

## **Calibration Chamber System을 이용한 KICT-type LPT 장비의 거동분석 Evaluation of KICT-type Large Penetration Test using Calibration Chamber System**

김영석<sup>1)</sup>, Young-Seok KIM, 김영진<sup>2)</sup>, Young-Chin KIM, 이우진<sup>3)</sup>, Woo-jin LEE, 안신환<sup>4)</sup>, Shin-whan AN

<sup>1)</sup>한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Disaster & Environment Research, Korea Institute of Construction Technology

<sup>2)</sup>한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotechnical Disaster & Environment Research, Korea Institute of Construction Technology

<sup>3)</sup>고려대학교 건축사회환경공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Korea University

<sup>4)</sup>고려대학교 건축사회환경공학과 선임연구원, Senior Researcher, Department of Civil Engineering, Korea University

**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 760mm and 150kg, respectively. 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. In this study, the performance of KICT-type LPT was evaluated by using a calibration chamber system and pile driving analyzer (PDA)

**Key words :** Large penetration test (LPT), Gravel, N-value, Calibration chamber system, PDA

### **1. 서론**

현재 모래를 대상으로 하는 지반조사 기법으로 표준관입시험(SPT)이 널리 이용되고 있으나, 조밀한 모래지반, 자갈지반, 풍화암반 지반 등에 동적관입시험을 적용하기 위해서는 기존의 SPT로는 많은 한계가 있다. 즉, SPT 샘플러의 직경, 타격에너지 등의 제약으로 지반종류(모래지반 이외)에 따라 관입이 어려울 수 있으며, 신뢰성 있는 N값의 산정에도 많은 문제점을 내포하고 있다 (Yoshida et al. 1988; Alex et al. 1997; Koeste et al. 2000; Chris et al., 2003).

한국건설기술연구원(KICT)에서는 SPT의 이러한 단점을 보완하고, 모래지반 이외에도 적용이 가능한 한국형 대형관입시험장비(이하 KICT-type LPT)를 개발하였다 (김영석 등, 2007). KICT-type LPT 장비는 에너지비를 1.5로 일정하게 가정하여 해머중량을 150kg, 낙하 높이를 76cm로 설계하여 제작되었다.

본 논문에서는 Calibration chamber system (KUCCS)을 이용하여 KICT-type LPT 장비의 거동을 평가하였다. 실내실험에서는 상대밀도 및 구속압 등을 변화시켜 KICT-type LPT 장비의 관입량 등 거

동을 검토하였으며, PDA를 이용하여 에너지 효율도 동시에 측정하였다. 또한, SPT도 동일조건에서 실시하여 KICT-type LPT 장비의 거동분석에 활용하였다.

## 2. KICT-type LPT 장비의 소개

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 사용되지만 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.

김영석 등(2007)은 이러한 문제점을 해결하고, 기존의 SPT가 적용될 수 없는 지반에서도 활용할 수 있도록 해머중량 및 샘플러 등의 사이즈를 조절하여 KICT-type LPT 장비를 새롭게 개발하였다. KICT-type LPT 장비는 크게 지반에 관입되어 교란시료를 채취하는 “샘플러”, 샘플러와 엔빌을 연결하는 “롯드”, 타격에너지를 제공하는 “엔빌”, “150kg 반자동 해머”로 구성되어 있다. 그림 1 및 사진 1은 KICT-type LPT 시험장비의 주요 구성요소 및 시추기에 연결한 장비 일체를 나타내고 있다. 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 에너지비를 1.5배로 가정하여 해머중량은 150kg, 낙하 높이는 760mm로 결정하였으며, 이렇게 결정된 KICT-type LPT 장비의 주요 제원은 표 1과 같다.

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 <sup>2</sup> )		17.1
에너지비(두께)		1.5

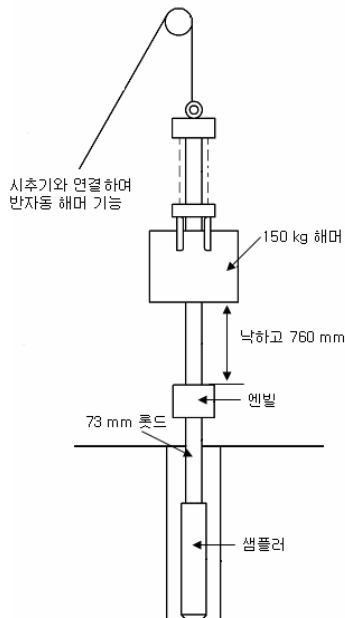


그림 1. KICT-type LPT 시험장비 주요구성



사진 1. KICT-type LPT 시험장비

기존 SPT 장비에서 에너지 효율 등의 많은 문제점이 지적되었던 낙하시스템은 KS F2307 및 JI A1259S에서 제시하고 있는 반자동 낙하시스템을 도입하고 있다. 이 시스템은 기존 시추장비의 유압을 이용하여 정해진 낙하고(760mm)까지 해머를 상승시키고 자동으로 낙하시키는 시스템이다. 또한, 150kg의 해머중량과 타격에너지를 고려하여 이에 견딜 수 있도록 엔빌, 룯드 및 샘플러 사이즈를 결정하였다. 엔빌은 직경이 150mm, 높이가 135mm이며, 73mm 룯드를 사용하였다. 모든 부품은 강화 열처리로 끝마무리를 하여 높은 타격 에너지에도 견딜 수 있도록 내구성면에서도 많은 고려를 하여 제작되었다. KICT-type LPT 장비의 선단부에는 교란시료를 채취할 수 있도록 2중관 대형 샘플러를 장착하여 대상 지반의 종류, 지반의 물성치 실험을 수행할 수 있도록 제작되었다. 시험방법은 기존의 SPT와 동일하며, 300mm 깊이까지 샘플러가 관입될 때의 타격횟수를 KICT-type LPT의 N값이라고 정의하고 있다.

### 3. Calibration Chamber System 및 계측기기 소개

본 연구에서 사용한 고려대학교 대형 Calibration Chamber System (Korea University Calibration Chamber System, 이하 KUCCS)은 직경 1.2m, 높이 1.0m 크기의 시료 조성이 가능한 세계 최대 규모의 장비로써 현장 시험에서 발생하는 많은 불확실성을 배제한 상태에서 각종 모의 현장시험의 수행이 가능하다. KUCCS는 국내 지반에서 채취된 각종 시료를 이용하여 시료를 조성한 후 표준관입시험은 물론, 콘관입시험, 딜라토미터 시험, 전단과 측정시험 등의 각종 시험을 수행함으로써, 기존 국외에서 제시된 각종 토질 상관관계식의 국내 지반 적용성을 평가하기 위해 주로 사용되고 있다 (최성근 등, 2006; 최성근 등, 2007).

에너지 측정은 PDI사의 Pile Driving Analyzer (PDA)를 이용하여 검토하였다. 룯드 에너지를 계산하기 위한 힘과 속도의 측정은 편타를 줄이기 위해 180° 방향으로 2개의 스트레인 게이지(Foil Type)와 2개의 가속도계(Piezoresistive Type)가 장착된 드릴 룯드에서 이루어지며 측정된 변형율은 PDA로 연결되어 단면적과 룯드 재료의 계수를 곱하여 힘으로 계산되며 측정된 가속도는 수치적분에 의해 Particle Velocity로 변환시킨다. SPT 에너지 측정 시 사용된 측정용 룯드는 PDA 제작 회사인 PDI에서 주문 제작되었으며, 모식도는 그림 2와 같다. 또한, KICT-type LPT의 에너지 효율 측정을 위해 가속도계와 스트레인 게이지가 부착된 드릴 룯드는 사진 2와 같다.

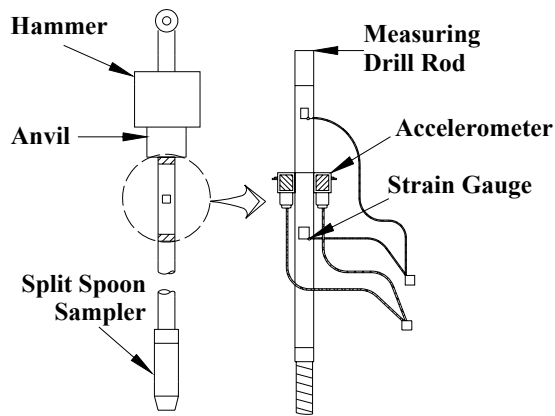


그림 2. SPT 에너지 측정용 드릴 룯드

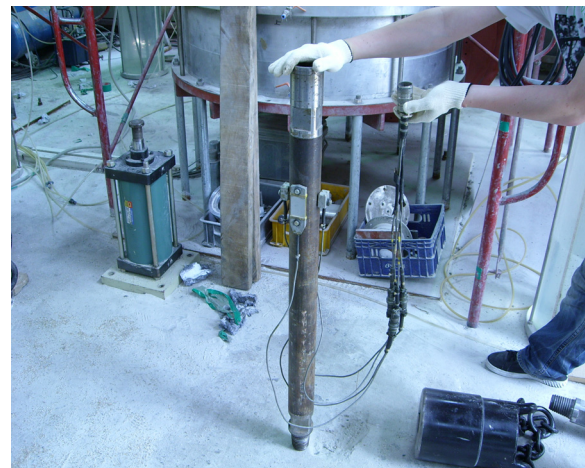


사진 2. LPT 에너지 측정용 드릴 룯드

### 4. Calibration Chamber 시험결과 (KICT-type LPT 거동)

#### 4.1 시험시료 및 시험방법

본 연구에서는 입경이 다른 두 종류의 모래시료가 사용되었으며, 각 시료의 기본물성과 입도분포는 표 2와

같다. K-7호사는 모암으로부터 인공적으로 파쇄된 평균입경 0.17mm의 세사로써, 조도는 중간모난 정도이며, SiO<sub>2</sub> 98% 이상의 석영질 모래이다. 또한 주문진사는 K-7 보가 입경이 큰 재료로, No.4 체를 100% 통과하고 No.40 체에 모두 남는 굵은 모래(자갈)이다.

표 2. 시험모래 기본물성

모래	Gs	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	USCS
K-7호사	2.647	0.09	0.17	2.111	0.988	1.054	0.719	SP
주문진사	2.628	0.863	1.398	1.87	0.94	0.870	0.423	SP

K-7호사와 주문진사로 약 80%와 40%의 상대밀도로 시료를 조성하여 실험을 실시하였다. 해머는 SPT 해머와 KICT-type LPT 해머(수동식) 두 가지 종류의 해머를 사용하였고, 구속압은 3 단계(100kPa, 200kPa, 300kPa)로 가압하여 단계별로 실험을 실시하였다. 또한, 해머의 타격에 대한 관입량을 측정하였고 동시에 PDA를 이용하여 각 타격별 에너지 전달율을 측정하였다.

#### 4.2 실험결과

본 실험에서는 두 종류의 해머(63.5kg, 150kg)와 세 종류의 낙하고(20cm, 40cm, 76cm)를 조합하여 진행되었다. 이는 6종류의 타격에너지 조합으로 표현되며 서로의 결과를 비교하기 위해서는 일정한 수준의 에너지로 변환할 필요가 있다. Schmertmann and Palacios (1979)에 따르면, 에너지와 관입량이 정비례 하므로 각각의 에너지 수준에 따른 관입량을 표준에너지(63.5kg hammer + 76cm stroke)로 보정할 수 있다. 표준에너지에 대하여 보정된 관입량에 따라 산정된 N'값(63.5kg hammer + 76cm stroke)을 시료의 상대밀도, 깊이, 구속압에 대하여 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3에 따르면 표준타격에너지로 정규화된 N값은 구속압에 대하여 비례하는 관계를 보이고 있으며, 깊이에 따라 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 첫 번째 계열(◆모양, DR=83.5%, 구속압=200kPa)은 동일한 상대밀도와 동일한 구속압에 대한 N값을 보이고 있으며, 평균 12~13의 N값을 나타내고 있다. 두 번째 계열(▲모양, DR=40%초반, 구속압=100, 300kPa)은 비교적 낮은 상대밀도의 N값을 보이고 있고, 두 개의 구속압이 적용되어 N값이 산정되었다. 세 번째 계열(●모양, DR=80%초반, 구속압=100, 200, 300kPa)은 높은 상대밀도에서 세 종류의 구속압에 대하여 N값이 산정되었다. 위의 세 종류의 계열로 나타난 데이터를 각각 분석해 보면 산정된 N값은 해머의 무게나 낙하고에 대해서는 크게 영향을 받지 않으며, 심도에 따라서 다소 증가하는 것으로 나타났다. 즉 동일한 시료에 대해서는 해머의 무게와 낙하고에 대해서 표준에너지로 정규화 할 수 있음을 의미하며, LPT 해머, 룯드, 샘플러 시스템이 에너지 변환을 통해서 기존의 SPT의 N값으로 쉽게 전환이 됨을 의미한다 (샘플러가 SPT와의 scale effect를 적절히 반영할 수 있는 크기로 설계되었음을 의미).

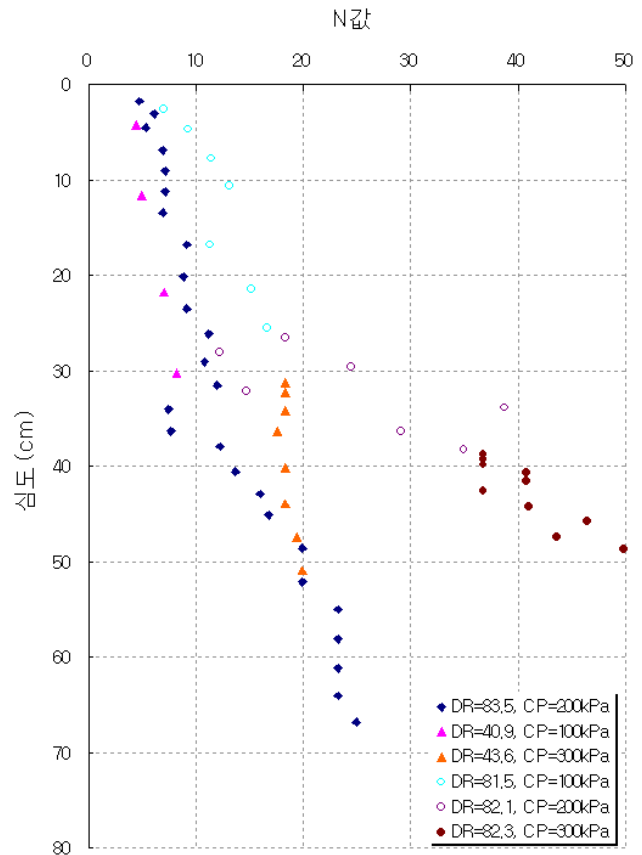


그림 3. 정규화된 N값 분포

심도에 따라 N값이 증가하는 경향은 시료가 조성된 chamber의 높이가 1m 내외 인 것을 감안하면 구속 압의 영향 보다는 타격에 의한 dilation의 영향으로 보인다. 즉 높은 상대밀도에서 타격에 의한 dilation 발생과 부피 구속으로 인한 강도의 증가가 누적되어 심도별 N값의 증가로 나타난 것으로 파악된다. 따라서 상대밀도가 작은 두 번째 계열(▲모양, DR=40%초반, 구속압=100, 300kPa)은 심도에 따른 N값의 증가가 상대적으로 미미하며 단지 구속압에 따른 N값의 차이가 뚜렷이 나타난다. 반면 상대밀도가 큰 첫 번째(◆모양, DR=83.5%, 구속압=200kPa)와 세 번째(●모양, DR=80%초반, 구속압=100, 200, 300kPa) 계열에서는 심도에 따른 N값의 증가가 현저하다. 특히 같은 조건하에서 입자강도와 입자크기가 크고 입자가 둥글어서 dilation이 큰 주문진사(세 번째 계열)에서는 심도에 따른 N값의 증가율이 더 크게 발생한다.

해머 타격시 타격별 관입량과 함께 PDA를 이용하여 타격 시 전달 에너지를 측정하였다. 해머의 역학적 에너지의 룯드 전달율은 관입량 및 N값의 산정에 중요한 요소이며, 에너지 전달율로 타격의 적정성 여부도 판단할 수 있다.

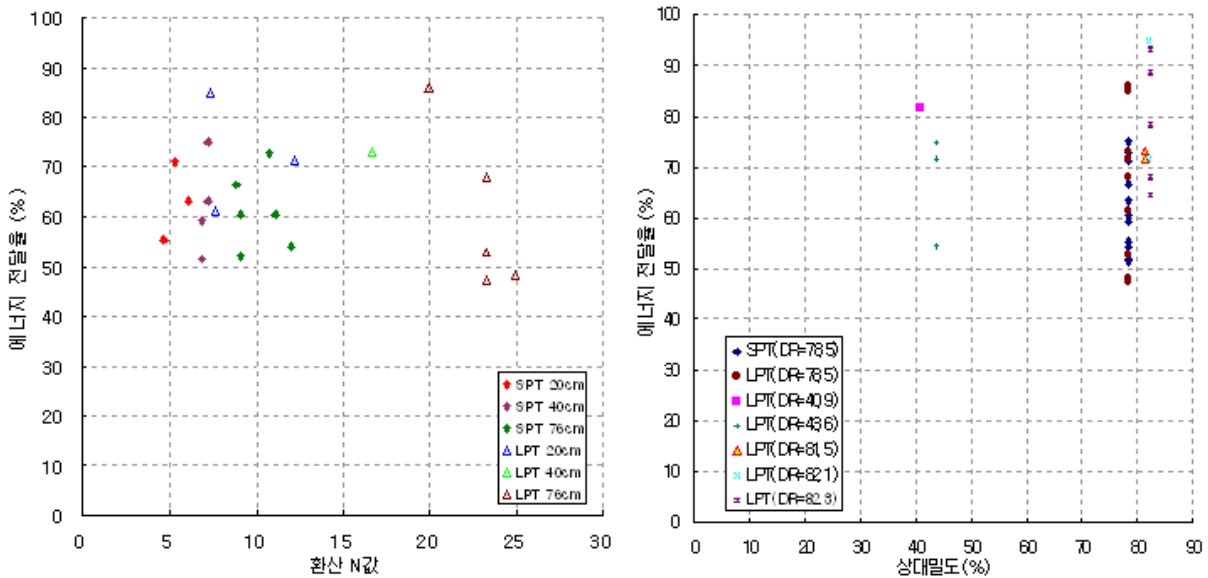


그림 4. N값 및 상대밀도에 따른 에너지 전달율

SPT 해머의 에너지 전달율은 대략 60% 내외로 측정 되었으며, KICT-type LPT 해머(수동방식)의 에너지 전달율은 대략 70% 이상으로 측정되었다. 실제 KICT-type LPT 장비는 반자동 낙하 시스템을 도입하고 있어, 수동방식 보다 에너지 전달율이 높을 것으로 판단된다. 또한 SPT와 KICT-type LPT 모두 에너지 전달율이 낙하고와 구속압, 상대밀도 등에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 즉 에너지 전달율은 이와 같은 요소에 영향을 받는 것이 아니라 해머-룯드-샘플러 시스템의 고유 함수임을 의미한다. 그림 4는 N값 및 상대밀도에 따른 에너지 전달율의 분포를 보이고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 SPT의 경우 안정적으로 좁은 지역에 분포하는 것으로 나타났다. 낙하고가 20cm, 40cm, 76cm일 경우 각각 SPT N값이 약 5, 7, 10 가량으로 측정되어, 낙하고가 증가함에 따라서 SPT N값이 큰 것으로 측정되었다. KICT-type LPT의 경우 에너지 전달율과 SPT N값이 넓은 지역에 분포하는 것으로 측정되어 N값이 낙하고에 따라 약 9, 17, 23 가량으로 측정되었다. KICT-type LPT 해머는 SPT 해머보다 약 2.3배 무거우므로 전반적으로 SPT보다 높은 N값이 측정되었다. 시료의 상대밀도에 따른 에너지전달율은 상대밀도와 관계없이 폭 넓게 분포하는 것으로 나타났으며 전술한 바와 같이 에너지 전달율은 해머 시스템의 함수임을 보이고 있다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 한국형 대형관입시험(KICT-type LPT) 장비의 거동을 Calibration chamber system (KUCCS)을 이용하여 평가하였다. 상대밀도 및 구속압 등을 변화시켜 KICT-type LPT 장비의 관입량을 측정하였으며, PDA를 이용하여 에너지 효율도 동시에 측정하였다. 그 결과, 룯드에 전달되는 에너지는 시료의 상대밀도, 해머 낙하고, 구속압 등의 영향이 적으며 에너지 전달율은 해머-앤빌-룯드-샘플러 시스템의 함수임을 확인하였다. 또한, KICT-type LPT 시스템은 에너지-관입량 관계를 이용해 쉽게 SPT와 같은 에너지 수준으로 변환할 수 있으며, 이를 통해 SPT N값과의 상관관계를 도출할 수 있음을 확인하였다.

## 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. 김영석, 김영진, 홍성완, 강재모, 지원구 (2007), "한국형 대형관입시험 장비의 개발 및 현장 적용성 평가", 2007 한국지반공학회 가을 정기학술회의 논문집, pp.603-610
7. 최성근, 이문주, 김승한, 이우진 (2006), "평균입경을 고려한 상대밀도-콘저항치 상관관계 연구", 2006 대한토목학회 정기학술회의 논문집, pp.1336-1339
8. 최성근, 이문주, 추현욱, 홍성진, 이우진 (2007), "Porous plate를 이용한 개선된 레이닝 시스템", 한국지반공학회논문집, Vol.23, No.6, pp.67-76.