[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 19, No. 1, 1999

관 외벽에 낮은 핀을 가진 수직 열사이폰의 비등 및 응축열전달 성능에 관한 연구

조 동 현

대진대학교 기계설계공학과

A Study on the Performance of the Boiling and Condensation Heat Transfer of Vertical Closed Two-Phase Thermosyphons with Low Integral-Fins

Dong-Hyun Cho

Dept. of Mechanical Design Engineering, Daejin University

ABSTRACT

An Experimental study on the boiling and condensation heat transfer performance of thermosyphons with low intergral-fins was performed to investigate its heat transfer characteristics. A plain thermosyphon having the same inner and outer diameter as the finned thermosyphons was also tested for comparison. Water and CFC-30 was used as working fluids. The experimental results have been assessed and compared with same existing theories. Good agreement with the theories of Imura and Nusselt was obtained. The vertical closed-type thermosyphons with low integral-fins gave significant increases in the overall heat transfer coefficient compared to plain thermosyphon. In addition, the overall heat transfer coefficients and the operating characteristics was obtained as a function *v*of operating temperature for the practical applications. Also, the closed two-phase thermosyphons with low integral-fins would be highly recommended to achieve some inexpensive and compact heat exchangers in the range of low temperatures.

NOMENCLATURES

A 열전달 표면적 (m^2)
c_{pl} 응축액 비열 (kJ/kgK)
c_{pw} 냉각수 비열 (kJ/kgK)
D_i 열사이폰 내경 (m)
F_w 핀부두께 (m)
fpm 핀밀도 (*fins per meter*)
g 중력 상수 ($9.81 m/s^2$)
h 열전달계수 (W/m^2K)
H_f 핀부높이 (m)
h_{fg} 응축 잠열 (J/kg)
L 열사이폰 길이 (m)
$\dot{m}$ 냉각수의 질량 유동율 (kg/s)
P_i 열사이폰 내부 포화증기 압력 (Pa)
P_f 핀 피치(m)
P_o 대기압 (Pa)
Q_{cool} 냉각수가 흡수한 열량 (W)
q 열유속 (W/m^2)
T 온도 (^oC)
U 총합 열전달계수 (W/m^2K)
X $\frac{\rho_l^{0.65} k_l^{0.3} c_{pl}^{0.7} g^{0.2} q_e^{0.4}}{\rho_v^{0.25} h_{fg}^{0.4} \mu_l} \left(\frac{P_i}{P_o}\right)^{0.3}$
(Fig. 8의 x축 변수)

GREEK SYMBOL

μ 점성계수 ($N \cdot s/m^2$)
ρ 밀도 (kg/m^3)
k 열전도계수 (W/mK)

SUBSCRIPTS

a : 단열부
avg : 평균
e : 비등
c : 응축
hot : 온수
i : 열사이폰 내부
in : 냉각수 입구
l : 응축액
out : 냉각수 출구
v : 증기

1. 서 론

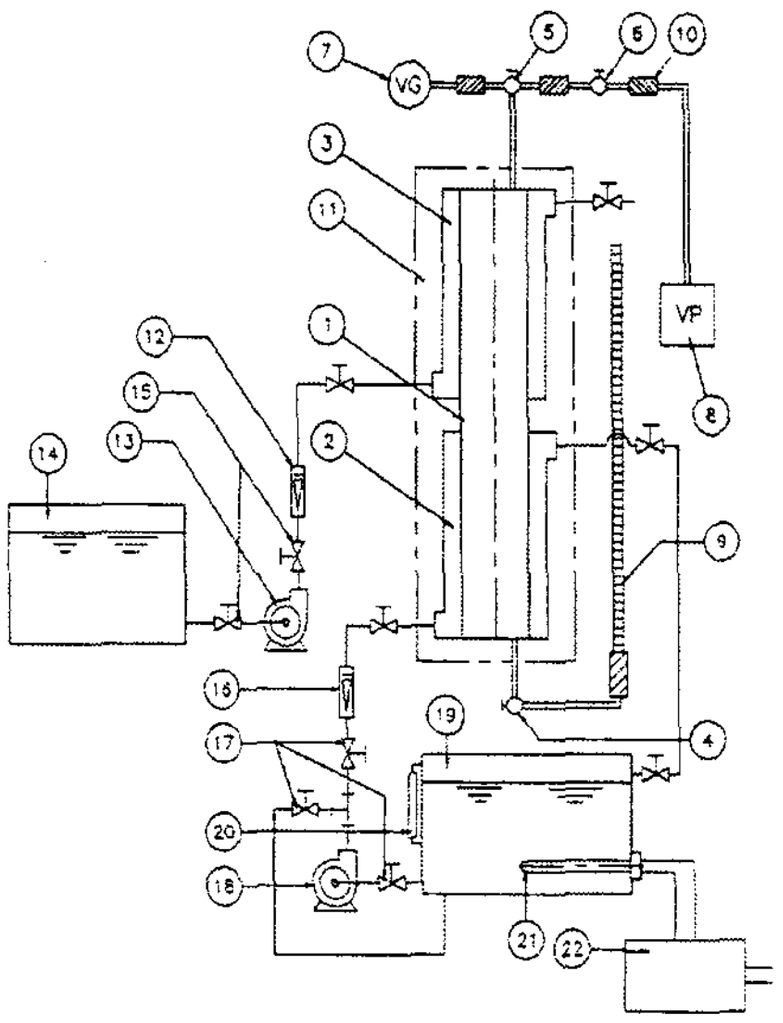
비등과 응축에 의한 열전달 과정에 의해 높은 열전달율을 얻을 수 있다는 것은 오래 전부터 알려져온 사실이다. 이와 같은 비등과 응축 과정을 응용한 밀폐 시스템이 있다. 즉, 이상밀폐 열사이폰(two-phase closed thermosyphon)이다. 이상밀폐 열사이폰은 매우 작은 온도차에 의해서도 작동유체(working fluid)의 비등과 증발에 의해 많은 양의 열플럭스를 전달할 수 있는 장치이다. 이상밀폐 열사이폰의 열전달 성능에 관한 연구는 Cohen과 Bayley[1]에 의해 최초로 수행되었으며, 그 이후 Larkin[2], Lee와 Mital[3], Strel'tsov[4], Savchenkov[5]등의 연구에 의하면, 이상밀폐 열사이폰의 열전달 성능은 작동유체, 작동유체의 양, 경사각, 튜브 내부 직경, 튜브 길이(증발부와 응축부의 길이 비율), 증발부와 응축부 사이의 단열부 길이, 열플럭스, 작동유체의 압력등의 변수에 많은 영향이 있다고 하였다. Park[6]은 어느 유체이건 이상밀폐 열사이폰의 작동유체로 이용될 수 있으며, 증류수가 이상밀폐 열사이폰의 작동유체로 가장 많은 장점을 가진다고 하였다. 그리고

작동유체의 종류에 따라 동일한 실험조건에서 열전달 계수값은 다르게 나타났다. 이[7]는 이상밀폐 열사이폰의 작동온도에 따라 작동유체의 종류를 선택하여야 한다고 했다. Chen[8], Bontemps등[9], Fledman과 Srinivasan[10]의 실험적인 연구 결과에 의하면 작동유체의 양은 이상밀폐 열사이폰의 총 체적에 20%일때 최대 열전달 계수값을 나타낸다고 했다. 그리고 Imur등[11]은 20～30%일때 최대 열전달 계수값을 나타낸다고 했다.

그러나 낮은 핀관으로 제작한 열사이폰에 대한 연구보고는 전무하며, 작동유체는 오존층에 무해한 CFC-30에 대하여도 연구보고가 없다. 그러므로 본 연구에서는 작동유체는 증류수와 CFC-30을 사용하여 평관으로 제작한 열사이폰과 낮은 핀을 가진 관으로 제작한 열사이폰에 대하여 각각 열전달 성능에 관하여 연구를 하였다. 이와 같은 연구 결과로 작동유체의 변화에 대한 열전달 성능을 비교 분석하였으며, 또한 작동유체가 증류수와 CFC-30인 경우에 대하여 평튜브로 제작한 열사이폰과 낮은 핀을 가진 관으로 제작한 열사이폰에 대하여 열전달 성능비를 비교분석했다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 시험구간(1), 온수 보일러(19), 온수 순환회로(16~18), 온수 공급펌프(18), 온수 유량계(16), 온수 유량 제어밸브(17)등의 온수 순환시스템과 냉각수 탱크(14), 냉각수 펌프(13), 냉각수 유량계(12), 냉각수 유량 제어밸브(15)등의 냉각수 순환 시스템과, 진공펌프(8), 진공 밸브(4~6), 진공게이지(7), 진공 호스(10)등의 진공시스템으로 구성하였다. Fig. 1에서와 같이 이상밀폐 열사이폰의 상부에 기밀 및 진공을 위해 진공펌프, 진공게이지, 고성능 진공밸브를 진공호스로 연결하여 구성하였다. 이상밀폐 열사이폰의 하부 밑부분



1.Test Tube 2.Heating Water Chamber 3.Cooling Water Chamber 4.Vacuum Valve 5.Vacuum Valve 6.Vacuum Valve 7.Vacuum Gauge 8.Vacuum Pump 9.Measuring Device for Liquid Level 10.Vacuum Rubber Hose 11.Insulation 12.Coolant Flow Meter 13.Coolant Pump 14.Coolant Tank 15.Coolant Control Valve 16.Heating Water Flow Meter 17.Heating Water Control Valve 18.Heating Water Pump 19.Heating Water Boiler 20. Liquid Level Gauge 21.Electric Heater 22.Thermo-Controller

Fig. 1. Schematic Diagram of the Experimental Apparatus

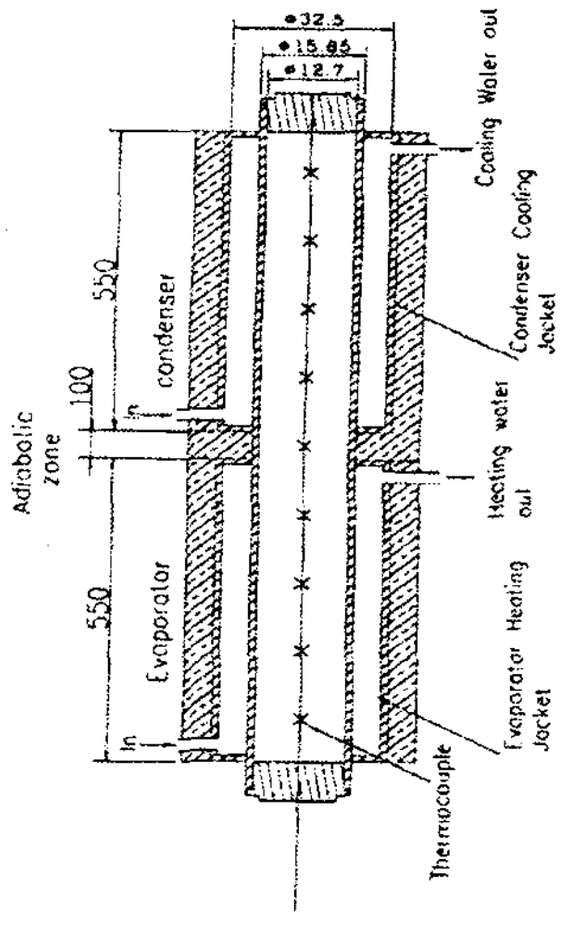


Fig. 2. Cross-Sectional View of the Experimental Two-Phase Thermosyphon

은 직경 17 mm의 캡으로 용접하여 기밀을 유지하였다. 작동유체(물, CFC-30)는 눈금이 새겨져 있는 메스실린더에서 이상밀폐 열사이폰의 하부에 있는 진공밸브를 통해 주입되도록 했다. 진공펌프를 작동하여 이상밀폐 열사이폰의 내부를 5 $\times 10^{-4}$ *Torr* 까지 진공을 시킨 후 상부에 설치된 진공밸브를 닫고 난 후 이상밀폐 열사이폰의 하부에 이상밀폐 열사이폰과 메스실린더 사이에 연결된 진공밸브를 열면 이상밀폐 열사이폰의 내부와 대기의 압력차에 의해 작동유체가 밀폐 열사이폰의 내부로 주입된다. Imura등[11]의 연구에 의하면 작동유체 양의 변화에 따라 열전달 성능의 변화를 나타내며, 작동유체의 양은 밀폐 열사이폰의 총체적의 20~30%일때 최대 열전달 성능을 나타낸다고 하였다. 그러므로 작동유체의 주입량을 정확하게 계측할 수 있는 주입 시스템을 구성하였다. Fig. 2는 시험구간을 나타낸다. 시험구간은 총 시험구간의 길이를 1200 mm로 구성하며, 증발부와 응축부 길이는 각각 550 mm로 구성했다. 열사이폰의 재질은 구리이며, 열사이폰의 외표면에는 Fig. 3의 사진과 같이 낮은 핀(649 *fpm*)이 전조가공되어 있다. 그리고 Fig. 4는 열사이폰의 단면을 나타낸다. 온수 보일러(5 *kW* 급 히타, 1대)에서 가열된 온수가 온수펌프, 온수 유량 제어 밸브, 온구 유량계, 시험구간(증축부), 온수 보일러로 순환의해 이상밀폐 열사이폰의 증발부에 열플럭스를 공급하도록 가열 시스템을 구성하였다. 온수 순환 시스템의 과부하를 방지하기 위하여 Fig. 1에서와 같이 바이패스 라인를 설치하였다. 증발부에 공급되는 온수의 온도는 온도 조절기에 의해 ±0.1℃까지 일정하게 유지하도록 제어하였다. 그리고 응축부의 냉각수 시스템에서 유동하는 냉각수는 냉각수 탱크, 냉각수 펌프, 냉각수 유량 제어 밸브, 냉각수 유량계, 시험구간(응축부), 외부 방출의 순으로 유동하면서 증발부로부터 공급된 열플럭스를 흡수하여 외부로 방출하도록 냉각시스템을 구성하였다. 시험구간의 냉온수 입·출구온도와 튜브 표면온도는 상온에서 오차가 적은 Pt 100Ω 저항 온도센서를 튜브 외표면에 심어 측정하도록 하였다. 이상밀폐 열사이폰의 증발부와 응축부의 튜브 표면 온도를 측정하기 위해 각각 길이 방향으로 120 mm 간격으로 4점, 단면에서 튜브 정면을 기준으로 하여 0°, 90°, 180° 위치에서 측정하여 평균값을 취하도록 했다. 시험튜브에 심은 열전대는 튜브 표면에 폭 2 mm, 깊이 0.3 mm, 길이 20 mm 크기의 홈을 밀링 가공하여 온도센서의 접점을 홈에 완전히 접착시킨 후 은납으로 채우고 24시간 경과한 후 에폭시 수지로 덮어 외부와 교란을 방지하도록 하였다. 모든 실험 데이타는 정상상태에서 측정하였다. 실험전에 시험 튜브는 아세톤으로 세척하여 불순물을 제거한 후 증류수로 세척하였다. 그리고 완전히 건조시킨 후 공기 압축기로 시험구간 내부의 압력을 상승시켜 24시간 동안 유지시켜 기밀시험을 하였다. 또한 미세한 누설까지도 감지하기 위하여 비눗물로 누설검사를 하였다. 기밀이 유지됨을 확인한 후 이상밀폐 열사이폰의 상부에 부착된 진

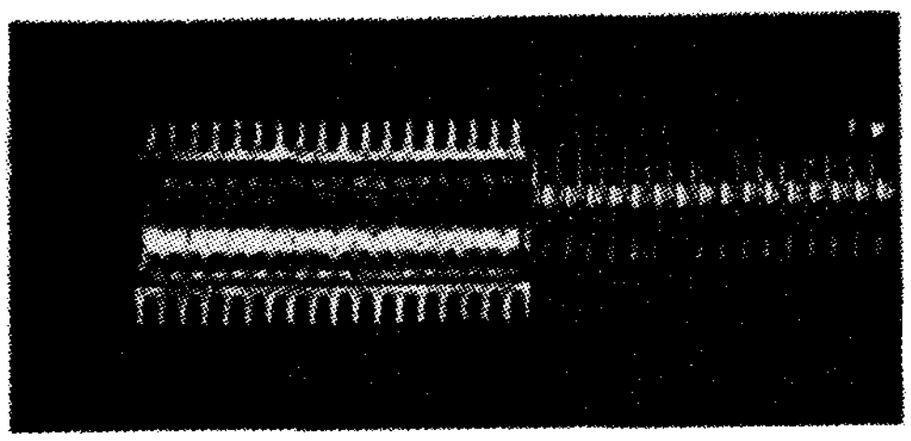


Fig. 3. Photograph of Low Finned Thermosyphon

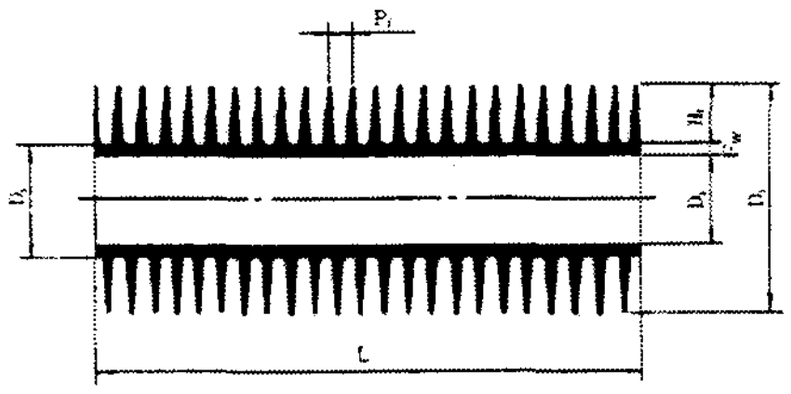


Fig. 4. Cross Section of Low Finned Themosyphon

공밸브를 열어 진공펌프에 의해 이상밀폐 열사이폰의 내부를 진공시킨다. 진공펌프의 작동시간은 12시간 가량하여 5×10^{-4} *Torr* 까지 진공시켰다. 이상밀폐 열사이폰이 정상상태로 작동하는 동안, 비응축가스인 공기는 이상밀폐 열사이폰의 상부로 상승하여 단열층(insulating layer)을 형성하며, 또한 형성된 공기층은 순환을 하지 않는다. 이러한 단열층은 실제적인 전열면적을 축소시키는 요인이 되며, 이러한 원인으로 공기등의 비응축가스는 이상밀폐 열사이폰의 열전달 성능을 감소키는 요인이 되므로 완전히 제거하였다.

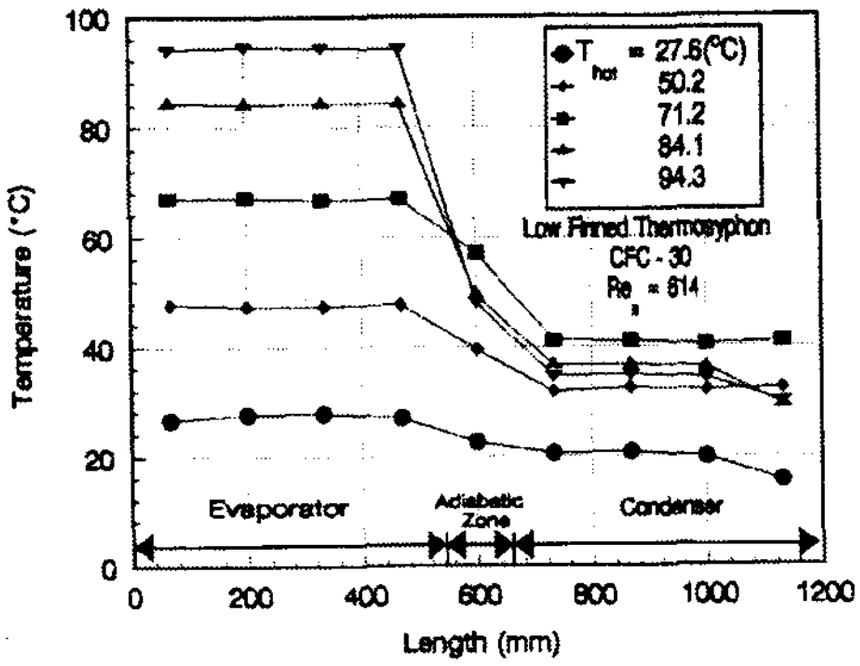


Fig. 5. Temperature Distributions along the Lenth of Themosyphon(CFC-30)

3. 결과 및 고찰

3.1 써모사이폰의 벽면 온도분포

Fig. 5와 6은 이상 밀폐 열사이폰의 증발부, 단열부 및 응축부의 벽면 온도분포를 나타낸다. 실험에 사용된 작동유체는 증류수와 CFC-30이다. 모든 변수는 일정하게 하고, 온수온도 변화에 대한 열사이폰의 벽면 온도분포를 나타낸다. 그리고 응축부에 유동하는 냉각수의 입구온도는 항온조에 의해 15℃로 일정하게 유지시켰으며, 냉각수 질량유동율은 0.03 *kg/s* 을 유지한 상태에서 실험을 수행했다. 증발부에서는 온도분포가 비교적 일정하게 나타났으나, 응축부에서는 온도분포가 조금 산포되어 있슴을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 응축부에서 응축액이 튜브 벽면을 따라 하부 방향으로 유동할 때 파동과 골을 형성하는 불규칙한 유동에 의해 기인된다. 그리고 Fig. 5에서 작동유체(CFC-30)의 온도가 84.1 ℃와 94.3 ℃인 경우 응축부의 벽면온도가 71.2 ℃에서의 벽면온도보다 낮게 나타났다. 이와 같은 현상은 작동유체의 온도가 84.1 ℃이상에서 실험한 것은 증발부와 응축부의 과대 온도차로 인하여 천이비등영역에서 비등열전달이 이루어지것으로 간주된다.

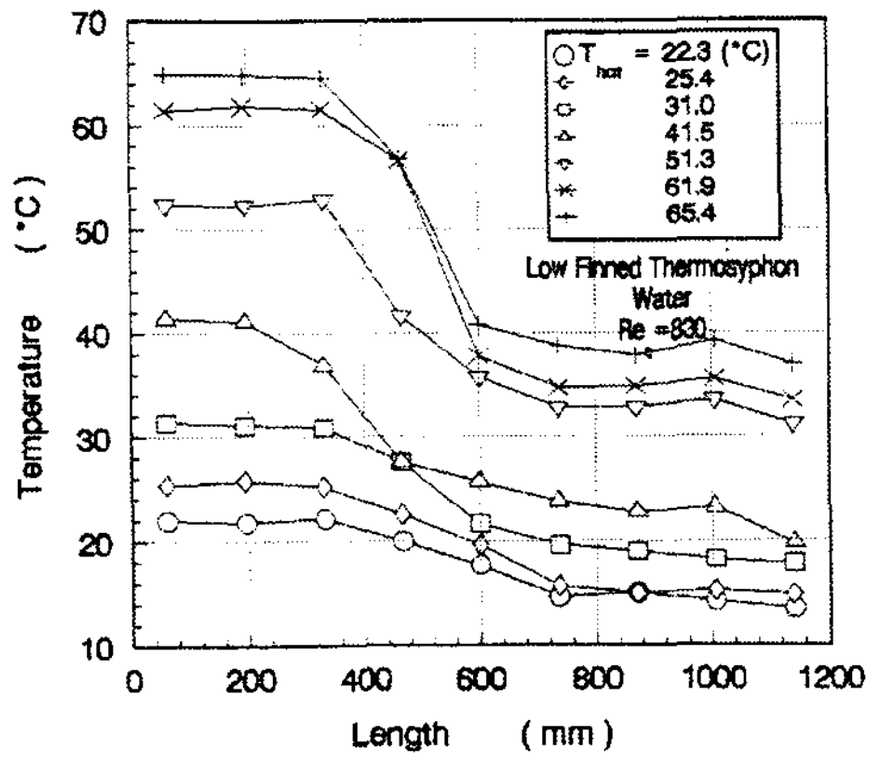


Fig. 6. Temperature Distributions along the Lenth of Thermosyphon

3.2 응축 및 비등열전달 계수

열사이폰의 증발부 및 응축부의 내표면적(A_i)은 식(1)에 의해 구했다.

$$A_i = \pi D_i L \tag{1}$$

열사이폰의 응축부에서 냉각수가 흡수한 열량(Q_{cool})은 식(2)에 의해 구했다.

$$Q_{cool} = \dot{m} c_{pw} (T_{in} - T_{out}) \tag{2}$$

열플럭스 (q)는 $q = Q_{cool}/A_i$로 정의되며, 실험 응축 열전달계수 (h_c)는 식(3)에 의해 산출했다.

$$h_c = \frac{q}{(T_a - T_c)_{avg}} \tag{3}$$

열사이폰 내부에 작동유체의 양이 적을 경우 응축부에서는 막응축이 형성되지만, 작동유체의 양이 증가함에 따라 기액이 혼합된 이상유동이 발생하게 된다. 그러나 막응축이 형성되는 것으로 고려하고, 막응축이 층류이며, 응축액막의 두께가 튜브의 내부 직경에 비해 아주 얇을 때 이상 밀폐 열사이폰에 Nusselt[12]의 막응축식(4)를 적용할 수 있다.

$$h_c = 0.943 \left[\frac{\rho_l^2 g h_{fg} k_l^3}{L_c \mu_l (T_{ai} - T_{ci})} \right]^{1/4} \tag{4}$$

Fig. 7은 이론식(4)와 실험값을 비교한 결과를 나타낸다. 여기서, L_c는 응축부의 길이이며, T_{ai}와 T_{ci}는 단열부 및 응축부의 평균온도를 나타낸다. 응축부와 단열부의 길이비가 같고, 열손실을 무시할 경우 Zahir[13]은 단열부의 온도를 작동유체의 증기온도로 간주할 수 있다고 하였다. 열전도 계수와 증발 잠열값이 큰 증류수가 작동유체인 경우의 열전달계수는 열전달계수가 낮은 범위에서는 비교적 큰 오차를 나타내고 있으며, 또한 대부분의 실험데이터가 이론값보다 낮게 나타났다. 이와 같은 현상은 열전달율이 적은 경우는 응축액막이 형성되지 않으므로 식(4)를 적용할 경우 오차가 많이 발생함을 알 수 있다. 그리고 열전달계수가 증가함에 따라 이론값과 실험값이 비교적 잘 일치하고 있다. 이와 같은 현상은 증기온도와 내부 벽면온도차가 적기 때문에 기인된다.

Fig. 8은 Imura[11]의 비등이론식과 실험결과를 비교한 그림이다. 증발부에서의 순수 비등 이론식

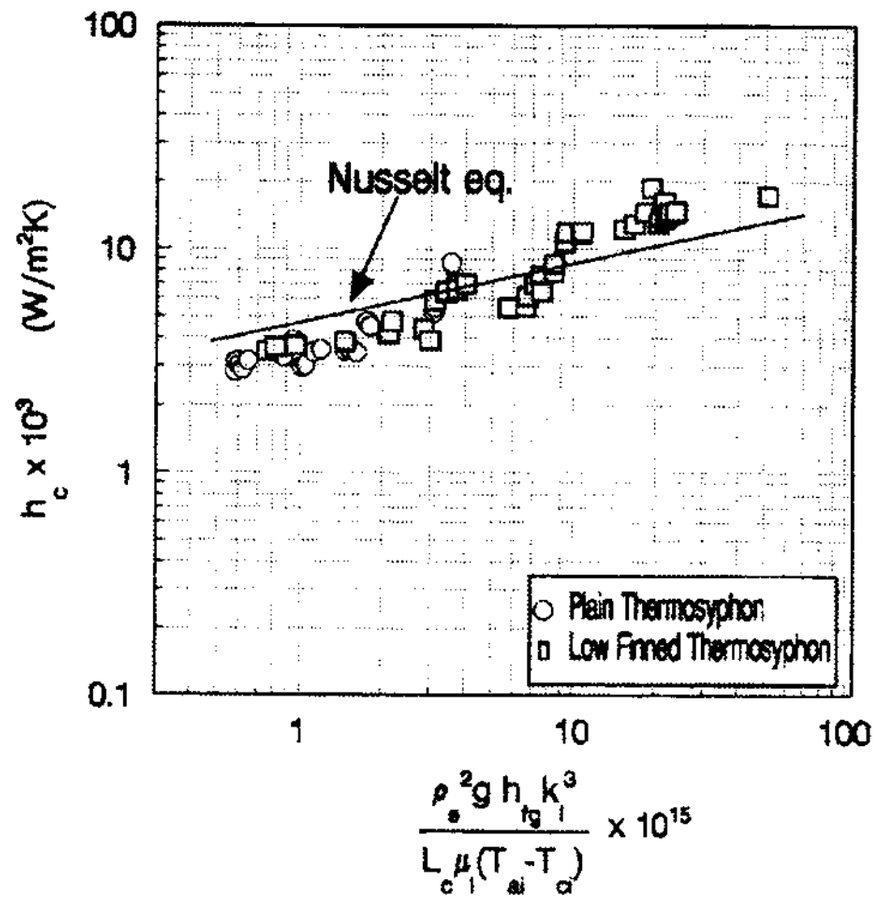


Fig. 7. Comparison of the Experimental Data with Nusselt's Correlation

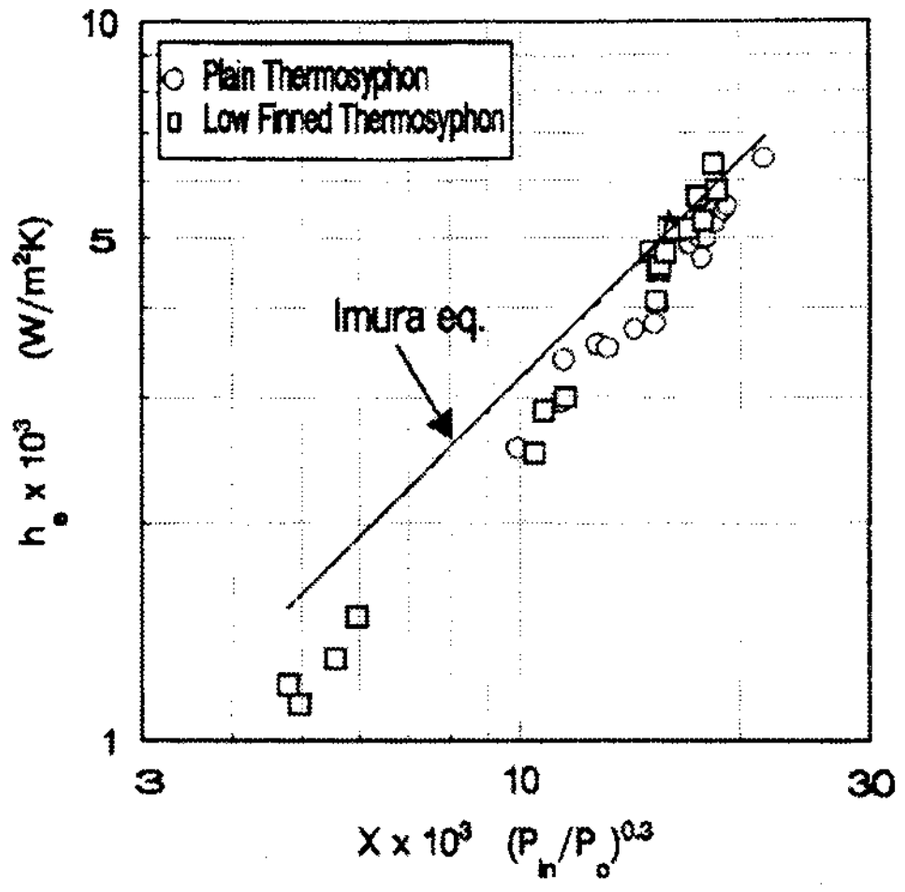


Fig. 8. Comparison of the experimental Data with Imura's Correlation

은 비등과정의 복잡성때문에 존재하지 않는다. 그러므로 비등 열전달계수는 경험식에 의해 구한다. 이상 밀폐 열시이폰 내부에서의 비등은 포화증기압력이 변하는 것외에는 대기압하에서 발생하는 비등현상과 같다. 일반적으로 이상밀폐 열사이폰 내에서의 비등은 진공에 의해 대기압보다 낮은

압력에서 발생하지만, 개방 열사이폰은 대기압하에서 비등이 발생한다. 개방 열사이폰에 대하여, Imura[11]는 차원해석을 토대로 하여 식(5)와 같이 비등 대류열전달 계수를 구할 수 있는 경험식을 세웠다.

$$h_e = 0.32 \frac{\rho_l^{0.65} k_l^{0.3} c_{pl}^{0.7} g^{0.2} q_e^{0.4}}{\rho_v^{0.25} h_{fg}^{0.4} \mu_l} \left(\frac{P_i}{P_o} \right)^{0.3} \quad (5)$$

Fig. 8에서 나타낸바와 같이 Imura의 이론 비등열전달계수와 본 연구의 실험값은 열사이폰 내부 포화증기 압력이 클 경우는 비교적 잘 일치하였다. 그러나 열사이폰 내부 포화증기 압력이 작은 경우 본 연구의 실험값은 Imura의 이론값보다 비교적 낮게 나타났다. 이와 같은 현상은 열사이폰 내부 포화증기 압력이 작은 경우 자연대류 비등영역이 크게 작용하여 열전달율 낮으므로 인하여 오차가 다소 발생하는 것으로 고려된다.

3.3 총합 열전달계수(Overall Heat Transfer Coefficient)

Fig. 9와 10은 평관으로 제작한 열사이폰과 낮은 핀을 가진 열사이폰에 대한 열플럭스와 총합 열전달계수를 나타낸다. 실험에 사용한 작동유체는 증류수와 CFC-30이다. 작동유체의 양은 열사이폰의 총 체적의 25%이다. 열사이폰의 총합 열전달계수는 식(6)과 같이 Nguyen-Chi[14]에 의해 제시되었다.

$$Q = UA_e (T_{ei} - T_{ci}) \quad (6)$$

여기서, U는 총합 열전달계수이며, A_e는 증발부 내부 표면적이다. 그리고 T_{ei}와 T_{ci}는 증발부와 응축부의 내부 표면온도이다. 작동온도(*operating temperature*)는 증발부와 응축부의 평균 온도차로서 정의된다. Fig. 9에서 나타낸

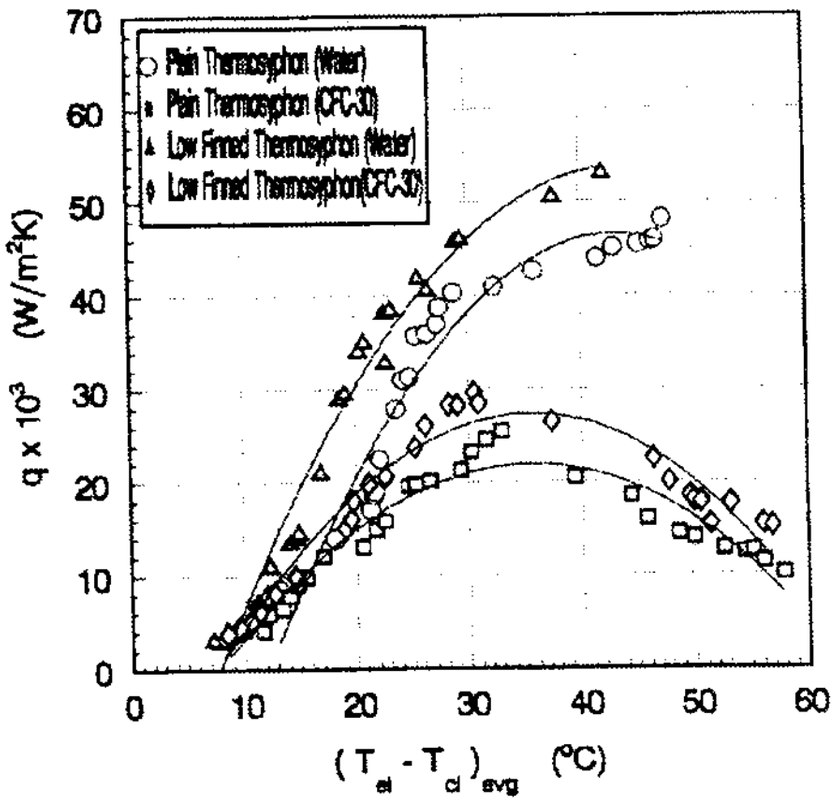


Fig. 9. Plot of Heat Flux versus Operating Temperature

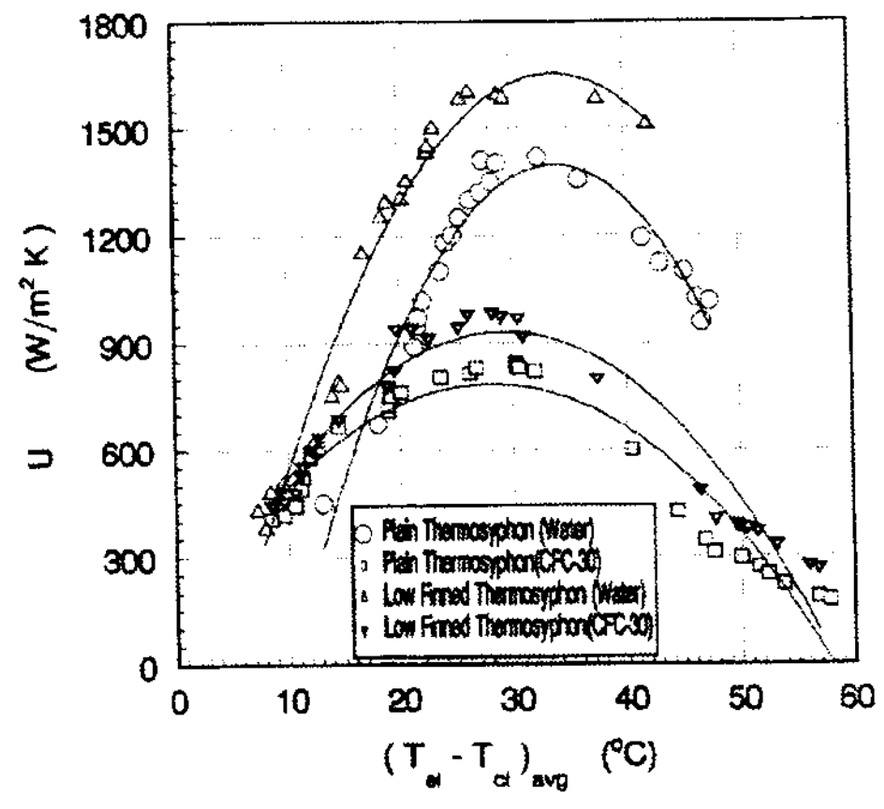


Fig. 10. Plot of Over Heat Transfer Cefficient versus Operating Temperature

바와 같이 작동유체의 증기온도가 증가함에 따라 열전달율은 증가하였며, 작동유체가 증류수인 경우가 CFC-30보다 더 높은 열전달율을 나타내었다. 즉 증발잠열이 큰 작동유체인 경우가 보다 더 높은 열전달 성능을 나타냄을 알 수 있다. 그리고 작동유체는 증류수로 동일하게 하고, 모든 실험조건을 일정한 상태에서 낮은 핀을 가진 열사이폰의 총합 열전달계수는 평관을 사용한 열사

이폰보다 1.3~1.5배 정도 향상되었다. 그리고 작동유체가 CFC-30인 경우에도 낮은 핀을 가진 열사이폰의 총합 열전달계수는 평관을 사용한 열사이폰보다 1.2~1.5배 정도 향상되었다. Fig. 9와 10에서 보는바와 같이 작동온도가 아주 낮은 범위에서는 작동유체가 증류수와 CFC-30인 경우의 열전달율은 크게 차이가 나타나지 않았다. 그리고 평관으로 제작한 열사이폰과 낮은 핀을 가진 열사이폰에 대한 열전달율과 총합 열전달계수도 크게 차이가 나타나지 않았다. 이 영역은 열사이폰 내부 포화증기 압력이 낮은 자연대류 비등영역에서 비등이 일어나는 것으로 고려된다. 그리고 작동유체가 증류수인 경우는 본 연구에서 실험의 전 범위가 자연대류 및 핵비등 영역에 일어나는 것으로 고려된다. 그러므로 작동유체의 온도가 증가함에 따라 열전달율이 증가하였다. 그런데 작동유체가 CFC-30인 경우의 열전달율은 작동온도가 30℃부근에서부터 작동유체의 온도가 이 이상 높은 경우는 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이와같은 현상은 천이비등 영역에서 비등이 일어나는 것으로 고려된다.

4. 결 론

작동유체는 증류수와 CFC-30을 사용하고, 평관과 낮은 핀관으로 이상밀폐 열사이폰을 제작하여 실험적인 연구를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구의 실험결과는 Imura의 이론 비등열전달계수와 비교적 잘 일치하였으며, Nusselt의 이론 막응축열전달 계수는 열플럭스가 큰 범위에서는 비교적 잘 일치하여으나, 열플럭스가 적은 범위에서는 실험값이 비교적 낮게 나타났다.

(2) 핵비등 영역에서는 작동유체의 증기온도가 증가함에 따라 열전달율은 증가하였으며, 작동유체가 증류수인 경우가 CFC-30보다 더 높은 열전달율을 나타내었다.

(3) 작동유체가 CFC-30인 경우 작동온도가 30℃까지는 열전달율이 증가하나, 그 이상 증가하면 열전달율이 천이비등에 의해 점차적으로 감소하였다.

(4) 낮은 핀을 가진 열사이폰의 총합 열전달계수는 평관을 사용한 열사이폰보다 1.3~1.5배 정도 향상되었다.

참 고 문 헌

1. Cohen, H., Baylay, F., J., "Heat Transfer Problems of Liquid Cooled Gas Turbine Blades", Proc. Inst. Mech. Eng., 169, pp. 1063~1080(1955).
2. Larkin, B., S., Trans. Canda. Soc. Mech. Engng., 14-B6, pp. 1~8 (1971).
3. Lee, Y. and Mital, Int. J. Heat and Mass Transf., 15-9, pp. 1695~1707(1707).
4. Stret'tsov, A. I., "Heat Transf.-Soviet Research", 7-1, pp. 23~27(1975).
5. Savchenkov, G. A. and Gorbis, Z. R., "Heat transf.-Soviet Research 8-4", pp. 52~56(1976).
6. Rohjoon Park, "Two-Phase Closed Thermosyphon with Two-Fluid Mixtures", Department of Mechanical Engineering University of Ottawa, Ontario, Canada, M. S. Thesis (1992).
7. 이영수, 이기우, "히트파이프 열교환기", 대한기계학회지, Vol. 35, N0. 9, pp. 805~815 (1995).
8. Chen, M., M., "Heat Transfer Performance of Two-Phase Closed Thermosyphons with Different Lengths, 6th IHPC,

Grenoble, 647~651(1987).
9. Bontemps, A., Goubier, C., Marquet, C., SSolecki, J., C., and Nardi, C., "Performance Limits of a Toluene Loaded, Closed Two-Phase Thermosyphon", 6th IHPC, Grenoble, 634~644 (1987).
10. Fledman, K., T., Jr. and Srinivasan, R., "Investigation of Heat Transfer Limits in Two-Phase Closed Thermosyphon, 5th IHPC, Tsukuba, pp.30~35(1984).
11. Imura, H., Sasaguchi, K. and Kozai, H., "Critical Heat flux in a Closed Two-Phase Thermosyphon", Int. J. Heat Mass Transfer, 26, No. 8, 1181~1188(1983).
12. Nusselt, W., "Die Oberflachenkondensation des Wasserdampfes," Z. Ver. Deut. Ing., 60, 541(1916).
13. Zahir, S. H., "A Two-Phase Closed Thermosyphon at Low Temperature", M. A. Sc. Thesis, University of Ottawa (1972).
14. Nguyen-Chi, H. and Groll, M., "Entrainment of flooding Limit in a Closed Two-Phase Thermosyphon", 4th IHPC, Tsukuba, 1-6 (1981).