

중고온 범위 폐열회수용 나프탈렌 히트파이프 열교환기에 대한 실험적 연구

정 원 복[†], 박 수 용, 황 선 홍
(주) 대흥기업 부설기술연구소

Experimental Study on Naphthalene Heat Pipe Heat Exchanger for Middle-high Temperature Heat Recovery

Won Bok Chung[†], Soo Yong Park, Seon Hong Hwang

ABSTRACT: This study is to develop heat recovery system using high performance heat pipe heat exchanger for Middle-high temperature range industrial exhaust gas. The naphthalene is used as working fluid of heat pipe in this study. Single naphthalene heat pipe could transport over 2,000 watts with 0.05 °C/W. The heat pipe heat exchanger consist of 50 naphthalene heat pipes recovered 62 kW when over 400°C gas exhausted and the maximum recovered heat rate was 173 kW in this study.

Key words: Naphthalene heat pipe (나프탈렌 히트파이프), Heat Pipe Heat Exchanger (히트파이프식 열교환기), Waste heat recover (폐열회수)

기 호 설 명

- h : 열전달계수 [W/m²K]
- R_{th} : 열저항 [°C/W]
- S_D : 대각선 방향 파이프 간격 [mm]
- S_T : 수직방향 파이프 간격 [mm]
- S_L : 수평 방향 파이프 간격 [mm]

하첨자

- e : 증발부
- c : 응축부

1. 서론

여러 형태의 열에너지 기기에서 배출되는 폐열 중에서도 중고온 범위의 폐열은 그 활용도가 저온범위의 폐열원보다 상대적으로 매우 높으면서도 국내에서는 아직 개발 보급되어 있지 않은 실정이다. 배가스에 의한 폐열량의 비율을 보면 배가스의 온도가 300°C에서 500°C의 배가스가 대부분으로 이것은 노 및 보일러 등의 연소가스임을 알 수 있다 이들 배가스는 금속, 요업, 섬유, 화공업종에서 보일러, 가열로 및 소각로 등에서의 연소 배가스가 대부분이다.

현재 요로 및 공업로에서 배출되는 300~500°C 정도의 배가스는 막대한 양이 회수되지 못하고 있는 실정이며, 이는 기존에 사용하고 있는 열교환기의 성능효율이 낮기 때문에 사용자의 측면에서 많은 관심을 갖고 있지 않다. 또한, 에너지가격이 비교적 저렴하기 때문에 폐열회수로 인한

[†] Corresponding author
Tel.: +82-31-434-9300; fax: +82-31-434-9307
E-mail address: wbchung@heatpipe.co.kr

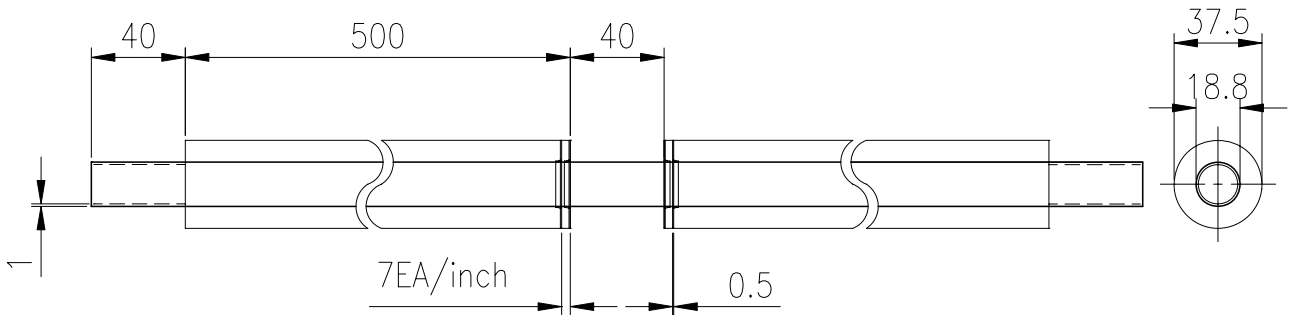


Fig. 1 Schematic of finned heat pipe for heat exchanger.

에너지절약의 타당성을 인식하지 못한 원인이기도 하다. 따라서 보다 전열성능이 우수하고 내구성이 있는 중고온 배가스 고성능 열회수 시스템을 개발하여 신뢰성을 확인하면 폐열회수에 대한 인식이 높아져서 고유가시대를 맞이하여 적극적으로 보급이 가능할 것으로 판단된다.

이러한 중고온범위의 열을 회수하는 방법으로 외부의 동력 없이 작동유체의 상변화 열전달에 의하여 매우 높은 열전달 특성을 갖는 히트파이프를 열전달장치로 사용하는 경우 효율이 높고, 고온에서도 전열면 증대를 위한 핀 부착이 용이하고 공기-공기, 공기-물 등 배기열 및 가열대상 작동유체에 따른 설계가 자유로운 등 여러 가지 장점이 있다.^(1, 2) 그런데 300~500℃ 정도의 중고온에 이러한 기술을 적용하기 위해서는 중고온 히트파이프와 히트파이프식 열교환기에 관한 연구가 필수적이다.

2. 나프탈렌 히트파이프 및 히트파이프 열교환기

2.1 히트파이프

중고온용 히트파이프를 제작하기 위해서는 작동유체의 선정이 선행되어야 한다. 150~550℃ 전후의 온도영역에서 사용할 수 있어야 하며 작동온도 범위에서 화학적 변화 없이 안정된 상태를 유지해야 하며, 특히 용기와의 적합성 여부를 확인하여 장기작동으로 인한 히트파이프의 성능 저하를 방지해야 한다. 이와 동시에 열역학, 유체역학적인 특성들이 좋아야 한다. 즉, 증발잠열(latent heat)이 커야하고, 표면장력(surface tension)이 크며, 액체점도(liquid viscosity)가 낮고, 증기압(vapor pressure)이 낮고, 액체 밀도

(liquid density)가 커야한다.

또한, 히트파이프 제작이 상온에서 이루어지는데, 저온용 히트파이프와 비교하여 상대적으로 작동유체가 삽입된 상태에서의 내부 압력이 매우 낮다. 그러나 작동온도가 상온보다 훨씬 높기 때문에 불응축가스가 생길 수 있는 여지가 많다. 저온용보다 상대적으로 제작에 많은 어려움이 따르므로 내부 충전 작동유체의 순도를 유지하는 것과 고온작동상태에서 발생하는 불응축가스를 제거하는 기술 등이 취약하므로 작동유체의 선정에 어려움이 있으나 통상적으로 작동유체로는 Dowtherm A, 나프탈렌, Biphenyl 등이 사용될 수 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 나프탈렌을 작동유체로 선정하여 히트파이프를 제작하고, 나프탈렌 히트파이프를 이용하여 열교환기를 제작하였다. 배가스 폐열회수를 목적으로 하기 때문에 원형 핀을 압입한 파이프를 준비하여 히트파이프를 제작하였다. 나프탈렌은 Dowtherm A는 Biphenyl과 달리 상온에서 고체로 존재하여 히트파이프 제작에 있어서 매우 편리한 장점이 있고, 다른 중온용 작동유체에 비하여 상대적으로 유독성이 적다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 히트파이프의 치수를 보이고 있다. 두께 0.5 mm, 외경 37.5 mm인 원형 핀을 18.8 mm 외경의 파이프에 인치당 7개(3.63 mm 간격)로 배치하여 히트파이프를 제작하였다.

Fig. 2는 중온용 히트파이프의 시동 및 정상상태 도달에 대한 열화상 이미지를 보이고 있다. 나프탈렌 히트파이프의 경우 가열하기 전에는 고체 상태로 존재한다. 따라서 그림과 같이 초기 가열 상태에서는 증발부만이 가열되고 응축부로는 열전달이 없는 상태이다. 시간이 경과함에 따라 점차 고체상태가 액체 상태로 변화하고, 증발하면서 응축부 쪽으로도 열이 전달되는 모습을

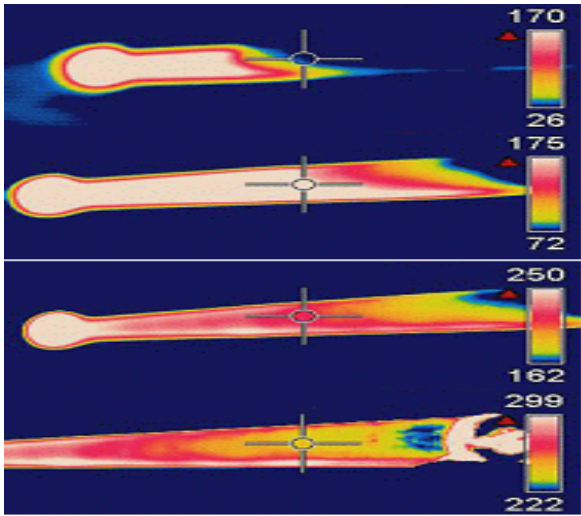


Fig. 2 Thermal image at start-up and steady-state with non-condensable gas(NCG).

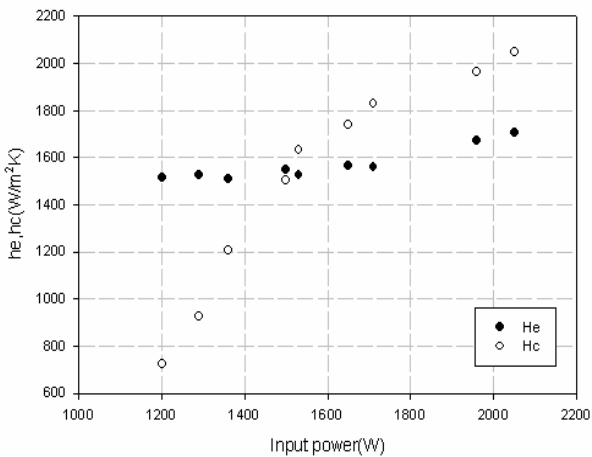


Fig. 3 Heat transfer coefficient of naphthalene heat Pipe at evaporator and condenser.

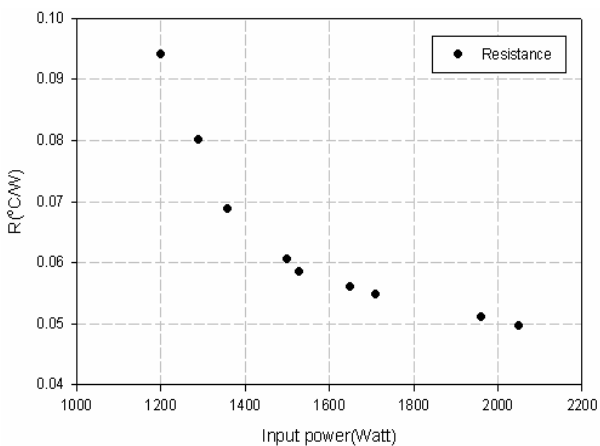


Fig. 4 Thermal resistance of naphthalene heat pipe.

볼 수 있다. 충분히 정상상태에 도달한 상태에서도 응축부의 일부분에서 온도가 낮은 부분이 발생하는 모습을 보이는데 이는 불응축가스에 의한 영향이다. 이 불응축가스는 히트파이프의 시동시간을 지연시키고, 정상상태에서는 히트파이프의 성능을 저하시키는 요인이다. 그러나 나프탈렌과 같이 시동시의 환경에서 고체로 존재하는 작동유체는 상변화 후 응축부로 이동하여 외부로 열을 방출하고 고체로 상변화 되는 경우가 발생하여 증발부로 작동유체가 귀환하지 못하게 되어 히트파이프가 작동불능 상태가 되게 된다. 불응축가스는 이런 경우 히트파이프가 정상적으로 작동할 수 있게 도와주는 역할을 하기도 한다.⁽⁴⁾

Fig. 3은 나프탈렌히트파이프의 증발부와 응축부에서의 실험에 의한 열전달 계수 값을 보이고 있다. 가열량이 클수록 증발부의 열전달 계수 값은 미소하게 증가하였고, 응축부의 열전달 계수 값은 큰 변화를 보였다. 응축부의 경우 불응축가스의 영향에 의한 것으로 보인다. 낮은 열부하에서는 히트파이프의 작동온도가 비교적 낮은 상태로 유지되기 때문에 불응축가스의 영역이 크고, 열부하가 클수록 히트파이프의 작동온도가 높아지면서 불응축가스의 영역이 작아졌고, 이로 인해 열전달 계수 값이 증가하게 되었다. 2000 W를 기준으로 증발부에서는 약 1,500 W/m²K, 응축부에서는 2,000 W/m²K 정도였다. Fig. 4는 히트파이프의 증발부와 응축부 외부벽면의 평균 온도 차이를 열부하를 나눈 값, 즉 열저항 값을 보이고 있다. 열부하가 증가할수록 열저항이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이런 경향은 일반적인 히트파이프에서 모두 나타나는 현상이다. 나프탈렌 히트파이프를 제작하고, 실험을 통해 성능을 확인한 후 중고온 폐열회수를 위한 히트파이프를 제작하였다.

2.2 열교환기 제작

Fig. 5 및 Fig. 6은 실험을 위해 제작된 히트파이프 열교환기에 대한 개략도를 보이고 있다. 앞선 나프탈렌 히트파이프의 실험결과를 바탕으로 열교환기를 설계하여 제작을 하였다. Fig. 1의 히트파이프를 수평방향으로 58 mm, 수직방향으로 60 mm, 대각선 방향을 61 mm인 삼각 엇갈림 배열로 배치하고, 5열 10단으로 구성된 50 kW급

히트파이프 열교환기를 제작하여 50 kW 열교환기 및 150 kW급 열교환기 실험을 수행할 수 있도록 하였다. 또한 히트파이프는 수평기준으로 7°를 기울여 설치하였다. 저온부를 상부에 배치하여 작동유체의 귀환이 원활할 수 있게 하였다.

Fig. 7은 폐열회수 시스템의 성능과약을 위한 시스템의 구성을 보여준다. 먼저 폐열회수 시스템에 열원을 공급하고자 고온 풍로를 전단에 설치하고 폐열회수 시스템의 후단에서는 연소된 가스가 외기로 배출되도록 하였다. 각 관로는 스테인리스 재질을 사용하였다. 고온풍로는 연료량을 제어하여 공급 열부하량을 제어하되 이론 공기연료비에 대하여 공기 과잉율을 조절함으로써 가스의 유동을 즉 전면속도를 변화할 수 있도록 하였다. 응축부로 이송된 열은 송풍기를 통하여 외기를 도입하여 제거하도록 하였다. 각부의 공기 온도 계측은 고온부 및 저온부 입출구에 탐침형 열전대(K-type)를 설치하였다. 히트파이프의 작동 특성을 파악하고자 증발부, 응축부 및 단열부에 열전대를 히트파이프 벽면에 용접하여 설치하였다. 고온 및 저온의 유속은 각 부의 입출구에 유속측정용 홀을 설치하고 고온 유속계 (Kanomax)와 피토크관을 이용하여 계측하도록 하였다. 한편 고온풍로의 연료는 LPG로써 50kg용 3개의 용기를 병렬로 설치하여 연료를 공급하도록 하였으며 공기 연료비는 버너의 입구 공기 유속을 오리피스 유량계로 계측하여 설정된 범위에서 작동하도록

구성되어 있다.

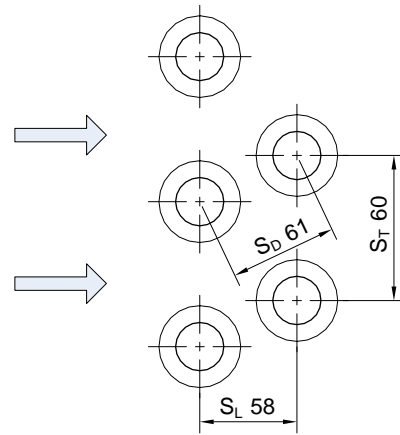


Fig. 5 Staggered array dimension for naphthalene heat pipe heat exchanger.

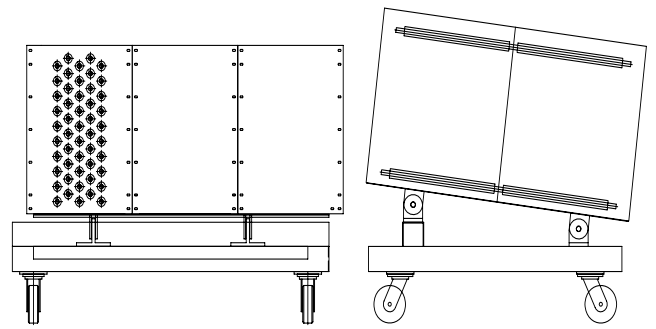


Fig. 6 Schematic of heat pipe heat exchanger

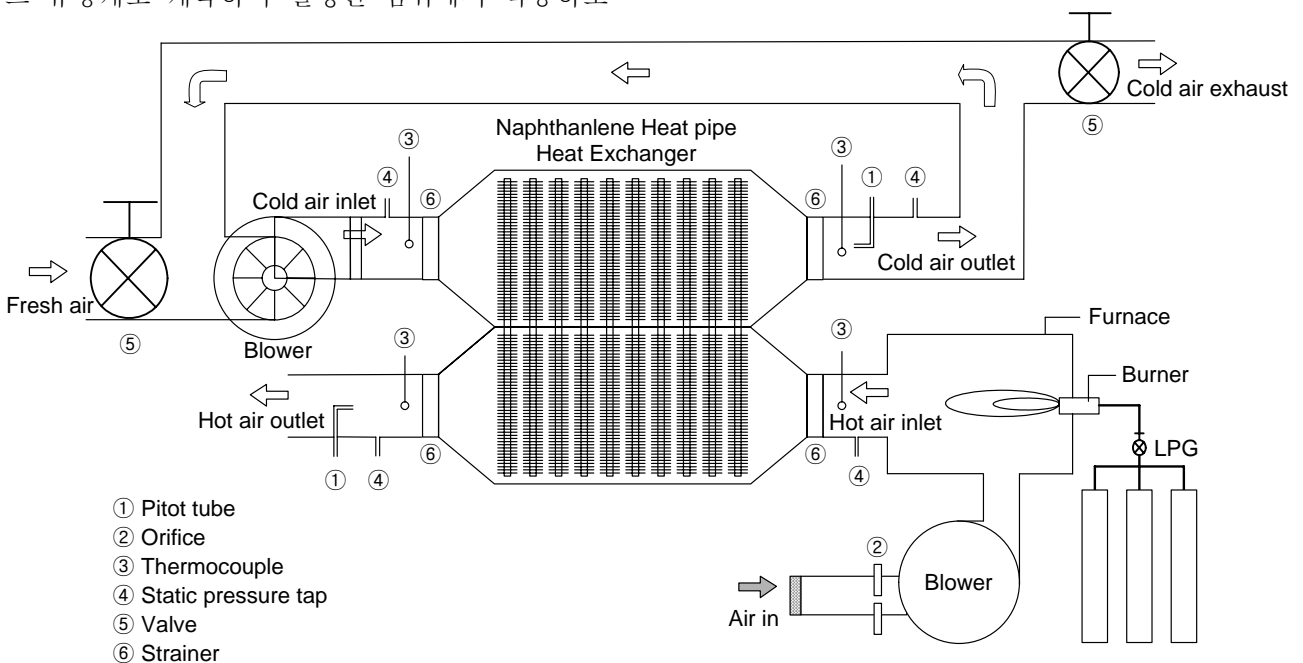


Fig. 7 Experimental set-up of naphthalene heat pipe heat exchanger

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 8은 나프탈렌 히트파이프의 시동특성을 보이고 있다. 고온측 배가스의 온도를 일정하게 유지하면서 저온측의 송풍기를 조작하여 풍속을 증가시킬 때의 작동특성이다. 50kW급으로 설계된 열교환기에 고온측 가스의 온도를 400°C로 유지하고 풍속을 1.5 m/s로 일정하게 유지하는 가운데 약 20분 동안 저온공기를 공급하지 않았다. 이는 나프탈렌 히트파이프가 정상적으로 작동하여 작동유체가 원활하게 순환하도록 하기 위해서이다. 20분경과 후 저온공기를 0.5 m/s로 공급하는 경우 열교환기가 정상적으로 작동하고 있는 모습을 보이고 있다. 40분 경과후 저온공기의 풍속을 1.5 m/s로 증가시켰다. 그 결과 일부의 히트파이프 온도가 낮아지는 경향을 보였다.

Fig. 9는 고온가스 유속과 공급온도 그리고 저온공기의 유속변화에 따른 열회수량을 보이고 있다. Fig. 9(a)는 400°C의 고온 가스가 공급될 때 50 kW급 열교환기 열회수량을 보이고 있다. 고온가스의 풍속이 증가하면 히트파이프와의 열교환이 증가하여 열회수량이 증가할 것으로 예상하였으나, 저속의 저온공기(0.5 m/s)에서는 고온가스의 유속에 무관하게 45 kW정도를 회수할 수 있었다. 이후 저온공기의 유속이 증가하면서 열회수량이 증가하다가 풍속이 2 m/s 정도에 가까워지면서 열회수량이 감소하였다. 이는 저온공기의 유속이 빨라지면서 히트파이프의 응축부 영역의 온도가 낮아지게 되고, 이로 인하여 불응축가

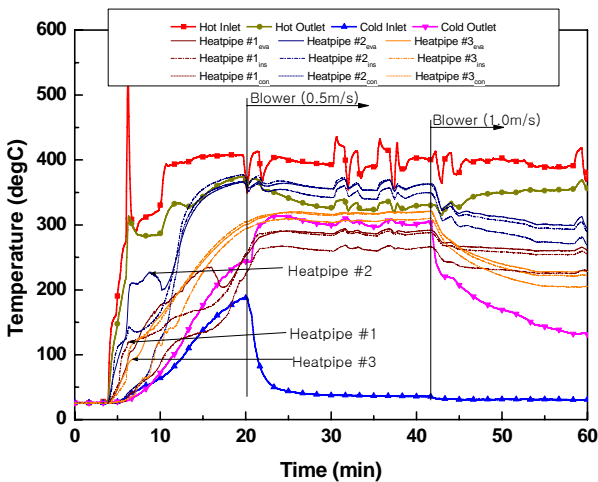
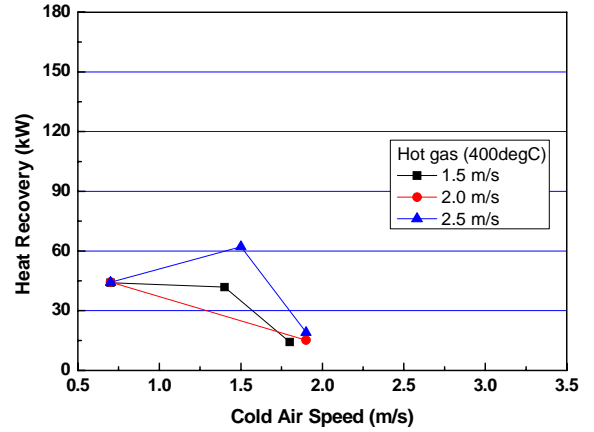
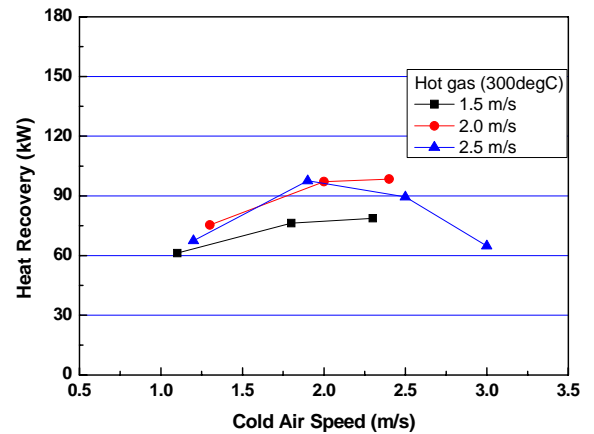


Fig. 8 Start-up of naphthalene heat pipes heat exchanger

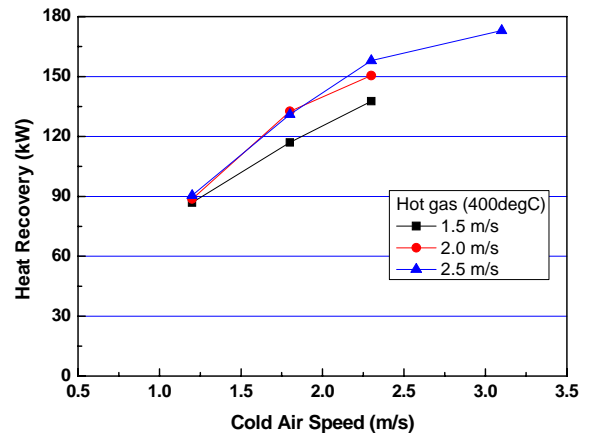
스의 영역이 증가하게 되어 열회수량이 감소하는



(a) 50 kW heat pipe heat exchanger at 400°C hot gas



(b) 150 kW heat pipe heat exchanger at 300°C hot gas



(c) 150 kW heat pipe heat exchanger at 400°C hot gas

Fig. 9 Heat recovery of Naphthalene heat pipe heat exchanger

것으로 보인다. 150 kW급 열교환기에서는 고온가스의 온도가 300°C인 경우(Fig. 9(b)) 저온공기의 유속이 증가하면서 열회수량이 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. 그러나 50 kW급에 비하여 보다 높은 유속까지 열회수량이 증가하는 모습을 보였다. Fig. 9(c)는 150 kW급 열교환기에서는 고온가스의 온도가 400°C인 경우이다. 저온공기의 유속이 증가하면서 열회수량이 증가하는 모습을 보이고 있다. 최대 열회수량이 173 kW이었으며, 설계한 150kW를 만족하는 결과를 얻었다.

4. 결 론

중고온 범위의 산업용 배가스에 대한 고성능 열회수시스템 개발을 위하여 나프탈렌 히트파이프 열교환기에 대한 연구를 수행하여 성공적인 결과를 얻었으며, 그 내용은 다음과 같다.

(1) 나프탈렌 단일본 히트파이프의 경우 불응축가스의 의한 영향이 나타났으나, 정상작동 후 최대 2 kW 이상을 처리할 수 있었다.

(2) 나프탈렌 히트파이프를 이용하여 50 kW급 열교환기에 대한 실험결과 저온측 공기의 유속이 크면 열교환기 성능이 감소하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 최대 62 kW를 회수함으로써 설계사양을 만족하였다.

(3) 50 kW급 열교환기 3대를 이용하여 150 kW급 열교환로 구성한 결과 최대 173 kW를 회수하였다.

후 기

본 연구는 2004년 산업자원부 에너지·자원기술개발사업(220-E-ID02-P-06)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Faghri, A., 1995, Heat Pipe Science and Technology, pp. 675-710.
2. Lee, Y. S. and Lee, K. W., 1995, Heat Pipe Heat Exchanger, The Korean Society of Mechanical Engineers Magazine, Vol. 35, No. 9, pp. 805-815.
3. Peterson, G. P., An Introduction to Heat Piles - Modeling, Testing, and Applications, pp. 329-345.
4. Hong, S. E. and Kang, H. K., 2006, A Study on the Chilling Start-up Characteristics and Performance of a Gas Loaded Heat Pipe, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18. No. 1, pp. 915-922.