

# 수중건설로봇 개발 동향 - 해저면 착저식 시추로봇을 위주로



장인성  
한국해양과학기술원  
수중건설로봇사업단 사업단장  
(isjang@kiost.ac.kr)

## 1. 서론

최근 바다의 중요성 및 해양 개발 필요성이 증가하고 있으며, 해양영토 확대와 해양자원 개발 등을 위한 각국들의 경쟁 또한 치열해지고 있다. 이러한 움직임들은 해양에너지 구조물<sup>1)</sup>, 해양플랜트 구조물<sup>2)</sup>, 해저도시 등 다양한 해양구조물의 개발로 연결된다. 우리의 생활공간이 해양으로 점차 확대되고 있는 것이다. 그러나 대수심의 수중환경에 구조물을 건설하기에는 기존의 잠수부가 하는 재래식 방법은 안전성 및 효율성 측면에서 한계가 있다. 수중 환경의 특성상 매우 극한적인 환경 조건들을 가지고 있기 때문이다. 수중 해양구조물의 건설에 있어서 수중 장비, 수중 로봇이 필요한 이유이기도 하다.

해양 구조물을 안전하게 설계 및 시공하기 위해서는 구조물을 지지하고 있는 해저지반의 특성을 정확하게 평가하는 것이 상당히 중요하다. 신뢰성 있는 해상기초 및 해양구조물 설계 및 시공을 위해서는 해저지반의 공학적 특성을 정확하게 파악하는 것이 가장 기본적인 작업이기 때문이다. 공학적 특성 파악은 물리탐사 이외에 주로 현장 원위치실험<sup>3)</sup> 또는 시료채취를 통한 실내실험을 통해 가능한데, 이를 위해서는 해저면 시추를 수행하여야 한다. 현장 지반조사의 기본이라 할 수 있는 시추 조사는 시추기를 이용하여 지반을 천공하면서 지반의 층서 및 층후, 압상 등을 파악하기 위하여 실시하며, 이는 육상과 해상 모두 동일하다. 지금까지 해상에서 이루어지는 대부분의 시추조사는 수심이 얇은 경우에는 해상작업장 위에 육상 장비를 거치하여 이루어

1) 파력-해상풍력 복합발전 구조물, 조력 및 조류발전 구조물, 해상풍력단지 등

2) 해저플랜트(subsea plant), 해저케이블 및 파이프라인 등

3) 표준관입실험(Standard Penetration Test, SPT), 콘관입시험(Cone Penetration Test, CPT) 등

지고 있다. 수심이 깊어지는 경우에는 drill ship과 같은 전용선박이나 해저면 착저식 시추로봇과 같은 수중로봇이 필요하다. 전용선박에서 흔들림을 제어할 수 있는 Dynamic Positioning과 같은 특수한 장비를 사용하여 시험기가 파랑이나 바람에 흔들리지 않도록 하여야 하기 때문에 실험에 매우 많은 비용이 소요되는 단점이 있고, 또한 단단한 지층에 대한 드릴링의 작업시 지반을 교란시킨다는 문제점을 가지고 있다. 하지만, 착저식 시험 장비는 장비 자체의 경량화, 소형화로 인하여 운용이 쉽고 빠르다는 장점을 지니고 있다. 이는 여러 다른 위치에서 신속하게 시험을 수행할 수 있도록 해주고 있다. 특히, 수심이 깊어질수록 이러한 장점은 더욱 빛을 발하게 된다. 전세계적으로 지반조사를 수행할 수 있는 다양한 착저식 시추로봇이 개발 및 활용되고 있다. 여기서는 착저식 시추로봇에 대한 국제 동향과 함께 국내 기술에 대한 현황, 그리고 수중건설로봇의 미래 전망에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 해저면 착저식 시추로봇 관련 해외 기술 동향

현재 국내외의 해저지반조사 장비를 작업 가능한 수심별로 살펴보면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 수심이 얇은 경우에는 해상작업장을 이용하여 조사를 하는 반면, 수심이 깊어질 경우에는 착저식 시추로봇이나 전용선박을 활용하게 된다. 전 세계적으로 이미 다양한 종류의 착저식 시추로봇을 개발하여 활용하고 있으며, 이를 간단하게 정리하였다.

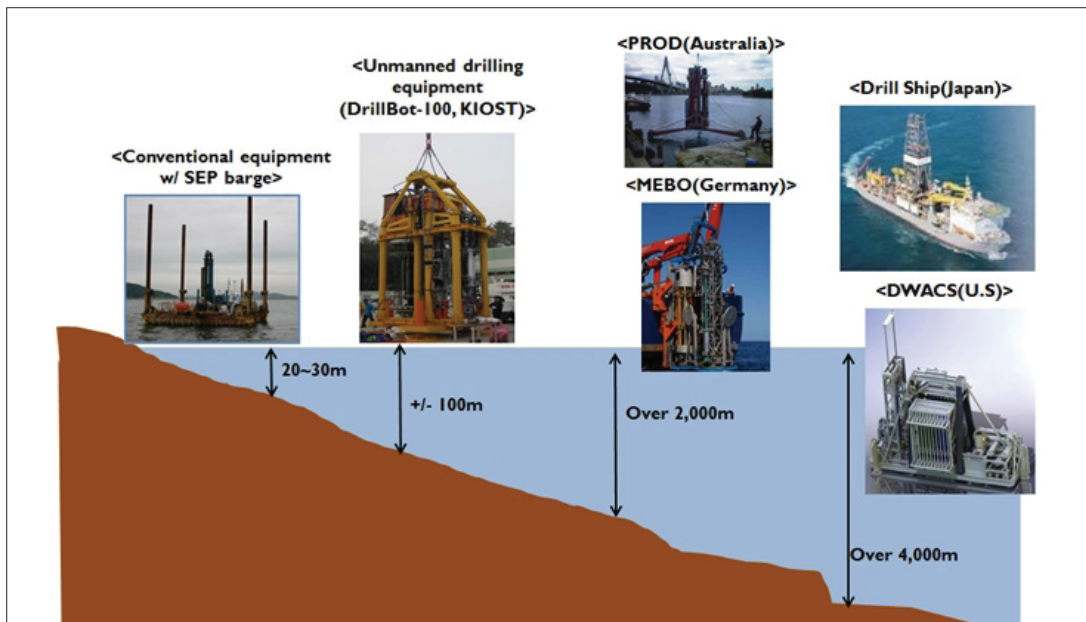


그림 1. 적용 수심별 국내외 해저지반조사 장비 현황



### (1) PROD(호주)

호주의 Benthics Geotech Pty LTD에서 보유하고 있는 PROD<sup>4)</sup>는 해저면 착저식 해양지반조사 로봇이며(그림 2), 선박에서 전력 공급뿐만 아니라 지반조사 작동을 원격으로 조종이 가능하며, 이송이 간편하고 보링 및 샘플링을 비롯하여 다양한 원위치 시험을 수행할 수 있다(Kelleher and Randolph, 2005)

PROD의 가장 큰 특징 중의 하나는 시험 위치까지 이송이 간편하다는 점인데, 이동을 위한 20인치 컨테이너를 활용하여 전 세계 어느 곳이든 관계없이 운반이 가능하다는 점이다(그림 3). PROD의 공기 중 무게는 10tf, 수중 무게는 8tf이며, 길이는 6m이다. 총 260m의 rod(관입용 로드 100m, sampling barrel<sup>5)</sup> 100m, casing 60m)를 보유하고 있다. 지반 시추 이외에도 토사 및 암반 샘플링, 콘관입시험기(CPT) 등 다양한 실험을 수행할 수 있다. PROD를 운용하기 위해서는 최소한 4개 이상의 컨테이너가 필요한데, 운영실(그림 4), 실내실험실(CPT 준비 포함), drill rod 보관실, drill tool 보관실 등이 있다.



(a)수중 진수 모습(Lunne, 2010)



(b)수중 진수모습(<http://www.benthics.com>)

그림 2. PROD



그림 3. PROD 선박(<http://www.benthics.com>)

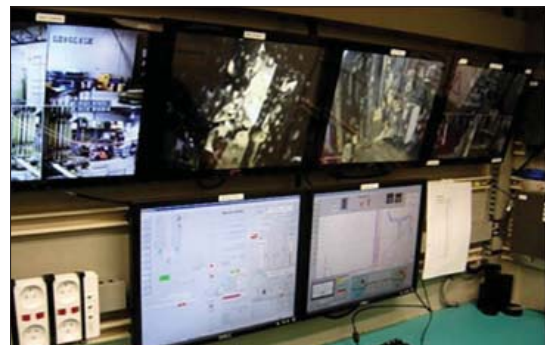


그림 4. PROD 컨트롤 룸(<http://www.benthics.com>)

4) Portable Remotely Operated Drill

5) 시료채취기

싱가폴과 미국, 앙골라, 노르웨이, 영국, 한국 등에서 다양한 실적을 보유하고 있으며, 현재 최대 수심 3,000m, 최대 심도 125m까지 적용할 수 있는 PROD-3까지 제작하여 활발하게 활용하고 있다. 한국에서도 프로젝트를 수행하 바 있는데, 2005년 11월 우리나라 동해 인근에서 수심 1,000m~1,600m 조건에 대한 보링 및 샘플링을 수행하였다. 1,000m 수심 조건에서 20m 실험하는데 약 6시간이 소요되었고, 1,500m 수심 조건에서 40m 실험하는데 약 12시간이 소요되었다. 여기에서는 PROD에 부착되어 있는 Hydrocarbon 센서를 이용하여 실시간 메탄 하이드레이트 검사도 함께 수행한 바 있다.

### (2) MEBO(독일)

수심 2,000m에 대한 시료채취를 주목적으로 개발된 독일의 대수심용 MEBO는 보링 깊이가 70m이고, 연약한 토사에서부터 단단한 암반까지 실험을 수행할 수 있다(그림 5). 코어의 직경은 55mm~ 84mm까지이며, 공기 중 무게는 10tf 정도이며, 전체 시스템의 무게는 약 75tf 정도이다. 20' 컨테이너에 보관하여 전 세계 어디든 이동 가능하게 설계, 제작되어 있다. 해저면 착저시 3개의 발판을 이용하여 로봇의 안전성을 증대시키고자 하였으며, 로봇에 부착되어 있는 수중 비디오카메라 및 다양한 센서를 활용하여 작업 중 제어 및 운용을 원활하게 하고자 하였다. 2013년도까지 총 2,066m의 시추작업을 수행하였으며, 최대 시추 깊이는 81m 정도이다(<http://www.marum.de>).

### (3) ACS(미국)

미국의 Williamson & Associates사는 수심 4,000m, 심도 50m를 대상으로 시료채취 장비인 ACS<sup>®</sup>를 개발하였다(Murray, 2010). 공기 중 무게는 13tf, 수중 무게는 12tf 정도이며, 3.7m 폭, 8.1m 길이에 5.7m 높이로서 다른 장비에 비해 상대적으로 큰 규모이고, 40ft의 컨테이너에 이송, 보관할 수 있도록 제작되어 있다(그림 6).

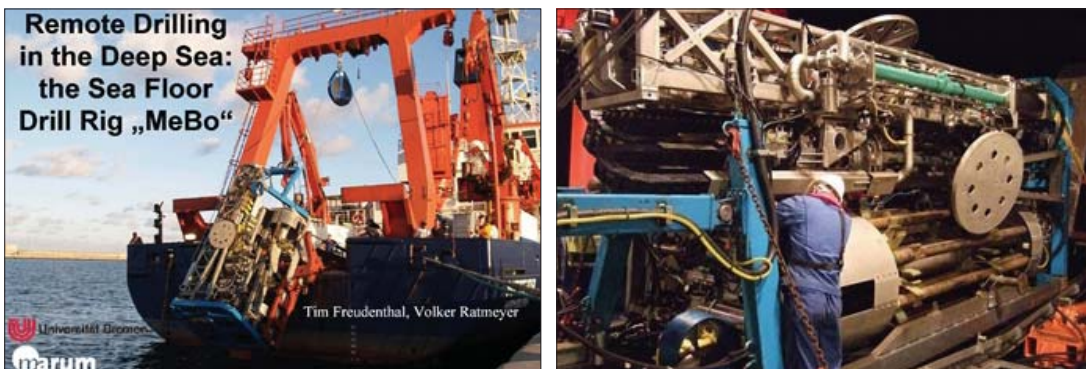


그림 5. MEBO(Freudenthal and Wefer, 2006)

6) Automated Coring System



30도 경사에서 운용이 가능하며, 시료채취 직경은 최대 73mm이다. 2011년도에는 이를 업그레이드 하여 A-BMS(Advanced Deepsea Boring System)를 개발하여 일본 JOGMEC<sup>7)</sup>에 공급한 바 있다 (<http://www.wassoc.com/>).



그림 6. ACS의 현장 활용 장면(<http://shaldril.org>)

#### (4) SDS(미국)

미국 GREGG 사에서는 수심 3,000m, 심도 150m에 적용할 수 있는 해저면 착저식 로봇인 SDS(Seafloor drilling system)를 개발하였으며, 시료채취 및 원위치 시험을 주목적으로 하고 있다. 크기는 5.4×3.8×6.6m이고 공기 중 무게는 약 10톤이다. 이 장비는 로드를 공급하기 위하여 다관절 로봇 팔을 활용한다(그림 7). 최대 85mm 직경의 시료채취 및 CPT를 수행할 수 있다.

#### (5) ROVDrill(영국)

영국 Forum사에서 개발한 ROVDrill은 수중에서 작업용 ROV<sup>8)</sup>가 구동할 수 있게 제작된 착저식 시추시스템이다(그림 8). 최대 3,000m 수심에서 운용 가능하며, 총 중량 9.5~18톤이다. 3m 길이의 관입용 로드를 활용하여 90m(최대 200m까지 확대 가능) 심도까지 콘관입시험(CPT)과 최대 직경 73mm의 시료채취를 수행할 수 있다.

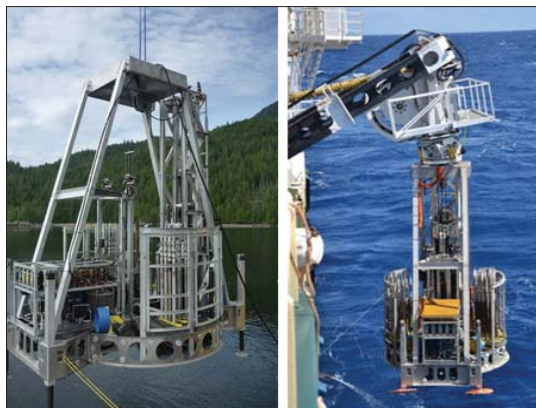


그림 7. GREGG사의 착저식 시추로봇(Robertson et al., 2012)

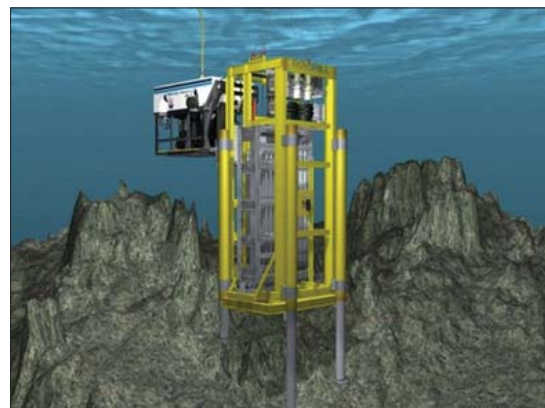


그림 8. ROVDrill(<http://www.f-e-t.com/>)

7) Japanese Oil, Gas and Metals National Corporation

8) 무인원격잠수경(Remotely Operated Vehicle)

### 3. 국내 해저면 착저식 시추로봇 개발 현황

지금까지 국내 해양구조물은 대부분 항만이나 해상교량 등 20m이내의 천해 조건에 위치하여 SEP<sup>9)</sup> 바지라고 불리는 고정식 해상작업장 위에 일반적인 육상 시추기를 올려놓고 지질조사 및 시료채취를 진행하였다. 하지만 수심이 30m 이상으로 깊어지거나 조류가 강한 경우에는 고정식 해상작업장을 활용하기가 힘들다. 고정식 해상작업장을 설치하기 위해서는 4각의 다리를 땅 속에 고정하여야 하는데, 수심이 깊거나 조류가 셀 경우 상당히 위험하기 때문이다. 이런 경우 해저면에 장비를 내려놓을 수 있다면, 고정식 해상작업장이 필요하지 않기 때문에 대수심 조건이나 조류가 강한 지역에 대해서도 실험을 수행할 수 있다.

해외에서는 이러한 착저식 해저지반조사장비가 다양하게 개발되어 활용되고 있는 반면에 국내에서는 전무한 실정이라 대수심 지반조사를 위해서는 막대한 비용을 들여 외국 장비를 임대하여 쓰고 있다. 따라서 중가 추세의 해양 구조물 수요와 수심이나 조류 등 열악한 해양환경을 고려하여 이에 적합한 해저 지반조사기법 개발이 필수적이다.

한국해양과학기술원(KIOST)에서는 2002년부터 국내 독자적인 기술을 바탕으로 착저식 해양지반조사 장비의 개발을 진행하고 있다. 이 중 대표적인 것이 연약지반을 대상으로 수행 가능한 해양 콘관입시험기(CPT)와 모든 지반에서 수행 가능한 해저지반 시추 및 시료채취 로봇을 들 수 있다. 둘 다 원격 제어방식의 로봇 개념이 포함된 것이다.

먼저 해양 콘관입시험기에 대해 설명하면, 해양 연약지반의 물성을 신뢰성 있고 경제적으로 측정할 수 있는 착저식 해양 콘관입시험기를 국내 독자적인 기술로 개발하였다(장인성 등, 2007). 시료채취 없이 지반조사가 가능한 시스템으로 국내 해양의 지형 및 지질 조건과 가용 선박조건 등을 고려하여 시험기의 제원을 결정하였다. 먼저, 대상지반 및 수심의 경우, 최대 시험 수심은 60m이고(적정 활용 수심 : 10m~40m), 최대 시험지반두께는 GL-60m 정도, 비교적 단단한 모래층 지반 정도까지 적용하는 것으로 계획하였다. 콘의 관입에 의한 반력을 자중으로 활용하고자 하는 목적으로 총중량은 11ton(수중 중량 기준) 정도로 하였고, 그림 9에 나타나 있는 바와 같이 부가되어 있는 앵커식 기초(석션 기초<sup>10)</sup>)의 용량까지 고려한다면 약 20ton 이상의 반력을 확보할 수 있도록 하였다.

수중에서 무인 착저식 전자동의 개념으로 작동되기 때문에 육상에서 사용하는 콘관입시험기와는 다른 제작 기술을 요구하고 있다. 이 시험기의 핵심 기술로는 신축이 자유로우면서 강성을 확보하는 관입용 로드<sup>11)</sup> 시스템, 휠드라이브 시스템<sup>12)</sup>을 이용한 자동관입기술, 콘의 연속 관입을 위한 관절형 로드 연결 및 제거 기술, 무인 작업을 위한 자동센서기술, 대수심에서의 작업을 위한 수밀기술 등 다양하다. 또한, 원통형의 기초를 3

9) Self Elevated Platform barge

10) 원통 형태의 기초에 석션압(suction pressure)을 가하여 내부와 외부의 수압 차에 의해 관입되는 방식

11) 지반 시추장치나 시료채취장치와 연결하여 지중으로 관입되는 연결용 로드(rod)이며 steel pipe 형태로 되어 있음

12) 관입용 로드를 휠드라이브(Wheel drive)의 마찰을 이용하여 지중으로 관입시키는 방식



그림 9. 착저식 해양 콘관입시험기(I)



그림 10. 착저식 해양 콘관입시험기(II)

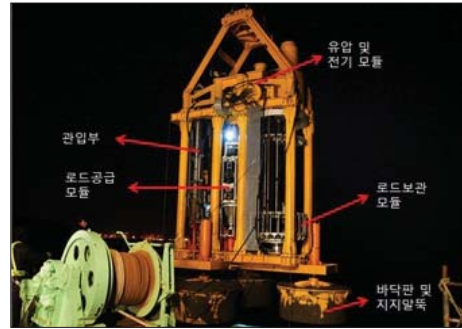


그림 11. DrillBot-100(KIOST, 2014)

함 설치하고 석션 기초 기술을 이용하여 지반에 완전히 밀착시킴과 동시에 지반에 안정적으로 위치할 수 있도록 제작되었다. 콘이나 측정장치 등은 기존에 육상에서 활용되고 있는 장치를 그대로 활용하였다.

그림 10은 착저식 해양콘관입시험기의 다른 예를 보여주고 있다. 이는 휠드라이브와 석션 기초를 활용한다는 측면에서는 그림 9의 장비와 유사하지만, 콘 로드를 장비에 연속적으로 연결한 상태에서 관입 및 인발을 한다는 측면에서는 다른 방식이다. 이 장비의 경우에는 약 15m 심도의 물성을 신속하고 정확하게 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다.

KIOST에서 개발한 또 다른 착저식 지반조사로봇은 DrillBot-100<sup>13)</sup>이다(그림 11). 이는 국토교통부의 초장대교량사업단 사업의 일환으로 진행된 것으로, 해저면에 착저하여 유선에 의한 원격 조정이 가능한 무인 자동화 지반조사 장비이다. 100m의 수압 조건에서 심도 50m까지 지반 굴착이 가능한 보링 장비 기술을 개발하였다(김우태 등, 2011). 앞선 해양콘관입시험기가 토사 지반에 대해 적용이 가능한 반면, 이 로봇은 모든 지반에 적용 가능하다.

수심 100m에서 시추 및 시료채취를 위하여 전기, 전자, 제어, 기계공학을 접목한 로봇 제작 기술과 100m 수압 조건에서 전원, 유압, 신호, 제어 케이블 연결 기술을 개발하였다. 또한 해저 지반의 심도 50m까지 굴착할 수 있도록 기존의 rotary drilling 방식<sup>14)</sup>을 활용하여 설계 및 제작하였다. 그에 필요한 자동 착탈식 로드 50m 이상 제작, 자동 착탈식 토사 지반 공벽 보호용 케이싱<sup>15)</sup> 장치, 로

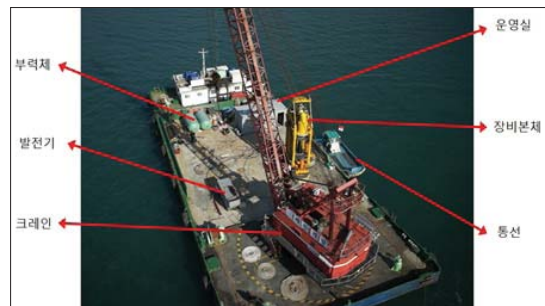


그림 12. DrillBot-100 운영 장면(부체식 바지선 활용)

13) KIOST와 참여기업인 두베시스템이 개발한 착저식 시추로봇의 이름이며, 100m 수심까지 실험을 수행할 수 있음

14) 물 순환 장치, 로드 회전 장치, 로드 관입 장치 등 포함하여 시추 작업을 수행하는 방식

15) 토사 지반에서 시추작업 동안 시추공벽이 무너지는 방지하기 위해 설치하는 steel pipe

드 및 케이싱 자동 연결 및 분리 시스템, 로드 및 케이싱 자동 공급 및 수납 시스템, 무인 원격 조정이 가능한 로봇 제어 시스템 기술, 다양한 표층 지반에 사용 가능한 착저식 frame 장치 기술을 포함하고 있다.

토사 및 암반에 대한 시료채취 이외에도 대표적인 지반조사기법 중 하나인 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)<sup>16)</sup> 장치가 포함되었다는 점은 해저 착저식 로봇 중 전세계적으로 유일한 특징이다. 수밀 조건 및 자동화 기술 등을 활용하여 육상시험과 동일한 조건을 고려하여 결과의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

#### 4. 맺음말

지금까지 국내 해양구조물은 대부분 항만이나 해상교량 등 천해 조건에 집중되었지만, 최근 들어 해상풍력을 포함한 해양에너지 시설 및 해양플랜트 시설 등 점차적으로 대수심 조건으로 변해가고 있는 추세이다. 이에 따라 다양한 종류의 해양 구조물 수요가 증대되고 있고 설치 수심 또한 점차적으로 깊어지고 있다. 대수심 조건에 대한 지반조사의 경우 해외에서는 독자적인 기술을 활용하여 이미 다양한 종류의 해저면 착저식 시추로봇을 개발하여 실제 현장에 투입하고 있다. 하지만, 현재 국내 착저식 시추로봇은 비교적 천해 조건(수심



그림 13. 수중건설로봇사업단 구성

16) 63kg의 추를 76cm 높이에서 자유낙하하여 샘플러가 30cm 관입될 때의 타격회수(N값)를 측정하는 시험법이며, N값을 이용하여 설계정수를 도출할 수 있음





그림 14. 수중건설로봇사업단 3개 로봇의 적용(예)



그림 15. 수중로봇복합실증센터

100m 이내)을 대상으로 한 착저식 해양콘관입시험기와 DrillBot-100이 전부인 실정이다. 물론 실제 현장 적용에 주목적을 두고 수중에서의 원격제어기술이나 수중로봇 설계/제작기술 등을 독자적으로 개발한 것이므로 향후 천해 조건을 대상으로 사업화 및 실용화에 상당히 유리한 입지를 확보할 수 있다. 하지만 대수심 조건(수심 2,000m 이상)에 적합한 해저 시추 시스템의 개발 또한 필요하다 할 수 있다.

한편, 미래 해양개발을 위한 수중건설로봇 사업이 진행되고 있는데, 이는 3종의 수중건설로봇 연구개발을 비롯하여 성능평가 시험을 위한 수조 등 인프라를 구축하는 복합형 R&D 사업으로 구성된다(장인성, 2014). 이 사업의 비전은 21세기 미래 해양시대를 주도적으로 개척하고, 녹색성장 강국으로 발전하기 위한 수중건설로봇의 독자 기술을 확보하고 실용화 기반을 마련하는 것이며, 최종 목표는 수심 500m~2,500m의 해양 구조물 건설을 위한 수중건설로봇(장비) 개발과 성능 검증을 위한 인프라를 구축하는 데 있다(그림 13).

그림 14에 나타난 것처럼 개발 범위 및 활용 목적에 따라 3종의 수중건설로봇이 개발되고 있다. 수중용접과 같은 유지관리 작업 등 경작업을 수행할 수 있는 유영식 ROV와 해저케이블 매설이나 수중 구조물 설치 등 중작업용 유영식 ROV, 비교적 단단한 지반 조건에서 파이프라인 매설 등 중작업을 수행할 수 있는 트랙기반 로봇이 그것이다. 앞서 설명한 해저면 착저식 시추로봇과는 구분되지만, 개발 기술은 서로 접목이 가능할 것이다. 수중건설로봇 개발과 함께 다양한 수중로봇의 성능을 실내에서 검증하기 할 수 있는 수중로봇복합실증센터(그림 15)도 함께 구축하였다.

수중건설로봇이 개발될 경우 인간을 대신하여 심해 수중작업과 위험한 작업을 로봇이 수행함에 따라 인명 보호뿐 아니라 해양과업 범위 확대, 효율성 증대 효과를 얻을 수 있고, 해외장비의 국산화로 수입대체 효과도 기대된다.

참고문헌

1. 김우태, 장인성, 이배, 황인철(2011). 수중 무인 지반조사장비 현황 및 개발 방향, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 발표논문집, 2013-2016
2. 장인성, 권오순, 정충기(2007). 무인착저식 해양 콘관입시험기 개발, 한국지반공학회 가을국제컨퍼런스 611-622
3. 장인성 (2014). 한국해양과학기술원 수중건설로봇사업단. 한국강구조학회지, 26(2), 84-85
4. Freudenthal, T., and Wefer, G.(2006). The sea-floor drill rig "MeBo": robotic retrieval of marine sediment cores. PAGES News, 14(1), pp.10
5. Kelleher, P.J. and Randolph M.F.(2005). Seabed geotechnical characterisation with the portable remotely operated drill. In Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics(ISFOG), Perth, Australia, Taylor & Francis, London, pp. 365-371.
6. Lunne, T.(2010). The CPT in offshore soil investigations - a historic perspective, 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA, May 2010, pp. 1-43
7. Murray, R. E.(2010). Deep Water Automated Coring System (DWACS). 20-23 Sept. 2010 The International Society of Offshore and Polar Engineers,
8. Robertson, P. K., Gregg, J., Boyd, T., and Drake, C.(2012). Recent developments in deepwater seafloor geotechnical and mineral exploration drilling, Offshore site investigation and geotechnics, Proceedings of the 7th International Conference, London, pp. 239-243
9. <http://www.f-e-t.com/>
10. <http://www.marum.de/>
11. <http://shaldril.org/>
12. <http://www.wassoc.com/>