

동남극 테라노바만 흙 시료의 동결 및 비동결 상태에서의 동적특성 평가

Dynamic Soil Properties of Frozen and Unfrozen Soils from Terra Nova Bay in Eastern Antarctica

김 재 현 ¹	Kim, Jae-Hyun	권 영 만 ²	Kwon, Yeong-Man
박 근 보 ³	Park, Keunbo	김 영 석 ⁴	Kim, YoungSeok
김 동 수 ⁵	Kim, Dong-Soo		

Abstract

The geotechnical characteristics of frozen ground is one of the key design issues for the construction of infrastructure in cold region. In this study, the dynamic properties (shear modulus and damping ratio) of frozen and unfrozen soils sampled from Terra Nova Bay located in eastern Antarctica, where Jang Bogo station was built, were investigated using Stokoe-type resonant column test (RC). In order to freeze the reconstituted soil specimen, the RC testing equipment was modified by adding a cooling system. A series of resonant column tests were performed in frozen and unfrozen soils with various soil densities and temperatures. The shear modulus (G) and damping ratio (D) of soil frozen at -7°C were compared with those of unfrozen soil. In addition, the effect of temperature rise on the maximum shear modulus (G_{\max}) and damping ratio was experimentally investigated. This study has significance in that the difference of dynamic soil properties between frozen and unfrozen soils and the effect of temperature rise on frozen soil were identified.

요 지

극한지에 구조물을 안정적으로 건설하기 위해서는 동결토의 지반공학적 특성을 평가하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 남극 제2과학기지(장보고 기지)가 건설된 남극 테라노바만 인근지역의 현장시료를 이용하여 동결토와 비동결토의 동적특성(전단탄성계수, 감쇠비)을 Stokoe 식 공진주 실험기를 이용하여 평가하였다. 시편을 동결시키기 위해 시편의 온도제어가 가능하도록 공진주 실험시스템을 개선하였으며, 다양한 밀도로 조성된 시편에 대해 동결상태와 비동결상태에서 공진주 실험을 수행하였다. 동결토 실험에서는 -7°C 에서 얼린 시료를 이용해 전단변형률에 따른 전단탄성계수와 감쇠비를 획득하였고, 이를 비동결토의 특성과 비교하였다. 또한, 동결토의 온도변화에 따른 최대전단탄성계수와 감쇠비 변화를 실험적으로 평가하여 동결-융해 작용에 의한 지반의 역학적 특성 변화를 확인하였다. 본 연구를 통해 동결토와 비동결토의 동적특성 차이를 확인하였으며, 온도상승이 동결토에 미치는 영향을 확인했다는 점에서 공학적 의의가 있다.

Keywords : Resonant-column testing, Frozen soil, Shear modulus, Damping ratio, Antarctic soil

- 1 정희원, 한국과학기술원 건설및환경공학과, 박사후연구원 (Member, Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil and Environ. Eng., KAIST)
- 2 비희원, 한국과학기술원 건설및환경공학과, 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environ. Eng., KAIST)
- 3 정희원, 극지연구소 극지기후과학연구부, 연구원 (Member, Research Scientist, Division of Polar Climate Sciences, Korea Polar Research Institute)
- 4 정희원, 한국건설기술연구원, 연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
- 5 정희원, 한국과학기술원 건설및환경공학과, 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environ. Eng., KAIST, Tel: +82-350-3619, Fax: +82-350-7200, dskim@kaist.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2017 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

영하의 기온에서 수분을 함유하고 있는 지반은 간극수의 동결로 인해 상온에서의 공학적 특성과는 상이한 거동을 보인다. 또한 계절변화나 이상적인 기온상승은 동결토의 간극수를 용해시키며 지반의 강도를 저하시키는 특성이 있다. 반대로 상온에서 영하로 낮아지면 간극수의 재동결로 인해 지반의 체적을 팽창시키며 구조물에 변형을 유발시켜 기능을 저하시키거나 파손에 이르게 한다. 이러한 동결토의 특성 때문에 기온이 0°C 이하로 떨어질 수 있는 지역에 철도, 교량, 건축구조물 등을 안정적으로 건설하기 위해서는 동결토의 역학적 특성을 사전에 평가하고 설계에 반영하는 것이 중요하다.

최근 들어 국내에서도 남극 세종과학기지나 장보고 기지와 같이 극한지에서의 기반시설 건설에 대한 수요가 증가하고 있으며, 이와 함께 동결토의 지반 공학적 거동특성분석의 필요성이 대두되고 있다(Hong et al., 2012; Park et al., 2013; Ling et al., 2015). 남극과학기지 주변의 기후는 겨울철에는 최저 -35°C(영하)에서 여름철에는 최고 +5°C(평균기온 -14°C)를 넘나들며 매년 동결-융해가 반복되고 있고, 지구온난화로 인한 대기온도 상승으로 영구동토층이 지속적으로 녹고 있다. 특히, 동결토의 융해는 지반의 강도를 저하시키며 상부구조물의 안정성에 영향을 미칠 수 있기 때문에 동결토의 융해작용에 의한 지반의 역학적 특성변화에 대해 연구할 필요가 있다.

동결토의 지반 공학적 특성은 다양한 연구자들에 의해 활발히 연구되고 있다. 온도제어가 가능한 동결시스템을 활용한 동결토의 밀도변화나 동상현상에 관한 연구(Qi et al., 2008; Hong et al., 2012)와 삼축압축실험을 이용한 동결토의 강도특성과 변형특성에 관한 연구(Li et al., 1979; Simonsen and Isacsson, 2001; Yoon et al., 2003; Arenson et al., 2004; Arenson and Springman, 2005; Ling et al., 2009, 2015; Yao et al., 2013), 직접전단실험이나 일축압축실험 등을 이용한 지반의 동결-융해 작용에 따른 동결토의 역학적 특성에 관한 연구(Seo et al., 2008; Lee et al., 2016; Tebaldi et al., 2016)등이 대표적이다. 이 외에도 최근에는 초음파나 탄성파를 이용해 비파괴 방법으로 동결토의 역학적 특성을 연구하는 사례가 늘고 있다(Wang et al., 2006; Christ and Park, 2009; Park et al., 2012, 2013; Park and Lee, 2014). 하지만 비교적 최근까지도 동결토의 강도(strength)특성이나 기본적인 역학적 특성들(i.e. 밀도, 동상특성, 토압계수, 간극비)을

분석하기 위한 연구가 주를 이루었으며, 동결토의 전단탄성계수(shear modulus, G) 및 감쇠특성(damping, D)에 대한 연구는 제한적이었다.

전단탄성계수와 감쇠비(damping ratio)는 지반의 동적 특성을 대표하는 물성으로 1970년대 이후 활발하게 연구되고 있으며, 지반의 동해석부터 변형해석에 관한 정적인 문제에 이르기까지 중요한 설계인자로 사용되고 있다. 이 중, 동결토의 동적특성을 나타내는 전단탄성계수 및 감쇠비는 일반적으로 온도, 함수비, 하중주파수, 구속응력 등에 영향을 받는다고 보고된 바 있다(Vinson et al., 1978; Li et al., 1979; Park et al., 2013; Ling et al., 2015). Bosscher and Nelson(1987)은 동결토를 이용한 공진주(resonant column)실험에서 지반의 포화도, 밀도와 구속압에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비의 특성을 순수 얼음(pure-ice)의 특성과 비교하였다. 이후, Al-Hunaidi et al.(1996)은 공진주 실험을 이용해 자연 동결된 지반의 전단탄성계수와 감쇠비를 동결되지 않은 지반의 특성과 비교하였고, 동결된 흙은 동결되지 않은 흙에 비해 전단탄성계수가 약 30~50배, 감쇠비는 약 두배 정도 큰 것을 확인하였다. 최근에 Ling et al.(2015)은 반복삼축압축실험을 통해 지반의 전단탄성계수는 온도, 함수비, 주파수, 구속압의 증가에 따라 증가하고, 동결-융해 반복횟수에 따라 감소하는 것을 확인하였으며, 감쇠비는 초기함수비, 동결-융해 반복횟수와 온도의 증가에 따라 증가하나, 하중 주파수와는 반비례 관계임을 보였다. 하지만 과거의 연구들은 동결토의 실험조건에 따른 최대전단탄성계수나 감쇠비의 특성을 비교하는 연구가 주를 이루었으나 온도변화나 변형률의 크기에 따른 동결토의 전단탄성계수나 감쇠비의 변화에 관한 연구는 제한적이었다. 특히, 기온상승에 따른 동결토의 융해와 이로 인한 지반의 탄성계수 변화는 구조물의 부등침하나 과도한 변형을 유발시킬 가능성이 있음에도 불구하고 이에 대한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 최대전단탄성계수를 포함한 중간변형률($\sim 10^{-1}\%$) 이하에서 동적특성을 합리적으로 평가할 수 있는 공진주 실험기를 활용하여 다양한 온도조건에서 비동결토와 동결토의 전단탄성계수 및 감쇠비를 평가하였다. 이를 위해 온도제어가 가능하도록 Stokoe 방식의 공진주 실험 장치를 개선하고, 남극 테라노바만 인근지역의 현장시료를 이용해 다양한 밀도와 온도조건에서 공진주 실험을 실시하였다. 본 연구를 통해 비동결토와 동결토의 변형률에 따른 동적특성과 온도 상승에 따른 남

극 장보고 기지 인근 시료의 동적물성변화를 확인하였다. 본 연구는 동결도와 비동결도의 역학적 특성차이를 확인하고, 기후변화에 따른 영구동토층의 용해와 이로 인한 지반의 물성변화를 확인한 것에 큰 의의가 있다.

2. 실험개요

2.1 실험장비

공진주 실험(resonant column test)은 저변형률($\sim 10^{-3}\%$)에서 중간변형률 영역($10^{-3} \sim 10^{-1}\%$)까지 지반의 변형특성(전단탄성계수, 감쇠비)을 합리적으로 평가하기 위해 고안된 대표적인 실험방법이다(Kim and Choo, 2001; Kim et al., 2004; 2005).

본 연구에서는 온도제어가 가능하도록 Stokoe식 공진주 실험기를 개선하였다. 공진주 실험기 내에서 시편을 동결시키고 온도를 제어하기 위해 아세탈(acetal)로 제작된 원통형 실린더를 시편을 둘러싸도록 실험기 바닥판(pedestal)에 고정시켜 수조(fluid bath)를 만들었다. 시편을 둘러싸고 있는 수조는 어느점이 물보다 낮은 실리콘 오일(Silicon oil, ShinEtsu KF-96-20CS)을 채워 시

편을 얼리고 공압(air pressure)을 이용해 시편에 구속압을 가할 때 압력을 전달하는 매체로 활용하였다. 실험에 사용한 실리콘 오일은 점도가 비교적 낮고($2 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ @ 25°C) 휘발량(5.0% 이하 @ $150^\circ\text{C}/24$ 시간)이 적으며, 어는점이 -60°C 이하이기 때문에 시편을 동결시킨 상태에서 실험이 가능한 장점이 있다.

시편을 얼리기 위해서 유체 순환(circulation)이 가능한 저온용 항온수조를 이용하였다. 저온용 항온수조는 -25°C 에서 150°C 까지 온도가 정밀하게 제어된 유체를 순환시킬 수 있다. 순환 유체는 어는점이 약 -110°C 인 에탄올(ethanol)을 사용하였다. 항온수조에서 냉각된 에탄올은 구리관을 통해 시편을 둘러싸고 있는 수조 주변으로 순회하며 시편을 냉각시키도록 하였다. 항온수조에서 냉각되는 에탄올의 온도가 구리관을 통해 전달되는 동안 실험실의 온도에 의해 증가되는 것을 고려하여 목표 온도보다 낮은 온도로 설정하고 실험을 실시하였다. 또한, 실내 에어컨을 이용하여 실험실 온도가 항상 25°C 가 될 수 있도록 하여 순환과정에서 에탄올의 온도 변화가 일정하도록 하였다.

시편의 온도는 바닥판에 연결된 두개의 K-type 온도센서(thermocouple)와 데이터 수집장치(digital acquisition)

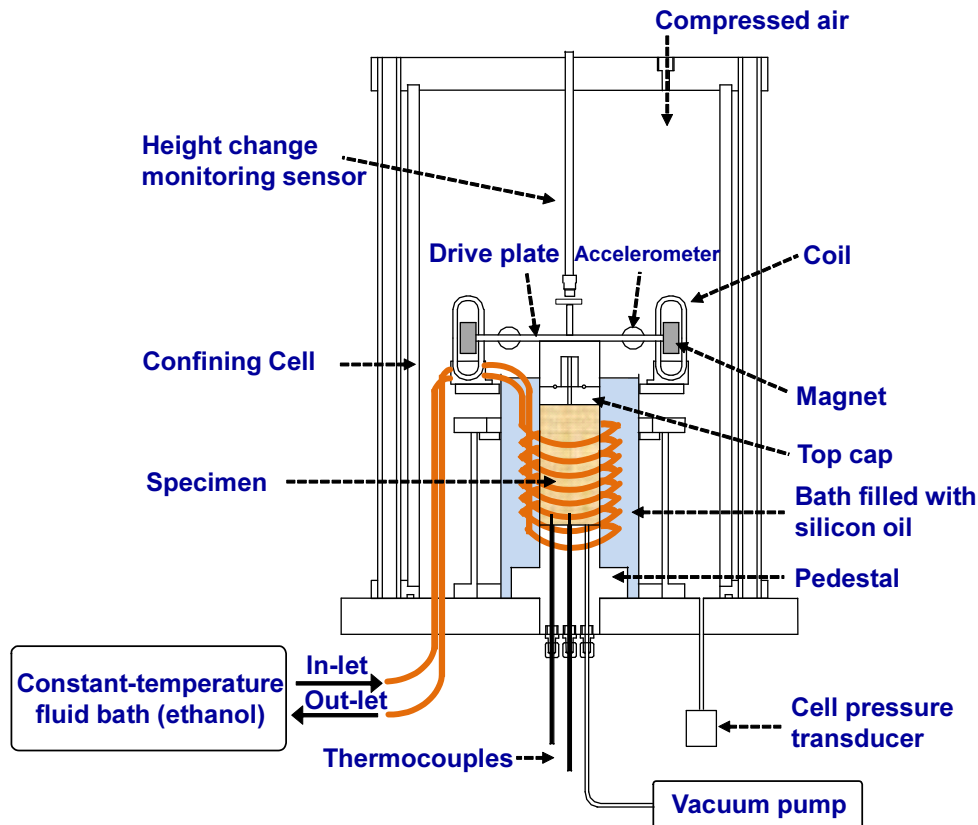


Fig. 1. Schematic diagram of resonant column testing equipment

를 이용해 계측하였다. 온도센서가 시편에 미치는 영향을 최소화 하기 위해 직경이 0.002m인 온도센서를 바닥판으로부터 약 0.01m 돌출시켜 시편의 온도를 계측하도록 하였다. 두 개의 온도센서를 시편의 하단부 중앙과 측면에 각각 설치하여 위치에 따른 온도의 차이를 확인할 수 있도록 하였다(Fig. 1).

2.2 실험시료

본 연구에서는 남극 제2과학기지(장보고 기지)가 건설된 남극 테라노바만 인근지역에서 표층을 0.3m 굴착 후 채취한 시료를 사용하였다(Hong et al., 2012). 남극 제2과학기지 주위 지반은 풍화된 암반이 흩과 혼재되어 분포하고 있고 빙하활동에 의해 타지역에서 운반된 빙하 퇴적물과 혼재되어 있다. 실제 장보고 기지가 건설될 지역의 시추조사 결과 시료 채취지점의 지층은 상부로부터

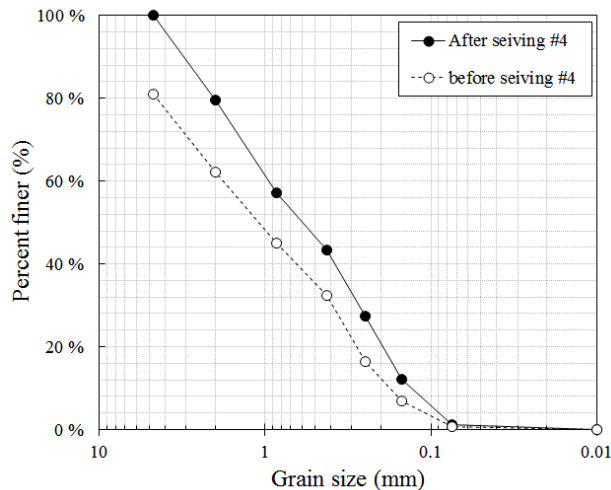


Fig. 2. Particle size distribution curve of antarctic soil

터 빙하퇴적층, 풍화암, 연암층으로 구성되어 있으며 두께는 각각 2.5~4.6m, 0~1.5m, 3m 이상인 것으로 확인되었다(Hong et al., 2012). 본 연구의 대상이 되는 표층에는 실트와 점토를 함유한 사질토가 분포하고 있으며 통일분류법(unified soil classification system)으로 SC-SM과 SP-SM에 해당된다. 채취된 시료는 비중이 2.64, 평균 유효입경(d_{50})이 0.00055m, 최대 및 최소 단위중량이 각각 2030kg/m³과 1680kg/m³으로 확인되었다. Table 1은 채취된 시료의 기본 물성을 나타낸다. ASTM D4015 (American society for testing and materials) 공진주 실험 표준서에는 합리적인 실험이 가능한 입자크기(particle size)를 시편 직경의 1/6 이하로 규정하고 있으므로 채취된 시료를 #4번체(유효 직경 0.00475m)에 통과시킨 후 실험에 사용하였다. Fig. 2는 #4번체 통과 전후의 시료 입도분포를 나타낸다.

2.3 시료조성

본 연구에서는 직경 0.05m, 길이 0.1m 인 원형 시편을 제작하고 공진주 실험을 실시하였다. 시편을 제작하기 위해 공진주 실험기 바닥판에 그리스를 도포 한 후 멤브레인(membrane)으로 덮고 O-ring으로 고정시킨다. 이후, 멤브레인을 감싸도록 분할형 몰드(split mold)를 설치하고, 건조된 교란시료를 목표 함수비와 목표 단위중량에 맞도록 총 5층으로 나누어 과소다짐법(under-compaction method)으로 성형하였다. 각 층은 밀도와 함수비가 동일하도록 하였고, 층간 분리현상을 최소화하기 위해 각 층 상단을 송곳으로 긁어 흠을 낸 후 다짐을 실시하였다(Ladd, 1978). 조성된 시편 상단에는 상부 캡(top cap)을 거치하고 측면에 그리스(grease)를 도포한 뒤

Table 1. Basic soil properties of antarctic soil sample taken from nearby the second scientific antarctic station of South Korea at Terra Nova Bay (after Hong et al., 2012)

Items	Properties
Sampling location (GPS coordinates)	(X, Y):(1718163.184, 477173.664)
Specific gravity, G_s	2.64
Fine contents passing #200 sieve (%)	5.80
Maximum dry density (kg/m ³)	2030
Minimum dry density (kg/m ³)	1680
Optimal moisture contents (%)	8.6
Grain size (m)	$d_{10} = 0.00015$ $d_{50} = 0.00055$ $d_{60} = 0.0009$
Soil classification, USCS	SP-SM
Uniformity coefficient, C_u	6
Plastic index, PI	NP

멤브레인과 O-ring으로 밀폐하였다. 이후, 시편에 진공펌프(vacuum pump)를 이용해 10kPa 이하의 진공압을 가하여 자립할 수 있도록 하고 분할형 몰드를 제거하였다. 이 때, 자립한 시료의 초기높이 및 직경을 측정하여 제작된 시편의 밀도를 확인하였다. 이후 공진주 시험기 바닥판에 수조와 가진 시스템을 체결하고 구속셀(confining cell)을 설치하였다. 구속셀 상단에는 압력과 온도에 따른 시편의 밀도변화를 확인하기 위해 비접촉식 프록시미터(Proximeter, Bently Nevada)를 고정하여 시편의 높이변화를 측정하였으며 각 실험조건에서 시편의 높이 변화가 없을 때 까지 유지 후 공진주 실험을 실시하였다. 상온 실험의 경우 구속응력을 단계적(25, 50, 100, 200, 400kPa)으로 높여가며 각 구속응력 상태에서 실험을 수행하였다. 구속응력에 대한 시편의 압축/압밀을 고려하여 각 구속응력 단계에서 20분간 유지 후 시편의 높이 변화가 없는 것을 확인하고 공진주 실험을 실시하였다. 각 구속응력에서는 0.0005~0.01% 전단변형률에

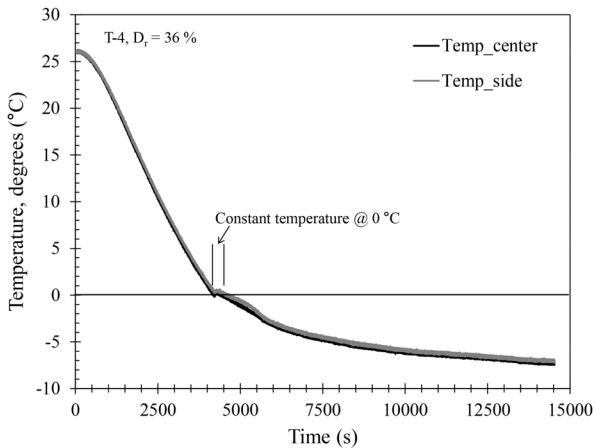


Fig. 3. Temperature changes of specimen for freezing condition

Table 2. Testing conditions and procedure

Test No.	Condition	Confining pressure σ'_m (kPa)	D_r^* (%)	e	Water contents (%)	Wetted soil unit density γ_t (kg/m ³)
T1**	Room temp. (25°C)	25	30	0.39	8.1	1910
T2**		50				65
T3**		100	87	2200		
T4***	Below zero temp.	25	36	0.36		1940
T5***	Room temp.		81	0.24		2130
T6***	Below zero temp.		100	0.16		2270

* Relative density measured before the test

** Performed the tests in the shear strain range of 0.0005~0.01%

*** After freezing the specimen (@ -7°C), the tests are carried out with a temperature rise in steps of 2°C (less than 0.0006% shear strain) → performed tests after re-freezing (@ -7°C) (shear strain range from 0.00001 to 0.02%)

서 시편의 전단탄성계수와 감쇠비를 측정하였다. 시편에 가해지는 하중은 10Hz에서 130Hz까지 가진 주파수를 증가시키며 정현파(sine wave)를 시편에 자동으로 재하하며 실험이 수행되었다(Choo, 1998).

저온실험의 경우에는 25kPa의 구속응력 조건에서 실험이 수행되었다. 시편을 동결시키기 위해 수조에 실리콘 오일을 시편이 모두 잠길 수 있는 높이까지 채우고 구속응력을 재하한 뒤 항온수조의 온도를 -25°C로 설정하고 약 4시간 동안 순환하였다. 순환과정에서 발생하는 순환유체의 온도변화를 최소화하기 위해 공진주 내부에 있는 수조, 구속셀과 외부로 노출되어 있는 구리관을 단열재로 덮었다. 시편의 온도는 공진주 바닥판을 통해 시편에 직접 맞닿아 있는 온도센서를 이용해 확인하였으며 데이터 수집장치를 통해 연속적으로 측정하였다. 시편의 동결은 시편의 높이가 일정하게 유지되는 시점을 통해 확인하였다. 동결과정에서 측정된 시간에 따른 대표적인 온도변화는 Fig. 3과 같다. 시편의 동결과정에서 0°C에 근접하였을 때 온도가 일정한 구간이 나타나며, 이는 시편에 함유된 물의 응고 및 액화과정에서 소비되는 열에너지에 기인하는 것으로 판단된다(Zumdahl and Zumdahl, 2008; Park et al., 2013; Kang et al., 2014). 시편 동결이 시작되면서 점차적으로 온도가 낮아져 최종적으로 -7°C를 유지하였다. 공진주 실험은 시편 상단의 가진판에 하중크기를 조절하여 전단변형률이 10⁻⁴% 이하가 되도록 전단하중을 재하하고 최대전단탄성계수와 최소 감쇠비를 측정하였다. 또한 온도상승에 따른 최대 전단탄성계수와 감쇠비의 변화를 확인하기 위해 항온수조의 온도를 약 2°C 씩 높여가며 각 온도별로 공진주 실험을 실시하였다. 각 목표 온도에 도달하는 시점에

서 2시간 이상 온도를 유지하였으며 높기와 온도 변화가 없는 시점에서 공진주 실험을 실시하여 온도에 따른 최대전단탄성계수와 감쇠비를 측정하였다.

온도 상승에 따른 공진주 실험이 수행된 이후, 동결토의 전단변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 변화를 확인하기 위해서 시편을 재동결하고 동결상태에서 하중크기에 따라 저변형률에서 중간변형률 영역까지 공진주 실험을 수행하였다. 또한 상대밀도에 따른 전단탄성계수의 변화를 확인하기 위해 동일한 함수비에서 상대밀도를 다르게 조성하여 실험을 실시하였다. 실험조건은 Table 2와 같다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 상온조건에서의 전단탄성계수 및 감쇠비

낮은 전단변형률 영역($\leq 10^{-4}$ %)에서 획득한 시편의 최대 전단탄성계수(maximum shear modulus, G_{max})를 구속응력에 따라 Fig. 4에 도시하였다. 세 가지 상대밀도 조건에서 최대전단탄성계수는 밀도와 구속응력에 비례적으로 증가하는 경향을 보였다. Hardin(1978)은 흙의 최대전단탄성계수가 간극비, 과압밀비, 구속응력 등에 영향을 받는다고 하였고 실험에 대한 식 (1)을 제안하였다.

$$G_{max} = A \cdot F(e) \cdot OCR^k \cdot Pa^{1-n} \cdot (\sigma'_m)^n \quad (1)$$

여기서, G_{max} 는 최대 전단탄성계수, A는 무차원 계수, n은 구속압 영향계수, F(e)은 간극비 함수, OCR은 과압

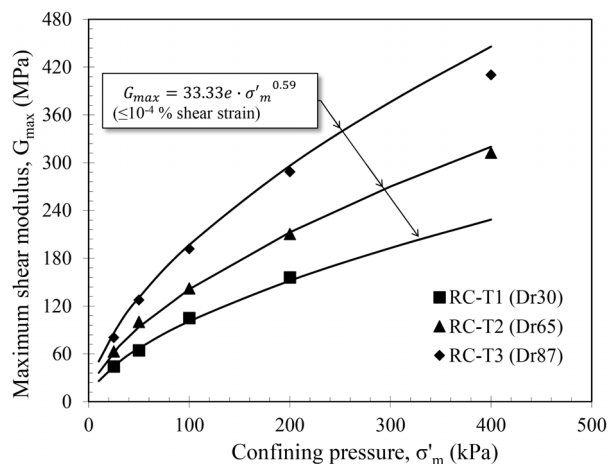


Fig. 4. Relation between Maximum shear modulus and confining pressure

밀비, k는 소성지수계수, P_a 대기압($\approx 100\text{kPa}$), σ'_m 은 평균유효응력(kPa)이다. 사질토의 경우, OCR 및 소성지수 효과가 미미하므로 식 (2)와 같이 단순화 될 수 있다.

$$G_{max} = A \cdot F(e) \cdot (\sigma'_m)^n \quad (2)$$

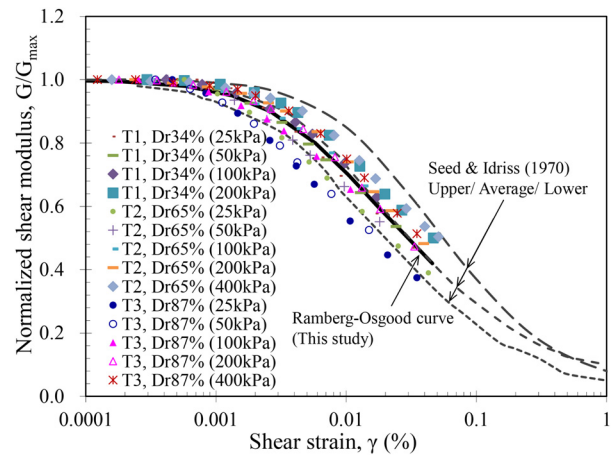
공진주 실험을 바탕으로 남극 테라노바만 인근지역 시료의 최대전단탄성계수(G_{max}), 간극비(e)와 구속응력 간의 실험식은 식 (3)과 같다.

$$G_{max} = 33.33e \cdot (\sigma'_m)^{0.59} \quad (3)$$

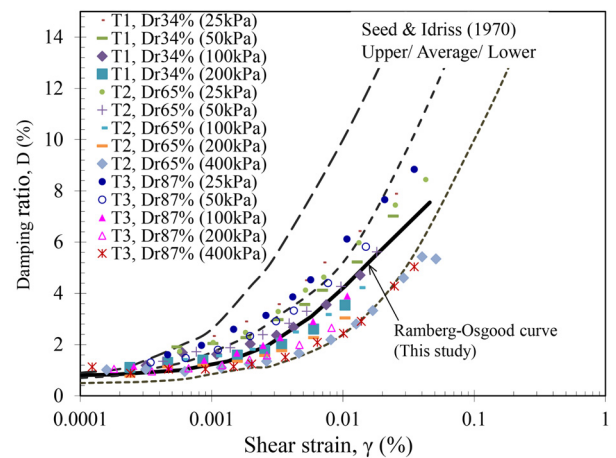
여기서, G_{max} 는 MPa, σ'_m 은 kPa 단위이다.

도출된 식 (3)을 Fig. 4에 함께 도시하였으며, 실험값을 25~400kPa 구속압 조건에서 합리적으로 대표하는 것을 확인하였다.

Fig. 5(a)는 상온에서 수행된 구속응력 별 전단탄성계수



(a) Normalized shear modulus reduction curve



(b) Damping ratio

Fig. 5. Normalized shear modulus curve and damping ratio at room temperature

감소곡선(G)을 최대전단탄성계수(G_{max})로 정규화 하여 나타내었다. 또한 실험결과를 바탕으로 Ramberg-Osgood 모델(Ramberg and Osgood, 1943)을 이용하여 근사(fitting)한 대표적 정규화 전단탄성계수 감소곡선(G/G_{max})을 함께 도시하였다. 정규화 전단탄성계수는 낮은 전단변형률 영역($\leq 10^{-3}\%$)에서 일정한 값을 유지하다가 이후 전단변형률이 커짐에 따라 비선형적으로 감소하는 형태를 보였다. 또한 정규화 전단탄성계수(G/G_{max}) 변화는 지반의 밀도에는 큰 영향이 없는 것으로 확인되었다. 한편, 구속응력이 증가함에 따라 동일한 변형률 조건에서 정규화 전단탄성계수가 증가하는 경향을 보이지만 그 크기가 크지 않은 것으로 확인 되었다. 모래지반의 대표적 정규화 탄성계수 감소곡선인 Seed and Idriss(1970)의 상하한 곡선 및 평균곡선과 비교한 결과 본 실험결과가 대체로 상하한선 내부에 위치하는 경향을 보이고 있으며, Ramberg-Osgood 모델을 이용한 실험결과 대표곡선과 Seed and Idriss의 평균 정규화 전단탄성계수 감소곡선이 잘 일치 하였다. Fig. 5(b)는 상온에서 전단변형률에 따른 감쇠비를 나타낸다. 시편의 감쇠비는 일반적으로 구속압이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이나 변화폭이 크지 않았으며, 지반 밀도변화에는 크게 영향을 받지 않았다. Ramberg-Osgood 모델을 이용한 실험 대표곡선과 Seed and Idriss(1970) 대표 감쇠비를 비교해 본 결과 대체적으로 Seed and Idriss 평균과 하한한계선 사이에 분포하는 것을 알 수 있다. Kim et al.(2004)은 국내지역의 풍화토에 대해 교란시료와 비교란시료의 정규화 전단탄성계수 및 감쇠비를 비교한 결과 채취 과정에서 발생하는 교란 정도가 결과에 미치는 영향이 크지 않음을 확인하였으며, 이를 통해 본 연구에서도 교란시료를 이용한 공진주 실험이 현장 지반의 전단탄성계수 및 감쇠비를 대표한다고 판단된다.

3.2 동결토의 전단탄성계수 및 감쇠비

동결토의 전단탄성계수 및 감쇠비 특성을 평가하기 위해 시편을 -7°C 에서 동결시키고 공진주 실험을 실시하였다. 상온에서 시편의 최대전단탄성계수 및 감쇠비와 비교하기 위해 세 가지 밀도조건을 설정하였고, 구속응력 25kPa 상태에서 공진주 실험을 수행하였다. Fig. 6은 동결토와 비동결토의 전단변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선을 나타낸다. 상대밀도 30~87% 범위인 비동결토 시편의 최대전단탄성계수는 낮은 구속응력(25kPa)

에서 40~80MPa의 범위를 보이나, 유사한 조건에서 동결토의 경우, 지반 밀도에 따라 960~1360MPa의 큰 전단탄성계수를 보인다. 본 실험에서는 동결토의 최대 전단탄성계수는 비동결토에 비해 약 17~24배 정도 큰 것으로 확인되었다. 비동결토에 비해 동결토의 전단탄성계수가 큰 것은 시편 내에 존재하는 간극수가 상변화(phase change)로 동결되면서 입자간 재배열이 이루어지고 결합력이 크게 증진되었기 때문으로 판단된다(Al-Hunaidi et al., 1996; Park et al., 2013; Kang et al., 2014; Lee et al., 2016). 동결토의 전단탄성계수는 전단변형률 $1 \times 10^{-4}\%$ 이하 조건에서 일정한 값을 보이다가 $1 \times 10^{-4}\%$ 이상에서는 전단변형률 크기에 따라 비선형적으로 감소하였다. 특히, 동결토 실험에서 전단변형률이 커짐에 따라 전단탄성계수가 급격히 감소하였고 큰 변형률($2 \times 10^{-2}\%$)에서는 비동결토의 전단탄성계수와 유사해 지는 것이 관측되었다. 이는 입자 간에 형성된 얼음결정(ice crystal)이 낮은 변형률에서는 강한 결합을 유지하지만 변형률이 커짐에 따라 깨지기 쉬운 얼음결정의 특성으로 인해 결합력을 잃으면서 전단탄성계수가 급격히 작아지는 것으로 판단된다.

Fig. 7(a)은 동일한 구속응력($\sigma_m = 25\text{kPa}$) 조건에서 동결토와 비동결토의 정규화 된 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비를 나타낸다. 동결토의 전단탄성계수는 전단변형률의 크기에 따라 시편의 초기밀도에 관계없이 동일한 경향을 보였다. 특히, 유사한 밀도조건에서의 비동결토의 전단탄성계수가 감소하기 시작하는 임계변형률은 $1 \times 10^{-3}\%$ 인 반면, 동결토의 경우 $1 \times 10^{-4}\%$ 인 것으로 확인되었다. 전단변형률 $1 \times 10^{-3}\%$ 수준을 기준으로 비교할 경우 동결토의 정규화 된 전단탄성계수는 비동결토

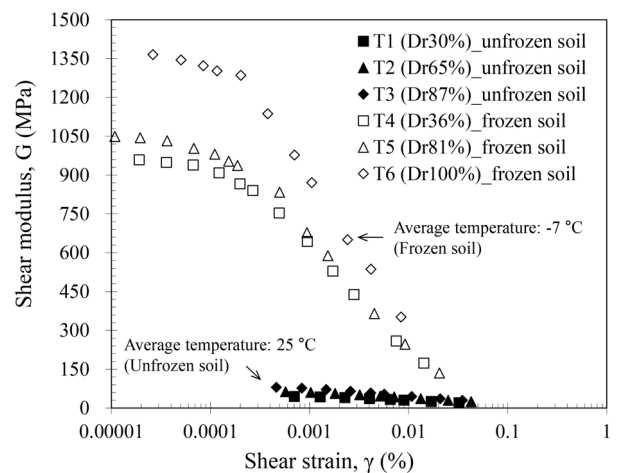
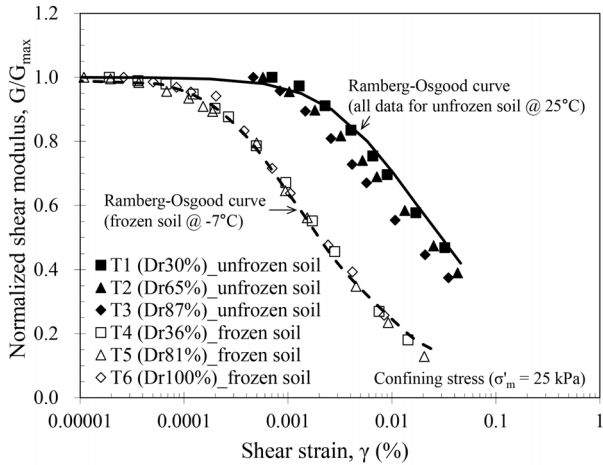
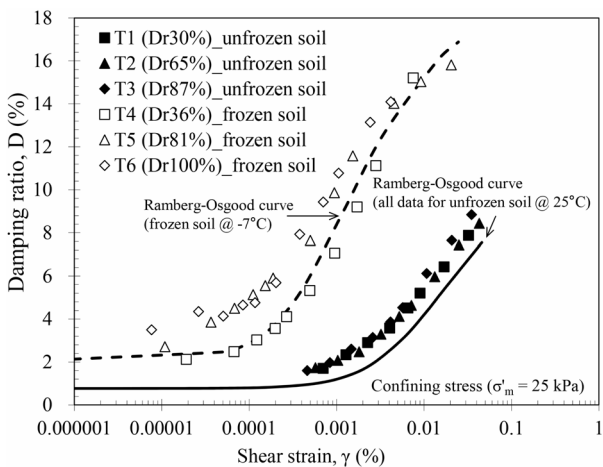


Fig. 6. Shear modulus of frozen soil with strain level



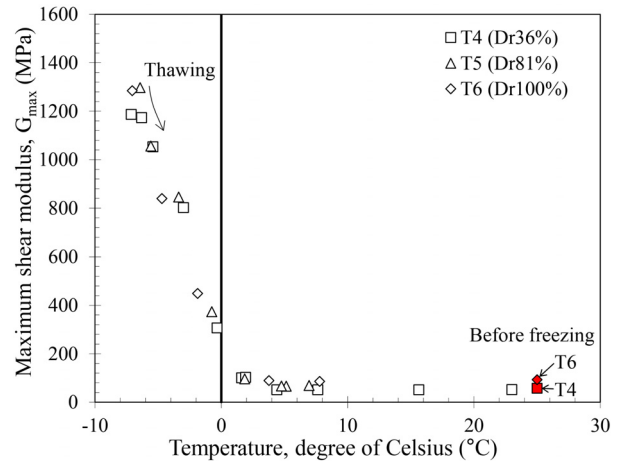
(a) Normalized shear modulus reduction curve



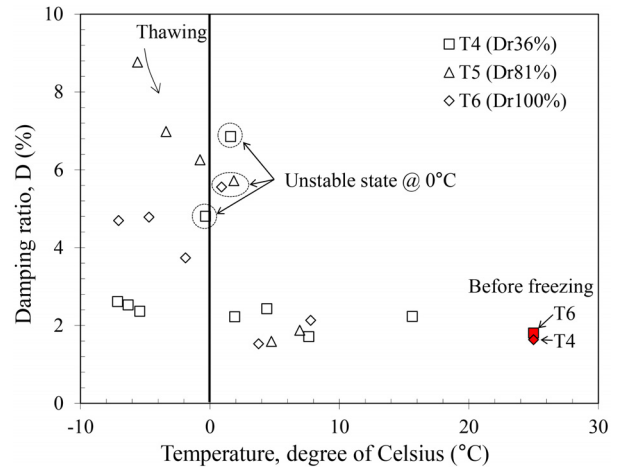
(b) Damping ratio

Fig. 7. Normalized shear modulus curve and damping ratio of frozen soil

에 비해 약 30% 정도 감소하였다. 이는 동결과정에서 입자사이에서 형성되는 얼음결정이 전단탄성계수에 크게 영향을 미친다는 것을 의미한다. Fig. 7(b)는 동결토와 비동결토의 감쇠비를 보여준다. 동결토의 감쇠비는 비동결토의 감쇠비 특성과 유사하게 전단변형률이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으나 동일한 전단변형률에서 비동결토에 비해 동결토의 감쇠비가 큰 것으로 확인되었다. 전단변형률 $1 \times 10^{-3}\%$ 수준을 기준으로 비교할 경우 동결토의 감쇠비는 비동결토에 비해 약 4배 정도 증가하였다. 이러한 결과는 선행연구결과들에서도 찾을 수 있다(Vinson et al., 1978; Al-Hunaidi et al., 1996; Ling et al., 2015). Ling et al.(2015)는 동결토 내에 존재하는 부동수분의 점성(viscosity)이 동결토의 감쇠비를 증가시키는 원인으로 제안한 바 있다.



(a) Maximum shear modulus (G_{max})



(b) Damping ratio (D)

Fig. 8. Trend of maximum shear modulus and damping according to temperature change ($-7^{\circ}\text{C} \rightarrow 25^{\circ}\text{C}$)

3.3 동결토 융해에 따른 최대전단탄성계수 및 감쇠비 변화

동결된 시편의 얼음결정이 온도상승으로 인해 녹으면서 발생하는 최대전단탄성계수 및 감쇠비의 변화를 확인하기 위하여 -7°C 에서 동결된 시편에 온도를 약 2°C 씩 상승시키면서 공진주 실험을 실시하였다. 각 온도에서 최대전단탄성계수 및 감쇠비를 획득하기 위해 전단변형률의 크기가 $1 \times 10^{-4}\%$ 이하가 되도록 하중을 재하하였다. 동결토의 융해과정에서 계측된 최대 전단탄성계수는 Fig. 8(a)와 같다. 실험 설정온도 중 최저 온도인 -7°C 에서 가장 큰 최대전단탄성계수를 보이고 0°C 이하의 온도에서 온도가 증가함에 따라 감소하였다. 본 결과를 통해서 동결토의 전단탄성계수는 온도에 매우 민감하게 반응하는 것을 확인하였다. 온도가 동결토의 동적거동에 미치는 영향은 0°C 이하의 온도에서 시편 내

에 존재하는 부동수분에 영향을 받으며 온도가 낮을수록 시편 내에 존재하는 부동수분이 동결되면서 시편의 강성이 증가한다(Simonsen and Isacsson, 2001; Wang et al., 2006; Christ and Park, 2009; Huang et al., 2013; Ling et al., 2015). 본 실험에서는 반대로 동결토가 용해되면서 얼음결정이 녹아 부동수분량이 증가하고 이로 인해 동결토의 전단탄성계수가 지속적으로 감소한 것으로 판단된다.

시편의 온도가 0°C 이상으로 상승되었을 때 최대전단탄성계수는 더 이상 변화하지 않고 일정한 값을 보였다. 본 연구에서는 시편이 동결된 이후 최초로 용해되었을 때 시편의 전단탄성계수 값에 큰 영향을 주지 않았다. 따라서 본 시편의 초기 함수비(8.1%) 조건에서 동결된 시료가 용해될 경우 시편에 동적거동특성 변화에 크게 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 하지만, 시편의 포화도, 실트질 모래 함량, 구속응력과 동결-용해 반복횟수 등에 따라 동결-용해 과정이 시편의 동적특성에 크게 영향을 미칠 것으로 판단되며 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다(Bosscher and Nelson, 1987; Yoon et al., 2003; Kang et al., 2014).

Fig. 8(b)는 동결토의 온도상승에 따른 감쇠비의 변화를 나타낸다. 동결토의 감쇠비는 -7°C에서 4~7%의 범위를 보이는 것으로 확인되었으며 지반의 밀도와는 일관적인 관계를 찾기 어려웠다. 동결토가 용해됨에 따라 분산정도는 크지만 감쇠비가 전체적으로 감소하는 경향을 보였으며 0°C 이상에서 일정한 값으로 수렴하였다. 이는 Ling et al.(2015)이 언급한 바와 같이 온도 증가에 따른 시편 내 부동수분의 점성(viscosity)이 온도에 따라 감소하기 때문으로 판단된다. 또한, 동결토가 용해되는 0°C 부근에서 일시적으로 감쇠비가 증가하는 경향(Fig. 8(b)의 점선으로 이루어진 원)을 보였는데 이는 시편 내에 동결토와 비동결토가 공존하는 불안정한 상태로 인해 감쇠비가 증가한 것으로 판단된다. 온도가 0°C 이상일 경우에는 시편이 완전히 용해되어 감쇠비가 비동결토의 값과 유사한 2~3%를 보였다. 또한 용해된 시료가 동결되기 전에 계측된 감쇠비와 잘 일치 하였으며 이를 통해 최초 동결-용해작용에 의한 감쇠비 변화가 미미한 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 남극 제 2과학기지(장보고 기지)가 건

설된 남극 테라노바만 인근지역에서 채취한 시료를 이용하여 동결토의 동적변형특성(전단탄성계수, 감쇠비)을 평가하고 비동결토와 비교하였다. 또한, 온도 변화에 따른 동결토의 동적변형특성을 실험적으로 평가하여 지반의 동결-용해에 의한 영향을 확인하였다. 이를 위해 시편의 온도를 제어할 수 있도록 공진주 실험시스템을 개선하고 다양한 온도, 구속응력, 상대밀도, 변형률 크기조건에서 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 현장에서 채취한 교란시료는 밀도 및 구속응력에 따라 최대전단탄성계수가 증가하는 경향을 보였으며, 실험결과를 바탕으로 현장시료에 대한 최대전단탄성계수를 실용적으로 예측할 수 있도록 경험식을 제안하였다.
- (2) 현장시료의 정규화 된 전단탄성계수와 감쇠비는 전단변형률의 크기에 의존적이었고 지반 밀도 및 구속응력에는 크게 영향을 받지 않았다. 또한 실험결과가 모래지반의 대표적 정규화 전단탄성계수 감소 곡선인 Seed and Idriss 곡선의 상하한선 내에 분포하고 있었다.
- (3) 본 연구의 실험 조건(-7°C~25°C, 36~100% 상대밀도)에서 동결토는 비동결토에 비해 최대전단탄성계수가 최대 17~24배 정도 큰 것으로 확인되었다. 이는 시편 내에 존재하는 간극수가 상변화(phase change)로 동결되면서 입자간 재배열이 이루어지고 결합력이 크게 증진되었기 때문으로 판단된다. 동결토의 감쇠비는 동결토의 감쇠비에 비해 약 4배정도 큰 것으로 확인되었다.
- (4) 동결토의 전단탄성계수는 1×10^{-4} % 이상의 전단변형률에서 급격히 감소하였고, 2×10^{-2} % 전단변형률에서는 비동결토의 전단탄성계수와 유사할 정도로 작아졌다. 또한 비동결토에 비해 낮은 전단변형률에서 전단탄성계수가 감소하기 시작하였다. 이는 입자 간에 형성된 얼음결정이 낮은 변형률에서는 강한 결합을 유지하지만 변형률이 커지면서 얼음결정이 파괴되어 전단탄성계수가 급격히 작아지기 때문으로 판단된다.
- (5) 동결토의 최대전단탄성계수 및 감쇠비는 0°C 이하에서 온도가 증가함(용해)에 따라 감소하였으며 0°C 이상에서는 온도와 관계없이 동결전의 값과 유사하였다. 감쇠비는 0°C 온도에서 일시적으로 증가하였

으며 이는 시편 내에 동결토와 비동결토가 공존하는 불안정한 상태에 기인하는 것으로 판단된다.

- (6) 동결토의 전단탄성계수와 감쇠비 변화는 시편의 포화도, 실트질 함량, 구속응력과 동결-융해 반복횟수 등에 크게 영향을 받을 것으로 판단되며 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. NRF-2015R1A2A1A15054531)과제 성과의 일부이며, 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2003), "Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method", ASTM D4015, Philadelphia.
- Al-Hunaidi, M.O., Chen, P.A., Rainer, J.H., and Tremblay, M. (1996), "Shear Moduli and Damping in Frozen and Unfrozen Clay by Resonant Column Tests", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.3, pp.510-514.
- Arenson, L.U., Johansen, M.M., and Springman, S.M. (2004), "Effects of Volumetric Ice Content and Strain Rate on Shear Strength under Triaxial Conditions for Frozen Soil Samples", *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol.15, No.3, pp.261-271.
- Arenson, L.U. and Springman, S.M. (2005), "Triaxial Constant Stress and Constant Strain Rate Tests on Ice-Rich Permafrost Samples", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42, No.2, pp.412-430.
- Bosscher, P.J. and Nelson, D.L. (1987), "Resonant Column Testing of Frozen Ottawa Sand", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.10, No.3, pp.123-134.
- Choo, Y.W. (1998), "Study on Normalized Shear Modulus Reduction Curves on Cohesionless Soils using Resonant Column/Torsional Shear Tests", Master thesis, Korea Advanced Institute and Science and Technology, Republic of Korea.
- Christ, M. and Park, J.B. (2009), "Ultrasonic Technique as Tool for Determining Physical and Mechanical Properties of Frozen Soils", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.58, No.3, pp.136-142.
- Hardin, B.O. (1978), "The Nature of Stress-Strain Behavior for Soils", Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference, Vol.1, ASCE, Pasadena, California, June, pp.3-90.
- Hong, S.S., Park, J.H., Lee, J.S., Lee, J.G., Kang, J.M., and Kim, Y.S. (2012), "Experimental Investigation of Frost Heaving Susceptibility with Soils from Terra Nova Bay in Eastern Antarctica", *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol.13, No.12, pp.5-16.
- Huang, X., Li, D., Ming, F., and Fang, J. (2013), "An Experimental Study on the Relationship between Acoustic Parameters and Mechanical

Properties of Frozen Silty Clay", *Sciences in Cold and Arid Regions*, Vol.5, No.5, pp.569-602.

- Kang, M., Kim, S., Hong, S., Kim, Y., and Lee, J. (2014), "Characteristics of Sand-Silt Mixtures during Freezing-Thawing by using Elastic Waves", *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol.15, No.5, pp.47-56.
- Kim, D.S. and Choo, Y.W. (2001), "Dynamic Deformation Characteristics of Cohesionless Soils in Korea using Resonant Column Tests", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.17, No.5, pp.115-128.
- Kim, D.S., Ko, D.H., and Youn, J.U. (2004), "Dynamic Deformation Characteristics of Granite Weathered Soils using RC/TS Tests", *Journal of Korean Geoenvironmental Society*, Vol.5, No.1, pp.35-46.
- Kim, D.S., Youn, J.U., Lee, S.H., and Choo, Y.W. (2005), "Measurement of G_{max} of Sands using Bender Element in Resonant Column and Torsional Shear Equipment", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.10, pp.17-25.
- Ladd, R.S. (1978), "Preparing Test Specimens using Undercompaction", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.1, No.1, pp.16-23.
- Lee, J.H., Lee, D.Y., Park, D.G., Kyung, D.H., Kim, G.R., and Kim, I.C. (2016), "Effect of Freezing and Thawing on K_0 Geostatic Stress State for Granular Materials", *Granular Matter*, Vol.18, No.3, pp.1-13.
- Li, J.C., Baladi, G.Y., and Andersland, O.B. (1979), "Cyclic Triaxial Tests on Frozen Sand", *Engineering Geology*, Vol.13, No.1, pp.233-246.
- Ling, X.Z., Zhang, F., Li, Q.L., An, L.S., and Wang, J.H. (2015), "Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Frozen Compacted Sand Subjected to Freeze-Thaw Cycle under Multi-Stage Cyclic Loading", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.76, pp.111-121.
- Ling, X.Z., Zhu, Z.Y., Zhang, F., Chen, S.J., Wang, L.N., Gao, X., and Lu, Q.R. (2009), "Dynamic Elastic Modulus for Frozen Soil from the Embankment on Beiluhe Basin along the Qinghai-Tibet Railway", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.57, No.1, pp.7-12.
- Park, J.H., Hong, S.S., Kim, Y.S., and Lee, J.S. (2012), "Characteristics of Elastic Waves in Sand-Silt Mixtures due to Freezing", *Journal of Korean Geoenvironmental Society*, Vol.13, No.4, pp.27-36.
- Park, J.H., Kang, M.G., and Lee, J.S. (2013), "Variation in Characteristics of Elastic Waves in Frozen Soils according to Degree of Saturation", *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol.33, No.3, pp.1063-1075 (in Korean).
- Park, J.H. and Lee, J.S. (2014), "Characteristics of Elastic Waves in Sand-Silt Mixtures due to Freezing", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.99, pp.1-11.
- Qi, J., Ma, W., and Song, C. (2008), "Influence of Freeze-Thaw on Engineering Properties of a Silty Soil", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.53, No.3, pp.397-404.
- Ramberg, W. and Osgood, W.R. (1943), "Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters", Technical Note 902, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, D.C.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970), "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses", Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Sept., p.37.
- Seo, Y.K., Kang, H.S., and Kim, E.S. (2008), "A Study of Cold

- Room Experiments for Strength Properties of Frozen Soil”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol.22, No.2, pp.42-49.
27. Simonsen, E. and Isacsson, U. (2001), “Soil Behavior During Freezing And Thawing Using Variable And Constant Confining Pressure Triaxial Tests”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, No.4, pp.863-875.
 28. Tebaldi, G., Orazi, M., and Orazi, U.S. (2016), “Effect Of Freeze-Thaw Cycles On Mechanical Behavior Of Lime-Stabilized Soil”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.28, No.6, 06016002.
 29. Vinson, T.S., Chaichanavong, T., and Czajkowski, R.L. (1978), “Behavior of Frozen Clays under Cyclic Axial Loading”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.104, No.7, pp.779-800.
 30. Wang, D.Y., Zhu, Y.L., Ma, W., and Niu, Y.H. (2006), “Application of Ultrasonic Technology for Physical-Mechanical Properties of Frozen Soil”, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.44, pp. 12-19.
 31. Yoon, Y.W., Kim, S.E., Kang, B.H., and Kang, D.S. (2003), “Dynamic Behavior of Weathered Granite Soils after Freezing-Thawing”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.4, pp.69-78.
 32. Yao, X., Qi, J., Yu, F., and Ma, L. (2013), “A Versatile Triaxial Apparatus for Frozen Soils”, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.92, pp.48-54.
 33. Zumdahl, S.S. and Zumdahl, S.A. (2008), “Chemistry (8th edition)”, Florence, Kentucky: Cengage Learning.

Received : February 21st, 2017

Revised : March 19th, 2017

Accepted : March 20th, 2017