

Review

심해저 망간단괴 개발사업의 국제기술 동향 분석 및 향후 개발 전망

박세헌* · 박성욱 · 강길모

한국해양연구원 해양과학기술정책연구센터
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호Evaluation on R&D Progress for Manganese Nodule
Development and Its Prospects

Se-Hun Park*, Seong-Wook Park, and Gil-Mo Kang

Ocean Policy Center, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : The development of manganese nodule mining technology is very important in order to secure a long-term and stable supply of rare strategic metals. In the twenty years following the R&D activities with the international consortia in the 1970s, studies on mining technologies have been carried out by several national projects in Korea. The current metal prices such as copper, nickel, cobalt, and manganese have been drastically changed since 2002. Rapid economic growth of Asian countries, especially China, have induced the situation. And the possibility of copper shortage is looming just around the corner. Because of the imbalance between production and consumption, copper is fundamentally the most threatened metal in the future in terms of potential metal shortage. Manganese nodules contain a considerable percentage of copper as the future metal resource. Therefore, it is necessary to concentrate our efforts on developing these resources. This paper introduces our evaluation of R&D progress for the development of manganese nodules. The issue and role of manganese nodules during the difficult period of a potential future metal shortage period is discussed and its prospect outlined. Also, this paper tried to emphasize the necessity of continuous R&D efforts for the commercial development of such mineral resources.

Key words : 망간단괴(manganese nodule), 기술개발(R&D), 금속가격(metal price), 동 부족(copper shortage), 전망(prospect)

1. 서 론

심해저광물자원 중 처음으로 개발 가능성이 있는 것으로 주목을 받아온 망간단괴는 2000년 국제해저지구에서 심해저 광업규칙(ISBA/6/A/18)과 환경영향평가 지침(ISBA/6/LTC/CRP.2)이 제정됨에 따라 공해상의 자원개발 추진근거가 마련되었다.

우리나라에서도 금속광물 자원의 안정적 공급과 첨단 산업분야 기술과급을 통한 국가경쟁력 향상 및 핵심기술·

장비의 국산화라는 필요성을 인식하여 한국해양연구원을 총괄기관으로 한국지질자원연구원, 대우조선해양(주) 등이 9개 핵심개발분야(담사, 집광·양광, 제련, 환경영향평가 등)에 참여하여 심해저광물자원개발을 위한 국책연구사업이 1994년부터 수행되었다. 1단계('94-'96년) 기술타당성 연구와 2단계('97-'02년) 핵심요소기술 실용화 연구, 그리고 현재는 2010년에 있을 해양종합실험계획에 따라 상업화를 위한 기술개발 연구가 활발하게 추진되고 있다(해양수산부 2001; 해양수산부 2003).

근년, 심해저 망간단괴의 상업적 개발에 대해 지속적인 기대를 가질 수 있을지 판단이 서지 않았던 것이 사실이

*Corresponding author. E-mail : shpark@kordi.re.kr

다. 그러나, 망간단괴 개발가능성 평가(Andrews et al. 1983; Charles et al. 1990)로부터 15~20년이 경과한 지금, 당시에는 고려할 수 없었던 기술·경제적 여건변화가 최근 새롭게 전개되고 있다. 경제적인 여건변화로서는 심해져 망간단괴에 함유되어 있는 금속광물자원의 수요급증과 가격상승 등 국제환경의 변화와 기술적인 여건변화로서는 기술개발의 발전에 따른 효율성·경제성 향상 등 경영환경의 변화를 지적할 수 있겠다(小島 1996; Hong and Choi 2001; 澤田 2004).

최근의 이러한 정세 변화를 바탕으로 미국, 캐나다, 독일 등 선진국들은 심해져 자원개발을 국가전략사업으로 재수정하고 적극적인 움직임을 재개하고 있어 심해져 망간단괴의 개발가능성이 다시금 주목되고 있다.

본 연구는 심해져 망간단괴 개발사업의 국제기술동향을 분석하고 그 개발 가능성을 전망해 보고자 한다. 먼저 최근의 금속수요 증대와 그에 따른 금속가격 상승에 대해 주요 육상광물자원의 수급동향과 금속가격 동향 및 우리나라의 심해져 망간단괴 상업적 개발을 위한 탐사, 집광·양광, 제련, 환경영향평가 등 일련의 연구개발 상황을 검토하고자 한다. 이를 바탕으로 주변국가 특히 일본의 기술개발 분석을 통하여 상업생산에 대비한 전략적 방안을 모색하고 기존자료를 종합하여 향후 심해져 망간단괴 개발사업의 상업생산 시점을 전망하고자 한다.

2. 주요 육상광물자원 수급동향

최근 BRICs(Brazil·Russia·India·China) 등 신흥경제 국가의 산업발전에 따라 금속광물자원의 수요급증, 그리고 육상 생산국의 정치·경제 여건변화에 따른 공급 불균형은 생각하는 것보다 우려할만한 수준에 이르고 있다.

우리나라의 경우에 있어서 예외 없이 이러한 현상이 발생 때마다 국가 자원수급에 심각한 문제로 대두되어 왔으며, 자원절약과 같은 단기적인 긴축정책으로 대처할 수 밖에 없는 구조적인 취약성을 보이면서 대외의존적 수급 정책은 여전히 국가경제발전에 불안요인으로 작용하고 있다. 우리나라의 금속광물자원 수입은 2000년 50억불에서 2004년에는 수입액이 80억불에 이르러 4년간 60%의 증가율을 보이며 원유와 같이 금속광물자원도 2010년이면 완전수입단계에 이르게 될 것으로 예측되고 있다(Table

1). 이러한 상황은 금속광물자원에 대한 개발 및 수급이 해외 의존적 성격에서 벗어나 독자적인 개발전략 중심으로 변화하여야함을 의미한다.

많은 양의 생산과 소비로 인해 산업적인 중요성이 큰 동 금속을 중심으로 육상광물자원의 수급동향을 파악하고자 한다. Fig. 1은 아시아 동 소비국의 동향¹⁾을, Fig. 2는 중국의 동 수요와 공급현황²⁾을 나타낸다. 동의 수요측면에서 아시아 국가들의 동향과 특히 중국에 있어서의 수급 전망을 보면 산업경제의 급성장에 따른 국내자급을 감소로 인해 국가차원의 해외자원개발 확대와 비축물량 확보에 주력하고 있다(澤田 2004). 또한 Fig. 3은 공급측면에서 비철금속의 세계 탐광비 내역³⁾을 나타낸다. 광산개발 여건 악화와 새로운 광상발견의 미흡 등으로 인해 탐광활동이 1998년 이후로 현저히 저하되고 있다는 것을 알 수 있다.

향후 중국은 2008년에 베이징올림픽과 2010년에 상하이 만국박람회를 준비하고 있어 금속수요는 계속해서 증가할 것으로 경제전문가들은 전망하고 있으며 이러한 수급 불균형 현상은 장기적인 추세를 유지할 것으로 내다보고 있다(澤田 2004). 따라서 세계 각국은 경쟁적으로 자원 확보에 나서고 있는 상황에서 자원의 안정적 확보여부가 국가안보와 직결되어 지속발전의 성패를 좌우할 것이다.

Table 1. Self-efficiency and imports for mineral resources in Korea.

Year	Self-efficiency (%) ⁴⁾	Imports (MS) ⁵⁾	Rate in the gross Imports (%) ⁶⁾
1994	2.52	2526.8	2.47
1995	1.77	4958.0	3.67
1996	1.79	7790.9	5.18
1997	1.36	8933.0	6.18
1998	0.77	6593.8	6.08
1999	0.67	5736.2	6.42
2000	0.55	5090.8	4.52
2001	0.21	4595.1	4.90
2002	0.27	4501.7	4.57
2003	0.33	6101.9	4.81
2004	0.75	7946.6	4.79

¹⁾World Metal Statistics 1994-2004.

²⁾AME Mineral Economics Copper Outlook 2005. Raw Materials Data 2005.

³⁾Roskill's Metals Databook 2000. <http://www.kores.or.kr/>한국자원정보서비스, 자원정보.

⁴⁾금속광물 자급율(국내생산내수) : '04년도 광산물 수급현황. 2005. 산업자원부·한국지질자원연구원.

⁵⁾금속광물 수입액(경상가격기준) : '04년도 광산물 수급현황. 2005. 산업자원부·한국지질자원연구원.

⁶⁾총수입액중 금속광물 수입액 비중(국내광산물수입액/총수입액) : '04년도 광산물 수급현황. 2005. 산업자원부·한국지질자원연구원.

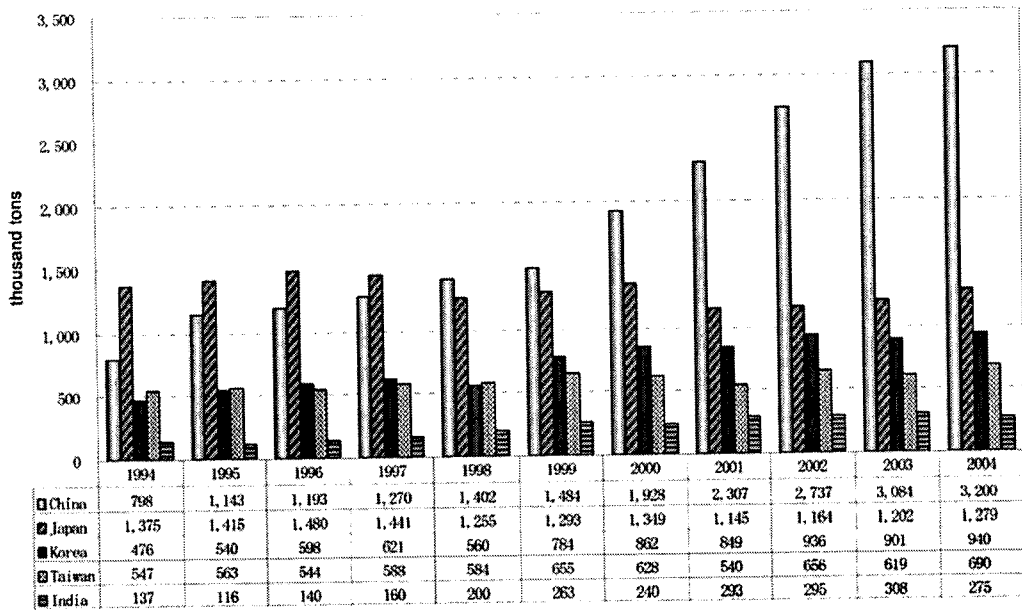


Fig. 1. Copper demand in major Asian countries.

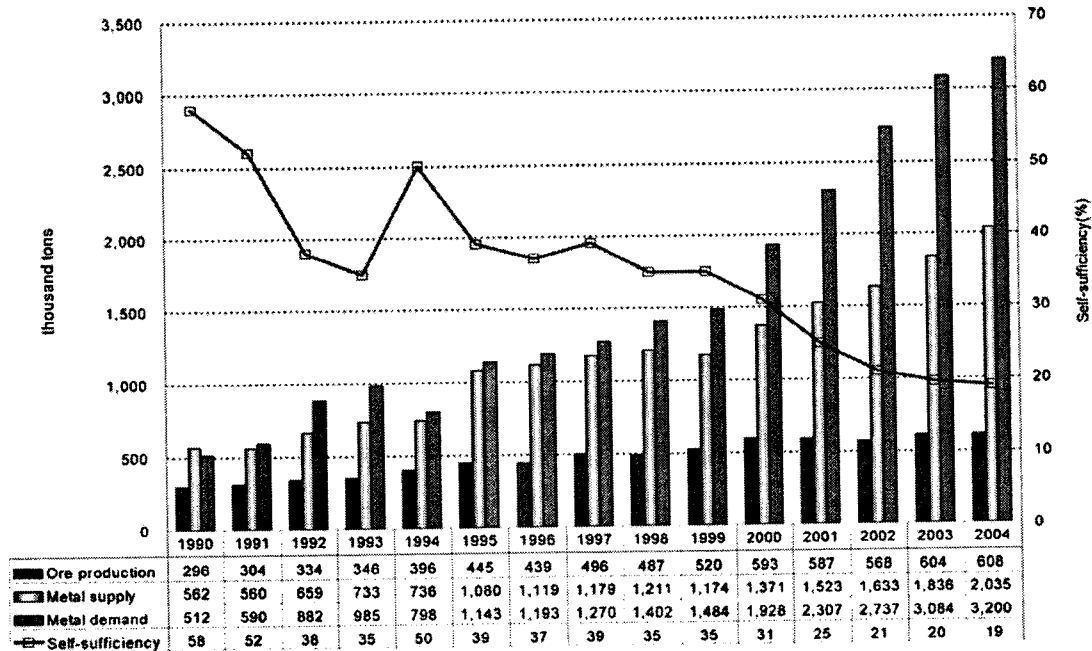


Fig. 2. Copper supply and demand in China.

3. 최근의 금속가격 동향

최근 금속가격의 급등은 국내외 경제전문가들의 예측과는 전혀 다른 방향으로 전개되고 있다. 기존의 예측결과는

니켈, 구리, 코발트를 포함한 금속가격이 하향 안정세를 유지함으로써 수급에 변화가 없을 것으로 예상하였지만 (繩田 2001), 2003년 이후의 코발트⁷⁾, 니켈⁸⁾, 동⁹⁾, 실리콘망간¹⁰⁾의 가격동향을 보면, 낮은 재고와 수급불안 등으로

⁷⁾Cobalt price: Platt's Metals Week의 MW 99.8% US Spot Cathode 가격.

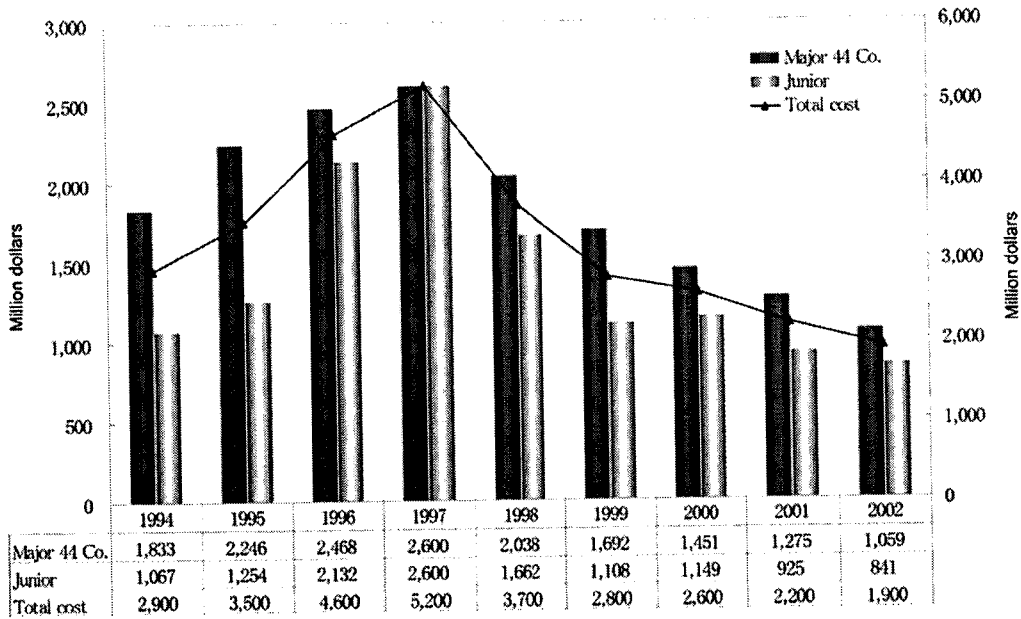


Fig. 3. World mine cost for nonferrous metals in 1994-2002.

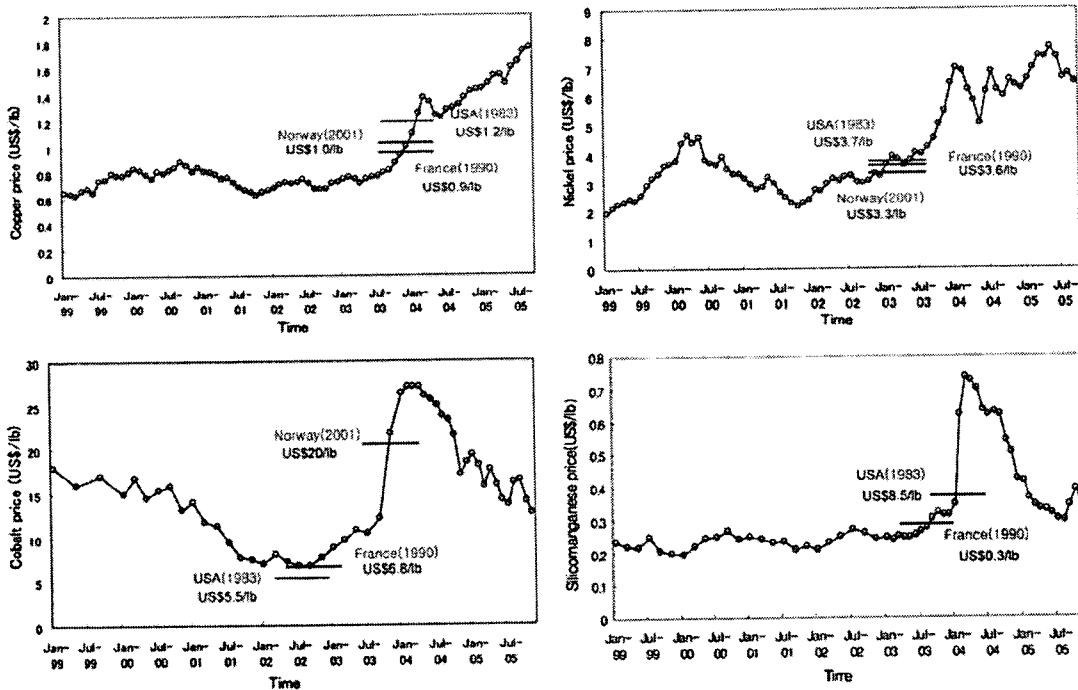


Fig. 4. Trend of main metal prices.

인해 초강세의 가격상승을 보이면서 사상 최고치를 경신하는 모습을 나타내고 있다. 코발트, 니켈, 실리콘망간에

대해서는 2004년에 들어와서는 상승을 멈추며 보합세를 유지하면서 일단 진정국면을 보이고 있지만 동에 대해서

⁸⁾Nickel price: Platt's Metals Week의 LME 결제가격.

⁹⁾Copper price: 전기동의 LME 결제가격, World Metals Statistics.

¹⁰⁾Si-Mn price: Platt's Metals Week의 MW 2% Free Market 가격.

는 여전히 높은 가격상승이 지속되고 있다. Fig. 4는 1999년부터 2005년 9월까지 코발트, 니켈, 동, 실리코망간 가격의 추이를 보여주고 있다.

동 가격에 대해 자세히 살펴보면, 90년대 말의 국제통화위기 등 국제경제 혼란의 영향으로 인해 1999년은 US\$ 0.76/lb으로 가격 저하가 두드러졌었지만, 2002년에는 국제경제 회복과 함께 US\$ 0.82/lb으로 비교적 강한 보합세를 보여 왔다. 그러나, 2004년에는 US\$ 1.4/lb로 과거 최고 가격수준을 나타내고 2005년 9월에는 US\$ 1.8/lb로 상승추세가 지속되고 있는 상황이다. 심해저 망간단괴 경제성 평가에서 1983년 미국(Andrews *et al.* 1983)이 US\$ 1.2/lb, 1990년 프랑스(Charles *et al.* 1990)가 US\$ 0.9/lb, 2001년 노르웨이 민간기업(Søreide *et al.* 2001)이 US\$ 1.0/lb 수준에서 개발가능성을 평가한 사실을 고려해 본다면 현재의 가격수준은 큰 가격상승이라 아니할 수 없다.

최근의 이러한 금속수급 불균형에 의한 가격상승은 단순한 주기변동의 일환으로 생각해야 할 것인지, 아니면 아시아 국가 특히 중국이 고도 경제발전을 주도하면서 새로운 가격상승요인에 의한 영향인지를 놓고 전문가들 사이에서도 의견이 엇갈리는 것이 사실이다. 수급측면에서 공급부족 현상이 지속되고 있기는 하지만 현재의 가격은 수급상황이 미치는 영향을 넘어선 현상으로 최근의 유가 강세 등에 의해 시작된 비철금속 가격상승은 자원수급전략에 큰 변화를 예고하고 있다.

향후 상승의 탄력을 만들었던 수급상황도 점차적으로 나아질 것이라는 예측과 함께 중국의 움직임과 펀드들의 매물 등이 비철금속 가격에 큰 영향을 미칠 것으로 예상하고 있다. 따라서 많은 전문가에 의하면 현재 수준의 가격이 앞으로도 유지될 가능성이 있다고 예측하고 있어 향후 금속가격의 향방에 시장의 관심이 집중되고 있다(時松 *et al.* 2004).

4. 망간단괴개발 추진 현황

탐사

우리나라는 2002년 태평양 하와이 동남쪽의 클라리온·클리퍼턴 해역(Clarion-Clipperton Fracture Zone)에 단독 개발광구 75,000 km² 광구(평균부존율 6.8 kg/m²)를 확정 한 이후 내년까지 4년간(2003~2006년)의 조사를 통해 우선채광지역(40,000 km²)의 선정과 그리고 상업생산체제 구축 시점(2007~2010년)에서는 최적 채광후보지역 20,000 km²를 확정할 예정이다(해양수산부 2003; 해양수산부 2004a; 해양수산부 2005a).

선행투자자로서 우리보다 앞서 탐사활동을 수행한 일본은 1981년 이래 심해저자원개발기술을 8대 대형 국책과제로 선정하여 통산성 산하의 금속광업사업단(MMAJ, 현

석유천연가스·금속광물자원기구)을 중심으로 망간단괴 개발사업을 추진하여 왔다(猪熊 *et al.* 1996). 또한 프랑스, 독일, 중국, 인도, 동구권 콘소시엄(InterOceanMetal) 등도 상업생산 활동에 가장 중요한 최적 채광지 선정을 위해 해상도가 높은 탐사장비를 광역탐사단계에 투입하여 점차적으로 조사대상지역을 세밀화하고 채광 route map을 설정하여 왔다(Charles *et al.* 1990; Kotlinski 1995; Das 2001b). 구체적으로는 광역탐사 및 광구탐사 단계에서 근접해지면 탐사시스템(Deep-towed side scan sonar)을 지속적으로 개발하고 현장조사에 활용하여 채광지의 선정과정에서 단위지역의 해저면 특성에 대한 3차원 분석자료에 근거하여 채광기의 성능 및 사양을 고려한 파일럿해역 선정, GIS 시뮬레이션에 의한 채광등급 분류 및 최적 채광지역 선정에 필요한 정밀탐사 자료를 단계적으로 확보하여 왔다(해양수산부 2003).

이에 비해 우리나라는 아직까지 근접해지면 탐사시스템의 연구결과 및 자료를 확보하고 있지 못하고 있는 실정이다. 2010년 상용화 목표의 차질 없는 이행을 위해서는 탐사장비 및 연구역량의 조기확보가 시급히 요구되고 있다.

탐사연구선의 보유현황을 비교해 볼 때, 일본은 심해저 자원탐사 전용선인 第2白嶺丸(2,127톤급, 대양심해연구선)를 비롯하여 가이레이(4,628톤, 대양심해연구선)등과 최근에 건조한 심해시추연구선 치큐우(57,087톤급)를 포함해 총 7척의 탐사선을 보유하여 해저미세지형 및 지질 공학특성, 해양환경 등 관련 자료를 지속적으로 수집할 수 있는 기반능력을 갖추고 있다. 또한 중국도 첨단기술능력을 보유한 대형 심해저연구선 대양 1호(5,600톤급)와 대양 2호(5,000톤급)를 이용하여 지질, 해저면 영상자료 및 해저퇴적특성 등 자국 광구탐사 및 환경연구에 적극적으로 활용하고 있다. 현재, 우리나라는 심해저 탐사를 위해 은 누리호(1,422톤급)를 보유하고 있지만, 탐사장비의 노후화와 장비의 부족으로 인해 탐사 정밀도를 높이는 데 많은 어려움을 겪고 있다.

Table 2는 한·일 심해저광물자원 탐사 연구선의 보유 장비 비교현황을 보여주고 있고, Fig. 5는 일본 第2白嶺丸의 대표적 탐사장비 특징을 나타낸다. 우선적으로 해결해야 할 사항으로는 채광지 선정단계의 데이터베이스 구축 및 GIS 시뮬레이션을 위하여 근접해지면 탐사시스템 등 핵심 탐사장비 도입과 함께 향후 실해역 정밀자료 구축 등을 위한 장비 국산화 및 기술자립을 통한 국가경쟁력 확보가 기술개발 전략으로 필요하다.

채광기술

우리나라의 채광시스템은 해양시스템안전연구소(MOERI)와 한국지질자원연구원(KIGAM)에서 자항식집광기와 수

Table 2. Research Vessel Comparisons between Korea's Onnuri and Japan's Hakureimaru No. 2.

	Korea (Onnuri)	Japan (Hakureimaru No. 2)
Exploration Equipments	<ul style="list-style-type: none"> • Multi-Beam Echo Sounder • Nallow-beam Sub-Bottom Profiler • Side Scan Sonar • Conductivity-Temp.-Depth Sensor • Precision Depth Recorder • Gravimeter • Mannetometer 	<ul style="list-style-type: none"> • Multi-Beam Echo Sounder • Multi-Frequency Exploration System • Nallow-beam Sub-Bottom Profiler • Side Scan Sonar • Conductivity-Temp.-Depth Sensor • Precision Depth Recorder • Proton Gradio Meter • Finder-installed Deepsea Camera • Continuous Deepsea Camera
Sampling Equipments	<ul style="list-style-type: none"> • Box Corer(BC) • Multiple Corer(MC) • Piston Corer(PC) • Dradge Bucket 	<ul style="list-style-type: none"> • Boring Machine System(BMS) • Finder Power Grab(FPG) • Free-Fall Grab(FG) • Spade Corer(SC) • Piston Corer(PC) • Large-caliber Corer(LC) • Dradge Bucket

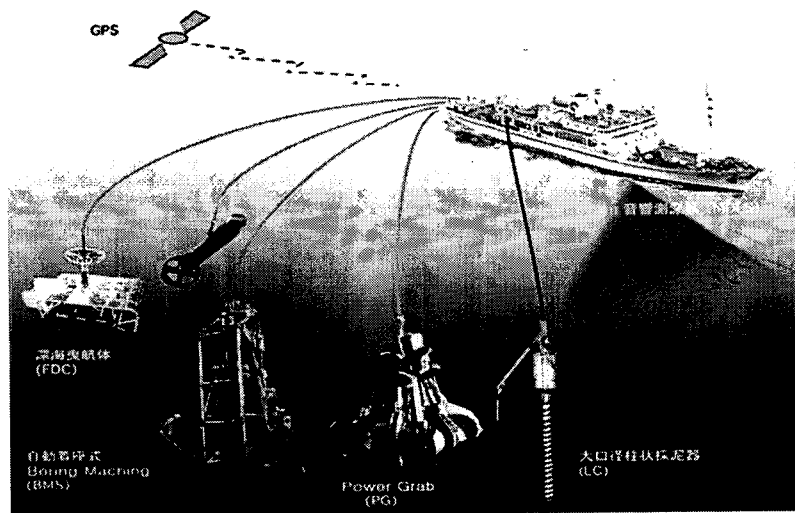


Fig. 5. Equipment characteristic of Japan's Hakureimaru No. 2.

력펄핑 양광시스템 기술개발을 국책연구로서 수행 중에 있다(Hong et al. 1999; Yoon et al. 2000; Hong and Choi 2001; 김 등 2004; 최 등 2004; 이 등 2004). 우리나라는 미국(Bath 1989), 일본(猪熊 et al. 1996) 등이 채택한 예인식집광방식이 아닌 자항식집광방식을 채택하고 있는데 예인식집광기는 자항식집광기에 비해 내구성, 신뢰성 등에 있어 우수하고 저비용이지만, 채광 효율성이 떨어지는 단점을 가지고 있기 때문에, 다른 국가에 비해 부존평균밀도가 낮고 평균유가급속 함유량이 떨어지는 우리광구의 현실을 적절히 반영한 방식이었다고 판단된다.

즉 동 방식은 효율성과 경제성을 향상시키는 기술적 방식이 불가피하다는 점, 심해저 사업의 상용화가 2010년 이후의 시점으로 예상해 볼 때 기술개발을 통한 혁신적인

진보를 이룩할 수 있다는 점에서 타당하다고 할 수 있다. 지금 심해저 자항식 집광시스템 및 통합운용기술 개발은 심해저 채광기술의 혁신(breakthrough)을 선도할 분야로서 선진국과 후발투자국 모두에게 기술 확보의 대상이 되고 있으며, 이를 위한 기술개발 협력(공동연구 또는 기술 이전)은 국가간 이해득실 분석에 따라 보다 확대되고 강화될 것으로 내다보고 있다.

일본은 상업적 채광시스템의 독자적 기술 확보라는 목표 실현을 위해 1981~1997년까지 「망간단과 채광시스템의 연구개발」 국가프로젝트가 수행되었다(Table 3). 심해저광물 채광시스템에 대해서만 17년간에 걸쳐 총 170억 엔(1,700억원)을 투자하였다(猪熊 et al. 1996). 그렇지만 예인식 주광방식을 고수함으로써 유체식 집광기, 유체식

Table 3. Japan's national research program for manganese nodule mining system.

Annual	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
Year	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97			
Original Plan	Elemental technologies R&D				Systems Design-Manufacture				Overall Ocean Test											
					↑ Mid-estimation				↑		1989.03 the first modification (R&D term: 9 years→14 years)									
First modification	Elemental technologies R&D				Japan · France technical cooperation research				Systems Design · Manufacture				Overall Ocean Test							
									↑				1992.03 the second modification (R&D term: 14 years→16 years, add the offshore oil drilling)							
Second modification	Elemental technologies R&D				Systems Design · Manufacture				Offshore Oil Drilling				Overall Ocean Test							
									↑				1994.03 the third modification (R&D term: 16 years→17 years, add Cobalt-rich crusts)							
Third modification	Elemental technologies R&D				Systems Design · Manufacture				Offshore Oil Drilling				Overall Ocean Test							
									↑				1996.03 the fourth modification (Comprehensive ocean test was changed as ocean test: Budget cutting)							
Fourth modification	Elemental technologies R&D				Systems Design · Manufacture				Offshore Oil Drilling				Ocean Test							
Original Budget	0.5	6	18	24	40	40	30	20											Total	21.8 B¥
Revised Budget	0.5	9	12	14	11	10	8	10	11	10	8	9	10	13	10	10	14	Total	17.0 B¥	

Source: 日本産業技術総合研究所, 2004.

Table 4. Korea's national research program for manganese nodule mining system.

Annual	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
Year	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10		
Original Plan	Elemental technologies R&D							Systems design-manufacture							Overall ocean test				
First modification	Elemental technologies R&D									Systems design-manufacture				Overall ocean test					
Budget	1.8	2.7	3.7	5.5	7.5	4.1	5.0	5.1	7.7	17.5	24.0	26.0	30.0*					Total	14.1B₩

주: *2006년도 예산액은 미확정치.

채집노즐의 형상최적화, 유적식 내압모터 개발, 공기양광 기술, 양광관 설계최적화, 고양정 양광펌프, Flexible Hose, 광통신/제어기법 개발 등에서는 많은 연구개발 실적을 보유하고 있지만, 1997년에 수심 2,200 m 실험역에서

의 집광기 성능시험은 통합시스템을 대상으로 하지 않은 과제를 남기며 개발된 집광시스템은 기술혁신을 이루지 못했다는 평가를 받고 있다.

이에 비해 한국의 국가프로젝트 “망간단괴 채광시스템

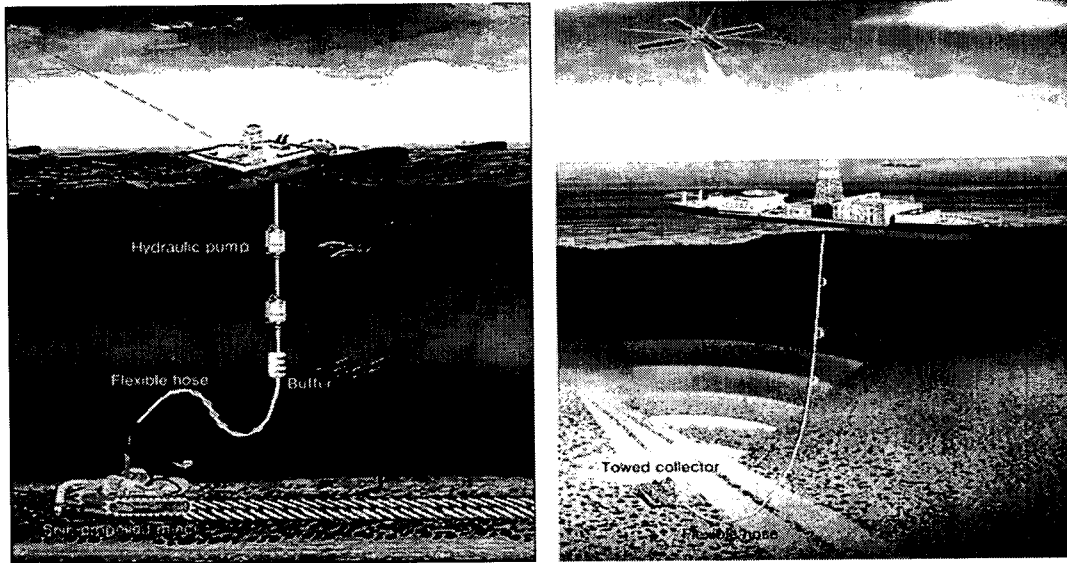


Fig. 6. Mining system for manganese nodule development in Korea (left) and Japan (right).

연구개발”은 상업적 개발을 목표로 한 R&D사업으로 내년 2006년도까지 총 140.6억원이 투자되어 일본에 비하면 10%도 되지 않는 투자실적을 보이고 있다(Table 4). 현재는 집광시스템에 대해서는 전산해석 모델을 이용한 통합 시스템의 시뮬레이션 기반 설계 기술, 양광시스템은 펌핑 시스템, 버퍼시스템 및 유연관시스템의 상용화를 위한 펌핑 시스템 및 유연관시스템의 소규모 실험과 버퍼시스템의 개념설계를 수행하고 있어 근해역 채광성능 시험을 통해 시뮬레이션 모델의 검증 및 시스템 성능 검증을 위한 본격적인 실증 성능시험이 시급히 요구되고 있는 실정이다(해양수산부 2004b). Fig. 6은 우리나라와 일본의 자항식과 예인식에 의한 채광시스템 개념도를 보여주고 있다.

이러한 상황에서도 해양종합실험 이후 우리나라는 일본보다 기술력 차원에서는 우위를 차지할 수 있을 것으로 전문가들은 예상하고 있다. 그렇지만 상용화 목표를 차질 없이 이행하기 위해서는 계획된 연구비의 안정적 확보가 선결되어야 가능할 것으로 여겨진다.

우리나라 외에도 현재 채광기술개발은 인도, 중국에서 활발히 이루어지고 있다(Yang and Wang 1997; Muthunayagam and Das 1999; Das 2001b; Yang and Tang 2003). 중국과 인도는 기초연구 단계를 넘어선 위치에 있으며 수심 150 m 호수집광시험 및 수심 410 m 실험역 모래채광시험(Fig. 7)을 통하여 엔지니어링 기술력이 축적된 것으로 평가되고 있다(Li and Zhang 1997; Deepak et al. 2001; Liu et al. 2003). 현 상황은 선진국과의 기술 격차를 줄일 수 있는 좋은 기회로서 한국, 인도, 중국 3국간의 기술개발 경쟁이 더욱 본격화될 것이며, 그 결과는 향후 기술적·경제적인 집중투자가 필요한 심해 파일럿 채광시

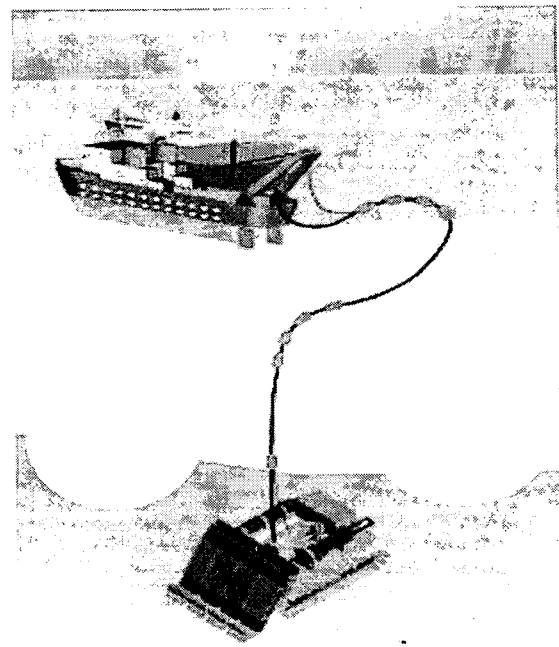


Fig. 7. India's proposed Flexible riser mining system.

험의 국제공동협력을 위해 유리한 전략적 기반확보 선점의 관건이 될 것으로 내다보고 있다.

또한 채광기술의 새로운 아이디어로서 Fig. 8에서 보듯이 노르웨이의 민간기업에서 불필요한 에너지효율 개선, 고장의 영향을 최소화하기 위해 Guided wireline lifting system을 개발한 것도 다시금 주목할 필요가 있다(Søreide et al. 2001).

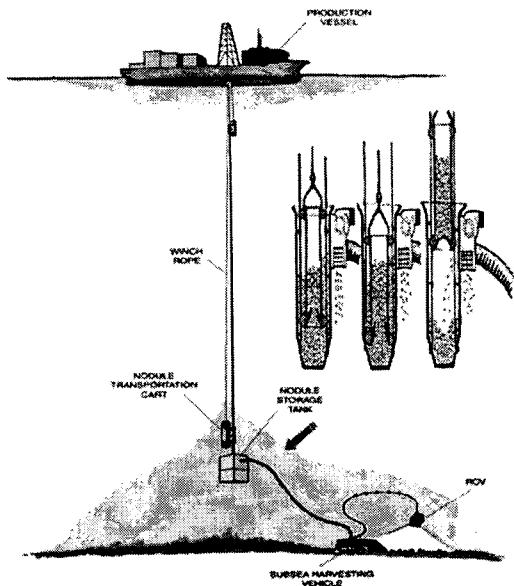


Fig. 8. Norway's proposed Guided wireline lifting system.

제련기술

망간단괴의 상업생산에 도달하기 위해서는 탐사·채광 뿐만 아니라 제련 기술개발을 추진해 나가는 것이 필수적이다. 망간단괴의 제련에 대해서는 현재까지 제안되고 있는 망간단괴의 처리법 중 실용화가 유망한 방법은 용련(溶鍊)-침출법, 배소(焙燒)-침출법, 직접 침출법 등 3가지로 크게 나눌 수 있다(Hubred 1980; 小島 1996; Zhong *et al.* 1999; Das 2001a; 남 등 2003). 이들은 모두 습식(濕式)처리방법으로써, 망간단괴가 함수율이 높은 저품위 복합광물이기 때문에 일관건식처리만으로는 많은 에너지 소비와 효율성이 저하되기 때문이다.

우리나라는 망간단괴로부터 유가금속들의 제련을 위한 단위공정기술(전처리, 환원용융, 침출, 분리·회수, 폐기물 처리)과 단위공정들의 조합인 일관제련공정 시스템 기술 그리고 플랜트 설계, 건설기술개발 등 제련 상용화 공정 확립을 위한 연구를 지속적으로 수행해 왔다(Park *et al.* 1995; Kim and Park 1997; 남 등 2004). 지금까지의 제련 연구는 주로 유가금속의 회수율에 중점을 두어 수행하여

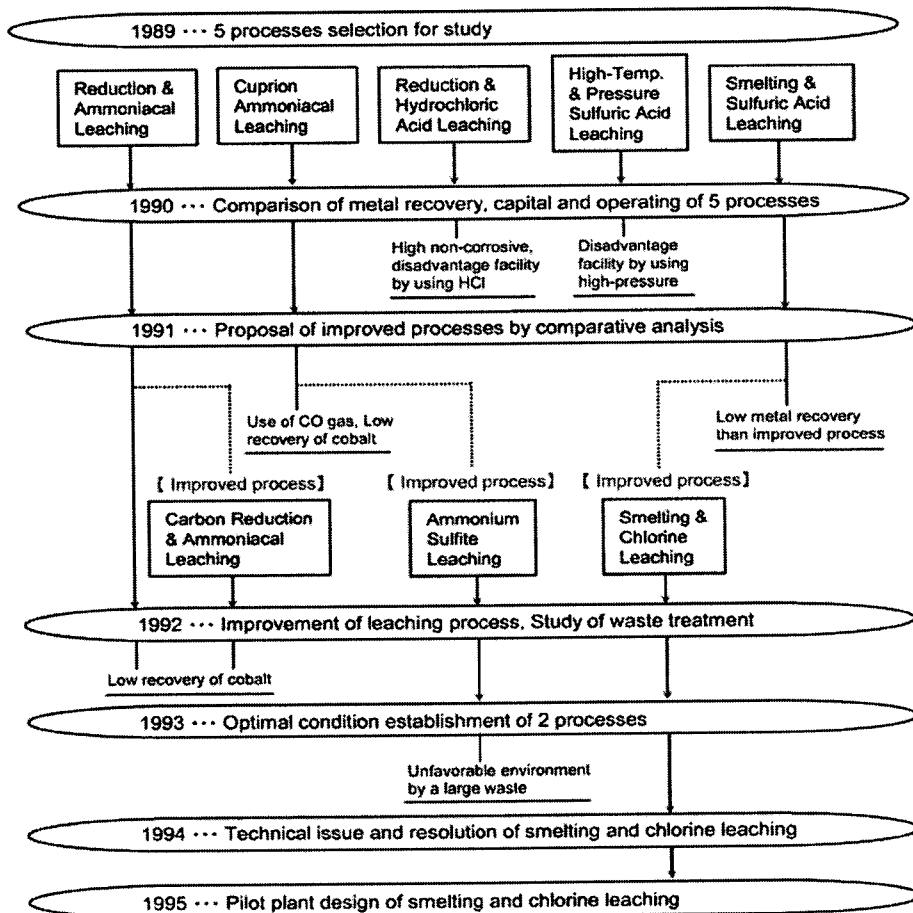


Fig. 9. Project studies on metallurgical processing of manganese nodules.

왔다면 앞으로는 이와 더불어 환경친화적이며 에너지절약 공정의 개발, 제련폐기물의 극소화 및 재활용 방안 그리고 망간의 경제적인 회수방법 등에 관한 기술개발을 추진목표로 설정하고 있다(해양수산부 2005b).

이에 비해 일본은 1989년부터 1995년까지 7년간 통산성 산하의 금속광업사업단과 일본자원환경연구소(현 산업기술종합연구소) 주도하에 住友금속광산(주)과 日鑛금속(주) 등 민간기업을 참여시킨 「심해저광물자원 유용금속 회수기술개발」 사업을 약 100억원을 투입해 실시하였다(深海底鉱物資源開發協會 1994, 1995; 小島 1996). 종래의 대표적인 5개 제련법을 동일 시료에서 비교·평가 실험하고, 또한 유망프로세스를 선정·개량하고 환경문제 해결을 위한 잔사처리실험까지 이루어진 종합적인 연구실험을 실시하였다(Yamazaki et al. 2004). 그 결과 용련황화·염산침출법을 최적 처리법으로 개발하였으며, 20톤/일 규모의 파일럿플랜트의 개념설계를 완성하였다(深海底鉱物資源開發協會 1995; 小島 1996). Fig. 9는 일본의 「심해저광물자원 유용금속 회수기술개발」 사업의 연구개발 추이를 정리하였다.

프랑스는 1972년 French Committee of Atomic Energy (CEA)에서 습식제련법, French Nickel Corporation(FNC)에서 건식제련법에 관한 연구를 하여 40여개의 가능성이 있는 제련공정을 평가하고 이들 중 최종적으로 암모니아 침출법, 황산침출법, 직접용융법을 유망공정으로 선택하여 규모확대실험(1톤/일)을 완료하였다(Charles et al. 1990).

또한 인도는 3개의 연구기관 즉, National Metallurgical Laboratory(NML)에서는 환원배소-암모니아 침출법, Regional Research Laboratory(RRL)에서는 암모니아-아황산 침출법, Hindustan Zinc Limited(HZL)에서는 고온고압 황산침출법을 수행하여 100 kg/일 규모의 파일럿 스케일 실험장치를 운용하였으며 이중 암모니아-아황산침출법을 선택하여 제작과 건설에 약 40억원을 투자하여 현재 500kg/일 규모의 파일럿 플랜트를 2001년 12월부터 운용 중에 있다(Das 2001b; Si et al. 2003).

중국의 제련관련 연구는 북경광야야금총원(BGRIMM)와 장사(長沙)소재 중국장사광야연구원(CRIMM)에서 1983년부터 제련관련 연구를 시작하였으며, 1991년 광구 등록과 더불어 2005년까지 15년 장기계획(1단계 '91~'95 실험실 규모, 2단계 '96~'00 규모확대 실험, 3단계 '01~'05 상용화기반 실험)으로 연구를 수행하여 왔다. 2001년부터는 건식용융-염산침출법과 암모니아침출법을 유망공정으로 선정하여 100 kg/일 규모확대 실험 중에 있으며 2006년부터는 500 kg/일 파일럿 스케일 실험을 계획 중에 있다(Zhong et al. 1999).

이를 통해 볼 때 우리의 제련연구는 단위공정 요소기술 개발 및 개선 수준에 머무르고 있는 기술수준을 규모확대

실험을 통한 운용기술 및 상용화 공정기술이 시급히 확립될 수 있도록 지속적인 투자가 필요하다.

환경영향평가

심해저 광업의 현실화를 위해서는 2000년 7월, 국제해저기구(ISA) 제76차 회의에서 승인된 광업규칙에 따라 ISA에서 제시한 환경지침(ISBA/6/LTC/CRP.2) 의무사항인 환경 모니터링을 통한 환경특성 및 자연변화량 파악과 인위적 환경교란에 의한 환경 변화량 연구 등이 수행되어 자원개발에 따른 환경파괴를 최소화하며, 환경친화적 채광기술 개발시 요구되는 환경특성자료가 제공되어야만 한다.

망간단괴 채광에 따른 해양환경의 영향을 평가한 최초의 시도는 미국의 해양대기청(NOAA)이 1975년부터 1980년에 걸쳐 실시한 DOMES(Deep Ocean Mining Environmental Study)이었다(ISOPE 2002). DOMES의 특징은 1) 1주일 정도의 단기적인 영향, 2) 5~10 km 범위의 근거리 영향, 3) 화학·물리 및 생물적인 영향에 대해서만 주목한 기초 환경조사였지만 최초의 파일럿채광실험의 모니터링이라는 점에서 커다란 의미를 가진다.

다음 단계로서 1989년부터는 실제로 집광기가 가동했을 때의 상황을 재현하여 저서생물군집에 미치는 영향을 실증하려는 시도가 계속되었다. 최초의 해저교란실험은 독일이 페루 앞바다에서 1989년부터 개시한 DISCOL(DISTurbance reCOLonization experiment)이었다(Schriever 1995). Plow-harrow이라 불리는 교란기를 78회에 걸쳐 가동해 집광기의 예항에 의한 직접적인 영향과 간접적인 영향을 교란 전, 직후, 반년 후, 3년 후 및 7년 후로 각각 설정하여 조직적인 모니터링 조사를 실시하였다. 이후 1991년 북태평양의 클라리온·클리퍼톤 해역에서 미국(ISOPE 2002) 주도의 BIE(Benthic Impact Experiment), 1995년 일본(Harada et al. 1995)이 실시한 JET(Japan's Deep-sea Experiment), 1996년 IOM(InterOceanMetal)이 실시한 IOM BIE(Radziejewska et al. 2001; Radziejewska et al. 2003), 그리고 1997년 인도양에 있는 인도광구의 일부에서 인도(Sharma 1999)가 실시한 INDEX (India Deep-sea Experiment) 등이 각각 실시되었다.

상기(上記)에서 실시한 해저교란실험의 조사내용을 정리해 보면, 망간단괴를 채광한 해역과 그렇지 않은 해역과는 근본적인 환경차이를 나타냈으며, 박테리아, 메이오벤토스, 매크로포너 등의 생물군은 교란 후에는 원래의 개체수까지 회복되어 교란의 영향은 줄어들 수 있다고 보고되고 있다(Schriever 1995; Harada et al. 1995). 또한 채광에 따른 환경영향은 강도와 근접도 등이 크게 영향을 미친다고 보고하고 있어 환경영향을 최소한으로 줄일 수 있는 채광기술을 확립하는 것이 무엇보다도 필요하다고 하

했다(ISOPE 2002; Radziejewska *et al.* 2003).

이러한 관점에서 고려해 본다면, 지금까지는 단지 실험 규모나 수준이 소규모 조사내용을 근거로 이루어졌기 때문에 상업적인 대규모 생산체제에서의 영향을 평가할 수 있는지에 대해서는 약간의 의문이 남아 있지만 각 나라와 연구기관이 수행해 온 조사내용은 매우 중요한 자료가 될 것이다.

향후 양광공정 과정과 그리고 선상에서 발생하는 미립자에 의한 표층의 환경영향을 포함해서 Plume의 퇴적물을 높이는 집광기 개발 등에 있어 국제협력체제가 구축되어 연구·검토될 수 있다면 망간단괴의 개발에 있어서의 환경영향은 충분히 해결될 수 있으리라 판단된다.

5. 향후 개발 전망

時松 *et al.*(2004)은 일본 환경성 지구환경연구종합추진사업의 일환으로서 2100년까지의 동 수급(需給) 시물레이션 연구에서 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 기후변동에 관한 정부간 패널)가 작성한 온실효과 가스나 황화산화물 배출예측을 위한 SRES(Special Report on Emission Scenario)에서 세계를 선진공업국형, 계획경제형, 개발도상국형, 그 외 지역형 등 4가지 지역으로 나누어, 미래사회상, 경제성장, 인구증가 등의 요인에 따라 배출량을 예측한 모델을 이용하여 동 광물자원의 수요량을 전망하였다.

그 결과, 동의 매장량이 전부 사용되는 것은 2008~2013년, 동의 예측(豫測)매장량이 전부 사용되는 것은 2015~2024년, 동의 채굴한계량이 전부 사용되는 것은 2047~2072년, 동의 총지각존재량이 전부 사용되는 것은 2075~2085년이라고 전망했다. 이에 따라 빠르면 2010년에는 동 공급부족현상이, 2050년에는 동 자원의 고갈가능성을 예고하고 있다. 이 보고는 2005년 미국지질조사소(U.S. Geological Survey)에서 발표한 동 금속의 육상채굴가능기간(Table 5)과 비교해 볼 때 10~15년 이내에 자원문제가 국가간 갈등요인으로 대두될 것이며 자원확보 경쟁이 그 어느 때보다 심화될 것이라는 전문가들의 예측과 무관하지 않다는 것을 시사한다(U.S. Geological Survey 2005). 이것은 국내적인 시각에서 추구하여 왔던 광구확보 전략과 함께 국제적인 동향변화에 능동적으로 대처하고 독자적 개발능력을 보유하기 위한 추진전략이 새로이 수립되어야 할 시기가 왔음을 의미한다.

자원개발에 있어서는 조사, 기술개발 등 준비기간이 10~15년, 또한 개발단계에 들어가서도 건설 및 테스트가동을 거쳐 실제의 금속이 생산되기까지는 최저 5년 정도가 필요하다.

이러한 점들을 종합하여 상업생산 시점을 예측해 본다

Table 5. Supply potentials of resources on land.

(Unit: thousand tons)

Metals	Production Reserves (A)	Reserve base (B)	Reserve base (C)	Supply potentials	
				B/A	C/A
Cu	14,500	470,000	940,000	32	67
Ni	1,400	62,000	140,000	44	100
Co	47	7,000	13,000	149	277
Mn	11,000	380,000	5,100,000	35	464

Source: USGS, Mineral Commodity Summaries, 2005. 1.

면 향후 심해저 망간단괴의 개발·이용을 위해서는 2010년까지 상업생산을 위한 기술개발 목표를 완료해야 할 필요가 있다. 채광시스템은 2007년 근해역 통합채광성능시험을 위한 육상성능시험과 집광기 및 양광시스템 설계·제작을 통해 상업생산에 필요한 집광과 양광 통합운용시스템의 최적 독자모델의 설계 완료가 필요하다. 또한 체련시스템은 최적 체련공정 기술개발과 체련상용화공장의 설계, 건설 및 운용기술의 확보가 우선적으로 이루어져야 할 과제이다.

물론 우리나라는 2010년까지 망간단괴 상용화를 위해 1,185억원을 투자하도록 「국가과학기술위원회」에서 의결한 바 있다(한국해양연구원 2005). 그러나 2000년 국과위 심의 이후 예산축소지원으로 2010년 이후 심해저 망간단괴 상용화 생산시스템 구축을 위한 핵심적인 기반기술 확보 계획에 차질이 발생하여 2003년 기술지도 작성을 통하여 근해역 통합채광성능시험을 2004년에서 2007년, 우선채광지역 선정을 2004년에서 2006년으로 재수정하여 단계별 추진 목표를 재설정한 바 있다. 원활한 연구비 투자에 의한 차질 없는 계획이행이 무엇보다도 시급히 요구되는 시기이다.

6. 고 찰

1994년부터 추진되어 온 우리나라의 심해저 광물자원 개발사업은 2010년도까지 총 사업비 1,186억원을 투자하여 상업적 개발을 목표로 R&D사업을 추진할 예정이나 올해 2005년도까지 총 483.6억원만이 투자되어 41%의 투자실적을 보이고 있는 실정이다(한국해양연구원 2005). 특히 2000년 국가과학기술위원회 의결 이후 2005년까지 5년 동안 총투자비의 30% 밖에 투자가 이루어지지 않아 2006년 이후에도 현재 규모(년 60억원, 2005년)의 투자가 이루어질 경우 상업생산 기반구축 목표 달성까지는 12년 정도 소요될 것으로 예상된다. 일본의 기술수준에 도달하기 위해서는 투자규모를 일본의 90% 수준까지는 증가시키는 방안과 함께 채광, 체련 더 나아가서는 환경 모니터

랑까지 조직적으로 일체화된 추진방향을 가지고 적극적인 기술개발이 추진되어야 할 것이다.

아시아의 동반자이면서 경쟁국인 중국은 국가해양국(SOA) 지원 하에 중국심해저개발협회(COMRA)를 중심으로 '76년 이후부터 적도태평양지역, 중부태평양지역, 동부태평양지역을 대상으로 탐사가 이루어져 총 탐사면적은 200만 km², 총 투자비는 1억9600만불을 투입하면서 심해저광물자원개발에 필요한 모든 조치를 강구하고 있음을 볼 수 있다(해양수산부 1995). 인도의 경우에 있어서도 독일·노르웨이 등 기술선진국과의 공동연구를 통하여 기술 도입을 추진하면서 실험을 통해 실용화 단계에 까지 진입하였다(Deepak et al. 2001). 특히, 중국의 심해저 자원개발의 추진현황은 우리보다 풍부한 자원을 갖고 있음에도 불구하고 한국과 비교할 수 없는 규모로 추진하고 있다는 것은 자국의 산업화를 지속적으로 유지, 발전시키는데 필요한 공급원 확보를 위해 심해저 자원개발에 전력하고 있다는 것을 의미한다.

향후 금속가격과 수급동향이 어떻게 변화할 것인지에 대한 장기적인 정확한 예측은 어려운 일이지만, 최근의 금속가격을 기준으로 안정적인 금속가격이 유지될 수만 있다면 망간단괴에 있어서의 상업적 개발 가능성은 과거와는 달리 새로운 전환국면을 맞이할 수 있으리라 기대된다. 물론, 전술한 바와 같이 우리는 아직까지 독자적인 상업적 수준의 기술개발 축적에는 이르지 않아 기술적인 측면에서의 기술력 확보가 무엇보다도 선행되어야 할 것이다. 이에 따라 2007년도에 계획된 근해역 통합채광성능시험과 2010년도에 계획된 실험역 통합채광성능시험은 열악한 환경이지만 반드시 실현되어 독자적인 상업적 수준의 기술개발이 이루어져야 할 것이다.

최근 많은 국제회의에서 선진국들은 우리의 심해저 자원개발 수준에 대하여 주목하고 있다. 한 예로 프랑스는 계약자로서 많은 탐사연구 자료를 축적하고 있음에도 불구하고 우리나라에 공식적으로 심해저 광물자원 탐사의 공동연구를 제안하고, 일본이나 인도도 한국과의 기술개발 공동연구를 조심스럽게 제안하고 있다. 이러한 결과는 선진국이 바라보는 한국의 심해저자원개발사업에 대한 인식이 크게 변하고 있음을 의미한다.

7. 결 론

이상으로 심해저 망간단괴 개발사업의 국제기술동향과 향후 개발 전망을 분석해 보았다. 일부에서는 안정적 자원 수급의 방안으로 석유개발과 같이 해외 육상자원개발을 대안으로 제시하고 있지만 육상자원개발은 투자비용과 개발여건 악화, 탐광의 High Risk, 광산개발의 경우 환경·지역주민의 문제와 안전·위생 관련설비의 해결이 요구되

고 있어 지속가능한 개발을 위해서는 해저광물자원개발이 효과적이라 할 수 있다. 또한 자원수급전략에 있어서 가장 중요한 것은 기술력이 국제적인 수준에 있다 할지라도 우리의 필요와 의지에 의해 생산하고 공급할 수 있는 독자적인 공급원을 확보하고 있어야 한다는 것이다.

최근 선진국들은 금속가격의 상승으로 인해 심해저 자원개발을 국가전략사업으로 재수정하고 적극적으로 재개하려는 움직임을 보이고 있다. 캐나다가 자원개발을 위해 유엔해양법협약에 비준하였으며, 심해저 자원개발기술을 선도하고 있는 미국이 유엔해양법협약 비준을 서두르고 있다. 유럽에서는 독일이 ISA에 광구를 등록하였으며, 프랑스가 태평양지역의 자국광구에서의 탐사 재개와 함께 국제공동 환경조사 참여발표 등 심해저 광업의 선도적 기술력을 보유하고 있는 국가들이 활발하게 움직이고 있는 것으로 분석되고 있다.

선진국의 동향변화는 후발국의 산업화가 급속하게 전개됨에 따라 자원확보 경쟁이 심화될 것이라는 판단 하에 광물자원의 해외의존 수급정책에서 자급을 위한 독자적 공급원 확보정책으로 전환하기 위해 심해저 자원개발로 변경하고 있음을 의미한다.

심해저 자원이 상업생산단계에 진입하면 한 국가가 독자적으로 개발하는 형태가 아니라 심해저 광구를 확보하고 있는 국가간 콘소시엄으로 추진될 것으로 전망된다. 콘소시엄 형태의 참여는 자본이나 기술 중 어느 것 하나를 갖고 있어야만 가능하다. 우리나라가 개발단계의 콘소시엄에 주도적으로 참여하기 위해서는 선진국과 경쟁력을 갖출 수 있는 심해저 개발 기술력의 조기확보가 필요하다. 이것은 당장 개발하지도 않을 심해저 자원개발에 왜 투자를 하고 있는가? 라는 질문에 현재 심해저 광구를 확보하고 있는 국가들이 심해저 자원개발 전략을 수정하면서 서까지 추진하는 데에서 그 이유를 찾을 수 있다.

앞으로 심해저 자원개발은 고부가가치 산업발전과 첨단 산업사회의 혜택을 국민들이 누릴 수 있는 시금석이 될 것이며, 급변하는 자원확보 경쟁의 시대에서 안정적 산업 발전을 유도할 수 있는 안전장치가 될 것이다. 심해저자원 개발에 대한 국가추진전략의 패러다임이 현시점에서 전환되어야 하는 이유가 여기에 있는 것이다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 “2005 심해저 광물자원개발(PM32105)” 연구의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

김형우, 홍섭, 최종수. 2004. 점착성 연약지반 주행차량의 동

- 적거동 연구. *Ocean and Polar Res.*, 26(2), 323-332.
- 남철우, 김병주, 박경호. 2003. 환원배소-용융에 의한 망간단괴로부터 코발트, 니켈, 구리회수. *한국지구시스템공학회*, 40(3), 191-197.
- 남철우, 박경호, 김홍인. 2004. (Cu-Ni-Co-Fe)계 매트리의 고온 고압 황산침출연구. *한국지구시스템공학회*, 41(5), 413-417.
- 小島和浩. 1996. マンガン團塊の製銅技術の開発. *資源と素材*, 112(14), 968-973.
- 繩田和満. 2001. 1990年代のベースメタルの生産量と價格の分析について. *資源と素材*, 117(4), 968-973.
- 時松宏治, 伊藤俊秀, 新熊隆嘉, 古川和彦, 荻原俊輔, 小寺隆信, 西山孝. 2004. IPCC의 SRES 시나리오에に基づく 2100년までの銅의需給シミュレーション. *資源と素材*, 120, 681-687.
- 深海底鉱物資源開發協會. 1994. 平成5年度深海底礦物資源有用金屬の回收技術開發調査報告書, 304 p.
- 深海底鉱物資源開發協會. 1995. 平成6年度深海底礦物資源有用金屬の回收技術開發調査報告書, 342 p.
- 이동길, 윤치호, 박용찬, 권석기, 성원모. 2004. 30 m급 육상 양광시험시스템의 제작과 실험 연구. *한국지구시스템공학회*, 41(6), 443-449.
- 猪熊明, 岡田久, 尾山哲夫. 1996. 國家プロジェクト「マンガン團塊採掘システム」. *資源と素材*, 112(14), 974-983.
- 최종수, 홍섭, 김형우, 이태희. 2004. 직교배열표 실험계획법에 의한 심해 연약지반 무한궤도차량의 견인성능에 대한 실험적 연구. *Ocean and Polar Res.*, 26(2), 333-339.
- 澤田賢治. 2004. アジアの經濟成長と金屬の需給動向. *大陸棚延長とその資源的重要性を考えるシンポジウム*, 資源・素材學會 海洋資源部門委員會, 8-15.
- 한국해양연구원. 2005. 심해저 광물자원개발사업. 과기부혁신본부 보고자료, 27 p.
- 해양수산부. 1995. '95년 심해저 광물자원탐사 보고서 III. 유엔해양법협약 및 국제해저기구동향분석분야.
- 해양수산부. 2001. 2000년 심해저 광물자원탐사 보고서 III. 심해저 자원개발 제도분석 및 기술발전 전략연구.
- 해양수산부. 2003. 심해저 광물자원개발 로드맵.
- 해양수산부. 2004a. 2003년 심해저 광물자원개발 보고서 I. 자원탐사 및 환경연구.
- 해양수산부. 2004b. 2003년 심해저 광물자원개발 보고서 IV. 심해저 광물자원개발 기술연구.
- 해양수산부. 2005a. 2004년 심해저 광물자원개발 보고서 I. 자원탐사 및 환경연구.
- 해양수산부. 2005b. 2004년 심해저 광물자원개발 보고서 III. 심해저 광물자원 개발기술연구.
- Andrews, B.V., J.E. Flipse, and F.C. Brown. 1983. The economic viability of a four-metal pioneer deep ocean mining venture. Texas A&M Univ., College Station, Texas. 201 p.
- Bath, A.R. 1989. Deep sea mining technology: recent developments and future projects. *Proc. 21st Offshore Tech Conf.*, No 5998.
- Charles, C., G. Herrouin, F. Mauviel, and J. Bernard. 1990. Views on future nodule technologies based on IFREMER-GEMONOD studies. *Mater. Soc.*, 14, 299-326.
- Das, R.P. 2001a. India's demonstration metallurgical plant to treat ocean nodule. p. 163-169. In: *Proc. 4th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Szczecin, Poland.
- Das, Sh. S.K. 2001b. Indian polymetallic nodule programme. p. 14-19. In: *Proc. 4th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Szczecin, Poland.
- Deepak, C.R., M.A. Shajahan, M.A. Atmanand, K. Annamalai, R. Jeyamani, M. Ravindran, E. Schulte, R. Handschuh, J. Panthel, H. Grebe, and W. Schwarz. 2001. Developmental test on the underwater mining system using flexible riser concept. p. 94-98. In: *Proc. 4th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Szczecin, Poland.
- Harada, K., Y. Shibamoto, and H. Kokubun. 1995. Chemical and radiochemical studies of sediment samples from the JET site. p. 187-192. In: *Proc. first ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, Japan.
- Hong, S., J.-S. Choi, J.-H. Kim, and C.-K. Yang. 1999. Experimental study on hydraulic performance of hybrid pickup device of manganese nodule collector. p. 69-77. In: *Proc. 3rd ISOPE Ocean Mining Symp.*, Goa, India.
- Hong, S. and J.-S. Choi. 2001. Experimental study on grouser shape effects on trafficability of extremely soft seabed. p. 115-118. In: *Proc. 4th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Szczecin, Poland.
- Hubred, G.L. 1980. Manganese nodule extractive metallurgy review 1973-1978. *Mar. Mining*, 2, 191-212.
- International Society of Offshore and Polar Engineers. 2002. Deep seabed mining environment: Preliminary engineering and environmental assessment. Special Report OMS-EN-1. 19 p.
- Kim, D.-J. and K.-H. Park. 1997. Study on the leaching mechanism of Cu and Ni from deep-sea manganese nodules with hydrochloric acid. p. 172-176. In: *Proc. 2nd ISOPE Ocean Mining Symp.*, Seoul.
- Kotlinski, R. 1995. InterOceanMetal Joint Organization: achievements and challenges. p. 5-8. In: *Proc. 1st ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, Japan.
- Li, L. and J. Zhang. 1997. The China's manganese nodules miner. p. 95-99. In: *Proc. 2nd ISOPE Ocean Mining Symp.*, Seoul, Korea.
- Liu, S., G. Wang, L. Li, Z. Wang, and Y. Xu. 2003. Virtual reality research of ocean poly-metallic nodule mining based on COMRA's mining system. p. 104-111. In: *Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, Japan.

- Muthunayagam, A.E. and S.K. Das. 1999. Indian polymetallic nodule program. p. 1-5. In: *Proc. 3rd ISOPE Ocean Mining Symp.*, Goa, India.
- Park, K.-H., B.-S. Roh, and D.-J. Kim. 1995. The adsorption behavior of copper ion manganese nodules. p. 223-227. In: *Proc. 1st ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, Japan.
- Radziejewska, T., J. Rokicka-Praxmayer, and V. Stoyanova. 2001. IOM BIE revisited: Meiobenthos at the IOM BIE site 5 years after the experimental disturbance. p. 63-68. In: *Proc. 4th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Szczecin, Poland.
- Radziejewska, T., K. Szamalek, and R. Kotlinski. 2003. Marine environment in the IOM area (Clarion-Clipperton region, subtropical Pacific): Current knowledge and future needs. p. 188-193. In: *Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, Japan.
- Schriever, G. 1995. DISCOL-Disturbance and recolonization experiment of a manganese nodule area of the Southeastern Pacific. p. 163-166. In: *Proc. 1st ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, Japan.
- Sharma, R. 1999. Indian Deepsea Environment Experiment (INDEX): Achievements and applications. p. 118-125. In: *Proc. 3rd ISOPE Ocean Mining Symp.*, Goa, India.
- Si, S., S. Anand, C.-W. Nam, K.-H. Park, and R.P. Das. 2003. Dissolution studies on Cu-Ni-Co-Fe matter obtained from manganese nodules. p. 231-237. In: *Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, Japan.
- Sørdeide, F., T. Lund, and J.M. Markussen. 2001. Deep ocean mining reconsidered a study of the manganese nodule deposits in Cook Island. p. 88-93. In: *Proc. 4th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Szczecin, Poland.
- U.S. Geological Survey. 2005. Mineral Commodity Summaries 2005. 197 p.
- Yamazaki, T., S.-H. Park, and S. Shimada. 2004. Review of Japan's R&D results for manganese nodule processing and an economic re-evaluation. p. 223-227. In: *Proc. 1st ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, Japan.
- Yang, N. and M. Wang. 1997. New era for China manganese nodules mining: Summary of last five years' research activities and prospective. p. 8-11. In: *Proc. 2nd ISOPE Ocean Mining Symp.*, Seoul, Korea.
- Yang, N. and H. Tang. 2003. Several considerations of the design of the hydraulic pick-up device. p. 119-122. *Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba, Japan.
- Yoon, C.-H., K.-S. Kwon, O.-K. Kwon, S.-K. Kwon, I.-K. Kim, D.-K. Lee, and H.-S. Lee. 2000. An experimental study on lab scale air-lift pump flowing solid-liquid-air three-phase mixture. p. 515-521. In: *Proc. 10th Int Offshore and Polar Eng Conf.*, Seattle, I.
- Zhong, X., Z. He, Y. Shen, Y. Mao, S. Qu, and X. Li. 1999. The smelting-rusting-solvent extraction process to recover valuable metals from polymetallic nodules. p. 227-231. In: *Proc. 3rd ISOPE Ocean Mining Symp.*, Goa, India.

Received Nov. 30, 2005

Accepted Dec. 12, 2005