

## 삼축압축실험을 이용한 인공동결시료의 강도평가 및 탄성과 특성변화

김종찬<sup>1</sup> · 이종섭<sup>1</sup> · 홍승서<sup>2</sup> · 이창호<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 건축사회환경공학과, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실, <sup>3</sup>전남대학교 해양토목공학과

### Characteristics of Shear Strength and Elastic Waves in Artificially Frozen Specimens using Triaxial Compression Tests

JongChan Kim<sup>1</sup>, Jong-Sub Lee<sup>1</sup>, Seung-Seo Hong<sup>2</sup>, and Changho Lee<sup>3\*</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

<sup>3</sup>Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University

지반에 대한 정확한 이해를 위해 비교란 시료의 채취를 통한 실내실험이 필수적이며, 사질토 지반의 비교란 시료 채취는 인공동결공법에 의한 방법이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다. 본 연구의 목적은 유사한 상대밀도를 가지는 동결-융해시료와 비동결시료의 비배수 삼축압축실험을 이용한 강도평가와 실험과정에서 측정된 압축파와 전단파 속도의 특성변화를 관찰하는 것이다. 인공동결공법에 의해 채취된 사질토 동결시료를 모사하기 위해 주문진 표준사를 이용하여 수증강사법으로 60%와 80%의 상대밀도를 가지는 동결시료와 비동결시료를 조성하였다. 동결된 시료는 삼축압축실험용 페테스탈에 거치하여 자연융해하면서 1분 간격으로 시료의 온도를 측정하였다. 시료가 완전히 융해된 후 비동결시료와 동일한 방법으로 실험을 실시하였으며, 포화, 압밀, 전단과정에서 연속적으로 압축파와 전단파를 측정하여 속도를 산정하였다. 실험결과, 동결시료는 비동결시료에 비하여 축재응력과 전단강도는 감소하는 결과를 보였지만, 내부마찰각은 동결-융해의 여부와 상관없이 일정한 값을 나타내었다. 압축파 속도는 포화과정에서 B-value가 증가함에 따라 약 1800 m/s까지 증가하여 수렴하였으나, 압밀과정과 전단과정에서는 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 전단파 속도는 포화과정에서 B-value가 증가함에 따라 감소하였고, 압밀과정과 전단과정에서는 시료가 받는 유효응력의 변화에 따라 거동하였다. 실험과정에서 압축파 속도는 상대밀도와 동결-융해여부에 상관없이 유사한 경향을 나타내었으나, 전단파 속도는 같은 상대밀도를 가지더라도 동결-융해시료가 비동결시료에 비해 작은 값을 나타내었다. 본 연구는 동결-융해시료와 비동결시료의 삼축압축실험 결과와 탄성과 특성을 비교함으로써 향후 인공동결공법으로 채취된 비교란 동결시료의 강도평가를 위한 예비실험으로 의의가 있다.

**주요어** : 삼축압축실험, 융해, 인공동결공법, 전단강도, 탄성과 속도

For accurate laboratory evaluations of soil deposits, it is essential that the samples are undisturbed. An artificial ground-freezing system is the one of the most effective methods for obtaining undisturbed samples from sand deposits. The objective of this study is to estimate the shear strengths and the characteristics of elastic waves of frozen-thawed and unfrozen specimens through the undrained triaxial compression test. For the experiments, Jumunjin standard sands are used to prepare frozen and unfrozen specimens with similar relative densities (60% and 80%). The water pluviation method is used to simulate the fully saturated condition under the groundwater table. When thawing the frozen specimens, the temperature is measured every minute. After the specimens are completely thawed, undrained triaxial compression tests are conducted using the same procedures as for the unfrozen specimens. During the triaxial tests (saturation, consolidation, and shear phase), compressional and shear waves are measured. The results show that the freeze-thaw process has minor effects on the peak deviatoric stress and shear strength values, and that the process does not affect the internal friction angle. The compressional wave velocity increases with increasing B-value to 1800 m/s in the saturation phase, but tends to remain constant in the process of consolidation and shearing. The shear wave velocity decreases with increasing B-value in the process of saturation, but changes velocity in accordance with the change in effective stress in the processes of consolidation and shearing. The compressional wave velocity has similar values regardless of the freeze-thaw process, but values of shear wave velocity are slightly lower in frozen-thawed specimens than in unfrozen specimens. This study is a preliminary experiment for estimating the shear strength and characteristics of elastic wave velocity in undisturbed frozen specimens that have been obtained using the artificial ground-freezing method.

**Key words** : Artificial ground freezing, Elastic wave velocity, Shear strength, Thawing, Triaxial compression test

\*Corresponding author: changho@jnu.ac.kr

© 2014, 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 복잡하고 대형화된 건설구조물에 대한 수요가 증가함에 따라 점토지반과 사질토지반 같이 상대적으로 열악한 조건의 지반에서도 건설공사를 수행해야 하는 경우가 증가하고 있다. 대부분의 건설 구조물은 지반을 그 기초 대상으로 하는 만큼, 해당지반에 대한 정확한 조사와 이해가 필수적이다. 지반의 특성을 조사하는 방법은 현장시험과 실내시험으로 구분할 수 있으며, 합리적인 지반의 강도정수를 산정하기 위해서는 현장에서 채취한 비교란 시료를 이용한 실내시험을 통하여 강도정수를 산정하는 것이 가장 효과적이다. 특히 동적 하중에 따른 사질토 지반의 액상화 평가 등을 위하여 사질토 지반의 비교란 시료 채취에 대한 연구자들의 관심이 증가하고 있으며, 현재 인공동결공법을 이용한 비교란 동결시료의 채취가 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다(Kim, 2005).

사질토 지반의 강도와 변형 특성은 시료의 상대밀도, 원지반 응력상태와 응력이력에 영향을 받는다(Ladd et al., 1977). 인공동결공법을 이용한 비교란 동결시료의 특성을 평가하기 위해 Yoshimi 등(1978)은 동결시료와 비동결시료를 조성하여 배수 삼축압축시험을 실시하였으며, 동결-융해과정은 사질토의 강도와 변형에 큰 영향을 미치지 않는다고 하였다. Yoshimi 등(1984)은 동결시료가 융해 시 받는 구속압에 따른 액상화 강도의 변화를 관찰하였으며, 구속압 5 kPa부터 98 kPa까지는 액상화 강도에 큰 영향이 없다고 제안하였다. Sasitharan 등(1994)은 사질토의 실트 함량에 따른 동결-융해 시 특성 변화를 관찰하기 위해 전단파 속도를 측정하였고, 동결 시 시료에 융기가 발생하지 않으면 동결-융해 전 후의 전단파 속도변화는 무시할 정도라고 하였다. 선행연구에서는 사질토 시료의 동결에 의한 강도 및 미소변형 특성을 관찰하고자 비동결시료를 삼축압축시험용 페데스탈에 거치한 상태에서 동결과 융해과정을 연속적으로 실시한 후 시험을 수행하였고, 비동결시료와 비교하였다. 그러나 이러한 방법의 시험은 인공동결공법으로 채취된 동결시료의 시험조건을 충분히 모사하지 못하는 한계를 가진다. 본 연구에서는 인공동결공법으로 채취된 동결시료의 강도평가 시험을 수행하기 위하여, 조성된 동결시료의 트리밍과정부터 페데스탈에 거치하여 융해까지의 과정을 실시한 후 삼축압축과정을 실시하였다.

본 연구에서는 주문진 표준사를 이용하여 수중강사법으로 상대밀도 60%, 80%를 가지는 동결시료와 비동결시료를 각각 조성하였다. 조성된 동결시료는 트리밍을

실시한 후 삼축압축시험용 페데스탈에 거치하여 자연융해시켰다. 이후 동결-융해시료와 비동결시료는 동일한 조건으로 비배수 삼축압축시험을 실시하였다. 동결시료의 융해과정에서 시료의 온도변화를 관찰하고자 삼축압축시험용 하부 페데스탈에 열전대(Thermocouple, K-type)를 설치하였다. 또한, 삼축압축시험 과정에서 시료의 미소변형 특성을 관찰하고자 압축파와 전단파를 측정할 수 있는 피에조 디스크 엘리먼트와 벤티 엘리먼트를 상·하부 페데스탈에 설치하여 포화, 압밀, 전단과정에서 연속적으로 압축파와 전단파를 측정하였다.

본 연구의 목적은 인공동결공법으로 채취된 동결시료의 강도평가를 위한 시험을 수행하여 동결시료와 비동결시료의 강도특성과 탄성과 특성 변화를 관찰하는 것이다. 본 논문에서는 인공동결공법을 이용한 비교란 시료채취에 대한 이론적 배경을 시작으로 시료의 조성과정, 트리밍 방법, 삼축압축시험과 탄성과 측정에 대해 설명하였다. 또한 각각의 상대밀도에 해당하는 동결-융해시료와 비동결시료의 삼축압축시험 결과와 산정된 압축파와 전단파 속도변화의 원인 및 분석에 대해 기술하였다.

## 인공동결공법의 이론적 배경

정확하고 효과적인 지반 강도정수 산정의 중요성이 커짐에 따라 비교란 시료 채취에 대한 연구자들의 관심이 커지고 있다. 점착력이 없어서 자립하기 하기 힘든 사질토의 경우 인공동결공법에 의한 샘플링의 우수성이 여러 현장적용 및 시험을 통해 입증되었으며, 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다.

인공동결공법은 연약한 지반이나 지하수가 있는 지반을 대상으로 하며, 지반을 동결하여 일시적으로 강도를 증진시키는 지반개량 목적과 지반 내 오염물질의 이동을 차단하는 목적으로 활용될 수 있으며(Shin et al., 2009; Shin et al., 2010), 지하수위 아래에 있는 사질토 지반을 동결하여 지반의 강성을 증가시킨 후 비교란 시료를 채취할 수 있는 방법으로 정의된다(Lee and Chae, 2011). 지반 내 수분의 동결로 인해 시료의 강성이 증가하기 때문에 시료의 자립이 불가능하여 채취하기 힘든 사질토 지반의 비교란 시료 채취에 유용하게 활용될 수 있다. 동결관에 순환시키는 냉매의 종류에 따라 액체질소 방식과 브라인 방식으로 나눌 수 있으며, 동결관을 지반에 연직으로 관입하여 냉각제를 순환시켜 주변지반을 동결시킨 후 샘플러를 관입하여 비교란 시료를 채취한다. 지반동결에 의한 팽창으로 발생할 수 있는 교란을

방지하기 위해 지반팽창의 가능성이 적은 세립분의 함량이 낮은 지반을 주로 대상으로 하며, 동결 시 간극수의 흐름은 동결관 바깥쪽으로 향할 수 있어야 한다 (Kim, 2005).

인공동결공법이 활발히 진행되고 있는 일본에서는 1964년 니가타 지진 이후, 지반의 액상화 예측이 빗나 가게 된 원인조사 차원에서 동결샘플링 기술 개발이 시작되었고, 1980년대 중반에 기술 개발이 완료되어 구조물의 안정성을 위한 지반조사 단계에서 활용되고 있다. 국내에서는 인공동결공법의 현장적용을 위해 인공동결 샘플링의 핵심기술인 동결기술의 개발 단계로 이중관 타입의 동결관 및 냉매(액화질소) 공급시스템을 개발하여 포화된 지반을 대상으로 동결성능 및 온도변화 양상을 실내실험으로 평가하였다(Kang et al., 2012; Chae et al., 2013). 인공동결공법에 의한 동결샘플링은 지반의 동결, 굴착, 채취, 운반, 보관, 공시체 제작, 실험의 단계를 거치며, 지반의 동결부터 강도평가까지 인공동결공법에 대한 연구가 활발히 진행중에 있다.

## 실험구성

### 시료 특성

#### 시료의 기본특성

본 연구에서는 비교란 시료 채취를 위한 인공동결공법의 적용 대상이 되는 사질토 지반을 모사하기 위하여 주문진 표준사를 이용하여 시료를 조성하였다. 시료 동결 시 시료 팽창을 발생시킬 수 있는 세립자의 영향을 최소화하고(Sasitharan et al., 1994), 입자크기에 대한 영향을 최소화하기 위해(Lee et al., 2008) 30번체와 50번체 사이의 평균입경 0.45 mm를 가지는 주문진 표준

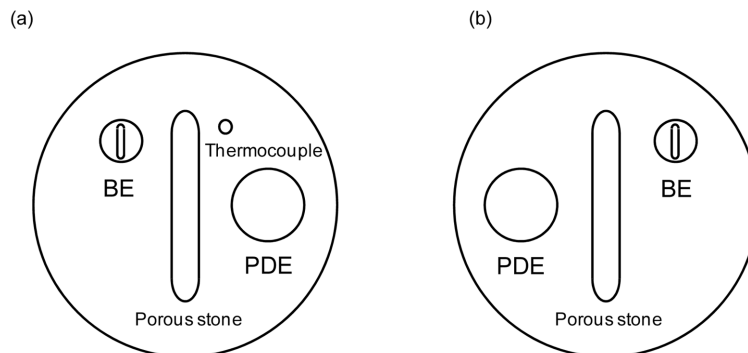
사를 사용하였으며, 시료의 최대간극비와 최소간극비는 ASTM 기준으로 산정하였고(ASTM D4253; ASTM D4254) 그 값은 0.94와 0.67이며, ASTM D854의 방법으로 산정한 비중은 2.66으로 나타났다.

### 시료 조성

인공동결공법을 이용한 비교란 시료 채취공법은 일반적으로 지하수위 아래 지반을 대상으로 하므로, 본 실험에서는 수증강사법으로 시료를 조성하였다. 각각 상대밀도 약 60%, 80%의 동결-용해시료와 비동결시료를 높이 10 cm, 직경 5 cm 크기로 조성하였다. 동결-용해 시료의 경우 직경 5 cm의 몰드에 조성된 시료를 냉동고에 넣어 동결시켰으며 이때 냉동고의 온도는  $-50^{\circ}\text{C}$ 로 설정하여 24시간 이상 동결하였다. 비동결 시료는 동결-용해시료와 같은 수증강사법으로 조성하였고, 동결-용해시료에서 결정된 상대밀도와 유사한 값을 가지도록 조성하였다.

### 탄성과 측정이 가능한 삼축압축실험 시스템

삼축압축실험 과정에서 온도, 압축과 및 전단파를 측정하기 위해 제작된 페데스탈은 Fig. 1과 같다. 페데스탈은 아크릴 재질로 시료의 직경과 같은 5 cm의 크기로 제작하였으며 온도와 탄성파를 측정할 수 있는 트랜스듀서를 설치하였다. 하부 페데스탈에는 온도를 측정할 수 있는 열전대를 설치하였다. 상·하부 페데스탈에는 각각 압축파를 측정할 수 있는 피에조 디스크 엘리먼트와 전단파를 측정할 수 있는 벤더 엘리먼트를 설치하였다. 피에조 디스크 엘리먼트는 직경 12 mm의 크기의 금속판과 직경 8 mm의 압전판으로 이루어져 있으며, 페데스탈 접촉면에 수평으로 설치하였다. 전단파 트랜스듀서로 사용된 벤더 엘리먼트는 홀과 트랜스듀서와의 결



**Fig. 1.** Pedestal for triaxial compression tests with measurements of temperature and elastic waves: (a) bottom pedestal, and (b) top pedestal.

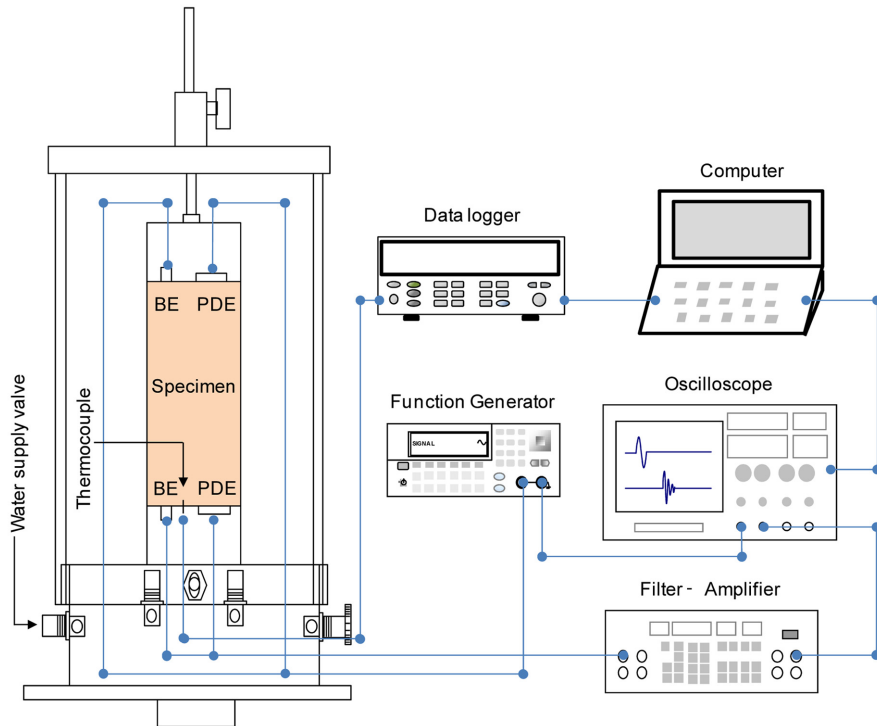


Fig. 2. Temperature and elastic wave measurement system.

합효과가 뛰어나다고 알려져 있다(Lee and Lee, 2006). 사용된 벤더 엘리먼트의 크기는  $6.0 \times 4.0 \times 0.6$  (길이  $\times$  너비  $\times$  두께, mm)이며, 페테스탈에 캔틸레버 보 형식으로 설치하였다. 상·하부 페테스탈 중앙부에 다공석(Porous stone)을 설치하여 삼축압축실험 중 시료내부에 유입되는 물이 시료 입자구조에 직접적으로 미치는 영향을 최소화하였다.

온도와 탄성파를 측정하기 위해 페테스탈에 설치된 트랜스 듀서의 측정시스템은 Fig. 2와 같다. 하부 페테스탈에 부착된 열전대는 데이터로거(Data Logger, Agilent 34970A)에 연결하여 1분 간격으로 온도를 측정하였다. 압축파와 전단파의 측정을 위하여 신호발생기(Function Generator, Agilent 33220A)에서 발생된 신호가 발신 트랜스듀서로 보내지고 시료를 통과한 신호가 수신 트랜스듀서로 보내진다. 모든 신호의 방향은 상부에서 하부로 진행하도록 설정하였다. 수신된 신호는 필터(Filter-Amplifier, Krohn-Hie 3361)를 통해 잡음을 제거하고 신호를 증폭시킨 후 오실로스코프(Oscilloscope, Agilent 54624A)를 통해 신호를 확인하여 컴퓨터로 저장하였다.

## 실험과정

### 동결시료의 용해

조성된 동결시료를 멤브레인에 장착한 후 삼축압축실험용 페테스탈에 거치하고 비배수 상태로 상온에서 자연용해시켰다. 시료 외부로 연결되는 Cell pressure는 10 kPa로 설정하여 동결시료의 용해로 인한 시료의 변형을 최소화하며 자립할 수 있도록 하였다. 동결시료와 Cell에 공급되는 물의 큰 온도차이로 인한 동결시료의 갑작스러운 용해를 방지하고자  $1^{\circ}\text{C}$  이하로 냉각된 증류수를 Cell의 공급수로 이용하였다. 동결시료의 내부까지 완전히 용해되도록 시료의 온도와 실험실의 온도가 평형을 이루는 시점까지 용해를 실시하였으며, 하부 페테스탈에 설치된 열전대를 이용하여 1분 간격으로 온도를 측정하였다.

### 비배수 삼축압축실험

동결시료의 용해가 완전히 이루어진 후, 비배수 삼축압축실험과정은 비동결시료와 동일하게 진행하였다. 시료 내부 및 시료와 멤브레인 사이에 존재하는 미세한 공기를 제거하기 위하여 Cell과 Pore의 압력을 10 kPa

과 0 kPa로 유지한 상태로 멤브레인 내부에 물을 순환시키는 Circulation 과정을 실시하였다. 물의 흐름은 하부에서 상부로 향하도록 하였으며 상부 페데스탈에 설치된 다공석(Porous stone)을 통해 외부로 유출시켰다. Circulation 과정이 완료되면 포화과정, 압밀과정, 전단과정의 순서로 실험을 진행하였다. 포화과정에서는 Cell pressure와 Pore pressure를 순차적으로 20 kPa씩 증가시켜 B-value를 측정하였으며, 측정된 B-value가 0.95이상이 되면 완전히 포화되었다고 판단하였다(ASTM D4767). 압밀과정에서는 동결-융해시료와 비동결시료 모두 80 kPa의 하중으로 등방압밀 하였으며, 압밀과정이 완료된 후 0.2%/min의 속도로 축변형률을 가해 전단과괴를 유도하였다. 축변형률이 25%에 도달할 때까지 전단과괴 하였으며, 전단이 완료된 후 회수한 시료의 건조 무게를 측정하여 상대밀도를 재확인하였다.

### 탄성과 측정

비배수 삼축압축실험과정에서 탄성파를 포화, 압밀, 전단과정에서 연속적으로 측정하여, 각 단계가 시료의 탄성과 특성에 미치는 영향과 동결-융해시료와 비동결시료의 특성을 관찰하였다. 측정된 신호는 다음과 같은 Eq. (1)을 이용하여 초기도달시간을 구할 수 있다.

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (1)$$

여기서,  $L$ 은 피에조 디스크 엘리먼트 및 벤더 엘리먼트 끝단의 거리를 의미하며  $\Delta t$ 는 압축파와 전단파의 초기 도달시간을 의미한다. 탄성파를 측정할 수 있는 트랜스듀서는 상·하부 페데스탈에 설치되어 있으므로, 실험과정 중 발생하는 축변형률이 탄성과 속도에 영향을 미치게 된다. 따라서 탄성과 측정이 이루어진 시점에서 축변형률을 고려한 트랜스듀서 간의 거리( $L$ )를 적용하여 탄성과 속도를 산정하였다.

## 실험 결과 및 분석

### 융해과정에서 온도변화

동결시료를 삼축압축실험용 페데스탈에 거치한 후 자연융해하면서 하부 페데스탈에 설치된 열전대를 이용하여 온도를 측정하였고, 그 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)와 3(b)는 각각 상대밀도 79%와 62%를 가지는 동결시료의 융해 시 온도변화 양상이다. 동결시료의 낮은 온도로 인하여 측정 초기에 시료 하부 경계면 온도는  $-1^{\circ}\text{C}$

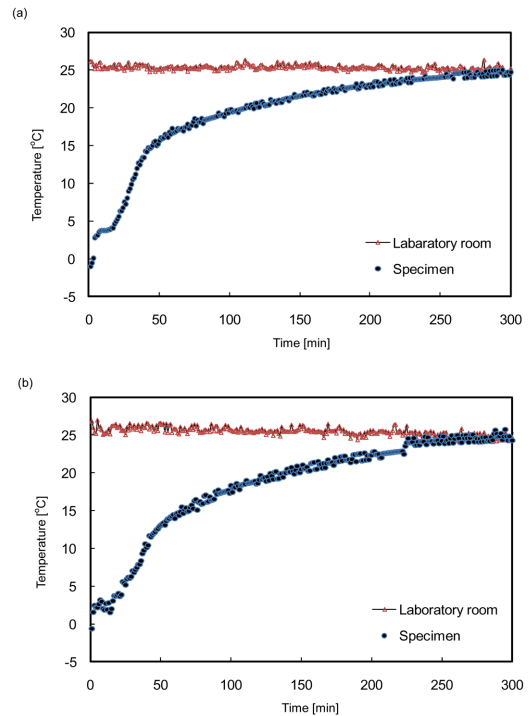


Fig. 3. Temperature versus time during the thawing phase: (a) frozen-thawed Dr 79%, and (b) frozen-thawed Dr 62%.

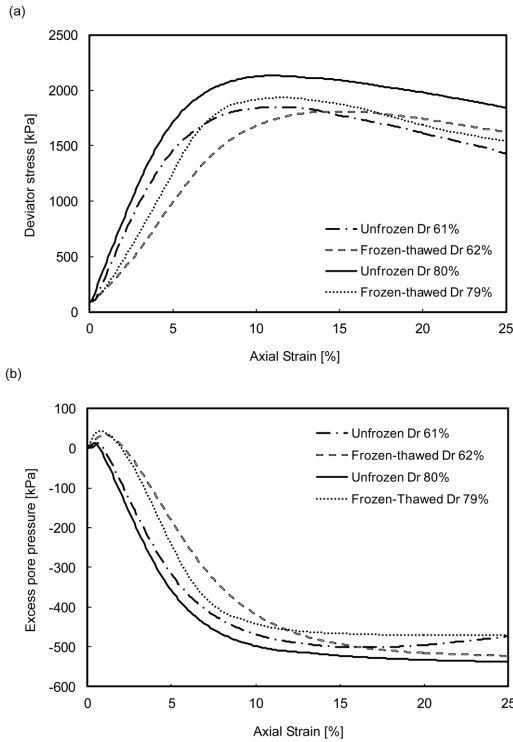
까지 하강하였으며, 이후 Cell에 냉각된 물이 주입되면서 온도가 상승하여 실험실 온도( $25^{\circ}\text{C}$ )와 평형을 이루었다. 융해 시 시료의 온도변화는 시료 외부의 수온과 시료의 경계면에서의 열 교환이 지배적이다. 따라서 시료 내부에 남아있을 가능성이 있는 빙정까지 완전히 융해시키기 위해 시료의 온도와 실험실의 온도가 평형을 이루는 시점까지 융해과정을 실시하였고, 약 300분이 소요되었다.

### 비배수 삼축압축실험

동결-융해시료와 비동결시료의 비배수 삼축압축실험을 통해 산정된 결과는 Table 1과 같다. Fig. 4(a)는 축방향 변형률에 따른 축차응력의 관계를 나타내며, Fig. 4(b)는 과잉간극수압의 발생경향을 보여준다. 축차응력과 과잉간극수압은 상대밀도와 동결-융해 여부에 따라 다른 결과를 나타냈다. 축차응력은 상대밀도가 낮을수록 작은 값을 나타냈으며, 유사한 상대밀도의 시료에서는 동결-융해과정을 겪은 시료가 비동결시료보다 작은 값을 나타냈다. 과잉간극수압은 모든 동결-융해시료와 비동결시료에서 전단과정 초기에 소폭 증가 한 후 감소하여 음의 값을 보였으며, 조밀한 상태의 사질토에서 일반

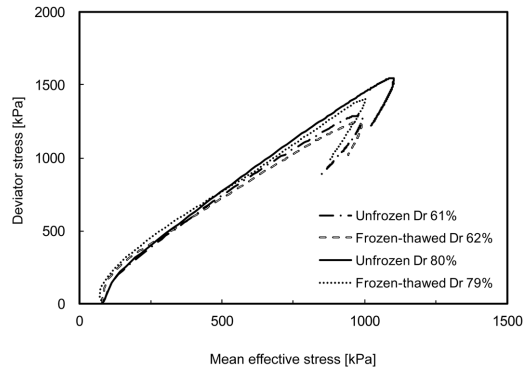
**Table 1.** Result of undrained triaxial compression test

Segment		Strain at failure [%]	Deviator stress at failure [kPa]	Shear strength at failure [kPa]	Mean effective stress at failure [kPa]	Excess pore pressure at failure [kPa]	Friction angle at failure [°]
Frozen-thawed	Dr 79%	11.2	1401.2	768.4	1000.9	-452.88	34.5
	Dr 62%	13.5	1243.4	621.6	973.7	-479.3	31.1
Unfrozen	Dr 80%	10.5	1547.5	774.1	1098.9	-502.4	34.6
	Dr 61%	12.3	1275.7	646.5	994.1	-489.1	31.5

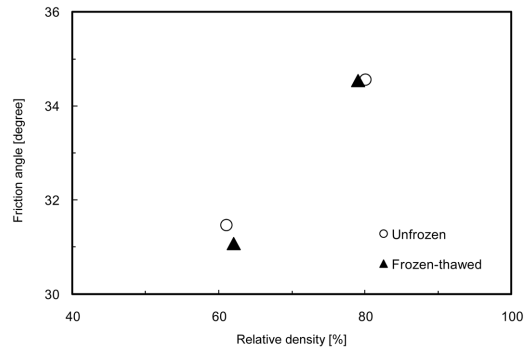


**Fig. 4.** Results of undrained triaxial compression test during the shear phase: (a) deviatoric stress versus axial strain, and (b) excess pore pressure versus axial strain.

적으로 관찰되는 경향과 유사하였다. 과잉간극수압의 감소량은 상대밀도가 낮을수록 작았으며, 동결-융해시료가 비동결시료에 비해서 작게 감소하였다. Fig. 5는 시료들의 응력경로 결과를 보여준다. 상대밀도와 동결-융해여부에 따라 최대값은 다르게 분포하고 있지만, 같은 상대밀도의 시료에서는 동결-융해여부에 상관없이 동일한 기울기를 가진다. Table 1과 같이, 전단강도는 축차응력과 동일하게 상대밀도가 낮을수록 작은 값을 나타냈고 동결-융해과정에 의해 감소된 값으로 나타났다. 동결-융해 과정에 의한 전단강도의 감소현상은 상대밀도 80%와



**Fig. 5.** Stress path during the shear phase.



**Fig. 6.** Effect of the freeze-thaw process on friction angle.

60% 시료에서 각각 약 1%, 4% 발생하였다.

Fig. 6에서는 침투 내부마찰각을 산정하여 상대밀도와 동결-융해 여부에 따라 구분하여 나타내었다. 내부마찰각은 상대밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였지만, 동결-융해시료와 비동결시료의 비교에서는 큰 차이를 보이지 않고 매우 유사한 값으로 나타났다. 시료의 동결-융해과정으로 인해 입자배열과 응력이력은 변할 수 있으므로 동결-융해시료에서 축차응력과 전단강도가 감소하는 경향을 보였지만, 강도정수인 내부마찰각은 큰 차이를 보이지 않았다.

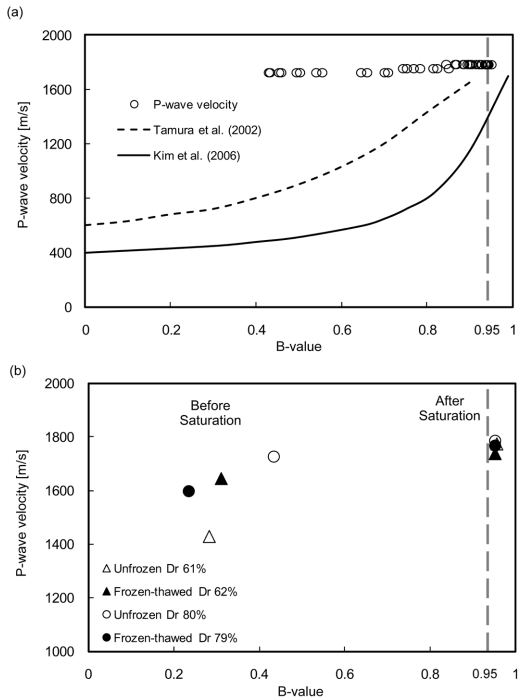


Fig. 7. P-wave velocity versus B-value during the saturation phase: (a) unfrozen Dr 80%, and (b) before and after saturation for all tested specimens.

**압축과 속도 변화**

압축과 속도는 함수비의 영향을 많이 받기 때문에 (Ishihara et al., 1998) 포화도를 나타낼 수 있는 지표인 B-value와 큰 연관관계가 있다. 압축과는 시료를 통과하면서 잔류하는 공기방울에 의해 속도가 감소되고 그 값으로 포화의 정도를 산정할 수 있다. B-value와 압축과 속도의 상관관계에 대한 선행연구에서는 Fig. 7(a)와 같이 B-value가 0.8이하 일 경우는 압축과 속도가 1000 m/s까지 서서히 증가하다가 B-value가 0.8 이상이 되면 급격히 증가하여 1500 m/s 이상의 값을 나타낸다고 보고하였다(Kim et al., 2006; Tamura et al., 2002). 압축과를 이용하여 시료의 포화도 및 B-value와 비교하는 경우, 시료 사이에 위치하는 공기방울의 크기와 위치에 따라 속도가 달라질 수 있다(Tamura et al., 2002). Naesgaard 등(2007)은 시료 내부에 위치하는 공기방울 분포의 균등 정도에 따라 압축과 속도가 받는 영향에 대해 연구하였으며, 공기방울이 시료 내부에 비균등하게 분포한다면 압축과 속도는 시료와 물의 강성에 크게 영향을 받으므로 상대적으로 더 강성이 높은 곳을 지나기 때문에, 낮은 B-value에서도 1500 m/s에 가까운 압축과

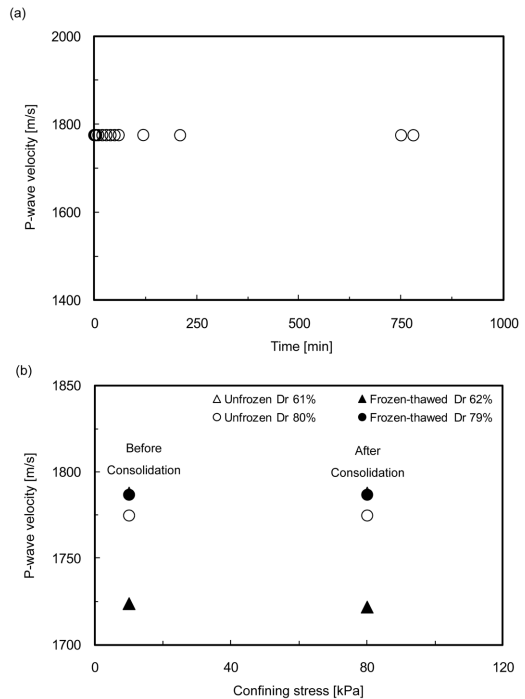


Fig. 8. P-wave velocity versus B-value during the consolidation phase: (a) unfrozen Dr 80%, and (b) before and after consolidation for all tested specimens.

속도를 나타낼 수 있다고 제안하였다.

포화과정에서 상대밀도 80% 비동결 시료의 압축과 속도변화는 Fig. 7(a)와 같으며, 각 시료의 포화과정 시작과 완료 후의 압축과 속도는 Fig. 7(b)와 같다. 시료들의 초기 압축과 속도는 다르지만 모든 시료에서 B-value가 낮은 값에서도 1400 m/s 이상의 상대적으로 높은 압축과 속도를 나타내었고 B-value가 증가함에 따라 각각의 압축과 속도는 약 1800 m/s로 수렴하는 현상을 보였다. 일반적인 유체의 압축과 속도는 1500 m/s~2000 m/s의 범위안에 있고, 순수한 물에서는 약 1500 m/s로 알려져 있으며 시료가 포화된 경우 그 값은 증가한다(Kokusho, 2000). 따라서 0.95 이상의 B-value와 약 1800 m/s로 수렴하는 압축과 속도로 미루어 보아 시료는 완전히 포화되었다고 판단하였으며, 포화과정에서 압축과 속도는 상대밀도와 동결-융해여부와 상관없이 분포하였다.

압밀과정에서는 80 kPa의 등방압밀을 하면서 시간에 따른 압축과 속도 변화를 관찰하였고 그 결과는 Fig. 8과 같다. 압밀에 따라 간극수압의 변화는 발생하나, 포화도의 변화는 발생하지 않아 압밀 전과 압밀 후의 압

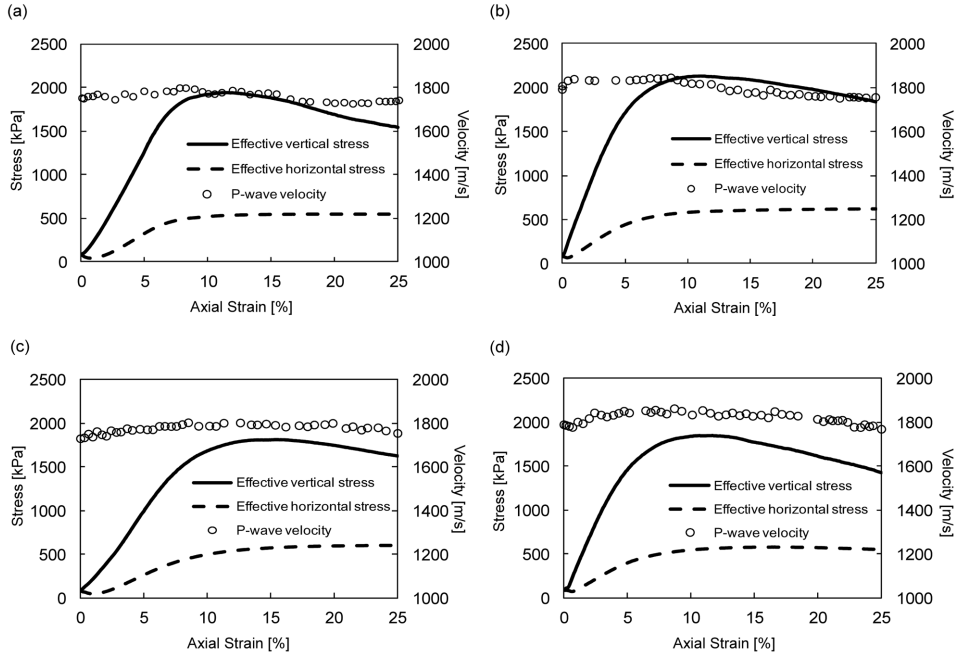


Fig. 9. P-wave velocity during the shear phase: (a) frozen-thawed Dr 79%, (b) unfrozen Dr 80%, (c) frozen-thawed Dr 61%, and (d) unfrozen Dr 60%.

축과 속도에는 변화가 없는 것으로 판단된다.

전단과정에서 압축과 속도의 변화는 Fig. 9와 같다. 축변형률이 증가함에 따라 모든 시료에서 유효응력이 증가하고 과잉간극수압과 간극수압이 감소하여 음의 값으로 나타났지만, 비배수 전단시험으로 시료 내 함수비의 변화가 없어 압축과 속도는 전단변형과 관계없이 일정한 값을 보였다.

**전단파 속도 변화**

벤더엘리먼트를 통해 산정한 전단파 속도는 유효응력의 크기에 영향을 받으며 Eq. (2)과 같이 유효응력의 함수로 표현할 수 있다(Roesler, 1979).

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

본 실험에서는 포화과정에서 연속적으로 전단파 속도를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 10과 같다. 전단파 속도는 상대밀도와 동결-융해 여부에 상관없이 B-value가 증가할수록 약 10% 정도 감소하는 결과를 보였다. Kim 등(2006)은 탄성과 측정이 가능한 비틀림 전단시험기에서 B-value 증가에 따른 전단파 속도를 비교하였고, B-value가 0.97에 도달한 후 약 10%의 전단파 속도 감소

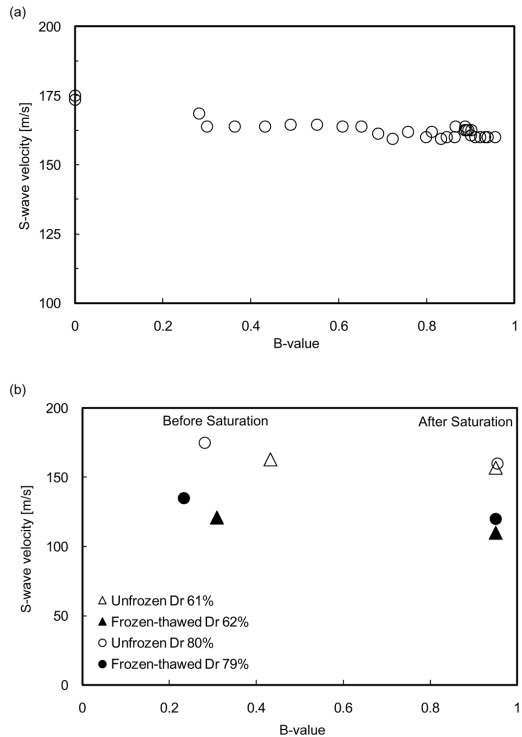
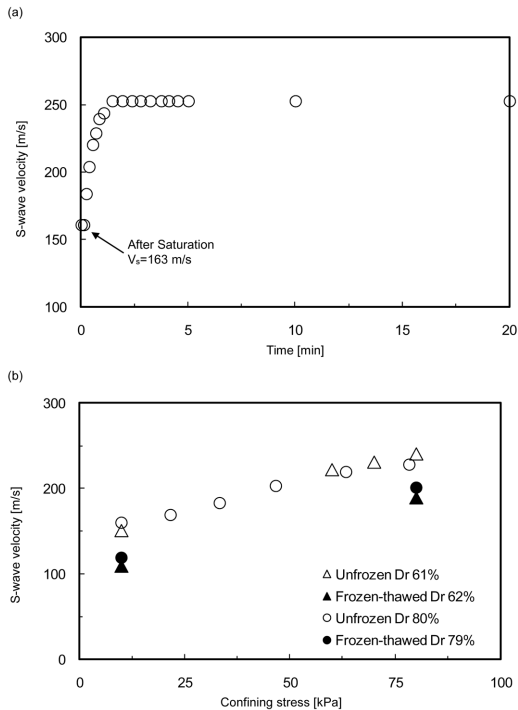


Fig. 10. S-wave velocity versus B-value during the saturation phase: (a) unfrozen Dr 80%, and (b) before and after saturation for all tested specimens.



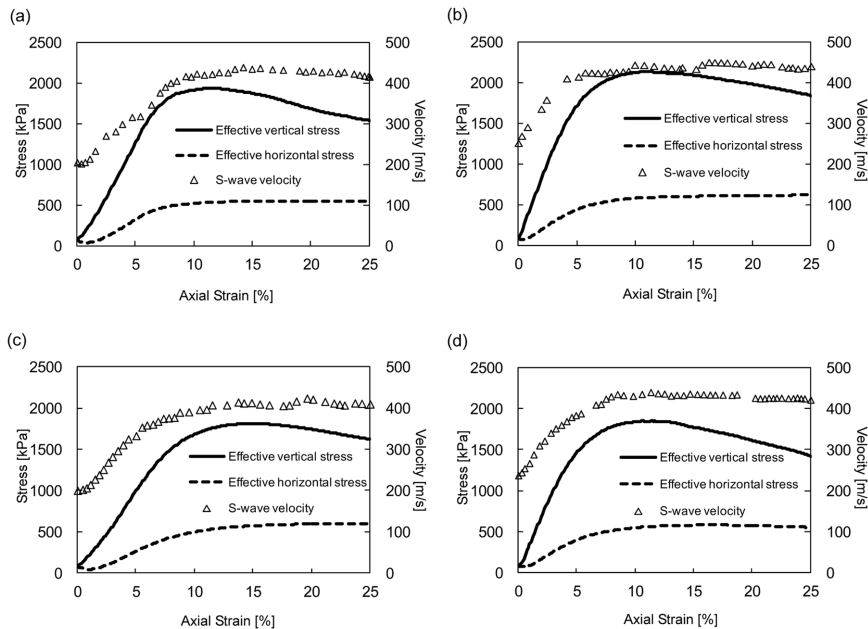


**Fig. 11.** S-wave velocity versus B-value during the consolidation phase: (a) unfrozen Dr 80%, and (b) before and after consolidation for all tested specimens.

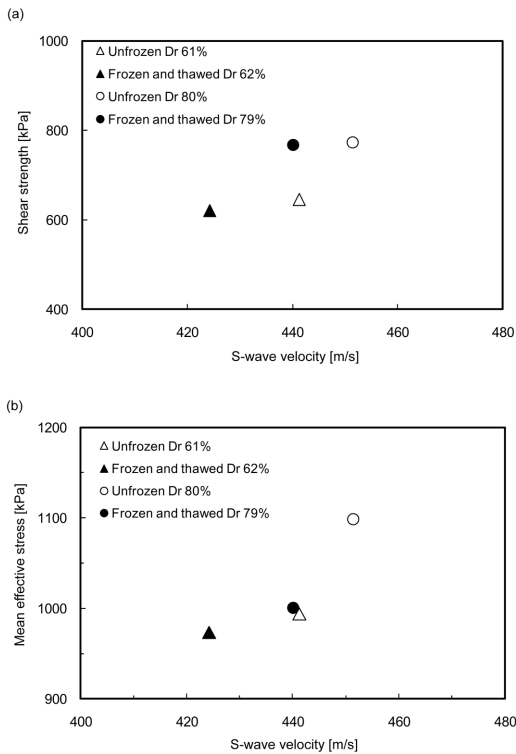
현상을 보인다고 보고하였다. B-value는 포화의 정도를 측정할 수 있는 지표로서, B-value가 증가할수록 포화도가 높아지고 이에 따라 시료가 받는 유효응력이 감소하여 전단파 속도가 느려진다고 판단된다.

압밀 전과 압밀 후의 전단파 속도 경향은 Fig. 11과 같다. 전단파 속도는 유효응력에 지배적인 영향을 받기 때문에 구속압의 증가에 따라 상대밀도와 동결-융해과정의 구분없이 증가하는 경향을 나타냈다.

전단과정에서 연속적으로 측정된 각 시료의 전단파 속도와 유효응력 경향을 Fig. 12에 나타내었다. 전단변형률이 발생함에 따라, Fig. 4와 같이 과잉간극수압이 증가하다 감소하여 부의 값을 나타내고 이후 일정한 값을 유지한다. 이로 인하여 수직유효응력과 수평유효응력은 초기에 모두 증가하나, 최대값을 보인 이후에는 수직유효응력은 소폭 감소하는 경향을 보였지만 수평유효응력은 큰 변화없이 거의 일정한 크기를 유지하였다. 전단파 속도는 전단 초기에 유효응력이 증가함에 따라 증가하는 모습을 보이다가, 유효응력이 최대값을 보인 이후에는 일정한 값을 유지하였다. Fig. 13(a)와 (b)는 시료가 파괴되는 시점의 전단파 속도와 전단강도, 전단파 속도와 평균유효응력을 비교한 것이다. Fig. 13(a)과 같이 시료의 상대밀도가 감소하면 동결-융해시료와 비동결 시료의 구분없이 일정하게 전단강도와 전단파 속도가 감



**Fig. 12.** S-wave velocity during the shear phase: (a) frozen-thawed Dr 79%, (b) unfrozen Dr 80%, (c) frozen-thawed Dr 61%, and (d) unfrozen Dr 60%.



**Fig. 13.** Effect of the freeze-thaw process on S-wave velocity: (a) with shear strength, and (b) with mean effective stress.

소하였다. 그러나 유사한 상대밀도에서 동결-융해시료는 비동결 시료에 비하여 전단파 속도와 전단강도가 감소하는 경향을 나타내었다. Fig. 13(b)와 같이 전단파 속도는 평균유효응력의 크기에 따라 거동하며, 동결-융해시료에서 평균유효응력과 전단파 속도가 비동결시료에 비해 모두 감소하는 경향을 보였다. 이는 시료의 동결-융해 반복에 따른 전단파 속도 감소에 대한 선행연구(Kang et al., 2013)와 유사한 결과를 보이고 있다.

## 결론

본 논문에서는 향후 인공동결공법으로 채취한 비교란 동결시료의 강도정수 평가를 위해 유사한 상대밀도를 가지는 동결-융해시료와 비동결시료를 조성하여 비배수 삼축압축실험을 수행하였다. 또한 삼축압축실험의 포화과정, 압밀과정, 전단과정에서 압축파와 전단파를 측정하여 비배수 삼축압축실험과정에서 시료에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 삼축압축실험용 페데스탈에 압축파를 측정할 수 있는 피에조 디스크 엘리먼트와 전단파를 측

정할 수 있는 벤더 엘리먼트를 설치하였다. 상대밀도 60%, 80%에 해당하는 직경 5 cm, 높이 10 cm의 동결시료와 비동결시료를 조성하였다. 동결시료는 페데스탈에 거치하여 자연융해시켰으며, 하부페데스탈에 설치된 열전대를 이용하여 온도변화를 관찰하였다. 융해가 완료된 동결-융해시료와 비동결시료를 이용하여 비배수 삼축압축실험을 수행하였으며, 각 과정에서 연속적으로 압축파와 전단파를 측정하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 동결-융해시료와 비동결시료의 비배수 삼축압축실험 결과, 동결-융해시료의 축차응력, 전단강도, 평균유효응력은 유사한 상대밀도의 비동결시료에 비해 작은 값을 나타내었다. 과잉간극수압은 실험시료 모두 일반적인 조밀한 시료의 특성과 유사하게 전단초기에는 상승하다가 이후 감소하여 음의 값을 나타내었으며, 비동결시료의 감소폭이 동결시료보다 상대적으로 크게 나타났다. 내부마찰각은 상대밀도의 증가에 따라 증가하였지만, 동결-융해과정의 여부에는 큰 차이를 보이지 않았다.

2. 포화단계에서 압축파 속도는 B-value가 증가함에 따라 증가하여 약 1800 m/s의 속도로 수렴하였으며, 상대밀도와 동결여부에는 큰 영향을 받지 않았다. 압밀과정과 전단과정에서는 압축파 속도가 변함없이 일정한 값을 유지하였다.

3. 전단파 속도는 포화단계에서 B-value가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. B-value가 0.95 이상이 되었을때의 전단파 속도는 포화과정 초기의 전단파 속도보다 약 10% 정도 감소하였으며, 상대밀도와 동결-융해 여부의 구분없이 동일한 경향을 나타내었다. 압밀과정에서 동일한 구속응력으로 인해 전단파 속도는 일정하게 증가하였다. 전단과정에서 수직유효응력은 최대값을 보인 후 감소하는 경향을 나타내었고, 수평유효응력은 최대값 이후 일정한 값에 수렴하였다. 전단파 속도는 유효응력의 증가에 따라 증가하는 양상을 보이거나 최대속도를 나타낸 이후 일정한 값을 유지하였으며, 동결-융해시료가 비동결시료에 비해 작은 값을 나타냈다.

4. 본 연구는 동결-융해시료와 비동결시료의 비배수 삼축압축실험을 통한 강도평가와 탄성과 특성을 관찰함으로써, 향후 인공동결공법으로 채취된 비교란 동결시료의 강도평가 실험방법과 결과적 특성을 알아보는데 의미가 있다. 또한 인공동결공법이 적용될 현장지반과 채취된 동결시료의 실내실험에서의 탄성과 속도를 비교함으로써 실내실험의 원지반 상태 모사를 판단하는데 좋은 활용안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(11기술혁신 E01)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- ASTM D854-10, 2010, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, Annual Book of ASTM Standard, 4(8).
- ASTM D4253-06, 2006, Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight for Soils using a Vibratory Table, Annual Book of ASTM Standard, 4(8).
- ASTM D4254-06, 2006, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight for Soils Calculation of Relative Density, Annual Book of ASTM Standard, 4(8).
- ASTM D4767-11, 2011, Standard Test Methods for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils, Annual Book of ASTM Standard, 4(8).
- Chae, J. G., Kim, Y. S., and Hong, S. S., 2013, Development of Ground Freezing System using Liquid Nitrogen, 2013 Spring Conference of Korean Geotechnical Society, 285-292. (In Korean with English abstract)
- 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., 583-586.
- Kang, M. G., Byun, Y. H., Lee, J. S., and Chae, J. G., 2012, Development and Performance Evaluation of Ground Freezing System using Liquid Nitrogen, 2012 Korean Society of Civil Engineers Conference, 1294-1297. (In Korean)
- 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, Science in Cold and Arid Regions, 5(4), 418-424.
- Kim, D. S., Lee, S. H., and Choo, Y. W., 2006, Development of Torsional Shear Testing System to Measure P-wave Velocity, S-wave Velocity and Pore Water Pressure Buildup on Fully and Partially Saturated Sands, Journal of Korean Geoenvironmental Society, 7(1), 55-66.
- Kim, Y. J., 2005, Characteristic and Application of Artificial Ground Method, Journal of Korean Geotechnical Society, 48(5), 82-87. (In Korean)
- Kokusho, T., 2000, Correlation of Pore-pressure B-value with P-wave Velocity and Poisson's Ratio for Imperfectly Saturated Sand or Gravel, Soils and Foundations, 40(4), 95-102.
- Ladd, C. C., Foot, R., Ishihara, K., Schlosser, F., and Polous, H. G., 1977, State of Art Report on Stress Deformation and Strength Characteristics, Proc., 9<sup>th</sup> ICSMFE, 2, 421-494
- Lee, C. H., Yoon, H. K., Lee, W. J., and Lee, J. S., 2008, Elastic Wave Characteristics in Cemented Engineered Soils, Journal of Korean Geotechnical Society, 24(2), 87-97. (In Korean with English abstract)
- Lee, H. G. and Chae, J. G., 2011, Trends of Artificial Ground Freezing Method, 2011 Fall Conference of Korean Society of Engineering Geology, 3-10. (In Korean)
- 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)
- Naesgaard, E., Byrne, P. M., and Wijewickreme, D., 2007, Is P-wave Velocity an Indicator of Saturation in Sand with Viscous Pore Fluid?, International Journal of Geomechanics, 7(6), 437-443.
- Roesler, S. K., 1979, Anisotropic Shear Modulus due to Stress Anisotropy, Journal of Geotechnical Engineering Division, 105(7), 871-880.
- Sasitharan, S., Robertson, P. K., and Segoo, D. C., 1994, Sample Disturbance from Shear Wave Velocity Measurements, Canadian Geotechnical Journal, 31(1), 119-124.
- Shin, E. C., Kang, H. M., Park, J. J., and Kim, S. H., 2009, Experimental Study of Frozen Barrier using Artificial Ground Freezing System, Journal of Korean Geosynthetics Society, 8(3), 35-44. (In Korean with English abstract)
- Shin, E. C., Kang, H. H., Park, J. J., and Kim, S. H., 2010, Experimental Study on Barrier of Contaminated Soils using Artificial Ground Freezing System, 2010 Fall Conference of Korean Geo-Environmental Society, 127-132. (In Korean with English abstract)
- Tamura, S., Tokimatsu, K., Abe, A., and Sato, M., 2002, Effects of Air Bubbles on B-value and P-wave Velocity of a Partially Saturated Sand, Soils and Foundations, 42(1), 121-129.
- Yoshimi, Y., Hatanaka, M., and Oh-oka, H., 1978, Undisturbed Sampling of Saturated Sands by Freezing, Soils and Foundations, 18(3), 59-73.
- Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Kaneko, O., and Makihara, Y., 1984, Undrained Cyclic Shear Strength of a Dense Niigata Sand, Soils and Foundations, 24(4), 131-145.

원고접수일: 2014년 3월 7일

수정본채택: 2014년 3월 15일

게재확정일: 2013년 3월 17일

**김종찬**

고려대학교 건축사회환경공학부  
136-713 서울특별시 성북구 안암동5가 고려대학교  
자연계캠퍼스  
Tel: 02) 3290-3839  
E-mail: senix011@hanmail.net

**이종섭**

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

**홍승서**

한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실  
411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283  
Tel: 031) 910-0403  
E-mail: sshong@kict.re.kr

**이창호**

전남대학교 해양토목공학과  
550-749 전라남도 여수시 대학로 50  
Tel: 061) 659-7322  
E-mail: changho@jnu.ac.kr