

연약지반조사를 위한 전기비저항 탄성과 Flat DMT 장비의 개발 및 검증 Development and Verification of Resistivity Seismic Dilatometer (RSDMT) System for Characterizing Soft Soil Site

방은석¹⁾, Eun-Seok Bang, 김영상²⁾, Young-Sang Kim, 성낙훈³⁾, Nak-Hun Sung, 박삼규¹⁾, Sam-Gyu Park, 서동남⁴⁾, Dong-Nam Seo, 이세현⁵⁾, Sei-Hyun Lee, 김정호⁶⁾, Jung-Ho Kim, 김동수⁷⁾, Dong-Soo Kim

- ¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, KIGAM
- ²⁾ 전남대학교 건설·환경공학부 조교수, Assistant Professor, Division of Civil and Environmental Engineering, Chonnam National Univ.
- ³⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임기술원, Principle Technician, Geotechnical Engineering Division, KIGAM
- ⁴⁾ 전남대학교 해양공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Ocean Engineering, Chonnam National Univ.
- ⁵⁾ 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST
- ⁶⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원, Principle Researcher, Geotechnical Engineering Division, KIGAM
- ⁷⁾ 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

개요(SYNOPSIS) : The aim of this research is development and verification of resistivity seismic dilatometer (RSDMT) system. The resistivity module for obtaining resistivity-depth plot and seismic module for obtaining wave velocity-depth plot are attached to the conventional flat dilatometer testing equipment. To enhance reliability and repeatability of seismic part in RSDMT, automatic testing system including automatic surface source, PC based data acquisition system and operating program were developed. To obtain real resistivity value of soil, geometric factor for the array of electrodes in RSDMT was derived empirically. The verification studies for the developed RSDMT system were performed at the southeast side of Korea where soil improvement work is planned. SPT, CPT, geophysical subsurface imaging techniques and some laboratory tests were performed for the comparisons. As one penetration of RSDMT, various soil parameters could be obtained. The results of field test showed good repeatability and reliability in every part. From these studies, developed RSDMT system was checked and the effectiveness of this system was verified in light of proper evaluation of geotechnical characteristics of soft soil.

주요어(Key words) : dilatometer, hybrid device, resistivity, seismic, site characterization

1. 서론

일반적으로 지반조사는 교란 및 비교란 시료를 이용한 실내 실험이 주된 역할을 해 왔으며 현장 실험은 실내 실험의 보조적 역할을 하여 왔다. 하지만 정밀한 실내 실험을 위해 소요되는 시간과 노력에 대한 비용이 너무 커서 근래에는 간단하게 현장 실험을 수행하고 이론식 및 경험식을 이용하여 지반 정보

를 신속하게 추정하는 방식이 각광받고 있다. 우리나라는 해안 및 강 유역을 중심으로 연약지반이 깊게 발달하여 있으며 국가 교통망의 직선화 및 항만 등 해안구조물의 건설 수요 증대에 따라 연약지반에 대한 지반조사가 점점 중요해져 왔다. 연약지반의 지반조사를 위한 현장 원위치 실험으로 표준 관입 시험(Standard Penetration Test, SPT), 콘 관입 시험(Cone Penetration Test, CPT), 딜라토미터 시험(Flat Dilatometer Test, DMT), 현장 베인 시험(Field Vane Shear Test, FVT), 프레스메터(Pressuremeter Test, PMT) 등이 있다. SPT는 시추와 동시에 수행되며 시료 채취가 가능하고 풍부한 D/B(data base)에 기반한 경험식이 있어 다양한 지반 설계 정수를 도출하는데 있어 널리 이용되고 있다. 그러나 연약지반의 경우에는 표준 관입 시험의 적용성이 떨어져 관입장비(penetrometer)로 정적 관입이 가능한 CPT 및 DMT의 적용이 확대되고 있다. SPT에 비해 시료 채취가 불가능한 단점이 있지만 지반 상태의 연속적인 평가가 가능하며 현장 실험이 자동화 되어 있거나 간단하며 반복성이 뛰어나다. 이론식 및 경험적 상관관계(empirical correlation) 등을 이용하여 지반 분류(soil classification) 및 지반설계 정수(geotechnical design parameter)들을 도출하게 된다. 이러한 시험들은 기본 기능 외에 추가적인 기능을 탑재한 형태로 많이 적용되고 있으며 탄성과 피에조콘(seismic piezocone, SCPT), 전기비저항 피에조콘(resistivity piezocone, RCPTu), 콘 프레스메터(cone pressuremeter, CPM), 탄성과 딜라토미터(seismic dilatometer, DMT) 등이 있다(Mayne, 2000; Maugeri 와 Monaco, 2006). 이러한 하이브리드 장비(hybrid device)들은 한 번의 관입으로 동일 지점, 동일 조건에서 여러 종류의 실험이 가능하므로 매우 경제적이며 해당 지역을 종합적으로 평가할 수 있다. 각각의 실험 결과를 독립적으로 활용할 수도 있으며 각 실험 결과들의 조합을 통해 하나의 실험으로 추정하기 어려웠던 지반 설계 정수의 추정이 가능하게 된다. 또한 하이브리드 장비는 상관관계를 위한 D/B 구축에 있어서도 보다 유리하다.

자원탐사에 주되게 이용되어 왔던 물리탐사 기술이 토목 공사를 위한 지반조사의 일부분으로 자리 잡은 지 오래다. 물리탐사 기술은 주로 비파괴적으로 수행되며 다차원 영상정보의 제공이 가능하여 원위치 시험에 의존하던 지반공학 분야에서 획기적인 기술로 인식되어 널리 적용되어 왔다. 하지만 비파괴 탐사의 근본적 한계 및 기술력의 미비로 인하여 탐사 결과에 대해서 확신하지 못하는 경우가 많아 토목 설계에 있어서 물리탐사 기술은 시추 등의 본 지반조사 전 단계의 예비 지반조사 및 보조 지반조사 수준에 머물러 있다. 근래 들어서는 보다 정확한 지반 거동을 예측하기 위해 다차원적인 지반 설계정수의 획득이 요구되고 있어 물리탐사 영상화 기술이 지반공학 분야에 기여할 수 있는 여지가 많으며 그에 따른 많은 추가적인 연구가 필요하다. 물리탐사 기법으로 지반 설계 정수를 도출하기 위한 방법 중 하나는 지구물리학적 계수(geophysical parameter)와 지반 설계 정수(geotechnical design parameter)간의 경험적 상관관계를 도출하는 것이다. 이는 각 계수간의 상관성에 기초를 하여야 하며 신뢰성 있는 D/B가 기반 되어야 한다. 이러한 측면에서 현장 원위치 시험 하이브리드 장비가 효율적이며 지반공학적 설계 정수를 신뢰성 있게 도출할 수 있는 시험기에 지구물리학적 계수들을 동시에 획득할 수 있는 방식으로 장비가 구성되는 것이 바람직하다. 물리탐사 기법을 통해 측정하는 지반의 지구물리학적 계수로는 전기비저항 값과 탄성과 속도가 일반적이다. 지반의 전기비저항은 주로 전기비저항 탐사(DC resistivity survey)로 측정하고 있으며 역산 기법의 발전으로 3차원은 물론이고 실시간으로 변화하는 지반에 대해서 4차원으로 영상화하고 있다(김정호와 이명중, 2006). 탄성과 속도에 대한 영상은 굴절법 탄성과 탐사 및 표면파 탐사 등을 통해서 가능하다. 그러므로 전기비저항 및 탄성과 속도와 지반 설계 정수간의 신뢰성 있는 상관 관계식이 주어지거나 다른 원위치 현장 시험과 연계함으로써 물리탐사 영상화 기법을 통해 지반 조사를 더욱 신뢰성 있게 수행할 수 있으며 대상 지반에 대한 설계정수 영상까지 획득이 가능하리라 본다.

이 논문에서는 이를 위한 연구의 일환으로 Flat DMT 장비에 전기비저항 및 탄성과 측정 모듈을 부착한 전기비저항 탄성과 Flat DMT(Resistivity Seismic Flat Dilatometer Test, RSDMT) 장비를 제작하고 검증한 내용을 소개하고자 한다. RSDMT를 통해 지반 분류, 지반의 강도 및 변형 특성 등과 관련된 전통적인 값을 획득할 수 있으며 이와 더불어 전기비저항 주상도 그리고 압축과 및 전단과 속도 주상도를 동시에 획득할 수 있다. 전체적인 실험을 신속하고 정확하게 수행할 수 있도록 장비를 구성하고자 하였으며 현장 검증 실험을 통해 제작된 장비의 성능을 점검하고 연약지반의 지반조사에 있어서 RSDMT 장비 및 물리탐사 기법의 적용성에 대해 고찰하였다.

2. RSDMT 장비의 제작

CPT 및 DMT는 유압기 등을 이용하여 시험기 본체를 지중으로 관입하면서 시험을 수행하기 때문에 비교적 지반의 교란 정도가 덜한 상태에서 깊이별로 연속적인 지반 정보를 획득할 수 있다. 또한 시험기 본체 상부에 다른 종류의 측정 모듈을 부착함으로써 하이브리드 장비를 구성하기에 유리하다. 상기 두 개의 관입 시험 중에 DMT를 하이브리드 장비의 기반이 되는 원위치 시험으로 선택한 이유는 다음과 같다. CPT의 관입 저항치는 그 절대치로써 의미를 가지기 위해서는 규정된 관입속도(2cm/sec)를 어느 정도 유지해야 하지만 전문관입장비를 사용하지 않을 경우 지반의 강도가 지속적으로 변화하는 가운데 관입 속도를 일정하게 해 주는 것이 매우 어렵다. 또한 탄성과 속도 측정을 위해서도 관입을 중단해야 하므로 너무 자주 관입을 중단하는 문제가 있다. 반면에 DMT는 관입속도와 무관하게 20~30cm 간격으로 실험이 진행되며 관입이 안 될 경우 타격을 통한 관입도 제한적으로 허용된다. 또한 DMT 수행 간격과 동일하게 탄성과 속도 및 전기비저항 측정을 할 수 있어 상관관계 도출을 위한 D/B 구축에 유리하다. DMT는 지반의 응력 및 밀도 변화 등에 대한 민감도가 CPT에 비해 뛰어나다고 알려져 있으며 반복성이 좋고 강도 및 변형 특성 측면에서의 지반 정수를 동시에 도출하므로 다양한 측면에서 하이브리드 장비로의 적용에 적합하다. 구축된 RSDMT 수행 시스템의 전체적인 개요를 그림 1에 도시하였다.

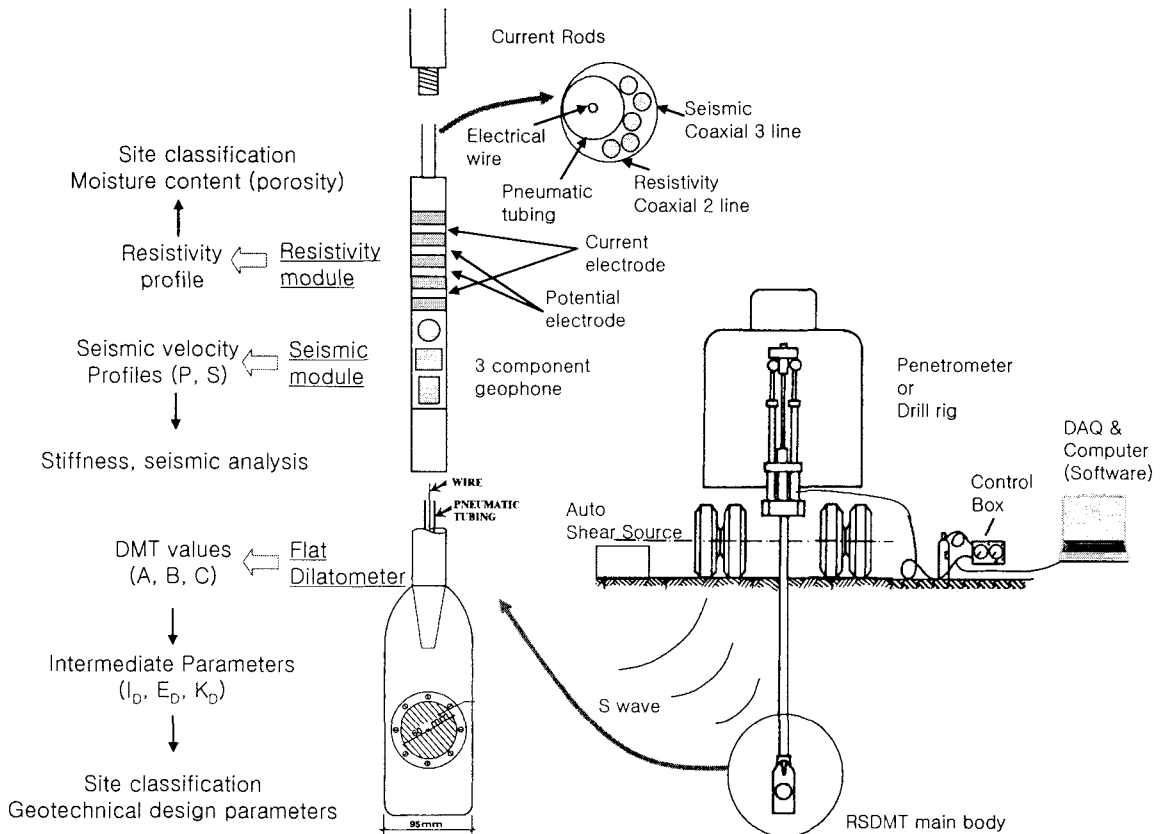


그림 1. RSDMT 장비 시스템의 개요도

크게 RSDMT 장비의 본체와 관입장비, 그리고 각 부분별 제어측장비 및 결과 해석 프로그램 등으로 구성되어 있다. DMT 블레이드 상단에 다운홀 시험을 위한 감지기 및 전기비저항 측정용 전극 배열을 탑재하는 방식으로 시험기 본체를 구성하였다. 유압장비로 시험기를 시험 심도까지 관입한 뒤 DMT, 전기비저항 측정, 다운홀 탐사의 순서로 전체적인 시험을 수행한다. 하나의 시험 심도에서 여러 가지 측정을 해야 하므로 신속함이 요구되고 모든 각 부분별 결과의 신뢰성을 증대시키기 위해서 현장 실험 수행 및 결과 해석 과정을 자동화 하고자 하였다. 각 모듈별 특징 및 상세한 구성 방식을 다음 각 절에 소개하였다.

2.1 Flat Dilatometer

DMT 시험 장비는 크게 시험기 본체(blade)와 전기신호라인을 포함한 공압라인(pneumatic tubing with electrical wire), 공압 조절 상자(air control box), 가스통(Nitrogen can) 등으로 구성된다. 지반 내로 시험기를 관입시키고 측면의 60mm 직경의 원형 멤브레인(membrane)을 1.1mm 외부로 변형시키는데 필요한 압력을 측정하는 방식으로 실험이 수행된다. 이 측정값으로 DMT 계수(intermediate parameter)로 불리는 I_D , K_D , E_D 값 및 간극수압 관련 값을 도출하고 이 값을 바탕으로 지반 분류 및 강도, 변형 계수 등의 다양한 지반 설계 정수를 도출할 수 있다(Marchetti 등, 1980). DMT는 시험 수행이 간편하여 자동화 비용에 비해서 얻는 효과에 적어 기존 방식대로 사용하였으며 여러 문헌에 널리 소개되어 있으므로 상세한 설명은 생략하였다.

2.2 전기비저항 측정 모듈

암반에서는 전기가 주로 간극에 존재하는 지하수를 통해 전달되기 때문에 암반의 전기비저항은 간극수의 전기비저항, 간극률 및 포화도와 관계되어 있다. 따라서 암반 파쇄대를 규명하는데 매우 유용하게 적용된다. 토사 지반에서는 토사 입자 자체로 전기가 어느 정도 통과하기 때문에 간극과 관련된 요인들과 복합적으로 작용한다. 일반적으로 특정 심도에 오염물질, 해수 등이 유입되지 않았다면 간극수의 전기 전도도는 동일 부지에서 거의 유사하다고 볼 수 있다. 그러므로 특정 지반에 대한 지하수의 전기 전도도 특성 및 토질의 전기적 특성을 어느 정도 파악하면 현장 실험을 통해 획득한 전기비저항 값을 이용하여 토질 분류나 함수 특성 등의 지반상태 평가가 가능하다. 전기비저항의 측정은 여러 가지 방법이 있지만 일반적으로 2개의 전극으로 전류를 흘려주고 나머지 2개의 전극으로 일정 구간의 전위차를 측정하는 뒤 전극 배열에 따른 거리계수(geometric factor)를 적용하여 실제 지반의 전기비저항을 계산한다. 전극 배열은 여러 가지가 있으며 지반조건 등에 따라 적합한 전극 배열을 사용하여야 한다. 웨너 배열(Wenner array)은 신호 강도도 높으며 배열 수평 방향으로의 민감도가 좋아서 수평탐사에 사용한다(이태섭 등, 2002). 관입방식의 전기비저항 측정은 지표에서 수평탐사를 하는 것과 동일하므로 RSDMT 장비에 있어서 전기비저항 측정 모듈은 웨너 배열을 적용하였다. 관입으로 인한 교란 영역을 고려하면서도 지반의 국부적인 전기비저항을 측정하기 위해 전극 간격을 2.5cm로 하였다. 그림 2(a)에 RSDMT 시험기 본체를 조립하기 전에 본체를 구성하는 각 부품들을 나열한 사진 및 전기비저항 측정 모듈의 시스템 개요를 도시하였다. 전극과 전극 사이에는 강화 플라스틱으로 절연하여 충분한 강도 및 강성을 보장하면서 전극의 독립적 거동을 보장하였다. 전기비저항 모듈 중심은 강재료로 보강함으로써 관입력의 전달이 용이하도록 하였다. 전기저항을 측정해 주는 장비로 OYO사의 MiniOhm을 사용하였다. 전류 및 전압 전극에 각각 연결된 2개의 동축 케이블을 측정 장비에 연결하게 된다. 전류 전극에 전류를 흘려주고 전위 전극간의 전위차를 측정하여 화면에 표시하도록 되어 있다. 측정 장비의 실행 버튼 하나로 측정이 완료되므로 매우 간단하다.

전기비저항 탐사에서는 각 전극 배열의 형태에 따른 거리계수를 적용하여 지반의 전기비저항을 구하게 된다. 이러한 거리계수는 점전류원(point current source)을 가정한 상태에서 이론적으로 유도된다. 따라서 본 연구에서 사용한 링 형태의 전극에서는 웨너 배열의 거리계수 $4\pi a$ (여기서 a 는 전극간격)를 그대로 사용할 수 없다. Fukue 등(1998)은 콘 형태의 전기비저항 측정 모듈을 위한 전기비저항 계산식을 옴의 법칙(Ohm's law)에 근거하여 식 (1)과 같이 유도한 바 있으며 K 가 거리계수를 의미한다.

$$\rho = \frac{\pi^2}{2/(d+a) - 2/(d+2a)} (\Delta V/I) = K(\Delta V/I) \quad (1)$$

여기서 d 는 전극 지름, a 는 전극 간격, ΔV 는 측정된 전위차, I 는 적용된 전류이다. 본 장비는 지름이 5cm, 전극간격이 2.5cm이므로 거리계수인 K 값은 1.478이 된다. 하지만 실제로 콘 형태의 전기비저항

측정 모듈은 링 형태의 전극 및 절연체의 복잡한 거동으로 인하여 이론적으로 거리계수를 정확하게 도출하기 어려우며, 도출한다고 하여도 실제 현상과 다를 수 있다고 판단하여 검증이 요구되었다. 검증 실험은 대형 수조에 물을 가득 채운 뒤 염분농도를 달리하면서 전기전도도를 측정하고 동시에 본 장비로 값을 측정하여 비교하는 방식으로 수행하였다. 이러한 검증 실험은 전기장 형태를 왜곡시키지 않을 정도의 대형 수조가 요구되며 본 연구에서는 가로, 세로, 깊이가 각각 3m, 3m, 1.5m인 수조를 이용하였다. 전기전도도가 다른 총 8개의 실험 결과를 획득하였으며 그 결과를 그림 2(b)에 도시하였다. x축은 전기비저항 측정 모듈로 측정한 전압을 흘려준 전류로 나누어준 값이며 y축은 EC(electric conductivity) meter로 측정한 전기전도도를 전기비저항 값으로 변환한 것이다. 실험 결과는 선형 특성을 보이며 그 기울기가 거리계수를 의미한다. 검증 실험을 통해 획득한 거리 계수는 0.5274이므로 식 (1)을 통해 획득한 값과 많은 차이를 보인다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 전기비저항 측정 모듈의 형태가 복잡하여 이론과 실제 거동이 다르기 때문으로 판단된다. 따라서 실험적으로 도출된 값인 0.5274를 장비 고유의 거리계수로 결정하였으며 이 값은 본 장비에만 해당되는 값이다. 본 형태와 같은 전기비저항 측정 모듈에 있어서 거리계수에 대한 추가적인 고찰이 필요하며 현재 이론식의 적절한 유도 및 수치 모델링 등을 통해 수행 중에 있다.

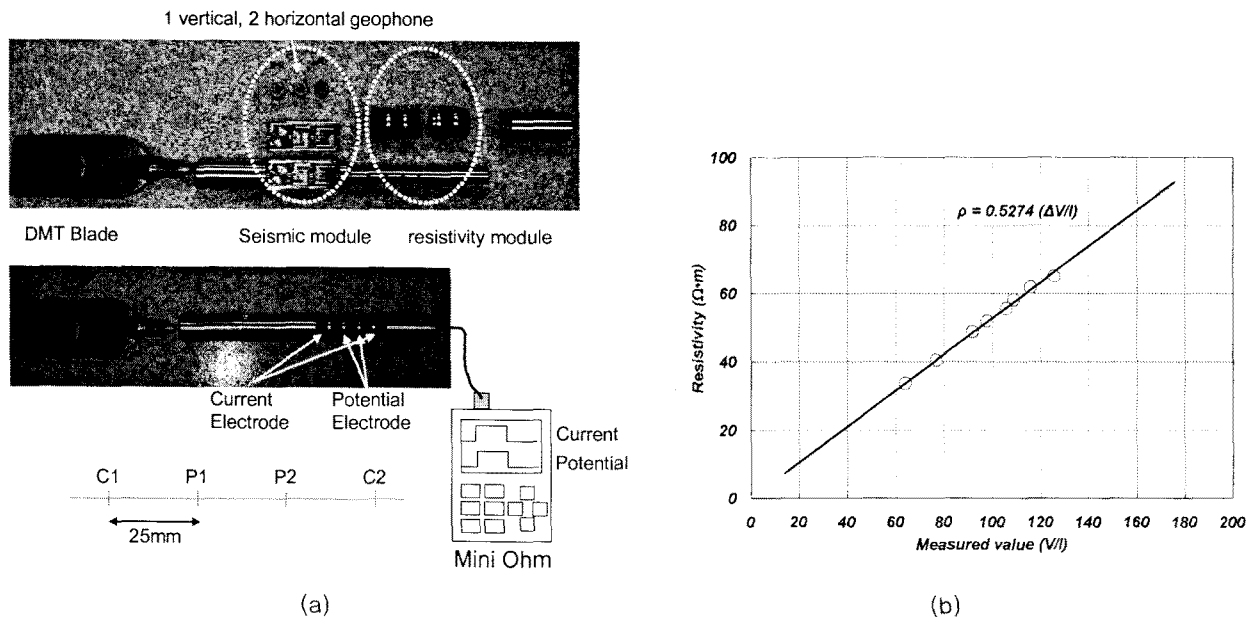


그림 2. RSDMT 장비의 전기비저항 측정 모듈. a) 본체의 부품도 및 전기비저항 측정 모듈의 시스템 개요, b) 거리계수의 실험적 도출

2.3 탄성과 속도 측정 모듈

RSDMT 장비에 있어 탄성과 속도 측정은 다운홀 탄성과 탐사 방식을 취하였다. 지표면 가진원에서 발생한 탄성파를 지중에 설치된 감지기로 감지하는 방식으로 현장 실험이 수행된다. 다운홀 방식은 시험기의 관입에 의해 발생하는 지반 교란을 무시할 수 있으며 관입식 감지기는 지반과의 접촉이 뛰어나 양질의 신호를 획득하는데 유리하다. SCPT, SDMT에서도 탄성과 속도 측정을 위해서 다운홀 방식을 취하고 있다. 본 연구에서는 전단파 속도 외에 압축파 속도 주상도도 도출할 수 있도록 3성분 속도계를 삽입한 감지기 모듈을 제작하였다. 측정이 단순하고 반복성이 뛰어난 다른 모듈에 비해서 탄성과 속도 측정은 정확한 값을 측정하기 매우 어려우며 결과의 반복성도 떨어진다. 지반 조건의 상이함이 아니라 실험상 문제로 인해 그 결과가 달라지면 관계식을 위한 D/B 구축 및 지반상태 평가를 위한 양질의 자료의 제공이 불가능하게 된다. 본 연구에서는 반복성 및 신뢰성 높은 결과를 제공하는 탄성과 속도 측정 모듈을 구축하기 위해 실험 수행 및 결과 해석 등 전체적인 과정을 자동화 하였다. 구축된 탄성과 속도 측정 시스템의 특징은 크게 다음과 같다. 지표면 자동 가진원, PC 기반의 신호 획득 장비, 그리고

적합한 운영 및 해석 프로그램이다. 그림 3에 자동 가진원 사진 및 운영 프로그램의 주화면을 포함하여 본 탄성과 탐사 측정 모듈을 통해 속도 주상도가 도출되는 과정에 대한 개요를 도시하였다.

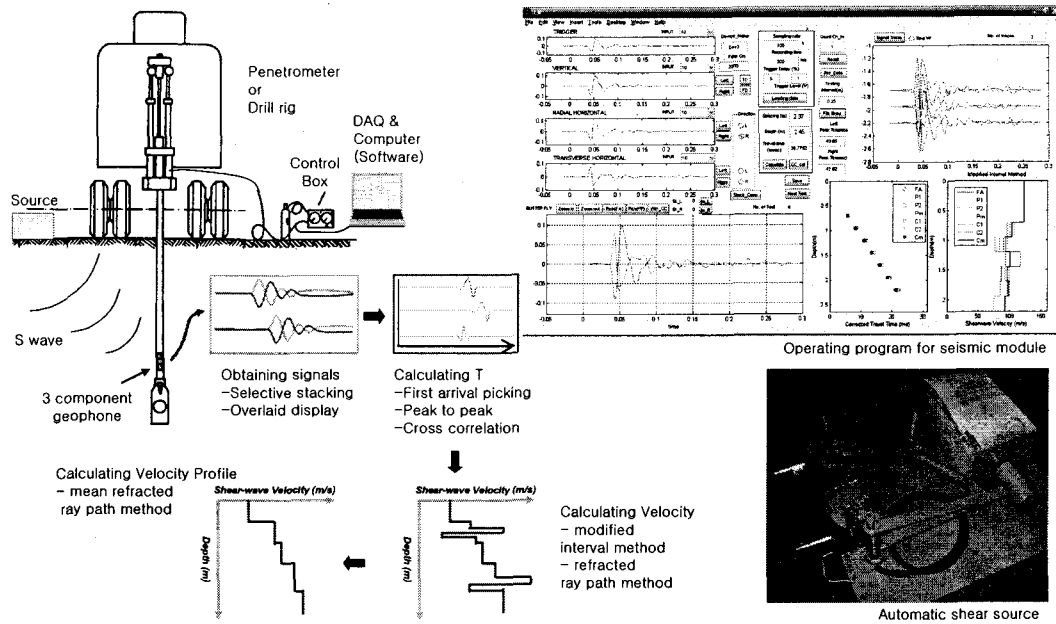


그림 3. RSDMT 시험 시스템의 탄성과 속도 측정 모듈을 통한 속도 주상도의 도출

본 연구에서 제작한 자동 가진원은 모터-스프링 해머 타격 방식으로 모터 제어기의 버튼 조작만으로 다운홀 시험을 위한 가진이 가능하다. 노동력을 대폭 줄일 수 있으며 동일 형태의 신호를 발생하므로 결과 해석에 유리하다. 다운홀 탄성과 탐사는 일반적으로 현장 실험과 결과 해석이 분리되어 있으며 보급되고 있는 신호 획득 장비들은 신호를 획득하는 데에만 초점이 맞추어져 있다. 본 연구에서는 노트북과 연결하여 사용이 가능한 자료수집 보드 및 MATLAB으로 코딩한 신호 획득 및 관리 프로그램을 통해 신호 획득 시스템을 구성하였다. 저비용으로 구성이 가능하며 다운홀 탄성과 탐사에 적합한 운영 프로그램을 통해 보다 손쉽게 현장 실험을 수행하고 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있다. 좌우 타격신호에 대한 동시도시가 이루어지며 이전 심도에서 획득한 신호에 대해서 선택적으로 중첩이 가능하여 획득한 파형을 비교 확인할 수 있어 효율적인 신호 획득 및 관리가 가능하다. 다운홀 획득 신호로부터 시간 정보 도출시 초동 인식(first arrival picking)보다는 극간법(peak to peak method)이나 상호상관법(cross correlation method)을 이용하는 것이 자동화나 결과의 신뢰성 측면에서 낫다고 알려져 있다(Liao, 2005; 방은석 등, 2007). 하지만 획득한 신호 형태가 매우 불량할 경우 초동 인식이 유리한 경우도 있다. 코딩된 운영 프로그램 상에서는 상기의 모든 방법으로 도달시간 정보를 도출할 수 있으며 속도 주상도가 동시에 계산되어 도시된다. 다운홀 결과 해석에 있어서는 프로그램 상에 기본적으로 시험간격별 속도 도출 기법 중 발전된 형태인 수정간법 및 굴절경로법을 이용하도록 하였다. 도달시간 정보 획득 및 심도 측정의 오차로 인하여 종종 속도 주상도의 형태가 의미 없이 증감하는 경우가 발생하므로 이러한 현상을 자동적으로 보정해 주는 평균 굴절 경로법(방은석 등, 2006) 또한 첨가되어 있다.

3. 현장 검증 실험의 수행

RSDMT 장비의 현장 적용성 평가를 위한 검증 실험을 수행하였다. 검증 부지는 남해안의 연약지반으로 향후 산업단지 조성을 위해 지반 개량공사가 진행될 곳이다. 기존 시추자료를 통해 본 부지는 사질토, 실트, 점토가 교차하여 퇴적 및 매립된 지반임을 확인할 수 있었으며 RSDMT 장비의 장점을 살려 현장 적용성을 평가하는데 아주 적합하리라 판단되었다. 해당 지점에 대해서 우선 실내 비교 실험을 위한 비교란 시료를 채취하였다. NX size thin wall tube를 이용하였으며 각 토층별로 총 10개를 채취하

였다. RSDMT 시험은 장비의 반복성을 검증하기 위해 2m 간격을 두고 총 2지점에서 수행하였다. DMT는 점토와 모래가 교차하는 상부는 25cm, 점성토가 균질한 하부는 50cm 간격으로 시험하였으며 전기비저항 측정 및 다운홀 시험도 동시에 수행하였다. 하나의 시험 심도에서 여러 가지 측정을 하게 되지만 개발된 RSDMT는 수행 과정이 대부분 자동화 되어 있어 소수의 인원으로도 신속하게 시험 수행이 가능하다. 또한 RSDMT 시험공으로부터 1m 떨어진 곳에서 피에조콘 관입시험을 실시하여 결과를 비교 검증하고 추가적인 고찰을 시도하였다. 마지막으로 해당 지점에서 SPT를 수행하여 상세한 층상구조 및 깊이별 N치를 획득하였다. 그림 4에 현장 실험 수행과 관련된 시험 부지의 개요 및 획득한 시추 주상도를 N치와 더불어 도시하였다. 추가적으로 현장 배인 전단 시험이 계획되어 있으며 비교란 시료를 이용한 각종 실내 실험이 진행 중에 있다. 이 외에 물리탐사 영상화 기법과의 연계성 연구를 위해서 현장 부지에 대해서 측선을 설정하고 탄성과 속도 영상을 위해서는 굴절법 탄성과 탐사, 표면파 탐사를 전기비저항 영상을 위해서는 DC 전기비저항 탐사 및 전자탐사를 수행하였으며 혹은 수행 예정에 있다. 시추 및 SPT로부터 본 부지는 기존 자료에서 확인한 바와 같이 다양한 토질이 교차로 퇴적 혹은 매립되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

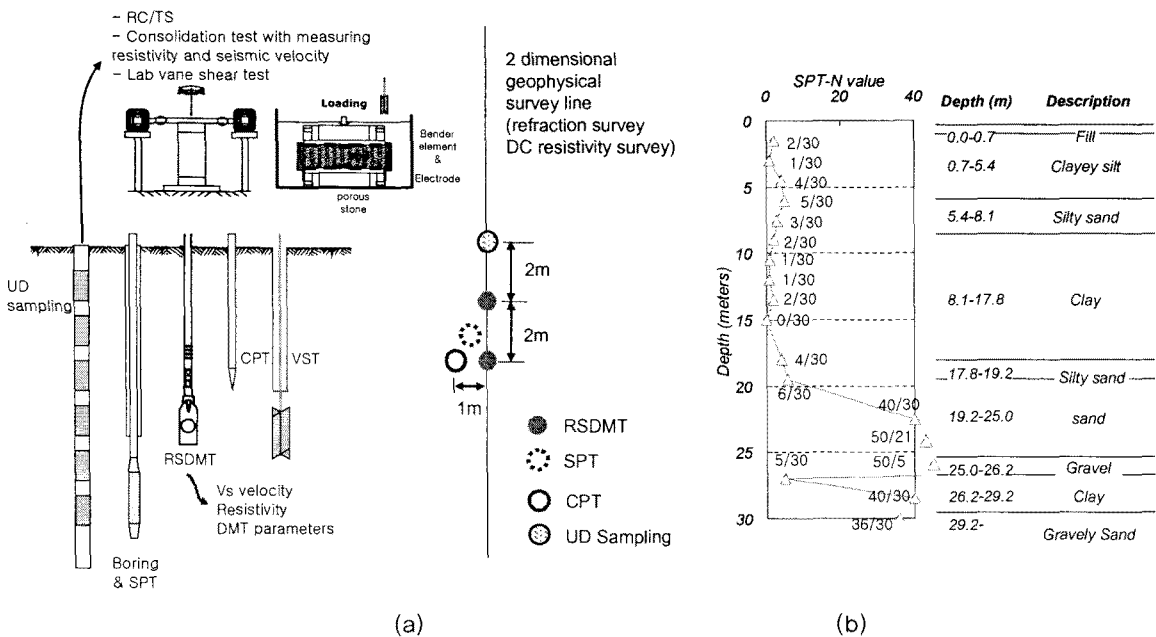


그림 4. 현장 시험 부지 개요 및 현장 시험 수행 장면과 시추 결과. (a) 검증 연구를 위해 수행된 혹은 수행 예정인 현장 실험과 실내 실험, (b) 시추 주상도 및 SPT-N치

그림 5에 두 번의 RSDMT 수행을 통해 획득한 깊이별 DMT 계측값, P_0 , P_1 , P_2 을 도시하였다. 두 번의 실험 결과가 비교적 일치하였으며 DMT의 반복성을 재확인할 수 있었다. 탄성과 속도 및 전기비저항 측정 모듈에 있어서도 반복성을 확인할 수 있었다(그림 6). 구성된 탄성과 속도 측정 시스템으로부터 그림 6(a)와 같은 매우 양호한 신호를 획득할 수 있었으며 이는 그림 6(b)와 같이 상세한 전단파 속도 도출로 이어졌다. 일반적으로 심도가 증가함에 따라 전단파 속도가 증가하고 있지만 다른 토질의 층이 교차함에 따른 속도의 증감이 있는 것을 볼 수 있다. 2회 실험에 대한 결과가 완벽하게 일치하지는 않지만 지반공학회 상호검증시험(방은석 등, 2007)에서 확인한 바와 같이 다운홀 시험을 통해 이정도 수준으로 상세하면서 반복성 있는 결과를 도출하기 쉽지 않으며 2회 결과 모두 층상 구조에 따라 동일한 추세로 전단파 속도가 변화하고 있는 것을 확인할 수 있다. 전기비저항 주상도의 경우 전반적으로 5Ω·m 이하의 낮은 비저항값을 보이고 있는데 이는 본 부지가 주로 해성퇴적층 및 준설매립토로 이루어져 간극수의 염분 농도가 높기 때문으로 판단된다. 해수의 영향이 더욱 두드러지는 기존 원지반 영역(약 6m 이하)에서는 2Ω·m 이하의 값을 보인다. 하지만 실트질 모래층과 점토층이 값의 차이를 보이며 구분되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 간극에 존재하는 염수가 전반적인 전기비저항 크기를 결정하지만 토사 상태에 따라서 전기비저항 값이 약간의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 전기비저항 값도 2회 결

과가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 이상의 결과에서 개발된 RSDMT의 각 모듈들이 모두 매우 우수한 반복성을 가지는 것으로 판단되며, 복합된 형태의 장비구성과 동일 깊이에서 연속된 실험에도 실험의 독립성을 보장하는 것을 알 수 있다.

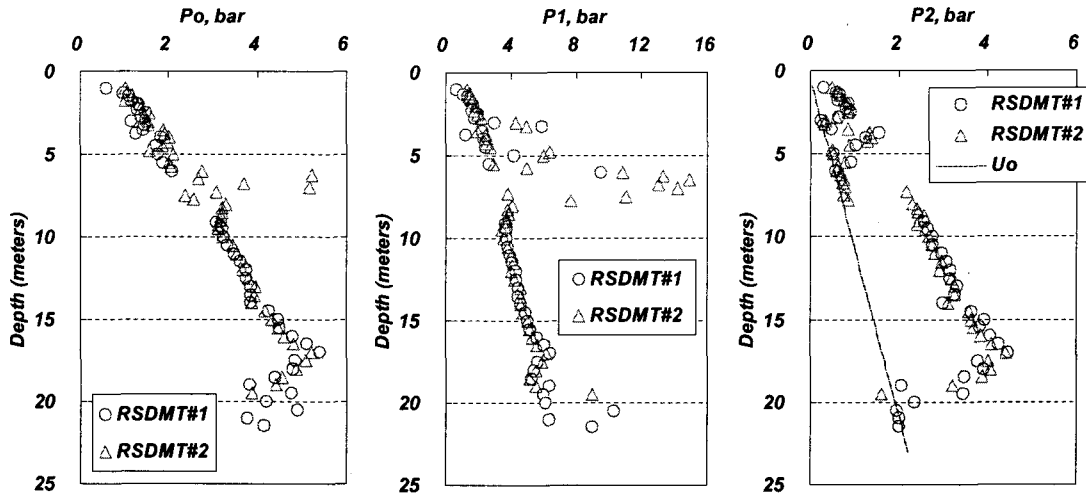


그림 5. 2회 수행한 RSDMT의 DMT 측정값 P0, P1, P2의 반복성 검증.

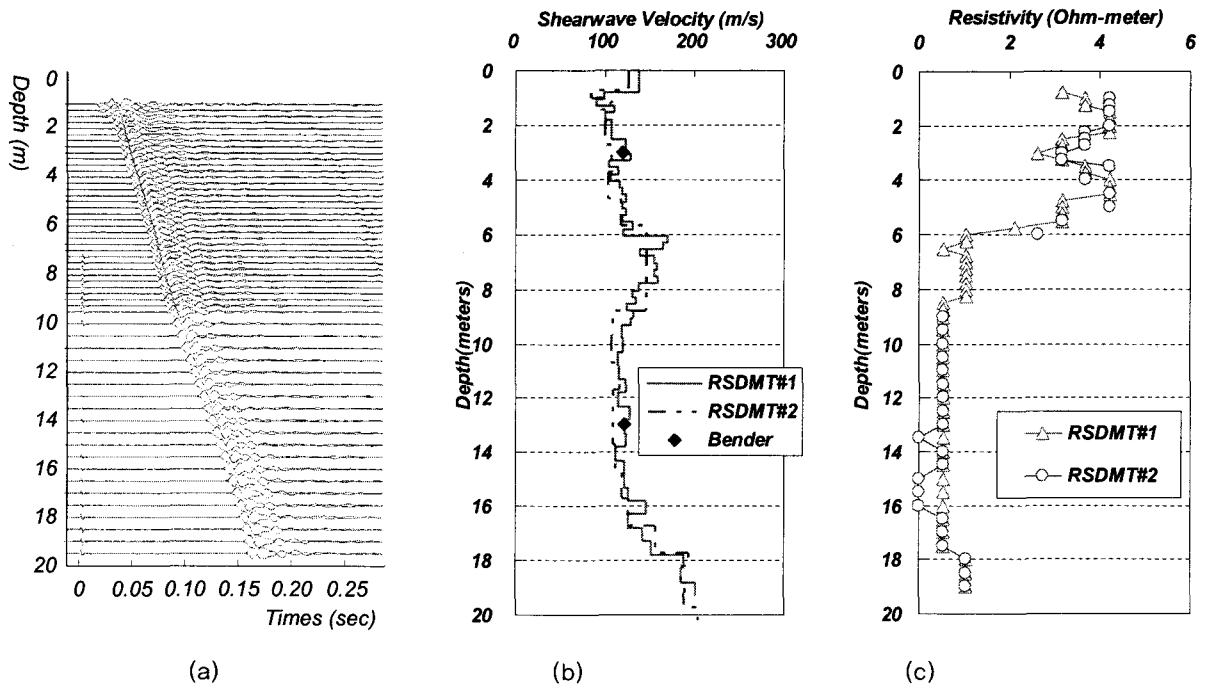


그림 6. 탄성파 속도 및 전기비저항 측정 모듈에 대한 실험 결과 및 반복성 검증 결과. (a) 깊이별 획득 신호, (b) 전단파 속도 주상도, (c) 전기비저항 주상도

그림 7은 DMT와 CPT의 결과를 비교한 것이다. DMT의 재료지수 I_D 값을 이용한 지반분류 결과는 전반적으로 시추 주상도와 일치하나 상부 점토질 실트층의 경우 점토와 실트가 교차하여 나타나는 것으로 추정하고 있다. 이는 상부 점토질 실트층의 준설 매립 시 재료의 침강속도에 따른 분리현상의 결과로 판단되며 시추 시에는 육안으로 구분하는 경우가 많아 명확하게 구분하지 못한 것으로 보인다. CPT를 통한 지반분류는 전반적으로 DMT 결과와 유사하지만 모래와 실트 구분에 있어서 다소 일치하지 않는 경우도 있다. 구속 탄성계수 M_{DMT} 값은 점토는 좀 작게 모래층은 좀 큰 경향을 보이고 있으며 최대 전단탄성계수를 의미하는 전단파 속도 주상도와 그 형태가 유사하다. 그림 7(c)-(e)는 기존 경험식들을 이

용하여 추정된 설계 정수들에 대한 비교로, DMT를 이용한 비배수전단강도(s_u)는 Marchetti(1980), Kamei와 Iwasaki(1995)의 제안식을 사용하였고 CPT는 순전단저항력($q_T - \sigma_{vo}$)을 이용하는 방법 ($s_u = (q_T - \sigma_{vo})/N_{KT}$ 이때 콘계수 $N_{KT}=11.5$ 적용)에 의해 계산된 비배수전단강도를 비교하였다. 상부와 하부에 위치한 모래질 지반을 제외하고는 대부분의 점토질 지반에서 비배수전단강도가 일치하는 것을 알 수 있다.

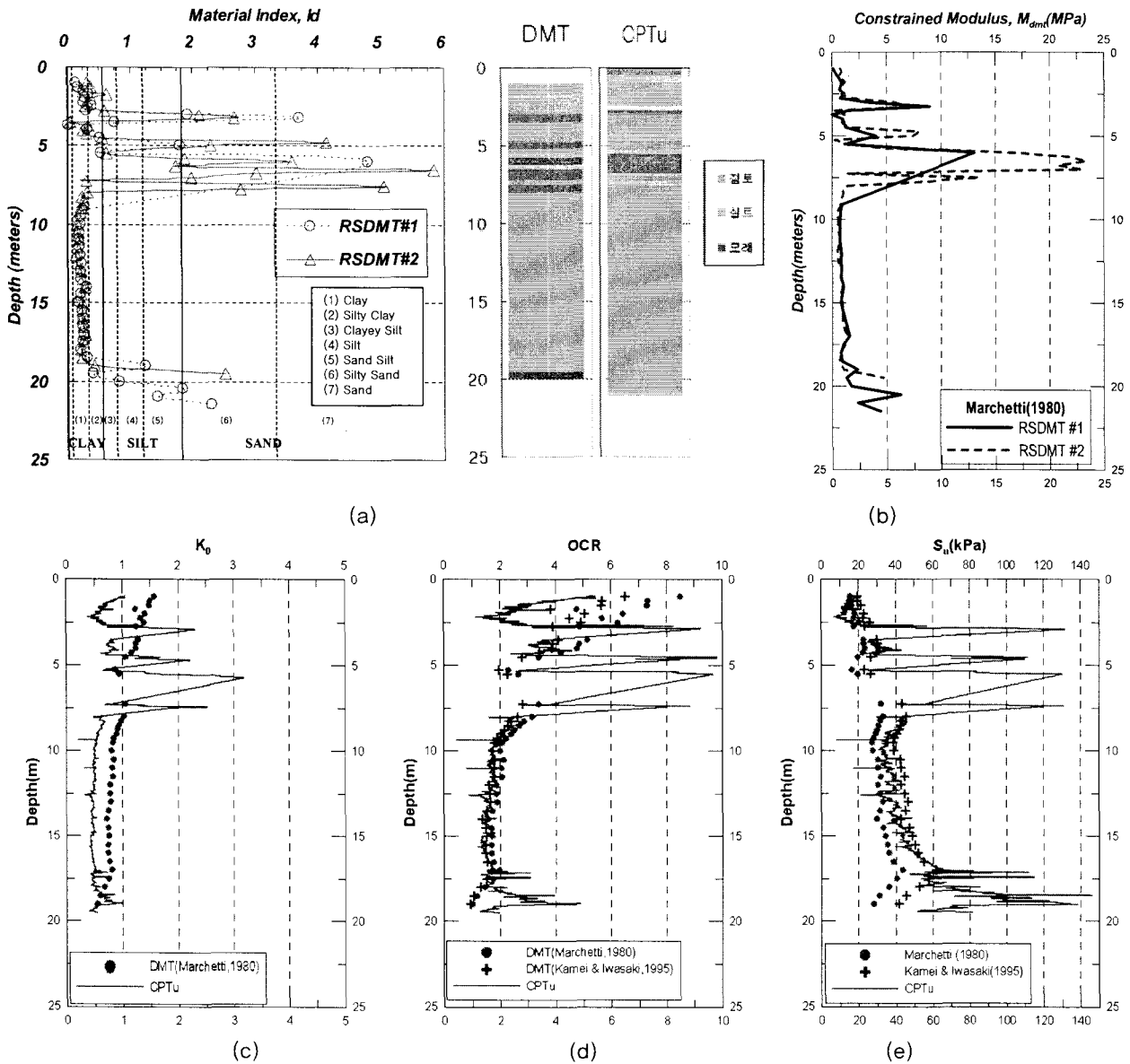


그림 7. DMT를 통한 지반 분류 및 지반설계정수의 도출 및 CPT 결과와의 비교. (a) ID 값을 이용한 지반 분류 및 CPT 지반 분류 결과와의 비교, (b) 지반 변형계수와 관련된 ED, (c) 정지토압계수, (d) 과압밀비, (e) 비배수 전단강도

정지토압계수(K_0)는 DMT의 경우 Marchetti(1980)의 제안식을 이용하였으며 피에조콘은 계산된 OCR로부터 정지토압계수를 추정하는 Mayne(1992)의 제안식을 이용하였다. 모래질 지층을 제외하고는 피에조콘은 0.5 전후의 전형적인 정지토압계수 값을 보이는 것으로 나타났으며 DMT를 이용한 결과는 약간 큰 경향을 보이고 있다. 과압밀비(OCR)는 DMT의 경우 Marchetti(1980), Kamei와 Iwasaki(1995)의 제안식을 사용하였고 피에조콘은 Lunne 등(1997)의 제안한 식을 사용하였다. 추정된 과압밀비는 하부로 갈수록 줄어들어 정규압밀상태에 근접하는 것으로 나타났으나 상부에서는 약간 과압밀된 경향을 보이고 있다. RSDMT에서 추정된 값들은 불균질한 상부에서는 25cm 간격으로, 비교적 균질한 하부에서

는 50cm 간격으로 수행되었음에도 불구하고 1cm 간격으로 자료를 획득하여 분석이 가능한 피에조콘 결과와 매우 유사한 결과를 제공하는 것으로 나타났다. 이상의 결과에서 개발된 RSDMT장비는 지반의 비저항값, 탄성파속도 등을 연속적으로 관측하면서도 DMT 시험을 지장 없이 수행할 수 있는 것으로 나타나 개발된 장비를 이용하여 한번의 시험으로도 보다 많은 지반정보를 얻을 수 있으며 추후 지속적인 상호관계에 대한 연구를 통하여 보다 신뢰성 있게 지반을 상호평가 할 수 있는 가능성을 가진 것으로 판단된다.

4. RSDMT 장비 적용성에 대한 고찰

RSDMT 장비는 각각의 모듈로 획득한 값들을 독립적으로 사용할 수 있으며 또한 각 결과를 조합하여 사용함으로써 독립적으로 획득할 수 없거나 도출에 신뢰성이 떨어졌던 지반 정보를 효율적으로 획득하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 보인다. 본 장에서는 본 검증 실험을 바탕으로 RSDMT 장비 적용 가능 분야에 대해서 고찰하여 보았다.

4.1 토질 분류에의 적용

딜레토미터 시험에서는 I_D 계수를 이용하여 토질 분류를 수행하고 있다. 하지만 경험식에 근거한 것으로 때로는 실제 지반과 다른 결과를 낼 수도 있으며 특히 지역적 특성에 따라 토질 분류를 결정짓는 경계가 다를 수 있다. 전기비저항은 토질 종류에 따라 그 값의 범위가 다르다. 일반적으로 점성토의 경우 1-100 Ω m, 사질토의 경우 100 Ω m 이상이다. 본 현장은 해수의 영향으로 인하여 전반적으로 작은 값을 보이지만 실트질 모래층과 점성토의 경계에 따라 그 값이 달라지는 것을 볼 수 있다. 탄성과 속도는 토질 종류와는 무관하지만 층상 구조의 변화에 따라 속도 변화가 존재하는 경우가 많다. 따라서 RSDMT 시험을 통해 나오는 결과를 종합적으로 판단할 경우 토질 분류에 있어서 더욱 합리적인 결론을 도출할 수 있을 것이라 판단된다. 실제로 I_D 계수를 통해 지반 분류한 결과를 보면 대부분 시추 주상도와 유사하지만 원지반 점토층과 하부 실트질 모래층의 경계(지표면 하 18m)를 규명하는데 있어서 시추 주상도와 다른 것을 볼 수 있다. 하지만 전기비저항 및 전단파 속도 주상도에서는 18m에서 층상의 변화가 있음을 유추할 수 있다.

4.2 지반의 비선형 변형 특성 도출에의 적용

지반의 비선형 특성은 현장 탄성과 탐사 및 실내 공진주/비틀전단 시험과의 결합을 통해서 도출되거나 문헌을 참고하여 비선형 특성 곡선을 선택하기도 한다. RSDMT를 통해서도 시추를 수행하지 않고 또한 실내 실험을 동반하지 않고도 지반의 비선형 특성의 파악이 어느 정도 가능하다. RSDMT 결과 값들을 바탕으로 지반분류를 정확히 할 수 있어 토질 종류에 따른 G/G_{max} 감소 곡선 후보들을 문헌으로부터 선택할 수 있다. 탄성과 속도 측정 모듈을 통해 획득한 G_{max} 값으로 실제 감소 곡선을 완성한 뒤 DMT 구속 탄성계수인 M_D 값을 이용하여 중간 변형율(0.05-0.1%)에서의 전단탄성계수 값을 추정함으로써 여러 후보 곡선들 중 하나를 선택할 수 있다(Marchetti, 2004). 지금 비교란 시료를 이용하여 공진주/비틀전단시험을 수행중이며 RSDMT를 통해 유추한 비선형 특성 곡선과 비교할 예정이다.

4.3 지표면 물리탐사 기법과의 조합 그리고 다차원적 지반 개량 평가

물리탐사 기법은 비파괴적으로 지반을 영상화 할 수 있다는 장점이 있지만 그 결과의 신뢰성에 대해 의문을 가지는 경우가 많다. 전기비저항 및 탄성과 탐사는 현장 실험의 제한적 요소 및 역산 해석 기술의 한계로 인하여 심도가 깊어질수록 결과의 신뢰도가 떨어진다. RSDMT는 심도에 상관없이 비교적 신뢰성 있는 결과를 획득할 수 있으므로 지표면 탐사 결과를 검증하는데 사용할 수 있다. 그림 8은 본 시

험 부지에서 수행한 지표면 전기비저항 탐사 결과이다. 그림 6(c)의 RSDMT 결과와 비교하여 볼 때 그 경향과 값이 유사한 것을 볼 수 있다. 6m 근방에서 상부 준설 매립지반과 하부 원지반이 구분되며 원지반 점토에서 최저값을 보이다가 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. RSDMT를 수행한 한 지점에 대해서 그 결과가 서로 유사하다면 영상 전체에 대해서 어느 정도 신뢰성을 가진다고 할 수 있다. 또한 역산 해석 수행 시 초기 모델로 RSDMT 결과를 사용함으로써 결과의 신뢰도를 한층 더 올릴 수 있다고 판단된다. 탄성과 탐사의 경우에도 유사하게 활용할 수 있다. 현재 본 부지에서는 PBD 시공 및 성토를 통한 지반 개량이 계획되어 있다. DMT 자체만으로도 지반 개량 평가에 뛰어난 성능을 보이지만 최근 전단파 속도를 이용한 지반 개량 평가에 관심이 높아지고 또한 물리 탐사 영상화 기법의 지반공학적인 적용 노력이 증대되는 것에 발맞추어 RSDMT와 물리탐사 영상화 기법간의 조화를 통하여 합리적인 연약 지반 개량 평가를 하고자 한다. 주기적으로 각 시험을 수행하고 종합적으로 분석함으로써 성토체 두께, 압밀도, 불균등 압밀 지역, 강도 증가 정도 등을 다차원적으로 추정할 수 있으리라 생각된다.

(2-D Resistivity Structure)

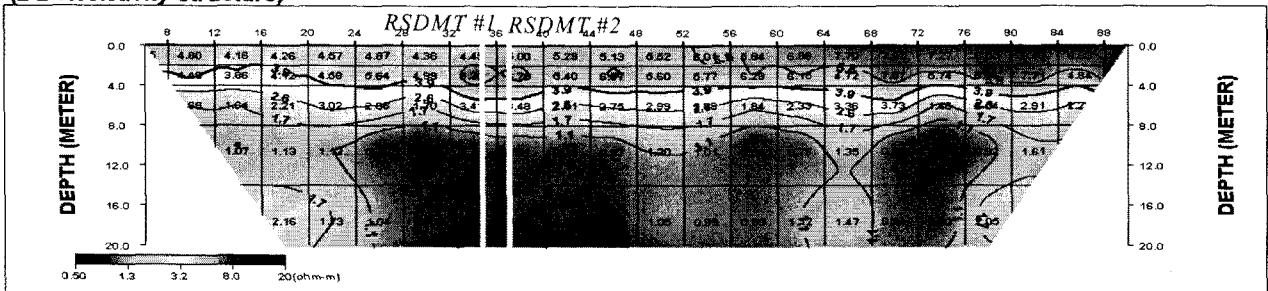


그림 8. 지표면 전기비저항 탐사 결과 (측선에 대한 2차원 단면)

4.4 하이브리드 실내 시험 장비의 검증, 시료 교란도 평가 및 상관관계를 위한 D/B 구축

최근 실내 실험에서도 기존 지반 물성 측정 장비에 전기비저항 및 탄성과 속도를 측정하는 장치를 첨가한 하이브리드 형태의 장비가 많이 사용되고 있다. 현장에서 채취한 시료는 교란된 경우가 많아 잘못된 실험 결과가 도출되기도 한다. 실내 실험 장비 내에 전기비저항 및 탄성과 속도 측정 시스템을 검증하거나 시료의 교란 정도를 평가하는데 있어 RSDMT 장비가 사용될 수 있으리라 본다. RSDMT로부터 획득한 현장 지반의 전단파 속도 및 전기비저항 값과 비교한 시료에 대해 전기비저항 값과 탄성과 속도를 측정하여 동시에 비교해 봄으로써 교란 정도를 평가하고 실내 실험을 수행에 있어 초기값에 대해 고찰하는데 도움이 되리라 판단된다. 탄성과 속도는 입자간 응력 등과 전기비저항은 함수비 등과 관련되어 있어 교란 정도의 지표가 될 수 있다. 본 부지 3m, 13m 지점에서 채취한 시료의 전단파 속도(벤더 엘리먼트 이용)는 각각 120m/s, 122m/s였는데 이는 RSDMT로 도출한 전단파 속도와 거의 동일한 것으로 채취한 비교란 시료의 상태가 매우 양호한 것을 확인할 수 있었다(그림 6b). DMT의 경우 Marchetti가 제안한 식을 그대로 사용하고 있는데 DMT를 더욱 신뢰성 있게 현장에 적용하기 위해서는 우리나라 지반특성에 맞는 경험식을 산출하는 것이 요구된다. 이러한 상관관계 도출시 신뢰성 있는 D/B는 필수적이다. 또한 물리탐사 영상화 기술로 지반 설계 정수를 도출하기 위한 가장 손쉬운 방법은 합리적인 상관관계를 이용하는 것이다. 이러한 측면에서 RSDMT와 같은 하이브리드 장비는 매우 유리하다.

그 외 액상화 평가를 포함한 내진 해석, 함수비 및 해수침투 평가 등 각 모듈별 결과를 개별적으로 이용하거나 종합적으로 이용하는데 있어 RSDMT 장비의 적용 분야는 확대 될 수 있으리라 생각된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 기존 DMT 장비에 전기비저항 및 탄성과 측정 모듈을 부착한 RSDMT(Resistivity Seismic Dilatometer) 장비를 제작하고 검증하였다. 제작된 장비의 현장 검증 실험을 수행하였으며 이를 통해 적절한 장비 구성 여부를 확인할 수 있었다. 다양한 현장 실험 및 실내 실험을 수행하여 결과

를 비교하고 적용성에 대해 고찰하였다. 동시에 서로 다른 여러 가지 지반 정보를 획득할 수 있는 RSDMT 장비는 실내 시험 및 물리탐사 영상화 기술과 연계를 통해 지반을 종합적으로 평가할 수 있으리라 판단된다. 하이브리드 장비를 효율적으로 운영하기 위해서는 제대로 된 시스템을 구축하는 것이 바람직하며 본 연구에 있어서도 하드웨어 개선과 더불어 통합 운영 및 해석 프로그램을 개발할 예정에 있다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 전문연구사업인 '지하 정밀 영상화 융합기술 개발' 과제의 일환으로 수행되었으며 적극적인 현장 지원을 해 주신 현대건설 관계자분들께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 김정호, 이명종(2006), 시간에 대해 변화하는 지하구조에서 획득한 물리탐사 자료의 역산, **2006년 대한지구물리학회 한국물리탐사학회 공동 학술 대회 논문집**, 대전대학교, pp. 117-122
- 방은석, 김동수, 김기석(2007), 상호검증시험을 통한 효율적인 다운홀 탄성과 기법 수행 시스템의 구성, **한국지반공학회 논문집**, 제23권 4호, pp. 133-147.
- 방은석, 김동수, 윤종구(2006), 다운홀 시험에서 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도 도출을 위한 해석 기법의 개선, **대한토목학회 논문집**, Vol. 26, No. 3c, pp. 157-170.
- 방은석, 이세현, 김종태, 김동수(2007), 다운홀 기법에서 신뢰성 있는 도달시간 정보 산출 방법에 대한 고찰, **한국지반공학회 논문집**, 게재 예정
- 이태섭 등(2002), 물리탐사 실무 지침, 전기탐사, 한국물리탐사학회, pp. 111-128
- Fukue, M., Minato, T., Matsumoto, M., Horibe H. and Taya N.(2001), Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers, *Engineering Geology*, 60, 361-369.
- Kamei, T. and Iwasaki, K.(1995), "Evaluation of underdrained shear strength of cohesive soils using a Flat Dilatometer" *Soils and Foundations*, Vol. 35, No. 2, June, 111-116.
- Lunne, T., Robertson, P.K., and Powell, J.J.M.(1997), *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic and Professional, p. 312.
- Liao, T.(2005), "Post processing of cone penetration data assessing seismic ground hazards, with application to the new madrid seismic zone", *Ph. D. dissertation*, Georgia Institute of Technology.
- Marchetti, S.(1980), "In situ tests by flat dilatometer", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, 106, GT3: 299-321.
- Marchetti, S.(2004), *Seismic dilatometer*, (SDMT information 1.1MB), downloadable from www.marchetti-dmt.it.
- Maugeri, M. and Monaco, P.(2006), "Liquefaction Potential Evaluation by SDMT", *Proc. Second International Conf. on the Flat Dilatometer*, Washington D.C., 295-305.
- Mayne, P.W.(1992). Discussion of "Interpretation of OCR from In Situ Tests in Recent Clay Deposits in Singapore and Malaysia", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29 (1), pp. 166-167. ,
- Mayne, P. W.(2000), "Enhanced Geotechnical Site Characterization by Seismic Piezocone Penetration Tests", Invited Lecture, *Fourth International Geotechnical Conference*, Cairo University, 95-120.