낮은 핀을 가진 경사 써모사이폰의 열전달 성능에 관한 실험적 연구

Experimental study on heat transfer inside inclined thermosyphon with low integral-fins

조 동 현*, 권 혁 홍**
D. H. Cho, H. H. Kwon

Key words : Inclined thermosyphon(경사 써모사이폰), Inclination angle(경사각), Condensation(응축), Overal heat transfer coefficient(총열전달계수), Operating temperature(작동온도)

Abstract

An experimental study on the heat transfer of the inclined thermosyphon with low intergral-fins in which boiling and condensation occured is performed to investigate its heat transfer performance. Water and CFC-30 have been used as the working fluids. The operating temperature and the inclination angle of thermosyphon have been used as the experimental parameters. The heat flux input and the inclination angle θ towards the vertical position were varied in steps. The heat transfer rate in the thermosyphon was depended upon the inclination angle. In addition, it is to obtain the overall heat transfer coefficients and the characteristics as a operating temperature for the practical applications.

기 호 설 명

A_e : 증발부의 열전달 표면적(m^2)
A_i : 써모사이폰 내표면적(m^2)
C_{pw} : 냉각수 비열(kJ/kgK)
D_i : 써모사이폰 내경(m)
fpm : 핀밀도(fins per meter)
h_c : 응축 열전달계수(W/m^2K)
h_{Nu} : Nusselt의 응축 열전달계수(W/m^2K)
L : 써모사이폰 길이(m)
$\dot{m}$: 냉각수의 질량 유동율(kg/s)
P_s : 써모사이폰 내부 포화증기 압력(kg/cm^2)
Q_{cool} : 냉각수가 흡수한 열량(W)
q : 열플럭스(W/m^2)
R : 튜브 반경(m)
Re_c : 응축부 냉각수의 레이놀즈수
Re_h : 증발부 온수의 레이놀즈수
T_{ai} : 단열부온도(℃)
T_{ci} : 응축부온도(℃)
T_{ei} : 증발부온도(℃)
T_{in} : 냉각수 입구 온도(℃)
T_{out} : 냉각수 출구 온도(℃)
U : 총열전달계수(W/m^2K)

* 정회원, 대진대학교 기계설계공학과, 생산기술연구소
** 대진대학교 기계설계공학과, 생산기술연구소

θ : 써모사이폰의 경사각
π : 상수(3.14159)
ϕ : 작동유체의 양

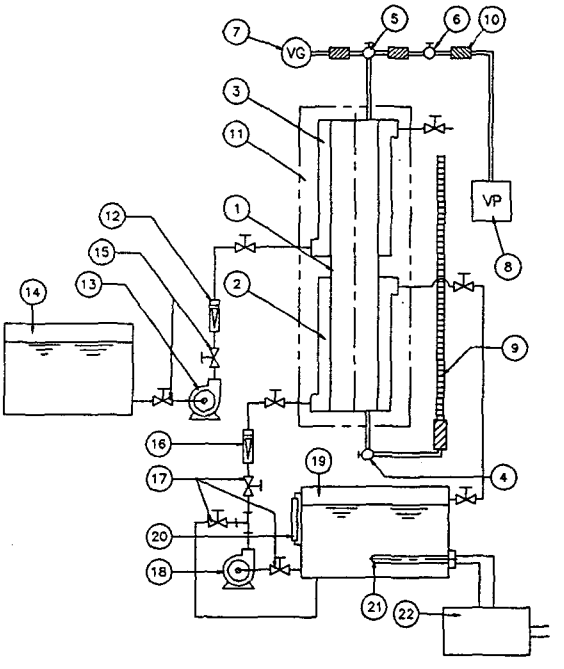
1. 서 론

이상 밀폐 써모사이폰은 매우 작은 온도차에 의해서도 작동유체의 비등과 응축에 의해 많은 양의 열플럭스를 전달할 수 있는 장치이다.[1~3] 열을 이상 밀폐 써모사이폰의 하부에 가열하면 이상 밀폐 써모사이폰 내부의 액체는 증발하게 되며, 증발된 증기는 상부로 상승하며, 이때 상승한 증기는 튜브 외부의 냉각유체에 열을 전달하고 응축이 된다. 응축된 액체는 중력에 의해 튜브 내표면을 따라 하부로 유동하는 과정에 의해서 가열유체에서 냉각유체로 열전달이 이루어진다. 이와 같은 이상 밀폐 써모사이폰의 열전달계수는 수직 상태보다 더 높은 열전달계수를 나타내는 경사각의 범위가 존재한다. 이상 밀폐 써모사이폰은 중력에 의해 작동하기 때문에 이상 밀폐 써모사이폰의 열전달 능력은 중력의 방향에 크게 의존한다. Tu등[4]은 작동유체는 물을 사용하고 길이는 10m, 직경은 25㎜인 이상 밀폐 써모사이폰에서 실험한 결과에 의하면 지표면을 0°로 기준으로 할 경우 경사각이 50°와 55° 사이에서 열전달계수가 최대를 나타내었다고 했다. Hahnc과 Gross[5]는 작동유체를 CFC-115를 사용하고, 길이는 2,000㎜, 직경이 40㎜인 강관 써모사이폰에서 실험한 연구결과에 의하면 경사각이 45°와 50°에서 최대 열전달계수를 나타내었다고 했다. 그리고 Negishi와 Sawada[6]는 작동유체는 물을 이용하고, 튜브길이가 330㎜, 직경이 13㎜인 구리 써모사이폰에서 실험적 연구를 수행한 결과에 의하면 경사각이 20°~40° 사이에서 최대의 열전달계수값을 나타내었다. 이와 같이 실험조건이 다를 경우 연구자들마다 최대 열전달계수를 나타내는 경사각이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 작동유체는 증류수와 CFC-30을 사용하고, 낮은 핀을 가진 구리 써모사이폰에서 경사각 변화와 증발부 온도변화에 대한 열전달계수를 구하였으며, 또한 최대 열전달율을 나타내는 경사각 범위를 실험적으로 구하고, 기존 이론값과 비교 · 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig.1은 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험장치는 시험구간(1), 온수 보일러(19), 온수 순환회로(16~18), 온수 공급 펌프(18), 온수 유량계(16), 온수 유량 제어밸브(17)등의 온수순환시스템과 냉각수 탱크(14), 냉각수 펌프(13), 냉각수 유량계(12), 냉각수 유량 제어밸브(15)등의 냉각



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

수 순환시스템, 그리고 진공펌프(8), 진공밸브(4~6), 진공게이지(7), 진공호스(10)등의 진공시스템으로 구성했다. 작동유체(증류수, CFC-30)는 눈금이 새겨져 있는 메스실린더에서 이상 밀폐 써모사이폰의 하부에 있는 진공밸브를 통해 주입되도록 했다. 진공펌프를 작동하여 이상 밀폐 써모사이폰의 내부를 5×10^{-4}Torr까지 진공을 시킨 후 상부에 설치된 진공밸브를 닫고 난 후 이상 밀폐 써모사이폰의 하부에 이상 밀폐 써모사이폰과 메스실린더 사이에 연결된 진공밸브를 열면 이상 밀폐 써모사이폰의 내부와 대기의 압력차에 의해 작동유체가 이상 밀폐 써모사이폰의 내부로 주입된다. Imura등[7]의 연구에 의하면 작동유체 양의 변화에 따라 열전달 성능의 변화를 나타내며, 작동유체의 양은 이상 밀폐 써모사이폰의 총체적의 20~30% 일 때 최대 열전달 성능을 나타낸다고 하였다. 그러므로 작동유체의 주입량은 열전달 성능에 큰 영향을 미치는 변수이므로 정확하게 계측할 수 있는 주입시스템을 구성했다.

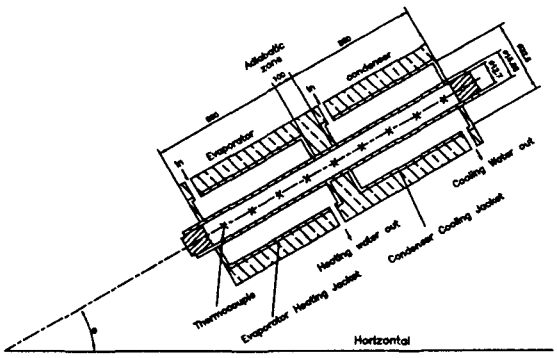


Fig.2 Cross sectional view of the experimental two-phase thermosyphon

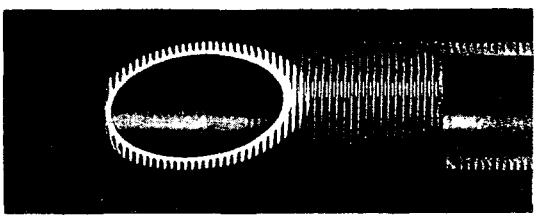


Fig.3 Photograph of low integral-fin thermosyphon

Fig.2는 이상 밀폐 써모사이폰의 시험구간을 나타낸 것이다. 시험구간의 길이는 1,200㎜이다. 시험구간은 증발부, 단열부, 응축부로 구성되며, 증발부와 응축부 길이는 각각 550㎜이며, 단열부는 100㎜이다. 써모사이폰의 내경은 12.7㎜이고, 외경은 15.9㎜이다. 그리고 재질은 구리이며, 외표면에는 Fig.3의 사진에서 나타낸 바와 같이 낮은 핀($649fpm$)이 전조가공되어 있다.

2.2 실험방법

5kW 용량의 온수보일러에서 가열된 온수가 이상 밀폐 써모사이폰의 증발부에 열플럭스를 공급하도록 가열 시스템을 구성했다. 증발부에 공급되는 온수의 온도는 온도 조절기에 의해 ±0.1℃까지 일정하게 유지하도록 제어했다. 그리고 응축부의 냉각수시스템에서 유동하는 냉각수는 증발부로부터 공급된 열플럭스를 흡수하여 외부로 방출했다. 냉각수의 온도는 항온수조에서 일정한 온도로 유지시켰다. 시험구간의 냉온수 입·출구온도와 튜브 표면온도는 상온에서 오차가 적은 Pt 100Ω 저항 온도센서를 사용하여 측정했다. 이상 밀폐 써모사이폰의 증발부와 응축부의 튜브 표면온도를 측정하기 위해 각각 길이방향으로 120㎜ 간격으로 4점, 써모사이폰의 단면에서 튜브 정면을 기준으로 하여 0°, 90°, 180° 위치에서 측정하여 평균값을 취했다. 시험 튜브에 심은 열전대는 튜브표면에 폭 2㎜, 깊이 0.3㎜, 길이 20㎜ 크기의 홈을 밀링 가공하여 온도센서의 접점을 홈에 완전히 접착시킨 후 은납으로 채우고 24시간 경과한 후 에폭시 수지로 덮어 외부와 교란을 방지하도록 했다. 모든 실험 데이타는 정상상태에서 측정했다. 이상 밀폐 써모사이폰이 정상상태로 작동하는 동안, 불응축가스는 이상 밀폐 써모사이폰의 상부로 상승하여 단열층(Insulating Layer)을 형성하며, 또한 형성된 불응축가스는 순환을 하지 않는다. 이러한 단열층은 실제적인 전열면적을 축소시키는 요인이 되며, 이러한 원인으로 공기등의 불응축가스는 이상 밀폐 써모사이폰의 열전달 성능을 감소시키는 요인이 되므로 진공펌프를 작동시켜 불응축가스를 5×10^{-4} Torr까지 제거했다. 이와 같은 실험조건에서 써모사이폰의 경사각 변화가 열전달 성능에 미치는 영

향을 고찰하기 위해 시험구간 하부에 힌지를 설치하여 시험구간이 자유자재로 회전할 수 있도록 했다. 그리고 시험구간 상부에 시험구간을 고정시킬 수 있는 장치를 설치하여 임의의 경사각에서 실험을 할 수 있도록 했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 벽면 온도분포

Fig.4와 5는 이상 밀폐 써모사이폰의 증발부, 단열부 및 응축부의 벽면 온도분포를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 작동유체는 증류수이다. Fig.4는 모든 변수는 일정하게 하고, 온수온도의 변화에 대한 튜브벽면 온도분포의 변화를 나타낸 것이다. 증발부에서는 온도분포가 비교적 일정하게 나타났으나, 응축부에서는 온도분포가 조금 산포되어 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 응축부에서 응축액이 튜브 벽면을 따라 하부 방향으로 유동할 때 파동과 골을 형성하는 불규칙한 유동에 의해 기인된다. 그리고 열플럭스가 작을수록 온도분포가 크게 산포되었다. 이와 같은 현상은 열플럭스가 소량이어서 써모사이폰의 벽면의 일부분이 응축액막을 형성하지 못하고 벽면이 증기에 노출됨으로 인하여, 전도에 의해 열전달이 이루어지는 것으로 고려된다.

Fig.5는 모든 변수는 일정하게 하고, 응축부의 냉각수 유량변화에 대한 온도분포를 나타낸 것이다. 냉각수의 레이놀즈수는 817~5,374까지 변화시키면서 실험한 결과, 증발부의 온도분포는 냉각수의 유량변화에 관계없이 거의 일정하였으나, 응축부의 온도분포는 냉각수 유량이 증가함에 따라 현저하게 감소하였다. 그러므로 냉각수의 유량증가에 의한 과냉도를 증가시키므로써 열전달율을 상승시킬 수 있음을 알 수 있다.

3.2 이론식과 실험결과의 비교

Fig.6과 7은 본 연구의 실험결과와 Yiwei등[5]의 이론치와를 비교한 것이다. 작동유체는 증류수이며, 써모사이폰의 증발부와 응축부에 유동하는 온수와 냉각수의 Reynolds수의 비(Re_c/Re_h)는 0.1로 일정하게 유지한 상태에서, 증발부의 온수온도를 변화시키면서 써모사이폰의 경사각의 변화에 따른 응축 열전달계수를 나타낸 것이다. 써모사이폰의 증발부 및 응축부의 내표면적(A_i)은 식(1)에 의해 구하였고

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

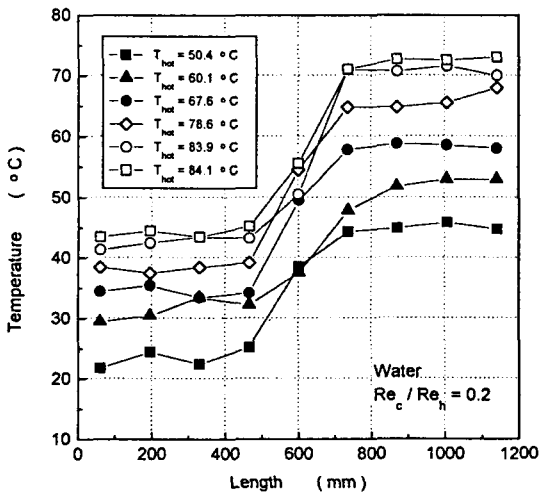


Fig.4 Temperature distributions along the length of thermosyphon(low-finned thermosyphon, water)

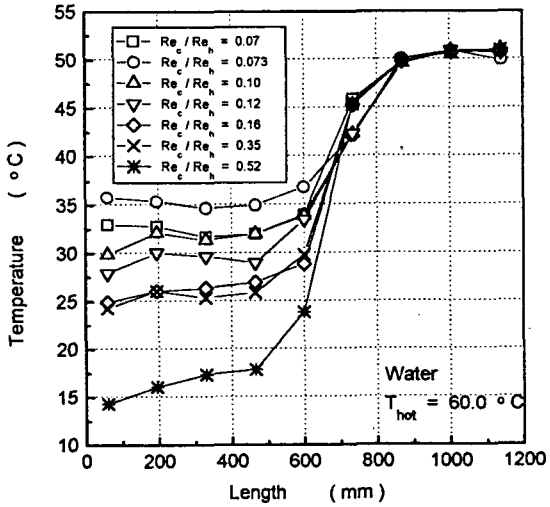


Fig.5 Temperature distributions along the length of thermosyphon(low-finned thermosyphon, water)

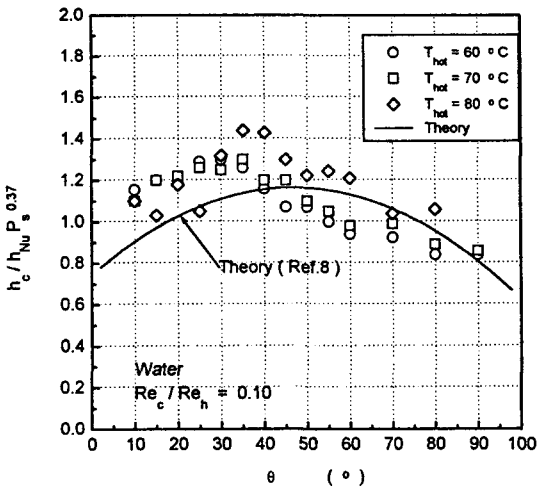


Fig.6 Effects of inclination angle on condensation coefficients

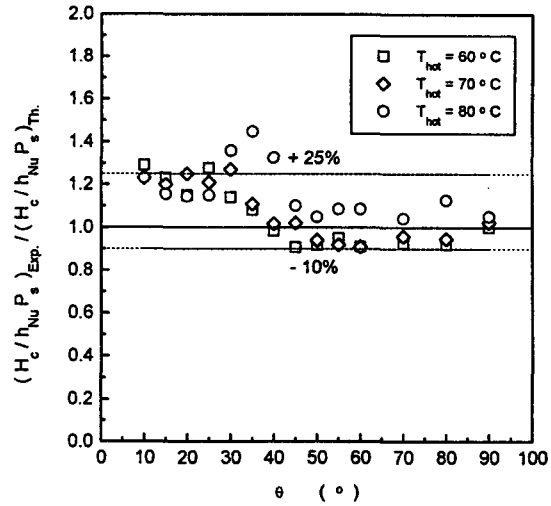


Fig.7 Comparisons between Eq.(4) and the experimental data

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

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

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

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

Yiwei등[8]은 써모사이폰 내부의 작동유체의 양은 비교적 소량이어서 작동유체가 액체 상태로는 응축부로 상승하지 않으며, 그리고 층류 막응축을 형성하며, 튜브 벽면온도는 응축부 전체가 일정하다는 가정하에서 이론식을 정립하고, 실험값과 비교한 결과에서 다소 오차가 나타내었다. 이러한 오차는 실험에서 작동유체의 양은 드리이-아웃이 발생하지 않도록 많이 주입되었으나, 반면에 이론해석에서는 작동유체의 양이 아주 적다는 가정하에서 이루어졌다. 작동유체의 양이 많이 주입된다면 작동유체는 액체상태로 응축부로 상승할 수 있다. 그러므로 Yiwei등[8]은 수치해석에서 구한 이론식에 증기압력과 작동유체의 양과 같은 변수를 추가하여 식(4)를 구하였다.

$$\frac{h_c}{h_{Nu}} = P_s^{0.37} \left(\frac{L}{R}\right) \frac{\cos\theta}{4} [0.41 - 0.72\phi + (-62.7\phi^2 + 14.5\phi + 7.1)\theta/1{,}000] \quad (4)$$

여기서 θ와 ϕ는 각각 써모사이폰의 경사각과 작동유체의 양을 나타내며, P_s는 써모사이폰 내부의 포화증기압력을 나타낸다. 그리고 써모사이폰의 경사각은 지표면을 0°로 기준으로 하여 측정한 값을 나타낸다. Fig.6의 그래프에서 나타낸 바와 같이 이론 및 실험결과로부터 열플럭스와 온도차는 h_c/h_{Nu}의 값에 큰 영향을 미치지 않으며 최적 경사각은 약 20°~45°의 범위임을 알 수 있다.

Fig.7은 식(4)와 실험결과를 비교한 결과를 나타낸 것이다. 실험조건은 응축부에 유동하는 냉각수의 Reynolds수는 850으로 일정하게 유지하고, 증발부의 온수온도는 60, 70, 80℃ 조건에서 써모사이폰의 경사각을 변화시키면서 구한 실험값을 나타낸 것이다. 실험값은 식(4)에서 구한 이론값보다 다소 높게 나타났고, 써모사이폰은 중력에 의하여 작동되므로 열전달 성능은 중력의 방향에 크게 영향을 받는다. 이것은 써모사이폰의 경사각이 열전달 성능에 크게 영향이 있을 것으로 예측된다. 이러한 이유때문에 써모사이폰의 현상의 분류와 새

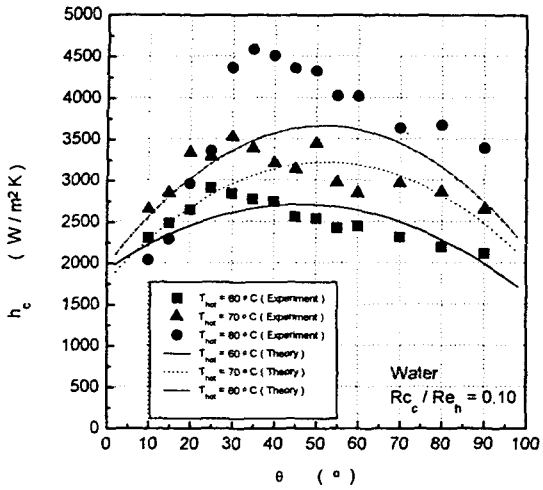


Fig.8 Comparison of the experimental results with quation(4)

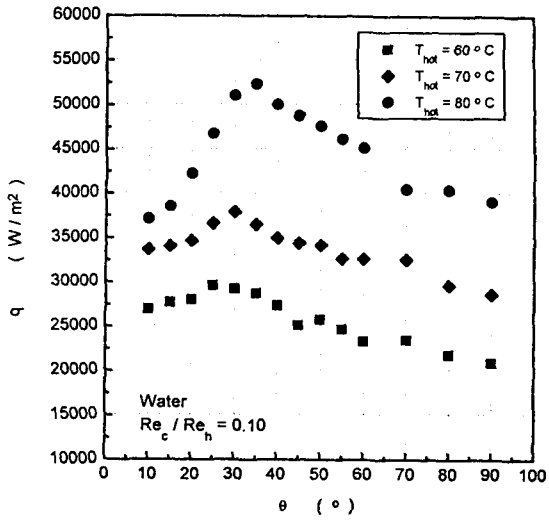


Fig.9 Plot of heat flux against inclination angle

로운 응용분야에 적용하기 위하여 경사각의 영향을 연구하는 것이 필요하다. Hahne과 Gross[5]는 써모사이폰의 응축부에서 응축액이 유동시 중력과 마찰력이 열전달계수에 큰 영향을 미치는 변수라고 하였다. 즉 열전달계수는 중력에 비례하고, 마찰력에는 역비례한다. 그러므로 최적 경사각은 0°와 90° 사이의 범위에서 존재하게 됨을 알 수 있고 본 연구에서는 경사각이 20°~45° 범위에서 최대 열전달계수를 나타내었다.

Fig.8은 이론 응축 열전달계수와 시험 응축 열전달계수를 비교한 결과를 나타낸 것이다.

실험조건은 냉각수와 온수의 Reynolds비, Re_c/Re_h=1.10로 일정하게 유지하고 증발부에 순환하는 온수온도를 60℃, 70℃, 80℃로 변화시키면서 실험한 결과를 나타낸 것이다. 경사각이 적은 범위에서는 실험값이 이론값보다 다소 높게 나타났으나 경사각이 큰 범위에서는 실험값이 이론값보다 다소 낮게 나타났다. 그러나 실험조건의 전 범위에서 실험값은 이론값과 비교적 잘 일치되는 것으로 나타났다. 그리고 이론 응축 열전달계수는 경사각 변화에 따라 크게 변화를 나타내며, 증발부에 순환하는 온수온도가 증가함에 따라 높게 나타났다. 이와 같은 현상은 써모사이폰의 증발부의 온도가 증가함에 따라 써모사이폰 내부의 증기압이 상승하게 되며, 이에 따라 열플럭스의 증가에 의해 응축 열전달계

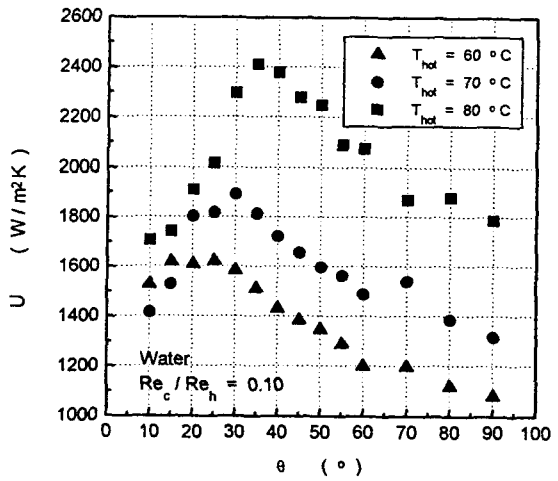


Fig.10 Plot of overall heat transfer coefficient against inclination angle

수값이 증가하는 것으로 판단된다.

3.3 총열전달계수

Fig.9와 10은 써모사이폰의 경사각 변화에 대한 열플럭스와 총열전달계수의 변화를 나타낸 것이다. 실험결과로 부터 경사각의 변화에 따라 열전달율이 크게 변화를 나타내었으며, 최대 열전달율을 나타내는 경사각의 범위가 존재함을 알 수 있다. 그리고 써모사이폰이 수직인 경우보다 경사진 경우가

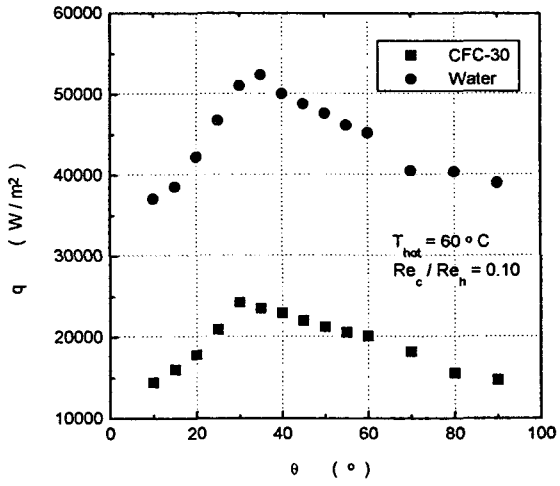


Fig.11 Plot of heat flux against inclination angle

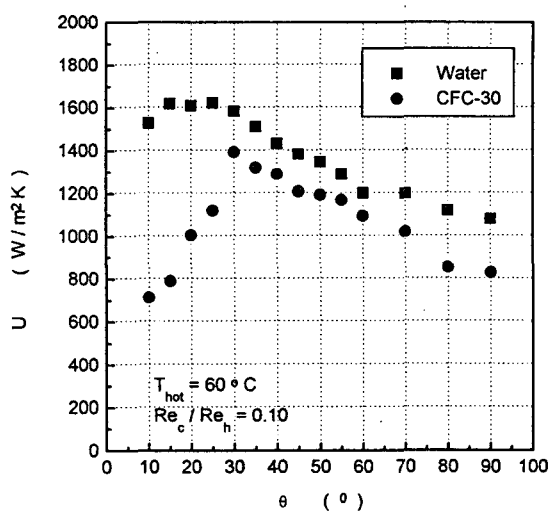


Fig.12 Plot of overall heat transfer coefficient against inclination angle

모두 열전달율이 높게 나타났다. 그리고 써모사이폰이 수직인 경우보다 경사진 경우가 모두 열전달율이 높게 나타났다. Yiwei등[5]의 이론해석 결과에 의하면 경사각이 20°～50°의 범위에서 최대 열전달율을 나타내었으며, Tu등[4]은 실험결과로부터 경사각이 35°와 40° 사이에서, Hahne과 Gross[5]는 경사각이 40°와 45°에서 그리고 Negishi와 Sawada[6]는 경사각이 50°～70° 사이에서 최대의 열전달계수값을 나타내었다. 이와 같은 결과로부터 여러 연구자들의 실험조건이 상이할 경우 최대 열전달을 나타내는 경사각의 범위가 다르게 나타났다. 그런데 본 연구에서는 증발부의 온수온도가 60℃에서는 경사각이 20～35℃, 온수온도가 70℃에서는 경사각이 25°～35°, 그리고 온수온도가 80℃에서는 경사각이 30°～45°에서 최대 열전달율을 나타내었다. 이 결과로부터 온수의 온도가 변화함에 따라 최대 열전달을 나타내는 경사각의 범위가 다르게 나타났다. 또한 온수온도가 증가함에 따라 최대 열전달율을 나타내는 경사각의 크기는 증가함을 알 수 있다.

Fig.11과 12는 모든 실험조건이 동일한 상태에서 써모사이폰 내부의 작동유체가 증류수와 CFC-30인 경우에 대한 써모사이폰의 경사각 변화에 대한 열플럭스와 총열전달계수의 변화를 나타낸 것이다. 작동유체의 양은 써모사이폰 총체적의 25%이다. 써모사이폰의 총열전달계수는 식(5)와 같이 Nguyen-Chi[9]에 의해 제시되었다.

$$Q = UA(T_a - T_a) \tag{5}$$

여기서, U는 총열전달계수이며, A는 증발부 또는 응축부의 튜브내부 표면적이다. 그리고 T_a와 T_a는 증발부와 응축부의 내부표면온도이다. 작동온도는 증발부와 응축부의 평균 온도차로서 정의된다. 실험결과로부터 최대 열전달율을 나타내는 경사각의 범위는 두 작동유체의 종류에 관계없이 유사하게 나타났으며, 작동유체가 증류수인 경우가 CFC-30보다 열전달율이 2.1～2.6배 정도 높게 나타났다.

4. 결 론

작동유체는 증류수와 CFC-30을 사용하고, 낮은 핀관으로 이상 밀폐 써모사이폰을 제작하여 경사각 변화에 대한 실험적인 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Yiwei의 이론 응축열전달계수와 비교적 잘 일치하였으며, 경사각이 적은 범위에서는 실험값이 비교적 높게 나타났으며, 경사각이 큰 범위에서는

비교적 낮게 나타났다.

(2) 열플럭스와 온도차는 h_i/h_{Nu} 값에 큰 영향을 미치는 변수가 아니다. 그러나 써모사이폰의 경사각은 응축 열전달계수에 큰 영향을 미치는 변수이다.

(3) 증발부의 온수온도가 60℃에서는 경사각이 20°～35°에서, 온수온도가 70℃에서는 경사각이 25°～35°에서, 그리고 온수온도가 80℃에서는 경사각이 30°～45°에서 최대 열전달율을 나타내었다.

(4) 최대 열전달율을 나타내는 경사각이 범위는 두 작동유체의 종류에 관계없이 유사하게 나타났으며, 작동유체가 증류수인 경우가 CFC-30보다 열전달율이 2.1～2.6배 정도 높게 나타났다.

후 기

이 논문은 "1996학년도 대진대학교 학술연구비 지원"에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Rohjoon Park, 1992, "Two-phase closed thermosyphon with two-fluid mixtures", Department of Mechanical Engineering University of Ottawa, Ottawa, Ontario, Canada, M. S. Thesis.
2. 이영수, 이기우, 1995, "히트파이프 열교환기", 대한기계학회지, Vol. 35, No. 9, pp. 805～815.
3. Zahir, S. H., 1972, "A two-phase closed thermosyphon at low temperature", M. A. Sc. Thesis, University of Ottawa.
4. Tu, C., Xie, G, Hu, C., Gao, Z. and Hong, R., 1984, "The two phase closed thermosyphon : an experimental study with flow pattern and optimum fill charge", China-U.S. Seminar on Two-flows and Heat Transfer, Sian, 395-405.
5. Hahne, E. and Gross, U., 1981, "The influence of the inclination angle on the performance of a closed two-phase thermosyphon", 3th IHPC, London, 125-135.
6. Negishi, K. and Sawada, T., 1983, "Heat transfer performance of an inclined two-phase closed thermosyphon", Int. J. Heat Mass Transfer, 26, No. 8, 1207-1213.
7. Imura, H., Kusuda, H., Ogata, J., Miyazaki, T. and Sakamoto, N., 1979, "Heat transfer in two phase closed-type thermosyphon", Heat Transfer Japanese Research, 8, NO. 2, 41-53.
8. Yiwei, M., Wang, J. C. Y., Jifu, L. and Yi, F., 1989, "Theoretical and experimental studies on condensation heat transfer inside vertical and inclined thermosyphons", National Heat Transfer Conference HTD-Vol. 108, pp. 111～116.
9. Nguyen-Chi, H. and Groll, M., 1981, "Entrainment of flooding limit in a closed two-phase thermosyphon", 4th IHPC, Tsukuba, 1-6.