

평관형 및 나선 그루브형 열사이폰 내부 작동유체의 포화온도와 단열부의 표면온도에 관한 연구

한 규 일*, 조 동 현†, 박 종 운**, 이 상 진***

A Comparison between the Internal Saturation Temperature of Working Fluid and the Surface Temperature of Adiabatic Zone of Two-Phase Closed Thermosyphons with Various Helical Grooves

K. I. Han, D. H. Cho, J. U. Park, S. J. Lee

Key words: Thermosyphon(열사이폰), Helical grooves(나선 그루브), Saturation temperature(포화온도), Surface temperature of adiabatic zone(단열부 표면온도), Heat transfer(열전달), Working fluid (작동유체)

ABSTRACT

This study is focused on the comparison between the internal saturation temperature of the working fluid and the surface temperature of adiabatic zone of two-phase closed thermosyphons with various helical grooves. Distilled water, methanol and ethanol have been used as the working fluid. In the present work, a copper tube of the length of 1200mm and 14.28mm of inside diameter is used as the container of the thermosyphon. Each of the evaporator and the condenser section has a length of 550mm, while the remaining part of the thermosyphon tube is adiabatic section. A experimental study was carried out for analyzing the performances of having 50, 60, 70, 80, 90 helical grooves. A plain thermosyphon having the same inner and outer diameter as the grooved thermosyphons is also tested for the comparison. The results show that the numbers of grooves and the type of working fluids are very important factors for the operation of thermosyphons. A good agreement between the internal saturation temperature of working fluid and the surface temperature of adiabatic zone of two-phase closed thermosyphons with various helical grooves is obtained.

1. 서 론

열사이폰은 매우 작은 온도차에 의해서도 작동유체의 비등과 증발에 의해 많은 양의 열유속을 전달할 수 있는 장치이다.⁽¹⁾ 열사이폰은 증발부의

† 정회원, 대전대학교 기계설계공학과

E-mail : chodh@daejin.ac.kr

TEL : (031)539-1973 FAX : (031)539-1970

* 정회원, 부경대학교 기계공학부

** 정회원, 부경대학교 수산교육과

*** 대전대학교 대학원

폴비등, 액막증발, 응축 열전달 등 열사이폰의 유동형태에 따른 작동원리, 내부유동 등의 작동특성 및 기초원리와 유동형태에 기초한 열전달계수의 예측 및 열전달계수를 촉진하기 위한 연구, 그리고 열사이폰의 응용분야에 적용하기 위한 응용연구 기술개발들에 관하여 집중적으로 연구가 진행되어 왔다.^(2,3) 그 동안의 연구결과 열사이폰이 주어진 작동범위에서 작동성능을 확보하기 위하여 단일성분의 작동유체를 사용하는 것이 요구되었으나, 최근에는 열전달 촉진을 위한 가열벽면의 구조나 온도제어를 용이하게 하기 위하여 두 종류의 유체를 혼합하여 사용하는 열사이폰에

대한 연구들이 진행되고 있다.⁽⁴⁵⁾ 초기의 공학분야로써는 통신위성 및 과학위성의 동력원으로 사용되는 핵발전로나 열전자 변환기에서 열유속의 변화로 효과적인 열 방출에 이용되어 왔으며, 최근에는 고출력 전자 장비의 냉각, 전동기의 냉각, 산업용 열교환기, 급속 가열기, 냉동 및 공기조화 장치, 가정용 냉난방 장치, 지상 및 우주에서의 열제어 계통, 음향기기의 증폭기 등은 물론 생명공학에까지 무수한 이용 사례를 볼 수 있다.^(6,7)

이와 같은 다양한 응용 예와 에너지 이동의 고효율성을 가진 열사이폰의 연구에서 증발부의 실험 비등열전달계수와 응축부의 실험 응축열전달계수를 산출하기 위해서는 열사이폰 내부 작동유체의 포화온도를 측정해야 한다. 열사이폰은 진공상태의 밀폐 용기이므로 열사이폰 내부 작동유체의 포화온도 측정은 고난도의 기술이 요구된다. 그런데 본 연구의 실험결과에 의하면 열사이폰 내부 작동유체의 포화온도는 단열부의 벽면온도와 1%의 오차범위에 잘 일치하였다. 그러므로 본 연구에서는 열사이폰 내부 작동유체의 포화온도와 단열부의 벽면온도와의 관계를 비교·분석하고, 이 결과로부터 열사이폰의 연구에서 증발부의 실험 비등열전달계수와 응축부의 실험 응축열전달계수 산출 시 변수인 작동유체의 포화온도를 단열부의 벽면온도로 대체할 수 있다는 것을 제시하고자 한다.

2. 열사이폰의 특성 및 작동원리

Fig. 1은 열사이폰의 시험구간을 나타낸 것이다. 시험구간의 총길이는 1200mm이다. 시험구간은 증발부, 단열부, 응축부로 구성되며, 증발부와 응축부의 길이는 각각 550mm이며, 단열부는 100mm이다. 열사이폰은 내경이 14.28mm이고, 외경은 15.88mm이다. 열사이폰의 재질은 구리이며 외표면은 평관형과 나선 그루브형 모두 아무런 가공이 없는 매끈한 파이프를 사용하였으며, 내표면은 평관형은 가공이 없는 매끈한 상태이고, 나선 그루브형은 그루브가 있는 형상을 사용하였다. 가열수용 항온조에서 일정한 온도로 가열된 가열수는 펌프를 통하여 길이 550mm, 내경 38mm, 외경 42mm인 가열수 챔버의 환상공간 내부로 흘러 열사이폰의 증발부를 가열한다. 냉각수 또한 냉각수용 항온조에서 일정한 온

도로 유지되어 펌프를 통하여 길이 550mm, 내경 38mm, 외경 42mm인 냉각수 챔버의 환상공간 내부로 흘러 열사이폰의 응축부를 냉각시킨다. 진공시스템은 진공펌프, 진공밸브, 작동유체 주입장치로 구성된다. 열사이폰의 제작은 고진공을 요구하므로 본 연구에서 사용된 진공펌프는 1차적으로 로터리 펌프에 의하여 1×10^{-2} torr까지 진공시킨 후 2차적으로 확산펌프를 사용하여 1×10^{-5} torr까지 고진공을 생성할 수 있는 로터리펌프와 확산펌프로 구성된 시스템을 사용하였다.

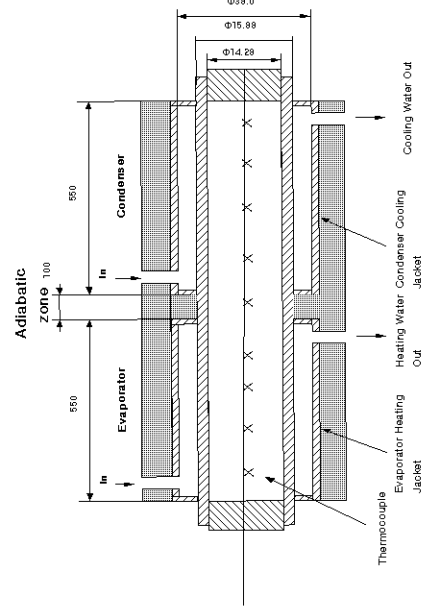


Fig. 1 Cross-Sectional view of the experimental two-phase closed thermosyphon.

Fig. 2는 열사이폰 내부 작동유체의 포화온도와 벽면온도 측정 위치를 나타낸다. 벽면온도는 Fig. 2와 같은 간격으로 열사이폰 벽면에 열전대를 부착하여 측정하였으며, 열사이폰 내부 작동유체의 포화온도는 열사이폰 내부의 중심 축 방향으로 Fig. 2와 같은 간격으로 설치하여 측정하였다. 그리고 열사이폰의 온도측정은 열사이폰의 표면온도 측정하는 열전대와 증발부, 응축부 및 단열부의 내부 증기온도 측정센서, 가열수 챔버와 냉각수 챔버 입구 및 출구의 온도 측정센서로 구성된다. 열사이폰의 표면온도를 측정하기 위하여 파이프 표면에 폭 2mm, 깊이

0.3mm, 길이 20mm 크기의 홈을 밀링 가공하여 파이프를 에탄올로 깨끗이 세척하여 열전대선 접점의 홈에 완전히 접촉시킨 후 은납으로 채우고 24시간이 경과한 다음 외부의 열교란을 방지하기 위하여 에폭시 수지로 덮었다. 그리고 증발부와 응축부의 길이 방향으로 120mm 간격으로 각각 4점, 단열부 중앙에 1점을 열전대를 사용하여 부착하였다. 증발부, 응축부 및 단열부의 내부 시험관 온도를 측정하기 위해서는 특수 제작한 온도센서를 상부와 하부의 시험관을 통하여 9점을 설치하여 내부의 온도를 측정하였다. 증발부와 응축부의 입구 및 출구의 온도를 측정하기 위하여 각각의 입, 출구에 온도센서를 4점을 심었다. 본 연구에 사용된 열전대와 온도센서들은 냉점을 통하여 보정하였다. 이렇게 시험구간에 22점의 열전대와 온도센서들에 의하여 온도가 측정되면 데이터 로그를 통하여 컴퓨터로 전송되어 0.1 °C 까지 정확한 값으로 기록되어 파일로 저장된다.

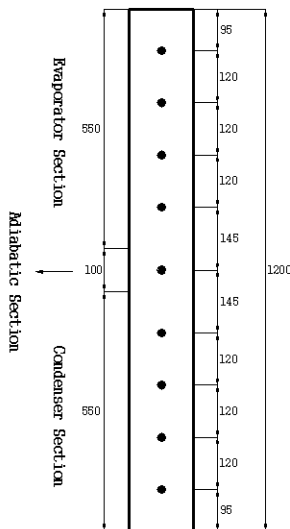


Fig. 2 Locations of thermocouples

실험에 사용한 재료는 평관형과 다섯 가지의 나선 그루브형의 동튜브를 사용하였고, 나선 그루브형 열사이폰에 사용된 형상에 대한 규격은 Table 1과 같다. Fig.3은 나선 그루브형 열사이폰에 사용한 튜브의 단면을 나타내며, Fig. 4는 나선그루브 단면을 25배 확대한 사진이다. 이와 같이 나선 그루브형 열사이폰 내부 작동유체의 포화온도와 표면온도의 관계를 연구하기 위해 증류

수, 메탄올, 에탄올에 대하여 각각, 그루브수를 50, 60, 70, 80, 90개의 다섯 가지 조건에서 실험을 수행하였다.

Table 1 Geometric specification of helical grooved thermosyphons

D _o (mm)	D _i (mm)	L (m)	Groove (No.)	h (mm)	w (mm)	b (mm)	A _i (m ² /m)	A _i / A _p
15.9	14.3	1.2	50	0.3	0.3	0.59	0.069	1.53
			60	0.3	0.3	0.44	0.073	1.63
			70	0.3	0.3	0.34	0.078	1.73
			80	0.3	0.3	0.26	0.082	1.83
			90	0.3	0.3	0.19	0.087	1.93

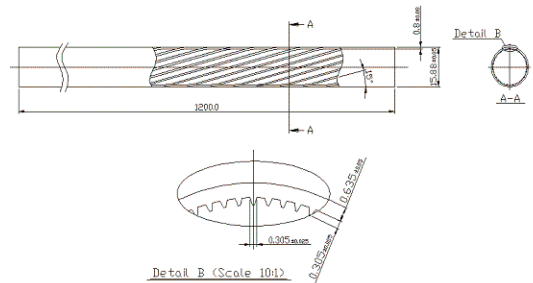


Fig. 3 Cross-sectional view of helical grooved thermosyphon

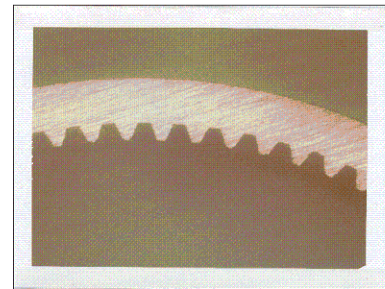


Fig. 4 Cross section of enlarged helical grooves

3. 실험결과 및 고찰

3.1 평관형 열사이폰

Fig. 5는 평관형 경사 열사이폰의 증발부, 단열부 및 응축부의 벽면온도 분포와 열사이폰 내부의 포화액체와 포화증기의 온도분포를 나타낸다. 실험에 사용된 작동유체는 증류수, 메탄올 및 에탄올이며, 증발부에 순환하는 가열수의 온도는

80 °C로 일정하게 유지하였다. 그리고 작동유체의 충전율은 총체적의 30%이다. 열사이폰 내부의 증발부의 포화액체 온도분포와 응축부의 포화증기 온도분포는 균일하였다. 열사이폰 내부의 증발부의 포화액체 온도분포와 응축부의 포화증기 온도분포는 균일하므로 증발부의 포화액체 온도분포와 응축부의 포화증기 온도분포를 평균한 값을 열사이폰의 내부의 작동유체의 포화온도로 정의한다. 이와 같은 실험결과로부터 열사이폰은 전 구간에서 포화상태에서 작동하는 것으로 판단된다. 그리고 모든 실험조건이 동일한 경우에 증발잠열이 큰 작동유체일수록 작동유체의 포화온도는 낮게 나타났다. 실험결과에서 나타난 작동유체의 포화온도로부터 잠열이 큰 유체일수록 열수송 능력이 크음을 알 수 있다.

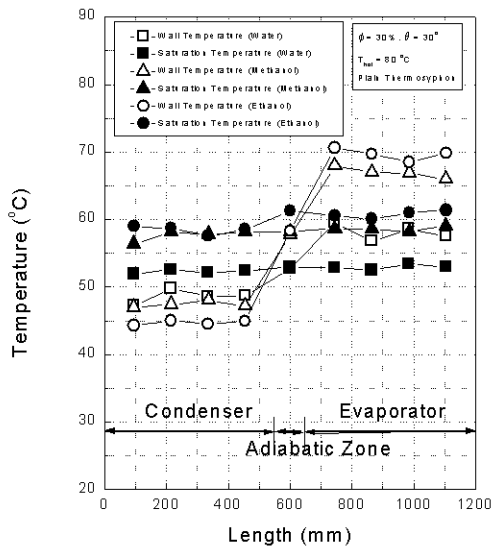


Fig. 5 Temperature distribution along the length of plain thermosyphon

Fig. 6 ~ Fig. 9는 증발부에 유동하는 가열수의 온도변화에 대한 작동유체의 포화온도와 단열부의 벽면 온도분포와의 관계를 나타낸다. 실험결과로부터 수직 열사이폰에서 단열부의 벽면 온도분포는 열사이폰 내부 작동유체의 포화온도와 동일하게 나타났다. 그러므로 단열부의 벽면온도를 열사이폰 내부의 포화온도로 간주할 수 있다. 단열부는 단열되어 있으며, 실험에 사용한 열사이폰의 재질은 열저항을 무시할 수 있을 정도로 적은 구리이므로 작동유체의 포화온도와 단열부의

벽면온도는 동일한 것으로 고려된다. 그리고 모든 실험조건이 동일한 경우에 증발잠열이 큰 작동유체일수록 단열부의 벽면온도 분포는 낮게 나타났다. 실험결과에서 나타난 단열부의 벽면온도분포로부터 잠열이 큰 유체일수록 열전달 성능이 향상됨을 알 수 있다.

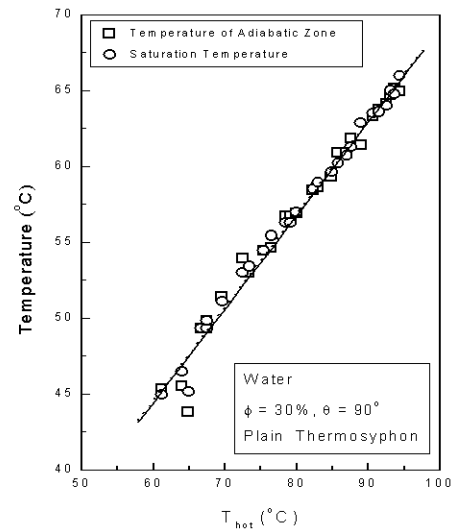


Fig. 6 Temperature distribution along the length of plain thermosyphon. The solid line was determined by a least squares method

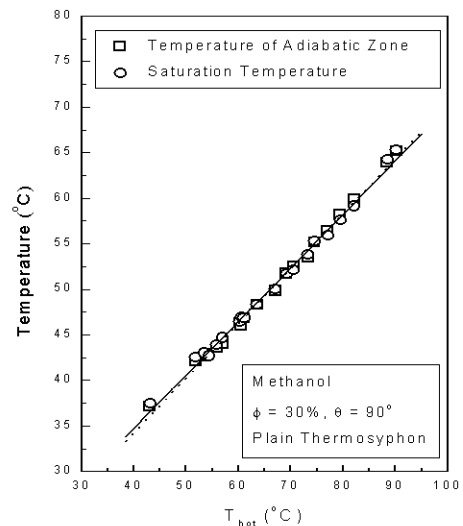


Fig. 7 Temperature distribution along the length of plain thermosyphon

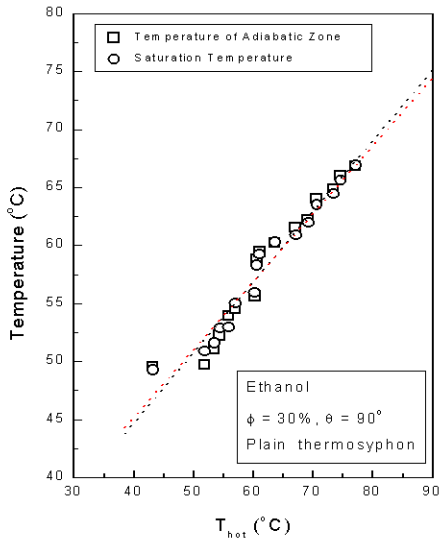


Fig. 8 Temperature distribution along the length of plain thermosyphon
The solid line was determined by a least squares method.

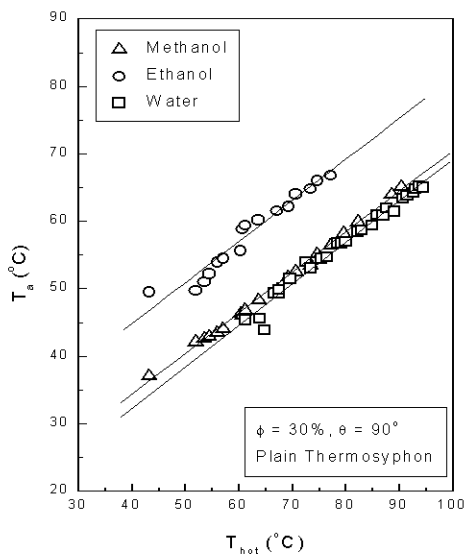


Fig. 9 Temperature distribution along the length of plain thermosyphon
The solid line was determined by a least squares method

Fig. 10은 작동유체의 포화온도와 단열부의 벽면 온도분포의 오차를 나타낸다. 증발부에 유

동하는 가열수의 온도범위가 40 ~ 90 °C에서 작동유체의 포화온도와 단열부의 벽면 온도분포의 오차는 ±1%의 범위에서 일치하였다. 그리고 증발부의 포화액체의 온도분포와 응축부의 포화증기의 온도분포가 균일하므로 작동유체의 포화온도와 단열부의 벽면온도는 동일한 것으로 판단된다.

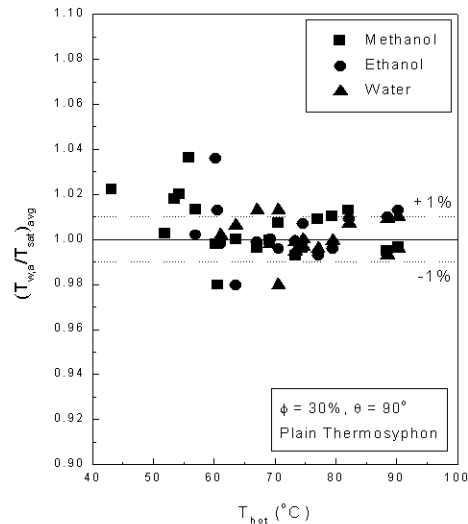


Fig. 10 Temperature distribution along the length of plain thermosyphon

3.2 나선 그루브형 열사이폰

Fig. 11은 나선 그루브형 열사이폰의 증발부, 단열부 및 응축부의 벽면온도 분포와 열사이폰 내부의 포화액체와 포화증기의 온도분포를 나타낸다. 실험에 사용된 작동유체는 증류수, 메탄올 및 에탄올이며, 증발부에 순환하는 가열수의 온도는 61°C와 90°C의 두가지인 경우다. 그리고 작동유체의 충전율은 총체적의 30%이다. 증발부와 응축부의 벽면 온도분포는 평관형 열사이폰의 결과와 경향이 동일하며, 열사이폰 내부의 증발부의 포화액체 온도분포와 응축부의 포화증기 온도분포는 균일하였다. 이와 같은 실험결과로부터 열사이폰은 전 구간에서 포화상태에서 작동하는 것으로 판단된다. 그리고 모든 실험조건이 동일한 경우에 증발잠열이 큰 작동유체일수록 작동유체의 포화온도는 낮게 나타났다. 실험결에서 나

타난 작동유체의 포화온도로부터 잠열이 큰 유체일수록 열수송 능력이 클을 알 수 있다.

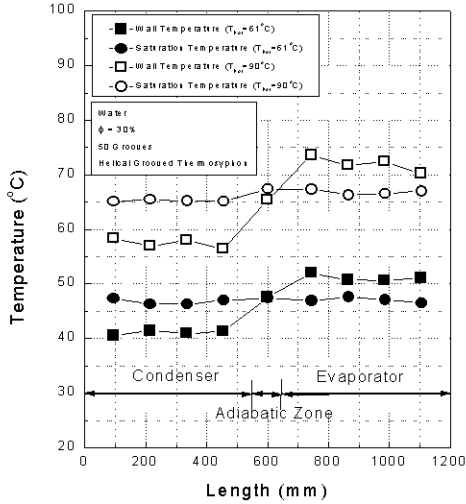


Fig. 11 Temperature distribution along the length of grooved thermosyphon

Fig. 12 ~ Fig. 14는 나선 그루브형 열사이폰의 증발부에 유동하는 가열수의 온도변화에 대한 작동유체의 포화온도와 단열부의 벽면 온도분포와의 관계를 나타낸다. 실험결과로부터 수직 열사이폰에서 단열부의 벽면 온도분포는 열사이폰 내부 작동유체의 포화온도와 동일하게 나타났다. 그러므로 나선 그루브형 열사이폰에서도 평관형 열사이폰과 동일하게 단열부의 벽면온도를 열사이폰 내부의 포화온도로 간주할 수 있다. 단열부는 단열되어 있으며, 실험에 사용한 열사이폰의 재질은 열저항을 무시할 수 있을 정도로 적은 구리이므로 작동유체의 포화온도와 단열부의 벽면온도는 동일한 것으로 고려된다. 그리고 모든 실험조건이 동일한 경우에 증발잠열이 큰 작동유체일수록 단열부의 벽면온도 분포는 낮게 나타났다. 실험결과에서 나타난 단열부의 벽면온도분포로부터 잠열이 큰 유체일수록 열전달 성능이 향상됨을 알 수 있다. 증발부에 유동하는 가열수의 온도범위가 40 ~ 90 °C에서 단열부의 벽면온도와 포화증기 온도분포의 오차는 ±1%의 범위에

서 일치하였다. 그리고 증발부의 포화액체의 온도분포와 응축부의 포화증기의 온도분포가 균일하므로 작동유체의 포화온도와 단열부의 벽면온도는 동일한 것으로 판단된다.

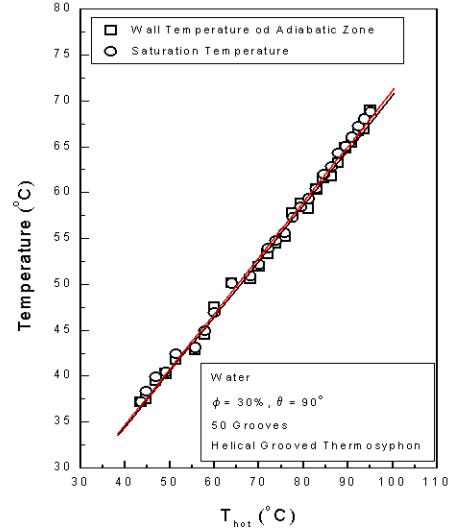


Fig. 12 Temperature distribution along the length of grooved thermosyphon. The solid line was determined by a least squares method

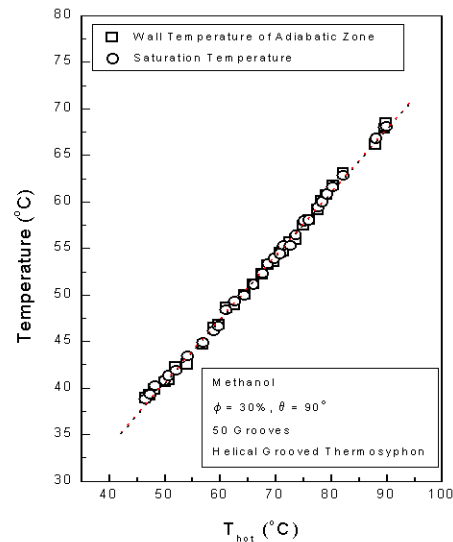


Fig. 13 Temperature distribution along the length of grooved thermosyphon

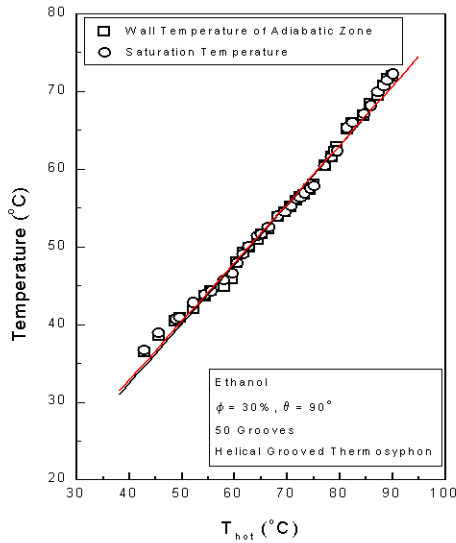


Fig. 14 Temperature distribution along the length of grooved thermosyphon
The solid line was determined by a least squares method

4. 결론

작동유체는 증류수, 메탄올 및 에탄올을 사용하고, 평관형 및 나선 그루브형 열사이폰에서 작동유체의 종류 변화 그리고 그루브 수의 변화에 대한 실험적인 연구를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 열사이폰 내부의 증발부의 포화액체 온도 분포와 응축부의 포화증기 온도분포는 균일하였다.

(2) 증발잠열이 큰 작동유체일수록 단열부의 벽면온도 분포는 낮게 나타났다. 단열부의 벽면 온도분포로부터 잠열이 큰 유체일수록 열전달 성능이 향상됨을 알 수 있다.

(3) 평관형 및 나선그루브형 열사이폰에서 단열부의 벽면 온도분포는 열사이폰 내부 작동유체의 포화온도와 동일하게 나타났다. 그러므로 단열부의 벽면온도를 열사이폰 내부 작동유체의 포화온도로 간주할 수 있다.

(4) 증발부에 유동하는 가열수의 온도범위가 40 ~ 90 °C에서 작동유체의 포화온도와 단열부의 벽면 온도분포의 오차는 ±1%의 범위에서 일치하였다.

참고문헌

- (1) Hong, S. E., Kim, C. J., Park, Y. J. and Kang, H. K., 2002, An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics of a FC-72 Thermosyphon, 12th Int. Heat Pipe Conference, Vol.2, D-7.
- (2) 강환국, 김윤철, 김철주, 박이동, 황영규, 1995, "낮은 경사각을 갖는 밀폐형 2상 써모사이폰의 열전달 특성에 관한 연구", 대한기계학회 춘계 학술논문집(II), pp. 169-174.
- (3) 이영수, 이기우, 1995, "히트파이프 열교환기", 대한기계학회지, Vol. 35, No. 9, pp. 805-815.
- (4) Park, R. J., 1992, "Two-Phase Closed Thermosyphon with Two Fluid Mixtures", Department of Mechanical Engineering University of Ottawa, Ottawa, Ontario, Canada, M. S. Thesis, 1992.
- (5) Chen, M. M., 1987, "Heat Transfer Performance of Two-Phase Closed Thermosyphons with Different Lengths", 6th IHPC, Grenoble, pp. 647-651, 1987.
- (6) Shiraish, M., Kikuchi, K. 1981 "Investigation of Heat Transfer Characteristics of a Two-Phase Closed Thermosyphon", 4th IHPC, London, 95.
- (7) Hijikata, K., Hasegawa, H. and Nagasaki, T., 1989 "A Study on a Heat Pipe using a Binary Mixture", Trans. JSME, Vol. 55호, No. 513, pp. 1469-1476.