

미세 서모사이폰 내의 작동유체의 유동에 대한 실험적 연구

오기열* · 김기남** · 장종훈***

An Experimental Study on the Flow Motion of the Working Fluid in Miniature Thermosyphons

K. Y. Oh, K. N. Kim and J. H. Jang

Key Words: Miniature Thermosyphon(미세 서모사이폰), Liquid Charge(충전량), Acetone(아세톤).

Abstract

This experimental study investigated the flow motion of the working fluid for various diameters of miniature thermosyphons and the performance characteristics for the various amount of the working fluid. The temperatures of condenser surface were measured and visual observations were conducted. The test results show that some fluid condensed in the tube diameters of 0.18cm, and 0.22cm is not returned to the evaporator section due to capillary effect so that large temperature gradients are measured. To enhance returning the working fluid, one copper wire of 0.5mm diameter was inserted and the test results show good performance. When the liquid charge was less than 10% in volume, dry-out was occurred for the thermosyphons of the inner diameter of 1.8mm and 2.2mm.

1. 서 론

서모사이폰이나 히트파이프는 작동유체의 상변화를 이용하여 작은 온도차이에서 매우 높은 열전달률을 가지도록 고안된 열전달 장치이기 때문에 현재 다양한 분야에서 응용되고 있다. 대표적인 예로 노트북 컴퓨터는 내부공간이 매우 협소하여 공기순환을 위한 팬을 설치할 수 없기 때문에 직경이 매우 작은 미세 서모사이폰을 많이 사용하게 되었다. 이런 미세 서모사이폰의 성능에 영향을 미치는 주요변수는 작동유체의 종류, 응축부 길이에 대한 증발부 길이의 비, 충전율, 내부 작동 온도(saturation vapor temperature)등이다. 이때 충전율은 서모사이폰의 내부 총 체적에 대한 작동유체의 체적의 비이다[1].

러시아인 Sterltosov는 서모사이폰의 작동유체량

에 대해서 다음과 같은 결과를 제시하였다. 최적의 열전달 과정은 증발부에서 막 증발(film evaporation)만 있고 풀(pool) 비등이 없을 때이다. 따라서, Nusselt 막상 응축이론은 증발부뿐만 아니라 응축부에도 사용 될 수 있다. 그러므로 적정 충전량은 벽면을 충분히 적신 상태이며 이 경우 열저항은 최소가 된다. 길이 1m, 내경 21mm인 서모사이폰에 작동유체의 온도 200℃에서 1kw의 열유속을 공급하였을 때 Sterltsov에 의한 이론적 충전량은 1.5mm이며 이것은 내부 총체적에 0.4%이다. 이러한 결과는 실험적으로 규정량보다 적다[2].

서모사이폰의 충전량에 대한 실험적 결과를 설명하기 위한 이상유동양식에 대한 조사가 이루어진 것으로 Chen과 Veziroglu는 직경 42mm와 64mm인 유리관과 물을 작동 유체로 실험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다[3]. 작동 유체량이 내부총체적의 5%이하 일 경우 증발부의 매끄러운 막이 생성되나 이때 막은 벽과 막(film)의 고착과 막의 표면장력에 의해 균일하지 않게 된다. 따라서 수직 서모사이폰은 증발부에서 dry out 현상이 나타난다. 또한, 충전량이 55%인 경우 내부 유동

* 울산대원

** 울산대원

*** 울산대 기계공학부

은 내경에 따라 슬러유동(slug flow)과 이상 비동 유동(two phase bubble flow)의 2가지 유동을 나타낸다. 이러한 유동은 작동유체의 과다 팽창으로 응축부의 열전달 계수의 저하를 가져온다. 한편, 적정 충전량인 13.8~18%에서는 증발부의 안정적인 슬러유동 및 이상 비동유동 과 함께 응축부의 균일한 막응축으로 내부 열저항은 최소가 된다. 이러한 유동은 서모사이폰에서 가장 안정적인 유동이며 온도 측정시 응축부의 온도도 균일한 값을 가진다.

한편 Lei와 Ziangshun은 일반적인 서모사이폰의 적정 충전량은 경험적으로 내부 총 체적에 22~30%로 권장하고 있다[4].

일반 서모사이폰과 달리 좁은 공간에 설치되는 서모사이폰은 직경이 작으면서 길이는 상대적으로 매우 긴 형태를 취하게 된다. 따라서, 관의 내경이 매우 작은 관계로 수직상태에서 중력이 작용하고 있는 환경에서도 서모사이폰의 관 내부에서 응축된 작동유체는 모세관현상에 의하여 아래에 위치한 증발부로 잘 돌아오지 않는 단점이 있다. 따라서, 작동유체의 유동과 충전량이 일반적인 서모사이폰과 현저히 다를 수 있다.

본 연구에서는 내경의 감소에 따른 작동유체의 유동특성과 적당한 충전량을 파악하기 위해 투명한 유리관에 아세톤을 작동유체로 하는 미세 서모사이폰을 제작하여 응축부 온도측정과 육안에 의한 유동관찰을 통하여 알아보려 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig.1은 실험에 사용된 미세 서모사이폰을 나타낸 것으로 각각의 내경이 5mm, 3.3mm, 2.2mm 와 1.8mm 인 유리관에 여러 분량의 아세톤을 주입하여 서모사이폰을 제작하였고, 40℃~ 95℃ 가열온도 범위에서 유동을 관찰하여 최적의 작동유체량과 임계반지름을 구하는 실험을 하였다. 작동유체량을 달리하기 위하여 응축부 끝 부분에 주입구를 장착하였으며 길이는 30cm로 동일하다.

Fig.2와 같이 직경이 15cm 길이가 25cm 인 실린더형 가열장치의 상부에 유리관을 장착할 수 있도록 3개의 너트를 설치하였다. 가열장치는 항온조(MRC-1131D)와 연결되어 일정한 온도의 물이 항온조와 가열장치를 순환하면서 가열장치의 온도를 일정하게 유지하였으며 실린더형 가열장

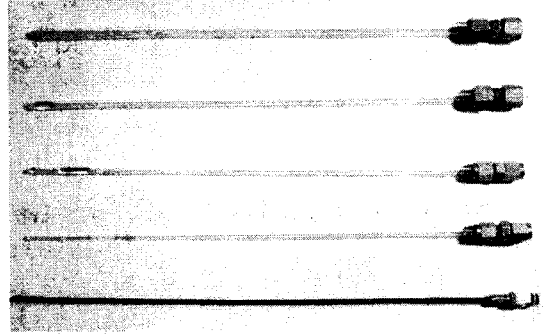


Fig.1 Photography of miniature thermosyphons

치 내부에 열전대(TC1)를 장착하여 물의 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 유리관의 가열길이는 5cm로 하고 응축부의 온도는 가열장치 상단에서 3cm (TC2), 응축부 중간(TC3)과 끝부분(TC4)에 열전대(크로멜-알루멜)를 설치하였다.

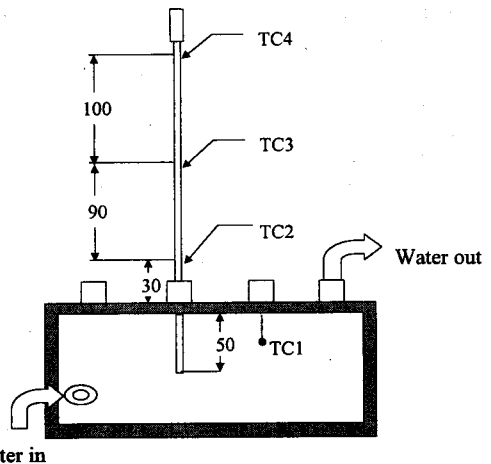


Fig.2 Locations of thermocouples on the surface of the thermosyphon

Fig.3과 같이 실험장치를 설치하고 각각의 열전대는 데이터 로거 (HP-Data Acquisition System)에 연결되어 있으며 이 데이터 획득장치는 HP-IB 선을 통해 컴퓨터에 연결되어 있어 온도변화를 기록하도록 하였다. 내부유동관찰을 위해 비디오 카메라로 기록하고 모니터를 통해 볼 수 있도록 하였으며 작동 유체량은 천칭($\pm 0.0001g$)을 사용하여 액체 주입 전 유리관의 무게를 측정하고 주입 후 무게와의 차로 액체량을 기록하였다. 증발부 가열온도를 40℃, 50℃, 60℃, 70℃, 80℃, 90℃와 95℃로 단계적으로 가열하면서 각각의 가

열온도에서 10분 동안 응축부의 온도 변화를 측정하였다. Fig.4는 실험장치의 실제 모습이다.

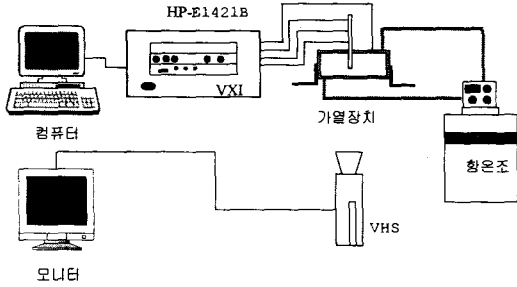


Fig.3 Schematic of a experiment setup

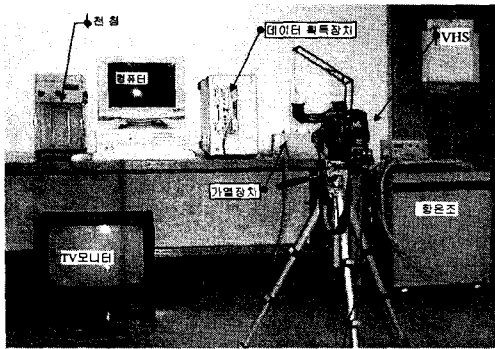


Fig.4 Photography of the experiment setup

3. 결과 및 고찰

내경이 5mm, 3.3mm, 2.2mm, 1.8mm, 구리선1개 삽입한 1.8mm 유리관에 작동유체의 양과 가열온도의 변화에 따른 실험을 하여 응축부의 온도변화와 내부유동을 관찰하였다. 응축부는 자연대류에 의하여 냉각되고, 이 때 주위 온도를 26℃ ~ 28℃로 유지하기 위해 실험 시작과 함께 주위 온도를 계속 측정하였다.

3.1 내경 5mm인 유리관 서모사이폰

Table 1은 작동유체의 충전량이 서로 다른 유리관 서모사이폰에 대하여 증발부 가열온도를 처음 상온에서 95℃까지 단계적으로 증가시킬 때 가열온도가 95℃일 때 응축부의 평균온도를 나타낸 것이다. 충전률은 서모사이폰의 내부 체적에 대한 작동유체가 차지하는 체적의 비다. 액체량

Table 1 Experimental results for the heating temperature of 95℃ and inner diameter of 5mm

실험번호 변수	N1	N2	N3	N4	N5	N6
액체량(g)	0.7365	0.5959	0.5200	0.4399	0.3310	0.1687
충전률(%)	16.7	14.3	11.7	9.3	6.7	4.7
응축부 평균온도 (℃)	52	56	58	60	72	70
참고						95도에서 dry-out

의 감소에 따라 응축부의 온도는 증가하여 충전률이 6.7% 일 때 응축부 평균온도는 72℃로 가장 높게 나타났다. 충전률이 4.7% 일 때는 Table 1에 나타난 것과 같이 응축부의 온도는 더 이상 증가하지 않았다. 즉 작동유체량이 너무 적어서 증발부가 말라 버리는 dry-out 현상이 나타났다. 내경이 5mm인 경우에는 모세관 현상에 의하여 응축된 유체가 응축부에서 증발부로 돌아오지 않는 현상은 관찰되지 않았다.

Fig.5는 응축부의 온도가 가장 높은 경우인 충전률이 6.7%일 때 각각의 가열온도에서 응축부 끝단(TC4)의 온도변화를 10분 동안 측정한 결과이다. 그림의 수평축의 Δt 는 각각의 가열온도에 대하여 응축부 끝단의 온도증가가 심하지 않을 때부터 가열이 지속된 시간이다. 증발부의 가열온도가 증가함에 따라서 응축부의 온도도 증가하였으나 응축부의 온도 변화도 심하게 나타났다.

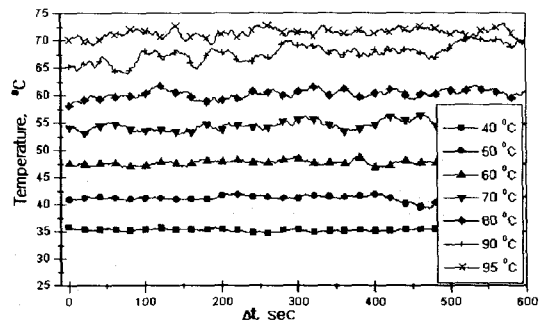


Fig.5 The variations of the condenser temperature for the various heating temperatures and the liquid charge of 6.7%

3.2 내경 3.3mm인 유리관 서모사이폰

Table 2 Experimental results for the heating temperature of 95°C and inner diameter of 3.3mm

실험번호 변수	N1	N2	N3	N4	N5
액체량 (g)	0.3448	0.2893	0.2372	0.1676	0.1122
충전율 (%)	16.7	13.3	10	6.7	4
응축부 평균온도 (°C)	49.5	57.3	60.6	69.45	54.77
참고	80도에서 dry-out

Table 2는 가열온도 95°C에서 액체량의 변화에 따른 응축부의 평균온도를 나타내었다. 전체적으로 액체 충전량이 감소함에 따라 응축부의 온도가 증가하는 경향은 내경 5mm와 유사하나 충전률이 4%인 경우에는 증발부에서 dry out이 발생하여 응축부의 온도가 감소하는 현상이 나타났다.

Fig.6은 액체 충전률이 6.7%일 때 각각의 가열온도에서 응축부의 온도 변화를 나타내고 있다. 가열온도가 80°C 이상에서 응축부의 온도 분포는 매우 변화가 심하게 나타났다. 이것은 비등시 작동유체의 기포가 균등한 크기로 일정하게 증발하지 않기 때문이다. Fig. 7과 같이 액체가 환상형 액체막을 형성하고 중앙부분에 기체가 들어있는 형태로 마치 기체가 액체 캡슐 속에 들어있는 모습이다. 따라서 비등이 잠깐 일어난 후 증발부의 dry out에 의하여 열전달이 멈추게되어 응축부의 온도가 감소하면 기체와 함께 밀려 올라온 액체가 다시 증발부로 내려간 후 다시 비등이 일어

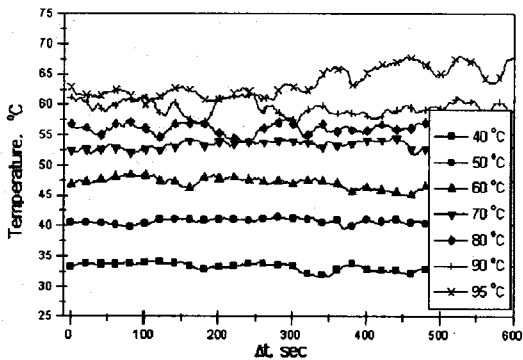


Fig.6 The variations of the condenser temperature for the various heating temperatures and the liquid charge of 6.7%

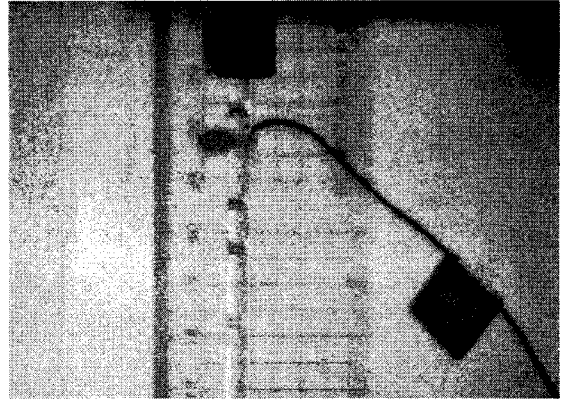


Fig.7 Photography of the flow pattern for the thermosyphon of 3.3mm inner diameter

나는 불안정한 현상이 반복되므로 응축부에서 일정한 온도를 유지하지 못하고 심한 온도 변화를 일으킨다.

3.3 내경 2.2mm인 유리관 서모사이폰

Table 3 Experimental results for the heating temperature of 95°C and inner diameter of 2.2mm

실험번호 변수	N1	N2	N3	N4	N5
액체량 (g)	0.1717	0.1441	0.1050	0.0637	0.0461
충전율 (%)	17.7	13	10.3	7.6	4.3
응축부 평균온도 (°C)	47.27	33.5	59.48	38.72	33.97
참고	.	90도에서 dry-out	.	80도에서 dry-out	60~70도 가열시 dry-out

Table 3은 내경이 2.2mm인 유리관 서모사이폰에 대하여 가열온도 95°C에서 액체량의 변화에 따른 응축부의 평균온도를 나타낸 것이다. 충전률 10.3%일 경우 응축부의 평균온도가 가장 높게 나타났다. 충전률이 17.7%인 경우에는 작동유체가 너무 많이 있어 서모사이폰이 잘 작동되지 않았다. 충전률이 13%인 경우에는 Fig. 8과 같이 가열온도 80°C까지는 응축부의 온도가 약간의 변화는 있으나 일정한 온도를 유지하고 있음을 알 수 있다. 그러나 가열온도 90°C에서는 응축부 온도의 급상승 후 온도 저하가 나타났다. 이 때는

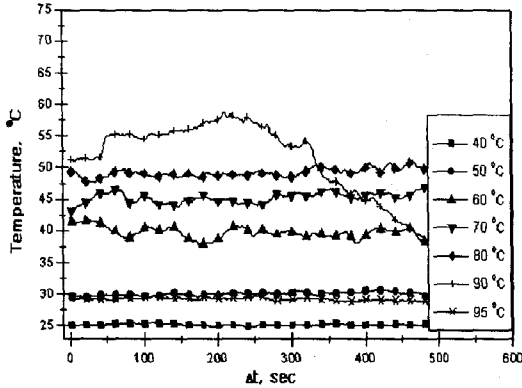


Fig.8 The variations of the condenser temperature for various heating temperatures and the liquid charge of 13%

순간적인 비동에 의해 다량의 액체가 일시에 상승하여 유리관의 상단에서 정체되어 내려오지 않는 현상이 Fig. 9와 같이 관측되었다. 따라서 작동유체가 증발부에 공급되지 않기 때문에 응축부의 온도가 내려갔다. 그 이후 가열온도를 95°C 까지 증가 시켰으나 응축부의 온도는 서서히 감소하여 30°C 부근을 유지하고 상단의 정체 액체는 응축부 온도의 하강과 함께 액주의 형태를 유지한 채 조금씩 아래로 이동 중간지점에서 머물러 있는 것을 관찰 할 수 있었다. 따라서 내경이 2.2mm인 경우는 서모사이폰의 작동이 매우 불안한 상태이다.

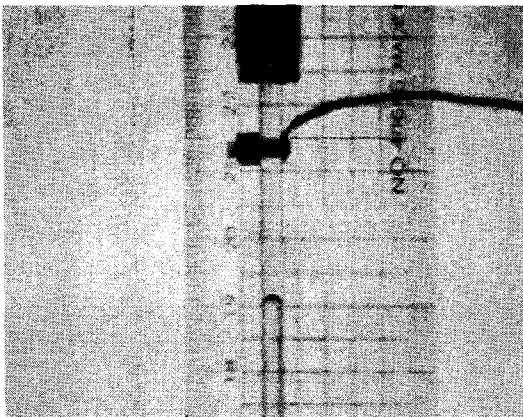


Fig.9 Photography of the flow motion for the thermosiphon of 2.2mm inner diameter

3.4 내경 1.8mm인 유리관 서모사이폰

Table 4 Experimental results for the heating temperature of 95°C and inner diameter of 1.8mm

실험번호 변수	N1	N2	N3	N4	N5
액체량(g)	0.1155	0.0829	0.053	0.0392	0.0242
충전률(%)	16.7	14	10.7	6.7	3.3
응축부 평균 온도 (°C)	33.28	68.7	67.1	57.3	38.4
참고	90도에서 dry-out			80도에서 dry-out	50도에서 dry-out

Table 4는 가열온도 95°C에서 액체량의 변화에 따른 응축부 평균온도를 나타낸 것으로서 충전률이 16.7%에서는 가열온도 70°C이하에서는 응축부 온도가 거의 변화가 없으며 가열온도가 70°C~80°C에서는 증가하며 가열온도가 90°C~95°C에서는 응축된 액체가 관의 상단에 정체하여 서모사이폰이 작동하지 않아서 온도가 감소하였다. Fig. 10에서 이 경우의 온도 분포를 알 수 있다. 충전률이 14%인 경우에는 성능은 많이 향상되었으나 응축부의 온도 변화가 심하게 일어났고 충전률이 10.7%인 경우에 가장 안정된 작동상태를 나타냈다. 충전률이 6.7%와 3.3%인 경우에는 dry-out이 발생하였으며, 특히 충전률이 3.3%인 경우에는 서모사이폰이 작동되지 않았다.

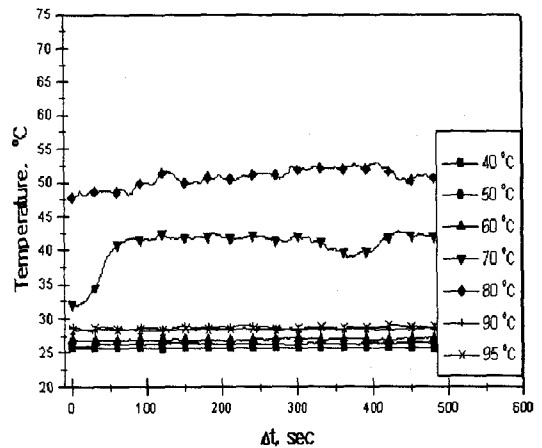


Fig.10 The variations of the condenser temperature for various heating temperatures and the liquid charge of 16.7%

3.5 내경 1.8mm인 유리관에 구리선 삽입

Table 5 Experimental results for the heating temperature of 95°C and with inserting copper wire

실험번호 변수	N1	N2	N3	N4	N5
액체량(g)	0.1042	0.0721	0.0506	0.0387	0.0238
충전률(%)	17.3	14	10	6.7	3.3
응축부 평균 온도 (°C)	70.2	68.1	61.5	49.5	40.34
참고				70도 dry-out	50도 dry-out

내경이 작은 1.8mm인 유리관에 직경 0.05mm인 가는 구리선 0.3m을 관에 삽입하고 실험한 결과 가열온도 95°C에서 액체량의 변화에 따른 응축부의 평균온도를 Table 5에 나타냈다. 구리선을 삽입한 결과 액체가 관의 상부에 정체하는 현상은 나타나지 않았으며 충전률이 10% ~ 17.3% 경우에는 서모사이폰이 잘 작동하였다. Fig. 11은 충전률이 14%인 경우의 온도 분포를 나타내고 있다. 충전률이 3.3%와 6.7%인 경우에는 dry-out이 발생하였다.

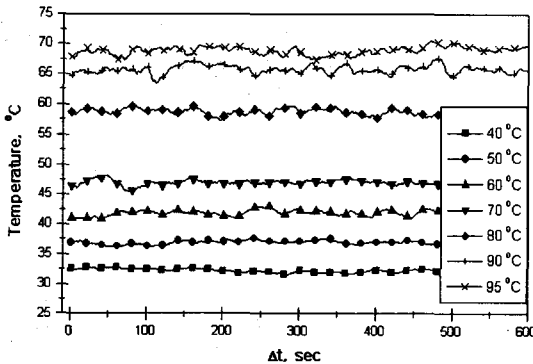


Fig.11 The variations of the condenser temperature for various heating temperatures and the liquid charge of. 14%

4. 결론

이상의 5가지 실험결과에 대해서 살펴보면 모든 내경에서 비등 후 응축부 온도의 급상승을 관찰할 수 있다. 이는 비등 후 내부 열유속의 증가로 인한 결과이며 각 각의 내경에 대해 최적의 작동유체량이 존재함을 알 수 있다. 또한 액체량

이 부족할 경우 증발부의 dry-out으로 관 내부는 작동유체의 기체상만 있게 되어 더 이상의 온도 상승 효과는 없게 된다.

내경 2.2mm이하에서는 비등 후 응축부 온도의 급상승이 있었으나 중력이 작용하고 있는 상태에서도 모세관 현상에 의해 응축액이 상단에서 정체하고 있어 응축부 온도의 하강을 유발한다.

모세관현상에 의한 작동유체의 상단 정체 현상을 방지하기 위해 열전도성이 우수한 구리선을 삽입한 결과 액체량이 적당한 경우 낮은 온도에서 비등효과와 작동유체의 원활한 순환을 도와 낮은 가열온도에서 고온의 가열 온도까지 응축부 온도의 양호한 응답성을 얻는다.

참고문헌

- (1) 신동렬, 노승탁, "히트 파이프의 성능에 관한 해석 및 실험적 연구" 공기조화 냉동공학 1권 4호 1989
- (2) Streltsov, A.I, Izv Vuzov. Energetika No. 12, 1973
- (3) Chen and Veziroglu, Two-Phase Flow and Heat Transfer, First Edition, 1985. pp.395-405.
- (4) Lei and Ziangshun, Heat pipe in space heating and ventilation, Chinese Scientific Civil Engineering publishing House, 1981