

동결토의 동상팽창압 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Frost Heaving Pressure Characteristics of Frozen Soils

신 은 철*¹ Shin, Eun-Chul

박 정 준*² Park, Jeong-Jun

Abstract

Most of land reclamation projects are being implemented along the south and west coastal lines of the Korean Peninsula. The earth structures and in-ground LNG tank, and buildings can be constructed using artificial freezing method on the reclaimed land to control the uplift pressure caused by capillary forces. In this study, upon freezing a saturated soil in a closed-system from the top, a considerable frost heaving pressure was developed. Decomposed granite soils, silty soil, and sandy soil were used in the laboratory freeze test which is sometimes subjected to thermal gradients under closed-systems. A major concern has been the ability to predict the frost heaving pressure over the results of relatively short-term laboratory tests. The frost heaving pressure arising within the soil samples and the temperature of the samples inside were monitored with time elapse. The degree of saturation versus heaving pressure curve is presented for each soil sample and the maximum pressure is closely related to this curve. TDR apparatus was used to measure the volumetric water content by the measurement of unfrozen water contents of frozen soils. Unfrozen water increased in soils containing a high percentage of fine-grained particles. In fine-grained soils with strong attractive forces between soil grains and water molecules, additional water is attracted into the pores leading to further volume changes and ice segregation.

요 지

최근 우리나라는 산업화 및 기술의 현대화로 국토의 유효면적이 인구에 비해 부족하기 때문에 대규모 공유수면을 매립하여 지하구조물 설치를 위한 연약지반의 동결, LNG와 같은 저온 액체를 저장하기 위한 지하저장탱크 건설 및 주변지반의 동결 등 인공동결 공법에 관심이 집중되고 있다. 본 연구에서는 화강풍화토, 실트질 흙, 모래질 흙에 대해서 동결시 흙의 거동을 지배하는 동상팽창압과 부동수분의 변화에 대해서 연구하였다. 즉, 단일방향으로 흙이 동결될 때 함수비에 지배되는 결과 뿐만아니라 시간과 온도변화에 대한 동상팽창압을 연관시켜 연구를 수행하였다. 그 결과, 동상팽창압을 보다 더 용이하게 측정할 수 있었고, 온도변화에 따른 동상팽창압과 수분특성을 알 수 있었다. 또한, TDR 장비를 이용하여 온도와 함수비와의 관계를 도출함으로써 동상팽창압이 발현되는데 지배적인 역할을 하는 수분 특성을 제시하였다. 실험조건은 매립지반의 특성상 지하수위가 지표면에 위치하며, 수분공급 방식 또한 수분이 동이 없는 폐쇄형에 적합하므로 완전포화 및 각각의 포화도에 따라 동상팽창압 실험과 수분 특성 실험을 수행하였다. 연구 결과, 동상팽창압은 세립분을 많이 함유한 흙일수록 발휘되는 동상팽창압은 크게 나타났고, 동상이 발현되기까지의 시간과 동상 지속시간 또한 크게 나타났다. TDR을 이용한 부동수분 측정 결과, 온도가 감소할수록 부동수분이 급격히 감소하였고, 비표면적이 큰 세립분을 많이 함유할수록 부동수분이 많이 존재하였다. 이는 동결된 간극수의 체적증가로 인한 Ice segregation이 발생되어, 부동수분이 많은 흙일수록 동상팽창압도 증가하는 것으로 판단되었다.

*1 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Envir. Engrg., Univ. of Incheon, ecshin@incheon.ac.kr)

*2 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Univ. of Incheon)

1. 서론

최근 우리나라는 산업화 및 기술의 현대화로 대규모 공유수면을 매립하여 매립지반에 지반구조물을 건설하는 경우가 늘고 있어 연약지반의 동결, LNG 지하저장탱크 건설 등 인공동결공법을 이용한 지반개량공법에 상당한 관심이 집중되고 있다. 또한, 우리나라는 계절동토지역으로서 지반 동결에 의한 동상압이 발생하면서 철도 노반, 도로 포장체, 매설관, 옹벽구조물 등 토목구조물이 파손되거나 기능이 저하되는 문제가 발생하고 있다.

이와 같이 동상 피해로 인한 문제들 특히, 동상으로 인한 용기 현상, 동결시 간극수의 움직임, 동결토의 물리적 역학적 특성에 대해서 선진외국의 경우에는 일찍이 많은 연구가 수행되었다(Hoekstra 등, 1965 ; Yong 등, 1975). 그러나 국내의 경우 김영진 등(1994, 1998, 2002), 신은철 등(2002) 외에는 거의 연구가 전무한 실정으로 동결토의 지반공학특성에 대한 전문적인 이해가 부족할 뿐만아니라 우리나라보다 기후조건이 열악한 북한으로의 진출이 예상되는 바 이와 관련된 연구가 절실히 필요하다.

흙의 동결 팽창에 따른 동상압력의 요인은 흙의 입도분포, 조성구조, 비표면적, 토립자 간극수의 화학적 성질 및 흙의 응력 등과 같은 내적 요인과 동결중의 구속력, 간극수압 및 동결속도 등의 외적요인이 있다. 내적 요인에 대해서는 저온지반의 자연동토를 대상으로 한 다수의 기초적 연구가 있으나 외적 요인에 대해서는 인공 구조물 지반의 안정 및 인공동결공법이라는 현실적 요구에도 불구하고, 연구된 바가 그리 많지 않아서 이에 대한 연구의 필요성이 요구되고 있다. 이 변수들의 가장 큰 특성 값들은 대부분 통일분류법을 통한 입도분포가 가장 큰 변수로서 동상민감성 기준을 고려하여 기존에 제시된 동상실험을 통해서 동결토의 물리적 특성 및 동상압 특성을 규명하고자 한다.

김영진 등(1998, 2002)은 산업부산물과 쇠석을 혼합하여 동상방지층으로 이용할 경우의 효과에 대한 연구 뿐만아니라 TDR장비와 초음파 측정기를 이용하여 화강토와 점성토 시료의 온도변화에 따른 부동수분의 상관관계를 제시하였다.

Hoekstra 등(1965)은 포화된 흙을 동결시켜 동상압이 증가하는 것은 얼음과 물 사이에서 작용되는 표면에너지 때문으로서 화학적 포텐셜과 표면 곡률 사이의 관계를 정의하고, 동상민감성 기준 평가에서 흙의 간극 크기에 따른 동상 특성은 투수계수와 모관력 등의 흙의 물리적 특성과 관련된 것으로 몇 가지 가정을 통하여 액체상태에서의 전단응력은 점성유체 흐름에 의해 지배되나, 표면인장력에 의해 발생된 형상 변화로부터 그 내부 변형에너지가 소실되는 관계를 설명하였다.

균질한 세립토층에서 얼음에 의하여 토립자 간극에 부분적으로 채워져 물이 스며드는 지역인 동결 영역(frost fringe)에서의 온도구배와 수분공급비의 비율을 Segregation potential로 정의하여 토립자는 상재압과 토립자에 주어진 초기압력을 합한 것보다 얼음이 주는 압력이 더 클 때 팽창하게 되며, 얼음의 압력은 토립자를 분리시켜 새로운 얼음렌즈를 형성시킨다고 제시하였다(Konrad 등, 1982; Nixon, 1991).

동결토의 수분특성의 결정요인인 부동수분은 전체 함수비에 대한 부동수의 비율로서 동결온도, 점토 함유율, 전해농도, 토립자의 구조, 포화도, 흡입자의 다짐정도, 자연함수비 등에 영향을 받게 된다(김영진 등, 2002). Tice 등(1978)은 핵자기공명장치(NMR)를 이용하여 함수비에 따른 부동수분의 변화를 연구하였고, Patterson과 Smith(1980)에 의하면 전송시간은 평행선 사이의 재료에 의한 영향으로서 평행선으로부터의 거리가 두 배일 경우는 무시해도 무관하며, Prove의 강성은 로드 직경의 함수가 되는 구체적인 TDR 장비의 원리 뿐만아니라 핵자기공명장치와 칼로리메타로 측정된 부동수분을 비교·설명하였다.

따라서, 본 연구에서는 지하구조물 설치를 위한 연약지반의 동결, LNG와 같은 저온 액체를 저장하기 위한 지하저장탱크 건설 및 주변지반의 동결 등 인공동결공법의 이용이 절실함에 따라서 해안매립지반에 건설공사 수행시 지반동결과 관련하여 예상되는 동상 특성 뿐만아니라 국내의 계절적 동결지반조건을 고려하여 시간과 온도변화에 따른 동상팽창압과 포화도에 따른 동상팽창압 특성을 분석하였고, 온도변화에 따라 부동수분이 어떻게 달라지는지를 TDR 장비를 이용하여 관계식을 제시하였다.

한편, 화강풍화토와 매립지반에 구성되어 있는 실트질 흙과 모래질 흙에 대한 지반공학적 기본 성질을 제시하였고, 해안매립지반과 같이 지하수위가 지표면에 일치할 때 얼음 층 아래로부터 수분공급이 없는 폐합시스템에서 동상압이 발생할 수 있는 사실을 감안하여 함수비 뿐만 아니라 시간과 온도변화를 동상압과 연관시켜 본 실험을 수행하였다. 그 결과, 동상압을 보다 더 용이하게 측정할 수 있었고, 온도변화에 따른 동상팽창압과 수분특성을 알 수 있었다.

2. 동결토의 실내시험

2.1 시험 개요

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 수행하였다. 각각의 실험종류 및 조건에 따른 내용을 간략히 정리하면 Table 1과 같다.

실험 내용은 각각의 토사종류에 따라 초기설정온도를 -5, -10, -15, -19℃로 하여 지속시간에 따른 온도를 단계적으로 강하시키면서 동상팽창압을 측정하였고, 포

화도는 초기함수비에서 변환하여 계산된 값으로서 각기 시료 모두 최적함수비 상태일 때의 포화도가 대략 60%로 나타남에 따라서 포화도 60, 80, 90, 100%일 때의 동상팽창압 실험을 실시하였다.

시료의 성형은 몰드 내의 공시체가 차지하는 부분까지 시료가 압축이 되도록 압축다짐기를 이용하여 정적다짐을 하였다. 정적다짐 과정에서 함수비가 높으면 몰드 상부로 물이 흘러나와 멤브레인을 부착하여 함수비의 변화를 최소화하였다. 이 때 공시체 직경 100mm, 높이가 180mm의 전 길이에 걸쳐 균등한 다짐에너지가 가해지도록 다짐작업은 5층으로 나누어 실시하여 최적함수비 상태에서 소정의 건조밀도가 되도록 성형하였다. 이후 시료의 포화는 삼축압축시험장치를 이용하여 상부의 진공펌프와 하부에서의 가해지는 수압을 시료가 받는 간극수압과 같거나 그 이하의 배압 0.5kg/cm^2 을 24시간 동안 가하여 포화시켰다. 몰드 상부의 포화된 부분에서 전단링으로 시료를 채취하여 초기 다짐시의 다짐도와 간극비를 비교함으로써 정확한 시료의 초기조건을 부여하였다.

2.2 시료의 공학적 특성

본 실험에 사용된 흙은 LNG 인수기지 현장에서 지하탱크 내부공사를 실시하기 위하여 지반굴착을 하였을 때

Table 1. Details of the laboratory test conditions

Test Series	Test Types	Comments		Soil Types			Test Details
				Decomposed granite soil	Silty soil	Sandy soil	
Series I	Frost heaving expansion pressure test	Elapsed time	-5→-10→-15→-19(℃)	○	○	○	Frost heaving pressure with elapsed time and phase down temperature
			-10→-15→-19(℃)	○	○	○	
			-15→-19(℃)	○	○	○	
			-19℃	○	○	○	
		Constant initial temperature	-5℃	○	○	○	Initial constant setting temperature
			-10℃	○	○	○	
			-15℃	○	○	○	
			-19℃	○	○	○	
Series II	Frost heaving expansion pressure test	Degree of saturation	60%	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> • Saturation 60% is optimum water content condition • Saturation 60%, 80%, 90% condition of sandy soil could not be results
			80%	○	○	○	
			90%	○	○	○	
			100%	○	○	○	
Series III	TDR test	Unfrozen water content		○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> • Measurement of minimum more than 3 • Volumetric water content Vs. Temperature

Table 2. Physical properties of soils

Physical properties	Test results		
	Decomposed granite soil	Silty soil	Sandy soil
G_s	2.66	2.67	2.65
LL(%) / PI	31.9 / NP	24.3 / NP	- / NP
$\gamma_{d\max}$ (t/m ³)	1.89	1.71	1.95
ω_{opt} (%)	12.4	16.3	11.1
k (cm/sec)	2.0×10^{-6}	1.7×10^{-5}	2.1×10^{-4}
Passing No. 200 (%)	38.5	75.2	7.8
USCS	SM	ML	SP

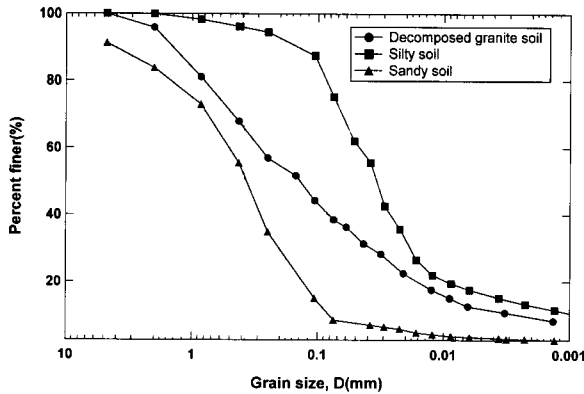


Fig. 1. Grain size distribution of soils

채취한 시료로서 세 가지 시료의 물리적 특성은 Table 2와 같고, 각 시료의 입도분포곡선은 Fig. 1에 나타내었다.

2.3 시험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 동상 시험기는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 직경 100mm, 높이 130mm인 몰드로써 내부에는 Teflon으로 도포하였다. 몰드 저면에는 다공판을 설치하고, 'O' 링으로 몰드를 실링하였다.

실험 과정은 최적함수비로 제작된 공시체를 48시간 동안 강제 포화시킨 후 몰드의 적재부에 설치한 다음 원통형 아크릴 셀을 적재부에 끼워 넣고, 스티로폼 알갱이를 몰드의 측면 상부까지 균일하게 채워 넣었다.

동상실험시 대기 온도는 우리나라의 최저 평균기온과 인공동결공법에서 적용되는 온도변화를 감안하여 최저 -19℃를 원칙으로 하되 필요에 따라 조금씩 변경하였다.

공시체는 동결시 아래로 부터의 수분공급이 없고, 응해시 비배수 조건인 폐합시스템의 상태로 동결시켰다. 동상시험이 완료되었을 때는 공시체를 동상 실험 상자

에서 꺼내어 동결된 상태와 동결융해후의 함수비 변화를 확인하였다. 또한, 몰드의 상부에는 알루미늄 디스크를 제작하여 시료에서 작용되는 압력을 로드셀로 전달되도록 하고, 알루미늄 디스크 위에 밀착시켜 로드셀을 반력지지대에 대하여 지지됨과 동시에 시료를 구속시킬 수 있도록 하였다. 그리고, 몰드 내부에는 그리스(grease)를 발라서 마찰력을 최소화시켰고, 냉각기를 통해 단일 방향으로 동결을 진행시키면서 로드셀로 측정되어진 압력은 자동수집장치로 나타내었다. 동결 상자 내부의 온도는 내부에 설치되어 있는 온도센서(thermometer)와 성형된 시료내부의 상부, 중부, 하부로 나누어 설치된 온도센서장치(thermocouple)로 측정하였다.

부동수분 측정은 ASTM 시험 기준에 의거 현장에서 채취한 시료를 직경 100mm, 높이 150mm의 투수시험용 몰드에 넣고, 강제 포화시켜 공시체를 만든 후 부동수분 측정 TDR probe 및 온도 측정용 센서를 삽입하였다. TDR probe의 오차를 줄이기 위하여 시료표면은 평평하게 다듬고, probe가 몰드의 저면과 측면에 접촉되지 않도록 삽입하였다. 이 후 공시체를 동상시험기 속에 넣은 후 상자 내부의 온도를 약 0℃에서 -24℃까지 변화시켜 해당 온도에서의 부동수분을 측정하였다. 이 때 각각 해당온도에서 7번씩 측정하였고, 각각의 시료에 대해 상대적인 비교값을 추정하기 위해서 3번의 실험을 반복 수행하였다.

이러한 시료의 수분특성을 측정할 수 있는 TDR(time domain reflectometry) 장비는 다공매체를 통한 전자기파의 전달속도로부터 결정되는 것으로서 빠른 전압을 제공하는 파형발생기가 높은 빈도의 신호를 낮은 빈도로 전달하는 샘플러를 통하여 오실로스코프나 자동기

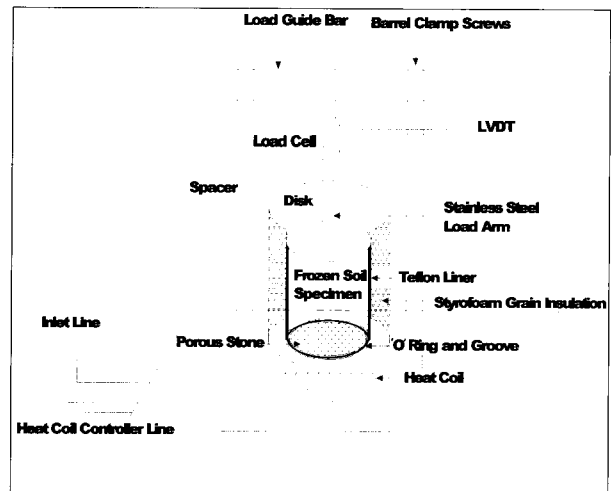


Fig. 2. Schematic diagram of apparatus

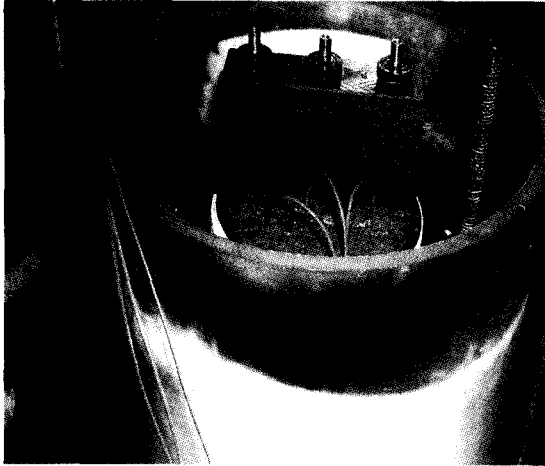


Fig. 3. Photo of TDR prove set up

룩장치로 나타나는 장비이다.

즉, TDR 장비는 신호를 단계적으로 보내어 전달선 길이와 전송시간을 측정할 수 있는 장비이다(Topp 등, 1980; Patterson 과 Smith, 1980). 본 실험에 사용된 TDR 장비(Trime FM-version P3)는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 측정용 probe를 동토 속에 설치하고, 시험기 내에서 전자파를 발생시키면 전자파는 probe의 길이를 따라 이동하는 전자파의 속도를 계산함으로써 흙의 유전을 상수를 측정하게 된다. 동토를 구성하는 요소인 토립자, 얼음, 간극수, 공기 등의 유전율이 서로 다른 원리를 이용하여 동결토의 체적함수비를 구할 수 있다.

3. 실내시험 결과 및 분석

3.1 시간과 온도 변화에 따른 동상팽창압 변화

본 연구에서의 일차원 동상실험에 따른 동상팽창압

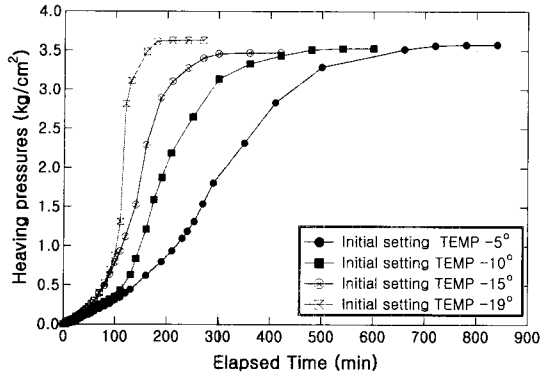
측정 결과, 동결온도 지속시간에 따른 동상팽창압의 변화는 Table 3과 같이 도출되었으며, 동상팽창압 변화 곡선은 Fig. 4에 나타낸 바와 같다.

실험방법은 Table 3에 제시된 바와 같이 초기설정온도를 각각 -5°C , -10°C , -15°C , -19°C 상태에서 단계적으로 온도를 강하하였다. 이 때 각각의 초기 설정온도에서 일정시간이 지나면 동상팽창압이 발현되기 시작하고, 이후 그 해당온도에서 동상팽창압이 증가되다가 일정한 값을 유지할 때 -0.5°C 씩 온도를 강하시켜 가면서 연속적으로 지속시간에 따른 팽창압의 변화를 측정하였다. 그러나, 초기설정온도를 -19°C 상태에서 시작하여 단계적으로 -0.5°C 씩 강하하였을 경우, 최종온도가 -24°C 가 되면, 동상팽창압은 증가하지 않고 일정하게 수렴하는 결과를 나타내었다.

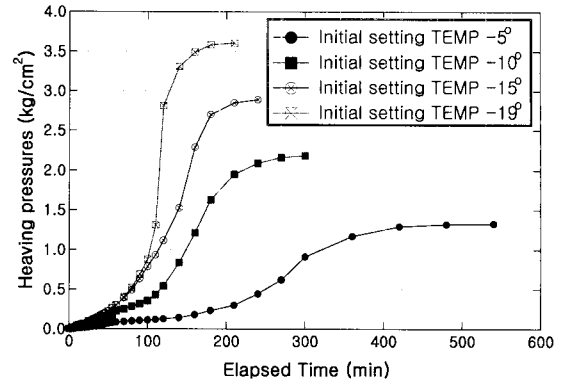
Fig. 4를 보면, 세립분을 많이 함유한 흙일수록 동상이 발현되기까지의 시간과 동상 지속시간이 더 크게 나타나고 있고, 각각의 시료에 대하여 초기설정온도에 따른 동상지속시간을 살펴보면, 영하 5°C 를 기준으로 하였을 경우, 화강풍화토는 840분, 실트질 흙은 1260분, 모래질 흙은 320분으로 나타났다. 이 때 발휘된 최대 동상팽창압은 화강풍화토의 경우 $3.575\text{kg}/\text{cm}^2$, 실트질 흙은 $4.199\text{kg}/\text{cm}^2$, 모래질 흙은 $0.363\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로서 세립분을 많이 함유하여 부동수분이 많은 흙일수록 발휘되는 동상팽창압은 우세하게 나타났다. 특히, 실트질 흙의 경우, 상부에 알루미늄 디스크를 로드셀과 분리하여 시료 표면에서 자유로운 상태로 동상을 허용한 결과, 14mm 로 동상팽창량이 증가되었다. 즉, 시료 표면에서는 균일하지 않은 상태로 동상량이 발생된 사실로 미루어 보아 입자사이에서 팽창압력이 가장 작게 저항하는 방향으로 그 힘이 발휘되는 것으로 판단된다.

Table 3. Variation of frost heaving pressures of soils with elapsed time

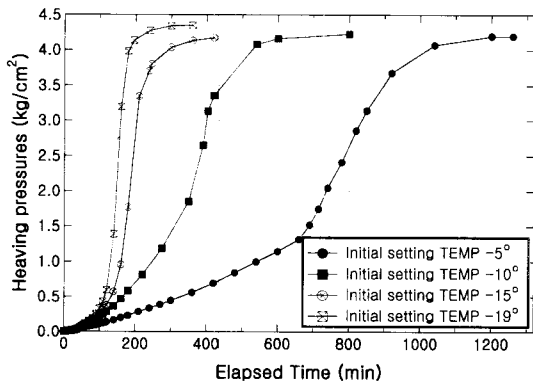
Soil types	Phase down temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Time of up to frost heaving pressure appearance (min)	Elapsed time of frost heaving (min)	Max. frost heaving pressure (kg/cm^2)
Decomposed granite soil	$-5 \rightarrow -10 \rightarrow -15 \rightarrow -19$	400	840	3.575
	$-10 \rightarrow -15 \rightarrow -19$	180	600	3.527
	$-15 \rightarrow -19$	130	420	3.472
	-19	70	270	3.628
Silty soil	$-5 \rightarrow -10 \rightarrow -15 \rightarrow -19$	530	1260	4.199
	$-10 \rightarrow -15 \rightarrow -19$	340	800	4.228
	$-15 \rightarrow -19$	270	420	4.173
	-19	200	360	4.349
Sandy soil	$-5 \rightarrow -10 \rightarrow -15 \rightarrow -19$	70	320	0.363
	$-10 \rightarrow -15 \rightarrow -19$	50	230	0.409
	$-15 \rightarrow -19$	45	160	0.404
	-19	40	110	0.412



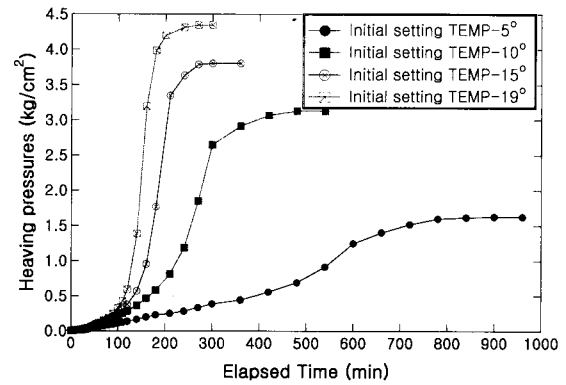
(a) Decomposed granite soil



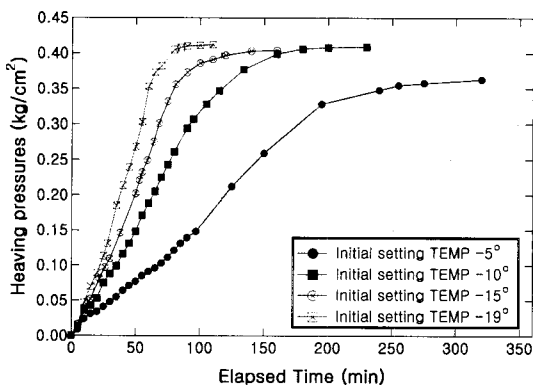
(a) Decomposed granite soil



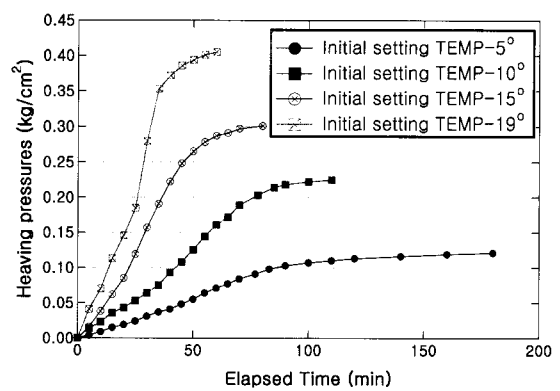
(b) Silty soil



(b) Silty soil



(c) Sandy soil



(c) Sandy soil

Fig. 4. Variation of frost heaving pressure with elapsed time and phase down temperature

Fig. 5. Variation of frost heaving pressure with constant initial setting temperature

3.2 초기 일정 온도에 따른 동상팽창압의 변화

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 초기 일정온도에 따른 동상팽창압과 최대동상팽창압의 변화를 나타내고 있다. 측정 결과, 온도가 낮을수록 팽창압은 증가하는데, 영하 19℃를 기준으로 최대팽창압을 살펴보면, 실트질 흙은 4.346kg/cm², 화강풍화토는 3.603kg/cm², 모래질 흙은 0.405kg/cm²을 나타내었다. 특히, 앞선 실험과 일치시켜 분석하면, 초

기온도를 영하 5℃와 영하 10℃로 설정하였을 때, 동상 팽창압은 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 기울기가 더욱 급하게 팽창압이 증가하다가 일정하게 유지될 때, 온도를 더 하강시키더라도 거의 변화없이 일정하

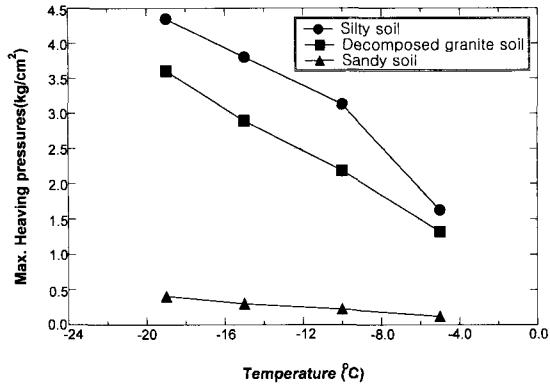


Fig. 6. Maximum frost heaving pressure with change of temperature

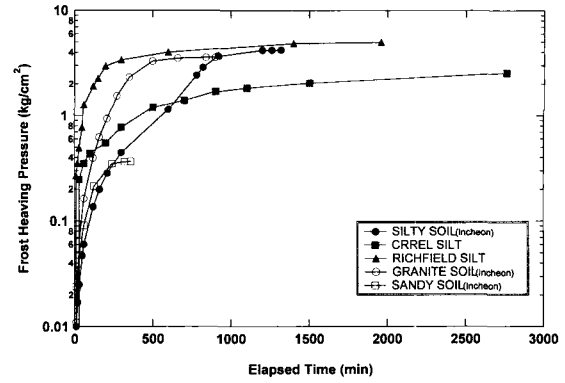


Fig. 7. Comparison of frost heaving pressure for Incheon soils vs. CRREL soils

게 수렴하였다. 이는 동결토 안에 아직 얼지 않은 부동수의 영향으로서, 동상팽창압 측정 이후 부동수분을 측정하여 그 상관성을 예측하였다.

실험 결과를 살펴보면, 토립자는 수분의 손실과 얼음 렌즈의 성장으로 인해 그 변위가 발생하게 되고, 열전달은 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°C와 19°C일 때 최대팽창압의 차이는 각각 화강풍화토가 2.278kg/cm²이고, 실트질 흙은 2.719kg/cm², 모래질 흙은 0.184kg/cm²의 차이를 나타내고 있다. 이는 앞에서 기술한 바와 같이 동결토 안에 잠재되어 있는 부동수분의 다소를 설명할 수 있고, 부동수가 동상압에 큰 영향을 미친다는 것을 충분히 알 수 있었다.

이 실험결과는 Makay(1975) 및 McRoberts와 Mogenstern(1972)이 제안한 작은 비표면적을 갖고 있는 모래와 자갈 같은 조립토는 물분자에 대하여 별다른 영향은 없으므로, 동상팽창압은 상대적으로 작은 값을 나타낸다는 사실과 일치한다.

Fig. 7은 동상팽창압에 대한 기존에 보고된 결과와 본 연구에서 수행한 실험 결과를 비교한 것으로서, Hockstra와 Chamberlain(1965)이 제안한 정상적인 방법으로 준비된 시료의 하부를 구속시킨 상태에서 상부에서 하부로 동결을 진행시킨 결과, CRREL 실트는 2.5311kg/cm², Richfield 실트는 4.9566kg/cm²으로서, 이는 각각의 시료에 대하여 간극크기에 따라 나타난 팽창압 결과이며, 본 연구의 실트질 흙과 화강풍화토를 비교

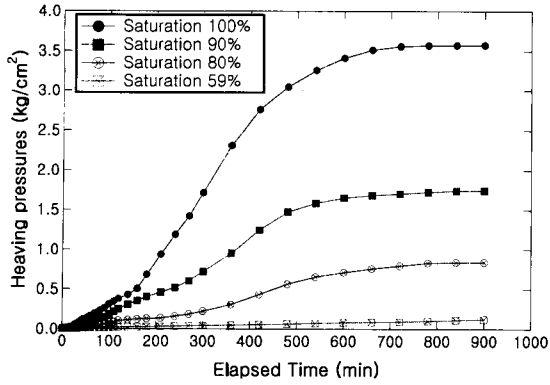
하였을 때 간극크기는 조금씩 차이가 있지만, 그 차이가 크지 않아 기존 연구 된 결과값의 범위로 나타났다.

3.3 포화도에 따른 동상팽창압의 변화

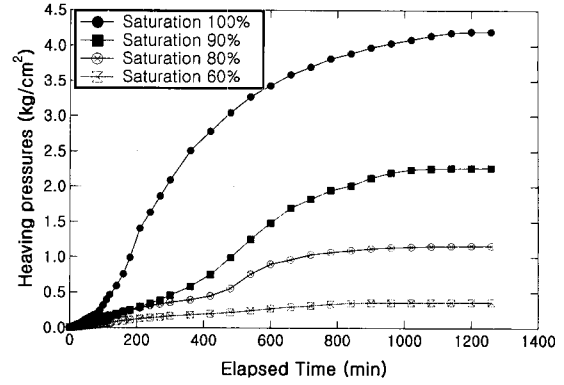
포화도에 따른 동상팽창압의 변화를 알아보기 위하여 포화도가 100%, 90%, 80%, 그리고 60%인 흙 시료를 3.1절에 제시된 시간에 따른 팽창압 변화와 동일한 실험 조건으로 온도를 단계적으로 강하시키면서 동상실험을 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 즉, 포화도가 최적함수비 상태보다 클 경우에 영하의 온도 지속 시간이 길고 온도가 낮을 수록 동상팽창압은 증가하며, 포화도가 증가할수록 동상팽창압은 더 크게 증가하고 있다.

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 체적 감소를 일으키기 때문으로 사료된다.

Fig. 9에 나타난 바와 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 현상



(a) Decomposed granite soil



(b) Silty soil

Fig. 8. Variation of frost heaving pressures with degree of saturation

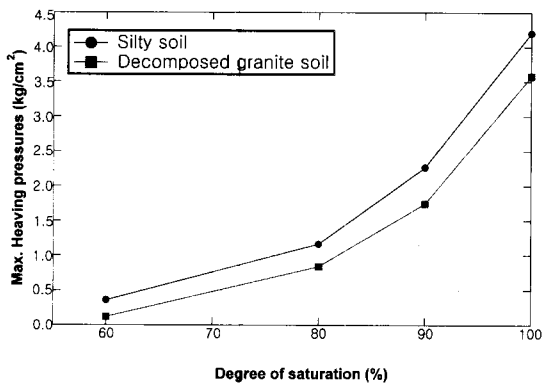


Fig. 9. Maximum frost heaving pressure with degree of saturation

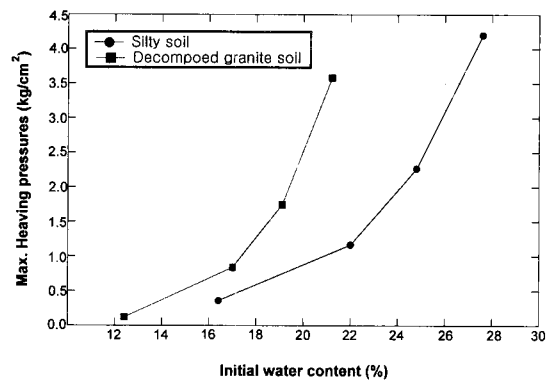


Fig. 10. Maximum frost heaving pressure with initial water content

이 발생하게 되어 팽창압력으로 인한 거대한 얼음렌즈를 형성하게 되는 것이다. Fig. 10은 포화도를 초기함수비로 환산하여 나타낸 그래프이다.

3.4 TDR을 이용한 부동수분 측정

동결된 시료의 부동수분을 결정하기 위해서는 TDR 장비를 이용하여 측정된 값으로서, Fig. 11은 완전 포화시킨 화강풍화토, 실트질 흙, 모래질 흙에 대한 체적함수비를 각각 중량함수비로 환산하여 온도변화에 따른 부동수분을 나타낸 곡선이다.

각각의 시료 모두에서 온도가 낮아질수록 부동수분은 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 특히, 영하 10℃ 이하에서의 부동수분 변화곡선은 일정한 값에 수렴하였다. 또한, 각각의 흙은 온도변화에 따라 부동수분 곡선이 서로 다르게 나타나고, 특히 모래질 흙의 경우에는 영하 2℃ 정도에서부터 거의 일정한 부동수분값을 나타내고 있어 Fig. 4(c)와 비교 분석하면 부동수가 적은 조립토에서는 흙의 동결과정 중 통로역할을 하는 부동수

가 적으므로 발휘되는 동상팽창압은 현저하게 저하되는 것을 알 수 있었다.

영하 5℃를 기준으로 감소율을 살펴보면, 화강풍화토는 71%, 실트질 흙은 72%, 모래질 흙은 82%의 감소율을 나타내었다. 따라서, 온도의 범위가 0℃ ~ 5℃ 범위에서 전체 부동수의 71% 이상이 변화되는 양상을 알 수 있다. 또한, 영하 5℃를 기준으로 화강풍화토와 실트질 흙은 모래질 흙보다 부동수분이 많은 것을 나타냈는데, 이는 비표면적이 큰 세립분을 많이 함유하고 있다는 결과로서, 동결된 간극수의 체적증가가 축적되어서 더욱 큰 체적변화와 Ice segregation이 발생하게 되어, 부동수

Table 4. Relationship between temperature and unfrozen water content

Soil types	Equation of Unfrozen water vs. Temperature
Silty soil	$\omega_u = 0.1623 (-T)^{-0.4324}$
Granite soil	$\omega_u = 0.1430 (-T)^{-0.4415}$
Sandy soil	$\omega_u = 0.0810 (-T)^{-0.3825}$

* ω_u : Unfrozen water content(%), T : Temperature(℃)

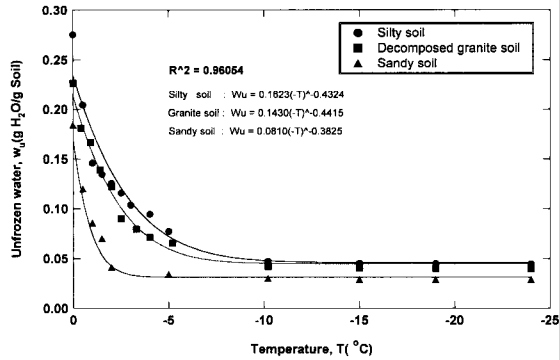


Fig. 11. Relationship between temperature and water content with various types of soil

분이 많은 흙일수록 동상팽창압도 커지는 것으로 사료된다. 각각의 세 가지 시료에 대하여 온도변화에 따른 부동수의 변화 관계를 식으로 표시하면 Table 4와 같다.

이는 Topp 등(1980)이 제시한 방법과 유사한 실험 결과로서, 동결 특성 곡선 즉, 부동수와 온도와의 관계는 온도가 저하됨에 따라 부동수도 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 동토 중에는 부동수가 존재하며, 부동수는 흙의 동상과정에서 중요한 역할을 할 뿐만 아니라 온도가 낮아질수록 감소하는 것을 알 수 있었다. 흙의 부동수는 흙의 종류에 따라 다르며, 동상압의 크기와 관련이 있다. 즉, 흙의 동결과정에서 토립자를 둘러싼 부동수막은 수분이 동결점까지 이동하는 통로 역할을 하므로 부동수가 많은 흙일수록 동상압도 커지게 되는 것으로 사료된다.

4. 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 온도 변화, 그리고, 포화조건에 따른 동상팽창압 특성과 동상팽창압 거동에 큰 영향을 미치는 수분 특성 값을 도출하였다.

- (1) 시간에 따른 최대 동상팽창압 실험결과, 실트질 흙이 가장 큰 값을 나타내었으며, 반면에 모래질 흙의 동상팽창압은 현저히 낮았다. 즉, 세립분을 많이 함유할수록 발휘되는 동상팽창압은 우세하게 나타났다.
- (2) 동상이 발현되기까지의 시간과 동상지속시간을 살펴보면, 실트질 흙과 화강풍화토가 모래질 흙에 비

하여 상당히 크게 나타났다. 즉, 초기설정온도에 따라 큰 차이를 보이고 있는 것은 각각의 흙마다 열전도율이 다르며, 실트질 흙과 화강풍화토는 모래질 흙보다 열전도율이 작고, 세립분을 더 많이 함유하고 있어 발현시간과 동상지속시간의 차이를 보이는 것으로 사료된다.

- (3) 동상시험을 완료한 후, 실트질 흙에 대하여 동상 몰드 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) 실트질 흙과 화강풍화토에 대하여 포화도 60%, 80%, 90%, 100% 일 때, 동상팽창압 측정 결과, 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 부동수분이 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 비표면적이 큰 세립분을 많이 함유하고 있는 실트질 흙과 화강풍화토는 동결된 간극수의 체적증가로 인한 체적변화와 Ice segregation이 발생하게 되어, 부동수분이 많은 흙일수록 동상팽창압도 커지는 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 김영진, 홍성완(1994), 동토지역기초구조물의 최적설계, 시공기법 개발 연구, 과학기술처.
2. 김영진, 강병희(1998), "페타이어를 이용한 지반동상방지", 한국지반공학회지, 제14권, 제1호, pp.49-58.
3. 김영진, 배정호, 송원근(2002), "동결토의 온도변화에 따른 부동수분과 초음파 속도의 변화에 관한 실험적 연구", 대한토목학회지, 제 22권 제3-C호, pp.207-217.
4. 신은철, 박정준, 김종인(2002), "흙의 동상민감성과 포화도를 고려한 동상팽창압 특성", 한국지반공학회, 2002 봄학술발표회는 논문집, pp.329-336.
5. Andersland, O. B. and Ladanyi, B.(1994), *An Introduction to Frozen Ground Engineering*, Chapman & Hall, pp.1-52.
6. 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.
7. Hoekstra, P., Chamberlain, E. and Frate, A.(1965), *Frost Heaving*

- Pressures*, Cold Region Research Engineering Laboratory, Report 176.
8. Konrad, J. M. and Mogenstern, N. R.(1982), "Effects of Applied Pressure on Freezing Soils", *Can. Geotech. J.*, Vol.19, pp.494-505.
 9. Nixon, J. F.(1991), "Discrete Ice Lens Theory for Frost Heave in Soils", *Can. Geotech. J.*, Vol.28, pp.843-859.
 10. Patterson, D. E. and Smith, M. W.(1980), "The Measurement of Unfrozen Water Content by Time Domain Reflectometry", *Can. Geotech. J.*, Vol.18, pp.131-144.
 11. Tice, A. R., Burrous, C. M., and Anderson, D. M.(1978), *Phase Composition Measurements on Soils at Very High Water Contents by the Pulsed Nuclear Magnetic Resonance Technique*, Presented at Trans. Res. Board Meeting, Washington, D. C., Jan., pp.16-20.
 12. Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P.(1980), "Electromagnetic Determination of Soil Water Content : Measurements in Coaxial Transmission Line", *Water Resources Research*, Vol.16, No.3, pp.574-582.

(접수일자 2002. 7. 30, 심사완료일 2002. 12. 20)