

스테인리스-아세톤 히트파이프의 열전달 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics of Stainless-Acetone Heat Pipe

강 금 춘 김 영 중 유 영 선 백 이 이 건 중
정회원 정회원 정회원 정회원 정회원
G. C. Kang Y. J. Kim Y. S. Ryou Y. Paek K. J. Rhee

SUMMARY

This study was conducted in order to find an ideal working fluid kind and a proper filling amount in the heat pipe, as well as an inclined angle of heat pipe, when they are placed to recover exhaust gas heat in the hot air heater. Followings are the findings of this research.

1. Of the four different working fluids - gasoline, kerosene, distilled water and acetone -, acetone filled heat pipe showed the best performance giving out more homogeneous temperature profile on the radiating part than the kerosene and gasoline heat pipe and carrying out heat transmitting function better than the distilled water heat pipe by 10~20°C higher on the radiating part. Acetone would be a good choice for recycling of exhaust gas heat in the hot air heater.

2. Of the filling amount of working fluid inside the heat pipes, dry-out situations, possible caused by insufficient filling, were found in the filling amount of 5, 7.5 and 10% heat pipes as heat supply rate increases gradually in the range of 50 to 150kJ/sec. But, no dry-out and stabilized heat transmitting performances occurred in the heat pipes of 12.5 and 15% filling at the same heat supply rate. It recommends that filling amount shall exceed 12.5% at least with the working fluids of this experiment.

3. The test revealed that the heat transmitting performance of heat pipe was more affected by filling amount rather than inclined angle.

주요 용어(Key Words) : 히트파이프(Heat pipe), 경사각(Inclined angle), 작동유체(Working fluid), 드라이아웃(Dry out), 열회수(Heat recovery)

1. 서 론

진공상태의 밀폐된 용기내에 적당량의 작동유체를 주입시켜 제작된 히트파이프의 증발부를 고온의 열매체로 가열하면 내부의 작동유체는 증발, 기화되고 압력차에 의하여 응축부로 이동하게 되며, 이때 증기가 존재하는 응축부를 저온의 열매체로 냉각시키면 증기상태의 작동유체는 응축, 액화되며 잠열을 저온의 매체로 전달하고 다시 증발부로 귀환한다. 이와 같이 히트파이프는 내부의 밀폐공간에서 순환하는 작동유체가 연속적으로 액체-증기간의 상변화를 수행할 때 동반하는 잠열(潛熱)을 이용하여 열을 이동시킴으로써 단일 상(Phase)의 작동유체를 이용하는 통상적인 열전달 기기에 비하여 매우 큰 열전달 성능을 발휘한다. 작동유체가 응축부로부터 증발부로 귀환하는 방법에는 모세관력과 중력을 이용한 방법이 있는데 전자를 히트파이프, 후자를 특히 써모사이폰(Thermosyphon)이라 하며 통칭하여 히트파이프라 한다.

또한 히트파이프는 열전달이 작동유체의 증발잠열에 의하여 전달되므로 거의 열저항이 무시되어 적은 온도차로 많은 열량을 전달시킬 수 있으며 무동력으로 고온측에서 저온측으로 열을 이동시킬 수 있는 장점이 있다.

국내에서는 1980년대 후반부터 산발적이긴 하지만 대학과 연구소에서 실험적 방법 위주로 제작과 이용에 대한 시도가 이루어져 왔지만 아직은 여러 가지 여건과 실적이 초보적 상태라고 할 수 있다. 그러나 한정된 에너지 자원에 대한 인식이 확산되고 최근 에너지 절약 및 대체에너지 개발의 수요 증가에 따라 각종 에너지 이용분야에서 효율 극대화의 필요성이 부각되고 있으며, 특히 첨단 산업과 관련하여 제품의 소형화 및 경량화는 물론 공정의 신뢰도와 정확도의 향상 등이 절실해지면서 히트파이프의 이용에 대한 관심도가 높아지고 있다.

특히, 보일러 및 운풍기의 폐열은 배기가스 형

태로 버려지는 것이 많으며 가스로부터 공기로의 열교환을 시키기 위해서는 전열면에 의한 열전달 계수가 작기 때문에 전열면적을 크게 하여야 하는 단점이 있다. 이러한 가스-공기 열교환기에 열전달 매체로서 히트파이프를 사용하면 가스 또는 공기를 양쪽 파이프 외부로 보낼 수 있으며, 파이프 외부에 핀 등을 부착하여 전열면적을 증가시키기가 용이하므로 기존의 가스-공기 열교환기에 비하여 크기를 1/2~1/3 정도 소형화할 수 있는 장점이 있다.

히트파이프에 관한 연구는 Gaugler(1942)에 의하여 처음 제안된 이래 Grover(1964) 등이 기존의 이론 및 실험결과를 종합하여 보고함으로써 본격화 되었으며, Hwang-Bo와 Hilding(1972)은 모세관작용에 의한 최대 열전달율에 관한 연구를 발표하였고, Chi와 Abhat (1979)는 동관-물 히트파이프를 이용하여 심지의 구조와 작동유체 주입량에 관한 연구를 발표하였다. Feldman과 Munje(1979)는 흙의 유무와 경사각의 변화에 따른 열전달율과 열전달 계수에 대하여 연구하였으며, 조(1987)는 물과 에탄올을 이용한 히트파이프의 특성 및 최소 액체 주입량에 대하여 연구하였다. 이 등(1991)은 히트파이프의 열전달특성에 관하여 연구하였으며, 장 등(1995)은 탄소강관-물 히트파이프의 열전달 특성에 관한 실험적 연구를 하였다.

본 연구에서는 운풍기의 연통을 통하여 손실되는 폐열을 회수할 목적으로 사용범위가 300℃ 이하의 가스-공기 열교환기의 매체로 히트파이프를 개발하기 위하여 작동유체는 아세톤, 용기는 작동유체와 상호 적합한 스테인레스로 하고 증발부가 하부로 설치가 가능한 히트파이프의 성능에 영향을 끼치는 작동유체의 주입량, 가열량 및 경사각 등을 실험의 변수로 하여 열전달 특성을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 히트파이프 요소설계 및 제작

온풍기의 연통을 통하여 손실되는 배기열에서 최대한의 열을 회수하기 위해서는 열교환 효율이 높은 열교환기를 설계하는 것이 요체이다. 이를 위하여 열전도 성능이 뛰어나고 소형, 경량으로 설치가 가능한 히트파이프를 이용하게 되면 큰 잇점이 있을 것으로 사료된다.

히트파이프의 열전달 성능시험을 위하여 외경 15.88mm, 두께 0.8mm, 길이 600mm의 스테인레스 용기에 작동유체는 아세톤 외 3종을 주입하여 사용하였으며, 히트파이프의 구조는 단열부 길이 25mm, 증발부 길이 200mm, 응축부 길이 375mm로 제작하여 실험 하였다. 히트파이프의 주요사항을 표 1에 나타내었다.

또한, 히트파이프 내부에 불순물이나 오염물질이 있으면 작동유체의 침투성이 나빠지거나 불응축 가스 발생으로 인하여 히트파이프의 성능이나 수명에 나쁜 영향을 주기 때문에 각 부품을 조립하기 전에 충분히 세척하였으며, 작동유체를 주입하기 전에 파이프내의 불응축 가스 및 공기 등을 제거하기 위하여 진공펌프로 $1.4 \times 10^{-7} \text{kg/cm}^2$ 까지 진공 시켰다.

경사진 무심지 히트파이프 작동유체의 최소질량은 다음의 Larkin(1982) 실험식 (1)에 의해 계산하였으며, 일반적인 스크린형이나 환상형 히트파이프 응용에서 주입량은 사용조건에 따라 한계유량보다 과충진을 하여 사용한다는 이론(Chi 등 1979)에 따라 작동유체 주입량을 용기 내부용적의

5~15%까지 5수준으로 변화하여 주입하였다.

$$m_{st} = m_{ft} + m_{sc} + m_{sa} + m_{se} \dots\dots\dots (1)$$

$$m_{ft} = \left(\frac{\mu_f \rho_f P_t D^2}{g \lambda} \right)^{1/4} [2.47(L_c + L_e) + 3.094L_a]$$

$$m_{sc} = \frac{14}{15} \rho_f \sqrt{D} \left(\frac{105}{32} \cdot \frac{\mu_f C_i}{\sqrt{D} \rho_f^2 g \sin \theta} \right)^{3/7} L_c^{10/7}$$

$$m_{sa} = \rho_f L_a A_{sa}$$

$$m_{se} = \frac{14}{15} \rho_f \sqrt{D} \left(\frac{105}{32} \cdot \frac{\mu_f C_i}{\sqrt{D} \rho_f^2 g \sin \theta} \right)^{3/7} L_c^{10/7}$$

여기서, m_{ft} : 관내 액체막의 질량 (kg)

m_{sc} : 응축부 액체의 질량 (kg)

m_{sa} : 단열부 액체의 질량 (kg)

m_{se} : 증발부 액체의 질량 (kg)

μ_f : 액체 상태의 점도 (kg/s · m)

ρ_f : 액체 상태의 밀도 (kg/m³)

P_t : 총 열전달량 (W)

D : 관 지름 (m)

λ : 증발잠열 (kJ/kg)

L_c : 응축부 길이 (m)

L_a : 단열부 길이 (m)

L_e : 증발부 길이 (m)

C_i : 단위 길이당 유량의 증분

A_{sa} : 단열부 단면적 (m²)

Table 1. Specification of heat pipe used for this study

Items	Specification
Size(O.D × t × L)	Ø15.88 × 0.8 × 600 mm
Material	SUS304 stainless steel
Degree of vacuum	$1.4 \times 10^{-7} \text{ kg/cm}^2 (1 \times 10^{-4} \text{ torr})$
Working fluid	Distilled water, acetone, gasoline, kerosene
Wick or Groove existence	No(thermosyphon)
Pouring ratio of working fluid	5, 7.5, 10, 12.5, 15%

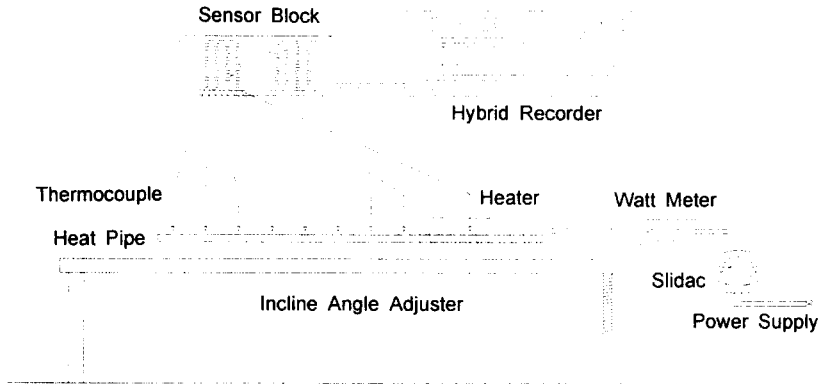


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment.

나. 히트파이프 전열특성 시험

(1) 시험장치

히트파이프의 전열특성을 구명하기 위하여 제작한 시험장치의 구조는 그림 1과 같이 코일식 전기히터, 전압조정기, 전력량계, 경사각 조절장치, 열전대 및 다점 온도기록계로 구성되어 있다.

임의로 경사각을 조절할 수 있는 시험대 윗면에 히트파이프를 내부에 삽입할 수 있도록 제작한 200(L)×100(W)×100(H)mm의 코일식 전기히터를 고정하고 전압조정기로 가열량을 조절할 수 있도록 하였으며, 전력량을 측정하기 위하여 전력량계(HIOKI 3181-01, Japan)를 설치하였다. 히트파이프 표면온도의 측정은 그림 2에서 보는 바와 같이 히트파이프 응축부측 끝단 25mm 지점으로부터 50mm 간격으로 총 8곳과 전기히터 내부의 중앙 1곳에 열전대(T타입)를 클램프로 밀착하고 히트파이프 응축부 표면온도가 더 이상 변화하지 않을 때까지 다점 온도기록계(YOKOGAWA DR230, Japan)로 온도를 측정하였다.

(2) 시험방법

가) 작동유체 선정을 위한 예비시험

온풍기 배기열 회수장치의 열교환기에 적합한 히트파이프의 작동유체를 선정하기 위하여 전열특

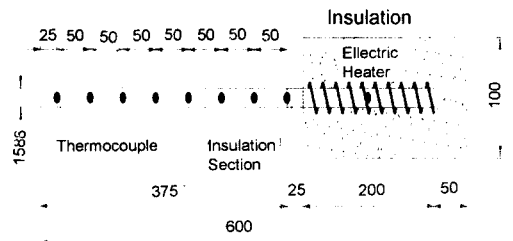


Fig. 2 Thermocouple positions on the heat pipe.

성 시험에 앞서 예비시험을 실시하였다. 이 시험에 사용된 히트파이프의 작동유체는 증류수, 아세톤, 휘발유 및 석유를 사용하였으며, 작동유체별로 파이프 내부용적의 5%를 주입하여 각각 4개씩 제작하고 시험장치의 경사각을 15°. 가열량을 50, 100 및 150kJ/sec의 3단계로 설정하여 히트파이프의 표면온도를 측정하였다.

나) 작동유체 주입량, 가열량 및 설치 경사각에 따른 전열특성 시험

예비시험 결과 선정된 작동유체 아세톤을 내부용적의 5, 7.5, 10, 12.5, 15%까지 5수준으로 주입하여 각각 4개씩의 히트파이프를 제작하였으며, 시험장치의 경사각을 5, 15, 30, 45°로 4수준, 가열량을 50, 100 및 150kJ/sec의 3수준으로 설정하

Table 2. Physical properties of the acetone(60℃)

Property	Unit	Acetone
Boiling point	K	330
Latent heat	kJ/kg	517.0
Viscosity	kg/s · m	0.226×10^{-3}
Density	kg/m ³	744.0
Thermal conductivity	W/m · K	0.168
Surface tension	N/m	0.0186

여 각 경우에 따른 히트파이프의 표면온도를 측정하였다.

시험에 사용된 작동유체의 물리적 성질은 표 2와 같다(P. D. DUNN 등 1994).

3. 결과 및 고찰

가. 작동유체에 따른 히트파이프 표면온도

열교환 소자로 사용할 히트파이프의 작동유체를 선정하기 위하여 증류수, 아세톤, 휘발유 및 석유를 작동유체로 하여 가열량별로 예비시험을 실시한 결과, 그림 3에서 보는 바와 같이 휘발유 및 석유를 주입한 히트파이프는 가열량이 50, 100, 150 kJ/sec일 때 열원으로부터 멀어질수록 응축부 표면온도가 불균일하게 나타나 작동유체로는 부적합한 것으로 나타났으며, 아세톤 및 증류수를 주입한 히트파이프는 균일하게 나타났으나 아세톤을 주입한 히트파이프가 증류수를 주입한 것에 비하여 표면온도가 약 10~20℃ 높게 나타나 열회수장치에 사용할 히트파이프의 작동유체로 아세톤을 선정하였다.

나. 작동유체 주입량에 따른 가열량 및 설치 경사각별 표면온도

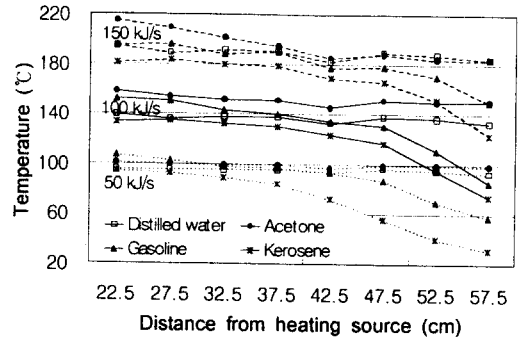


Fig. 3 Variation of the heat pipe surface temperature with working fluids.

히트파이프 내부체적의 5~15% 5수준으로 작동유체를 주입하여 제작한 히트파이프를 경사각도 5~45° 범위의 4수준, 가열량 50~150kJ/sec 범위의 3수준으로 하여 시험한 결과를 그림 4(a)~4(e)에 나타내었다.

가열량을 50kJ/sec로 하였을 때 각 주입량별 히트파이프 응축부 표면온도는 약 100℃로 비교적 균일하게 나타났으며, 100kJ/sec 일 때는 주입량 5%에서 약 150℃로 주입량 7.5~15% 일 때의 약 170℃에 비하여 20℃ 정도 낮게 나타났다. 또한, 가열량 150 kJ/sec에서는 주입량이 5~10% 일 때 응축부 표면온도가 불균일하게 나타나 히트파이프로서의 작동을 하지 못하는 것으로 나타났으며, 주입량 12.5~15%에서는 약 220℃로 균일하게 나타났다.

이 시험결과 가열량이 50~150kJ/sec로 상승함에 따라 주입량이 5, 7.5, 10%인 히트파이프는 주입량이 부족하여 드라이아웃 현상이 발생하고 이로 인해 히트파이프로서의 성능발휘를 못하는 것으로 나타났다. 작동유체 주입량 12.5, 15%에서는 좋은 성능을 발휘하는 것으로 나타나 히트파이프의 최소 주입량은 12.5% 이상이 되어야 함을 알 수 있었다.

또한, 각 주입량 하에서 설치 경사각의 영향은 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

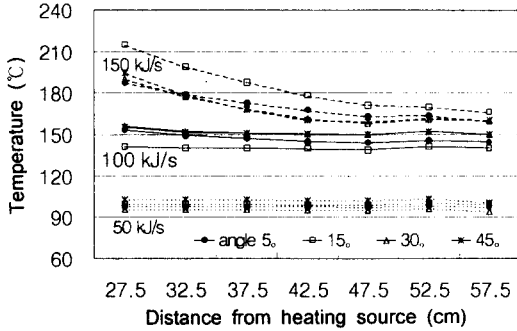


Fig. 4(a) Variation of the heat pipe surface temperature with the inclined angle (5% filling).

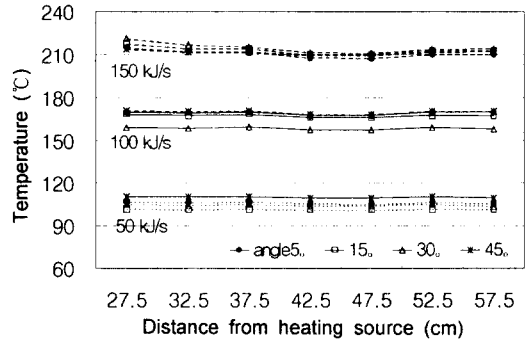


Fig. 4(d) Variation of the heat pipe surface temperature with the inclined angle (12.5% filling).

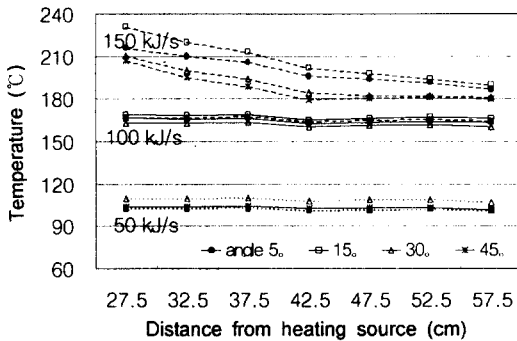


Fig. 4(b) Variation of the heat pipe surface temperature with the inclined angle (7.5% filling).

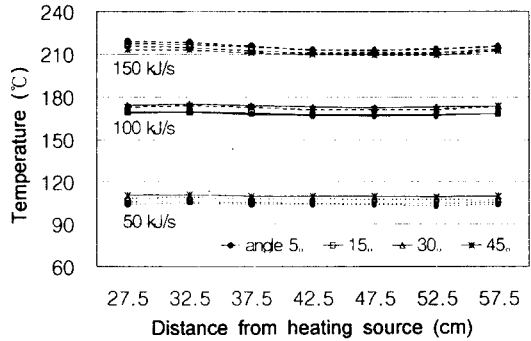


Fig. 4(e) Variation of the heat pipe surface temperature with the inclined angle (15% filling).

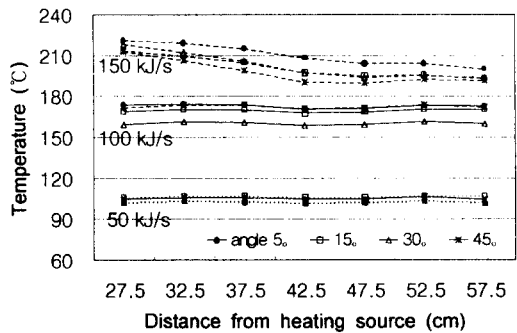


Fig. 4(c) Variation of the heat pipe surface temperature with the inclined angle (10% filling).

다. 설치 경사각에 따른 가열량 및 주입량별 표면온도

히트파이프 설치 경사각에 따른 가열량 및 주입량별 표면온도를 그림 5(a)~5(d)에 나타내었다.

가열량을 50kJ/sec로 하였을 때 설치 경사각 5~45°에서 히트파이프 응축부 표면온도는 약 100°C로 균일하게 나타났으며, 100kJ/sec일 때도 약 170°C로 비교적 균일하게 나타났다. 그러나 작동 유체를 5% 주입한 히트파이프는 전 설치 경사각에서 표면온도가 약 150°C로 20°C 정도 낮게 관찰되었으며, 가열량을 100kJ/sec로 하고 주입량을 5%

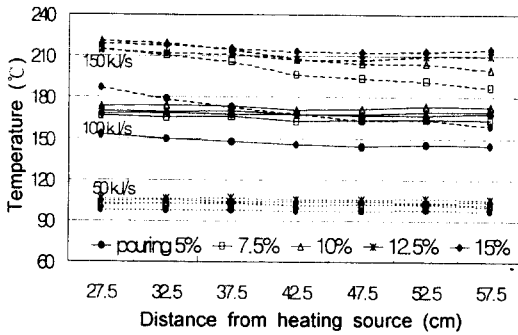


Fig. 5(a) Variation of the heat pipe surface temperature with the filling amount (inclined angle 5°).

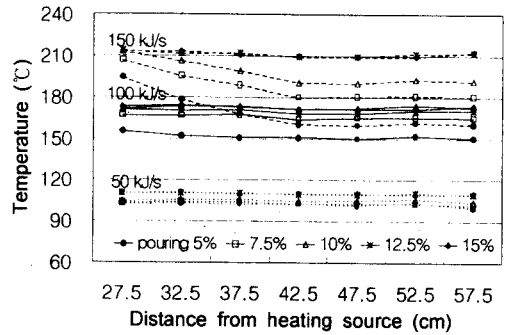


Fig. 5(d) Variation of the heat pipe surface temperature with the filling amount (inclined angle 45°).

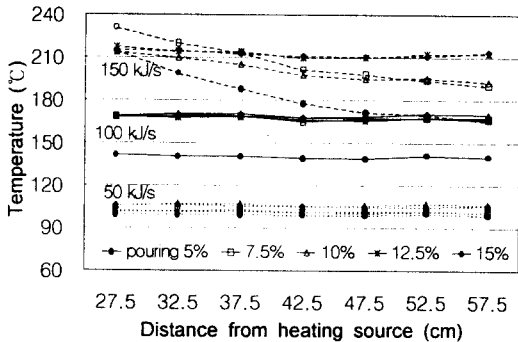


Fig. 5(b) Variation of the heat pipe surface temperature with the filling amount (inclined angle 15°).

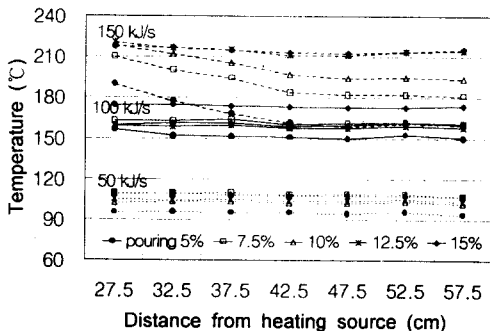


Fig. 5(c) Variation of the heat pipe surface temperature with the filling amount (inclined angle 30°).

로 한 경우의 히트파이프에서 이미 작동유체 주입량 부족으로 인한 드라이아웃 현상이 일어나고 있음을 알 수 있었다. 설치 경사각의 증가와 관계없이 가열량 150kJ/sec 일 때는 작동유체 주입량 차에 의한 표면온도 차이가 확실하게 관찰되었으며, 주입량 12.5, 15%에서는 거의 동일한 경향을 나타내었다. 또한 주입량이 5%에서 15%로 많아질수록 표면온도가 높고 균일하게 나타났으며, 주입량 5~10%에서는 드라이아웃 현상으로 인해 표면온도가 불균일하게 나타나 히트파이프 성능은 설치 경사각 보다 작동유체 주입량에 의하여 더 큰 영향을 받는다고 판단되었다.

4. 요약 및 결론

온풍기 연통을 통하여 손실되는 폐열을 열교환 성능이 우수한 히트파이프 방식의 열교환기로 회수, 온실난방에 재이용하기 위하여 히트파이프의 전열특성 구명 시험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 휘발유 및 석유를 주입한 히트파이프는 가열량 50~150 kJ/sec에서 열원으로부터 멀어질수록 응축부 표면온도가 불균일하게 나타났으며, 아세톤 및 증류수를 주입한 히트파이프는 균일하게 나타났으나 아세톤이 증류수에 비하여 표면온도가 약 10~20°C 높게 나타나 열회수장치에 사용할 히

트파이프의 작동유체로 아세톤을 선정하였다.

2) 가열량이 50~150kJ/sec로 상승할 경우 작동유체를 5, 7.5, 10%로 주입한 히트파이프는 작동유체의 양이 부족하여 드라이아웃 현상이 발생하였으며, 작동유체 주입량 12.5, 15%에서는 좋은 성능을 발휘하는 것으로 나타나 히트파이프의 최소 주입량은 12.5% 이상이 적합한 것으로 판단되었다.

3) 히트파이프 성능은 설치 경사각 보다 작동유체 주입량에 의하여 더 큰 영향을 받는다고 판단되었다.

참 고 문 헌

1. Chang, K. C., K. W. Lee, K. J. Lee and H. S. Ra. 1995. An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics of Carbon Steel-Water Heat Pipe. Journal of Energy R&D 17(1). (IN Korean)
2. Chi, H. N. and A. Abhat. 1979. Performance Evaluation of Gravity Assisted Copper-Water Heat Pipe with Liquid Overfill. Journal of AIAA 17(9).
3. Cho, B. O. 1987. An Experimental Study on the Heat Pipe Characteristics with Ethanol and Water. M. S. Thesis in Dankook University. (In Korean)
4. Feldman, K. T. and S. Munje. 1979. Experiment with Gravity-Assisted Heat Pipe with and without Circumferential Grooves. Journal of Energy 3(4).
5. Hwang-Bo, H. and W. E. Hilding. 1972. Optimization of a Heat Pipe with a Wick and Annulus Liquid Flow. Journal of ASME 94(2).
6. Lee, K. W., K. C. Chang, J. S. Woo and M. J. Cho. 1991. A Study on the Heat Transfer Characteristics of Heat Pipe. Journal of Energy R&D 13(1). (IN Korean)
7. Larkin, B. S. 1982. A heat Pipe for Control of Heat Sink Temperature. Proceeding of the Seventh International Heat Transfer Conference.