

제주도 주변 대륙붕 퇴적물의 REE와 Sr-Nd 동위원소 조성

김태정 · 윤정수*

제주대학교 지구해양학과, 690-756, 제주특별자치도 제주시 제주대학로 102

REE and Sr-Nd Isotopic Composition of the Shelf Sediments around Jeju Island, Korea

Tae-Joung Kim and Jeungsu Youn*

Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 690-756

Abstract: REE, major and trace elements, and Sr-Nd isotopic ratios of surface sediments around Jeju Island were analyzed for identifying the origin of the sediments. The Chemical Index of Alteration (CIA) between 44.2 to 68.9 (av. 59.4) shows a similarity with the Huanghe sediment. The most sediments found within the study areas show a very similar chondrite-normalized REE pattern that has enriched LREE ($La_{(N)}/Sm_{(N)} > 3$) and small negative Eu anomaly, typically of average shales. The UCC-normalized REE patterns of the southwestern offshore sediment samples show a very similar pattern with the Changjiang sediment with enriched in most REE and more convex REE pattern than those of the Huanghe and Keum rivers sediments, which indicates that the Changjiang River's suspended sediments have been transported into the western part of Jeju Island. The $^{87}Sr/^{86}Sr$ isotopic ratios vs $\epsilon_{Nd}(0)$ values were thus used as a tracer to discriminate the provenance of sediments in the study area. Based on the discriminated diagram, it clearly showed that most sediments in the western and northwestern part were closely plotted with sediments of the Huanghe River. However, the sediments in the southwestern part near the Changjiang estuary were closely plotted with submerged delta sediments of the Changjiang River. In contrast, the sediment samples of the northeastern part showed discriminative figures from those of the Chinese rivers. It suggests that sediments around Jeju Island must be originated from diverse sources.

Keywords: surface sediment, REE, Sr-Nd isotopic ratios, Chinese and Korean rivers, Jeju Island

요약: 제주도 주변 대륙붕해역에 분포하는 퇴적물의 기원지를 해석하기 위해 표층퇴적물의 희토류원소(REE), 주성분 및 미량원소, Sr-Nd 동위원소비를 분석하였다. 퇴적물의 화학원소에 근거한 변질지수(CIA)는 44.2-68.9(av.59.4)의 범위를 보이며 황하강퇴적물과 유사하였다. 연구지역 퇴적물을 콘드라이트로 표준화한 REE 패턴에서 대부분 LREE가 부화된($La_{(N)}/Sm_{(N)} > 3$) 작은 Eu 부(-) 이상을 가지는 전형적인 셰일의 희토류원소의 패턴을 나타낸다. UCC로 표준화한 REE 패턴에서 연구지역 남서쪽 외해지역의 퇴적물 시료들은 황하나 금강기원 퇴적물보다 양자강퇴적물과 유사한 높은 희토류원소함량과 위로 볼록한 REE 패턴을 보여 양자강기원 부유물질이 제주도 서쪽해역까지 운반되고 있음을 의미한다. $^{87}Sr/^{86}Sr$ 동위원소비와 $\epsilon_{Nd}(0)$ 의 구분지수는 연구지역 퇴적물의 기원지를 밝히는데 지시자로 제시할 수 있었다. 연구지역의 서쪽과 북서쪽에 분포하는 대부분의 퇴적물은 황하강 퇴적물 주위에 밀집 분포하는 특징을 보이고, 양자강 하구역과 가까운 남서쪽지역의 퇴적물들은 양자강 수중삼각주 퇴적물과 유사성을 보였다. 반면 제주도 북동쪽지역의 퇴적물은 중국의 강기원 퇴적물과는 다른 지역에 위치하는 특징을 보여, 따라서 제주도 주변해역은 복잡기원 퇴적물이 집적되고 있음을 의미한다.

주요어: 표층퇴적물, 희토류원소, Sr-Nd 동위원소비, 중국과 한국의 강, 제주도 주변해역

*Corresponding author: jsyoun@jejunu.ac.kr
Tel: +82-64-754-3432
Fax: +82-64-725-2461

서 론

본 조사지역은 북위 32°00'-34°00', 동경 123°00'-127°00' 범위에 위치하는 제주도 주변해역으로 황해 남부와 동중국해 북부가 포함되는 대륙붕지역으로서 주변 육상으로부터 다양하게 퇴적물을 공급받고 있는 지역이다(Fig. 1). 황해는 한반도와 중국대륙으로 둘러싸여 있는 평균 수심이 50 m에 달하는 반폐쇄형의 천해수역으로 북쪽으로는 발해만과 연결되며, 양자강 하구역의 귀동(Qidong)에서 제주도에 이르는 경계면을 따라 남쪽으로는 동중국해와 접해 있다. 해저지형은 편평한 서부수역과 경사가 급한 동부수역으로 구분이 뚜렷하며, 수심은 연안에서 중심부로 갈수록 증가하여 중앙부에서 분지지형을 형성한다.

황해 남부의 대륙붕에는 중국의 황하강(Huanghe River)과 양자강(Changjiang River)으로부터 각각 약 1.1×10^9 ton/yr 과 4.9×10^8 ton/yr에 달하는 육상기원 퇴적물이 공급되며 또한 한반도의 여러 강으로부터 약 5.0×10^6 ton/yr의 퇴적물이 공급된다(박용안 외, 1994; Schubel et al., 1984). 중국의 주요 강들로부터 유입된 퇴적물의 대부분은 황해의 서부와 중앙부에 퇴적되며, 황해 동측북부의 상대적으로 좁은 해역은 한반도의 크고 작은 강과 하천을 통해 유입된 퇴적물이 분포하는 것으로 보고되었다(Chough and Kim, 1981; Alexander et al., 1991).

동중국해는 서태평양과 황해를 연결하는 수심 200 m 이하인 넓은 대륙붕과 좁은 대륙사면으로 이루어져 있으며(Liu et al., 2000) 후기 제4기 빙하기-간빙기에 일어난 전 지구적인 해수면 변동에 따라 대륙붕지역은 육상과 천해역 환경이 반복된 지역이다(Li et al., 1999; Liu et al., 2000). 동중국해의 내대륙붕역은 50 m 등수심선을 기준으로 할 때 양자강 하구역인 서쪽에 위치하여 이곳에는 수중삼각주가 넓게 분포하고 있으며, 외대륙붕역에 해당하는 중앙부는 50-100 m 정도의 수심을 보이며 이곳에도 많은 단구가 분포하고 있다(Zhu and Wang, 1988).

황해와 동중국해 퇴적물에 대한 지화학적 및 고환경 변화의 연구로서 Milliman et al.(1985)은 해역퇴적물에서 황하와 양자강기원 퇴적물의 구별에는 점토 광물 조성, 광물형상 및 화학조성의 특징에 의해 동중국해에 분포하는 퇴적물을 황하기원형과 양자강기원형으로 구분하는 연구를 하였고, DeMaster et al.(1985)는 동중국해 대륙붕지역에 분포하는 니토대에

서 동위원소를 이용한 퇴적률 및 퇴적물 수지(budget)를 평가하는 연구를 하였고, Zhao et al.(1990)은 남황해 중앙부에 분포하는 니질퇴적체(CYSM, Central Yellow Sea Mud)에 대한 ^{210}Pb 동위원소를 이용한 퇴적률 측정과 화학조성의 특징에 근거하여 이곳의 니토는 황하강으로부터 운반된 물질, 장수 북쪽지역의 고향하 삼각주 해안의 침식·운반된 물질 및 양자강기원 물질이 혼합된 복합기원 현생니토대(multi-source modern mud)로 해석하였다. Zhao and Yan (1992)은 황하, 양자강 및 동중국해 대륙붕 지역에서 채취된 퇴적물에 대한 60여종의 화학분석치로부터 근원지별 배경농도와 이들을 식별할 수 있는 지화학적 연구를 하였고, 임동일 외(2007)은 한국 서남해역에 분포하는 니질퇴적체에 대한 주요원소와 Sr-동위원소비의 연구를 통해 이곳 니질퇴적체를 한국과 중국의 혼합기원으로 해석하였으며, 남승일 외(2003)은 황해 남부해역과 동중국해 북부해역에서 채취된 코아 퇴적물 시료에 대한 유기지화학적 및 안정동위원소값을 이용한 고환경변화에 관한 연구를 하였다. 윤정수 외(2005, 2006)와 Youn and Kim(2011)은 퇴적물의 화학조성 특징과 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소비를 이용한 동중국해 대륙붕 퇴적물의 기원지 추적자 연구에서 양자강기원 부유퇴적물의 동중국해 외대륙붕의 니토대 분포지역으로 공급될 가능성을 지적하였고, 윤정수와 김태정(2008)은 퇴적물의 지화학적 연구에서 제주도 서부해역은 황하와 양자강에서 운반된 복합기원 퇴적물의 집적되는 지역으로 해석하였다. Yang and Youn (2007)은 황해지역 니질퇴적물에 대한 퇴적률과 지화학적 특징에 근거해 남황해 중앙부에 분포하는 니질 퇴적물은 주로 황하강으로부터 공급된 퇴적물로 구성되어 있고, 동쪽의 사질퇴적물은 후빙기 해침 기간에 한반도 강들로부터 기원 되었다고 해석하였다. 그러나 남황해 중앙부에 광범위하게 분포하는 니토대(CYSM), 한국 남서해 연안에 분포하는 니토대(SEYSM), 제주도 남서쪽 동중국해 외대륙붕에 형성된 니토대(SWJIM)는 대부분 중국의 황하와 양자강 및 한반도 서해안의 강들로부터 공급된 것으로 평가하고 있으나, 아직까지 기원지 구분에 이용될 수 있는 확실한 지화학적 추적자가 제시되지 못한 상태이다. 이처럼 황해 남부와 동중국해 북부지역은 중국과 한반도 주변의 육지에서 강과 대기를 통해 유입되는 물질과 해류에 의해서 운반된 물질로 혼합되어 이 지역의 복잡한 해양조건을 반영하므로 유입된 물질들의 근원지별로 지화학적 특성

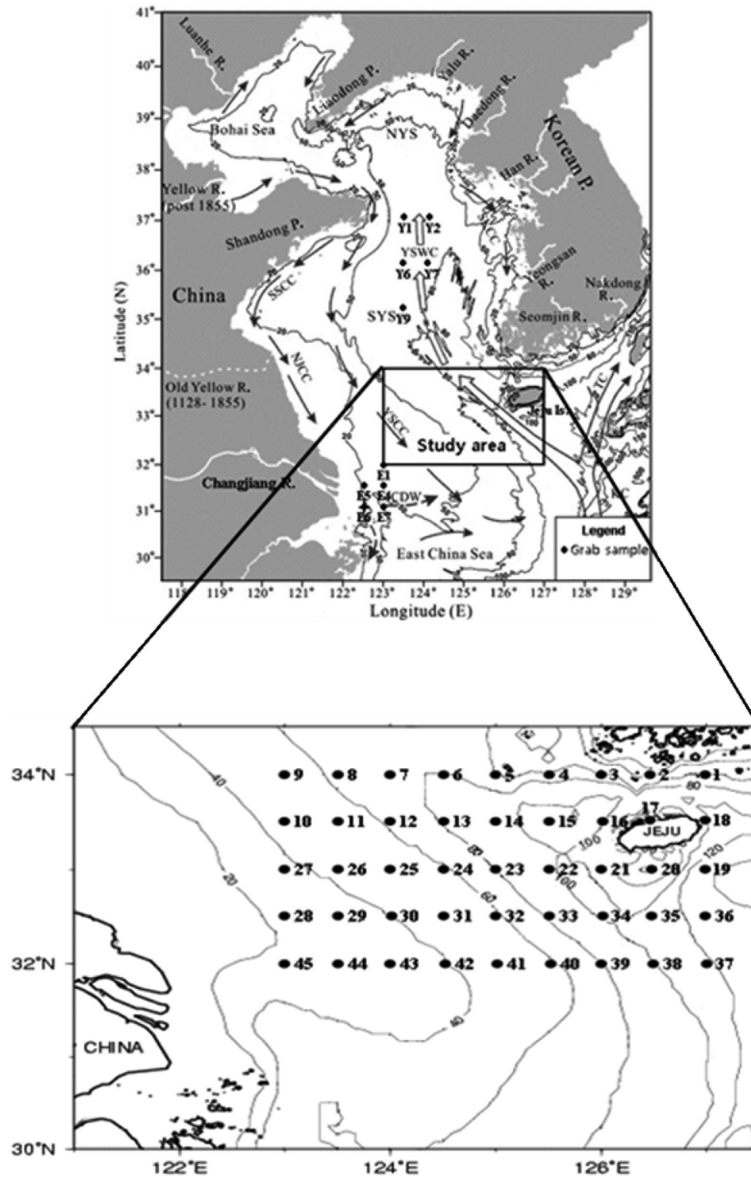


Fig. 1. Study area, sampling sites and bathymetry around Jeju Island. Contours in meters. Y₁-Y₇ and E₁-E₇ Sr isotopic data from Youn and Kim (2011).

이 명확히 밝혀지지 못한 상태에 있다. 따라서 본 연구에서는 제주도 주변해역에서 채취된 표층퇴적물 시료에 대한 입도분석과 주성분 및 미량원소, 희토류원소를 분석하여 이미 연구 보고된 중국의 황하와 양자강 및 한국의 강 퇴적물 등의 값과 비교하여 고찰하고, Sr-Nd 동위원소비(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)의 분석연구를 수행하여 제주도 주변대륙붕해역에 분포하는 퇴적물의 근원지를 해석하였다.

연구 방법

본 연구를 위해 제주도 주변 대륙붕해역(동경 123°00'-127°00', 북위 32°00'-34°00')의 45개 정점에서 표층퇴적물 시료를 채취하였다(Fig. 1). 퇴적물의 입도 분석은 Ingram(1971)과 Galehouse(1971)의 방법에 따라 유기물과 탄산염을 제거한 후 4Φ (63 μm)체를 사용하여 조립질과 세립질로 분리하였다. 조립질 퇴

적물은 건식체질 방법으로, 그리고 세립질 퇴적물은 피펫 방법으로 입도별 중량 백분율을 1 ϕ 간격으로 구분하여 Folk and Ward(1957)가 제시한 도표 계산법에 따라 입도조직 상수를 계산하였다. 퇴적물의 원소함량 분석을 위한 시료는 먼저 입도에 따른 광물 조성 차이의 영향을 최소화하기 위해 습식 체질하여 4 ϕ (63 μ m)보다 세립한 니토(실트+점토) 입자만을 사용하였으며, 분석된 시료는 100°C로 건조시킨 후 agate mortar에서 분말화하여 분석에 용이하도록 처리하였다. 이렇게 분말화된 퇴적물 시료 0.2 g을 테플론 가압산분해용기(Savillex™)로 HF, HClO₄, HNO₃ 혼합용액으로 반응시켜 규산염 광물 격자를 파괴시킨 후 1M HNO₃ 용액으로 추출하였다(Kitano and Hujiyoshi, 1980). 전처리된 시료들의 주성분, 미량원소 및 희토류원소 분석은 한국기초과학지원연구원의 ICP-AES와 ICP-MS를 각각 이용하여 정량되었다. 각 시료의 원소분석 자료의 정확도를 검증하기 위하여 NRCC의 MESS-3을 시료와 같이 처리하였고, 회수율은 91.7101%의 범위로 비교적 만족스러운 수준이었다.

스트론튬-네오디뮴(Sr-Nd) 동위원소 분석을 위해 채취된 시료는 제주도 주변해역에서 18개 시료를 선택하였고, 황해 중앙부해역과 양자강하구 연안역에서 각각 5개의 퇴적물 시료를 채취하였다(Fig. 1). 채취된 시료에 대해 해수기원의 스트론튬(즉 biogenic carbonates와 Fe/Mn oxy-hydroxides)을 제거하기 위해 Eisenhaner et al.(1999) 방법에 따라 1N-HCl로 처리하였다(Snoeckx et al., 1999). 또한 입도의 영향을 최소화하기 위해 염산처리된 28개의 시료에 대해 230 mesh체를 사용하여 습식 체질한 후 세립부 시료를 건조시켜 10 g 정도를 분말화하여(Tutken et al., 2002) 이 시료를 한국기초과학지원 연구원에 의뢰하여 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 및 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 동위원소비를 분석하였다. 분석기간 중 반복측정된 표준시료의 La Jolla (JNdi)와 JNdi-NBS987의 동위원소비는 각각 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd이 0.512108±5, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr이 0.710267±4이었고, $\epsilon_{Nd}(0)$ 값은 [¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd]_{CHUR}=0.512638에 의해 계산하였다.

연구결과 및 논의

표층퇴적상의 조성분포

연구지역 표층퇴적물의 유형은 소량자갈함유니질모래((g)mS), 니질모래(mS), 모래(S), 사질니토(sM), 니토(M) 등으로 총 9개 유형의 분포를 보이나, 크게

Table 1. Grain-size and organic material content of surface sediments around Jeju Island

Station No.	Size analysis (%)				Sediment type	Mz (ϕ)
	Gravel	Sand	Silt	Clay		
1	0.3	57.8	33.7	8.20	(g)mS	2.58
2	5.6	26.7	25.3	42.4	gM	5.78
3	3.2	58.4	13.8	24.6	(g)mS	4.34
4	-	1.70	44.9	53.4	M	8.07
5	-	57.0	16.2	26.8	mS	4.45
6	-	52.2	17.2	30.6	mS	4.57
7	-	38.9	24.6	36.6	sM	6.37
8	-	21.1	32.0	46.9	sM	7.23
9	-	3.40	38.7	57.9	M	8.54
10	-	31.2	45.1	23.7	sZ	6.00
11	-	7.60	51.2	41.2	M	7.33
12	-	20.0	31.3	48.7	sM	6.20
13	-	37.4	22.1	40.5	sM	6.67
14	-	48.3	17.9	33.9	sM	5.78
15	-	54.6	16.9	28.5	mS	4.32
16	-	18.6	73.5	8.00	sZ	4.28
17	-	24.5	22.4	53.1	sC	6.47
18	Rocky Bottom					
19	-	56.4	19.2	24.5	mS	2.50
20	-	35.8	26.2	38.0	sM	5.35
21	-	88.4	4.40	7.20	mS	2.92
22	-	59.7	14.5	25.8	mS	4.13
23	-	43.9	15.3	40.9	sM	6.65
24	-	57.0	13.5	29.5	cS	5.43
25	-	13.5	48.5	38.0	sM	6.93
26	-	46.5	25.2	28.3	sM	5.72
27	-	49.5	25.3	25.2	sM	5.71
28	-	75.6	14.4	10.0	mS	3.57
29	-	71.6	15.1	13.4	mS	3.93
30	-	46.5	35.1	18.4	sM	5.13
31	-	45.2	16.7	38.1	sC	6.27
32	-	15.0	34.5	50.5	sM	7.47
33	-	17.9	29.2	52.9	sM	6.32
34	-	2.70	39.3	58.0	M	6.98
35	-	23.1	31.1	45.8	sM	6.00
36	-	70.1	5.30	24.6	cS	3.93
37	-	66.5	15.2	18.3	mS	3.50
38	-	5.00	39.5	55.5	M	7.01
39	-	1.80	38.5	59.7	M	7.57
40	-	34.7	25.3	40.0	sM	5.63
41	-	70.5	11.3	18.2	mS	4.67
42	-	64.7	16.5	18.8	mS	3.73
43	-	84.3	7.90	7.80	mS	2.87
44	-	90.6	4.20	5.20	S	2.43
45	-	83.3	11.6	5.10	zS	3.23
Average	3.03	42.7	25.2	31.9		5.33
Huanghe		24.6	52.4	23.1	sZ	5.8
Changjiang		43.1	48.5	8.40	sZ	4.5
Keum		-	-	-	-	-

Note. (g)mS: slightly gravelly muddy sand, gM: gravelly mud, S: sand, mS: muddy sand, sM: sandy mud, sZ: sandy silt, Z: silt, sC: sandy clay, M: mud, zS: silty sand, cS: clayey sand, Mz is mean grain size with unit of ϕ

보아 니질모래퇴적상((g)M+S+mS+cS+zS), 사질니토 퇴적상(sZ+sM+sC+gM), 니토 퇴적상(M) 분포 지역으로 분류할 수 있다(Table 1).

니질모래퇴적상은 연구지역 북동쪽에 광범위한 분포를 보이며 그 외 양자강 하구역과 가까운 남서쪽 끝지역에는 소규모로 분포하고 있다. 평균조성은 자갈 1.8%, 모래 66.4%, 실트 14.5%, 점토 18.9%이고, 평균입도는 3.80 ϕ 로 극세립질 모래에 해당한다. 사질니토퇴적상은 연구지역 북서쪽에서 남동쪽으로 광범위한 대상 분포를 보이며 평균조성은 모래 32.2%, 실트 30.6%, 점토 37.2%이고, 평균 입도는 6.11 ϕ 로 중립질 실트에 해당한다. 니토퇴적상은 연구지역 남동쪽 지역(Stn-34, 38, 39)와 북서쪽 끝지역(Stn-9, 11) 및 북동쪽지역(Stn-4)에 소규모의 분포를 보이며 평균조성은 모래 3.7%, 실트 42.0%, 점토 54.3%이고, 평균입도는 7.58 ϕ 로 세립질 실트에 해당한다. 본 연구지역 남동쪽 끝지역(Stn-34, 38, 39)에 분포하는 니토퇴적상은 제주도 남서쪽 동중국해 외대륙붕 지역에 형성된 니토대(SWJIM)로 (고)황화와 양자강을 통해 공급된 복합기원 현생퇴적물로 해석하였고(윤정수 외, 2005), Youn and Kim(2011)과 Hu and Yang(2001)에 의해 연구지역의 북동쪽 지역(Stn-4)에 분포하는 니토, 즉 황해남동부 지역에 분포하는 니토대(SEYSM)는 주로 금강 및 영산강에 의해 니질퇴적물이 공급된 것으로 알려졌다. 아직까지 근원지가 명확히 밝혀지지 못한 상태에 있다(Lee and Chough, 1989; Alexander et al., 1991; Yang et al., 2003). 사질퇴적상은 양자강 하구역과 근접한 남서쪽 끝지역(Stn-44)에 소규모로 분포하며 평균조성은 모래 90.6%, 실트 4.2%, 점토 5.2%이고, 평균입도는 2.43 ϕ 로 세립질 모래에 해당하며 상기의 사질 퇴적물들은 지난 마지막 최대 빙하기(Last Glacial Maximum)의 해수면이 하강하였던 동안 집적된 잔류 퇴적물(relict sediment)로 보고되었다(Niino and Emery, 1961).

주성분원소 및 미량원소

쇄설성 퇴적물에 대한 주요원소(major elements) 분석을 통하여 퇴적물 간의 조성 차이를 밝힘과 동시에 육성기원 퇴적물의 공급원을 평가하고 또한 화학적 변질지수(CIA, Chemical Index of Alteration)을 이용하여 퇴적물 근원지의 풍화정도를 평가할 수 있다. 화학적 변질지수는

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)} \times 100$$

으로 나타낸다(Harnois, 1988). 변질지수에 사용되는 주요원소들은 풍화가 진행되는 동안 상대적으로 쉽게 유통하는 원소를 의미하며 CaO*와 Na₂O과 같은 원소가 이에 속하며, CaO*는 퇴적물내 규산염광물에 포함된 CaO양을 의미한다. Nesbitt and Young(1982)은 근원암의 퇴적 및 변성작용 기간에도 CIA값이 크게 변하지 않아 근원지의 풍화작용의 강도를 반영할 수 있다고 하였다. 따라서 CIA값의 변화는 공급원 퇴적물의 풍화정도를 지시하기 때문에 현재 퇴적된 퇴적물의 공급원을 평가하는데 이용되기도 한다. 본 조사지역 퇴적물의 CIA값은 44.2-68.9(av. 59.4)의 범위를 보이며, 양자강 퇴적물의 CIA값(74.0) 보다는 낮고, 황화 퇴적물과 유사한 값(61.0)을 보였다(Yang et al., 2004). 또한 풍화받지 않은 화성암의 CIA값은 50 정도이고, PAAS에서 CIA값은 69 정도인 것으로 보고되었다(Nesbitt and Young, 1984; Taylor and McLennan, 1985). 따라서 연구지역 퇴적물에서 CIA값은 평균 59.4로 PAAS (69) 보다 낮은 값을 보이는데 이는 근원지에서 강한 풍화작용을 많이 받지 않았음을 의미한다.

일반적으로 토양과 퇴적물의 화학조성 차이로 풍화정도를 파악하는 것이 무리이기 때문에 Al₂O₃-CaO-Na₂O-K₂O-FeO_t의 조성비를 이용한 Nesbitt and Young (1984)가 제시한 A-CN-K 혹은 A-CN-K-FM 삼각도표가 기원암과 기원암의 풍화강도 연구에 많이 이용된다. Fig. 2에서 CN 축과 CNK 축의 CaO*는 규산염광물내의 CaO의 양을 의미한다. 암석, 토양 및 퇴적물을 구성하는 사장석, 정장석, 흑운모, 방해석, 녹니석, 고령석, illite, smectite 및 gibbsite 등의 주요광물들은 이 삼각도상의 각정점 혹은 중앙점에 위치한다. 그러므로 삼각도표상에 표시되는 시료의 위치에 따라 퇴적물 혹은 토양의 주요 광물 조성을 알아낼 수가 있다.

연구지역 퇴적물을 A-CN-K 삼각도상에 표시하면 대부분의 시료들이 강한 풍화작용을 받지 않았음을 의미하며 주로 사장석과 양자강 퇴적물보다 황하강 퇴적물이 많이 함유되어 있는 smectite 광물과 가까운 곳에 주로 밀집 분포한다(Fig. 2a). 또한 중국의 양자강이나 한국의 금강 퇴적물의 평균값보다 황하강 퇴적물 평균치 주위에 집중적으로 위치하는데, 이는

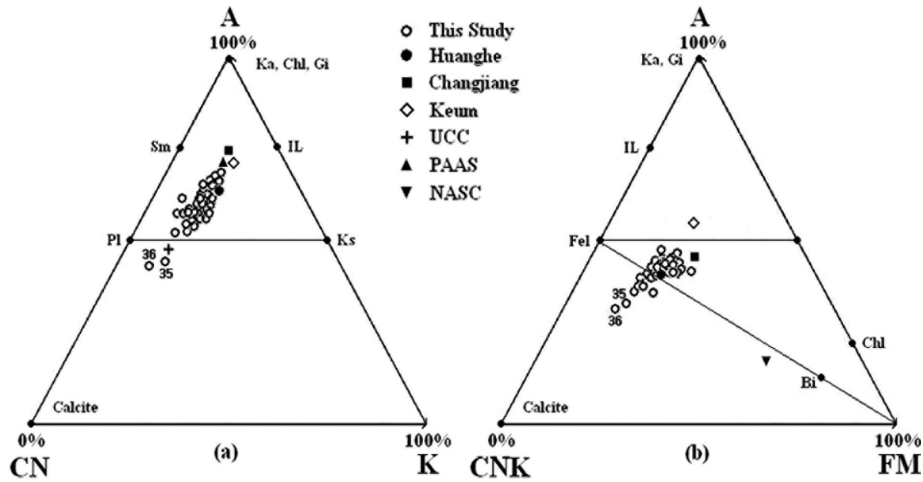


Fig. 2. A-CN-K and A-CN-K-FM diagram of the river and study area sediments (Nesbitt and Young, 1982, 1984). Ka: kaolinite, Chl: chlorite, Gi: gibbsite, IL: illite, Pl: plagioclase, Ks: K-feldspar, Fel: feldspar, Bi: biotite. A: Al₂O₃, CN: CaO*+Na₂O (CaO* represents CaO incorporated into silicate minerals; K: K₂O, CNK: CaO+Na₂O+K₂O, FM: FeO+MgO).

본 연구지역에 분포하는 퇴적물은 양자강보다 황하강의 영향을 더 많이 받고 있음을 의미한다. A-CN-K-FM 삼각도상에서도 유사하게 사장석 광물과 가까운 CNK 집중 위치하는데(Fig. 2b) 이는 장석의 풍화작용에 의해 영향을 많이 받은 것으로 사료된다. 반면 토양이나 퇴적물의 화학조성에서 Zr과 Ti는 비교적 이동성이 낮은 안정한 원소들로서 토양의 Zr/Ti 비를 모암의 Zr/Ti와 비교하여 토양을 구성하는 물질들간의 모암의 균질성 여부를 파악할 수 있다(Birkeland, 1984; 이용일와 이선복, 2002). Table 2에서 보는바와 같이 황하강, 양자강 퇴적물의 Zr/Ti비의 평균값은 각각 397.2와 242.1이며, 제주도 주변해역 퇴적물의 Zr/Ti 비는 230.2-608.7 범위(av. 359.2)로 양자강 퇴적물의 평균값(av. 242.1) 보다는 높고 전반적으로 황하강 퇴적물의 평균값(av. 397.2)과 유사한 값을 보여 본 연구지역은 주로 황하강의 영향을 더 받고 있음을 의미한다(Yang et al., 2004). 황하강 기원 퇴적물이 연구지역으로 이동이 가능한 기작으로는 황하강은 1128년부터 1855년 기간 동안에는 그 유로가 산둥반도 남쪽의 장수(Jianghsu) 지역에 위치하였으며 직접 황해로 흘러들어 갔다. 황하강의 유로가 1855년에 산둥반도 북쪽의 발해역으로 이동한 이후 장수 연안지역은 급격한 해안 침식이 일어나 1,400 km²의 연안 육지지역이 소실되었고 연평균 4.4×10⁸ ton 정도의 퇴적물이 생산되는 것으로 보고되었다(Saito, 1998). 이들 (고)황하기원 삼각주 퇴적물은 장수연안류 등에

의해 황해 중앙부해역과 제주도 서쪽해역 및 동중국해 외대륙붕의 니토대 분포 지역까지 운반되고 있는 것으로 알려져 있다(Milliman et al., 1985).

희토류원소

희토류원소(REE)는 외적요인 즉 변성작용, 변질작용 및 풍화작용의 영향을 다른 원소와 비교해 볼 때 덜받는 특성을 보이고, 특히 지구환경에서 발생된 모든 환경에서 규칙성을 가지고 거동하는 특성을 보이는 것으로 보고되었다(Taylor and McLennan, 1985; McLennan, 1989). REE의 존재도 특히 운석이나 상부대륙지각세일(UCC, Upper Continental Crust)로 규격화한 분포양상에서도 변화하지 않기 때문에 이를 이용하면 퇴적물의 기원지 혹은 근원암을 추적하는데 매우 유용하게 이용되고 있다(Piper, 1985; McLennan, 1989; Sholkovitz and Szymeazk, 2000; Yang et al., 2002). 또한 암석이 심하게 풍화를 받아 토양화된 후에도 REE의 분포도가 변화되지 않음을 보고한 바 있다(Lee et al., 1994, Yang et al., 2002). Cullers et al.(1979, 1987, 1988)와 Li et al.(2009)은 퇴적물의 입도, 광물조성이 REE의 함량에는 영향을 주지만 운석이나 UCC로 규격화한 분포도에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 보고되었다. 연구지역 퇴적물의 희토류원소의 조성은 Table 2에 기재되었다. 표에서 보는바와 같이 REE의 함유량은 140.2-186.0 ppm (av. 163.2 ppm)의 범위로 양자강 퇴적물의 평균값보다 낮고 황

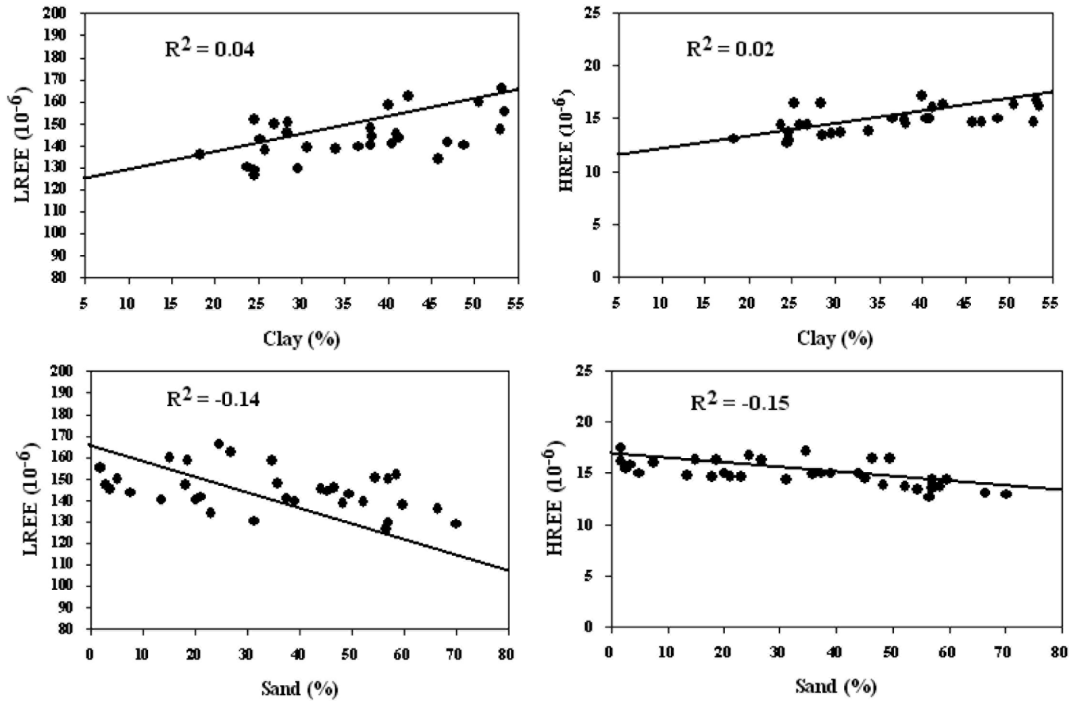


Fig. 3. Correlation between REE and sediment grain size.

하강 퇴적물보다 다소 높은 값을 보이나, NASC 평균값과 유사한 함유량을 보였다.

퇴적물 조성 and REE와의 관계는 Fig. 3에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 퇴적물 내 점토함량이 증가함에 따라 가벼운 희토류원소(LREE, Light Rare Earth Element)와 무거운 희토류원소(HREE, Heavy Rare Earth Element)의 함량은 증가하는 정(+)의 상관관계를 보였고, 반면에 모래함량이 증가함에 따라 LREE 및 HREE는 상대적으로 감소하는 부(-)의 상관관계를 보이는데, 이는 퇴적물내 REE의 함량은 점토광물뿐만 아니라 퇴적물의 입도에 의해 영향을 받고 있음을 의미한다.

연구지역 퇴적물 시료들 중 전술한 풍화작용과 운반과정에서 비교적 보존적 거동을 보이는 Zr, Ti 원소 자료와 후술할 Sr-Nd 동위원소 분석자료를 근거하여 황하강기원 퇴적물로 추정되는 시료(Stn-7, 9, 13, 23, 24), 양자강기원 퇴적물로 추정되는 시료(Stn-27, 30, 32, 40, 44), 한반도 남서해안 기원으로 추정되는 퇴적물시료(Stn-2, 4) 및 제주도기원 시료(Stn-16, 17)를 선택하였고, 기보고된 황하강 및 양자강 퇴적물의 희토류원소의 평균값을 이용하여 이들 시료들에 대하여 REE의 분포패턴을 도시하였다(Fig. 4 and

5). 토양이나 퇴적물의 화학조성 중 REE의 패턴을 이용하여 근원암이 염기성암에서 기원한 것인지 혹은 규산질암에서 유래된 것인지를 평가하는데도 유용하게 이용된다. 즉 기원암이 염기성암일 경우 일반적으로 LREE/HREE가 낮고 Eu의 부(-) 이상이 미미하지만 기원암이 규산질암일 경우는 보다 높은 LREE/HREE비를 보이고 Eu의 부(-) 이상도 두드러진 특징을 보인다 하였다(Culler et al., 1979, 1987).

따라서 본 연구지역에서 선택된 퇴적물 시료와 중국의 황하강, 양자강 및 한국의 금강 퇴적물의 REE의 평균값을 운석으로 규격화한 REE분포 패턴은 Fig. 4a에서 보는 바와 같이 황하와 양자강 및 금강 퇴적물인 경우 LREE는 상당히 부화되어 있고($La_{(N)}/Sm_{(N)} > 3$), HREE는 전반적으로 고갈된 편이며 Eu의 부(-) 이상의 특징은 전형적인 세일의 운석으로 표준화한 희토류원소의 분포 패턴을 보였다(Fig. 4a). Fig. 4b는 연구지역 퇴적물의 REE 조성을 Taylor and McLennan(1985)가 제시한 운석값으로 표준화한 REE의 분포도이다. 그림에서 보는 바와 같이 연구지역 퇴적물도 LREE가 상당히 부화되어 있고($La_{(N)}/Sm_{(N)} > 3$), HREE는 고갈되며 평평한 경향을 보이고, 특히 제주 화산암 시료와 제주도 기원으로 추정되는 퇴적

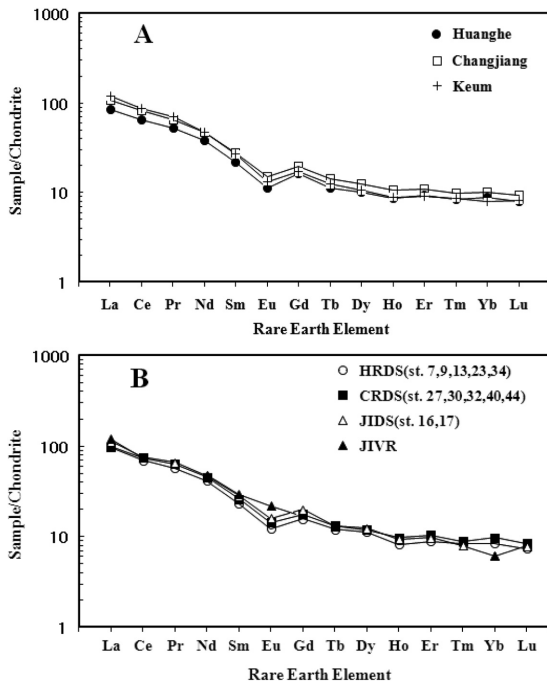


Fig. 4. Chondrite-normalized REE diagram. Note. HRDS: Huanghe-derived sediment, CRDS: Changjiang-derived sediment, JIDS: Jeju Island-derived sediment, JIVR: Jeju Island volcanic rock.

물시료(Stn-16, 17)를 제외한 나머지 시료들은 Eu의 부(-) 이상을 보이며 황하강, 양자강 및 금강 퇴적물의 REE 분포 패턴과 매우 유사하였다. 따라서 본 연구지역은 황하강과 양자강의 영향을 많이 받고 있으며 그 외에 주로 제주도 및 한반도 남서해안에서 다른 기원된 물질도 섞여 있음을 의미한다. 그러나 Fig. 4b에서 보는 바와 같이 이들 퇴적물 시료들의 REE 분포 패턴이 너무 가까이 인접한 분포를 보여 운석으로 표준화한 REE분포를 이용하여 연구지역 퇴적물의 기원지를 명백히 구분할 수가 없었다. 반면에 Table 2에서 보는 바와 같이 LREE와 HREE의 값은 황하강기원 퇴적물로 추정되는 시료에서(Stn-7, 9, 13, 33, 34) 평균값은 각각 144.1와 15.20로 이는 황하강 퇴적물 평균값과 유사하였고, 양자강기원 퇴적물로 추정되는 시료에서(Stn-27, 30, 32, 40, 44)은 각각 154와 17.2로 이는 양자강 퇴적물의 평균값과 유사하였다(Table 2). 또한 양자강기원 퇴적물로 추정되는 시료(Stn-27, 30, 32, 40, 44)의 $(La/Yb)_N$ 과 $(La/Sm)_N$ 비값은 각각 11.7과 4.02로 양자강 퇴적물의 평균값(10.63, 3.83)과 유사한 값을 보였고, $(Eu/Eu)^*$

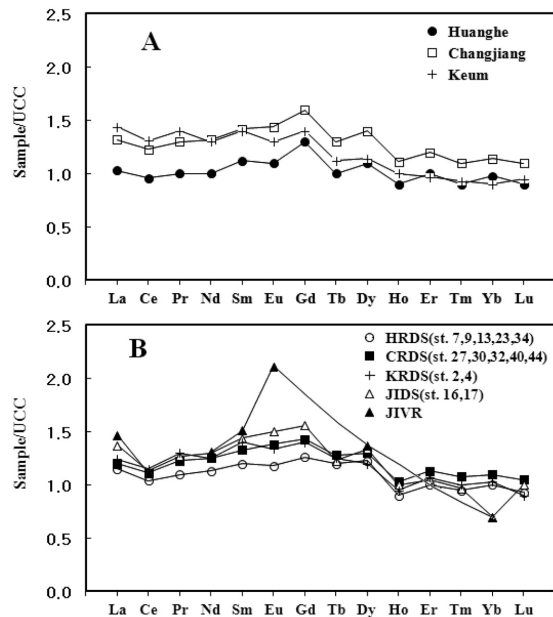


Fig. 5. The Upper Continental Crust (UCC) normalized distribution patterns for REEs. Note; HRDS: Huanghe-derived sediment, CRDS: Changjiang-derived sediment, KRDS: Korean river-derived sediment, JIDS: Jeju Island-derived sediment, JIVR: Jeju Island volcanic rock.

값도 0.65로 양자강 퇴적물 값(0.64)의 유사한 값을 보였다. 따라서 양자강기원 물질도 제주도 남서쪽 외해 지역까지 이동되고 있음을 의미한다.

Fig. 5a는 Taylor and McLennan(1985)가 제시한 상부대륙지각세일(UCC) 평균값으로 표준화한 REE 분포 패턴이다. 그림에서 보는 바와 같이 양자강 퇴적물이 황하강과 한국의 금강 퇴적물보다 높은 REE 함량과 전반적으로 위로 불록한 REE 패턴을 보이고, 중희토류원소(MREE; Sm-Dy)도 더 부화되어 있다. 이처럼 중국의 황하, 양자강 및 한국의 금강 퇴적물에서 현저히 다른 REE 패턴을 보이는 것은 이들 강 유역의 지질, 생성연대, 근원암의 조성 및 풍화작용 강도 등이 다르기 때문이다(Yang et al., 2002).

Fig. 5b는 연구지역 퇴적물과 제주 화산암을 UCC로 규격화한 REE 분포 패턴이다. 그림에서 보는 바와 같이 양자강기원 퇴적물로 추정되는 본 역의 남서쪽 외해지역에 분포하는 시료(Stn-27, 30, 32, 40, 44)는 황하강기원 퇴적물로 추정되는 북서쪽에 위치하는 시료(Stn-7, 9, 13, 23, 34)에 비해 높은 REE 함량치를 보이고 MREE (Sm-Dy)도 더 부화된 형태를 보였고, 또한 $(La/Yb)_{UCC}$ 와 $(La/Sm)_{UCC}$ 비도 각각 1.27과 0.96로 양자

Table 2. REE concentration around Jeju Island shelf sediments in comparison to Huanghe (HURS), Chanjiang (CHRS), Keum rivers sediments, UCC, PAAS and NASC (unit: * in wt.% and $\mu\text{g/g}$ for the other elements)

St.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
La	37.80	40.20	38.60	34.20	36.30	33.90	34.00	33.50	34.10	31.20
Ce	70.70	73.00	71.10	74.20	70.30	63.90	65.30	67.70	68.20	60.90
Pr	8.70	9.20	7.30	9.30	9.10	8.70	7.50	7.60	7.70	6.80
Nd	29.30	33.70	28.70	31.50	28.90	27.30	27.70	27.40	29.80	27.20
Sm	5.70	6.40	5.90	6.10	5.30	5.10	5.00	5.20	5.80	4.30
Eu	1.21	1.22	1.20	1.19	1.19	0.94	0.96	1.10	1.20	0.93
Gd	4.70	5.40	4.80	5.30	4.33	4.40	4.80	4.70	4.90	4.20
Tb	0.73	0.74	0.71	0.75	0.72	0.63	0.66	0.64	0.72	0.60
Dy	3.20	4.30	3.40	4.23	3.90	3.60	4.10	3.80	4.30	4.10
Ho	0.71	0.75	0.71	0.76	0.72	0.60	0.65	0.64	0.68	0.70
Er	2.00	2.30	2.00	2.30	2.00	2.15	2.30	2.20	2.34	2.10
Tm	0.28	0.30	0.25	0.30	0.31	0.24	0.27	0.30	0.32	0.30
Yb	1.84	2.27	1.72	2.26	2.16	2.00	2.00	2.10	2.30	2.10
Lu	0.23	0.28	0.24	0.26	0.29	0.22	0.25	0.24	0.28	0.30
St.	11	12	13	14	15	16	17	19	20	
La	34.20	33.40	35.30	35.00	36.80	39.30	42.70	30.30	35.40	
Ce	66.50	65.40	64.20	63.20	71.10	71.30	73.20	58.70	68.80	
Pr	7.73	7.60	8.00	7.80	7.90	8.80	9.10	6.90	7.80	
Nd	29.30	28.60	28.50	27.10	29.10	32.70	34.20	26.10	30.20	
Sm	5.70	5.30	5.10	5.10	5.30	6.30	6.60	4.60	5.90	
Eu	1.20	0.97	0.96	1.00	1.25	1.32	1.34	0.91	1.20	
Gd	4.98	4.80	4.70	4.50	4.40	5.85	5.90	4.20	4.70	
Tb	0.74	0.70	0.70	0.60	0.68	0.74	0.73	0.61	0.76	
Dy	4.20	4.00	4.20	3.80	3.70	4.62	4.73	3.20	3.70	
Ho	0.76	0.70	0.66	0.64	0.63	0.78	0.80	0.62	0.71	
Er	2.42	2.20	2.10	2.20	2.10	2.40	2.42	2.00	2.30	
Tm	0.34	0.30	0.30	0.28	0.25	0.27	0.31	0.24	0.32	
Yb	2.30	2.00	2.10	1.60	1.50	1.50	1.52	1.60	2.10	
Lu	0.35	0.30	0.30	0.26	0.23	0.27	0.32	0.26	0.28	

강 퇴적물 평균값(1.20, 0.93)과 유사하였다(Table 2).

따라서 양자강 기원 부유퇴적물은 양자강 하구역과 가까운 본 연구지역 남서쪽 외해지역을 비롯하여 동중국해 외대륙붕의 니토대(SWJIM) 분포 지역까지 이동되고 있음을 의미한다. 한편 제주도 화산암 시료의 REE 패턴에서 Eu의 정(+) 이상이 상당히 두드러진 특징을 보이나(Fig. 5a), 반면에 중국 및 한국의 강기원 퇴적물에서는 이런 두드러진 양상을 볼 수 없었다. 반면 제주도 기원으로 추정되는 시료(Stn-16, 17)에서 Eu의 두드러진 정(+) 이상을 보이지 않으나, 강기원 퇴적물에 비해 MREE가 더 부화되어 있고, 또한 $(\text{La/Yb})_{\text{UCC}}$ 와 $(\text{La/Sm})_{\text{UCC}}$ 비도 각각 1.27과 0.96으로 비교 지역 중 가장 높은 값을 보였다. 따라서 UCC로 표준화한 REE 패턴을 이용하여 제주도 주변 대륙붕지역에 분포하는 퇴적물의 기원지 추적에 매우 유용하게 이용될 수 있었다.

Sr-Nd 동위원소비에 의한 퇴적물 기원지 해석

토양이나 퇴적물 내에 기록된 Sr-Nd 동위원소계 연구는 맨틀과 지각의 화학적 분화연구, 고해양 해수의 변화, 강기원 퇴적물의 해양으로 유출입(flux), 지층의 연대측정 및 근원암 추적 등 다양한 분야에서 이용되고 있다(Burke et al., 1982; Koepnick et al., 1985; Capo and Depaolo, 1990). 퇴적물 내 Sr 동위원소계 조성은 비록 화학적 풍화작용이 강도 차이에 따른 장석이나 운모류의 분해비율의 차이, 퇴적물의 입도차이, 인간의 활동 등에 영향을 받으나, 퇴적층이 형성되는 동안 화학적 형상의 형성과 분리과정, 증발작용과 생물체의 동화작용 등에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보고되었다(Asahara et al., 1995; Douglas et al., 1995; Capo et al., 1998; Martin and McCulloch, 1999). 퇴적물 내에 Sr 동위원소비는 근원암 내 Rb/Sr비와 형성시기 또한 화학적 풍화작용

Table 2. continued

St.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
La	33.80	33.40	36.80	29.80	33.50	34.60	32.90	37.60	38.60	36.30
Ce	65.10	64.00	68.30	61.50	65.50	69.10	66.50	71.60	72.80	78.60
Pr	7.30	7.40	7.10	7.20	7.50	8.10	7.90	8.90	8.70	9.60
Nd	27.30	27.60	27.80	26.20	28.80	28.60	30.30	32.90	32.70	34.70
Sm	5.40	5.10	5.40	4.70	5.30	5.70	5.40	6.60	6.50	6.70
Eu	1.12	1.14	1.10	0.94	0.96	1.00	0.96	1.10	1.22	1.40
Gd	4.60	4.50	4.73	4.70	4.70	5.20	5.00	5.80	5.70	6.30
Tb	0.68	0.67	0.68	0.59	0.60	0.75	0.72	0.80	0.84	0.86
Dy	3.90	3.80	4.38	3.50	4.10	4.20	4.10	4.20	4.40	4.90
Ho	0.69	0.70	0.73	0.62	0.70	0.80	0.77	0.86	0.87	0.84
Er	2.10	2.20	2.10	2.00	2.10	2.60	2.72	2.61	2.40	2.80
Tm	0.30	0.30	0.28	0.22	0.30	0.34	0.32	0.37	0.35	0.33
Yb	1.90	1.91	1.85	1.72	2.00	2.30	2.50	2.43	2.50	2.40
Lu	0.24	0.28	0.29	0.25	0.30	0.33	0.34	0.36	0.38	0.31
St.	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
La	32.80	36.50	32.40	37.10	31.70	30.50	32.10	37.60	40.20	38.80
Ce	60.10	74.60	61.20	66.80	62.60	60.30	64.00	67.80	65.60	71.40
Pr	8.10	8.40	7.60	8.20	8.30	6.80	7.20	9.70	10.40	9.20
Nd	37.30	34.10	26.30	29.70	26.30	26.40	27.60	29.10	31.91	32.80
Sm	5.80	6.20	4.10	5.30	5.10	4.80	5.10	5.60	6.41	6.20
Eu	1.10	1.31	1.20	1.10	0.95	0.92	0.90	1.14	1.34	1.33
Gd	4.12	5.10	4.30	4.60	4.50	4.10	4.10	4.42	5.10	4.90
Tb	0.65	0.70	0.59	0.76	0.71	0.63	0.63	0.78	0.84	0.81
Dy	4.10	4.60	4.30	4.37	3.82	3.40	3.40	4.10	4.80	4.64
Ho	0.70	0.80	0.63	0.78	0.74	0.63	0.64	0.80	0.90	0.91
Er	2.30	2.20	2.10	2.26	2.10	2.10	2.00	2.14	2.76	2.70
Tm	0.30	0.31	0.28	0.31	0.30	0.25	0.26	0.30	0.37	0.34
Yb	2.00	2.41	2.18	2.15	2.17	1.70	1.80	2.30	2.32	2.43
Lu	0.31	0.31	0.25	0.30	0.26	0.20	0.26	0.30	0.36	0.33

비율의 다름 등에 의해서도 결정되는 것으로 알려졌다(Goldstein and Jacobsen, 1988; Borg and Banner, 1996; Capo et al., 1998). 또한 Shaffer and Faure(1976)에 의해 홍해지역 퇴적물의 Sr 동위원소계 연구에서 추적자로서 유효함이 밝혀진 이래 많은 연구가 수행되었다. 반면에 Nd 동위원소계는 지표면 물질의 순환과정에서 보존적 거동을 하며, 퇴적물의 입도, 화학적 풍화작용, 퇴적물의 운반과 퇴적과정에서 큰 영향을 받지 않는 것으로 보고되었고, 특히 지각과 맨틀 사이의 분화과정에서 Sm 원소가 Nd 원소로 분배되므로 퇴적물내 Nd 동위원소 조성은 퇴적물의 기원지 연구에 더 유효하다고 알려졌다(Goldstein and Jacobsen, 1988; Borg and Banner, 1996; Weldeab et al., 2002). Dasch(1969)의 연구에 따르면 탄산염 물질이 제거된 퇴적물에서 퇴적물 입도가 감소함에 따라 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소비가 증가하는 경향을 보인다고 지적하였다.

따라서 이러한 입도(광물조성)에 따른 영향을 최소화하기 위하여 본 연구에서는 $63\ \mu\text{m}$ 이하인 니질퇴적물(silt와 clay) 시료 부분만을 분석대상으로 선택하여 탄산염을 제거한 퇴적물 시료를 대상으로 Sr-Nd 동위원소 분석을 실시하였다.

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 와 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 동위원소비의 측정결과는 Table 3와 같다. 표에서 보는 바와 같이 산동반도 동쪽지역과 황해 중앙부해역의 퇴적물 시료에서는 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소비는 0.7213-0.7245로 넓은 범위의 높은 값을 보인다. 반면에 양자강 하구역의 수중삼각주 퇴적물 시료에서 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소비는 0.7119-0.7172으로 좁은 범위와 황해 중앙부해역에 비해 상당히 낮은 값을 보였다. 제주도 주변 대륙붕지역의 니질퇴적물에서 추정된 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소비는 0.7119-0.7235로 대단히 넓은 범위와 황해 중앙부해역과 양자강 하구역의 퇴적물 시료에서의 동위원소비값과 중간 정도의 값을 보였다. 이처럼 연구지역 퇴적물 시

Table 2. continued

St.	41	42	43	44	45	Av.	JIVR ^a	HURS ^b	CHRS ^b	KEUM ^b	UCC ^c	PAAS ^c	NASC ^c
La	37.10	38.10	37.90	36.30	35.60	35.41	4.40	31.00	39.50	43.30	30.00	38.00	31.10
Ce	71.70	70.80	69.30	32.70	65.90	66.72	71.00	61.80	78.70	83.80	64.00	80.00	67.03
Pr	8.70	9.40	10.60	8.60	9.40	8.27		7.15	8.87	9.62	7.10	8.83	-
Nd	32.20	33.50	29.40	29.70	28.30	29.75	34.00	26.90	33.60	33.80	26.00	32.00	30.40
Sm	5.70	6.20	5.90	5.40	5.70	5.57	6.80	5.02	6.37	6.23	4.50	5.60	5.98
Eu	1.20	1.20	1.24	1.20	1.12	1.12	1.90	0.97	1.30	1.15	0.90	1.00	1.25
Gd	4.60	5.20	4.60	5.80	4.70	4.84		4.92	5.98	5.21	3.80	4.70	5.50
Tb	0.60	0.70	0.85	0.74	0.80	0.71		0.65	0.82	0.72	0.64	0.77	0.85
Dy	4.10	4.70	4.50	4.40	4.20	4.09	4.80	3.90	4.74	4.00	3.50	4.40	5.54
Ho	0.60	0.70	0.92	0.78	0.83	0.73		0.72	0.89	0.76	0.80	1.00	-
Er	2.20	2.30	2.41	2.41	2.38	2.27		2.29	2.71	2.25	2.30	2.90	3.28
Tm	0.28	0.30	0.37	0.30	0.33	0.30		0.30	0.35	0.31	0.33	0.41	-
Yb	2.00	2.20	2.34	2.42	2.34	2.07		2.16	2.48	1.97	2.20	2.80	3.11
Lu	0.26	0.30	0.36	0.32	0.36	0.29		0.30	0.35	0.31	0.32	0.40	0.46

St.	Av.	JIVR ^a	HURS ^b	CHRS ^b	KEUM ^b	UCC ^c	PAAS ^c	NASC ^c
Zr/Ti	359.20	-	397.20	242.10	361.50	463.40	350.00	425.50
CIA	59.35	-	61.00	74.00	71.70	-	69.00	-
ΣREE	163.16	-	148.10	186.70	193.30	146.40	183.07	154.49
LREE	146.75	-	131.90	167.00	178.60	131.60	164.50	134.51
HREE	15.30	-	15.20	18.30	15.50	13.90	17.47	18.73
LREE/HREE	9.63	-	8.70	9.10	11.40	9.50	9.41	7.18
(Eu/Eu*)	0.65	-	0.60	0.64	0.61	0.65	0.65	0.67
(La/Yb) ^N	11.73	19.70	9.61	10.63	14.81	9.21	9.17	6.75
(La/Sm) ^N	4.02	4.10	3.81	3.83	4.33	4.20	4.26	3.27
(Gd/Yb) ^N	1.92	-	1.73	1.92	2.13	1.40	1.40	1.44
(Ce/Ce*)	0.90	-	0.97	0.99	0.94	1.07	1.07	1.04
(Ce/Yb) ^N	8.56	12	7.45	8.26	11.05	7.58	7.40	5.90
(Ce/Sm) ^N	2.94	3	2.97	3.87	3.23	3.42	3.45	2.70
(La/Lu) ^N	12.87	-	10.70	11.70	11.40	9.70	9.84	8.35
(La/Yb) _{ucc}	1.27	2.10	1.00	1.20	1.60	-	1.00	1.59
(Gd/Yb) _{ucc}	1.37	-	1.33	1.40	1.56	-	0.98	1.03
(La/Sm) _{ucc}	0.96	0.96	0.92	0.93	1.03	-	1.02	1.68

^aJeju Island volcanic rock (Park and Kwon, 1993)

^bHuanghe, Chanhjiang and Keum rivers sediment (Yang et al., 2004)

^cAverage upper continental crust (UCC: Taylor and McLennan, 1985); Post-Archaean shale average Australian sedimentary rock (PAAS: McLennan, 1989); North American shale composition (NASC: Gromet et al., 1984)

료에서 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 동위원소비가 큰 폭의 변화를 보이는 것은 아마도 퇴적물이 입도의 차이에서 오는 결과 보다는 일차적으로 기원지의 다양성을 반영하는 것으로 보여진다. 왜냐하면 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 동위원소비 분석에 사용된 시료들은 입도의 영향을 최소화하기 위하여 모두 63 μm 이하의 니질퇴적물 시료 부분만을 분석하였기 때문이다.

따라서 산동반도 동쪽 퇴적물 시료(Stn-Y1)에서 측정된 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 동위원소비 값 0.7245를 황하강기원 퇴적물의 단성분(end-member)으로 가정하고, 양자강 하구역의 수중삼각주 퇴적물시료(Stn- E5, 6)에서 측

정된 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 동위원소비 값 0.7167을 양자강기원 퇴적물의 단성분으로 가정한다면, 제주도 주변해역 퇴적물 시료에서 얻은 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 동위원소비는 평균 0.7187로 황해 중앙부해역보다는 낮은 값을 보이나, 양자강 하구역의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 동위원소비와 유사한 값을 보였다. 따라서 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 동위원소비의 지역별 분포특성을 종합해 볼 때 양자강기원 부유퇴적물이 본 연구지역까지 운반·퇴적되고 있음을 의미한다. 반면에 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 동위원소비와 ε_{Nd}(0) 값은 산동반도 동쪽 지역과 황해 중앙부해역의 퇴적물 시료에서 각각 0.5118-0.5120, -12.6- -15.2의 범위를 보이고, 양자강

Table 3. Isotope (Sr-Nd) chemistry of the < 63 μm fraction of sediments around Jeju Island samples (AJIS), SPMW, CYMSS and CRSDS

Station	Latitude (N)	Longitude (E)	Sediment type	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$
Around Jeju Island Sediment (This study)						
St. 2	34°00'	126°30'	gM	0.718912±13	0.511895±14	-14.5
St. 4	34°00'	125°30'	M	0.717435±14	0.511874±19	-14.9
St. 7	34°00'	124°00'	sM	0.721886±11	0.511895±13	-14.8
St. 9	34°00'	123°00'	M	0.722106±10	0.511854±10	-15.3
St. 11	33°30'	123°30'	M	0.719920±11	0.511986±14	-12.7
St. 13	33°30'	124°30'	sM	0.721814±12	0.511967±10	-13.1
St. 16	33°30'	126°00'	sZ	0.717684±13	0.511841±15	-13.6
St. 21	33°00'	126°00'	mS	0.719177±14	0.512064±12	-11.2
St. 23	33°00'	125°00'	sM	0.723523±13	0.511901±15	-14.4
St. 25	33°00'	124°00'	sM	0.719306±13	0.512008±12	-12.3
St. 27	33°00'	123°00'	sM	0.717563±13	0.512058±14	-11.4
St. 30	32°30'	124°00'	sM	0.714832±12	0.512060±11	-11.3
St. 32	32°30'	125°00'	sM	0.717617±13	0.512038±15	-11.7
St. 34	32°30'	126°00'	M	0.721726±11	0.512023±13	-12.0
St. 39	32°00'	126°00'	M	0.719056±10	0.511977±13	-12.9
St. 40	32°00'	125°30'	sM	0.715498±10	0.512117±14	-10.2
St. 42	32°00'	124°30'	mS	0.716588±14	0.512104±11	-10.4
St. 45	32°00'	123°00'	zS	0.711966±10	0.512132±15	-9.9
Av.				0.718701±12	0.511994±13	-12.6
Shandong Peninsula Mud Wedge (SPMW)						
Y1	37°00'	123°30'	sM	0.724479±11	0.511966±10	-13.1
Y2	37°00'	124°00'	mS	0.721631±11	0.511935±14	-13.5
Av.				0.723005±11	0.511951±12	-13.3
Central Yellow Sea Muddy Sediment (CYMSS)						
Y6	36°00'	123°30'	sM	0.723710±13	0.511855±10	-15.2
Y7	36°00'	124°00'	M	0.722522±9	0.511994±11	-12.6
Y9	35°00'	123°30'	C	0.721258±11	0.511872±15	-14.9
Av.				0.722497±11	0.511907±12	-14.2
Changjiang River's Submerged Delta Sediment (CRSDS)						
E1	32°00'	123°00'	zS	0.711966±10	0.512132±15	-9.9
E4	31°30'	123°00'	mS	0.713518±13	0.512084±11	-10.8
E5	31°30'	122°30'	sZ	0.717200±10	0.512126±14	-10.0
E6	31°00'	122°30'	M	0.716240±10	0.512105±13	-10.4
E7	31°00'	123°00'	Z	0.716309±13	0.512066±11	-11.2
Av.				0.715047±11	0.512103±13	-10.5

Note. gM: gravelly mud, mS: muddy sand, zS: silty sand, sZ: sandy silt, sM: sandy mud, M: mud, C: clay, Z: silt. n-run uncertainties given for Sr and Nd isotope ratios are 2σ errors. $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ ratios are calculated as $\epsilon_{\text{Nd}} = \left[\frac{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{sample}}}{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}} - 1 \right] \times 10^4$ using the present-day CHUR value $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0.512638$ (Jacobsen and Wasserburg, 1980). Note. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of the SPMW, CYSS and CRADS data from Youn and Kim (2011)

하구역의 수중삼각주 퇴적물시료에서 각각 0.5120-0.5121와 -9.9 -11.2의 범위를 보였다. 이는 산둥반도 동쪽과 황해 중앙부해역에 비해 양자강하구 수중삼각주 니질퇴적물에서 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 동위원소비와 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 가 더 높은 값을 보인다. 이처럼 양자강 하구역의 수중삼각주 퇴적물시료에서 Nd 동위원소비가 황해의 영향을 주로 받고 있는 산둥반도 동쪽지역과

남황해 중앙부해역 퇴적물시료에서 보다 높은 값을 보이는 것은 근원암내에 Nd 동위원소가 높게 함유하고 있거나 혹은 양자강 유역은 온난·습윤한 기후환경에서 화학적 풍화작용이 활발히 진행됨에 따라 이곳 강유역에 분포하는 퇴적물에서 높은 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 동위원소비의 조성을 보이는 것과 관련이 있을 것으로 추정된다.

연구지역 퇴적물 시료에서 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 동위원소비와 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 값은 각각 0.5118-0.5121과 -9.9- -15.3으로 황하 중앙부해역과 양자강 하구역 수중삼각주 퇴적물의 Nd 동위원소 값을 모두 포함하는 대단히 넓은 범위의 값을 보였다(Table 3). 따라서 산둥반도 동쪽 니질퇴적물 시료(Stn-Y1)에서 측정된 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 동위원소비와 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 값 0.5119와 -13.1을 황하기원 퇴적물로 가정하고, 또한 양자강 하구역의 니질퇴적체 시료(Stn-E5, 6)에서 Nd 동위원소비와 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 값 0.5121과 -10.2을 양자강 기원 퇴적물로 가정한다면 연구지역 퇴적물 시료에서 측정된 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 동위원소비와 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 값은 각각 0.5120와 -12.6로 이는 풍화된 대륙지각의 평균값(0.51204±2)과도 유사하며 UCC의 평균값(0.5117) 보다 다소 높은 값을 보였다(Goldstein and Jacobsen, 1988). 또한 양자강 기원 퇴적물의 단성분 값 보다는 낮으나, 황하기원 퇴적물의 단성분 값과 더 유사한 특징을 보였다. 따라서 연구지역 퇴적물의 Nd 동위원소비 값을 종합해 볼 때 제주도 주변해역은 양자강 보다는 황하강의 영향을 더 강하게 받고 있음을 의미한다.

강 퇴적물 내의 Sr-Nd 동위원소계는 풍화된 대륙지각의 평균조성을 반영하므로, 이를 이용하여 육성기원 물질이 해양으로의 유출입(flux)을 평가하는데도 많이 이용되고 있다(Palmer and Edmond, 1989, 1992; Derry and France-Lanord, 1996; Goldstein and Jacobsen, 1988).

따라서 제주도 주변 대륙붕해역에 분포하는 퇴적물 시료와 산둥반도 동쪽과 남황해 중앙부의 니질퇴적물 시료, 양자강 하구역 수중삼각주 퇴적물 시료에서 분석된 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소비와 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 값의 상관도를 이용하여 연구지역 퇴적물의 기원지를 추정하였다. Fig. 6에서 제시된 바와 같이 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소비와 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 값의 상관도에서 제주도 주변 대륙붕해역에 분포하는 퇴적물은 기원지로서의 어느 특정 지역을 보여주지 않았으며 크게 세 유형으로 구분된다(Fig. 6).

즉 중국에 가까운 연구지역 북동쪽과 제주도 서쪽에 분포하는 퇴적물시료(Stn-7, 9, 13, 23, 34)들은 황하강으로부터 기원된 퇴적물로 추정되는 산둥반도 동쪽 및 남황해 중앙부 퇴적물시료 가까이 밀집 분포하였다. 반면 양자강 하구역과 가까이 위치하는 남서쪽지역과 동중국해 외대륙붕의 니토대 퇴적물시료(Stn-27, 30, 32, 40, 42, 44, 45)들은 양자강 하구역의 수중삼각주 퇴적물시료 주위에 주로 밀집 분포하

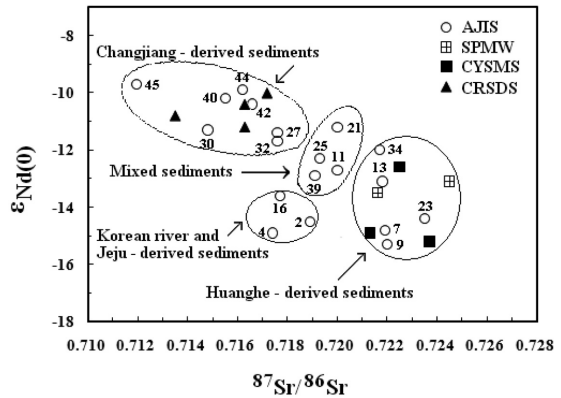


Fig. 6. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio versus $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ plot of the around Jeju Island sediment samples (AJIS) in East China Sea, Shandong peninsula mud wedge (SPMW), Central Yellow Sea muddy sediment (CYSMS) and Changjiang River's submerged delta sediments (CRSDS).

는 경향을 보였다. 또한 연구지역 북동쪽과 제주도 북서쪽 연안지역에 분포하는 퇴적물시료(Stn-2, 4, 16)는 상기 두 지역과는 별개로 독립된 지역에 위치하여 이들 퇴적물은 한반도 남서해안지역과 제주도에서 운반된 퇴적물임을 의미한다.

따라서 제주도 주변 대륙붕지역에 분포하는 퇴적물은 기원지로서의 어느 특정한 지역을 보여주지 않았으며, 주로 중국의 황하와 양자강에서 운반된 퇴적물이 주를 이루며, 그 외 한국의 남서지역에 분포하는 영산강과 보성강 및 제주도 등 다양한 기원지로부터 유입된 퇴적물이 혼합된 복합기원(multiple origin) 퇴적물로 구성되어 있음을 의미한다. 이처럼 양자강기원 퇴적물이 연구지역으로 이동이 가능한 기작으로는 양자강으로부터 유출되는 부유퇴적물은 주로 하구역의 동쪽과 남동쪽의 동경 122°-123° 지역에 분포하는 수중삼각주 지역에 퇴적되고, 소량만이 동중국해로 확산되기 때문이다. 그러나 대만해류가 중국 동쪽해안을 따라 북동방향으로 흐르는 계절에는 남풍계에 편승하여 양자강기원 부유퇴적물은 표층프름(plume)으로 북동진하여 제주도 서쪽까지 이동되는 것으로 알려져 있다(Milliman et al., 1985). 또한 Lie(1986)는 양자강희석수는 홍수철에 북동진하여 제주도 서쪽해역을 지나 황해로 북상하는 것으로 보고하는 등 양자강기원 물질이 동중국해 외대륙붕해역까지 이동이 가능하다는 것이다. 이러한 기존의 연구 결과는 본 연구지역 퇴적물 내에 기록된 Sr-Nd 동위원소계 연구를 통해서도 확인할 수 있었다.

결 론

제주도 주변해역 대륙붕지역에 분포하는 퇴적물의 기원지를 밝히기 위하여 채취한 45개 퇴적물시료에 대한 입도분석, 주성분·미량원소, 희토류원소, Sr-Nd 동위원소조성에 대한 연구결과는 다음과 같다.

1. 연구지역 표층퇴적물의 유형은 소량자갈함유니질모래, 니질모래, 모래, 사질니토, 니토 등으로 총 9개의 유형이 분포하나 크게 보아 니질모래 퇴적상이 분포하는 북동쪽지역, 사질니토 퇴적상이 분포하는 서쪽지역, 니토 퇴적상이 분포하는 남동쪽 끝 지역으로 구분된다.

2. 니질모래 퇴적상의 평균조성은 자갈 1.8%, 모래 66.4%, 실트 14.5%, 점토 18.9%이고, 평균입도는 3.80 ϕ 로 극세립질 모래에 해당하며, 사질니토 퇴적상은 모래 32.2%, 실트 30.6%, 점토 37.2%이고, 평균입도는 6.11 ϕ 로 중립질 실트이고, 니토 퇴적상은 모래 3.7%, 실트 42.0%, 점토 54.3%이고, 평균입도는 7.58 ϕ 로 세립질 실트에 해당한다.

3. 화학적 변질지수(CIA)는 평균 59.4로 양자강 퇴적물의 평균치보다는 낮고 황하강 퇴적물과 유사한 특징을 보였다.

4. 연구지역 퇴적물의 REE 함량은 평균 163.2 ppm으로 양자강 퇴적물 보다는 낮고 황하강 퇴적물보다는 다소 높으나, NASC 값과 유사한 특징을 보였다. UCC로 표준화한 REE 분포 패턴에서 연구지역 남서쪽 외해지역에 분포하는 퇴적물은 중국의 황하강과 한국의 금강 퇴적물에 비해 높은 REE 함량과 HREE도 상당히 부화되어 있으며, (La/Yb)_{UCC}와 (La/Sm)_{UCC} 비도 양자강 수중삼각주 퇴적물과 유사한 특징을 보여 양자강기원 부유퇴적물이 제주도 남서쪽 외해역에 분포하는 니토대지역까지 운반되고 있음을 의미한다.

5. 연구지역 퇴적물의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 동위원소비는 평균 0.7187로 황하강의 영향을 받는 산둥반도 동쪽과 황해 중앙부해역 니토대 분포지역(av. 0.7225)보다는 낮고, 양자강 하구역의 수중삼각주 퇴적물값(av. 0.7151)과 유사한 특징을 보였다.

6. 연구지역 퇴적물의 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 동위원소비는 평균 0.5120으로 양자강기원 단성분(av. 0.5122) 보다는 낮으나, 황하강기원 퇴적물의 단성분과 더 유사한(av. 0.5119) 특징을 보였다.

7. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 동위원소비와 $\epsilon_{Nd}(0)$ 의 동위원소비 구분 지수에서 제주도 주변 대륙붕해역은 기원지로서의 어

느 한 특정 지역을 보여주지 않았으며 주로 황하와 (고)황하강에서 기원된 물질이 주를 이루며, 그 외 양자강기원 퇴적물과 제주도 그리고 한반도 서남해안에서 운반된 퇴적물들이 혼합되어 있는 것으로 해석되었다.

사 사

본 연구를 수행함에 있어서 시료채취에 많은 배려를 해주신 제주대학교 아라호 직원 여러분과 실험에 도움을 준 지구해양학과 지질해양학연구실의 허승걸 학생에게 감사드립니다. 또한 논문의 심사과정에서 세심한 검토와 지적으로 많은 도움을 주신 편집위원님과 익명의 두분 심사위원님께서 감사드립니다.

참고문헌

- 남승일, 김성필, 장정해, Mackensen, A., 2003, 마지막 해빙기 해침 이후 동중국해 북부해역과 황해의 고환경 변화. 지질학회지, 39, 149-160.
- 박용안, 최진용, 이창복, 김대철, 최광원, 1994, 한국서해 중부해역 대륙붕 퇴적물의 분포와 퇴적작용. 한국해양학회지, 29, 357-365.
- 이용일, 이선복, 2002, 용인시 평창리 구석기유적발굴지 고토양 특성과 이의 고고지질학적 적용. 지질학회지, 38, 471-489.
- 임동일, 신인현, 정희수, 2007, 한국과 중국의 강 퇴적물의 주성분원소 함량특성: 황해니질퇴적물의 기원지 연구를 위한 잠재적 추적자. 한국지구과학회지, 28, 311-323.
- 윤정수, 김태정, 2008, 제주도 서부해역 표층퇴적물의 지화학 조성 및 기원 연구. 한국지구과학회지, 29, 328-340.
- 윤정수, 변종철, 김여상, 2006, 동중국해 외대륙붕해역 니질 퇴적물의 지화학적 특성. 한국지구과학회지, 27, 198-208.
- 윤정수, 임동일, 변종철, 정희수, 2005, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr비를 이용한 동중국해역 대륙붕 퇴적물의 기원연구. 한국해양학회지, 10, 92-99.
- Alexander, C.R., DeMaster, D.J., and Nittrouer, C.A., 1991, Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: The Yellow Sea. Marine Geology, 98, 51-72.
- Asahara, Y., Tanaka, T., Kamioka, H., and Nishimura, A., 1995, Asian continental nature of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios in north central Pacific sediments. Earth and Planetary Science Letter, 133, 105-116.
- Birkeland, P.W., 1984, Soils and geomorphology. Oxford University Press, Oxford, UK, 372 p.
- Borg, L.E. and Banner, J.L., 1996, Neodymium and strontium isotopic constraints on soil sources in

- Barbados, West Indies. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 60, 4193-4206.
- Burke, W.H., Denison, R.E., Hetherington, E.A., Koepnick, R.B., Nelson, H.F., and Otto, J.B., 1982, Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time. *Geology*, 10, 516-519.
- Capo, R.C. and Depaolo, D.J., 1990, Seawater strontium isotopic variation from 2.5 million years ago to the present. *Science*, 249, 51-55.
- Capo, R.C., Stewart, B.W., and Chadwick, O.A., 1998, Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: Theory and methods. *Geo-derma*, 82, 197-225.
- Chough, S.K. and Kim, D.C., 1981, Dispersal of fine-grained sediments in the southeastern Yellow Sea: A steady-state model. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51, 721-758.
- Cullers, R.L., Chaudhuri, C., Kilbane, N., and Koch, R., 1979, REE in size fractions and sedimentary rocks of Pennsylvanian-Permian age from the mid-continent of the USA. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 43, 1285-1301.
- Cullers, R.L., Barrett, T., Carlson, R., and Robinson, B., 1987, REE mineralogic changes in Holocene soil and stream sediment. *Chemical Geology*, 63, 275-297.
- Cullers, R.L., Basu, A., and Suttner, L.J., 1988, Geochemical signature of provenance in sand-material in soils and stream sediments near the Tobacco Root Batholith, Montana, USA. *Chemical Geology*, 70, 335-348.
- Dasch, E.J., 1969, Sr isotope in weathering profiles, deep-sea sediments and sedimentary rocks. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 33, 1521-1552.
- DeMaster, D.J., Mckee, B.A., Nittourer, C.A., Qian, J., and Cheng, G., 1985, Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurement from continental shelf deposit in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 4, 143-158.
- Derry, L. and France-Lanord, C., 1996, Neogene Himalayan weathering history and river $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: Impact on the marine Sr record. *Earth and Planetary Science Letter*, 142, 59-74.
- 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. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 59, 3799-3815.
- Eisenhaner, A., Meyer, H., Rachold, V., Tutken, T., Wiegand, B., Hansen, B.T., Spielhagen, R.F., Lindemann, F., and Kas-sens, H., 1999, Grain-size separation and sediment mixing in Arctic Ocean sediments: Evidence from strontium isotope systematic. *Chemical Geology*, 158, 173-188.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957, Brazor river bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-27.
- Galehouse, J.S., 1971, Sedimentation analysis. In Carver, R.E. (eds.), *Procedures in sedimentary petrology*. Wiley-Interscience, NY, USA, 69-94.
- Goldstein, S.J. and Jacobsen, S.B., 1988, Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: Implications for crustal evolution. *Earth and Planetary Science Letter*, 87, 249-265.
- Gromet, L.P., Dymek, R.F., Haskin, L.A., and Korotev, R.L., 1984, The North American shale composite: It's compilation major and trace element characteristics. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 48, 2468-2482.
- Harnois, L., 1988, The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 55, 319-322.
- Hu, D. and Yang, Z., 2001, Key processes in the ocean flux of the East China Sea. China Ocean Press, Beijing, China, 513-516.
- Ingram, R.L., 1971, Sieve analysis. In Carrer, R.E. (eds.), *Procedure in sedimentary petrology*. Wiley Interscience, NY, USA, 49-68.
- Jacobsen, S.B. and Wasserburg, G.J., 1980, Sm-Nd isotopic evolution of chondrites. *Earth and Planetary Science Letter*, 50, 139-155.
- Kitano, Y. and Hujiyoshi, R., 1980, Selective chemical leaching of cadmium, copper, and manganese and iron in marine sediments. *Geochemical Journal*, 14, 113-122.
- Koepnick, R.B., Burke, W.H., Denison, R.E., Hetherington, E.A., Nelson, H.F., Otto, J.B., and Waite, L.E., 1985, Construction of the seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ curve for the cenozoic and cretaceous: Supporting data. *Chemical Geology*, 58, 55-81.
- Lee, H.J. and Chough, S.K., 1989, Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea. *Marine Geology*, 87, 195-205.
- Lee, S.G., Masuda, A., and Kim, H.S., 1994, An early proterozoic leuco-granitic gneiss with the REE tetrad phenomenon. *Chemical Geology*, 114, 59-67.
- Li, B., Park, B.K., and Kim, D., 1999, Paleooceanographic records from the Northern shelf of the East China Sea since the Last Glacial Maximum. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 34, 151-166.
- Li, C., Kang, S., Zhang, Q., and Wang, F., 2009, Rare earth elements in the surface sediments of the Yarlung Tsangpo (upper Brahmaputra River) sediments, Southern Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 208, 151-159.
- Lie, H.J., 1986, Summertime hydrographic features in the southeastern Huanghe. *Progress of Oceanology*, 28, 680-683.
- Liu, Z.X., Beme, S., Saito, Y., Lericolasis, G., and Marsset, T., 2000, Quaternary seismic stratigraphy and paleoenvironments on the continental shelf of the East China Sea. *Journal of Asian Earth Science*, 18, 441-

- 452.
- Martin, C.E. and McCulloch, M.T., 1999, Nd-Sr isotopic and trace element geo-chemistry of river sediments and soils in a fertilized catchment, New South Wales, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 287-305.
- McLennan, S.M., 1989, Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. *Review Mineralogy*, 21, 170-199.
- Milliman, J.D., Beardslay, R.C., Yang, Z.S., and Limebruner, R., 1985, Modern Huanghe deived mud on the outer shelf of the East China Sea: Identification and potential transport mechanisms. *Continental Shelf Research*, 4, 175-188.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1982, Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715-717.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1984, Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 1523-1534.
- Niino, H. and Emery, K.O., 1961, Sediments of shallow portion of East China Sea and South China Sea. *Geological Society of America Bulletin*, 72, 731-762.
- Palmer, M.R. and Edmond, J.M., 1989, The strontium isotope budget of the modern ocean. *Earth and Planetary Science Letter*, 92, 11-26.
- Palmer, M.R. and Edmond, J.M., 1992, Controls over the strontium isotope composition of river water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 415-418.
- Park, J.B. and Kwon, S.T., 1993, Geochemical evolution of the Cheju Volcanic Island: II. Trace element chemistry of volcanic rocks from the northern part of Cheju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 29, 477-492.
- Piper, D.Z., 1985, Rare earth elements in the sedimentary cycle: A summary. *Chemical Geology*, 14, 285-304.
- Saito, Y., 1998, Sedimentary environment and budget in the East China Sea. *Bulletin on Coastal Oceanography Japan*, 36, 43-58.
- Schubel, J.R., Shen, H.T., and Park, M.J., 1984, A comparison of some characteristic sedimentation process of estuaries entering the Yellow Sea. *Proceedings of Korea-U.S. Seminar and Workshop, Marine Geology and Physical Processes of the Yellow Sea*, 286-308.
- Shaffer, N.R. and Faure, G., 1976, Regional variation $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios and mineral composition in sediment in the Red Sea. *Geological Society of America Bulletin*, 87, 1491-1500.
- Sholkovitz, E.R. and Szymezak, R., 2000, The estuarine chemistry of rare earth elements: Comparison of the Amazon, Fly, Sepik and the Gulf of Papua system. *Earth and Planetary Science Letter*, 179, 299-309.
- Snoeckx, H., Grousset, F., Rerel, M., and Boelaert, A., 1999, European contribution of ice-rafted sand to Heinrich layers H3 and H4. *Marine Geology*, 158, 197-208.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.K., 1985, *The continental crust: Its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, USA, 312 p.
- Tutken, T., Eisenhauer, A., Wiegand, B., and Hansen, B.T., 2002, Glacial-interglacial cycles in Sr and Nd isotope composition of Arctic marine sediments triggered by the Svalbard/Barents Sea ice sheet. *Marine Geology*, 351-372.
- Weldeab, S., Emeis, K.C., Hemleben, C., and Siebel, W., 2002, Provenance of lithogenic surface sediments and pathways of riverine suspended matter in the Eastern Mediterranean Sea: Evidence from $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios. *Chemical Geology*, 186, 139-149.
- Yang, S.Y., Li, C.X., Jung, H.S., and Lee, H.J., 2002, Discrimination of elemental compositions between the Changjiang and Huanghe sediments and identification of sediment source in northern Jiangsu coast plain, China. *Marine Geology*, 186, 229-241.
- Yang, S.Y., Jung, H.S., and Lim, D.I., 2003, A review on provenance discrimination of the Yellow Sea sediments. *Earth-Science Reviews*, 63, 93-120.
- 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. *Marine Geology*, 206, 41-53.
- Yang, S. and Youn, J.S., 2007, Geochemical compositions and provenance discrimination of the central south Yellow Sea sediments. *Marine Geology*, 243, 229-241.
- Youn, J.S. and Kim, T.J., 2011, Geochemical composition and provenance of muddy shelf deposits in the East China Sea. *Quaternary International*, 230, 3-12.
- Zhao, Y.Y., Qing, Z.Y., and Li, F., 1990, On the source and genesis of the mud in the central area of the South Yellow Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 8, 66-73.
- Zhao, Y.Y. and Yan, M.C., 1992, Abundance of chemical elements in sediments from the Huanghe River, the Changjiang River and the continental shelf of China. *Chinese Science Bulletin*, 37, 1991-1994.
- Zhu, E. and Wang, Q., 1988, Sedimentation on the north shelf of the East China Sea. *Marine Geology*, 81, 123-136.

2012년 8월 13일 접수

2012년 9월 18일 수정완료 접수

2012년 9월 19일 채택