

# 실험과 수치해석을 통한 동토지반 안정화용 수직형 열사이펀의 성능평가

## Experimental and Numerical Investigation of the Performance of Vertical Thermosyphon for Frozen Ground Stabilization

이장근<sup>1</sup>, 이철호<sup>2</sup>, 장창규<sup>3</sup>, 최창호<sup>4\*</sup>

Janguen Lee<sup>1</sup>, Chulho Lee<sup>2</sup>, Changkyu Jang<sup>3</sup>, Changho Choi<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, SOC Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do 411-712, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Research Specialist, Geotechnical Engineering Research Division, SOC Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do 411-712, Republic of Korea

<sup>3</sup>Nonmember, Graduate Student, University of Science and Technology, Gyeonggi-do 411-712, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, SOC Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do 411-712, Republic of Korea. Professor, Geo-space Engineering Dept., University of Science and Technology

### ABSTRACT

Frozen ground in cold region consists of an upper active layer and lower permafrost which is permanently frozen land. During the summer season, the air temperature is high enough to make the frozen ground melt, which causes the reduction of soil strength and thaw settlement. These phenomena result in structural instability, so it is necessary to apply frozen ground stability techniques. Thermosyphon is a closed natural two-phase convection device to maintain the ground temperature below 0°C by extracting heat from the ground and discharges it into the atmosphere. Experimental and numerical investigation has been performed to estimate the effect of the refrigerant filling ratio in thermosyphon using R-134a refrigerant and the thermal conductance of the thermosyphon.

### 요 지

가

가

가

R-134a

**Keywords :** Thermosyphon, Thermal conductance, Frozen ground, Experiment, Numerical Investigation, Ground Stability

## 1. 서 론

한대지역에서는 일년 중 동절기에만 동결되는 활동층

과 계절변화에 상관없이 항시 동결상태로 유지되는 영구 동토지반으로 구성되어 있다(Esch, 2004). 한대지역에서 구조물 기초의 지지력 산정 시 동착강도가 가장 중요한 변수이며, 동착강도는 동결된 수분 및 토사, 기초의 접촉면에서 발휘되는 응력을 의미한다(Choi and Ko, 2011). 한대지역에서 여름철에는 지반에 함유된 수분이 녹아 동착강도가 저하되어 지지력 감소와 침하가 발생하여 구조물

Received 29 Sep. 2014, Revised 5 Nov. 2014, Accepted 7 Nov. 2014

\*Corresponding author

Tel: +82-31-9100-785; Fax: +82-31-9100-211

E-mail address: [chchoi@kict.re.kr](mailto:chchoi@kict.re.kr) (C. Choi)

Table 1. Operating temperature of thermosyphon refrigerants (Kang et al., 2012)

Temperature range	Refrigerant
Very low temperature (-270°C ~ -70°C)	helium, argon, krypton, nitrogen, methane
Low temperature (-70°C ~ 200°C)	freon, ammonia, methanol, ethanol
Medium temperature (200 ~ 500°C)	naphthalene, sulfur, mercury
High temperature (500°C ~ 1000°C)	cesium, potassium, sodium
Very high temperature (1000°C)	lithium, lead, silver

의 안정성에 문제가 발생한다(Ko, 2012). 따라서 지반응해에 따른 상부구조물의 지지력 저하를 방지하기 위해 한대지역에서는 지반의 온도를 영하상태로 유지할 수 있는 지반 안정화 공법이 필요하다(Ma et al., 2012).

열사이펀(Thermosyphon)은 구조체 내부에 충전된 냉매의 자가적인 열순환으로 지반의 온도를 강하하는 동결 지반 안정화 공법 중 하나로 한대지역에서 지중온도 변화가 심한 지역 또는 상부구조물의 지반 열전달로 인한 동결 토사의 강도 저하가 우려되는 지역에 설치되고 있다(Wolfe, 1998). 열사이펀의 구조는 액체상태의 냉매가 지중의 높은 열을 흡수하여 기체 상태로 변화하는 증발부, 대기에 의해 기체상태의 냉매가 액체 상태로 변화하는 응축부로 구성되어 있다. 따라서 열사이펀은 지중과 대기의 온도차로 작동하며 지중온도를 영하로 유지하는 구조체로 정의할 수 있다(Andersland and Ladanyi, 2004).

열사이펀의 열흐름율(heat flow rate)은 시간에 따라 지반의 온도상태를 제어하는 열에너지의 흐름을 의미하며, ① 증발부 주변의 지반온도, ② 응축부 주변의 대기온도, ③ 열사이펀의 열전도율(total heat pipe conductance)에 따라 변화된다. 즉 열사이펀에 충전된 냉매의 순환은 지중온도와 대기온도에 밀접한 관련이 있으며 냉매의 고유성능은 열사이펀의 열전도율(thermosyphon conductance)에 영향을 미치게 된다.

열사이펀은 냉매의 종류 및 충전율에 따라 지반동결 제어 시기가 변화하는 것으로 알려져 있다(Silverstein, 1992). 그러나 현재까지 열사이펀 시공에 필요한 설계 및 냉매의 열전달성능을 분석한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 대기온도 저하에 따른 열사이펀의 지반 동결 제어성을 분석하기 위해 소구경 열사이펀을 이용한 실내실험 및 수치해석을 수행하였다. 친환경적인 R-134a 냉매를 이용하여 냉매의 충전율에 따른 열사이펀의 지반 동결시기 및 동결 제어반경을 분석하였다. 또한 열사이펀의 열전달성능을 수치화할 수 있는 열전도율을 실내실험에서 측정

된 온도데이터를 바탕으로 수치해석기법을 적용하여 산정하였다. 산정된 열전도율을 단위길이당 열전도율(unit length conductance)로 환산하였으며 기존 열사이펀의 열전도율 예측식과 비교하였다.

## 2. 열사이펀

### 2.1 열사이펀 열순환 원리

열사이펀의 외피 소재는 냉매의 열순환을 통한 지반온도제어를 효과적으로 수행하기 위해 열전도성이 우수한 강성체(carbon steel)로 제작되고 있다. 구조체 내부에는 저온상태에서 열전달성능이 우수한 프레온, 암모니아 냉매가 활용되고 있으며, 현재는 환경적인 측면을 고려하여 CO<sub>2</sub>가 많이 활용되고 있다(Mckenna and Biggar, 1998). 본 연구에서 사용되는 R-134a 냉매는 프레온 계열이며, 작동온도 범위는 -70°C에서 200°C로 계절에 따른 영상과 영하의 대기온도 변화를 충분히 수용하고 있어 일반적인 열사이펀 냉매로 사용이 가능하다(Table 1).

Sabharwall(2009)은 열사이펀 내부에 충전된 냉매의 순환 현상을 Fig. 1과 같이 4단계로 분류하여 설명하였다.

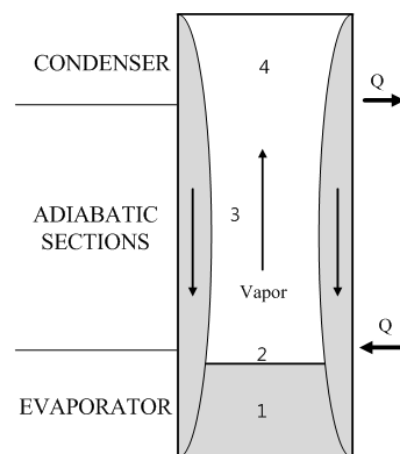


Fig. 1. Refrigerant circulation inside vertical two-phase thermosyphon (Sabharwall, 2009)

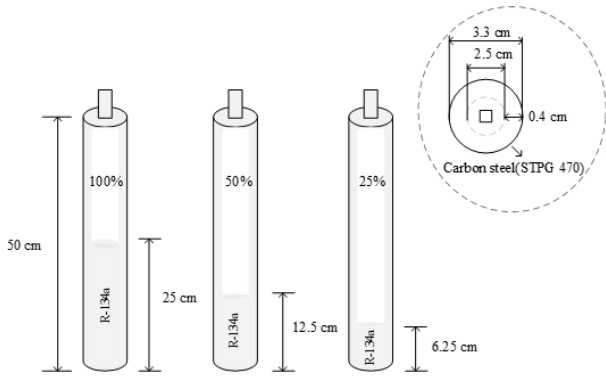


Fig. 2. Tested three thermosyphons with different filling ratios

- ① 증발부에서 액체 상태의 냉매는 지중의 열을 흡수하고 기체상태로 상변화 하기 시작한다(stage 1-2).
- ② 기체 상태의 냉매는 증발부와 응축부 사이의 압력차로 인하여 단열 부분(adiabatic section)으로 이동한다(stage 3).
- ③ 응축부에서 기체상태의 냉매는 열을 방출하고 액체상태로 상변화 한다(stage 4).
- ④ 응축된 액체상태의 냉매는 중력에 의해서 단열부를 통해 증발부로 재이동 한다(stage 4-1).

### 3. 실내실험

#### 3.1 열사이펀 및 항온챔버

냉매 충전율에 따른 열사이펀의 지반동결 제어 실험을 수행하기 위해 길이 50cm, 외경 3.3cm로 제작된 강관형태의 수직형 열사이펀을 제작 하였다. 구조체 내부에 충전된 냉매는 프레온계 냉매인 R-134a이며 전체 길이에서 25cm (열사이펀 길이/2)를 기준으로 100%, 50%, 25%로 충전

되어있다(Fig. 2). 본 실험에서는 영하의 일정온도에서 열사이펀의 성능을 분석하기 위해 규모가 200cm(W)×300cm(L)×250cm(H)이고 -20℃에서 0℃까지 ±1℃로 온도제어가 가능한 항온챔버에서 실험이 진행되었다.

#### 3.2 동결지반 조성

열사이펀을 통한 지반 동결제어 실험을 수행하기 위해, 열전도성이 낮은 아크릴 토조(60cm × 60cm × 50cm)를 4개 제작하였다. 3개 토조의 중앙에는 냉매충전율이 100%, 50%, 25%인 열사이펀이 배치되어 있으며, 나머지 토조에는 열사이펀의 성능을 비교하고 수치해석 모델 검증을 위해 열사이펀이 설치되지 않았다.

시료의 열물성치를 동일하게 조성하기 위해 토사의 입도가 균일한 주문진 표준사를 사용하였으며 토립자간의 간극에 차지하는 공극은 수분으로 완전 포화시켰다. 시료 준비를 위해 4개 층으로 나누어 수분 적재 및 다짐작업을 시행하였다. 열사이펀을 통해 시료가 동결될 수 있도록 각 토조의 바닥, 그리고 측면 경계를 두께 10cm의 스티로폼 단열재로 마감하였으며 지표의 상부에는 열사이펀의 응축부가 충분히 노출되도록 두께 5cm의 스티로폼 단열재로 마감하였다. 실험이 진행되는 동안 열사이펀을 통해 시료가 동결되는 시기와 제어 반경을 분석하기 위해 온도센서가 부착된 총3개의 말뚝을 열사이펀 주변으로 2cm, 7cm, 12cm로 이격하여 배치하였다. 열사이펀이 설치되지 않은 토조에는 온도센서를 토조의 중앙에 배치하였다(Fig. 3).

토조에 준비된 시료는 상대밀도 59%, 함수비 27.4%에

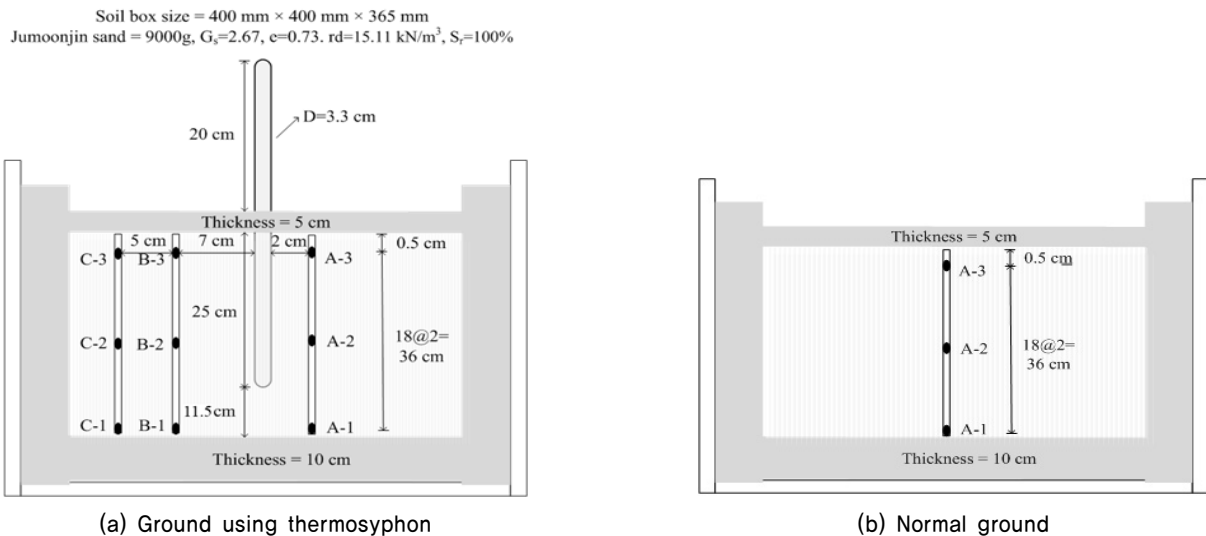


Fig. 3. Schematic diagram of laboratory tests

Table 2. Physical properties of tested specimens

Degree of saturation (%)	100
Width (cm)	40
Height (cm)	40
Height (cm)	36.5
Total volume, $V_t$ (cm <sup>3</sup> )	58,400
Volume of solid, $V_s$ (cm <sup>3</sup> )	33,708
Volume of void, $V_v$ (cm <sup>3</sup> )	24,692
$n$	0.42
$D_r$ (%)	59
$G_s$	2.67
USCS	SP
$\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16.7
$\gamma_{d,min}$ (kN/m <sup>3</sup> )	13.3
Water contents (%)	27.4
Void ratio ( $e$ )	0.73

서 완전 포화되었으며 공극비( $e$ )는 0.73으로 측정되었다 (Table 2). 실내실험은 준비된 4개의 토조를 항온챔버에 배치 후 서서히 온도를 강하하여 최종적으로 평균온도가 영하 13.4°C로 유지되고 지중의 온도가 동일해지는 시기 까지 온도변화를 측정하였다.

#### 4. 수치해석을 통한 지중의 동결현상 모델화

##### 4.1 냉매 충전율에 따른 열사이편의 모델링

본 연구에서는 상용수치해석 프로그램인 TEMP/W를 이용하여 열사이편의 충전율에 따른 열전도율을 수치적으로 평가하였다. TEMP/W는 지반의 규모, 대기의 경계조건, 시료(지반) 및 열사이편의 입력변수를 필요로 한다. 그러므로 열사이편의 지반온도 제어성능을 열전도율로 수치화하기 위해 Table 3과 같이 실내실험에서 조성된 지반의 열물성(열전도도, 비열, 부동수분)들을 TEMP/W에 반영하였다(Jang et al., 2013). 토사의 비열과 토사의 부동수분은 재료의 열물성 자료와, 토조의 용적률(volumetric)을 바

탕으로 산출하였다. 시료를 구성하고 있는 성분의 일반적 인 비열은 사질토(830 J/kg°C), 수분(4186 J/kg°C), 얼음 (2093 J/kg°C) 이다.

지반의 열전달 해석에는 반드시 열전도계수가 필요하며, TEMP/W는 포화도에 따른 지반의 열전도계수를 입력해야 한다. 열전도계수는 토사를 구성하고 있는 토립자의 성분 분석과 경험식을 이용하여 산출 할 수 있다. 그러나 낮은 포화도에서 실제 토사의 열전도계수와 오차가 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 포화도에 따른 열전도계수를 정확히 추정하기 위해 열전도계수 측정 장비(QTM, Kyoto Electronics)를 이용하여 상온 상태에서 토사의 포화 및 건조 열전도도를 측정한다. Côté and Konard(2005)의 열전도도 경험식에 입력된 경험계수(용해=3.55, 동결=1.7)를 수정하였다(Jang et al., 2013). Table 4는 토사의 열전도계수 경험식에 필요로 하는 주문진 표준사의 구성 성분을 나타내며, 분석결과 Quartz는 76.4%, Orthoclase는 23.6%로 확인됐다. Fig. 4는 토사의 열전도도 산출과정을 설명한 것이며 토사의 적정 열전도도를 산출하기 위해 열전도도 측정결과를 바탕으로 경험식에 입력된 경험계수들

Table 3. Input parameters for numerical analysis (Jang et al., 2013)

Volumetric water contents (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.42
Latent heat water (kJ/m <sup>3</sup> /°C)	3.34×10 <sup>5</sup>
Frozen heat capacity (kJ/m <sup>3</sup> °C)	1364.0
Thawed heat capacity (kJ/m <sup>3</sup> °C)	2249.0
Frozen thermal conductivity (W/m·K)	4.67
Unfrozen thermal conductivity (W/m·K)	2.45

Table 4. Quantitative analysis of Jumoonjin sand (X-ray diffraction, XRD)

Materials	Quartz	Orthoclase
Contents (%)	76.4	23.6

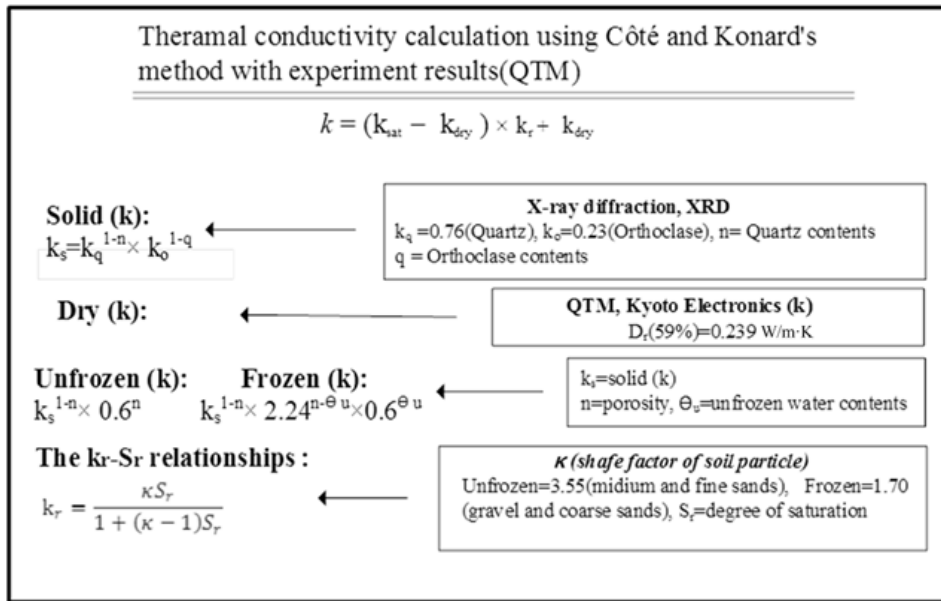


Fig. 4. Method for calculating the thermal conductivity of unfrozen and frozen soils

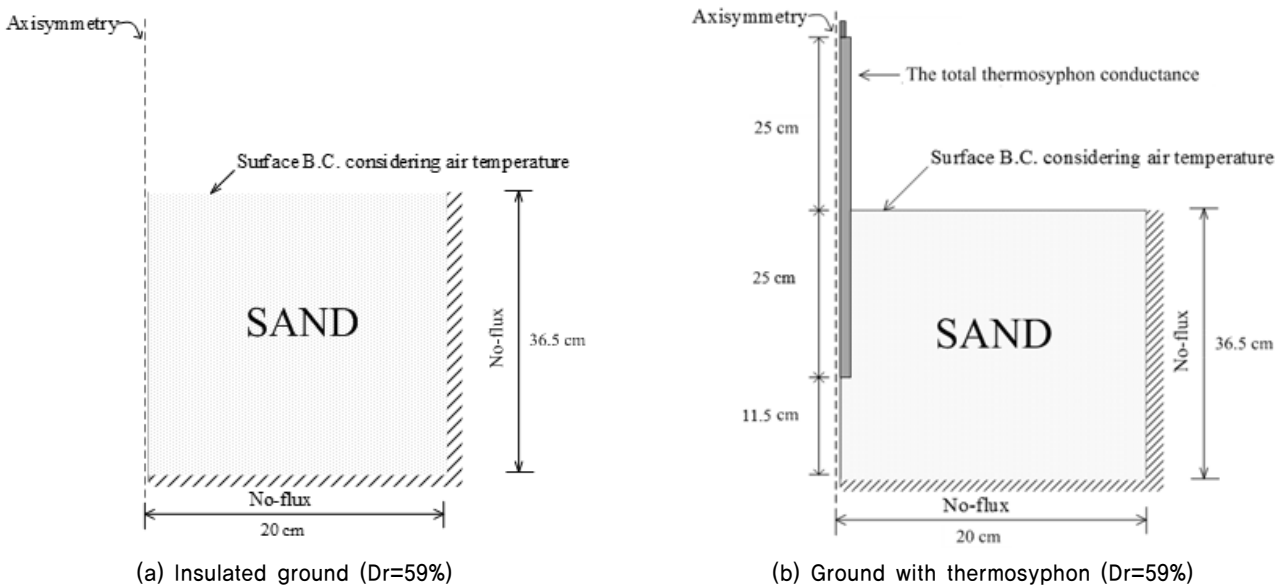


Fig. 5. Schematic diagram for numerical analysis

을 수정 하였다. 점토와 실트 함유량이 미미한 사질토에서는 온도가 감소할수록 공극수의 결빙이 급격히 발생하여 부동수분( $\theta_u$ )량은 급격히 감소한다는 연구결과를 토대로 본 연구에서는 부동수분이 없다고 간주하였다(Shin et al., 2013).

토조의 주변은 10cm의 스티로폼으로 단열되어 있어 열 차단이 충분하다고 판단되어 열유속이 없는 경계조건을

적용하였다. 그러나 토조의 상부는 비교적 얇은 두께 5cm인 스티로폼(열전도도 0.04W/m·K)이 설치되어 완벽한 차단이 어려울 것으로 판단된다. 따라서 모델링에서는 상부표면(외기 접촉면)의 경계조건으로는 기존 연구(Freitag and McFadden, 1997)에서 제시하는 지표의 대류열전달계수 범위를 활용하였다. Fig. 5는 열사이편의 열전도율을 산정하기 위해 수치해석모델링에 필요한 경계조건을 보여

주고 있다. 각각의 실험결과는 지반에 설치된 온도센서 데이터(0.5cm, 18.5cm, 36.5cm)를 바탕으로 지반의 온도변화에 유사한 열사이펀의 열전도율을 산출하는 것을 목적으로 한다.

#### 4.2 열사이펀의 열전도율 산정

본 연구에서는 열사이펀의 냉매충전율(100%, 50%, 25%)에 따른 열사이펀의 열전도율을 산출하기 위해, TEMP/W를 활용하였다. 열사이펀의 열전도율은 풍속 및 외기온도, 지중의 물성치(열전도도, 비열, 부동수분량)에 따라 열사이펀의 열전도율의 수치는 민감하게 변화한다. 따라서 실내실험에서 측정된 대기 데이터와 지반의 열물성치 산출은 중요하다. 식 (1)은 TEMP/W에서 열사이펀의 열전도율 산출하는데 사용되고 있으며 지중에 매설된 증발부 및 외기에 노출된 응축부 주변의 대기온도에 따라 열사이펀의 열전도율은 민감하게 변화하는 것을 알 수 있다.

$$Q = C_{hp}(T_{evp} - T_{air}), C^{*hp} = \frac{C_{hp}}{L_{evp}} \quad (1)$$

여기서, Q는 열 흐름률(the heat flow rate, W),  $C_{hp}$ 는 열사이펀의 열전도율(total thermosyphon conductance, W/K),  $C^{*hp}$ 는 단위 길이당 열사이펀의 열전도도(unit length conductance, W/m·K),  $T_{evp}$ 는 증발부 주변지반의

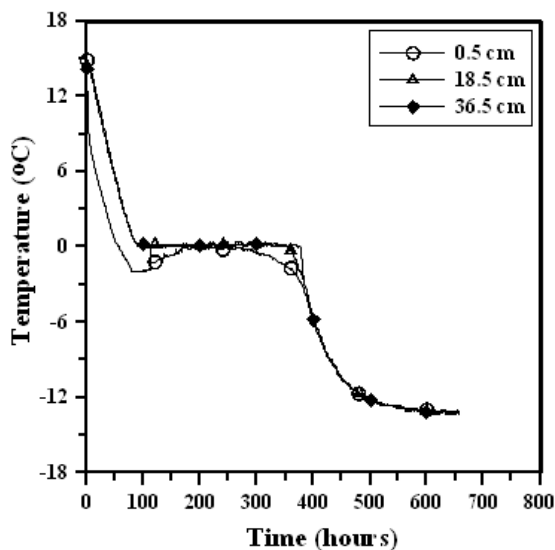
온도,  $T_{air}$ 는 열사이펀 주변의 대기온도,  $L_{evp}$ 은 지중에 매설된 열사이펀의 증발부 길이이다. TEMP/W에서 필요한 입력변수는  $C_{hp}$ 이며, 기존 문헌에서는 증발부에서 지반의 열을 흡수하는 열량인 단위길이당 열전도율( $C^{*hp}$ )로 사용하고 있다(Haynes et al., 1992). 하지만 증발부의 단위 길이당 열전도율은 열사이펀의 단면적을 고려하지 않기 때문에 각 문헌에서 산정한 열전도율이 모든 열사이펀에 공통적으로 적용할 수는 없다.

### 5. 실험결과 및 수치해석 비교

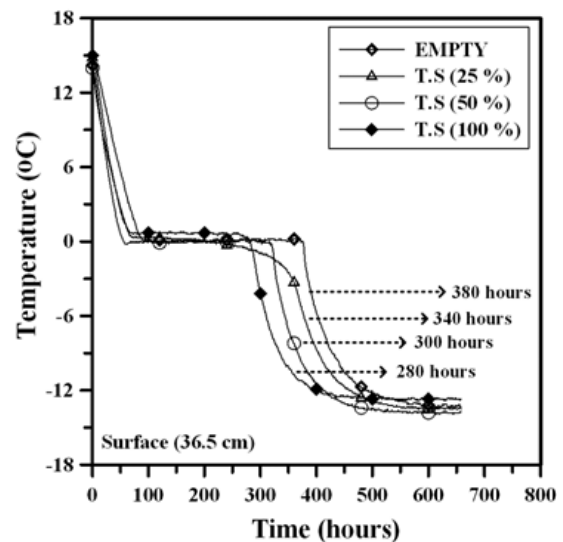
#### 5.1 실내실험 결과

냉매 충전율(100%, 50%, 25%)에 따른 열사이펀의 지반 동결 제어시기와 지반온도에 영향을 미치는 범위를 분석하기 위해, 냉매충전율이 각기 다른 열사이펀을 모형지반에 배치하고 지반 동결실험을 수행하였다. 열사이펀을 설치하지 않고 단열재만 배치된 토조에서 깊이별 온도변화를 Fig. 6(a)에서 보여주고 있다. 실험이 장시간 동안 진행 되면서 동결현상이 발현되는 것을 확인할 수 있다. 또한 깊이별 온도강하가 관측되었으므로 상부에서 단열효과가 충분하지 않다는 사실을 보여주고 있다. 열사이펀이 없는 토조의 깊이 36.5cm에서 온도가 0°C 이하로 급격하게 저하되는 시기는 약 380시간으로 확인되었다.

냉매충전율이 100%일 때 깊이 36.5cm에서 온도가 0°C

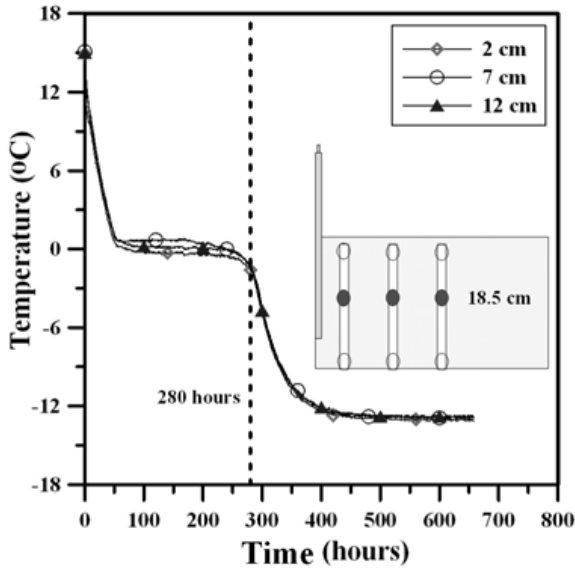


(a) Temporal temperature distribution without thermosyphon

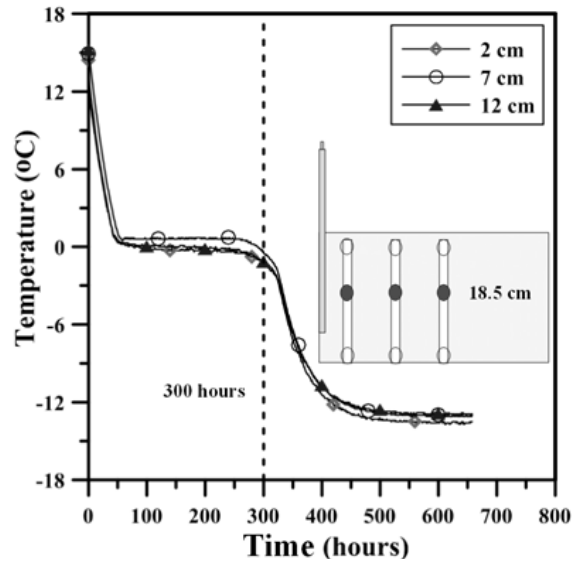


(b) Ground depth 36.5 cm

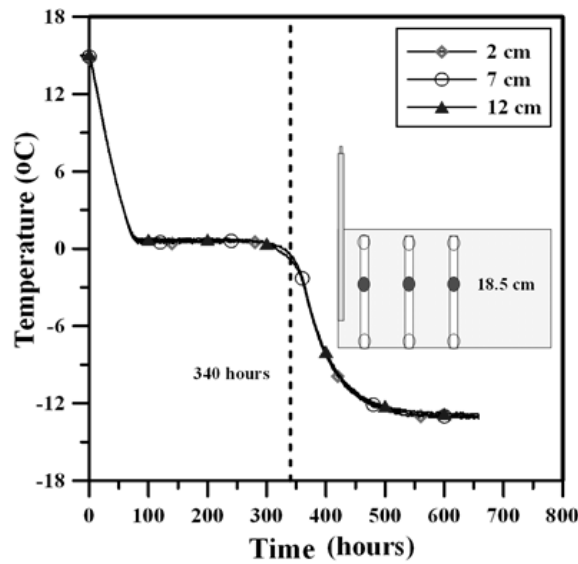
Fig. 6. Measured temperature distributions for tested specimens with and without thermosyphons



(a) Refrigerant charge 100%



(b) Refrigerant charge 50%



(c) Refrigerant charge 25%

Fig. 7. Measured temperature changes with respect to radius distance from thermosyphon

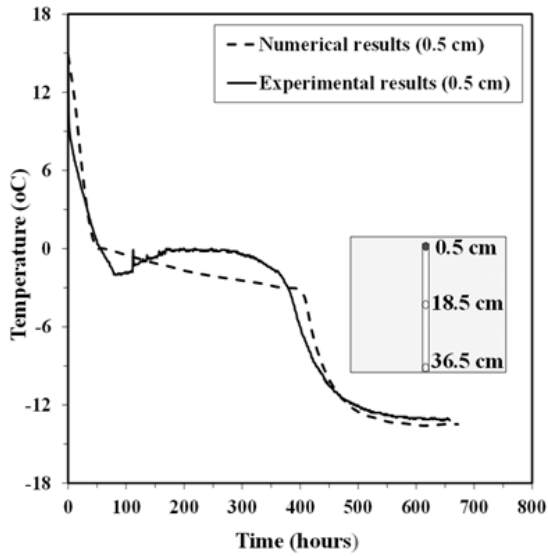
이하로 급격하게 저하되는 시기는 약 280시간으로 확인되었으며 50%와 25%는 각각 300시간과 340시간으로 확인되었다. 실험결과 냉매충전율이 높을수록, 열사이펀의 지반동결 제어시기가 단축되는 것을 지중에 설치된 온도센서를 통해 확인할 수 있었다. 따라서 본 실험에서 측정된 온도제어시기를 통해 R-134a냉매는 지중과 대기의 온도차에 의해서 열순환을 정상적으로 수행한 것으로 판단된다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 열사이펀 주변 온도강하는 거리에 상관없이 동일하게 관측되었다. 열사이펀에서 이격거리 2cm와 12cm의 온도차는 냉매 충전율에 상관없이 동일하게 온도가 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 이는

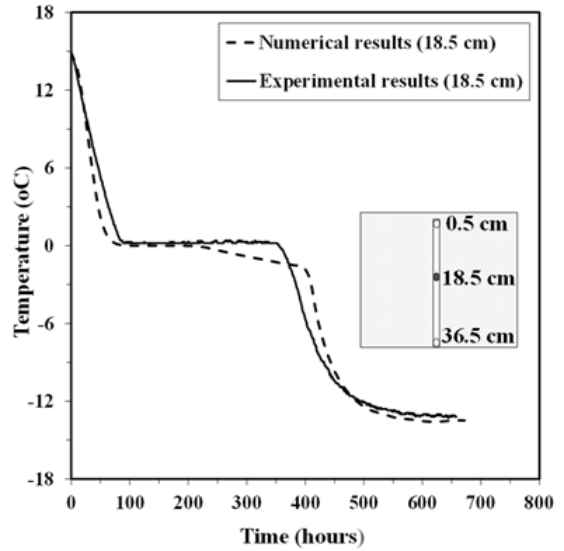
열사이펀의 제어반경이 예상보다 미미하여 실험에 사용된 소구경(직경 3.3cm) 열사이펀으로 제어반경을 측정할 수 없는 것으로 판단된다.

## 5.2 수치해석 결과

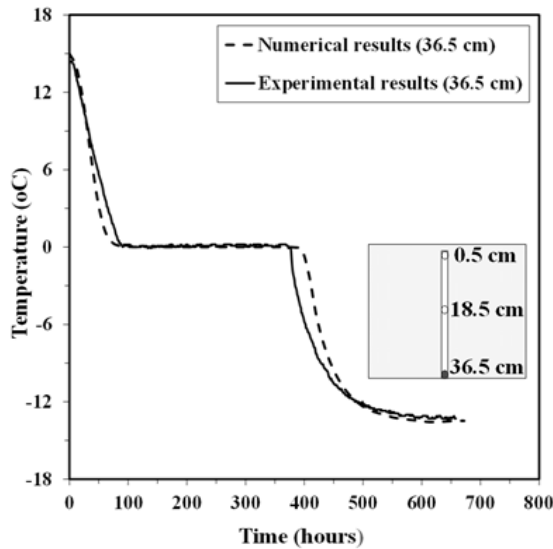
실험결과에서 밝혀진 바와 같이 상부에 설치된 비교적 얇은 스트로폼에 투입되는 열유속을 배제하고 열사이펀의 열전도율을 산정한다면 과도한 수치가 산정될 우려가 있을 것으로 판단된다. 따라서 상부쪽의 대류열전달계수의 산정을 위해 우선적으로 열사이펀이 없는 토조의 지반동



(a) Ground depth 0.5 cm



(b) Ground depth 18.5 cm



(a) Ground depth 36.5 cm

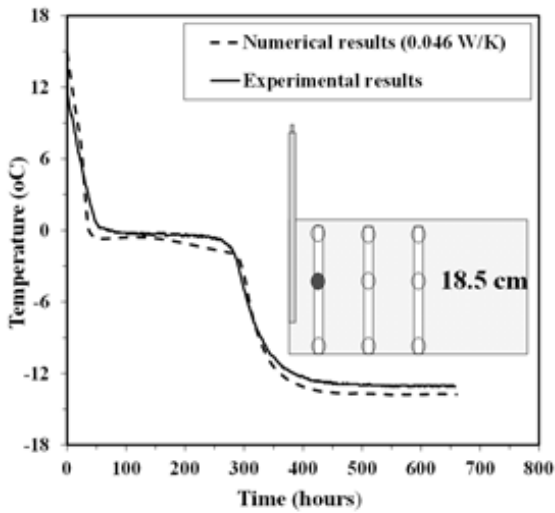
Fig. 8. Measured and predicted temporal temperature without a thermosyphon

결현상을 모델링하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 상부 표면에 대류열전달계수  $4\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 를 TEMP/W에 반영하여 해석한 결과 지표(0.5cm)를 제외한 지중(18.5cm, 36.5 cm)에서는 실내실험과 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 지표에서 측정된 온도와 모델링 결과의 차이는 TEMP/W에서 모사가 불가능한 복사 및 열전도도가 복합적으로 발생하거나 동결에 따른 수분이동 현상을 고려할 수 없기 때문이라고 판단된다. 따라서 열사이펀의 열전도율을 수치 해석으로 산정하기 위해 지표를 제외한 지중(18.5cm와 36.5cm)에서 측정된 온도데이터를 바탕으로 열사이펀의

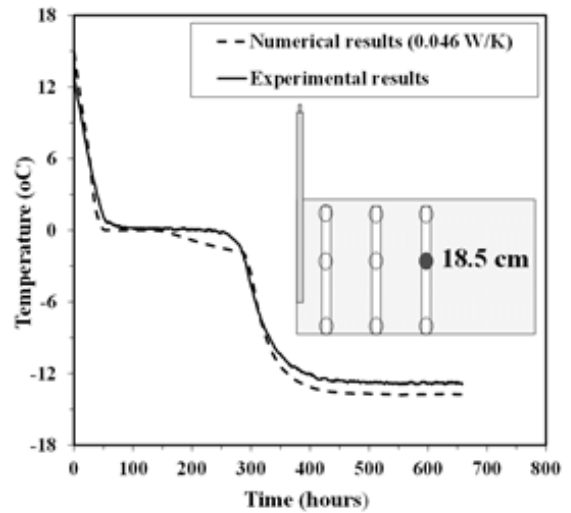
열전도율을 산정하였다.

냉매 충전율 100%, 50%, 25%에 따른 열사이펀의 열전도율( $C_{hp}$ )은 각각  $0.046\text{ W/K}$ ,  $0.035\text{ W/K}$ ,  $0.0185\text{ W/K}$ 에서 실내실험 결과와 가장 유사하다(Figs. 9 ~ 11). 산정된 열전도율을 토대로 열사이펀의 성능을 기존의 문헌과 비교하기 위해, TEMP/W를 통해 산정된 열전도율을 지반에 매설된 증발부 길이로 나누었으며 각각  $0.19\text{W/m}\cdot\text{K}$ ,  $0.14\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,  $0.07\text{W/m}\cdot\text{K}$ 와 같았다. TEMP/W로 산정된 단위 길이당 열전도율( $C_{hp}^{*}$ )은 Shannon and Wilson(2009)이 실 대형 수직형 열사이펀을 바탕으로 산출한  $1.43\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 의

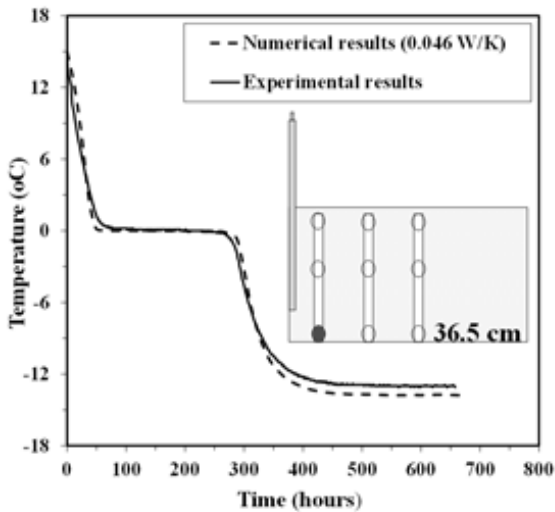




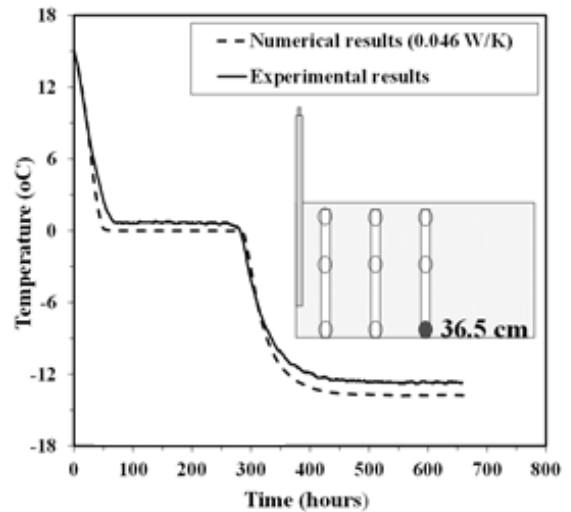
(a) Interval: 2 cm, Depth: 18.5 cm



(b) Interval: 12 cm, Depth: 18.5 cm



(c) Interval: 2 cm, Depth: 36.5 cm



(d) Interval: 12 cm, Depth: 36.5 cm

Fig. 9. Measured and predicted temporal temperature for 100% filling ratio

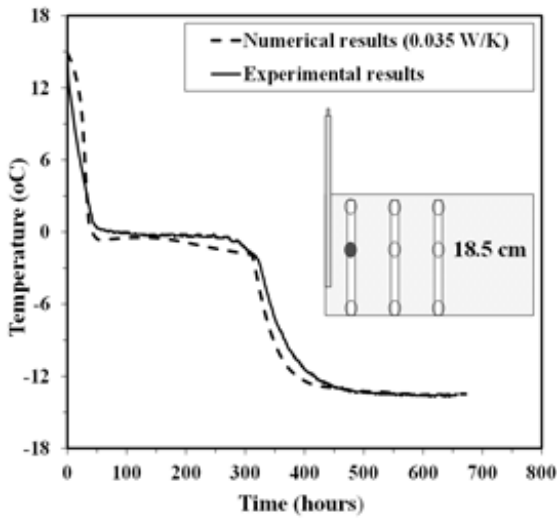
값보다는 작다. 하지만 문헌에서 수행된 실험조건은 CO<sub>2</sub> 냉매를 바탕으로 열사이편의 열전도율을 산정하였고 본 연구에서 활용된 R-134a 냉매와는 직접적으로 비교하기 어렵다고 판단되었다. 또한 본 실험에서 활용된 열사이편은 소구경이기 때문에 현장에서 측정된 실대형 열사이편보다 열전도율이 작게 산출되었다고 판단된다.

Fig. 12는 수치해석을 통해 산정된 열사이편의 장기적 온도제어반경을 보여주고 있다. 열사이편은 실험초기에 응축부(외기)와 증발부(시료)의 큰 온도차로 시료온도를 강하시키는데 효과가 높지만, 시료가 동결됨에 따라 온도차가 적어질수록 효과는 미미한 것으로 확인되었다. 400

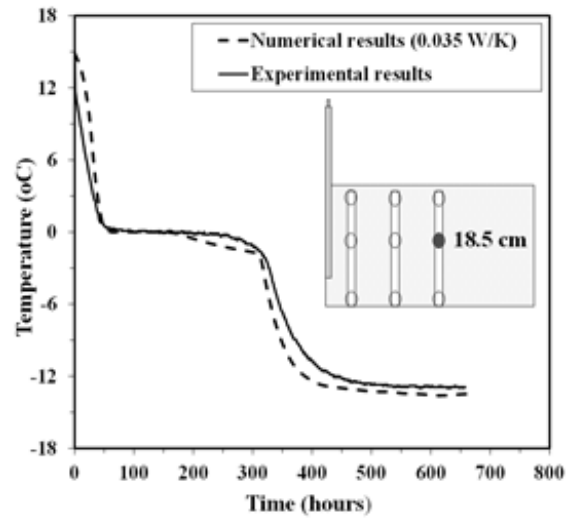
시간이 지난 동결된 시료는 일차원 열전달을 보여주고 있으며, 이는 동결시료의 열전도계수가 비동결시료의 열전도계수와 비교하여 상대적으로 높기 때문에 시료내부의 열전달이 열사이편을 통한 열전달보다 빠르기 때문으로 판단된다.

## 6. 결론

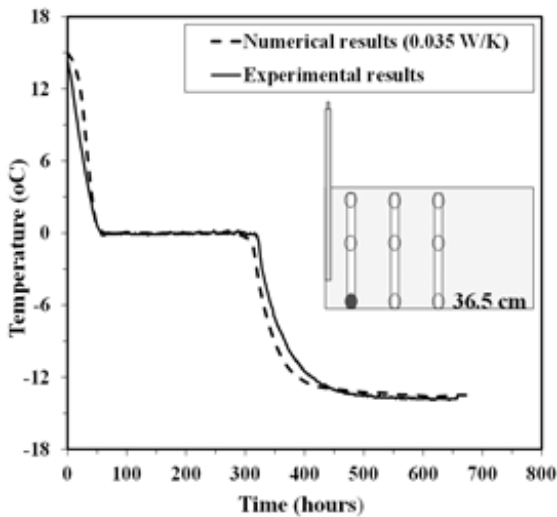
본 연구에서는 대기온도 저하에 따른 열사이편의 지반 동결 제어성능을 분석하기 위해, 실내실험 및 수치해석을 수행하였다. 열사이편은 구조체 내부에 충전된 냉매에 의



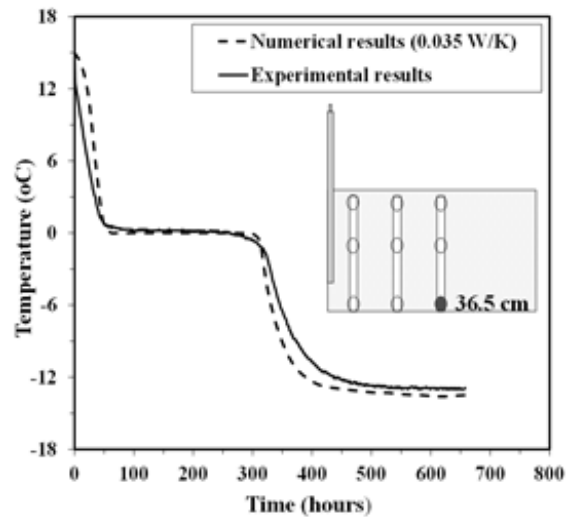
(a) Interval: 2 cm, Depth: 18.5 cm



(b) Interval: 12 cm, Depth: 18.5 cm



(c) Interval: 2 cm, Depth: 36.5 cm



(d) Interval: 12 cm, Depth: 36.5 cm

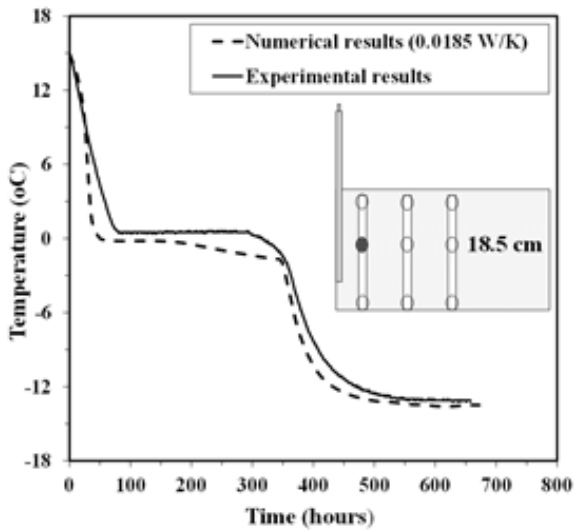
Fig. 10. Measured and predicted temporal temperature for 50% filling ratio

해서 지반의 온도를 영하의 상태로 제어하기 때문에 냉매의 종류 및 충전률에 따라 지반동결 제어 시기가 변화한다. 따라서 열사이펀의 냉매 충전율(100%, 50%, 25%)에 따른 지반 동결실험을 수행하고, 동결 시기 및 영향반경을 분석하였다. 또한 실내실험에서 측정된 데이터를 수치해석에 반영하여 열사이펀의 열전달성능을 수치화할 수 있는 열전도율을 산정하였다. 본 연구를 통해 분석된 내용을 정리하면 다음과 같다.

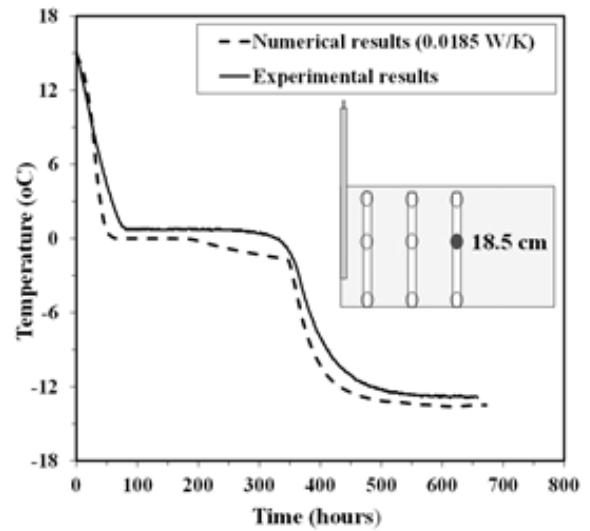
(1) 냉매 충전율(100%, 50%, 25%)에 따른 열사이펀의 성능실험 결과에 따르면 냉매 충전률이 증가 할수록 열

사이펀의 동결 제어시기는 점차 단축되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 구조체 내부의 충전된 냉매(R-134a)가 대기와 지반의 온도차에 의해 작동하였음을 의미하며 냉매충전량 100%까지는 상변화가 지속적으로 발생하여 열순환이 원활하게 발현된 것으로 분석되었다. 하지만 열사이펀이 비교적 소구경이므로 주변지반의 온도변화는 측정할 수 없었다.

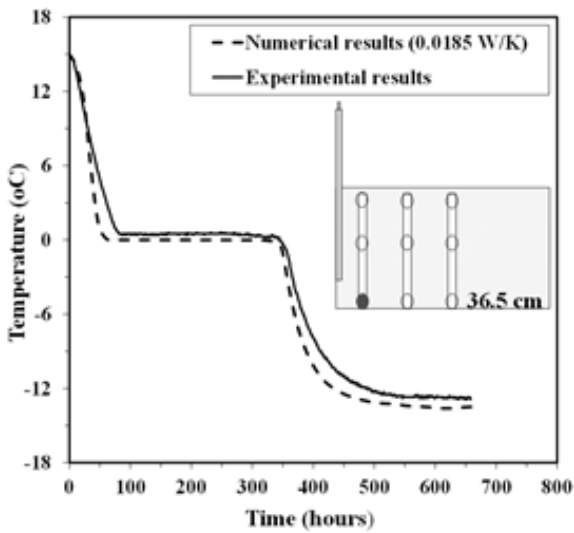
(2) 열사이펀의 냉매충전율(100%, 50%, 25%)에 따른 지반동결제어성능을 열전도율로 수치화 하기 위해 단일재가 배치된 지반의 모델링에 열사이펀을 추가 반영하여 해석하였다. 해석결과 냉매 충전률이 100%, 50%,



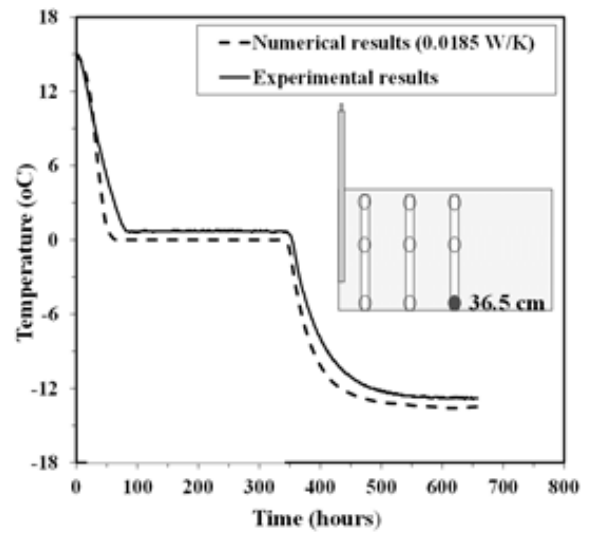
(a) Interval: 2 cm, Depth: 18.5 cm



(b) Interval: 12 cm, Depth: 18.5 cm

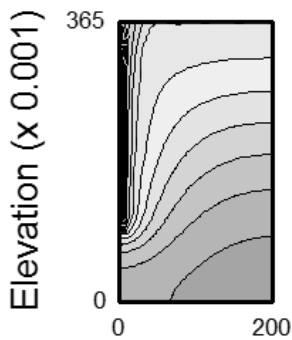


(c) Interval: 2 cm, Depth: 36.5 cm



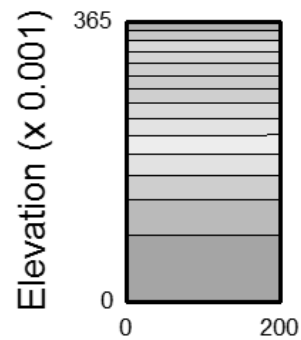
(d) Interval: 12 cm, Depth: 36.5 cm

Fig. 11. Measured and predicted temporal temperature for 25% filling ratio



Distance (x 0.001)

(a) After 50 hours



Distance (x 0.001)

(b) After 400 hours

Fig. 12. Predicted temperature changes with respect to radius distance from a thermosyphon (100% filling ratio)

25%인 열사이펀이 설치된 토조의 단위길이당 열전도율 수치는 각각 0.19W/m·K, 0.14W/m·K, 0.07W/m·K로 산정되었다. 산출된 단위길이당 열전도율은 기존 연구에서 제시한 1.43W/m·K 보다 작지만 본 실험에서 사용된 열사이펀의 제원은 소구경 일뿐만 아니라 냉매성분이 다르기 때문에 직접적으로 비교하기 어렵다고 판단된다. 하지만 냉매 충전율에 따라 열전도율 수치는 증가 하였기 때문에 R-134a 냉매는 열사이펀의 작동유체로써 정상적인 기능을 수행하였다고 판단된다.

열사이펀은 동결지반의 온도를 영하로 급속히 강하시켜 안정화가 가능하다고 판단된다. 열사이펀을 현장에 적용하기 위해서는 반드시 매립깊이를 고려하여 작동유체를 50% 이상 충전하여야 한다. 또한 영향범위가 미미하므로 최적간격과 구경을 선정하기 위해 수치해석적 연구가 반드시 선행되어야 한다. 본 연구를 통해 열사이펀의 설계에 필요한 수치해석 기법을 정립하였으며, 향후 국내 기업의 동토지역 건설에 열사이펀 적용 시 활용이 가능하다고 판단된다.

### Acknowledgement

The authors acknowledge that financial support for this investigation was provided by the Platform Technology Development of Extreme Cold Region Ground from the Korea Institute of Construction and Technology (KICT).

### References

1. Andersland, O. B., and Ladanyi, B. (2004), *Frozen Ground Engineering*, Second Edition, ASCE, John Wiley & Sons. Inc, pp.322-326.
2. Choi, C. H. and Ko, S. K. (2011), "A Study for Predicting Adfreeze Bond Strength from Shear Strength of Frozen Soil", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.10, pp.13-23.
3. Cote, J., and Konrad, J. M. (2005), "A Generalized Thermal Conductivity Model for Soils and Construction Materials", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42, No.2, pp.443-458.
4. Esch, D. C. (2004), "Thermal analysis, construction, and

- monitoring methods for frozen ground," *The technical council on cold regions engineering*, Virginia: American society of Civil Engineering. pp.3-8.
5. Freitag, D. R. and McFadden, T. (1997), *Introduction to Cold Regions Engineering*, New York: ASCE Press, pp.47-78.
6. Haynes, F. D., Zarling, J. P., and Gooch, G. E. (1992), "Performance of a Thermosyphon with a 37-meter-long, Horizontal Evaporator", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.20, No.3, pp.261-269.
7. Jang, C. G., Choi, C. H., Lee, C. H., and Lee, J. (2013), "Assessment of Surface Boundary Conditions for Predicting Ground Temperature Distribution", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.8, pp.75-84.
8. 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.
9. Ko, S. K. (2012), *A Study on Proportional Coefficient for Estimating Adfreeze Bond Strength using Direct Shear Test*, Master Thesis, Univ. of Science & Technology, pp.6-15 (in Korean).
10. Ma, W., Wen, Z., Sheng, Y., Wu, Q., Wang, D., and Feng, W. (2012). "Remedying Embankment Thaw Settlement in a Warm Permafrost Region with Thermosyphons and Crushed Rock Revetment", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.49, No.9, pp.1005-1014.
11. McKenna, J. K., and Biggar, K. W. (1998), "The Rehabilitation of a Passive-ventilated Slab on Grade Foundation Using Horizontal Thermosyphons", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, No.4, pp.684-691.
12. Sabharwall, P. (2009). *Engineering Design Elements of a Two-Phase Thermosyphon to Transfer Nuclear Thermal Energy to a Hydrogen Plant*, Idaho National Laboratory, pp.1-5.
13. Shannon and Wison (2009), *Geotechnical Design Study Tundra Women's Coalition Bethel*, Alaska, Attachment to Report, 31-1-02073-001, pp.7-23.
14. Shin, E. C., Ryu, B. H. and Park, J. J., (2013), "The Frost Heaving Susceptibility Evaluation of Subgrade Soils Using Laboratory Freezing System", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.12, No.2, pp.13-23.
15. Silverstein, C. C. (1992), *Design and Technology of Heat Pipes for Cooling and Heat Exchange*, Hemisphere Publishing Corporation. pp.3-12.
16. Wolfe, S. A. (1998), *Living with Frozen Ground: a Field Guide to Permafrost in Yellowknife, Northwest Territories*, Geological Survey of Canada, Miscellaneous Report 64, pp. 26-28.