

# Thermosyphon의 지열채열 성능에 관한 고찰

## A Study on the Characteristics of the Earth Heat Extraction Using Thermosyphon

신현준\*·서정윤\*\*  
H. J. Shin, J. Y. Seo

**Key words :** Thermosyphon(열사이폰), Snow Melting(용설), Earth Heat(지열)

### Abstract

Thermosyphons are simple devices that can passively transport thermal energy over relatively large distance with little temperature degradation. Especially, the thermosyphon system requires no costly energy input and is completely maintenance free. These attributes permit the use of low grade thermal energy for thermal control of structures including the stabilization of highway foundations.

This paper presents the experimental results of the snow melting system in which thermosyphon was utilized to transfer the earth energy to the pavement to remove snow and ice.

The test facility, three earth heated and one unheated test panels, is designed to investigate the variables associated with removing snow and ice from pavement surfaces.

The results of these test show that the earth heated panel surface temperature is higher 2~6°C than unheated panel when the ambient air temperature is -7°C.

The thermal performance of this earth source thermosyphon system for road heating showed that there was no snow on the heated test panels when the snowfall was 5cm average for the region.

### 기호설명

- A : 판넬의 표면적[m<sup>2</sup>]
- A<sub>c</sub> : 열사이폰의 응축부 표면적[m<sup>2</sup>]
- C : 비열[kcal/kg.°C]
- L : 판넬의 길이[m]
- L<sub>a</sub> : 열사이폰의 단열부 길이[m]
- L<sub>e</sub> : 열사이폰의 증발부 길이[m]
- M : 판넬의 폭[m]
- N : 판넬의 두께[m]
- P : 열사이폰의 매설피치[m]
- T : 온도[°C]

그리스문자

ρ : 밀도[kg/m<sup>3</sup>]

τ : 시간[hr]

## 1. 서론

열사이폰(Thermosyphon)은 열에너지를 비교적 적은 온도차를 가지고서도 원거리에서 효과적으로 전달할 수 있는 전열소자로서, 이러한 전열특성을 이용한 폐열회수시스템이 이미 오래전부터 산업분야를 중심으로 개발되어 실용화 되고 있다. 그러나 산업계에서의 폐열회수 이용은 대부분 약 60°C 이상의 비교적 온도가 높은 경우에 집중되고 있으며, 이보다 온도가 낮은 저온폐열의 경우에는 거의 이용되지 못하고 있다. 일상생활을 통해 배출되는 폐열은 대표적인 저온폐열로서 온도와 에너지 밀도가 낮아 경제성은 낮지만 보유열량이 막대하고 도시전

\*한국건설기술연구원

\*\*인하대학교 기계공학과

역에 비교적 고르게 분포되어 있어 에너지절약 차원에서 이들 폐열의 유효이용에 대한 관심이 날로 높아지고 있다. 또한, 이들 폐열과 같은 저온·저밀도의 특성을 가지고 있으며 무한정한 이용 잠재력을 보유하고 있는 것이 토양이 함유하고 있는 열에너지(이하 “지열”)이다. 지열은 위에서 언급한 바와 같이 에너지밀도가 낮은 비교적 저온의 특성을 가지고 있지만 양이 방대하고 어느 곳에서나 비용을 들이지 않고서도 쉽게 이용할 수 있는 자연에너지라는 장점을 지니고 있다. 이러한 점에 착안하여 최근 겨울철에 도로의 결빙을 방지하거나 눈을 녹이기 위해 열사이폰으로 지열을 채열하여 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 개념은 1970년에 미국의 연방도로청에 의해 처음으로 제안되었으며,<sup>(7)</sup> 이 개념을 처음으로 현장에 적용한 것은 1975년에 1213개의 열사이폰을 매설한 미국 Virginia주의 한 고속도로 현장이었다. 실험결과 이 시스템은 도로에 눈과 얼음이 쌓이는 것을 방지하는 데에 있어서 커다란 효과가 있다는 것이 밝혀짐에 따라 Wyoming주의 Cheyenne을 비롯한 여러 곳에 추가로 설치되어 이용되고 있다.

일본과 유럽에서도 이와같은 시스템을 독자적으로 개발하여 실용화 하고 있는데, 일본에서는 1977년에 처음으로 현장에 대한 적용이 시도된 이후 1982년까지 20여 곳에 설치되었고 현재까지도 시스템의 성능을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

한편 겨울철에 결빙이 특히 잦은 도로구조물 중의 하나인 교량의 상판(Bridge Deck)표면을 지열로 가열하기 위한 연구가 J. E. Nydahl 등<sup>(1)</sup>에 의해 수행되었다. 이 연구에서는 교량의 각 모서리에 증발부의 길이 30.5m, 응축부의 길이 12.5~6.4m인 열사이폰 15개를 피치 150mm 간격으로 설치하고 이것을 설치 하지 않은 상판의 표면온도와 비교한 결과 설치된 부분이 평균 10°C 정도 더 높은 온도를 유지한다는 것을 확인하였다.

또한 O. Tanaka 등<sup>(2)</sup>은 눈이 특히 많은 일본의 산간지방에 대한 적용을 목적으로 토양열과 지하수의 열을 동시에 채열할 수 있는 시스템을 개발하여 현장에 설치한 결과 토양으로 부터 40~100 W/m<sup>2</sup>, 지하수로 부터 최대 400 W/m<sup>2</sup>까지 채열할 수 있었다.

우리나라에서는 아직 이분야에 대한 연구경험이

전무한 상태이기 때문에 외국의 연구결과를 참조하여 열사이폰을 이용한 실험장치를 설치하고, 이것을 통해 수집한 실험자료의 분석결과를 통하여 영동지방과 같은 특수지형의 도로에 대한 응용가능성을 파악하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 열사이폰 제작

지열의 채열에 사용한 열사이폰은 KSD5301의 규격에 맞추어 생산된 호칭경 25.4 mm, 두께 1.65 mm의 배관용 동파이프(K-type)와 KSD5578에 규정된 소켓(Socket), 밸브(Valve) 등의 부속품을 사용하여 제작하였다. 열사이폰 제작에 필요한 소정의 길이로 절단한 파이프와 부속품의 관내부에 부착된 기름, 녹 등의 이물질들을 Acetone과 같은 용제를 사용하여 완전히 제거하는 전처리작업이 끝나면 산소 용접법을 이용하여 파이프를 연결한다. 이 경우 용접시 발생하는 고온의 열로 인하여 파이프의 표면에는 동의 산화피막이 형성되며, 특히 파이프 내부에 형성된 이들 산화물질들은 열사이폰의 성능저하의 원인이 되기 때문에 고압세척기를 사용하여 내부로 부터 완전히 제거하였다. 이와같은 과정을 거쳐 파이프의 제작이 끝나면 파이프의 본체, 용접부등에 발생한 결함을 찾아내기 위해 약 10 kg/cm<sup>2</sup>의 내압을 가하여 실시하는 기밀시험을 거쳐 파이프 내부를 2×10<sup>-6</sup>Torr 이상의 진공도로 약 2~3시간 동안 유지시켜 조직 내부에 잔존해 있는 기체를 완전히 탈기하므로써 열사이폰을 설치한

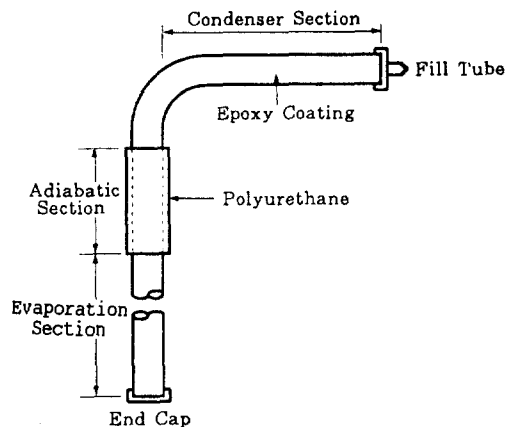


Fig. 1 Thermosyphon Components

**Table 1** Specifications of Thermosyphon

Items	Descriptions
Case Material	Copper(KSD 5301, K-type)
Diameter	Ø25.4
Working Fluid	Methanol
Surface Treatment	Epoxy Coating
Detergent for Pipe Cleaning	Acetone, Trichloroethylene

후 파이프내부에 불용축가스가 발생하는 것을 방지 하도록 하였다.

이상과 같은 과정을 통해 준비된 파이프는 특수 하게 제작된 진공장치를 이용하여 파이프의 내부진 공도가  $5 \times 10^{-7}$ Torr 이상이 되도록 배기하고, 이 러한 상태에서 작동액(Methanol)을 주입한 후 주 입구(Fill Tube)를 밀봉하므로써 열사이폰의 제작 을 완료한다. 제작된 열사이폰은 다시 15~20°C의 열을 증발부(Evaporator Section)에 공급하여 정 상적인 작동여부를 검사한다.

제작이 완료된 열사이폰의 구조를 Fig. 1에 제작 사양을 Table 1에 나타낸다.

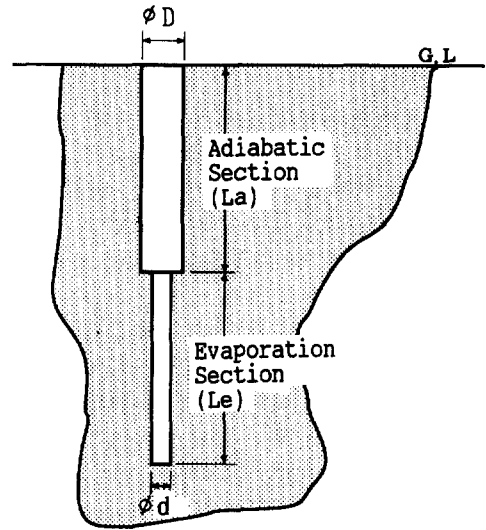
**2.2 실험장치의 설치**

실험장치는 인천에 소재하고 있는 야외시험장에 설치하였으며 증발부가 설치된 위치(지표면으로 부 터 깊이 6~20m 지점)의 토양은 함수율[(토양중 수분의 무게/토양중 토립자의 무게)×100%]이 약 45%, 밀도가 약 900 kg/m<sup>3</sup>이고, 토립자의 비중이 약 2.2 정도인 점토를 주성분으로 하고 있다.

(1) 열사이폰 증발부의 설치

열사이폰의 증발부와 단열부를 설치하기 위한 구멍을 Fig. 2와 같은 구조로 지정된 위치에 보오링 (Boring)하였다. 그림에서 La는 단열부(Adiabatic Section)가 위치하는 부분으로서 직경 100 mm, 지 표면으로 부터의 깊이가 2~6 m이며, Le는 증발부 (Evaporator Section)가 매설되는 부분으로서 직 경 50 mm, 단열부의 하단으로부터 4~14m의 깊 이에 위치한다. 이상의 보오링 작업의 내용을 정리 하면 Table 2와 같다.

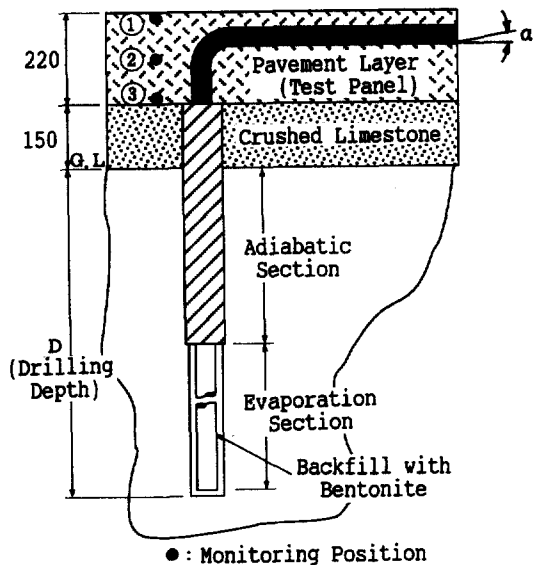
여기서 보오링 직경은 열사이폰의 설치를 원활하 게 할 수 있도록 하기 위해 증발부는 파이프의 외



**Fig. 2** Schematic of Excavation

**Table 2** Specifications of Excavation

Adiabatic Section		Evaporator Section	
Diameter(D) (mm)	Depth(La) (m)	Diameter(d) (mm)	Depth(Le) (m)
Ø100	6	Ø50	14
Ø100	4	Ø50	6
Ø100	2	Ø50	4



**Fig. 3** Installed Thermosyphon in Cross Section

Table 3 Summary of Test panels

Site No.	Descriptions					Remarks
	Length of Evaporator Section(m)	Length of Adiabatic Section(m)	Length of Condenser Section(m)	Drilling Pitch:P (m)	Dimension (L×M×N)(m)	
PANEL A	14	6	4	0.4	1×4.5×0.37	<u>General Conditions</u> ·Pipe Diameter : $\phi 25.4$ ·Pipe Material : Copper (KSD5301)  ·No. of Installed Thermosyphons : 2 EA/Panel
PANEL B	None	None	None	None	1×4×0.37	
PANEL C	6	4	2.5	0.4	1×3×0.37	
PANEL D	4	2	2	0.4	1×2.5×0.37	

※See Fig. 4 for Site No.

경이 28.58 mm인 점을 고려하여 50 mm, 단열부는 단열용 PVC파이프의 외경이 89 mm인 점을 고려하여 100 mm로 하였다.

보오링 작업시에는 측면붕괴를 방지하기 위하여 Bentonite 등의 점결제를 주입하면서 공사를 진행하고, 특히 입구에서의 측면붕괴를 방지하기 위하여 보호용 관(Protection Tube)을 약 3~4 m 깊이 까지 삽입시키는 것이 바람직스럽다.

보오링 작업이 완료된 후 제작된 열사이폰은 크레인을 사용하여 보오링 hole에 삽입한다. 이때 증발부에 대한 지열의 열전달을 촉진시키기 위해 파이프 외벽과 보오링 hole 내벽 사이의 틈새를 벤토나이트(Bentonite) 등과 같은 점결제로 완전히 뒤채움을 함으로써 증발부의 설치공사를 완료한다.

한편 단열부는 호칭경 75 mm의 PVC파이프를 열사이폰 파이프와 동심이 되도록 지표면으로부터 2~4 m 깊이에 설치한 후 틈새에 발포용 Polyurethane을 주입시켜 단열효과를 내도록 하였다.

Fig. 3은 열사이폰이 지중에 설치된 단면의 상세도를 나타낸 것으로 도로의 포장층(Pavement layer)과 보조기층(Crushed Limestone)은 열사이폰의 응축부가 설치되어 채열된 지열을 방열시키는 실험용 Panel이 된다.

#### (2) 열사이폰 응축부의 설치

열사이폰 내에 충전된 작동액은 증발부에서 지열을 흡수하여 기화되고, 그 결과 파이프 내부에 압력차가 발생하여 증기는 압력과 온도가 낮은 지면(응축부)쪽으로 상승하고 잠열을 방출하면서 응축된다. 이때 응축된 작동액은 중력에 의해 증발부로 다시 환류된다. 따라서, 열사이폰의 응축부는 응축

된 작동액이 중력에 의해 다시 증발부로 원활히 환원될 수 있도록 하기 위해 Fig. 3에 표시한 것과 같이 수평으로 부터  $\alpha=3\sim 5^\circ$ 의 경사가 유지되도록 하여야 하며 외부의 충격등에 의해 변형(특히, 굽힘)이 일어나지 않도록 설치에 주의하여야 한다. 이와 같은 방법으로 파이프의 설치작업이 끝나면 응축열의 열전달을 촉진시키고 열이 응축부 주위에 균일하게 분포되도록 하기 위하여 열확산핀을 200 mm 간격으로 부착시킨 후 150 mm 두께로 자갈을 깔고 그 위에 두께 220 mm로 콘크리트를 타설하여 응축부의 설치를 완료하며, 이때 길이 및 폭은 열사이폰의 치수와 설치여부에 따라 4종류로 하였다. 지열의 채열성능을 실험하기 위해 이와같은 과정으로 설치를 완료한 실험장치(이하 "판넬"이라 함)의 규격과 완성된 모습을 Table 3과 Fig. 4에 나타낸다.

Table 3에서 보는 바와같이 판넬의 표면적에 대

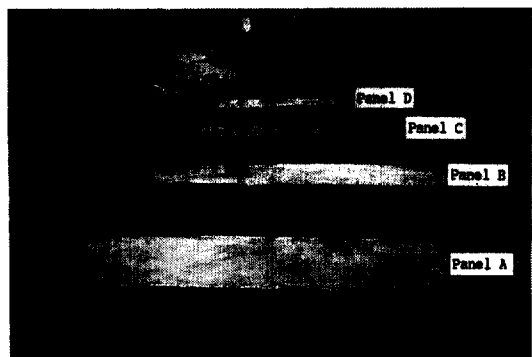


Fig. 4 Site Arrangement

한 열사이폰 응축부의 표면적의 비( $\frac{A_c}{A}$ )는 모두 0.4가 되도록 각 판넬의 치수를 정하였으며, 증발부는 설치깊이의 변화에 따른 채열량의 변화상태를 분석하여 장치 필요한 증발면적을 예측하기 위해 3종류로 구분하여 설치하였다. 즉, Panel A, Panel C, Panel D는 이러한 기준에 따라 열사이폰이 설치된 판넬이며, Panel B는 설치되지 않은 판넬이다.

2.3 실험방법

(1) 센서의 설치

판넬 각 부분의 온도를 측정하기 위해 사용한 열전대(Thermocouple)는 미국 ANSI/MC96.1에 규정된 Type T로서 AWG No. 32(American Wire Gage Number 32: 직경 약 0.2 mm)이다. 열전대의 접점은 0.5 mm 내외로 만들고 온도교정장치

(Calibration Apparatus)를 이용하여 측정오차가  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 의 범위내에 속하는 것만을 엄선하여 사용하였다. 실험장치로부터 실험자료를 수집하기 위한 센서의 부착위치(Monitoring Position)는 Fig. 3에 표시한 것과 같이 각 실험장치의 표면(①), 단면의 중앙(②), 포장층과 자갈층의 경계(③)에 설치하였으며, 각 평면층에 대해서는 Fig. 5에 표시한 것과 같이 중앙(㉓)과 주위로 부터 각 변의 길이의 1/4이 되는 위치 ㉔, ㉕, ㉖, ㉗ 등 총 5개를 설치하여 온도분포를 측정할 수 있도록 하였다.

(2) 실험자료의 수집

실험자료의 수집을 위해 설치된 열전대의 수는 모두 72개이며 10분 간격으로 측정자료를 수집·저장한 후 분석하였다. Fig. 6은 Data Acquisition의 개략도이다.

3. 실험결과 및 고찰

실험장치는 10월 중순부터 가동하였으나 이 시기에는 아직 기온이 비교적 높아 이때 수집된 자료로는 열사이폰의 지열채열효과를 파악하기 어려워 '92.12.31~'93.1.14일을 열사이폰의 채열성능 분석을 위한 자료수집기간으로 정하였다.

Fig. 7은 이 기간 동안에 수집한 각 판넬표면의 평균온도와 대기온도의 변화상태를 나타낸 것이다. 각 판넬의 표면온도는 대기온도의 변화와 거의 같은 경향으로 변하는 것을 알 수 있다.

따라서, 열사이폰의 채열성능을 분석하여 적정 매설깊이를 도출하기 위해서는 실험기간 중 기온이 가장 낮은 시기를 선택하여 이때에 수집된 여러가

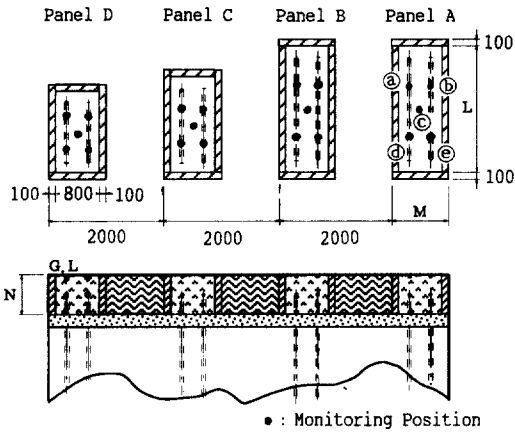


Fig. 5 Monitoring Schematic

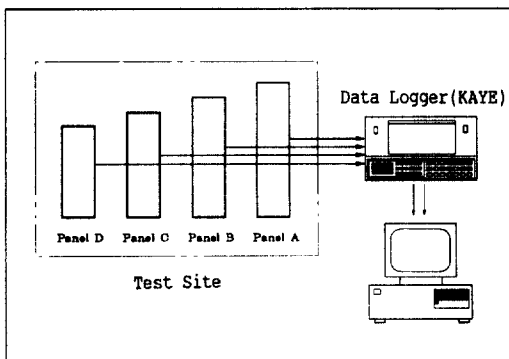


Fig. 6 Schematic of Data Acquisition

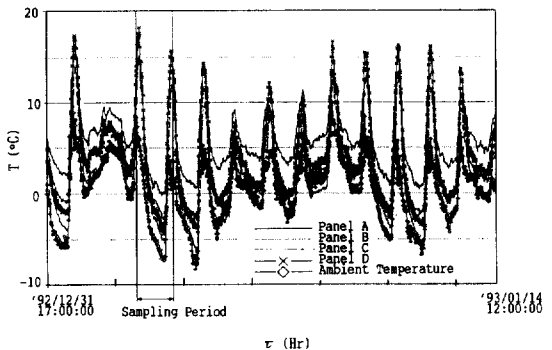


Fig. 7 Ambient Air and the Four Panel Surface Temperature Profiles (Jan. 1, 1993~Jan 14, 1993)

지 관련 자료를 중점적으로 비교·분석하는 것이 합리적이다. 즉, 기온이 가장 낮은 날은 열손실이 가장 많다고 볼 수 있기 때문에 패널 각 부분의 온도도 역시 가장 낮은 값을 나타낼 것이므로 채열능력의 정도를 간단히 비교할 수 있다. 이와같은 취지에서 Fig. 7에 표시한 'Sampling Period'('93.1월 3일 10:48:00~1월 4일 17:02:24)를 설정하고 이 기간 동안에 수집한 각종 실험자료를 발췌하여 성능분석을 위한 기준으로 사용하였다.

Fig. 8은 해당기간 동안에 대한 대기온도의 변화 상태를 나타낸 것이다. 이 기간 동안의 최저온도는  $-7.3^{\circ}\text{C}$ 이며, 하루 중에서 최저온도는 대체적으로 오전 6~8시 사이에서 나타나고 있다.

Fig. 9는 해당기간 동안의 대기온도와 각 패널의 표면온도상태를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 파이프 증발부의 설치 깊이에 비례하여 패널 표면의 온도가 높아지고 있다. 즉, 기온이 가장 낮은( $-7.3^{\circ}\text{C}$ ) 시각에 Panel A는  $0^{\circ}\text{C}$ , Panel C는  $-3.2^{\circ}\text{C}$ , Panel D는  $-4.4^{\circ}\text{C}$  인데 비해 열사이폰이 설치되지 않은 Panel B의 경우는  $-5.5^{\circ}\text{C}$ 를 나타내어 열사이폰이 지열을 채열하여 패널을 가열하고 있음을 알 수 있다. 또한 일사의 영향을 거의 받지 않는 18:00~08:00 사이에는 외기온도가 낮아질수록 열사이폰이 설치된 패널과 설치되지 않은 패널과의 온도차가 더욱 커지고 있는 현상으로 부터 열사이폰의 지열채열에 의한 패널의 가열효과를 더욱 뚜렷이 확인할 수 있다. 특히 이 시간대에 도로의 결빙이 가장 심하다는 점을 감안하면 이러한 장치를 이용함으로써 결빙으로 인해 발생할 수 있는

교통사고를 효과적으로 예방할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 10~Fig. 12는 각 패널 단면의 중앙, 하부층에 대한 온도분포를 나타낸다.

Fig. 10은 패널 수직단면의 가운데 층의 중앙에 위치한 지점(L/2, M/2, N/2)의 온도변화를 나타낸 것이며, Fig. 11은 자갈층과 접한 지점(L/2, M/2, N)의 온도변화를, Fig. 12는 열사이폰의 응축부가 위치한 바로 아래의 자갈층과 접한 지점(L/2, M/4, N)의 온도변화를 나타낸다. 외기의 영향을 직접 받지 않는 위치의 온도분포를 나타내는 이들 그림을 통해서 알 수 있는 것과 같이 열사이폰을 설치하지 않은 패널 내부의 온도와 열사이폰을 설치한 패널 내부의 온도와의 차는 각 패널의 표면온도차보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 한편, 이러한 결과는 도로의 결빙을 방지하기 위하여 설치하는

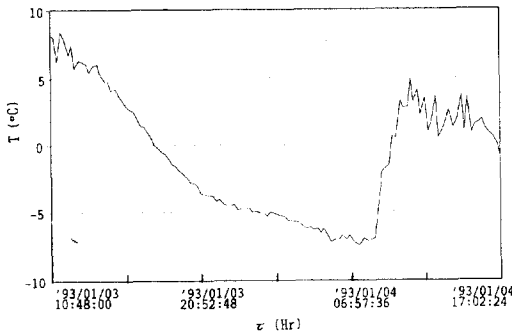


Fig. 8 Ambient Air Temperature Profile for the Sampling Period.

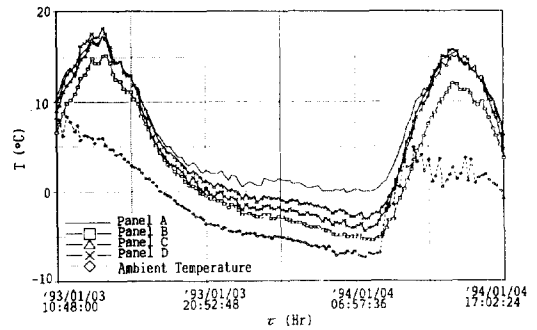


Fig. 9 Ambient Air and Four Panel Surface Temperature Profiles for the Sampling Period

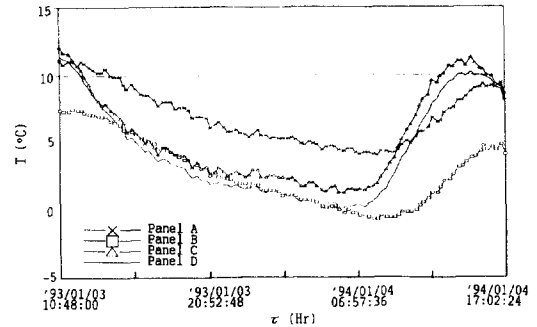


Fig. 10 Temperature Profile at the Cross Section(L/2, M/2, N=0.11 m) of the Panels for the Sampling Period

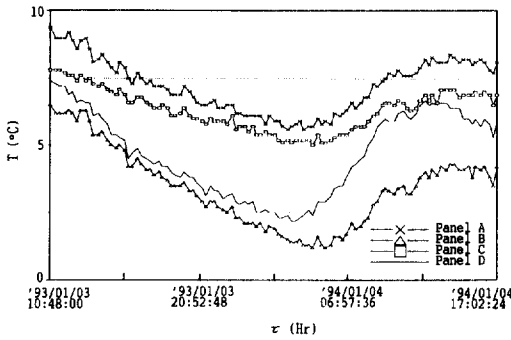


Fig. 11 Temperature Profile at the Cross Section(L/2, M/2, N=0.22 m) of the Panels for the Sampling Period

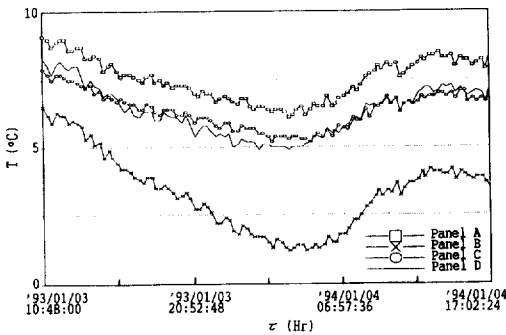


Fig. 12 Temperature Profile at the Cross Section (L/2, M/4, N=0.22m) of the Panels for the Sampling Period.

동결방지층의 두께를 줄일 수 있는 가능성을 보여주는 것으로 이것을 효과적으로 이용하면 도로건설비를 절약할 수 있을 뿐만 아니라 결빙과 해빙에 따른 열응력 발생을 억제하여 해빙기에 많이 발생하는 도로의 파손율을 감소시킬 수 있는 목적으로도 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

이상의 실험결과를 분석해 볼때 도로의 융설이나 결빙 및 동결방지를 위해 지열은 충분한 이용 가능성을 지니고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 에너지 사용에 따른 비용이 들지 않고, 열사이폰을 사용할 경우 운전비에 대한 부담이 없으며, 대기온도의 상태에 따라 자동적으로 열을 공급하거나 차단하므로 유지·관리가 필요없을 뿐만 아니라 도로단면의 온도차를 작게하고 동결을 방지함으로써 열충격을 감소시켜 도로의 내구성을 높여주는 부수적인 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 다른 방법에 비해 설치에 따른 초기투자비가 비교적 높기

때문에 이에 대한 해결방안이 강구되어야 하므로 우선 산간지방의 경사도로, 터널입구, 건물의 지하 주차장 출입구 및 교량의 상판 등에 선택적으로 설치하면 좋은 효과를 기대할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

도로의 융설 및 결빙방지를 위해 지열에너지의 활용 가능성을 파악하기 위한 목적으로 열사이폰을 이용한 채열시스템을 설치하여 수집한 실험자료를 분석한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 대기의 온도가  $-7.3^{\circ}\text{C}$ 일 때 증발부 길이 14 m, 응축부 길이 4m, 호칭경 25.4 mm의 동파이프를 사용하면 단면두께 370 mm의 도로 1.8~2.5m<sup>2</sup>를 영상의 온도로 유지할 수 있으며, 이경우 열사이폰을 설치한 판넬의 표면온도는 설치하지 않은 판넬의 표면온도 보다 평균 5~7°C가 높은 것으로 나타났다.

2) 열사이폰을 설치한 판넬과 설치하지 않은 판넬표면의 온도차는 외기온도가 낮아질수록, 증발부의 면적이 증가할수록 더욱 커지는 것으로 나타났다. 특히 일사의 영향을 받지않는 시간대의 온도차가 다른 시간대에 비해 크게 나타나고 있다. 이것은 응축부의 손실열량에 따라 열사이폰의 채열성능이 능동적으로 변하고 있음을 나타내는 것이다.

3) 도로의 단면 중간층을 영상으로 유지하여 해빙과 결빙에 따른 도로의 파손을 방지할 목적으로 열사이폰을 설치할 경우 증발부의 매설깊이를 낮게 하여 설치비를 줄일 수 있다. 즉, 외기온도가  $-7.3^{\circ}\text{C}$ 일 때 도로동결방지층의 동결을 방지하기 위해서는 지표면으로부터 4m 이하의 깊이에  $8.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  ( $\phi 25.4 \text{ mm}$  파이프 기준 : 길이 6m) 이상의 증발부 면적이 필요하다.

#### 참고문헌

(1) Nydahl, J. E., Pell, K. and Lee, R., 1987, "Bridge Deck Heating with Ground-Coupled Heat Pipes," ASHRAE Transactions, Vol. 93, Pt. 1A. pp. 939~958.  
 (2) Tanaka, O. and Yamakage, H., 1981, "Snow Melting Using Heat Pipes," IV International Heat Pipe Conference, pp. 11~23.  
 (3) Svec, O. J., Goodrich, L. E. and Palmer, J. H.

- L., 1982, "Heat Transfer Characteristics of In-Ground Heat Exchanger," Energy Research, Vol. 7, pp. 265~278.
- (4) Rosenbland, G., 1979, "Earth Pump System with Vertical Pipes for Heat Extraction and Storages," Paper Presented at Nordic Symposium on Earth Source Heat Pumps, pp. 102~110.
- (5) Dunn, P. D. and Reay, D. A., 1982, Heat Pipes, Pergamon Press.
- (6) Ingersoll, L. R. And Zobel, D. J. 1948, Heat Conduction with Engineering and Geological Application, McGraw-Hill, pp. 45~57.
- (7) Bienert, W. B., Pravda, M. F., et al., 1970, Nuclear Wastes in Comparison with Other Heat Sources for Deicing, Bridge, Ramps and Pavements, FHWA-DTM-70-6.