

상변화 물질로부터의 열에너지 추출에 관한 연구

- 핀이 부착된 열싸이폰 이용에 관하여 -

Thermal Energy Extraction from Phase Change Material

- by Means of Finned Thermosyphon -

목재균*

Jai Kyun Mok

유재석**

Jai Suk Yoo

김기현***

Ki Hyun Kim

ABSTRACT

One of the effective means to transfer the heat into and from the energy storage medium is thermosyphon. In this study, a two-phase closed thermosyphon with circular fins was used to extract the thermal energy stored in paraffin wax (Sunoco p-116). Heat transfer characteristics along the heat flow path were investigated as well as the overall performance. Some of the important results are as follows: (1) The temperature distribution of the wax in the radial direction was always maintained fairly uniformly; (2) Compared with bare thermosyphon, the heat transfer rate was vastly improved in the early stage of the experiment; and (3) Heat transfer coefficient between the wax and evaporating section of thermosyphon remained nearly constant during the experiment.

1. 서론

1970년대의 에너지 파동 이후 태양열의 이용에 관하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 태양에너지는 그 성질상 간헐적이며 저농도이기 때문에 흐린 날이나 밤에도 에너지를 연속적으로 사용하려면 날이 맑은 날 낮에 태양 에너지를 열에너지로 바꾸어 저장하여야 한다. 그러나 현재의 열에너지 저장 및 추출 기술이 만족할 만한 수준이 못되며 이는 태양열 이용에 장애요

인이 되고 있다¹⁾.

축열 방법은 크게 물질의 현열을 이용하는 방법과 잠열을 이용하는 방법으로 구분할 수 있다. 현재 주로 사용하고 있는 방법은 전자로서 축열 물질로는 물, 돌, 콘크리트 등이 많이 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 대단히 큰 체적의 축열조를 필요로 하며 물질의 온도 변화 폭이 크다는 문제점을 안고 있다. 현열을 이용하는 방법에 비해 어떤 물질의 상변화에 관계되는 잠열을 이용한 축열 방법은 열에너지 저장과정이나 추출 과정 동안 온도변화가 거의 없고 작은 양의 물질에 많은 양의 열에너지를 저장할 수 있다는 이점이 있다. 그러나 상변화축열계(PCES 계 :

* 아주대학교 대학원

** 아주대학교 공과대학 기계공학과

*** 정희원, 아주대학교 공과대학 기계공학과

Phase Change Energy Storage System)를 사용하기 위하여서는 상변화 과정에서 발생하는 물리적 및 화학적 현상의 이해 외에도 열에너지 저장 및 추출을 위한 효과적인 열전달 기구 및 이에 따른 열전달 문제가 선결되어야 한다.

열싸이폰이나 열파이프는 그 구조가 단순하며 작은 온도차에서도 많은 열을 전달할 수 있으므로 열에너지원이 저농도 일지라도 효과적으로 사용될 수 있으며, 따라서 잠열을 이용한 축열조, 즉 PCES 계의 열전달 문제를 해결하는 하나의 좋은 방법이 될 수 있다.²⁾

구미 제국과 일본, 중공등 외국에서는 열싸이폰이나 열파이프에 관한 연구가 이론적으로 또한 실험적으로 활발히 진행되어 왔으며 그 응용범위도 더욱 확대되어 가고 있다.³⁾ 그러나 우리나라의 경우 열파이프에 관한 기초적인 연구논문이 수편 발표되었을 뿐이며, 열싸이폰이나 이들의 응용에 관한 연구는 전무한 형편이다.

상변화 물질(PCM : Phase Change Materials) 내에서의 축열에 관한 문제도 아직 초보적인 단계로 축열시의 열저장 능력만을 고려한 연구결과는 발표되었으나, 열저장조로부터의 열추출에 관한 연구 및 열추출 방법이나 이들의 효과적인 조합에 대한 전체적인 해석은 극히 드문 형편이다. Abhat⁴⁾는 PCM속에서 수평에 가까운 각도로 놓여 있는 열파이프에 관한 실험결과를 발표하였으나 주로 열파이프 자체의 성능을 조사하는데 그쳤다. Kim and Lee⁵⁾는 열싸이폰을 이용하여 PCM에 열에너지를 저장할 때의 열전달 특성에 관하여 연구하였으며 김기현 등^{6,7)}은 수직열싸이폰을 이용하여 PCM으로부터의 열에너지 추출시의 열전달 현상을 연구하였다.

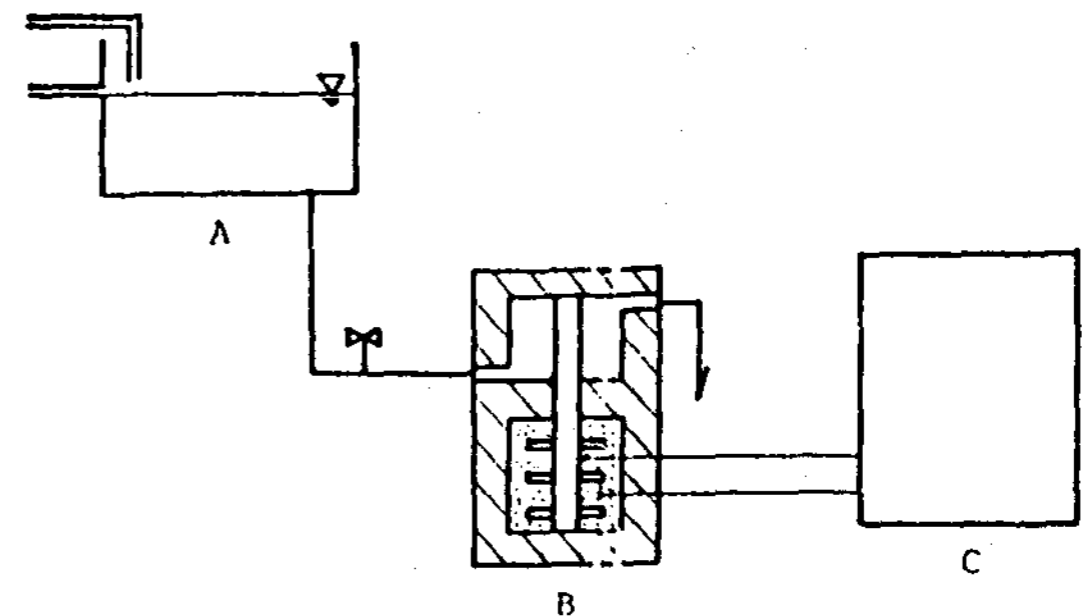
본 연구에서는 PCES 계에서의 열전달을 촉진시키기 위하여 환형핀이 달린 열싸이폰을 사용

하여 상변화물질로 부터 열에너지를 추출할 때의 열전달 현상과 열싸이폰의 성능을 실험을 통하여 조사하여 PCES 계의 효율적 이용에 대한 방안을 마련하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2-1 실험장치

실험장치는 크게 PCES 계, 온도측정 및 기록장치, 냉각수유입장치로 구성되어 있으며 Fig. 1에 나타난 바와 같다. PCES 계는 열싸이폰과 PCM 용기등으로 구성되어 있다.



A: Cooling Water Reservoir
B: PCES System
C: Data Logger

Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

열싸이폰은 외경 2.22 cm, 내경 2 cm, 길이 46 cm인 구리파이프로 제작하였으며, 열싸이폰에 부착한 핀은 두께 0.1 cm의 구리판을 사용하여 반경 6 cm 크기로 제작하였다. 열싸이폰 내부에는 전체 체적의 7%에 해당되는 증류수를 충전하였다. PCM으로는 파라핀 왁스(Sunoco P-116)를 사용하였으며, PCM 용기는 두께 0.3 cm, 직경 14 cm, 높이 20 cm인 스테인레스강관과 두께 0.3 cm의 스테인레스강판으로 제작하였다. PCES 계는 유리섬유와 단열재(아이소핑크)로 철저히 단열하였다. 온도 측정을 위하여 30개의 구리-constantan(T-type) 열전대를

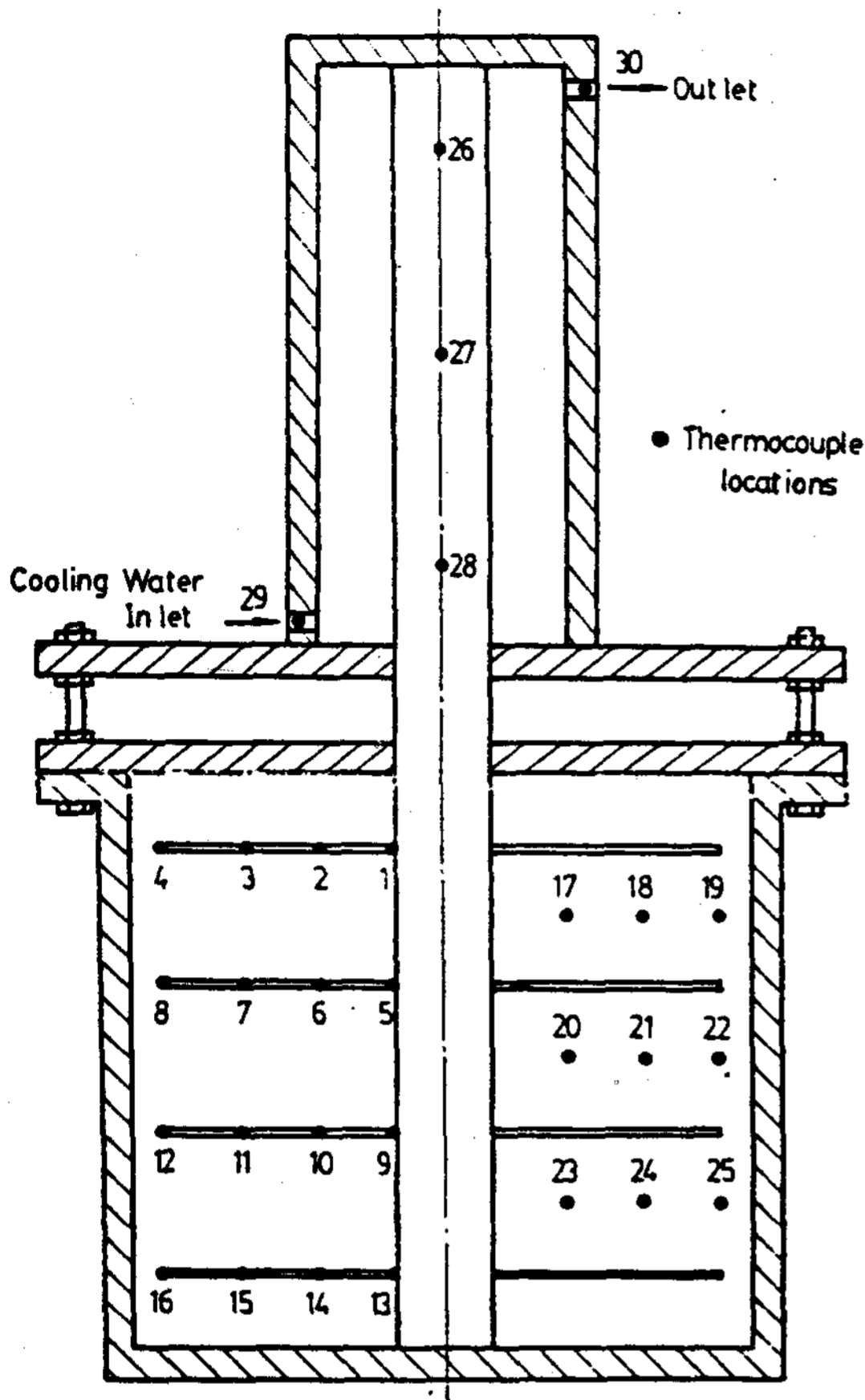


Fig.2 Thermocouple Locations in PCES System

사용하였다. 이 중 16개의 열전대는 핀의 수직 및 반경방향의 온도분포 측정에 사용하였으며 PCM의 온도측정에는 9개의 열전대를 사용하였다. 또한 열싸이폰의 응축부 온도측정에 3개, 냉각수의 입구 및 출구 온도측정에 각각 1개의 열전대를 사용하였다. 각 열전대의 온도 측정 위치는 Fig.2에 표시하였다.

2-2 실험 방법

먼저 왁스의 온도가 실험수행 초기온도 보다 약간 높게 되도록 가열수조에서 PCES계를 가열한 후, 가열수조에서 빼내어 단열물질로 단열시킨다. 왁스의 온도가 실험수행 초기온도까지

비교적 균일하게 냉각되면 냉각유체를 응결부로 유입시키면서 실험을 시작하여 온도 및 냉각수 유량을 측정한다. 온도는 3분간격으로 측정하였으며, 냉각수 유량은 30분 간격으로 측정하였다. 왁스의 가장 높은 온도가 응고점 43°C 를 지나 42°C 에 이르면 실험을 끝마친다. 이러한 방법으로 핀의 수를 4, 6, 8개로, 왁스의 초기온도를 $70, 80^{\circ}\text{C}$ 로 변화시키며 실험을 수행하였으며, 또한 각 실험조건에 대하여 냉각수 유량을 변화시켰다.

3. 결과 및 고찰

Fig.3과 Fig.4에 핀과 핀 사이의 중간지점에서 측정된 왁스의 반지름 및 수직방향으로

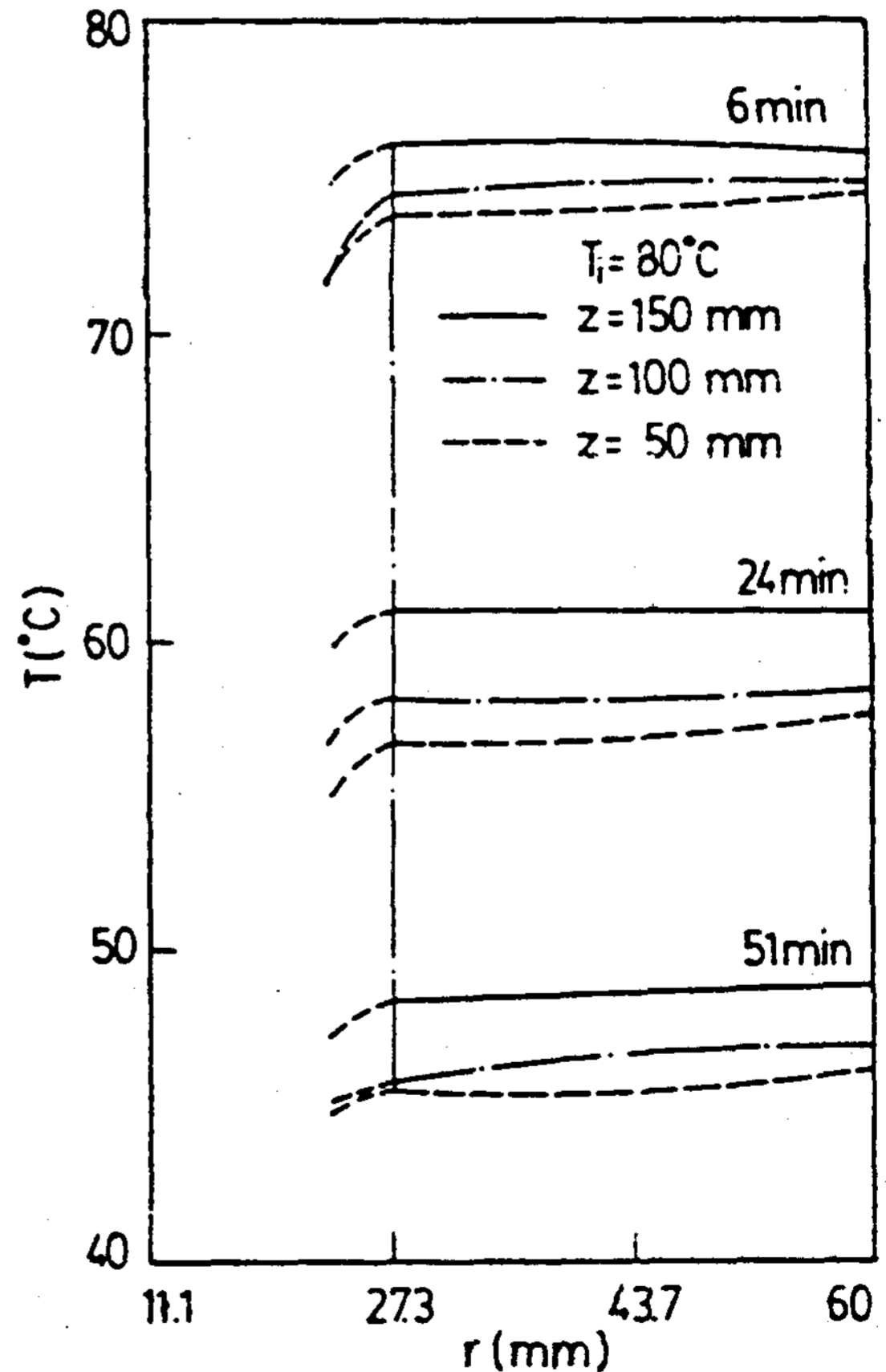


Fig.3 Representative Radial Temperature Distributions of Wax (4Fin, $\dot{m}=49.633\text{g/min}$)

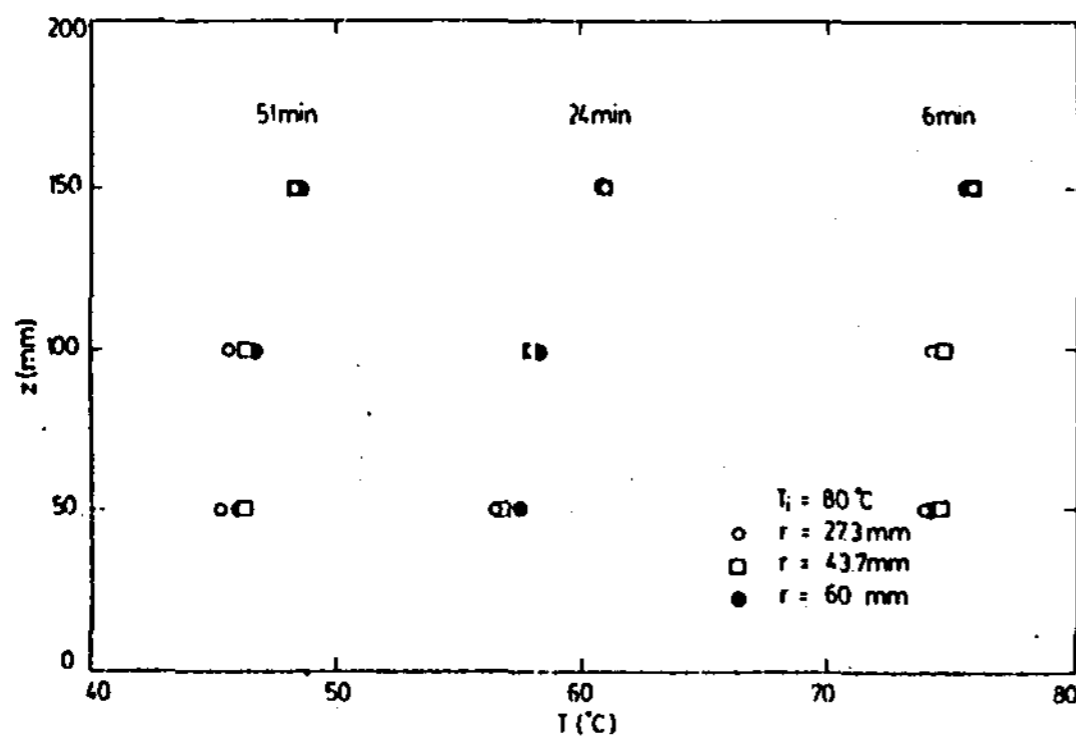


Fig. 4(a) Representative Vertical Temperature Distributions of Wax (4Fin, $\dot{m}=49.633\text{g/min}$)

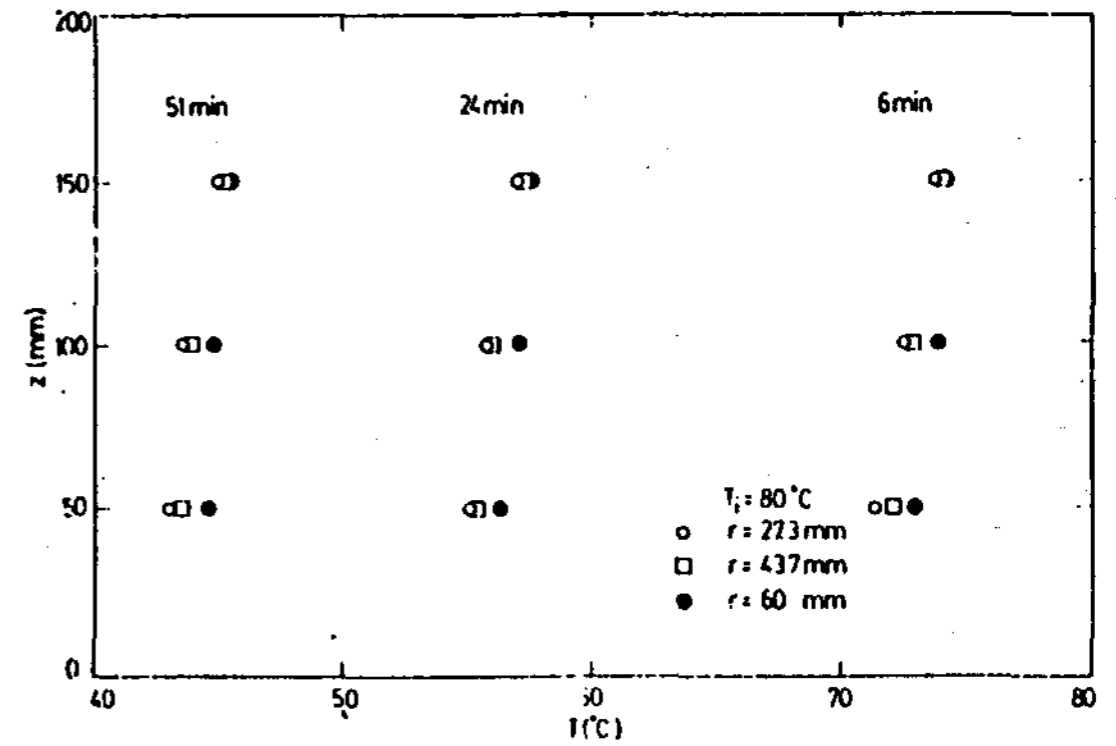


Fig. 4(b) Representative Vertical Temperature Distributions of Wax (8Fin, $\dot{m}=46.614\text{g/min}$)

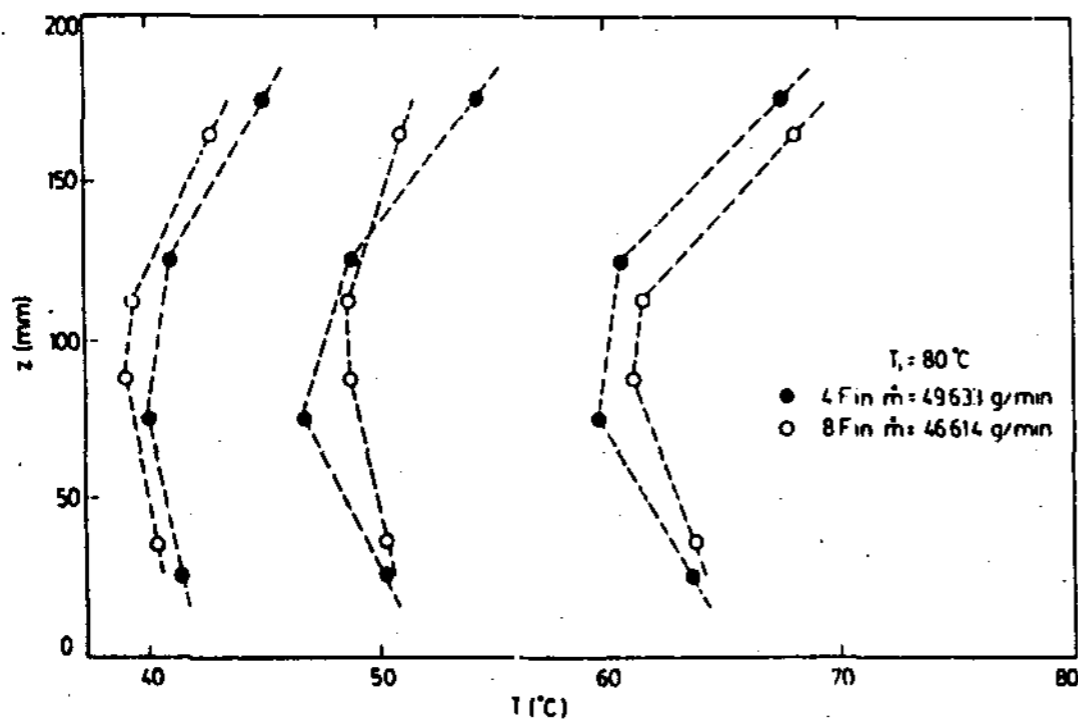


Fig. 5(a) Representative Vertical Temperature Distributions on the Thermosyphon Surface (Evaporator Section)

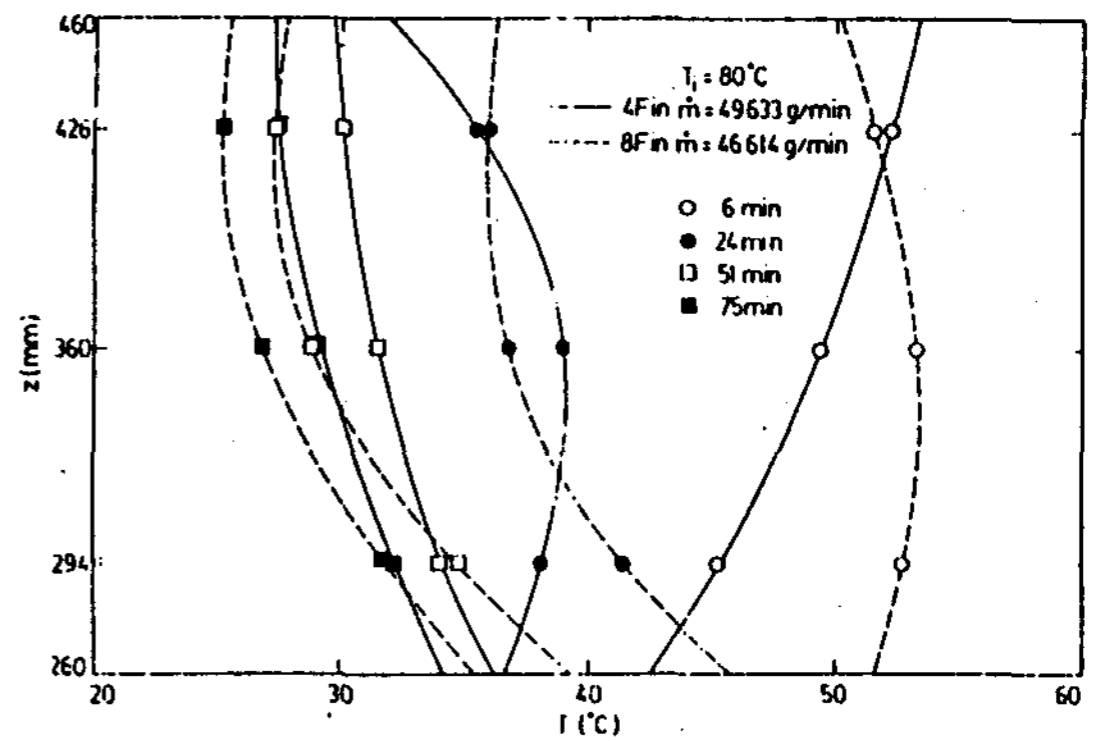


Fig. 5(b) Representative Vertical Temperature Distributions on the Thermosyphon Surface (Condenser Section)

온도분포가 시간의 함수로 주어졌다. 이 그림에서 왁스의 수평 방향으로의 온도변화가 편이 없을 경우 6,7)에 비하여 현저하게 작음을 볼 수 있다. 이것은 수평핀으로 인하여 대류현상이 억제된 결과이며 이와 유사한 문제의 해석에 있어 대류효과를 무시할 수 있고 왁스와 열싸이폰 사이의 열전달계수를 정의할 때 핀사이의 중앙에서의 온도를 기준온도로 사용할 수 있음을 시사한다. 수직방향 온도분포의 경우 실험이 진행됨에 따라 중앙부에서의 온도가 상, 하부의 온도

보다 낮아지는 것은 아래에서 설명한 바와 같이 열싸이폰의 중앙부위에서의 열전달이 더 활발하기 때문인 것으로 풀이된다.

열싸이폰 표면의 온도분포가 역시 시간의 함수로 Fig. 5(a)에 그려져 있다. 여기서 왁스와 접촉하고 있는 증발부의 온도는 핀의 기저(base)에서 측정된 온도로서 중앙부분에서의 온도보다 증발부 양 끝부분에서의 온도가 더 높고 그 차이는 실험의 초기단계 즉, 열전달이 활발할 때 가장 큼을 볼 수 있다. 이러한 현상은 핀

의 수에 관계없이 항상 발생하였으며, 하부의 온도가 높은 원인은 열싸이폰 내의 작동유체(증류수)의 양(체적비 7%)이 충분하지 못한 데에 있다고 분석된다. 즉, 응축부에서 응결된 작동액이 증발부로 되돌아 올때 증발부의 상단에서 증류수막의 두께가 가장 크고, 따라서 이 곳에서 전도 열저항이 가장 크며 이것은 열전달을 저하시켜 열싸이폰 표면의 온도를 높이게 된다. 한편, 작동유체의 양이 충분하지 않으면 증발부의 하부에 도달하기 전에 그 대부분(또는 전부)이 증발하여 하단부에는 건조현상이 일어난다. 이로 인하여 하단부에서의 열전달이 원활하지 못하게 되어 열싸이폰 표면의 온도는 높게 유지된다. 증발부의 상부와 하부에서 열전달율이 낮음은 Fig.6에 보인 핀의 온도분포에서 핀기저에서의 온도구배를 비교할 때 더욱 명확해진다.

Fig.5(b)에는 응축부에 해당하는 열싸이폰의 표면온도를 시간의 함수로 나타냈다. 응축부에서는 냉각수의 유동방향을 고려할 때 응축부 윗 부분에서의 온도가 가장 높을 것으로 예상되나 실험결과는 반대현상을 보이고 있다. 이 현상은 열싸이폰 내부에 불응결 기체가 발생하여 응축부 상단으로의 증기의 흐름을 막기 때문인 것으로 판단된다.⁸⁾

핀에서의 전형적인 온도분포가 Fig.6에 나타나 있다. 핀의 기저에서의 온도구배를 비교해 보면 중앙부에 있는 핀들에서의 온도구배가 양쪽 끝의 핀들의 온도구배보다 항상 월등히 큼을 볼 수 있고, 이것은 이미 언급했던 바와 같이 증발부 중앙에서의 열전달률이 양 끝에서의 것보다 높다는 사실을 확인해 준다.

Fig.7은 핀의 수와 순간 열전달률과의 관계를 보여주며 냉각수의 유량에 따른 순간 열전달률의 변화는 Fig.8에 주어졌다. 이 그림에서 순간 열전달률은 다음의 식으로 부터 계산한 것

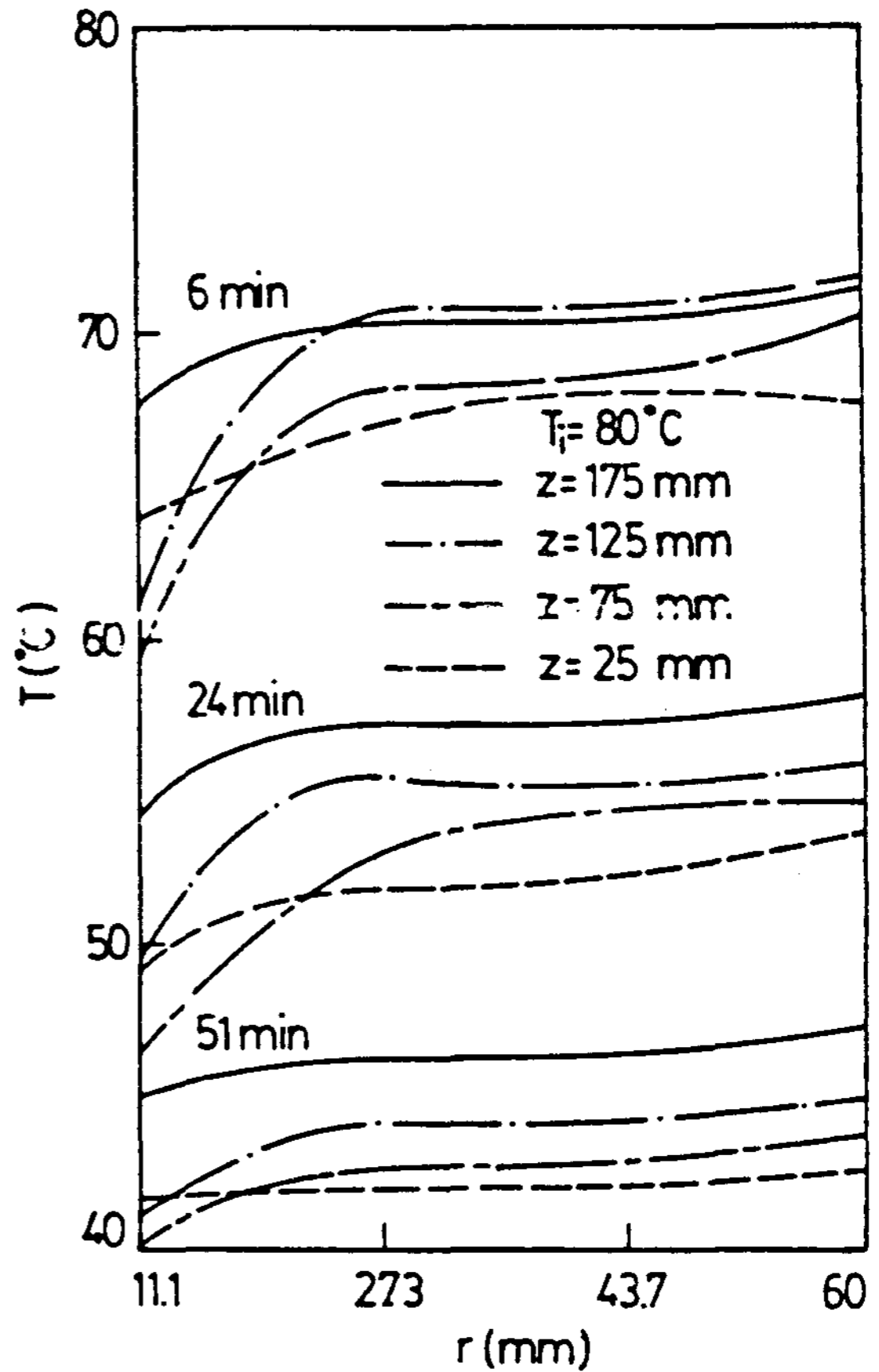


Fig.6 Representative Radial Temperature Distributions of Fins (4Fin, $\dot{m}=49.633\text{g/min}$)

이다.

$$q = \dot{m} C_p (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$$

열전달률은 실험초기에 가장 높고, 왁스내에 저장된 열에너지가 감소함에 따라 계속하여 떨어지며 이것은 실험조건으로 부터 예측되는 결과이다. 또한 열전달률은 핀의 수에 따라 그리고 유량이 증가할수록 커지나 반드시 일차적으로 비례하지는 않음을 볼 수 있다.

Fig.8에는 참고로 핀이 없는 경우^{6,7)}의 열전달률 곡선을 포함시켰으며 같은 조건하에서의 핀의 효과가 잘 나타나 있다.

핀이 있을 때와 없을 때의 실험초기의 곡선의

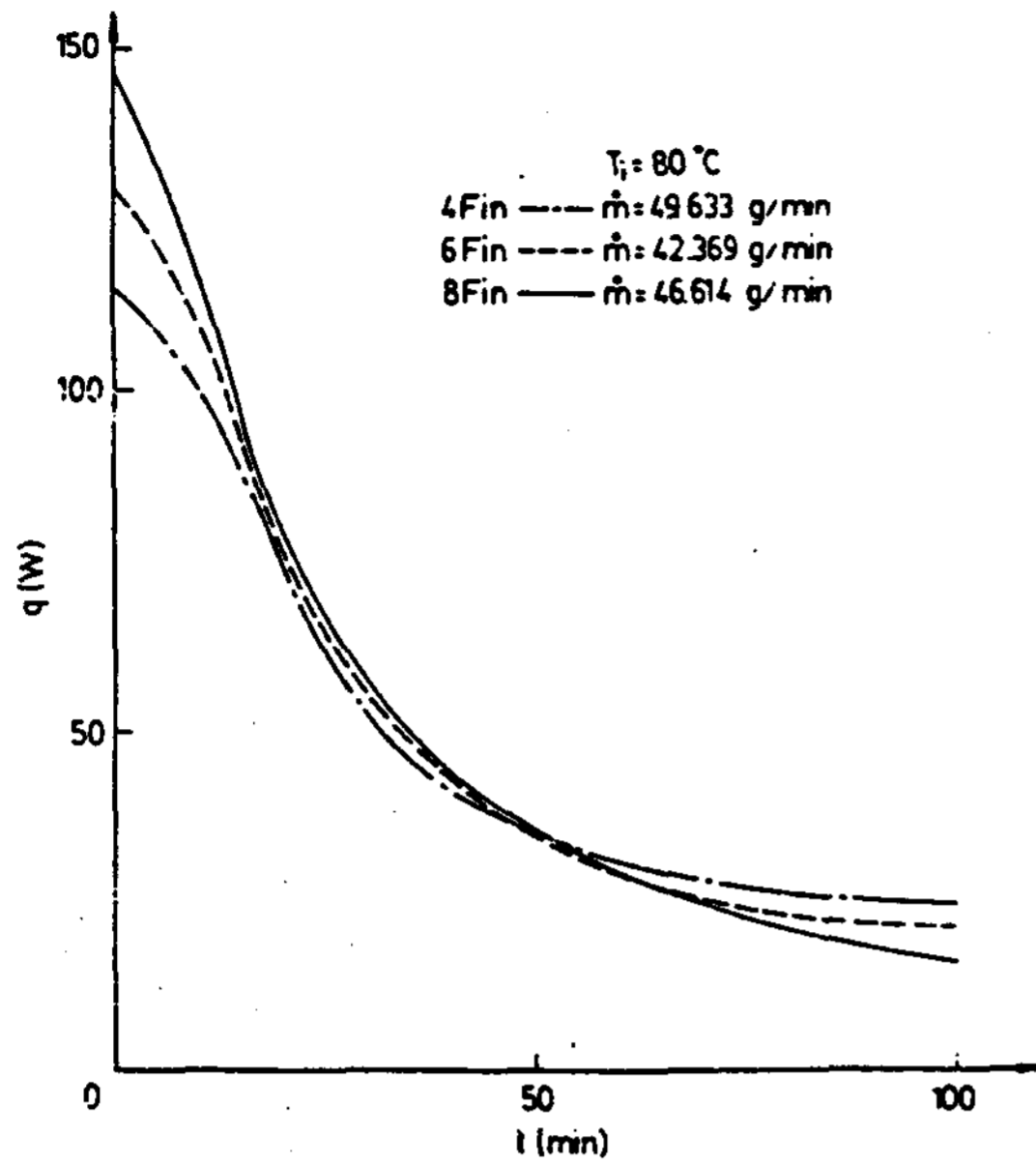


Fig. 7 Effect of Number of Fins on the rate of Heat Transfer

형태가 다른것은 실험방법의 차이때문이다. 즉, 핀이 없을 때는 응축부를 포함한 냉각수 유로에 냉각수를 채우고 일정한 온도로 유지된 왁스에 증발부를 삽입시키는 동시에 냉각수를 흘려 보내면서 실험을 시작하였으나^{6,7)}, 본 실험에서는 왁스용기와 핀 달린 증발부가 이탈되기 어려워 Fig. 3에 보여진 대로 축열조를 구성한 후 왁스의 온도가 비교적 균일하게 되면 냉각수를 유입시키면서 실험을 시작하였다. 시간이 경과하면서 핀이 있을 때의 열전달률이 더 낮은 이유는 실험 초기에 이미 대부분의 열에너지가 왁스로 부터 추출되었기 때문이다.

Fig. 9(a,b)는 왁스와 열싸이폰 증발부 표면 사이의 열전달계수 h_h , 열싸이폰내의 열관류계수 U_{TS} 및 응축부의 표면과 냉각수 사이의 열전달계수 h_c 의 변화를 그린 것이다. 여기서 열전달계수는 각각 다음과 같이 정의되었다.

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

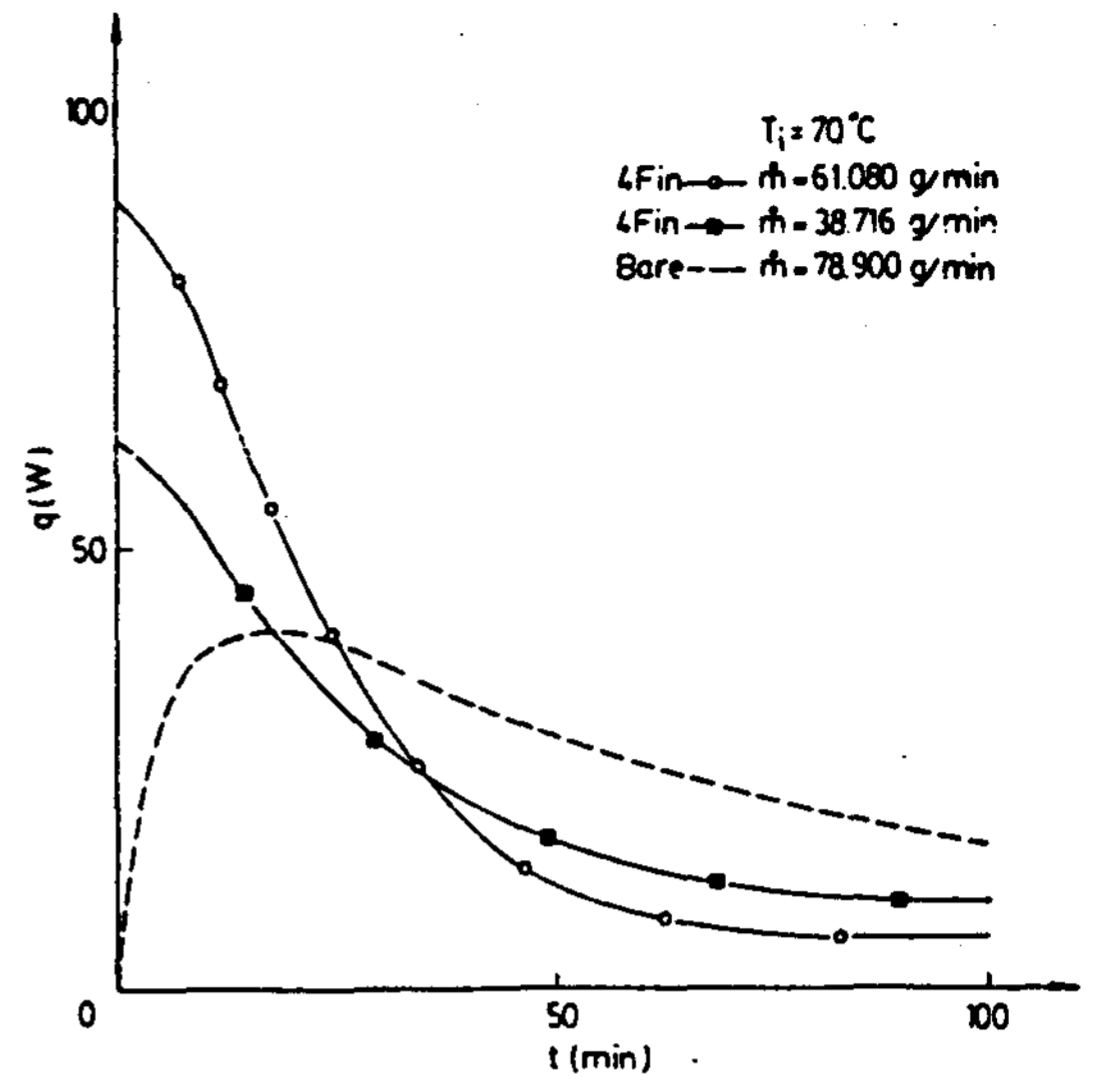


Fig. 8 Effect of Mass Flow Rate of Cooling Water on the Rate of Heat Transfer

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

$$h_h = \frac{q}{(A_h + A_{fin})(T_{wax,ave} - T_{h,ave})}$$

$T_{h,ave}$ 는 핀의 기저(base)에서의 온도를 평균한 것이며, $T_{wax,ave}$ 는 왁스 중앙에서의 세 온도를 체적에 대한 가중치를 주어 평균한 온도이다. U_{TS} 가 실험초기에 급격히 떨어지는 현상은 실험이 응축부위에 냉각유체를 유입시키면서 시작되므로 초기에는 열싸이폰의 증발부와 응축부의 온도차이가 거의 없다가 응축부위로부터 냉각유체가 유출될 즈음에는 증발부와 응축부의 온도차가 크게 되기 때문이다. h_h 는 같은 조건하에서 핀의 수가 증가함에 따라 감소하며 그 이유는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 q 가 핀의 수에 일차적으로 비례하지 않기 때문이다. Fig. 10(a)에서 h_h 는 핀이 없을 때와는 달리 시간에 따라 큰 변화를 보이지 않으며 그 값의 차이가 시간이 경과함에 따라 현저하게 커짐

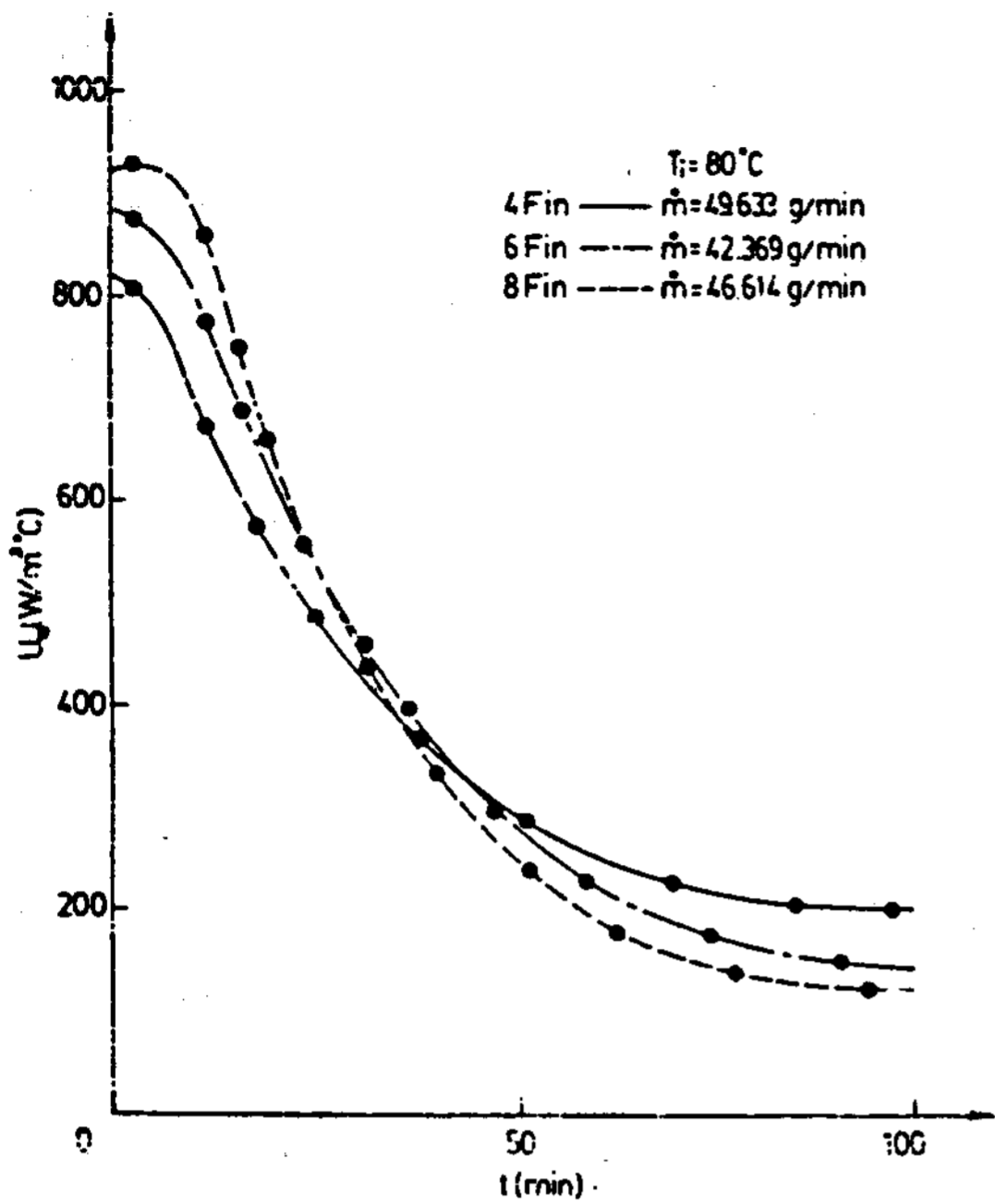


Fig. 9(a) Effect of Number of Fins on the Heat Transfer Coefficient, U_{TS}

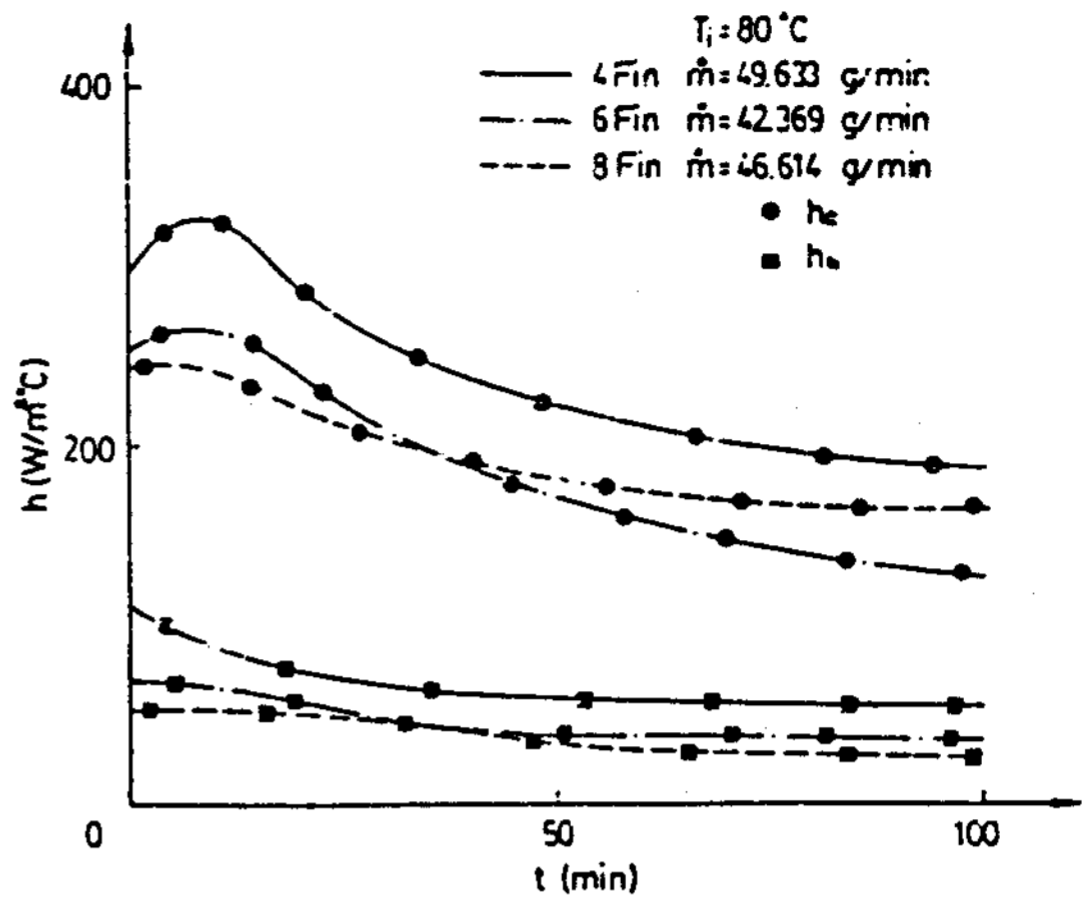


Fig. 9(b) Effect of Number of Fins on the Heat Transfer Coefficients, h_c and h_h

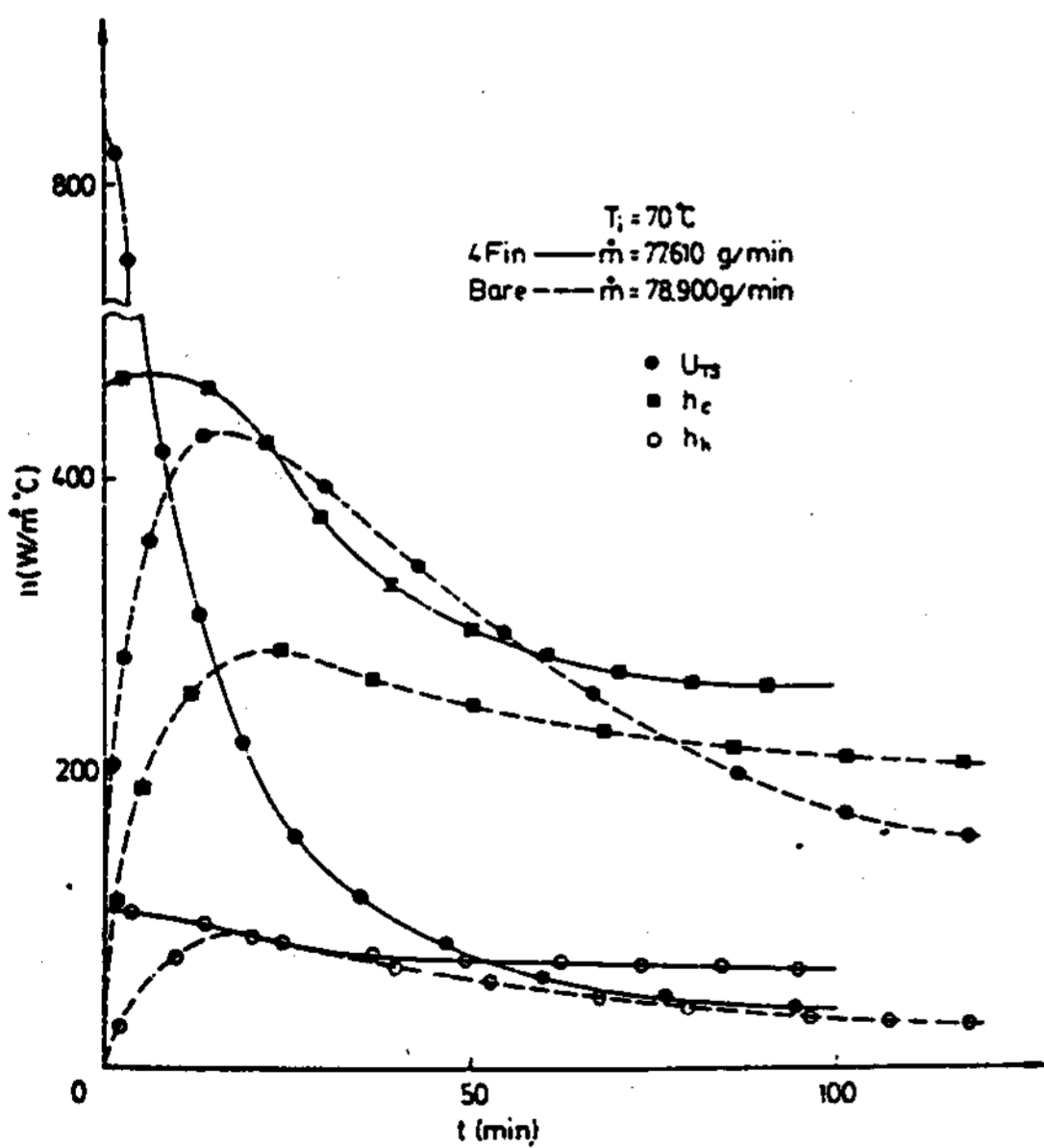


Fig. 10(a) Comparison of the Magnitudes of Heat Transfer Coefficients for Bare and Finned Thermosyphon

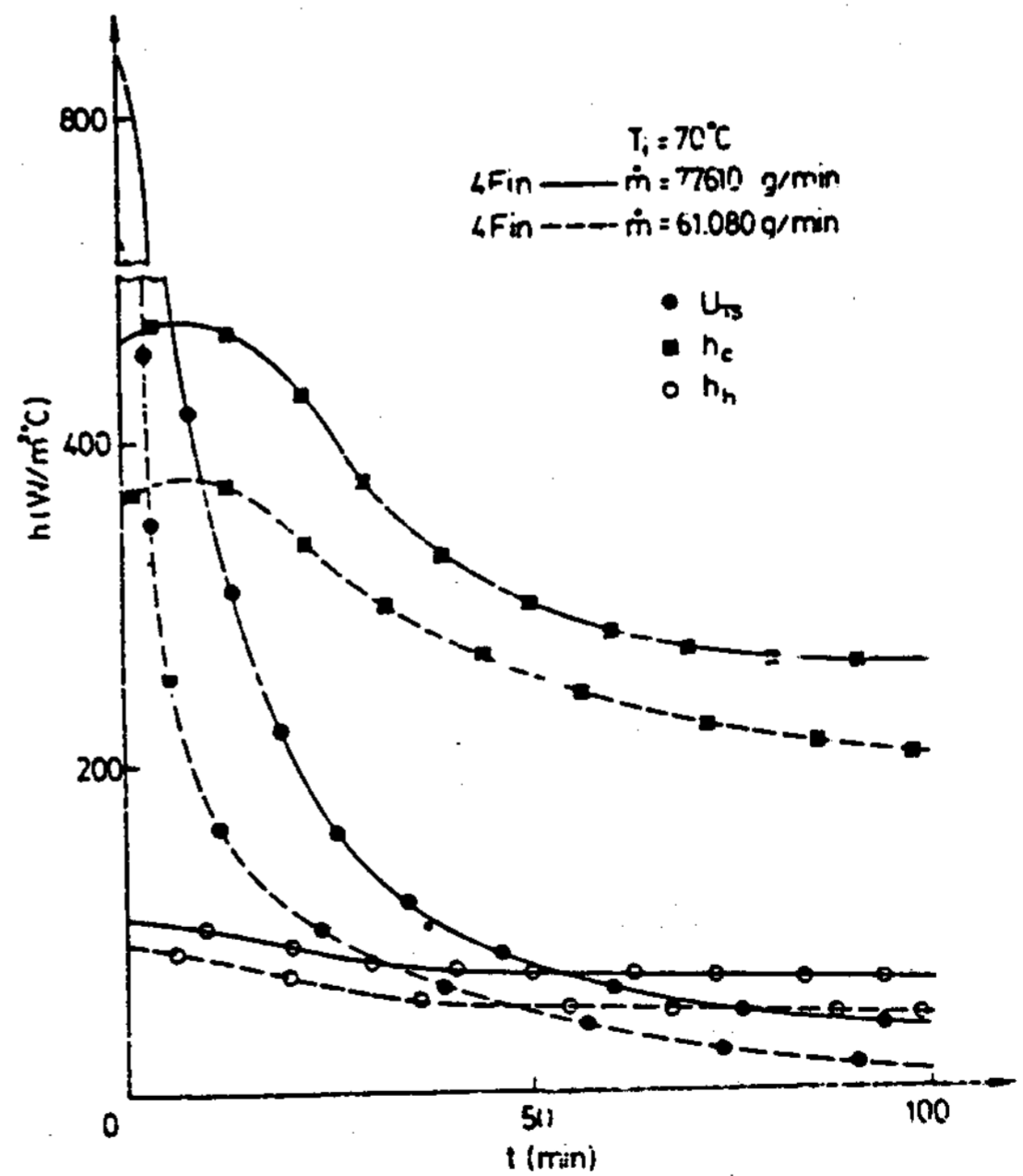


Fig. 10(b) Effect of Mass Flow Rate of Cooling Water on the Heat transfer Coefficient.

을 볼 수 있다. Fig.10(b)에서 h_c 는 예측할 수 있는 바와 같이 냉각수의 유량에 따라 증가하는 반면 h_h 는 큰 영향을 받지 않음을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 핀이 달린 열싸이폰을 이용하여 잠열축열계로부터 열에너지를 추출할 때의 제반 열전달 현상을 조사하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 왁스의 수평방향의 온도분포는 항상 거의 균일하게 유지된다.
2. 본 연구에서 사용된 열싸이폰의 작동 매체의 양(체적비 7%)은 충분하지 못하며 그 적정량은 잠열축열계의 제반 작동 조건이 같을 경우에 핀의 수에 따라 달라질 것이다.
3. 열전달률은 핀의 수에 따라 증가하나 1차적으로 비례하지는 않으며 핀이 없을 때에 비하여 실험초기에는 현저하게 향상된다.
4. 왁스와 열싸이폰의 증발부 표면 사이의 열전달계수 h_h 는 시간에 따라 거의 일정하게 유지된다.

후 기

본 연구는 산학협동재단의 연구비 지원에 의해 수행되었음을 밝히며 동 재단에 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. Subhsh Saxena, S. Subrahmaniyam and M.K.

- Sarkar, "A Preliminary Model For Phase Change Thermal Energy Storage in a Shell and Tube Heat Exchanger", Solar Energy, Vol. 29 No. 3 pp. 257-263 (1982)
2. C.L. Tien, S.L. Chen and F.M. Gerner, "The Wickless Heat Pipe - Two-Phase Closed Thermosyphon", Heat Transfer: Korea-U.S.A. Seminar, Oct, pp. 129-138 (1986)
3. D. Japikse, "Advances in Thermosyphon Technology", Academic Press, pp. 40-90 (1983)
4. A. Abhat, "Performance Investigation of a Long Slender Heat Pipe for Thermal Energy Storage Application", Solar Energy, Vol.6, pp. 361-367 (1982)
5. K.H. Kim and Y. Lee, "A Study on the use of Two-Phase Closed Thermosyphone for Latent Heat Storage System", 5th Int. Heat Pipe Conf. (Proc) Part. 1, May (1984)
6. 정태산, "열싸이폰을 이용한 상변화 물질로부터의 열추출에 관한 연구", 아주대학교 석사학위논문 (1986).
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, Oct. pp. 141-149 (1986)
8. K. Hijikata, S.J. Chen and C.L. Tien, "Non-Condensable Gas Effect on Condensation in a Two-Phase Closed Thermosyphon", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No.8, pp.1319-1325 (1984)