

# 물의 흐름을 고려한 인공동결 시스템의 열-수리 거동 연구

## Experimental and Numerical Study on Hydro-thermal Behaviour of Artificial Freezing System with Water Flow

진 현 우<sup>1</sup>

Jin, Hyunwoo

이 장 근<sup>2</sup>

Lee, Jangguen

유 병 현<sup>3</sup>

Ryu, Byung Hyun

고 규 현<sup>4</sup>

Go, Gyu-Hyun

### Abstract

The artificial ground freezing method is a ground amelioration technology that does not have a permanent effect on the ground. One of the key factors that determine the efficiency and design criteria of the artificial ground freezing is the groundwater flow. Therefore, in order to accurately evaluate the behavior of the artificial ground freezing, studies on the effect of water flow on the formation of ice walls must be preceded. In this paper, experimental and numerical analyses were conducted using only pure water to maximize the effect of water flow on the formation of ice walls. A hydro-thermal coupled model for freezing behavior was proposed and the accuracy of the model was verified. Through the numerical and experimental studies, the flow rate dominates not only the formation time but also the shape of the ice wall. In addition, this study proposes a method to indirectly predict the ice wall formation time, which is expected to be highly useful for a practical application where it is difficult to visually identify ice walls.

### 요 지

인공동결 공법은 지반에 영구적인 영향을 초래하지 않는 지반개량 공법으로 인공동결 공법의 효율성 및 설계기준을 결정하는 핵심인자는 물의 흐름이다. 따라서 인공동결 공법을 적용하기 위해서는 동결구근 및 벽체 형성에 물의 흐름이 미치는 영향에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 물의 흐름이 동결구근 및 벽체 형성에 미치는 영향을 극대화하기 위해 순수한 물을 활용한 실내실험과 수치해석 연구를 수행하였다. 열-수리 연계 해석모델을 새롭게 제안하고 이를 실험적으로 검증하였으며, 유량이 동결벽체 형성 시간 및 형상을 결정짓는 핵심인자임을 확인하였다. 나아가, 동결구근 및 벽체를 가시적으로 확인하기 어려운 지반에서 활용성이 높을 것으로 예상되는 동결벽체 형성 시간을 간접적으로 예측할 수 있는 방안을 새롭게 제시하였다.

**Keywords :** Artificial ground freezing, Experiment, Groundwater flow, Ice wall, Numerical analysis

- 1 정회원, 한국건설기술연구원 극한환경연구센터 박사후연구원 (Member, Postdoctoral Researcher, Extreme Engrg. Research Center, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)
  - 2 정회원, 한국건설기술연구원 극한환경연구센터 연구위원/센터장 (Member, Research Fellow / Head of Center, Extreme Engrg. Research Center, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)
  - 3 정회원, 한국건설기술연구원 극한환경연구센터 전임연구원 (Member, Research Specialist, Extreme Engrg. Research Center, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)
  - 4 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Tech., Tel: +82-54-478-7620, Fax: +82-54-478-7859, [gyuhyungo@kumoh.ac.kr](mailto:gyuhyungo@kumoh.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)
- \* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2020 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

지반인공동결(artificial ground freezing, AGF) 공법은 지중에 매설된 동결관에 브라인(brine) 또는 액체질소(LN<sub>2</sub>)와 같은 냉매를 순환시켜 동결관을 중심으로 동결구근(ice column) 형성을 유도하여 일시적으로 차수 및 지반강성을 향상시키는 지반개량 공법이다. 지반인공동결 공법은 그라우팅(grouting) 또는 지중연속벽(diaphragm walls)과는 달리 지반에 영구적인 영향을 초래하지 않고 지반을 개량할 수 있다는 장점이 있다(Andersland and Ladanyi, 2004). 이러한 장점에도 불구하고 아직까지 우리나라는 지반인공동결 공법과 관련하여 선진국들의 사례연구 및 동결토 거동 규명을 위한 기초연구만이 진행되어온 실정이다(Tuksu, 2007). 반면 해외에서는 인공동결 공법을 적용한 다수의 현장실증시험이 진행되어왔다. 네덜란드에서는 Sophiaspoor 터널에 적용된 인공동결 시스템을 대상으로 냉매(브라인 및 액체질소) 종류에 따른 지반 온도 변화추이에 관한 연구결과를 발표한 바 있으며(Crippa and Manassero, 2006), 이탈리아에서는 Naples subway에 시공된 인공동결 시공 사례를 토대로 동결거동에 영향을 미치는 핵심적인 인자에 대해 분석하였다(Papakonstantinou et al., 2013). 중국에서는 상하이 양쯔강 터널의 실증시험을 통해 인공동결에 따라 발생하는 동상압(frost heave pressure)이 미치는 영향에 대해 분석한 사례가 있다(Han et al., 2016). 현장실증시험 뿐만 아니라 수치해석 연구 또한 활발하게 진행 중이며 공통적으로 지반의 지하수 흐름을 인공동결 공법의 효율성에 영향을 미치는 주요 변수로 판단하고 있다(Pimentel et al., 2012a; Vitel et al., 2016; Marwan et al., 2016; Huang et al., 2018; Shin et al., 2018; Li et al., 2019). 하지만, 선행 연구들에서는 해석모델에 대한 실험적 검증에 있어 동결구근 및 얼음벽체 형상을 육안으로 관측할 수 없거나 특정지점에서 취득한 소수의 온도데이터를 기반으로 한 검증이 주를 이루고 있다는 한계점이 존재하고 있다(Pimentel et al., 2012b; Lao et al., 2017; Alzoubi et al., 2019; Yang et al., 2019). 또한, 지하수 흐름이 존재하는 모래지반의 경우 간극수의 유동 특성 및 동결 거동이 시료전체의 동결거동을 지배하기 때문에 순수한 물에 의한 동결 거동을 평가해보는 기초연구가 의미를 지닐 수 있음에도 불구하고 아직까지 물만을 이용한 연구는 전무한 실정이다. 오직 물로만 동결 실험을 진행할 경우 가장 핵심적인 영향인자인 물의 흐름이 동결구근 및 얼음벽체 형성에 미치는 영향을 극대화하여 분석할 수 있다는 장점이 있어 보다 정밀한 수치해석 모델의 개발 및 검증이 가능하다.

따라서 본 논문에서는 순수한 물을 대상으로 물의 흐름을 모사한 인공동결 실내 모형실험을 수행하고 이를 해석적으로 평가하기 위한 열-수리 연계해석모델을 제안 및 검증하였다. 동결관을 중심으로 형성되는 동결구근들이 얼음벽체(ice wall) 형성 과정을 육안으로 관측하고, 이를 검증된 해석모델을 활용해 추정할 수 있는 방안을 제시함으로써 향후 동결벽체 형성을 육안으로 관측할 수 없는 지반에 대해 간편하게 적용할 수 있는 방안을 제시하고 있다.

## 2. 인공동결 실내 모형실험 시스템

인공동결 실내 모형실험을 위한 실험장비 모식도를 Fig. 1(a)에 나타냈다. 동결관이 위치한 메인수조는 직육면체 모형으로 가로 300mm(x축 방향), 세로 600mm(y축 방향), 높이 600mm(z축 방향)이며 하부에서 상부로 균등한 물의 흐름을 모사하기 위해 하부에 다공판(두께 5mm)을 설치하고 모래 45mm를 포설하였다. 또한, 외기 온도로 인한 영향을 최소화하기 위해 전면을 20mm 두께의 단열재(eXtruded Poly Styrene, XPS)로 단열하였다. 동결관은 외경이 20mm인 2중관 형태의 미국석유회(API, American Petroleum Institute) 규격의 라인파이프(API-5L-X42)를 사용하였으며 각 동결관마다 동일한 냉각펌프를 각각 연결하였다.

물의 흐름은 1) 온도조절장치가 설치된 수조(물 온도를 약 5℃로 유지)에서 펌프를 이용해 유량 조절( $\Delta h$ )이 가능한 별도의 수조로 공급, 2) 유량 조절용 수조에서 메인수조 하부로 물 공급, 3) 동결실험이 수행되는 동안 메인수조의 수위를 일정하게 유지하기 위한 배수, 4) 메인수조에서 배수된 물이 온도조절장치가 설치된 수조로 배수되도록 물 순환 시스템을 구성하였다. 메인수조에 위치하고 있는 3개의 동결관들을 수평방향으로 설치하여 동결관과 물 흐름이 직교하도록 하였다. 2중 동결관의 냉각은 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 내관으로 브라인이 투입된 뒤 외관으로 배출되며 순환하는 방식이며, 인공동결 시 동결관 주변의 온도변화를 관측하기 위해 y축 방향 200mm 간격으로 2개의 온도센서 판을 설치했다.

Fig. 1(c)는 1개의 온도센서 판에 온도센서의 배치를

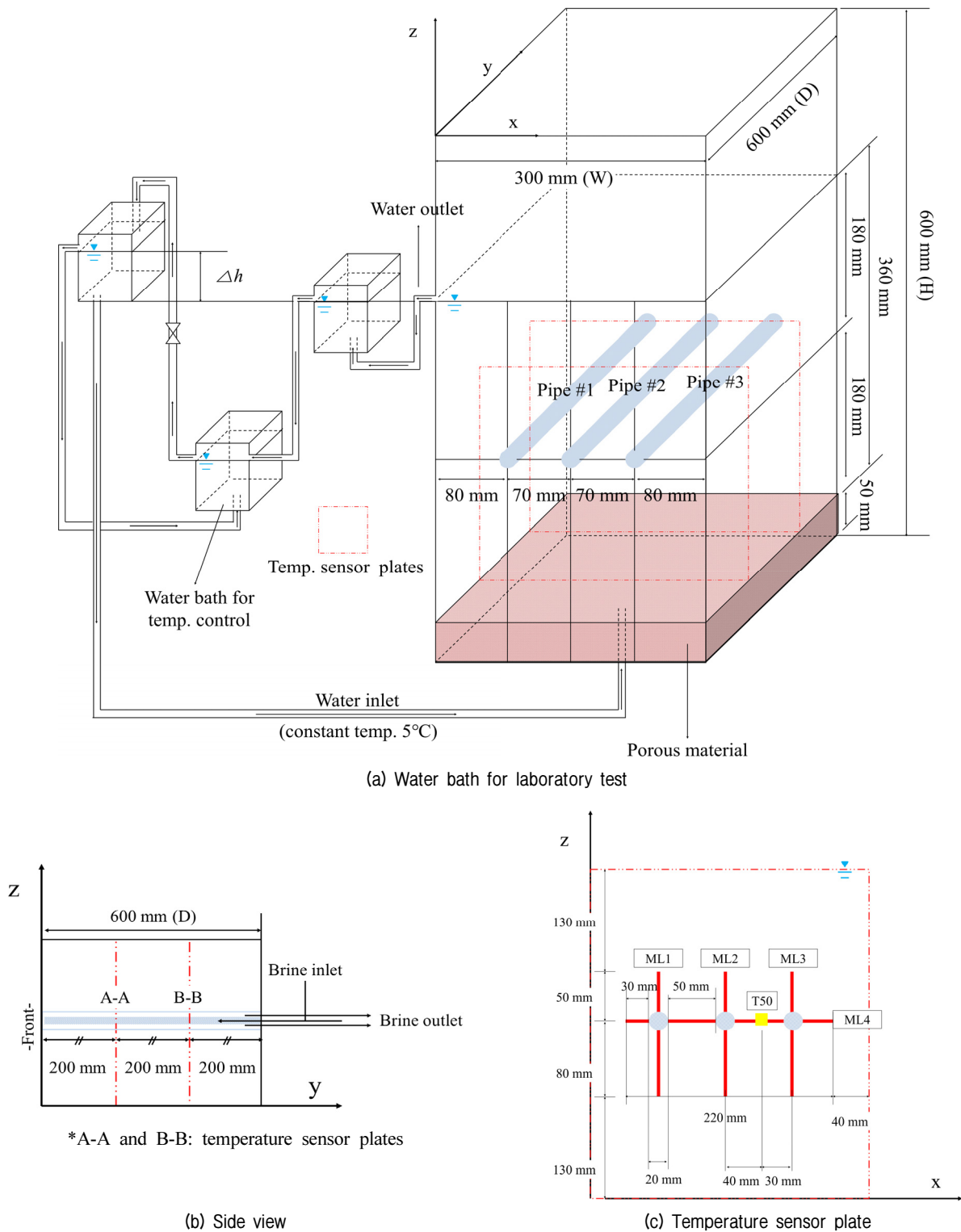


Fig. 1. Schematic diagram of laboratory testing system for artificial freezing

개략적으로 보여주고 있다. 동결관 중심으로부터 10mm 간격으로 상부로 4개, 하부로 8개 총 12개의 온도센서를 각 동결관마다 수직선상 온도 관측지점을 설치하였다. 이를 통해 각각의 온도센서 판에 설치된 수직위치별 온도센서로 측정되는 2개의 평균값을 왼쪽부터 차례대

로 ML1, ML2, ML3으로 명명하였다. 또한 3개의 동결관 중심과 동일한 높이에서 수평방향으로 20개의 온도센서를 10mm 간격으로 설치해 수평선상 온도 관측지점을 설정하고 이를 통해 측정되는 2개의 온도센서 판의 평균값을 ML4로 명명하였다. 또한 얼음벽체 형성을

판단하기 위한 2개의 동결관(pipe #2 및 pipe #3) 사이 중간지점을 T50으로 명명하였다.

### 3. 인공동결을 모사하기 위한 열-수리 해석

#### 3.1 질량보존방정식(Mass balance equation)

일반적으로 지반의 동결과정을 모사하기 위해서 몇 가지 가정 사항이 필요하다. 본 연구에서는 완전히 포화된 지반을 흙 입자와 물, 얼음으로 이루어진 3상 구조로 간주하였고, 국부적인 온도평형상태를 가정하였다. 이에 대한 질량보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}(\rho_i \theta_i) + \frac{d}{dt}(\rho_w \theta_w) + \rho_w \nabla \cdot q = 0 \quad (1)$$

여기서,  $t$ 는 시간,  $\theta_i$  및  $\theta_w$ 는 각각 얼음과 간극수의 온도변화에 따른 체적함수비를 나타내며,  $\rho_i$  및  $\rho_w$ 는 각각 얼음과 간극수의 밀도( $\text{kg/m}^3$ )를 나타낸다. 간극수에 대한 체적함수비  $\theta_w$ 는 시편 재료의 종류에 따라 곡선의 형태가 달리 결정된다.  $q$ 는 비동결 영역에서의 지하수 유량을 의미하며, 식 (2)에 의해 계산된다.  $\nabla$ 는  $(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$ 로 표현되는 벡터연산자이다.

$$q = -k_{vir} k_{rel} \left( \frac{\nabla p}{\rho_w g} + g \right) \quad (2)$$

여기서,  $k_{vir}$ 는 가상통수능계수( $\text{m/s}$ ),  $k_{rel}$ 는 온도의 함수로 표현되는 상대통수능(무차원),  $p$ 는 간극수압( $\text{Pa}$ ),  $g$ 는 중력가속도( $\text{m/s}^2$ )를 의미한다.

본 연구에서는 지반동결 해석에 앞서 순수한 물에 대한 동결 해석을 우선적으로 수행하였다. 지반 내 물 흐름이 아닌 순수한 물에 대한 흐름을 모사할 경우 Laminar flow 모델을 적용하는 것이 이론적으로 부합하지만, 본 연구에서 다루고 있는 유속의 크기가 매우 작으며 향후 지반동결모델링으로의 확장성을 고려할 때 Darcy 법칙을 사용하는 것이 유용할 것으로 판단하였다. Darcy 법칙의 주요 파라미터인 가상통수능계수(Virtual discharge capacity)는 동일 수두조건에 대한 실험데이터와의 유속 비교를 통해 역계산하였다.

#### 3.2 에너지보존방정식(Energy balance equation)

지반 동결에 따른 온도변화를 산정하기 위해 다음과 같이 에너지보존방정식이 사용되었다.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} - L \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \rho_i + \nabla(-\lambda \nabla T) + \rho_w C_w q \nabla T = 0 \quad (3)$$

여기서,  $T$ 는 온도(K)이며,  $L$ 은 물의 단위질량당 잠재용해열( $\text{kJ/kg}$ )을 의미한다. 식 (3)의 두 번째 항은 동결시 간극수의 상변화로 인한 에너지 방출을 나타내며, 마지막 항은 Fourier 법칙에 따른 전도에 의한 에너지 전달을 나타낸다.  $C$ 는 동결토의 유효 열용량,  $\lambda$ 는 동결토의 유효 열전도도( $\text{W/m/K}$ )를 나타내는데 각각 식 (4) 및 식 (5)로부터 계산된다.

$$C = (1-n)\rho_s C_s + \theta_w \rho_w C_w + \theta_i \rho_i C_i \quad (4)$$

$$\lambda = \lambda_s^{\theta_s} \lambda_w^{\theta_w} \lambda_i^{\theta_i} \quad (5)$$

여기서,  $n$ 은 지반의 간극률, 아래첨자  $s$ ,  $w$ ,  $i$ 는 각각 흙입자, 간극수, 그리고 얼음을 의미한다.

#### 3.3 경계조건 및 초기조건(Boundary and initial condition)

본 연구에서 제작한 인공동결 실험장비는 Fig. 1과 같이 3차원 형상이지만,  $y$ 축 방향에 따른 관측 결과에 큰 차이가 없음이 확인되었고 이에 따라 수치해석 모델은 해석의 효율성을 위해 2차원으로 구현하였다. 초기조건은 정수압(Hydrostatic)상태로 간주하였고, 하부에서 상부로 흐르는 물의 흐름을 구현하고자 상·하부 사이에 일정한 수두차를 유지하였다. 3개 파이프에서 측정된 온도를 경계 온도조건(Dirichlet boundary condition)으로 부여하였고, 하단은 초기온도와 동일한 온도로 일정하게 유지하였다. 또한, 메인수조의 벽면 및 상단은 단열조건(Zero flux condition)으로 설정하였다. 상기 기술된 구성방정식 및 경계조건을 적용하기 위해 상용 수치해석 코드인 COMSOL Multiphysics PDE module을 이용하였다(Comsol Inc, 2020). 해석에는 총 6758개의 삼각 요소망(triangular mesh)이 사용되었고 모델에 사용된 재료물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Material properties for numerical simulation

| Properties                 | Symbol      | Value    | Unit              |
|----------------------------|-------------|----------|-------------------|
| Porosity                   | $n$         | 1        |                   |
| Virtual discharge capacity | $K_{vir}$   | 3.85E-05 | m/s               |
| Initial density            | $\rho_w$    | 1000     | kg/m <sup>3</sup> |
|                            | $\rho_i$    | 917      | kg/m <sup>3</sup> |
| Heat capacity              | $C_w$       | 4200     | J/(kg·K)          |
|                            | $C_i$       | 2100     | J/(kg·K)          |
| Thermal conductivity       | $\lambda_w$ | 0.6      | W/(m·K)           |
|                            | $\lambda_i$ | 2.2      | W/(m·K)           |
| Latent heat of fusion      | L           | 3.33E05  | J/kg              |

## 4. 결과 분석

### 4.1 인공동결실험 및 해석결과

본 연구에서는 열-수리 연계해석모델을 통해 순수한

물에 대한 인공동결해석을 수행하였고 그 결과를 실내 모형실험 결과와 비교하였다. 흐름이 있는 순수한 물에 대한 동결 해석을 수행하고자 기 제안된 구성방정식에서 지반의 간극률을 1로 간주하여 해석을 수행하였다. 실험 및 해석은 2가지 유량(유량 0.2L/min, 0.3L/min)에 대해서 진행되었고, 파이프 및 바닥 경계면에 적용된 온도조건은 Fig. 2와 같다. 바닥경계면으로부터 일정한 온도와 유량의 물이 지속적으로 유입되는 조건이기 때문에 바닥 경계면의 온도는 일정하게 유지하였다.

Fig. 3은 Fig. 1(c)에 도시된 각 수직선상 관측지점(ML1, ML2, ML3)에 대한 온도분포를 나타내는데 해석 결과가 대체적으로 실험결과를 합리적으로 예측함을 알 수 있다. 단, 동결 초기에 파이프 상부 영역에서 수치해석이 동결진행을 과잉 예측하는 경향을 보였는데, 이

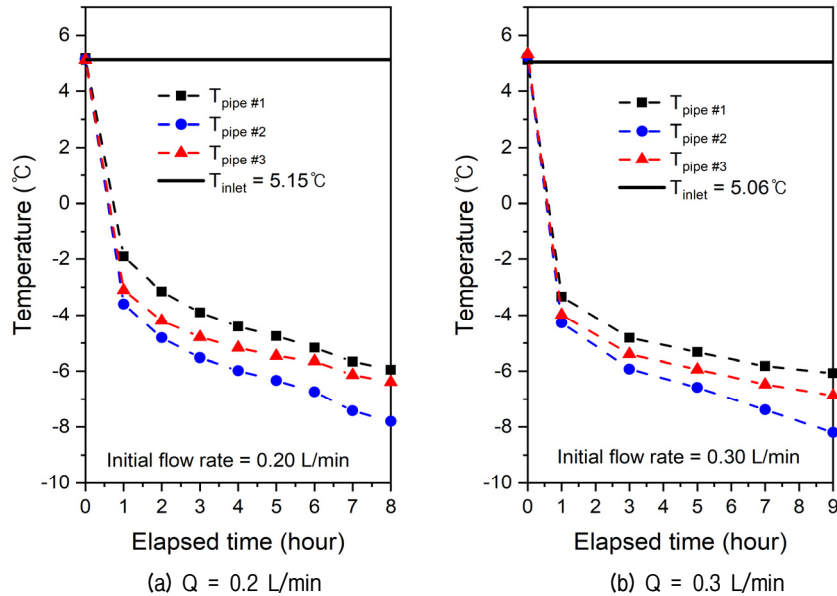


Fig. 2. Temperature boundary conditions at pipes and bottom lines for different flow rates

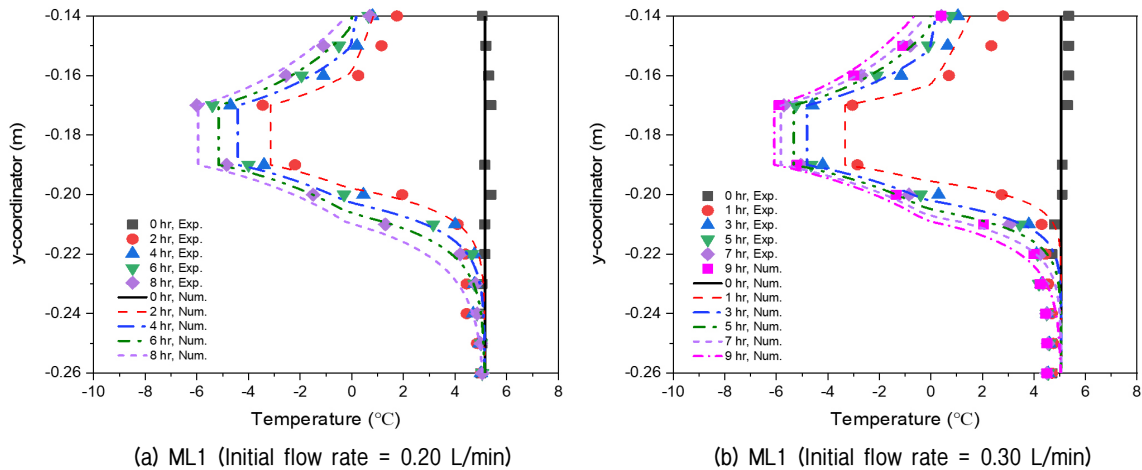


Fig. 3. Temperature profiles (ML1, ML2, and ML3) during artificial freezing tests

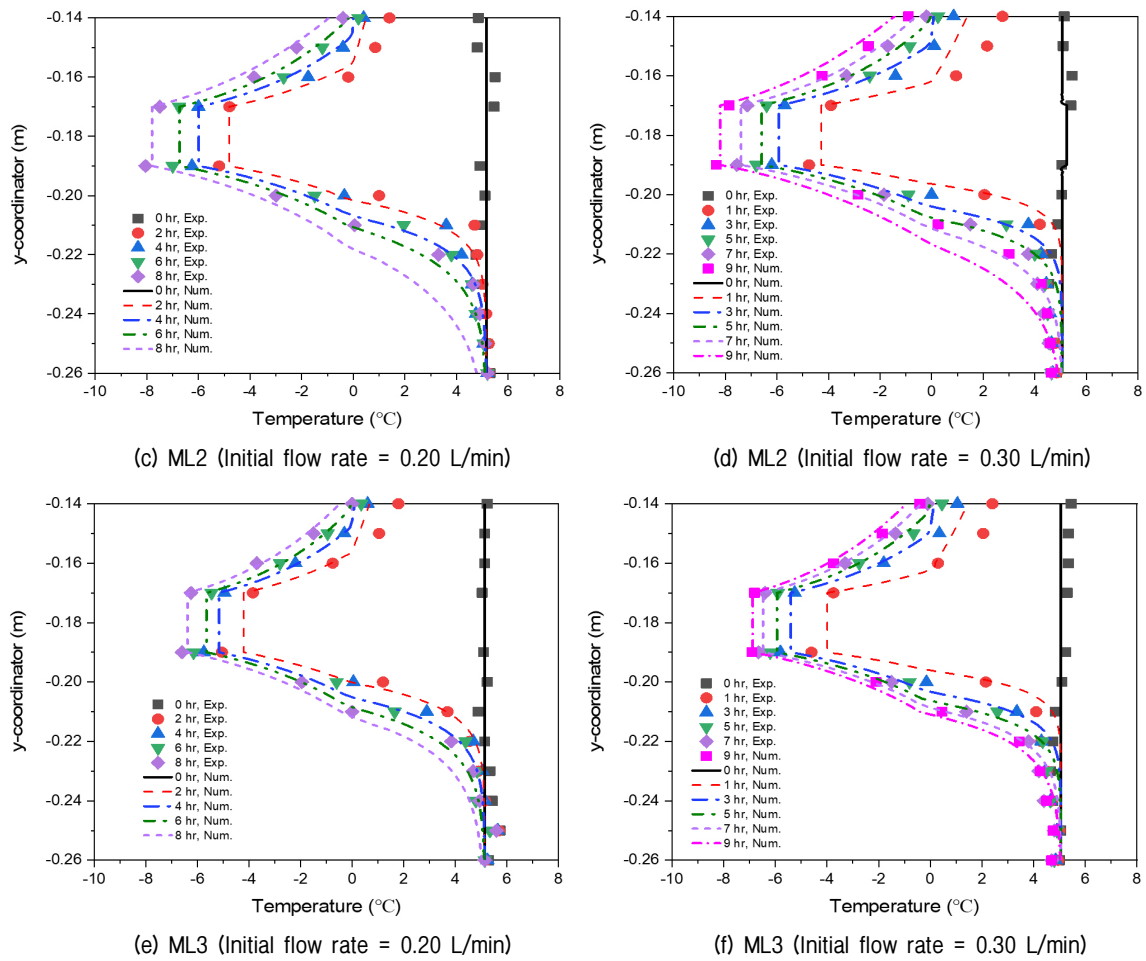


Fig. 3. Temperature profiles (ML1, ML2, and ML3) during artificial freezing tests (Continued)

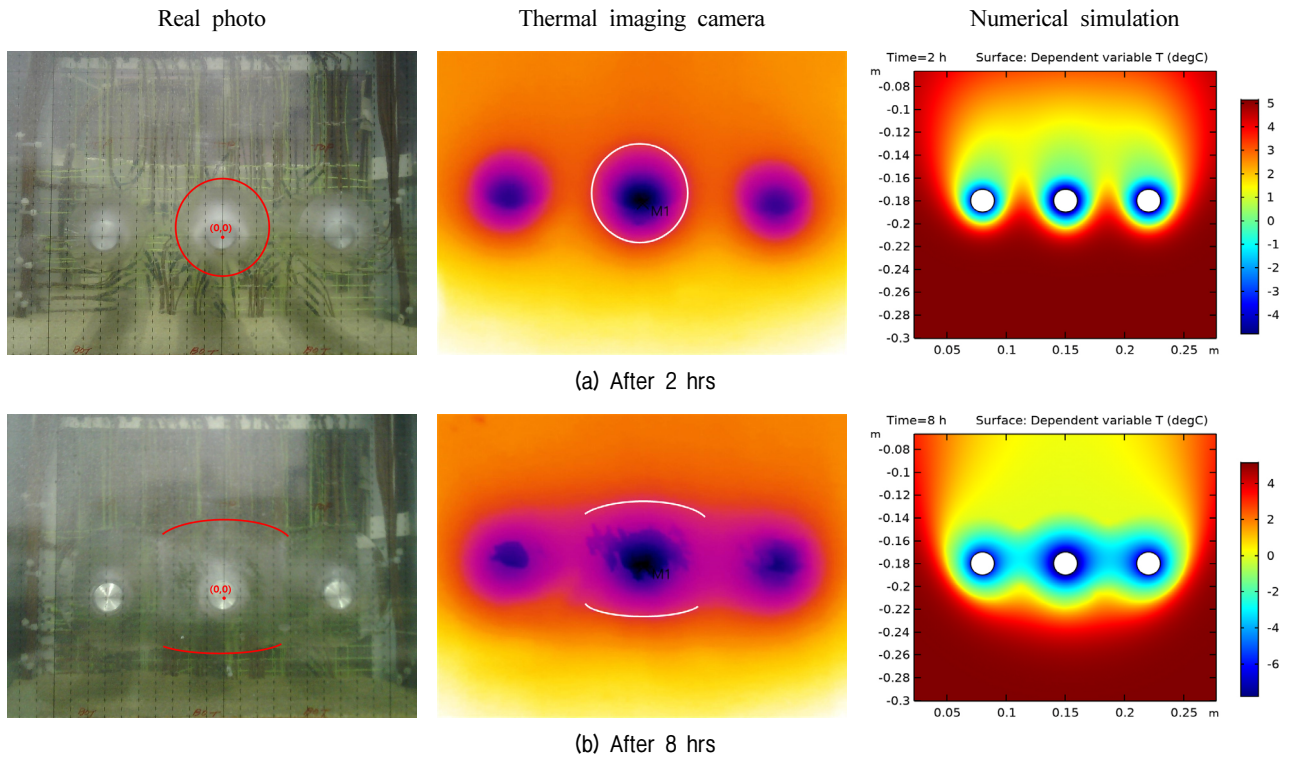


Fig. 4. Transient ice wall formations during artificial freezing (initial flow rate = 0.2 L/m)



는 수치해석 시 해석단면의 상부 경계는 완전한 단열 조건이 부여된 반면 실험적으로는 상부에 여유 공간에 남아 있는 공기로 인해 완전한 단열 조건에 부합하지 않기 때문에 해석과 실험간 온도편차가 나타난 것으로 사료된다. 바닥 경계면을 일정한 온도로 유지시킴으로 인하여 동결파이프 기준으로 상부의 온도구배가 크고

하부 온도구배가 완만한 비대칭적인(non-symmetric) 온도분포를 나타내고 있는데, 바닥 경계면에서의 연속적인 열에너지 공급으로 인해 동결관 하부 영역의 냉각에 상당한 영향을 받음을 알 수 있다.

Fig. 4는 동결진행에 따른 동결구근 및 얼음벽체 형성 과정에 대해 실사, 열화상카메라(측정가능 온도범위:

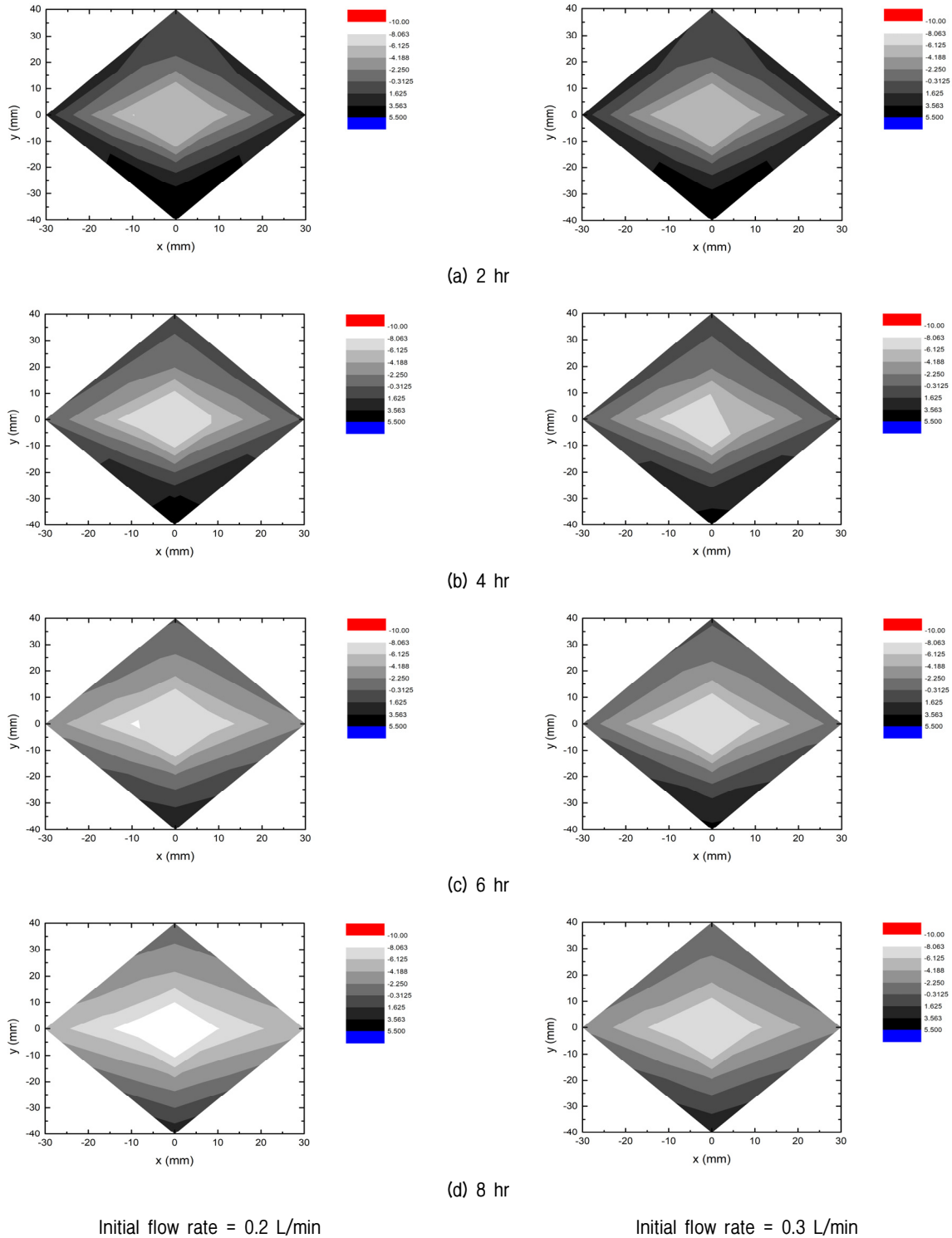


Fig. 5. Heat map near pipe #2

-30℃ ~ 100℃, 정확도: 측정값의  $\pm 2\%$ ), 수치해석 결과를 각각 제시하고 있다. 메인수조 내에서 발생하고 있는 물 흐름으로 인해 동결이 진행됨에 따라 형성되는 동결구근이 비대칭적인 타원형 모양으로 확장되는 양상이 실사, 열화상카메라, 수치해석 결과에서 모두 확인되었다. 보다 정밀한 동결구근 형상을 확인하기 위해 동결관(Pipe #2)의 ML2와 ML4의 온도데이터 일부분을 발췌하여 확인하였다(Fig. 5). 시간이 지남에 따라 하부에 비해 상부가 더 넓게 확장되어 나감을 확인할 수 있었을 뿐 아니라 유량이 작을수록 동결구근 확장 속도가 더 빠르게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 6은 두 번째 동결관(Pipe #2)과 세 번째 동결관(Pipe #3) 사이의 관측지점 T50에서의 시간에 따른 온도 변화를 보여준다. 그래프에서 실험과 해석결과 모두 거

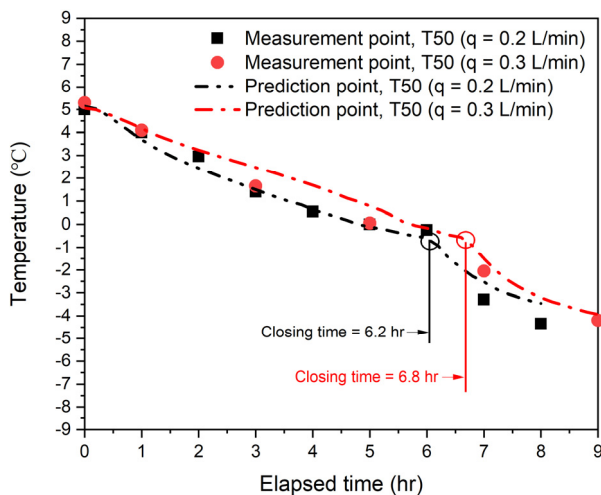


Fig. 6. Comparison between experimental and numerical results for the closing time

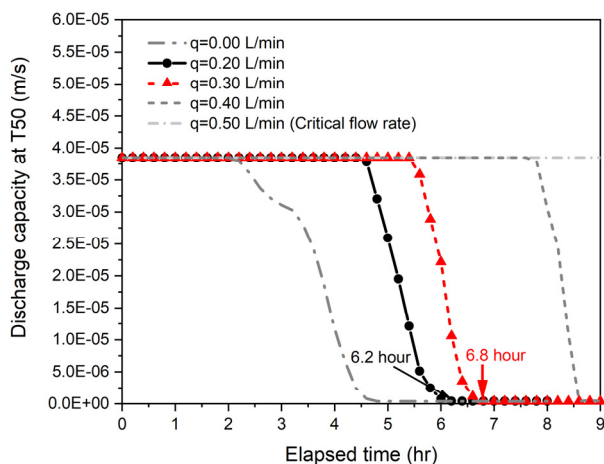


Fig. 7. Discharge capacity coefficient change due to artificial freezing

의 동일한 시각에서 온도변화에 대한 변곡점이 나타났는데, 이 시점이 두 개의 동결구근이 하나의 벽체로 서로 연결되는 시점(closing time)이라 판단된다. 왜냐하면 동결 초기에는 동결구근 사이로 국부적으로 빠른 유량이 형성되어 구근이 연결되기까지 많은 시간이 소요되지만, 동결구근들이 연결되어 얼음벽체가 형성되면 방해요소로 작용하던 물의 흐름 영향이 제거되어 온도하강 및 얼음벽체 확장이 가속화되기 때문이다. 이러한 사실은 인접한 동결관 사이에서 계속된 온도 데이터만으로 얼음벽체 형성 시작 시점을 간접적으로 확인할 수 있음을 시사하며, 동결벽체 형성을 육안으로 관측하기 어려운 지반 인공동결 실험에서 동결벽체 형성 시작 시점을 간접적으로 예측하는데 활용될 수 있다. Fig. 7은 T50에서의 통수능계수(Discharge capacity coefficient)에 대한 수치해석 결과이며 Fig. 6에서 변곡점이 나타난 시점과 동결구근이 서로 연결되어 통수능계수가 0에 수렴하는 시점이 정확히 일치함을 보여준다. 또한, 임계유량에 가까운 유량조건이 될 경우, 동결이 지속되어도 벽체형성이 항구적으로 불가능하다는 사실을 보여준다. 따라서 인공동결공법을 적용하기 전 대상지반에 존재하는 지하수 유량에 대한 면밀한 검토와 수치해석을 통한 임계유량 예측이 필수적으로 요구된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 물의 흐름을 고려한 인공동결 시스템에서 동결관 사이 얼음벽체 형성 과정을 해석적으로 정밀하게 예측하기 위한 열-수리 연계해석모델을 제안하고 이를 실험적으로 검증하였으며 그 과정에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 본 연구에서 제안된 수치해석 모델은 물의 흐름을 고려한 인공동결 과정을 합리적으로 예측하고 있으며, 물의 흐름이 존재하는 경우 물 흐름의 반대방향에서 동결구근이 빠르게 확장되어 타원형 모양으로 동결구근이 성장한 후 얼음벽체를 형성한다는 것을 실험적·수치해석적으로 확인하였다. 또한, 얼음벽체의 형성 시점은 유량이 증가할수록 지연됨을 알 수 있었다.
- (2) 본 연구에서는 인접한 두 개의 동결관 중간지점의 온도하강곡선 상에서 변곡점이 나타난 시점과 두 개의 동결구근이 서로 연결되는 시점이 서로 일치한다



는 것을 실험 및 해석을 통해 확인하였다. 이러한 사실은 인접한 동결관 사이에서 예측된 온도 데이터만으로 얼음벽체 형성 시작 시점을 간접적으로 확인할 수 있다는 것을 시사한다.

- (3) 본 연구는 포화된 지반이 아닌 순수한 물을 대상으로 동결실험을 수행하였기 때문에 물 흐름에 대한 영향을 과대평가할 수 있는 우려가 존재하지만, 물을 사용함으로써 얼음벽체 형성을 가시적으로 확인이 가능하여 수치해석결과와의 정확성을 더욱 면밀히 검증할 수 있었고, 이를 통해 얼음벽체 형성 시점을 간접적으로 유추할 수 있는 방안을 제시했다는 점에서 향후 지반 인공동결공법 관련 연구에 활용될 요소가 많을 것으로 판단된다.
- (4) 임계유량에 가까운 유량 조건에서는 동결 지속시간에 상관없이 얼음벽체가 형성되지 않은 채 정상상태에 도달한다. 따라서 인공동결공법 적용 대상 지반에 존재하는 지하수 유량에 대한 면밀한 검토와 정확한 임계유량 예측을 통해 지반 인공동결공법 적용의 효율성을 사전에 평가하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음 (202002090001).

## 참고문헌 (References)

1. Alzoubi, M.A., Madiseh, A., Hassani, F.P., and Sasmito, A.P. (2019), "Heat Transfer Analysis in Artificial Ground Freezing under High Seepage: Validation and Heatlines Visualization", *Int. J. of Thermal Sciences*, Vol.139, pp.232-245.
2. Andersland, O.B. and Ladanyi, B. (2004), "Frozen ground engineering (Second edition).", John & Wiley Sons.
3. Comsol Inc, Comsol Multiphysics User's Manual Ver. 5.5, 2020. USA.
4. Crippa, C. and Manassero, V. (2006), "Artificial Ground Freezing at Sophiaspoortunnel (The Netherlands). Freezing Parameters: Data Acquisition and Processing", *Proceeding of GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age, Civil Engineering in the Arctic Offshore*, Atlanta, pp.1-6.
5. Han, L., Ye, G., Li, Y., Xia, X., and Wang, J. (2016), "In Situ Monitoring of Frost Heave Pressure during Cross Passage Construction Using Ground-freezing Method", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.53, pp.530-539.
6. Huang, S., Guo, Y., Liu, Y. Ke, L., Liu, G., and Chen, C. (2018), "Study on the Influence of Water Flow on Temperature Around Freeze Pipes and its Distribution Optimization during Artificial Ground Freezing", *Applied Thermal Engineering*, Vol.35, pp.435-5.
7. Tuksu (2007), "Research on the Development of Design and Construction Techniques of Artificial Ground Freezing to Construction Application", *Tuksu Engineering & Construction, Report RPO3398*, Korea.
8. Lao, L., Ji, Z., Huang, L., and Li, S. (2017), "Research on the Temperature Field of a Partially Freezing Sand Barrier with Groundwater Seepage", *Sciences in Cold and Arid Regions*, Vol.9, pp. 280-288.
9. Li, Z., Chen, J., Sugimoto, M., and Ge, H. (2019), "Numerical Simulation Model of Artificial Ground Freezing for Tunneling under Seepage Flow Conditions", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.92, 103035.
10. Marwan, A., Zhou, M., Abdelrehim, M.Z., and Meschke, G. (2016), "Optimization of Artificial Ground Freezing in Tunneling in the Presence of Seepage Flow", *Computers and Geotechnics*, Vol.75, pp.112-125.
11. Papakonstantinou, S., Anagnostou, G., and Pimentel, E. (2013), "Evaluation of Ground Freezing Data from the Naples Subway", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, Vol.166, Issue. GE3, pp.280-298.
12. Pimentel, E., Papakonstantinou, S., and Anagnostou, G. (2012a), "Numerical Interpretation of Temperature Distributions from Three Ground Applications in Urban Tunnelling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.28, pp.57-69.
13. Pimentel, E., Sres, A., and Anagnostou, G. (2012b), "Large-scale Laboratory Tests on Artificial Ground Freezing under Seepage-flow Conditions", *Geotechnique*, Vol.62, No.3, pp.227-241.
14. Shin, H., Kim, J., and Lee, J. (2018), "Effect of Groundwater Flow on Ice-wall Integrity", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No.11, pp.43-55.
15. Vitel, M., Rouabhi, A., Tijani, M., and Guerin, F. (2016), "Modeling Heat and Mass Transfer During Ground Freezing Subjected to High Seepage Velocities", *Computers and Geotechnics*, Vol.73, pp.1-15.
16. Yang, X., Ji, Z., Zhang, P., and Qi, J. (2019), "Model Test and Numerical Simulation on the Development of Artificially Freezing Wall in Sandy Layers Considering Water Seepage", *Transportation Geotechnics*, Vol.21, 100293.

Received : August 24<sup>th</sup>, 2020

Revised : September 15<sup>th</sup>, 2020

Accepted : September 15<sup>th</sup>, 2020