

마이크로 그루브를 가진 열사이폰 열교환기의 비등열전달 특성에 관한 연구

조동현* · 이종선*

A Study on the Characteristics of Boiling Heat Transfer of Thermosyphon Heat Exchangers with Various Micro Grooves

Dong-Hyun Cho*, Jong-Sun Lee*

요 약 열사이폰 열교환기는 잠열을 이용한 대량의 열수송 능력과 증기류의 열확산에 의한 온도 분포의 균일화, 경량, 간단한 구조, 빠른 열응답 특성 등의 우수성을 가지고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 우수성을 보유하고 있는 열사이폰 열교환기에 대하여 기하학적 형태, 유체의 물성, 열유속 및 내부압력 등 열사이폰의 작동에 관련된 변수들에 관하여 열전달 성능을 실험적으로 연구하였다. 평관형 및 마이크로 그루브형 열사이폰에서 마이크로 그루브수의 변화와 작동유체는 증류수, 메탄올 및 에탄올의 종류 변화에 대한 실험적인 연구를 수행한 결과, 열전도계수와 증발 잠열값이 큰 증류수가 메탄올 및 에탄올보다 비등열전달계수가 높게 나타났다. 또한 마이크로 그루브형 열사이폰이 평관형 열사이폰보다 비등열전달계수가 높게 나타났으며 작동유체가 증류수인 경우 2~2.5배, 메탄올인 경우 1.5~2배, 에탄올인 경우 1.3~1.5배 높게 나타났다.

Abstract This study concerns the characteristics of boiling heat transfer in two-phase closed thermosyphons with various micro grooves. A study was carried out with the performance of the heat transfer of the thermosyphon having 60 internal micro grooves in which boiling and condensation occur. A plain thermosyphon having the same inner and outer diameter as the grooved thermosyphon is also tested for comparison. Distilled water, methanol, ethanol have been used as the working fluid. The heat flux and the boiling heat transfer coefficient at the evaporator zone are estimated from the experimental results. The experimental results have been assessed and compared with existing correlations. Imura's and Kusuda's correlation for boiling showed in good agreement with experimental results within $\pm 20\%$ in plain thermosyphon.

Key Words : Thermosyphon, Boiling Heat Transfer, Micro grooves, Working fluid

1. 서 론

열사이폰은 잠열을 이용한 대량의 열수송능력과 증기류에 의한 열확산에 의한 온도 분포의 균일화, 경량, 간단한 구조, 빠른 열응답 특성 등의 우수성이 있다. 또한 증발부의 풀비등, 액막증발, 응축 열전달 등 열사이폰의 유동형태에 따른 작동원리와 내부유동 등의 작동 특성 및 기초원리, 유동형태에 기초한 열전달계수의 예측 및 열전달계수를 촉진하기 위한 연구, 그리고 열사이폰의 응용분야에 적용하기 위한 응용연구의 기술개발

들에 관하여 집중적으로 연구가 진행되어 왔다[1-3]. 초기의 공학분야로써는 통신위성 및 과학위성의 동력원으로 사용되는 핵발전로나 열전자 변환기에서 열유속의 변화로 효과적인 열방출에 이용되어 왔으나[4-5], 최근에는 고출력 전자 장비의 냉각과 전동기의 냉각, 산업용 열교환기, 급속 가열기, 냉동 및 공기조화장치, 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 열사이폰 열교환기는 국내에서는 아직 실용화가 많이 이루어지지 않고 있으며, 다양한 작동유체의 종류에 대한 연구보고가 미흡한 실정이다. 그리고 특히 비등 및 응축의 잠열을 이용한 열교환기 분야에서는 고

* 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과
E-mail : chodh@daejin.ac.kr
TEL : (031)539-1973

성능화를 위해 마이크로 그루브형 튜브를 사용하고 있으나[8-9] 열사이폰에 마이크로 그루브를 적용한 사례는 극히 드물다. 또한 열사이폰의 경사각 변화에 대한 열전달 성능의 연구보고가 다소 많이 보고되고 있으나 다양한 작동유체의 종류에 대한 더 많은 연구가 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 열사이폰의 기하학적 형태, 유체의 물성, 열유속 및 내부압력 등 열사이폰의 작동에 관련된 변수들에 관하여 열사이폰 열교환기의 열전달 성능을 연구하고자 한다.

2. 열사이폰 열교환기의 작동원리

열사이폰이 안정된 상태에서 작동할 때의 열 이송 경로와 열사이폰 내부 작동유체의 상변화 및 유동상태는 Fig. 1에 나타내었다.

증발부에 열부하를 가하면 용기 하단으로부터 액상의 작동유체가 비등을 일으켜 기화되고, 증기가 응축부로 이송된다. 응축부에서 냉각된 응축액은 벽면 위에서 작용하는 중력 등의 체적력에 의해 관벽을 따라 증발부로 되돌아오게 된다. 이 과정이 연속적으로 진행됨에 따라 용기의 하단으로부터 상단으로 열전달이 이루어지게 된다. 이러한 열전달 과정에서 작동유체의 구동을 위한 외부로부터 일의 공급은 없으며, 이 부분이 열사이폰이 기존의 대류 열전달 장치와 다른 점이다. 열사

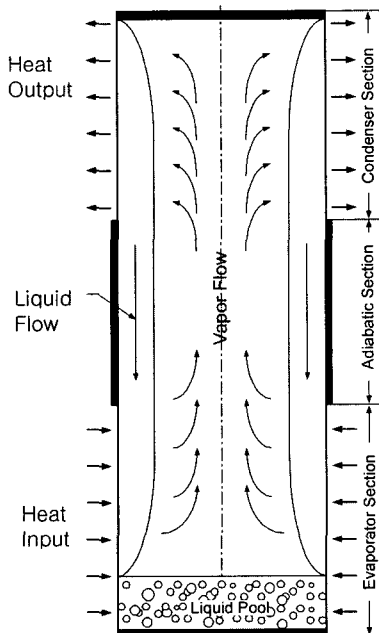


Fig. 1. A Schematic of a Closed, Gravity Assisted, Two-phase Thermosyphon

이폰의 열전달 과정이 기-액 상변화에 의존하기 때문에 양단 사이의 온도차이가 작으며, 따라서 열사이폰의 열전도는 동일한 형상의 고체 물질에 비하여 수천배의 열전도를 갖는다[10-11]. 그리고 열사이폰의 열전달 특성은 내부 작동유체의 비등 메카니즘과 액막 및 증기 유동에 의해 크게 영향을 받으며, 따라서 열사이폰의 길이, 직경, 설치 경사각, 작동유체 봉입율, 열유속, 증기압, 작동유체의 물성 등이 열전달율을 결정하는 중요한 인자가 된다[12-13].

3. 열사이폰 열교환기 개발

3.1 열사이폰의 구성 및 작동

Fig. 2는 열사이폰의 단면도이다. 열사이폰의 총길이는 1200 mm이며 증발부, 단열부, 응축부로 구성되고, 증발부와 응축부의 길이는 각각 550 mm, 단열부는 100 mm, 열사이폰의 내경과 외경은 각각 14.28 mm, 15.88 mm이다. 열사이폰의 재질은 구리이며 외표면은

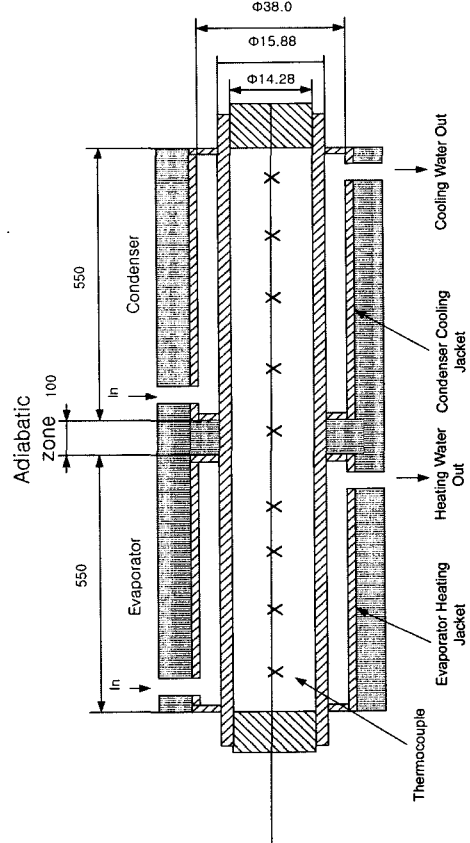


Fig. 2. Cross-Sectional View of the Experimental Closed Thermosyphon

평관형과 마이크로 그루브형 모두 아무런 가공이 없는 매끈한 파이프를 사용하였으며 내표면은 평관형은 가공이 없는 매끈한 상태이고 마이크로 그루브형은 그루브가 있는 형상을 사용하였다. 가열수용 항온조에서 일정한 온도로 가열된 가열수는 펌프를 통하여 길이 550 mm, 내경 38 mm, 외경 42 mm인 가열수 챔버의 환상공간 내부로 흘러 열사이폰의 증발부를 가열한다. 냉각수 또한 냉각수용 항온조에서 일정한 온도로 유지되어 펌프를 통하여 냉각수 챔버의 환상공간 내부로 흘러 열사이폰의 응축부를 냉각시킨다.

3.2 열사이폰의 열교환시스템

온수 항온조에서 일정한 온도로 가열된 가열수는 펌프를 통하여 열사이폰의 증발부인 가열수 챔버로 공급된다. 그리고 냉각수 항온조에서 일정한 온도로 조정된 냉각수는 펌프를 통하여 열사이폰의 응축부인 냉각수 챔버로 공급된다. 열사이폰의 증발부와 응축부를 통과한 가열수와 냉각수는 각각 가열수용 항온조와 냉각수용 항온조로 귀환하여 다시 일정한 온도로 유지되어 순환한다. 열사이폰 열교환기는 이와 같이 순환에 의해 열사이폰에서 온수와 냉각수사이에서 열교환이 되는 열교환기이다. 그리고 열사이폰의 작동과정에서 고성능 열전달을 위해 진공도는 1×10^{-3} torr 이상 유지시켰다. 또한 안정적인 진공환경을 조성하기 위하여 열사이폰의 상부와 하부에 각각 진공밸브를 부착하고, 상부 진공밸브에서는 열사이폰 내부의 불응축가스를 탈기하여 고진공을 유지하였다. 그리고 열사이폰 열교환기의 열전달 성능을 산출하기 위해 열사이폰의 표면온도를 측정하는 열전대와 증발부, 응축부 및 단열부의 내부 증기온도 측정센서, 가열수 챔버와 냉각수 챔버 입구 및 출구에 온도 측정센서를 설치하였다. 열전대는 증발부와 응축부의 길이 방향으로 120 mm 간격으로 각각 4점, 단열부 중앙에 1점에 열전대를 사용하여 부착하였다. 증발부, 응축부 및 단열부의 내부 시험관 온도를 측정하기 위해서 특수 제작한 온도센서를 상부와 하부의 시험관에 9점을 설치하여 내부의 온도를 측정하였다. 증발부와 응축부의 입구 및 출구의 온도를 측정하기 위하여 각각의 입, 출구에 온도센서 4점을 설치하였으며 본 연구에 사용된 열전대와 온도센서들은 냉점을 통하여 보정하였다.

3.3 실험 재료

실험에 사용한 재료는 평관형과 그루브수가 60골인 마이크로 그루브형의 동관을 사용하였다. Fig. 3은 마이크로 그루브형 열사이폰의 사진이며, 본 실험에 사용된 튜브의 내부를 나타낸다. Fig. 4는 실험을 위하여 동

관으로 된 마이크로 그루브형 열사이폰의 단면도를 25 배로 확대하여 상세한 내부 형상을 보여주는 사진이다. Fig. 3에 도시된 마이크로 그루브형 열사이폰의 열전달 성능을 실험적으로 연구하고, 평관형 열사이폰과 열전달 성능을 비교·분석한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 열사이폰의 벽면온도 분포

Fig. 5~7은 열사이폰 열교환기의 증발부, 단열부 및 응축부의 벽면온도 분포를 나타내었으며 실험에 사용된 작동유체는 증류수, 메탄올 및 에탄올이다. 모든 변수를 일정하게 두고, 증발부에 순환하는 가열수의 온도 변화에 대한 열사이폰의 벽면온도 분포의 변화를 나타내었다. 증발부에 순환하는 가열수의 온도는 $60^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 범위에서 실험데이터를 산출하였으며 작동유체의 봉입율은 30%인 경우이다. 증발부에서는 온도분포가 비교적 일정하게 나타났으나, 응축부에서는 온도분포가 조금 산포되어 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 응축부에서 응축액이 튜브 벽면을 따라 하부 방향으로 유동할



Fig. 3. Photograph of Micro Grooved Tube(60 Micro Grooves)

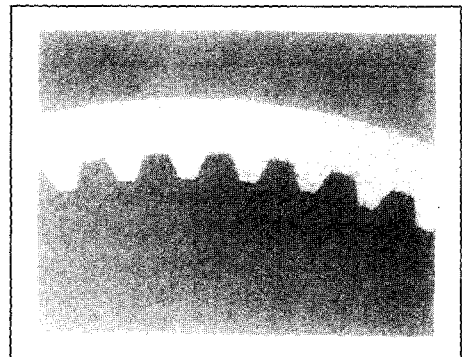


Fig. 4. Cross Section of Enlarged Micro Grooves(60 Micro Grooves)

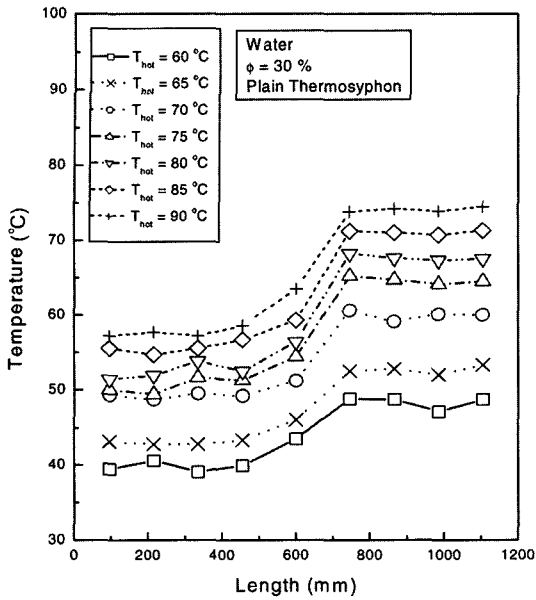


Fig. 5. Temperature distribution along the length of plain thermosyphon

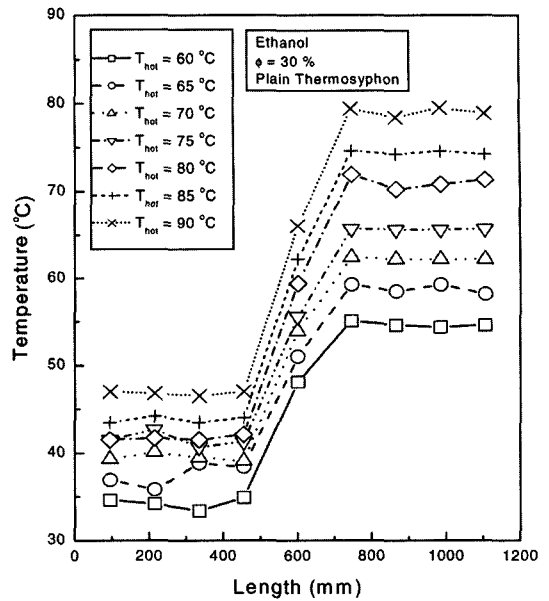


Fig. 7. Temperature distribution along the length of plain thermosyphon

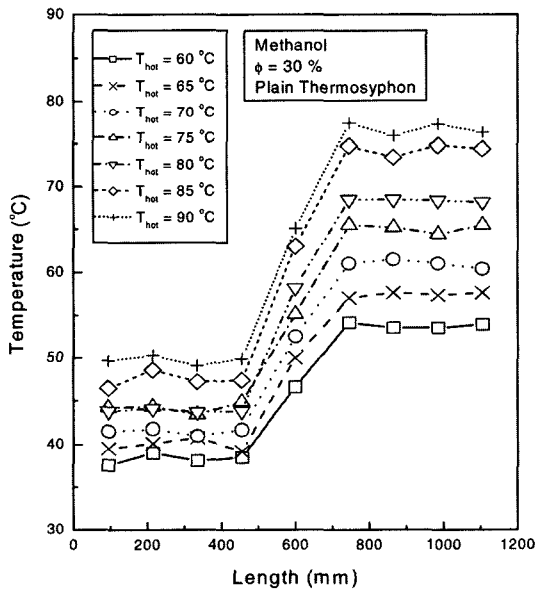


Fig. 6. Temperature distribution along the length of plain thermosyphon

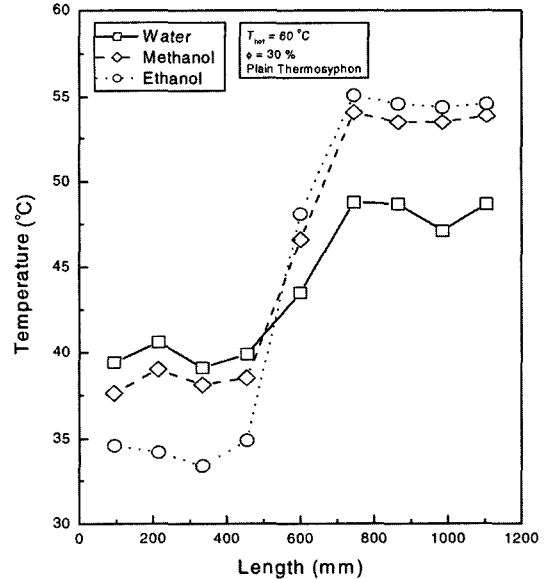


Fig. 8. Temperature distribution along the length of plain thermosyphon

때 파동과 리프트를 형성하는 불규칙한 유동에 의해 기 인된다. 그러나 전 범위의 영역에서 열사이폰의 증발부, 단열부 및 응축부의 벽면온도 분포는 비교적 균일한 분포를 나타내었다. 가열수의 온도가 증가함에 따라 열사이폰의 증발부, 단열부 및 응축부의 벽면온도 분포는

증가하였다. 본 실험에서 작동유체의 종류에 따라서 응축부에서는 증류수, 메탄올, 에탄올 순으로 벽면온도 분포가 높게 나타나고 있으며 증발부에서는 에탄올, 메탄올, 증류수 순으로 나타나고 있다. Fig. 8~10에서 모든 변수를 일정하게 두고, 작동유체의 종류에 대한 열사이

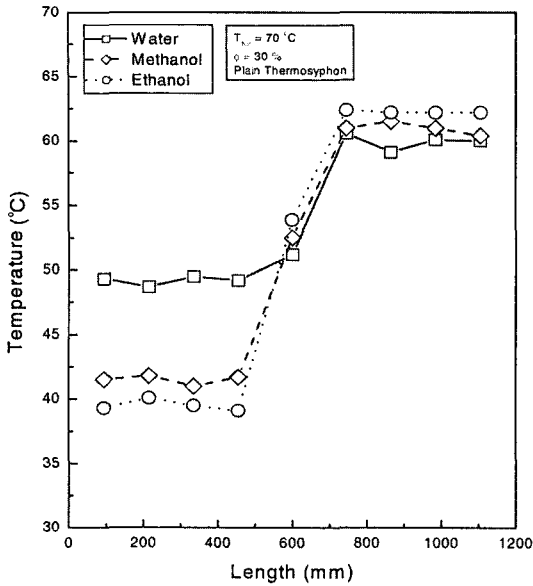


Fig. 9. Temperature distribution along the length of plain thermosyphon

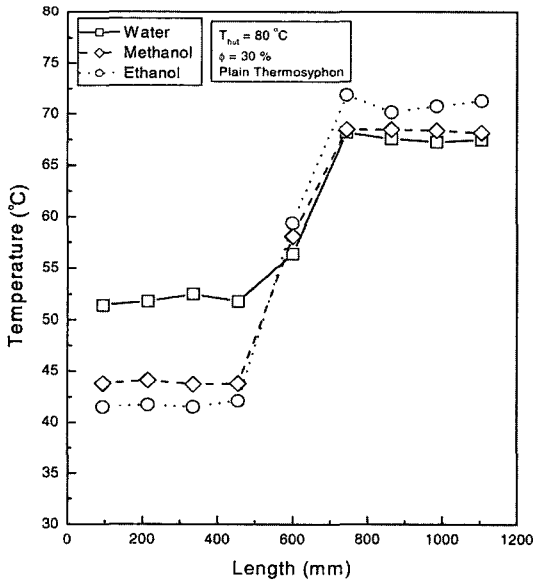


Fig. 10. Temperature distribution along the length of plain thermosyphon

폰의 벽면온도 분포를 나타내었다. 증발부에 순환하는 가열수의 온도는 60°C, 70°C, 80°C의 세 가지 온도조건에서 실험데이터를 산출하였으며 봉입율은 30%이다. 작동유체가 잠열이 큰 유체일수록 열사이폰의 응축부 벽면온도 분포는 높게 나타났으며, 증발부 벽면온도 분

포는 낮게 나타났다. 즉, 작동유체가 잠열이 큰 증류수인 경우가 상대적으로 잠열 값이 적은 메탄올 및 에탄올보다 열사이폰의 응축부 벽면온도 분포는 높게 나타났으며, 증발부 벽면온도 분포는 낮게 나타났다. 이와 같은 현상은 열사이폰 내부의 증발부에서 발생한 포화증기 중 보다 더 많은 양이 응축부로 상승하여 응축부의 챔버에 순환하는 냉각수에 열전달이 되는 것으로 고려된다. 포화증기의 잠열이 클수록 보다 더 많은 양의 열량을 냉각수에 전달시킬 수 있으므로 열사이폰의 응축부 벽면온도 분포는 높게 나타나는 것으로 생각된다. 포화증기가 열을 냉각수에 전달하고, 응축액이 되면 중력에 의해 응축액이 증발부로 귀환하게 된다. 열사이폰의 증발부에 귀환되는 응축액 양이 증가할수록 증발부의 작동유체의 온도는 감소하게 된다. 그러므로 잠열이 큰 작동유체일수록 증발부의 표면온도는 감소하게 된다. 응축부에서 열전달율이 많을수록 응축액 양은 증가하게 된다. 그리고 열사이폰의 벽면온도 분포는 잠열이 큰 증류수인 경우보다 표면장력 값이 적은 메탄올 및 에탄올이 비교적 균일한 분포를 나타내었다.

4.2 평관형 열사이폰의 비등열전달계수

증발부의 포화액이 단위 시간당 비등질량(m_b)에 의한 비등열량(Q_b)은 식(1)에 의해 구했다.

$$Q_b = m_b h_{fg} \quad (1)$$

가열수가 잃은 에너지량(Q_{hot})은 증발부를 통과한 단위 시간당의 가열수 질량에 따라서 식(2)에 의해 구했다.

$$Q_{hot} = m_{hot} C_{p, hot} (T_{in} - T_{out})_{avg} \quad (2)$$

이와 같은 정상상태 조건하에서 측정된 데이터로부터 식(3)을 이용하여 실험 비등열전달계수를 구했다.

$$h_e = \frac{Q_{avg}}{A_o \Delta T_{wf}} = \frac{(Q_{cool} + Q_{hot})/2}{A_o (T_{we} - T_{fe})_{avg}} \quad (3)$$

Fig. 11과 Fig. 12는 Imura[1] 및 Kusuda[9]의 비등 이론식과 실험결과를 비교한 그림이다. 증발부에서의 순수 비등 이론식은 비등과정의 복잡성 때문에 존재하지 않는다. 그러므로 비등 열전달계수 값은 경험식에 의해 구한다. 열사이폰 내부에서의 비등은 포화증기 압력이 변하는 것 외에는 대기압하에서 발생하는 비등현상과 같다. 일반적으로 2상밀폐 열사이폰 내에서의 비등은 진공에 의해 대기압보다 낮은 압력에서 발생하지만, 개방 열사이폰은 대기압하에서 비등이 발생한다. 개방 열사이폰에 대하여 Imura[1]는 차원해석을 토대로

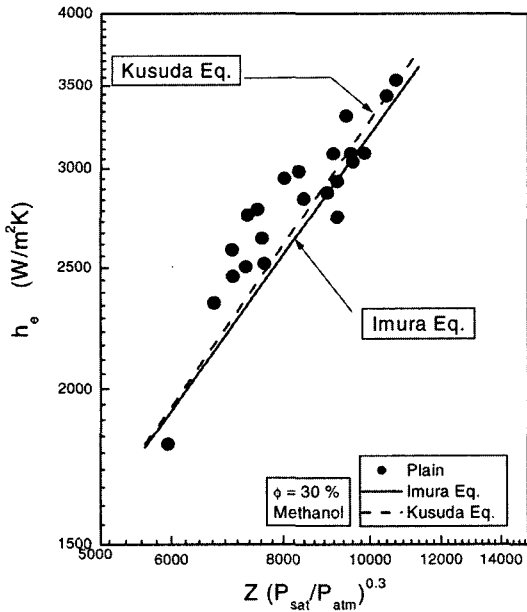


Fig. 11. Comparison of the experimental data with correlations

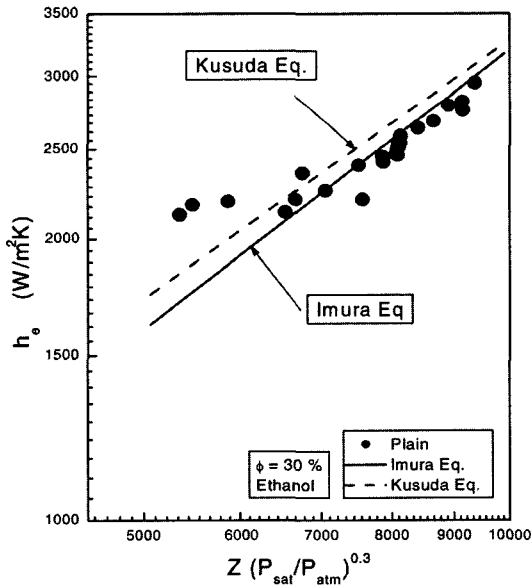


Fig. 12. Comparison of the experimental data with correlations

하여 식(4)와 같이 비등 대류 열전달계수를 구할 수 있는 경험식을 세웠다.

$$h_e = 0.32Z \left(\frac{P_{sat}}{P_{atm}} \right)^{0.3} \quad (4)$$

여기서 $Z = \frac{\rho_l^{0.65} k_l^{0.3} c_{pl}^{0.7} g^{0.2} q_e^{0.4}}{\rho_v^{0.25} h_{fg}^{0.4} \mu_l^{0.1}}$ 이다.

Fig. 11과 Fig. 12에서 나타낸 바와 같이 Imura[1] 및 Kusuda[9]의 경험식과 본 연구의 실험값은 비교적 잘 일치하였다. 그리고 열유속이 적은 범위에서는 경험식보다 실험값이 비교적 높게 나타났으나, 열유속이 큰 범위에서는 반대 현상을 나타내었다.

4.3 마이크로 그루브형 열사이폰의 비등열 전달 계수

Fig. 13~15는 평관형 열사이폰과 마이크로 그루브형 열사이폰의 비등열전달계수를 비교하였다. 실험에서 작동유체는 증류수, 메탄올 및 에탄올을 사용하였다. 평관형 열사이폰의 실험값은 Imura[1]의 비등 경험식과 비교하였다. 작동유체의 봉입율은 써모사이폰 총체적의 30%를 봉입하였다. 열사이폰의 마이크로 그루브수는 60그루브이다. 열사이폰의 증발부에 순환하는 가열수의 온도를 변수로 하여 실험데이터를 산출하였다. 열유속이 증가함에 따라 비등열전달계수는 증가하였다. 평관형 열사이폰의 비등열전달계수는 작동유체가 증류수인 경우 실험값이 Imura[1]의 비등 경험식보다 대부분 낮게 나타났다. 그리고 작동유체가 메탄올과 에탄올인 경우 실험값은 Imura[1]의 비등 경험식과 비교적 잘 일치하고 있다. 그리고 작동유체가 증류수, 메탄올 및 에탄올의 세 가지 종류의 실험에서 전 범위에 실험값과 이

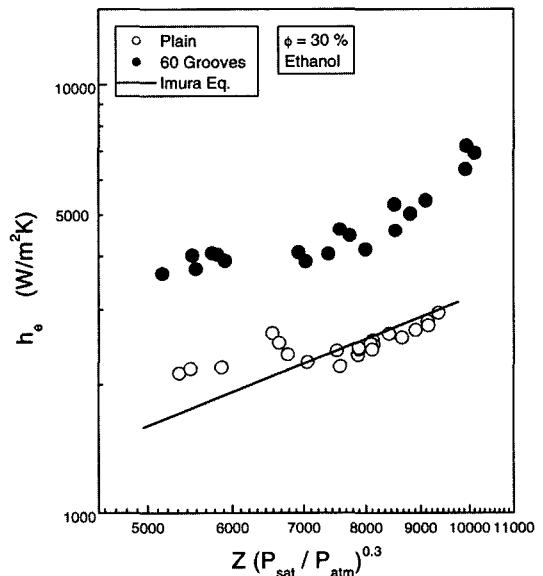


Fig. 13. Comparison of the experimental data with Imura's correlations

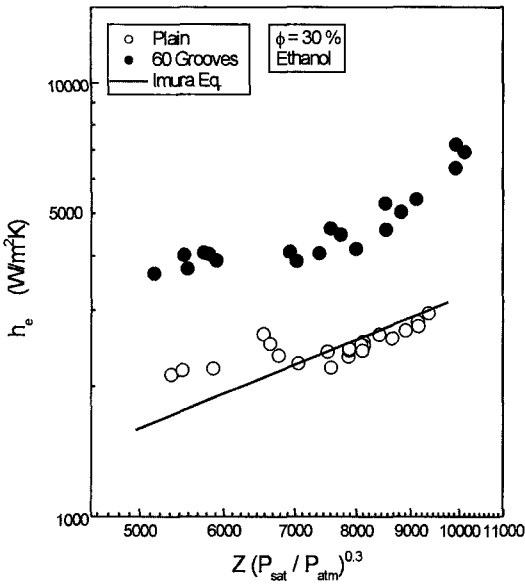


Fig. 14. Comparison of the experimental data with Imura's correlations

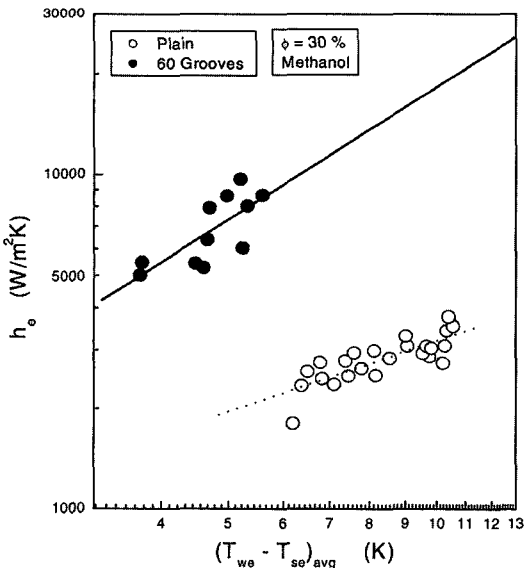


Fig. 15. Comparison of the experimental data with Imura's correlations

른값의 오차는 20% 범위에서 잘 일치하고 있다. 열전도계수와 증발 잠열값이 큰 증류수가 작동유체인 경우의 비등 열전달계수 값은 작동유체가 메탄올과 에탄올인 경우보다 비등 열전달계수가 높게 나타났다. 그러므로 열전달 성능 측면에서 고려할 경우 열사이폰의 작동유체로서는 증류수가 아주 좋은 작동유체로 생각된다.

또한 증류수, 메탄올과 에탄올을 작동유체로 사용하고, 이와 같은 실험조건에서 평관형 열사이폰과 마이크로 그루브형 열사이폰을 실험한 결과 평관형 열사이폰보다 마이크로 그루브형 열사이폰의 비등열전달계수가 실험 전 범위에서 높게 나타났으며, 작동유체가 증류수인 경우 2~2.5배, 메탄올인 경우 1.5~2배, 에탄올인 경우 1.3~1.5배 정도 증가하였다. 이와 같이 마이크로 그루브형 열사이폰에서 열전도계수와 증발 잠열값이 큰 작동유체일수록 비등 열전달계수 값의 증가폭이 크게 나타났다.

5. 결 론

작동유체는 증류수, 메탄올 및 에탄올을 사용하고, 평관형 및 마이크로 그루브형 열사이폰에서 마이크로 그루브수의 변화, 작동유체의 종류에 대한 실험적인 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 작동유체가 잠열이 큰 유체일수록 열사이폰의 응축부 벽면온도 분포는 높게 나타났다.
- 2) 실험 비등열전달계수는 이론 비등열전달계수와 20%에서 잘 일치하였다.
- 3) 열전도계수와 증발 잠열값이 큰 증류수가 메탄올 및 에탄올보다 비등 및 응축 열전달계수가 높게 나타났다.
- 4) 마이크로 60그루브형이 평관형보다 비등 열전달계수가 높게 나타났으며 작동유체가 증류수인 경우 2~2.5 배, 메탄올인 경우 1.5~2배, 에탄올인 경우 1.3~1.5배 높게 나타났다.
- 5) 마이크로 그루브형 열사이폰에서 열전도계수와 증발 잠열값이 큰 작동유체일수록 비등 열전달계수 값의 증가폭이 크게 나타났다.

참고문헌

- [1] Imura, H., Kusuda, H., Ogata, J. I., Miyaz, T. and Sakamoto, N., "Heat Transfer in Two-Phase Closed-Type Thermosyphons", Trans. of Japan Soc. of Mech. Engrs., pp. 485-493, 1977.
- [2] Park, R. J., "Two-Phase Closed Thermosyphon with Two-Fluid Mixtures", Department of Mechanical Engineering University of Ottawa, Ottawa, Ontario, Canada, M. S. Thesis, 1992.
- [3] 이영수, 이기우, "히트파이프 열교환기", 대한기계학회지, Vol. 35, No. 9, pp. 805-815, 1995.
- [4] Hong, S. E., Kim, C. J., Park, Y. J. and Kang, H. K., "An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics of a FC-72 Thermosyphon", 12th Int. Heat Pipe Conference, Vol.2, D-7, 2002.

- [5] Chen, M. M., "Heat Transfer Performance of Two-Phase Closed Thermosyphons with Different Lengths", 6th IHPC, Grenoble, pp. 647-651, 1987.
- [6] Fledman, K. T. Jr. and Srinivasan, R., "Investigation of Heat Transfer Limits in Two-Phase Closed Thermosyphon", 5th IHPC, Tsukuba, pp. 30-35, 1984.
- [7] Pioro, I. L. and Vorontsova, M. V., "Calculation of the Ultimate Heat Flux for Liquid Boiling in Two-Phase Thermosyphons", J. of Eng. Physics, 53, No. 3, pp. 376-383, 1987.
- [8] Imura, H., Kusuda, H., Ogata, J., Miyazaki, T. and Sakamoto, N., "Heat Transfer in Two-Phase Closed-Type Thermosyphon", Heat Transfer Japanese Research, 8, No. 2, pp. 41-53, 1997.
- [9] Kusuda, H., Imura, H., "Boiling Heat Transfer in an open Thermosyphon", Bul, JSME, 16, No. 101, pp. 1734-1740, 1973.
- [10] 강환국, 김윤철, 김철주, 박이동, 황영규, "낮은 경사각을 갖는 밀폐형 2 상 써모사 이폰의 열전달 특성에 관한 연구", 대한기계학회춘계학술논문집(II), pp. 169-174, 1995.
- [11] Kim, C. J., Kang, H. K., Park, E. T. and H., Wang, Y. K., "The Visual Study of Nucleat Boiling Phenomena in Liquid Pool for a Closed Two Phase Thermosyphon", ISTP 6th in Thermal Engineering, Seoul, Korea, Vol. I., pp. 389-399, 1993.
- [12] K. S. Ong, "A Simple Theoretical Model of a Thermosyphon", The 7th International Heat Pipe Symposium, Korean Society of Mechanical Engineers, Heat Pipe Section, pp. 18, 2003.
- [13] S. H. Noie, M. H. Kalaei, M. Khoshnoodi, "Experimental Investigation of a Two Phase Closed Thermosyphon", The 7th International Heat Pipe Symposium, Korean Society of Mechanical Engineers, Heat Pipe Section, pp. 1419, 2003.