

# 해상에서 실시하는 현장지반조사

조 성 민

한국도로공사 인천대교건설사업소 기술지원팀 기술지원팀장

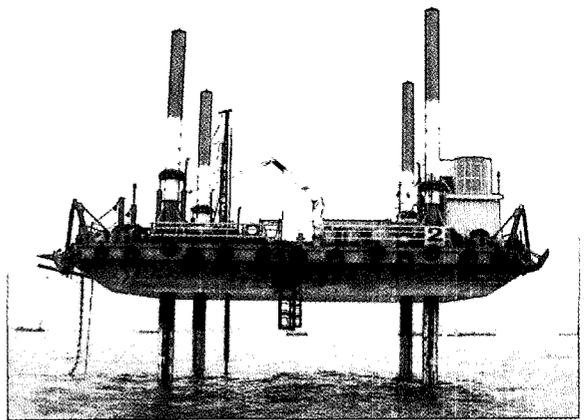
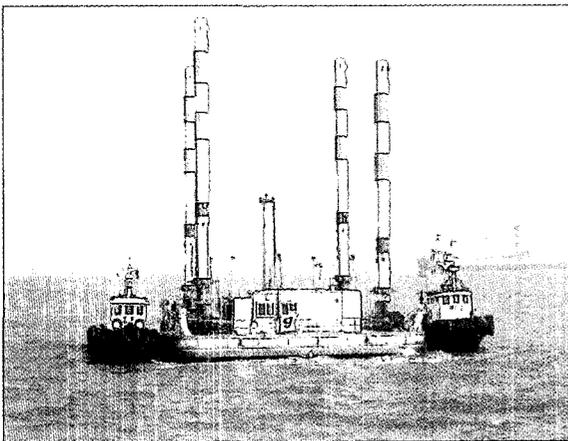
## 1. 개요

바다에서는 자원 채취와 항해, 군사적 목적을 위하여 아주 오래전부터 수많은 조사가 이루어지고 있다. 최근에는 해양개발, 육지의 대체 수송로 확보 등을 위하여 바다 위에 인공 구조물을 건설하는 경우가 늘고 있어, 구조물을 지지하는 해양지반에 대한 조사가 빈번해지는 실정이다. 우리나라에서도 대규모 매립, 연육교 및 연도교 건설, 각종 해상기지 및 시설물 건설을 위해 다양한 종류의 해상 지반조사가 진행되고 있는데, 여기서는 해양지반의 공학적 특성을 파악하기 위한 해상 지반 조사에 대해 간략하게 설명하고자 한다.

## 2. 지반조사의 준비

해상에서는 육상과 달리 시추 및 조사 작업의 능률이 현저하게 감소할 수 밖에 없다. 수심을 가진 바다 위의 한정된 작업 공간에서 해풍과 파도, 조위차를 극복하는 일은 쉬운 일은 아니다. 이러한 어려운 조사는 조사의 신뢰성에도 영향을 주기도 한다.

해상 지반조사를 위해서는 먼저 가설작업장을 확보해야 하는데, 조사목적, 수심, 선박 교통 여건 등에 따라 부채작업장과 고정작업장으로 구분할 수 있다. 부채작업장은 수심이 깊은 해역에서 주로 이용하는데, 선박식 및 반잠수식으로 다시 나뉜다. 일반 선박의 경우 피칭과 롤링의 영향을 받



[그림 1] SEP바지선의 세팅 모습 및 세팅 후 조사 수행 중인 모습

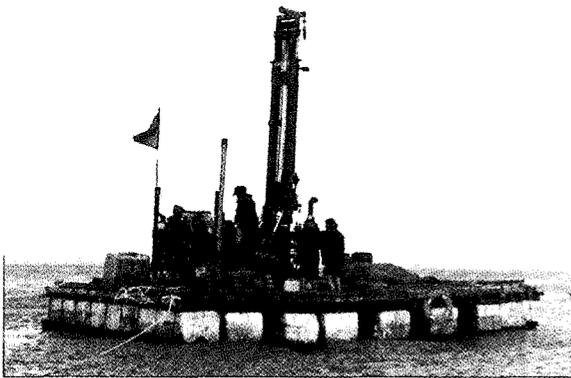
기 때문에, 이러한 흔들림을 흡수할 수 있는 장치를 활용하여 시추 및 샘플링을 진행해야 한다. 반잠수식은 유정 굴착과 같은 경우에 많이 이용하는 매우 안정된 작업장이지만, 통상적인 조사의 경우는 경제성이 매우 낮다.

고정작업장은 강제식, 스팩트식, 파이프식, 원통형식, 부이식 등으로 다시 나눌 수 있다. 이 중에서 스팩트식은 레그를 내려 작업대의 높이를 조절할 수 있는 SEP(self elevating platform) 방식으로, 일반적인 조사시 널리 사용하고 있다[그림 1]. SEP 바지선은 조위차, 파도의 영향을 받지 않고 안정적으로 조사 장비를 탑재할 수 있는 장점을

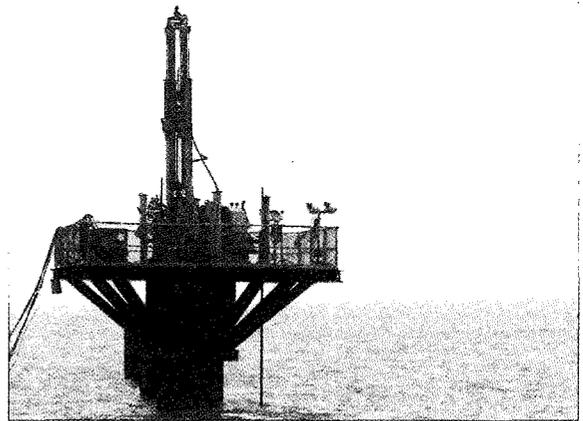
가지고 있다. 그림 2는 플로팅 바지선으로서, 경제성은 뛰어나지만 조류의 영향을 직접 받게 되므로 주의가 필요하다. 그림 3은 해상에 설치한 말뚝 기초 등 기존 구조물에 작업대를 설치하여 조사를 실시하는 모습이다.

우리나라 서해 등 갯벌이 발달한 지역의 경우 간조대의 경우 물이 빠져나가 해저면이 노출되는 경우가 많은데, 그림 4와 같은 특수한 장비들은 지반조사 수행에 도움이 된다.

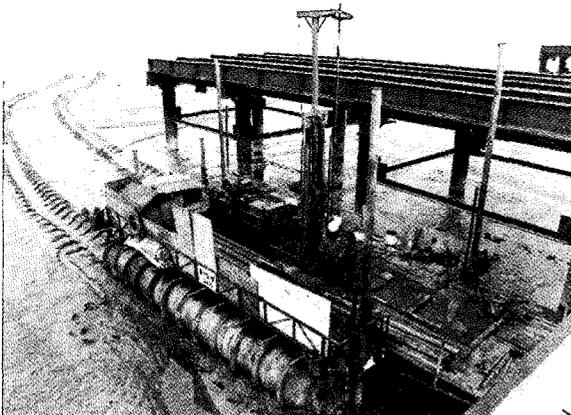
한편, 해상에서는 정확한 조사 위치를 설정하기 위하여 보정위성항법시스템(DGPS, differential global positioning system)을 이용한다 일반적



[그림 2] 플로팅 바지선에서 시추하는 모습



[그림 3] 기존 구조물을 이용한 작업대의 시추조사



[그림 4] 갯벌 등에서 지반조사에 이용하는 특수 장비들



으로 DGPS는 2대의 GPS수신기 조합으로 구성되어, 한대는 기준이 되며 또 다른 한대는 위치측정을 표시하기 위해 움직이는데, 널리 사용하는 DGPS의 거리 오차는 대략 1미터 정도이다. 해상에서 조사구역에 승인된 기준점을 확인하고, 기지점의 좌표와 수신된 좌표를 비교하여 GPS 상태를 점검하여 예인선, 또는 바지 등에 DGPS를 설치하여 운영한다. 시추공 주변에는 DGPS에 따라 선박으로 부표를 설치하고, 시추 위치의 정확한 실제 좌표를 측정한다.

### 3. 시추조사 및 샘플링

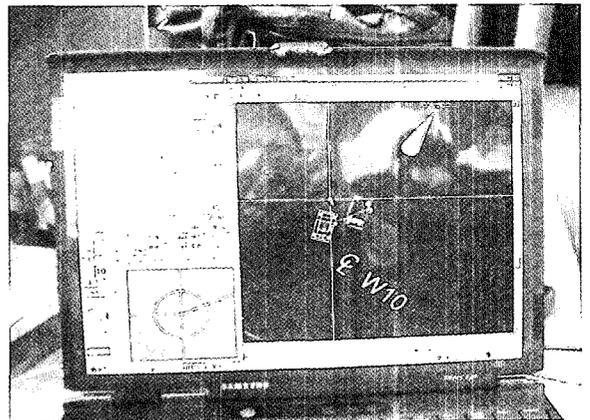
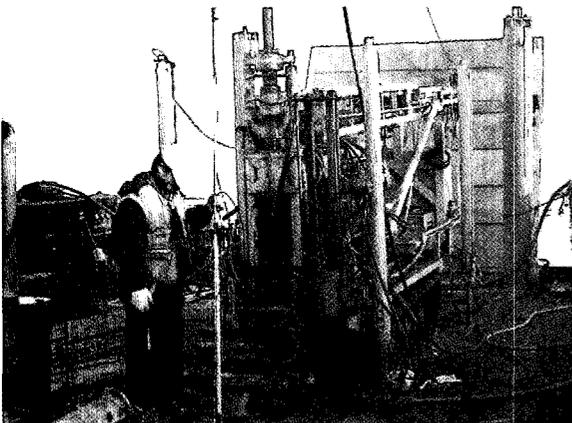
현장지반조사의 기본이라 할 수 있는 시추(test

boring)는 굴착기를 이용하여 지반을 착공하면서 배토되는 시료와 시추장비의 관입 상태 등을 분석하여 지반의 층서 및 층후, 암상, 지하수위 및 지하수 흐름 등을 파악하기 위하여 실시한다. 해상에서 이루어지는 시추조사는 작업 조건상 앞서 언급한 특별한 작업대의 설치가 필요하다는 점 외에는 육상 조사와 큰 차이는 없다.

시추를 통해 형성한 지중의 시추공에서 불교란, 또는 교란 시료를 채취하는 작업 및 현장 원위치 시험을 위한 시추공 굴착 및 형성 역시 시추 공정에 포함된다. 실내시험이나 상세 조사를 위해서는 현장에서 교란되지 않은 점성토 시료를 채취해야 하는데, 시료채취 과정에서 전용력 감소(응력이완), 물리 화학적 변화, 함수비 감소 등이 수반되

<표 1> SEP 바지와 플로팅 바지의 비교

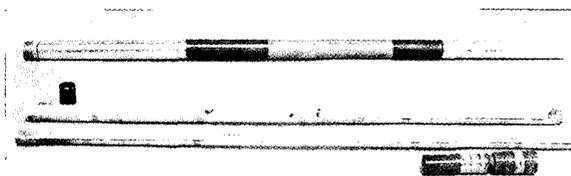
구분	S.E.P. 바지	플로팅 바지
개요	바지선 모서리의 유압식 다리(leg)를 해저면에 거치시켜 지지하는 방식으로 작업의 안정성을 극대화	부력이 좋은 재료로 작업대를 형성하고 모서리에 있는 앵커(anchor)를 해저면에 지지시켜 바지를 고정시키는 방식으로 간단한 현장시험 수행시 이용함.
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일반적인 해저면에서 지지능력 양호</li> <li>• 파랑, 유속의 영향을 거의 받지 않음</li> <li>• 해상에서 정밀 지반조사 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 제작 및 해체가 용이</li> <li>• 제작비가 저렴</li> <li>• 인근해 작업시 기동성이 양호</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 장비 제작비, 임대료가 고가</li> <li>• 해저면에 연약한 토층이 있는 경우, 다리(leg)의 고정 및 분리에 문제점 발생</li> <li>• 이동 및 작업 위치 측량시 시간 소요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 해저면에 연약한 토층이 있는 경우, 앵커 고정의 문제점 발생</li> <li>• 파랑, 유속에 따라 안전사고 위험성 내포</li> </ul>



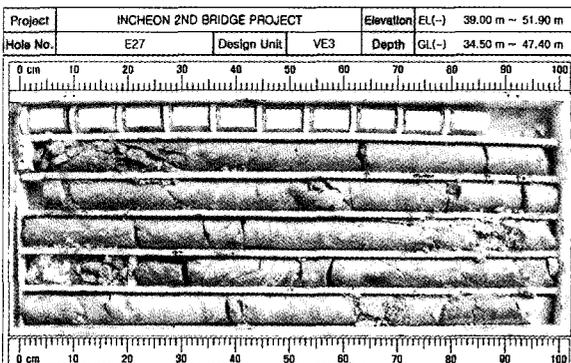
[그림 5] GPS 측량 실시

므로 이들 영향을 최소화하는 것이 중요하다. 시료채취 분야 연구 역시 샘플링 장비의 개발과 그 맥을 함께 하고 있는데, 상기 영향 요인을 줄이기 위해서 샘플러의 면적비, 절삭날의 각도, 샘플러 길이/직경 비, 관입(절삭) 방법 등을 최적화하기 위한 시도가 모색되고 있다. 해저의 퇴적층을 주 대상으로 하는 불교란 점성토 시료의 채취는 크게 튜브 샘플링과 블록 샘플링으로 구별할 수 있으며, 튜브식은 다시 관입식과 절삭식으로 나눌 수 있다. 튜브식 중에서는 La Rochelle 등이 개발한 Laval 샘플러가 연약한 점토의 불교란 시료 채취에 매우 효과적인 것으로 알려져 있다. 블록 샘플링은 지표 부근은 물론이고, Sherbrooke 샘플러 등을 이용하여 깊은 곳에서도 가능하나, 수심을 가진 해상에서는 적용하기 어렵다. 사질토의 경우에는 일반 샘플러 뿐 아니라 동결채취법, 약액주입 채취법 등이 이용되고 있다.

암반의 경우 코어 채취가 쉽게 되는 조건(암질이 균일하거나, 균열이 적은 암층)에서는 싱글 코어



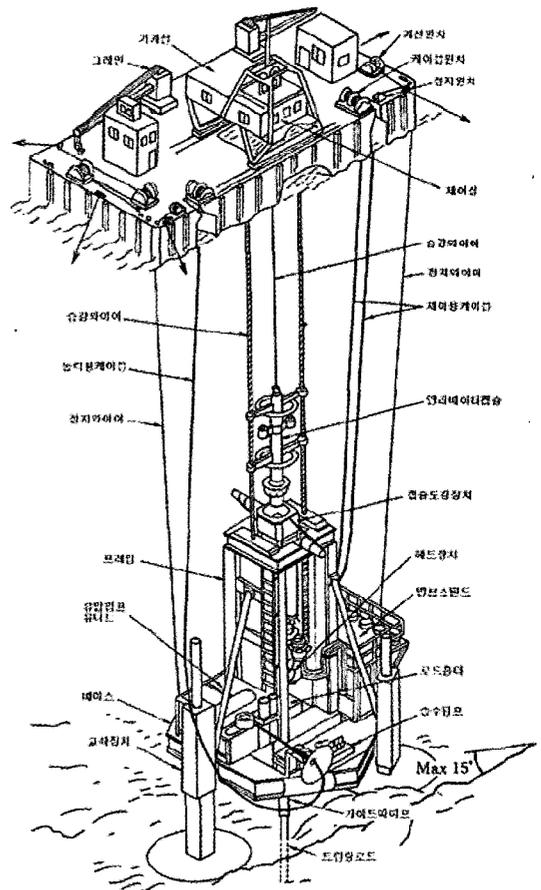
[그림 6] 트리플 코어 배럴



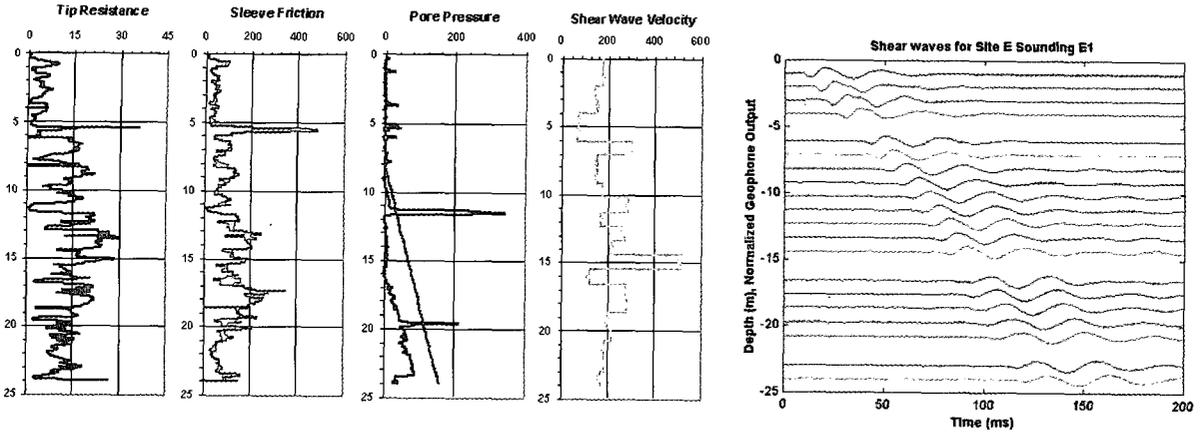
[그림 7] 풍화토층과 하부 암반층에서 채취한 시료

배럴(single core barrel)을 사용할 수 있으며, 외관과 그 내부에 설치되어 있는 내관, 즉 2중관식으로 된 더블 코어 배럴(double core barrel)을 사용하여 코어의 회수율을 높일 수 있다. 더블 코어 배럴은 외관은 회전하나 내관은 고정되어 있는 방식과 외관과 내관이 같이 회전하는 방식으로 구분된다. 파쇄대나 풍화가 심하여 시료 채취가 매우 어려운 암반층의 경우는 더블 튜브 코어 배럴의 내관 안에 코어 고정용 라이너를 넣어 시료의 회수율을 극대화시킨 트리플 코어 배럴을 사용할 수 있다.

샘플링 기법 못지 않게 채취된 시료의 품질을 객관화하기 위한 시도도 이루어지고 있는데, 채취 시료로 얻은 지반정수와 현장시험으로 얻은 지반



[그림 8] 착저형 해저지반 샘플링 장치 개요도



[그림 9] 탄성과 콘관입시험 결과

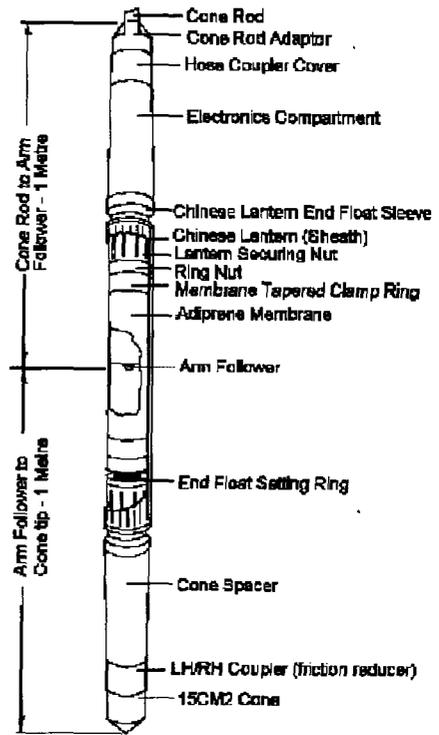
정수를 각각 비교하거나 실제 해석에 적용하여 신뢰성을 검증하고자 하는 연구들이 진행되고 있으며, 튜브 안으로 시료가 채취되는 과정에 대한 수치해석을 다루는 연구들도 국내외에서 꾸준히 진행되고 있다.

그림 8은 해저 지반에 거치한 상태에서 시료를 채취하는 착저형 장비의 개요도이다.

#### 4. 원위치 토질시험

해상 지반조사에서도 가설작업대에 시험장비를 탑재하여 육상에서와 동일하게 위와 같은 현장 토질시험을 실시한다.

최근 들어 국내에서도 지반조사의 중요성이 재차 강조되고, 입찰 제도 변화 등에 따라 설계품질 제고에 대한 노력이 증대되면서 다양한 지반조사 기법들이 소개되어 적용되고 있으나, 아직도 대부분의 경우는 표준관입시험 등 재래적인 방법에 크게 의존하는 실정이다. 연약지반 조사 분야는 피에조콘관입시험(CPTU/CPT)의 실무 적용 사례가 늘고 있으며, 딜라토미터 시험(DMT), 자가 굴착식 프레스미터 시험(SBPT), 전기비저항 탐사 등에 대한 연구가 시도되고 있다. 또한 표준관입시험과 관련하여 N-값의 적용한계를 명확히 하고, 에너지 효율 등 주요 요소에 대한 보정을 재



[그림 10] 콘-프레스미터

규정하려는 노력이 진행되고 있다.

CPT는 거둬진 장비 개량과 해석기술의 발전에 힘입어 외국에서는 점성토 지반은 물론 사질토 지반에서도 광범위하게 사용되고 있으며, 연약지

반 조사시 가장 기본적인 시험법으로 자리하고 있다. 또한 기존의 콘에 다양한 종류의 센서와 장치를 부착하여 부가적인 지반정보를 획득하고자 하는 시도가 꾸준히 행해지고 있으며, 여러 가지 복합적인 기능을 갖는 일종의 크로스오버, 또는 퓨전 형태의 시험장비들이 많이 등장하고 있다.

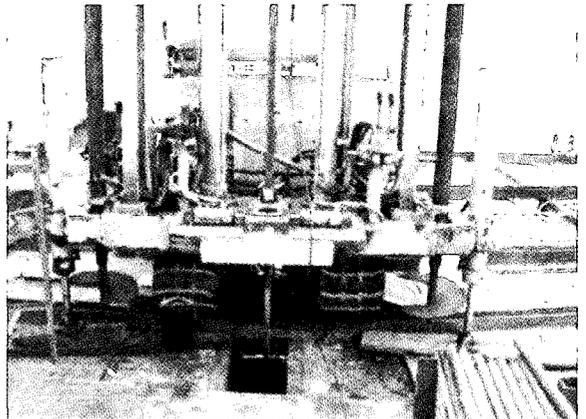
콘에 수진기(geophone)나 가속도계를 탑재하여 시추공을 형성하지 않고도 콘 관입 도중 다운 홀 형식의 탄성과 탐사가 가능한 탄성과 콘(seismic cone)이 보편화되고 있으며, 관련 연구도 활발하게 진행되고 있다[그림 9]. 또한 전기비저항 센서를 부착하거나, 환경조사 목적으로 수소이온농도, redox potential 센서를 내장한 콘이 상용화되었으며, 현재는 유도형광물질이나 자외선 감지 센서를 부착하는 경우도 있다. 콘 후방에 프레스미터를 함께 부착한 콘-프레스미터[그림 10]는 일정 심도에서 콘 관입을 멈추고 프레스미터 재하시험을 실시하여 초기에는 한번의 시험으로 연약지반의 전단강도와 전단계수를 함께 평가할 수 있는 방법으로 호평을 받았으나, 시험시간이 길고 장치가 복잡하여 널리 보급되지는 않았다.

콘에 방사성 동위원소를 담아 흙의 밀도나 함수비를 측정하고자 하는 시도가 Mitchell, Shibata 등을 중심으로 행해졌으나, 조사 중 콘의 유실로 동위원소를 유출시킬 위험 때문에 보편화되지는 못

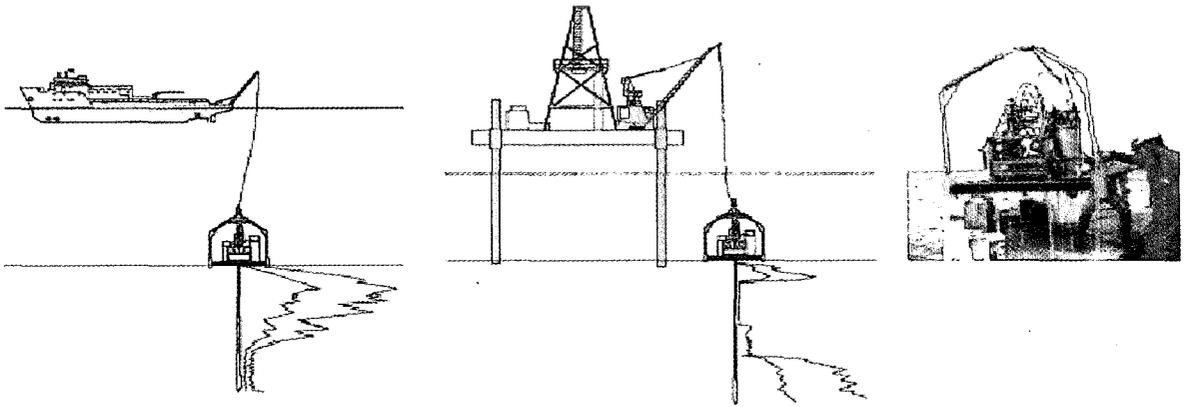
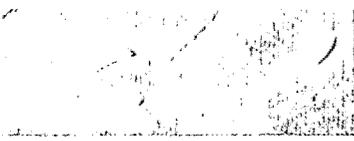
하고, 근래에는 방사선 오염물질 탐색을 위해  $\gamma$ -선 센서를 탑재하는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

최근 들어서는 콘 선단에 소형 카메라를 장착(vision cone)하여 관입 도중 지층 상태, 지하수 오염정도, 전단 및 활동면 등을 시각적으로 확인할 수 있는 기법이 시도되고 있으며, 관입 중 화상처리에 소요되는 시간을 줄이는 데 연구가 집중되고 있다. 또한 지표에서 일정한 경사를 두고 관입하여 수평 방향으로 CPT를 수행하기도 하는데, 연직방향 관입시에 비하여 룯드 주변의 마찰이 매우 크므로 관입 길이는 장비 용량의 제약을 크게 받는다. calibration chamber나 현장을 대상으로 한 최근의 연구에 따르면 동일한 지반에서 수평관입한 콘 저항력은 연직관입한 경우보다 큰 것으로 나타났다. Clementino 등은 수평시추시 시추공 양단의 개방을 최대한 활용하여 소규모 시추공을 뚫은 후 시추 룯드를 회수(인발)하면서 시추공 종점부터 대형 콘을 같이 잡아당겨 500 m 이상의 길이에서 저항력을 측정하는 방법을 개발하기도 하였다.

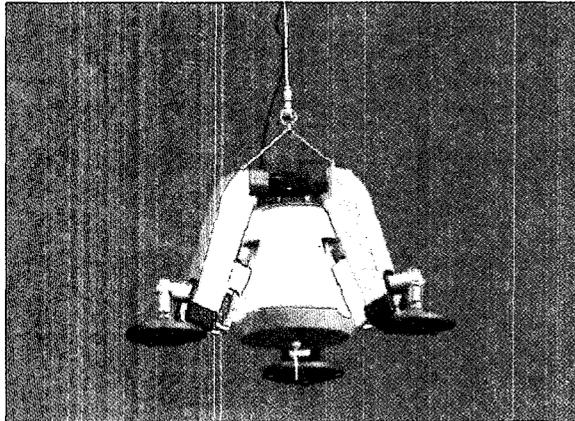
그런데, 육상 조건, 또는 가교 등 하부 지지 가설 구조물에서는 그림 11과 같이 대형 시험장비를 사용할 수 있으나, 해상에서는 곤란한 경우가 많다. 가설 작업대에 소형 CPT 장비를 탑재하여 시추조사와 동일한 과정으로 콘관입시험을 실시할 수 있으나, 수심이 깊은 해저 지반을 조사할 경우



[그림 11] 가설 구조물, 플로팅 바지를 이용한 CPT 수행 모습



[그림 12] 해저 지반 CPT를 위한 Seascout 장비(Fugro)

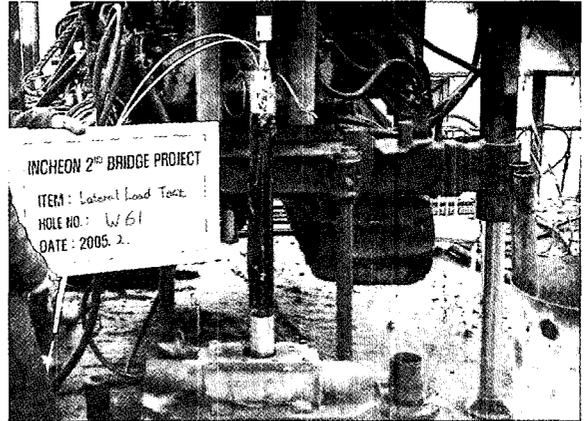


[그림 13] 착저형 해양콘의 외형(한국해양연구원)

라면 선단면적이  $1 \text{ cm}^2$  (표준 콘의 경우  $10 \text{ mm}^2$ ) 인 소형 피에조콘과 특수한 관입장비가 사용되기도 하는데 [그림 12], 현재는 조사가 가능한 깊이가 10m 이내로서, 조사 깊이의 연장이 관건이 되고 있다. 최근에 국내에서는 유연성이 큰 로드를 이용하여 표준형 콘을 관입시킬 수 있는 장비가 개발되기도 하였다 [그림 13].

## 5. 해상 물리탐사

지반을 구성하는 각 지층의 물리적 성질의 변화와 특성을 조사하는 지구물리학적 탐사(geophysical



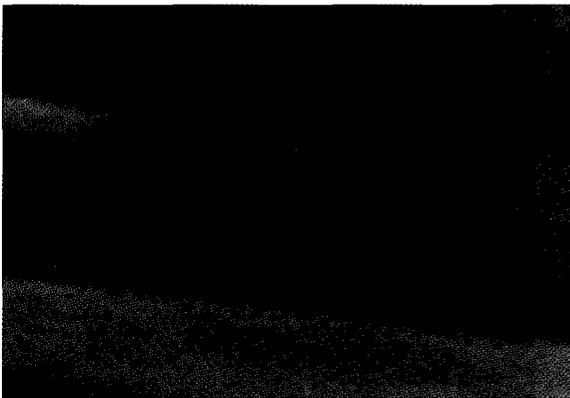
[그림 14] SEP 바지를 이용한 횡방향 재하시험

survey) 역시 해상 지반조사에 널리 활용되고 있다. 물리탐사의 초기에는 광물자원이나 지하수 개발, 지하구조 탐사가 주목적이었으나, 지금은 토목공학 및 환경 분야로 그 적용성이 확대되고 있다. 토목 분야에서는 지층 구조 파악, 단층 및 파쇄대 등 지질 이상대의 규명, 지하 공동이나 매설물 유무 파악 등 지하구조 가시화에 활용하고 있으며, 암반의 분류 및 공학적 특성 파악, 불연속면 평가 등에도 많이 이용한다.

물리탐사에 주로 이용하는 지반의 대표적인 특성값으로는 탄성파 속도, 전기적 성질, 자기적 성질, 밀도 등이 있으며, 이에 따라 탐사 방법은 크

<표 2> 설계 및 시공을 위한 대표적 물리 탐사법(한국지반공학회)

대분류	소분류	대표적 탐사방법	측정대상	주요 탐사법	
지표 탐사	탄성파탐사	· 탄성파 굴절법 탐사 · 탄성파 반사법 탐사 · SASW/TSP	탄성파 도달시간 및 파형	탄성파 굴절법	
	전기탐사	· 수평 탐사(Profiling) · 수직 탐사(Sounding)	전기 비저항	쌍극자 배열 수평 탐사	
	전자탐사	· 주파수 영역 탐사 · 시간 영역 탐사	유도 전류의 위상 및 진폭	CSMT (IMAGEM) 탐사	
	GPR 탐사	· 반사법 GPR 탐사	레이다파 도달 시간 및 파형	반사법 GPR	
시추공 탐사	단일 시추공 탐사	· 다운홀 탐사(PS 검층) · 시추공 GPR 탐사	탄성파 도달 시간 반사 레이다파	다운홀 탐사	
	시추공간 속도측정	· Crosshole 탐사	탄성파 도달 시간	크로스홀 탐사	
	시추공간 토모그래피	· 탄성파 토모그래피 · 비저항 토모그래피 · 레이더 토모그래피	탄성파 도달 시간 전기 비저항 직접 레이다파	탄성파 토모그래피	
	물리 검층	전기검층	· 전기 비저항 검층 · 자연 전위 검층	전기 비저항 자연 전위 등	비저항 검층
		방사능검층	· 자연 감마 검층 · 밀도 검층	감마율 측정	밀도검층
		음파검층	· Sonic logging · Suspension PS logging	P, S 파 도달시간	SPS logging
		시추공 영상촬영	· Optical Scanning(BIPS) · Acoustic Scanning (Televiewer)	공벽 영상 초음파 도달시간	BIPS(OBI), Televiewer(ABI)



[그림 15] 해상의 시추공주사검층(BHTV) 모습

탄성파 탐사, 전기 탐사, 전자 탐사, 자력 탐사, 중력 탐사 등으로 나눌 수 있다. 이중 자력 탐사와

중력 탐사는 대규모 광물 자원 탐사나 지하 구조 규명이 그 목적으로 설계나 시공을 위한 비교적 얕은 심도의 정밀 조사 자료가 요구되는 엔지니어링 목적에는 부합되지 않아 많이 사용되고 있지 않고 있다. 따라서 토목 분야에 흔히 적용되는 물리 탐사는 측정 대상이 되는 물성에 따라 탄성파, 전기 및 전자 탐사 등으로 크게 분류할 수 있으며, 또한 탐사가 수행되는 지역에 따라 육상, 해상 및 공중 탐사로 나눌 수 있다. 시추공 탐사 중 물리 검층의 경우 송·수신 장치가 같이 붙어있는 탐침봉(probe)을 이용하고, 측정치가 연속적인 경우가 일반적이어서 따로 분류되기도 한다. 표 2는 설계 및 시공을 위하여 많이 사용되는 탐사법을 측정 방법에 따라 분류한 것이다. 29