

심해자원 채광에 소요되는 첨단기술 조사, 분석 및 발전방향 연구

박 노 식* 홍 도 천

* 울산대학교 충남대학교

1. 서론

해저광물자원으로는 망간단괴, 열수광상 및 코발트 함유도가 높은 망간각 등이 알려져 있다.

해저 망간단괴는 1803년에 처음 발견되었다고 한다. 망간을 위시한 코발트, 니켈, 구리 등 유용 광물이 함유됨이 알려지면서 2차 대전 이후 대양에 대한 전반적인 탐사에 의하여 태평양 해저 5,000 m에서 망간단괴의 대규모 분포가 확인되어 1960년대 이래 미래의 주요자원으로 부각되었다. 심해저 광구에서의 상업적 채광에 대한 경제성은 망간단괴 분포면적 및 밀집도에 대한 정확한 예측 및 이에 따른 생산량 과 채광비용 등의 산출에 근거하여 평가되며 채광시스템의 통합운용특성이 평가에 큰 영향을 미친다.

지난 30년 동안 심해저 망간단괴에 대한 탐사 및 채광시스템의 개발 및 시험이 수행되었다. 국제콘소시움으로는 KCON(Kennecot Consortium), OMI(Ocean Management Inc.), OMCO(Ocean Mineral Company) 및 OMA(Ocean Mining Associates) 등이 있고, 국가 프로그램으로는 프랑스, 독일, 일본, 인도, 중국, 러시아 및 한국이 있다. 이들에 의하여 시험 채광이 태평양, 대서양, 인도양 및 홍해에서 수행되었다.

1970년에 OMI에 의하여 대서양의 Blake 해저 고원에서 최초의 단괴 시험 채광이 이루어졌다. 이후 1977-79년 사이에 OMA, OMCO 및 OMI에 의하여 태평양의 Clarion-Clipperton 해저에서 시

험 채광이 계속되었다. OMCO는 자주식 집광기를 사용한 반면 OMA와 OMI는 예인식 집광기를 사용하였다. 이 시기에 KCON도 그들의 채광 시스템의 일부에 대한 해역 시험을 하였다. 집광 유닛에서 단괴는 분쇄되어 해수와 일정비율로 혼합되어 라이저를 통하여 해상의 채광선에 이송된다.

홍해에서는 사우디 아라비아-수단 협력사업으로 1979년에 다금속니토에 대한 예비 pilot mining 시험이 행해졌다. 그 시스템은 해저 니토를 몇가지 펌프 개념을 사용하여 흡입, 이송하였다. 니토와 해수의 혼합물이 채광선에 도착하면 부양처리에 의하여 농축 니토가 추출되었다. 이 시험에는 광석으로부터 필요한 광물을 추출하고 이를 선광하는 것이 포함되어있다. 이중 관심을 끄는 사항은 사용된 물이 파이프라인을 따라 채광선으로부터 400m 해저로 펌핑되어 방출됨으로서 가장 생산적인 해수 상층의 환경을 보전할 수 있다는 것이다.

현재 전형적인 심해저 망간단괴 채광시스템은 집광 유닛, 양광 유닛 및 채광선으로 구성된 3개의 서브 시스템으로 구성된다. 특히 심해저 집광 유닛 및 양광 라이저의 설계와 제작에는 우주기술에 버금가는 첨단 엔지니어링 기술이 요구된다.

지금 까지 집광 유닛에 대하여 여러 가지 해법이 개발, 시험되었다. 단괴는 양광 라이저 내에서 수중 펌프 또는 에어리프트에 의하여 인양

될 것이다.

효율적인 채광작업을 위해서는 라이저 파이프와 채광선 및 해저 유니트간의 연결 시스템 및 터미네이션의 설계에 요구되는 라이저의 거동에 측이 필수적이다. 또한 라이저 시스템에 작용하는 외력에 대한 연속 모니터링이 채광효율을 좌우한다. 라이저의 가속도, 수직위치, 경사, 인장력 및 응력의 측이 필요함과 동시에 단괴유량의 모니터링도 필요하다.

양광작업은 라이저에 공기를 주입하는 에어-리프트 및 유압구동 펌프의 양자 모두에 의하여 가능하다. 에어-리프트 개념이 천해 및 심해 모두에서 시험되었다.

최종적으로 단괴 슬러리가 라이저를 통하여 채광선으로 이송되면 사용된 해수는 분리되어 해상에서 바다로 방출된다

심해자원 채광에 소요되는 첨단기술에 대한 국내·외의 자료를 분석하고 발전 방향에 대하여 연구하였다. 현재 심해저 광물자원 개발에 대한 세계시장은 형성되어 있지는 않으나, 국내 대형중공업들의 심해저 광물자원 개발에 관련된 기술 및 장비개발의 잠재력은 충분히 보유하고 있는 것으로 분석되었으나, 아직은 심해저 채광장비 개발에 대한 참여 욕구가 부족한 것으로 나타났다.

2. 국외 심해저 채광기술개발 현황

가. 독일

A M R (Arbeitsgemeinschaft Meerestechnischgewinnbare Rohstoffe)가 1974년에 설립되어 다국적 컨소시엄 OMI의 지분에 참여하여 1978/79년의 파일럿 채광시험에 참여한 바 있다. 1980년대 중반 이후 심해저 망간단괴 개발을 위한 프랑스 GEMONOD와의 쌍무적 기술개발 협력프로그램을 체결하였으며 Preussag의 Thetis사와 대학 연구소에서 집광장치 개발에 관한 연구를 수행하여 1992년에는 IKS연구소에서 심해저 자주식 무한궤도 채광기를 개발하였다.

나. 프랑스

1974년에 심해저광업 사업주체인 AFERNOD를 설립하였다. IFREMER와 CEA가 주축이 되어 구성된 심해저 망간단괴 개발그룹 GEMONOD에 의한 심해저 채광기술 타당성 연구 및 경제성 분석에 대한 연구가 수행되었으며 아르키메데스 추진기를 장착한 무인 채광장비를 사용하는 shuttle-mining 개념이 도출되어 PLA2가 제작, 시험된 바 있다(1983-1988).

다. 미국

민간기업 주축으로 다국적 컨소시엄에 지분참여(OMI : SEDCO, OMCO: Lockheed Missile & Space Co.)하였으며 70년대 말 실 해역 파일럿 채광시험을 수행한 바 있다.

라. 일본

미쯔비시, 스미토모 등의 19개 민간기업으로 구성된 DOMCO가 다국적 컨소시엄(OMI, KCON)에 지분참여하여 70년대 말 실 해역 파일럿 채광시험에 참여한 바 있다. 1987년에 심해저광구 선행투자자로 등록된 DORD(심해저자원개발주식회사)는 통상산업성(MITI) 산하금속광업사업단(MMAJ)와 19개 민간기업으로 구성되었으며 심해저 탐사 기획/수행 및 사업성 조사를 한 바 있다. 심해저 광물자원 개발기술연구조합(TRAM)의 설립(1982년), 운영에 의하여 실용기술이 개발되었으며, 자원환경기술연구소(NIRE)에서 기초기술이 연구되고있다. 국가 프로젝트로 17년간의 연구개발이 수행되어 1997년에 독자적인 실 해역 채광시험이 수행되었다.

마. 인도

1990년 이후 해양개발부(DOD) 산하 국립해양공학연구소 NIOT가 독일 지이겐 대학 IKS와 심해저자원개발 공동협력프로그램을 체결, 운영하고 있다. 1단계 성과로 수심 500m 해저모래 채광시스템 제작 및 성능 시운전이 수행되었다. 2단계 목표는 6000m 급 망간단괴 채광시스템 제작, 실 해역 시험으로 설정되어있다.

바. 중국

1990년 설립된 심해저광업 사업주체인 중국대양광물자원개발협회(COMRA) 주도에 의한 심해저 망간단괴 개발기술 연구사업을 수행하고있다. 2단계까지의 연구개발사업(1990-2000)은 채광시스템 호수시험(2001년 예정)을 목표로 추진 중에 있다. 3단계(2001-2005) 목표는 2005년 수심 1000m 해양시험(PPMT)의 수행이다. 선진기관 전문가의 기술자문(VWS Oebius)을 통하여 첨단 기술을 소화하고 있으며 핵심부품 및 시스템은 외국제작 발주(예: 시험집광시스템 프랑스 Cybernetix)에 의존하는 전략도 사용한다.

3. 한국의 심해저 채광기술 개발현황

가. 배경

우리나라는 1983년 8월 유엔 해양법 협약에 서명하고 그해 12월 한국해양연구소가 태평양의 Clarion-Clipperton 해역의 약 20 만 평방 km 에 대한 해저탐사를 수행한 바 있다.

이후 1988-1991년까지 기초탐사를 수행하였고 1991년 제 58차 경제장관회의에서 “심 해저 광물 자원 개발사업 추진계획”이 의결되어 이후 한국 해양연구소와 한국 자원연구소 공동으로 유망광구 집중탐사를 수행한바 있다.

1992년 한국해양연구소의 1,300 톤급 해양조사선 온누리호가 신조되어 태평양에서 탐사활동을 시작하였다.

1983년부터 1993년 9월까지 실 해역 탐사작업 일수 365일, 총 탐사면적 188만 5천 평방 km를 탐사하여 광구등록 에 필요한 유망광구 30만 평방 km를 확보하였다.

1993년 7월 이후 당시 상공자원부와 관계기관 합동으로 태평양 해저의 망간단괴 분포도, 해저 지형도 및 수심도 등을 작성하여 광구등록 준비 작업이 수행되었다.

이러한 노력에 힘입어 1994년 8월 UN에서 7번째 선행투자자로 인정되어 태평양 Clarion - Clipperton 해역의 15만 평방 km 광구에 대한 개

발권을 획득하였다.

이후 본격적인 심 해저광물 채광기술개발을 위하여 1994-2000년까지 과학기술부가 지원하는 국책연구사업으로서 한국해양연구소, 한국자원연구소, 및 한국기계연구원 등의 연구기관에서 기초연구, 타당성 조사, 실험실 규모 시험연구 등이 수행되었다.

나. 연구개발 실적

(1). KRISO 및 협동연구기관의 심해채광기술 기초연구

심해저 망간단괴의 상업적 채광을 위한 타당성 조사에 근거하여 연간 150-300 만톤의 생산능력을 가지며 환경친화적인 채광시스템의 개념설계를 한국기계연구원 선박해양공학분소(KRISO)에서 수행된 바 있다. 1999년에 KRISO가 한국해양연구소에 편입됨에 따라 국내 심해저 망간단괴 채광기술개발은 한국해양연구소와 한국자원연구소에서 중점, 추진될 예정이다.

전체 시스템으로 자주식 집광기와 수직양광 라이저에 의한 연속 채광 방식이 채택되었다. KRISO와 현대중공업(주) 및 독일의 Thetis사 3자의 공동연구를 통하여 기계식과 유체식이 결합된 집광기가 설계, 개발되었다.

한편 5,000 m 양광관의 거동특성을 파악하기 위한 해석 프로그램 및 양광관 내부유동해석 프로그램도 개발된 바 있다.

또한 소규모 시험 채광기의 설계를 위하여 시뮬레이션 프로그램이 개발, 사용되었다. 연약지반 주행실험, 수직 파이프 내의 2상 및 3상 유동 실험 등이 수행되었다.

채광시스템의 통합운용을 위한 시뮬레이션 연구로서 집광기 자세제어 및 구동·주행 시뮬레이션 전산 프로그램이 개발되었다. 채광선, 양광 라이저, 완충기 및 유연관과 집광기를 망라하는 최적 상대위치 제어시뮬레이션에 관한 연구도 수행되어 pilot 채광시스템 설계에 필요한 각종 자료가 구하여 졌다.

(2). 민간기업 연구개발 현황

심해저 광물자원 개발에 대한 세계적인 시장은 아직 형성되어 있지 못하며 따라서 이 분야에서 활발한 활동은 없으나 관련기술의 예비차원에서, 연구개발이 이루어지고 있다.

-현대중공업(주)은 초대형 조선소 이외에 해저 석유시추·생산용 해양구조물의 설계, 건조에 20년 이상의 경험이 있고, 대형 엔진 및 증전기를 비롯한 각종 중장비의 제조도 담당하고 있으므로 심해저 채광시스템의 설계·제작에 관한 잠재력을 충분히 보유하고 있다. 이 업체는 KRISO 및 독일의 Thetis사와의 3자 공동연구를 통하여 기계식과 유체식이 결합된 집광기의 설계개발에 참여한 바 있다.

-대우중공업(주)도 현대중공업에 버금가는 조선 및 해양구조물 설계, 건조 능력이 있고 특히 6,000 m급 무인 수중탐사정(AUV)의 개발 등 해저 무인 탐사·작업 장비의 설계·제작에 관한 경험이 있으므로 심해저 채광시스템의 설계·제작에 관한 잠재력을 충분히 보유하고 있다.

-삼성중공업(주)은 조선 및 해양구조물 분야에서 현대 및 대우중공업보다 후발주자이나, 꾸준한 연구개발 및 생산능력 확장에 노력하여 최근에는 전자에 견주어 볼 수 있는 업체로 자리잡았다. 특수선 및 여객선 등의 개발이 추진되고 있으며, 심해저 채광시스템 분야에서는 채광선의 개발에 주력하고 있다.

이 밖에 한진중공업(주)도 잠재력은 보유하고 있으나 선박 건조에 주력하고 있고 국내 중장비 또는 플랜트 관련 업체에서도 아직은 심해저 채광장비 개발에 대한 참여 욕구가 미미한 수준으로 판단된다.

4. 심 해저 채광기술 발전 및 국내 관련산업 육성 전망

심 해저 광물자원 개발 관련 기술은 이미 개발된 망간단괴 채광분야 기초기술을 생산기술로 발전시키는 것이 중요한 과제이다. 이에 병행하여 열수광상 및 망간각 채광기술의 연구개발도 이루어져야 할 것이다.

가. 전통적 기술의 발전 전망

현 기술 수준에서 보면 심 해저 채광기술의 향후 개발에서 고려해야할 사항은 다음과 같다.

-에어-리프트와 유압구동 펌프에 관해서는 양자의 경쟁에 의한 진전이 기대된다.

-해저 유니트의 위치제어 및 추진에 관한 연구도 진전이 있을 것이다. 추진 개념으로는 무한궤도와 아르키메데스 추진기가 개발되어 시험된 바 있으나, 이동성능의 최적화, 접근성 향상 및 유연성 확보를 위한 연구, 개발이 필요할 것이다. 위치제어의 주목적은 채광선과 집광기 사이의 상대위치 확보의 정확도를 높이는 것이다. 이에 의하여 집광기가 해저면의 예상 채광 경로를 따르도록 정확한 위치 및 방향의 제어가 이루어질 것이다.

-라이저에 대해서는 크기결정, 소재 및 부력재 선정 등이 고려되어야 할 것이다. 최적 크기는 예상 채광량, 유체항력의 크기, 용력 및 파이프 자중 등의 인자에 의하여 결정될 것이다. 복합 소재를 라이저에 사용하는 것도 시도될 것이다.

-채광선과 양광 라이저의 연결도 중요한 인자이다. 채광선의 운동이 라이저에 전달되는 것을 막으려면 해상에서의 유연 링크 또는 채광선에서의 운동보상장치 등에 의존하여야 한다.

나. 첨단기술의 적용 전망

현재의 채광기술이 내일에도 동일하게 적용될 수 있는지 숙고할 필요가 있다. 다음과 같은 분야의 발전이 예상된다.

(1) 시스템 운용

해저 집광기, 양광 라이저 및 채광선에 대한 통합운용의 효율 및 신뢰성을 제고하기 위하여 채광선의 위치유지 및 자동항법 시스템, 해저 집광작업 감시 및 제어 시스템, 양광 유량 모니터링 등의 기술에 로봇틱, 자동제어 및 정보통신분야의 새로운 know-how 및 hardware를 도입한 첨단기술이 적용될 것이다.

(2) 재료

최근 개발된 titanium 경합금 및 탄소섬유 복합 재료의 사용범위가 확대될 수 있으며, 나아가 새로이 개발될 신소재도 라이저 및 심해 장비의 구조설계에 적용될 수 있을 것이다. 이것이 성사되면 강도, 내구성, 부식 등의 설계조건이 크게 바뀔 것이다.

(3) 채광 왕복선

프랑스에서 해저에서 단괴를 채광하여 채광선까지 수송하는 일군의 무인 잠수정(ROV)을 사용하는 shuttle-mining 개념이 개발되었으나 제1세대 채광 project에서는 아직 사용된 바 없다. 이 개념은 기술적 측면에서 실현 가능하지만 경제적 측면에서는 아직 부적합한 것 같다. 그러나 이 시스템이 차세대 채광 시스템으로 채택될 가능성을 배제할 수는 없을 것이다

(4) 해저 선광

망간단괴는, 정유과정에서 버리는 부분이 거의 없는 해저석유와는 다르게, 제련과정에서 폐기하는 부분이 단괴의 70%에 상당할 것으로 예상되고 있다. 이 부분이 재활용된다면 망간단괴 채광전량을 육지로 수송할 것이나 그렇지 않을 경우에는 해상에서 선광하는 것이 유리하다고 알려져 있다. 나아가 물리적 분리에 의한 선광기법이 개발된다면 채광과 선광을 해저에서 일체화하는 방법도 사용될 수 있을 것이다. 해저에서 선광을 통하여 폐기될 부분이 제거될 수 있다면 해저로부터 5,000 m 해상까지 운반하는 양이 대폭 감소하는 장점이 있으나 해저 선광플랜트의 실현이 선결과제가 될 것이다. 이것이 실현되는 경우 양광관의 크기, 해상지원선 및 수송선단의 규모에 큰 영향을 줄 것이다.

다. 국내 관련산업 육성전망

앞서 국내 민간기업 연구개발 현황에서 언급한 바와 같이 해양 구조물 설계, 제작분야에서는 국

내기업이 충분한 경쟁력을 보유하고 있다. 그러나 해양플랜트 운용기술, 해양작업기술 및 ROV와 같은 수중 무인 작업장비, 수중 센서, 수중통신기술 등 고부가가치 해양산업 분야에서는 정부출연연구소 및 기업연구소의 실험실 규모 연구결과가 있으나 기업화되지 못하고 있는 실정이다. 이 원인을 살펴보면 수중작업분야 업체가 해저 석유생산지 즉 유럽의 북해, 북중미의 멕시코만, 남미의 campos 해역 부근에서 활동하고 있어서 한국과 거리가 멀고, 우리는 수출용 해양구조물 건조에 주력하고 있기 때문이다.

태평양 심해저 망간단괴의 채광이 년간 300만 톤 규모로 이루어질 경우 년간 운영비 약 5억불, 내부 수익률 약 15%가 예상된다. 이러한 대규모 채광에 있어서는 작업공정에 지장이 없도록 안전을 기하여야 한다. 따라서 시스템 각 요소의 완벽한 성능은 물론이고 시스템 전체의 원활한 통합운용 및 모니터링기술이 절대적으로 요구된다. 현재 이와 유사한 통합운용 시스템은 해저 석유개발산업분야에서 사용되고 있으므로 이를 벤치마킹하여야 할 것이다. 프랑스도 망간단괴의 양광 라이저 설계에 관하여 프랑스 국립석유회사(IFP : Institut Français du Petrole)의 자문을 받은 바 있다. 적절한 벤치마킹 대상으로 프랑스의 coflaxip사를 들 수 있다. 이 회사는 해저석유개발분야에서, 한국이 경쟁력을 보유하고 있는 해양구조물설계, 건조를 제외한 거의 모든 분야에서 세계적인 선두그룹에 속하여 있으며 지난 3년간의 평균년 매출액이 10억불을 상회하고 있다. 특히 최근 해저유전개발계획이 1,000 - 2,500 m까지의 심해쪽으로 이동함에 따라 해저 석유가 심해기술면에서 망간각 및 열수광상과 같은 해저광물과 동일한 수심에서 개발될 예정이므로 심해저 석유개발기술에서 라이저를 위시한 많은 부분을 참고할 필요가 증대될 것이다.

앞으로, 해양구조물 분야에 이미 진출해 있는 국내기업에서 고부가가치 해양산업에서 특화 분야를 선택하여 중장기적으로 투자하면 연구소 규모에서 벗어나 전문적인 해양 장비 제작 및 엔지니어링 서비스업체로 발전할 수 있을 것이다. 아래에 특화 분야를 열거하여 보았다. 이중 해저 무인작업 서비스는 우리가 독립적으로 보유하여야 할 것이다. 5,000 m 심해저에서의 시스템 장애 시

이를 현장에서 수리하는 기술은 용역비가 엄청난 것이기 때문이다. 예를 들어 해저 300 m 급 해저 석유 생산 jacket에 부식방지용 anodes를 설치하는데 2,000 만불의 용역비가 소요되었다 하며 이 비용은 jacket의 설치비용으로 알려진 500 만불의 4배이며 jacket 구조물의 건조단가와 대등한 액수이다. 5,000 m 심해저에서 발생할 수 있는 시스템의 장애로 인하여 년 간 망간단괴 300만톤을 채광하는 공정이 일정기간 중단되면 엄청난 손실을 초래하게되므로 즉각적인 개입(subsea intervention)에 의하여 시스템을 복구하는 심해저 무인작업 기술의 육성은 절실하다 하겠다.

끝으로 해저석유개발 호황기이었던 1980년대에 해저석유생산에 관련된 세계 해양산업의 년 간 매출액이 약 500 억불 규모인 것을 감안하면 심해저 망간자원을 위시하여 열수광상 및 코발트 함유 망간각 등의 개발이 본제도에 오를 경우 관련분야의 년 간 매출액은 최소 50억불(1980시세)대에 이를 것으로 예상할 수 있다. 따라서 이들 심해저 광물자원의 탐사, 채광 및 제련에 관련된 기술을 개발하여 미래해양산업에 적극 참여하여야 할 것이다.

5. 결론

최근 해양연구소를 중심으로 해양조사, 탐사 및 채취가 가능한 기술상의 문제들의 해결 방법들에 대한 연구가 진행이 되어, 많은 발전을 이룩하였다. 현재 심해저 광물자원 개발에 대한 세계시장은 형성되어 있지는 않으나, 국내 대형 중공업들의 심해저 광물자원 개발에 관련된 기술 및 장비 개발의 잠재력은 충분히 보유하고 있는 것으로 분석되었으며, 이에 따라 심해저 자원의 개발을 위하여는 효과적인 채취방법, 안전하고도 효율적인 제련, 가공 공장까지의 운송방법, 경제성, 개발에 따른 산업분야의 시너지효과 및 심해저의 환경 파괴 문제대책 등 첨단 기술 응용에 대한 연구가 이제부터는 병행되어야 할 것으로 생각한다.

참고문헌

- Amann, H. 1982, Technological Trends in Ocean Mining, Philosophical Transaction of the Royal Society of London
- Tetsuo Yamazaki 1993, A Re_Evaluation of Cobalt-Rich Crust Abundance on the Pacific Seamounts, Journal of ISOPE, Vol.3, No. 4
- 홍섭 1994, 심 해저 망간단괴 채광용 6000m 급 라이저의 개념설계, 한국기계연구원 보고서 UCE551-1838.D
- 홍섭 외 1996, 심 해저 단괴채집장치 개발(I), 한국기계연구원 보고서 UCK031-2012.D
- 홍섭 외 1997, 심 해저 단괴채집장치 개발(II), 한국기계연구원 보고서 UCK035-2074.D
- 양승일 외 1997, 심 해저 망간단괴 채광기술 연구, 한국기계연구원 최종보고서 UCN376-2068.D
- 황기형, 조규남 1998, 우리 나라 심 해저 광물자원 개발사업의 경제성평가 연구, 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집
- 정진수 1999, Deel-Ocean Resources Technology Developments: Future Issues, Ocean Science & Technology Vision 21, MOMAF International Symposium
- 홍섭 2000, 심해저 망간단괴 채광기술 현황 및 향후 전망, 선박해양기술 29호