## 협재층 탐지를 위한 선단비저항 콘

## **Cone Resistivity Penetrometer for Detecting Thin-Layered Soils**

윤	형	$\overline{\mathcal{P}}^{1}$	Yoon, Hyung-Koo	정	순	혁²	Jung, Soon-Hyuck
김	래	현³	Kim, Rae-Hyun	٥	종	섭4	Lee, Jong-Sub

#### Abstract

The thin-layered sand seam in clay affects the soil behavior. Although the standard cone penetrometer (A:  $10 \text{ cm}^2$ ) have been used to evaluate the thin-layered soil, the smaller diameter cone penetrometer have been commonly recommended because of the high resolution. The purpose of this study is the development and application of the Cone Resistivity Penetrometer (CRP), which detects qc, fs, and electrical resistivity at cone tip for the evaluation of thin layered soils. Two sizes of the CRP are developed for the laboratory and field test. The projected areas of CRP for the laboratory and field tests are 0.78 cm<sup>2</sup> (d: 1.0 cm) and 1.76 cm<sup>2</sup> (d: 1.5 cm), repectively. The length of friction sleeve is designed in consideration of ratio of the projected area to the friction sleeve area. The application tests are carried out by using the artificially prepared thin-layered soils in the laboratory. In addition, the field tests are conducted at the depth of 6 to 15 m in Kwangyang. In the laboratory test, the measured electrical resistivity and cone tip resistance detect the soil layers. Moreover, in the field test the CRP investigates the three thin-layered soils. This study suggests that the CRP may be a useful tool for detecting thin-layered in soft soils.

### 요 지

점토층 사이에 존재하는 모래 협재층은 연약지반 거동에 중요한 영향을 미친다. 협재층은 주로 표준 콘(단면적: 10cm<sup>2</sup>)에서 측정된 지반의 저항력과 간극수압 값을 이용하여 평가하고 있지만, 높은 해상도를 위하여 소형 콘이 널리 활용되고 있다. 본 논문의 목적은 연약지반에 얇게 분포된 협재층을 선단저항력, 주면마찰력 그리고 전기비저항을 이용하여 평가할 수 있는 전기비저항 콘(Cone Resistivity Penetrometer, CRP)을 개발하고 적용하는 것이다. CRP는 각각 실내실험(단면적: 0.78cm<sup>2</sup>, 직경: 1.0cm)과 현장실험(단면적: 1.76cm<sup>2</sup>, 직경: 1.5cm)에 활용되도록 제작하였으며, 길이는 표준 콘(단면적: 10cm<sup>2</sup>, 직경: 3.57cm)의 단면적과 마찰부의 면적비를 고려하여 제작하였다. 실내실험은 모래 와 점토가 반복적으로 조성된 다층의 층상탐지 셀을 사용하여 각 지층의 경계면을 탐사하였으며, 현장실험은 광양지 역에서 심도 6m부터 15m까지 관입실험을 수행하였다. CRP는 실내실험에서 측정된 선단저항력과 전기비저항으로 조성된 시료의 각 지층 경계면을 뚜렷하게 평가하였으며, 현장실험에서는 3개의 협재층을 탐지하였다. 본 연구에서 개발된 CRP는 실내 및 현장결과 적용성이 뛰어나 추후 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

Keywords : Cone tip resistance, Electrical resistivity, Field test, Friction sleeve, Smaller diameter cone, Thin-layered soil

<sup>1</sup> 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Ph.D Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

<sup>2</sup> 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

<sup>3</sup> 정회원, 포스코컨설 토목기술그룹 대리, 공학박사 (Member, Assistant Manager, Ph.D, Civil Engrg. Group, POSCO Engrg. & Construction Co., Ltd.)

<sup>4</sup> 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., jongsub@korea.ac.kr, 교신저자)

<sup>\*</sup> 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서 론

다양한 침식, 풍화 그리고 퇴적작용으로 형성된 연약 지반은 구성조건에 따라 다양한 특성과 구조를 가지고 있다. 연약지반의 점토층은 수 mm 이내의 두께로 모래와 실트 층이 존재하며, 이를 샌드심(sand seam) 혹은 협재 층(thinly layered soil)이라고 한다. 이런 협재층은 수평 방향뿐만 아니라 수직방향으로 형성되어 비균질 및 비등 방성의 복잡한 구조를 나타낸다(한국지반공학회 2005).

협재층은 주로 대표적인 현장 지반조사 실험 방법중 의 하나인 콘관입시험(Cone Penetration Test: CPT)을 이 용하여 탐지하고 있다(Lunne et al. 1997). 그러나, 직경 이 3.57cm이고 단면적이 10cm<sup>2</sup> 인 표준 콘 관입 장비의 경우 관입 시 주변 지반이 이동하거나 관입 방향으로 압 축되는 등 교란 현상이 크게 나타난다. 이러한 교란효과 는 입자의 전단변형 파괴를 유발하고 원지반 강도를 감 소시켜 대상 지반의 정확한 거동 특성을 파악하기 어렵 게 만든다(Hird et al. 2003). 이와 같은 이유로 교란 발생 효과가 작고 해상도가 뛰어나도록 직경이 작은 소형 콘 들이 개발되었으며 수치해석, 실내 실험, 그리고 현장실 험을 이용하여 장비의 적용성이 평가되었다(Threadwell 1976; Lunne et al. 1997; Hird et al. 2003; Ahmadi and Robertson 2005; Hird and Springman 2006; 김래현 등 2008; 윤형구 등 2008; 이종섭 등 2008; Yoon et al. 2009). 협재층을 탐지하기 위해 개발된 소형 콘들은 직경 이 표준 콘 관입 장비보다 작기 때문에 부착되는 센서의 크기도 콘의 직경에 맞도록 작아져야 하는 제약이 있다. 이와 같은 이유로 초소형의 전기저항식 변형률계(strain gauge)를 이용하여 지반의 저항력을 측정해야 한다.

전기비저항 탐사는 일정하게 가해진 전류에 의해 생 성된 전위차를 이용하여 대상물의 저항을 측정하는 방 법이다. 전기비저항 탐사는 해상도가 뛰어나 지층의 구 조, 설계정수 산정, 오염 물질의 존재 여부, 그리고 지반 의 현장 상대밀도 평가 등에 다양하게 활용되고 있다 (Horsnell 1988; Campanella and Weemees 1990; 김준한 등 2009). 주로 콘 후면에 전기비저항 측정 장치(module) 가 부착된 롯드(rod)를 연결하여 콘 관입 실험을 수행하 면서 전기비저항을 측정한다. 그러나 후면에 설치된 측 정장치는 콘과 롯드의 관입에 의해 이미 교란이 발생한 지반의 상태를 평가하기 때문에 측정 값의 신뢰성이 떨 어진다는 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 김준한 등 (2009)은 선단부에서 전기비저항 측정이 가능한 전기비 저항 콘 프로브(Electrical Resistivity Cone Probe, ERCP) 를 개발하였으며, 이를 이용하여 다양한 현장의 전기비 저항 특성 분포를 평가하였다.

본 연구의 목적은 협재층을 탐지하기 위하여 개발된 변형률계 타입의 소형 콘에 전기비저항 탐침을 선단부 에 설치하여 강도와 전기비저항 탐사가 가능한 장비 (Cone Resistivity Probe: CRP)를 개발하는 것이다. 본 논 문에서는 협재층을 탐지하기 위하여 기존에 개발된 소 형 콘 관입 장비의 연구결과와 전기비저항 탐사 기법의 배경이론에 대하여 기술한 뒤 본 연구에서 개발한 CRP 의 개발과정, 장비형상 및 특징에 대하여 서술하였다. 개발된 장비의 검증을 위하여 수행한 실내 층상 탐지 실험과 현장실험에 대한 내용 및 결과도 기술하였으며, 현장 실험의 경우 표준 콘 관입 장비에서 획득한 결과와 비교하여 장비의 신뢰성을 평가하였다.

## 2. 기존 연구 동향

#### 2.1 콘 관입 장비

콘 관입 장비는 연속적인 관입으로 대상지반의 관입 저항치(선단저항력 및 주면마찰력)와 간극수압을 측정 하기 위해 사용되며, 신뢰성 높은 데이터 측정으로 인하 여 다양한 지반에서 지반조사와, 협재층 탐지등에 활용 되고 있다. 특히 협재층 판별은 주변 지반의 강도와 지 층의 두께 등과 같이 다양한 요소에 영향을 받기 때문에 수많은 연구가 수행되어 오고 있다.

Threadwell(1976)은 지반 특성이 다른 연속적인 두개 의 지층에서 측정된 콘 관입 저항치를 수치해석적으로 분석하였으며, 원지반과 특성이 다른 협재층이 존재 할 경우 지층의 강도차이로 인하여 콘 저항치를 이용한 지 층분류는 어렵다고 제안하였다. Lunne et al.(1997)은 Threadwell(1976)의 연구 결과를 실험적으로 재 정립하 고자, 경계면의 지층 강도에 따라 콘 관입 저항치의 영 향범위를 평가하였다. 경계면에서 강성이 작아지는 경 우는 측정값의 영향범위가 콘 직경의 2~3배보다 작게 나타났으며, 반대로 경계면에서 강성이 커지는 경우는 콘 직경에 10~20배 정도로 영향범위가 커지는 것을 보 여주었다. 이와 같은 이유로 단면적이 10cm<sup>2</sup> 인 표준 콘 을 이용하여 협재층을 탐지 할 경우 협재층의 강도는 주변 지반의 강도보다 작아야 영향범위가 줄어들어 상 대적으로 정확한 탐지가 가능하다고 하였다. Ahmadi and Robertson(2005)는 밀한 모래(dense sand), 느슨한 모래 (loose sand) 그리고 연약지반(soft soil)을 이용하여 불규 칙하게 구성된 지층의 경계면 탐지를 수치해석적으로 평 가하였다. 경계면이 주변의 강도 보다 약할 경우에 측정 영향 범위가 작게 나타났으며, 이는 Lunne et al.(1997)의 결과와 유사함을 보여준다.

Hird et al.(2003)은 단면적이 1cm<sup>2</sup>(직경: 1.10cm) 그 리고 5cm<sup>2</sup>(직경: 2.52cm)인 소형콘을 이용하여 장비 크 기 및 간극수압계 위치에 따라 측정값의 해상도를 실험 적으로 비교하였다. 인공적으로 조성된 협재층을 이용 하여 실험을 수행하였으며, 콘의 단면적이 작을수록, 간 극수압계가 선단에 가깝게 설치될수록 해상도가 증가하 는 것을 관찰하였다. 즉, 협재층과 같은 얇은 지층을 탐 지하기 위하여 측정 장비의 단면적은 작아야하며, 측정 센서는 선단부에 가깝게 부착되어 있어야 정확한 값을 평가할 수 있음을 알 수 있다. Hird and Springman(2006) 은 Hird et al.(2003)의 실내실험 연구결과를 검증하기 위해 단면적이 5cm<sup>2</sup>(직경: 2.52cm)인 콘과 단면적이 10cm<sup>2</sup>(직경: 3.57cm)인 콘을 이용하여 현장실험을 수행하 였다. 실내실험에서 사용된 단면적이 1cm<sup>2</sup>(직경: 1.10cm) 인 콘은 현장적용시 강성이 부족하여 단면적이 큰 장비 로 교체되어 사용되었으며, 이를 이용하여 장비 크기와 간극수압계 위치에 따른 경계면 탐지의 해상도를 관찰 하였다. 현장실험결과, 실내실험의 결과와 유사하게 단 면적이 작을수록 그리고 간극수압계 위치가 선단부에 근접할수록 해상도가 높게 나타났다.

이종섭 등(2008)은 주면마찰력과 선단저항력을 분리 할 수 있는 형태로 단면적이 0.196cm<sup>2</sup>(직경: 0.5cm)인 초소형 콘을 제작하여 실내에서 시료를 조성한 뒤 경계 면 탐지에 적용하였다. 적용결과 개발된 소형 콘은 경계면 탐지에 매우 효과적이었으며, 특히 액상화 이후 모래지반 에서 지지력 증가 현상도 파악하였다. 김래현 등(2009)은 기존에 사용되고 있는 전기저항식 변형률계의 온도에 대 한 문제점을 개선하고자 광섬유센서가 부착된 단면적 이 0.071cm<sup>2</sup>(직경: 0.3cm)인 소형콘을 개발하였다. 개발 된 장비는 주변의 온도변화와 입력 전압에 의한 자체발 열등을 효과적으로 배제하여 협재층 및 지반의 특성을 보다 신뢰성 높게 평가할 수 있음을 보여주었다.

## 2.2 전기비저항 측정 장비

전기비저항 콘 관입시험(Resistivity Piezocone Penetro-

meter Testing: RCPTU)은 콘의 후면에 장착된 전기비저 항 측정 프로브를 이용하여 전기비저항을 측정한다. 측 정된 전기비저항을 이용하여 지반의 간극비, 현장 지층 상태 그리고 지반 오염물질 파악등에 다양하게 적용하 고 있으며(Horsnell 1988; Campanella and Weemees 1990), Campanella and Kokan(1993)은 RCPTU 장비를 적용하 여 지반의 팽창정도도 평가하였다.

Horsnell(1988)은 전도율 콘(Conductivity Cone)이라고 불리는 프로브를 콘 후면에 설치하여, 지반환경 분야의 오염물질 탐사에 적용하였다. 전기비저항 측정 프로브 는 2개의 전극으로 구성되며 세라믹 성분의 재료를 이용 하여 각 전극 사이를 절연하였다. Zuidberg et al.(1988) 은 전극에 이온 흡착이 발생하는 것을 방지하기 위해 낮은 주파수의 교류 전원을 공급하여 지반의 전기적인 특성을 평가하였다. 또한 전기비저항은 지반의 오염물 뿐만 아니라 지하수의 농도에도 영향을 받음을 실험적 으로 증명하였다.

김준한 등(2009)은 단면적이 0.78cm<sup>2</sup>(직경: 1.0cm)인 소형 전기비저항 콘 프로브(Electrical Resistivity Cone Probe: ERCP)를 개발하여 현장실험을 수행하였으며, 표 준관입시험, 콘관입시험 그리고 딜라토미터 시험결과와 비교하여 측정값의 신뢰성을 검증하였다. ERCP는 전기 비저항 측정 센서가 선단에 설치되어있으며, 4단자 쌍 회로 연결 방식(4terminal pair configuration)으로 구성되 어 있는 특징이 있다.

#### 3. 선단 비저항 콘의 개발

기존연구동향에서 소개하였듯이 콘과 전기비저항 탐침 이 결합된 지반조사 장비(RCPTU)가 선행연구자들에 의해 제안되었다. 하지만, 이는 직경이 크고(직경: 3.57cm) 전기 비저항 측정 시스템이 후면에 설치되어 있어 얇은 협재 층을 탐지하기에는 정밀도가 떨어진다는 한계가 있다. 이를 극복하고자 본 연구에서는 지반의 얇은 협재층을 고해상도로 탐지할 수 있도록 직경은 작고(직경: 1.0~ 1.5cm) 전기비저항 탐침이 선단부에 장착된 선단비저항 콘(Cone Resistivity Penetrometer, CRP)을 개발하고 적 용하고자 한다. 선단에서 측정된 물리적이고 전기적인 특성은 각 센서 특성에 따라 측정값을 상호보완할 수 있어 협재층과 같은 지반의 불확실성을 정확하게 평가 할 수 있다.

CRP는 지반의 저항력과 전기비저항을 동시에 측정 할 수 있도록 개발되었으며, 기존 표준 콘 관입 장비의 형상과 동일하게 선단 각도는 60°를 유지하였다. CRP 의 단면적은 실내실험의 경우 0.78cm<sup>2</sup>(직경: 1.0cm)로 설계하였으며, 현장실험의 경우는 1.76cm<sup>2</sup>(직경: 1.5cm) 으로 제작하였다(그림 1 참조). CRP 길이는 표준 콘 장 비의 선단과 주면의 면적비(100:150)를 고려하여 3.7cm (실내용)과 5.6cm(현장용)으로 제작하였다. CRP는 표준 콘 장비의 측정 체계와 동일하게 초소형 변형률계가 설 치되는 내관(inner rod)과 주면마찰력을 측정하거나 내 관을 보호하는 외관(outer rod)으로 구성된다. 내관의 직 경은 각각 0.79cm(실내용)과 1cm(현장용)이며, 외관의 두께는 실내 및 현장용 모두 동일하게 0.2cm로 제작하였 다. 전기비저항은 내관안에 설치된 직경 0.4cm(실내 및 현장용 크기 동일)의 초소형 내부전극(inner electrode)과 변형률계가 설치되는 내관을 외부 전극(outer electrode) 으로 이용하여 측정하였다. 내부전극은 CRP 후면으로 0.5cm 돌출시켜 케이블 연결이 용이하도록 하였으며, 외부전극은 내관자체에 케이블을 연결하였다. 내부전극 과 외부전극 사이의 전기적 절연은 신축성 튜브를 이용 하였으며, 내관, 외관, 내부전극 그리고 외부전극의 재 질은 모두 강성이 큰 스테인리스 스틸을 사용하였다. 실내용 CRP의 연결 롯드(connection rod)는 모터 형식의

실내 관입기 롯드(rod)와 연결되도록 외경을 1.0cm로 제작



(a)

되었으며, 협소한 단면으로 인하여 변형률계는 선단부에 2개만(half-bridge) 부착하였다. 모터 형식의 관입기에 대 한 내용은 이종섭 등(2008)에 자세히 설명되어 있다. 현장 실험용의 CRP는 외경이 큰 현장 롯드와 연결되기 때문에 CRP 후면에 연결되는 롯드는 변단면 형태로 제작되었다.

#### 3.2 선단저항력 측정 시스템

CRP의 선단저항력은 내관에 설치된 전기저항식 변 형률계를 이용하여 측정하였으며, 금속 재료의 변형률 변화와 동일하게 변형하는 변형률계를 사용하였다. 미 세한 저항변화를 증폭 시키기 위해 휘트스톤 브리지 (Wheatstone Bridge) 회로를 이용하였다. 실내실험용 CRP 는 앞서 언급하였듯이 단면적 부족으로 half-bridge 형태 로 회로를 구성하였으며, 현장실험용 CRP는 4개의 변 형률계를 모두 부착한 full-bridge 형태의 회로로 구성하 였다. 전기저항식 변형률계는 Kyowa사의 1mm 스트레 인 게이지(KFG-1-12-C1-16L3M2R)를 사용하였으며, 입 력 전압은 이종섭 등(2008)의 기존 연구결과를 참고하 여 일정한 저항값이 출력되는 1.5~2V 사이의 값을 사 용하였다. 변형률계의 입력 및 출력값은 모두 Quantum X(MX410, HBM사) 장비를 이용하여 측정하였다.

## 3.3 전기비저항 측정 시스템

전기비저항 측정 시스템은 내부전극과 외부전극으로



그림 1. CRP: (a) 실내실험 CRP; (b) 현장실험CRP. 그림 속의 단위는 mm임

구성된 두개의 전극에 각각 동축케이블이 연결된 4단자 쌍 회로 연결방식으로 구성된다(그림 2 참조). 측정시 발생할 수 있는 전기적인 누전 및 간섭을 억제시키기 위하여 내·외부전극에 연결된 동축케이블의 접지선은 모두 일체화 되도록 연결하였다. 또한 전극간의 접촉에 따른 누전을 방지하도록 에폭시를 이용하여 연결 부분 을 모두 코팅하였다. 극성화(polarization)를 방지하고 측 정값이 입력 전류에 영향을 받지않도록 CRP 장비 자체의 공명현상도 측정하였다. 다양한 농도(0.125mol, 0.25mol, 그리고 0.5mol)의 소금물에 대하여 1kHz~1MHz 범위 의 주파수 영역을 대상으로 측정하였으며, 이때 발생한 전 기저항값의 변화는 low frequency(LF) impedance analyzer (HP4192A)를 이용하여 측정하였다. 실내용 CRP와 현 장용 CRP의 측정결과는 그림 3과 같으며, 실내용 CRP 는 주파수 범위가 증가할수록 저항값에 큰 변화 없이 거의 일정한 값이 측정되었다. 현장용 CRP의 경우도 약 400kHz까지는 실내용 CRP의 결과와 동일하게 안정된 값이 나타났지만, 그 이후에는 갑작스럽게 증가하는 현 상을 관찰하였다. 따라서 측정된 결과를 토대로 안정하 게 측정할 수 있는 CRP의 적용 가능한 작동 주파수를 100kHz로 결정하였다. 전기비저항은 LCR Meter(Intec LCR-819)를 이용하여 측정하였으며, 장비자체에 연결 된 접지선을 외부 접지단자와 연결하여 장비고유의 잡



그림 2. 전기비저항 회로 구성도. 여기서 Hc, Hp, Lc 그리고 Lp는 각 각 High current, High potential, Low current 그리고 Low potential을 의미함

음도 제거하였다.

#### 3.4 관입속도

콘 관입 속도는 대상 지반의 특성에 따라 입자의 파 쇄 및 크립(creep)을 유발 시킬 수 있으며, 이와 같은 현 상은 간극수압과 선단저항력에 영향을 미치므로 신뢰 성 높은 측정값을 획득하기 위해 합리적인 관입속도를 고려해야한다. 일반적으로 단면적이 10cm<sup>2</sup>인 표준 콘 관입 장비의 관입속도는 선행 연구자들의 연구결과를 통해 2cm/sec로 사용되고 있다(Roy et al. 1982). 그러나 단면적이 작은(A=1.27cm<sup>2</sup>, 2cm<sup>2</sup>) 콘 장비에 동일한 관 입속도가 적용되면, 선단 저항력은 11% 크게 측정되며, 주면 마찰력은 9% 작게 측정되는 것으로 알려져있다 (De Lima and Tumay 1991). 따라서 단면적이 작은 콘의 신뢰성 높은 측정값을 얻기 위해서는 적절한 관입속도 를 결정해야 하며, 본 논문에서는 배수조건을 고려하여 개발된 CRP의 관입속도를 결정하였다.

배수조건은 콘이 관입되는 시간(*t*pen)과 과잉간극수압 이 소산되는 시간(*t*dis)에 의해 결정 되며, Cho et al.(2004) 은 *t*dis/*t*pen≫1 조건에서는 관입에 의한 지반의 국부적인 체적 변화가 적다고 하였다. 위와 같은 *t*dis/*t*pen의 관계는 식 (1)과 같이 표현되며



그림 3. HP 4192A Low Frequency Impedance Analyzer를 이용한 Frequency sweeping 결과(입력전압: 1V): (a) 실내실험용 CRP; (b) 현장실험용 CRP

$$\frac{t_{ds}}{t_{pen}} \cong \frac{d^2/c_v}{\lambda/V_{in}} = \left(\frac{d}{\lambda}\right) \cdot \frac{d \cdot V_{in}}{c_v}$$
(1)

여기서, d는 콘의 직경, λ는 콘 선단부의 길이, Vin은





관입 속도, c、는 압밀계수를 나타낸다. 점토지반에서 c、는 참고문헌 값을 통해 1×10<sup>3</sup>cm<sup>2</sup>/sec(Lambe and Whitman 1979) 값을 사용하였으며, 실내 및 현장용 CRP의 λ는 각각 0.89cm와 1.16cm 그리고 d는 각각 1.0cm과 1.5cm 값을 이용하였다. 관입속도는 실내 및 현장실험에 적합 하도록 V<sub>in</sub> = 0.1 cm/sec과 1~2cm/sec로 가정하였다. 이 를 이용하여 계산한 t<sub>dis</sub>/t<sub>pen</sub> 값은 모두 1보다 큰 값을 나 타내어 가정값을 장비의 관입속도로 결정하였다.

#### 4. 장비보정

#### 4.1 선단저항력 및 주면마찰력

선단저항력과 주면마찰력 보정실험은 일정한 크기의 하중을 반복적으로 재하 및 제하시킨 후 출력전압을 측 정하는 방식으로 진행되며, 그 결과는 그림 4와 같다. 그림 4와 같이 측정된 출력전압값과 선단저항력 및 주 면마찰력 사이에는 선형적인 관계가 형성된다. 실내실 험 CRP의 경우는 앞서 설명하였듯이 변형률계 부착 공 간이 협소하여 선단저항력에 대한 보정과정만 수행되 었으며, 현장실험용 CRP는 선단저항력과 주면마찰력 모두 보정과정을 실시하였다. Half-bridge을 이용한 실 내용 CRP보다 Full-bridge을 이용한 현장용 CRP의 선형 성이 더 우수한 것으로 나타났다.

#### 4.2 전기비저항

전기저항(electrical resistance)은 측정장비의 전극 길



그림 5. 전기비저항 프로브의 보정: (a) 실내실험 CRP; (b) 현장실험 CRP

이, 재질, 케이블 길이 등 기하학적 및 전기적인 형상에 민감하게 반응하여 동일시료라 하여도 다양한 값을 나 타낸다. 따라서 대상지반의 전기적인 특성은 전기저항 이 아닌 전기비저항(electrical resistivity)으로 환산해야 한다. 전기비저항은 물질의 고유한 특성을 나타내는 값 으로, 전기저항과 선형관계를 가지며 캘리브레이션 과 정을 통해 전기비저항으로 환산 할 수 있다. 본 연구에 서 실험을 통해 얻은 환산 식을 그림 5에 나타내었으며, 캘리브레이션에 관한 내용은 김준한 등(2009)에 자세히 설명되어 있다.

## 5. 인공조성 시료에 대한 층상 탐지 실험

협재층 탐지를 목적으로 개발한 CRP는 인공적으로 조 성한 층상시료를 이용하여 실내 관입 실험을 수행하였다.

#### 5.1 시료조성

0mm 50mm 65mm 115mm 130mm 180mm 195mm 245mm 245mm 310mm

시료의 시각적 및 공간적 분포를 간접적으로 파악하

## 그림 6. 조성된 층상탐지 시료(이종섭 등 2008)

#### 표 1. 카올리나이트의 물리적 특성

기 위해 층상탐지용 셀은 투명한 아크릴 재질로 제작되 었으며, 내경은 20cm, 높이는 협재층을 모사하기 위하 여 각각 1.5cm와 5cm로 구성하였다. 시료는 그림 6과 같이 전체 7개의 층으로 구성되며, 점토(높이: 5cm)와 사질토(높이: 1.5cm)가 번갈아 쌓이도록 조성하였다. 점 토는 분말상태의 카올리나이트(kaolinite)를 이용하였으 며, 사질토는 규암 분쇄토인 K-7 모래를 사용하였다. 시 료는 모두 포화상태로 조성되었으며, 이때 사용한 간극 수는 전기비저항 해상도를 높이기 위해 소금물(전기전 도율: 33.02mS/cm)을 사용하였다. 시료조성시 사용된 카올리나이트와 K-7 모래의 구체적인 물리적 성질은 표 1과 2에 각각 정리하였다.

### 5.2 층상 탐지 실험

시료 조성 후 층상탐지 실험을 수행하였으며, 매 깊이 에 따른 특성을 측정하였다. 측정된 데이터는 보정과정 을 통해 얻은 식(그림 4 및 5 참조)을 이용하여 선단저항 력과 전기비저항으로 환산하였으며, 환산 결과는 그림 7에 나타내었다. 선단저항력과 전기비저항은 모두 점토 층에서 일정한 범위의 값을 보였지만, 사질토층에서는 갑작스럽게 증가하는 것으로 나타났다. 특히 전기비저 항의 경우는 사질토 층이 시작되는 심도에서 거의 즉각 적인 반응이 나타났지만, 선단저항력은 첫번째와 세번 째 층에서 반응이 상대적으로 늦게 나타났다. 이는 전기 비저항 측정센서가 선단저항력 측정 변형률계보다 선단 부분에 위치하여 더욱 빠르고 민감한 반응이 나타난 것 으로 판단된다. 또한 마지막의 사질토층에서는 전기비 저항의 측정 값이 크게 증가한 것을 확인하였으며, 이는 시료 조성시 사용된 소금물의 농도 차이로 인하여 발생 한 것으로 분석된다. 실내실험 결과는 개발된 소형 CRP 의 협재층 탐지 능력이 상당히 민감한 것을 보여준다.

Liquid Limit	Plastic Limit	Plasticity Index	Specific Gravity	USCS
(%)	(%)	(%)	G <sub>S</sub>	
67.1	30.7	36.4	2.54	СН

#### 표 2. 분쇄사의 물리적 특성

Specific Gravity Gs	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	Сс	Cu	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	USCS
2.65	0.09	0.17	0.99	2.11	1.07	0.68	SP



그림 8. 광양 현장 지반조건: (a) 주상도; (b) 표준관입저항치



Cone tip resistance [kPa]

Electrical resistivity [ $\Omega \cdot m$ ]

# 6. 현장 적용 실험

## 6.1 지반조건

점토와 실트가 혼재되어 지층구조 및 특성이 복잡한 광양지역의 매립층(그림 8)에서 현장실험을 수행하였 다. 이 지역은 상부의 모래를 이용하여 매립하였으며 하 부지반이 매립 후 수년간에 걸쳐 압밀이 진행되고 있는 지반으로, 통일분류법상 점토가 섞인 실트(ML)로 구분 된다. 액성한계 및 소성지수는 약 35~40%와 7~15% 범위를 나타내며, 대상지반의 물성치를 표 3에 정리하 였다.

## 6.2 관입실험

매립된 상부층을 그림 8과 같이 심도 6m까지 보링 한

## 표 3. 광양지역의 물리적 특성

후, 공벽을 유지하도록 케이싱을 설치하여 관입실험을 수행하였다. CRP의 관입실험은 현장에서 사용되고 있 는 일반적인 유압기를 이용하여 심도 6m에서부터 15m 까지 수행되었으며, 관입속도는 1cm/sec를 유지하였다. 관입심도 15m에서는 관입장비의 반력 부족으로 더 이 상 관입이 불가능하여 실험을 종료하였다.

## 6.2.1 CRP 관입 실험 결과

측정된 데이터는 캘리브레이션 식을 이용하여 선단 저항력, 주면마찰력 그리고 전기비저항으로 환산하였으 며, 그 결과를 그림 9에 나타내었다. 선단저항력과 주면 마찰력은 약 1~2MPa과 0.001~0.01MPa 값을 보이며, 협재층이 존재하는 부분에서는 약 2~4MPa과 0.02~ 0.04MPa 값을 보였다. 전기비저항은 대체적으로 약 0.5~ 1Ω·m 값으로 환산되었으며, 협재층이 있는 영역에서 는 선단저항력과 유사하게 1~2Ω·m까지 측정값이 증

Depth (m)	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index (%)	Specific Gravity GS	USCS
9m	35.2	27.3	7.9	2.63	ML
16m	36.4	24.5	11.9	2.61	ML
20m	40.3	25.4	14.9	2.63	ML
24m	38.9	23.7	15.2	2.60	ML



그림 9. 광양 현장에서의 CRP관입실험 결과: (a) 선단저항력; (b) 주면마찰력; (c) 전기비저항

가하였다. 측정된 선단저항력과 전기비저항 결과는 실 내실험 결과와 유사하게 협재층이 존재하는 심도(약 11m, 13m 그리고 14m)에서 측정값이 갑작스럽게 증가하였 다. 비록 지하수의 농도, 입자특성등에 의한 계측 센서 들간의 민감도 차이가 있어, 측정된 협재층의 경향성에 는 약간 차이가 있지만 모두 비슷한 심도에서 협재층을 탐지하였다.

측정된 데이터를 검증하기 위하여 CRP 실험 위치에 서 그림 8과 같이 수평으로 약 30m 떨어진 위치에서 표 준 콘을 이용하여 콘 관입 실험(CPT)을 실시하였다. CRP 실험과 동일하게 심도 6m까지 선굴착한 후 관입실험이 수행되었으며, 관입장비의 반력 부족으로 심도 15m까 지만 실험이 수행되었다. CPT 측정결과는 그림 10과 같 으며, 평균적으로 1~2MPa 값을 보이다가 협재층이 존 재하는 부근에서는 2~4MPa의 높은 값을 나타냈다. 지 층의 형성 조건이 상이하여 협재층 탐지 심도 및 특성은 약간 차이가 있지만, CPT와 CRP 모두 12m, 13m 그리 고 14m 부근에서 3개의 협재층이 측정되었다. 이는 그 림 10(c)의 간극수압 그래프에서도 12~15m 사이에서 3번의 급격한 간극수압 증가로부터 협재층 존재 가능성 이 높음을 알 수 있다. 측정 심도까지 CRP의 평균 선단저항력과 평균 주면 마찰력은 0.88MPa와 0.0062MPa 값으로 계산되었으며, CPT는 각각 0.99MPa과 0.010MPa로 나타났다. 이를 비 교하면 CRP의 선단저항력과 주면마찰력이 CPT 보다 약 11% 그리고 약 40% 작게 산정되었음을 알 수 있다. 일반적으로 콘의 직경이 작을수록 선단저항력은 크게 평가되나(Titi et al. 2000), CRP의 관입속도가 1cm/sec 인 반면 CPT의 관입속도는 2cm/sec 인 관계로 CRP의 측정값이 작게 나타난 것으로 판단된다. 추후 다양한 실 험에 따른 보정이 수행된다면 CRP의 상관관계식을 통 해 지반의 저항력을 정확하게 평가 할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 7. 결 론

본 연구에서는 선단저항력, 주면마찰력, 그리고 전기 비저항을 동시에 평가하여 협재층을 탐지 할 수 있는 전기비저항 측정 콘(Cone Resistivity Probe: CRP) 장비 를 개발하고 적용하였다. 기존에 개발된 소형 콘 관입 장비와는 다르게 선단에 전기비저항 측정 센서가 추가 되어 지반의 저항력과 전기비저항을 측정 할 수 있으며,



그림 10. 광양 현장실험 결과비교: (a) 선단저항력; (b) 주면마찰력; (c) 간극수압

다양한 계측값을 통해 높은 해상도로 협재층을 탐지 할 수 있다. CRP는 직경이 1.0cm 그리고 높이가 3.7cm인 실내실험용과 직경이 1.5cm이고 높이가 8.4cm인 현장 실험용으로 제작되었다. 지반의 저항력은 전기저항식 변 형률계를 이용하여 측정하였으며, Wheatstone Bridge회 로를 구성하여 측정하였다. 전기비저항은 내부전극과 외부전극의 4단자 쌍 회로 방식으로 구성되며, 내·외부 전극사이에는 절연체를 이용하여 누전을 방지하였다. 개발된 장비의 적용성 및 측정값의 신뢰도는 실내 층상 탐지 실험과 현장의 관입 실험을 통해 검증하였다.

실내실험은 시각적으로 식별이 가능한 투명한 아크 릴 셀에 인공적으로 협재층 시료를 조성하여 진행하였 으며, 측정된 데이터는 조성된 시료와 유사한 경향성을 보였다. 실내실험 결과를 토대로 CRP는 상부가 매립된 광양 지역의 지반에서 지반특성 평가에 적용하였다. 광 양지역의 관입실험은 심도 6~15m까지 진행하였으며, 측정 데이터를 통해 3개의 협재층을 확인하였다. CRP 는 실내 및 현장 실험결과 적용성과 신뢰성이 높게 나타 났으며, 추후 다양한 지반 평가에 적용될 것으로 판단된 다. 또한 선단에서 측정되는 전기비저항은 지반의 간극 비나 오염여부등 지반을 다각도로 평가 할 수 있어 활용 성도 높게 나타날 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 논문은 2008년 정부의 재원으로 한국과학재단(KRF-2008-331-D00603)과 2008년도 산학협동재단의 지원으 로 수행된 연구이며, 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김래현, 윤형구, 이우진, 이종섭 (2008), "광섬유를 이용한 온도 보상형 마이크로콘의 개발", *대한토목학회 논문집* 29(4C), pp. 163-174.
- 김준한, 윤형구, 최용규, 이종섭 (2009), "전기비저항 콘 프로브 를 이용한 해안 연약 지반의 간극률 산정", 한국지반공학회 논문 집, 25(2), pp.45-54.
- 이종섭, 신동현, 윤형구, 이우진 (2008), "초소형 마이크로콘 관입 시험기의 개발 및 적용", 한국지반공학회 논문집, 24(2), pp.77-86.
- 윤형구, 김준한, 김래현, 최용규, 이종섭 (2008), "CRPT를 이용한 연약지반 협재층 탐지", 2008 지반공학회 가을 학술 발표회, pp.

117-125.

- 5. 한국지반공학회 (2005), "연약지반", 지반공학 시리즈, 구미서관.
- Ahmadi, M. M. and Robertson, P. K. (2005), "Thin-layer Effects on the CPT qc Measurement", *Canadian Geotechnical Journal*, 42(5), pp.1302-1317.
- Campanella, R. G. and Kokan, M. J. (1993), "A new approach to measuring dilatancy in saturated sands", *Geotechnical Tesing Journal*, ASTM, 16(6), pp.485-495.
- Campanella, R. G. and Weemees, I. (1990), "Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies", *Canadian Geotechnical Journal*, 27, pp.557-567.
- Cho, G. C., Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2004), "Spatial variability in soils: high resolution assessment with electrical needle probe", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(8), pp.843-850.
- De Lima, D. and Tumay, M. T. (1991), "Scale Effects in Cone Penetration Tests", Proceedings, Geotechnical Engineering Congress 1991, ASCE, Boulder, 1, pp.38-51.
- Hird, C. C., Johnson, P. and Sills, G. C. (2003), "Performance of Miniature Piezocones in Thinly Layered Soils", *Geotechnique*, 53(10), pp.885-900.
- Hird, C. C. and Springman, S. M. (2006), "Comparative performance of 5cm<sup>2</sup> and 10cm<sup>2</sup> piezocones in a lacustrine clay", *Geotechnique*, 56(6), pp.427-438.
- Horsnell, M. R. (1988), "The use of cone penetration testing to obtain environmental data", In penetration testing in the U.K. Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London, U. K., pp. 289-295.
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979), "Soil Mechanics", John Wiley & Sons.
- Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M. (1997), "Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice", Blakie Academic, Great Britain, London.
- Roy, M., Tremblay, M., Tavenas, F. and La Rochelle, P. (1982), "Development of Pore Pressures in Quasi-Static Penetration Tests in Sensitive Clay", *Canadian Geotechnical Journal*, 19(2), pp. 124-138.
- Threadwell, D. D. (1976), "The influence of gravity, prestress, compressibility, and layering on soil resistance to static penetration", Ph.D. thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, Calif.
- Titi, H. H., Mohammad, L. N. and Turnay, M. T. (2000), "Miniature cone penetration tests in soft and stiff clays", *Geotechnical Tesing Journal*, ASTM, 23(4), pp.432-443.
- Yoon, H. K., Kim, J. H., Kim, R. and Lee, J. S. (2009), "Electrical Resistivity and Cone Tip Resistance Monitoring by Using Cone Resistivity Penetrometer", *Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan, pp.168-171.
- Zuidberg, H. M., Hoope, J. ten and Geise, J. M. (1988), "Advances in in-situ measurements", 2<sup>nd</sup> International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Sakurai, pp.279-291.

(접수일자 2010. 2. 11. 심사완료일 2010. 8. 16)