Vol. 31(2):167-176
DOI: 10.4217/OPR.2009.31.2.167

Ocean and Polar Research

June 2009

Article

심해저 망간각 개발의 경제성 평가

박세헌* · 양희철

한국해양연구원 해양정책연구실
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

A Technical and Economic Evaluation of Cobalt-rich Manganese Crusts

Se-Hun Park* and Hee-Cheol Yang

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

Abstract : Cobalt-rich manganese crusts on seamounts have received an increasing amount of attention as future resources for Co, Ni, Cu, and Mn. A dearth of detailed information regarding the relevant distribution characteristics, mining technologies, and ore processing technologies, however, has precluded potential evaluations of the technical and economic advantages of these crusts. In the past 4 years, Korea has undertaken a survey of the cobalt-rich manganese crusts in and around the Magellan Seamount and Mid-Pacific Mountains. This paper introduces the preliminary feasibility study of the distribution features and R&D results centered around the development of the cobalt-rich manganese crusts. The evaluation model was developed by modifying the model for the manganese nodules. In addition to considering the geological and geophysical differences between the manganese nodules and the cobalt-rich manganese crusts, an ore dressing subsystem was installed in the model. The mining subsystem is composed of a self-propelled collector--a pipeline with submersible hydraulic pumps for crust lifting. The smelting and chlorine leach method was selected for metallurgical processing. The production scales were established at 2,500t/y of cobalt metal. The production of three metals--cobalt, nickel, and copper--was considered in terms of metallurgical processing. The economic feasibility analyses demonstrated that the payback period was 11.4 years, the NPV was 36M$, and the IRR was 9.6% with the economic factors in the case of a cobalt price of US$ 25/lb. It was also demonstrated in this study that the payback period was 8.6 years, the NPV was 154M$, and the IRR was 14.0% in the case of a cobalt price of US$ 30/lb. This indicates that the approach under consideration appears to offer greater potential given the predicted metal prices.

Key words : Cobalt-rich manganese crust, economic evaluation model, deep-sea mining, ore dressing, metallurgical processing

1. 서 론

망간각은 망간단괴보다 얕은 수심 800~2,500 m 범위의 해저산 사면에 분포하여 채광비용에 있어 유리한 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 금속가격이 높은 코발트 함유율은 망간단괴 평균치보다 약 3배(0.8 wt%) 이상 높은 품위도 발견되고 있다(Hein et al. 1985; Hirt et al. 1988; Cronan and Hodkinson 1993). 또한, 육상광상에서도 금의 생산량과 비교하면 20분의 1 정도로 산출량이 극히 적은 백금을 함유하고 있어 경제적 가치가 주목되어 왔다(Manheim 1986; Ritchey 1987).

그러나, 망간각은 유용금속이 포함되어 있는 각(Crust) 부분이 기반암을 피복한 상태로 밀착되어 있기 때문에 망간각 부분만을 선택적으로 채굴하는 것은 현재의 기술로

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

서는 어렵고 채굴된 광석에 기반암이 혼입되는 것은 피할 수 없는 과제로 남아 있다(Hein et al. 1988; Yamazaki et al. 1992).

따라서, 망간각 개발에서는 기반암을 가능한 적게 혼입되도록 채굴하고, 또한 혼입된 기반암을 제거하기 위해 선광처리를 도입하는 것이 필요하다. 이러한 요인들의 채굴 및 처리에 따라서는 앞에서 언급한 망간각의 장점을 살리지 못할 가능성도 배제할 수 없어 경제성 평가를 수행하는데 있어 기술·경제적 검토가 충분히 이루어져야 할 사항이다.

망간각이 심해저광물자원으로서 주목을 받아 탐사가 시작된 것은 망간단괴보다 매우 늦게 이루어졌기 때문에 기술·경제적 검토를 위한 자료 축적은 미흡한 실정이다(Hawaii DPED 1987). 따라서 본 연구에서는 심해저 망간단괴 상업적 개발을 위해 수행해 왔던 개발기술 정보를 활용하여 개발시스템에 필요한 투자설비와 그 처리비용, 운반비용 등 망간각 개발에 있어 불충분한 데이터를 응용하여 기술·경제성 평가 모델을 구축하였다. 망간단괴의 기술정보를 활용할 수 있는 근거로서는 개발 대상 유용광물(Co, Ni, Cu)이 동일하다는 점, 동일한 Mn·Fe 산화광물로 구성되어 제련처리기술이 동일하다는 점, 채광방식에 있어서도 유사한 특징이 많다는 이유를 들어 필요한 기술·경제적인 요소를 적용하였다.

구체적으로는 망간단괴 개발 시스템과 같은 방식을 채용하고, 위치, 수심, 품위 등의 파라미터와 채굴난이, 선광처리 등에 대한 기술적인 특징을 반영하여 모델을 개발하였다.

2. 국내외 현황

망간각 개발에 대해서는 미국이 자국의 배타적경제수역(EEZ) 및 인근 공해지역을 대상으로 독일과의 일부 공동탐사를 포함하여 총 150여 곳의 해저산 조사를 수행하였고, 일본, 러시아, 프랑스 등도 마샬제도, 키리바스, 마젤란해산군, Mid-Pacific Mountains 등 남서태평양 도서국 EEZ 및 인근 공해지역을 대상으로 조사활동을 수행하여 왔다(Halbach and Manheim 1984; Hein et al. 1985; Yamazaki et al. 1992; Cronan and Hodkinson 1993). 이러한 많은 지질·지구물리적 조사연구를 통해 망간각 광상의 수평·수직적 분포상황, 지형 및 기반암의 암석학적 특성과 종류 등 일반적 특징은 상세하게 규명되어 왔다(Yamazaki et al. 1994; Usui and Someya 1997).

특히 일본은 석유천연가스·금속광물자원기구(JOGMEC)를 통해 1987년부터 南鳥島~웨이크섬 공해해역(JA해역) 22해산과 1988년에는 웨이크섬~존스턴섬 공해해역(JB해역) 15해산에서 지형조사, 샘플링조사를 통해 망간각 내부조직과 금속함유량 등 지화학적 특성을 통한 부존상황 조사를 수행하였다(Yamazaki et al. 1995).

망간각 광상이 상업생산에 이르기 위해서는 탐사뿐만 아니라 채광시스템, 선광·제련처리기술에도 지속적인 연구개발이 필요하지만 아직 미확립된 요소가 많이 남아있다. 지금까지 검토된 채광시스템은 컷헤드를 굴착장치로 지형 변화와 장애물에 대응 가능한 자항식 집광기에 의한 유체 드렛지방식이 제안되었다(Halkyard 1985; Latimer and Kaufman 1985). 또한, 선광처리를 통하여 기반암을 폐석으로 제거하기 위해 부유선별, 자력선별, 비중선별 등의 기초시험이 수행되었다(Hirt et al. 1988; 深海底鉱物資源開發協會 1997). 제련처리는 망간단괴와 같이 Mn·Fe 산화광물로 구성되어 있어 기본적으로 망간단괴의 용해·침출처리 방법과 거의 동일한 방식을 채용하여 망간각 적응성 검토 및 유가금속 회수율 향상 등의 처리공정 연구를 수행하여 왔다(Hawaii DPED 1987).

국제해저기구(International Seabed Authority; ISA)는 2004년 심해저 망간각 및 해저열수광상 개발을 위한 광업규칙 초안(Model Clauses)이 산하 법률기술(위)를 통해 마련하였으나, 열수광상과 망간각의 광상 특성 및 상업화 가능성을 고려하여 열수광상규칙안을 우선 제정토록 하였다. 현재 제 14회기까지 대부분의 해저열수광상규칙안 조문이 논의 및 합의되었다는 점에서 망간각 규칙도 조기에 가시화될 것으로 사료된다. 또한 남태평양응용지구과학위원회(South Pacific Applied Geoscience Commission; SOPAC)에서는 1999년 남서태평양 도서국 EEZ에서의 해양광물자원개발을 위한 정책지침과 2001년 해양과학조사를 위한 정책지침 작성을 통해 상업적 개발 계획(안)을 마련하여 왔었다.

우리나라의 망간각 광상에 대한 연구개발 사업은 2001~2004년에 걸쳐 1단계로 공해지역 및 남서태평양 도서국 EEZ에서의 광역탐사를 수행한 바 있으며, 특히 2003년에는 괌(Guam)동부 공해지역의 마젤란해저산군 해저산 3개를 대상으로 지형도 작성 및 경사분석, 지자기 이상치 분석, 천부지층 음향특성 등 지구물리조사, 기반암 속성작용 및 퇴적지역의 고해양환경 해석과 수층환경 특성 해석 등을 위한 정점조사 등 실해역 광역탐사를 통해 망간각 분포가능지역 분류와 자원잠재력 평가를 수행하였다(해양수산부 2003). 2004~2005년에 걸쳐서는 마젤란해저산군 20여개 지역의 광역탐사를 수행하였고(해양수산부 2004; 해양수산부 2005), 향후 개발유망지역 선정을 통한 ISA 광구등록을 추진할 계획에 있다.

3. 경제성 평가 기법

평가기준 생산량

과거에 실시된 심해저 망간단괴 개발을 위한 경제성 평

가(Andrews et al. 1983; Hillman and Gosling 1985; Herrouin et al. 1989; Søreide et al. 2001)는 금속시장의 규모를 상정하지 않고, 생산된 금속량이 많아도 가격시장에 미치는 영향은 고려하지 않았다. 그러나, 소비량이 적은 코발트시장 규모에서 코발트 함유량이 높은 망간각으로부터 생산되는 금속량은 금속가격 영향을 고려할 필요성이 제기되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 연간 코발트 세계 소비량의 약 8%에 해당하는 2,500톤의 코발트 생산량을 기준으로 설정하고, 신규시장공급에 따른 가격 영향을 최소화하고자 하였다. 그리고, 다음에 기술(記述)하는 기술파라미터를 바탕으로 역산하여 채광 및 제련조업 규모를 상정하였다(朴 등 2002). 실제로는 생산량 8%의 규모라도 금속가격 시장에는 영향을 미칠 것으로 예상되지만, 본 연구에서는 개발개념모델 구축을 연구목적으로 두었기에 이러한 영향은 고려하지 않기로 한다.

니켈과 동에 대해서는 세계 소비량이 많은 이유로 생산규모를 제약할 요인으로 고려하지 않았다. 또한, 망간에 대해서는 Søreide et al.(2001)과 동일하게 에너지 소비량이 많은 이유로 다량의 CO_2 배출 문제와 대량생산에 따른 가격영향이 우려될 수 있다는 판단 하에 본 연구에서는 유용금속의 회수대상으로 고려하지 않았다.

지형 · 지질 조건

망간각의 경제성 평가 대상해역은 괌(Guam)북동부 약 360해리(Latitude N19°, Longitude E151°) 부근 공해지역에 위치한 마젤란해저산군을 선택하였다(Fig. 1). 기준조건은 수심 1,000~2,500 m의 망간각 광상 분포대의 사면 상부에서 얻어진 샘플 분석치로부터 평균 유용금속 함유율과 위치만을 실제 데이터로 사용하고 평균수심, 비중, 분포밀도, 기반암 종류, 기반암혼입율 등의 지질적 요소는 실제 데이터에 관계없이 임의로 가정하여 평가모델을 구축하였다.

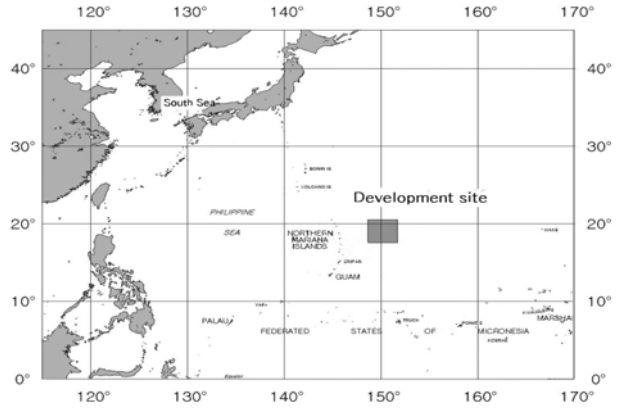

Fig. 1. Development site of cobalt-rich manganese crusts.

해저산의 지형적인 모델링은 다음과 같다. 표면적 1,500 km^2의 비교적 대형 해산을 설정하고, 그 면적의 20%에 걸쳐 망간각이 평균 두께 30 mm로 분포한다고 가정하였다(産業技術總合研究所 2002). 채굴대상은 분포면적 중 20%에 해당하는 평균 두께 50 mm의 산 정상 둘레 부근과 사면상부 지역이 개발대상으로 설정하였다. 분포밀도는 100 kg/m^2, 매장량은 600만 톤 정도로 추정하고, 동 해저산에서 채굴 종료 후에는 주변 다른 해저산으로 이동하여 채굴하는 것으로 가정하였다.

평균 유용금속 함유율은 Co: 0.62 wt%, Ni: 0.51 wt%, Cu: 0.11 wt%, 평균수심은 2,000 m, 망간각 부분의 습비중은 2.0, 함수율은 35%, 기반암 습비중은 2.5, 함수율은 10%, 기반암 혼입율은 약 20%, 기반암 구성은 석회암과 현무암이 각각 60%와 40% 비율로 구성한다고 가정하였다.

개발시스템 구성

채광시스템

망간각 채광시스템은 망간단괴와 비교해 볼 때 채광기에 굴착장치가 필요하다는 점과 양광관 길이가 짧다는 점을 제외하면 기본적으로 동일하다(Halkyard 1985; Latimer and Kaufman 1985). 따라서, 본 연구에서는 일본 深海底鉱物資源開發協會(Deep Ocean Mineral Association; 이하 DOMA) (1995)에서 제안한 지형 변화 및 장애물에 대응 가능한 주행장치와 컷헤드를 장착한 자항식 집광기와 수력펌핑 양광시스템을 결합한 유체 드레지 방식을 채택하였다(Fig. 2).

채광기의 굴착방법은 광석물성특성의 압축강도가 15 MPa 해저지형까지 개발 가능하도록 설계하였고, 컷헤드를 장착한 비트내장타입 자유회전식 압쇄롤러를 갖춘 굴착장치와 제트노즐 흡입장치를 갖춘 집광장치, 그리고 과대파쇄 편을 제거하기 위한 분리 · 파쇄 그리즐리

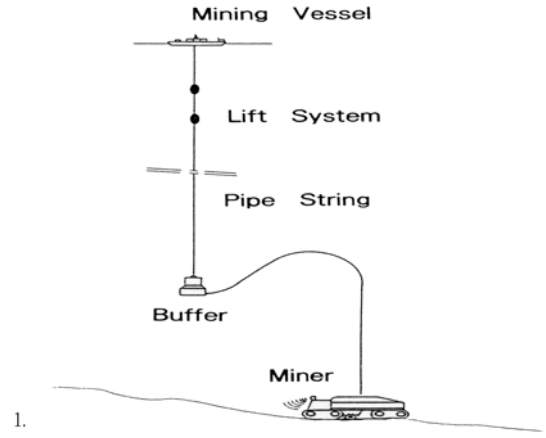

Fig. 2. Mining system for cobalt-rich manganese crust development (Yamazaki et al. 1995).

(Grizzly)와 작은 싱글 롤 크러셔(Single roll crusher)파쇄기를 탑재한 시스템으로 구성되어 있다(DOMA 1996). 그 외에 본체 플레임, 채집장치, 송출장치, 유압장치, 제어계측장치 등으로 구성되어 있다.

채광기 용량은 채굴적합지역에서만 가동하게 하고, 채집손실을 고려하여 채집량은 170 t/h으로 상정하였다. 채광 시 평균굴착두께는 50 mm, 평균접지압력 0.5 kgf/cm^2, 집광기 유효폭은 5 m, 망간각 습비중은 2로 설계하였다. 이 경우, 채광기의 크기는 폭 5.0 m, 길이 13.5 m, 높이 4.2 m이며 개략적인 중량은 본체 19톤, 주행장치 19톤, 굴착장치 5톤, 이 외 8톤(흡입장치 2.5톤, 공급장치 2톤, 제어장치 1톤, 채광물 2.5톤) 등 합계 51톤으로 추정하였다. 동력은 500 kW 정도가 소요되고 채광 시 주행속도는 0.4 m/s로 설정하였다.

수력펌프 양광에서는 양광관 도중에 1~2단의 고양정 다단슬러리펌프에 의해 최고 유속 5.0 m/s 속도로 채광선까지 관내수송이 이루어지는 것으로 설계하였다.

양광량이 163 t/h일 때 1호 펌프 본체는 설치 수심 1,000 m에 설치하고, 구경 298 mm, 정격출력 3,200 kW, 중량은 80톤(수중중량 72톤) 정도로 추정하였다.

채광선은 1일 습윤 3,893톤 처리규모로 설계하고 운반선 이송방법과 채광선 저장 능력과의 관계에서 약 41,000톤(28,000톤 저장조)급 규모를 상정하였다. 또한, 채광선상에는 건조장치를 설치하고 망간각에 포함되어 있는 수분을 제거하여 운반비용의 절감효과를 도모하고자 하였다. 양광된 망간각은 정량공급기를 통해 분쇄기를 거쳐 건조기(RAS-650)에 들어가는 구조로서, 시간당 처리량 125톤을 상정할 경우 1대 당 연료 사용량은 2.5 kl/h(A중유), 전기 사용량은 700 kWh 정도가 소요된다.

탐사비는 현재 한국해양연구원이 보유・운영 중인 온누리호의 항해비용을 바탕으로 육상지원 인건비, 휴항비용 등을 제외한 생산 직전의 정밀조사 비용만 고려하여 연간 2백만 달러가 지출되는 것으로 추정하고, 채광해역에서의 환경영향 조사비용은 포함하지 않았다.

선광시스템

망간각의 선광처리 목적은 유용금속이 포함되어 있는 Mn・Fe 산화물로 구성된 망간각 부분과 채굴 시에 혼입되는 기반암을 분리・선별하는 것이다. 이러한 경우, 기반암혼입율, 기반암에 포함되어 있는 현무암과 석회암의 함유비율 등에 의해 선광효율은 크게 영향을 미칠 것으로 예상된다. 현재까지의 선광처리를 위한 체계적인 실험데이터는 일본 DOMA(1997, 1998)에 의해 실시된 연구보고서가 유일하다. 따라서 그들이 실시한 부유선광시험, 자력선광시험, 비중선광시험 등의 데이터를 인용하여 시스템 설계를 수행하였다.

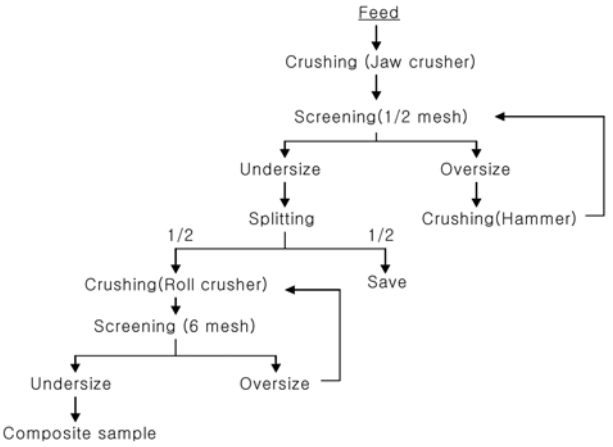

Fig. 3. Flowchart of composite sample arrangement.

Table 1. Chemical analysis of samples

(wt%)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Co	0.38	0.46	0.21	0.27
Ni	0.40	0.52	0.14	0.14
Cu	0.07	0.10	0.04	0.03
Fe	7.61	10.7	8.86	9.54
Mn	14.4	19.5	6.44	7.69
Ca	15.4	6.79	4.13	6.30
Si	2.07	3.09	16.0	11.7
Ti	0.52	0.78	1.45	1.10
S	0.49	0.39	0.15	0.37
C	2.9	0.57	0.14	0.65
Pb	0.10	0.13	0.15	0.07
Zn	0.06	0.06	0.01	0.06
Al_2O_3	1.13	1.4	11.5	6.59
Mg	0.83	0.99	1.26	1.38
Total	51.14	50.23	55.62	51.08

일본 DOMA의 실험 데이터

DOMA(1998)의 조사연구에서는 전부 4종류의 실험시료를 만들어 선광시험을 수행하였다. 각 시료는 Fig. 3에 나타난 공정도에 따라 −6 mesh의 입도까지 분쇄 후 성분분석과 함께 선광시험을 수행하였다. 실험시료의 화학성분 분석 결과를 Table 1에 나타낸다.

분석결과에서 유용금속의 차이는 망간각 부분 속에 포함되어 있는 유용금속 함유량의 차이와 기반암혼입율의 차이에 의해 발생하는 것이다. 그렇지만 DOMA(1998) 보고서에는 이들 데이터 차이에 대한 원인분석이 없다. 따라서 본 연구에서는 탐사채취 시료의 화학성분 분석자료를 조사해 유용금속 함유율은 Co가 0.66~0.84 wt%, Ni이 0.37~0.74 wt%, Cu이 0.07~0.13 wt%이라는 사실을 파악하였다. 이러한 결과를 바탕으로 혼입된 기반암 종류와 기반암혼입율에 대한 분석을 통해 4종류의 샘플시료 특징은

Table 2. Geological features of composite samples

Sample No.	The sampling site		Contents in crust (wt%)			Depth (m)	Landform
	Latitude	Longitude	Co	Ni	Cu		
Sample 1	N20°45.309'	E173°25.073'	0.76	0.74	0.13	1551	Slope upper
Sample 2	N20°08.503'	E156°39.225'	0.66	0.62	0.12	1945	Summit edge
Sample 3	N20°57.179'	E178°25.166'	0.76	0.44	0.13	2970	Slope lower
Sample 4	N20°54.810'	E178°32.226'	0.84	0.37	0.07	2460	Slope center

다음과 같이 재정의 하였다.

Sample 1: 평균 기반암혼입율 42%, 기반암 구성은 석회암:현무암=80%:20%의 석회암주체 모의광석

Sample 2: 평균 기반암혼입율 19%, 기반암 구성이 석회암:현무암=60%:40%의 각 부분 비율이 높은 모의광석

Sample 3: 평균 기반암혼입율 67%, 기반암 구성이 석회암:현무암=15%:85%의 현무암주체 모의광석

Sample 4: 평균 기반암혼입율 60%, 기반암 구성이 석회암:현무암=35%:65%의 복합기반암 모의광석

기반암혼입율은 평균 분석치로서 DOMA의 자료에서는 시험에 따라 급광의 기반암혼입율(바꿔 말하자면 유용금속 품위)은 수 %의 변동 폭이 나타난다. 또한 기반암 구성에 대해서는 시료의 화학분석 결과에서 석회암(Fluorapatite: $Ca_5(PO_4)_3F$ 등)과 현무암(Anorthite: $CaAl_2Si_2O_8$ 등)의 중심성분 비율을 구한 것이다. 시료의 샘플링위치와 각 부분의 유용금속 함유량을 Table 2에 나타낸다.

단, 본 연구에서 상정한 채광량은 대규모 수준이 아니라는 판단 하에 선광선을 별도로 건조하지 않고 채광선상에서 선광처리 플랜트를 설치하여 분리·선별을 수행하는 것으로 상정하였으며, 선광처리 후의 폐석은 직접 바다에 투기하는 것으로 가정하였다.

유엔해양법 협약에 있어 주변 어업관련국의 피해에 대한 보상 등이 필요하지만 구체적인 방법, 금액 등에 대해서는 개발 단계에서 논의하기로 하여 본 연구에서는 관련 비용을 상정하지 않았다.

해상수송

해상수송에 대한 기술개발은 기존 광석운반 기술수준 및 응용범위에서 충분히 대응 가능하다고 판단된다. 제련소의 입지장소는 수송 및 제련비용에 크게 영향을 미칠 수 있기에 이러한 요인들의 검토만으로도 개발 가능성 평가에 중요한 인자로 고려되어야 할 요인이지만, 본 연구에서는 개발개념모델의 구축을 목적으로 하기 때문에 입지장소를 바꾸는 검토는 수행하지 않고, 에너지비용, 세재 등 기초 자료가 갖추어진 한국국내(경남주변)를 제련장소로 임의로 가정하였다.

해상수송에 필요한 광석운반선 규모는 연간 채광량, 수송거리, 운반선의 속도 등에 의해 설계되었다. 채광위치에서 한국까지는 직선거리 약 1,660해리(2,980 km)로서 평균속도 16노트(Laden 15노트, Unladen 17노트)로 가정한다면 광석수송에는 편도 4.3일이 소요된다. 하역과 해상플랫폼에서의 이송작업까지 고려해 본다면, 1회 왕복소요일은 약 11일 정도가 소요됨에 따라 연간 조업일수를 250일로 가정해 본다면 총 23회의 운반이 가능하다.

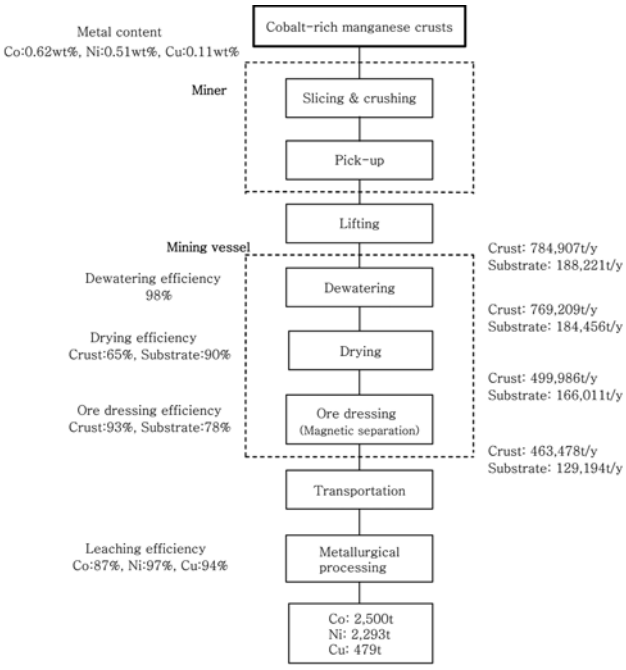

Fig. 4. Flowchart for cobalt-rich manganese crust development.

연간 운반량이 592,672톤(Fig. 4)인 점을 고려해 본다면, 1회 수송량은 25,768톤이 된다. 그러므로 본 연구에서는 30,000톤급 규모의 1척으로 수송하는 방법을 설계하였다. 배의 특성은 길이 215 m, 폭 33 m, 깊이 18 m, 흘수 13 m 규모로 가정하고 승무원은 약 10명 정도를 산정하였다. 연료 소비량은 1일 600 bbl(해상 550 bbl/d, 항만 48 bbl/d, 윤활유 2.4 bbl/d)로 계산하고, 간이 전용항만시설과 정비시설도 건설하는 것으로 가정하였다.

제련시스템

망간각은 망간단괴와 비교해 볼 때 기반암이 혼입된다

는 사실을 제외하면 지질·광물학적으로 동일한 Mn·Fe 산화물로 구성되어 있어 제련방법은 망간단괴 개발을 위해 제안되고 있는 처리방법이 그대로 적용가능하리라 생각된다. 따라서 본 연구는 일본이 망간단괴 상업적 개발을 위해 추진하여 왔던 용융황화염소침출법을 선정하여 모델을 구축하였다(小島 1996).

물론, 우리나라의 망간단괴개발 사업을 위해 환원배소-용융-고온고압황산침출법의 R&D연구가 수행되고 있지만, 파일럿플랜트 수준의 시스템설계가 이루어지지 않아 공정별 비용산출이 어려운 상황이기에 망간단괴 처리법으로서 체계성과 정확성이 인정받고 있는 용융황화염소침출법을 적용하여 평가모델을 구축하기로 하였다.

이 처리법은 육상 라테라이트광 처리공정과 유사한 환원용융-황산침출법의 개량법으로서, 단괴 안에 포함되어 있는 유가금속을 환원배소 시킨 다음, 1693 K로 가열하여 질소분위기에서 용융 후 CaO-MnO-SiO_2 슬래그와 Cu-Co-Ni합금의 매트(matte)상으로 농축하는 건식공정과 얻어진 매트로부터 염소를 이용해 Co, Ni, Cu 등의 유가금속을 침출하여 얻는 습식공정, Fe-Mn, Si-Mn을 회수하는 공정으로 나누어진다. 특징으로서는 유가금속의 침출율이 높고 잔사처리 및 얻어진 침출액으로부터 금속분리가 쉬울 뿐만 아니라 염소의 반복사용이 가능한 장점을 가지고 있다. 반면, 부식성이 높은 염소를 사용하기 때문에 침출장치에는 내식성 재료를 사용할 필요가 있다.

용융황화염소침출법의 처리공정 설비는 건조설비, 용융환원설비, 매트산화설비 등의 환원·용융공정, 고온고압설비, 황산침출 등의 침출공정, 용매추출(Solvent Extraction) 설비, 고온가수분해설비, 전해채취(Electro-Winning) 설비 등의 유가금속 분리·회수공정과 수처리, 세정탑, 환경집연처리설비 등의 환경보호설비로 구성되어 있다. 세부공정 설비비는 1일 20톤 처리 파일럿플랜트 건설비를 스케일 확장하여 산정하고, 조업자재, 에너지비용 등도 한국전력 공장용 단가, 석탄 국제가격을 바탕으로 기준연도에 준용하여 적용하였다. 유가금속의 침출율은 Co: 87%, Ni: 97%, Cu: 94%를 적용하였다.

망간을 회수하지 않는다면 97%에 이르는 제련잔사의 환경문제가 중요한 과제로 남는다. 현재로서는 제련잔사에 대한 재활용 및 유효이용 방법이 아직까지 확립되지 않았지만, 잔사 독성이 미국 환경청(EPA) 기준을 초과하지 않고, 입도가 큰 비반응성 유기물로서 안정성이 뛰어나다는 점을 활용하여 도로기반 충전제로 사용할 수 있다는 연구결과를 바탕으로 재활용이 가능하다는 가정 하에 잔사취급 및 반출에 소요되는 비용만을 고려하여 개발개념 모델을 구축하였다.

기술 파라미터의 가정

연간 코발트 세계 소비량의 약 8%에 해당하는 2,500톤의 코발트 생산량으로부터 역산하여 개발시스템의 각 구성요소의 생산규모를 산출하였다. 필요한 기술적 효율은 기반암이 19.4% 혼입된 망간각을 자력선별로 선상 선광처리를 실시하는 경우에 대해 설명해 본다면 다음과 같다.

해저에서 집광기 통과면적의 70%를 굴착효율, 굴착된 광석의 87%를 채집효율로 설정하였다(Yamada and Yamazaki 1998). 또한 선상 양광 후, 고액분리에 의해 98%를 탈수효율로(Yamazaki et al. 1991), 건조장치에 의해 망간각 부분에 포함되어 있는 35%, 기반암 부분에 포함되어 있는 10%의 수분이 제거되는 것으로 설정하였다. 선별기는 고구배자선기(HGMS)를 사용하여 유용광물이 포함되어 있는 망간각 부분은 93%를 회수하고 기반암은 22%가 제거되어 한국에 있는 습식제련소로 수송된다. 습식제련소에서는 유용금속 침출율을 Co: 87%, Ni: 97%, Cu: 94%로 설정하고, 코발트 2,500톤, 니켈 2,293톤, 동 479톤을 생산하는 개발시스템을 구축하였다. Fig. 4와 Table 3에 전체적인 개발시스템의 공정도와 개요를 나타낸다.

각 개발시스템의 조업일수는 집광기와 양광시스템은 망간단괴 경제성 평가와 동일하게 연간 250일 연속작업으로 가정하고(Herrouin et al. 1989; Søreide et al. 2001), 선광처리, 해상수송 등 해상조업의 경우에도 채광시스템의 조업조건에 맞추어 연간 250일로 가정하였다. 육상에서 가동하는 제련처리시스템은 연간 330일로 가정하였다.

경제 파라미터의 가정

개발스케줄

자금조달은 총 투자자금의 30%를 자기자본으로, 그 잔여부분 70%는 차입금으로 조달하는 것으로 상정하였다.

Table 3. Method and development plan of cobalt-rich manganese crusts

	Mining system (Wet)	Ore dressing (Dry)	Transportation (Dry)	Metallurgical processing (Dry)
Method	Self-propelled miner+submersible pumps	Magnetic separation	30,000t	Smelting and chlorine leaching process
Development plan (Production rate & operation time)	973,128t/y (3,893t/d) Time: 250 d/y	665,997t/y (2,664t/d) Time: 250 d/y	592,672t/y (2,371t/d) Time: 250 d/y	592,672t/y (1,796t/d) Time: 300 d/y

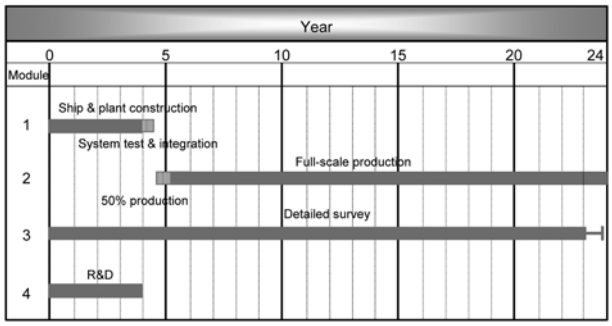

Fig. 5. Project development schedule.

개발시스템은 건설에서 경제적 조업까지 총 25년을 설정하고, 배와 플랜트 건설에 4년, 0.5년간의 테스트 가동을 거쳐 0.5년간 50%생산, 6년째부터 19년간 100% 생산하는 개발스케줄을 설정하였다. 개발시스템의 수주계약과 동시에 채굴대상 해역의 정밀조사를 수행하고, 탐사비, 약간의 R&D비, 연락사무소 운영비, 사원기술교육비 등과 차입금의 이자를 전부 합쳐 준비금(Continuing Expenses)으로 설정하였다(Fig. 5).

또한 테스트 가동기간 중에는 운전자금으로서 0.5년간분의 운전비를 계상하고, 50% 생산체계에 들어갈 때 운전자금으로서 3개월분을 준비하였다. 여기에서 3개월간의 운전비 의미는 금속판매 대금이 회수되는데 3개월이 소요된다고 가정했기 때문이다.

스케일 계산법

플랜트 건설비의 계산방법은 개별적산법, 단가법, 비율법, 지수법 등이 있으며 각각에는 장단점이 있다. 본 연구에서는 플랜트 및 단일기기의 비용은 용량에 산술비례하는 것이 아니라 지수비례에 의해 변동한다는 특성을 적용하여 아래와 같이 계상하였다. n은 정수(0.5~0.9)이며, 여기에서는 0.6을 적용하였다(자원개발 프로젝트 비용추정 정밀도를 위한 지수선택은 0.6~0.7이 가장 많이 사용되고, 특히 화학플랜트설비에 대해서는 0.6이 추정 정밀도가 가장 높은 것으로 보고되고 있다. 상세한 내용은 石炭開發技術協力センター(1993, pp 55 등 참조).

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

P_1: 구하고자 하는 플랜트 및 기기 비용, P_2: 알고 있는 플랜트 및 기기 비용, L_1: 구하고자 하는 플랜트 및 기기 용량 크기, L_2: 알고 있는 플랜트 및 기기 용량 크기.

원가요소의 설정

원가요소는 다음과 같이 설정하였다. 운전비용 산출에 대해서는 2005년도를 기준연도로 설정하고 물가상승률은 고려하지 않았다.

1) 변동비: 조업자재, 에너지 등을 고려한다.

2) 감가상각비: 설비투자에 의해 고정화된 자산은 빠른 시간 내에 감가상각에 의해 유동화하는 것이 유리한 이유로 스피드가 빠른 정률법을 적용하여 감가상각을 실시하였다. 재정경제부고시의 내용년수에 의거하여 감가상각을 실시하고 잔존가치율은 허용 가능한 5%까지 준용하였다. 개발시스템은 채광선·수송선과 그 부대설비에 대해서는 내용년수 15년, 감가상각율 0.142를 적용하였다(한국감정원 1999).

3) 수선비: 해상조업의 수선비에 대해서는 망간단괴 경제성 평가에 적용된 내용을 준용하여 선박은 건조설비 투자액의 2%, 해중 자항기와 양광관에 대해서는 설비비의 20%, 다른 부대설비에 대해서는 설비비의 5%를 적용하였다(朴 등 2002). 또한 제련시스템은 육상작업이기 때문에 제조설비 투자액의 4%를 적용하였다.

4) 인건비: 플랜트에 종사하는 인력은 시스템 운전에 필요한 노무종류에 맞추어 추정하였다. 채광시스템은 작업원과 승무원을 30-day-on, 30-day-off의 2교대로 일하는 것으로 가정하고, 선광처리에 필요한 노동력은 채광시스템으로부터 지원도 가능하다고 판단되기에 약 7명의 인건비만을 상정하였다. 또한 제련시스템은 조업노무, 간접노무(안전), 관리감독, 사무공통 등 필요한 노무량을 평가하여 급료, 환율을 적용하여 산출하였다(Hillman and Gosling 1985).

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

6) 재산·종합토지세: 선박, 건축물에 대한 지방세법 제234조에 의거 과세(시가)표준액의 0.3%를 재산세 및 종합토지세로 부과되는 것으로 고려하였다.

7) 금리: 차입금의 금리에 대해서는 우량기업의 기업대출 평균금리를 적용하여 연 4%를 적용하고, 차입금은 12년 내에 변제하는 것으로 가정하였다. 변제금은 일정금액으로 상정하고 여유분은 임시비로 보유하는 것으로 가정하였다.

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

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

10) 부가가치세: 생산되는 부가가치에 대해 부과되는 일반소비세로서 부가가치세법 14조에 의거하여 세율은 총판매액의 10%를 과세하였다.

11) 법인세, 지방세: 법인세는 법인세법 55조에 의거 25%를 적용하고 지방세는 지방세법령에 의거 법인세의

Table 4. Total investment cost of cobalt-rich manganese crusts

Items	Cobalt-rich Manganese Crusts	
	Capital costs	Operating costs
Mining system	149.5	24.3
Ore dressing	30.9	7.4
Transportation	68.6	13.0
Metallurgical processing	268.9	30.5
Sub-total	517.9 M$	75.2 M$
Continuing expenses	43.4	
Working capital	56.4	
Total	617.7 M$	

10%를 적용하였다. 또한 이 세금은 당해 연도까지 결손이 있은 경우에는 이익이 발생했던 시점에서 손실을 보전한 후 남는 이익에 부과하는 것으로 설정하였다.

금속가격

금속가격은 World Bureau of Metal Statistics(2005)로부터 2004년과 2005년의 2년간 평균치를 계산하여 Ni: US$ 6.5/lb, Cu: US$ 1.5/lb로 설정하고, 코발트는 편재된 생산구조로 인해 아프리카 국내 상황 등 국제환경변화에 의해 가격변동이 투기적 경향을 보이고 있어 US$ 15/lb, US$ 20/lb, US$ 25/lb, US$ 30/lb 경우로 나누어 분석하였다.

이상의 경제적 파라미터를 고려하여 산출된 망간각 총 개발비용 내역은 Table 4와 같다.

기본적 수익판단법

1) 자본회수법(Payback Periods): 화폐의 시간적 가치를 무시하고, 투자에 소요된 자금을 그 투자로부터 발생하는 현금흐름의 연간 이익 누적액으로부터 모두 회수하는데 걸리는 기간을 분석하여 투자에 대한 효과를 평가한다.

자본회수기간 = 초기투자액/연간 이익 누적액

2) 순 현재가치(Net Present Value): 산정된 모든 지출과 수입의 현금흐름(Cash flow)을 현재 가치로 환산하여 최초의 투자자본과 수익의 차이에 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 할인율[1]을 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 (24년), t: 년차

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

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

Table 5. Results of an economic evaluation of cobalt-rich manganese crusts

Sensitivity factors	Magnetic separation with 19.4% substrate		
Cobalt price	Payback periods	Net present value ($)	Internal rate of return (%)
US$ 15/lb	-	-	-
US$ 20/lb	16.8	−86M	3.8
US$ 25/lb	11.4	36M	9.6
US$ 30/lb	8.6	154M	14.0

이상과 같이 코발트 2,500톤 생산기준 하에 구축한 경제성 평가 결과를 Table 5에 나타낸다.

코발트 가격이 US$ 15/lb의 경우는 개발기간 중에 자본회수는 불가능하고, US$ 20/lb의 경우 자본회수기간은 16.8년, 순 현재가치는 US$ −86million, 내부수익률은 3.8%를 보여 수익 전망이 어려운 것으로 나타났다. 하지만 US$ 25/lb의 경우에는 자본회수기간 11.4년, 순 현재가치 US$ 36million, 내부수익률은 9.6%를 나타내면서 수익 전망이 있는 것으로 기대되고, 30/lb의 경우에는 자본회수기간 8.6년, 순 현재가치 US$ 154million, 내부수익률은 14.0%로 나타나서 금속가격이 높은 코발트 가격상승 효과가 반영된다면 망간각광상 개발은 높은 경제적 이익이 기대될 수 있는 것으로 분석되었다.

그러나 코발트 가격 변동에 의한 경제적 이익 변화폭이 크고 불안정한 경향을 보이고 있다는 점을 알았다. 따라서

[1]경제주요지표인 금리 및 경제성장률에 대한 최근의 저금리 및 저성장 현상을 반영한다면 사회적 할인율 수준은 하향조정할 필요성이 있음. 한국개발연구원(KDI)에서 공공투자사업에 적정 할인율은 2003년 7.5%, 2005년 6.5%, 2008년 5.5%를 제시하면서 하향 경제지표에 동조하여 조정되고 있음. 그러나, 사업의 리스크에 대한 충분한 검토가 이루어지지 못한 점을 감안할 때 보다 높은 수준의 할인율이 적용되는 것도 요구됨.

망간각 개발에 있어서는 코발트 수요 확대를 통한 가격 상승이 경제적인 개발 가능성에 큰 영향을 미친다고 말할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 세계 연간 코발트 소비량의 약 8%에 해당하는 2,500톤을 생산한다는 설정 하에 망간각 개발을 위한 기술·경제성 평가 모델을 구축하였다. 단, 채광시스템 및 선광·제련처리기술에 대한 연구개발이 아직 미확립된 상황이라는 점을 고려, 망간단괴의 상업적 개발을 위한 기술개발 정보를 이용하여 개발개념모델을 구축하였다. 가정한 파라미터가 많고 망간단괴 경제성 평가 데이터로부터 많은 인자를 차용한 점, 금속시장 가격변동과 인플레이션율을 고려하지 않은 점 등은 개발 가능성을 예측하는데 분명한 한계로 남는다.

이에 대해서는 광상 부존상황이라는 기본정보를 포함한 지속적 연구가 필요하며 검토를 통해 정밀도 높은 경제성 평가모델로 개량하는 것이 무엇보다도 중요하다.

구축된 모델에 의한 평가 결과로 보건대, 코발트 가격의 변동에 따라 경제성 변화폭이 크다는 점이 도출되었다. 따라서 망간각 개발에 있어서는 코발트 수요 확대를 통한 가격 상승이 경제적인 개발 가능성에 큰 영향을 미친다고 말할 수 있겠다.

또한, 기술적인 측면에서는 기반암혼입율에 의한 영향분석, 효율적인 선광처리방법 검토, 백금의 침출·회수 가능 여부 등 개발시스템의 경제성 향상을 위한 평가 불확정 요소가 남아 있어 지속적인 기술정보 수집이 필요하다.

특히 망간각내에 미량 함유이지만 금속 가격이 높은 백금은 효율적·경제적으로 추출할 수 있는 기술이 확립된다면 향후 수요증가(연료전지 등)가 예상되는 가운데 망간각의 부존 가치는 불안정한 백금 수급체계의 장기·안정적 공급원으로서 더욱 주목받을 수 있을 것으로 기대된다 (Stüuben et al. 1999).

우리나라는 망간단괴의 광구등록과 같이 망간각 광상에 대해서도 광구등록의 필요성 여부가 주목되고 있다. 구축한 개발개념모델은 이러한 문제들에 대한 정책의사결정의 판단근거로 활용될 것이다. 단, 도출된 개발개념모델의 정밀성에 대한 한계를 감안할 때, 향후 개발개념모델의 검토·개량 등을 통하여 보다 정밀한 경제성 평가를 수행할 필요가 있다. 동시에 경제성 지배요인들의 영향분석과 목표탐색법을 이용하여 경제성을 갖춘 부존특성 및 지형·지질조건 도출 등 경제적으로 성립 가능한 개발조건의 구체상(具体像)이 되어야 한다. 이는 심해저광물자원, 특히 망간각의 상업적 개발을 위한 우리나라의 발전적·효과적 투자시기와 기술적 접근방법의 조율을 통한 거시적 국가자원수급 정책수립을 위한 선행과제이기도 하다.

사 사

본 연구는 국토해양부의 지원으로 수행된 '2005 남서태평양 광물자원(해저열수광상, 망간각) 개발(PM36003)' 연구의 일환으로 수행되었다. 본 논문을 세밀하게 심사하고 좋은 의견을 주신 심사자분들께 감사드립니다.

참고문헌

朴洗憲, 山崎哲生, 島田莊平, 山本恭久 (2002) コバルトリッチクラストのポテンシャル比較手法の開發. 資源と素材 **118**:641-649

産業技術總合硏究所 (2002) 平成14年度深海底鉱物資源の探査技術等の開發調査報告書. 108 p

石炭開發技術協力センター (1993) よくわかる資源の経濟性評價, 島田莊平 譯. 石炭開發技術協力センター, 東京, 208 p

小島和浩 (1996) マンガン團塊の製鈇技術の開發. 資源と素材 **112**(14):968-973

深海底鉱物資源開發協會 (1995) 平成6年度コバルト・リッチ・クラスト鉱床の採鉱システムの調査硏究報告書. 92 p

深海底鉱物資源開發協會 (1996) 平成7年度コバルト・リッチ・クラスト鉱床の採鉱システムの調査硏究報告書. 78 p

深海底鉱物資源開發協會 (1997) コバルト・リッチ・クラスト鉱床の選鉱技術に關する調査報告書. 176 p

深海底鉱物資源開發協會 (1998) コバルト・リッチ・クラスト鉱床の選鉱技術に關する調査報告書. 158 p

한국감정원 (1999) 유형고정자산 내용년수표. 한국감정원, 서울, 425 p

해양수산부 (2003) 남서태평양 망간각 탐사 및 개발사업. 한국해양연구원

해양수산부 (2004) 남서태평양 망간각 탐사 및 개발사업. 한국해양연구원

해양수산부 (2005) 남서태평양 망간각 탐사 및 개발사업. 한국해양연구원

Andrews BV, Flipse JF, Brown FC (1983) The economic viability of a four-metal pioneer deep ocean mining venture, Texas A&M University, Texas, 201 p

Cronan DS, Hodkinson RA (1993) An evaluation of manganese nodules and cobalt-rich crusts in South Pacific EEZ. Mar Geores Geotechnol **11**:153-174

Halbach P, Manheim FT (1984) Potential of cobalt and other metals in ferromanganese crusts on seamounts of the central pacific basin. Marine Minin **4**:319-336

Halkyard JE (1985) Technology for mining cobalt-rich manganese crusts from seamounts, In: Proceedings Oceans '85, San Diego, CA, 12-14 Nov 1985, pp 352-374

Hawaii Department of Planning and Economic Development (1987) Mining development scenario for cobalt-rich manganese crusts in the EEZ of the Hawaiian Archipelago and Johnston Island. Hawaii Department of Planning and Economic Development, Honolulu, 326 p

Hein JR, Manheim FT, Schwab WC, Davis AS (1985) Ferromanganese crusts from necker ridge, horizon guyot, and S.P. Lee guyot: geological considerations. Mar Geol **69**:25-54

Hein JR, Schwab WC, Davis AS (1988) Cobalt and platinum-crusts and associated substrate rocks from the Marshall Islands. Mar Geol **78**:255-283

Herrouin G, Lenoble J, Charles C, Mauviel F, Bernard J, Taine B (1989) A manganese nodule industrial venture would be profitable-summary of a 4-year study in France. In: Proceedings of the 21st Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1-4 May 1989, 5997 p

Hillman CT, Gosling BB (1985) Mining deep ocean manganese nodules description and economic analysis of a potential venture. U.S. Bureau of Mines, IC**9015**, 20 p

Hirt WC, Foot DG Jr, Shirts MB (1988) Beneficiation of cobalt-rich manganese crust, Marine Mining **7**:165-180

Latimer JP, Kaufman R (1985) Prelimianry Considerations for the Design of Cobalt Crusts Mining System in the U.S EEZ. In: Proceedings Oceans '85, San Diego, CA, 12-14 Nov 1985, pp 378-399

Manheim FT (1986) Marine Cobalt Resources, Science **232**:600-608

Ritchey JL (1987) Assessment of cobalt-rich manganese crust resources on horizon and S.P. Lee guyots, U.S. EEZ. Marine Mining **6**:231-243

Søreide F, Lund T, Markussen JM (2001) Deep ocean mining reconsidered a study of the manganese nodule deposits in Cook Island. In: The proceedings of the 4th ISOPE ocean mining symposium, Szczecin, Poland, September 23-27 Sep 2001, pp 88-93

Stüben D, Glasby GD, Eckhardt J-D, Berner Z, Mountain BW, Usui A (1999) Enrichment of platinum-group elements in hydrogenous, diagenetic and hydrothermal marine manganese and iron deposits. Explor Mining Geol **8**:233-250

Usui A, Someya M (1997) Distribution and composition of marine hydrogenetic and hydrothermal manganese deposits in the northwest Pacific. In: Nicholson K, Hein JR, Bühn B, Dasgupta S (eds) Manganese mineralization: geochemistry and mineralogy of terrestrial and marine deposits, Geological Society Special Publication no 119. Geological Society, London, pp 177-198

World Bureau of Metal Statistics (2005) World metal statistics yearbook. World Bureau of Metal Statistics, Herts, UK

Yamada H, Yamazaki T (1998) Japan's ocean test of the nodule mining system. In: Proceedings of the 8th international offshore and polar engineering conference, Montreal, Quebec, Canada 24-29 May 1998, pp 13-19

Yamazaki T, Chung JS, Tsurusaki K (1995) Geotechnical parameters and distribution characteristics of the cobalt-rich manganese crust for the miner design. Int J Offshore and Polar Eng **5**:75-79

Yamazaki T, Sharma R, Tsurusaki K (1994) Microtopographic analysis of cobalt-rich manganese deposits on Mid-Pacific seamount. Mar Geores Geotechnol **12**:33-52

Yamazaki T, Tsurusaki K, Handa K (1991) Discharge from manganese nodule mining system. In: The proceedings of the 1st international offshore and polar engineering conference, Edinburgh, UK, August 11-16 Aug 1991, pp 440-446

Yamazaki T, Tsurusaki K, Handa K, Tomishima Y (1992) Ore grade evaluation of cobalt-rich manganese crusts. In: The proceedings of the 2nd international offshore and polar engineering conference, San Francisco, USA, 14-19 Jun 1992, pp 483-489

Received Mar. 4, 2009
Revised Mar. 18, 2009
Accepted Apr. 9, 2009