

## 함수비가 낮은 동결토의 전단강도 및 강성 평가

김상엽<sup>1</sup> · 이종섭<sup>1</sup> · 김영석<sup>2</sup> · 변용훈<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 건축사회환경공학부, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 Geo-인프라연구소

### Evaluation of the Shear Strength and Stiffness of Frozen Soil with a Low Water Content

Sang Yeob Kim<sup>1</sup>, Jong-Sub Lee<sup>1</sup>, Young Seok Kim<sup>2</sup>, and Yong-Hoon Byun<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

<sup>2</sup>Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

Received 27 February 2015; received in revised form 12 March 2015; accepted 16 March 2015

지반은 동결이 발생함에 따라 물리적 특성이 변화하며, 동결현상에 따른 기초구조물의 안정성 평가는 설계시 중요한 고려사항 중 하나이다. 본 연구에서는 동결 및 전단과정 중 연직응력 변화에 따른 동결토의 전단강도 및 강성을 평가하고자 하였다. 동결토의 강도평가를 위하여 직접전단실험을 수행하였으며, 직접전단실험 중 강성평가를 위한 전단파 측정과 동시에 수행하였다. 실험수행을 위하여, 동결용 직접전단상자를 제작하였으며, 상·하부 전단상자의 벽면에는 전단파 트랜스듀서인 벤더 엘리먼트를 각각 설치하였다. 시료는 주 문진사 및 실트, 그리고 증류수를 이용하여 포화도 10%로 혼합하였으며, 상대밀도가 모든 조건에서 동일하게 유지되도록 조성하였다. 조성된 시료는 -5°C까지 동결을 진행시킨 후, 온도를 유지한 상태로 직접전단실험을 수행하였다. 동결 및 전단과정 중 시료에는 다양한 크기의 연직응력이 가해졌으며, 전단과정 중 수평변위에 따른 전단응력 및 수직변위, 그리고 전단파를 측정하였다. 실험결과, 모든 구속 조건의 경우에서 동결 혹은 전단과정의 연직응력이 증가함에 따라 전단강도는 증가하였으며, 전단과정의 연직응력만 증가한 경우보다 동결과정의 연직응력도 함께 증가한 경우 전단강도가 더 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 전단파 속도의 변화는 측정위치에 따라 다른 경향을 보였으며, 전단면을 통과하여 측정된 경우 전단파 속도는 전단변형이 진행됨에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구는 동결 및 전단과정 시 구속조건의 효과를 평가한 연구로써, 포화도가 낮은 상태의 동결토의 강도 및 강성에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

**주요어:** 구속조건, 동결토, 전단강도, 전단파, 직접전단실험

The characteristics of frozen soils are one of most important factors for foundation design in cold region. The objective of this study is to evaluate the shear strength and stiffness of frozen soils according to the confining conditions during the freezing and shearing phase. A direct shear box is constructed for the frozen specimens and bender elements are mounted on the wall of the shear box to measure shear wave velocities. Specimens are prepared by mixing sand and silt with a silt fraction of 30% in weight and the degree of saturation of 10%, giving a relative density of 60% for all tests. The temperature of the specimens in the freezer is allowed to fall below -5°C, and then direct shear tests are performed. A series of vertical stresses are applied during the freezing and shearing phase. Shear stress, vertical displacement, and shear wave along the horizontal displacement are measured. Experimental results show that in all the tests, shear strength increases with increasing vertical stress applied during the freezing and shearing phases. The magnitude of the increase in shear strength with increasing vertical stress during shearing under fixed vertical stress in the frozen state is smaller than the magnitude of the increase in vertical stress during freezing and shearing. In addition, the change in shear wave velocities varies with the position of the bender elements. In the case of shear waves passing through the shear plane, the shear wave velocities decrease with increasing horizontal displacement. This study provides an evaluation of the properties of shear strength and stiffness of frozen soils under varied confining condition.

**Key words:** confining condition, frozen soils, shear strength, shear waves, direct shear test

\*Corresponding author: asan1103@korea.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서 론

최근 청정대체에너지 중 영구 동토지역에서 발견되는 가스가 새로운 미래의 에너지로 주목 받게 됨에 따라, 동토지반의 거동에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라, 대체에너지의 확보 및 운송을 위한 동토 지반에서의 기초구조물과 같은 인프라건설이 불가피하며, 설계 시 온도저하에 따른 지반거동의 특성은 고려되어야 한다. 따라서, 일반적으로 널리 알려진 비동결토와 달리, 동결토에 대한 지반공학적 특성을 파악하는 것이 필요하며, 특히 동토지역에서 기초구조물을 지지할 수 있는 흙의 강도 및 강성에 대한 평가가 요구된다.

동토지역에 분포하는 지반재료는 일반적으로 흙입자, 물, 공기, 부동수분의 4상으로 구성되어 있으며, 간극수의 동결현상에 따른 입자 사이의 결합(Bonding)에 대한 고려가 수반되어야 한다. 입자간 결합력을 증가시키는 고결화 현상은 강도와 강성을 비롯한 공학적 특성에 큰 영향을 미치며, 시료의 종류, 상대밀도, 하중 및 시간을 비롯한 구속조건에 따라 다르게 발생한다. 이와 같은 이유로, 비동결토와 다른 특성을 갖는 동결토의 거동 및 강도 특성에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다(Zhu et al., 1988; Ladanyi and Theriault, 1990). 또한, 동결된 흙의 특성 뿐만 아니라 동결과정에서 특성변화를 파악하기 위하여, 전단파, 압축파, 전기비저항 등을 통한 실험방법들이 제안된 바 있다(Kang et al., 2013; Park et al., 2013; Park and Lee, 2014).

일반적으로 안정한 강도특성을 나타내는 동토지역의 경우에도 지반의 전단파괴에 대한 가능성이 있기 때문에, 기초구조물 설계 시 강도정수의 추정이 중요하다. 동결토의 강도정수를 파악하는 실험으로는 일축압축실험 및 삼축압축실험, 그리고 직접전단실험이 수행되어 왔다. 그러나, 일축압축실험의 경우에는 정밀한 실험이 어려우며, 삼축압축실험의 경우 동결시료를 적용하기에는 아직 한계가 있는 것으로 판단된다. 반면, 직접전단실험은 동결토에 대한 적용성이 우월하고 강도의 과소평가로 인한 과다설계를 방지할 수 있어, 동결토 강도평가에 적합한 것으로 알려져 있다(Seo et al., 2009). 이에 따라, 직접전단실험을 이용한 동결토의 전단강도 산정에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔다(Yasufuku et al., 2003; Christ and Park, 2010). Choi and Ko (2011)는 동결 시 온도-전단강도 및 연직응력-전단강도의 상관관계를 제시하였고, Lee and Choi (2012)는 시료종류에 따른 동결토의 전단강도 변화 및 연직응력 조건에 따른

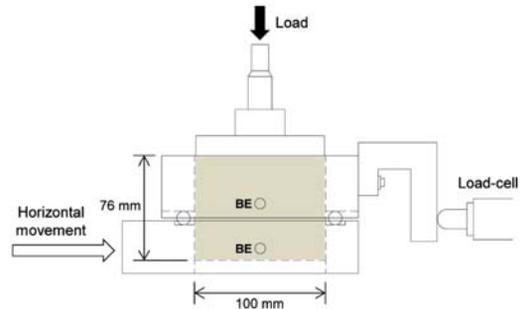


Fig. 1. Direct shear box with bender elements.

영향을 연구하였다. 선행연구(Choi and Ko, 2011; Lee and Choi, 2012)에서 연직응력의 재하 없이 시료를 동결시킨 후, 전단과정에서만 연직응력을 증가시켰으나, 동결과정 중 연직응력의 재하에 따른 시료의 고결현상에 의한 강도변화는 연구된 바 없었다. 이러한 동결과정 중 재하 된 연직응력은 상부구조물 혹은 원지반의 상재하중에 의하여 구속된 조건에서 지반이 동결되는 현상을 보다 유사하게 모사하여 강도정수를 파악하는데 중요한 요소 중 하나가 될 것으로 판단된다.

본 논문에서는 포화도가 낮은 동결토에 대하여 동결 및 전단 과정에서의 구속조건이 전단강도와 전단강성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 냉동고 내 영하의 환경을 유지하며 시료의 조성 및 직접전단실험을 수행하였고, 전단파를 측정함으로써 전단과정 중 동결토의 강성변화도 측정하였다. 먼저, 본 연구에서 제작한 동결용 전단실험기 및 전단파 측정시스템에 대하여 기술하고, 시료의 조성 및 온도 측정, 그리고 직접전단실험에 설명하였다. 각 실험결과를 보여준 후, 및 동결토의 전단강도 및 강성변화에 대한 구속조건의 효과를 토의하였다.

## 실험 장비

### 동결용 직접전단실험기

본 연구에서 적용된 동결용 직접전단실험기는 동결시료의 전단강도를 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 제작되었다. 동결용 전단상자는 상자내부의 가로 및 세로 길이가 100 mm이고, 높이는 76 mm가 되도록 제작하였다. 전단상자는 황동 재질로서 동결 시 온도환경이 시료에 효과적으로 전달되도록 하였으며, 상자벽면의 두께는 25 mm로, 시료의 부피팽창에 의한 상자의 변형을 방지하였다. 상부와 하부상자 사이는 베어링을 설치하여, 전단 이동 시 마찰력이 발생하지 않도록 하였으며, 간격은 시

료가 통과되지 않도록 0.5 mm로 설정하였다. 또한, 상자표면과 시료 사이의 접촉면에서 발현되는 동착강도의 영향을 배제하기 위해 내부 벽면에 영하에서 얼지 않는 그리스(Grease)로 처리하였다.

연직응력 조건에 따른 동결토의 전단거동을 파악하기 위하여, 직접전단실험기에는 전단력을 측정하기 위한 용량 5 ton의 로드셀(Load-cell)을 설치하였으며, 전단강도의 정확한 측정을 위해 로드셀에 기록된 하중값은 매초마다 저장되었다. 또한, 수평변위 및 수직변위를 측정하기 위해 직선형 가변 차동변압기(LVDT)를 설치하였다. 동결 및 전단과정 중 조성된 시료에 영하의 환경을 유지시키기 위하여, 직접전단실험기는 -10°C로 설정된 냉동고 내에 위치시켰다.

**전단파 측정시스템**

시료의 전단과정에서 전단강성의 변화를 관찰하기 위하여, Fig. 2와 같이 전단파 트랜스듀서인 벤더 엘리먼트(Bender element)를 상·하부 전단상자에 서로 마주보도록 각각 한 쌍씩 설치하였다. 벤더 엘리먼트는 길이 8 mm, 폭 4 mm, 그리고 두께 0.6 mm의 규격으로 절단하여, 시료와 접촉된 부분의 길이가 4 mm가 되도록 캔틸레버 보의 형식으로 제작하였다(Lee and Santamarina, 2005). 여기서, 벤더 엘리먼트는 나일론 재질의 스크류 내에 에폭시를 사용하여 고정시켰으며, 벤더 엘리먼트를 전단상자에 고정시 스크류와 전단상자 사이의 큰 임피던스 차이에 의하여 전단상자로 이동하는 직접파의 영향을 최소화하였다(Yoon et al., 2010). 또한, 벤더 엘리

먼트는 전단상자의 내부로 돌출되지 않도록 상자벽면에 삽입함으로써, 동결시료의 전단이 진행됨에 따라 직접적으로 과도한 하중이 가해지지 않도록 하였다.

벤더 엘리먼트와 연결된 전단파 측정시스템은 Fig. 2와 같이 구성하였다. 신호 발생기(Signal generator)를 통해 발신된 신호가 한 쌍의 벤더 엘리먼트를 이용하여 시료를 통과하게 되고, 수신된 신호는 필터증폭기(Filter-amplifier)를 거쳐 오실로스코프(Oscilloscope)에서 출력되도록 하였다. 이 때 수신된 신호는 500 Hz-1.5 MHz 범위의 신호만 획득되도록 필터링하였으며, 여기서 적용된 로우패스 필터링(Lowpass filtering)은 선행연구의 결과와 같이 동결토의 공진주파수의 10배 이상이 되도록 1.5 MHz로 설정하였다(Lee and Lee, 2006; Kang et al., 2012; Park et al., 2012).

**실험 구성**

**시료 조성**

본 연구에서는 주문진사에 대한 실트의 무게비가 30%가 되도록 주문진사와 실트를 혼합하여 시료를 조성하였다. 주문진사-실트 혼합도의 기본물성은 Table 1와 같이 비중은 2.59, 최대 간극비와 최소 간극비는 각각 0.79와 0.45로 측정되었다. 또한, 혼합토의 입도분포 곡선을 Fig. 3에 나타냈으며, 주문진사와 실트 각각의 입도특성이 반영된 이종재료의 입도분포를 보여준다.

직접전단실험을 위해 사용된 시료는 포화도가 10% (함수비 2.3%) 되도록 증류수를 첨가하여 충분히 고르

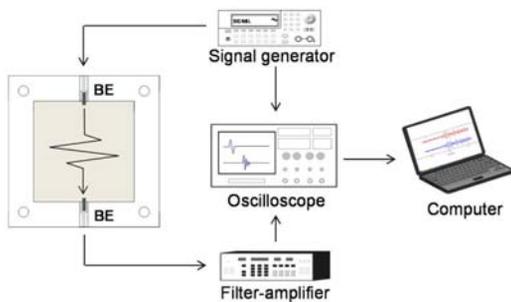


Fig. 2. Measurement system for shear wave.

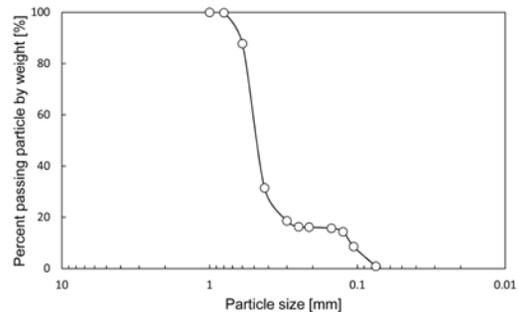


Fig. 3. Particle distribution curve.

Table 1. Properties of the sand-silt mixture.

| Specific gravity ( $G_s$ ) | Degree of saturation (S) | Maximum void ratio ( $e_{max}$ ) | Minimum void ratio ( $e_{min}$ ) |
|----------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 2.65                       | 10%                      | 0.82                             | 0.48                             |

게 퍼지게 하였으며, 상대밀도는 60%로 모든 실험조건마다 동일하게 조성하였다. 전단상자에 시료조성시 시료를 5층으로 나누어 동일한 다짐 횟수 및 에너지를 가하여 조성하였고, 각 층당 9구역으로 나누어 10회씩 다졌다. 혼합토의 기본적인 강도특성을 파악하기 위해, 동결 시료와 동일한 조건으로 조성된 비동결시료를 이용하여 직접전단 실험을 수행하였다. 실험결과는 Fig. 4와 같이 혼합토의 내부마찰각이 37.7° 인 것을 보여주었다.

시료의 온도 측정을 위하여 3층까지 시료를 조성한 후 중앙부에 K-type의 열전대(Thermocouple)를 설치하였고, 케이블이 통과할 수 있도록 상부 재하판의 모서리에 홀을 가공하였다. 이때, 열전대는 전단과정 중 전단면에 영향을 주지 않도록 상부로부터 깊이 30 mm 지점에 위치시켰다. 시료조성후 상부 재하판에 연직응력을 가하고, 냉동고 온도를 -10°C로 설정함으로써 동결과정을 시작하였다. 측정된 온도는 자동으로 기록이 가능한 데이터 로거(Data logger)를 사용함으로써 1분마다 저장하였고, 컴퓨터를 통해 출력된 온도를 확인하여 -5°C부터는 온도를 유지한 상태로 전단과정을 시작하였다.

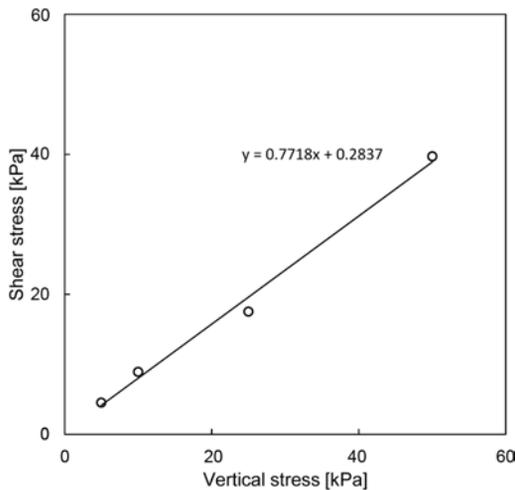


Fig. 4. Results of analysis of shear strength in unfrozen soils.

**직접전단실험**

계절의 온도 변화에 따라 동결과 용해를 반복하는 활동층의 공학적 특성은 동토지역의 시공 된 상부구조물의 안정성 평가에 영향을 주는 중요한 요소 중 하나이다. 이러한 동토지역의 활동층은 약 2m의 비교적 얇은 심도까지 생성되며, 이 때 가해지는 낮은 구속압의 상태를 모사하기 위하여 Table 2와 같이 비교적 작은 연직응력 5 kPa, 10 kPa, 25 kPa 및 50 kPa을 조합하여 직접전단실험을 수행하였다. 이는 동결( $\sigma_t$ ) 및 전단과정( $\sigma_s$ )의 연직응력이 모두 변화되는 경우(4 case), 동결과정 중 연직응력의 변화 없이 전단과정의 연직응력을 변화시킨 경우(3 case), 그리고 전단과정의 연직응력은 변화 없이 동결과정의 연직응력을 변화시킨 경우(3 case)로 구성된 다. 전단속도는 0.35 mm/min으로 설정하였으며, 이는 ASTM (D3080)에서 규정한 0.0025~1.0 mm/min 범위의 전단속도 기준에 만족한다. 시료의 전단은 동결토의 최대강도가 발현될 수 있도록 수평변위가 20 mm에 도달할 때까지 지속하였다.

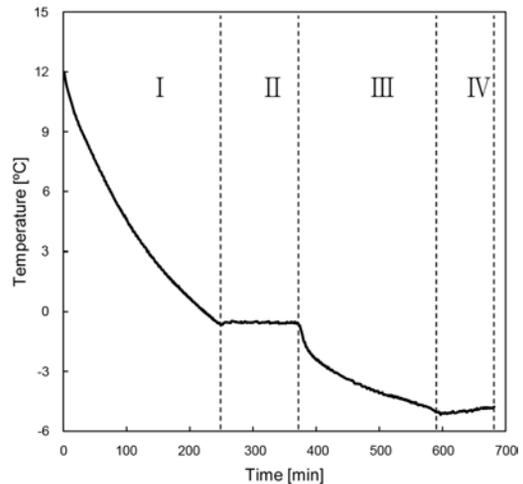


Fig. 5. Variation in temperature in four steps: I denotes a temperature decrease at room temperature, II denotes a phase transition, III denotes temperature decrease under sub-zero conditions, IV denotes a shearing phase.

Table 2. Confining conditions during freezing and shearing.

| Confining conditions                           |        | Vertical stress during shearing ( $\sigma_s$ ) |        |        |        |
|--|--------|--|--------|--------|--------|
|  |        | 5 kPa  | 10 kPa | 25 kPa | 50 kPa |
| Vertical stress during freezing ( $\sigma_f$ ) | 5 kPa  | O  | O      | O      | O      |
|  | 10 kPa | O  | O      | -      | -      |
|  | 25 kPa | O  | -      | O      | -      |
|  | 50 kPa | O  | -      | -      | O      |

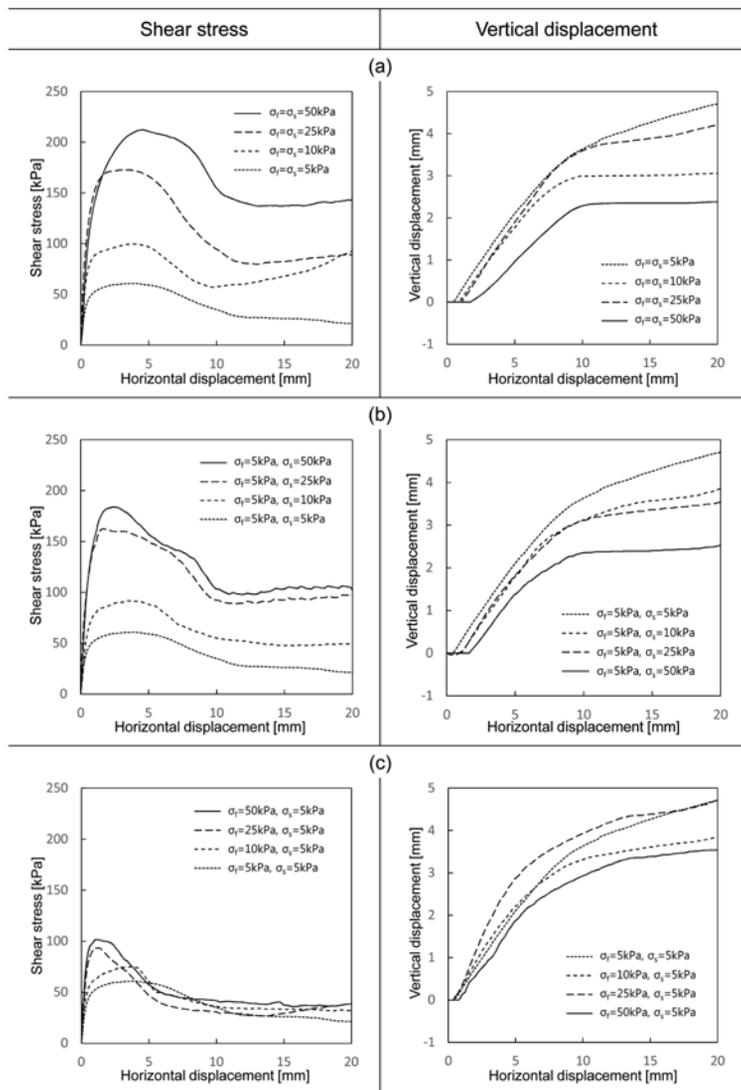
직접전단실험 중, 전단파는 수평변위가 1 mm의 진행됨에 따라 기록함으로써, 최종적으로 수평변위 20 mm 까지 총 20개의 신호를 획득하였다. 이 때 기록된 각 신호는 잡음에 대한 영향을 줄이기 위해 1024개의 신호를 평균하여 획득되었다. 전단파 신호는 상부 전단상자에 설치된 한 쌍의 벤더 엘리먼트와 상부 전단상자와 맞은편 하부 전단상자에 설치된 한 쌍의 벤더 엘리먼트를 이용하여 수평변위당 2회씩 측정되었다. 여기서, 2종류의 다른 이동거리를 갖는 전단파 신호는 각각 전단면으로부터 최대한 가깝게 위치시켜 전단영역의 형성범위

를 파악하기 위한 목적과 전단면을 통과시켜 전단영역의 강성특성을 비교할 목적으로 측정되었다.

### 실험 결과

#### 온도 변화

전단상자 내에 조성된 시료는 측면으로부터 중심방향으로 동결되도록 유도되었으며, 시료가 동결 및 전단과정에서 측정된 시료 중심의 온도 변화는 Fig. 5와 같이 나타났다. 시료를 빠른 속도로 동결시키기 위해, 각 조



**Fig. 6.** Results of direct shear tests according to confining conditions: (a) variations in freezing and shearing, (b) variations in shearing; (c) variations in freezing.

건의 실험들은 동일한 방식으로 냉동고의 온도를  $-10^{\circ}\text{C}$ 로 설정하여 상온부터 동결을 시작하였으며,  $-5^{\circ}\text{C}$ 에 도달한 후에 설정온도를  $-5^{\circ}\text{C}$ 로 유지하며 전단과정을 수행하였다. Fig. 5에서는 물이 얼음으로 변하는 구간에서 온도가 일정하게 나타났으며, 이는 액체에서 고체로 상태가 변화함에 따라 액체로부터 방출된 응고열로 인하여 온도가 내려가지 않기 때문이다. 이러한 상변화가 종료된 후, 온도는 다시 하강하게 되며, 이 시점부터 시료가 동결된 것으로 간주하였다.

### 전단응력 및 수직변위

동결된 시료의 수평변위에 따른 전단응력의 변화는 Fig. 6과 같이 나타났다. 동결 및 전단과정의 연직응력이 모두 변화되는 경우에는 Fig. 6a와 같이 연직응력이 증가함에 따라 침투전단강도가  $61\text{ kPa}$ 에서부터  $212\text{ kPa}$ 까지 증가하였다. 동결과정의 연직응력을  $5\text{ kPa}$ 로 고정한 후, 전단과정의 연직응력을 증가시킨 경우에도 Fig. 6b와 같이 침투전단강도가  $184\text{ kPa}$ 까지 증가하였다. 또한, 동결과정의 연직응력을 변화시키고 전단과정의 연직응력을  $5\text{ kPa}$ 로 고정한 결과, Fig. 6c와 같이 동결과정에서의 연직응력이 증가함에 따라 침투전단강도가  $61$

$\text{kPa}$ 에서부터  $101\text{ kPa}$ 까지 증가하였다. 여기서 주목해야 할 점은 Fig. 6a와 b의 경우에는 수평변위  $10\text{ mm}$  내에서 한계상태에 접근하기 시작한 반면, Fig. 6c의 경우에는 보다 초기의 수평변위에서 침투전단강도 및 한계상태가 발생한 것이다. 이는 동결과정 중 받았던 선행 압밀응력보다 작은 크기의 연직응력을 전단과정 동안 가해주었기 때문에 나타난 과압밀 효과로 판단된다.

전단과정에 따른 수직변위의 변화는 모든 경우에서 조밀한 시료와 유사한 거동을 보여주었다. 조밀한 시료의 상대밀도는  $60\%$ 로서 매우 조밀한 상태는 아니지만, 동결로 인한 입자간 결합으로 인하여 전단발생에 따라 수직방향으로 팽창하는 경향을 보인 것으로 판단된다. 또한, 연직응력이 증가함에 따라 부피팽창이 감소하는 것으로 나타났다.

### 전단파 신호

동결과정 중 연직응력의 변화 없이 전단과정의 연직응력을 변화시킨 경우에서 전단과정 중 측정된 전단파 신호를 Fig. 7 및 8과 같이 나타내었다. Fig. 7에서는 전단면 상부에서 측정된 전단파로서, 연직응력의 크기에 상관없이 전단과정 중 초기도달시간의 변화는 거의 발

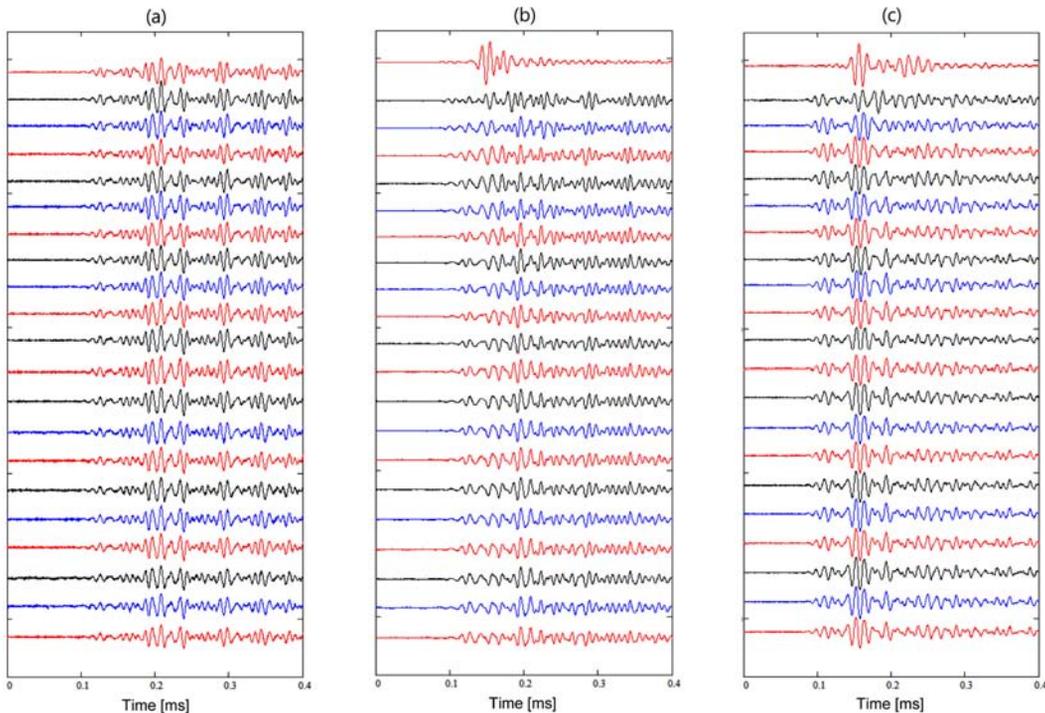


Fig. 7. Shear wave signals above the shear plane: (a)  $\sigma_v = 10\text{ kPa}$ , (b)  $\sigma_v = 25\text{ kPa}$ , (c)  $\sigma_v = 50\text{ kPa}$ .

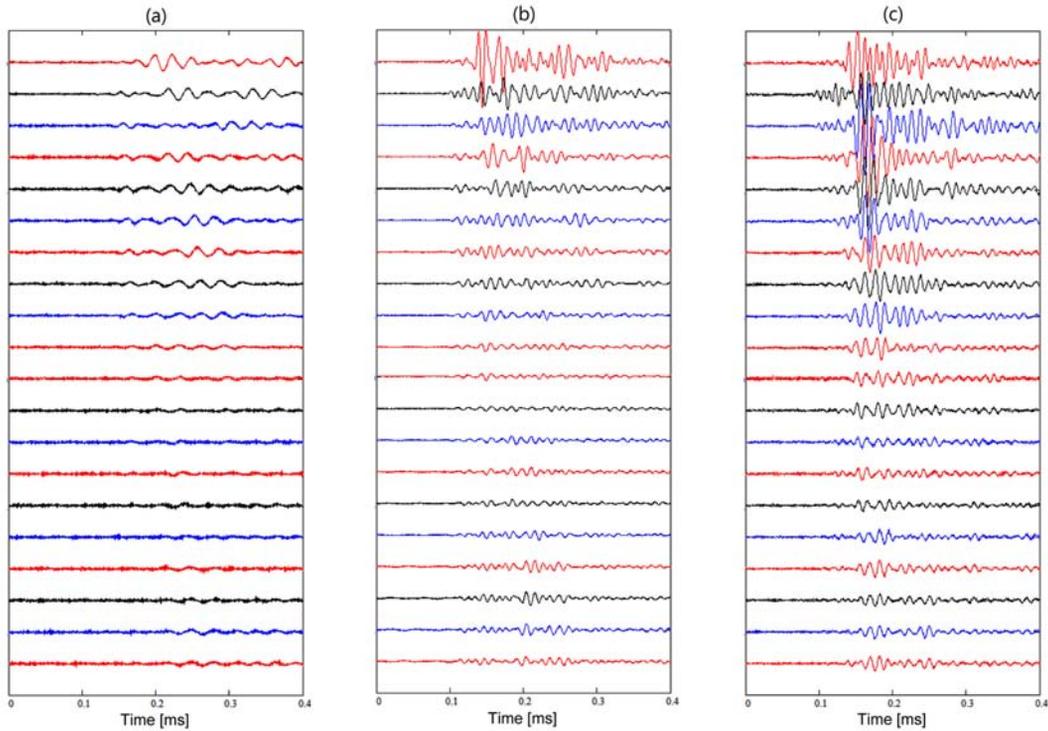


Fig. 8. Shear wave signals passing through the shear plane: (a)  $\sigma_s = 10 \text{ kPa}$ , (b)  $\sigma_s = 25 \text{ kPa}$ , (c)  $\sigma_s = 50 \text{ kPa}$ .

생하지 않으며, 파의 진폭도 크게 변화하지 않았다. 반면에, Fig. 8과 같이 전단면을 반영한 전단파의 초기 도달시간은 전단과정이 진행됨에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 파의 진폭도 점차 감소하는 경향을 보여주었다. 이는 전단과정이 진행됨에 따라, 전단면을 반영하도록 상·하부 전단상자에 마주보도록 각각 설치된 벤더 엘리먼트 사이의 이동거리가 증가되었기 때문이며, 추가로 전단면을 중심으로 분포된 전단영역의 강성이 감소되었을 가능성도 내포하고 있다.

### 토 의

#### 구속조건에 따른 전단강도 변화

동결토는 흙입자의 마찰력보다 입자간 동착된 얼음의 지배적인 영향으로 침투전단강도가 발현되며, 동결온도가 낮아질수록 침투전단강도 후 급격한 파괴가 발생하는 취성거동을 보인다(Lee et al., 2013). 이와 같은 이유로, 동결 시 온도와 포화도 등에 영향을 받는 침투전단강도의 변화에 관한 고찰로써, 취성거동을 보이는 동결토의 중요한 공학적 정수인 침투전단강도의 변화를

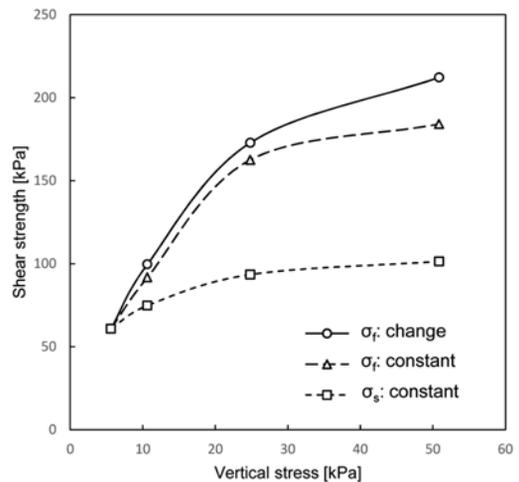


Fig. 9. Results of analysis of shear strength in frozen soils.

파악하고자 하였다. 또한, 동결 및 전단과정 중 구속조건에 영향을 파악하기 위하여, 모든 경우의 연직응력 변화에 따른 침투전단강도를 정리하여 Fig. 9에 도시하였다. 동결 및 전단과정의 구속조건에 상관없이 연직응력-전단강도의 관계는 전단강도의 증가량이 점차 수렴하는

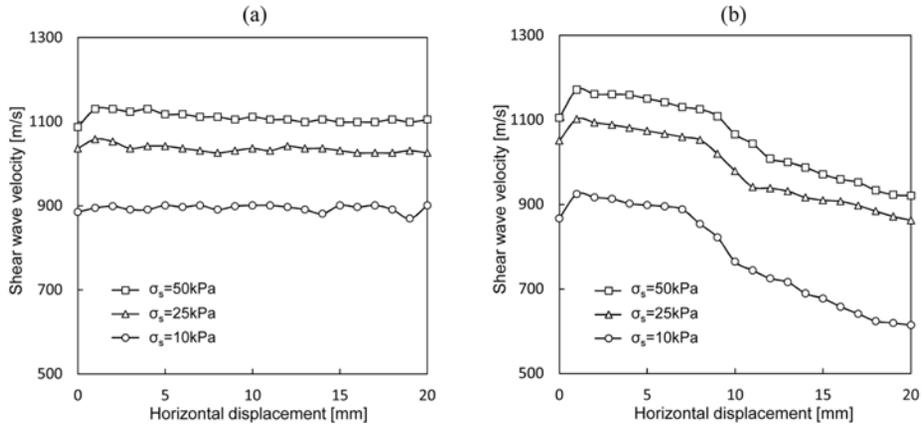


Fig. 10. Results of analysis of shear wave velocities: (a) above shear plane; (b) passing shear plane.

형태의 곡선으로 나타났다. 이는 본 연구에서 사용된 시료는 낮은 포화도로 조성되었고, 가해진 연직응력의 크기도 작기 때문인 것으로 판단된다. 이에 따라, 동결과정의 연직응력을 가하지 않고 전단실험을 수행했던 선행연구들(Choi and Ko, 2011; Lee and Choi, 2012)과 달리, 모든 경우의 있어서 침투전단강도는 연직응력이 증가함에 따라 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 동결 및 전단과정의 연직응력을 5 kPa부터 50 kPa로 증가시킨 경우와 달리, 동결과정의 연직응력을 5 kPa로 고정한 경우에는 전단과정의 연직응력이 증가함에 따른 침투전단강도의 증가량이 다소 감소하였다. 이러한 현상은 동결과정 중 가해진 연직응력이 흙 입자 사이에 존재했던 물이 얼음으로 상변화하여 결합력을 증가시키는 고결화에 영향을 준 것으로 판단된다. 한편, 동결과정의 연직응력을 변화시키고, 전단과정 중 연직응력을 5 kPa로 고정한 경우에는 연직응력의 증가에 따른 침투전단강도의 증가량은 비교적 작게 나타났다. 이와 같은 결과를 통하여, 동결 및 전단과정 모두 구속조건에 따라 전단강도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

#### 구속조건에 따른 전단파 속도 변화

전단과정 중 측정된 전단파 신호로부터, 전단파 속도 ( $V_s$ )는 다음 식 (1)과 같이 산정될 수 있다.

$$V_s = \frac{L_{tip}}{t_a} \quad (1)$$

여기서,  $L_{tip}$ 은 한 쌍의 벤더 엘리먼트의 양 끝간거리를 의미하며,  $t_a$ 은 측정된 전단파 신호에서의 초기도달시간을 의미한다. 전단면 상부의 벤더 엘리먼트간의 거리는

100 mm로 동일하게 유지되는 반면, 전단면을 통과하는 전단파의 이동거리는 전단과정이 진행됨에 따라 증가하며, 이에 따라 이동거리에 대한 보정이 필요로 된다.

전단파 신호로부터 산정된 전단파 속도를 전단과정 중 재하된 연직응력 크기에 따라 분류하여 Fig. 10에 도시하였다. 전단면 상부에서 측정된 전단파 속도의 경우, 전단과정 중 일정하게 유지되는 것을 보여주었다. 이를 통해 동결토의 경우 전단영역(shear zone)의 형성범위는 비동결토에 비하여 미미한 것을 알 수 있으며 (Byun et al., 2011), 동결토에서의 전단영역이 보다 평면에 근접하게 형성되는 것으로 판단된다(Lee et al., 1994). 반면, 전단영역의 특성을 반영하도록 전단면을 통과하여 측정된 전단파의 경우, 전단과정이 진행됨에 따라 전단파 속도가 감소하는 모습을 보였으며, 특히 한계 상태가 시작되는 수평변위 10 mm 부근에서 전단파 속도가 급격히 감소하였다. 전단과정이 진행되며 시료의 파괴에 의해 수직변위가 증가하며, 이에 따라 전단파 속도가 감소하는 결과가 나타났다. 또한, 수직변위의 증가량이 감소하기 시작하는 부근에서 전단파 속도가 급격히 감소하였다. 이는 전단파의 이동거리가 보정되었음에도 불구하고, 전단과정이 진행됨에 따른 시료의 전단강성이 감소되었기 때문인 것으로 판단되며, 전단강성의 감소는 입자간 결합의 파괴 및 시료 전체의 수직변위 발생으로부터 초래되었을 것으로 추정된다.

#### 요약 및 결론

본 연구에서는 상재하중에 의해 구속된 동결지반의 거동을 평가하기 위하여, 동결 및 전단과정의 구속조건

이 변화됨에 따른 동결토의 전단강도 및 강성의 변화를 파악하고자 하였다. 영하의 환경에서 작동 가능하도록 설계된 직접전단실험기를 이용함으로써 전단강도를 평가하였으며, 여기서 전단상자의 벽면에 전단파 트랜스듀서인 벤더 엘리먼트를 설치하여 전단과정에 따른 전단파 속도의 변화를 관찰하였다. 시료조성시 포화도(10%), 실트 함량(30%), 상대밀도(60%)는 동일하게 유지하였으며, 각 경우에 따른 연직응력을 재하 시킨 후 상온에서 동결을 시작하여 -5°C에 도달하였을 때 전단실험을 진행하였다. 동결 및 전단과정의 연직응력을 변화시킴으로써, 각 구속조건에 따른 전단강도 변화와 전단파 속도의 변화를 측정할 결과, 다음과 같은 주요 결론을 도출하였다.

(1) 동결 및 전단과정의 연직응력을 증가시킨 동결토의 경우, 연직응력이 증가할수록 전단강도가 증가하는 결과가 나타났다. 실험은 포화도가 낮은 상태에서 동결된 시료를 이용하여 작은 크기의 연직응력 범위에서 수행되었으므로, 전단강도의 증가량은 연직응력이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.

(2) 동결과정의 연직응력을 고정한 경우, 전단과정의 연직응력이 증가함에 따른 침투전단강도의 증가량은 동결과정의 연직응력을 증가시킨 경우와 비교하여 다소 감소하였다. 이와 같은 결과를 통해, 동결과정 중 가해진 연직응력이 흙 입자사이의 결합력을 증가시키는 고결화에 영향을 준 것을 알 수 있다.

(3) 동결과정의 연직응력을 변화시키고, 전단과정 중 연직응력을 고정한 경우에는 연직응력의 증가에 따른 침투전단강도의 증가량은 상대적으로 미소하게 나타났다. 이로부터, 동결 및 전단과정에서 연직응력의 변화는 모두 전단강도의 변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(4) 전단과정이 진행됨에 따라, 전단면 상부에서 측정된 전단파 속도 및 진폭은 일정하게 유지된 반면, 전단면을 통과하는 전단파의 속도 및 진폭은 감소하였다. 이를 통해 전단발생에 따른 동결토의 전단강성이 감소하는 것으로 추정되며, 동결토의 경우 전단면을 중심으로 전단영역(shear zone)의 형성범위가 크지 않음을 보여주었다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 플랜트연구사업의 연구비지원(13IFIP-B06700801)에 의해 수행되었습니다.

### References

ASTM D3080-03, 2004, Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, Annual Book of ASTM Standard, 04.08.

Byun, Y. H., Truong, Q. H., Tran, M. K., and Lee, J. S., 2011, Evaluation of shear zone in direct shear test using elastic, electromagnetic waves and cone tip resistance, Journal of the Korean Geotechnical Society, 27(2), 43-52 (in Korean with English abstract).

Choi, C. H. and Ko, S. G., 2011, A study for predicting adfreeze bond strength from shear strength of frozen soil, Journal of the Korean Geotechnical Society, 27(10), 13-23 (in Korean with English abstract).

Christ, M. and Park, J. B., 2010, Laboratory determination of strength properties of frozen rubber-sand mixtures, Cold Regions Science and Technology, 60(2), 169-175.

Kang, J. M., Lee, J. G., Lee, J. Y., and Kim, Y. S., 2013, Analysis of the relationship between unconfined compression strength and shear strength of frozen soils, Journal of the Korean Geosynthetics Society, 12(3), 23-29 (in Korean with English abstract).

Kang, M. G., Seo, S. Y., Chae, J. G., and Lee, J. S., 2012, Variation of shear wave velocities according to cyclic freezing and thawing, Korean Geotechnical Society Fall National Conference, Korean Geotechnical Society, 567-572 (in Korean).

Ladanyi, B. and Theriault, A., 1990, A study of some factors affecting the adfreeze bond of piles in permafrost, Canadian Geotechnical Engineering Congress GSP 27 ASCE, 1, 213-224.

Lee, J. S. and Lee, C. H., 2006, Principles and considerations of bender element tests, Journal of the Korean Geotechnical Society, 22(5), 47-57 (in Korean with English abstract).

Lee, J. S. and Santamarina, J. C., 2005, Bender elements: Performance and signal interpretation, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 131(9), 1063-1070.

Lee, J. Y. and Choi, C. H., 2012, A study for shear strength characteristics of frozen soils under various temperature conditions and vertical confining pressures, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 13(11), 51-60 (in Korean with English abstract).

Lee, J. Y., Kim, Y. S., and Choi, C. H., 2013, A study for adfreeze bond strength developed between weathered granite soils and aluminum plate, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 14(12), 23-30 (in Korean with English abstract).

Lee, S. D., Kang, J. H., and Lee, C. I., 1994, Shear strength and deformation behavior of rock joint with roughness, Journal of the Korean Society for Rock Mechanics, 4(3), 261-273 (in Korean with English abstract).

Park, J. H. and Lee, J. S., 2014, Characteristics of elastic waves in sand-silt mixtures due to freezing, Cold Regions Science and Technology, 99, 1-11.

Park, J. H., Kang, M. G., and Lee, J. S., 2013, Variation in characteristics of elastic waves in frozen soils accord-

- ing to degree of saturation, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 33(3), 1063-1075.
- Park, J. H., Hong, S. S., Kim, Y. S., and Lee, J. S., 2012, Characteristics of elastic waves in sand-silt mixtures due to freezing, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 13(4), 27-36 (in Korean with English abstract).
- Seo, M. W., Kim, B. J., and Ha, I. S., 2009, Comparison of shear strength of coarse materials measured in large direct shear and large triaxial shear tests, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 10(1), 25-34 (in Korean with English abstract).
- Yasufuku, N., Springman, S. M., Arenson, L. U., and Ramholt, T., 2003, Stress-dilatancy behavior of frozen sand in direct shear, Proc. of the Eighth International Conference on Permafrost, Switzerland, 1253-1258.
- 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 the Korean Society of Civil Engineers, 30(2C), 85-93 (in Korean with English abstract).
- Zhu, Y., Zhang, J., and Shen, Z., 1988, Uniaxial compressive strength of frozen medium sand under constant deformation rates, 5<sup>th</sup> International Symposium on Ground Freezing, Rotterdam, 1, 225-232.

#### 김상엽

고려대학교 건축사회환경공학부  
136-713 서울특별시 성북구 안암동5가 고려대학교  
자연계캠퍼스  
Tel: 02-3290-3838  
E-mail: s3778@hanmail.net

#### 이종섭

고려대학교 건축사회환경공학부  
136-713 서울특별시 성북구 안암동5가 고려대학교  
자연계캠퍼스  
Tel: 02-3290-3325  
E-mail: jongsub@korea.ac.kr

#### 김영석

한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실  
411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283  
Tel: 031-910-0371  
E-mail: kimys@kict.re.kr

#### 변용훈

고려대학교 건축사회환경공학부  
136-713 서울특별시 성북구 안암동5가 고려대학교  
자연계캠퍼스  
Tel: 02-3290-3838  
E-mail: asan1103@korea.ac.kr