

## Article

## 북동태평양 Clarion-Clipperton 해역 표층 퇴적물의 희토류 조성 및 희토류 광상으로서의 잠재성

서인아<sup>1,2</sup> · 박상준<sup>1\*</sup> · 형기성<sup>1</sup> · 공기수<sup>3</sup> · 김종욱<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국해양과학기술원 심해저광물자원연구센터  
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

<sup>2</sup>서울대학교 지구환경과학부

(151-742) 서울특별시 관악구 관악로 1

<sup>3</sup>한국지질자원연구원 석유해저연구본부 해저지질연구실  
(305-350) 대전광역시 유성구 과학로 124

## Composition of Rare Earth Elements in Northeast Pacific Surface Sediments, and their Potential as Rare Earth Elements Resources

Inah Seo<sup>1,2</sup>, Sang Joon Pak<sup>1\*</sup>, Hyeong Kiseong<sup>1</sup>, Gee-Soo Kong<sup>3</sup>, and Jonguk Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Deep-sea and Seabed Mineral Resources Research Center, KIOST  
Ansan 426-744, Korea

<sup>2</sup>School of Earth and Environmental Science, Seoul National University  
Seoul 151-742, Korea

<sup>3</sup>Marine Geology Department, Petroleum & Marine Research Division, KIGAM  
Daejeon 305-350 Korea

**Abstract :** The surface sediments from the manganese nodule exploration area of Korea in the Clarion-Clipperton fracture zone were investigated to understand the resource potential of and emplacement mechanism for rare earth elements (REEs). The sediments are categorized into three lithological units (Unit I, II and III from top to bottom), but into two groups (Unit I/II and Unit III) based on the distribution pattern of REEs. The distribution pattern of REEs in Unit I/II is similar to that of Post-Archean Australian Shale (PAAS), but shows a negative Ce anomaly and enrichment in heavy REEs (HREEs). In Unit III, the HREE enrichment and Ce anomaly is much more remarkable than Unit I/II when normalized to PAAS, which are interpreted as resulting from the absorption of REEs from seawater by Fe oxyhydroxides that were transported along the buoyant plume from remotely-located hydrothermal vents. It is supported by the PAAS-normalized REE pattern of Unit III which is similar to those of seawater and East Pacific Rise sediments. Meanwhile, the PAAS-normalized REE pattern of Unit I/II is explained by the 4:1 mixing of terrestrial eolian sediment and Unit III from each, indicating the much smaller contribution of hydrothermal origin material to Unit I/II. The studied sediments have the potentiality of a low-grade and large tonnage REE resource. However, the mining of REE-bearing sediment needs a large size extra collecting, lifting and treatment system to dress and refine low-grade sediments if the sediment is exploited with manganese nodules. It is economically infeasible to develop low-grade REE sediments at this moment in time because the exploitation of REE-bearing sediments with manganese nodules increase the mining cost.

**Key words :** Rare earth elements, Northeast Pacific, REE-bearing sediments, REE origin, REE resources

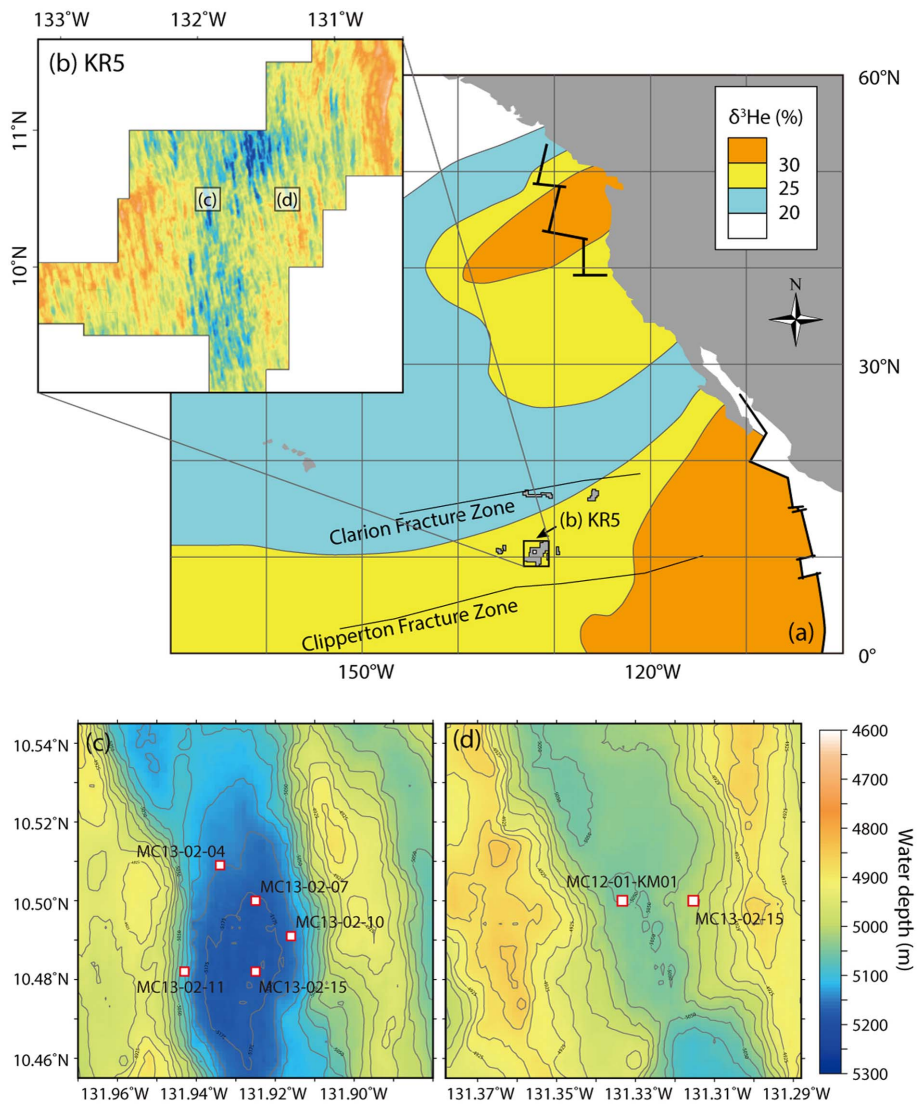
\*Corresponding author. E-mail : electrum@kiost.ac

### 1. 서론

현재 전기자동차, 디스플레이산업, 태양전지, 원전플랜트 등 다양한 산업분야에서 희유금속(稀有金屬, rare metal)의 수요 급증과 희토류(稀土類, rare earth elements; REE) 자원의 공급 편중에 따라 망간각, 망간단괴 등의 해저광물자원 내 희유금속이 잠재적 자원으로서 부각되고 있다(Banerjee 2004; Hein et al. 2003, 2010; Kawamoto 2008). 해저광물자원에 함유된 희유금속의 품위는 일반적으로 육상광상에 비해 낮아 독립 채산성은 없지만, 주 금속(Ni, Co, Cu 등) 제·정련시 부산물로 생산할 시 채산성을 높여줄 것으로 예상된다(박 등 2010). 특히 동태평양 적도 인근에 분포하는 표층퇴적물의 REY(희토류 + Y) 함

량은 약 1,000~2,230 ppm으로, 중국 남부 희토류 광상에 포함된 500~2,000 ppm 보다 풍부한 것으로 보고되었다(Kato et al. 2011). REY 평균 함량을 1,200 ppm으로 가정한다면, 해당 지역에서 1 km<sup>2</sup> × 10 m의 개발을 통해 전 세계 REY 소비량(134,000 tREY-oxides, 2010년 기준; Humphries, 2010)의 1/15에 해당하는 양을 공급할 수 있다(Kato et al. 2011). 이러한 결과는 동태평양 적도지역 표층퇴적물이 잠재적 REY 자원으로써 가치가 높음을 시사한다.

우리나라가 보유하고 있는 망간단괴 탐사광구 지역은 앞서 언급한 동태평양 적도지역 인근에 위치하며, 따라서 광구지역의 퇴적물 내 REY의 자원잠재력이 높을 것이라 예상된다. 그러나 지금껏 이 지역의 퇴적물을 이용하여 망



**Fig. 1.** Map of study sites (KR5 area) in the Eastern Pacific. (a) Contours represent Helium-3 anomalies ( $\delta^3\text{He}$ ) of mid-depth seawater (Lupton, 1995). (b) Detailed bathymetry of the KR5 area. (c), (d) Sampling sites of analyzed cores. The coordinates of sampling sites are shown in Table 1. Same depth scales are used for (b), (c) and (d)

Table 1. Sampling locations of sediment cores analyzed in this study

Core No.	Latitude (°N)	Longitude (°W)	Units	Boundary depth (cm)	Core length(cm)
MC12-01-KM01	10.49975	131.34423	I/II	11	18
MC13-02-04	10.51133	131.93582	I/III	5	27
MC13-02-07	10.50133	131.92162	I/II	7	43
MC13-02-10	10.48717	131.91415	I/II	10	43
MC13-02-11	10.48332	131.94103	I/III	4	13
MC13-02-12	10.48508	131.92283	I/III	5	22
MC13-02-15	10.49942	131.31750	I/III	10	25

간단괴의 성인 및 고환경 복원연구만이 수행되었을 뿐, 퇴적물 자체를 자원개발의 대상으로 여기고 REE 광상으로서의 잠재성을 논의한 사례는 아직 없다. 본 연구에서는 우리나라 망간단괴 광구해역에 분포하는 표층퇴적물의 분포 깊이와 암상에 따른 REY 분포 특성을 파악하고, 그들의 농집 기작 및 자원 잠재성을 살펴보고자 한다.

## 2. 연구 지역 및 방법

연구지역은 북동태평양 클라리온-클리퍼튼 균열대 내 대한민국 망간단괴 광구 중 KR5에 위치한다(Fig. 1). 해당 지역에서 다중시료채취기를 이용하여 총 7개의 주상시료(Table 1)를 채취하였고 각각의 길이는 8~30 cm이다(Fig. 2). 퇴적물은 KR5 지역에 일반적으로 나타나는 니질특성을 보이며 색상, 함수율, 조직 등의 특성 차이에 따라 상부로부터 Unit I, Unit II, Unit III로 구분된다(Fig. 2). Unit I은 모든 정점의 최상부에 분포하며, 상부로부터 약 10 cm 내외의 두께를 갖는다. 색상은 갈색/암갈색(brown, 10YR5/3)이며, 매우 균질하고 함수량이 높다. Unit II는 황갈색(brownish yellow, 10YR6/6)을 띠고, 생교란작용을 많이 받은 층으로서 Unit I과 경계가 뚜렷하지 않으며 약

20 cm 내외의 두께를 보인다. Unit III는 대체로 흑갈색(very dark brown, 10YR3/2)으로, 생교란작용으로 생성된 서관구조(burrowing)를 일부 포함하고 있으며 이 서관구조는 Unit I과 Unit II의 퇴적물로 채워져 있다(Fig. 2). 3개 주상시료(MC13-02-10, 12, 15)의 표층에서 소형 망간단괴가 발견되었고 크기는 4 cm 이하이며 대부분 원반형태(discoidal type)를 갖는다.

퇴적물 내 주요원소의 정량 분석을 위해 2 cm 간격으로 부시료를 채취하여 동결 건조 후 분말화하고 산처리하여 원소별로 화학분석을 실시하였다. 주요원소는 한국지질자원연구원의 유도결합플라즈마 분광분석기(ICP-OES)인 Labtest, Labtam 3000; Jobin Yvon, JY 38 Plus를 사용하여 분석하였으며, 희토류원소와 Y는 한국지질자원연구원이 보유한 미국 PerKin Elmer 사의 Elan DRC-II 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)를 사용하였다. 각각 원소의 분석 오차는 5% 미만이다.

## 3. 결 과

분석된 원소의 함량은 Table 2에, Unit I/II/III 및 함께 산출된 망간단괴 내 총 REE/REY 함량은 Fig. 3에 제시하

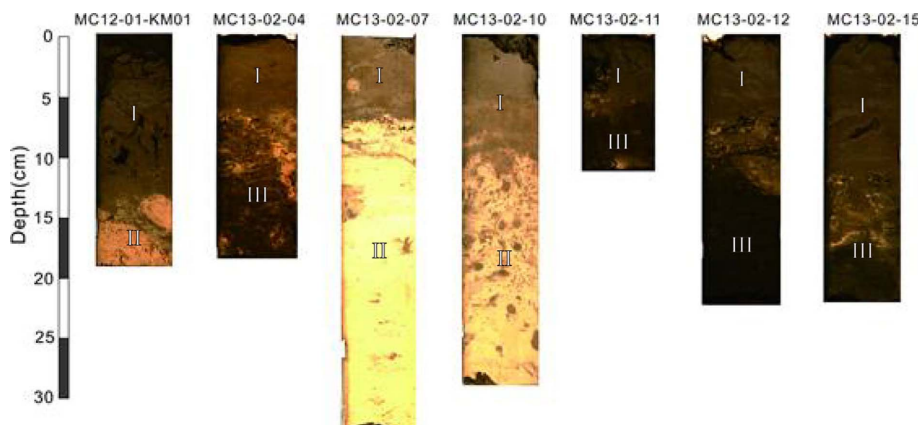


Fig. 2. Pictures of multiple core sediments used for geochemical analysis in this study. The lithological units (Unit I, II and III) are presented in the figure

Table 2. Analytical results of sediment samples (REYs in ppm and Fe, Mn and Al in wt%)

Unit	Core ID	Depth (cm)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Total REE	Ce/Ce*	Y	Fe	Mn	Al	Boström Index
I	MC12-01-KM01	1	51.0	78.6	15.4	58.9	14.6	4.5	15.0	2.7	13.8	3.0	7.6	1.2	7.2	1.2	274.7	0.6	77.7	4.1	0.5	2.9	38.3
	MC12-01-KM01	4	52.0	79.7	15.6	59.9	14.9	4.6	15.3	2.7	14.3	3.1	8.0	1.3	7.4	1.2	279.9	0.6	79.4	4.1	0.6	2.9	38.3
	MC12-01-KM01	6	53.2	82.9	16.1	61.6	15.0	4.6	15.8	2.8	14.5	3.2	7.9	1.2	7.6	1.3	287.8	0.6	80.1	4.2	0.5	3.0	38.6
	MC12-01-KM01	8	48.1	76.8	14.5	54.9	13.6	4.2	14.3	2.5	13.0	2.8	7.3	1.1	6.7	1.1	261.0	0.6	74.8	4.2	0.5	3.0	38.9
	MC12-01-KM01	10	48.3	74.8	14.4	54.7	13.6	4.1	13.8	2.5	12.7	2.8	7.2	1.1	6.8	1.1	257.8	0.6	76.5	4.3	0.5	3.1	39.0
	MC12-01-KM01	12	70.3	80.4	21.8	83.0	20.7	6.2	21.9	3.8	19.6	4.3	10.7	1.6	9.8	1.6	355.8	0.4	117.0	4.6	0.3	3.3	40.3
	MC13-02-04	1	34.0	58.4	10.0	36.4	8.9	2.7	9.3	1.7	8.6	1.9	4.7	0.8	4.5	0.8	182.6	0.7	56.6	4.1	0.5	2.9	39.1
	MC13-02-04	3	32.5	56.7	9.7	35.3	8.4	2.6	9.0	1.7	8.3	1.9	4.6	0.7	4.5	0.8	176.8	0.7	55.7	4.2	0.4	3.0	39.5
	MC13-02-04	5	33.0	56.9	9.8	36.1	8.7	2.7	9.2	1.7	8.5	1.9	4.8	0.8	4.6	0.8	179.4	0.7	57.0	4.2	0.4	3.0	39.5
	MC13-02-07	1	37.4	68.5	11.4	41.1	9.9	3.1	10.5	1.9	9.6	2.1	5.5	0.9	5.2	0.9	208.0	0.7	60.0	4.1	0.4	2.9	39.2
	MC13-02-07	3	35.5	63.9	10.5	38.8	9.4	3.0	9.8	1.8	8.8	2.0	4.9	0.8	4.9	0.8	194.9	0.7	58.8	4.2	0.4	3.0	39.9
	MC13-02-07	5	33.6	59.3	10.0	36.9	8.9	2.8	9.5	1.7	8.6	1.9	4.8	0.8	4.6	0.8	184.2	0.7	57.7	4.2	0.4	3.0	39.5
	MC13-02-10	2	35.1	81.2	10.5	38.5	9.3	2.8	9.6	1.7	8.5	1.8	4.6	0.7	4.5	0.8	209.7	0.9	50.4	4.6	4.2	2.8	24.2
	MC13-02-10	4	28.9	54.2	8.5	30.5	7.4	2.3	7.8	1.4	7.0	1.6	3.9	0.7	3.8	0.6	158.5	0.8	47.3	4.2	0.4	3.0	39.9
	MC13-02-11	1	47.7	78.4	14.3	54.6	13.3	4.1	14.1	2.5	13.0	2.8	7.0	1.1	6.9	1.1	260.9	0.7	71.6	3.9	0.8	2.7	36.4
MC13-02-11	3	51.0	79.0	15.1	58.1	14.3	4.4	14.9	2.6	13.5	3.0	7.7	1.2	7.2	1.2	273.2	0.6	76.4	4.0	2.7	2.7	28.9	
MC13-02-12	1	30.6	54.8	9.0	33.0	7.7	2.4	8.1	1.5	7.5	1.7	4.2	0.7	4.2	0.7	166.1	0.7	51.4	4.1	0.5	2.9	38.8	
MC13-02-12	3	33.1	57.3	9.7	35.6	8.6	2.6	9.1	1.7	8.4	1.8	4.5	0.8	4.5	0.8	178.5	0.7	55.6	4.1	0.5	2.9	39.1	
MC13-02-12	5	45.4	77.1	13.8	51.9	12.7	3.8	13.1	2.3	12.0	2.7	6.7	1.1	6.4	1.1	250.0	0.7	68.5	4.1	0.5	2.9	39.0	
MC13-02-15	1	47.3	79.9	14.3	54.2	13.4	4.2	13.8	2.4	12.4	2.7	7.0	1.1	6.4	1.1	260.3	0.7	69.6	4.0	0.5	2.8	38.6	
MC13-02-15	3	45.8	75.7	13.8	52.2	12.6	4.0	13.1	2.3	11.9	2.6	6.7	1.0	6.3	1.0	249.2	0.7	68.3	4.1	0.5	2.9	38.5	
MC13-02-15	5	45.7	75.7	13.5	51.4	12.3	4.0	12.9	2.2	11.7	2.5	6.5	1.0	6.0	1.0	246.5	0.7	66.5	4.4	0.5	3.1	38.3	
MC13-02-15	8	46.2	77.6	13.6	51.5	12.6	4.0	13.0	2.3	11.7	2.6	6.6	1.0	6.3	1.0	250.1	0.7	68.2	4.3	0.4	3.1	39.4	
MC13-02-15	10	60.9	85.3	18.4	71.3	17.3	5.4	18.2	3.2	16.4	3.6	9.0	1.4	8.1	1.4	319.8	0.6	93.5	4.5	0.5	3.3	39.6	
Unit I average			43.6	71.4	13.1	49.2	12.0	3.7	12.5	2.2	11.4	2.5	6.4	1.0	6.0	1.0	<b>236.1</b>	0.7	68.3	4.2	0.7	3.0	37.9
II	MC12-01-KM01	18	122.0	82.6	36.4	142.0	33.8	10.0	36.9	6.5	33.5	7.4	18.6	2.8	16.4	2.8	551.7	0.3	214.0	4.9	0.1	3.4	40.6
	MC13-02-07	18	45.4	69.8	13.5	50.2	11.7	4.2	12.3	2.2	10.7	2.4	5.7	0.9	5.4	0.9	235.3	0.6	69.3	4.9	0.1	3.4	40.8
	MC13-02-07	21	60.1	101.0	16.7	59.2	13.1	4.4	13.3	2.3	10.7	2.3	5.8	0.9	5.5	0.9	296.3	0.7	69.0	5.0	0.1	3.4	40.2
	MC13-02-07	24	46.4	85.8	13.6	50.5	12.0	4.2	12.6	2.2	10.9	2.4	5.9	1.0	5.8	1.0	254.2	0.7	70.5	5.0	0.1	3.5	40.9
	MC13-02-07	27	44.0	64.0	13.3	48.6	11.5	4.1	12.0	2.2	10.6	2.3	5.7	0.9	5.4	0.9	225.4	0.6	65.2	5.1	0.1	3.4	40.0

Table 2. Continued

Unit	Core ID	Depth (cm)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Total REE	Ce/Ce*	Y	Fe	Mn	Al	Boström Index
	MCI3-02-07	30	44.5	84.5	13.8	51.1	12.1	4.4	12.7	2.3	11.0	2.5	6.0	1.0	5.8	1.0	252.5	0.7	70.9	4.9	0.1	3.5	41.0
	MCI3-02-10	13	30.2	57.5	8.9	32.4	7.6	2.4	8.1	1.4	7.4	1.6	4.0	0.7	3.9	0.7	166.8	0.8	46.9	4.1	0.2	3.1	41.5
	MCI3-02-10	16	30.9	59.6	9.1	33.1	7.9	2.4	8.3	1.5	7.4	1.7	4.1	0.7	4.0	0.7	171.3	0.8	48.7	4.3	0.1	3.1	41.5
	MCI3-02-10	19	31.1	61.4	9.2	33.7	8.1	2.5	8.4	1.5	7.7	1.7	4.3	0.7	4.2	0.7	175.1	0.8	50.6	4.2	0.1	3.1	41.7
	MCI3-02-10	22	31.5	58.7	9.4	33.6	8.2	2.5	8.7	1.6	7.8	1.7	4.4	0.7	4.2	0.7	173.6	0.7	52.3	4.3	0.1	3.2	41.9
	MCI3-02-10	25	39.7	78.0	12.1	42.9	9.9	2.8	10.2	1.8	8.5	1.9	4.7	0.8	4.5	0.8	218.4	0.8	55.5	4.4	0.1	3.2	41.8
	MCI3-02-10	28	36.0	67.9	10.6	38.3	9.2	2.8	9.5	1.7	8.6	1.9	4.8	0.8	4.6	0.8	197.3	0.8	57.1	4.6	0.1	3.3	41.9
	Unit II average		46.8	72.6	13.9	51.3	12.1	3.9	12.7	2.3	11.2	2.5	6.2	1.0	5.8	1.0	<b>243.2</b>	0.7	72.5	4.6	0.1	3.3	41.2
III	MCI3-02-04	15	101.0	73.9	30.6	116.0	27.1	7.8	28.9	5.2	25.4	5.7	13.9	2.2	12.5	2.1	452.3	0.3	177.0	5.5	0.7	3.2	34.3
	MCI3-02-04	17	102.0	73.6	30.8	117.0	27.1	7.8	29.3	5.2	25.8	5.7	13.7	2.2	12.4	2.1	454.7	0.3	176.0	5.5	0.8	3.2	33.7
	MCI3-02-12	7	99.8	83.3	31.0	121.0	29.4	8.3	30.8	5.5	26.8	5.8	14.4	2.2	12.6	2.0	472.9	0.3	156.0	5.0	0.5	3.1	36.5
	MCI3-02-12	9	112.0	92.4	33.8	131.0	31.4	8.9	33.0	5.8	29.4	6.5	16.0	2.4	13.9	2.3	518.7	0.3	172.0	5.3	0.5	3.3	36.1
	MCI3-02-12	13	166.0	105.0	47.1	186.0	42.5	12.4	46.0	8.0	40.8	9.1	22.5	3.4	19.9	3.3	712.0	0.3	242.0	5.8	1.1	3.1	31.1
	MCI3-02-12	15	165.0	98.3	47.1	185.0	43.2	12.4	47.0	8.0	40.9	9.1	22.5	3.4	20.0	3.2	705.1	0.2	250.0	5.9	1.4	3.1	29.8
	MCI3-02-12	17	165.0	99.7	47.7	188.0	43.7	12.5	46.9	8.2	41.5	9.1	22.5	3.3	19.5	3.2	710.9	0.2	241.0	5.9	1.5	3.1	29.8
	MCI3-02-12	19	160.0	96.6	46.9	186.0	43.1	12.4	46.7	8.0	40.4	8.8	21.8	3.3	19.2	3.1	696.4	0.2	233.0	5.9	1.8	3.1	28.5
	MCI3-02-15	12	106.0	107.0	33.3	130.0	32.3	9.5	33.3	5.9	29.5	6.5	16.1	2.4	13.9	2.3	527.8	0.4	168.0	5.1	0.6	3.4	37.3
	MCI3-02-15	16	123.0	112.0	38.1	148.0	36.0	11.0	38.2	6.8	34.6	7.5	18.6	2.8	16.3	2.7	595.6	0.4	201.0	4.9	0.7	3.4	38.3
	MCI3-02-15	19	129.0	364.0	42.1	163.0	40.9	10.5	40.0	6.9	33.2	6.9	16.9	2.7	15.9	2.6	874.6	1.1	106.0	4.9	1.3	3.1	33.7
	Unit III average		129.9	118.7	39.0	151.9	36.1	10.3	38.2	6.7	33.5	7.3	18.1	2.7	16.0	2.6	<b>611.0</b>	0.4	192.9	5.4	1.0	3.2	33.6
Nodule	MCI3-02-10		79.0	234.0	26.2	98.3	24.2	6.2	23.3	4.2	19.6	4.1	9.8	1.6	9.4	1.6	541.4	1.1	72.6	5.2	27.8	1.3	25.6
	MCI3-02-10		53.1	153.0	17.5	66.8	16.5	4.5	16.0	3.0	14.0	3.0	7.3	1.2	6.8	1.2	363.8	1.1	63.3	6.9	15.3	2.5	10.0
	MCI3-02-12		99.7	243.0	35.6	140.0	36.8	9.6	34.8	6.2	30.0	6.1	15.2	2.4	14.6	2.3	676.4	0.9	92.7	4.3	30.1	1.1	32.3
	MCI3-02-15		132.0	113.0	39.5	155.0	37.3	11.4	40.3	6.9	35.6	7.8	19.6	3.0	17.5	2.8	621.7	0.3	215.0	5.6	29.1	1.3	28.8
	MCI2-01-KM01		109.0	253.0	36.3	141.0	35.3	9.2	34.9	6.1	29.0	6.1	14.9	2.3	13.9	2.3	693.2	0.9	102.0	5.5	28.6	1.2	30.1
	Nodule average		94.6	199.2	31.0	120.2	30.0	8.2	29.9	5.3	25.6	5.4	13.4	2.1	12.4	2.0	<b>579.3</b>	0.9	109.1	5.5	26.2	1.5	25.4

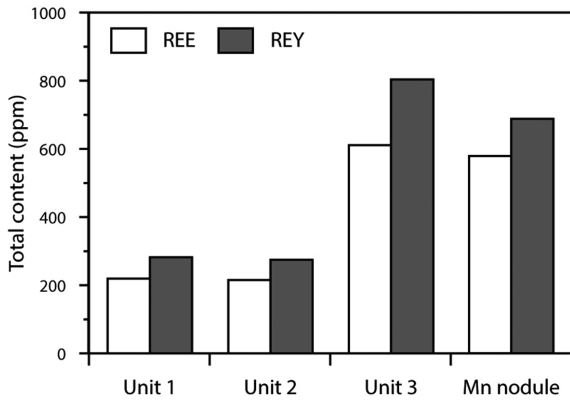


Fig. 3. Total (Average) contents of rare earth element (REE) and REY (REE + Y) in each unit and manganese nodule entrapped in the multiple cores

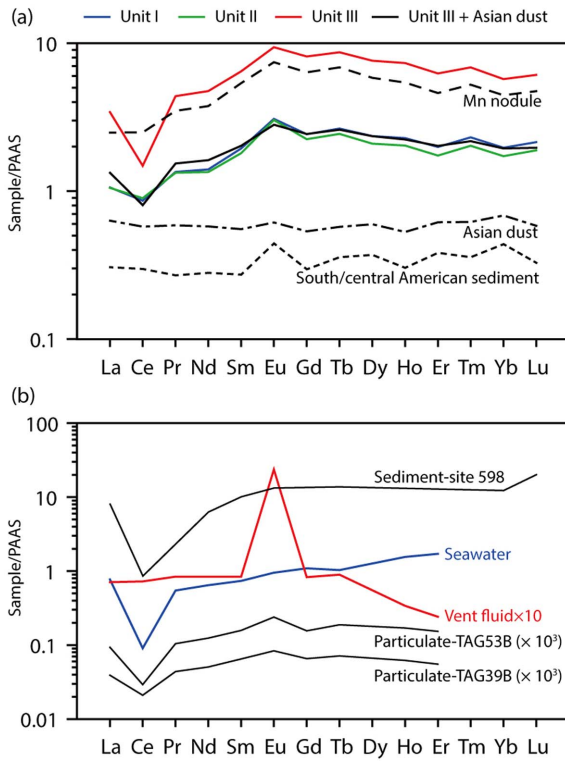


Fig. 4. PAAS-normalized REE distribution patterns of (a) studied sediment samples, Mn nodule, and eolian dust delivered to the study site (Hyeong et al. 2005); and (b) seawater, vent fluid, plume particulates at the Trans-Atlantic Geotraverse (TAG) sites (German et al. 1990), and the hydrothermal sediments dispersed away from the vents in the Pacific (site 598 sediment, 904 km from the rise) (Ruhlin and Owen 1986)

였다. 연구시료 내 총 REE 함량은 158~875 ppm으로 매우 넓은 범위를 보이거나, Unit 별로 그 패턴 및 함량이 특

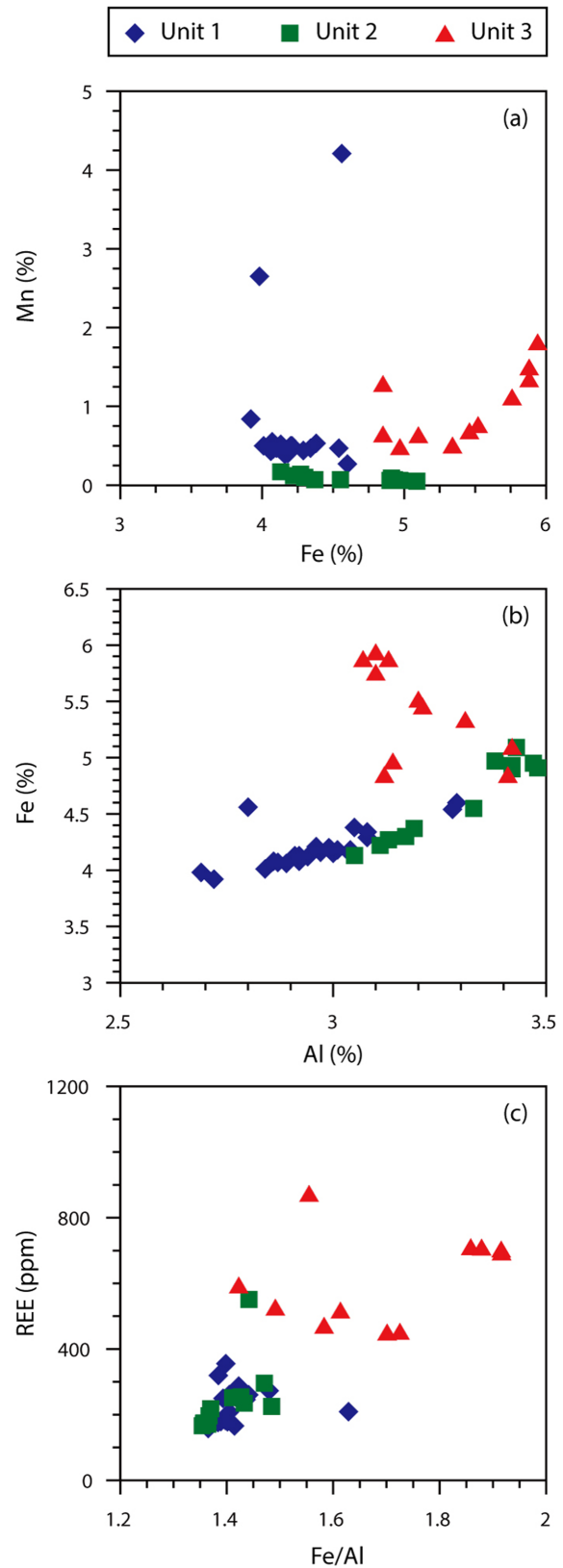


Fig. 5. Cross-plots of (a) Fe versus Mn, (b) Al versus Fe, and (c) Fe/Al ratio versus total REE content in studied samples

징지어진다. 상부의 Unit I/II 내 REE(각각  $219 \pm 52$ ,  $215 \pm 42$  ppm,  $1\sigma$ ) 및 REY(각각  $282 \pm 66$ ,  $275 \pm 51$  ppm,  $1\sigma$ ) 함량은 서로 매우 유사하며, PAAS(Post-Archean Australian Shale)의 REE 함량(183 ppm; Taylor and McLennan, 1995)에 비해 다소 높다. 특히 중희토류(Heavy REE, HREE)가 PAAS보다 2~3배 부화되었고, 경희토류(Light REE, LREE)에서는 약한 음의 Ce 이상치가 나타난다(Unit I:  $0.69 \pm 0.08$ ; Unit II:  $0.72 \pm 0.07$ ) (Fig. 4a). Unit III은 세 암상 중 가장 높은 REE( $611 \pm 138$  ppm,  $1\sigma$ ) 및 REY( $804 \pm 152$  ppm,  $1\sigma$ ) 농도를 보이며, REE가 Unit I/II에 비해 약 3배, PAAS에 비해 평균 4배 정도로 높게 나타난다. 특히, 중희토류는 PAAS에 비해 6~9배 정도 부화되는 경향을 보인다. PAAS에 표준화했을 때, Unit III의 함량과 분포양상은 함께 채취된 망간단괴와 매우 유사하지만 강한 음의 Ce 이상치( $0.4 \pm 0.2$ )가 Unit III에서 특징적으로 나타난다(Fig. 4a).

세 가지 암상은 Fe, Mn, Al 함량에서도 뚜렷한 차이를 보인다(Fig. 5). Unit I, III은 Unit II에 비해 전반적으로 Mn 함량이 높다. 또한 Unit I/II가 Fe와 Mn 함량 간에 상관관계를 전혀 보이지 않는 반면( $r = -0.19$ ,  $n = 36$ ; Fig. 5a), Unit III은 Mn 함량 증가에 따라 Fe 함량이 전반적으로 증가하는 양의 상관관계를 보인다( $r = 0.65$ ,  $n = 11$ ;

Fig. 5a). 또한 Unit I/II가 Fe와 Al 함량에 있어 좋은 양의 상관관계를 보이는 반면, Unit III은 두 시료를 제외하고 음의 상관관계를 보인다(Fig. 5b).

자원학적 관점에서의 희토류 품위는 개별 원소의 산화희토류 함량(rare earth oxide; REO)으로 표시한다. 또한 개별 산화희토류 원소의 함량과 더불어 이들 총산화희토류 함량(total rare earth oxide; TREO)을 이용하여 희토류 광상의 품위를 비교한다. KR5 망간단괴 광구(남측광구)에서 회수된 퇴적물의 총산화희토류의 평균 함량은 Unit I에서 0.034, Unit II 및 III에서 각각 0.040 및 0.081 TREO %를 보여 Unit III로 가면서 총희토류의 함량이 증가한다(Table 3).

퇴적물의 총산화희토류 함량 중 경(輕)희토류( $\text{La}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3$ ; LC)의 함량비는 약 40%를 보이며, 넘지 않는다. 반면 중(重)희토류( $\text{Sm}_2\text{O}_3 + \text{Er}_2\text{O}_3 + \text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{Y}_2\text{O}_3 + \text{Tb}_2\text{O}_3$ ; SEGY)와 중(中)희토류( $\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Pr}_2\text{O}_3 + \text{Dy}_2\text{O}_3$ ; NPD) 함량비는 60%를 차지한다(Table 4; Fig. 6A). Unit 별 산화희토류 함량비 변화를 보면 SEGY 함량비는 Unit I (35.3%)에서 Unit III(39.8%)로 가면서 증가한다. NPD 함량비 역시 Unit I(24.8%)에서 Unit III(28.6%)로 가면서 증가한다. 반면 LC 함량비는 Unit I(39.9%)에서 Unit III (31.6%) 가면서 감소한다(Table 4; Fig. 6A).

**Table 3. Contents of rare earth oxides of sediments, manganese nodule and manganese crust from Korean exploration area**

Resource type	Sediments in KR5 (south)												Manganese nodule (NE Pacific Ocean)									
	Unit I				Unit II				Unit III				South				North					
	Area	Mean	Min	Max	N	Mean	Min	Max	N	Mean	Min	Max	N	Mean	Min	Max	N	Mean	Min	Max	N	
Unit : %																						
$\text{La}_2\text{O}_3$	0.005	0.003	0.007	25	0.006	0.004	0.100	17	0.013	0.007	0.019	20	0.013	0.009	0.022	10	0.015	0.004	0.029	78		
$\text{Ce}_2\text{O}_3$	0.008	0.006	0.010	25	0.009	0.007	0.145	17	0.011	0.004	0.043	20	0.042	0.024	0.085	10	0.068	0.021	0.186	78		
$\text{Pr}_2\text{O}_3$	0.001	0.001	0.002	25	0.002	0.001	0.030	17	0.004	0.002	0.006	20	0.004	0.003	0.006	10	0.004	0.001	0.008	78		
$\text{Nd}_2\text{O}_3$	0.005	0.004	0.008	25	0.007	0.004	0.111	17	0.015	0.008	0.022	20	0.016	0.011	0.023	10	0.017	0.004	0.031	78		
$\text{Sm}_2\text{O}_3$	0.001	0.001	0.002	25	0.002	0.001	0.026	17	0.003	0.002	0.005	20	0.004	0.003	0.006	10	0.004	0.001	0.007	78		
$\text{Eu}_2\text{O}_3$	0.000	0.000	0.001	25	0.000	0.000	0.008	17	0.001	0.001	0.001	20	0.001	0.001	0.001	10	0.001	0.000	0.002	78		
$\text{Gd}_2\text{O}_3$	0.001	0.001	0.002	25	0.002	0.001	0.028	17	0.004	0.002	0.005	20	0.004	0.003	0.006	10	0.004	0.001	0.008	78		
$\text{Tb}_2\text{O}_3$	0.000	0.000	0.000	25	0.000	0.000	0.005	17	0.001	0.000	0.001	20	0.001	0.000	0.001	10	0.001	0.000	0.001	78		
$\text{Dy}_2\text{O}_3$	0.001	0.001	0.002	25	0.001	0.001	0.024	17	0.003	0.002	0.005	20	0.003	0.002	0.005	10	0.003	0.001	0.006	78		
$\text{Ho}_2\text{O}_3$	0.000	0.000	0.000	25	0.000	0.000	0.005	17	0.001	0.000	0.001	20	0.001	0.000	0.001	10	0.001	0.000	0.001	78		
$\text{Er}_2\text{O}_3$	0.001	0.000	0.001	25	0.001	0.000	0.013	17	0.002	0.001	0.003	20	0.002	0.001	0.002	10	0.002	0.000	0.003	78		
$\text{Tm}_2\text{O}_3$	0.000	0.000	0.000	25	0.000	0.000	0.002	17	0.000	0.000	0.000	20	0.000	0.000	0.000	10	0.000	0.000	0.000	78		
$\text{Yb}_2\text{O}_3$	0.001	0.000	0.001	25	0.001	0.000	0.012	17	0.002	0.001	0.002	20	0.002	0.001	0.002	10	0.002	0.000	0.003	78		
$\text{Lu}_2\text{O}_3$	0.000	0.000	0.000	25	0.000	0.000	0.002	17	0.000	0.000	0.000	20	0.000	0.000	0.000	10	0.000	0.000	0.000	78		
$\text{Y}_2\text{O}_3$	0.008	0.006	0.012	25	0.010	0.006	0.171	17	0.022	0.013	0.032	20	0.012	0.009	0.017	10	0.011	0.002	0.017	78		
$\Sigma\text{REO}^1$	0.034	0.024	0.049	25	0.040	0.025	0.091	17	0.081	0.044	0.115	20	0.104	0.067	0.178	10	0.133	0.037	0.302	78		

<sup>1</sup>Total rare earth oxides. Min = minimum, Max = maximum, N = number of sample

Table 4. Mean REO grade and value proposition of seabed REE resources explored by Korea and REE deposits in land

Rare earth oxide	Sediments in manganese nodule area			Manganese nodule		REE deposits in land				REE price (US\$/kg) <sup>4</sup>	
	unit I	unit II	unit III	South	North	Mt. Pass	Mount Weld	Nolan's Bore	Longnan		
% REO contained	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.10	14.65	15.95	12.67	11.42	33.20	25.50	19.74	7.80	4.3
	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.71	21.20	13.86	40.58	50.90	49.10	46.74	47.53	2.40	4.1
	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.20	4.38	4.73	3.97	3.26	4.38	5.32	5.82	2.40	91.0
	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.70	16.26	18.29	15.37	13.11	12.00	18.50	21.20	9.00	57.0
	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.80	3.86	4.29	3.82	3.05	0.80	2.27	2.37	3.00	6.5
	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.18	1.23	1.25	0.95	0.74	0.10	0.21	0.40	0.03	590.0
	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.95	4.04	4.53	3.57	3.12	0.20	0.75	1.00	4.40	31.0
	Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.70	0.71	0.79	0.59	0.48	0.00	0.00	0.08	0.90	510.0
	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.58	3.55	4.00	2.98	2.50	0.00	0.00	0.33	5.30	340.0
	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.80	25.01	26.67	11.44	8.11	0.00	0.00	1.32	56.20	10.4
	Others <sup>1</sup>	5.28	5.11	5.64	4.06	3.31	0.22	0.29	0.21	2.37	-
Relative %REO ditribution	LC <sup>2</sup>	39.91	37.78	31.59	55.50	64.45	82.48	72.76	67.41	11.16	
	NPD <sup>2</sup>	24.79	25.49	28.63	23.26	19.51	16.42	23.99	27.41	18.27	
	SEGY <sup>2</sup>	35.30	36.73	39.78	21.23	16.03	1.10	3.25	5.18	70.58	
Relative REO price (US\$/kg)	LC <sup>3</sup>	1.58	1.50	1.25	2.21	2.58	3.44	3.01	2.80	0.43	
	NPD <sup>3</sup>	24.95	25.33	28.33	22.49	18.95	10.83	15.39	18.50	25.33	
	SEGY <sup>3</sup>	13.26	13.74	14.47	10.05	7.84	0.64	1.39	3.06	10.81	
	total price	39.79	40.56	44.05	34.75	29.36	14.91	19.79	24.36	36.57	

<sup>1</sup>Others are Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<sup>2</sup>Relative %REO ditribution: LC = (La + Ce) × 100 / (La + Ce + Nd + Pr + Dy + Sm + Eu + Gd + Y + Tb), NPD = (Nd + Pr + Dy) × 100 / (La + Ce + Nd + Pr + Dy + Sm + Eu + Gd + Y + Tb), SEGY = (Sm + Eu + Gd + Y + Tb) × 100 / (La + Ce + Nd + Pr + Dy + Sm + Eu + Gd + Y + Tb)

<sup>3</sup>Calculated prices with relative %REO, <sup>4</sup>Prices as purity of 99% in REO except Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99.999%). Price list from Metal-Pages (August 2014, website)

#### 4. 토 의

##### 퇴적물의 암상별 희토류 분포 특성 및 희토류 농집 기작

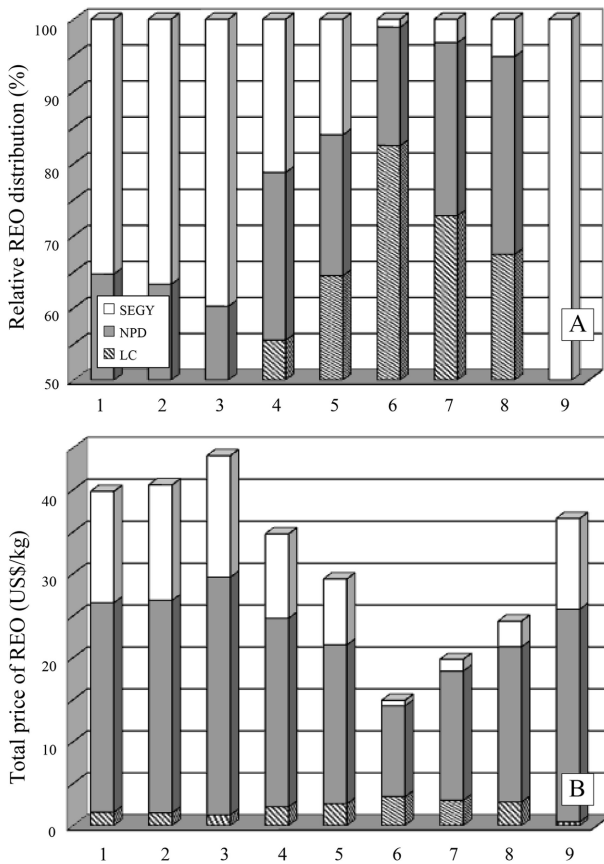
보스트림 지수(Boström index,  $Al/(Al+Fe+Mn) \times 100$ )는 퇴적물 내 금속의 열수기원 여부를 판단하는 데 사용되며, 그 값이 60 보다 작으면 일반적으로 열수기원 물질의 영향을 받은 것으로 해석된다(Boström and Peterson, 1969). 연구시료의 보스트림 지수는 24~42 사이로 모든 시료가 열수기원 물질의 영향을 받은 것으로 해석되며, 그 중 Unit III이 평균 24.2로 가장 낮은 값을 보여(Unit I: 35.5, Unit II: 38.6) 이러한 영향을 가장 크게 받은 것으로 해석할 수 있다(Table 2). 동태평양 지역 중수심대의 Helium-3 이상치( $\delta^3He$ )는 동태평양해령과 Juan de Fuca Ridge로부터 유래한 열수 플룸이 연구지역을 포함한 광범위한 지역에 영향을 미치고 있음을 보이며(Fig. 1), 이 지역의 퇴적물이 열수기원물질의 영향을 받았다는 해석에 부합한다(Kato et al. 2011; Lupton 1995).

##### Unit III 내 REE의 기원

열수기원물질의 영향은 희토류원소의 분포양상에서도

관찰된다. 열수 분출공에서 바로 배출된 유체(vent fluid)는 PAAS에 표준화할 때 전체적으로 평탄한 가운데 양의 Eu 이상치가 강하게 나타난다(Fig. 3b; German et al. 1990). 하지만, 열수분출구로부터 떨어진 입자는 열수에 비해 HREE가 부화되고 강한 음의 Ce 이상치가 나타난다(Particulate-TAG53B/39B, Fig. 3b). 음의 Ce 이상치와 HREE의 상대적 부화는 해수에서 나타나는 특성으로(Fig. 3b), 이는 열수로부터 기원된 철산화/수산화물이 열수의 성분을 간직하기보다는 중성부력의 플룸을 따라 장거리를 이동하는 중 해수로부터 REE를 농집시키면서 해수와 유사한 성분으로 변화하기 때문이다(Ruhlin and Owen 1986; Owen and Olivarez 1988). 연구지역의 퇴적물, 특히 Unit III의 희토류 분포양상(Fig. 3a)은 태평양 중앙해령으로부터 수백 km 떨어진 지역, 즉 열수플룸의 직접적 영향으로부터 떨어진 퇴적물과의 희토류 분포양상과 유사하다(Site 598; Fig. 3b)(Ruhlin and Owen 1986). 따라서 열수 기원의 철산화/수산화물이 기원지에서 중성부력의 플룸을 타고 멀리 이동하면서 해수로부터 REE를 농집시키고, 이들이 연구지역으로 다량 유입되어 Unit III가 높은 REE 함량을 보이는 것으로 해석할 수 있다. 이들 철산화/수산화





**Fig. 6. Relative REO distribution of Lanthanides in seabed REE deposits versus land-based REE deposits (A) and total price of REO of seabed and land-based deposits (B).** See Table 4 for abbreviation SEGY, NPD and LC. Figure on the vertical bar in lower diagram (B) means dollar per kilogram. 1, 2 and 3 = seabed sediment in manganese nodule area; 4 and 5 = manganese nodule; 6 = Mt. Pass; 7 = Mount Weld; 8 = Nolan's Bore; 9 = Longnan

물은 퇴적 후에도 해수와의 접촉이 일어나는 동안 지속적으로 희토류를 흡착하는 것으로 알려져 있으며, 이런 기작을 통해 해수보다 매우 높은 희토류 함량을 보이게 된다 (Ruhlin and Owen 1986; German et al. 1990; Dickens and Owen 1995). 또한 연구 시료는 REE 함량과 Fe/Al 간의 양의 상관관계( $r = 0.78, n = 47$ ; Fig. 5c)를 나타내며, 이는 Fe산화/수산화물 입자에 의한 REE의 흡착이 연구지역 퇴적물 내 REE의 농집에 영향을 미쳤음을 시사한다.

열수기원물질의 영향은 Fe, Mn, Al의 상관관계에서도 나타난다(Fig. 5). Unit III 퇴적물 내의 Fe와 Mn은 심해저에 분포하는 일반적 퇴적물과 Unit I/II에 비해 상당히 높으며, 이들과 다르게 양의 상관관계를 보인다(Fig. 5a). 일반적으로 열수기원의 Mn은 oxyanions(As, Sb, V)과 같이 Fe와 상관성을 보이며(German et al. 1990; Mills and

Elderfield 1995; Mills et al. 1993), Fe와 Mn간의 양의 상관관계는 열수기원을 지시한다. Unit III는 또한 Al의 함량이 감소함에 따라 Fe의 함량이 증가하는 특징을 보인다(Fig. 5b). 이 역시 Unit III 퇴적물 내 Fe가 Al처럼 규산염 광물에 주로 포함되어 있지 않고, Mn과 함께 산화/수산화물의 형태로 다량 존재하여 산화/수산화물과 규산염이 서로 희석효과를 나타냈기 때문으로 생각된다. 따라서 Fe의 산화/수산화물로서의 존재는 REE의 농집에 결정적 요소로 여겨지며, REE의 함량은 Fe/Al의 비와 양의 상관관계는 이 가능성을 지지한다(Fig. 5c).

**Unit I/II 내 REE의 기원**

Unit I/II의 희토류 분포양상은 이들 퇴적물과 해저면의 경계에 놓이는 망간단괴 그리고 Unit III과 매우 유사하지만 Ce의 음의 이상치가 망간단괴에 비해 크게, Unit III에 비해서는 작게 나타난다(Fig. 4a). REE 함량이 PAAS에 비해 높고, 분포양상도 Unit III와 유사한 것으로 보아 Unit I/II에서도 희토류 원소가 열수기원 철산화/수산화물에 의해 농집된 것으로 여겨진다. 단지 Unit I/II의 보스트림지수는 각각 평균 37.5와 38.6으로, Fe와 Mn 농도가 Unit III 보다 낮고 열수의 영향을 상대적으로 적게 받은 것으로 보인다. 즉 Unit I/II와 Unit III 모두 열수기원물질의 영향을 받았으나, Unit I/II에는 REE가 농집되는 철산화/수산화물이 Unit III에 비해 적어 REE의 함량이 낮게 나타난다는 것이다. 앞서 지적했듯이, 철의 산화/수산화물로서의 존재 정도를 간접적으로 나타내는 Fe/Al과 REE 함량은 양의 상관관계를 가지고(Fig. 5c), Unit I/II는 Unit III에 비해 Fe/Al 및 REE 함량이 낮다. Unit I/II 내 철산화/수산화물의 양이 적은 것은 해양지각의 이동에 의해 연구지역이 동태평양 중앙해령으로부터 멀어지면서 철산화/수산화물의 유입이 감소했거나, 중앙해령 열수활동이 약해졌거나, 북/남아메리카의 충돌로 적도해역의 대서양과 태평양의 연결이 단절되면서 해류의 방향 및 그 강도가 변화하여 발생한 결과일 수 있다.

Unit I/II의 Fe와 Al 함량의 선형관계에서 나타나듯(Fig. 5b), 바람에 의해 이동되어 퇴적된 대륙기원 규산염 광물이 퇴적물의 상당 부분을 차지하고 있고, 이들과 열수기원 물질이 함께 희토류 조성에 영향을 미치고 있는 것으로 해석된다. 실제로 Unit III 퇴적물과 이 지역에 공급되는 육상기원 물질에 각각 1:4의 무게를 주어 계산하면 Unit I/II과 거의 동일한 희토류 분포양상을 얻을 수 있으며(Fig. 4a), 이는 Unit I/II에서 열수기원 물질이 영향이 Unit III에 비해 1/4 정도에 불과했음을 시사한다. 대륙기원 물질과 망간단괴의 혼합을 가정해도 유사한 희토류 분포양상을 얻을 수 있지만, Unit I/II에 관찰되는 음의 Ce 이상치는 이들의 혼합만으로 설명되지 않는다(Fig. 4a). Unit I/

II에 포함된 방산층은 비록 강한 음의 Ce 이상치를 보이지만, 방산층 내 희토류의 함량이 매우 낮아(PAAS  $\times 10^{-6}$ , Elderfield et al. 1981), 음의 이상치 설명이 불가능하다. 따라서 Unit I/II의 REE 조성은 열수 기원 철산화/수산화물 및 대륙 기원 물질의 영향을 함께 반영하는 것으로 판단할 수 있다.

### 희토류 광상으로서의 잠재성

연구지역 퇴적물의 Unit별 산화희토류(Rare Earth Oxides, REO) 총합량(TREO)을 보면, 망간단괴 채광시 함께 회수될 것으로 예상되는 Unit I은 0.034 TREO %를 보여 Unit II(0.04 TREO %)와 III(0.081 TREO %)에 비해 가장 낮은 품위를 보인다. 연구지역 퇴적물에 배태되는 망간단괴의 산화희토류 총합량은 0.104 TREO %으로 Unit I의 희토류 총합량 보다 약 3배 가량 농집되어 있다. 한편 망간단괴 광구지역 북쪽에서 산출되는 망간단괴의 평균 총산화희토류 함량은 0.133 TREO %로 남측 지역의 망간단괴의 것보다 다소 높은 품위를 보인다(Table 3). Kato et al. (2011)에 따르면 북동태평양 C-C지역에서의 표층퇴적물의 총 REY 함량은 대체로 400~700 ppm을 보이고 있어 ~1/100 정도의 총산화희토류 함량의 변화를 가질 것으로 생각된다. 따라서 북측광구에 분포하는 퇴적물의 산화희토류 총합량은 남측광구의 것 보다 다소 높을 것으로는 예측되지만, 자원량의 관점에서의 망간단괴 지역 표층 퇴적물 품위변화는 크지 않을 것으로 판단된다. 퇴적물 중 산화희토류 총합량은 표층에서 하부로 가면서 품위가 상승하는 경향을 보인다. 그러나 총합량이 가장 높은 Unit III의 품위도 망간단괴의 산화희토류 총합량 보다 낮다(Table 3).

육상 희토류광상들의 가행 품위는 대체로 4 TREO % 이상을 보인다(Table 5). 연구지역 퇴적물의 희토류 품위는 이들 광상의 품위에 비교하여 매우 낮은 품위를 보인다. 일반적으로 품위가 낮은 광상의 경우 대규모 매장량을

확보하여 채광경제성을 높인다. 연구지역 퇴적물의 희토류 함량은 육상 희토류광상의 함량과 비교하여 매우 낮기 때문에 채광경제성을 가지기 위해서는 대규모 매장량 확보를 통한 대량의 퇴적물 처리가 이루어져야 한다. 망간단괴로부터 주요 채광예상종인 Co, Ni, Cu 등을 추출하면서, 망간단괴에 함유되어 있는 희토류를 추출한다면 소규모의 희토류 정·제련 시설만 추가될 뿐, 선광 및 채·집광처리 시스템 및 폐석처리 용량은 크게 변하지 않는다. 현재 한국이 추진중인 망간단괴 개발의 규모는 연간 3백만톤의 광석처리를 기준으로 연구되고 있다. 그러나 망간단괴 채광과 함께 표층 퇴적물(Unit I)의 선광 및 제·정련을 수행하기 위해서는 약 2천5백만 톤의 처리시설을 추가로 확보해야 할 것으로 판단된다. 이는 대규모 매장량이 확보될 지라도 저품위 퇴적물의 효율적 정·제련을 위해서는 대규모 채광·집광 및 정·제련 시스템이 필요하다는 것을 의미하며 망간단괴 개발을 위해 채광비용이 증가함을 시사한다.

상기한 바와 같이 저품위 함희토류 퇴적물 중 희토류를 단독으로 채광하는 개발은 제한적일 것으로 판단된다. 망간단괴에 함유되어 있는 희토류의 품위(0.12 TREO %) 역시 낮다. 따라서 망간단괴 개발 시 고려되는 희토류 생산은 망간단괴내 희토류 단독 추출이 아닌, 주 채광종인 Ni, Co 등을 개발하면서 부산물로 희토류를 생산하여 망간단괴의 주 채광금속의 채광경제성을 확보해야 한다(박 등 2010). Unit I 퇴적물의 희토류 품위는 망간단괴 희토류 품위의 33%에 불과하여, 망간단괴와 퇴적물을 혼합하여 희토류를 제·정련할 때 전체 희토류 품위가 희석되어 전체 가행품위는 망간단괴에서만 희토류를 추출할 때 보다 가행 품위가 더욱 낮아질 것으로 생각된다. 이는 망간단괴에서 희토류를 추출할 때 퇴적물을 추가함으로써 오히려 부산물로서 생산되는 희토류의 정·제련 효율을 저하시켜 Co, Ni 등과 같은 주요 채광금속의 경제성을 저하시키는 요인이 될 것으로 생각된다.

연구지역 퇴적물의 산화희토류 총 함량 중 가격이 높은

**Table 5. REO grade of the selective land-based REE deposits around world and seabed REE resources explored by Korea**

	Deposit or district	Country	Mean Grade, REO %	Deposit type	Situation	Reference
Seabed resources explored by Korea	NE Pacific Ocean	high sea	0.05	sediments	exploration	this study
	NE Pacific Ocean	high sea	0.13	manganese nodule	exploration	Pak et al. 2010
	WC Pacific Ocean	high sea	0.20	manganese crust	exploration	Pak et al. 2010
Land-based REE deposits	Mount Weld	Australia	11.2	carbonatite laterite	preparing	Castor and Hedrick, 2006
	Mountain Pass	United States	8.9	carbonatite	recently closed	Castor and Hedrick, 2006
	Nolan's Bore	Australia	4	vein	feasibility study	Castor and Hedrick, 2006
	Hongcheon	Korea	2.4	carbonatite	scoping study	KIGAM, 2001
	Longnan and Xunwu	China	0.05~0.20	laterite	operating	Wu et al. 1996
Lovozero	Russia	0.01	peralkaline syenite	operating	Castor and Hedrick, 2006	

NPD(Nd + Pr + Dy) 및 SEG(Y + Sm + Eu + Gd + Y + Tb)는 육상광산의 그것에 비해 상대적으로 높은 함량을 보인다(Table 4; Fig. 6A). 이들 함량비를 2014년 시장가격 기준으로 환산하여 보면 Unit I의 경우 kg당 평균 39.8불을 보이며 Unit II와 III는 각각 40.6불과 44.1불을 보인다(Fig. 6B). 반면 육상의 마운트웰드광산(Mount Weld, 오스트레일리아)은 kg당 각각 19.8불로, 연구지역 퇴적물에 비하여 약 20불 가량 낮은 가격을 갖는다(Fig. 6B). 또한 망간단괴와 망간각의 희토류 가격은 퇴적물과 비교하면 약 10불 정도 낮다. 이는 퇴적물에 함유되어 있는 희토류의 함량이 육상광산에 비해 비교적 매우 낮지만 희토류 구성비에 있어서는 가격이 높은 중(重)희토류가 다량 포함되어 있기 때문이다(Table 4). 퇴적물 희토류의 함량비 특성은 망간단괴의 함량비 구성과 유사하다. 망간단괴에 함유되어 있는 유용성분의 침전기작은 수성기원·속성기원 혹은 열수기원에 따라 차이가 있으나 대체로 이들의 주 구성광물인 망간산화물 또는 철산화물에 흡착되어 산출되는 것으로 보고되어 있다. 희토류 원소 역시 망간 또는 철산화물에 탄산착이온종(예;  $\text{HREE}(\text{CO}_3)^{2-}$  또는  $\text{LREE}(\text{CO}_3)^+$ )의 형태로 흡착된다(Hein et al. 2000). 퇴적물에 함유되는 희토류 원소 중 NPD 및 SEG의 함량이 높은 것은 퇴적물의 희토류 부존특성이 망간단괴의 희토류 부존특성과 유사함을 시사한다. 그러나 정확한 퇴적물의 희토류 부존특성 연구가 선행되어야, 망간단괴와 함께 퇴적물에서 희토류를 정·제련할 수 있을 것으로 생각된다. 망간단괴의 희토류 추출과 다른 방법의 퇴적물 희토류 추출과정을 적용해야 한다면 기술적·환경적 제·정련 비용이 증가할 수 있다.

연구지역 퇴적물 중 Unit III는 Unit I 및 II에 비하여 상대적으로 높은 산화희토류 총량 및 고가 희토류 함량비를 보인다. 산화희토류 총합량에 의한 단순 매장량을 생각하면 Unit III는 Unit I의 약 100배 이상에 해당하는 매장량을 가질 것으로 생각된다. 퇴적물 중 Unit III의 희토류 품위가 다른 unit에 비해 상대적으로 높고, 매장량이 크다. 일부 육상 희토류광상들은 가행 품위가 0.01에서 0.20 TREO %을 보이기도 하나(Table 5), 이는 지표에 분포하는 라테라이트에 흡착된 희토류 토양이 채광 대상이어서 희토류 추출비용이 기타 유형의 희토류 광산에 비해 상대적으로 낮거나(룽난광상; Wu et al. 1996), 채광비용은 높으나 넓게 분포하는 복합관입암체를 대상으로 저품위 대규모 광상(로보제로광상; Nikolaev et al. 2008)을 개발하여 경제성을 확보하고 있기 때문이다. Unit III와 같은 퇴적물은 저품위 대규모 광상으로서 채광경제성을 확보하기 위해서는 퇴적물을 대규모로 채·집광하는 새로운 개념 시스템 및 대규모 선광 및 처리용량을 가지는 채광선, 저품위 흡착광석의 희토류 정제 기술 등이 구축되어야 할 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 연구지역의 30 cm 깊이까지 분포하는 표층퇴적물은 조직 및 조성에서 독특한 세 개의 암상으로 나타나며(Unit I, II, III), 이들은 희토류 조성에 근거하여 두 개의 그룹(Unit I/II와 Unit III)으로 구분이 가능하다.

둘째, 상부에 분포하는 Unit I과 Unit II는 유사한 희토류 조성을 보이며, LREE는 PAAS 및 일반 육상기원물질과 그 함량이 유사하나, 음의 Ce/Ce\* 이상치를 보이고 중희토류 원소가 PAAS에 비해 2~3배 정도 농집된 양상을 보인다.

셋째, 최하부에 놓이는 Unit III는 매우 강한 음의 Ce 이상치를 제외하면 Unit I/II와 유사한 REE 분포 유형을 보인다. 하지만, REE 함량이 PAAS에 비해 경희토류는 약 2배, 중희토류함량은 평균 약 6배(원소에 따라 1.5~9.4배), 그리고 Unit I/II에 비해 평균 3배 이상 농집된 특징을 보인다. 이러한 REE 함량은 이 지역에 분포하는 망간단괴의 REE 함량보다 평균 20% 정도 높은 수준이다.

넷째, Unit III의 PAAS로 표준화한 REE 분포 유형은 Ce 이상치와 전체적인 분포 유형에서 열수기원 물질의 영향을 받은 퇴적물의 전형적인 특성을 보인다. 열수물질은 장거리 이동을 통해 분출구로부터 먼 거리를 이동하면서 함께 이동한 플룸 혹은 해수로부터 REE를 농집한 것으로 해석된다.

다섯째, Unit I/II의 REE 분포 특성은 중앙/남아메리카 또는 아시아에서 기원한 풍성기원입자와 열수기원입자의 영향을 강하게 받은 Unit III의 혼합으로 잘 설명된다. 이는 열수기원 물질의 유입이 Unit III에 비해 상대적으로 적었으며, 대륙으로부터 운반된 풍성기원입자의 REE 조성이 Unit I/II의 조성에 큰 영향을 미친 것으로 해석된다.

여섯째, 연구지역의 퇴적물은 저품위 대규모 희토류 광상으로 평가된다. 매우 낮은 희토류 품위를 보이는 퇴적물의 선광 및 제·정련을 위해서는 별도의 대규모 채광·집광 및 정·제련 시스템이 필요하다. 망간단괴 채광시 퇴적물의 희토류를 동시에 채·집광 및 선광하는 것은 망간단괴 채광비용 증가로 연결되어 현재 희토류 단독자원으로서 개발 잠재성을 확보하기에는 많은 제한이 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 해양수산부 R&D 사업인 태평양 심해저 광물자원 개발(PM57950) 및 심해퇴적물 고기후 지시자를 이용한 북태평양 순환류 변동성 연구(PE98915) 사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 논문에 조언해 주신 심사위원분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 박상준, 문재운, 이경용, 지상범 (2010) 한국이 탐사 중인 해저 광물자원의 희유금속 함량과 의미. *자원환경지질* **43**: 455-466
- Banerjee R (2004) Manganese nodules as a possible source of precious metals. *Curr Sci India* **87**:278-279
- Boström K, Peterson MNA (1969) The origin of aluminum-poor ferromanganous sediments in areas of high heat flow on the East Pacific Rise. *Mar Geol* **7**(5):427-447
- Castor SB, Hedrick JB (2006) Rare earth elements. In: Kogel, J. E., Trivedi NC, Barker JM (eds) *Industrial Minerals and Rocks*. 7th Edition. Society for Mining, Metallurgy and Exploration. Littleton, Colorado, pp 769-792
- Dickens GR, Owen RM (1995) Rare earth element deposition in pelagic sediment at the Cenomanian-Turonian boundary, Exmouth Plateau. *Geophys Res Lett* **22**(3):203-206
- Elderfield H, Hawkesworth CJ, Greaves MJ, Calvert SE (1981) Rare earth element geochemistry of oceanic ferromanganese nodules and associated sediments. *Geochim Cosmochim Acta* **45**(4):513-528
- German CR, Klinkhammer GP, Edmond JM, Mura A, Elderfield H (1990) Hydrothermal scavenging of rare-earth elements in the ocean. *Nature* **345**(6275):516-518
- Hein JR, Koschinsky A, Halliday AN (2003) Global occurrence of tellurium-rich ferromanganese crusts and a model for the enrichment of tellurium. *Geochim Cosmochim Acta* **67**(6):1117-1127
- Hein JR, Koschinsky A, Bau M, Manheim FT, Kang JK, Roberts L (2000) Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific. In: Cronan DS, (ed.) *Handbook of Marine Mineral Deposits*. CRC Press, Boca, pp 239-279
- Humphries M (2010) Rare earth elements: The global supply chain. CRS Report for Congress R41347, Congressional Research Service, Library of Congress
- Hyeong K, Park SH, Yoo CM, Kim KH (2005) Mineralogical and geochemical compositions of the eolian dust from the northeast equatorial Pacific and their implications on paleolocation of the Intertropical Convergence Zone. *Paleoceanography* **20**:PA1010
- Kato Y, Fujinaga K, Nakamura K, Takaya Y, Kitamura K, Ohta J, Toda R, Nakashima T, Iwamori H (2011) Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nat Geosci* **4**(8):535-539
- Kawamoto H (2008) Japan's Policies to be adopted on Rare Metal Resources. *Quart Rev* **27**:57-76
- KIGAM (2001) Mineralization and feasibility study of Fe-REE deposits in Hongcheon area, South Korea. 2000-R-TI02-P-01, 257 p
- Lupton JE (1995) Hydrothermal Plumes: Near and Far Field. In: Susan EH, Robert AZ, Lauren SM, Richard ET (eds) *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions*. American Geophysical Union, Washington, DC, pp 317-346
- Metal-Pages <http://www.metal-pages.com/> Accessed 13 August 2014
- Mills RA, Elderfield H, Thomson J (1993) A dual origin for the hydrothermal component in a metalliferous sediment core from the Mid-Atlantic Ridge. *J Geophys Res-Sol Ea* **98**(B6):9671-9681
- Mills RA, Elderfield H (1995) Hydrothermal Activity and the Geochemistry of Metalliferous Sediment. In: Susan EH, Robert AZ, Lauren SM, Richard ET (eds) *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions*. American Geophysical Union, Washington, DC, pp 392-407
- Nikolaev AI, Larichkin FD, Nikolaeva OA (2008) Choosing the technology of combined processing of titanium-rare-metal raw materials. *Theor Found Chem Eng* **42**:675-679
- Owen RM, Olivarez AM (1988) Geochemistry of rare earth elements in Pacific hydrothermal sediments. *Mar Chem* **25**(2):183-196
- Ruhlin DE, Owen RM (1986) The rare earth element geochemistry of hydrothermal sediments from the East Pacific Rise: Examination of a seawater scavenging mechanism. *Geochim Cosmochim Acta* **50**(3):393-400
- Taylor SR, McLennan SM (1995) The geochemical evolution of the continental crust. *Rev Geophys* **33**(2):241-265
- Wu C, Yuan Z, Bai G (1996) Rare earth deposits in China. In Jones AP, Wall F, Williams CT (eds) *Rare earth minerals: Chemistry, origin and ore deposits*. Mineralogical Society Series, No. 7, Chapman and Hall, London, pp 281-310

### 국문 참고자료의 영어 표기

**English translation / Romanization of references originally written in Korean**

- Pak SJ, Moon JW, Lee KY, Chi SB (2010) Rare metal contents and their implications of seabed mineral resources explored by Korea. *Econ Environ Geology* **43**(5):455-466 (in Korean)

*Received Sep. 30, 2014*

*Revised Oct. 29, 2014*

*Accepted Nov. 20, 2014*