

Article

해저열수광상 기술 · 경제성평가 모델 개발

박세현* · 박성욱 · 권석재

한국해양연구원 해양과학기술정책연구센터
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호Development of Technical and Economic Evaluation Model
for Seafloor Massive Sulfide Deposits

Se-Hun Park*, Seong Wook Park, and Suk-Jae Kwon

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

Abstract : The Kuroko-type seafloor massive sulfide deposits found in the western Pacific have been considered to have potentials for economic recovery of Au, Ag, Cu, Zn, and Pb. In this study, a preliminary model was developed for the technical and economic evaluation of them. The FRSC site on Lau Basin in the Tonga EEZ was selected as a target. In this study, no construction fee for the metallurgical processing subsystem was accounted for. Instead, it was assumed to sell the Cu, Zn, and Pb concentrates to the existing sulfide customer smelter. The low total investment costs for the development make the venture very attractive. However, the result of the economic feasibility evaluation is still less attractive with the mean metal yield of the Kuroko on land. It is considered that commercial mining may be plausible if the richer metal yields are applied to the development. Quantitative information for metal yield is necessary for a more accurate evaluation. However, the important resource potential information regarding the amount of ore body, the inside structure, and the metal yields have not yet been clarified sufficiently. In addition, the flotation of ore body using seawater has not been tested yet. It is necessary to solve these problems through the experimental R&D and a survey.

Key words : economic evaluation model, seafloor massive sulfide, mining system, mineral processing, desalting

1. 서 론

심해저 광물자원 중 망간단괴와 망간각은 니켈, 코발트 등 전략적 금속을 개발대상으로 고려하고 있는 것에 비해, 해저열수광상은 동, 납, 아연 등 비금속(base metal)이 주성분이며, 금, 은 등 귀금속도 포함하고 있다. 단위면적당 금속품위 및 매장량이 높고 망간단괴보다 부존 수심이 얕다는 점, 그리고 개발에 있어서는 기존 육상 황화물 제련소를 이용할 수 있어 제련시스템 비용의 대폭적인 삭감

이 가능하다는 점 등 개발하기에 유리한 장점을 갖추고 있어 다른 심해저 광물자원보다 상업적 개발 시기가 가장 앞설 것으로 예측되고 있다.

해저열수광상은 수심 250~3,000 m에 분포하고, 열수분출공과 그 주변에는 white smoker(220°C 저온열수), black smoker(300°C 이상 고온열수), 침니(Chimney; 해수와 급격한 혼합·침전에 의해 형성된 굴뚝모양의 열수분출구로 황화광물 및 황산염광물 등이 주 구성성분), 마운드(Mound; 간헐적 열수분출작용에 의해 침니의 형성과 파괴가 순차적으로 진행됨에 따라 침니의 파편 등이 집적되어 주변 지형보다 다소 높게 둔덕을 이루는 형태) 등 열수해

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

역 특유의 현상을 보이면서 특정의 지질환경 장소에 분포하고 있는 양상을 나타내고 있다(Macdonald *et al.* 1988; Morgan and Chen 1993).

해저열수광상은 망간단괴에 비해 늦게 발견되어 아직까지 채광 및 선광시스템에 대한 체계적인 기술 확립이 이루어지지 않은 상황이다. 하지만, 해저열수광상 자원개발과 관련한 각국의 연구조사 및 기술개발 동향을 분석하고 기존의 육상 다금속 황화물 광상 개발 자료를 종합하여 현 단계에서 적용 가능한 기초물성, 지질구조, 자원량 평가 등 개발에 관한 기술정보와 초기투자자본, 운전비 등의 분석을 통해 기술·경제성 평가 모델 개발이 가능하다고 여겨진다(Yamazaki *et al.* 2003). 또한, 모델 개발의 특징 중 경제성 향상을 위한 새로운 아이디어로서 국내에 설치되어 있는 기존 육상 황화물 제련소를 이용하여 신규 제련소를 건설하지 않는 새로운 개발개념모델을 구축하여 다각적인 개발가능성 검토를 실시하고자 한다.

구체적으로는 망간단괴 개발시스템과 기본적으로 동일한 방식을 채택하고, 해역선정에 따른 수심, 금속품위 등 지형·지질적인 요소와 탈연효과, 염분에 의한 처리 영향, 육상 황화물 광산에서 개발되어 온 선광·제련처리 등 기술적인 차이점을 입력하고, 투자설비 및 운전비용, 금리·세제 등 경제적인 요소도 고려한 종합적인 모델을 개발한다.

이 모델을 바탕으로 경제적 타당성을 얻기 위한 방향성을 살펴보고, 정책적 대안을 찾고자 한다. 그 방법으로는 역산(逆算)에 의해 경제성을 갖춘 부존특성 및 지형·지질조건 도출 등 경제적으로 성립 가능한 개발조건. 구체상(具體像)을 제시함과 동시에 연구기술 요소의 목표치 제안 등 상업적인 개발을 위한 다각적인 가능성 평가의 도구로 활용코자 한다.

2. 국내외 조사동향

해저열수광상은 1965년 홍해의 Atlantis II Deep에서 발견된 중앙해령계의 중금속니(重金屬泥)광상과 일본 주변 EEZ내 伊是名海穴 및 明神海丘, 파푸아뉴기니 동쪽의 Manus海盆 등에서 발견된 背弧海盆·海洋島弧계의 괴상(塊狀)광상이 알려져 있다(Haymon and Kastner 1981; Amann 1985; Scott 1985; Iizasa *et al.* 1999).

중앙해령계의 대표적인 해저열수광상중 하나인 홍해의 Atlantis II Deep은 사우디아라비아와 수단 양국이 홍해 공동위원회를 구성하여 1975~1982년에 걸쳐 실패역에서 채굴·양광 및 제련·폐기물 처리기술과 함께 경제성평가 결과를 보고하였다(Amann 1985; Nawab 2001). 채광에 의해 얻어진 중금속니는 2 μm 이하의 미립자가 80%를 차지하면서 양광된 슬러리는 고체량이 100 g/l 이하로 희박

(稀薄)하고, 유용금속 품위는 Zn: 3~6 wt%, Cu: 1.0 wt%, Ag: 50 g/t 수준으로 낮기 때문에 제련 전에 농축할 필요성이 지적되었다(Amann 1985). 예상 총광량은 9,400만톤으로 추정하고 연간 채광량은 300만톤 규모로 설정하여 Zn: 6만톤, Cu: 1만톤, Au: 1톤, Ag: 100톤을 20년간에 걸쳐 생산하는 개발모델을 구축하여 DCF(Discount Cash Flow)는 약 17%에 이른다고 발표하였지만, 습식제련처리 설비 등의 신설로 인한 초기투자자본의 부담 증가로 인해 상업적 개발 착수까지는 이르지 못하였다(Nawab 2001).

背弧海盆·海洋島弧계의 해저열수광상은 중앙해령계와 비교해 보면 금·은 등 귀금속 원소를 풍부하게 함유하고 있어 경제적인 관점에서 주목 받고 있다(Scott 1985). 광물구성은 현무암으로 대표되는 염기성암이 주체이지만 규장질암석과 퇴적암도 존재하고 있기 때문에 형성된 광상의 금속품위와 매장량에는 많은 차이를 보이고 있다(Sillitoe 1982; Rona 1985). 조사연구는 미국을 중심으로 일본, 프랑스, 호주 및 뉴질랜드에서 활발히 추진되어 왔다. 1979년에는 미국과 프랑스 그룹에 의해 21°N 동태평양해령(East Pacific Rise; EPR) 해저확장대축에 있어 열수광상 및 생물군집을 이룬 왕성한 열수해역이 발견되었고, 이후 많은 과학자들에 의해 지질·지구화학적 조사연구가 조직적으로 수행되어 과학적·자원적 중요성을 불러왔다(Francheteau *et al.* 1979; Hekinian *et al.* 1980; Spiess *et al.* 1980; Hekinian *et al.* 1983).

또한 일본의 EEZ내 해역에서는 1989년 黒鑛형 황화물 광상과 유사한 성인·조성을 갖춘 伊是名海穴이 沖繩トラフ(Trough)내에 발견되었다(Halbach *et al.* 1989). 그 후 1999년에는 伊豆·小笠原島弧의 明神海丘에서도 伊是名海穴과 같이 동, 남, 아연 등 비금속과 함께 금, 은이 풍부하게 함유된 대규모 黒鑛형 광상이 발견되어 현재까지도 자국 EEZ내 해저열수광상에 대한 조사항해에 적극적인 관심을 보이고 있다(Iizasa *et al.* 1999). 明神海丘의 마운드 규모는 폭 400 m, 길이 400 m, 높이 30 m 이상으로 지금까지 보고된 黒鑛형 해저열수광상 중에서는 최대규모와 최고품위를 갖추고 있는 것으로 알려져 있으며, 예상추정량은 900만톤 이상으로 전망하고 있다.

Table 1과 Fig. 1에서 보듯이 BMS(Boring Machine System: Sarata and Matsumoto 1999)에 의해 분석된 100 cm 코어(B-F)의 평균 유용금속 함유율은 Cu: 6.67 wt%, Pb: 0.78 wt%, Zn: 14.95 wt%, Au: 6.38 g/t, Ag: 391.82 g/t으로 보고되고 있다(Iizasa *et al.* 1999).

미국, 일본, 프랑스 등 선진국들은 80년대부터 남서태평양도서국들의 EEZ내 Lau Basin, North Fiji Basin 등에서 자원분포 파악을 위해 동 지역의 기구인 남태평양응용지구과학위원회(South Pacific Applied Geoscience Commission; SOPAC)에 지원을 통하여 향후 개발과정에서 기

Table 1. Metal yields of BMS core sections obtained in Sunrise Deposit in Myojin Noll.

Sample name	Drilled length: 757 cm Recovered core length: 146 cm	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)
A	about 46 cm in 0-757 cm			No analysis		
B	about 10 cm in 163-351 cm	1.44	0.91	45.40	18.60	656.00
C	about 15 cm in 351-553 cm	28.90	0.01	0.40	1.40	28.20
D	about 30 cm in 553-757 cm	0.21	0.18	5.76	3.30	44.90
E	about 35 cm in 553-757 cm	2.59	1.86	20.60	8.20	945.00
F	about 10 cm in 553-757 cm	0.22	0.92	2.59	0.38	285.00
Average of 100 cm (B~F)		6.67	0.78	14.95	6.38	391.82

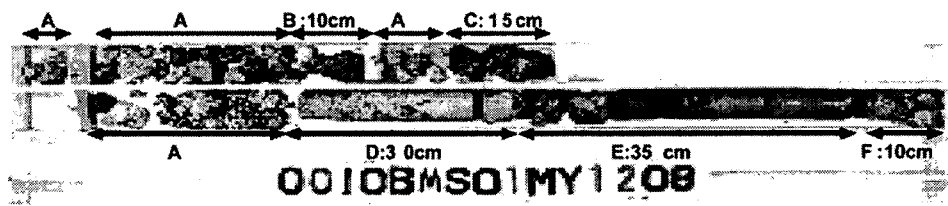


Fig. 1. Overview of recovered core by Boring Machine System.

특권 확보를 위한 전략을 펼치고 있다(Fouquet *et al.* 1991; Bendel *et al.* 1993). 특히, 1997년 호주 노틸러스사는 민간기업의 자격으로 파푸아뉴기니 EEZ 내의 Manus 海盆에서 발견된 PACMANUS 및 SuSu해구군의 약 4000 km²의 해역조사를 파푸아뉴기니 정부로부터 허가 받았다¹⁾. 노틸러스사의 탐사권은 1999년 11월에 2년간의 계약이 종료되었지만, 2001년 4월에 탐사권이 연장되어 현재는 정밀조사를 실시 중에 있다.

우리나라의 해저열수광상에 대한 해양수산부의 연구개발 사업은 2002년 및 2003년 피지군도 North Fiji Basin의 해저확장대축 주변지역에 있어 광역탐사를 시작으로, 2004년과 2005년에는 Lau Basin 지역 등 남서태평양 해역에 발달하고 있는 후호상분지(Back arc basin) 주변지역을 대상으로 광역탐사를 수행 중에 있다(해양수산부 2003, 2004, 2005). 광역탐사 수행 후 2010년까지는 개발 유망지역 선정 및 독점적 탐사권 확보, 자원매장량 평가를 위한 정밀탐사를 수행할 계획이다.

3. 공학적 특성 및 탈염시험

공학적특성

해저열수광상은 각 분야에서 활발히 조사연구가 실시되고 있지만, 이들 연구는 부존상황, 품위, 생성원인 등 지질·광상학적 연구가 대부분을 차지하고 있어 압축·인

장강도 및 경도(硬度) 등 공학적 특성에 관한 연구는 거의 이루어지고 있지 않다. 그렇지만 해저열수광상 개발을 위해서는 채광시스템에 대한 설계 검토가 필요하고, 이를 위해서는 공학적 특성 파악이 무엇보다도 중요하다.

본 연구에서는 Yamazaki *et al.*(1990)와 Yamazaki and Park(2003)으로부터 육상黑鑛, Gorda호호, 沖繩트라프내 伊是名海穴, 그리고 伊豆·小笠原島弧에서 채취된 시료를 이용하여 비중, 공극율, 일축압축강도, 비정형형압열인장(非整形型壓裂引張)강도, P파 속도, 쇼어 경도, 마이크로·비커스 경도, 영율, 포아송비 등 공학적 특성을 측정된 결과를 바탕으로 해저열수광상의 채굴장치와 채굴방법, 그리고 선광처리 시의 파쇄장치와 파쇄방법 검토 등 개발시스템 설계를 위한 기초물성자료로 활용하였다.

해저열수광상의 공극율은 15~49%로 육상黑鑛에 비해 매우 커다란 수치를 나타내고 있지만 다른 심해저 광물자원인 망간단괴와 망간각보다는 낮은 공극율을 나타내고 있다. 또한 광석입자의 비중은 4.1~5.3으로 높게 나타나고 있으며 그 영향으로 평균 중량 함수율은 12.8%로 비교적 낮은 특성을 보이고 있다.

각 시료의 품위와 공학적 특성의 측정결과를 토대로 양자 사이의 관계에 대해 살펴보면, 해저열수광상은 금속함유율이 많을수록 공극율은 낮아지고 진비중은 커진다. 또한 일축강도, 인장강도, 쇼어경도 등을 통한 관계를 살펴 보아도 금속함유율이 많은 부분에서는 강도가 강하고 단

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

Table 2. Results of physical desalting experiment.

Step	Size	Dry weight (g)	Dissolved salt (g)	Sum of dissolved salt (g)	Desalt efficiency (%)	Cumulative efficiency (%)
No. 1	50-60 mm (original)	608	0.46	0.46	13.4	13.4
No. 2	10-20 mm	604	0.56	1.02	16.3	29.7
No. 3	1-2 mm	595	0.83	1.85	24.0	53.7
No. 4	0.1-0.2 mm	594	0.75	2.60	21.8	75.5
No. 5	under 200 μ m	591	0.85	3.46	24.5	100

단한 경향을 보여주고 있다.

상기(上記)의 공학적 특성 결과로부터 채굴장치의 사양은 고품위 광상을 개발대상으로 선정할 경우에는 다소 경암굴진(硬岩掘進)용 채굴장치를 상정할 필요가 있다 하겠다.

광석탈염시험

해저열수광상의 물리적 탈염 가능성에 대한 기초시험으로서 파쇄 진행 및 입도분포와 증류수에 광석을 담갔을 때 염분용출량의 관계를 측정된 자료를 인용하였다 (Yamazaki et al. 2003). 시험방법은 각 서브 샘플에 대해 중량측정, 증류수에 담갔을 경우의 염분용출량측정, 입도분포측정, 파쇄 진행 등 순서로 실시되었다.

최종단계(4차 파쇄)에서는 서브 샘플의 일부를 90% 누적통과입경으로 200 μ m 정도까지 파쇄하여 증류수에 5분간 담근 후, 서브 샘플과 용액을 분리하여 용액내의 염분 함유율과 용적을 측정하고, 마이크로 트랙을 이용하여 입도분포를 측정하였다.

그 결과, Table 2에 나타난 것과 같이 증류수에 광석을 5분간 담가 가볍게 짓는 비교적 간단한 조작을 통해 3차 파쇄까지 70~80%의 염분이 제거될 수 있다는 것이 보고되고 있다(Yamazaki et al. 2003). 3차 파쇄 후의 시료중량 속에 포함되어 있는 염분중량 비율은 0.07~0.36 wt%이며, 현 단계만이라도 기존 황화물 제련처리설비 내에서 우려될 수 있는 염분 속의 염소 성분에 의한 부식 영향은 충분히 감당할 수 있는 함유비율이라는 사실이 알려지고 있다.

또한 4차 파쇄 후의 입도는 부유선광을 실시할 때의 일반적 입도와 유사하여 부유선광 전후가 탈염처리하기 가장 적절한 시점이라는 사실을 보여주고 있다.

4. 경제성 평가방법

지형·지질조건

해저열수광상의 경제성 평가모델을 구축함에 있어서는

함유금속성분, 광상규모 등 지금까지의 조사연구에서 경제적 가치가 유망한 통가 EEZ내 Lau Basin의 포넬라이 확장대(Fonualei Rift and Spreading Center) 지역을 개발해역으로 삼았다. 광상의 황화물 생성형태와 광물조성은 흑연광상과 많은 유사한 특성을 가지고 있다고 관측되고 있지만, 아직까지 개략조사가 수행 중에 있어 광물 조성, 광체구조, 평균품위, 총광량, 고품위 분포 등을 포함한 광상 부존상황에 대해서는 정확히 파악된 정보자료가 부족한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 우선 위치와 평균수심만을 실제 데이터로 사용하고, 광체구조, 광량, 강도, 유용금속함유율 등 열수광상 조건에 대해서는 기존 흑연 열수광상 자료를 준용하여 모델을 구축하였다.

개발해역은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 남위 21°10', 서경 175°60' 부근에 위치하고, 수심은 1,400 m로 가정하였다.

평균 유용금속 함유율은 본 연구가 기본개발 개념모델을 구축하는 것이 목적인 점을 고려하여 기존 정보자료가 갖추어진 육상 흑연광상의 평균품위인 Cu: 1.7 wt%, Pb: 2.5 wt%, Zn: 10.5 wt%, Au: 1.4 g/t, Ag: 113.0 g/t를 우선 설정했다.

채광시스템 설계를 위해서는 Yamazaki and Park(2003)에 의한 물성분석 결과를 참고하여 평균수분 함유율은 약 12.8%, 압축강도는 3.1~38 MPa, 인장강도는 0.14~5.2 MPa 등으로 고려했다.

장소적 부존상황에서 채굴법을 고려해 보면 광상을 채굴하는 굴착기구, 광석을 채집하는 집광기구, 그들의 기구를 탑재하여 이동하기 위한 주행기구에 대해서는 연구개발이 진행되고 있는 심해저 망간단괴 및 망간각 채광기술의 응용에 의해 많은 부분은 대응가능하다고 생각된다 (Schwarz 2001).

평가기준

평가기준 설정은 해저에서의 파쇄효율, 집광효율 등의 명확한 연구가 공표되어 있지 않아 양광된 채광량을 기준으로 연간 300,000톤(습윤기준)을 설정하였다.

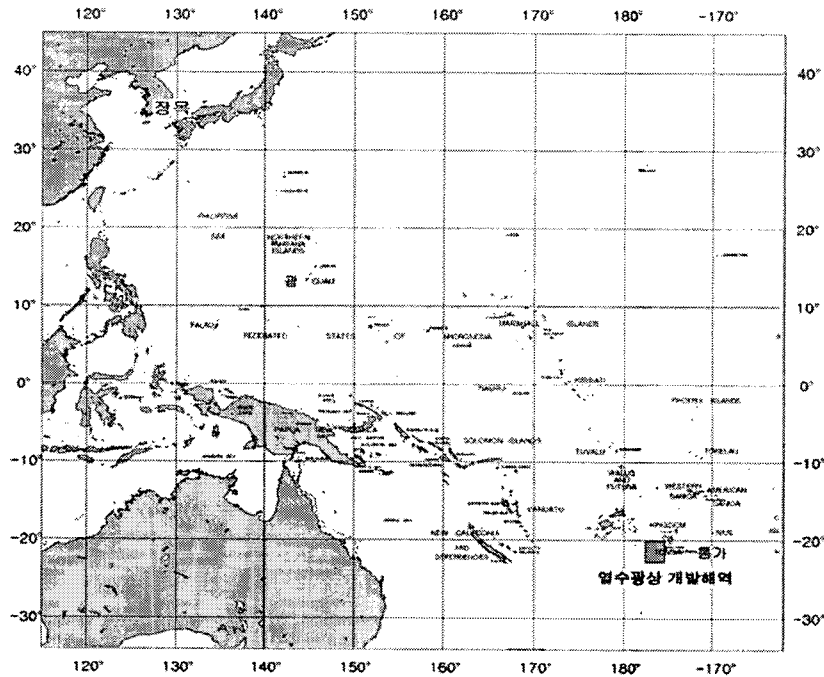


Fig. 2. Development site of seafloor massive sulfide deposit.

개발시스템은 양광-건조²⁾-파쇄-부유선광(해수)-건조-해상수송-탈염처리(육상)-황화물제련소의 처리공정 순서로 구축하였다. 해저열수광상의 개발에 있어 예상되는 염분에 의한 선광·제련처리의 영향은 상기(上記)의 탈염시험 결과를 참고하여 처리기술의 설계를 수행하였다.

개발시스템 개요는 25,000톤급의 채광선을 사용하여 해수에 의한 선상 부유선광을 실시한다. 이 때, 선광효율은 육상부유선광 효율에 비해 회수율이 10% 떨어진다고 설정하고, 동정광, 납정광, 아연정광을 9,500톤의 수송선 1척을 사용하여 국내에 가동되고 있는 황화물제련소에 광석 판매한다. 각 개발시스템의 개요를 정리하여 Table 3에 나타낸다.

기술 파라미터 가정

채광시스템의 기술적 효율은 해저의 채광기 통과면적의 70%를 해저열수광상 굴착효율로, 굴착된 광석의 87%를 채집효율로 설정하였다(Yamada and Yamazaki 1998). 선상 양광 후, 고액분리에 의해 98%를 탈수효율(Dewatering efficiency)로 설정하고 건조장치에 의해 광석에 포함되어 있는 12.8% 수분이 제거되는 것도 고려하였다(Yamazaki et al. 1991).

해저열수광상은 광석속에 포함된 염분이 선광 및 제련처리에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 육상에서 부유선광을 통해 조업하는 경우, 담수(淡水, fresh water)의 사용량은 처리광석 1톤 당 18 m³로 보고하고 있다(石岡과 高橋

Table 3. Method and development plan of seafloor massive sulfides.

	Mining system (Wet)	Ore dressing (Dry)	Transportation (Dry)
Method	25,000 t	Flotation	9,500 t
Development Plan (Production rate)	300,000 t/y (1,200 t/d)	256,368 t/y (1,025 t/d)	66,016 t/y (264 t/d)
Operation time	Time : 250 d/y	Time : 250 d/y	Time : 250 d/y

²⁾해저열수광상의 함수물성 및 습식파쇄 특성에 대한 기술정보가 부족해 기본개발 개념모델 구축에 있어서는 일반적인 개발시스템 구성으로 우선 구축. 그러나 부유선광은 습식처리공정임을 고려할 때, 양광된 광석을 건조 후 파쇄하는 처리공정은 파쇄공정 측면이나 에너지비용측면에서 경제적 부담 증가가 예상된다.

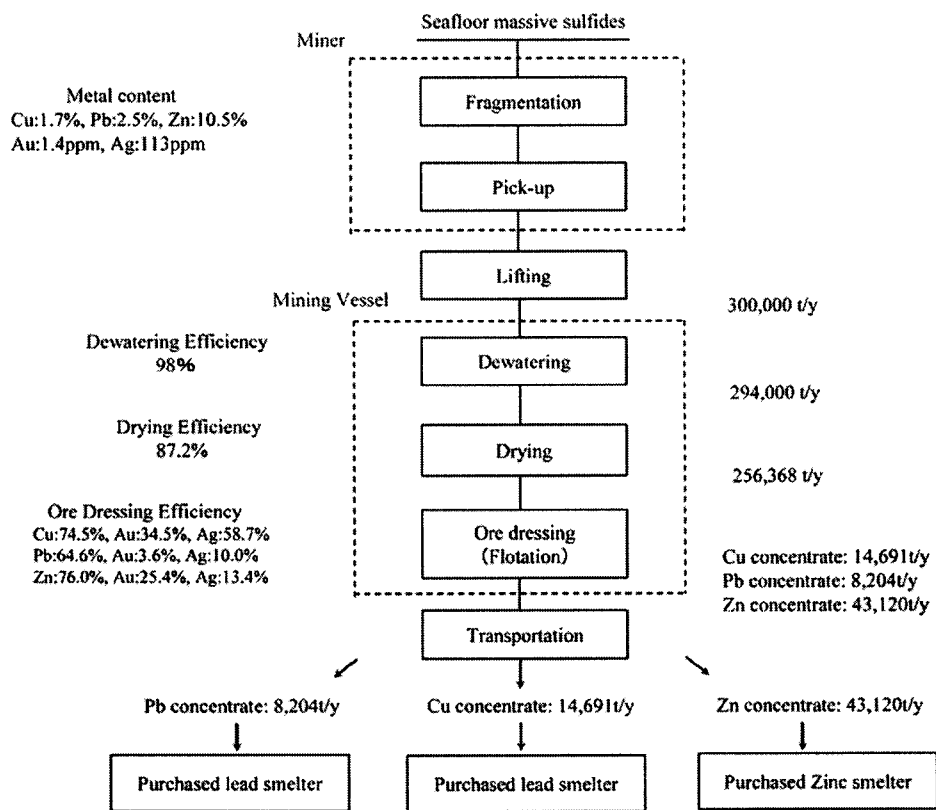


Fig. 3. Outlines of 300,000 t/y production scale model and ore flowchart.

1975). 따라서 비용절감을 위해 선상 부유선광을 실시하고자 하는 본 연구에서는 필요한 대량의 담수를 해상 수송해 선상에서 수행하는 것은 비경제적이라 판단될 수 있기 때문에 해수에 의한 선상 부유선광을 상정했다.

부유선광 후에는 동정광, 납정광, 아연정광이 얻어진다. 그 중에서 동정광은 동을 74.5%, 금을 34.5%, 은을 58.7% 회수하고 납정광은 납을 64.6%, 금을 3.6%, 은을 10.0% 회수한다. 또한 아연정광은 아연을 76.0%, 금을 25.4%, 은을 13.4% 회수하여 건조 후, 국내에 있는 제련소로 옮겨진다.

육상에서는 기존 황화물제련소에 광석 판매하기 전, 담수에 의한 탈염처리를 실시한다. 앞에서 언급한 탈염시험에서 -200 mesh 60~65% 파쇄까지 약 99%의 염분이 제거될 수 있어 제련소 광석 판매에는 지장이 없다고 가정한다. 동정광, 납정광, 아연정광은 건식제련법에 의해 Cu: 98%, Pb: 95%, Zn: 95%가 회수된다고 설정하였다.

채광, 선광, 수송 등의 개발시스템 조업일수에 대해서는 대상해역이 연 2회 이상 저기압대가 된다는 것을 고려해 연간 250일로 가정하였다. 육상 탈염처리 조업은 연 330일로 설정했다. 전체적인 개발시스템의 공정도는 Fig. 3에 나타낸다.

경제 파라미터의 가정

개발일정

지금조달은 Soreide et al.(2001)이 제시한 것과 같이 총 투자자금의 30%를 자기자본으로, 그 잔여부분 70%는 차입금으로 조달하는 것으로 가정했다.

개발시스템은 건설에서부터 경제적 조업까지 총 23년을 설정했다. 배와 플랜트 건설에 3년, 0.5년간의 테스트 가동을 거쳐 0.5년간 50% 생산, 5년째부터 19년간 100% 생산하는 개발일정을 설정했다. 개발시스템의 발주계약과 동시에 채굴해역의 정밀조사를 실시하고, 그 탐사비, 약간의 R&D비용, 연락사무소, 사원기술교육 등과 차입금의 이자를 전부 합쳐 준비금(Continuing Expenses)으로 설정했다. 전체 개발일정은 Fig. 4와 같다.

또한 테스트 가동기간 중에는 운전자금으로서 0.5년간분의 운전비를 계산하고, 50% 생산체계에 들어갈 때 운전자금으로서 3개월분을 준비했다. 여기에서 3개월분의 운전자금 의미는 금속판매대금이 회수되는데 3개월이 걸린다고 보았기 때문이다.

스케일 계산법

플랜트 건설비의 계산방법은 개별적산법, 단가법, 비율

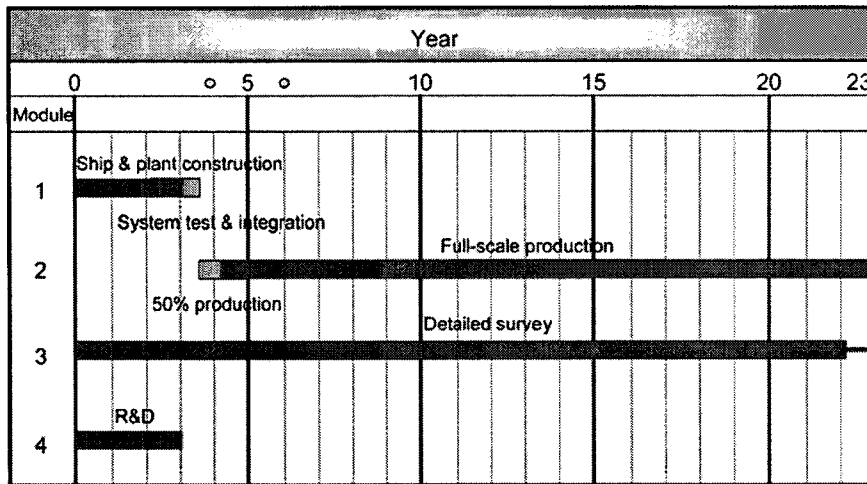


Fig. 4. Project development schedule.

법, 지수법 등이 있으며 각각에는 장단점이 있다. 여기서는 플랜트 및 단일기기의 비용은 용량에 산술비례하는 것이 아니라 지수비례에 의해 변동한다는 특성을 이용해 아래와 같이 지수법을 채용했다. n 은 상수(0.5~0.9)이며, 여기에서는 0.6을 적용했다(자원개발프로젝트 비용추정 정밀도를 위한 지수선택은 0.6~0.7이 가장 많이 사용되고 화학플랜트에 있어서는 0.6이 추정 정밀도가 가장 높은 것으로 보고되고 있다. 상세한 내용은 石炭開發技術協力センター(1993, 55 p.) 등 참조).

$$P_1 = P_2 \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^n$$

p_1 : 구하고자 하는 플랜트 또는 기기 비용, p_2 : 알고 있는 플랜트 또는 기기 비용, L_1 : 구하고자 하는 플랜트 또는 기기 용량 크기, L_2 : 알고 있는 플랜트 또는 기기 용량 크기.

원가요소의 설정

원가요소는 다음과 같이 설정했다. 운전비의 산출에 있어서는 2005년도를 기준연도로 설정하고 인플레이션은 고려하지 않았다.

- 1) 변동비: 조업자재, 에너지비용 등을 고려한다.
- 2) 감가상각비: 설비투자에 의해 고정화된 자산은 빠른 시간 내에 감가상각에 의해 유동화하는 것이 유리하기 때문에 스피드가 빠른 정률법을 적용하여 감가상각을 실시했다. 재정경제부고시의 내용년수에 의거하여 감가상각을 실시하고 잔존가치율은 허용 가능한 5%를 준용했다(한국감정원 1999).

개발시스템은 채광선·수송선과 그 부대설비에 대해서는 내용년수 15년, 감가상각율 0.142를 적용했다(한국감

정원 1999).

3) 수선비: 해상조업의 수선비에 대해서는 망간단괴 경제성평가에 적용된 내용을 준용하여 선박은 건조설비 투자액의 2%, 해중 자항기와 양광관에 대해서는 설비비의 20%, 다른 부대설비에 대해서는 설비비의 5%를 적용했다(Andrews et al. 1983). 또한 육상의 탈염처리에 대해서는 제조설비 투자액의 4%를 적용했다(朴 등 2002).

4) 인건비: 플랜트에 종사하는 인력은 시스템 운전엔 필요한 노무종류에 맞추어 추정했다. 채광시스템은 작업원과 승무원의 조업조건에 맞추어 30-day-on, 30-day-off의 2교대로 일하는 것으로 가정하고 육상작업인 탈염처리엔 필요한 노무량을 평가하여 급료, 환율을 적용하여 산출했다.

5) 손해보험비: 선박과 처리설비에 대해서는 석유화학 플랜트의 기획설계에 사용되는 제조설비 투자액의 1%를 적용하고 2교대 작업원에 대한 보험료를 추가하여 설정했다(朴 등 2002).

6) 재산·종합토지세: 선박, 건축물에 대해 지방세법 제 234조에 의거 과세(시가)표준액의 0.3%를 재산세, 또한 종합토지세로서 과세표준액의 0.3%를 적용했다.

7) 금리: 차입금의 금리에 대해서는 우량기업의 기업대출 평균금리를 적용하여 연 4%로 적용하고 차입금은 12년내에 변제하는 것으로 설정했다. 변제금은 일정금액으로 상정하고 여유분은 임시비로 보유하는 것으로 가정하였다.

8) 일반관리비: 석유화학 플랜트의 기획설계에 사용되는 운전비의 5.5%를 적용했다.

9) 조업관리비·잡비: 석유화학 플랜트의 기획설계에 사용되는 수선비의 5%를 적용했다.

10) 부가가치세: 생산되는 부가가치에 대해 부과되는 일

반소비세로서 부가가치세법 14조에 의거하여 세율은 총 판매액의 10%를 과세했다.

11) 법인세, 지방세: 법인세는 법인세법 55조에 의거 25%를 적용하고 지방세는 지방세법령에 의거 법인세의 10%를 적용했다. 또한 이 세금은 당해년도까지 결손이 있었던 경우에는 이익이 발생했던 시점에서 손실을 보전한 후 남은 이익에 부과했다.

금속가격

금속가격은 World Bureau of Metal Statistics(2005)로부터 2005년의 평균치를 계산하여 Cu: US\$ 1.67/lb, Pb: US\$ 0.44/lb, Zn: US\$ 0.63/lb, Au: US\$ 444.90/oz, Ag: US\$ 7.32/oz로 설정하였다.

5. 평가모델의 시스템구성

채광시스템

해저열수광상 채광기의 구성 기기는 침니, 마운드 등으로 형성되어 있는 열수광상을 굴착하는 굴착장치, 굴착된 광석을 집광하는 집광장치, 탑재된 이들 기구를 움직이는 주행기구로 크게 나눌 수 있어 현재 진행 중인 망간단괴 및 망간각 상업적 개발을 위한 연구개발 및 그 응용기술 범위 내에 있다고 생각되어 진다(Schwarz 2001).

따라서 본 연구에서는 굴착, 집광, 분쇄 등 일련의 작업이 연속되어 이루어질 수 있는 자항식 채광기와 수중펌프에 의한 유체드렛지방식을 채광시스템 모델로 채택하였다(Fig. 5 참조).

굴착방법에 대해서는 상기(上記)의 광석 물성특성을 위한 분석 결과를 참고하여 압축강도가 15 MPa인 지형을 대상으로 설계한 비트삽입 자유회전식 압쇄롤러를 장착한 굴착장치, 집광된 광석에서 과대파쇄편을 제거하기 위한 분리·파쇄장치로서 그리즐리(Grizzly)와 작은 싱글 롤 크러셔(Single roll crusher) 파쇄기 등을 탑재한 시스템이

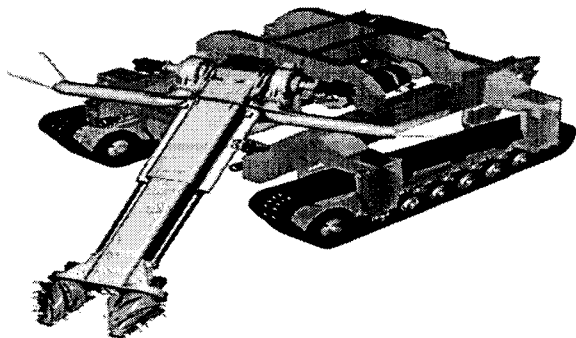


Fig. 5. Self-propelled miner proposed for seafloor massive sulfide development.

다. 그 외에 본체 플레임, 주행장치, 공급장치, 제어장치 등으로 구성되어 있다.

또한 상부구조의 바깥둘레에는 전도, 전락, 매물 등의 돌발사고에 대비하여 장치를 보호하기 위한 롤오버 프로텍션 스트럭처(Roll over protection structure)를 장비하고, 계측기기, 감시기기 및 조명 등이 장착된다.

개발조건은 연간 300,000톤(습윤기준), 연간조업 250일, 1일 1,200톤 규모를 계획하였다. 채광기의 용량에 대해서는 채굴적지(適地)만을 가동한다고 가정하여 채굴량은 약 80 t/h 규모로 설계하였다. 이 경우, 채광기의 크기는 길이 11 m, 폭 4.5 m, 높이 4.2 m이며 개략적인 중량은 본체 12톤, 주행장치 18톤, 굴착장치 4톤, 수확장치 2.5톤, 유압장치 3.0톤, 그 외 7.5톤(공급장치 2톤, 제어장치 1톤, 채광물 2.5톤)으로 상정하여 합계 47톤 정도로 설정했다. 동력은 350 kW 정도이고, 채광 시 주행속도는 0.6 m/s로 고려했다.

채광기 비용은 인도의 410 m에서 해사채취를 위한 자항식집광기 실험역 파일럿실험내역을 인용하여 스케일 계산법에 의해 생산량 및 수심 변동에 따른 채광기 비용을 산출했다(Deepak et al. 2001).

양광장치는 1,400 m의 해저에서 선상까지 광석을 양광하는 것으로 주요 구성기기는 채광기에 장착된 라이저 급광장치, 유연호스 및 부력재, 양광관, 양광펌프로 구성된다.

채광선은 채광선의 저장능력과 운반선의 이송방법과 관련하여 25,000톤(9,000톤 저장광)급 디젤발전기식 전기추진기관을 상정하였다. 건조비, 운전비 등의 비용은 망간단괴 채광시스템의 파일럿 플랜트 실험 등 상업적 생산을 위한 기술·경제적 가능성 평가에서 검토된 정보자료를 활용하여 산출했다(Andrews et al. 1983; Søreide et al. 2001).

채광시스템에 필요한 노동력은 조업조건을 고려하여 9명의 선상 승무원과 18명의 채광 작업원으로 구성하고 30-day-on, 30-day-off의 2교대로 조업하는 것으로 설정했다.

또한 채광선상에는 건조장치를 설치하여 단괴에 포함되어 있는 수분을 제거하여 운반비 절감을 도모하고자 했다. 양광된 단괴는 정량공급기에 의해 분쇄기를 거쳐 건조기(RAS-650)에 들어가는 구조로서 처리량 43 t/h으로 상정하는 경우 1대 당 연료 사용량은 0.9 kl/h(A중유), 전기 사용량은 250 kWh가 소요된다.

탐사비는 현재 한국해양연구원이 보유·운영 중인 은누리호의 항해비용을 바탕으로 육상지원 인건비, 휴항비용 등을 제외한 생산 직전의 정밀조사 비용만 고려하여 연간 2백만 달러가 지출되는 것으로 추정하고, 채광해역의 환경영향평가를 위한 조사비용은 포함하지 않았다.

선광처리

육상의 黑鑛 광석은 각 구성광물이 매우 미세할 뿐만 아니라 복잡성, 다양성, 다원성을 가진 조직으로 구성되고 있어 선광분리가 어렵다는 특징이 있다(飯島 1967; 前田 1976). 背弧海盆·海洋島弧계의 괴상광상은 생성원인 및 조성이 黑鑛 광석과 매우 유사하기 때문에 黑鑛의 선광기술이 그대로 적용 가능하리라 생각된다(Sillitoe 1982).

본 연구에서는 (주)일본광업의 花輪(明通系)선광조업 방식을 채택하였다. 당사(当社)는 납·아연 품위가 높고 황철광 함유율이 낮은 순수 黑鑛을 종합직접부선부선(All bulk straight flotation)이라는 독특한 특징을 가진 방법으로 처리하여 우수한 선별효과를 나타냈다(飯島 1967).

본 공정의 특징은 비교적 조광(粗鑛) 상태에서 올 벌크 부유선광을 실시하여 그 정광을 재 마광(摩鑛) 후, 아황산과 덱스트린(dextrin)의 억제작용을 이용해 동·납·아연·황철광 순서로 직접부선 부유선광을 실시하는 방식이다. 아황산법은 부선억제 특성에서 볼 때 동광물과 아연광물의 부선분리가 기대된다. 또한 덱스트린 병용에 의한 동·납·아연·황화철 분리방법은 종래의 시안법에 비해 금·은의 용해 손실이 없다는 점에서 뛰어나다. 부선원광의 입도는 -200 mesh 60~65%, 처리액 pH는 6.0부근, 부선제로는 포수제(捕收劑), 기포제 및 약간의 황산만을 사용하고 있다.

Table 4에는 飯島(1967)가 연구한 부유선광 결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서 상정하고 있는 해수를 이용한 선상 부유선광 처리를 수행하기 위해서는 해수와 담수에 의한 부유선광 영향을 분석할 필요가 있다. 해수에 의한 복합 황화물의 부유선광처리에 대해서는 홍해의 Atlantis II Deep의 중금속니를 대상으로 실험적 선상 처리를 수행한 예가 있다. 유사한 원광품위를 대상으로 한 高草木(1954)의 논문과 비교하여 양자의 선별결과를 보면 해수와 담수에 따른 효과의 차이점은 거의 없는 듯이 보인다. 하지만 黑鑛형 열수광상에 대해서 실제로 해수를 이용하여 부유선광 처리를 실시한 예가 없기 때문에, Table 4의

회수율, 정광량 등의 선별결과를 그대로 적용하는 것은 의문점이 남는다.

따라서 본 연구에서는 선별효과가 10% 나빠져 유용금속 회수율이 떨어진다는 가정하에서 모델을 구축하였다. 구체적으로는 정광량은 그대로 적용하고 품위만을 Table 4의 선별결과에 0.9를 곱한 수치가 모델에 입력되도록 설정하였다.

조업조건은 연간 256,368톤(건조기준), 1일 1,025톤(건조기준)규모를 처리량으로 계획하였다. 부유선광의 결과, 동정광은 동이 74.5%, 금이 34.5%, 은이 58.7% 회수되어 정광품위는 동이 22.1 wt%, 금이 8.4 g/t, 은이 1,157.1 g/t이며, 광량은 14,691 t/y이 된다. 또한 납정광은 납이 64.6%, 금이 3.6%, 은이 10.0% 회수되어 정광품위는 납이 50.4 wt%, 금이 1.6 g/t, 은이 352.7 g/t이며, 광량은 8,204 t/y이 된다. 아연정광은 아연이 76.0%, 금이 25.4%, 은이 13.4% 회수되어 정광품위는 아연이 47.4 wt%, 금이 2.1 g/t, 은이 90.1 g/t이며, 광량은 43,120 t/y이 된다.

선광처리에 있어 노동력은 채광시스템으로부터의 지원이 가능하다고 생각되어 몇 명분의 인건비만을 산정하였다. 또한 선광처리 후, 맥석에 대해서는 직접 해양에 투기하는 것으로 가정하였다.

유엔해양법 협약은 개발에 있어 주변어업 관련국의 피해에 대한 보상 등이 필요하지만 구체적인 방법, 금액 등에 대해서는 개발 단계에서 논의하기로 하여 본 연구의 모델개발에서는 피해보상비를 계상하지 않았다.

해상수송

선별된 동정광, 납정광, 아연정광을 광석 판매하는 황화물제련소는 국내로 상정하였다. 채광위치로부터 국내까지는 약 4,860해리(8,750 km)로서 평균속도 16노트(Laden 15 노트, Unladen 17노트)로 가정한다면 정광수송에는 편도 12.6일이 소요된다. 광석하역과 해상플랫폼에서의 이송작업을 고려해 1회 왕복을 28일로 설정했다. 따라서 조업일수를 250일로 고려해 본다면 연간 9회의 운반이 가능하다.

Table 4. Results of Cu-Pb-Zn-Sp flotation in Hanawa Flotation Plant (飯島, 1967).

	Mass		Metal yields					Relative mass		Mineral Processing efficiency					
	t	g/t	Au g/t	Ag g/t	Cu %	Pb %	Zn %	S %	%	Au %	Ag %	Cu %	Pb %	Zn %	S %
Supplied ore	4,031	1.4	113	1.7	2.5	10.5	12.5	100	100	100	100	100	100	100	100
Cu conc.	231	9.2	1,291	24.0	3.8	10.3	34.7	5.7	38.3	65.2	83.1	8.9	5.6	15.9	
Pb conc.	129	1.7	392	0.8	54.9	16.3	20.9	3.2	4.0	11.1	1.8	71.8	5.0	5.4	
Zn conc.	678	1.9	100	1.2	1.8	52.7	31.1	16.8	28.2	14.9	10.4	12.1	84.1	41.8	
Sp conc.	485	2.3	35	0.3	1.0	1.5	31.8	12.0	20.3	3.8	1.7	4.9	1.7	30.5	
Tailing	2,508	0.2	9	0.1	0.1	0.5	1.3	62.3	9.2	5.0	3.0	2.3	3.6	6.4	

연간 운반량이 66,015톤(동정광 14,691 t/y, 납정광 8,204 t/y, 아연정광 43,120 t/y)인 것을 고려하면 1회 수송량은 7,335톤이 된다. 그러므로 본 연구에서는 9,500톤급 규모의 1척으로 운반하는 것을 가정했다.

연료소비량은 망간단과 경제성평가에서 고려된 데이터를 준용하여 600 bbl/d(해상 550 bbl/d, 항만 48 bbl/d, 운할유 2.4 bbl/d)로 계산하고, 간이 전용항만시설과 정비시설도 건설하는 것으로 가정했다.

제련시스템

해저열수광상의 제련시스템 검토에 있어서는 기존 육상 황화물 처리 제련소를 이용하여 신규 제련소를 건설하지 않는 잇점을 살려 개발개념모형을 고려할 수가 있다. 국내에 가동 중에 있는 황화물제련소에 유용금속정광을 판매함으로써 심해저광물자원개발에 필요한 초기투자자금의 반 이상을 차지하는 제련시스템 비용을 대폭적으로 삭감함에 따라 경제적인 개발 가능성을 한층 더 높일 수 있는 개발구상이 될 수 있다 하겠다.

건식제련법에 의한 동과 금·은 회수율은 (株)住友金屬鑛山, (株)三井金屬鑛業, (株)三菱金屬鑛業, (株)日本鑛業, (株)小坂鑛業 등 일본 6사(社) 제련소의 연간 평균 실적치인 동 98%, 금·은 98%를 적용하였다. 또한 아연은 일본 (株)日曹金屬(會津製鍊所), (株)東邦亞鉛(安中製鍊所)의 연간 평균 실적치인 95%, 납은 제련소마다 방법과 원료가 크게 달라 94~98%로 차이가 있지만 본 연구에서는 아연과 같이 95%로 설정하였다.

신규제련소를 건설하지 않는 경우에도 해수에 의한 부유선광 후 운반되는 동정광, 납정광, 아연정광은 기존 황화물제련소가 매수할 수 있는 광석조건으로 맞추기 위해 탈염처리 및 건조 처리공정이 육상에서 실시될 필요가 있다. 따라서, 간이항만시설이 건설되는 주변에 그 처리시설을 설치한다고 가정했다. 본 연구에서는 해상수송은 탈염·건조처리 시설과 지휘·운영 본부를 설치하는 비용이 모두 포함되어 있다.

이상의 경제적 파라미터를 고려해서 산출한 해저열수광

상의 총비용 내역은 Table 5와 같다.

6. 기본적 수익판단법

1) 자본회수법(Payback Periods): 세금공제 후 이익과 감각상각비의 합계금의 연 누적액이 자산투자액에 도달하는 연수를 구한다.

2) 순 현재가치(Net Present Value): 산정된 모든 지출과 수입의 현금흐름(Cash flow)을 현재가치로 환산해 최초의 투자자본과 수익의 차에 의해 구한다. 정부에서는 국고지원 대상사업에 대해 공공사업간의 상호비교가 가능하도록 공공투자사업의 적정할인율을 적용하도록 되어 있는데 그 수준은 소비자이자율(은행금리, 제2금융권금리, 공사채수익율), 생산자이자율(총자본이익율, 자기자본이자율), 국제기구 계산방법(OECD, 세계은행) 등에 의거하여 산출하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 바탕으로 8%의 할인율을 적용하여 분석하였다.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}$$

B_t : 수익(= 감각상각비 + 세금공제후 이익 - 차입금변제), C_t : 투자자본, i : 할인율(8%), n : 프로젝트 년수(23년), t : 년차

3) 내부수익률(Internal Rate of Return): 산정된 모든 지출과 수입의 현금흐름(Cash flow)을 현재가치로 환산해 최초의 투자자본과 수익이 일치하는 할인율을 구한다.

$$\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} = \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t}$$

이상과 같이 해저열수광상의 경제성 평가모형을 구축한 결과를 Table 6에 나타낸다.

국내에 설치되어 있는 기존 황화물제련소에 동정광, 납정광, 아연정광을 광석 판매하는 경우, 그 가격은 제련처리 되어 생산되는 동, 납, 아연, 금, 은 금속의 판매수익 중 75%를 매도자측 기준거래가격으로 설정하고, 70%를 매수자측 기준거래가격으로 설정하였다.

그 결과, 광석 판매가격을 75%로 설정하는 경우는 자본회수기간은 11.8년, 순 현재가치(할인율 8%)는 US\$

Table 5. Total investment cost of seafloor massive sulfide.

Item	Seafloor Massive Sulfide	
	Capital costs	Operating costs
Mining system	81.5	11.0
Mineral processing	20.9	3.7
Transportation	28.5	5.3
Sub-total	130.9 M\$	20.0 M\$
Continuing expenses		15.4
Working capital		15.0
Total		161.4 M\$

Table 6. Results of economic evaluation for 300,000 t/y production scale.

Sensitivity factor	Production scale: 300,000 t/y		
	Payback periods (year)	NPV (\$)	IRR (%)
Metal Sales in 75%	11.8	7M	9.4
Metal Sales in 70%	13.6	-7M	6.6

7 million, 내부수익율은 9.4%로 나타났다. 또한 광석 판매 가격을 70%로 설정하는 경우 자본회수기간은 13.6년, 순현재가치는 US\$ -7 million, 내부수익율은 6.6%로 나타나 매도자측 거래가격 설정 결과와 비교해 2.8% 정도 경제성이 낮게 나타났다.

본 연구에서는 Table 1의 BMS 분석결과에서도 알 수 있듯이 해저열수광상의 평균품위가 Cu: 6.67 wt%, Pb: 0.78 wt%, Zn: 14.95 wt%, Au: 6.38 g/t, Ag: 391.8 g/t로 보고되고 있는 것과 비교해 본다면, 약 4배 정도 낮게 설정된 육상 黑鑛광상의 평균품위를 설정한 평가 결과이다. 따라서 이러한 설정만으로도 경제적인 수익 가능성이 나타날 수 있다는 사실에 주목할 필요가 있다 하겠다.

망간단괴 및 망간각은 망간·철의 산화광물로 구성되어 있어 상업적 개발을 위해서는 신규로 습식 제련소를 건설할 필요성이 있다. 이로 인해 초기투자비용의 경제적 부담 증가가 장애요인으로 지적되고 있다. 그렇지만, 해저 열수광상은 신규로 제련소를 건설하지 않고 기존의 황화물제련소를 이용하는 개발개념을 통하여 대폭적인 경제성 향상을 도모할 수 있다는 장점에 상업적 개발 가능성의 기대를 높이고 있는 것이다.

7. 결 론

해저열수광상의 광체구조, 평균품위, 광량, 물성특성 등을 포함한 광상 부존상황과 채광 및 선광처리기술에 대한 연구가 이루어지지 않은 상황 하에서 본 연구는 개발개념모델을 구축하는 단계에 머물렀다. 가정한 파라미터가 많고 기존의 망간단괴 개발을 위한 사업타당성 분석(Feasibility Study) 설정치 적용, 개발에 따른 주변어업관련국에 대한 보상, 금속시장의 수급변화에 따른 가격변동을 고려하지 않은 점 등 현 단계에서는 정밀도 높은 경제성 평가모델을 구축하였다고는 말할 수 없다.

그러나 본 연구는 심해저 망간단괴자원 개발에 있어서는 투자자본의 대폭적인 삭감이 필요하다는 것을 인지하여 해저열수광상 개발은 기존 육상 황화물제련소를 이용하는 개발모델을 구축함으로써 대폭적인 경제성 향상 가능성을 기대할 수 있음을 알았다.

또한 현재 추진 중에 있는 해저열수광상 개발사업의 탐사, 채광, 선광, 제련 등 각 분야에 있어 상업적 개발에 필요한 정보기술의 현재 도달수준을 파악할 수 있었다. 이를 바탕으로 추후 해저열수광상 개발에 대한 연구자나 기술자의 연구 수행에 있어 제안된 연구개발비를 효과적으로 사용할 수 있도록 기본적인 정책결정의 판단기준으로서 역할을 수행할 수 있으리라 기대된다.

앞으로 추진해야 할 기술적 과제를 검토해 보면 광체구

조, 평균품위, 광량파악, 고품위부분의 분포상황 등을 포함한 광상부존상황의 정보수집, 해저에서의 채굴장치와 채굴방법의 검토, 선광처리 시의 파쇄장치와 파쇄방법의 검토 등 개발시스템 설계를 위한 강도·경도 등의 공학적 특성 파악, 선상에서 해수를 이용한 선별효과 및 영향, 탈염처리효과 등의 처리기술에 대한 분석 등 필요한 조사연구 및 기술개발 과제가 다수 남아 있다.

이러한 광상부존 및 분포상황을 정확히 파악하기 위해서는 지형과 지질구조 파악을 위한 정밀 지구물리 탐사기법 개발이 요구된다. 또한 열수광화작용의 단계 및 진화특성의 이해와 자원으로서의 가치를 평가하기 위해서는 해저면 하부구조를 파악할 필요가 있다.

향후 우리나라가 해저열수광상개발 대상해역을 선정해 추진할 계획으로 있는 라우분지 포넬라이 확장대해역 광상은 탐사결과에 따라서는 상업적 개발 가능성이 기대될 수도 있다. 이에 보다 상세한 데이터 수집과 분석을 위해 조직적·지속적인 조사연구가 필요하다 하겠다. 이와 같은 데이터의 수집·분석결과를 근거로 향후 모델 개량을 수행하고 경제적인 개발 가능성을 위한 다각적인 평가를 통해 효율적인 전략방안을 수립해 나아가 갈 예정이다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 “2005 남서태평양 광물자원(해저열수광상, 망간각) 개발(PM36003)” 연구의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- 高草木政英. 1954. 粗鉱の性質変化と浮選成績の変動に就て. 浮選, 1, 12-19.
- 朴洗憲, 山崎哲生, 島田莊平, 山本恭久. 2002. コバルトリックラスト의ポテンシャル比較手法の開発. 資源と素材, 118, 641-649.
- 飯島一. 1967. 黑鉱のオールバルク優先浮選方式について. 日本鉱業會誌, 83, 364-369.
- 石岡豊三, 高橋堅之. 1975. 神子畑選鉱工場の変遷と現況. 日本鉱業會誌, 91, 251-258.
- 石炭開發技術協力センター. 1993. よくわかる資源の經濟性評價. Tokyo, 208 p.
- 前田耕一. 1976. 硫酸による銅と鉛・亞鉛の分離浮選について. 浮選, 23, 249-251.
- 한국감정원. 1999. 유형고정자산 내용년수표. ISBN 89-88365-01-1, 425 p.
- 해양수산부. 2003. 남서태평양 해저열수광상 탐사 및 개발.
- 해양수산부. 2004. 남서태평양 해저열수광상 탐사 및 개발.

- 해양수산부. 2005. 남서태평양 해저열수광상 탐사 및 개발.
- Amann, H. 1985. Development of ocean mining in the Red Sea. *Mar. Mining*, 5, 103-116.
- 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 University College Station, Texas*. 201 p.
- Bendel, V., Y. Fouque, J.M. Auzende, Y. Lagabrielle, D. Grimaud, and T. Urabe. 1993. The White Lady Hydrothermal Field, North Fiji back-arc basin, Southwest Pacific. *Econ. Geol.*, 88, 2237-2249.
- 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. of the 4th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Szczecin, Poland.
- Fouquet, Y., U. Von Stackelberg, J.L. Charlou, J.P. Donval, J. Erzinger, J.P. Foucher, P. Herzig, R. Muhel, S. Soakai, M. Wiedickie, and H. Whitechurch. 1991. Hydrothermal activity and metallogenesis in the Lau Back-arc Basin. *Nature*, 349, 778-781.
- Francheteau, J., T. Juteau, and C. Rangan. 1979. Basaltic pillars in collapsed lava-pools on the deep ocean-floor. *Nature*, 281, 209-211.
- Halbach, P., K. Nakamura, M. Wahsner, J. Lange, L. Kaselitz, R.D. Hansen, M. Yamano, J. Post, B. Prause, R. Seifert, W. Michaelis, F. Teichmann, M. Kinoshita, A. Marten, J. Ishibashi, S. Czerwinski, and N. Blum. 1989. Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulfide deposit in the Okinawa Trough back-arc basin. *Nature*, 338, 496-499.
- Haymon, R.M. and M. Kastner. 1981. Hot spring deposits on the East Pacific Rise at 21°N: Preliminary description of mineralogy and genesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 53, 363-381.
- Hekinian, R., M. Fevrier, J.L. Bishoff, P. Picot, and W.C. Shanks. 1980. Sulfide deposits from the east pacific rise near 20°N. *Science*, 207, 1,433-1,444.
- Hekinian, R., M. Fevrier, F. Avedik, P. Cambon, J.L. Charlou, H.D. Needham, L. Raillard, J. Boulegue, L. Merlivant, A. Moinet, S. Manganini, and L. Lange. 1983. East Pacific Rise near 13°N: Geology of new hydrothermal field. *Science*, 219, 1321-1324.
- Iizasa, K., R.S. Fiske, O. Ishizuka, M. Yuasa, J. Hashimoto, J. Ishibashi, J. Naka, Y. Horii, Y. Fujiwara, A. Imai, and S. Koyama. 1999. A Kuroko-type polymetallic sulfide deposit in a submarine silicic caldera. *Science*, 283, 975-977.
- Macdonald, K.C., P.J. Fox, L.J. Perram, M.F. Eisen, R.M. Haymon, S.P. Miller, S.M. Carbotte, M.-H. Cormier, and A.N. Shor. 1988. A new view of the mid-ocean ridge from the behaviour of ridge-axis discontinuities. *Nature*, 335, 217-225.
- Morgan, J.P. and Y.J. Chen. 1993. Dependence of ridge-axis morphology on magma supply and spreading rate. *Nature*, 364, 706-708.
- Nawab, Z. 2001. Atlantis II Deep: A future deep sea mining site. p. 301-313. In: *Proc. Proposed Technologies for Mining Deep-Seabed Polymetallic Nodules*, Kingston, Jamaica, Int. Seabed Authority.
- Rona, P.A. 1985. Hydrothermal mineralization at slow-spreading centers: Red Sea, Atlantic Ocean, and Indian Ocean. *Mar. Mining*, 5, 117-145.
- Sarata, S. and K. Matsumoto. 1999. Deepsea cor boring by BMS in Northern Mariana Area. p. 49-54. In: *Proc. 3rd ISOPE Ocean Mining Symp.*, Goa.
- Schwarz, W. 2001. An Advanced Nodule Mining System. p. 39-54. In: *Proc. Proposed Tech. for Mining Deep-Seabed Polymetallic Nodules*, Kingston, Jamaica, Int. Seabed Authority.
- Scott, S.D. 1985. Seafloor polymetallic sulfide deposits: modern and ancient. *Mar. Mining*, 5, 191-212.
- Sillitoe, R.H. 1982. Extensional habitats of rhyolite-hosted massive sulfide deposits. *Geology*, 10, 403-407.
- Søreide, 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.
- Spieß, F.N., K.C. Macdonald, T. Arwater, R. Ballard, A. Carranza, D. Cordoba, C. Cox, V. Diaz-Garcia, J. Francheteau, J. Guerrero, J. Hawkins, R. Haymon, R. Hessler, T. Juteau, M. Kastner, R. Larson, B. Luyendyk, D. Macdougall, S. Miller, W. Normark, J. Orcutt, and C. Rangin. 1980. East Pacific Rise: Hot springs and geophysical experiments. *Science*, 207, 1,421-1,433.
- World Bureau of Metal Statistics. 2005. *World Metal Statistics*.
- Yamada, H. and T. Yamazaki. 1998. Japan's ocean test of the nodule mining system. p. 13-19. In: *Proc. of the 8th Int Offshore and Polar Eng. Conf.*, Montreal.
- Yamazaki, T., K. Tsurusaki, and K. Handa. 1991. Discharge from manganese nodule mining system. p. 440-446. In: *Proc. of the 1st Int Offshore and Polar Eng. Conf.*, Edinburgh.
- Yamazaki, T. and S.-H. Park. 2003. Relationship between geotechnical engineering properties and assay of seafloor massive sulfides. p. 310-316. In: *Proc. 13th Int. Conf.*

Offshore and Polar Eng., Honolulu.
Yamazaki, T., S.-H. Park, S. Shimada, K. Iizasa, and S. Shiokawa. 2003. A case study of mining seafloor massive sulfides in Japanese EEZ. p. 63-70. In: *Proc. 5th ISOPE Ocean Mining Symp.*, Tsukuba.
Yamazaki, T., Y. Tomishima, K. Tsurusaki, and K. Handa.

1990. Engineering properties of deep-sea mineral resources. p. 385-392. In: *Proc. of the 4th Pacific Congress on Marine Sci. and Tech.*

Received May 10, 2006
Accepted May 29, 2006