



일반원고

히트파이프와 지중열교환기

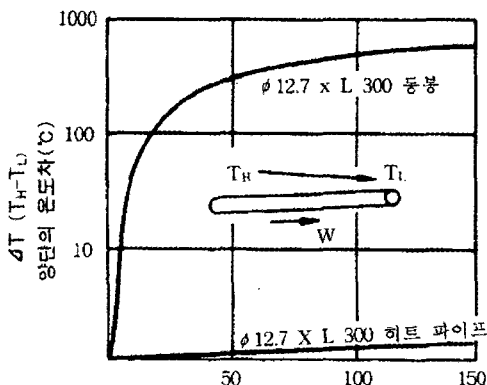
성재용, 이석종*

서울산업대학교 기계공학과 교수, *서울산업대학교 에너지환경대학원

1. 서론

오늘날 열전달 시스템 중 가장 효과적으로 알려진 것은 히트파이프이다. 이 히트파이프를 이용하면 종래의 다른 방법보다 작은 횡단면을 통해 다량의 열을 다른 에너지원이 없이 전달할 수 있다는 것이다. 게다가, 생산이 쉽고 양 끝단의 온도차가 적으며, 다양한 온도에서 높은 열을 콘트롤하고 전달할 수 있다. 이러한 히트파이프는 1942년 GM社의 Gaugler에 의해 그 작동 원리가 처음 소개된 이후 1960년대 중반부터 미국 및 유럽에서 그 연구와 개발이 본격화되었으며, 1970년대부터는 아시아에서도 일본과 인도 그리고 중국에서도 연구가 시작되어 현재 활발한 연구 및 그 개발 성과가 알려지고 있다. 이에 히트파이프의 이용 사례를 살펴보고 그 가능성을 알아보려고 한다.

2. 히트파이프의 원리 및 특성

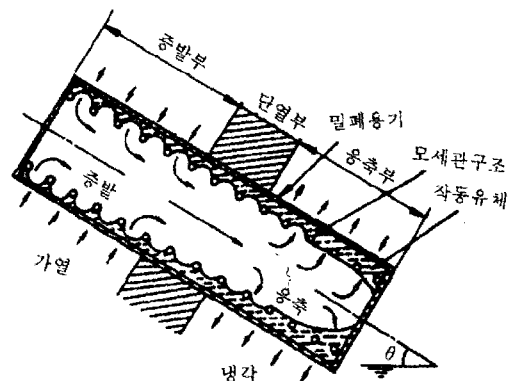


[그림 1] 히트파이프와 동봉과의 열전도 비교

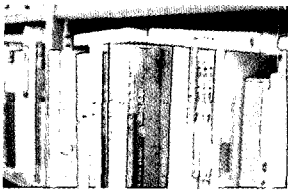
히트파이프는 밀폐된 용기 내에 작동유체를 주입한 후 진공 배기한 것인데 한쪽 끝을 가열하면 내부의 작동유체가 기화되어 압력차에 의해 다른 쪽으로 이동하고 주변으로 열을 방출한 후 다시 응축의 과정을 거쳐 가열부로 귀환하는 구조로 외부동력 없이 잠열을 이용하여 열을 전달하는 기구이다. 또한 히트파이프는 그림 1에서 보는 바와 같이 적은 온도차로 대량의 열수송을 하는 것이 특징이다.

그림 1은 동봉(copper rod)과 히트파이프의 열전도성을 비교한 것이다. 100 W의 열을 이송시키기 위하여 동봉의 경우는 양끝단의 온도차가 600 정도 필요하지만 히트파이프의 경우는 1~2 °C이면 충분한 것을 보여주고 있다.

히트파이프의 기본원리는 그림 2에서와 같이 밀폐된 용기 내에 다공성 모세관을 만들고 이 관을 작동유체의 액상의 형태로 포화시키고 관 안쪽의 공간을 기체상태로 만들면 외부열원에 의해 증발



[그림 2] 히트파이프의 작동원리



일반원고

부에 열이 부과될 때 그 부위의 작동유체는 증발되고 결과적으로 압력차가 발생해서 증발부로부터 응축부로 증기가 이동한다. 이 증기는 응축부에서 잠열을 히트파이프 주위에 전달하고 응축이 일어난다. 응축된 액체는 수직일 경우 중력에 의해 다시 증발부로 벽을 타고 내려와 계속적인 열수송이 일어난다. 그러나 다공성 모세관 벽을 내부에 만들면 반드시 수직의 형태로 설치하지 않아도 모세관 형태에 의해 액체는 증발부로 이동한다. 액체의 귀환에는 모세관 외에도 전자기력, 원심력, 삼투압, 혹은 중력 등을 이용할 수 있다.

히트 파이프 작동의 핵심 부품인 벽은 응축부에서 증발부로 액체 상태의 작동 유체를 되돌려 보내는 내부의 모세관 구조물로서, 보통 메쉬(mesh), 소결된 금속, 그루브(groove)의 형상을 가지며, 이것은 액체의 표면 장력에 의한 모세관 현상을 일으킨다.

히트파이프에 의한 열전달은 고체열전도에서 나타나지 않는 여러 가지 특징이 있다.

- (1) 열유속이 매우 크다. 잠열에 의해 열을 수송하기 때문에 금속류에 비해 월등하게 많은 열량을 히트파이프의 축방향으로 수송할 수 있다.
- (2) 표면의 온도분포가 균일하다. 포화증기의

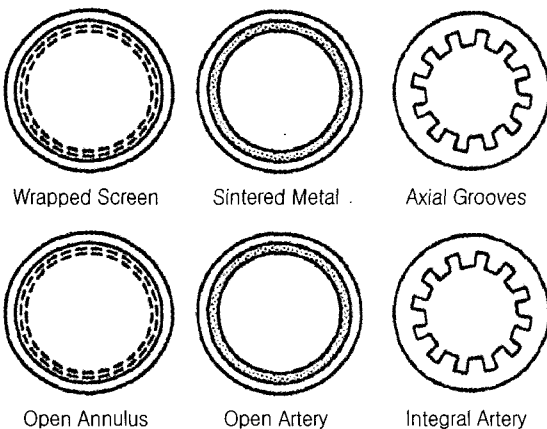
압력은 온도에 좌우되기 때문에 국부적으로 온도가 하강한 부분에 보다 많은 증기가 응축되어 온도를 일정하게 유지된다.

- (3) 열의 응답성이 좋다. 히트파이프가 작동하기 시작할 때 증발하는 증기의 속도가 음속에 가까운 속도로 이동하기 때문에 히트파이프의 축방향으로 열전달 속도가 일반금속에 비하여 매우 빠르다.
- (4) 가열부와 응축부를 분리시킬 수 있다. 비교적 작은 온도차에서도 대량의 열을 먼 거리까지 수송할 수 있기 때문에 주위로 열을 방출하기 곤란한 경우 히트파이프를 이용하여 열을 먼 거리까지 수송하여 열을 방출할 수 있다.
- (5) 구조가 간단하고 경량이다.
- (6) 유지 및 보수에 비용이 거의 들지 않는다.
- (7) 가변 콘덴턴스형 히트파이프의 경우 열유속을 제어할 수 있다.
- (8) 무중력 하에서도 작동이 가능하다.
- (9) 써모사이폰의 경우는 한쪽 방향으로만 열을 이동시킬 수 있다.

3. 히트파이프의 분류

히트파이프의 사용목적에 따라 작동온도를 절대 온도 0에 가까운 극저온부터 1,000℃ 이상의 초고온 영역까지의 온도범위를 5단계로 분류할 수 있으며, 온도에 따른 대표적인 작동유체를 표 1에 나타내었다.

히트파이프의 다양한 사용처를 표 2에 나타내었



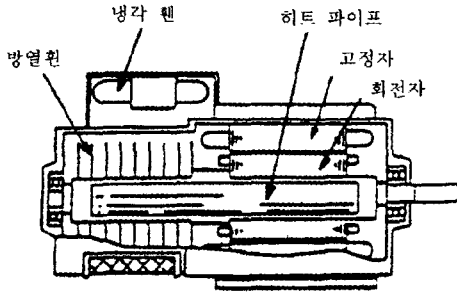
[그림 3] 벽의 형상

<표 1> 작동온도와 주요 작동유체

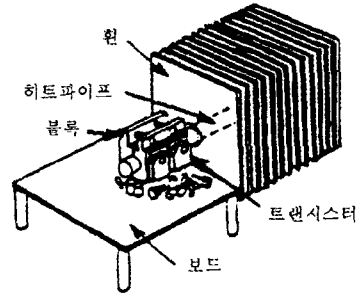
| 작동온도(℃) | 주요 작동 매체 |
|----------------|-----------------------------|
| -270~70(극저온) | 헬륨, 아르곤, 크립톤, 질소, 메탄 |
| -70~200(저 온) | 프레온, 암모니아, 아세톤, 메탄올, 에탄올, 물 |
| 200~500(중 온) | 나프탈린, 다우상, 유황, 수은 |
| 500~1,000(고 온) | 세슘, 칼륨, 나트륨 |
| 1,000이상(초고온) | 리튬, 칼슘, 납, 은 |

<표 2> 이용목적과 사용처

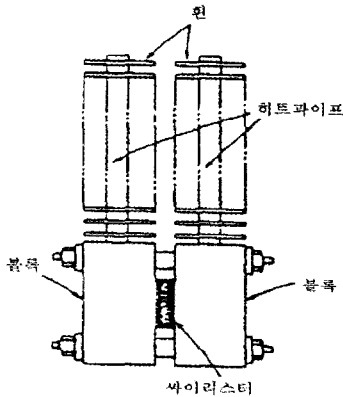
| 목적 | 사용처 |
|-----------|--|
| 열수송 | 열교환기, 폐열회수, 공기조화, 태양열집열기, 지열이용, 잠열장치 |
| 가열 | 보일러, 노면, 옥상의 응설, 급배수관의 동결방지, 카브레타의 가열, 주방기기 |
| 냉각 | 트랜지스터·다이오드·IC·VLSI 등 전기소자의 방열, 전자기기의 냉각, 인공위성의 냉각, 송·변전기의 냉각, 회전기의 냉각, 케이블의 냉각, 금형 및 주물의 냉각, 엔진 및 브레이크의 냉각, 저온외과수술 |
| 온도, 열유속제어 | 가변 콘덕턴스 히트파이프(VCHP), 열다이오드, 열스위치 |



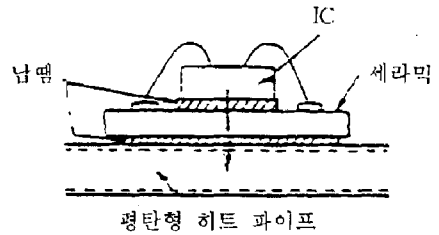
[그림 4] 전동기의 냉각에 이용된 히트파이프



[그림 5] 전자부품 냉각에 이용된 히트파이프



[그림 6] 사이리스터에 이용된 히트파이프



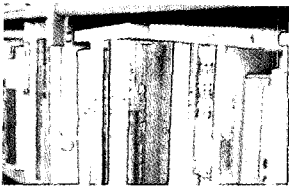
[그림 7] IC 냉각에 이용된 히트파이프

다. 히트파이프는 단순히 열전달을 목적으로 하는 것 이외에도 히트파이프의 한부분의 온도를 일정하게 유지시키는 가변 콘덕턴스 히트 파이프(variable conductance heat pipe), 열원의 온도가 과도하게 높을 때 열의 흐름을 차단하는 열스위치(thermal switch) 및 한 방향으로의 열전달은 가능하나 열 방향의 열유동을 억제해주는 열다이오드(thermal diode) 등이 개발되어 있다.

4. 히트파이프의 이용 사례

4.1 전자기기용 소형 열교환기

히트파이프를 사용한 열교환기의 대부분은 전기 장비의 온도조절 또는 냉각, 전자장치의 냉각에 응용되고 있다. 최근 들어 전자기기는 고속화 및 대용량화하고 있으면서도 크기는 오히려 소형화 되고 있어 이에 발생하는 열량을 어떻게 유효하게 제거하느냐가 중요한 문제로 제기되고 있다. 장치의 내장밀도가 적을 때는 기존 알루미늄 히트싱크를 사용하여도 열에 의한 사고는 거의 발생하지 않지만 고밀도장치의 경우에는 열설계의 중요도



일반원고

가 이전에는 비교도 안될 만큼 커지고 있다.

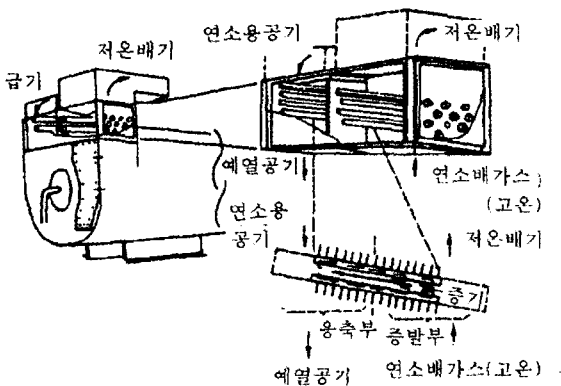
따라서 소자의 열발생밀도 증대와 함께 이것에 대한 효과적인 냉각에 히트파이프가 주목을 받고 있으며 국내에서도 개발하여 시판하고 있다.

전기장비에 대한 히트파이프의 응용에는 전동기 등의 회전기계, 변압기, 충전시스템 그리고 레이저나 마이크로 웨이브 발생장비의 냉각 및 온도 조절 등에서 볼 수 있다. 전자장치에서는 트랜지스터, 사이리스터 등은 물론 회로기판 또는 모듈의 냉각에 이용되고 있다. '히트싱크'라고 불리는 냉각기구는 몇 개의 전자부품이나 모듈로부터의 발생열을 히트파이프의 증발부로 집결시키고 현이 여러 개 부착되어 응축부에서 자연대류에 의한 열을 방출시키는 구조로 되어 있다.

이외에도 열발생을 억제함으로써 정밀도를 기할 수 있는 기계가공, 사출성형, 정밀 구조 등도 좋은 응용분야이며, 등온화를 함으로써 제품의 열응력을 최소화할 목적으로 주물, 금형 등에도 이용될 수 있다. 또한 외형상의 크기가 매우 작은 바늘크기 정도로 직경이 0.5 mm 이내이고 길이가 20~30 mm 정도의 마이크로 히트파이프도 개발되어 소형 고집적 회로의 냉각에 사용되고 있다.

4.2 열회수용 중형 열교환기

중형 열교환기는 주로 빌딩, 공장 등의 폐열회수, 가열 및 냉각공정에서의 고효율 에너지 변환

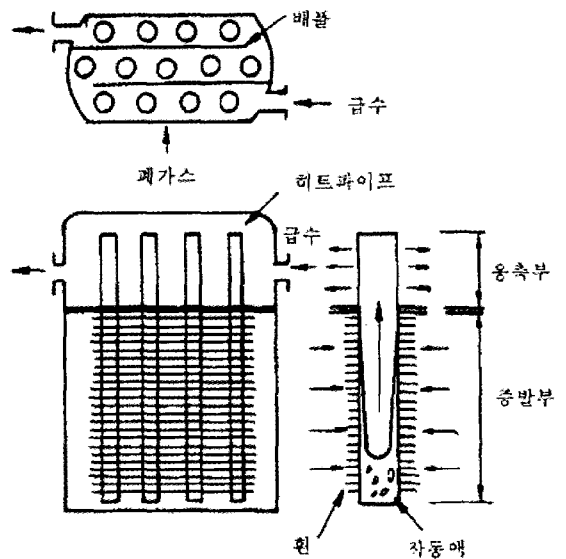


[그림 8] 가스연소용 연관식 보일러

및 이송, 공기조화 및 냉동장치 등에서 활용되고 있다. 중국에서는 제철공장, 정유소 등 중화학 플랜트의 가열로, 고온공기로, 보일러, 공기에열기, 건조탑 등에 사용하여 산업용 폐열의 30~50%를 회수하고 있으며, 연료절감률은 5~10%에 이르고, 초기투자에 대한 회수기간은 불과 1~3년 정도였다. 주로 사용되는 종류로는 공기히터, 에코노마이저, 증기제너레이터의 세 종류가 있다. 공기 히터는 가스-가스 열교환기이며, 빌딩 내부의 배기를 환기용의 공기로 열교환하거나 드라이어 배기해서 흡입공기로, 또한 가열로의 배기에서 연소용의 공기형태로 열교환한다.

에코노마이저는 가스-물 열교환기이며 보일러의 배기에서 공급수와 열교환한다. 증기제너레이터는 배기가스열을 물의 증발에 사용하므로 이 증기를 이용하기 위한 열교환기이다.

그림 8은 히트파이프를 가스연소용 연관식 보일러에 적용한 예로 배기에서 열을 회수하고 이것을 연소용 공기 예열에 이용하여 연료비의 절감을 목적으로 이용되고 있다. 열교환기는 보일러의 연소실에 설치되어 있으나 경량이며 구조가 간단하고 대향류라는 장점이 있다.



[그림 9] 에코노마이저의 개략도

히트파이프를 이용한 에코노마이저의 개략적인 것은 그림 9에 나타내었다. 이 경우 히트파이프의 폐가스측은 열전달률이 적으므로 환을 설치하고, 물이 통과하는 쪽에는 배플(baffle)을 설치하여 열교환 효율의 향상을 도모하고 있다. 그림 10은 화학공장의 증유 연소보일러에 설치된 예를 보여 준다.

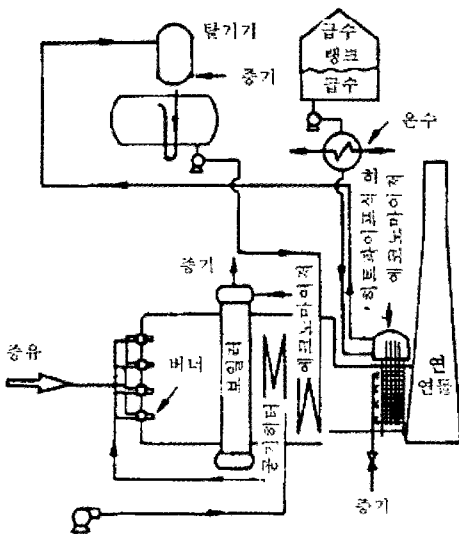
분리형 히트파이프의 특징을 보면 일반적인 히트파이프의 내부유동과는 다른 시스템이다. 일반적 히트파이프의 내부의 유동은 증기의 흐름에 대하여 액체 흐름은 역방향이다. 그러나 분리형 히트파이프는 증기와 액체를 따로 분리하여 흐르게 함으로써 대형열교환기에 적합하다. 그림 11은 분리형 히트파이프의 설치 예로써 열풍로의 폐열을 회수하여 연소실에 공급하는 공기를 예열하는 시스템이다

이 외에 히트파이프 제습기를 예로 들 수 있다. 히트 파이프 제습기는 두 부분으로 나누어져 있는데, 한 부분은 공기조화 시스템의 입구 측 더운 공기 흐름 쪽에 위치하고 있으며, 다른 한 쪽은 공급 측의 차가운 공기 흐름 쪽에 위치하고 있어 공기조화 시스템이 가동 중일 때는 자동적으로 히

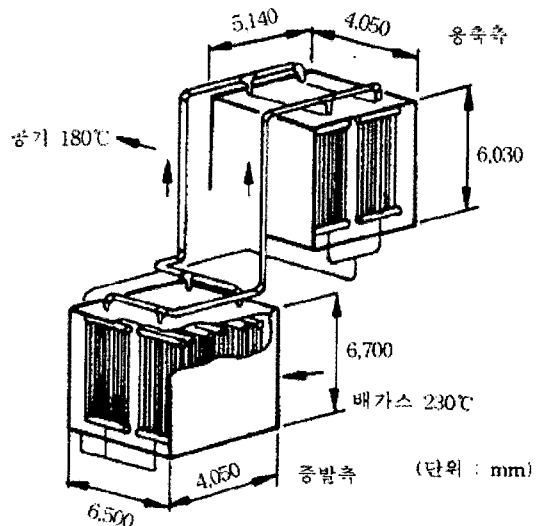
트 파이프가 열원부분과 응축부분으로 구분되어 작동 되도록 해준다. 첫 번째 부분에서 히트 파이프는 더운 공기로부터 열을 흡수하고, 이 공기가 냉각 코일에 도달하기 전에 예냉 작용으로 인하여 냉각코일이 더욱 차가운 온도에서 작동할 수 있도록 도와주기 때문에 컴프레샤의 냉방부하 또한 감소 될 수 있다. 히트 파이프의 첫 번째 부분에서 흡수한 열은 두 번째 부분으로 전달되어 습기조절을 위한 공급공기의 재가열 용으로 사용된다. 히트 파이프의 이러한 과정을 통하여 추가적인 재가열의 필요성을 감소시켜준다.

히트 파이프 시스템을 새로 설치 할 경우에는 냉방 용량이 작아지기 때문에 그 차액으로 히트 파이프 비용이 상쇄 될 수 있으며, 기존 시스템을 개보수 할 경우에는 히트 파이프 비용은 2~3년 안에 회수 될 수 있다.

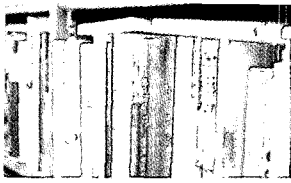
미국의 환경청(EPA) 과 에너지성(DOE)의 최근 연구보고에 의하면 히트 파이프 시스템은 쾌적하고 건강에 유익한 실내 환경 조성이 가능 할 뿐만 아니라 제습능력이 우수하고 능동형 제습방법에 비교하여 획기적으로 에너지를 절약 할 수 있는 시스템으로 발표 되었다. 또한, EPA에 의해



[그림 10] 히트파이프를 이용한 에코노마이저



[그림 11] 열풍로 폐열회수 공기에열시스템



발표된 히트 파이프의 유효성 연구보고에 의하면, 히트 파이프 제조기의 자본회수 기간은 3년 미만인 것으로 발표 되었다.

히트 파이프는 수동형이기 때문에 움직이는 부분이 없고 사실상 관리 비용이 들지 않는다. 이러한 점들이 건물의 유지관리 요원이나 건물 소유주 등이 기존의 시스템을 기꺼이 히트 파이프 시스템으로 바꾸기를 원하는 직접적인 원인이 되고 있다. 이러한 히트 파이프는 호텔, 학교, 음식점, 및 산업용 분야 에서도 다양하게 사용 될 수 있는 시스템 이다.

4.3 지중에 적용한 열교환기

폐열과 같은 저온, 저밀도의 특성을 가지고 있으며 무한정한 이용 잠재력을 보유하고 있는 것이 토양이 함유하고 있는 열에너지이다. 지열은 위에서 언급한 바와 같이 에너지 밀도가 낮은 비교적 저온의 특성을 가지고 있지만 양이 방대하고 어느 곳에서나 비용을 들이지 않고서도 쉽게 이용할 수 있는 자연에너지라는 장점을 지니고 있다. 이러한 점에 착안하여 겨울철에 도로의 결빙을 방지하거나 눈을 녹이기 위해 열사이폰으로 지열을 채열하여 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 개념은 1970년에 미국의 연방도로청에 의해 처음으로 제안되었으며, 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

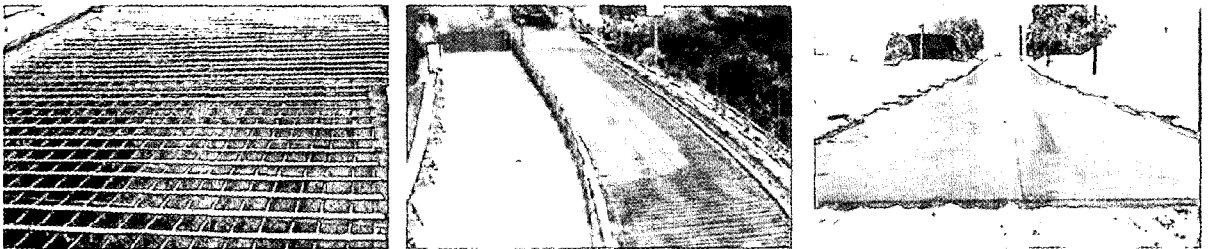
커다란 효과가 있다는 것이 밝혀짐에 따라 Wyoming주의 Cheyenne을 비롯한 여러 곳에 추가로 설치되어 이용되고 있다. 또한 활주로 밑에 긴 코일 형태의 히트파이프를 매설하고 비상시에 많은 열을 한꺼번에 보내 짧은 시간 동안 제설할 수 있도록 하는 방법도 실제 사용하고 있다.

일본과 유럽에서도 이와 같은 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 등에 의해 수행되었다. 이 연구에서는 교량의 각 모서리에 증발부의 길이 30.5 m, 응축부의 길이 12.5~6.4 m인 열사이폰을 15 개를 피치 150 mm 간격으로 설치하고 이것을 설치하지 않은 상판의 표면온도와 비교한 결과 설치된 부분이 평균 10℃ 정도 더 높은 온도를 유지한다는 것을 확인하였다.

또한 O. Tanaka 등은 눈이 특히 많은 일본의 산간지방에 대한 적용을 목적으로 토양열과 지하수의 열을 동시에 채열할 수 있는 시스템을 개발하여 현장에 설치한 결과 토양으로부터 40~100 W/m², 지하수로부터 최대 400 W/m²까지 채열할 수 있었다.

최근에는 히트펌프의 열원으로 지중열을 채열하는데, 히트파이프를 이용한 채열 방식도 연구 중에 있다.



[그림 12] 히트파이프를 이용한 도로의 결빙방지 설치예

5. 맺음말

히트파이프의 전열성이 크고 응답성이 좋기 때문에 기술의 발전과 함께 산업현장 또는 우리 생활 속으로 들어오고 있으나 국내에서는 축적된 기술이 부족한 편이다. 이처럼 부족한 히트파이프의 설계와 제작에 관련된 기술을 구축하기 위해서는 구조물의 가하학적 변화에 따른 성능예측은 물론 외부의 형상이나 작동조건의 변화에 따른 성능과 제반 효과를 예측할 수 있어야 하고, 진공 및 작동유체의 충전기술, 내벽의 가공기술, 워 등 모세관 구조물의 제작 및 부착기술 등은 제작비와 직결된 문제이므로 실용화를 위해 더 많은 노력과 투자가 필요하다. 외국의 히트파이프에 대한 연구, 신기술 및 응용사례를 비추어 볼 때 우리나라에서도 히트파이프에 대한 적극적인 기술 개발 및 연구는 당연한 과제처럼 생각되며, 또 에너지 절약 및 효율적 이용문제가 절실히 요청되는 이때 부존자원이 빈약한 국내에서 히트파이프 및 서모사이폰의 산업의 응용은 커다란 효과를 가져올 수 있으리라 생각된다.

6. 참고문헌

1. 이영수, 이기우, 1995, "히트파이프 열교환기", 대한기계학회지, 제 35 권 제 9호, pp. 805-815.
2. 신현준, 서정윤, 1993, "Thermosyphon의 지열채열 성능에 관한 고찰", 공기조화 냉동공학 논문집 제 5권 제3호, pp.226-233.
3. 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.
4. Tanaka, O. and Yamakage, H., 1981, "Snow Melting Using Heat Pipes," IV International Heat Pipe Conference, pp.11~23.
5. 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.
6. Chi, S. W., 1976, Heat Theory and Practice, A Source Book, Hemisphere Pub. Corp.
7. Teen, C. L., 1986, "Heat Pipes," Hand book of Heat Transfer Data Book, 507.5.
8. Lee, Y. and Mital, U., 1972, "A Two-Phase Closed Thermosyphon," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp.1695~1707.