

히트 파이프를 이용한 폐열회수 이용기술

Waste Heat Recovery Technology using Heat Pipes

이 영 수*
Young Soo Lee

1. 개 요

히트 파이프는 1942년 미국 G. M. 사의 Gaugler에 의해 'Heat transfer device'란 제목으로 특허출원된 후 냉장고로 사용한다는 아이디어였으나 당시는 실용화되지 못하고 말았다. 그러나 꾸준한 연구개발로 1963년 미국원자력위원회에서 비로소 히트 파이프라는 단어를 사용하면서 본격적인 실용화 단계에 이르렀다.

히트 파이프를 처음으로 상품화시킨 것은 미국의 RCA로 1966년이었으니 지금으로부터 20년전의 일이다. 그 7년 뒤에 서독에서 국제 히트 파이프 회의 등이 열리면서 우주를 대상으로 하는 응용연구도 활발히 진행되고 있다. 이제는 가까운 일본에서도 히트 파이프는 년 50억엔의 양산 단계로 들어가 응용분야도 점점 확대되어가고 있는 실정이며, 히트 파이프의 응용분야도 인공위성 냉각을 포함하여 폐열회수용 열교환기, 전기장치 전자소자의 냉각, 음향기기의 냉각, 태양열 및 지열의 유효 이용, 금형냉각 등 응용범위가 광범위하여 기대가 되는 분야이다.

2. 기본원리

히트 파이프는 밀폐된 용기내에 작동유체를

주입한 후 진공 배기한 것으로 작동유체의 증발과 응축이 별도의 외부 동력 없이 잠열을 이용하여 열을 전달하는 기구이다.

히트 파이프의 기본원리는 그림 1에서와 같이 밀봉된 튜브내에 다공성 모세관 벽을 감고 이 벽을 작동유체의 액상의 형태로 포화시키고 벽 안쪽의 공간을 기체상태로 만들면 외부 열원에 의해 증발부에 열이 부과될때 그 부위의 작동유체는 증발되고 결과적으로 압력차가 발생해서 증발부로부터 응축부로 증기가 이동한다. 이 증기는 응축부에서 증발잠열을 히트 파이프 주위에 전달하고 응축이 일어난다. 응축된 액체는 수직일 경우 중력에 의해 다시 증발부로 벽을 타고 내려와 계속적인 열수송이 일어난다. 그러나 다공성 모세관 벽을 감으면 반드시 수직의 형태로 설치하지 않아도 모세관 형태에 의해 액체는 증발부로 이동한다. 이때 그림 2와 같이 벽이 없는 히트 파이프를 특히 '서모-사이폰'(Thermosyphon)이라 부르기도 한다. 증발부에서 dry out이 일어나지 않고 모세관 현상이 계속되는 한 연속적으로 증발부에서 응축부로 열의 수송이 계속된다. 이 때 잠열로 전달되는 열의 총량은 대류와 전도로 전달되는 열의 5~6배 정도가 되는 우수한 열전달 장치이다.

* 정회원, 동력자원연구소 기기개발연구실

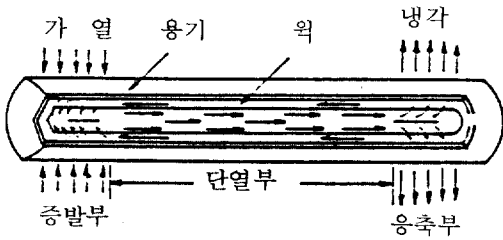


그림 1 히트 파이프의 단면도

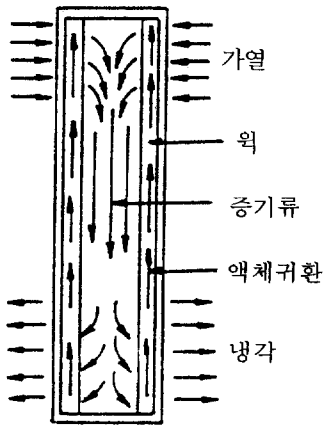


그림 2 서모 사이폰의 단면도

3. 구 성

일반적으로 히트 파이프를 구성하는 주요 요소는 밀폐용기(container), Wick(wick), 작동유체(working fluid)의 세 요소로 구성되어 있다. 사용목적 및 작동온도에 알맞는 히트 파이프를 제작하기 위해서는 이 요소들의 물성치에 따른 재질, 특성의 조합에 신중을 기해야 한다. 이들 서로간의 적합성(compatibility) 문제는 가장 중요한 것으로 히트 파이프의 성능에 결정적인 영향을 미치게 된다. 표1은 작동유체 및 용기재료의 적합성을 예시한 것이다.

다음은 Wick의 선정문제로 작업유체의 물성치와 밀접한 관계가 있다. 대표적인 Wick의 형상은 그림 3에 나타나 있다.

스크린(screen)형은 가장 보편화되어 있는 것으로서 제작이 쉽고 스크린을 감을 때 여유

를 뚫으로써 액체의 유동저항을 자유로이 조절할 수 있다는 잇점이 있다.

소결금속(sintered metal)형은 액체유동저항은 크지만 열전도계수가 높으므로 Wick두께 방향으로의 온도강하를 상당히 저하시켜주는 장점을 가지고 있다.

홈(groove)형은 비교적 최근에 개발된 것으로서 액체의 통로로서 홈을 이용하기 때문에 액체유동 저항이 매우 작고 또한 홈과 홈사이의 핀으로서 파이프의 재질과 같은 금속을 이용하기 때문에 열저항이 매우 작다. 홈형은 중력이 작용하지 않는 우주선에 많이 응용되고 있다.

환(annular)형이나 편심(crescent)형은 Wick과 관벽사이에 빈 공간을 뚫으로써 액체유동저항을 줄여주는 잇점이 있지만 액체가 차지하는 부분이 많아짐으로 인하여 상대적으로 열저항은 커지는 단점을 가지고 있다.

중추(artery)형은 Wick두께를 줄이는 대신 중추를 만들어 액체가 이 중추를 통하여 흐르게 하므로써 열저항과 액체의 유동저항을 줄인 것이다.

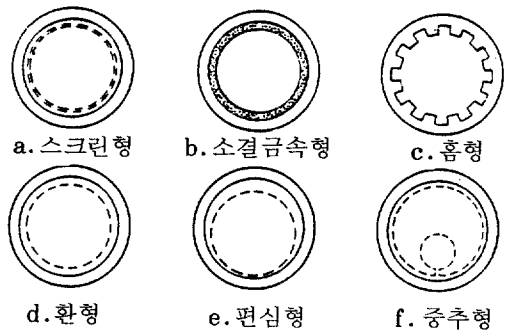


그림 3 히트 파이프의 여러가지 Wick의 구조

보통 히트 파이프의 작동범위는 작동유체의 빙점과 비등온도에 따라서 극저온(cryogenic), 저온(moderate), 고온(liquid-metal)으로 구분한다. 산업적 측면에서 볼때 위 세가지 히트 파이프 가운데 저온용 히트 파이프의 응용성이 가장 높고 따라서 연구도 저온용 히트 파이프에 대하여 가장 많이 수행되어 왔다.

표 1 작동유체 및 용기재료의 적합성

	Aluminum	Stainless Steel	Cold rolled steel	Iron	Copper	Brass	Silica	Nickel	Inconel	Tungsten	Tantalum	Molybdenum	Rhenium	Titanium	Niobium
Water	I	C*			C		C	C	I					C	
Ammonia	C	C	C	C				C							
Methanol	I	C		C	C	C	C	C							
Acetone	C	C			C	C	C								
Freon-11	C														
Freon-21	C			C											
Freon-113	C														
C ₆ F ₆					C		C								
n-butane	C														
n-pentane	C	C													
n-heptane	C														
Benzene	C														
Toluene	I														
Dowtherm A		C			C		C								
Dowtherm E	I	C*	I		C	I									
DC 200	C	C			C			C							
DC 209					C										
Perchloroethylene					C		C								
Dimethyl Sulfide					C		C								
Monsanto CP-9					C		C								
Monsanto CP-32 (pyridene)	I				C										
Monsanto CP-34	I														
Lithium		I						I	I	C	C	C		I	C
Sodium		C						C	C					I	C
Potassium								C						I	
Cesium														C	C
Mercury		C#						I	I		I	I		I	I
Lead		I						I	I	C	C			I	I
Indium		I						I	I	I	I	I			I
Silver										C	C		I		

C = Compatible

I = Incompatible

* Sensitive to Cleaning

I with Austenitic SS

표 2는 작동유체의 중별과 그 선택 온도범위를 나타낸 것이다.

표 2 온도범위에 따른 작동유체 선택

Medium	Melting point (%)	Boiling point at atmos. press.(°C)	Useful range (°C)
Helium	-272	-269	-271~-269
Nitrogen	-210	-196	-203~-160
Ammonia	-78	33	-60~ 100
Freon 11	-111	24	-40~ 120
Pentane	-130	28	-20~ 120
Freon 113	-35	48	-10~ 100
Acetone	-95	57	0~ 120
Methanol	-98	64	10~ 130
Ethanol	-112	78	0~ 130
Heptane	-90	98	0~ 150
Water	0	100	30~ 200
Thermex	12	257	150~ 395
Mercury	-39	361	250~ 650
Caesium	29	670	450~ 900
Potassium	62	774	500~ 1000
Sodium	98	892	600~ 1200
Lithium	179	1340	1000~ 1800
Silver	960	2212	1800~ 2300

같은 여러가지 한계를 나타내면 그림4와 같다.

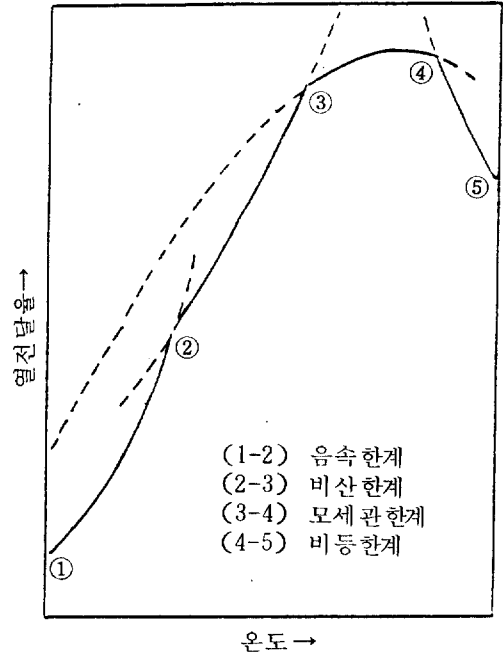


그림 4 히트 파이프의 여러가지 한계

4. 이 론

히트 파이프가 정상적으로 작동하기 위해서는 최대 모세관 압력강하 $\Delta P_c, max$ 는 파이프 전길이에서 발생되는 총압력강하보다 커야 하므로

$$\Delta P_c, max \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g \dots\dots\dots (1)$$

이 성립되어야 한다.

여기서 ΔP_l , ΔP_v 는 각각 응축부와 증발부의 압력강하이며, ΔP_g 는 히트 파이프 경사에 따른 압력강하이다.

윗식의 조건이 만족되지 못하면 히트 파이프는 정상적인 작동 및 성능에 영향을 주는 한계성이 나타나는데 이것에는 모세관한계, 음속한계, 비등한계 및 비산한계가 있다. 이와

증발부와 응축부에서 작동유체의 증발과 응축이 일어나며 그 결과 증기부와 액체부사이의 압력차로 인해 모세관 압력강하가 발생되어 응축된 액체가 증발부로 되돌아오게 된다. 그러나 외부의 요인에 의해 응축부에서 증발부로 충분하고 지속적인 액체의 공급이 이루어지지 않을때 증발부 워내의 액체는 점점 감소하여 증발부에서 액체가 말라버리는 현상(dry out)이 나타나는 것을 말한다.

4-2 음속한계(Sonic limit)

나트륨, 칼륨 등을 작동유체로 사용하는 고온용 히트 파이프에서 나타나는 현상으로 증발부에서 열입력이 증가하여 증발부의 출구부분에서 증기의 속도가 음속이상으로 증가할 수 없기 때문에 생기는 응축부에서의 한계를 말한다.

4-3 비등한계(Boiling limit)

증발부에서 액체의 부족 또는 외부의 과다한 열입력에 의해 기포가 발생하며 이는 열전도를 방해하는 것으로 작용하여 열입력이 감소되며 그 결과 발생증기량 또한 적어지므로 응축부로 전달되는 열량이 감소되어 외부에 충분한 열을 공급할 수 없는 것을 말한다.

4-4 비산한계(Entrainment limit)

증발부에서 응축부로 유동하는 증기와 응축부에서 가열부로 유동하는 액체와의 경계면에서 증기는 액체에 전단력을 작용하여 발생하는 작은 물방울이 증기흐름에 유입되어 응축부로 유동하게 되어 충분한 작동을 할 수 없는 경우로 이는 증기속도와 물질치와의 관계가 있다.

이상의 히트 파이프의 작동한계 중 상온에서 작동하는 경우 히트 파이프의 성능에 문제가 되는것은 모세관 한계와 비산한계이다.

식(1)의 각항에 대한 이론해석은 생략하기로 하고 히트 파이프의 작동한계로 나타나는 모세관한계 즉 식(1)에서 등호가 성립될때의 최대 열수송량 Q_{max} 에 대해서 알아보기로 한다.

$$Q_{max} = \frac{\left(\frac{2\sigma_l}{r_{e, min}} + g\rho_l L \sin\theta \right)}{\mu_l L_{eff}} \rho_l K_w A_w H_{fg} \quad (2)$$

여기서 K_w : 워의 침투도(Permeability)

A_w : 워의 단면적

L_{eff} : 히트 파이프의 유효길이

$r_{e, min}$: 증발부에서 워세공의 유효반지름

θ : 히트 파이프의 수평면에 대한 경사각

식(2)에서 최대 열수송량은 작동유체, 워의 선택 및 히트 파이프의 경사에 따라 결정됨을 알 수 있다.

5. 용 용

5-1 열교환기 및 공기조화용 회수장치

히트 파이프 열교환기는 우수한 전열특성이 있는 히트 파이프를 열교환기에 적용한 것으로

로서 구조는 간단히 그림 5에서와 같이 히트 파이프, 케이스, 칸막이의 3요소로 되어있다. 히트 파이프는 전열면적을 넓히기 위해 핀 등을 부착하고 칸막이를 통해 관통해서 설치한다. 한쪽은 고온가스, 다른 한쪽은 저온가스를 접촉시키고 위치는 수평, 수직, 경사의 형태로 설치 가능하다.

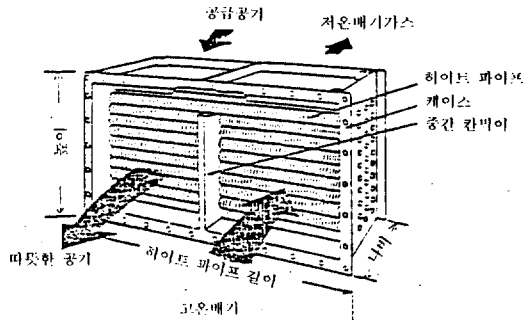


그림 5 히트 파이프 열교환기의 기본구조

히트 파이프를 사용한 열교환기의 일반적인 특징은

- 1) 고온의 배기가스와 공급공기가 직접 섞이지 않으므로 오염의 문제가 없고
- 2) 핀에 의한 접촉면적 증가가 용이하고
- 3) 구조가 일반 열교환기와 별로 다르지 않아 일반 열교환기 설계기술을 이용할 수 있으며
- 4) 기계적 구동부위가 없어 운전비가 필요없고, 구조가 간단하여 유지관리가 편리한 점 등이다.

5-2 기존 보일러에의 응용

최근 히트 파이프를 이용한 보일러의 배가스 폐열을 회수, 공급공기를 예열하는 장치가 고안되었다. 그림 6은 서모코일 열교환기의 일반적인 개략도이다. 배출가스는 서모코일의 하부에 접촉되고 히트 파이프는 수직으로 설치되어 있으며 흡입공기가 서모코일의 상부에 접촉되어 배기가스에서 흡수된 열량으로 인해 증발된 증기가 히트 파이프내에서 상부로 이동하기 쉽게 되어 있다.

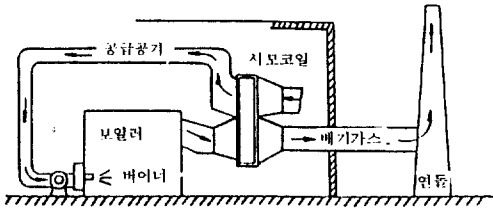


그림 6 기존 보일러에의 응용개념도

5-3 가스-증기 보일러

최근 500kg/hr의 비교적 소형 보일러의 효율을 개선하기 위하여 소형의 서모코일을 내장한 노통식 및 관류식 가스-증기 보일러가 개발되었다. 그림 7은 노통연관식 보일러에 소형의 서모코일을 설치한 것으로 보일러 효율을 92%정도 이상으로 올릴 수 있어 환산증발량이 동일한 도시가스의 소비량으로 환산하면 8시간 가동시 설치전 배출물이 496Nm³/hr에 비해 375Nm³/hr로 되어 약 25% 정도의 연료절감효과가 있다. 더우기 배출물의 절대량이 감소하여 대기오염 방지에도 기여할 수 있다.

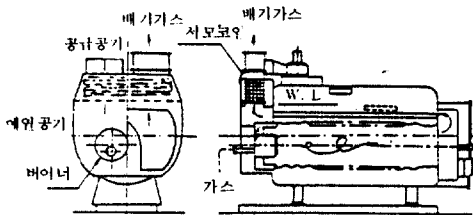


그림 7 서모 코일을 내장한 노통연관식 보일러

이외에도 한냉한 지방에서 지열을 히트 파이프에 의해 지상으로 끌어올려 도로상의 눈이나 얼음을 녹이는데 사용하고 또한 등온특성을 이용하여 인공위성의 온도분포를 균일하게 유지하는데 사용되며, 전자장치의 냉각, 변압기 냉각, 항공기나 자동차 브레이크 냉각 등 히트 파이프의 우수한 열전달 성능을 이용한 예는 무수히 많다.

6. 맺음 말

외국의 경우 히트 파이프에 대한 연구, 신

기술 및 응용사례를 비추어 볼 때, 또 에너지의 절약 및 효율적 이용문제가 절실히 요청되는 이때 우리나라에서 히트 파이프에 대한 적극적인 기술개발 및 연구는 당연한 과제처럼 생각되며 부존자원이 빈약한 국내에서 히트 파이프의 산업에의 응용은 커다란 효과를 가져올 수 있으리라 생각된다.

참 고 문 헌

1. S. W. Chi, Heat Pipe Theory and Practice a Source Book, Mcgraw-Hill Book Company, 1976.
2. P. D. Dunn and D. A. Reay, Heat Pipes, Pergamon Press Ltd., 1978.
3. D. A. Reay, Advances in Heat Pipe Technology, Pergamon Press Ltd., 1982.
4. 根岸完二, 大島耕一, 伊藤謹司, 實用ヒートパイプ, 日本ヒートパイプ協會編, 1985.
5. K. H. Sun and C. L. Tien, "Thermal Performance Characteristics of Heat Pipes", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp. 363~380, 1975.
6. A. V. Luikov and L. L. Vasilier, "Progress in Heat Pipe and Porous Heat Exchanger Technology", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp. 177~190, 1975.
7. I. C. Finaly and D. B. Green, "Heat Pipes and Their Instrument Application", J. Physics, E, Scientific Instrument, Vol. 9, pp. 1026~1035, 1976.
8. M. Oshiro and S. Takasu, "The Heat Pipe Exchanger with Controllable Heat Exchanging Area", Inst. Space Astronaut Sei. Rep, pp. 83~92, 1984.
9. B. Horbaniuc, "Optimal Heat Pipe Exchanger Design", J. Heat Recovery System, Vol. 4, pp. 9~24, 1984.
10. D. Chisholm, "Heat Pipes with Header and Artery System", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 1207~1212, 1978.