

## 유기물 함유량에 따른 동토 시료의 열적·역학적 거동 평가를 위한 실험적 연구

### Experimental Study to Evaluate Thermal and Mechanical Behaviors of Frozen Soils according to Organic Contents

박상영<sup>1</sup>, 박현태<sup>2</sup>, 최항석<sup>3</sup>, 김영석<sup>4</sup>, 김세원<sup>5\*</sup>

Sangyeong Park<sup>1</sup>, Hyeontae Park<sup>2</sup>, Hangseok Choi<sup>3</sup>, YoungSeok Kim<sup>4</sup>, Sewon Kim<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Non-Member, Postdoctoral Researcher, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

<sup>2</sup>Non-Member, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Professor, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Senior Researcher Fellow, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Gyeonggi-Do 10223, Republic of Korea

<sup>5</sup>Member, Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Gyeonggi-Do 10223, Republic of Korea

#### ABSTRACT

Recently, development of non-traditional energy such as oil sands has been actively conducted in the cold region such as Canada. Frozen soil has different thermal and mechanical characteristics from general soil due to its high organic contents. This study evaluated the impact of organic matter content on the thermal and mechanical behavior of frozen soil samples collected from Alberta, Canada, and Gangwon Province, South Korea. As the organic content increases, the maximum dry unit weight decreases and the optimum moisture content increases in compaction tests. In uniaxial compression tests under frozen conditions, the strength of the frozen specimens increased as the temperature decreased. The strength of Canada soil sample increased with higher organic matter content at low temperatures. However, the strength of frozen soil was not significantly affected by organic matter content due to the complex behavior and unfrozen water content. Thermal conductivity tests showed higher thermal conductivity in frozen conditions compared to unfrozen conditions, due to the higher thermal conductivity of ice compared to water. These findings provide essential data for geotechnical design and construction in large-scale projects such as oil sands development in cold regions. Further research is needed to explore the impact of organic matter content on different types of frozen soils.

#### 요 지

최근 오일샌드와 같은 비전통에너지 개발이 활발히 이루어지고 있는 동토 지역은 지반의 유기물 함유량이 높아 일반적인 지반과 다른 열적·역학적 특성을 지니고 있다. 본 논문에서는 캐나다 앨버타주와 국내 강원도에서 채취한 동토 시료를 대상으로 다양한 실내시험을 통해 유기물 함유량이 토양의 열적 및 역학적 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 유기물 함유량이 증가할수록 다짐시험에서 최대 건조단위중량은 감소하고 최적 함수비는 증가하는 경향이 나타났다. 동결 일축 압축시험에서는 동결온도가 낮아질수록 시료의 강도가 증가했으나, 모든 시료는 동결 조건에서 얼음 및 부동수분의 양에 따라 복잡한 거동을 보여 유기물 함유량이 강도에 큰 영향을 미치지 않았다. 열전도도 측정시험에서는 동결 조건에서 비동결 조건보다 열전도도가

Received 30 May. 2024, Revised 12 Jun. 2024, Accepted 14 Jun. 2024

\*Corresponding author

Tel: +82-31-995-0851; Fax: 82-31-910-0561

E-mail address: [kkimsse@kict.re.kr](mailto:kkimsse@kict.re.kr) (S. Kim)

더 크게 측정되었고, 이는 물보다 얼음의 열전도도가 더 크기 때문으로 판단된다. 또한, 유기물 함유량이 증가할수록 부동 수분량도 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 극한지 건설 프로젝트에서 지반 공학적 설계 및 시공에 중요한 엔지니어링 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

**Keywords** : Frozen soil, Laboratory experiment, Loss on ignition method, Organic soil

## 1. 서 론

오일샌드(oil sand)는 비전통유일의 일종으로 모래, 물, 점토, 역청 등의 혼합물로, 보통 2ton의 오일샌드에서 약 1배럴(barrel) 가량의 원유를 생산할 수 있다. 전 세계적으로 대부분의 오일샌드는 캐나다의 앨버타(Alberta) 주와 사스카치완(Saskatchewan) 주에 매장되어 있고(Kim, 2008), 특히 앨버타주의 아사바스카(Athabasca) 지역, 콜드레이크(Cold Lake) 지역 및 피스리버(Peace River) 지역이 대표적인 오일샌드 매장 지역으로, 개발 지역의 원시 부존량만 해도 약 840억 배럴에 이르고 있다. 에너지 수입 의존도가 매우 높고, 에너지 다소비형 산업 구조적 특징을 가지고 있는 국내의 에너지 자원 시장의 안정적 확보를 위하여 오일샌드 개발 관련 국내 건설업계의 진출은 사업의 다각화 및 새로운 기회가 될 수 있지만(Kim et al., 2023), 플랜트와 기반 시설에 대한 설계 및 시공을 위해서는 해당 지역 토양의 공학적 특성에 대한 이해는 필수적이다(Kim et al., 2022).

캐나다 오일샌드 분포 지역은 유기물 함량이 높은 지반으로 알려져 있으며, 유기질토양은 유기물의 함량에 따라 열적·역학적·수리적 거동이 전혀 달라질 수 있다(Mesri and Godlewski, 1977). 유기질 토양은 주로 분해되지 않은 섬유질로 구성되어 있으며, 보수력 및 팽창성이 크고 탈수 시 수축성이 큰 특징을 가지고 있다. Chalmers and Bustin (2007)은 캐나다 브리티시 컬럼비아(British Columbia) 주의 북동부지역의 토양에는 유기물 함량이 최소 0.6%에서 최대 10.1%까지 분포하며 평균적으로 2.3%라고 보고하였으며, Uno et al.(2005)은 캐나다 동부지역에서 유기물 함량이 평균 4.83%를 보였으며 최소 3.35%에서 최대 6.63%의 값을 가지는 것으로 조사되었고, 캐나다의 동부 지역 토양의 유기물 함량은 2.3~7.3%로 분포하며 평균적으로 4.2%임을 보고하였다(Mabit and Bernard, 2010). 일반적으로 지반의 공학적인 성질에 문제가 되는 유기물 함량은 10% 이상이지만, 첨가제를 사용하여 흙의 성질을 개량하는 경우에는 첨가제의 종류에 따라 소량의 유기물이

라도 문제가 될 수 있다(Park and Koo, 2001). 따라서 다양한 유기물 함유량에 따른 토양의 거동에 대한 이해와 더불어, 캐나다가 앨버타 지역의 기후 조건을 고려할 때 일반적인 비동결 조건에서의 거동뿐만 아니라 동결 조건에서의 지반의 거동에 대한 이해가 요구된다.

토양의 유기물 함유량을 측정할 때, 유기물질 중 가장 큰 비중을 차지하며 측정이 비교적 간편한 탄소를 이용하는 것이 일반적이다. National Institute of Agricultural Sciences(2010)에 따르면 토양 내 유기탄소의 함량을 평가하는 방법은 습식산화법과 건식연소법으로 구분할 수 있다. 습식산화법에는 Tyurin법과 Walkley & Black법, 건식연소법에는 원소분석기 측정법과 강열감량법이 있다. Tyurin법은 토양의 유기물 함유량을 평가하기 위한 전통적인 방법 중 하나로, 농축황산(conc.  $H_2SO_4$ )과 중크롬산칼륨( $K_2Cr_2O_7$ )을 혼합하여 시료와 함께 가열하여 산화시킨 후 산화 과정을 통해 소모된 산화제의 양으로 유기탄소의 함량을 추정하는 방법이다. Walkley & Black 법은 Tyurin법과 유사한 원리를 사용하지만, 외부의 가열 없이 농축황산과 중크롬산칼륨의 혼합열을 이용하여 산화 과정을 진행한다. Tyurin법에 비해 실험방법이 간단하고 가열을 위한 장비가 필요하지 않다는 장점이 있지만, 혼합열만으로는 시료의 유기물을 완전히 산화시키기 어렵다는 단점이 있다. 원소분석기 측정법은 시료를 연소시켜 발생한 가스를 분석하여 유기탄소의 양을 직접적으로 평가한다. 분석이 빠르고 간편하며 정확하다는 장점이 있지만, 고가의 장비비와 소모품의 주기적인 교체 등의 단점이 있다. 강열감량법(loss on ignition method)은 시료를 강열 후 감량된 무게를 측정하여 유기물의 함량을 산정한다. 시험방법이 간단하고 다양한 종류의 시료에 일반적으로 적용할 수 있다는 장점이 있어 본 연구에서 사용되었다.

본 논문에서는 유기물의 함유량에 따른 동토 시료의 열적·역학적 거동을 평가하기 위하여 캐나다 앨버타와 국내 강원도에서 채취한 현장 동토 시료를 사용하여 일련의 실내시험을 진행하였다. 또한 캐나다 피트모스(peat moss)를 활용하여 다양한 유기물 함유량의 시료를 조성하였다. 실

내시험은 유기물 함유량에 따라 다짐시험, 열전도도시험, 동결일축압축시험 등을 수행하였다.

## 2. 동토 시료의 물성특성

### 2.1 동토 시료 물성 특성

실내시험에 활용한 두 종류의 캐나다 시료(Canada sample #1 및 Canada sample #2)는 캐나다 앨버타 주의 아타바스카 오일샌드지역 내에 채굴작업이 진행 중인 지역에서 채취하였다. 캐나다 시료는 표토층을 제거한 후 최대 대한 토양의 원형을 보존한 채로 채취하였다. 또한 캐나다 시료와 비교분석 및 유기질토를 포함한 동토 시료를 모사를 위하여 국내 강원도 강릉시 일대의 유기질토(Korea sample)를 채취하여 일련의 실내시험을 수행하였다. 국내 (강원도) 시료는 지층이 우백질 화강암으로 구성된 위치에서 캐나다 시료 채취 방법과 동일하게 표토 10cm 정도를 제거하고 시료를 채취하였다.

채취한 시료에 대하여 기본 물성 실험을 수행하였고 (Kim et al., 2022), Fig. 1과 Table 1에 요약하여 나타내었다. 세 가지 시료 모두 비슷한 비중값이 산정되었고, 일반적인 흙의 비중(2.6~2.7)값 범위와 일치하는 결과를 보였다. 액성한계 시험과 소성한계 시험은 40번 체에 통과된

건조 시료를 사용하였다. 액성한계는 Fall Cone Test를 통해 평가하였고, 소성한계는 ASTM D4318의 시험방법에 따라 평가하였다. 함수비는 채취된 시료(약 50cm 높이)의 상, 중, 하 부분의 흙에 대하여 총 3번 측정하였으며 산정된 값들의 평균을 사용하였다. 통일분류법에 따르면 Canada sample #1은 SC(clayey sand), Canada sample #2는 SP(poorly graded sand), 그리고 Korea sample은 SC(clayey sand)로 분류되었다.

### 2.2 동토 시료의 유기질 특성

본 연구에서는 ASTM D2974를 따라 강열감량법을 적용하여 각 시료의 초기 유기물 함유량을 평가하였다. 이때, 유기물 함유량은 중량비로 산정하였다. 노건조된 시료를  $440\pm 40^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 최소 5시간 연소시킨 후, 연소 전 유기물이 포함된 시료의 중량과 연소 후 유기물이 제거되고 남은 시료의 중량 차이로 유기물 함량을 평가하였다. 시료의 수분을 제거하기 위한 노건조는  $90\pm 5^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 진행되어 이로 인한 유기물 함량의 변화는 없다. 시험은 시료별로 총 6회 측정하여 평균값을 제시하였다. 시험 결과는 Fig. 2에 나타내었고, Canada sample #1의 유기물 함유량은 1.1083%, Canada sample #2는 0.6250%, 그리고

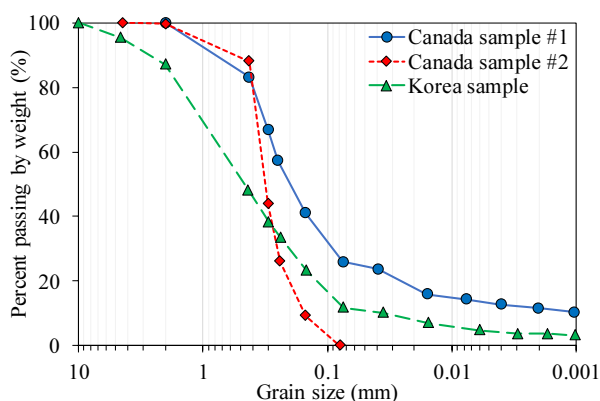


Fig. 1. Grain size distributions

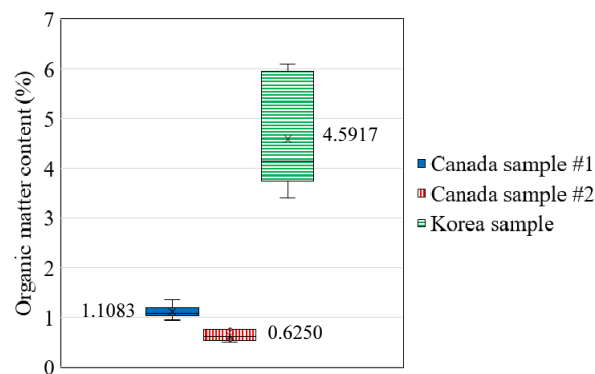


Fig. 2. Organic matter contents obtained by loss on ignition method

Table 1. Engineering properties of soil specimens

Soil specimen	Canada sample #1	Canada sample #2	Korea sample
Specific gravity	2.69	2.64	2.69
Liquid limit (%)	22.94	—	41.88
Plastic limit (%)	11.99	—	30.79
Water content (%)	13.78	13.39	26.97
Unified soil classification system	SC	SP	SC

Korea sample은 4.5917%로 평가되었다. Canada sample #1과 Canada sample #2에 비해 Korea sample은 유기물 함유량의 편차가 크게 나타났다.

추가로, 이후 시험에서 시료의 유기물 함유량을 인위적으로 조절하기 위하여 사용된 캐나다산 피트모스를 활용하였다. 피트모스는 연평균온도가 낮은 지역에서 식물이 산소가 불충분한 지하에서 오랜 시간 부분적으로 분해된 것으로 주로 캐나다와 북유럽 지역에서 많이 채취되어 주로 원예용 자재로 널리 사용 중이다(Kim and Kim, 2011). 본 연구에서 사용한 피트모스의 유기물 함량도 강열감량 방법으로 측정하였고 평균 99.44%의 유기물 함량으로 측정되었다. 계산의 편의를 위하여 시험 시에는 피트모스의 유기물 함유량을 100%로 가정하였다.

### 3. 동토 시료의 유기질 함유량에 따른 동결 열·역학적 특성

#### 3.1 유기질 함유량에 따른 부동수분 특성

저온 환경의 지반은 흙, 물, 공기, 부동수분의 4상으로

구성되어 동결 현상에 따른 각 성분들의 부피비 변화를 고려해야 하기 때문에 부동수분량을 측정하였다(Kim et al., 2015). 부동수분의 존재는 동토의 강도, 장기변형 및 동결 시간에 영향을 미치며, 부동수분의 함량은 외부온도 및 동결 시간에 따라 다르게 나타난다. 유기물 함유량 및 시료에 따른 부동수분의 차이를 평가하기 위하여 상온 및 영하의 온도(-10°C)에서 각 시료별로 시료를 채취한 캐나다 앨버타 주와 유사한 현장 유기물 함유량 조건의 0.0, 1.5, 4.5%로 피트모스 중량비로 혼합하여 시료를 조성 후 체적함수비를 평가하였다.

Fig. 3의 Time Domain Reflectometry(TDR) 장비(HL1101, 프로브 길이 0.075m)를 사용하여 유기질 함유량에 따른 부동수분량을 평가하였다. 이 방법은 펄스 발생기(pulse generator)에서 발생된 펄스가 전달매체(동축케이블, 프로브 등)를 따라 전달되고, 전달매체의 형상변화나 전달매체 주변(흙 시료 등)의 물리적·전기적 변화가 있는 경우에 펄스가 반사되어 오실로스코프(oscilloscope)로 출력된다. 이를 통해 전자파가 전파되는 시간을 측정하여 매질의 유전율(dielectric constant)을 결정하고, 유전율과 함수비의 관계를 통해 부동수분량을 간접적으로 평가하는

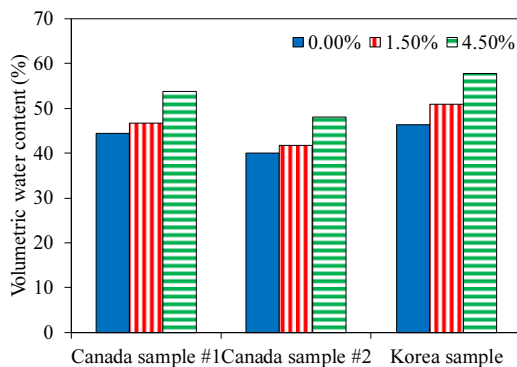


(a) TDR body

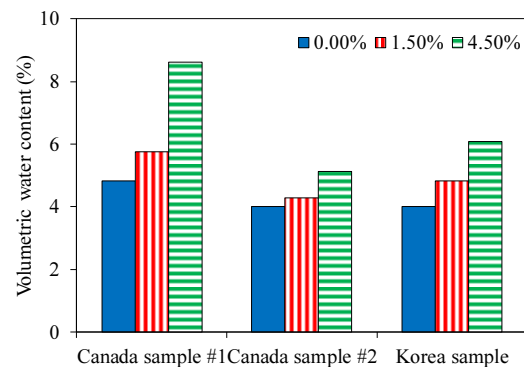


(b) TDR probe

Fig. 3. Photography of the TDR system



(a) Unfrozen condition



(b) Frozen condition

Fig. 4. Water contents depending on the phase

방법이다. 사전실험 단계에서 조성된 함수비에 따라 상응하는 유전율을 측정하여 유전율과 함수비의 관계를 구축하고, 본실험에서는 시료의 유전율을 측정하여 함수비를 계산하게 된다. 본 연구에 사용된 유전율과 함수비의 관계는 Topp et al.(1980)이 제안한 삼차방정식 구조를 적용하였다.

실험결과(Fig. 4)는 상온에서의 함수비는 기존 연구(Kim et al., 2022)의 결과와 동일하게 Korea sample이 가장 크고 Canada sample #2가 가장 작은 값이 나타났다. 유기물 함유량이 증가할수록 공극의 증가로 인해 함수비는 증가하였다. 또한, 동결 시 부동수분량은 크게 감소하였으나, 여전히 유기물 함유량이 증가할수록 부동수분량도 증가하는 것으로 나타났다. Canada sample #1의 경우 유기물 함유량에 따른 부동수분의 증가량이 가장 큰 것으로 확인되었다.

### 3.2 동토 시료의 유기물 함유량에 따른 역학적 특성

유기물 함유량에 따른 동토 시료의 역학적 거동 특성을 분석하기 위하여 다짐실험과 동결일축압축시험을 수행하였다. 다짐시험은 국내의 표준다짐시험법인 한국산업규격 KS F 2312 표준법의 A 시험을 따랐다(Fig. 5). 다짐시험의 램머(rammer) 무게는 2.5kg, 다짐 몰드(mold)의 내경은 10cm, 다짐 층수는 3회, 그리고 층당 다짐횟수는 25회로 진행하였다. 유기물 함유량에 따른 시료의 다짐거동을 평가하기 위하여, 시험 전에 각 시료를 건조로에서  $440 \pm 40^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 최소 5시간 연소시켜 유기물 함유량을 0%로 동일한 기준으로 구성하였다. 시료를 채취한 지역인 캐나다 앨버타 지역은 Black chetnozemic soil(기름진 검은색 흙)을 제외하였을 때 유기물 함유량이 5% 미만으로 조사되었다(Hanes et al., 2022). 따라서 유기물 함유

량에 따른 역학적 거동 특성을 분석하고자 0.0, 1.5, 3.0, 4.5%의 시료를 조성하여 시험을 진행하였다.

유기물 함유량에 따른 다짐시험 결과는 Fig. 6에 나타났다. 동일한 유기물 함유량일 때, Canada sample #1이 가장 큰 건조단위중량을 보였으며 Korea sample에서 가장 작은 건조단위중량이 관찰되었다. 모든 시료에서 유기물 함유량이 증가할수록 다짐곡선의 곡률이 완만해졌고, 최대건조단위중량은 감소하였으며, 최적함수비는 증가하는 경향이 나타났다. 이는 Kwon et al.(1997) 및 Park and Kwon (2008)의 시험 결과와 동일한 결과이다.

시료를 채취한 캐나다 앨버타 중부 지역은 겨울철 영하  $17^{\circ}\text{C}$ 까지 관측되는 지역(AdaptWest, 2022) (<https://adaptwest.databasin.org/>)으로, 동토 시료의 유기질 함유량에 따른 저온 환경의 거동 특성을 평가하고자 동결 일축압축시험을 수행하였다. 동결 일축압축시험 장비는 대상 시료에 하중을 재하하는 프레임(frame), 재하속도를 조절하고 하중-변



Fig. 5. Compaction mold and rammer (KS F 2312)

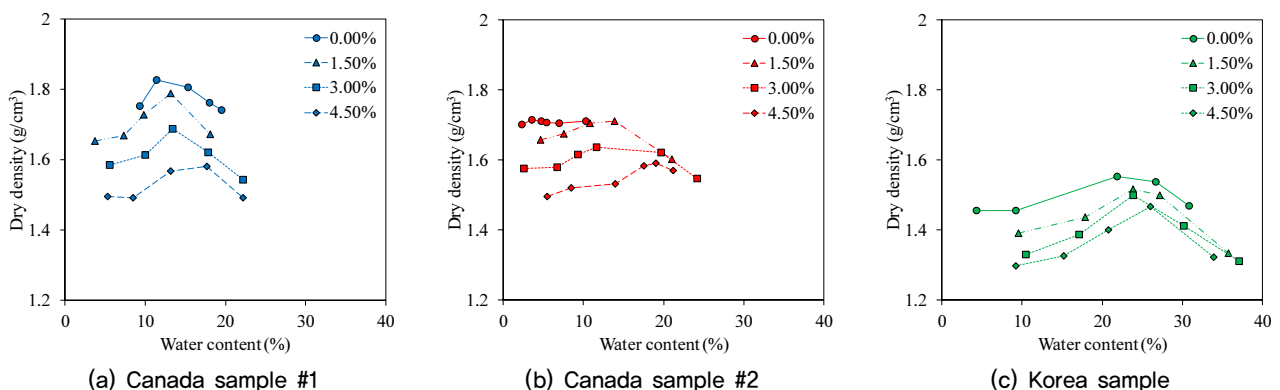


Fig. 6. Compaction test results according to the organic matter contents



위를 측정하는 등 전반적인 시험을 수행하는 컨트롤 박스, 시험을 통해 측정된 데이터를 시료 물성치에 따른 강도로 분석하는 컴퓨터시스템으로 구성되었다. 프레임 상부에 고정되어 있는 로드셀(load cell)를 통해 시료에 가해지는 하중을 측정하였고, 시료의 변위는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용하여 측정하였으며, 동결 일축압축 시험 중 시료의 온도변화는 데이터 로거(data logger)에 연결된 열전대를 통해 측정하였고 목표 동결온도가 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. 해당 장비는 하중 최대 20MPa, 변위 최대 50mm까지 측정이 가능하다.

동결된 시료를 일축압축장비로 이동하거나 실험 도중 시료 주변 온도의 영향을 최소화하기 위해 MC-Nylon 재질의 케이스를 제작하여 시험에 이용하였다. MC-Nylon은 열전도도가 0.29W/mK로 낮아 단열효과를 기대할 수 있으며, MC-Nylon 케이스는 시료와 온도가 동일하도록 목표 온도가 설정된 냉동고 안에 시료와 함께 보관하여 MC-Nylon 내부에 위치할 시료의 온도변화를 최소화할 수 있도록 하였다. 동결이 완료된 시료는 MC-Nylon 케이

스 내부에 위치시키고 수분 증발 및 온도 변동을 방지하기 위하여 MC-Nylon 케이스 전체를 랩으로 마감하여 밀봉하여 시험을 수행하였다(Oh, 2015).

동결 일축압축시험을 위한 원통형 시료를 조성하기 위해 Fig. 7에 나타난 시료 제작 몰드를 사용하였다. 오븐에 24시간 이상 건조한 현장 흙 시료와 피트모스를 혼합하여 다짐시험과 동일한 조건(유기질 함유량 0.0, 1.5, 3.0, 4.5%)으로 시료를 준비하였다. 시료는 직경 50mm, 높이 100mm 크기로, 건조 단위중량 1.5g/cm<sup>3</sup>로 조성하였다. 준비된 흙 시료를 시료 조성 몰드에 넣고, 몰드 아래쪽 벨브를 통해 물을 주입하여 시료를 포화시켰다. 포화된 시료는 몰드에서 분리하고, 수분의 증발을 막기 위해 냉동고 안에서 랩으로 시료를 감싼 후 목표 동결 온도인 -5, -10, -15°C에서 24시간 이상 동결을 진행하였다. 이후 일축압축시험 장비에 시료를 위치시키고 변형률 속도 1%/min의 조건에서 시험을 진행하였다.

시험을 통해 얻은 동결온도 및 유기물 함유량에 따른 동결 일축압축강도는 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 시험

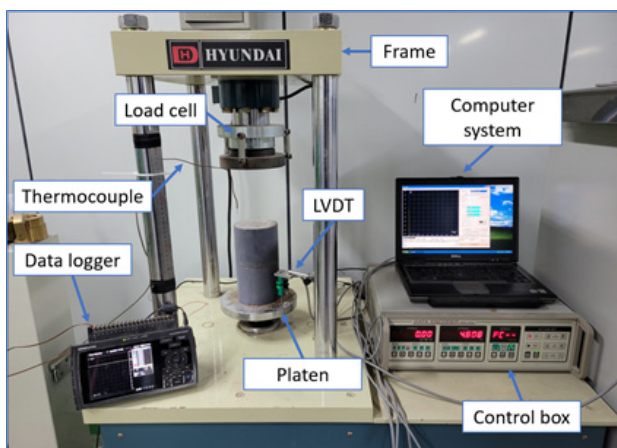


Fig. 7. Experiment set-up and specimen manufacture mold set

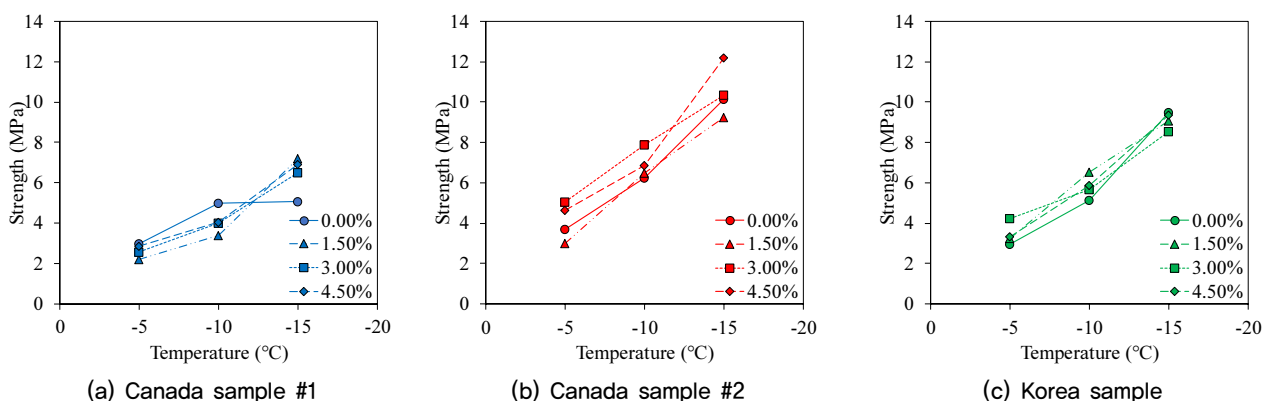


Fig. 8. Uniaxial strengths of frozen samples according to the temperature

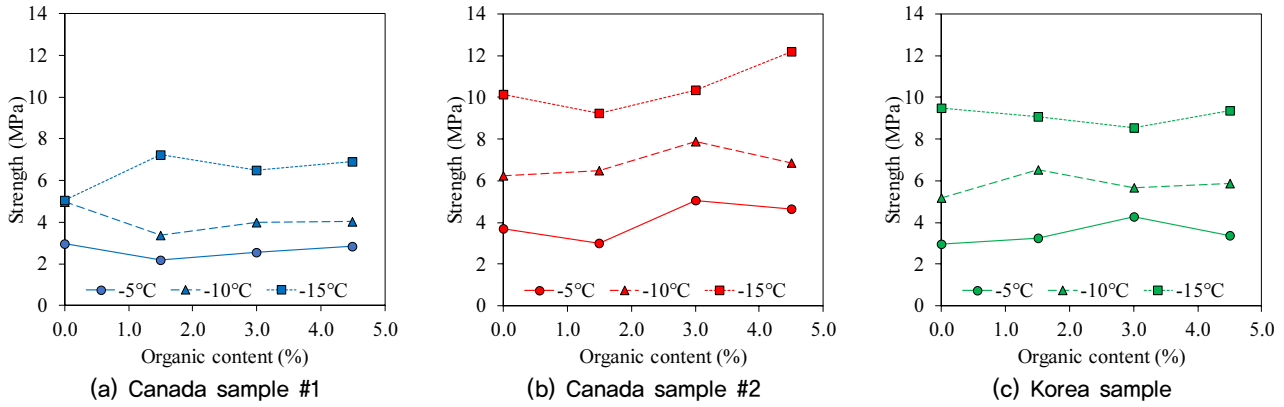


Fig. 9. Uniaxial strengths of frozen samples according to the organic contents

결과 동결온도의 감소에 따라 시료의 강도가 증가하는 것을 확인하였고, Canada sample #2, Korea sample, Canada sample #1 순서로 동결 일축압축강도가 크게 나타났다. SP로 분류된 Canada sample #2는 저온에서는 유기물 함량이 증가할수록 강도가 크게 나타났지만, SC로 분류된 Canada sample #1과 Korea sample은 유기물 함량이 동결 강도에 큰 영향을 주지 못한 것으로 평가되었다. 단, Canada sample #1의 유기물 함량 0.00%의 -10°C, -15°C의 강도결과는 다른 실험 조건보다 매우 작은 증가량을 보였으나 이는 실험오차로 인한 아웃라이어 데이터(outlier data)로 판단된다.

Ozden(1970)에 따르면 유기물 함량이 클수록 단립구조의 발달이 양호하고 간극비가 크기 때문에, 일축압축강도는 감소하며 변형률 경화(stain hardening)가 발생한다. 또한 Kwon et al.(1997)은 40번 체를 통과한 톱밥을 사용하여 유기물 함량을 조절하였고, 유기물 함량이 동일한 혼합토에서 다짐함수비가 클수록 일축압축강도가 감소하였으며 유기물 함량이 클수록 최적함수비 상태의 일축압축강도가 감소하였다. Hong and Kim(2016)의 시험 결과에 의하면 muskeg soil은 유기물의 함량에 따라 일축압축강도는 최대 43.2% 감소하는 것으로 나타났다. 다만, 이 선행연구들은 비동결 조건에서 진행된 실험이므로 본 연구에서 진행된 얼음 및 부동수분의 양에 따라 복잡한 거동을 보이는 동결 일축압축시험과의 직접적인 비교는 어려울 것으로 판단된다. 본 실험에서는 각 시료의 유기질 함량에 따른 동일한 조건(건조당위중량 1.5g/cm<sup>3</sup>)으로 시료를 조성하여 온도별 동결 강도를 평가한 결과, 저온 환경에서는 유기질 함량보다 시료 내 함수비가 동결 거동에 더 큰 영향을 주었다고 판단된다. 향후 다양한 시료에 대한 추가적인 실험을 통해 동결 시료의 종류에 따른 유기

물 함량의 영향을 규명할 필요가 있다.

### 3.3 유기물 함량에 따른 열역학적 특성

유기질 함량에 따른 동토 시료의 열역학적 특성을 평가하고자, 비동결조건(20°C)과 동결조건(-10°C)에서 비정상 열선법(transient hot wire method)를 활용하여 열전도도 실험을 수행하였다. 비동결토에 달리 동결토는 열전도도 측정에 필요한 열원과 시료의 단위 온도 구배가 커 열적 평형상태를 유지하기 매우 어렵고, 열원으로 인해 동결토의 용해가 발생할 가능성이 있어 빠른 시간 내에 열전도도를 측정해야 한다. 이와 같은 이유로 비정상조건 방법을 적용하였고, 그 중에 열전도도 측정시간이 짧은 비정상 열선법을 이용하였다. 비정상 열선법은 식 (1)에서 나타나듯이 열선이 시료에 열량을 일정하게 공급하게 되면, 시간에 따른 온도의 상승 관계가 직선 형태를 보이게 되고, 이때 나타나는 직선 기울기의 역수를 통해 대상 시료의 열전도도를 산정하는 방식이다.

$$T_1 - T_2 = \frac{q}{4\pi k} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (1)$$

여기서,  $T_i$  : 시간( $t_i$ )에 따른 온도

$q$  : 열 유속(heat flux)

$k$  : 열전도도

$t_i$  : 측정시간( $i=1,2$ )

열역학적 특성을 평가하기 위하여 Fig. 10에 나타난 KD2 Pro를 사용하여 열전도도를 측정하였다. KD2 Pro는 가볍고 빠르게 열전도도를 측정할 수 있는 휴대용 장비로,

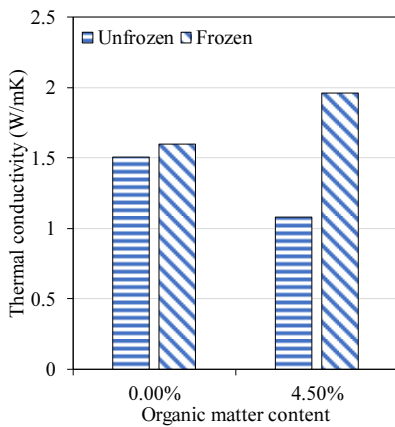


(a) KD2 Pro controller

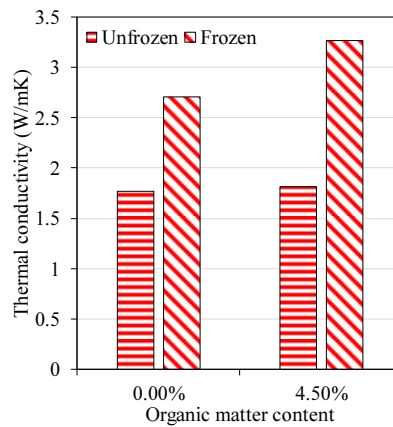


(b) TR-1 probe

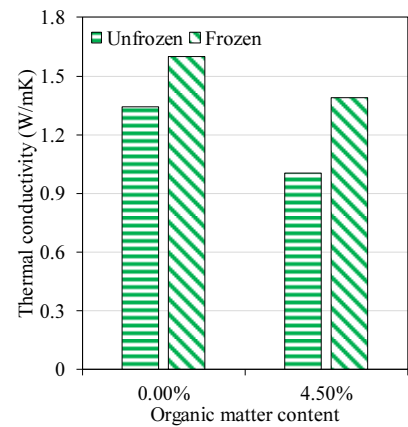
Fig. 10. Photography of the KD2 Pro system



(a) Canada sample #1



(b) Canada sample #2



(c) Korea sample

Fig. 11. Thermal conductivity under various conditions

컨트롤러와 프로브(probe)로 구성되었다. 측정장치의 가용 온도는 0~50°C이고, 프로브의 가용 온도는 -50~150°C이다. 프로브는 흙과 같은 입상체 재료의 열전도도를 측정하는 시험에 적합한 TR-1 프로브를 사용하였다.

채취한 시료들의 유기물 함유 여부에 따른 열전도도 변화를 분석하기 위하여 유기물 함유량 0.0%, 4.5%에 대하여 실험을 수행하였다. 일정한 건조단위중량으로 시료를 조성 후 포화시켜 비동결조건과 동결조건에서 7번씩 열전도도를 측정하여 평균값을 대표 열전도도 값으로 산정하였다. 동결조건인 경우 프로브를 설치한 상태로 -10°C에서 24시간 이상 동결 후 열전도도를 측정하였다. 프로브의 가용 온도는 -50~150°C이나 컨트롤러의 가용 온도는 0~50°C이기 때문에 냉동챔버 외부에 컨트롤러를 위치시켜 열전도도를 측정하였다.

시험결과(Fig. 11) 시료의 열전도도는 Canada sample #2가 가장 큰 값을 보였고, Korea sample이 가장 작은 값을

을 보였다. 이는 흡입자의 광물구성 및 입도분포의 차이에 따른 흡입자 구조의 영향으로 사료된다. 또한, 간극수의 상변화로 인하여 비동결조건보다 동결조건에서 열전도도가 더 크게 측정되었는데, 물의 열전도도(0.59 W/mK, Ramires et al., 1995)보다 얼음의 열전도도(2.22 W/mK, Bonales et al., 2017)가 크기 때문으로 판단된다. 마지막으로, 비동결 조건에서 흡입자 사이에 상대적으로 열전도도가 낮은 유기물이 존재하는 경우 공극의 증가 및 열전달의 지연으로 전체 시료의 열전도도는 감소하는 것으로 나타났다. 다만, 동결일축압축 시험 결과와 동일하게 흙의 종류에 따라 유기물 함유에 따른 3 영향이 상이하였다. 비동결 조건에서 SC로 분류된 Canada sample #1과 Korea sample은 유기물 함유량에 따른 열전도도 감소가 크게 나타났다. SP로 분류된 Canada sample #2는 유기물 함유량에 따른 영향이 거의 나타나지 않았다.



## 4. 결 론

캐나다 앨버타주와 국내 강원도에서 채취한 동토 시료를 대상으로 유기물 함유량이 토양의 열적·역학적 거동에 미치는 영향을 평가하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

1. 유기물 함유량이 증가할수록 다짐시험에서 최대 건조 단위중량이 감소하고 최적 함수비가 증가하는 경향을 보였다. 동결일축압축시험에서는 동결온도가 내려감에 따라 시료의 강도가 증가하였다. SP로 분류된 Canada sample #2는 저온에서 유기물 함유량이 증가할수록 강도가 크게 증가하였다. 반면, SC로 분류된 Canada sample #1과 Korea sample은 유기물 함유량이 강도에 큰 영향을 미치지 않았다.
2. 열역학적 특성 분석 결과 비동결 조건보다 동결 조건에서 열전도도가 더 크게 측정되었으며, 이는 물의 열전도도보다 얼음의 열전도도가 크기 때문으로 판단된다. 또한, 비동결 조건에서 유기물이 존재하면 공극 증가와 열전달 지연으로 인해 열전도도가 감소하였다.
3. 또한, 유기물 함유량이 증가할수록 부동수분량 증가하는 경향을 보였고 Canada sample #1이 유기물 함유량에 따른 부동수분량의 증가가 가장 두드러지는 것으로 나타났다.
4. 극한지에서의 오일샌드 개발과 같은 대규모 건설 프로젝트에서 지반 공학적 설계 및 시공에 중요한 기초 자료를 활용할 수 있으며, 향후 다양한 시료에 대한 추가적인 실험을 통해 동결 시료의 종류에 따른 유기물 함유량의 영향을 더욱 구체적으로 규명할 필요가 있다.

## Acknowledgement

This research was supported by the grants from Ministry of Land Transportation Technology Business Support Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government (Development of packaging design and integrated demonstration technology for oil production plant(RS-2022-00143644), Development of Deep Geological Formation Characteristic Evaluation Technologies and Optimal Design Technologies to Improve 10% of CO<sub>2</sub> Injectivity for CO<sub>2</sub> Geosequestration (RS-2024-00410248)).

## References

1. Adaptwest (2022), <https://adaptwest.databasin.org>.
2. ASTM D2974, *Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*.
3. ASTM D4318, *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*.
4. Bonales, L. J., Rodríguez, A. C. and Sanz, P. D. (2017), "Thermal conductivity of ice prepared under different conditions", *International Journal of Food Properties*, Vol.20, pp.610-619.
5. Chalmers, G. R. and Bustin, R. M. (2007), "The organic matter distribution and methane capacity of the Lower Cretaceous strata of Northeastern British Columbia, Canada", *International Journal of Coal Geology*, Vol.70, No.1-3, pp.223-239.
6. Hanes, C. C., Wotton, M., Woolford, D. G., David, L., and Flannigan, M., (2022), Douglas, G., "Mapping organic layer thickness and fuel load of the boreal forest in Alberta, Canada", *Geoderma*, Vol.417, p.115827.
7. Hong, S. S. and Kim, Y. S. (2016), "Geotechnical Properties of Muskeg Soil for Construction Machinery Distributed in Oil-sand Areas", *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol.19, No.3, pp.29-32. (in Korean).
8. Kim, D. (2008), "New energy repository, soil sand", *Future Strategy & Business Department of Shinhan Bank*, pp.34-37. (in Korean).
9. Kim, H. S. and Kim, K. H. (2011), "Physical Properties of the Horticultural Substrate According to Mixing Ratio of Peatmoss, Perlite and Vermiculite", *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol.44, No.3, pp.321-330. (in Korean).
10. Kim, S. W., Choi, H. J., Yang, B. Y. and Kim, Y. S. (2023), "Development of a Site Suitability Evaluation Model for Arctic-Circle Energy Resource Construction", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.22, No.3, pp.105-117. (in Korean).
11. Kim, S. W., Park, S. Y., Won, J. M. and Kim, Y. S. (2022), "Experimental Study for Thermal Characteristics of Frozen Soil Samples", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.21, No.4, pp.31-40. (in Korean).
12. Kim, S. Y., Lee, J. S., Kim, Y. S. and Byun, Y. H. (2015), "Evaluation of the Shear Strength and Stiffness of Frozen Soil with a Low Water Content", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.25, No.1, pp.93-102. (in Korean).
13. KS F 2312, *Test method for soil compaction in laboratory*.
14. Kwon, H. J., Yi, G. J., Lee, W. T. and Park, J. (1997), "Compaction Characteristics of Soil Mixed with Organic Material", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.3, pp.193-196. (in Korean).

15. Mabit, L. and Bernard, C. (2010), "Spatial distribution and content of soil organic matter in an agricultural field in eastern Canada, as estimated from geostatistical tools", *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, Vol.35, No.3, pp.278-283.
16. Mesri, G. and Godlewski, P. M. (1977), "Time-and stress-compressibility interrelationship", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.103, No.5, pp.417-430.
17. National Institute of Agricultural Sciences (2010), "Methods of soil chemical analysis", *Rural Development Administration*.
18. Oh, M. (2015), *Geothermal chamber test and numerical study for applying the artificial ground freezing method in subsea tunnelling construction*, M.S. Thesis, Korea University. (in Korean).
19. Ozden, Z. S. (1970), "Shear strength characteristics and structure of organic soils", *In Proceedings of 13th Muskeg Research Conference*, pp.8-26.
20. Park, H. G. and Koo, J. M. (2001), "A study on the engineering characteristics of yang-dong organic soils", *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, Vol.2, No.1, pp.23-30. (in Korean).
21. Park, P. Y. and Kwon, H. J. (2008), "Compaction Characteristics of Weathered Soil Mixed with Organic Material", *Korean Geotechnical Society Spring National Conference*, Gwangju, Korea, pp.10-11. (in Korean).
22. Ramires, M. L., Nieto de Castro, C. A., Nagasaka, Y., Nagashima, A., Assael, M. J. and Wakeham, W. A. (1995), "Standard reference data for the thermal conductivity of water", *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol.24, No.3, pp.1377-1382.
23. Topp, G. C., Davis, J. L. and Annan, A. P. (1980), "Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines", *Water Resources Research*, Vol.16, No.3, pp.574-582.
24. Uno, Y., Prasher, S. O., Patel, R. M., Strachan, I. B., Pattey, E. and Karimi, Y. (2005), "Development of field-scale soil organic matter content estimation models in Eastern Canada using airborne hyperspectral imagery", *Canadian Biosystems Engineering*, Vol.47, No.1.9, pp.1-14.