

동토지반에 대한 역학적 구성모델

Mechanical Constitutive Model for Frozen Soil

신 호 성¹ Shin, Hosung

김 지 민² Kim, Ji-Min

이 장 근³ Lee, Janguen

이 승 래⁴ Lee, Seung-Rae

Abstract

Recently, growing interests in frozen ground have stimulated us to advance fundamental theories and systematic researches on soil behavior under freezing conditions. Unlike the well-established soil mechanics theory, temperature variation and phase change of pore-water cause water migration to cold side, ground heaving, sharp increase in earth pressure, etc., which bring about serious problems in frozen geotechnical structures. Elasto-plastic mechanical constitutive model for frozen/unfrozen soil subjected to fully coupled THM phenomena is formulated based on a new stress variable that is continuous in frozen-unfrozen transitional regions. Numerical simulations are conducted to discuss numerical reliability and applicability of the developed constitutive model: one-dimensional heaving pressure, tri-axial compression test, and one-side freezing tests. The numerical results show that developed model can efficiently describe complex THM phenomena of frozen soil, and they can be utilized to analyze and design the geotechnical structures under freezing conditions, and predict their long-term behavior.

요 지

최근 동결지반의 다양한 문제들에 대한 관심이 증대하면서 동결의 영향을 받는 지반의 거동특성에 관한 이론정립 및 체계적인 연구의 필요성이 제기되고 있다. 기존의 정립된 토질역학 이론과는 달리 동결지반에서 온도의 영향과 간극수의 동결에 의한 상변화는 간극수의 이동, 지반팽창, 작용토압의 급격한 증가 등 여러가지 문제들을 야기한다. 본 논문에서는 비동결-동결 전이 상태에서 연속성을 갖는 새로운 응력변수를 도입하여, 동결 작용을 받는 다공질 재료에 대한 THM 역학적 탄소성 구성모델을 유도하였다. 개발된 구성모델을 1차원 팽창압, 동결토의 삼축압축 강도 그리고 일방향 동결실험에 적용하여 해의 안정성과 구성모델의 적용성에 대하여 논의하였다. 수치해석 결과는 동결토의 복잡한 THM현상들을 효과적으로 묘사할 수 있었으며, 동결의 영향하에 있는 지반구조물의 해석과 설계 및 시공될 구조물의 장기거동예측에 활용될 수 있을 것이다.

Keywords : Frozen soil, Heaving pressure, Mechanical constitutive model, THM coupling

1. 서 론

계절동토지역으로 분류되는 국내에서 동결토에 관한

연구는 주로 동상압에 의한 도로 포장체의 기능저하를 해결하기 위한 방안에 집중되어 왔다. 하지만, 최근 남극 대륙기지 건설과 러시아 극동지역의 천연가스를 도입하기

1 정희원, 울산대학교 건설환경공학부 조교수 (Member, Assistant professor, Dept. of Civil & Environmental Engrg., University of Ulsan, Tel: +82-52-259-1723, Fax: +82-52-259-2629, shingeo@ulsan.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 울산대학교 건설환경공학부 석사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., University of Ulsan)

3 정희원, 한국건설기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KICT)

4 정희원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engrg., KAIST)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

위한 1100km의 남-북-러 가스 파이프 라인의 협상이 진행되면서 자연적 혹은 인위적으로 동해를 입은 지반의 거동 특성에 관한 관심이 증가하고 있다(Figure 1).

지반 동결에 대한 연구는 1920년대부터 주로 캐나다, 미국, 러시아, 일본 등을 위주로 활발히 진행되어 왔다. 일반적으로 동결작용을 받은 지반은 Figure 2와 같이 동결영역(frozen zone), 동결주변부(frozen fringe), 그리고 비동결영역(unfrozen zone)으로 구분할 수 있다. 그리고 동결영역과 동결주변부 사이의 새로운 빙정(ice lens)이 형성되는 경계를 동결면(freezing front)이라 한다. 동결주변부는 1mm~10mm의 두께로 매우 얇은 층으로서 흙의 종류와 동결율(freezing rate)에 의해 두께가 결정된다. 동결주변부내의 온도구배에 의한 Cryogenic suction은 비동결영역의 물을 흡수하여 동결면에 새로운 빙정을 형성시키면서 흡입자 사이를 분리시키는데 이를 segregation freezing이라고 한다. Konrad와 Morgenstern(1981)은 동



(a)



(b)

Fig. 1. a) Crack of around pipe by frozen (Phillips et al., 2002), b) Freeze-thaw damage (www.pavementinteractive.org)

결주변부 내부의 온도구배와 유입유량의 비를 segregation potential이라 정의하고, segregation potential과 흙의 기본 물성치와의 경험적인 상관관계식을 제시하고 새로운 동상 가능성 평가 방법을 제시하였다(Konrad, 1999).

상대적으로 높은 흡입력(suction)을 유발하고 큰 투수계수를 갖는 실트질 흙은 동상의 영향을 받기 쉬우며, 느린 동결(slowing freezing)과 이로 인한 작은 온도구배에서 더 두꺼운 빙정이 형성된다(Lawrence 등, 2005). 상재하중의 증가는 동상에 의해 팽창(heaving)량을 제한하는 것으로 알려져 있으나, 더 이상 팽창이 발생할 수 없는 shut-off pressure의 존재에 대해서는 아직 논쟁 중이다 (Arvidson과 Morgenster, 1977). Konrad와 Morgenstern (1982)는 이러한 외부 하중의 크기를 고려한 segregation potential 함수를 제시하기도 하였다. 그리고 간극내의 전해질은 전체 흡입력의 크기를 감소시켜 동결지반의 팽창량을 감소시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

국내의 동결지반에 대한 연구는 현장실험 및 실내 실험을 이용하여 동결토의 특성 분석과 동결에 의해 야기되는 문제점들을 해결하기 위한 다양한 실험적 연구들이 진행되어 왔다. 동결토에서 부동수분의 함량에 따른 동상 팽창압 변화에 대한 실내실험이 수행되었고(Shin과 Park, 2003), 현장도로 모형실험에서 포장구조체의 역학적 실험을 통하여 동상민감성에 근거한 개선된 동상 방지층 설계법이 제시되었다(Shin 등, 2010). 또한 지반 동결 공법에 대한 실내실험과 현장실험, 그리고 수치해석을 통한 지하구조물의 열적 안정성 검토도 수행되었다(Shin 등, 2009).

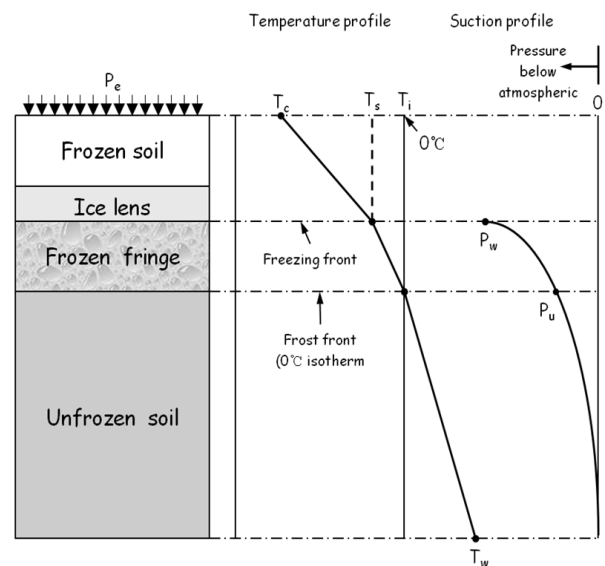


Fig. 2. Schematic of conditions in a freezing soil (Konrad, 1999)

페타이어를 함유시킨 지반의 동결깊이가 원지반에서 보다 적게 나타나는 실험적 결과를 통해, 지반동결시 매설관 주변부의 토압을 감소시키기 위해 페타이어 조각 혼합토를 활용하는 매설관 파손 방지안으로 제시하였다(Kang 등, 2009a). 또한 EPS(expanded polystyrene)조각, 페비닐, 페스티로폼 등을 이용한 혼합토도 동결방지 효과가 있는 것으로 나타났다(Kang 등, 2009a; Kim, 2003). Thermal siphon은 지열을 배출하여 지중 온도변화를 감소시키고, 지반의 열적 안정상태를 만들어 파이프라인에 작용하는 토압을 감소시키는 효과가 있었다(Kang 등, 2009b). 또한 수치해석 사례로는 Kim(2010)이 지반의 동결조건을 고려한 열전도에 관한 유한요소해석을 수행하였다.

다공질 재료에서 동결작용에 의한 물의 액체와 고체(얼음)간의 상 변화는 물과 얼의 흐름뿐만 아니라 변형 특성에 밀접한 영향을 미친다. 따라서, 다공질 재료의 완전 결합된(fully coupled) THM(Thermo-Hydro-Mechanical) 현상들에 대한 지배방식의 정립이 필요하며, 방정식들의 비선형성과 구성관계식간의 복잡한 상호 연관성을 해결할 수 있는 수치해석 도구의 개발이 요구된다.

지금까지 동결토의 거동특성을 이해하기 위해 많은 수치해석적 연구가 수행되어 왔다. 하지만 대부분의 연구들은 역학적 거동 특성을 고려하지 않고 결합된 TH 해석만을 수행하였다(Tan 등, 2011; Painter, 2011). 최근 들어 전응력에 근거한 응력-변형해석을 시도하였으나(Michalowski 과 Zhu, 2006), Nishimura 등(2009)의 연구를 제외하고는 동결지반을 단순 선형탄성 재료로 가정하고 해석을 수행하였다(Liu과 Yu, 2011; Thomas 등, 2009).

본 논문에서는 흡입자, 부동수, 얼음으로 구성된 다공질 재료의 동결 작용에 대한 THM 역학적 탄소성 구성모형을 제시하였다. 새로운 응력변수는 얼음과 흙의 골격(soil skeleton)에 의해 전달되는 응력의 합으로 비동결과 동결의 전이상태에서 연속성을 갖도록 하였으며 응력-변형률에 대한 증분 형태의 구성관계를 수식화 하였다. 구성모형의 적용성을 평가하기 위하여 기존의 개발된 THM 유한요소 프로그램과 결합하여 동결작용에 의한 다공성 재료의 THM 예제 해석들을 수행하였다.

2. 역학적 구성모형의 유도

동결에 대한 다공성 재료의 THM현상들과 연관된 변형특성을 정의하기 위한 역학적 구성 모델은 다음과 같

은 두 가지의 기본 가정들에 근거하였다.

첫째로, 재료의 간극에 공기가 존재하지 않는 포화상태이다. 동결상태에서 간극은 얼음과 부동수로 이루어져 있으며, 비동결상태의 간극은 물로 완전히 포화된 상태이다.

둘째로, 흡입자, 물, 얼음의 3상으로 이루어진 다공성 재료는 국부적으로 온도 평형조건에 있어 같은 지점에서 3상의 온도는 동일하다.

이러한 기본 가정들에 근거하여 본 연구에서 제안하는 역학적 구성모형은 간극의 2상 재료에 대하여 Alonso 등(1990)이 제안한 기본 역학적 모델인 BBM(Barcelona Basic Model) 모델을 기반으로 유도하였으며 응력과 변형률은 압축을 양의 값으로 설정하였다.

2.1 응력 변수의 정의

물로 완전히 포화된 다공질 재료에서 역학적 변형 특성을 지배하는 응력변수(stress variable)는 유효응력(Terzaghi, 1936)인 것으로 받아들여지고 있으나, 간극이 물과 공기로 채워진 불포화 지반의 경우 응력변수의 선택은 구성모델 관점에서 중요한 쟁점이 되고 있다(신호성, 2011). 재료의 간극이 물과 얼음으로 채워진 동토의 경우, 기존의 대부분 연구에서 변형에 의한 투수계수, 열전도도 등의 변화를 고려할 수 없는 TH 해석만을 수행하거나 단순히 전응력에 근거한 선형 탄성 해석을 수행하였다. 다만, 최근에 Nishimura 등(2009)이 동토지반의 비선형적인 거동특성을 모사하기 위해 순응력 $p_n = p - \max(P_i, P_e)$ 과 흡입력 $s = \max(P_i - P_e, 0)$ 을 사용하여 구성모형을 제안하였다. 하지만 이러한 응력변수의 사용은 동결점 이하에서의 얼음압력 P_i 이 일반적인 지표면하중과 흙의 골격이나 물에 의해 전달되는 하중보다 급격하게 증가하여 물의 동결점을 전후하여 불연속적인 특징을 갖게 되어 잠재용해열(Latent heat of fusion) 생성과 더불어 수치적인 안정성을 저해한다.

본 논문에서는 주어진 하중에 대한 흙의 골격과 얼음에 의한 응력을 합하여 식 (1)과 같은 응력변수 $\bar{\sigma}$ 를 정의하였다. 그리고 얼음압(ice pressure)과 유체압(fluid pressure)의 차이를 나타내는 흡입력 s 는 선행압밀하중에 영향을 미치는 경화변수 즉 내부변수로 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}' + (1 - \chi) P_i + \chi P_e = \bar{\sigma} + \chi P_i \quad (1)$$

여기서 $\underline{\sigma} = \sigma_{ij} (i, j = 1, 3)$ 는 전응력, $\underline{\sigma}'$ 은 흙의 골격에 의해 전달되는 유효응력, P_i 는 Clausius-Clapeyron 방정식 (식 13)에 의해 정의되는 얼음압, P_i 는 유체압이다. $\underline{1} = \delta_{ij}$ 는 Kronecker's delta tensor이며, χ 는 Bishop의 유효응력계수로 포화도 S_i 로 간략화 하였다. 응력변수 $\underline{\bar{\sigma}} = \underline{\sigma}' + (1 - \chi)P_i$ 는 동결점 이상의 온도에서는 유효응력과 동일하며, 추후 공기/가스를 포함한 불포화 동결토에 대한 구성모델의 개발에서 유용한 응력변수로 사용될 수 있다.

2.2 항복면과 소성포텐셜 함수

동결토 및 비동결토의 변형 특성을 정의하는 통합된 항복면과 소성 포텐셜 함수는 응력변수 $\underline{\bar{\sigma}}$ 와 흡입력 s 을 변수로 사용하였다. 제안된 항복면 함수는 MCC(Modified Cam Clay) 모델을 기반으로 얼음에 의한 점착강도를 고려하여 타원형상으로 정의되었다(Figure 3). 이때 점착강도의 증가는 압축과 인장 방향으로 동일하다고 가정하였으며, 강도비 k_s (Nishimura 등, 2009)와 간극 얼음의 체적비($\phi S_i = \phi(1 - S_i)$, 여기서 ϕ =간극율)에 비례한다.

$$f = q^2 - M^2(\bar{p} + k_s \phi S_i s)(\bar{p}_c - \bar{p}) = 0 \quad (2)$$

여기서 선형압밀 하중은 $\bar{p}_c = p_r \left(\frac{p_0}{p_r} \right)^{\frac{\lambda(0) - \kappa(0)}{\lambda(s) - \kappa(s)}} + k_s \phi S_i s$

이며, 동결점 이상의 온도에서는 p_0 과 같고, 동결점 이하의 온도 영역에서 흡입력에 의한 증가와 더불어 얼음압 P_i 의 급격한 증가로 비선형적인 경향을 보인다. p_r 은 기준응력(reference stress)이며, M 은 $\bar{p} - q$ 공간에서 한계상태선의 기울기이다. 압축지수는 $\lambda(s) = \lambda(0)[(1 - r)\exp(-\beta s) + r]$ 으로 표현되고, 팽창지수 $\kappa(s)$ 는 수치적인 안정성 확보를 위해 압축지수와 동일한 형태로 흡입력에 의해

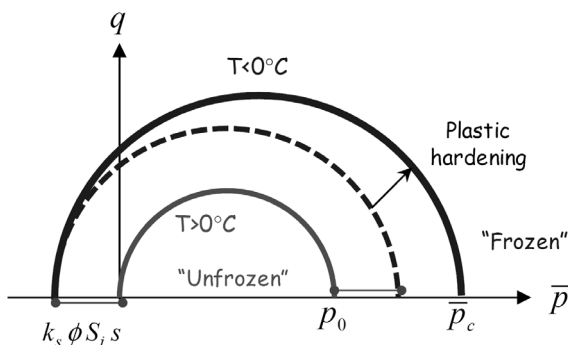


Fig. 3. Yield surface of porous material in frozen and unfrozen regions

변화하는 것으로 산정하였다.

소성변형 증분방향을 결정하는 역학적 소성 포텐셜 함수는 연관된 흐름법칙(associated flow rule, $g = f$)을 사용하였으며, 본 모델에서는 동토의 거동특징 중 하나인 변형률 의존적인(strain-rate-dependent) 거동특성은 고려하지 않았다.

2.3 응력-변형률 증분관계

전체 변형률 증분은 역학적 변형률, 온도에 의한 흙의 골격의 변형률, 그리고 간극의 얼음과 물의 상변화에 의한 변형률로 구분할 수 있다.

$$d\underline{\varepsilon} = d\underline{\varepsilon}^{<m>} + d\underline{\varepsilon}^{<T>} + d\underline{\varepsilon}^{<ph>} = d\underline{\varepsilon}^{e<m>} + d\underline{\varepsilon}^{p<m>} + d\underline{\varepsilon}^{e<T>} + d\underline{\varepsilon}^{e<ph>} \quad (3)$$

여기서 탄성 역학적 변형률은 $d\underline{\varepsilon}^{e<m>} = D^{e-1} : d\underline{\sigma}$ 이며 (Sheng 등, 2008; 신호성, 2011), $D^e = (K - 2G/3)\underline{1} \otimes \underline{1} + 2G \underline{I}$ 는 탄성 응력-변형률 강성 텐서(elastic stiffness tensor)이다.

온도에 의한 탄성영역의 체적변화는 열압축계수(α_r , thermal elastic contractile coefficient)로부터 $d\underline{\varepsilon}_v^{e<T>} \approx d\underline{\varepsilon}_v^{e<T>} = \frac{\partial \underline{\varepsilon}_v^e}{\partial T} dT = 3\alpha_r dT$ 과 같이 결정된다. 그리고 물의 질량보존의 법칙에 의해 상 변화에 대한 체적 변형률은 다음과 같다.

$$d\underline{\varepsilon}_v^{e<ph>} = \frac{(\rho_i^w - \rho_i^i)\phi}{\rho_i^w(1 - S_i) + \rho_i^i S_i} dS_i = \alpha_{ph} dS_i \\ = \alpha_{ph} \left(\frac{\partial S_i}{\partial P_i} dP_i + \frac{\partial S_i}{\partial T} dT \right) \approx \alpha_{ph} \frac{\partial S_i}{\partial T} dT = \alpha_{ph} C_{ST} dT \quad (4)$$

여기에서 ρ_i^w 과 ρ_i^i , ρ_i^s 는 물의 유체와 얼음상태에서의 단위질량이며, 상변화에 의한 변형률은 $d\underline{\varepsilon}^{e<ph>} = \underline{a}^{e<ph>} dT$ 으로 표현할 수 있다.

따라서, 응력과 변형률에 대한 증분관계식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d\underline{\bar{\sigma}} = D^e : [d\underline{\varepsilon} - d\underline{\varepsilon}^{p<m>} - d\underline{\varepsilon}^{e<T>} - d\underline{\varepsilon}^{e<ph>}] \quad (5)$$

역학적 소성변형 증분은 소성흐름법칙(plastic flow rule)에 의해 소성 포텐셜 함수에 수직인 방향으로 $d\lambda$ 만큼 발생하게 된다.

$$d\underline{\varepsilon}^{p<m>} = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \underline{\bar{\sigma}}} \quad (6)$$

2.4 일관성의 조건과 역학적 구성관계식

응력공간에서 응력상태가 항복면내에 존재하는 일관성의 조건식(consistency condition)은 다음과 같은 미분형태로 표현된다.

$$df = \frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} : d\bar{\sigma} + \frac{\partial f}{\partial \bar{p}_c} d\bar{p}_c = 0 \quad (7)$$

소성체적변형을 유효응력에 의한 역학적인 부분과 온도에 의한 부분으로 구분할 수 있으나, 온도에 의한 소성체적변형을 무시하였다.

$$d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_v^p(\bar{p}_c, T) = \frac{\partial \varepsilon_v^p}{\partial \bar{p}_c} d\bar{p}_c + \frac{\partial \varepsilon_v^p}{\partial T} dT \approx \frac{\partial \varepsilon_v^p}{\partial \bar{p}_c} d\bar{p}_c = d\varepsilon_v^{p<cm>} \quad (8)$$

여기서, 소성체적 변형률에 의한 소성경화는 $d\bar{p}_c = \frac{(1+e_0)\bar{p}_c}{\lambda(s)-\kappa(s)} d\varepsilon_v^p$ 으로 표현할 수 있다.

미지 상수 $d\lambda$ 는 식 (5)의 응력-변형률 증분 관계식과 식 (7)의 일관성의 조건을 이용하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$d\lambda = a \left[\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} : D^e : d\varepsilon - \frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} : D^e : a^{<ph>} dT - b dT \right] \quad (9)$$

$$\text{여기서 } a = \left[\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} : D^e : \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}} - \frac{\partial f}{\partial \bar{p}_c} \frac{\partial g}{\partial \bar{p}_c} \frac{\partial \varepsilon_v^p}{\partial \bar{p}_c} \right]^{-1}, \quad b = 3M^2 K$$

$(2\bar{p} + k_s \cdot s - \bar{p}_c) \alpha_T$ 이다.

식 (5)와 식 (9)를 결합하여 증분형식의 변형률과 온도 변화에 대한 강성 텐서(stiffness tensor)를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$d\bar{\sigma} = D^{ep} : d\varepsilon - R dT \quad (10)$$

$$\text{여기서 } D^{ep} = D^e - a D^e : \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}} \otimes \frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} : D^e, \quad R = a D^e : \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}} \otimes \frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}}$$

$$D^e : a^{<ph>} + D^e : a^{<ph>} + ab D^e : \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}} + 3K\alpha_T \mathbf{1} \text{이다.}$$

마지막으로, 개발된 불포화 역학적 구성모델의 구현은 기존의 개발된 THM 유한요소 프로그램(요소형태: 변위-8절점, 유압-4절점, 온도-4절점)을 이용하였다(Shin, 2011).

개발된 역학적 구성모델을 구현하기 위한 동결지반

의 물성치는 강도와 변형특성에 대한 부분으로 구분할 수 있다. 강도에 관한 물성치는 삼축압축실험으로부터 상온에서의 마찰각(ϕ) 그리고 온도에 따른 마찰각의 변화 $k_s(T)$ 가 필요하며, 변형특성을 정의하기 위해 온도 변화에 따른 1차원 압축지수의 변화 $\lambda(T)$ 가 요구된다.

2.5 동결토의 수리학적 특성

다공질 재료에서 전수두 경사에 의한 물의 흐름은 일반적으로 Darcy's law를 채택하고 있다. 그리고 동결지반에 대한 많은 실험결과는 동일한 전수두에서 온도경사에 의해 낮은 온도 방향으로 유체의 흐름을 보였다(Hoekstra, 1966; Mageau과 Morgenstern, 1980). 이러한 온도경사에 의해 유체의 흐름을 고려하는 방법은 물/유체 사이의 interfacial tension에 의한 cryogenic suction을 추정하여 이용하거나(Thomas 등, 2009; Hansson 등, 2004; Liu와 Yu, 2011), segregation potential을 이용(Tan 등, 2011)하여 고려하는 두 가지 방법이 있다. 본 연구에서는 실내실험을 통하여 유체 유량을 직접 산정할 수 있는 segregation potential을 이용한 방법을 사용하였다. 따라서 동결토에 대한 Darcy's law는 여유 유동수(abundance of liquid water)를 고려하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$q_l = -\frac{k_l}{\gamma_l} \left(\nabla P_l - \gamma_l g \right) - \phi S_l SP_0 \nabla T \quad (11)$$

여기서 SP_0 는 온도경사에 의한 부동수의 유속을 나타내는 segregation potential(Konrad과 Morgenstern, 1981)이다.

동결지반의 온도변화에 따른 부동수의 체적 함수비 관계식을 동결특성함수(freezing characteristic function)라고 한다. 일반적으로 동결특성함수는 실내 실험을 통하여 결정하는 경험식(12a, Andersland과 Ladanyi, 2004)과 불포화토의 함수비 특성곡선(SWCC)을 이용하는 방법(12b, van Genuchten, 1980; Nithimura 등, 2009; Tan 등, 2011)이 있다. 경험식(12a)은 기존의 제안식이 $-1.0^\circ C < T < 0.0^\circ C$ 사이에서 과다한 포화도를 예측하여 부분적으로 수정하였다(Thomas 등, 2009).

$$S_l = [1 - (T - T_0)]^\alpha \quad (12a)$$

$$S_l = \left[1 + \left(\frac{P_l - P_l}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (12b)$$

여기서, T_0 는 물의 동결온도이고, α 는 간극의 크기와 유체의 화학성분에 의해 결정되는 상수(Thomas 등, 2009)이다. 그리고 P_0 와 λ 는 van Genuchten model에서 재료 상수이다(van Genuchten, 1980).

그리고 동결지반의 얼음압 P_i 은 간극의 얼음과 유체의 접촉면에서 열-동역학적 평형상태(thermodynamic equilibrium)를 만족한다고 가정할 때 Clausius-Claperyron 방정식으로부터 식 (13)과 같이 산정할 수 있다(Henry, 2000).

$$P_i = \frac{\rho_i^w}{\rho_i^w} P_i - \rho_i^w L_f \ln(T/273.15) \quad (13)$$

여기서 L_f 은 물의 단위질량당 잠재 융해열(specific latent heat of fusion, $3.34 \times 10^5 \text{J/kg}$)이다.

3. 수치예제 해석

본 연구에서 개발된 동결토에 대한 역학적 구성모델의 수치적인 안정성과 적용성을 확인하기 위하여 예제 해석을 수행하였다. 기존 연구에서 동결토의 변형특성을 정의하기 위한 탄소성 구성모델이 매우 제한적이어서, 사용된 재료 물성치는 기존의 실내실험 결과(Andersland 과 Ladanyi, 2004; Nishimura 등, 2009)를 주로 이용하였다 (Table 1). 수치해석은 1차원 팽창압, 삼축압축 강도특성, 그리고 일방향 동결실험에 대해 수행하고 이에 대해 논의하였다.

3.1 온도변화에 따른 팽창압의 변화

다공질 재료에서 온도가 유체의 동결온도 이하로 내려가면, 간극수의 상변화로 인해 부피 팽창이 발생하는데 이를 동결 팽창(frost heaving)이라 하고, 이때 걸리는 압력을 동상 팽창압(frost heaving pressure)이라 한다. 예제해석을 통하여 온도에 따른 동상 팽창압의 변화를 기존의 실험적 결과와 비교 분석하였다.

수치해석은 1차원 축대칭 요소를 사용하여 변위가 구속된 경계조건에서 재료의 내부 온도를 하강하면서 수평과 연직방향으로 작용하는 팽창압을 평가하였다. 변위의 구속조건으로 인하여 수평방향과 연직방향의 팽창압은 동일하게 산정되었다. 그리고 Figure 4에서와 같이 온도 하강에 의한 팽창압의 변화는 실험결과의 “silty soil”과 매우 유사한 경향을 보였으며, 동결에 의한 팽창

압은 초기에 급격히 증가한 후 수렴하는 경향을 보였다 (Shin과 Park, 2003). 온도에 따른 팽창압의 변화는 동결 특성함수와 동결토 강성의 상호 작용에 의해 결정되며, 실내실험을 통해 얻은 동결특성함수는 실제 동결지반에서 지반구조물에 작용하는 토압 및 동상 팽창압을 예측하는데 중요한 요소이다.

3.2 삼축압축 거동

동결토의 전단거동에 대한 선행연구는 Figure 5와 같이 사질토의 간극변화에 따른 전단강도에 기여하는 4가지 요소들을 구분하고 있다(Ting, 1981; Ting 등, 1983). 동토에서 밀도뿐만 아니라, 온도, 구속압 그리고 선행이력 등도 동토의 전단강도와 매우 밀접한 관련이 있다.

제안된 구성모델로부터 소성포텐셜 함수의 한계상태(critical state)에서의 응력변수의 크기는 $\bar{p}_f = (\bar{p}_c - k_s \phi S_i s)$

Table 1. Soil properties in numerical simulations

Property	Value
Mechanical	$\nu=0.3, C_{cl(s=0)}=0.5, C_{sl(s=0)}=0.05, e_{1kPa}=2.0, M=1.0$ $\beta=1/(1000kPa), r=0.1, k_s=0.5, P_r=100kPa$
Hydraulic	• Freezing characteristic function $\alpha=-0.7, S_{lmax}=1.0, S_{lmin}=0.05, S_l=[1-(T-T_0)]^\alpha$ • Intrinsic hydraulic conductivity $k_f=1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ • Relative hydraulic conductivity $\lambda=0.82, S_{lmax}=1.0, S_{lmin}=0.05$ (van Genuchtenmodel) $k_{rl} = \sqrt{S_e} \left(1 - (1 - S_e^{1/\lambda})^\lambda \right)^2$
Thermal	• Thermal conductivity $\lambda_{soil}=3.0 \text{W/m}\cdot\text{K}, \lambda_{water}=0.6 \text{W/m}\cdot\text{K}, \lambda_{ice}=2.2 \text{W/m}\cdot\text{K}$ $\lambda = \lambda_{soil}^{1-\phi} \lambda_{water}^{\phi S_l} \lambda_{ice}^{\phi(1-S_l)}$ (Geometricmean) • Specific heat capacity $C_{soil}=874 \text{J/kg}\cdot\text{K}, C_{water}=4190 \text{J/kg}\cdot\text{K}, C_{ice}=2095 \text{J/kg}\cdot\text{K}$
Others	• Mass density $\rho_{soil}=2.65 \text{g/cm}^3, \rho_{water}=1.0 \text{g/cm}^3, \rho_{ice}=0.91 \text{g/cm}^3$

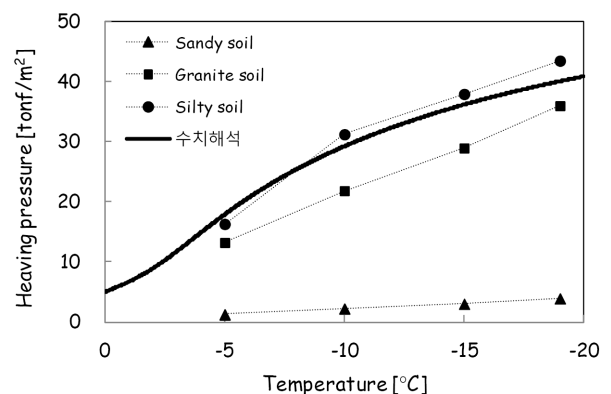


Fig. 4. Effect of temperature on heaving pressure in experimental (Shin & Park, 2003) and numerical tests

/2로 결정하고, 항복면 함수로부터 전단강도는 $q_f = M(\bar{p}_f + k_s \phi S_i s)$ 과 같이 산정된다. 따라서 배수-삼축압축 실험조건에서의 축차 하중강도는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}_f = \frac{(3+2M)\bar{\sigma}_c + 3M k_s \phi S_i s}{3-M} \quad (14)$$

여기서 강도정수와 마찰각의 관계는 $M = \frac{6\sin\phi'}{3-\sin\phi'}$ 이며, $\bar{\sigma}_c$ 는 삼축압축 실험에서의 외부 구속압이다. 식 (14)는 간극의 얼음에 의한 강도 증분과 외부 구속압에 의한 강도증가를 잘 모사하고 있다.

Figure 6a의 수치해석은 동일한 초기 삼축압축조건

(온도=1°C, 외부 구속압=10tonf/m²)하에서 각각 다른 온도로 강하한 후 축차 응력을 재하 하여 얻어진 변형곡선을 나타냈다. 낮은 온도에 대한 수치해석은 물의 상변화에 의한 초기 팽창으로 높은 간극비를 가지며, 강성과 강도가 급격하게 증가함을 보여주었다. Figure 6b의 수치해석은 동일한 초기 온도 1°C와 각기 다른 외부 구속압 조건하에서 온도를 -5°C까지 강하한 후 축차 응력을 재하한 결과를 나타냈다. 초기 외부구속압이 낮을수록 높은 간극비를 갖게 되며, 온도변화에 비해 강도 증가는 상대적으로 작은 편이다. 이론식과 수치해석 결과의 차이는 한계상태(식 14)에서의 변형에 대한 간극비 추정에 기인한다.

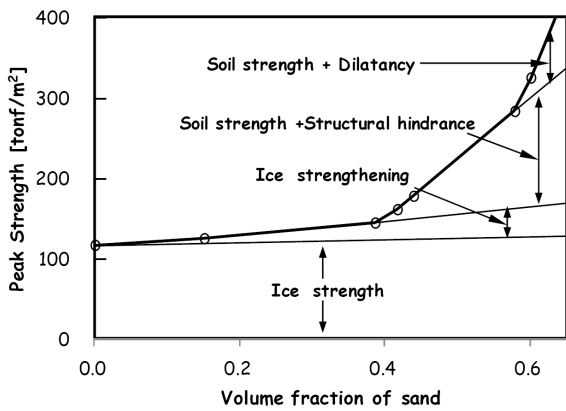


Fig. 5. Failure mechanism map for unconfined compressive strength of frozen sand (Ting et al., 1983)

3.3 일방향 동결실험

지표면의 온도 저하에 의한 동결을 모사하기 위해 일방향 동결에 대한 예제 해석을 수행하였다. 수치해석에서 컬럼의 높이는 10cm이고, 컬럼 전체의 초기 온도는 1°C이다. 수치해석은 하부(warming side)의 온도는 1°C로 일정하게 유지하면서 상부(cooling side)의 온도를 Figure 7(a)과 같이 -4°C로 내리면서 일정하게 유지하도록 하였다. 지하수위는 하부와 동일선상에 있어 동결작용시 필요한 물을 공급할 수 있도록 하였다.

Figure 7(b)에서 상부(10cm)는 온도 강하와 동시에 동

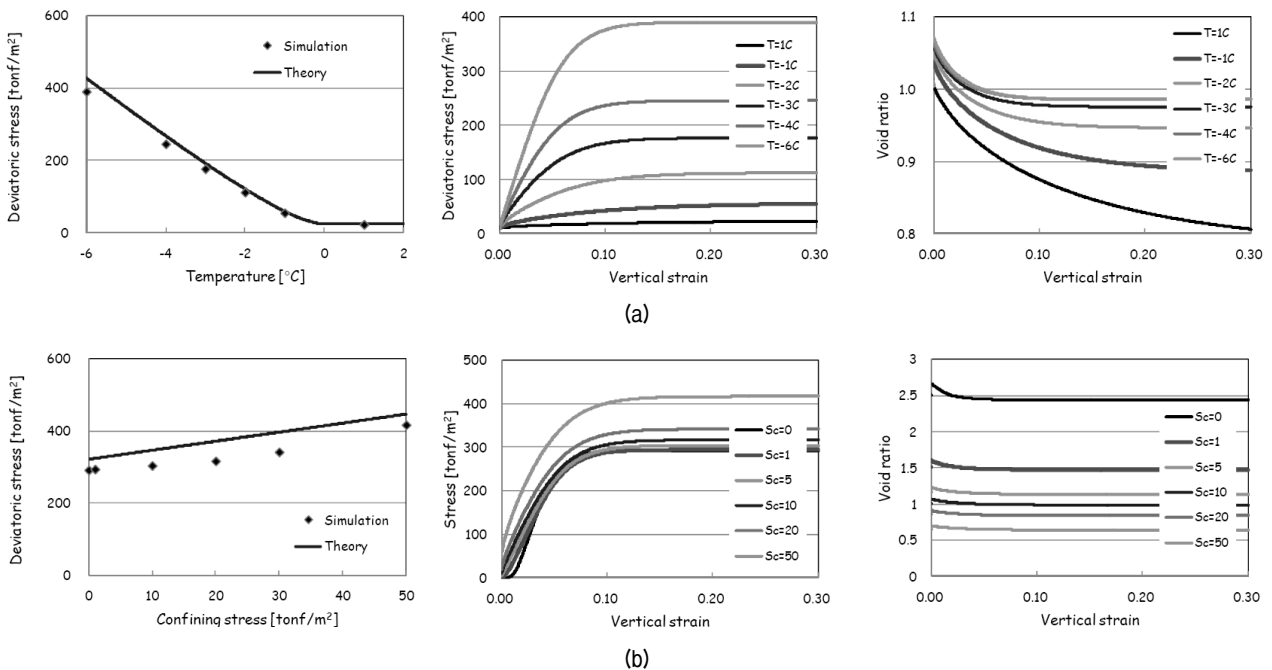
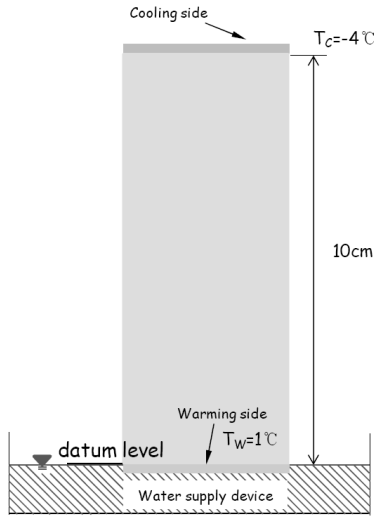
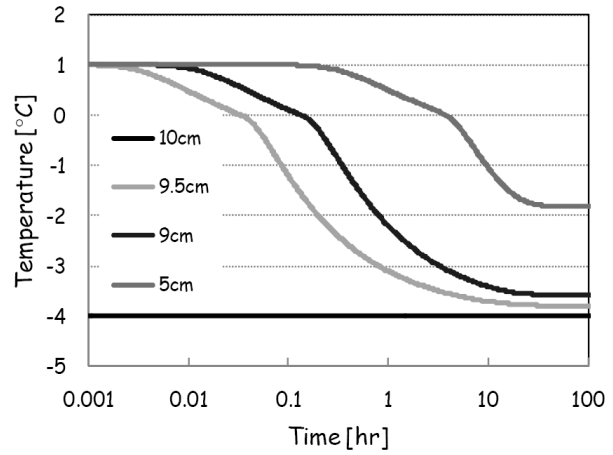


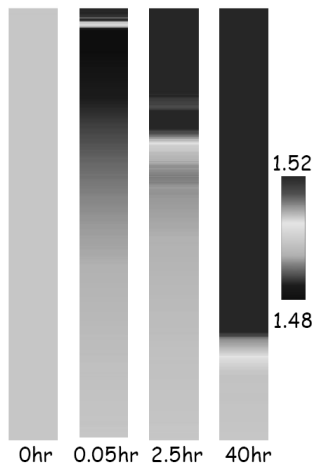
Fig. 6. Deformation behavior of frozen soil under triaxial compression tests. a) Effect of temperature on shear strength and void ratio (confining pressure=10tonf/m²), b) Effect of confining pressure on shear strength and void ratio (temperature=-5°C)



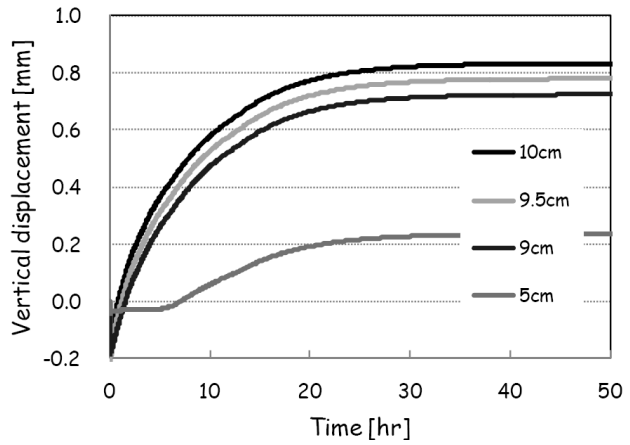
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7. One dimensional freezing test. a) Analysis domain and boundary conditions, b) temperature, c) void ratio, d) vertical displacement with time

결이 시작되고, 상부로부터 동결면이 하부로 진행하면서 온도 저하에 의한 동결작용이 일어나는 것을 확인할 수 있다. Figure 7(c)와 7(d)는 시간경과에 따른 간극비와 연직방향 변화를 보여주고 있다. 동결초기(Figure 7(c), 0.05hr) 동결면을 기준으로 온도가 물의 동결점 이하인 상부는 물의 상변화에 의해 간극비가 증가하고, 하부는 cryogenic suction에 의해 동결면 상부로 유체가 이동하며 간극비가 감소하는 영역이 나타난다(Tan 등, 2011). 이로 인하여 연직방향으로 침하가 발생하게 된다(Figure 7(d)). 시간이 경과후(~6시간) 흡입력에 의한 유동수의 상부 흐름이 완화되고 동결면 상부에서 상변화에 의한 체적 팽창이 발생하면서 간극비가 증가하고, 변위 또한 연직 방향으로 팽창하였다. 그리고 20시간 정도 경과후에는 간극비와 연직 변위량이 일정한 크기로 수렴하게 된다.

본 연구에서 개발된 역학적 구성모델을 이용한 수치해석 결과는 일방향 동결의 과정을 잘 묘사할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

최근 국내에서 동토지반에 대한 관심이 증가하고 자연적 혹은 인위적으로 동해를 입은 지반의 거동특성에 관한 이론정립 및 체계적인 연구의 필요성이 제기되고 있다. 기존의 동토지반에 대한 수치해석은 주로 역학적 거동특성을 고려하지 않는 TH해석을 수행하거나, 혹은 동결지반을 단순 선형탄성재료로 가정하여 해석을 하였다.

본 논문에서는 흡입자, 부동수, 얼음으로 구성된 동결작용을 받는 다공질 재료에 대한 THM 역학적 탄소성

구성모형을 유도하였다. 새로운 응력변수는 얼음과 흙의 골격에 의해 전달되는 응력의 합으로 비동결-동결 전 상태에서 연속성을 가지며, 불포화 동결토에도 용이하게 응용될 수 있다. 제안된 역학적 구성모형은 증분형태로 수식화 되었으며, 변형률과 온도 변화에 대한 응력증분 관계식으로 표현된다. 구성모형에 필요한 지반 물성치는 온도에 따른 삼축압축 강도 변화와 1차원 압축특성곡선이며, 얼음포화도를 결정하기 위한 동결특성 함수도 필요하다.

개발된 구성모형을 THM 유한요소 프로그램에 구현하여 1차원 팽창압, 동결토의 삼축압축 강도 그리고 일방향 동결실험에 적용하여 해의 안정성과 구성모형의 적용성에 대하여 확인하였다. 수치해석 결과는 지배방정식과 구성관계식이 비선형인 동결토의 복잡한 THM 현상들을 효과적으로 묘사할 수 있었다.

지금까지 동결 지반에 강도 특성에 관한 많은 연구가 진행되었음에도 불구하고 압축/변형 특성에 관한 실험 결과가 부족하여 지속적인 실내실험이 요구하며, 기존의 실내실험 결과를 활용한 지반 물성치의 산정과 역학적 구성모형의 개선이 시급하다. 그리고 동결토 지반에 대한 실내 모형실험 및 현장실험도 병행되어 동결지반에 대한 체계적인 이론확립과 THM 역학 거동을 묘사할 수 있는 구성모형의 개선이 진행되어야 한다. 개발된 역학적 구성모형을 통한 추가적이고 심층적인 동결지반에 대한 해석은 구조물 설계 및 시공될 구조물의 장기거동에측에 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 일반연구자 지원사업(과제번호 2011-0338) 및 한국건설교통기술평가원 건설기술 혁신산업(11기술혁신E04)의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Alonso, E. E., Gens, A., and Josa, A. (1990), "A constitutive model for partly saturated soils", *Géotechnique*, Vol.40, No.3, pp.405-430.
2. Arvidson, W. D., Morgenstern, N. R. (1977), "Water flow induced by soil freezing", *Can. Geotech. J.*, Vol.14, pp.237-245.
3. Andersland, O. B., Ladanyi, B. (2004), "Frozen Ground Engineering", John Wiley and Sons.
4. Hansson, K., Šimůnek, J., Mizoguchi, M., Lundin, L. C., and van

- Genuchten, M. Th. (2004), "Water flow and heat transport in frozen soil: Numerical solution and freeze-thaw applications", *Vadosezone J.*, Vol.3, pp.693-704.
5. Hoekstra, P. (1966), "Moisture movement in soils under temperature gradients with the cold-side temperature below freezing", *Water Resour. Res.*, Vol.2, No.2, pp.241-250.
6. Henry, K. S. (2000), "A review of the thermodynamics of frost heave", *CRREL, US Army Corps of Engineers*.
7. Kang, J. M., Kim, H. S., Hong, S. S., Kim, Y. S. (2009a), "A fundamental study on behavior of pipeline during ground freezing in Vladivostok site, Russia", *Korean Geo-Environmental conference*, pp.254-257.
8. Kang, J. M., Kim, H. S. (2009b), "An Study on Efficiency and Application of Thermal Siphon in the Permafrost", *International Symposium on Urban Geotechnics*, pp.963-966.
9. Kim, Y. J. (2003), "An Experimental Study on the Waste Polyethylene Aggregate for Construction Materials", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.4, No.4, pp.5-16.
10. Kim, Y. S., Kang, J. M., Hong, S. S., Kim, K. J. (2010), "Heat Transfer Equation and Finite Element Analysis Considering Frozen Ground Condition the Cyclic Loading", *J. Korean Geosyn the tics Society* Vol.9 No.3, pp.39-45.
11. Konrad, J. M., Morgenstern, N. R., (1981), "The segregation potential of a freezing soil", *Can. Geotech. J.*, Vol.18, pp.482-491.
12. Konrad, J. M., Morgenstern, N. R., (1982), "Effects of applied pressure on freezing soils", *Can. Geotech. J.*, Vol.19, pp.494-505.
13. Konrad, J. M. (1999), "Frost susceptibility related to soil index properties", *Can. Geotech. J.*, Vol.36, pp.403-417.
14. Liu, Z., Yu, X. (2011), "Coupled thermo-hydro-mechanical model for porous materials under frost action: theory and implementation", *Acta. Geotechnica.*, Vol.6, pp.51-65.
15. Mageau, D. W., Morgenstern, N. R. (1980), "Observations on moisture migration in frozen soils", *Can. Geotech. J.*, Vol.17, No.1, pp.54-60.
16. Michalowski, R. L., Zhu, M. (2006), "Frost heave modelling using porosity rate function", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.30, pp.703-722.
17. Nishimura, S., Gens, A., Olivella, S. and Jardine, R. J. (2009), "THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application", *Géotechnique*, Vol.59, No.3, pp.159-171.
18. Painter S. L. (2011), "Three-phase numerical model of water migration in partially frozen geological media: model formulation, validation, and applications", *Comput. Geosci.*, Vol.15, pp.69-85.
19. Phillips, R., Clark, J. I., and Hanke, R. (2002), "Pipeline frost heave modeling", *Proc. Int. Conf. on physical modeling in geotechnics*, St John's, NL, pp.313-318.
20. Sheng, D., Gens, A., Fredlund, D. G., and Sloan, S. W. (2008), "Unsaturated soils: From constitutive modelling to numerical algorithms", *Computers and Geotechnics*, Vol.35, pp.810-824.
21. Shin, E. C., Kang, J. G., Park, J. J. (2009), "Thermal Stability in Underground Structure with Ground Freezing", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.3, pp.65-74.
22. Shin, E. C., Park, J. J. (2003), "An Experimental Study on Frost Heaving Pressure Characteristics of Frozen Soils", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.2, pp.65-74.
23. Shin, E. C., Ryu, B. H., Park, J. J. (2010), "The Freezing Characteristics of Pavement Layer Using the Field Road Model

- Test”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.7, pp.71-80.
24. Shin, H. (2011), “Formulation of Fully Coupled THM Behavior in Unsaturated soil”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.3, pp.75-83.
 25. Taber, S. (1929), “Frost heaving”, *Journal of Geology*, Vol.37, No.5, pp.428-461.
 26. Tan, X., Chen, W., Tian, H., Cao, J. (2011), “Water flow and heat transport including ice/water phase change in porous media: Numerical simulation and application”, *Cold Regions Sci. and Tec.*, Vol.68, pp.74-84.
 27. Terzaghi, K. (1936), “The shear resistance of saturated soils”, *Proceedings for the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, MA*, pp.54-56.
 28. Thomas, H. R., Cleall, P., Li, Y. C., Harris, C., and Kern-Luetsch, M. (2009), “Modelling of cryogenic processes I permafrost and seasonally frozen soil”, *Géotechnique*, Vol.59, No.3, pp.173-184.
 29. Ting, J. M. (1981), “The creep of Sand: Qualitative and Quantitative Models”, *Res. Rep.*, pp.81-85.
 30. Ting, J. M., Martin, R. T., and Ladd, C. C. (1983), “Mechanisms of strength for frozen sand”, *J. Geotech. Eng. ASCE*, Vol.109, No.10, pp.1181-1185.
 31. Van Genuchten, M. Th. (1980), “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”, *Soil science society of America journal*, Vol.44, pp.892-898.

(접수일자 2012. 2. 20, 심사완료일 2012. 5. 16)