태양열 집열기용 열파이프의 구조와 작동 특성에 관한 연구
A Study on Design and Performance of a Heat pipe for the application to Solar collector

임광빈*, 김철주, 박이동, 황영규(성균관대), 강환국(성균관대원)

ABSTRACT

Heat pipes, applied to flat plate solar collectors, have a long and slender configuration with relatively low heat flux on the evaporator. Such a heat pipe has a tendency to build-up a liquid pool at the lower half of evaporator zone, and at this pool occurs such complicated phenomena of evaporation and fluid dynamics as superheat, sudden generation of bubble, its likely explosive growth process and flooding etc.

In the present study, we tried to solve those problems by means of adjusting the two principle design parameters, liquid fill charge and wick length, using 4 heat pipes and 3 thermosyphons, with different values of parameter respectively.

The corresponding results can be summmarized as followings,

- The thermal conductance of heat pipes was largely improved by eliminating wick from adiabatic and condenser zone.
- But on evaporator zone wick is inevitable to reduce behavier of the build-up of liquid pool, where arise diverse internal complex phenomena.
- The liquid fill charge should have to be increased by 10~20% more than the quantity to saturate the wick.

1. 서 론

열파이프는 내부의 작동유체가 상변화를 일으켜 열을 전달하는 장치로써 이를 실제 산업 시스템에 적용하기 위하여 적용 환경 조건에 적합하도록 설계하는 것은 용이하지 않으며, 많은 지식과 경험이 필요하다[1][2].

태양열 집열기에 이용되는 열파이프는 기하학적으로 긴 증발부와 짧은 응축부를 가지며, 세장비가 매우 크다. 그리고 중력장은 내부 작동유체가 액상으로 하강하는데 필요한 일차적인 구동력이된다. 이러한 조건에서 위크를 제거하면 관 중심방향으로의 열저항을 감소시켜 전체적인 열전도도의 증가를 얻을 수 있다. 그러나 다른 측면에서 세장비가 크기 때문에 낮은 열속에서 증발부의 하단에 액체 Pool의 형성을 촉진시켜 Pool의 과열과 Pool내의 단속적인 핵비등이 발생되어 Blow-up현상에 의해 내부의 액적비산과 Flooding이 발생하여 열전달이 불안정하게 되고 벽면온도의 진동현상이 나타난다[3].

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 열파이프 내부에 위크를 부분적으로 설치하거나 또는 작동유체의 충진량을 변환시키는 등의 방법을 적용하여 작동상태를 실험적

으로 고찰함으로써 안정된 작동을 얻을 수 있는 열파이프의 설계조건을 제시하고자 한다.

2. 집열기의 개요와 열부하조건

Fig. 1은 지표와 45°의 경사각을 갖도록 설치된 평판형 집열기의 구성을 개략적으로 표시한 그림으로써 열파이프가 집열표면에 길이방향으로 일정한 간격을 갖도록 설치되어있다. 열파이프는 집열판에 흡수된 태양 복사 에너지를 순환 유체에 이송하거나 또는 직접 저장조에 전달하는 역할을 한다. 여기서 열파이프는 증발부가 응축부보다 아래에 위치하게 되어 열파이프 내부의 작동유체가 증발부로 귀환하는 데에는 주로 중력장의 도움을 받게 된다.

따라서 이와 같은 형태의 열파이프의 작동에서는 작동유체의 유동저항만을 고려할 때 위크가 오히려 유동저항을 증가 시키며, 따라서 위크가 없는 열사이폰을 사용하는것이 유동저항을 줄이는 방법이 되고 따라서 열전달을 증가시킬 수 있다.

그림과 같은 열파이프에서 예상열부하를 결정하기 위하여 먼저 평판형 집열면의 길이는 2m, 그리고 1개의 열파이프에 대한 집열면의 폭은 약 10 cm로 가정하였다. 이 경우 1개의 열파이프가 이송해야하는 순간 최대 열이송량은 태양 복사조건을 고려할때 시간에 따라 평균 10~100W로써 안정성을 고려하더라도 최대 150 W를 넘지 않는다. 그리고 열저장조의 순환 유체의 온도를 10~70 ℃로 설정하면, 열파이프의 작동온도 범위는 30~100 ℃로 예상할 수 있다[4].

3. 열파이프의 설계

본 연구에서 열파이프의 구성요소는 앞절의 열부하와 아래에 기술한 조건들과 변수들을 고려하여 Table 1과 같이 결정하였다.

작동유체 - 동절기 결빙 방지와 인체의 무해성
관 경 - 증기 유동속도와 열용량
위크 ┌ 구조 : 실험실의 제작여건
　　└ 설치영역 : 열저항을 감소시키기 위하여 증발부에만 설치

Table 1 Components of heat pipe manufacture for test

Elements	Specification	Materials
Pipe	Length(mm) : 2000(l_e:1750, l_a:150, l_c:150) Outer diameter(mm) : 9.52	Copper
Wick	Wrapped screen (100 Mesh, 2 Layers)	Stainless
Working fluid	Fill charge is varied as seen in table 2	Ethanol

본 연구에서 주 변수로 고려하고 있는 작동유체의 충진량과 위크의 설치유무는 Table 2에 명시되어 있다. 이들 변수들의 조합에 따라서 4개의 열파이프와 3개의 열사이폰을 제작하였다. 먼저 작동유체 충진량은 작동에 가장 큰 영향을 미치기 때문에 설계목적에 따라서 적절하게 조정해야 한다. 다만 일반적인 기준으로써 열파이프에서는 위크를 적실 수 있는 량[2], 그리고 열사이폰은 Imura등이 제시한 기하학적 크기에 따른 실험식[5]등을 사용할 수 있다. 이 경우 열파이프는 약 14 ml(V_e^+ = 24%), 열사이폰은 약 20~30 ml(V_e^+ = 23~34%)로써 Table 2의 HP2와 TS1에 해당된다. 여기서 V_e^+는 무차원 충진율로써 증발부 체적

에 대한 작동유체의 체적비이다.

집열기에서와 같이 내부 액상의 작동유체의 유동이 중력장의 도움을 받는 경우 위크는 다음과 같은 상반된 기능을 나타낸다. 일차적으로 내부의 액체유동 저항과 함께 증발부와 응축부의 관 중심방향으로의 열저항의 증가를 초래하는 요인이 될 수 있다. 그러나 위크는 모세 공간속에 액상의 유체를 내포시킬 수 있기 때문에 증발부 하단에 형성되는 액체 Pool 을 감소시킬 수 있는 순 기능을 갖고 있다. 이러한 특성을 절충하여 증발부에만 위크를 설치한 이론적 해석[6]으로부터 얻을 수 있는 열저항 감소효과는 Fig. 2에서 보는 바와 같다.

한편 Fig. 3은 작동온도범위에서 위 기준유량을 갖는 열파이프(HP2)와 열사이폰(TS1)에 대하여 각각 이론적으로 모세관 한계[2]와 Flooding한계[7]를 적용하여 해석적으로 구한 결과와 비교한 것이다. 그림은 열파이프의 모세관 한계가 예상 최대 태양열부하(150 W)보다 작은 값을 보여주고 있다. 이러한 결과는 열파이프의 위크를 통한 유동저항이 매우 크기 때문에 증발부 하부에서 Dry out이 발생하기 때문이다. 한편, 열사이폰은 충분한 열전달량을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Table 2 Specifications of heat pipes and thermosyphons for performance test

Systems	Installation section of wick	Fill charge (ml / V_e^+)	Systems	Installation section of wick	Fill charge (ml / V_e^+)
HP1	Evaporator	20 / 24	TS1	None	20 / 23
HP2	Evaporator	14 / 17	TS2	None	10 / 11
HP3	Evaporator	32 / 39	TS3	None	45 / 51
HP4	Total	20 / 24			

4. 실 험

제작된 열파이프는 피복열선(Sheath heater, ϕ1.0mm, Thermocoax philips, co.)을 열파이프의 축을 따라서 증발부 벽면 상부에 접촉이 잘되도록 단단히 고정하여 한줄 설치한 후 솜으로 단열하였다. 그리고 응축부에 매니폴드를 설치하여 유체를 순환시킴으로써 냉각하였다.

한편 벽면온도는 열전대(T-type, ϕ0.12mm)를 벽면에 부착하여 측정하였으며, Hybrid recorder(Y.E.W 3088)와 데이타 처리장치(Fluke 2240)를 이용하여 처리하였다. 다수의 열전대가 열파이프 길이 방향으로 설치되어 있고, 온도분포의 측정결과에 대한 Fig. 4에서 위치를 확인할 수 있다. 그리고 본 실험에서 사용한 실험장치와 방법에 관한 기타 자세한 내용은 참고문헌에 기술되어 있다[3][4].

5. 결과 및 고찰

5.1 정상상태의 작동

열파이프 내부의 작동이 안정되어 있을때에는 벽면의 온도가 시간에 대하여 정상적인 상태를 보인다. Fig. 4 (a)와 (b)는 열파이프 HP1와 열사이폰 TS1의 두 경우에 대하여 열부하 변화에 따른 정상 상태에서의 벽면온도분포를 각각 나타낸 것이다. 그러나 그림에서 두 경우 30 W이하의 낮은 열부하에서는 증발부 하단은 그 상부에 비하여 벽면온도가 과열되어 있음을 볼 수 있고 과열온도의 크기는 열부하의 증가에 따라 약 30~40℃까지 도달된다. 이는 낮은 열부하에서는 증발부 하단에 형성된 Pool에서 비등이 발생하지 않기 때문이다. 그러나 열부하가 30 W이상으로 증가되면 증발부의 벽면온도는 등온성을 이루고 증발부 전

영역에서 균일하게 기화가 일어나고 있음을 나타낸다.

한편 열사이폰은 30~70W의 열부하 범위에서 벽면온도가 Fig. 5와 같이 충격음을 동반한 주기적인 맥동 현상을 나타내었다. 이는 김등[8]의 열사이폰에 대한 가시화 실험에 의하면 Pool에서 핵비등이 단속적으로 진행되고 핵비등이 발생될 때 액적기포의 폭발에 의해 다량의 액체가 비산하는 Blow-up현상을 일으키기 때문이다.

5.2 과도상태의 작동

5.2.1 시동성

Fig. 6의 (a)와 (b)는 정지 상태에서 50 W의 열부하를 가할 때 열파이프 HP1과 열사이폰 TS1에 대한 시동성을 각각 나타낸 것이다. 증발부 국소온도 T_{e1}, T_{e2}, T_{e3}는 각각 증발부 하단으로 부터 축방향 거리 x(cm)가 10, 96, 160이고, 단열부 온도 T_a와 응축부 온도 T_c는 각 영역의 평균 온도이다.

그림에서 증발부에 열부하를 가함에 따라 내부 증기의 발생과 이송이 시작되는 초기 응답구간에서의 시간지연은 열파이프 HP1의 경우 약 20초 미만으로 열사이폰 TS1보다 매우 작게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 HP1은 초기에 액상의 유체가 증발부의 위크에 일부 존재하여 작동유체가 기화되어 응축부로 이송되지만 TS1은 Pool의 계면에서만 기화가 일어나고 증기 발생량이 적어서 그에 따른 시간이 지연되기 때문이다.

한편, 실험결과로 부터 초기 시동구간의 과도상태 경향은 열부하의 크기에 따라 다르게 나타났다. 즉 Pool내에서 핵비등의 발생에 관한 임계 열부하(30 W)이상에서는 초기 핵비등이 발생한 후 정상 상태로 빠르게 진입하지만 임계 열부하 미만에서는 증발부 하단의 온도가 과열된 상태에서 정상상태로 도달하였다.

5.2.2 열부하 변화

정상 작동상태에서 열부하를 증가시키거나 감소시키면 다음과 같은 천이과정을 거친후 정상상태로 도달된다.

Fig. 7의 (a)와 (b)는 열부하를 50 W에서 70 W로 증가할때 HP1과 TS1에 대한 천이상태의 벽면온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 열파이프 HP1은 벽면 온도가 점진적으로 정상 상태에 접근하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 열사이폰 TS1은 관 벽면의 맥동 주기가 대단히 짧아져 미동상태의 온도분포를 나타내고 있다. 그리고 TS1의 과도 시간은 HP1보다 긴 약 10분이 소요된다. 이는 열사이폰은 증발부 하단에서 Pool이 형성되어 있고, Pool이 임계온도(약 55 ℃)에 도달할때 까지 소요되는 시간이 포함되었기 때문으로 생각한다.

5.3 ΔT - Q 관계

5.3.1 작동유체 충전량

Fig. 8 (a)와 (b)는 작동유체 충진량이 서로 다른 열파이프(HP1, HP2, HP3)와 열사이폰(TS1, TS2, TS3)에 대한 증발부-응축부의 온도차 ΔT와 열부하 Q의 관계를 각각 나타낸 것으로써 Q에 대한 ΔT는 열저항 R을 나타내며, 그의 역수는 열전도도 C라 일컬어진다. 즉 $C = 1/R$이다.

Fig. 8 (a)에서 HP1과 HP3는 모든 열부하 구간에서 거의 일정한 열전도도를 나타내고 있으나 작동유체가 위크만을 포화시키는 HP2는 40 W에서 열전도도가 급격히 감소함을 볼수 있다. 이는 증발부 하단에서 Dry out이 발생하기 때문이며, 그림 3의 모세관 한계에 대하여 실험적으로 확인할 수 있다.

Fig. 8 (b)에서 TS1, TS2에서는 열전달율이 비교적 일정하게 나타나고 있으나 충전량이 많은 TS3의 경우 20 W이상의 열부하에서 열전도도가 급격히 저하되고 있다. 이는 작동유체 충진량이 과다하여 열사이폰의 전 길이에 액체와 증기가 혼합된 유동 양상을 이루고 있기

때문에 열저항이 증가된 것으로 예측된다[5].

5.3.2 응축부에서 위크의 영향

Fig. 9는 위크가 열파이프의 전 길이에 설치된 HP4와 증발부에만 설치된 HP1에 대하여 증기의 온도와 응축부의 벽면 온도차($\Delta T = T_v - T_c$)와 열전달율(Q)의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 HP1이 HP4보다 열전도도가 크게 나타나고 있다. 이러한 결과는 그림 2에서 해석적으로 검토한 바와 같이 증발부에서 작동유체의 유동과 상변화 과정에 영향을 주지않고 열속이 큰 응축부의 열저항만을 감소시킬 수 있음을 보여주고 있다.

6. 결론

작동유체의 충진량과 위크의 설치 영역을 변화시킨 다수의 열파이프를 제작하고 정상 상태와 비정상 상태의 열적 조건을 적용하여 초기 시동과정, 열부하 변화에 따른 천이과정, Pool에서의 핵비등 과정등의 실험 결과는 다음과 같다.

1. 응축부에 위크를 제거함으로써 관 중심방향으로의 열저항이 감소되어 열파이프의 열전도도를 증가시킬 수 있다.
2. 증발부에 설치한 위크는 작동유체를 액상으로 포화시킴으로써 초기 시동지연을 감소시키고, 또한 Pool의 형성을 억제시키기 때문에 Pool내의 핵비등 발생과 이에 따른 Blow - up현상으로 인한 불안정한 작동을 현저히 감소시킬 수 있다.
3. 작동유체의 충진량은 위크를 포화시키는 양 이외에 잉여량을 충진시킴으로써 증발부의 Dry out이 극복되어 열전달량을 증가시킬 수 있다.
4. 그외에 위크를 증발부의 전 영역에 설치해야만 하는가라는 문제와 위크의 구조에 대해서는 앞으로 계속 연구가 이루어져야할 것이다.

참고문헌

1. A.Basjulis, T.A.Hummel, 1974, "Design Scope-Designer's guide to heat pipe", Design News, pp. 159~184.
2. Chi, S, W.,1976, "Heat Pipe Theory and Practice", McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
3. 박형기, 임광빈, 김철주, 박이동, 1991, "온수 급탕 태양열 집열기용 2상 열사이폰의 열적특성 실험" 공기조화 냉동학회 학술대회 논문집, pp.226~230.
4. 임광빈, 이태형, 김철주, 박이동, 1991, "태양열 집열기용 Heat Pipe의 열전달 특성에 대한 실험적 고찰", 대한 기계학회 학술대회 논문집(Ⅱ), pp.98~102.
5. H. Imura, K. Sasaguchi and Kozai, 1983, "Critical heat flux in a Closed Two Phase Thermosyphon", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.26, No.8, pp.1181~1188.
6. "實用 ヒートパイプ" 日本 ヒートパイプ 協會編.
7. Tien, C. L. and Chung, K. S., 1978, "Entrainment limits in Heat Pipe", Proceedings of 3rd Int. Heat Pipe Conference, May, 22-24, Palo Alto, California, pp.36~40.
8. C. J. Kim, E. T. Pak, Y. K. Hwang and H. K. Kang, 1992, "The Visual Study of Nucleate Boiling Phenomena in Liquid Pool for a Closed Two-Phase Thermosyphon", Proceedings of The First Heat Pipe Workshop, Korea, pp.161~174.

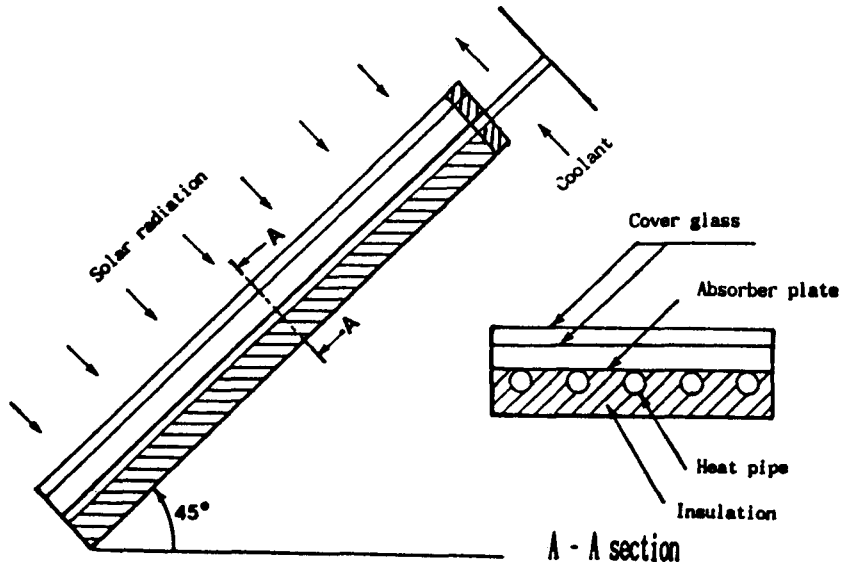


Fig. 1 Schematic of a flat plate solar collector with heat pipes.

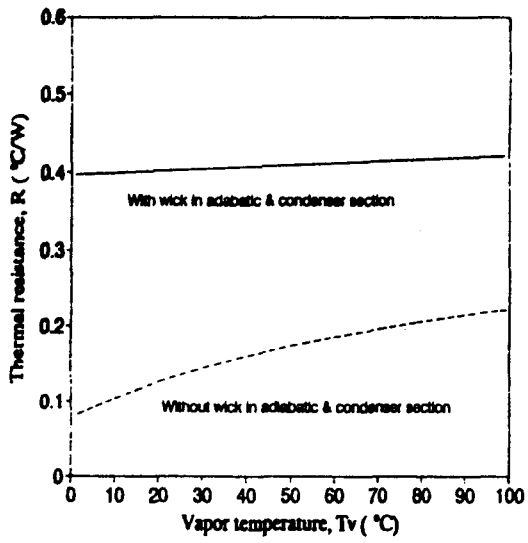


Fig. 2 Effect of partly removal of wick, exclusively on adiabatic and condenser zone, on thermal resistance.

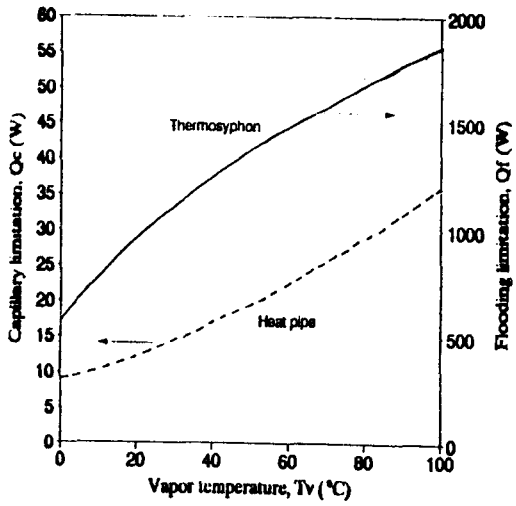
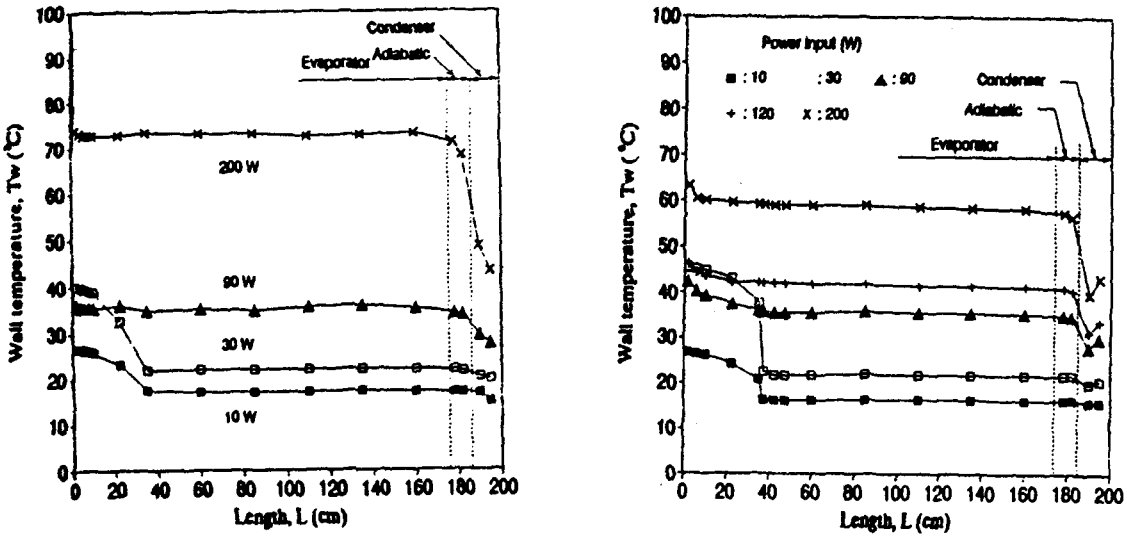


Fig. 3 Theoretically calculated limitations of heat transport for two reference models, heat pipe HP2 and thermosyphon TS1.



(a) Heat pipe HP1

(b) Thermosyphon TS1

Fig. 4 Axial wall temperature distributions versus power input for HP1 and TS1 (Coolant temperature : 15 ℃, Coolant flow rate : 150 ml/min).

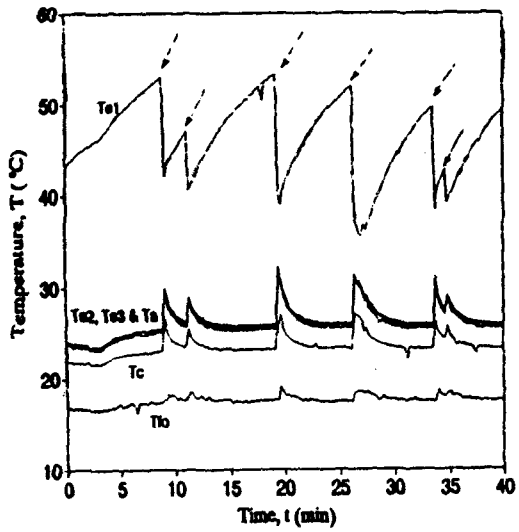
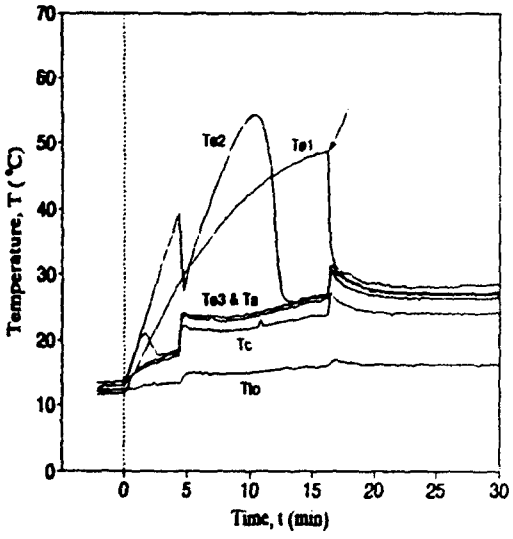
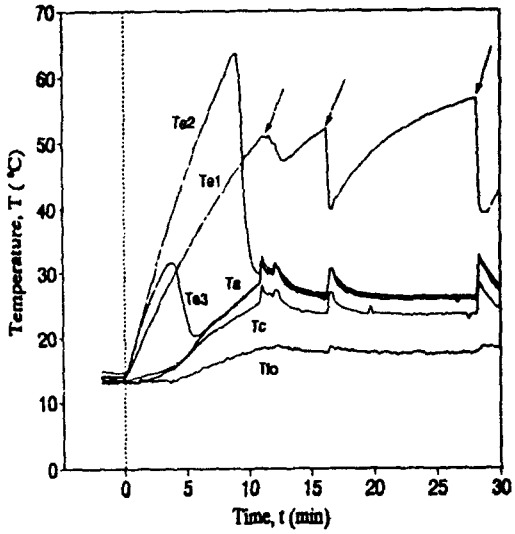


Fig. 5 Temperature fluctuation with time for thermosyphon TS1 at power input of 50 Watt (Coolant temperature : 15 ℃, Coolant flow rate : 150 ml/min).

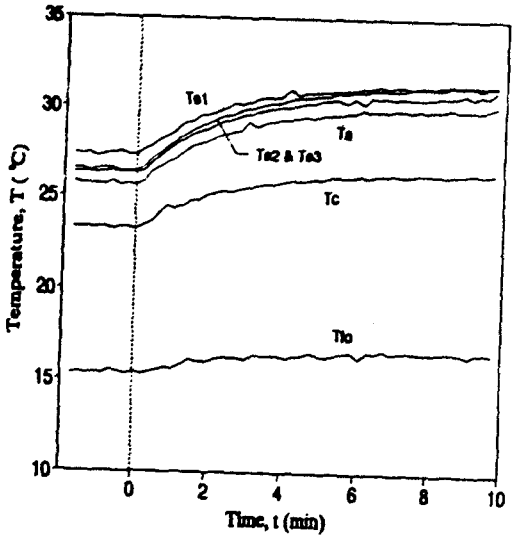


(a) Heat pipe HP1

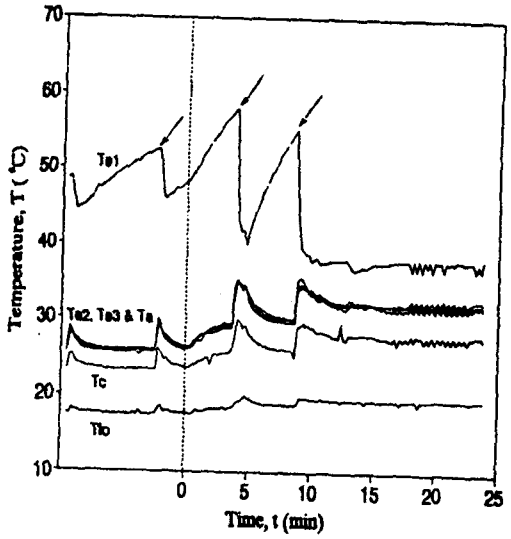


(b) Thermosyphon TS1

Fig. 6 Wall temperature variations with time for heat pipes HP1, and thermosyphon TS1 during initial start - up process at power input of 50 W (Coolant temperature : 15 ℃, Coolant flow rate : 150 ml/min).

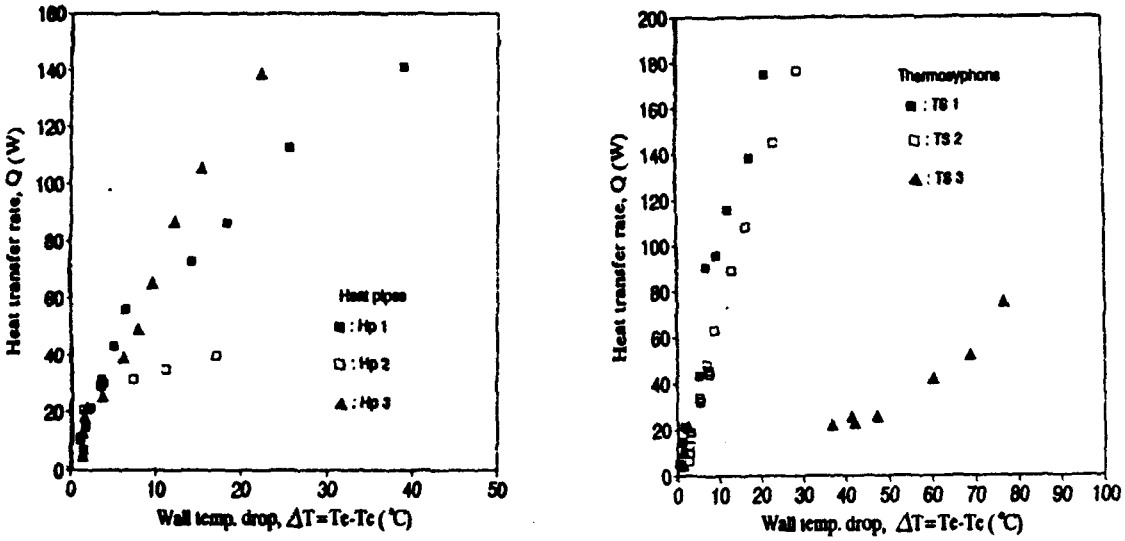


(a) Heat pipe HP1



(b) Thermosyphon TS1

Fig. 7 Variation of temperature T_{fo} for heat pipe HP1 and thermosyphon TS1 during the transient peroid, when the power input was increased from 50 W to 70 W (Coolant temperature : 15 ℃, Coolant flow rate : 150 ml/min).



(a) Heat pipes (b) thermosyphons

Fig. 8 Heat transfer rate Q versus wall temperature drop ΔT between the evaporator and condenser for heat pipes & thermosyphons with different quantity of fill charge (Coolant temperature : 15 ℃, Coolant flow rate : 150 ml/min).

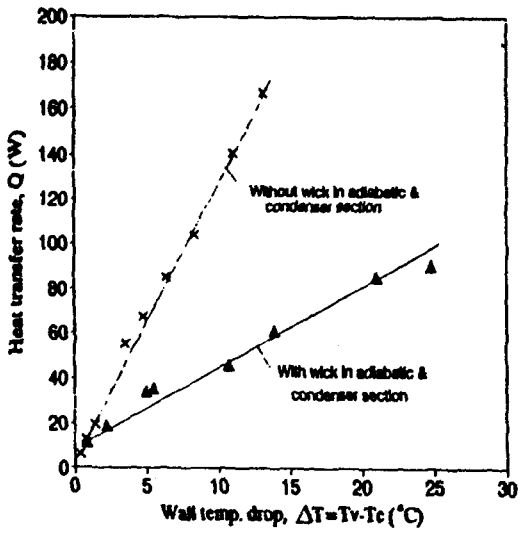


Fig. 9 Effect of presence of wick installation at condenser on thermal conductance of heat pipes. (Coolant temperature : 15 ℃, Coolant flow rate : 150 ml/min).