

한국형 대형관입시험 장비의 개발 및 현장 적용성 평가 Performance of KICT-type Large Penetration Test (LPT)

김영석¹⁾, Young-Seok Kim, 김영진²⁾, Young-Chin Kim, 홍성완³⁾, Sung-Wan Hong,
강재모⁴⁾, Jae-Mo Kang, 지완구⁵⁾, Wan-Goo Ji

- 1) 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology
- 2) 한국건설기술연구원 지반연구부 책임연구원, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology
- 3) 한국건설기술연구원 지반연구부 연구위원, Senior Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology
- 4) 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원, Researcher, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology
- 5) 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 수석연구원, Principal Researcher, Research Inst. of Technology, Samsung Corporation Engineering & Construction

SYNOPSIS : It is well known that the standard penetration test (SPT) has been used in all over the world to get geotechnical properties of the ground. However, it is difficult to apply the SPT to the dense sand, gravel, weathered rock, etc. For the application of the SPT in these grounds, it is necessary to change in the diameter and the impact energy of the SPT.

For the improvement of site investigation technology, Large Penetration Testing device (KICT-type LPT) was developed and applied to the in situ condition. The drop height and weight of the hammer in developed system were decided as 760 mm and 150 kg, respectively. Semi-auto hammer drop system identical with KS F2307 and JI A1259S was adopted. And the developed sampler has the inner diameter of 63 mm and the length of 500 mm with the adjustment of energy ratio to the SPT of 1.5. The hammer energy level was measured during the performance of the KICT-type LPT using SPI system (quality control system from driven piles).

Keywords : Large penetration test (LPT), Gravel, N-value, Semi-auto hammer, SPI system

1. 서론

최근 산업의 급속한 발달로 구조물의 대형화와 대심도화가 진행되고 있으며, 토목, 건축, 환경시설물 등에 대한 공사도 더 이상 양호한 지반에서만 이루어질 수 없는 상황에 직면하였다. 즉, 해안의 연약지반, 풍화암 지대, 쓰레기 매립지, 매설관 등 기존 시설물들이 다수 존재하는 도심지역 등 종래 건설공사 입지 선정 시 제외되었던 난조건 지역에서도 건설공사를 수행해야 하는 경우가 점점 증가하고 있는 추세이다. 이러한 난조건 지반의 특성을 정확히 규명하고, 안전한 공사를 수행하기 위해서는 더욱 정확한 지반조사 기술이 요구되고, 이러한 의미에서 지반조사의 정확성은 곧 건설공사의 성공과 직결되는 일이라고도 볼 수 있다.

국내에서는 지반정수를 결정할 때, 다양한 현장 실험방법이 있음에도 불구하고 대부분 표준관입시험

(standard penetration test, SPT)에 의한 지반조사에만 의존하고 있다. 그러나, SPT는 모래지반을 대상으로 하는 지반조사 기법으로 자갈 지반, 풍화토 지반 등에 동적관입시험을 적용하기 위해서는 기존의 SPT로는 많은 한계가 있다. 이를 해결하기 위하여 선진 외국에서는 SPT의 해머직경, 낙하높이 등 타격에너지를 조절하여 지반조사에 활용할 수 있도록 연구를 진행하고 있다 (Yoshida et al. 1988; Alex et al. 1997; Koeste et al. 2000; Chris et al., 2003).

본 연구에서는 보다 정확한 지반조사 기술 개발의 일환으로, 모래지반 이외에도 적용이 가능하도록 해머중량 및 샘플러 등의 사이즈를 조절하여 한국형 대형관입시험(KICT-type LPT) 장비를 개발하였다. 새롭게 개발한 KICT-type LPT장비의 거동을 말뚝 항타시험에서 사용되고 있는 항타품질 분석시스템(Quality Control System for Driven Piles, SPD)을 이용하여 측정/검토하였다. 또한, KICT-type LPT 장비의 현장 성능 평가를 실시하였으며, SPT 시험결과와 비교하여 LPT-SPT 상관관계 연구도 함께 수행하였다.

2. KICT-type LPT 장비 개발

2.1 개발배경

북미와 남미의 경우 일반적인 기초설계의 85-90% 가량이 SPT에 의존하여 수행되고 있으며, 일본과 우리나라에서도 대부분의 지반공학적 설계가 SPT의 결과로 얻어진 N값에 좌우되고 있는 실정이다 (Bowles, 1988). 이와 같은 시험은 원칙적으로 사질토에 한정하여 사용되는 방법이지만 국내에서는 SPT의 간편성, 축적된 많은 데이터(N값) 때문에 다양한 흙에서 이 시험법이 사용되고 있다. 그러나, SPT에서는 샘플러의 직경, 타격에너지 등의 많은 제약으로 인하여 조밀한 모래층, 자갈층, 연암층 등에서는 샘플러의 관입이 어려우며 신뢰성 있는 N값의 산정에도 많은 문제점이 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고, 기존의 SPT가 적용될 수 없는 지반에서도 활용할 수 있도록 해머중량 및 샘플러 등의 사이즈를 조절하여 KICT-type LPT 장비를 새롭게 개발하였다.

2.2 장비구성

새롭게 개발한 KICT-type LPT 장비는 크게 지반에 관입되어 준고관시료를 채취하는 “샘플러”, 샘플러와 엔빌을 연결하는 “롯드”, 타격에너지를 제공하는 “엔빌”, “150 kg 반자동 해머”로 구성되어 있다. 그림 1은 KICT-type LPT 시험장비의 주요 구성 요소를 나타내고 있다.

표 1. KICT-type LPT 장비의 제원

제원	장비명	KICT-LPT
해머중량(kg)		150
낙하높이(mm)		760
외경(mm)		76
샘플러 내경 open shoe(mm)		60
샘플러 내경 barrel(mm)		63
샘플러 선단면적(두께) (cm ²)		17.1
에너지비(두께)		1.5

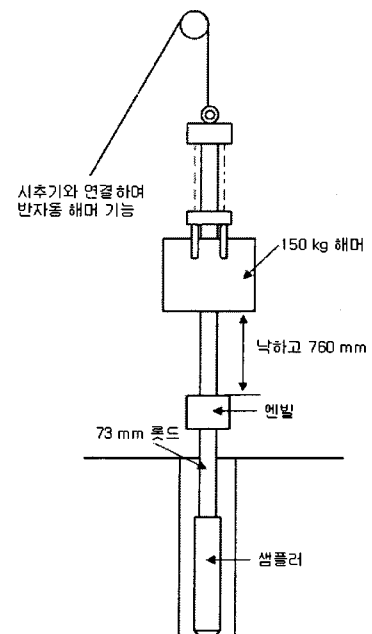


그림 1. KICT-type LPT 시험 장비 주요구성

KICT-type LPT 장비의 제원, 특히 해머중량, 낙하높이, 샘플러 사이즈는 샘플러 선단부의 두께를 고려한 면적 에너지비를 일정하게 가정하여 결정하였다. 즉, SPT에 대한 KICT-type LPT 샘플러의 에너지를 1.5배로 가정하여 해머중량은 150 kg, 낙하 높이는 760 mm로 결정하였으며, 이렇게 결정된 KICT-type LPT 장비의 주요 제원은 표 1과 같다. 모든 부품은 강화 열처리로 끝마무리를 하여 높은 타격 에너지에도 견딜 수 있도록 내구성면에서도 많은 고려를 하여 제작되었다.

주요 장비의 특징은 다음과 같다.

(a) 샘플러 및 룯드

KICT-type LPT 장비의 선단부에는 준교란 시료를 채취할 수 있도록 2중관 대형 샘플러를 장착하여 대상지반의 종류, 지반의 물성치 실험을 수행할 수 있도록 설계하였다. 그림 2 및 사진 1에는 샘플러 구조 및 규격을 나타내고 있다. 슈의 재질은 SCM 4종, 이중 관(튜브)은 S45C로 제작되었으며, 기존의 SPT 샘플러의 경우, 직경이 35-40 mm정도로 작아 완전히 교란된 시료만 채취할 수 있으나, 본 연구에서 설계한 샘플러의 직경은 63 mm로 비교적 커, 준교란 정도의 시료 채취가 가능하다고 판단된다 (사진 2 참조).

룯드는 샘플러와 앤빌을 연결하는 중요한 부재이며, 앤빌을 통해 전달되는 해머의 타격에너지가 손실되지 않고 샘플러에 전달되어야 한다. KICT-type LPT 장비의 룯드는 기존 NX 구경에 맞추어 사이즈를 결정하였으며, 시판중인 73 mm 의 룯드를 사용하였다.

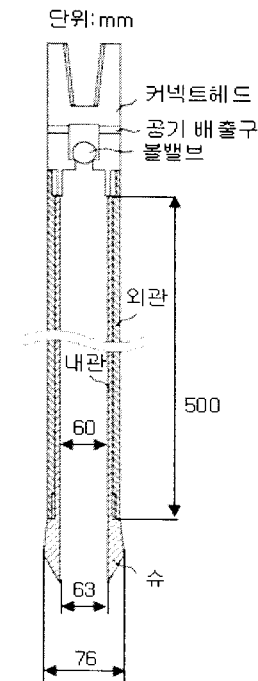


그림 2. 샘플러 규격

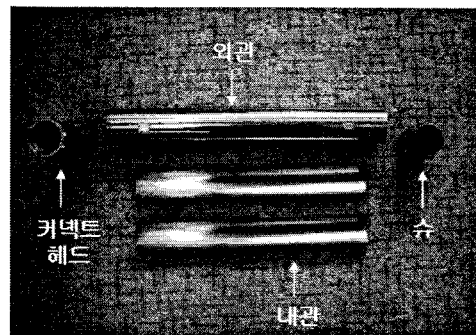


사진 1. 샘플러 구조

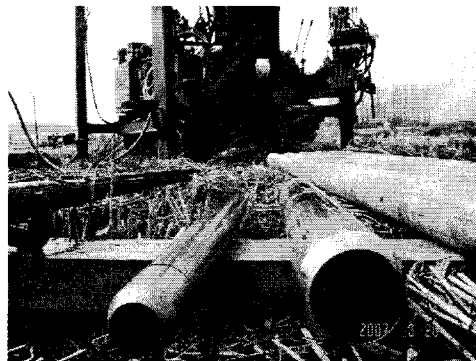


사진 2. SPT 샘플와 LPT 샘플러

(b) 해머와 앤빌

선단 에너지를 SPT의 1.5배로 가정하여 해머중량은 150 kg, 낙하 높이는 760 mm로 설계하였다. 해머의 타격에너지를 직접적으로 받는 앤빌도 직경 150 mm, 높이 138 mm로 제작하여 높은 타격에너지에 견딜 수 있도록 하였다.

(c) 반자동 낙하장치

기존 SPT 장비에서 에너지 효율 등의 많은 문제점이 지적되었던 낙하시스템은 KS F2307 및 JI A1259S에서 제시하고 있는 반자동 낙하시스템을 도입하였다 (조성민, 2001; 이우진, 2007). 이 시스템은 기존 시추장비의 유압을 이용하여 정해진 낙하고까지 해머를 상승시키고 자동으로 낙하시키는 시스템이다.

2.3 시험방법

시험방법은 기존의 SPT와 동일하며, 300 mm 깊이까지 샘플러가 관입될 때의 타격횟수를 LPT의 N값이라고 정의하였다. 예비타를 포함한 보다 구체적인 시험방법은 향후 다양한 지반조건에서 현장 적용성 평가를 실시하여 검토할 필요가 있다. 사진 3은 기존 시추기에 연결한 KICT-type LPT 장비 일체를 나타내고 있다.

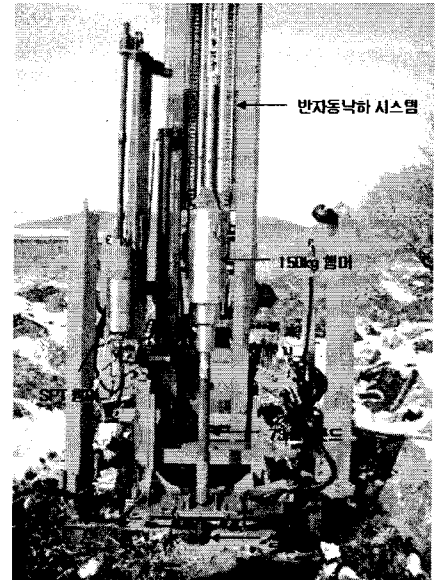


사진 3. KICT-type LPT 시험장비

3. 계측장비를 활용한 KICT-type LPT 장비의 거동평가

SPT를 포함한 모든 관입시험을 수행 할 때는 해머의 에너지 효율 및 거동을 분석하여 N값에 영향을 미치지 않도록 반드시 정량적인 평가와 보완이 이루어져야 한다. SPT 과정에서는 여러 가지 요인에 의하여 룯드를 타격하는 해머의 에너지 손실이 발생하여 결과적으로 샘플러의 관입에 사용되는 에너지는 이론적인 상태의 에너지 보다 작게 된다. 현재까지 수많은 연구자에 의해 룯드를 통해 전달되는 해머의 타격에너지가 복잡한 과정을 거쳐 최종적으로 하부 지반에 가해지면서 스피릿 스펀 샘플러의 관입이 이루어지며, 해머의 낙하방법과 룯드의 길이, 그리고 엔빌의 형태와 크기 등이 룯드에 전달되는 에너지의 크기에 직접적인 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 관입시험 결과의 신뢰성을 유지하는 최선의 대안은 항상 균일한 타격이 보장되는 시험장비를 사용하여 시험 시 인적, 기계적인 요인에 의한 오류를 근본적으로 방지하는 것이다.

본 연구에서는 향타품질 분석시스템(SPI)을 이용하여 KICT-type LPT 장비의 거동을 평가하였다. 즉, 매 타격 시 마다의 해머 타격에너지 및 관입량을 계측/분석하였다.

3.1 향타품질 분석시스템(SPI) 소개

향타품질 분석시스템(SPI)은 교량, 건물 등의 구조물 하중을 지지하는 기초가 올바르게 시공되고 있는지를 평가하는 장비로, 대형 구조물 기초 공사의 시공품질 검사를 위하여 개발되었다(삼성물산, 2004; 윤희석 등, 2004, 홍정택 등, 2006; 석정우 등, 2007). 고속/정밀 관찰선 직각방향 변위 측정 기술을 이용하여 대형 구조물의 기초공사 시, 말뚝 침하량과 향타 에너지의 정밀한 측정을 통하여 말뚝의 지지력을 분석, 평가할 수 있다. 즉, 고속 라인스캔 카메라를 이용한 2차원 변위 측정으로 말뚝의 좌우, 상하, 회전의 3방향 변위를 고속으로 정확하게 측정할 수 있다. 본 연구에서는 SPI의 이러한 특징을 이용하여 새롭게 개발한 KICT-type LPT 장비의 거동을 평가하였다.

그림 3의 개념도와 같이 SPI는 특수 고안된 마크, 실시간으로 촬영하는 라인스캔 카메라, 촬영된 영상들을 PC로 전송하는 영상 획득장치와 노트북으로 구성되어 있다.

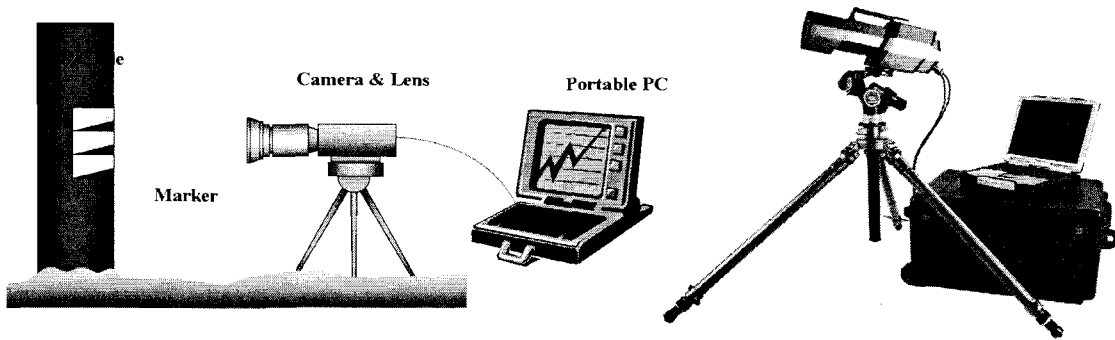


그림 3. 향타품질 분석시스템 (SPI)

라인스캔 카메라는 일반 상용 디지털 카메라에 사용되는 촬상 소자(면적형, area-scan CCD)와 달리 한 줄로 이루어진 소자(line-scan CCD)를 사용한다. 특수 고안된 마크는 측정 대상물에 부착되어 카메라의 촬영선과 수직방향의 대상물 움직임을 3방향으로 측정 할 수 있다. SPI는 말뚝의 향타시 최종 향타관리 뿐만 아니라, 구조물의 진동 등의 다양한 영역에 활용이 가능하다. 측정 원리 등 보다 상세한 SPI의 내용은 참고문헌에 소개하고 있다(삼성물산, 2004; 윤희석 등, 2004, 홍정택 등, 2006; 석정우 등, 2007).

3.2 KICT-type LPT 장비의 거동 평가 결과

본 연구에서 개발한 KICT-type LPT 장비의 거동(해머의 타격에너지, 관입량)을 SPI를 이용하여 검토하였다. 해머의 낙하속도를 감안하여 10 kHz 속도로 촬영하였으며, 측정정밀도는 측정 대상체와 카메라 사이의 거리, 렌즈의 사양 등에 따라 달라질 수 있으나, 약 1 mm 정도의 정밀도를 유지 할 수 있도록 하였다. 또한, 해머의 거동과 침하량을 보다 높은 정밀도로 분석하기 위하여 2대의 라인 스캔 카메라를 이용하였다. 그림 4는 KICT-type LPT 장비의 해머 및 룯드에 부착한 마크를 나타내고 있다.

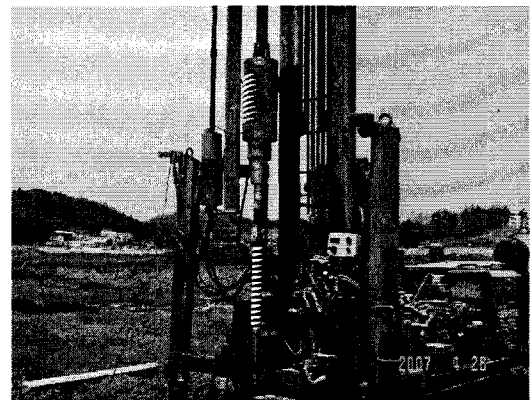


그림 4. SPI 계측을 위한 표식 설치

(a) 해머 낙하속도 분석

그림 5-8에는 SPI 장비를 이용하여 계측 한 KICT-type LPT 해머의 상승속도 및 낙하속도를 나타내고 있다. (+) 값의 속도는 매 타격시 원치와 강선을 통하여 해머가 낙하고인 760 mm 까지 상승할 때의 속도를 의미하며, (-) 값의 속도는 해머가 760 mm 낙하고에서 자동낙하 할 때의 속도를 의미한다. 또한, 하나의 sine 곡선이 한번의 타격횟수를 의미한다. 그림 5-8과 같이 다양한 지반에서 해머의 거동을 분석 한 결과, 해머의 상승속도는 모든 케이스에서 거의 일정하였다. 또한, 해머의 낙하속도(엔빌에 도달할 때의 순간속도) 역시 타격횟수, 지반조건에 관계없이 비교적 일정한 값(0.0018 -0.002 m/sec)을 나타내고 있다. 즉, 매

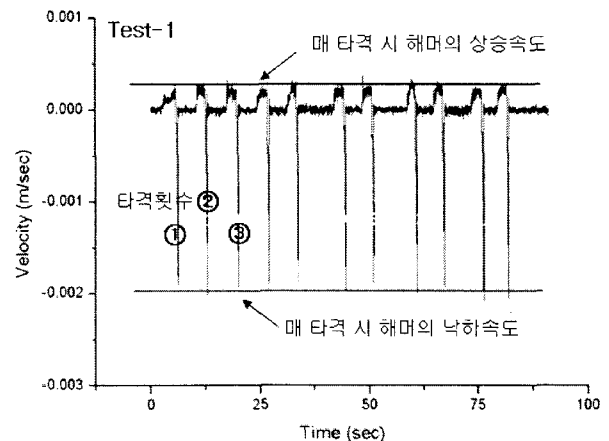


그림 5. 해머의 타격에너지 분석 1

타격 시 마다 해머의 타격에너지 크기가 균등함을 확인 할 수 있다.

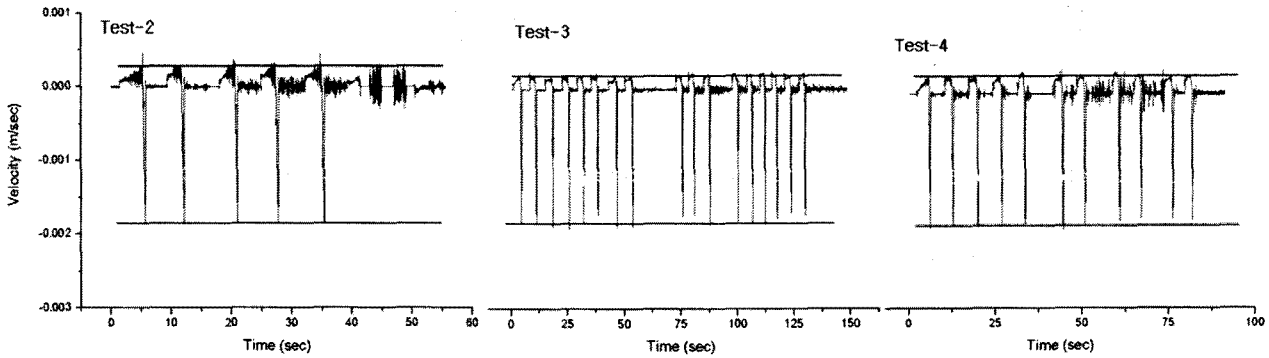


그림 6. 타격에너지 분석 2

그림 7. 타격에너지 분석 3

그림 8. 타격에너지 분석 4

(b) 관입량 분석

그림 9-12에는 SPI로 계측한 매 타격 시 관입량을 나타내고 있다.

(-) 값의 의미는 지중으로 관입되는 양을 나타낸다. 그림 9-12와 같이 다양한 지반에서 거동을 분석한 결과, 2차 타격에 의한 관입량은 무시 가능하다. 즉, KICT-type LPT 장비는 매 타격 시 일정한 관입량을 나타내고 있음을 알 수 있다.

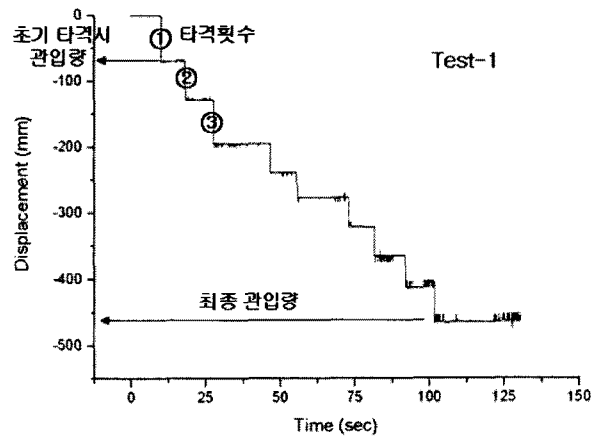


그림 9. 관입량 측정결과 1

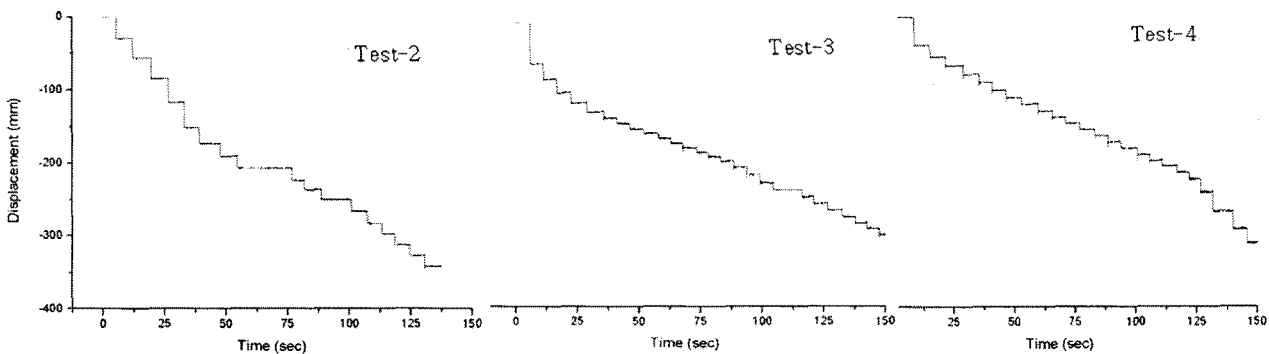


그림 10. 관입량 측정결과 2

그림 11. 관입량 측정결과 3

그림 12. 관입량 측정결과 4

4. 현장 적용성 평가 결과

시작품의 제작된 KICT-type LPT 장비의 성능평가 (반자동 해머의 작동여부, 구조적 문제점 등)를 실시한 결과, 특별한 문제점은 발견되지 않았으며 기존 시추기에 바로 연결하여 현장실험이 가능하였다. 이에 KICT-type LPT 장비의 현장 적용성 평가 및 SPT와의 상관관계 도출을 위한 기초연구도 함께

실시하였다.

그림 13-14는 각각 다른 현장에서 실시한 SPT와 LPT 결과로부터 구해진 N값을 나타내고 있다. 타격에너지의 증가로 인하여 LPT-N값이 기존의 SPT-N값보다 감소하여 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그림 15에는 LPT-N값과 SPT-N값의 상관관계를 분석하기 위하여 정리한 결과를 나타내고 있다. 단위면적당 타격에너지는 1.5배로 일정함에도 불구하고 모래층에서는 약 3배, 자갈층에서는 약 1.5-2배의 차이를 나타내고 있다. 향후 보다 많은 데이터를 확보하여 두 시험법의 상관관계 등을 연구할 필요가 있을 것으로 판단된다.

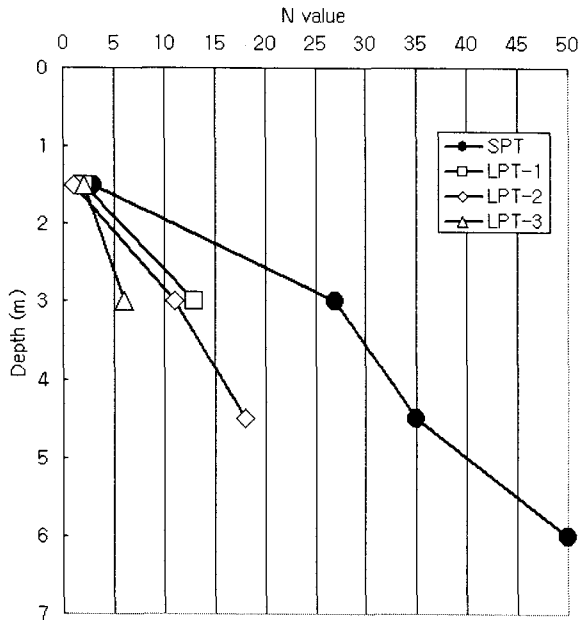


그림 13. SPT, LPT 결과 1

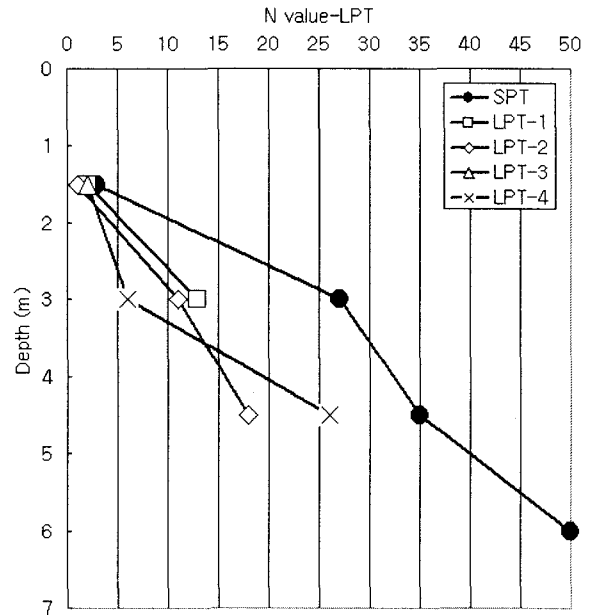


그림 14. SPT, LPT 결과 2

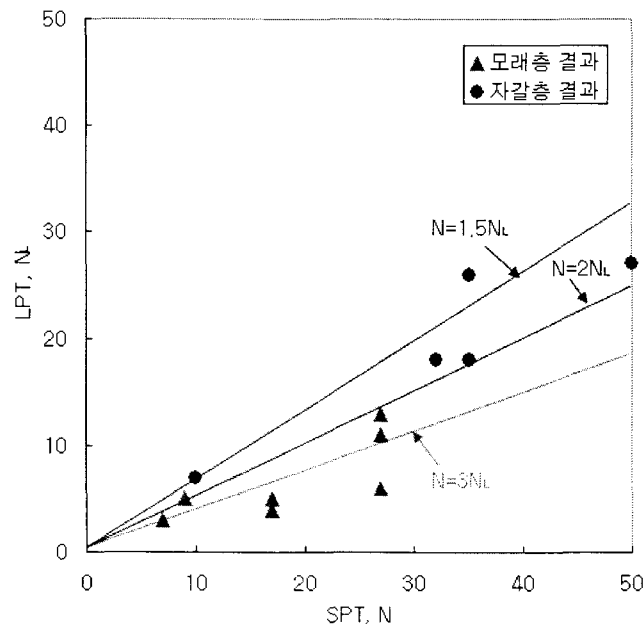


그림 15. 지층별 SPT/LPT 상관관계

4. 결론

본 연구에서는 기존의 SPT가 적용될 수 있는 지반뿐만 아니라 SPT가 적용될 수 없는 조밀한 모래, 자갈층, 연암 등에서도 활용할 수 있는 한국형 대형관입 시험장비(KICT-type LPT)를 개발하였다. 새롭게 개발한 KICT-type LPT 장비는 에너지비를 1.5로 일정하게 가정하여 해머중량을 150 kg, 낙하 높이를 760 mm로 설계하여 제작하였으며, 낙하시스템은 KS F2307 및 JI A1259S에서 제시하고 있는 반자동 낙하시스템을 도입하였다. 향타품질 분석시스템(SPI)를 이용하여 KICT-type LPT장비의 거동을 분석한 결과, 매 타격 시 마다 해머의 타격에너지 크기는 균등하였으며, 매 타격 시 일정한 관입량을 나타내고 있음을 확인하였다. 또한, 현장 성능평가를 실시하여 장비의 적용가능성을 확인하였으며, 기존 SPT 결과와 비교하여 LPT의 성능을 검토하였다.

향후 보다 많은 지반을 대상으로 개발 장비의 적용성 평가를 실시하고 데이터를 축적하는 등 추가적인 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 2005년 건설핵심기술연구사업(과제번호 05건설핵심C06)의 일환으로 수행되었으며, 관계가 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Alex, Sy., and Ken K.Y., Lum. (1997), "Correlations of mud-injection Becker and standard penetration tests", *Can. Geotech. J.*, **34**, pp.139-144.
2. Bowles, J.E. (1988), "*Foundation analysis and design*", 4th Edition, McGraw Hill Book Company, New York, pp.131-143.
3. Chris, R.D., John, A.H., and Alex, Sy. (2003), "A method for correlating large penetration test (LPT) to standard penetration test (SPT) blow counts", *Can. Geotech. J.*, **40**, pp.66-77.
4. Koester, J.P., Daniel, C.R., and Anderson, M.L. (2000), "In situ investigation of liquefiable gravels", *Journal of the Transportation Research Board*, No. 1714, Paper No. 00-0875, pp. 75-82.
5. Yoshida, Y., Motonori, I., and Kokusho, T. (1988), "Empirical formulas of SPT blow-counts for gravelly soils", *Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing (ISOPT-1)*, Orlando, Fla, A.A., Balkema, Rotterdam, pp.381-387.
6. 삼성물산 (2004), "라인스캔 카메라를 이용하는 평면 운동물체의 변위측정 마크와 그 측정방법", 특허 제0437275.
7. 석정우, 이계영, 지원구, 황대진 (2007), "향타품질 분석시스템(SPI)의 현장적용 사례연구", 한국구조물진단학회 봄 학술발표회 논문집, 제11권, 1호, pp.37-46.
8. 이우진 (2007), "표준관입시험 N값의 보정 및 사용", *지반공학의 현기술과 개선방향*, 홍성완, 구미서관, pp.519-548.
9. 윤희석, 석정우, 황대진, 김명모 (2004), "DPRMs를 이용한 말뚝 시공관리", 2004년 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.1335-1340.
10. 조성민, 정종홍, 김동수, 이우진 (2001), "표준관입시험시 룯드에 전달되는 해머의 낙하에너지 평가1", *한국지반공학회 2001년 봄 학술발표회 논문집*, pp.469-476.
11. 홍정택, 이계영, 이상현, 한송수, 정진태 (2006), "디지털 향타관리기(DPRMs)의 진동영향 평가 및 측정 정밀도 향상 방안에 관한 연구", *한국소음진동학회 논문집*, 제16권 제5호, pp.514-520.