

# 탄성파를 통한 시료성형방법에 따른 모래 전단거동특성 평가

## Evaluation of the Influence of the Method of Sample Preparation on the Shearing Behavior of Sands using Elastic Waves

유진권<sup>1)</sup> · 박두희<sup>†</sup>  
Jinkwon Yoo · Duhee Park

Received: February 9<sup>th</sup>, 2014; Revised: March 19<sup>th</sup>, 2014; Accepted: April 7<sup>th</sup>, 2014

**ABSTRACT** : For economic and technical reasons, it is difficult to obtain high quality undisturbed cohesionless samples, hence most researchers rely on preparing remolded and reconstituted representative samples of sandy soils. In this study, moist tamping, air pluviation, and dry deposition methods were applied to make remolded samples at similar relative densities. A series of isotropically consolidated drained tests were conducted with accompanied by measured elastic wave velocities in order to evaluate a difference between sample preparation methods and relative densities. For the elastic wave velocity measurements, piezoelectric elements were installed on the top and bottom cap of the triaxial device. The results showed that soil behavior relies on sample preparation methods, and that the trend of shear wave velocity was the same with volumetric strain behavior.

**Keywords** : Moist tamping, Air pluviation, Dry deposition, Triaxial drained test, Shear wave velocity

**요지** : 경제적, 기술적인 이유에서 실내시험을 위한 *in situ* 상태 그대로의 현장 모래 시료를 채취하는 것은 매우 어렵다. 따라서 현장과 유사한 상태의 시료 조성을 위한 다양한 시료 재성형 방법이 제시되었으며, 연구 목적에 따라 적합하다고 판단되는 시료 성형방법이 다양하게 적용되고 있다. 본 논문에서는 모래의 시료 재성형 시 널리 이용되고 있는 습윤다짐법, 건조낙사법, 그리고 건조퇴적법을 적용하여 동일한 상대밀도로 시료를 조성한 후, 일정한 구속압 조건에서 압밀배수전단 시험을 수행하였다. 또한 자체 제작을 통해 시료의 상·하부 캡에 압전소자를 설치하여 압밀 종료 시점과 전단과정에서의 탄성파 속도를 측정함으로써 시료 재성형 방법 및 상대밀도에 따른 오타와 모래에서의 거동 특성 및 전단거동 시의 탄성파 속도의 변화 경향을 분석하였다. 분석 결과, 시료 조성방법에 따라 전단과정에서 모래의 거동에는 차이가 발생할 수 있는 것으로 나타났으며, 전단과정 시 전단파 속도는 체적 변화 양상과 동일한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

**주요어** : 습윤다짐법, 건조낙사법, 건조퇴적법, 배수삼축압축시험, 전단파 속도

## 1. 서 론

실내시험 시 현장 채취 시료의 교란 여부는 삼축압축시험 결과의 정확성에 중대한 영향을 미칠 수 있는 매우 중요한 요소이다. 하지만 점착력이 없는 모래의 경우 현장에서 교란되지 않은 상태로 시료를 채취하기란 쉽지 않다. Yoshimi et al.(1994)에 의해 점착성이 없는 모래에 대해 *freezing* 공법을 적용하여 교란되지 않은 모래 시료를 획득할 수 있는 방법이 제시되었으나 경제적인 측면에서 효율적이지 못한 것으로 나타났다. 따라서 대부분의 경우 모래 시료를 통한 삼축압축 시험 시에는 낙사, 다짐, 그리고 두드림 등의 방법을 적용하여 재성형 된 시료를 사용하는 것이 일반적이다. 일부 연구를 통해 시료의 조성방법에 따라 모래의 강도나 체적변화에 있

어 다른 거동 양상을 보인다는 연구 결과가 제시되기는 하였지만(Juneja & Raghunandan, 2010; Raghunandan et al., 2012) 각각의 시료 재성형 방법을 적용하여 삼축압축시험 시 나타나는 모래의 거동을 규명하거나 시험의 목적 별 적합한 시료 조성방법에 대해서는 연구결과가 제시되지 못하였다.

본 논문에서는 습윤다짐법(*moist tamping method*), 건조낙사법(*air pluviation method*), 그리고 건조퇴적법(*dry deposition method*)을 적용하여 동일한 상대밀도의 시료를 제작한 후 압밀배수전단 시험을 수행하여 전단과정에서 나타나는 거동의 차이를 분석하였다. 이를 위해 북미의 대표적인 표준사인 오타와 모래를 각각의 시료 조성방법 별로 40%~50% 사이의 다양한 상대밀도로 조성하여 포화, 압밀 후 전단 시

1) Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

† Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University (Corresponding Author : dpark@hanyang.ac.kr)

켰으며, 이 과정에서 압밀 종료 시점과 전단과정에서의 탄성과 속도를 측정함으로써 시료 재성형 방법 및 상대밀도에 따른 오타와 모래에서의 거동 특성 및 전단거동 시의 탄성파 속도의 변화 경향을 분석하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 재성형 시료의 조성

점착력이 없는 모래로 삼축압축시험 시 시료의 재성형은 필수불가결한 요소이다. 따라서 재성형된 시료의 균질성은 간과해서는 안 되는 매우 중요한 부분이며 이를 위해 다양한 시료 성형 방법이 제시되어 적용되고 있다. 시료의 재성형 방법은 수분의 포함 여부에 따라 건조와 습윤 상태로 구분할 수 있으며, 시료의 배치 방법에 따라 낙사법(pluviation), 스푸닝(spooning), 퇴적법(deposition), 그리고 플로잉(flowing) 방법으로 구분할 수 있다. 제시된 시료 재성형 방법을 조합하여 다짐, 두드림, 손다짐, 그리고 진동 등의 절차를 통해 목표로 하는 상대밀도(Dr)의 시료를 조성한다.

#### 2.1.1 습윤다짐법

상대적으로 높은 간극비를 갖는 시료 조성에 적용되는 습윤다짐법은 준정적(quasi-static)인 하중을 시료의 각 층에 가해줌으로써 시료를 제작하는 방법이다. 습윤다짐법을 통한 시료의 균질성은 과소다짐법(undercompaction)을 적용하여 확보할 수 있다(Ladd, 1978; Ladd, 1974). 과소 다짐법은 시료 조성 시 하부에 위치한 층을 상부층에 비해 덜 다짐으로써 시료 전체의 균질성을 확보하는 방법이다. Frost & Park(2003)은 image analysis를 통해 습윤다짐법으로 시료 재성형 시 낙사법에 비해 균질성이 다소 떨어진다는 연구 결과를 제안하기도 하였으나 낮은 상대밀도에 대해서도 상대적으로 손쉽게 시료를 조성할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있어 널리 적용되고 있다.

#### 2.1.2 건조낙사법

건조낙사법은 낙사 높이와 질량유량(mass-flow)을 조절함으로써 다양한 초기 간극비를 갖는 시료를 조성하는 방법이다. 낙사법으로 제작한 시료는 다른 재성형 방법으로 성형된 시료에 비해 높은 균일성을 갖는다는 연구결과 또한 발표되었다(Cresswell et al., 1999; Frost & Park, 2003). Vaid & Negussey(1988)는 낙사 높이에 따른 운동에너지의 변화 및 상대밀도의 변화를 Eq. (1)로 표현하였다.

$$ma = mg - V\rho g - C_d\rho A \frac{v^2}{2} \quad (1)$$

여기서  $a$  = 입자의 가속도,  $g$  = 중력가속도,  $V$  = 입자 체적,  $A$  = 입자의 면적,  $v$  = 입자 속도,  $C_d$  = 항력계수(drag coefficient), 그리고  $\rho$ 는 유체의 밀도이다. Eq. (1)에 의해 공기 중 낙사 시 낙사 높이가 증가할수록 시료의 상대밀도는 증가하게 되며, 반면 유체에 낙하 시에는 유체의 영향으로 낙사 높이에 상관없이 종속도는 항상 0.2 cm에서 낙사 시키는 속도로 유지된다고 제안하였다.

#### 2.1.3 건조퇴적법

건조퇴적법은 다른 시료 재성형 방법에 비해 비교적 간단하게 시료의 제작이 가능한 방법으로 목표로 설정한 상대밀도에 따라 시료의 총 질량을 결정한 후, 동일한 양의 시료로 나누어 정해진 부피에 맞게 채워 넣는 방법이다. 층의 구분 없이 연속적으로 몰드를 채워 나가는 건조낙사법과는 달리 층을 이루며 시료를 성형하며, 시료가 균등하게 다져지도록 성형몰드의 주위를 상, 하, 좌, 우 대칭으로 가볍게 두드리며 원하는 상대밀도가 얻어지도록 시료의 높이를 조절한다.

## 2.2 탄성파 측정

탄성파를 통한 흙의 특성 연구는 압전소자가 토질시험에 처음 적용된 이래 여러 실내시험에 다양한 용도로 이용되어 왔다. 특히 지반공학분야에서는 파의 전파특성을 고려하여 체적파 즉 전단파(S-wave)와 압축파(P-wave)가 널리 이용되고 있다. 전단파는 오직 흙 입자로 이루어진 골격(skelton)의 전단강성에 의해 결정되는 특성으로 인해 포화된 지반에서의 지반 특성파악에 선호된다. 반면 압축파는 간극수의 포화상태에 매우 민감하게 반응하기 때문에 흙의 특성파악 보다는 포화 여부를 판단하는데 적용하는 것이 효과적으로 알려져 있다(Cho & Lee, 2002). 특히 전단파의 경우 속도 측정을 통해 전단탄성계수(G)의 산출에 직접적으로 적용이 가능하다(Eq. (2)).

$$G = \rho V_s^2 \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 밀도를 나타내며,  $V_s$ 는 전단파 속도를 의미한다. 지반의 진동이나 내진 설계와 같은 지반의 거동 해석에 있어 매우 유용한 토질 정수인 전단탄성계수는 유효응력, 간극비, 응력이력, 알갱이의 특성 그리고 포화도에 의해 영

향을 받으며 특히 유효응력과 간극비가 가장 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Richart et al., 1970). 또한 전단파 속도의 측정을 통한 지반의 특성 파악은 기존에 널리 수행되고 있는 표준관입시험(SPT)이나 콘관입시험(CPT)과는 달리 지반을 교란시키지 않는 범위 내에서 지반정보의 획득이 가능하다는 큰 장점을 지니고 있어 최근 측정된 전단파 속도를 이용하여 지반정수를 산출하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. (Lee et al., 2013)은 현장에서 획득한 탄성과 속도를 이용하여 기존에 제시되었던 이론식(Wood 방법, Gassmann 방법, Foti 방법)으로 간극비를 도출하고 각 이론식들의 특성을 오차규범(error norm) 방법으로 분석하였으며 Yoon et al.(2010)은 탄성과 측정이 가능한 측정장비(FVRP)의 개발을 통해 부피를 이용하여 산정한 간극비와 Foti 방법을 기반으로 탄성파를 통해 산출한 간극비가 서로 유사한 값을 나타낸다는 것을 증명하였다. 또한 Been & Jefferies(1985), Robertson et al.(1995), Cunning et al.(1995)은 in situ 상태의 간극비와 한계평형상태(critical steady state)에서의 간극비와의 차이를 나타내는 state parameter( $\psi$ ) 개념을 도입하여 측정된 전단파 속도로부터 in situ 상태의 간극비를 예측하였다. 최근에는 오이도미터 압축 시험(oedometric compression test)과 직접 전단 시험(direct shear test)을 통해 전단파 속도, 간극비 그리고 전단강도의 상관관계를 시험적으로 분석하여 현장에서의 전단파 속도를 통해 강도정수를 산정할 수 있는 방법도 제시되었다(Cha & Cho, 2007).

### 3. 시험개요

#### 3.1 시료 조성

본 연구에서는 북미 지역의 대표적인 실험용 표준사인 오타와 모래를 시험을 위한 시료로 사용하였다. Table 1에는 오타와 모래에 대한 기본 물성치를 정리하였으며 오타와 모래에 대한 입도분포곡선은 Fig. 1에 도시하였다. 오타와 모래는 균등계수( $C_u$ )가 1.15, 유효입경( $D_{50}$ )이 0.72 mm, 그

Table 1. Properties of Ottawa sands

Property	Ottawa sand
$G_s$	2.65
$C_u$	1.15
$D_{50}$ (mm)	0.72
$D_{10}$ (mm)	0.65
$e_{max}$	0.742
$e_{min}$	0.502

Note :  $C_u$  is the coefficient of uniformity ( $C_u = D_{60}/D_{10}$ )

리고 비중( $G_s$ )이 2.65인 주로 석영으로 구성된 균질한 모래이다.

삼축압축시험을 위한 시료는 습윤다짐법, 건조낙사법, 건조퇴적법을 적용하여 지름 70 mm, 높이 145 mm로 성형하였다(ASTM D7181). 습윤다짐법의 경우, 오타와 모래의  $e_{max}$ ,  $e_{min}$  값을 이용하여 상대밀도별 시료의 양을 결정한 후 5%의 함수비에 해당하는 공기를 제거한 물(de-aired water)을 혼합하였다. 상대밀도 결정에 적용한 공식은 Eq. (3)과 같다.

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (3)$$

몰드 내부에 동일한 양의 시료로 총 7개의 층으로 나누어 탬퍼로 다짐을 실시하였으며, 다짐을 실시함에 따라 시료 하부층의 상대밀도가 커지는 것을 방지하기 위해 과소다짐법을 적용하였다. 건조낙사법은 시험 전 오븐 건조시킨 오타와 모래를 일정한 높이를 유지하며 0.7mm 직경(질량유량: 6.92 g/sec)의 튜브를 통해 낙사시켜 중간 상태, 조밀한 상태의 상대밀도를 갖는 시료를 각각 제작하였다. 시료의 낙사 높이가 증가할수록 상대밀도가 선형적으로 증가하는 점을 고려하여 사전에 결정된 낙사 높이에 따라 시료를 낙사하였다. 이때 시료는 층을 구분하지 않고 설정된 높이에 이를 때까지 연속적으로 낙사를 수행하였다. 건조퇴적법의 경우, 노건조 시킨 시료를 입구의 직경이 15 mm 되는 깔때기 모양의 용기에 담은 후 시료가 낙하높이 없이 성형 몰드 안에 자연스럽게 퍼지도록 제작하였다. 총 5개의 층으로 동일한 양의 시료를 넣은 후 성형 몰드 주위를 상, 하, 좌, 우 대칭으로 가볍게 두드려 원하는 상대밀도의 시료를 조성하였다. 각각의 재성형 방법으로 조성된 시료에는 10 kPa 미만의 진공압을 가해줌으로써 최소한의 진공압으로 입자의 구조 변화 없이 시료가 자립할 수 있도록 하였다(ASTM D7181). 자립된 시료에는 포화를 돕기 위해 5 kPa 미만의

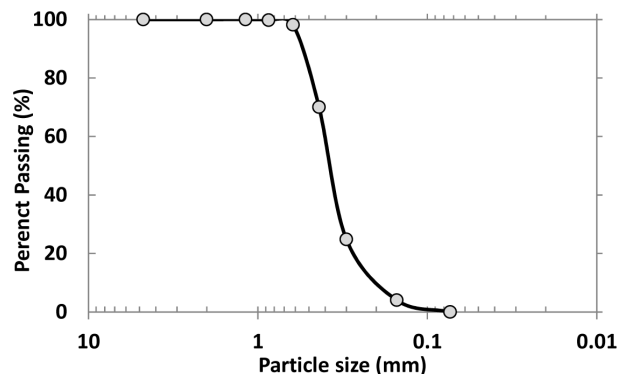


Fig. 1. Grain size distribution curve of Ottawa sand

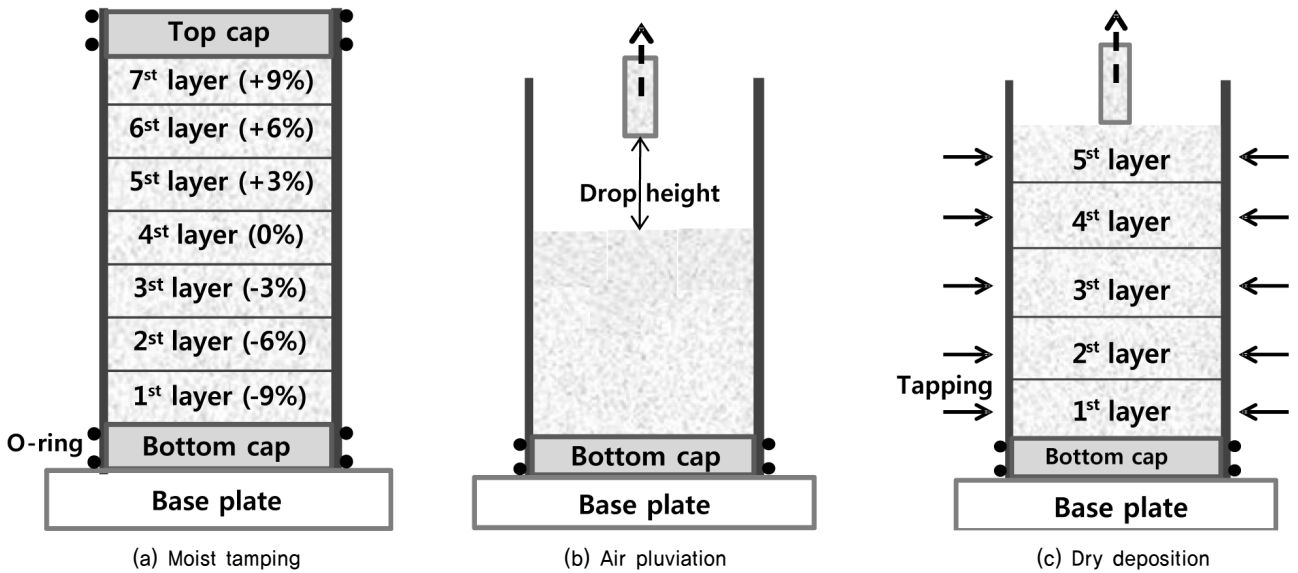


Fig. 2. Sample preparation method

이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 시료 내부로 통과시켜 내부 공기를 이산화탄소로 치환하고, 수두차를 이용하여 공기가 제거된 물을 시료 내부에 순환시키는 과정을 반복 수행하였다. Fig. 2에는 본 논문에서 적용된 습윤다짐법, 건조낙사법, 그리고 건조퇴적법의 제작과정을 도시하였다.

### 3.2 압전소자의 제작 및 측정

탄성과 속도 측정에는 벤더엘리먼트(bender element)와 피에조 디스크 엘리먼트(piezo disc element)와 같은 압전소자(piezoelectric element)가 사용되었다. 전단파 속도 측정에 사용된 벤더엘리먼트는 별도의 차폐나 접지 없이도 전기적 간섭 문제(cross-talk)를 최소화할 수 있는 병렬 타입으로 연결하였다(Lee & Santamarina, 2005). 가로 4 mm, 세로 12 mm의 벤더엘리먼트에 병렬 타입으로 동축 케이블(coaxial cable)을 연결한 후, 벤더엘리먼트의 중심 부(metal shim)와 외부(piezoelectric ceramic plate)를 에폭시로 코팅하여 삼축 압축시험 시 포화로 인한 간극수와의 접촉을 차단하였다. 또한 전도성 도료(conductive paint)로 벤더엘리먼트 전체를 코팅함으로써 전기적 간섭으로 인한 문제를 최소화하였다(Lee & Santamarina, 2005). 압전소자가 설치된 캡은 Fig. 3에 도시하였다.

하부 캡과 상부 캡의 벤더엘리먼트는 각각 송신기(transmitter)와 수신기(receiver)의 역할을 담당하며, 탄성과 측정 시에는 송신기 역할을 하는 하부 벤더엘리먼트에 신호발생기(signal generator, Agilent 3320A)로 3 kHz, 10 V의 sine burst 신호를 발생시켜 상부 캡의 수신 벤더엘리먼트에 전달하였다. 주파수 영역의 컷오프(cut-off) 및 증폭을 위한 필터(filter-

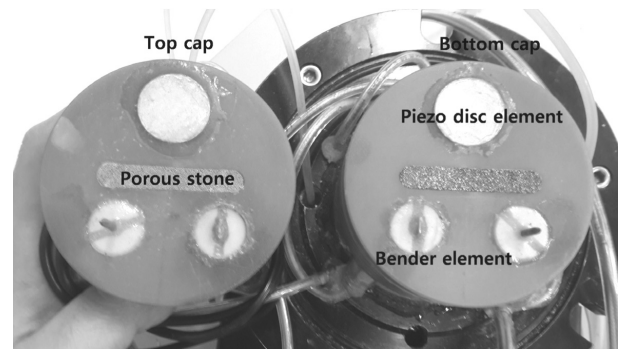


Fig. 3. Installation of Piezoelectric elements on the Top and bottom cap

amplifier)로는 Krohn-hite 3944를 이용하였으며 신호 데이터의 저장에는 오실로스코프(oscilloscope, Tektronix TDS 2014c)를 이용하였다. 이때 보다 정확한 신호의 획득을 위해 총 128회의 스택킹(stack)을 수행하였다. 하부 벤더엘리먼트에서 상부 벤더엘리먼트로의 신호 도달시간은 최초 도착시간(travel time)을 산출하여 Eq. (4)로 탄성과의 속도를 산출하였다.

$$V_s (V_p) = \frac{\text{distance}(\text{between piezoelectric elements})}{\text{Travel time}} = \frac{l}{t} \quad (4)$$

여기서  $l$ (distance)은 하부캡과 상부캡 사이의 압전소자간 거리를 나타내며 기존 공진주시험 결과와의 비교(Dyvik & Madshus, 1985), 전단파의 이동 시간과 시편의 길이 비교(Viggiani & Atkinson, 1995), 그리고 토모그래피 분석(Fernandez, 2000)을 통해 밝혀진 연구 결과를 토대로 두 압전소자의 끝

단간의 거리(tip-to-tip)를 적용하였다.  $t$ (travel time)는 하부의 압전소자로부터 상부의 압전소자까지 전달되는 시간을 나타내며 본 연구에서는 첫 번째 bump가 발생한 이후에 다시 원점을 통과하는 시간을 최초 도달시간으로 선정하는 것이 적당한 기존의 연구(Lee & Santamarina, 2005)를 참고하여 최초 도달시간을 산정하였다.

### 3.3 삼축압축시험

본 연구에서 사용된 삼축압축시험기는 Geocomp Corporation에서 제작된 자동화 삼축압축시험기로써 수직응력을 발생시키고 수직 방향의 변위를 측정하는 load track과 cell pressure, sample pressure를 컨트롤하는 2개의 flow track으로 구성되어있다(Fig. 4). 모든 시험과정은 load track과 flow track에 연결된 컴퓨터를 통하여 모니터링되고 시험 전 설정된 조건에 의해 시험이 진행된다. 시험에 사용된 모든 시료는 일정한 유효응력을 유지하면서 배압(back pressure)을 20 kPa 단위로 최대 600 kPa까지 증가시켜 포화시켰으며, 이때 Skempton(1954)의 간극수압계수 B값이 0.95 이상의 수치에 도달하였을 때를 완전히 포화된 것으로 간주하였다. B값은 0에서 1 사이의 수치를 갖는 것으로 알려져 있으며 시료가 완전 포화상태(fully saturated)에 가까워질수록 1에 가까운 값을 나타낸다. 압밀 시에는 300 kPa의 일정한 유효응력( $\sigma'$ )을 등방조건(isotropic)으로 가하였으며 압밀이 종료되었다고 판단되면 탄성과 속도를 측정 후 전단과정을 수행하였다. 전단은 배수 조건하에서 축방향 변형률( $\epsilon_a$ )이 0.1 %/min이 되도록 strain control을 통하여 수행되었다. 총 8회의 압밀배수(Consolidated Isotropic Drained test, CID) 시험이 수행되었으며, Table 2에는 본 연구에서 수행된 시험 조건을 matrix 형태로 나타내었다.

시험이 종료된 후에는 시험에 사용되었던 시료를 수거하여 오븐 건조(oven dry) 후 중량을 측정하여 상대밀도를 재확인하였다.

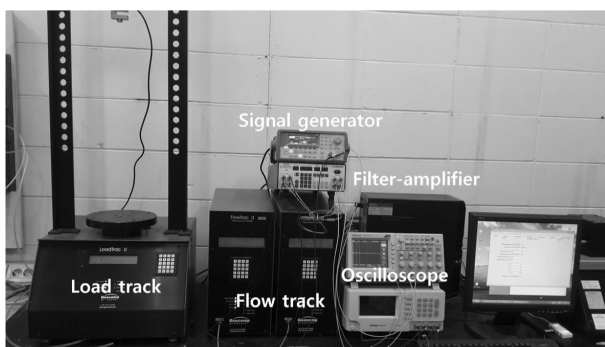


Fig. 4. Triaxial and shear wave measurement test setup

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 시료 조성방법에 따른 흙의 거동

습윤다짐법, 건조낙사법, 그리고 건조퇴적법으로 상대밀도별 시료를 조성하여 압밀배수전단시험을 수행하였다. 전절에 서술한 바와 같이 습윤다짐법은 상대 밀도 34 %, 40 %, 46 %, 건조낙사법의 경우 상대 밀도 40 %, 47 %, 60 %에 대해서 시험을 수행하였으며 건조 퇴적법은 47 %, 60 %에 대해서 시험을 각각 수행하였다. 건조낙사법과 건조퇴적법의 경우 일정 수준 이하의 상대밀도에 대해서는 시료 조성이 어려운 점을 고려하여 3가지 방법 모두로 시료 조성이 용이한 40~50 %의 상대밀도에 대해 시료를 조성하여 비교·분석하였다. Fig. 5에는 압밀배수전단시험으로 시험으로 산출된 응력-변형률( $\epsilon_a$ ) 곡선을 도시하였다.

시험 결과, 각각의 시료 조성방법으로 시료 조성 시 동일한 상대밀도에서도 전단 시 흙의 거동이 다르게 나타났다. 건조낙사법과 건조퇴적법은 60 %의 동일한 상대밀도에서 응력 최대값(파괴점)의 차이가 약 4.9 %로 상대적으로 작게 나타났으며 응력-변형률 곡선의 경향 또한 유사하게 나타났다. 이때 발생한 파괴점에서의 최대 응력 차이는 시료 조성 시 일정한 높이에서 연속적으로 시료를 낙사시키는 건조낙사법과는 달리 건조퇴적법에서는 층을 나누어 몰드의 측면

Table 2. Testing matrix in this study

Sample preparation method	Relative density (Dr) [%]	Confining pressure [kPa]
Moist tamping	34	300
	40	
	46	
Air pluviation	40	300
	47	
	60	
Dry deposition	47	300
	60	

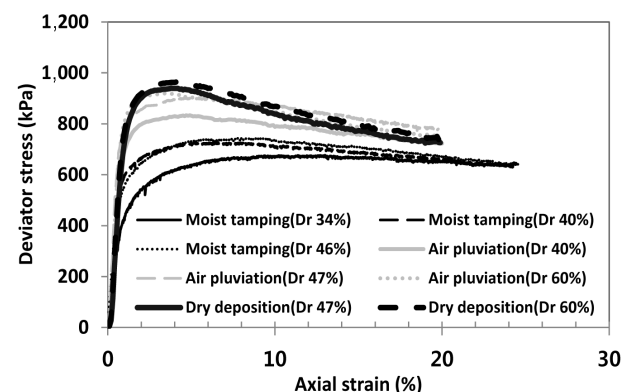
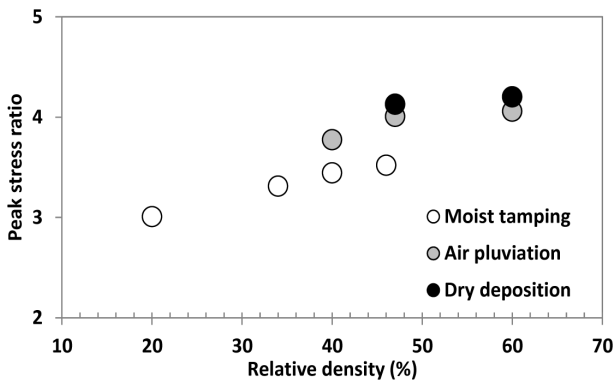


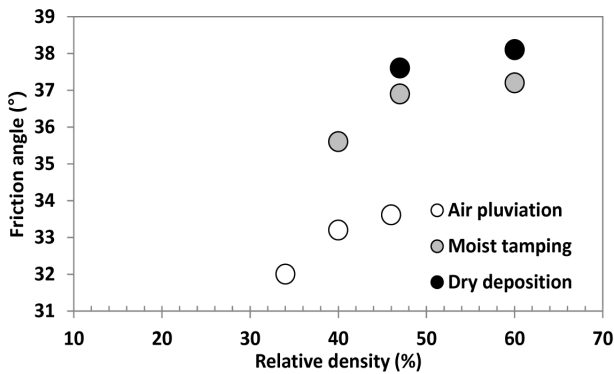
Fig. 5. Stress - strain( $\epsilon_a$ ) curve measured from CD tests

에서 태핑을 통해 다짐을 실시하기 때문으로 판단된다. 반면 습윤다짐법은 이와는 달리 응력의 최대점이 명확하게 나타나지 않는 느슨한 흙의 거동을 나타냈으며 상대밀도 40%에서 건조낙사법보다 최대 응력(파괴점)의 수치가 약 21% 작게 산출되었다. 마찬가지로 건조퇴적법과 비교하여도 상대적으로 작은 최대 응력을 나타냈다. 이와 같은 시료의 상태별 강도의 차이는 각각의 시험에서 파괴 시의 최대 응력비 및 내부 마찰각을 산출하여 비교해보면 더욱 명확하게 확인할 수 있다. Fig. 6에는 각각의 시험으로 산출된 응력비-변형률 곡선과 파괴 시의 최대 응력비 및 내부 마찰각을 도시하였다. 상대밀도별 파괴 시의 최대 응력비를 비교해 보면 건조낙사법과 건조퇴적법이 유사한 수치를 나타낸 반면 습윤다짐법으로 제작된 시료는 상대적으로 작은 최대 응력비를 가지는 것으로 나타났다. 이는 시료 제작 시 간극 사이에 수분이 존재하기 때문에 다짐을 실시하여도 건조한 상태로 시료를 제작하는 낙사법과 퇴적법에 비해 작은 응력이 산출되는 것으로 판단된다. 따라서 일반적으로 느슨한 시료 제작 시 널리 사용되는 습윤다짐법이 실제 강도보다 과소 예측될 수 있음을 알 수 있으며, 습윤다짐법을 적용하여 실내 시험을 수행할 시에는 이를 고려하여 강도를 예측할 필요가 있다고 판단된다.

본 시험에서 예측된 마찰각의 정확성을 평가하기 위하여



(a) Peak stress ratio at failure



(b) Friction angle

Fig. 6. Stress ratio and friction angle measured from CD tests

기존 연구에서 제안된 값과 비교하였다. 상대밀도와 마찰각의 관계를 도출하기 위하여 Terzaghi & Peck(1948)에 제시된 (N1)60과 마찰각의 관계를 이용하였으며 이를 Cubrinovski & Ishihara(2001)가 제안한 Eq. (5)를 사용하여 상대밀도를 계산하였다.

$$N = \frac{9D_r^2}{(e_{max} - e_{min})^{1.7}} \left( \frac{\sigma'_v}{98} \right)^{1/2} \quad (5)$$

여기서  $\sigma'_v$ 는 유효수직응력이며 단위는 kPa이다. Cubrinovski & Ishihara(2001)의 식은 지반동결공법으로부터 획득된 양질의 비교란 시료를 사용하여 도출되었으므로 신뢰도가 기존의 식에 비하여 높을 것으로 판단되어 사용되었다.

Fig. 7에는 본 연구에서 계산된 상대밀도-마찰각 상관관계와 Cubrinovski & Ishihara(2001)의 자료를 통하여 산정된 관계를 비교하였다. Cubrinovski & Ishihara(2001)의 관계식을 적용할 경우, 상대밀도와 마찰각간의 관계가 비선형인 것을 확인할 수 있다. 상대밀도 30%의 경우 습윤다짐법으로 조성된 시료는 Cubrinovski & Ishihara(2001)의 관계식과 잘 일치하는 반면 이보다 큰 상대밀도에서는 크게 과소예측하는 것으로 나타났다. 건조낙사 및 건조퇴적법의 결과는 50%까지 Cubrinovski & Ishihara(2001)와 유사한 반면 상대밀도 60%는 건조퇴적법이 가장 유사한 것으로 나타났다. 물론 Cubrinovski & Ishihara(2001)의 관계식으로부터 계산된 결과가 정해는 아니지만, 이는 시료조성법간의 상대적 차이와 각각의 적절성을 평가하기 위한 의미 있는 단서를 제공한다고 판단된다. 결과적으로 상대밀도 40% 미만의 느슨한 사질토는 습윤다짐법이 적절하며 상대밀도 50% 이상의 사질토는 건조퇴적법을 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

Fig. 8에는 전단과정 시 발생하는 체적 변화를 도시하였

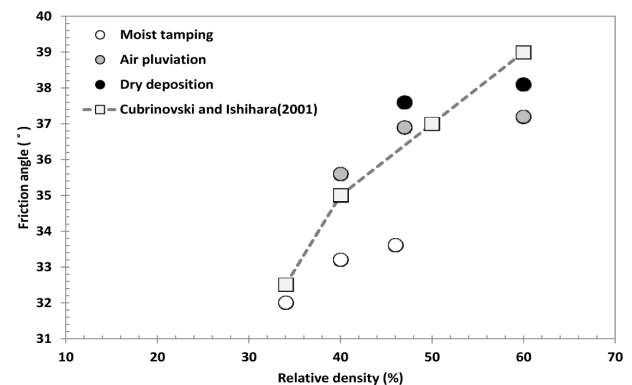


Fig. 7. Comparison between the measured and recommended friction angles of Cubrinovski & Ishihara (2001)

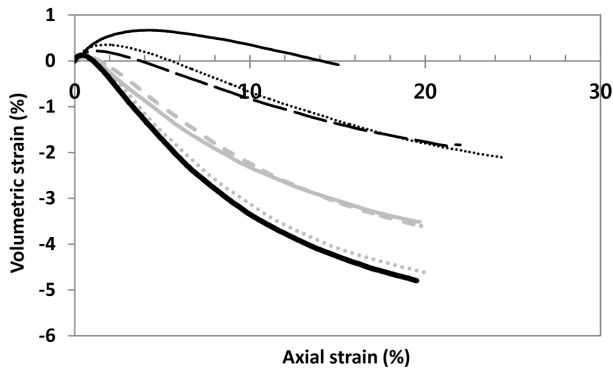


Fig. 8. Volumetric strain – strain curve measured from CD tests

다. 앞서 응력-변형률, 응력비-변형률 곡선과 마찬가지로 습윤다짐법으로 시료 제작 시 체적 변화에 있어서도 건조퇴적법 및 건조낙사법과 상이한 거동을 보였다. 변형률이 커질수록 시료가 팽창되기는 하지만 체적 변형의 크기와 압축에서 팽창으로 거동이 변화하는 변형률에서는 큰 차이를 나타내었다. 건조낙사법과 건조퇴적법을 적용하였을 경우, 시료는 초반 소폭의 압축 거동을 나타내었으며 상대밀도에 따라 차이는 있지만 1~2%의 축변형률에서 압축에서 팽창으로 체적 변화가 발생하는 것으로 나타났다. 하지만 습윤다짐법의 경우에는 이와는 다른 거동을 나타냈다. 동일한 상대밀도로 시료가 제작되었음에도 불구하고 압축에서 팽창으로 체적 변화가 발생하는 시점이 건조낙사법이나 건조퇴적법에 비해 상대적으로 큰 축변형률에서 발생하였으며 시료의 압축 또한 상대적으로 크게 발생하였다.

#### 4.2 시료 조성방법에 따른 전단파 특성

전 절에 서술한 바와 같이 본 연구에서는 압밀배수전단 시험을 수행함과 동시에 압밀 종료 시점과 전단 진행과정에서의 전단파 속도를 측정하였다. 상부 캡과 하부 캡에 설치된 벤더엘리먼트를 통해 측정이 이루어졌으며 압밀 종료 시점에서 시료 조성방법별 상대밀도에 따른 전단파 속도의 측정 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 10에는 전단이 진행됨에 따라 전단파 속도가 변화하는 wave trace를 도시하였다.

Fig. 9의 결과에 나타난 바와 같이 전단파 속도는 간극비가 작아질수록 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 상대밀도 증가로 인한 간극비의 감소가 입자간의 접촉력을 증가시켜 상대적인 전단파 속도의 증가로 나타난 결과이다. Fig. 11에는 전단 과정에서의 축차응력-변형률, 체적 변화-변형률, 그리고 전단파 속도-변형률 곡선을 도시하였다. 배수전단시험을 수행한 모든 시료에서 전단으로 인한 하중이 증가할수록 초반에는 전단파 속도가 증가하는 경향을 나타냈으며 최고점에 도달한 이후에는 변형률이 증가 할수록 전단파 속도

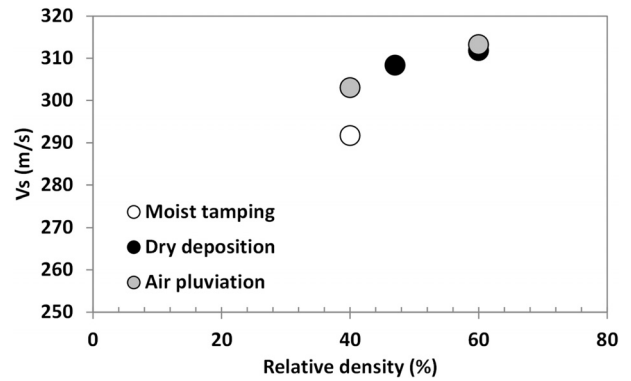


Fig. 9. Shear wave velocity at the end of the consolidation

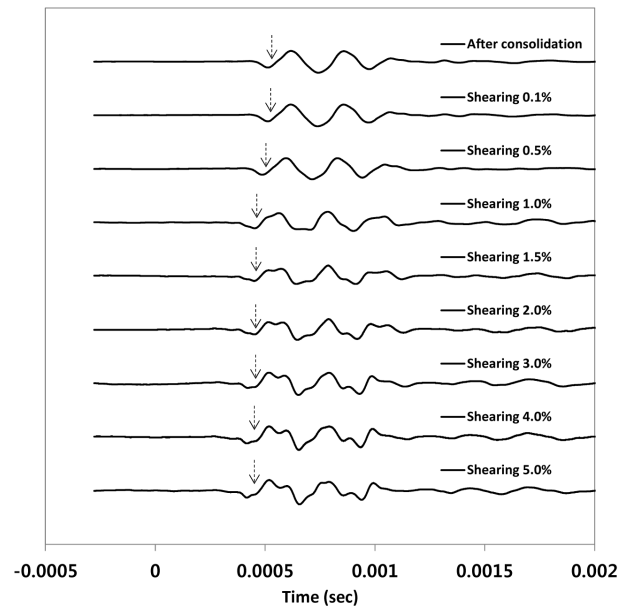
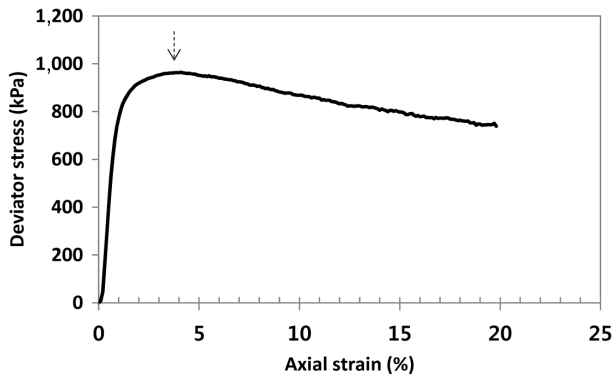


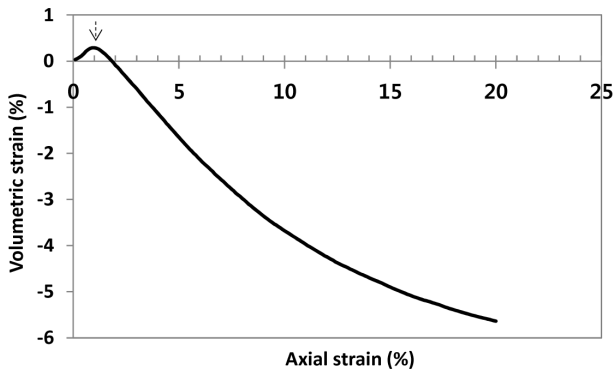
Fig. 10. Wave trace during shear phase (Dry deposition : Dr 60 %)

가 점차 감소하는 모습을 보였다. 이는 전단 시 발생하는 축차응력의 양상과 유사한 경향을 나타냈지만 전단파 속도가 최고점에 도달하는 변형률과 축차응력이 최대점에 도달하는 변형률에서는 차이를 보였다. 실제 본 연구에서 수행한 모든 배수전단시험에서 전단파 속도가 최대치로 산출되는 지점이 축차응력이 최대로 산출되는 파괴 시의 변형률보다 앞서 나타나는 경향을 보였다. 이를 통해 실제 흙의 최대 강도는 압축이 최대로 발생한 지점이 아닌 입자들의 재배열 이후에 발현된다는 것을 알 수 있다. 시험 결과, 전단파 속도는 체적 변화의 양상에 따라 변화하였으며 체적이 최대로 압축되는 변형률에서 전단파 속도가 가장 크게 산출되었다.

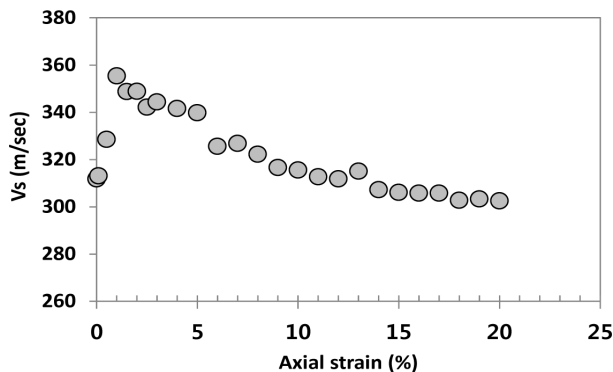
달리 말하면 체적이 압축되는 구간에서는 전단파 속도가 증가하고 팽창이 발생하는 구간에서는 전단파 속도가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 배수전단과정에서의 체적 변화로 인해 전단파 속도에 영향을 주는 입자들간의 접촉력 또한 변화했기 때문으로 판단된다.



(a) Deviator stress-strain curve



(b) Volumetric strain-strain curve



(c) Shear wave velocity-strain curve

Fig. 11. Results from CID test during shear phase  
(Dry deposition : Dr 60 %)

를 통해 시료 재성형 방법 및 상대밀도에 따른 오타와 모래에서의 거동 특성 및 전단거동 시의 전단파 속도의 변화 경향을 분석하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 실내시험 시 널리 적용되고 있는 습윤다짐법, 건조낙사법, 그리고 건조퇴적법은 동일한 초기 간극비로 시료가 조성되더라도 전단 시 흙의 거동에는 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 건조퇴적법이 건조낙사법에 비해 태핑으로 인한 다짐으로 파괴 시 다소 높은 축차응력을 보였으며 습윤다짐법은 상대적으로 흙의 강도를 과소 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 지반동결법으로 추출된 시료로부터 도출된 경험식과 위의 시료 조성법으로부터 계산된 마찰각을 비교한 결과, 습윤다짐법은 40 % 미만의 상대밀도의 사질토에는 적절한 반면, 그 이상의 상대밀도에서는 마찰각을 과소예측하는 것으로 나타났다. 건조낙사법은 60 % 미만의 상대밀도에서는 적절하며 60 % 이상에서는 건조퇴적법이 적절한 것으로 나타났다.
- (2) 전단과정 시 전단파 속도의 측정 결과 전단파 속도는 체적 변화와 양상과 동일한 경향을 나타냈다. 시료가 최대로 압축된 변형률에서의 전단파 속도가 가장 크게 산출되었으며 시료의 체적 변화에 따라 시료가 팽창되면 전단파 속도가 감소하는 경향을 보였다. 또한 본 연구에서 수행한 모든 배수 전단 시험에서 전단파 속도가 최대치로 산출되는 지점이 파괴 시 축차응력이 최대로 산출되는 변형률보다 앞서 나타났다. 이는 실제 흙의 최대 강도가 압축이 최대로 발생한 지점이 아닌 입자들의 재배열 이후 발견되는 것으로 판단된다.
- (3) 따라서 시험 목적에 맞는 시료 재성형 방법이 적절히 적용되어야 할 것으로 판단되며, 전단 시 전단파 속도의 변화 경향을 통해 지반의 파괴 시점을 사전 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 모래를 통한 실내 시험 시 적용되는 시료 성형방법에 따른 흙의 거동특성 및 전단파 속도의 특성을 분석하였다. 이를 위해 시료 재성형 시 폭 넓게 적용되고 있는 습윤다짐법, 건조낙사법, 그리고 건조퇴적법으로 각각 시료를 조성한 후 압밀배수전단시험을 수행하였다. 각각의 시료 조성방법의 적용 가능 범위를 고려하여 상대밀도 40~50 % 사이의 다양한 상대밀도로 시료를 조성하였다. 이 과정에서 상부 캡과 하부 캡에 벤더엘리먼트를 설치하여 압밀 종료 시점과 전단 과정에서의 전단파 속도를 측정하였으며 이

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(과제#11기술혁신E02)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

1. Been, K. and Jefferies, M. (1985), State parameter for sands, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences



- and Geomechanics Abstracts: Elsevier Science, Vol. 22, No. 6, pp. 198.
2. Cha, M. and Cho, G. C. (2007), Shear strength estimation of sandy soils using shear wave velocity, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 30, No. 6, pp. 484-495.
  3. Cho, K. C. and Lee, I. M. (2002), Soil properties in relation to elastic wave, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 18, No. 6, pp. 83-101 (in Korean).
  4. Cresswell, A., Barton, M. E. and Brown, R. (1999), Determining the maximum density of sands by pluviation, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 22, No. 4, pp. 324-328.
  5. Cubrinovski, M. and Ishihara, K. (2001), Correlation between penetration resistance and relative density of sandy soils, 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, Turkey, pp. 393-396.
  6. Cunning, J., Robertson, P. and Segoo, D. (1995), Shear wave velocity to evaluate in situ state of cohesionless soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, No. 5, pp. 848-858.
  7. Dyvik, R. and Madshus, C. (1985), Laboratory measurements of  $G_{max}$  using bender elements, *Proceedings of the ASCE Convention in Detroit, Michigan, USA*, pp. 186-196.
  8. Fernandez, A. L. (2000), Tomographic imaging the state of stress, Ph. D dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta. pp. 298.
  9. Frost, J. and Park, J. Y. (2003), A critical assessment of the moist tamping technique, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 26, No. 1, pp. 57-70.
  10. Juneja, A. and Raghunandan, M. (2010), Effect of sample preparation on strength of sands, *Indian Geotechnical Conference, Mumbai, India*, pp. 327-330.
  11. Ladd, R. S. (1974), Specimen preparation and liquefaction of sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division*, Vol. 100, No. 10, pp. 118-184.
  12. Ladd, R. S. (1978), Preparing test specimens using undercompaction, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 16-23.
  13. Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2005), Bender elements: performance and signal interpretation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 9, pp. 1063-1070.
  14. Lee, J. S., Yoon, S. M., Park, C. H. and Yoon, H. K. (2013), A study of theoretical methods for estimating void ratio based on the elastic wave velocities, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 2, pp. 35-45 (in Korean).
  15. Raghunandan, M., Juneja, A. and Hsiung, B. (2012), Preparation of reconstituted sand samples in the laboratory, *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 125-131.
  16. Richart, F. E., Hall, J. R. and Woods, R. D. (1970), *Vibrations of soils and foundations*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. pp. 414.
  17. Robertson, P., Sasitharan, S., Cunning, J. and Segoo, D. (1995), Shear-wave velocity to evaluate in-situ state of Ottawa sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No. 3, pp. 262-273.
  18. Skempton, A. (1954), The pore-pressure coefficients A and B, *Geotechnique*, Vol. 4, No. 4, pp. 143-147.
  19. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1948), *Soil mechanics in engineering practice*, J. Wiley, New York. pp. 150.
  20. Vaid, Y. and Negussey, D. (1988), Preparation of reconstituted sand specimens, *Advanced triaxial testing of soil and rock*, ASTM STP, Vol. 977, pp. 405-417.
  21. Viggiani, G. and Atkinson, J. (1995), Interpretation of bender element tests, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol. 32, No. 8, pp. 373A.
  22. Yoon, H. K., Kim, D. H., Lee, W. J. and Lee, J. S. (2010), Field elastic wave and electrical resistivity penetrometer for evaluation of elastic moduli and void ratio, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers C*, Vol. 30, No. 2C, pp. 85-93 (in Korean).
  23. Yoshimi, Y., Tokimatsu, J. and Ohara, A. (1994), In situ liquefaction resistance of clean sands over a wide density range, *Geotechnique*, Vol. 44, No. 3, pp. 479-494.