

고효율 실내 동결실험장비의 개발 및 성능검증

Development and Verification of High Efficiency Experimental Apparatus to Evaluate Freezing Phenomenon of Soils

최창호^{1*} Choi, Chang-Ho

ABSTRACT

In order to design suitable geo-structures in cold region, it is generally required to consider the mechanical properties of permafrost soils. '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. In this paper, a new type of experimental apparatus is proposed to evaluate the engineering characteristics of frost heave in permafrost soils and a set of verification test results is presented. Based on the verification tests, the proposed apparatus is a suitable to obtain frost characteristics of soils.

요지

극한지에 적합한 지반구조물의 설계를 위해서는 일반적으로 영구동토지반의 공학적 특성에 대한 고려가 필요하다. 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. 따라서 본 논문에서는 동상현상을 비롯하여 토사의 동결현상을 보다 면밀히 분석할 수 있도록 개발된 실내 동결 실험장비를 소개하고, 장비의 활용성을 검증하기 위한 실내실험 결과를 제시한다. 검증 실험결과로부터, 개발된 고효율 동결실험장비의 다양한 동결현상 모사성능과 동상시험에의 활용 가능성을 검증하였다.

Keywords : Frost heave, Permafrost, Cold region

1. 서론

영하의 기온이 장기간 지속되어 공학적 설계 및 시공에 영향을 미치는 극한지에서는 일반적으로 영구동토(permafrost)의 지반특성이 나타나며, 동토지역에서 지반 구조물설계는 영구동토 지반의 공학적 특성을 고려하여 수행된다. 0°C이하의 기온에 장기간 노출된 흙의 간극수가 동결되어 토사 내에 빙정(ice lens)이 형성되고, 계속적으로 수분을 흡수하여 체적이 팽창되는 현상을 의미하는 동상(frost heave)은 동토지반에서 공통적으로 발현되는 대표

적인 공학적 특성으로서, 지반구조물 설계에 있어 동착(adfreeze bond) 및 크리프 침하(creep deformation)와 함께 주요 설계정수로서 고려된다(김영진 등, 1992). 동상현상의 특성을 학문적으로 분석하기 위한 연구는 각각도로 이루어져 왔는데, 국외의 경우 1960년대부터 흙의 동상에 대한 민감성, 즉, 동상성을 평가하기위한 실험적 연구가 수행되어 왔고(Loch, 1981; Saetersdal, 1981), 이를 바탕으로 현재는 미국 ASTM(American Society for Testing and Materials)이나 일본 JGS(Japanese Geotechnical Society) 등에서 흙의 동상성 평가를 위한 시험법과 정량적 판단기

^{1*} 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, E-mail: chchoi@kict.re.kr)

표 1. 실내 동상실험의 미국 ASTM과 일본 JGS 기준 특성비교

항 목	ASTM (D5918-06)	JGS (0171, 0172)	
동결방식	편면온도강하식	편면온도강하식	
동결방향	상부 → 하부	하부 → 상부	
몰드재료	투명한 아크릴	투명한 아크릴	
시료크기	직경 146mm, 높이 150mm	0171	직경 60mm, 높이 20-40mm
		0172	직경 100mm, 높이 50mm
지하수 유입조건	폐쇄형	개방형	

준을 제시하고 있다. 흙의 동상성에 관한 연구와 더불어 동상에 의한 융기특성, 지반의 동상력 측정 등에 관한 연구가 활발하게 진행되어 왔다(木下, 1973; Penner, 1974; Kujala, 1991; Szuki 등, 1993; Szuki와 Swada, 1994). 그러나 우리나라의 경우, 동상에 대한 연구는 주로 도로에서 발생하는 동상의 방지대책 연구를 위한 기초 연구 성격으로 일부 특정 분야 내에서 국한적으로 진행되어 온 경향이 있으며, 아직까지 동상현상을 정량적으로 분석·판단하기 위한 실내 실험기준은 제시되지 않은 실정이다. 따라서 본 논문에서는 기존의 동상 관련 연구에서 활용되어온 실험 장비들의 특성을 동결방식, 동결방향, 지하수 조건 등의 대표적인 실험조건별로 분석하고, 이를 바탕으로 동상현상을 비롯하여 다양한 토사의 동결현상을 분석하기 위한 연구에 적합한 실내 실험장비 개발방안을 제안하고, 장비의 활용성 검증 실험 결과를 제시하고자 한다.

2. 동상실험 방법에 관한 고찰

토사의 동상특성을 분석하기 위한 기준화된 실내 실험은 미국 ASTM과 일본 JGS등에서 제안하고 있다. 각 실험 기준들은 동상실험에 적합한 장비를 제안하고 있으며, 이외에도 1960년대 이후부터 현재까지도 활용되고 있는 영국의 TRRL(Transport and Road Research Laboratory) 동상시험기 등의 기타 실험장비들이 다양한 연구 목적에 따라 활용되어 왔다. 본 절에서는 국내외의 대표적인 실험기준 및 연구사례에서 제안·활용 되어온 실내의 동상실험 장비들의 특성을 살펴보고 이를 바탕으로 본 연구에서 제안된 실내 동상 실험장비의 개발 방향에 대해 기술한다.

2.1 해외 동상실험 기준

동상에 관한 오랜 실험적 연구를 바탕으로 미국과 일본에서는 흙의 동상율을 측정하여 이를 바탕으로 흙의 동상

성을 판단할 수 있는 실내 실험기준(ASTM D5918-06; JGS 0172)과 지반의 동상량을 추정할 수 있는 실내 실험기준(JGS 0171)을 제안하였다. 각 실험 기준에서 제안하고 있는 실험장비의 공통적인 특성은 다음 절에서 설명하는 영국의 TRRL시험과 달리 한 번에 한 개의 시료만을 실험할 수 있다는 점과, 포화된 시료를 한쪽 면에서부터 서서히 동결시켜 그에 따라 발휘되는 동상량을 측정하는 방식을 활용하는 점 및 실험시 상재하중을 재하하여 동상현상에 미치는 지중응력의 영향을 고려한다는 점이다. 그러나 실험에 사용되는 몰드의 크기, 시료의 동결방향, 시험중 탈기수(脫氣水) 유입조건 등에서 차이점이 나타난다. 두 실험기준의 주요특성을 비교/정리하면 표 1과 같다.

미국 ASTM 기준의 경우 몰드의 크기가 JGS 기준에 비해 상대적으로 크고, 동결을 상부에서 하부로 진행시켜 지반의 자연적 동결메커니즘을 재현하고 있다. 이는 현장에서 채취한 시료의 동상성 평가를 위한 실험에 적합한 반면, 일본 JGS 기준은 몰드가 작고 시료를 하부로부터 동결시킴으로서 동결시 몰드 표면과 동결토 사이의 접촉면에서 발생할 수 있는 동착강도의 저항을 최소화할 수 있으므로 토사의 동상특성을 분석하기 위한 요소 실험에 적합한 것으로 판단된다. 특히 지반의 동상량을 추정하기 위한 JGS 0171 실험기준의 경우, 시료의 크기를 최소화하여 국부적 빙정형성에 의한 동상량의 과대 평가현상이 발생하지 않도록 하고 있다. 시험중 탈기수 유입조건은 ASTM기준과 JGS기준 각각 폐쇄형과 개방형을 채택하고 있다. 폐쇄형의 경우 시험중 시료내로 물의 유입을 차단하므로, 시험직전에 시료내부에 존재하는 간극수의 동결만이 체적팽창에 기인하는 반면, 개방형의 경우는 유입수의 영향이 추가되어 체적팽창이 상대적으로 크게 측정될 가능성이 있다. 탈기수 유입조건에 결정은 현장의 지하수 변동 상황을 고려하여 결정할 필요가 있을 것으로 사료된다.

2.2 기존의 동상실험 사례

1960년대 이후 Kaplar(1965), Croney and Jacobs(1967), Zoller(1973), Aguirre-Puente 등(1974), Loch(1979) 등에 의해 다양한 실험장비와 이를 활용한 동상 실험방법이 제안되었다. 당시 개발된 동상실험법 중 TRRL(영국)에서 개발한 동상시험기와 이를 이용한 실험방법은 가장 널리 활용되어온 대표적인 실내 동상 실험방법이다(Jones and Dudek, 1979). TRRL에서 제안한 동상시험기는 그림 1과 같은 구조를 갖으며, 영하의 온도조건을 모사할 수 있는

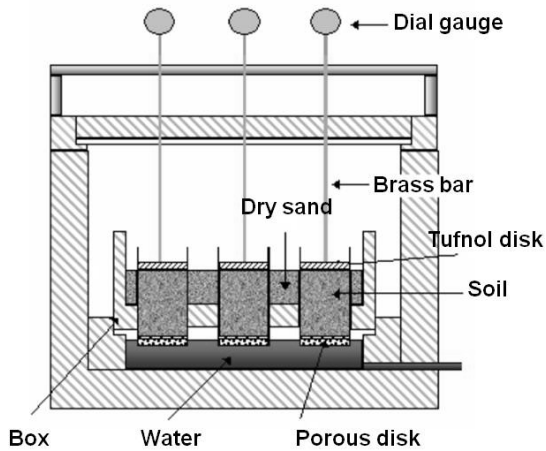


그림 1. TRRL 동상시험기 모식도(홍성완 등, 1992)

소형 냉동고에 시료를 넣고 지하수를 공급하는 개방형 조건에서 시료를 동결시켜, 그로 인해 발생하는 체적변화량이나 팽창압을 측정하는 방식이다. TRRL 동상시험기는 다수의 시료를 한꺼번에 동결시킬 수 있으며, 각 시료에 대하여 동상현상에 의한 체적변화량과 팽창압을 개별적으로 선택하여 측정할 수 있다는 장점이 있으나, 시료의 동결 진행 상황을 확인할 방법이 없다는 단점이 있다. 또한, 시료의 동결 방향성이 일정하지 않을 가능성이 높고, 상재 하중에 의한 영향을 반영하지 못하므로 실제 지반의 동결 메커니즘을 재현하는데 있어서 분명한 한계점을 가지고 있다. 그러나 한 번에 여러 시료를 실험할 수 있으므로, 개별 시료간의 상대적인 동상민감성을 빠르게 비교할 수 있다는 장점이 있다.

국내에서는 김영진 등(1992)이 영국 TRRL 동상시험기를 직접 제작하여 흙의 입경변화, 간극수의 화학성분 변화, 상재하중 작용 등에 따른 동상특성을 분석한 사례가 있다. 신은철 등(2002)은 직경 100mm, 높이 130mm 크기의 시료를 연속적으로 동결·융해 시킬 수 있는 실험장비를 제작하여 동결온도, 속도, 포화도 등의 영향에 따른 동상압의 특성을 분석하고 동결·융해를 경험한 흙의 물리적 특성 변화를 분석하였다. 또한, 토사의 동결·융해 실험장비를 그림 2와 같이 개량하여 동상 민감성 흙의 공학적 특성을 분석 하였다(신은철 등, 2009).

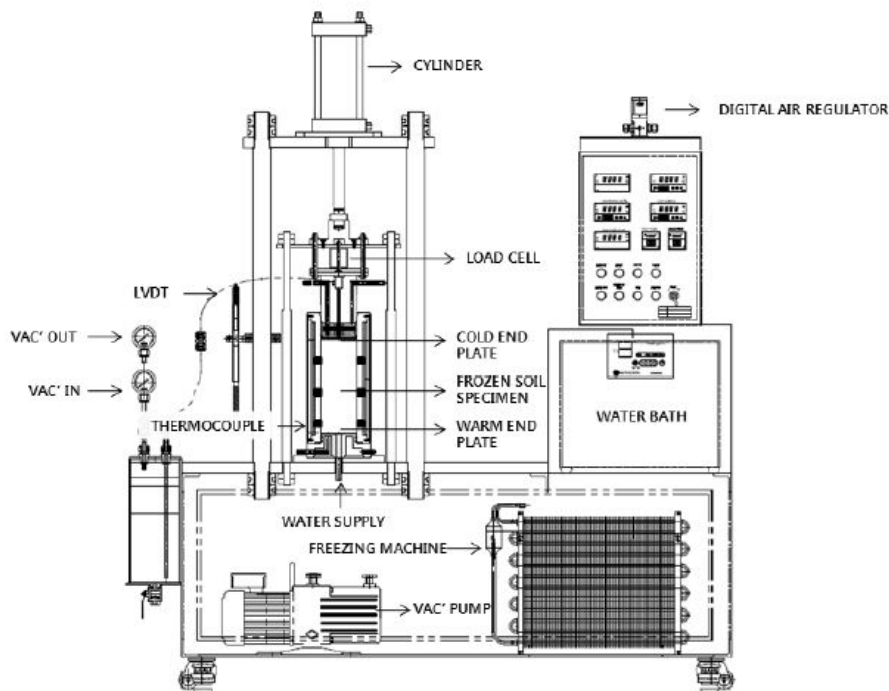


그림 2. 개량된 동결·융해 실험장치 모식도(신은철 등, 2009)

예대호 등(2007)은 실제 지반의 동상량을 측정할 수 있는 실험장비를 개발하여 약 8년여에 걸친 현장 측정실험을 실시하였고 이를 바탕으로 자연지반의 동상력을 정량적으로 파악하고 그 특성을 분석하였다. 김학삼 등(2010)은 그림 3과 같은 실내 동상 실험 장비를 활용하여 부동수, 열전도율, 동상량에 관한 실내실험을 수행하여 페타이어 파우더 혼합토의 동상억제 특성을 분석하였다. 본 실험장비는 일본 JGS 기준에서 제안하고 있는 실험장비와 흡사하지만, 시료주변에 단열재를 설치하는 대신 냉동챔버 내에서 실험을 수행하였고, 시료의 높이가 상대적으로 높다는 차이점을 나타내었다.

2.3 실험장비 개발방안 도출

상기 기술한 국내외 실험기준과 연구사례에서 제시/활용되어온 실험장비들의 특성을 살펴보면, 장비의 개발을 위해서는 동결방식, 동결방향, 시료의 크기, 시험중 탈기

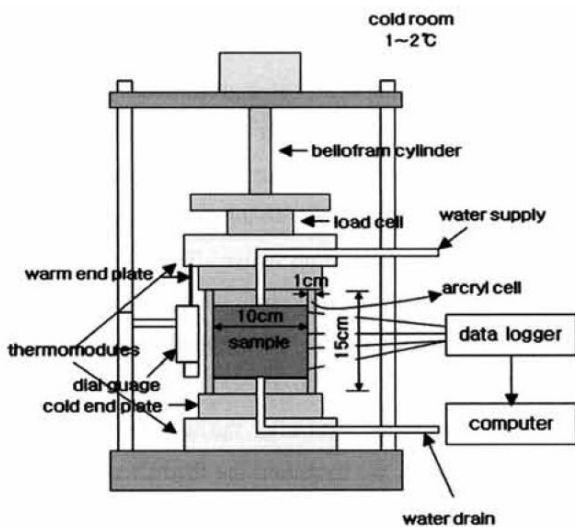


그림 3. 동상 실험장치 모식도(김학삼 등, 2010)

수 유입조건 등 다양한 요소를 고려해야 한다는 사실을 확인할 수 있다. 각 장비들의 특성을 바탕으로 새로운 동상 실험장비의 개발내용을 정리하면 다음과 같다.

2.3.1 동결방식

시료를 동결시키는 방식은 토사의 동상현상의 발현양상에 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’, 셋째, 한 면의 온도를 일정하게 유지한 채 다른 한 면의 온도를 낮추는 ‘편면온도강하식’으로 구분된다(小野 丘 등, 2003). 미국 ASTM과 일본 JGS 기준은 시료를 한 단면으로부터 서서히 동결시키는 ‘편면온도강하식’을 제안하고 있으며, 신은철 등(2009)과 김학삼 등(2010)의 연구사례에서도 이와 같은 동결방식이 활용되고 있다. 실제 자연현상에 의한 지반의 동결 메커니즘을 살펴보면, 대기의 온도가 저하되고 그로 인한 영향으로 지표면에서부터 동결깊이까지 동결이 일어나므로, 시료의 한 단면으로부터 방향성을 가지도록 서서히 동결시키는 방식은 동상 특성을 분석하기에 적합한 동결방식으로 판단된다.

2.3.2 동결방향

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, 몰드 내에 구속되어 있는 시료가 동결하면서 몰드와

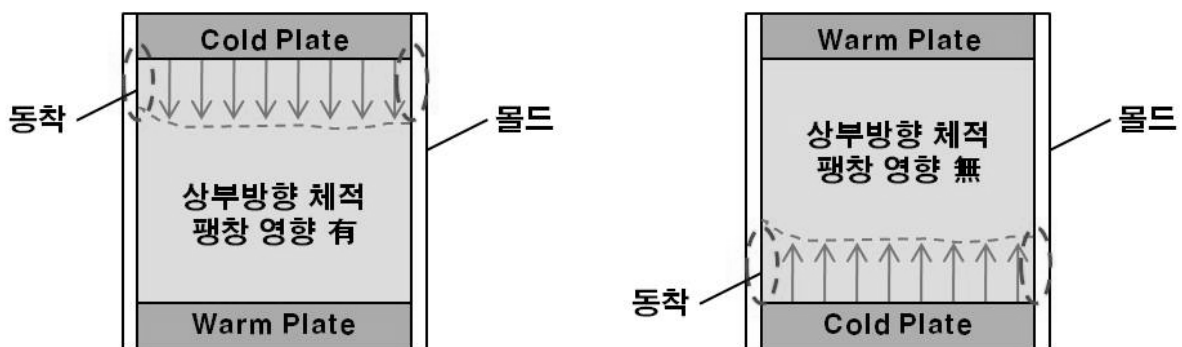


그림 4. 동결방향에 따른 동착력의 영향

시료의 인터페이스에서 동착력이 발생하여 동상에 의한 체적팽창현상에 대해 저항력으로 작용할 가능성이 있다. 반대로, 일본 JGS 기준에서 제안하고 있는 동결방향은 시료를 하부로부터 동결시키기 때문에 동착력에 의한 동상현상 저감현상을 최소화 할 수 있다(그림 4). 본 연구에서의 동결 실험장치는 상하부 어느 쪽에서도 온도를 제어할 수 있는 방식이지만, 실제 실험에 있어서는 하부에서 상부로 동결시키는 방식을 채택하였다. 이는 자연동결현상의 방향성과는 반대되지만, 시료의 크기가 작은 요소실험에서 동결방향에 기인한 실험값의 오차는 크지 않을 것으로 예상되고, 동결방향보다 동상현상에 의한 체적팽창 현상의 발현을 저감시킬 수 있는 가능성을 배제하는 것이 상대적으로 중요할 것으로 판단되기 때문이다.

2.3.3 몰드재료

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. 미국 ASTM과 일본 JGS 기준을 비롯한 기타 연구사례들에서도 이를 감안하여 아크릴 재질의 몰드를 사용할 것을 제안하고 있다. 또한 시료의 동결상태를 육안으로 확인하기 위하여 되도록 투명한 아크릴을 사용하는 것이 적합하며, 토사 동결에 의한 동상력을 측정하기 위해 상부 체적팽창을 구속할 때 수평방향으로 발생할 수 있는 팽창압을 충분히 견딜 수 있도록 10mm 이상의 두께를 갖도록 제작해야 할 것으로 판단된다.

2.3.4 시료크기

시료의 크기는 해외 동상실험 기준들과 기타 연구사례에 따라 제각기 다른 조건을 제시하고 있는 항목이다. 미국 ASTM 기준과 일본 JGS 기준을 비교하면, ASTM에서 규정하는 시료크기가 JGS보다 다소 크다는 것을 알 수 있다(표 1). 특히 일본 JGS 기준의 경우 동상실험의 목적에 따라 시료의 크기가 다른 실험을 제시하고 있다(JGS 0171, 2003; JGS 0172, 2003). 이는 토사의 동상에 대한 민감성을 의미하는 동상성을 정성적으로 분석하기 위해서는 시료의 크기가 상대적으로 큰 것이 적합하고, 동상의 특성을 동상량이나 동상력의 정량적인 정수로 분석하기 위해서는 시료 내부의 국부적 빙정형성을 방지할 수 있도록 작은 크기의 시료가 적합하기 때문인 것으로 판단된다.

그러므로 시료의 폭을 100mm 정도로 제한하고 시료의 직경과 높이의 비를 2:1 정도로 유지하여 시료의 높이를 최소화함으로써 동결시 시료 내부에 국부적 빙정이 형성되어 과도한 체적 팽창현상이 일어나지 않도록 할 필요가 있다.

2.3.5 탈기수 공급조건

동상실험에서 실험중 탈기수 유입조건은 실험중 탈기수를 지속적으로 공급하는 개방형 조건과 공급하지 않는 폐쇄형 조건으로 나눌 수 있다. 일반적으로 지하수를 공급하는 개방형 조건의 실험에서 동상현상은 상대적으로 과대하게 나타나게 되며, 폐쇄형 조건에서는 체적팽창에 한계를 나타낸다. 일본 JGS 기준과 영국 TRRL 동상실험에서는 시료 동결시 지하수를 공급하는 개방형 조건을 제안하고 있는 반면, 미국 ASTM 기준의 경우 폐쇄형 조건을 제안하고 있다. 토사의 동상성 판정과 같이 동상현상을 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 실험의 목적과 상황에 따라 개방형과 폐쇄형조건을 선택적으로 적용할 수 있어야 할 것으로 판단된다.

2.3.6 기타 개선사항

앞서 기술한 해외 동상실험 기준들과 기타 연구사례들을 살펴보면 시료 주변의 온도에 의한 영향을 최소화하기 위하여 단열재를 설치하거나(ASTM D5918-06, 2006; JGS 0171, 2003; JGS 0172, 2003; 신은철 등, 2009) 일정온도가 유지되는 냉동챔버 내에서 실험을 수행하는 방식을 제안하고 있다(김학삼 등, 2010). 하지만 이러한 방법은 실험중 몰드 내부를 확인하기가 어렵고, 외기온도에 따라 실험값에 오차가 발생하는 등의 단점이 있다. 그러므로 본 논문을 통해 개발되는 실내 동상 실험장비에는 시료 주변의 온도를 효과적으로 제어할 수 있는 시스템을 설치해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3. 고효율 실험장비의 개발

앞서 도출한 실험장비의 개발방향을 바탕으로 새롭게

개발/제작한 고효율 실내 동결 실험장비의 특성을 정리하면 표 2와 같다. 그 중 본 실험장비의 대표적인 주요 특성은 첫째, 상·하부 개별 냉각 제어방식, 둘째, 시료 주변온도 보냉(保冷)시스템, 셋째, 동상량/동상력 측정시스템 장착이다. 본 절에서는 고효율 동결 실험장비의 각 특성을 구체적으로 제시하며, 새롭게 개발된 실험장비의 토사 동결성능시험 결과를 제시함으로써 본 연구에서 개발된 새로운 실험장비의 활용가능성을 살펴본다.

3.1 상·하부 개별 냉각 제어방식

앞서 살펴본 바와 같이 미국 ASTM과 일본 JGS기준, 그리고 신은철 등(2009)이 제안한 실험장비의 경우 모두 시료를 동결시키는 방법으로 ‘편면온도강하식’을 활용하

표 2. 고효율 동결 실험장비 특성

항 목	특 성
동결방식	상·하부 개별냉각 방식을 활용한 ‘편면온도강하식’
동결방향	상부→하부, 하부→상부, 상하부 양방향 모두 가능
물드재료	마찰이 적은 투명한 아크릴 재질, 두께 10mm 이상
시료크기	직경 100mm, 폭과 높이의 비 2:1
지하수 유입조건	개방형, 폐쇄형 조건 모두 가능
기타 개선사항	시료 주변온도 보냉(保冷)시스템 적용 동상량/동상력 측정시스템 적용

고 있으며, 이는 시료를 동결하는 방법 중 실제 지반이 동결되는 메커니즘을 가장 유사하게 모사할 수 있는 방법으로 판단된다. 그러므로 본 논문에서 제안하는 실내 동상 실험장비에도 ‘편면온도강하식’의 시료 동결방식을 적용할 수 있도록 시료의 상·하 단면의 온도를 개별적으로 제어할 수 있는 냉각시스템을 설계하였다.

본 실험장비의 냉각 제어시스템은 냉각기 2기와 제어판으로 이루어져 있으며, 실험장비의 외부에 독립적으로 설치되어있다. 각 냉각기는 제어판을 이용하여 개별적인 온도조절이 가능하다. 2기의 냉각기는 각각 시료 상·하부에 위치한 냉각판과 관으로 연결되어 부동액을 순환시키는 방식으로 냉각판의 온도를 조절한다. 냉각기의 온도조절 범위는 최저 -25℃까지이며, 찬 공기를 대류 시켜 온도를 조절하는 공랭식 냉각방식에 비하여 온도제어가 정밀하다. 상·하부 개별 냉각 제어방식은 온도조건을 설정하는 방법에 따라 양단면온도강하식, 양단면온도일정식, 편면온도강하식의 세 가지 동상 실험법을 모두 적용할 수 있다.

3.2 시료 주변온도 보냉시스템

일반적으로 동상실험은 시료를 인공적으로 영하의 환경조건에 노출시켜 시료가 동결하며 발생하는 동상량을 측정하는 방식으로 진행된다. 이때, 시료를 동결시키는 진행방향 및 온도 조건 등에 의해 동상현상의 발현양상이 영

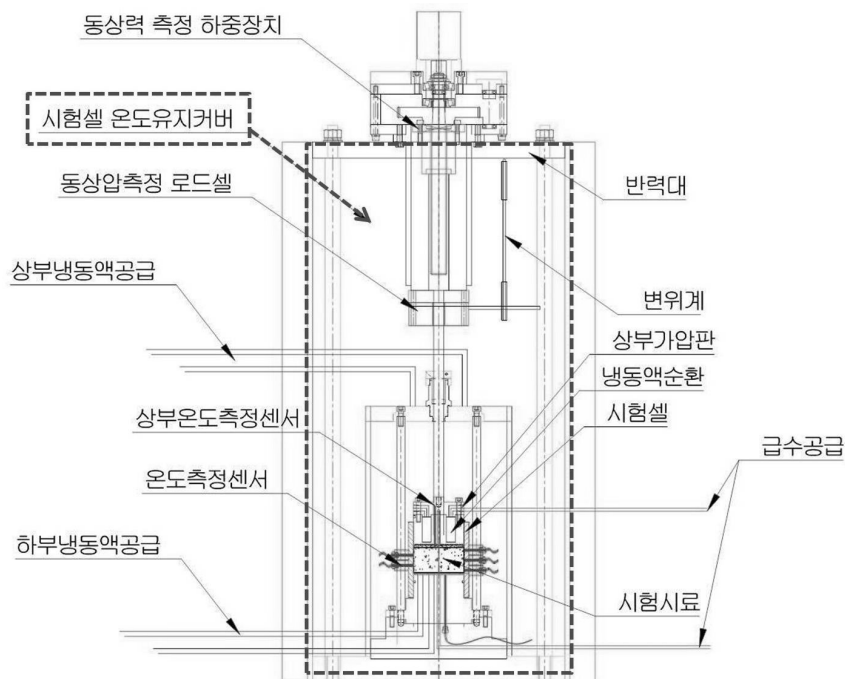


그림 5. 시료 주변온도 보냉(保冷)시스템

향을 받을 수 있다. 특히, 시료의 측면에서 외부 온도에 영향을 받게 되면 시료의 동결이 지연되거나, 혹은 측면에서부터 국부적인 동결이 일어나는 현상이 발생할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 기존의 동상 실험장비들은 이를 방지하기 위해 몰드 주변에 단열재를 설치하거나 대형 냉동 챔버 내부에서 일정한 온도를 유지한 상태로 실험을 실시할 것을 권하고 있다. 그러나, 단열재를 설치하면 시료의 변화 양상을 눈으로 확인할 수 없다는 단점이 있으며, 대형 챔버 내에서의 실험은 경제적으로 비효율적인 것으로 사료되므로, 본 연구에서 제안하는 실내 동상 실험장비는 그림 5와 같은 시험셀 온도유지커버와 공랭식 온도 조정 장치로 구성된 보냉(保冷)시스템을 설치함으로써 시료의 주변온도를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 개발한 실험장비는 시료 상·하부의 냉각제어 시스템과 시료 주변온도 보냉(保冷)시스템을 설치함으로써 그림 6과 같이 토사의 동결 시 시료의 주변온도를 동결직전인 약 0~1℃ 정도로 유지한 상태에서 실험자가 원하는 방향으로 시료를 동결시키는 것이 가능하도록 설계되었다. 이러한 동결방식은 환경조건에 따라 시료 동결 속도의 차이가 발생하는 것을 최소화 하고, 실험이 지연되거나 국부적인 동결형태가 발생하는 것을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

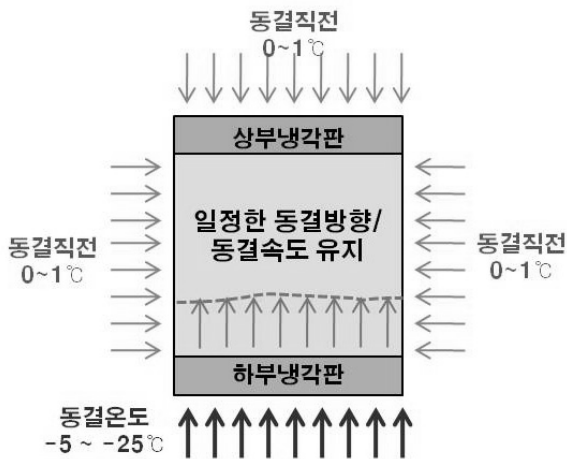


그림 6. 토사의 동결원리

표 3. 동결성능시험 조건

성능시험	동결방향	보냉시스템	보냉시스템 설정온도	상부냉각기 설정온도	하부냉각기 설정온도
No.1	하부 → 상부	ON	1℃	1℃	-15℃
No.2	하부 → 상부	OFF	-	1℃	-15℃
No.3	상부 → 하부	ON	1℃	-15℃	1℃
No.4	상·하부 양방향	ON	1℃	-15℃	-15℃

3.3 동상량/동상력 측정시스템

동상현상은 일반적으로 동상량 판정을 통해 평가되는 경향이 있다(예대호, 2007). 하지만 동상현상을 보다 정확히 분석하기 위해서는 동상량뿐 아니라 동상력, 즉 동상현상에 의한 체적 팽창을 구속했을 때 발현되는 힘에 대한 측정이 함께 이루어져야 할 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 새로운 실내 동상 실험장비는 일정한 하중을 유지한 상태에서 동상량과 동상력을 선택적으로 측정할 수 있도록 설계하였다.

4. 고효율 동결실험장비의 성능검증

상기 개발된 고효율 동결실험장비의 성능을 검증하기 위하여 동결성능시험 및 동상시험을 수행하였다. 동결성능은 동일한 시료에 대하여 4가지 서로 다른 동결조건을 적용해 시료내부의 온도변화를 측정함으로써 상하부 개별 냉각시스템과 보냉시스템의 성능을 검증하였고, 동상시험을 동상에 민감한 토사에 대한 시험을 수행함으로써 개발장비의 토사 동상발현유도 성능 및 동상량 측정성능을 검증하였다.

4.1 동결성능시험

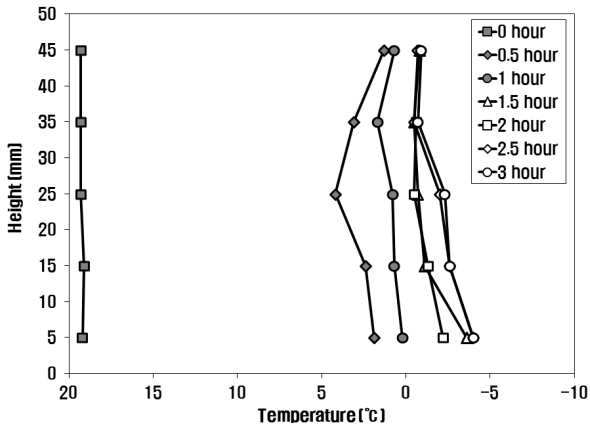
본 연구에서 개발 및 제작한 새로운 동결실험장비의 성능을 평가하기 위하여 직경 100mm 높이 50 mm의 시료를 제작하여 4가지 서로 다른 조건에서 동결실험을 수행하였다. 성능평가에 활용된 시료는 비중 2.67, 최대/최소 건조단위중량이 각각 16.7kN/m³과 13.3kN/m³인 물리적 특성을 나타내며, USCS 토질분류 기준에 의해 전형적인 빈립도 사질토(SP)로 분류되는 주문진 표준사를 활용하여 상대밀도 77%(e=0.66)로 제작하였다. 투명아크릴로 제작된 시험셀 내부에 토사를 채운 후 목표한 상대밀도를 나타낼 수 있도록 상부의 하중재하기를 활용하여 다짐하고, 하부로부터 물을 주입하여 포화시켰다. 포화를 위한 물은 몰드

외측에 설치된 실린더를 통하여 공급되었으며, 실린더내의 수두는 시료상부와 약 100mm의 수두차가 유지되도록 하였다. 포화는 약 4시간에 걸쳐 진행되었으며, 이때 포화도를 100%로 가정하였다. 준비가 완료된 시료에 표 3과 같이 서로 다른 조건을 모사하여 동결성능시험을 수행하였다.

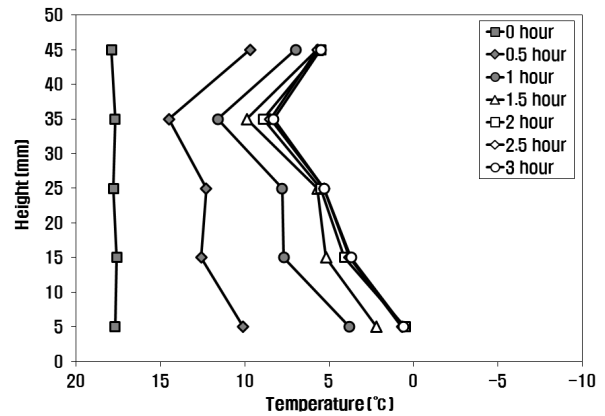
시료측면부에 위치한 5개의 온도센서를 통하여 시간의 흐름에 따른 시료의 온도변화를 측정하였다. 그림 7은 실험을 통해 측정된 결과를 시간의 흐름에 따라 나타내고 있다. 냉각시스템을 가동시킨 후 0.5시간별로 측정된 각 온도를 도시함으로써 시료내부의 깊이별 온도분포를 추정할 수 있도록 하고 있다. 그림 7에서 횡축은 온도센서를 통해 측정된 시료의 온도, 종축은 시료의 높이에 따른 온도센서의 측정위치를 의미한다.

그림 7(a)는 하부에서부터 상부방향으로 동결을 시킨 경우이다. 동결 후 약 2시간 이내에 시료가 동결되었으며,

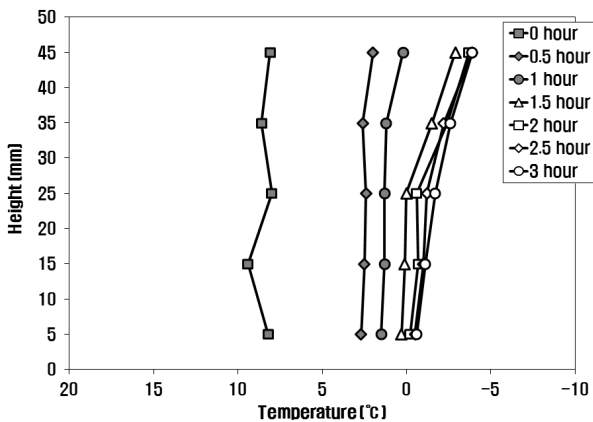
최종적인 동결온도 분포가 하부가 낮고 상부가 높은 형태를 나타내고 있다. 그림 7(b)는 그림 7(a)와 동일한 조건에서 보냉시스템을 가동하지 않은 경우이다. 동일한 조건임에도 불구하고 동결효율이 떨어져 결과적으로 시료가 동결하지 않는 결과를 나타냈다. 하지만 하부 냉각기의 영향으로 시료내부의 온도 분포가 하부가 낮고 상부가 높은 형태를 나타내고 있다. 그림 7(c)는 그림 7(a) 및 7(b)와는 반대로 상부에서부터 하부방향으로 동결을 시킨 경우이다. 단, 외기온도가 낮은 야간에 실험을 수행하여 초기 온도값 자체가 비교적 낮은 상태에서 실험하였다. 실험결과 그림 7(a)의 동결조건과 동일하게 동결 후 약 2시간 이내에 시료가 동결되었으나, 그와는 반대로 최종적인 동결온도 분포가 상부가 낮고 하부가 높은 형태를 나타내고 있다. 그림 7(d)는 상하부 양단면으로부터 시료를 동결시킨 경우이다. 그림 7(c)의 경우와 마찬가지로 외기온도가 낮은 야간에 실험을 수행하여 초기온도값 자체가 비교적 낮



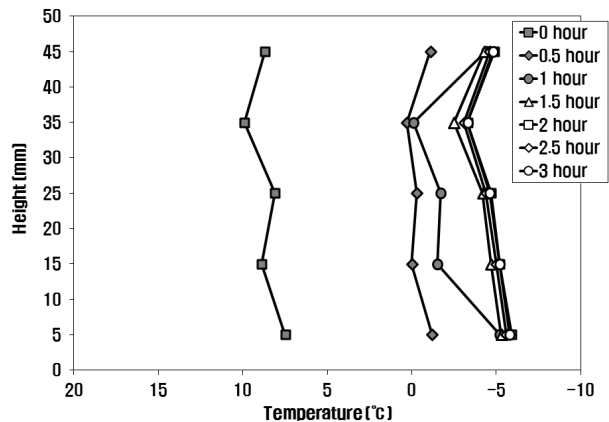
(a) No.1-시료 하부에서 상부로 동결(보냉시스템 사용)



(b) No.2-시료 하부에서 상부로 동결(보냉시스템 미사용)



(c) No.3-시료 상부에서 하부로 동결(보냉시스템 사용)



(d) No.4-시료 상하부 양단면 동결(보냉시스템 사용)

그림 7. 제안된 실험장비의 동결성능 실험결과

은 상태에서 실험하였으며, 0.5시간여 만에 시료가 동결되었다. 상하부 단면에서 동결을 시켜 시료내부의 온도가 평균적으로 약 -5°C 까지 저하되었으며, 상하부의 온도편차가 가장 작게 나타났다.

위와 같은 동결성능시험결과 본 연구에서 개발 및 제작한 실험장비는 연구의 목적에 따라 시료의 다양한 동결양상을 모사하여 연구를 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 추가적인 단열재의 설치가 필요하지 않아 동결시험 중 시료내부의 변화를 실험자의 육안으로 관찰할 수 있다는 장점이 확인되었으며, 보냉시스템을 가동시킴으로써 냉동챔버의 도움없이도 충분한 동결효율을 나타내는 것으로 판단된다.

4.2 동상시험검증

본 연구를 통해 개발 및 제작된 고효율 동결실험장비의 동상시험 적용가능성을 평가하기 위하여 2차례에 걸친 동상시험을 수행하였다. 시험에 활용된 토사는 충분한 동상이 발생할 수 있도록 화강풍화토에 실트질 토사를 중량비 7:3으로 혼합하여 제작하였다. 혼합토사의 다짐곡선은 그림 8과 같고, #200번체 통과량은 약 30% 이상으로 동상민감성이 충분한 것으로 판단되며, 실험장비의 토사 동상발현 유도성능 및 동상량 측정을 위한 실험에 적합한 것으로 판단된다.

토사의 동상을 원활히 발생시키기 위해서는 충분한 함수비가 필요할 것으로 판단하여 비교적 느슨하게 다짐하여 건조단위밀도 $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ ($16.7\text{kN}/\text{m}^3$)로 시료를 제작하여 포화시켰다. 포화가 완료된 시료를 2가지 서로 다른 동결조건을 적용하여 동상시험을 수행하였다. 첫 번째 시료는 하부에서 상부방향으로 -15°C 의 온도조건으로 동결을

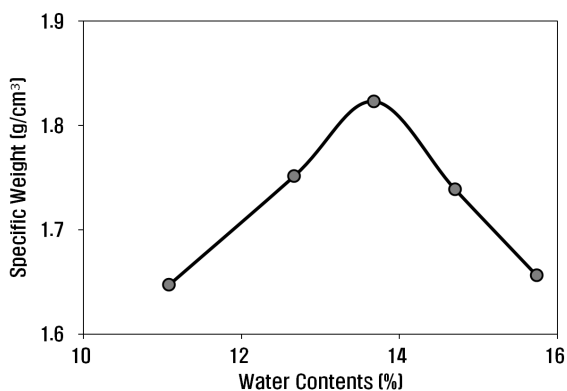
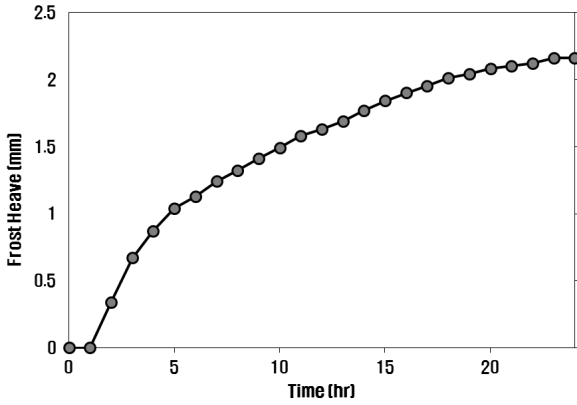


그림 8. 혼합시료의 다짐곡선

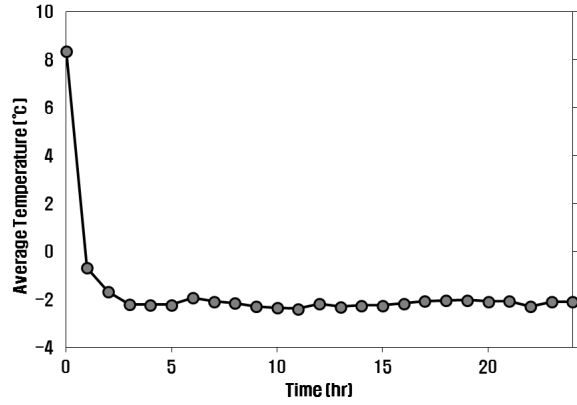
시켰으며, 두 번째 시료는 상·하부 양단면으로부터 시료 중심방향으로 역시 -15°C 의 온도조건으로 동결시켰다. 실험에 적용된 동결온도는 임의적으로 설정되었으며, -15°C 는 냉매의 온도이고 실제로 시료 상하부에서 적용된 온도는 냉매온도 보다 높은 것으로 사료된다. 그림 9는 두 개의 시료에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 그림 9(a)와 9(b)는 하부에서 상부로 동결시킨 시험결과로 각각 시간의 변화에 따른 동상량 측정결과와 시료내부의 평균온도변화를 나타내고 있다. 여기서 평균온도는 시료측면부에 설치된 5개 온도센서의 계측값의 평균을 나타낸다. 그림 9(c)와 9(d)는 상·하부 양단면으로부터 동결시킨 시험결과로 각각 시간의 변화에 따른 동상량 측정결과와 시료내부의 평균온도변화를 나타내고 있다. 본 검증 실험에서는 상부재 하장치의 변위를 측정하여 동상량을 분석하였으나, 상부재 하장치를 고정시킬 경우 상부면 위쪽에 고정되어 있는 로드셀을 통하여 동상력을 측정할 수 있다. 동상력 분석 및 상부고정에 따른 온도 분포에 관한 실험은 향후 추가 연구를 통해 진행될 계획이다.

하부로부터 동결시킨 시료의 경우 시료가 동결되기 시작하며 급격한 동상량을 나타내었고, 시료의 내부온도가 더 이상 저하되지 않고 수렴된 상태에서도 지속적인 동상현상을 나타냈다. 이는 시료내부의 부동수분(unfrozen water)에 의해 형성되어 있는 간극수의 이동통로를 통해 수분이 이동하며 시료 내부의 빙정(ice lens)을 지속적으로 성장시키는 현상에 의한 것으로 판단된다. 이러한 현상은 동상현상의 전형적인 메커니즘을 모사했기 때문에 발생한 것으로 판단되며, 본 장비의 토사 동상시험 적용 가능성을 시사하는 것으로 사료된다. 시료는 약 24시간 동안 동결하였으며, 시간에 따른 동상량의 증가량이 저감되는 것을 확인하였다. 약 24시간 후 시료의 동상율은 약 4%정도로 나타났다.

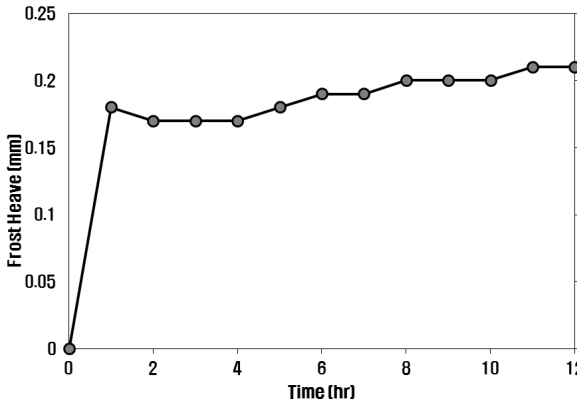
반면, 상·하부 양단면으로부터 동결한 시료의 경우 시료가 동결되기 시작하며 동상량이 발생하였으나, 초기 구간을 넘어서면서부터 더 이상의 동상현상이 발생하지 않았다. 이는 하부로부터 동결시킨 시료와 비교하여 보다 빠른 속도로 동결되어 초기 동결구간에서 동상현상 역시 빠르게 나타났으나, 상부의 동결시스템 주변의 간극수가 동결되며 물드상부와 상부동결시스템의 접촉면에서 발생한 동착현상에 의하여 변위가 발생하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 또한 시료의 상부가 급격히 동결하며 부동수분량이 상기 시험시 조건과 비교하여 상대적으로 감소하



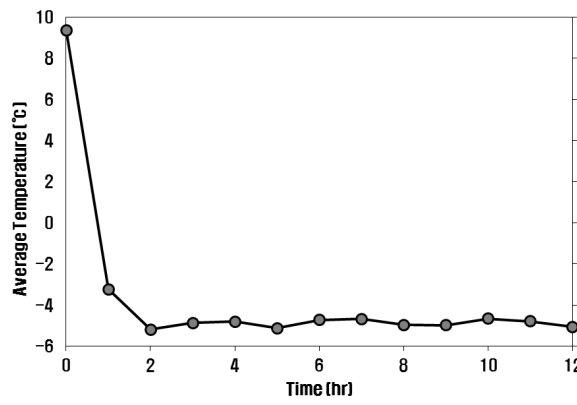
(a) 하부동결시험 동상량



(b) 하부동결시험 평균온도



(c) 양단면동결시험 동상량



(d) 양단면동결시험 평균온도

그림 9. 동상시험결과

였고 이로 인해 간극수의 지속적인 공급이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서 개발한 고효율 동결시험장비를 동상시험에 적용하기 위해서는 일본의 JGS 동상시험기준과 같이 하부로부터 동결시키는 방식을 활용하는 것이 합리적일 것으로 사료되나, 양단면 동결방식을 적용할 경우 상부토사의 동결로 발현되는 동착강도를 최소화하기 위하여 실리콘 테이프 또는 윤활유 등을 몰드 상부내측에 적용하는 방안이 고려될 수 있다.

5. 결 언

토사의 동결에 의한 체적 팽창 현상인 동상현상은 영구 동토의 지반특성을 나타내는 극한지에서 주요한 지반 구조물 설계정수로서 고려된다. 동상현상의 특성을 분석하기 위한 실내 실험장비들은 국내외적으로 실험기준이나 연구 사례들을 통하여 다양하게 제시되어 왔으나, 동상을 설계정수로서 분석하기 위한 연구에 활용하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 현재까지 제시되어 온 실내 동상 실험

장비들의 장·단점을 분석하여, 동상실험을 비롯하여 다양한 토사의 동결현상을 분석하기 위한 고효율의 동결실험장치 개발방안을 제시하였고, 주요 사항은 다음과 같다.

- (1) 시료동결방식에 있어서 상·하부 개별 냉각 제어 시스템을 구축하여, 시료의 동결시 시료와 아크릴 사이의 마찰의 영향을 최소화 할 수 있는 ‘편면온도강하식’의 시료동결 방법을 비롯한 다양한 동결조건을 모사할 수 있도록 하였다.
- (2) 시험셀 온도유지커버와 공랭식 온도조정장치로 구성된 보냉시스템은 몰드주변에 단열재를 설치하는 기존 형식에서 발생하는 문제점(실험중 주변온도 제어 및 시료내부의 육안 관찰이 불가능)을 해결할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 제안된 동결실험장비는 상재하중 재하하에서 동상량을 측정할 수 있고, 상부를 고정시킬 경우 로드셀을 활용하여 동상력을 측정할 수 있으므로, 동상특성을 동상율로 평가하는 기존의 방법과 비교하여 보다 신

뢰성 있는 자료를 제공할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 위와 같은 3가지 주요 사항을 반영하여 실제 실험장비를 제작하였으며, 실험장비의 활용 가능성을 타진하기 위한 목적으로 동결성능시험 및 동상시험검증을 수행하였다. 동결성능시험은 4가지 서로 다른 조건을 모사하여 수행하였으며 동상시험은 2가지 조건을 모사하여 수행하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 실험장비는 시료의 다양한 동결양상을 모사할 수 있어 연구의 목적에 따라 적합하게 활용될 수 있을 것으로 판단되었으며, 토사의 동상발현유도 성능이 뛰어나 토사 동상시험에 활용될 수 있을 것으로 판단되었다. 하지만 상부에서 동결을 시킬 때에는 몰드와 상부동결시스템이 부착되고, 간극수 공급이 원활하지 않아 상향거동 변위의 측정에 문제가 발생할 수 있다는 한계가 있었다. 하지만, 추가적인 단열재의 설치 필요하지 않아 동결시험 중 시료내부의 변화를 실험자의 육안으로 관찰할 수 있고, 보냉시스템을 가동시킴으로써 냉동챔버의 도움 없이도 고효율의 동결성능을 나타낸다는 장점이 있어 다양한 방면에서의 활용가능성이 높을 것으로 사료된다. 향후 동일 시료에 대하여 국외 실험 기준에 따라 수행된 결과를 본 논문의 결과와 상호 비교분석하여 실험장비 및 방법에 대한 신뢰성을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업인 “극한지 하부구조 급속시공 플랫폼 기술개발” 과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김영진, 허승범, 홍성완 (1992), “흙의 동상특성에 관한 실험 연구”, *대한토목학회 학술발표회 개요집*, 제1권, pp.425-428.
2. 김학삼, 서상열, Nakamura, D., Fukuda, M., Yamashita, S. and Suzuki, T. (2010), “페타이어 파우더 혼합토의 동상특성”, *한국지반공학학회논문집*, 제26권, 제4호, pp.15-26.
3. 신은철, 박정준, 이창섭 (2002), “철도노반재료의 동상 팽창압 특성에 관한 연구”, *한국철도학회 춘계학술대회논문집*, pp. 264-270.
4. 신은철, 류병현, 박정준 (2009), “변형된 동결-융해 시험장치를 이용한 동상민감성 흙의 지반공학특성”, *한국토목섬유*

학회논문집, 제8권, 제1호, pp.53-59.

5. 예대호,鈴木 輝之, 김영수 (2007), “지반의 동상력과 구조물의 피해대책”, *한국지반공학학회논문집*, 제23권, 제5호, pp.43-51.
6. 홍성완, 김영진, 허승범, 공길용 (1992), *동토지반 기초구조물의 최근 설계·시공기법개발연구 1차년도*, 과학기술원.
7. 木下 (1973), “凍上力實驗”, *低溫科學*, 第30期, pp.191-201.
8. 小野 丘, 山本英夫, 伊豆田久雄 (2003), “土の凍結と地盤工學 4. 凍上試験法”, *土と基礎(講座)*, 日本地盤工學會, pp.47-53.
9. Aguirre-Puente, J., Dupas, A. and Philippe, A. (1974), “Frost Heaving and the Classification of Soils in Accordance with Their Frost Susceptibility”, *Frost Action in Soils*, Oslo, No. 14, pp.41-47.
10. ASTM D5918-06 (2006), *Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils*, American Society for Testing Materials.
11. Croney, D. and Jacobs, J. C. (1967), *The Frost Susceptibility of Soils and Road Materials*, TRRL Report, LR 90, Crowthorne, pp.68-72.
12. JGS 0171 (2003), *凍上量予測のための土の凍上試験方法*, 地盤工學會基準, 日本地盤工學會.
13. JGS 0172 (2003), *凍上性判定のための土の凍上試験方法*, 地盤工學會基準, 日本地盤工學會.
14. Jones, R. H. and Dudek, S. J. M. (1979), “A precise Call Compared with Other Facilities for Frost Heave Testing”, *Proceeding of 58th Annual TRB Meeting*, Washington, pp.28-49.
15. Kapler, C. W. (1965), *A Laboratory Freezing Test to Determine the Relative Frost Susceptibility of Soils*, Lab-Technical Note, CRREL, Hanover, pp.17-21.
16. Kujala, K. (1991), *Factors Affecting Frost Susceptibility and Heaving Pressure in Soils*, ACTA University of Oulu, pp.26-37.
17. Loch, J. P. G. (1979), “Suggestions for an Improved Standard Laboratory Test for Frost Heave Susceptibility of Soils”, *Frost Action in Soils*, Oslo, No.20, pp.33-38.
18. Loch, J. P. G. (1981), “State of the Art Report - Frost Action in Soils”, *Engineering Geology*, No.18, pp.213-224.
19. Penner, E. (1974), “Uplift Forces on Foundations in Frost Heaving Soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.11, No. 3, pp.238-338.
20. Saetersdal, R. (1981). “Heaving Conditions by Freezing of Soils”, *Engineering Geology*, No.18, pp.291-305.
21. Szuki, T., Swada, S. and Liu, C. (1993), “Field and Laboratory Tests on Adfreeze Strength of Ground to Model Pile”, *Proceeding of 2th International Symposium on Frost Geotechnical Engineering*, pp.103-109.
22. Szuki, T. and Swada, S. (1994), “Full-scale Test on Frost Heaving Pressure in a Reinforced Retaining Wall”, *Proceeding of 7th International Symposium on Ground Freezing*, pp.311-316.
23. Zoller, J. H. (1973), “Frost Heave and the Rapid Frost Heave Test”, *Public Road*, Vol.37, No.6, pp.211-220.

(논문접수일 2011. 11. 15, 심사완료일 2011. 12. 19)