소형콘관입시험(Miniature CPT)의 국내현장적용 사례분석
Case Studies on the Field Application of Miniature CPT's in South Korea

윤성수[1], Sungsoo Yoon, 황대진[2], Daejin Hwang, 김준오[3], Junou Kim, 지완구[4], Wan-Goo Ji

[1] 삼성물산(주) 건설부문 선임연구원, Senior Researcher, Samsung C&T Corporation
[2] 삼성물산(주) 건설부문 상무, Vice President, Samsung C&T Corporation
[3] 삼성물산(주) 건설부문 주임, Senior Associate, Samsung C&T Corporation
[4] 삼성물산(주) 건설부문 차장, Deputy General Manager, Samsung C&T Corporation

개요(SYNOPSIS) : The cone penetration test(CPT) has been increasingly used for in situ site characterization. However, the use of CPT is often limited due to specific site conditions depending on the cone size, geometry, and capacity of the CPT system used. In South Korea, it has generally been considered that the CPT could be satisfactorily performed only in soft soils. Louisiana State University/ Louisiana Transportation Research Center has implemented a field-rugged continuous intrusion miniature cone penetration test (CIMCPT) system since the 1990s. The miniature cone penetrometer of the CIMCPT system has a cross-sectional cone area of $2cm^2$ allowing finer soil profiles compared to the standard $10cm^2$. The reduced cross-sectional area also enables a system capacity reduction leading to cost saving and ease in maintenance. In addition, the continuous intrusion mechanism allows fast and economic site investigations. Samsung C&T Corporation has recently implemented a similar CIMCPT system. In this study, case studies on the field application of Samsung CIMCPT system for the last 2 years are presented to illustrate its performance investigation and its usefulness and limitation. Results of the case studies show that the CIMCPT system can be applied to soils with cone tip resistance(q_c) values up to about 30MPa and allows a reliable and useful way to characterize soft soils. The results also show that the rod buckling limits the investigation depth by the system and the large contact pressure of the CIMCPT truck prevents the use of the system at sites with soft surface soils. According to the results of the case studies, the Samsung CIMCPT system has been being upgraded with a miniature cone with a longer rod, a crawler-type transportation system, a pre-boring system, and so on.

주요어(Key words) : cone penetration test, miniature cone penetration test, continuous intrusion, in-situ test, case study

1. 서 론

콘관입시험(Cone Penetration Test, CPT)이란 원추모양의 콘을 로드(Rod)에 연결하여 일정한 속도(2±0.5cm/sec)로 지중에 압입하면서 원하는 심도에서 선단저항값(q_c)과 주면마찰력(f_s) 등을 측정하는 시험법이다. CPT는 1932년 네덜란드 엔지니어인 P. Barentsen이 약 4m 정도의 두꺼운 매립층의 q_c를

측정하기 위해 현장지반조사 시험법으로 처음 사용되었다(Broms and Flodin, 1988). 초기 기계식이었던 CPT 장비는 이후 전자식으로 바뀌었고 기계식 CPT의 측정시스템의 문제점으로 지적된 이중 로드 방식에서 f_s의 정확한 측정이 두 개 로드 사이의 녹(rust)이나 휨(bending)으로 방해받는 부분을 해결하여 q_c와 f_s를 분리하여 측정하는 것이 가능하게 되었다. 최근들어 CPT는 장비 및 계측장치들의 발달과 더불어 기능이 크게 향상되었고, 자동화된 계측 시스템을 활용하여 원지반의 특성을 연속적으로 조사할 수 있는 장점에 힘입어 대표적인 현장조사방법의 하나로 자리매김 하고 있다. 최근에는 자원개발, 해상풍력발전 건설 등의 수요증가로 필요성이 증대하고 있는 해저 지반조사의 시험법으로 자동화된 계측시스템과 원거리 조작이 가능한 점, 측정센서의 추가가 용이한 점 등의 장점을 가진 CPT 적용 영역이 증가하고 있다.

CPT의 적용을 방해하는 요소로는 너무 단단한 지반조건이나 장비의 진입이 어려운 경우 등이 있는데 이는 콘을 압입시키는 유압장치의 용량과 가용한 반력의 크기에 영향을 받는다. 국내의 경우 해안가 등 일부 연약지반이 존재하는 지역을 제외하면 비교적 얕은 심도에서 단단한 지반조건이 출현하는 경우가 빈번하여 CPT의 활발한 적용을 어렵게 하고 있다. 또한 구입 및 유지보수에 많은 비용이 들어가는 대형 CPT 장비가 드문 실정이어서, 현업에서 CPT는 연약점성토 지반에서만 가능한 조사방법인 것으로 인식되고 있다.

CPT를 통해 측정되는 q_c와 f_s는 콘선단(Cone Tip)과 마찰주면(Friction Sleeve)에 각각 부착된 로드셀(Load Cell)을 이용하여 구한다. CPT에는 일반적으로 10cm^{2}의 콘단면적과 150cm^{2}의 마찰주면을 갖는 표준콘(Standard Cone)이 사용되며, 대심도 조사 등을 위해 15cm^{2}의 콘단면적과 200cm^{2}의 마찰주면을 갖는 대형콘의 사용도 증가하고 있다. 또한, 장비의 경량화를 위해 표준콘 보다 작은 소형콘의 개발 및 적용도 이뤄졌는데, 90년대 본격적으로 연구가 시작된 연속관입형 소형콘관입시험(Miniature CPT, MCPT)은 콘의 단면적을 표준콘의 1/5인 2cm^{2}로 축소하여 유압장치의 용량과 반력으로 사용되는 조사차량의 크기를 줄이고, 연속관입이 가능한 관입장치를 사용하여 신속하고 경제적인 지반조사를 가능하게 만든 조사방법으로 90년대 후반 이후부터 현재까지 현장적용이 활발하게 이뤄지고 있다(Tumay and Kurup, 1997; Tumay and Kurup, 1999; Tumay et al., 2001).

삼성물산 건설부문에서는 90년대 후반에 제작되어 현재까지 현장조사시험법으로 활발하게 사용되고 있는 미국 루이지애나 교통연구소(Louisiana Transportation Research Center, LTRC)의 연속관입형 MCPT 시스템을 모델로 삼성 MCPT 시스템을 2008년 6월 구축하였다. 이후 2010년 6월까지 2년의 기간 동안 9곳의 국내현장에서 삼성 MCPT 시스템을 이용한 지반조사를 수행하였고, 이를 통해 MCPT 시스템의 국내 현장적용성을 검증하였고, 현장적용성을 확대시키기 위한 사항들을 도출하여 시스템을 개선시켜왔다. 본 연구에서는 현장 적용한 사례들의 분석을 통해 연속관입형 MCPT 시스템의 현장적용성을 분석하여 그 용도와 한계에 대해 살펴보고 적용성 확대를 위한 성능개선 방안들을 고민하였다.

2. 삼성 MCPT 시스템

삼성 MCPT 시스템은 일반적인 CPT 시스템과 같이 다음 세 가지 부분으로 구성되어 있다(그림 1): 1) 연속관입형 소형콘과 이의 지중 관입을 가능하게 하는 관입장치부, 2) 콘의 센서로부터 전기신호를 받아 계측을 가능하게 하는 자료측정시스템, 그리고 3) 조사위치로의 이동과 현장에서의 작업, 관입장치에 동력을 전달하는 역할을 수행하는 조사차량.

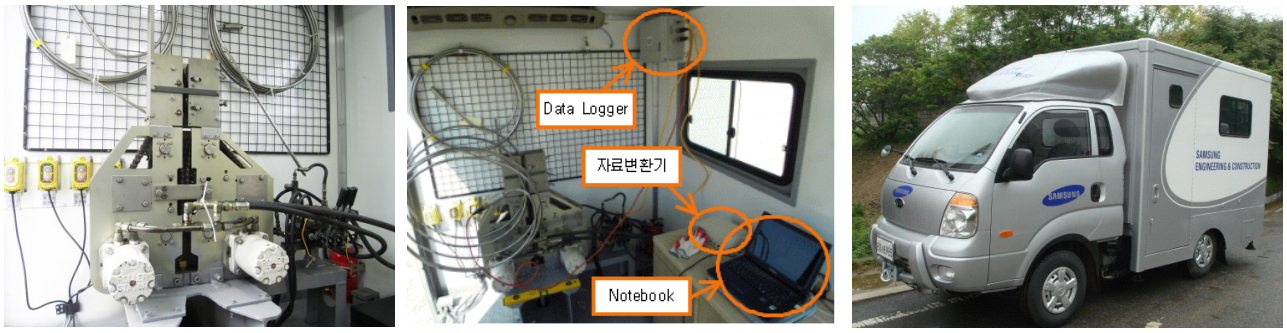


그림 1. 삼성 MCPT 시스템: 왼쪽부터 관입장치부, 자료측정시스템, 조사차량

3. 삼성 MCPT 국내현장적용

삼성 MCPT 시스템은 2008년 6월 시범적용을 시작으로 2010년 6월까지 2년의 기간 동안 Scale-Effect 규명 비교실험을 포함해서 총 9개 현장에서 적용되었다. Scale-Effect 규명 비교실험은 점성토지반과 모래지반 각각 구성된 2개 현장에서 MCPT와 일반 CPT의 비교실험을 수행하여 콘크기의 차이에 따른 영향을 규명하기 위한 것으로 별도로 진행된 실내실험을 통한 MCPT와 일반 CPT의 Scale-Effect 규명 연구(고려대학교, 2008)와 더불어 진행 되었다. 본 사례분석에 활용된 MCPT 지반조사는 간극수압측정 없이 깊이별 q_c와 f_s 두 가지 값의 측정을 통해 진행되었다. 표 1은 삼성 MCPT 시스템의 국내 현장 적용 사항을 요약하여 정리한 것이다.

표 1. 삼성 MCPT 시스템의 국내 현장 적용 사항

현장	지역	공사 종류	시험 횟수	조사심도 (m)	최대 q_c(MPa)	조사대상 지층	조사목적	표층조건
A	전남 남원	도로	5	4.5~6.0	12	점토층	연약층 심도 및 특성파악	매립층
B	경기 시화	매립지	4	10.0	6	점토층	Scale-Effect 규명	점토
C	부산	항만	6	5.5~7.5	33	모래층	Scale-Effect 규명	성토 모래
D	경남 김해	도로	11	6.5~10.0	15	점토층	연약층 심도 파악	논
E	전남 신안	교량	3	10.0	13	점토층	연약층 심도 및 특성파악	논
F	경기 평택	교량	10	7.0~10.0	15	점토층	연약층 심도 및 특성파악	포장도로
G	경북 구미	하천 정비	7	1.5~10.0	20	사질토	연약층 심도 및 특성파악	연약사질토
H	전북 정읍	철도	22	2.0~10.0	31	점토층	연약층 심도 및 특성파악	논, 실트층 매립층
I	경기 용인	도로	16	1.5~3.5	30	점토층	연약층 심도 및 특성파악	매립층

3.1 A 현장

본 현장에서는 고속도로공사를 위한 연약점토층 처리를 위한 설계를 위해 심도 및 특성 파악이 요구되었다. 조사가 필요한 구간은 논경지 지역으로 조사차량의 진입이 가능한 농로에서 조사작업을 수행하였다.농로는 농기계 운행을 위해 단단한 매립층이 표층에 있어 MCPT 관입을 위해 매립층 심도만큼 선굴착(Pre-boring)이 진행되었다. 5개 지점에서 수행한 조사결과 4.0~5.0m 심도까지 연약점토층이 존재

하고 있으며 이후 사질토지반이 나타난다. 본 현장의 경우 시범적용 이후 처음으로 MCPT 지반조사를 수행하여서 장비에 무리가 가지 않도록 조사목적에 맞게 연약층까지만 조사가 진행되었다.

3.2 B, C 현장

본 두 개의 현장은 상부 10m 정도가 각각 퇴적 점성토와 성토 모래로 비교적 균질하게 구성되어 있어 콘크기의 차이 따른 Scale-Effect 영향을 규명하기 위해 적절한 조건을 제공하고 있다. B현장에서는 60m×40m 영역에서 총 4 곳에서 1m 간격을 두고 CPT와 MCPT의 비교시험이 수행되었다. C현장에서는 5m×10m 영역에서 총 6개의 위치에서 1m 간격을 두고 CPT와 MCPT의 비교시험이 수행되었다.

3.3 D 현장

본 현장에서는 도로건설공사를 위한 연약지반처리의 목적으로 연약지반구간에서 점토층의 심도 파악을 위해 약 100m의 조사간격으로 총 11개소에서 MCPT가 수행되었다. 조사지역은 기존에 수행된 시추조사와 표준관입시험 결과를 바탕으로 약 7.5m의 심도까지 연약 점토층이 분포하는 것으로 보고 연약지반개량 설계가 이뤄진 구간이었다. 하지만 시공을 앞두고 수행된 시추조사 결과 10~11m 심도까지 점토층이 존재하는 것으로 나타나 안정적이고 경제적인 설계가 이뤄지기 위해선 연약점토층의 심도에 대한 정확한 정보가 필요한 상황이었다. 각 조사 위치에서 간극수압의 측정을 배제한 q_c와 f_s의 측정으로 MCPT 지반조사가 이뤄졌다.

그림 2는 MCPT 결과를 보여준다. 조사결과 MCPT-1~5구간의 경우 지표 매립층과 MCPT-3과 MCPT-5의 일부 층을 제외하면 10m 심도까지 q_c=0.5~1.0MPa 정도의 연약층이 분포하는 것으로 나타난다. 반면 MCPT-6~11 구간의 경우 MCPT-7과 MCPT-11에서만 지표 매립층을 제외한 10m 심도까지 연약층이 분포하는 것으로 나타났으며, 나머지 위치에서는 연약층의 최종 심도도 얕게 나타났으며 중간에 모래층 등 보다 견고한 층이 혼재해 있었다. MCPT 조사결과로부터 구한 지층분류는 기존 시추조사결과와도 잘 일치하고 있어 조사자료의 신뢰성을 더해 주었다. 현재의 MCPT 지반조사는 로드의 좌굴위험 등으로 10m 심도까지 조사가 가능하여 연약층의 심도가 10m를 넘어가는 6개소에서는 연약층의 종료심도를 확인하지 못 한 채로 조사가 마무리되었다.

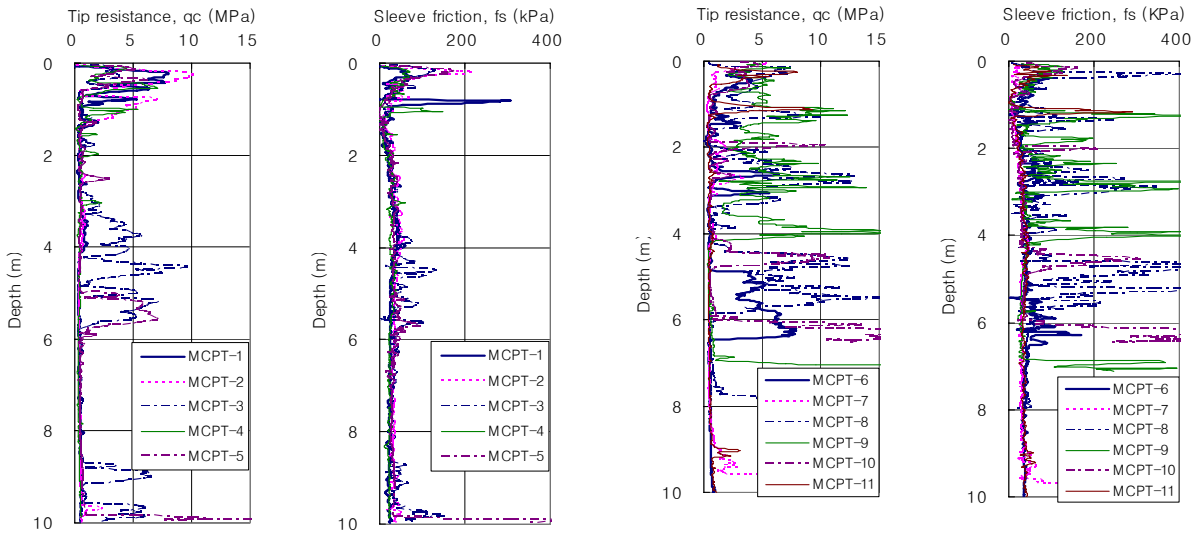


그림 2. MCPT 결과(D 현장): 왼쪽부터 MCPT-1~5의 q_c와 f_s, 그리고 MCPT-6~11의 q_c와 f_s

3.4 E 현장

본 현장은 교량공사가 예정돼 있는 곳으로 일부 연약지반의 처리를 위해 그 특성파악이 필요하였다. MCPT 지반조사는 연약지반구간에 기존 시추공 주변에서 30m 간격으로 3 곳에서 수행되었다. 조사가 수행된 곳은 좁은 농로였는데 조사차량의 진입이 어려워 계획대로 노선의 종단을 따라 수행되지 못하고 횡단으로 수행되었다. MCPT의 현장적용성을 높이기 위해 개선해야 할 부분이다.

세 개 조사결과 모두에서 상부 매립층을 제외하면 약 3m 심도까지는 연약점토층이 존재하고 있으며, 이후 조사위치별로 심도가 다르기는 하지만 q_c값 5~10MPa정도의 다소 견고한 층이 혼재하는 형태로 10m 조사심도까지 퇴적층이 존재하는 것으로 나타났다.

3.5 F 현장

본 현장은 교량공사가 예정돼 있는 곳으로 강을 중심으로 양쪽으로 발달한 연약점토층에 대한 조사가 필요하였다. MCPT 지반조사는 강 동쪽과 서쪽에서 각각 7개소와 3개소에서 수행되었다. 그림 3은 MCPT 지반조사 결과를 보여준다. 강 동쪽에서 수행된 MCPT-1~7의 조사결과 지반조건은 매립층 이후 약 4 m의 심도까지 연약점토층이 존재하며 이후 최종 조사심도인 10m까지 실트층과 모래층이 분포하는 것으로 나타났다. 강 서쪽에서 수행된 MCPT-8~10의 조사결과 도로포장층 아래로 약 4 m의 심도까지 연약점토층이 존재하며 이후 실트층과 실트질 모래층이 분포하였다.

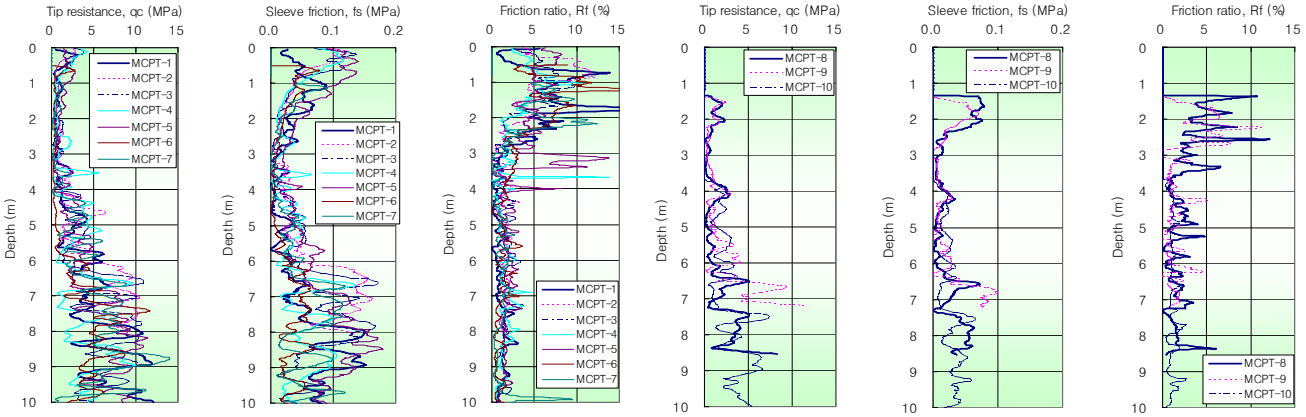


그림 3. MCPT 결과(F 현장): 왼쪽부터 MCPT-1~5의 q_c와 f_s, 그리고 MCPT-6~11의 q_c와 f_s,

3.6 G 현장

본 현장은 하도정비가 예정돼 있는 곳으로 강을 중심으로 좌우로 총 7개소에서 旣 수행된 시추위치에 1~2m 내외에 근접하여 MCPT 지반조사가 수행되어 기존 조사자료로 파악된 지층분포 및 특성의 신뢰성을 높이는데 그 목적을 두었다. 하안(河岸)을 따라 수행된 조사결과 1개 위치에서 조사심도인 10m까지 점성토층이 존재하는 것으로 나타났고, 나머지 6개 위치에서는 상부 점성토~실트질 점성토층이 나타나고 이후 실트질 모래~모래층이 분포하다 자갈층이 나타나면서 조사가 종료되었다. 조사심도는 자갈층 출현 심도에 따라 1.5~10m 사이에 분포하고 있어 강을 따라 퇴적되어 형성된 지반조건이 위치에 따라 다르게 나타나고 있음을 보여주고 있다.

3.7 H 현장

본 현장은 철도시공이 이뤄지고 있는 곳으로 전체 구간의 1/4에 해당하는 연약지반 출현이 예상되는 구간에서 안정적이고 경제적인 시공이 이뤄질 수 있도록 정밀한 지층분포 현황 및 특성을 파악하기 위해 노선 종단을 따라 총 22개소에서 MCPT 지반조사가 수행되었다.

조사결과 1.2~5.0m 심도까지 점토층이 분포하고 있으며, 이후로 실트층과 모래층이 조사심도인 10m 심도까지 나타나고 있었다. MCPT가 수행된 곳들 중 7개소의 위치에서는 약 1.0~7.5m로 인접한 거리에서 수행된 시추자료가 있어 MCPT 조사결과와 비교하였다. 전반적으로 유사한 결과가 나타났으며 MCPT 조사결과의 확률론적 분석(Zhang and Tumay, 1999) 결과와 시추조사결과의 비교를 통해 본 현장에 분포하는 점토층 대부분이 다량의 실트질 성분을 포함하고 있다는 것을 확인 수 있었다.

3.8 I 현장

본 현장은 도로공사가 이뤄지고 있는 곳으로 공사 구간 중 연약지반 출현이 예상되는 지역에서 안정적이고 경제적인 설계가 이뤄질 수 있도록 MCPT 지반조사를 격자형으로 조밀하게 수행하여 연약지반의 분포와 심도, 특성을 파악하고자 하였다.

본 현장은 상부 1.5~2.0m가 자갈과 전석을 포함한 흙으로 매립되어 있어 MCPT 지반조사를 위한 선굴착 작업이 수행되었다. 선굴착 작업은 매립층이 종료되는 지점까지 육안으로 지반조건을 확인하면서 진행되었다. 이러한 추가적인 선굴착 작업의 수행은 MCPT 지반조사에 들어가는 시간과 노력을 배가시키는 것이었다. 조사결과 1.5~3.5m 심도까지 점토층이 분포하고 있으며, 이후로 실트층과 모래층이 나타나면서 급격하게 단단해져서 4.0m 심도에서 대부분의 조사가 종료되었다.

4. 사례분석

4.1 사례분석 1: MCPT-CPT Scale-Effect 비교시험

MCPT와 CPT의 콘크기의 차이에서 오는 측정결과의 차이는 MCPT 결과의 올바른 적용을 위해 주지해야 하는 사항이다. Tumay and Kurup(2001)은 미국에 위치한 3개 현장에서 수행한 표준 CPT와 MCPT의 비교시험을 통해 q_c와 f_s의 비를 구하였다. 비교시험은 지반의 불균질성 영향을 최대한 배제하기 위해 균질성이 우수한 구간을 선별하여 수행하였고, 선별된 점토 및 실트질 점토 지반인 경우 $10cm^2$ 표준 CPT 측정값을 기준으로 $2cm^2$ MCPT에서 q_c는 약 10~13%정도 크게, f_s는 약 9~13% 작게 측정되었다. 고려대학교(2008)에서는 5개의 서로 다른 상대밀도와 구속압 조건의 사질토와 1개의 점성토 시료에 대해 CPT와 MCPT의 비교시험을 수행하였다. 시험결과 사질토에서는 MCPT의 q_c가 약 11~14% 크게 f_s는 약 3~14% 작게 측정되었고, 점성토에서는 각각 4% 크게, 7% 작게 측정되었다. 이러한 측정값에서의 차이는 측정값을 이용한 흙의 분류나 비배수전단강도와 같은 흙의 물성치 산정에 있어서는 더욱 미미한 차이가 되어 MCPT 지반조사 결과의 분석에 있어 무시할 만한 수준인 것으로 여겨진다.

그림 4는 B 현장에서 수행된 비교시험의 결과이다. MCPT의 경우 CPT와 비교했을 때 q_c 측정에서 10% 정도의 차이를 보이고 있어 기존 연구결과와 크게 다르지 않았다. 하지만, q_c 측정값 비교와 다르게 측정이 까다로운 f_s는 의미 있는 비교결과를 보여주지 못하였다.

그림 5는 C 현장에서 수행된 비교시험결과 중 하나이다. C 현장의 6 개 조사지점은 연약지반 상부에 해상모래를 10m 높이로 성토한 곳으로 Robertson et al.(1986)이 제안한 지반분류표를 이용했을 때 CPT 및 MCPT 조사결과 모두 조사구간 내 대부분의 지반을 Soil Behavior Type 9인 모래로 분류하여 MCPT 지반조사를 통해 실제와 일치하는 지반분류결과를 얻었음을 확인하였다. MCPT로부터 얻어진 q_c는 CPT로부터 측정된 q_c와 비교했을 때, 기존 연구결과와 유사한 수준의 차이(약 10~15%)를 보임도 확인하였다. 그러나 f_s의 경우 MCPT와 CPT 사이의 Scale Effect는 기존 연구결과의 값을 넘어서는 수준

으로 측정되었고, 보다 정확한 f_s 측정을 위해 주기적인 계측센서의 검교정, 시험 후 마찰주면의 작동여부 확인 등 보다 세밀한 시험의 세부과정 수행이 뒤따라야 할 것으로 여겨진다.

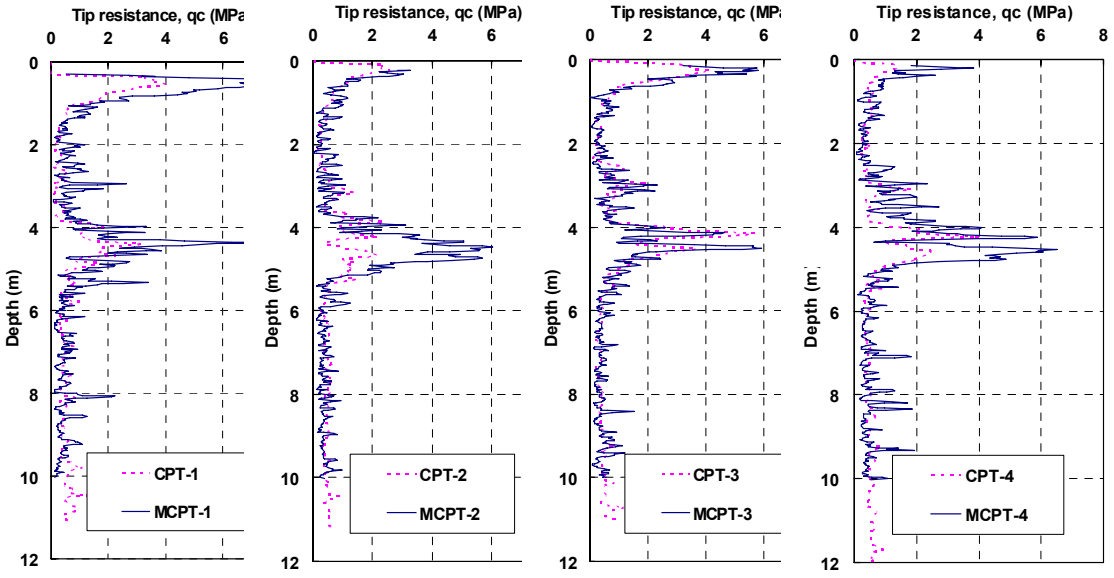


그림 4. CPT와 MCPT 지반조사 결과 비교(B 현장)

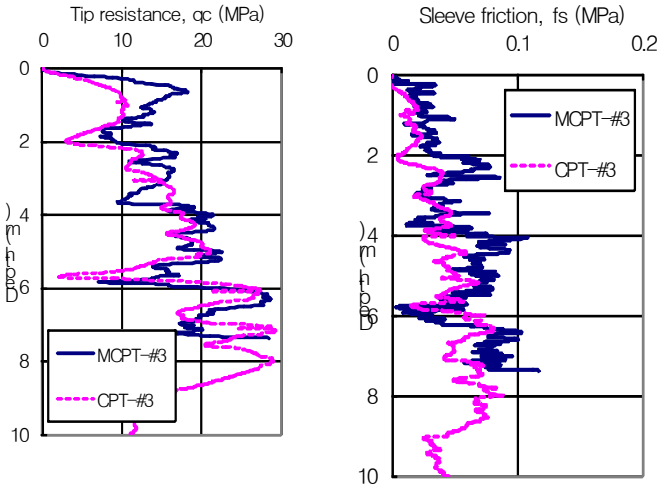
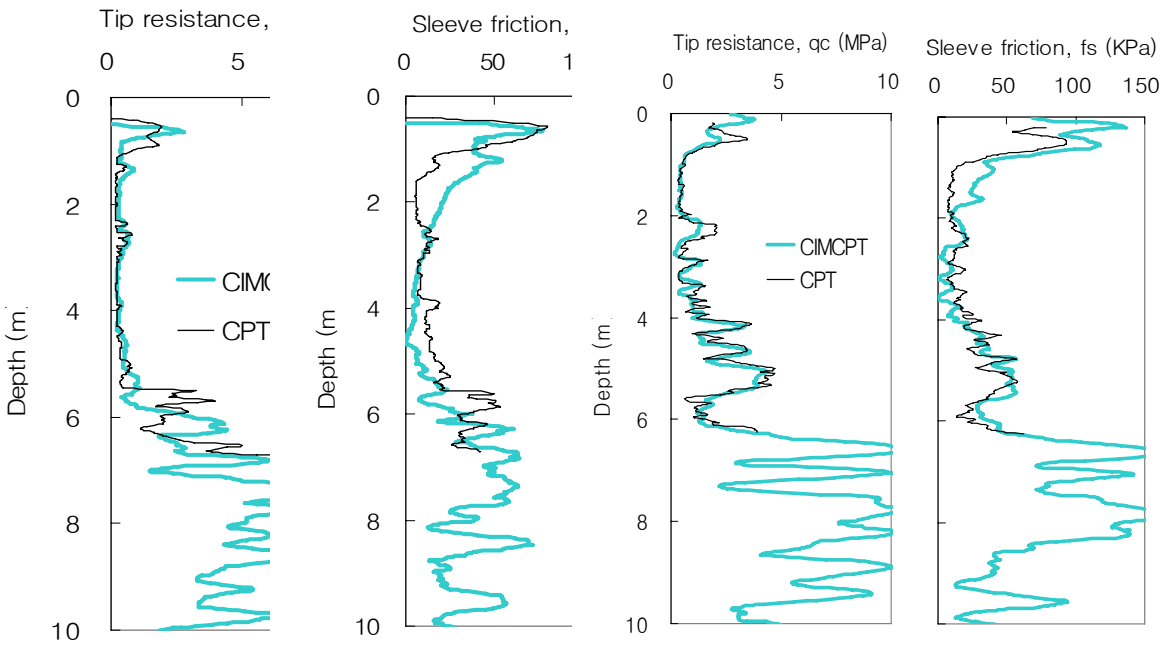


그림 5. CPT와 MCPT 지반조사 결과 비교(C 현장)

4.2 사례분석 2: MCPT 지반조사 결과 검증

MCPT 시스템을 구축하고 운영하기 위해선 올바른 유지관리와 이를 확인하기 위한 검증작업을 수시로 진행하는 것이 필요하다. 삼성 MCPT 시스템은 2년간의 현장적용 작업 중 가능하면 인접하여 수행된 시추조사, CPT, 실내실험 결과 등을 활용해 MCPT 지반조사 결과를 검증하는 작업을 수행하였다. 그림 6은 F 현장에서 수행된 2개 지점에서의 MCPT-CPT 시험결과의 비교를 보여준다. MCPT와 CPT로부터 측정된 q_c와 f_s는 1~2m 심도의 f_s를 제외하면 매우 잘 일치하고 있다. MCPT 지반조사결과는 Zhang and Tumay(1999)가 제안한 확률론적 방법을 이용하여 지반을 분류하는데 이용되었다. 그림 7은 MCPT 지반분류와 시추조사결과의 비교를 보여준다. 비교가 이뤄진 2개 지점 중 Test location #1에서는 1.5m와 3.0m 심도에서 Test location #2에서는 2.2m와 4.0m 심도에서 입도분석을 비롯한 실내실험을 수행하였다(표 2). MCPT 지반조사 결과로부터 Zhang and Tumay(1999)가 제안한 확률론적 방법을 이



용한 지반분류 결과는 시추조사결과와 USCS 결과와 잘 일치하고 있다.

(a) Test location #1 (b) Test location #2

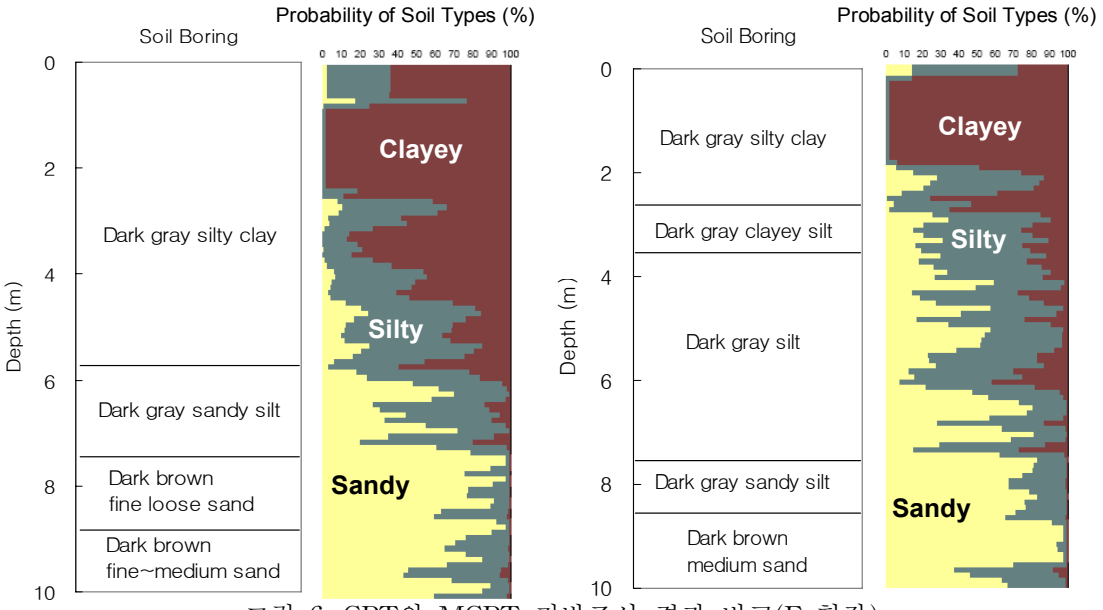


그림 6. CPT와 MCPT 지반조사 결과 비교(F 현장)

(a) Test location #1 (b) Test location #2

그림 7. MCPT 지반분류와 시추조사결과의 비교

표 2. 실내실험 결과 및 통일분류(USCS)결과(F 현장)

Depth / Location	Gs	W_n (%)	LL (%)	PI	#200 passing	USCS
1.5 m / #1	2.68	35.6	32.8	7.0	97.0	CL
3.0 m / #1	2.69	42.9	37.7	15.2	96.5	CL
2.2 m / #2	2.69	44.8	35.8	9.2	99.6	CL
4.0 m / #2	2.68	29.9	31.0	6.4	91.1	ML

4.3 사례분석 3: MCPT 조사목적

CPT는 시추와 병행하여 진행되는 SPT와 달리 유압장치를 이용하여 콘을 지중에 압입시키며 보다 정밀하게 진행되기 때문에 그 특성상 연약지반의 특성파악에 적합한 지반조사 장비이다. 하지만, 국내에서 인식되고 있는 상황과 달리 CPT가 연약지반에서만 사용될 수 있는 것은 아니다. NCHRP(2007)에 따르면 미국과 캐나다에 위치한 36곳의 교통국(DOT)으로부터 설문조사한 결과 CPT가 적용되는 지반조건 중 연약점토, 연약사질토 등 연약지반은 약 50%정도이고 나머지 절반은 풍화토, 조밀한 모래 등 일반적인 지반조건이었다. 결국 지반조사 장비의 관입력 부족 등의 성능 부족이 CPT의 일반지반 적용을 방해하는 요소이며, 소형장비로도 N치 30~40정도까지의 일반지반에 적용 가능한 경제적인 대안이 MCPT라고 판단하여 시스템을 구축하였다.

표 1의 조사목적을 살펴보면 Scale-Effect 규명을 위한 실험 목적의 2개 현장을 제외하면 현업에서 요청된 MCPT 지반조사의 목적은 모두 연약층의 심도 및 특성파악이었다. 하지만 조사대상 지층은 점토층뿐 아니라 모래층 등 사질토 층을 포함하고 있었으며 적용된 지층의 q_c도 최대 33MPa로 연약지반 및 주변의 일반지반까지도 함께 조사하여 단단한 지반 아래로 연약지반이 분포하고 있는 경우나 연약지반과 일반지반이 교호하고 있는 경우 모두에서 연약지반의 심도 및 특성을 파악할 수 있는 것으로 나타났다. 연약층의 특성파악을 위해 점토층의 비배수전단강도, 사질토층의 상대밀도, 내부마찰각 등의 자료를 MCPT 측정자료로부터 도출하였다.

4.4 사례분석 4: 조사가능 최대 q_c

삼성 MCPT 시스템에 사용된 관입기의 제원을 살펴보면, 관입력의 경우 약 1.36ton까지 발휘할 수 있어 제작사 측에서 밝힌 자료에 따르면 반력이 충분하다면 약 67MPa까지의 q_c와 670kPa까지의 f_s를 측정할 수 있다. 하지만, 실제 현장적용을 통해 나타난 MCPT의 조사가능 지반조건은 관입기의 성능보다는 로드의 좌굴(Buckling) 발생에 의해 제한을 받으며 대략 30MPa ~ 35MPa의 q_c를 갖는 지반까지를 포함한다. MCPT 사용된 로드는 연속관입이 가능하도록 코일 모양으로 감겨져있다 관입 시 직선으로 펴질 수 있을 정도의 연성이 있어야 하고, 무엇보다 소형(13mm)으로 제작되기 때문에 조사심도가 깊어질수록 로드 좌굴에 대해 취약점을 가지고 있다. 그림 8은 C현장에서 MCPT 적용 시 로드 좌굴이 발생한 상황을 보여준다. 모래로만 구성된 C현장에서 수행된 MCPT 조사에서 좌굴을 고려한 최대 q_c를 대략 30MPa이었다. 이는 Kulhawy and Mayne(1990)와 Jefferies and Davies(1993)가 각각 제안한 q_c와 N치의 상관관계식을 이용하면 각각 70과 50 정도의 N_{60}에 해당하는 값이 된다.

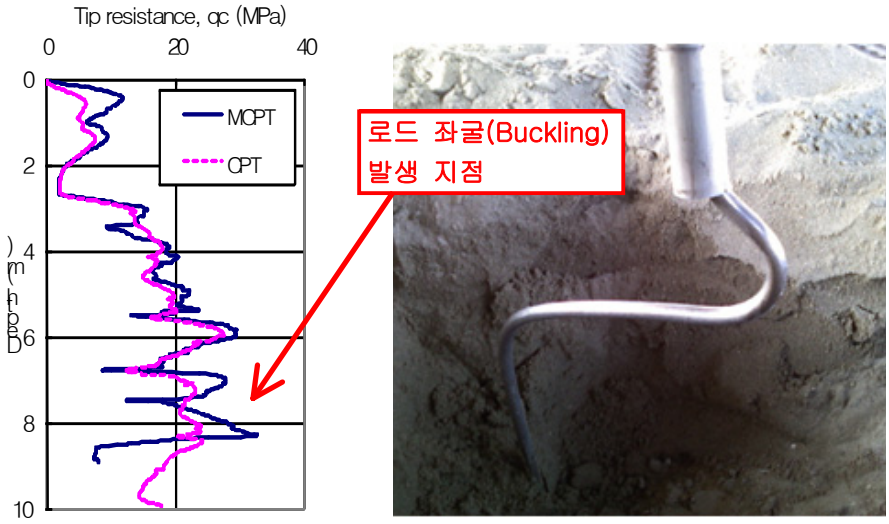


그림 8. MCPT 지반조사 시 로드 좌굴의 발생(C 현장)

4.5 사례분석 5: MCPT 현장 적용 시 문제점

4.5.1 MCPT 조사차량의 제한적인 현장접근성

미국과 캐나다에 위치한 48곳의 DOT로부터 조사한 자료(NCHRP, 2007)에 따르면 CPT 현장적용을 방해하는 요소로 너무 단단한 지반조건(Too Hard)과 제한적인 현장접근성(Limited Access)을 각각 첫 번째와 두 번째로 꼽았다. MCPT의 경우 장비의 소형화에 따라 현장접근성 측면에서 대형 트럭에 장착된 일반 CPT의 경우보다 낫다고 할 수 있으나 삼성 MCPT 시스템과 같이 트럭에 탑재되어 운행되는 경우 연약지반에서 장비주행성능이 떨어지는 문제점을 가지게 된다(그림 9). 따라서 이러한 MCPT 조사차량의 제한적인 현장접근성의 문제점을 해결하기 위해서는 그림 10과 같은 MCPT 운반 궤도장치의 제작이 요구된다. 현재 기존 MCPT 조사차량에 탑재가 가능하도록 소형시추기 형태의 궤도장치가 제작중에 있으며 이를 통해 제한적인 현장접근성으로 인해 제약받았던 현장적용성이 크게 향상될 것으로 기대하고 있다.

그림 9. MCPT 조사차량의 제한적인 현장접근성

그림 10. MCPT 운반 궤도장치(Gregg Drilling 社)

4.5.2 MCPT의 제한적인 조사심도

MCPT의 제한적인 조사심도는 지반조건에 따른 로드 좌굴의 발생과 연속관입형 로드사용에 따른 로드 제작길이의 한계에 기인한다. MCPT 제작사인 Gregg Drilling & Testing 社에서 제공하는 콘과 일체된 로드의 경우 12m의 길이를 가지는데 조사차량 높이와 관입장치 높이를 고려하면 결국 10m의 조사심도를 제공하게 된다.

10m의 조사심도는 로드의 좌굴과 내부경사계 없이 진행되는 MCPT의 특성을 감안하면 적절한 심도인 것으로 여겨진다. 하지만, 10m라는 제한적인 조사심도로 인한 MCPT 적용의 제한을 줄여보고자 12m 길이의 로드 두 개를 용접으로 연결한 24m 로드를 제작(그림 11)하여 적합한 지반조건에 적용할 수 있도록 하였다. 최근 Gregg Drilling & Testing 社로부터 앞으로는 용접 없이 15m 길이의 로드를 장착한 소형콘을 표준으로 제작할 예정이며 좌굴을 고려해 내부경사계를 장착하는 작업을 진행 중이라는 소식을 들었다.

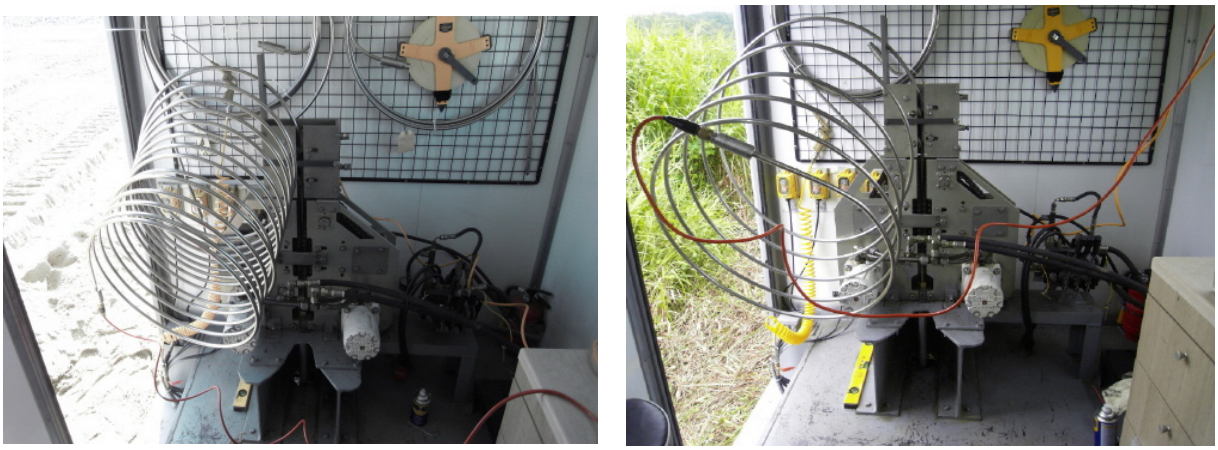


그림 11. MCPT 로드 비교: 24m(왼쪽), 12m(오른쪽)

4.5.3 기타(간극수압측정 불가, 상부매립층 관통 불가 등)

간극수압측정은 q_c와 f_s에 이은 CPT의 3번째 측정값으로 보다 명확한 지반의 분류와 설계물성치 도출을 위한 중요한 정보를 제공한다. MCPT의 경우 16mm의 콘 외경과 콘 두께를 고려하면 간극수압계를 설치할 수 있는 공간은 불과 수 mm정도에 불과하기 때문에 초소형 센서를 설치하여야 하며 센서로 수압을 전달하는 필터의 크기도 작기 때문에 표준 CPT와 비교했을 때 정확한 간극수압의 측정이 더 어렵게 된다. 삼성 MCPT 시스템에는 최근 간극수압측정이 가능한 MCPT 콘이 구비 되어 시범적용을 거친 후 현업에 적용하기 위한 준비에 들어가 있는 상황이다. CPT와 마찬가지로 MCPT에서도 간극수압의 측정은 장비의 가능 유무를 떠나 필터의 포화 등 장비의 유지관리에 많은 신경을 써야 하는 작업이므로 간극수압측정을 위한 장비의 유지관리에 필요한 세부사항을 정리하는 것 또한 필요하다.

지반 조사가 필요한 현장에서 차량이나 장비의 운행을 위한 상부 매립층의 존재는 아주 빈번하게 마주치게 되는 일이다. 그런데 이러한 매립층은 대부분 자갈을 포함하여 다져지는 경우가 많아서 매립층 아래로 지반조사가 필요한 대상 지반이 존재하는 경우 MCPT의 적용을 어렵게 하는 요인이 된다(A, F, I 현장). 이러한 경우 시추장비를 이용해 단단한 매립층을 선시추하여 MCPT가 대상지반에 직접 관입 수 있도록 하는 작업을 진행하게 되는데 이런 추가작업은 비용과 시간을 증가시켜 MCPT의 현장적용을 방해하는 요소가 되기도 한다(그림 12). 이런 문제점을 해결하기 위해 상부 1~2m 매립층을 선시추할 수 있는 장치를 MCPT 운반 궤도장치에 함께 부착하는 작업을 진행하고 있다.

그림 12. MCPT 지반조사를 위한 상부 매립층 굴착

5. 결 론

본 연구에서는 국내에 처음 도입된 소형콘관입시험 장비인 삼성 MCPT 시스템의 현장적용 사례분석을 통한 장비의 효용성과 한계, 그리고 현장적용성 향상을 위한 성능개선사항에 대해 살펴보았다. MCPT는 널리 알려진 CPT와 콘의 크기만 다를 뿐 시험방법이나 측정자료의 분석 등 다른 모든 부분은 똑같은 시험법이다. 따라서 콘의 크기 차이에서 오는 Scale-Effect에 대한 이해와 MCPT 시스템의 현장적용성에 대한 부분을 이해한다면 MCPT는 연약지반 뿐만 아니라 일반지반조건에서도 적절하게 활용할 수 있는 경제적인 현장시험법이다. 본 연구에서 사례분석을 통해 살펴본 삼성 MCPT 시스템의 국내현장적용과 관련한 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 콘크기의 차이에서 오는 CPT와 MCPT의 q_c와 f_s 측정값의 차이는 10% 내외로 측정자료를 이용하여 지반분류나 설계물성치를 도출하는 경우 이러한 측정값의 차이는 무시할 수 있을 만큼 작다고 할 수 있다. 다만, 비교적 정확한 측정이 가능한 q_c와 비교했을 때 f_s의 경우 측정이 까다롭기 때문에 측정에 보다 섬세한 주의가 필요하다.

(2) MCPT 시스템을 구축하고 운영하기 위해선 올바른 유지관리와 이를 확인하기 위한 검증작업을 수시로 진행하는 것이 필요하다. 삼성 MCPT 시스템은 2년간의 현장적용 작업 중 인접하여 수행된 시추조사, CPT, 실내실험 결과 등을 활용해 MCPT 지반조사 결과를 검증하는 작업을 수행하였고, 대부분 다른 조사방법들의 결과와 일치하거나 유사한 결과를 얻어 MCPT 조사결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

(3) Scale-Effect 규명을 위한 실험 목적의 2개 현장을 제외하면 현업에서 요청된 MCPT 지반조사의 목적은 모두 연약층의 심도 및 특성파악이었다. 충분한 관입력으로 MCPT는 대상 연약지반뿐 아니라 주변 일반지반까지도 조사가 가능하기 때문에 단단한 지반 아래로 연약지반이 분포하고 있는 경우나 연약지반과 일반지반이 교호하고 있는 경우 모두에서 연약지반의 심도 및 특성을 파악할 수 있는 것으로 나타났다.

(4) 삼성 MCPT 시스템은 현장적용 시 로드의 좌굴 없이 최대 30MPa 정도의 q_c를 가지는 지반까지는 조사가 가능하였다. 이는 시추기에 부착되어 운영되는 대부분의 국내 CPT 장비가 10MPa 정도의 q_c까지 주사가 가능함을 감안하면 관입력의 증대를 통해 현장적용성을 크게 향상 시켰다고 할 수 있다. 모래지반에서 30MPa의 q_c는 Kulhawy and Mayne(1990)와 Jefferies and Davies(1993)가 각각 제안한 q_c와 N치의 상관관계식을 이용하면 각각 70과 50 정도의 N_{60}에 해당하는 값이 된다.

(5) 삼성 MCPT 시스템은 현장적용을 통해 문제점을 분석하여 지반조사심도 향상, 간극수압측정, MCPT의 현장접근성 향상, 단단한 매립층 선시추 장비 제작 등의 성능개선 사항들을 도출하였고, 이을 통해 MCPT의 현장적용성을 확대시켜 나가고 있다.

참고문헌

1. 고려대학교 (2008), 소형 콘관입시험기(MCPT)의 Scale Effect 규명 연구 최종보고서, 69 p.
2. Broms, B. B. and Flodin, N. (1988). "History of Soil Penetration Testing", *Proc. of the First International Symposium on Penetration Testing, Vol. 1, Orlando, Fla.* (*Penetration Testing 1988*), Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Mar. 20-24, pp. 157-220.
3. Jefferies, M.G. and Davies, M.P. (1993). "Use of the CPTu to estimate equivalent SPT N_{60}."

Geotech. Testing J., GTJODJ, 16(4), 458-468.
4. Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design*, Report EPRI-EL 6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto, 306p.
5. NCHRP(2007). *Cone Penetration Testing*, Consulted by Mayne, P. W., Transportation Research Board, Washington, D.C.
6. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and Greig, J. (1986). "Use of piezometer cone data." *Use of In-Situ Tests in Geotechnical Engineering (GSP 6)*, Ed. S. P. Clemence, ASCE, New York, pp. 1263~1280.
7. 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, 71 p.
8. 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, 60 p.
9. 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.
10. Tumay, M.T., Titi, H.H,, Senneset, K., and Sandven, R. (2001), "Continuous intrusion miniature piezocone penetration test in quick soil deposits", *Proc. XVth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, Turkey, Vol. 1, pp. 523~526.