한국지반공학회논문집 제24권 2호 2008년 2월 pp. 77 ~ 86

초소형 마이크로콘 관입시험기의 개발 및 적용

Development and Application of Ultra Small Micro-Cone Penetrometer

이 종 섭[1] Lee, Jong-Sub　　신 동 현[2] Shin, Dong-Hyun
윤 형 구[3] Yoon, Hyung-Koo　　이 우 진[4] Lee, Woojin

Abstract

The disturbance zone and measured values are affected by the size of the penetrometer. The local value may be measured by the smaller penetrometer. An ultra small Micro-Cone penetrometer (5mm in outer diameter) is designed and manufactured to characterize soil properties with minimum disturbance during penetration tests. The tip resistance is measured by using stain gauges attached near the Micro-Cone. In addition, the friction sleeve is adopted to effectively remove the skin friction from the tip resistance. Design concern includes the installation of stain gauges, circuits, penetration systems, penetration rate, sampling rate, operating temperature, and calibration. Application tests show that the clay interface, and the soil layers consisting of clay and sand are clearly detected by the Micro-Cone. Furthermore, the cone tip resistances measured by the Micro-Cone and the miniature cone (16mm in outer diameter) are similar. Note the resolution is much higher in the Micro-Cone. This study shows that the Micro-Cone may effectively detect the soil interface with high resolution, and with minimum disturbance.

요 지

흙의 교란영역과 측정값은 관입시험기의 크기에 영향을 받는다. 관입기의 크기가 작을수록 더 국부적인 값을 얻을 수 있다. 관입시험 시 흙의 교란을 최소화 하면서 흙의 특성을 파악하기 위하여 극소형 마이크로콘(외경 5mm)을 설계 및 제작하였다. 선단저항력은 마이크로콘 선단부에 설치된 변형률계를 이용하여 측정하였다. 뿐만 아니라 선단저항력으로부터 마찰저항력 성분을 효과적으로 제거하기 위하여 이중관 형식의 마찰 슬리브를 채택하였다. 설계 시 변형률계의 설치, 회로구성, 관입시스템, 관입속도, 측정률, 작동 온도, 그리고 calibration 과정이 고려되었다. 점토의 경계면, 점토-모래지반의 경계면을 마이크로콘을 적용함으로써 효과적으로 찾아 낼 수 있었다. 뿐만 아니라, 마이크로콘과 직경 16mm의 미니어처 콘을 이용하여 측정한 선단저항력이 매우 유사하지만, 마이크로 콘의 해상도가 매우 높은 것으로 나타났다. 본 논문은 마이크로 콘이 매우 높은 해상도 그리고 주변지반의 변형을 최소화하면서 흙의 경계면을 효과적으로 감지할 수 있음을 보여준다.

Keywords : Calibration Chamber, Cone tip resistance, Interface detection, Layer detection, Liquefaction, Miniature cone

1. 서 론

최근 들어 빠르고 경제적이며 연속적인 데이터를 획득할 수 있다는 장점 때문에 콘관입시험이 많이 수행되고 있다. 콘관입시험은 대상 지반에 일정한 속도(표준 20mm/sec)로 콘을 관입시켜 연속적인 관입저항치를 측

1 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ)
2 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)
3 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)
4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr 교신저자)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

정하는 시험으로써, 별도의 시추공이 필요 없고 신뢰할 만한 데이터를 획득할 수 있기 때문에 대상 지반의 공학적 특성을 평가하기 위해 오늘날 보편적으로 사용되는 지반조사 시험방법 중 하나이다. 그러나 원지반 속으로 콘을 밀어 넣기 때문에 타 지반 조사 장비와 마찬가지로 주변 지반을 교란시키게 된다. 이때 발생하는 저항특성을 콘을 이용하여 측정하게 된다. 그러나 지층을 감지하기 위해서는 관입에 따른 주변 지반의 교란을 최소화시키는 것이 상당히 중요하다. Powell와 Quarterman (1988)에 따르면 콘의 직경은 관입시험 동안에 생성되는 과잉간극수압의 크기에 비례한다고 하였다. 또한, 콘의 직경이 커지게 되면 관입에 따른 주변 지반의 전단변형에 더 넓은 면적이 관여되어 평균화 되기 때문에 해상도가 감소하게 된다(Hird 등 2003). 표준 콘을 가지고 실내시험을 할 경우, 그 크기에 의한 영향(시료-콘 직경비)과 시료 경계에 의한 영향(boundary effects) 때문에 더욱 더 부정확한 데이터를 얻게 된다(Parkin와 Lunne 1982; Baldi 등 1985). 따라서 콘의 직경이 작을수록 관입에 따른 교란이 작아지고 시료 경계에 대한 영향도 줄어든다.

본 논문에서는 주변 지반의 교란을 최소화시키고 실내실험 시 크기에 의한 영향을 줄이기 위해, 콘의 크기가 작으면서도 주면마찰력을 완전히 분리하여 선단저항력을 측정할 수 있는 마이크로콘 관입시험기(Micro-Cone penetrometer)를 개발하였다. 그리고 새롭게 개발된 마이크로콘 관입시험기의 다양한 적용성을 소개하였다.

2. 기존의 소형 관입시험기

지금까지, 주로 간극수압을 측정할 수 있는 소형 관입장비들이 개발되었다. Hird 등(2003)은 1cm^2(직경11.3mm)의 면적을 가진 소형 피에조콘(Miniature piezocone)을 개발하여 얇은 층상으로 구성된 시료(thinly layered soil)에 대한 관입 시험을 수행하였다. 그 결과 1cm^{2}의 소형 피에조콘이 그보다 큰 직경을 갖는 콘에 비해 뛰어난 층상 구별 능력을 가지며 투수층의 탐지 면에 있어서도 민감하게 반응하는 것을 관찰하였다. 이는 DeJong 등 (2003), Yafrate와 Dejong(2005)의 결론과도 일치한다. 그들은 각각 12.5mm, 12.7mm의 직경을 갖는 소형 피에조프로브(Miniature Piezoprobe)를 개발하여 varved clay와 같은 층상구조를 지닌 시료에 대한 시험을 실시하여 소형 피에조프로브가 일반적인 CPTu보다 훨씬 고해상도로 층상 경계면을 탐지해 낸다는 점을 입증하였다.

간극수압이 아닌 콘 저항력을 측정하는 소형 관입장비도 개발되었다. Yun(2005)은 외경 5.6mm의 콘 모양 스테인레스 스틸에 full-bridge 변형률계 회로를 이용하여 콘 저항치를 측정할 수 있는 소형 콘 모양의 장비를 개발하지만 선단저항력과 주면마찰력을 분리가 어려운 장비로써 전체지지력이 측정되는 장비였다. Liu 등 (2006)은 직경 0.3~1mm의 관입 프로브를 가진 초소형 관입기(Micropenetrometer)를 개발하여 연약지반의 조직 강도(structural strength)를 측정하였다. 지금까지 개발된 소형 관입기 중에서 가장 작은 직경을 갖는 관입기이기는 하지만 프로브 전체가 로드셀에 연결되어 관입저항치를 측정하기 때문에 이 역시 선단저항력과 주면마찰력의 정확한 구분이 불가능하였다.

3. 마이크로콘 관입시험기

3.1 설계 시 고려사항

지금까지 간극수압이 아닌 콘 저항치를 측정할 수 있는 소형 관입장비들의 최대 문제점은 주면마찰력을 완전히 분리하여 선단저항력을 정확하게 측정하는 것이 불가능하였다는 점이다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하여 선단저항력을 정확하게 측정할 수 있는 새로운 마이크로콘 관입시험기를 소개하려고 한다(Shin 2008).

마이크로콘 관입시험기의 설계에 있어서 가장 주요한 고려사항은 다음의 세 가지이다: (1) 직경 5mm; (2) 독립적인 선단저항력의 측정; 그리고 (3) 상대적으로 높은 해상도의 획득. 주면마찰력과 선단저항력의 완전한 분리를 위해 일명 "Subtraction Cone"을 참고로 하여 2중 관으로 된 로드(rod)가 고려되었다(Schaap과 Zuidberg 1982; Lunne 등 1997). 선단저항력은 콘 선단과 연결되어 있는 내관(inner rod)의 앞부분에 부착된 초소형 변형률계를 이용하여 측정을 하게 되고 주면마찰력의 영향을 받는 외관(outer rod)은 콘의 선단 및 내관의 앞부분과 분리되어 있으며 내관의 뒷부분에서 연결되도록 하여 주면마찰력의 영향을 제거하였다. 이와 동시에 직경이 5mm로 상당히 작기 때문에 내관 안쪽 벽면에 변형률계의 부착가능성과 2중 관의 강성을 고려하되 민감한 변형률의 획득을 위하여 가능한 한도 내에서 최대한 얇은 두께로 내관과 외관의 두께를 결정하였다. 그림 1은 마이크로콘 관입시험기의 개요도 및 사진을 나타낸다.

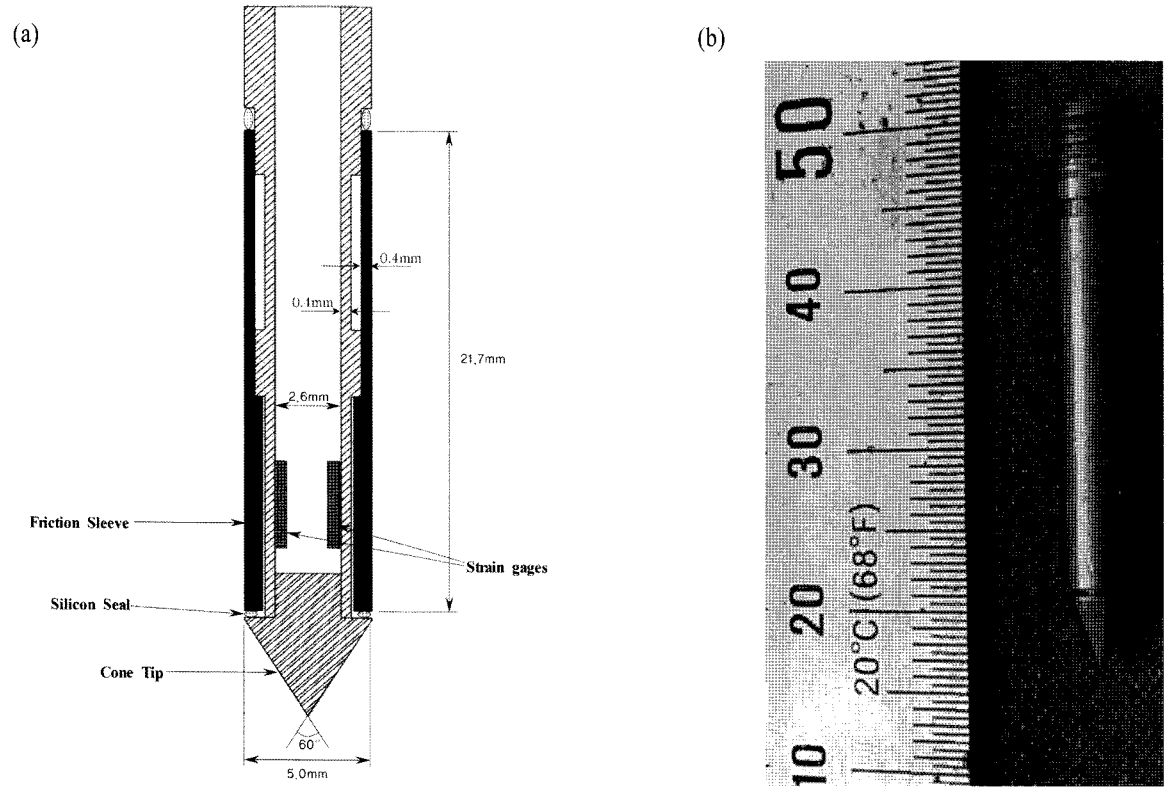

그림 1. 마이크로콘 관입시험기: (a) 개요도; (b) 사진

3.2 회로의 구성

선단저항력은 콘 선단과 연결되어 있는 내관의 앞부분 내벽에 부착된 두 개의 초소형 변형률계를 이용하여 측정을 하게 된다. 변형률계는 피측정물이 받는 변형률과 동일하게 늘어나거나 수축되도록 단단히 접착되어, 수감소자(금속저항박)가 변형률에 따라 신축된다. 대부분의 금속은 기계적인 인장과 압축이 가해질 때 그 본래의 전기저항은 변화하며 변형률계는 이 원리를 응용해 저항변화에서 변형률을 측정한다. 하지만 변형률 자체가 아주 작기 때문에 그것에 의해 발생하는 저항 변화도 극히 미세하다. 이와 같은 미소한 저항변화를 정확하게 측정하는 것은 어렵기 때문에 일반적으로 사용되고 있는 저항계로는 계측이 불가능하다. 따라서 휘트스톤 브리지(Wheatstone Bridge)라고 불리는 변형률 증폭 전용 전기회로를 이용하여 미소한 저항변화를 측정한다.

그림 2는 선단저항력 측정을 위한 주변장치를 나타낸 것이다. 마이크로콘 관입시험기가 대상 지반에 관입될 때 선단부에 부착된 변형률계의 저항 변화를 휘트스톤 브리지를 이용하여 증폭시키고 전압의 변화로 변형시킨다. 이 전압의 변화를 Agilent 34401A 멀티미터로 측정하여 지반의 관입저항을 평가하게 된다.

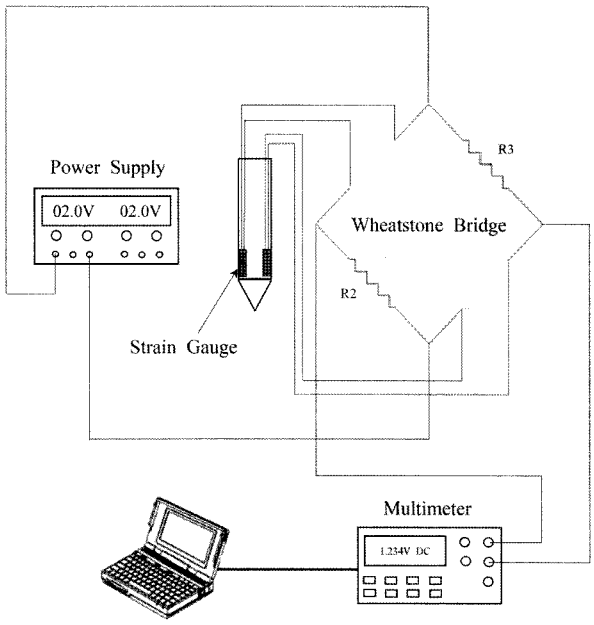

그림 2. 선단저항력 측정을 위한 주변장치

3.3 관입 장치

마이크로콘의 관입 장치는 크게 연결 로드(pushing rod)와 추력 구동부(thrust mechanism)로 구성되어 있다. 두 개의 변형률계와 연결된 전선의 보호와 로드 내 전선의 위치 확보를 고려하여 외경 10mm, 내경 7mm의 스테인레스 스틸 중공관을 가공하여 연결로드로 사용하

였다. 추력 구동부는 콘 로드의 외측에 배치되고 콘 관입을 위한 회전 구동력을 생성하는 전기모터와, 로드 추력 베어링, 전기모터의 회전 구동력을 로드 추력 베어링에 전달하는 로드 추력 변환 장치로 구성되어 있다. 로드 추력 변환 장치는 모터의 구동축에 배치되는 구동 풀리와 로드 추력 베어링 각각의 외주에 접촉하는 구동 벨트로 구성되어 있고 관입 속도는 감속기에 의해 조절된다.

3.4 관입 속도(Penetration Rate)

Lunne 등(1997)에 따르면, 단면적이 5cm^2~15cm^{2}인 콘은 대부분의 지반에서 상당히 유사한 선단저항력을 나타내지만, 이보다 크거나 작은 콘을 사용할 경우, 콘의 관입속도는 변형률 속도(strain rate)의 차이를 고려하여 이상적으로 조정되어야 한다. de Lima와 Tumay(1991)는 단면적 1.27cm^{2}인 콘의 선단저항력이 표준콘의 선단저항력 보다 18% 정도 더 크다고 하였다. 이는 2cm^2 콘과 15cm^2 콘의 선단저항력을 비교 분석한 Titi 등(2000)의 연구 결과와도 연관성이 있다. 그들은 2cm^2 콘이 표준콘에 비하여 선단저항력의 경우 11% 정도 큰 측정값들을 보이고 주면마찰력은 9% 정도 작은 측정값들을 보인다고 하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 직경 5mm (단면적 0.196cm^2)의 마이크로콘 관입시험기를 사용할 경우, 표준콘보다 큰 선단저항력을 측정하게 되므로 관입속도의 조정이 필요하다.

콘의 관입속도는 크립(creep)이나 입자 파쇄 등을 일으킬 수 있으나, 일반적으로 피에조콘 사용 시 간극수압 측정에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Bemben와 Myers(1974)는 약간 과압밀된 점토에서 0.2mm/sec~200mm/sec의 콘관입속도에 대한 선단저항력 비교 실험을 실시하여, 그림 3과 같이 정리하였다. 2mm/sec의 콘

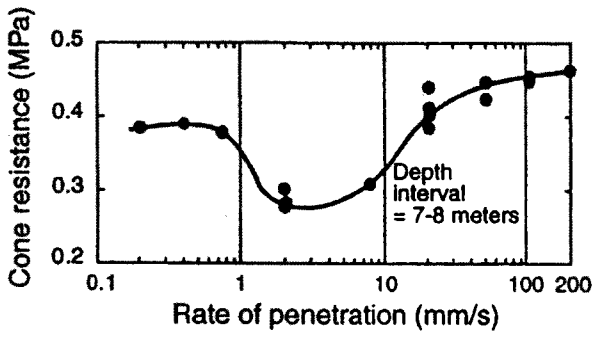

그림 3. 콘관입속도가 선단저항력에 미치는 영향(Bemben와 Myers 1974)

관입속도에서 측정된 선단저항력은 최소이고 그보다 빠를 경우와 느릴 경우 모두 선단저항력이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 Roy 등(1982)의 결과와도 거의 일치한다.

마이크로콘의 관입속도를 결정함에 있어서 고려해야 할 또 다른 사항은 배수조건이다. 마이크로콘의 관입은 주변지반의 변형을 발생시켜 포화된 점토 지반에서 과잉간극수압을 발생시킨다. 콘 선단 주변의 배수 조건은 콘이 관입되는 시간(t_{pen}) 및 과잉간극수압의 소산시간(t_{dis})과 관계가 있다. Lee(2003)의 연구에 의하면 $t_{dis}/t_{pen} \gg 1$인 비배수 관입 조건에서는 콘의 관입이 지반의 국부적인 체적 변화를 일으키지 않는다고 하였다.

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

여기서, d는 마이크로콘의 직경, λ는 콘 선단부의 길이, V_{in}은 관입 속도, c_v는 압밀계수를 나타낸다.

본 논문에서는 마이크로콘의 단면적과 관입속도에 의한 영향을 고려하는 동시에, 관입 시 비배수 상태를 유지하도록 콘 관입 속도를 1mm/sec로 결정하였다.(식 1)을 이용하여 콘 관입 속도가 1mm/sec일 때의 배수 조건을 검증해 보면, 점토에서 $c_v = 1\times10^{-3}$cm^2/sec(Lambe와 Whitman, 1979), λ = 0.433cm, d = 0.5cm, V_{in} = 0.1 cm/sec이고 이를 토대로 계산된 t_{dis}/ t_{pen} = 57.737이다. 따라서 1mm/sec로 관입하는 것은 비배수 상태임을 알 수 있다.

3.5 Calibration

마이크로콘의 선단저항력은 변형률계를 이용하여 측정된 전압의 변화량으로부터 계산된다. 여기서 주의할 점은 변형률계의 저항이 변형률에 의해 변화될 뿐만 아니라 주변 온도에 의해서도 변화된다는 점이다. 또한, 입력 전압이 너무 클 경우 변형률계가 점차 가열되어 저항의 변화가 발생하게 된다. 따라서 적절한 입력 전압과 작동 온도 범위는 사전에 결정되어야 할 것이다.

그림 4는 입력 전압에 의한 영향을 나타낸다. 일정한 작동 온도 (20°C)에서 작용되는 하중 없이 입력 전압의 크기만 다르게 하였을 때 시간의 경과에 따라 측정되는 전압을 도시한 것이다. 입력 전압이 1~2V일 경우 시간에 따라 측정된 전압에는 변화가 거의 없다. 그러나 입력 전압이 3V 이상일 경우 시간이 경과함에 따라 측정

된 전압이 감소함을 알 수 있다. 작용되는 하중이 없는데도 불구하고, 높은 입력 전압에 의해 변형률계가 가열되면서 측정 전압에 변화가 생긴다. 따라서 본 연구에서는 입력 전압으로 2.0V를 선택하였다.

그림 5는 작동 온도에 의한 영향을 나타낸다. 일정한 입력 전압(2.0V) 하에서 작용되는 하중 없이 주변 온도만 다르게 하였을 때 시간의 경과에 따라 측정되는 전압을 도시한 것이다. 주변 온도가 20°C일 경우 시간에 따라 측정된 전압에는 변화가 거의 없다. 그러나 주변 온도가 20°C 미만일 경우 변형률계에 약간의 수축이 발생하고, 주변 온도가 20°C 초과일 경우 변형률계에 약간의 이완이 발생하여 시간에 따라 측정된 전압에는 변화가 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 작동 온도가 항상 18°C~22°C를 유지하도록 하였다.

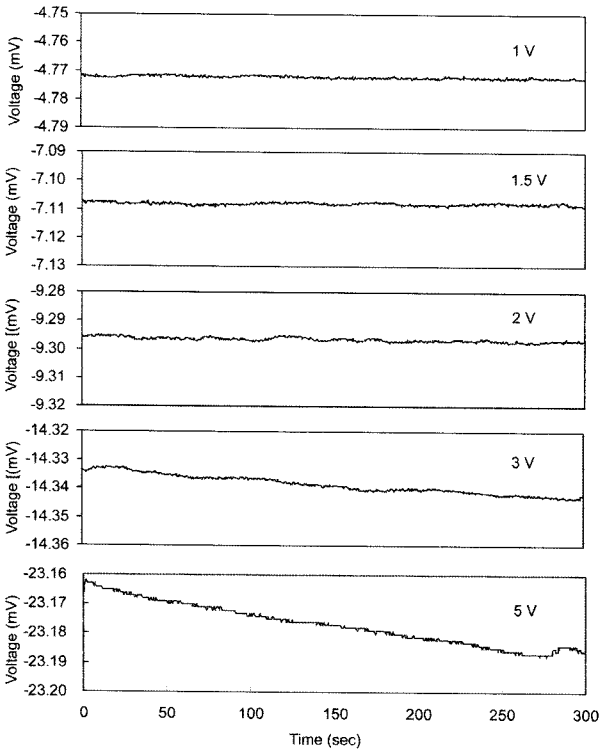

그림 4. 입력 전압에 의한 영향(온도: 20℃)

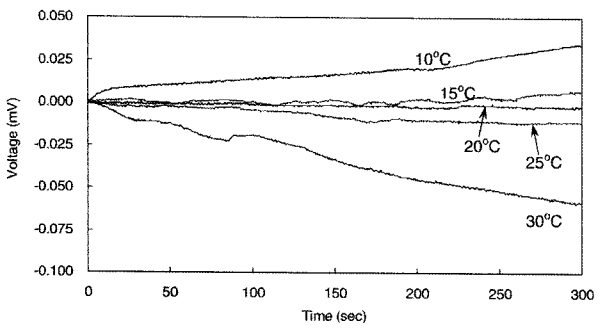

그림 5. 작동 온도에 의한 영향(입력 전압: 2.0V)

일정한 입력 전압(2.0V)과 작동 온도(18°C~22°C) 하에서 특별히 제작된 calibration 장비를 이용하여 4.8kg의 연직 작용 하중까지 마이크로콘의 calibration을 수행하였다. 그림 6은 마이크로콘의 calibration 데이터를 나타낸다. 마이크로콘의 calibration 결과, 작용 하중 (P)와 측정 전압 변화량 (ΔV) 사이에 (식 2)와 같은 관계가 있음을 확인하였다.

$$P\ [g] = 21971.76 \times \Delta V\ [mV] \quad (2)$$

4. 적용 시험

본 연구에서 개발한 마이크로콘의 적용성 검증을 위하여 특별히 준비된 각종 시료를 가지고 마이크로콘의 다양한 적용성 실험을 실시하였다. 실시된 모든 실험에 있어서 입력 전압은 2V, 작동 온도는 18°C~22°C였으며 마이크로콘은 1mm/sec의 속도로 관입되었고 데이터는 매 0.5mm마다 획득하였다.

4.1 경계면 탐지(Interface Detection)

작은 크기의 관입시험기는 경계면(interface)을 더 정확하게 탐지해낼 수 있는 방향으로 점차 발전되어왔다. 본 연구에서 개발한 마이크로콘의 경계면 탐지 능력을 분석하기 위하여 부산 점토를 물과 혼합하여 슬러리 상태로 만든 후 이를 액성한계까지 압밀시킨 점토 시료를 가지고 경계면 탐지 실험을 실시하였다. 그림 7은 마이

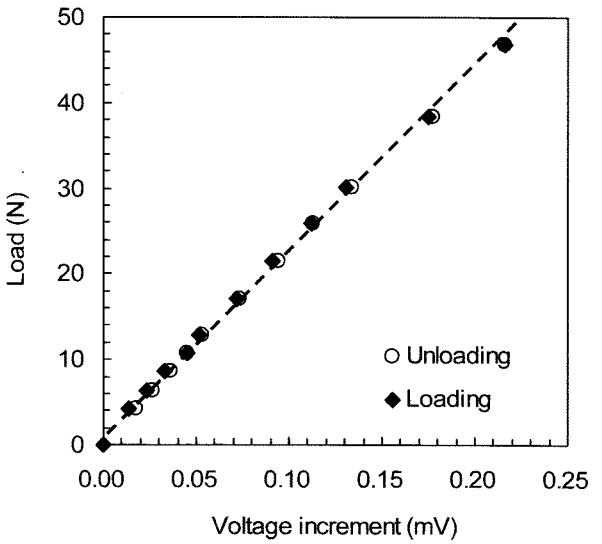

그림 6. 마이크로콘 calibration: 작용 하중과 출력 전압 관계(입력 전압: 2.0V, 온도: 20℃)

크로콘으로 공기와 점토의 경계면 탐지 실험을 실시한 결과를 도시한 것이다. 공기 중에서 일정하던 선단저항은 점토시료의 경계면에서부터 15mm 부근까지 선형적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 이유는 압밀후 관입실험을 실시하기 위하여 시료의 하중을 제거하여 상부의 하중이 이완되어 나타난 현상으로 사료된다. 15mm 이후의 선단저항이 비교적 일정한 값에 수렴하기는 하지만 미세하게 증가함을 알 수 있다. 이는 점토 압밀 시료를 조성할 때 하부 방향 배수조건이어서 시료 하부에 조금 더 많은 압밀이 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 층상 탐지(Layer Detection)

지금까지 소형 관입장비는 많은 연구자들에 의해 연구되었으며 다양한 형태의 소형 관입장비들이 개발되었다. 이렇게 개발된 소형 관입장비들은 기존의 표준 콘보다 더 정밀하고 연속적이며 높은 해상도를 갖는 것을 특징으로 하였다. 이런 특징들을 효과적으로 검증할 수 있는 것이 바로 층상 탐지 실험이다. 그러나 지금까지 고해상도의 소형 관입장비는 주로 간극수압을 측정하는 것으로부터 비롯되었다. 선단저항력의 정확한 분리 측정이 가능하지 못했을 뿐 아니라 간극 수압을 측정하는 것이 좀 더 민감한 측정 값을 얻을 수 있었기 때문으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 선단저항력을 정확하게 측정할 수 있도록 새롭게 개발된 마이크로콘을 가지고 층상 탐지 실험을 실시하였다.

특별히 제작된 층상 모형 셀에 점토와 사질토가 번갈아 쌓여있는 시료에 대해 마이크로콘의 층상 탐지 실험을 실시하였다. 점토층은 분말상태의 카올리나이트(kaolinite)를 이용하여 액성한계보다 약간 낮은 60%의 함수비로 반죽하여 층을 만들었다. 사질토층은 규암 분쇄토인 K-7 모래를 사용하였다. 카올리나이트와 K-7 모래의 기본 물성치는 표 1과 2에 각각 정리하여 나타내었다.

그림 8은 층상 모형 셀의 개요도를 나타낸다. 셀은 투명한 아크릴 재질로 내경 200mm, 높이310mm의 원통형 모양으로 만들어졌다. 셀은 총 9개의 층으로 나누어지는데 5개 층은 높이 50mm의 점토층, 나머지 4개 층은 높이 15mm의 사질토층으로 조성하였다. 그림 9에 조성된 시료 사진을 나타내었다.

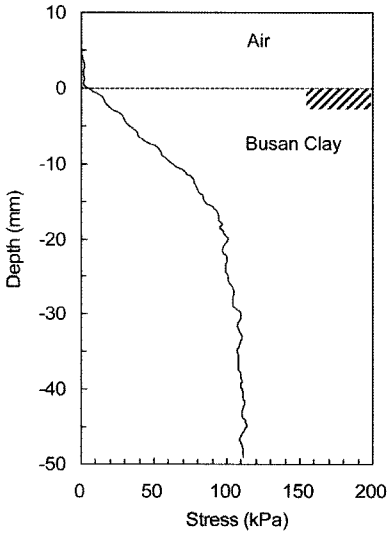

그림 7. 공기-점토의 경계면 탐지

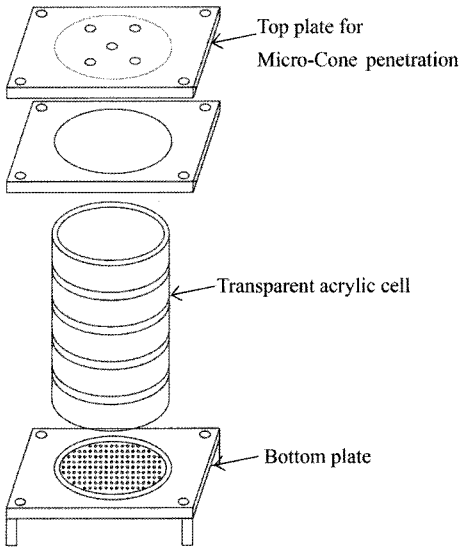

그림 8. 층상 탐지 셀의 개요도

표 1. 카올리나이트 및 부산 점토의 기본 물성치

액상한계(%)	소성한계(%)	소성지수	비중	통일분류법
67.2	30.8	36.4	2.65	CH
46.4	24.1	22.3	2.64	CL

표 2. K-7 모래의 기본 물성치

비중	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	곡률계수	균등계수	e_{max}	e_{min}	통일분류법
2.65	0.09	0.17	0.99	2.11	1.05	0.71	SP

깊이에 따라 측정된 마이크로콘의 선단저항력은 그림 10과 같다. 실험 결과, 점토층에서 선단저항력은 깊이에 따라 큰 변화 없이 약간 증가하는 경향을 보이다가 점토층에서 사질토층으로 바뀌는 경계면에서는 선단저항력이 상당히 크게 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 시료의 층상 구조에 따라 마이크로콘의 선단저항력이 상당히 민감하게 반응하여 층상구조를 비교적 정확하게 탐지해 내는 것을 나타낸다. 그러나 그림 10에서 확인할 수 있는 바와 같이 사질토층에서 점토층으로 바뀌는 경계면은 민감하게 탐지하지 못하는 것을 알 수 있다. 즉, 하부에 강성이 큰 물질이 있을 경우는 저항이 빠르게 변화하고 반대의 경우는 반응이 늦게 일어나는 일반적인 콘 선단 저항치 데이터와 비슷한 경향으로 나타난 것을 확인해 볼 수 있었다. 이에 따라 사질토층에서 점토층으로 바뀌는 경계면은 뚜렷하게 구별되지 못하고 선단저항력이 완만하게 감소하였다. 만약 점토층이 좀 더 단단하다면 사질토층에서 점토층으로 바뀌는 경계면이 좀 더 민감하게 탐지될 것으로 판단된다.

마이크로콘의 층상 탐지 실험 결과, 지금까지 개발된 소형 관입장비들의 주된 연구였던 간극 수압이나 전기비저항 탐사가 아닌 마이크로콘의 선단저항력으로 상당히 고해상도의 층상 탐지 능력이 가능함을 확인하였다.

4.3 미니어처 콘(Miniature Cone) vs. 마이크로콘 관입 시험기

마이크로콘을 이용하여 측정한 선단저항력의 타당성 검증을 위하여 직경 16mm(단면적 2cm^2)의 미니어처 콘과 본 연구에서 개발된 마이크로콘의 선단저항력 측정 비교 실험을 실시하였다. 본 연구에서 비교 실험을 실시한 16mm 미니어처 콘은 기존의 실험을 통하여 이미 그 효용성이 검증된 바 있고 실내 실험 시 시료-콘 직경 비에 의한 영향과 시료 경계에 의한 영향을 줄이기 위해 표준 콘 대신 비교 대상으로 선정되었다.

그림 11은 마이크로콘, 미니어처 콘, 그리고 표준 콘의 크기를 비교한 사진이다. 실험에 사용된 미니어처 콘과 마이크로콘의 상세 제원은 표 3에 정리하였다.

마이크로콘과 미니어처 콘의 비교 실험은 내경 700mm,

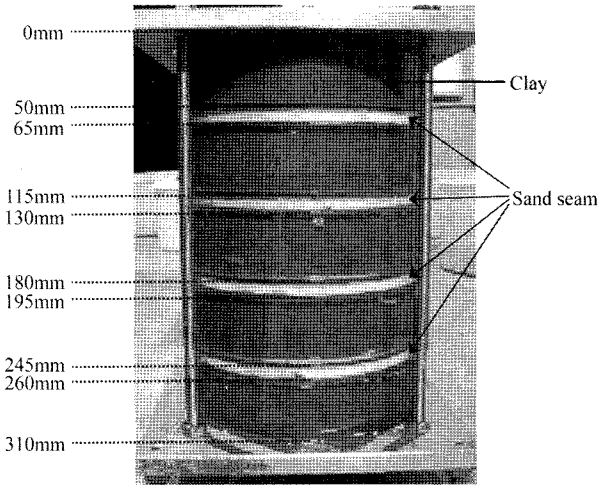

그림 9. 층상 탐지 셀에 조성된 층상 시료

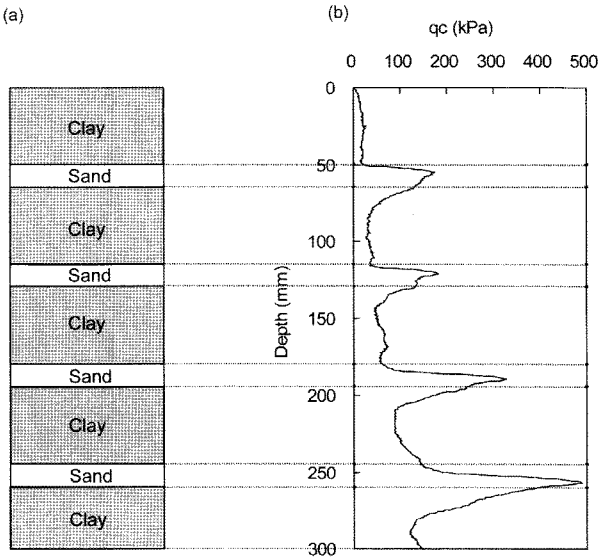

그림 10. 깊이 별 측정된 선단저항력

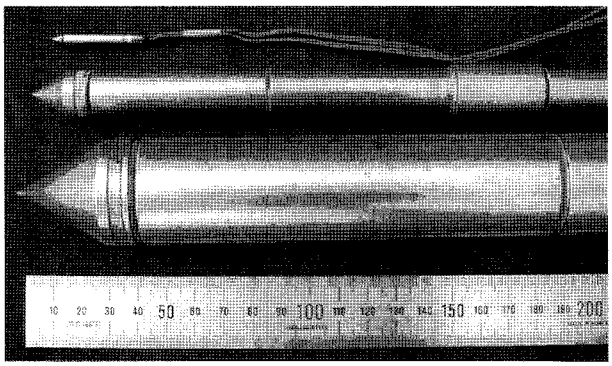

그림 11. 마이크로콘, 미니어처 콘, 표준 콘 비교

표 3. 미니어처 콘과 마이크로콘의 상세 비교

	직경	콘면적	Cone tip angle	관입속도
Miniature Cone	1.6cm	2.01cm^2	60°	2cm/sec
Micro-Cone	0.5cm	0.20cm^2	60°	1mm/sec

높이 1000mm의 대형 챔버에서 이루어 졌다. 본 실험에서 사용한 부산 점토의 기본 물성치는 표 1에 정리하였다. 시료를 슬러리 상태로 만들기 위해 대형 슬러리 믹서기를 이용하여 액성한계 두 배의 함수비(93.2%)로 물과 혼합하였다. 혼합하는 동안 대형 슬러리 믹서기에 연결되어 있는 진공 펌프를 이용하여 점토 속 공기를 제거하였다. 시료의 균등 압밀을 위하여 챔버 하부판에 필터재(fliter textile)와 모래층(sand mat)을 30mm 두께로 깔고 슬러리를 대형 챔버로 옮겼다. 시료 표면에도 필터재(fliter textile)와 모래층(sand mat)을 30mm 두께로 깔았다. 이틀간 50kPa의 압력을 가하여 시료를 안정시킨 후, 압력을 200kPa까지 단계적으로 증가시켜가며 30일 동안 챔버의 위, 아래 양방향 배수 압밀을 시켰다. 32일간의 압밀 후, 시료의 최종 높이는 651mm이었다.

압밀 후 실시한 마이크로콘(관입속도: 1mm/sec)과 미니어처 콘(관입속도: 20mm/sec)의 관입시험 결과는 그림 12에 도시한 것과 같다. 그림 12에서 확인할 수 있는 바와 같이 마이크로콘의 선단저항력은 관입 초기에 상당히 큰 값을 보이고 시료의 중간 부분인 300~400mm 깊이에서 가장 작은 값을 보이다가 시료의 하부로 가면서 다시 증가하게 되는데, 이는 챔버의 경계효과 때문인 것으로 판단된다. 시료를 압밀시킬 때 챔버의 위, 아래 양방향 배수이기 때문에 시료의 윗부분과 아랫부분은 시료의 중앙부 보다 더 많은 압밀이 발생하였고 이에 기인하여 시료의 위와 아래 경계면 부분에서 훨씬 더 큰 선단저항력이 측정된 것으로 추정된다. 이는 미니어처 콘 선단저항력 프로파일의 경향과도 일치한다. 그러나 미니어처 콘의 관입 시험은 챔버 상판 어댑터(adaptor)의 문제로 인해 50mm 정도 미리 관입을 시켜놓고 실험을 실시하였다. 이에 따라 미니어처 콘 관입 시험의 데이터는 150mm 이후의 것만 분석에 사용하였다. 실험결과, 측정된 마이크로콘과 미니어처 콘의 선단저항력은 상당히 유사한 경향을 보이고 측정된 선단저항력의 크기 또한 큰 차이 없이 유사함을 확인하였다. 측정된 선단저항력의 크기가 서로 유사하다는 점은 미니어처 콘과 마이크로콘의 단면적과 관입속도 차이에 의한 영향을 고려했을 때 타당한 결과라고 할 수 있다. de Lima와 Tumay(1991)와 Titi 등(2000)은 단면적이 7~8배 정도 작은 콘의 선단저항력이 큰 단면적을 갖는 콘에 비해 11~18% 정도 크게 측정된다고 하였다. 따라서 마이크로콘은 미니어처콘 보다 10~20% 정도 큰 측정값을 나타낼 것이다. 그러나 관입속도에도 차이가 있기 때문에 이점 또한 고려를 해야 한다. 앞의 그림 3에서 확인할 수 있는 바와 같이, 미니어처콘의 관입속도 20mm/sec일 때의 선단저항력이 마이크로 콘의 관입속도 1mm/sec일 때 보다 14% 정도 크다(Bemben와 Myers 1974). 이에 따라 콘의 단면적과 관입속도를 동시에 고려할 경우, 미니어처 콘과 마이크로콘의 선단저항력은 큰 차이없이 유사한 값을 보이게 된다. 실험 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 단면적 차이에 의한 영향과 관입속도 차이에 의한 영향이 서로 상쇄되어 비슷한 크기의 선단저항력이 측정되었다. 이는 개발된 마이크로 콘의 측정 데이터가 신뢰성이 있다는 것을 의미 하며, 추후 초소형 크기의 장점을 이용하여 타 장비와의 결합을 통해 하이브리드 장비로 발전할 수 있다는 가능성을 제시한다. 뿐만 아니라, 마이크로 콘의 직경이 작기 때문에 챔버의 경계효과를 고려하여 챔버의 직경을 줄일 수 있어 챔버실험시 비용과 시간을 줄일 수 있다.

4.4 액상화로 인한 지지력 변화

액상화 현상이 발생된 후에 강도 변화를 조사하기 위해 1g 모델을 이용하여 액상화 실험을 수행하였다. 액상화 토조의 치수는 높이 400mm 내경이 190mm이다. 층상 탐지에 사용된 동일 시료인 규암 분쇄토 K-7 모래시료를 이용하여 수중 강하법을 통해 시료를 조성 하였다. 시료의 초기 높이는 310mm로서 상대밀도는 37%로 나타났다. 액상화 시험은 수중 강하 이후 24시간 경과후에 수행되었다. 100N의 햄머를 이용하여 액상화 토조의 하판을 타격하여 시료의 액상화 현상을 유발 시켰다(자세

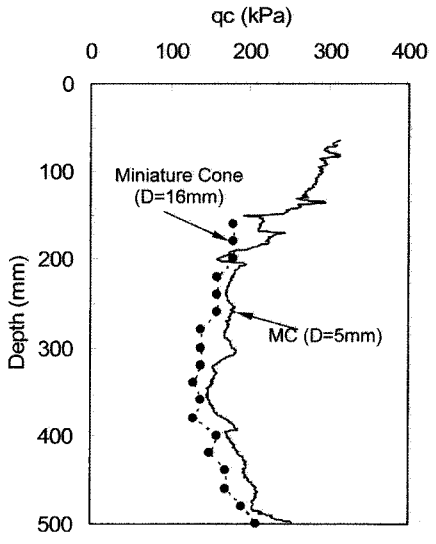

그림 12. 마이크로콘과 미니어처 콘 관입 시험 결과

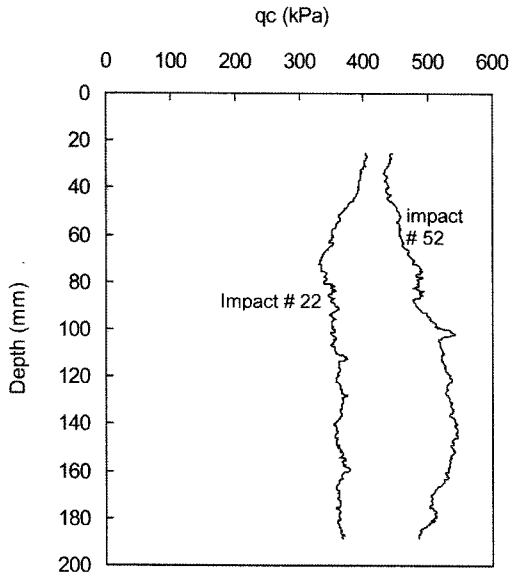

그림 13. 액상화 이후 지지력 증가

한 실험방법은 Lee와 Santamarina 2007 참조). 관입기는 시료의 중앙에 관입 될 수 있도록 설치 되었으며 22번과 52번의 타격후 1시간 경과후 마이크로 콘의 관입실험이 진행되었다. 측정된 마이크로콘의 선단 저항력은 그림 11에 나타내었다. 액상화가 진행되면서 지반의 상대밀도가 증가하여 선단저항력이 350kPa에서 500kPa까지 크게 증가 된 것을 알 수 있었다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 주변 지반의 교란을 최소화시키고 실내 실험 시 크기에 의한 영향을 줄이기 위해 외경 5mm로 크기가 작으면서도 주면마찰력을 완전히 분리하여 선단저항력을 측정할 수 있는 마이크로콘 관입시험기를 개발하여 그 적용성을 검증하였다. 마이크로콘의 관입 시 비배수 상태를 유지하도록 콘 관입 속도를 1mm/sec로 유지하였고 데이터는 매 0.5mm마다 하나씩 획득하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 변형률계의 저항은 변형률에 의해 변화할 뿐만 아니라, 주변 온도 및 과다한 입력 전압에 의한 가열에 의해서도 변화한다. 신뢰성 높은 측정 결과의 획득을 위해서는 적절한 입력 전압과 작동 온도 범위가 결정되어야 한다. 본 연구에서는 정확하고 안정된 선단저항력 측정을 위하여 입력 전압은 2.0V, 작동 온도는 18°C~22°C로 일정하게 유지하였다.

(2) 공기-점토 경계면 탐지 실험 결과, 마이크로콘은 점토의 경계면을 효과적으로 탐지할 수 있고 전이 구간의 길이는 대략 15mm임을 확인하였다.

(3) 점토와 사질토가 교차하여 쌓여있는 층상 시료에 대한 관입시험 결과, 시료의 층상 구조에 따라 선단저항력이 상당히 민감하게 반응하여 층상구조를 비교적 정확하게 탐지해 내는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 마이크로콘이 상대적으로 단단한 사질토층을 지나 연약한 점토층으로 관입될 때, 콘의 선단 앞부분에 있는 모래와 콘 벽면에 있는 모래 일부분이 콘과 함께 점토층으로 관입되면서 사질토층에서 점토층으로 바뀌는 경계면은 뚜렷하게 구별되지 못하고 선단저항력이 완만하게 감소하였다.

(4) 마이크로콘과 직경 16mm 미니어처 콘(miniature cone)의 선단저항력은 상당히 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있었다. 측정된 선단저항력의 크기에 있어서도 큰 차이 없이 비슷하게 측정되었다. 이는 단면적 차이에 의한 영향과 관입속도 차이에 의한 영향이 서로 상쇄되는 효과에 기인하는 것으로 판단된다.

(5) 액상화이후 지반의 강성 변화를 1g 모델의 액상화 토조에 시료를 조성한후 마이크로 콘 관입시험을 통하여 조사하였다. 액상화가 진행되면서 지반의 상대밀도가 증가하여 콘의 선단저항력이 증가함을 관찰할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Baldi, G., Bellotti, R., Crippa, V., Fretti, C., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Pasqualini, E., Pedroni, S., and Ostricati, D. (1985), "Laboratory Validation of In-Situ Tests", *AGI Golden Jubilee Volume for XI ICSMFE*, San Francisco, pp.217-239.
2. Bemben, 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 on Penetration Testing*, Stockholm, Vol. 2.2, pp.33-34.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979), "*Soil Mechanics*", John Wiley & Sons. 523p.
7. Lee, J. S. (2003), "*High Resolution Geophysical Techniques for Small-Scale Soil Model Testing*", Ph.D. thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

8. Lee, J.S., and Santamarina, J.C. (2007), "Seismic monitoring short-duration events - Liquefaction in 1g models", *Canadian Geotechnical Journal*. 44(6), 659-672.
9. Liu, Z., Shi, B., and Sheng, D. (2006), "A Micropenetrometer for Detecting Structural Strength Inside Soft Soils", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.29, No.6, pp.15-22.
10. Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell J. J. M., (1997), "*Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*", Chapman & Hall, London.
11. Parkin, A. K. and Lunne, T. (1982), "Boundary Effects in the Laboratory Calibration of a Cone Penetrometer in Sand", *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, Vol.2, pp.761-768.
12. Powell, J. J. M. and Quarterman, R. S. T. (1988), "Interpretation of Cone Penetration Tests in Clays, with Particular Reference to Rate Effects", *Proceedings of the First International Symposium on Penetration*, Orlando, FL, Vol.2, pp.903-910.
13. 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*, Vol.19, No. 2, pp.124-138.
14. Schaap, L. H. J. and Zuidberg, H. M. (1982), "Mechanical and electrical aspects of the electric cone penetrometer tip", *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, Vol.2, pp.841-851.
15. Shin, D. H. (2008), "Detection of Smear Zone Using Micro-Cone and Electrical Resistance Probe", Master. D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University, Seoul.
16. Titi, H. H., Mohammad, L. N. and Tumay, M.T. (2000), "Miniature Cone Penetration Tests in Soft and Stiff Clays," *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.23, No.4, pp.432-443.
17. Yafrate N. J. and DeJong, J. T. (2005), "Detection of Stratigraphic Interfaces and Thin Layering Using a Miniature Piezoprobe", *Geo Frontiers 2005*, ASCE, Austin, Texas, GSP 138, pp.2103-2113.
18. Yun, T. S. (2005), "*Mechanical and Thermal Study of Hydrate Bearing Sediments*", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Geogia.

(접수일자 2007. 12. 10, 심사완료일 2008. 1. 29)