

CRPT를 이용한 연약지반 협재층 탐지

Detection of thin-layered soil using CRPT in soft soil

윤형구¹⁾, Hyung-Koo Yoon, 김준한²⁾, Joon Han Kim, 김래현³⁾, Raehyun Kim, 최용규⁴⁾, Yong-Kyu Choi, 이종섭⁵⁾, Jong-Sub Lee

- 1) 고려대학교 건축.사회환경공학과 박사과정, Ph.D. Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- 2) 고려대학교 건축.사회환경공학과 석사과정, Graduate Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- 3) 고려대학교 건축.사회환경공학과 박사과정, Ph.D. Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- 4) 경성대학교 토목공학과 교수, Professor, Department of Civil Engineering, Kyung Sung University.
- 5) 고려대학교 건축.사회환경공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University (jongsub@korea.ac.kr).

SYNOPSIS : The detection of thin-layered soil is important in soft soils to evaluate the soil behavior. The smaller diameter cone penetrometer have been commonly used to detect the layer with increasing sensitivity. The objective of this study is to detect the thin-layered soil using cone resistance and electrical resistance. The cone resistivity penetration test (CRPT) is developed to evaluate the cone tip resistance and electrical resistance at the tip. The CRPT is a micro-cone which has a 0.78cm^2 in projected area. The application test is conducted in a laboratory large-scale consolidometer (calibration chamber). The kaolinite, sand and water are mixed to make the specimen at the liquid limit of 46% using a slurry mixer. It takes two months for the consolidation of the specimen. After consolidation, the CRPT test is carried out. Furthermore the standard CPT results are compared with the electrical resistance measured at the tip in the field. This study suggests that the CRPT may be a useful tool for detecting thin-layers in soft soils.

Key words : thin-layered soil, micro-cone, cone resistance, electrical resistance, CRPT

1. 서 론

침식, 풍화 그리고 퇴적 작용으로 형성된 연약지반은 형성 조건에 따라 다양한 특성과 구조를 가지게 된다. 연약지반의 지층은 점토 이외에도 모래나 실트로 형성된 샌드심(sand seam)과 같은 협재층(thinly layered soil)으로 구성되며 이에 따라 수평 및 수직 방향의 비균질, 비등방성의 특성을 지니고 있다. 이러한 지층은 비록 두께가 수 mm로 얇다고 하여도 투수계수의 차이가 크기 때문에 연약지반의 압밀에 상당한 영향을 미치므로 협재층은 합리적인 연약지반 설계를 위해 지반조사 단계에서 반드시 탐지 되어야 한다.

큰 관입 시험은 대표적인 현장 지반 조사 실험으로 별도의 시추공 없이 연속적으로 신뢰성 있는 데이터 측정이 가능하다(Lunne et al. 1997). 그러나, 직경이 35.7mm이고 단면적이 10cm^2 인 표준 큰 관입 장비의 경우 관입 시 주변 지반이 밀려나거나 관입 방향으로 말려 들어가는 교란 현상이 크게 나타난

다. 이러한 교란효과는 입자의 전단변형 파괴를 유발하고 원지반 강도를 감소시켜 대상 지반의 정확한 거동 특성을 조사하기 어렵다 (Hird et al. 2003). 따라서 이종섭 외. (2008)은 현장 실험시 협재층 및 샌드짐의 올바른 측정으로 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 관입 장비의 크기는 작아져야 한다고 하였다.

전기 비저항 탐사는 지반의 전류과 전위를 이용하여 대상 지반의 비저항 및 전도도를 측정하는 방법이다. 이는 지층의 대략적인 구조와 오염 물질의 존재 여부를 파악 하기 위해 주로 사용되었으나, 현재는 지반의 층상구조 및 설계정수를 산정하기 위해 활용되고 있다 (이종섭 외. 2008). 대상 지반의 일반적인 전기 비저항 측정은 콘 관입 시험시 내부 및 외부 전극이 설치되어 있는 관입용 룯드 (rod)를 이용하여 측정 하게 된다. 하지만, 이 실험법은 선단 부분의 콘 관입으로 형성된 교란 영역을 상단에 설치된 전기비저항 프로브가 측정하는 방식이므로 신뢰성이 떨어져 정확한 현장 상태를 반영하지 못하는 한계가 있다. 즉, 심도에 따른 효율적인 지층구조 파악을 위해 전기 비저항 프로파일은 상단의 룯드 연결이 아닌 선단 부분에 설치된 프로브를 이용하여 측정하는 것이 올바르다.

본 논문에서는 점토로 구성된 연약지반에서 모래나 실트로 구성된 협재층을 탐지하기 위해 선단부에 전기비저항 프로브를 설치한 초소형 콘 관입 장비를 개발하였다. 현장 실험을 이용하여 선단지저력과 전기비저항의 관계를 평가하였으며, 실내 실험을 통해 개발된 장비의 적용성을 검증하였다.

2. 기존 연구 동향

2.1 소형 콘 관입 장비

일반적으로 콘은 단면적의 크기에 따라 표준 콘(reference cone, 10cm²), 소형 콘(miniature cone, 2cm²) 그리고 마이크로 콘(micro cone, 1cm² 이하)으로 구분 된다. 표준 콘은 분해능이 낮고 민감도가 우수하지 못해 점토 내 협재층 탐지가 어렵고, 주로 심도에 따른 포괄적인 측정값으로 대상 지반을 평가한다. 협재층 탐지를 위해 상대적으로 분해능과 민감도가 우수한 소형 콘과 마이크로 콘이 개발되었으며, 간극수압과 콘 저항치의 변화를 이용하여 상세한 지층의 분류나 협재층과 같은 신뢰성 높은 지반 조사를 수행할 수 있다. 간극 수압 측정을 위한 소형 피에조 콘은 직경이 1.13cm, 1.25cm, 그리고 1.27cm등으로 개발되었으며 (Dejong et al. 2003; Hird et al. 2003; Yaftrate and Dejong 2005), 콘 저항력 측정을 위해서는 0.3-1mm, 5mm, 그리고 5.6mm의 직경으로 소형 및 마이크로 콘이 개발 되었다 (Yun 2005; Liu et al. 2006).

2.2 전기 비저항 탐사 장비

전기 비저항 탐사는 대상 지반에 인위적으로 전류를 흘려 발생하는 전위차를 측정하고 각 지층의 고유 비저항을 산출하여 지층에 대한 정보를 획득하는 탐사기술이다. 이 실험법은 민감도가 뛰어나 해저 지형 탐사, 함수비 변화 관측, 지반 오염대 관측 그리고 시설물 관리 등의 다양한 분야에 활용되고 있다. 또한 Archie (1942)는 연약지반 설계 정수인 간극비 산정을 위한 경험식을 제안하였으며 이를 바탕으로 대상 지반의 신뢰성 높은 설계 정수 획득을 위한 연구가 진행되고 있다 (이종섭 외. 2008). 특히 단면적이 10cm²인 표준 콘은 슬리브 상단에 전기 비저항 측정용 전극이 1개(single) 혹은 2개(double) 설치되어 있어 콘 관입에 따른 대상 지반의 특성을 평가 하고 있다 (Zuidberg et al. 1987; Campanella and Kokan 1993). 그러나, 표준 콘을 이용한 비저항 탐사는 앞에서 언급하였듯이 상대적으로 큰 직경으로 인해 민감도가 떨어져 정밀한 층상구조의 파악이 어렵고, 콘 선단 관입에 의해 이미 교란된 영역이 탐지되어 신뢰성이 낮은 결과를 초래 하고 있다. 따라서 신뢰성이 높은 전기 비저항을 이용하여 현장 상태를 평가 할 수 있는 비교란 원위치 실험 방법이 필요한 실정이다.

3. 장비 개발

3.1 비저항 측정 장비

콘 프로브 (Cone Probe : CP)는 대상지반의 전기 저항을 측정하여 지층 특성 및 설계상수를 산정하기 위해 개발되었다. 콘 관입 장비와 동일한 방법으로 대상 심도까지 룯드(rod)를 연결한 후 일정한 관입 속도로 지반을 조사 할 수 있다. CP는 강성 및 전기전도성을 고려하여 스테인레스 재질을 사용하였으며, 중심전극의 직경이 4mm, 외부 전극의 직경이 10mm, 그리고 길이가 130mm로 제작되었다. 또한 외부 전극과 내부 전극의 합선을 방지하기 위해 에폭시로 내부 전극을 코팅하였다 (자세한 내용은 이종섭 외, 2008 참조).

3.2 비저항 측정 소형 콘 관입 장비

연약지반 내 모래나 실트로 형성된 수 mm 두께의 협재층은 민감도가 높은 소형 콘의 선단 저항력과 정성 및 정량적인 평가가 가능한 전기 비저항을 이용하여 신뢰성 높게 평가 될 수 있다. 따라서 지반의 불확실성을 정확하게 파악하기 위해 각 특성에 따른 측정값은 독립적이지 않고 상호 보완적이어야 한다.

비저항 측정 소형 콘 관입 장비 (Cone Resistivity Penetration Test : CRPT)는 선단 저항력과 전기 비저항을 동시에 측정 할 수 있도록 개발되었다. CRPT는 선단 각도가 60° 그리고 단면적이 0.78cm²(D=1cm)인 마이크로 콘 형태로 설계 및 제작 되었다. 비록 주면 마찰력은 사용되지 않았지만, 추후 연구 진행을 위하여 표준 콘의 면적비를 고려해 길이를 3.7cm로 하였다. 일반적인 콘 측정 체계와 동일하게 선단 저항력은 내관 (inner rod)에 설치되어 있는 초소형 변형률계를 이용하였다. 전기 비저항은 내관 안에 설치되어 있는 중심 전극 (inner electrode)과 외부 전극 (outer electrode)을 이용하여 측정되었으며, 내관과 중심전극의 전기적 합선을 방지하기 위해 신축성 튜브를 이용하여 차폐하였다. CRPT 주면 뒤 부분에 길게 돌출된 중심 전극을 이용하여 케이블과의 원활한 연결을 하였다. 비교란 영역의 전기 비저항을 측정하기 위해 CRPT는 단면적을 최소화시켰으며, 선단 부분으로 전극을 유도하여 신뢰성 높은 협재층 탐지 장비로 개발되었다. 개발된 장비의 전체적인 모형은 그림 1과 같다.



그림 1. CRPT의 구성.

3.3 CRPT 장비 개발시 고려 사항

3.3.1 초소형 변형률계

금속 및 콘크리트 등의 복합 재료는 본래 고유의 전기 저항을 지니고 있으며, 변형률계는 기계적이나 자연적인 외부 조건에 의해 발생된 저항 변화를 변형률로 나타내준다. 특히 금속재료에서 발생하는 변형률은 상당히 작아 미세한 저항 변화를 나타내는데, 이런 미세 저항 변화는 일반적으로 사용되는 저항 계로 신뢰성 있는 측정이 불가능하여 변형률 증폭 전기 회로인 휘트스톤 브리지 (Wheatstone Bridge)를 이용하여 미소 변화 값을 측정한다. 휘트스톤 브리지 회로는 정밀 저항 측정용 회로로 4개의 저항을 이용하여 대칭적인 회로로 구성된다.

본 연구에서 개발된 CRPT도 측정 저항의 미세변화를 증폭시키기 위해 휘트스톤 브리지 회로를 사용하였다.

초소형 변형률계는 분해능 높은 선단 저항력을 측정하기 위해 CRPT 내관에 대칭으로 2개가 설치되었으며, 나머지 2개는 단면적 감소에 따른 부착 부분이 부족하여 외부에 회로를 구성하여 연결 하였다. 대상 지반 관입에 따라 발생하는 저항 변화를 휘트스톤 브리지 회로로 증폭 시킨 후 멀티 미터 (Agilent 34401A)를 이용하여 측정하였으며, 초소형 변형률계는 Kyowa사의 1mm 스트레인 게이지 (KFG-1-12-C1-16L3M2R)를 사용하였다.

3.3.2 전기 비저항 측정 시스템

CRPT는 CP와 동일하게 중심전극과 외부전극에 각 2쌍의 동축케이블이 연결된 2 터미널 방식의 전기 비저항 측정 시스템이 사용되었다. 또한 중심 및 외부 동축 케이블의 접지를 모두 연결하여 전기적인 간섭에 의해 발생할 수 있는 오류를 최소화하였다. 전기 저항은 LCR Meter (Intec LCR-819)를 이용하여 측정되었으며, 회로의 안정화를 위해 최대 주파수인 100kHz와 최대 전압인 1.275V를 입력 신호로 사용하였다. 중심 전극과 케이블은 그림 1과 같이 주면 뒤 돌출된 부분을 이용하여 연결하였으며, 외부 전극은 나사선에 별도의 홈을 만들어 연결하였다. 또한 내·외부 케이블은 서로간의 접촉에 따른 합선을 방지하기 위해 에폭시를 이용하여 연결 부분을 얇게 코팅하였다.

3.3.3 관입 속도

콘 관입 속도는 대상 지반의 특성에 따라 입자의 파쇄 및 크립 (creep)을 유발 할 수 있으며, 이는 간극 수압과 선단 저항력에 영향을 미치므로 신뢰성 높은 측정값을 획득하기 위해서는 실험에 따라 일정한 관입 속도가 고려되어야 한다 (Bemben and Myers 1974). 표준 콘 ($A=10\text{cm}^2$)의 관입속도인 20mm/sec를 이용하여 단면적이 작은 콘 ($A=1.27\text{cm}^2$, 2cm^2)에 적용된 측정값을 비교하면 선단 저항력은 11% 크게 측정되며, 주면 마찰력이 9% 작게 측정된다고 한다 (De Lima and Tumay 1991). 따라서 단면적이 작은 콘은 신뢰성 높은 측정값을 얻기 위해 매 초당 관입 깊이를 느리게 조절하여 실험이 진행되어야 한다. 본 연구에서는 제안된 CRPT의 효율적인 관입 속도를 결정하기 위해 1mm/sec, 5mm/sec, 그리고 10mm/sec의 관입속도를 조절 하여 실험을 진행하였다.

4. 캘리브레이션

4.1 CP

전기 저항은 프로브의 전극 길이, 재질, 케이블의 길이 등 기하학적 및 전기적인 형상에 따라 값이 변

화한다. 따라서 신뢰성 있는 전기 저항 값은 캘리브레이션을 통해 물질의 고유 저항인 비저항 값으로 환산하여 평가해야 된다. 측정된 전기 저항은 비저항 값과 선형관계를 나타내며 프로브 형상에 따라 다양하게 도출되는 선형 상수 (기울기)를 이용하여 대상지반을 평가한다. 서로 다른 농도의 소금물을 조성한 후 전기 전도도 및 측정 프로브 장비 자체의 저항값을 측정해 식 (1)과 같은 관계식을 도출하였다.

$$R[\text{Ohm}] = 0.622 \times \rho[\text{Ohm.cm}] \quad (1)$$

여기서, R은 저항[Ohm] 그리고 ρ 는 비저항[Ohm·cm] 값이다.

4.2 CRPT

변형률계는 인장 및 압축에 따른 재료의 고유 저항 변화 값에 따라 반응 하나, 주변 온도에 따라라도 변화하는 한계점을 가지고 있다. 온도 변화는 실험실 환경에 의한 원인 외에, 입력 전압 값이 클 경우 변형률계가 자체 발열하여 측정값이 변화하는 현상도 나타난다. 따라서 실험은 주변 온도와 입력 전압 값을 적절한 상태로 유지시킨 후에 진행되어야 하며, 본 연구에서는 입력 전압 및 주변 온도에 대한 선행연구 (이중섭 외, 2008) 결과를 반영하여 2.0V와 20°C를 사용하였다.

캘리브레이션은 측정된 전압 변화량에 따른 전기 값을 하중 값으로 환산하기 위한 과정으로 일정한 입력 전압 (2.0V)과 작동 온도 (20°C)를 유지하여, 7단계 동안 연직 하중 4.3kg까지 캘리브레이션을 수행하였다. 측정 전압 값과 하중의 관계는 식 (2)와 같으며 그림 2에 캘리브레이션 결과를 나타내었다. 캘리브레이션 결과는 입력 및 출력의 회로 연결이 반대 방향으로 되어 기울기 값이 음수로 나타났으며, 그에 따른 결정계수 (R^2)는 0.98로 나타났다.

$$P[g] = -334756 \times V[mV] \quad (2)$$

여기서, P는 하중[g] 그리고 V는 전압[mV] 값이다.

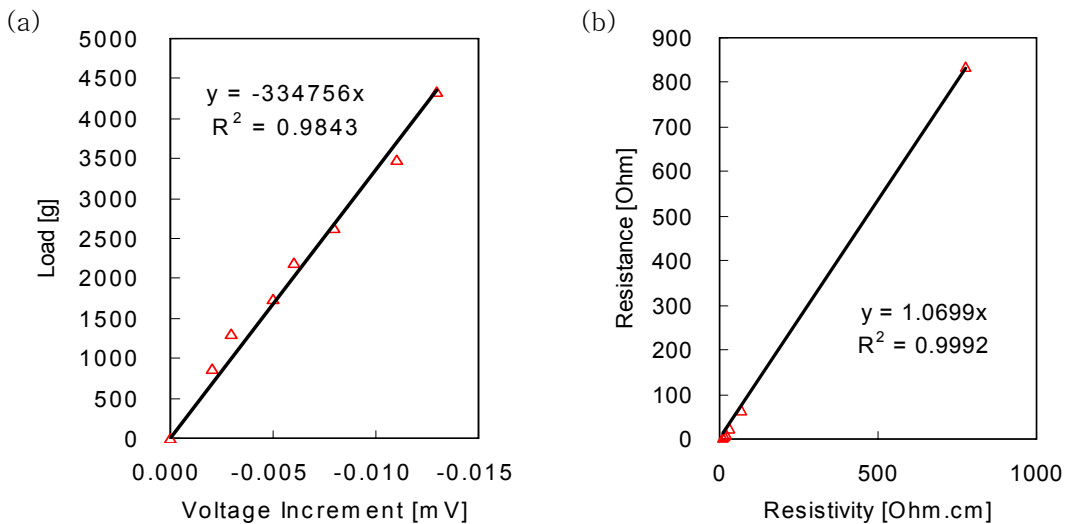


그림 2. 캘리브레이션 결과: (a) 변형률계; (b) 전기 비저항.

CRPT의 전기 비저항 측정을 위한 캘리브레이션은 앞서 언급한 CP의 캘리브레이션 방법과 동일하며 식 (3)과 같은 관계식을 도출 하였다. 결정계수 (R^2)는 0.99로서 변형률계의 캘리브레이션 값과 거의 비슷한 신뢰성을 보여준다.

$$R[Ohm] = 1.0699 \times \rho [Ohm.cm] \quad (3)$$

여기서, R은 저항[Ohm] 그리고 ρ 는 비저항[Ohm-cm] 값이다.

5. 적용 실험

5.1 현장 실험

독립적으로 측정된 콘 선단 지지력과 전기 비저항의 특성 및 관련성을 평가하기 위해 현장 실험이 수행되었다. 콘 관입 실험은 직경이 37.5mm인 표준 콘을 이용하였으며, 전기 비저항은 직경 10mm로 기존에 개발된 CP가 이용되었다. 현장 실험은 부산 화전 지구에서 수행되었으며, 심도 약 10m까지 모래층, 약 30m 심도까지는 실트질 점토층으로 구성되어 있다. 대심도 구간의 관입을 용이하게 하기 위하여 유압식 시추기가 사용되었으며, LCR meter와 컴퓨터를 이용하여 각각의 측정 데이터를 자동 저장하였다. 표준 관입 콘의 경우 매심도 20mm/sec의 표준 속도로 관입하였으며, CP는 상세한 주상도를 얻기 위해 20cm/sec(≒3mm/sec)을 유지 하였다.

5.2 실내 실험

신뢰성 높은 협재층 탐지를 위해 선단 지지력 및 전기 비저항이 동시 측정 가능하도록 개발된 CRPT의 적용성 평가를 위해 높이 1.8m, 직경 1.2m인 대형 calibration 챔버에서 실험이 진행되었다. 카올리나이트(GF-1250)와 모래(인공 K-7호사, 평균입경: 0.17mm)를 1:1로 배합하여 시료가 조성되었으며, 비중이 서로 다른 두 시료의 혼합과정에서 발생할 수 있는 재료 분리를 최소화시키기 위해 액성한계(LL=23%)의 2배인 46%로 시료를 조성하였다 (Kim 2004). 교반기를 이용하여 혼합된 시료는 균질성을 유지하기 위해 공기에 의한 기포 형성이 발생되지 않도록 주의하여 챔버 셀 안으로 주입 하였다.

셀 하부에 2cm 모래층을 포설하고 부직포를 깔아 원활한 양면배수가 되도록 노력하였다. 조성된 시료는 초기의 안정 상태를 유지하기 위하여 이틀 간 50kPa의 압력으로 가압했으며, 안정 후에는 최종 200kPa 까지 단계적으로 압력을 증가시켜 시료를 압밀 시켰다. 상·하부의 양면배수 조건으로 약 2개월 동안 압밀을 수행 하였으며, 최종 침하량은 56.2cm로 측정되었다.

재하하중에 대한 압밀이 종료된 시료에 대해, CRPT의 적용성 실험을 수행하였다. 현장 조건과 유사한 구속압을 조성하기 위해 실험 진행동안 100kPa의 구속압을 가압하였으며, 정밀한 관입속도의 유지를 위해 유압 관입기를 이용하였다. 시료는 경계면 구속효과를 고려하여 깊이 60cm까지 관입하였으며, 연속적인 관입을 통해 대상 지반의 특성을 측정하였다.

CRPT의 관입속도 영향을 평가하기 위해 깊이에 따라 관입 속도를 다르게 조절하였다. 초기 관입 속도는 1mm/sec를 유지 하였으며, 심도가 30cm 그리고 50cm 일 때 관입 속도를 5mm/sec 그리고 10mm/sec로 증가 시켜 실험을 진행하였다.

6. 결과

6.1 현장 실험

전기비저항과 선단지지력의 관계는 그림 3과 같다. 표준 콘 관입 실험 결과는 심도가 깊어질수록 선

단 저항력이 증가하여 하부 구조가 상부보다 단단한 지층으로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 심도에 따라 측정된 전기 비저항 결과는 Archie (1942)의 연구 결과에 따라 간극비 감소를 나타내며, 이는 표준 콘 관입 실험 결과의 경향과 유사하게 하부로 갈수록 단단한 지층이 있음을 의미한다. 즉, 강도 특성을 나타내주는 선단 지지력과 전기적인 특성인 전기 비저항이 서로 독립적이지 않으며 두 가지 시험결과를 종합하여 신뢰성 높은 지층 분석이 가능함을 알 수 있다.

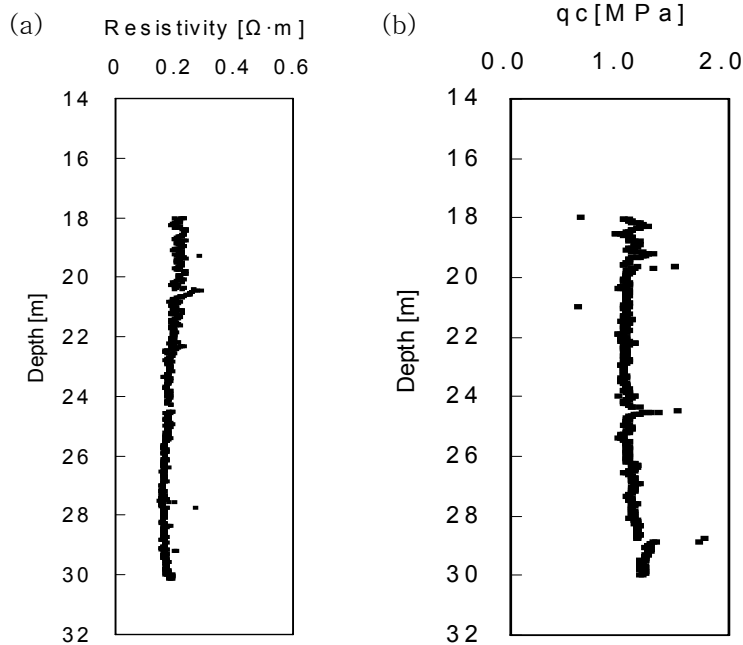


그림 3. 현장 실험 결과: (a) 선단 지지력; (b) 전기 비저항.

6.2 실내 실험

선단 저항력은 측정된 전압 값과 캘리브레이션 식을 이용해 그림 4에 나타내었다. 선단 저항력은 미세한 변화가 있지만 대체로 일정한 값으로 나타내며, 관입 속도를 증가시킨 심도 300mm와 500mm에서 선행연구 결과와 비슷하게 값이 증가 되는 것을 알 수 있다. 또한 심도 180mm와 480mm 지점에서 갑작스럽게 선단 저항력이 증가 되었으며, 이는 협재층과 같이 지층구조가 다른 층이 존재함을 나타낸다. CRPT를 이용하여 측정된 선단 저항력은 직선거리로 40cm 떨어져 측정된 표준 콘의 측정값과 비교하여 그림 4에 나타내었다.

전기 비저항 값 역시 측정된 전기 저항 값과 캘리브레이션을 통해 얻은 기울기 값을 이용하여 그림 4에 나타내었다. 선단 저항력과 비슷하게 관입 속도 증가 및 협재층 존재 구역에서 값이 증가 되는 것을 확인 할 수 있으며, 특히 협재층이 존재하는 영역에서 전기 비저항 값은 상당히 큰 증가 양상을 보이는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 전기 비저항 값의 민감도가 상당히 높음을 보여주며, 선단 저항력과의 상호 보완적인 측정을 이용하여 협재층 탐사 및 대상지반의 강도 특성 파악에 용이함을 보여준다.

Archie (1942)는 전기 비저항 값과 간극비를 비례 관계로 제안하였다. 측정된 전기 비저항 값은 심도 약 500mm 까지 감소하며, 이후에는 심도가 깊어질수록 증가 하는 경향으로 나타난다. 이에 따라 조성된 시료는 중간 부분 까지 간극비가 증가하여 상대적으로 약한 지층으로 형성 되어 있으며, 하부 지층으로 갈수록 간극비 감소로 인하여 지층이 단단한 것을 알 수 있다. 이는 시료 조성 시 양면배수로 상·하부 지층이 중간지층 보다 상대적으로 압밀이 촉진되었기 때문인 것으로 판단된다.

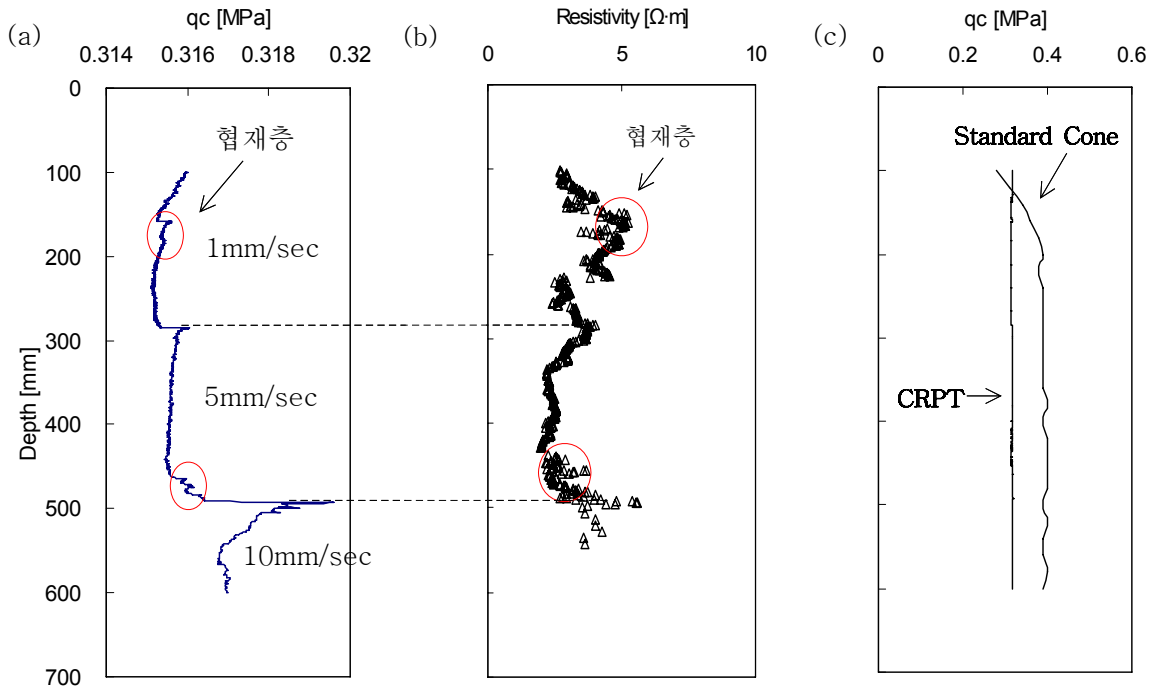


그림 4. 실내 실험 측정 결과: (a) 선단 지지력; (b) 전기 비저항; (c) 선단 지지력 비교.

7. 결론

본 연구에서는 현장 실험으로부터 증명된 선단 지지력 및 전기 비저항 관계를 이용하여 층상 탐지가 가능한 CRPT 장비를 개발하였다. CRPT는 마이크로 콘 형태로서 단면적이 0.78cm^2 ($D=1\text{cm}$) 이다. 선단 저항력은 기존 방법과 동일하게 선단부에 설치된 변형률계를 이용하여 측정되며, 전기 비저항도 비교란 영역 탐지를 위해 선단부분에서 측정할 수 있도록 제작되었다. 개발된 장비의 적용성 검토를 위해 시료 조성 후, 단계적인 압밀과정으로 압밀이 된 대형 캘리브레이션 챔버를 이용하여 실내 실험을 진행하였다. CRPT는 관입에 따라 연속적으로 측정되었으며, 관입 속도에 따른 영향을 검토하기 위해 1mm/sec, 5mm/sec, 그리고 10mm/sec의 관입 속도를 증가 시켰다. 개발된 CRPT는 점토층에서 사질 토층으로 바뀌는 경계면 탐지가 효율적으로 평가 되었으며, 특히 전기 비저항 값은 선단 저항력보다 협재층 탐사에 높은 민감도를 나타냈다.

새롭게 개발된 CRPT는 강도 및 전기적인 특성을 이용하여 연약지반 지층 구분 및 특성 파악에 신뢰성 높은 결과를 보여준다. 이는 추후 현장 적용시 대상 지반의 특성을 고해상도로 반영하여 탁월한 지반 조사 장비로 사용될 가능성이 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 지역특성화 연구개발사업(과제번호:B04-01)과 2008년도 산학협동재단 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이종섭, 김준한, 윤형구, 조태현, 최용규 (2008). “전기저항 콘 프로브를 이용한 해안 지반의 간극률 산정”, 2008년 지반공학회 봄 학술발표 대회. pp. 127-133.
2. 이종섭, 신동현, 윤형구, 이우진 (2008). “초소형 마이크론콘 관입시험기의 개발 및 적용”, 지반공학회 논문집, 제 24권 1호, pp. 77-86.
3. Archie, G .E. (1942). "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics", Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Vol. 146, pp. 54-62.
4. Bembem, S. M. and Myers, H. J. (1974). “The Influence of Rate of Penetration on Static Cone Resistance in Connecticut River Valley Varved Clay”, Proceedings of the European Symposium Penetration Testing, Stockholm. Vol. 2, No. 2, pp. 33-34.
5. Campanella, R. G. and Kokan, M. J. (1993). "A new approach to measuring dilatancy in saturated sands", Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 16, No. 4, pp. 485-495.
6. DeJong, J. T., DeGroot, D. J., Yafrate, N. J. and Jakubowski, J. (2003). “Detection of Soil Layering Using a Miniature Piezoprobe”, Soil Rock America 2003, Boston, MA, pp. 151-156.
7. De Lima, D. C. and Tumay, M. T. (1991). “Scale Effects in Cone Penetration Tests”, Proceedings of the Geotechnical Engineering Congress 1991, ASCE, Boulder, Colorado, Vol. 1, pp. 38-51.
8. Hird, C. C., Johnson, P. and Sills, G. C. (2003). “Performance of Miniature Piezocones in Thinly Layered Soils”, *Geotechnique*, Vol. 53, No. 10, pp. 885-900.
9. Kim, T. J. (2004). "Dissipation of pore water pressure due to piezocone penetration in OC clay", Ph.D thesis, Korea University.
10. Liu, Z., Shi, B. and Sheng, D. (2006). “A Micro penetrometer for Detecting Structural Strength Inside Soft Soils”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 29, No. 6, pp. 15-22.
11. Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M. (1997). “Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice”, Blackie Academic & Professional.
12. Yafrate N. J. and DeJong, J. T. (2005). “Detection of Stratigraphic Interfaces and Thin Layering Using a Miniature Piezoprobe”, *GeoFrontiers2005*, ASCE, Austin, Texas, GSP138, pp. 2103-2113.
13. Yun, T. S. (2005). “*Mechanical and Thermal Study of Hydrate Bearing Sediments*”, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
14. Zuidberg, H. M., ten Hoop, J. and Geise, J. M. (1987). "Advances in in-situ measurements", Proceedings of the 2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Kobe, Vol. 1, pp. 279-291.