

탄성파를 이용한 모래-실트 혼합토의 동결-융해 특성

Characteristics of Sand-Silt Mixtures during Freezing-Thawing by using Elastic Waves

강민구¹⁾ · 김상엽¹⁾ · 홍승서²⁾ · 김영석²⁾ · 이종섭[†]

Mingu Kang · Sangyeob Kim · Seungseo Hong · Youngseok Kim · Jongsub Lee

Received: February 6th, 2014; Revised: March 5th, 2014; Accepted: March 29th, 2014

ABSTRACT : In winter season, the pore water inside the ground freezes and thaws repetitively due to the cold air temperature. When the freezing-thawing processes are repeated on the ground, the change in soil particle structure occurs and thus the damage of the infrastructure may be following. This study was performed in order to investigate the stiffness change of soils due to the freeze-thaw by using elastic waves. Sand-silt mixtures are prepared with in the silt fraction of 40 %, 60 % and 80 % in weight and in the degree of saturation of 40 %. The specimens are placed into the square freezing-thawing cell by the temping method. For the measurement of the elastic waves, a pair of the bender elements and a pair of piezo disk elements are installed on the cell, and a thermocouple is inserted into soils for the measurement of the temperature. The temperature of the mixtures is decreased from 20 °C to -10 °C during freezing, is maintained at -20 °C for 18 hours, is gradually increased up to the room temperature of 20 °C to thaw the specimens. The shear waves, the compressional waves and the temperature are measured during the freeze-thaw process. The experimental result indicates that the shear and the compressional wave velocities after thawing are smaller than those of before freezing. The velocity ratio of after thawing to before freezing of shear wave is smaller than that of the compressional wave. As silt fraction increases from 40 % to 80 %, the shear and compressional wave velocities are gradually increased. This study suggests that the freezing-thawing process in unsaturated soil loosens the soil particle structure, and the shear wave velocity reflects the effect of freezing-thawing more sensitively than the compressional wave velocity.

Keywords : Elastic waves, Temperature, Frozen soil, Freeze-thaw, Sand-silt mixture

요 지 : 겨울철의 낮은 기온으로 인하여 지반 내부의 간극수는 동결과 융해를 반복한다. 지반에 이러한 동결-융해작용이 반복되면 흙의 입자구조 변형이 발생하며 이는 지중 기반시설에 손상을 가져올 수 있다. 본 연구는 흙의 동결-융해 과정에서의 탄성파 속도 변화를 통하여 흙의 강성 변화 양상을 알아보기 위하여 수행되었다. 40 %, 60 %, 80 %의 3가지 모래-실트의 무게비를 가진 모래-실트 혼합토를 포화도 40 %, 상대밀도 70 %로 동일하게 조성하였다. 각 시료를 동결-융해를 위해 제작된 사각형 형태의 셀에 다짐법으로 조성하였다. 탄성파를 측정하기 위하여 한 쌍의 벤더 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트를 시료 양편에 설치하였으며, 시료의 온도 변화 양상을 관찰하기 위하여 탄성파 트랜스듀서와 같은 깊이의 중앙부에 열전대를 설치하였다. 조성한 시료에 대하여 시료를 20 °C에서 -10 °C까지 동결시킨 후 -20 °C를 18시간 동안 유지하였으며, 다시 실험실 상온(20 °C)까지 온도를 서서히 올려 융해시켰다. 이 과정에서 온도, 전단파, 그리고 압축파를 측정하였다. 연구결과, 융해 이후의 탄성파 속도는 같은 온도의 동결 이전보다 감소하였다. 이때 전단파의 속도가 압축파의 속도보다 더 큰 비율로 감소하는 모습을 보였다. 실트의 함량이 40 %에서 80 %까지 증가함에 따라 탄성파의 속도는 증가하는 양상을 보였다. 본 연구를 통해 동결-융해가 불포화토의 입자구조를 느슨하게 만들며, 그 영향은 압축파에 비해 전단파 속도의 변화에서 잘 나타남을 알 수 있었다.

주요어 : 동결-융해, 동결토, 실트함량, 온도변화, 탄성파

1. 서 론

지반의 온도는 대기 온도에 큰 영향을 받으며, 일정 깊이의 동결 심도에 이르는 지반은 대기의 온도가 영하와 영상을 오가는 겨울철에 동결 및 융해작용을 반복한다. 이러한 지반의 동결-융해작용은 지반의 많은 특성에 영향을 미치

며, 특히 기온이 올라가는 해빙기에는 지반의 강도저하 및 융해침하로 인하여 도로, 철도, 지중 매설관, 사면 등 지중 기반시설에 피해가 발생한다. 국내의 경우 특히 수도권의 겨울철 이상저온 발생빈도가 높으므로(Heo, 2006) 이러한 지반의 동결-융해작용에 대한 연구가 요구된다.

동결-융해작용이 지반에 미치는 영향을 분석하기 위하

1) School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

2) Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

† School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University (Corresponding Author : jongsob@korea.ac.kr)

여 다양한 연구가 수행되었다. 흙의 동결-융해작용은 흙의 입자구조를 느슨하게 하고, 결합력을 감소시키며 강성의 저하를 일으킨다(Graham & Au, 1985; Qi et al., 2008). Yoon et al.(2003)은 화강풍화토의 동결-융해 전후의 시료에 대하여 반복삼축시험을 수행하였으며, 전단탄성계수가 감소한다는 결과를 보고하였다. Kim et al.(2004)은 화강풍화토에 대하여 200회 이상의 동결-융해작용을 반복하여 입도 분포의 변화와 비중변화 등 풍화도에 대하여 연구하였으며, 풍화토 입자의 세립화와 비중의 감소가 발생한다고 보고하였다.

탄성파는 흙의 미소변위에서의 거동을 비파괴적으로 판단할 수 있는 방법으로서, 많은 연구자들에 의하여 지반의 특성 규명을 위하여 사용되었다(Lee & Lee, 2006; Yoon et al., 2009). 흙의 동결특성 역시 탄성파를 이용하여 규명하고자 하는 노력이 지속되어 왔다. 액침법을 이용한 동결토의 탄성파 특성에 대한 연구가 수행되었으나(Wang et al., 2006; Christ & Park, 2009), 이는 동결 과정에서 탄성파 특성을 모니터링 할 수 없다는 한계점이 있었다. Park et al.(2012)은 벤더엘리먼트를 이용하여 흙의 동결과정에 따른 전단파 특성을 연구하였다. 하지만 동결-융해 과정에서 탄성파 특성에 대한 연구는 수행되지 않았다. 동결-융해 과정에 대한 탄성파 또는 전기비저항을 이용한 연구(Kang et al., 2013; Seo et al., 2013)가 최근 활발히 진행되고 있으나, 실트함량에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구는 모래-실트 혼합토가 동결-융해과정을 거치는 과정에서 전단파 및 탄성파의 특성을 파악하고, 이를 통하여 흙의 미소변위 거동 특성을 파악하기 위하여 수행되었다. 본 논문은 실험을 위하여 조성된 시료의 특성으로부터 시작하여 본 실험을 수행하기 위하여 제작된 셀의 특징, 탄성파 측정 시스템에 대하여 기술하였으며, 마지막으로 시료의 동결 및 융해과정에서의 온도변화에 따른 탄성파 특성에 대하여 분석하였다.

2. 시 료

2.1 기본특성

본 연구를 위하여 다양한 실트 비율을 가진 모래-실트 혼합재가 시료로 사용되었다. 시료 조성에 사용된 모래는 주문진 표준사를 사용하였다. 입자 크기의 영향을 최소화하기 위하여 30번체와 50번체 사이의 입경을 가지는 모래를 사용하였으며, 모래의 평균 입경 D_{50} 은 0.45 mm로 나타났다. ASTM D854-10(2006)에 따라 측정된 모래시료의 비중은 2.62로 측

정되었다. ASTM D4254-00(2006)과 ASTM D4253-00(2006)에 의하여 측정된 모래시료의 최대 및 최소간극비는 1.02와 0.57로 측정되었다. 시료 조성에 사용된 실트는 200번체를 통과한 Crushed limestone을 사용하였으며, 실트의 평균 입경 D_{50} 은 0.019 mm로 나타났다. ASTM D854-01(2006)에 의해 측정된 실트시료의 비중은 2.72, 최대간극비(ASTM D4254) 및 최소간극비(ASTM D4253)는 1.99과 0.78로 측정되었다.

2.2 시료 조성

실험 수행을 위하여 모래 무게에 대한 실트 무게의 비(Silt fraction = $W_{silt}/W_{sand} \times 100 \%$)가 40 %, 60 %, 그리고 80 %인 총 3가지의 모래-실트 혼합토를 조성하였다. 모래-실트 혼합토의 포화도는 40 %이며 상대밀도는 70 %로 조성하였다. ASTM D854-10(2006)에 따라 측정된 각 시료의 비중(G_s)은 실트 무게비가 40 %, 60 %, 80 %인 시료에서 각각 2.66, 2.66, 2.67로 측정되었다. 각 시료의 최대간극비와 최소간극비는 ASTM D4254-00(2006)과 ASTM D4253-00(2006)에 따라 측정하였으며, 실트 무게비가 40 %, 60 %, 그리고 80 %의 시료에서 최대간극비는 0.83, 0.99, 1.03으로 최소간극비는 0.43, 0.44, 0.46으로 나타났다. 모든 시료는 동일한 3개의 층으로 나누어 다짐법(Tamping method)으로 조성하였으며, 각 층은 동일하게 1.5 kg의 다짐추를 이용하여 10회씩 다짐하였다.

3. 실험 구성

3.1 동결-융해 셀

조성된 시료가 동결 및 융해되는 동안 탄성파를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 탄성파 측정용 셀을 제작하였다. 동결-융해 셀의 재질은 온도에 따른 변형이 적은 MC나일론으로 제작하여 저온의 실험환경에 최적화하였다. 동결-융해 셀의 가로 및 세로길이는 100 mm, 높이는 70 mm, 각 벽면의 두께는 25 mm로 제작하여 시료가 동결되는 동안 부피변화 및 측방향 변형을 최소화하였다. 시료가 아닌 셀의 벽면을 통하여 탄성파가 전달되지 않도록 Fig. 1의 점선 원으로 표시한 바와 같이 벽면 교차 부분이 분리되도록 제작하였다. 탄성파의 측정을 위하여 깊이 5 cm의 위치에 크로스홀(cross-hole) 방식으로 벤더엘리먼트 및 피에조 디스크 엘리먼트를 설치하였다.

3.2 탄성파 측정 시스템

실험과정에서의 온도변화를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같

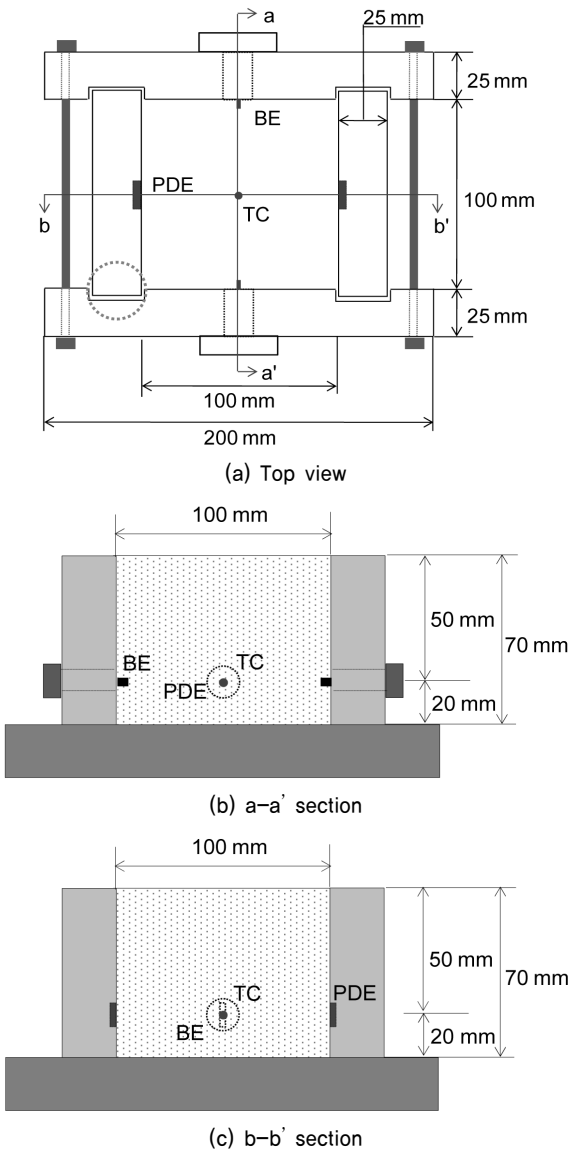


Fig. 1. Freezing-thawing cell

Notation: BE: bender element; PDE: piezo disk element; TC: thermocouple

이 열전대(thermocouple)를 설치하였다. Park et al.(2013)은 냉각된 찬 공기에 노출된 표면에 가장 가까운 시료의 상부로부터 하부에 따른 순서로 온도의 변화가 나타남을 보였으므로, 탄성과 트랜스듀서가 설치되어 있는 시료의 상부로부터 50 mm 깊이 중앙부(평면도)에 1개의 열전대를 설치하였다. 열전대로 측정된 온도는 데이터로거(Agilent 34970A)를 이용하여 컴퓨터에 저장하였다. 탄성파의 측정을 위하여 전단파 트랜스듀서로 벤더 엘리먼트를, 압축파 트랜스듀서로 피에조 디스크 엘리먼트를 이용하였다. 벤더 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트는 많은 실내실험과 실무에 사용되고 있다(Lee & Lee, 2006; Lee et al., 2010; Yoon et al., 2010). 탄성파 측정 시스템을 Fig. 2와 같이 나타내었다. 시료의 공진주파수를 찾기 위하여 frequency sweeping 과정을 통하여 입력주파수를 산정하였으며, 산정된 입력주파수를 갖는 단일 정현파를 신호 발생기에서 발신 트랜스듀서로 전달하도록 하였다. 발생한 탄성파는 시료를 통해 수신 트랜스듀서로 전달되며, 수신된 탄성파는 필터-증폭기(Filter - Amplifier)로 전달되어 신호의 잡음을 제거하고 신호를 증폭시킨다. 필터-증폭기를 거친 신호는 오실로스코프(Oscilloscope)를 통해 육안으로 관찰할 수 있으며 이를 컴퓨터로 저장하였다. 잡음을 제거하기 위하여 1,024개의 신호를 평균하여 저장하였으며, 필터-증폭기의 주파수 범위를 500 Hz~2 MHz 로 설정하여 필터링 주파수가 실험결과에 영향을 미치지 않도록 방지하였다(Lee & Lee, 2006).

3.3 실험 과정

실트함량 40 %, 60 %, 80 %의 각 시료를 동결-용해 셀에 조성한 후, 실험용 냉동고 내부에 배치하였다. 냉동고의 설정 온도는 -20 °C로 설정하였으며, 이를 약 10시간의 동

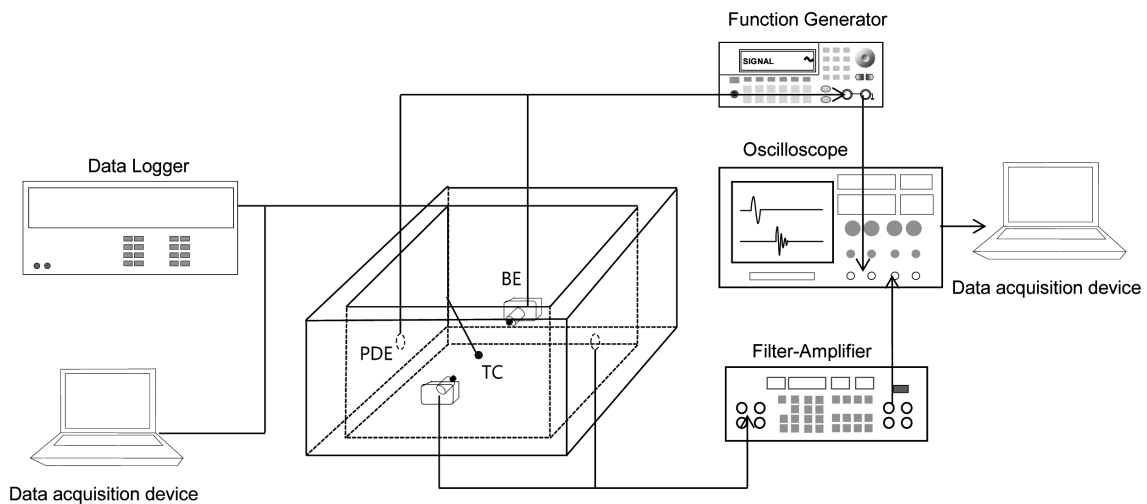


Fig. 2. Elastic waves and temperature measuring system

결시간 동안 유지하였다. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 동결된 시료는 약 18시간 동안 같은 온도를 유지하였으며, 이후 실험실 상온($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)에서 시료온도 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 융해되었다. 동결과 융해를 반복하는 동안 동결-융해 셀에 설치된 열전대를 통하여 온도를 연속적으로 측정하였으며 탄성과 트랜스듀서를 통하여 전단파 및 압축파 또한 연속적으로 측정하였다. 상부로부터 하부로 동결이 진행되는 실제 동결-융해 지반을 모사하기 위하여 동결-융해 셀의 주변은 스티로폼 박스로 단열하였다. 동결-융해과정의 반복이 흙에 미치는 영향은 첫 번째 사이클이 가장 크고 이후의 영향은 미미하므로(Yong et al., 1985; Othman & Benson, 1993) 실험은 1번의 사이클만 진행되었다.

4. 실험 결과

4.1 온도 변화

시료가 동결-융해되는 동안 탄성과 트랜스듀서와 같은 깊이에 설치된 열전대를 이용하여 실트함량 40 %, 60 %, 80 %의 시료에 대하여 온도변화를 측정하였다. 시간에 따른 실트함량 40 % 시료의 깊이별 온도변화를 Fig. 3에 나타내었다. 실트함량이 60 %와 80 %인 모래-실트 혼합토의 온도변화는 실트함량 40 %의 온도변화 결과와 유사하였다. 시료가 동결과정 및 융해과정에서 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 도달하였을 때, 약 2시간 동안 온도가 변화하지 않는 구간을 보인다. 물의 응고 및 액화에는 80 cal/g 의 열에너지가 소요되며(Zumdahl & Zumdahl, 2008), 이로 인하여 시료 간극수의 상변화에 소요되는 응고열 및 액화열에 의하여 이러한 일정 온도구간이 나타난다. Park & Lee(2014)에서도 유사한 결과가 관찰되었다.

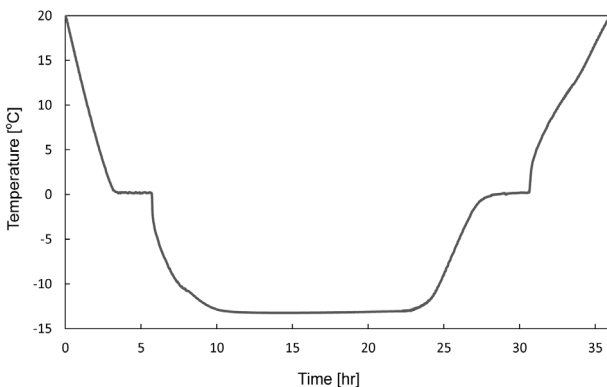


Fig. 3. Temperature change (Silt fraction: 40 %)

4.2 전단파

4.2.1 전단파 신호

동결-융해가 진행되는 동안 동결-융해 셀에 설치된 벤더 엘리먼트를 통하여 전단파를 측정하였다. 각기 다른 실트함량을 가지는 시료의 온도에 따른 전단파 신호형상을 Fig. 4에 나타내었다. 동결 시 전단파의 초기도달 시간은 상온에서 동결 과정에 따라 서서히 빨라지는 모습을 보이며, 이와 유사하게 융해 시에는 서서히 느려지는 모습을 보인다. 동결이 진행됨에 따라 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 경계로 신호의 형상이 완전히 변화하는 모습을 보인다. 전단파 신호의 초기도달 시간은 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 급격하게 빨라지는 모습을 보이며, 신호의 파장은 급격하게 작아지는 모습을 보인다. 시료의 융해 시에도 마찬가지로 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 경계로 상온에서 초기도달 시간은 느려지고 파장은 증가하는 결과를 나타낸다. 시료가 같은 온도일 때, 동결 이전의 전단파 신호와 융해 이후의 전단파 신호는 다른 형상을 보인다. 융해 이후의 전단파 신호는 동결 이전에 비하여 초기도달 시간은 느려지고 파장은 증가하였다.

4.2.2 전단파 속도

측정된 전단파 신호를 이용하여 전단파 속도를 산정하였다. 전단파 신호의 초기도달시간(t_s)과 벤더엘리먼트간의 거리(L_{up})를 이용하여 전단파 속도($V_s = L_{up}/t_s$)를 산정하였다. 동결-융해 시의 온도에 따른 전단파 속도를 Fig. 5에 도시하였다. 전단파의 속도는 상온에서 온도가 감소함에 따라 점차 증가하는 모습을 보이며, 융해 시에는 온도가 증가함에 따라 점차 감소하는 양상을 보인다. 시료의 온도 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이후 전단파의 속도는 크게 증가하여 일정한 속도에 수렴한다. 융해 이후의 전단파 속도는 같은 온도의 동결 이전의 전단파 속도에 비하여 감소한 결과를 보이며, 이는 Fig. 6에 나타났다.

4.3 압축파

4.3.1 압축파 신호

동결-융해가 진행되는 동안 동결-융해 셀에 설치된 피에조 디스크 엘리먼트를 통하여 압축파를 측정하였다. 각기 다른 실트함량을 가지는 시료의 온도에 따른 압축파 신호형상을 Fig. 7에 나타내었다. 동결 시 압축파의 형상 및 초기도달 시간은 전단파와 달리 상온에서 거의 변화가 없으나, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 경계로 신호의 형상이 완전히 변화하는 모습을 보인다. 동결 시 압축파 신호의 초기도달 시간은 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 경계로 급격하게 빨라지는 모습을 보이며, 신호의 파장은 크게 작아지는 모습을 보인다. 융해 시에도 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 경계로 상온에서

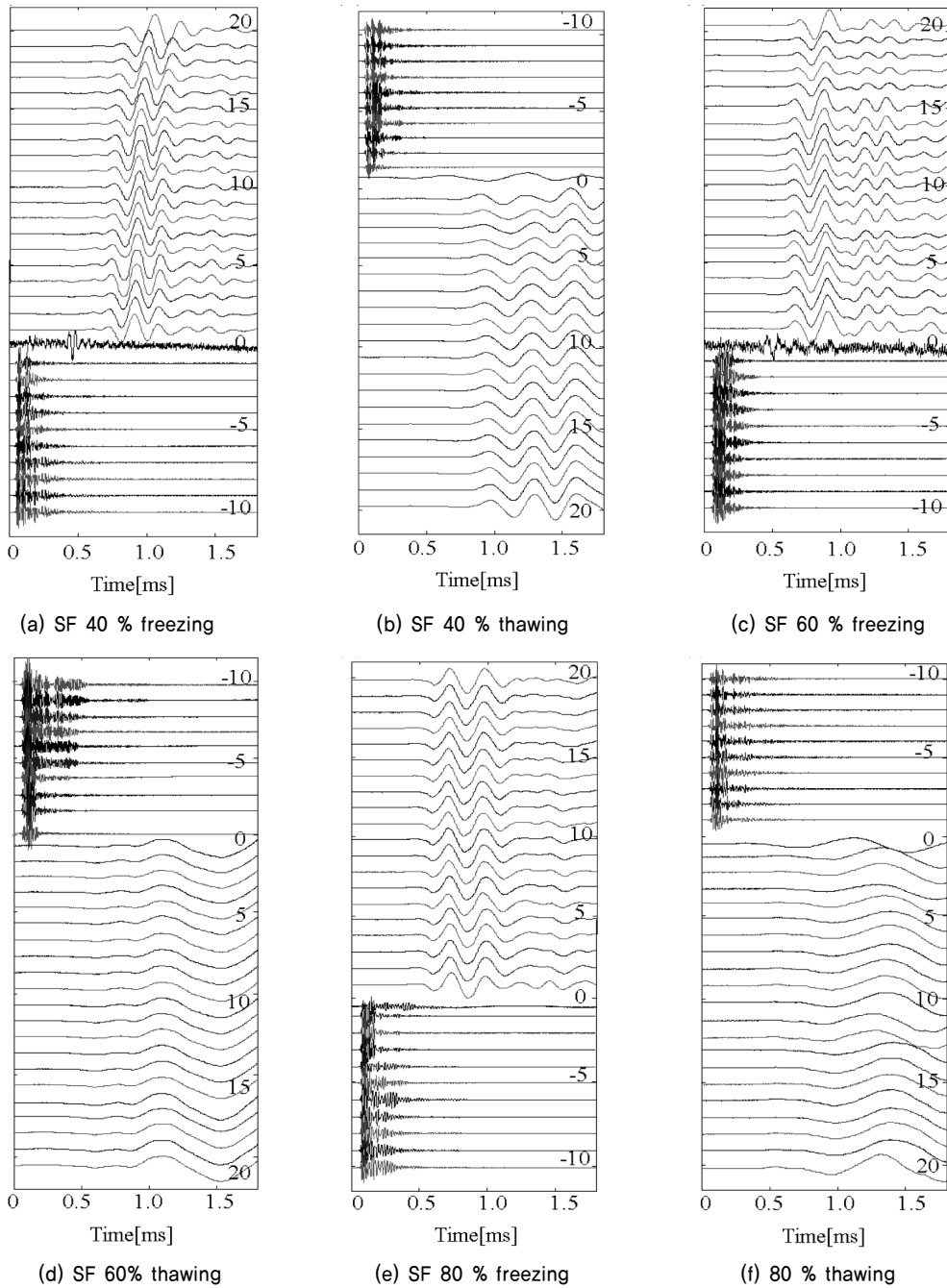


Fig. 4. Shear wave signal: The numbers in the figures denote the temperature in °C, SF denotes the silt fraction

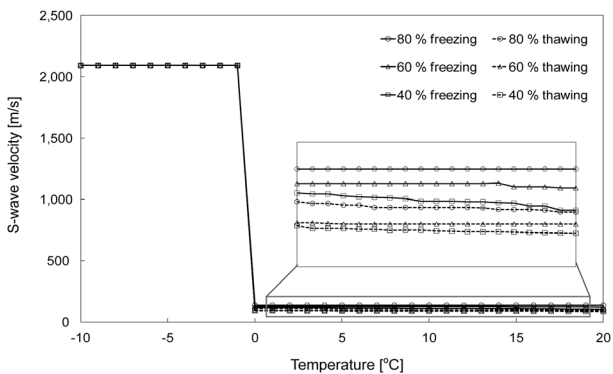


Fig. 5. Shear wave velocity versus temperature

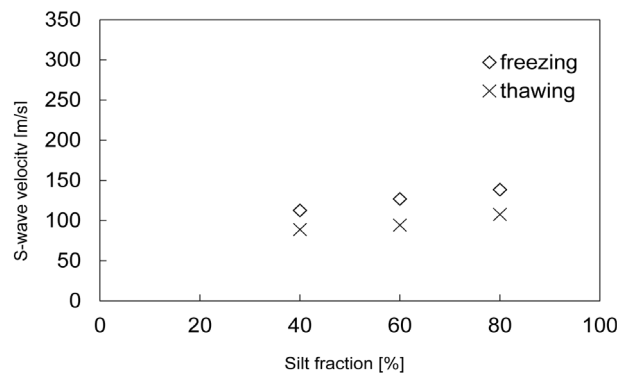


Fig. 6. Shear wave velocities before and after freezing–thawing (Temperature: 10 °C)

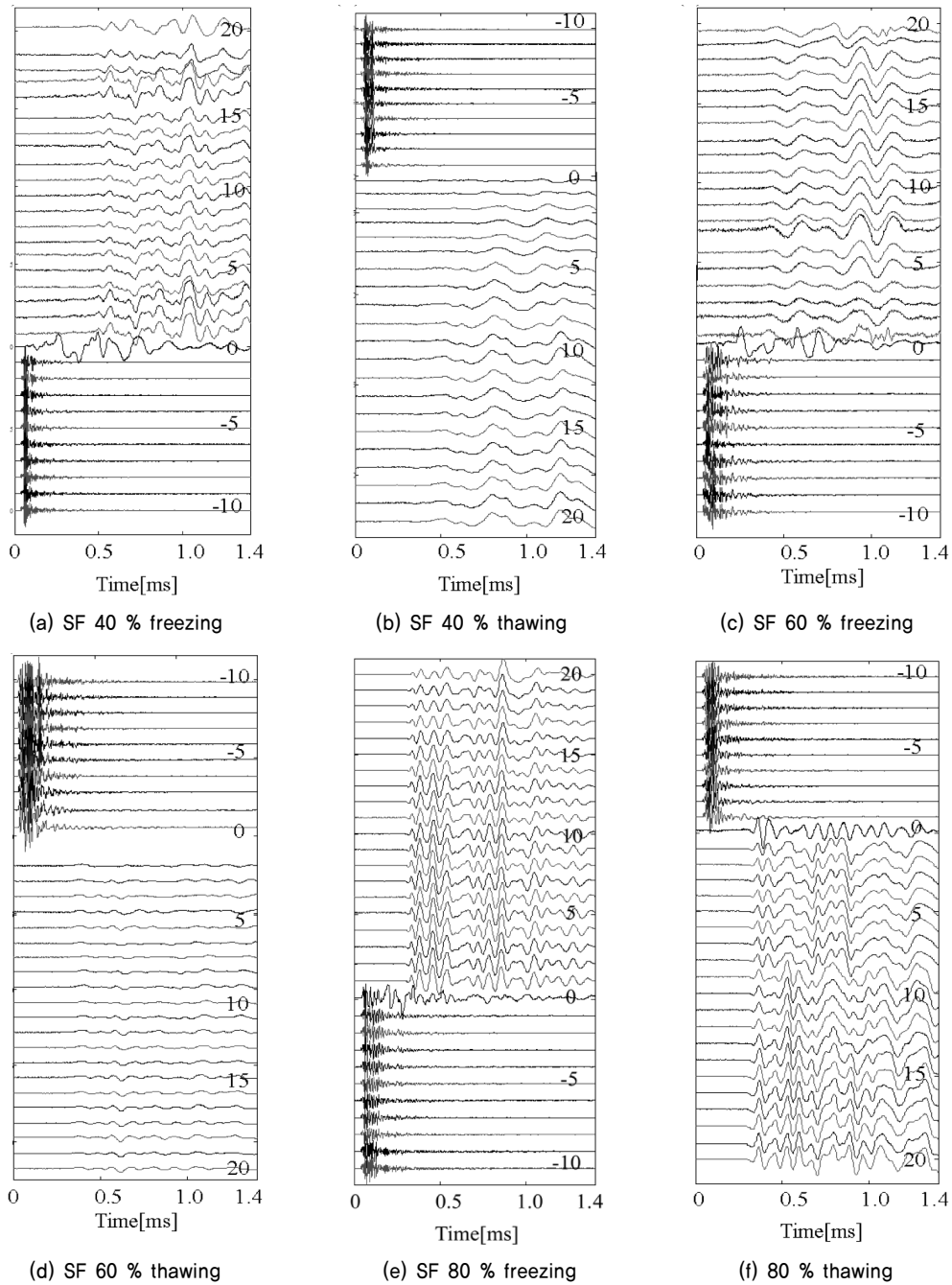


Fig. 7. Compressional wave signal: The numbers in the figures denote the temperature in °C. SF denotes the silt fraction

느려진 초기도달 시간과 증가한 파장을 관찰할 수 있다. 또한 압축파 역시 같은 온도의 동결 이전 압축파 신호에 비하여 융해 이후의 압축파 신호는 초기도달 시간이 다소 느려진 결과를 보인다.

4.3.2 압축파 속도

측정된 압축파 신호를 이용하여 압축파 속도를 산정하였다. 압축파 신호의 초기도달시간(t_p)과 피에조 디스크 엘리먼트간의 거리(L_{plate})를 이용하여 압축파 속도($V_p = L_{plate}/t$)를 산정하였다. 동결-융해 시의 온도에 따른 압축파 속도를

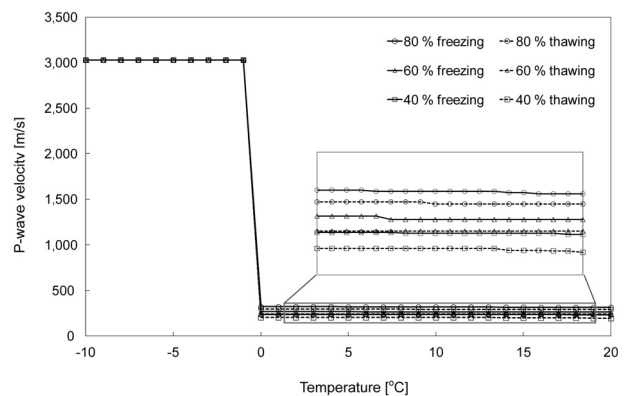


Fig. 8. Compressional wave velocity versus temperature

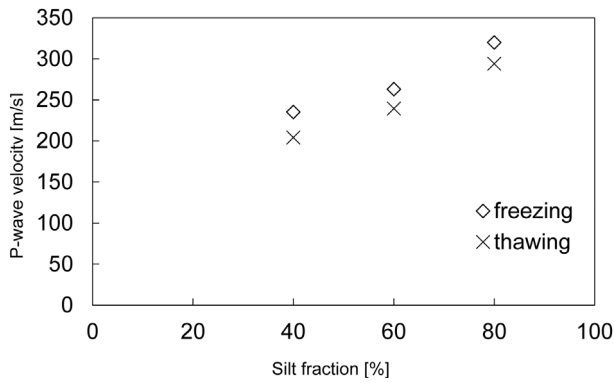


Fig. 9. Compressional wave velocities before and after freezing-thawing (Temperature: 10 °C)

Fig. 8에 나타내었다. 압축파의 속도는 상온에서는 전단파와 달리 온도 변화에 따라 거의 변화를 보이지 않는다. 그러나 시료의 온도가 0 °C 이하로 내려갈 때 전단파 결과와 유사하게 압축파의 속도는 크게 증가하여 일정한 속도에 수렴한다. 또한 Fig. 9와 같이 용해 이후의 압축파 속도는 같은 온도의 동결 이전의 압축파 속도에 비하여 감소한 결과를 보인다.

5. 토의 및 분석

5.1 동결-용해 영향

시료가 동결되고 용해됨에 따라 0 °C를 경계로 상온에서 영하로 시료의 온도가 변화할 때 전단파 및 압축파의 속도는 급격하게 증가한다. 이는 시료 내부의 간극수의 상변화(Phase change)에 따라 시료가 입상체에서 연속체로 변화함에 따른 영향으로, 동결된 간극수가 시료 입자 사이의 간극을 얼음으로 연결하여 시료 입자 간의 결합력을 증가시킨다. 이로 인하여 탄성파의 속도는 크게 증가하고 주파수도 크게 증가한다(Deschartres et al., 1988; Park et al., 2013; Park & Lee, 2014).

Fig. 6과 Fig. 9에 나타난 바와 같이, 동일온도(예: 10 °C)에서 동결 이전에 비하여 용해 이후의 전단파와 압축파의 속도는 확연히 감소한 모습을 보인다. 흙의 동결 시 시료 내부의 간극수가 액체에서 고체로 상변화 과정을 거친다. 얼음이 흙의 간극 내에서 완전히 자유롭게 팽창할 수 없으므로 압력이 발생하며, 이는 시료의 미세한 입자구조의 변화를 일으킨다. 이러한 흙의 구조적 변화는 용해됨에 따라 완전히 회복되지 않는다(Yoon et al., 2003). 이러한 미세구조 변화는 흙 입자의 미소변위 거동을 반영하는 탄성파 형상에 의하여 나타난다. 시료의 응력 상태가 등방성일 경우,

탄성파의 전파 속도는 Eq. (1)로 나타낼 수 있다(Roesler, 1979).

$$V = \alpha \left(\frac{\sigma'_0}{P_a} \right)^\beta \quad (1)$$

여기서 σ'_0 는 입자의 평균 유효응력, P_a 는 유효응력과 같은 단위의 대기압을 의미한다. α 와 β 는 실험적을 통하여 결정되는 상수로서 α 계수는 입자구조, 강성, 간극비 등에 좌우되며 β 계수는 입자구조 및 입자의 접촉면의 특성 등에 좌우된다(Santamarina et al., 2001). 동결-용해과정 이후의 전단파 속도의 감소는 동결에 의하여 느슨해진 입자구조가 용해 이후 완전히 회복되지 못하는 입자 구조변화의 결과로써, 입자 간 접촉면의 수가 감소하였기 때문에 판단된다(Santamarina et al., 2001; Lee & Santamarina, 2005; Lee et al., 2006).

5.2 탄성파 속도 감소비율

동일 온도(10 °C)에서 동결 전의 탄성파 속도로 용해 이후의 탄성파 속도를 정규화한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10은 동결-용해로 인한 전단파 속도의 감소비에 비하여 압축파 속도의 감소비가 작음을 보여준다. 전단파 및 압축파의 속도는 Eq. (2)와 Eq. (3)으로 표시할 수 있다(Santamarina et al., 2001).

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{B + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (3)$$

여기서 M 은 시료의 구속탄성계수, G 는 시료의 전단탄성계수, B 는 시료의 체적탄성계수, 그리고 ρ 는 시료 밀도를 의미한다. 입자와 액체의 혼합재에서 Eq. (3)에 나타난 구속탄성계수 M 은 혼합재의 포화도가 100 %일 때 액체의 체적탄성계수 B_0 에 주로 좌우되며, 이는 매우 적은 포화도의 감소에도 큰 영향을 받는다(Santamarina et al., 2001). 압축파의 속도는 포화도가 100 %일 때 1,500~2,000 m/s의 속도를 보이나, 포화도 99 % 이하의 범위에서는 급격하게 감소하여 약 300~400 m/s의 속도에 수렴하는 경향을 보이며 이는 Eom et al.(2009)의 연구에서 보고된 바 있다. 또한 Ishihara et al.(1998)은 압축파의 속도는 유효응력보다는 포화도에

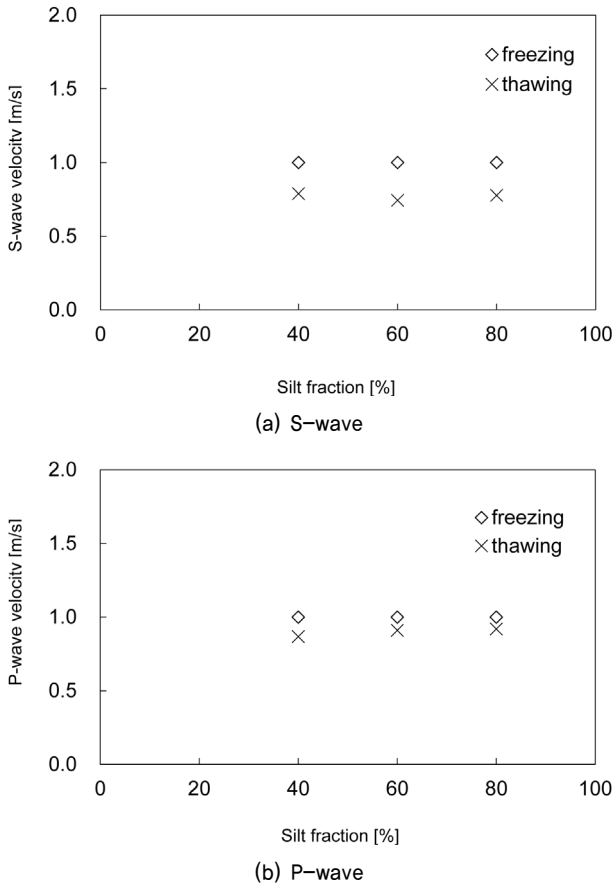


Fig. 10. Normalized wave velocity before and after freezing-thawing (Temperature: 10 °C)

더 영향을 받는다고 보고한 바 있다. 즉 압축파의 속도는 시료의 포화 여부에 의해 주로 좌우되며, 압축파 속도가 수렴하는 구간에 속하는 포화도에서 수행된 본 실험에서 큰 변화를 보이지 않았다고 판단된다.

전단파의 속도는 시료의 포화도에 따라 3가지의 구간을 보인다. 포화도 100%~90%에 이르는 첫 번째 구간에서는 포화도의 감소에 따라 전단파의 속도가 크게 증가한다. 포화도 90%~20%의 두 번째 구간에서 전단파의 속도는 완만하게 증가하며, 포화도 20%~0%의 세 번째 구간에서는 시료 조성의 영향에 따라 상이한 결과를 보이나 주로 포화도 5%에서 최고점을 보인 후 감소하는 경향을 보인다(Eom et al., 2009). 즉 본 논문에서 사용된 포화도 40%의 시료는 동결-융해에 의한 영향을 전단파의 속도가 더 민감하게 반영할 수 있는 포화도 범위에 있었다고 판단된다. 따라서 불포화 지반의 동결-융해에 의한 입자구조의 변화는 압축파보다 전단파를 통하여 더 효과적으로 관찰할 수 있을 것으로 보인다.

5.3 실트 함량의 영향

동결 이전과 융해 이후의 동일온도 10 °C에서 탄성파 속

도를 나타낸 Fig. 6, Fig. 9와 같이 전단파 속도 및 압축파 속도는 실트 함량이 증가함에 따라 증가하는 모습을 보인다. Eq. (1)로 표현되는 흙 입자의 미소변위에서 탄성파 속도는 입자의 거칠기 및 입자 간의 접촉면 특성, 입자 packing 종류 등에 좌우된다(Santamarina et al., 2001). 모래-실트 혼합토에서 실트의 함량이 증가함에 따라 모래 입자는 실트입자에 매몰되어 유동하게 되며 모래 입자의 접촉면은 하중 체인(force chain)의 역할을 잃는다(Thevanayagam, 1998). Tran et al.(2011)은 입자간의 접촉점 수가 감소하면 입자조직이 불안정해져 전단강도가 감소함을 수치해석을 통해 보고한 바 있다. 본 실험에 사용된 모래와 실트의 평균 입경 비율은 0.04로 모래 입자가 실트 입자의 약 25배의 직경을 가진다. 같은 부피의 모래시료에 비하여 실트시료 입자가 가지는 비표면적이 훨씬 크기 때문에, 시료의 실트함량이 커질수록 시료 입자의 비표면적이 커짐에 따라 입자 간 접촉면이 증가한다. 즉 실트함량의 증가에 따른 탄성파 속도의 증가는 입자 간 접촉면의 증가로 입자조직이 견고해진 영향으로 판단된다.

6. 요약 및 결론

본 논문에서는 동결-융해과정이 흙에 미치는 영향을 탄성파를 통하여 알아보기 위한 실험이 수행되었다. 실트 함량이 40%, 60%, 80%로 각기 다른 모래-실트 혼합토를 조성하여 동결-융해용 셀에 조성하였다. 벤더엘리먼트 및 피에조 디스크 엘리먼트를 크로스홀(cross-hole)형태로 설치하여 실험과정에서의 전단파 및 압축파를 측정하였으며, 탄성파 트랜스듀서와 같은 깊이에 열전대를 설치하여 시료의 동결 및 융해 진행과정을 모니터링하였다. 시료가 조성된 동결-융해 셀을 -20 °C로 설정된 냉동고에 배치하여 20 °C에서 -10 °C까지 동결과 융해과정을 반복하였다. 이 과정에서 온도, 전단파, 그리고 압축파를 측정하여 흙의 거동 변화를 분석하였다. 본 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 모래-실트 혼합토가 동결 및 융해되는 과정에서, 간극수의 상변화로 인하여 0 °C 이하에서 탄성파의 속도는 상온에 비하여 급격히 증가하고 주파수도 크게 증가하는 모습을 보인다. 이는 간극수가 액체에서 고체로 상변화함에 따라 입자 간의 결합력과 접촉면적이 크게 증가하여 강성이 증가하였기 때문이다.
- (2) 상온에서 모래-실트 혼합토의 동결 이전의 탄성파 속도에 비하여 융해 이후의 탄성파 속도가 감소하는 모습을

나타내었다. 탄성파의 속도는 입자구조, 강성, 접촉면의 수에 좌우되며, 탄성파 속도의 감소는 동결-융해로 인해 입자구조가 느슨해져 입자 간의 접촉면이 감소한 결과로 보인다.

- (3) 실트의 함량이 증가함에 따라 전단파 및 압축파가 증가하는 모습을 보이며, 이는 입자 입경이 작은 실트의 비율이 커짐에 따라 입자 비표면적이 증가하고 접촉면이 증가하였기 때문으로 판단된다.
- (4) 동결-융해 이전과 이후의 전단파의 속도변화 비율이 압축파의 속도변화 비율에 비하여 크게 나타났다. 이는 본 실험에 사용된 40 % 포화도는 압축파의 속도의 경우 수렴구간에 속하는 반면 전단파의 속도는 민감하게 변화하는 구간에 속하기 때문으로 판단된다. 즉 동결-융해가 지반에 미치는 영향을 관찰하기 위한 비파괴 실험을 위하여, 압축파보다 전단파의 활용이 더 효과적일 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(11기술혁신E01)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. ASTM D4253-00 (2006), Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table, Annual Book of ASTM Standard.
2. ASTM D4254-00 (2006), Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils calculation of relative density, Annual Book of ASTM Standard.
3. ASTM D854-10 (2006), Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. Annual Book of ASTM Standard.
4. 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, No. 3, pp. 136~142.
5. Deschartres, M. H., Cohon-Tenoudji, F., Aguirre-Puente, J. and Khastou, B. (1988), Acoustic and unfrozen water content determination, Proc.5th Intl. Conf. on Permafrost, International Permafrost Association (IPA), Trondheim, Norway, Vol. 1, pp. 324~328.
6. Eom, Y. H., Truong, Q. H., Byun, Y. H. and Lee, J. S. (2009). Elastic wave characteristics according to cementation of dissolved salt, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 25, No. 5, pp. 75~86 (in Korean).
7. Graham, J. and Au, V. C. S. (1985), Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, No. 1, pp. 69~78.
8. Heo, I. H. (2006), The distribution of regional unusual temperature in Korea, Journal of the Korean Association of Regional Geographers, Vol. 12, No. 4, pp. 461~474 (in Korean).
9. Ishihara, K., Huang, Y. and Tsuchiya, H. (1998), Liquefaction resistance of nearly saturated sand as correlated with longitudinal wave velocity, In: Proceedings of the Biot Conference on Poromechanics, A Tribute to Maurice A. Biot. Balkema, Rotterdam, Netherland, p. 583~586.
10. Kang, M. G., Kim, J. C., Park, J. H. and Lee, J. S. (2013), Freezing and thawing effects of sand-silt mixtures on elastic waves, Sciences in Cold and Arid Regions, Vol. 5, No. 4, pp. 418~424.
11. Kim, Y. S., Kim, S. S., Jang, B. S. and Shin, C. G. (2004), Evaluation of engineering properties of decomposed granite soil due to cyclic freezing and thawing, KSCE Conference, pp. 5408~5412 (in Korean).
12. Lee, C., Truong, Q. H. and Lee, J. S. (2010), Cementation and bond degradation of rubber-sand mixtures, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 47, No. 7, pp. 763~774.
13. 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).
14. Lee, J. S., Lee, C. H., Lee, W. J. and Santamarina, J. C. (2006), Characteristics of engineered soils, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 22, No. 8, pp. 129~136 (in Korean).
15. 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.
16. Othman, M. A. and Benson, C. H. (1993), Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 30, No. 2, pp. 236~246.
17. Park, J. H., Kang, M. G., Seo, S. S. 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. 6, pp. 285~293 (in Korean).
18. Park, J. H. and Lee, J. S. (2014), Characteristics of elastic waves in sand-silt mixtures due to freezing, Cold Regions Science and Technology, Vol. 99, pp. 1~11.
19. Park, J. H., Lee, J. S., Hong, S.S. and Kim, Y. S. (2013), Properties of elastic waves in sand-silt mixtures due to freezing, In: Mechanical properties of frozen soils, ASTM STP 1568, p. 140~152.
20. Qi, J. L., Ma, W. and Song, C. (2008), Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil, Cold Regions Science and Technology, Vol. 53, No. 3, pp. 397~404.
21. Roesler, S. K. (1979), Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy, Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 105, No. 7, pp. 871~880.
22. Santamarina, J. C., Klein, K. A. and Fam, M. A. (2001), Soils and waves - particulate materials behavior, characterization and process monitoring. Wiley, New York, 508 p.
23. Seo, S. Y., Hong, S. S. and Lee, J. S. (2013), Electrical resistivity of soils due to cyclic freezing and thawing, In 10th International Symposium on Cold Regions Development Anchorage, Alaska, pp. 149~154.
24. Thevanayagam, S. (1998), Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands, Journal of Geotechnical

- and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 6, pp. 479-491.
25. Tran, M. K., Park, J. H., Byun, Y. H., Shin, H. S. and Lee, J. S. (2011), Shear strength characteristics of geo-soluble-materials, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 27, No. 12, pp. 17-25 (in Korean).
 26. 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, No. 1, pp. 12-19.
 27. Yong, R. N., Boonsinsuk, P. and Yin, C. W. P. (1985), Alteration of soil behavior after cyclic freezing and thawing, In 4th International Symposium on Ground Freezing, Rotterdam, the Netherlands: A.A. Balkema, pp. 187-195.
 28. 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 Korean Society of Civil Engineers, Vol. 30, No. 2C, pp. 85-93 (in Korean).
 29. Yoon, H. K., Lee, C. H., Kim, J. H. and Lee, J. S. (2009), Evaluation of preconsolidation stress considering small-strain shear wave velocity, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 25, No. 5, pp. 5-16 (in Korean).
 30. Yoon, Y. W., Kim, S. E., Kang, B. H. and Kang, D. S. (2003), Dynamic behavior of weathered granite soils after freezing-thawing, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 19, No. 5, pp. 69-78 (in Korean).
 31. Zumdahl, S.S. and Zumdahl, S.A. (2008), Chemistry (8th edition), Florence, Kentucky: Cengage Learning, 1184 p.