

투명 온도제어형 삼축셀을 이용한 흙의 동상 실내실험

Experimental Study of Frost Heaving using Temperature Controlled Triaxial Cell

유 병 현¹⁾ · 진 현 우²⁾ · 이 장 근[†]

Byung-Hyun Ryu · Hyun-Woo Jin · Jangguen Lee

Received: April 8th, 2016; Revised: April 26th, 2016; Accepted: May 18th, 2016

ABSTRACT : Nowadays abnormal coldness happens frequently in Korea and frost heaving causes unexpected ground deformation which results in severe problems for structures such as roadway, railroad and cutoff slope. 'Frost heave' as one of the primary phenomenon is considered to be an important factor together with 'adfreeze bond-strength' and 'creep deformation' for structural design process in permafrost area. Therefore, the fundamental study for frost heave has to be preceded for design of geo-structures in cold region. While various experimental apparatuses have been developed, there still exist a certain level of limitation to evaluate the frost-heave characteristics as design parameters. There are no standard testing method and criteria for analyzing frost heaving in Korea because temperature controlled testing apparatuses including a freezing chamber are expensive. In this paper, a new standard freezing and thawing testing apparatus is introduced, which simulates various freezing and thawing conditions in a soil specimen by using a temperature controlled triaxial cell. Frost heaving tests were performed to assess the new testing apparatus and experimental procedure to evaluate frost heaving for soils is proposed.

Keywords : Frost heaving experiment, Temperature control triaxial cell, Standard freezing and thawing method, Frost heave

요 지 : 최근 들어 우리나라에 이상한파가 자주 발생하고 있으며, 이로 인해 지반에서는 동상에 따른 도로, 철도, 사면과 같은 구조물을 대상으로 지반변형에 따른 문제가 야기되고 있다. 동상현상은 가장 대표적인 동토지반의 공학적 특성으로, 구조물 설계에 있어서 동착 및 크리프 현상과 함께 주요한 설계정수로서 고려된다. 그러므로 극한지 지반구조물 설계에 관한 연구를 위해서는 동상현상에 대한 기초적 연구가 선행되어야 한다. 이미 다양한 동상 관련 실험장비가 개발되어 연구에 활용되고 있지만, 기존의 동상 연구를 위한 실험장비들은 기초의 설계정수로서 동상현상을 분석하기에는 한계점이 나타난다고 판단된다. 국내에는 동상을 실험적 모사하기에는 필요한 장치와 냉동챔버의 고비용으로 시험방법 및 기준이 전무한 실정이다. 이에 본 논문에서는 다양한 방법으로 동결-융해를 모사할 수 있는 투명 온도제어형 삼축셀을 소개하고자 한다. 새롭게 개발된 동결-융해 실험장치를 활용해 동상 실내실험을 수행하였으며, 본 장치를 활용한 실내실험법을 제안하고자 한다.

주요어 : 동결 실험, 온도제어형 삼축셀, 동결-융해 표준 방법, 동상현상

1. 서 론

0°C 이하의 기온이 지속될 때 흙 속에 존재하는 간극수가 액체에서 고체로 상변화 하는 동결현상이 발생한다. 물은 얼음으로 상변화를 하면서 약 9%의 부피팽창을 유발하게 되는데(Akagawa, 1983) 이러한 부피팽창에 의해 흙 표면이 융기(heaving)하게 된다. 이와 같이 동결에 의해 흙 표면이 팽창하게 되는 현상을 동상(frost heaving)이라고 한다. 1월을 포함한 평균기온 0°C 이하인 겨울철에는 이러한 동상현상으로 인해 지반의 팽창 현상이 발생하고, 봄철(해빙기)에는 온도가 영상으로 상승하여 동결된 수분이 녹아 체적이 감소하며 지반침하를 발생시킨다. 계절의 특성으로 인해 생

기는 지반의 융기 및 침강 현상은 지반 표층부인 도로나 철로의 변형, 사면붕괴 등을 유발할 수 있고, 동결 깊이 이하로 매설되어 있는 파이프 라인시설의 변형 및 파손을 일으킬 수 있기 때문에 동결-융해(freezing and thawing)작용은 토목구조물을 설치함에 있어 고려해야 할 중요한 요소이다.

국외의 경우 1960년대부터 흙의 동상 민감성에 대해 평가하기 위한 실험적 연구가 수행되어왔으며(Saetersdal, 1981), 영국의 TRRL(Transport and Road Research Laboratory), 미국의 ASTM(American Society for Testing and Materials), 일본의 JGS(Japanese Geotechnical Society) 등 흙의 동상 특성 분석을 위한 표준화된 실내실험이 제시되어 있다. 국내에서도 동결토의 동상 팽창압 특성에 대한 실내실험이 수행

1) Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

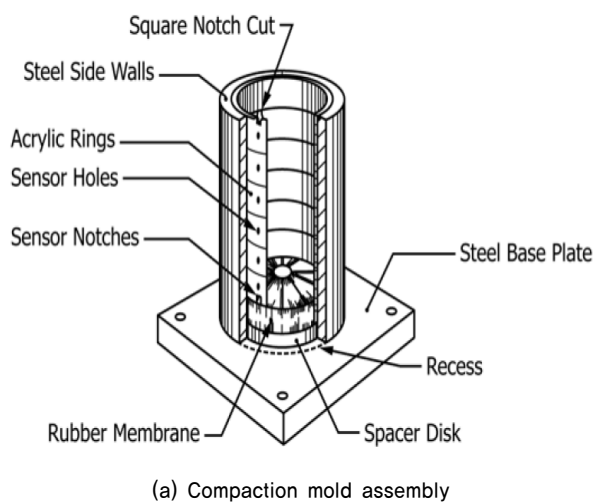
2) Department of Geotechnical and Geo-Space Engineering, University of Science & Technology

† Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (Corresponding Author : jlee@kict.re.kr)

되었고, 지반 동결 공법에 대한 실내실험과 현장실험, 수치 해석을 통한 지하구조물의 열적 안정성 검토가 수행되었다 (Shin et al., 2014). 또한, 현장도로 모형실험에서 포장구조체의 역학적 실험을 통하여 동상 민감성에 근거해 개선된 동상방지층 설계법이 제시되었다. 하지만 동상현상을 정량적으로 분석하기 위한 실내실험 기준이 적립되어 있지 않은 것이 현 실정이다. 국내에서 동상현상을 재현하기 위해서는 온도조절이 가능한 냉동챔버가 필요하고 소규모 챔버를 제작하더라도 온도조절 조건을 포함하게 되면 고비용의 문제로 학술적 연구나 현장적용에 어려움이 발생한다. 따라서 보다 경제적이고 간편한 실험장비를 이용한 동상 민감성 판정 기준을 위한 실험방법이 필요하다고 판단된다. 이에 본 연구에서는 동결-융해 실험장비를 새롭게 개발하고 동상 민감성 흙에 대한 동상 실내실험을 실시하여 동상 실내실험 방안을 제시하고자 한다.

2. 동상 실험 방법 조사

동상 실험장비의 개발 방향을 설정하기 위해 국외에서



(a) Compaction mold assembly

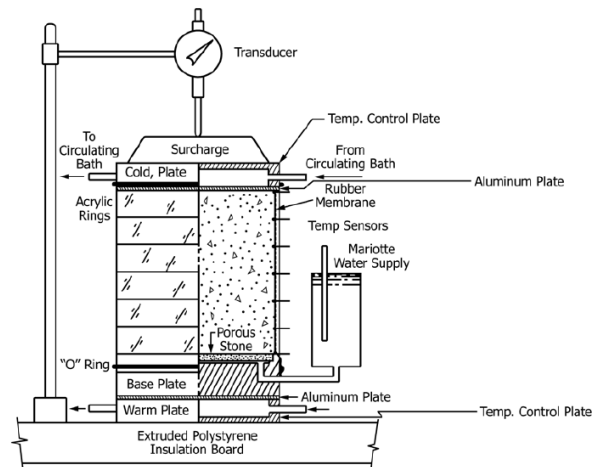
수행되고 있는 동상 실내실험 및 장비들의 특성을 살펴보고자 한다.

2.1 국외 동상 실내실험

흙의 동상 민감성 판정에 관한 기존 연구를 바탕으로 영국의 경우 TRRL에서 개발한 동상시험기와 이를 이용한 실험방법이 가장 널리 활용되어온 실내 동상 실험방법(Jones & Dudek, 1979)이며, 미국에서는 흙의 동상을 판단할 수 있는 실내실험 기준인 ASTM D5918-06(2006)에서 제안되었다. 일본에서는 흙의 동상을 판단할 수 있는 실내실험 기준인 JGS 0172(2003)와 지반의 동상량을 추정할 수 있는 실내실험 기준인 JGS 0171(2003)이 제안되었다.

각 실험 기준에서 제안하고 있는 실험장비의 공통적인 특징은 동결방식이다. 3개 국가에서 제시하고 있는 실험방법에서 시료를 동결시키는 방법으로 ‘편면온도강하식’ 방법을 활용하고 있으며, 이는 시료를 동결하는 방법 중 실제 지반이 동결되는 메커니즘과 가장 유사하게 모사되는 방법이다. Table 1은 각 기준별 실내실험의 주요특성을 비교하였다.

미국 ASTM 기준의 경우 몰드의 크기(직경 146mm, 높이



(b) Specimen assembly for freezing test

Fig. 1. Schematic diagram of ASTM frost heaving test apparatus (ASTM D5918-06, 2006)

Table 1. Comparison of TRRL, ASTM, JGS for frost heaving experiments

Categories	ASTM (U.S.A) D5918-06	JGS (Japan) 0171, 0172		TRRL (U.K)
Freezing type	One side temperature falling type	One side temperature falling type		One side temperature falling type
Direction of freezing	Top → Bottom	Bottom → Top		Top → Bottom
Condition of influent water	Open or closed system	Open system		Open system
Material of mold	Steel	Acrylic		Brass
Size of specimen	D = 146 mm H = 150 mm	0171	D = 60 mm H = 20 ~ 40 mm	D = 100 mm H = 150 mm
		0172	D = 100 mm H = 50 mm	

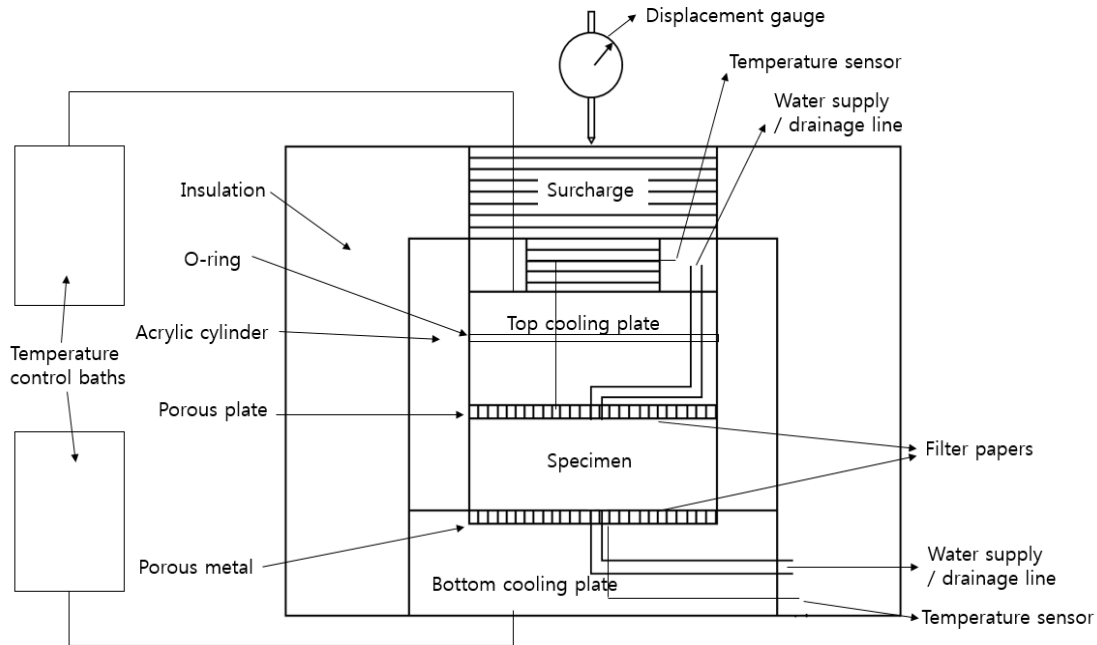


Fig. 2. Schematic diagram of JGS frost heaving test apparatus

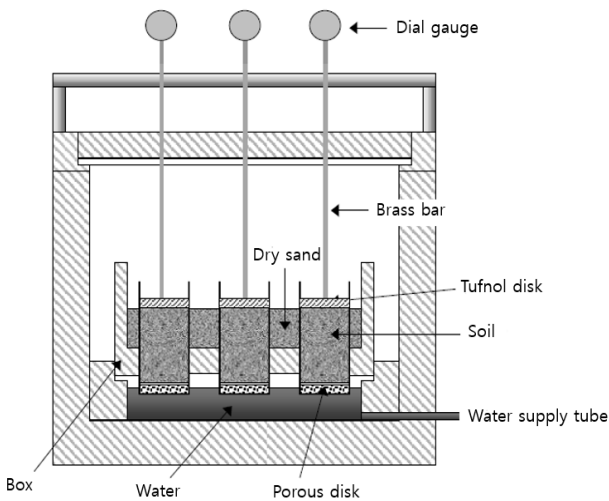


Fig. 3. Schematic diagram of TRRL frost heaving test apparatus (Croney & Jacobs, 1967)

150mm)가 다른 기준들에 비해 상대적으로 크고, 동결을 상부에서 하부로 진행시켜 지반의 자연적 동결메커니즘을 재현하고 있다는 것이 특징이다. 시료는 현장조건을 반영하여 포화시켜 준비하거나 초기 현장 함수비 상태로 준비하며 실험 중 지하수 유입조건은 개방형 또는 폐쇄형을 채택하고 있다. 다수의 시료를 한꺼번에 동결시켜 시료 간의 동상 민감성을 비교할 수 있으며, 시료 주변 온도를 제어하기 위한 소형 냉동챔버가 필요하다.

일본 JGS(Japanese Geotechnical Society) 기준은 미국 ASTM과 달리 시료를 하부에서 상부로 동결시킨다. ASTM 방법과 같이 상부에서 하부로 동결 시 몰드와 동결토 주변의 접촉면에서 발생하는 동착강도의 저항으로 동상 평가에

오류가 발생할 수 있다. 시료는 포화시켜 준비하고 동상을 평가하기 위해 동결 실험 중 수분 유입이 상부에서 가능한 개방형을 채택하고 있다.

영국의 TRRL에서 제안한 실내실험 방법은 미국 ASTM과 유사하게 다수의 시료를 한꺼번에 동결시켜 실험할 수 있으므로 시료 간의 동상 민감성을 비교할 수 있다. TRRL에서 제안한 동상시험기는 영하의 온도조건을 모사할 수 있는 소형 냉동챔버에 시료를 넣고 건조된 모래를 채우며 지하수를 공급하는 개방형 조건에서 시료를 동결시켜 그로 인해 발생하는 체적변화량과 팽창압을 측정하는 방식이다. 소형 냉동챔버의 온도 강하로 시료를 동결하는 방식으로 동결 방향을 설정하기에는 한계가 있다.

2.2 한국형 동상 실험장비의 설계

국외 흙의 동상 실내실험과 관련된 장비의 특성을 정리하면 동결방식, 동결방향, 시료의 크기, 모세관 현상으로 인한 수분의 유입조건과 같은 핵심 요소를 고려해야 한다. 각 장비들의 특성을 바탕으로 새로운 동상 실험장비의 인자들을 설정하였다.

2.2.1 시료의 동결방법

시료를 동결시키는 방식은 흙의 동상현상으로 인한 동결 팽창량에 큰 영향을 미치는 요소이다. 동상 실험방법은 시료를 동결하는 방법에 따라 첫째, 토사의 상부와 하부로부터 동시에 온도를 낮추는 ‘양단면온도강하식’, 둘째, 상부와 하부의 온도를 일정하게 유지하는 ‘양단면온도일정식’, 셋

째, 한 면의 온도를 일정하게 유지한 채 다른 한 면의 온도를 낮추는 ‘편면온도강하식’으로 구분된다. 미국 ASTM과 일본 JGS 기준은 시료를 한 단면으로부터 서서히 동결시키는 ‘편면온도강하식’을 제안하고 있다. 실제 자연현상에 의한 지반의 동결 메커니즘을 살펴보면 대기의 온도가 저하되고 그로 인한 영향으로 지표면에서부터 동결 깊이까지 동결이 일어나므로 시료의 한 단면으로부터 방향성을 가지도록 서서히 동결시키는 방식은 동상 특성을 분석하기에 적합한 동결방식으로 판단된다.

미국 ASTM과 일본 JGS 기준의 가장 큰 차이점 중 하나는 시료를 동결시키는 방향이다. 미국 ASTM은 시료를 상부로부터 하부로 동결시킬 것을 제안하고 있는 반면, 일본 JGS 기준은 시료를 하부로부터 상부 방향으로 동결시킬 것을 제안하고 있다. 상기 기술한 바와 같이 자연 상태에서의 지반 동결 메커니즘을 고려한다면 미국 ASTM 기준에서 제안하고 있는 동결방향이 타당한 것으로 판단되지만, 상부에서 동결이 시작되면 몰드 내에 구속되어 있는 시료의 상부가 동결하면서 몰드와 동착이 발생하여 시료 하부의 동상에 의한 체적팽창 현상에 대해 저항력으로 작용할 가능성이 있다. 반대로 일본 JGS 기준에서 제안하고 있는 하부에서 상부로 동결하는 방식은 시료를 하부로부터 동결시키기 때문에 상부에서 발생하는 동착력에 의한 동상 저감을 최소화할 수 있다. 본 연구의 동결 실험장치는 상하부 어느 쪽에서도 온도를 제어할 수 있는 방식이지만 실제 실험에 있어서는 하부에서 상부로 동결시키는 방식을 채택하였다. 이는 자연 동결현상의 방향성과는 반대되지만 시료의 크기가 작은 요소실험에서 동결방향에 기인한 실험값의 오차는 크지 않을 것으로 예상되고, 동결방향보다 동상현상에 의한 체적팽창을 저감시킬 수 있는 오류를 배제하는 것이 중요하다고 판단되기 때문이다.

2.2.2 몰드 재료

상기 기술한 바와 같이 시료를 동결시키는 과정에서 몰드와 시료의 접촉면에서 동착현상이 발생하면 동상현상에 의한 체적팽창 현상이 저감될 수 있으므로 몰드의 재료는 마찰력이 최대한 작은 재료를 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 또한, 주변 온도변화가 동상 실험에 문제를 야기할 수 있기에 열전도도가 낮은 재료를 사용해야 한다. 일본 JGS 기준을 비롯한 기타 연구사례들에서도 이를 감안하여 아크릴 재질의 몰드를 사용할 것을 제안하고 있다. 아크릴 재질의 몰드는 동결상태를 육안으로 관찰할 수 있는 장점도 보유하고 있다. 그러나 시료 내의 간극수 동결에 따른 팽창압이 수평으로도 발생하여 아크릴에 변형 또는 파괴를 유발할 수 있기에 충분히 견딜 수 있도록 10mm 이상의 두께를

갖도록 제작해야 한다.

2.2.3 시료 크기

시료의 크기는 해외 동상 실험 기준들과 기타 연구사례에 따라 제각기 다른 조건을 제시하고 있는 항목이다. 미국 ASTM 기준과 일본 JGS 기준을 비교하면 ASTM에서 규정하는 시료 크기가 JGS보다 다소 크다는 것을 알 수 있다. 일본 JGS 기준의 경우 동상 실험의 목적에 따라 시료의 크기가 다른 실험을 제시하고 있다(JGS 0171, 2003; JGS 0172, 2003). 본 연구에서는 시료 주변이 아크릴 몰드로 구속되어 주변 마찰력으로 발생하는 문제를 최소화하기 위해 시료의 직경과 높이의 비가 2:1을 권장하고 있지만, 시료의 동결현상을 관찰하기 위해 직경과 높이를 1:1로 선정하여 실내실험을 수행하였다.

2.2.4 모세관현상 재현을 위한 수분공급 조건

동상 실험에서 수분의 유입조건은 지속적으로 공급하는 개방형 조건과 공급하지 않는 폐쇄형 조건으로 나눌 수 있다. 지하수를 공급하는 개방형 조건의 실험에서는 동상이 상대적으로 과다하게 나타나게 되며, 폐쇄형 조건에서는 체적팽창에 한계가 있다. 일본 JGS 기준과 영국 TRRL 동상 실험에서는 시료 동결 시 지하수를 공급하는 개방형 조건을 제안하고 있는 반면, 미국 ASTM 기준의 현장조건을 반영하여 개방형과 폐쇄형 조건을 모두 제안하고 있다. 시료의 동상 판정과 같이 정성적으로 판단하기 위한 실험의 경우 개방형 조건이 적합할 것으로 사료되나 정량적 결과 값을 얻기 위한 요소실험을 수행할 경우 개방형 조건을 적용할 시 동상현상이 과대 측정되어 실험결과를 실제 현장에 적용하는 것이 보수적인 결과를 유도할 수 있다. 반면 폐쇄형 조건은 지하수위가 높은 지반의 자연현상을 모사하는 실험에는 적합하지 않을 수 있으므로, 지하수 조건은 현장조건 및 실험의 목적과 상황에 따라 개방형과 폐쇄형 조건을 선택적으로 적용할 수 있어야 할 것으로 판단된다.

3. 온도제어형 삼축셀을 이용한 동상 실험장비

해외 실험기준에서 활용되어 온 실험장비들의 특성을 살펴보면 장비의 개발을 위해서는 동결방식, 동결방향, 시료 크기, 지하수 유입조건 등 다양한 요소를 고려해야 한다는 것을 알 수 있다. 실험장비의 개발방향을 바탕으로 새롭게 개발되고 제작한 온도제어형 삼축셀을 이용한 동결 실험장비의 특성을 정리하면 Table 2와 같다. 본 실험장비의 대표적인 특성은 첫째, 상·하부 개별 냉각 제어방식, 둘째, 시료

Table 2. Characteristics of newly developed frost heaving test apparatus

Categories	Characteristic
Freezing type	One side temperature falling type Both sides temperature falling type Both sides temperature uniform type
Direction of freezing	Top → Bottom Bottom → Top Freezing both sides simultaneously
Condition of influent water	Open system Closed system
Material of mold	Acrylic
Size of specimen	D = 100 mm, H = 100 mm
Improvements	Independently adjustable thermostats installation (top, bottom, around mold)

주변 온도 보냉(保冷)시스템, 셋째, 동상량/동상력 측정시스템 장착이다. 본 절에서는 경제적이고 효율적인 동결 실험장비의 특성을 구체적으로 제시하며, 새롭게 개발된 실험장비의 동결 성능평가 실험 결과를 제시함으로써 개발된 새로운 실험장비의 활용 가능성을 살펴본다.

3.1 온도제어 냉각 방식

본 연구에서 개발된 동상 실험장비의 해외 실험장비들과 다른 주요한 특징은 상부와 하부, 몰드 주변 온도를 각각 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 범위로 조절할 수 있도록 독립적인 냉각장치가 연결되어 있는 것이다. 따라서 상부에서 하부, 하부에서 상부로의 편면온도강하식 및 양단면온도강하식, 양단면온도일정식 등 다양한 조건으로 동결을 모사할 수 있다는 장점이

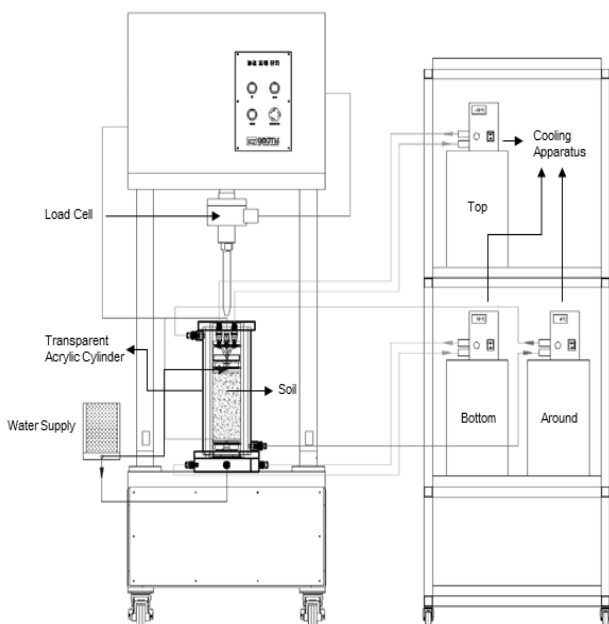


Fig. 4. Newly developed frost heaving test apparatus

있다. 냉각장치는 외부에 설치된 제어판을 이용하며, 각각 연결된 부위에 부동액을 순환시키는 방식으로 최저 -45°C , 최고 40°C 까지 온도 조절이 가능하다. 몰드 주변 온도 조절이 가능해짐에 따라 냉동챔버에서 진행해야 했던 기존의 실험들과 달리 외부에서도 실험 진행이 가능해졌다. 또한, 실험 도중에 주변 온도를 제어할 수 있으며, 내부를 육안으로 관찰할 수 있어 동상현상을 육안으로 관찰할 수 있다는 장점이 있다.

지금까지 동상현상은 동상팽창량을 통해 평가되는 경향이 있지만 동상현상을 보다 정확히 분석하기 위해서는 동상팽창량에 더해 동상팽창압, 즉 동상현상에 의한 체적 팽창을 구속했을 때 발견되는 힘에 대한 측정이 함께 이루어져야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제안하는 새로운 동결-융해 시험기는 일정한 상재하중을 유지한 상태에서 흙의 동결-융해작용으로 인해 일어나는 동상량과 동상팽창압 측정을 위해 LVDT와 Load cell을 설치하였으며, 상·하부에 배수가 가능하도록 제작되었다.

3.2 시료 온도제어 시스템

동상 실내실험은 시료를 저온의 인공적인 환경조건에 노출시켜 시료가 동결하며 발생하는 동상량 및 동상속도를 측정하는 방법으로 진행된다. 이때 시료를 동결시키는 진행방향 및 온도조건 등에 의해 동상현상의 발현양상이 영향을 받을 수 있다. 특히 시료의 측면에서 외부 온도에 영향을 받게 되면 시료의 동결이 지연되거나, 혹은 측면에서부터 국부적인 동결이 일어나는 현상이 발생할 수 있다. 기존의

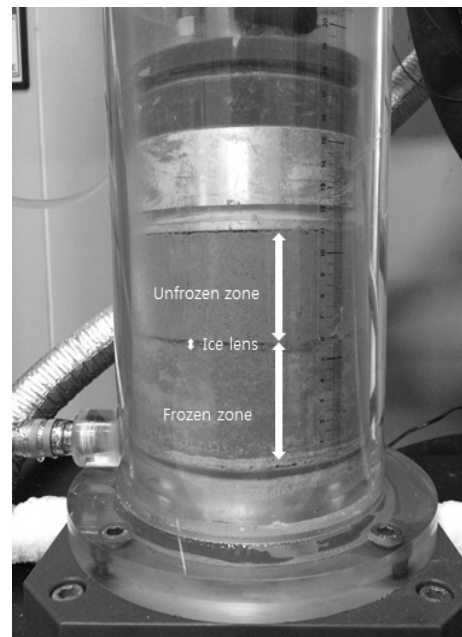


Fig. 5. Temperature controlled triaxial cell

동상 실험장비들은 이를 방지하기 위해 몰드 주변에 단열재를 설치하거나 냉동챔버 내부에서 일정한 온도를 유지한 상태로 실험을 실시할 것을 권하고 있다. 그러나 단열재를 설치하면 시료의 변화 양상을 육안으로 관찰할 수 없다는 단점이 있으며, 냉동챔버 설치로 인한 고비용으로 사용에 제한적이다.

본 연구에서 제안하는 동상 실험장비는 투명 온도제어형 삼축셀을 외부 관과 내부 관의 이중 관으로 구성하였다. 외부 관과 내부 관 사이에는 항온액체가 순환이 가능한 공간이 형성되어 있어 동상 실험을 수행하면 항온액체가 순환하면서 시료 주변의 온도를 일정하게 유지하도록 고안되었다. 투명한 아크릴 재질의 이중 관으로 이루어져 있어 시료가 동결되는 과정을 육안으로 관찰할 수 있으며, 상부와 하부에도 독립적으로 온도조절이 가능하도록 항온액체를 순환시켜 실험자가 원하는 방향으로 시료를 동결시키는 것이 가능하도록 설계되었다. 이러한 동결방식은 환경조건에 따라 시료 동결속도의 차이가 발생하는 것을 최소화하고, 실험이 지연되거나 국부적인 동결형태가 발생하는 것을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 투명 온도제어형 삼축셀을 이용한 동상 실험

상기 개발된 동상 실험장비의 성능을 검증하기 위하여 동상 실내실험을 수행하였다. 동결성능은 동일한 시료에 대하여 3가지 서로 다른 동결조건을 적용해 시료 내부의 온도변화와 동상량을 측정함으로써 상·하부 개별냉각시스템의 성능을 검증하였다. 또한, 동상에 민감한 시료를 대상으로 실내실험을 수행함으로써 개발된 장비의 동상발현 유도 성능 및 동상량 측정성능을 검증하였다.

4.1 온도제어 및 배수 성능평가

온도제어 및 배수 성능평가에 활용된 시료는 비중 2.67, 최대/최소 건조단위중량이 각각 16.7kN/m^3 와 13.3kN/m^3 인 물리적 특성을 나타내며, USCS 토질분류 기준에 의해 전형적인 빈입도 사질토(SP)로 분류되는 주문진 표준사를 활용하여 상대밀도 77% ($e_{\max}=0.919$, $e_{\min}=0.625$)로 제작하였

다. 건조된 사질토 시료를 높이 100mm로 몰드에 주입 후 시료 포화를 위해 몰드 외부에 설치된 실린더를 통하여 수분을 하부에서 상부로 공급하였으며, 시료 상부와 약 100mm의 수두차가 유지되도록 하였다. 포화는 상부의 유입수를 제거하며 약 48시간에 걸쳐 진행되었다. 포화가 완료된 시료는 상부의 유입수를 제거하고 Table 3과 같이 서로 다른 온도 및 배수조건에서 성능평가를 수행하였다.

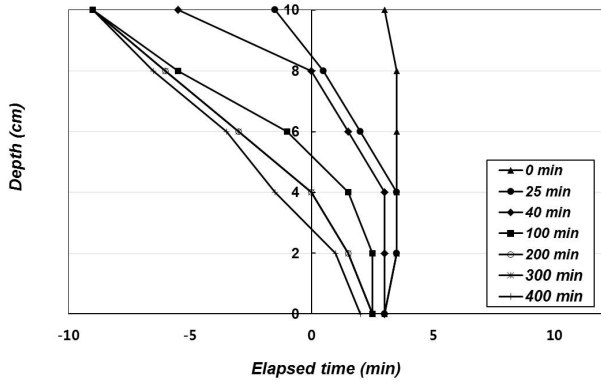
실험은 3가지 조건으로 수행되었다. 첫 번째 조건(No. 1)은 -10°C 의 상부에서 3°C 의 하부로 동결하는 방식으로 시료 주변 온도는 3°C 로 유지하며 상부는 배수, 하부는 비배수 상태로 진행하였다. 두 번째 조건(No. 2)은 동결방식은 No. 1과 동일하게 진행되되 하부는 배수조건으로 외부 실린더와 연결된 상태를 유지하고 외부 실린더의 수두는 시료 높이와 일치시켜 수두차가 없도록 하였다. 세 번째 조건(No. 3)은 하부에서 상부로 동결하는 방식으로 하부 동결에 따른 비배수, 상부는 배수로 수두차가 없는 외부 실린더와 연결된 상태를 유지하도록 설정하였다.

시료의 내부에는 5개의 온도센서를 설치하여 시간의 흐름에 따른 시료 내부의 온도변화를 측정하였다. Fig. 6은 실험을 통해 측정된 시간에 따른 시료 내부의 온도를 보여주고 있다. 모든 실험에서 시료 상부와 하부의 측정 온도는 온도제어 시스템의 설정온도와 차이가 발생하였으며 서로 다른 재료의 경계면에서 온도 불연속이 발생한 것으로 판단된다. Fig. 6(a)와 (b)는 상부에서부터 하부방향으로 동결을 시키는 경우로 상부 온도 저하 후 약 400분 이내에 시료가 동결되었으며, 시료 내부의 온도 분포는 유사하게 관측되었다. Fig. 6(c)는 하부에서 상부로 동결하는 방식으로 상부에서 하부로 동결하는 방식(Fig. 6(a)와 (b))에 비해 온도 구배가 직선으로 동결되는 높이는 최대치인 8.5cm로 관측되었다. 동결 진행방향과 관계없이 0°C 이하의 동결되는 깊이(또는 높이)는 동일할 것으로 예상되었으나 하부에서 상부로 동결하는 방식이 효과적인 것으로 관측되었다.

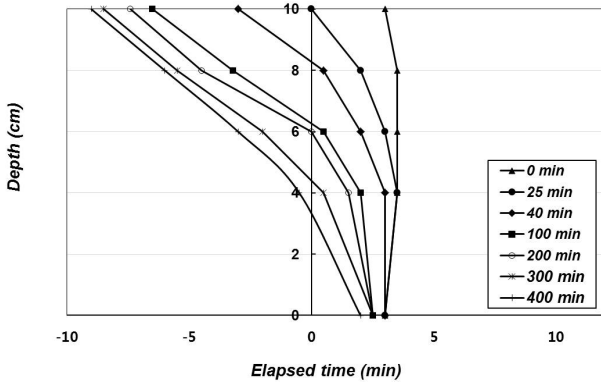
Fig. 7은 동결이 진행되는 동안 발생하는 동상량을 측정된 결과를 보여주고 있다. No. 1은 시료에 수분이 공급되지 않아 동상량이 미미하다. No. 2에서는 하부에서 수분이 공급되는 상태에서도 동상량이 미미한 것으로 볼 때 상부 동결방식은 시료 주변과 몰드의 동착 발생으로 동상 저감이

Table 3. Temperature and drainage conditions

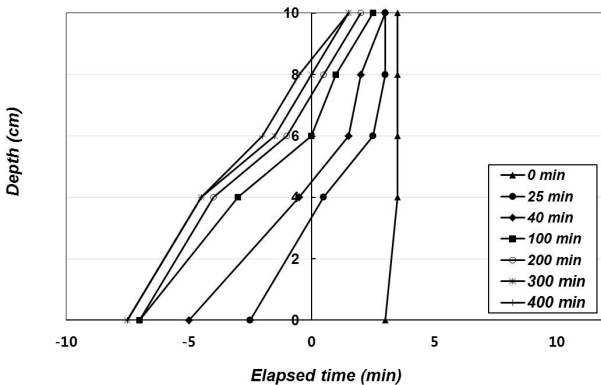
Freezing type	Test No.	Direction of freezing	Temperature of top	Temperature of bottom	Temperature of around mold	Condition of influent water
One side temperature falling type	1	Top → Bottom	-10°C	3°C	3°C	Top drained, Bottom undrained
	2	Top → Bottom	-10°C	3°C	3°C	Top drained, Bottom drained
	3	Bottom → Top	3°C	-10°C	3°C	Top drain, Bottom undrained



(a) No.1 Top to bottom freezing direction (top drained & bottom undrained)



(b) No.2 Top to bottom freezing direction (top drained & bottom drained)



(c) No.3 Bottom to top freezing direction (top drained & bottom undrained)

Fig. 6. Temperature distribution with elapsed time

발생하는 것으로 판단된다. No. 3은 하부에서 동결하며 상부에서 물이 공급되는 방식으로 상부 미동결로 동착이 발생하지 않기에 No. 1과 2에 비해 동상량이 급격히 증가하고 있다.

위와 같은 동결 성능평가를 통해 본 연구에서 개발 및 제작한 실험장비는 연구의 목적에 따라 시료의 다양한 동결양상을 모사하여 연구를 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 추가적인 단열재가 필요치 않아 동결 실험 중 시료 내부

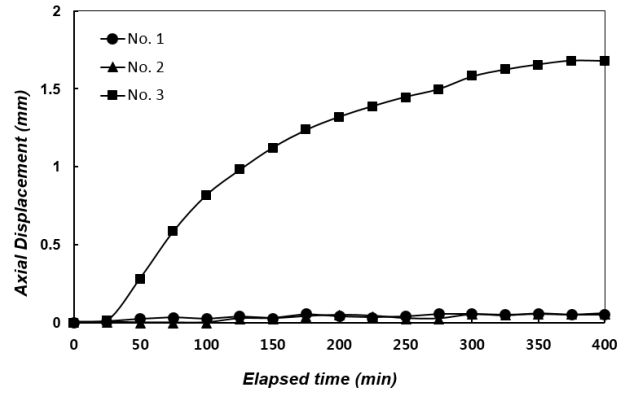


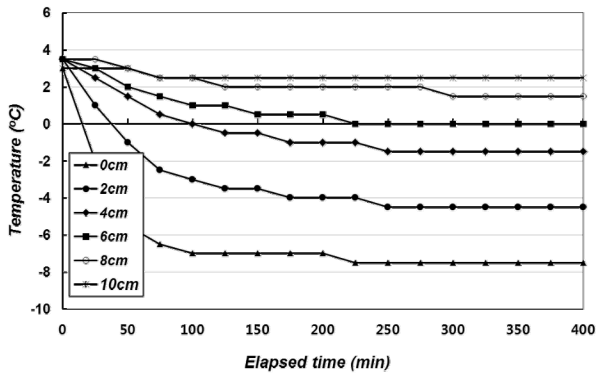
Fig. 7. Measured axial displacement during frost heaving tests

의 변화를 실험자의 육안으로 관찰할 수 있다는 장점이 확인되었으며, 투명 온도제어형 삼축셀을 사용함으로써 냉동챔버가 없어도 충분한 동결효율을 나타내는 것으로 판단된다.

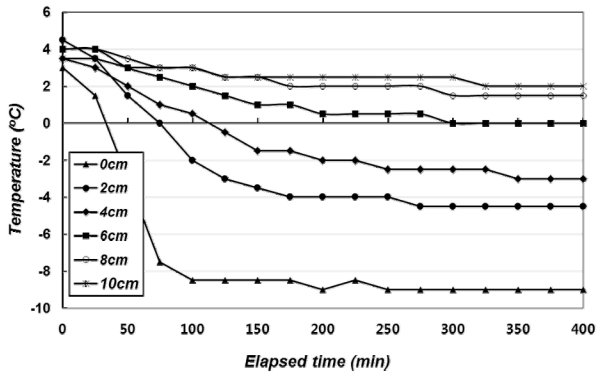
4.2 동상 실내실험

새롭게 개발된 온도제어형 삼축셀을 이용하여 2차례 동상 실험을 수행하였다. 실험에 활용된 시료는 화강풍화토와 주문진 표준사를 이용하여 시료를 제작하였다. 화강풍화토의 #200번체 통과량은 약 30% 이상으로 USCS 토질분류 기준에 따라 동상에 민감한 SM으로 분류되었다. 화강풍화토는 건조단위중량 16.7kN/m^3 , 높이 100mm로 시료를 제작하였다. 시료를 초기 함수비로 혼합하여 온도제어형 삼축셀에 느슨한 상태로 채운 후 일축압축시험기를 이용하여 3번에 걸쳐 층별 정적다짐으로 준비하였다. 주문진 표준사는 건조단위중량 18.9kN/m^3 로 높이 100mm의 시료를 준비하였다. 동상 발현을 초기에 가속시키고자 준비된 시료를 포화시켰다. 화강풍화토는 상부에서 물을 공급하고 하부에 진공압을 이용하여 시료 내부로 유입수를 순환시켜 포화를 진행하였다. 주문진 표준사는 건조된 모래를 온도제어형 삼축셀에 채우고 유입수를 상부에서 하부로 순환시켜 포화를 진행하였다. 포화가 완료된 시료의 상부는 배수상태로 시료 높이와 동일한 수두를 유지하며, 시료의 하부(-10°C)에서 상부방향(3°C)으로 동결을 시켰다. 시료 주변부의 온도는 3°C 를 유지 하였다. Fig. 8은 두 개의 시료에 대한 실험결과를 나타내고 있다.

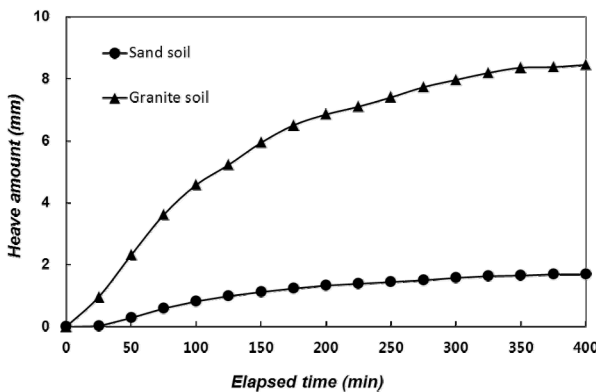
Fig. 8(a)와 (b)는 시간에 따른 시료 깊이별 온도 분포를 보여주고 있다. 화강풍화토에 비해 주문진 표준사의 깊이별 온도가 빠르게 감소하고 있으며, 이는 주문진 표준사를 구성하는 석영의 높은 열전도도에 기인한다. Fig. 8(c)는 시간에 따른 동상량 측정 결과를 보여주고 있다. 시료가 0°C 이하로 동결되기 시작하는 시점에서 동결속도가 급격히 증가



(a) Temperature distribution of sand soil



(b) Temperature distribution of granite soil



(c) Frost heave amount with elapsed time

Fig. 8. Experimental results of frost heaving tests with the temperature controlled triaxial cell

하고 있다. 화강풍화토는 시료 내부의 온도가 수렴하는 200분을 기점으로 동결속도는 감소하지만 지속적으로 동상이 발생하고 있다. 이는 시료 내부의 간극수가 빙정(ice lens)이 형성되는 지점으로 수분이 이동하며 모세관압에 따른 상부에서 추가적인 수분의 공급으로 지속해서 동상이 발생하는 것으로 판단된다. 주문진 표준사는 유사한 온도조건에서 화강풍화토에 비해 동상량이 적으며 빙정이 형성되더라도 시료 내부의 간극수만이 동결에 따른 팽창이 발생하고 모세관압은 발생하지 않기에 동상량은 화강풍화토와 비교하여 상대적으로 미미하다. Table 4는 포화된 시료가 전체적으로 동결되었다 가정하고 내부 간극수의 동결만으로 발생하는

Table 4. Calculated maximum axial displacements of frozen specimens

Type	Dry unit weight (kN/m ³)	Void ratio	V _w (cm ³)	ΔH (mm)
Sand	18.9	0.66	224.7	2.6
Granite	16.7	0.59	290.0	3.3

동상량을 계산하여 정리하고 있다. 시료 내부의 간극수 동결만으로는 화강풍화토와 주문진 표준사에서 발생하는 최대 동상량은 각각 3.3mm와 2.6mm로 예상된다. 동상 실험이 시작되고 400분에 측정된 동상량은 화강풍화토가 8.3mm, 주문진 표준사가 1.6mm 발생하였다. 화강풍화토의 경우 완전 동결되지 않은 시료에서 발생한 동상량이 완전 동결된 시료의 간극수만의 동결로 발생하는 동상량의 약 2.5배로 외부에서 수분공급이 반드시 필요하다. 따라서 빙정 형성에 따른 모세관압으로 외부의 수분이 추가적으로 공급되었다는 가정을 뒷받침하고 있다. 주문진 표준사의 경우 완전 동결되지 않은 시료에서 발생하는 동상량이 완전 동결된 시료의 간극수만의 동결로 발생하는 동상량의 약 0.6배로 시료 내부의 간극수만의 동결로 동상이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 동상현상의 전형적인 메커니즘을 모사하고 있으며, 본 장비의 동상 실험 적용 가능성을 시사하는 것으로 사료된다.

5. 결 론

시료의 동결에 따른 체적 팽창 현상인 동상은 국내 겨울철과 극한지에서 지반 구조물의 안정성을 평가하는데 반드시 고려된다. 동상 민감성을 판정하기 위해 수행되는 실내 실험은 해외에서 기준이나 연구사례들을 통하여 다양하게 제시되어 왔으나, 시료 동결에 필요한 장비와 냉동챔버와 같은 설비로 인한 고비용의 문제로 국내에서 활용하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 현재까지 제시된 동상 실험장비들의 장·단점을 분석하고 동상 실험을 비롯하여 다양한 지반의 동결현상을 분석하기 위한 새로운 동결 실험장치를 개발하고 성능평가를 수행하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 사항을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 시료의 동결방식이 상·하부 개별 냉각 제어 시스템으로 구성되어 시료의 동결 시 다양한 동결조건을 모사할 수 있다. 시료 전체의 온도를 제어하기 위해 별도의 냉동챔버가 필요치 않은 이중관 타입의 투명 온도제어형 삼축셀을 개발하여 경제성을 확보하고 동결 중 시료 내부의 변화를 육안으로 관찰할 수 있는 장점을 보유하고 있다.

- (2) 동상 실내실험 시 동결방향은 하부에서 상부로 설정하도록 제안한다. 상부에서 동결이 시작되면 시료 주변 동결에 따른 물드와의 동착으로 동상발생을 감소시켜 동상량 또는 동상속도 측정에 오류가 발생한다.
- (3) 시료의 동상을 판정하기 위해서는 외부에서 수분을 공급하며 수행하는 방법이 효과적이며, 수두차에 따른 수분공급이 발생하지 않도록 주의한다. 단 동결 발생에 따른 모세관압으로 수분의 이동만이 가능하도록 수두 높이는 가급적 시료의 높이와 동일하게 유지하며 실내 실험을 수행한다.

본 연구에서 제안한 실험장비는 시료의 다양한 동결양상을 모사할 수 있어 연구의 목적에 따라 적합하게 활용될 수 있을 것으로 판단되며 향후 다양한 시료를 대상으로 동상 실내실험을 수행하고 동상 민감성 판정 기준을 제시하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(13IFIP-B06700801) “동토지역 자원이송망 설계·시공 및 유지관리 기술개발” 과제에 의해 수행되었습니다.

References

1. Akagawa, S. (1983), Relation between frost heave and specimen length, Shimizu Tech Res. Bull., 4, pp. 1~7.
2. ASTM D5918-06 (2006), Standard test methods for frost heave and thaw weakening susceptibility of soils, American Society for Testing Materials.
3. Croney, D. and Jacobs, J. C. (1967), The frost susceptibility of soils and road materials, TRRL Report, LR 90, Crowthorne, pp. 68~72.
4. JGS 0171 (2003), 凍上量予測のための土の凍上試験方法, 地盤工学会基準, 日本地盤工学会.
5. JGS 0172 (2003), 凍上性判定のための土の凍上試験方法, 地盤工学会基準, 日本地盤工学会.
6. Jones, R. H. and Dudek, S. J. M. (1979), A precise cell compared with other facilities for frost heave testing, Proceeding of 58th Annual TRB Meeting, Washington, pp. 28-49.
7. Saetersdal, R. (1981), Heaving conditions by freezing of soils, Engineering Geology, No. 18, pp. 291~305.
8. Shin, E. C., Ryu, B. H., Kang, H. H. and Hwnag, S. G. (2014), Behavior characteristics of water supply pipeline due to freezing temperature, Korean Geosynthetics Society, Vol. 13, No. 4, December, pp. 1~10 (in Korean).