

민감도 분석을 기반으로 한 시료의 동결 특성에 미치는 영향인자 분석

Influencing Factors on Freezing Characteristics of Frost Susceptible Soil Based on Sensitivity Analysis

고 규 현¹ Go, Gyu-Hyun
이 장 근² Lee, Janguen
김 민 섭³ Kim, Minseop

Abstract

A fully coupled thermo-hydro-mechanical model is established to evaluate frost heave behaviour of saturated frost-susceptible soils. The method is based on mass conservation, energy conservation, and force equilibrium equations, which are fully coupled with each other. These equations consider various physical phenomena during one-dimensional soil freezing such as latent heat of phase change, thermal conductivity changes, pore water migration, and the accompanying mechanical deformation. Using the thermo-hydro-mechanical model, a sensitivity analysis study is conducted to examine the effects of the geotechnical parameters and external conditions on the amount of frost heave and frost heaving rate. According to the results of the sensitivity analysis, initial void ratio significantly affects each objective as an individual parameter, whereas soil particle thermal conductivity and temperature gradient affect frost heave behaviour to a greater degree when applied simultaneously. The factors considered in this study are the main factors affecting the frost heaving amount and rate, which may be used to determine the frostbite sensitivity of a new sample.

요 지

동상민감성 시료의 동상 거동을 평가하기 위해 완전히 결합된 열-수리-역학 연계해석을 수행하였다. 이를 위한 구성모델은 질량보존방정식, 에너지보존방정식, 힘평형방정식을 기반으로 유도되었다. 구성모델을 통해 간극수의 상 변화, 간극수 유동 및 수반되는 기계적 변형 등 1차원 동결에 대한 다양한 물리적 현상을 정량적으로 고려할 수 있었다. 한편, 시료의 동상발생량 및 동상속도에 미치는 영향 인자들을 조사하기 위해 민감도 분석 연구가 수행되었다. 민감도 분석 결과에 따르면, 시료의 초기 간극비는 종속변수인 동상발생량과 동상속도에 독립적으로 큰 영향을 미치는 반면 흙 입자 열전도도 및 온도구배는 독립적으로 미치는 영향보다 두 변수 간 상호 작용을 통해 더 큰 영향을 미침을 확인하였다. 본 연구에서 고려된 인자들은 모두 동상발생량과 동상속도에 영향을 미치는 주요 인자이며, 표본 시료의 동상민감성 여부를 결정하는 데에 활용될 수 있을 것이다.

Keywords : Finite element method, Frost heave, Metamodels, Sensitivity analysis, Thermo-hydro-mechanical model

1 정희원, 금오공과대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology)

2 정희원, 한국건설기술연구원 극한환경연구센터 연구위원 / 센터장 (Member, Research Fellow / Head of Center, Extreme Engrg. Research Center, Korea Institute of Construction and Technology, Tel: +82-31-910-0791, Fax: +82-31-910-0150, jlee@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 비회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Advanced Institute of Science and Technology)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

동토지반에서 주로 발생하는 동상(frost heave)현상은 하수관거의 파괴, 도로 노면의 균열, 지반구조물 파손 등의 다양한 공학적 문제들을 야기시킨다. 이러한 동상 현상의 분석 및 예측을 위해서는 동토지반의 동결과정에서 일어나는 복잡한 열-수리-역학적(Thermal-Hydro-Mechanical, THM) 물리현상에 대한 정확한 이해가 요구된다. 동결토는 일반적으로 동결층(frozen zone), 동결수반층(frozen fringe), 비동결층(unfrozen zone)으로 구분되며, 동결수반층과 비동결층 사이의 경계를 동결전진층(frost front)이라 불린다(Fig. 1). 동결층에서 동결이 시작되어 동결전진층(frost front)이 비동결층으로 전진하게 되면, 동결수반층에서는 간극수의 상변화에 의한 부피팽창(freezing in situ)이 일어난다. 이후, 상변화로 손실된 간극수를 보충하기 위해 물이 동결전진층 쪽으로 흡입되어 주기적인 얼음층을 형성하며 두터워지는데 이를 얼음띠(ice lens)라고 부른다. 또한, 간극수의 유동은 얼음띠 바로 아래 영역까지만 나타나는데, 이는 얼음띠가 만들어진 동결층은 불투수층이 되어 간극수 유동이 제한되기 때문이다.

동결토에서 동상이 일어나기 위한 전제조건들은 다음과 같다(Michalowsky and Zhu, 2006). 첫째로, 지반의 종류는 동상에 취약한(frost-susceptible) 실트질 점토 지반이어야 하며, 둘째로, 지속적인 수분 공급(water supply)이 있어야 하며, 셋째로, 동상을 유발하는 열적조건(thermal condition)을 가져야한다. 여기서, 열적조건이란 동결전진층의 이동속도가 동결전진층으로의 간극수 유동을 허락할 만큼 충분히 느린 조건을 말한다. 즉, 동상에 취약

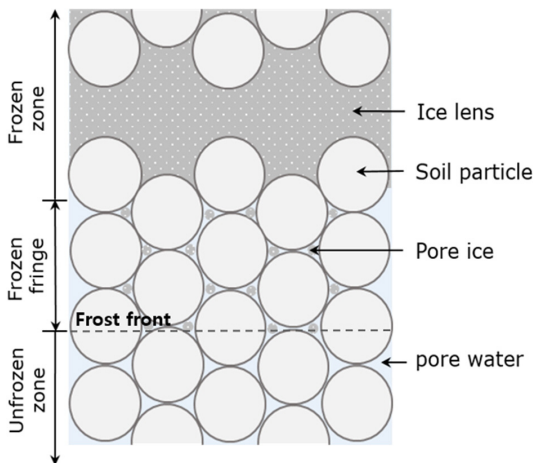


Fig. 1. Freezing zone in frost-susceptible soil

한 지반이라 할지라도 상기 언급한 수리적 조건과 열적 조건이 갖춰지지 않으면 동상은 발생하지 않는다.

이러한 동상과정을 이해하고 분석하기 위해 많은 연구가 수행됐다. Taber(1929) 및 Beskow(1947)와 같은 연구자들에 의해 동상에 관한 실험적 연구가 시작되었다. 특히, Taber(1929)는 동상 현상이 간극수의 부피팽창보다 간극수 이동으로 만들어지는 얼음띠에 의한 영향이 더 지배적이라는 것을 실험적으로 입증하였다. 이후, 모세관 이론(capillary theory)을 이용한 동상 예측 연구들이 수행되었는데(Penner, 1959; Everett, 1961), 이론적으로 예측된 동상압이 실제 압력보다 낮게 예측되는 등의 한계점이 있었다. 이 외에 얼음띠 형성과정과 관련한 연구도 많이 수행되었다. 초기에는 경험적 모델식을 이용한 연구(Giplin, 1980; Konard and Morgenstern, 1980; O'Neill and Miller, 1985; Nixon, 1991; Konrad and Duquennoi, 1993)가 주를 이루었다. 대표적인 예로 Konard and Morgenstern(1980)는 Segregation Potential (SP_0)이론을 제시하였는데, 동결수반층에서 온도구배(gradT)와 간극수의 투과유량(water flux)이 계수 SP_0 에 의해 상관관계를 가진다고 분석하였다. 하지만 SP_0 가 상재하중, 동결전진층에서의 흡입력, 흙의 특성과 같은 영향을 정확히 반영하기 어렵다는 한계점이 존재하였다. 이후, Konrad and Duquennoi(1993)는 흙을 비압축성 재료로 간주한 열역학 모델을 제안하였고, 얼음띠 형성에 관한 새로운 규준을 제시하였다. 한편, 온도구배에 의한 유체의 흐름을 고려하는 방법으로 SP_0 외에 얼음과 유체 사이의 계면장력에 의한 극저온흡입력(Cryogenic suction)으로 유체의 흐름을 추정할 수 있다. 몇몇 연구자들은 이러한 Clausius-Clapeyron 방정식을 이용하여 극저온흡입력을 산정하였고, 이를 이용한 THM 해석을 수행하였다(Thomas et al., 2009; Liu and Yu, 2011; Zhou and Li, 2012; Lai et al., 2014). 또한, 이 외에 별도의 유동해석 없이 동상을 예측하는 열응력(TM) 해석방법도 제시되었다(Michalowski, 1993; Michalowski and Zhu, 2006; Zhang and Michalowski, 2015). 이들은 porosity rate function을 이용하여 동상으로 인한 체적 변화를 효율적으로 산정하였다.

국내의 경우, 실내실험을 통한 동결토의 특성 분석에 관한 연구들이 주로 수행되었다. 일례로, 동결토 전단강도를 활용한 강도 산정에 대한 연구(Choi and Ko, 2011; Ko, 2012; Kim et al., 2017)와 온도별 부동수분 측정 시험 연구(Kim et al., 2008), 부동수분 함량에 따른 동상

팽창압 연구(Shin and Park, 2003), 온도제어형 삼축셀을 이용한 동상시험 연구(Ryu et al., 2016), 개선된 동상시험법을 이용한 동상민감성 판정 기준 연구(Jin et al., 2017)가 수행되었다. 수치해석의 경우, Song et al.(2003)은 폐쇄형 시스템에서 강관이 매설된 동결 화강토의 온도분포에 대한 수치해석을 수행하여 이를 실내실험결과와 비교하였고, Kim et al.(2010)은 간극수의 상변화를 고려한 열전도 구성방정식과 해석기법을 제안하였다. 또한, Shin et al.(2012)은 SP₀을 이용한 동토지반의 역학적 탄소성 구성모델을 개발하였고, 동결작용에 의한 다공성 재료의 THM 예제 해석을 수행하였다.

요약하면, 선행연구들은 다양한 경험적 이론적 방법을 사용하여 동결토의 열역학적 특성들을 평가하였다. 특히 수치해석적 연구에 있어서 상당한 진전이 있었지만 대부분 수학적 모형 구축 및 물리적 현상 모사, 예측 정확도에 주안점을 두고 있는 반면 해석 모델을 활용한 동상시료의 동상 민감도 평가 연구는 아직 미진한 상황이다. 계절 동토의 영향권에 있는 국내 지반의 경우, 지반공학적인 인자의 특성에 따라 시료의 동상 민감성 여부가 결정되며, 동상 민감성에 근거해 개선된 동상방지 설계법이 적용된다. 따라서, 국내 지반 시료의 지반공학적인 특성을 고려한 동상 민감도 평가가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 Thomas et al.(2009)이 제안한 구성방정식을 기반으로 THM 해석을 수행하여 1차원 동결 시 일어나는 물리적 현상에 대해 고찰하였고, 이와 더불어 지반공학적인 인자 및 온도구배가 동토지반의 동상 거동에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 핵심인자 별 매개변수 연구를 수행하였다.

2. THM 구성방정식

본 연구에서는 동토의 동상(frost heave)을 모사하는 열-수리-역학(THM) 수치해석모델을 구현하기 위해 다음과 같은 사항을 가정하였다.

1. 대상 지반은 등방 균질탄성(uniform elastic)재료이며, 공극에 공기가 존재하지 않는 완전 포화토로 간주한다.
2. 동결층에서는 흡입자(soil particle)와 공극얼음(pore ice) 및 얼음띠(ice lens)가 구성되며, 동결수반층에서는 흡입자와 간극수 및 공극얼음으로, 비동결층에서는 흡입자와 간극수만으로 구성된다.

3. 동결수반층 및 비동결층에서 발생하는 간극수 유동은 Darcy법칙을 따른다.
4. 흡입자와 간극수 및 얼음은 비압축성으로 간주하며, 이들 3상으로 이루어진 지반 재료는 국부적인 열평형상태를 만족한다(local thermal equilibrium).

2.1 질량보존방정식(Mass balance equation)

완전히 포화된 동결지반에서의 체적함수비(θ)는 간극수에 대한 체적함수비(θ_w)와 얼음에 대한 체적함수비(θ_i) 합으로 나타낼 수 있으며, 간극비(e) 및 얼음포화도(S_i)의 함수로 표현될 수 있다. 또한, 얼음포화도(S_i)는 온도에 의존하는 함수로서 다양한 경험식으로부터 산정될 수 있는데 본 연구에서는 Tice(1976)가 제시한 식 (2)를 사용하였다.

$$\theta = \theta_w + \theta_i = \frac{e}{1+e}(1-S_i) + \frac{e}{1+e}S_i \quad (1)$$

$$S_i = \begin{cases} 1 - [1 - (T - T_0)]^\alpha & T \leq T_0 \\ 0 & T > T_0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서, T 는 온도, T_0 는 간극수의 어는점($T_0=273.15$ K), α 는 경험적 상수이다.

한편, 동결지반 내에서 온도구배가 생기면 간극수의 유동을 야기시키는데, 균일한 압력장(uniform pressure field)에서 상대적으로 더 낮은 온도영역으로 유체흐름이 발생한다(Hoekstra, 1966; Mageau and Morgenstern, 1980). 이를 수치해석적으로 모사하기 위해서는 다음과 같은 수식화 과정이 필요하다.

우선, 얼음과 간극수의 접촉면에서 열동역학적 평형상태(Thermodynamics equilibrium)가 만족할 때, 얼음과 유체 사이의 극저온흡입력을 추정하는데 활용되는 Clapeyron식에 의해 다음과 같은 관계가 성립한다(Kay and Groenevelt, 1974; Black, 1995; Henry, 2000; Chen et al., 2006).

$$\frac{u_w + u_a}{\rho_w} - \frac{u_i + u_a}{\rho_i} = L \ln \frac{T}{T_0} \quad (3)$$

여기서, ρ_w 는 유체의 밀도(kg/m^3), ρ_i 는 얼음의 밀도(kg/m^3), u_a 는 대기압($u_a=101.3\text{kPa}$), L 은 물의 단위질량당 잠재 용해열(latent heat of fusion, 334.5kJ/kg)이다. 한편, 동결지반에서의 공극압(u_{por})은 얼음압(u_i)과 간극수

압(u_w)의 가중합으로 나타낼 수 있다(O'Neill and Miller, 1985).

$$u_{por} = (1 - S_i)u_w + S_i u_i \quad (4)$$

또한, 동결과정에 대한 질량보존방정식은 다음과 같이 표현되는데

$$\frac{\partial(\rho_w \theta_w)}{\partial t} dV + \frac{\partial(\rho_i \theta_i)}{\partial t} dV + \rho_w \nabla q dV = 0 \quad (5)$$

여기서, t 는 시간, dV 는 동결토의 미소체적(volume element)을 의미하며, 간극수의 유속 q 는 Darcy 법칙에 따라 계산된다.

$$q = -k_r k_u \nabla \psi = -k_r k_u \nabla \left(z + \frac{u_w}{\rho_w g} \right) \quad (6)$$

여기서, 전수두 ψ 는, 위치수두 z 와 압력수두 $u_w/(\rho_w g)$ 의 합으로 표현된다. k_r 는 상대수리전도도를 의미하며, 식 (7)과 같이 온도에 대한 함수로 표현된다(Gilpin, 1980; Nixon, 1991).

$$k_r = \begin{cases} [1 - (T - T_0)]^\beta & T \leq T_0 \\ 1 & T > T_0 \end{cases} \quad (7)$$

여기서, β 는 -8에서 -40까지의 범위를 지니는 경험적 상수이며 본 연구에서는 점토시료에서 일반적으로 사용되는 8로 가정하였다. k_u 는 비동결층에서의 수리전도도를 의미하는데 본 연구에서는 민감도 분석을 위해 간극비의 함수로 표현되는 식 (8)을 이용하였다(Kozeny, 1927).

$$k_u = k_{ref} \left(\frac{e}{e_{ref}} \right)^3 \left(\frac{1 - e_{ref}}{1 - e} \right)^2 \quad (8)$$

한편, 미소체적 dV 는 입자의 미소체적 dV_s 와 $dV = (1+e)dV_s$ 의 관계를 가지므로, 식 (5)의 질량보존방정식은 최종적으로 식 (9)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} & \rho_w \left[\frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} (1 - S_i) - \frac{\partial S_i}{\partial t} \frac{e}{1+e} \right] \\ & + \rho_i \left[\frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} S_i + \frac{\partial S_i}{\partial t} \frac{e}{1+e} \right] + \rho_w (\nabla q) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

2.2 에너지보존방정식(Energy balance equation)

동결토의 동결과정에 대한 에너지보존방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\Phi dV)}{\partial t} + \nabla(-\lambda \nabla T) dV + C_w q \nabla T dV = 0 \quad (10)$$

여기서, Φ 는 미소체적당 열함량(heat content, J/m^3)을 나타내며 식 (11)과 같이 얼음함량 증가에 의한 잠재용해열을 포함하고 있다. C 는 동결토의 체적열용량(Volumetric heat capacity, $J/m^3/K$)이며, C_s , C_w , C_i 는 각각 흡입자, 간극수, 그리고 얼음의 비열용량(Specific heat capacity, $J/kg/K$)을 의미한다. 또한, 유효 열전도도계수 λ 는 Geometric mean 모델에 의해서 산정되며, 여기서 λ_s , λ_w , λ_i 는 각각 흡입자, 간극수, 그리고 얼음의 열전도도(thermal conductivity, $W/m/K$)를 의미한다.

$$\Phi = CT - L \frac{e}{1+e} S_i \rho_i \quad (11)$$

$$C = \frac{1}{1+e} C_s \rho_s + \frac{e}{1+e} C_w \rho_w (1 - S_i) + \frac{e}{1+e} C_i \rho_i S_i \quad (12)$$

$$\lambda = (\lambda_s)^{\frac{1}{1+e}} (\lambda_w)^{\frac{e(1-S_i)}{1+e}} (\lambda_i)^{\frac{eS_i}{1+e}} \quad (13)$$

따라서, 식 (10)의 에너지보존방정식은 $dV = (1+e)dV_s$ 의 관계식에 의해 최종적으로 다음과 같이 정리된다.

$$\left(C - \frac{L \rho_i e}{1+e} \frac{\partial S_i}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{L \rho_i S_i}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + C_w q \nabla T \quad (14)$$

2.3 힘평형방정식(Force equilibrium)

동결토의 비등온 미소변형(Non-isothermal small deformation)에 대한 힘평형방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \sigma + \gamma = 0 \quad (15)$$

여기서, σ 는 전응력(Pa), γ 는 단위중량(N/m^3)을 나타낸다. 단위중량 γ 는 식 (16)과 같이 표현될 수 있다.

$$\gamma = \frac{1}{1+e} [\gamma_s + e(1 - S_i) \gamma_w + e S_i \gamma_i] \quad (16)$$

전응력과 유효응력, 그리고 공극압 사이에는 식 (17)과 같은 관계가 성립하며, 식 (18)과 같이 시료에 대한 응력-변형률 관계를 이용하면

$$\sigma = \sigma' + u_{por} \quad (17)$$

$$d\sigma' = -E_s d\epsilon_v \quad (18)$$

힘평형방정식이 최종적으로 다음과 같이 정리된다.

$$\nabla \left\{ -E_s \left(\frac{e - e_0}{e + e_0} \right) \right\} + \nabla u_{por} + \gamma = 0 \quad (19)$$

여기서, e_0 는 초기 간극비를 의미한다. 또한, 식 (19)를 적분하여 공극압에 정리하면 다음과 같다.

$$u_{por} = \int_z^{height} (\gamma - \gamma_0) dz_0 + E_s \left(\frac{e - e_0}{e + e_0} \right) \quad (20)$$

3. 전산 실험 설계(Computer experiment design)

3.1 수치해석

본 연구에서는 상기 기술된 구성방정식들을 이용하여 지반의 동상 예측을 위한 THM 해석을 수행하였다. 제

시된 구성방정식들은 매우 높은 비선형성을 지니고 있어 상용 수치해석 코드인 COMSOL Multiphysics PDE module을 이용하여 해를 도출하였다. 수치해석모델의 구현은 1차원 동결시험에 대한 예제 해석을 통해 이루어졌다. 고려된 시료는 깊이는 100mm로 설정하였고, 시료 전체의 초기온도는 1°C로 설정하였다. 또한, 동결 시 하부온도를 1°C, 상부 온도를 -3°C로 일정하게 유지시켜 열평형상태에 도달할 때까지 해석을 수행하였다. 지하수위는 하부와 동일 선상에 위치시켜 동결 시 지속적인 수분 공급이 가능하도록 하였다. 시료에 가해진 상재하중은 100kPa로 설정하여 해석을 수행하였다. 수치해석 모델에 적용된 재료 물성은 Table 1과 같다.

한편, 본 연구는 민감도 분석을 기반으로 지반의 동상 거동에 미치는 영향 인자들에 대해 정량적으로 분석하였다. 3개의 독립적인 변수(흙 입자의 열전도도 λ_s , 시료의 초기 간극비 e_0 , 시료의 온도구배 $gradT$)를 민감도 분석의 입력인자로 선정하였다. 이는 흙 입자의 열전도도 및 온도구배가 동결 전진층의 이동속도에 관여하며 초기 간극비는 지반재료의 열수리학적 거동에 영향을 줄 것으로 판단되었기 때문이다. 몇몇 선행연구에서 온도구배를 동상 거동의 주요 인자로 판단하고 있음을 확인할 수 있었다(Lai et al., 2014; Michalowski and Zhu, 2006). 본 연구에서 고려한 온도구배는 표본의 상하단 경계의 온도 차를 표본의 깊이(100mm)로 나눔으로써

Table 1. Material properties used in numerical simulation model

Parameter	Value	Unit	Note
ρ_w	1000	kg/m ³	Density of water
ρ_i	917	kg/m ³	Density of ice
ρ_s	2600	kg/m ³	Density of soil particle
C_s	831	J/kg/K	Heat capacity of soil particle
C_w	4180	J/kg/K	Heat capacity of water
C_i	2044	J/kg/K	Heat capacity of ice
L	334.5	kJ/kg	Latent heat of fusion
λ_w	0.56	W/m/K	Thermal conductivity of water
λ_i	2.24	W/m/K	Thermal conductivity of ice
T_0	0	°C	Freezing temperature of water
E_s	1.2	MPa	Modulus of compression
ν	0.3	-	Poisson's ratio
g	9.81	m/s ²	Gravitational acceleration
e_{ref}	0.6	-	Reference void ratio
a	-5	-	Empirical constant
β	-8	-	Empirical constant
k_{ref}	2.5×10^{-10}	m/s	Reference hydraulic conductivity

정의되었다. 종속변수인 동상비(Frost heave ratio)와 동상속도(frost heaving rate)는 식 (21) 및 식 (22)를 통해 산정되었다.

$$\zeta(\%) = \frac{\Delta H_f}{H_0} \times 100 \quad (21)$$

$$U_f(\text{mm/hr}) = \frac{\Delta H_f}{\Delta t_{95}} \quad (22)$$

여기서, ζ 는 동상비(%), ΔH_f 는 전체 동상발생량(mm), H_0 는 동결 전 시편의 초기높이(mm), U_f 는 동상속도(mm/hr), Δt_{95} 는 최종 동상발생량의 95%가 진행될 때의 경과시간(hr)으로 정의하였다.

3.2 메타모델 및 민감도 분석(Metamodeling and Sensitive analysis)

동상 거동에 영향을 미치는 인자 간의 정확한 실제 관계식을 구현하는 것은 불가능하므로 메타 모델을 사용하여 민감도 분석을 하였다(Booker et al., 1999). 실제 시스템을 대신하여 표현한 모델인 메타모델은 입력 데이터와 출력 데이터 사이의 간단한 관계를 나타내는 수학적 방정식 혹은 알고리즘이다(Booker et al., 1999; Hoffman et al., 2003). 다양한 메타모델 방식 중에서 Kriging 방식은 적당한 수의 매개변수를 가지는 비선형적인 결정론적 모델에 적용하기에 가장 적합하다(Matheron, 1963). Gaussian Kriging 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(x) = \sum_{j=0}^L \beta_j B_j(x) + z(x) \quad (23)$$

여기서 β_j 는 미지 계수; $B_j(x)$ $j=1, \dots, L$ 는 데이터에 값에 근거한 기준값, $z(x)$ 는 오차 값이다. Gaussian 상관 함수인 $r(\theta; s, t)$ 는 식 (24)를 통해 메타모델의 오차 값을 도출할 수 있다.

$$r(\theta; s, t) = \text{Corr}(z(s), z(t)) = \exp\left\{-\sum_{k=1}^n \theta_k |s_k - t_k|^2\right\} \quad (24)$$

식 (24)에서 θ_k 는 평활 파라미터, n 은 디자인 변수의 개수, 그리고 s_k 와 t_k 는 샘플의 k 번째 요소들이다. $y(x)$ 에 대한 Kriging 예측값 $\hat{y}(x)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{y}(x) = b(x)\hat{\beta} + r'(x)R^{-1}(\theta)(y - B\hat{\beta}) \quad (25)$$

여기서, R 은 상관행렬이고 $r'(x) = \{r(\theta; x_1, x), \dots, r(\theta; x_n, x)\}'$ 이다.

본 연구에서는 세 종류의 영향 인자 x_{id} 에 대하여 50개의 세트를 도출하였고, 이러한 입력변수들을 수치해석 모델에 대입하여 데이터 세트를 구성하였다.

$$x_{id} = \min + \text{rand}(0,1) \cdot (\max - \min) \quad (26)$$

이때, \max 와 \min 은 입력변수의 최대 및 최소값이며 (Table 2), $\text{rand}(0,1)$ 은 Latin hyper cube 샘플링을 통하여 0과 1 사이에서 균등하게 추출된 임의의 값이다.

민감도 분석 시, Sobol 방식이라고 불리는 분산기반 민감도 분석 기법(Variance-based sensitivity analysis, VBSA)이 사용되었는데(Sobol, 1993) 이때 도출되는 값인 $g(x)$ 는 다음과 같이 여러 개의 항으로 구성되어 있다.

$$g(x) = g_0 + \sum_i g_i(x_i) + \sum_{i,j} g_{ij}(x_i, x_j) + \dots + g_{1\dots s}(x_1, \dots, x_s) \quad (27)$$

$$\text{이때 } \int_0^1 g_{i_1 \dots i_t}(x_{i_1}, \dots, x_{i_t}) dx_k = 0, k = i_1, \dots, i_t \quad (28)$$

$g_i(x_i)$ 는 주 효과(main effect)를 나타내고 $g_{ij} = (x_i, x_j)$ 는 1차 상호 효과(first-order interaction effect)를 나타낸다. 민감도를 나타내는 전역적 민감도 지수 $S_{i_1 \dots i_j}$ 는 식 (29)와 같이 분산 값을 통해 나타낼 수 있다.

Table 2. Range of independent variable used in the sensitivity analysis

Parameter	Minimum	Maximum	Unit
Soil particle thermal conductivity, λ_s	1.62	6.044	W/m/K
Initial void ratio, e_0	0.146	0.784	-
Temperature gradient, gradT	0.636	0.364	°C/cm

$$S_{i_1 \dots i_j} = \frac{D_{i_1 \dots i_j}}{D} \quad (29)$$

$$D = \int g^2(x) dx - g_0^2, \quad D_{i_1 \dots i_s} = \int g_{i_1 \dots i_s}^2 dx_{i_1} \dots dx_{i_s} \quad (30)$$

이는 다른 변수와의 상호 작용을 포함하여 각 변수의 총 민감도 지수를 더한 값이다.

$$ST_i = S_i + S_{(i,-i)} = 1 - S_{-i} \quad (31)$$

민감도 지수는 매개변수의 중요도 판단, 불필요한 변수 선별 등에 사용되는데 이때 민감도 지수가 0.01 미만일 경우 매개변수로서의 영향력이 없다고 판단한다. Homma and Saltelli(1996)는 총 민감도 지수 ST_i 를 제안했는데,

4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 1차원 동결시험에 대한 예제 해석 결과를 보여준다. 상부로부터 시료가 동결됨에 따라 동결전진층

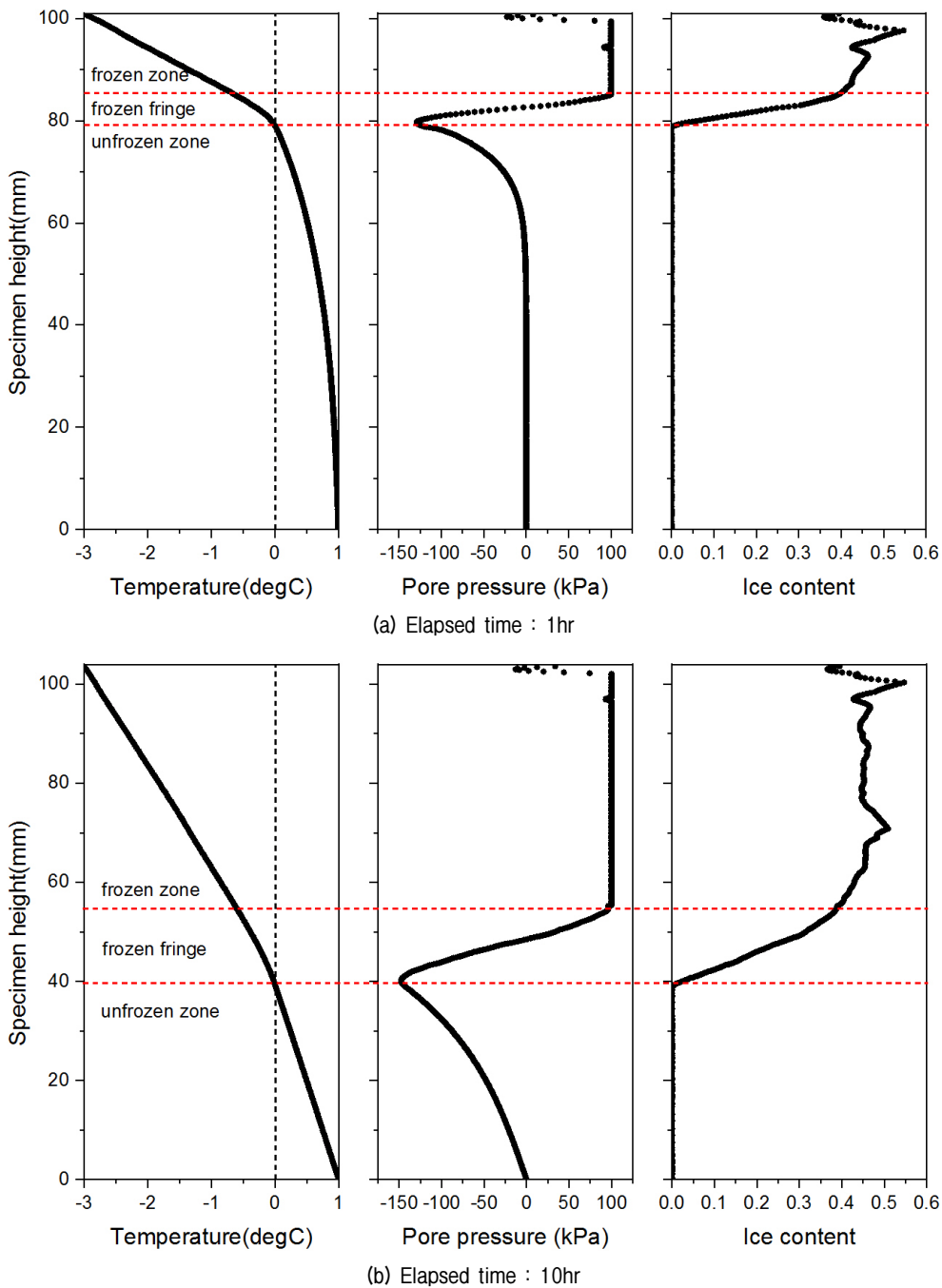


Fig. 2. Results of numerical analysis for 1D freezing

이 하부로 전진하게 되고, 온도 하강에 따른 동결과정은 순차적으로 진행됨을 보였다. 또한, 동결전진층 아래쪽에 형성된 음의 공극압(negative pore pressure)은 비동결 영역의 간극수를 동결전진층 쪽으로 흡입시켜 얼음 형성을 촉진하는데, 이는 동결수반층에서 공극압과 얼음 함유량이 급격히 증가하는 현상에 의해 확인된다. 하지만, 공극압이 시료에 가해진 상재하중보다 커질 수는 없으므로 동결영역에서의 간극수압은 상재하중 크기로 제한되는 결과를 나타내었다. 하지만, 본 해석모델이 지닌 높은 비선형성으로 인하여 높은 투수성을 지닌 지반에 대해서는 해석의 수렴성이 떨어진다는 한계점이 발견되었다. 본 연구에서 적용한 경계조건에 대해 해석모델의 수렴성이 담보되는 초기 수리전도도는 $1.25 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 이내로 확인되었다. 그러나 이렇게 확인된 초기 수리전도도는 사용자가 설정한 열적 경계조건에 따라 달라질 수 있다.

Fig. 3은 시간에 따른 동상량 및 동결전진층 위치를 보여준다. 동결전진층 전진속도는 시간이 지날수록 감소하였는데, 이는 초기단계에서는 온도하강이 급격히 일어나다가 동결이 진행될수록 동결속도가 점차적으로 느려짐을 의미한다. 동결전진층의 전진속도가 비동결층의 간극수 유동을 유발할 만큼 충분히 느려져 동상 발생 조건을 갖춘 후에는 동상량이 얼마간 지속적으로 증가하였다. 그러다가 동결시작으로부터 약 100시간 후에는

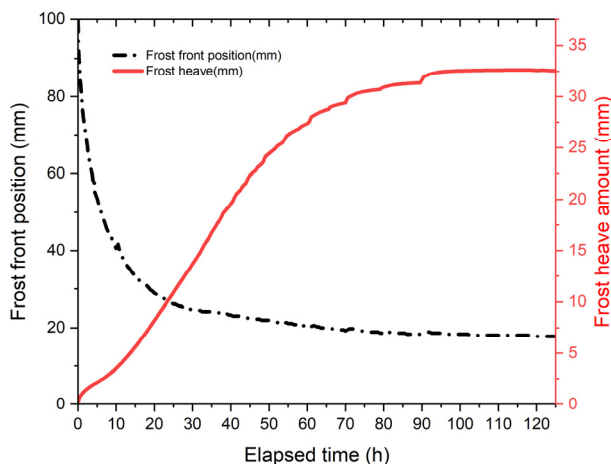


Fig. 3. Frost heave amount and frost front position

Table 3. Parameters of the Gaussian Kriging model

Parameter	μ	η^2	θ_1	θ_2	θ_3
Frost heave ratio ζ	0.3902	0.0685	11.4868	2.7447	18.8865
Frost heaving rate U_f	0.3583	0.1021	3.7544	3.0566	34.0475

시편의 온도는 열평형상태에 도달하여 동결전진층(frost front)의 전진이 멈추었고, 동상발생량도 더이상 발생하지 않고 수렴하였다. 시간에 따른 동상량은 전반적으로 비선형적인 증가 양상을 나타내었는데, 이러한 양상은 Konrad and Morgenstern(1980)의 실험결과와 유사한 경향이라 할 수 있다.

한편, 지반공학적 인자 및 온도구배가 동상비와 동상 속도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 50개의 수치해석 데이터를 이용하여 매개변수와 동상 현상과의 관계를 나타내는 메타 모델을 구축하였고, 메타모델의 계수는 Table 3에 나타내었다. 동상비 및 동상속도에 대한 전역적 민감도 지수(global sensitive index) 및 총 민감도 지수(total sensitive index)는 Table 4에 제시하였다. 분석된 총 민감도 지수를 고려할 때, 모든 민감도 지수가 0.01보다 크게 나타났기 때문에 선정된 모든 매개변수가 시편의 동상비 및 동상속도에 유의미한 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

Fig. 4는 각 매개변수와 종속변수 사이의 상관관계를 보여준다. 분석 결과, Fig. 4(a)와 (b)에 나타난 초기 간극비가 다른 매개변수 대비 동상 거동에 가장 절대적인 영향력을 나타내었다. 이는 Table 4에 제시된 정량적인 수치를 통해서도 확인되는데 동상비 및 동상률에 대한 초기 간극비의 민감도 지수는 각각 0.5332, 0.6089로서, 다

Table 4. Global sensitivity indices and total sensitivity indices

Frost heave ratio ζ			
S^*	λ_s	e_0	gradT
λ_s	0.0593	0.0459	0.1430
e_0	0.0459	0.5332	0.0166
gradT	0.1430	0.0166	0.0691
ST^{**}	0.2481	0.5957	0.2287
Frost heaving rate U_f			
S^*	λ_s	e_0	gradT
λ_s	0.0178	0.0179	0.1149
e_0	0.0179	0.6089	0.0654
gradT	0.1149	0.0166	0.0936
ST^{**}	0.2067	0.6434	0.2739

*S is total variances

**ST is a total sensitivity index

른 인자들에 비해 월등히 높음을 알 수 있다. 입자 열전도도와 온도구배의 경우, 각 파라미터의 독립적인 영향 정도를 나타내는 $g_i(x_i)$ 지수는 다소 낮은 수치로 나타났지만(동상비에 대해 각각 0.0539 및 0.00691, 동상률에 대해 각각 0.0178 및 0.0936) 두 변수 간 영향 정도를 나타내는 $g_{ij}(x_i, x_j)$ 지수는 상대적으로 높게 나타났다(동상비에 대해 0.1430, 동상률에 대해 0.1149). 즉, 초기 간

극비는 동상 거동에 독립적으로 큰 영향을 미치는 반면, 입자 열전도도 및 온도구배는 개별적인 영향보다는 두 변수 간 상호 작용을 통해 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 초기 간극비가 절대적인 영향 인자로 작용하는 원인은 초기 간극비가 동결수반층에서의 간극수 유입 정도에 관여할 뿐 아니라 열함량, 유효열전도 등 다양한 열물성에 동시에 영향을 미치기 때문인 것으로 사

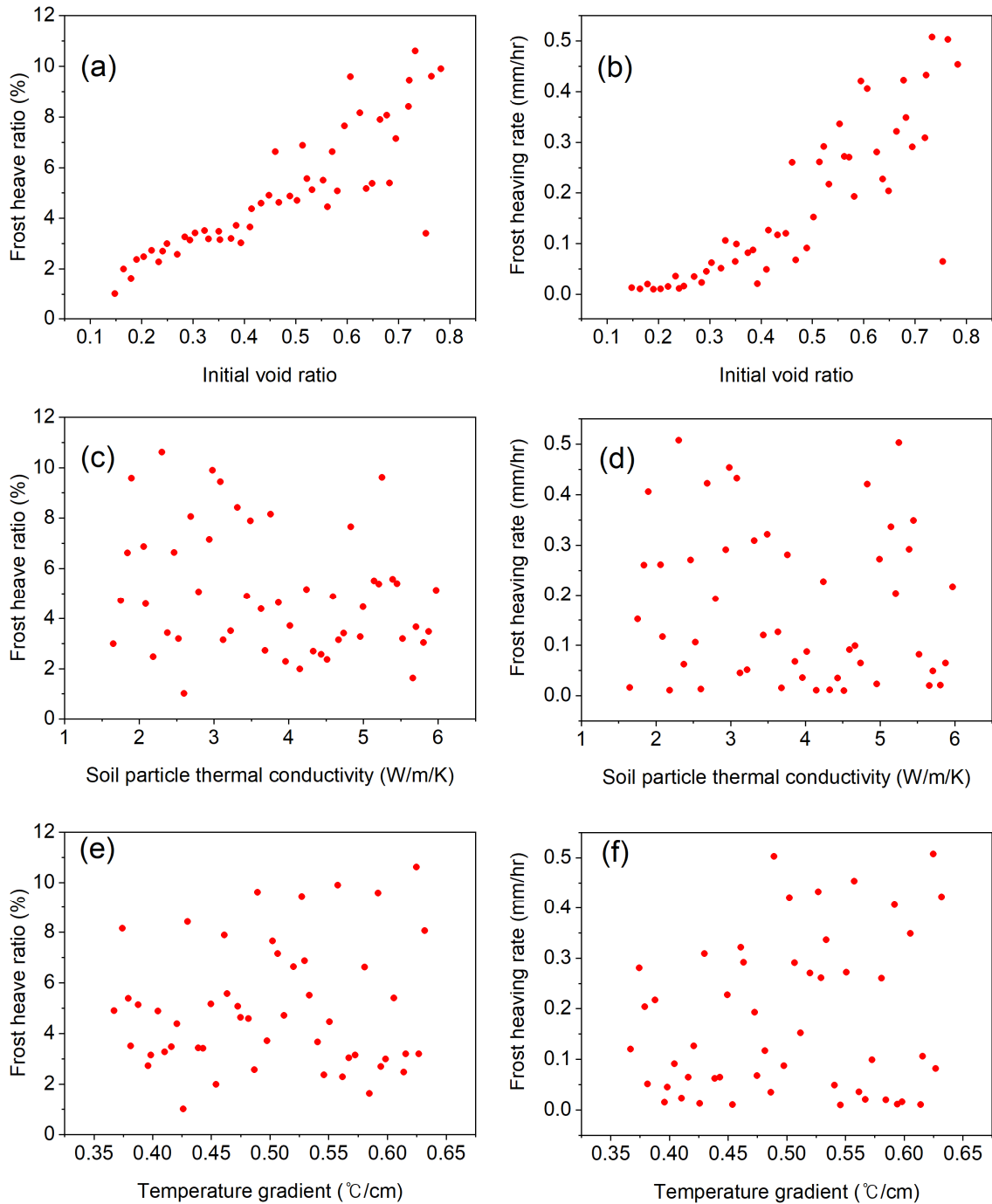


Fig. 4. Effect of parameters on frost heave ratio and frost heaving rate: (a), (b): Initial void ratio, (c), (d): Soil particle thermal conductivity, (e), (f): Temperature gradient

료된다.

한편, Table 5에서 알 수 있듯이 동결토를 평가하는 국외 주요 기관들은 동상비 또는 동상속도를 기준으로 시료의 동상 민감성을 판단하고 있다. 본 연구에서 수행한 50개의 데이터 세트를 Table 5의 동상 민감성 평가 기준에 적용한 결과, 22개의 데이터 세트에서 동상민감성 시료로 확인되었고, 이 중 U.S. Army Corps of Engineers 기준이 시료의 동상민감성 여부를 가장 보수적으로 판

정하고 있음을 확인하였다(Table 6). 또한, 동상 민감성 판정 결과가 각 기관의 기준별로 차이를 보이는 것으로 볼 때, 추후 광범위한 동상 실험 데이터베이스를 구축하여 국내 동토시료에 적용하기에 적합한 새로운 판별 기준을 제시할 필요성이 있으며, 이를 통해 위험지역으로 판단되는 동토지반에서의 개선된 동상방지 설계법이 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

Table 5. Frost susceptibility criteria

ζ (%)	U_f (mm/hr)	Judgement	References
<12	<0.375	Negligible frost susceptibility (NFS)	TRRL (Croney and Jacobs, 1967)
≥ 12	≥ 0.375	Possibly frost susceptibility (PFS)	
	< 0.1	Low	JGS (JGS 0172, 2003)
	0.1 – 0.3	Medium	
	≥ 0.3	High	
	<0.02	Negligible	U.S. Army Corps of Engineers (Johnson et al., 1975)
	0.02 – 0.04	Very low	
	0.04 – 0.08	Low	
	0.08 – 0.17	Medium	
	0.17 – 0.33	High	
	≥ 0.33	Very high	

Table 6. Frost susceptibility analysis results

Dataset number	Parameter			Frost susceptibility criteria		
	λ_s	e_0	gradT	TRRL	JGS	USACE
#3	2.69	0.68	0.63	PFS	High	Very High
#5	1.84	0.46	0.58	NFS	Medium	High
#8	5.25	0.76	0.49	PFS	High	Very High
#10	4.99	0.56	0.55	NFS	Medium	High
#11	5.39	0.52	0.46	NFS	Medium	High
#12	2.46	0.57	0.52	NFS	Medium	High
#14	5.97	0.53	0.39	NFS	Medium	High
#15	3.49	0.66	0.46	NFS	High	High
#18	2.98	0.78	0.56	PFS	High	Very High
#19	5.15	0.55	0.53	NFS	High	Very High
#29	2.94	0.70	0.51	NFS	Medium	High
#31	2.30	0.73	0.62	PFS	High	Very High
#35	3.76	0.63	0.37	NFS	Medium	High
#36	4.24	0.64	0.45	NFS	Medium	High
#38	2.80	0.58	0.47	NFS	Medium	High
#39	3.32	0.72	0.43	NFS	High	High
#44	4.83	0.59	0.50	PFS	High	Very High
#45	1.90	0.61	0.59	PFS	High	Very High
#46	5.45	0.68	0.61	NFS	High	Very High
#47	2.06	0.51	0.53	NFS	Medium	High
#49	3.09	0.72	0.53	PFS	High	Very High
#50	5.21	0.65	0.38	NFS	Medium	High

5. 결론

본 연구에서는 동토지반의 동결 시 발생하는 동상 현상을 모사하고 평가하기 위해 완전 연계된 열-수리-응력 연계해석을 수행하였다. 동결과정에서의 지반 내 동결 전진층의 전진 양상, 공급압 및 얼음함유량의 변화 등을 확인하였다. 또한, 지반공학적 인자가 동상에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 이를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 해석모형을 통한 1차원 동결시험 결과, 상부로부터 시료가 동결됨에 따라 동결전진층 아래쪽에 형성된 얼음의 공급압이 비동결영역의 간극수를 동결전진층으로 흡입시켜 얼음띠 형성을 촉진하고 이로 인해 동상 발생량이 급격히 증가하는 것을 확인하였다.
- (2) 시간에 따른 동상발생량 양상과 동결전진층의 전진 양상 사이에 상관관계가 있었다. 동결전진층은 동결 초기 단계에서 빠르게 전파되었으며 열평형 상태에 도달한 후 멈추었다. 동상발생 역시 동결 초반 급격히 증가하다가 열평형상태에서는 추가적인 동상이 발생하지 않았다. 즉, 시간에 따른 동상량은 전반적으로 비선형적인 증가 양상을 나타내었는데, 이러한 양상은 Konrad and Morgenstern(1980)의 실험결과와 유사한 경향이라 할 수 있다.
- (3) 민감도 분석을 위해 고려된 매개변수들은 모두 민감도 지수가 0.01 이상으로 나타나 시편의 동상비 및 동상속도에 유의미한 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이 중, 초기 간극비는 동상 거동에 독립적으로 막대한 영향을 미치는 반면, 입자 열전도도 및 온도 구배는 이들이 개별적으로 작용했을 때보다는 두 변수 간 상호 작용을 통해 종속변수에 더 큰 영향을 나타내었다.

감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음 (2018-104-152).

참고문헌 (References)

1. Beskow, G. (1947), "Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Railroads", Northwestern Univ.

2. Black, P.B. (1995), "Applications of the clapeyron equation to water and ice in porous media", Cold Regions Res. & Eng. Lab., US Army Corps of Engineers.

3. Booker, A.J., Dennis, J.E., Frank, P.D., Serafini, D.B., Torczon, V., and Trosset, M.W. (1999), "A Rigorous Framework for Optimization of Expensive Functions by Surrogates", *Structural optimization*, Vol.17, No.1, pp.1-13.

4. Chen, F.X., Song, Z.P., and Li, N. (2006), "Study on Moisture Migrating Force Model of Freezing Soil base on Adsorption-film Moisture Migration Mechanism", *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, Vol.4, No.3, pp.1-4 (in Chinese with English abstract).

5. Choi, C.H. and Ko, S.G. (2011), "A Study for Predicting Adfreeze Bond Strength from Shear Strength of Frozen Soil", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.10, pp.13-23.

6. Cronney, D. and Jacobs, J.C. (1967), The frost susceptibility of soils and road materials, No. Lr 90, Transport and Road Research Laboratory report, pp.68-72.

7. Everett, D.H. (1961), "The Thermodynamics of Frost Damage to Porous Solids", *Trans. Faraday Soc.*, Vol.57, pp.1541-1551.

8. Gilpin, R.R. (1980), "A Model for the Prediction of Ice Lensing and Frost Heave in Soils", *Water Resour. Res.*, Vol.16, No.5, pp. 918-930.

9. Henry, K.S. (2000), "A review of the thermodynamics of frost heave", CRREL, US Army Corps of Engineers.

10. 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.

11. Hoffman, R.M., Sudjianto, A., Du, X., and Stout, J. (2003), Robust Piston Design and Optimization using piston secondary motion analysis (No. 2003-01-0148). SAE Technical Paper.

12. Homma, T. and Saltelli, A. (1996), "Importance Measures in Global Sensitivity Analysis of Nonlinear Models", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.52, No.1, pp.1-17.

13. JGS 0172 (2003), Test method for frost susceptibility of soils, *Japan Geotech. Soci.*, pp.1-6.

14. Jin, H.W., Ryu, B.H., and Lee, J. (2017), "Evaluation on the Reliability of Frost Susceptibility Criteria", *J. of the Korean Geo-Environ. Soci.*, Vol.18, No.12, pp.37-45.

15. Johnson, T.C., Berg, R.L., Carey, K.L., and Kaplar, C.W. (1975), Roadway design in seasonal frost areas, Transportation Research Board and Cold Regions and Engineering Laboratory, Technical report 259, pp.18.

16. Kay, B.D. and Groenevelt, P.H. (1974), "On the Interaction of Water and Heat Transport in Frozen and Unfrozen Soils: I. Basic Theory; The Vapor Phase", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.38, No.3, pp.395-400.

17. Kim, S.Y., Kim, Y.S., Lee, J., and Lee, J.S. (2017), "An Experimental Study of Strength Evaluation in Frozen Soils according to Direct Shear Box Systems", *J. of the Korean Geo-Environ. Soci.*, Vol.18, No.3, pp.5-14.

18. Kim, Y.S., Kang, J.M., Hong, S., and Kim, K.J. (2010), "Heat Transfer Equation and Finite Element Analysis Considering Frozen Ground Condition the Cyclic Loading", *J. of Korean Geosynthetics Soci.*, Vol.9, No.3, pp.39-45.

19. Ko, S.G. (2012), A Study on Proportional Coefficient for Estimating Adfreeze Bond Strength using Direct Shear Test, MS thesis, University

- of Science and Technology.
20. Konrad, J.M. and Duquenois, C. (1993), "A Model for Water Transport and Ice Lensing in Freezing Soils", *Water Resour. Res.* Vol.29, No.9, pp.3109-3124.
 21. Konrad, J.M. and Morgenstern, N.R. (1980), "A Mechanistic Theory of Ice Lens Formation in Fine-grained Soils", *Can. Geotech. J.*, Vol.17, pp.473-486.
 22. Kozeny, J. (1927). "Über Kapillare Leitung der Wasser in Boden", Royal Academy of Science, Vienna, Proc. Class I, Vol.136, pp. 271-306.
 23. Lai, Y., Pei, W., Zhang, M., and Zhou, J. (2014) "Study on Theory Model of Hydro-thermal-mechanical Interaction Process in Saturated Freezing Silty Soil", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.78, pp.805-819.
 24. Liu, Z. and Yu, X. (2011) "Coupled Thermo-hydro-mechanical Model for Porous Materials under Frost Action: Theory and Implementation", *Acta Geotechnica*, Vol.6, pp.51-65.
 25. Mageau, D.W. and Morgenstern, N.R. (1980), "Observations on Moisture Migration in Frozen Soils", *Can. Geotech. J.* Vol.17, No.1, pp.54-60.
 26. Matheron, G. (1963), "Principles of Geostatistics", *Economic geology*, Vol.58, No.8, pp.1246-1266.
 27. Michalowski, R.L. (1993), "A Constitutive Model of Saturated Soils for Frost Heave Simulations", *Cold Region Sci. Technol.* Vol.22, No.1, pp.47-63.
 28. Michalowski, R.L. and Zhu, M. (2006), "Frost Heave Modelling Using Porosity Rate Function", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.30, pp.703-722.
 29. Nixon, J.F.D. (1991), "Discrete Ice Lens Theory for Frost Heave in Soils", *Can. Geotech. J.* Vol.28, No.8, pp.843-859.
 30. O'Neill, K. and Miller, R.D. (1985), "Exploration of a Rigid Ice Model of Frost Heave", *Water Resour. Res.* Vol.21, No.3, pp. 281-296.
 31. Penner, E. (1959), "The Mechanism of Frost Heave in Soils", Highway Research Board Bulletin, Vol.225, pp.1-22.
 32. Ryu, B.H., Jin, H.W., and Lee, J. (2016), "Experimental Study of Frost Heaving using Temperature Controlled Triaxial Cell", *J. of the Korean Geo-Environ. Soci.*, Vol.17, No.6, pp.23-31.
 33. Shin, E.C. and Park, J.J. (2003), "An Experimental Study on Frost Heaving Pressure Characteristics of Frozen Soils", *J. of Korean Geotech. Soci.*, Vol.19, No.2, pp.65-74.
 34. Shin, H.S., Kim, J. M., Lee, J., and Lee, S.R. (2012) "Mechanical Constitutive Model for Frozen Soil", *J. of Korean Geotech. Soci.*, Vol.28, No.5, pp.85-94.
 35. Sobol' I.M. (1993) Sensitivity analysis for nonlinear mathematical models. *MathModel Comput Exp*;1:407e14.
 36. Song, W.K., Kim, Y.C., and Lee, H.Y. (2003), "A Experimental and Numerical Studies of Thermal Flow Motion in a Geothermal Chamber", *J. of the comput. struct. eng. inst. of Kor.*, Vol.16, No.3, pp.219-228.
 37. Taber, S. (1929), "Frost Heaving", *J. Geology*, Vol.37, pp.428-461.
 38. Thomas, H.R., Cleall, P., Li, Y.C., Harris, C., and Kern-Luetsch, M. (2009), "Modeling of Cryogenic Processes in Permafrost and Seasonally Frozen Soils", *Geotechnique*, Vol.59, No.3, pp.173-184.
 39. Tice, A.R., Anderson, D.M., Banin, A. The prediction of unfrozen water contents in frozen soils from liquid limit determinations. Cold Regions Research & Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, 1976.
 40. Zhang, Y. and Michalowski, R.L. (2015), "Thermal-Hydro-Mechanical Analysis of Frost Heave and Thaw Settlement", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.141, No.7, pp.04015027.
 41. Zhou, J. and Li, D. (2012) "Numerical Analysis of Coupled Water, Heat and Stress in Saturated Freezing Soil", *Cold Region Sci. Technol.* Vol.72, pp.43-49.

Received : May 13th, 2020

Revised : June 1st, 2020

Accepted : June 1st, 2020