

## 흙의 동상민감성과 포화도를 고려한 동상팽창압 특성

### Frost Heaving Pressure Characteristics of Frozen soils with Frost-Susceptibility and Degree of Saturation

신은철<sup>1)</sup>, Eun-Chul Shin, 박정준<sup>2)</sup>, Jeong-Jun Park, 김종인<sup>2)</sup>, Jong-In Kim

<sup>1)</sup> 인천대학교 토목환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, University of Incheon

<sup>2)</sup> 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사과정, Ph. D. Student, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, University of Incheon

**SYNOPSIS** : The earth structures and in-ground LNG tank, and buildings can be constructed with using artificial freezing method on the reclaimed land. In this study, upon freezing a saturated soil in a closed-system from the top, a considerable pressure was developed. The pressure is the result of the surface energy of a curved ice-water interface. The most significant of these parameters will have the greatest effect on the classification. In order to establish frost-susceptibility criteria based on frost heaving expansion pressure, more soils have to be tested.

This study was initiated to investigate the soils frost heaving expansion pressure and moisture characteristics resulting from freezing and freezing-thawing cycle process. Weathered granite soils, silty soil, sandy soil were used in the laboratory freezing test subjected to thermal gradients under closed-systems.

**Key words** : Frost heaving pressure, Closed-system, Degree of saturation, Silty soil, Sandy soil, Weathered granite soil

## 1. 서 론

최근 우리나라는 산업화 및 기술의 현대화로 국토의 유효면적이 인구에 비해 작기 때문에 대규모 공유수면을 매립하여 매립지반에 지반 구조물을 건설하는 경우가 늘고 있다. 지하구조물 설치를 위한 연약지반의 동결, LNG와 같은 저온 액체를 저장하기 위한 지하저장탱크 건설 및 주변지반의 동결 등 인공동결 공법이 시도되고 있다. 따라서, 해안매립지반에 건설공사 수행 시 지반동결과 관련하여 예상되는 지반공학적 특성들을 분석하고, 이에 따른 기술적 해결방안의 밑거름이 될 수 있는 연구성과를 제시하여 향후 해안매립지반의 개발 사업 수행 시 기초자료로 활용될 수 있도록 해야 할 것이다.

또한, 연약지반 보강공법의 하나인 인공동결공법을 적용하고자 할 때 보다 더 신뢰성 있는 기준을 평가하기 위해서 각각의 흙에 대한 동상 민감성과 비민감성 흙에 대한 정의가 제시되어야 한다. 또한, 각각의 흙에 나타나는 변수를 기초로한 경계조건을 반드시 수립하여야 한다. 이 변수들의 가장 큰 특성값들은 대부분 통일분류법을 통한 입도분포가 가장 큰 변수로 나타나고 있다.

본 연구에서는 우리나라 전지역에 널리 분포된 화강풍화토와 인천지역 해안 매립지반의 대부분으로 구성되어 있는 모래질 흙과 실트질 흙에 대한 토질 및 기초공학적인 기본 성질을 제시하였다. 그리고, 동상민감성 기준을 기초로하여 기존에 제시된 동상과 관련된 실험을 통하여 단일방향으로 흙이 동결 될

때 함수비에 지배되는 결과와 더불어 시간과 온도변화에 대한 동상팽창압을 연관시켜 본 실험을 수행하였다. 그 결과, 동상팽창압을 보다 더 용이하게 측정할 수 있었고, 각각의 흙마다 다른 특성을 나타내고 있었다.

## 2. 동결토의 동상압과 수분 특성

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 제시하였고, 간극 크기의 특성은 투수계수와 모관력과 같은 흙의 특성과 관련이 있다고 발표하였다. 즉,  $P_{iw}$ 는 얼음과 물 경계면의 압력으로 동결시 평면의 곡선에 의존하게 되며, 얼음과 물 사이의 계면에너지와 관계된 상수로서 다음과 같이 관계식을 유도하였다.

$$P_{iw} = \Delta P = \sigma_{iw} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.1)$$

여기서,  $\sigma_{iw}$ 는 얼음과 물 사이의 계면에너지이고,  $r_1$ 과  $r_2$ 는 경계면 곡선의 주 반경이다.

Mckyes(1966)와 Yong(1975)은 Ice segregation으로 인한 동상압을 계산하기 위해서 균일한 3차원 형상을 예측한 기하학적인 모델을 사용하여 Maxwell의 열동역학 관계로 간극에 존재하는 얼음과 물 사이의 관계식을 유도하였다.

$$\Delta T = \frac{2\sigma_{iw}T}{\rho_i L r} \quad (2.2)$$

여기서,  $\rho_i$ 는 얼음의 밀도,  $\Delta P$ 는  $2\sigma_{iw}/r$ ,  $\sigma_{iw}$ 는 얼음과 물의 경계면간의 에너지,  $r$ 은 곡면의 반경,  $L$ 은 잠열,  $\Delta T$ 는 곡면상에서 변화되는 동결점이다.

동결토의 수분특성의 결정요인인 부동수분량은 전체함수비에 대한 부동수의 비율로서 동결온도, 점토함유율, 전해농도, 토립자의 구조, 포화도, 흙입자의 다짐정도, 자연함수비 등에 영향을 받는다.

Finn and Yong(1978)에 의하면 동결토는 광물입자, 얼음, 부동수, 용해된 염기, 수증기, 다른 가스 등으로 구성되어져 있고, 광물입자는 부동수의 양극 분자에 따른 정전기와 전기분자력을 통한 부동수에 상당한 영향이 있다고 제시하였다. 점토와 같이 비표면적이 큰 흙은 입자 표면의 양극수 분자와 주위에 수화물 혹은 교환가능한 이온들이 차지하는 수분층이 물을 흡수하여 동결점 이하의 지속적인 감소로 동결면에서 얇은 막이 형성된다고 발표하였다.

Cary and Mayland(1972)에 의하면 부동수는 동결된 세립토의 거동측면에서 살펴보면, 온도 보다 더 기본적인 변수로서, 토립자와 물분자 사이에서 상호 작용하는 동결된 간극수의 체적증가가 축적되어서 더욱 큰 체적변화와 Ice segregation이 발생하게 된다고 제시하였다.

## 3. 실험방법

### 3.1 시료의 공학적 특성

본 연구에서는 해안매립지반에 널리 분포되어 있고, 동상에 민감한 반응을 보이는 실트질 흙과 동상에 큰 영향을 받지 않는 모래질 흙, 그리고 건설공사시 많은 부분에 대해 활용되고 있는 화강풍화토에 대하여 동상팽창압과 함수비 특성에 대한 실험을 실시하였다. 사용된 시료는 인천 LNG 인수기지 현장에서 채취한 시료로서 공시체는 매립지반의 특성상 지하수위가 지표면에 위치한 것을 감안하여 각각의 포화도에 따라 실시하였다. 다음에 제시된 표 3.1은 각각의 시료에 대한 공학적 특성을 나타낸 것으로서 시험방법은 한국공업규격에 명시된 표준시험방법에 의거하여 실시하였다.

표 3.1 시료의 공학적 특성

공학적 특성	실험 결과		
	화강풍화토	실트질 흙	모래질 흙
자연 함수비, $\omega_n$ (%)	16.47	26.4	17.18
비중, $G_s$	2.66	2.67	2.65
LL(%)/ PI	31.9/NP	24.3/NP	- / NP
$v_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )/ $\omega_{opt}$ (%)	1.89/12.4	1.71/16.3	1.95/11.1
투수계수, $k$ (cm/sec)	$2.0 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-5}$	$2.1 \times 10^{-4}$
No. 200체 통과량(%)	38.5	75.2	7.8
통일분류법에 의한 분류(USCS)	SM	ML	SP

### 3.2 실험장치 및 장비

본 연구에서 사용된 동결융해 시험기는 그림 3.1에 나타난 바와 같이 실험장치는 직경10cm, 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, 알루미늄 디스크 위에 밀착시켜 로드셀을 반력지지대에 대하여 지지됨과 동시에 시료를 구속시킬 수 있도록 하였다. 또한, 몰드 내부에는 그리스를 발라서 마찰력을 최소화시켰고, 냉각기를 통해 단일 방향으로의 동결을 진행시켜서 동결 조절을 적절하게 진행시켰다. 시료가 동결되면서 발휘되는 압력은 로드셀로 측정되어진다. 이 측정된 값은 자동수집장치로 나타내어진다. 동결 온도는 동상실험기 내부에 설치되어 있는 Thermometer와 시료내부의 상부, 중부, 하부로 나누어 설치한 Thermocouple로 측정하였다.

또한, 시료의 수분특성은 TDR(time domain reflectometry)을 이용하여 측정하였다. 유전상수는 TDR 장비를 이용하여 다공매체를 통한 전자파의 전달속도로부터 결정된다. TDR 장비는 빠른 전압을 제공하는 파형발생기가 높은 빈도의 신호를 낮은 빈도로 전달하는 샘플러를 통하여 오실로스코프나 자동기록장치로 나타나는 장비이다. 이 TDR 장비는 이 신호를 단계적으로 보내어 전달선 길이와 전송시간을 측정하는 장비이다(Topp et al., 1980; Patterson and Smith, 1980). TDR 장비는 독일의 IMKO사 제품(Trime FM-version P3)으로서, 그림 3.2에 나타난 바와 같이 측정용 probe를 동토 속에 넣고, 시험기 내에서 전자파를 발생시키면 전자파는 probe의 길이를 따라 이동하는 전자파의 속도를 계산함으로써 흙의 유전율 상수를 측정하게 된다. 동토를 구성하는 요소인 토립자, 얼음, 간극수, 공기 등의 유전율이 서로 다른 원리를 이용하여 동토의 체적함수비(부동수분량)를 환산해 낸다.

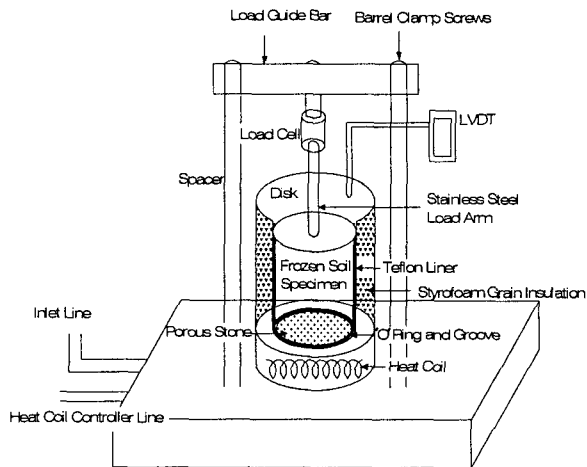


그림 3.1 동상실험에 사용된 몰드의 모식도

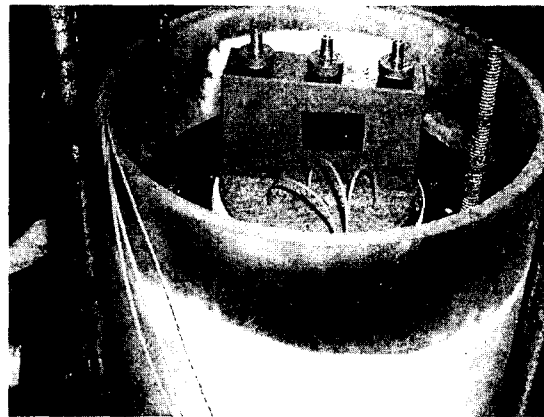


그림 3.2 TDR Probe의 삽입 전경

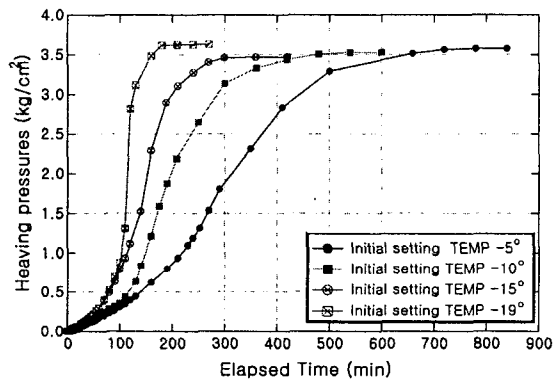
## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 시간과 온도 변화에 따른 동상팽창압의 변화

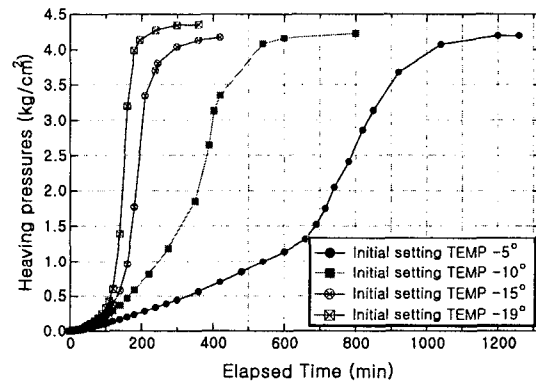
본 연구에서 수행한 일차원 동상실험에 따른 동상팽창압 측정 결과, 동결온도 지속시간에 따른 동상팽창압의 변화는 표 4.1과 같이 도출되었으며, 동상팽창압 변화 곡선은 그림 4.1에 나타낸 바와 같다. 실험은 초기온도를 각각 설정한 다음, 단계적으로 온도를 변화시켜 가며 측정된 것으로서, 해당 온도에서 팽창압의 변화가 일정하게 유지될 때, 온도를 더 하강시켜 연속된 팽창압의 변화를 측정하였다.

표 4.1 토사종류와 시간변화에 따른 동상팽창압의 변화

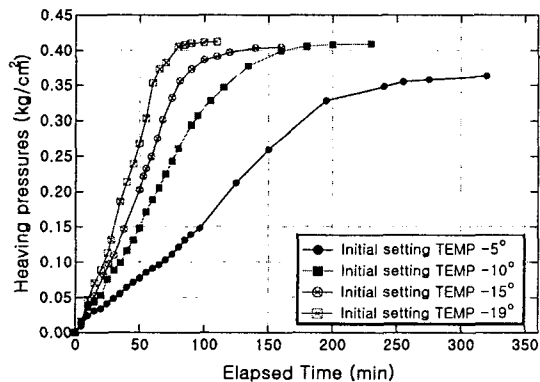
토사 종류	설정온도(°C)	동상팽창압 발현시점까지의 시간 (min)	동상지속시간 (min)	최대동상팽창압 (kg/cm <sup>2</sup> )
화강풍화토	-5	400	780	3.574
	-10	180	540	3.526
	-15	130	320	3.471
	-19	70	230	3.624
실트질 흙	-5	530	1220	4.197
	-10	340	760	4.228
	-15	270	420	4.173
	-19	200	360	4.349
모래질 흙	-5	70	320	0.363
	-10	50	200	0.408
	-15	45	140	0.403
	-19	40	110	0.412



(a) 화강풍화토



(b) 실트질 흙



(c) 모래질 흙

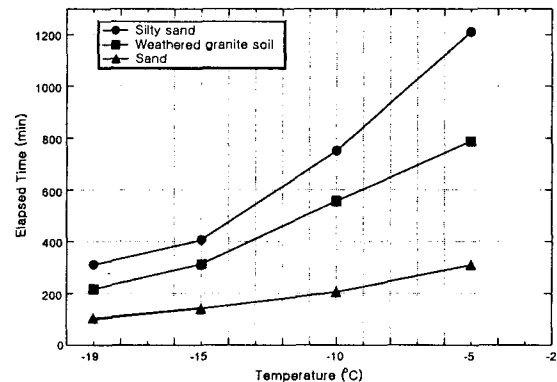


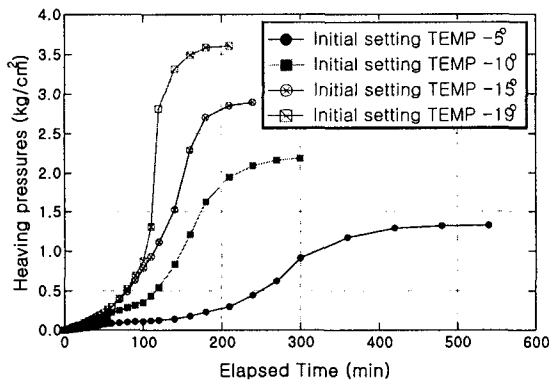
그림 4.2 초기 설정온도에 따른 동상지속시간의 변화

그림 4.1 시간변화에 따른 동상팽창압의 변화

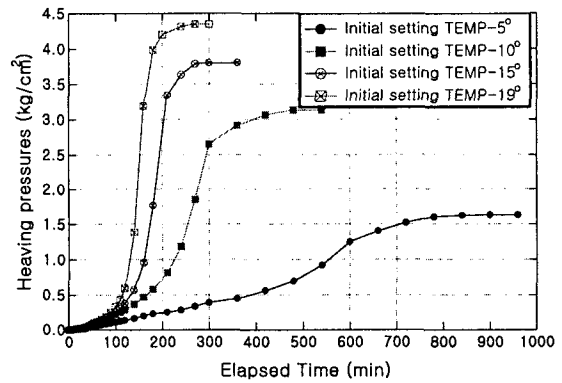
그림에 나타난 바와 같이 세립분을 많이 함유할수록 동상이 발생되기까지의 시간과 동상 지속시간이 더 크게 나타나고 있다. 또한, 그림 4.2는 초기설정온도에 따른 동상지속시간을 나타낸것으로서 영하 5℃를 기준으로 화강풍화토는 780분, 실트질 흙은 1220분, 모래질 흙은 320분으로 나타났다. 이 때 발휘된 최대 동상팽창압은 화강풍화토의 경우 3.549kg/cm<sup>2</sup>, 실트질 흙은 4.237kg/cm<sup>2</sup>, 모래질 흙은 0.397kg/cm<sup>2</sup>으로서 세립분을 많이 함유할수록 발휘되는 동상팽창압은 우세하게 나타났다. 특히, 실트질 흙의 경우, 상부에 알루미늄 디스크를 로드셀과 분리하여 시료표면에서 자유로운 상태로 동상을 허용한 결과, 14mm로 동상팽창량이 증가되었다. 즉, 시료 표면에서는 균일하지 않은 상태로 동상량이 발생한 사실로 미루어 보아 입자사이에서 팽창압력이 가장 작게 저항하는 방향으로 그 힘이 발휘되는 것으로 판단된다.

#### 4.2 설정 온도에 따른 동상팽창압의 변화

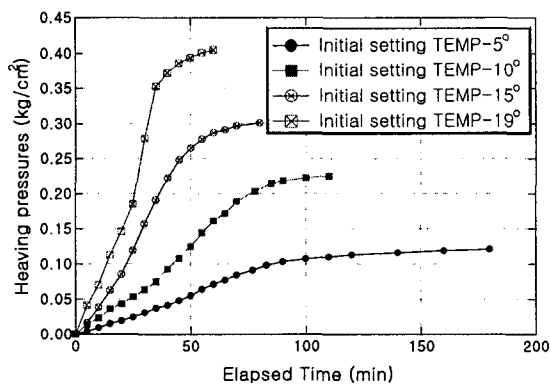
그림 4.3과 그림 4.4는 설정온도에 따른 동상팽창압과 최대동상팽창압의 변화를 나타내고 있다. 측정 결과, 온도가 낮아질수록 팽창압은 증가하는데, 영하 19℃를 기준으로 최대팽창압을 살펴보면, 실트질 흙은 4.346kg/cm<sup>2</sup>, 화강풍화토는 3.603kg/cm<sup>2</sup>, 모래질 흙은 0.405kg/cm<sup>2</sup>을 나타내었다. 특히, 앞선 실험과 일치시켜 분석하면, 초기온도를 영하 5℃와 영하 10℃로 설정하였을 때, 동상팽창압은 지속적으로 증가하다가 일정하게 유지된 후, 온도를 더 하강시키면 팽창압은 상당히 증가하는 양상을 나타내었다. 한편, 초기온도를 영하 15℃, 19℃로 설정한 경우에는 영하 5℃, 10℃로 설정된 실험결과와는 다르게 기온기가 더욱 급하게 팽창압이 증가하다가 일정하게 유지될 때, 온도를 더 하강시키더라도 거의 큰 변화없이 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있었다. 이는 동결토안에 아직 얼지 않은 부동수의 영향으로 사료된다. 따라서 동상팽창압 측정 이후 부동수분량을 측정하여 제시하기로 하였다.



(a) 화강풍화토



(b) 실트질 흙



(c) 모래질 흙

그림 4.3 설정온도에 따른 동상팽창압의 변화

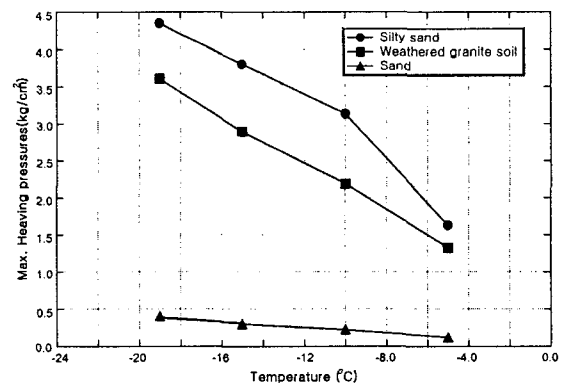


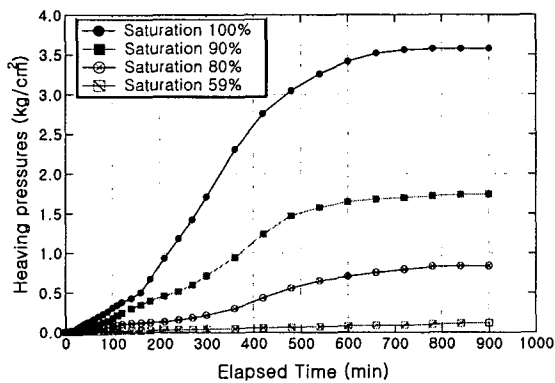
그림 4.4 설정온도에 따른 최대 동상팽창압

실험 결과를 살펴보면, 토립자는 수분의 손실과 얼음렌즈의 성장으로 인해 그 변위가 발생하게 되고, 열 전달은 본질적으로 한 방향으로 전달되기 때문에 얼음 결정체는 열 손실 방향의 수평방향으로 렌즈 모양을 형성하는 것을 알 수 있었다. 이는 토립자에 접해 있는 간극에 수분이 많을수록 그 주변간극으로부터 얼음렌즈로 진행되는 자유수는 더 많아지는 것을 의미한다. 또한, 초기 설정온도가 영하 5℃와 19℃일 때 최대팽창압의 차이는 각각 화강풍화토가 2.278kg/cm<sup>2</sup>이고, 실트질 흙은 2.719kg/cm<sup>2</sup>, 모래질 흙은 0.184kg/cm<sup>2</sup>의 차이를 나타내고 있다. 이는 앞에서 기술한 바와 같이 동결토 안에 잠재되어 있는 부동수분량의 다소를 설명할 수 있고, 부동수가 동상에 큰 영향을 미친다는 것을 충분히 알 수 있었다.

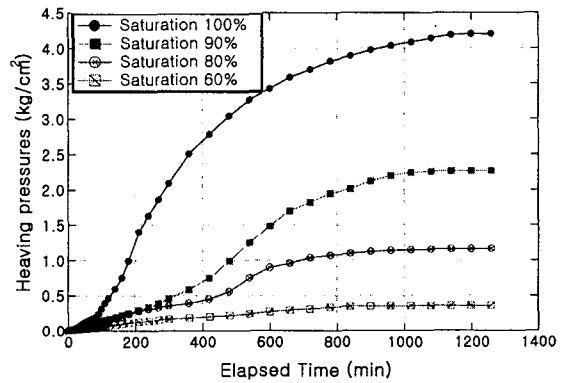
이 실험결과는 Makay(1975) 및 McRoberts and Mogenstern(1972)가 제안한 작은 비표면적을 갖고 있는 모래와 자갈 같은 조립토는 물분자에 대하여 별다른 영향은 없으므로, 동상팽창압은 상대적으로 작은 값을 나타낸다는 사실과 일치한다. 또한, Hoekstra and Chamberlain(1965)가 제안한 정상적인 방법으로 준비된 시료의 하부를 구속시킨 상태에서 상부에서 하부로 동결을 진행시킨 결과, 실험에 나타난 결과 값과 미국 CRREL 실트와 유사한 값을 나타내고 있다.

### 4.3 포화도에 따른 동상팽창압의 변화

포화도에 따른 동상팽창압의 변화를 알아보기 위하여 포화도가 100%, 90%, 80%, 그리고 60%인 흙 시료를 영하 19℃로 설정하여 단계적으로 온도를 변화시켜 동상실험을 측정하였으며, 그 결과는 그림 4.5에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 포화도가 최적함수비 상태보다 클 경우에 영하의 온도 지속시간이 길고 온도가 낮을 수록 동상팽창압은 증가하며, 포화도가 증가할수록 동상팽창압은 더 크게 증가하고 있다.



(a) 화강풍화토



(b) 실트질 흙

그림 4.5 포화도에 따른 동상팽창압의 변화

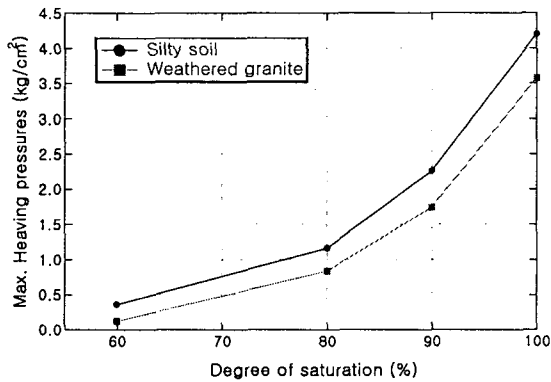


그림 4.6 포화도에 따른 최대 동상팽창압

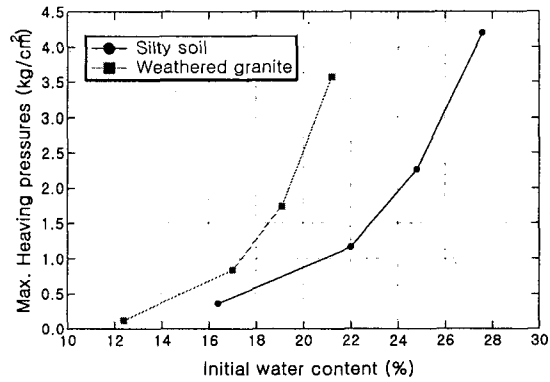


그림 4.7 초기함수비에 따른 최대 동상팽창압

최적함수비 상태의 포화도를 나타내는 함수비 이하에서는 동상팽창압의 변화는 나타나지 않고, 오히려 수축하는 상태를 나타내었다. 이러한 현상은 기존의 Taber가 제시한 실험결과와 마찬가지로 함수비가 낮은 상태일 때는 온도가 낮아질수록 토립자의 용적이 수축하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 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 4.6에 나타낸바와 같이 포화도 90%와 100%일 때의 동상팽창압의 증가율은 화강풍화토가 49%, 실트질 흙은 54%정도 증가된 것을 알 수 있다. 따라서, 동결영역으로 수분이 계속 공급된다면, 포화도 90%단계를 통과하여 간극은 100%의 얼음으로 포화되는 단계가 된다. 이 때, 안정된 동결전선이 형성되어 Ice segregation 현상이 발생하게 되어 팽창압력으로 인한 거대한 얼음렌즈를 형성하게 되는 것이다. 그림 4.7은 포화도를 초기함수비로 환산하여 나타낸 그래프이다.

#### 4.4 TDR을 이용한 부동수분 측정

동결된 시료의 부동수분량을 결정하기 위해서는 TDR 장비를 이용하여 실험을 수행하였다. 그림 4.8은 TDR 장비에 읽히는 체적함수비 값이고, 그림 4.9는 체적함수비를 중량함수비로 환산한 값이다.

그림에 나타낸 바와 같이 세립분을 많이 함유하고 있는 실트질 흙과 화강풍화토는 모래보다 많은 부동수분량이 존재함을 알 수 있다. 또한, 실트질 흙과 화강풍화토를 비교하였을 경우, 동상팽창압 곡선과 마찬가지로 수분곡선 감소율이 초기단계에는 유사하다가 일정온도 이후에는 실트질 흙의 감소폭이 크게 증가하는 것을 나타내고 있다. 이는 팽창압 곡선에서 실트질 흙이 화강풍화토 보다 잠재되어져 있는 부동수분량 존재가 많은 것을 나타내고, 더 큰 팽창압을 보이는 것을 알 수 있다.

즉, 영하 5°C를 기준으로 감소율을 살펴보면, 화강풍화토는 68.6%, 실트질 흙은 68%, 모래질 흙은 87.5%의 감소율을 나타내었다. 따라서, 온도의 범위가 0°C ~ -5°C 범위에서 전체 부동수분량의 68% 이상이 변화되는 양상을 알 수 있다. 또한, 영하 5°C를 기준으로 화강풍화토와 실트질 흙은 모래질 흙보다 부동수분량이 많은 것을 나타냈는데, 이는 비표면적이 큰 세립분을 많이 함유하고 있다는 결과로서, 동결된 간극수의 체적증가가 축적되어서 더욱 큰 체적변화와 Ice segregation이 발생하게 되어, 부동수분량이 많은 흙일수록 동상팽창압도 커지는 것으로 사료된다.

Topp et al.(1980)이 제시한 방법과 유사한 실험 결과로서, 동결 특성 곡선 즉, 부동수분량과 온도와의 관계는 온도가 저하됨에 따라 부동수분량도 감소하는 것을 알 수 있었다.

따라서, 동토중에는 부동수분량이 존재하며, 부동수분은 흙의 동상과정에서 중요한 역할을 하게 되고, 아울러 동토중의 부동수분량은 온도가 낮아질수록 감소하는 것을 알 수 있었다.

흙의 부동수분량은 흙의 종류에 따라 다르며, 동상팽창압의 크기와 관련이 있다. 즉, 흙의 동결과정에서 토립자를 둘러싼 부동수막은 수분이 동결점까지 이동하는 통로 역할을 하므로 부동수분량이 많은 흙일수록 동상압도 커지게 되는 것이다.

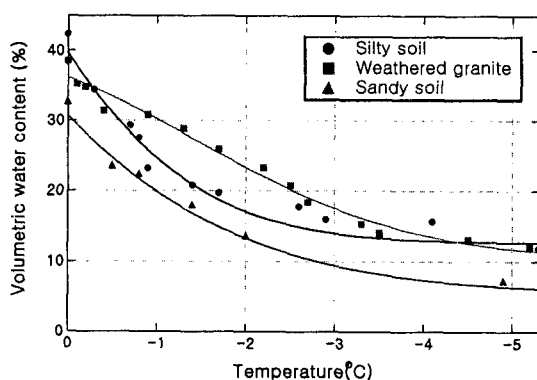


그림 4.8 온도와 체적함수비와의 관계

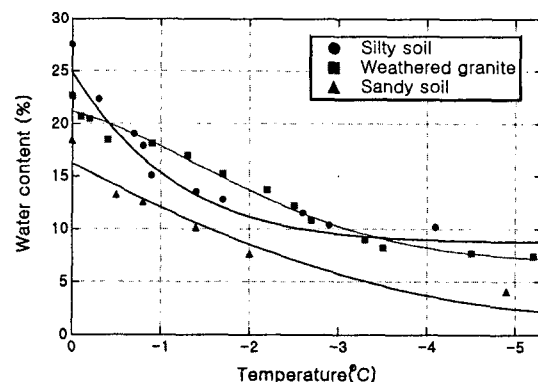


그림 4.9 온도와 함수비의 관계

## 5. 결론

본 연구에서는 해안매립지반에 구성되어 있는 실트질 흙과 모래질 흙, 그리고 노상토용 건설재료로 사용되고 있는 화강풍화토에 대하여 동상팽창압 실험과 수분 특성 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터, 시간과 온도변화, 그리고, 포화조건에 따른 동상팽창압 특성과 동상팽창압 거동의 근거를 제시하는 수분 특성 값을 도출하였다.

1. 시간에 따른 최대 동상팽창압 실험결과, 화강풍화토는  $3.549\text{kg/cm}^2$ , 실트질 흙은  $4.237\text{kg/cm}^2$ , 모래질 흙은  $0.397\text{kg/cm}^2$ 으로서 세립분을 많이 함유할수록 발휘되는 동상팽창압은 우세하게 나타났다.
2. 세립분을 많이 함유할수록 동상이 발현되기까지의 시간과 동상 지속시간이 더 크게 나타났다. 즉, 실트질 흙, 화강풍화토, 모래질 흙 순으로 지속시간이 크게 도출되었다. 또한, 화강풍화토와 실트질 흙은 모래질 흙에 비해 초기 지속시간이 크게 나타나고 있다.
3. 동상실험을 완료한 후, 실트질 흙에 대하여 동상 물드 상부의 알루미늄 디스크를 로드셀과 분리시킨 결과, 시료의 상부 표면에 균일하지 않은 상태로 14mm의 동상팽창량이 발생하였다. 이는 입자사이에서 팽창압력이 가장 작게 저항하는 방향으로 그 힘이 발휘된 것으로 판단된다.
4. 각각의 토사에 대하여 포화도에 따른 최대 동상팽창압 실험결과, 포화도 60%, 80%, 90%, 100%에 대하여 화강풍화토의 최대 동상팽창압은 0.121, 0.839, 1.744,  $3.576\text{kg/cm}^2$ 으로 나타났다. 실트질 흙의 최대 동상팽창압은 0.359, 1.163, 2.267,  $4.199\text{kg/cm}^2$ 으로 도출되었다. 이 때, 포화도 90%와 100%일 때의 팽창압 증가율이 가장 크게 나타났는데, 이는 포화도 90% 단계를 통과하여 간극은 100%의 얼음으로 포화되는 단계에서 안정된 동결전선이 형성되어 Ice segregation 현상이 발생됨으로서 팽창압력으로 인한 거대한 얼음렌즈를 형성되는 과정으로 판단된다.
5. TDR 장비를 이용한 부동수분 측정 결과, 각각의 시료는 온도가 낮아질수록 부동수분량이 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 영하 5°C를 기준으로 감소율을 살펴보면, 화강풍화토는 68.6%, 실트질 흙은 68%, 모래질 흙은 87.5%의 감소율을 나타내었다. 이는 비표면적이 큰 세립분을 많이 함유하고 있다는 결과로서, 동결된 간극수의 체적증가로 인한 체적변화와 Ice segregation이 발생하게 되어, 부동수분량이 많은 흙일수록 동상팽창압도 커지는 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 김영진, 강병희(1998), “페타이어를 이용한 지반동상 방지”, *한국지반공학회지*, Vol. 14, No.1, pp.49~58.
2. Andersland, O. B. and Ladanyi, B.(1994), *An Introduction to Frozen Ground Engineering*, Chapman & Hall.
3. American Society for Testing and Materials(1996), “Standard test methods for Frost heave and thaw weakening susceptibility of soils”, *ASTM Standards Designation: D 5918-96*, pp. 823~834.
4. Beskow, G.(1935), “Soil freezing and frost heaving with special applications to roads and railroads”, *In CRREL Special Report 91-23*, pp. 41~157.
5. Hoekstra, P., Chamberlain, E. and Frate, A.(1965), “Frost heaving pressures”, *Cold Region Research Engineering Laboratory, Report 176*.
6. Konrad, J. M. and Mogenstern, N. R.(1982), “Effects of applied pressure on freezing soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 19, pp. 494~505.
7. Nixon, J. F. (1991), “Discrete ice lens theory for frost heave in soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 28, pp. 843~859.
8. Patterson, D. E. and Smith, M. W.(1980), “The measurement of unfrozen water content by time domain reflectometry”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 18, pp. 131~144.
9. Yong, R. N. and Warkentin, B. P.(1975), *Soil Properties and Behaviour*, Elsevier Sci. Pub. Com., Chapter 11. Soil Freezing and Permafrost, pp. 383~419.