

# 철도노반재료의 동상 팽창압 특성에 관한 연구

## The Characteristics of Frost Heaving Pressure on the Railroadbed Materials

신은철 \*  
Shin, Eun-Chul

박정준 \*\*  
Park, Jeong-Jun

이창섭 \*\*  
Lee, Chang-Seob

---

### ABSTRACT

The frost heaving pressure can be a problem for weakening of the railroadbed material. In this study, upon freezing a saturated soil in a closed-system from the top, a considerable pressure was developed. This pressure is induced as a result of a curved ice-water interface. This study was initiated to investigate the soils frost heaving expansion pressure and physical characteristics resulting from freezing and freezing-thawing cycle process. Weathered granite soils, sandy soil were used in the laboratory freezing test subjected to thermal gradients under closed-systems.

---

### 1. 서 론

최근 국내·외적으로 남북한 철도망 복원과 아시아 육상교통 인프라 개발계획 등 남북한철도망 연결가능성이 높아지고 있으며, 동토지역에 해당되는 러시아·중국·일본 등 관련 국가들과 다양한 접촉을 통하여 동북아시아의 역내 철도망 구축 및 활성화에 대한 인식이 고조되고 있는 실정이다. 따라서, 동토지역의 건설공사 수행 시 지반동결과 관련된 지반공학적 특성들을 분석하여 향후 철도관련 및 매설관 등 동토지역의 개발 사업 수행 시 기초자료로의 활용을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 철도노반재료로 사용되어지고 있는 화강풍화토와 모래질 흙에 대한 토질 및 기초공학적 기본 성질을 제시하였고, 기존에 제시된 동상과 관련된 실험을 통하여 단일방향으로 흙이 동결 될 때 함수비에 지배되는 결과와 더불어 시간과 온도변화에 대한 동상팽창압을 연관시켜 본 실험을 수행하였다. 또한, 동결 및 융해에 따른 흙의 역학적 거동으로 발생하는 구조적 변화 및 연경도 변화를 규명하여 철도노반재료로 사용 시 예상되는 문제점을 실험적으로 분석하였다.

### 2. 동결토의 동상압과 물리적 특성 변화

Taber(1929)는 동결이 진행 될 수 있도록 충분한 온도로 동결을 시키고, 얼음렌즈가 성장할 수 있도록 수분을 계속 공급한 결과, 압력의 증가는 얼음결정의 성장에 의한 동결에 관계된다고 제시하였다. 또한, 동상량과 동상압 실험을 통하여 점토를 동결시켰을 경우, 그 최대동상압이  $7.38\text{kg/cm}^2$ 에 이르고, 마찰력까지 포함시키면, 그 압력은  $15.12\text{kg/cm}^2$ 이 이른다고 발표하였다.

Hoekstra et al.(1965)은 동상민감성 기준 평가에서 흙의 간극 크기에 따른 동상 특성을 제시하였

---

\* 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 교수, 정회원

\*\* 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 박사과정

고, 간극 크기의 특성은 투수계수와 모관력과 같은 흙의 특성과 관련이 있다고 발표하였다.

동결 융해에 따른 액성한계 변화에 대하여 Aoyama et al.(1985), Yong et al.(1985) 등은 동결·융해 후의 높은 소성의 점토는 입자 집합체의 변화로 인해서 액성한계 값이 감소하고, Matagami 점토의 동결융해 반복 회수와 액성한계의 관계를 보여주었다. 액성한계는 초기 약 80%에서 동결융해 반복 회수가 증가함에 따라 급격히 감소하여 4번 정도 반복 후 약 30%정도 감소된다고 발표하였다.

또한, 동결융해에 의한 투수계수의 변화에 대하여 Konrad(1989)는 Segregation 포텐셜로 정의하므로 투수계수의 변화는 첫 번째 동결융해회수에서 가장 큰 변화를 보인다고 제시하였다. Chamberlain(1980)은 몇 차례의 동결융해 과정을 반복하여 간극비와 투수계수의 변화를 실험한 결과, 압밀응력에 의해 간극비가 감소하는데도 불구하고 수평, 연직의 투수계수는 오히려 동결시 수축 균열이 형성되기 때문에 크게 증가한다는 사실을 밝혔다.

흙입자의 구조적 변화는 간극의 부피와 집합체 내부의 간극 또는 집합체간의 간극 분포에 의해 결정된다. 집합체 내부의 간극과 집합체간의 간극의 상태는 동결 단계 초기의 얼음 입자가 높은 포텐셜 간극내에서 생성되어 동결 속도에 의해 얼음입자는 더 커지거나 패드 내부로 들어오게 되며 이것은 패드의 이동, 분할, 균열을 발생시키고 초기의 흙 구조는 변한다. Lanoe and Dupas(1991)는 흙이 동결되는 점 아래에서 노출되었을 때 얼음은 간극 사이의 자유수내에서 형성되기 시작하여 동결 과정이 계속되면 얼음 입자는 커지게 되며, 동결융해 반복회수가 약 4~5회 정도 지난 후 안정화되는 경향을 보인다고 제시하였다.

### 3. 실험방법

#### 3.1 시료의 공학적 특성

본 연구에서는 철도노반재료로 사용되어지고 있는 화강풍화토와 모래질 흙에 대하여 동상팽창압과 물리적 특성에 대한 실험을 실시하였다. 사용된 공시체는 각각의 포화도에 따라 실시하였고, 시간과 온도에 대한 동상팽창압은 완전포화조건으로 수행하였다. 다음의 표 3.1은 각각의 시료에 대한 공학적 특성을 나타낸 것이고, 그림 3.1은 노반재료의 입도분포곡선을 나타낸 것이다.

표 3.1 시료의 공학적 특성

공학적 특성	실험 결과	
	화강풍화토	모래질 흙
자연 함수비, $\omega_n$ (%)	16.47	17.18
비중, $G_s$	2.66	2.65
LL(%) / PI	31.9 / NP	- / NP
$\gamma_{d \max}$ ( $t/m^3$ )	1.89	1.95
$\omega_{opt}$ (%)	12.4	11.1
투수계수, $k$ (cm/sec)	$2.0 \times 10^{-6}$	$2.1 \times 10^{-4}$
No. 200채 통과량(%)	38.5	7.8
USCS	SM	SP

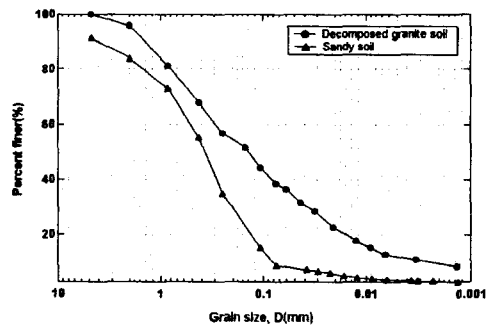


그림 3.1 노반재료의 입도분포 곡선

#### 3.2 실험 장치

본 연구에서 사용된 동결융해 시험기는 그림 3.2와 그림 3.3에 나타낸 바와 같이 실험장치는 직경 10cm, 높이 13cm인 몰드로 된 장치로서 내부에는 Teflon으로 도포하였다. 몰드 저면에는 다공판을 설치하였고, 'O' 링으로 몰드를 실링하였다. 또한, 몰드의 상부에는 알루미늄 디스크를 제작하여 시료에서 작용되는 압력을 로드셀로 전달할 수 있게 제작하였다. 또한, 몰드 내부에는 그리스를 발라서 마찰력을 최소화시켰고, 냉각기를 통해 단일 방향으로의 동결을 진행시켜서 동결 조절을 적절하게

진행시켰다. 시료가 동결되면서 발휘되는 압력은 로드셀로 측정되고, 이 측정된 값은 자동수집장치로 나타내어진다. 동결 온도는 동상실험기 내부에 설치되어 있는 Thermometer와 시료내부의 상부, 중부, 하부로 나누어 설치한 Thermocouple로 측정하였다.

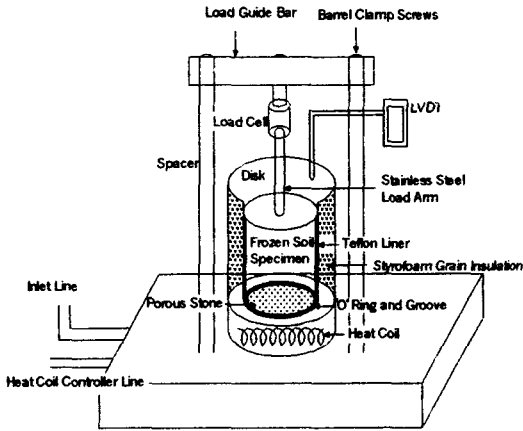


그림 3.2 동상실험에 사용된 몰드의 모식도

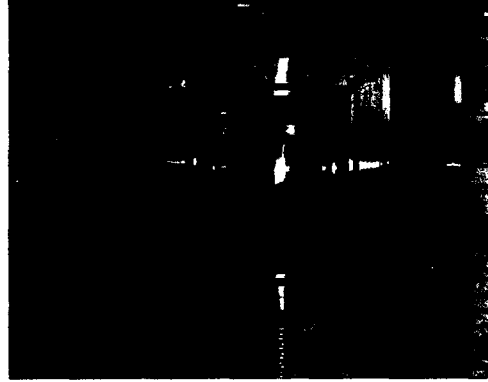


그림 3.3 동결용해 실험장치

#### 4. 실험 결과 및 분석

##### 4.1 시간과 온도 변화에 따른 동상팽창압의 변화

본 연구에서 수행한 동상실험에 따른 동상팽창압 측정 결과, 동결온도 지속시간에 따른 동상팽창압의 변화는 표 4.1과 같고, 동상팽창압 변화 곡선은 그림 4.1에 나타난 바와 같다. 실험은 초기온도를 각각 설정한 다음, 단계적으로 온도를 변화시켜 가며 측정한 것으로서, 해당 온도에서 팽창압의 변화가 일정하게 유지될 때, 온도를 더 하강시켜 연속된 팽창압의 변화를 측정하였다.

그림에 나타난 바와 같이 세립분을 많이 함유할수록 동상이 발현되기까지의 시간과 동상 지속시간이 더 크게 나타나고 있다. 또한, 초기설정온도에 따른 최대 동상팽창압을 살펴보면, 영하 5℃를 기준으로 화강풍화토의 경우, 3.549kg/cm<sup>2</sup>, 모래질 흙은 0.397kg/cm<sup>2</sup>으로서 세립분을 많이 함유할수록 발휘되는 동상팽창압은 우세하게 나타났다.

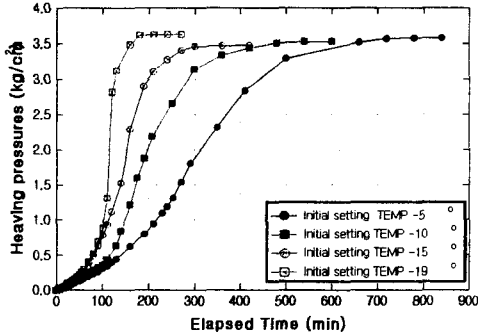
표 4.1 토사종류와 시간변화에 따른 동상팽창압의 변화

토사 종류	설정온도 (℃)	동상팽창압 발현시점까지의 시간 (min)	동상지속시간 (min)	최대동상팽창압 (kg/cm <sup>2</sup> )
화강풍화토	-5 → -10 → -15 → -19	400	780	3.574
	-10 → -15 → -19	180	540	3.526
	-15 → -19	130	320	3.471
	-19	70	230	3.624
모래질 흙	-5 → -10 → -15 → -19	70	320	0.363
	-10 → -15 → -19	50	200	0.408
	-15 → -19	45	140	0.403
	-19	40	110	0.412

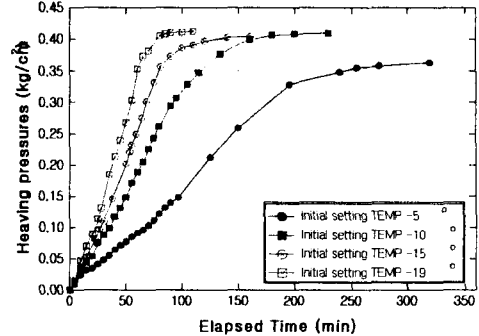
##### 4.2 설정 온도에 따른 동상팽창압의 변화

그림 4.2는 설정온도에 따른 동상팽창압의 변화를 나타내고 있다. 측정 결과, 온도가 낮을수록 팽창압은 증가하는데, 영하 19℃를 기준으로 최대팽창압을 살펴보면, 화강풍화토는 3.603kg/cm<sup>2</sup>, 모래질 흙은 0.405kg/cm<sup>2</sup>을 나타내었다. 또한, 초기 설정온도가 영하 5℃와 19℃일 때 최대팽창압의 차이는 각

각 화강풍화도가 2.278kg/cm<sup>2</sup>이고, 모래질 흙은 0.184kg/cm<sup>2</sup>의 차이를 나타내고 있다. 이 결과들은 동결도 안에 잠재되어 있는 부동수분량의 영향으로 사료된다. 이 실험결과는 Makay(1975) 및 McRoberts and Mogenstern(1972)가 제안한 작은 비표면적을 갖고 있는 조립토는 물분자에 대하여 별다른 영향은 없으므로, 동상팽창압은 상대적으로 작은 값을 나타낸다는 사실과 일치한다.

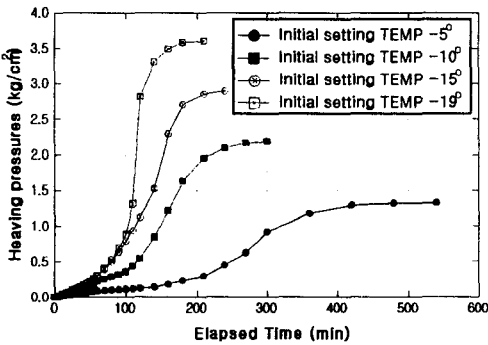


(a) 화강풍화토

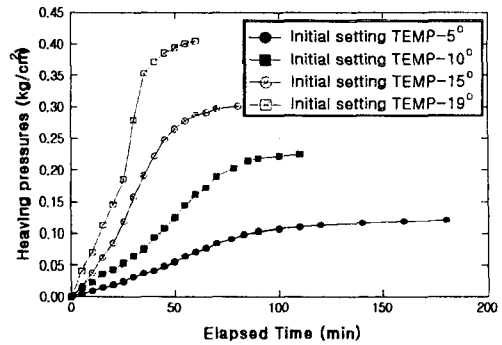


(b) 모래질 흙

그림 4.1 시간변화에 따른 동상팽창압의 변화



(a) 화강풍화토



(b) 모래질 흙

그림 4.2 초기 설정온도에 따른 동상팽창압의 변화

### 4.3 포화도에 따른 동상팽창압의 변화

포화도에 따른 동상팽창압의 변화를 알아보기 위하여 포화도가 100%, 90%, 80%, 그리고 60%인 화강풍화토를 영하 19°C로 설정하여 단계적으로 온도를 변화시켜 동상실험을 측정하였으며, 그 결과는 그림 4.3에 나타내었다. 그림 4.4는 포화도를 초기함수비로 환산하여 나타낸 그래프이다. 그림에 나타낸 바와 같이 포화도가 최적함수비 상태보다 클 경우에 영하의 온도 지속시간이 길고 온도가 낮을 수록 동상팽창압은 증가하며, 포화도가 증가할수록 동상팽창압은 더 크게 증가하고 있다.

최적함수비 상태의 포화도를 나타내는 함수비 이하에서는 동상팽창압의 변화는 나타나지 않았다. 이는 낮은 포화도에 대한 조건일 경우, 간극안에서 얼음의 크기는 주위 토립자에 변위를 일으킬 만큼은 충분하지 않고 토립자의 용적수축으로 부간극수압이 증가함에 따라 동결토체의 체적감소를 일으키기 때문으로 사료된다. 그림 4.3에 나타낸 바와 같이 포화도 90%와 100%일 때의 동상팽창압의 증가율은 49%정도 증가된 것을 알 수 있다. 따라서, 안정된 동결전선이 형성되어 Ice segregation 현상이 발생하게 되어 팽창압력으로 인한 거대한 얼음렌즈를 형성하게 되는 것이다.

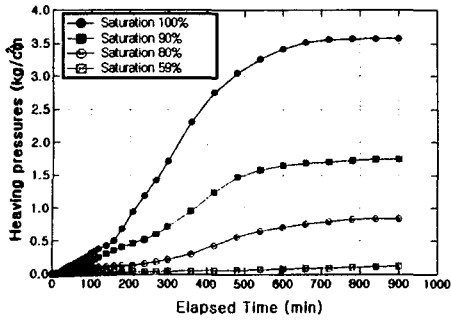


그림 4.3 포화도에 따른 동상팽창압의 변화

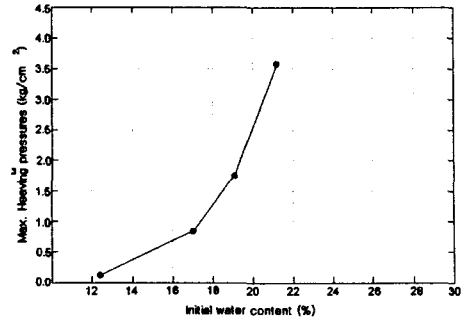


그림 4.4 초기함수비에 따른 최대 동상팽창압

#### 4.4 동결융해후의 물리적 특성 변화

동결과 융해로 인한 흙의 특성 변화로 흙의 강도, 구조적인 변화 등으로 주변에서 많은 피해 사례들이 나타나고 있다. 봄철 해빙 후에 철도 사면의 붕괴, 도로 포장면 균열의 발생, 동상작용에 의한 맨홀의 융기 등 각종 토질 구조물에 대한 역학적 성질의 변화를 초래하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 현상을 실험적으로 규명하기 위하여 실내에서 흙의 동결 상태와 융해 상태를 인위적으로 반복하여 이들 결과를 상호 비교 분석하였다.

##### 4.4.1 동결융해 후의 액성한계와 일축압축강도의 변화

그림 4.5는 액성한계와 동결융해 반복회수와의 관계를 표시한 것으로, 각각의 시료는 첫번째의 동결융해에서 액성한계가 가장 크게 감소되고 반복회수 4회 이상으로 계속되면 서서히 감소하여 8회 이상으로 되면 거의 변화되지 않고 있다. 대체적으로 동결융해 반복작용으로 액성한계가 9%정도 감소된 결과를 나타내었다.

흙의 동결융해에 따른 일축압축 특성의 관계를 그림 4.6에 나타내었다. 비동결토에서의 화강풍화토의 일축압축강도는 0.817kg/cm<sup>2</sup>를 나타내었다. 동결융해 반복회수 1회에서는 18%의 강도가 감소하여 강도 저하의 차이는 크게 발생하였고, 동결융해가 4회 이상 되면 강도는 거의 변화가 없었다. 또한, 동결융해토가 부동토에 비하여 파괴강도를 나타내는 부분에서 완만한 곡선을 보이고 있는데, 이는 얼음렌즈의 성장으로 인한 흙의 구조 변화와 동결 중에 성장된 얼음렌즈로 인한 흠착수막이 얇아져 입자간의 전기적 포텐셜이 저하, Ice segregation 작용으로 토립자 사이의 간극이 증대로 시료 내부에 미세한 균열의 발생으로 사료된다.

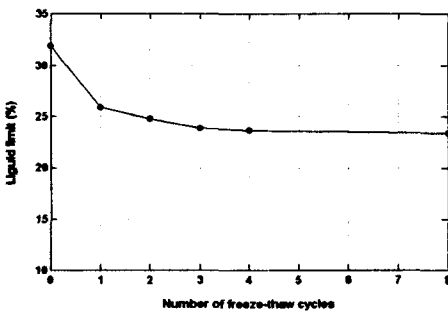


그림 4.5 액성한계와 동결융해 반복 회수와의 관계

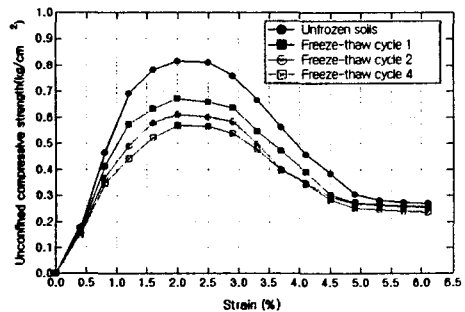


그림 4.6 동결융해 반복회수에 따른 압축강도와 변형률의 관계

#### 4.4.2 SEM 촬영을 통한 흙의 구조적 변화

본 실험은 화강풍화토에 대하여 1,000배율로 동일하게 SEM 촬영을 하였다. 동결전과 동결융해 후의 시료에 대해서는 시료를 건조시킨 상태로 촬영을 실시하였다. 촬영 시 사진 선택에 대한 불확실성이 있어 여러 개의 사진을 찍어 선택한 후 다음의 그림 4.7과 같이 나타내었다.

흙의 입자구조를 정성적으로 SEM에 의하여 분석한 결과, 동결융해에 의하여 흙의 구조는 면모구조에서 분산구조로 이행되었고, 특히, 실험 중 반복된 압력으로 인한 클러스터의 충돌에 의하여 입자구조의 분리 및 붕괴로 랜덤배열성을 확인할 수 있었다.

흙이 동결융해된 상태의 구조는 정향배열을 한 분산구조를 나타내고 있다. 면모구조인 배열에서는 입자 모서리-면(edge-face)의 거리가 매우 접근(10A)되어 있으므로 매우 큰 결합력을 발휘하는 환결합을 이루며, 압력이 작용되면 환결합의 구조성은 증가되나, 흙-간극수 체계의 상태가 일시적으로 붕괴되어 압축성은 증가되고, 구조성이 감소됨을 알 수 있다.



(a) 동결전의 입자구조      (b) 동결융해후의 입자구조 (1 cycle)      (c) 동결융해후의 입자구조 (4 cycle)

그림 4.7 동결융해 전후의 SEM 촬영에 의한 화강풍화토의 입자구조

#### 4.4.3 동결융해후의 투수계수 변화

시험 방법은 준비된 공시체에 상부에는 'O' 링으로 밀폐시키고, 하부는 다공판을 삽입하였다. 이 후 삼축시험장치에 연결하여 0.5kg/cm<sup>2</sup>의 배압을 가하여 시료를 포화시켰다.

동결융해 반복회수에 따른 투수계수는 초기상태의 투수계수보다 반복횟수가 증가할수록 커지는 경향을 나타내고 있다. 표 4.2와 그림 4.8에 나타낸 바와 같이 반복회수가 5cycle 이후의 투수계수는 동결융해 반복실험 전 초기값에서 화강풍화토는 54.7배, 모래질 흙은 17.2배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 반복실험을 계속 실시한다면 Chamberlain과 Gow(1979)가 제시한 바와 같이 투수계수는 더 이상 증가하지 않고 일정한 값으로 수렴할 것으로 사료된다. 따라서, 균열에 의한 국부적인 부등침하를 초래하여 구조물에 큰 영향을 미칠 수 있다.

표 4.3 동결융해 반복에 따른 투수계수의 증가

토사종류		반복회수			
		부동토	1 cycle	3 cycle	5 cycle
화강 풍화토	투수계수 (cm/sec)	$2.0 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-6}$	$2.4 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-4}$
	$\frac{K_{cycle}}{K_{initial}}$	1.0	1.3	11.8	54.7
모래질 흙	투수계수 (cm/sec)	$2.1 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$3.6 \times 10^{-3}$
	$\frac{K_{cycle}}{K_{initial}}$	1.0	1.2	4.9	17.2

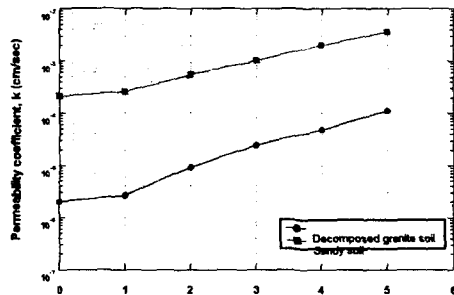


그림 4.14 동결융해 반복회수에 따른 투수계수의 변화

## 5. 결론

본 연구에서는 철도노반재료로 사용되어지고 있는 화강풍화토와 모래질 흙에 대하여 동상팽창압 실험과 물리적 특성 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터, 시간과 온도변화, 그리고, 포화조건에 따른 동상팽창압 특성과 동결융해후의 물리적 특성에 대한 값을 도출하였다.

1. 시간에 따른 최대 동상팽창압 실험결과, 화강풍화토는  $3.549\text{kg/cm}^2$ , 모래질 흙은  $0.397\text{kg/cm}^2$ 으로서 세립분을 많이 함유할수록 발휘되는 동상팽창압은 우세하게 나타났다.
2. 화강풍화토에 대하여 포화도에 따른 최대 동상팽창압 실험결과, 각각의 포화도에 대하여 최대 동상팽창압은 0.121, 0.839, 1.744,  $3.576\text{kg/cm}^2$ 으로 나타났다. 이 때, 포화도 90%와 100%일 때의 팽창압 증가율이 가장 크게 나타났는데, 이는 이 단계에서 안정된 동결전선이 형성되어 Ice segregation 현상이 발생되어 팽창압력으로 인한 얼음렌즈를 형성되는 과정으로 판단된다.
3. 동결융해 반복회수에 따른 액성한계시험 결과, 각각의 시료는 첫번째의 동결융해에서 액성한계가 크게 감소되고, 반복회수 4회 이상되면 서서히 감소하여 8회 이상 되면 거의 변화되지 않고 있다. 또한, 일축압축 시험결과, 부동토에서의 일축압축강도는 화강풍화토의 경우,  $0.817\text{kg/cm}^2$ 로 나타났고, 동결융해 반복회수 1회에서 감소율이 18%로서 가장 큰 감소율을 나타내었다.
4. 흙의 입자구조를 SEM에 의하여 분석한 결과, 동결융해에 의한 흙의 구조는 면모구조에서 분산구조로 변화된 것을 관찰할 수 있었고, 실험 중 반복된 압력으로 인한 입자간 충돌에 의하여 입자구조의 분리 및 붕괴로 랜덤배열성을 확인할 수 있었다.
5. 동결융해에 따른 투수계수 시험 결과, 반복회수가 5회 이후의 투수계수는 동결융해 반복실험 전 초기값에서 화강풍화토는 54.7배, 모래질 흙은 17.2배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 동결융해 반복에 따른 토립자의 이합 및 균열이 발생되어 흐름의 저항성을 감소시켜 투수성이 증가되는 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 신은철, 박정준, 김종인(2002), 흙의 동상민감성과 포화도를 고려한 동상팽창압 특성, 한국지반공학회 봄학술발표회논문집, 한국지반공학회, pp. 329~336.
2. Andersland, O. B. and Ladanyi, B.(1994), *An Introduction to Frozen Ground Engineering*, Chapman & Hall.
3. Chamberlain, E. J. and Gow, A.(1979), Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils, *Engineering Geology*, Vol. 13, pp. 73~92.
4. Hoekstra, P., Chamberlain, E. and Frate, A.(1965), "Frost heaving pressures", *Cold Region Research Engineering Laboratory*, Report 176.
5. Yong, R. N. and Warkentin, B. P.(1975), *Soil Properties and Behaviour*, Elsevier Scientific Publishing Company, Chapter 11. Soil Freezing and Permafrost, pp. 383~419.