

압축파와 전단파를 이용한 불포화토의 간극비 산정

Void Ratio Evaluation of Unsaturated Soils by Compressional and Shear Waves

변 용 훈 ¹	Byun, Yong-Hoon	조 세 현 ²	Cho, Se-Hyun
윤 형 구 ³	Yoon, Hyung-Koo	추 연 옥 ⁴	Choo, Yun-Wook
김 동 수 ⁵	Kim, Dong-Su	이 종 섭 ⁶	Lee, Jong-Sub

Abstract

Soils are commonly unsaturated in the near surface. The stiffness of soils is affected by the amount of air and water. The objective of this study is to evaluate the porosity of the unsaturated soils by using the elastic waves including compressional and shear waves. The elastic waves are measured at different degrees of saturation by controlling the matric suction. Thus, the unsaturated soils are characterized at different levels of the matric suction. Shear and compressional waves are measured by using the bender elements and the piezo disk elements, respectively. Both transducers are installed on the walls of the rectangular cell. The unsaturated soils are prepared by using uniform size sands and silts. Test results show that both compressional and shear wave velocities change according to the matric suction. The elastic modulus, the shear modulus, and the Poisson's ratio are estimated based on the measured elastic wave velocities. In addition, the void ratio of the unsaturated soils estimated using elastic wave velocities matches well with the volume based void ratio. This study demonstrates that the elastic waves can be effectively used for the characterization of unsaturated soils.

요 지

지표 근처의 지반은 대부분이 불포화 상태로 이루어진다. 이러한 불포화토의 강성은 지반에 존재하는 물과 공기의 양에 영향을 받게 된다. 본 연구의 목적은 전단파와 압축파 신호를 이용하여, 불포화토가 가지는 특성을 파악하는 것이다. 인위적으로 지표 근처의 불포화토를 조성하기 위해 압력관 추출시험기를 사용하였으며, 모관흡수력 조절을 통해 포화도를 변화시키면서 각 포화단계에 따른 탄성파를 측정하였다. 전단파 속도의 측정을 위해 벤더엘리먼트가 사용되었고, 압축파 속도의 측정을 위해서 디스크엘리먼트가 사용되었다. 각각의 트랜스듀서는 실험을 위해 제작된 사각형의 구속셀 안쪽에 설치되었다. 균질한 크기의 모래시료와 세립분을 이용하여 불포화토를 조성하였다. 실험을 통해 모관흡수력 변화에 따른 시료의 포화도 변화를 관찰하고, 각 포화단계에 따른 전단파 속도와 압축파 속도를 산정하였다. 또한, 측정된 탄성파 속도를 바탕으로 탄성계수, 전단탄성계수 그리고 포아송비를 추정하였다. 탄성파를 이용하여 산정한 간극비와 부피측정에 근거한 간극비가 거의 유사한 것으로 나타났다. 본 논문에서 제시한 불포화토

1 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 수료 (Ph. D. Candidate, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University)
 2 비희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University)
 3 정희원, 대전대학교 지반방재공학과 조교수 (Assistant Professor, Department of Geotechnical Disaster Prevention Engineering, Deajeon University)
 4 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수 (Research Professor, Department of civil and Environmental Engineering, KAIST)
 5 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Professor, Department of civil and Environmental Engineering, KAIST)
 6 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Professor, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University, Tel: +82-2-3290-3325, Fax: +82-2-3290-3838, jongsub@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

의 각 포화단계에 따른 탄성과 속도의 측정실험은 지표 근처의 불포화토가 지니는 특성을 파악하기 위한 매우 효과적인 방법이 될 수 있음을 보여준다.

Keywords : Degree of saturation, Elastic wave velocity, Matric suction, Unsaturated soils, Void ratio

1. 서론

지반구조물의 설계 시 침투 및 안정성 해석은 포화토를 가정한 상태에서 대부분 이루어져 왔다. 이는 포화된 상태에서의 구조물 설계가 불포화 상태에 비해 안전측이고, 불포화토의 연구에 소모되는 많은 시간과 비용에 기인한다. 하지만 물-공기-흙으로 이루어진 불포화토의 해석은 물-흙으로만 이루어진 포화토와 그 해석이 상이하기 때문에 지반의 해석 시 포화도를 고려한 불포화토의 안정성 해석이 요구되어 왔다. 국내외에서는 1970년대부터 선행연구자들에 의해 불포화토의 해석이 활발히 진행되어 오고 있다(Fredlund et al., 1978; Fredlund and Xing, 1994; Vanapalli et al., 1996; Kim et al., 2003). 기본적으로, 불포화토의 해석은 포화된 상태의 지반이 건조해짐에 따라 지반의 체적 함수비는 감소하게 되고, 이때 토사의 모관흡수력(Matric suction)은 증가하는 현상에 근거하고 있다(Fredlund and Rahardjo, 1993). 우리나라의 경우, 댐이나 교량 등의 토목공사가 많이 시행되며, 이러한 지역의 지반은 대부분 불포화 상태로 존재하고 있기 때문에, 불포화토의 연구는 지반공학분야에서 상당히 중요한 주제로 여겨진다.

불포화토의 해석에 앞서, 대상지반의 토질 및 강도특성의 파악은 반드시 선행되어야 하며, 강도 및 체적변화와 관련이 있는 지반의 물성치와 간극비 등의 정확한 산정이 요구된다(Yoon et al., 2010). 이러한 지반의 물성치 탐사를 위해 사용되는 방법 중 비파괴 탐사는 도심지 내 소음공해를 줄이며, 비교란된 시료를 이용한 정확한 설계상수를 산정을 위해 다양하게 적용되고 있다. 벤더엘리먼트와 디스크엘리먼트를 이용한 지반조사기법은 선행연구에 의해 그 신뢰성이 입증되었으며(Lee and Lee, 2006; Lee and Santamarina, 2005; Yoon et al., 2010), 이를 이용하여 대상지반의 전단파 및 압축파 속도를 산정할 수 있다. 여기서 산정된 탄성과 속도를 이용하여, 전단탄성계수 및 탄성계수 그리고 포아송비의 예측이 가능하게 된다(Santamarina et al., 2001).

본 연구에서는 압축파와 전단파를 이용하여 지반의 변형특성 및 간극비를 산정하는 이론적 배경을 설명한 후, 개선된 압력관 추출시험기의 특징 및 장비형상을 서술하였다. 개선된 장비를 이용하여 불포화토에서 탄성과 속도를 측정하고, 포화도에 따른 탄성과의 특성변화를 파악하였다. 획득된 탄성과 속도를 바탕으로 불포화 지반의 탄성계수, 전단탄성계수, 포아송비를 산정하였으며, 축응력을 가함과 동시에 부피변화를 관측하여, 탄성과 속도로 추정된 불포화토의 간극비를 비교하였다.

2. 배경이론

2.1 체적변형

포화된 지반의 응력변화에 따른 구성방정식은 Hooke's law를 따르게 된다. 흙 구조를 탄성체로 보면, x, y, z방향에 대한 유효응력과 변형률의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_x = \frac{(\sigma_x - u_w)}{E} - \frac{\mu}{E}(\sigma_y + \sigma_z - 2u_w) \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{(\sigma_y - u_w)}{E} - \frac{\mu}{E}(\sigma_x + \sigma_z - 2u_w) \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(\sigma_z - u_w)}{E} - \frac{\mu}{E}(\sigma_y + \sigma_x - 2u_w) \quad (3)$$

여기서, σ_x , σ_y , σ_z 는 각 방향에 대한 연직응력을 의미하므로, $(\sigma_x - u_w)$, $(\sigma_y - u_w)$, $(\sigma_z - u_w)$ 은 각 방향의 유효응력을 의미한다. 또한, E는 지반의 Young's modulus를, μ 는 포아송비를 가리킨다.

불포화된 지반의 부피는 모관흡수력(matric suction)으로 정의되는 $(u_a - u_w)$ 와 순연직응력(net normal stress) $(\sigma - u_a)$ 의 영향을 받게 된다(Matyas et al., 1968). 여기서, u_a 는 간극공기압, u_w 는 간극수압, 그리고 σ 는 연직응력

을 의미한다. 이처럼 정의된 모관흡수력과 연직응력의 증감에 따라 불포화된 지반의 부피는 변화하게 된다. 응력변화에 따른 부피변화를 산정하기 위해, 불포화된 지반의 구성방정식은 포화된 지반의 구성방정식에 순연직응력항과 모관흡수력항을 더하여 다음과 같이 표현된다 [Fredlund and Morgenstern(1977), Fredlund(1979)].

$$\varepsilon_x = \frac{(\sigma_x - u_a)}{E} - \frac{\mu}{E}(\sigma_y + \sigma_z - 2u_a) + \frac{(u_a - u_w)}{H} \quad (4)$$

$$\varepsilon_y = \frac{(\sigma_y - u_a)}{E} - \frac{\mu}{E}(\sigma_x + \sigma_z - 2u_a) + \frac{(u_a - u_w)}{H} \quad (5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(\sigma_z - u_a)}{E} - \frac{\mu}{E}(\sigma_y + \sigma_x - 2u_a) + \frac{(u_a - u_w)}{H} \quad (6)$$

여기서, H는 모관흡수력을 반영한 지반의 탄성계수를 의미하며, Fredlund et al.(1993)은 H의 대표값을 E/0.17로 제안하였다. 위의 식에서 왼쪽항은 각 방향의 변형에 관한 요소를 설명하고 있으며, 오른쪽 항은 응력의 변화에 관한 성분을 포함하고 있다. 지반의 변형을 탄성체로 가정하고, x, y, z 각 방향의 변형률을 모두 합하면 전체 부피에 대한 부피변형률 $\varepsilon_v = (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$ 이 되며, 최종적으로 체적변형률의 증분($d\varepsilon_v$)은 다음과 같이 표현된다.

$$d\varepsilon_v = 3\frac{(1-2\mu)}{E}d(\sigma_{mean} - u_a) + \frac{3d(u_a - u_w)}{H} \quad (7)$$

여기서, $\sigma_{mean} (= (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3)$ 은 평균 전연직응력을 의미한다.

2.2 탄성과 속도

지반의 물리적 변형특성은 여러 가지 형태로 나타나며, 각각의 특성에 따라 탄성계수(Young's modulus: E), 전단탄성계수(Shear modulus: G) 등으로 표현될 수 있다. 전단파와 압축파를 이용한 물리적 특성조사시, 전단파의 속도는 미소변형 상태에서의 전단탄성계수는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (8)$$

여기서, ρ 는 밀도이며, V_s 는 전단파 속도를 의미한다.

또한, 탄성계수는 전단탄성계수와 관계를 통해 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$E = 2 \cdot G \cdot (1 + \mu) = 2V_s^2 \rho (1 + \mu) \quad (9)$$

한편, 포아송비는 탄성과 속도를 이용하여, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu = \frac{0.5(V_p/V_s)^2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1} \quad (10)$$

여기서, V_p 는 압축파 속도이며, 식 (8), (9), (10)을 통해 전단파와 압축파 속도를 이용하면 전단탄성계수와 탄성계수, 그리고 포아송비를 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

2.3 간극비

2.3.1 부피 간극비

토질역학에서 간극비는 간극의 부피와 흙입자의 부피의 비로 표현된다. 불포화토에서 부피를 이용한 간극비는 흙의 삼상관계를 이용하여 구할 수 있으며, 다음과 같이 산정된다.

$$e = \frac{V(1 + \omega)G_s \gamma_w}{W_s + W_w} - 1 \quad (11)$$

여기서, ω 는 흙시료의 함수비를 의미하며, V는 시료 전체의 부피, G_s 는 흙입자의 비중, γ_w 는 물의 단위중량, W_s 와 W_w 는 각각 흙과 물의 무게를 의미한다.

2.3.2 탄성과 추정 간극비

식 (9)와 식 (10)과 같이, 탄성과 속도를 이용하여 산정된 탄성계수와 포아송비를 식 (7)에 대입하면, 다음과 같이 간극비의 변화량을 나타낼 수 있다. 간극비의 변화량은 $\Delta e = \Delta(V_v/V_s)$ 이고, 여기서 V_s 는 거의 불변이라 가정하면, 간극부피의 변화량은 $\Delta V_v = \Delta \varepsilon_v = \Delta(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$ 이다. 탄성과 속도로 추정된 탄성계수와 포아송비를 이용하면, 간극비의 변화량을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta e = 3 \frac{\left(1 - 2 \frac{0.5 \cdot (V_p / V_s)^2 - 1}{(V_p / V_s)^2 - 1}\right)}{2 \cdot V_s^2 \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{0.5 \cdot (V_p / V_s)^2 - 1}{(V_p / V_s)^2 - 1}\right)} \Delta(\sigma_{mean} - u_a) + \frac{3\Delta(u_a - u_w)}{H} \quad (12)$$

여기서, 모관흡수력($u_a - u_w$)은 축이동기법(Axis-translation technique)에 근거하여, 실험시 압력셀 내부에 가해주는 공기압(u_a)을 측정하고, 간극수에 대한 압력은 변하지 않는 것($u_w = 0$)으로 가정함으로써 결정된다(Hilf, 1956). 이와 같이, 지반에 가해지는 축응력과 모관흡수력을 측정할 경우, 탄성과 속도를 적용하여 간극비의 변화량을 예측할 수 있다.

3. 실내 실험

3.1 압력판 추출시험기

본 연구에서는 모관흡수력을 조절함으로써 지반의 포화도가 변화하는 동시에, 공압실린더를 통해 연직 축응력을 가하여 지표 부근의 불포화된 지반상태를 모사하고자 하였다. 따라서, Soilmoisture Equipment사에서 개발한 압력판 추출시험기를 Fig. 1(a)와 같이 개량하여 사용하였다(Soilmoisture Equipment Corporation, 2005). 선행연구에서, Lee et al.(2009)은 개선된 압력판 추출시

험기(Volumetric Pressure Plate Extractor, VPPE)를 이용하여 불포화도의 전단파 속도를 측정할 수 있는 시스템을 개발한 바 있다. 본 실험에는 동일한 원리의 개선된 압력판 추출시험기를 적용하여 저압용 레귤레이터(0~15 kPa 범위) 및 고압용 레귤레이터(15~500kPa 범위)를 조합함으로써, 압력셀 내부에 공기압을 가하여 모관흡수력의 제어가 가능하게 하였다. 또한, 시료 상부에 공압 실린더를 통해 가해지는 공기압을 축하중용 레귤레이터를 통해 조절함으로써, 축하중을 재하한 상태에서 실험할 수 있도록 장비를 개조하였다. 이러한 축하중은 공압실린더에 연결된 로드와 하부(즉, 시료의 상부)에 설치된 로드셀을 통해 측정되었으며, 시료를 구속하는 셀과 같은 크기의 사각형 가압판을 제작하여 시료에 가해지는 응력이 고루 분포되도록 하였다. 또한, 셀 상부에는 실린더와 연결된 로드 측면에 디지털 다이얼게이지를 설치하여, 0.001mm 단위로 길이변화를 측정하여, 이를 통해 보다 정밀한 부피변화의 측정이 가능하게 하였다. 본 시험기는 최대 공기압입치가 500kPa인 세라믹 디스크를 사용하여 넓은 범위의 함수비 조절이 가능하도록 구성하였으며, 이를 이용하여 인위적으로 지표 부근의 포화도 상태를 지닌 시료를 모사할 수 있다. 압력판 추출시험기를 이용하여 지반의 흡수과정 및 건조과정을 구현할 수 있으며, 이에 따른 함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)을 구할 수 있다.

3.2 탄성과 측정시스템

탄성과 측정을 위해서 사용된 측정센서는 벤티엘리먼트(Bender Element, BE)와 디스크엘리먼트(Piezo Disk Element, PDE)이다. 이들 트랜스듀서는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환이 가능한 압전소자로서, 압밀 실험장비나 현장 관입장비, 액상화 실험등에 장착되어 적용된 바 있다(Lee and Lee, 2006; Yoon et al., 2010). BE와 PDE는 동축케이블과 격리된 셀 내부와 외부사이의 커넥터를 이용하여, Fig. 1(a)와 같이 신호발생기로 연결하였다. 또한, Yoon et al.(2010)이 신호의 전기적 잡음 및 누화현상(cross-talk)억제를 위해 적용한 전도성 페인트를 사용하여 양질의 신호획득이 가능하도록 하였다. 접착제로써, 에폭시와 실리콘을 혼합하여 트랜스듀서를 고정하는 동시에, 트랜스듀서간의 직접적으로 도달하는 파의 간섭을 최소화하였다. 탄성과 신호측정을 위한 시스템은 신호발생기(Agilent 33220A), 디지털

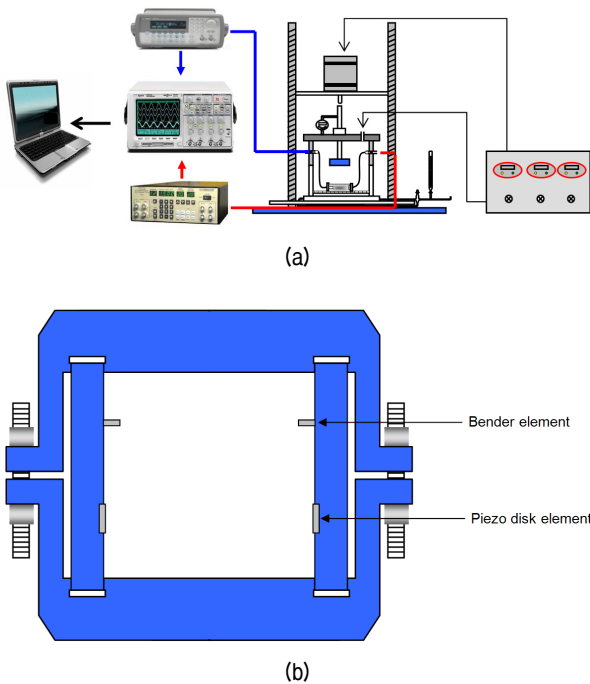


Fig. 1. Experimental setup. (a) Volumetric pressure plate extractor and Elastic wave measurement system, (b) Confining cell

오실로스코프(Agilent 54624A), 그리고 필터 및 증폭기(Krohn-Hite Model 3364)로 구성된다.

본 연구에 사용된 구속셀은 프레임을 통한 파의 전파를 억제하기 위하여, Fig. 1(b)와 같이 4개의 분리된 판을 이용하였으며, 축응력에 의한 셀의 변형을 방지하기 위하여 셀의 재질은 고강성 나일론으로 선택하였다. 총 4개로 분할된 구속용 나일론 판은 한쪽 나일론 판의 홈에 다른 나일론 판을 끼워 고정되도록 제작하였으며, 양 끝단은 나사로 고정하여 일체화되도록 하였다. 또한, 나일론 판과 나일론 판 사이에 우레탄 고무를 충전함으로써 신호가 셀을 통해 전파되는 현상을 방지하였다.

3.3 시료 조성

본 연구에서는 실험을 위한 시료로 #30체를 통과하고 #50체에 잔류하는 주문진사($D_{50}=0.45\text{mm}$)를 이용하였다. 압력관 추출시험기를 이용하여 총 3번의 실험이 수행되었으며, 각 시료의 초기 조건은 Table 1에 정리하였다. 시료 1과 시료 2의 경우, 주문진 표준사로 구성된 시료에 응력을 100kPa와 200kPa로 가하였으며, 시료 3의 경우, 모래시료에 #200체를 통과한 실트를 전체부피의 20%에 해당하는 양만큼 혼합한 모래-실트 혼합시료에 축응력 100kPa를 적용하였다.

3.4 실험 절차

탄성파를 이용하여 불포화토의 간극비를 산정하기 위해, 실험은 다음과 같은 과정으로 수행되었다. 압력관 추출시험기의 세라믹 디스크 위에 Fig. 1(b)와 같이 사각형의 구속셀을 준비하고, 구속셀에 설치된 BE와 PDE를 압력셀과 연결한다. 실험이 시작되기 전, 세라믹 디스크는 미리 포화상태가 되도록 물에 침지시킨다. 주문진 표준사를 설정된 간극비에 맞도록 구속용 사각셀에 성형한 후, 구속셀 주변으로 물을 채워 시료가 포화되도록 24시간동안 기다린다. 시료가 완전히 포화되면 남은

물을 제거한 뒤, 압력셀에 공기가 통하지 않도록 완벽히 잠그도록 한다. 그 후, 시료에 축응력을 가함과 동시에 시료의 모관흡수력을 조절하여 실험을 진행하였다. 본 실험은 인위적으로 지표 부근의 지반을 모사하여 포화도를 조절하는 것이 목적이었으며, 이를 위해 일반적으로 사용된 불포화 실험법을 참고하여 시료에 가해지는 공기압을 20, 50, 100kPa로 결정하였다. 일반적으로 모래시료의 경우 공기함입치가 20~50kPa사이에서 포화도의 변화가 가장 심하였으며, 이를 이용하여 본 실험에서는 위와 같은 공기함입치를 결정하게 되었다. 본 실험의 특징은 불포화과정이 진행되는 동안 단계별로 포화도와 탄성파 속도를 동시에 측정할 점이다. 포화도와 탄성파 속도는 실험이 진행된 순간부터 1, 4, 9, 16, 25min, 1, 2, 4, 6, 24hour의 단계마다 측정되었다.

건조과정이 진행되는 동안, 시료에서는 설치된 뷰렛을 통해 물이 유출되며, 동시에 시료의 부피가 감소한다. 건조과정이 완료되면, 셀 내부로 함입되는 공기압을 감소시키면서 습윤과정을 진행하였다. 습윤과정을 통해 밖으로 유출되었던 물이 뷰렛을 통해 시료내부로 들어가게 되며, 동시에 시료의 함수비와 부피가 증가하게 된다. 이 과정에서도 마찬가지로 디지털 다이얼 게이지를 이용하여 부피변화를 관찰함과 동시에 탄성파 속도를 측정하였다.

4. 실험 결과

4.1 함수특성곡선

실험은 건조과정과 습윤과정으로 이루어졌으며, 실험을 통하여 산정된 함수특성곡선을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2와 같이, 모관흡수력이 증가함에 따라 체적함수비가 감소하는 현상이 나타나며, 그에 따라 포화도가 함께 변화한다. 시료 1과 시료 2의 경우, 동일한 모래시료이지만 SWCC곡선이 차이가 발생함을 알 수 있다. Charles and Pang(2000)에 따르면, 재하된 응력이 증가

Table 1. Specimen properties

Name	Specimen	G_s	e_{max}	e_{min}	Initial water content (%)	Initial void ratio
No. 1	Sand	2.62	0.82	0.56	26.26	0.761
No. 2	Sand	2.62	0.82	0.56	22.81	0.729
No. 3	Sand + Silt (20%)	2.62	0.80	0.42	20.62	0.638

할수록 초기 부피함수비가 감소하며, 모관흡수력의 증가에 따라 부피함수비의 감소량이 줄어든다고 하였다. 시료 2의 경우에도 재하된 응력이 증가함에 따라 초기 부피함수비는 감소하였고, 모관흡수력의 증가에 따라 부피함수비의 감소량은 크지 않았다. 본 연구에서는 SWCC곡선을 통한 지반의 특성평가보다, 포화도 변화에 따른 탄성파 속도의 측정 및 간극비의 추정에 목적을 두었다. 이에 따라, SWCC 곡선을 통해 얻은 포화도의 변화와 동시에 측정된 탄성파 속도의 변화에 주목하고자 한다. 각 시료에서 포화도의 범위는 시료 1의 경우는 90~15%, 시료 2의 경우는 80~10%, 그리고 시료 3의 경우는 85~7%정도로 나타났다. Fig. 2와 같이, 건조과정에서는 모관흡수력 변화에 따라 시료의 포화도가 감소한 후, 습윤과정을 통해 다시 증가하는 것을 알 수 있

다. 시료의 초기 포화도가 100%가 이루어지지 않은 것은 초기 응력을 가하는 과정에서 발생한 물의 손실과 시료 속에 남아있던 공기의 영향으로 판단된다.

4.2 탄성파 신호

각 모관흡수력 단계별로 탄성파 신호를 획득할 수 있었으며, 3개의 시료 중 시료 3에 대해 측정된 압축파와 전단파의 신호를 Fig. 3에 나타내었다. 모관흡수력에 따른 압축파 신호의 측정결과, 압축파의 초기도달시간은 모관흡수력에 의해 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다. 전단파 신호의 경우, 모관흡수력 20kPa하에서는 초기 도달시간이 시간변화에 따라 감소하는 것으로 나타났으나, 나머지 모관흡수력 단계에서의 시간변화에 따

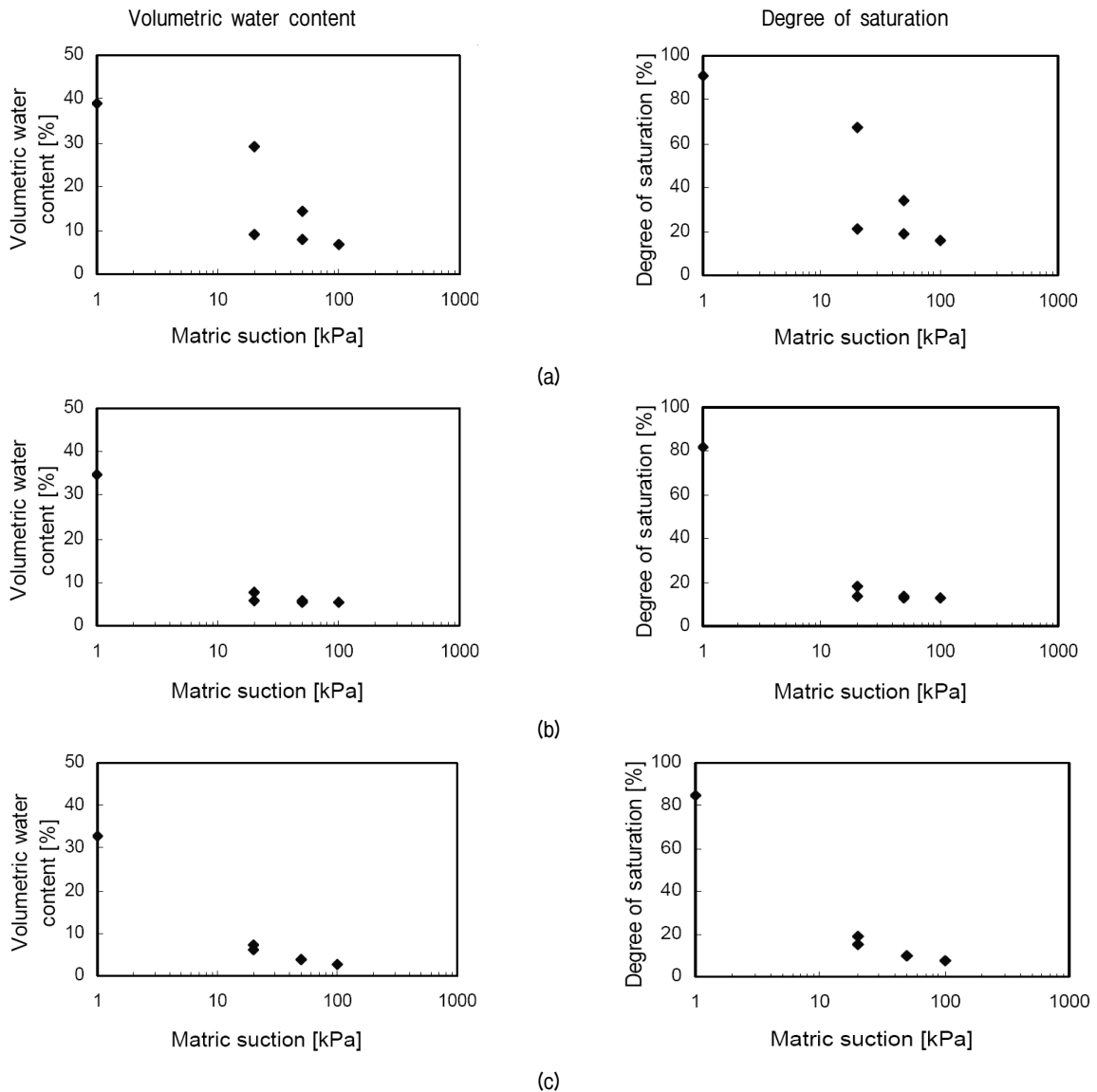


Fig. 2. Soil water characteristic curve (SWCC). (a) No. 1 specimen, (b) No. 2 specimen, (c) No. 3 specimen

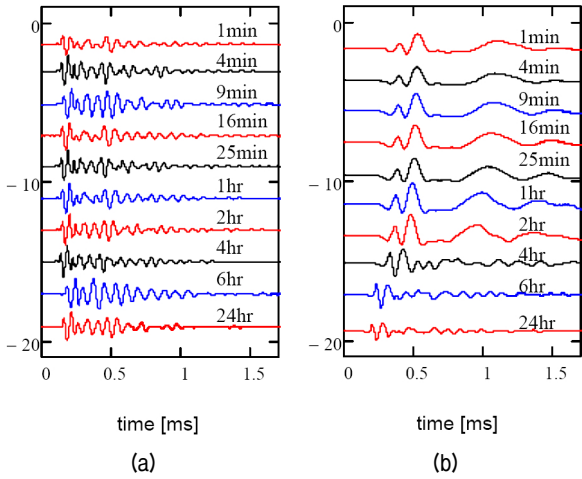


Fig. 3. Wave signatures of No. 3 specimen under the matric suction of 20kPa (drying). (a) Compressional wave, (b) Shear wave

른 초기도달시간은 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 가해진 각각의 모관흡수력 단계에서는 시간이 경과함에 따라 포화도가 변화하게 된다.

5. 결과 분석

5.1 탄성과 속도, 전단탄성계수, 탄성계수 및 포아송비

본 연구에서는 모관흡수력의 조절이 가능한 압력판 추출시험기를 이용하여 포화도 10%~90% 사이의 불포화 지반을 모사하였다. 실험을 통해 획득한 탄성과 신호를 바탕으로, 초기도달시간을 취하여 압축파 속도와 전단파 속도를 산정한 후, Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4와 같이, 불포화된 지반의 경우 압축파의 속도는 포화도

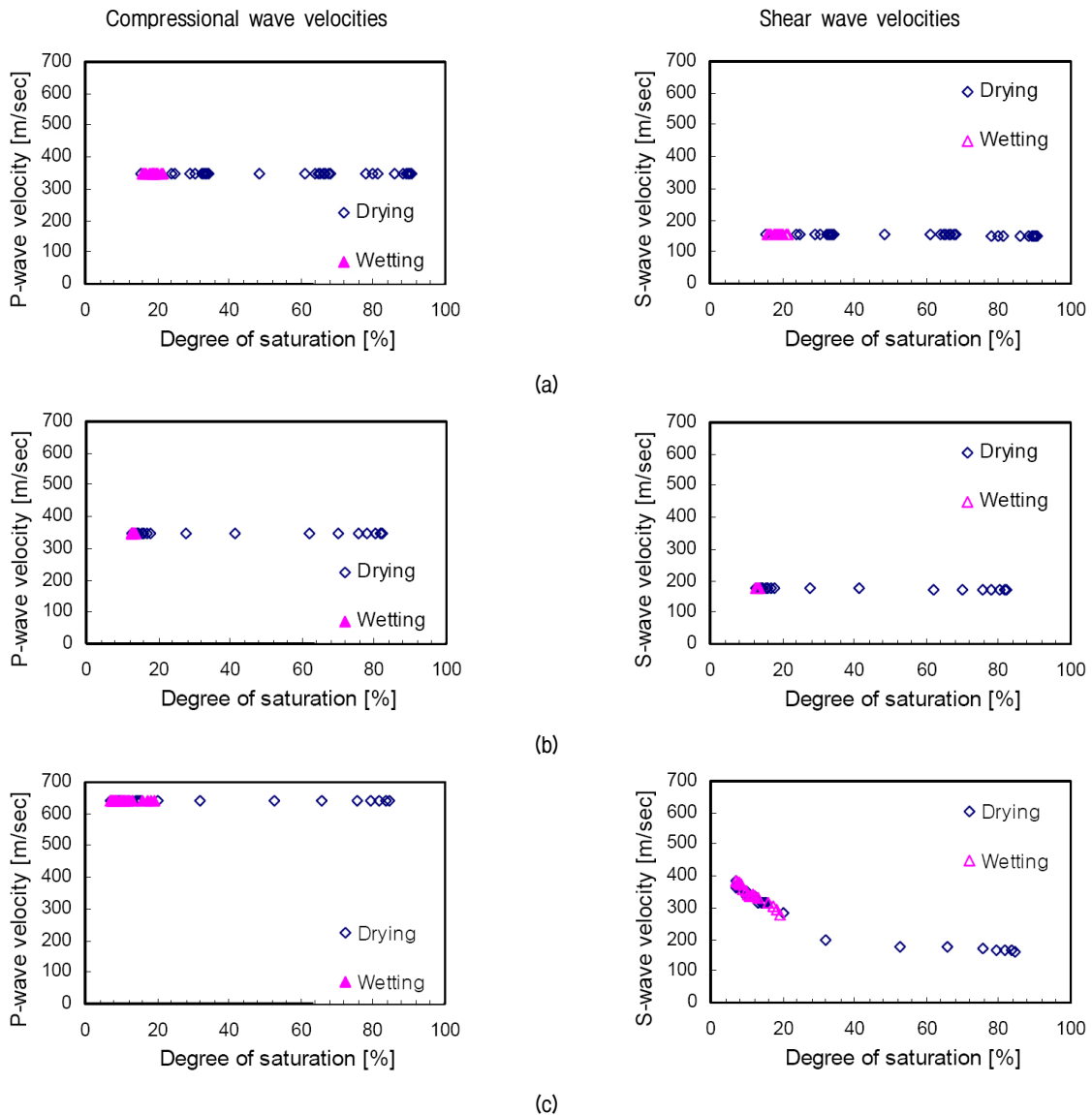


Fig. 4. Elastic wave velocities according to the degree of saturation. (a) No. 1 specimen, (b) No. 2 specimen, (c) No. 3 specimen

90~10% 구간에서 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 또한, 시료 1, 2와 시료 3을 비교해 보면, 매질이 바뀌는 경우 압축파의 속도의 크기가 상당히 변화하는 것으로 나타났다. 전단파 속도의 경우, 포화도가 변화함에 따라 모래시료에서는 속도변화가 거의 없이 일정하였으며, 모래와 실트를 혼합한 시료의 경우에는 포화도 30-70% 구간에서 일정하게 나타났다. 그러나 포화도가 30% 이하인 경우, 포화도가 감소함에 따라 전단파 속도가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 실험을 통해 나타난 압축파 및 전단파 속도는 매질에 따라 변화하고, 시료에 가해지는 축응력에 따라 속도변화가 발생하는 것으로 나타났다.

측정된 탄성과 속도를 바탕으로 전단탄성계수와 탄성계수, 그리고 포아송비를 추정할 수 있었으며 실험에 따른 각각의 시료의 탄성계수 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 동일한 모래를 사용한 시료 1과 2의 경우, 축응력의 변화가 전단탄성계수와 탄성계수의 값에 많은 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 모래와 실트를 섞은 시료 3의 경우, 모래로만 이루어진 시료에 비해 전단탄성계수와 탄성계수는 포화도가 감소함에 따라 점차 증가하였으

며, 포아송비는 포화도가 감소함에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다. 결과적으로, 동일한 입도분포를 가질 경우, 지반의 강성은 포화도의 변화보다 축응력의 크기에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 또한, 모래와 실트가 혼합된 불포화된 지반에서 포화도의 변화에 따라 탄성계수가 크게 영향받고 있음을 알 수 있다.

5.2 간극비

본 연구에서는 전단파 속도와 압축파 속도를 이용하여 간극비의 변화를 예측하였으며, 실험을 통해 측정된 부피변화에 따른 부피 간극비와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에서는 모래시료(시료 1과 2)의 간극비를 도시하였고, Fig. 6(b)에는 모래-실트 혼합시료(시료 3)의 결과를 비교하였다. 전체적으로 보면, 포화도가 감소함에 따라 시료의 부피는 미소한 크기로 감소하였다. 시료 1과 2에서는 포화도가 90%에서 10%로 갈수록, 간극비가 0.76에서 0.75로, 0.73에서 0.70으로 각각 변화하였다. 이러한 결과로부터, 일정한 크기의 축응력하에서

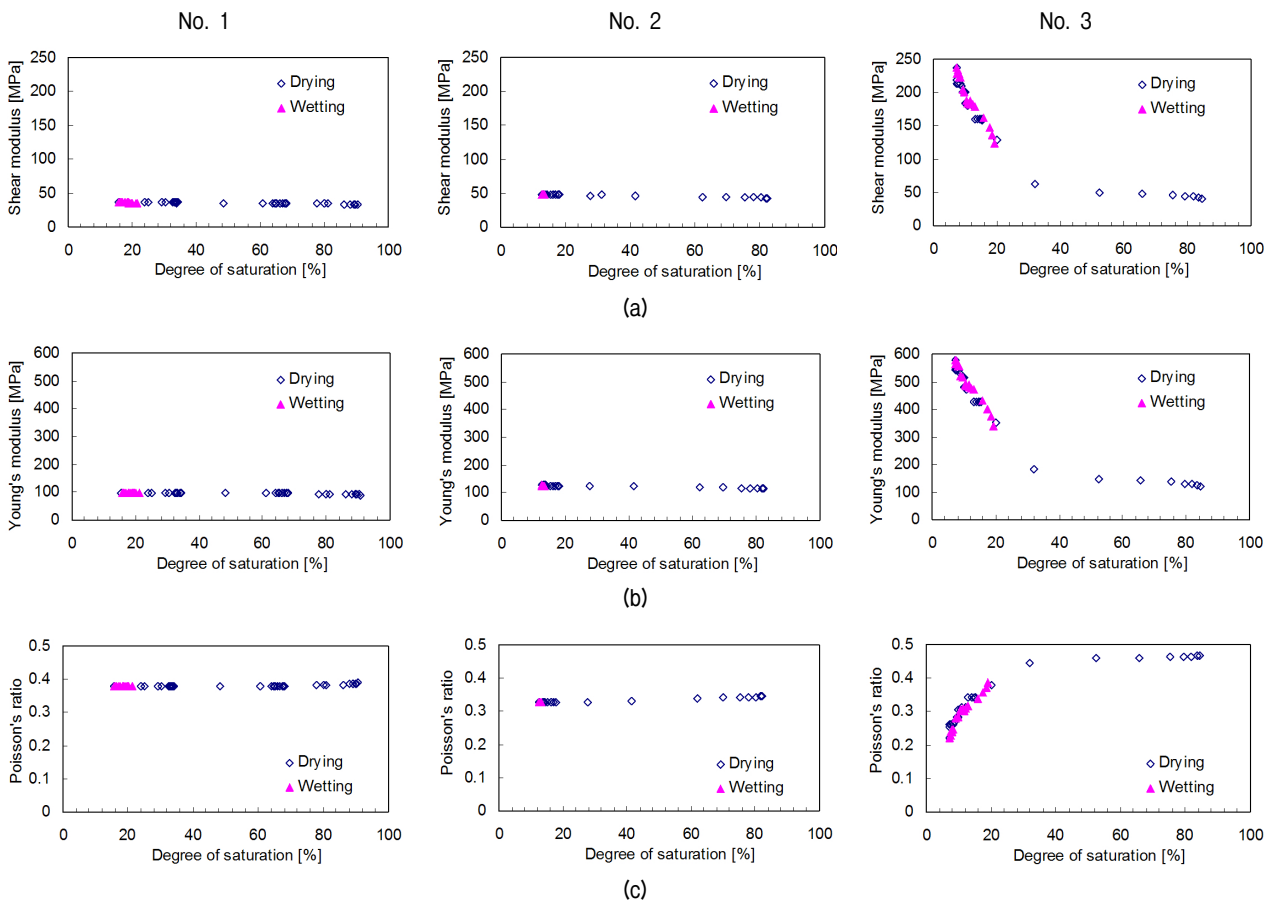


Fig. 5. Variation of elastic modulus according to degree of saturation. (a) Shear modulus, (b) Young's modulus, (c) Poisson's ratio

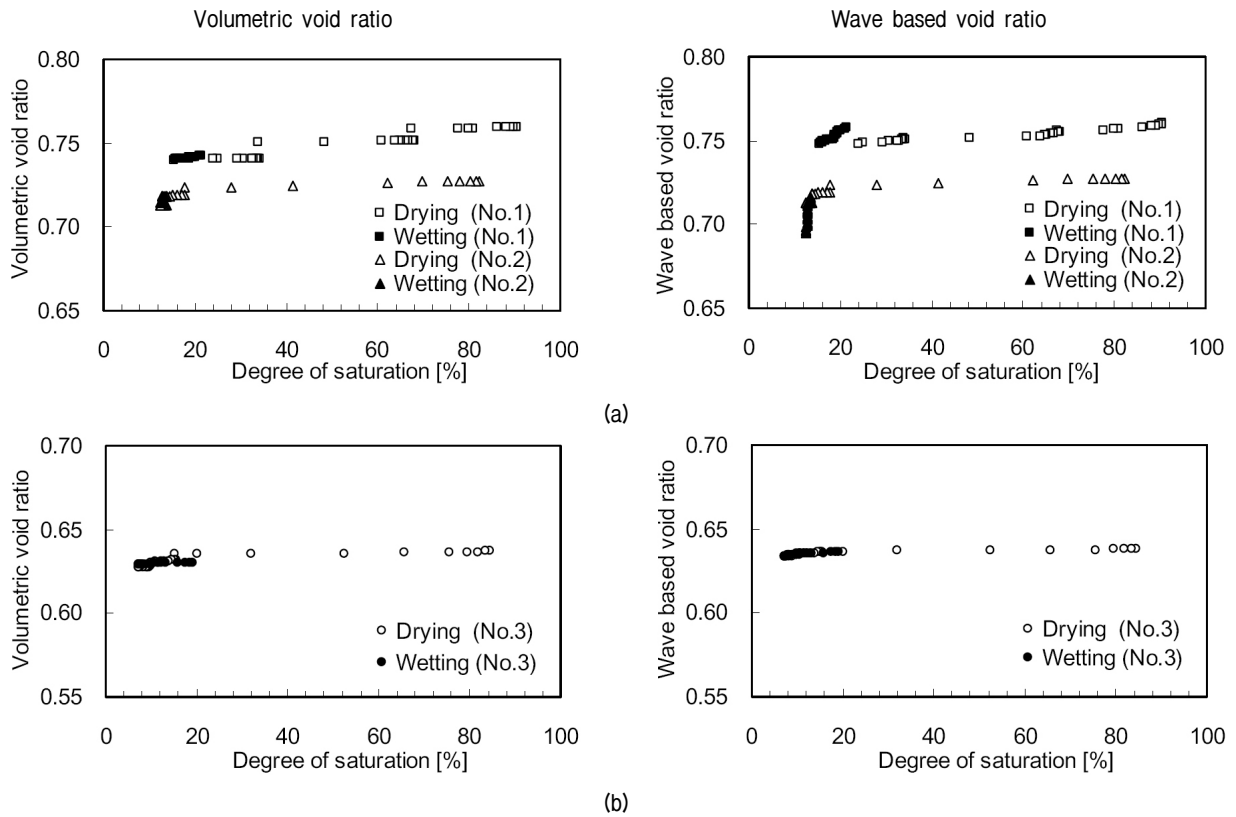


Fig. 6. Estimation of void ratio. (a) sand (No. 1 & 2 specimens), (b) sand-silt (No. 3 specimen)

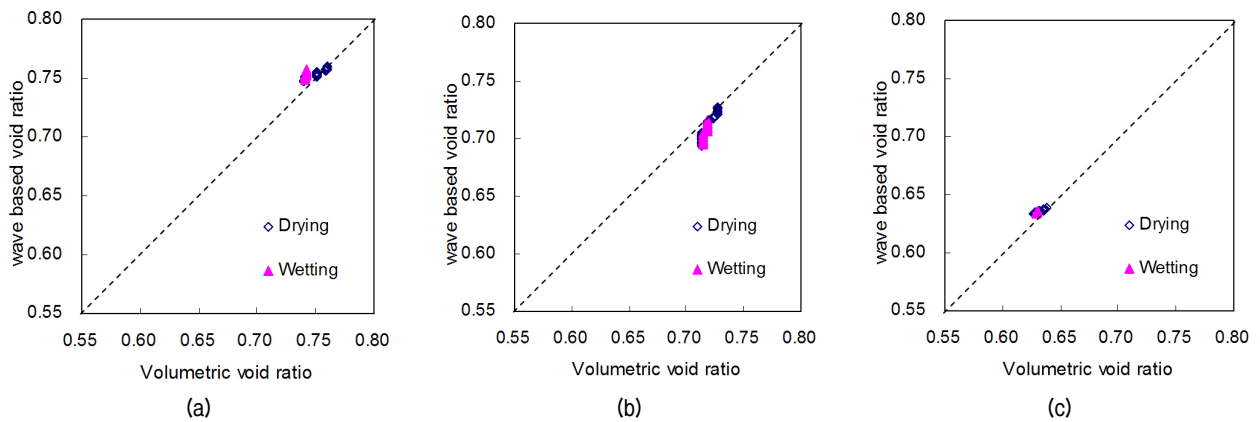


Fig. 7. Volumetric void ratio versus wave based void ratio. (a) No. 1 specimen, (b) No. 2 specimen, (c) No. 3 specimen

시료 내 물의 이동은 부피함수비의 변화뿐 만 아니라, 전체부피의 크기변화에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한, 시료에 가해지는 축응력이 증가함에 따라, 간극비는 감소하고 있음을 알 수 있다. 시료 3의 경우, 포화도가 85%에서 7%로 갈수록 간극비가 0.64에서 0.63으로 변화하였다. Fig. 6(a) 와 6(b)를 비교해 보면, 모래-실트 혼합시료보다 모래시료에서 간극비의 변화가 크게 발생하였다. 이는 입자크기가 거의 균등한 모래시료의 입자구조가 세립분을 섞은 경우보다 불안정하여 나타난 결과로 판단된다. 이러한 경향은 모관흡수력의 크기가

증가할수록, 즉 포화도가 감소할수록 뚜렷이 나타났다. 또한, 부피에 근거한 간극비와 비교하기 위해, 탄성과 속도에 의해 산정된 간극비를 포화도의 변화에 따라 Fig. 6에 나타내었다. 부피 간극비와 마찬가지로, 포화도의 변화에 따라, 탄성파로 산정한 간극비에서 변화가 관찰되었다.

각 시료에 대하여, 시료의 높이 변화로 측정된 부피 간극비와 탄성과 속도로 산정된 탄성과 추정 간극비를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 건조과정의 경우, 탄성파 속도로 산정된 간극비는 부피측정을 이용해 구한 실

제 간극비와 유사한 것으로 나타났다. 그러나, Fig. 7(b)를 보면, 습윤과정에서 탄성과 속도로 산정된 간극비는 부피 간극비보다 약간 작게 나타났다. 이와 같은 이유는 시료에 남아 있는 잔류 축응력의 크기가 매우 컸기 때문에 변형되었던 시료가 습윤과정을 통해 원래의 간극비 상태로 회복되기 어려웠던 것으로 판단된다. 그러나 습윤과정의 추정 간극비 또한 건조과정과 마찬가지로 일정한 경향성을 지니며, 실제 간극비와 차이는 매우 작은 값이다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 개선된 압력판 추출시험기를 이용하여 모관흡수력을 조절하는 불포화도 실험을 수행하였다. 개선된 압력판 추출시험기는 실험이 진행되는 동안 일정한 축응력을 가할 수 있도록 제작되었으며, 탄성과 측정시스템과 연결되어 포화도에 따른 탄성과 속도의 측정이 가능하도록 하였다. 모관흡수력 조절을 통한 포화도의 단계마다 탄성과 신호가 측정되었다. 주문진 표준사를 이용하여 30번체를 통과하고 50번체에 잔류하는 균등한 모래를 시료로 사용하였다. 균등한 모래시료를 이용하여 축응력을 100kPa와 200kPa로 변화시켜 실험을 수행하였으며, 균등한 모래시료에 실트를 20% 혼합하여 축응력 100kPa 에서 동일한 실험을 수행하였다. 벤티엘리먼트와 디스크엘리먼트를 이용하여 탄성과 신호의 변화를 관찰하였다. 본 연구를 통해 제시된 결론은 다음과 같다.

- (1) 실험결과, 모래로만 구성된 불포화 지반에서 포화도 15~90% 구간의 경우, 탄성과 속도는 거의 일정하게 나타났다. 모래-실트 혼합시료의 경우, 포화도가 20%이하로 감소될 때 전단파 속도는 급격히 증가하였다. 결과적으로, 탄성과 속도는 매질을 구성하는 재료에 의존하는 것으로 나타났다.
- (2) 측정된 탄성과 속도를 바탕으로 지반의 전단탄성계수, 탄성계수 그리고 포아송비가 산정되었다. 모래시료의 경우, 포화도가 감소함에 따라 탄성계수가 일정하게 유지되는 반면, 모래-실트 혼합시료에서는 포화도가 감소함에 따라 전단탄성계수와 탄성계수는 증가하고, 포아송비는 감소하였다. 또한, 동일한 시료에서 전단탄성계수와 탄성계수는 가해지는 축응력의 증가에 따라, 증가하고, 포아송비는 감소

하는 것으로 나타났다.

- (3) 부피변화를 측정하여 산정한 간극비와 탄성과 속도를 이용하여 산정한 간극비를 비교한 결과, 탄성과 속도를 이용한 간극비는 부피 간극비와 매우 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 모래-실트 혼합시료보다 모래시료의 간극비 변화가 약간 큰 것으로 나타났다. 마지막으로, 시료에 가해지는 축응력과 모관흡수력의 크기가 커질수록 간극비의 변화도 크을 관찰하였다.
- (4) 본 연구에서는 탄성과 속도를 이용한 간극비 산정은 추후 현장에서 탄성과 속도를 활용한 불포화 지반의 물성치 조사 시 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0018110)을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Charles, W. W. and Pang, Y. W. (2000), "Influence of Stress State on Soil-Water Characteristics and Slope Stability", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.2, pp.157-166.
2. Fredlund, D. G. (1979), "Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.16, No.1, pp.121-139.
3. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977), Closure to Pater Entitled, "Stress State Variables for Unsaturated Soils", *ASCE J.Geotech.Eng.Div.GT5*, Vol.103, pp.447-466.
4. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley & Sons, New York, pp.1-517.
5. Fredlund, D. G. and Xing. (1994), "Equations for the Soil-Water Characteristic Curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.4, pp.521-532.
6. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. (1978), "The shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, pp.313-321.
7. Hilf, J. W. (1956), "An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils, Ph. D. Thesis, Technical Memo No. 654, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver, Colorado.
8. Kim, D. S., Seo, W. S., and Kim, M. J. (2003), "Deformation characteristics of soils with variations of capillary pressure and water content", *Soils and Foundations*, Vol.43, No.4, pp.71-70.
9. Lee, J. S. and Lee, C. H. (2006), "Application of Bender Elements in Consolidation, Tomography, and Liquefaction Tests", *Journal of*

- Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.22, No.8, pp.43-54.
10. 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.
 11. Lee, S. H., Seo, W. S., Choo, Y. W., and Kim, D. S (2008), "Development of VPPE-BE Testing System to Evaluate Modulus under Post-Compaction Variation in Matric Suction for Unsaturated Compacted Soils", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.24, No.5, pp.117-127.
 12. Matyas, E. L. and Radhakrishna, H. S. (1968), "Volume Change Characteristics of Partially Saturated Soils", *Geotechnique*, Vol.18, No.4, pp.432-448.
 13. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), "Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring", John Wiley and Sons, New York, pp.1-488.
 14. Soilmoiture Equipment Corporation (2005), "Volumetric Pressure Plate Extractor and Hysteresis Attachments", Operating Instructions: Model 1250, SantaBarbara, CA, USA. pp.1-12.
 15. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., and Clifton, A. W. (1996), "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.3, pp.379-392.
 16. Yoon, H. K., Kim, D. H., Lee, W., and Lee, J. S. (2010), "Field Elastic Wave and Electrical Resistivity Penetrometer for Evaluation of Elastic Moduli and Void Ratio", *Journal of KSCE*, Vol.30, No.2c, pp.85-93.

(접수일자 2011. 11. 25, 심사완료일 2012. 11. 29)