

## 상변화 물질을 이용한 에너지의 저장에 관한 연구 —핀이 부착된 열싸이폰의 이용에 관하여—

김 권 진 · 유 재 석 · 김 기 현\*

아주대학교 대학원(현재 동양노즐 재직)  
아주대학교 공과대학 기계공학과\*

## Thermal Energy Storage in Phase Change Material —by Means of Finned Thermosyphon—

Kwon Jin Kim · Jaisuk Yoo\* · Ki Hyun Kim\*

Graduate School, Ajou University(Currently Dong Yang Nozzle Co.)  
Dept. of Mechanical Engineering, Ajou University\*

### 요 약

파라핀 왁스에 열에너지를 저장하기 위해 열전달 기구로 원판형 핀이 달린 열싸이폰을 사용하였다. 실험은 4, 6, 8개의 핀에 대해 수행되었으며 각각의 경우 왁스의 초기 온도와 주입열량을 변화시키면서 실험을 반복하였다. 실험을 통하여 특히 잠열 축열계의 전열경로의 주요지점에서의 열전달 특성을 규명하고자 하였으며 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 열싸이폰의 열관류율과 총합열관류율은 핀의 수가 증가함에 따라 커지나 핀과 왁스사이의 열전달계수는 감소하였다.
- (2) 핀에 의해 열전달이 촉진됨으로서 핀이 없는 열싸이폰에서 일어나는 dry-out 현상이 제거되었다.
- (3) 수평형의 핀은 왁스의 큰 규모의 대류를 억제하며 핀의 수가 증가함에 따라 핀사이에서의 국소대류도 더욱 억제되었다.

### ABSTRACT

A two-phase closed thermosyphon with circular fins was used as the heat transfer device for storing the thermal energy in paraffin wax. Experiments were carried out for 4, 6 and 8 fins and for various initial temperatures of the wax and power inputs. Heat transfer characteristics along the heat flow path were investigated as well as the overall performance of the system.

Some of the important results are as follows:(1) The thermosyphon heat transfer coefficient and the overall heat transfer coefficient increased with the number of fins, whereas the heat transfer coefficient between the fin and the wax decreased; (2) Facilitation of heat transfer by the fins seemed to alleviate the dry-out phenomenon that had been reported to occur in case of bare thermosyphon; and (3) The horizontal fins had adverse effect of subduing a full scale convection in the wax, and the increase of the number of fins delayed the onset of local convection between the fins.

## 1. 서론

태양에너지는 그 성질상 간헐적이고 저농도이기 때문에 흐린 날이나 밤에 사용할 열에너지를 맑은 날 낮에 저장하여야 하며, 열에너지의 저장기술은 비단 태양열 뿐만 아니라 모든 형태의 열에너지의 효율적인 이용에 중대한 역할을 한다.<sup>1)</sup>

현재 주로 사용되고 있는 축열방법은 물질의 현열을 이용하는 것으로 축열물질로는 물, 돌, 콘크리트 등이 많이 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 대단히 큰 체적의 축열조를 필요로 하며 열의 저장 및 추출과정중 온도의 변화폭이 크다는 문제점을 안고 있다. 한편 물질의 상변화에 관계되는 잠열을 이용하는 축열방법은 저장이나 추출과정 동안 온도변화가 없고 적은 양의 물질에 많은 양의 열에너지를 저장할 수 있다는 이점이 있다. 그러나 축열에 사용될 수 있는 상변화 물질(PCM: Phase Change Material)들은 대부분 열전도 계수가 낮아 효율적인 열전달 방법의 개발이 요청된다.

잠열축열 시스템은 캡슐형(capsule type)<sup>2,3)</sup>과 각-관형(shell-and-tube type)<sup>4)</sup>으로 나눌 수 있으며 열파이프(또는 열싸이폰)를 열전달기구로 사용하는 시스템이 시도되고 있다. Abhat<sup>5)</sup>는 상변화 물질속에 수평에 가까운 각도로 놓여있는 열파이프에 관한 실험결과를 발표하고 열파이프가 잠열축열 시스템에 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다. 그러나 그는 주로 열파이프 자체의 성능을 조사하는데 그쳤다. Kim과 Lee<sup>6)</sup>는 열싸이폰을 열전달기구로 사용하여 파라핀 왁스에 열에너지를 저장하는 문제를 취급하였으나 fin이 없는 경우만을 고려하였다. 한편 김과 유<sup>7)</sup>, 목재균 등<sup>8)</sup>은 각각 핀이 없는 열싸이폰과 핀이 달린 열싸이폰을 이용하여 상변

화 물질로부터 열에너지를 추출하는 문제에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 열전달기구로 원관형 핀이 달린 열싸이폰을 사용하여 상변화 축열계(PCES계: Phase Change Energy Storage System)의 축열성능과 열전달 특성을 실험을 통해 조사하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

실험장치는 PCES계, 온도측정 및 기록장치, 열주입장치로 구성되어 있으며 PCES계의 개략도가 Fig.1에 그려져 있다. 열싸이폰은 외경

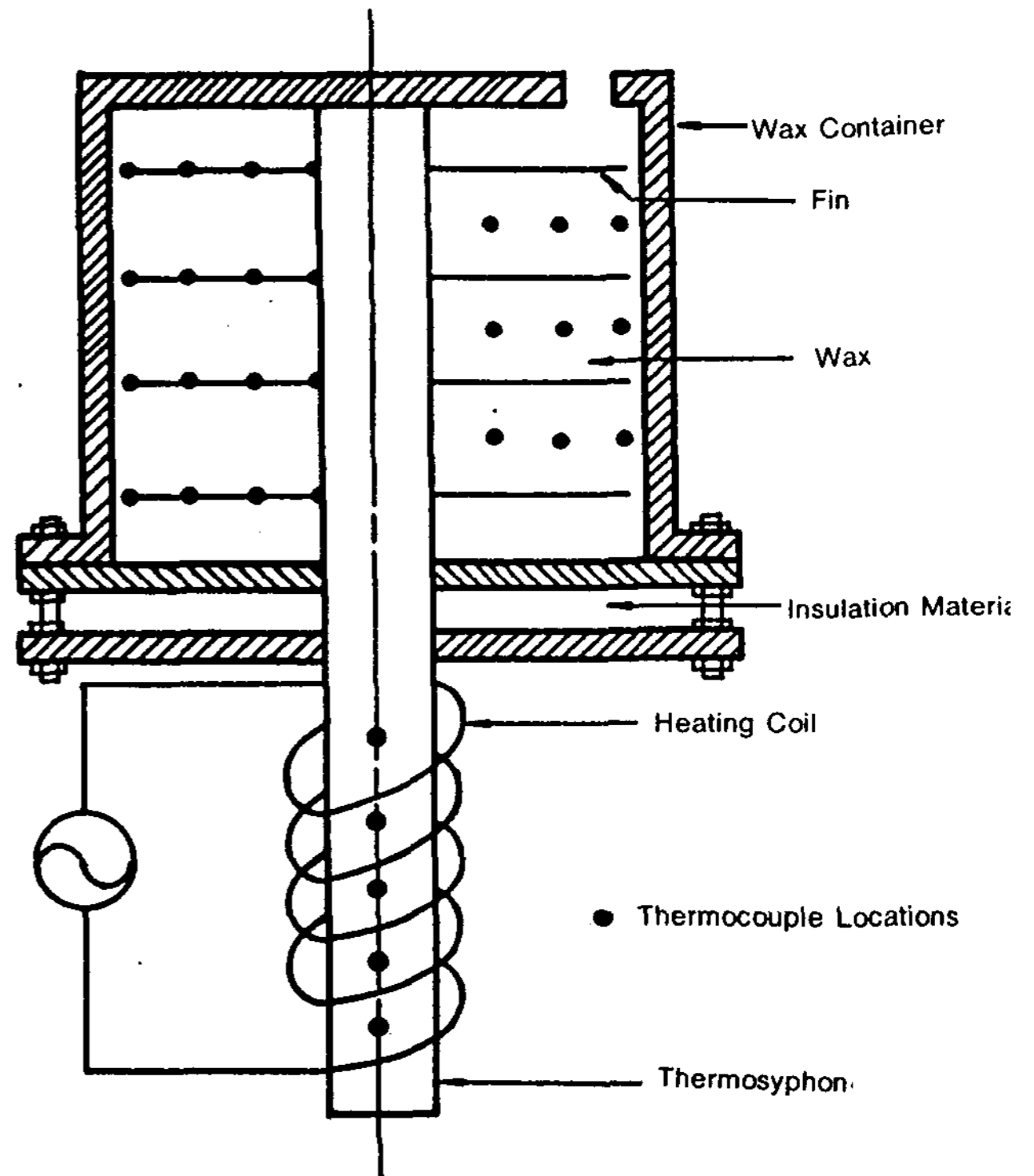


Fig. 1 Schematic of PCES System

2.22cm, 내경 2cm, 길이 46cm의 동관으로 되어 있고 작동유체는 증류수이며 예비실험에서 최적치로 나타난 전체 체적의 10%에 해당되는 양을 열싸이폰 내부에 충전시켰다. PCM으로는 paraffin wax(Sunoco p-116, melting point: 43°C)를 사용하였다. PCM용기는 지름 14cm, 높이 20cm의 원통이며 벽면은 두께 0.3cm의 스테인레스 강판으로 제작하였다.

PCES계는 전체를 유리섬유와 단열재(아이소핑크)로 잘 단열시켰으며 열싸이폰의 응축부는 열전달을 증가시키기 위하여 열싸이폰에 두께 0.1cm의 구리판을 사용하여 반경 6cm 크기로 제작된 핀을 달아 왁스 속에 수평으로 잠기게 하고 증발부 주위로는 니크롬선을 감고 전압을 조절하여 열전달량을 결정하였다. 온도측정을 위하여 30개의 Copper-Constantan(T-type) 열전대를 사용하였다. 이 중, 핀과 PCM내의 온도 분포 및 그 변화를 측정하기 위하여 25개의 열전대를, 그리고 증발부의 온도를 측정하기 위하여 5개의 열전대를 사용하였다. 각 열전대의 온도 측정 위치는 Fig.2에 표시하였다.

### 2.2 실험방법

먼저 왁스의 온도가 실험수행 초기온도보다 약간 높게 되도록 가열시킨 후 단열물질로 PCES계를 단열시켰다. 왁스의 온도가 실험수행 초기온도까지 비교적 균일하게 냉각되면 열주입 장치로 일정 열을 주입시키면서 실험을 시작하며 각 부위의 온도를 측정하였다. 온도는 1분 간격으로 측정, 기록하였다.

왁스의 가장 낮은 온도가 용융점 43°C를 지나면 실험을 끝마쳤다. 이러한 방법으로 핀 수를 4, 6, 8개로 왁스의 초기온도를 32, 36.5, 40°C로 변화시키며 실험을 수행하였으며 각각에 대해 유입열량(power input)을 40, 50, 60W로 변화시키면서 반복 실험하였다.

### 3. 결과 및 고찰

핀과 핀사이에서 측정한 왁스의 반지름 방향과 수직 방향의 온도분포가 각각 Fig.3과 Fig.4에 시간의 함수로 주어졌다. 그림에서 DSC는 실험 초기의 과냉도로서 다음 식으로 정의된다.

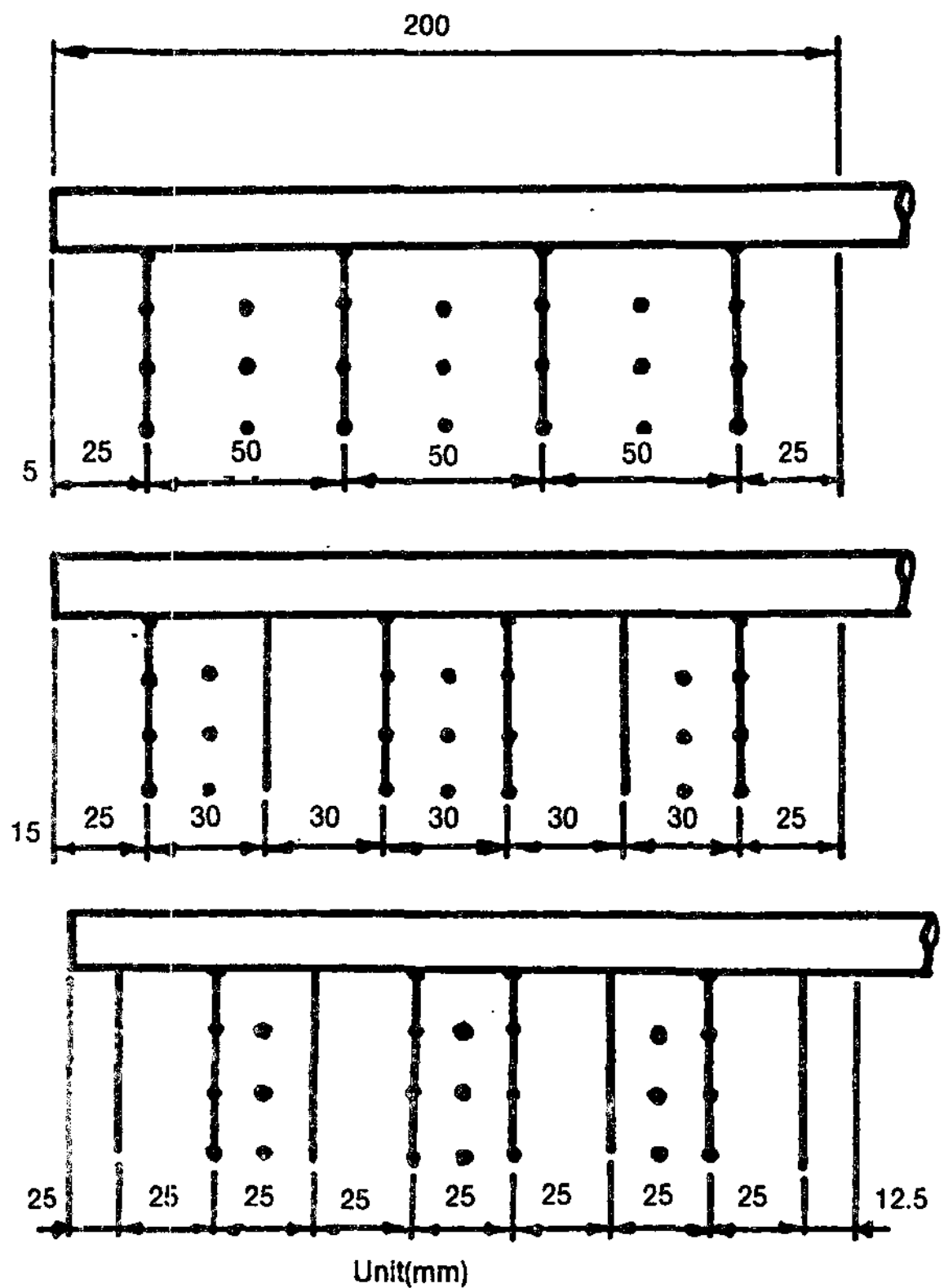


Fig. 2 Locations of Thermocouples

$$DSC = (T_m - T_i) / T_m$$

여기서  $T_m$ 은 PCM의 용융온도이고  $T_i$ 는 PCM의 초기온도이다. 또한  $L^+$ 는 열싸이폰의 응축부의 길이  $L_c$ 와 증발부의 길이  $L_h$ 의 비로 다음과 같이 정의된다.

$$L^+ = L_h / L_c$$

왁스의 수평방향으로의 온도 분포를 핀이 없을 경우<sup>6)</sup>의 결과와 비교하면 그 변화가 현저히 적음을 볼 수 있으며 이것은 핀을 통한 반지름 방향의 열전달의 결과이다. 수직방향의 온도분포의 경우 실험이 진행됨에 따라 중앙부에서의 온도가 상대적으로 높은 것은 열싸이폰의 중앙부에서의 열전달이 가장 활발했음을 의미하며 특히 상부에서의 온도가 낮은 것은 아래에 설명하는 바와 같이 열싸이폰의 작동상태에 그 원인이 있다고 생각된다.

열싸이폰 표면의 온도분포가 시간의 함수로 Fig.5에 그려져 있다. Fig.5(a)는 응축부의 온도를 나타낸 것으로 온도는 핀의 기저(base)에서

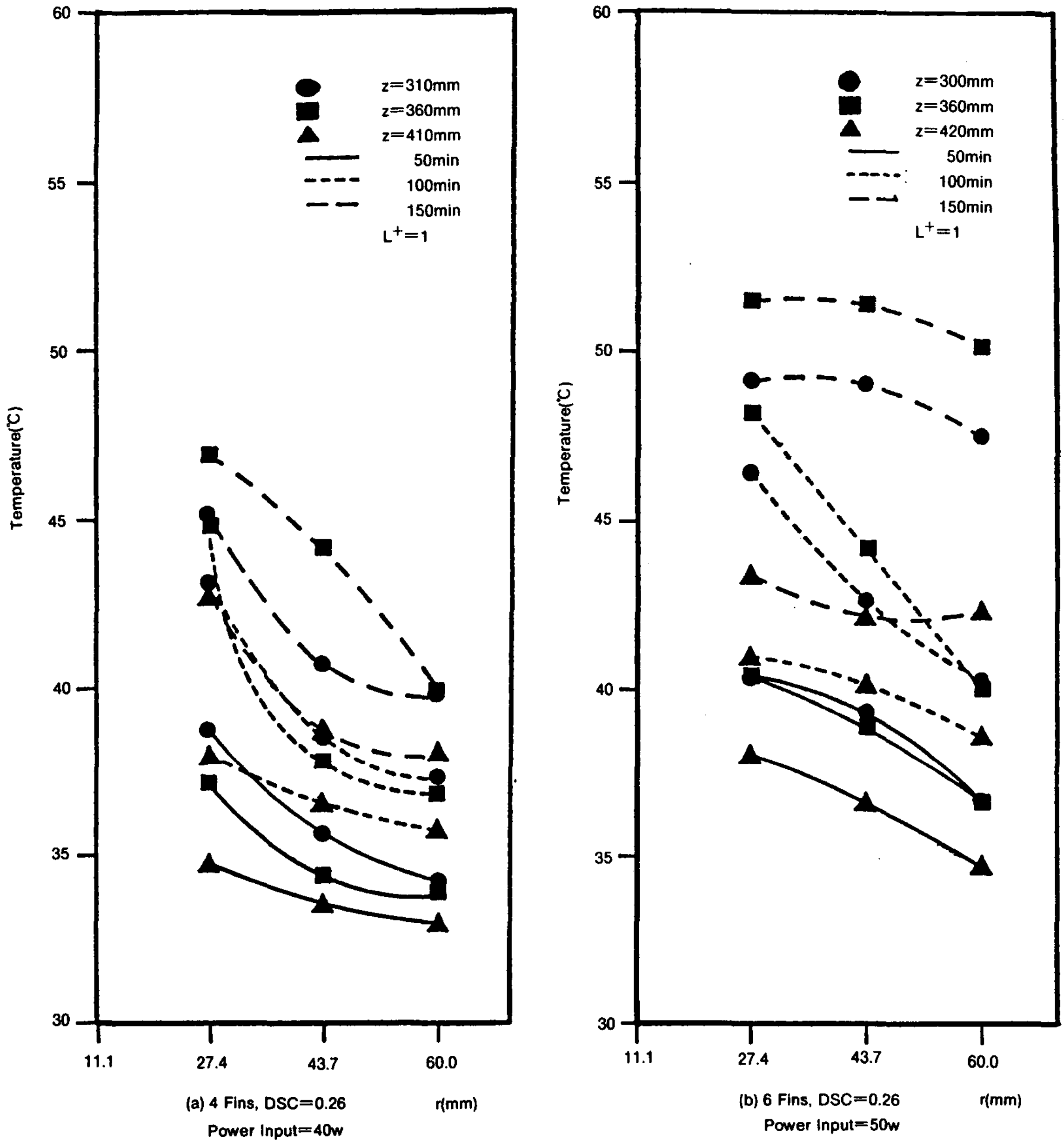


Fig. 3 Representative Radial Temperature Distributions of Wax

측정한 것이다. 그림에서 응축부 상단 부위의 온도는 핀의 수에 관계없이 상당히 낮음을 볼 수 있으며 이러한 현상은 열사이폰 내부에 불응결 기체가 발생하여 열사이폰의 상부에 모임으로서 증기의 흐름을 막았기 때문인 것으로 판단된다.

Fig.5(b)는 증발부의 온도를 그린 것으로 비교적 균일한 온도분포를 보여준다. 그러나 시간에 따라 표면온도가 증가한 것은 실험초기에는 주위 단열재에로의 열손실이 상대적으로 많고 단열재의 온도가 증가하면서 열손실이 줄었기 때문으로 생각된다. 핀이 4개일 때보다 6개

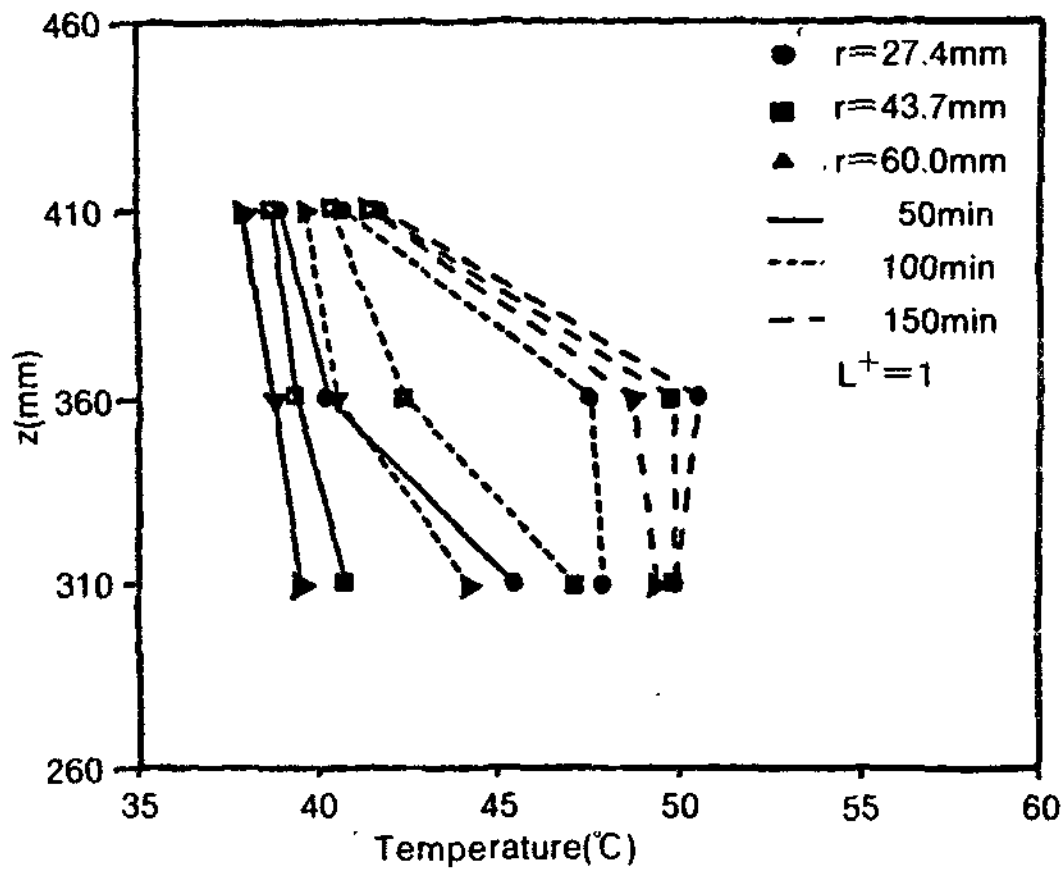


Fig. 4 (a) Representative Vertical Temperature Distributions of Wax(4 Fins, DSC=0.15, Power Input=60w)

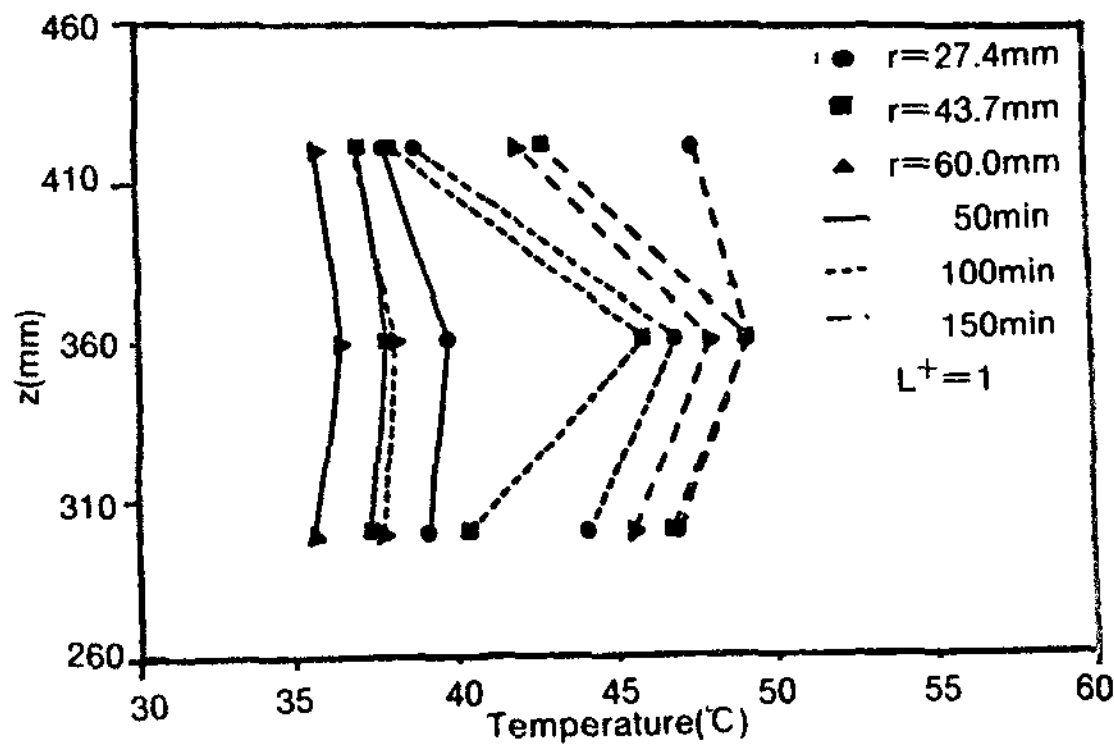


Fig. 4 (b) Representative Vertical Temperature Distributions of Wax(6 Fins, DSC=0.15, Power Input=50w)

의 경우 온도가 낮은 것은 핀의 수가 많을수록 열전달이 더 원활하기 때문이며 예측된 결과이다.

Fig.6에는 시간에 따른 핀의 온도분포의 변화를 나타내었다. 앞에서 언급한 바와 같이 가장 위의 핀의 온도가 현저히 낮은 것은 불활성기체의 영향으로 보이며 핀이 6개의 경우에 4개일 때보다 전반적으로 핀의 온도가 낮고 온도구배가 상대적으로 작은 것은 핀 하나를 통해 나가는 열량이 적기 때문이다.

Fig.7은 열싸이폰 표면의 온도변화를 핀이 없는 경우<sup>6)</sup>와 비교하여 그린 것이다. 과냉도가 다르므로 직접적인 비교는 할 수 없으나 주목

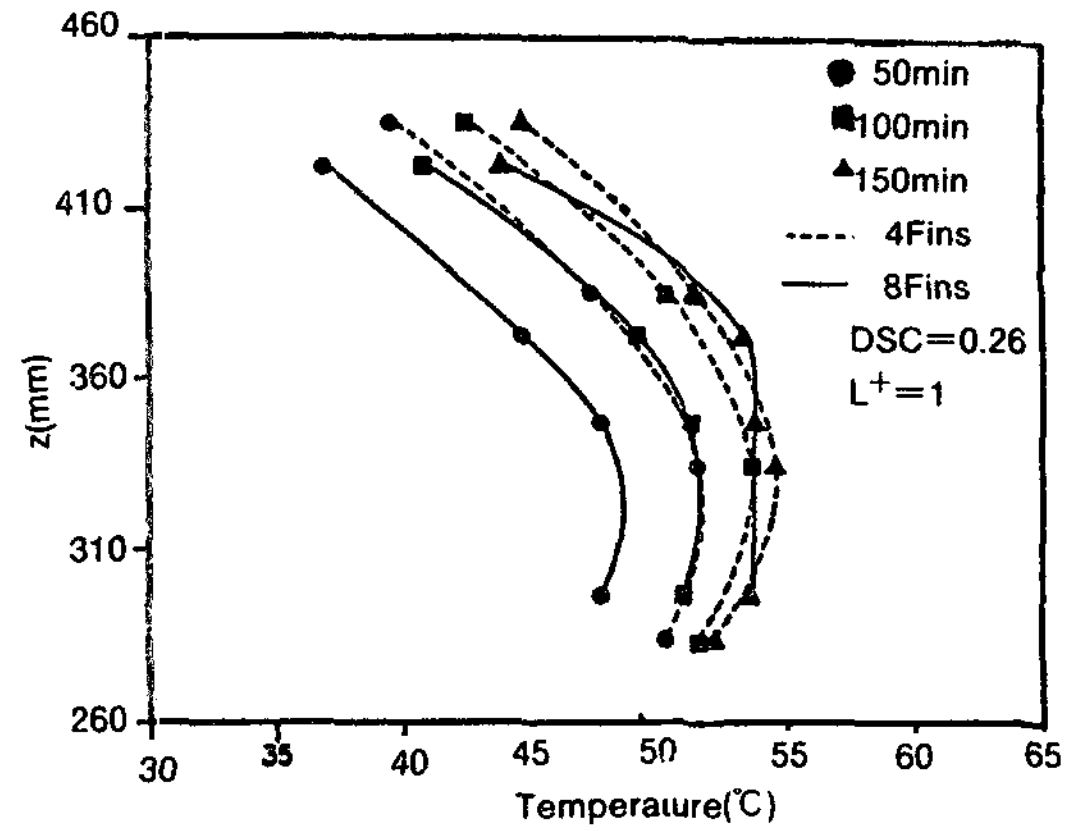


Fig. 5 (a) Representative Temperature Distributions of the Thermosyphon(Condenser Section)

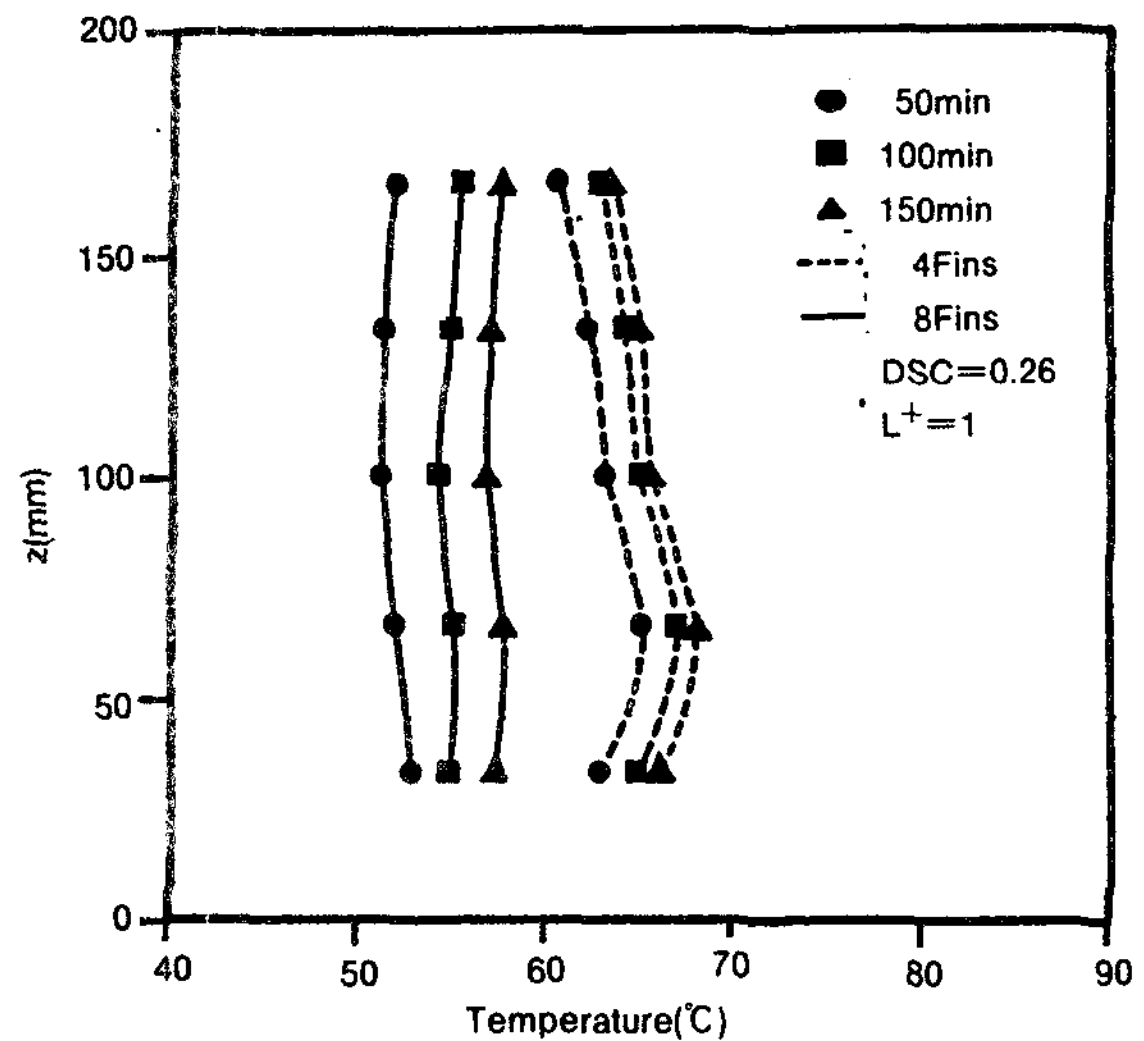
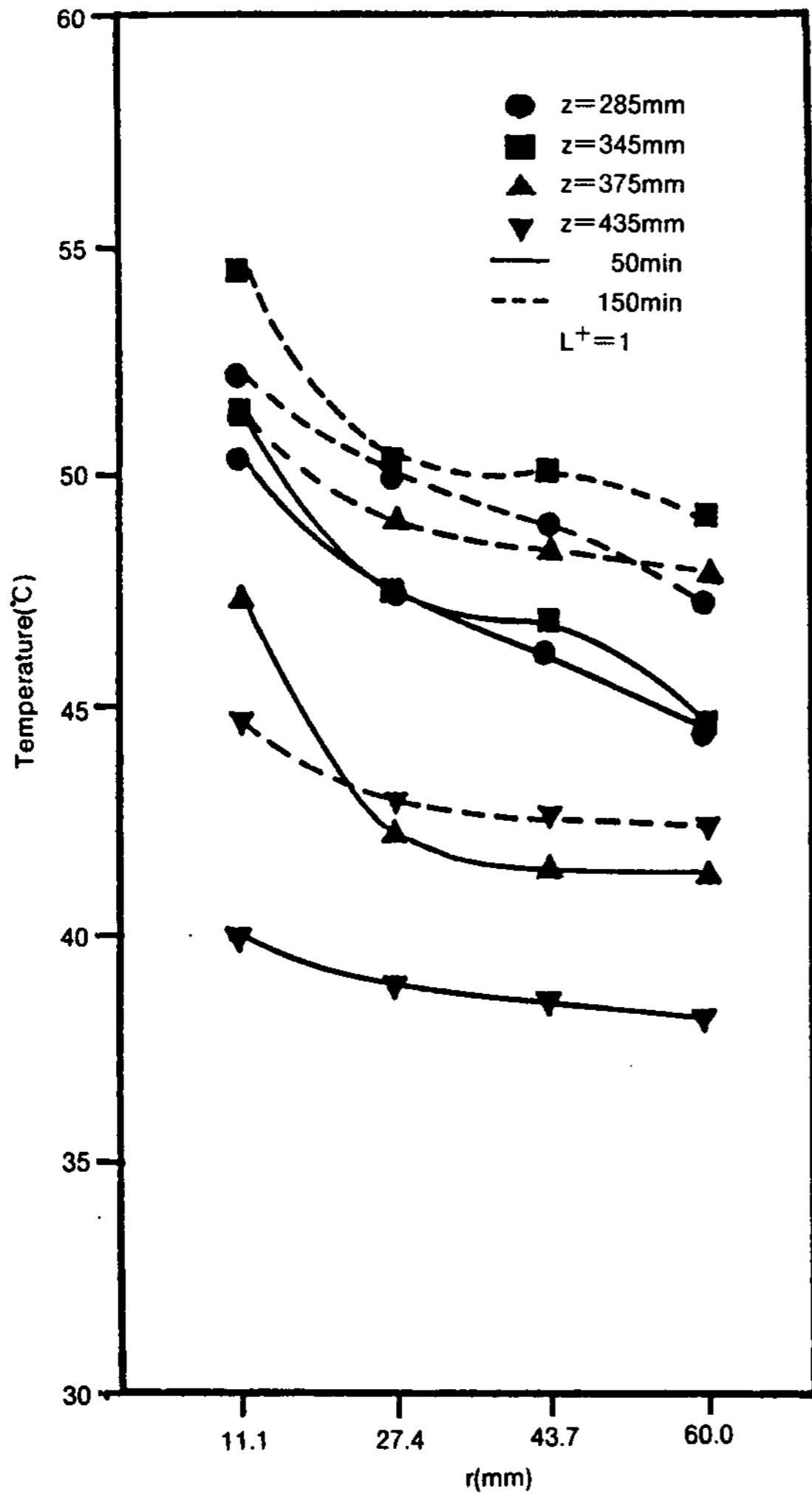


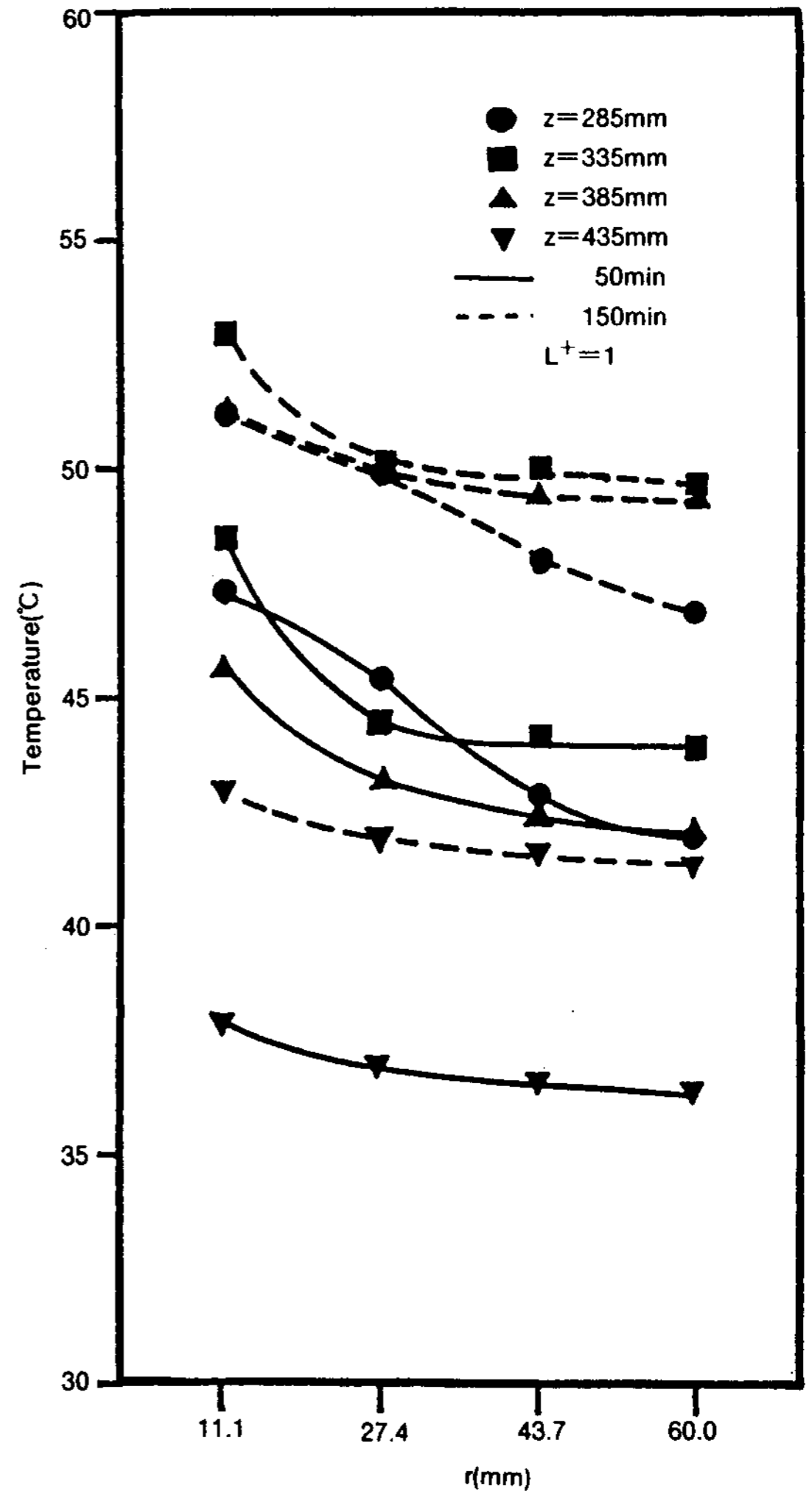
Fig. 5 (b) Representative Temperature Distributions of the Thermosyphon(Evaporator Section)

할 것은 핀이 없을 때에 일어나는 dry-out 현상이 핀을 부착하였을 경우에는 발생하지 않는다는 사실이다. 본 연구에서 전 실험을 통하여 한번도 dry-out 현상이 일어나지 않았으며 따라서 핀이 없을 경우의 dry-out 현상은 열전달이 원활하지 못했기 때문이라고 결론지을 수 있다.

Fig.8과 9는 각각 열싸이폰 표면과 왁스 사이의 열전달 계수 hc와 열싸이폰 내의 열관류계수 U<sub>TS</sub>의 변화를 그린 것이며 Fig.10에는 핀의



(a) 4Fins, DSC=0.26 Power Input=40w



(a) 6Fins, DSC=0.26 Power Input=50w

Fig. 6 Representative Radial Temperature Distributions of Fins

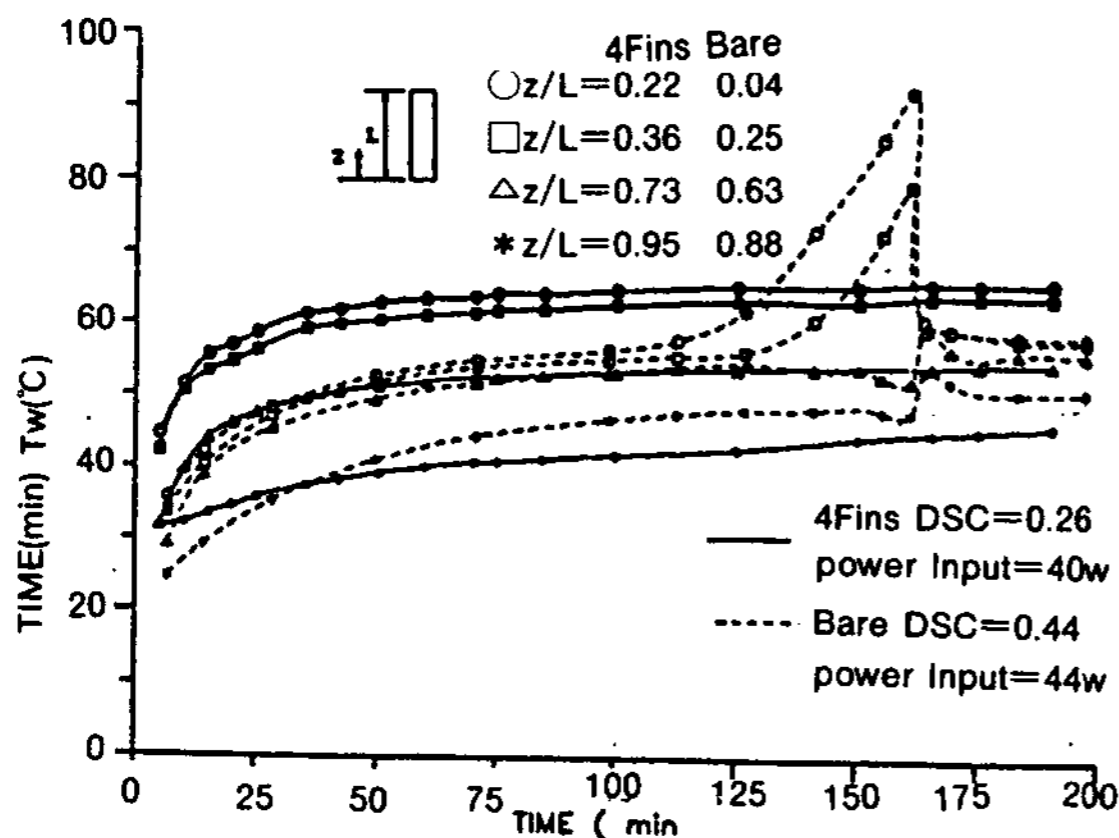


Fig. 7 Temperature History of the Surface of the Thermosyphon

수에 따른 PCES계의 총합 열관류 계수를 나타내었다. 열전달 계수는 각각 다음과 같이 정의하였다.

$$h_c = \frac{q}{(A_c + A_{fin})(T_{c,ave} - T_{wax,ave})}$$

$$U_{TS} = \frac{q}{A_c(T_{h,ave} - T_{c,ave})}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_{TS} L^+} + \frac{1}{h_c(1 + A_{fin}/A_c)}$$

여기서

q = 열전달률 (W)

$A_c$  = 열사이폰의 응축부 표면적 ( $m^2$ )

$A_h$  = 열사이폰의 증발부 표면적 ( $m^2$ )

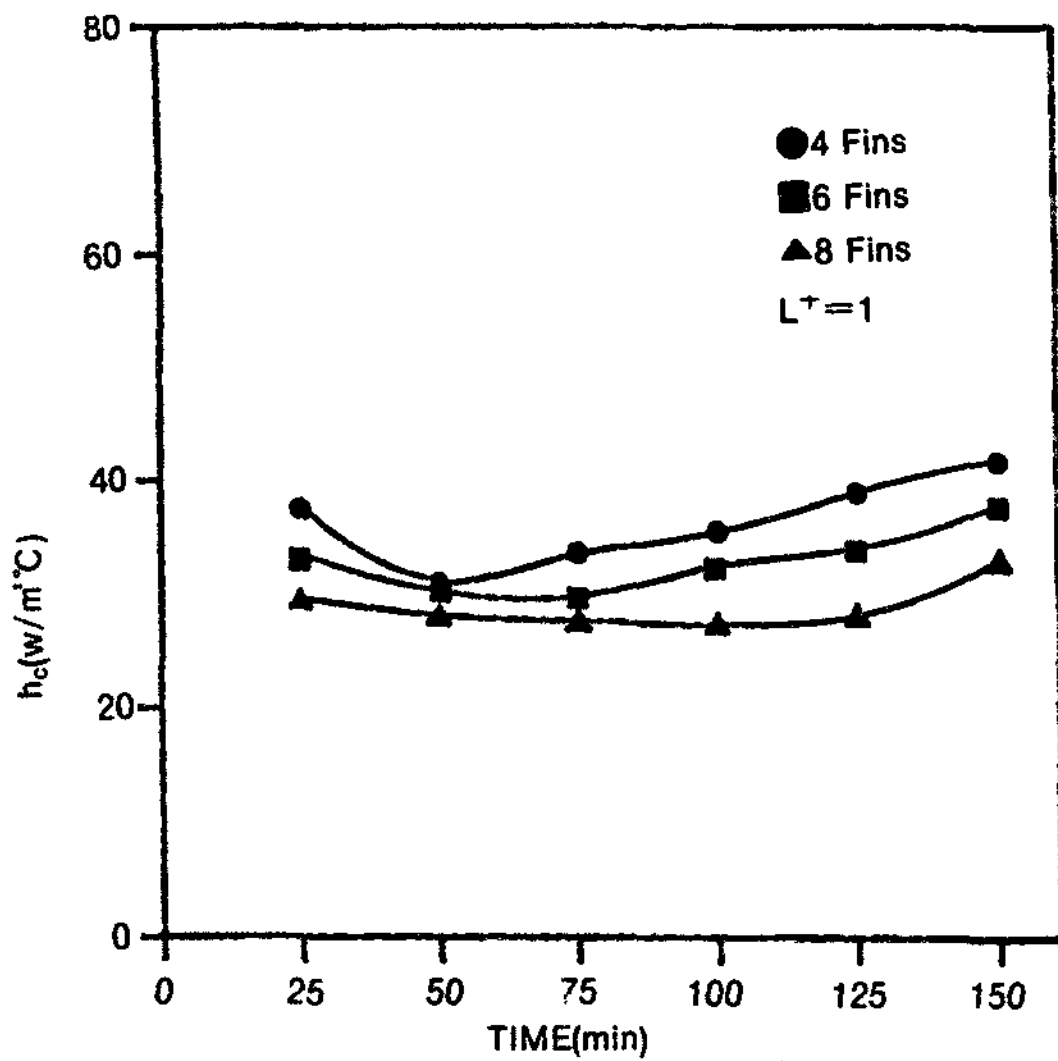


Fig. 8 Effect of Number of Fins on  $h_c$ (DSC=0.26, Power Input=40w)

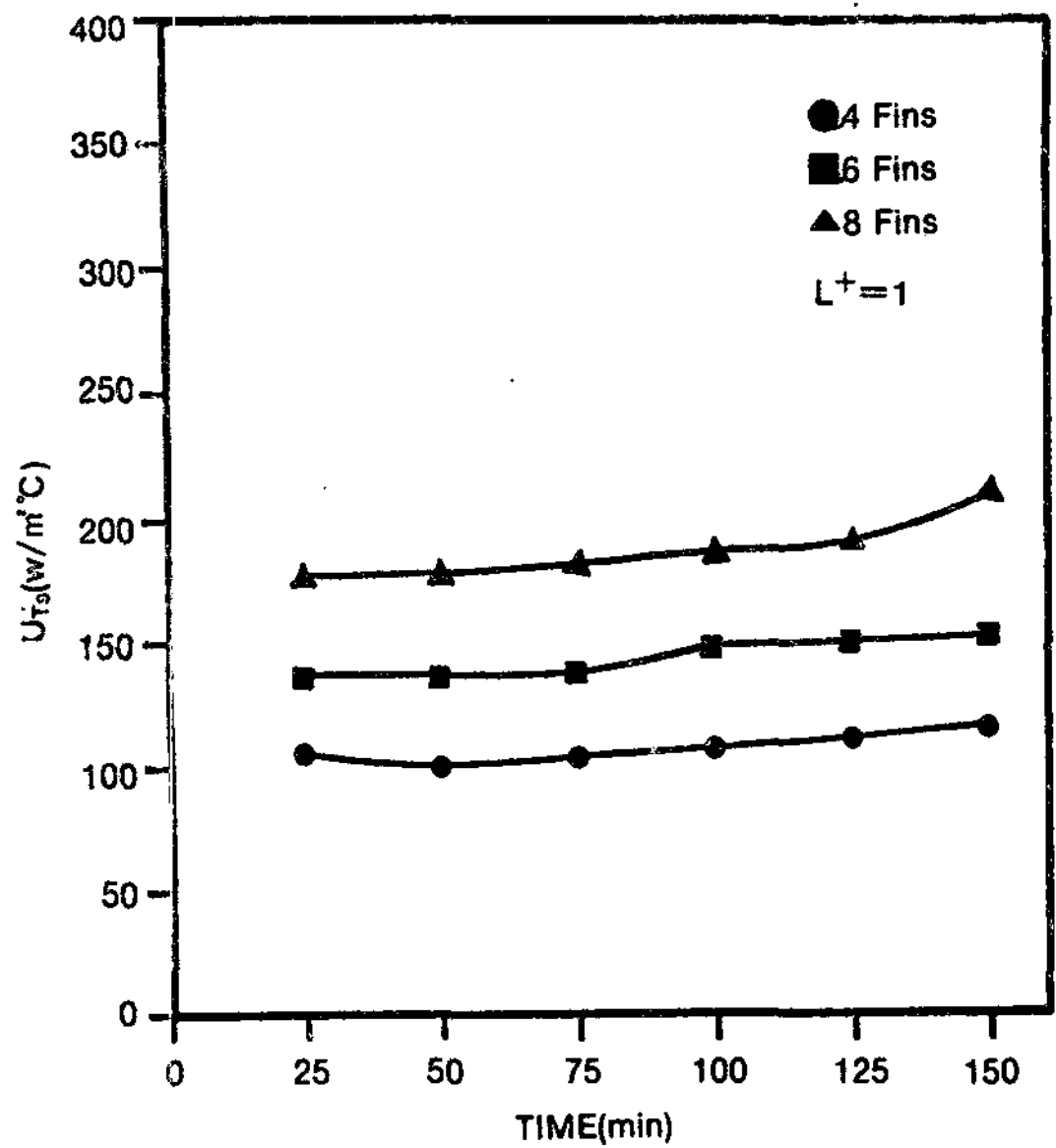


Fig. 10 Effect of Number of Fins on  $U$ (DSC=0.26, Power Input=40w)

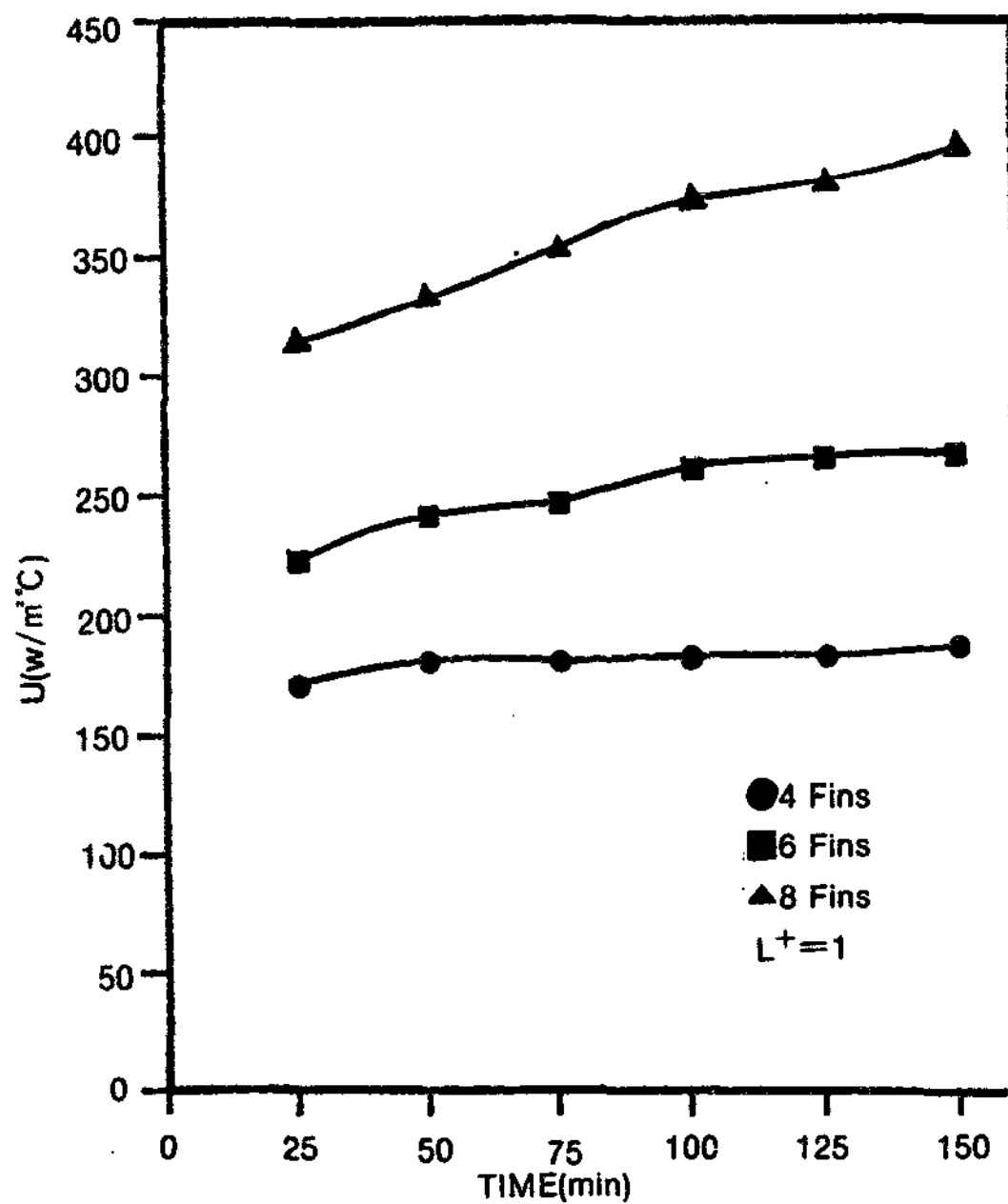


Fig. 9 Effect of Number of Fins on  $U_{Ts}$ (DSC=0.26, Power Input=40w)

$A_{fin}$  = 핀의 표면적 ( $m^2$ )

$T_{c,ave}$  = 응축부 표면의 평균온도 ( $^{\circ}C$ )

$T_{h,ave}$  = 증발부 표면의 평균온도 ( $^{\circ}C$ )

$T_{wax,ave}$  = 왁스의 평균온도 ( $^{\circ}C$ )

$h_c$ 는 실험초기에는  $T_{c,ave}$ 와 차이가 적으므로 큰 값을 나타내나  $T_{c,ave}$ 가 급격히 증가함

에 따라(Fig.7 참조) 감소한다. 그러나 시간이 경과하면서 용해된 왁스의 양이 많아짐에 따라 대류현상이 일어나고 따라서  $h_c$ 는 증가한다. 핀의 수가 많을수록 핀 간격은 좁고 이것은 대류현상을 억제할 것이며 이로 인해 대류의 효과가 나타나기 시작하는 시간, 즉  $h_c$ 가 다시 증가하기 시작하는 시간이 점점 늦어짐을 볼 수 있다. 핀의 수가 많을수록  $h_c$ 가 감소하는 것은  $h_c$ 의 정의식에서 핀의 수에 비례하여  $A_{fin}$ 이 커지기 때문이다.

그러나  $U_{Ts}$ 는  $h_c$ 와는 반대로 핀의 수가 많을수록 그 값이 크며 이것은 정의식에서  $A_c$ 는 일정한 반면 원활한 열전달로 인하여  $T_{h,ave}$ 와  $T_{c,ave}$ 의 차가 적어지기 때문이다. 또  $U_{Ts}$ 의 증가율이 핀의 수에 비례하여 커지는 것은 핀이 많을수록  $T_{h,ave}$ 의 증가율보다  $T_{c,ave}$ 의 증가율이 더 크기 때문이다(Fig.5 참조). 총합 열관류계수 또한  $U_{Ts}$ 와 같은 경향을 보이고 있으며 이것은 Fig.11에서 잘 볼 수 있는바와 같이  $h_c$ 보다는  $U_{Ts}$ 의 영향이 더 지배적이기 때문이다.

Fig.11은 또한 주입열량이 클수록  $h_c$ ,  $U_{Ts}$  및  $U$ 의 값이 증가함을 보여준다. 그러나 이것은 본 연구에서 사용한 주입열량의 범위내에서 그

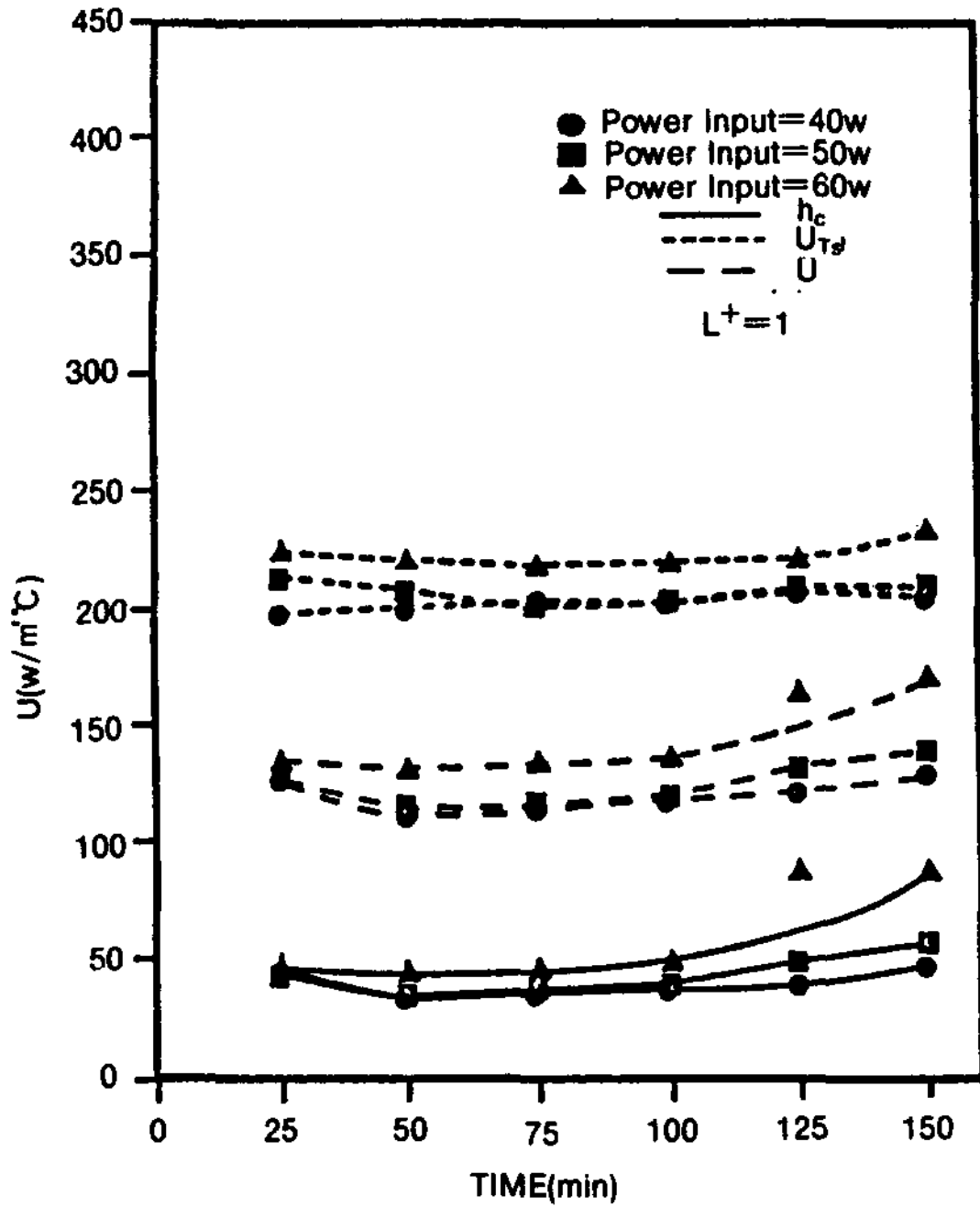


Fig. 11 Comparison of the Magnitudes of  $h_c$ ,  $U_{Ts}$ , and  $U$  (4Fins,  $DSC=0.15$ )

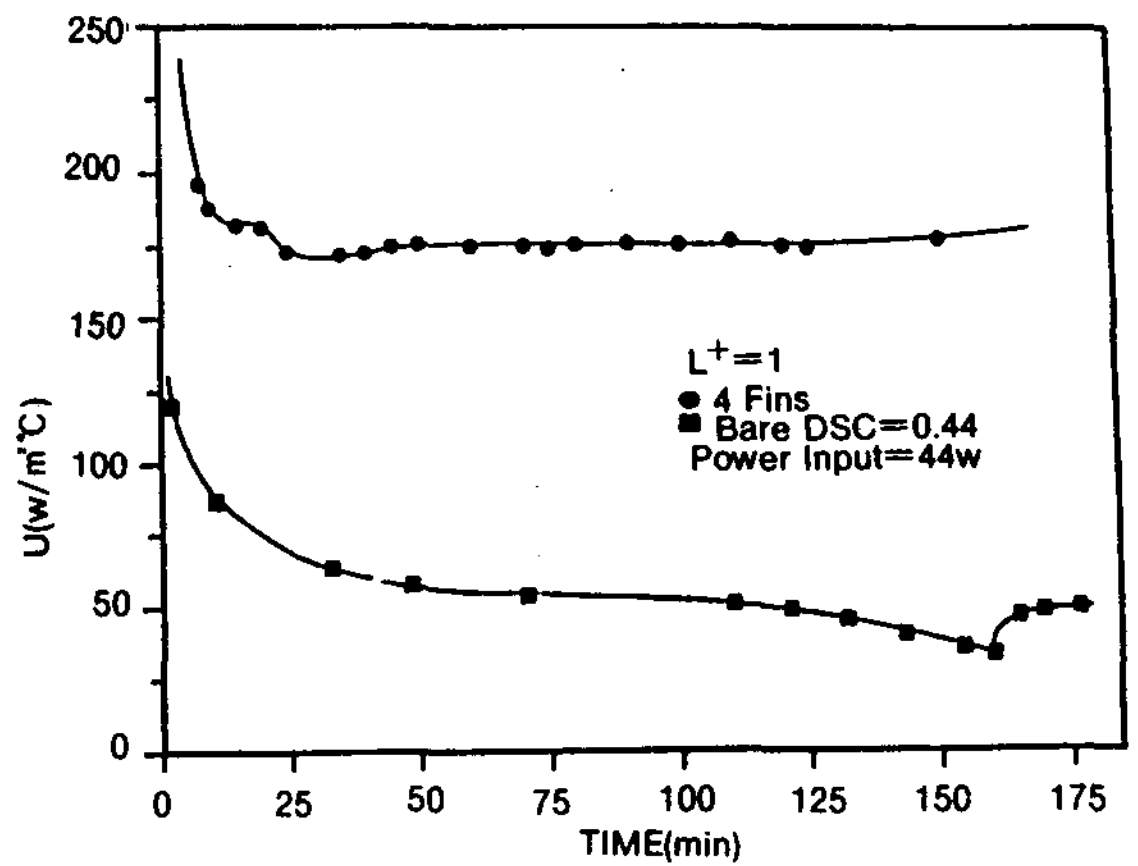


Fig. 12(b) Comparison of the Magnitudes of  $U$  for Bare and Finned Thermosyphons ( $DSC=0.26$ , Power Input=40w)

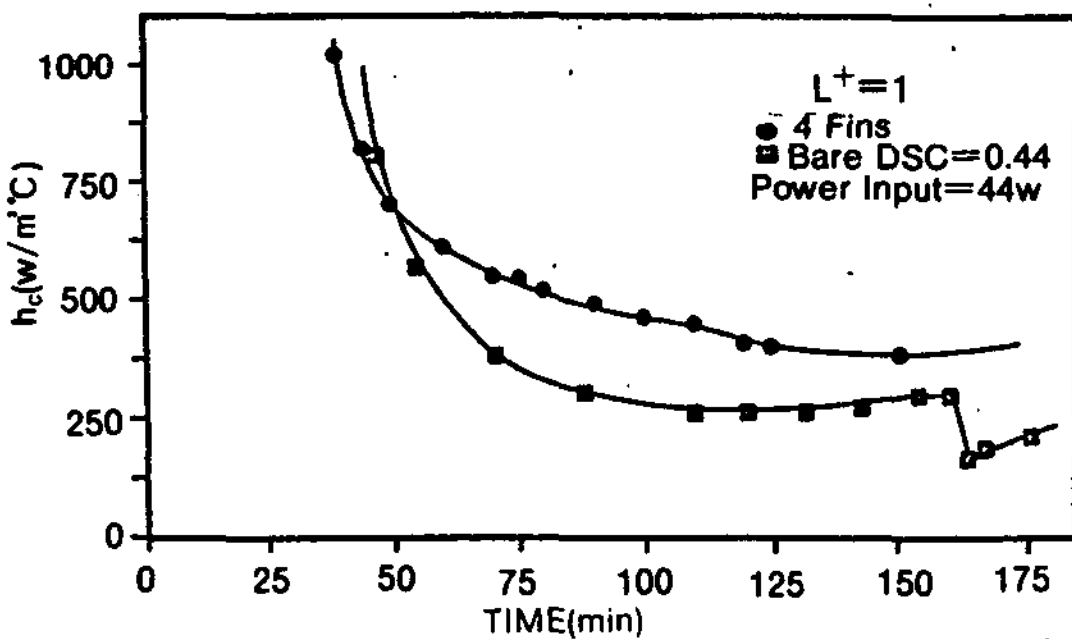


Fig. 12(a) Comparison of the Magnitudes of  $h_c$  for Bare and Finned Thermosyphons ( $DSC=0.26$ , Power Input=40w)

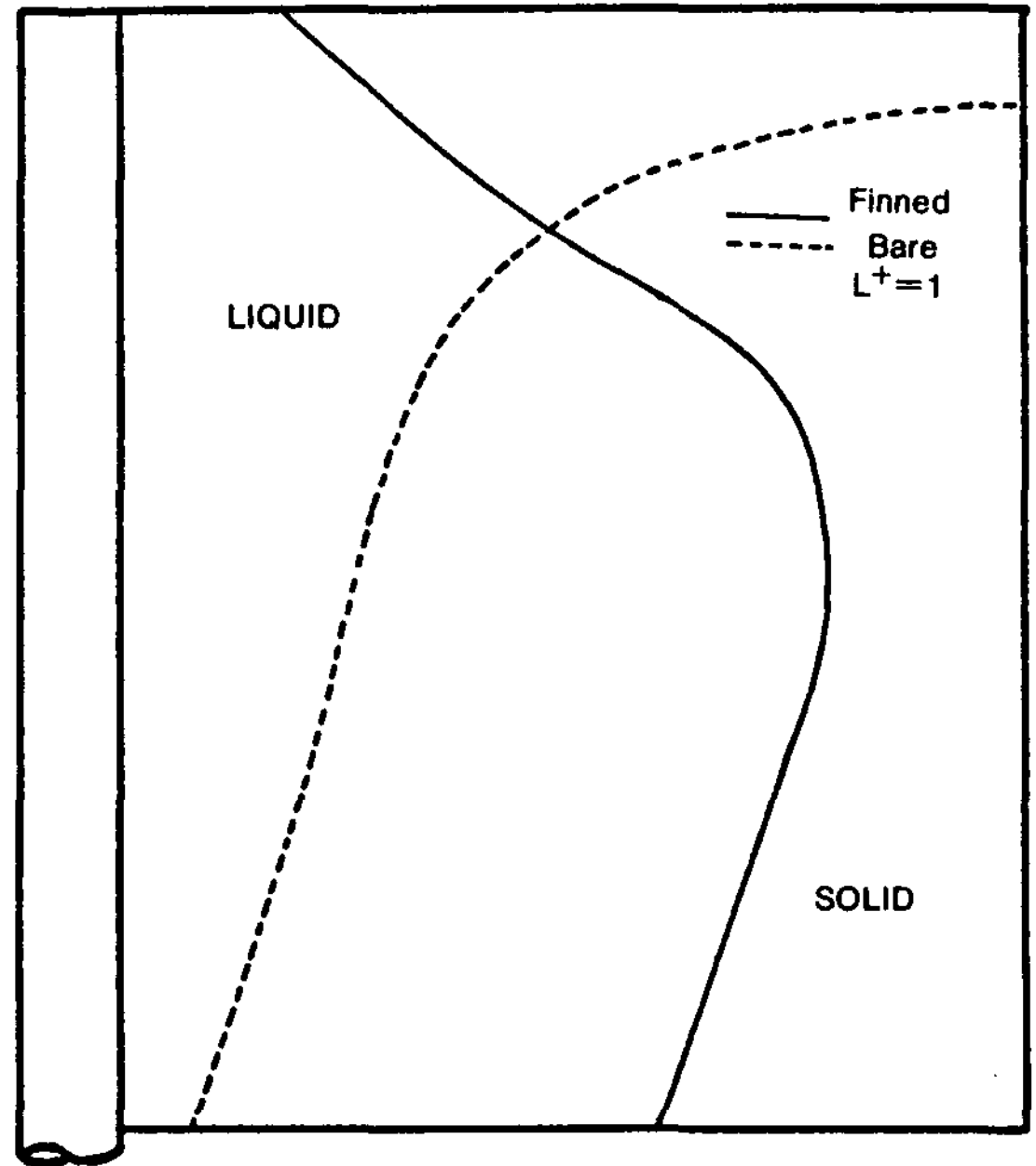


Fig. 13 Typical Shape of melt Cavity for Bare and Finned Thermosyphons

러한 것이며 주입열량을 더 높이면 열사이폰의 전열한계에 도달할 것이고 dry-out 등의 현상에 의해 열전달계수들의 값이 급격히 감소할 것이다.

Fig.12와 Fig.13에는 핀이 없는 경우<sup>6)</sup>와 핀이 있을 때의 열전달 계수와 왁스의 상변화 경계면을 같이 도시하였으며 핀의 효과가 잘 나타나 있다. Fig.12에서는 핀이 없는 경우와의 비교를 위해 열전달계수  $h_c$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$h_c = \frac{q}{A_c(T_{c,ave} - T_m)}$$

Fig.13에서 볼 수 있듯이 핀이 있을 때와 없을 때의 상변화 경계면의 모양은 전혀 다르고 핀들에 의해서 큰 스케일의 대류가 억제되고 있음을 알 수 있으며, 핀이 있음에도 불구하고 상부에서의 용해가 더딘것은 이미 언급한대로



열싸이폰내의 불활성 기체의 영향으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 핀이 달린 열싸이폰을 사용하여 잠열축열계로 열에너지를 저장할 때의 제반 열전달 현상을 조사하였으며 이로부터 얻은 몇 가지 중요한 결론은 다음과 같다.

1. 핀 수의 증가에 따라  $U_{TS}$  증가하나  $h_c$ 는 감소한다. 그러나  $U_{TS}$ 의 영향이 더 지배적이므로  $U$ 는  $U_{TS}$ 와 같은 경향을 보인다.
2. 핀을 부착하므로써 핀이 없을 경우 발생할 수 있는 dry-out 현상을 억제할 수 있다.
3. 핀의 수가 많을수록 핀과 핀사이에서의 대류현상의 발생은 지연된다.
4. 수평핀은 열전달을 원활하게 하나 핀이 없을 때 나타나는 큰 규모의 대류를 억제한다. 따라서 대류의 발생을 방해하지 않는 방법의 강구가 요망된다.

#### 후 기

이 연구는 한국학술진흥재단연구비(1988년도 자유공모과제) 지원에 의해 수행되었음을 밝히며 동 재단에 깊이 감사함을 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. E.G.Kovach(Ed.), "Thermal Energy Storage", Pergamon Press(1978)
2. E. van Allen, Experimental Results of a La-

tent Heat Storage System Based on Sodium Acetate Trihydrate in a Stabilizing Colloidal Polymer Matrix, Tested as a Component of a Solar Heating System, Thermal Storage of Solar Energy(C. den Ouden, Ed.), Nijhoff(1981)

3. M.M.Farid, Y.Kim, and A. Kansawa, Thermal Performance of a Heat Storage Module Using PCM's with Different Melting Temperature: Experimental, J. of Solar Energy Engineering, Vol.112(1990)
4. B.Carlsson and G. Wettermark, Heat Transfer Properties of a Heat of Fusion Store Based on  $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ , Solar Energy, Vol.24(1980)
5. A. Abhat, Performance Investigation of a Long Slender Heat Pipe for Thermal Energy Storage Application, J. Energy, Vol.6(1982)
6. K.H. Kim and Y. Lee, A Study on the Use of Two-Phase Closed Thermo-syphon for Latent Heat Storage System, 5th Int. Heat Pipe Conf. Proc., Part 1(1984)
7. K.H. Kim and J. Yoo, Thermal Energy Extraction from Phase Change Material by Means of Thermosyphon, Heat Transfer: Korea-U.S.A. Seminar(1986)
8. 목재균, 유재석, 김기현, 상변화 물질로부터의 열에너지 추출에 관한 연구-Fin이 부착된 Thermosyphon의 이용에 관하여, 태양에너지, Vol.8, No.1(1988)

## **Thermal Energy Storage in Phase Change Material —by Means of Finned Thermosyphon —**

**Kwon Jin Kim · Jaisuk Yoo\* · Ki Hyun Kim\*\***

Graduate School, Ajou Univ.(Currently Dong Yang Nozzle Co.)  
Dept. of Mechanical Engineering, Ajou Univ.\*

### **ABSTRACT**

A two-phase closed thermosyphon with circular fins was used as the heat transfer device for storing the thermal energy in paraffin wax. Experiments were carried out for 4, 6 and 8 fins and for various initial temperatures of the wax and power inputs. Heat transfer characteristics along the heat flow path were investigated as well as the overall performance of the system.

Some of the important results are as follows:(1) The thermosyphon heat transfer coefficient and the overall heat transfer coefficient increased with the number of fins, whereas the heat transfer coefficient between the fin and the wax decreased; (2) Facilitation of heat transfer by the fins seemed to alleviate the dry-out phenomenon that had been reported to occur in case of bare thermosyphon; and (3) The horizontal fins had adverse effect of subduing a full scale convection in the wax, and the increase of the number of fins delayed the onset of local convection between the fins.

## **A Study on the Heat Transfer Characteristics of Rotating Heat Pipe with the Water-Ethanol Mixture as Working Fluid**

**Choon-Kun Park · Chul-Ho Jun · Hae-Sung Seo\***

Dept. of Mechanical Engineering, College of Engineering, Dong A Univ.  
PUSAN Junior College\*

### **ABSTRACT**

Heat transfer characteristics of a rotating heat pipe have been studied numerically and experimentally with using water-ethanol mixture as working fluid. And triangular fins are attached inside the rotating heat pipe.

Experimental results generally agreed with numerical results.

According to increasing rpm and vapour pressure of the rotating heat pipe, the heat transfer rate increased. And also according to decreasing the concentration of ethanol, the heat transfer rate increased.

In the case of using the pure ethanol as working fluid, the heat transfer rate was about 80% of using distilled water.

The heat transfer rate and operating temperature difference of the rotating heat pipe was much influenced by ethanol concentration, and the optimum ethanol concentration was 0.2.