서태평양 해저산 고코발트 망간각 자원평가를 위한 광역 탐사 방안

김종욱* · 고영탁 · 형기성 · 문재운

한국해양과학기술원 심해저자원연구부

Geophysical and Geological Exploration of Cobalt-rich Ferromanganese Crusts on a Seamount in the Western Pacific

Jonguk Kim*, Young-Tak Ko, Kiseong Hyeong and Jai-Woon Moon

Deep-sea and Seabed Resources Research Division, KIOST, 787, Haeanro, Ansan 426-744, Korea

Co-rich ferromanganese crusts (Fe-Mn crusts) distributed on the seamounts in the western Pacific are potential economic resources for cobalt, nickel, platinum, and other rare metals in the future. Regulations for prospecting and exploration of Fe-Mn crusts in the Area, which enables the process to obtain an exclusive exploration right for blocks of the fixed size, were enacted recently by the International Seabed Authority, which led to public attention on its potential for commercial development. Evaluation and selection of a mining site can be established based on abundance and grade of Fe-Mn crusts in the site as well as topography that should be smooth enough for mining efficiency. Therefore, acquisition of shipboard echo-sounding and acoustic backscatter data are prerequisite to select potential mine sites in addition to visual and sampling operations. Acoustic backscatter data can be used to locate crust-covered areas in a regional scale with the understanding of acoustic properties of crust through its correlation with visual and sampling data. KIOST had collected the topographic and geologic data to assess the resources potential for Fe-Mn crusts in the west Pacific region from 1994 to 2001. However, they could not obtain acoustic backscatter data that is crucial for the selection of prospective mining sites. Therefore, additional exploration surveys are required to carry out side scan mapping combined with seafloor observation and sampling to decide the blocks for application of an exclusive exploration right.

Key words : ferromanganese crust, seamount, guyot, exploration, western Pacific

서태평양 해저산 사면에 부존하는 고코발트 망간각은 코발트, 니켈, 백금, 희유금속 등을 다량 함유하고 있으며, 최근 국제해저기구에서 공해상 탐사규칙이 제정됨에 따라 개발 대상으로 더욱 주목받고 있다. 해저산에 분포하는 망간각의 개발을 위해서는 경사가 낮고 지형기복이 완만하여 채광에 유리한 지형조건을 갖추면서 망간각이 두껍게 분포하는 유망지역을 선별하여야 한다. 따라서 광역단계의 망간각 탐사는 음향 수집탐사를 통한 지형 및 경사도의 확인, 음향산란 자료의 획득을 통한 기저면 표층 매질 분포 파악, 그리고 해저면 영상 관찰과 시료채취를 통한 망간각의 분포 두께 파악이 필요하다. 또한 음향산란 자료를 이용하여 망간각 분포 지역을 확인하기 위해서는 영상관찰 및 시료채취를 통한 망간각 음향매질 특성분석이 필요하다. 기존의 탐사를 통해 수행된 망간각 기초탐사 자료를 분석한 결과 해저산 지형 해석과 망간각 광역분포와 같은 망간각 유망지역 선별을 위한 일부 자료를 확인할 수 있었다. 하지만, 음향산란 자료를 확보하지 못하여 넓은 탐사지역을 대상으로 망간각 부존 유망지역을 선별하는 데 필요한 망간각 분포 변화는 파악하지 못하였다. 따라서 향후 탐사는 망간각 탐사후보 지역을 대상으로 음향산란 자료의 확보가 선행되어야 하며, 해저면 관찰 및 시료채취를 병행하여 해저면 음향매질 특성과 망간각 분포의 상관성을 파악하기 위한 탐사가 수행되어야 한다.

주요어 : 망간각, 해저산, 기요, 탐사, 서태평양

*Corresponding author:

1. 서 론

서태평양의 해저산들에 광범위하게 부존하는 것으로 알려진 수성기원 고코발트 망간각(Cobalt-rich Ferromanganese Crust, 망간각)에는 경제적 가치가 높은 금속원소들의 함량이 높아 망간단괴, 해저열수광상과 함께 개발가치가 높은 주요 해양광물자원으로 알려져 왔다. 망간각에는 코발트(Co), 니켈(Ni), 망간(Mn)은 물론 최근 전자, 통신 산업과 같은 첨단 산업에 이용되는 희토류원소(Rare Earth Elements), 백금족원소(Platinum Group Elements), 텔루륨(Te), 타이타늄(Ti), 몰리브덴(Mo), 지르코늄(Zr), 비스무스(Bi), 텅스텐(W)의 함량이 높아 최근 들어 더 높은 자원가치를 인정받고 있다(Halbach and Manheim 1984; Hein *et al.*, 2000; Hein *et al.*, 2010). 이러한 높은 관심에 따라 공해상 해양광물자원의 탐사와 개발을 관리하는 국제해저기구(International Seabed Authority, ISA)는 2012년 7월 망간각 탐사규칙을 제정하여 망간각 개발을 위한 본격적인 탐사의 길이 열리게 되었고 이에 따라 중국, 일본, 러시아 등 3개 국가가 국제해저기구에 탐사권 신청서를 제출하였다.

망간각 자원개발에 대한 높은 관심과는 별도로 망간각이라는 해양광물에 대한 학문적 이해는 여전히 부족하다. 더구나 망간각 자원 개발을 위한 채광기술, 환경영향평가, 경제성 평가 등의 제반 요소에 대한 이해도 불충분하다. 망간각의 개발을 위해서는 지구물리와 지질탐사를 통한 자원량 평가와 유망지역 선정이 선행되어야 한다. 망간각이 분포하는 해저산은 지형 기복이 심하고, 기반암의 종류, 퇴적물의 분포와 피복정도가 다양하다. 이러한 해저산의 특성은 망간각의 성장 및 분포와 밀접한 관련을 보인다. 따라서 망간각의 자원량평가를 위해서는 탐사를 통해 해저산의 지형, 지질, 해양 특성을 탐사하고 이를 자원량평가 목적에 부합하도록 이해해야 한다. 예를 들어, 망간각의 부존량(두께) 변화에 영향을 미치는 공간 요인의 평가, 망간각과 기반암과의 상관관계, 망간각의 조성변화 파악과 영향요인 평가 등을 들 수 있을 것이다.

우리나라는 지난 1999년부터 2004년까지 해양수산부의 국가연구개발사업으로 망간각 탐사를 수행하여 서태평양 공해상 해저산을 대상으로 지구물리 탐사를 통한 지형조사, 음향매질 특성, 망간각 분포 및 조성 등 기초탐사자료를 획득하였다. 하지만, 이들 자료를 토대로 망간각 부존 유망지역을 평가하고 국제해저기구에 탐사권을 신청하기에는 탐사자료가 충분하지 않다. 앞

서 기술하였듯이 국제해저기구의 망간각 탐사규칙 승인 후 이미 세 나라가 탐사권을 신청하였으며, 망간각 개발에 관심이 있는 국가 혹은 민간 기업이 자원 확보에 관심을 갖고 탐사를 개시할 가능성이 높다. 따라서 우리나라가 망간각 탐사권을 확보하기 위해서는 망간각 탐사의 재개를 통해 유망지역 선정을 위한 자료를 조속히 확보해야 할 것이다.

이 논문에서는 망간각 유망지역 선정을 위해 고려해야 할 요인을 정리하고 이들 요인을 파악하기 위한 망간각 탐사기법들을 기술하였다. 또한 기존의 망간각 기초탐사 자료와 해석결과를 평가하고 이를 통해 유망지역 선정 및 자원평가를 위한 효율적인 탐사방안을 제시하고자 하였다.

2. 서태평양 망간각의 분포 특성 및 자원평가를 위해 고려해야 할 요인

2.1. 망간각의 분포 특성

망간각의 주요 구성 원소인 망간과 철은 주로 하천을 통해 대륙에서 유입되거나 해저화산 및 열수활동에 의해 공급된다. 수성기원 망간각은 주로 결정도가 낮은 망간산화물(δ - MnO_2)과 비정질의 철수산화물($FeOOH \cdot xH_2O$)로 구성되어 있으며 그밖에 방해석, 인회석, 석영, 규산염 광물들을 소량 포함한다(Koschinsky and Halbach 1995). 망간각의 미량금속원소들은 대개 산소결핍층(Oxygen Minimum Zone, OMZ)에서 환원성 이온으로 존재하다가 해저산 사면을 따라 용승하는 산소가 풍부한 저층수와 만나 망간, 철산화물로 침전되는 과정에서 망간, 철과 함께 침전되거나 이들의 표면에 흡착되어 망간각으로 유입되는 것으로 알려져 있다(Hein *et al.*, 2000). 망간각의 산상은 주로 기반암의 형태에 의해 결정된다(Fig. 1). 즉, 기반암에 피복되어 성장하는 망간각의 특성에 따라 기반암의 굴곡을 따라 성장하며, 일부지역에서는 작은 암편 주위에 동심원 상으로 성장한 단괴의 형태를 갖기도 한다. 서태평양 지역에서 망간각은 최대 25 cm의 두께를 보인다. 망간각은 10 mm/Myr 이하의 매우 느린 성장률을 가지고 있으며 에오세 초기나 그 이전부터 성장하기 시작한 것으로 알려져 있다(Usui and Ito, 1993).

망간각 자원량평가를 위해 가장 중요한 요소는 부존량과 금속품위이다. 최대두께 25 cm의 망간각을 부존량으로 환산하면 500 kg/m²에 해당된다(비중 2.0 g/cm³ 가정). 동태평양 망간단괴의 최대 부존량이 약 50 kg/m² 정도임을 감안할 때 망간각은 매우 높은 자원잠재력을

Fig. 1. Occurrence of ferromanganese crusts. (A) Bottom photograph of slope of seamount. (B) Photograph of a slab of ferromanganese crust sample. Ferromanganese crusts form pavements up to 250 mm thick on substrates.

가지고 있음을 알 수 있다. 하지만, 망간각의 두께는 지역별로 편차가 크다. 망간각이 수 mm/Myr의 성장 속도로 매우 느리게 성장한다는 점을 감안할 때 망간각이 성장하는 기반암의 연령도 중요하다. 즉, 연령이 오래된 해저산에 망간각이 더 두껍게 피복될 수 있다. 하지만, 해저산 연령이 오래되었다는 사실만으로 두꺼운 망간각의 분포와 높은 자원잠재력을 보장하는 것은 아니다. 실제로 해저산에 부존하는 망간각의 두께는 일정하지 않으며, 해저산 사면의 붕괴, 기반암의 변형, 원양성 퇴적물의 공급 등에 의한 영향을 받는다(Hein *et al.*, 1997; Glasby *et al.*, 2007).

망간각 내 금속함량 역시 지역, 수심, 망간각 연령 등에 의한 영향을 받는다(Hein *et al.*, 2000). 망간각 내 미량금속의 변화는 주로 이들 금속을 흡착하고 있는 망간산화물 및 철산화물이 망간각 내 포함되는 다른 비금속광물, 퇴적물, 기반암 등에 의해 희석되기 때문이다(Usui and Okamoto, 2010). 망간각의 자원개발을 위해서는 망간각이 피복된 기반암으로부터 망간각을 분리하는 과정을 거치게 되는데, 이 과정에서 퇴적물이나 기반암의 유입을 최소화하는 것이 중요하다. 결국 망간각의 자원으로서의 가치는 망간각의 두께와 함유금속의 품위에 의해 결정되며, 망간각의 금속품위가 비교적 균질할 것으로 추정되므로, 두께가 중요한 요인이 될 수 있다.

2.2. 망간각 자원 평가를 위해 고려해야할 기술적 요인

해저산에 부존하는 망간각의 자원평가를 위해 탐사에서 고려해야할 요인은 아래와 같이 정리될 수 있다.

2.2.1. 해저산의 지형 특성

망간각이 부존하는 해저산은 일반적으로 지형의 기

복이 심해 채광작업이 쉽지 않을 것으로 알려져 있다. 따라서 망간각은 정상부의 주변이 평탄한 지역(경사도 10도 이하)에 분포하는 것이 채광에 유리하다. 또한 2,500 m 보다 깊은 수심에서는 경사가 커지고 망간각의 두께도 얇고 금속함량이 감소하는 경향을 보이므로 2,500 m 보다 얕은 수심에 망간각이 분포하는 것이 유리하다. 이러한 특성을 감안할 때 정상부가 평탄한 기요(guyot)형태의 해저산이 망간각 개발에 좋은 조건을 가지고 있으며 정상부의 면적이 넓을수록 유리하다.

2.2.2. 해저산의 지질특성

정상부가 평탄한 기요는 최대 70%까지 퇴적물에 덮여 있는 것으로 알려져 있다. 퇴적물의 공급이 많을수록 망간각의 성장을 방해하기 때문에 퇴적물 분포지역에서는 망간각의 발달이 불량하다. 하지만, 얇은 두께의 퇴적물로 덮인 지역에서는 기반암에 망간각이 피복된 경우도 흔히 관찰된다. 따라서, 망간각 유망지역을 선정하기 위해서는 퇴적물의 분포 특성을 파악하는 것이 중요하다.

망간각의 기반암은 해저산의 주요구성 암석인 현무암 등의 화산암 이외에도 각력암, 석회암, 인회암, 미고화 퇴적물 등 다양하다. 이중 특히 석회암에서 성장하는 망간각은 두께가 얇은 편이며 기반암으로부터 분리하기도 어려운 것으로 알려져 있어 개발에 불리한 것으로 평가된다(Hein *et al.*, 2009). 또한 위에서 언급하였듯이 연령이 오래되지 않은 해저산은 망간각의 발달이 충분하지 않으며, 백악기(6천만년 이전)에 생성된 오래된 해저산들이 적당하다. 특히 서태평양에 위치하는 해저산들이 적도 이남에 분포하는 열점활동에 의해 생성되어 지판의 운동에 따라 북서방향으로 이동되어 온 점을 감안한다면 해저산의 연령은 해저산의 현재 위치와도 관련된다.

2.2.3. 채광 및 환경 특성

망간각은 아직 명확한 채광개념이 제시되지 않아 채광기술을 고려한 기술요인을 판단하기는 어렵다. 하지만 망간각의 부존형태를 고려할 때 망간각의 두께가 두꺼울수록 유리할 것이며, 적어도 3-4 cm 이상이 되어야 개발 가능한 두께로 추정한다(Hein *et al.*, 2009). 망간각의 금속함량의 경우 인접하여 존재하는 개발 대상 지역 내에서 크게 변하지 않을 것이며, 채광 시 기반암이 함께 채취되는지 여부가 더 중요하므로 결국 망간각 두께는 채취된 광석의 품위와도 관련된다. 또한 해저산 내 산재하는 소규모 불규칙 지형 혹은 생물 보존 지역 등의 채광장애 요인도 고려되어야 한다. Hein *et al.* (2009)는 전체 망간각 분포 면적의 약 50%정도가 이러한 지형과 환경 특성에 의한 채광장애지역일 것으로 예측하였다.

2.2.4. 국제해저기구의 망간각 탐사규칙

국제해저기구의 망간각 탐사규칙은 공해상 망간각 탐사광구 신청 및 운영에 대한 제반 내용을 포함한다.

이중 망간각 탐사를 위한 신청구역은 망간각의 분포특성을 반영하여 규정되어 있다. 탐사규칙에 따르면 탐사광구는 정사각형이나 직사각형의 모양을 갖는 20 km² 크기의 블록형태를 가지며 최소한 5개 이상의 블록이 인접한 단위(cluster)로 구성된다. 각 단위는 인접할 필요가 없으나 서로 근접해야 하며 550 km×550 km 보다 크지 않은 지리적 범위 내에 전체 탐사광구가 위치하여야 한다. 총 신청면적은 3,000 km²(150 블록)를 넘지 않아야 하며, 탐사광구 신청 후 광구 포기 과정을 통해 신청면적의 1/3인 1,000 km²(50 블록)의 면적이 개발 활동이 가능한 최종광구의 크기이다. 탐사규칙에 규정된 블록의 크기나 단위의 구성을 고려할 때 동일한 해저산 내에서도 유망지역을 선별하여 신청할 수 있다. 따라서 탐사광구 신청을 위한 탐사자료의 확보에서도 이 점이 고려되어야 한다.

2.3. 망간각 탐사기법

위에서 정리한 망간각의 분포특성과 기술적 요인의 평가는 해저산 지역의 현장 탐사를 통해 획득되는 지

Table 1. Techniques and devices used for exploration of ferromanganese crusts

Survey item	Equipment	Objectives	Application to the OSM7 survey
Geophysical survey			
Seismic	Air-gun seismic	Physical property of deep subbottom sediments/rocks with low resolution	No
	Subbottom profiler(SBP)	Physical property of shallow subbottom sediments/rocks with low resolution	Yes (Fig. 3)
Echo-sounding	Single/Multi beam echo sounder	Topography and general physical property of seabed	Yes (Fig. 3)
	Side scan sonar	Microtopography and physical property of bottom material with high resolution	No
Image mapping			
Visual observation	Deep-towed camera	Seabed morphology, color	Yes (Fig. 5)
Geological sampling			
Dredge		Large whole samples from any seabed	Yes (Fig. 4)
Coring		Undisturbed sediments or soft rocks at seabed	Yes (not shown in this study)
Drilling		Undisturbed hard rocks from outcrop of fixed position	No
Manipulator		Undisturbed samples from real outcrop with in-situ visible images and measurement	No
Future innovated method			
ROV/AUV	Photo mosaic mapping	High resolution seabed morphology, color	No
	Physical/Chemical sensors	Exploration and environmental monitoring	No
	Laser mapping	Ultra-fine topography	No
	Ultrasonic profiler	Inner fine structure	No
	In-situ chemical analysis	Remote sensing of compositional nature	No

구물리, 지질, 해양환경 자료의 분석과 해석을 통해 진행된다. 망간각 개발 유망지역을 선정하기 위한 탐사의 목표는 개발이 유망한 지형조건과 망간각 부존량(두께) 변화 파악으로 요약될 수 있다. 망간각 탐사의 주요 탐사기법은 지구물리 탐사, 해저면 영상탐사, 시료 채취로 구분할 수 있다(Table 1).

지구물리 탐사는 주로 선상에 탑재된 음향장비를 이용해서 이루어지며 수심을 측정하여 지형도를 작성하거나 해저면을 매질특성을 파악하는데 활용된다. 주로 조사선에서 원격탐사를 통해 수행되지만, 견인형 탐사체나 무인잠수정을 이용한 근접해저면 조사를 통해 해상도가 높은 자료의 획득도 가능하다. 해저면 영상탐사는 전통적으로 견인형 카메라를 이용하며 해저면의 직접 관찰을 통해 미세지형 파악, 기반암 및 망간각 피복 판별 등을 수행한다. 최근 무인잠수정 기술의 발전과 함께 고해상도 영상자료와 위치보정자료를 통한 정밀영상탐사가 가능해졌다. 시료채취의 경우 퇴적물, 기반암, 망간각 등에 대한 교란되지 않은 시료를 채취하고 이들 시료가 부존하는 환경요인을 파악하는데 이용된다.

일반적으로 지구물리 탐사자료는 정량화된 자료를 획득하여 통계분석을 수행하는데 유리하다. 하지만, 실제 현상과 지구물리 자료와의 상관성 파악이 전체되어야 하며 그렇지 않을 경우 실제와 다르거나 부정확한 해석이 도출될 수 있다. 망간각 탐사의 경우 지구물리 탐사자료는 퇴적물 피복지형 판별, 경사분석을 통한 지형기복 해석, 계곡지형의 경사면을 따라 발생하는 사태 지역 판별 등 망간각 피복 불리지형을 판별하는 등에 이용될 수 있다.

해저면 영상관찰의 경우 실제 해저면을 관찰함으로써 지구물리 탐사자료 해석결과와 비교할 수 있는 고해상도 자료를 제공한다는 장점이 있다. 반면, 영상탐사로 확인할 수 있는 해저면의 면적은 매우 좁아 광역 탐사에는 적합하지 않다는 단점이 있다. 따라서 해저면 영상탐사는 지구물리 탐사와 실제 관측의 상관성을 제공함으로써 지구물리 자료 해석의 신뢰도를 높이는 방식으로서의 활용가치가 더 높다.

해저면 시료채취는 해저면에 분포하는 망간각의 실제 두께와 부존량을 측정할 수 있는 유일한 방법이다. 또한 시료채취를 통해 망간각 시료의 금속품위를 측정할 수 있다. 하지만, 시료채취는 연속적인 자료를 얻을 수 없다는 한계를 가지고 있어 그 결과가 항상 대표성을 갖지 못한다는 단점이 있다. 특히, 드래지를 이용한 전통적 시료채취 방식은 시료 채취 위치를 정확하게

알 수 없다. 해저 착저식 시추장비를 이용한 망간각 시추는 망간각의 정밀 분포를 파악할 수 있다는 장점이 있으나 탐사비용이 커서 광역탐사 단계에서는 제한적으로만 이용될 수 있다.

따라서 각각의 탐사 기법을 통해 망간각의 실제 분포 특성을 파악하기는 어려우며 이들 탐사 기법의 조합을 통해 효율성 높은 탐사를 수행하는 것이 관건이다. 특히, 이 논문에서 고려하는 탐사는 국제해저기구 탐사광구 신청을 위한 목적으로 보다 넓은 지역을 효율적으로 탐사하고 광구 등록 이후 수행될 정밀 탐사를 수행하기 위한 대상을 선정하는 광역탐사 단계라는 점도 고려되어야 한다.

3. 서태평양 공해지역 망간각 기초 탐사 수행 사례 분석

우리나라는 지난 1999년부터 2004년까지의 탐사수행을 통해 서태평양 공해지역을 대상으로 14개 해저산의 망간각 기초탐사를 수행하였다. 기존 탐사의 사례 분석을 위해 OSM7 해저산을 대상으로 탐사자료를 정리하였다. OSM7은 기존 망간각 탐사 중 가장 후반부에 수행된 해저산 중 하나로 당시 탐사자료가 가장 잘 정리된 해저산 중 하나이며, 망간각 발달정도가 양호하여 망간각 탐사권 신청을 위한 탐사대상지역에도 포함되어 있어 기존 자료를 확인하고 추가로 획득해야할 탐사자료를 확인하는 데에도 적합하다. 망간각 탐사기법 중 OSM7 해저산에 적용된 탐사항목들은 Table 1에 요약되어 있다. 조사선은 해양과학기술원의 온누리호를 이용하였다. 탐사항목은 크게 음향장비를 이용한 지형조사와 천부지층탐사 등 지구물리탐사와 드래지를 이용한 망간각 시료채취 결과로 나뉜다.

3.1. OSM7의 지형 및 천부지층 특성

OSM7(152° 00'E, 17° 00'N)은 마젤란 해저산대에 속하며 팜으로부터 북동쪽으로 약 850 km 떨어져 위치한다(Fig. 2). OSM7은 전형적인 기요의 형태를 가지며, 가장 얇은 정상부 깊이는 1,330 m이고, 평평한 정상부의 수심은 1,400-1,600 m 내외이다. 정상부의 평탄한 부분은 주변의 다른 해저산들에 비해 매우 넓다. OSM7의 기저부의 깊이는 약 5,500 m로 해저산의 높이는 약 4,170 m에 달한다. 남동쪽에 작은 테라스(terrace)가 위치하며, 북동쪽 하부경사면은 주변의 다른 해저산과 연결된다. OSM7은 동서방향으로 110 km, 남북방향으로 90 km의 규모를 갖는다.

OSM7의 경사면은 평평한 정상부, 정상부로부터 급

Fig. 2. Location (upper) and bathymetric map (lower) of OSM7.

경사로 변하는 상부경사면, 상부경사면의 급경사에서 약간 완만해지는 중부경사면, 그리고 심해평원으로 이어지는 하부경사면으로 분류할 수 있다. 전반적으로 해

저산의 정상부 및 남동쪽의 테라스는 매우 낮은 경사도를 보이지만, 정상부를 벗어나면서부터 매우 급한 경사도를 나타낸다(Fig. 3B). 10도 이하의 경사도를 갖는

Fig. 3. Bathymetry (A), slope distribution (B), upper transparent layer (C), and acoustic type (D) maps of OSM7. Bathymetry and slope distribution maps are processed using data from multibeam echo sounding sonar (SeaBeam 2000). Thickness of transparent layer and acoustic types are determined using data from sub-bottom profiler (BATHY-2000P).

해저면은 전체의 67.7%를 차지하며, 정상부를 제외한 사면에서는 53.1%를 차지한다.

OSM7의 최상부 음파투명층의 분포와 해저면의 음향상 분류는 천부지층 탐사를 통해 수행되었다(Fig. 3). 심해에 분포하는 최상부 음파투명층은 대부분 원양성 퇴적물로 구성되어 있다고 알려져 있다(Tanahashi, 1986). OSM7 정상부에 분포하는 최상부 음파투명층은 매우 고르게 분포하고 그 두께는 최대 100 m를 넘는다(Fig. 3C). 해저산의 기저부에도 20-30 m 안팎의 최상부 음파투명층이 폭넓게 분포하는데, 이들은 대부분 사태에 의해 해저산의 상부에서 이동된 것으로 해석된다.

음향상은 저층반사파, 지층 내 반사파와 지형 등의 특성에 따라 6가지로 구분하여 도시되었다(Fig. 3D). 먼저 해저산의 정상부는 상대적으로 뚜렷한 표층반사파와 이에 평행한 지층 내 반사파가 존재하여 원양성 퇴적층을 지시하는 음향상 I-1로 구분되며, 정상부의 가장자리는 강하고 작은 쌍곡선 형태의 표층반사파가 존재하고 불투명하거나 쌍곡선 형태를 띤 지층 내 반사파들이 존재하는 음향상 II-1이 분포한다. 음향상 II-1은 압초로 구성된 퇴적체를 지시하는 것으로 해석된다. 해저산의 경사부와 기저부는 규모와 높이가 다양한 쌍곡선 형태의 표층반사파가 존재하고 지층 내 반사파가 거의 존재하지 않는 음향상 II-2와 뚜렷하지 않은 표층반사파가 존재하고 지층 내 반사파가 없거나 확산된 형태로 존재하는 음향상 III-1로 구분되는데 이들은 음향상의 차이는 있지만 모두 화산암체 기반암으로 판단

된다. 해저산의 기저부는 규모가 작은 쌍곡선 형태의 표층반사파가 존재하고 지층 내 반사파들이 불규칙한 음향상 II-3과 표층반사파가 뚜렷하지 않고 지층 내 반사파가 거의 없는 음향상 III-2로 나뉘는데 이들은 사태 혹은 암설류에 의해 생성된 퇴적체로 보인다.

3.2. OSM7의 망간각 분포

OSM7 해저산의 망간각 분포는 1개 측선에서의 해저면 영상자료와 7개 측선에서의 드래지 시료채취를 통해 수행되었다(Fig. 4). 심해저 카메라시스템의 운영은 동쪽 사면(DSC 01)의 1524-3726 m 구간에서 수행되었다. 시료 채취를 위한 드래지 구간은 해저산의 사면별로 수심 2000 m 이하의 하부사면과 2000 m 이상의 상부사면으로 나누었다.

OSM7의 동쪽사면에서 수행된 해저면 관찰 결과 퇴적물이 덮여있는 해저산 정상부를 지나면서 망간각이 관찰되기 시작하였으며 망간각이 잘 발달한 사면과 망간각과 퇴적물이 함께 관찰되는 사면이 교대로 관찰되며, 약 2,000 m 수심까지 망간각의 피복이 매우 양호한 편이다. 하지만 수심이 2,000 m 보다 깊은 사면에서는 대부분 퇴적물이 주를 이루며 부분적으로 퇴적물과 망간각이 혼재하여 관찰되었다(Fig. 5). 이는 해저면 관찰을 수행한 사면이 상대적으로 완만한 능선에 해당되기 때문에 퇴적물이 상대적으로 넓게 분포할 것이라는 예측에 부합한다. 하지만, 경사가 급해지는 2,500 m 보다 깊은 수심에서도 퇴적물이 우세한 구간이 유지되다가 망간각이 피복된 기반암 우세지역으로 변화하는

Fig. 4. Distribution diagrams showing the thickness of crusts on the slope of OSM7. Sampling of crusts conducted in all directions of seamount as shown in inserted map. In general, the crusts sampled from upper slope shallower than 2,000 m (solid line) are thicker than those from lower slope deeper than 2,000 m (dashed line). Both average and maximum thickness of crusts show similar shape of distribution pattern.

Fig. 5. Small scale variation in occurrences of ferromanganese crusts along camera tow line on the eastern flank of OSM7. Crusts are dominant on the peripheral slope on the flat summit around 2,000 m in depth.

Table 2. List of selected ferromanganese crust samples with thickness and substrate type

Dredge site	Water depth (m)	Location		Number of sample	Substrate	Thickness of crust (mm)	
		Latitude (N)	Longitude (E)			average	maximum
DG1-3	1,814	152° 19'	16° 50.4'	3	phosphorite	67	100
DG2-1	2,269	152° 00'	16° 39.5'	2	mud	4	5
DG2-2	1,758	152° 00'	16° 40.3'	3	breccia, limestone	15	40
DG3-1	2,715	151° 46.8'	16° 48.5'	4	phosphorite, mud	28	55
DG3-3	1,709	151° 48.4'	16° 49'	3	breccia	48	65
DG4-1	2,324	151° 46.5'	17° 07'	1	broken crust	45	45
DG4-2	1,608	151° 47.5'	17° 06.7'	2	broken crust	98	110
DG5-2	2,092	152° 00'	17° 12.4'	3	basalt, breccia, limestone	15	35
DG5-3	1,617	152° 00'	17° 11.7'	3	breccia, phosphorite	94	135
DG6-1	1,932	152° 17.7'	17° 01.6'	9	limestone, breccia, phosphorite	46	105
DG6-2	1,673	152° 17'	17° 01.3'	1	breccia	135	135
DG7-1	2,023	152° 14.5'	17° 11.1'	1	broken crust	45	45
DG7-2	1,682	152° 13.7'	17° 10.4'	3	limestone, breccia	18	50

경향을 나타내었다.

OSM7에서 망간각이 피복된 기반암은 주로 각력암, 석회암, 인회암으로 구성되어 있으며, 현무암과 미고화 퇴적물 등도 함께 관찰되었다(Table 2). 기반암의 종류에 따른 망간각의 피복 두께는 기반암이 떨어져 나간 망간각과 각력암에 피복된 망간각이 평균두께 약 60 mm로 가장 두꺼우며, 인회암, 현무암, 석회암, 미고화 퇴

적물의 순으로 두께가 감소한다. 기반암의 종류와 피복된 망간각의 두께는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았지만, 망간각이 피복된 기반암의 빈도수와 두께를 고려할 때 OSM7에서 망간각의 피복은 주로 각력암과 석회암 및 인회암에 더 발달되어 있는 것으로 보인다.

OSM7에서 드래지가 수행된 사면의 방향을 따라 채취된 망간각의 평균두께와 최대두께를 살펴보면 OSM7

해저산의 북서 방향과 동쪽방향의 사면에서 평균두께 100 mm 이상으로 두껍게 발달한 반면, 북동사면, 남쪽사면 및 남서사면에서는 상대적으로 망간각의 피복 두께가 얇은 것으로 나타난다(Fig. 4). 채취된 망간각이 가장 두꺼운 정점은 해저산 동쪽의 상부사면인 DG6-2로 최대 135 mm의 두께를 나타낸다. 전반적으로 북동사면과 남쪽사면인 DG07, DG02 정점을 제외하고는 평균두께가 약 40 mm 이상으로 망간각이 두껍게 발달해있으며, DG07, DG02 정점의 상부사면에서도 최대두께는 40 mm 이상 발달한다.

일반적으로 해저산 사면의 망간각 분포는 해저산의 지형과 상관성을 보인다. 즉, 골짜기에 비해 능에서 망간각의 두께가 더 두껍게 피복되는데, 이는 골짜기를 따라 사태 혹은 암설류의 형성이 빈번하여 망간각의 성장을 방해하기 때문으로 해석된다. OSM7에서는 지형과 망간각 분포의 상관성은 뚜렷하지 않은 편인데, 이는 해저산의 형태가 상대적으로 단순한 형태를 띠고 있어 능과 골짜기의 구분이 확실치 않기 때문으로 판단된다. 망간각의 분포(두께)차이는 수심차이에 의해 잘 드러난다(Fig. 4). 망간각의 평균두께를 살펴보면 DG07 정점을 제외하고 나머지 정점들에서 모두 2,000 m 보다 얇은 상부사면에서 망간각이 더 두껍게 발달한다. 이러한 경향은 망간각의 최대두께에서도 동일하게 관찰되는데, 최대두께는 모든 정점에서 상부사면이 더 두껍게 관찰되었다.

DG07 정점 하부사면의 망간각 두께가 다른 방향의 하부사면과 비슷하다는 점을 고려한다면 이는 정점 DG07의 상부사면에서 망간각의 성장이 약했기 때문으로 풀이된다. DG07 정점의 경우 해저산의 능에 해당되지만 망간각의 발달이 미비한 것은 완만한 경사로 인해 퇴적물이 저탁류를 통해 유입되어 망간각의 성장을 방해하는 요인으로 작용했을 가능성이 있다.

3.3. OSM7 해저산 기초 탐사를 통한 망간각 분포 해석의 가능성과 한계

OSM7 해저산을 대상으로 수행된 지구물리, 해저면 관찰, 망간각 시료채취 결과를 정리해보면 먼저 지구물리 탐사를 통해 지형도, 경사분석도, 최상부 음파투명층 두께 분포, 음향상 분류도 등이 작성되었으며, 심해저카메라 운영을 통해 1개 측선에 대한 해저면 관찰과 망간각 분포를 파악하였다. 그리고 드래지 시료채취를 통해 7개 방향 사면에 대한 상부 및 하부의 망간각 분포와 두께 자료를 획득하였다. 각각의 결과는 망간각 탐사를 위한 유망지역 선정과 분포를 파악하는

데 이용될 수 있다. 지형 및 경사분석 결과는 망간각 채광 불리 지형을 판별하고, 음파투명층 두께를 통해 망간각의 형성이 어려운 퇴적물 피복지역을 파악하는데 이용될 수 있다. 또한 해저면 관찰 및 망간각 시료채취 결과를 토대로 망간각이 발달한 사면의 방향과 깊이에 따른 분포 경향을 파악할 수 있다.

그러나, 기초 탐사 사례에서 확보된 자료를 통해 서로 다른 탐사자료 사이의 상관성을 파악하기는 어렵다. 예를 들어 천부지층 탐사 결과를 토대로 작성된 음향해석도(Fig. 3D)의 결과와 망간각 시료채취를 통해 확인된 망간각의 분포(Fig. 4)는 의미있는 상관성을 보이지 않는다. 이는 사례연구에서 수행된 탐사자료가 서로 유기적인 상관성을 도출하기에 충분하지 않았기 때문으로 판단된다. 특히, 음향탐사의 경우 음향산란강도 자료가 해저면 매질의 특성을 파악하는데 유용하게 활용될 수 있으나 기초 탐사 당시 다중빔 음향 측심장비의 문제로 인해 음향산란자료를 획득하지 못하여 Fig. 3D의 음향해석도는 천부지층탐사 결과만을 토대로 작성되었다. 따라서 음향산란자료의 확보를 통한 음향해석도의 보완이 먼저 수행되어야 할 것으로 판단된다.

전반적으로 사례연구를 통해 분석된 망간각 탐사자료는 망간각 분포 파악을 위한 해저산 규모의 기초탐사 수준으로, 국제해저지구 탐사규칙에서 제시하는 망간각 탐사지역을 선정하기에 충분한 망간각 분포에 대한 정량 자료나 망간각 유망지역 추론을 위한 지구물리 탐사와 망간각 분포의 상관성 자료를 제공하지 못한다. 따라서 망간각 부존 유망지역 선정 및 자원평가를 위한 탐사를 위해서는 기존 탐사 자료를 확충하는 한편 원격탐사(음향탐사) 결과와 망간각 분포(시료채취 및 해저면 관찰)의 상관성을 파악할 수 있는 정밀탐사가 수행되어야 한다.

4. 망간각 부존 유망지역 선정 및 자원평가를 위한 탐사 방안

해저산 기반암에 피복된 형태로 부존하는 망간각의 부존 유망지역을 선정하기 위해서는 망간각 피복 지역을 판별할 수 있는 평면자료와 망간각 두께를 파악할 수 있는 심도자료가 필요하다. 망간각 피복지역은 선상 음향탐사를 통해 효과적으로 파악할 수 있다. 즉, 퇴적물로 피복되어 낮은 음향산란강도를 갖는 지역은 망간각의 분포가능성이 낮은 지역으로 분류할 수 있다. 하지만, 망간각의 피복 여부에 관계없이 기반암이 노출된 지역은 모두 강한 음향 산란을 보일 것이므로 음향산란강도만으로 망간각 부존여부를 판단할 수는 없다.

따라서 음향산란 자료를 보충하기 위해서 해저면 관찰이나 시료채취를 통한 망간각 피복 여부를 판단하여야 한다. 특히, 시료채취의 경우 연속적인 자료를 얻는데 제한적이므로 망간각 피복여부의 판별을 위해서는 음향산란 자료와 해저면 영상관찰 자료의 상관성을 파악하는 것이 중요하다. Usui and Okamoto (2010)은 음향산란 자료와 해저면 영상관찰 결과를 토대로 강한 음향산란강도를 지시하는 해저면 사면을 망간각 피복 지역, 암설류, 석회암 지역 등으로 구분하고 이들 지역의 44%에서만 망간각의 피복률이 높다고 해석하고 탐사 대상 해저산의 망간각 매장량을 7.5 Mt으로 추정하였다. 또한 이들의 결과가 유사한 크기의 해저산에서 높은 음향산란강도 지역을 모두 망간각 피복지역으로 간주하여 추정된 매장량인 34 Mt에 비해 차이가 크다는 점을 지적하고, 높은 음향산란강도 지역을 모두 망간각 피복지역으로 간주할 경우 실제 매장량이 과장될 가능성이 높다고 하였다.

따라서 해저면의 음향산란 자료를 활용하여 망간각 피복지역을 판별하기 위해서는 동일 지역에 대한 해저면 영상자료를 비교하여 두 자료의 상관성을 파악하여야 한다. 한편, 해저면의 매질 특성을 파악하기 위한 음향탐사는 선상 원격탐사와 견인체 탐사로 구분할 수 있다. 선상 원격탐사가 보다 넓은 면적을 대상으로 시간대비 효율적인 탐사자료를 획득할 수 있는 반면 견인체 탐사는 고해상도 자료를 획득할 수 있는 장점이 있다. 따라서 선상 원격탐사를 통해 전체 탐사대상 지역에 대한 음향산란 자료를 획득하는 동시에 탐사 지역의 해저면 매질특성 분포를 대표할 수 있는 정밀탐사지역을 선정하고 견인체 탐사 및 해저면 영상탐사를 병행하여 음향산란강도와 해저면의 지질 특히 망간각 피복여부의 상관성을 기준으로 음향 매질 특성을 분류하여야 할 것이다.

해저산 내 망간각 분포 및 두께는 해저면 지형, 사태나 암설류의 발생, 기반암의 종류와 연령, 해저산의 침강역사, 저층류의 패턴 등 다양한 요인에 의해 결정된다. 망간각이 두껍게 성장하기 위해서는 (1) 산소가 풍부한 저층류가 지속적인 공급되어야 하고, (2) 망간각이 성장하는 해저면의 기반암이 오랜 기간에 걸쳐 안정적으로 유지되어야 하며, (3) 망간각의 성장을 방해하는 퇴적물의 공급이 적어야 한다. 동일한 해저산 내에서 저층류의 공급이나 퇴적물의 차이가 크지 않을 것이라고 가정한다면 사면 내 망간각의 두께에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 안정적인 기반암 환경으로 볼 수 있다. 즉, 사태나 저탁류의 생성이 빈번하거나

기반암의 침하 등이 일어나는 불안정한 조건에서는 상대적으로 망간각이 두껍게 성장하기 어렵다는 것이다. 따라서 동일한 해저산 내에서 골짜기에 비해 사면안정성이 높은 능을 따라 더 두꺼운 망간각이 성장할 것으로 기대할 수 있다. 또한 해저산 지역에서 소규모의 지형기복은 대개 사태에 의해 형성될 것이므로 이러한 소규모 지형기복 판별을 통해서도 망간각의 성장에 불리한 지형을 구분할 수 있다.

실제 망간각의 분포와 두께는 시료채취를 통해서만 확인될 수 있다. 따라서, 적정한 규모의 시료채취를 통해 망간각 피복지역의 망간각 두께 자료를 확보함으로써 망간각 부존 유망지역을 파악하여야 한다. 망간각 시료채취의 가장 이상적인 방법으로는 음향산란 자료를 확보한 지역의 해저면 사면을 따라 해저면 관찰을 수행하고 특정 구간에서 소규모 시추를 통해 망간각의 두께를 확인하는 것이다. 하지만, 해저면 시추는 비용이 크고 장기간의 탐사기간이 요구되므로 시추를 통한 망간각 분포는 보다 좁은 지역을 대상으로 수행되는 정밀탐사 단계에서 수행되는 것이 더 타당할 것이며, 탐사지역 신청을 위한 광역탐사 단계에서는 기존의 드래지 운영을 통한 시료채취가 주로 수행되어야 할 것이다. 드래지를 이용한 망간각 시료채취는 해저산의 규모에 따라 다양한 방향과 서로 다른 수심대에서 수행되기 위해 1 km 이하의 짧은 구간에서의 운영이 요구된다.

사 사

이 연구는 한국해양과학기술원에서 수행중인 남서태평양 및 인도양 해양광물자원 개발(PM57581) 사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 논문을 심사해주신 심사위원들께 감사의 말씀 드립니다.

참고문헌

- Glasby, G.P., Ren, R., Ahi, X. and Pulyaeva, I.A. (2007) Co-rich Mn crusts from the Magellan Seamount cluster: the long journey through time. *Geo-Marine Letters*, v.27, p.315-323.
- Halbach, P. and Manheim, F.Y. (1984) Potential of cobalt and other metals in ferromanganese crusts on seamounts of central Pacific basin. *Marine Mining*, v.4, p.319-336.
- Hein, J.R., Koschinsky, A., Halbach, P., Manheim, F.T., Bau, M., Kang, J.-K. and Lubik, N. (1997) Iron and manganese oxide mineralization in the Pacific. In Nicholson, K. et al. (eds.) *Manganese Mineralization*:

- Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits. Geological Society Special Publication 119, London, p.123-138.
- Hein, J.R., Koschinsky, A., Bau, M., Manheim, F.T., Kang, J.-K. and Roberts, L. (2000) Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific. In Cronan, D.S. (ed.) Handbook of Marine Mineral Deposits. CRC Press, Boca Raton, p.239-279.
- Hein, J.R., Conrad, T.A. and Dunham, R.E. (2009) Seamount characteristics and mine-site model applied to exploration- and mining-lease-block selection for Cobalt-rich ferromanganese crusts. Marine Georesources and Geotechnology, v.27, p.160-176.
- Hein, J.R., Conrad, T.A. and Staudigel, H. (2010) Seamount mineral deposits: A source of rare metals for high-technology industries. Oceanography, v.23, p.184-189.
- Koschinsky, A. and Halbach, P. (1995) Sequential leaching of marine ferromanganese precipitates: Genetic implications. Geochim. Cosmochim. Acta, v.59, p.5113-5132.
- Tanahashi, M. (1986) Subsurface acoustic layers detected by 3.5 kHz subbottom profiler in the GH81-4 area (Eastern part of the Central Pacific Basin). Geol. Surv. Japan Cruise Rept. v. 21, p. 21-32.
- Usui, A. and Ito, T. (1993) Fossil manganese deposits buried within DSDP/ODP cores, legs 1-126. Marine Geology, v.119, p.111-136.
- Usui, A. and Okamoto, N. (2010) Geophysical and geological exploration of Cobalt-rich ferromanganese crusts: An attempt of small-scale mapping on a Micronesian seamount. Marine Georesources and Geotechnology, v.28, p.192-206.

2013년 9월 9일 원고접수, 2013년 11월 2일 1차수정,
2013년 12월 5일 게재승인