

## 연속관입형 소형콘관입시험기에 대한 크기효과 및 현장적용

윤성수\* · 김규선\*\* · 이진형\*\*\* · 신동현\*\*\*\*

Yoon, Sungsoo\*, Kim, Kyu-Sun\*\*, Lee, Jin Hyung\*\*\*, Shin, Dong-Hyun\*\*\*\*

### Scale Effects and Field Applications for Continuous Intrusion Miniature Cone Penetrometer

#### ABSTRACT

Cone penetration tests (CPTs) have been increasingly used for site characterizations. However, the site investigations using CPTs are often limited due to soil conditions depending on the cone size and capacity of the CPT system. The small sectional area of a miniature cone improves the applicability of the CPT system due to the increased capacity of the CPT system. A continuous intrusion system using a coiled rod allows fast and cost effective site investigation. In this study, the performance of the continuous intrusion miniature cone penetration test (CIMCPT) system has been evaluated by comparison tests with the standard CPT system at several construction sites in Korea. The results show that the CIMCPT system has a same performance with the CPT system and has advantages on the mobility and applicability. According to field verification tests for scale effect evaluation, the cone tip resistance evaluated by CIMCPT overestimates by 10% comparing to standard CPTs. A crawler mounted with the CIMCPT system has been implemented to improve accessibility to soft ground, and has shown improvement over the truck type CIMCPT system. Therefore, the improved CIMCPT system can be utilized as a cost effective and highly reliable soil investigation methodology to detect the depth of soft ground and to evaluate soil classification.

**Key words :** Cone penetration test, Continuous intrusion, Miniature cone, Scale effect

#### 초 록

콘관입시험은 현장조사 시험법으로 사용 빈도가 증가되고 있다. 그러나 콘관입시험은 콘크기와 용량 등에 따라 적용 가능한 현장조건이 제한 되는 단점이 있다. 소형콘의 감소된 단면적은 시스템 용량을 증대시켜 적용성을 향상시킬 수 있으며, 코일식 로드를 이용한 연속관입 시스템은 신속하고 경제적인 지반조사를 가능하게 한다. 본 연구에서는 국내 여러 현장에서 연속관입형 소형콘관입시험 시스템의 성능을 표준 콘관입시험 시스템과의 비교시험을 통하여 평가하였다. 소형콘관입시험 장비는 기존의 표준콘관입시험 장비와 비교하여 지반정수 도출 및 지반분류에 동일한 성능을 발휘하는 것을 확인하였으며, 장비의 기동성 및 적용대상 토질 확대 등의 장점을 나타내는 것으로 평가되었다. 크기효과 검증을 위한 현장시험 결과 기존 시험 방법에 비해 콘저항력의 경우는 약 10% 과대평가하는 것으로 나타났다. 차량 형태의 조사장비는 표층이 연약하거나 진입이 어려운 경우에는 조사의 한계가 있으므로, 궤도장치에 탑재된 연속관입형 소형콘관입시험 시스템으로 개선하여 적용성을 확대시켰다. 따라서 개선된 연속관입형 소형콘관입시험 시스템은 연약지반 심도탐지 및 흠분류시 경제적이고 신뢰성 높은 지반조사 방법으로 활용할 수 있다.

**검색어 :** 콘관입시험, 연속관입, 소형콘, 크기효과

\* 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 미주법인 차장 (ss72.yoon@samsung.com)

\*\* 정회원 · 교신저자 · 삼성물산(주) 건설부문 기술연구센터 수석 (Corresponding Author · Samsung C&T Corporation · kyusun@empas.com)

\*\*\* 삼성물산(주) 건설부문 기술연구센터 선임 (jh175.lee@samsung.com)

\*\*\*\* 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 기술연구센터 전임 (dh45.shin@samsung.com)

Received December 14, 2012/ revised May 8, 2013/ accepted September 4, 2013

## 1. 서론

최근 수 십 년간 기반시설 건설을 위한 토목구조물의 건설이 광범위하게 이루어져 왔으며, 이에 따른 다양한 형태의 지반조사가 수행되고 있다. 안전하고 경제적인 구조물 건설을 위해서는 대상 부지에 대한 공학적 특성을 정확하게 파악하는 것뿐만 아니라, 시공 시 불확실한 리스크를 최소화하고 공사를 원활하게 진행할 수 있도록 지층의 형태를 정확하게 파악하는 것 또한 매우 중요하다. 이에 따라, 여러 종류의 현장조사 시험법이 지반조사 기법으로 제안 및 적용되어 왔다. 각각의 시험법은 공학적 매커니즘 및 개발 배경 등이 다르기 때문에, 조사 대상 및 시험법을 정확하게 파악하여 용도에 맞게 이용해야 한다. 통상적으로 흙의 특성 파악 및 분류를 위해 사용되는 지반조사 기법 중 콘관입시험(Cone Penetration Test, CPT)은 원추 모양의 콘을 일정한 속도로 지중에 관입하면서 콘저항력과 주면마찰력을 연속적으로 측정하는 시험 기법이다. CPT는 1930년대에 네덜란드에서 최초로 개발되었으며, 이후 각종 계측 센서 및 데이터처리 장치 등의 발달과 함께 기능이 크게 개선되었다. 현재는 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)과 더불어 지반조사 방법의 대표적인 시험법으로 사용되고 있다(Robertson and Campanella, 1988; Lunne et al., 1997).

CPT의 일종인 소형콘관입시험(Miniature Cone Penetration Test, MCPT)은 장비의 경량화와 연속관입(Continuous Intrusion)을 통하여 경제적이고 신속한 지반조사가 가능하도록 개발된 지반조사 방법이며, 이러한 특성을 반영하여 연속관입형 소형콘관입 시험(Continuous Intrusion Miniature Cone Penetration Test, CIMCPT)으로 명명하고 있다(Kurup and Tumay, 1999). 국내에 도입되어 활용되고 있는 CIMCPT 시스템은 12 m 코일식 로드를 이용하여 10 m 내외의 심도에 대한 토층분류, 지반특성 분석 및 연약지반 탐지 등에 활용되고 있으며, 조사 목표심도에 따라 15 m 혹은 20 m 코일식 로드로 교체하여 이용할 경우 깊은 심도에 대한 조사도 가능하다. 초기에 도입된 CIMCPT 시스템은 조사차량으로 개조된 중량 2.5 톤 트럭에 장착하여 운영하였다(Yoon et al., 2009; 2010). 차량을 이용한 지반조사는 이동성과 조사 편의성 등의 장점을 가지고 있지만, 차량에 전달되는 큰 접지압으로 인해 표층이 연약한 경우에는 장비 운행 시 조사 안정성을 확보하기 어려우며, 또한 상부에 단단한 매립층이 존재할 경우 콘관입에 제약이 있는 등 다양한 토층에 대한 적용성이 떨어지는 단점이 발생 하였다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 CIMCPT 시스템을 궤도장치에 장착하는 등 조사장비의 성능을 개선하여 현장 적용 범위를 확대하였다. 본 연구에서는 CIMCPT와 기존의 표준 CPT와의 비교 검증을 위하여 서로 다른 토질특성을 나타내는 3개 현장에서 각각 수행된 시험 결과 분석을 통하여 콘크기에 따른 크기효과

(scale effect)에 대해서 평가하였으며, 트럭 형태의 조사차량에 장착된 CIMCPT 시스템과 궤도장치에 장착되어 개량된 CIMCPT 시스템의 연약지반 탐지를 위한 현장적용 결과를 비교분석하였다.

## 2. 연속관입형 소형콘관입시험

### 2.1 소형콘관입시험 개발 배경

콘관입시험(CPT)은 콘선단과 주면에 위치한 로드셀(load cell)에서 심도에 따라 측정된 콘저항력( $q_c$ ) 및 주면마찰력( $f_s$ )을 이용하여 흙분류 및 공학적 특성을 파악하는데 이용되는 시험법이다. CPT는 일반적으로 10 cm<sup>2</sup>의 단면적의 표준콘이 사용되며, 대심도 조사를 위해서 15 cm<sup>2</sup>의 단면적을 가지는 대형콘이 사용되기도 한다(Yoon, 2009). CPT는 자동화된 계측시스템을 활용하여 원지반의 특성을 연속적으로 조사할 수 있는 장점 때문에 사용이 증가되고 있는 시험법이지만, 표준콘을 사질토 지반에 적용할 경우에는 콘의 지중 관입을 위해서 반력 용량이 큰 대형장비가 요구되고, 약 1 m 길이의 로드를 반복적으로 연결하면서 시험을 수행해야 하므로, 심도가 깊어질수록 소요 시간 및 비용이 증가하는 단점이 있다. 또한, 콘의 직경이 커지게 되면 관입에 따른 주변지반의 전단변형에 더 넓은 면적이 영향을 미치게 되어, 소성영역을 증가시키므로 측정 해상도가 감소하게 된다(Powell and Quarterman, 1988; Hird et al., 2003). 따라서, 관입 시 지반교란을 최소화 하고, 측정 해상도를 높이며, 장비 용량을 감소시킬 수 있는 소형콘이 개발되었으며 미주 지역에서는 현장적용 또한 증가하고 있다(Tumay and Kurup, 1997; Kurup and Tumay, 1999; Titi et al., 2001). CIMCPT는 1990년대 미국 루이지애나 대학(Louisiana State University) 및 루이지애나 교통연구소(Louisiana Transportation Research Center, LTRC)에서 표준 CPT의 단점을 보완하기 위한 연구의 일환으로 개발되었으며, 콘 단면적은 표준콘에 비해 1/5로



Fig. 1. Miniature Cone Versus Standard Cone

감소시키고(Fig. 1), 연속관입이 가능하도록 스테인레스로 제작된 코일식 룯드(coiled rod)와 자동 관입장치를 사용하여 장비의 크기를 소형화와 신속하고 경제적인 지반조사를 가능하게 하였다(Tumay and Kurup, 1997; Tumay and Kurup, 1999; Tumay et al., 2001).

## 2.2 연속관입형 소형콘관입시험 장치

국내에 도입된 CIMCPT 시스템은 미국 LTRC의 장치를 기본 모델로 제작되었다. CIMCPT 시스템은 코일형태로 제작된 스테인레스 콘을 유압모터와 체인형태의 무한궤도를 통하여 연속적으로 지중 관입시키는 연속관입(continuous intrusion) 장치를 이용한다(Fig. 2). 전체적으로 CIMCPT 시스템은 1) 연속관입을 위한 코일형 소형콘과 지중 관입을 가능하게 하는 관입장치, 2) 콘의 센서로부터 전기신호를 받아 계측을 가능하게 하는 자료측정 시스템, 3) 조사위치로부터 이동과 현장에서의 작업 및 관입장치에 동력을 전달하고 지중관입을 위한 반력으로 작용하는 조사차량의 세 부분으로 구성되어 있다. 코일은 300회 이상의 코일링(coiling) 및 언코일링(uncoiling)에 견딜 수 있도록 제작되었으며, 일반적인 관입심도는 약 10 m(코일 교체시 최대 20 m) 이다(Tumay and Kurup, 2001). 국내에 도입된 CIMCPT 시스템은 초기에는 중량 2.5톤 트럭에 장착하여 운영되어 왔으며(Yoon et al., 2009), 현재는 총 중량 1톤의 궤도장치에 탑재되어 운영되고 있다(Fig. 3). 일반적인 콘관입시험과 마찬가지로 실험 데이터는 데이터 취득장치를 통하여 실시간 모니터링 및 저장 가능하므로 시험 시 지반 조건에 따라 즉시 대응이 가능한 장점이 있다.

소형콘관입시험 장치의 관입력은 약 14 kN까지 발휘할 수 있으며 약 60 MPa의 콘저항력과 약 0.6 MPa의 주면마찰력을 측정할 수 있으나, 실제 현장적용 결과에 따르면 조사가능 지반은 관입기

성능보다는 룯드 휨에 의해 제한을 받게 된다. CIMCPT의 경우에는 코일형태로 감겨있던 룯드가 관입시 직선으로 퍼지면서 지중 관입될 수 있도록 연성 스테인레스 스틸로 제작되었다. 또한, 룯드의 직경이 13 mm로 가늘게 제작되므로, 길이가 길어질수록 룯드 휨에 취약점을 가지게 된다. 실제 CIMCPT 시스템에서 약 30 MPa의 콘저항력이 측정되었을 경우에 룯드 휨이 발생했기 때문에(Fig. 4), 사용된 CIMCPT 시스템의 측정 가능한 최대 콘저항력은 약 30 MPa로 예상된다(Yoon et al., 2010). 이는 Table 1에서 제시한 흙의 상태에 따른 콘용량과 관련한 가이드라인에서 중간 정도의 조밀상태를 가지는 흙에 대한 콘저항력의 범위이므로(Yoon and Lee, 2004), CIMCPT 시스템은 중간 이하의 연약층 혹은 모래층에 대해서 적용 가능성을 가진다고 평가된다. CIMCPT 시스템은 국내에 도입된 이후 3년여 동안 10곳의 국내 현장에서 모래지반 및 점토지반에 대해 지반조사를 수행하였고, 현장적용 사례 분석을 통하여 지속적으로 개선되었다(Yoon et al., 2010).



(a) Truck

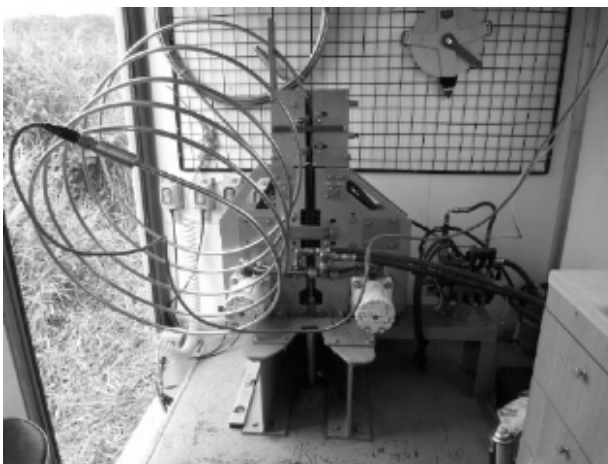


Fig. 2. Continuous Intrusion Miniature Cone Penetration Test (CIMCPT) System



(b) Crawler

Fig. 3. Research Vehicle for CIMCPT System

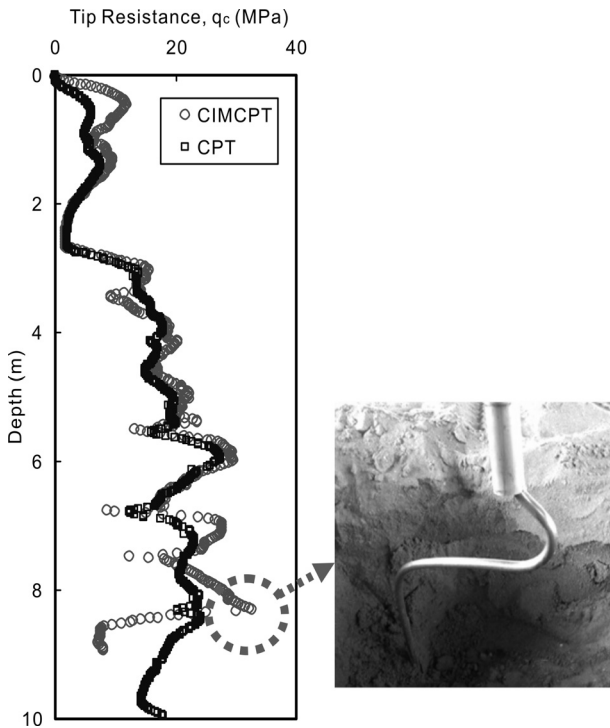


Fig. 4. Buckling of a Coiled Rod

Table 1. Capacity of CPT Tip Resistance by Soil Condition

Soil condition	Capacity of Cone Resistance ( $q_c$ ) (MPa)
Very soft (clay, sand)	5 ~ 12.5
Soft to medium (clay, sand)	12.5 ~ 25
Medium to slightly dense (sand)	25 ~ 50
Very dense (sand)	over 75

### 2.3 콘관입시험의 크기효과

CPT 결과 분석을 위해 제안된 도표 및 상관관계를 이용하여 CIMCPT 결과로부터 지반물성치를 도출하기 위해서는 우선 콘크기에 따른 크기효과(scale effect)에 대한 검증이 선행되어야 한다. 크기효과는 대상구조물에 대한 실물 실험이 불가능한 경우 크기가 축소된 모형시험 결과로부터 실물 크기의 결과를 예측하는 경우에 실물과 축소 모형간 크기의 차이에 따른 영향을 의미한다. 크기효과는 지반조건 및 실험조건에 따라 차이가 발생할 수 있으므로, 콘크기에 따라 콘저항력과 주면마찰력에 미치는 영향을 분석하는 연구는 모형시험이나 현장시험을 통해서 이루어져 왔다. Lima and Tumay (1991)는 콘크기에 따른 영향을 선형회귀방정식으로 분석하였으며, 콘크기에 따른 크기효과로 소형콘이 표준콘보다 콘저항력은 15% 크고, 주면마찰력은 10% 작다고 보고하였다. Kurup and

Tumay (1998), Titi et al. (2000), Tumay and Kurup (2001)은 현장시험 결과 소형콘의 콘저항력은 표준콘에 비해 약 10% 정도 크고, 주면마찰력은 반대로 약 10% 정도 작은 것으로 분석하였다. Kim et al. (2008)의 국내 주문진 모래를 이용한 모형토조 실험결과에 따르면 구속압과 상대밀도가 다른 사질토 지반에서 Tumay and Kurup (2001)의 결과와 유사한 10% 내외의 오차를 콘저항력과 주면마찰력의 측정값에서 보이는 것으로 나타났다.

기존 연구결과에 따르면, 시험조건에 따라 수치가 있어서 약간의 차이는 있지만, 대체적으로 소형콘이 콘저항력에 대해서는 10~15% 과대평가, 주면마찰력에 대해서는 10% 정도 과소평가하는 것으로 나타났다. Tumay and Kurup (1999)은 콘크기 차이에 따른 크기효과는 콘관입에 따른 소성영역 발생과 관계가 있다고 주장하였다. 콘크기가 커짐에 따라 소성영역이 증가하므로 측정되는 콘저항력과 주면마찰력은 콘의 크기에 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Lima and Tumay, 1991; Tumay and Kurup, 2001). 하지만, 크기효과로 인한 10% 정도의 차이는 확률론적 방법(Zhang and Tumay, 1999)에 의한 흙분류 시에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다(Yoon et al., 2010). 오히려, CIMCPT의 경우 지반교란 영역의 감소 및 종류가 다른 토층 사이에 협재된 얇은 층까지도 탐지가 가능한 장점이 있다. 이러한 이유로 CIMCPT 사용에 따른 크기효과에 대한 보정은 고려하지 않아도 실용적으로 조사 결과에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되며, CIMCPT와 CPT의 현장 실험결과를 이용하여 수행한 토층분류 결과는 3장에서 비교하였다.

### 2.4 소형콘관입시험 결과를 활용한 토층분류

CPT 결과를 이용한 토층분류를 위해 콘저항력과 마찰저항비 혹은 간극수압비 등을 이용한 흙분류 차트가 선행연구자 들에 의해 제안되어 사용되고 있다(Robertson and Campanella, 1988; Lunne et al., 1997). 본 연구에서는 CIMCPT 조사 결과의 간편한 이용을 위해서 확률론적 지반분류를 수행할 수 있는 콘관입시험 결과 분석 프로그램인 PClass-CPT v3.0으로 자료를 분석하여 심도별 지반분류를 수행하였다(Zhang and Tumay, 1999; Abu-Farsakh et al., 2008). 프로그램에서 사용된 확률론적 지반분류법은 퍼지이론(Fuzzy logic)을 이용하여 콘저항력 및 주면마찰력과 관련한 흙의 거동에 기반을 두고 흙을 점토(Highly Probable Clay, HPC), 실트(Highly Probable Mixed Soil, HPM), 모래(Highly Probable Sandy Soil)로 구분한다. 콘저항력( $q_c$ )과 마찰저항비( $R_f$ )로부터 Eqs. (1)~(3)으로 정의되는 흙거동 단위(Soil Behavior Unit, U)를 이용하여 각각의 토층을 구분하기 위해 정규화된 퍼지 멤버십 함수(Fuzzy membership function)를 Eqs. (4)~(6)과 같이 경험적으로 정의하였고, 각각의 특성은 Fig. 5와 같다(Zhang and Tumay, 1999; Abu-Farsakh et al., 2008).

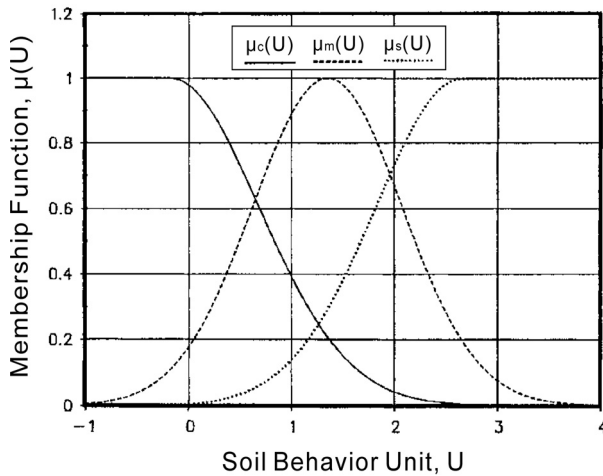


Fig. 5. CPT Fuzzy Soil Classification Chart (After Zhang and Tumay, 1999)

$$U = \frac{(a_1x - a_2y + b_1)(c_1x - c_2y + d_1)}{(c_1x - c_2y + d_1)^2 + (c_2x + c_1y + d_2)^2} - \frac{(a_2x + a_1y + b_2)(c_2x + c_1y + d_2)}{(c_1x - c_2y + d_1)^2 + (c_2x + c_1y + d_2)^2} \quad (1)$$

$$x = 0.1539 R_f + 0.8870 \log q_c - 3.35 \quad (2)$$

$$y = -0.2957 R_f + 0.4617 \log q_c - 0.37 \quad (3)$$

여기서,  $q_c$ : 콘저항력,  $R_f$ : 마찰저항비(=  $f_s/q_c$ ),  $f_s$ : 주면마찰력,  $a_1=11.345$ ,  $a_2=3.795$ ,  $b_1=15.202$ ,  $b_2=5.085$ ,  $c_1=-0.296$ ,  $c_2=-0.759$ ,  $d_1=2.960$ ,  $d_2=2.477$ .

점토(HPC):

$$\mu_c(U) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{U+0.1775}{0.86332}\right)^2\right] & \text{for } U \geq 0.1775 \\ 1.0 & \text{for } U < 0.1775 \end{cases} \quad (4)$$

실트(HPM):

$$\mu_m(U) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{U-1.35}{0.724307}\right)^2\right] \quad -\infty < U < \infty \quad (5)$$

모래(HPS):

$$\mu_s(U) = \begin{cases} 1.0 & \text{for } U > 2.6575 \\ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{U-2.6575}{0.834586}\right)^2\right] & \text{for } U \leq 2.6575 \end{cases} \quad (6)$$

### 3. 현장 검증 시험

CIMCPT의 현장적용을 위해서는 콘크기의 차이로 인해 발생하는 측정 결과의 차이를 파악하여 측정된 데이터를 올바르게 활용할 수 있어야 한다. 현장 비교 시험 시 대상지반의 불균질성을 최대한 줄이기 위해서는, 균질한 토층에 대하여 1 m 이내의 인접 구역에서 두 가지 시험이 동시에 수행되도록 계획하였다. 따라서, 객관적인 현장검증 시험을 위해 흙의 특성이 서로 다른 세 개의 현장을 선정하여, CIMCPT 및 CPT를 동시에 수행하고 콘의 크기에 따른 콘저항력 및 주면마찰력에 대한 영향과 흙의 분류 결과에의 영향을 평가하였다.

#### 3.1 부산 모래매립 지반

부산 OO지역 모래매립 지반을 대상으로 크기효과 검증 시험이 수행하였다. 조사 지역은 연약지반 상부에 모래를 10 m 두께로 매립한 곳으로 통일분류법상 SP(Poorly graded sand)로 분류되는 지반이다. 시험 시 발생하는 지반교란으로 인한 영향을 방지하고, 신뢰성 있는 비교를 위하여 약 1 m 간격으로 6개의 조사대상 지점을 선정한 후 시험을 수행하였다.

Fig. 6은 심도별 콘저항력, 주면마찰력 분포 및 확률론적 방법으로 분석한 흙분류 결과이다. CIMCPT는 룯드 휨방지를 위해 10 m 미만에서 25 MPa 정도의 콘저항력이 측정되는 심도에서 조사를 종료하였고, CPT의 경우에는 10 m까지 시험을 수행하였다. Figs. 6(a) and 6(b)에서 볼 수 있듯이, 전반적으로 콘저항력 및 주면마찰력의 경향성은 두 가지 시험 모두 동일하게 나타내었다. 콘저항력의 경우에는 기존 문헌의 결과들과 유사하게 10~20% 정도 과대평가 하는 경향을 나타내었으나, 주면마찰력의 경우 경향성은 유사하나 실험값은 기존 문헌과는 반대로 CIMCPT가 크게 예측하는 결과를 나타내었다. 콘저항력은 주면마찰력에 비해 상대적으로 큰 값을 측정하기 때문에 안정적인 수치를 측정할 수 있었지만, 주면마찰력은 상대적으로 작은 측정값으로 다소 불안정한 값을 보이는 경향이 나타났다. 이러한 이유로 인하여 주면마찰력 비교 측정치가 기존 문헌 결과에 비해 상이한 경향이 나타난 것으로 보인다.

Figs. 6(c) and 6(d)는 CPT와 CIMCPT 결과에 대한 확률론적 지반분류 결과이다. 전반적인 경향성은 시험방법에 관계없이 동일하게 나타났으나, CIMCPT에 의한 결과가 약 3.5 m 심도에서 실트층의 존재 가능성을 조금 더 큰 것으로 예측하고 있다. 두 시험법 모두 상부 1 m 이내에 약간의 점토층이 존재하는 것으로 판단하였으나, 이는 구속압이 작은 상부에서의 측정치이기 때문인 것으로 판단된다. 본 시험결과, CIMCPT를 이용한 모래지반에서의 측정치는 기존 CPT와 유사한 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다.

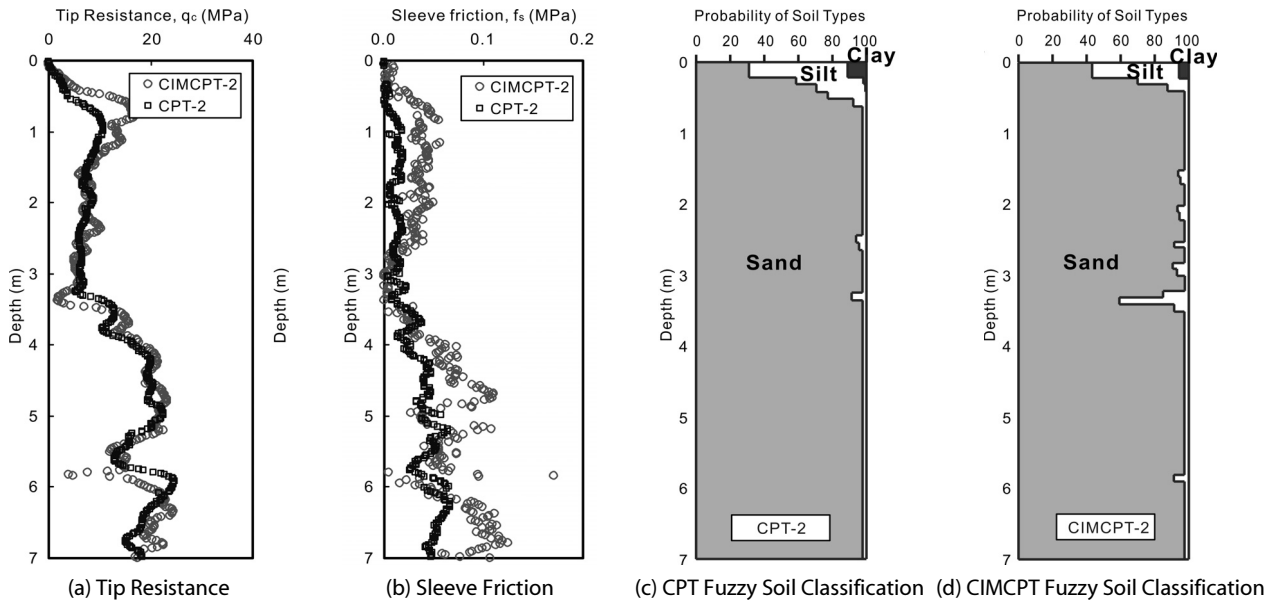


Fig. 6. Comparison of Penetration Profiles at the Busan Site

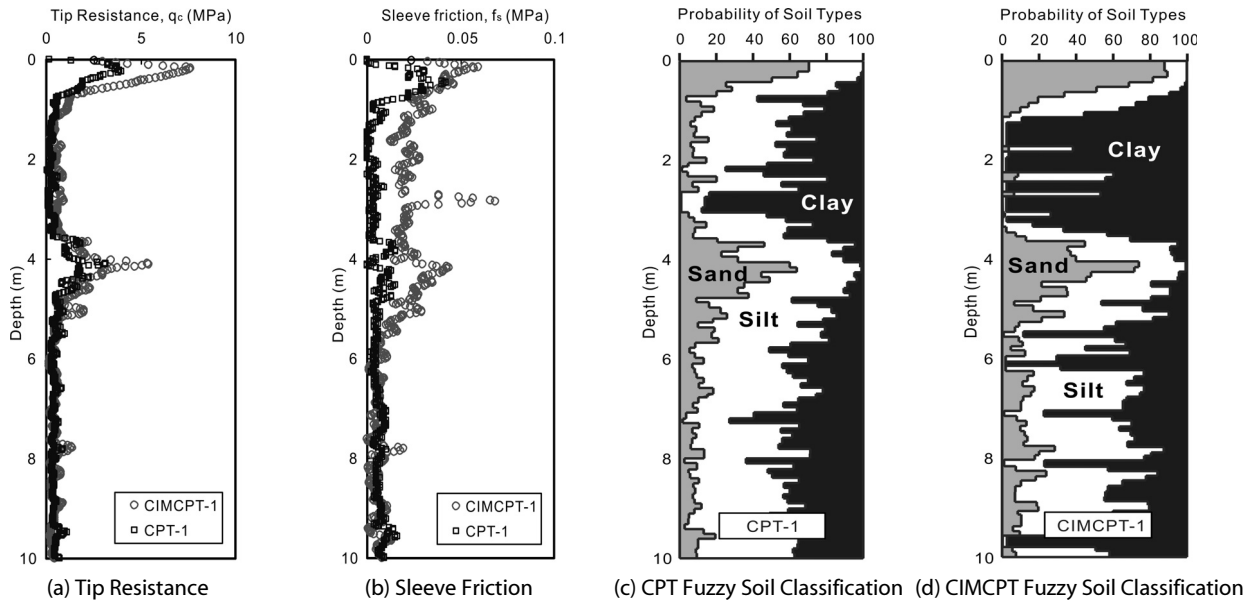


Fig. 7. Comparison of Penetration Profiles at the Sihwa Site

### 3.2 시화 점토 지반

경기도 시화지역에 분포하는 점토지반에서 현장검증 시험을 수행하였다. 대상부지는 상부 10 m 정도가 퇴적 점토로 균질하게 구성되어 있으며 현장검증 시험을 위해 총 4개소에 대해서 1 m 간격으로 비교시험을 수행하였다.

Fig. 7은 심도별 콘저항력, 주면마찰력 분포 및 확률론적 방법으로 분석한 흠분류 결과이다. Figs. 7(a) and 7(b)에서 알 수 있듯이, 시험 결과 심도별 콘저항력 분포는 거의 동일하게 나타났으나,

주면마찰력의 경우는 부산 매립모래 현장 결과와 동일하게 CIMCPT의 결과가 CPT의 결과보다 크게 측정되었다. 확률론적 지반분류 결과는 Figs. 7(c) and 7(d)에 나타난 바와 같이 두 시험법이 유사한 결과를 나타냈으며, CIMCPT의 결과가 상부 연약층의 점토성분이 더 많을 것으로 예측하였다. 상부 연약층은 4.5 m 심도에 존재할 것으로 예상되며, 심도에 따른 콘저항력, 주면마찰력, 확률론적 흠분류를 통해서 점토층 심도를 확인할 수 있었다.

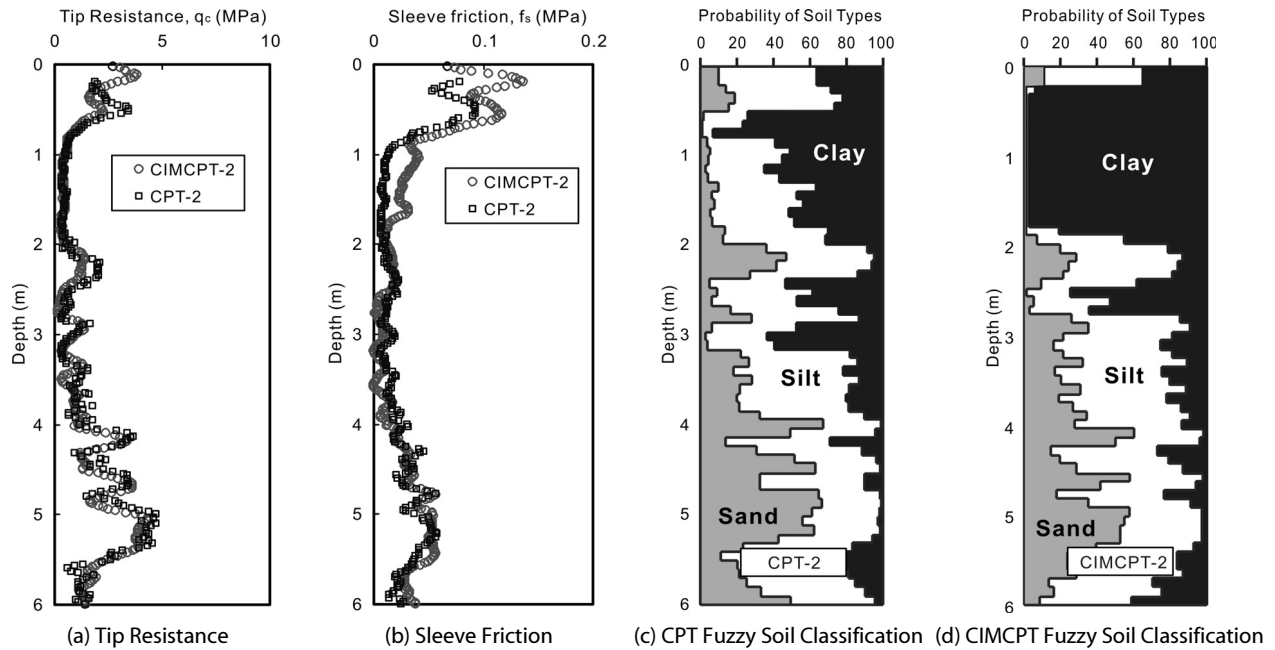


Fig. 8. Comparison of Penetration Profiles at the Pyeongtaek Site

### 3.3 평택 연약점토 지반

경기도 평택지역에 분포하는 연약점토층에 대해 현장검증 시험을 수행하였다. 본 현장은 교량공사가 예정되어 있는 곳으로 강을 중심으로 양쪽으로 발달한 연약점토층 3개소에 대한 비교 조사를 수행하였다. Fig. 8은 심도별 콘저항력, 주면마찰력 분포 및 확률론적 방법으로 분석한 흙분류 결과이다. Figs. 8(c) and 8(d)에서 볼 수 있듯이, 약 4 m 심도까지는 연약점토층이 존재하고 이후 심도에서는 실트층과 모래층이 분포하는 것으로 나타났다. 심도별 콘저항력 및 주면마찰력 분포는 비슷한 결과를 나타내었으나, CIMCPT 결과가 상부 연약층에 대해 점토 성분이 더 많은 것으로 평가하였다.

### 3.4 크기효과 분석

전체 시험 심도에 대하여 크기효과로 인한 차이를 Table 2에 요약하여 정리하였으며, 본 연구에서의 측정결과 및 기존 문헌연구 결과를 요약하여 Table 3에 나타내었다. 서로 다른 지반특성을 보이는 국내 3개의 현장에서 CPT와 CIMCPT에 의해 수행된 비교시험 결과에 따르면, 크기효과는 콘저항력의 경우 최대 56%까지 과대평가하는 것으로 나타났다(Table 2). 이는 기존의 연구결과(Table 3)와 유사한 결과이나 주면마찰력의 경우에는 기존의 문헌과는 다르게 CIMCPT가 과대평가하는 것으로 나타났다. 이는 기존 연구에서 수행한 현장시험이나 모형토조 시험은 상대적으로 균질한 토층조건인데 반해 본 연구에서 분석한 3개의 현장 지반은 중간에 협재된 층이 존재하는 등 상대적으로 불규칙한 토층을

Table 2. Scale Effects at the Tested Sites Using Tip Resistance and Sleeve Friction

Location/Soil type	Test No.	Depth (m)	$q_{c(CIMCPT)} / q_{c(CPT)}$	$f_{s(CIMCPT)} / f_{s(CPT)}$
Busan/Reclaimed sand	1	6.0	1.04	2.02
	2	7.0	1.07	1.70
	3	6.0	1.21	1.54
	4	7.0	1.16	2.20
	5	10.0	1.20	1.58
	6	7.0	1.21	1.20
Sihwa/Clay	1	10.0	1.56	2.40
	2	10.0	1.33	3.48
	3	10.0	1.04	2.88
	4	10.0	1.55	4.74
Pyeongtaek/Soft clay	1	7.0	0.95	0.94
	2	6.0	0.94	1.34
	3	8.0	1.06	1.20

가지고 있어, 상대적으로 큰 값을 측정하는 콘저항력이 주면마찰력에 비해 상대적 높은 신뢰성을 나타내고 주면마찰력은 다소 불안정한 값이 측정된 것으로 판단된다. 이에 대한 명확한 규명을 위해서는 크기효과 검증시험에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 생각된다.

확률론적 방법을 이용한 흙분류를 통하여 점토, 실트, 모래의 심도별 분포경향을 파악할 수 있으며, 각각의 CPT와 CIMCPT

Table 3. Summary of Published and Studied Scale Effects

Reference	$q_{c(CIMCPT)} / q_{c(CPT)}$	$f_{s(CIMCPT)} / f_{s(CPT)}$	Remarks
Lima and Tumay (1991)	1.15	0.90	-
Kurup and Tumay (1998)	1.10	0.89	Overconsolidated, dessicated silty clay / clayey silt
Titi et al. (2000)	1.11	0.91	Soft to stiff clay
Tumay and Kurup (2001)	1.13	0.91	Highly plastic, stiff clay
	1.11	0.87	Overconsolidated stiff to hard clay
Kim et al. (2008)	1.14	0.89	Jumunjin and, Calibration chamber test
This study	1.04~1.21	1.20~2.20	Busan reclaimed sand
	1.04~1.56	2.40~4.74	Sihwa clay
	0.94~1.06	0.94~1.34	Peongtaek soft clay

Table 4. Scale Effects at the Tested Sites Using the Fuzzy Soil Classification

Location/ Soil type	Test type	Test No.	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Busan / Reclaimed sand	CPT	1	92.1	7.0	0.9
	CIMCPT		94.5	5.3	0.1
	CPT	2	94.2	5.5	0.4
	CIMCPT		94.1	5.8	0.2
	CPT	3	93.4	6.4	0.2
	CIMCPT		96.5	3.4	0.1
	CPT	4	91.2	8.0	0.7
	CIMCPT		94.2	5.7	0.1
	CPT	5	93.0	6.7	0.3
	CIMCPT		83.5	8.5	7.9
	CPT	6	92.8	6.9	0.3
	CIMCPT		94.5	4.7	0.7
Sihwa/ Clay	CPT	1	15.9	49.3	34.8
	CIMCPT		17.0	37.4	45.3
	CPT	2	19.8	56.0	24.3
	CIMCPT		13.3	35.2	51.2
	CPT	3	21.6	54.9	23.5
	CIMCPT		10.7	32.9	54.0
	CPT	4	19.0	55.2	25.8
	CIMCPT		13.7	37.8	48.5
Pyeongtaek/ Soft clay	CPT	1	11.1	20.0	68.9
	CIMCPT		12.9	34.4	52.7
	CPT	2	24.0	48.2	27.9
	CIMCPT		19.4	39.1	41.5
	CPT	3	18.8	48.9	32.3
	CIMCPT		24.5	44.3	31.2

결과의 차이를 비교하였다. Table 4는 조사심도에 대해 확률론적 방법으로 분석한 흙분류 결과를 정량적으로 나타내었다. 모래지반의 경우에는 CPT 및 CIMCPT가 유사한 결과를 나타냈지만, 점토지반의 경우에는 대체적으로 CIMCPT가 점토성분의 분포범위를 크게 평가하는 것으로 나타내었다.

#### 4. 연속관입형 소형콘관입시험의 현장적용

국내 OO지역의 고속철도노반 공사구간에서 연약지반 출현이 예상되는 구간에 대한 지층분포 현황 파악을 위해, CIMCPT를 수행하여 심도에 따른 콘저항력의 분포를 실시간으로 모니터링하여 연약점토층의 심도별 분포 경향을 평가하였다. 트럭형태의 CIMCPT 조사차량을 이용하여 1차 조사를 수행하고, 1차 조사에서 진입이 어려웠던 구역에 대해서는 CIMCPT 시스템을 궤도장치에 탑재하고 추가조사를 수행하여 전체 구간에 대해서 분석을 수행하였다.

##### 4.1 차량과 궤도장치에 따른 비교

동일한 CIMCPT 시스템을 트럭형태의 조사차량과 궤도장치에 장착하여 시험을 수행하였을 경우, 운송장비 변경으로 발생 가능한 차이점은 단지 반력으로 작용하는 상재하중의 차이를 들 수 있다. 이론적으로는 허용관입력 이내에서는 결과값의 차이가 발생하지 않아야 하지만, 실측 결과를 통하여 차이점을 비교해 보기 위해 동일 지역에서의 조사결과를 Fig. 9에 비교하여 도시하였다. 비교를 위한 조사위치는 성토공사가 진행 중인 현장에서 선정되었으며, 약 100 m 이격된 위치의 차이로 인하여 직접적인 비교는 어렵지만, 연약지반의 심도는 유사하게 분포할 것이라고 판단하여 비교조사를 수행하였다. 전반적으로 궤도장치에 탑재된 CIMCPT 시스템으로 측정된 콘저항력은 다소 작게 측정되었으나, 심도별 경향성은 유사하게 나타났다. 따라서, 콘저항력으로 실시간 연약지반의 분포



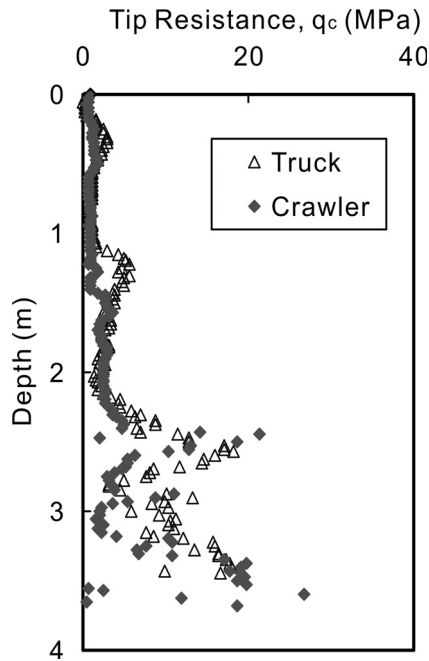


Fig. 9. Comparison of Tip Resistance Profiles Tested by the Truck and the Crawler

경향을 파악하는 목적으로서의 CIMCPT 시스템의 연약지반 탐지 성능은 이동장치에 관계없이 유사하다고 평가된다.

#### 4.2 CIMCPT 시스템을 이용한 연약지반 탐지

연약지반 탐지를 위한 CIMCPT는 2차에 걸쳐서 수행(총 36공) 되었으며, 1차 조사는 트럭에 탑재된 시스템을 이용하였고(22공), 2차 조사는 궤도장치에 탑재된 시스템을 이용하여 1차 조사 시 접근하기 어려웠던 지역을 위주로 조사를 수행하였다(14공).

연약지반 심도 파악을 위한 흠분류 방법으로는 퍼지이론을 이용한 심도별 확률론적 흠분류법(Zhang and Tumay, 1999)을 적용하였다. 점토층과 사질토층이 교호하고 있는 경우 확률론적 분류방법을 이용하여 토층을 단순화 시켜 간편하게 점토의 분포 성향을 파악할 수 있는 장점이 있다(Abu-Farsakh et al., 2008). 분석결과에 따르면 상부 약 4 m까지는 점토층이 우세한 것으로 나타났으며, 연약지반 심도는 상부로부터 약 4 m 깊이에 위치할 것으로 예상된다. Table 5는 CIMCPT 조사위치와 인접한 기존 시추주상도를 비교하여 추정된 연약지반 심도의 차이를 나타내었다. 대체적으로 약 1 m 내외의 심도 차이를 보이므로, CIMCPT를 이용하여 예측한 연약지반 심도가 적절하게 평가된 것으로 판단된다. 따라서, 연약지반 출현이 예상되는 구간에 대해 CIMCPT를 이용한 지반조사를 수행할 경우, 연약점토층의 심도 및 분포현황을 간편하게 파악할 수 있는 수단으로써 장점이 있음을 확인할 수 있었다.

Table 5. Comparison of Clay Depth Estimated by CIMCPT and Drilling Log

Vehicle type	Test No.	Clay depth by CIMCPT (m)	Clay depth by drilling log (m)	Depth difference (m)
Truck	T-3	4.0	4.7	-0.7
	T-9	2.4	2.7	-0.3
	T-10	3.9	2.8	+1.1
	T-17	4.8	3.5	+1.3
	T-18	5.0	4.0	+1.0
	T-19	3.0	3.0	0
	T-20	4.8	2.0	+2.8
Crawler	C-2	4.3	4.0	+0.3
	C-3	4.0	4.0	0
	C-4	5.2	3.5	+1.7
	C-6	4.9	5.6	-0.7
	C-9	2.4	4.0	-1.6
	C-10	5.5	5.4	+0.1
	C-14	2.7	4.4	-1.7

### 5. 결론 및 요약

본 연구에서는 연속관입형 소형관입시험(CIMCPT) 장비의 크기효과, 효용성과 한계, 그리고 성능 향상을 위한 현장적용 개선 사항에 대해 살펴보았다. 도입 및 개선된 장비를 이용한 현장시험 결과에 대한 사례분석 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 콘크기에 따른 CPT와 CIMCPT의 콘저항력과 주면마찰력 측정값의 비는 각각  $q_{c(CIMCPT)} / q_{c(CPT)} = 0.94\sim 1.56$ 와  $f_{s(CIMCPT)} / f_{s(CPT)} = 0.94\sim 4.74$ 로 측정되었다.
- (2) CIMCPT는 CPT에 비해 작은 단면적으로 인해 상대적으로 큰 관입력을 발휘하므로, 연약지반뿐만 아니라 중간정도 조밀한 모래지반까지도 조사가 가능하기 때문에, 연약지반과 상대적으로 단단한 일반 지반이 교호하고 있는 경우에도 지층 분포 및 지반 특성을 파악하는데 사용할 수 있는 장점이 있다.
- (3) CIMCPT의 현장적용 결과 코일식 로드의 휨현상이 발생하지 않는 30 MPa 정도의 콘저항력을 나타내는 지반까지 관입이 가능하므로 중간정도의 조밀한 토층에서 조사가 가능함을 확인하였다.
- (4) 차량에 탑재된 CIMCPT는 차량의 높은 접지압으로 인해 표층이 연약한 경우에는 안정적인 조사가 어렵기 때문에 다양한 토층에 대한 현장적용이 불리한 측면이 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 CIMCPT 시스템을 궤도장치에 장착하여 조사대상을 확장하여 현장적용성을 개선할 수 있었다.

- (5) 12 m 코일식 룯드가 장착된 CIMCPT 시스템은 10 m 내외의 연약점토층의 심도 및 분포현황을 간편하고 신속하게 파악할 수 있는 조사방법으로써 장점이 있음을 확인하였다.

## References

- Abu-Farsakh, M. Y., Zhang, Z., Tumay, M. T. and Morvant, M. (2008). "Computerized cone penetration test for soil classification: Development of MS-Windows Software." *Journal of the Transportation Research Board*, TRR 2053, National Research Council, Washington, D.C., pp. 47-64.
- 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.
- Kim, R., Cho, Y., Yoon, S. and Lee, W. (2008). "Effect of the cone's size on the tip resistance of sandy soil." *Proc. of the 34th KSCE Conference 2008*, pp. 3897-3901 (in Korean).
- Kurup, P. U. and Tumay, M. T. (1998). "Calibration of a miniature cone penetrometer for highway applications." *Transportation Research Record*, No. 1614, pp. 8-14.
- Kurup, P. U. and Tumay, M. T. (1999). "Continuous intrusion miniature cone penetration test system for transportation applications." *Transportation Research Record*, No. 1652, pp. 228-235.
- Lima, D. C. and Tumay, M. T. (1991). "Scale effects in cone penetration tests." *Proc. of the Geotechnical Engineering Congress 1991*, ASCE, Boulder, CO, Vol. 1, pp. 38-51.
- Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell J. J. M. (1997). *Cone penetration testing in geotechnical practice*, Chapman & Hall, London.
- Powell, J. J. M. and Quarterman, R. S. T. (1988). "Interpretation of cone penetration tests in clays, with particular reference to rate effects." *Proc. of the First International Symposium on Penetration*, Orlando, FL, Vol. 2, pp. 903-910.
- Robertson, P. K. and Campanella, R. G. (1988). *Guidelines for Geotechnical Design Using CPT and CPTU*, University of British Columbia, Vancouver, Department of Civil Engineering, Soil Mechanics Series 120.
- Titi, H. H. and Morvant, M. (2001). "Implementation of miniature cone penetrometer in roadway design and construction." *Journal of the Transportation Research Board*, TRR 1755, National Research Council, Washington, D.C., pp. 60-68.
- Titi, H. H., Mohammad, L. N. and Tumay, M. T. (2000). "Miniature cone penetration tests in soft and stiff clays." *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 23, No. 4, pp. 432-443.
- Tumay, M. T. and Kurup, P. U. (1997). *Calibration and implementation of miniature electronic cone penetrometers for road and highway design and construction*, Louisiana Transportation Research Center, Project No. 88-1GT Final Report.
- Tumay, M. T. and Kurup, P. U. (1999). *A continuous intrusion miniature cone penetration test system for transportation applications*, Louisiana Transportation Research Center, Project No. 96-3GTX Final Report.
- Tumay, M. T. and Kurup, P. U. (2001). "Development of a continuous intrusion miniature cone penetration test system for subsurface explorations." *Soils and Foundations*, Vol. 41, No. 6, pp. 129-138.
- Yoon, G. and Lee, K. (2004). *Applications of cone penetration test for geotechnical design*, Goomibook (in Korean).
- Yoon, S. (2009). "Miniature cone penetration tests for detecting the depth of a clay layer." *Proc. of the 35th KSCE Conference 2009*, pp. 1930-1933 (in Korean).
- Yoon, S., Hwang, D., Kim, J. and Ji, W. (2010). "Case studies on the field application of miniature CPT's in South Korea." *Proc. of the KGS Fall National Conference 2010*, pp. 269-280 (in Korean).
- Yoon, S., Ji, W., Kim, J. and Kim, R. (2009). "The field application of miniature cone penetration test system in Korea." *Proc. of the KGS Spring National Conference 2009*, pp. 349-360 (in Korean).
- Zhang, Z. and Tumay, M. T. (1999). "Statistical to fuzzy approach toward CPT soil classification." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 3, pp. 179-186.