

## 정동적 콘관입시험 장비의 개발과 검증

### Development and Verification of Static-Dynamic Cone Penetrometer

배 명 호<sup>1</sup> Bae, Myeong-Ho

유 정 동<sup>2</sup> Yu, Jung-Dong

김 주 한<sup>3</sup> Kim, Ju-Han

사 공 명<sup>4</sup> Sagong, Myung

이 중 섭<sup>5</sup> Lee, Jong-Sub

#### Abstract

The advanced geotechnical information has been required to determine the accurate design parameters for complex construction. However, the Standard Penetration Test (SPT), which has low reliability, has been used to estimate the subsurface condition in the field. The objective of this paper is development and application of the Static-Dynamic penetrometer, which detects the resistances in soft clay, sand and rock. The energy losses according to the rod connection methods (perfect or non-perfect connection, and number rods) are experimentally evaluated. The reflection and transmission ratios are used to investigate the energy loss by a simulation. The static-dynamic cone penetrometer, in which the accelerometers and strain gauges are installed on the cone tip and the rod head, is used to estimate the energy loss during penetration by impacts. The experimental and simulation studies show that the transferred energy through rods with non-perfect connection dramatically decreases. Furthermore, the transferred energy on the rod head is not the same as that on the cone tip. This study demonstrates that the energy loss should be evaluated on the cone tip.

#### 요 지

건설 프로젝트의 대형화와 시공장소의 다양화에 따라 지반 조사 내용이 다양해지고 있다. 더욱이 날로 엄격해지는 시공조건으로 인해 보다 높은 수준의 지반정보가 요구되고 있다. 그러나 우리나라에서는 최근까지도 비교적 결과의 신뢰도가 낮은 표준관입시험 등의 원위치 시험법에 의존하고 있는 현실이다. 본 논문에서는 복합적인 지반의 거동 특성 평가를 위하여 연약지반은 물론 암반에서도 에너지 변화를 측정할 수 있는 새로운 콘관입 시험기를 개발하고자 하였다. 본 연구에서는 룯드의 체결 방식에 따른 에너지 감쇠를 평가하기 위해 룯드를 인위적으로 불완전하게 체결하거나, 전체 길이는 일정하게 유지시키면서 체결된 룯드의 수를 변화시키며 시험을 수행하였다. 또한, 체결 조건이 다른 룯드에서 탄성파의 전달율과 반사율을 적용하여 에너지 손실을 평가 하였다. 그리고 정동적 콘관입 시험 장비를 제작하여 두부와 선단부에 변형률계와 가속도계를 부착함으로써 에너지 손실을 실내 시험을 통하여 평가하고자 하였다. 시험 결과 룯드의 체결 상태가 완벽하지 않으면 에너지 전달률이 급격히 감소하는 것을 시험과 시뮬레이션을 통하여 알 수 있었다. 또한 실내 시험결과 새로 개발된 정동적 콘 관입 시험기의 두부와 선단부의 전달에너지가 다를 수 있었다. 본 연구에서는 두부는 물론 선단부에서의 에너지 평가가 필요함을 알 수 있었다.

**Keywords :** Energy loss, Reflection, Rod connection, Transmission

1 도담이앤씨 대리 (Assistant Manager, DODAM Engrg. & Construction)

2 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Ph.D. Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정희원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 철도구조연구실장 (Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute)

5 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., jongsu@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

특정 지반의 물리적 특성을 파악하기 위하여 다양한 지반조사 방법이 사용되고 있다. 원위치 실험법(in-situ test)으로 표준관입실험(Standard Penetration Test: SPT), 콘관입실험(Cone Penetration Test: CPT), 딜라토미터실험(Dilatometer Test: DMT) 등이 있으며, 측정 목적과 지반 상태에 따라 적합한 방법을 사용한다(한국지반공학회 2006). 이 중 국내에서는 표준관입실험이 가장 보편적으로 사용되고 있으며, 최근 콘관입실험도 많이 적용되고 있다. 그러나 이들 방법들은 모래지반이나 연약 점토지반에 제한적으로 사용 가능하며, 암반이나 중간토에 대해서는 추가적으로 일축이나 삼축압축실험을 실시해야 하는 번거로움이 있다. 이와 같은 이유로 원지반 조건에서 암반 및 중간토의 강성특성 평가를 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 국내에서는 남문석(2006)이 미국 텍사스 주에서 암반지역 조사에 사용되고 있는 텍사스 콘관입실험기(Texas Cone Penetration Test: TCPT)를 연구하였다(Texas DOT 1995; Texas DOT 2000). 이들 실험법은 일정한 중량을 가지고 있는 해머를 낙하시켜 선단부의 프로브가 일정 깊이를 관입시키는데 필요한 횡수나 그에 따른 반발력을 이용하여 지반을 평가하는 방법이다. 이들 원위치 실험들은 데이터 획득이 수월하여 널리 사용되고 있으나 실험 시 표준적이고 상세한 제원과 규칙들을 준수해야 한다(Skempton 1986; 박용원 1994).

대부분의 원위치 실험 시 실험 수행자의 주관적 판단에 의해 실험이 진행되고 있다. 이로 인해 지반의 특성을 정확하게 평가하지 못해 잦은 설계 변경과 시공비 상승의 문제를 야기하고 있다(한국지반공학회 2006). 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 다양한 연구들이 수행되고 있다. 측정값의 신뢰도를 높이기 위해 타격 에너지 효율에 대한 연구가 중점적으로 수행되어, 선단부에 전달되는 에너지 효율을 고려하고 보정하여 정확한 값을 도출하고자 노력하고 있다(Kovacs and Salomone 1982; 이우진과 이창호 2005). 또한, 해머의 모양, 타격시스템 등 측정값에 영향을 주는 다양한 인자에 대한 연구도 수행되었다(Schmertmann and Palacios 1979). 이와 같이 관입실험에 대해 다양한 방면에서의 실험 및 검증이 이루어지고 있으나, 이들 실험 방법들은 에너지 측정을 하지 않거나, 수행하더라도 관입기의 두부에서 수행하는 단점이 있다.

이우진 등(2001)은 룯드의 길이가 길어질수록 에너지 감쇠가 크게 일어나기 때문에 룯드의 길이에 따른 보정

계수의 사용이 필요함을 제안한바 있다. 더욱이 룯드를 체결하는 방식에 따른 에너지 감쇠효과는 현재 대략적인 추정만 할 뿐 구체적인 실험이 진행되지 않아 정확한 보정 수행이 이루어지지 못하고 있다. 이와 같은 이유로 룯드의 체결 방식에 따른 에너지 감쇠의 평가가 수행되어야 하며(배명호 등 2009), 두부는 물론 선단부에서의 에너지 평가가 필요하다. 본 연구에서는 탄성파의 반사와 투과 원리를 이용하여 룯드의 체결방식에 따른 에너지 감쇠를 측정하였다. 이 원리는 기존 룯볼트 건전도 평가에도 적용된바 있다(이종섭 등 2008).

정적으로 관입실험을 수행하는 원위치 실험의 경우 단단한 층을 만날 경우 룯드를 모두 제거한 후 드릴 등의 관입장비를 이용하여 단단한 층을 관통한 후 정적실험용 룯드를 재연결하여야 한다. 룯드를 모두 연결한 후 정적실험을 재수행하기 위해서 추가로 공벽의 붕괴를 방지하기 위한 케이싱의 설치 등이 필요하므로 원위치 실험에 막대한 시간이 필요하게 된다. 만약 단단한 층을 만난 경우, 정적 관입실험 대신 동적으로 관입할 경우, 룯드 제거와 드릴 작업 및 케이싱 설치 등이 생략될 수 있어 원위치 실험에 상당한 시간을 절감할 수 있으므로 정적 및 동적 관입실험을 동시에 수행할 수 있는 새로운 실험장비가 요구된다.

본 논문에서는 룯드의 결합 상태 및 결합 형태에 따른 에너지 감쇠를 실험과 시뮬레이션을 통하여 평가하였다. 에너지 감쇠연구 결과를 바탕으로 관입실험기의 선단부에서 에너지 측정이 가능한 정동적 콘관입실험기(Static-Dynamic Cone Penetration Test)를 개발하였다. 개발한 콘관입실험기를 온도와 하중에 대하여 보정한 후 실내 실험을 수행하였다. 실내 실험을 통해 새로 개발된 정동적 콘 관입실험기의 적용성을 평가하였다.

## 2. 룯드 체결에 따른 에너지 전달 평가

관입실험기의 두부 타격시 발생하는 에너지 감쇠를 평가하기 위해 룯드의 체결 상태 및 형태에 따른 에너지 전달률을 측정하였다. 이를 위해 분리 가능한 금속성 재질의 룯드를 이용하여 길이와 체결 숫자를 변화시켜가며 두부 타격 시 발생하는 에너지 감쇠를 가속도계로 측정하였다. 또한, 룯드 체결 상태에 따른 에너지 전달을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

### 2.1 에너지 감쇠원리

평면파(plane wave)가 매질을 따라 전파될 때 매질 자

체내에서 감쇠가 발생하며 이를 재료감쇠(material attenuation)이라고 한다. 이와 같은 에너지 손실은 매질이 완전히 탄성체가 아닌 경우에 발생한다. 재료감쇠는 입자운동 크기(particle motion amplitude),  $u(x,t)$ 로 다음과 같이 표현된다.

$$u(t) = u_0 e^{-\alpha \cdot x} e^{(kx - \omega t)} \quad (1)$$

여기서,  $x$ 와  $t$ 는 공간과 시간에 대한 변수이며,  $u_0$ 는 평면파 초기의 입자운동 크기이며  $k$ 와  $\omega$ 는 주파수와 파수를 의미하며,  $\alpha$ 는 감쇠계수(attenuation coefficient)이다.

탄성파가 전파되면서 매질의 특성이 달라지게 되면 그 경계면에서 일부는 반사되고 일부는 전파된다. 반사와 전파는 두 재료의 임피던스(mechanical impedance)  $Z$ 와 관련된다. 경계면에서 발생하는 반사계수(reflection coefficient)  $R$ 과 투과계수(transmission coefficient)  $T$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (2)$$

$$T = \frac{2}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{2\rho_2 V_2}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (3)$$

여기서,  $Z$ 는 매질의 임피던스를 나타내며, 아래첨자 1과 2는 파가 전파되고 있는 매질로써 파는 1에서 2로 전파된다.  $\rho$ 는 매질의 밀도,  $V$ 는 매질의 속도를 의미한다.

매질이 서로 다른 경계면에서 탄성파의 반사와 투과가 항상 발생하며 탄성파의 입자운동 크기에 영향을 준다. 입자운동 크기는 식 (1)에 반사계수나 투과계수를 곱하여 산정할 수 있다. 탄성파의 반사와 투과의 원리는 록볼트의 건진도 평가에도 적용되었다(이종섭 등 2008). 룯드 연결에 따른 에너지 전달효과에도 동일한 원리를 적용할 수 있으므로 이에 대한 연구를 수행하였다.

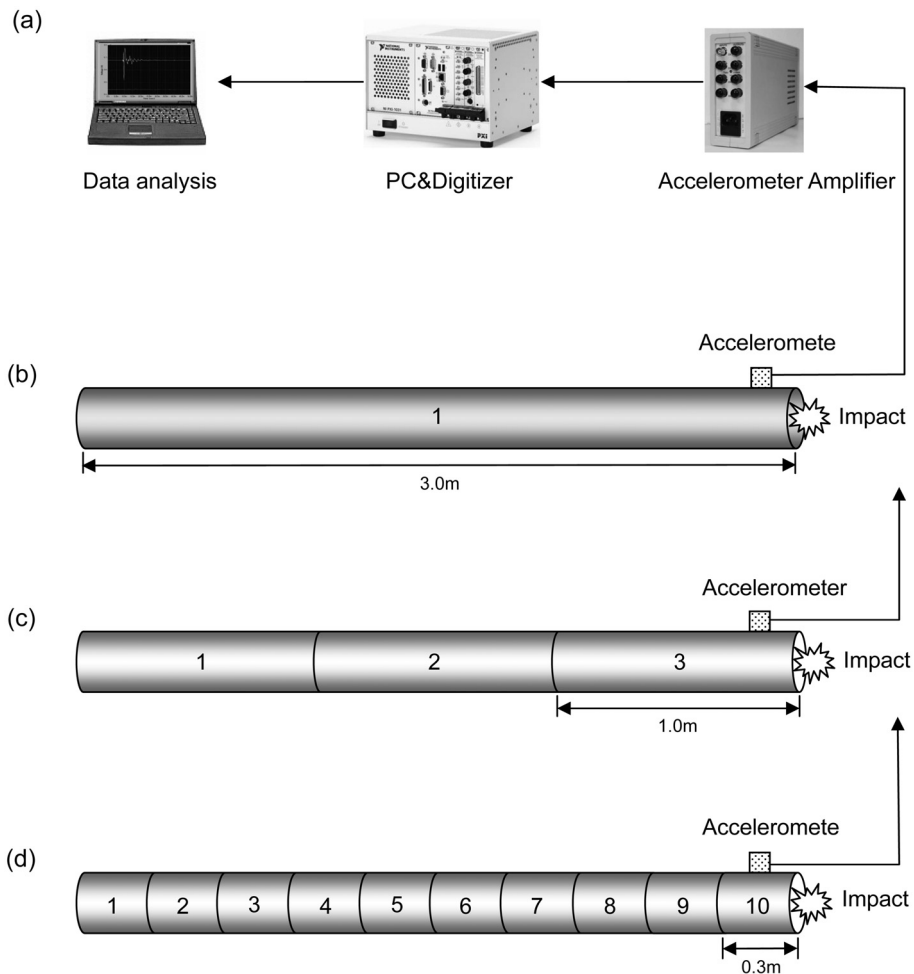


그림 1. 룯드 체결에 따른 에너지 평가 모식도: (a) 측정시스템; (b) 길이 3000mm인 룯드 1개; (c) 길이 1000mm인 룯드 3개 연결; (d) 길이 300mm인 룯드 10개 연결

## 2.2 실험 방법

실험을 통하여 룯드의 체결에 따른 에너지 감쇠를 평가하기 위하여 그림 1(a)와 같이 측정시스템을 구축하였다. 룯드 두부로부터 150mm 떨어진 곳에 가속도계를 설치하여 타격 후 룯드를 통해 전파되며 감쇠되는 에너지를 측정하였다. 가속도계를 통해 측정된 신호는 PCB사의 가속도계 증폭기(MODEL - 483A16)를 이용하여 10배 증폭시켰으며, 증폭된 신호는 National Instruments사의 NI PXI \* 1042Q를 이용하여 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

실험에 사용된 룯드는 현장 적용성 평가를 위해 실제 현장에서 사용되고 있는 파이프 직경과 길이를 고려하여 제작하였다. 본 연구에서는 외경 25mm, 내경 20mm, 총 길이 3m의 파이프를 사용하였으며 재질은 실제 지반조사에서 사용되는 강철재질로 제작하였다. 그림 1(b)는 길이 3000mm의 파이프 1개를 사용하여 룯드를 구성한 것이고, 그림 1(c)와 1(d)는 각각 길이 1000mm의 파이프 3개, 길이 300mm의 파이프 10개를 연결하여 구성한 룯드의 모식도이다. 에너지 감쇠를 측정하기 위한 가속도계는 그림 1과 같이 타격 위치로부터 150mm 떨어진 곳에 설치하였다.

## 2.3 실험 결과

룰드 체결 방식에 따른 에너지 전달을 평가하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 우선 그림 1(b)와 같이 길이 3000mm인 룯드의 두부를 타격하여 체결이 없을 때의 에너지 감쇠를 측정하여 기준 삼았다. 그리고 그림 1(c)와 같이 길이 1000mm인 룯드 3개를 연결한 것과, 그림 1(d)와 같이 길이 300mm인 룯드 10개를 연결한 룯드의 두부를 타격하였다. 연결 방식에 따른 에너지 감쇠를 평가하기 위해 각 연결부를 아주 조밀하게 체결(완벽체결)시키거나 체결 부위를 1mm의 간격을 남겨둔(비완벽체결) 상태에서 타격실험을 실시하였다. 룯드의 체결은 나사식으로 이루어지며 완벽체결의 경우 나사가 완벽하게 체결된 경우에 해당되며 비완벽체결은 상하부 룯드 사이에 1mm의 틈이 있는 상태로 체결된 것을 의미한다. 타격에너지를 동일하게 유지하기 위하여 무게 2 N인 추를 높이 100mm에서 자유 낙하시켜 룯드를 타격하였다.

길이 3000mm인 룯드 1개로 구성된 경우, 그림 2(a)와

같이 타격 후  $4 \times 10^3$ ms 까지도 입자운동에너지가 관측되었다. 길이 1000mm인 룯드 3개를 완벽 체결한 경우, 그림 2(b)와 같이 타격 후  $0.6 \times 10^3$ ms 이후에는 타격으로 인한 입자 운동에너지가 완전히 감쇠되었다. 또한 길이 300mm인 룯드 10개를 완벽체결한 경우,  $0.4 \times 10^3$ ms 이후에 타격으로 인한 입자 운동에너지가 관찰되지 않는다(그림 2(c) 참고). 그림 2(a)~2(c)를 비교하면, 지반조사용 룯드의 체결이 완벽하더라도 에너지 전달과 감쇠

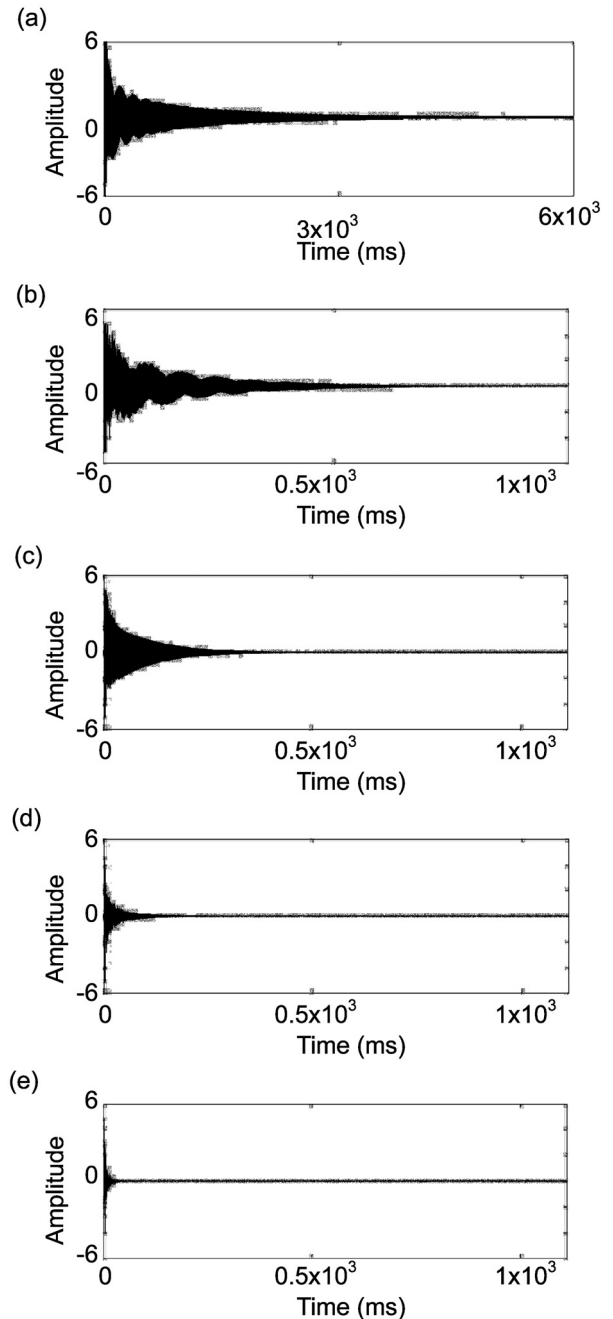


그림 2. 룯드 체결방식에 따른 에너지 감쇠 실험결과: (a) 3000mm x 1; (b) 1000mm x 3(완벽체결); (c) 3000mm x 10(완전체결); (d) 1000mm x 3(불완전체결); (e) 300mm x 10(불완전체결)

는 매우 큰 차이가 발생하며 길이가 동일하더라도 체결 개수가 증가하면 에너지 감쇠가 크게 증가하는 것을 의미한다. 길이 1000mm인 룯드 3개를 완벽체결하지 않은 경우와 길이 30mm인 룯드 10개를 완벽체결하지 않은 경우 관찰된 에너지 특성은 그림 2(d)와 그림 2(e)에 나타내었다. 룯드체결이 완벽하지 않으면 룯드 체결이 완벽한 경우에 비하여 에너지 감쇠가 훨씬 크게 발생하는 것으로 나타났다.

## 2.4 시뮬레이션

2.3절에서 얻은 실험 결과의 타당성을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 2.1절에서 언급한 이론식을 바탕으로 실제 실험과 동일한 룯드로 구성하였다. 시뮬레이션의 기본 개념에 대한 모식도는 그림 3과 같다. 입자운동 크기에 대한 시뮬레이션 결과,

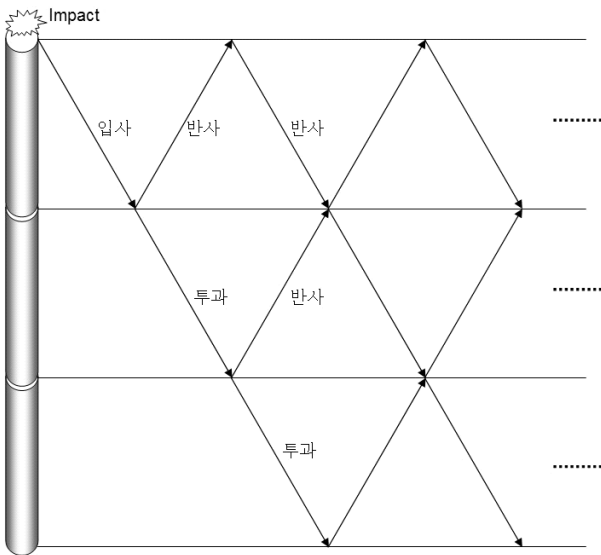


그림 3. 에너지 감쇠시뮬레이션 모식도

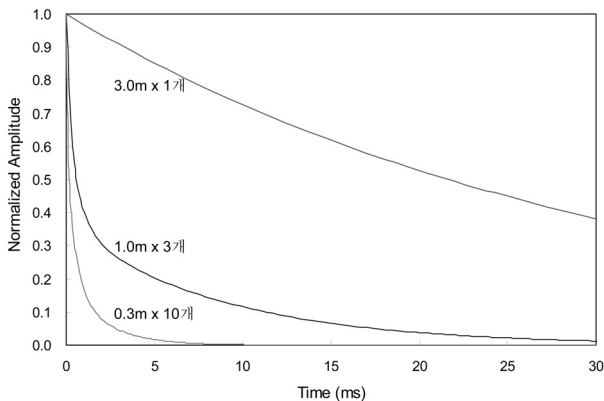


그림 4. 룯드 체결에 따른 에너지 감쇠 시뮬레이션 결과

그림 4와 같이 실제 실험 결과와 유사한 경향의 결과를 얻을 수 있었다. 길이 3000mm인 룯드 1개로 구성된 경우에 비하여 룯드의 전체 길이는 동일하더라도 룯드 개수가 증가 한 경우 에너지 감쇠가 매우 커지는 것을 알 수 있다.

## 2.5 룯드 체결상태에 따른 에너지 감쇠 요약

실험과 시뮬레이션을 통해 룯드 체결 상태 및 체결 방식에 따른 에너지 감쇠를 평가하였다. 룯드에서의 에너지 감쇠를 평가하기 위해 룯드 두부에서 150mm 지점에 가속도계를 설치하였으며, 체결 상태를 인위적으로 조절하며, 전체 룯드 길이는 일정하게 유지하면서 룯드 체결의 수를 증가시킬 경우의 에너지 평가를 실시하였다.

이는 현장에서 관입 심도의 증가에 따른 룯드 길이 및 체결 수의 증가를 모사하기 위해 실내 실험에 맞는 룯드를 제작하여 측정한 것이다. 측정 결과, 룯드의 연결 부위가 완벽하게 체결되었다 하더라도 체결된 룯드 수가 증가함에 따라 에너지가 감쇠되는 것으로 나타났다. 더욱이 연결부위에 1mm의 작은 비완벽 체결이 있을 경우, 전체 길이에 비해 매우 작은 값이지만, 에너지 감쇠의 폭은 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 실제 현장 실험이나 시공 시 연결된 룯드의 수와 연결 상태에 따라 두부와 선단부에서의 에너지 차이가 크게 발생할 가능성을 보여 주고 있다. 이와 같은 결과는 원위치 실험 시 룯드의 두부에서뿐만 아니라 선단부에서의 에너지 측정이 필요함을 보여준다.

## 3. 정동적 콘관입실험기

### 3.1 형상

새로 개발된 정동적 콘 관입실험기는 점성토, 사질토, 중간토 및 암반 등의 다양한 지반에서 모두 적용 가능한 지반조사 장비이다. 점성토와 사질토에서는 전기저항식 변형률계를 이용하여, 콘 관입실험과 동일한 원리로 지반의 관입력을 평가 할 수 있도록 하였다. 또한, SPT와 TCPT의 원리를 이용하여 일정 깊이까지 관입하는데 필요한 타격 횟수로 지반의 강성을 평가하여 중간토와 암반에서도 사용이 가능하도록 하였다. 이와 같은 이유로 선단부에 가속도계를 설치하여 해머 타격에 의한 에너지 효율을 정확하게 측정하여 룯드 길이 등과 같은 외부

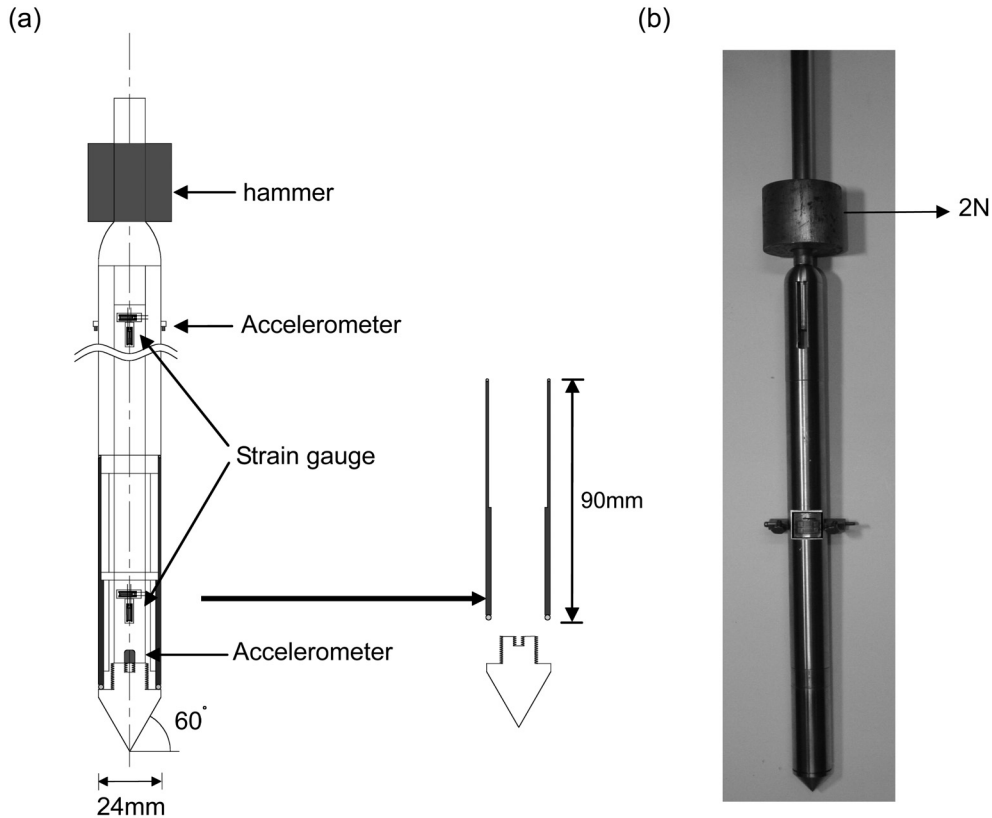


그림 5. 정동적 콘 관입기의 형상: (a) 전체 모식도; (b) 사진

요소에 영향을 받지 않은 신뢰도 높은 측정값을 획득하고자 하였다. 이와 같이 새로 개발된 정동적 콘 관입시험기는 선단부의 원추 관입 저항력(Cone tip resistance), 주변 마찰저항력(Friction sleeve), 관입 깊이에 따른 타격 횟수(Blow count) 그리고 에너지 효율(Energy efficiency)을 모두 평가할 수 있어 주어진 지층에 대한 다양한 물성치를 높은 신뢰도로 측정할 수 있도록 하였다.

정동적 콘 관입시험기는 그림 5와 같이 직경 24mm (단면적 4.5mm<sup>2</sup>)이고 선단각도가 60°인 원추 형태로 개발되었으며 Subtraction Cone 형태로 제작하여 마찰저항력도 측정할 수 있도록 하였다. CPT의 선단부와 주변마찰 부분의 면적비를 고려하여 관입시험기를 제작하였으며 두부와의 연결을 위해 다수의 룯드를 추가로 제작하였다.

### 3.2 계측센서 및 장비

#### 3.2.1 변형률계

정동적 콘관입시험 장비의 관입저항력을 측정하기 위하여 전기저항식 변형률계를 사용하였다. 변형률계는 그림 5와 같이 두부에 설치하여 타격에너지를 평가하

였으며, 선단부의 2곳에 설치하여 원추 관입 저항력과 주변 마찰력을 측정하도록 하였다. 사용된 변형률계는 자체적으로 2축(biaxial)으로 구성되어 있으며, 온도와 외부적인 요소에 대한 영향이 억제되도록 액티브-더미(active-dummy)법을 이용하여 설치하였다. 또한 미세한 변화량에 따른 출력 값을 증폭시키기 위하여 휘트스톤 브리지(Wheatstone Bridge) 연결방식을 이용하여 회로를 구성하였다.

#### 3.2.2 가속도계

가속도계는 측정 주파수 범위에 따라 변형률계 타입(strain gauge type)과 피에조 일렉트릭 타입(piezo electric type)으로 나뉘며, 본 연구에서는 측정 주파수와 사용성을 고려하여 피에조 일렉트릭 타입을 이용하였다. 사용된 가속도계는 PCB사 제품으로 두부에는 PCB353B15를 사용하였고 선단부에는 PCB350B04를 사용하였다. PCB353B15는 민감도 약 1.0mV/g, 측정범위 약 ± 5000g 그리고 측정 주파수 범위 약 0.4~10000Hz이며, PCB350B04의 민감도는 약 10mV/g, 측정범위 약 ± 500g 그리고 측정 주파수의 범위는 약 0.7~18000Hz의 특징을 가지고 있다.

### 3.3 측정장비

본 장비는 동적 사운드링 기법의 일환으로써 측정에 사용된 장비는 다음과 같다. 변형률계는 선단부에서 30mm 부분과 두부로부터 150mm 떨어진 부분에 각각 Full bridge 형태로 부착되었다. 동적관입은 중량 2 N의 해머를 자유낙하시켜 실시하였다. 해머의 타격에 의한 반응을 두부와 선단부에 각각 설치된 변형률계와 가속도계로부터 측정하게 된다. 이들 반응은 이더넷(Ethernet)에 근거한 오실로스코프로를 이용하여 측정하였으며, 측정된 신호는 컴퓨터에 저장하였다.

### 3.4 온도보정

전기저항식 변형률계는 부착 방식 및 배열 방식에 따라 주변 환경의 영향을 받는다. 특히 온도에 대한 영향은 자체적으로 일정부분 보상이 된다고 하여도, 측정값에 영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서 온도에 의한 영향을 평가하기 위하여 온도보정을 실시하였다. 외부온도에 대한 영향이 작고 보온 효과가 뛰어난 스티로폼 소재의 토조를 이용하여 보정을 실시하였다. 10°C부터 5°C씩 총 5단계에 걸쳐 최종 온도 30°C까지 물의 온도를 높이며 실험을 진행하였다. 입력전압은 선행연구 결과값인 2V(이중섭 등 2008)를 적용하였으며, 각각의 온도에서 수집시킨 정동적 콘관입실험기의 출력값 변화를 약 5분간 측정하였다. 측정된 결과는 그림 6과 같으며, 주변 온도가 20°C~25°C인 범위에서 상대적으로 일정한 출력값을 보이는 것으로 나타났다.

### 3.5 하중보정

정동적 콘관입실험기에 정적 하중을 가한 뒤 두부와

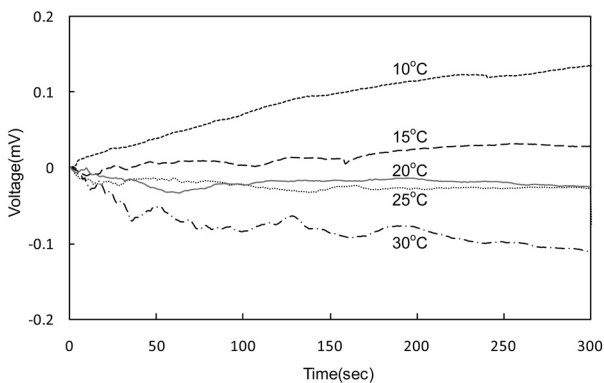


그림 6. 온도에 따른 정동적 콘관입실험기의 측정값 변화

선단부에 설치된 변형률계를 이용하여 하중에 대한 보정을 실시하였다. 하중 보정 시 0.0 N에서 3.4 N씩 총 5단계에 걸쳐 최종 하중 17 N까지 재하와 제하를 수행하여 하중과 출력 전압 관계를 산정하였다. 또한 보정시 입력 전압을 조절하여 출력 전압과 하중과의 관계 또한 산정하였다. 실험 결과 재하와 제하 시의 값이 거의 일치하는 것으로 나타났다. 입력전압 2.0 V에 대한 보정 결과는 그림 7과 같이 하중과 출력 전압에서 선형관계가 얻어졌다.

## 4. 실내 모래지반 검증 실험

### 4.1 실험 방법

정동적 관입실험기의 적용성을 검증하기 위해 내경 240mm, 높이 800mm인 투명 아크릴 소재의 토조를 사용하였다. 시료는 비중 2.63인 시료를 상대밀도 85%로 조성하여 사용하였다. 시료 조성 시 10번 체를 이용하여 낙하고 300mm에서 균등한 양이 낙하도록 강사법으로 시료를 조성하였다. 토조 전체 높이를 고려하여 시료는 700mm까지 조성하였다. 정동적 콘관입실험기의 반

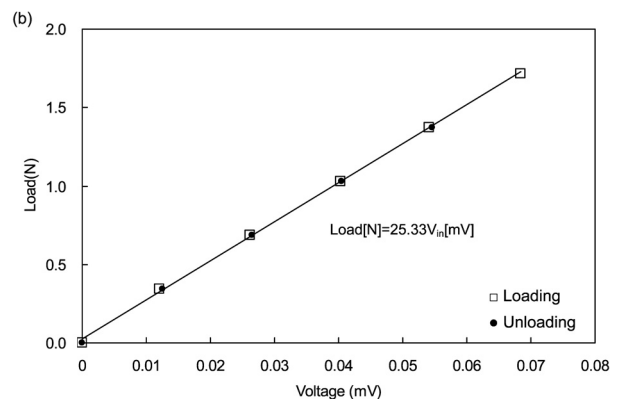
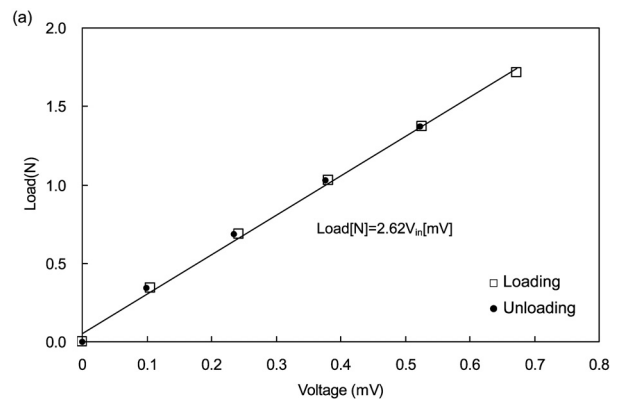


그림 7. 하중 단계별 변형률계 보정: (a) 선단부; (b) 두부

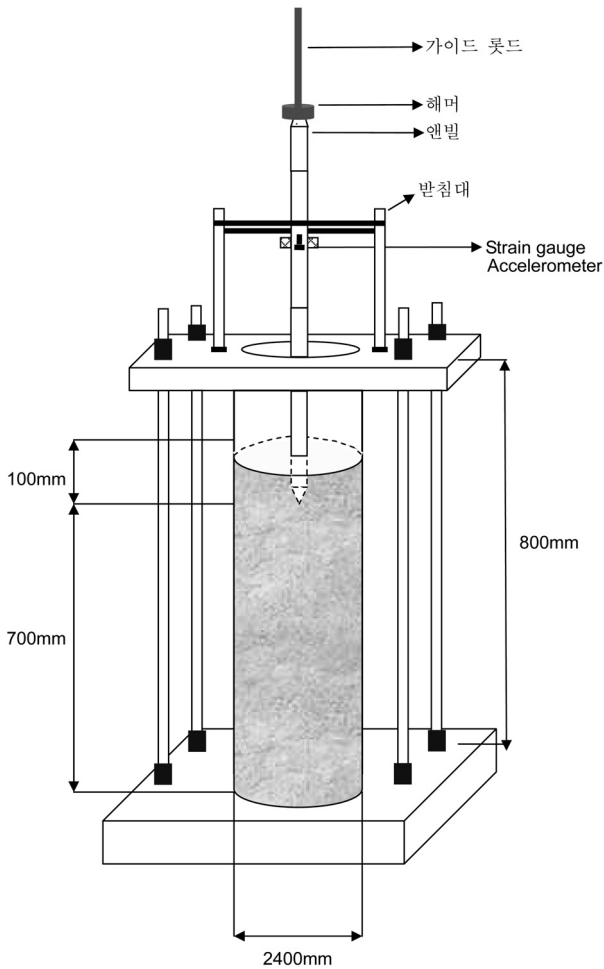


그림 8. 적용성 평가 실험 모식도

응성 평가는 정동적 콘관입실험기를 그림 8과 같이 시료의 상부 100mm 깊이까지 선관입하여 장비의 수직도를 유지시킨 후, 중량 2 N의 해머를 낙하고 100mm와 200mm에서 낙하시켜 동적 관입 저항력을 평가 하였다. 이때, 연속적으로 타격하는 표준관입실험과는 다르게 단순히 적용성만을 평가하기 위해 낙하고 마다 한번의 타격을 수행하였다. 타격에 따른 에너지 측정은 두부와 선단부에 부착된 변형률계와 가속도계를 이용하였다.

#### 4.2 실험 결과

타격시 두부와 선단부에 부착된 변형률계를 통해 측정된 전압 변화를 선단 타격력으로 환산하였다. 2 N의 해머를 이용하여 낙하고 100mm에서 타격한 경우 측정된 두부와 선단부의 타격력과 가속도를 그림 9에 나타내었으며 낙하고가 200mm인 경우는 그림 10에 나타내었다. 두부와 선단부에서의 측정 데이터는 모두 유사한 경향의 파형을 보인다. 또한 타격시 전기저항식 변형률계와 가속도계가 반응한 시간은 거의 동일하게 관찰되었다. 각 하중에서 따라 정동적 콘 관입실험기를 100mm 선관입하여 실험을 진행하였기 때문에 주변환경에 의한 에너지 효율이 유사하다고 가정하면 낙하고가 증가할수록 즉, 낙하에너지가 증가하여 측정되는 두부 및 선

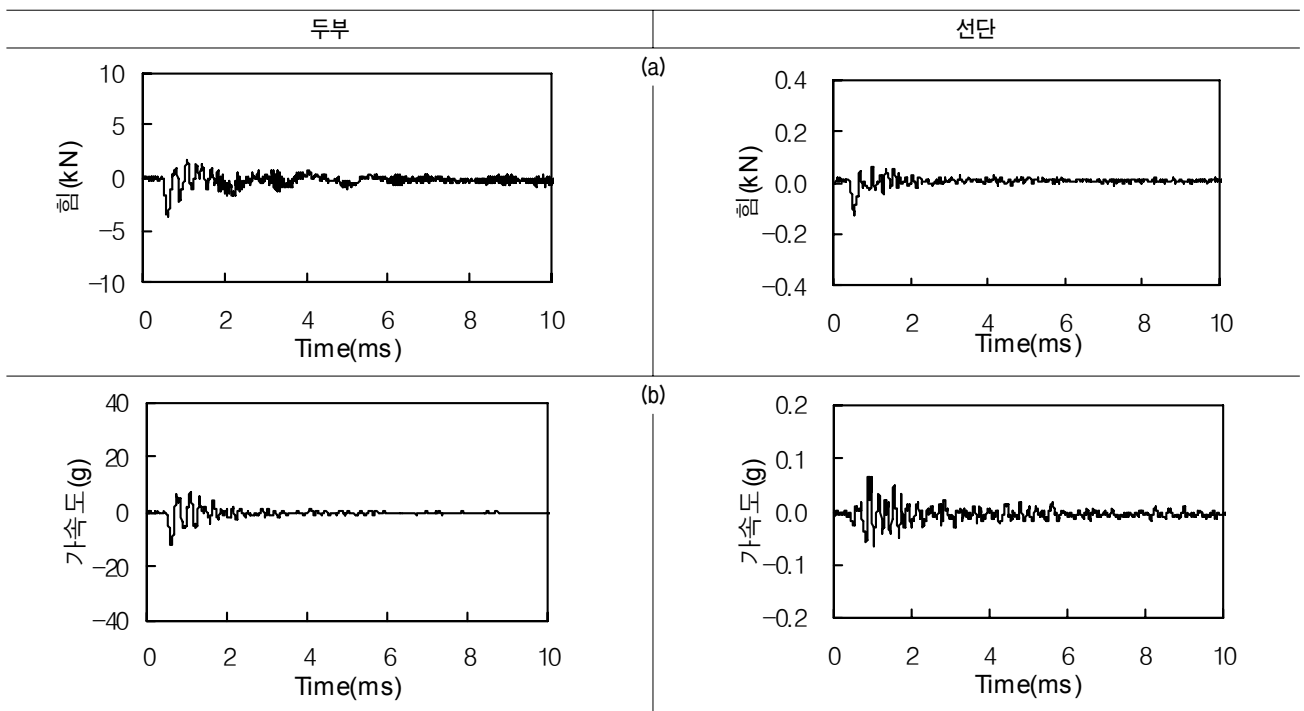


그림 9. 측정된 힘과 가속도 반응(해머중량 = 2N, 낙하고 = 100mm): (a) 힘; (b) 가속도



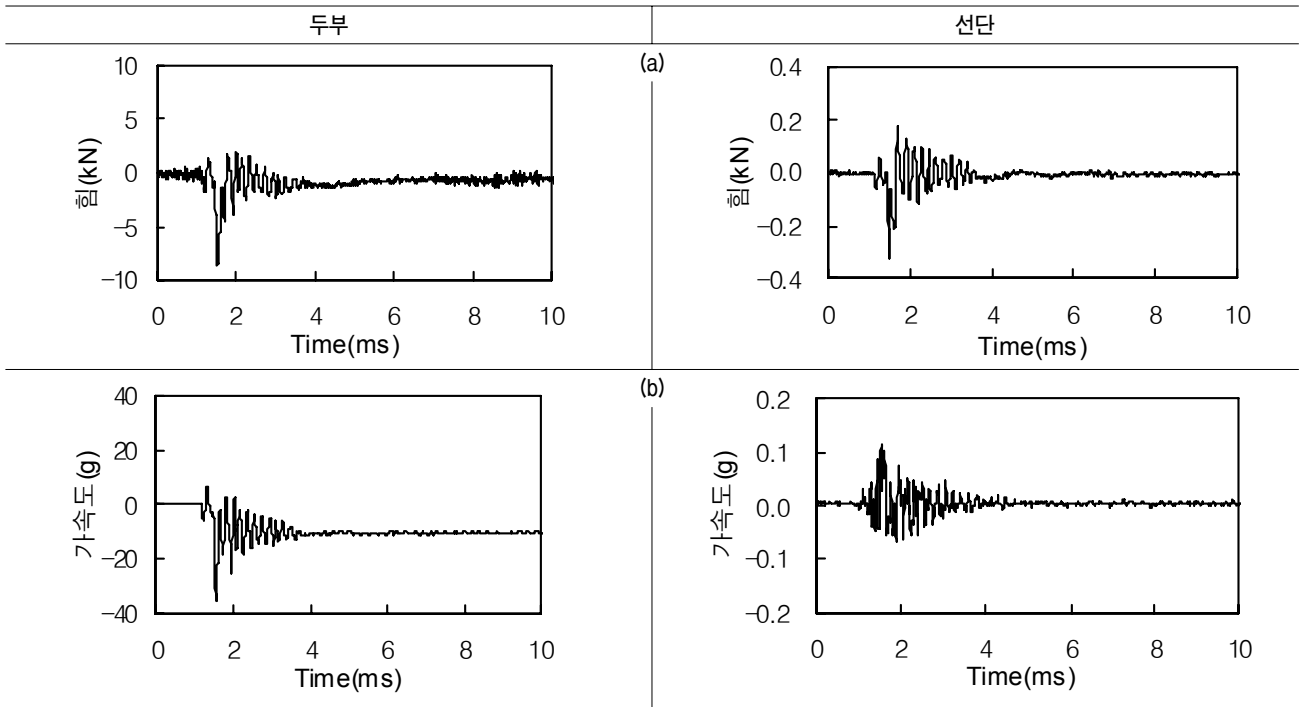


그림 10. 측정된 힘과 가속도 반응(해머중량 = 2N, 낙하고 = 200mm): (a) 힘; (b) 가속도

단 타격력 그리고 가속도가 증가하는 것으로 나타났다. 낙하 높이에 상관없이 선단부에서 측정된 힘과 가속도는 두부에서 측정된 힘과 가속도에 비하여 매우 작게 측정되었다. 이는 원위치 시험시 두부 뿐만 아니라 선단부에서 계측이 필요함을 나타낸다고 볼 수 있다.

## 5. 요약 및 결론

롯데의 체결 상태 및 체결 형태에 따른 에너지 감쇠를 평가하기 위해 롯데 체결부를 완벽체결하거나 비완벽체결하여 타격 후 에너지 변화를 측정하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 결과를 재확인하였다. 그 결과 아주 작은 비완벽체결점이 있더라도 에너지 감쇠 현상이 매우 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 실제 현장에서 롯데 체결부가 부식되거나 아주 작은 이물질이 끼어도 결과값에 큰 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

에너지 전달이 롯데의 체결에 영향을 받기 때문에 두부뿐만 아니라 관입기 선단부에도 가속도계와 변형률계를 부착함으로써 롯데의 체결 및 길이 증가에 따른 에너지 감쇠를 반영하여 지반 특성을 파악 할 수 있도록 정동적 콘관입시험기를 개발하였다. 개발된 정동적 콘관입시험기의 검증을 위해 주문진사로 조성된 토조에서 타격 시험을 수행하였다. 시험 결과 해머의 낙하고가

증가함에 따라 두부 및 선단부에서 측정되는 타격력과 가속도가 증가하였다. 이는 낙하고의 증가로 인한 낙하 에너지의 증가 때문이다. 두부와 선단부에서 측정된 데이터는 유사한 경향을 보이며 측정 시간 또한 동일하게 나타났다. 선단부에서 측정된 힘과 가속도는 두부의 그것들에 비해 매우 작게 나타났다.

본 연구에서는 실내 실험을 통해 정동적 콘관입시험 장비가 새로운 지반조사 장비로써의 가능성이 큼을 확인할 수 있었다. 추후 현장 실험을 통해 측정값의 신뢰도를 향상 시킨다면 실제 실무에 널리 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술 평가원이 시행하는 2009년도 첨단도시개발사업(08도시재생B03)의 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 남문석 (2006), “텍사스 콘 관입시험을 이용한 IGM에 근입된 현장 타설말뚝의 설계”, *한국지반공학학회논문집*, 제22권, 10호, pp.55-67.
2. 박용원 (1994), “표준관입시험의 표준화 연구”, *공학기술연구소*

- 논문집, 제9집, pp.1-12.
3. 배명호, 유정동, 이종섭 (2009), “지반 강성 특성 파악을 위한 다목적 콘관입시험기의 개발과 적용”, *대한토목학회 2009년도 정기학술대회논문집*, pp.969-972.
  4. 이우진, 유재명, 류동현 (2001), “표준관입시험 룯드 길이에 따른 에너지 전달효율”, *한국지반환경공학회 2001년도 정기 학술발표회논문집*, pp.193-198.
  5. 이우진, 이창호 (2005), “표준관입 시험 해머의 에너지와 동적효율”, *한국지반공학회논문집*, 제21권, 9호, pp.5-12.
  6. 이종섭, 배명호, 유정동, 이인모 (2008), “유도초음파의 에너지 감쇠 특성을 이용한 록볼트 건전도 평가에 대한 기초 연구”, *대한토목학회 2008년도 정기학술대회 논문집*, pp.4159-4162.
  7. 한국지반공학회 (2006), *지반조사결과 해석 및 이용*, 구미서관.
  8. Kovacs, W.D. and Salomone, L. A.(1982), “SPT hammer energy measurement”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.108, pp.599-620.
  9. Schmertmann, J.H. and Palacios, A. (1979), “Energy dynamics of SPT”, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.105, No.8, pp.909-926.
  10. Skempton, A.W. (1986), “Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation”, *Geotechnical*, Vol.36, No.3, pp.425-447.
  11. Texas Department of Transportation (1995), *Manual of Testing Procedures*, 100-E Series.
  12. Texas Department of Transportation (2000), “Geotechnical Manual (On-Line Version)”, Texas Department of Transportation, Bridge Division, Austin, Texas.

(접수일자 2010. 9. 16, 심사완료일 2010. 12. 14)