

동심형 히트파이프의 열성능에 관한 연구

김도형[†]((주)유익)·박수용^{*}(한국항공대 원)·부준홍^{**}(한국항공대)

A Study on the Thermal Performance of Concentric Annular Heat Pipes

Kim, D. H., Park, S. Y. and Boo, J. H.

Key Words: Concentric annular heat pipe(동심형 히트파이프), Isothermal characteristics(등온성), Thermal performance(열성능)

Abstract

Concentric annular heat pipes having the length of 200 mm and the outside diameter of 25.4 mm were manufactured and tested. The inside diameters of the heat pipes were 11.3 mm and 8.1 mm and the material of the container was copper. To compare with thermal performances between the concentric annular heat pipe and a copper block with same shape, start-up and isothermal performance were tested. In the result, the start-up of the concentric annular heat pipe was influenced by the start-up of their heat source. The concentric annular heat pipe reached at steady state faster than the same shape of copper block. The maximum wall temperature difference of the concentric annular heat pipe on whole surface was 4.6°C, and the case of the copper block was 16.5°C.

1. 서 론

히트파이프는 작동유체의 상변화를 이용하여 열을 이송함으로써, 현열을 이용하는 열전달기기에 비해 매우 큰 열전달 능력을 가진 장치이다⁽¹⁾. 1965년 히트파이프가 소개된 이래, 산업적인 부분에서 많은 적용이 이루어졌으며, 다양한 형태와 원리로 응용되고 있다. 히트파이프는 정밀한 온도 제어, 외부 동력의 불필요, 넓은 작동 온도 영역, 그리고 다양한 형태로 제작이 가능하다는 장점들을 가지는데, 이러한 장점들로 인해 전자제품 냉각, 위성체 냉각, 산업용 열 회수, 열 저장 등으로

점차 응용 범위를 넓혀가고 있다⁽²⁻⁴⁾.

일반적인 히트파이프는 증발부, 단열부 그리고 응축부로 이루어진 파이프 형태이며, Fig. 1은 기존의 히트파이프 형상을 보여주고 있다. 이러한 일반적인 형상은 히트파이프가 열수송 장치로서 충실한 역할을 할 수 있도록 설계단계에서 각 부분의 길이를 조정할 수 있으며, 발열부에서의 열을 방열부로 원활한 열이송이 가능하게 한다. 현재는 보다 다양한 산업적인 응용을 위해서 여러 형태의 히트파이프가 제작되고 있으며, 판형, 원형의 용기뿐 아니라 다양한 단면 형상을 가진 히트파이프가 개발되고 있다^(5,6).

동심형 히트파이프에 대한 기본 개념은 이미 1973년 Vasiliev⁽⁷⁾의 연구에서 찾아 볼 수 있다. 그는 동축 히트파이프(Co-axial heat pipe)라는 이름으로 몇 가지 동심형 히트파이프의 형상을 제안하였으며, 공급 열부하와 히트파이프 반경 방향에 따른 온도를 측정하여 제안한 히트파이프의

[†](주)유익

E-mail : dhkim@ewic.co.kr

TEL : (02)300-0053 FAX : (02)3158-4429

* 한국항공대학교 대학원

** 한국항공대학교

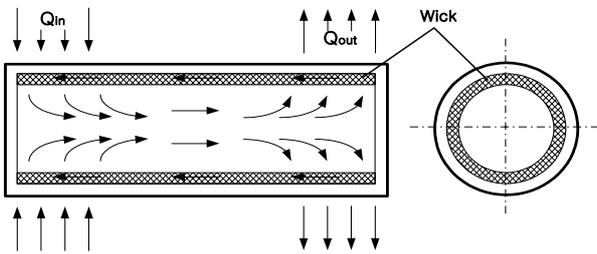


Fig. 1 A Conventional Heat Pipe

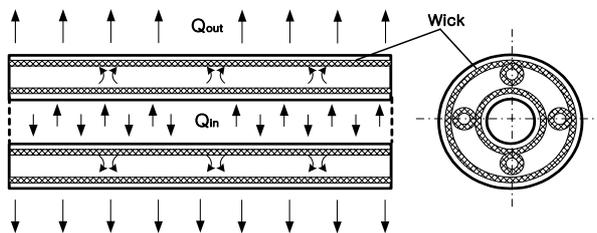
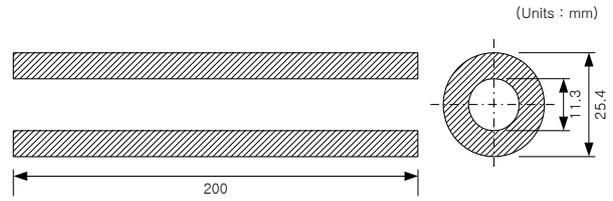


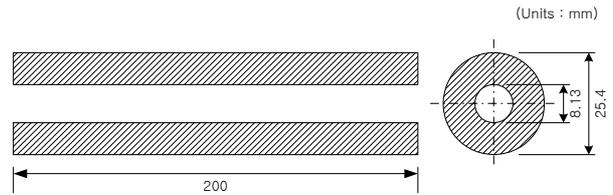
Fig. 2 A Concentric Annular Heat Pipe

성능 평가를 수행하였다. 이후 Faghri와 Thomas⁽⁸⁾는 기존 형상의 히트파이프의 중심에 직경이 작은 파이프를 삽입한 후, 증발부 영역에서는 외부 파이프와 내부 파이프를 동시에 가열하고, 응축부 영역에서는 외부 파이프와 내부 파이프를 동시에 냉각함으로써, 전체적인 열전달 면적을 늘리는 시도를 하였다. 그리고 그 실험 결과를 동일한 외경을 가지는 기존 형태의 히트파이프의 성능과 비교함으로써, 열전달 면적 증가로 인해 열성능 향상을 확인하였다. 최근에는, Kim et al.⁽⁹⁾이 레이저 프린터의 가열부로 사용되는 할로겐 램프를 대체할 수 있는 히트파이프식 가열 롤러를 개발하였고, 그 응답 시간을 관찰하였다.

본 연구에서는 증류수를 작동유체로 하며, 두 개의 외경이 다른 파이프를 이용하여 제작한 동심형 히트파이프에 대한 열적 성능 실험을 수행하였다. 그리고 동일한 형태의 구리 블록과의 열적 성능과의 비교를 위해 동심형 히트파이프와 외형이 동일한 구리 블록을 제작한 후 같은 방법으로 실험하였다. Fig. 2는 본 연구를 위해 제작한 동심형 히트파이프의 개략도를 보여주고 있다. 실험은 공급 열부하와 작동유체 충전율 변화에 따른 표면 온도 변화를 관찰하였다. 그리고 히트파이프의 시동 특성을 확인하기 위해 가열원으로 사용한 카트리지식 히터와 이를 삽입한 구리 블



(a) 1/2 inch (Inside Diameter)



(b) 3/8 inch (Inside Diameter)

Fig. 3 Tested Concentric Annular Heat Pipes

록과의 시동 특성 및 등온성을 각각 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 동심형 히트파이프

실험을 위해 제작한 동심형 히트파이프는 모두 두 개인데, 길이와 외경은 각각 200 mm와 25.4 mm(1 인치)로 동일하다. 다만 증발부 역할을 하는 내부 파이프를 외경이 각각 12.7 mm(1/2 인치)와 9.53 mm인 구리관을 사용하였다. 외경 파이프의 두께는 1 mm이었으며, 외경 12.7 mm와 9.53 mm인 파이프의 두께는 모두 0.7 mm이다. Fig. 3은 제작한 동심형 히트파이프들의 크기를 보이고 있다. 히트파이프의 내경은 각각 11.3 mm와 8.13 mm로 별도로 제작된 카트리지식 히터를 삽입할 수 있게 하였다.

성능 실험을 위해 제작한 동심형 히트파이프의 내부에는 작동유체의 원활한 순환을 위해 스크린 메쉬 워크(screen mesh wick)를 부착하였으며, 내부 파이프의 외면과 외부 파이프의 내면을 연결하기 위해 원형으로 등글게 만 브릿지(bridge) 워크를 90° 간격으로 네 개 삽입하였다. 부착한 스크린 메쉬의 번호는 #80으로 내벽에 증발부에 2겹, 응축부에 2겹, 그리고 브릿지 워크도 모두 2겹씩이 되게 말아 삽입하였다. 삽입한 워크 구조물에서 발생하는 모세관력은 유체가 워크사이를 흐를 때 발생하는 마찰압력강하량과 유체가 최고로 상승해야 하는 압력수두의 합보다 크거나 같아야 한다. 즉,

$$\frac{2\sigma}{r_c} \geq \Delta P_f + \rho g h_{\max} \quad (1)$$

여기서, σ 는 표면장력, r_c 는 모세관 반경, ΔP_f 는 액체가 스크린 사이를 통과하면서 발생하는 마찰 압력강하, ρ 는 유체 밀도, g 는 중력가속도, 그리고 h_{\max} 는 작동유체가 상승할 최대 높이이다. 본 연구에서 이를 바탕으로 스크린 메쉬의 크기를 결정하였다.

2.2 작동유체

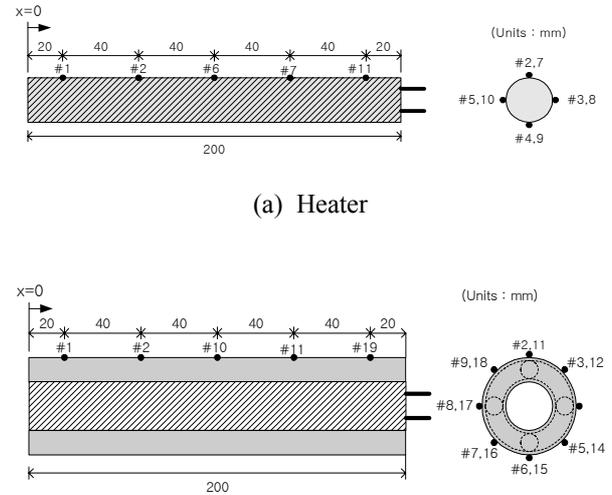
작동유체로는 증류수(distilled water)를 사용하였다. 충전한 작동유체의 양은 내부에 삽입한 전체 위의 중공도를 고려하여 스크린 메쉬의 중공체적을 100%로 계산하고, 이를 기준으로 각각 100%, 120%, 140%의 충전을 변화를 주어 작동유체 양에 따른 히트파이프의 성능변화를 확인하였다. 내경 1/2 인치 동심형 히트파이프의 경우 충전을 100%는 10.7 cc이며, 내경 3/8 인치 동심형 히트파이프의 경우 충전을 100%는 11.3 cc이었다.

2.3 히터

중앙에 열원으로 삽입된 카트리지식 히터는 길이 200 mm, 외경 11 mm인 것과 외경 8 mm인 전기저항식 히터를 사용하였는데, 각각은 내경 1/2 인치 동심형 히트파이프와 내경 3/8 인치 동심형 히트파이프에 삽입할 수 있도록 제작하였다. 히터의 용기는 스테인리스 스틸로 제작되었으며, 내부에 얇은 코일을 감고 마그네슘 분말을 분사하여 고정시켰다. 히터의 최대 공급 가능 열부하는 300 W이며 전압조절기를 통하여 공급 열부하를 조절할 수 있게 하였다. 전압조절기와 히터 사이에는 열량계(watt meter)를 설치하여 입력 열량을 확인하였다.

2.4 성능 비교용 구리 블록

히트파이프와의 성능 차이를 알아보기 위해 제작한 히트파이프와 동일한 크기의 구리 블록을 제작하였고, 이에 대해 공급열부하에 대한 온도변화 실험을 수행하였다. 제작한 구리 블록은 1/2 인치 원심식 히트파이프와 동일한 형상으로, 외경 25.4 mm(1 inch), 내경 11.3 mm, 그리고 길이가 200 mm이다.



(b) Copper block and Concentric Heat Pipe

Fig. 4 Attached Thermocouple's Location

2.5 온도 측정

온도 측정을 위해 K-type 열전대를 사용하였다. 카트리지식 히터의 표면 온도차를 알아보기 위해 히터의 직경과 길이를 고려하여 모두 11개의 열전대를 부착하였다. 구리 블록의 경우에는 동심형 히트파이프와 외형이 동일하기 때문에 동일한 위치에 열전대를 부착하였다. 축방향으로는 히터와 동일하게 5개를 40 mm 간격으로 배치하였으며, 양 끝 60 mm 지점에 원주 방향으로 8개를 배치하였다. 측정에 사용한 열전대는 Omega사의 TT-K-30-SLE 모델로 399.5°F에서 0.5°F의 편차를 가진다. 부착한 열전대는 100°C를 기준으로 보정한 후 사용하였다. Fig. 4는 각각에 부착한 열전대의 위치를 보이고 있다.

2.6 냉각 및 기타 실험 장치

히트파이프 응축부에서의 열 제거를 위해서 공기를 이용한 강제대류 냉각방식을 택했는데, 이를 위해 팬(fan)이 부착된 덕트를 제작하였다. 덕트 출구에서의 평균 공기 속도는 3~4 m/s 사이로 측정되었으며, 히트파이프의 원활한 열전달을 위해 공기는 히트파이프의 옆쪽에서 불어주었다. 데이터 기록을 위해 Fluke사의 자료획득장치를 사용하여 5초 간격으로 컴퓨터에 저장하여 분석하였다.

2.7 실험 방법

외경이 11 mm인 카트리지식 히터, 카트리지식 히터를 삽입한 외경 1 인치의 원형 구리 블록, 그리고 내경 1/2 인치와 내경 3/8 인치 동심형 히트파이프 각각에 대한 성능 실험을 수행하였다.

먼저, 시동(start-up) 특성을 알아보기 위해 카트리지식 히터, 구리 블록, 그리고 내경 1/2 인치 동심형 히트파이프에 각각 120 W의 열부하를 공급한 후 정상상태에 도달하는 시간을 측정하였다. 실험에서는 5분에 1°C 미만의 온도 상승을 보였을 때를 정상상태로 정하였다.

두 번째로, 단계적인 공급 열부하에서의 온도 특성을 알아보기 위해 구리 블록, 내경 1/2 인치 동심형 히트파이프, 그리고 내경 3/8 인치 동심형 히트파이프에 20 W씩의 열부하를 공급하여 공급 열부하에 따른 각각의 온도 분포와 표면에서의 최대 온도차를 확인하였다.

마지막으로 동심형 히트파이프에 대해 작동유체 충전율 변화에 대한 성능 특성을 확인하였는데, 작동유체 충전율 100%를 기준으로 20%씩 변화시켜가며 실험하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 시동

Fig. 5는 카트리지식 히터, 구리 블록, 그리고 내경 1/2 인치 동심형 히트파이프의 시동 특성을 비교하여 보이고 있다. 나타낸 온도는 히터에 120 W의 열부하를 공급한 후 각 실험 대상의 표면에서 측정된 온도들의 평균을 시간에 따라 도시한 것이다.

열원으로 사용한 카트리지식 히터의 경우 외경이 11 mm이기 때문에 전체 냉각을 위한 열전달 면적은 69cm² 정도이다. 구리 블록이나 동심형 히트파이프의 냉각 면적은 160 cm²으로 카트리지식 히터의 경우보다 2.3배 이상 넓다. 따라서 카트리지 히터의 경우 동일한 공급 열부하에서 표면 평균 온도가 구리 블록이나 동심형 히트파이프의 경우보다 높게 나타난 것이다. 정상상태 시 카트리지식 히터 표면의 평균온도는 172°C 정도를 나타내었으며, 시동 후 25분 내외에서 정상상태 기준을 만족하였다.

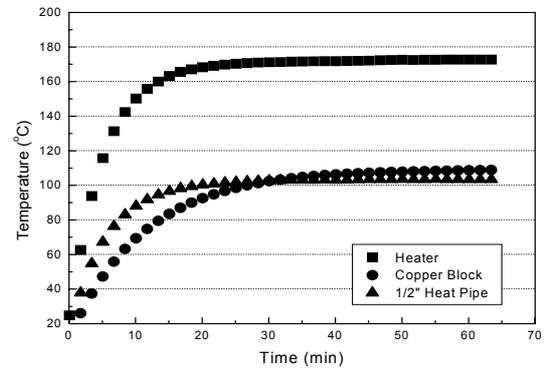


Fig. 5 Comparison with Start-up Characteristic

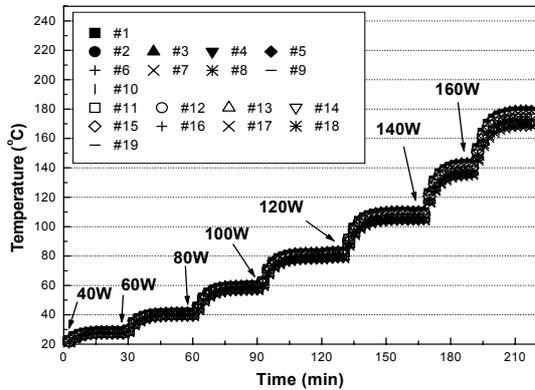
동심형 히트파이프의 경우, 시간에 따른 표면 온도 상승이 열원인 카트리지식 히터에 비해 낮게 나타났으며, 정상상태에서 열원보다 70°C 정도 낮았다. 그러나 정상상태에 도달한 시간은 열원과 거의 동일하여 시간 지연이 나타나지 않았으며, 시동 후 25분 내외에서 정상상태에 도달하였다.

히트파이프와 동일 형상의 구리 블록의 경우, 상대적으로 느린 응답성을 보이고 있다. 정상상태 온도는 히트파이프 보다 약 5°C 정도 높게 나타났으며, 시동 후 50분 경과 후에 정상상태에 도달하여 약 25분의 시간지연을 보였다.

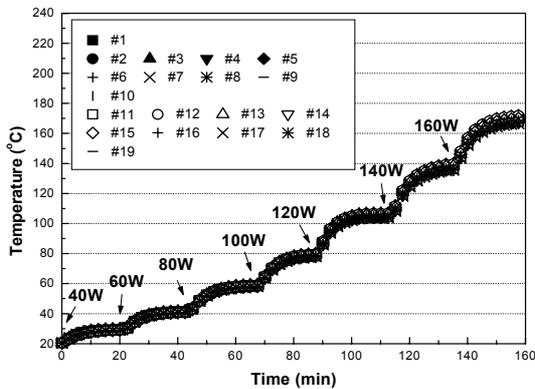
3.2 표면 온도 변화

Fig. 6의 (a)와 (b)는 충전율 100%인 경우, 내경 3/8 인치 동심형 히트파이프와 내경 1/2 인치 동심형 히트파이프의 온도 변화를 보이고 있다.

내경 3/8 인치 동심형 히트파이프의 경우, 최대 공급 열부하에서 히트파이프 표면의 최고 온도가 178.3°C이고 최저 온도가 168.5°C로 최고-최저 온도차가 9.8°C를 보였다. 축방향의 온도차는 이보다 작게 나타났는데, 최고-최저 온도차가 3.5°C를 보였다. 내경 1/2 인치 동심형 히트파이프의 경우도 크게 다른 온도 변화를 보이지는 않는다. 축방향 가운데에 위치한 #10의 온도를 살펴보면, 40W 부터 160 W까지 20 W 상승에 따라서 27.6°C, 40.6°C, 58.6°C, 81.3°C, 108.8°C, 142.3°C 그리고 176.9°C를 나타내었다.



(a) 3/8 inch (Inside Diameter)



(b) 1/2 inch (Inside Diameter)

Fig. 6 Surface Temperature Variation of the Concentric Annular Heat Pipe as a function of Input Thermal Loads

3.3 등온 특성

Fig. 7은 카트리지식 히터, 구리 블록, 그리고 내경 1/2 인치 동심형 히트파이프의 축방향에서 발생하는 최대 온도차를 보이고 있다. 축방향 40 mm 간격으로 부착한 5개의 열전대의 최고 온도와 최저 온도와 차이를 도시한 것이다. 카트리지식 히터의 경우, 공급 열부하에 따라 40 W에서 10.5°C의 온도차를 보였으나 공급 열부하가 120 W로 증가함에 따라 온도차가 100°C를 초과하게 된다. 구리 블록의 경우, 최대 온도차가 160 W에서 4°C 이하로 작은 온도차를 보인다. 가장 작은 공급 열부하인 40 W에서는 0.6°C로 카트리지 히터와 비교하였을 때 10°C 정도의 차이를 보인다.

동심형 히트파이프의 경우 열부하 공급량 증가에 따라 온도차 증가를 보이나, 구리 블록의 경우 보다는 상대적으로 작은 온도차를 갖는다. 축방향 온도차의 경우는 히트파이프 충전율에 따른 뚜렷한 차이를 확인하기는 어려우나, 충전율 140%에서 가장 작은 온도차를 보였다. 최대 축방향 온도차는 최대 공급 열부하인 160 W에서 3.9°C로 구리 블록과 비교하여 1°C 작은 값을 보였다.

Fig. 8은 구리 블록과 동심형 히트파이프들 간의 보다 뚜렷한 성능 차를 확인하기 위해 각각에서 측정된 표면 온도들의 최고-최저 온도차를 도시한 것이다. 구리 블록의 경우 최대 공급 열부하에서 16.5°C의 표면 온도차를 보였으나, 내경 1/2 인치 동심형 히트파이프의 경우에는 최대 4.6°C의 온도차를 보였으며, 내경 3/8 인치 동심형 히트파이프

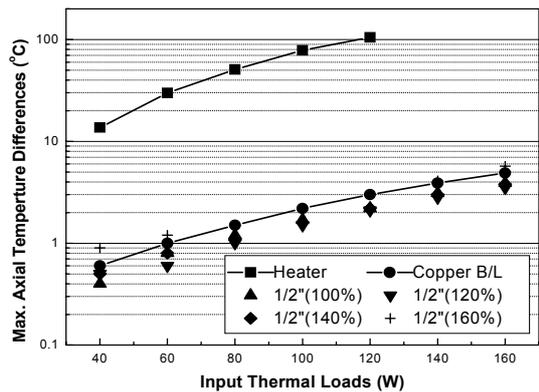


Fig. 7 Comparison with Maximum Axial Temperature Differences

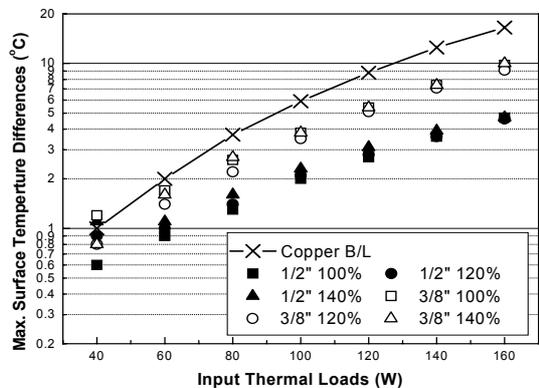


Fig. 8 Comparison with Maximum Surface Temperature Differences

이프의 경우에는 충전율 100%에서 최대 9.8℃의 표면 온도차를 보이는 것을 확인할 수 있다. 내경 1/2 인치 동심형 히트파이프의 경우에는 충전율 120%에서 가장 작은 표면 온도차를 보였으나, 측정 오차 안의 값을 가지며, 내경 3/8 인치 동심형 히트파이프의 경우에도 역시 120%에서 9.1℃로 가장 작은 표면 온도차를 보였다.

4. 결 론

동심형 히트파이프로써 증류수-구리 조합을 사용하여 동일한 외경을 가지나 내경이 서로 다른 히트파이프들에 대한 제작과 성능 실험을 통해 열적 특성을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 최대 공급 열부하(160W)에서 내경 1/2 인치 히트파이프가 응축부 표면에서 최대 4.6℃의 최대 온도차를 보였으며, 내경 3/8 인치 히트파이프는 최대 9.8℃를 보여 동일한 외경에서는 내경이 큰 동심형 히트파이프가 상대적으로 우수한 등온 특성을 보였다.

(2) 위 1.에서와 같은 열부하에서 열원인 카트리지식 히터 표면의 최대 온도차가 105℃를 나타낼 때 내경 1/2인치 구리 블록의 표면 최대 온도차는 16.5℃로 나타났다. 따라서 동심형 히트파이프(최대 온도차 4.6℃)의 최대 온도차는 구리블록 대비 28% 이내로서 우수한 등온성을 나타내었다.

(3) 내경이 다른 두 히트파이프의 작동유체 충전율을 워 증공체적의 100%에서 140%까지 변화시켜가며 실험한 결과, 충전율 120%에서 가장 우수한 표면 등온 특성을 보였다.

(4) 동일한 120 W의 열부하에서 동심형 히트파이프와 구리 블록의 시동에 따른 응답성을 비교하기 위해 120W의 열부하를 각각 공급하였을 때, 히트파이프는 카트리지식 히터의 온도 상승과 비교하여 시간 지연 없이 정상상태에 도달하였으나, 구리블록은 히트파이프와 비교하여 약 100%(25분)의 시간 지연을 보였다.

참고문헌

(1) 부준홍, 1998, “히트파이프의 기본원리,” 제1

회 히트파이프의 원리 및 응용기술에 관한 강습회, pp. 3-7.

(2) 김광수, 1998, “Heat Pipe를 이용한 전자장비 냉각기술,” 제1회 히트파이프의 원리 및 응용기술에 관한 강습회, pp. 27-58.

(3) Gregory J. Kowalski, 1988, “Heat Exchanger Theory Applied to the Design of Water and Air-Heating Flat-Plate Solar Collectors,” Transactions of the ASME, pp. 132-138.

(4) Y. H. Yau, and S. Y. Lee, 2000, “Experimental and Theoretical Performance Analysis of Heat Pipe Exchangers for Building HVAC Systems in Tropical Climate,” The 6th International Heat Pipe Symposium, pp. 183-190.

(5) Boo, J. H., Chung, W. B., Kim, T.G., Park, C. H. and Kim, C. S., 2000, “A Study on the Isothermal Characteristics of a Disk-Type Heat Pipe,” Proceedings of the 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, pp. 579-584.

(6) Boo, J. H. and Peterson. G. P., 1995, “Measurement of Evaporation and Condensation Heat Transfer through a Liquid - Vapor Interface in a Flat-Plate Heat Pipe,” The 9th International Heat Pipe Conference. pp. 30-33.

(7) Vasiliev, L.L., 1973, “Heat and Mass Transfer in Low Temperature Heat Pipes,” 1st International Heat Pipe Conference, 3-1.

(8) Faghri, A. and Thomas, S., 1989, “Performance Characteristics of a Concentric Annular Heat Pipe,” Journal of Heat Transfer, Vol.111, pp. 844-850.

(9) Kim, K.S., Kim H.B., and Lee, K.W., 2003, “Development of Heat Pipe Heating Roller in Laser Printer,” 7th International Heat Pipe Symposium, D-2.