

밀폐형 2상 열사이폰의 열전달 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics of Two-phase closed Thermosyphon

조기현*, 백 이**, 정형길***

Ki-Hyun Cho*, Yee-Paek**, Hyung-Kil Chung***

<Abstract>

The thermosyphon has been used as a heat transmission device in the heat recovery of low level energy and cooling for heat generating equipments. Many studies on the working fluids and wicks have been reported to improve the heat transfer efficiency of the thermosyphon. A low temperature heat pipe with acetone is chosen in the present study to compare the heat transfer characteristics due to pouring amount of working fluid, magnitude of power supplied and tilt angles. The thermosyphon made $\varnothing 15.88 \times 0.8t \times 600\text{mm}$ of copper, evaporation section 200mm, insulation section 25mm, condensation 375mm. Heat transfer rate of the thermosyphon increase as magnitude of power supplied increase and observe dry out phenomenon at 5~10% of pouring amount of working fluid. So thermosyphon at the 150kJ/s judged to need 12% or more. Heat transfer rate of the thermosyphon have nothing to do with tilt angles. Dry out phenomenon of the thermo syphon makes it possible that a low temperature thermosyphon may be used to control temperature and heat transfer of a system when the critical quantity of a working fluid is supplied in the thermosyphon.

key words : *Thermosyphon, Container, Wick, Working fluid, Dry out, Heat recovery*

I. 서론

최근 산업의 고도화에 따라 열에너지의 효율적인 이용방법에 대한 중요성이 크게 나타나고 있는 바, 기존의 난방기 및 열풍기를 주로 사용하여 왔으며, 그 결과 유류의 사용량이 크게 증대되어 투입된 에너지가 증가되었다. 그러므로 구조상으로는 간단한 구조를 가지며 탁월한 열 수송능력을 발휘

할 수 있는 난방장치의 개발을 필요로 하고 있다. 이 목적에 적합한 것으로 구조가 간단하고 적용범위가 넓으며 열 수송이 매우 우수한 열사이폰을 이용한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이에 관한 열사이폰의 원리는 일정한 진공도를 유지한 밀폐된 용기내에 비교적 휘발성이 높은 상변화 물질을 충전시킨 구조로 되어있다. 열사이폰이 열원으로 부터 증발부에 열을 받으면 작동유체가

* 경도대학 차량기계학과 교수

** 농업기계화연구소 연구원

*** 경상대학교 대학원 박사과정

증발되면서 열사이폰 내의 증발부의 압력이 높아져 압력이 낮은 응축부로 이동하게 되고 이에 따라 작동유체는 증기의 형태로 증발잠열을 저온측으로 이동하게 된다. 저온측에 도달한 작동유체는 응축되면서 응축잠열을 방출하고 응축된 작동액은 다시 고온측으로 환원되는 작용을 반복 순환하게 된다. 즉 진공상태의 밀폐된 용기내에 적당량의 작동유체를 주입시켜 제작된 열 사이폰의 증발부를 고온의 열매체로 가열하면 내부의 작동유체는 증발, 기화되고 압력차에 의하여 응축부로 이동하게되며 이때 증기가 존재하는 응축부를 저온의 열매체로 냉각시키면 증기상태의 작동유체는 응축, 액화되며 잠열을 저온의 매체로 전달하고 다시 증발부로 귀환한다. 이와 같이 열 사이폰은 내부의 밀폐공간에서 순환하는 작동유체가 연속적으로 액체-증기간의 상변화를 수행할 때 동반하는 잠열(潛熱)을 이용하여 열을 이동시킴으로써 단일 상(Phase)의 작동유체를 이용하는 통상적인 열전달 기기에 비하여 매우 큰 열전달 성능을 발휘한다. 작동유체가 응축부로부터 증발부로 귀환하는 방법에는 모세관력과 중력을 이용한 방법이 있는데 전자를 히트파이프, 후자를 특히 열사이폰(Thermo-syphon)이라고 한다. 또한 열 사이폰은 열전달이 작동유체의 증발잠열에 의하여 전달되므로 거의 열저항이 무시되어 적은 온도차로 많은 열량을 전달시킬 수 있으며 무동력으로 고온측에서 저온측으로 열을 이동시킬 수 있는 장점이 있다. 특히 보일러 및 온풍기의 폐열은 배기가스 형태로 버려지는 것이 많으며 가스로부터 공기로의 열교환을 시키기 위해서는 전열면에 의한 열전달계수가 작기 때문에 전열면적을 크게 하여야 하는 단점이 있다. 이러한 가스-공기 열교환기에 열전달 소자로서 열 사이폰을 사용하면 가스 또는 공기를 양쪽 파이프 외부로 보낼 수 있으며 파이프 외부에 핀 등을 부착하여 전열면적을 증가시키기가 용이하므로 기존의 열교환기에 비하여 크기를 30%~50% 정도 소형화할 수 있는 장점이 있다.

히트파이프에 관한 연구는 Gaugler(1942)에 의하여 처음 제안된 이래 Grover(1964) 등이 기존의 이론 및 실험결과를 종합하여 보고하

로써 본격화 되었으며 Hwang-Bo와 Hilding(1972)은 모세관작용에 의한 최대 열전달율에 관한 연구를 발표하였고 Chi와 Abhat(1979)는 동관-물 히트파이프를 이용하여 심지의 구조와 작동유체 주입량에 관한 연구를 발표하였다. Feldman과 Munje(1979)는 흡의 유무와 경사각의 변화에 따른 열전달율과 열전달계수에 대하여 연구하였으며 조(1987)는 물과 에탄올을 이용한 히트파이프의 특성 및 최소 액체 주입량에 대하여 연구하였다. 이 등(1991)은 히트파이프의 열전달특성에 관하여 연구하였으며 장 등(1995)은 탄소강관-물 히트파이프의 열전달 특성에 관한 실험적 연구를 하였다.

그 중에서도 구조가 간단하면서도 열전달이 탁월한 열 사이폰을 이용한 난방시스템을 개발하기 위한 기초연구로서 작동유체는 아세톤, 메탄올, 에탄올, 증류수를 사용하였으며 용기는 작동유체와 상호 적합한 동관을 사용하여, 열사이폰의 성능에 영향을 끼치는 작동유체의 주입량, 가열량 및 경사각 등을 실험의 변수로 열전달 특성을 분석하여 난방시스템에 활용하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

(1) 실험 장치

실험장치의 구성은 상변화물질 주입장치, 열사이폰 본체, 열사이폰으로의 열공급 장치, 열사이폰으로부터의 방열장치, 데이터 수집부, 코일식 전기히터, 전압조정기, 전력량계, 경사각 조절장치, 열전대선 및 온도기록계로 구성되어 있다.

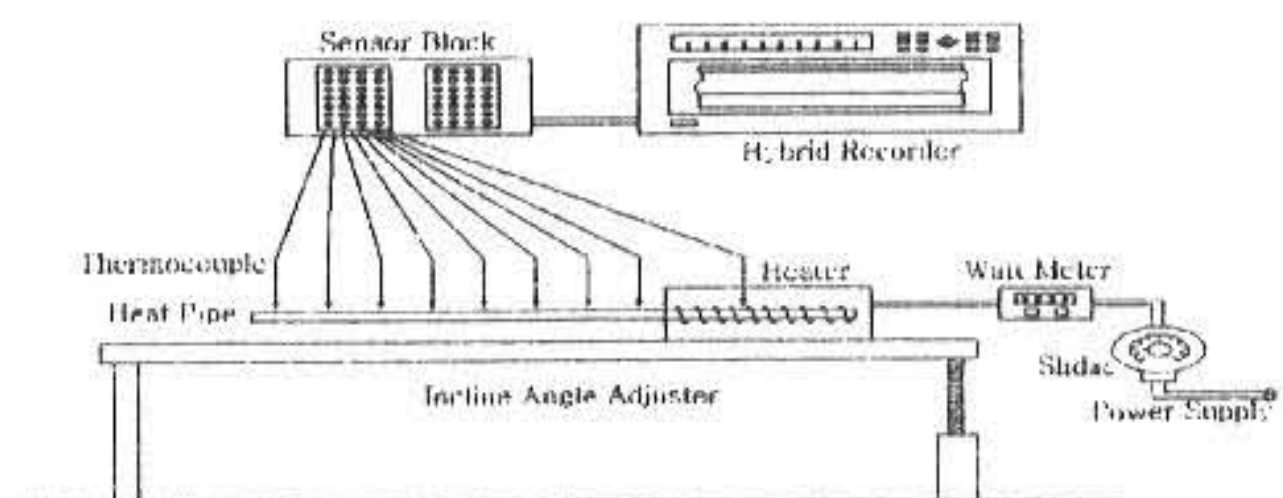


Fig. 1 Schematic diagram of the test equipment.

임의로 경사각을 조절할 수 있는 시험대 윗면에 열사이폰을 내부에 삽입할 수 있도록 제

작한 200(L)×100(W)×100(H)mm의 코일식 전기히터를 고정하고 전압조정기로 가열량을 조절할 수 있도록 하였으며 전력량을 측정하기 위하여 전력량계(HIOKI 3181-01, Japan)를 설치하였다. 그 개략도는 Fig.1과 같다.

열사이폰의 본체는 재료, 전열 특성을 고려하여 구리 파이프를 이용하여 상하단을 용접밀폐하여 구성하였고, 구리파이프는 열전도성이 다른 금속보다 양호하고 작동유체인 메탄올과 화학적인 반응을 일으키지 않아 실험의 안정을 지속할 수 있어서 본 실험에서 열사이폰의 재료로 사용을 하였다. 구리파이프의 설계는 실험의 안정성을 유지하지 위해서 참고문헌을 참고하여 내경 26.16mm, 두께 1.17mm, 길이 1500mm로 제작하였으며, 열사이폰의 주요사양을 Table1에 나타내었다.

구성과정에서 가장 주의를 요하는 것은 열사이폰 내부를 진공화시키는 것인데 진공펌프를 10분 이상을 가동시켜서 절대 압력 5×10^{-6} Torr 정도의 진공상태로 하였으며 진공도를 확인하기 위해서 계획된 실험을 수행하기 전에 3일간을 실험을 하지 않은 상태에서 보존 후 진공도를 확인한 후 계획된 실험을 수행하였다. 작동유체의 주입량은 문헌에 의하면 열사이폰 총체적의 10%가 바람직하다고 하였으므로 본 실험에서도 작동유체의 주입량은 열사이폰 총체적의 5%, 7.5% 10% 12.5% 15%로 주입하여 실험을 수행하였다. 작동유체의 주입은 용기에 뷰렛을 이용하여 정확한 양으로 정한 후 진공 밸브를 통해서 열사이폰 내부로 주입하였다.

열사이폰으로의 열공급은 열사이폰 하단부에서 열저항밴드를 부착해서 100,150,200,250,300,350W의 6수준으로 입력하였고, 열입력량은 자동전압 조정기를 통해서 조절하였으며 자동전압조정기로부터 각 수준마다 출력되는 전압은 다시 디지털 전압측정기를 통해서 확인한 후 사용하였으며 열사이폰 응축부에 열량을 공급하는 써이즈히터와 열사이폰과의 열접촉효과를 높이기 위해서 전열테이프로 감은다음 최종적으로 단열재로 증발부를 단열시켰다. 열사이폰의 중간 위치인 단열부에서는 열전대를 용접을하여 설치한 후 단열재로 단열을 시켰다. 응축부에서의 열방출방법으로서의 냉각방식은 수

냉식이고 일정온도의 물을 펌프에 의해 열사이폰의 응축부를 통과하도록하였으며, 냉각수의 입구, 출구온도 및 유량을 계측하여 열사이폰의 열수송량인 방열량을 계산하였다. 유량계는 정확한 메스실린더를 이용, 일정기간 공급된 양을 측정, 계산하여 측도 설정의 정확성을 확인한 다음 사용하였다. 열사이폰으로부터 주위로의 열손실을 막기 위해 단열재로 실험장치 본체를 전체적으로 확인 단열하였다.

Table 1. Specification of heat pipe used for heat transfer experiment

Items	Specification
Size(O.D×t×L)	Ø15.88 × 0.8 × 600mm
Material	Copper
Degree of vacuum	1.4×10^{-4} kgf/cm ² (1×10^{-4} torr)
Working fluid	water,acetone,ethanol, methanol
Wick or Groove existence	No(thermosyphon)
Pouring ratio of working fluid	5, 7.5, 10, 12.5, 15 %

(2) 실험방법

본 실험에서 열사이폰 자체의 온도계측을 위해 K형 열전대를 열사이폰 벽면에 9점을 설치하였던 바 그것은 증발부와 단열부에 각각 3점, 응축부 3점으로 구성된다, 그리고 외기온도를 측정하기 위해 외부에 1점을 설치하였고 열사이폰 방열특성을 알아보기 위해 냉각수 입구와 출구에 각각 1점을 설치하였다, 온도의 기록은 다점자동온도기록계를 이용해서 기록하였고, 또한 열전대의 출력전압은 다점자동온도기록계에서 온도데이터로 변환하여 기록시킴과 동시에 개인용 컴퓨터가 정상적으로 작동되고 있는지를 점검한 후에 열입력을 시작함과 동시에 온도계측을 수행하였다.

그리고 한 수준의 실험이 끝나면 다른 열사이폰의 열전달특성을 알아보기 위해 다시 열사이폰을 진공시켜 작동유체를 주입하고 열입력량을 변화하여 반복실험을 수행하였으며, 데이터를 수집하는 시간은 1분간격으로 1시간씩 수

행하였다.

실험에 사용된 계측기 및 주변기기의 사양은 Table 2.와 같다.

Table.2 Specifications of measuring apparatus

작동유체	융점	비점	사용온도범위	온도영역
Helium	-272	-269	-272~-269	극저온
Nitrogen	-210	-196	-203~-160	극저온
Ammonia	-78	-33	-60~100	상온
Freon 11	-111	24	-40~120	상온
Pentain	-130	28	-20~120	상온
Freon 113	-35	48	-10~100	상온
Acetone	-95	57	0~120	상온
Methanol	-98	64	10~130	상온
Flutec pp2	-50	76	10~160	상온
Ethanol	-112	78	0~130	상온
Hepthane	-90	98	0~150	상온
Water	0	100	30~200	상온
Toluene	-95	110	50~200	상온
Flutec pp9	-70	160	0~225	상온
Thermex	12	257	150~395	고온
Mercury	-39	361	250~650	고온
Cesium	29	670	450~900	고온
Potassium	62	774	500~1000	고온
Sodium	98	892	600~1200	고온
Lithium	179	1340	1000~1800	고온
Silver	960	2212	1800~2300	고온

Table 3. Properties of working fluids(℃)

Items	Specifications
Hybrid temperature recorder	Type : RD-3500(San-ei) Thermocouple :R, S, B, K, E, T, J(JIS)type Channel Numbers : 40 Channels
Personal computer	Type : 486DX 2-66 Ram : 4M Hard disk : 420M
Pressure gauge	Type : A(Konics) Diameter : 60mm Range : 0~101.33(kPa)
Water metering gauge	Mass clinder

또한, 작동유체를 주입하기 전에 파이프내의 불응축 가스 및 공기 등을 제거하기 위하여 진공펌프를 사용했다.

경사진 열사이폰 작동유체의 최소질량은 다음의 Larkin(1982) 실험식에 의해 계산하였으며 일반적인 스크린형이나 환상형 히트파이프 응용에서 주입량은 사용조건에 따라 한계유량 보다 과충진을 하여 사용한다는 이론(Chi 등 1979)에 따라 작동유체 주입량을 용기 내부용적의 5~15%까지 5수준으로 변화하여 주입하였다.

$$m_{st} = m_{ft} + m_{sc} + m_{sa} + m_{se}$$

$$m_{ft} = \left(\frac{\mu_l \rho_l P_t D^2}{g \lambda} \right)^{1/2} (2.47 (L_c + L_e) + 3.094 L_a)$$

$$m_{sc} = \frac{14}{15} \rho_l \sqrt{D} \left(\frac{105}{32} \cdot \frac{\mu_l C_i}{\sqrt{D} \rho_l^2 g \sin \theta} \right)^{3/7} L_c^{10/7}$$

$$m_{sa} = \rho_l L_a A_{sa}$$

$$m_{se} = \frac{14}{15} \rho_l \sqrt{D} \left(\frac{105}{32} \cdot \frac{\mu_l C_i}{\sqrt{D} \rho_l^2 g \sin \theta} \right)^{3/7} L_e^{10/7}$$

여기서,

m_{ft} : 관내 액체막의 질량 (kg)

m_{sc} : 응축부 액체의 질량 (kg)

m_{sa} : 단열부 액체의 질량 (kg)

m_{se} : 증발부 액체의 질량 (kg)

μ_l : 액체 상태의 점도 (kg/s · m)

ρ_l : 액체 상태의 밀도 (kg/m³)

P_t : 총 열전달량 (W)

D : 관 지름 (m)

λ : 증발잠열 (kJ/kg)

L_c : 응축부 길이 (m)

L_a : 단열부 길이 (m)

L_e : 증발부 길이 (m)

C_i : 단위 길이당 유량의 증분

A_{sa} : 단열부 단면적 (m²)

일반적인 작동유체의 물리적 성질은 Table 3과 같다.

3. 결과 및 고찰

(1) 작동유체에 따른 히트파이프 표면온도

열교환 소자로 사용할 열사이폰의 작동유체를 선정하기 위하여 증류수, 아세톤, 에탄올 및 메탄올을 작동유체로 하여 가열량별로 예비시험을 실시한 결과, Fig.2에서 보는바와 같이 에탄올 및 메탄올을 주입한 열사이폰은 가열량이 50, 100, 150kJ/sec일 때 열원으로부터 멀어질수록 응축부 표면온도가 불균일 하게 나타나 작동유체로는 부적합한 것으로 나타났으며 아세톤 및 증류수를 주입한 열사이폰은 균일하게 나타났으나 아세톤을 주입한 열사이폰이 증류수를 주입한 것에 비하여 표면온도가 약 10~20℃ 높게 나타나 열회수장치에 사용할 열사이폰의 작동유체로 아세톤이 적합하다고 판단되었다.

(2) 작동유체 주입량에 따른 가열량 및 설치 경사각별 표면온도

열사이폰 내부체적의 5~15% 5수준으로 작동유체를 주입하여 제작한 열사이폰을 경사각도 5~45° 4수준, 가열량 50~150kJ/sec 3수준으로 하여 시험한 결과를 Fig.3(a)~3(e)에 나타내었다.

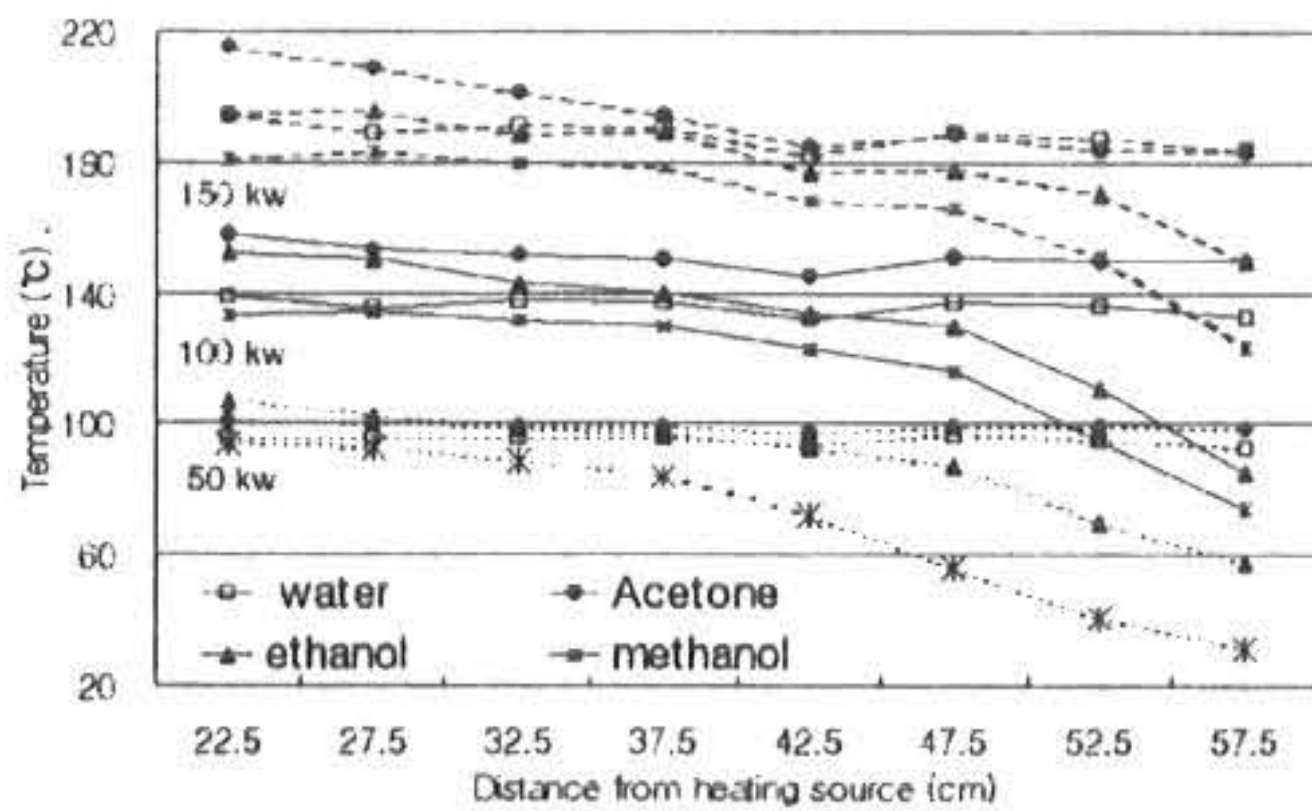


Fig. 2 Variation of heat pipe surface temperature with working fluid.

가열량을 50kJ/sec로 하였을 때 각 주입량별 열사이폰 응축부 표면온도는 약 100℃로 비교적 균일하게 나타났으며 100kJ/sec 일 때는 주입량 5%에서 약 150℃로 주입량 7.5~15% 일 때의 약 170℃에 비하여 20℃ 정도 낮게 나타났다. 또한, 가열량 150kJ/sec에서는 주입량이 5~10% 일 때 응축부 표면온도가 불균일하게

나타나 열사이폰으로서의 작동을 하지 못하는 것으로 나타났으며 주입량 12.5~15%에서는 약 220℃로 균일하게 나타났다.

이 시험결과 가열량이 50~150kJ/sec로 상승함에 따라 주입량이 5, 7.5, 10%인 열사이폰은 주입량이 부족하여 드라이아웃 현상이 발생하고 이로 인해 열사이폰으로서의 성능발휘를 못하는 것으로 나타났으며 작동유체 주입량 12.5, 15%에서는 좋은 성능을 발휘하는 것으로 나타나 열사이폰의 최소 주입량은 12.5% 이상이 되어야 한다고 판단되었다.

또한, 각 주입량 하에서 설치 경사각에 따른 영향은 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

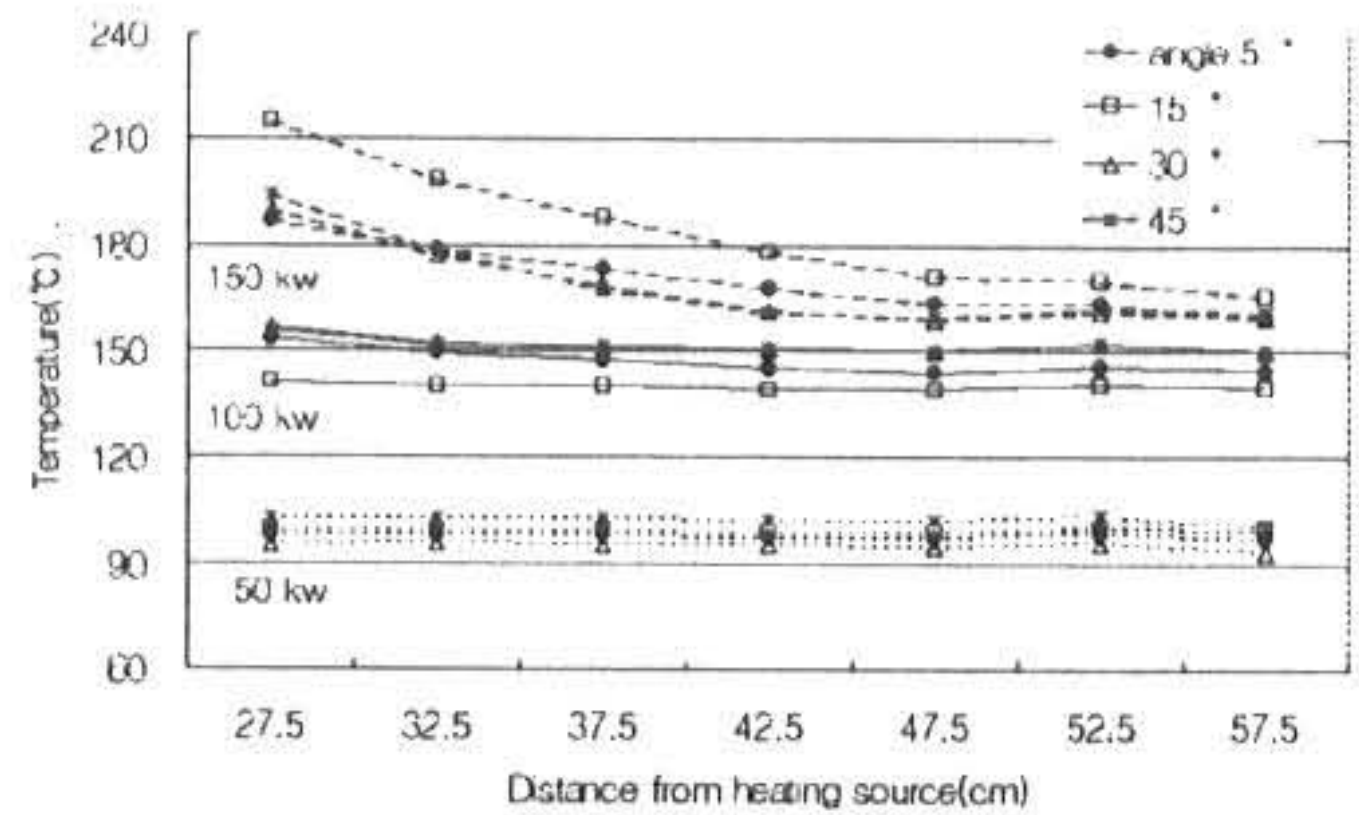


Fig. 3(a) Variation of heat pipe surface temperature with incline angle (5% of working fluid).

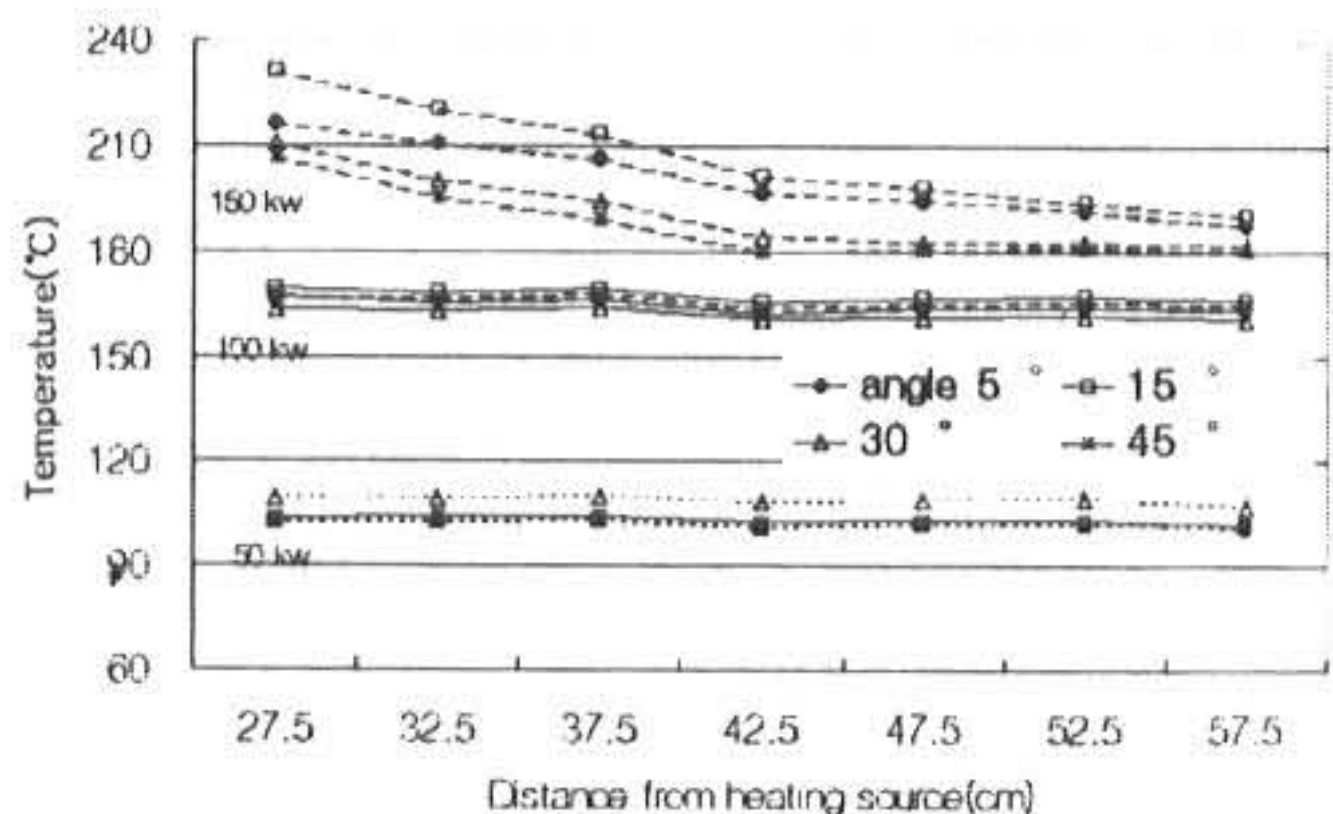


Fig. 3(b) Variation of heat pipe surface temperature with incline angle (7.5% of working fluid).

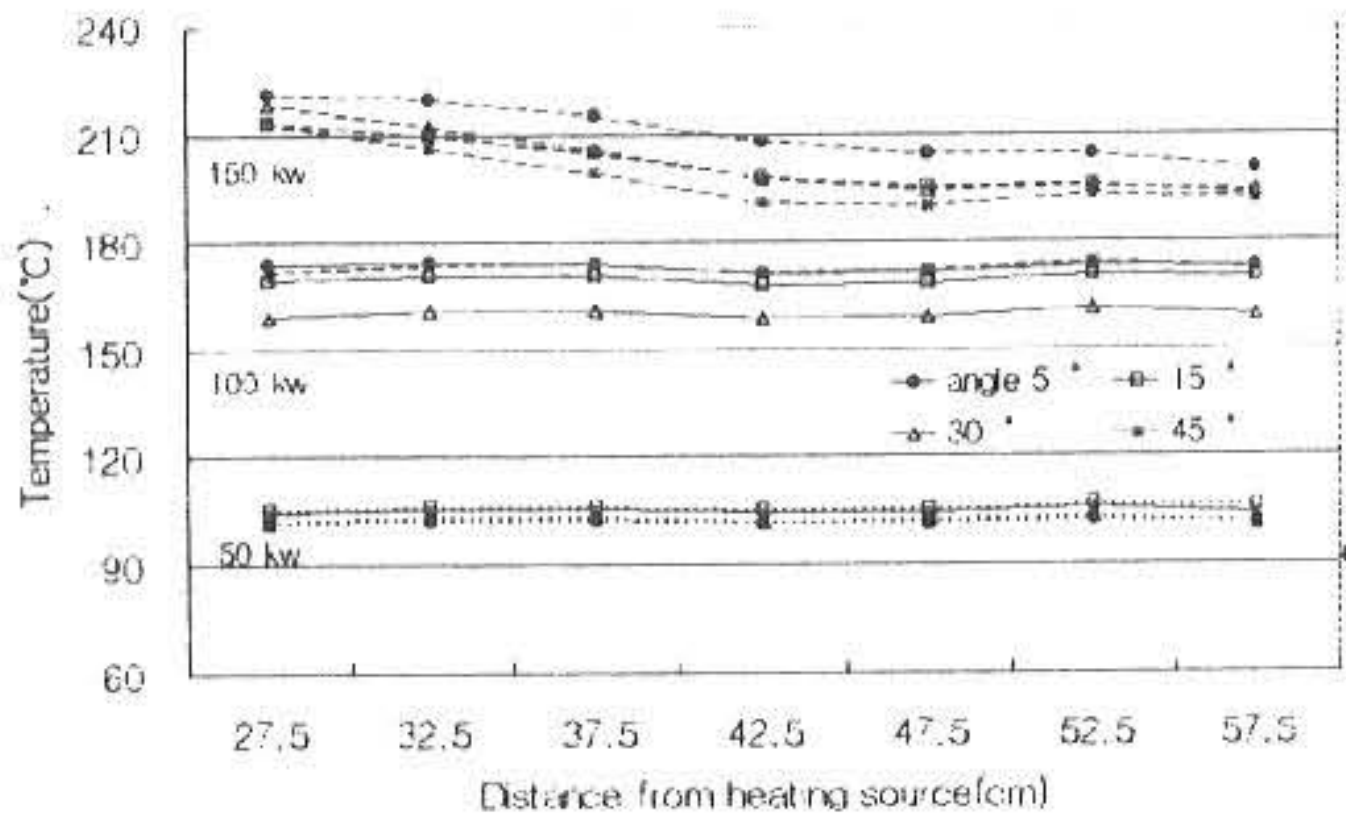


Fig. 3(c) Variation heat pipe surface temperature with incline angle (10% of working fluid).

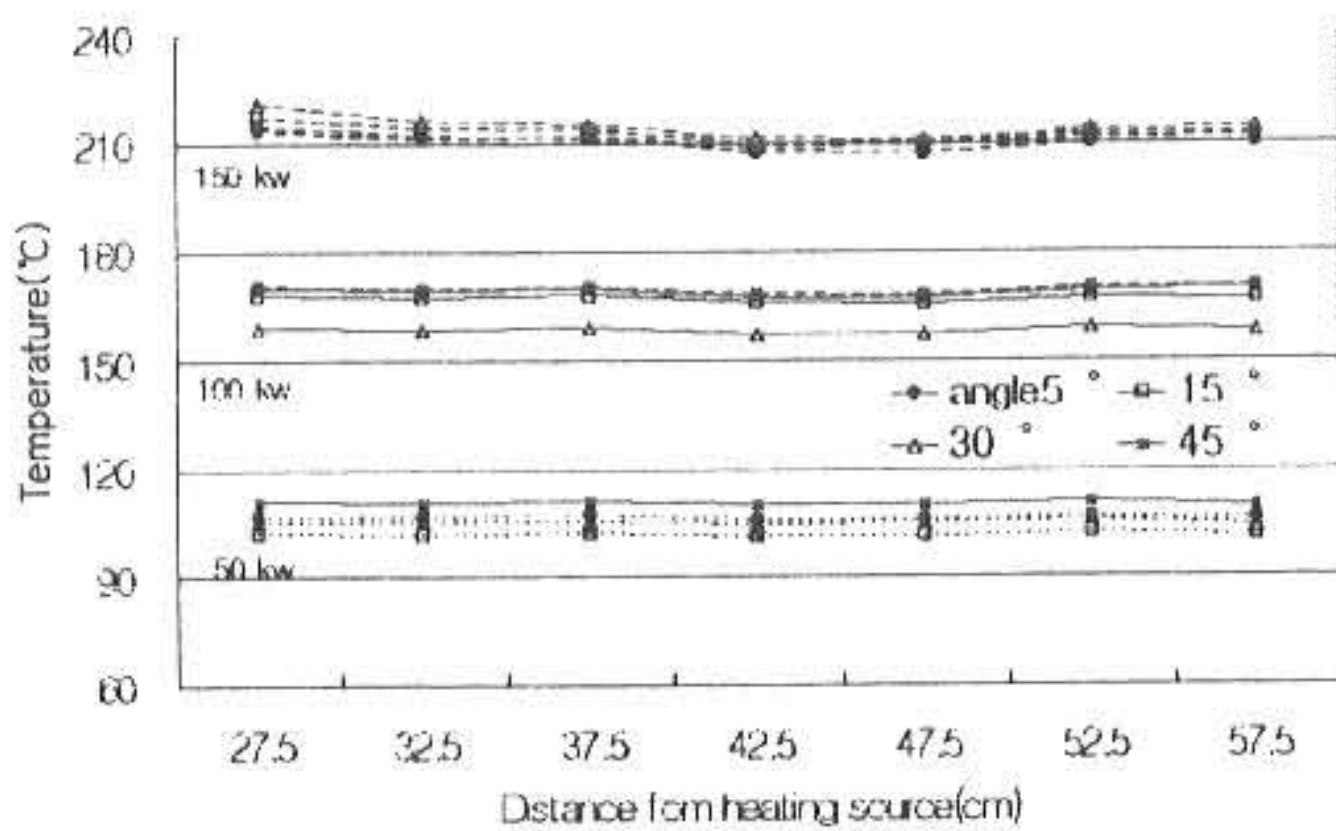


Fig. 3(d) Variation of heat pipe surface temperature with incline angle (12.5% of working fluid).

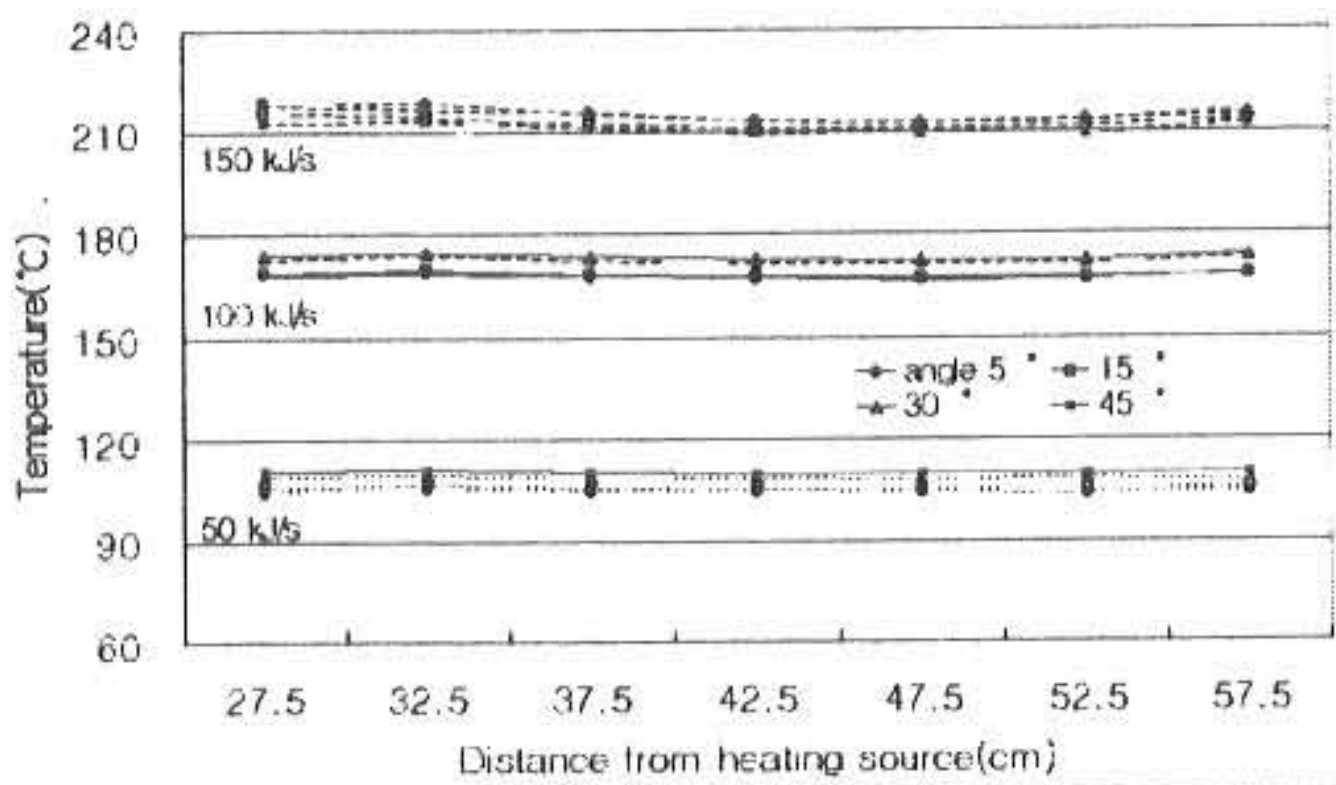


Fig. 3(e) Variation of heat pipe surface temperature with incline angle (15% of working fluid).

(3) 설치 경사각에 따른 가열량 및 주입량별 표면온도

열사이폰 설치 경사각에 따른 가열량 및 주입량별 표면온도를 Fig.4(a)~4(d)에 나타내었다. 가열량을 50kJ/sec로 하였을 때 설치 경사각 5~45°에서 열사이폰 응축부 표면온도는 약 100°C로 균일하게 나타났으며 100kJ/sec 일

때도 약 170°C로 비교적 균일하게 나타났다. 그러나 작동유체를 5% 주입한 열사이폰은 전 설치 경사각에서 표면온도가 약 150°C로 20°C 정도 낮게 관찰되었으며 이것은 가열량 100 kJ/sec에서 주입량 5%인 열사이폰에서 이미 작동유체 주입량 부족으로 인한 드라이아웃 현상이 일어나고 있다고 판단되었다. 설치 경사각의 증가와 관계없이 가열량 150kJ/sec 일 때는 작동유체 주입량 차에 의한 표면온도 차이가 확실하게 관찰되었으며 주입량 12.5, 15%에서는 거의 동일한 경향을 나타내었다. 또한 주입량이 5%에서 15%로 많아질수록 표면온도가 높고 균일하게 나타났으며 주입량 5~10%에서는 드라이아웃 현상으로 인해 표면온도가 불균일하게 나타나 열사이폰의 성능은 설치 경사각 보다 작동유체 주입량에 의하여 더 큰 영향을 받는다고 판단되었다.

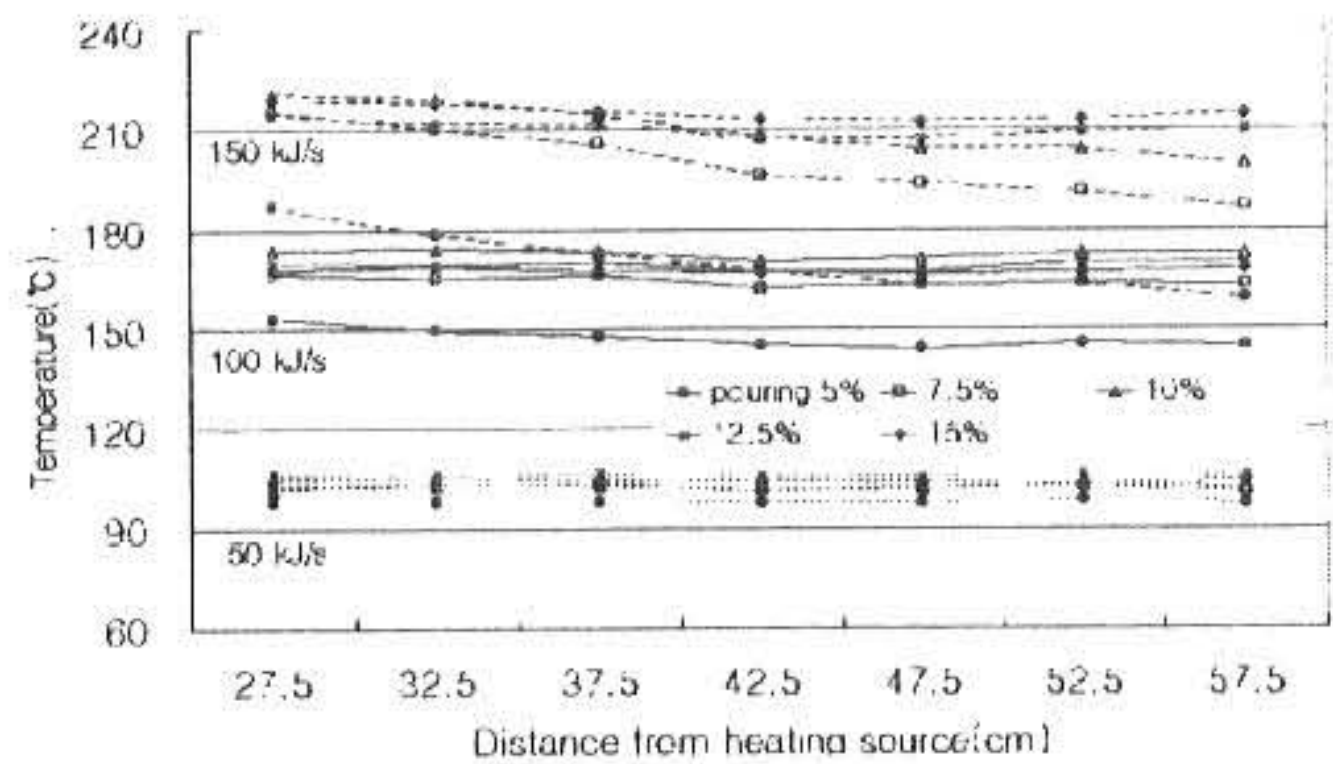


Fig. 4(a) Variation of heat pipe surface temperature with working fluid pouring amount (angle 5°).

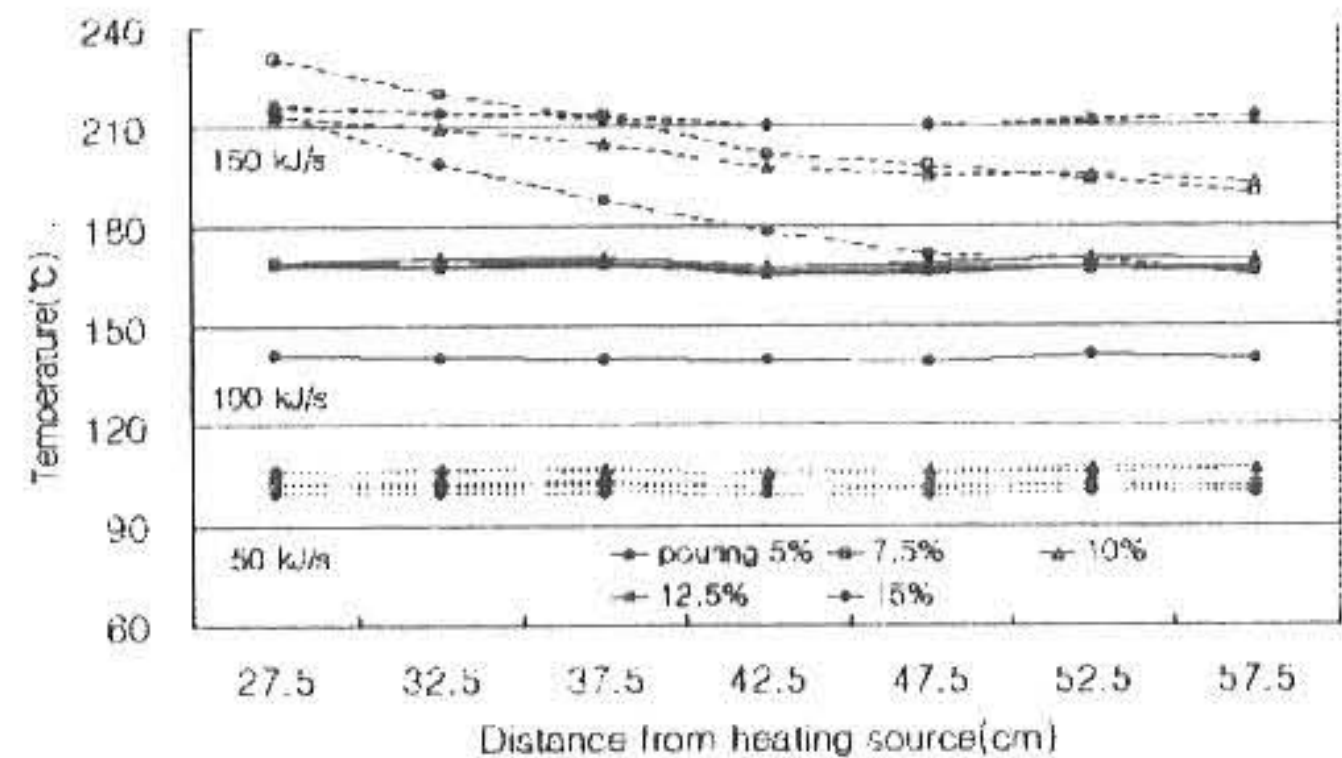


Fig. 4(b) Variation of heat pipe surface temperature with working fluid pouring amount (angle 15°).

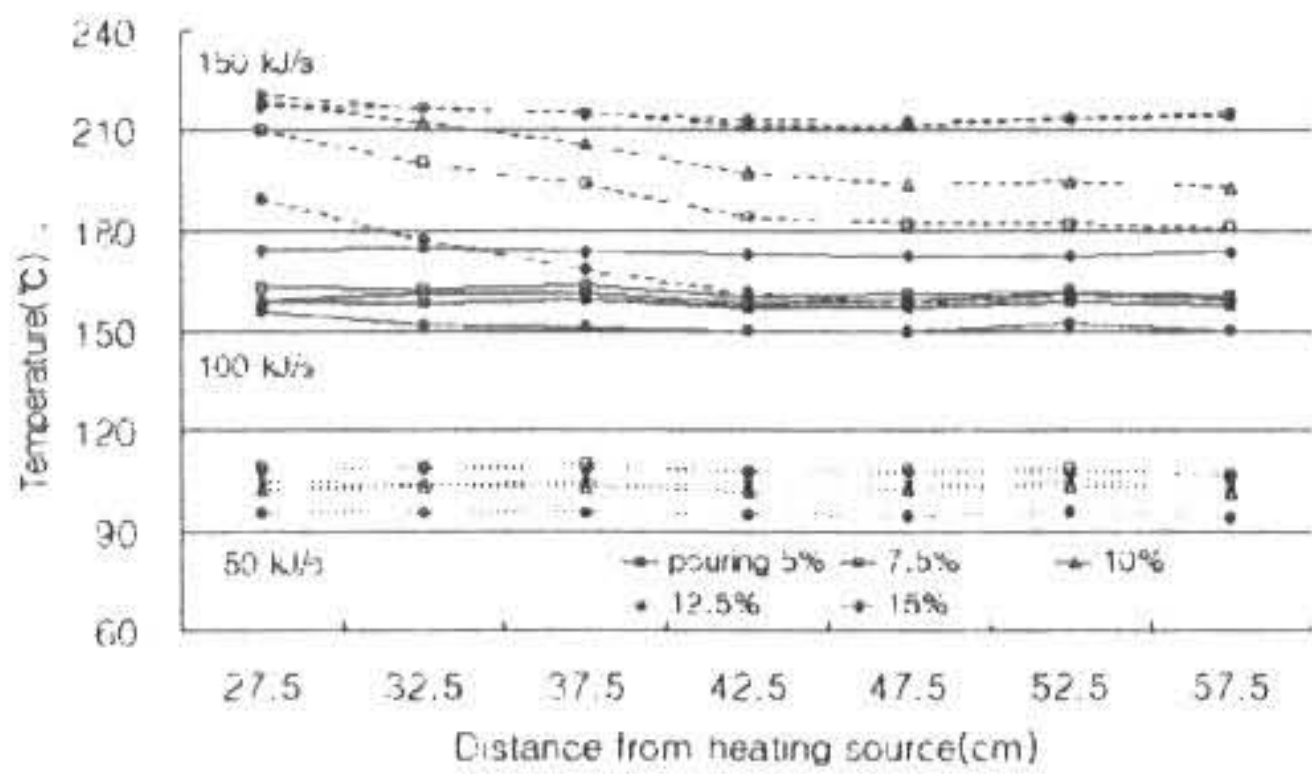


Fig. 4(c) Variation of heat pipe surface temperature with working fluid pouring amount (angle 30°).

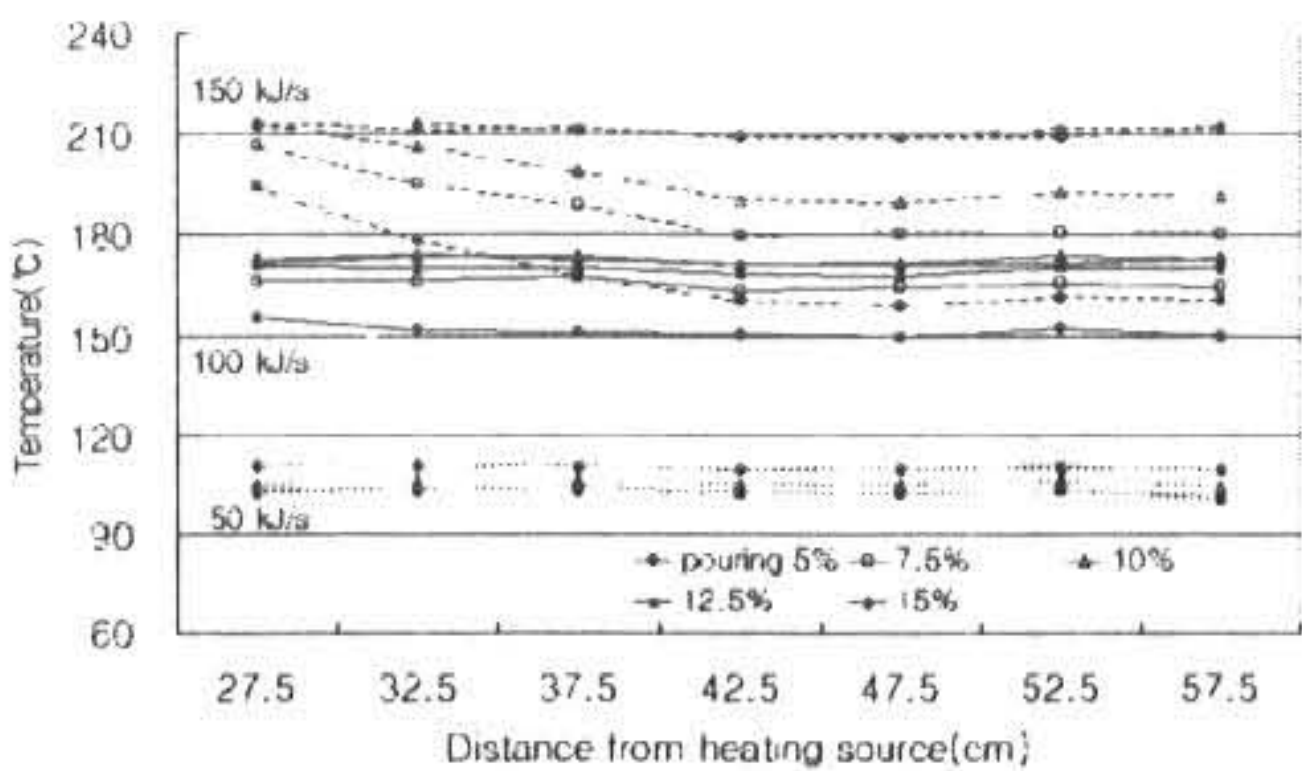


Fig. 4(d) Variation of heat pipe surface temperature with working fluid pouring amount (angle 45°).

4. 결론

열사이폰의 전열특성 구명 시험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 에탄올 및 메탄올을 주입한 열사이폰은 가열량 50~150 kJ/sec에서 열원으로부터 멀어질수록 응축부 표면온도가 불균일 하게 나타났으며 아세톤 및 증류수를 주입한 열사이폰은 균일하게 나타났으나 아세톤이 증류수에 비하여 표면온도가 약 10~20°C 높게 나타나 열회수장치에 사용할 열사이폰의 작동유체로 아세톤이 적합하다고 판단되었다.

(2) 가열량이 50~150kJ/sec로 상승함에 따라 주입량이 5, 7.5, 10%인 열사이폰은 작동유체의 양이 부족하여 드라이아웃 현상이 발생하였으며 작동유체 주입량 12.5, 15%에서는 좋은 성능을 발휘하는 것으로 나타나 열사이폰의 최소 주입량은 12.5% 이상이 되어야 한다고 판단되었다.

(3) 열사이폰의 성능은 설치 경사각 보다 작동

유체 주입량에 의하여 더 큰 영향을 받는다고 판단되었다.

참고 문헌

- 1) B. O. Cho. An Experimental Study on the Heat Pipe Characteristics with Ethanol and Water. M. S. Thesis in Dankook University. (In Korean) (1987)
- 2) H. Hwang-Bo, W. E. Hilding. Optimization of a Heat Pipe with a Wick and Annulus Liquid Flow. Journal of ASME 94(2). (1972)
- 3) H. N. Chi, A. Abhat. Performance Evaluation of Gravity Assisted Copper-Water Heat Pipe with Liquid Overfill. Journal of AIAA 17(9). (1979)
- 4) K. C. Chang, K. W. Lee, K. J. Lee, H. S. Ra. An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics of Carbon Steel-Water Heat Pipe. Journal of Energy R&D 17(1). (IN Korean) (1995)
- 5) K. T. Feldman, S. Munje. Experiment with Gravity-Assisted Heat Pipe with and without Circumferential Grooves. Journal of Energy 3(4). (1979)
- 6) K. W. Lee, K. C. Chang, J. S. Woo, M. J. Cho. A Study on the Heat Transfer Characteristics of Heat Pipe. Journal of Energy R&D 13(1). (IN Korean) (1991)
- 7) Larkin. B. S. A heat Pipe for Control of Heat Sink Temperature. Proceeding of the Seventh International Heat Transfer Conference. (1982)

(2002년 1월 22일 접수, 2002년 8월 20일 채택)