다목적 콘 관입시험기의 활용

배명호[1], Myeong-Ho Bae, 윤형구[2], Hyung-Koo Yoon, 김주한[3], Ju-Han Kim, 이종섭[4], Jong-Sub Lee

[1] 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
[2] 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
[3] 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
[4] 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

SYNOPSIS : Today, In-Situ testing for measureing geotechnical characterization are divided by Cone Penetration Test, Standard Penetration Test and Dilatometer Test, and will vary depending on soil conditions have been applied (Korea Geotechnical Engineering, 2006).
However, these methods can be applied on sand or soft clay soil.
Now, many studies are progressing for evaluating the stiffness characteristic of rocks and IGM. and Nam moon suk(2006) did Texas Cone Penetrometer Test for designing field penetration pile intruded at rocks and IGM. but, reliability of Texas Cone Penetration Test has confidence limits because TCPT is testing in Texas centrally, and energy dose not measure
Woojin Lee, etc. (1998) did calculate Standard Penetration Test Hammer`s dynamic energy efficiency by using dongjaeha analyzer. this research, we installed strain gage and accelerometer for supply existing equipment, and develop MCP that can use variety soils.
this thesis, we measured energy at head and tip of Rod for evaluating energy that transport at free falling. As a result, Energy differences are occurred at head and tip of Rod

Keywords : TCPT, MCP, Energy loss, IGM, rock

1. 서 론

현재 국내·외에서는 지반 특성 평가를 위한 원위치 시험법은 콘 관입시험, 표준관입시험 그리고 딜라토미터시험 등으로 나뉘며, 측정 목적과 지반 상태에 따라 다양하게 적용되고 있다(한국지반공학회 2006). 하지만 위의 방법들은 모래지반이나 연약점토지반에 대해서만 적용할 수 있다. 현재 원지반 조건에서 암반 및 중간토의 강성 특성을 평가하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있으며, 국내에서는 남문석(2006)이 IGM에 근입된 현장타설말뚝의 설계를 위해 텍사스 콘 관입시험(Texas Cone Penetrometer: Test)을 수행하였다. 하지만 텍사스 지역을 중심으로 이루어지고 있으며, 에너지 측정이 이루어 지고 있지 않아 측정된 텍사스 콘 관입저항의 신뢰성이 떨어질 수 있다. 지반조사의 정확성과 신뢰성을 높이기 위해 센서를 활용하는 조사법이 널리 이용되고 있으며 현재에는 그 활용도가 계속 증가하는 추세에 있다. 이우진 등(1998)은 표준관입시험 해머의 에너지비와 동적효율을 산정하기 위해 스트레인게이지와 가

속도계를 사용하는 말뚝 동재하 분석기를 활용하였다. 본 연구에서는 기존에 원위치 장비를 보완하기 위해 두부와 선단부에 스트레인게지와 가속도계를 설치하여 점성토, 사질토, 중간토 그리고 암반에 다방면으로 활용될 수 있는 MCP를 개발하고 그 적용성을 평가하는데 있다. 본 논문은 해머 자유낙하시 롯드에 전달되는 에너지에 대한 평가를 위해 제작된 모형 토조를 이용하여 두부 및 선단부에서 측정하였다. 실험결과, 두부와 선단부에서 에너지차가 발생되는 것을 관찰할 수 있었다.

2. 타격 에너지 평가

롯드에 전달된 에너지는 힘(F)과 거리(S)의 곱으로 표시할 수 있다.

$$E_T = W = F \cdot S = \int F dx \tag{1}$$

여기서, F(t): 힘

x: 변위

여기서, 힘F(t)는 롯드에 로드셀을 설치하여 측정할 수 있다. 로드셀 대신 변형률계를 설치하여 롯드의 단면적과 탄성계수를 적용하여 하중 즉, 힘으로 환산할 수 있다. 또한 롯드의 변위를 변위계, 속도계 또는 가속도계를 설치하여 평가할 수 있다. 가속도를 적분하면 속도로 환산되며 이를 이용하면 롯드에 전달된 에너지는 다음과 같이 된다.

$$E_T = F \cdot S = \int F dx = \int F(t)\, V(t) dt \tag{2}$$

여기서, F(t): 시간에 따른 충격파 힘의 이력

V(t): 시간에 따른 충격파 속도의 이력

한편 롯드의 관입속도V(t)는 변형률 또는 가소도계만을 이용하여 평가할 수 있다. 즉, 입자의 이동속도 V(t)와 롯드의 탄성파 속도(C) 관계를 이용하는 것이다. 입자의 이동속도V(t)와 롯드의 탄성파 속도(C)는 다음과 같다.

$$F = \frac{EA}{C} V \tag{3}$$

여기서, E, A는 롯드의 탄성계수와 단면적을 의미한다. 식(2.12)를 식(2.11)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_T &= \int F(t) dx \\ &= \int F(t)\, V(t) dt \\ &= \frac{EA}{C} \int V^2(t) dt \\ &= \frac{C}{EA} \int F^2(t) dt \end{aligned} \tag{4}$$

힘과 속도를 동시에 적용하여 에너지를 산정할 경우, 롯드의 단면적(A), 계수(E), 롯드의 탄성파 속도(C)를 산정할 필요 없이 바로 에너지를 산정할 수 있다. 국내·외적으로 타격시 해머의 에너지를 산정하여 보다 신뢰성있는 표준관입시험 결과를 얻으려고 하고 있다. 이를 위해 항타분석기(Pile Driving Analyzer, PDA)를 이용하여 해머의 타격에 의해 롯드에 전달된 에너지를 평가하고 있다.

3. 계측 센서

3.1 스트레인게이지

에너지 전달평가를 위해서는 응력측정이 필요하며, 이는 스트레인 게이지를 통하여 측정할 수 있다. 스트레인 게이지는 측정하는 대상의 변형을 직접 측정할 수 있으며, 이를 전기적인 신호를 변환하여 측정하고자 하는 물체의 변형율이나 응력변화를 알 수 있다. 본 연구의 MCP에 사용한 전기저항식 변형률계는 Kyowa사의 5mm 스트레인 게이지(KFG-1-120-D1 -16L3M2S)이며, 관입에 따른 저항력을 측정하기 위하여 장비의 두부와 선단부에 설치하였다. 휘트스톤 브리지의 개념을 적용하여 일반적으로 사용되는 브리지의 종류는 Quarter bridge, Half bridge, Full bridge가 있다. 이들 브리지의 연결방식은 다음과 같다.

3.1.1 Poisson Quarter Bridge

쿼터 브리지는 스트레인 게이지를 단면 1곳에 종축으로 부착시키는 방법이다. 이는 온도 보상에 대한 효과가 없으며, 벤딩과 편심을 보상할 수 없다는 단점이 있다. 입력전압과 출력전압사이의 관계식은 아래와 같다.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1) \tag{5}$$

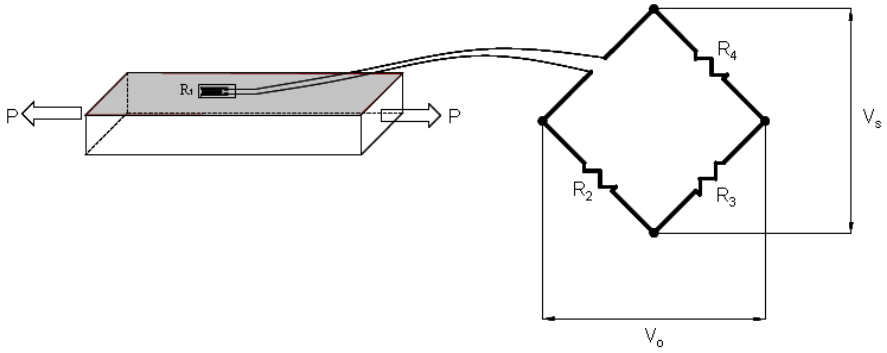

그림 1. Quater bridge 원리

3.1.2 Poisson Quarter Bridge

포아송 하프 브리지에서는 2개의 스트레인 게이지를 단면 1곳에 종축과 횡축으로 부착된다. 이는 온도 보상에 대한 효과는 있지만 벤딩과 편심을 보상할 수 없다는 단점이 있다. 입력전압과 출력전압사이의 관계식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\frac{V_o}{V_s} &= \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \\ &= \frac{k}{4}\varepsilon_1(1+\nu)\end{aligned} \tag{6}$$

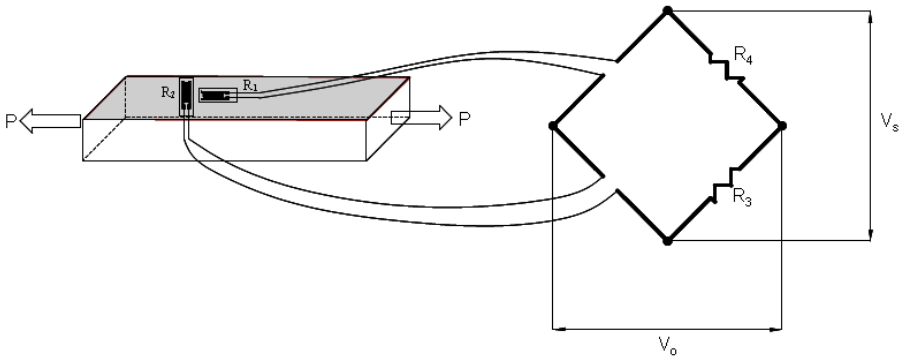

그림 2. Poisson Quarter Bridge 원리

3.1.3 Poisson Quarter Bridge

포아송 풀 브리지에서는 4개의 스트레인 게이지를 단면 2곳에 종축과 횡축으로 부착된다. 이는 온도보상에 대한 효과가 좋으며, 벤딩과 편심을 보상할 수 있다. 이는 하프 브리지에 비해 출력 전압이 2배 이므로 지반 특성을 파악하는데 있어 효율적인 센서이다. 입력전압과 출력전압사이의 관계식은 아래와 같다. 본 연구에서는 이 포아송 풀 브리지를 사용하여 측정하였다.

$$\begin{aligned}\frac{V_o}{V_s} &= \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \\ &= \frac{k}{4}[\varepsilon_1(1+\nu) + \varepsilon_3(1+\nu)]\end{aligned} \tag{7}$$

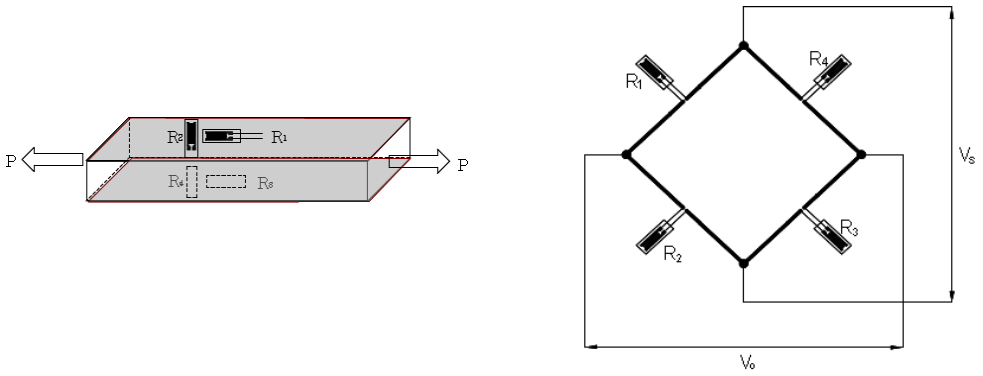

그림 3. Poisson Full Bridge 원리

3.2 가속도계

본 연구를 수행하기 위해 사용된 계측센서는 일반적으로 타격시 발생하는 파의 특성을 분석하고자 할 때 사용하는 가속도계를 이용하였다. 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 PCB사의 PCB353B15와 PCB353B04이며, 민감도의 범위는 약 10mV/g, 측정범위는 약 ±500g 그리고 측정 주파수의 범위는 약 0.7~18000Hz의 특징을 가지고 있다.

4. 다목적 콘관입시험기(Multipurpose Cone Penetration: MCP)

본 연구에서는 다목적 콘 시험기를 개발하고 그 적용성을 평가하기 위해 스트레인게이지가 부착된 다목적 콘관입시험기에 대해 보정을 수행하였으며, 모형 실험탱크에 시료를 조성하여 타격시 지반 반발력에 의한 가속도계와 스트레인게이지의 반응을 동시에 측정하였다.

4.1 형상

MCP는 실내 실험시 경계면 효과(boundary effect)를 고려했으며, 반발력이 상대적으로 작게 소요되는 현장실험에 활용하기 위하여 소형 크기로 제작되었다. 다목적 콘 관입시험기는 직경 24mm(단면적: 4.52cm^2), 길이 110mm의 선단부 롯드, 선단각도가 60°인 원추 형태로 개발되었으며 그리고 마찰슬리브를 제작하여 마찰저항력도 측정이 가능토록 제작되었다. 두부 롯드의 길이는 300mm로 제작되어 조사깊이에 따라 롯드를 연장할 수 있도록 하였다. 해머 중량은 각각 0.2kg, 0.3kg으로 낙하 거리(롯드 가이드)는 50cm로 설계하였으며, 앤빌 직경은 12mm로 제작되었다. 센서들은 두부와 선단부에 모두 설치하였다.

4.2 측정 장비

본 장비는 동적 사운딩 기법의 일환으로써 측정 장비는 다음과 같다. 스트레인 게이지는 선단부에서 30mm 부분과 두부로부터 150mm 부분에 각각 Full bridge로 구성되었으며, 해머 중량 0.2kg과 0.3kg을 자유낙하시킨다. 이때 해머의 타격에 의한 반응을 두부와 선단부에 동일한 위치에 각각 설치된 스트레인게이지와 가속도계로부터 측정하게 된다. 이들 반응은 이더넷(ethernet)에 근거한 오실로스코프로를 사용하였으며, 측정된 신호는 PC에 저장하였다(그림 4참조).

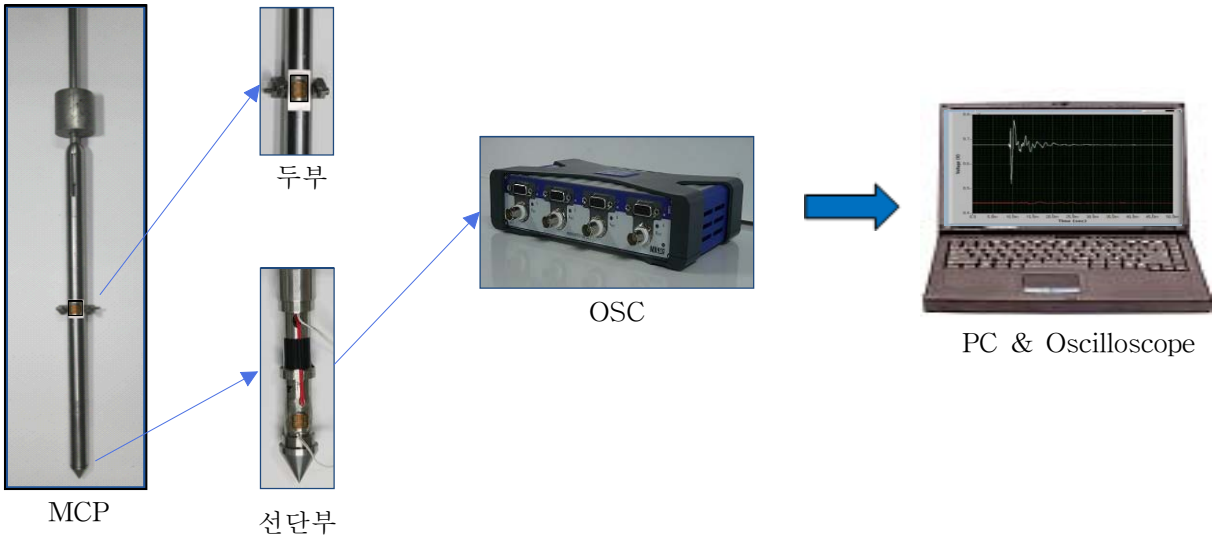

그림 4. 측정장비의 구성

4.3 스트레인게이지 Calibration

MCP의 두부와 선단부에 설치된 스트레인게이지에 정적 하중을 가하여 변형률에 대한 분석을 실시하였다. 스트레인게이지 측정시 입력 전압을 조절하여 출력 전압과 하중관계를 산정하였다. 각 하중 단계에 따라 전압이 선형적으로 증가하였으며, 재하와 제하시 값이 거의 일치하는 것으로 측정되었다.

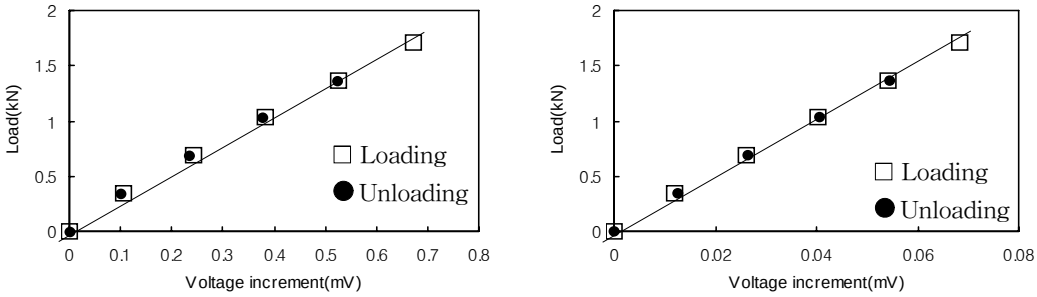

그림 5. 하중 단계별 변형률계 보정: (a) 선단부; (b) 두부

4.4 실험방법

MCP의 적용성을 평가하기 위하여 내경이 240mm이고 높이가 800mm인 투명 아크릴 소재의 토조가 사용되었다. 시료는 비중 2.61, 상대밀도 85%인 주문진사의 시료를 사용하였다. 시료는 낙하고를 30cm로 유지하였고, 낙하량은 #10체를 이용해, 일정한 높이에서 균등한 양이 낙하되도록 조절하여 균질한 시료를 조성하도록 노력하였다. 토조의 전체 높이를 고려하여 시료는 70cm까지 조성되었다. 다목적 콘 관입시험기의 반응성 평가는 다목적 콘 관입시험기를 그림 6과 같이 상부에서 10cm 깊이까지 관입한 후 10cm 높이에서 각 해머 중량 0.2kg, 0.3kg을 이용하여 자유낙하시켜 1회 타격하여 실험을 실시하였다. 다목적 콘 관입시험기를 수직으로 시키기 위해서 관입용 고정 장치를 설치하였다.

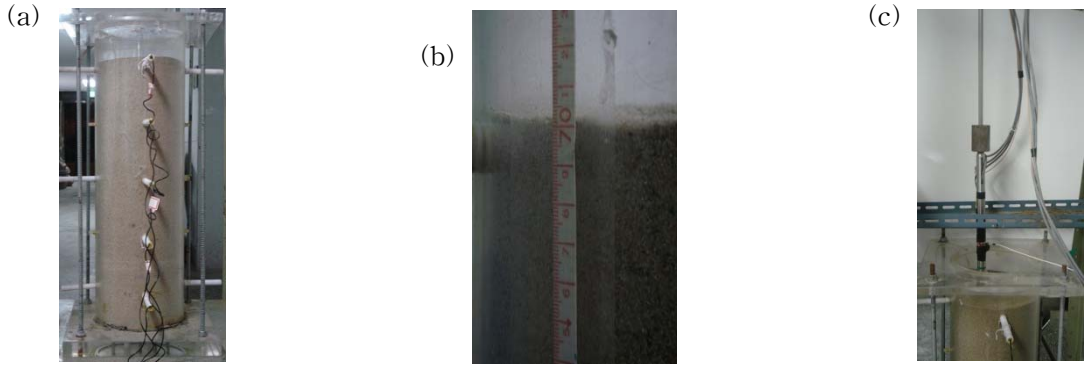

그림 6. 시료조성 및 장비타격: (a) 시료조성; (b) 시료높이; (c) 장비 타격시 근입상태

4.5 실험결과

두부와 선단부에 부착된 변형률계를 통해 측정된 값은 하중 보정과정에서 도출된 식을 이용하여 타격력으로 환산하였다. 그림 6은 해머 중량 0.2kg을 해머 낙하고 10cm에서 자유낙하시킨 경우 타격력 0.9MPa, 가속도차 20g가 두부에서 측정되었다. 이는 스트레인 게이지와 가속도계의 반응이 동일하게 나타났다. 또한, 선단부에서 0.36MPa, 0.1g가 측정 되었으며, 이는 스트레인 게이지와 가속도계의 반응은 지반의 저항으로 인해 달라지는 것을 관찰하였다. 해머 중량에 따라 위치에너지 변화시 두부에 설치된 센서들의 반응을 측정한 하였다. 낙하고를 10cm로 유지하고, 해머 중량을 0.2kg에서 0.3kg으로 증가시키면 두부에서의 타격력은 0.8MPa에서 1.8MPa, 가속도차는 17g에서 40g로 증가되었다. 즉, 위치 에너지 증가시 응력 및 가속도가 증가되는 것을 관찰하였다. 타격력을 측정하기 위해 해머 중량 0.3kg을 해머 낙하고10cm에서 자유낙하시켜 타격력는 두부에서 1.51MPa, 선단부에 0.60MPa이며, 가속도차의 반응은 두부에서 40g, 선단부에서는 0.2g로 크게 감소되었다. 이는 선단부 측정이 필요하다는 것을 보여주고 있다.

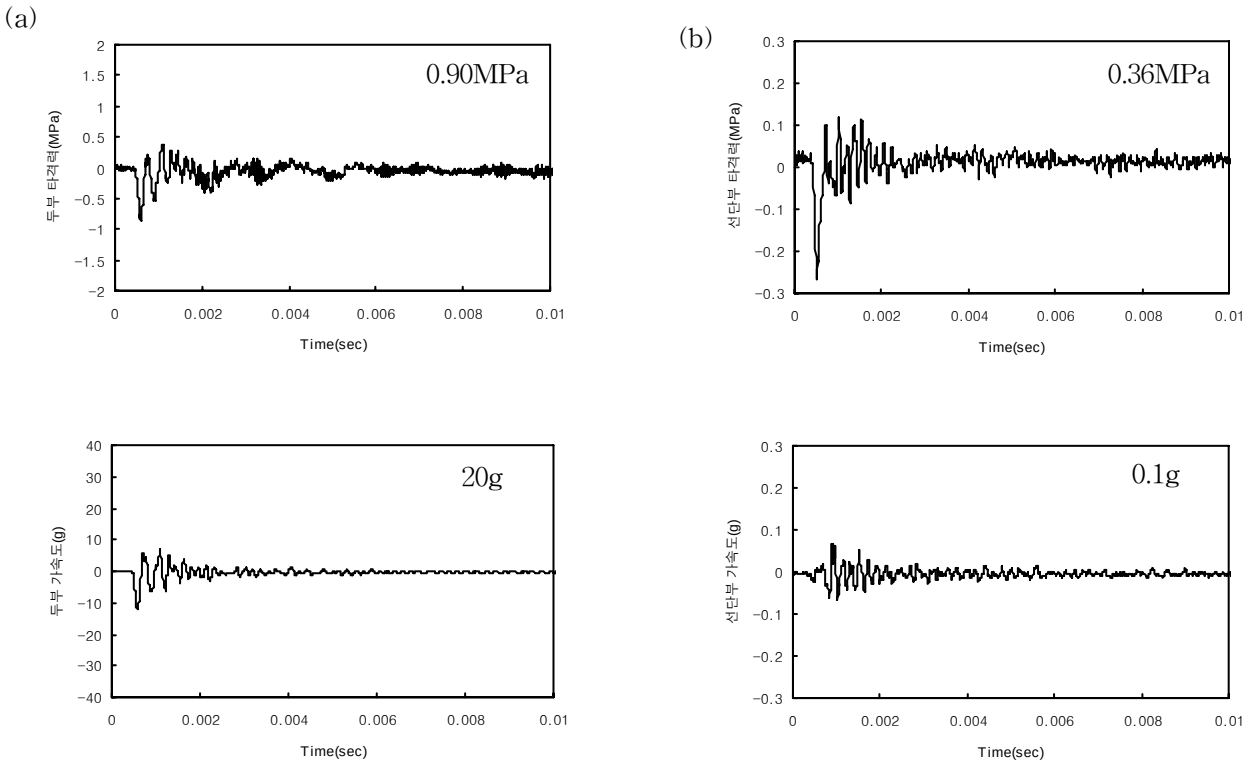

그림 7 해머 중량 0.2kg을 자유낙하시 두부 및 선단부 센서 반응: (a) 두부; (b) 선단부

5. 결 론

본 연구에서는 다목적 콘 관입시험기를 개발하고 그 적용성을 평가하엿다. 개발된 장비의 두부와 선단부에 대해 스트레인 게이지에 대한 케리브레이션을 실시하였으며, 하중이 증가함에 따라 전압이 선형 증가는 것으로 나타났다. 이는 롯드에 스트레인 게이지가 정확히 부착되어 있으며, 또한 다목적 콘 관입시험기에 전달되는 힘을 스트레인 게이지가 정확히 계측한다는 것을 보여준다. 이로부터 모형 지반에서 다목적 콘 관입시험기를 관입 후 타격하여 반발력을 측정하였다. 측정 결과, 해머 중량을 증가시 두부보다 선단부에 있는 스트레인게지가 큰 전압을 보였다. 또한 지반의 저항으로 인해 스트레인게이지와 가속도계의 반응이 다르게 측정되었다. 또한, 위치 에너지 증가시 타격력 및 가속도가 증가되는 것을 보여주었다. 본 연구의 결과들은 선단부에서의 에너지 평가가 필요하며, 본 연구에서 개발된 다목적 콘 관입시험의 구성 및 실험 수행 방법 등에 있어서 지반 강성특성 파악을 위한 적용 가능성을 보여준다. 본 연구의 다목적 콘 관입시험의 현장 적용에 있어 그 선행 실내실험으로써 적용성 평가를 수행할 것 이다. 따라서 본 연구의 결과가 지반의 강성 특성을 평가하는데 있어 지표가 될 수 없지만 후행 연구에 있어서 큰 도움을 줄 것으로 판단 된다.

감사의 글

“본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2009년도 첨단도시개발사업 (07 도시재생B03)의 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 남문석(2006), “텍사스 콘 관입시험을 이용한 IGM에 근입된 현장타설말뚝의 설계,” 한국지반공학회 논문집, 제22권, 10호, pp.55-67.
2. 박용원(1994), “표준관입시험의 표준화 연구,” 공학기술연구소논문집, 제9집, pp.1-12.
3. 이우진, 유재명, 류동현(2001), “표준관입시험 롯드 길이에 따른 에너지 전달 효율,” 한국지반환경공학회 2001년도 학술발표회논문집, pp. 193-198.
4. 이우진, 이창호(2005),“표준관입시험 해머의 에너지와 동적효율”, 한국지반공학회논문집, 제22권, 9호, pp.5～12.
5. 이종섭, 신동현, 윤형구, 이우진(2008),“초소형 마이크로 콘 관입시험기의 개발 및 적용”, 한국지반공학회논문집, 제 21권, pp.77～86.
6. Cavusoglu, E., Nam, M. S., O′neill, M. W., and McClelland, M.(2004), "Multi-Met hod Strength Characterization for Soft Cretaceous Rocks in Texas", Geotechnical Special Publication 124, Geo Support 2004, Orlando, Florida. pp.199-210.
7. Kovacs, W.D. and Salomone, L. A.(1982), "SPT hammer energy measurement", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 108, pp.599-620.
8. Skempton, A.W.(1986), "Standard penetration test procedures and effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation", Geotethnical, Vol.36, No.3, pp.425-447.