

진공 유리관 태양열 집열기에 열파이프의 적용을 위한 기초 연구

김 철 주
성균관대 기계공학과

A Study on Application of a Heat Pipe to an Evacuated Glass Tube Solar Collector

Chul-Joo Kim
Sungkyunkwan University

Key Words : Solar Collector(태양열 집열기), Heat Pipe(열파이프),
Thermosyphon(열사이폰), Heat Transfer Limitation(열전달 한계)

ABSTRACT

This is an experimental work concerning about an application of a heat pipe to an evacuated-glass-tube solar collector system. A methanol heat pipe with length of 0.7 m and diameter of 8 mm was manufactured and tested to compare its performance with that of freon thermosyphon which was originally used in a solar collector system fabricated at Thermomax Co..

Then this methanol heat pipe was utilized to be one component, i.e. heat transfer element, of the present experimental model of a solar collector. This model was performed the operation test as its absorber plate was irradiated by infrared lamps.

The following results were obtained.

- (1) The methanol heat pipe was showed a stable operation when the variation of axial heat transport was 0~40 watts and that of inclination angle was 30~90°.
- (2) The heat transport capability of the heat pipe was proved to be higher than that of the thermosyphon, because the heat transport limitation of the latter was occurred at about 30 watt.

- (3) The heat pipe in a solar collector was also showed good performance as it transmitted absorbed energy.

1. 서론

대체 에너지로서 태양열의 유용성이 매우 큰 분야가 가정용 급탕장치이다. 미국의 경우 국가에너지 수요의 약 3%가 가정용 급탕에 소요되는 것으로 조사되었으며, 이 수요의 약 50%를 태양열 이용으로 충당할 수 있을 것으로 추정하고 있다.⁽¹⁾ 국내의 에너지 수요도 생활환경의 개선으로 점차 이러한 경향으로 에너지 수요가 증가될 것으로 생각되며, 이러한 생활에너지 수요를 태양열로 대체할 수 있도록 관련기술 개발과 시설 지원을 증대시키는 일이 국가적인 에너지 관리 차원에서 필요할 것으로 생각된다.

그 동안 태양열의 집열과 이용 효율을 증가시키기 위한 관련 기술의 연구 분야는 집열기의 구조, 복사열 흡수 표면, 축열조, 집열기로 부터 축열조로 열의 이송방법등에 대한 많은 연구와 기술 개발이 지속적으로 이루어져 왔다.^{(2),(3),(4)}

본 연구는 태양열 집열시스템으로 부터 축열조로 열을 이송하는 요소로서 열파이프(또는 열사이폰)를 집열판에 적용시키는 기술을 개발하기 위한 기초적인 연구이며, 실험용 집열기 모델은 진공관식 집열기를 대상으로 선택하였다. 진공관식 집열기의 구조는 열파이프의 증발부에 집열판을 부착하고 이것을 진공 유리관 내부에 설치하여 밀봉시킨 것이다. 따라서 이러한 집열 시스템은 그 동안 국내에서 생산해 오던 평판형 집열기에 비하여 집열표면으로부터 주위 공기에 의한 대류손실을 억제할 수 있기 때문에 상대적으로 집열효율이 높으며, 높은 집열온도에서도 적용성이 큰 것으로 알려져 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 이러한 진공 유리관 집열 시스템이 집열판에서의 열유동 경로가 보다 단순하여 집열기에 부착된 열파이프의 특성을 이해하는데 도움이 될 것으로 기대하고 있다.

본 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 열파이프의 설계 및 제작
- (2) 열부하 변화에 따른 열파이프의 성능시험
- (3) 실험용 진공관식 집열기에서 복사 열부하의 변화에 따른 열파이프의 적응성과 성능시험

열파이프를 적용한 집열기의 개발 현황은 현재 국내의 경우 기초적인 개발단계에 있다. 그러나 미국, 일본, 영국등의 국가들에서는 80년대에 이미 상품화되어 보급되고 있다.⁽⁵⁾ 이러한 개발 경향은 열파이프가 갖는 높은 열전도성, 등온성 및 열 다이오드 특성등⁽⁶⁾⁽⁷⁾을 태양열 집열기에 이용함으로써 동절기의 집열기 동파방지를 위한 보조가열 및 제어설비의 절감과 이에 따른 집열기의 유지관리 비용의 절감등을 기대하는데 있다. 따라서 이러한 연구 노력은 국내의 관련업계의 기술향상과 함께 새로운 집열기의 개발에 기여할 것으로 생각한다.

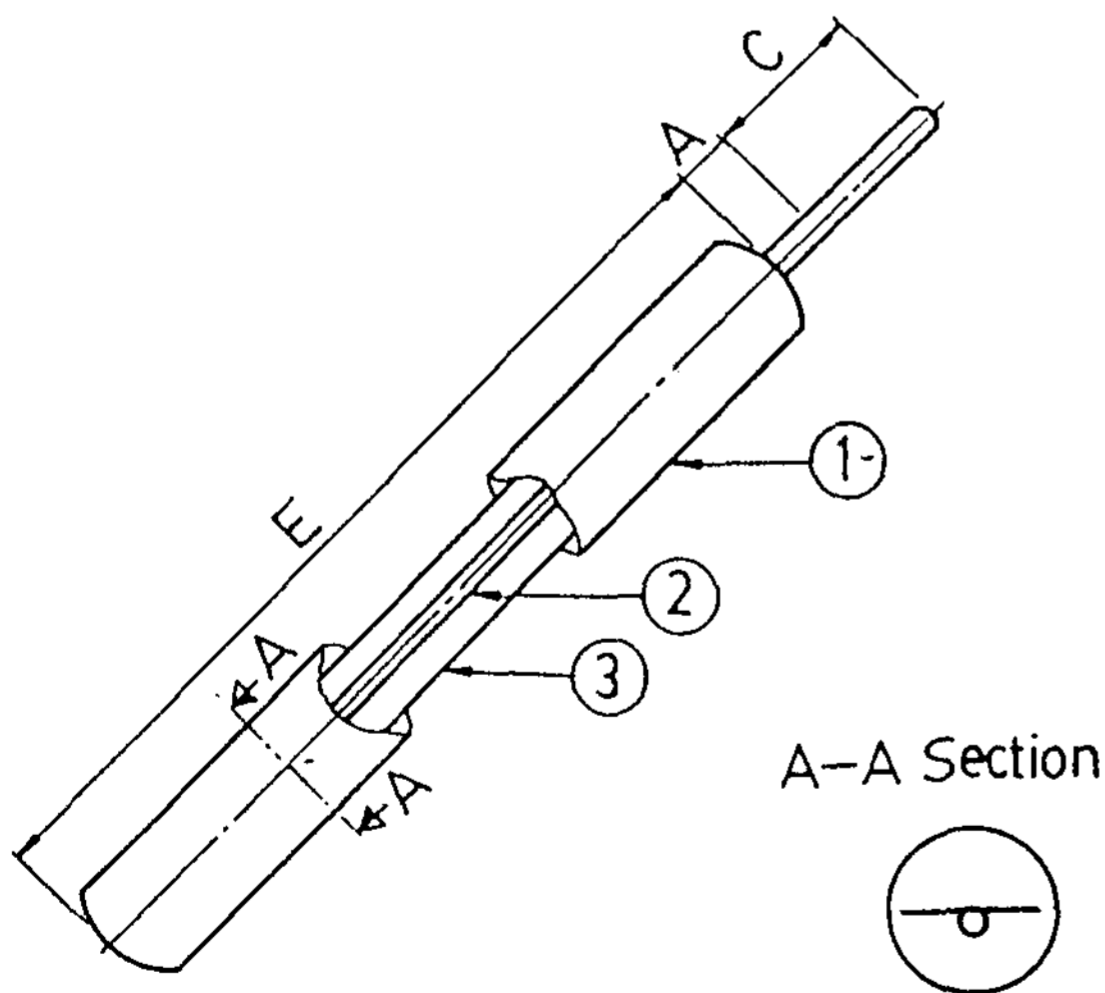
2. 집열기의 설계 및 제작

2.1 집열기의 제원

Fig. 1은 열파이프를 이용한 진공 유리관 집열기의 구조를 개략적으로 나타낸 것이다. 여러 형상의 모델들이 개발되어 있으나 일반적으로 기본요소는 열파이프, 집열판과 진공 유리관이다. 실험용 집열기의 기하학적 형상과 크기는 Thermomax Co.에서 개발한 진공관식

Table 1 Comparison of specifications for two systems of solar collector(One manufactured for present study and the other developed at thermomax Co.)

Specs	System 1 (Present study)	System 2 (Thermomax Co.)
* Element of heat transfer :		
Mode of operation	Heat pipe	Thermosyphon
Working fluid	Methanol	Freon
Material of tube	Copper	Carbon steel
Dimension of tube(mm) (L×Do×t)	700×8×1	985×8×1
Wick	Wrapped screen of stainless steel(80mesh, 2layers)	Non
* Absorber plate :		
Material	Cu	Cu
Dimension(mm) (L×W×t)	500×60×0.1	850×60×0.1
* Evacuated glass tube :		
Dimension(mm) (L×Do×t)	600×60×1.5	900×70×1.6



E : Evaporator A : Adiabatic C : Condenser
 ① Evacuated glass tube ② Heat pipe
 ③ Absorber plate

Fig. 1 Structure of an evacuated tube type solar collector with a heat pipe.

집열기의 모델을 기준으로 결정하였으며, 이들 양자의 주요 제원은 Table 1과 같다.

Table 1에서 보는 바와 같이 두 전열 요소의 기하학적 형상은 본 실험실에서 제작한 것이 Thermomax Co.에서 개발한 것에 비하여 약 30cm 짧으며, 그외 직경등은 유사하다. 그러나 작동형태는 각각 열파이프와 열사이폰으로써 다르다.

본 연구에서 열파이프를 적용한 이유는 열파이프가 열사이폰에 비하여 상대적으로 Ent-
 rainment 발생률의 저하, 증발부 하단에 Pool영
 역의 감소등에 의해서 작동 안정성이 높다는데
 근거를 두고 있다.⁽⁸⁾ 또한 작동유체는 환경오
 염의 문제점등을 고려하여 프레온 대신에 메
 탄올을 사용하였다.

2.2 집열기의 제작

실험용 진공관식 태양열 집열기의 각 요소의

제작과정에 대해 간략히 서술하면 다음과 같다.

2.2.1 열파이프

일반적으로 열파이프의 제작에는 관 내부 벽면과 작동유체에 이물질의 개입이나 오염이 발생되지 않도록 세심한 주의와 많은 노력이 필요하다.

열파이프의 제작과정에 요구되는 제반 기계적, 화학적 처리과정에 대한 엄밀한 내용은 관련서적⁽⁶⁾⁽⁷⁾에서 찾아볼 수 있고, 본 실험실 조건하에서 가능한 이를 엄격히 적용하도록 노력하였으며⁽⁸⁾ 여기서는 자세하게 설명하지 않았다.

본 연구에서는 특히 작동유체 내부에 용해된 비 응축성 가스를 제거하는데 유의하였다. 이를 위하여 작동유체를 급속히 결빙하고 그 내부에 남아있는 가스를 진공 펌프로 제거하는 방법을 사용하였다. 또한 파이프내에 작동유체를 충전하기전에 파이프 벽면을 적용온도 이상 가열(약 200°C)하면서 파이프내의 진공도를 10^{-5} Torr이하로 5~6시간 유지하여 공기가 잔류되지 않도록 하였다.

또한 열파이프에 열다이오드 특성을 증진시킬 수 있도록 응축부 내벽에는 Wick를 설치하지 않았으며 이러한 조처에 대한 유효성은 실험적으로 확인되었다.⁽⁸⁾

2.2.2 집열판

집열판과 열파이프의 부착에는 Arc에 의한 Spot용접 또는 Soldering등 여러 방법이 적용되고 있다. 본 연구에서는 제작된 열파이프를 성능시험한 후에 집열판을 증발부의 벽에 축을 따라서 접합부가 좁게 납용접 하였다. 그리고 복사열 흡수를 위한 집열판 표면은 간단히 내열흑색 도료로 도포하였으며, 이 표면의 복사 특성은 본 연구 내용에서는 중요성을 갖지 않는다.

2.2.3 기타

진공관 유리는 Pyrex 유리관 재질을 사용하였으며, 내부의 기밀 유지는 단지 제작상의 편의성을 고려하여 양단에 Silicon 고무와 Epoxy 수지를 이용하였다. 그러나 이러한 방법으로도 내부의 진공도는 열전달 성능 시험시 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ Torr를 유지할 수 있었다.

그외에 열파이프의 축 방향 온도분포와 집열판의 횡 방향 온도분포를 측정할 수 있도록 열파이프벽면과 집열판에는 열전대를 일정한 간격으로 부착하였고 측정점의 위치들은 다음의 4절에서 온도분포에 대한 그림으로 부터 확인할 수 있다.

3. 실험 장치

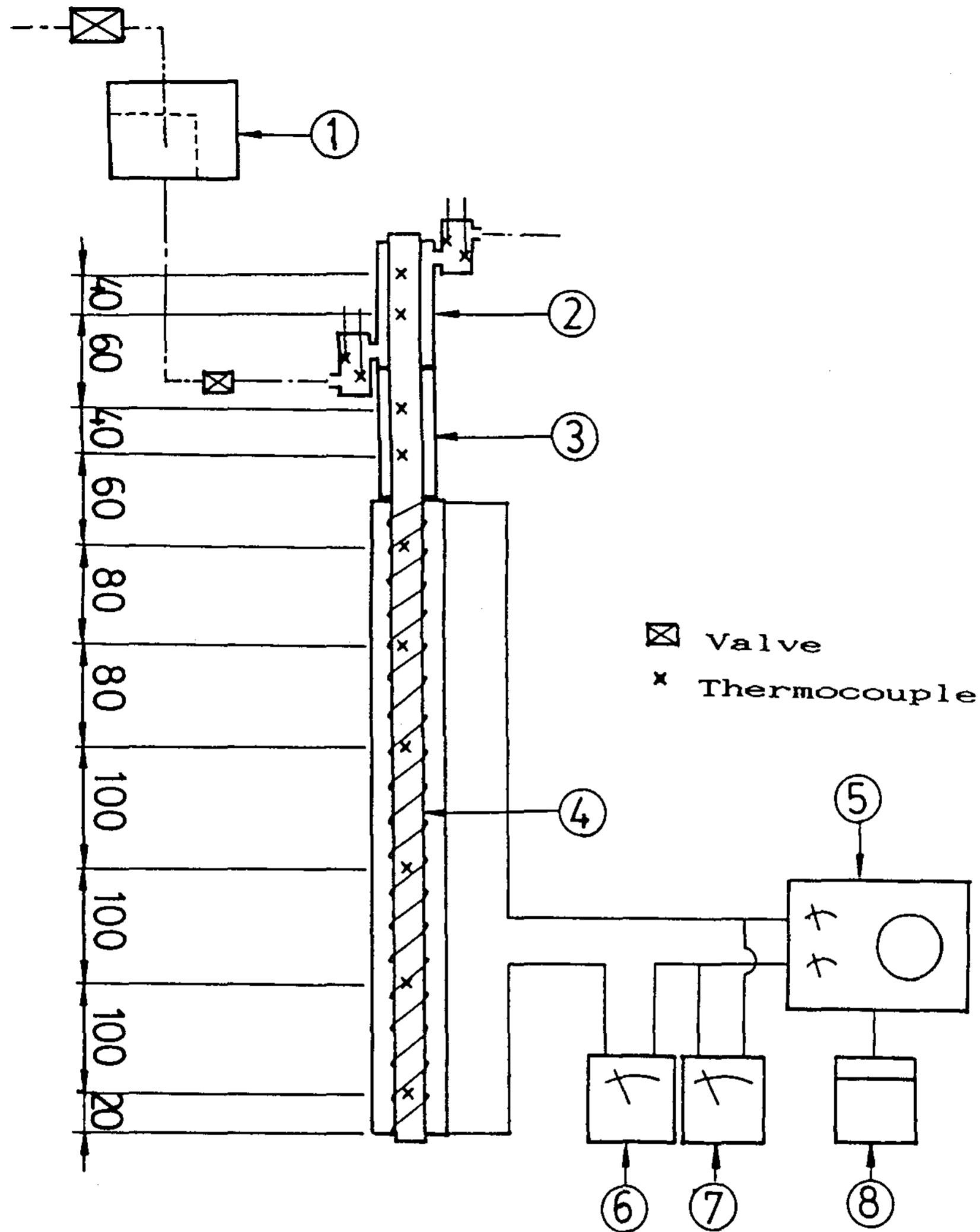
실험용 집열기에서 집열면적의 크기와 국내의 연중 예상 최대 복사 강도등을 고려하면 예상 최대 열부하량의 범위는 약 20~25W이다.⁽⁹⁾ 그러나 열파이프의 성능시험에서는 집열기의 안전을 고려하여 열부하 범위를 0~40W까지 수행하였다.

3.1 열파이프이 열전달 성능시험

먼저 제작된 열파이프의 열부하 성능시험을 수행하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치를 구성하였다.

열원은 PVC수지로 절연된 부드러운 전기저항선($1\Omega/m$, 외경 : 2mm, 내열 온도 : 150°C)을 이용하였으며 열파이프의 증발부 외벽에 균일하게 감았다. 이러한 가열 방법은 열부하의 제어가 매우 용이하고 균일한 열속을 작용할 수 있다.

응축부 외벽에는 냉각수 순환용기를 설치하여 용기의 입출구 냉각수 온도 및 유량을 측정함으로써 열파이프를 통하여 이송된 열전달을 Q를 아래와 같이 구하였다.



- ① Constant level tank ② Water Jacket ③ Insulation
 ④ Heat pipe ⑤ Slidacs ⑥ Ampere meter
 ⑦ Volt meter ⑧ A.V.R

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus for general performance test of the heat pipe.

$$Q = \dot{m} C_p (T_o - T_i)$$

\dot{m} : 냉각수의 질량 유동을 [Kg/sec]

C_p : 냉각수 비열 [J/Kg°C]

T_o : 냉각부 출구의 냉각수 온도 [°C]

T_i : 냉각부 입구의 냉각수 온도 [°C]

용한 Hybrid recorder(Y.E.W, Model 3088)를 사용 하였다.

한편, Thermomax Co.에서 제작한 집열기로부터 분리한 열사이폰도 위와 동일한 방법으로 성능시험을 수행하여 본 실험용 열파이프와 열전달 성능을 비교 검토하였다.

온도측정은 열전대(T type, $\phi=0.3\text{mm}$)를 이

3.2 진공관식 집열기내의 열파이프 적응시험

Fig. 3은 실험용 진공관식 집열기에 적외선 열부하를 적용하여 열파이프의 작동 상태와 그 적응성을 검토하기 위한 실험장치의 개략도이다. 일반적으로 열파이프는 열원의 유형에 따라 그 성능이 변화하지 않는다. 그러나 집열판과 납용접하는 과정에서 열파이프의 증발부 전체가 300°C 이상 가열되었으며, 이 과정에서 관 내부에 새로운 비응축 가스의 생성이나 초기 제작과정에서 유입될 수 있는 이물질에 의한 내부 표면의 산화등에 의해 열파이프의 작동 특성에 어떠한 변화가 있는지를 확인하는 것이 본 실험의 중요한 사항이다.

열원으로써 조명용 전구(500W)를 이용하여 집열면에 적외선 복사를 작용하였다. 집열기는 지표면에 대하여 경사각 $\Phi=45^\circ$ 가 되도록 하고 전구들은 집열판에 평행하게 설치된 지지대에 등간격을 이루도록 고정하였다. 이때 전구의 지지대와 집열판의 거리를 변화시킴으로써 집

열판에 도달되는 복사강도를 변화시킬 수 있었다.

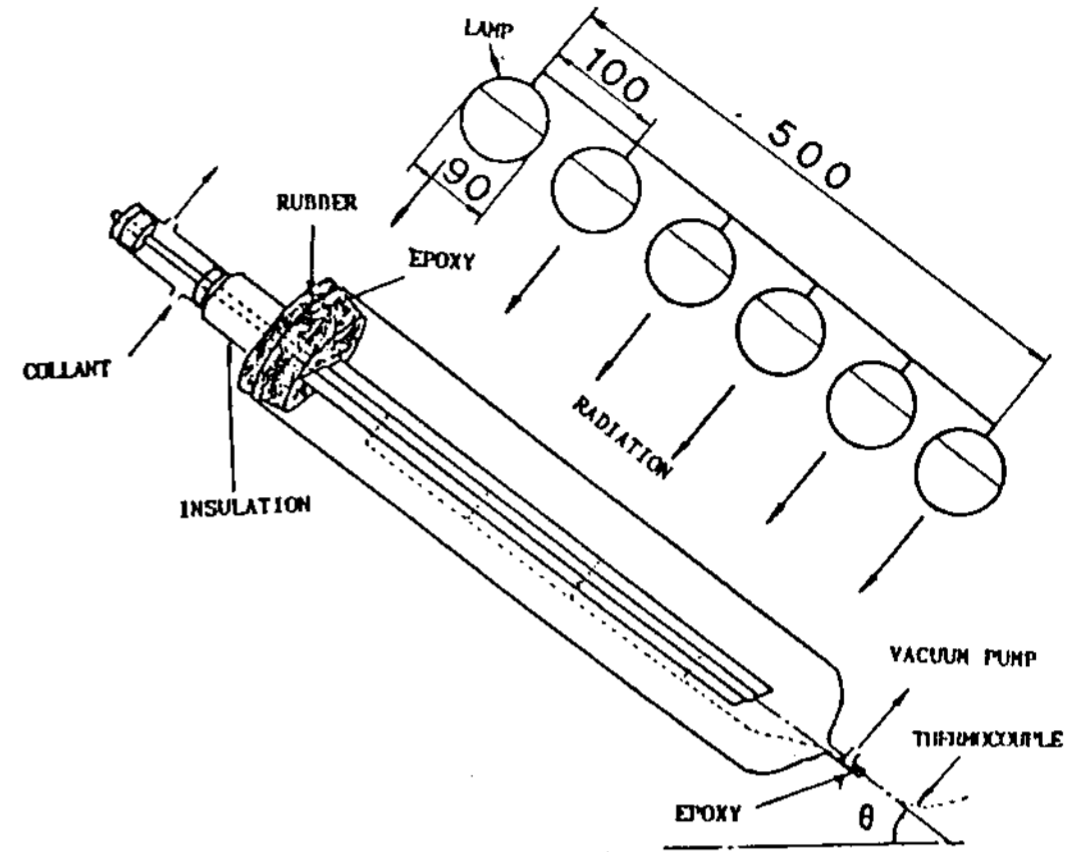


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus to test operation of the solar collector model of evacuated glass tube type.

4. 결과 및 고찰

4.1 열파이프의 열전달 특성

4.1.1 작동 안정성

Fig. 4는 열파이프의 응축부가 증발부 위에

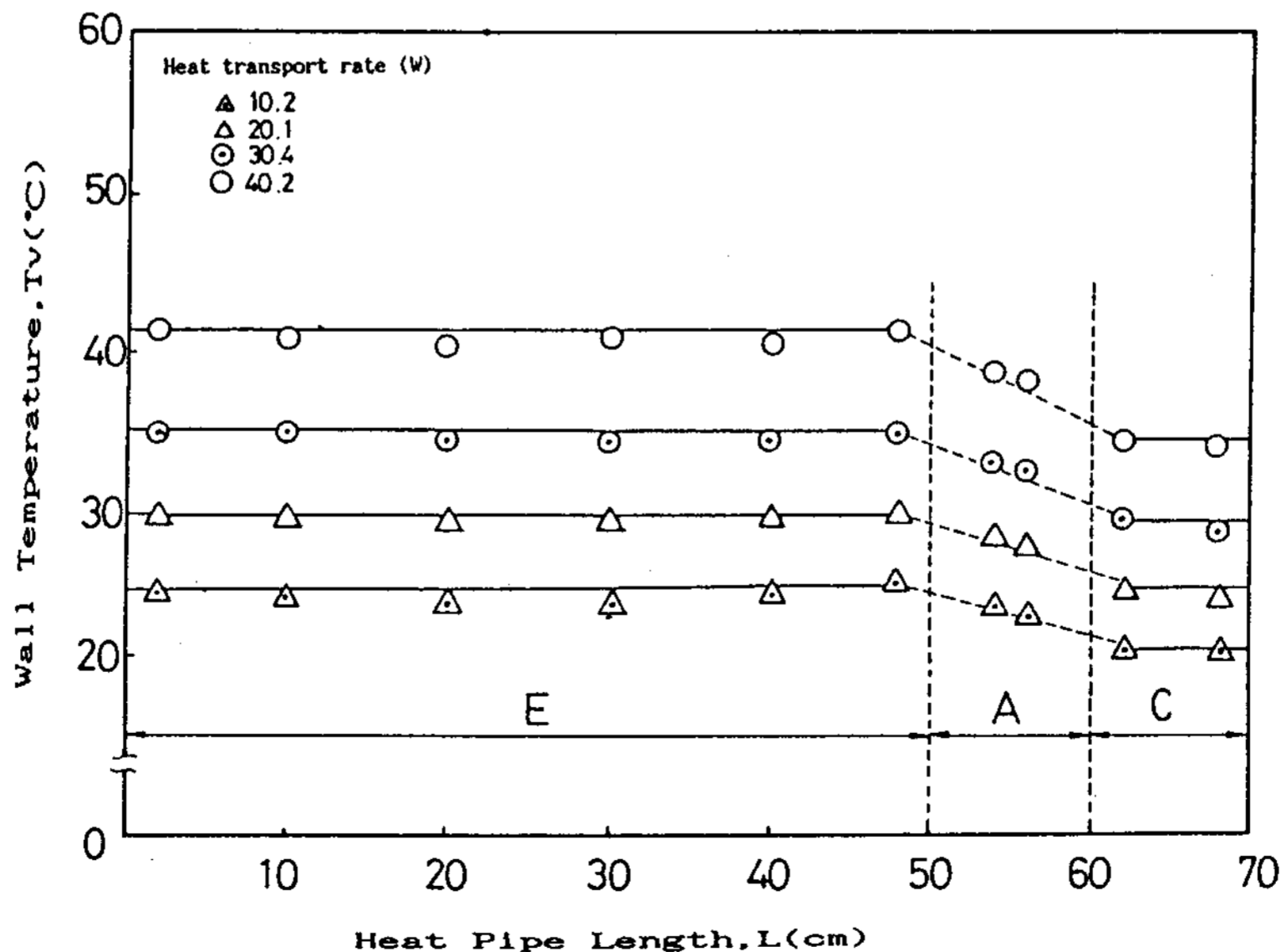


Fig. 4 Axial wall temperature distribution of the heat pipe for various heat transport rates. (E : Evaporator A : Adiabatic C : Condenser)

놓이도록 (경사각, $\Phi=90^\circ$) 설치하고, 열부하를 변화시켰을때 정상 작동상태에서의 열파이프의 벽면 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 증발부와 응축부의 벽면은 각각 거의 등온을 유지하고 있다. 이러한 등온성은 내부 벽면에서의 국소 열저항이 전 길이에서 균일하게 나타나고 있으며 따라서 내부 작동유체가 안정된 상태에서 작동하고 있음을 알 수 있다.

4.1.2 열전달 한계와 열저항

Fig. 5는 Table 1에서 제시한 두 시스템의 전열 요소인 열파이프와 열사이폰을 경사각 $\Phi=90^\circ$ 에서 동일한 실험 방법으로 수행한 측정 결과이다. 여기서 열전달율 Q 와 증발부와 응축부의 벽면 온도차 ΔT 함수로 표시하였다. 이로부터 두 전열 요소의 열전달 한계와 열저항 R 을 비교할 수 있다.

먼저 열전달 한계를 비교한 결과는 다음과 같다.

열사이폰에 열부하를 약 30W이상 증가시키면 증발부와 응축부 벽면의 온도차가 급격히 상승하여 이른바 열전달 한계에 도달하였다. 이에 비하여 열파이프는 40W에서도 안정된 작동을 유지함으로써 상대적으로 열전달 한계가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 두 전열 요소내의 작동유체의 물성차이에 의한 것보다 Wick에 의한 모세관 현상에 보다 큰 원인이 있는 것으로 생각된다. 그러나 이 두 시스템의 예상 최대 태양열 부하가 약 25W이하인 것을 고려하면 두 경우 모두 충분한 열전달 한계를 나타낸다고 할 수 있다.

한편, 열저항 비교 결과는 다음과 같다.

Fig. 5에서 ΔT 는 열사이폰의 경우가 1~1.5 $^\circ\text{C}$ 로 다소 높게 나타내고 있다. 이는 내부 열저항으로 표시해보면 약 20~30%증가를 의미한다. 그러나 두 전열 요소의 구조를 비교해보면 열사이폰의 길이가 약 30cm 더 길고 응축부 형상이 보다 복잡한 점을 고려할때 양자 사이에 중요한 차이는 없는 것으로 생각된다.

이상의 비교로 부터 열전달 특성만을 고려하면 특히 열전달 한계에서 열파이프가 상대적으로 보다 나은 특성을 나타내고 있는 것으로 평가된다.

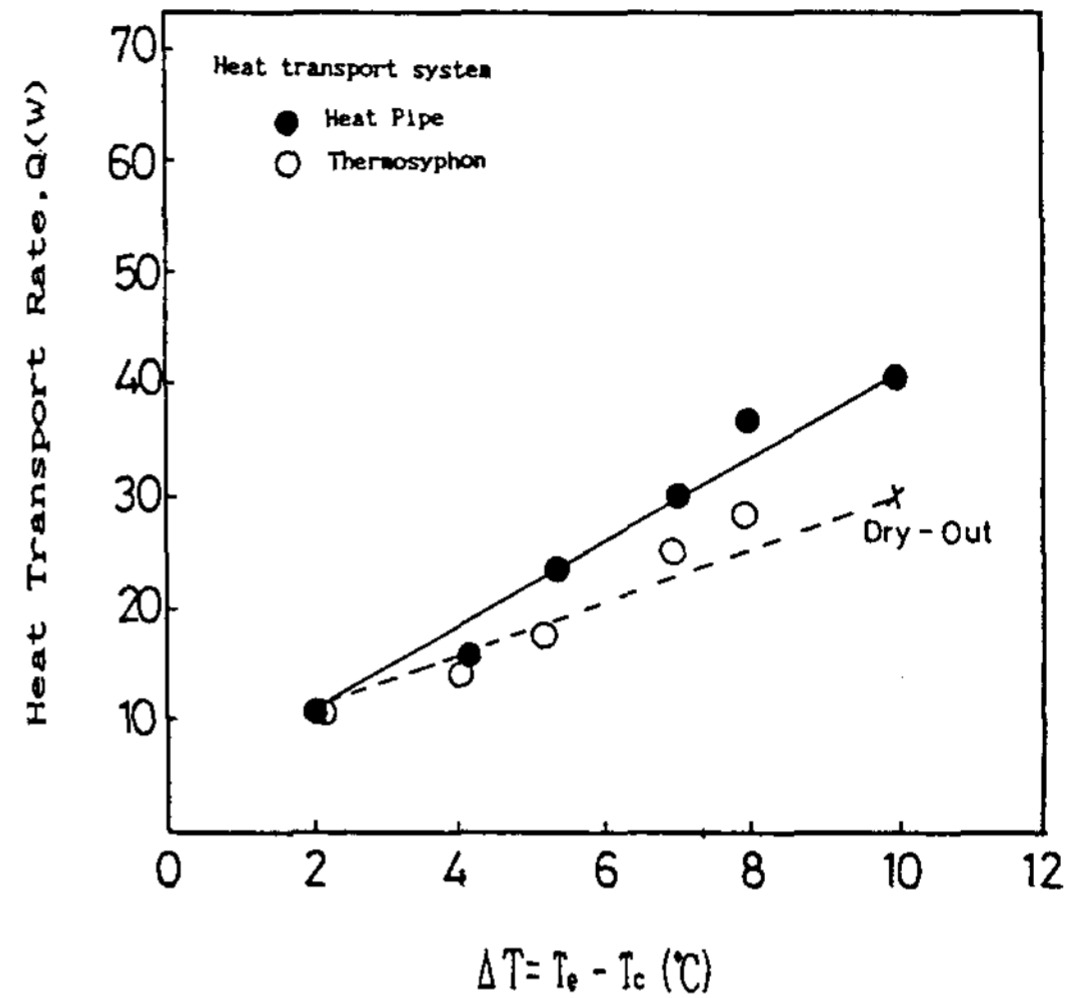


Fig. 5 Comparison of heat transport rates between two heat transfer elements of the heat pipe & thermosyphon.

4.1.3 경사각의 영향

Fig. 6은 열파이프의 경사각 Φ 를 90 $^\circ$, 45 $^\circ$, 30 $^\circ$ 로 고정시키고 열부하 실험을 수행한 결과를 증기온도 T_v 와 열전달율 Q 의 관계로 도시한 것이다. 실제 집열기의 경사각은 계절 및 위도에 따라 30~60 $^\circ$ 의 범위가 많이 적용된다.⁽³⁾

그림에서 먼저 안정성 차원에서 보면 열부하 40W까지 모든 경사각에 대하여 정상적인 작동을 이루고 있음을 알 수 있다. 그러나 열파이프의 경사각이 감소함에 따라 동일한 증기온도에서 열전달율이 감소하는데 이러한 현상은 경사각의 감소에 따라 액상의 작동유체의 유동에 관련된 중력장의 영향이 감소하는데 따른 결과이다.

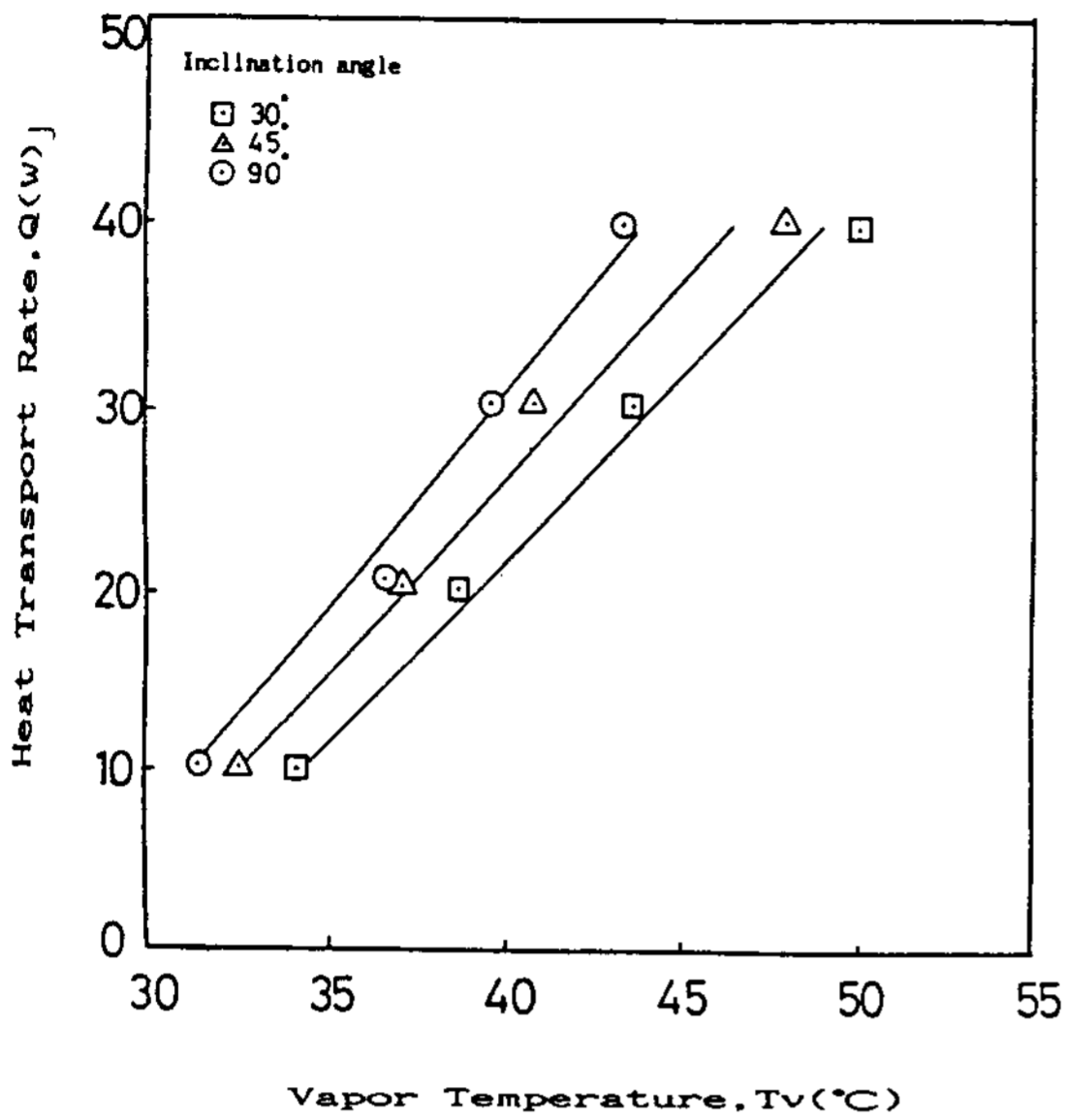


Fig. 6 Heat transport rate vs. vapor temperature for various inclination angles.

4.2 진공관 집열기내의 열파이프 성능 및 적응성

열파이프의 실험장치를 이용하여 성능 시험을 수행한 열파이프가 집열기내에서의 성능과 적응성에 대한 실험 결과는 다음과 같다.

4.2.1 열부하 변화와 열저항

Fig. 7은 집열판 위에 작용하는 적외선 복사강도를 변화시켰을때 열파이프를 통한 열전달을 Q 와 증발부와 응축부의 온도차 ΔT 의 관계를 나타낸 것이다. 여기에 Fig. 6에서 도 시험한 열파이프의 성능 시험 결과를 대비시켰다.

그림에서 두 경우의 실험 결과는 거의 동일하게 나타나고 있다. 이것으로부터 다음의 두 사실을 확인할 수 있다.

- (1) 집열기에서는 열파이프가 집열판과 좁은 접촉면을 따라 가열되고 있으나 이에 따른 열파이프의 내부저항의 변화는 크지 않으며 무시될 수 있다.
- (2) 열파이프의 초기 제작과정과 고온으로

가열하는 과정에서 이물질이 개입되었거나 생성되지 않았다.

이상으로부터 실험실에서 제작한 열파이프가 충분한 적응성과 신뢰성을 갖는다고 생각된다.

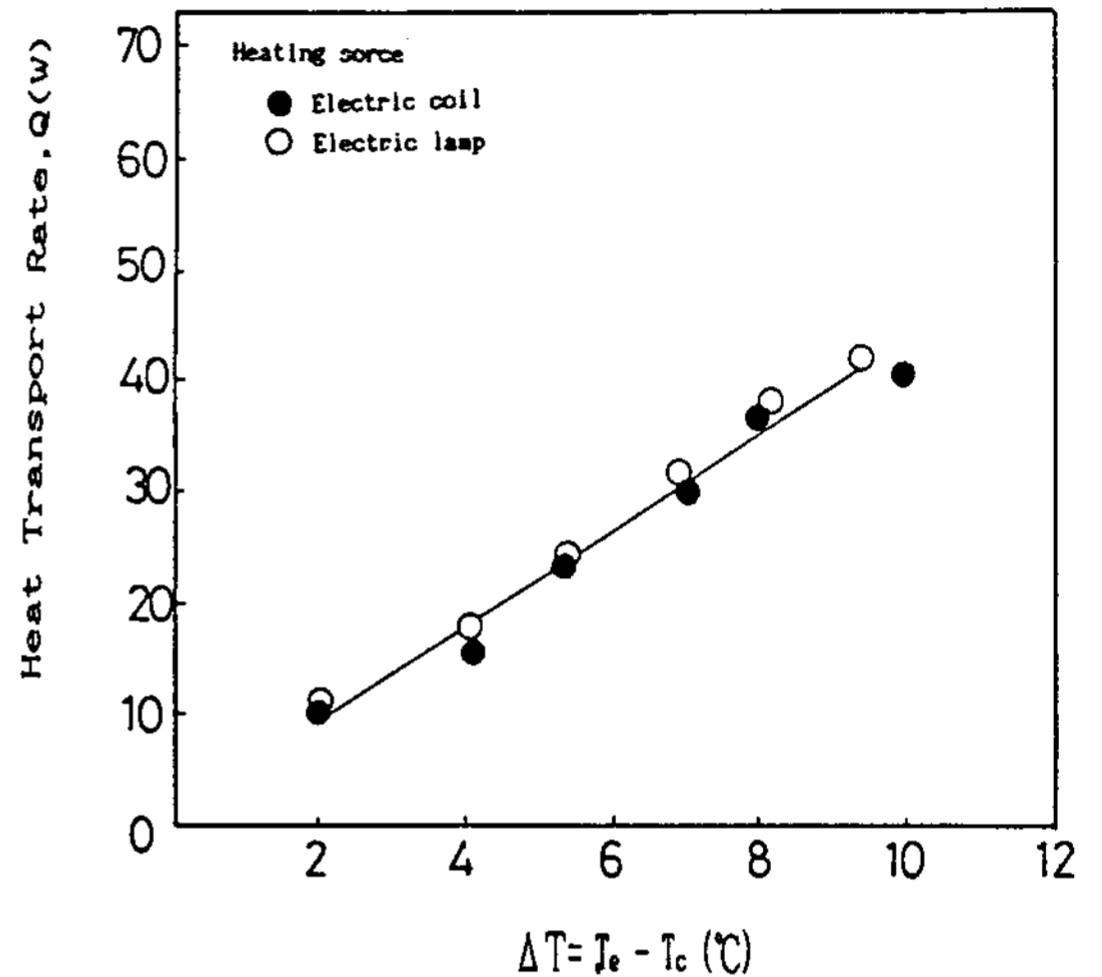


Fig. 7 Comparison of heat transport rates of the given heat pipe in the next two cases :

- (a) General performance test
- (b) Operation test in the solar collector

4.2.2 집열판의 횡방향 온도 분포

Fig. 8은 집열판내의 열유동 상태를 이해하기 위하여 집열판의 횡방향의 온도 분포를 측정 한 결과이다.

그림은 열유속이 일정할때 온도 분포의 기울기가 축 중심부로 갈수록 점차 증가하며 열부하 증가에 따라 주어진 측정점의 온도 기울기가 점차 증가됨을 보여주고 있다.

이러한 온도 분포 특성은 집열판에 대한 전형적인 것으로써⁽³⁾ 다소 불균일한 적외선 램프의 복사열에 대해서도 집열기로서의 작동특성을 잘 나타내고 있다.

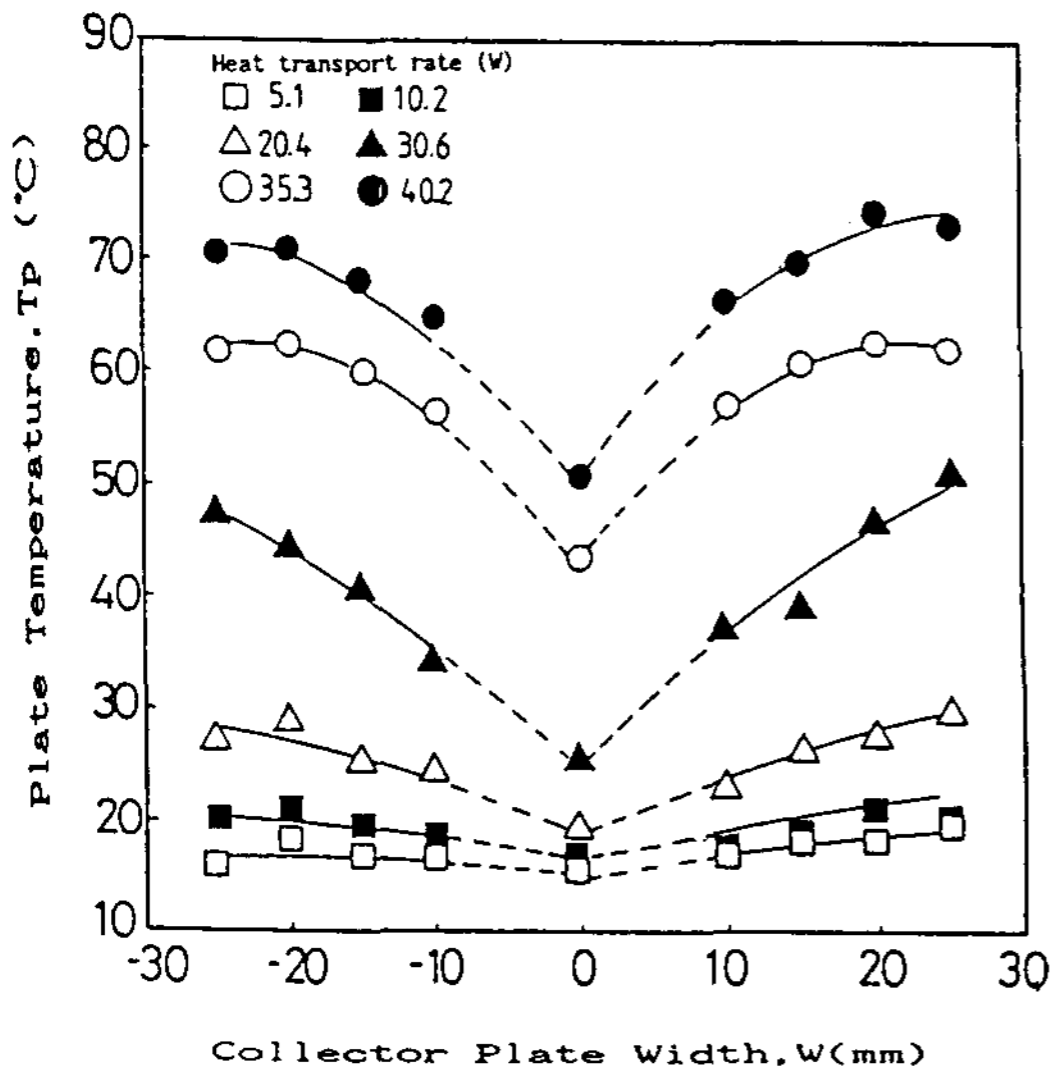


Fig. 8 Transversal temperature distribution on the absorber plate for various heat transport rates.

5. 결론

태양열 집열기에 열파이프를 적용하는 기술을 개발하기 위한 기초 연구로써 열파이프의 제작과 성능시험 그리고 실험용 진공관식 집열기를 통한 적응성 시험 결과를 정리하면 아래와 같다.

1. 실험용으로 제작한 열파이프가 매우 안정된 작동을 보이고 있으며 제작과정에서 이물질의 개입으로 인하여 초래될 수 있는 문제점들이 목격되지 않았다.
2. 열파이프의 경사각 Φ 가 감소함에 따라 작동유체의 유동에 작용하는 중력장의 효과가 감소되어 열이송율이 감소하는 경향이 확인되었다. 그러나 국내에서 태양의 고도를 고려할때 집열기의 연중 최소 경사각 $\Phi=30^\circ$ 까지 충분한 열이송율을 나타내었다.
3. 메탄올 열파이프가 유사한 형상의 프레온 열사이폰(Thermomax Co.)에 비하여 열저항에 대해서는 중요한 차이를 나타내지

않으나 열전달 한계값은 보다 큰 값을 나타내며, 이러한 차이는 Wick에 의한 모세관 현상에 주로 기인한다.

4. 진공관내의 집열판에서의 온도분포는 기울기와 대칭성이 태양열 집열기의 전형적인 특성을 보여주었다.

참고 문헌

1. Donald, R., 1981, "Solar Energy", Prentice Hall Inc.
2. Tabassum, S.A., Norton, B. and Probert, S.D., 1988, "Heat Removal from a Solar-Energy Collector with a Heat Pipe Absorber", Solar & Wind Technology, Vol.5, No.2, pp.141~145.
3. Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1980, "Solar Engineering of Thermal Processes", Wiley, New York, USA.
4. McDonald, G.E., 1975, "Spectral Reflectance Properties of Black Chrome for Use as a Solar Selective Coating", Solar Energy, Vol.17, pp.119~122.
5. Ribot, J. and McConnel, R.D., 1987, "Testing and Analysis of a Heat Pipe Solar Collector", J. of Solar Energy Engineering, Vol.105, pp.440~445.
6. Chi, S.W., 1978, "Heat Pipe Theory and Practice : A Source book", Hemisphere Publishing Corp., Washington, D.C..
7. Dunn, P. and Reay, D.A., 1978, "Heat Pipes", Pergamon Press.
8. 김철주, 임광빈, 1990, "상변화 전열소자의 개발 연구", 대체 에너지 기술개발 위탁연구, 한국 에너지 기술 연구소.
9. 이준엽, 1989, "열파이프를 이용한 진공관식 태양열 집열기에 대한 실험적 연구", 석사학위논문, 성균관대학교.

ABSTRACTS

SOLAR ENERGY VOL. 12, NO.1, 1992

Variation Characteristics of Hourly Atmospheric Temperature Throughout a Winter

Lee, Seung Eon* · Shon, Jang Yeul**

* *Korea Institute Construction Technology*** *Dept. of Architectural Engineering, Hanyang Univ.***ABSTRACT**

Identifying characteristics of heating and cooling systems requires estimation of thermal load of specific time interval, especially in cases that its system is operated intermittently, by using thermal storage, of in a partial load condition. Estimating the thermal load, however, needs to forecast hourly weather data variation. Hence, this paper attempts to examine characteristics of hourly outdoor temperature variation as a preliminary research for the mathematical modeling of the hourly weather variation.

Speculating characteristics of daily minimum and maximum temperature occurrences, hourly outdoor temperature variation, and daily temperature differences in the increasing range(07h~15h) and decreasing range(15h~07h), we were able to analyze changing patterns of daily temperature differences in each range in terms of daily solar amount, cloud ratio, and other weather data.

Results from the multiple regression analysis enables us to conclude that daily differences in the increasing range are strongly affected last night temperature itself while the other range's differences are influenced by many weather data, which are solar amount, the variation of cloud, and the maximum temperature of the previous day.

A Study on Application of a Heat Pipe to an Evacuated Glass Tube Solar Collector**Chul-Joo Kim***Sungkyunkwan University***ABSTRACT**

This is an experimental work concerning about an application of a heat pipe to an evacuated-glass-

tube solar collector system. A methanol heat pipe with length of 0.7 m and diameter of 8 mm was manufactured and tested to compare its performance with that of freon thermosyphon which was originally used in a solar collector system fabricated at Thermomax Co..

Then this methanol heat pipe was utilized to be one component, i.e. heat transfer element, of the present experimental model of a solar collector. This model was performed the operation test as its absorber plate was irradiated by infrared lamps.

The following results were obtained.

- (1) The methanol heat pipe was showed a stable operation when the variation of axial heat transport was 0~40 watts and that of inclination angle was 30~90°.
- (2) The heat transport capability of the heat pipe was proved to be higher than that of the thermosyphon, because the heat transport limitation of the latter was occurred at about 30 watt.
- (3) The heat pipe in a solar collector was also showed good performance as it transmitted absorbed energy.

PREPARATION AND PROPERTIES OF ELECTROCHROMIC WINDOW COATING BY THE SOL-GEL METHOD

Kil-dong Lee

kyung-gi University Dept. of physics

ABSTRACT

Multilayer coatings of WO_3 were deposited by the sol-gel technique on microscope slide glass and ITO coated glass.

These films were characterized optically, chemically, and structurally by XRD, spectrophotometry, DTA/TGA, SEM/EDAX and RBS.

Uniform WO_3 sol-gel films were dip coated on slide glass at dipping speed of 5mm/s. This sample indicated a low near IR transmittance in optical properties as a result of coloration using a dilute HCl electrolyte as the H^+ ion sources. Differential thermal analysis results have allowed the accurate determination of the formation temperature of the WO_3 crystalline phase from the gel data in the range of 380°C–500°C, consistent with crystallization temperature of sol-gel film. RBS spectrometry was performed on the uncolored WO_3 sol-gel film, yielding a chemical composition of WO_3 .