

루우프형 2상 유동 열사이폰의 비등열전달 특성에 관한 연구

조 동 현[†]
(대진대학교)

A Study on the Characteristics of Boiling Heat Transfer of Two-Phase Loop Thermosyphons

Dong-Hyun CHO[†]
(Daejin University)

Abstract

A heat exchanger using two-phase loop thermosyphons was developed as a waste heat recovery system. An experimental study was carried out on the heat transfer characteristics of two-phase loop thermosyphons heat exchanger and the results from the experiments were used to see the possibility which the two-phase loop thermosyphons could be an alternate solution for waste heat recovery system. In the present work, R134a has been used as the working fluid and the filling rate do working fluid and heat flux have been used as the experimental parameters. The results show that the filling rate of working fluid and heat flux are very important factors for the operation of two-phase loop thermosyphons. The experimental results showed the provisional results as a waste heat recovery system.

Key words : Two-phase loop thermosyphon, Boiling heat transfer, Filling rate, Heat flux

I. 서론

2상 유동 루프형 열사이폰(two-phase loop thermosyphon)은 루프 내에서 작동유체의 연속적인 2상 유동 현상(two-phase process)에 따라 작동유체의 잠열을 이용하여 열원(heat source)으로부터 방열부(heat sink)로 열을 전달하는 장치이다(Rhi, S. H. 1998). 루프형 열사이폰은 열원인 증발부와 방열부인 응축부, 그리고 작동유체가 증발부와 응축부 사이를 유동할 수 있는 유로인 수송부로 나누어져 있다. 현재 냉각유체로 해수 또는 담수를 이용하고 이를 순환시키기 위한 펌프, 현열 변화에 의한 열전달 특성을 갖는 기존 쿨러

와는 달리 본 연구의 2상 유동 루프형 열사이폰은 열매체의 증발과 응축 과정을 이용한 쿨러로 높은 열전도 계수를 가지는 은이나 구리의 열전도 계수에 수백배에 해당하는 열전달 계수를 확보할 수 있는 열사이폰 방식의 쿨러이다(Lee, J. S, 1999). 열사이폰 방식의 쿨러는 많은 공간을 차지하지 않으며 가볍고 높은 열전달 능력을 가지고 있으므로 중량과 공간을 많이 차지하던 기존 냉각방법에 비해 월등히 우수한 쿨러 시스템이다(Lee, K. W, 1995). 또한 시스템의 작동유체인 냉매로는 루프형 열사이폰의 작동유체로 R-134a유체가 사용되었다(Lim, T. W., 2002). 열사이폰은 큰 열전도율, 열다이오드 특성, 작동운동

[†] Corresponding author : 031-539-1973, chodh@daejin.ac.kr.ac.kr

* 이 논문은 2014학년도 대진대학교 학술연구비 지원에 의한 것임

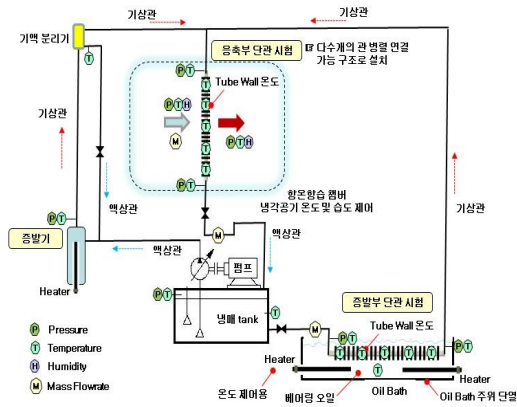
범위의 다양성 등의 특성을 가지고 있어 열회수 시스템의 열교환기, 전기 발열체의 냉각 등 여러 산업 전반에 걸쳐 그 응용분야가 다양하다(Lee, K. W, 2000). Gaugler(1994)에 의해 열사이폰이 개발된 이후 오늘날까지 열사이폰내의 유동 및 열전달 메카니즘에 대한 많은 연구가 이루어졌다(Lim, T. W., 2008). 이러한 연구에서는 증발부에서의 비등과 응축부에서의 액막응축 등 여러 가지 현상들을 다루고 있다(Park, Y. H., 2008). 그 중 증발부에서 일어나는 상변화 및 유동현상은 매우 복잡하고 열사이폰의 해석을 어렵게 만드는 주요인이 되는데 증발부에서 일어나는 현상은 열량에 따라 다르며(Park, J. W., 2004), 열전달이 일어나는 위치에 따라서도 다르다(Kim, S. H., 2005). 액체 풀내에서는 자연대류, 그리고 핵비등이 일어나며 액막형태의 유동이 있는 증발부 영역에서는 액막에서의 증발이 발생한다(Youn, H. P., 2008). 열사이폰내 증발부는 풀내 핵비등에 의해서 기포가 발생하고 이것은 풀의 평균밀도를 변화시키며 풀의 높이를 변화시키는 주요 원인이 되고 있다(Park, Y. H., 2007). 본 연구에서는 최적의 열사이폰 냉각 시스템을 개발하기 위하여 다양한 실험을 수행하였다. 그리고 냉매 충전량에 대한 시스템의 온도 및 압력을 측정함으로써 본 시스템에 대한 최적의 냉매 충전량을 제시하였다.

II. 실험장치 및 방법

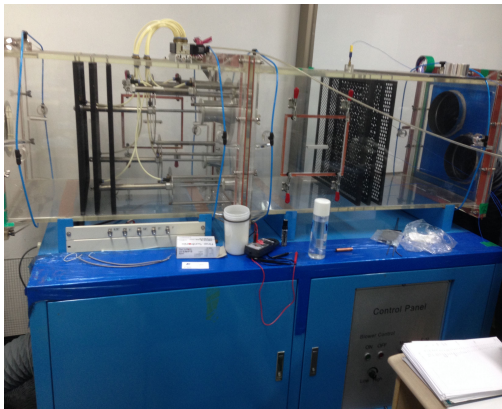
1. 실험장치

[Fig. 1]은 2상 유동 루프형 열사이폰 실험장치를 나타낸다. 실험장치는 시험구간, 증기냉매순환회로, 응축냉매순환회로, 고진공시스템, 비등부 열공급용 오일탱크, 응축부 공기 온도와 풍속 측정용 풍동과 온도측정 및 기록장치로 구성된다. [Fig. 2]는 공기유량 및 온도 측정용 열교환기 전용 풍동을 나타낸다. 그리고 [Fig. 3]은 루우프형

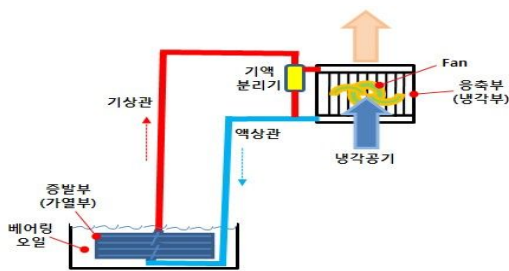
2상 유동 열사이폰의 개략도를 나타낸다. [Fig. 3]에 나타낸바와 같이 루우프형 2상 유동 열사이폰은 증발부와 응축부, 냉매순환회로로 구성된다. 시험구간인 응축부의 총 길이는 1000mm이며, 튜브 직경은 12mm이며, 튜브 개수는 7개이다. 공기가 유동하는 응축부의 외부는 플레이트형 핀을 설치하여 응축부의 열전달 성능이 향상되도록 하였다. 그리고 [Fig. 2]에 나타낸 바와 같이 응축부에서 응축열을 흡수한 고온의 공기의 공기유량 및 온도는 열교환기 전용 풍동에서 측정하였다. [Fig. 2]에 나타낸 바와 같이 공기 풍량의 정밀도를 향상시키기 위하여 직경 19.1mm, 25.4mm, 40.6mm, 50.8mm, 76.2mm의 5가지 노즐을 설치하여 응축부에 유동하는 공기의 풍량에 따라 노즐이 개폐가 되도록 하였다. 그리고 비등부의 총 길이는 500mm이며, 직경은 12mm인 튜브 4개를 수직으로 오일탱크 내부에 설치하였다. 오일탱크는 직경이 300mm이며, 높이는 500mm이다. 오일탱크 내부에 오일을 가득주입하고 1kW 용량의 히터를 설치하여 오일에 열을 공급하도록 구성하였다. 오일탱크 내부에 설치한 히터를 가동하여 오일온도를 상승시킨다. 온도가 상승된 오일이 보유하고 있는 열을 증발부 내부의 작동유체에 공급한다. 증발부 내부의 작동유체가 열을 흡수하면 비등이 일어나고 비등증기는 비등냉매순환회로를 통해 상부의 응축부로 수송된다. 응축부 내부의 비등증기는 응축부 외부에 유동하는 저온의 공기에 열이 전달되고 응축이 된다. 응축된 응축액은 중력에 의해 냉매증기순환회로를 통해서 하부의 비등부로 수송된다. [Fig. 1]에 나타낸 바와 같이 냉매증기순환회로에 냉매질량유량계를 설치하여 냉매질량유량을 측정하였다. 시험구간의 외부는 주위로부터 열손실을 방지하기 위하여 시험구간의 증발부, 응축부와 냉매증기순환회로에 각각 50mm 두께의 단열보온재로 두겹 단열하여 열손실을 방지하였다.



[Fig. 1] Schematic Diagram of Experimental Apparatus



[Fig. 2] Wind tunnel for condenser air cooling



[Fig. 3] Schematic diagram of two-phase loop thermosyphons

2. 실험방법

실험에서 작동유체는 R-134a를 사용하였다. 작

동유체의 충전율은 50%, 70%, 80%, 100%의 4가지 봉입율에서 실험을 수행하였다. 열사이폰의 증발부에 열을 공급하는 오일온도는 30~95°C 범위에서 실험데이터를 산출하였다.

그리고 고진공시스템은 진공펌프, 진공밸브, 작동유체 주입장치로 구성된다. 열사이폰의 작동은 고진공일수록 열전달 성능이 향상되므로 본 연구에서 사용된 진공펌프는 1차적으로 로터리진공펌프에 의하여 1×10^{-2} torr까지 진공시킨 후 2차적으로 고진공용 확산펌프를 작동시켜 1×10^{-4} torr까지 고진공시켰다. 온도측정장치는 열사이폰의 파이프 표면온도를 측정하는 열전대와 증발부, 응축부 및 냉매순환회로 내부의 비등증기와 응축액의 온도센서, 오일탱크 내부의 오일온도와 응축부 외부에 유동하는 공기온도를 측정하는 온도센서를 구성하였다. 열사이폰의 표면온도를 측정하기 위하여 열사이폰 표면에 폭 2mm, 깊이 0.3mm, 길이 20mm 크기의 홈을 밀링 가공하고 에탄올로 깨끗이 세척한 후 열전대선 접점을 홈에 완전히 접촉시키고 은납으로 채우고 24시간이 경과한 다음 외부의 열교란을 방지하기 위하여 에폭시수지로 덮었다. 그리고 증발부의 표면온도를 측정하기 위하여 증발부의 길이 방향으로 50mm 간격으로 각각 열전대를 3점 설치하여 표면온도분포를 측정하였다. 그리고 응축부의 표면온도를 측정하기 위하여 응축부의 길이 방향으로 50mm 간격으로 9점을 열전대를 설치하였다. 증발부외 응축부의 입·출구 온도를 측정하기 위하여 입·출구에 4점의 열전대 온도를 설치하였으며, 또한 측정오차를 감소시키고, 비교·분석하기 위하여 응축부와 증발부 입·출구에 압력센서를 설치하여 냉매의 비등증기와 응축액의 압력을 측정하였다. 본 연구에 사용된 열전대와 온도센세 모두는 냉점을 통하여 보정하였다. 이와 같이 하여 열사이폰의 시험구간에 설치된 열전대와 온도센서들에 의하여 온도가 측정되면 데이터 로그를 통하여 컴퓨터로 전송되어 0.1°C까지 정확한 값으로 기록되어 파일로 저장된다.



[Fig. 4] Oil tank and evaporator

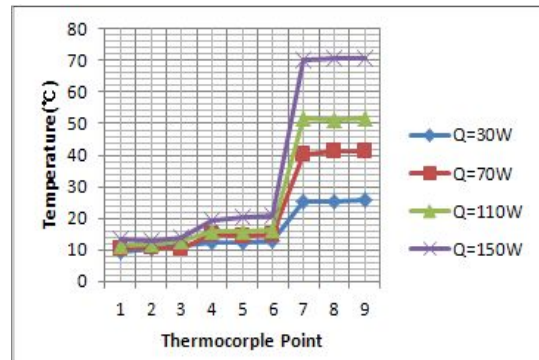
Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 증발부의 열플럭스 변화에 대한 비등열 전달 특성

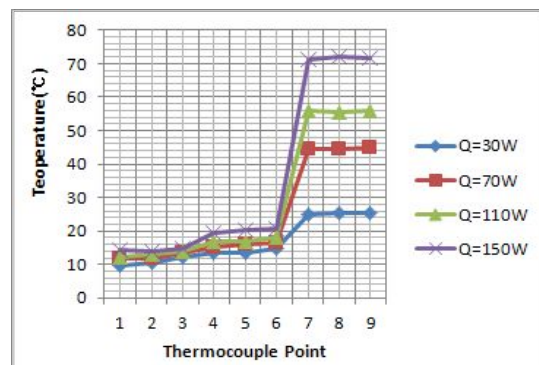
[Fig. 5]~[Fig. 8]은 증발부의 열플럭스 변화와 작동유체 충전량 변화에 대한 비등열전달 특성을 나타낸다. 그리고 작동유체의 충전율은 증발부 체적의 50%, 70%, 80%, 100%의 4가지 조건에서 실험을 수행하였다. [Fig. 5]에 나타낸바와 같이 증발부에 공급한 열플럭스는 30W, 70W, 110W, 150W의 4가지 실험조건에 실험을 수행하였다.

작동유체는 냉매 R134a이며, 작동유체 충전량은 50%이다. 그리고 그래프의 온도축에 No. 1~No.3은 응축부의 온도이며, No.4~No.6은 단열부의 온도를 나타내고, No.7~No.9는 증발부의 온도를 나타낸다. [Fig. 5]에 나타낸바와 같이 루우프형 2상 유동 열사이폰의 증발부와 단열부 및 응축부의 온도분포가 모든 실험조건에서 균일하

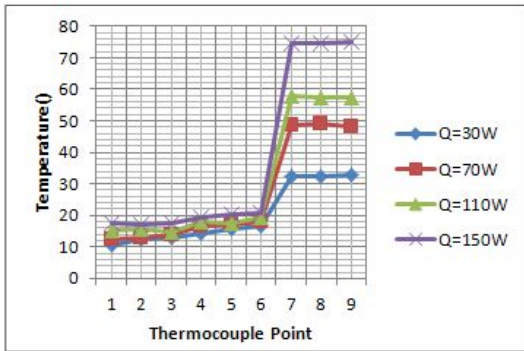
게 나타나므로 열사이폰의 작동은 정상상태에서 정상적으로 작동함을 알 수 있다. 그리고 열플럭스가 증가함에 따라 응축부 및 증발부의 온도분포가 증가하였다. 그러므로 증발부의 열플럭스가 증가함에 따라 열사이폰의 열전달율이 증가함을 알 수 있다. [Fig. 6]~[Fig. 8]은 열플럭스는 [Fig. 5]의 실험과 같이 열플럭스는 30W, 70W, 110W, 150W의 4가지 실험조건에 실험을 수행하였으며 작동유체는 냉매 R134a이며, 작동유체 충전량은 각각 70%, 90%, 100%에서 실험을 수행하였다 [Fig. 5]의 실험결과와 같이 열플럭스가 증가함에 따라 응축부 및 증발부의 온도분포가 증가하였다. 그러므로 증발부의 열플럭스가 증가함에 따라 열사이폰의 열전달율이 증가함을 알 수 있다.



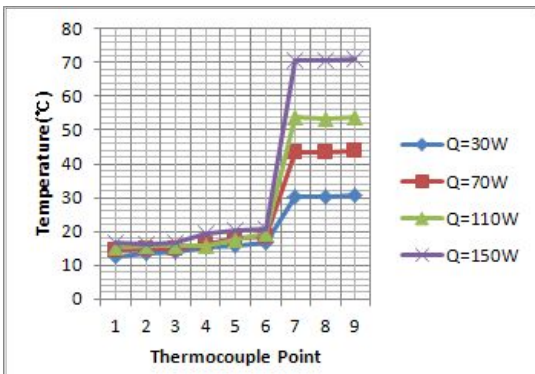
[Fig. 5] Temperature Profiles along thermocouple point (R134a, $\phi=50\%$)



[Fig. 6] Temperature Profiles along thermocouple point (R134a, $\phi=70\%$)



[Fig. 7] Temperature Profiles along thermocouple point (R134a, $\phi=80\%$)

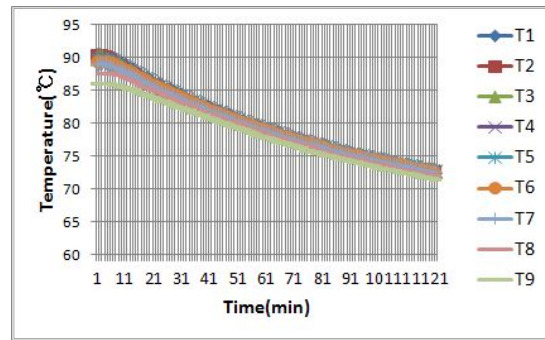


[Fig. 8] Temperature Profiles along thermocouple point (R134a, $\phi=100\%$)

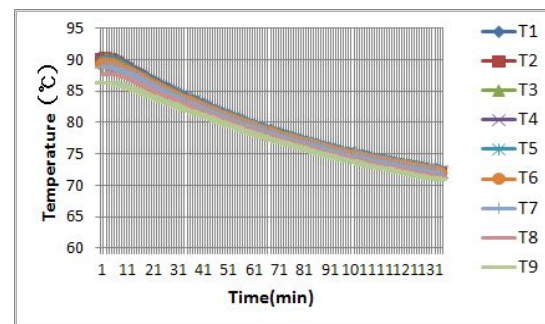
2. 냉매충진량 변화에 대한 비등열전달특성

[Fig. 9]~[Fig. 12]는 증발부의 작동유체 충전량 변화에 대한 비등열전달 특성을 나타낸다. 작동유체의 충전율은 증발부 체적의 50%, 70%, 80%, 100%의 4가지 조건에서 실험을 수행하였다. 그리고 [Fig. 9]~[Fig. 12]에 나타낸바와 같이 증발부에 공급한 열플럭스는 30W, 70W, 110W, 150W의 4가지 실험조건에서 실험을 수행하였다. 작동유체는 냉매 R134a이다. 냉매 충전량이 많으면 시스템 내에서 액상 냉매가 차지하는 부피가 증가하고, 이에 따라 기상 냉매가 차지할 수 있는 가용 부피는 감소한다. 열사이폰의 냉각은 증발부에서 냉매의 증발잠열과 응축기에서의 응축잠열에 의

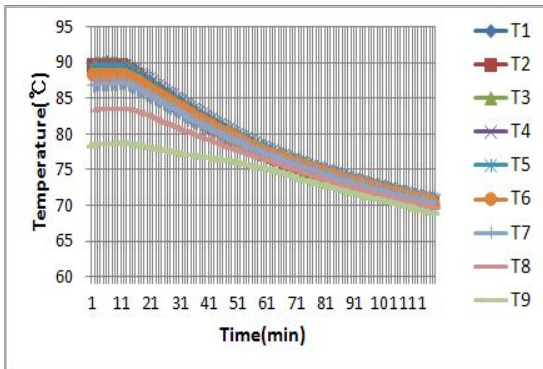
하여 이루어진다. 그러므로 일정한 열량이 증발기에 공급되면 그 열을 수송할 만큼의 냉매가 증발하여 기체 상태로 변해야 한다. 그러므로 시스템 내에 냉매 충전량이 많으면 기상 냉매의 가용체적이 감소하므로 작동압력이 상승하였다. 냉매 충전량이 증가하면 작동압력이 증가한다. 또한 냉매 충전량이 너무 적으면 증발기에서 dry-out 현상이 발생하여 열사이폰의 열전달 성능이 크게 감소하게 된다. 그러므로 작동유체의 최적 충전량이 요구된다. 본 실험결과에서 작동유체의 충전율은 증발부 체적의 50%, 70%, 80%, 100%의 4가지 조건에서 실험을 수행한 결과 작동유체의 충전량이 80%에서 온도분포가 최고 높게 나타났다. 그러므로 작동유체의 충전량은 80%에서 최고 비등열전달 성능을 나타내었다.



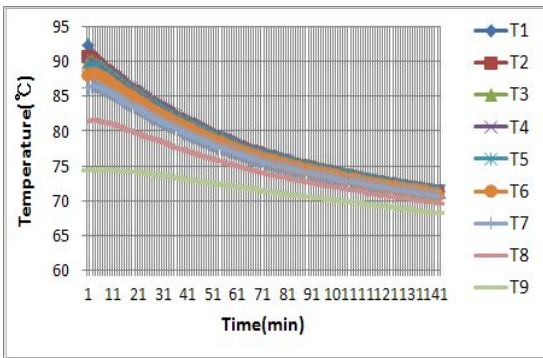
[Fig. 9] Evaporator temperature change vs. time (R134a, $\phi=50\%$)



[Fig. 10] Evaporator temperature change vs. time (R134a, $\phi=70\%$)



[Fig. 11] Evaporator temperature change vs. time (R134a, $\phi=80\%$)

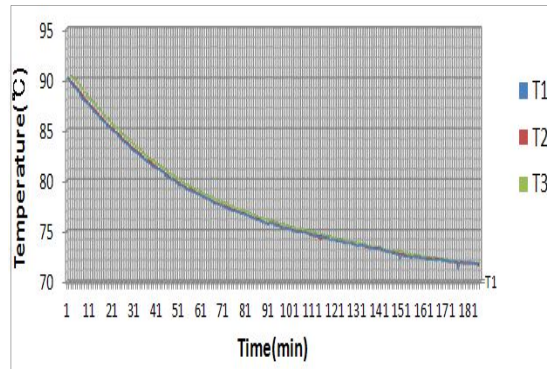


[Fig. 12] Evaporator temperature change vs. time (R134a, $\phi=100\%$)

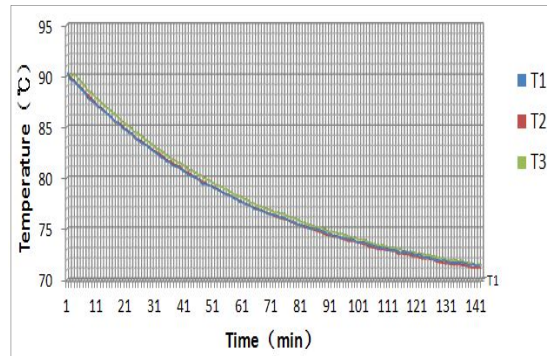
3. 증발부 오일 온도 변화에 대한 비등열전달 특성

[Fig. 13]~[Fig. 16]은 증발부의 오일온도 변화에 대한 비등열전달 특성을 나타낸다. 작동유체의 충전율은 증발부 체적의 50%, 70%, 80%, 100%의 4가지 조건에서 실험을 수행하였다. [Fig. 13]~[Fig. 16]에 나타낸바와 같이 증발부의 온도가 75°C까지 감소하는데 소요되는 시간을 측정하였다. 작동유체는 냉매 R134a이다. [Fig. 13]~[Fig. 16]의 실험결과에 나타낸바와 같이 작동유체의 충전량이 80%일 때 증발부의 온도가 75°C까지 감소하는데 소요되는 시간은 81분으로 가장 적게 소요되었다. 그러므로 작동유체의 충전량이 80%

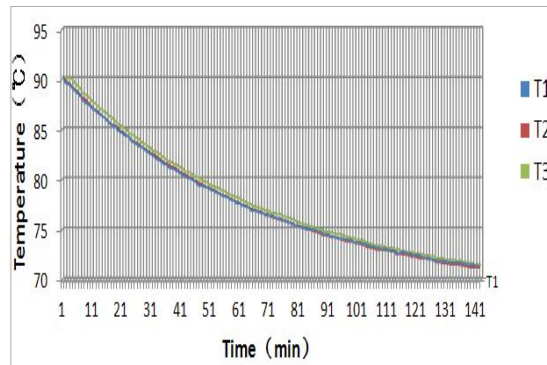
일때 비등열전달 성능이 가장 높게 나타났다.



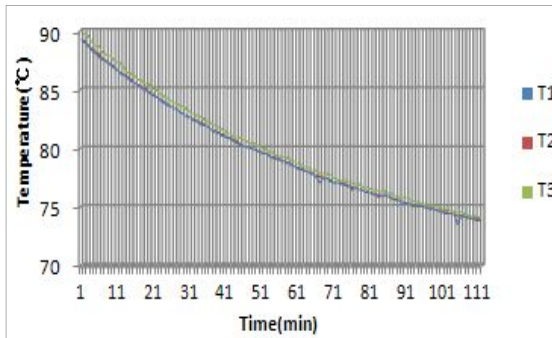
[Fig. 13] Oil Temperature change vs. time (R134a, $\phi=50\%$)



[Fig. 14] Oil Temperature change vs. time (R134a, $\phi=70\%$)



[Fig. 15] Oil Temperature change vs. time (R134a, $\phi=80\%$)



[Fig. 16] Oil Temperature change vs. time (R134a, $\phi=100\%$)

IV. 결론

작동유체는 R134a를 사용하고 작동유체의 충전율은 증발부 체적의 50%, 70%, 80%, 100%의 4가지 조건과 증발부에 공급한 열플럭스는 30W, 70W, 110W, 150W의 4가지 실험조건에 대한 실험적 연구를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 루우프형 2상 유동 열사이폰의 증발부와 단열부 및 응축부의 온도분포가 모든 실험조건에서 균일하게 나타나므로 열사이폰의 작동은 정상 상태에서 정상적으로 작동하였다.

(2) 열플럭스가 증가함에 따라 응축부 및 증발부의 온도분포가 증가하였다. 그러므로 증발부의 열플럭스가 증가함에 따라 열사이폰의 열전율이 증가하였다.

(3) 작동유체의 충전율은 증발부 체적의 50%, 70%, 80%, 100%의 4가지 조건에서 실험을 수행한 결과 작동유체의 충전량이 80%에서 온도분포가 최고 높게 나타났다. 그러므로 작동유체의 충전량이 80%일 때 비등열전달 성능이 가장 높게 나타났다.

참고 문헌

Gaugler, R. S.(1994), Heat Transfer Device, Us Patent

No.2350348, Applied December 21, 1942. Published June 6.

Kim, S. H. · Shin H. M. and Kim C. J.(2005), A Numerical Analysis of Convective Heat Transfer in Air Flow Channels of a Plate Fin-tube Matrix for Heat Pipe Heat Sinks, Journal of the Korean Society of Marine Engineering 29(8), 862~869.

Lee, J. S. · Rhi, S. H. · Kwon, J. H. and Lee, Y. (1999), A Use of Two-Phase Loop Thermosyphons for Heat Extraction of Enclosed Spaces: Experiments and Analysis, Proceedings of 11th International Heat Pipe Conference, Vol 1. Tokyo, September 1999(B), 82~87.

Lee, K. W. · Hong, S. H. · Chang, K. C · Lee, K. J. and Ra, H. S.(1995), Heat Transporting Technology of Separate Heat Pipe Heat Exchanger, Energy R. D. 17(2).

Lee, K. W. · Rhi, S. H. · Chang, K. C. and Lee, Y.(2000), An Experimental and Simulation Study on Medium and Large Scale Two-Phase Loop Thermosyphons, 6th Int. Heat Pipe Conference, Chiang

Lim, T. W. and You, S. S.(2008), A Study on the microcooling Fin Fabrication Process for Enhancing Boiling Heat Transfer, Jour. Fish. Mar. Sci. Edu. 19(3), 366~372.

Lim, T. W. · Park, J. U. and Kim. J. H.(2002), A Study on Heat Transfer and Pressure Drop in Flow Boiling of Binary Mixtures in a Uniformly Heated Horizontal Tube, Jour. Fish. Mar. Sci. Edu. 14(2), 177~190.

Park, J. U. · Cho, D. H.(2004), A Study on Heat Transfer Characteristics of Helical Coiled Tube, Jour. Fish. Mar. Sci. Edu. 16(2), 257~270.

Park, Y. H. and Boo, J. H.(2008), A Numerical Study on the Heat Transfer Characteristics of a Metal Hydride Reactor with Embedded Heat Pipes, KSME, 2346~2351, Mai, November 5

Park, Y. H. · Jung, E. G. and Boo, J. H.(2007), A Numerical Study on the Heat Transfer Characteristics of a Solar Thermal Receiver with High-temperature Heat Pipes, Proceedings of the KSME, 71~76, to 9.

Rhi, S. H. · Kim, W. T. · Song, K. S. and Lee, Y. (1998), A Desing of Telecommuni cations System(I):

Experiments and Visualization, KSME int. J, 12(5),
926~941.

Youn, H. P. and Boo, J. H.(2008), A Numerical
Study on the Heat Transfer Characteristics of a
Hydrogen Storage Material with Inserted Heat
Pipes, KSME, 318~321.

-
- 논문접수일 : 2014년 06월 05일
 - 심사완료일 : 1차 - 2014년 06월 10일
 - 게재확정일 : 2014년 06월 13일