



## 원위치 동적강성 분석기의 개발 및 성능평가

### Development and Performance Evaluation of In-situ Dynamic Stiffness Analyzer

김동주<sup>a</sup> · 변용훈<sup>b, †</sup>

Kim, Dong-Ju · Byun, Yong-Hoon

#### ABSTRACT

Stiffness characteristic of subgrade is one of the most important aspects for the design and evaluation of pavement and railway. However, adequate field testing methods for evaluating the stiffness characteristics of the subgrade have not been developed yet. In this study, an in-situ dynamic stiffness analyzer (IDSA) is developed to evaluate the characteristics of subgrade stiffness along the depth, and its performance is evaluated in elastic materials and a compacted soil. The IDSA consists of a falling hammer system, a connecting rod, and a tip module. Four strain gauges and an accelerometer are installed at the tip of the rod to analyze the dynamic response of the tip generated by the drop of hammer. Based on the Boussinesq's method, the stiffness and Young's modulus of the specimens can be calculated. The performance of IDSA was tested on three elastic materials with different hardness and a compacted soil. For the repeatability of test performance, the dynamic signals for force and displacement of the tip are averaged from the hammer impact tests performed five times at the same drop height. The experimental results show that the peak force, peak displacement, and the duration depend on the hardness of the elastic materials. After calculating the stiffness and elastic modulus, it is revealed that as the drop height of hammer increases, the stiffness and elastic moduli of MC nylon and the compacted soil rapidly increase, while those of urethanes less increase.

**Keywords:** In-situ test; dynamic response; hammer impact; stiffness; subgrade

#### 1. 서 론

고속도로 및 철도의 이용이 매년 증가함에 따라, 기존 노선에 대한 유지보수 및 신규노선의 건설이 진행되어 왔다. 기존 노선의 경우, 지속적인 차량통행의 증가와 노후화로 인하여 차량의 주행성 및 안정성이 저하되었으며, 기존 도로의 유지보수 및 신규 도로의 건설을 위하여 노반의 강도 및 강성특성은 중요한 평가요소라 할 수 있다(Kang et al., 2008). 철도의 경우, 궤도 하부구조물의 노후화는 궤도의 변형을 유발시킬 수 있으며, 안전관리 기준을 초과한 변형은 철도 구조물의 전체적인 파괴를 일으켜 큰 인명피해로 이어질 수 있다. 이에 따라, 궤도하부의 노반에 대한 강도 및 강성특성도 철도 하부구조물의 안정성 평가를 위한 중요한 요소로 여겨지고 있다(Hong et al., 2015).

도로 및 철도 노반의 물성평가를 위하여, 기존에는 현장에서 평판재하시험(Plate Loading Test, PLT), 캘리포니아 지지력비시험(California Bearing Ratio Test, CBR Test) 및 동적 콘관입시험(Dynamic Cone Penetration Test, DCPT) 등이 적용되어 왔다. PLT에서는 원형판에 가한 하중과 침하량을 측정함으로써 노반의 지지력을 평가할 수 있으며, CBR시험은 대상 시험체에 피스톤의 관입에 따른 하중과 기준 재료에 대한 하중의 비를 구하여 지지력을 산정하게 된다. DCPT는 78N 해머의 낙하로 발생한 동적에너지로 콘을 관입시킴으로써, 타격당 관입깊이를 통해 지반의 심도별 저항강도를 획득할 수 있다. 특히, DCPT는 시험장비의 구성이 간편하여 현장의 강도평가에 많이 이용되고 있으나, 콘관입 시 지반에 탄성범위 이상의 대변형을 발생시키기 때문에 강성특성을 평가하기에는 한계가 있다.

노반의 강성특성을 평가하기 위한 비파괴 시험기법으로써, 동평판재하시험기(Falling Weight Deflectometer, FWD), 소형 동평판재하시험기(Light Falling Weight Deflectometer, LFWD) 및 흙강성측정기(Soil Stiffness Gauge, SSG) 등이 이용되어 왔다. FWD시험은 해머를 일정한 높이로부터 재하판에 낙하시켜 포장표면에 충격하중을 가함으로써, 일정한 간격으로 설치된 Geophone를 통하여 처짐을 측정하게 된다. 그 후, 측정된 처짐량과 역해석을 통하여 지층별 탄성계수를 추정할 수 있다. FWD시험은 중량의 해머를 이용하기 위한 대형차량이

<sup>a</sup> Graduate Student, School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National University

<sup>b</sup> Assistant Professor, School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Institute of Agricultural Science & Technology, Kyungpook National University

† **Corresponding author**

Tel.: +82-53-950-5732 Fax.: +82-53-950-6752

E-mail: yhbyun@knu.ac.kr

Received: January 15, 2019

Revised: March 4, 2019

Accepted: March 4, 2019

필수적으로 수반되므로, 휴대용으로 경량화된 LFWD도 널리 이용되고 있다. 한편, SSG는 장비 내부의 shaker가 수직방향의 진동을 발생시킨 후 변위센서로 미소 변형을 측정함으로써 지반의 강성을 도출하게 된다. 이러한 LFWD 및 SSG는 시험법 및 장비의 구성이 간단하고 휴대성이 우수하며, 협소한 장소에서 사용이 가능하다는 장점이 있다. 그러나, LFWD의 경우 재하관 직경의 두 배에 해당하는 심도까지 유효범위에 해당하며, 이 유효범위 내 노반의 강성평가만 가능하게 된다(Elhakim et al., 2014; Fleming et al., 2007; Nazzal et al., 2004). SSG의 경우에도 지표면으로부터 약 220mm의 깊이 내 노반으로 측정이 제한되는 것으로 알려져 있다(Seyman, 2003). 특히, SSG는 유효범위 내 노반의 대표적인 강성만 도출하므로, 유효범위 내 비균질 구간이 존재할 경우 노반의 심도별 강성특성을 정확히 평가하기 어렵게 된다(Sawangsurriya et al., 2002).

이러한 기존의 비파괴 시험기법들의 한계를 극복하기 위하여, 최근 다양한 원위치 시험기법들이 개발되어 왔다. 먼저, 철도궤도 하부구조물의 자갈도상과 같은 단단한 지반을 통과하기 위하여, 해머의 낙하에너지를 증가시켜 10cm 관입당 낙하 횟수를 측정하는 Pagani-Cone이 개발된 바 있다(Lee et al., 2015). 또한, Sol solution사에서 개발한 경량화된 동적 콘관입기(PANDA)는 관입기의 두부에 가속도계를 설치함으로써 해머타격에 의한 지반의 관입저항치를 산정할 수 있으며, 기존의 DCPT보다 경량으로 제작되어 휴대성이 높은 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2014). 지반의 강도평가 시 에너지 손실에 대한 영향을 보정하기 위하여, 선단부 및 두부에 변형률계와 가속도계가 내장된 계장화된 동적 콘관입기(Instrumented Dynamic Cone Penetrometer)가 개발된 바 있으며, 선단부에 전달된 에너지 측정을 통해 심도별 지반의 강도를 보다 정확하게 평가할 수 있음을 보여주었다(Byun and Lee, 2013; Byun et al., 2014). 한편, 노반의 강성특성을 평가하기 위해 개발된 크로스홀 방식의 동적 콘관입기(Cross-type Dynamic Cone Penetrometer, CDCP)는 양단에 설치된 수신기와 발신기를 이용하여, 전단파를 측정함으로써 전단파 속도를 산정할 수 있다(Hong et al., 2018). 그러나, CDCP의 경우, 두 지점에서 한 쌍의 콘이 관입되어야 하며, 관입 시 수신기 및 발신기가 동일한 심도에 위치해야 하는 단점이 있다. 이와 같이, 지금까지 개발되어 온 원위치 시험기법들은 동적 콘관입기의 경우 관입에 따라 대변형률( $\epsilon=0.1\%$  이상)에 해당하는 변위를 발생시키고, CDCP를 이용한 전단파 속도로부터 산정된 강성의 경우 미소변형률( $\epsilon=0.001\%$  이하) 영역에 해당되므로, 포장설계 시 사용되는 중간변형률( $\epsilon=0.01\sim 0.1\%$ ) 영역의 강성과 여전히 차이가 남아 있다(Kim et al., 2005; Clayton, 2011; Kim, 2015).

본 연구에서는 도로 및 철도 노반의 심도별 강성평가를 위하여 원위치 동적강성 분석기를 개발하였으며, 실내실험을 통해 개발된 장비의 성능을 평가하였다. 먼저, 동적강성의 산정을 위한 이론을 소개한 후, 시험기의 구성 및 측정시스템에 관해 기술하였다. 실내실험에서 사용된 재료의 특성 및 조건, 그리고 동적반응실험에서 획득된 변위 및 하중의 동적 신호에 대해 설명하였다. 마지막으로, 대상 시험체의 종류 및 해머낙하 높이에 따른 강성 및 탄성계수의 변화에 대해 토의하였다.

## II. 원위치 동적강성 분석기

### 1. 강성 산정 이론

본 연구에서는 지반의 강성을 산정하기 위하여, 지반을 등방, 균질의 탄성 반무한체라고 가정하였으며, 정적해석을 근간으로 하중이 가해진 원형기초하에서 발생한 변위로부터 강성(k)을 식(1)과 같이 산정하였다.

$$k = \frac{f}{x} \quad (1)$$

여기서, f는 원형기초에 가해진 하중이고, x는 가해진 하중으로 인해 지반에 발생하는 기초의 중심에서의 변위를 나타낸다. 반무한체에서 집중하중으로 인한 응력-변위의 관계는 Boussinesq 탄성론으로부터, 전단탄성계수(G)와 강성(k)를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G = \frac{k(1-\nu)}{\eta a} \quad (2)$$

여기서, a는 원형기초의 반지름,  $\nu$ 는 포아송비,  $\eta$ 는 지반에 접촉된 원형기초에 작용되는 응력분포에 따라 변화되는 형상인자이다. 응력이 원형기초하에 균일하게 분포된 경우  $\eta=\pi$ 이며, 응력의 분포가 균일하지 않은 경우  $\eta=4$ 로 가정한다. 식(3)과 같이 탄성계수 및 전단탄성계수, 그리고 포아송비의 관계식을 이용함으로써, 대상지반의 탄성계수를 구할 수 있다.

$$E = 2G(1+\nu) \quad (3)$$

이와 같이, 본 연구에서 개발된 원위치 동적강성 분석기를 반무한체에 놓인 원형기초로 고려하면, 가해진 하중과 발생한 변위를 측정하고 대상 지반의 포아송비를 가정함으로써, 강성 및 탄성계수를 산정할 수 있다.

## 2. 원위치 동적강성 분석기

원위치 동적강성 분석기(In-situ Dynamic Stiffness Analyzer, IDSA)는 Fig. 1(a)와 같이 직경 30mm의 원추형 선단부에 8개의 날이 표면에 부착된 형태로써, 룯드에 연결되어 해머를 낙하함으로써 지반의 강성을 평가할 수 있다. 룯드의 직경과 길이는 각각 24mm 및 960mm이고, 낙하에 사용되는 해머의 질량은 43N이며, 최대 낙하가능높이는 685mm가 되도록 제작하였다. Fig. 1(b)와 같이 룯드 하단에 연결된 선단부에는 4개의 변형률계와 1개의 가속도계가 설치되었고, 설치된 센서들을 배선하기 위해 룯드를 외경 24mm 및 내경 16mm의 스테인리스 강으로 중공관을 제작하였다. 선단부의 하중을 측정하기 위해 부착된 4개의 변형률계는 휘트스톤 브릿지(Wheatstone Bridge) 회로로 구성되었고, 가속도계(350C03, PCB Piezotronics, Inc.)의 측정범위 및 민감도는 각각  $\pm 10,000g$  및  $0.5mV/g$ 이며, 사용주파수의 범위는  $0.4 \sim 10000Hz$ 에 해당한다.

## 3. 측정시스템

하중 및 가속도를 측정하기 위한 IDSA 및 측정시스템을 Fig. 1(b)와 같이 구성하였다. IDSA를 타격하여 얻어지는 하중과 가속도는 동적 데이터로거(MX440b, HBM)로 기록되며, 이를 컴퓨터로 연결하여 실시간으로 모니터링되도록 하였다.

실험 시 해머의 타격에 의해 발생하는 동적반응을 감지하여 측정하기 위해 Triggering level을  $49m/s^2$ 로 설정하였고, Triggering 시점을 기준으로 100ms전부터 1,000ms후까지의 신호를 10kHz의 샘플링속도로 측정하였다. 후처리 분석 시, 고주파수의 잡음을 없애기 위해 차단주파수를 300Hz로 설정하여 저역통과 필터링을 적용하였다.

## III. 실내 실험

### 1. 재료 특성 및 조건

본 연구에서 개발된 IDSA를 이용한 동적반응실험을 수행하기 위하여, 직경×높이가 150mm×300mm의 원기둥 형태의 3종류의 탄성체를 이용하였다. Fig. 2와 같이, 3종류의 탄성체는 각각 MC나일론 및 두 종류의 우레탄으로 제조되었으며, MC나일론의 경도는 Shore D기준으로 약 85도이고, 우레탄은 Shore A기준으로 90도 및 70도인 재료를 사용하였다. 여기서, Shore 경도는 경도계 선단 바늘을 해머로 타격하여 반발 높이로 재료의 굳기를 표시하는 방법으로써, Shore A 경도보다 Shore D 경도의 물체가 보다 단단함을 나타낸다. 따라서 본 연구에서 사용된 탄성체는 물리적으로 MC나일론이 가장 단단하고, 90도 및 70도의 우레탄 순서로 경도가 낮음을 알 수 있다. Fig. 2에서, 경도 90의 우레탄은 U-1로, 경도 70의 우레

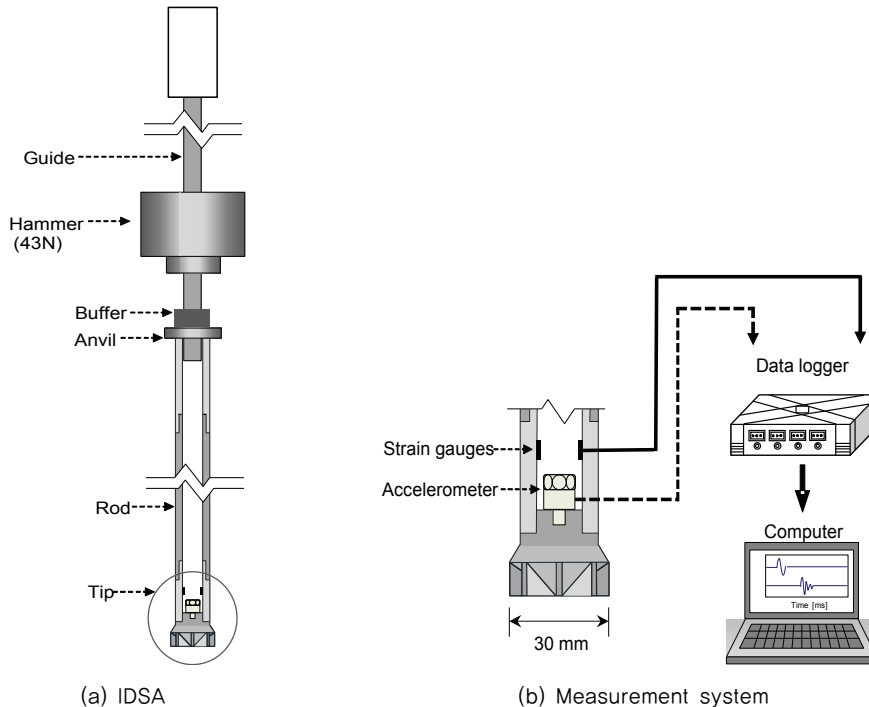


Fig. 1 Schematic drawings of in-situ dynamic stiffness analyzer

Table 1 Index properties of the compacted soil

Specific gravity $G_s$	Particle sizes corresponding to percent finer [mm]				Gradation coefficient $C_c$	Uniformity coefficient $C_u$	USCS
	$D_{10}$	$D_{30}$	$D_{50}$	$D_{60}$			
2.66	0.19	0.52	0.87	1.05	1.4	5.53	SP

탄은 U-2로 표기하였다.

지반재료에서 IDSA의 동적반응실험을 수행하기 위하여 풍화토를 이용하여 다짐시료를 조성하였다. 풍화토의 비중시험 및 입도분석결과는 Table 1에 정리되었으며, 다짐시료의 조성 시 입도분석결과에 따라 각 층별 시료의 입도분포를 일정하게 유지하였다. ASTM D1557(2012)에서 제시하고 있는 수정다짐법을 이용하여, 총 5층으로 나누어 44N의 해머로 각 층마다 56회씩 타격을 통해 다짐을 실시하여 높이 및 직경이 각각 167mm 및 150mm인 다짐시료를 조성하였으며, 조성된 풍화토의 단위중량은  $17.3\text{KN}/\text{m}^3$ 로 나타났다.

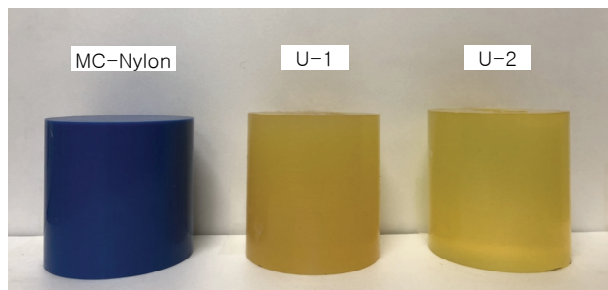


Fig. 2 Picture for three different elastic materials

## 2. 하중보정

IDSA의 선단부에 작용된 하중은 변형률계로 구성된 휘트 스톤 브릿지 회로의 출력전압을 변화시키며, 동적반응실험 시, 측정된 전압으로부터 선단부에 작용된 하중을 산정하기 위하여, 변형률계에 대한 하중보정실험을 실시하였다. 하중 보정을 위해 선단부에 정적하중을 240, 510, 730, 1000, 1250, 1520, 1780, 2030, 2250, 2520N의 크기로 재하시킨 후 역순으로 무게를 제거하였으며, 각 하중단계별 출력되는 전압을 평균하여 전압-하중의 관계를 Fig. 3과 같이 도출하였다. 전압 및 하중의 상관관계를 나타내기 위하여 회귀분석을 수행하였으며, 결정계수는 하중의 재하 및 제하 시 모두 0.99이상으로 높은 상관성을 보여주었다.

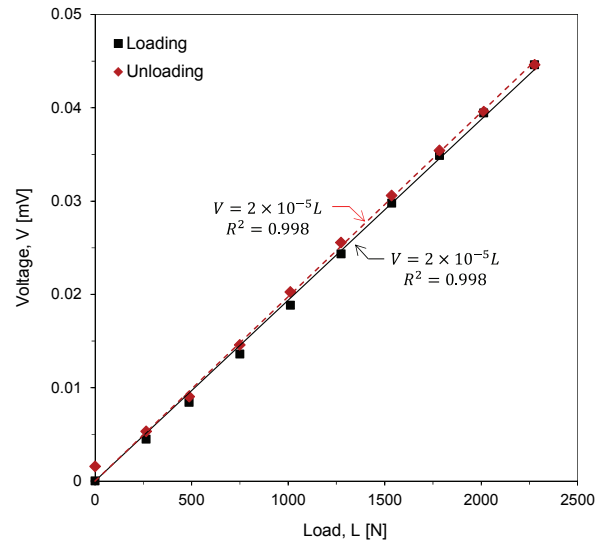


Fig. 3 Calibration of strain gauges installed in the tip of IDSA.

## 3. 시험 방법

IDSA를 이용하여 대상 시험체의 강성을 산정하기 위하여 실내에서 동적반응실험을 수행하였다. 동적반응실험은 3종류의 탄성체와 풍화토의 다짐시료에서 수행되었으며, 실험구성을 Fig. 4에 나타내었다. 동적반응실험은 탄성체의 경우, 시험체 중앙부에 IDSA를 위치시킨 후 낙하높이를 5, 10, 15cm로 변화시키며 각 높이당 해머를 5회 낙하시켜 시험체를 동적으로 타격하였다. 이때, 시험체는 바닥에 고정시켜 실험을 수행하였다. 다짐시료의 경우, 중앙이 도넛형태로 비어 있는 22N의 추를 몰드 상부에 재하한 상태에서 동적반응실험을 실시하였다. 탄성체와 달리, 낙하높이는 10, 20, 30cm로 변화하여 실험을 수행하였다. 해머 낙하에 의한 동적 에너지는 IDSA에 설치된 가속도계와 변형률계에 각각 가속도 및 전압의 변화를 발생시키고, 동적 데이터로거를 통해 저장되었다.

## IV. 결과 및 분석

4종류의 시험체에서 IDSA로부터 획득된 동적신호를 분석하여, 시험체의 동적 변위 및 하중을 계산한 후, 최종적으로 강성 및 탄성계수를 산정하였다.

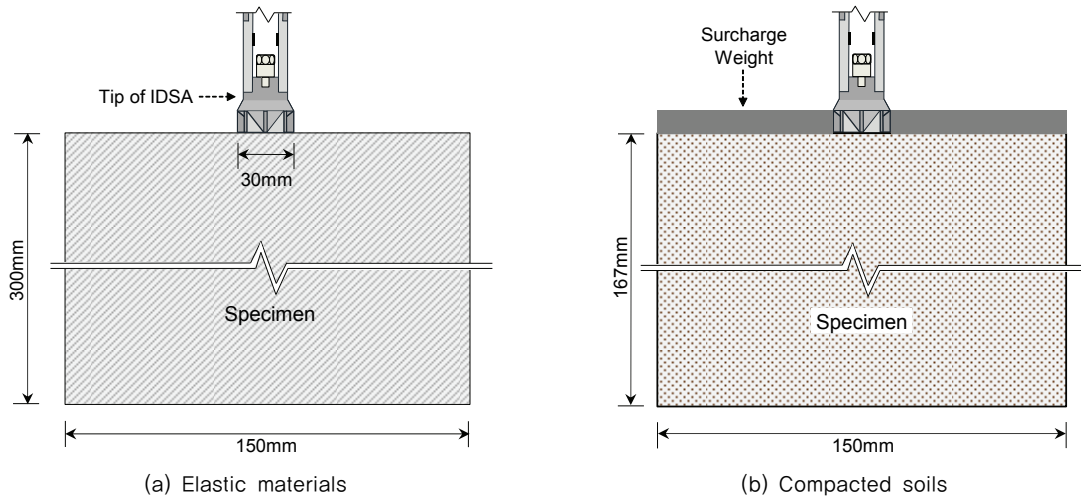


Fig. 4 Test setup for IDSA on different specimens

### 1. 동적신호

동일한 낙하높이에서 5회의 동적반응실험을 수행한 결과, Fig. 5와 같 동적신호를 획득하였다. 해머의 1회 낙하 후, 해머의 반발로부터 연속되는 타격이 측정되었으며, 각 신호의 크기 및 형태, 그리고 지속시간의 형태가 일관적으로 나타났다. 해머의 낙하 및 반발로부터 발생한 연속적인 타격으로 인해 획득된 동적반응 중 해머의 낙하로 인해 발생한 최초의 반응을 제외한 나머지 구간의 신호는 분석에서 제외하였다. 이에 따라, Fig. 6과 같이 최초로 발생한 동적반응을 이용하여 동적 변위 및 하중을 산정하였다.

### 2. 변위 및 하중

동적변위의 산정 시, 저역통과 필터링이 적용된 가속도 신호를 이중적분함으로써 변위를 계산하였으며, 이때 최초의

동적반응 전 변위가 다소 지속적으로 증가 혹은 감소하는 현상이 나타났다. 이는 저역통과 필터링으로는 제거되지 않고 선형적으로 누적되는 오차에 의해 발생하므로, 변위산정 시 최초 반응에 대한 영점보정을 적용하였다. Fig. 7은 경도 90의 우레탄 시험체에서 15cm 낙하높이의 동적반응실험을 통해 획득된 대표적인 가속도신호와 이중적분 및 영점보정이 적용된 변위의 신호양상을 보여준다. 최대변위 및 최대하중은 각 동적신호에서 최저점 및 최고점을 선정하여, 각 낙하높이마다 5회 실험한 결과값들을 평균하여 도출되었다. Fig. 8은 낙하높이에 따른 탄성체의 최대 변위 및 하중, 그리고 지속시간의 평균값의 변화를 나타내었다. 전체적으로, 모든 탄성체에서 낙하높이가 증가할수록 최대 변위 및 하중은 증가하는 양상을 보였다. 최대변위는 경도가 가장 낮은 U-2에서 3.2~5.5mm범위로 가장 크게 발생하였고, 경도가 가장 높은 MC나 일론에서는 0.5~0.8mm정도로 가장 작게 나타났다. 반면, 최

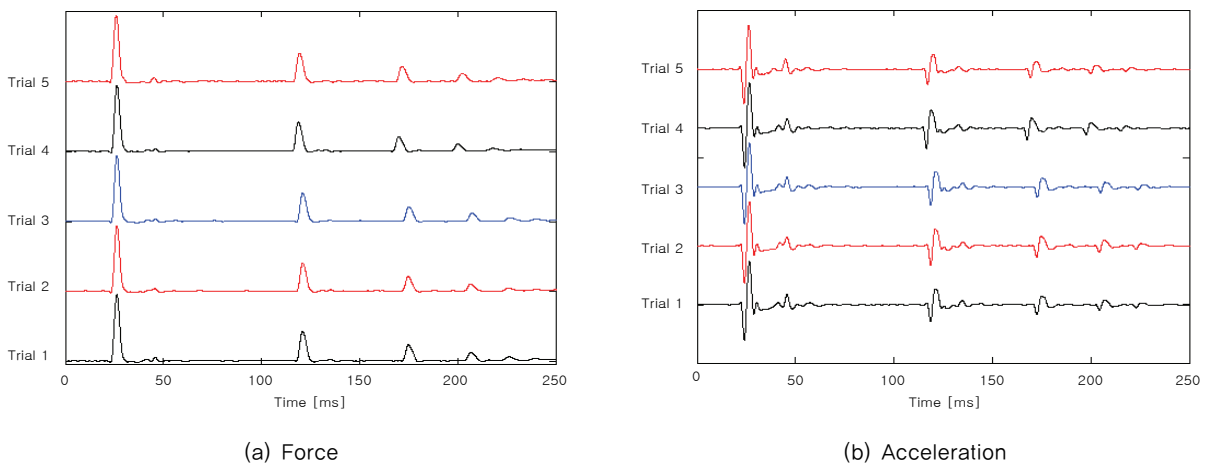


Fig. 5 Typical waveforms obtained for the duration of 250 ms from the IDSA under a hammer impact

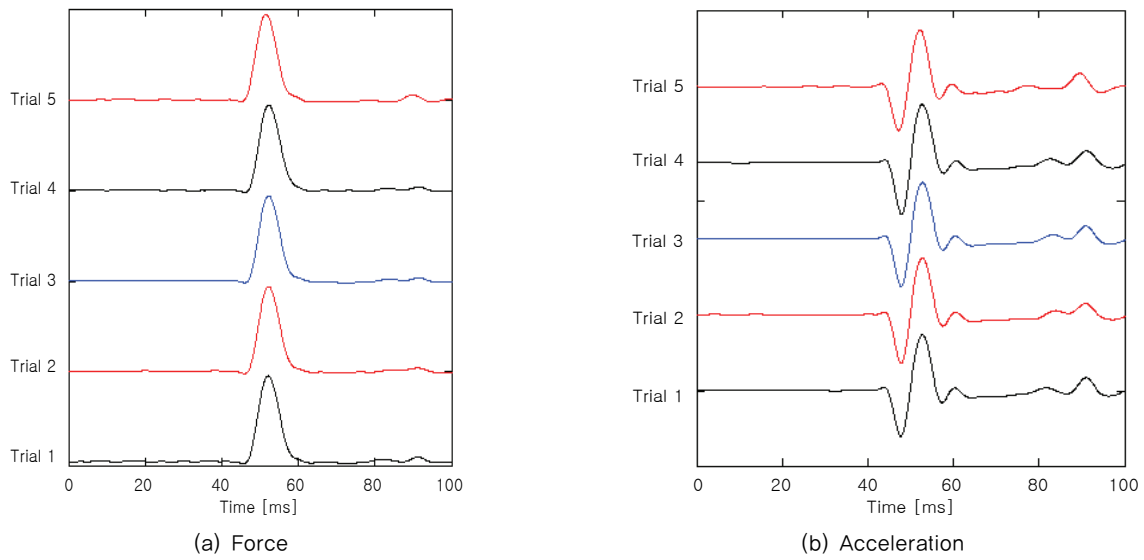


Fig. 6 Typical waveforms obtained for the duration of 100 ms from the IDSA under a hammer impact

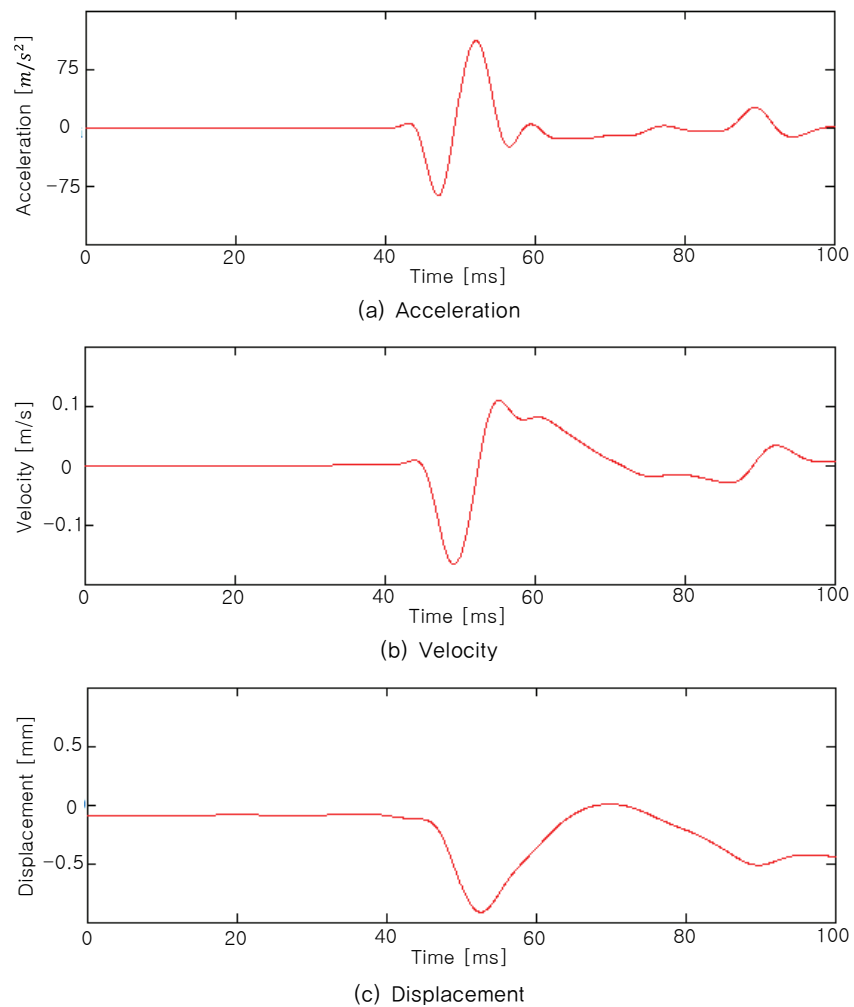
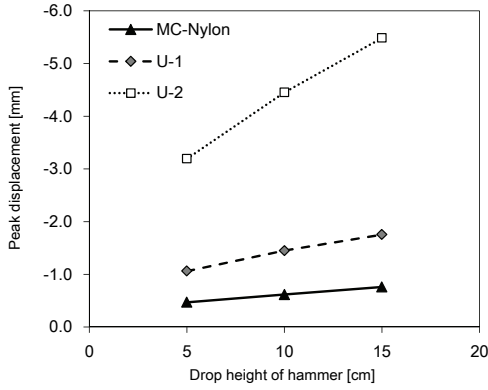


Fig. 7 Calculation of displacement from the measured acceleration

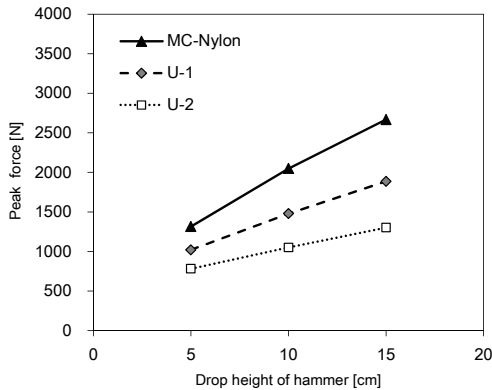
대하중은 MC나일론에서 최대값을 보여주었으며, U-2에서 최소값을 나타내었다. 이는 IDSA로부터 전달된 압축파가 접하고 있는 매질에 의해 반사될 때, 매질의 임피던스에 따라 반사된 파동의 크기가 변화하기 때문인 것으로 판단된다. 그에 비해, 동적반응의 지속시간은 3종류의 탄성체에서 낙하높이가 증가하여도 증가 혹은 감소하는 경향없이 대체로 유지되었다.

U-2에서 동적반응의 지속시간 평균은 약 21ms정도인 반면, U-1과 MC나일론에서는 평균 17.5ms 및 16.5ms의 지속시간을 유지한 것으로 보아, 탄성체의 경도의 크기가 동적반응의 지속시간에도 영향을 주는 것으로 판단된다.

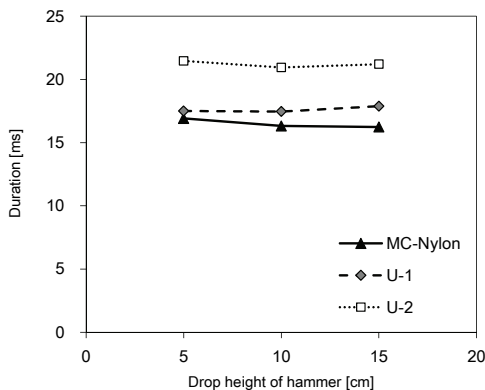
다짐시료에서도 탄성체에서의 마찬가지로 동적반응실험을 실시하여, 실험결과를 Fig. 9에 나타내었다. 낙하높이가 증



(a) Peak displacement

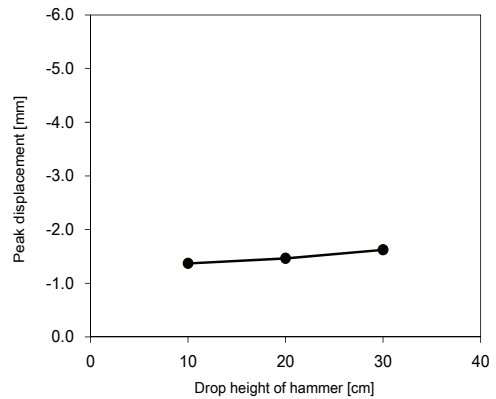


(b) Peak force

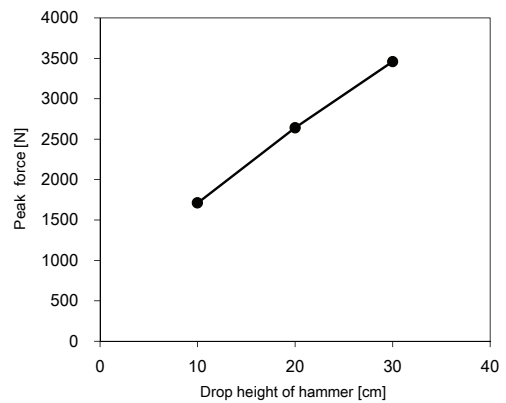


(c) Duration

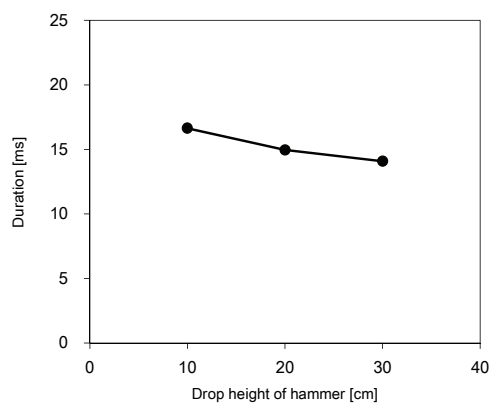
Fig. 8 Results of dynamic analysis according to drop height of hammer at three different elastic materials



(a) Peak displacement



(b) Peak force



(c) Duration

Fig. 9 Results of dynamic analysis according to drop height of hammer at compacted soil

가함에 따라, 최대변위가 다소 증가하였으며, 최대하중의 경우 탄성체와 비교할 때 증가폭이 매우 크게 나타났다. 다짐시료의 최대변위는 낙하높이 10cm에서 U-1 유사하게 -1.4mm정도 나타났으며, 최대하중은 MC나일론과 보다 약간 큰 1700N로 나타났다. 동적반응의 U-1 및 MC나일론과 서로 유사하게 나타났으며, 낙하높이의 증가에 따라 다소 감소하는 경향을 보여주었다. 결국, 동적반응실험에 사용된 시험체의 종류에 따라, 최대 하중 및 변위, 그리고 지속시간이 변화하며, 낙하높이에 따라 변화양상이 다를 수 있음을 확인하였다.

### 3. 강성 및 탄성계수

IDS A를 이용한 동적반응실험에서 시험체의 강성을 산정하기 위하여, 측정된 최대 변위 및 하중을 식(1)에 대입하여 강성을 산정하였다. 3종류의 탄성체에 대하여 재료별 낙하높이에 따른 강성의 변화를 Fig. 10(a)에 도시하였다. 전체적으로, MC나일론의 강성이 약 2,700~3,500N/mm 사이로 가장 크게 나타났고, U-1 및 U-2의 강성이 약 960~1,075N/mm와 235~245N/mm로 작게 나타났다. 또한, 낙하높이가 증가함에 따라 MC나일론의 강성은 증가한 반면, U-1 및 U-2에서는 강성변화가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 낙하높이가 증가할수록 최대 변위와 하중 모두 증가하지만, MC나일론의 경우 상대적으로 최대하중의 증가량이 최대변위의 증가량보다 크나, 우레탄의 경우 최대하중의 증가량이 최대변위의 증가량에 비해 크지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 다짐시료의 경우, Fig. 10(b)와 같이 MC나일론과 유사하게 낙하높이가 증가함에 따라 강성이 1,200N/mm에서 2,100N/mm로 증가하였으며, 이는 MC나일론보다는 작고 U-1의 강성보다는 큰 것으로 나타났다. 참고로, 강으로 제작된 단순보의 경간길이가 약

0.5~0.7m인 경우의 강성은 1,000~3,000N/mm로 보고되었다(Hoffmann, 2002).

각 시험체에서 산정된 강성과 식(2)를 이용하여 전단탄성계수를 계산할 수 있으며, 이때 각 재료별 포와송비는 Table 2와 같이 가정하였다. 최종적으로, 전단탄성계수를 식(3)에 대입함으로써, 낙하높이에 따른 재료별 탄성계수를 산정하여 Fig. 11에 도시하였다. 4종류의 시험체중 MC나일론은 탄성계수가 약 100~130MPa로 가장 컸으며, U-1은 약 30~40MPa, 그리고 U-2는 약 8MPa로 산정되었다. 다짐시료의 탄성계수는 40~80MPa로 산정되었으며, 이는 Kim (2015)이 국내에서 도로 노반으로 사용되는 4종류의 시료를 대상으로 SSG를 이용하여 측정된 탄성계수 결과(20~80MPa)와 유사한 범위에 있으며, Kim et al. (2007)이 반복 평판재하시험에서 획득한 탄성계수와도 범위가 유사한 것으로 나타났다. 또한, Choi et al. (2011)이 29개소 현장에서 LFWD를 이용한 실험을 수행하여 도출한 탄성계수도 유사한 범위에 있었다. 또한, 본 연구에서는 다짐시료에서 압축파 트랜스듀서를 이용하여 탄성계수를 산정하였으며, 그 값이 77MPa로 평가되어 IDS A를 통해 산정한 탄성계수와 유사한 것으로 나타났다. 이처럼 탄성계수 산정 시, 우레탄(U-1 및 U-2)은 해머의 낙하높이에 대한 영향이 미미한 반면, MC나일론 및 다짐시료에서는 낙하높이가 증가할수록 탄성계수가 증가함을 알 수 있다. 이를 통하여 추후 도로 및 철도 노반에 IDS A의 적용 시, 해머의 낙하높이에 따른 강성 및 탄성계수의 변화를 고려해야 할 것으로 판단된다.

Table 2 Poisson's ratio of the tested specimens

MC-Nylon	U-1	U-2	Compacted soil
0.4	0.45	0.5	0.35

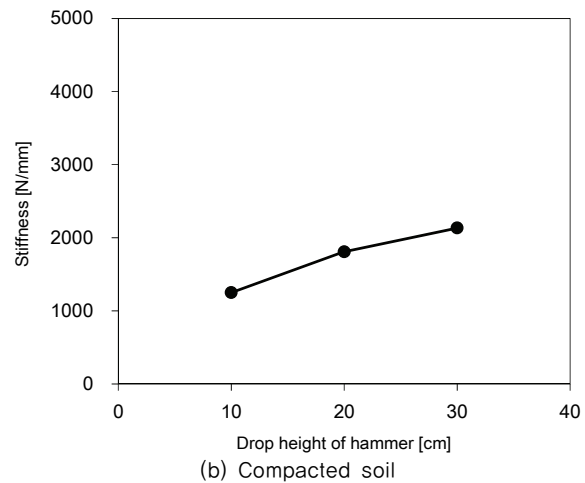
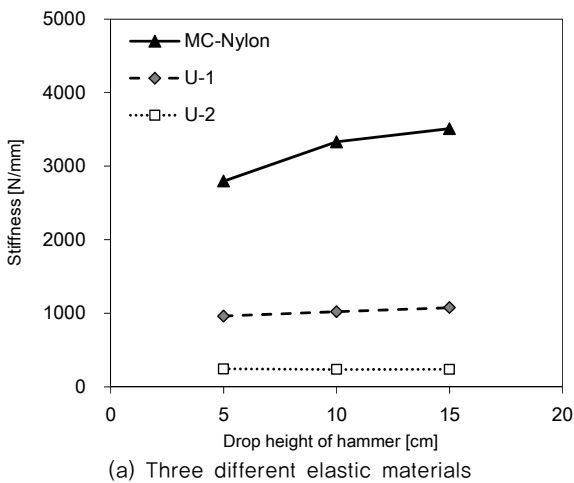


Fig. 10 Stiffness according to drop height of hammer



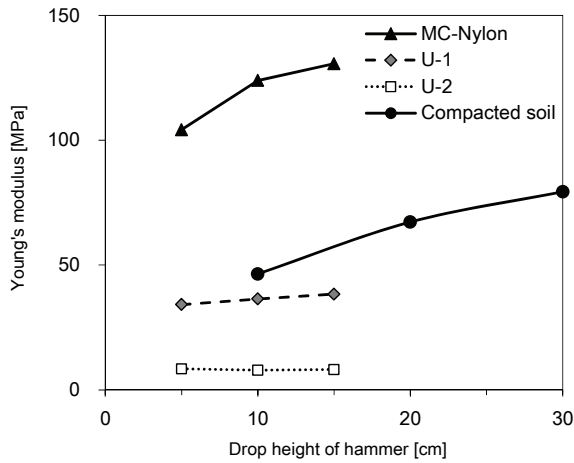


Fig. 11 Young's modulus estimated at four different materials

## V. 결 론

본 연구에서는 도로의 및 철도 노반의 강성특성을 평가하기 위하여 원위치 동적강성 분석기(In-situ Dynamic Stiffness Analyzer, IDSA)를 개발하였으며, 현장적용에 앞서 실내실험을 통하여 개발된 시험기의 성능평가를 수행하였다. IDSA는 선단부에 휘트스톤 브릿지 회로로 구성된 변형률계와 가속도계가 설치되었으며, 해머낙하에 의한 타격 시 작용하는 하중 및 변위를 측정하여 Boussinesq 탄성론에 근거하여 강성 및 탄성계수를 산정할 수 있다. 해머타격 시, 선단부에서 감지되는 동적 하중 및 변위의 신호를 획득하기 위하여 동적 데이터 로거를 연결하였으며, 획득된 동적신호는 저역통과 필터링 및 영점보정을 적용하여 잡음을 제거하였다. MC나일론 및 우레탄으로 제조된 3종류 탄성체와 풍화토로 다져진 시료에서 IDSA를 이용하여 해머의 낙하높이를 변화시켜가며 동적 반응실험을 실시하였다. 후처리 분석 시, 하중보정 및 이중적분을 통하여 최대 변위 및 하중을 도출하였고, 최종적으로는 강성 및 탄성계수를 산정하여 재료별 탄성계수를 비교하였다.

실험결과, 4종류의 시험체 모두 낙하높이가 증가할수록 최대 변위 및 하중은 증가하였다. 탄성체와 다짐시료에서 동일 낙하높이의 결과를 비교 시, 최대변위는 우레탄에서 가장 크고 MC나일론에서 가장 작게 나타났으며, 최대하중의 결과는 최대변위와 반대로 나타났다. 한편, 지속시간은 낙하높이에 크게 영향받지 않는 것으로 나타났으나, 탄성체에서는 경도가 클수록 최대변위 및 지속시간은 작게 측정되고 지속시간은 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 획득된 최대 변위 및 하중을 통해 강성을 산정한 결과, 해머의 낙하높이가 증가함에 따라 MC나일론 및 다짐시료에서는 강성이 증가하였으며, 두

종류의 우레탄에서는 강성변화가 미미하였다. 전체적으로 강성은 경도가 가장 높은 MC나일론에서 크게 나타났으며, 경도가 낮은 우레탄에서 가장 작은 값을 보였다. 최종적으로 다짐시료에서 탄성계수 산정 시, 해머의 낙하높이에 따라 탄성계수가 크게 증가하였으며, 선행연구에서 SSG와 반복 평판재하시험에서 산정된 탄성계수와 유사한 범위에 놓이는 것으로 나타났다. 본 연구에서 수행한 IDSA의 성능평가를 통해, 추후 도로 및 철도 노반의 강성평가를 위한 IDSA의 적용가능성을 예상할 수 있으며, 현장적용 시 해머의 낙하높이에 따른 강성 및 탄성계수의 변화를 고려함으로써 보다 적절한 원위치 노반의 평가가 이뤄질 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2017R1C1B5077072)을 밝히며, 이에 깊이 감사드립니다.

## REFERENCES

1. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2012. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort, D1557.
2. Byun, Y. H., and J. S. Lee, 2013. Instrumented dynamic cone penetrometer corrected with transferred energy into a cone tip: a laboratory study. *Geotechnical Testing Journal* 36(4): 553-542. doi:10.1520/GTJ20120115.
3. Byun, Y. H., H. K. Yoon, Y. S. Kim, S. S. H, and J. S. Lee, 2014. Active layer characterization by instrumented dynamic cone penetrometer in Ny-Alesund, Svalbard. *Cold Regions Science and Technology* 104: 45-53. doi:10.1016/j.coldregions.2014.04.003.
4. Choi, C. Y., S. H. Lee, J. H. Bae, and D. H. Park, 2011. Evaluation of correlation between strain modulus and deformation modulus using cyclic plate loading test and LFW. *Journal of the Korean Geosynthetics Society* 10(3): 33-41 (in Korean).
5. Clayton, C. R. I., 2011. Stiffness at small strain: research and practice. *Géotechnique* 61(1): 5-37. doi:10.1680/geot.2011.61.1.5.
6. Elhakim, A. F., K. Elbaz, and M. I. Amer, 2014. The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction. *HBRC Journal* 10(3): 298-307. doi:

- 10.1016/j.hbrcj.2013.12.003.
7. Fleming, P., M. Frost, and J. Lambert, 2007. Review of lightweight deflectometer for routine in situ assessment of pavement material stiffness. *Journal of the Transportation Research Board* 2004: 80-87. doi:10.3141/2004-09.
  8. Hoffmann, O., 2003. Enhancements and verification tests for portable deflectometers, 5-8. MN/RC-2003-10.
  9. Hong, W. T., C. Y. Choi, Y. J. Lim, and J. S. Lee, 2018. Stiffness characterization of subgrade using crosshole-type dynamic cone penetrometer. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 34(2): 55-63 (in Korean). doi: 10.7843/kgs.2018.34.2.55.
  10. Hong, W. T., S. H. Kang, S. J. Lee, and J. S. Lee, 2015. Development of cone penetrometer for shear wave velocity assessment of track substructures. *Journal of the Korean Society for Railway* 5: 781-791 (in Korean). doi:10.14481/jkges.2015.16.2.45.
  11. Kang, H. B., K. J. Kim, S. K. Park, and J. R. Kim, 2008. A study on the relation between dynamic deflection modulus and in-situ CBR using a portable FWD. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection* 12(2): 149-155 (in Korean).
  12. Kim, D. S., C. Y. Choi, S. J. Kim, J. Y. Yu, and S. C. Yang, 2007. Study on the subgrade reaction modulus (K30) and strain modulus (Ev). *Journal of the Korean Society for Railway* 10(3): 264-270 (in Korean).
  13. Kim, D. S., W. S. Seo, and G. C. Kweon, 2005. Evaluation of field nonlinear modulus of subgrade soils using repetitive static plate bearing load test. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 21(6): 67-79 (in Korean).
  14. Kim, K. S., 2015. Comparison of elastic moduli of subgrade soils using plate loading test, soil stiffness gauge and dynamic cone penetrometer. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 31(3): 63-72 (in Korean). doi: 10.7843/kgs.2015.31.3.63.
  15. Kim, Y. I., J. Y. Kim, J. R. Shim, J. Choi, K. S. Kang, W. J. Baek, and K. I. Lee, 2014. Amechanical properties according to the compaction degree on weathered granite soil using lightweight dynamic cone penetrometer. *Journal of the Korean Geosynthetics Society* 13(3): 21-30 (in Korean). doi:10.12814/jkgss.2014.13.3.021.
  16. Lee, K. S., Y. H. Park, and K. H. Cho, 2015. A study on the application of railway using Pagani cone test. *Journal of the Korean Society for Railway* 2015: 462-468 (in Korean).
  17. Nazzal, M., M. Abu-Farsakh, K. Alshibli, and L. Mohammad, 2004. Evaluating the potential use of a portable LFWD for characterizing pavement layers and subgrades. *Geotechnical Engineering for Transportation Projects* 2004: 915-924. doi:10.1061/40744(154)79.
  18. Sawangsuriya, A., P. J. Bosscher, and T. B. Edil, 2002. Laboratory evaluation of the soil stiffness gauge. *Journal of the Transportation Research Board* 1808(1): 30-37. doi: 10.3141/1808-04.
  19. Seyman, E., 2003. Laboratory evaluation of in-situ tests as potential quality control/quality assurance tools. LSU Master's Theses. 2601.