

Article

해저열수광상 상업개발을 위한 국제동향분석과 국가대응전략

박세현\* · 양희철 · 이문숙

한국해양연구원 해양정책연구실  
(425-600) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Strategies for the Commercial Development of Seafloor Hydrothermal Deposits in Consideration of International Progress

Se-Hun Park\*, Hee-Cheol Yang, and Moon-Suk Lee

*Ocean Policy Research Division, KORDI  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

**Abstract :** Hydrothermal deposits on deep-sea floors are expected to provide potential metal resources for future demands. Korea was recently granted a prospecting licence to undertake exploration for hydrothermal metal deposits in the exclusive economic zone (EEZ) of the Kingdom of Tonga in the Pacific Ocean. The Korean Deep Seabed Mining Group (KDSMG), which consists of four Korean companies involved in marine technologies, oil and gas shipping, and smelter industries, has conducted research to evaluate the region's resource potential in cooperation with the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) of Korea. Here we present and reflect on the exploration results of these companies and their strategic plans. We also evaluate Research and Development (R&D) progress for the commercial development of seafloor hydrothermal deposits. Our own strategies and prospects for the commercial development of this potential resource are also outlined. We do acknowledge that other potentially important information regarding the amount of ore body, the inside structure, and the metal yields have not yet been clarified sufficiently. As such it is necessary to address these problems through experimental R&D and surveys.

**Key words :** seafloor hydrothermal deposits, commercial development, exploration, feasibility study, exclusive economic zone of Kingdom of Tonga

1. 서 론

지금 세계 각국은 고갈되어가는 육상 자원에서 탈피, 해양에서 이를 만회하고자 심해저자원 개발에 심혈을 기울이고 있다. 이중 상업적 개발이 가장 빠를 것으로 예상되는 해저열수광상은 구리, 납, 아연 등 산업발전에 필수

적인 베이스금속과 금, 은 등 귀금속을 다량 포함하고 있어 국가의 금속 광물 수급 안정화에 중요한 기반을 제공할 수 있으리라 평가된다(Hekinian et al. 1980; Fouquet et al. 1991; Nawab 2001). 이러한 기대에 중국과 인도 등 신흥 세력국을 비롯하여 외국 민간 광업회사<sup>1)</sup>도 금속광물 자원 확보에 가세하고 있다는 점에서 정부차원의 장기적

<sup>1)</sup><http://www.nautilusminerals.com/i/pdf/NautilusNewsJanUSLetter.pdf>

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

이고 집중적인 투자가 요구된다.

해저열수광상 개발 사업은 이미 고품위 부존량의 광구 확보가 가능하다는 것이 확인되었고, 향후 효율성과 안전성이 제고된 개발기술이 확보된다면 광물자원의 안정적 공급원 확보와 함께 고부가가치 신해양산업을 창출할 수 있다는 평가가 지배적이다. 특히, 에너지광물자원에 대한 해외 의존도가 절대적인 우리나라의 산업구조로 볼 때, 해저열수광상 개발은 지속적 경제성장을 확보하기 위한 중요한 파라미터로 작용할 수 있다는 점에서 국정 과제로서의 과감한 투자가 요구된다(해양수산부 2007). 물론, 심해저 자원 개발에 대한 국가적 차원에서의 노력과 투자 집중을 위한 조치는 이루어진 바 있으나, 광구 선정을 위한 전제로서의 예비투자와 첨단 과학 기술 개발 노력의 정도는 여전히 의문이다.

주지하는 바와 같이, 우리나라의 해저열수광상개발 사업은 지난 2000년 국가과학기술위원회에서 의결된 “심해저 광물자원개발사업 추진계획”에 따라 본격적으로 추진되었고, 2008년 3월 남서태평양 통가 EEZ내에서 해저열수광상 독점 탐사권을 확보하는 성과로 이어졌다(국토해양부 2008). 이후 정부는 상업화의 조기 추진을 위하여 동년 12월에는 대우조선해양(주), 삼성중공업(주), SK네트웍스(주), LS-Nikko동제련(주) 등 4개 기업과 상업개발을 위한 정밀탐사를 수행하는데 있어 3년간 총 120억원의 투자협정계약을 체결, 상업생산의 조기화를 위한 정밀탐사를 추진함으로써 심해저 자원이 국가 신성장동력의 중요한 축임을 다시 한번 확인한 바 있다(국토해양부 2009).

해저열수광상 개발 사업이 순조롭게 추진되어 상업생산으로 이어진다면 개발시스템으로부터 검증된 기술은 타 기술과의 직접적인 융합을 통하여 새로운 부가가치를

창출할 수 있을 뿐만 아니라 타 기술들끼리의 융합을 촉매하는 시너지 효과도 제고할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

이에 본고에서는 우리나라 해저열수광상 상업개발의 효과적 추진방안을 모색하고 연구자들이 기술개발 추진시 참고할 수 있는 정책정보의 제공을 우선적 과제로 설정하였다. 이를 위해 해외 민간기업을 포함한 주요국의 분야별 사업추진 현황과 핵심기술개발 성과 및 잠재력 분석을 수행하였다. 특히, 통가 독점 탐사권 해역에 대한 재무적 예비타당성 분석을 통해 해저열수광상 자원개발 정책의 객관성과 효율성 제고 방안을 제언하고자 한다.

## 2. 주요 해외기업의 활동

### 노틸러스사

해저열수광상개발의 선두주자로 평가받고 있는 캐나다의 노틸러스사(Nautilus Minerals Inc.)는 2012년 파푸아뉴기니의 Solwara 1 해역에서 세계 최초의 상업생산을 목표로 사업을 추진 중에 있다. 노틸러스는 이미 2008년 2월에는 자원량 평가<sup>2)</sup>와 상업개발을 위한 기술·경제적 사업타당성 평가를 완료하고, 동년 10월에는 파푸아뉴기니 정부에 개발권(Mining Lease)을 신청하였다. 최근 2009년에는 환경영향평가서(Environment Impact Statements)의 최종 승인을 얻으면서 상업개발을 위한 제반여건을 확보한 상태에 있다.

현재, 노틸러스사는 2009년 6월말 기준으로 해저열수광상의 광구 선점을 통해 파푸아뉴기니, 통가, 솔로몬제도, 피지, 뉴질랜드에 약 230,000 km<sup>2</sup> 이상의 면적을 확보하였으며, 약 280,000 km<sup>2</sup> 면적에 해당하는 탐사권을 신청<sup>3)</sup> 중에 있다.

Table 1. Tenements of Nautilus as at January 2009

Location	Total Tenements Granted		Tenement Applications Underway		Total (km <sup>2</sup> )
	Number	Total Area km <sup>2</sup>	Number	Total Area km <sup>2</sup>	
PNG	73		18		200,000
Tonga	16	77,500	28	128,000	
Fiji	0	0	14	63,000	
Solomon Islands	14	8,200	0	0	
New Zealand	0	0	1	48,200	
Total	103	≈ 250,000	61	≈ 275,000	≈ 520,000

Source : Nautilus Minerals, <http://www.nautilusminerals.com/s/Tenements.asp>

<sup>2)</sup>임무는 Golder Associates사가 수행하였으며, 결과보고서는 노틸러스사 홈페이지 참조([http://www.nautilusminerals.com/i/pdf/2008-02-01\\_Solwara1\\_43-101.pdf](http://www.nautilusminerals.com/i/pdf/2008-02-01_Solwara1_43-101.pdf))

<sup>3)</sup>Nautilus Minerals, <http://www.nautilusminerals.com/s/Tenements.asp>

또한, 2008년 통가와 파푸아뉴기니<sup>4)</sup>에서는 6개월간 수행된 탐사 및 환경프로그램인 Pipeline Project를 수행하였고, 2009년에는 비스마르크, 우들라크, 솔로몬제도에서 Fugro Solstice호(전장 70.25 m, 2,397톤, DP2, ROV 장착)를 활용한 탐사 프로그램을 수행한 바 있다.

특히, Pipeline Project에서는 ROV 기능과 드릴 장비를 탑재한 Nor Sky호를 활용하여 통가 EEZ의 75,000 km<sup>2</sup> 면적에서 12개의 해저열수광상을 발견하였다. 2009년에는 호주해양국방시설인 Southern Surveyor호를 활용하여 통가 바신해역의 Nuku'alofa 샘플에 대한 평가를 진행, 구리 12.6%, 금 34.0 g/t, 아연 60.9%, 은 185 g/t의 함유량을 가진 광상을 발견하는 성과를 이루어 내기도 하였다(국토해양부 2009).

채광장비와 관련해서는 2007년 12월 세계 최초로 채광비(ROV SMS mining machines)를 제작하기 위하여 영국의 Soil Machine Dynamics(SMD)사<sup>5)</sup>와 계약을 체결<sup>6)</sup>(채광로봇 2대, 6,600만 달러)하였고, 채광선은 2009년 노르웨이의 North Sea Shipping AS를 통해 선체 계약을 체결한 바 있다. 선체는 전장 153.6 m, 폭 30 m, 배수톤수 14,200톤, 작업가능 수심 2,500 m, 갑판 면적 2,900, 승선

인원 120명의 규모로서 2010년 장비 탑재 절차가 완료될 예정이었으나, 세계적 경기 침체로 추진이 다소 연기된 상태다. 특히, 양광시스템의 설계 및 제작을 위해서도 공개 입찰 방식을 통해 2008년 4월초 Technip USA Inc를 최종 선정하여 1억 1,600만 달러에 공급계약<sup>7)</sup>을 체결할 예정이었지만, 2010년 이후로 늦춰진 것으로 알려져 있다.

노틸러스사의 해저열수광상 상업개발과 관련하여 주목할 만한 것은, 그 동안 노틸러스사 해저열수광상 사업 추진의 최대 난관으로 회자된 환경영향평가서 승인을 파푸아뉴기니 정부로부터 획득하였다는 것이다. 세계 15개 연구기관 및 전문가들이 참여하여 2년간에 걸쳐 작성한 환경영향평가 결과가 2009년 12월에 최종 환경허가(Environmental Permit) 승인을 받게 됨으로써, 노틸러스는 향후 2035년까지 25년간 안정적이고 탄력적인 해저열수광상 사업을 진행할 수 있는 조건을 확보하게 되었다.

**넵툰사**

영국에서 설립(1999년)된 넵툰사(Neptune Minerals PLC)<sup>9)</sup>의 해저열수광상 탐사면허 취득지역과 신청지역은 전 세계 해역을 대상으로 추진되나, 현재에는 기존 학술적

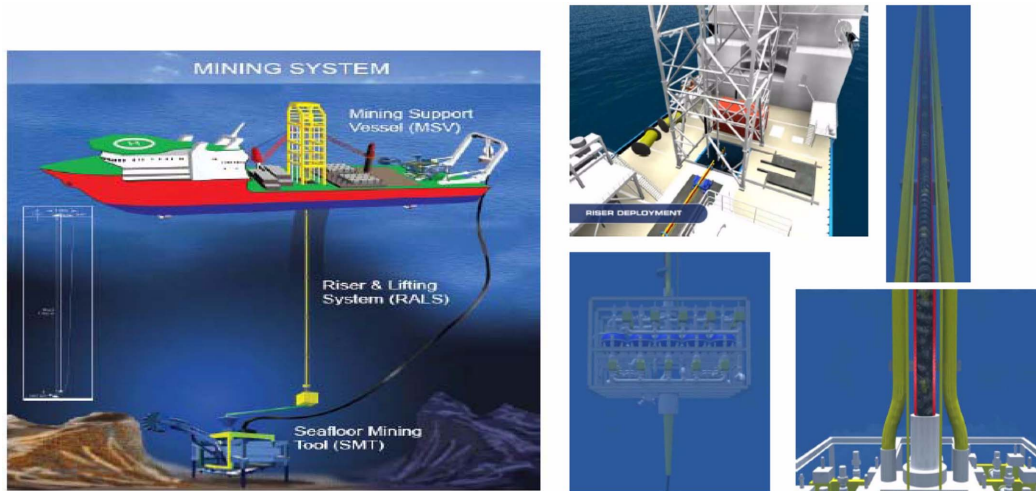


Fig. 1. Nautilus's proposed mining system and lift system

<sup>4)</sup>조사는 전장 50 m의 MV Sepura호를 이용하여 33일의 항행일정으로 3월 26일에 시작됨. 노틸러스사 2008. 3. 31일자 New Release

<sup>5)</sup>영국 SMD사(www.smd.co.uk)는 에너지, 통신, 광업분야에서 이용되는 복잡한 해양굴착시스템의 설계 및 제조를 전문하는 세계적으로 유명한 회사

<sup>6)</sup>계약은 다수의 ROV 및 채광장비제작 회사가 지원할 수 있도록 공개경쟁입찰 방식으로 이루어졌으며, 최종 업체 선정까지 약 4개월이 소요

<sup>7)</sup>공급될 양광시스템에는 심해펌프, 양광파이프, 양광핸들링시스템, 부속갑판장비가 포함. 2008. 4. 3일자 노틸러스사 News Release

<sup>8)</sup>College of William and Mary(미국)와 Duke University(미국), Scripps Institution of Oceanography(미국), University of Toronto(캐나다), Woods Hole Oceanographic Institution(미국), CSIRO(호주), Hydrobiology(호주), University of Papua New Guinea(파푸아뉴기니), Coffey Natural Systems(호주), Rabaul Volcano Observatory(파푸아뉴기니), Asia Pacific Applied Science Associates(호주), Australian National University(호주), Curtin University of Technology(호주), James Cook University(호주), Charles Darwin University(호주)

<sup>9)</sup>www.neptuneminerals.com

연구 결과를 토대로 도출된 발견과 상업적 개발 잠재력이 있는 해역에 집중되어 이루어지고 있다. 해저열수광상 분야에서는 가장 선구적이라 할 수 있는 노틸러스사와는 규모와 탐사지역 등의 투자 면에서 여전히 열세에 있으나, 넵튠사의 향후 사업 방향은 세계 해저열수광상 상업화의 조기화에 중요한 역할을 발휘할 것임은 분명해 보인다.

넵튠사는 2006년 약 54억원을 투자하여 뉴질랜드 Kermadec 해역<sup>10)</sup>의 광구 확보 탐사를 수행하였으며, 2007년에는 약 50억원을 투자하여 C&C Technologies<sup>11)</sup>와 23개 드릴링작업을 포함한 Trident Project 정밀탐사, AUV조사를 수행한 바 있다. 해당 연구결과는 2008년 7월 뉴질랜드 정부에 Rumble II West 해저산을 중심으로 한 Kermadec 탐사광구(PL39-195)의 첫 채광면허 신청으로 이어졌으며, 현재 2014년 시험채광 목표를 차질없이 달성하기 위하여 회사의 전문인력을 보강하는 등 탐사단계에서 개발단계로 전환하기 위한 준비에 만전을 기하고 있다.

또한 시스템 개발을 위한 노력으로 2007년 10월에 프랑스의 해양엔지니어링회사인 Technip<sup>12)</sup>과 네덜란드의 준설회사인 Boskalis<sup>13)</sup>을 통해 해저열수광상 상업개발을 위한 상용기술 적용가능성 분석연구를 수행하였고, 기존의 해저채광 및 양광, 처리시스템 관련 장비와 기술을 확인·분석하여 이들의 유효성과 운영상의 신뢰성, 성능 및 환경

적 문제 등을 평가<sup>14)</sup>하였다. 이를 통해 해저열수광상의 총 채광비용은 톤당 145~162달러, 고품위 유용광석의 가치는 톤당 500~2,000달러로 전망하고 있다.

향후, 넵튠사는 결과 보고서에 기초하여 파일럿 테스트 및 채광 예비타당성 연구를 진행할 예정으로 있으며, 현재 Kermadec의 상업개발을 위한 파트너로서 채광시스템을 BOO(Build Own and Operate) 사업방식으로 추진하기 위한 준설회사들을 물색하고 있는 중이다.

### 3. 주요국의 정책동향

#### 일본

해양에 대한 종합적·체계적인 정책 추진을 위해 해양기본법(2007)을 제정한 일본은 2008년 3월 해양기본계획을 통해 자국의 영해, 배타적 경제수역, 대륙붕에서 에너지·광물자원의 탐사 및 개발을 최우선 목표로 설정하였다. 또한, 지난 2009년 3월에는 경제산업성 자원·에너지청이 중심이 되어 해저열수광상에 대한 조사 및 개발을 위해 해양에너지·광물자원개발계획<sup>15)</sup>을 발표한 바 있다. 이에 따르면 우선적으로 자원 부존상황 등을 정확하게 파악하고 국가 주도 하에 기초조사 및 기술개발, 본격적인 탐사 및 개발이라는 추진 방향을 설정하고 있다. 해당 계

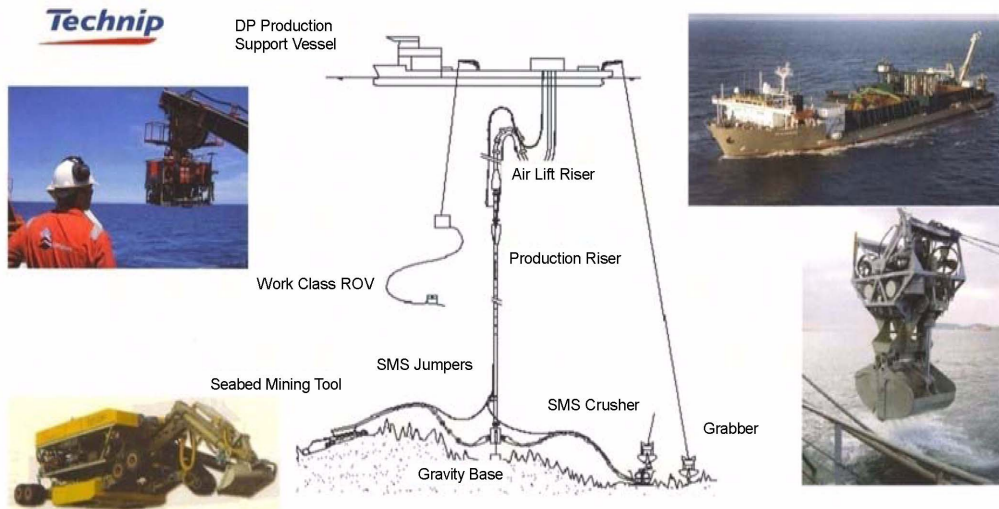


Fig. 2. Neptune's mining scoping study proposal utilising existing technology

<sup>10)</sup>Kermadec 광구(PL 39-195)는 뉴질랜드 해안으로부터 80 km 정도 떨어져 있으며, 약 400 km에 걸쳐 12개의 해저화산이 존재

<sup>11)</sup>www.cctechnol.com

<sup>12)</sup>www.technip.com

<sup>13)</sup>www.boskalis.com

<sup>14)</sup>www.neptuneminerals.com/en/News-2008

<sup>15)</sup>해양기본계획에서는 이 개발계획에 대해 i) 목표 달성에 이르기까지의 탐사 개발 방법, ii) 이를 위해 필요한 기술 개발, iii) 국가, 연구기관 및 민간기업이 수행해야 할 역할 분담 등을 명시해야 한다고 규정하고 있다

획에 의하면, 제1기에 해당되는 2009년에서 2012년, 제2기에 해당되는 2013년부터 2018년까지의 기간동안 자원량 평가, 환경영향평가, 자원개발기술 및 제련기술 등 4가지 분야에 대한 단계별 연구개발을 추진하고, 10년 후인 2018년에는 상업생산을 추진하는 것을 최종목표로 설정하고 있다.

구체적으로는 제 1기에는 오키나와해역, 이즈·오가사와라 해역 등 해저열수광상이 확인되어 있는 해역을 중심으로 자원량을 파악하고, 해양환경조사 실시, 환경영향예측모델 개발, 채광시스템 등의 기초적 검토, 해저집광기 설계, 제련 기술의 기초적 검토 및 파일럿 플랜트 설계를 목표로 설정하고 있다(Iizasa et al. 1999).

제 2기에는 신규 광상을 중심으로 탐사 및 자원량 분석을 실시하고, 환경영향예측모델의 실증시험 및 환경보전책의 유효성 검증, 해저집광기 제작, 해양실증시험을 고려하여 상업생산을 위한 개념/상세설계, 제련 파일럿 플랜트 시험 및 실증 플랜트 건설, 경제성 평가 등을 실시한다는 계획이다.

일본의 심해저 자원개발 정책에서 주목할 만한 것은 해저열수광상 개발해역의 생태계 보전을 위한 과학적 자료 축적과 보전방향 제시가 동시에 전개되고 있다는 점이다. 특히, 해역환경정보 등 환경베이스라인 조사, 환경영향예측모델 개발, 보호구역 선정 등 환경보전 정책 검토 등에 대한 환경영향평가 계획 등은 국제적 환경 논의에 대한 사전적 고려이면서, 국가관할권 내외측 사업 수행에 대한 적극적 기준 설정이라는 점에서 시사하는 바가 크다 하겠다.

## 중국

중국은 2006년 11·5계획을 필두로 심해저 자원확보를 위한 기술개발, 환경모니터링, 생물자원 이용 등<sup>16)</sup>을 확대하여 왔다. 국가 863계획<sup>17)</sup>에서는 심해저 망간단괴, 망간각, 해저열수광상 등의 탐사를 지원하는 기반 구축을 목표로 함으로써 탐사기술, 샘플링기술, 수증적재기술, 해양탐사통용기술, 해저자원개발 및 운송기술 등의 분야에 다양하게 투자가 이루어졌다. 또한 2007년부터는 4,500미터급 심해 작업시스템과 해저열수광상의 자원조사와 자원량 평가를 위한 코아샘플채취보링기, 7,000 m급 유인잠수정 개발계획 등을 추진하고 있다.

탐사분야에서는 2005년부터 대양 1호를 이용한 태평양, 대서양, 인도양<sup>18)</sup> 해역에 대한 열수분출구와 열수광상 탐사<sup>19)</sup>를 시작하였고 현재까지 매년 열수활동분포와 생물자원 조사를 수행하고 있다. 특히, 중국이 자체 설계한 3,500미터의 심해 관측 및 샘플링 무인 잠수기 시스템을 통해 서인도양의 1,800미터 수심의 비활동 해저열수구를 발견하여 촬영과 샘플링 작업에 성공한 사실은 중국이 이미 해저열수구 탐사를 위한 전문적 수준의 역량을 보유하고 있음을 의미한다.

한편, 중국은 국제해저기구의 해저열수광상 탐사규칙 채택 직후인 2010년도 5월 25일, Southwest Indian Ocean Ridge에 대한 탐사광구를 신청함으로써 국제해저기구(ISA)가 관리하는 심해저에서의 첫 번째 탐사 광구 신청자가 되었다<sup>20)</sup>. 이는 중국의 전지구 해저열수광상에 대한 이해와 기술적 투자에 대한 반영이면서, 동시에 자원 확보에 대한 국가적 역량이 표출된 사례로 이해할 수 있다.

## 4. 재무적 예비타당성 분석

해저열수광상의 경제적 개발 가능성에 대해 망간단괴 개발시스템과 기본적으로 동일한 방식을 채택하고, 수심, 금속품위 등 지형지질적인 요소와 탈염효과, 염분에 의한 처리영향, 육상 황화물 광산에서 개발되어 온 선광·제련 처리 등 기술적인 차이점을 입력하여, 투자설비 및 운전비용, 금리세제 등 경제적인 요소를 가미한 재무적 예비타당성 분석을 통해 해저열수광상 자원개발 정책의 객관성과 효율성 제고 방안을 제안하고자 한다(박 등 2006).

### 경제성 평가방법

#### 평가기준

개발해역은 박 등 (2006)에 의해 구축된 기술·경제성 평가 모델과 동일하게 통가 EEZ내 독점 탐사권 지역을 상정하고, 수심은 1,400 m, 평균품위는 Cu: 5.0 wt%, Pb: 0.7 wt%, Zn: 22.0 wt%, Au: 13.0 g/t, Ag: 167.0 g/t를 설정하였다.

개발규모는 연간 300,000톤(Wet)을 설정하고, 28,000톤급의 채광선을 사용하여 해수에 의한 선상 부유선광을 실시한 후, 동정광(48,698 t/y), 납정광(2,128 t/y), 아연정광(82,010 t/y)을 16,000톤 규모의 수송선 1척을 사용하여 국

<sup>16)</sup><http://www.comra.org/haidi/2007/070323.htm>

<sup>17)</sup>중국의 국가고기술연구발전계획으로 세계 선진수준의 과학기술발전의 제고로 중국의 고기술을 발전시킨다는 취지에서 수립된 계획(1986.3월에 건의됨)으로 현재까지 중국의 과학기술발전을 선도하는 기본계획으로 자리하고 있다

<sup>18)</sup>2005.09.20일자 중국해양보; 北京科普 <http://www.bast.net.cn/bjkpcz/kjqy/hyky/63609.shtml>

<sup>19)</sup>2007.01.09일자 중국해양보

<sup>20)</sup>ISA, News and Events(2010.5.25)

내에 가동되고 있는 황화물제련소에 매광(賣鑛)하는 개발 시스템을 구축하였다(Yamazaki et al. 2003).

**기술 파라미터 가정**

채광시스템의 기술적 효율은 해저의 채광기 통과면적의 70%를 굴착효율, 굴착된 광석의 87%를 채집효율로 설정하였다(Yamada and Yamazaki 1998). 선상 양광 후, 고액 분리에 의해 98%를 탈수효율(Dewatering efficiency)로 설정하고, 건조장치에 의해 광석에 포함되어 있는 12.8% 수분을 제거하는 것도 고려하였다(Yamazaki et al. 2003).

부유선광 후에는 동정광, 납정광, 아연정광이 얻어진다. 그 중에서 동정광은 동을 88.4%, 금을 38.3%, 은을 65.2% 회수하고 납정광은 납을 58.7%, 금을 4.0%, 은을 11.1% 회수한다고 가정하였다. 또한 아연정광은 아연을 89.2%, 금을 28.2%, 은을 14.9% 회수하여 건조 후, 국내에 있는 제련소로 옮겨지고, 황화물제련소에 매광(賣鑛)된 동정광, 납정광, 아연정광은 건식제련법에 의해 Cu: 98%, Pb: 95%, Zn: 95%가 회수된다고 설정하였다. 이를 통해, 연간 동은 12,638톤, 납은 1,359톤, 아연은 53,474톤, 그리고 부산물로서 금은 2.27톤, 은은 37.9톤이 생산된다.

채광, 선광, 수송 등의 개발시스템 조업일수에 대해서는 연간 250일로 가정하고, 육상 탈염처리 조업은 연 330일로 설정하였다.

**경제 파라미터의 가정**

자금조달은 총 투자자금의 30%를 자기자본으로, 그 잔여부분 70%는 차입금으로 조달하고, 개발시스템은 건설에서부터 경제적 조업까지 총 23년을 설정하였다(Søreide et al. 2001). 배와 플랜트 건설에 3년, 0.5년간의 테스트 가동을 거쳐 0.5년간 50% 생산, 5년째부터 19년간 100% 생산하는 개발일정을 설정하였다.

원가요소는 2009년도를 기준년도로 인플레이션은 고려하지 않고, 1) 변동비, 2) 감가상각비, 3) 수선비, 4) 인건비, 5) 손해보험비, 6) 재산·종합토지세, 7) 금리, 8) 일반관리비, 9) 조업관리비·잡비, 10) 부가가치세, 11) 법인세, 지방세 등을 상정하였다(朴 et al. 2002).

금속가격은 World Bureau of Metal Statistics(2009)로부터 2009년의 평균치를 계산하여 Cu: US\$ 2.3/lb, Pb: US\$ 0.8/lb, Zn: US\$ 0.7/lb, Au: US\$ 973.0/oz, Ag: US\$ 14.7/oz로 설정하였다.

이상의 경제적 파라미터를 고려하여 산출한 해저열수광상의 총비용 내역은 다음과 같다(Table 2).

기본적 수익판단법으로서, 자본회수법(Payback Periods), 순 현재가치(Net Present Value), 내부수익률(Internal Rate of Return)을 적용한 예비타당성 분석 결과를 Table 3에 나타낸다.

**Table 2. Total investment cost of seafloor massive sulfide**

Item	Seafloor Massive Sulfide	
	Capital costs	Operating costs
Mining system	350.9	16.4
Mineral processing	35.9	4.8
Transportation	59.6	14.5
Sub-total	446.5 M\$	35.7 M\$
Continuing expenses		34.2
Working capital		26.7
Total	507.4 M\$	

**Table 3. Results of an economic evaluation for 300,000 t/y production scale**

Sensitivity factor	Production scale: 300,000 t/y			
	Purchased price	Payback periods	NPV(\$)	IRR (%)
Metal Sales in 75%		6.2 year	490M	24.1
Metal Sales in 70%		6.8 year	417M	22.0

제련처리 후 생산되는 동, 납, 아연, 금, 은 금속 판매수익의 75%를 매도자측, 판매수익의 70%를 매수자측 기준 거래가격으로 설정한 분석 결과는 매광가격을 75%로 설정하는 경우, 자본회수기간은 6.2년, 순 현재가치(할인율 5.5%)는 US\$ 490 million, 내부수익율은 24.1%로 나타났다. 또한 매광가격을 70%로 설정하는 경우, 자본회수기간은 6.8년, 순 현재가치는 US\$ 417 million, 내부수익율은 22.0%로 약 2.1% 정도 경제성이 낮은 것으로 나타났다.

해저열수광상 개발에 있어서는 신규로 제련소를 건설하지 않고 기존의 황화물처리 제련소를 이용할 수 있는 장점을 활용한 새로운 개발모델 설정을 통하여 대폭적인 경제성 향상과 함께 상업적 개발 가능성을 기대할 수 있음을 확인하였다.

**5. 대응전략**

해저열수광상에 대한 국제적 논의는 국가 경제적 가치로서의 금속광물 확보와 함께 전략 광물로서의 갈등 가능성까지를 포함하여 다양하게 접근되고 있다. 특히, 자원 민족주의 강화로 인해 에너지광물자원 접근에 제한적인 우리나라로서는 기술과 투자를 통한 국가관할권 내외측 심해저 자원 확보가 중요한 국정과제로 선정될 필요가 있다.

이러한 점에서 해저열수광상 상업 개발에 적극적인 노틸러스사, 넵튠사의 기술개발 및 투자 동향은 우리나라의 심해저자원개발 정책 방향과 기술투자의 모델로 중요한

의미를 가진다. 이 분야의 선두주자인 노틸러스사는 최근 파푸아뉴기니의 Solwara 1 광구에서 환경영향평가서 (Environment Impact Statements)의 최종 승인을 얻으면서 상업개발을 위한 모든 제반여건을 확보한 상태에 있으며, 넵튠사는 Trident Project라고 명명된 탐사활동을 뉴질랜드 탐사광구에서 수행함으로써 채광면허를 신청할 최종 광구를 모색하고 있는 중이다.

또한, 중국, 일본 등 심해저 광업의 선도적 기술력을 보유하고 있는 국가들 역시 활발하게 해저열수광상 자원개발에 주력하고 있는 것으로 보고되고 있다. 중국은 연간 약 300일의 대양 탐사를 통해 심해저 자원 전반에 대한 탐사를 지속하고 있으며, 이미 자국 EEZ에 해저열수광상을 포함한 심해저 자원을 확보하고 있는 일본 역시 심해저 자원개발을 위한 기술적, 예산적 투자를 아끼지 않고 있다. 이는 심해저 자원 확보에 대한 접근이 현재적 가능성 뿐 아니라, 향후 잠재적 자원에 까지 포괄적으로 이루어지고 있음을 의미한다.

국제사회의 해저열수광상 개발 노력 또한 국제해저기구 (ISA)를 중심으로 가시화되고 있다. 해외 민간 기업을 중심으로 한 개발투자가 상업적 측면에서의 접근이라면, 2010년도 5월 국제해저기구에서 채택된 해저열수광상 탐사규칙은 법적·제도적 측면에서의 열수광상 개발의 틀을 제시할 것으로 평가된다. 이미 탐사 광구신청이 진행되고 있는 만큼, 우리나라의 광구 신청 작업 또한 조기에 그리고 정밀한 경제성에 기초하여 추진될 필요가 있다. 단, 정책적 차원에서 우리나라의 해저열수광상 개발 기술과 탐사 현황과 방향에 대한 객관적 사전 점검이 이루어질 필요가 있다. 해저열수광상 확보가 국가관할권 내외측을 포괄하여 접근되어야 한다는 점에서는 국제적으로 형성된 레짐 및 각국의 자원 정책에 대한 이해가 전제될 필요가 있으나, 심해저 자원개발이 자원에 대한 이해와 기술개발을 동시에 요구한다는 측면에서는 무엇보다 국가적 차원의 집중적이고 장기적 투자가 선행되어야 한다.

따라서, 해저열수광상 확보와 우리나라 자원 공급의 안정화를 위해서는 연구, 기술, 전략적 추진체계 등의 측면에서 다음과 같은 선행 요건이 해결될 필요가 있다.

첫째, 경제성 분석 과정에서도 나타난 것과 같이 보다 상세한 데이터 수집과 분석을 위해 체계적인 조사연구 및 기술개발이 시급히 요구된다. 상업개발을 위해서는 광체 구조, 평균品位, 자원량, 고품위 부분의 분포상황 등 광상 부존상황의 정보수집과 함께 해저에서의 채굴장치와 채굴 방법, 선광처리 시의 파쇄장치와 파쇄방법 등 개발시스템

설계를 위한 강도·경도 등의 공학적 특성 파악이 필요하다. 또한, 선상에서 해수를 이용한 선별효과 및 영향, 탈염 처리효과 등 처리기술에 대한 분석자료 확보와 같은 조사 연구 및 기술개발 과제가 다수 남아 있다.

이러한 광상부존 및 분포상황을 정확히 파악하기 위해서는 지형과 지질구조 파악을 위한 정밀 지구물리 탐사기법 개발이 요구되고, 또한 열수광화작용의 단계 및 진화특성의 이해와 자원량 평가를 위해 드릴링 작업을 포함한 정밀 해저면 하부구조 파악이 필요하다.

둘째, 기술·경제적 효과를 극대화할 수 있는 최적 상업개발시스템 구축이 필요하다. 광물자원개발은 산업발전을 위해 중요한 필수적 투입요소일 뿐만 아니라 심해저자원개발 자체는 타 산업에 미치는 기술·경제적 파급효과가 클 것으로 기대된다. 따라서, 고부가가치 실현을 위한 경쟁력 확보를 위해 다양한 관점의 시스템 변화를 통한 영향 및 파급효과 분석을 함으로써 투자의 최적화를 위한 의사결정의 객관적 판단기준으로 역할을 수행해야 한다.

셋째, 선진 해외민간광업회사와 유기적인 의견교환 및 정보의 상호 교류·협력을 위한 Joint Technical Committee 구성을 제의한다. 비록 경쟁적 입장이라는 하나 이들의 앞선 기술투자와 심해저광물자원 개발을 통해 미래시장을 선점할 가능성을 고려해 본다면, 상호 협력적인 사업추진을 통해 윈-윈의 시너지효과를 창출할 필요성이 있다. 탐사·채광·선광·제련 등 분야별 상호 기술정보 교류 및 개발기술 협력 방안을 협의하고, 체계적·효율적인 협력 개발 전략을 수립하여야 한다. 결과적으로, 상업개발을 위한 최적의 R&D 추진방향을 지속적으로 모색하는 것도 이러한 이유에서다.

사실, 자원확보를 위한 각국의 노력이 외교적 갈등으로 확대되는 것은 이미 뉴스가 되지 않는다. 미국이 지난 2001년부터 국가에너지정책개발그룹을 구성하고 에너지 안보를 미국통상 및 외교정책의 최우선 순위에 둔 것이나<sup>21)</sup>, 중국이 2007년까지 아프리카 33개국에 대한 채무를 담감하고, 아프리카의 인프라건설 및 사회문화 등을 포함한 에너지 확보를 위한 외교적 노력을 경주하고 있는<sup>22)</sup> 등의 조치는 자원 확보가 외교적 갈등을 감안하고도 추진하는 최우선 국가 정책으로 대두되고 있다는 반증이다. 그럼에도 불구하고, 심해저 자원은 기술적 수준과 지속적 투자 조건이 요구된다는 측면에서 우리나라 자원확보를 위한 원거리 외교정책에서 긍정적이다. 국제 레짐 형성차원에서는 선진국과 개도국의 이익을 조정할 수 있는 역량을 발휘할 수 있다는 것과 심해저 자원개발을 독자적으로 추

<sup>21)</sup> 김현진. (시론) 새정부 자원외교가 성공하려면. 조선일보(2008.2.19)

<sup>22)</sup> 新華網(2008.2.15); <http://www.mofcom.gov.cn/aarticle/i/jyjil/m/200702/20070204342364.html>(중국 상무부홈페이지)

진할 수 있는 연구 기반이 구축되어 있다고 평가되기 때문이다. 중요한 것은 기술과 투자에 대한 장기적 플랜과 정책적 지원이다. 국민경제의 지속 가능한 발전을 위한 자원 확보가 절대적 과제라는 점에 공식(共識)이 있는 만큼, 해저열수광상개발을 통한 자원 확보는 자원 공급원의 다원화와 전지구 해역 자원 확보를 위한 기술 개발측면에서 접근될 필요가 있다 하겠다.

## 참고문헌

- 朴洗憲, 山崎哲生, 島田莊平, 山本恭久 (2002) 코발트리튬 클러스트의 잠재력 비교 평가 방법의 개발. *자원과 소재* **118**:641-649
- 박세현, 박성욱, 권석재 (2006) 해저열수광상 기술·경제성평가 모델 개발. *Ocean and Polar Res* **28**(2):187-199
- 해양수산부 (2007) 2006년도 남서태평양 광물자원(해저열수 광상·망간각) 개발 보고서
- 국토해양부 (2008) 2007년도 남서태평양 광물자원(해저열수 광상·망간각) 개발 보고서
- 국토해양부 (2009) 2008년도 남서태평양 광물자원(해저열수 광상·망간각) 개발 보고서
- Fouquet Y, Von Stackelberg U, Charlou, JL, Donval JP, Erzinger, J, Foucher JP, Herzig P, Muhel R, Soakai S, Wiedickie M, Whitechurch H (1991) Hydrothermal activity and metallogenesis in the Lau Back-arc Basin. *Nature*, **349**:778-781
- Hekinian R, Fevrier M, Bishoff JL, Picot P, Shanks WC (1980) Sulfide deposits from the east pacific rise near 20°N. *Science* **207**(1):433-1444
- Iizasa K, Fiske RS, Ishizuka O, Yuasa M, Hashimoto J, Ishibashi J, Naka J, Horii Y, Fujiwara Y, Imai A, Koyama S (1999) A Kuroko-type polymetallic sulfide deposit in a submarine silicic caldera. *Science* **283**:975-977
- Nawab Z (2001) Atlantis II Deep: A future deep sea mining site. In: Proc. Proposed Technologies for Mining Deep-Seabed Polymetallic Nodules, Kingston, Jamaica, Int. Seabed Authority, pp 301-313
- Søreide F, Lund T, Markussen JM (2001) Deep ocean mining reconsidered a study of the manganese Nodule Deposits in Cook Island. In: Proc. 4th ISOPE Ocean Mining Symposium, Szczecin, Poland, 23-27 Sep. 2001, pp 88-93
- World Bureau of Metal Statistics (2009) World Metal Statistics
- Yamada H, Yamazaki T (1998) Japan's ocean test of the nodule mining system. In: Proc. 8th International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal, Canada, 24-29 May, pp 13-19
- Yamazaki T, Park SH, Shimada S, Iizasa K, Shiokawa S (2003) A case study of mining seafloor massive sulfides in Japanese EEZ. In: Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symposium, Tsukuba, Japan 15-9 Sep 2003, pp 63-70

*Received Oct. 27, 2010*

*Revised Nov. 17, 2010*

*Accepted Dec. 8, 2010*