

탄성과 속도를 이용한 간극비 산정 기법 연구 Estimation of Void Ratio by Elastic Wave Velocities

윤형구¹⁾, Hyung-Koo Yoon, 정순혁²⁾, Soon-Hyuck Jung, 정훈준³⁾, Hun-Jun, Jeong,
이종섭⁴⁾, Jong-Sub Lee

- 1) 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- 2) 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- 3) (주) 지이엔씨 대표이사, Director, Geotechnical Engineering & Consultant.
- 4) 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University (jongsub@korea.ac.kr).

SYNOPSIS : Many methods and techniques have been developed to obtain the accurate design parameters in soft soils. In particular, several researchers suggest the techniques to get the void ratio for understanding the soil behavior. The objective of this paper verifies the accuracy of the proposed analytical solution for determining the void ratio based on the elastic wave velocities. The paper covers the theories of Wood, Biot, Gassmann and Foti proposed chronological order. The total theory represents the wave propagation in fully saturated medium. To verify the proposed analytical solution, the laboratory and field tests are carried out. After measuring the elastic wave, the void ratios are assessed using proposed equation. The volume based void ratios are also obtained for comparing with the estimated value by several equations. The values estimated by volume, Gassmann and Biot are show good similarity. However, the void ratios based on Wood and Foti methods have a slightly different trend. This study suggests that the theories of Biot and Gassmann may be a useful equation for assessing the void ratio using elastic wave velocities in the field.

Keywords : Analytical solution, Clay, Compressional wave, Shear wave, Void ratio, Wave propagation

1. 서론

국토의 협소한 이용공간을 확대시키고 다양한 개발사업을 수행하기 위하여 국내의 해안 및 연약지반에는 대규모의 지반개량 및 보강공사가 이루어지고 있다. 다양한 지하지층 및 기후특성으로 형성된 국내 해안 및 연약지반은 외부하중 작용시 입자사이에 존재하는 간극수가 배출하여 과도한 체적변화가 발생한다 (한국지반공학회 2005). 이와 같은 이유로 해안 및 연약지반의 특성을 정확히 평가해야하며, 특히 간극비와 같은 설계상수값은 지층의 성질을 대변하고 침하량을 결정할 수 있어 더욱 중요한 값으로 인식하고 있다.

간극비는 지반의 상태를 반영하는 기본적인 지표중 하나로서 간극의 부피와 흙 입자의 부피 비율을 이용하여 도출한다. 부피를 결정하기 위해서는 대부분 현장에서 채취한 시료를 사용하고 있으며 실험실로 운반하여 현장의 응력상태와 동일한 조건을 가할 수 있는 표준압밀실험을 수행한다. 그러나 점착력이 없는 모래는 일반적인 시료채취 방법으로는 채취가 어려워 현장의 하중상태와 동일한 조건에서의 간극비 산정에 한계

가 있다. 또한 시료를 채취하여도 시료 채취 순간에 발생하는 응력해방(stress relief) 현상과 운반과정에서 발생하는 오차요인으로 인하여 정확한 값을 반영하지 못할 수 있다.

탄성파는 체적파(Body wave)와 표면파(Surface wave)로 구분하며 각 파의 전파 및 전달특성에 따라 지반공학에서는 주로 체적파가 사용된다. 체적파는 압축파(Compressional wave)와 전단파(Shear wave)로 나뉘며 전파방향과 그에 따른 입자운동 특성에 따라 구분한다. 본 연구에서는 간극비 산정시 시료채취 및 운반과정에서 발생하는 문제점을 해소하고 시료채취 없이 대상지반에서 획득한 탄성파 속도만을 이용하여 간극비를 산정할 수 있는 기존의 이론식을 소개하고 국내 지반에 검증하고자 한다.

본 논문은 탄성파의 기본적인 이론과 개념에 대한 내용으로 시작하며, 지반공학에서의 탄성파 활용성도 언급하였다. 간극비의 기본적인 이론, 산정방법 그리고 탄성파 속도를 이용하여 기존에 개발된 이론식에 대한 내용도 서술하였으며 제안된 이론식을 검증하기 위하여 실내 및 현장실험도 수행하였다. 끝으로, 채취한 시료를 통하여 도출한 결과와 이론식으로 계산한 간극비를 비교 및 분석하여 다양하게 제안한 이론식의 타당성을 검증하였다.

2. 탄성파

탄성파는 그림 1과 같이 체적파(Body wave)와 표면파(Surface wave)로 구성되며, 체적파는 압축파(Compressional wave) 및 전단파(Shear wave)로 표면파(Surface wave)는 레일리파(Rayleigh wave)와 러브파(Love wave)로 분류한다 (Santamarina et al. 2001). 탄성파는 일반적으로 자원탐사나 지질특성을 평가하기 위하여 사용하며 그중 전파특성을 고려하여 신호의 발생 및 획득이 편리하고 활용성이 뛰어난 체적파를 주로 사용한다. 체적파의 세부적인 특성은 다음과 같다.

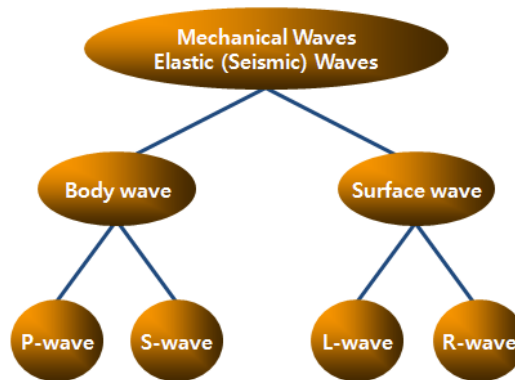


그림 1. 탄성파의 종류

2.1 압축파(compressional wave)

압축파는 입자의 움직임(particle motion)이 파의 진행방향(wave propagation)과 평행하게 반향하는 특성으로 전파하며, 평행방향의 변위가 발생하여 부피변화에 따른 체적탄성파 밀접한 관련이 있다. 따라서 압축파의 전파특성은 식 (1)과 같이 대상영역의 밀도와 체적탄성계수를 이용하여 수식으로 표현할 수 있다. 상대적으로 전파속도가 가장 빠르며 크기(amplitude)는 작은 특성이 있으며, 고체뿐만 아니라 액체에서도 전파가 가능하여 하천 및 해안의 수중특성 분석등에 활용하고 있다.

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{M}{\rho} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서, u_x 는 x 방향의 입자 움직임(particle motion), t는 시간, M은 체적탄성계수, 그리고 ρ 는 중량밀도를 나타낸다.

2.2 전단파(shear wave)

전단파는 입자의 움직임이 파의 진행방향과 수직으로 반항하는 특성을 가지고 있으며, 전단탄성계수를 이용하여 식 (2)와 같이 전달 특성을 수식으로 표현 할 수 있다. 압축파 보다 상대적으로 크기는 크지만 속도는 느리며, 고체 매질만 통과 할 수 있는 특징이 있다. 따라서 흙입자의 구조적 특성 및 유효응력에 따른 거동 특성 분석에 다양하게 활용하고 있다.

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \quad (2)$$

여기서, u_y 는 y 방향의 입자 움직임(particle motion), t는 시간, G는 전단탄성계수, 그리고 ρ 는 중량밀도를 나타낸다.

3. 간극비 산정 기법

간극비는 지반의 자연적인 상태를 반영하는 기본적인 지표 중의 하나로서 지반의 물리적, 수리학적, 그리고 전기적 특성 등에 의하여 다양한 값을 보인다. 간극비는 대부분 현장에서 채취한 시료를 실험실로 운반하여 압밀실험과 같은 실내실험으로 결정하지만, 시료채취나 운반과정에서 발생 할 수 있는 교란효과로 인하여 정확한 값을 평가하기 어려운 한계점이 있다. 이와 같은 이유를 개선하기 위하여 많은 연구자들이 시료 채취 없이 현장실험에서 산정된 결과를 이용하여 간극비를 도출 할 수 있는 여러 가지 방법들을 제안하였으며, 본 연구에서는 탄성과 속도에 근거한 관계식을 소개하고 그 타당성을 검증하고자 한다.

3.1 부피 체적을 이용한 간극비

간극비(e)는 간극의 부피 (V_v)와 흙 입자의 부피 (V_s) 비 ($e=V_v/V_s$)로 표현하며, 이는 채취되어 실험실로 운반된 시료를 사용하여 산정한다. 지반의 포화도(S), 함수비(w), 그리고 비중(G_s)의 값을 선행적으로 알고 있으면 다음의 식 (3)을 통해서도 간극비를 산정 할 수 있다.

$$e = \frac{w \cdot G_s}{S} \quad (3)$$

3.2 탄성과 속도를 이용한 간극비

3.2.1 Wood (1949) 이론

압축파 및 전단파의 개별적인 특성은 다양한 학자들에 의하여 연구되고 있으며, 복합적인 상관관계를 통하여 지반의 거동분석을 위한 연구도 수행되고 있다 (Biot 1956; Klimentos and McCann 1990; Berryman 1995). 특히 Wood (1949)는 포화된 세립토의 경우 압축파의 속도를 물과 흙입자의 밀도, 물과 흙입자의 압축성 (Compressibility, C) 그리고 간극률로 표현하였다. 그러나 대상지반이 다양한 입자들로 존재 할 경우 전단탄성계수의 항을 추가해야 한다고 주장하여 압축파 속도를 식 (4)와 같이 제안

하였다. Wood (1949)는 포화된 시료의 압축성 (Compressibility, C)을 상당히 중요한 인자로 인식하였으며, 압축성은 체적탄성계수의 역수($C=1/\text{bulk modulus}$)를 이용하여 산정 할 수 있다.

$$V_P = \left[\frac{\frac{1}{n \cdot C_f} + C_s \cdot (1-n) + \frac{4 \cdot G}{3}}{n \cdot \rho_f + \rho_s \cdot (1-n)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

여기서, C_f , C_s 는 유체 및 흙입자의 압축성을 의미하며, ρ_f , ρ_s 는 유체 및 흙입자의 밀도를 나타낸다. 또한 G , V_P , 그리고 n 은 각각 전단탄성계수, 압축파 속도 그리고 간극률을 의미한다. 전단탄성계수($G=\rho \cdot V_s^2$)가 전단파 속도의 함수인 것을 고려하면 식 (4)는 탄성과 속도를 이용하여 간극률을 획득 할 수 있는 가능성을 보여주며, 부피관계를 통하여 간극비로 환산 할 수 있다.

3.2.2 Gassmann (1951) 식

Gassmann (1951)은 포화된 등방입체의 거동특성을 입자와 유체의 체적탄성계수 및 전단탄성계수를 이용하여 식 (5)와 같이 나타냈다. 특히 식 (5)는 각각의 탄성계수에 영향을 미치는 유체와 간극의 관계가 화학적인 반응이 발생하지 않으며, 매체안의 전파특성을 저주파수 영역의 상태로 가정하였다. Gassmann (1951)은 부피와 간극수압의 증가량을 이용하여 유체의 체적탄성계수를 이론적으로 유도하였으며, 현탁액(suspension) 상태에서 입자의 체적탄성계수와 간극률의 관계도 정립하였다.

$$B_{Gassmann} = B_{SK} + \frac{\left(1 - \frac{B_{SK}}{B_g}\right)^2}{\frac{n}{B_f} + \frac{1-n}{B_g} - \frac{B_{SK}}{B_g^2}} \quad (5)$$

여기서, $B_{Gassmann}$, B_{SK} , B_g 그리고 B_f 는 각각 포화된 시료(mixture), 입자의 골격(skeleton), 입자의 알갱이(grain) 그리고 유체(fluid)의 체적탄성계수를 나타낸다. n 은 Wood (1949)와 동일하게 간극률을 의미하며 관계식을 이용하여 간극비로 환산 할 수 있다. 포화된 시료의 체적탄성계수($B_{Gassmann}$)는 식 (6)과 같이 탄성계수들 간의 상호관계를 통하여 구속탄성계수(Constraint Modulus, M)와 전단탄성계수(Shear Modulus, G)로 구성한다. 구속탄성계수($M=\rho \cdot V_P^2$)와 전단탄성계수($G=\rho \cdot V_s^2$)는 탄성과 특성에서 설명하였듯이 압축파속도(V_P), 전단파속도(V_s) 그리고 밀도(ρ)와 관련이 있다. 이와 같은 관계식을 체계적으로 정리하면 포화된 시료의 체적탄성계수($B_{Gassmann}$)는 식 (7)과 같이 표현되며, 최종적으로 Gassmann (1951)의 이론식 (5)는 탄성과 속도의 함수를 이용하여 식 (8)로 재정립 된다.

$$M = \frac{4}{3}G + B \quad (6)$$

$$B_{Gassmann} = \rho \cdot \left(V_P^2 - \frac{4}{3} \cdot V_s^2 \right) \quad (7)$$

$$n = \frac{B_g^2 \cdot B_f - B_{SK} \cdot B_f \cdot B_g - B_f \cdot B_g \cdot B_{Gassmann} + B_{SK} \cdot B_f \cdot B_{Gassmann}}{B_g^2 \cdot B_{Gassmann} - B_f \cdot B_g \cdot B_{mix} - B_{SK} \cdot B_g^2 + B_f \cdot B_g \cdot B_{SK}} \quad (8)$$

식 (8)은 각종 체적탄성계수와 탄성과 속도의 함수로 구성하여 대상지반의 탄성과 속도를 정확히 획득한다면 별도의 시료 채취 없이 이론적으로 간극비를 결정 할 수 있는 가능성을 보여준다.

3.2.3 Biot (1956) 이론

Biot (1956)은 포화된 매체에서의 파 전달 현상에 대한 지배방정식 (governing equation)을 제안하였다. 유체와 흙이 동일위치에 동시에 채워져 있다는 두 부분 연속체 (binary continuum) 이론을 기초로 하며 등방성, 선형탄성 그리고 비소산 특성의 유체조건을 가정으로 파 전달 현상을 모사하였다. 제안한 식은 흙입자 및 유체의 응력 텐서(tensor), 벡터(vector) 그리고 각종 Biot 상수로 이루어져있다. Biot 상수 중 H로 표현하는 구속탄성계수는 식 (9)와 같으며, 이는 구속탄성계수($M=\rho \cdot V_p^2$)와 압축파의 관계를 이용하여 재정리 될 수 있다. 또한 재정리된 식은 간극률의 함수로 표현이 가능하며 이는 식 (10)과 같다.

$$H = \frac{(B_s - B_{sk})^2}{(B_s \cdot [1 + n \cdot (\frac{B_s}{B_f} - 1)] - B_{sk})} + B_{sk} + \frac{4}{3} \cdot G \quad (9)$$

$$n = \frac{B_{sk} - \frac{(B_g - B_{sk})^2}{B_{sk} - B_{mix}} - 1}{\frac{B_g}{\frac{B_g}{B_f} - 1}} \quad (10)$$

여기서, B_{mix} , B_{SK} , B_g 그리고 B_f 는 각각 포화된 시료, 입자의 골격(skeleton), 입자의 알갱이(grain) 그리고 유체(fluid)의 체적탄성계수를 나타내며 G와 n은 전단탄성계수 및 간극률을 상징한다. 간극률은 앞서 설명하였듯이 관계식을 통하여 쉽게 간극비로 환산 할 수 있다.

3.2.4 Foti et al. (2002) 이론

Foti et al. (2002)은 포화된 지반에서 탄성과 속도를 이용하여 간극률을 산정할 수 있는 이론적인 수식을 제안하였다 (식 (11) 참조). 식 (11)은 Biot (1956)이 제안한 선형 poroelasticity 이론을 토대로하며, 입자 사이에 존재하는 물의 소산 영향을 최소화시키기 위하여 저주파수(low frequency) 영역으로 가정하였다. 저주파수 영역은 탄성과 전파시 흙 입자와 물의 상대적인 변위가 동일하다는 가정 (Miura et al. 2001)을 나타내며, 이와 같은 이유로 입자의 체적탄성 특성이 상당히 크다는 조건하에 식 (11)를 제안하였다.

$$n = \frac{\rho^S - \sqrt{(\rho^S)^2 - 4(\rho^S - \rho^F)B^F / [V_p^2 - 2(1 - v^{SK}) / (1 - 2v^{SK}) V_s^2]}}{2(\rho^S - \rho^F)} \quad (11)$$

여기서, V_s , V_p 는 전단파 및 압축파 속도를 나타내며, ρ^S, ρ^F, B^F 와 v^{SK} 는 각각 입자의 밀도, 물의 밀도, 물의 체적 탄성 계수, 그리고 입자 골격(skeleton)의 포아송 비를 의미한다. 여기서 n은 간극률을 나타내며, 부피관계식으로 쉽게 간극비로 나타낼 수 있다.

4. 실내 검증 실험

4.1 토조실험

앞서 설명하였듯이 본 연구에서는 기존에 제안한 다양한 해석기법을 검증하기 위하여 크기가 서로 다른 두 종류의 실내 대형 토조 (Calibration Chamber)를 이용하여 실험을 진행하였다. 사용된 토조의 제원은 높이와 직경이 각각 1.0m, 0.7m 그리고 2.0m, 1.2m 이다. 두개의 토조 모두 하판에는 수압을 이용하여 수직 응력을 가할 수 있는 수압조절기를 설치하였다. 시료조성은 카올리나이트 (GF 1250) 계열의 점토와 분쇄사 (인공 K-7호사)를 사용하였으며, 점성토의 성질은 유지하면서 압밀시간을 단축시키기 위하여 각 시료의 질량을 기준으로 1:1 혼합하였다. 시료 조성에 사용된 점토와 모래 각각의 물성치는 표 1과 표 2에 정리하였다. 혼합시 재료 분리를 방지하도록 액성한계는 선행연구에서 수행된 액성한계 (LL=23%)의 2배인 46%를 유지하였으며, 약 40분간 혼합기를 이용하여 혼합 후 발생하는 기포는 혼합기 외부에 설치된 진공 펌프를 통하여 제거하였다. 압밀시 양면배수를 위하여 토조 상·하부에는 2cm 두께의 모래층과 부직포를 설치하였으며, 시료조성 후 이틀간 약 50kPa의 압력을 가압하여 시료를 안정화 시켰다. 가압 후에는 100kPa, 150kPa, 그리고 최종적으로 200kPa까지 단계적으로 압력을 증가시켰으며 총 60일간 압밀을 진행하였다.

표 1. 카올리나이트의 물리적 성질

Liquid Limit LL(%)	Plastic Limit PL(%)	Plasticity Index PI (%)	Specific Gravity Gs	USCS
67.1	30.7	36.4	2.54	CH

표 2. 분쇄사의 물리적 성질

Specific Gravity Gs	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	Cc	Cu	e _{max}	e _{min}	USCS
2.65	0.09	0.17	0.99	2.11	1.07	0.68	CH

압밀 완료 후 탄성과 속도는 투과법을 응용하여 개발한 현장 탄성과 프로브 (Field Velocity Probe: FVP)를 이용하였다. FVP는 연속적인 관입으로 대상지반의 탄성과 속도를 측정할 수 있는 장비이다. 압축과 속도는 원형의 금속관에 압전 세라믹 소자가 설치된 피에조 디스크 엘리먼트 (Piezo Disk Element: PDE)를 이용하여 측정하였으며, 전단과 속도는 PDE와 동일하게 압전 소자로 구성하지만 형상이 전혀 다른 벤더 엘리먼트 (Bender Element: BE)를 이용하였다. 탄성과 측정에 사용된 현장 탄성과 프로브의 구체적인 제원 및 장비 특성은 윤형구 등 (2008)을 참조하기 바란다. 측정된 탄성파는 초기 도달시간과 이동거리를 이용하여 각각의 속도 값으로 계산하였으며, 선행연구의 이론적 방법을 이용하여 각 심도의 간극비 값을 결정하였다. 각종 입력 물성치 값은 문헌값을 이용하였으며, 표 3에 정리하였다.

표 3. 간극비 환산시 입력상수

입자의 밀도 (ρ^S)	물의 밀도 (ρ^F)	물의 체적탄성계수 (B^F)	입자 골격의 포아송비 (ν^{SK})	입자 골격의 체적탄성계수 (B_{SK})	입자 알갱이의 체적탄성계수 (B_g)
2.61	1000Pa	2.18×10^9 Pa	0.4	7.778×10^7 Pa	50×10^9 Pa

탄성과 속도 획득 후 시료의 상부, 중부 그리고 하부에서 일정량의 시료를 채취하였으며, 채취한 시료를 이용하여 각 위치에서 부피 간극비를 산정하였다.

4.2 토조실험 결과

탄성과 속도를 이용하여 계산한 간극비와 채취한 시료로 결정한 간극비의 비교 결과를 그림 2에 도시하였다. Wood (1949) 이론과 Foti et al. (2002) 이론을 이용하여 도출한 간극비는 두 개의 토조 실험결과 실제 간극비 값 보다 큰값을 보였으며, 도출된 결과의 분산정도도 심하게 나타났다. 특히 그림 2(b)는 그림 2(a) 보다 Wood (1949)와 Foti et al. (2002) 이론으로 획득한 값이 부피를 이용하여 결정한 값에 비해 차이가 상당히 크며 심도가 증가할수록 분산성이 심하여 일정한 경향성을 찾아볼 수 없다. 이와 같은 결과는 실제 활용시 주위조건에 대한 반영이 충분히 될 수 있도록 주의가 필요함을 나타낸다. 반면 Gassmann (1951)과 Biot (1954)의 이론을 토대로 결정된 간극비는 두 가지 실내 검증실험에서 실제값과 거의 유사한 결과를 보여주며 분산성도 없는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 그림 2(a)의 결과는 계산결과 두 가지 기법 모두 동일한 값으로 나타났으며, 실제 활용시 적용성이 뛰어난 것을 검증하였다.

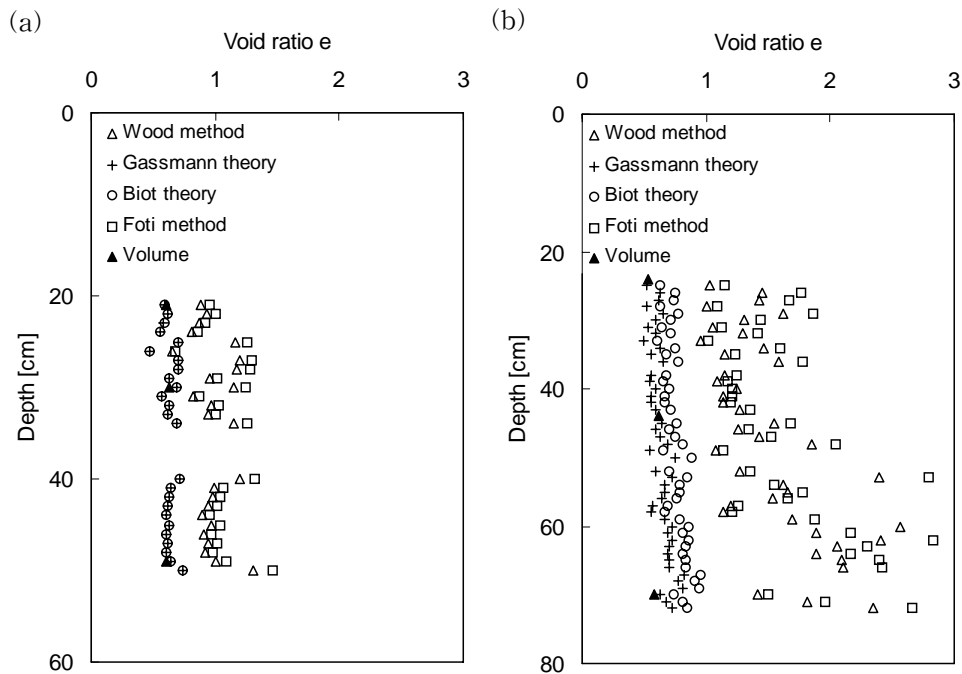


그림 2. 간극비 환산 결과: (a) 직경:0.7m 높이:1.2m 인 토조; (b) 직경:1.0m, 높이:2.0m 인 토조

5. 현장 검증 실험

5.1 현장실험

간극비의 함수로 재정리시킨 기존의 이론을 검증하기 위하여 남해안 부근의 매립지층인 광양지역에서 탄성과 속도 실험 및 시료채취 실험을 수행하였다. 탄성과 속도 실험은 실내실험과 동일하게 투과법 원리로 개발된 FVP를 이용하였으며, 시료는 일반적으로 사용되는 쉘비 튜브(Shelby tube)를 이용하여 비교란 시료를 채취하였다. 시료채취는 탄성과 속도 획득 심도를 고려하여 각각 16.0m와 20.0m에서 수행하였으며, 응력상태를 반영하여 간극비의 참고값을 얻기 위하여 표준압밀실험도 진행하였다. 압밀실험

결과는 그림 3과 같으며, 각 심도에서 획득한 압축지수 및 물리적 특성은 표 4와 같다. 또한 간극비 환산시 입력상수 값은 실내 토조 실험에서 사용한 값과 동일한 값을 사용하였으며, 입자의 밀도값은 서로 다른 지반 상태를 반영하기 위하여 실험을 통하여 계산된 비중값을 사용하였다.

표 4. 현장의 물리적 성질

Depth (m)	Liquid Limit LL(%)	Plastic Limit PL(%)	Plasticity Index PI (%)	Specific Gravity Gs	USCS	Compression Index Cc
16	36.4	24.5	11.9	2.61	ML	0.30
20	40.3	25.4	14.9	2.63	ML	0.19

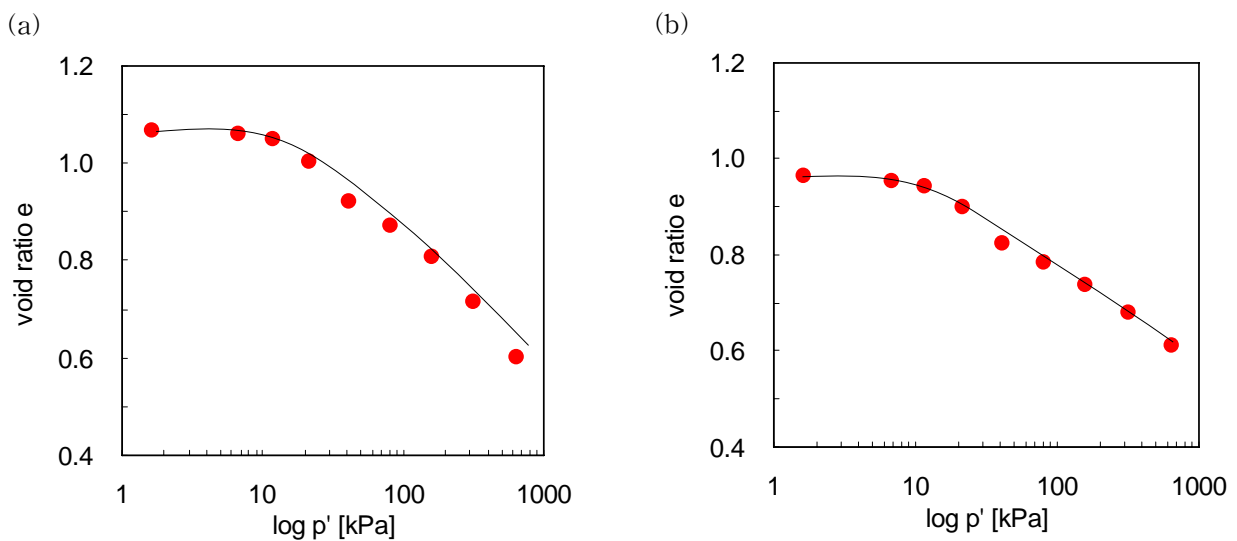


그림 3. 압밀실험 결과: (a) 16.0m; (b) 20.0m

5.2 현장실험결과

기존에 다양한 연구자들이 제안한 이론식에 현장에서 획득한 탄성과 속도를 대입하여 간극비로 도출한 결과를 그림 4에 도시하였다. 또한 심도 16.0m와 20.0m에서 표준압밀실험으로 현장유효응력을 고려한 간극비도 산정하였으며 동일하게 그림 4에 도시하여 화살표로 표시하였다. 실내실험결과에 비해 산출된 값은 실제값과 거의 유사하게 보이며 분산성도 작게 나타났다. Wood (1949) 이론을 토대로 환산한 간극비 값은 실내실험 결과와 동일하게 4개의 이론식 중 가장 큰 차이를 보였으며, Foti et al. (2002) 방법은 실제값 보다 약간 큰 값으로 도출하였지만 대체적으로 유사한 경향으로 나타났다. Gassmann (1951)과 Biot (1954)의 이론을 토대로 결정한 간극비 값은 실내 적용 결과와 동일하게 실제값과 유사한 값으로 나타났다. 이와 같은 결과는 실내 및 현장적용 결과 Gassmann (1951)과 Biot (1954) 이론식이 지반특성평가 활용에 신뢰성이 우수함을 나타낸다.

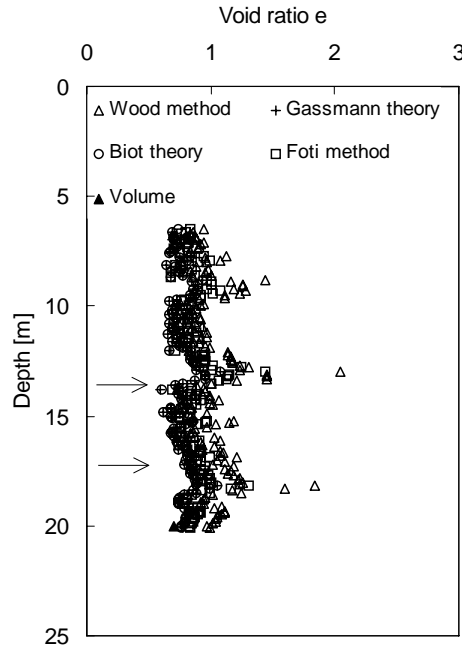


그림 4. 현장실험결과

6. 결론

본 논문에서는 지반 구조물 설계 시 활용빈도가 높은 간극비를 현장에서 효율적으로 평가 할 수 있는 기법에 대하여 연구하였다. 이는 시료채취 및 운반과정에서 발생 할 수 있는 문제점들을 해소할 수 있어 활용성이 상당히 높다고 할 수 있다. 기존에 개발된 Wood (1949), Gassmann (1951), Biot (1954), 그리고 Foti et al. (2002)이론을 근본으로 하여 간극비에 대한 함수로 재정립 후 제안된 이론을 검증하였다. 이와 같이 재정립된 식은 압축파속도, 전단파속도 그리고 각종 체적탄성계수들과의 관계로 구성한다. 따라서 각각의 체적탄성계수들의 값은 문헌값을 이용하여 가정하였으며, 포화된 지층의 체적탄성계수는 측정된 탄성과 속도를 이용하여 계산하였다. 제안된 기법은 실내 및 현장 실험에서 산정한 탄성과 속도 및 채취한 시료를 이용하여 검증하였다. 탄성과 주상도는 투과법을 응용하여 개발한 FVP 장비로 획득하였으며, 초기 도달시간과 이동거리를 이용하여 압축파 및 전단파 속도로 도출하였다. 실내실험은 시료 채취후 흙의 기본적인 관계식을 이용하여 간극비로 계산하였고 현장실험에서 채취한 시료는 압밀실험으로 유효응력을 고려하여 실제 현장의 간극비 값을 결정하였다. 기존이론과 부피로 결정한 간극비 비교결과 본 연구에서는 Gassmann (1951) 이론과 Biot (1954) 이론으로 계산한 간극비 값이 실제 값과 상당히 유사하게 나타났다. 이와 같은 이유는 탄성과 속도는 직접 획득하였지만, 지반의 다양한 입력상수는 모두 가정값을 이용한 것으로 판단된다. 따라서 추후 입력상수 값의 체계적인 정리가 구축된다면 시료채취 과정 없이 현장의 탄성과 속도를 이용하여 정확한 간극비 값을 산정 할 수 있다고 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2008년 정부의 재원으로 한국과학재단(KRF-2008-331-D00603)의 지원을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 윤형구, 김준한, 조용순, 이우진, 이종섭 (2008). “압축파 및 전단파 측정 FVPe를 이용한 간극비 평가.” 한국지반공학회 해안항만기술위원회 학술발표회, pp.125-132.
2. 한국지반공학회 (2005). “연약지반.” 지반공학 시리즈, 구미서관
3. Berryman, J. G. (1995). “Mixture theories for rock properties.” In Rock physics and phase relations: A handbook of physical constants. Washington: American Geophysical Union.
4. Biot, M. A. (1956). “Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I low-frequency range.” Journal of Acoustic society America, 28, pp.161-178.
5. Foti, S., Lai, C. G. and Lancellotta, R. (2002). “Porosity of fluid-saturated porous media from measured seismic wave velocities.” Geotechnique, 52(5), pp.359-373.
6. Klimentos, T. and McCann, C. (1990). “Relationships between compressional-wave attenuation, porosity clay content and permeability in sandstones.” Geophysics, 55, pp.998-1014.
7. Miura, K., Yoshida, N. and Kim, Y. S. (2001). “Frequency dependent property of waves in saturated soil.” Soils and Foundations, 41(2), pp.1-19.
8. Santamarina, J.C., Klein, K.A. and Fam, N.A. (2001). “Soils and Waves.” John Wiley & Sons.