

포화도에 따른 동결토의 탄성파 특성 변화

박정희* · 강민구** · 이종섭***

Park, Jung-Hee*, Kang, Min-Gu**, Lee, Jong-Sub***

Variation in Characteristics of Elastic Waves in Frozen Soils According to Degree of Saturation

ABSTRACT

The strength of frozen soils is one of the significant design parameters for the construction in frozen ground. The properties of frozen soils should be investigated to understand the strength of frozen soils. The objective of this study is to figure out the characteristics of elastic waves in frozen soils, which reflect the constituent and physical structure of frozen soils in order to provide fundamental information of those according to the degree of saturation. Freezing cell is manufactured to freeze specimens, which are prepared with the degree of saturation of 10%, 40%, and 100%. Piezo disk elements are used as the compressional wave transducers and Bender elements are used as the shear wave transducers. While the temperature of specimens changes from 20°C to -10°C, the velocities, resonant frequencies and amplitudes of the compressional and shear waves are investigated based on the elastic wave signatures. Experimental results reveal that the elastic wave velocities increase as the degree of saturation increases. The variation of resonant frequencies coincide with that of elastic wave velocities. A marked discrepancy in amplitudes of compressional and shear waves are observed at the temperature of 0°C. This study renders the basic information of elastic waves in frozen soils according the degree of saturation.

Key words : Compressional waves, Degree of saturation, Frozen soils, Elastic wave amplitudes, Resonant frequencies, Shear waves

초 록

극한지 지반의 설계정수 산정을 위해 동결토의 강도 특성은 매우 중요한 요인이며 이를 파악하기 위해서는 동결토의 기본적인 특성을 파악하는 것이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 동결토의 구성 성분 및 물리적 구조를 반영하는 탄성파에 대한 기초적인 정보를 제공하기 위해 포화도에 따른 동결토의 탄성파 특성을 파악하고자 하였다. 시료를 동결시키기 위해 동결 용 셀을 제작하였으며 포화도가 각각 10%, 40%, 100%인 시료를 조성하였다. 시료가 동결되는 동안 탄성파를 측정하기 위해 전단파 트랜스듀서로서 벤틀리엘리먼트를 사용하였으며, 압축파 트랜스듀서로서 피에조 디스크 엘리먼트를 사용하였다. 포화도가 다른 세 가지 시료의 온도가 20°C 에서 -10°C 까지 변화하는 동안 압축파 및 전단파 신호를 측정하였으며, 이를 토대로 탄성파 속도, 공진주파수 및 진폭의 변화를 파악하였다. 또한 탄성파 속도를 이용해 포화도가 다른 동결토의 포아송 비를 분석하였다. 시료가 동결된 이후에 포화도가 큰 시료의 탄성파 속도가 가장 크게 나타났다. 또한 탄성파 속도와 공진주파수의 변화는 매우 유사하게 나타났고 그 변화는 동시에 발생하였다. 압축파와 전단파의 진폭은 시료가 동결되는 0°C 에서 각기 다른 양상을 나타내었다. 본 연구는 동결토의 구조적 메커니즘에 대한 정보를 제공하는 탄성파 특성을 시료의 포화도에 따라 파악하고자 하였다는 점에서 의의가 있다.

검색어 : 압축파, 포화도, 동결토, 탄성파 진폭, 공진주파수, 전단파

* 정희원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (chdl34@korea.ac.kr)

** 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (windforest@korea.ac.kr)

*** 정희원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Corresponding Author · Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University · jongsu@korea.ac.kr)

Received February 12 2013, Revised March 12 2013, Accepted April 10 2013

1. 서론

압축파와 전단파로 구분되는 탄성파는 미소변형을 범위($<10^{-3}\%$)에서 물질을 구성하는 입자의 진동에 의해 전파된다. 대상 물질의 탄성과 특성은 물질의 구성 성분 및 물리적 구조를 반영하는 중요한 요소(Nakano et al. 1972; Deschartres et al. 1988; Rose, 1999)이다. 탄성파를 이용하여 연약지반의 탄성계수 및 간극비 평가, 흙의 특성연구, 록볼트의 진전도 평가, 지반내의 불연속 물질 탐측 등과 같이 탄성파의 적용분야는 점점 확대되고 있다(Yoon et al. 2010; Cho and Santamarina, 2001; 유정동 등. 2008; Lee et al. 2009). 비동결토뿐만 아니라 탄성파를 이용한 동결토의 연구는 흙 입자, 물, 공기, 부동수분의 4상으로 구성되어 있는 동결토의 특성을 비파괴 방법으로 평가할 수 있다는 장점으로 인해 활발히 진행되고 있다.

동결토의 탄성과 특성을 파악하기 위한 기존의 연구는 동결토의 압축파 및 전단파 속도를 액침법(Critical angle method)을 이용하여 측정하고 있다(Nakano et al. 1972; Nakano and Arnold, 1973; 김영진, 2003; Wang et al. 2006; Christ and Park, 2009). 액침법은 저온의 온도($\sim -20^{\circ}\text{C}$)로 동결된 시료를 등유로 채운 수조에 넣은 후, 동결된 시료를 녹이면서 탄성과 속도만을 측정한다. 여기서 동결토의 압축파 속도는 압축파 트랜스듀서를 이용하여 직접 측정되지만 동결된 시료의 전단파 속도는 모드변환(mode conversion)의 원리를 이용하여 간접적으로 측정된다. 액침법을 이용한 동결토의 탄성과 특성 파악은 다음과 같은 한계를 보여준다. 첫째, 시료를 등유 속에 넣고 탄성파를 측정하기 때문에 시료의 자립을 위해서 시료를 저온으로 얼린 후, 녹이면서 탄성파를 측정해야 한다. 둘째, 등유 속의 시료는 표면부터 녹기 때문에 시료의 자립이 어려워지는 0°C 근처에서의 탄성과 속도를 산정할 수 없다. 마지막으로 속도, 주파수 및 진폭으로 구성되는 탄성파의 특성 중 동결토의 탄성과 속도만을 파악할 수 있다.

본 연구에서는 동결토의 탄성과 특성파악에 사용된 기존의 연구 방법을 보완할 수 있는 새로운 방법으로 동결토의 탄성과 특성을 파악하고자 하였다. 압축파 트랜스듀서로서 피에조 디스크 엘리먼트(piezo disk element)를, 전단파 트랜스듀서로서 벤더엘리먼트(bender element)를 사용하였다. 압축파 및 전단파 신호의 초기도달시간(first arrival technique)을 이용하여 탄성과 속도를 산정하였다. 탄성파 트랜스듀서의 효과적인 설치와 시료의 온도를 상온에서 영하로 변화시키면서 시료를 동결시킬 수 있는 동결용 셀을 제작하였다. 시료 준비를 위해 모래와 실트를 혼합하였으며 포화도가 10%, 40%, 100%인 시료를 조성하였다.

본 논문의 목적은 시료의 온도를 20°C 에서 -10°C 까지 변화시키면서 동결토의 탄성과 속도, 공간주파수 및 진폭의 변화를 파악하는

것이다. 또한 포화도가 각기 다른 세 가지 시료를 통해 포화도가 동결토의 탄성과 특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 본 논문에서는 시료 동결용 셀 시료 특성 및 조성 방법, 피에조 디스크 엘리먼트와 벤더엘리먼트의 특징에 대해 설명을 하고, 실험을 통해 획득한 탄성과 신호를 토대로 포화도가 다른 동결토의 탄성과 속도, 공간주파수, 진폭 및 포아송 비의 변화를 파악하였다.

2. 탄성파 측정 : 동결토의 구성 성분 및 구조 특성

토질역학에서 흙 입자에 대한 거동만을 따로 생각할 수 없으며, 삼상재료(흙 입자, 물, 공기)가 함께 존재할 때의 거동이 중요하다(이인모, 2011). 일반적인 흙에 반해, 동결토는 삼상재료에 추가하여 영하의 온도에서도 얼지 않는 부동수분이 존재한다. 온도는 동결토의 강도를 결정하는 중요한 요인이며(Wang et al. 2006) 온도에 따라 달라지는 부동수분의 양과 흙 입자, 얼음의 결합 정도에 따라 동결토의 강도가 달라진다(김영진 등. 2002).

탄성파를 이용하여 동결토의 구성 성분을 파악하는 이론적인 접근법은 다음과 같다. 대상 물체가 2개의 구성 성분으로 구성되어 있다고 가정하면, Wyllie et al.(1956)은 2개의 구성 성분 각각의 압축파 도달시간의 합과 유효도달시간 사이의 관계를 이용하여 대상 물체의 압축파 속도를 표현하는 모델을 Eq. (1)과 같이 제안하였고 Wood(1941)는 공기와 액체로 구성된 복합체의 탄성계수를 Eq. (2)와 같이 제안하였다.

$$\frac{1}{V^*} = \frac{\phi}{V_1} + \frac{(1-\phi)}{V_2} \quad (1)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{\phi}{E_1} + \frac{(1-\phi)}{E_2} \quad (2)$$

여기서, V^* 는 유효 압축파 속도, E^* 는 복합체의 탄성계수, V_1 , V_2 와 E_1 , E_2 및 ϕ , $1-\phi$ 는 각 구성성분의 압축파 속도, 탄성계수 및 부피비이다.

Wyllie et al.(1956)은 Eqs. (1) and (2)를 이용하여 고체-액체 또는 고체-고체 상태에서의 탄성파의 전달체계를 체적탄성계수(bulk modulus, B)의 함수로 나타내고자 하였으며 이를 Eq. (3)에 나타내었다.

$$\frac{1+q^*}{V^{*2}} = \left(\frac{(1+q_1) \cdot \phi}{V_1^2 \cdot \rho_1} + \frac{(1+q_2) \cdot (1-\phi)}{V_2^2 \cdot \rho_2} \right) \cdot (\phi \cdot \rho_1 + (1-\phi) \cdot \rho_2) \quad (3)$$

여기서, q 는 전단탄성계수와 관련된 상수이며 $0 \sim 1.2$ 의 값을 가진다. 액체의 q 값은 0이며 액체에 담긴 암석의 경우 q^* 값은

0.6을 제안하였다. ρ_1, ρ_2 는 각 구성 성분의 밀도를 의미하며 각 구성 성분의 체적탄성계수 B_x 는 Eq. (4)와 같다고 제안하였다.

$$B_x = \frac{\rho_x \times V_x^2}{1 + q_x} \quad (4)$$

Timur(1968)은 Eq. (1)을 확장하여 3가지 구성성분으로 이루어진 물체의 유효 압축과 속도를 산정하기 위해 Eq. (5)와 같은 모델을 제안하였다(Christ and Park, 2009).

$$\frac{1}{V^{*2}} = \left(\frac{\phi_s}{V_s^2} + \frac{\phi_i}{V_i^2} + \frac{\phi_w}{V_w^2} \right) \quad (5)$$

여기서 아래첨자 s, i 및 w는 흙 입자, 얼음 및 부동수분을 의미한다. Deschartres et al.(1988)은 영하의 온도에서 존재하는 부동수분에서 전단탄성계수의 영향을 반영하는 q는 무시할 수 있다라는 단순화를 통해 Eq. (3) and (5)를 단순화시켜 다음과 같이 Eq. (6)을 제안하였다.

$$\frac{1}{V^{*2} \cdot \rho^*} = \left(\frac{\phi_s}{V_s^2 \cdot \rho_s} + \frac{\phi_i}{V_i^2 \cdot \rho_i} + \frac{\phi_w}{V_w^2 \cdot \rho_w} \right),$$

$$\rho^* = (\phi_s \cdot \rho_s + \phi_i \cdot \rho_i + \phi_w \cdot \rho_w) \quad (6)$$

흙 입자를 모사하기 위해 입경이 균일한 글라스 비즈(glass beads)를 사용한다고 가정하면, ρ^* 는 동결토의 전체밀도이고 $\rho_s \approx 2.7t/m^3$, $\rho_i = 0.92t/m^3$ 및 $\rho_w = 1t/m^3$ 이며 $V_s = 5900m/s$, $V_i = 3800m/s$, 및 $V_w = 1480m/s$ 이고 전체 물의 부피는 얼음 및 부동수분이 차지하고 있으므로 측정된 압축과 속도로부터 Eq. (6)을 이용해 동결토의 부동수분 및 얼음함량을 파악할 수 있다.

탄성파를 이용한 동결토의 구성 성분 및 구조를 파악하기 위한 이론적인 접근법은 실험결과와의 비교를 통해 비교적 정확한 것으로 알려져 있다(Christ and Park, 2009). 앞에서 기술한 이론적인 접근법은 동결된 시료를 녹이는 과정에서 동결시료의 전단탄성계수에 대한 영향을 배제하였다. 시료의 온도가 상온에서 영하로 변하는 동안 동결 시료의 전단탄성계수를 고려할 수 있는 이론식의 수립이 필요하다고 판단된다.

3. 시료 동결

3.1 동결용 셀

시료의 동결 과정에서 포화도에 따른 탄성과 특성을 파악하기 위해 Fig. 1과 같이 고강도 나일론 재질 ($E = 25 \times 10^9 N/m^2$)의 동결용

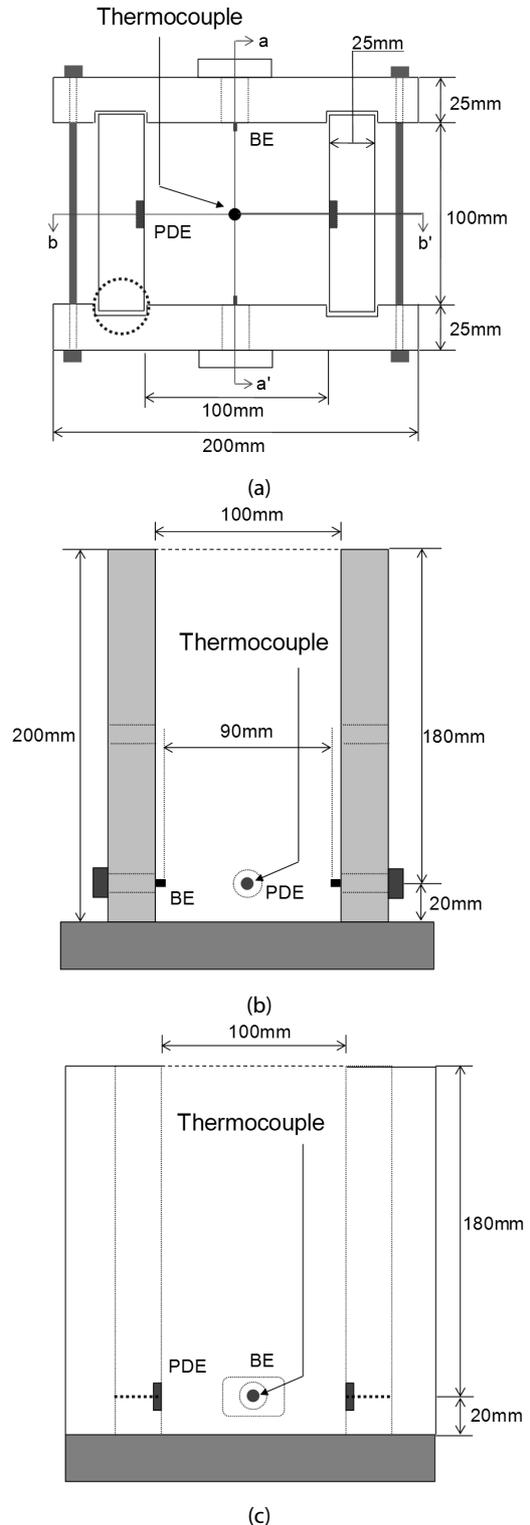


Fig. 1. Freezing cell with thermocouple, and shear and compressional wave transducers: (a) Top view; (b) Side view along a-a' section; (c) Side view along b-b' section (BE and PDE denote bender elements and piezo disk elements, respectively).

셀을 제작하였다. 온도 하강으로 인한 나일론의 부피변화를 최소화하기 위해 셀의 두께는 25mm로 하였으며 시료의 동결로 인해 횡방향 변위가 발생하지 않도록 셀의 바닥 및 옆면은 고정력 볼트로 고정하였다. 이 셀을 이용하여 Fig. 1(a)와 같이 시료의 상부 단면이 노출되며 가로 및 세로의 길이가 100mm이고 Fig. 1(b)와 같이 높이가 200mm인 시료를 조성할 수 있다. 셀을 통하여 신호가 직접적으로 전달되는 경우, 대상 시료의 순수한 전단파 및 압축파와 신호를 획득할 수 없기 때문에 Fig. 1(a)와 같이 셀의 옆면을 분리한 후, 셀이 맞닿는 부분은 실리콘(Silicon) 처리를 한 후 조립하였다. 또한 시료의 하부로부터 20mm 상부 지점에서 전단파와 압축파 트랜스듀서를 크로스 홀(Cross-hole)형상으로 설치하기 위해 셀을 가공하였다.

3.2 온도측정

시료가 동결되는 동안 시료의 온도를 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 온도센서(Thermocouple, K-type)를 설치하였다. 온도센서는 시료 하부로부터 20mm 상부 지점에 위치하며 시료 단면 중앙부의 온도를 측정하고자 하였다. 측정된 온도는 온도센서와 연결된 데이터 로거(Data logger, Agilent 34970A)를 통해 컴퓨터로 전달된다. 본 실험에 사용된 데이터 로거는 ±0.001℃의 정밀도로 온도를 측정하며 실험 경과시간을 연속적으로 컴퓨터에 저장한다.

3.3 시료 특성

본 연구에서는 모래-실트 혼합토를 이용하여 시료를 조성하였다. 모래 무게에 대한 실트의 무게비 (% of silt = $W_{silt}/W_{sand} \times 100\%$)가 10%가 되도록 모래와 실트를 균일하게 혼합하였다. 실험에 사용된 모래는 30번체와 50번체 사이의 입경을 가지는 주문진 표준사 ($D = 0.30 \sim 0.60\text{mm}$)로서 모래의 평균입경은 0.45mm이다. 모래와 혼합하기 위하여 사용한 실트는 crushed limestone으로 200번 체를 통과한 것을 사용하였다. 모래-실트 혼합토의 최대 및 최소 간극비 산정하기 위해 ASTM D4253 및 D4254방법을 사용하였으며 최대 및 최소 간극비는 각각 0.74, 0.47이고 ASTM D854의 방법을 통하여 산정한 비중은 2.57로 나타났다. 시료 조성에 사용된 모래 및 모래-실트 혼합토의 특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. The properties of sand and sand-silt mixture

Property	Sand	Sand-silt mixture
Gs	2.62	2.57
D ₅₀ (mm)	0.45	-
e _{max}	0.82	0.74
e _{min}	0.56	0.47

3.4 시료 조성

균일하게 혼합된 모래-실트 혼합토를 노 건조 시킨 후, 상대밀도 70% ($\gamma_d=16.3\text{kN/m}^3$)에 대응하는 무게의 시료를 준비하여 포화도가 10%, 40%, 그리고 100%인 시료를 조성하기 위해 Eq. (7)을 사용하였다.

$$S = \frac{\omega G_s}{e_{(70\%)}} \quad (7)$$

여기서, S는 포화도, ω 는 함수비, G_s는 모래-실트 혼합토의 비중, $e_{(70\%)}$ 는 상대밀도 70%에 해당하는 간극비를 의미한다.

포화도가 10%, 40%인 모래-실트 혼합토는 탬핑(tamping)방법을 이용하여 시료를 조성하였으며 탬핑에 사용된 다짐추의 무게는 2kg이다. 모래-실트 혼합토를 100% 포화시키기 위해 증류수가 충분히 담긴 트레이(tray)에 모래-실트 혼합토를 넣고 공기방울이 발생하지 않을 때까지 트레이를 가열하였다. 증류수에 완전히 잠긴 모래-실트 혼합토를 플라스틱 밀폐 용기에 5일 동안 보관하였으며, 수중에서 퇴적된 자연상태 흙의 구조를 가장 잘 모사할 수 있는 시료조성 방법(Chaney and Mulilis, 1978; Vaid and Nequssey, 1984)으로 알려진 수중 강사법을 적용하여 시료가 100% 포화되도록 하였다.

4. 실험 방법

4.1 탄성과 트랜스듀서

포화도가 다른 동결토의 탄성과 특성을 파악하기 위해 압축파 및 전단파를 측정하였으며, 본 연구에 사용된 전단파 및 압축파 트랜스듀서인 벤더 엘리먼트(bender element)와 피에조 디스크 엘리먼트(piezoelectric disk element)를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 1(a)와 같이 한 쌍의 벤더엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트는 크로스 홀(cross-hole)형상으로 설치하였다. 셀을 통한 파의 직접적인 전달이 발생하는지 파악하기 위해 공기 중에서 전단파 및 압축파를 측정하였다. 벤더엘리먼트를 통해서 신호가 측정되지 않았으며, 피에조 디스크 엘리먼트를 통해서 공기의 압축파 속도인 약340m/s를 측정할 수 있었다.

전단파 트랜스듀서인 벤더 엘리먼트는 흙과 결합효과가 뛰어나다고 알려져 있으며 Fig. 2(a)와 같이 병렬형식의 벤더엘리먼트를 사용하여 전기적 간섭문제를 감소시키고자 하였다(이종섭과 이창호, 2006). 본 실험에 사용된 벤더엘리먼트 치수는 8.0 × 4.0 × 0.6 (길이 × 너비 × 두께, mm)이며, 전단파의 공진주파수가 흙의 특성에 의해 결정되도록 흙과 결합되기 위한 캔틸레버 보 형태의 길이는 5mm로 충분히 길게 하였다(Lee and Santamarina, 2005).

압축파 트랜스듀서인 피에조 디스크 엘리먼트는 시료의 포화여

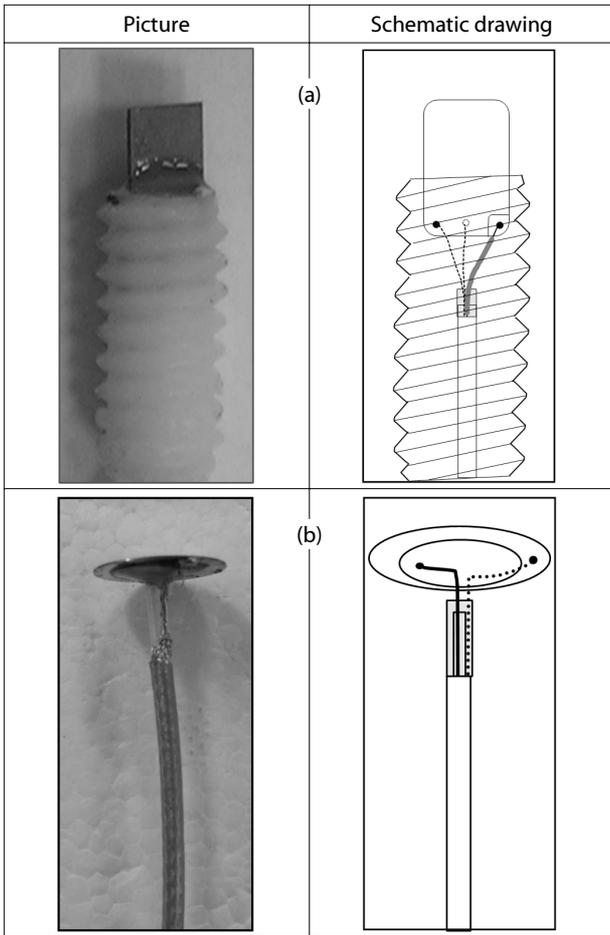


Fig. 2. Elastic wave transducer: (a) Bender elements for shear waves; (b) Piezo disk elements for compressional waves.

부를 판단하는데 매우 효과적이다. 흙의 구속탄성계수(constraint modulus) 대 밀도 비 증가량이 물보다 크기 때문에 포화된 흙에서의 압축파 속도는 물에서의 속도보다 증가하게 된다. 일반적으로 물에서의 압축파 속도는 1480m/s이며 시료가 포화된 경우, 압축파 속도는 이보다 크게 나타난다. 본 실험에서 사용된 피에조 디스크 엘리먼트를 구성하는 금속판의 직경은 15mm이고 압전 세라믹의 직경은 10mm이며 두께는 0.4mm이다.

4.2 실험 과정

본 연구에서는 포화도에 따른 동결토의 탄성과 특성을 파악하기 위해 포화도가 각각 10%, 40%, 100%인 시료를 동결 셀에 조성한 후, 시료의 온도가 20℃에서 -10℃ 까지 변화하는 동안 벤더 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트를 이용하여 진단파와 압축파를 측정하였다. 시료의 상부에서 하부로 동결이 진행되도록 하기 위해 시료가 조성된 동결 셀을 단열상자에 고정하였으며 시료를 동결시키기 위한 냉동고의 온도를 -30℃로 설정하였다.

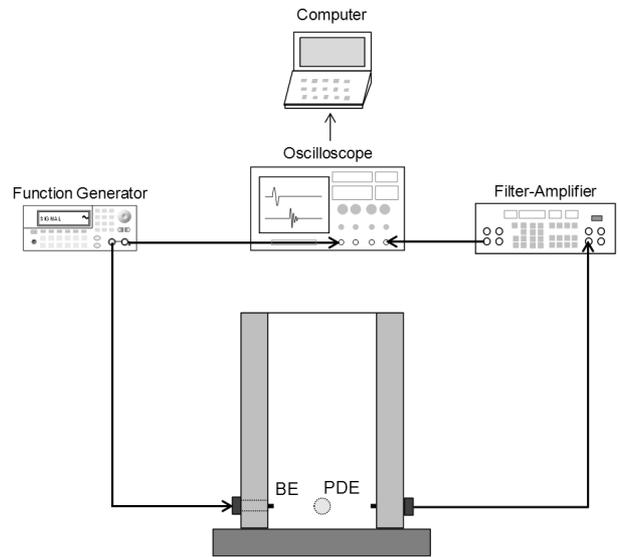


Fig. 3. Elastic wave measurement system.

시료의 온도가 시료 단면에 따라 균일하게 변하지 않기 때문에 시료 단면 중앙부의 온도를 파악하여 시료의 온도변화를 대변하고자 하였으며 시료의 온도변화는 데이터 로거를 통해 연속적으로 측정하였다.

4.3 탄성과 측정 시스템

압축파와 진단파의 측정시스템을 Fig. 3과 같이 구성하였으며 발신 트랜스듀서에서 물리적 신호를 발생하도록 하는 신호발생기(Function Generator, Agilent 33220A, Input frequency: 20Hz, Input voltage: 10V)에서 수신 트랜스듀서에서 획득한 신호의 잡음을 제거하고 신호를 증폭시키기 위한 필터-증폭기(Filter and Amplifier, Krohn-Hie 3364) 및 수신된 신호를 저장할 수 있는 오실로스코프(Oscilloscope, Agilent 54624A)로 구성되어 있다. 고주파수의 불필요한 잡음을 제거하기 위하여, 1024개의 신호를 평균하여 저장하였으며 또한 로우 패스 필터링(low pass filtering)에 사용되는 차단 주파수(cut off frequency)는 공진주파수보다 10배 이상 설정하여 로우 패스 필터로 인해 실험결과에 미치는 영향을 차단하였다 (이종섭과 이창호, 2006).

5. 실험결과 및 분석

5.1 온도변화에 따른 탄성과 신호

시료가 동결되는 동안 셀의 하부에 설치된 온도센서를 통해 포화도가 다른 세 가지 시료의 온도변화를 측정하였고 포화도 40%인 시료의 시간에 따른 온도변화를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 액체가 고체로 변화할 때 시간에 따라 온도가 변하지 않는 일정은

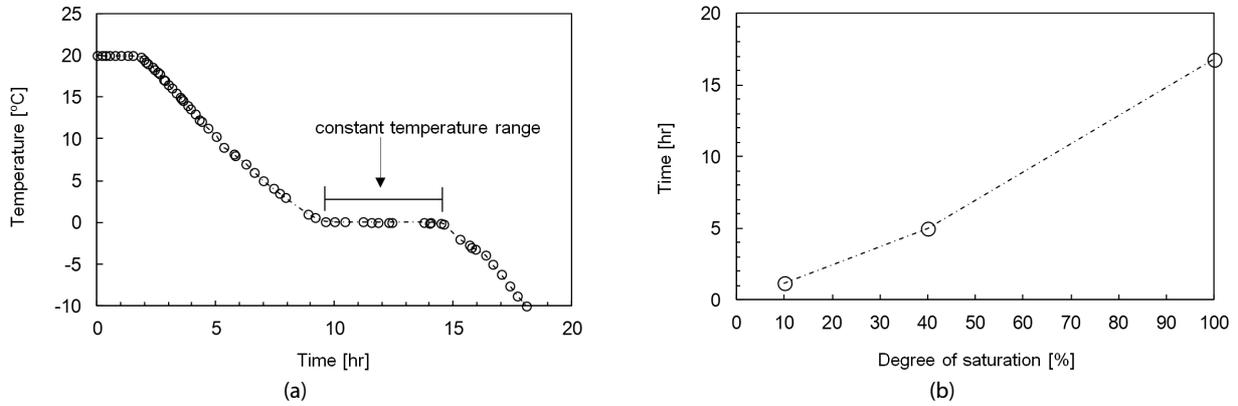


Fig. 4. Temperature change: (a) Temperature versus time at the degree of saturation of 40%; (b) Constant temperature range time according to the degree of saturation.

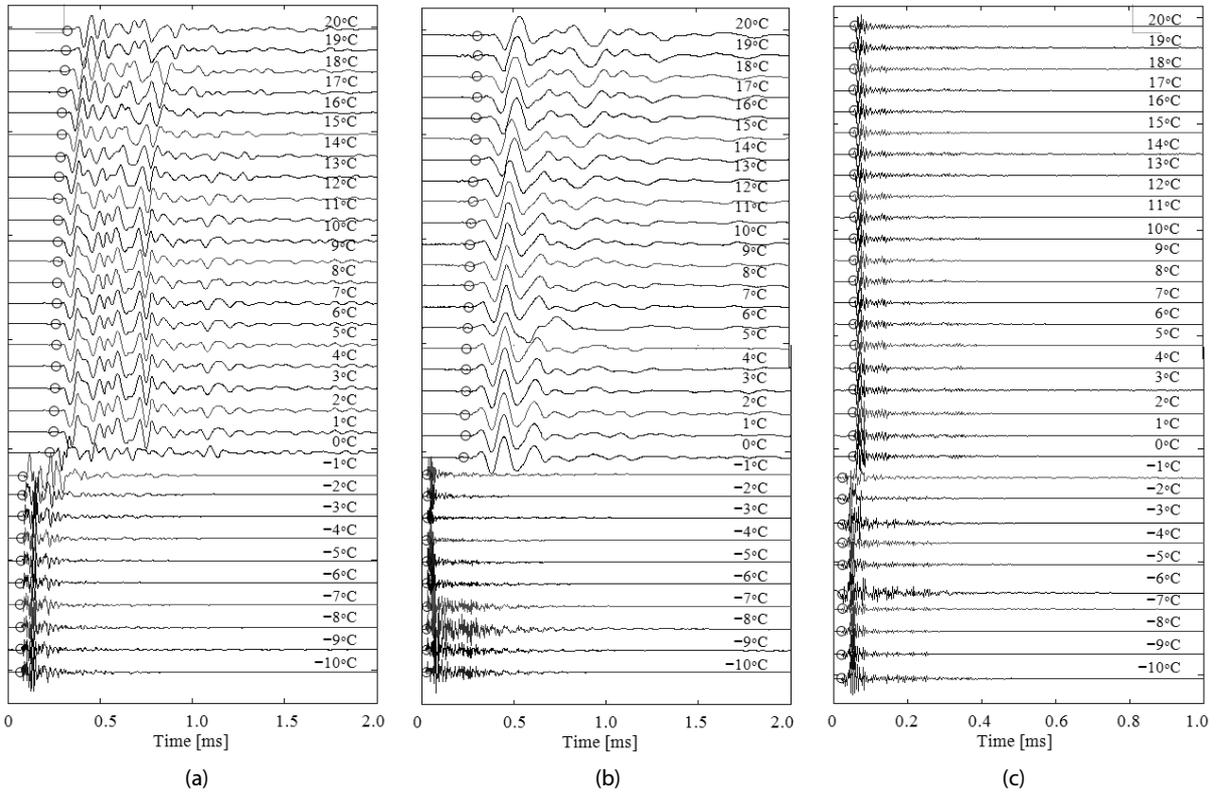


Fig. 5. Compressional wave signatures during the temperature change according to the degree of saturation: (a) S=10%; (b) S=40%; (c) S=100%.

도 구간(constant temperature range)이 나타나는데 이 구간에서는 액체와 고체가 공존한다. 이러한 현상은 물질의 상태변화가 일어나면서 발생된 열에너지가 모두 응고열로 쓰이면서 온도가 일시적으로 내려가지 않고 유지되기 때문이며, 일정한도구간을 거쳐 물체의 상태가 완전히 고체로 변한 다음에 다시 온도가 낮아진다 (Zumdahl and Zumdahl, 2008).

시료가 동결되는 동안 포화도에 따라 다르게 나타나는 일정한

도구간의 지속시간을 Fig. 4(b)에 나타내었다. 포화도 10%인 시료의 일정한도구간은 약 1시간 동안 지속되었고 포화도 40%인 시료는 약 5시간의 지속시간을 보였으며, 포화도 100%인 시료는 약 17시간 동안 일정한도구간이 지속되었다. Fig. 4(b)는 시료에 포함된 수분함량이 많을수록 시료가 동결되기 위해 더 많은 에너지가 사용됨을 나타낸다. 또한 포화도와 일정한도구간의 지속시간이 비교적 선형의 관계를 가짐을 보여준다.

탄성과 신호는 탄성과 속도, 공진주파수 및 진폭 변화를 파악하기 위해 필요한 기본적인 정보를 포함한다. 포화도가 10%, 40%, 100%인 세 가지 시료의 온도가 20°C에서 -10°C까지 변하는 동안 측정된 압축과 신호를 Fig. 5에 나타내었다. 상온에서는 포화도 10%와 40%인 시료의 압축과 초기도달시간이 유사하며 포화도 100%인 시료의 압축과 초기도달시간이 가장 빠르게 나타났다. 또한 포화도 10%와 40%인 시료의 압축과 신호는 포화도 100%인 시료의 압축과 속도에 비해 낮은 주파수의 신호양상을 보여준다. 0°C에서 포화도가 다른 세 가지 시료의 압축과 초기도달시간은 모두 감소하였으며, 포화도가 큰 시료일수록 압축파의 초기도달시간이 더 작게 나타났다. 0°C에서 포화도 10%, 40%인 시료의 압축과 신호 변화가 뚜렷하게 나타난 반면, 포화된 시료에서는 압축과 신호가 크게 달라지지 않았다. 영하의 온도에서는 포화도가 다른 세 가지 시료의 압축과 초기도달시간은 큰 변화를 보이지 않았다.

시료의 온도가 변하는 동안 전단파를 측정하였으며 이를 Fig. 6에 나타내었다. 상온에서는 포화도 10%인 시료의 전단파 초기도달시간이 가장 빠르게 나타났으며 포화도 100%인 시료의 전단파 초기도달시간이 가장 느리게 나타났다. 0°C에는 포화도가 다른 세 가지 시료의 전단파 초기도달시간은 큰 폭으로 감소하였으며

파형의 변화가 확연하게 나타났다. 압축과 신호와 유사하게 영하에서 전단파 신호의 초기도달시간은 포화도가 큰 시료에서 더 작게 나타났다. 영하의 온도에서 포화도가 다른 세 가지 시료의 전단파 초기도달시간은 온도가 감소하더라도 거의 변화하지 않았다.

5.2 탄성과 속도

Figs. 5 and 6에서 보인 신호를 토대로 압축파와 전단파 초기도달시간과 트랜스듀서 끝 단간 거리를 고려하여 Eq. (8)을 통해 압축과 및 전단파 속도를 산정하였다.

$$V = \frac{L}{\Delta t} \tag{8}$$

여기서, L은 피에조 디스크 엘리먼트 및 벤더 엘리먼트의 끝 단간 거리를 의미하며 Δt는 압축파 및 전단파의 초기도달시간을 의미한다. Fig. 1(b)에 나타난 것과 같이 피에조 디스크 엘리먼트의 양 끝간 거리는 100mm이며 벤더엘리먼트의 양 끝간 거리는 90mm이다. 벤더 엘리먼트를 통해 전단파 속도를 산정하는 경우에는, 근접장 효과를 반드시 고려하여야 하며 본 연구에서는 Lee and Santamarina(2005)에 의해 제안된 zero after first bump점을 이용하여 전단파의 초기도달시간을 산정하였다.

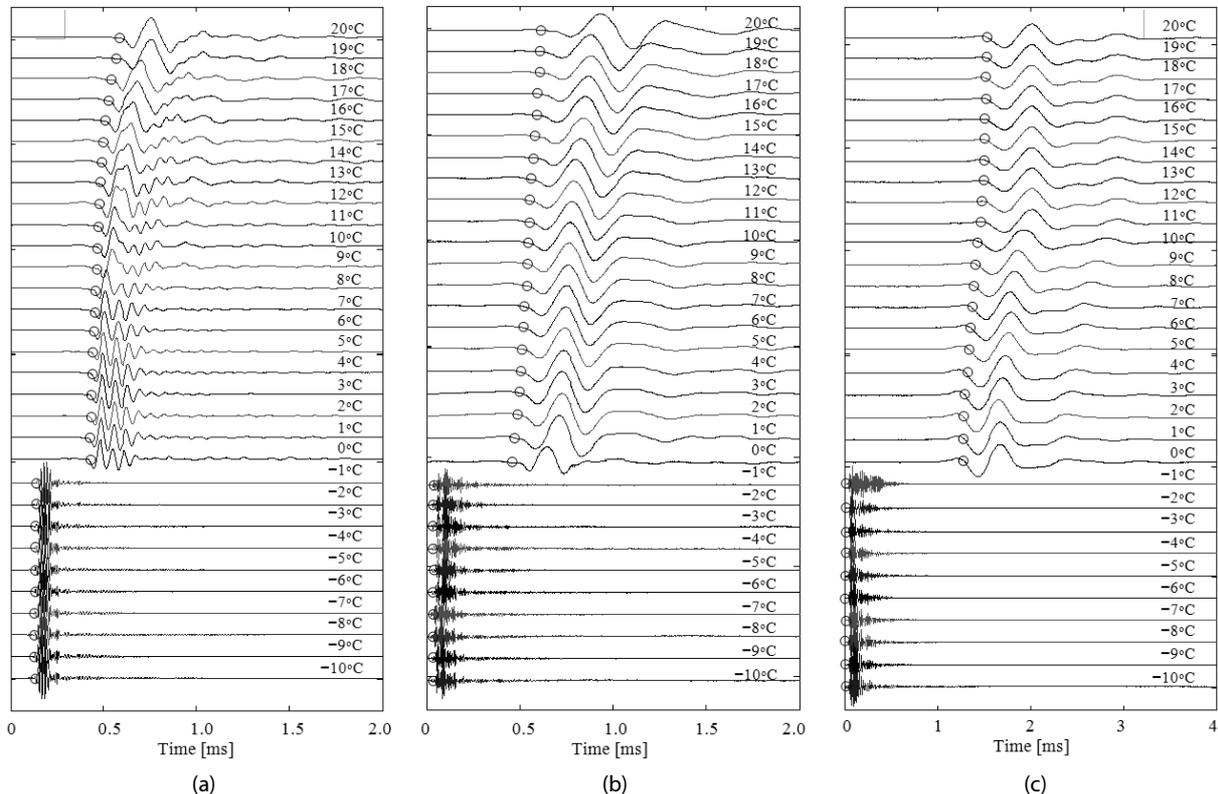


Fig. 6. Shear wave signatures during the temperature change according to the degree of saturation: (a) S=10%; (b) S=40%; (c) S=100%.

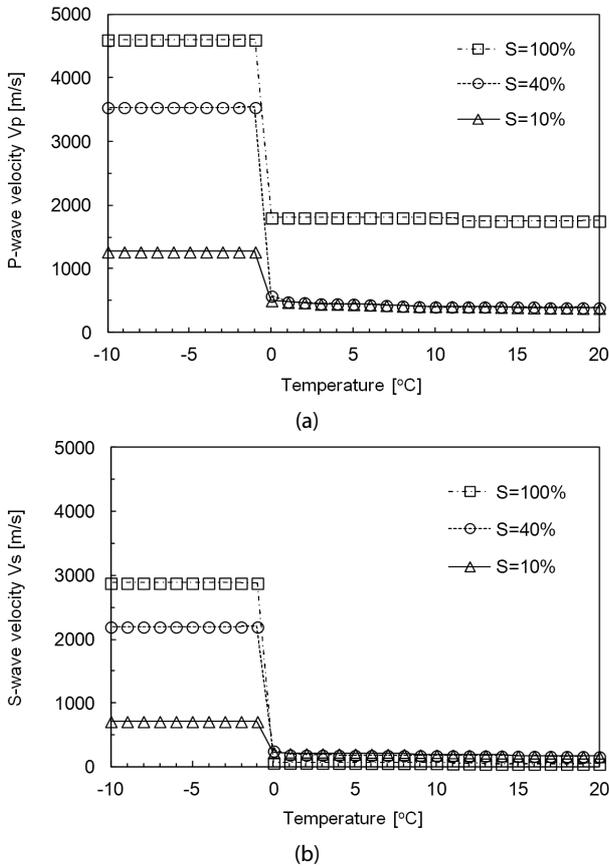


Fig. 7. Elastic wave velocities versus temperature according to the degree of saturation: (a) Compressional wave; (b) Shear wave.

포화도가 10%, 40%, 100%인 시료의 온도가 20°C에서 -10°C까지 변하는 동안 압축파 및 전단파 속도의 변화를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 상온에서는 포화도 100%인 시료의 압축파 속도가 가장 빠르게 나타났으며 포화도 10%와 40%인 시료의 압축파 속도는 유사하게 나타났다. 시료가 동결되는 0°C에서는 포화도가 다른 세가지 시료의 압축파 속도는 큰 폭으로 증가하였으며 포화도가 큰 시료일수록 압축파 속도가 더 크게 나타남을 보여준다. 영하의 온도에서 세가지 시료의 압축파 속도는 온도가 감소하더라도 큰 변화 없이 일정하게 나타났다.

포화도가 다른 세가지 시료의 온도변화에 따른 전단파 속도의 변화를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 상온에서는 포화도가 10%인 시료의 전단파 속도가 가장 크게 나타났으며 포화도가 100%인 시료의 전단파 속도가 가장 작게 나타났다. 압축파 속도변화와 유사하게 시료가 동결되는 0°C에서 포화도가 다른 세가지 시료의 전단파 속도는 큰 폭으로 증가하였으며, 포화도 100%인 시료의 전단파 속도 증가량이 가장 크게 나타났다. 영하의 온도에서 모든 시료의 전단파 속도는 온도가 변화하더라도 거의 일정한 값을 보였다.

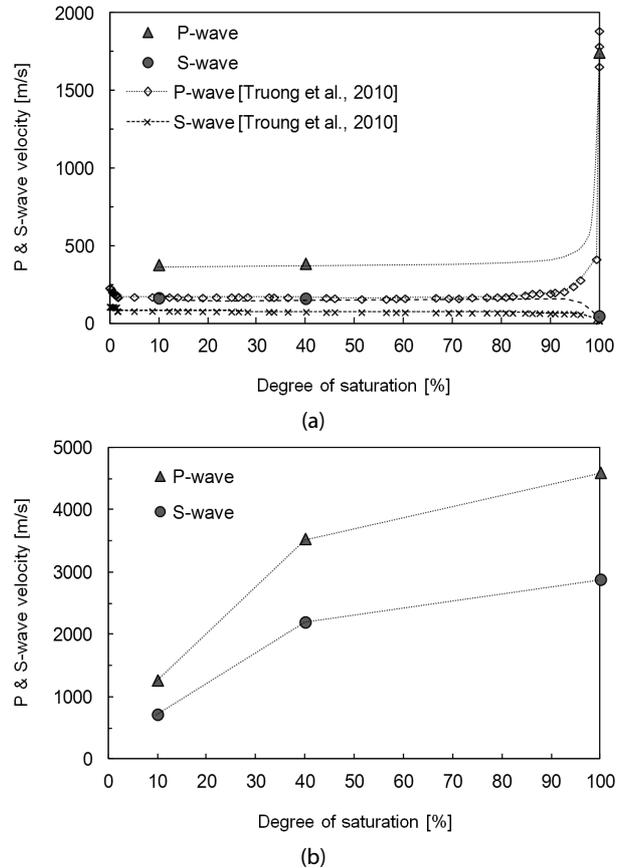


Fig. 8. Elastic wave velocities versus degree of saturation: (a) At the temperature of 20°C; (b) At the temperature of -10°C.

포화도가 다른 세 가지 시료의 압축파 및 전단파의 초기 도달시간을 산정해 포화도 별로 압축파 및 전단파 속도를 계산하였고, 시료의 온도를 낮추기 시작한 20°C와 시료가 완전히 동결된 -10°C에서의 포화도에 따른 압축파 및 전단파 속도를 Figs. 8(a) and 8(b)에 각각 나타내었다. 20°C의 온도에서는 포화도가 10%와 40%인 시료의 압축파 속도는 유사하게 나타난 반면, 포화도 10%인 시료의 전단파 속도는 포화도 40%인 시료의 전단파 속도보다 크게 나타났다. 포화도 100%인 시료에서 압축파 속도는 약 1750m/s를 나타내었으며 이를 통해 시료는 완전히 포화되었다고 판단된다. 포화도 100%인 시료의 전단파 속도는 약 50m/s로 나타났으며 이는 시료의 포화로 인해 유효응력이 감소했기 때문이다. Fig. 8(a)에 나타난 압축파와 전단파 속도 결과는 시료의 차이로 인해 용해된 소금의 고결화에 따른 탄성과 특성(Truong et al. 2010)에서 보여준 탄성파속도보다 다소 크게 나타났으나 탄성과 속도의 변화 양상은 유사하며 이를 통해 본 연구에서 조성된 시료의 준비가 양호하다고 판단된다. Fig. 8(b)와 같이 시료가 완전히 동결된 -10°C의 온도에서, 시료의 포화도가 증가할수록 압축파 및 전단파 속도는 크게 나타났으며 시료의 포화도가 증가할수록 압축파와 전단파 속도의

차이가 커짐을 보여준다.

상온에서의 압축과 속도는 유효응력보다는 함수비의 영향을 더 많이 받기 때문에(Ishihara et al. 1998) 포화도 10%와 40%인 시료의 압축과 속도는 유사한 반면, 포화도 100%인 시료의 압축과 속도는 포화도 10%와 40%인 시료의 압축과 속도와 큰 차이를 보여주었다. 시료가 동결된 후에도 압축과 속도는 포화도가 큰 시료일수록 더 크게 나타났으며 압축과 속도는 시료가 동결되기 전과 시료가 동결된 후에도 포화도에 의해 지배됨을 보여준다. 포화도 100%인 동결토에서 압축과 속도는 얼음의 압축과 속도인 3800m/s (Christ and Park, 2009)보다 크며, 가장 빠르게 나타나지만 동결 전과 동결 후의 압축과 속도의 변화량은 포화도 40%인 시료에서 약 2900m/s(500m/s에서 3400m/s로 증가)로 가장 크며 포화도 10%인 시료에서 약 760m/s(390m/s에서 1150m/s 증가)로 가장 작게 나타났다. 이는 불포화토의 동결에 의한 압축과 속도의 증가는 포화도에 매우 민감하게 반응함을 의미한다.

벤더엘리먼트를 통해 산정한 전단파 속도는 유효응력의 크기에 영향을 받으며 Eq. (9)와 같이 유효응력의 함수로 표현할 수 있다 (Roesler, 1979; Yu and Richard, 1984).

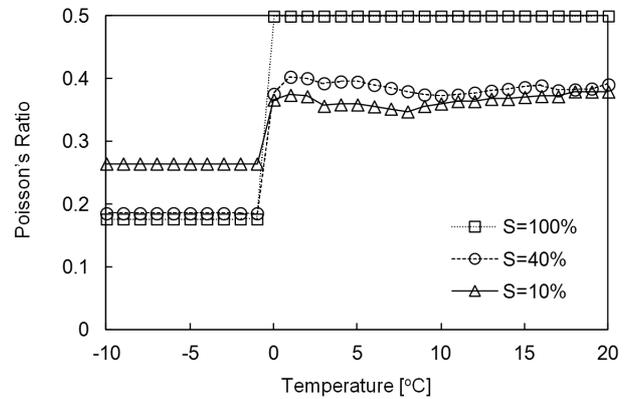
$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_0}{P_a} \right) = \alpha \left(\frac{\sigma'_w + \sigma'_m}{2P_a} \right)^\beta \quad (9)$$

여기서, σ'_w 는 전단파의 진행 방향의 유효응력, σ'_m 는 입자의 이동 방향의 유효응력, σ'_0 은 σ'_w 와 σ'_m 의 평균값, P_a 는 σ'_0 와 같은 단위의 대기압, 그리고 α 및 β 는 실험적으로 결정되는 상수로써, 실험결과를 curve fitting 하여 얻을 수 있다 (Santamarina et al. 2001). 상온에서의 전단파 속도는 포화도10%인 시료에서 가장 크게 나타났으며 이는 모래-실트 혼합토의 간극수에 의한 표면장력의 효과로 인해 유효응력이 가장 크기 때문인 것으로 판단된다 (박정희 등. 2012-b). 상온에서는 유효응력의 효과로 인해 포화도 100%인 시료의 전단파 속도가 가장 작게 나타났다. 시료가 동결된 후에는 포화도가 100%인 시료의 전단파 속도는 얼음의 전단파 속도인 1900m/s (Christ and Park, 2009)보다 크며 포화도가 다른 세가지 시료 중에서 가장 빠르게 나타났으며 포화도 10%인 시료의 전단파 속도가 가장 작게 나타났다. 포화도가 같은 조건에서는 유효응력이 큰 상태로 고결화된 흙의 전단파 속도가 더 크게 나타나지만(Lee et al. 2010) 포화도가 다른 동결토의 전단파 속도 변화로부터 간극수의 상 변화는 모래-실트 입자 사이를 얼음으로 연결시켜 고결화시키며 동결토의 전단강성을 결정하는 가장 중요한 요인은 포화도임을 보여준다. 또한 상온에서 지반의 전단강성은 유효응력에 의해 결정되지만, 동결된 지반은 간극의 크기를 조절하는 얼음함량에 의한 고결화 작용에 지배됨을 보여준다. 압축과 및 전단파 속도는 재료의 구속탄성계수 및

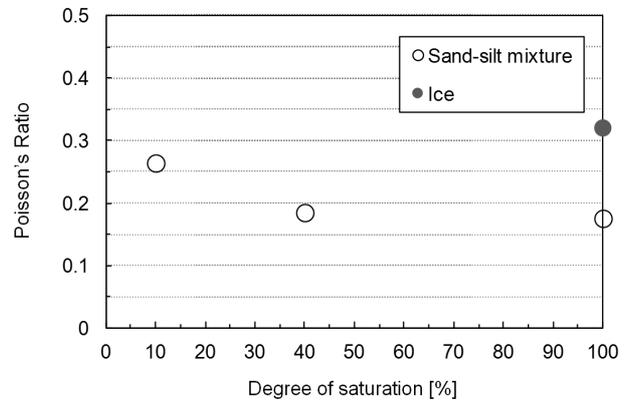
전단탄성계수의 제곱근에 비례 (Santamarina et al. 2001)하기 때문에 동결에 의한 압축과 및 전단파 속도의 급격한 증가는 동결토의 구속탄성계수 및 전단탄성계수가 크게 증가하였다는 것을 의미하며 터널 공사와 같은 건설현장에서 인공동결공법의 적용(홍승서 등. 2010)은 차수기능(신은철과 김진수, 2011) 및 지반의 일시적인 강성증가로 인해 매우 효과적인 것으로 기대된다. 동결토의 강성특성은 동결 전의 포화도에 의존하기 때문에 계절동토지역에서 지반이 동결되기 전의 포화도를 파악하고 있다면 지반이 동결 된 후의 지반강성을 대략적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

압축과와 전단파의 속도를 이용하여 포이송비를 Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다(Santamarina et al. 2001).

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \quad (10)$$



(a)



(b)

Fig. 9. Poisson's ratio at small strain: (a) Poisson's ratio versus temperature according to the degree of saturation; (b) Poisson's ratio versus degree of saturation at the temperature of -10°C.

Eq. (4)와 Fig. 8에 나타난 압축파와 전단파 속도를 이용해 온도변화에 따른 모래-실트 혼합토의 포아송 비를 산정하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 상온에서 완전히 포화된 시료의 포아송 비는 약 0.5를 보이고 있으며 포화도 10%인 시료의 포아송 비는 약 0.38, 포화도 40%인 시료의 포아송 비는 약 0.4의 값을 보이고 있으며 Das(2008)가 제안한 silty sand의 포아송 비(0.2~0.4)와 유사한 값을 나타낸다. Fig. 9(a)는 포화도가 큰 시료일수록 포화송 비가 크게 나타남을 보여준다. 시료의 온도가 0℃에서 -1℃로 변하는 동안 포화도가 다른 세 가지 시료의 포아송 비는 큰 폭으로 감소하였으며 영하의 온도에서 포화도가 큰 시료에서 더 작은 포아송 비를 나타내었다.

시료의 온도가 -10℃일 때 포화도에 따른 동결토의 포아송 비를 Fig. 9(b)에 나타내었다. 상온에서 포화도가 10%, 40%, 100%인 동결토의 포아송 비는 얼음의 포아송 비(≈0.33)보다 더 작게 나타났다. Fig. 9(b)는 시료의 동결로 인한 흙 입자와 얼음의 결합력은 동결토의 횡 방향 변위를 감소시키며 동결토의 포아송 비는 포화도에 의존함을 보여준다.

본 연구에서 사용한 모래-실트 혼합토는 모래함량이 매우 크기 때문에 영하의 온도에서 얼지 않는 부동수분이 매우 적을 것으로 판단되며(김영진 등. 2002), 영하의 온도에서 부동수분의 변화량이 미미하므로 포화도가 다른 세 가지 동결토의 포아송비는 일정하게 나타났다고 판단된다. Fig. 9(a)에 나타난 포아송 비는 피에조 디스크 엘리먼트와 벤더 엘리먼트로부터 구한 압축파 및 전단파 속도를 통해 산정하였고, 본 연구에서 적용한 실험방법은 영하의 온도에서 온도가 감소에 따라 증가 및 감소를 보이는 액침법(critical angle method)을 통해 구한 포아송 비(Christ and Park, 2009)보다 안정적인 결과를 보여준다.

5.3 공진주파수

시스템상의 공진주파수와 입력 주파수가 일치할 때 진폭이 최대인 탄성과 신호를 얻을 수 있기 때문에(Lee와 Santamarina, 2005) 시료가 동결되는 동안 주파수 스위핑(sweeping)과정을 통해 압축파와 전단파의 공진주파수를 결정하였으며 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)는 상온에서 압축파의 공진주파수는 포화도가 100%인 시료에서 가장 크게 나타났으며 포화도가 10%와 40%인 시료에서의 공진주파수는 유사하게 나타나는 것을 보여준다. 시료의 온도가 0℃에서 -1℃로 변하는 동안 포화도가 다른 세가지 시료의 공진주파수는 큰 폭으로 증가하였으며 포화도가 40%인 시료의 공진주파수 변화량이 가장 크게 나타났다. 영하의 온도에서 압축파의 공진주파수는 변화 없이 일정하게 나타났다.

포화도가 각기 다른 세 가지 시료의 온도변화에 따른 전단파의 공진주파수 변화를 Fig. 10(b)에 나타내었다. 상온의 온도에서는

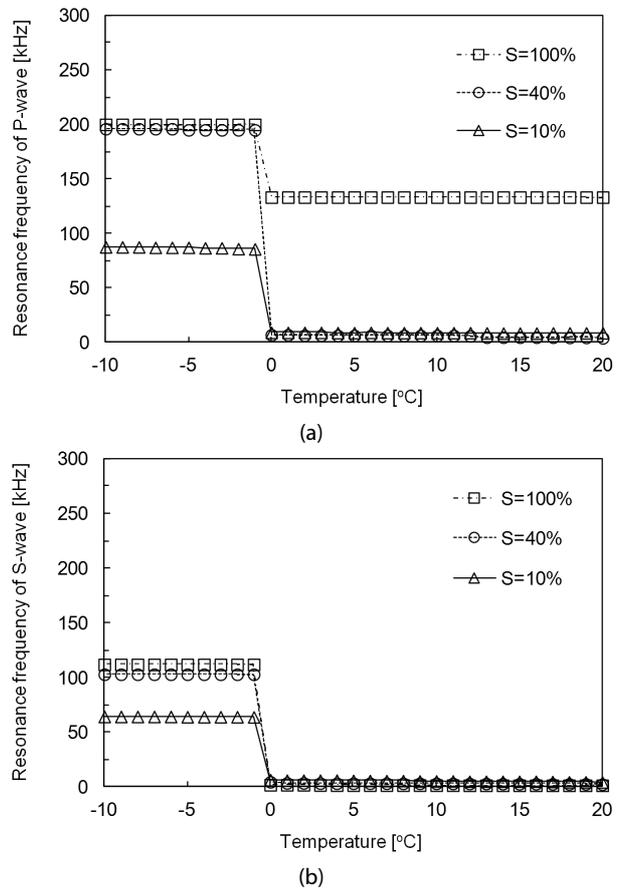


Fig. 10. Resonance frequency versus temperature according to the degree of saturation: (a) Compressional waves; (b) Shear waves.

모든 시료의 공진주파수가 유사한 반면, 시료가 동결되면서 전단파의 공진주파수는 큰 폭으로 증가하였으며 포화도가 큰 시료일수록 전단파의 공진주파수가 크게 나타났다. 시료가 동결됨에 따라 압축파의 공진주파수는 포화도 40%에서 가장 큰 변화량을 나타낸 반면, 전단파의 공진주파수는 포화도 100%에서 가장 큰 변화량을 나타내었다.

Figs. 7 and 10은 포화도가 다른 세 가지 시료가 동결됨에 따라 압축파와 전단파의 공진주파수의 변화는 압축파와 전단파 속도의 변화와 매우 유사하게 나타나며, 탄성과 속도와 공진주파수의 변화는 동시에 발생함을 보여준다. 이를 통해 공진주파수가 큰 흙일수록 더 큰 강성을 나타낸다고 판단된다. 0℃에서 발생하는 간극수의 상 변화는 압축파 및 전단파의 공진주파수 증가에 가장 큰 영향을 미쳤다고 판단되며 시료가 동결되면서 압축파의 공진주파수는 전단파의 공진주파수보다 포화도에 따라 약 1.4-2배 정도 크게 나타났다.

시료의 온도를 낮추기 시작한 20℃와 시료가 완전히 동결된

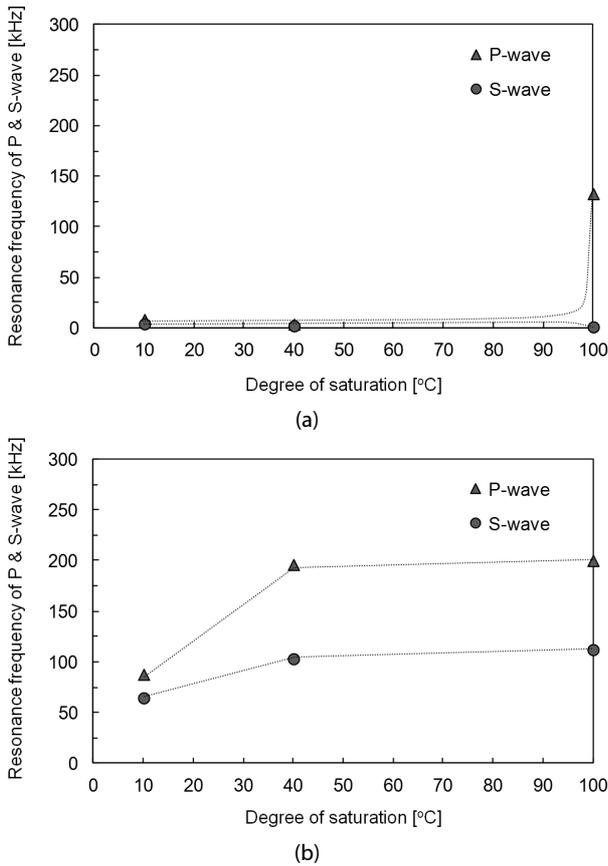


Fig. 11. Resonance frequencies of compressional and shear waves versus degree of saturation: (a) At the temperature of 20°C; (b) At the temperature of -10°C.

-10°C에서의 포화도에 따른 압축파 및 전단파의 공진주파수를 Figs. 11(a) and 11(b)에 각각 나타내었다. Figs. 8 and 11은 포화도에 따른 공진주파수의 변화는 포화도에 따른 탄성과 속도의 변화에서 나타난 결과와 매우 유사함을 보여준다. 즉, 상온의 온도에서 압축파의 공진주파수는 포화된 시료에서 가장 크게 흡이 동결된 이후에는 포화도에 공진주파수가 의존함을 나타낸다.

5.4 진폭

포화도 10%, 40% 및 100%인 시료가 동결되는 과정에서 측정된 압축파 및 전단파 신호를 토대로 진폭의 변화를 파악하였으며 온도변화에 따른 정규화된 진폭을 Fig. 12에 나타내었다. 포화도 10%와 40%인 시료의 압축파 및 전단파의 진폭은 시료의 온도가 20°C에서 1°C로 낮아지는 동안 거의 일정하게 유지되었다. 시료가 동결되는 0°C에서 압축파의 진폭은 20°C에서의 진폭과 거의 유사한 반면 전단파의 진폭은 크게 감소한 후 사라진다. 영하의 온도에서 압축파와 전단파의 진폭은 20°C에서의 진폭과 유사하거나 크게 나타난다. 포화도 10%와 40%인 시료의 탄성과 진폭의 변화와

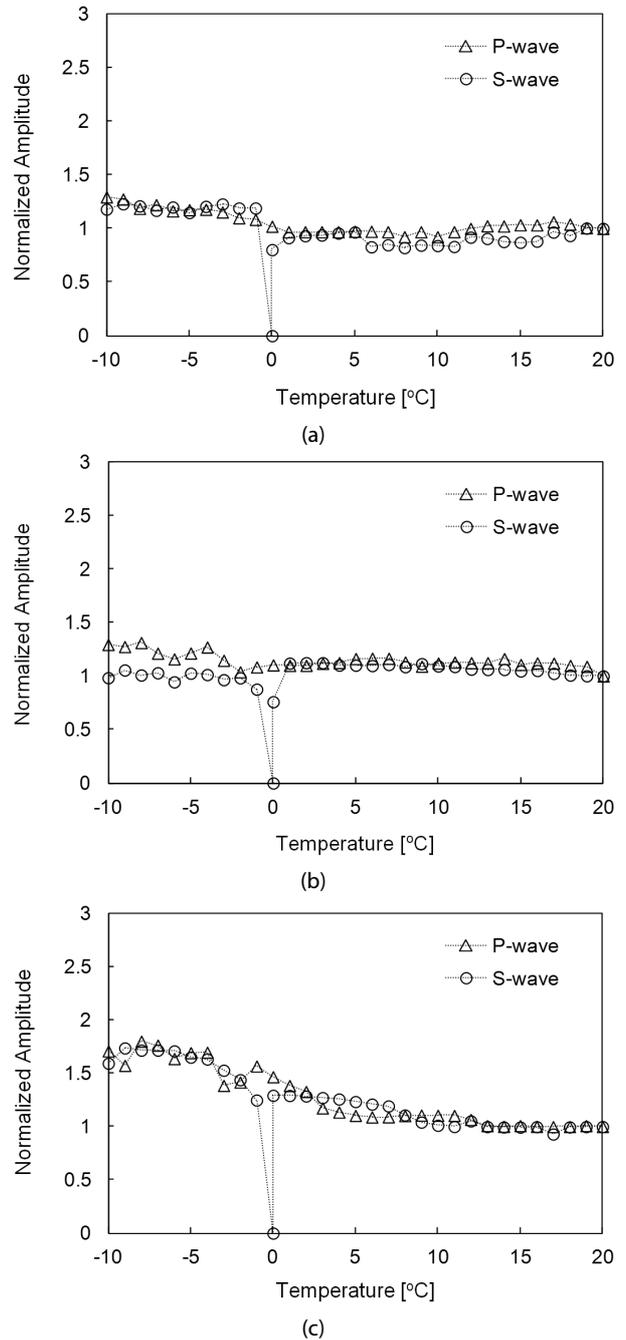


Fig. 12. Normalized amplitude versus temperature according to the degree of saturation: (a) S=10%; (b) S=40%; (c) S=100%.

상이하하게 포화도 100%인 시료의 압축파 및 전단파의 진폭은 시료의 온도가 20°C에서 1°C로 낮아지는 동안 점점 증가하였으며 0°C에서 전단파의 진폭은 사라졌다. 영하의 온도에서 압축파 및 전단파의 진폭은 점점 증가한 후, 일정하게 수렴하였다.

상온에서는 시료 단면이 균일하기 때문에 압축파 및 전단파의

전달이 원활하게 이루어지지만 0℃에서는 시료의 동결이 동결 셀에 가까운 부분에서 진행되기 때문에 임피던스 (Impedance) 차이가 발생한다(박정희 등, 2012-a). 피에조 디스크 엘리먼트와 벤더 엘리먼트가 설치된 위치의 시료 단면은 동결토-상 변화 상태의 부분 동결토-미 동결상태의 불포화도가 동시에 존재하는 매우 불균질한 상태를 보이게 된다. 압축과는 파의 전파 방향과 입자의 진동 방향이 일치하며 파의 전파에 있어서 임피던스 차이에 의한 영향이 적기 때문에 0℃ 근처에서 진폭이 감소하지 않았다. 압축파의 전파 특성과는 상이하게 전단파는 파의 전파 방향과 입자의 진동 방향이 수직이기 때문에 시료 단면의 임피던스 차이로 인한 감쇄효과로 인해 파형이 크게 감소한 후 사라졌다고 판단된다.

시료 단면이 전체적으로 동결된 영하의 온도에서 압축파의 진폭은 20℃에서의 진폭보다 포화도에 따라 약 1.3배에서 1.7배정도 증가하며, 전단파의 진폭은 포화도에 따라 20℃에서의 진폭보다 약 1~1.5배정도 증가한 진폭의 크기를 나타내었다. 이는 시료의 동결로 인해 시료가 고결되었음을 의미한다. 이를 통해 압축파 및 전단파의 진폭은 동결토의 상 변화와 매우 밀접한 관계가 있다고 판단된다.

6. 요약 및 결론

본 논문에서는 포화도가 각각 10%, 40%, 100%로 다르게 조성된 시료의 동결에 따른 탄성과 특성변화를 파악하고자 하였다. 시료를 동결시키면서 포화도가 다른 세 가지 시료의 압축파와 전단파를 측정하였다. 시료의 동결에 따른 셀의 변형을 최소화하고자 고강도 나일론 재질의 동결용 셀을 제작하였으며, 셀을 통한 직접파의 전달을 방지하기 위해 셀을 구성하는 모든 면을 분리형으로 제작하여 조립하였다. 압축파 트랜스듀서로서 피에조 디스크 엘리먼트와 전단파 트랜스듀서인 벤더 엘리먼트를 크로스 홀(cross-hole)형태로 부착하였다. 탄성과 트랜스듀서가 설치된 깊이와 동일한 위치에 온도센서(thermocouples)를 설치하여 시료의 온도변화를 측정하였다. 포화도가 다른 세 가지 시료의 온도가 20℃에서 -10℃까지 변하여 시료가 동결되는 동안 나타난 압축파 신호와 전단파 신호를 연속적으로 측정하여 저장하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 시료의 온도를 낮추기 시작한 20℃의 온도에서 포화도가 10%, 40%인 시료의 압축파 속도는 포화도의 영향으로 유사하게 나타났으며 포화도 100%인 시료의 압축파 속도는 물에서의 압축파 속도보다 더 크게 나타났다. 전단파 속도는 유효응력의 영향으로 포화도 10%인 시료에서 가장 크게 나타났으며 포화도 100%인 시료에서 가장 작게 나타났다. 시료가 동결되는 0℃에

서는 포화도가 다른 세가지 시료의 압축파 및 전단파 속도는 큰 폭으로 증가하였으며 포화도가 큰 시료일수록 압축파 및 전단파 속도가 더 크게 나타났다. 영하의 온도에서 세가지 시료의 압축파 및 전단파 속도는 큰 변화 없이 일정하게 나타났다.

(2) 간극수의 상 변화로 인해 시료가 동결됨에 따라 포화도가 다른 세 가지 시료의 압축파와 전단파의 공진주파수의 변화 특성은 압축파와 전단파 속도의 변화 특성과 매우 유사하게 나타났다. 동결토에서 압축파의 공진주파수는 전단파의 공진주파수보다 포화도에 따라 약 1.4~2배 정도 크게 나타났다. 또한 동결토에서 탄성파의 공진주파수 변화는 탄성과 속도의 변화와 동시에 발생함을 보여주었다.

(3) 압축파 및 전단파의 진폭은 시료의 상온에서 일정하게 유지되지만 시료가 동결되는 0℃에서 압축파의 진폭은 증가한 반면, 전단파의 진폭은 크게 감소한 후 사라졌다. 이는 시료 단면의 부분적인 동결로 인해 발생하는 임피던스 차이와 압축파와 전단파의 전파방향과 입자의 진동방향이 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

(4) 시료의 온도가 0℃에서 -1℃로 변하는 동안 포화도가 다른 세 가지 시료의 포이송 비는 큰 폭으로 감소하여 얼음보다 더 작은 포이송 비를 보였으며, 영하의 온도에서는 포화도가 큰 시료에서 더 작은 포이송 비를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2011년도 건설기술혁신사업(11기술혁신E01)의 지원 및 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2012-0005729)이며 이에 감사드립니다.

References

- ASTM D854 (2006). *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*, Annual Book of ASTM Standard.
- ASTM D4253 (2006). *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table*, Annual Book of ASTM Standard.
- ASTM D4254 (2006). *Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils calculation of relative density*, Annual Book of ASTM Standard.
- Chaney, R. and Mulilis, P. J. (1978). "Suggested method for soil specimen remolding by wet raining." *Geotech. Testing J. ASTM*, Vol.1, No.2, pp. 107-108.
- Cho, G. C. and Santamarina J. C. (2001). "Unsaturated particulate materials-particle-level studies." *Journal of Geotech Geoenviron*

- Eng, ASCE*, Vol. 127, No. 1, pp. 84-96.
- Christ, M. and Park, J. B. (2009). "Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils." *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 58, pp. 136-142.
- Deschartres, M. H., Cohn-Tenoudji, Fr., Aguirre-Puente, J. and Khastou, B. (1988). "Acoustic and unfrozen water content determination." *In Proc. 5th Intl. Conf. on Permafrost*, pp. 324-328.
- Das B. M. (2008). *Advanced soil mechanics*, Taylor & Francis Group, London.
- Hong, S. S., Kim, Y. S., Kim, H. S., and Bae, G. J. (2010). "A fundamental study of artificial ground freezing," *2010 Korean Geo-Environmental Society Fall Conference*, pp. 417-421 (in Korean).
- Ishihara, K., Huang, Y., and Tsuchiya, H. (1998). "Liquefaction resistance of nearly saturated sand as correlated with longitudinal wave velocity." *Proc. Biot Conf. on Poromechanics, Poromechanics - A Tribute to Maurice A. Biot*, Thimus, J.F., Abousleiman, Y. Cheng, A.H.D. Coussy, O., and Detournay, E., eds., pp 583-586.
- Kim, Y. C., Bae, J. H., and Song, W. K. (2002). "An experimental study on the unfrozen water contents and ultrasonic wave velocity in frozen soil." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 2, No 3-C, pp. 207-217 (in Korean).
- Kim, Y. C. (2003). "An experimental study on the electrical resistivity and ultrasonic wave velocity in frozen soil." *Korean Geoenvironmental Society*, 03 conference, pp. 135-142.
- Lee, I. M. (2011). *Principle of soil mechanics*, Saeron, Seoul, pp. 566 (in Korean).
- Lee, I. M., Hung Truong, Q., Kim, D. H., and Lee, J. S. (2009). "Discontinuity detection ahead of a tunnel face utilizing ultrasonic reflection : Laboratory Scale Application." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, No. 2, pp. 155-163.
- Lee, J. S. and Lee, C. H. (2006). "Principles and considerations of bender element tests." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 22, No. 5, pp. 47-57 (in Korean).
- Lee, C., Truong, Q. H., Lee, J. S. (2010). "Cementation and bond degradation of rubber-sand mixtures." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47, No. 7, pp. 763-774
- Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2005). "Bender elements : Performance and Signal Interpretation." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 131, No. 9, pp. 1063-1070.
- Nakano, Y., Arnold, R. (1973). "Acoustic properties of frozen Ottawa sand." *Water Resources Research*, Vol. 9 No. 1, pp. 178-184.
- Nakano, Y., Martin, R. J. and Smith, M. (1972). "Ultrasonic velocity of the dilation and shear wave in frozen soil." *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 4, pp. 1024-1030.
- Park, J. H., Hong, S.S., Kim, Y, and Lee, J.S. (2012). "Characteristics of elastic waves in sand-silt mixtures due to freezing." *Journal of Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 13, No 4, pp. 27-36 (in Korean).
- Park, J. H., Kang, M. G., Seo, S. Y., and Lee, J. S. (2012). "The effect of surface tension on shear wave velocities according to changes of temperature and degree of saturation." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol 32, No 6C, pp. 285-293 (in Korean).
- Roesler, S. K. (1979). "Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy." *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 105, No. 7, pp. 871-880.
- Rose, J. (1999). *Ultrasonic waves in solid media*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001). *Soils and Waves - Particulate materials behavior, Characterization and Process Monitoring*, Wiley, New York.
- Shin, E. C. and Kim, J. S. (2011). "Experimental study on freezing soil barrier wall for contaminant transfer interception." *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol. 10, No. 2, pp. 29-34 (in Korean).
- Truong, Q. H., Eom, Y. H., Byun, Y. H., and Lee, J. S. (2010). "Characteristics of elastic waves according to cementation of dissolved salt." *Vadose Zone Journal*, Vol. 9, No. 3, pp. 662-669.
- Timur, A. (1968). "Velocity of compressional waves in porous media at permafrost temperatures." *Geophysics*, Vol. 33, No. 4, pp. 584-595.
- Vaid, Y. P. and Nequessey, D. (1984). "Relative density of air and water pluviated sand." *Soils and Foundations*, Vol. 24, No. 2, pp. 101-105.
- Wang, D. Y., Zhu, Y. L., Ma, W., and Niu, Y. H. (2006). "Application of ultrasonic technology for physical-mechanical properties of frozen soil." *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 44, pp. 12-19.
- Wood, A. B. (1941). *A textbook of sound*, The Mac-millan Company, New York.
- Wyllie, M. R., Gregory, A. E., and Gardner, L. W. (1956). "Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media." *Geophysics*, Vol. 21 No. 1, pp. 41-70.
- Yoon, H. K., and Lee, J. S. (2010). "Field velocity resistivity probe for estimating stiffness and void ratio." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, No. 12, pp. 1540-1549.
- Yu, J. D., Bae, M. H., Han, S. I., Lee, I. M., and Lee, J. S. (2008). "Defect ratio evaluation of the rock bolt grouting using the reflection method of guided ultrasonic waves." *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, Vol. 10, No. 3, pp. 221-232 (in Korean).
- Yu, P. and Richart, F. E. Jr. (1984). "Stress ratio effects on shear modulus of dry sands." *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 110, No. 3, pp. 331-345.
- Zumdahl, S.S and Zumdahl, S.A. (2008). *Chemistry*, Brooks Cole, Belmont.