

공학석사 학위논문

**Cold Room 실험을 통한 동결토의  
강도특성에 관한 연구**

A Study of Cold Room Experiments for Strength Properties of  
Frozen Soil

지도교수 서 영 교

2006년 8월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

김 은 섭

本 論 文 을 劉 晋 秀 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

위 원 장 : 공 학 박 사      박 한 일 (인)

위    원 : 공 학 박 사      김 재 수 (인)

위    원 : 공 학 박 사      서 영 교 (인)

2006년 8월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

김 은 섭

# A Study of Cold Room Experiments for Strength Properties of Frozen Soil

by

Eun Sub Kim

Department of Ocean Development Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University

## Abstract

Recently many countries are showing the concern to the deep sea or pole in which abundant resources have been buried from the shortage of the resource.

Also, a north policy of the government is actively propeling. Consequently the research work of frozen ground has been risen to reality subject and taken the importance of the construction industry. So it is the view that the construction market of big scale has been formed at the frozen ground during hereafter several years like a past Middle East.

Problems to be faced at this time basically are physical properties of the frozen soil and they are altered sensitively according to the conditions of the

soil, like clay content, water content, strain rate, freezing temperature and rate of loading.

This research used a cold room equipment and was experimented. Frozen soil was made artificially and was examined through the unconfined compression test and indirect tension test according to the temperature, water content, clay content. The strength properties of the frozen soil was investigated through the cold room experiment.

The unconfined compression strength and tensile strength of the frozen soil as a result showed the tendency to increase as the water content reached fully saturated state. The maximum strength was founded in the fully saturated condition and the strength confirmed to be reduced gradually as the water content increased.

The strength of the frozen soil increased also in a clay content to a certain extent. But it confirmed in a clay content over that the strength of the frozen soil is reduced gradually.

# 목 차

Abstract .....	i
목 차 .....	iii
그림목차 .....	v
표 목 차 .....	vi
<b>I. 서 론 .....</b>	<b>1</b>
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 연구내용 및 방법 .....	3
<b>II. 이론적 배경 .....</b>	<b>6</b>
2.1 동결토의 일반적 성질 .....	6
2.1.1 동상 메커니즘 .....	8
2.1.2 동결토의 물리적 성질 .....	10
2.2 동결토에 영향을 미치는 요소 .....	13
2.3 동결토의 공학적 성질 .....	17
2.3.1 압축강도와 인장강도 .....	17
2.3.2 전단강도 .....	18
2.3.3 동착력 .....	20
2.3.4 Creep 거동 .....	21
2.3.5 융해압밀 .....	23
<b>III. 실험내용 및 방법 .....</b>	<b>25</b>
3.1 시료의 물리적 성질 .....	25
3.2 Cold Room 실험장비 .....	26
3.3 시편 제작 및 추출 .....	28

3.4 일축압축시험 .....	30
3.5 인장강도시험 .....	32
<b>IV. 실험결과 및 분석 .....</b>	<b>34</b>
4.1 실험의 일관성 .....	34
4.2 일축압축시험을 통한 동결토의 강도특성 .....	37
4.3 간접인장시험을 통한 동결토의 강도특성 .....	46
<b>V. 결 론 .....</b>	<b>55</b>
<b>참 고 문 헌 .....</b>	<b>58</b>

## 그림 목차

- Fig. 2-1 북미와 유라시아 대륙의 영구동토 분포도
- Fig. 2-2 동상의 메커니즘
- Fig. 2-3 3단계 크리프 거동
- Fig. 3-1 Universal Testing Machine
- Fig. 3-2 동토 시편 추출 모습
- Fig. 3-3 간접인장실험 공시체 설치
- Fig. 4-1 실험의 일관성
- Fig. 4-2 일축압축강도실험시 파괴된 시편
- Fig. 4-3 함수비에 따른 일반적인 압축강도 특성
- Fig. 4-4 함수비에 따른 일축압축강도
- Fig. 4-5 함수비에 따른 일축압축강도 거동 특성
- Fig. 4-6 낮은 함수비 ( $w_7$ )에서 점토 함유비에 따른 일축압축강도
- Fig. 4-7 포화함수비 부근( $w_{20}$ )에서 점토 함유비에 따른 일축압축강도
- Fig. 4-8 흙의 종류에 따른 응력-변형률
- Fig. 4-9 점토 함유비에 따른 일축압축강도 거동 특성
- Fig. 4-10 간접인장실험의 시편 설치 모습
- Fig. 4-11 간접인장실험으로 파괴된 동결토의 모습
- Fig. 4-12 함수비에 따른 인장강도-변형률
- Fig. 4-13 취성파괴를 나타내는 동결토
- Fig. 4-14 함수비에 따른 인장강도 거동 특성
- Fig. 4-15 점토 함유비에 따른 동결토의 인장강도
- Fig. 4-16 점토 함유비에 따른 인장강도 거동 특성

## 표 목차

Table 1-1	입경에 따른 동상성의 판정
Table 1-2	강도 특성 실험을 위한 시료의 함수비와 점토 변화량
Table 2-1	동결유형
Table 2-2	동상판정방법
Table 2-3	흙과 나무 사이의 동착강도
Table 3-1	시료의 물리적 성질
Table 4-1	1, 2, 3차 동결토의 최대 일축압축강도
Table 4-2	실험 전, 후 함수비 변화
Table 4-3	점토 함유비에 따른 1, 2, 3차 Max Compressive Strength
Table 4-4	함수비에 따른 1,2,3 차 Max Tensile Strength
Table 4-5	점토 함유비에 따른 1,2,3 차 Max Tensile Strength

# I. 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

과거부터 현재까지 인류는 생존과 번영을 위해 지구사의 자원을 끊임없이 이용해 왔고, 이제 많은 자원들은 고갈 상태에 다다랐다. 이에 여러 나라들은 이제껏 이용할 수 없었던 풍부한 자원이 매장되어 있는 심해나 극한지로 눈길을 돌리기 시작했다. 우리나라의 경우 또한 자원이 부족한 나라임에 틀림없고 앞으로 우리가 이런 미개발지역을 개발해야 할 필요성도 증가하고 있다. 더군다나 최근 정부의 북방정책이 활발히 추진됨에 따라 시베리아 지역 등 동토지역이 현실적 과제로 대두되면서 건설업계에 상당한 관심을 모으고 있으며 따라서 향후 수년간 과거 중동에서와 같이 큰 규모의 건설 시장이 동토지역에 형성될 전망이다.

그러나 동토지역은 기상, 기후조건, 지반의 공학적 특성, 인문지리, 풍습 등 제반 건설 환경이 국내 또는 중동 지역과는 판이하게 다르다. 따라서 종래의 지반에 관한 기초지식을 그대로 동토에 적용한다는 것은 무리한 결과를 가져올 우려가 있고 때문에 국내 건설업체, 자원개발업체 등의 이 지역에 관한 기술 자료의 수집, 분석과 구조물 설계, 시공법에 관한 체계적이고 전문적인 연구가 요구된다. 이때 기본적으로 부딪히게 되는 문제점은 동토의 역학적 성질들이고, 이런 역학적인 성질은 하중이 가해진 속도, 온도, 함수비, 결정입자, 흙의 종류 등에 따라 민감하게 달라진다.

그리고 이러한 동토의 물리적, 역학적 특성에 관하여 해결되지 않은 문제점들은 타 분야에 비해 굉장히 많으며 계절기 동토지역에 속하는 국내 역시 현실적인 요구가 절실하지 못한 이유로 이 분야의 시공경험과 연구가 미약한 편에 속한다. 겨울에 동결조건이 계속됨에 따라 포장훼손, 지하매설물 동파 등

은 지반동결과 관련하여 항상 마주치는 공학적 문제였으나 이를 해결하기 위한 노력이 미흡했던 것이 사실이다. 하지만 동토는 일반 흙과 성질이 확연히 다르기 때문에 우선적으로 동토의 기본적인 강도 특성을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다.

이에 본 연구는 극한지 개발의 시대적 요구에 부응하여 동토의 일반적인 성질과 물리적 성질을 정리하고 cold room 실험을 통하여 동토 강도에 영향을 주는 변수들에 따른 강도특성을 파악하는데 목적이 있다.

## 1.2 연구내용 및 방법

극한지에서 실제로 발생하는 동결토는 지하수위의 영향으로 수분이 계속적으로 공급되는 개방형동상이 발생하는 경우가 있지만 본 연구에서는 미동토 내에 미리 포함되어 있던 수분만이 동결면을 향하여 이동함으로써 동결이 이루어지는 폐쇄형동상에 의한 방법으로 실험을 수행하였다. Cold Room 시설을 이용한 실험은 실험실에서 점토의 함유비, 함수량에 따라 인공적으로 시편을 만들어 일축압축강도시험과 간접인장강도시험을 통해 동토의 강도 특성 등을 살펴본다.

일축압축시험을 위한 시료는 주문진 표준사를 노건조시켜 사용하였고 점토의 함유비에 따른 강도 특성을 파악하기 위해 대표적 점토인 카오리나이트를 노건조시켜 막자사발을 이용해 큰 덩어리를 부수고, 분쇄기로 갈아서 표준사와 잘 섞일 수 있도록 No. 200번체(0.075mm)로 쳐서 사용하였다. 연구결과에 의하면 입경이 0.005mm ~ 0.002mm의 입경에서 동상이 가장 크다고 알려져 있기 때문에, 본 연구에서는 동결토의 강도에 영향을 미치는 요인 중의 하나인 점토 함유비를 No.200번체를 통과한 입경으로 정의하였다<sup>(1)</sup>.

Table 1-1 입경에 따른 동상성의 판정

입경에 따른 분류	동상성의 판정
0.1mm 이상의 사질토	동상이 거의 일어나지 않음
0.1mm ~ 0.005mm	동상이 일어나기 시작
0.005mm ~ 0.002mm	동상이 가장 강함
0.002 이하	동상성이 다시 감소

점토 함유비에 따른 강도 특성에 관한 실내시험은 점토 함유비를 10%, 20%, 30% 로 변화시켜 가면서 각각의 점토 함유비에 따른 특성을 관찰하였

다. 또한 함수비에 따른 강도 특성에 관한 실내시험은 같은 점토 함유비 상태의 시료에 함수비를 7%, 15%, 20% 로 변화시켜가며 관찰하였는데 이 함수비는 점토 함유비에 따른 시료의 포화상태를 고려하여 정하였다(Table 1-2 참조).

점토 함유비에 따른 포화상태를 고려하기 위해 각 시료의 포화 상태 함수비를 실내시험과 이론식을 이용해 구하였다. 실내시험은 변수위투수시험기를 이용해 시료를 포화시켜 함수비를 측정하였고, 이론식은 아래의 식을 이용하였다.

$$\omega = \frac{Se}{G_s} \quad (1-1)$$

여기서,  $S$  = 포화도(포화상태를가정하였으므로  $S=1$ )  
 $e$  = 간극비  
 $G_s$  = 표준사의비중

여기 사용된 간극비( $e$ )는 시료를 다진 후 구해진 습윤단위중량을 이용해 구한 간극비의 평균값을 사용하였다. 함수비 20%는 포화상태 전, 후로 나누어 특성을 파악할 수 있는 동토에서 실내시험이 가능한 포화상태와 가장 가까운 함수비로 정의될 수 있다. 실제로 시험과 이론식을 이용해 구한 9가지 경우의 시료들의 포화상태함수비는 20~22%의 값들을 나타내었다.

함수비와 점토 함유비에 따라 총 9가지의 상태를 갖는 시료는 주문 제작된 지름 100mm, 길이 210mm인 아크릴 몰드에서 2.5kg 래머를 사용하여 3층 25회 다짐하여 시편을 만들고  $-15^{\circ}\text{C}$ 의 Cold Room에서 6일간(144시간) 동결시킨 후 시료 추출기를 이용해 추출한 후 만능재료시험기를 이용하여 일축압축시험과 간접인장시험을 수행하였다.

주문 제작한 몰드의 크기는 일축압축시험에서 일반적으로 사용되는 공시

체의 직경과 길이 비율인 1:2.1를 고려하였고, 동결기간은 시료내의 수분이 완전히 동결되도록 충분한 기간을 갖되, 실험결과에 오차를 최대한 줄이기 위해 모든 시편은 같은 시간 동안 동결하는 것을 원칙으로 시험을 수행하였다. 결과 값은 같은 경우에 대해 3번의 시험을 수행하여 그 평균값을 이용하였다.

Table 1-2 시료의 함수비와 점토 변화량

점토 함유율 (k, %)	함수비 (w, %)
10%	7
	15
	20
20%	7
	15
	20
30%	7
	15
	20

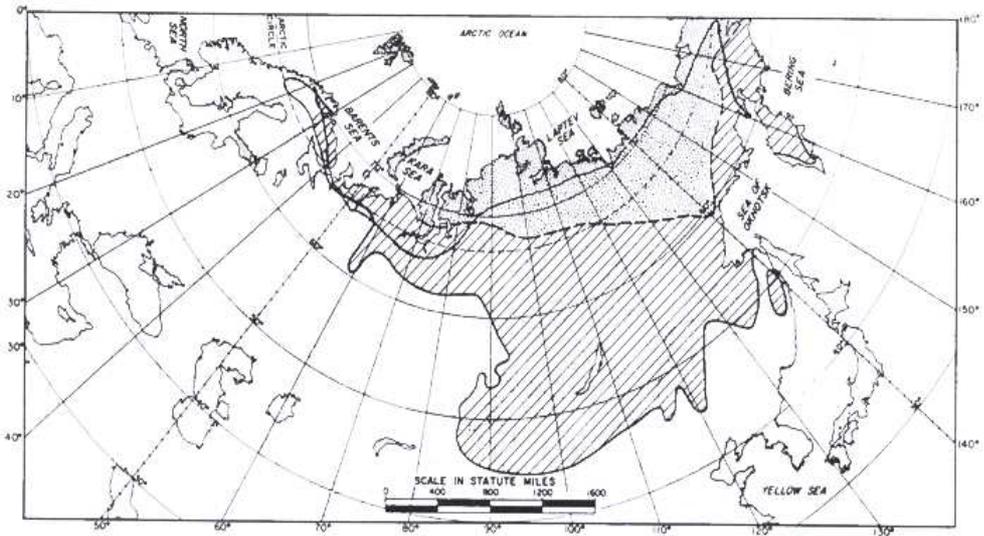
## II. 이론적 배경

### 2.1 동결토의 일반적 성질

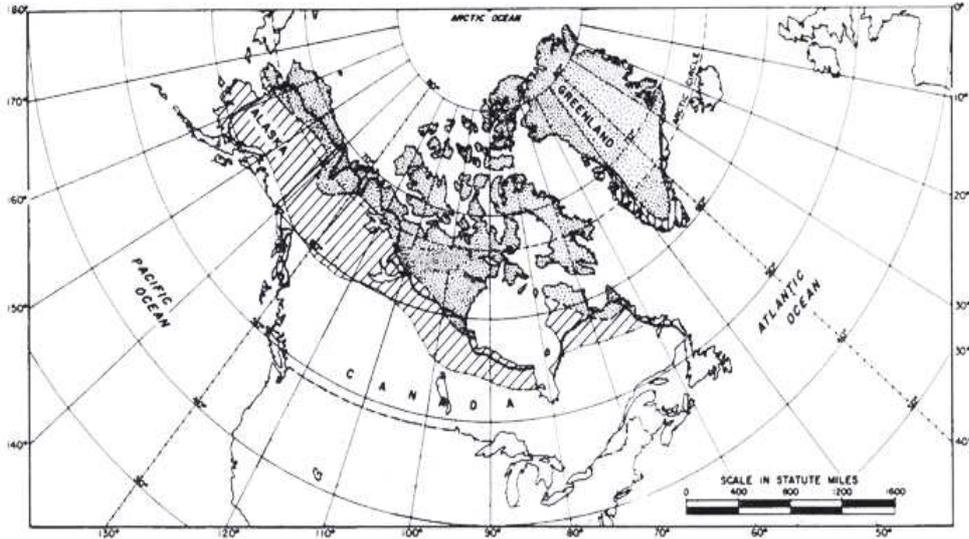
영구(永久)동토(凍土)란 “동결된 지반이 일 년 이상 계속해서 동결상태를 유지하는 지반”을 말한다. 원래는 "다년간 동결된 지반(Perennially Frozen Ground)" 이라는 말에서 영구(永久)동토(凍土) Permafrost가 유래되었다.

미국 극지공학연구소(CRREL)에서는 평균기온 0°C가 지속되는 기간에 따라 저온 지역을 둘로 분류하는데 한랭구역(colder zone)이란 연간 평균기온이 0°C이하인 모든 지역을 의미하며 다른 하나는 연중 가장 추운 달의 평균기온이 0°C이하인 지역을 포함한다. 이 기준에 따르면 한랭구역은 영구동토층이 존재하는 지역과 거의 일치한다. CRREL기준에 따른 구분을 지도 위에 그려보면 지구상 육지의 거의 1/4 이 한랭구역에 놓여 있으며 극한지로 구분될 수 있다(Fig. 2-1참조).

지역 분포상 지구상의 25%에 해당하는 영구동토지역은, 시베리아, 알래스카, 캐나다 북부, 중국의 오지 등의 면적을 모두 합하면 약 2100만 km<sup>2</sup>, 그린랜드 면적은 약 170만 km<sup>2</sup>, 남극은 1300만 km<sup>2</sup>정도가 된다. 국가별 영구동토 보유율은 소련은 국토의 약 40%, 캐나다는 국토의 약 50%, 미국은 알래스카주 면적의 약 80%, 그 밖에 노르웨이, 중국 등의 국가도 상당한 퍼센트의 보유율을 가지고 있다(Fig 2-1참조).



LEGEND



LEGEND



Fig. 2-1 북미와 유라시아 대륙의 영구동토 분포도

동토를 계절에 따라 지반의 상태로 분류하면 여름에는 녹고 겨울에는 어는 지반 활동층(Active zone)과 그 밑에는 계절의 변화와 상관없이 항상 얼어 있는 영구동토층(Permafrost)으로 분류하는데 이 두 층 사이의 경계면을 영구동토면(Permafrost Table)이라 하고, 영구동토층과 그 밑의 부동층과의 경계를 영구동토기면(Permafrost Base)라고 한다. 또 활동층의 깊이는 온도와 흙의 종류에 따라 다르고 영구동토층의 깊이는 지반 내부에서의 열전도 손실과 지구 내부의 열 때문에 어느 한계까지만 존재한다.

### 2.1.1 동상 메커니즘

일반 토질은 물을 함유하고 있는 다공성 물질로 볼 수 있는데 이런 다공성 물질이 낮은 온도에 노출되게 되면 그 일부가 동결할 때 이미 동결된 부분의 흙은 아직 동결되지 않은 부분으로부터 모세관 현상에 의해 물을 빨아들인다. 동결의 진행과 물의 공급이 원활해지게 되면 흙은 팽창하게 되는데 이는 동결된 토립자 사이의 평균 간극이 동결되기 전에 비해 훨씬 확장되게 되고, 확장된 토립자 사이의 간극의 물은 동결된 얼음으로 남아 지속적인 수분 공급으로 인해 얼음 결정체가 점점커지기 때문이다. 이런 현상을 동상이라 부르고 기본적인 구조는 Fig. 2-2와 같다.

동상시 흙에 지속적으로 수분이 공급되지 않는 폐쇄형 동상의 경우에는 최대 9%의 체적팽창을 나타내지만, 북해도 대학에서 실측한 결과에 의하면 지속적으로 수분이 공급되는 개방형 동상의 경우에는 추위가 길게 지속되게 되면 그 체적이 250%까지 팽창하기도 한다고 한다<sup>2)</sup>. 이때 흙 입자 사이를 확장하는 동상압이 발생하여 상수도관, 가스관, 도로, 철도, 건축물, 송전탑, 옹벽 등의 구조물을 파괴하거나 내구성에 중대한 결함을 초래하게 된다.

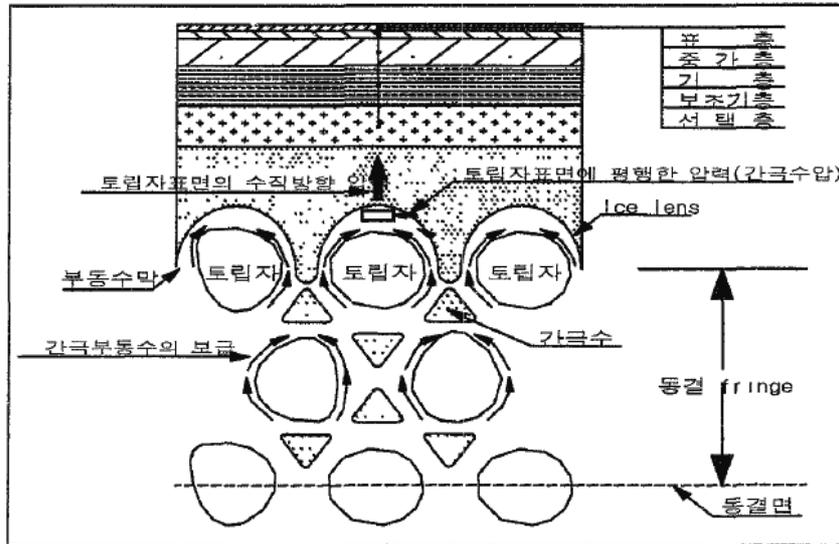


Fig. 2-2 동상의 메커니즘

이 팽창하는 동상압은 흙의 종류와 추위의 정도에 따라 다르지만 점성토 지반일 경우 2001년 겨울 강원도 대관령지역에 찾아 온 추위만으로  $150 \text{ ton/m}^2$ 의 동상력을 발휘한 적도 있다<sup>②</sup>. 또한 흙 내부의 수분은 전부 얼지 않고 흙의 성분에 따라 어느 정도의 부동수분으로 잔존하기도 하는데 온도가 저하함에 따라 감소하게 되고, 일반적으로 흙의 입경이 클수록 부동수분량도 감소한다.

토립자 표면에 부착된 수분(부동수분)은  $0^\circ\text{C}$  에서는 얼지 않는다. 반면 동결면으로 향하여 흐르는 물은 자유수로서 동결면에서 부터 얼음층이 된다. 동결토는 몇 가지 형태의 얼음으로 나타내는데 토립자 표면에 아주 작은 얼음 렌즈에서 부터 커다란 얼음조각과 거대한 얼음조각에 이르기까지 범위가 다양하다.

## 2.1.2 동결토의 물리적 성질

동결토를 구성하는 성분들에는,

1. 고체 (흙입자)
2. 점소성체 (얼음)
3. 액체 (비동결수)
4. 기체 (공기, 증기)가 있으며,

설계시 중요한 동결토의 성분으로는,

1. 총함수량 ( $\omega_t$  (%))
2. 얼음의 함량 ( $\omega_i$  (%))
3. 동결토의 밀도 ( $\rho_f$ )
4. 동결토의 건조밀도 ( $\rho_{fd}$ )
5. 얼음의 포화도 ( $S_i$  (%))가 있다. 각각은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{총함수량} \quad \omega_t = \omega_i + \omega_{uw} \quad (2-1)$$

$$\text{여기서,} \quad \omega_i = \frac{W_w}{W_s} = \frac{\text{물의 중량}}{\text{건조 흙의 중량}}$$

$$\text{얼음중량} \quad W_i = W_t - W_{uw} \quad (2-2)$$

$$\text{함빙량} \quad i_{ice} = \frac{W_i}{W_t} = \frac{\omega_i W_s}{\omega_t W_s} = \frac{\omega_t - \omega_{uw}}{\omega_t} = \frac{\omega_{uw}}{\omega_t} \quad (2-3)$$

$$\text{동결토의 밀도} \quad \rho_f = \frac{W}{V} \quad (2-4)$$

$$\text{동결토의 건조 밀도} \quad \rho_{df} = \frac{W_s}{V} \quad (2-5)$$

따라서,

$$\begin{aligned} \rho_f &= \frac{W}{V} + \frac{W_s + W_{iuw}}{V} = \frac{W_s}{V} + \frac{W_{iuw}}{V} \\ &= \rho_f + \omega_t \frac{W_s}{V} = \rho_{df} (1 + \omega_t) \end{aligned} \quad (2-6)$$

완전히 포화되었다고 가정하여, 비동결수는 없고 과잉 얼음은 존재한다고 하면,

$$\rho_f = \frac{G_s \rho_w (1 + \omega)}{1 + 1.09 (G_s \omega)} \quad (2-7)$$

$$\text{동결토의 건조단위중량} \quad \rho_{df} = \frac{\rho_f}{1 + \omega} \quad (2-8)$$

$$\rho_{df} = \frac{G_s \rho_w}{1 + 1.09 G_s \omega}$$

얼음의 포화도 ( $S_i$ )는

$$S_i = \frac{V_i}{V_v} = \frac{W_i}{\rho_i e V_s} = \frac{\omega G_s \rho_w}{\rho_i e} \quad (2-9)$$

일반적으로 포화도는 물의 부피와 간극부피의 비로 정의한다. 모든 간극이 물로 채워졌다면 포화도는 100%이다.

$$e = \frac{V_v}{V_s}, \rho = \frac{W_w}{V_w} \quad (2-10)$$

$$W_w = \rho_w V_w = \omega W_s = \omega V_s \rho_s$$

$$\rho_w S V_v = \omega V_s \rho_s$$

$$\rho_w S e = \omega \rho_s \quad (2-11)$$

## 2.2 동결토에 영향을 미치는 요소

동결토를 구성하는 4가지 성분에서 알 수 있듯이 일반적으로 동상의 3요소를 토질, 온도, 수분으로 정의하며 흙 자체의 성질과 관련되는 내적요인과 동결 중에 영향을 미치는 외적인 요인으로 구분할 수 있다. 공학적인 측면이 강한 내적요소들로는 흙의 입경, 비표면적, 간극수의 성질 등이 있으며, 외적인 요소들로는 재하속도, 동결속도, 지하수(수분), 온도 등 자연환경과 밀접하게 관계있는 요소들이 있다. 이런 수많은 요소 중에서 동결토에 지배적인 영향을 미치는 요소는 토질, 온도, 수분으로써 동상의 3요소가 동결토에 어떠한 영향을 미치는지 본 연구에서는 Cold Room 실험을 통하여 거동특성을 바탕으로 알아보기로 한다.

### 2.2.1 토질

토질이 동결토에 영향을 미치는 가장 큰 이유는 토립자의 크기에 의해 좌우되는 모관장력이라고 말할 수 있다. 토립자는 모관장력에 의해 지하수를 흡수함으로써 동결토에 지속적으로 수분을 공급하여 동결토의 체적 팽창과 빙정형성에 큰 영향을 미친다. 즉, 모래는 점토에 비해 지하수를 흡입하는 힘이 작

으며 따라서 모래지반은 동결하여도 빙정을 형성하지 않는다. 이것을 입경에 의해 구분하면, 입경이 0.2mm이상의 사질토에서는 동상이 거의 일어나지 않으며, 0.05~0.1mm입경을 가진 흙으로부터 동상이 발생하기 시작하여 입경이 작을수록 동상성이 강하게 되며 입경 0.005mm~0.002mm가 되면 동상성이 가장 강하게 된다. 하지만 그 이하의 입경에서는 토립자의 간극이 좁아 투수성이 나빠지고 동결면으로의 수분보합이 어려워진다<sup>(3)</sup>. 이런 사실을 바탕으로 본 연구에서는 사질토에 점토 함유비를 달리 해가면서 점토 함유비에 따라서 즉, 입경이 작은 흙이 일정 비율로 포함되었을 때 동결토의 거동이 어떻게 변하는지를 살펴보기로 한다.

### 2.2.2 온도

흙의 동결시 온도가 낮으면 낮을수록 동결이 잘 일어날 것으로 생각하기 쉽지만 날씨가 너무 추워 기온이 너무 낮아지게 되면 lens 모양의 얼음층이 생기지 않고 concrete 모양의 동결상태가 되기 때문에 동상이 일어나지 않는다(Table 2-1, 2-2 참조). 이는 기온이 낮으면 동결의 진행이 빨라져 동결면으로 수분의 공급이 충분하지 않기 때문에 온도와 동결과의 관계가 비례관계 성립되지 않을 수도 있기 때문이다<sup>(4)</sup>.

Table 2-1 동결유형

	1	2	3	4	5
유형	콘크리트 모양의 동결	미세한 서리모양의 콘크리트 동결	미세한 서리 모양	서리모양	서리 기둥 모양
설명	빙정이 확인되지 않음	일부에 빙정이 가늘다	빙정이 매우 가늘고 촘촘함	1~2mm 두께 정도의 빙정	순수한 서리 기둥 모양

Table 2-2 동상판정방법

	동 결 유 형	동상율 (%)	판 정
1	콘크리트 모양의 동결	20% 미만	합격
		20% 이상	요주의
2	부분적으로 매우 미세한 서리모양의 동결을 포함한 콘크리트 모양의 동결	20% 미만	요주의
		20% 이상	불합격
3	미세한 서리모양, 서리기둥, 얼음층 등 분명한 빙정 (ice lens) 분리 경향이 있는 동결	동상율의 크기에 관계없음	불합격

### 2.2.3 수분

수분의 공급에 따라 동상은 폐쇄형 동상과 개방형 동상으로 나뉘어 질 수 있다. 앞에서 언급했듯이 폐쇄형 동상은 지속적인 수분의 공급 없이 미동토내에 미리 포함되어 있던 수분만이 동결면을 향하여 이동함으로써 동결이 이루어지는 경우를 말하며, 개방형 동상은 미동토내에 지하수가 유입하여 지속적인 수분 공급이 이루어지는 경우를 말한다. 이러한 개방형 동상에서는 예측할 수 없을 만큼의 체적 팽창이 발생할 수도 있다. 특히, 흙속의 수분으로써 토립자 표면에 흡착하여 일정온도에서 일정시간이 지나도 동결되지 않는 부동수분은 동결토의 거동에 큰 영향을 미친다.

이런 부동수분은 전체 함수비에 대한 부동수의 비율로써 동결온도, 점토 함유율, 전해농도, 토립자의 구조, 포화도, 흙의 다짐정도, 자연함수비등에 영향을 받는다. 부동수의 양은 점토에서는 0°C일 때 24.5%, -1°C일 때 3.3%, -29°C에서는 1.7%이다. 입경이 커지면 부동수분의 양이 줄어든다. Silt질 흙에서는 0°C에서 10~15%이고, 사질토에서는 거의 0%이다. 벤토나이트와 같이 비표면적이 큰 흙은 동결점 이하에서 더 많은 부동수를 포함하고 있다<sup>(5)</sup>.

## 2.3 동결토의 공학적 성질

동결토의 공학적 성질들은 물리적 성질과 달리 공학적 성질을 변화시키는 여러 영향인자들(하중이 가해진 속도, 온도, 함수비, 결정입자, 흙의 종류)에 의해 민감하게 달라질 수 있다. 동결토의 강도는 온도와 시간의 함수이고, 동결토의 강도는 점착력과 흙-얼음 구조의 마찰력에 의존한다. 이런 동결토의 공학적 성질들은 여러 실험에 의해 경험적으로 구해진 값들이 많으며, 아직도 많은 변수들이 존재하고 있다. 하지만 인공 동결토를 만들고 실험을 하기 위해서는 고가의 실험장비가 필요하기 때문에 본 논문에서는 이제 막 장비를 갖추기 시작한 Cold Room(한국해양대 극지실험실)에서 수행할 수 있는 실험을 통해 동결토의 강도 특성을 연구하는데 초점을 맞추었다.

### 2.3.1 압축강도와 인장강도

동결토의 압축강도와 변형특성은 흙의 온도, 얼음의 함량, 변형속도, 동토의 구조(교란 및 비교란 시료), 동결토의 입도에 의존한다. 변형속도가 증가하거나 온도가 감소하면 동결토의 압축강도는 강해지며, 1.0 mm/sec의 높은 변형 속도와  $-40^{\circ}\text{C}$  이하의 저온에서는 탄성 거동한다<sup>(6)</sup>. 주어진 온도에 대한 변형속도와 압축강도는 (식 2-12)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_c = a + b(\theta)^n \quad (2-12)$$

여기서,  $\theta$ 는 주어진 온도,  $a$ ,  $b$ ,  $n$ 은 실험상수로 일반적으로  $n$ 은 1/2로 제안되고 있으며,  $a$ ,  $b$ 는 재하시간에 의존하는 변수로 재하시간이 증가함에 따라 감소한다. 여기서 중요한 것은 동결토의 순간강도는 단기강도(극한강도)와 같다고 보는 것과 장기 강도에서는 creep이 발생한다는 것이다.

보통 동결토의 장기 압축강도는 영구동토에서 구조물을 축조할 때 기초 지반을 평가하는데 가장 중요한 극한강도의 약 1/5~1/10까지 낮게 나타나며, 순간강도 보다는 더욱 작게(약 1/10) 나타난다. 극한강도의 경우와 같이 온도에 따른 장기강도의 특성은 (식 2-12)로 나타낼 수 있다. 동토의 인장강도는 압축강도보다 약 1/2~1/6 정도로 보고 있으며 압축강도와는 달리 사질토보다 점성토의 경우가 더 큰 인장강도를 나타낸다<sup>(7)</sup>. 그 외의 인장강도 특성은 압축강도의 특성과 매우 흡사하다. 본 연구에서는 이런 연구내용을 바탕으로 cold room 실험을 통해 동결토의 압축강도와 인장강도에 대해 알아본다.

### 2.3.2 전단강도

동결토의 전단강도에 영향을 미치는 주 영향요인은 흙의 온도, 수직응력, 하중재하 시간이며, 동결토의 전단강도는 두 가지 요소로 분리할 수 있다.

첫째, 변형에 대한 얼음의 저항 : 시간의존형 비구속압축강도

둘째, 흙 입자간의 접촉으로 인한 마찰력 : 시간독립형 경계응력하의 마찰저항변화

Vyalov(1969)는 동결토의 전단강도를 구하기 위해서 다음의 수정된 Mohr-Coulomb 파괴이론을 제안하였으며, 지금까지도 동결토의 전단강도를 구하는데 있어서 가장 많이 사용하고 있다.

$$\tau = C_t + \sigma_n \tan \phi_t \quad (2-13)$$

여기서,  $\tau$  : 전단강도

$\sigma_n$  : 전단면상의 연직응력

$C_t, \phi_t$  : 점착력과 내부마찰각 (온도와 시간의 함수)

이 식을 바탕으로 동결토의 전단강도의 두 성분에 대해 정의하면, 첫째는 Smooth Shear의 저항, 두 번째는 수직응력의 함수로서의 마찰저항이다.

식에서 점착력 성분인  $C_t$ 는 입자들 간의 물리적이거나 화학적인 접촉과 흙 간극 속에서 얼음이 형성되면서 입자들을 접촉시키는 것을 포함하여 입자들 사이의 분자인력에 기인한다. 점착력은 흙 입자들 사이에서 접촉하는 얼음의 넓이, 강도, 양에 영향을 받으며 이들은 각각 온도에 영향을 받는다. 실험 자료에 근거하여 Vyalov와 Shusherina(1970)은 점착력을 구하기 위해 (식 2-14)를 제한하였다.

$$C_t = \frac{\beta}{\log(t/B)} \quad (2-14)$$

여기서,  $\beta, B$  :  $\log t$  대  $C_t$ 의 도표에서 얻어지는 상수

$t$  : 상수

많은 경우 전단강도는 거의 점성에 의한 것이고, 변형률 속도가 낮을 때 빈빙동결토는 마찰반응을 나타내며, 부빙동결토의 강도와 변형 특성은 흙속에 있는 얼음의 거동에 영향을 받게 된다.

동결토의 극한전단강도는 온도가 낮을수록 커지고 내부마찰각과 점착력 모두가 증가하게 된다. 전단강도를 평가하는데 매우 중요한 것은 재하시간으로 특히 순간강도에 대한 장기강도의 감소비는 대단히 크다. 이러한 경우 동결토의 전단저항의 감소는 주로 점착력 성분의 감소에서 연유된다<sup>(6)</sup>.

### 2.3.3 동착력

동결토와 기초구조물과의 동착력은 영구동토에 기초를 설계할 때 이용되는 중요한 사항으로 초창기 30년대에는 동착력으로써 표준재하속도 15kg/cm<sup>2</sup>/min 하에서 구한 극한강도가 이용되었다. (Table 2-3)에서 보는 것처럼 극한 강도는 함수비가 증가할수록 증가하고 온도가 낮을수록 증가한다. 극한강도는 동토의 입경에 크게 영향을 받는데 모래를 중심으로 입경이 커지거나 작아질수록 동착력은 감소한다. 40년대 골드스테인의 장기 동착력 강도 실험 결과 이후, 동착력에 대한 접근 방향은 극한강도 혹은 순간강도에서 장기강도의 개념으로 수정되게 되었다<sup>(7)</sup>. 골드스테인은 장기강도가 극한강도의 평균 1/12정도에 해당된다고 하였으며, Thytovich. N. A (1975)의 연구에 의하면 기초구조물의 지반에 대한 상대변위까지 고려할 경우 용기력으로서의 장기강도는 이 값의 약 1/2까지 줄어든다고 하였다.

Table 2-3 흙과 나무 사이의 동착강도 (Thytovich. N. A, 1975)

흙의 종류	온 도( $\theta, ^\circ\text{C}$ )	함수비(%)	동착강도(kg/cm <sup>2</sup> )
<b>Sandy loam</b> (68% content of fraction from 1.0 to 0.05mm ; 8% smaller than 0.005mm)	-0.2	11.0	1.3
	-1.2	6.3	2.8
	-1.2	14.2	6.2
	-5.6	11.4	20.8
	-10.5	12.3	24.7
	-17.5	11.3	27.4
<b>Clayey soil</b> (36% content of fractions smaller than 0.005mm)	-0.2	21.3	2.9
	-1.5	20.9	5.9
	-5.8	22.1	11.1
	-10.8	22.1	18.6
	-9.9	1.4	0.9
<b>Gravel</b> (99% content of fractions from 2 to so mm)	-10.5	2.7	1.6

### 2.3.4 Creep 거동

Creep이란 일정한 체적을 가지고 시간에 의존하여 일어나는 회복할 수 없는 변형을 뜻한다. 이 정의는 영구적인 체적감소를 일으키는 압밀과 구별되는데 동결토는 낮은 응력수준에서도 Creep 거동을 하며 이는 얼음의 함량, 온도, 하중속도에 의존한다.

Creep의 물리적 과정은 동결토에서 흙 입자들이 얼음과 만나는 접점에서 얼음을 녹이는 압력을 야기하는 일정한 하중이 집중할 때 시간에 의존하는 과정으로써 설명된다. 동결토 속에 존재하는 응력의 차이는 녹은 얼음을 재동결될 수 있는 응력이 낮은 곳으로 이동시킨다. 이러한 이동 과정에서 흙 입자 사이의 구조적인 점착력과 얼음의 붕괴, 간극얼음의 소성변형, 흙 입자의 재조정 등이 동반된다. 이런 구조적 변형은 흙 입자들을 조밀하게 하는데, 입자들 사이의 접촉면을 점진적으로 딱딱하게 함으로써 강도를 증가시키고 내부마찰력을 증가시킨다.

이 과정의 역으로 구조적인 점착력은 감소되고 비동결수량은 증가된다. 만약 재하된 하중이 동결토의 한계 장기강도를 넘지 않는다면, 강도는 증가되고 변형의 속도는 시간에 따라 감소하며 이를 일차 크리프(감쇠변형)라고 한다. 하지만 하중이 한계 장기강도를 넘어서면 내부점착력의 감소는 강도 증가로 이어지지 않으며 변형속도가 시간에 따라 증가되며 크랙을 야기하는 3차 크리프(비감쇠변형)가 발생하게 된다. 1차와 3차 크리프 사이의 변형률 속도가 일정하게 유지되는 구간을 2차 크리프라고 한다. 정리해 보면 Creep는 변형률 속도에 따라 다음의 세 가지로 나뉜다.

1차 크리프 : 변형률 속도가 감소한다.

2차 크리프 : 변형률 속도가 일정하다.

3차 크리프 : 변형률 속도가 증가한다.

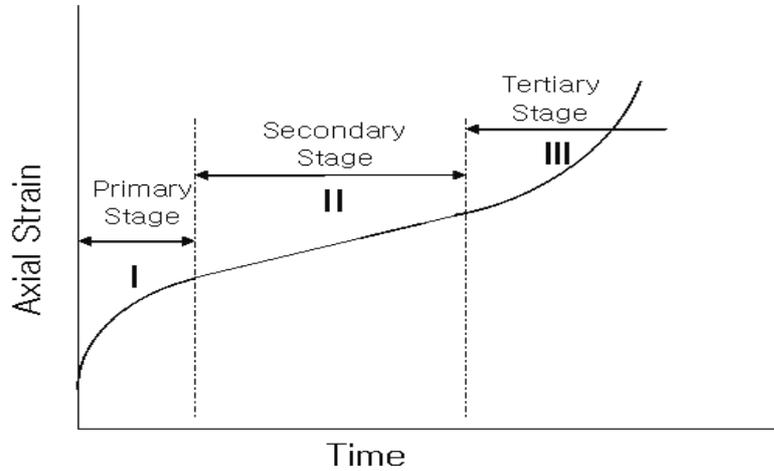


Fig. 2-3 3 단계 크리프 거동

### 2.3.5 융해압밀

융해압밀은 우리나라와 같은 계절적 동결토 지역에서 더욱 심각한 문제가 되고 있는 동결토의 공학적 성질 중에 하나로, 영구동결층이 녹아서 생기는 융해-침하(압밀) 현상과 규모면에서만 다를 뿐이지 이 두 가지 모두 침하량은 얼음층이 어느 정도로 형성되어 있는가에 달려 있다. 동결층에 함유된 순수얼음덩어리가 자연적이거나 인위적인 변화로 녹을 때, 큰 압력 감소의 현상으로 지표면에서 기포가 발생되기도 한다.

영구 동결토는 계속 얼어 있는 한 대부분의 구조물을 지지할 수 있지만 많은 양의 얼음을 함유하고 있는 지반은 계절적 요인으로 인해 녹기 때문에 공학적인 문제가 발생된다. 동결된 지반이 융해 될 때 중력과 재하된 하중의 영향으로 지반으로부터 물이 빠져나오기 때문에 침하가 발생한다. 이때 과잉 간극수압이 발생하게 되면 사면과 지반이 파괴된다. 융해가 상당히 빠르게 진행된다면 동결토는 얼음이 녹은 물과 흙 입자의 혼탁액이 되고 말아 중요한 하

중을 지지할 수 없게 된다. 반면 융해가 낮은 속도로 진행되면 물이 거의 같은 속도로 흙속에서 흘러나오기 때문에 과잉간극수압은 존재하지 않으며 침하 융해에 따라 발생한다. 그러므로 동결토의 융해압밀 특성에서는 융해속도와 양을 산정하는 것과 더불어 동결토의 자중과 구조물의 하중을 받는 상태에서의 동결토의 이차압밀과 융해에 연관된 과잉간극수압을 산정하는 것도 중요하다 할 수 있다.

또한 융해된 흙에서 물의 움직임이 시간에 따라 변하거나 매우 불규칙한 성질이 있으면 간극수를 배출하거나 저장하는 흙의 능력을 산정하는 이론도 요구된다. 이런 동결토의 융해 침하와 압밀 거동에 대한 지식은 다음과 같은 열을 발생하는 구조물 송유관, 도로 및 공항 등의 기초설계에 반드시 고려되어야 한다. 기초설계시 반드시 동결융해를 고려해야 하는 경우는 아래와 같다.

1. 융해를 피할 수 없거나 허용되는 지역의 건물 기초
2. 고온관을 매설
3. 물막이 구조물
4. 융해된 사면의 안정성
5. 제한된 동결방호만이 유효한 도로나 제방

해빙기가 되면서 기온이 올라가고 얼음이 녹으면서 지표면이 내구력을 잃어버리는 융해 압밀이나 융해 침하(Thaw Settlement) 동토가 융해되면서 얼음이 물로 변하여 소산됨으로써 토양구조의 변형과 체적변화를 일으키며, 이는 토양의 성질, 토양의 함수량, 밀도, 토양의 압축성에 따라 달라진다.

### Ⅲ. 실험 내용 및 방법

#### 3.1 시료의 물리적 성질

본 연구에 사용된 일축압축강도시험을 위한 시료는 주문진 표준사에 대표적인 점토인 카오리나이트를 중량비로 10, 20, 30% 비율로 섞어서 사용하였다. 이 세 가지 기본 시료의 기본 물성을 파악하기 위해 KS F 시험방법에 의해 체가름시험, 비중시험, 액, 소성시험, 다짐시험, 투수시험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 표준사와 카오리나이트는 노건조시킨 후 사용하였다. 기본 시료의 물리적 성질로 점토 함유비 10%인 시료는 균등한 모래, 점토 함유비 30%인 시료는 세립질 모래로 생각할 수 있다<sup>(8)</sup>.

Table 3-1 시료의 물리적 성질

물리적 성질		점토 함유비		
		10%	20%	30%
입도분포시험	#4	100	100	100
	#10	100	100	100
	#40	12.9	17.3	21.6
	#200	0.2	0.3	0.2
다짐시험	$\gamma_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	1.79	1.93	2.03
	$\omega_{opt}$ (%)	13.2	12.0	10.8
투수계수(k, cm/sec)		$4.17 \cdot 10^{-2}$	$8.25 \cdot 10^{-3}$	$1.40 \cdot 10^{-3}$
균등계수 (Cu)		1.76	1.88	1.98
곡률계수 (Cg)		1.22	1.24	1.23

## 3.2 Cold Room 실험 장비

### 3.2.1 Cold Room 사양

- Dimension : 4M \* 6M \* 2.6M
- Temperature Control : -30 deg ~ + 15 deg
- Temperature Accuracy :  $\pm 0.5$  deg at -20 deg
- Temp/ Humidity Controller : Digital PID Controller Automatic Defrost
- Interior Material : STS-316 Polished Plate
- Exterior Material : Polyurethane Pannel
- Compressor : 10 RT

### 3.2.2 Universal Testing Machine (만능재료시험기)

본 연구에 사용된 시험기는 저온에서 작동 가능 하도록 특수 제작되었으며, 인장, 압축, 굴곡, 항절 시험 등을 할 수 있는 만능재료시험기로서 종래의 지침식 시험기(Analog) 및 숫자식 시험기(Digit type)에서 발전된 것으로 하중을 전자식 감응 장치인 Load Cell로 감지하여 디지털 표시 장치로 표시하게 되며, 정밀도 및 내구성 면에서 훨씬 발전된 시험기이다. 또한 시험 중에는 시험 하중(Load)과 변형량(Elongation)의 관계를 Digital Display Panel 및 Computer로 Data를 계측함으로써 자료 분석이 용이하다(Fig. 3-1참조).

기계식 utm용 digital 인디케이터는 위와 같은 형태로 하중 인디케이터, 변위 인디케이터, Speed Controller로 구성되어 있으며, 하중 및 변위 인디케이터의 연계동작을 위하여 Start 및 End 신호를 연결하여 동작이 가능 하도록 되어 있으며 속도를 수동으로 설정 및 Computer에서도 설정이 가능하도록 되어 있다. Load 인디케이터는 하중을 표시하는 Digital 인디케이터로 Peak 및 파단검출 Over Load 설정 Start 신호 출력기능을 가지고 있다. DISP 인디케

이터는 변위량을 측정하는 인디케이터로 Exentio Meter와 병용해서 사용이 가능하도록 2단의 교정 값을 가지도록 하였으며, 수동 시험시 초기 하중이 가해지는 상태에서 시작하여 시료 파단시 계측이 멈추도록 되어있다. 이는 Load 인디케이터의 Start설정 값에서 시작하여 End 신호에서 정지한다.



Fig. 3-1 Universal Testing Machine

### 3.3 시편제작 및 추출

본 연구에 사용된 시편은 직경 100mm, 길이 210mm로 주문 제작된 아크릴 통을 몰드로 사용하고, 밀도를 균질하게 하기 위해 2.5kg 래머로 3층, 25회 다짐하여 제작하였다<sup>(9)</sup>. 점토 함유비에 따른 동토의 강도특성을 알아보기 위해 점토 함유비는 10%, 20%, 30%로 변화시켰고 이를 각각 K10, K20, K30으로 나타내었다.

또 함수비 변화에 따른 동토의 강도 특성을 알아보기 위해 함수비는 7%, 15%, 20% 로 변화시키고, 각각은 w7, w15, w20으로 나타내었다. 함수비는 이론식과 변수위투수시험기를 이용한 실험을 통해 점토의 함유비에 따른 각각의 시료에 대해 포화 함수비를 구하였다. 그 결과 각 점토 함유비에 따른 포화 함수비는 약 20%로 나타났고, 충분치 못한 실험 장비로 인해 과포화 상태의 시료를 다짐하는 데에 따르는 어려움으로 포화상태의 함수비까지만 실험하였다. 다짐된 시편은 동결과정에서 발생할 수 있는 수분 손실을 고려하여 랩으로 윗부분을 마감하였다. 시편의 동결은  $-15^{\circ}\text{C}$ 의 Cold Room에서 6일(144시간) 동안 진행되었고, 동결 온도와 동결시간에 따라 예민하게 달라질 수 있는 동토의 강도를 고려하여 모든 시편에 동일하게 적용시켰다.

6일간 동결시킨 시편은 동결과정에서 몰드와 시편 사이의 수분으로 인한 부착력이 크게 작용하기 때문에 다짐 시험시 시료를 추출하는데 사용되는 유압식시료추출기를 사용하여 추출하였다(Fig 3-2). 추출된 시료는 동결과정에서 시료 안에 포함된 수분에 의해 체적 팽창이 발생하여 일축압축강도 시험시 가압판과 맞닿는 부분이 평행하지 않아 시편에 편심이 작용하여 정확한 강도 실험을 할 수 없을 거라 판단되어 동결시 체적 팽창이 발생된 시편의 위, 아래 부분을 트리밍하여 압축시험에 사용하였다. 간접인장시험시에는 아크릴 몰드로 구속된 측면이 가압판과 접촉되므로 미소한 체적 팽창은 인장강도에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단되어 추출된 시편을 그대로 사용하였다.

Cold Room에서 동결되는 시편은 이론적으로 시편의 모든 부분이 균질하게 동결된다고 가정하고는 있지만 실질적으로는 100% 균질하지 않기 때문에 추출된 시편은 실험의 일관성과 결과의 오차를 줄이기 위한 방법으로 동결시킬 때의 위, 아래 방향을 표시하고 압축강도와 인장강도 시험시 방향을 고려하여 실험하였다.



Fig. 3-2 동토 시편 추출 모습

### 3.4 일축압축시험

동토의 압축강도는 동토의 가장 기본적인 공학적 성질로 이미 여러 연구자들에 의해 연구된 바 있다(Thytovich. N. A. 1975, K. K. Pekarakaya. 1966)<sup>(7)</sup>. 이들 연구에 의해 동결토의 강도는 온도와 시간의 함수임이 밝혀졌고, 흙의 강도는 점착력과 흙-얼음 구조의 마찰력에 의존한다고 알려져 있다. 빈빙점토(부피의 30%보다 얼음의 함량이 더 적을 때)의 강도는 입자 상호간의 마찰력에 의해 좌우되고, 부빙점토(부피의 30%보다 얼음의 함량이 더 클 때)의 강도는 흙-얼음구조의 점착력에 의해 좌우된다. 또한 동토의 압축강도와 변형특성은 흙의 온도, 얼음의 함량, 변형속도에 의존하게 되는데 변형속도가 증가하거나 온도가 감소하게 되면 강도는 강해지게 된다.

본 연구에서는 앞서 설명한 방법으로 제작된 동토시편을 이용해 cold room에서 일정한 온도 하에서 점토의 함유비와 함수비에 따른 일축압축시험

을 통해 동토의 공학적인 거동을 파악하였다.

하중 재하시, 변형 속도는 공시체 높이의 2%(4.2mm/mim)로 고정하였고 실험시 Cold Room의 온도는  $-15^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다. 파괴응력은 최대 하중(peak)이 나타날 때의 값을 일축압축강도로 하였다. 미리 준비된 w7, w15, w20의 동토 시편을 일축압축 시험기에 설치한다. 시편을 시험기에 설치할 때는 시편이 정확히 상, 하 가압판의 중심에 위치 할 수 있도록 주의를 기울여야 한다. 압축 시험시 시편이 파괴되면서 시료가 떨어져 나가면서 시험기에 고장을 일으킬 수 있을 것을 대비하고 파괴된 시편의 회수를 용이하게 하기 위해 시험기의 겉은 비닐로 감싸고 실험을 수행하였다.

또한, 실험 준비를 완료한 후에 사람이 들어가서 작업하느라 내려간 Cold Room의 온도가 정확히  $-15^{\circ}\text{C}$ 가 될 때까지 기다린 후 실험을 수행하였다. 실험 수행에 걸린 시간은 10~15분 정도였으며 함수비에 따라 최대하중을 보이는 시간에는 차이가 있었다. 실험이 끝난 후 파괴된 시편은 다시 시료 팬에 잘 담아 무게를 측정하고 건조시킨 후 함수비를 계산하여 실험 전, 후 함수비를 비교함으로써 정확한 함수비에서의 강도 특성을 알 수 있도록 하였다.

k10, k20, k30의 점토 함유비에 따른 시편 역시 앞서와 같은 방법으로 압축시험기에 설치하고, 온도가 일정해 질 때까지 기다린 후 실험을 수행하고, 파괴된 시편 역시 시료 팬에 담아 무게를 측정하고 실험 후 함수비를 계산하여, 실험 전, 후 함수비를 비교하였다.

### 3.5 간접인장시험

간접 인장 시험은 원주형 공시체에 대하여 연직 평면에 평행하게 작용하는 정적 및 반복 압축하중을 가함으로써 수행된다(Fig. 3-3 참조).

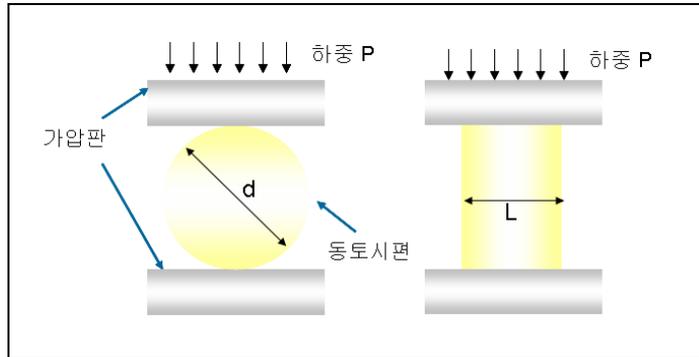


Fig. 3-3 간접인장실험 공시체 설치

이러한 하중 재하 방법은 하중 재하 방향과 연직 평면 방향을 따라 상대적으로 일정한 인장 응력이 발생하게 되는데, 궁극적으로 공시체의 연직 지름 방향으로 파괴가 일어나게 할 수 있다. 이러한 간접 인장 시험은 브라질과 일본에서 독자적으로 발전되어 왔다(Akazawa 1953, Hadley 1965 등). 간접 인장 시험의 단점은 시료에 발생하는 응력 상태가 현장에서 발생하는 응력상태와 다르다는 것과 해석이 직접인장 시험이나 휨 시험보다 훨씬 복잡하다는 것이다. 그러나 시험이 비교적 간단하고, 시료의 파괴가 비교적 균일한 인장응력 안에서 시작된다는 장점 때문에 유용하게 사용되고 있다.

파괴시의 극한 인장응력은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\sigma_f = \frac{2P}{\pi DL} \quad (3-1)$$

여기서,  $\sigma_f$  : 인장강도 (MPa)

$P$  : 최대하중 (N)

$D$  : 공시체의 지름 (mm)

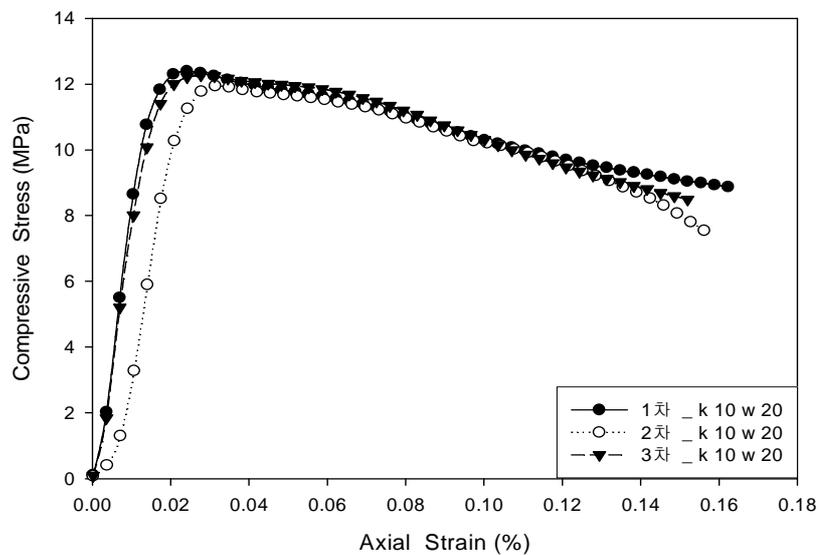
$L$  : 공시체의 길이 (mm)

이 같은 장점으로 본 연구에서도 동토의 인장시험은 간접인장시험으로 실시하였다. 일축압축시험과 같은 조건으로 시편을 제작하고 설치하여, 실험을 수행하였다. 일반적으로 동토의 인장강도는 압축강도보다 약 1/2 ~ 1/6 정도로 보고 있다<sup>(7)</sup>. 하중 재하시 변형 속도는 1mm/mim로 고정하였고 실험시 Cold Room의 온도는 모든 동결토 시편에 동일하게 -15°C로 일정하게 유지하였다. 시험기에 편심이 작용하지 않도록 시편을 재하대에 설치하고 Cold Room의 온도가 일정해 질 때까지 기다려 일축압축시험과 같은 방법으로 간접인장시험을 실시하였다. 시험은 KS F 에 명시된 표준시험방법에 의거해 실시하였다<sup>(9)</sup>.

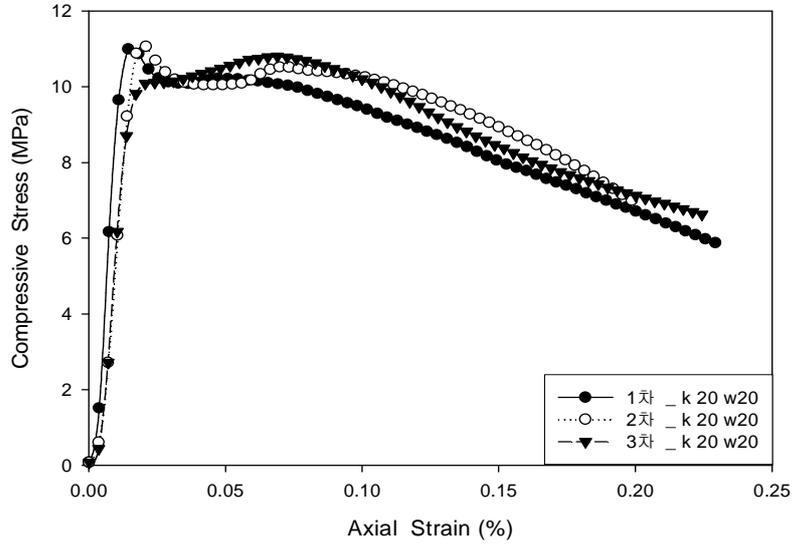
## IV. 실험 결과 및 분석

### 4.1 실험의 일관성

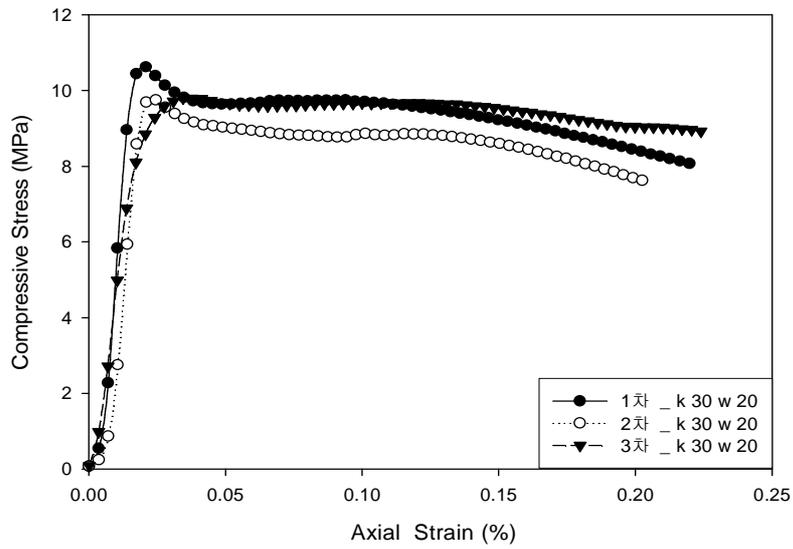
1, 2, 3차 실험 결과 3차례의 실험에서 점토 함유비와 함수비가 일정 할 때, 동토는 거의 같은 거동특성을 보였다. 시료를 다짐하는 과정이나 동결시키는 과정에서 발생하는 약간의 오차에 의해 조금의 강도차이를 보이기도 했지만 하중재하 속도가 같을 때 Peak 값을 나타내는 시기나 그때의 변형율은 거의 일치하고 있었다. 동토의 일축압축강도는 대략 3.0~14.0 MPa 사이의 값을 나타냈으며, 그때의 변형률은 0.2~0.4% 사이의 값들을 나타냈다. 아래 그래프들은 이러한 사실을 보여주고 있다(Fig. 4-1참조).



(a) k10w20일 때의 1, 2, 3차 일축압축실험 결과



(b) k20w20일 때의 1, 2, 3차 일축압축실험 결과



(c) k30w20일 때 1, 2, 3차 일축압축실험 결과

Fig. 4-1. 실험의 일관성

Table 4-1은 3차례에 걸친 동결토의 일축압축강도시험을 통해 얻은 최대압축강도의 값을 수치적으로 나타내고 있다. Fig. 4-1과 Table 4-1에서 보듯이 1, 2, 3차 시험 값들은 비교적 같은 값들을 나타냄을 알 수 있으며 이로써 본 연구에서 수행한 시험의 결과가 비교적 정확하다고 판단할 수 있다.

Table 4-1. 1, 2, 3차 동결토의 최대 일축압축강도

	Max Compressive Strength [MPa]			
	1차	2차	3차	평균
k10w7	4.21	5.17	5.33	<b>4.90</b>
k10w15	9.03	10.29	10.27	<b>9.86</b>
k10w20	11.96	12.39	12.28	<b>12.21</b>
k20w7	5.48	5.22	6.38	<b>5.69</b>
k20w15	10.41	9.65	10.43	<b>10.16</b>
k20w20	11.05	11.10	10.80	<b>10.98</b>
k30w7	3.43	3.51	4.05	<b>3.66</b>
k30w15	10.73	7.18	9.84	<b>9.25</b>
k30w20	10.63	9.80	9.81	<b>10.08</b>

## 4.2 일축압축시험을 통한 동결토의 강도 특성

본 연구에서 실시한 동결토의 일축압축시험을 통해 볼 때 동결토의 압축 강도는 3.0~1.04 MPa 사이의 값을 나타냈으며, 그 중 가장 큰 강도를 나타낸 시편은 점토 함유비 10%일 때 함수비 20%인 경우의 시편이었다. 이는 단적으로 세립질 보다는 사질토의 압축강도가 크며, 함수비가 포화함수비에 근접할수록 압축강도가 크다는 사실을 말해주고 있다. (Fig. 4-2)는 일축압축강도 시험시 파괴된 시편을 나타내고 있다.



Fig. 4-2 일축압축강도 시험시 파괴된 시편

#### 4.2.1 함수비에 따른 강도특성

본 연구에서 함수비에 따른 일축압축강도는 시료가 포화될 때까지는 함수비가 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있었다. 포화 상태 이후의 함수비에 대해서는 실험하기가 무척 까다로워 실제 실험을 수행할 수 없었지만 여러 문헌을 통해 볼 때 함수비에 따른 동결토의 일축압축강도는 포화상태까지는 함수비가 증가함에 따라 증가하고 포화이후 부터는 함수비가 증가함에 따라 강도가 감소하는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다<sup>(7)</sup>.

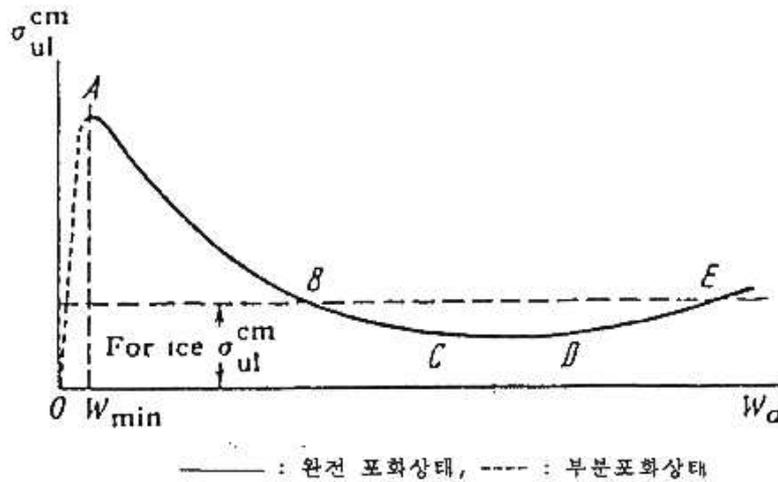
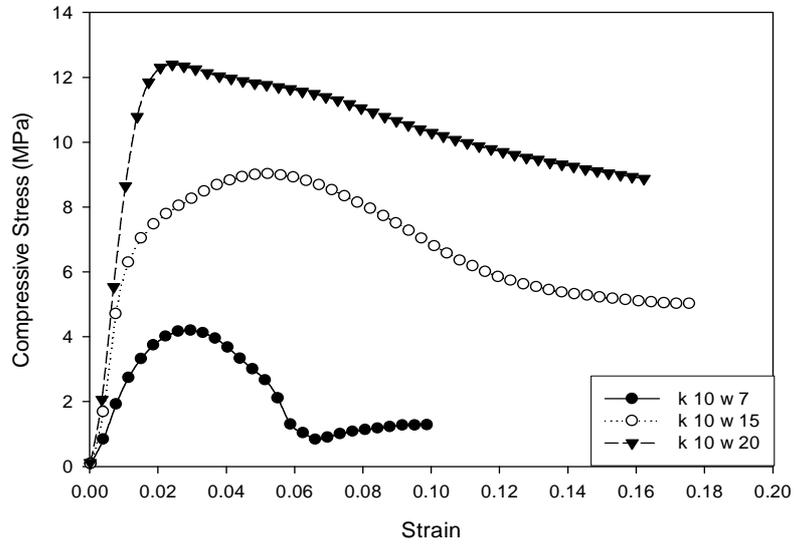


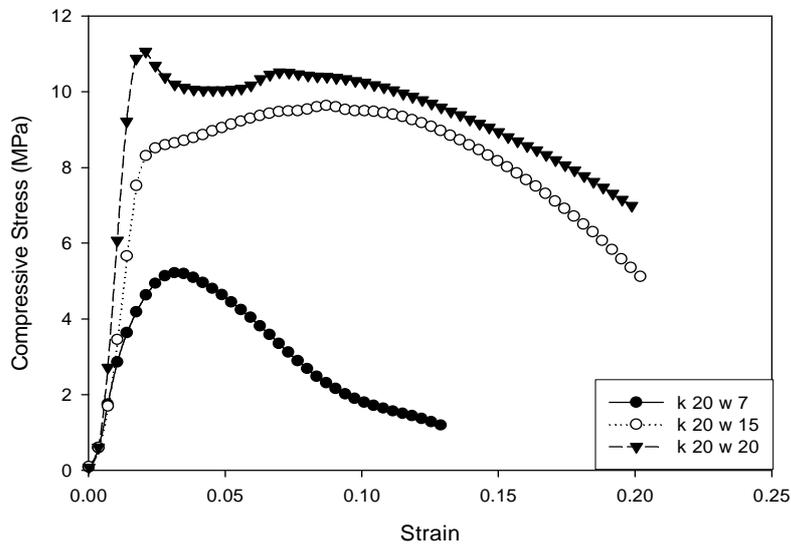
Fig. 4-3 함수비에 따른 동결토의 일반적인 압축강도 특성

또한, 불포화 상태에서 포화 상태 사이의 압축강도는 증가하는 경향을 보이지만 포화되고 난 후에는 얼음의 강도까지 감소한 후 더 이상 함수비가 증가하면 약간 감소하다가 다시 얼음의 강도로 수렴함을 알 수 있다.

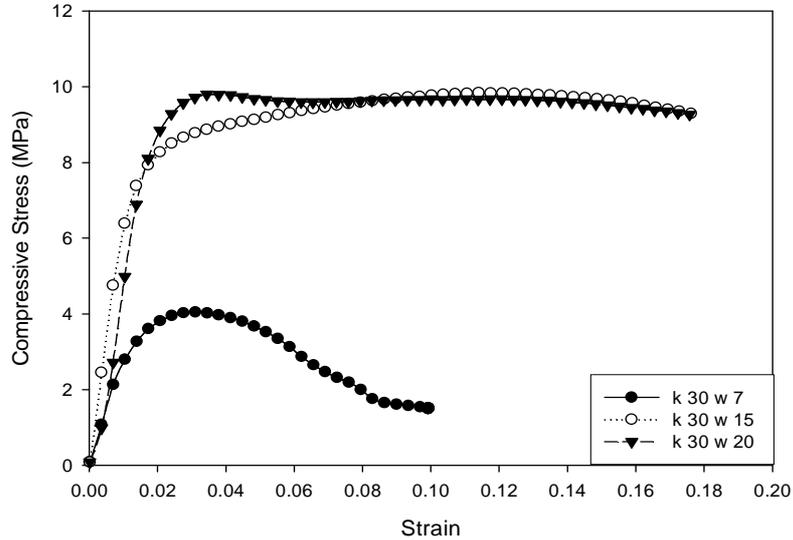
(Fig. 4-4)는 점토 함유비가 일정한 경우에 대해 함수비가 변화함에 따라 동토의 일축압축강도가 어떠한 거동을 보이는지를 나타내고 있다.



(a) 점토함유비가 10% 일 때 함수비에 따른 일축압축강도



(b) 점토 함유비가 20% 일 때 함수비에 따른 일축압축강도



(c) 점토 함유비가 30% 일 때 함수비에 따른 일축압축강도

Fig. 4-4 함수비에 따른 일축압축강도

3단계로 조절된 함수비를 갖는 동결토는 다른 조건이 모두 동일할 때 거의 모든 경우에서 함수비가 포화 함수비에 도달하면서 일축압축강도가 증가하는 것으로 나타났는데 특히 점토 함유비가 낮은 경우 함수비가 2배, 3배로 증가하면서 동결토의 압축강도 또한 함수비의 증가량과 비슷한 추세로 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 함수비가 7%에서 15%로 증가할 때 함수비가 15%에서 20%로 증가 할 때 보다 더 큰 강도 증가를 보였다.

이는 포화되기 전까지의 시편속의 수분은 토립자 사이에서 윤활유 역할을 하여 시편을 다짐할 때 다짐의 효과를 극대화시키고 이로써 시편의 간극을 최소화함으로써 동결토의 압축강도에 치명적인 영향을 미치는 시편 간극 속에 얼음 결정이 생길 수 있는 공간을 최소한으로 만들면서 동결토의 압축강도 증가에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

일축압축실험을 실시하여 파괴된 시편은 실험 후 실험실로 옮겨져 실험 후의 함수비 측정에 이용되었다. 이것을 통해서 본 연구에서 행하고자 하는 함수비에서의 실험이 확실히 이루어졌는지를 판단할 수 있었다. 실험과정에서 함수비를 조절하여 시료를 만들거나 시편을 다짐하는 과정, 시편을 동결시키는 과정에서 수분의 손실이 발생할 수 있다. 또 추출한 시편을 트리밍하는 과정에서 다짐하면서 시편 위로 올라온 수분들이 윗부분에 모여 동결 되어 있었는데 그 부분을 잘라내면서 발생하는 수분의 손실도 무시하지 못할 것이라 생각된다. 따라서 실험 전 시편을 성형하는 과정에서의 함수비와 실험 후 재 측정된 함수비에 대한 차이는 필연적이기는 하나, 그 값이 크게 차이나지 않기 때문에 미소한 함수비의 오차는 전체적인 동결토의 거동특성을 파악하는데 있어서는 무시할 수 있는 정도라고 판단된다.

Table 4-2 실험 전, 후 함수비 변화

함수비 (%)	1차		2차		3차	
	실험 전	실험 후	실험 전	실험 후	실험 전	실험 후
10	7	6	7	6	7	7
	15	14	15	14	15	15
	20	18	20	18	20	18
20	7	4	7	6	7	7
	15	17	15	13	15	15
	20	19	20	17	20	15
30	7	7	7	9	7	7
	15	13	15	14	15	15
	20	18	20	17	20	19

그러나 1차 k20w15와 2차 k30w7의 시편의 경우는 다른 시편과 달리 실험 후 함수비가 증가하는 현상을 보였는데 이는 실험과정에서 여러 차례 시료의 중량을 측정하는 과정에서의 오차와 시편 파괴 후 시료의 유실에서 발생되었다고 판단된다.

함수비 변화에 따른 동결토의 강도특성은 (Fig. 4-5)에서 더욱 확실히 알 수 있다. 점토함유비에 따라 약간의 차이가 있긴 하지만 대체적으로 함수비가 포화함수비에 접근할수록 강도는 증가하는 경향을 보인다. 하지만 강도 증가율은 점차 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 시료의 최적함수비 부근에서 강도 증가율은 가장 크다는 것을 확인 할 수 있다.

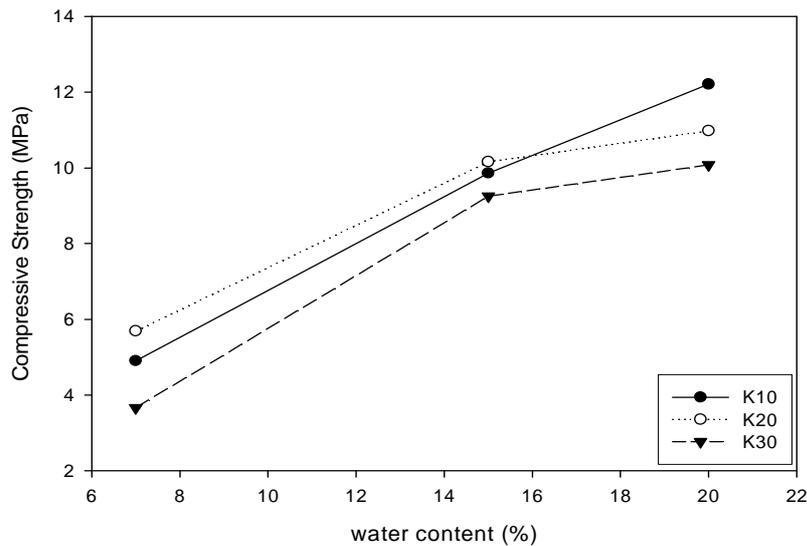


Fig. 4-5 함수비에 따른 일축압축강도 거동 특성

#### 4.2.2 점토 함유비에 따른 강도특성

본 연구에서 일축압축강도시험을 위한 시료는 주문진 표준사를 이용해 사 질토에 대하여 점토 함유비에 따라 동토의 강도 특성이 어떻게 변하는지에 대해 실험을 통해 알아보았다. 점토 함유비는 중량비로 표준사에 각각 10%, 20%, 30% 로 변화 시켰다. 실험결과  $-15^{\circ}\text{C}$ 의 같은 온도에서 점토 함유비에 따른 동토의 강도는 낮은 함수비 (w7)에서는 점토분의 함유비가 20%일 때는 10%에 비해 크게 나타났지만 30%일 때는 20%일 때 보다 작게 나타났다.

즉, 점토 함유비에 따른 일축압축강도는 20% > 30% > 10% 순으로 나타나는데 이는 어느 정도의 점토 함유율은 동결토의 강도 증가에 영향을 주지만 어느 이상을 넘어가게 되면 오히려 동결토의 강도를 저하시키는 결과를 초래한다는 것을 나타낸다. 그것은 점토와 같은 미립분의 함유량이 많을 경우 동토 속에는 부동수분의 양이 많아지기 때문인 것으로 파악된다.

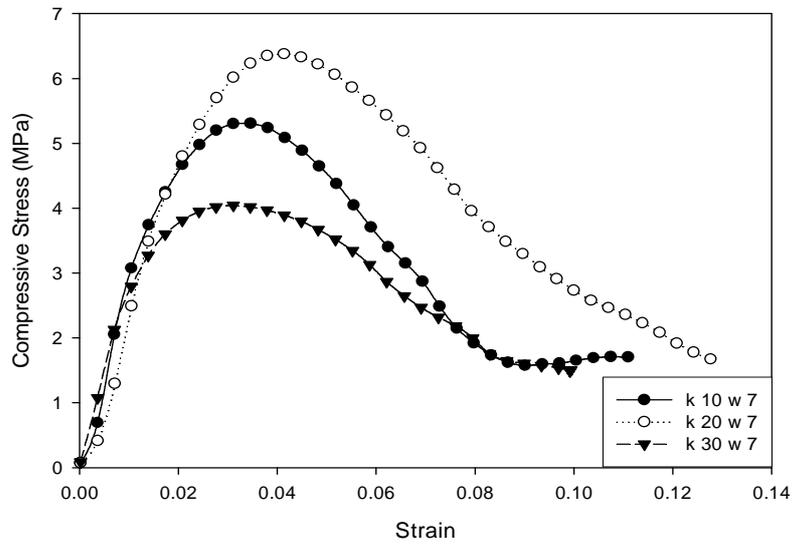


Fig. 4-6 낮은 함수비 (w7)에서 점토 함유비에 따른 일축압축강도

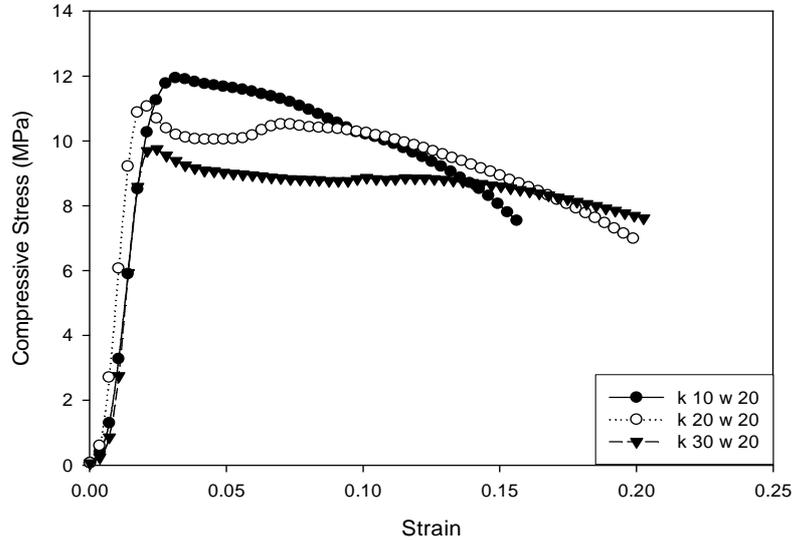


Fig. 4-7 포화함수비 부근(w20)에서 점토 함유비에 따른 일축압축강도

그러나 이와는 다르게 높은 함수비에서는 점토 함유비에 따른 동토의 강도에 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있었고, 낮은 함수비에서와는 달리 점토 함유분이 가장 적은 동토 시편이 가장 큰 강도를, 점토 함유분이 가장 많은 동토 시편이 가장 작은 강도를 나타내었다. 이는 함수비가 작을 때는 함수비에 비해 점토 함유비가 동토의 강도 특성에 더 영향을 미치지만 함수비가 커질수록 점토의 함유비 보다는 함수비에 의해 동토의 강도 특성이 달라진다는 것을 나타낸다. 그리고 함수비가 낮은 경우든 높은 경우든 점토 함유비가 가장 많이 포함된 k30의 경우의 압축강도가 가장 작게 나왔는데 이것은 점토의 함유비가 많아짐으로써 부동수분의 양이 많아져서 강도의 저하가 발생되었다고 생각할 수 있다. 그 이유는 점토는 모래에 비해 모관장력에 의해 수분을 흡입하는 흡입력이 크기 때문에 점토 함유비가 많아질수록 작용하는 모관인력이 커져 시편의 부동수분의 양이 증가하고, 그로 인해 일축압축강도는 저하되게 되는 것이다.

Table 4-3 점토 함유비에 따른 1, 2, 3차 Max Compressive Strength

	Max Compressive Strength [MPa]			
	1차	2차	3차	평균
k10w7	4.21	5.17	5.33	4.90
k20w7	5.48	5.22	6.38	5.69
k30w7	3.43	3.51	4.05	3.66
k10w15	9.03	10.29	10.27	9.86
k20w15	10.41	9.65	10.43	10.16
k30w15	10.73	7.18	9.84	9.25
k10w20	<b>11.96</b>	<b>12.39</b>	<b>12.28</b>	<b>12.21</b>
k20w20	11.05	11.10	10.80	10.98
k30w20	10.63	9.80	9.81	10.08

결과적으로 볼 때 동결토의 압축강도는 시료에 따라 다르겠지만 포화직전의 함수비와 가장 적은 점토분을 함유하고 있을 때의 강도가 가장 크다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다.

본 연구에서 수행한 9가지 경우의 시편에 대한 일축압축강도실험에서 얻은 응력-변형을 그래프는 크게 두 가지의 형태로 나누어 볼 수 있었다 (Fig.4-8 참조). 첫 번째 형태는 하중이 꽤 높은 Peak 값을 보이면서 동결토의 파괴가 일어난 후 하중이 급격히 떨어지는 형태와 낮은 하중에서 파괴가 일어난 후 하중 값이 떨어지는 속도가 아주 느리거나 떨어지지 않고 꾸준히 올라가는 형태였다. 두 가지 형태의 그래프를 분리해서 확인해 본 결과 점토 함유비가 30%인 시편의 경우에서 두 번째 형태의 그래프를 볼 수 있었고, 점토 함유비가 10%와 20%에서 첫 번째 형태의 그래프를 확인 할 수 있었다. 점토의 함유비가 많아질수록 시료가 점성토의 성질을 띤다고 볼 때 위의 사실로 세립질 동결토와 사질토 동결토의 대표적인 압축응력-변형률 거동 특성을 파악 할 수 있었다.

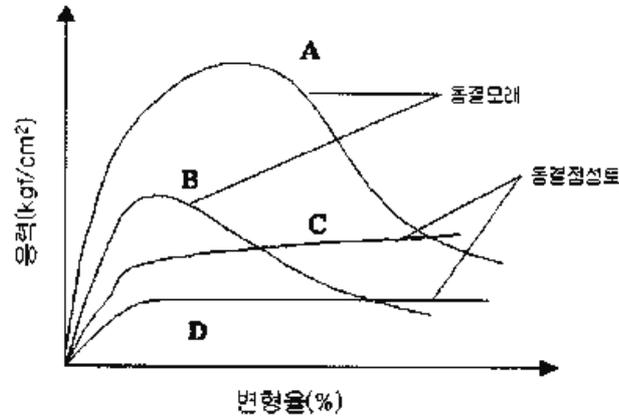


Fig. 4-8 흙의 종류에 따른 응력-변형률

(Fig. 4-9)는 점토 함유비에 따른 압축강도 거동 특성을 보여 주고 있다. 점토 함유비가 증가할 때 함수비가 낮은 w7, w15의 경우는 약간의 강도 증가를 보이기는 하지만 대체적으로 강도는 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이것은 점토 함유비의 증가와 함께 부동수분양도 증가했기 때문으로 판단 된다.

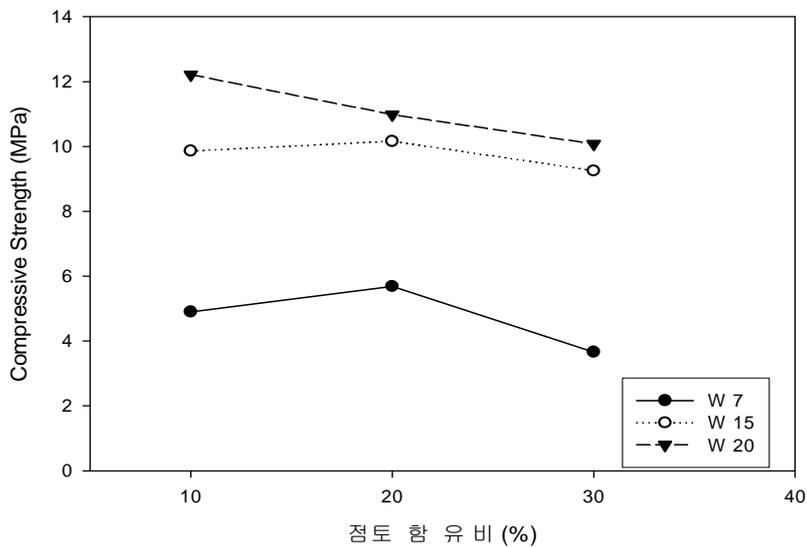


Fig. 4-9 점토 함유비에 따른 일축압축강도 거동 특성

### 4.3 간접인장시험을 통한 동결토의 강도 특성

동결토의 인장강도는 압축강도의 1/3~1/4정도의 값을 나타내고 있음을 실험을 통해 알 수 있었다. KS F 에 명시된 표준시험방법에 의해 실시된 간접인장시험의 공시체 설치 모습은 (Fig. 4-10)과 같다.



Fig. 4-10 간접인장시험의 시편 설치 모습

1mm/min 의 하중재하속도로 간접인장시험을 실시한 결과 실험시간은 일축압축강도와 비슷하게 10분 내외의 시간에서 시편이 파괴되었다. 파괴된 동결토의 시편은 (Fig. 4-11)와 같은 수직 균열의 양상을 보였다.



Fig. 4-11 간접인장실험으로 파괴된 동결토의 모습

또한 일축압축실험에서처럼 시편이 서서히 파괴되는 연성파괴의 형태를 띠는 시편이 대부분이었지만 시편이 갑작스럽게 파괴되는 취성파괴의 형태를 보이며 하중 값이 큰 폭으로 떨어지는 경우도 볼 수 있었다(Fig. 4-13참조).

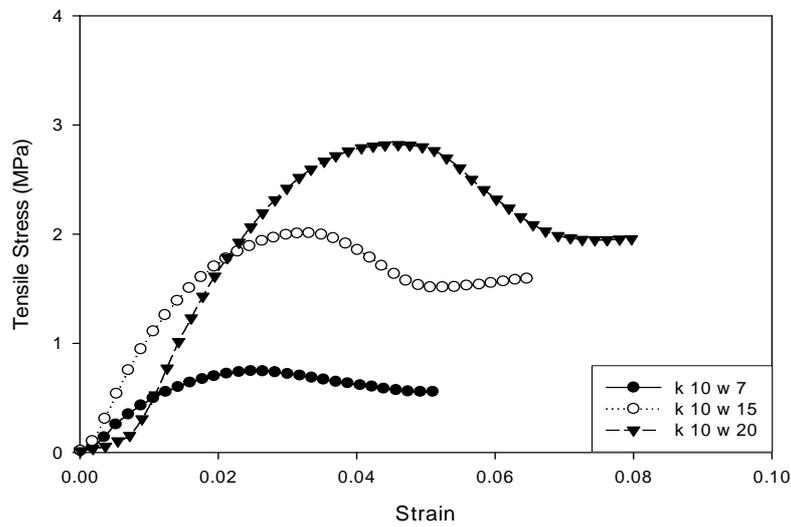
#### 4.3.1 함수비에 따른 강도 특성

동결토의 간접인장시험결과인 (Table 4-4)를 통해 볼 때 인장강도는 압축강도에 비해 굉장히 작은 값을 나타냄을 알 수 있었는데, 강도의 크기는 달랐지만 압축강도와 마찬가지로 함수비가 포화 함수비로 근접해 갈수록 인장강도는 커지는 경향을 보였다. 특히 함수비가 7%에서 15% 변할 때는 인장강도가 2~3배 정도로 급격히 증가하지만 함수비 15%에서 20%로 증가할 때는 점토함유비가 적은 경우를 제외하고는 강도의 증가가 거의 없었다. 동결토의 인장강도는 0.7~2.8 MPa 범위의 값들을 나타냈다.

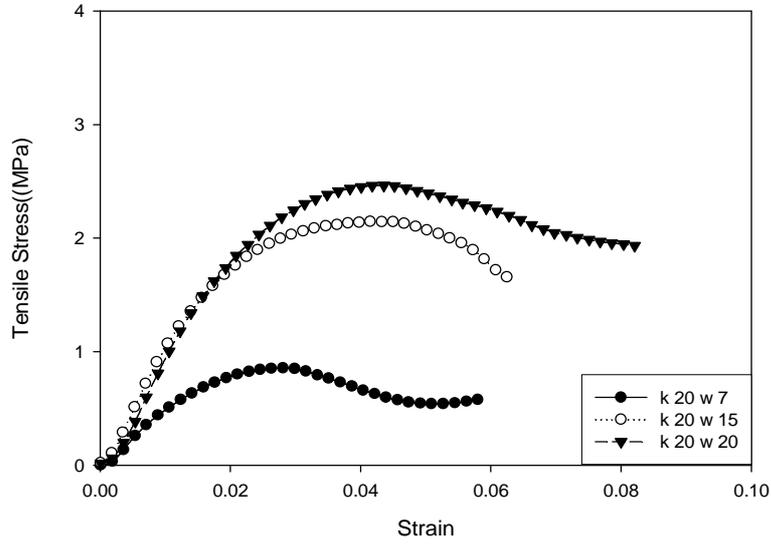
Table 4-4 함수비에 따른 1,2,3 차 Max Tensile Strength

	Max Tensile Strength [MPa]			
	1차	2차	3차	평균
k10w7	0.98	0.82	0.53	<b>0.78</b>
k10w15	2.49	2.01	1.49	<b>2.00</b>
k10w20	2.88	2.82	2.69	<b>2.80</b>
k20w7	1.17	0.99	0.90	<b>1.02</b>
k20w15	2.93	2.40	2.26	<b>2.53</b>
k20w20	2.96	2.76	2.59	<b>2.77</b>
k30w7	0.75	0.63	0.53	<b>0.64</b>
k30w15	2.55	2.36	2.20	<b>2.37</b>
k30w20	2.78	2.52	2.28	<b>2.53</b>

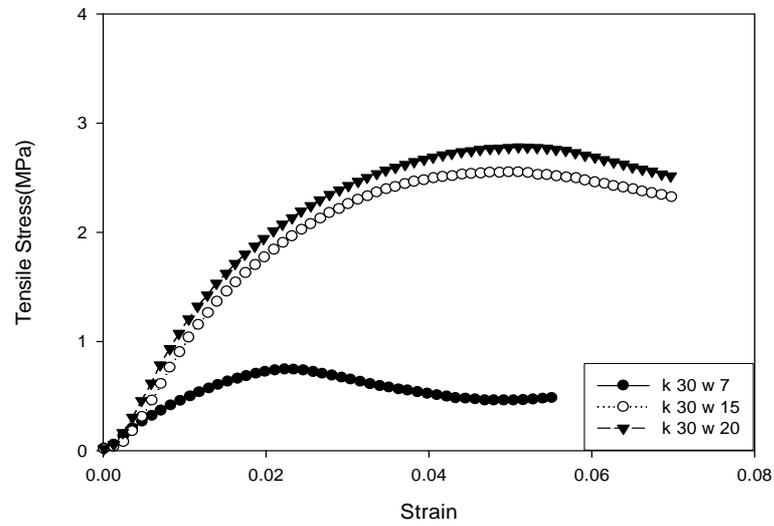
(Fig. 4-12)에서 볼 수 있듯이 동결토의 인장시험의 인장강도-변형을 그래프를 살펴보면, 압축시험의 응력-변형을 그래프와는 달리 점토 함유비가 커질수록 첨두(peak)응력이 잘 나타나지 않고 있음을 알 수 있다.



(a) 점토 함유비가 10% 일 때 함수비에 따른 인장강도



(b) 점토 함유비가 20% 일 때 함수비에 따른 인장강도



(c) 점토 함유비가 30% 일 때 함수비에 따른 인장강도

Fig. 4-12 함수비에 따른 인장강도-변형률

하지만 그와는 반대로 동결토의 함수비에 따른 인장강도시험에서 특이했던 점은 (Fig. 4-13)과 같이 일축압축강도 실험에서는 볼 수 없었던 갑작스러운 파괴, 즉 취성파괴였다. 취성파괴는 일반적인 재료들에서도 파괴를 예측할 수 없기 때문에 중요한 요인 중의 한가지로 분류된다.

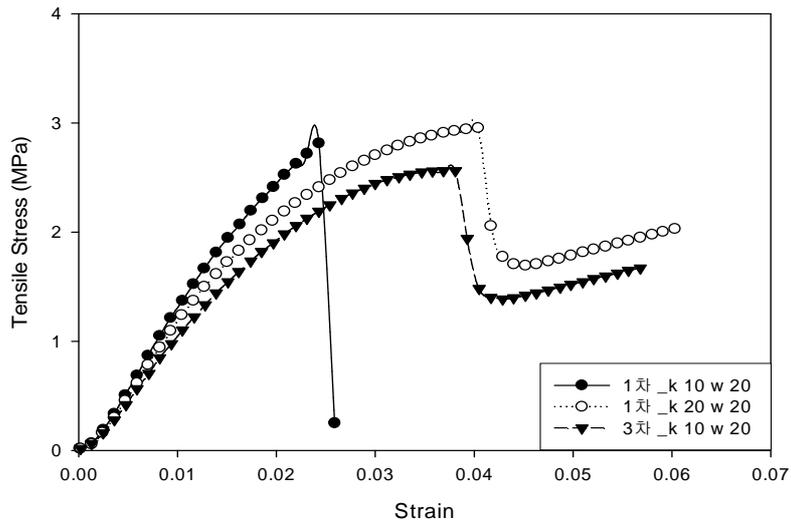


Fig. 4-13 취성파괴를 나타내는 동결토

동결된 흙은 일반 흙과는 달리 콘크리트 정도의 큰 압축강도를 갖게 된다. 콘크리트는 토목 분야에서 압축에는 강하지만 인장에는 굉장히 취약한 재료의 하나로 알려져 있다. 이런 취약점을 보완하기 위해 콘크리트에 철근이나 섬유를 넣는 방법 외에도 여러 가지 방법들이 개발되고 있으며 이것은 취성파괴를 방지하고 연성파괴를 유도하기 위한 방법이다. 동결토의 간접인장시험을 통해서 동결토 역시 인장에는 취약하며, 콘크리트와 비슷한 취성파괴를 보였는데, 특히, 낮은 점토 함유비의 20%의 함수비에서 취성파괴의 거동을 많이 보였다. 이러한 동결토의 성질은 앞으로 우리가 극지방에 진출했을 때 여러 가지 문제점을 야기 시킬 수 있는 근본적인 원인이므로 이에 대한 연구가 향후 계속 되어야 할 것이다.

또한, 이러한 점은 동결도가 포화상태 이후부터는 얼음의 강도로 수렴한다는 Thytovich. N. A (1975)의 연구내용을 통해 볼 때 인장강도시험에서 보인 취성파괴의 관찰이 모두 함수비가 20%인 포화상태와 가까운 함수비에서 발생했다는 점과 얼음이 취성재료의 특성을 나타낸다는 점은 동결도가 포화상태 이후 얼음의 강도로 수렴한다는 연구 결과를 확인 할 수 있게 해주었다. 또한 이런 결과를 보이는 이유는 동토의 함수비가 증가하면서 상대적으로 토립자 보다 수분의 양이 많아지면서 동토의 성질이 얼음의 성질로 바뀌는 것으로 생각된다.

결과적으로, (Fig. 4-14)에서 보는 바와 같이 함수비에 따른 동토의 인장강도 거동 특성은 압축강도와 비교했을 때 작은 값을 나타내기는 하지만 함수비가 포화함수비에 근접할수록 강도가 증가하며 최적 함수비 부근에서 가장 큰 강도 증가를 보이며 압축강도의 거동과 거의 유사한 거동 특성을 보임을 알 수 있었다.

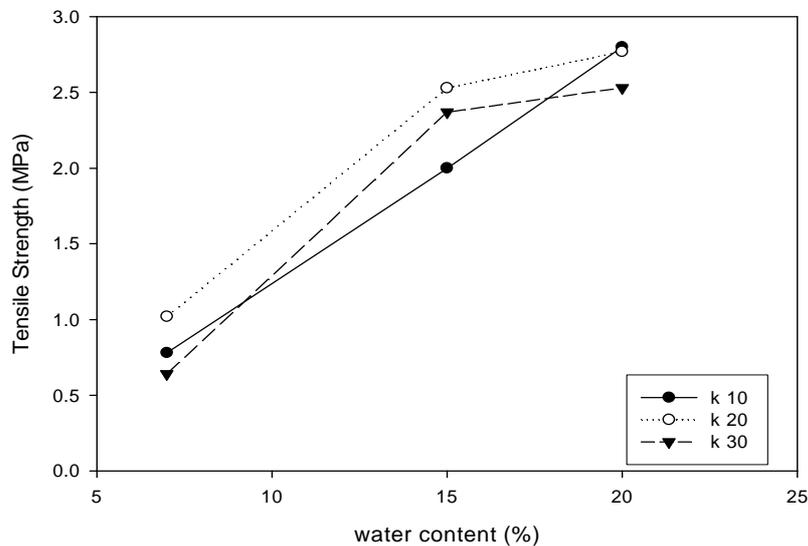


Fig. 4-14 함수비에 따른 인장강도 거동 특성

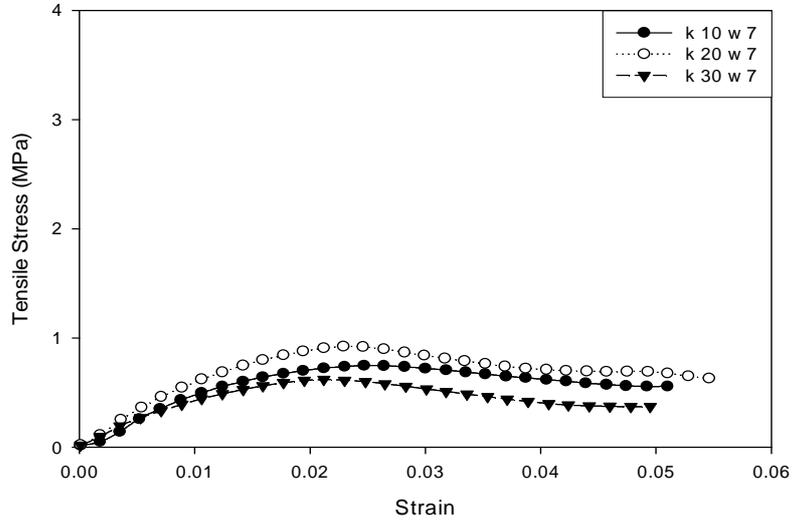
### 4.3.2 점토 함유비에 따른 강도 특성

사질토인 주문진 표준사에 10, 20, 30%로 점토 함유비를 조절하여 시편을 만들어 점토 함유분이 동결토의 인장강도에 어떤 영향을 주는지 알아본 이 실험에서 함수비가 일정할 때 어느 정도의 점토 함유비는 동결토의 강도에 긍정적인 영향을 끼치지만 정도가 지나칠 경우에는 동결토의 인장강도 감소를 가져 왔다. 특히 이런 영향은 함수비가 클 때보다 함수비가 작은 경우에 더 크게 나타났으며 이는 사질토 속의 점토 함유분들이 보다 많은 부동 수분을 포함함으로써 동결토의 인장강도의 감소를 가져왔다고 볼 수 있다. (Table 4-5)는 점토 함유비에 따른 1, 2, 3차 간접인장시험의 결과 값을 나타낸다.

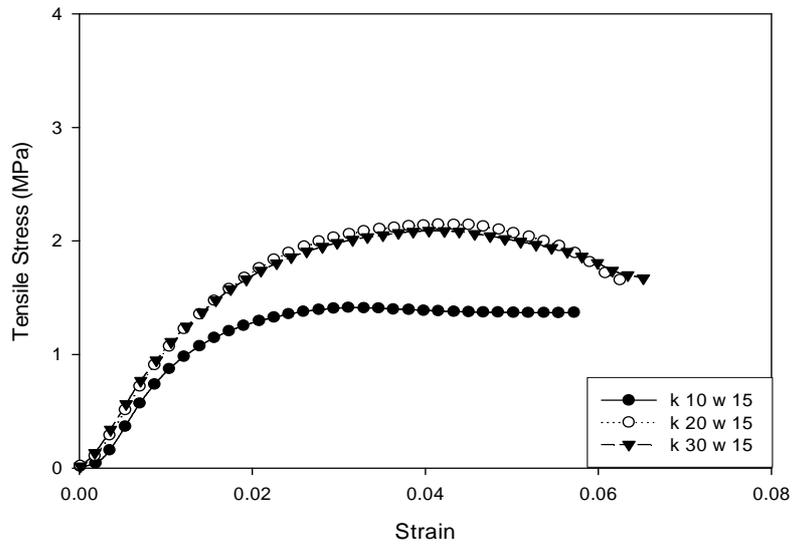
Table 4-5 점토 함유비에 따른 1,2,3 차 Max Tensile Strength

	Max Tensile Strength (MPa)			
	1차	2차	3차	평균
k10w7	0.98	0.82	0.53	<b>0.78</b>
k20w7	1.17	0.99	0.90	<b>1.02</b>
k30w7	0.75	0.63	0.53	<b>0.64</b>
k10w15	2.49	2.01	1.49	<b>2.00</b>
k20w15	2.93	2.40	2.26	<b>2.53</b>
k30w15	2.55	2.36	2.20	<b>2.37</b>
k10w20	2.88	2.82	2.69	<b>2.80</b>
k20w20	2.96	2.76	2.59	<b>2.77</b>
k30w20	2.78	2.52	2.28	<b>2.53</b>

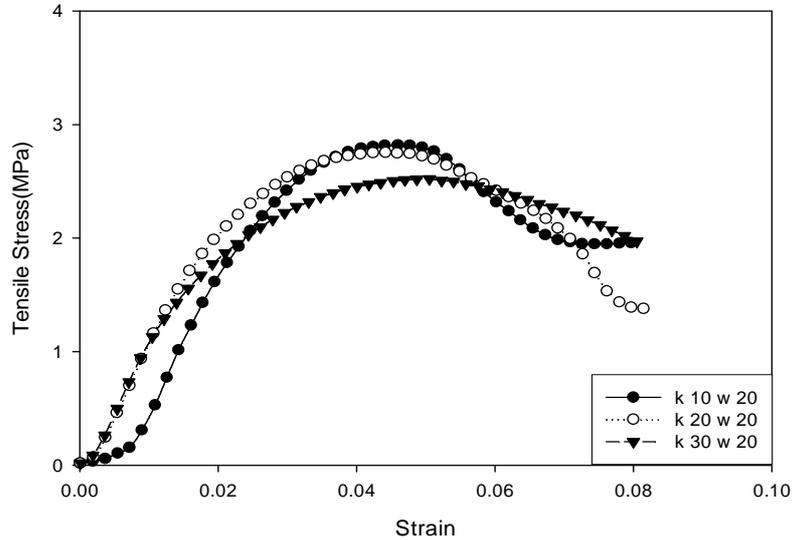
그러나 (Fig. 4-15)에서 보면 알 수 있듯이, 점토 함유비가 동결토의 강도에 영향을 미치는 것은 하나, 앞서 살펴본 함수비가 동결토의 인장강도에 영향을 주는 것보다는 그 영향력이 작다는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 살펴본 동결토의 일축압축강도와 같은 경향을 나타냈다.



(a) 함수비가 7% 일 때 점토 함유비에 따른 인장강도



(b) 함수비가 15% 일 때 점토 함유비에 따른 인장강도



(c) 함수비가 20% 일 때 점토 함유비에 따른 인장강도

Fig. 4-15 점토 함유비에 따른 동결토의 인장강도

함수비가 7% 일 때 점토 함유비에 따른 동결토의 인장강도는 거의 변화가 없었으며, 함수비가 15% 일 때 약간의 강도 차이를 보였다. 점토 함유비에 따른 동결토의 인장강도에 대한 실험 결과로 동결토의 강도가 가장 클 때 최적의 점토 함유비를 찾아낸다면 향후 동결토 지반을 개량하는 문제에 있어서 좋은 해결책이 될 것이라 생각된다. 동상을 일으키는데 있어서 함수비 못지않게 점토 즉 미립분의 함유비도 많은 영향을 끼친다. 미립분 함유량이 많아지면 열전도율이 커지기 때문에 대기의 온도가 영하로 강하됨에 따라 흙의 온도 역시 영하로 강하되는 온도의 전달성이 높아지기 때문이다. 또한 앞서도 계속 언급했듯이 점토의 함유비가 클수록 부동수분량이 많아져 동상을 일으키는 요인으로 작용하기 때문이다.

점토 함유비에 따른 동결토의 인장강도 거동 특성 또한 (Fig. 4-16)에서

보는 바와 같이 점토 함유비에 따른 동결토의 압축강도 거동 특성과 거의 유사한 형태를 보임을 알 수 있다. 비교적 강도의 값은 작지만 점토 함유비가 증가하면서 대체적으로 강도가 감소하는 경향을 보이는 것 또한 점토 함유비의 증가와 함께 토립자 부근에서 얼지 않은 상태로 존재하는 부동수분의 양이 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

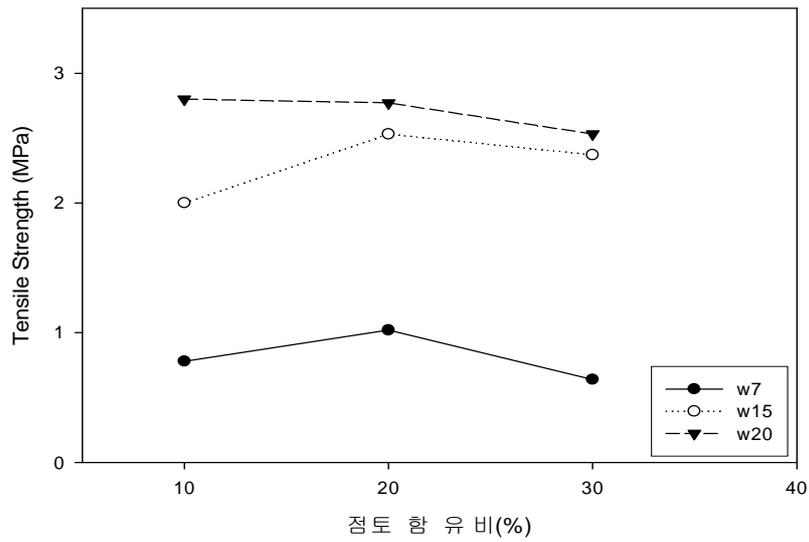


Fig. 4-16 점토 함유비에 따른 인장강도 거동 특성

## V. 결론

미개발 지역인 극한지와 동토지역의 개발이 현실적인 과제로 대두되면서 건설업계의 상당한 관심을 모으고 있지만, 그에 부합하는 기술 자료의 수집과 분석, 구조물 설계, 시공법 및 동토지역 지반에 대한 역학적 성질에 대한 체계적이고 전문적인 연구가 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 극한지 개발의 시대적인 요구에 부응하여 동토의 일반적인 물리적 성질을 정리하고 Cold Room 실험을 통하여 동결토 강도에 영향을 주는 변수들에 대한 강도특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 도출하게 되었다. 아래의 결론들은 3차례의 실험을 통해 실험의 정확성을 입증하였다.

- (1) Cold Room 실험을 통한 데이터를 분석해 볼 때 함수비별 일축압축강도와 인장강도의 경우, 인장강도가 압축강도에 비해 1/4~1/6정도의 작은 강도를 나타내는 했지만 함수비가 증가할수록 압축강도와 인장강도가 모두 증가하다가 포화함수비 부근에서(시료가 포화되기 이전) 가장 큰 강도 값을 나타내는 경향을 보였고, 계속해서 함수비가 증가 하게 되면 압축강도와 인장강도 모두 감소하다가 다시 얼음의 강도로 수렴함을 알 수 있었다. 또한 포화함수비에 근접할수록 동결토의 압축강도와 인장강도의 증가율은 감소함을 알 수 있었고, 최적함수비 부근에서의 강도 증가율이 가장 크다는 것을 알 수 있었다. 이는 다짐의 효과가 동토의 강도에 영향을 미친다는 사실을 말해주고 있으며, 시료가 포화되기 전 까지의 수분은 동결토의 강도에 긍정적인 영향을 끼친다고 해석할 수 있다.
- (2) 점토 함유비별 압축강도와 인장강도의 경우도 Cold Room 실험을 통해 분석해 볼 때 강도의 크기는 다르지만 일정비의 점토가 함유되면 강도가 증가하지만 그 보다 적거나 많은 점토가 함유되면 압축강도와 인장강도 모두 감소하는 경향을 보였다. 압축강도와 인장강도 모두에 가장 큰 강

도를 나타내는 점토 함유비는 중량비로 20%였으며 점토 함유비가 20%보다 작은 10%나 많은 30%의 경우에는 20%보다 작은 강도를 나타냈으며, 점토 함유비가 10%일 때 보다는 30%일 때 더 작은 강도를 나타냈다. 이는 점토 함유비는 함수비와 달리 작을 때보다는 많을 때가 동결토에 더욱 부정적인 영향을 끼친다고 해석할 수 있다.

- (3) 일축압축시험과 간접인장시험을 통해 표준사에 포함되는 점토 함유비가 높아질수록 강도가 감소함을 알았다. 이는 모관장력에 의해 수분을 흡입하는 흡입력이 큰 점토 미립자들의 함량이 많아지면서 모관장력이 커지고 이에 따라 동결토 내에 얼지 않은 상태로 존재하는 부동수분의 양이 증가하기 때문이라 생각된다.
- (4) 동결토의 일축압축강도 시험과 간접인장시험 데이터를 통해 흙의 종류에 따른 응력-변형률의 대표적인 거동특성을 찾아 낼 수 있었다. 동결모래의 경우에는 높은 응력 하에서 최대응력을 보이면서 동결토의 파괴가 발생한 후 하중이 급격히 떨어지는 형태를 보였고, 점토 함유비가 높은 세립질 동결토의 경우 시편의 경우에는 낮은 응력에서 파괴가 발생하고 파괴가 발생한 후 응력 값이 떨어지는 속도가 아주 느리거나 떨어지지 않고 꾸준히 올라가는 형태를 보였다.

본 연구에서는 미동토내에 미리 포함되어 있던 수분만이 동결면을 향하여 이동함으로써 동결이 이루어지는 폐쇄형동상에 의한 방법으로 Cold Room 실험을 통한 동결토의 강도특성에 대해 분석하였으며 이에 대한 결론으로 동결토에 있어서 포화함수비에서의 강도가 가장 크게 나타났으며, 동결토 내의 점토 함유비는 시편내의 모관장력을 증가시켜 부동수분의 양을 증가시키고 결과적으로 동결토의 강도 저하를 유도함을 알아냈다. 또한 개략적인 동결 사질토와 동결 점성토의 응력-변형률에 대한 거동특성을 파악하였다.

이를 토대로 극한지의 개발에 있어서 기본적으로 부딪히게 되는 동결토의 역학적 성질과 관련된 문제점을 보다 신속하고, 정확하게 해결할 수 있으리라 생각된다.

## 참고문헌

- [1] 김영진, 유준, 김현민 (1999) “동결심도 및 포장체 온도분포조사”, 한국건설기술연구원, p.5, p.25
- [2] 김영진, 홍승서, 김현민 (2001) “동절기 지반의 동결심도 장기조사”, 한국건설기술연구원
- [3] 권기범 (2002) “동상영향에 따른 노상토의 지지력 평가”, 석사학위논문, 인천대학교
- [4] 홍성완 (1992) “동토지역 기초구조물의 최적설계, 시공기법개발연구”, 과학기술처
- [5] Nakano, Y. and Froula, N. H (1973) "Sound and Shock transmission in frozen soil", North America Contribution to the Second International Conference on Permafrost, U. S. National Academy of Science, p.359-369
- [6] 최영 (1991) “영구 동토의 특성과 시공”, 석사학위논문, 서울대학교
- [7] 조천환, 손준익, 이원제, 김학삼 (1993) “동결토의 특성과 동토지역에서 말뚝연구기초”, 한국건설기술연구원
- [8] 권호진, 박준범 외 2명 (2005) “토질역학”, 구미서관, p.47-59
- [9] 한국산업규격(KS F 2312) (1991) "흙의 다짐시험방법“

- [10] 김영진, 배정호, 송원근 (2002) “동결토의 온도변화에 따른 부동수분과  
초음파 속도의 변화에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회논문집, 제  
2권 3-C호, pp. 207~217
- [11] D. R. Freitag, T. T. McFadden, (1997) “Introduction to Cold  
Regions Engineering”, ASCE
- [12] 오문교 (2002) “재생 아스팔트 포장 도로의 성능 평가 연구”, 석사학위  
논문, 전남대학교
- [13] 홍성원 (1989) “한지와 영구동토”, 대한토목학회지, 제 37권 3호, pp.  
46~64
- [14] 조태규, 진정훈, 남영국 (2002) “도로포장의 동상방지층 실효성 검증을  
위한 현장계측 및 실내시험 연구”, 대한토목학회논문집, 제 22권 5-D호,  
pp. 913~921
- [15] 김남호 (1996) “아스팔트 혼합물의 내부 수분 변화에 따른 물성의 변화  
연구”, 대한토목학회논문집, 제 16권 3-4호, pp. 323~334
- [16] 이석근 (1996) “섬유보강 아스팔트 혼합물의 인장거동 특성”, 경희대학  
교 산학협력기술연구논문집, 제 2집
- [17] T. S. Vinson "Geotechnical Engineering in Cold Regions"
- [18] Willam L. Ryan . Cold Regions Engineering, ASCE, 1986

