 REE 함량은 사장석, 정장석, 흑운모 등 주요 광물에 존재하는 양으로 대표되지만 통상 현격한 함량 차이는 REE(특히 LREE)가 농축된 스피넬, 아파타이트, 모나자이트와 같은 기타 광물(accessory mineral)의 함량에 의해 좌우된다. 점토광물 중 REE의 총 함량은 탄산염암이나 사암 중 함량보다는 높는데, 이는 점토광물 표면에 REE가 흡착-농축되어 있기 때문이다. 한편, 변성암 중 가넷에는 REE(특히 HREE)가 매우 농축되어 있고, 정출 말기에 형성된 페그마타이트와 같은 거정질 화강암에도 REE가 농축되어 있다

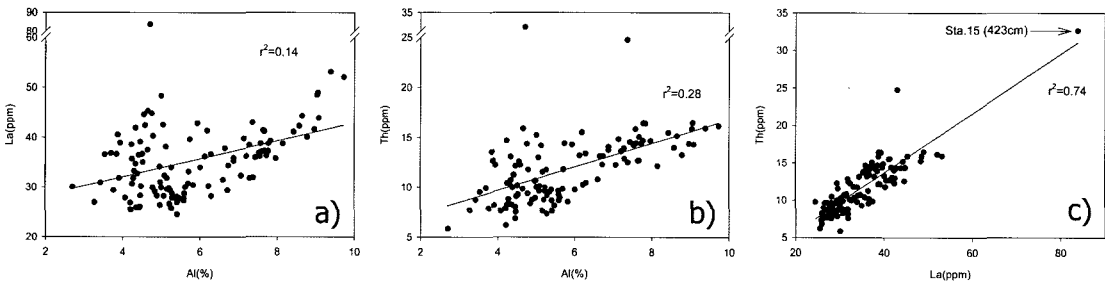
(Henderson, 1984).

한반도 연안에서 산출되고 REE를 다량 포함한 중광물로는 아파타이트( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ), 알라나이트( $(\text{Ce, Ca, Y})_2(\text{Al, Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{SiO}_4)_3\text{OH}$ ), 모나자이트( $(\text{Ce, La, Y, Th})\text{PO}_4$ ), 저어콘( $(\text{Zr, Y})(\text{Si, P})\text{O}_4$ ), 그리고 일부 크세노타임(Xenotime,  $\text{YPO}_4$ ) 등을 들 수 있다. 이 가운데 크세노타임은 주로 Y 그리고 Yb, Dy 등 일부 HREE를 주성분으로 함유하기 때문에 (Mason and Berry, 1968; Henderson, 1984), 크세노타임이 D-type 함량특성을 조절하는 중광물이라고 하기는 어렵다. 또한 크세노타임과 함께 주로 동반 산출되는 저어콘은 한반도 주변 퇴적물에서 흔히 출현하는 중광물 중 하나이지만(Lee *et al.*, 1988; KORDI, 2002), 크세노타임과 마찬가지로 주로 HREE를 많이 함유하므로(Mason and Berry, 1968; Henderson, 1984) 저어콘도 D-type을 지배하는 광물로 간주하기는 어렵다. 한편, 아파타이트 그룹은 매우 다양하지만, 가장 흔한 그룹은  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$  군으로 소위 “fluorapatite”라 불린다(Mason and Berry, 1968; Henderson, 1984). 이들 광물은 해양환경에서 자생적으로 형성되고, 일부는 육성기원 풍화산물로 생성되기도 한다. 이 광물에는 Ce와 HREE 계열의 원소들이 부화되어 있으나, 일부 태평양 심해 퇴적물 중 생물기원 아파타이트에 La 함량이 농축되어 나타나는 경우는 있다(Jung *et al.*, 1998). 그런데 북동중국해 퇴적물은 대부분 조립질이며, 따라서 수력학적 조건이 비교적 강한 환경에서 퇴적되었을 것이고, 퇴적물로의 산소공급도 용이하였을 것으로 생각된다. 결국 무산소 환경에서 형성되는 것으로 알려진

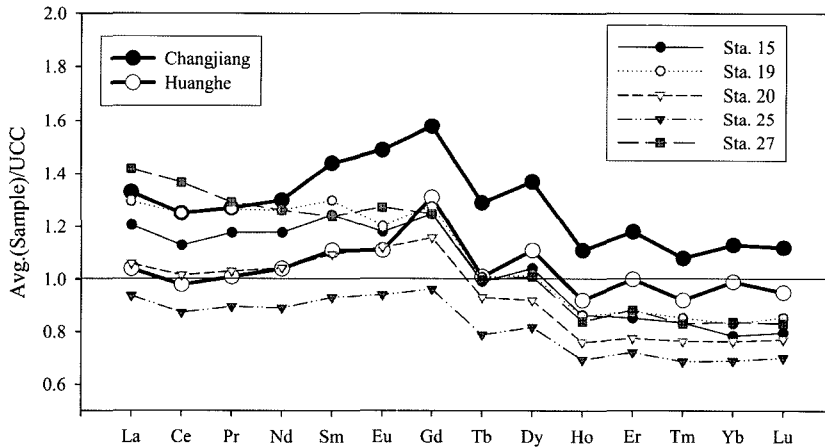
fluorapatite가 연구해역에서 자생적으로 형성되었다고 보기는 어렵다. 더욱이, 황하와 양쯔강에서 공급되는 퇴적물에서 REE 함량은 아파타이트에 의한 기여율이 상대적으로 낮다고 보고되고(Yang *et al.*, 2002), 연구지역 인근에서 아파타이트 함량이 높다는 보고 또한 찾기 어렵다. 실제 연구지역 퇴적물 중 중광물 관찰 결과를 볼 때 아파타이트는 거의 출현하지 않는다(KORDI, 2002). 따라서 아파타이트도 D-type 분포양상을 조절하는 주 요인으로 보기는 어렵다.

본 연구해역 퇴적물 중 Al과 La 함량 사이의 상관계수는 전 시료를 대상으로 했을 경우 0.58로 높지 않다(Table 2). 더욱이 Al과 La 함량이 낮고 탄산염이 풍부한 코아 24의 퇴적물을 제외한 시료에 대해 상관관계를 구한 결과, Al-La 함량간 상관계수는 0.14로 매우 낮게

나타난다(Fig. 6a). 이는 Fe, Cu 등 다른 일반적인 금속과 달리, REE 함량이 입도에 의해 주로 조절되지 않음을 의미한다. 또한 Al과 Th 함량간 상관계수도 0.28로 낮게 나타나므로(Fig. 6b) Th 또한 입도와 상관관계가 크지 않음을 알 수 있다. 그런데, La과 Th 함량 사이의 상관계수는 0.74로 높게 나타나(Fig. 6c), Th과 REE의 함량 변화가 서로 밀접한 관계가 있음을 지시한다. 한편, 본 연구지역은 물론 황해, 북동중국해의 다른 지역에서도 흔히 산출되는 모나자이트는 일반적으로 LREE가 부화되어 있고, 잔류광상 또는 해빈환경에서 산출되며, 주로 13 wt.% 이상의 ThO<sub>2</sub>와 동시에 출현하는 특징이 있다(Mason and Berry, 1968; Henderson, 1984; Lee *et al.*, 1988; KORDI, 2002; KORDI, 2005). 즉, 모나자이트를 제외한 다른 중광물들이 북동



**Fig. 6.** Three pair diagrams showing relationships between a) Al and La, b) Al and Th, c) La and Th in all sediments from the northern East China Sea, except CaCO<sub>3</sub>-enriched Sta.24 sediment samples in order to remove the dilution effect that is expected to be caused by carbonate materials generally with extremely low Al, La, and Th concentrations. A data point in c) represents the 423cm depth sample of Sta.15, which has very high heavy mineral content (about 6%) compared to other core-depth samples of Sta.15 (1-3%)(KORDI, 2002). Note poor linear relationships between Al and La ( $r^2=0.14$ ) Al and Th ( $r^2=0.28$ ), while a good linear relationship between La and Th ( $r^2=0.74$ ).



**Fig. 7.** Comparison of UCC-normalized REE distribution patterns in sediments from two Chinese rivers (Huanghe and Changjiang rivers) and the northern East China Sea. MREEs appear to be enriched in the Chinese river sediments. Note the depleted HREEs and enriched LREEs in sediments from this study area, especially Sta. 27 which is close from Nakdong river originated from the peninsula of Korea, compared to Chinese river sediments.



중국해 퇴적물 중 REE 함량을 조절할 가능성은 크지 않고, REE와 Th 함량 사이의 높은 상관관계를 고려할 때, 연구해역 퇴적물 중 REE 분포양상은 주로 모나자이트 함량변화에 의한 것으로 해석될 수 있다.

#### 4.2. 북동중국해 코아 퇴적물의 기원

퇴적물의 기원을 밝히기 위해서는 우선 대상 퇴적분지로 유입되는 강에서 유출되는 퇴적물의 조성(end-member composition)을 파악해야 한다. 북동중국해로 퇴적물을 공급해 온 주요 강은 중국 기원의 황하, 양쯔강, 약 100년 전에 흐른 고 황하, 그리고 한반도에서 유입되는 한강, 금강, 영산강, 낙동강, 섬진강 등이다. 특히 황하와 양쯔강은 한반도에서 기원하는 강에 비해 그 규모가 워낙 크기 때문에, 황해 및 북동중국해로 유입되는 퇴적물은 대부분 중국 강에서 기원했다고 생각할 수 있다(Yang *et al.*, 2003). 그러나, 황해 및 북동중국해 퇴적물이 중국 기원이라는 연구결과는 뚜렷하지 않고(Yang *et al.*, 2003; Lim, 2003; Yang *et al.*, 2004), 이러한 불분명한 연구결과와 원인 중 하나는 강 기원 퇴적물 조성에 관한 자료가 충분하지 않기 때문이다(Yang *et al.*, 2003).

북동중국해의 5개 코어시료 중 REE 분포양상을 중국과 한국 강 자료와 함께 도시한 결과 대부분 MREEs가 부화된 C-type과 LREEs가 부화된 D-type의 중간 형태를 보인다(Fig. 7). 그러나 정점 27 퇴적물의 REE 분포양상은 전형적인 D-type으로 나타난다(Fig. 7). 정점 27은 낙동강과 매우 인접한 곳으로 이 지점의 퇴적물은 한반도(낙동강)에서 기원되었다고 할 수 있다.

C-type과 D-type을 대표할 수 있는 특징은 각각 MREEs와 LREEs가 부화되어 있다는 사실이다. 이러한 특징에 착안, C-type과 D-type을 대표하는 수치적 LREEs에 비해 MREEs가 부화된 정도( $M_{(MREEs/LREEs)}$ )와 HREEs가 부화된 정도( $H_{(HREEs/LREEs)}$ )를 설정하여 그림에 도시하였다(Fig. 8).

$$M_{(MREEs/LREEs)} = \frac{\left( \sum_{j=Sm}^{Dy} \frac{C_j(\text{sample})}{C_j(\text{UCC})} \right)^5}{\left( \sum_{i=La}^{Nd} \frac{C_i(\text{sample})}{C_i(\text{UCC})} \right)^4}$$

$$H_{(HREEs/LREEs)} = \frac{\left( \sum_{j=Ho}^{Lu} \frac{C_j(\text{sample})}{C_j(\text{UCC})} \right)^5}{\left( \sum_{i=La}^{Nd} \frac{C_i(\text{sample})}{C_i(\text{UCC})} \right)^4}$$

UCC=upper continental crust,  $C_i$ =concentration of a specific REE(i)

그리고 각 정점 또는 강의 부시료들을 아래와 같은 식으로 평균하여, 각 정점과 강 퇴적물의 대표 값을 구하였다.

$$M_{(MREEs/LREEs)Avg.} = \text{Log}_{10} \left( \frac{\sum_{i=1}^n M_{(MREEs/LREEs)i}}{n} \right)$$

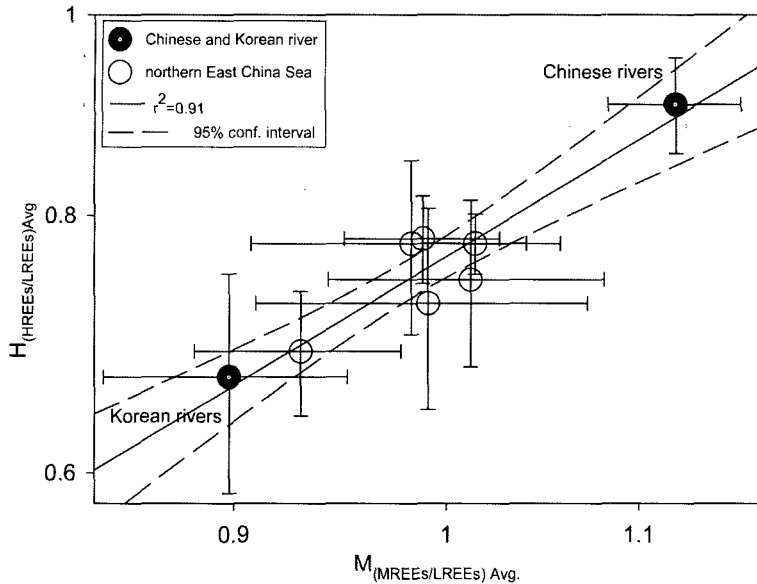
$$H_{(HREEs/LREEs)Avg.} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n H_{(HREEs/LREEs)i}}{n} \right)$$

$n$ =number of samples in individual coring stations in the northern East China Sea, Chinese rivers, and Korean rivers

그런 후, 배수를 등거리에 표기하기 위해 로그(Log) 좌표상에 중국 강, 한국 강 그리고 각 정점의( $M_{(MREEs/LREEs)avg.}$ ,  $H_{(HREEs/LREEs)avg.}$ )를 도시하였다(Fig. 8). 한편, MREEs는 드물게 Pm부터 Ho까지의 원소로 규정되기도 하지만(Henderson, 1980) 본 연구에서는 REE 분포양상과(Fig. 7) MREEs와 HREEs의 원소 수 등을 고려하여 MREEs를 Sm~Dy까지의 원소로 정의하였다.

중국 강, 한국 강, 그리고 연구해역 퇴적물의  $M_{(MREEs/LREEs)}$ 과  $H_{(HREEs/LREEs)}$  값은 전체적으로 일직선상에 분포한다(Fig. 8). 각 정점의 값들은 큰 오차범위(error bars)를 보이지만, 이러한 큰 변화폭에도 불구하고 연구지역 정점의 값들은 중국과 한국 강의 값 사이의 일직선 상에 위치한다. 또한 연구지역의 값들은 중국 강과 한국 강 값의 중간에 도시되어(Fig. 8) 북동중국해 동측에 위치한 연구해역의 퇴적물이 중국과 한국 강에서 기원된 퇴적물의 혼합체(mixture)임을 알 수 있다.

북동중국해 퇴적물은 황해 퇴적물과 마찬가지로 거대한 중국 강에서 배출된 퇴적물로 대부분 구성되어 있다고 생각할 수 있다(Lin *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2003). 특히 연구지역과 인접한 제주도 남쪽의 퇴적체는 황하 삼각주의 꼬리 부분(distal part)으로 보고되었다(DeMaster *et al.*, 1985; Milliman *et al.*, 1985; Alexander *et al.*, 1991). 그러나 위의 연구들을 포함한 대부분의 기존 연구지역들은 제주도 남서측에 위치하므로 본 연구해역인 북동중국해 동측과는 위치가 다르다(Lin *et al.*, 2002; Su and Huh, 2002; Yoo *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2003). 특히, 쿠로시오 해류와 북서 동중국해 사이에는 강한 대륙붕 전선(shelf front)이 존재하므로(Lie and Cho, 2002) 북동



**Fig. 8.** A pair diagram on log-sheet between  $M_{(HREEs/LREEs)Avg.}$  and  $H_{(HREEs/LREEs)Avg.}$  for the sediments from Chinese and Korean rivers and the northern East China Sea.  $M_{(MREEs/LREEs)}$  represents “an averaged value of “UCC-normalized middle rare earth element (MREE, Sm to Dy) contents” divided by “an averaged value of UCC-normalized light rare earth element (LREE, La to Nd) contents”.  $M_{(MREEs/LREEs)Avg.}$  means an averaged value of  $M_{(MREEs/LREEs)}$  values of many sediment samples in each coring station, Chinese rivers and Korean rivers. Data of Station 27 are included in Korean river data set because the Station 27 is very close from the Korean Peninsula and also Nakdong river. Heavy rare earth elements (HREEs) are Ho to Lu. A solid linear regression line in the figure has a high correlation coefficient ( $R^2=0.91$ ). Although some error bars (standard deviation) are out of range of the 95% confidence interval, almost all the data points are included in there.

중국해의 서측과 동측은 서로 다른 해양환경 특성을 보일 수 있다. 즉 남하하는 장수 연안수(Jiangsu coastal current, JCC), 양쯔강 희석수(Changjiang diluted water, CDW), 그리고 간헐적으로 흐르는 황해 난류수(intermittently flowing Yellow sea warm current, YSWC)의 영향을 강하게 받는 제주도 남서쪽(또는 북동중국해 서측) 퇴적체와 북동중국해 동측에 위치하고 쿠로시오 분류의 영향을 받는 본 연구해역과는 지역적 해양환경 특성이 구분된다(Fig. 1a). 더욱이 본 연구지역은 양쯔강과 600 km 이상 멀리 떨어져 있고, 연구지역 코아 15, 19, 20 퇴적물의 평균입도가 각각 2~4  $\Phi$  3~4  $\Phi$  2~8  $\Phi$  정도로 상당히 조립하며(KORDI, 2002), 북동중국해 표층 퇴적물도 대부분 조립하므로(Cho *et al.*, 1999), 중국 강에서 공급된 조립 퇴적물이 본 연구해역까지 공급되기는 쉽지 않았을 것으로 보인다. 한편, 제주도 남측 외대륙붕 퇴적체는 LGM 이후 퇴적물이 재동-재퇴적된 것으로 순 퇴적율이 거의 0에 가까울 것으로 보고된 바 있다(Su and Huh, 2002).

한편, 해수면이 낮았을 당시 한반도 기원 강의 유로는 지금보다 훨씬 길었을 것이고(Fig. 1), 따라서 현재

보다는 많은 양의 퇴적물이 해양으로 배출되었을 것으로 생각된다. 연구지역 북측(34~35°N, 128~129°E)에는 한반도에서 기원한 낙동강과 섬진강의 고수로(paleo-channel)가 많이 분포하는데, 이 지역의 조립 퇴적물은 과거 이러한 고 수로를 따라 공급된 결과물로 보고된다(Yoo *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2003). 또한 좀 더 넓은 연구지역 북측(33.5~35°N, 127.25~128.5°E)에 퇴적된 평균입도 8.2  $\Phi$ 의 빨은 한반도 섬진강에서 유출된 퇴적물이고, 평균입도 1~3  $\Phi$ 의 모래는 해수면이 낮았던 시기에 해변환경에서 퇴적된 해안 전면(shoreface) 퇴적물이라고 보고된다(Bahng *et al.*, 1995). 연구지역 코아 19 퇴적물의 입도는 전 깊이에서 변화가 없지만 사층리는 상부 2 미터 깊이까지 잘 발달되어 있다(KORDI, 2002). 또한 코아 20의 표층시료 중 2~3개 시료를 제외하면 상부 150cm 깊이까지는 조립하지만, 그 이하 퇴적층은 세립한 퇴적물로 구성되어 있다(KORDI, 2002). 그리고 상부 퇴적층에는 꽤 각편들이 산재하고 매우 활발한 생물교란 흔적이 많지만 그 이하 깊이 퇴적층에서는 조수(tidal) 기원으로 해석되는 평행 엽층리(parallel laminae), 사층리(cross lami-



Fig. 9. Photographs showing core sediment sections of station #20. Sediments in the upper part of the core sample (0-150cm) are mixed with coarse grains and fine sediments (i.e., poorly sorted), and boulders are intercalated in the layer. In lower part of this core sample, there are numerous sediment layers such as parallel and cross laminae that can be easily found in the modern tidal flat environment.

nae) 등 다양한 물리적 구조들이 뚜렷하게 나타난다(Fig. 9; KORDI, 2002). 이러한 사실은 코어 19의 상부와 코어 20의 하부 퇴적물이 홀로세 기간 중 조수 환경에서 퇴적되었음을 의미한다(KORDI, 2002).

전체적으로, 중국 강에서 유출된 퇴적물이 매우 많지만 현재의 해양환경 조건에서는 뜬짐(suspended load) 또는 밑짐(bed load) 형태로 연구지역까지 이동·집적되기는 쉽지 않았을 것으로 보인다. 그런데, 북동중국해에서 조석작용에 의한 퇴적물의 재동력(reworking force)은 현재보다는 과거에 더 강했을 것으로 보고된다(Uehara and Saito, 2003). 따라서 연구지역 퇴적물은 과거 중국 대륙과 한반도에서 흘러 나온 퇴적물이 고기 강 수로(paleo-river channel, Fig. 1)를 따라 북동중국해 고 연안(paleo-coast)으로 공급되어 재동-재분포된 혼합기원 퇴적물로 사료된다.

### 5. 요약 및 결론

중국과 한국 강에서 유출되는 퇴적물 중 REE 분포양상은 각각 MREEs가 부화된 convex-type (“C-type”)과 LREEs가 부화된 linearly-decreasing type (“D-type”)으로 나타난다. 한반도와 인접한 코어 27 퇴적물의 REE 분포는 한국 강 퇴적물과 유사하고, 북동중국해 퇴적물의 분포양상은 중국과 한국 강 퇴적물이 혼합된 형태를 보인다(Fig. 8). 한편, 연구해역 퇴적물의 REE 함량을 조절하는 주요 인자는 LREEs와 Th 이 부화되어 있는 모나자이트로 생각된다.

연구지역 중 외대륙붕에 위치한 코어 15, 19, 20 퇴적물은 평균입도가 각각 2~4 Φ 3~4 Φ 2~8 Φ로 조립하며, 과거 해수면이 낮은 시기 동안 수력학적 조건이 강했던 연안환경에 쌓인 퇴적물로 보인다. 특히, 코어 15와 19, 그리고 코어 20의 상부 150cm 깊이까지 분포하는 조립 퇴적물은 해침모래층(transgressive sand sheet)이고, 코어 20의 150cm 하부에 쌓인 세립 퇴적물은 해수면이 낮았을 때 쌓인 조수환경 퇴적물로 해석된다. 이러한 결과에 근거할 때 LGM 이후 중국 대륙과 한반도에서 북동중국해로 공급된 세립 퇴적물의 양은 적었고, 북동중국해 퇴적물의 대부분은 과거 해수면이 낮았을 때 쌓인 잔류 퇴적물(relic sediment)로 판단된다.

북동중국해 퇴적물의 기원은 REE 분포양상에 근거할 때 한국과 중국 기원 퇴적물이 혼합된 것으로 나타나므로(Fig. 8) 중국과 한국 강 기원 퇴적물의 혼합체로 해석할 수 있다. 그러나 조석작용과 파랑이 강했던 북동중국해의 고 연안환경에서 퇴적물이 체질(winnowing)되는 과정 중 LREEs가 부화된 중광물(예: 모나자이트)이 중국기원 퇴적물에 선택적으로 집적되어 초래되었을 가능성도 배제할 수 없다. 이 경우, 북동중국해 퇴적물이 중국 기원임에도 불구하고 북동중국해 퇴적물 중 REE 분포양상은 마치 중국과 한국 기원 퇴적물의 혼합체인 것처럼 보일 수 있다. 그런데 황해와 북동중국해 및 대한해협 연안의 수많은 퇴적물에서 나타나는 중광물의 함량(각종 중광물의 총 함량)은 2~4% 또는 한반도 남동해역에서 최대 10% 이상에 이르지만(KORDI, 2005), 코어 15, 19, 20 퇴적물의 중광물 함량은 6%를 넘지 않는다(KORDI, 2002). 즉, 주변해역 퇴적물에 비해 코어 15, 19, 20 퇴적물중 중광물 함량이 특별히 높지 않고, 따라서 체질작용에 의해 북동중국해 퇴적물에 중광물이 집적되었다고 보기는 어렵다. 특히 대한해협과 인접한 코어 25 퇴적물중 중광물의 총 함량은

0.2~0.4 %로 현저히 낮음에도 불구하고, REE 분포양상은 중국과 한국 기원의 중간 형태로 나타난다. 더욱이 퇴적물 전체(bulk sediments) 또는 전체 중광물 중 모나자이트만의 함량분포를 알 수는 없는 현 단계에서 체질작용에 의한 북동중국해 퇴적물중 모나자이트의 집적을 논하는 것은 무리로 판단된다. 따라서, 현재까지 도출된 자료에 근거할 때, 북동중국해 퇴적물은 중국은 물론 한반도에서도 기원한 퇴적물이 서로 혼합된 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국해양연구원의 “황해-북동중국해 퇴적물의 기원지 추적자 개발” 연구사업과 해양수산부의 “배타적 경제수역 해양자원조사” 연구사업의 지원을 받았습니다. 세심한 심사를 해주신 목포대학교 조영길 교수님께 감사드립니다. 그리고 시료채취와 분석을 도와주신 군산대학교 해양학과 지질해양학 연구실 학생들에게도 감사드립니다.

### 참고문헌

- Alexander, C. R., DeMaster, D. J., Nittrouer, C. A. (1991) Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: the Yellow Sea. *Mar. Geol.*, v. 98, p. 51-72.
- Bahng, H. G., Min, G. H. and Oh, J. K. (1995) Sedimentary environment of bimodal shelf sediments: southern continental shelf of Korean Peninsula. *J. Korea Soc. Oceanogr.*, v. 30, p. 1-12.
- Cho, Y. G., Lee, C. B. and Choi, M. S. (1999) Geochemistry of surface sediments off the southern and western coast of Korea. *Mar. Geol.*, v. 159, p. 111-129.
- Chough, S. K., Lee, H. J. and Han, S. J. (1991) Sedimentological and geotechnical properties of fine-grained sediments in part of the South Sea, Korea. *Cont. Shelf Res.*, v. 11, p. 183-195.
- Chough, S.K., Lee, H. J. and Yoon, S. H. (2000) *Marine Geology of Korean Seas*. Elsevier, Amsterdam, 313p.
- Condie, K. C. (1991) Another look at rare earth elements in shales. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 55, p. 2527-2531.
- DeMaster, D. J., McKee, B. A., Nittrouer, C. A., Qian, J. G., Cheng, G. D. (1985) Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, v. 4, p. 143-158.
- Henderson, P. (1984) *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, 510p.
- Jung, H. S., Choi, M. S., Kim, D., Cha, H. J. and Lee, K. Y. (1998) Geochemistry of rare earth elements in two-color core sediments from the Korea Deep Ocean Study (KODOS)-90 site, western part of Clarion-Cliperton fracture zone, northeast equatorial Pacific. *Geochem. J.*, v.32, p. 281-299.
- KORDI (2002) *National exploration of marine resources in the Korea Exclusive Economic Zone (EEZ)*. Ministry of Marine Affairs and Fishery, 769p.
- KORDI (2005) *Oceanographic Atlas of Korean waters*, <http://www.kordi.re.kr>.
- Lee, C.B., Jung, H. S. and Jeong, K. S. (1992) Distribution of some metallic elements in surface sediments of the southeastern Yellow Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, v. 27, p. 55-65.
- Lee, H. J., Jeong, K. S., Han, S. J. and Bahk, K. S. (1988) Heavy minerals indicative of Holocene transgression in the southeastern Yellow Sea. *Cont. Shelf Res.*, v. 8, p. 255-266.
- Lee, H.J. and Chu, Y. S. (2001) Origin of inner-shelf mud deposit in the southeastern Yellow Sea: Huksan Mud Belt. *J. Sediment. Res.*, v. 71, p. 144-154.
- Lim, D. I. (2003) Geochemical compositions of coastal sediments around Jeju island, south sea of Korea: potential provenance of sediment. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, v. 24, p. 337-345.
- Lie, H. J. and Cho, C. H. (2002) Recent advances in understanding the circulation and hydrography of the East China Sea. *Fisheries Oceanogr.*, v. 11, p. 318-328.
- Lin, S., Hsieh, I. J., Huang, K. M. and Wang, C. H. (2002) Influence of the Yangtze river and grain size on the spatial variations of heavy metals and organic carbon in the East China Sea continental shelf sediments. *Chem. Geol.*, v. 182, p. 377-394.
- Liu, J., Zhu, R and Li, G. (2003) Rock magnetic properties of the fine-grained sediment on the outer shelf of the East China Sea: implication for provenance. *Mar. Geol.*, v.193, p. 195-206.
- Mason, B. and Berry, L. G. (1968) *Elements of mineralogy*. Freeman and Company, 550p.
- Milliman, J. D., Beardsley, R. C., Yang, Z. S., Limeburner, R. (1985) Modern Huanghe-derived muds on the outer shelf of the East China Sea: identification and potential transport mechanisms. *Cont. Shelf Res.*, v. 4, p. 175-188.
- 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. *Mar. Geol.*, v. 170, p. 271-288.
- Park, S. C., Han, H. S. and Yoo, D. G. (2003) Transgressive sand ridges on the mid-shelf of the southern sea of Korea(Korea Strait): formation and development in high-energy environments. *Mar. Geol.*, v. 193, p. 1-18.
- Park, Y. A. and Gong, W. S. (2001) *Quaternary environment, Korea*. Seoul Nat. Univ. Press, 564p.
- Park, Y. A. and Khim, B. K. (1992) Origin and dispersal of recent clay minerals in the Yellow Sea. *Mar. Geol.*, v. 104, p. 205-213.
- Su, C. C. and Huh, C. A. (2002) <sup>210</sup>Pb, <sup>137</sup>Cs and <sup>239</sup>, <sup>240</sup>Pu in East China Sea sediments: sources, pathways and budgets of sediments and radionuclides. *Mar. Geol.*, v. 183, p. 163-178.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M. (1985) *The continental*

- crust: its composition and evolution. Blackwells, Oxford, 312p.
- Uehara, K. and Saito, Y. (2003) Late Quaternary evolution of the Yellow/East China Sea tidal regime and its impacts on sediments dispersal and seafloor morphology. *Sediment. Geol.*, v. 162, p. 25-38.
- Yang, S. Y., Lim, D. I., Jung, H. S. and Oh, B. C. (2004) Geochemical composition and provenance discrimination of coastal sediments around Cheju Island in the southeastern Yellow Sea. *Mar. Geol.*, v. 206, p. 41-53.
- 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-Sci. Rev.*, v. 63, p. 93-120.
- Yang, S. Y., Jung, H. S., Choi, M. S. and Li, C. X. (2002) The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtz) and Huanghe (Yellow) river sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 201, p. 407-419.
- Yoo, D. G. and Park, S. C. (2000) High-resolution seismic study as a tool for sequence stratigraphic evidence of high-frequency sea-level changes: latest Pliocene-Holocene example from the Korea Strait. *J. Sediment. Petrol.*, v. 70, p. 296-309.
- Yoo, D. G., Lee, C. W., Kim, S. P., Jin, J. H., Kim, J. K. and Han, H. C. (2002) Late Quaternary transgressive and highstand systems tracts in the northern East China Sea mid-shelf. *Mar. Geol.*, v. 187, p. 313-328.
- Yoo, D. G., Park, S. C., Sunwoo, D. and Oh, J. H. (2003) Evolution and chronology of late pleistocene shelf-perched lowstand wedges in the Korea strait. *J. of Asian Earth Sci.*, v. 22, p. 29-39.

---

2005년 8월 3일 원고접수, 2006년 2월 6일 게재승인.