해저기지 건설을 위한 핵심기술 조사

Key Technologies for Construction of Seabed Base

한택희* · 이진학** · 한상훈** · 원덕희*** · 박우선****

Han, Taek Hee · Yi, Jin-Hak · Han, Sang-Hun · Won, Deokhee · Park, Woo-Sun

Abstract

By the exhaustion of natural resources and the aggravation of the food situation, many countries are going ahead with development of the ocean space and ocean resources. To expand the border of human life, it is necessary to develop the underwater space. To perform these objectives, it is required to construct and secure a seabed base. The construction of a seabed base will also be the motive power for economy growth in the future. The key technologies to construct a seabed base under high pressure and low temperature conditions are the extreme engineering technologies and they are some parts of space engineering. They are also key technologies to survive when a worldwide-huge disaster attacks the earth. In this study, the necessary technologies for the construction of seabed base were surveyed. And the surveyed technologies were categorized by phase 1 and phase 2, which were defined by construction depth and size, and possible time. The surveyed results showed that it is necessary to construct a seabed base and develop a new constructional material and energy supplying method.

Key words : Seabed base, Subsea habitat, Extreme engineering, Underwater construction, Composite structure

요 지

지상 자원의 고갈 및 환경 문제, 인구 증가에 따른 식량 자원의 부족 등에 따라 세계 각국은 자원의 보고인 해양 자원 개발을 적극적으로 추진하고 있으며, 미래 인류 생활 영역의 확장 및 해양 관광 자원의 개발을 위하여 해저 공간 개발이 필요하다. 또한, 해양 공간의 개발과 해양 영토 주권 수호를 위한 전초 기지로서 해저 공간 개발과 해저 기지의 확보가 필요하며, 미래 경제성장 원동력으로서 해양 자원 및 해양 공간의 개발은 필수적이다. 고압/저온의 극한 환경인 해저 기지 건설 기술의 개발은 극지 및 우주공간 구조물 개발 시 활용되는 원천 기술 확보로 이어지며, 미래에 발생 가능한 전 지구적 재난 시, 인류 생존을 위한 필수 거주 공간 확보 기술로도 활용될 수 있다. 본 연구에서는 미래 해저기지의 개발을 위한 필수 기술을 조사하였으며, 1단계 기술과 2단계 기술로 구분하였다. 조사 결과 해저기지의 건설은 반드시 필요하며, 이의 건설을 위해서는 건설 신재료의 개발과 에너지 공급 기술들이 필수적으로 필요한 것으로 조사되었다.

핵심용어 : 해저기지, 해저 도시, 극한공학, 수중 건설, 합성 구조

1. 서 론

인류는 지금까지 육상에서의 생활을 기반으로 문명을 건설하고, 자원을 획득하며 생활을 영위해 왔다. 육상에서 농업을 기반으로 하여 문명을 건설하였으며, 탄광에서 채굴한 석탄을 이용하여 산업혁명을 일으켜 문명을 발전시키고 도시화를 이루어 부족한 생활공간은 고층건물을 건설하여 해결하였다. 하지만, 인구의 지속적인 증가와 자원의 고갈, 환경의 파괴 문

제로 인하여 점차 해양 자원과 식량, 해저 공간의 이용에 대한 관심이 증대하고 있으며, 세계 각국은 자원의 보고인 해양 자원 개발을 적극적으로 추진하고 있다.

향후 20년간 30억 명의 신흥국 소비자가 신규 수용자로 등장해 자원의 절대 소비량이 급증할 것으로 예측되며(Dobbs et al., 2011), 2035년에 이르러 1차 에너지 수요는 2009년 대비 40% 증가할 것으로 예상되고 있다(Bae, 2011; IEA, 2011). 현재 인류가 사용하는 대표 자원인 석유는 2000년 이

*정회원. 한국해양과학기술원 연안개발 · 에너지연구부 선임연구원(E-mail: taekheehan@kiost.ac)

Member. Senior Research Scientist, Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology

**한국해양과학기술원 연안개발 · 에너지연구부 책임연구원

Principal Research Scientist, Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology

***정회원. 한국해양과학기술원 연안개발 · 에너지연구부 연수연구원

Member. Post Doctoral Scientist, Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology

****교신저자. 정회원. 한국해양과학기술원 연안개발 · 에너지연구부 책임연구원(Tel: +82-31-400-6325, Fax: +82-31-408-5823, E-mail: wspark@kiost.ac)

Corresponding Author. Member. Principal Research Scientist, Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology

후 수요 증가로 인해 고유가 현상이 지속되고 있으며, 향후에도 이러한 현상이 지속될 가능성이 높아(IMF, 2011), 2035년까지 원유 수요는 13.8% 증가해 1배럴당 120달러 수준에 달할 것으로 전망되고 있다(IEA, 2011).

이에, 세계 각국은 막대한 규모의 해양자원을 확보하기 위해 해상 영유권 다툼을 지속하고 있으며, 1970년대부터 해양 자원 확보를 위해 자국 연안 200해리(370.4 km) 내 모든 자원의 독점 권리를 주장하는 배타적 경제수역(EEZ: Exclusive Economic Zone)을 경쟁적으로 선포하고 있다. 또한 자원 부족 현상이 심화됨에 따라 최근 중국, 브라질, 호주 등 자원 부족국을 중심으로 자원민족주의 현상이 가시화되고 있다(Bae, 2011).

심해저는 망간단괴, 메탄 하이드레이트 등 각종 자원이 부존된 자원의 보고이며, 우리나라가 남서태평양의 피지공화국에서 확보한 75,000의 독점개발광구의 경제적 가치는 약 1,500억 달러로 추정되며, 상용화시 연간 300만 톤의 망간단괴 채광으로 전략금속자원 국내수요의 약 30%(연간 15억 달러)를 충족할 것으로 예측되며, 해양 생태계의 잠재가치는 연간 총 22조 5,970만 달러로, 지상 생태계의 잠재가치(11조 달러)를 추월하고 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010).

21세기 들어 해양자원 탐사 기술 개선 및 주요 해양국간의 해양자원 확보 경쟁 심화로 근해 지역에서 심해지역으로 각국의 탐사가 확대되고 있으며, 탐사 및 시추 기술의 발전으로 최근 3,000미터 이하 심해저 탐사가 증가하고 있다. 현재까지 심해저자원의 탐사·개발을 위하여 심해저 잠수정을 이용하고 있으나, 향후 안정적인 자원의 개발을 위해서는 필요 인원이 작업/체류할 수 있는 해저기지의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

또한, 자원 기지 및 과학 기지로서의 기능 이외에도 해저 기지는 미래에 인류의 거주 및 생활공간의 확장 의미가 있으며, 이는 Fig. 1과 Fig. 2에 나타난 바와 같이 2013년 1월에 발표한 국토해양부의 '2040 국토해양 미래기술 예측조사'(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2013)

Fig. 1. Future Mega Trend (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2013)

와 지식경제부의 미래기술 예측 조사(KEIT, 2011)에도 보고되었다. 미래의 인류 생활 영역 확장 및 해양 관광 자원의 개발을 위하여 해저 공간 개발은 반드시 필요하며, 해양 공간의 개발과 해양 영토 주권 수호를 위한 전초 기지로서 해저 공간 개발과 해저기지의 확보가 반드시 필요할 것으로 판단된다. 또한, 해양 자원 및 해양 공간의 개발은 미래 경제 성장의 원동력이 될 것으로 예상된다. 해저기지의 활용에 대한 내용을 Fig. 3에 나타내었다.

심해에 건설되는 해저기지는 우주공간에서의 조건보다 더 극한의 환경에 건설되며, 이를 위해서는 구조공학, 자원공학, 기계공학, 조선공학, 해양공학, 지질학 등의 관련 분야의 극한기술이 상호 융합되어야 한다. 또한, 해양자원 개발에는 해양물리, 화학, 생물학, 지질학 등 기초 해양과학 이외에도 기계, 전자, 조선, 기상, 잠수의학 등 응용과학 지식의 융·복합이 필요하며, 각 필요 기술들의 발전과 각 기술의 종합적인 융합이 이루어져야만 해저기지의 건설이 가능할 것이다. 또한, 관련 극한 기술의 발전은 각 분야의 최첨단 기술이 될 것이며, 우주공간 및 타 분야에도 적용이 가능하여, 최신 기술을 선점할 수 있는 기회가 될 것이다. 이에, 본 연구에서는 해저기지 건설을 위한 필요 요소기술을 공학적 측면에서 분석하고 개발 필요 기술을 도출하였으며, 미래 해저기지 건설 단계에 따른 단계별 기술 목표를 설정하고, 단계별 필요 기술을 도출하고자 한다. 또한, 해저기지 건설 후, 운용을 위한 필요 기술 도출 및 목표 수심, 목표 규모에 따른 운영 방법에 대하여 조사·분석하였다.

Fig. 2. Undersea City (KEIT, 2011)

Fig. 3. Applications of Seabed Base

2. 기술 현황 및 전망

2.1 해저기지 구조 형상

해저의 거주시설이나 작업기지로 사용되는 해저기지에는 큰 수압이 작용하며, 해저기지는 이러한 수압에 대해 안전하여야 한다. 심해 조건과 같은 높은 외압을 받는 구조물은 좌굴에 의한 붕괴 위험성이 높아 구조물의 안전성이 확보될 수 있는 형상의 고려가 필요하다. 큰 수압에 저항하기 위하여 가장 안정적인 구조물로는 Fig. 4와 같은 돔형식의 구조물 또는 Fig. 5와 같은 Arch형의 루프실드 구조물을 고려할 수 있다. 이 형식의 구조물은 아치액션(arching action)에 의해 수압을 분산시키는 구조이며, 이러한 형상의 구조물의 강도에 대해서는 많은 연구자들이 연구를 하였다(Shin & Woo, 1999; Han et al., 2008). 루프실드 구조물의 해저기지 본체로의 적용 보다는 돔과 돔을 이어주는 연결 구조물로서의 역할이 타당할 것으로 판단된다.

2.2 심해 구조물 건설 재료

해저도시 역시 외벽을 구성할 수 있는 재료는 강재, 콘크리트, 유리 및 복합소재 등을 고려할 수 있다. 강재의 경우에는 염분에 의한 부식 방지 대책이 필요하며, 유리 및 복합소재는 고압에 저항하기 위해 심해잠수정에 사용되는 고강도 플라스틱 수지인 ‘메타그릴 수지 글라스’를 적용할 수 있다(Kim, 2012). 복합소재의 경우에는 내부식성을 갖고 고강도로 제작할 수 있어 복합소재의 강도에 대해 많은 연구가 이루어지고 있으며, 강재와 콘크리트 합성구조에 대한 연구도 이루어지고 있다.

심해에서의 환경조건은 지상에서와 달리, 저온과 고압이 작용하는 환경이기 때문에, 1974년에 미해군에서는 심해 조건에서의 구조물 상태 변화를 파악하기 위하여, Fig. 6과 같은 직경 6ft(183 cm)의 콘크리트 구체를 수심 2,790ft(850 m)에 설치하여 431일 후의 상태를 관찰하였다. 관찰결과, 초기에는

Fig. 4. Concept of Seabed Base - Dome Structure (Kim, 2012)

Fig. 5. Roof Shield Structure (Han et al., 2008)

Fig. 6. Concrete Sphere in Deep Sea (Haynes, 1974)

강도가 증가하나 최종적으로 약 28%의 강도 감소를 확인하였으며, 강도 변화를 추산할 수 있는 관계식을 도출하였다(Haynes, 1974). 이 외에도 미해군에서는 해저에서 건설재료 상태 변화를 관찰할 수 있는 실험틀을 제작하여 강재 및 콘크리트에 대한 상태 변화를 측정하고 심해저 구조물 건설에 대한 사전 연구를 수행하였다(Rush, 1962).

해저기지 건설에는 건설 신소재를 활용할 수도 있으며, 미국 Alabama대학교에서는 물 없이 사용하는 월토의 강도에 대해 분석하였다(Toutanji et al., 2005). 미국항공우주국(NASA)에서는 월토(月土)로 만드는 ‘물 없는 콘크리트’ 개발에 성공하였다(Meyers and Toutanji, 2007). 이 콘크리트는 복제토(JSC-1A)에 에폭시 수지와 소량의 탄소나노튜브를 섞어 콘크리트를 제작하였으며, 2020년 착공 계획인 달기지 건설은 물론 해저기지 건설에도 도움이 될 것으로 예상된다. 국내에서도 한양대학교에서 달의 토양과 성분이 비슷한 경주 지방의 흙을 이용해 물 없이 콘크리트를 만드는 실험에 성공하였다(Koh et al., 2010).

2.3 대공간 구조

과거 냉전시기에 구소련이 군사적 목적으로 해저기지를 설치하고, 미국이 3개의 해저 실험기지를 개발한 전례가 있으나 지금은 대부분 운영 중단된 상태이다. 또한 당시의 해저기지는 대부분 천해에 설치되었으며, 프랑스도 1960년대 심해 정거장 개념을 추진하였으나, 실제 현실화되지는 못했다. 현재 운영되는 해저기지는 미국 국립해양 대기청에서 운영하는 Aquarius 산호 기지가 유일한 것으로 알려져 있으나 19 m 깊이에 설치돼 심해 정거장과는 큰 차이가 있다(Ocean Explorer, NOAA website)

1986년에 미국 국립해양 대기청에서는 플로리다의 칸크 산호초 지역에 세계 유일의 해저연구소 Aquarius를 건설하였으며, 이 기지는 해안으로부터 4.5 km 떨어져 있고, 수심도 19 m에 불과해 연구수행이 제한적이다. 그러나 NASA의 극한환경 생활 우주인을 위한 연구프로젝트인 ‘NEEMO 7’에도 활용되고 있으며, 많은 해양 관련 연구가 수행되고 있다(National Geographic Channel, 2011).

중국은 심해 탐사 부문의 기술력에서 선진국을 앞서겠다는 계획을 갖고 있으며, 본격적인 심해 정거장 개발에 앞서 실험용 정거장을 먼저 개발한다는 계획이다. 이 실험용 정거장

은 12명이 탑승해 18일간 물속에서 활동할 수 있도록 설계된다. 오는 2015년까지 개발을 완료한다는 것이 중국선박과 학연구소의 방침이다(metro, website).

캐나다는 2009년 9월에 세계 최대의 수중관측소인 ‘NEPTUNE Canada’를 설립하였으며, 빅토리아 대학이 설립한 ONC(Ocean Networks Canada)에 의해 추진되었다. NEPTUNE 캐나다는 지진과 해일(tsunami) 활동, 해양과 기후의 연관성 및 수산업에의 영향, 해양오염, 자원개발, 메탄 하이드레이트 매장량, 해양생태에 대한 광범위한 연구는 물론 광섬유 통신, 전력시스템 설계, 데이터 관리, 센서 및 로봇

Fig. 7. Aquarius Underwater Laboratory (Ocean Explorer, NOAA website)

Fig. 8. The Water Disc Underwater Hotel (DOT, 2011)

등 해저 신기술 개발에 도움을 줄 것으로 기대되고 있다 (Neptune Canada, website).

연구목적의 해저기지 외에도, 해중 위락사업을 위한 구조물의 건설도 추진되고 있으며, 남태평양 섬나라 비누아투에는 수중을 찾은 дай버들을 위한 이벤트로 세계 최초의 ‘수중 우체국’이 2003년에 개장하였고(Wikipedia, website), 아랍에미리트 두바이의 한 호텔에는 잠수함을 타고 입장하는 수중 레스토랑 개장하였다. 또한, 이스라엘의 해안가 수심 5 m 아래에는 ‘The Red Sea Star’ 해중레스토랑이, 몰디브 해안가 수심 5 m 아래에는 전체를 투명아크릴로 만든 ‘Ithaa’ 해중레스토랑이 개장하였다. 일본 및 미국의 해중 전망탑은 바다 속 풍경의 감상을 위해 잠시 머무를 수 있는 공간으로 활용되고 있다(Environmental Graffiti, website).

해저 대공간 구조에서 생활할 경우, 산소는 액화 산소와 기체 산소 순화여과장치로 정화하여 사용이 가능하지만 빛을 만들기 위해 사용되는 조명의 온도 조절장치가 미제로 남아 있다. 일반적으로 폐쇄된 공간 안에 일정량의 밝기를 가진 빛을 일정시간 비추다면 내부 온도가 상승하게 되며, 이를 유지하기 위해서는 대량의 전력 소모가 필요하다. 인공 밤을 위해 조명을 차단하는 경우에도 온도 하강으로 인한 추위에 대한 보온 처리 시설을 위해서는 고비용이 소요될 것으로 예측되고 있다. 100가구가 거주할 해저 주거지에는 최소 1일에 3 MWh의 동력이 필요할 것으로 예측되고 있으며(National Geographic Channel, 2011), 50명 미만의 소규모 돐을 여러 개 지어서 상호 연결하는 방식이 현재까진 가장 실현가능한 방법으로 채택되고 있다. 일반적으로 독일 건축학계에서는 2000만 명이 살 수 있는 지상도시를 건설하는 비용으로 수중 도시에서는 50만 명 정도 사는 구조물을 만드는 비용이 소요될 것으로 추산하고 있다.

3. 개발 기술 조사 범위 및 목표 설정

3.1 기술 개발 범위

본 연구에서는 해저기지 건설 기술에 대한 고려 사항을 1) 사용목적(Utilization), 2) 안전성(Safety), 3) 환경 보존(Envi-

Fig. 9. Considerations for Construction of Seabed Base

Fig. 10. Lamination of FRP (Han et al., 2004)

ronmental Protection), 4) 건설 기술(Construction), 5) 경제성(Economy)과 같이 5개의 범위로 설정하였다. 사용목적에 대한 고려 사항은 자원 채굴, 과학연구, 거주공간으로 분류할 수 있으며, 안전성 분야는 재료 기술, 구조 형상, 재난 대응 기술로 분류할 수 있다. 환경 보존 분야는 자원 채굴 시 해양 오염 문제와 거주 시 생활 폐기물 처리 문제를 고려할 수 있으며, 건설 기술 분야는 건설 공정, 수중 로봇 활용, 안전 시공, 건설부지 선정으로 분류할 수 있다. 경제성에 대해서는 사용 목적에 맞는 가장 경제적인 선택인가에 대한 결정이 필요할 것이다. 이를 정리하면 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다.

안전성에 대한 고려 사항을 정리하면 다음과 같다. 수압을 견딜 수 있는 돔(또는 쉘) 형태의 구조물이 적합하며, 햇빛을 받기 위해서는 철골과 유리소재를 사용하는 것이 유리할 것이다. 또한, 구조 안전성 확보를 위해서는 특수 코팅 처리한 티타늄 합금이나 Fig. 10과 같은 구조를 갖는 등의 고강도 신소재의 적용이 필요할 것으로 판단된다. 산소 및 물, 에너지를 공급할 수 있는 장치가 필수적이며, 100 가구가 거주할 해저 주거지에는 최소 1일에 3 MWh의 동력이 필요하다. 지상으로 이동 시에는 잠수정을 타거나 지상과 연결된 진공터널을 이용할 수 있다.

건설 기술에서는 모듈러 공법을 고려할 수 있다. 모듈러 공법은 지상에서 해저기지의 각 모듈을 제작한 후에 제작된 모듈을 해상으로 이동하여 조립하거나 수중에서 조립하여 건설하는 기술이다. 또한, 해저기지의 건설 시에는 Fig. 11과 같은 수중 무인 건설 로봇을 활용할 수 있으며, 무인 건설 로봇은 ROV(Remotely-Operated Vehicle)와 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)등으로 운용할 수 있다. 해저기지의 건설을 위해서는 건설부지 선정 및 확보 기술이 필요하다. 해저기지의 거주를 위해서는 햇빛의 투과 여부 또한 중요하며, 대륙붕 중 해곡과 같은 곳을 제외한, 지진 등의 자연재해로부터 안전한 곳에 해저기지를 건설 부지를 선정하여야 한다. 거주목적의 해저도시인 경우에는 바다 수면 외부 기압과 내

Fig. 11. Unmanned Underwater Excavation Equipment (Jang et al., 2011)

부 압력 등을 고려해 볼 때 30~100 m가 해저도시 건설에 적합한 수심으로 판단된다.

3.2 기술 목표 설정

본 연구에서는 해저기지 건설의 실현 시기, 규모, 목표 수심, 기술난이도 등을 고려하여 1단계 목표 기술과 2단계 목표 기술로 분류하였다. 1단계 목표 기술은 수심 50 m에 건설 가능한 해저기지 구조체 기술 및 5인 이상 작업/연구 인력이 상주 가능한 소규모 해저기지 구조체 기술로 정의하였으며, 해저기지에 대하여 기본적인 에너지 공급 및 생명유지 기술을 확보하는 것을 포함하였다. 2단계 목표 기술은 수심 200 m 이상에 건설 가능한 해저기지 구조체 기술 및 50인 이상 작업/연구 인력이 상주 가능한 대규모 해저기지 구조체 기술로 정의하고, 해저기지-지상간 인력 및 채굴 광물 운송

Table 1. Required Technology for Constructing Seabed Based Structure

필요 기술	세부 기술
해저기지 구조체 설계 기술	해저기지 안전성 확보를 위한 수압 분산 기술 : 돔, 구형, 실린더 형 등 수압 분산을 위한 최적 형상 설계 기술
	구조체 강성 증대 기술 : 리브, 파형 등 외력 저항성 증진을 위한 좌굴 강도 향상 기술
	국부 파괴 및 안전성 저하를 발생 시키는 집중 응력 저감 기술
	강도 증진을 위한 신형식 구조형식 개발 : FRP-Concrete 합성 및 Metal-FRP 합성 재료 기술
	지진 및 쓰나미, 해일 등의 해양 자연재해에 대한 안전성 확보 기술
해저기지 시공 기술	급속/정밀 시공을 위한 최적 구조체 모듈화 기술 개발
	수밀성이 확보된 정밀 수중 시공 기술
	해저기지 구조체 모듈 운송 기술
해저기지 운영 및 유지 관리 기술	해저기지 손상부 자가 복구 기술(Smart Material 등)
	해저기지 에너지 공급 및 생명유지 기술
	해저기지-지상간 인력 및 채굴 광물 운송 기술(잠수정, 해저터널, 수중 타워 등)
	해저기지 구조물 손상 시 격벽 차폐 및 분리 기술
	응급/위기 상황 시 신속 이탈 기술
	대수심 채류 연구 인력 건강 확보 기술(예: 수심 300m 이상 폐 과열)

기술을 포함한다. 각 단계별 목표 기술은 이후에 전문가 설문 조사 자료를 통하여 수정 및 보완하였다. 각 단계별 목표 기술을 달성하기 위해서는 Table 1과 같이, 해저기지 구조체 설계 기술, 해저기지 시공 기술, 해저기지 운영 및 유지 관리 기술의 확보가 필요할 것이다.

4. 개발 필요 기술 도출

본 연구에서는 기술 개발 설정 목표와 필요 기술에 대해 관련 분야 전문가를 대상으로 설문 조사를 수행하여 개발 필요 기술을 도출하였다. 설문 표본은 69명으로서, 이메일을 통하여 서면으로 설문 조사를 실시하였다. 설문 표본의 종사업 종은 산업계 43%, 학계 25%, 연구계 31%, 정부 및 지자체 1%의 분포를 보였으며, 학력 분포는 박사 53%, 석사 28%, 학사 19%로 나타났다. 설문 대상자들의 전공별 분포는 구조공학 47%, 토목공학 19%, 해양공학 10%, 건축공학 2%, 지반공학 13%, 전기/기계공학 5%, 행정/경영/정책학이 4%의 분포를 보였다. 설문 내용은 Table 2와 같다.

4.1 기술 목표 설정 수준

기술 목표 설정 수준에서는 목표 달성 가능 시기, 목표 수심, 목표 규모, 최대 체류시간에 대해, 1단계와 2단계로 나누어 조사하였다. 1단계 기술목표는 수심 50 m, 상주인력 5인으로 설정을 하여 조사하였으며, 2단계 기술 목표 달성 가능 시기는 수심 200 m, 상주인력 50인으로 설정하여 조사하였다. 조사 결과, 1단계 기술목표 달성 가능 시기는 평균 10년 이후로, 2단계 목표 달성 가능 시기는 평균 22년 후로 조사되었다. 각 항목에 대한 조사결과는 Fig. 12와 같다.

목표 수심에 대해서는 1단계에서는 50 m이하에 대한 응답이 36%, 50 m 이상에 대한 응답이 31%로, 평균 51 m의

목표 수심을 갖는 것이 타당하다는 조사결과가 도출되었으며, 2단계 목표 수심은 평균 253 m로 조사되었다. 해저기지 규모는 1단계에서는 평균 1,562 m³로 조사되었고, 2단계에서는 평균 11,720 m³로 조사 되었다.

설문조사 결과, 수심 50 m, 체류인원 5인으로 설정한 1단계의 경우, 목표 최대 체류 기간은 평균 28일로 조사 되었으며, 수심 200 m, 체류인원 50인으로 설정한 2단계의 경우

Fig. 12. Possible Time for Construction of Seabed Base

Fig. 13. Target Depth of Seabed Base

Fig. 14. Target Size of Seabed Base

Table 2. Questions for Technology Survey

필요 기술	세부 기술
I. 기술 목표 설정 수준	1. 목표 달성 가능 시기
	2. 목표 수심
	3. 목표 규모
	4. 최대 체류 기간
II. 해저기지의 필요성 및 활용성	1. 건설 필요성
	2. 건설 필요 이유
	3. 해저기지 활용도
III. 해저기지 건설 필요 기술	1. 해저기지 건설 필요 기술
	2. 해저기지 건설재료
	3. 해저기지 시공 방법
	4. 해저기지 에너지 공급 방법
	5. 자체 에너지 공급을 위한 발전 방법
IV. 해저기지 운영 및 유지 기술	1. 해저기지 사고 발생 시 필요 안전 기술
	2. 해저기지 운영을 위한 개발 필요 기술
	3. 체류자의 해저기지-지상간 이동 방법
	4. 채취자원 지상 운송 방법
	5. 해저기지의 건설이 해양 환경에 미치는 영향

목표 최대 체류 기간이 평균 77일로 조사되었다. 상기 조사 시에 중국이 2030년 완성을 목표로 계획 중인 심해 정거장의 상주인원이 33인에 2개월 거주를 목표로 하고 있으며, 크기는 길이 60.2 m, 폭 15.8 m, 높이 9.7 m(9926 m³)인 점을 설문응답에 참고하도록 하여 조사한 결과이다.

4.2 해저기지의 필요성 및 활용성

향후 인류가 미래에 활용할 수 있는 해저기지의 건설 기술 개발 도출을 목표로 하고 있는 본 연구에서 향후 해저기지 건설의 필요성과 활용성에 대해 설문 조사를 실시하였다. 필요성의 경우에는 필요정도에 따라 5단계로 답변하여 각각 2~10점의 점수를 부여하였을 때, 평균 9.2점이 도출되었으며, 반드시 필요하다는 의견이 74%로 가장 많은 분포를 나타내었다. 해저기지 건설이 필요한 이유에 대해서는 Fig. 15와 같이 기술적 산업적 요인이 52%로 가장 많았으며, 다음으로 대체 공간 개발 부족에 따른 요인이 30%로 두 번째를 차지하였다.

해저기지의 활용방법에 대해서는 복수응답으로하여, 1단계와 2단계로 조사하였으며, 1단계와 2단계 모두 해저 환경을 이용한 과학 연구의 응답이 가장 높았다. 이에 대한 조사 결과를 Table 3과 Table 4에 나타내었다. Table 3~4에서 각 항목은 10점이 만점이다.

Fig. 15. Necessity of Seabed Base

Table 3. Application of Seabed Base (Phase 1)

순위	항목	점수
1	③ 해저 환경을 이용한 과학 연구	8.5
2	⑥ 해양 생태계 및 해양지질/환경 연구	7.8
3	⑤ 해저 광물 자원 채취	6.3
4	④ 해저 목장 및 생물자원 획득	6.0
5	① 관광 및 레저	5.9
6	⑦ 해양 영토 확보 및 방어	4.3
7	② 거주 공간	2.9

Table 4. Application of Seabed Base (Phase 2)

순위	항목	점수
1	③ 해저 환경을 이용한 과학 연구	7.8
2	⑥ 해양 생태계 및 해양지질/환경 연구	7.6
3	⑤ 해저 광물 자원 채취	7.4
4	④ 해저 목장 및 생물자원 획득	6.4
5	① 해양 영토 확보 및 방어	4.9
6	⑦ 관광 및 레저	4.7
7	② 거주 공간	3.0

4.3 해저기지 건설 필요 기술

해저기지의 건설을 위해서는 건설부지 선정을 위한 해저 환경 탐사 기술, 내수압의 고성능 구조 및 재료 기술, 수중 건설을 위한 시공 기술(모듈러 기술/수중 건설 로봇 기술 등), 해저기지의 에너지 공급 기술, 해저기지-지상간 이동 기술, 건설인력/체류인력의 생명 유지 기술 등이 필요하다. 또한 해저기지의 건설에는 고강도의 건설재료가 필요하며, 새로운 건설재료의 개발과 해저 조건에서 건설재료의 물성 변화에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 해저기지 건설에 필요한 기술과 건설재료에 대하여 1단계 및 2단계로 구분하여 조사를 실시하였으며, 그 결과는 Table 5~6, 그리고

Table 5. Necessary Technologies for Seabed Base Construction (Phase 1)

순위	항목	점수
1	② 고성능 구조 및 재료 기술	8.2
2	③ 수중 시공 기술	7.4
3	⑥ 생명 유지 기술	5.8
4	④ 에너지 공급 기술	5.7
5	① 건설부지 선정 기술	5.2
6	⑤ 해저기지-지상간 이동 기술	4.2

Table 6. Necessary Technologies for Seabed Base Construction (Phase 2)

순위	항목	점수
1	② 고성능 구조 및 재료 기술	7.9
2	③ 수중 시공 기술	7.0
3	⑥ 생명 유지 기술	6.4
4	④ 에너지 공급 기술	5.2
5	① 건설부지 선정 기술	4.7
6	⑤ 해저기지-지상간 이동 기술	4.3

Fig. 16. Recommended Material for Seabed Base Construction

Fig. 16과 같다. Table 5~6에서 각 항목은 10점이 만점이다.

Table 5~6과 Fig. 16에 나타난 바와 같이, 1단계 및 2단계 모두에서 개발되어야 할 건설 기술로는 고성능 구조 및 재료 기술 개발이 가장 중요하게 나타났으며, 복합신소재가 해저기지 건설을 위해 가장 선호되는 재료로 나타났다.

해저기지의 시공 방법은 지상 조립 후 가라앉히는 방법, 지상 제작에서 모듈을 제작한 후에 해상에서 조립한 후 가라앉히는 방법, 지상 제작 모듈을 수중에서 조립하는 방법, 非 모듈 식으로 수중 제작하여 건설하는 방법 등을 고려할 수 있다. 조사 결과, Table 7에서와 같이, 1단계에서는 해저기지를 지상 조립한 후 가라앉히는 방법이, 2단계에서는 해저기지 모듈을 지상에서 제작한 후, 제작 모듈을 해상에서 조립하여 가라앉히는 방법이 선호되었다.

해저기지의 운영 및 체류인원의 생활을 위해서는 해저기지에 에너지를 공급하는 방법도 매우 중요하며, 이 경우에는 에너지를 지상에서 공급하는 방법과 해저기지 자체에서 해결하는 방법의 두 가지로 크게 구분할 수 있다. 에너지를 지상에서 공급하는 경우에는 전력케이블 공사로 해결할 수 있으며, 해저기지 자체에서 에너지 공급을 하기 위한 발전 방법으로는 원자력 등 핵연료에 의한 발전 방법, 기존의 화석 연료에 의한 발전 방법, 수소 등을 이용한 화학연료에 의한 발전 방법, 조류/파력 발전, 태양열 발전(발전 패널 수면 노출),

풍력 발전(풍력 터빈 수면 노출) 등을 이용하는 방법을 고려할 수 있다. 조사결과 1단계에서는 해저기지에 필요한 에너지를 외부에서 공급하는 방법(60%)이 선호되었으며, 자체 공급할 경우에는 조류력과 파력에 의한 발전 방법이 선호되었다. 2단계에서는 해저기지에 필요한 에너지를 자체 공급하는 방법에 대한 선호도가 90%로 압도적이었으며, 발전 방법으로는 조류력과 파력(34%), 핵에너지(31%)의 순으로 선호되었다. Table 8에 조사 결과를 정리하여 나타내었다.

4.4 해저기지 운영 및 유지 기술

해저기지를 건설하여 운영할 때, 거주자 및 체류자의 안전이 가장 중요하다. 따라서 해저기지에서 사고가 발생하였을 경우에 체류인원의 대피 및 탈출 기술이 매우 중요하며, 운영을 위해서 해저기지와 지상간의 인원/물자의 이동/이송 방법이 중요하다. 또한 자원 개발의 목적으로 해저기지를 운영할 경우에는 채취 자원의 이송 방법 또한 중요한 고려 사항이라 할 수 있다. 안전사고 발생 시 해저기지의 체류자 및 거주자의 안전을 위한 중요 안전 기술은 긴급 생명유지 장치 기술, 긴급 탈출 기술(탈출 포트 등), 사고 구역 분리/격리 기술, 에너지 공급 안정화 기술(보조 에너지원 확보 등), 해저기지 전체 또는 일부 분리 후 부상 기술 등을 고려할 수 있으며, 이에 대한 중요도 조사를 실시한 결과는 Table 9와 같으며, 긴급 생명유지 장치 기술이 가장 중요한 것으로 나타났다.

해저기지 운영을 위한 기술로는 생명유지 장치 기술(산소/식량/압력 등), 에너지 공급 기술, 해저기지-지상간 거주자/물자 이동 기술, 해저기지 파손 시 복구 기술, 해저기지-지상간 통신 기술 등을 고려할 수 있으며, Table 10에 나타난 바와 같으며, 생명유지 장치 기술의 개발이 가장 시급한 것으로 조사되었다.

체류자의 해저기지-지상간 이동 방법에는 해저기지-지상간 수중터널 건설 후 이동하는 방법, 수면 노출 구조물 건설 후 해상 이동하는 방법, 해저기지-지상간 잠수정 이동하는 방법

Table 7. Construction Method for Seabed Base

단계	순위	항목	비율
Phase 1	1	① 지상 조립 후 가라앉힘.	31%
	2	② 지상 제작 모듈을 해상에서 조립 후 가라앉힘.	25%
	3	③ 지상 제작 모듈을 수중에서 조립	10%
	4	④ 수중 제작 (非 모듈 식)	3%
Phase 2	1	② 지상 제작 모듈을 해상에서 조립 후 가라앉힘.	33%
	2	③ 지상 제작 모듈을 수중에서 조립	14%
	3	① 지상 조립 후 가라앉힘.	11%
	3	④ 수중 제작 (非 모듈 식)	11%

Table 8. Energy Supplying Method

단계	순위	항목	비율
Phase 1	1	④ 조류/파력	46.9%
	2	③ 화학연료(수소 등)	21.9%
	3	① 핵에너지	18.8%
	4	⑤ 풍력 발전	6.3%
	5	② 화석 연료	3.1%
	5	⑤ 태양열	3.1%
Phase 2	1	④ 조류/파력	34.3%
	2	① 핵에너지	31.3%
	3	③ 화학연료(수소 등)	17.9%
	4	⑤ 태양열	10.4%
	5	② 화석 연료	3.0%
	5	⑤ 풍력 발전	3.0%

Table 9. Safety Technologies

순위	항목	점수
1	① 긴급 생명유지 장치 기술	8.4
2	② 긴급탈출기술	7.6
3	③ 사고 구역 분리/격리 기술	6.1
4	④ 비상에너지공급 기술	4.6
5	⑤ 해저기지 전체 또는 일부 분리 후 부상 기술	4.2

Table 10. Necessary Technologies for Operation

순위	항목	점수
1	① 생명유지 장치 기술	9.2
2	② 에너지 공급 기술	7.4
3	③ 해저기지-지상간 거주자/물자 이동 기술	4.7
3	⑤ 해저기지-지상간 통신 기술	4.7
5	④ 해저기지 파손시 복구기술	4.5

등을 고려할 수 있으며, 조사 결과 비교적 수심이 얇은 1단계(수심 50 m)의 경우에는 수면 노출 구조물 건설 후 해상 이동하는 방법이 선호되었으며, 수심이 깊은 2단계(수심 200 m)의 경우에는 해저기지-지상간 잠수정 이동 방법이 선호되었다. Table 11에 조사 결과를 정리하여 나타내었다.

해저기지에서 채취한 자원을 지상으로 운송하는 방법은 해저기지-지상간 수중터널/튜브 건설 후 운송하는 방법, 수면 노출 구조물(타워 등)을 이용한 해상 운송하는 방법, 해저기지-지상간 잠수정을 이용한 운송하는 방법, 잠수정으로 해상까지 운송 후 선박 등을 이용하여 해상 운송하는 방법, 별론 등을 이용하여 자원을 해상으로 부상시킨 후 선박 등을 이용하여 해상 운송하는 방법 등을 고려할 수 있다. 조사 결과, 1단계와 2단계 모두, 해저기지-지상간 수중터널을 건설하여 운송하는 방법이 선호되었으며, Table 12에 조사 결과를 정리하여 나타내었다.

해저기지의 건설 및 운영 시에 해양 환경의 오염 등의 문

Table 11. Transferring Method between Seabed Base and Ground

단계	순위	항목	비율
Phase 1	1	② 수면 노출 구조물 건설 후 해상 이동	28%
	2	③ 해저기지-지상간 잠수정 이동	20%
	3	① 해저기지-지상간 수중터널 건설 후 이동	18%
	4	④ 기타	3%
Phase 2	1	③ 해저기지-지상간 잠수정 이동	40%
	2	① 해저기지-지상간 수중터널 건설 후 이동	15%
	3	② 수면 노출 구조물 건설 후 해상 이동	13%
	4	④ 기타	1%

Table 12. Transferring Method of Extracted Resources

단계	순위	항목	비율
Phase 1	1	① 해저기지-지상간 수중터널/튜브 건설 후 운송	25%
	2	② 수면 노출 구조물(타워 등)을 이용한 해상 운송	21%
	3	⑤ 별론 등을 이용하여 자원을 해상으로 부상시킨 후 선박 등을 이용하여 해상 운송	15%
	4	③ 해저기지-지상간 잠수정을 이용한 운송	4%
	4	④ 잠수정으로 해상까지 운송 후 선박 등을 이용하여 해상 운송	4%
Phase 2	1	① 해저기지-지상간 수중터널/튜브 건설 후 운송	22%
	2	② 수면 노출 구조물(타워 등)을 이용한 해상 운송	19%
	3	⑤ 별론 등을 이용하여 자원을 해상으로 부상시킨 후 선박 등을 이용하여 해상 운송	17%
	4	③ 해저기지-지상간 잠수정을 이용한 운송	7%
	5	④ 잠수정으로 해상까지 운송 후 선박 등을 이용하여 해상 운송	4%

해저기지 건설을 위한 핵심기술 조사

Fig. 17. Environmental Effect by Seabed Base Construction

제가 발생할 수 있으므로, 해저기지의 건설이 해양 환경에 미치는 영향에 대해 의견 조사를 실시하였다. 조사결과, Fig. 17과 같이 영향이 있다는 의견이 46%, 영향이 없다는 의견이 38%로 나타났으며, 향후 환경 문제에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

4.5 개발 필요 기술 도출

설문조사 자료 정리를 통하여, 개발 필요 기술을 도출하였으며, 이를 Table 13에 나타내었으며, Fig. 18에 해저기지 개념도를 나타내었으며, 도출된 필요기술을 단계별로 표시하였다. 이를 통하여 향후 10년 후와 22년 후의 1단계, 2단계 목표달성을 위한 개발 필요 기술은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 해저 환경용 고성능 건설재료 개발
- 모듈형 해저기지 및 시공 기술 개발
- 해저기지 공급용 조류/파력 발전 기술 개발
- 해저기지 에너지 공급 장치 개발
- 해저기지 생명 유지 장치 개발
- 해저기지 긴급 탈출 기술 개발
- 해저기지-지상 연결용 수중 터널 개발

5. 결 론

본 연구에서는 미래 자원 확보, 해양주권 확립, 해양레저, 해양 과학 연구 및 해양거주 공간을 위한 해저 기지 및 해저도시 건설을 위한 핵심 기술 조사를 실시하였다. 기술 단계는 목표 달성 가능 시기, 목표 수심, 목표 규모, 최대 체류시간에 대해, 1단계와 2단계로 나누어 조사하였다. 1단계 기술목표는 수심 50 m, 상주인력 5인으로 설정을 하여 조사하였으며, 2단계 기술 목표 달성 가능 시기는 수심 200 m, 상주인력 50인으로 설정하여 조사하였다. 조사 항목은 크게, 1) 기술 목표 설정 수준, 2) 해저기지의 필요성 및 활용성, 3) 해저기지 건설 필요 기술, 4) 해저기지 운영 및 유지 기술로 분류하여 조사하였으며, 각 항목별로 세부 기술을 조사하였다. 조사 결과 해저기지의 건설은 반드시 필요하며, 이의 건설을 위해서는 건설 신재료의 개발과 에너지 공급 기술들이 필수적으로 필요한 것으로 나타났다. 따라서 향후 해저기지의 건설을 위해서는 도출된 필요 기술들에 대한 집중적인 연구와 개발이 필요하며, 이는 국가의 지속적인 발전과 국민 생활 영역의 확장을 위해 반드시 수행되어야 할 것으로 판단된다.

Table 13. Survey Results of Required Technologies for Construction of Seabed Base

분류	항목	조사 결과	
		1단계 (50m)	2단계 (200m)
I. 기술 목표 설정 수준	1. 목표달성가능시기	평균 10년 후	평균 22년 후
	2. 목표수심	51m	253m
	3. 목표규모	1562 cubic meter	11720 cubic meter
	4. 최대 체류 기간	28일	77일
II. 해저 기지의 필요성 및 활용성	1. 건설 필요성	반드시필요하다.(평균 9.2점)	
	2. 건설 필요 이유	기술적/산업적 요인	
	3. 해저기지 활용도	해저 환경을 이용한 과학 연구	해저 환경을 이용한 과학 연구
III. 해저 기지 건설 필요 기술	1. 해저기지 건설 필요 기술	고성능 구조 및 재료 기술	고성능 구조 및 재료 기술
	2. 해저기지 건설재료	복합신소재(FRP등)	
	3. 해저기지 시공방법	지상 조립 후 가라앉힘.	지상 제작 모듈을 해상에서 조립 후 가라앉힘.
	4. 해저기지 에너지 공급 방법	지상 공급	자체공급
	5. 자체 에너지 공급을 위한 발전 방법	조류/파력	조류/파력
IV. 해저 기지 운영 및 유지 기술	1. 해저기지 사고 발생 시 필요 안전 기술	긴급 생명유지 장치 기술	
		긴급탈출기술	
	2. 해저기지 운영을 위한 개발 필요 기술	생명유지 장치 기술	
		에너지 공급 기술	
	3. 채류자의 해저기지-지상간 이동 방법	수면 노출 구조물 건설 후 해상 이동	해저기지-지상간 잠수정 이동
	4. 채취 자원 지상 운송 방법	해저기지-지상간 수중터널/튜브 건설 후 운송	해저기지-지상간 수중터널/튜브 건설 후 운송
	5. 해저 기지의 건설이 해양 환경에 미치는 영향	영향 있다.

Fig. 18. Seabed Base Concept and Required Technologies

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원(KIOST)에서 시행한 ‘해양·융복합 기획연구사업(PE9879E)’의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Bae, Y.I. (2011) Present and Future of Developing Ocean Resources, *SERI Business Note*, Samsung Economic Research Institute, 131, pp. 1-11.
- Dobbs, R. et al. (2011) A New Era for Commodities, *Mckinsey Quarterly*, November.
- DOT (2011) Underwater Hotel Project, <http://www.deep-ocean-technology.com>, DOT.
- Environmental Graffiti, <http://www.environmentalgraffiti.com/featured/incredible-underwater-habitats/2593>
- Han, T.H., Han, S.Y., and Kang, Y.J. (2008) Elastic Buckling Behavior Characteristics of GFRP Pipe with Reinforced Ribs, *Composites Research Journal*, Vol. 2, No. 3, pp. 7-15.
- Han, T.H., Kim, S.N., Kang, Y.J., and Yoon, K.Y. (2004) An Experimental Study of Material Characteristics for GFRP Pipes, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 4, No. 2, pp. 35-45.
- Han, T.H., Stallings, J.M., and Kang, Y.J. (2010) Nonlinear Concrete Model for Double-Skinned Composite Tubular Columns, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 12, pp. 2542-2553.
- Han, T.H., Yoon, K.Y., and Kang, Y.J. (2010) Compressive Strength of Circular Hollow Reinforced Concrete Confined by an Internal Steel Tube, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 9, pp. 1690-1699.
- Haynes, H.H. (1974) Long-Term Deep-Ocean Test of Concrete Spherical Structures, Technical Report, Civil Engineering Laboratory, Naval Construction Battalion Center.
- International Energy Agency (2011) World Energy Outlook 2011, IEA.
- International Monetary Fund (2011) World Economic Outlook, IMF.
- Jang, I.S., Kim, W.T., Ko, J.H., Kim, T.S., and Park, K.W. (2011) Development of Unmanned Underwater Excavation Equipment for Port Construction, *Proceedings of 6th International Conference on Asian and Pacific Coasts*, Hong Kong, pp. 2123-2130.
- KEIT (2011) Survey of Future Technologies 2025 - For Smart IT Convergence -, Ministry of Knowledge and Economy.
- Kim, M.S. (2012) Construction of Seabed Base, *DONGA Science*.
- Koh, S., Yoo, J., Bernold, L., and Lee, T. (2010) Experimental Study of Waterless Concrete for Lunar Construction. *Earth and Space* 2010, 1098-1102.
- metro, <http://www.metroseoul.co.kr>
- Meyers, C. and Toutanji, H. (2007) Analysis of Lunar-Habitat Structure Using Waterless Concrete and Tension Glass Fibers, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 220-226.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) 2nd Master Plan for Development of Oceans and Fisheries (2011~2020), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2013) 2040 Future Technology Survey and Direction for Land and Ocean, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- National Geographic Channel (2011) Underwater City Construction Project, *Naked Science*, 2011.
- Neptune Canada, <http://www.neptunecanada.com>
- NOAA, <http://oceanexplorer.noaa.gov/technology/diving/aquarius/aquarius.html>
- Rush, P. J. (1962) Preliminary Studies Concerning Structures in the Deep Ocean, Technical Note N-447, U.S. Naval Civil Engineering Laboratory
- Shin, J.R. and Woo, J.S. (1999) Collapse Analysis for Deep Sea Pressure Vessel, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 13, No. 4, pp. 82-97.
- Toutanji, H. and Schrayshuen, B. (2005) Strength and Durability Performance of Waterless Lunar Concrete, *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, U.S.A.
- Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Mele_\(island\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Mele_(island))

© Received April 16, 2013

© Revised April 17, 2013

© Accepted May 20, 2013