

열 사이펀의 열전도율 산정을 위한 수치해석 모델 개발

Development of Numerical Analysis Model for the Calculation of Thermal Conductivity of Thermo-syphon

박 동 수¹ Park, Dong-Su

신 문 범¹ Shin, Mun-Beom

서 영 교² Seo, Young-Kyo

Abstract

The areas consisting of frost susceptible soils in cold regions, such as the Arctic area, have problems of frost heave and thaw settlement due to the seasonal air temperature changes and internal temperature of installed structures. Ground stabilization methods for preventing frost heave and thaw settlement of frost susceptible soils include trenching, backfilling and thermo-syphon. The thermo-syphon is the method in which refrigerant can control the ground temperature by transferring the ground temperature to atmosphere in the form of two-phase flow through the heat circulation of the internal refrigerant. This numerical study applied the function of these thermo-syphon as the boundary condition through user-subroutine coding inside ABAQUS and compared and analyzed the temperature results of laboratory experiments.

요 지

북극권과 같은 한대지역의 동상민감성 지반은 계절적 대기 온도 변화 및 설치된 구조물의 온도에 의해 지반의 융기 및 침하 문제가 존재한다. 이러한 동상민감성 지반의 융기 및 침하 방지를 위한 지반안정화 공법으로는 매립 및 치환공법, 열 사이펀 등이 존재한다. 여기서 열 사이펀이란 내부 냉매의 증발, 응축을 반복하며 열 순환을 통해 이상 유동(two-phase flow)의 형태로 냉매가 지반의 온도를 외부로 전달하여 지반 온도를 조절 할 수 있는 공법이다. 본 연구는 이러한 열 사이펀의 성능을 열전도율로 수치화하기 위하여 ABAQUS 내부의 User-subroutine 코딩을 통해 열 사이펀을 지중의 한 열원으로 간주, 경계조건으로 적용시켜 기존 문헌의 열 사이펀 실내모형실험의 온도분포 결과와 비교하여 산정하였다.

Keywords : Frost susceptible soil, Ground stabilization methods, Thermo-syphon, Unfrozen water content, User-subroutine

1 정회원, 한국해양대학교 해양과학기술융합학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Korea Maritime and Ocean Univ.)

2 정회원, 한국해양대학교 해양공학과 교수 및 해양과학기술융합학과 겸임교수 (Member, Prof., Dept. of Ocean Engrg., Korea Maritime and Ocean Univ. & Adjunct Prof., Dept. of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Korea Maritime and Ocean Univ., Tel: +82-51-410-4683, yseo@kmou.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 지구 온난화로 북극권 수송여건이 크게 개선됨에 따라 인접국들의 국가 차원 자원개발 및 인프라 건설 사업이 활발히 추진 중이다. 북극권과 같은 한대지역의 동상민감성 지반은 영구적으로 얼어있는 영구동토 혹은 계절적 온도 변화에 따라 동결 및 융해가 반복되는 계절동토로 구성되어 있다(Esch, 2004). 여기서 동결 시 발생하는 지반의 융기는 지반 내 공극수가 동결되어 공극빙 및 아이스렌즈 형성에 기인한 부피증가로 인한 현상이며, 반대로 융해 시 발생하는 지반의 침하의 경우 형성되어 있던 공극빙 및 아이스렌즈의 융해에 의한 부피감소로 인한 현상이다. 이러한 동상민감성 지반의 융기 및 침하는 수송배관의 좌굴, 포장 지역의 침식 등 설치된 구조물의 구조적 안정성 문제를 야기한다(Li et al., 2019).

따라서 지반의 동결특성과 더불어 지반의 동상을 방지하기 위한 지반 안정화 공법들이 연구되어왔으며 대표적으로 매립 후 동상방지재 사용, 열 사이펀(thermosyphon) 등이 있다. 여기서 열 사이펀이란 열 사이펀 내부의 냉매가 지중의 열을 흡수하여 기체 상태로 증발, 차가운 외기온도로 인해 다시 액체로 응축하는 메커니즘을 가지며 지중과 대기의 온도차로 작동하는 구조체이다(Andersland and Ladanyi, 2004).

열 사이펀의 작동원리는 내부 냉매의 이상 유동(two-phase flow)에 의해 정의 할 수 있으며 전산유체역학(CFD)을 통한 열 사이펀 모사 연구들이 이루어져 왔다. 전산유체역학을 통한 열 사이펀 모사에 관한 연구는 대표적으로 Alizadehdakheel et al.(2010), Fadhl et al.(2013), Jafari et al.(2017) 등이 있다. 해당 연구들은 Fluent를 이용한 이상 유동모델로 열 사이펀을 모사하였으며 다양한 열 흐름율(heat flow rate, W) 및 냉매의 충전율 변화에 대한 해석을 실시, 실내모형실험결과와 비교분석하였다. 열 사이펀의 전산 유체역학을 통한 모사의 경우 이상 유동의 복잡한 계산이 동반되므로 막대한 수치해석 시간이 요구된다. 따라서 열 사이펀 적용에 따른 지반의 융기 및 침하 해석의 경우 열 사이펀 내부의 유동 특성을 고려하지 않고 열 사이펀을 하나의 열 전도체로 간소화 한 연구들이 진행되어왔다.

대표적인 연구는 Xu et al.(2011), Abdalla et al.(2015), Abdalla et al.(2016)로 ABAQUS를 이용하여 지반을 모델링, 열 사이펀의 경우 사용자 서브루틴으로 열 사이펀 내부의 열 유속(heat flux)의 방향에 따라 열전도율을 부

여하는 방식으로 구현하였다. 해당 연구들은 이러한 방법으로 열 사이펀의 개수, 배치방법에 따라 수송배관 주변 지반의 온도차이, 융기 차이 등을 비교 분석하였다. 하지만 해당 연구들에서 구현한 열 사이펀의 경우 정확한 열전도율을 필요로 하지만 정확한 열전도율 대신 높은 열전도율을 부여하여 해석을 실시하였다. 또한 실증 실험과의 비교연구는 진행되지 않았다.

열 사이펀의 열전달 성능은 각각의 연구마다 해당 열 사이펀에 대해 저항의 단위로 표시하거나 단위길이, 단위면적당 전도도로 표시한다(Jang et al., 2014). 이러한 열 사이펀의 열전달 성능을 수치 해석적으로 도출하기 위한 연구들이 진행되어왔다. 대표적으로 Jang et al.(2014), Lee et al.(2014)은 열 사이펀을 경계조건으로 부여할 수 있는 Temp/w 프로그램을 통해 열 사이펀의 열전도율을 변화시켜 도출한 지반의 온도분포와 실내실험을 통해 도출한 지반 온도분포를 비교하여 해당 열 사이펀의 성능을 도출하였다. 하지만 Temp/w의 경우 지반의 열전달 해석만 가능하며 열전달에 따른 융기 및 침하에 대한 해석을 할 수 없다.

따라서 추후 지반의 융기 및 침하 해석을 수행 할 수 있는 FEM 프로그램을 이용한 열전달 해석을 선 수행 할 필요가 있다. 그러므로 본 연구에서는 FEM 프로그램 툴인 ABAQUS를 통해 열 사이펀을 적용, 기존 문헌의 실내모형실험 결과와 비교하였다. ABAQUS는 열전달에 따른 지반의 융기 및 침하 해석을 동시에 적용할 수 있지만 본 연구는 기존 문헌의 지반이 동상민감성 지반이 아닌 사질토에 대한 결과이므로 이를 고려하지 않았다. 열 사이펀의 경우 기존 문헌의 열 유속에 따른 열전도율을 부여하는 방식이 아닌 열 사이펀을 모델링 하지 않고 지반과의 접촉면에 경계조건으로 부여하는 방식을 사용하였으며 이는 ABAQUS 프로그램 내부 사용자 서브루틴인 DFLUX를 코딩하여 적용하였다. 또한 본 연구에서는 포화토인 지반의 구성요소인 흙, 공극수, 공극빙의 체적분율에 따른 물성 변화 등을 적용시키기 위해 사용자 서브루틴 UMATHT를 코딩하여 적용하였으며 외기온도 및 지반 온도결과를 토대로 열 사이펀의 열전달을 구현하였다.

2. 열 사이펀 원리 및 기존 실내모형실험 연구

2.1 열 사이펀 원리 및 열 사이펀 내부 냉매

일반적인 two-phase closed 열 사이펀의 작동 원리는

Fig. 1과 같다. 먼저 지중의 높은 온도의 열로 인하여 Evaporator section에서 열 사이펀 내부의 액체상태 냉매가 증발하여 기체 상태로 변화한다. 다음으로 기체상태의 냉매는 Evaporator section과 Condenser section의 압력차로 인하여 Adiabatic section으로 이동한다. Condenser section에서 외기의 낮은 온도로 인하여 기체상태의 냉매는 열을 방출하며 액체 상태로 응축되며 마지막으로 Adiabatic section을 통해 Evaporator section으로 재 이동 한다(Sabharwall, 2009).

열 사이펀 내부 냉매의 경우 열 사이펀 성능을 결정하는 가장 중요한 인자로 저온에서 열 수송이 가능한 암모니아, 프레온계 냉매, CO_2 등이 있으며 Table 1에 나타내었다(Kang et al., 2012). 열 사이펀 내부 냉매는 초기 현장에 적용될 때 암모니아와 프레온계 냉매가 주로 활용되었으나 현재 환경오염 유발 가능성에 대한 문제로 CO_2 , $R-123_a$ 를 냉매로 주로 사용하는 추세이다(Kang et al., 2012).

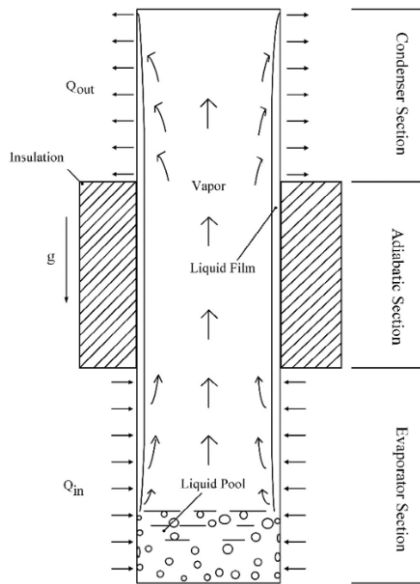


Fig. 1. Schematic of the two-phase closed thermo-syphon (He et al., 2017)

2.2 기존 실내모형실험 연구

기존 문헌(Jang et al., 2014; Lee et al., 2014)의 실내 모형실험에서 사용된 열 사이펀의 제원은 Fig. 2와 같다. 열 사이펀은 수직 형태의 two-phase closed 열 사이펀으로 길이 0.5m, 외경 0.033m으로 제작되었다. Fig. 2(a)와 같이 기존연구에서는 열 사이펀 냉매 충전율을 100%, 50%, 25%로 설정하여 실험하였다. 열 사이펀 내부 냉매의 경우 프레온 계열 중 친환경적인 냉매로 최근 들어 활용도가 높아지고 있는 $R-123_a$ 를 사용하였다.

동결 지반 모사를 위한 토조의 경우 Fig. 2(b)와 같이 가로, 세로, 길이가 각각 0.6m, 0.6m, 0.5m로 제작하였으며 토조 측면 및 바닥의 단열을 위해 0.01m의 스티로

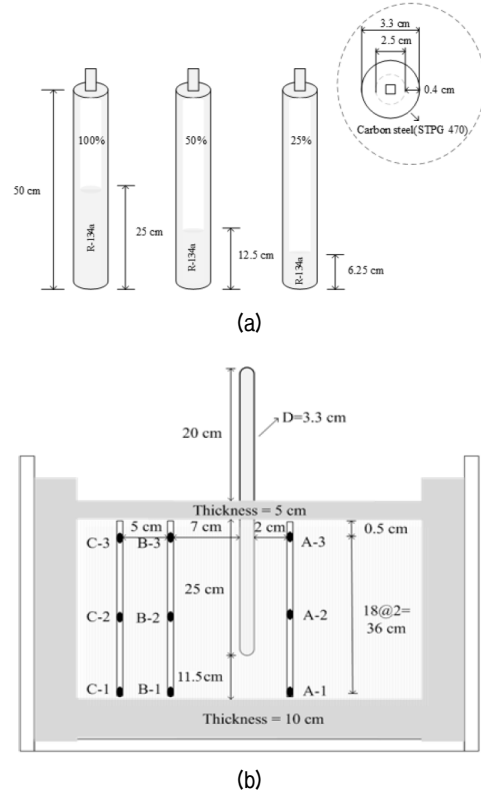


Fig. 2. (a) Thermo-syphons with different filling ratio, (b) Apparatus of laboratory experiments (Lee et al., 2014)

Table 1. Characteristic of refrigerants for thermo-syphon (Kang et al., 2012)

Temperature range	Working fluid
-270 to -70°C	He , Ar , Kr , N , CH_4
-70 to 200°C	H_2O , Freon refrigerants, NH_3 , CH_3OH , CH_3COH_3 , C_2H_5OH , CO_2
200 to 500°C	$C_{10}H_8$, S , Hg
500 to 1000°C	Cs , K , Na
More than 1000°C	Li , Pb , Ag

폼으로 마감하였다. 또한 토조 상부의 지반 표면의 경우 열 사이펀의 Condenser section이 충분히 외기에 노출되도록 0.005m 두께의 스티로폼으로 마감하였다.

실내모형실험에 사용된 지반 시료는 통일분류법상 SP이며 59%의 상대밀도를 가진다. 해당 시료의 최대건조단위중량($\gamma_{d,max}$)은 $1,670\text{kg}/\text{m}^3$, 최소건조단위중량($\gamma_{d,min}$)은 $1,330\text{kg}/\text{m}^3$ 이다. 또한 공극비(e)는 0.73, 완전포화토로 구성하였다. 실내모형실험은 전 케이스 모두 흡 시료를 15°C 로 일정하게 조성한 후 온도를 강하여 최종적으로 평균온도가 영하 13.4°C 로 유지되고 지중 온도가 동일해지는 시기까지 온도변화를 측정하였다. 해석 케이스의 경우 실내모형실험은 열 사이펀이 없는 케이스와 열 사이펀의 냉매 충전율 100%, 50%, 25% 케이스 총 네 가지 케이스 해석을 실시하였으며 Fig. 2(b)와 같이 총 6개의 열전대를 두어 시간에 따른 온도를 측정하였다. 기존 연구는 Temp/w 프로그램의 결과와 실내모형실험의 온도분포 결과를 비교하여 냉매 충전율에 따른 열 사이펀의 성능(단위길이당 열전도율, W/mK)을 도출하였다.

3. 열 사이펀 열전도율 산정을 위한 수치해석 모델

본 연구에서 열 사이펀의 열전도율 산정을 위한 수치해석 모델의 내부 서브루틴의 구성 및 방법은 Fig. 3과 같다. 여기서 SDVINI은 초기 물성을 정의하기 위한 서

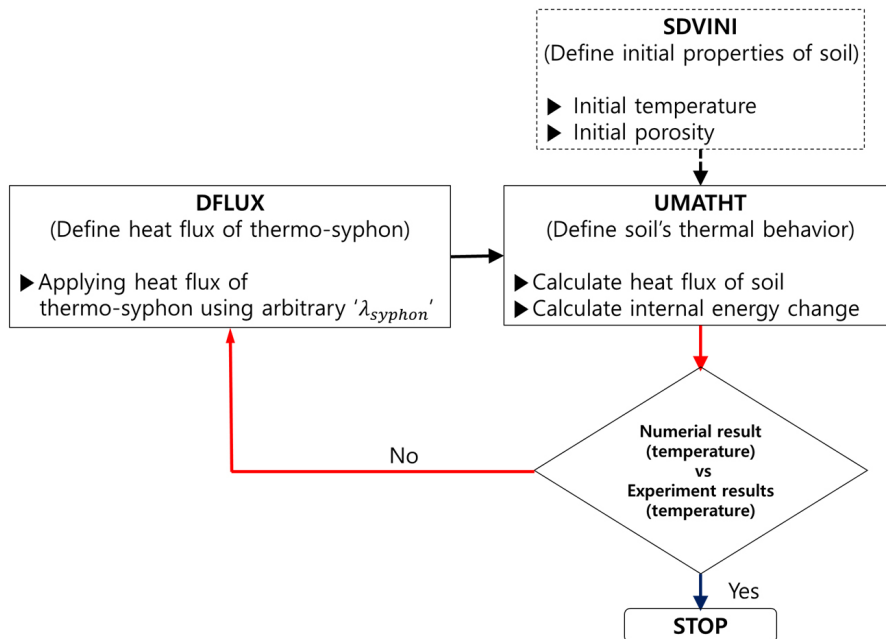


Fig. 3. Flow chart of user subroutine for finding thermal conductivity of thermo-syphon

브루틴이며 DFLUX 및 UMATHT의 자세한 설명은 3.2 및 3.3절에 기술하였다.

3.1 지반 동결에 따른 부동수분 적용

지반은 지반 종류에 따라 동결특성 즉, 지반 온도 감소에 따른 잔류 부동수분 변화 추세가 각각 다르다. 주로 굵은 입자를 가지는 자갈 혹은 모래의 경우 온도 감소에 따른 부동수분량은 급격하게 감소하지만 점토나 실트질 지반의 경우 부동수분 변화 추세가 완만한 곡선을 이루며 최종 수렴되는 부동수분도 모래나 자갈에 비해 큰 경향을 보인다(Anderson and Tice, 1973). 지반 종류에 따른 부동수분 감소 경향은 Fig. 4와 같다.

기존 문헌(Jang et al., 2014; Lee et al., 2014)의 실내모형실험 및 수치해석 연구에서는 해당 연구에 사용한

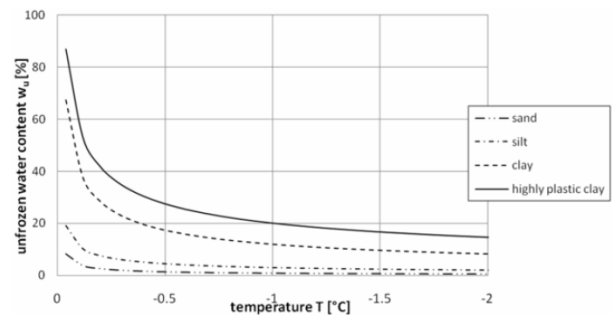


Fig. 4. Unfrozen water contents for different soil types (Ziegler et al., 2009)

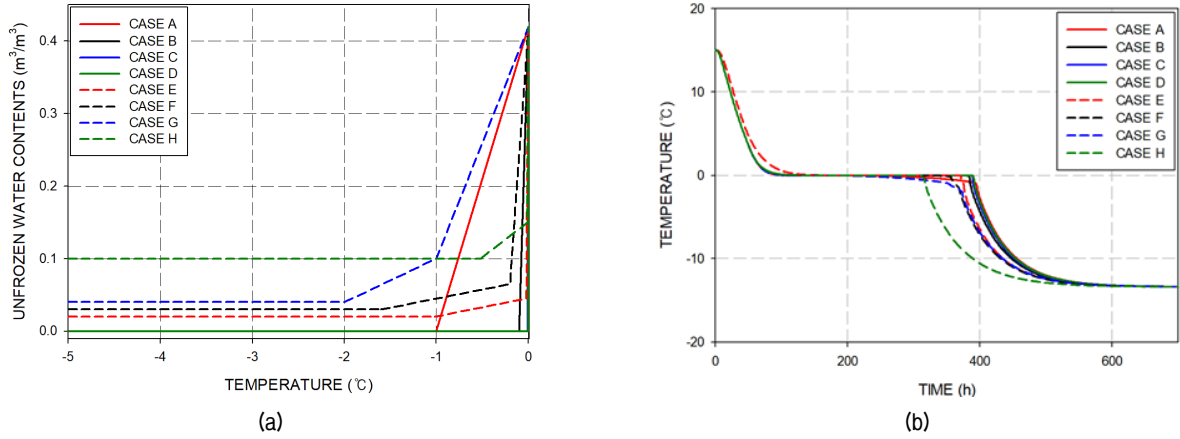


Fig. 5. Temperature results by variety of unfrozen water contents tendency, (a) unfrozen water contents tendency, (b) Temperature result by unfrozen water contents

지반 시료가 점토와 실트 함유량이 미미한 사질토이기 때문에 부동수분이 없다고 간주하였으며 부동수분 변화 추세에 대한 정보가 없다. 부동수분이 급격하게 감소 하더라도 감소 경향의 차이에 따라 Fig. 5와 같이 시간에 따른 온도 변화 차이가 크게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 최종 잔류 부동수분이 0이 아닌 아주 작은 값으로 수렴 한다 가정하였으며(Osterkamp and Burn, 2015), 부동수분 곡선의 경우 Fig. 4의 Ziegler et al.(2009)의 부동수분 경향을 사용하였다. 또한 사질토의 경우 동결 시용기에 큰 영향을 미치는 아이스렌즈(Ice lens) 형성이 미미하므로 본 연구에서는 온도에 따른 부동수분에 상응하는 얼음은 부피변화가 없는 공극빙(Pore ice)형성만 고려하였다.

3.2 지반 동결에 따른 열평형 및 열용량 적용

본 연구에서는 동결 지반의 부동수분에 따른 에너지, 열전도율, 비열, 열류 변화를 적용시키기 위하여 물질의 온도에 따른 상변화, 이에 기인한 물성 변화를 정의 할 수 있는 서브루틴인 UMATHT를 사용하였으며 동결에 따른 물성 변화 및 에너지 변화는 다음과 같다.

먼저 동결지반 내부의 흙, 부동수분, 공극 내 얼음으로 구분하기 위하여 Eq. (1)과 같이 체적분율에 따라 구성한다(Michalowski and Zhu, 2006).

$$\theta^s = \frac{V^s}{V} = 1 - n, \quad \theta^w = \frac{V^w}{V} = \nu n, \quad \theta^i = \frac{V^i}{V} = n(1 - \nu) \quad (1)$$

여기서 θ^s , θ^w , θ^i 은 각각 동결 지반 내 흙, 부동수분,

공극 내 얼음의 체적분율을 나타내며 V , V^s , V^w , V^i 는 각각 동결 지반 전체부피, 동결 지반 내 흙의 부피, 부동수분의 부피, 공극 내 얼음의 부피를 나타낸다. 여기서 각각의 체적분율은 공극률(porosity, n)과 ν 로 다시 표현할 수 있으며 ν 는 Eq. (2)로 나타낼 수 있다.

$$\nu = \frac{V^w}{V^i + V^w} \quad (2)$$

동결 지반의 밀도의 경우 동결 지반 내 흙, 부동수분, 공극 내 얼음의 체적분율을 통해 도출되며 Eq. (3)과 같다.

$$\rho = \theta^s \rho^s + \theta^w \rho^w + \theta^i \rho^i = (1 - n) \rho^s + \nu n \rho^w + n(1 - \nu) \rho^i \quad (3)$$

여기서 ρ 는 동결 지반 밀도를 의미하며 위첨자 s, w, i는 각각 흙, 부동수분, 얼음을 의미한다.

동결 지반의 비열용량(specific heat capacity)또한 지반 구성요소의 체적분율을 통해 도출할 수 있으며 단위 체적 당 비열용량(C_{volume})은 Eq. (4)와 같다. 또한 이를 단위 질량당 비열용량(C_{mass})으로 나타내면 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 c 는 단위 질량당 비열을 뜻한다.

$$C_{volume} = \theta^s \rho^s c^s + \theta^w \rho^w c^w + \theta^i \rho^i c^i \\ = (1 - n) \rho^s c^s + \nu n \rho^w c^w + n(1 - \nu) \rho^i c^i \quad (4)$$

$$C_{mass} = \frac{\theta^s \rho^s c^s + \theta^w \rho^w c^w + \theta^i \rho^i c^i}{\theta^s \rho^s + \theta^w \rho^w + \theta^i \rho^i} \\ = \frac{(1 - n) \rho^s c^s + \nu n \rho^w c^w + n(1 - \nu) \rho^i c^i}{(1 - n) \rho^s + \nu n \rho^w + n(1 - \nu) \rho^i} \quad (5)$$

동결 지반의 열전도율(λ)은 로그법칙으로 계산되며 (Johansen, 1977; Michalowski and Zhu, 2006), Eq. (6)과 같다.

$$\log \lambda = \theta^s \log \lambda_s + \theta^w \log \lambda_w + \theta^i \log \lambda_i \quad \text{or} \quad \lambda = \lambda_s^{\theta^s} \lambda_w^{\theta^w} \lambda_i^{\theta^i} \quad (6)$$

본 연구는 열전달 해석에 있어 대류, 복사 등은 고려하지 않았으며, 열전도에 대한 영향을 고려하였다. 푸리에 법칙(Fourier's law of heat conduction)은 Eq. (7)과 같다(Holman, 2011). 여기서 Q_k 는 열 유속, $\partial T / \partial x_k$ 은 열 유동방향에 따른 온도구배를 나타낸다.

$$Q_k = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad k = 1, 2, 3 \quad (7)$$

열전달에 있어 열전도만 고려한 열평형 방정식은 Eq. (8)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 L 은 잠열(Latent heat of fusion, J/kg)을 나타낸다.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} - L \frac{\partial \theta^i}{\partial t} \rho^i - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = 0, \quad (8)$$

3.3 열 사이펀의 적용

본 연구에서는 열 사이펀을 별도로 모델링 하지 않고 열 사이펀과 지반의 경계면에 경계조건을 부여하는 방식을 적용하였다. 외기 온도와 지반의 온도에 따른 열 사이펀의 작동 조건을 부여하기 위하여 사용자 서브루틴 DFLUX을 사용하여 Eq. (9)와 같이 열 유속을 정의하였다.

$$q'' = -\frac{Q_{syphon}}{A_{syphon}} \quad (9)$$

여기서 q'' 는 경계조건에 부여할 열 유속(heat flux, W/m^2)이며 Q_{syphon} 는 열 흐름율(heat flow rate, W)을 나타낸다. A_{syphon} 은 열 사이펀과 지반의 경계면의 면적(m^2)을 나타낸다.

본 연구는 열 사이펀의 성능을 비교하기 위하여 q'' 의 값에 변화를 주어 실내 모형실험으로 도출된 지반 온도 분포 결과와 비교하여 열 사이펀의 단위길이당 열전도율을 산출하였다. 열 사이펀의 단위길이당 열전도율 산출은 열 흐름율 산출하는 식인 Eq. (10)를 Eq. (9)에 대입하여 산출할 수 있다. 여기서 λ_{syphon} 은 열 사이펀의 단

위길이당 열전도율(W/mK)이며, L_{evp} 은 지반에 매설된 열 사이펀의 Evaporator section 길이(m)를 뜻한다. T_{evp} 의 경우 Evaporator section 주변 지반의 온도($^{\circ}C$), T_{con} 은 Condenser section 주변 외기온도($^{\circ}C$)를 나타낸다.

$$Q_{syphon} = \lambda_{syphon} \times L_{evp} \times (T_{evp} - T_{con}) \quad (10)$$

열 사이펀의 작용 조건은 열 사이펀과 지반의 경계면의 온도가 외기 온도보다 높을 때 열 유속을 부여하며 열 사이펀과 지반의 경계면의 온도가 외기 온도와 같아 지거나 낮아지면 열 유속 조건을 차단하여 열 사이펀의 작동을 중지하였다.

열 사이펀의 열전도율은 Eq. (10)의 열전도율을 임의의 값($0.124 W/mK$)에서부터 점차 증가시켜가며 실내 모형실험의 지반 온도분포 결과와 비교하여 부합하는 열전도율을 산정하였다.

4. 수치해석 및 결과

4.1 수치해석 모델링 및 케이스

본 연구의 수치해석에 사용된 지반의 물성치는 기존 문헌(Jang et al., 2014; Lee et al., 2014)과 동일하게 적용하였으며 해당 지반의 물성치의 경우 Table 2에 정리하였다. 해당 지반은 주문진 표준사로 통일분류법상 SP로 분류되며 X선회절법(X-ray diffraction, XRD)을 통해 석영 76.4%, 정장석 23.6%로 구성됨을 확인하였다(Jang et al., 2014; Lee et al., 2014).

해석 케이스의 경우 Table 3과 같이 기존 문헌의 실내 모형실험 케이스와 동일하다. 먼저 열 사이펀 사용 이전 지반의 온도분포 결과를 확인하기 위한 CASE 1, 다음으

Table 2. Properties of soils for numerical analysis

Degree of saturation (%)	100
e	0.73
Dr (%)	59
$\gamma_{d,max}$ (kg/m^3)	1,670
$\gamma_{d,min}$ (kg/m^3)	1,330
Latent heat of fusion (J/kgK)	334,000
Heat capacity of frozen soil (J/kgK)	1915
Heat capacity of thawed soil (J/kgK)	1250
Thermal conductivity of frozen soil (W/mK)	4.67
Thermal conductivity of thawed soil (W/mK)	2.45

Table 3. Numerical analysis cases

	Existence of thermo-syphon	Filling ratio of refrigerants (%)
CASE 1	×	×
CASE 2_100	○	100
CASE 2_50	○	50
CASE 2_25	○	25

로 열 사이펀 냉매 충전율에 따른 케이스(CASE 2_100%, CASE 2_50%, CASE 2_25%)로 구성하였다.

본 수치해석에 사용된 모델의 제원과 격자는 Fig. 6 과 같다. CASE 1의 경우 열 사이펀 적용 이전 단일 방향 열전달 케이스이기 때문에 실험에서 사용한 토조 전체를 모델링 하지 않고 길이방향(0.365m)으로 모델링 (Axisymmetric)하여 해석을 실시하였다. 모델의 측면 밑 하단은 단열조건을 부여하였으며 상부에는 경막계수

(Film coefficient)를 부여하여 외기의 영향을 모사하였다. CASE 2 또한 Axisymmetric으로 모델링 하였으며 가로 0.2m, 세로 0.36m이다.

본 연구에서 사용한 지반은 동상민감성 지반이 아닌 사질토 지반이며 용기 혹은 침하의 영향이 미미하다. 따라서 용기 및 침하에 따른 열 사이펀의 거동에 대한 영향이 미미할 것으로 예상되어 열 사이펀은 별도로 모델링하지 않았다. 열 사이펀의 경우 열 유속 조건으로 대체하였으며 모델 측면, 하단은 단열조건 상부는 경막계수를 부여하였다.

시간에 따른 온도를 기존 실내모형실험과 비교하기 위하여 해당 문헌에서 설정한 측정점과 동일한 측정점의 온도를 도출하였으며 측정점은 CASE 1에서 총 세 포인트(A-1~3), CASE 2에서 총 여섯 개 포인트(A-1~3, B-1~3, C-1~3)로 구성하였다.

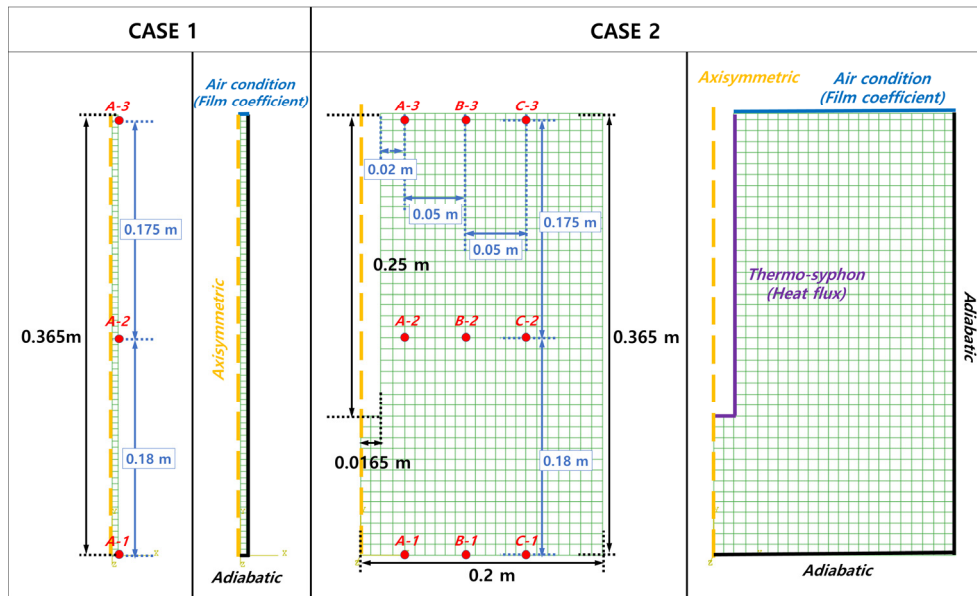


Fig. 6. Schematic diagram and boundary condition of numerical analysis

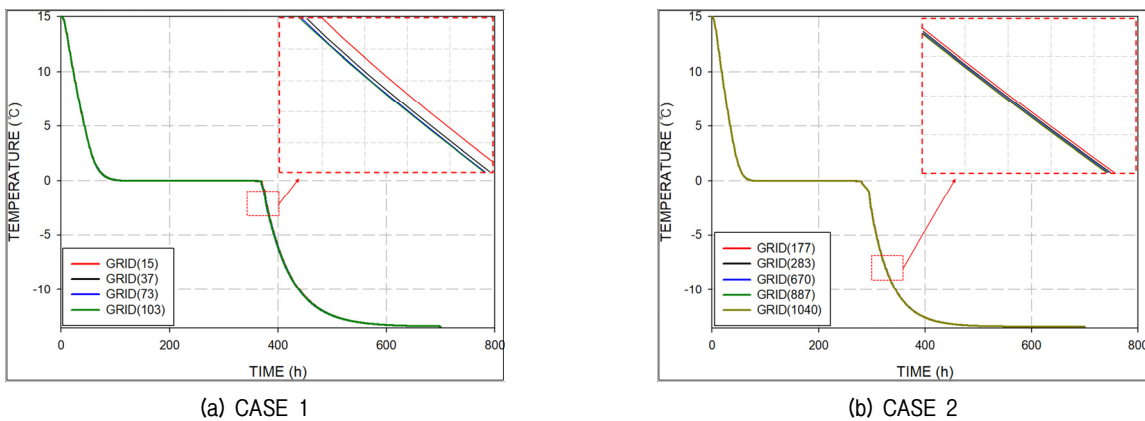


Fig. 7. Grid dependence test of CASE 1 and CASE 2

CASE 1, CASE 2 모두 4절점 Axisymmetric 열전달 요소인 DCAX4 요소로 모델링하였으며 Fig. 7과 같이 격자 의존성 검사를 통해 격자수를 결정하였다. CASE 1의 경우 73개의 격자에서 결과가 수렴하였으며, CASE 2의 경우 887개의 격자에서 결과가 수렴하였다. 따라서 수치해석에 사용된 모델의 격자수는 CASE 1, CASE 2 각각 73개, 887개로 적용하였다.

4.2 수치해석 결과

열 사이편 적용 이전 단일 방향 열전달 해석 케이스인 CASE 1의 결과는 Fig. 8과 같다. 해당 그래프에서 붉은색 심별 및 점선이 실내모형실험 결과를 나타내며 파란색 심별 및 점선이 해당 문헌에서 Temp/w 프로그램으로 도출한 수치해석 결과이다. 그리고 흑색 실선이 본 연구에서 ABAQUS를 통해 도출한 결과이다.

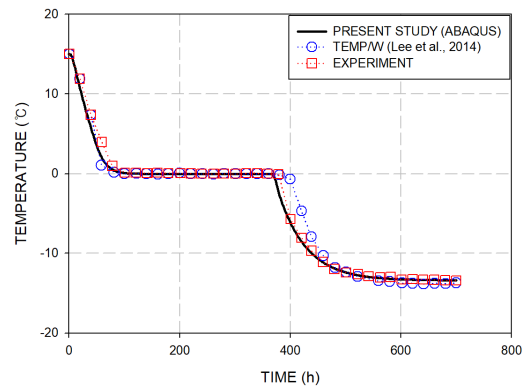
해당 문헌의 경우 토조 상부 단열재가 0.05m로 완벽한 단열이 어려울 것으로 예상하여 모델 상부에 경계조건으로 대류열전달계수를 부여하였으며 그 값을 $4 W/m^2K$ 로 사용하였다(Jang et al., 2014; Lee et al., 2014).

본 수치해석 연구에서는 실내모형실험과 가장 유사한 결과를 가지는 $3.5 W/m^2K$ 의 대류열전달계수 경계조건을 사용하였으며 기존 문헌과 이러한 차이가 나는 원인은 조성 지반의 온도에 따른 부동수분 추세를 달리 하였기 때문이라 생각된다.

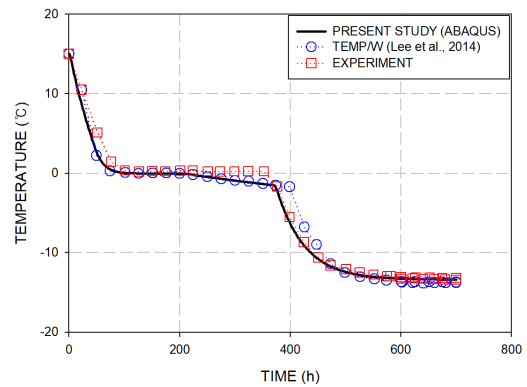
해당 결과 그래프를 살펴보면 크게 세 단계로 구분할 수 있다. 먼저 초기 설정 온도인 $15^{\circ}C$ 에서 $0^{\circ}C$ 로 하강하며 두 번째로 잠열에 의해 $0^{\circ}C$ 로 유지되며 마지막으로 잠열의 영향이 끝나고 온도가 다시 하강한다. 본 연구 결과를 살펴보면 잠열의 영향이 끝나고 온도가 강하하는 시작점이 기존 문헌의 수치해석 결과보다 실내모형실험 결과와 더 잘 부합하는 것을 확인 할 수 있다.

CASE 1의 측정점 A-3결과를 보면 실내모형실험과 수치해석 온도 추세가 다른 것을 확인 할 수 있다. 이는 실내모형실험의 경우 지반 상부의 복사, 동결에 따른 수분 이동 현상을 수치해석에서 제외하였기 때문이다(Jang et al., 2014; Lee et al., 2014). 따라서 기존 연구에는 지반 상부 측정점(A-3, B-3, C-3)을 제외한 측정점을 바탕으로 열 사이편의 열전도율을 산정하였으며 본 연구 또한 이와 동일한 방법을 사용하였다.

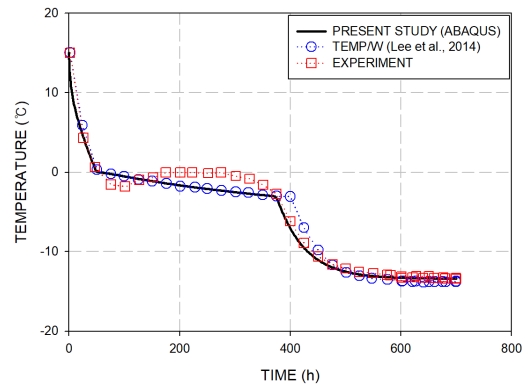
CASE 2의 경우 열 사이편의 냉매 충전율 100%, 50%, 25%로 구성되어있다. 본 연구에서는 해당 열 사이편의



(a) A-1



(b) A-2



(c) A-3

Fig. 8. Temperature results of CASE 1 : (a) A-1, (b) A-2, (c) A-3

냉매 충전율에 따른 열 사이편의 성능 즉 열 사이편의 단위길이당 열전도율을 산정하기 위하여 열 유속 조건을 달리 하여 실내 모형실험으로 도출된 측정점의 온도 분포결과와 부합하는 열전도율을 산정하였다. Fig. 9는 측정점 A-1의 결과로 열 사이편의 열전도율을 $0.124 W/mK$ 에서부터 $0.584 W/mK$ 까지 점차 증가시켜 해당 냉매 충전율에 따른 실내모형실험 온도분포 결과와 비교하여 산정하였다.

냉매 충전율 100% 케이스인 CASE 2_100의 열전도

울은 수치해석 결과 $0.464 W/mK$ 에서 가장 부합하는 결과를 나타내었다. Fig. 10(a), (b)는 CASE 2_100의 측정점 A-1, A-2에서의 실내모형실험결과(붉은색 심벌)와 ABAQUS로 도출된 결과(흑색 실선)를 비교하였으며, Fig. 10(c), (d)는 측정점 C-1, C-2에서의 결과를 나타낸다. 결과를 비교해 보면 온도가 감소하는 추세, 지반이 동결하며 잠열의 영향이 시작하고 끝나는 시간이 잘 부

합하는 것을 확인 할 수 있다. 열 사이펀 냉매 충전율 50% 및 25% 케이스인 CASE 2_50과 CASE 2_25의 열전도율의 경우 각각 $0.264 W/mK$, $0.084 W/mK$ 에서 실내모형실험 결과와 가장 부합하는 결과를 보였다. 세 가지의 열 사이펀 충전율 케이스 결과는 Fig. 11에 나타내었다.

본 수치해석으로 도출된 냉매 충전율에 따른 열 사이

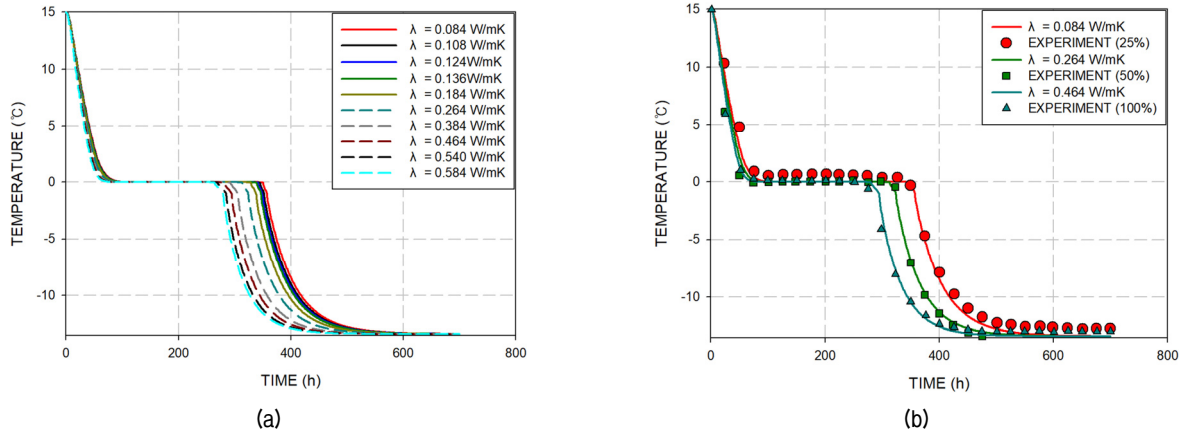


Fig. 9. (a) Temperature results at A-1 by various thermal conductivity of thermo-syphon (b) Thermal conductivity of thermo-syphon for different refrigerant ratios

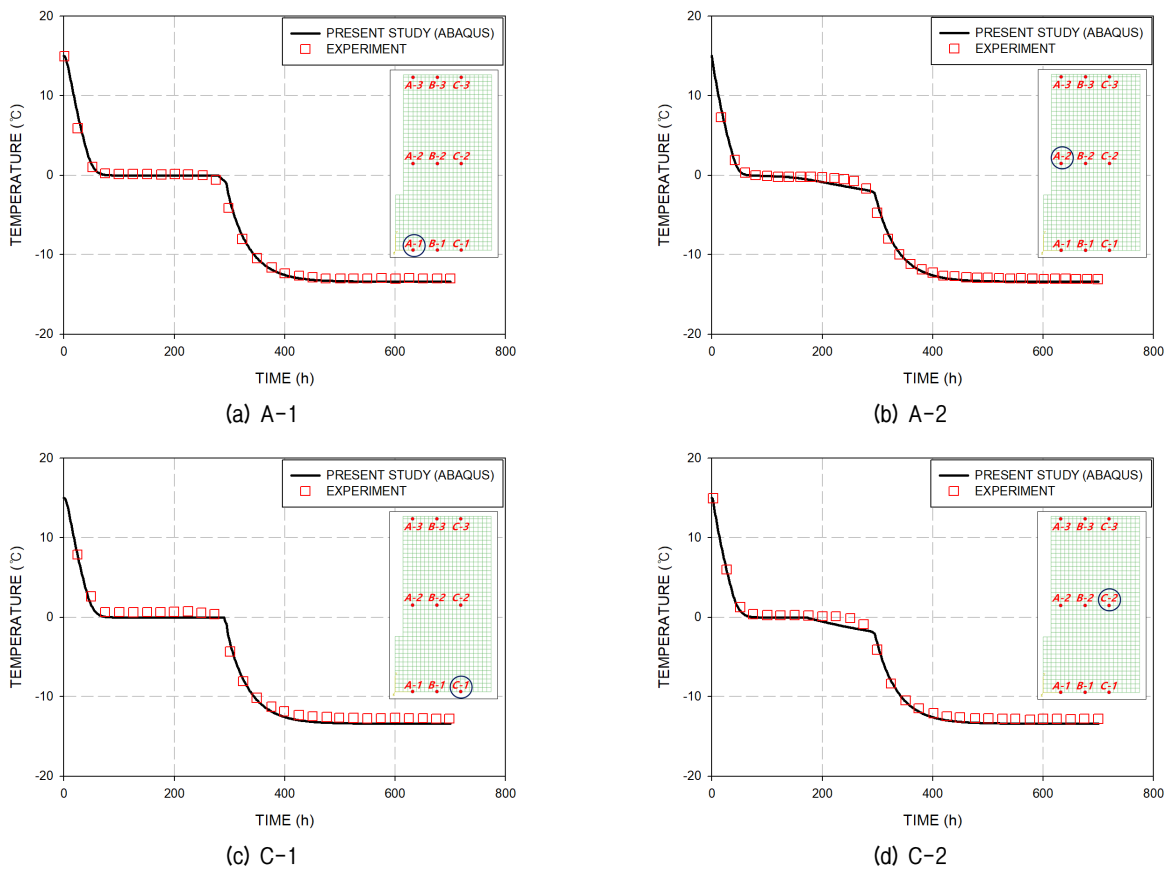


Fig. 10. Comparison between experiment results and numerical results (refrigerant ratios = 100%, $\lambda = 0.464 W/mK$)

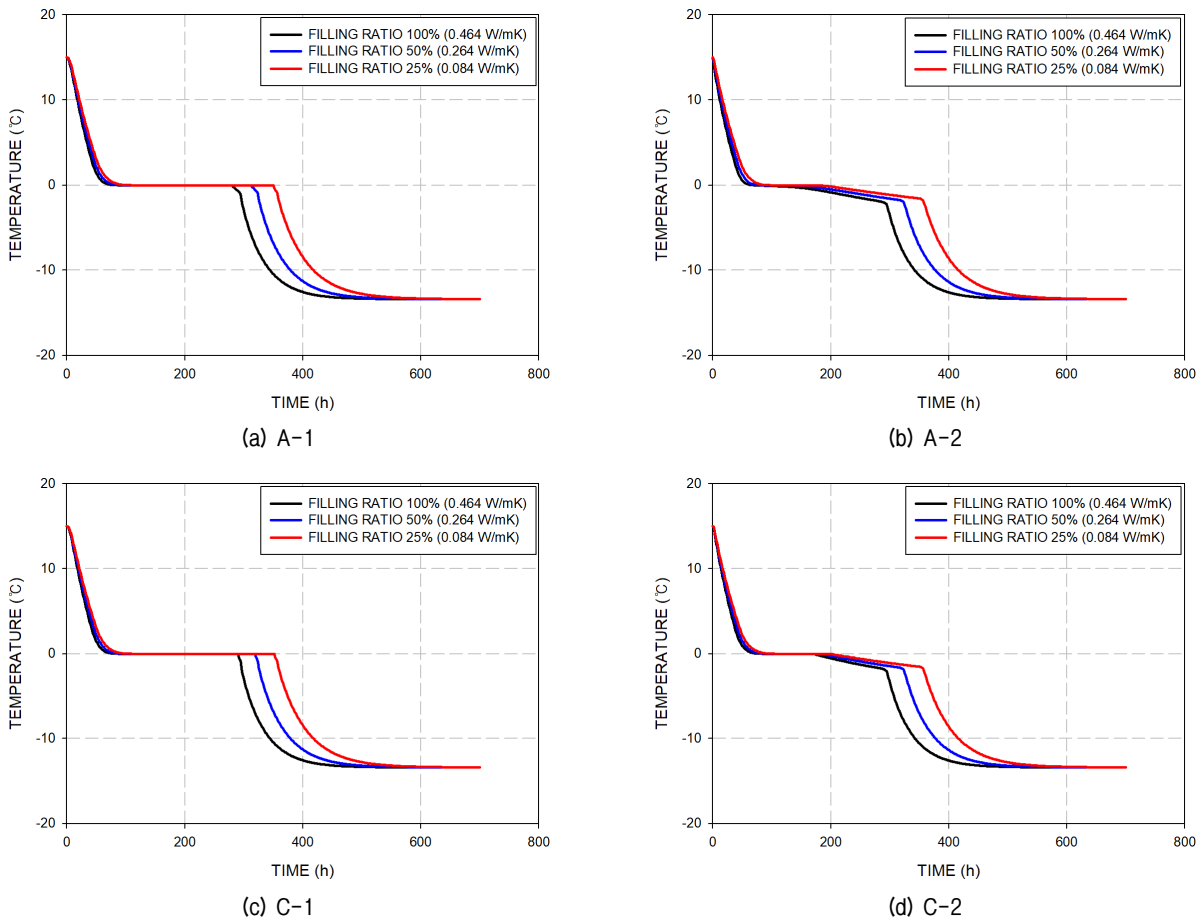


Fig. 11. Numerical results for different filling ratios of refrigerant (100%, 50%, 25%)

편의 열전도율은 기존 문헌에서 산출된 열전도율(충전율 100%, 50%, 25%에서 각각 $0.19 W/mK$, $0.14 W/mK$, $0.07 W/mK$)보다 큰 결과를 보였다. 이는 기존 문헌에서 사용한 지반의 온도에 따른 부동수분곡선과 본 수치 해석 연구에서 사용한 부동수분과 다르기 때문이며, 이러한 부동수분 차이가 해석 시 지반 표면의 대류 열전달 계수조건을 다르게 부여하는 조건을 만들기 때문이다. 이러한 이슈는 해당 지반의 온도에 따른 부동수분 변화에 대한 정확한 실험결과가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 문헌에서 사용한 Temp/w가 지반의 용기 및 침하에 대한 해석을 할 수 없는 한계를 보완하기 위하여 열 해석과 용기 및 침하 연계해석이 가능한 상용 수치해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 열 사이펀의 성능을 산정하였으며 본 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 지반의 온도에 따른 부동수분 변화, 이에 기인한 열물성 변화 및 에너지변화를 부여하기 위하여 ABAQUS 내부 사용자 서브루틴인 UMATHT를 코딩하여 적용하였다. 해석 케이스 중 열 사이펀 적용 이전 외기에 의한 지반 동결 케이스 해석의 경우 기존 문헌의 수치해석에서는 외기의 영향의 경계조건인 대류열전달계수를 $4 W/m^2K$ 로 부여했지만 본 연구에서는 $3.5 W/m^2K$ 를 적용하였을 때 실내모형실험 결과와 가장 유사한 결과를 확인하였다.
- (2) 다음으로 열 사이펀의 냉매 충전율에 따른 실내모형 실험결과를 토대로 열 사이펀의 성능을 나타내는 지표인 열전도율을 점차적으로 증가시켜가며 실내모형 실험의 온도분포결과와 부합하는 열전도율을 산정하였다. 이때 열 사이펀의 경우 열 사이펀을 직접 모델링 하지 않고 지반과 열 사이펀의 경계면에 열유속을 부여하는 방법을 사용하였으며 이를 위해 사용자 서브루틴인 DFLUX를 코딩하여 사용하였다. 해석 결과 열 사이펀 냉매 충전율 100%, 50%, 25%에서 열 사이펀의 열전도율은 각각 $0.464 W/mK$, 0.264

W/mK 그리고 $0.084 W/mK$ 으로 산정되었다.

- (3) 본 연구에서 도출한 열 사이펀의 열전도율 결과는 기존 문헌의 수치해석에서 도출한 열 사이펀의 냉매 충전율에 따른 열전도율 결과와 차이가 존재한다. 이는 기존 문헌에서 사용한 지반의 온도에 따른 부동수분 곡선이 다르기 때문이며 이러한 지반특성의 차이로 인해 외기의 영향에 대한 대류열전달계수 경계조건의 차이가 발생했기 때문으로 생각된다. 하지만 본 수치해석에서 부여한 대류열전달계수 경계조건으로 산정한 결과가 기존 문헌의 수치해석 결과에 비해 실내모형실험결과와 더욱 부합하는 결과를 나타냈기 때문에 신뢰 가능하다고 판단된다. 하지만 더욱 정확한 결과를 확인하기 위해선 해당 지반의 온도에 따른 부동수분 변화에 대한 실험적 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

본 연구는 사질토에 대한 연구만 이루어졌으므로 용기 및 침하에 대한 영향은 배재하였다. 하지만 본 연구를 기반으로 검증된 열 사이펀 구현 서브루틴을 통해 추후 다양한 동상민감성 지반(실트, 점토)과 열 사이펀의 성능에 따른 용기 및 침하에 대한 비교연구를 진행하여 열 사이펀의 직접적인 효과검증 연구를 진행해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업 및 4단계 BK21 사업의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

참고문헌 (References)

1. Abdalla, B. A., Mei, H. X., McKinnon, C., and Gaffard, V. (2016), "Numerical Evaluation of Permafrost Thawing in Arctic Pipelines and Mitigation Strategies", Arctic Technology Conference, Canada.
2. Abdalla, B., Fan, C., McKinnon, C., and Gaffard, V. (2015), "Numerical study of thermosyphon protection for frost heave", OMAE2015-42326, Proceeding of the ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2015.
3. Alizadehdakel, A., Rahimi, M., and Alsairafi, A. A. (2010), "CFD Modeling of Flow and Heat Transfer in a Thermosyphon", *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol.37, pp. 312-318.
4. Anderson, D. M. and Tice, A. R. (1973), "The Unfrozen Interfacial Phase in Frozen Soil Water System", *Ecological studies 4: physical*

aspects of soil water and salts in ecosystems, Springer, Berlin, Heidelberg.

5. Andersland, O. B. and Ladanyi, B. (2004), "Frozen Ground Engineering 2nd Edition", John Wiley&Sons, Inc, pp.322-326.
6. Esch, D. C. (2004), "Thermal Analysis, Construction and Monitoring Methods for Frozen Ground", TCCRE Monographs, ASCE, pp.3-8.
7. Fadhl, B., Wrobel, L. C., and Jouhara, H. (2013), "Numerical Modelling of the Temperature Distribution in Two-phase Closed Thermosyphon", *Applied Thermal Engineering*, Vol.60, pp.122-131.
8. He, T., Mei, C., and Longtin, J. P. (2017), "Thermosyphon-assisted Cooling System for Refrigeration Applications", *International Journal of Refrigeration*, Vol.74, pp.165-176.
9. Holman, J. P. (2011), "Heat Transfer Tenth Edition", McGraw-Hill Education Pvt. Ltd, pp.1-25.
10. Jafari, D., Filippeschi, S., Franco, A., and Marco, P. D. (2017), "Unsteady Experimental and Numerical Analysis of a Two-phase Closed Thermosyphon at Different Filling Ratio", *Experimental Thermal of Fluid Science*, Vol.81, pp.164-174.
11. Jang, C. G., Choi, C. H., Lee, J. G., and Lee, C. H. (2014), "Evaluation on Thermal Performance of Thermosyphon by Numerical Analysis", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.9, pp. 57-66.
12. Johansen, O. (1977), "Thermal Conductivity of Soils", Cold Regions Research and Engineering Lab, Hanover NH, pp.199-204.
13. Kang, J. M., Lee, J. G., Kim, Y. S., and Kim, H. S. (2012), "The Experimental Study of Thermosyphon for Stabilizing Ground in the Warm Permafrost", *Korean Society of Civil Engineers Annual Convention*, Vol.1, No.1, pp.1302-1305.
14. Lee, K. M., Lee, J. G., Kim, Y. S., and Kim, H. S. (2012), "The Experimental Study of Thermosyphon for Stabilizing Ground in the warm Permafrost", *Proc. 38th Conf. on Korean Society of Civil Engineering*.
15. Li, H., Lai, Y., Wang, L., Yang, X., Jiang, N., Li, L., Wang, C., and Yang, B. (2019), "Review of the State of the Art: Ingeractions between a Buried Pipeline and Frozen Soil", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.157, pp.171-186.
16. 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.
17. Osterkamp, T. E. and Burn, C. R. (2015), "Encyclopedia of Atmospheric Sciences", Elsevier Science, Burlington, Vol.4, pp. 1717-1729.
18. Sabharwall, P. (2009), "Engineering Design Elements of a Two-Phase Thermosyphon to Transfer NGNP Thermal Energy to a Hydrogen Plant", INL/EXT-09-15383, Idaho National Laboratory Next Generation Nuclear Plant Project.
19. Xu, J., Eltaker, A., and Jukes, P. (2011), "Three-dimensional FE Model for Pipeline in Permafrost with Thermosyphon Protection", Arctic Technology Conference, USA.
20. Ziegler, M., Baier, Ch., and Aulbach, B. (2009), "Simplified Phase Change Model for Artificially Frozen Ground Subject to Water Seepage", *Proc. 17th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*, Amsterdam, Netherlands: IOS Press, pp.562-565.

Received : September 1st, 2020

Revised : November 2nd, 2020

Accepted : November 24th, 2020