

## 포화도와 실트 함량에 따른 동결토의 부동 수분량 및 일축압축강도 특성

### Unfrozen Water Content and Unconfined Compressive Strength of Frozen Soils according to Degree of Saturations and Silt Fractions

김 상 엽 <sup>1</sup>	Kim, Sang Yeob	홍 원 택 <sup>1</sup>	Hong, Won-Tack
홍 승 서 <sup>2</sup>	Hong, Seung Seo	백 용 <sup>3</sup>	Baek, Yong
이 종 섭 <sup>4</sup>	Lee, Jong-Sub		

#### Abstract

The strength of frozen soils is affected by size and shape of particles, and the amount of ice and unfrozen water. The objective of this study is to characterize the unfrozen water content and the unconfined compressive strength of the frozen soils according to the degree of saturations and silt fractions. The specimens are mixtures of sand, silt, and water. The silt fractions (SF), which are the ratio of the silt weight ( $W_{\text{silt}}$ ) to the sand weight ( $W_{\text{sand}}$ ), are 10% and 30%. In addition, the degrees of the saturation are 5%, 10%, 15%, and 20%. The specimens are frozen under the temperature of  $-10^{\circ}\text{C}$  conditions. The uniaxial compression tests are conducted for 24 hours, 48 hours, and 72 hours after freezing to determine proper freezing time. The freezing time of 24 hours is chosen because the unconfined compressive strengths of specimens after 24 hours freezing times are similar to each other. Furthermore, the unfrozen water content is monitored during freezing using the TDR system. The unfrozen water content increases with the increase of the silt fraction and degree of saturation. The unconfined compressive strength of the frozen soils exponentially increases with increasing the degree of saturation. This study shows that the amount of ice has more influence on the strength of the frozen soils than the amount of unfrozen water.

#### 요 지

동결토의 강도는 흙 입자의 크기와 모양, 그리고 얼음과 부동 수분의 양과 같은 요인에 영향을 받는다. 본 연구에서는 동결토의 포화도와 실트 함량에 따라 변화하는 부동 수분의 양과 강도를 평가하고자 하였다. 시료는 주문진사, 실트, 그리고 증류수를 혼합하여 사용하였다. 실트의 함량비(SF)는 주문진사의 중량( $W_{\text{sand}}$ )에 대한 실트 중량( $W_{\text{silt}}$ )의 비율이 10%와 30%가 되도록 혼합하고, 포화도는 5%, 10%, 15%, 그리고 20%가 되도록 조성하였다. 시료는  $-10^{\circ}\text{C}$ 의 챔버 내에서 동결하였고, 동결 시간을 선정하기 위하여 24 시간, 48 시간, 그리고 72 시간동안 동결한 시료에 대하여 일축압축실험을 수행하였다. 일축압축강도가 동결 시간 24 시간 이후에 유사하여 동결 시간은 24 시간으로 선정하였

1 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사수로 (Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 비희원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)

3 정희원, 한국건설기술연구원 연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)

4 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3325, Fax: +82-2-928-7656, [jongsub@korea.ac.kr](mailto:jongsub@korea.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

다. 또한, 동결 과정 중 부동 수분의 양을 파악하기 위해 TDR 시스템을 이용하여 시료의 함수비를 모니터링 하였으며, 실트의 함량과 포화도가 증가함에 따라 부동 수분의 양이 증가하였다. 동결이 완료된 시료에 대하여 일축압축실험을 수행하였고, 포화도의 증가에 따라 일축압축강도가 지수함수적으로 증가하는 것으로 나타났다. 포화도가 증가함에 따라 부동 수분의 양이 증가하였으나, 동결에 사용된 물 즉, 얼음이 강도 발현에 보다 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

**Keywords** : Degree of saturation, Frozen soils, Ice, Silt fraction, TDR, Unfrozen water, Unconfined compressive strength

## 1. 서론

동결토는 일반적인 지반 구성과 달리 흙 입자, 공기, 얼음, 그리고 부동 수분이 존재하는 4상의 형태로 구성되어 있다. 부동 수분은 0°C 이하의 온도에서도 동결되지 않는 수분으로서 용질과 모관의 영향에 의한 응고점 강하, 흙입자 표면의 흡착력장의 영향 등에 의해 물의 화학능이 저하하여 형성된다(Uhlmann and Jackson, 1966; Hivon and Segó, 1995). 또한 부동수분은 흙 입자간 결합력을 유연하게 하여 동결토의 강도를 감소시키며, 모세관 현상에 의해 지하로부터 상승한 지하수가 부동수막을 통하여 상부에 아이스렌즈를 형성시켜 동상에 의한 피해를 야기할 수 있다(Ohrai, 1986; Shin and Park, 2003). 그러므로, 동결 지반의 안정성 평가를 위하여, 부동 수분의 존재와 강도 등의 동결토의 역학적 및 공학적 특성에 대한 평가는 필수적이다.

부동 수분은 간극의 자유수가 동결되지 않은 약한 결합 상태와 입자 표면에 형성되어 있는 얇은 막의 강한 결합 상태로 분류된다. Anderson and Morgenstern(1973)은 비교적 약한 결합 상태의 부동 수분을 평가하기 위해 사질토를 사용하여 실험을 수행하였고, 흙입자 표면의 강한 결합 상태의 부동 수분 평가는 주로 비표면적을 증가시키기 위하여 점토와 실트를 혼합하여 온도와 중량비 등을 변화시키며 부동 수분의 양을 파악하였다(Williams, 1964; Koopmans and Miller, 1966; Konrad and Samson, 2000). 또한, 이와 같이 흙입자 표면에 강하게 결합되어 있는 부동 수분은 -70°C 이상에서 존재하는 것으로 보고된 바 있다(Olhoef, 1977). 부동 수분의 양을 추정할 수 있는 Time domain reflectometry(TDR)는 전선의 불연속한 위치를 파악하는 용도로 소개된 기법으로, 지반공학 분야에서 흙의 함수비에 따라 변화하는 유전율 특성을 활용하여 시료의 체적함수비를 측정하도록 응용되었다(Topp et al., 1980). Patterson and Smith(1981)는 TDR을 동결토에 적용하여 온도 변화에 따른

부동 수분의 양을 평가하기도 하였다.

동결토에 대한 연구는 주로 온도와 포화도를 변화시키며 조성한 시료를 대상으로 다양한 변형률 조건에서 일축압축실험을 이용한 강도 평가가 수행되었다(Tsytoovich, 1963; Baker, 1978; Zhu and Carbee, 1984; Chae et al., 2014). 그러나, 선행 연구는 동결 이후의 강도에 대한 비교 평가로서, 동결 과정에서의 동결토의 특성 변화에 대한 연구는 미비한 실정이다. Kim et al.(2002)과 Shin et al.(2010)은 동결 중의 특성 평가를 위해 유전율과 초음파 속도 등을 이용하여 실험을 수행했으나, 부동 수분 형성에 큰 영향을 미치는 실트 함량의 비율에 따른 연구는 수행되지 않았다. 또한, 기존의 연구는 시료 조건에 따른 동결 과정 중의 특성 평가와 동결 이후의 강도에 대한 연구가 구분되어 수행되었다는 한계가 있다.

본 연구에서는 포화도와 실트 함량에 따른 시료의 동결 중 부동 수분량을 모니터링하고, 동결 이후의 동결토에 대한 일축압축실험을 수행하여 각 결과를 상호비교하였다. 동결 과정의 부동 수분 평가를 위해 동결용 몰드 내부 벽면에 TDR 센서를 설치하였으며, 동결 이후 동결토에 대하여 최대압축강도가 나타날 때까지 일축압축실험을 수행하였다. 동결 과정과 이후의 일축압축실험은 영하의 온도를 유지하도록 제작된 동결 챔버 내에서 수행되었다. 본 논문은 부동 수분을 측정할 수 있는 동결 몰드와 일축압축실험기에 대하여 기술하고, 시료 조성법 및 영하의 온도를 일정 시간동안 유지한 실험 구성에 대해 설명하였다. 다음으로 동결 중의 TDR 측정 신호와 일축압축강도에 대한 실험 결과를 제시한 후, 각 결과를 비교 분석 및 토의하였다.

## 2. 실험 장비

### 2.1 동결 몰드

본 연구에서 사용된 동결 몰드는 동결 과정 중 부동

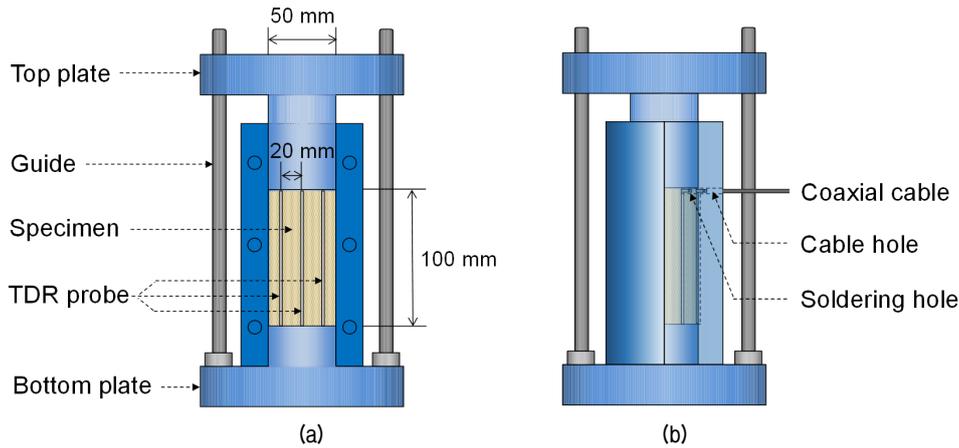


Fig. 1. Specimen preparation mold instrumented TDR probe: (a) front view; (b) side view

수분량 측정을 위해 제작되었다. 동결 몰드는 Fig. 1과 같이 동결 이후 일축압축실험을 수행하기 위해 직경이 50mm이고, 높이가 100mm인 동결 시료가 제작되도록 설계되었다. 몰드는 MC 나일론 재질로 제작하여 TDR 용 전극 사이를 절연하였고, 불필요한 전기적 신호의 영향을 최소화하였다. 몰드 벽면은 좌우로 분리할 수 있도록 제작되어 동결 이후 시료를 획득하도록 설계되었고, 시료 조성시 벽면간의 볼트 체결을 통해 시료 손실을 최소화하였다. 또한, 동결 이후 동결 시료와 몰드 사이의 동착력에 의한 시료의 교란 가능성을 최소화하기 위해 내부 벽면과 체결부에 그리스(grease)를 도포하였다. 시료의 내부는 유전율을 이용한 부동 수분량의 추정을 위해 내부 벽면에 길이 100mm, 두께 2mm의 TDR 전극을 20mm 간격으로 설치하여 시료의 대표적 유전율을 측정하고자 하였다. 설치시 내부 벽면에 전극의 한 쪽면이 노출되도록 홈을 가공한 후 에폭시로 고정하였다. 세 개의 전극과 연결된 동축 케이블은 벽면 몰드를 통과하여 전선이 외부의 장비와 연결되도록 구성하였다.

## 2.2 일축압축실험기

일축압축실험기는 Fig. 2와 같이 제작되어 동결 챔버 내에 설치되었다. 장비의 상부에 최대 측정 하중이 10kN 인 로드셀을 설치하여 직경 50mm인 시료에 대하여 최대 5MPa까지 압축응력을 측정할 수 있도록 제작되었다. 또한, 하부에는 모터의 과부하를 방지하기 위해 하중 20kN 가감속에 대한 응답성이 우수한 서보모터(servomotor)를 설치하여 일정한 변형 속도로 실험을 수행하였다. 본 모터는 일축압축실험기의 하부판과 연결되어

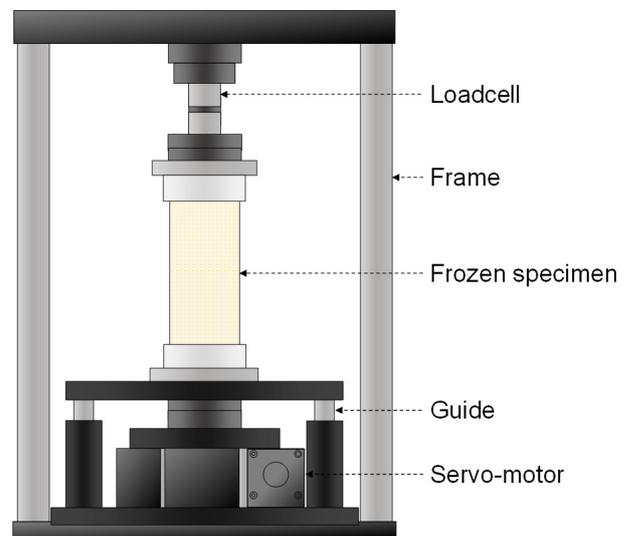


Fig. 2. Schematic drawing of the uniaxial compression test device

상하 이동을 조작하도록 설계되었으며, 강도 평가 실험시 하부판이 상향으로 이동하며 시료의 전단 파괴를 수행하였다. 전단 속도는 0.1mm/min부터 최대 2mm/min 까지 설정이 가능하도록 설계되었다. 또한, 동결 챔버의 한 개 면은 일축압축실험 과정의 시료의 변형을 관찰하기 위해 열선 처리된 유리로 제작되었다.

## 3. 실험 구성

### 3.1 시료 조성

본 연구에 사용된 시료는 모래와 실트이다. 모래는 입경의 차이에 따른 영향을 최소화하기 위해 30 번 체를 통과하고 50 번 체에 남는 것으로 균일한 입경의 주분

진사를 사용하였으며, 실트는 200 번 체를 통과한 세립 분을 사용하였다. 주문진사와 실트의 비중은 각각 2.62 와 2.72로 나타났다. 모래와 실트는 혼합하여 실트 중량 비를 식 (1)과 같이 정의하여 사용하였다.

$$SF = \frac{W_{silt}}{W_{sand}} \times 100\% \quad (1)$$

여기서, SF는 실트중량비(silt weight fraction)이며,  $W_{silt}$  와  $W_{sand}$ 는 각각 실트와 모래의 중량이다. 또한, 포화도의 차이에 의한 특성 비교를 수행하기 위해 각각의 시료는 포화도 5, 10, 15, 그리고 20%의 조건으로 증류수를 혼합하여 조성하였다. 각 실트 함량에 따른 혼합토의 기본 물성은 Table 1과 같이 실트비 10%의 경우 비중은 2.64, 최대 간극비와 최소 간극비는 0.84과 0.52이며, 실트비 30%의 경우 비중은 2.65, 최대 간극비와 최소 간극비는 0.81과 0.42이다. 주문진사와 실트를 혼합한 후 각 포화도에 해당하는 증류수를 첨가하여 밀폐된 용기에 보관하여 시료 내에서 포화도가 동일하도록 하였다. 모든 시료는 상대밀도 60%가 되도록 동결 몰드에 조성되었다. 시료 조성시 네 개의 층으로 나누어 동일한

에너지로 5 회씩 다짐 방법을 적용하여 시료를 조성하였으며, 동결 중의 수분 손실을 방지하기 위하여 상부를 밀폐한 상태로 동결 과정을 진행하였다. 동결 몰드를 설치한 동결 챔버의 온도는  $-10^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였으며 24 시간동안 동결을 수행하였고, 시료가 동결되는 동안 TDR 을 통하여 시료의 유전율을 측정하여 부동 수분을 산정 하였다.

### 3.2 TDR 측정 시스템

TDR 측정 시스템은 Fig. 1과 같이 제작된 프로브 및 케이블을 포함한 TDR 장비와 신호 측정을 위한 컴퓨터로 구성되어 있다. TDR 프로브는 세 개의 전극으로 구성되어, 중앙에 위치한 전극에 동축 케이블의 내선을 연결하여 전자기파가 전파되도록 하였다. 양 측의 전극은 케이블의 외선과 연결하여 유전율을 측정할 수 있는 시료의 영역을 대표하고, 동시에 접지의 역할을 하였다. 모든 전극은 스테인레스 스틸 재질로 제작되어 전자기파 신호를 측정하였으며, 전극과 접하고 있는 시료 매질의 유전율에 따라 변화하는 신호를 통해 부동 수분의 양을 파악하고자 하였다.

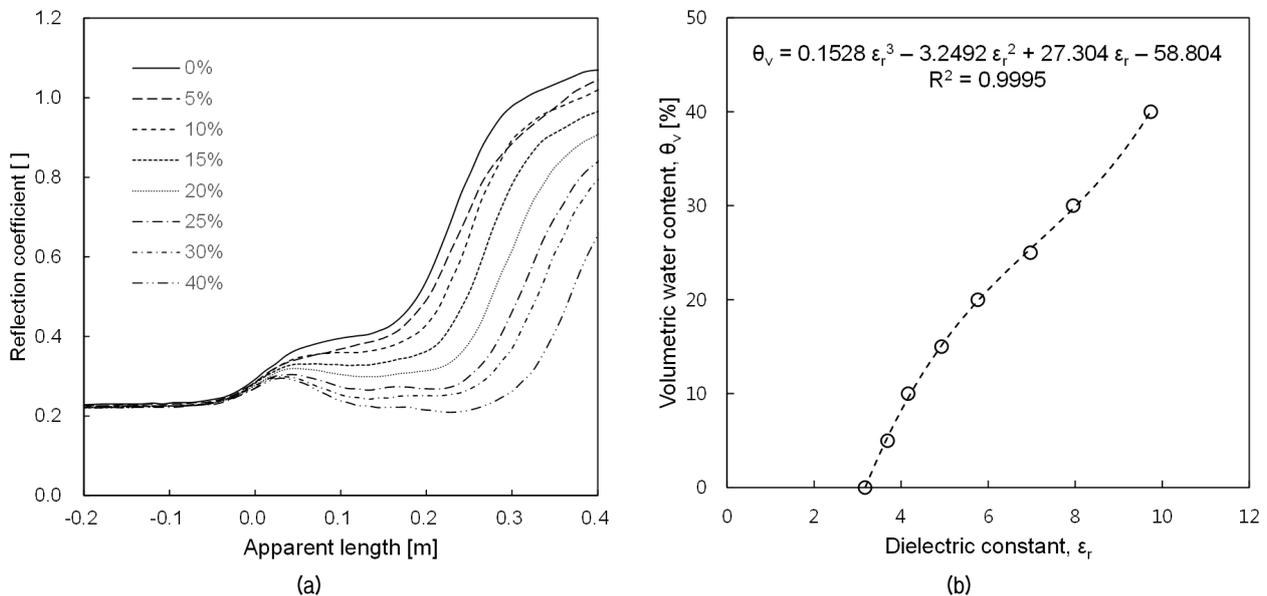


Fig. 3. Calibration of TDR system: (a) TDR waveforms; (b) relationship between the volumetric water content and the measured dielectric constant.  $\theta_v$  and  $\epsilon_r$  denote the volumetric water content and dielectric constant, respectively

Table 1. Index properties of specimens

Silt fraction [ $W_{silt} / W_{sand}$ ]	Specific gravity [ $G_s$ ]	Maximum void ratio [ $e_{max}$ ]	Minimum void ratio [ $e_{min}$ ]
10%	2.64	0.84	0.52
30%	2.65	0.81	0.42

TDR의 모든 전극은 본 실험을 위해 설계된 동결 몰드 벽면에 설치되도록 제작되었다. 이와 같이 새롭게 제작된 3전극 TDR 프로브는 MC 나일론 재질의 유전율을 반영하므로 유전율과 함수비의 관계식을 산정하기 위해 실내 보정 실험을 수행한다(Noborio, 2001; Hong et al., 2015; Jung et al., 2015). 본 연구에서 제작된 TDR 프로브의 실내 보정 실험 결과는 Fig. 3과 같으며, 이는 Topp et al.(1980)과 유사하게 체적함수비와 유전상수간의 관계식으로 표현되었다. 함수비가 증가할수록 유전율이 증가하였으며, 도출된 함수비-유전율 관계식은 결정계수( $R^2$ )가 0.999 이상인 높은 상관관계를 나타냈다. 실제 상용화된 TDR의 경우 세 개의 전극이 모두 노출되어 있으나, 본 연구에서 제작된 TDR 프로브의 경우 나일론 재질의 동결 몰드에 접하도록 설치되어 있기에 함수비-유전율 관계식의 계수가 Topp et al.(1980)이 제시한 계수와 서로 다르게 나타났다.

### 3.3 일축압축실험

동결이 완료된 동결 시료는 몰드로부터 탈형하여 일축압축실험을 수행하였다. 일축압축실험은 동결 과정과 동일하게  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 일정 시간 구동하여 모터의 미열에 의한 시료의 용해를 방지하도록 하여 수행하였다. 실험은 전단 속도  $1\text{mm}/\text{min}$ 으로 최대압축응력이 나타난 이후인 약  $12\text{mm}$ 까지 수행되었고, 변위에 따른 압축응력은 매 초마다 획득하였다. 획득된 신호는 컴퓨터로 출력하여 자동 저장되도록 시스템을 구성하였다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 동결 시간 선정

본 실험에 앞서 동결이 완료된 시점을 파악하기 위한 동결 시간에 따른 시료의 강도 변화를 파악하기 위해 일축압축실험을 수행하였다. 동결 시간은 24 시간, 48 시간, 그리고 72 시간으로 나누어 강도 평가를 수행하였으며, 결과는 Fig. 4와 같다. 실험 결과, 세 경우의 동결 강도의 크기가 모두 유사한 것으로 나타났으며, 이를 통해 24 시간의 동결 시간은 시료의 동결이 완료되기에 충분하다고 판단하였다. 이에 따라, 동결 과정 중 TDR 측정이 수행되는 본 실험에 24 시간의 동결 시간을 선정하였다.

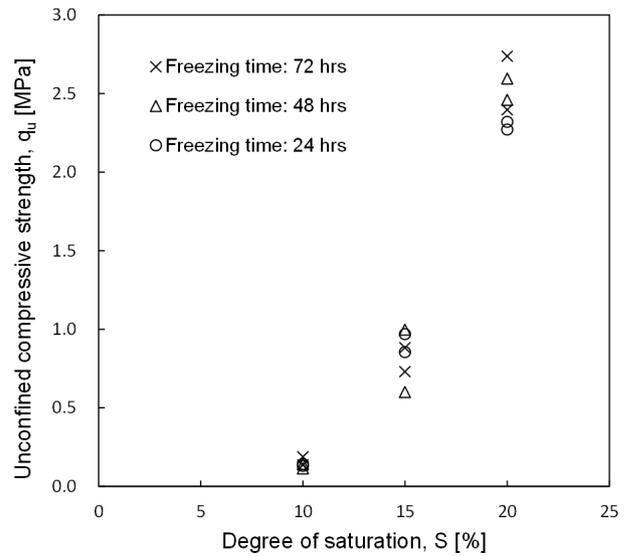


Fig. 4. Unconfined compressive strength versus degree of saturation according to the freezing time

### 4.2 TDR 신호

동결 과정 24 시간동안 측정된 TDR 신호는 Fig. 5에 나타내었다. 측정된 신호는 포화도 조건과 실트 함량에 관계없이 4 시간 이후부터 동일한 형상을 나타내며, 이를 통해 부동 수분량이 동결 4 시간 이후부터 수렴된 것으로 판단된다.

각 조건별 수렴된 부동 수분량을 Fig. 6에 나타내었다. 시료의 실트 함량비가 10%와 30%의 경우에 대하여 포화도가 5%로부터 20%로 증가함에 따라 부동 수분의 함수비가 다소 증가하는 것으로 측정되었다. Fig. 6과 같이 실트 함량이 증가할수록 부동 수분의 양이 크게 증가하였으며, 포화도의 증가에 따라 부동 수분의 양이 다소 증가하였다. 이에 따라, 동일한 포화도에서 실트의 영향으로 부동 수분의 양이 증가하게 되고, 동결 전 포화도의 증가에 따라 절대적인 물의 양이 증가하므로 부동 수분의 양도 다소 증가하게 된 것으로 판단된다.

### 4.3 일축압축강도

주문진사에 대한 실트의 무게비가 10%와 30%인 혼합토에 대하여 포화도 5, 10, 15, 그리고 20 %가 되도록 증류수를 혼합한 시료를 동결하였다. 동일한 영하의 온도에서 일축압축실험을 수행하였으며 각 조건별 변위에 따른 일축압축응력을 Fig. 7에 나타내었다. 실트의 무게비가 10%인 경우, 포화도의 증가에 따라 일축압축강도가  $0.10\text{MPa}$ 에서  $4.88\text{MPa}$ 까지 증가하였으며, 실트비가

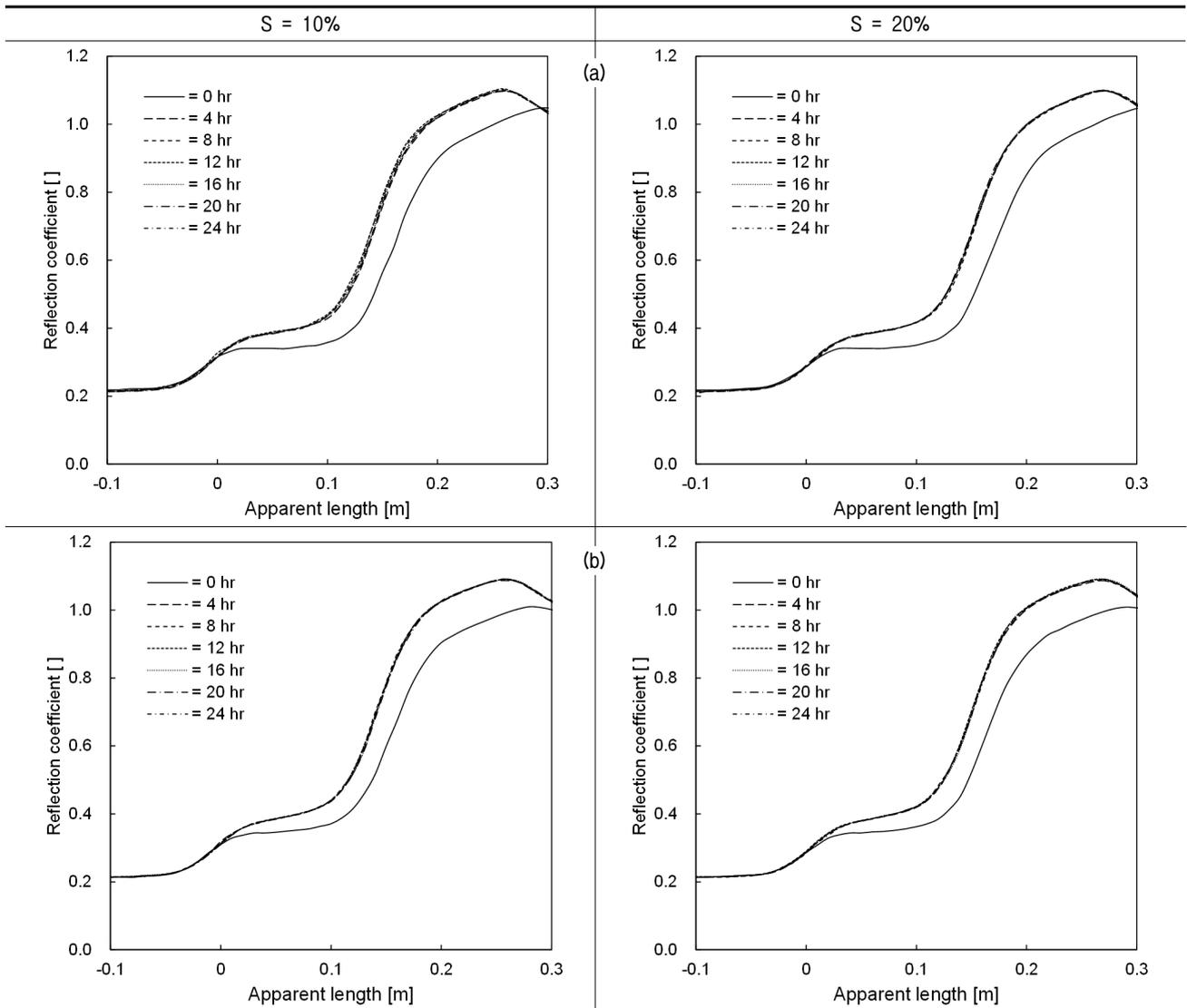


Fig. 5. TDR waveforms during freezing phase: (a) SF = 10%; (b) SF = 30%. S and SF denote the degree of saturation and silt fraction, respectively

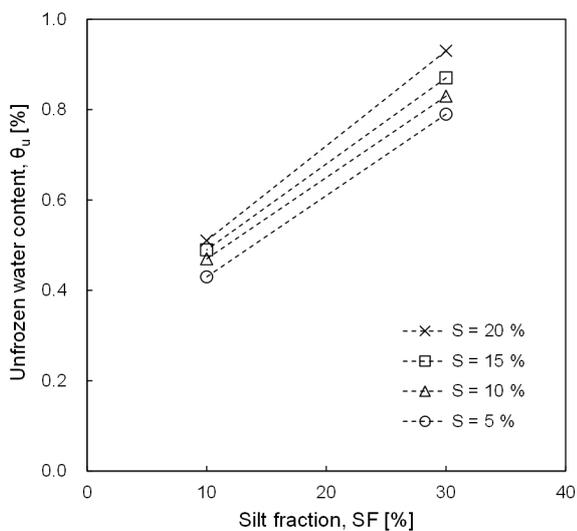


Fig. 6. Unfrozen water content in frozen specimens with different degree of saturations according to the silt fraction

30%인 경우, 일축압축강도는 0.08MPa에서 2.32MPa까지 증가하는 것으로 나타났다. 이는 실트비가 증가함에 따라 부동 수분의 양이 증가하므로 강도에 직접적인 영향을 주는 얼음의 비중이 감소하였고, 부동 수분이 입자간 마찰력을 약하게 하여 동결 시료의 강도를 감소시켰을 것으로 사료된다.

측정된 일축압축강도의 신뢰도 향상을 위해 각 조건별 일축압축실험을 추가 진행하였으며, 수행된 전 경우의 일축압축강도는 실트 함량별 포화도에 따라 Fig. 8과 같이 도시하였다. 동일한 조건의 시료로 일축압축실험을 추가 수행한 경우, 전 경우의 일축압축강도와 유사하게 나타났다. 포화도의 증가에 따라 일축압축강도는 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났고, 이는 강도 발현에 미치는 얼음의 영향이 급격하게 증가한 것으로 판단

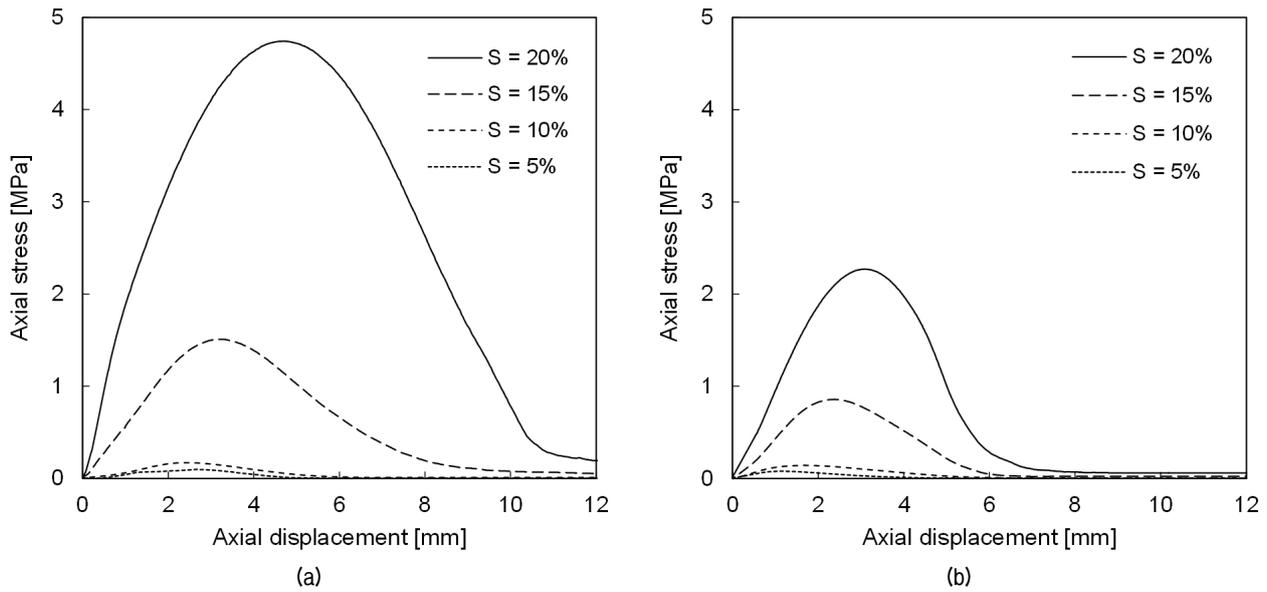


Fig. 7. Axial stress versus axial displacement during uniaxial compression test according to degree of saturation: (a) SF = 10%; (b) SF = 30%

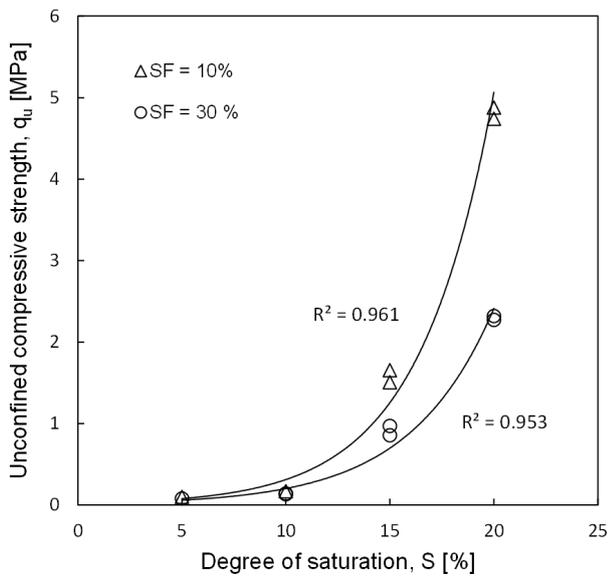


Fig. 8. Unconfined compressive strength of frozen specimens with different silt fractions and degree of saturations

된다. 또한, 동결 시료의 실트 함량이 감소할수록 일축 압축강도는 증가하였으며, 이는 비교적 낮은 포화도의 동결 시료에서 얼음뿐만 아니라 구성 흙 입자간의 마찰력 등이 강도 발현에 영향을 미친 것으로 판단된다.

## 5. 토 의

동결토의 실트 함량과 포화도의 차이에 따른 부동 수분을 파악하기 위해 동결 과정에서 TDR 측정을 통해

함수비를 측정하였으며, 동일한 조건의 시료로 일축압축 실험을 수행하여 강도를 파악하였다. 부동 수분과 일축압축강도 간의 관계를 Fig. 9에 도시하였다. 또한, 동결토의 강도 발현에 큰 영향을 미치는 얼음의 결합력 (ice bonding)을 파악하기 위해 초기 함수비에서 동결 후 부동 수분의 양을 제외한 함수비, 즉 동결에 사용된 함수비(얼음에 해당)와 일축압축강도 간의 관계를 Fig. 10에 나타내었다.

동일한 실트비의 동결 시료에 대하여 함수비의 증가에 따른 부동 수분과 일축압축강도의 관계는 Fig. 9(a)와 같이 나타났다. 포화도의 증가에 따라 일축압축강도는 크게 증가하였으며, 부동 수분은 다소 증가하였다. 동결 시료의 강도 발현에는 얼음의 강도와 결합력 등이 지배적인 영향을 미치므로(Ting et al., 1984), 포화도가 비교적 낮은 상태의 동결 시료에서 포화도가 증가하는 것은 동결토의 강도 발현에 영향을 미치는 얼음의 양이 급격하게 증가함을 의미한다. 부동 수분의 경우 포화도의 증가에 따라 동결 전 절대적인 증류수의 양이 증가한 관계로 다소 증가한 것으로 판단된다. 이에 따라, 부동 수분은 증가했지만 강도에 큰 영향을 미치는 얼음의 양이 Fig. 10과 같이 크게 증가하여 일축압축강도가 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 9(b)와 같이 실트 함량이 증가할수록 일축압축강도는 감소하였으나, 초기 함수비가 동일한 경우 부동 수분은 크게 증가하였다. 부동 수분의 양은 흙 입자 표면

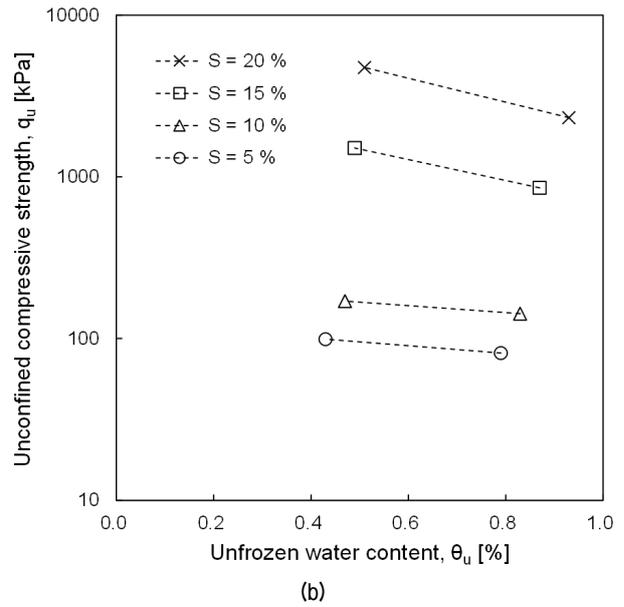
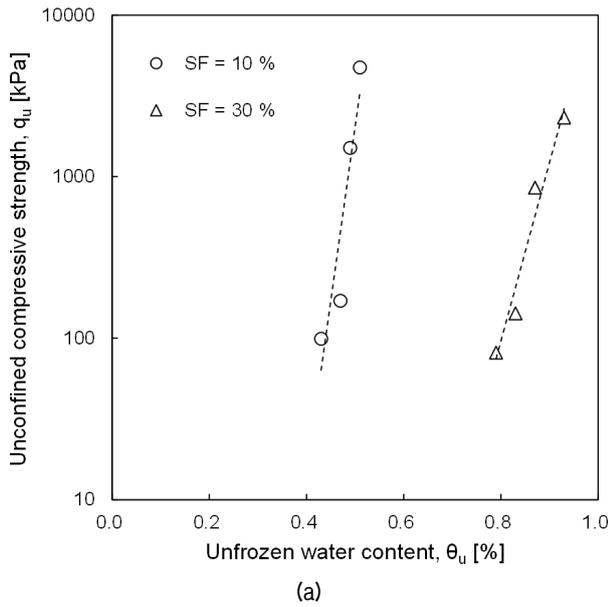


Fig. 9. Correlation between unfrozen water content and unconfined compressive strength: (a) with different silt fractions; (b) with different degree of saturations

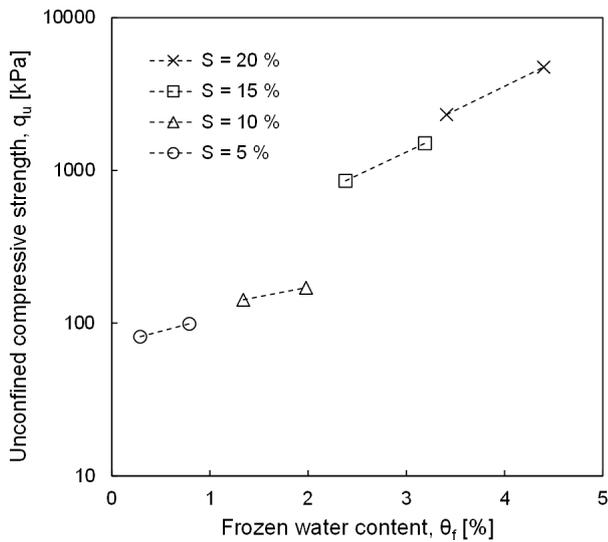


Fig. 10. Correlation between frozen water contents and unconfined compressive strength with different degree of saturations

## 6. 요약 및 결론

본 연구에서는 포화도와 실트 함량에 따른 동결토의 부동 수분과 일축압축강도 특성을 비교 분석하고자 하였다. 실트 함량은 주문진사에 대한 무게비가 10%와 30%인 두 가지의 혼합토 시료를 준비하였고, 각 시료에 증류수를 포화도 5, 10, 15, 그리고 20%가 되도록 첨가하였다. 동결 챔버 내에서  $-10^{\circ}\text{C}$ 의 조건으로 동결을 수행하였으며, 동결이 완료된 이후 일축압축실험을 통해 강도를 파악하였다. 또한, 모든 시료에 대하여 동결 과정에서의 TDR을 이용하여 부동 수분량을 파악하였다. 이에 따라 실트 함량 및 포화도에 따른 일축압축강도와 부동 수분량의 변화를 파악하였고, 일축압축강도와 부동 수분의 관계 또한 분석하였으며, 아래와 같은 주요한 결론을 도출할 수 있었다.

의 화학적 특성 뿐만 아니라 입자의 크기, 비표면적과 같은 물리적 특성에 의해 차이를 나타내며(Watanabe and Mizoguchi, 2002), 이와 같은 원인으로 비표면적이 큰 실트질 시료의 증가에 따라 부동 수분의 양이 크게 증가한 것으로 추정된다. 이에 따라, 부동 수분이 입자간 마찰력에 유연제 역할을 함으로써 동결 시료의 일축압축강도를 다소 감소시킨 것으로 사료된다(Ohrai, 1986). 또한, 부동 수분 형성에 따라 흙 입자보다 강한 결합력을 나타내는 얼음의 비중이 감소하기 때문에 실트의 함량이 증가함에 따라 일축압축강도가 감소한 것으로 판단된다.

- (1) 시료의 동결 완료 여부를 판단하기 위해 24, 48, 그리고 72 시간의 동결 과정 후 일축압축실험을 수행하였고, 최대압축강도는 모두 유사하게 나타났다. 또한, 동결 중 TDR 측정을 통해 파악한 부동 수분은 동결 4 시간 이전에 수렴하였으므로 실트 함량이 30% 미만이고 포화도가 20% 미만인 경우, 동결 시간은 24 시간이면 충분할 것으로 판단된다.
- (2) 실트의 함량이 증가할수록 부동 수분의 양이 크게 증가하였으며, 이는 비표면적이 큰 실트질의 입자

표면에 얇은 막의 강한 결합 상태로 존재하는 부동 수분층의 동결을 방지한 것으로 판단된다. 한편, 포화도의 증가에 따라 부동 수분이 증가하였고, 이는 동결 전 첨가한 증류수의 양이 절대적으로 증가하였기 때문으로 판단된다.

- (3) 포화도의 증가에 따라 일축압축강도가 지수 함수적으로 증가하였고, 이는 동결토의 강도 발현에 미치는 얼음의 영향이 급격하게 증가하였기 때문으로 판단된다. 한편, 일축압축강도는 실트 함량이 증가할수록 감소하였으며, 비교적 낮은 포화도의 동결 시료인 관계로 얼음뿐만 아닌 구성 흙 입자간 마찰력이 강도 발현에 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다.
- (4) 동일한 포화도 조건에서 부동 수분량의 증가에 따라 일축압축강도가 다소 감소하였으며, 이는 부동 수분이 동결 시료의 입자간 결합력을 약하게 한 것으로 추정된다. 동일한 실트 함량 조건에서는 포화도가 증가함에 따라 부동 수분의 양이 다소 증가하지만, 부동 수분을 제외한 동결된 물의 양(즉, 얼음)이 보다 더 크게 증가하기 때문에 일축압축강도 또한 증가하는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 플랜트연구사업의 연구비지원(13IFIP-B06700801)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌 (References)

1. Kim, Y. C., Bae, J. H., and Song, W. K. (2002), "An Experimental Study on the Unfrozen Water Contents and Ultrasonic Wave Velocity in Frozen Soil", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.22, No.3C, pp.207-217.
2. Shin, E. C. and Park, J. J. (2003), "An Experimental Study on Frost Heaving Pressure Characteristics of Frozen Soils", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.19, pp.65-74.
3. Shin, E. C., Ryu, B. H., and Park, J. J. (2010), "The Frost Heaving Characteristics of Subgrade Soils using Laboratory Freezing System", *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol.12, No.2, pp.71-79.
4. Jung, Y. S., Sa, H. D., Kang, S., Oh, S. B., and Lee, J. S. (2015), "Soil Water Characteristic Curve using Volumetric Pressure Plate Extractor Incorporated with TDR System", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.8, pp.17-28.
5. Chae, D., Kim, Y., Lee, J., and Cho, W. (2014), "An Experimental Study on the Creep Behavior of Frozen Sand", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.15, No.2, pp.27-36.
6. Hong, W. T., Jung, Y. S., Lee, J. S., and Byun, Y. H. (2015), "Development and Application of TDR Penetrometer for Evaluation of Soil Water Content of Subsoil", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.2, pp.39-46.
7. Anderson, D. M. and Morgenstern, N. R. (1973), "Physics, Chemistry and Mechanics of Frozen Ground", *National Academy of Sciences*, pp.257-288.
8. Baker, T. H. W. (1978), "Effect of End Condition on the Uniaxial Compressive Strength of Frozen Sand", pp.608-614.
9. Hivon, E. G. and Segoo, D. C. (1995), "Strength of Frozen Saline Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.32, No.2, pp.336-354.
10. Konrad, J. M. and Samson, M. (2000), "Hydraulic Conductivity of Kaolinite-Silt Mixtures subjected to Closed System Freezing and Thaw Consolidation", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, No.4, pp.857-869.
11. Koopmans, R. W. R. and Miller, R. D. (1966), "Soil Freezing and Soil Water Characteristic Curves", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.30, No.6, pp.680-685.
12. Watanabe, K. and Mizoguchi, M. (2002), "Amount of Unfrozen Water in Frozen Porous Media Saturated with Solution", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.34, No.2, pp.103-110.
13. Noborio, K. (2001), "Measurement of Soil Water Content and Electrical Conductivity by Time Domain Reflectometry: A Review", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.31, No.3, pp.213-237.
14. Olthoef, F. R. (1977), "Electrical Properties of Natural Clay Permafrost", *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol.14, No.1, pp.16-24.
15. Ohrai, T. (1986), "Experimental Studies on the Effects of Ice and Unfrozen Water on the Compressive Strength of Frozen Soil", *Ph. D. dissertation, Hokkaido University, Sapporo, Japan*.
16. Patterson, D. E. and Smith, M. W. (1981), "The Measurement of Unfrozen Water Content by Time Domain Reflectometry: Result from Laboratory Tests", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.18, No.1, pp.131-144.
17. Ting, J. M., Torrence Martin, R. and Ladd, C. C. (1983), "Mechanisms of Strength for Frozen Sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.109, No.10, pp.1286-1302.
18. Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980), "Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements on Coaxial Transmission Line", *Water Resources Research*, Vol.16, No.3, pp.574-582.
19. Tsytoich, N. A. (1973), "The Mechanics of Frozen Ground", *Scripta Book Co.*
20. Uhlmann, D. R. and Jackson, K. A. (1966), "Frost Heave in Soils", *Physics of Snow and Ice*, Vol.1, No.2, pp.1361-1373.
21. Williams, P. J. (1964), "Specific Heat and Apparent Specific Heat of Soils", *Geotechnique*, Vol.14, No.2, pp.133-142.
22. Zhu, Y. and Carbee, D. L. (1984), "Uniaxial Compressive Strength of Frozen Silt under Constant Deformation Rates", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.9, No.1, pp.3-15.

Received : September 1<sup>st</sup>, 2016

Revised : October 12<sup>th</sup>, 2016

Accepted : November 7<sup>th</sup>, 2016