

## 한국이 탐사 중인 해저광물자원의 희유금속 함량과 의미

박상준\* · 문재운 · 이경용 · 지상범

한국해양연구원 심해 · 해저자원연구부

## Rare Metal Contents and Their Implications of Seabed Mineral Resources Explored by Korea

Sang Joon Pak\*, Jai-Woon Moon, Kyeong-Yong Lee and Sang-Bum Chi

Deep-sea & Marine Georesources Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul, 425-600, Korea

Seabed mineral resources explored by Korea are categorized into major three types of deposit; manganese nodule, manganese crust and polymetallic sulfides. Pt displays high enrichment factors (400, ore/crust ratios) in manganese nodule. Rare earth oxide content in manganese nodule ranges from 0.037 to 0.302 REO % with mean value of 0.12 REO %. Both of Te and Pt are enriched elements in manganese crust, displaying enrichment factors of 10800 and 150, respectively. Rare earth oxide's contents of manganese crust are slightly higher than manganese nodule's (0.013~0.387 REO %, average = 0.18 REO %). Se and In are outstanding rare metals from seabed polymetallic sulfides, showing enrichment factors of 1300 and 110, respectively. Au (0.8~26.3 g/t) and Ag (0.9~348.0 g/t) are another enriched elements in polymetallic sulfides. The main concern at exploiting seabed mineral resource will be a securing rare metals for high-technology industries and rare metals from subsea mineral deposits will add economic values to commodity candidates such like Co, Ni and Cu.

**Keywords :** rare metals, rare earth elements, manganese nodule, manganese crust, polymetallic sulfides

한국이 현재 탐사하고 있는 해저광물자원의 유형은 망간단괴, 망간각, 다금속황화광체 등으로 구분된다. 망간단괴에 함유되어 있는 주요 희소금속은 Pt로 지각함량 대비 최대 400 배까지 부화되어 있다. 망간단괴의 총 희토류 함량은 0.037~0.302 REO %, 평균 0.12 REO %를 보인다. 망간각의 주요 희소금속은 Te 및 Pt로 각각 10800 배, 150배 정도의 부화량을 보인다. 총 희토류 함량은 0.013~0.387 REO %, 평균 0.18 REO %로 망간단괴 보다 다소 높은 함량을 보인다. 다금속황화광체의 주요 희소금속은 Se 및 In으로 각각 1300 배, 110 배의 높은 부화량을 보이며, 금 (0.8~26.3 g/t), 은(0.9~348.0 g/t) 등의 귀금속이 함유된다. 해저광물자원에 함유되어 있는 희유금속은 채광 예상 금속 종인 Co, Ni, Cu 등의 채광 경제성을 높여 줄 것으로 생각되며 첨단산업을 위한 희유금속 확보 차원에서 의미가 있다.

**주요어 :** 희유금속, 희토류, 망간단괴, 망간각, 다금속황화광체

### 1. 서 언

한국은 1983년 북동태평양에서 첫 망간단괴 조사를 시작한 이래 지금까지 전 세계 공해(high seas) 및 타국 배타적경제수역(Exclusive Economic Zone; EEZ)에서 활발한 심해저 광물자원 탐사를 수행하여 오고

있다. 한국이 탐사를 수행 중인 심해저 광물자원은 크게 망간단괴, 망간각, 해저다금속황화광체 등의 세 유형으로 구분된다. 세계적으로 망간단괴 및 망간각 탐사는 각각 1950년대 말과 1980대 초에 본격적인 탐사가 시작되었다. 한국은 1989년도부터 망간단괴에 대한 본격적인 탐사를 수행하여 1994년 국제해저기구(ISA;

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

international seabed authority)를 통해 북동태평양에 한국 광구 150,000 km<sup>2</sup>를 등록하였으며, 2002년 최종적으로 75,000 km<sup>2</sup> 크기의 배타적 개발광구를 획득하였다. 망간각의 경우 서태평양 마샬제도를 중심으로 1989년 최초 탐사가 수행된 이후 1997년도부터 단속적인 탐사가 수행되고 있으며, 국제해저기구 탐사·개발 규칙안이 통과될 것으로 생각되는 향후 2~3년 안에 전 세계 공해를 대상으로 광구 등록이 시작될 것으로 전망된다. 고품질 천연금속(base-metal) 자원으로서 최근 주목 받고 있는 해저다금속황화광체에 대한 한국의 탐사는 1997년부터 남서태평양 라우분지(Lau Basin) 및 통가 EEZ를 중심으로 수행되어 오고 있다. EEZ 탐사의 경우 통가정부로부터 다금속황화광체에 대한 탐사권을 획득하여 상업개발을 위한 집중적인 탐사가 수행 중에 있다.

망간단괴와 망간각의 주요 채광 예상 금속은 Co, Ni, Cu, Mn 등의 전이원소 금속들이며, 해저다금속황화광체의 주요 채광 예상 금속은 Cu, Pb, Zn 등의 천연금속들이다. 한국은 북동태평양 망간단괴 광구확보를 통해 357백만 건톤(Mt, dry tonnage)의 광석량을 확보하고 있으며, 서태평양 망간각 탐사를 통해 6백만 건톤 이상의 광석량을 확보할 수 있을 것으로 예상하고 있다(Nam *et al.*, 2004; Park and Yang, 2009). 또한 현재 통가 탐사권 획득 해역에서 민간사 투자로 진행되고 있는 탐사를 통해 약 6백만 건톤의 광석량을 확보할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

최근 들어 휴대폰·디스플레이산업·태양전지·원전플랜트 등에 대한 희유금속에 대한 수요가 급증하면서 해저금속자원 중 전통적으로 연구되어 온 Co, Ni, Cu, Pb, Zn 등의 금속 중 이외에 해저광물자원의 희유금속 종에 대한 자원학적 관점의 연구가 주목 받고 있다(Wiltshire *et al.*, 1999; Hein *et al.*, 2003; Banerjee, 2004; Kawamoto, 2008; Hein *et al.*, 2010). 그러나 망간단괴, 망간각 및 다금속황화광체와 같은 해저금속 광상 탐사·개발에 대한 국내 연구는 일부 희유금속(Co, Ni)을 포함하는 천연금속(Cu, Pb, Zn)의 광량 평가 및 성인 연구에 편중되어 있다(Lee *et al.*, 2002; Nam *et al.*, 2004; Park and Yang, 2009). 해저금속 광상을 대상으로 한 채·양광 연구 및 해저 광체의 채·정련 연구 역시 상기한 금속 종을 대상으로만 수행되어 왔다(Yoon *et al.*, 1999; Song *et al.*, 2001).

한국이 수행 중인 해저광물자원의 희유금속 함량 분석은 광상 및 광체의 성인 연구를 위하여 부분적 또는 단속적으로 수행되었으며, 자원량의 관점에서 체계적인

정리 또는 금속자원으로서의 연구는 거의 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 국내 처음으로 한국에 의해 지금까지 수행되었던 망간단괴·망간각·다금속황화광체 등의 희유금속 함량을 자원량 관점에서 정리하고, 해저금속광상별 희유금속 함량 특성을 고찰하여 향후 해저금속광상 개발에 있어 각 광상 유형별 희유금속이 갖는 의미를 살펴보고자 한다.

## 2. 해저금속광상 탐사 개요

우리나라의 해저광물자원 탐사지역은 북동태평양, 서태평양, 남서태평양, 인도양 등 크게 4개 해역으로 구분되며, 각각 망간단괴, 망간각, 해저다금속황화광체를 대상으로 탐사를 수행 하였거나 수행 중이다(Fig. 1). 망간단괴는 태평양 해양지각판에 발달하는 클리퍼톤-클리퍼톤 구조대(Clarion-Clipperton fracture zone, C-C zone)내의 심해평원(deep-sea plain)을 중심으로 넓은 지역에 산점 분포하고 있다. 망간단괴는 직경 약 1~10 cm 크기로 여러 종류의 핵을 중심으로 철망간산화물(ferromanganese oxide) 및 점토광물 또는 불석 등이 중심원상의 층리를 이루며 성장한 금속집합체이다. 주요 금속들은 심해퇴적물의 속성작용 또는 해수로 부터의 직접적인 침전 등에 의해 농집된다(Jeong *et al.*, 1994). 한국 단독 광구(75,000 km<sup>2</sup>)에 분포하는 단괴들은 수심 약 5000 m 내외의 깊이에 부존되어 있으며 약 360백만 건톤의 광석량이 확인되어 있다(Table 1).

망간각 탐사는 서태평양 마샬제도 일대 공해상 및 EEZ를 중심으로 수행되었다(Fig. 1). 망간각은 북서 방향을 보이는 화산열도 부근 해저에 형성된 해저화산군의 화산체를 피복하며 배태된다. 망간각은 철망간산화물 및 인산염광물(phosphate minerals) 등으로 구성된 다(Kang, 1987; Kim *et al.*, 2004). 망간각의 기원은 수성기원(hydrogenetic), 속성기원(diagenetic), 열수기원(hydrothermal fluid) 등이 있으나 본문에 기재된 망간각은 대체로 수성기원을 보인다(Choi *et al.*, 2001). 심해분지에 위치한 탐사지역 해저산들은 기저부의 수심이 4000 m 정도이며, 정상부의 수심이 1400 m 정도를 보여 해저산 높이가 약 2,500 m 이른다. 해저산은 정상부가 넓은(~900 km<sup>2</sup>) 기요(guyot) 형태를 보이며 망간각은 이들 해저산 표층부를 1~10 cm 정도, 국부적으로는 10 cm 이상의 두께로 피복하여 분포한다(Table 1). 현재까지 망간각에 대한 공해상 광구등록은 국제적으로 시행되지 않았으며, 국제적인 합의가 도출

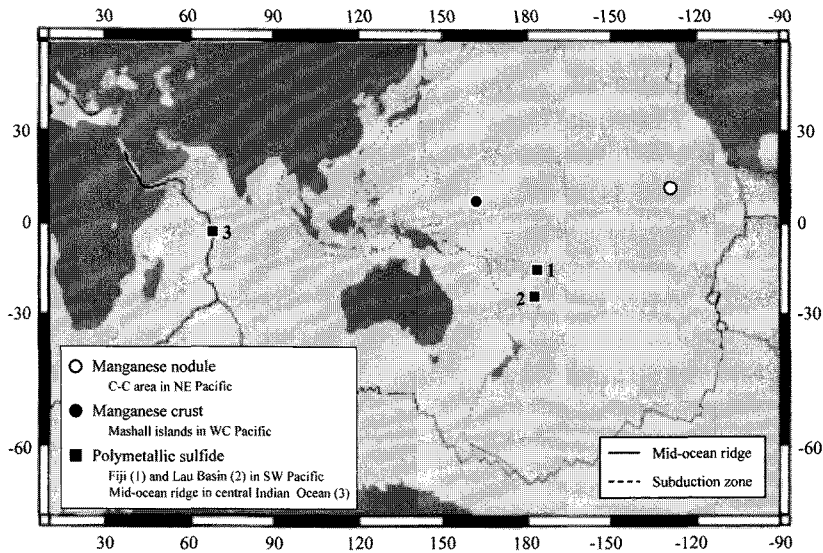


Fig. 1. World map showing the seabed mineral deposits explored by Korea. C-C in legend indicates Clarion-Clipperton fracture zone in northeast Pacific.

Table 1. Features of seabed mineral resources explored by Korea

Type of resource		Manganese nodule	Manganese crust	Polymetallic sulfides
Area		NE Pacific Ocean	WC Pacific Ocean	SW Pacific & Indian Ocean
Geological setting		oceanic intraplate (deep-sea plain)	oceanic intraplate (volcanic chain, seamount)	subduction and mid-ocean ridge (volcanic chain, seamount)
Host rock		unsolidified deep-sea sediments	volcanics	volcanics, sediments
Geological features	Shape of ore/ore body	nodule (1~10 cm in diameter)	crustification (1~10 cm in thickness)	chimney (0.5~3 m in heights), mounds
	Major minerals	Fe-Mn oxides	Fe-Mn oxides	base-metal sulfides
	Target metals	Ni, Co, Cu, Mn	Co, Ni	Cu, Pb, Zn
	Genesis	hydrogenetic, diagenetic	diagenetic	hydrothermal fluid
Scale of deposit		>100 km	~10 km (seamount)	~1 km (mound)
Amount of primitive resource		357 million ton <sup>1</sup> (proved, tenement area)	5.5 million ton <sup>1</sup> (indicated, 1 seamount)	~6 million ton <sup>1</sup> (inferred, 1 site)
Water depth		4000~6000 m	1000~3000 m	<2000 m
Location and development status	Relationship to high sea or EEZ	high sea	high sea, EEZ	Tongan & Fiji's EEZ (SW Pacific Ocean), high sea (Indian Ocean)
	Tenement	yes (from ISA <sup>2</sup> )	not yet	yes (from Tonga), applying (to Fiji and ISA <sup>2</sup> )
	Development	on-site testing completed	exploration	venture companies investigating

<sup>1</sup>dry tonnage, <sup>2</sup>ISA = International Seabed Authority. See the text for references

되는 향후 2~3년 내에 공해상을 대상으로 한 망간각 광구 등목이 신속하게 진행 될 것으로 판단된다.

한국이 탐사 중인 해저다금속황화광체는 섭입대 및 배호분지(back-arc basin)에 분포하며, 활동성 심해 열수 분출구 주변에 우세하게 배태된다(Table 1). 약 20,000 km<sup>2</sup> 크기의 지역에 대한 탐사권을 보유하고 있는 통가 EEZ 해역은 라우분지(Lau Basin) 지역의 화산열도에 위치한다(Fig. 1). 광체는 해저산 칼델라 또는 화산추를 중심으로 해저로부터의 높이에 따라 수심 100~2000 m 사이에 배태된다(Table 1). 피지 EEZ 해역은 배호분지인 북피지분지(North Fiji Basin)에 해당하며 광체는 다양한 규모의 해저산 정상부에 분포하는 화산암 또는 인근의 미고화 퇴적물을 모암으로 하여 우세하게 배태된다. 광체는 크게 열수분출구(chimney)와 광체구(sulfide mound)로 구성되며 열수 특성 및 분출 심도에 따라 Cu가 우세한 광체와 Pb-Zn가 우세한 광체로 구분되기도 한다. 현재 통가 EEZ 해역에 대한 탐사는 민간기업과 공동투자를 통해 수행되고 있으며 광체 표층구조 파악을 위한 정밀탐사에 주력하고 있다. 2009년부터는 해령(mid-ocean ridge)과 관련된 해저열수광체를 확보하기 위해 중앙인도양해령(Central Indian ridge) 지역에 대한 탐사도 시작하였다.

### 3. 해저금속광상의 유형별 희유금속 함량

희유금속(rare metals)이란 지각 함유량이 매우 제한적인 금속이거나 또한 산업적으로 극히 소량만 사용되는데도 불구하고 기술적·경제적인 이유로 인해 추출이 쉽지 않은 비철금속(non-ferrous metals)을 말한다. 비철금속에 속하는 원소는 기술적·경제적 정의에 따라 다소 달라지나 본 논문에서는 30개 비철금속 원소와 Sc, Y를 포함하는 란탄족 원소(Lanthanoids) 총 17개 원소로 정의하고자 한다. 비철금속 중 지각 함유량이 많고 산업적으로 대량 생산·소비되는 Cu, Pb, Zn 등과 같은 천금속(base metals)은 포함되지 않으며 금·은과 같은 귀금속도 희유금속 정의에 포함시키지 않는다.

희유금속과 희소금속이란 두 용어는 현재 뚜렷한 차이 없이 혼용되고 있다. 본 논문에서는 희유금속을 30개 비철금속과 17개 란탄족원소를 모두 포함하는 용어로 사용하였다. 반면 희소금속은 30개 비철금속 만을 지칭하는 용어로 사용하였으며, Sc, Y를 포함하는 란탄족원소는 희토류라는 용어를 사용하였다[희유금속(47개) = 희소금속(30개) + 희토류(17개)]. 또한 본 논문에서는 상기한 해저광물자원의 다양한 자원 잠재성을 살

펴보고자 백금족 원소(Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) 및 귀금속 원소(Au, Ag)의 함량 특성도 함께 고려하여 기재하였다. 백금족 원소 6개 중 Pd와 Pt는 희소금속에도 속하나, 본 논문에서는 이들 원소의 함량을 백금족원소들의 것과 함께 고려하여 기술하였다.

현재 한국에서는 상기한 희소금속 30개, 희토류원소 17개 이외에 알칼리토금속 1개 (Mg), 반금속/금속 4개 (P, As, Si, Sn) 백금족 원소 중 희소금속에 속하지 않는 4개 (Ru, Rh, Os, Ir)를 포함하여 총 56개의 희유금속을 규정하고 있다. 본 논문에서는 상기한 47개 희유금속을 중심으로 기재하였으며, 본 논문에서 사용된 희소금속군, 희토류군, 백금족 및 귀금속에 속하는 원소들의 종류는 Table 2에 분류된 바와 같다.

#### 3.1. 망간단괴의 희유금속 함량

망간단괴의 희유금속 함량은 북동태평양 한국 광구 내 총 5개 지역에서 채취된 시료로부터 분석된 것으로, KR1 및 KR2 지역은 광구내 북측에 위치하며 나머지 지역은 광구내 남측에 위치한다. 광구 북측지역에서 산출되는 망간단괴는 남측 것에 비하여 수성기원의 단괴가 보다 우세하게 분포하는 특징을 보인다(Jeong *et al.*, 1994). 망간단괴에 함유된 희소금속 함량을 지각함량을 기준으로 비교해 보면 Ti, Mn, Bi, Sb, Ni, Co 정도에서 희소금속함량/지각함량 비(이하 부화량)가 100 정도를 보인다(Fig. 2A). 이 중 Ni와 Co는 채광 예상 금속으로 많은 탐사·연구가 수행되어 왔다. 한국 광구에서 산출되는 망간단괴 중 희소금속을 포함하는 백금족 원소는 분석된 바 없어 함량을 알 수 없다. 그러나 중앙태평양 해역에서 산출되는 망간단괴에는 지각함량 대비 약 50 배에서 400 배에 이르는 Pt(120~930 ppb)가 함유되어 있으며, Rh(11~39 ppb)는 약 20 배에서 80 배 정도 부화되어 있는 것으로 보고되어 있다(Banerjee, 2004; Fig. 2A). 또한 인도양에서 산출되는 망간단괴에는 Pd(평균 3668 ppb)가 약 1900배 부화되어 있는 것으로 보고된다(Fig. 2A). 한국 광구에서 산출되는 단괴 중 귀금속으로는 약간의 Ag(0.5 ppm)가 함유되나, 인도양에서 산출되는 망간단괴에는 Ag(1.9ppm)가 37배 부화되어 있다(Banerjee, 2004).

망간단괴의 산화희토류(rare earth oxides; REO) 총 함량은 남측광구에서 0.067~0.178 REO % (평균 0.104 REO %)를 보이며 북측광구에서 0.037~0.302 REO % (평균 0.133 REO %)를 보여 북측광구에서 다소 높은 희토류 총 함량을 보인다(Table 3). 이는 상기한 바와 같이 망간단괴의 성인적 특성을 반영하는



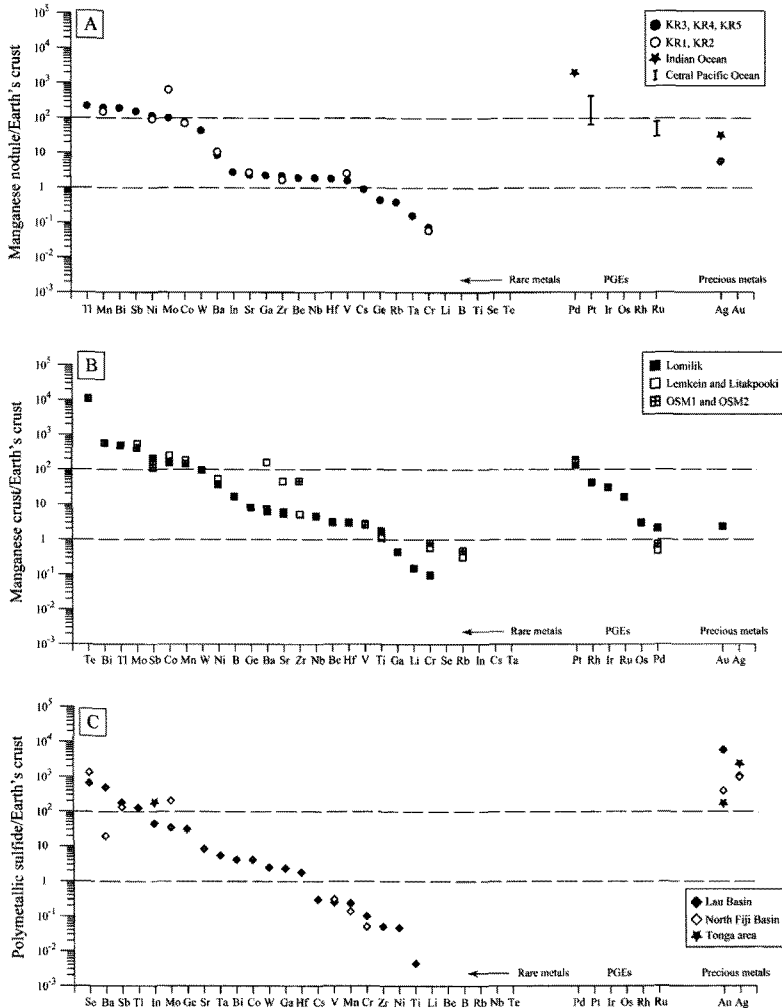


Fig. 2. Mean concentrations of rare metals as well as precious metals in manganese nodule, manganese crust and polymetallic sulfides explored by Korea compared with their concentrations in continental crust. PGEs = platinum group elements.

것으로 희토류는 수성기원을 통해 보다 부화되는 것으로 생각된다. 총 산화희토류 함량은 북측에 분포하는 망간단괴가 보다 높은 값을 보이나 산화희토류 중의 구성은 서로 상반된 비율을 보인다. 광구 남측에서 산출되는 망간단괴의 산화희토류 함량비는 중(中)희토류( $Nd_2O_3 + Pr_2O_3 + Dy_2O_3$ ; NPD)가 23.3%를 보이며, 중(重)희토류( $Sm_2O_3 + Er_2O_3 + Gd_2O_3 + Y_2O_3 + Tb_2O_3$ ; SEGY)가 21.2%를 나타낸다. 경(輕)희토류( $La_2O_3 + Ce_2O_3$ ; LC)는 총 희토류 중 55.5%를 점한다(Table 4 and Fig. 3A). 반면 광구 북측에서 산출되는 망간단괴는 중(中)희토류(NPD)가 19.53%, 중(重)희토류(SEGY)가 16.0%를 보이는 반면 경희토류(LC)의 총 희토류

함량은 64.5%를 보이고 있어 광구 남측 망간단괴의 NPD 및 SEGY 함량이 상대적으로 부화되어 있는 특징을 보인다(Table 4 and Fig. 3A).

### 3.2. 망간각 희유금속 함량

망간각 희유금속 함량 분석은 서태평양 마샬제도 부근 3개 해역 해저산들에서 획득된 망간각 시료를 대상으로 수행되었다. 망간각에 함유된 희소금속 중 Te(35~85 ppm, 평균 56 ppm)는 10,000 배 이상의 매우 높은 부화량을 보인다(Table 1 and Fig. 2B). 채광 예상 금속 중인 Ni, Co를 포함한 Bi, Tl, Mo, Sb, Mn, W 등이 지각대비 약 100 배 정도의 부화량을 보인다.

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

Resource type	Manganese nodule (NE Pacific Ocean)						Manganese crust (WC Pacific Ocean)						Polymetallic sulfides											
	KR3, KR4, KR5 (southern part)			KRI, KR2 (northern part)			Lomilik seamount			Lemkein and Litaakooki seamount			OSM1 and OSM2 seamount			Lau Basin								
Area	Mean	Min	Max	N	Mean	Min	Max	N	Mean	Min	Max	N	Mean	Min	Max	N	Mean	Min	Max	N				
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.013	0.009	0.022	10	0.015	0.004	0.029	78	0.026	0.017	0.043	48	0.027	0.013	0.045	108	0.022	0.002	0.057	53	0.001	0.000	0.002	7
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.042	0.024	0.085	10	0.068	0.021	0.186	78	0.093	0.032	0.205	48	0.109	0.045	0.183	108	0.061	0.003	0.103	53	0.001	0.000	0.002	7
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.004	0.003	0.006	10	0.004	0.001	0.008	78	0.005	0.003	0.007	48	0.004	0.002	0.006	108	0.004	0.000	0.025	53	0.000	0.000	0.000	5
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.016	0.011	0.023	10	0.017	0.004	0.031	78	0.020	0.012	0.030	48	0.018	0.009	0.029	108	0.018	0.002	0.056	53	0.000	0.000	0.000	6
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.004	0.003	0.006	10	0.004	0.001	0.007	78	0.004	0.003	0.007	48	0.003	0.002	0.005	108	0.004	0.001	0.015	53	0.000	0.000	0.000	4
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.001	0.001	0.001	10	0.001	0.000	0.002	78	0.001	0.001	0.001	48	0.002	0.001	0.003	108	0.003	0.000	0.007	53	0.001	0.000	0.001	6
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.004	0.003	0.006	10	0.004	0.001	0.008	78	0.005	0.003	0.007	48	0.005	0.003	0.007	108	0.005	0.001	0.013	53	0.000	0.000	0.000	5
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.001	0.000	0.001	10	0.001	0.000	0.001	78	0.001	0.000	0.001	48	0.001	0.000	0.001	108	0.001	0.000	0.007	53	0.000	0.000	0.000	4
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.003	0.002	0.005	10	0.003	0.001	0.006	78	0.004	0.003	0.007	48	0.004	0.002	0.006	108	0.004	0.000	0.011	53	0.000	0.000	0.000	2
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.001	0.000	0.001	10	0.001	0.000	0.001	78	0.001	0.001	0.001	48	0.001	0.000	0.001	108	0.001	0.000	0.003	53	0.000	0.000	0.000	2
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	0.001	0.002	10	0.002	0.000	0.003	78	0.003	0.001	0.004	48	0.003	0.001	0.005	108	0.002	0.000	0.006	53	0.000	0.000	0.000	4
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.000	0.000	0.000	10	0.000	0.000	0.000	78	0.000	0.000	0.001	48	0.000	0.000	0.001	108	0.000	0.000	0.003	53	0.000	0.000	0.000	2
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	0.001	0.002	10	0.002	0.000	0.003	78	0.002	0.002	0.004	48	0.002	0.001	0.004	108	0.002	0.000	0.004	53	0.000	0.000	0.000	4
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.000	0.000	0.000	10	0.000	0.000	0.000	78	0.000	0.000	0.001	48	0.000	0.000	0.001	108	0.000	0.000	0.002	53	0.000	0.000	0.000	4
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.012	0.009	0.017	10	0.011	0.002	0.017	78	0.021	0.010	0.065	33	0.022	0.011	0.047	108	0.016	0.002	0.057	54	0.000	0.000	0.001	2
ΣREO <sup>1</sup>	0.104	0.067	0.178	-	0.133	0.037	0.302	-	0.185	0.086	0.383	-	0.202	0.091	0.345	-	0.143	0.013	0.368	-	0.004	0.001	0.007	-

<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 land-based REE deposits

Rare earth oxide	Manganese nodule		Manganese crust			Land-based REE deposits				REO price (US\$/kg) <sup>4</sup>	
	KR3,4,5	KR1,2	Lomilik	Lemkein	OSM1,2	Mt. Pass	Mount Weld	Nolan's Bore	Longnan		
REO % contained	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.67	11.42	13.89	13.37	15.38	33.20	25.50	19.74	7.80	6.5
	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40.58	50.90	50.30	53.94	42.44	49.10	46.74	47.53	2.40	5.0
	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.97	3.26	2.45	2.16	3.04	4.38	5.32	5.82	2.40	30.3
	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.37	13.11	10.72	9.00	12.40	12.00	18.50	21.20	9.00	30.8
	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.82	3.05	2.34	1.70	3.05	0.80	2.27	2.37	3.00	4.5
	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.95	0.74	0.50	1.05	1.89	0.10	0.21	0.40	0.03	525.0
	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.57	3.12	2.56	2.50	3.39	0.20	0.75	1.00	4.40	7.7
	Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.59	0.48	0.36	0.32	0.64	0.00	0.00	0.08	0.90	580.0
	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.98	2.50	2.26	2.02	2.64	0.00	0.00	0.33	5.30	195.0
	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.44	8.11	11.13	10.70	11.15	0.00	0.00	1.32	56.20	11.5
	Others <sup>1</sup>	4.06	3.31	3.48	3.24	3.98	0.22	0.29	0.21	2.37	-
Relative REO % distribution	LC <sup>2</sup>	55.50	64.45	66.51	69.57	60.22	82.48	72.76	67.41	11.16	
	NPD <sup>2</sup>	23.26	19.51	15.99	13.62	18.82	16.42	23.99	27.41	18.27	
	SEGY <sup>2</sup>	21.23	16.03	17.50	16.80	20.96	1.10	3.25	5.18	70.58	
Relative REO price (US\$/kg)	LC <sup>3</sup>	2.8	3.3	3.4	3.5	3.1	4.6	4.0	3.6	0.6	
	NPD <sup>3</sup>	11.7	9.9	8.5	7.4	9.9	5.0	7.5	8.9	13.8	
	SEGY <sup>3</sup>	10.2	8.0	6.3	8.9	15.3	0.6	1.6	2.9	12.3	
	total price	24.7	21.1	18.1	19.8	28.3	10.2	13.1	15.4	26.8	

<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>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 (April, 2010, website), REO compositions data of the Mt. Pass, Mount Weld and Longnan deposits from Lichtblau *et al.*, 2009.

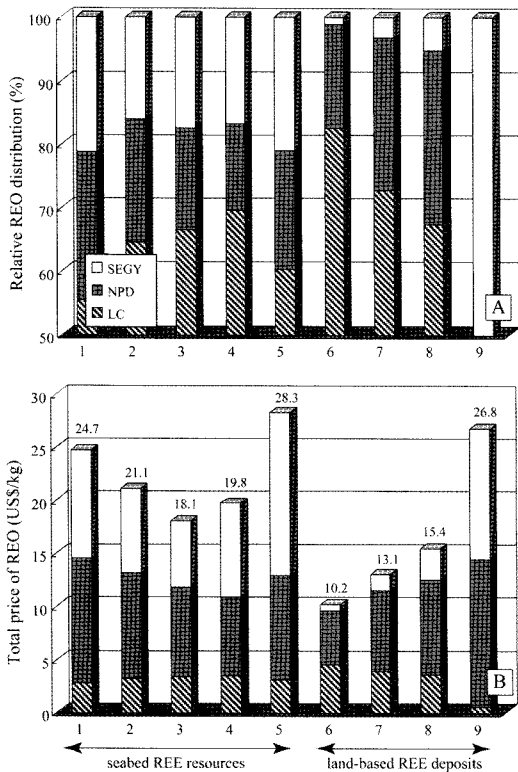
Those of the Nolan's Bore deposit from Nolans project progress report (May, 2010, Arafura Resources Limited website)

특징적으로 이들 해역에서 회수된 망간각의 Pt(165~909 ppb, 평균 364 ppb)는 약 150 배 정도의 부화량을 보인다(Fig. 2B). Pt를 제외한 백금족 원소에서는 Rh, Ir, Ru 등이 42~16 배 정도 부화되어 있다. 한국의 탐사 지역을 제외한 전 세계 해저에서 산출되는 망간각의 백금족 원소들은 Pt 71~333 ppb, Rh 8~21 ppb, Ru 9~22 ppb 등으로 대체로 한국 탐사 지역의 그 것들 보다 다소 낮거나 비슷한 백금족 함량을 보인다(Hein *et al.*, 2005).

망간각에 함유된 희토류 총 함량을 보면, 로밀리크(Lomilik) 해저산에서 산출되는 망간각에는 0.086~0.387 REO % (평균 0.185 REO %)의 희토류가 함유된다(Table 3). 램카인·리탁푸키(Lemkein·Litakpooki) 해저산에서 산출되는 망간각에는 0.091~0.345 REO % (평균 0.202 REO %)의 희토류가 함유되어 있어 로밀리크 해저산들의 것 보다 다소 높은 희토류 함량을 보인다. OSM1 및 OSM2 해저산에 배태되는 망간

각의 희토류 함량은 0.013~0.368 REO % (평균 0.143 REO %)로 상기한 해저산에서 산출되는 망간각의 것에 비해 다소 낮은 함량을 보인다(Table 3). 총 희토류의 함량은 램카인·리탁푸키, 로밀리크, OSM1·2 순으로 낮아지나 희토류 원소의 구성비는 서로 상반된 비율을 보인다. 이 지역에서 산출되는 망간각 중 가장 높은 총 희토류 함량을 보이는 램카인·리탁푸키의 희토류 함량비는 중(中)희토류(NPD), 중(重)희토류(SEGY), 경희토류(LC)가 각각 13.6%, 16.8% 69.6%의 함량을 보인다. 반면 가장 낮은 총 희토류 함량을 보이는 OSM 해저산들의 망간각은 중(中)희토류(NPD) 18.8%, 중(重)희토류(SEGY) 21.0%, 경희토류(LC) 64.5%를 보여, NPD와 SEGY의 두 함량이 램카인·리탁푸키의 것에 비해 약 10 % 정도 더 높은 함량을 보인다(Table 4 and Fig. 3A) 로밀리크 해저산에서 산출되는 망간각은 중(中)희토류(NPD)가 16.0%, 중(重)희토류(SEGY)가 17.5 %를 보이는 반면 경희토류(LC)





**Fig. 3.** 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 = manganese nodule (KR3,4 and 5); 2 = manganese nodule (KR1 and 2); 3 = manganese crust (Lomilik); 4 = manganese crust (Lemkein and Litakpooki); 5 = manganese crust (OSM1 and 2); 6 = Mt. Pass; 7 = Mount Weld; 8 = Nolan's Bore; 9 = Longnan.

는 총 희토류 함량의 66.5%를 집하고 있어 경희토류(LC) 함량비가 상기한 두 해저산 것의 중간정도를 보인다(Table 4 and Fig. 3A).

**3.3. 다금속황화광체의 희유금속 함량**

해저다금속황화광체의 희유금속 함량 분석은 남서태평양 피지 및 통가 인근의 북피지분지와 라우분지에서 획득된 광체를 대상으로 수행하였다. 다금속황화광체에 함유된 희소금속 중 가장 높은 부화량을 보이는 것은 Se(4~811 ppm, 평균 49.6 ppm)으로 지각대비 약 1300 배 이상의 농도를 보인다(Fig. 2C). 그 외에 Ba, Sb, Tl 등의 금속이 지각대비 약 100 배 이상 부화되어 있다. 북피지분지 및 라우분지에서 산출되는 광체에서는 0.4~4.1 ppm (평균 2.3 ppm) 정도의 In이 함

유되어 있어 약 50 배 가량의 부화량을 보인다(Table 2). 한편 통가 탐사권 획득 지역에서 2009년 회수된 Pb-Zn 유형의 광체구(sulfide mound) 시료 중 일부에서는, In 함량이 0.2~41.2 ppm (평균 5.5 ppm)을 보여 지각대비 110 배의 높은 부화량을 보인다(Fig. 2C). 희유금속에는 포함되지 않지만 귀금속으로 채광 가치가 매우 높은 금은 라우분지에서 평균 17.6 ppm (17.6 g/t), 북피지분지에서 평균 1.2 ppm (1.2 g/t)의 높은 함량을 보인다 (부화량 약 400~5900 배). 은의 경우 두 분지 모두에서 평균 약 80 ppm (80 g/t) 정도의 함량을 보인다. 통가 탐사권 획득 지역에서 회수된 시료에서 분석된 금은 0.5 ppm 에서 30 ppm 이상을 보이며 (평균 5.5 ppm 이상) 은은 평균 192 ppm 정도를 보인다(Fig. 2C).

해저다금속황화광체에 함유되어 있는 희토류의 총 함량은 라우분지에서 평균 0.004 REO %로 매우 낮은 함량을 보인다(Table 3). 북피지분지에서 산출되는 다금속광체는 희토류를 거의 함유하지 않고 있다.

**4. 고 찰**

해저광물자원 중 망간단괴에는 Co, Ni 이외에 Pt 및 Pd가 상당량이 함유되어 있다. 중앙태평양 지역에서 획득된 망간단괴에는 Pt가 120~930 ppb 함유되어 있으며, 인도양산 망간단괴에는 Pd가 평균 3668 ppb 함유되어 있다(Banerjee, 2004). 한국이 보유하고 있는 북동태평양 광구 전체에 대략 동일한 평균품위 500 ppm을 기준 약 360백만 건톤의 매장량을 확보 할 수 있다. 이는 대략 금속 Pt 180 톤(Mt)에 해당한다. 망간각의 경우 Te가 평균 56 ppm 함유되어 있어 지각 대비 약 10000 배 이상의 부화량을 보인다. 규모에 따라 상이하지만 1개 해저산에서 약 6백만 건톤의 광석량이 확보되면 1개 해저산에서 Te 금속 약 340 톤 정도를 확보 할 수 있을 것으로 예상된다. 망간각에서 산출되는 Pt의 경우 평균 364 ppb의 품위를 보여 1개 해저산에서 약 2.2 톤 정도의 금속 Pt가 함유될 것으로 추정된다. 상기한 망간단괴 및 망간각의 희소금속 함량은 탐사 지역의 일부에서 획득된 시료에서 분석된 값이다. 한 지역 또는 1개 해저산에 분포하는 망간단괴와 망간각의 금속 품위는 대체로 일정한 값을 보이 나 국지적 편차가 존재 할 수 있어 보다 자세한 매장량 평가는 체계적인 품위 분석이 수행된 후에 이루어 질 수 있을 것으로 판단된다.

다금속황화광체에서는 Se이 가장 높은 부화량(1300

배)을 보이며 In이 약 110 배의 부화량을 보인다. Se 및 In의 평균 함량은 각각 50 ppm과 5.5 ppm으로 1 개 해저열수광상에서 6백만 건톤의 광석 확보시 Se과 In 금속은 각각 3백 톤 및 33 톤이 확보 될 것으로 전망된다. 해저다금속광체의 경우 열수의 이동과 농집 및 분출에 따라 다양한 금속 종의 광체가 배태된다 (Pak, 2009). 특히 Se·In과 같은 희유금속은 황동석·섬아연석 등과 같은 황화광물에 수반되고 있어 Se 및 In의 함량은 이들 황화광물의 조합에 따라 지역별·광체별 함량 편차가 있을 것으로 예상된다.

육상광상의 희토류 가행 품위는 0.01 REO %에서 11.2 REO %까지 매우 넓은 특징을 보인다(Table 5). 이는 희토류와 함께 생산되는 다양한 부산물·부산물 금속의 가치 및 광물·모암으로 부터의 희토류 추출을 위한 제·정련 비용 등이 광산별로 매우 다변적이기 때문인 것으로 판단된다. 육상 희토류광상 중 롱난(Longnan)지역의 희토류광상의 가행 품위는 0.05에서 0.20 REO %를 보여 다른 육상광상에 비해 상대적으로 낮은 가행 품위를 보인다(Table 5). 이는 라테라이트에 흡착된 희토류가 채광 대상이어서 희토류 추출비용이 기타 유형의 희토류 광상에 비해 상대적으로 낮기 때문이다(Wu *et al.*, 1996). 한편 품위가 0.01 REO %를 보이는 러시아의 로보제로(Lovozero) 희토류광산은 함세습광물인 로파라이트(loparite)를 함유한 과알칼리(peralkaline)암을 채광 대상으로 한 광상이다(Nikolaev *et al.*, 2008). 이 광상은 라테라이트를 대상으로 한 광상 보다 채광비용은 높으나 대규모 복합관입암체를 대상으로 대규모 저품위 광상 개발을 진행하

고 있다.

한국이 탐사 중인 해저광물자원 중 망간단괴 및 망간각에 함유되어 있는 희토류의 양은 각각 0.12 REO %, 0.18 REO %로 육상 희토류 광상에 비하여 비교적 낮은 함량을 보인다. 그러나 가행 중인 일부 육상 희토류 광산의 최저 가행 품위 0.01~0.20 REO %와 비교하면 거의 유사한 품위를 나타낸다(Table 5). 망간단괴 및 망간각에 함유되어 있는 유용성분의 침전 기작은 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; HREE(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 또는 LREE(CO<sub>3</sub>)<sup>+</sup>]의 형태로 흡착 된다(Hein *et al.*, 2000). 이는 망간각 및 망간단괴에 함유되는 희토류가 함희토류 라테라이트광체와 유사한 부존형태를 보일 가능성을 의미한다. 따라서 향후 해저금속광체로부터 희토류의 경제적인 추출을 위해 이들에 대한 희토류 제·정련 연구가 필요할 것으로 생각된다. 망간단괴의 경우 한국 보유 광구 전 지역에서 망간단괴의 희토류 품위를 0.12 REO %로 가정하면 약 432천 톤의 총 산화희토류 매장량(360백만 건톤 @ 0.12%)을 보일 것으로 예상된다. 최근 가행을 준비 중인 마운트웰드(Mount Weld) 육상광산은 현재 가장 높은 희토류 품위를 보인다(11.2 REO %; Table 5). 이 광산의 총 산화희토류 매장량은 190천 톤(1.7백만 톤 @ 11.2%)을 보여 망간단괴(432천 톤)보다 낮은 매장량을 보인다(Castor and Hedrick, 2006). 망간단괴와 망간각에서 산출되는 희토류의 총 함량

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

	Deposit or district	Country	Grade, REO %	Deposit type	Situation	Reference
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
	Bayan Obo	China	6	iron-rich	operating	Drew <i>et al.</i> , 1990
	Nolan's Bore	Australia	4	vein	feasibility study	Castor and Hedrick, 2006
	Hongcheon	Korea	2.4	carbonatite	scoping study	KIGAM, 2001
	Weishan	China	1.6	vein	operating	Wu <i>et al.</i> , 1996
	Chungju	Korea	0.84	iron-rich	scoping study	KIGAM, 1988
	Longnan and Xunwu	China	0.05~0.20	laterite	operating	Wu <i>et al.</i> , 1996
	Lovozero	Russia	0.01	peralkaline syenite	operating	Castor and Hedrick, 2006
Seabed resources explored by Korea	NE Pacific Ocean	high sea	0.10~0.13	manganese nodule	exploration	this study
	WC Pacific Ocean	high sea	0.14~0.20	manganese crust	exploration	this study

중 가격이 높은 NPD 및 SEGY(중(中)희토류 및 중(重)희토류)는 육상광산의 그것에 비해 상대적으로 높은 함량을 보인다(Table 4; Fig. 3A). 이들 함량비를 2010년 시장가격 기준으로 환산하여 보면 망간단괴의 경우 kg당 평균 22.9 불을 보이며 망간각의 경우 평균 22.1 불을 보인다(Fig. 3B). 반면 육상의 마운틴패스(Mt. Pass)광산, 마운트웰드광산, 놀란스보어(Nolan's Bore)광산, 롱난광산은 kg당 각각 10.2 불, 13.1 불, 15.4 불, 26.8 불 (평균 16.4 불)을 보여 해저금속광상에 비하여 약 6 불 정도 낮은 가격을 보인다(Fig. 3B). 이는 망간단괴와 망간각에 함유되어 있는 희토류의 함량이 육상광상에 비해 비교적 낮지만 희토류 구성비에 있어서는 가격이 높은 중(重)희토류가 우세하게 포함되어 있기 때문이다(Table 4).

망간단괴 및 망간각에 있어서 채광 예상 금속인 Ni, Co, Cu 등의 채광 여부는 채광 경제성과 밀접한 관련을 보인다(Nam *et al.*, 2004; Park and Yang, 2009). 망간단괴와 망간각에서 산출되는 희소금속 중 Te, Pt는 지각대비 부화량이 높아 경제성 있는 희유금속 중으로 판단되며, 주 금속 제·정련시 부산물로 생산하여 Ni, Co 등의 채산성을 높여 줄 것으로 생각된다. 망간단괴 및 망간각에 함유된 희토류의 품위는 비교적 낮으나 대규모 광석량 확보를 통해 채광 경제성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 이들 해저금속광상에는 채광시 시장가격 측면에서 유리한 중(重)희토류 함량비가 높아 채광 예상 금속의 경제적 가치를 증대시킬 것으로 생각된다. 단, 망간각은 희유금속 개발에 있어 대규모의 광석량을 확보하는 것이 중요하다. 즉 한국이 탐사 중인 서태평양 공해에서 국제 광구 등록을 통해 망간각이 피복된 해저산을 다수 포함 할 수 있도록 하는 것이 관건이 될 것이다. 이는 광구의 크기에 따라 달라진다. 현재 망간각 국제 광구등록 규칙 논의에서 가장 핵심적인 사항은 망간각 광구의 크기 결정으로, 양질의 해저산을 다수 포함 할 수 있으면서 타국의 광구와는 중첩되지 않도록 적절한 크기의 광구 범위를 설정하는 것이 중요할 것으로 생각된다.

다금속황화광체에서는 Se과 In이 지각에 비해 다량 함유되어 있다. 이들 희소금속을 다금속황화광체로부터 개발 가능한 천금속의 부산물로 생산하므로써 천금속 개발의 채산성을 높여 줄 수 있을 것으로 생각된다. 또한 황화광체에 다량 함유되는 귀금속은 희유금속과 더불어 Cu, Pb, Zn 등의 채광 경제성을 배가시킬 것으로 생각된다. 상기한바와 같이 Se 및 In 등은 대체로 천금속 정출과 밀접한 관련을 보이므로 열수 성인

에 따른 금속분대를 따라 희소금속 함량의 변화가 예상된다. 따라서 이들 희소금속의 정밀한 매장량 평가 및 개발은 광상 성인모델을 통한 해석을 통해 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 태평양 심해저 광물자원 개발 (PM5565)·통가 해저열수광상의 광구관리 및 자원량평가 (PM5568)·남서태평양 및 인도양 해양광물자원(해저열수광상, 망간각) 개발(PM5588) 사업 등의 지원을 받아 수행되었습니다. 본 논문을 위해 유익한 조언을 주신 심사위원분들께 감사의 말씀 드립니다. 또한 본 논문 작성을 위해 도움을 주신 이현복 박사님과 김종욱 박사님께도 감사드립니다.

## 참고문헌

- Arafura Resources Limited, website, <http://www.arafuraresources.com.au/> (May, 2010)
- Banerjee, R. (2004). Manganese nodules as a possible source of precious metals. *Current Science*, v.87, p.278-279.
- Castor, S.B. and Hedrick, J.B. (2006) Rare earth elements. In Kogel, J. E., Trivedi, N.C., Barker, J.M. (eds.) *Industrial Minerals and Rocks*. 7<sup>th</sup> Edition. Society for Mining, Metallurgy and Exploration. Littleton, Colorado, p.769-792.
- Choi, Y.-J., Woo, K.-S., Park, S.-H., Jung, H.-S., Moon, J.-W. and Lee, K.-Y. (2001) Textural and geochemical characteristics of ferromanganese crusts from the Lomilik and Litapooki seamounts, Marshall islands, West Pacific. *The Sea*, v.6, p.13-26.
- Drew, L.J., Meng, Q. and Sun, W. (1990) The Bayan Obo iron-rare earth-niobium deposits, Inner Mongolia, China. *Lithos*, v.26, p.43-65.
- Hein, J.R., Conrad, T.A. and Staudigel, H. (2010) Seamount mineral deposits: A source of rare metals for high-technology industries. *Oceanography*, v.23, p.184-189.
- Hein, J.R., Koschinsky, A. and Alliday, A.N. (2003) Global occurrence of tellurium-rich ferromanganese crusts and a model for the enrichment of tellurium. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.67, p.1117-1127.
- Hein, J.R., Koschinsky, A. and McIntyre, B. (2005) The global enrichment of platinum group elements in marine ferromanganese crusts; In Tormanen, T. O., Alapieti, T.T. (eds.) *Extended Abstracts*, 10<sup>th</sup> International Platinum Symposium. Oulu, Finland, p.98-101.
- Hein, J.R., Koschinsky, A., Bau, M., Manheim, F.T., Kang, J.-K. and Roberts, L. (2000) Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific. In Cronan, D.S. (ed.) *Handbook of Marine Mineral Deposits*. CRC Press, Boca.

- p.239-279.
- Kawamoto, H. (2008). Japan's Policies to be adopted on Rare Metal Resources. *Science & Technology Trends*, v.27, p.57-76.
- Jeong, K.S., Kang, J.K. and Chough, S.K. (1994) Sedimentary processes and manganese nodule formation in the Korea Deep Ocean Study (KODOS) area, western part of Clarion-Clipperton fracture zones, north-east equatorial Pacific. *Marine Geology*, v.122, p.125-150.
- Kang, J.-K. (1987) Mineralogy and internal structures of a ferromanganese crust from a seamount, Central Pacific. *Jour. Ocean Soc. Korea*, v.22, p.168-178.
- Kim, J., Moon, J.-W., Chi, S.-B., Ko, Y.-T. and Lee, H.-B. (2004) Chemical Speciations of Elements in the Fe-Mn Crusts by Sequential Extraction. *Ocean and Polar Research*, v.26, p.231-243.
- KIGAM (1988) Rare-earth mineralization in Kyemyung-san formation of Ogcheon group, Mt.Eorae area near Choongju city, middle Korea. In *Study on geology and ore deposits for rare metals in Korea*. KR-88-8A. 508p.
- KIGAM (2001) Mineralization and feasibility study of Fe-REE deposits in Hongcheon area, South Korea. 2000-R-TI02-P-01. 257p.
- KORDI (1996) Exploration deep-sea mineral resources (Part I). 1996 year report. 954p.
- KORDI (1998) Cruise report for Leg KODOS 97-4. BSPG 97272-00-1098-7. 140p.
- KORDI (1999) Exploration for manganese crusts in the southwestern Pacific. CRPM 99022-00-1207-7. 263p.
- KORDI (2001) Exploration for manganese crusts in the southwestern Pacific. CRPM 00052-00-1314-7. 290p.
- KORDI (2004) Exploration for hydrothermal deposits in the southwestern Pacific. CRPM 199-00-1584-5. 242p.
- KORDI (2006) Exploration for seafloor hydrothermal deposits and Fe-Mn crusts in the southwestern Pacific (Exploration part). 2005 year report. CRPM 36000-1799-5. 378p.
- Lee, K.-Y., Choi, S.-H. and Park, S.-H. (2002) Geochemistry of the hydrothermal chimneys in the Manus Basin, Southwestern Pacific Ocean. *Econ. Environ. Geol.*, v.35, p.1-12.
- Lichtblau, A.F., Ravnaas, C., Storey, C.C., Hinz, P. and Bongfeldt, J. (2009) Report of Activities 2008, Resident Geologist Program, Red Lake Regional Resident Geologist Report: Red Lake and Kenora Districts; Ontario Geological Survey, Open File Report 6232, 84p.
- Metal-Pages, website, <http://www.metal-pages.com/> (April, 2010)
- Nam, K. H., Oh, W.Y. and Kwon, S.J. (2004) An Economic Feasibility Study of Manganese Nodule in Korea Area: Clarion-Clipperton Fracture Zone. *Ocean and Polar Research*, v.26, p.187-197.
- Nikolaev, A.I., Larichkin, F.D. and Nikolaeva, O.A. (2008) Choosing the technology of combined processing of titanium-rare-metal raw materials. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, v.42, p.675-679.
- Pak, S.J. (2009) Features of Seabed hydrothermal polymetallic deposits and their exploration and exploitation. *Minerals and Industry*, v.22 p.45-59.
- Park S.-H. and Yang, H.-C. (2009) A Technical and Economic Evaluation of Cobalt-rich Manganese Crusts. *Ocean and Polar Research*, v.31, p.167-176.
- Song, Y.-H., Kim, J.-W., Kim, H.-J. and Lee C.-T. (2001) The recovery of valuable metals from leachate of deep sea manganese nodule. *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, v.12, p.236-271.
- Taylor, S.R. (1964). The abundance of chemical elements in the continental crust - a new table. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.28, p.1273-1285.
- Taylor, S.R. and McLennan (1985). *The continental crust: Its composition and evolution*. Blackwell Scientific Publ., Oxford, England, 312p.
- Wiltshire, J.C., Wen, X.Y. and Yao, D. (1999) Ferromanganese Crusts near Johnston Island: Geochemistry, Stratigraphy and Economic Potential. *Marine Georesources and Geotechnology*, v.17, p.257-270.
- Wu, C., Yuan, Z. and Bai, G. (1996) Rare earth deposits in China. In Jones, A.P., Wall, F., Williams, C.T. (eds.) *Rare earth minerals: Chemistry, origin and ore deposits*. Mineralogical Society Series no.7. Chapman and Hall, London, p.281-310.
- Yoon, C.H., Kim, I.K. Kwon, K.S. and Kwon, O.K. (1999) Analysis of unsteady state flow mechanism in pipe for hydraulic pumping system in deep-sea manganese nodules. *Korean Soc. Geosystem Eng.*, v.36, p.33-41.