

동관-알루미늄 환 회전형 히트파이프 열교환기의 성능에 관한 연구

박기호* · 이기우* · 이계중* · 전원표*

A Study on the Performance of Rotary Heat Exchanger Using Aluminum Finned Copper Tube Heat Pipe

K. H. Park, K. W. Lee, K. J. Lee, W. P. Chun

Key Words: Rotary heat exchanger(회전형 열교환기), Working fluid(작동유체), Heat pipe(히트파이프), Heat transfer coefficient(열전달계수), Heat transport capability(열수송능력)

Abstract

The purpose of this study is to develop heat transfer analysis program of heat pipe elements and design a revolving heat pipe exchanger by the performance experiment of hot air production by means of middle-temperature waste heat. Experimental variables are the revolution per minute, normal velocity of inlet air and the temperature of waste heat. The revolving heat exchanger has designed as 2° in inclination angle of heat pipe bundle and as 20% in working fluid quantity and as water in working fluid. Experimental value of the total heat transfer coefficient was 20 w/m²-°C.

1. 서론

회전형 히트파이프식 열교환기는 다수의 히트파이프 요소를 원통형으로 구성하여 회전시킴으로서 열전달 계수값의 향상과 분진 대책이 용이한 열교환기로서 전열관으로 사용하는 히트파이프를 회전시켜서 열전달 계수값을 향상시키므로 폐열회수율을 증가시키고 배가스에 포함되어 있는 dust대책이 용이하여 오염 폐가스에 대해서도 연속적으로 안정적인 운전이 가능하게 된다. 더욱이 회수열의 형태도 공기뿐만 아니라 증기형태로도 회수가 가능하여 사용용도가 광범위하다. 히트파이프 요소를 삼각배열 원통형으로 조립하고 증간

부분을 완전히 분리하여 배가스측과 열풍 또는 증기발생영역으로 구분하고, 각 히트파이프 요소를 중심회전축과 2-5도 정도의 경사각으로 조립하여 회전반경을 갖고 회전하는 것으로 히트파이프로 구성된 전열부가 회전한다는 것이 기존의 히트파이프식 열교환기와 다른 것이다. 회전형 히트파이프식 열교환기로는 배가스의 열회수에 의한 열풍 발생형과 물을 분사시켜 증기를 발생시키는 증기발생형과 냉각기능형이 있으며 회전형 히트파이프식 열교환기의 용도로는 제철소, 요로 및 보일러 등의 오염폐가스 배출업체의 폐열회수장치와 증기를 발생시켜 폐열발생장치로부터 이용장소까지 증기형태로 이송이 가능하므로 난방용 열원, 흡수식 냉동기 및 열펌프의 열원, 저압 증기 터빈의 구동원으로 활용이 가능하고 냉각기능으로는 모터의 회전축, 선반, 중부하 베어링, 압착기 등 방열을 필요로 하는 회전축에 응용이 되고 있다. 본 연구에서는 분진이 많고 부식성 가스가 아닌 폐열회수를 목적으로 동관에

* 정희원, 한국에너지기술연구소

알루미늄 원을 부착하여 회전형 열교환기를 제작하여 열교환기의 회전속도, 배가스의 온도, 응축부 공기의 유속에 따른 열전달 특성과 성능실험 연구를 하였다.

2. 회전형 히트파이프식 열교환기

2.1 동관-알루미늄 원 히트파이프 열교환기

2.1.1 히트파이프 요소

히트파이프요소는 알루미늄 파이프내에 동파이프를 삽입한 후 알루미늄 파이프를 전조작업하였다. 외부의 캡과 파이프는 본당작업을 하여 마무리를 하여 condenser plate와 evaporator plate 와 center plate와 용접한다. 동파이프의 내경은 23.6mm으로 하고 외경은 25.2mm, 그리고 외부의 알루미늄 파이프의 내경은 25.2mm이고 외경은 28.2mm로 하였다.

외부 알루미늄관에 부착된 원재질은 알루미늄으로 두께 0.37 mm, 높이 11.5 mm, 간격 2.5 mm로 단위 히트파이프 요소당 모두 250개의 원을 부착하였다. 그리고 히트파이프의 길이는 원이 부착된 유효길이가 825mm이고, 증발부와 응축부의 길이는 390mm로 동일하게 하였다. 또한 작동유체의 주입량은 20%이다.

2.1.2 동관-알루미늄 원 히트파이프 열교환기

회전형 히트파이프 열교환기는 증온배가스열에 의해 열풍을 발생시키는 것을 목적으로 하였으므로 고온의 배가스가 유동하는 고온실과 공기가 유동하는 저온실사이를 간막이한 회전관판과 양쪽의 회전관판이 회전하는 회전축을 중심으로 회전하고, 각 회전관판을 관통하여 동심원상으로 다수의 히트 파이프를 나란히 설치하고 각 히트파이프군의 고온실측 회전반경을 저온실측 회전반경보다 크게 되도록 히트 파이프군을 회전축중심에 대하여 2도의 경사각을 유지하도록 하였다.

회전식 히트 파이프 열교환기는 히트 파이프의 dry-out을 방지하고 히트 파이프의 최대 열수송량 증대와 함께 전열면적을 증가시키기 위한 것으로 고온실과 저온실을 간막이한 회전관판에 회전축과 평행하게 다수의 히트파이프를 관통하여 나란히 설치하는 것이다. 회전축을 중심으로 히트 파이프군이 회전하면서 히트파이프의 관

내와 관외의 열수송력을 증가시키고 동시에 회전에 의한 팬효과도 얻어 정지상태에서 열교환을 하는 기존의 히트 파이프 열교환기와 비교하면 고성능 및 대용량의 열교환이 가능하다는 것이다. 열교환 효율을 고려하여 고온실과 저온실을 간막이한 회전관판에 회전축을 중심으로 동심원상으로 다수의 히트 파이프를 고온실측 회전반경이 저온실측 회전 반경보다 크게 각 히트 파이프군을 회전축 중심에 대해서 2°의 경사각을 두어 배치하는 것으로 하였다.

2.2 동관-스테인리스 2중관 히트파이프 열교환기

히트파이프 요소의 관은 스테인리스 원을 부착한 스테인리스 강관의 내부에 동관을 삽입하여 2중관으로 하였으며 동관과 탄소강관의 부착은 가압팽창방법으로 하였다. 내부 동파이프의 내경은 20.2mm, 외경은 22.2mm 그리고 외부의 스테인리스 강관의 내경은 23.3mm, 외경은 27.2mm로 하였다. 외부 스테인리스 강관에 부착된 원 재질은 스테인리스304로 두께 0.8mm, 높이12mm, 간격 3.6mm로 단위히트파이프 요소당 모두 250개의 원을 부착하였다. 그리고 히트파이프의 길이는 원이 부착된 유효길이가 966mm이고, 증발부와 응축부의 길이는 468mm로 동일하게 하였다. 내부스크린 메쉬로 동메쉬200번을 2회 감아 삽입하였다.

2.2.1 열교환량

Fig. 1은 배가스와 공기의 유속을 각각 2.25Nm/sec로 하고 응축부에 유입되는 공기는 대기온도로 하여 증발부에 투입되는 배가스열의 온도를 변화시켰을 경우의 열교환량의 변화를 나타낸 것이다. 배가스 온도가 160℃일때 열교환량은 26,000watt에서 250℃일때 열교환량은 42,000watt까지 변화하는 것을 볼 수 있었다.

2.2.2 총괄열전달계수

Fig. 2는 배가스와 공기의 유속을 각각 2.25Nm/sec로 하고 응축부에 유입되는 공기는 대기온도로 하여 증발부에 투입되는 배가스열의 온도를 변화시켰을 경우의 총괄열전달계수의 변화를 나타낸 것인데 총괄열전달계수값은 배가스의 온도에는 별로 영향이 없고 그 값은 약 15W/

m²·°C로 나타났다. 이 결과를 고찰하면 히트파이프 요소로 구성된 원통형이 회전하므로 회전방향과 동일한 쪽으로 유입되는 배가스와 공기는 압력손실이 적고, 회전방향과 반대방향으로 유입하는 유체는 압력손실이 커지게 되므로 유체는 자연히 압력손실이 적은 쪽으로 유동하므로 내부에 위치한 히트파이프요소와는 열교환이 이루어지지 않을 수도 있어 배가스와 공기의 유입을 히트파이프요소들이 구성된 원통형의 중심으로 유동하도록 하면 열교환 성능이 향상될 것이다.

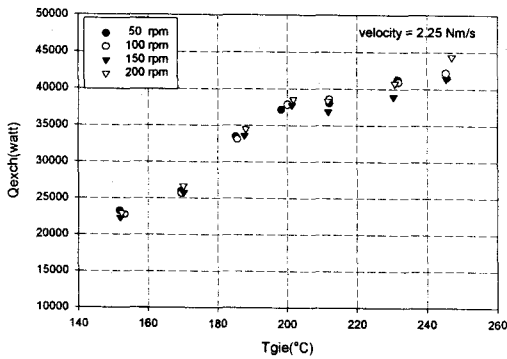


Fig. 1 Heat quantity of heat pipe according to temp (front velocity=2.25Nm/s)

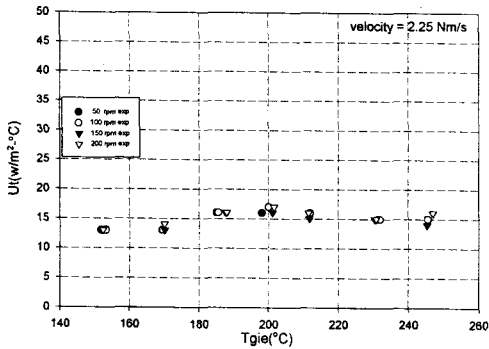


Fig. 2 Overall heat transfer coefficient of heat pipe (front velocity=2.25Nm/s)

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 실험장치

Fig. 3은 회전형 히트파이프 열교환기의 성능

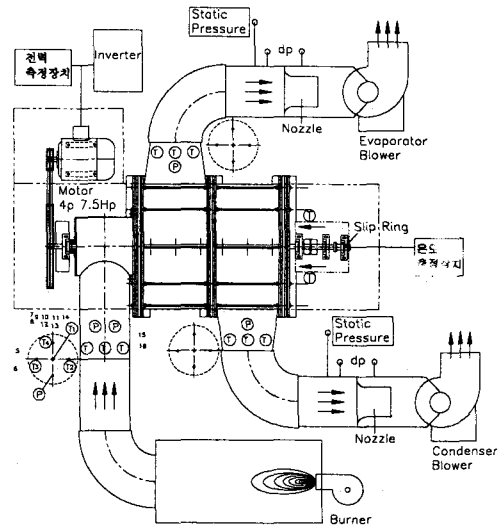


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus of rotary heatpipe exchanger

실험장치 구성도이며 증온의 배가스열발생 및 공기 공급장치, 열교환기를 회전시키고 속도조절을 위한 회전장치 및 속도조절용 인버터, 온도 및 압력손실측정을 위한 측정장비 및 기록장비 등으로 구성하였다. 증발부에 배가스열의 온도를 160°C에서 220°C까지 변화시켜 공급하기 위해 건타입 버너를 이용하여 배가스를 직접 증발부에 공급하여 사용하였으며, 배가스 온도의 조절은 건타입버너의 노즐을 교체하여 조정하였다. 그리고 응축부에 공급되는 냉각용 공기는 상온의 대기를 직접 유입시켜 사용하였으며, 송풍기를 출구측에 부착하여 배가스 및 공기를 유입시키고 유속의 변화는 송풍기의 임펠라의 회전수를 변화시켜 조절하였다. 회전 속도를 75 rpm ~ 200 rpm까지 변화시키고 제어하기 위해 7.5마력의 3상 유도전동기에 인버터를 부착하여 회전수를 조절할 수 있도록 하였으며 증발부 및 응축부 열교환량 계산을 위해 증발부 및 응축부 닥트의 입출구에 각각 5개씩 20개의 K-type 온도센서를 설치하였다. 증발부 및 응축부의 압력손실 측정은 차압계(140mmH₂O)를 증발부와 응축부 입출구의

다트에 각각 설치하여 히트파이프 열교환기의 압력손실을 측정하였다.

3.2 실험방법

회전형 히트파이프의 성능에 영향을 주는 인자로는 작동유체, 히트파이프의 설치 경사각도, 작동유체의 주입량, 회전속도, 배가스온도 및 배가스와 공기의 유속 등으로 볼 수 있다. 따라서 히트파이프 열교환기의 설치경사각은 2° , 작동유체의 주입량은 20%로 일정하게 하고, 실험의 변수로는 열교환기의 회전속도와 증발부 입구의 배가스온도, 응축부의 유속 등을 변화시켜 열전달 특성값을 도출하였다.

회전속도로는 73, 112, 151, 172 및 200rpm으로 하고, 배가스의 온도는 160에서 220°C , 그리고 히트파이프 열교환기의 전면 공기유입속도로는 1.8 Nm/sec, 2.0 Nm/sec 및 2.2 Nm/sec로 하였다. 히트파이프 열교환기의 증발부 전면속도는 1.3 Nm/sec로 하였다. 이와같은 조건에서 회전형 히트파이프 열교환기의 증발부와 응축부 표면의 온도와 증발부와 응축부 입출구 온도를 측정하여 열교환량 및 총괄열전달계수를 구하여 설계의 자료를 도출하는 것으로 하였다.

4. 성능실험결과 및 고찰

4.1 배가스온도에 따른 열전달특성

Fig. 4 및 Fig. 5는 응축부 전면유속을 2.2 Nm/sec, 증발부 전면유속을 1.3 Nm/sec로 하고, 응축부에 유입되는 공기는 20°C 의 대기온도로 하여 증발부에 유입되는 배가스열의 온도를 변화시켰을 경우의 열교환량과 총괄열전달계수의 변화를 나타낸 것이다

유속이 2.2 Nm/sec에서 배가스온도가 165°C 일 때는 60,000watt에서 배가스온도가 223°C 일 때는 76,000watt까지 변화하고 유속을 1.8 Nm/sec에서 2.2 Nm/sec로 증가시키면 열교환량은 약 10%정도 증가하는 것으로 나타났다. Fig 2의 배가스열의 온도가 210°C 일 때의 38,500watt로 2중관 히트파이프를 사용하였을 때의 값과 비교하면 성능결과의 값은 88%정도 높게 나타나고 있어 이것은 히트파이프 요소를 2중관에서 알루

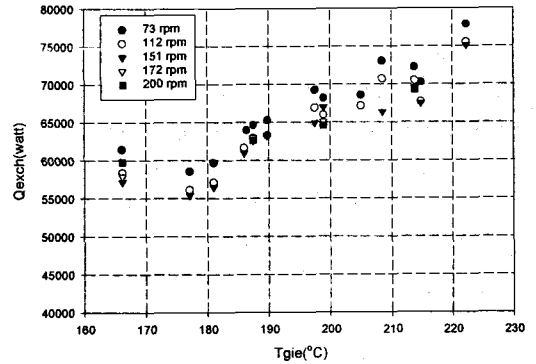


Fig. 4 Heat quantity of heat pipe according to temp (front velocity=2.2Nm/s)

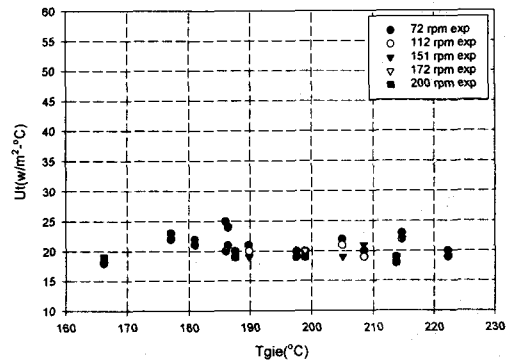


Fig. 5 Overall heat transfer coefficient of heat pipe (front velocity=2.2Nm/s)

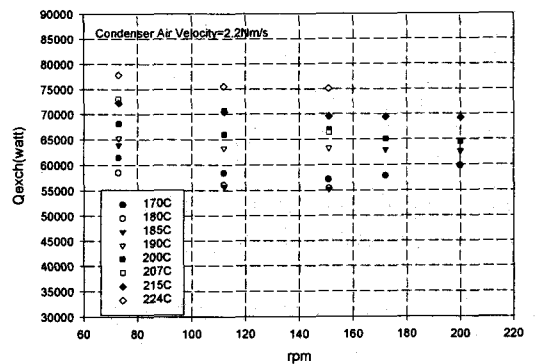


Fig. 6 Heat quantity of heat pipe according to RPM(front velocity=2.2Nm/s)

미늄 환이 달린 동관으로 하고 배가스와 공기를 히트파이프 열교환기의 중심으로 유입시킴으로서 열전달 효과가 상당히 개선된 것으로 판단된다. 증발부에 유입되는 배가스열의 온도를 변화시켰을 경우의 총괄열전달계수값은 배가스열의 온도에는 영향이 별로 없으나, 유속이 2.2 Nm/sec에서는 약 $20 \text{ w/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ 로 유속을 1.8 Nm/sec에서 2.2 Nm/sec로 증가시켜도 총괄열전달계수값은 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

4.2 회전속도에 따른 열전달특성

Fig. 6은 응축부의 공기유속을 2.2 Nm/sec로 하고 회전형 히트파이프열교환기의 회전수를 변화시켰을 경우의 열교환량의 변화를 나타낸 것이다. 배가스열의 온도가 클수록 열교환량은 증가하지만, 회전속도에 따른 열교환열량의 변화는 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 전반적으로 회전속도가 73rpm에서 가장 크게 나타났으며, 회전속도를 증가시킬수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 회전속도가 증가할수록 귀환력은 증가하지만, 히트파이프요소가 회전축을 중심으로 회전하므로 히트파이프요소의 내부에 있는 작동유체가 중심축에서 먼 쪽으로 원심력에 의해 물리는 현상도 커지므로 내부의 증발 및 응축열 전달면적이 감소하여 발생가능한 현상이라고 할 수 있다. 따라서 작동유체의 귀환력이 가능하면 회전속도는 크지 않게 하는 것이 바람직하다고 사료된다. 따라서 회전속도를 너무 크게 하면 오히려 구동력의 증가로 전체적인 효율을 떨어뜨

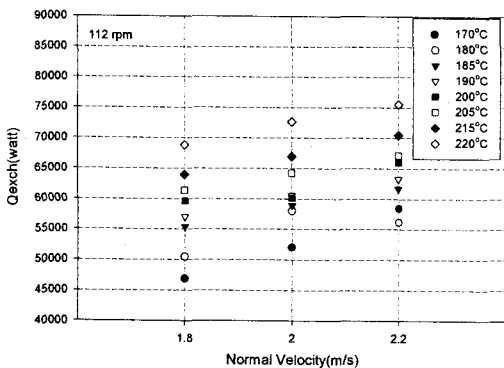


Fig. 7 Heat quantity of heat pipe according to velocity(RPM=112rpm)

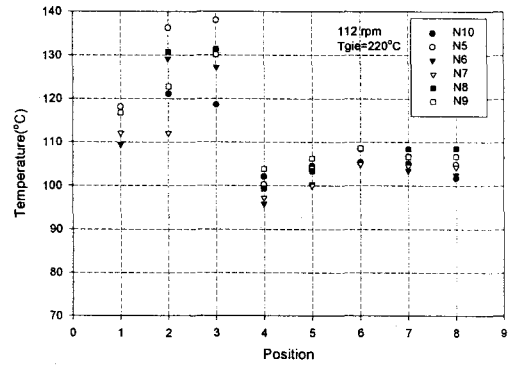


Fig 8 Surface temperature of heat pipe

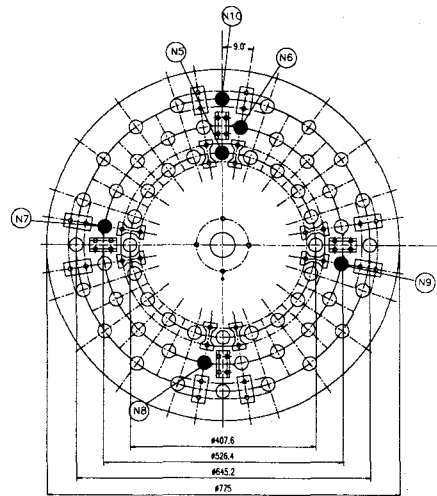


Fig 9 Position according to compass direction of heat pipe elements

리는 결과로 될 수 있으므로 적합한 회전속도를 유지하는 것이 바람직하다.

4.3 유속에 따른 열전달특성

회전속도를 112rpm으로 하고, 증발부에 유입되는 배가스의 유속은 일정하게 하고 응축부에 유입되는 공기의 유속을 변화시켰을 경우의 열교환량의 변화를 나타낸 것이다. 배가스열의 온도가 증가하고 유속이 클수록 열교환량은 증가하며, 2.2 Nm/sec에서는 58,000watt에서 78,000watt까

지 열교환량을 얻었으며, 회전속도 112rpm 이상에서는 거의 차이가 나지 않는 것을 알 수 있고, 이것은 회전속도에 따른 영향은 크지 않다는 것은 전술한 바와 같으며, 유속의 증가에 의해서는 열교환량은 약 7% 정도 증가한다는 것을 알 수 있었다.

4.4 히트파이프 표면온도분포

Fig 8은 증발부의 배가스 유입속도 1.3 Nm/s 및 응축부 공기 유입속도 2.0 Nm/sec에서 증발부와 응축부의 1열, 2열, 3열에 위치한 히트파이프 요소의 표면에 열전대를 부착하여 배가스 입구 온도 220°C에서의 히트파이프의 표면온도분포를 나타낸 것이다. 위치1에서 3은 증발부, 위치 4에서 8은 응축부의 표면온도이며, N5에서 N10은 각열에서의 방위에 따른 위치이고 Fig 9에 나타내었다. 여기서 배가스 입구온도에 상관없이 증발부와 응축부의 표면온도차는 23°C~30°C로 나타났다. 이때의 열교환열량이 53,000 watt~72,000watt로서 히트파이프요소 하나당의 교환열량은 880 watt~1200 watt이며, 따라서 히트파이프 요소의 열저항은 0.025~0.026 °C/watt로 적다고 볼 수 있다.

5. 결론

회전형 히트파이프의 설계기술을 확립하고자 이론해석기술을 개발하고 설계프로그램으로부터 증고온의 배가스로부터 열풍발생에 이용하고자 히트파이프요소 60개를 회전중심축에 2도의 경사각을 유지시켜 삼각배열로 조립하여 회전형 열교환기의 성능실험을 히트파이프 열교환기의 중심축에 대해 회전속도, 배가스의 온도, 응축부 공기의 유속을 변화시켜 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분진함유량이 많은 배가스로부터의 열회수효과를 증가시키고자 히트파이프요소를 원통형으로 조립한 회전형 히트파이프 열교환기에서 설계의 중요한자인 설치경사각, 회전속도 및 포화온도에 따른 이론해석기술을 개발하였으며, 해석결과 중심축으로부터 히트파이프요소까지의 직경과 회전속도가 귀환력에 영향을 미치는 것으로 판단되었다.
- 2) 열교환기의 성능실험결과에서 배가스온도가

220 °C일 때 공기유속이 2.2 Nm/sec에서는 열교환기의 열교환량은 78,000 watt의 결과를 얻었으며, 2중관 히트파이프의 성능결과와 비교하면 실험결과와 값은 88% 정도 높은 결과로 우수한 성능을 나타내었다.

3) 공기유속을 2.2 Nm/sec 로 하고, 증발부에 유입되는 배가스열의 온도를 변화시켰을 경우의 총괄열전달계수는 20 w/m²-°C 정도의 범위로 나타났다.

후기

본 연구는 1999년 산업자원부 에너지·자원기술개발사업 연구비에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. R.Curtilla and T.Chataig, 1984, "Experimental Study of a Revolving Heat Pipe", Proc. 5th Int. Heat Pipe Conf. Tsukuba, Japan.
2. T.Okino, S.Tanaka and S.Maezawa, 1986, "Heat Transfer Characteristics of Parallel Rotating Heat Pipe", Technology Reports of the Sekei University, No.42.
3. S. Niekawa and K. Matsumoto, 1990, "Performance of Revolving Heat Pipes and Application to a Rotary Heat Exchangers", 7th IHPC, pp. 225-234.
4. K. W. Lee, Y. S. Lee and Y. S. Jang, 1996, "Effect of Heat Transfer on Aluminum Rotor with Rotating Heat Pipe", 5th International Heat Pipe Symposium, Melbourne, Australia.
5. Vasiliev, L. L., 1988, "Study of a Heat Pipes Transfer Process in the Condensation Zone of Rotating Heat Pipes", Heat Recovery Systems, Vol. 3, NO. 4, pp.281-290.
6. 이기우 외, 1999, 히트파이프 이용 회전형 열교환기 개발, 산업자원부 연구보고서
7. 이기우 외, 1999, 히트파이프 회전형 열교환기의 성능에 관한 연구, 99공기조화냉동공학회 하계학술발표회 논문집, p31-35.