

## 제설·방빙용 친환경 Thermosyphon 열성능 연구

이석진\* · 강석경\* · 서진혁\* · 이정호\*†

### Thermal Performance of Eco-Friendly Thermosyphon for Snow Melting and Anti-icing

Seokjin Lee\*, Sukkyung Kang\*, Jin Hyeuk Seo\*, Jungho Lee\*†

**Key Words** : Thermosyphon(써모사이폰), Snow melting(제설), Anti-icing(방빙), Geothermal(지열)

#### ABSTRACT

Snow melting and anti-icing on the roads are crucial during the winter season. Conventional methods such as de-icing agents and electric heatings exhibit great challenges to fire hazards, environmental pollution, and accelerated corrosion of roads and vehicles. The corresponding research has been conducted on applying geothermal thermosyphon utilizing geothermal energy as a heat source for snow melting and anti-icing on roads. However, working fluids such as ammonia, commonly used in geothermal thermosyphons, can potentially pose significant toxicity to human beings in the event of leakage or contribute to global warming. In response to these concerns, acetone can be chosen as an alternative working fluid, and a lab-scale geothermal thermosyphon was fabricated for experimental validation. Experimental heat flux data of the condenser were compared with the calculated values obtained using the equation for heat flux provided in the 2019 ASHRAE Handbook, which is required for snow melting and anti-icing. The experiments confirmed that the geothermal thermosyphon can effectively melt road snow and anti-icing using acetone as a working fluid. The experiments were conducted by varying the filling ratio of working fluids to compare the thermal performance of the geothermal thermosyphon. It was determined that acetone needs to be charged at a filling ratio of 75% or higher for optimal thermal performance of the geothermal thermosyphons.

#### 기호 설명

$A$	면적 [ $m^2$ ]	$Pr$	프란틀수
$c_p$	비열 [ $J/kg \cdot K$ ]	$q''$	열유속 [ $W/m^2$ ]
FR	충진율 [%]	$q''_0$	제설 및 방빙에 필요한 열유속 [ $W/m^2$ ]
$h$	열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]	$q$	열전달률 [W]
$h_m$	물질전달계수 [m/s]	$R$	열저항 [K/W]
$h_c$	대류 열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]	Re	레이놀즈수
$h_{if}$	용해열 [J/kg]	s	강수량 [m/s]
$h_{fg}$	증발잠열 [J/kg]	Sc	슈미트수
		T	온도 [ $^{\circ}C$ ]

\* 아주대학교, 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Ajou University)

† 교신저자, E-mail : jungholee@ajou.ac.kr

$k$	열전도율 [W/m · K]	$T_m$	눈의 녹는점 [°C]
$K$	포함 인자(Coverage factor)	$u$	불확도
$L$	도로의 폭 [m]	$u_c$	합성 표준 불확도
$\dot{m}$	질량유량 [kg/s]	film	눈이 녹아 생성된 액막
$I$	전류 [A]	in	입구
$V$	전압 [V]	l	잠열
$W$	습도비 [kg/kg]	out	출구
		r	복사
		s	현열
		sat	포화상태
		snow	눈
		water	물

<b>하철자</b>		<b>그리스 문자</b>	
a	외기	$\rho$	밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]
air	공기	$\sigma$	스테판-볼츠만 상수 [W/m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup> ]
c	대류	$\epsilon$	방사율
cond	응축부		
coolant	냉각수		
dry air	건공기		
e	증발		
eva	증발부		

## 1. 서론

매년 겨울 강설로 인해 도로 위 적설과 결빙이 생성되며 이는 교통사고 및 인명피해를 유발한다. 도로교통공단 TAAS 교통사고분석시스템이 제공하는 통계에 따르면<sup>(1)</sup>, 2005년부터 2021년까지 17년간 국내에서 연평균 약 2,800건의 교통사고와 약 80명의 사망 사고가 도로 위 적설 및 결빙으로 인해 발생하였다. 도로 위 적설 및 결빙을 예방하기 위해 사용하는 대표적인 방법으로 제설제 살포와 열선 매설이 있다. 제설제 살포는 일반적으로 염화칼슘을 도로에 살포하는 방법으로 살포된 염화칼슘은 대기 중 수분을 흡수하여 용해되면서 용해열을 방출하여 주위의 눈을 녹인다. 이와 다르게 열선 매설 방법은 도로 표면으로부터 일정 깊이에 매설된 열선을 이용하여, 도로 표면에 열을 직접적으로 공급함으로써 도로 위에 쌓인 눈을 제거한다. 제설제를 살포하는 방법은 제설제에 포함된 염소 이온이 차량과 도로 표면의 부식을 촉진 시키고 환경 오염을 유발하며<sup>(2,3)</sup>, 열선을 도로 아래에 매설하는 방법은 열선 과열로 인한 화재 발생의 위험이 존재하며 열선 구동에 많은 전기에너지가 소모된다. 또한 두 가지 방법 모두 운영 및 유지 보수에 필요한 비용이 지속적으로 발생한다.

히트파이프의 일종인 써모사이폰(thermosyphon)은 작동 유체의 상변화를 통해 열을 효과적으로 전달하는 장치로써, 파이프 내부에 워(wick) 구조 없이 중력만으로 응축된 작동 유체를 증발부로 공급하는 특징을 가진다. 써모사이폰은

Fig. 1과 같이 증발부(evaporator), 단열부(adiabatic), 응축부(condenser)로 구성되어 있으며, 써모사이폰의 작동 원리는 다음과 같다. 증발부에서 흡수된 열에 의해 써모사이폰에 주입된 작동유체는 액상(liquid phase)에서 기상(vapor phase)으로 상이 바뀌게 된다. 생성된 증기는 낮은 밀도를 가지기 때문에 상단의 응축부로 이동하게 되고, 응축부의 차가운 표면에 도달한 증기는 열을 방출하며 다시 액상으로 상변화 열전달을 한다. 이때 액화된 응축수는 중력에 의해 파

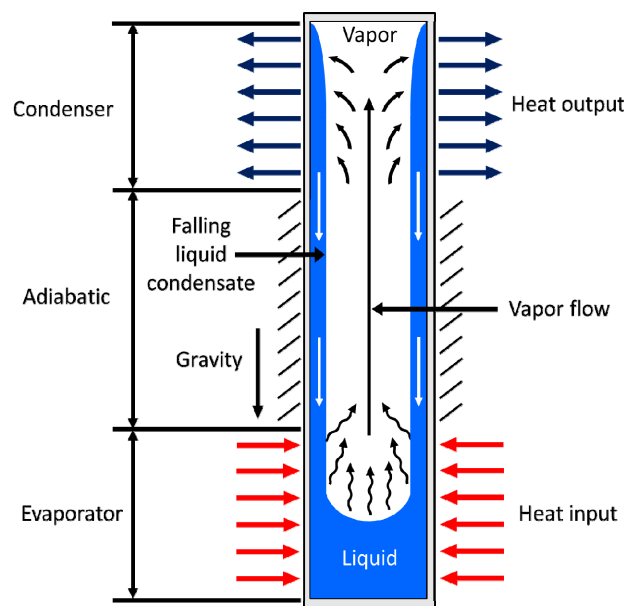


Fig. 1 Working principle of the thermosyphon

이프 하단의 증발부로 되돌아와서 증발과 응축을 연속적으로 반복하게 된다. 상변화 기반으로 작동하는 써모사이폰은 온도 차이로 열교환을 하는 현열 기반 열전달 장치 대비 작은 온도 차이만으로도 효과적인 열전달이 가능하다. 또한 별도의 추가 동력 없이 작동하는 장점이 있다.

앞서 언급한 기존 제설 방법들의 한계를 극복하기 위해 지열을 이용한 제설 방법이 주목받고 있다<sup>(4-8)</sup>. 지열은 특정 깊이부터 일정한 온도를 유지하는 특성을 갖기 때문에 제설을 위한 안정적인 열원으로 사용될 수 있다. 지열을 도로 표면으로 전달하기 위한 장치로 앞서 소개한 써모사이폰을 이용할 수 있다. 제설용 지열 써모사이폰은 초기 설치 비용을 제외하면 별도의 운영 비용 없이 반영구적으로 사용할 수 있으며, 이와 더불어 기존 제설 방법들이 갖는 부식 및 환경오염, 화재 발생 등의 한계 또한 극복할 수 있고, 지열 써모사이폰을 구동하는 데에 별도의 에너지 소모가 없어 효과적인 열전달 기구이다.

몇몇 선행 연구들에서 도로의 제설 및 방빙을 위해 지열 써모사이폰을 적용한 바 있다<sup>(6-8)</sup>. Chi et al.<sup>(6)</sup>은 Harbin과 Beijing에 위치한 비행장 활주로에 눈이 쌓이는 것을 방지하기 위해 활주로 하단에 지열 써모사이폰을 설치하였다. 설치된 써모사이폰은 탄소강으로 제작되었고 작동유체로는 암모니아를 사용하였다. 해당 연구에서는 파이프 매설 깊이, 파이프 간격, 증발부 길이가 제설 성능에 중요한 인자임을 확인하였다. Zorn et al.<sup>(7)</sup>은 독일 Bad Waldsee의 소방서 입구에 눈이 쌓이는 것을 방지하기 위해 지열 써모사이폰을 사용하였다. 그들은 구리 파이프 내부에 이산화탄소를 충전하여 써모사이폰을 제작하였으며, 이를 소방서 입구에 설치하여 도로 표면 온도가 상온으로 유지되는 것을 확인하였다. Sakata et al.<sup>(8)</sup>은 Toyohira River 주변 지역에서 지열 써모사이폰의 성능을 측정하였다. R-134a를 작동유체로 하는 스테인리스강 재질의 써모사이폰을 사용하였으며 약 11°C의 지열원을 이용하여 제설이 가능함을 확인하였다. 또한 그들은 지하수가 흐르는 부분에 써모사이폰을 설치함으로써 증발부 외부 열저항이 감소하여 더욱 효율적인 제설이 가능함을 확인하였다.

앞서 소개한 연구들은 지열 써모사이폰의 작동 온도를 고려하여, 작동유체로 암모니아, R-134a, 액화 이산화탄소 등을 사용하였다. 하지만 이전에 검토되었던 작동유체들은 사용하는 측면에 있어서 환경적인 문제를 유발할 수 있다. 암모니아의 경우, 반수치사능도가 2000 ppm으로, 인체에 매우 유해함을 나타내는 급성독성물질 분류 기준인 반수치사능도 10 mg/L 또는 2500 ppm 이하의 값을 가진다. 이로 인해, 만일 사고로 인한 암모니아 유출 시 치명적인 인명피해로 이어질 가능성이 있다. R-134a의 경우 암모니아에 비해 상대적으로 낮은 독성을 가지고 있지만, 이산화탄소 대비 약 1300배 이상 지구온난화를 촉진하는 것으로 보고되었

다<sup>(9)</sup>. 이로 인해 키갈리 개정서에 규제 물질로 추가되어 2024년부터 R-134a에 대한 국내 사용량 감축 규제가 진행되고 있다. 액화 이산화탄소의 경우 매우 낮은 비등점을 가지기 때문에 작동 온도에서 매우 높은 포화압력을 가져 폭발의 우려가 있다. 특히, 여름철에는 도로 표면의 온도가 상승하고 이로 인해 써모사이폰 내부 압력이 약 74 bar까지 증가한다. 내부 압력에 의한 폭발 방지를 위해서는 매우 두꺼운 관을 사용해야 하나, 제작 비용이 상승할 뿐만 아니라 파이프 두께의 증가로 인해 벽면을 통한 전도 열저항이 증가하게 되어 써모사이폰은 열성능이 크게 감소할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 기존 지열 써모사이폰에 사용되는 작동유체가 지닌 인체에 유해한 독성, 지구온난화 촉진, 여름철 높은 포화압력 등의 한계를 극복할 수 있는 작동유체를 검토하였으며, 인체, 환경, 장치 내구성에 미치는 영향을 고려하여 기존 작동유체를 대체할 수 있는 가장 적합한 물질로 아세톤을 선정하였다. ASHRAE Hand book<sup>(10)</sup>을 기반으로 제설에 필요한 지열 써모사이폰의 열성능을 분석하였다. 또한 Lab-scale 지열 써모사이폰 실험 장치를 설계 및 제작하였으며, 아세톤을 작동유체로 하는 써모사이폰이 실제 방빙 및 제설에 활용될 수 있는 열성능을 갖는 것을 확인하였다. 또한 다양한 충진을 조건에서의 실험 결과를 비교 분석하여, 제설 및 방빙에 가장 유리한 충진 조건을 제시하였다.

## 2. 제설 및 방빙을 위한 도로 표면 열유속 계산

본 연구에서는 ASHRAE Hand book<sup>(10)</sup>을 기반으로 제설 및 방빙에 필요한 도로 표면 열유속을 계산하였다. 도로 표면에 필요한 열유속은 Fig. 2와 같이 눈을 녹이는 열과 도로 온도를 올리고 유지하기 위해 보충해야 하는 열로 구분되

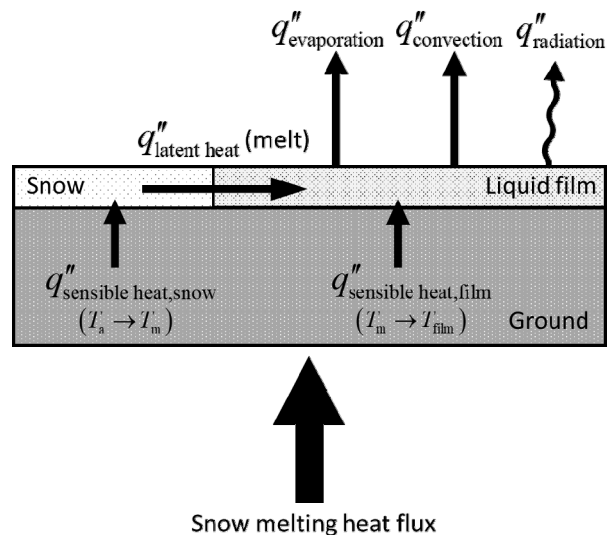


Fig. 2 Components of heat flux for snow melting

며, 눈을 녹이는 열은 현열과 잠열로 구분하며, 보충해야 하는 열은 증발, 대류, 복사에 의한 열손실로 구분된다. 도로에 쌓인 눈은 외기온도( $T_a$ )와 같은 온도이며, 눈을 녹이기 위해 눈을 녹는 점( $T_m$ )까지 올리기 위한 단위면적 당 현열은 아래 식 (1)과 같다.

$$q''_{s, \text{snow}} = \rho_{\text{water}} s [c_{p, \text{snow}} (T_m - T_a)] \quad (1)$$

여기서 강수량( $s$ )은 눈이 녹은 후 생성된 물을 기준으로 한다. 따라서, 식 (1)에서는 눈의 단위면적 당 질량유량 계산에 물의 비열 값을 사용한다. 눈은 고체 상태의 물로 가정하므로 눈의 비열 값으로 얼음의 비열 값을 사용한다. 녹는 점에 도달한 눈을 녹이기 위한 단위면적 당 잠열은 아래 식 (2)를 이용해 계산한다.

$$q''_1 = \rho_{\text{water}} s h_{if} \quad (2)$$

여기서 눈의 용해 잠열( $h_{if}$ )은 334 kJ/kg의 값을 가진다. 눈이 녹아 생성된 액막이 다시 어는 것을 방지하기 위해 액막의 온도를 녹는점( $T_m$ )에서 목표한 액막 온도( $T_{\text{film}}$ )까지 올리기 위한 단위면적 당 현열은 아래 식 (3)과 같다.

$$q''_{s, \text{film}} = \rho_{\text{water}} s [c_{p, \text{water}} (T_{\text{film}} - T_m)] \quad (3)$$

본 연구에서 목표로 한 액막의 온도는 0.6°C이다. 눈이 녹아 생성된 액막은 외기에 의해 온도가 저하되어 액막이 다시 얼 수 있다. 따라서, 증발, 대류, 복사의 형태로 발생하는 열손실을 고려하여 도로 표면에 열을 공급해 주어야 한다. 대류에 의해 발생하는 단위면적 당 열손실은 식 (4)와 같다.

$$q''_c = h_c (T_{\text{film}} - T_a) \quad (4)$$

여기서 대류 열전달계수( $h_c$ )는 도로 위 유동을 완전 난류 유동으로 가정하여 아래 식 (5)에 나타난 난류 유동에서의 대류 열전달계수 상관식을 이용하여 계산한다<sup>(11)</sup>.

$$h_c = 0.037 (k_{\text{air}}/L) \text{Re}^{4/5} \text{Pr}^{1/3} \quad (5)$$

여기서 도로의 폭( $L$ )은 국내 도로 폭 기준으로 3 m를 사용하였으며, 이를 Re의 특성 길이로 사용하였다. 복사에 의한 단위면적 당 열손실은 식 (6)과 같다.

$$q''_r = \sigma \epsilon (T_{\text{film}}^4 - T_a^4) \quad (6)$$

여기서 도로 표면의 방사율( $\epsilon$ )은 젖은 도로 표면의 방사율로 0.9 값을 사용한다. 물의 증발로 인한 단위면적 당 열손실은 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$q''_e = \rho_{\text{dry air}} h_m (W_{\text{film}} - W_a) h_{fg} \quad (7)$$

여기서 물질전달계수( $h_m$ )는 열 및 물질전달 유사성에 의해 아래 식 (8)을 이용하여 구할 수 있다<sup>(11)</sup>.

$$h_m = h_c / (\rho_{\text{dry air}} c_{p, \text{air}}) (\text{Pr}/\text{Sc})^{2/3} \quad (8)$$

제설 및 방빙에 필요한 총 열유속은 아래 식 (9)와 같이 앞서 고려한 요소를 모두 더하여 계산한다.

$$q''_0 = q''_{s, \text{snow}} + q''_1 + q''_{s, \text{film}} + q''_c + q''_r + q''_e \quad (9)$$

제설 및 방빙용 써모사이폰에 요구되는 성능을 확인하기 위해, 기상청에서 제공하는 경기도 수원시 날씨 데이터(2000~2022년, 총 23년간)와 식 (9)를 이용하여 제설 및 방빙에 필요한 도로 표면 열유속을 계산하였다. 그 결과 지난 23년 동안 제설에 필요한 표면 열유속의 평균값이 160 W/m<sup>2</sup>, 최댓값이 950 W/m<sup>2</sup>임을 확인하였다. 기록적인 폭설 상황에서도 제설 장치로 작동하는 것을 기대하기 위해 본 연구에서는 950 W/m<sup>2</sup>을 써모사이폰 응축부의 목표 열유속으로 선정하였다. 이를 증발부의 열유속으로 나타내면 285 W/m<sup>2</sup>이며, 이러한 차이는 증발부와 응축부의 길이 차에서 기인한다.

### 3. Lab-scale 제설용 써모사이폰 열성능 실험

#### 3.1 제설용 써모사이폰 열성능 실험 장치

본 실험에 사용된 써모사이폰은 아세톤과 적합성이 우수하고, 높은 내부식성을 갖는 스테인리스강 SUS 304 재질로 제작되었으며, 외경 25.4 mm, 두께 1.65 mm를 가진다. Fig. 3에 나타난 바와 같이, 증발부와 응축부의 길이는 660 mm 및 200 mm이며 단열부는 곡관부를 중심으로 각각 100 mm이다. 증발부의 1/3 지점과 2/3 지점에서 써모사이폰 외벽온도와 내부온도를 측정하였으며, 응축부의 전후 50 mm 지점에서 외벽온도와 내부온도를 각각 측정하였다. 또한 단열부에 써모사이폰 내부압력을 측정하기 위한 압력센서를 설치하였다. 증발부에 열을 공급하기 위해 증발부 외벽에 밴드 히터를 부착하였으며, TIM (Thermal Interface Material)을 사용하여 밴드 히터와 증발부 외벽의 접촉 열저항을 최소화하였다. 또한 응축부에 63.5 mm 직경을 갖는 cooling jacket을 설치한 후 내부에 냉각수를 공급함으로써 증발부에서 인

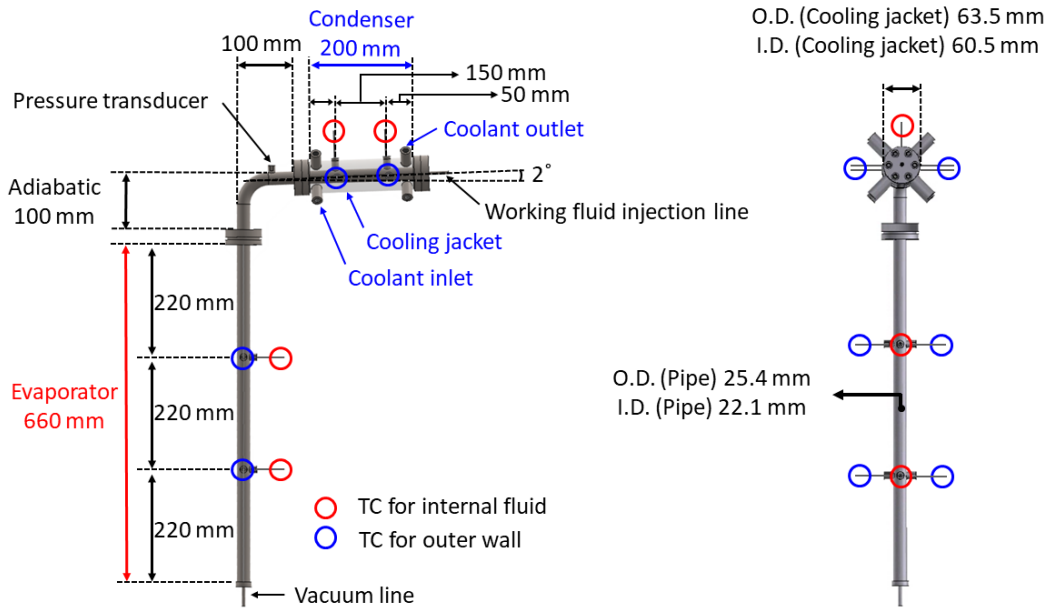


Fig. 3 Schematic diagram of geothermal thermosyphon device

Table 1 Working fluids for geothermal thermosyphon<sup>(9,12-16)</sup>

Working Fluid	Ammonia	R-134a	CO <sub>2</sub>	Acetone
LC <sub>50</sub>	2000 ppm	500×10 <sup>3</sup> ppm	820×10 <sup>3</sup> ppm	76 mg/L
Global Warming Potential (GWP)	0	1300	1	0.5
Figure of Merit (15 °C) [kg · s <sup>5/2</sup> /K <sup>3/4</sup> ]	4557	950	1056	1568

가한 열을 회수하였다. 도로의 넓은 면적에 열을 공급할 수 있도록 응축부를 도로와 평행하게 제작하되, 응축된 작동유체가 증발부로 원활히 돌아가는 것을 위해 응축부를 지면으로부터 2° 기울어진 형태로 써모사이폰을 제작하였다.

제작한 써모사이폰 내부에 작동유체를 주입하기 전 작동유체를 2시간 동안 충분히 끓여 내부에 잔존할 수 있는 불응축가스를 제거한 후, 진공 상태의 써모사이폰 내부에 주입하였다. 본 연구에서 써모사이폰의 작동유체로는 아세톤을 사용하였다. Table 1은 기존 작동유체와 아세톤의 독성, 지구온난화 지수 그리고 성능지수(Figure of Merit, FOM)를 나타낸다. 아세톤의 반수치사농도(LC<sub>50</sub>)는 76 mg/L로 급성독성물질의 기준인 10 mg/L보다 큰 값을 나타내며, 암모니아와 비교하여 낮은 독성을 지닌 것을 확인하였다. 또한 아세톤의 지구온난화 지수는 0.5의 값을 가지며, 기존에 사용 중인 R-134a와 비교하여 낮은 값을 나타낸다. 지열 온도인 15 °C에서 계산한 아세톤의 FOM은 CO<sub>2</sub>, R-134a의 FOM보다 큰 1568 kg · s<sup>5/2</sup>/K<sup>3/4</sup>를 나타내며, 지열 온도에서 아세톤을 작동유체로 사용하는 써모사이폰이 CO<sub>2</sub>, R-134a를 작동유체로 사용한 써모사이폰보다 좋은 성능을 보일 것으로 예상된다. 아세톤은 작동 환경에서 낮은 내부 압력으로 인해 폭발의 문제로부터 자유로우며, CO<sub>2</sub>를 작동유체로 사용하는 써모사이폰과 비교하여 상대적으로 얇은 관으로 써모사이폰

을 제작할 수 있기 때문에 제작 비용 또한 낮출 수 있다. 아세톤의 작동 온도는 -50~100°C 사이로, 겨울철 강설 환경인 -18~0°C에서 사용하기 충분하므로 제설용 써모사이폰에 매우 적합한 작동유체로 판단하였다.

### 3.2 실험 방법 및 조건

써모사이폰에 작동유체의 주입을 완료한 후 실험을 진행하였으며, 실험을 진행하는 조건은 강설 환경과 지열 온도를 고려하였다. 증발부의 경우, 국내 지열은 5 m 깊이부터 200 m 깊이까지 약 15°C의 일정한 온도를 갖기 때문에, 지열 온도 조건에 부합하는 증발부의 온도를 15°C로 유지할 수 있도록 전원공급기(power supply)에 연결된 밴드 히터를 통해 열을 일정하게 공급하였다. 이때, 실험의 전체적인 구성과 장치의 에너지 밸런스 계산을 고려하여 균일 열유속 조건으로 열을 증발부에 공급하였으며, 공급하는 열유속은 증발부 온도가 15°C와 유사하게 유지될 수 있는 0.76, 1.02 kW/m<sup>2</sup> 2가지로 설정하였다.

응축부는 강설 시 도로 위 적설을 녹이고 결빙을 방지하기 위해 낮은 주위 온도에도 응축부 외벽은 영상의 온도를 유지해야 한다는 점을 고려하여 응축부를 감싸는 cooling jacket에 0°C의 냉각수를 40 L/hr 유량으로 흘려보내며 증

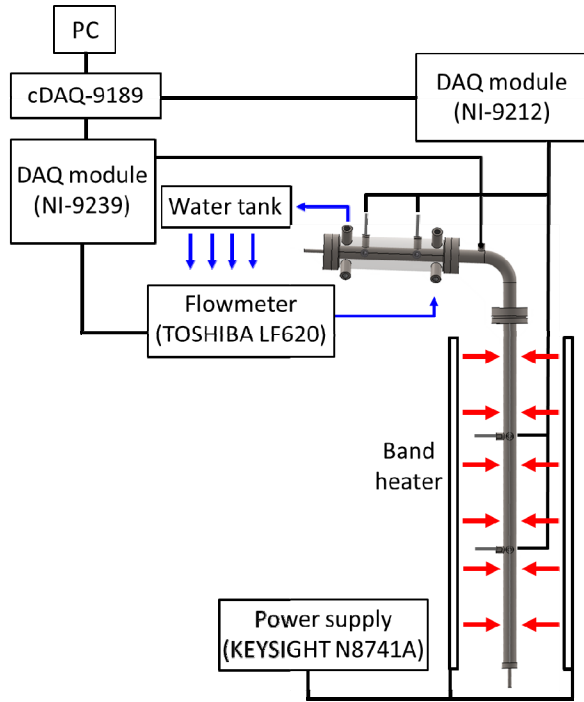


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental apparatus

발부로부터 공급된 열을 회수하였다. 이 과정에서 응축부 외벽의 온도를 측정하였으며, 유량계를 통해 냉각수의 유량을 측정하고, cooling jacket의 입구 및 출구 온도를 측정하여 응축부에서 방출된 열량을 계산했다. 또한 응축부로 공급되는 냉각수가 결빙되는 것을 방지하기 위해 어는점이  $-33.8^{\circ}\text{C}$ 인 에틸렌글리콜 50 wt% 수용액을 냉각수로 사용하였다. 실험 장치 구성은 Fig. 4와 같다. 실험에서는 KEYSIGHT사 N8741A 전원공급기를 사용하여 밴드 히터에 전력을 공급하였으며, Jeio Tech사 RW3-3025P 항온수조를 사용하여  $0^{\circ}\text{C}$ 의 냉각수를 cooling jacket에 공급하였다. 또한 TOSHIBA사 LF620 유량계를 이용하여 냉각수 유량을 측정하였고, OMEGA사 압력센서와 T형 열전대를 사용하여 압력과 온도를 정밀하게 측정하였다. 써모사이폰의 열성능 측정에 필요한 모든 데이터는 NI사 cDAQ-9189, NI-9212, NI-9239를 이용하여 획득하였다.

### 3.3 써모사이폰 열성능 계산 및 불확도 분석

증발부의 열전달률은 아래 식 (10)과 같이 계산한다.

$$q_{\text{eva}} = V \times I \quad (10)$$

응축부의 열전달률은 아래 식 (11)과 같다.

$$q_{\text{cond}} = \dot{m}_{\text{coolant}} c_{p,\text{coolant}} (T_{\text{coolant,in}} - T_{\text{coolant,out}}) \quad (11)$$

증발부와 응축부에서 측정한 두 열량은 Table 2에 나타난 바와 같이, 평균 3%의 차이를 보였다. 증발부의 열전달계수는 식 (12)와 같이 계산한다.

$$h_{\text{eva}} = q_{\text{eva}} / [A_{\text{eva}} (T_{\text{eva}} - T_{\text{sat}})] \quad (12)$$

응축부의 열전달계수는 아래 식 (13)과 같다.

$$h_{\text{cond}} = q_{\text{cond}} / [A_{\text{cond}} (T_{\text{sat}} - T_{\text{cond}})] \quad (13)$$

모든 증발부와 응축부의 벽면 온도는 각 위치의 좌우 두 점에서 측정한 값의 평균을 사용하였다. 써모사이폰의 열저항은 아래 식 (14)를 이용하여 계산하였다.

$$R = (T_{\text{eva}} - T_{\text{cond}}) / q_{\text{eva}} \quad (14)$$

측정 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 국제표준화기구 (ISO)의 측정 불확도 표현지침<sup>(17)</sup>에 따라 95% 신뢰구간에서 측정 불확도를 분석하였다. 열전달계수와 열저항의 합성 표준 불확도(combined standard uncertainty)는 아래 식 (15)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n ((\partial f / \partial x_i) u(x_i))^2} \quad (15)$$

여기서  $y$ ,  $f$  그리고  $x$ 는 각각 열전달계수와 열저항의 측정값, 계산식 그리고 계산에 사용하는 요소이다. 열전달계수와 열저항의 상대 확장 불확도(Relative expanded uncertainty)는 식 (16)과 같다.

$$\text{Relative expanded uncertainty} = K u_c(y) / |y| \quad (16)$$

Table 2 Energy balance of the thermosyphon

Filling Ratio [%]	25		50		75		100	
Heat flux [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]	0.76	1.02	0.76	1.02	0.76	1.02	0.76	1.02
Evaporator heat transfer rate [W]	35.01	46.66	35.01	46.66	35.01	46.66	35.01	46.66
Condenser heat transfer rate [W]	33.21	44.32	34.43	44.27	34.74	46.18	33.79	46.08
Energy balance [%]	95	95	98	95	99	99	97	99

Table 3 Uncertainty analysis of experimental results

	Evaporator Heat Transfer Coefficient	Condenser Heat Transfer Coefficient	Thermal Resistance
Measurement value	0.06~0.36 kW/m <sup>2</sup> ·K	1.3~2.3 kW/m <sup>2</sup> ·K	0.101~0.406 K/W
Combined Standard Uncertainty of the Results	0.002~0.017 kW/m <sup>2</sup> ·K	0.19~0.47 kW/m <sup>2</sup> ·K	0.003~0.012 K/W
Relative Expanded Uncertainty	6.1~9.9%	28.2~41.9%	5.1~6.9%

여기서 포함 인자( $K$ , coverage factor)는 95% 신뢰구간의 값인 2를 사용하였다. 본 실험에서 측정된 증발부 열전달 계수, 응축부 열전달 계수, 그리고 열저항의 상대 확장 불확도는 평균적으로 각각 8%, 35%, 그리고 6%이다. 응축부를 통해 방출된 열량이 매우 작으므로 냉각수 입·출구 온도 차이가 작게 나타났으며, 이로 인해 응축부 열전달 계수의 상대 확장 불확도가 비교적 크게 나타났다. 자세한 불확도 계산 결과는 Table 3에 정리하였다.

#### 4. 제설 및 방빙용 써모사이폰 성능 측정 결과

##### 4.1 증발부 열성능

Fig. 5(a)에 증발부 열유속 0.76, 1.02 kW/m<sup>2</sup> 및 충전율 25%, 50%, 75%, 그리고 100% 조건에 대하여 충전율에 따른 증발부 온도를 나타내었다. Fig. 5(a)의 온도는 Fig. 3에 나타난 증발부 외벽의 총 4개 지점에서 측정된 온도의 평균값이며, 그래프의 오차 막대는 10분간 측정된 온도의 표준편차에 해당한다. 충전율 25%로 충전된 써모사이폰에서 증발부 벽면 온도가 20°C 이상으로 가장 높게 나타났으며, 충전율이 증가함에 따라 벽면 온도가 감소하는 경향을 보였다. 충전율이 75%까지 증가하였을 때 벽면 온도가 가장 낮았으며, 충전율이 100%까지 증가하면 벽면 온도가 다소 증가하였다. 본 측정에서는 충전율이 50%보다도 높은 조건에서 증발부 벽면 온도가 겨울철 지열 온도인 15°C 이하로 유지됨을 확인하였다. 본 실험에서 목표한 열유속 0.285 kW/m<sup>2</sup> 또한 만족하는 것을 확인하였다. Fig. 5(b)는 충전율에 따른 증발부의 열전달 계수를 나타내었으며, 그래프의 오차 막대는 열전달 계수의 불확도를 나타낸다. Fig. 5(b)를 통해 충전율이 증가함에 따라 증발부의 열전달 계수가 점차 증가하고, 충전율 75%에서 최대값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 충전율이 100%까지 증가하면 열전달 계수가 다소 감소하나, 충전율 25%, 50%에서의 값과 비교하면 작은 차이임을 확인하였다.

충전율에 따른 증발부 열성능 변화의 결과를 고찰하기 위해 축 방향 위치에 따른 벽면 온도를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)~6(c)는 각각 충전율 25%, 50%, 그리고 75% 조건에서의 결과이며, 온도측정 위치와 충전된 작동유체의 수위를 각 그래프 우측 하단에 그림으로 표시하였다. 목표한 충전율만큼 작동유체를 충전하기 위하여 각 충전율에 따른 증

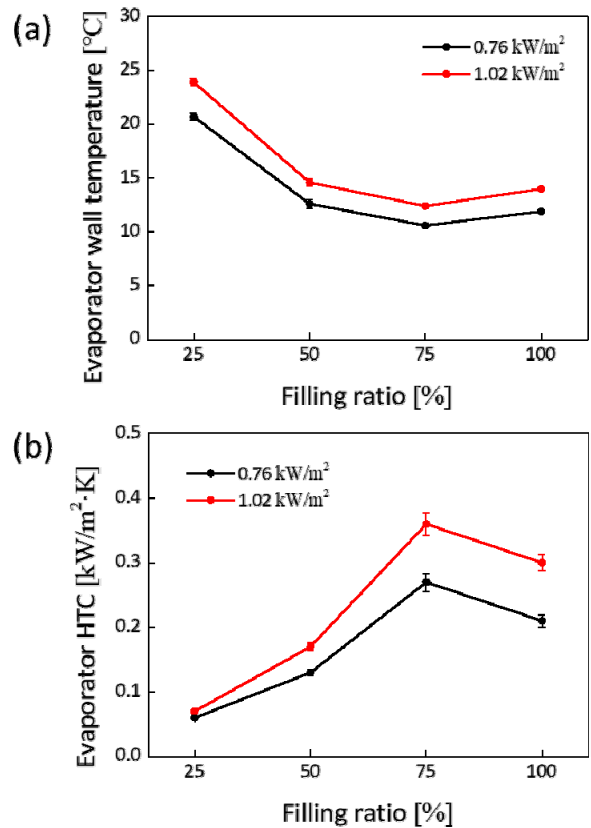


Fig. 5 Evaporator thermal performance of the geothermal thermosyphon according to filling ratio (a) Evaporator wall temperature (b) Heat transfer coefficient at the evaporator

발부의 체적을 계산하였으며, 동일한 체적의 스테인리스강 실린더를 제작하였다. 이를 이용하여 작동유체를 주입하였으며, 실험 종료 후 충전된 작동유체의 질량을 측정함으로써 작동유체의 수위를 확인하였다. 여기서, 충전율은 증발부 체적에 대한 작동유체의 백분율을 의미한다. 증발부에 0.76, 1.02 kW/m<sup>2</sup>의 열을 공급하는 조건에서 충전율 25%로 충전된 써모사이폰은 증발부 벽면의 온도가 21.0~24.6°C로 측정되었으며(Fig. 6(a)), 충전율 75%로 충전된 써모사이폰의 증발부 벽면 온도는 8.9~14.1°C로 측정되었다(Fig. 6(c)). Fig. 6(a)와 6(c)를 비교하면, 액체 풀이 존재하는 벽면 온도가 액체 풀이 존재하지 않는 영역의 벽면 온도보다 낮은 것을 알 수 있으며, Fig. 6(b)에 나타난 충전율 50%에서의 결과를 통해 액체 풀 영역의 증발부 벽면 온도가 액체 풀이 존

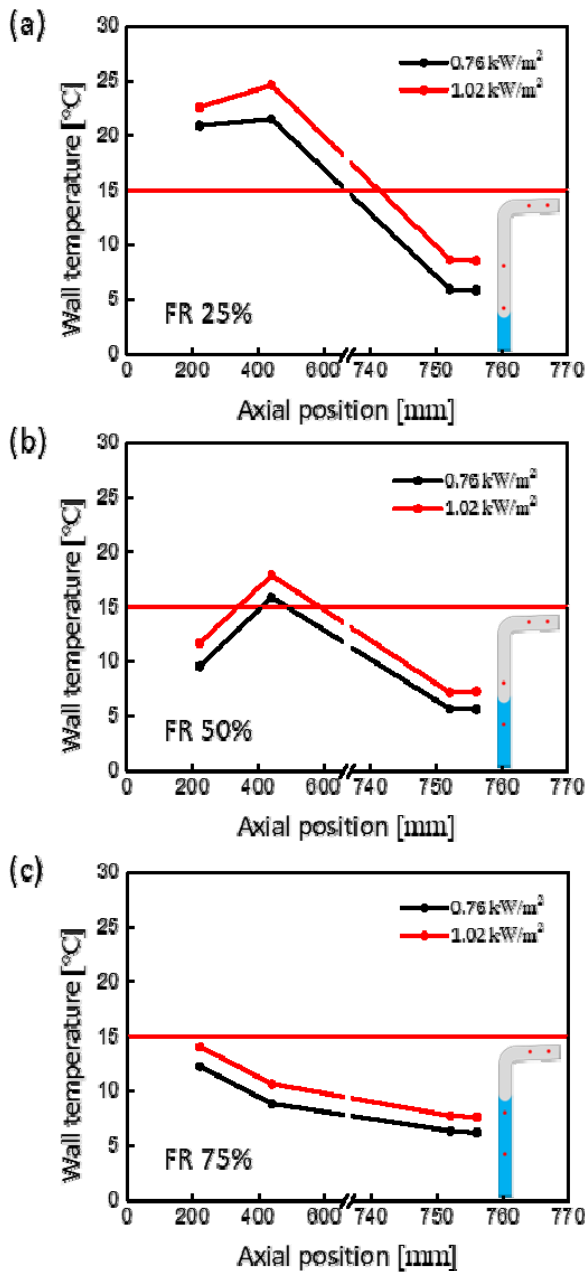


Fig. 6 Wall temperature of the geothermal thermosyphon along the axial position for various filling ratio (a) filling ratio 25% (b) filling ratio 50% (c) filling ratio 75%

재하지 않는 영역의 증발부 벽면 온도보다 낮은 것을 확인할 수 있다.

본 실험의 증발부 열유속 조건은 최대  $1.02 \text{ kW/m}^2$ 로, 일반적으로 내경 1인치 TPCT (Two-Phase Closed Thermosyphon) 증발부 내부의 액체 풀에서 비등이 발생하는 열유속인  $10 \text{ kW/m}^2$  대비 매우 작다<sup>(18)</sup>. 따라서, 본 실험에 사용된 지열 써모사이폰 증발부에 존재하는 액체 풀에서는 비등이 발생하지 않으며, 증발부와 작동유체의 열교환은 증발부 벽면을 따라 흘러내리는 응축수의 증발과 액체 풀 내부 자연대류에 의해 이루어진다. Chatterjee et al.<sup>(19)</sup>이 제시한 총

진율에 따른 써모사이폰 열성능 고찰 결과를 살펴보면, 낮은 열유속 조건에서 충진율 40%일 때의 증발부 성능이 충진율 80% 대비 우수함을 확인하였다. 이것은 낮은 열유속 조건에서, 벽면을 따라 떨어지던 응축수의 증발이 액체 풀 내부에서 발생하는 자연대류 열전달 혹은 비등보다 지배적인 열전달 기구로 작용하였다고 설명하였다. Fig. 6(b)와 6(c)의 액체 풀에 잠긴 증발부 하단의 벽면 온도를 비교하면, 충진율 75%의 벽면 온도가 충진율 50%의 벽면 온도보다 높은 것을 확인할 수 있다. 두 측정 지점 모두 액체 풀에 잠겨있지만, 충진율 50%의 온도측정 위치는 증발부 벽면의 막 증발이 발생하는 영역과 인접하여 액막에서 발생하는 증발의 영향을 받아 충진율 75%의 벽면 온도보다 더욱 낮은 온도를 나타낸 것으로 판단된다. 충진율 100%의 증발부 벽면 온도 또한 충진율 75%와 같은 위치에서 온도를 측정하였지만, 막 증발의 영향으로 충진율 75%의 벽면 온도가 더 낮게 나타났으며, 이로 인해 증발부의 열전달계수가 더 높게 나타난 것으로 판단되어진다.

하지만 증발부 벽면의 평균 온도를 비교하면 본 연구 결과에서는 충진율 50%의 증발부 온도가 충진율 70%의 증발부 온도보다 높게 나타나며 증발부에 존재하는 얇은 액막에서 발생하는 증발보다 액체 풀에서 발생하는 자연대류 열전달의 영향이 더욱 크게 나타났다고 판단되어진다.

Fig. 1과 같은 형상을 가지는 일반적인 써모사이폰은 응축부가 기울어져 있지 않아 응축수의 회수가 비교적 원활하고, 액체 풀이 존재하지 않는 증발부 벽면에 액막이 균일하게 형성된다. 하지만 본 연구에서 사용된 지열 써모사이폰은 넓은 범위의 도로를 제설하기 위해 응축부를 도로와 평행하도록 제작하므로 기울어진 써모사이폰의 응축부에서 응축된 아세톤은  $1\sim 2^\circ$  수준의 경사를 따라 증발부로 유입된다. 이로 인해 응축수의 회수가 어려울 뿐만 아니라, 벽면에 액막이 균일하게 형성되지 못하므로 액막이 존재하는 영역의 벽면 온도가 액체 풀이 존재하는 영역의 벽면 온도보다 높게 나타난 것으로 판단된다. 이를 통해 액체 풀이 차지하는 비중이 높아 자연대류 열전달이 활발히 발생할 수 있도록 하는 것이 증발부에서 지열을 흡수하는 데 보다 유리함을 알 수 있다. 또한 Fig. 5(a)에 나타난 실험 결과로 보아 충진율 75%와 100%의 증발부 온도 차이가 크지 않으며, Fig. 6에 나타난 실험 결과로 미루어보아, 지열 써모사이폰 증발부 체적의 75% 이상으로 작동유체를 충전할 때 지열을 원활히 흡수할 수 있을 것으로 판단된다.

## 4.2 응축부 열성능 및 써모사이폰 열저항

Fig. 6(a)~(c)에 나타난 벽면 온도의 측정 결과를 보면, 증발부에  $0.76, 1.02 \text{ kW/m}^2$ 의 열을 공급하는 조건에서 응축부 벽면 온도는  $5.7\sim 8.7^\circ\text{C}$ 로 측정되었으며, 실험에서 각



응축부 벽면 온도는 평균 0.4°C 미만의 온도 차로 균일한 온도로 유지되었다. 모든 써모사이폰의 응축부 외벽온도는 눈의 녹는점 0°C보다 높은 온도로 유지되는 것을 확인하였으며, 강설 환경에서 도로 위 적설을 제거하고 결빙을 방지하기 위해 응축부 온도를 눈이 녹는 온도 이상으로 유지한다는 목표를 충족하였음을 알 수 있다. 또한 장치의 증발부에 0.76, 1.02 kW/m<sup>2</sup>의 열을 공급할 때 증발부와 응축부의 면적 차이로 인해 응축부에서는 2.5, 3.2 kW/m<sup>2</sup>의 열을 방출하여 앞서 설명한 제설 및 방빙을 위해 도로에 공급해야 하는 열유속 0.95 kW/m<sup>2</sup>을 만족하는 열을 응축부를 통해 방출하는 것을 확인하였다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 15°C 지열을 이용한 제설을 목표로하므로 증발부 온도가 15°C를 초과한 충진율 25%, 50%는 지열 써모사이폰에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 7은 충진율에 따른 응축부 열전달계수를 나타내었다. 응축부의 열전달계수는 충진율 50% 조건에서 가장 높았으며, 50%에서 충진율이 증가하거나 감소할수록 응축부 열전달계수가 감소하는 경향을 보였다. Fig. 6(a)~(c)에 나타난 충진율에 따른 벽면 온도의 그래프를 통해 충진율에 따른 응축부의 위치별 벽면 온도가 약 1°C 수준의 차이를 보임을 확인할 수 있다. 본 실험에서는 충진율이 증발부 성능과 비교하여 응축부 성능에 상대적으로 미미한 영향을 미쳤으며, 이를 통해 실제 환경에서 지열 써모사이폰 응축부의 성능은 충진율에 따라 큰 차이가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 8에 충진율에 따른 지열 써모사이폰 열저항을 나타내었다. 앞서 고찰한 바와 같이, 증발부 성능은 75% 충진율에서 가장 우수하며, 응축부의 성능은 충진율에 따른 명확한 차이가 보이지 않았다. 각각 Fig. 5와 Fig. 7에 나타난 증발부와 응축부 열전달계수의 order of magnitude를 비교해 보면, 응축부 열전달계수가 증발부 열전달계수에 비해 약 10배

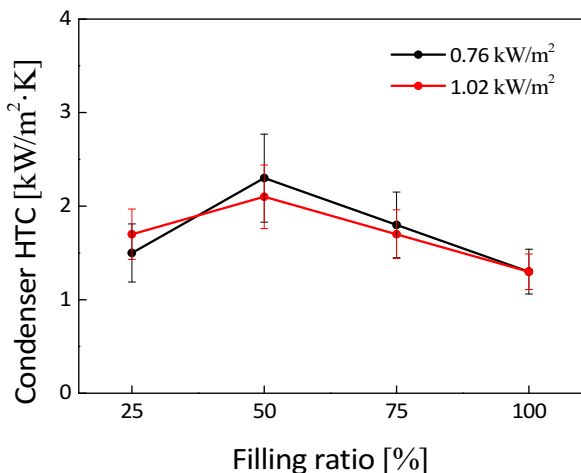


Fig. 7 Condenser heat transfer coefficient of the geothermal thermosyphon according to filling ratio

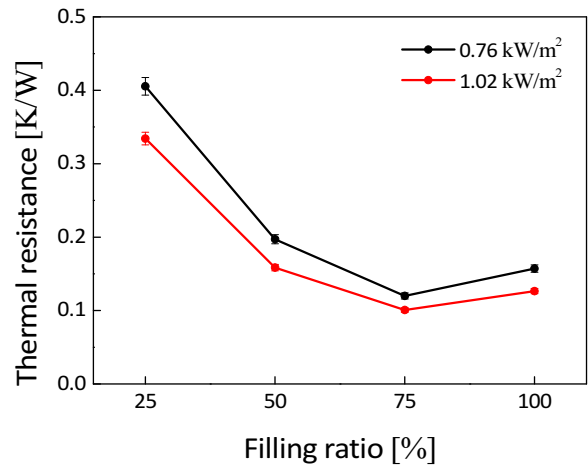


Fig. 8 The overall thermal resistance of the geothermal thermosyphon according to filling ratio

큰 것을 확인할 수 있다. 이는 지열 써모사이폰의 응축부에서 열을 방출하는 능력은 충분하나, 증발부에서 지열을 흡수하는 능력이 상대적으로 부족함을 의미한다. 즉, 지열 써모사이폰 내부에서는 증발부의 열저항이 응축부의 열저항보다 매우 크며, 증발부의 성능이 써모사이폰 전체 열저항에 더욱 지배적인 영향을 미친다. 이로 인해 Fig. 8에 나타난 써모사이폰 열저항 측정 결과에서도 작동유체가 충분하지 않을 때 열저항이 크고, 충진율 75% 이상에서 비교적 낮은 열저항을 보였다. 이를 통해 지열 써모사이폰의 성능 향상을 위해서는 안정적인 지열 흡수가 중요하며, 마이크로 다공질 금속 표면 개질을 통해 증발부의 열성능을 향상시킨다면 지열 써모사이폰이 보다 안정적인 제설 및 방빙 성능을 낼 수 있을 것으로 예상된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 기존 제설 방법이 갖는 다양한 한계를 극복할 수 있는 지열 써모사이폰의 열성능을 측정하였다. 작동유체의 선택에 있어서는 기존에 검토되었던 작동유체들의 한계를 극복할 수 있는 아세톤을 사용하였다. 우리나라 환경에서 제설 및 방빙에 필요한 열유속을 분석하였으며, 이를 이용하여 아세톤 기반 지열 써모사이폰의 제설 및 방빙 가능성을 판단하였다. 또한 충진율에 따른 써모사이폰 증발부, 응축부의 성능과 써모사이폰 열저항을 고찰하였으며, 최적의 성능을 낼 수 있는 충진율을 제시하였다. 주요한 결론은 다음과 같다.

1. 작동유체의 독성, 지구온난화 지수, 작동 압력, FOM 등을 고려하였을 때 암모니아, R-134a 등의 작동유체는 지열 써모사이폰에 적합하지 않으며, 아세톤이 기존 작동유체의 문제점들을 보완할 수 있는 대안임을 확인

- 했다.
2. 아세톤을 작동유체로 사용하는 Lab-scale 지열 써모 사이폰을 제작하였으며, 실제 강설 환경과 유사한 환경에서 지열 써모사이폰의 열성능을 측정하였다.
  3. 과거 20년 동안의 기상 데이터를 기반으로 안정적인 제설 및 방빙에 필요한 열유속을 계산하였으며, 이를 본 실험의 결과와 비교하였다.
  4. 충전율이 증가함에 따라 자연대류 영역이 증가하여 증발부 성능이 향상됨을 확인하였으며, 충전율 75% 이상의 조건에서 지열을 보다 잘 흡수할 수 있음을 확인하였다. 또한 응축부의 성능은 충전율에 따른 차이가 없음을 확인하였다.
  5. 지열 써모사이폰의 열저항은 증발부 성능에 지배적인 영향을 받음을 확인하였으며, 지열 써모사이폰은 충전율 75% 이상의 조건에서 좋은 성능을 보였다.
  6. 75% 충전율 조건에서, 아세톤을 작동유체로 하는 써모 사이폰이 실제 작동 환경 조건(증발부 벽면 온도 15°C 이하, 응축부 온도 0°C 이상)을 만족하고, 앞서 계산한 제설 및 방빙에 필요한 열유속을 만족함을 확인하였다.

### Acknowledgments

본 연구는 산업통상자원부 에너지수요관리핵심기술개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 한국에너지기술평가원의 연구비(과제번호: 20212020800270) 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

### References

- (1) Korea Road Traffic Authority, 2023, [https://taas.koroad.or.kr/sta/acs/exs/typical.do?menuId=WEB\\_KMP\\_OVT\\_UAS\\_PDS#](https://taas.koroad.or.kr/sta/acs/exs/typical.do?menuId=WEB_KMP_OVT_UAS_PDS#).
- (2) Shi, X., Fay, L., Yang, Z., Nguyen, T. A., & Liu, Y., 2009, "Corrosion of deicers to metals in transportation infrastructure: Introduction and recent developments", Corrosion reviews, Vol. 27, Nos. 1-2, pp. 23-52.
- (3) Fay, L., & Shi, X., 2012, "Environmental impacts of chemicals for snow and ice control: state of the knowledge", Water, Air, & Soil Pollution, Vol 223, pp. 2751-2770.
- (4) Liu, H., Maghoul, P., Bahari, A., & Kavacic, M., 2019, "Feasibility study of snow melting system for bridge decks using geothermal energy piles integrated with heat pump in Canada.", Renewable Energy, Vol. 136, pp. 1266-1280.
- (5) Balbay, A., & Esen, M., 2010, "Experimental investigation of using ground source heat pump system for snow melting on pavements and bridge decks.", Scientific Research and Essays, Vol 5(24), pp. 3955-3966.
- (6) Chi, Z., Yiqiu, T., Fengchen, C., Qing, Y., & Huining, X., 2019, "Long-term thermal analysis of an airfield-runway snow-melting system utilizing heat-pipe technology.", Energy Conversion and Management, Vol. 186, pp. 473-486.
- (7) Zorn, R., Steger, H., & Kolbel, T., 2015, "De-icing and snow melting system with innovative heat pipe technology.", Proceedings World Geothermal Congress.
- (8) Sakata, Y., Chishimba, J., Mochizuki, M., & Nagano, K., 2021, "Evaluating Groundwater Flow Effects for Enhancement of Ground-Source Heat Pipes in the Case of the Toyohira River Alluvial Fan, Japan.", Hydrology, Vol. 8(3), pp. 135.
- (9) UK Department for Environment, 2012, "Guidance on Minimising Greenhouse Gas Emissions from Refrigeration, Air-conditioning and Heat Pump Systems", <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7ed12ced915d74e6226a3e/fgas-rac7-alternatives.pdf>.
- (10) ASHRAE., 2019, "2019 ASHRAE Handbook Heating Ventilating and Air-Conditioning Applications (SI Edition).", American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Incorporated (ASHRAE)., pp. 52.1-52.22.
- (11) Incropera F. and DeWitt D., 2018, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," 8th Edition, J. Wiley & Sons, New York.
- (12) RIGAS, 2020, Ammonia 99.9999%, MSDS No. AA00155-000000198, [https://www.rigas.co.kr/file\\_download.php?filename=1.%20Ammonia%2099.9999%20%20AA00155-000000198.pdf](https://www.rigas.co.kr/file_download.php?filename=1.%20Ammonia%2099.9999%20%20AA00155-000000198.pdf).
- (13) National Refrigerants, Inc., 2021, R-134a, SDS No. R-134a, <https://refrigerants.com/wp-content/uploads/2019/12/SDS-R134a.pdf>.
- (14) Dräger, 2017, Carbon Dioxide, SDS No. 50242/4594917, [https://labelsds.com/images/user\\_uploads/Draeger%20CalGas%20Carbon%20Dioxide%204595193%20SDS%206-21-17.pdf](https://labelsds.com/images/user_uploads/Draeger%20CalGas%20Carbon%20Dioxide%204595193%20SDS%206-21-17.pdf).
- (15) Sigma-Aldrich Korea, 2018, "SAFETY DATA SHEET", SIGALD-179124.
- (16) Gómez-Hernández, J., Grimes, R., Briongos, J. V., Marugán-Cruz, C., & Santana, D., 2023, "Carbon dioxide and acetone mixtures as refrigerants for industry heat pumps to supply temperature in the range 150-220 °C", Energy, Vol. 269, pp. 126821.
- (17) ISO, 2008, "Uncertainty of measurement Part 3 : Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)", Geneva, Switzerland, Vol. 122.
- (18) Kim, J. S., Kim, Y., Shin, D. H., You, S. M., & Lee, J., 2021. "Heat transfer and flow visualization of a two-phase closed thermosiphon using water, acetone, and HFE7100". Applied Thermal Engineering, Vol. 187, pp.

- 116571.
- (19) Chatterjee, D., Kulshrestha, T., & Khandekar, S., 2023, "Continuous vapor generation for thermal-desalination applications using a thermosyphon based heat localization strategy". *desalination*, Vol. 555, pp. 116492.