

Biot 음향 전파 이론을 이용한 실내 사질 시료의 투수계수 산정

Laboratory Evaluation of Soil Permeability for Sand Using Biot's Acoustic Wave Propagation Theory

김진원¹ Kim, Jin-Won

송정락² Song, Chung-Rak

Abstract

Biot proposed the frequency dependent formulation for the propagation of elastic waves in saturated media based on the coupled theory mixtures. Based on Biot theory, a special frequency called 'the characteristic frequency' contains unique information of the permeability of soils. The characteristic frequency is measured from 1/Q (inverse quality factor) versus frequency curve by an acoustic sweep test, and the permeability of soils is computed from Biot equation. In this paper, laboratory tests are performed at The University of Mississippi using a large test box. The measured characteristic frequency is consistently obtained at 3500 Hz for mortar sands. The computed permeability of mortar sands based on Biot equation turned out $2.01 \cdot 10^{-4}$ m/sec, while the permeability from the laboratory constant head test turned out $1.49 \cdot 10^{-4}$ m/sec. This paper addresses the theoretical background and experimental procedure of this technique.

요 지

Biot는 균질하며 등방성인 포화된 물질에서의 혼합체 연동이론(coupled theory mixtures)을 이용하여 탄성과 전파의 진동수 의존성에 관한 이론을 제시하였다. Biot의 이론에 의하면 포화된 지반을 전파하는 탄성파의 진동수는 지반의 투수계수에 관한 정보를 가지고 있음을 보여주고 있다. 지반의 투수계수 산정에 사용되는 특정 진동수는 '특성 진동수(characteristic frequency)'라 불리며, 특성 진동수는 진동수의 연속변화를 통한 1/Q(inverse quality factor)와 진동수의 관계도에 의하여 구할 수 있으며, 지반의 투수계수는 Biot의 식을 이용하여 산정할 수 있다. 본 연구에서는 시험상자(test box)를 이용한 실내 시험을 미시시피 주립대학에서 수행함으로써 특성 진동수를 측정하였으며, 또 이를 이용하여 투수계수를 계산하였다. 모르타르 모래 시료에 대하여 시험한 결과 특성 진동수는 3500Hz에서 나타났으며 이를 Biot 식을 이용하여 시료의 투수계수를 산정한 결과 투수계수는 $2.01 \cdot 10^{-4}$ m/sec로 나타났다. 이는 실내 정 수두 투수계수 시험 값인 $1.49 \cdot 10^{-4}$ m/sec 와 비교했을 때 다소 크게 나타났다. 그러나 이 차이는 투수계수의 통상적인 오차범위를 고려할 때 매우 합리적인 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구는 음파를 이용하여 보다 쉽고 빠르게 지반의 투수계수를 산정할 수 있는 가능성이 있음을 보여 주었다. 본 논문에서는 특별히 고안된 장치를 통하여 시료의 특성 진동수를 실험적으로 결정하는 세부적인 방법과 그 이론적인 배경을 기술하였다.

Keywords : Acoustics, AC permeability, Biot theory, Coupled theory mixtures, Permeability

1 미시시피대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Mississippi)

2 정회원, 미시시피대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Univ. of Mississippi, csong@olemiss.edu, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

투수계수는 지반 구조물 설계 및 해석 시 중요한 요소 중 하나임에도 불구하고 그 크기를 결정하는 방법은 상당히 어려운 실정이다. 따라서 이론적이나 시험적인 측면에서 보다 쉽고 빠르게 투수계수를 산정하는 방법들이 보고되고 있다(Torstensson and Petsonk, 1986; Voyiadjis and Song, 2003). 그러나 현재의 통상적 방법으로는 신속성과 경제성과 같은 실질적인 문제와 더불어 천공과 시료채취시 발생하는 교란 문제와 같은 기술적인 문제에서 자유롭지 못한 것이 사실이다. 본 연구에서는 Biot(1955, 1956 a, b)의 연동이론을 이용하여 이러한 문제점들을 극복할 수 있는 가능성을 가진 새로운 투수계수 산정 방법을 제시하고자 한다.

Biot(1956a)에 의하면 포화된 지반내에 탄성파가 전파할 경우, 지반 입자와 간극수는 서로 상대적인 움직임을 가지며, 간극수와 지반 입자들의 상대적인 움직임은 지반 입자들의 표면에 위치한 간극수의 상대흐름을 동반한다. 간극 속에서 물의 상대적인 흐름은 물의 점성과 간극크기에 밀접한 관계가 있으며, 물의 점성과 간극크기는 지반의 투수계수를 결정짓는 요소라는 사실을 고려하면 이는 상대적 흐름과 흙의 투수계수와의 관련성을 나타낸다. 따라서, 탄성파 특성으로부터 지반의 투수계수를 역산할 수 있다. 탄성파의 진동수 반응과 재료의 투수계수와의 관계는 Biot(1956 a, b)에 의해 예측되었으며 Biot(1956 a, b) 이론에 대한 검증은 1980년대에나 이루어졌다(Plona, 1980). 이를 지반재료의 투수계수 산정에 사용하는 시도는 Yamamoto(2003)에 의하여 원유 함유 암반에 적용되었다. 그러나 일반적 지반(모래, 실트, 점토 등)에의 적용은 아직 이루어 지지 않은 실정이다. 본 연구는 Biot(1956 a, b) 이론으로부터 지반의 투수계수를 산정하는 기법을 모래질 시료에 적용한 결과를 제시하였다.

2. 배경 이론

지반은 서로 다른 크기와 형태를 가지고 있는 흙 입자와 물, 공기로 채워진 간극의 집합체임으로 다상(multiphase) 물질로 여겨야 한다. 이 때의 지반의 거동은 각각의 개별적인 재료에 대한 응력과 변형이 연동된 형태로 표현되며(Prevost, 1980) 이런 혼합체의 연동 현상을 다루는 이론인 혼합체 연동 이론(coupled theory of mixture)은

Biot(1955)에 의하여 처음 제안되었다. Biot(1955)의 혼합체 연동 이론(coupled theory of mixture)에 관한 초기 연구는 흙의 선형 탄성 거동(linear elastic behavior)을 해석하기 위하여 시작되었으나 후에 Prevost(1980) Voyiadjis와 Abu-Farsakh(1996), Voyiadjis와 Song(2000, 2006) 그리고 Song과 Voyiadjis(2005a, b, 2006)에 의하여 비탄성 영역까지 확장되었다.

Biot(1956a, b)에 의하면 탄성파의 위상속도(phase velocity)와 감쇠는 식 (1)부터 (4)에 나타난 바와 같이 진동수에 의존하는 특성으로 표시할 있다. 식 (1)과 (3)은 Biot(1956a)의 fast P-wave에 대한 진동수 의존성을 나타내고 있으며 (2)와 (4)는 slow P-wave에 관한 식을 나타내고 있다. 그러나 본 연구에서는 측정의 편리성을 위하여 fast P-wave만을 고려하기로 한다.

$$\frac{V_1}{V_c} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \frac{(\sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{12}^2)}{(\gamma_{12} + \gamma_{22})^2} \zeta_1 \zeta_2 \left(\zeta_1 + \zeta_2 + \frac{1}{2} \zeta_1 \zeta_2 \right) \quad (1)$$

$$\frac{V_2}{V_c} = \left[2 \left(\frac{f}{f_c} \right) \frac{(\sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{12}^2)}{(\gamma_{12} + \gamma_{22})} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\frac{L_c}{x_1} = \frac{1}{2} |\zeta_1 \zeta_2| \frac{(\sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{12}^2)}{\gamma_{12} + \gamma_{22}} \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \quad (3)$$

$$\frac{L_c}{x_2} = \left[\frac{1}{2} \frac{f}{f_c} \frac{(\gamma_{12} + \gamma_{22})}{(\sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{12}^2)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

여기서, f 는 진동수, f_c 는 특성 진동수, $\zeta_1 = z_1 - 1$, $\zeta_2 = z_2 - 1$, $z_1 = V_c^2 / V_1^2$, $z_2 = V_c^2 / V_2^2$, V_c 는 상대 속도, V_1 는 fast P-wave 속도, V_2 는 slow P-wave 속도, L_c / x_i (여기서 $i=1$ and 2)는 first P-wave와 second P-wave의 사이클당 감쇠를 표현한다.

식 (1)부터 (4)는 특성 진동수보다 낮은 진동수에서의 관계를 나타내며 특성 진동수보다 높은 진동수를 표현하는 식은 Biot(1956 b)에 보다 상세히 표현되어 있다. 식 (1)부터 (4)와 그 이상의 진동수 영역을 종합하여 도시하면 그림 1과 2로 표현될 수 있다. 그림 1에서 나타나는 fast P-wave의 변곡점이 나타나는 진동수를 특성 진동수라 하는 반면 감쇠계수(attenuation)와 진동수의 상관관계를 도식한 그림 2에서는 가장 큰 감쇠지수(intrinsic specific attenuation factor)에서의 진동수가 특성 진동수가 된다.

그림 1과 2를 비교해 보면 특성 진동수는 거의 같은 값을 가지고 있으나 그림 1에서는 그 속도의 차이가 미미

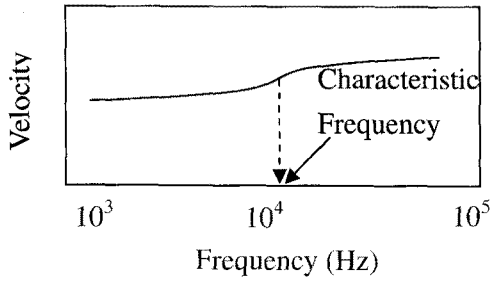


그림 1. P-wave의 속도와 진동수의 관계

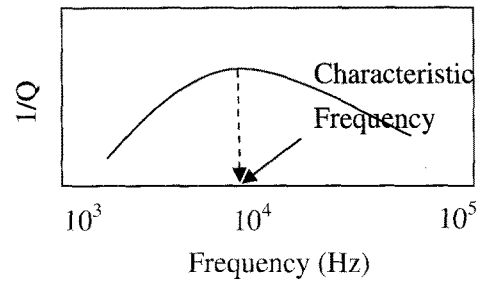


그림 2. 진동수의 변화에 따른 감쇠계수(attenuation)의 변화

하여 변곡점을 찾는 일이 쉽지 않다. 그러나 그림 2에서는 감쇠지수의 차이가 뚜렷히 구별되는 최대 감쇠지수를 비교적 쉽게 구할 수 있으며 따라서 특성 진동수 역시 쉽게 찾을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 특성 진동수를 찾는 방법으로 그림 2에서 나타난 것과 같은 감쇠지수를 사용한다. 이를 통해 구한 특성 진동수는 Biot(1956, a, b)에 의해 제시된 투수계수 산정식 (5)에서 입력정수로 사용된다.

$$\omega_c = \frac{\eta \phi}{K \rho} \quad (5)$$

여기서 ω_c 는 특성진동수(각진동수), η 는 점성, ϕ 는 공극률, K 는 고유투수계수(intrinsic permeability, 길이의 제곱단위), 그리고 ρ 는 유체의 밀도이다. 식 (5)를 지방공학자들이 널리 쓰는 단위를 가진 투수계수의 식으로 표현하면 아래와 같은 식 (6)이 된다.

$$f_c = \frac{\phi \cdot g}{2\pi \cdot k} \quad (6)$$

이 때 g 는 중력 가속도, f_c 특성진동수(Hz 단위) 그리고 k 는 투수계수(거리/시간 단위)이다.

입자 속의 마이크로 간극과 같은 보다 미시역학적(micro-mechanical) 지반 물성치를 고려하기 위하여 Batzle 등(2001), Kelder와 Smeulders(1997)와 Yamamoto(2003) 등은 식 (6)과는 다소 다른 특성 진동수를 이용한 투수계수 산정법을 제시하기도 하였으나 본 연구에서 사용되는 시료가 사질토라는 특성을 고려하여 Biot(1956, a)로부터 제기된 식 (6)만을 사용하였다.

한편, 위의 식의 적용성에 관한 연구는 Batzle 등(2001)에 의하여 그 한계점이 제기되기도 하였다. 즉, Biot(1956)에 의해 제시된 투수계수 산정식은 특성 진동수가 확연하게 나타났을 경우에 한하여 유용하며 특성 진동수는 낮은 투수성의 물질($K < 200 \text{ mD} \approx 10^{-6} \text{ m/s}$)에서는 적

표 1. Biot의 투수계수에 따른 대략적인 특성진동수

Permeability (m/s)	f_c (kHz)	Remarks
10^{-6}	500	Ultrasonic
10^{-5}	50	Ultrasonic
10^{-4}	5	Sonic
10^{-3}	0.5	Sonic

용성이 떨어진다는 적용성의 한계를 제시하기도 하였다. 그러나 다른 연구자들(Yamamoto, 2003)은 보다 낮은 투수성 암반에 상기 방법을 적용하기도 하였다. 따라서 상기방법의 작용대상 지반으로서 모래와 같은 높은 투수계수를 가진 물질이 보다 타당함을 알 수 있다. 일반적인 지반 정수를 이용하여 산출한 개략적인 특성 진동수 값은 표 1과 같다. 표 1로부터 사질토의 경우 특성 진동수는 대개 음파 영역으로서 진동의 발생 및 측정이 비교적 쉬움을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 진동원으로서 음파를 사용하였다.

상기 기법을 적용함에 있어 또 다른 한계점은 음파 신호의 도달거리에 따른 문제일 수 있다. 그러나, Batzle 등(2001)과 Yamamoto(2003)은 원유를 함유한 다공질 암반에서(hydrocarbon bearing rocks)에서도 음원-수신기 거리 100m 이상에서도 신호를 수신하여 P-wave 속도를 산정할 수 있었다. 지반에서는 큰 감쇠효과로 인하여 동일한 세기의 음원과 거리에서도 감지되는 신호의 세기가 작다. 음파 신호의 이동 거리를 높이기 위해서는 보다 발전된 신호 처리 기술이 이용되고 있으며 최근 Yamamoto(2003)와 Xiang과 Sabatier(2003)은 PSRN(Pseudo Random Noise)라 불리는 대역확산 통신방식(spread spectrum technology)을 사용하였다고 보고하였다. Yamamoto는 PSRN 암호처리 신호(encoded signal)의 사용을 통해서 S/N(signal/noise)비를 40% 이상 높일 수 있었을 뿐만 아니라 음원(source)에서 부터 더 멀리 신호를 보내 압축파(음파)의 감쇠계수를 계산할 수 있는 것으로 보고한 바 있다. 지금까지 살펴본 바, Biot(1955, 1956 a, b)의

이론 및 암반에의 작용은 검증되었으나 지반(사질지반이나 점토지반)에 직접적으로 적용한 연구 결과는 보고되지 않고 있다. 따라서 본 연구를 통하여 이론으로만 제시되었던 Biot 이론의 지반에 관한 적용성을 투수 계수를 통하여 고찰 하고자 한다. 특히 음파의 발생 및 수신에 용이한 사질토 시료의 실내 시험을 그 대상으로 하였다.

3. 시험 장치

본 연구에서 사용된 시험프로그램은 디지털 오실로스코프, 음원(source)와 신호 감지 장치(receiver)를 이용하는 보편적인 표면파 측정 기법과 유사하다. 즉, 오실로스코프는 두 개의 감지된 신호를 기록하며 이를 스크린을 통해서 표시하며 이 때 감지된 신호의 크기를 비교함으로써 압축파의 감쇠 지수를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 음파원(acoustic source)과 두 개의 감지장치(receiver)가 이용되었으며 그 구성은 그림 3과 같다. 음파원은 Ocean Engineering Enterprises에서 제작된 OCEANEARS DRS-8을 사용하였으며 감지장치는 AFAB Enterprises에서 제작된 Aquarian Hydrophones H-1이 사용되었다. 파동 발생기(wave generator)에 의해 만들어진 신호는 증폭기(amplifier)를 통하여 증폭되며, 이와 같이 증폭된 신호는 지반속의 음원(acoustic source)으로 부터 서로 다른 거리에 위치해 있는 두 개의 감지장치(receiver)로 전달된다. 두 개의 신호가 감지된 후 그 신호의 크기는 정산표

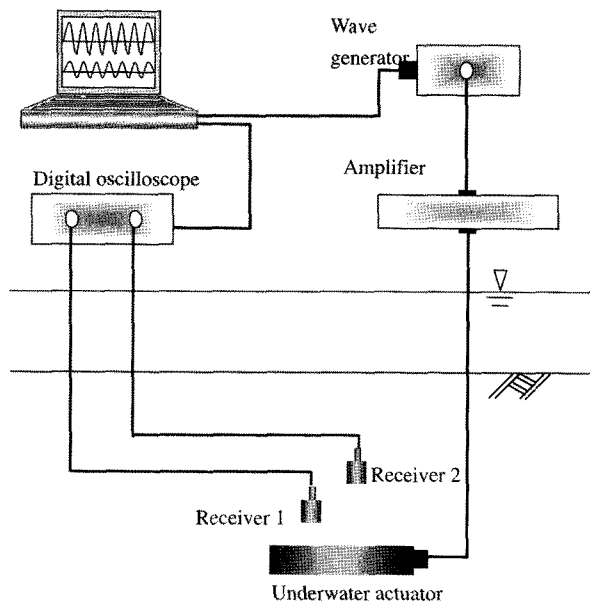


그림 3. 시험계획 및 장치

(spread sheet)를 통해 감쇠 지수를 계산하는데 사용된다.

이 때, 감쇠계수는 다음과 같은 식 (7)에 의하여 구할 수 있다.

$$A_2 = A_1 e^{-\alpha(r_2-r_1)} \quad (7)$$

이 때, A_1 과 A_2 는 감지 장치 1과 2로부터 감지된 신호의 크기이며, (r_2-r_1) 은 그림 4와 같이 두 개의 감지 장치의 거리차를 의미한다. 여기서 α 는 감쇠 계수(attenuation coefficient)를 나타낸다. 본 연구에서는 감지 장치들의 거리를 고정시킴에 따라서 항상 일정한 기하 감쇠(geometric attenuation)이 발생하도록 하였으며, 이 경우 기하 감쇠는 특성 진동수에 영향을 미치지 않으므로, 기하감쇠의 영향을 고려하지 않았다. 기하감쇠와 본고의 감쇠계수에 대한 보다 상세한 설명은 Kim and Lee(2000)를 참고 바란다. 감쇠계수 α (attenuation coefficient)를 이용하여 $1/Q$ 또는 Q^{-1} (inverse quality factor 또는 intrinsic specific attenuation of compression wave factor, 편의상 본고에서는 감쇠지수라 칭함)는 식 (8)을 통하여 구할 수 있다.

$$Q^{-1} = \frac{\alpha c}{\pi f} \quad (8)$$

여기서, c 는 위상속도(phase velocity), f 는 진동수(frequency)이다. 본 연구에서는 위상속도는 물의 속도(1463m/s)로 가정하였으나 지반 매질에서의 위상 속도는 낮은 진동수 영역에서는 낮고 높은 진동수 영역에서는 보다 높음에 따라 일정하지 않다(대개 5% 정도의 차이를 나타냄). 그러나 본 연구에서는 이러한 차이를 무시하였다.

4. 시스템 교정(system calibration)

음파를 이용한 본 연구의 결과는 시스템(센서, 음원 그리고 시험 환경)의 음파 특성에 영향을 받는다. 이런

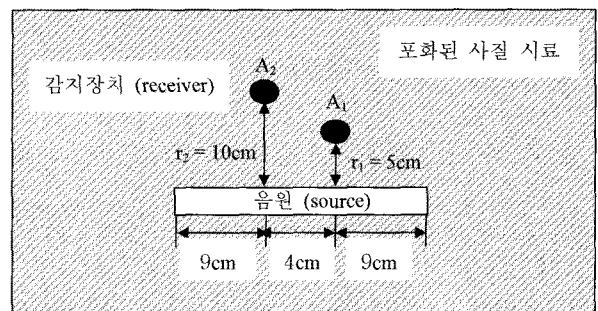


그림 4. 감쇠계수(attenuation coefficient) 계산을 위한 시험장치

바람직하지 않는 영향에 관한 조사 및 시험은 실내시험을 통하여 진행되었다.

근방 영역 영향(near field effect)는 음파를 사용함에 따라서 나타나는 특성으로서, 유한한 크기를 가진 음원의 경우 음원의 여러지점에서 발생한 음원이 서로 간섭을 일으키는 현상을 일컫는다. 음향기기의 스피커에 지나치게 가까운 위치에서는 소리가 정상적으로 들리지 않는 예로부터 그 존재를 확인 할수 있다. 근방 영역은 음원으로 사용되는 소스(source)의 크기에 따라 결정되는 것으로 이론 적으로 볼 때 그 크기가 점과 같은 아주 작은 크기일 경우 근방 영역에 따른 영향은 거의 무시할 수 있으나 하지만 실제로 생산되는 음원은 일정한 크기가 있으며 근방 영역의 영향을 무시할 수 없다. 근방 영역에서는 떨림 판(vibrated plate)의 동시 떨림에 의하여 기하 감쇠(geometric damping)의 영향이 정상적으로 나타나지 않는 문제점을 발생시킨다. 근방 영역 영향(near field effect)에 관한 연구 Hueter와 Bolt(1955)와 Kinsler 등(1982)에 의해 제안된 단순 공식에 의해 대략적인 그 값을 쉽게 계산할 수 있다. 그러나 공식의 특성 상 정확한 음원의 크기를 파악해야 하는 문제점이 있으며 본 연구에서 사용된 정확한 음원의 크기(실제 크기가 아닌 실제 떨림판의 크기)는 제조사로부터 정확한 정보를 얻을 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 물로 채워진 테스트 박스를 이용하여 직접 시험을 수행하였다. 음파원(acoustic source)과 감지 장치(receiver)의 거리를 변화시키면서 각 거리마다 여러 다른 진동수에서 근방 영역의 범위를 측정하였으며 대표적인 결과는 그림 5에 나타난 것과 같다. 그림 5로부터 근방 영역의 영향을 피하기 위한 최소한의 거리는 0.05m로 나타났다. 또한 그림 5로부터 물 속에서의 음파의 감쇠효과는 매우 미미한 것으로 나타남바, 본 연구에서는 그 영향을 고려하지 않았다.

음파는 그 특성상 음원 및 수신시의 방향에 의하여 수신되는 신호의 크기가 좌우될 수 있다. 음원과 감지 장치의 방향성(directionality)에 관한 결과는 그림 6을

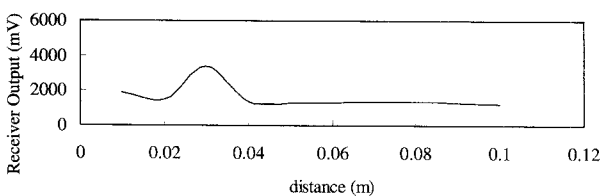


그림 5. 5kHz에서의 근방 영역 영향

통하여 고찰하였다. 그림 6은 시스템의 수평 또는 수직이 정렬되지 않았을 때 나타나는 오류를 나타내고 있다. 이런 오류를 최소화 시키기 위하여 본 연구에서는 세 개의 기포관이 있는 레벨을 사용하여 음원 및 수신기의 방향을 교정함으로써 시스템의 정렬 오차를 최소화하였다.

지향성의 오류와 최적화된 음원-수신기 거리등을 바탕으로 그림 7과 같은 합리적인 진동수 반응 결과를 얻을 수 있었다. 이 때 데이터 비(data ratio)는 감지 장치 1(receiver 1)를 통하여 측정된 신호의 출력을 감지 장치 2(receiver 2)로부터 측정된 출력 값으로 나누어 구해졌다. 물의 감쇠를 무시할수 있을 때 그 비는 1에 가까와야 하며, 실제 결과는 1과 매우 가까운 값을 나타낸다.

그림 7은 약 8,000Hz 까지의 진동수 영역에서는 거의 일정한 수신강도 반응을 보이고 있다. 이는 반사파와 시스템 정렬에 관한 오류를 효과적으로 제어했다는 것을 나타내고 있으며 또한 일정 구간에서의 음원과 신호 감지 장치의 반응이 거의 일정하다는 것을 의미하고 있다. 10,000Hz에서의 급격한 Q^{-1} 의 증가는 시스템의 특성을 나타내고 있다고 판단되며 투수 계수 산정을 위해 본 연구에서 사용된 진동수 영역인 200Hz부터 6,000Hz까지의 범위에서는 시스템의 특성 영역인 10,000Hz의 영향을 받지 않는다고 판단된다. 본 연구에서 사용된 실험 장치는 디지털 오실로스코프, 프리 증폭기, 메인 증폭기, 음원(source) 및 신호 감지 장치(receiver) 등의 복합 시스템인바, 각 구성요소의 주파수 특성을 이용하여 전체 시스템의 주파수 특성을 이론적으로 구하기 보다는 시험을 통하여 구하였다.

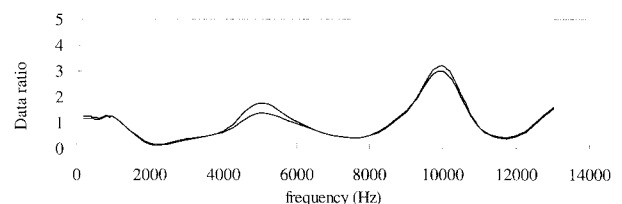


그림 6. 지향성 오류에 따른 결과

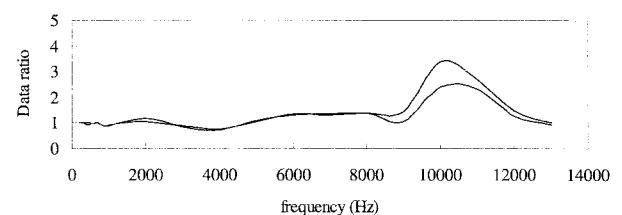


그림 7. 최적화된 시스템 교정에 따른 결과

5. 실내 시험 개요

본 시험은 미시시피대학 토질 연구실에서 진행되었다. 일반적인 토질계수는 ASTM(American Society for Testing and Materials)의 시험방법에 의거하여 수행하였으며 그 결과는 표 2 및 그림 8에 나타난 바와 같다.

음파를 이용한 실내 시험을 위하여 시험 상자를 제작하였으며 그림 9에 제시된 바와 같이 그 크기는 약 67cm × 60cm × 63cm 이다. 상자의 옆 면은 철망(wire mesh)로 둘러싸여 있으며 전체의 골격은 5cm × 10cm

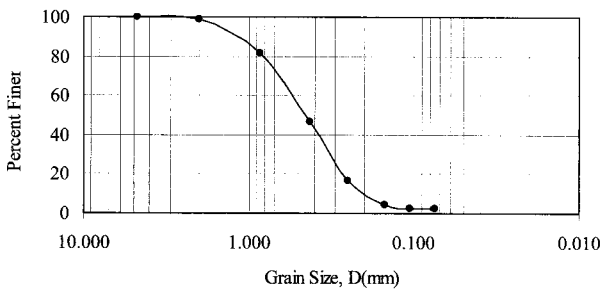


그림 8. 체가름 시험결과

표 2. 시료의 일반적 특성

G_s	w (%)	r_d (t/m^3)	e	n
2.64	23.14	1.639	0.611	0.379

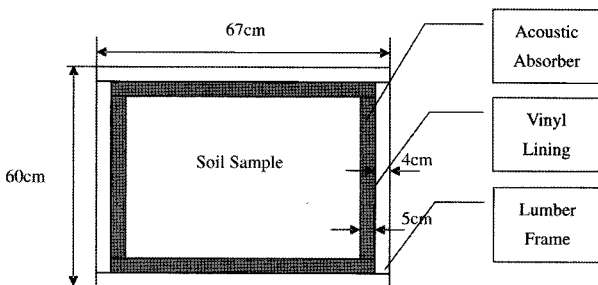
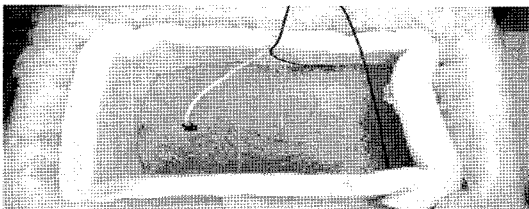
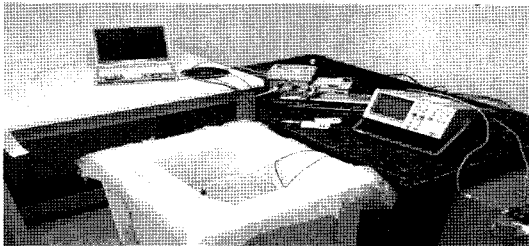


그림 9. 시험 상자

목재로 제작하였다. 모래질 시료의 포화과정에서 발생할 수 있는 누수를 방지하기 위하여 방수막을 적용하였으며 반사파(reflected wave)와 굴절파(refracted wave)와 같은 의도하지 않는 다른 파동의 영향을 억제하기 위하여 철망 인쪽에 흡음제(acoustic absorber)를 사용하였다.

6. 시험 결과 분석

(1) 투수계수

본 연구에서 사용된 시료의 일반적인 특성은 표 2와 같다. 표 2와 그림 8을 통하여 시료의 특성과 종류를 파악해 보면 모래질 흙이라는 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 시료를 이용하여 위에 제시된 시험방법을 통하여 반복 시험을 수행한 결과 그림 10에 보여지는 바와 같이 $1/Q$ (inverse quality factor)의 값은 동일하지 않으나 3500Hz에서 최대값을 갖는 것으로 나타나고 있다. 서두에 기술한 바 같이 $1/Q$ 값이 최대로 나타난 진동수를 특성 진동수(characteristic frequency)라 표현하며 이는 Biot(1956a,b)의 이론에 따라 시료의 투수성에 관한 자료를 내포하고 있다. 이 때 차이를 보이는 $1/Q$ 값은 서로 다른 전치 증폭기(pre-amplifier)의 건전지의 상이함에서 기인된다고 판단된다. 즉, 본 시험은 서로 다른 4개 회사의 건전지를 사용하였으며 각각의 다른 제조사에서 제작된 건전지의 특성상 미세하지만 다른 출력(output)을 보였다. 특히, 두개의 수시기에 사용된 각각의 건전지의 출력이 정확히 같지 않을 경우, 수신기 출력이 영향받을 수 있으며, 따라서 $1/Q$ 값이 소폭 달라질 수 있을 것이다. 비록 다른 건전지를 사용하였으나 전체적인 추세는 같게 나타나며 이로부터 특성 진동수(characteristic frequency)를 찾는 데는 별다른 문제가 없다고 판단된다.

산정된 특성 진동수와 일반적인 시료의 토질계수를 이용하여 Biot(1956a,b)가 제시한 식 (6)을 사용할 수 있었다. 식 (6)을 통하여 구한 투수계수는 $2.01 \times 10^{-4} m/sec$ 로

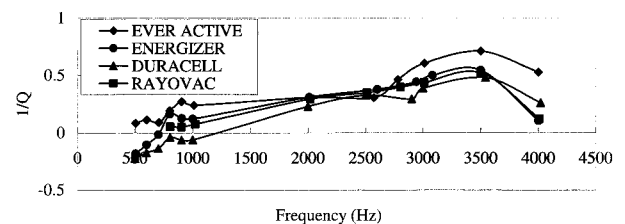


그림 10. $1/Q$ 와 진동수의 상관관계

나타났으며 이의 신뢰성과 정확성을 비교하기 위하여 실내 정수두 투수계수 시험을 실시한 결과 $1.49 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$ 의 투수계수 값을 구할 수 있었다. 두 결과로 판단할 때 Biot(1956 a, b)를 통하여 구한 투수계수 값이 전형적인 정수두 시험 결과보다 1.35배 정도 크게 나타났다. 그러나 이러한 차이는 통상적인 투수시험시 나타나는 차이가 크게 다르지 않으며, 음파를 이용한 투수 계수 산정시의 흐름 조건은 한 방향으로의 지속적인 흐름 상태가 아닌 상대 흐름의 방향이 지속적으로 바뀌는 조건임을 고려하면 어느 정도의 차이는 존재 할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 건조시료와 포화시료를 통한 Biot 이론의 확증

다른 시험은 건조 시료와 포화 시료를 통하여 Biot(1956 a, b)의 이론을 확증하기 위하여 실행되었다. 포화된 지반의 경우에는 흙 입자와 간극을 채운 물 사이에서의 움직임에 의한 추가적 에너지의 감소현상이 발생하며 이를 viscous damping 이라 한다. Tong과 Patrik(2006)은 viscous damping과 skeleton damping(입자와 입자의 마찰에 의한 감쇠현상)을 보다 명확히 구별하기 위하여 hydraulic damping 이라는 새로운 용어로 정의하였다. Skeleton damping 은 주로 건조된 시료에서 나타나며 에너지 감소의 원인이 포화된 지반과는 상이하게 흙 입자 사이의 미끌어짐(sliding)과 회전(rotation)에 의해 발생되며 이는 진동수가 변화하여도 그 값의 차이는 거의 없거나 미미한 정도이다. 이를 Biot(1956 a, b)의 이론을 고려하면 특성 진동수는 건조시료에서는 발생되지 않아야 함을 알 수 있다. 이 시험의 결과는 그림 11에 잘 나타나 있다. 본 연구에 사용된 건조된 시료의 함수비는 0.098%이며 포화된 시료의 함수비는 23.14%이다. 시험 결과 특성 진동수(charactersitic frequency)는 포화된 시료에서는 분명히 나타난 반면 건조시료의 경우 1/Q (invese quality factor)의 변화는 전 진동수 영역에 걸쳐 별다른 차

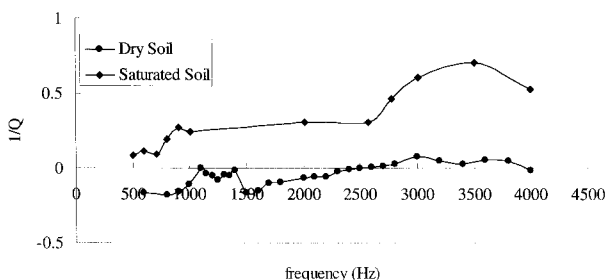


그림 11. 건조시료와 포화된 시료를 이용한 특성진동수 산정

이를 보이지 않았으며 특성 진동수(characteristic frequency) 또한 발견되지 않았다. 따라서, 그림 11에서 측정된 특성 진동수는 기계적인 특성이 아닌 지반의 특성으로 나타난 현상임이 확인되었다.

7. 결론

본 연구에서는 음파를 이용한 새로운 모래질 시료의 투수계수 산정법에 대하여 시험적으로 그 결과 고찰하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 포화된 모래질 시료에서의 특성 진동수는 분명하게 나타났으며 이를 이용하여 Biot(1956 a, b) 이론에 바탕을 둔 음향 기법으로서 투수계수를 산정할 수 있었다.
- (2) 음파를 이용한 투수계수 값은 정수두 시험법과 비교했을 때 약간 큰 값을 보였으나 이런 오차는 통상적인 투수계수의 오차범위 및 동적 시험법시의 흐름조건으로 판단해 볼 때 매우 타당한 값이라 판단할 수 있다.
- (3) 동적 방법에 의한 투수계수와 정적 방법에 의한 투수계수와의 상관관계는 명확히 제시할 수 없으나 더 많은 시험결과 값의 축적을 통하여 더 낫은 관계를 제시할 수 있을 것이다.
- (4) 음파를 이용한 산정법은 사질토의 투수계수를 산정하는 데 매우 유용한 방법 중 하나이다.
- (5) 본 연구의 결과는 교란된 시료로부터 얻어진 값이나 시험 방법의 발전을 통해 원래의 교란되지 않은 상태에서의 투수계수 값도 얻을 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 바이텍 코리아와 The University of Mississippi의 지원으로 수행되었으며, 조언을 아끼지 않은 NCPA (National Center for Physical Acoustic)의 Dr. C. Hickey와 Georgia Institute of Technonogy의 Dr. Santamarina, 그리고 고려대학교 이종섭 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Batzle, M., Hofmann, R., Han, D.H., and Castagna, J. P. (2001), "Fluids and frequency dependent seismic velocity of rocks", *The*

- Leading Edge*, 2, 168-171.
2. Biot, M. A. (1955) a, "General theory of acoustic in porous dissipative media", *J. Acoust. Soc. Am.*, 34 (9), 1254-1264.
 3. Biot, M. A. (1955) b, "Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid", *J. of Appl. Phys.* Vol.26, pp.182-185.
 4. Biot, M. A. (1956a), "Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous rock: I. Low frequency range", *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, 168-178.
 5. Biot, M. A. (1956b), "Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous rock: II. Higher frequency range", *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, 179-191.
 6. Hickey, C.J., and Sabatier, J.M. (1997), "Measurements of the two types of dilatational waves in an air-filled unconsolidated Sand", *J. Acoust. Soc. Am.*, 102, 128-136.
 7. Hickey, C. (2007), "Personal communication."
 8. Kelder, O., and Smeulders, D. M. J. (1997), "Observation of the Biot slow wave in water saturated Nivelsteiner sandstone", *Geophysics*, 62 (6), 1794-1796.
 9. Kim, D. S., and Lee, J. S. (2000), "Propagation and attenuation characteristics of various ground vibration", *Soil Dynamics and Earthquake Eng.*, 19, 115-126.
 10. Prevost, J. H. (1980), "Mechanics of continuous porous media", *International Journal of Engineering Science*, 18, 787-800.
 11. Plona, T. J. (1980), "Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies", *Appl. Phys. Lett.* Vol.36, No.4, pp.259-261.
 12. Santamarina, J. C. (2001), "Soils and Waves", *John Wiley & Sons, Inc*, New York, 487 p.
 13. Song, C.R. and Voyiadjis, G.Z. (2006), "Analytical Observation of Micro-Mechanical Interactions in Plasticity of Saturated Soils", *International Journal of Plasticity*, under final review.
 14. Song, C.R. and Voyiadjis, G.Z. (2005b), "Pore Pressure Response around a Penetrating Object", *Computers and Geotechnics*, 32, 37-46.
 15. Torstensson, B. A., and Petsonk, A. K. (1986), "A device for in-situ measurement of hydraulic conductivity", *Proceedings of the 4th International Seminar Field Instrumentation and In-situ Measurements*, Nanyang Technological Institute, Singapore.
 16. Voyiadjis, G. Z., and Abu-Farahkh, M.Y. (1996), "Coupled theory of mixtures for clayey soils", *Invited lecture presented at the 11th ASME Symposium on Theoretical and Experimental Methods for Particulate Materials*, ASME, Mechanics and Materials Conference, John Hopkins University, Baltimore, Maryland.
 17. Voyiadjis, G.Z. and Song, C.R. (2005a), "A Coupled Micro-Mechanical Based Model for Saturated Soils", *Mechanics Research Communications*, 32(5), 490-503.
 18. Voyiadjis, G. Z., and Song, C. R. (2003), "Determination of hydraulic conductivity using piezocone penetration test", *Int. J. of Geomechanic.*, ASCE, 3, 217-224.
 19. Voyiadjis, G. Z., and Song, C. R. (2000), "Finite strain anisotropic modified cam clay model with plastic spin. 1: Theory", *J. of EM Div.*, ASCE, 126 (10), 1012-1019.
 20. Voyiadjis, G. Z., and Song, C. R. (2006), "The coupled theory of mixtures in geo-mechanics with applications", *springer*, New York, 438p.
 21. Yamamoto R. (2003), "Imaging permeability structure within the highly permeable carbonate earth: Inversetheory and experiment", *Geophysics*, 68 (4), 1189-1201.

(접수일자 2007. 2. 12, 심사완료일 2008. 8. 25)