

열파이프를 이용한 2중 진공관식 태양열 집열기의 열전달에 관한 실험적 연구용량

An Experimental Study on the Heat Transfer for a Dewar-Type

Evacuated Solar Collector with a Heat Pipe

김 철주⁰, 박 이동, 황 영규, 이 진성*

성균관대 기계공학과, 성균관대 대학원*

1. 서론

그동안 국내의 태양열 이용은 저온의 생활온수를 생산하는데 치중되었으 며, 국책과제로 기술개발과 투자가 이루어져왔다. 그러나 증기생산, 냉난방 등과 같이 산업분야에 태양에너지를 이용하기 위해서는 중온용 집열기가 필 요하며 이 분야에 기술은 상대적으로 취약하다. 본 연구는 현재 국내에서 개발중에 있는 반사판과 2중 진공관으로 이루어진 집광형 태양열 집열장치 를 이용하여 열전달 문제를 취급하였다. 이 집열기에서는 집열면 유리관 내 부에 열파이프를 설치하여 집열면으로부터 열을 축열수로 이송하는 방법을 적용하고있다. 아울러 집열면과 열파이프 사이의 열저항을 줄이기 위하여 구리 박판의 fin을 사용하여 두 경우의 집열효율을 비교하였다.

2. 진공관식 태양열 집열기의 구조

그림 1은 본 실험에서 이용한 2중 진공관식 집광형 집열기의 구조를 개괄 적으로 보여주고 있다. 이 집열기는 반사판, 2중 진공유리관, 및 열파이프 로 구성되어 있다. 그림 2는 본실험에서 사용한 반사판과 2중 진공유리관의 크기를 나타낸것으로써 집열기의 집광비는 0.955 그리고 허용각은 90°이다. 2중 진공관 형태의 집열기를 반사판과 같이 사용하면 2중 유리관의 투명한 외부 유리관 영향으로 반사판과의 간격이 생겨 입사되는 태양광선의 상당량 (20~30%)이 내부 유리면에 흡수되지 못하고 외부로 반사되어 버린다.(1) 그러므로, 집광비를 높이는 것보다 집열면의 태양광선 흡수율을 증가시키는 것이 더 중요한 문제가 되며, 반사되어 나가버리는 태양광선을 최대한 다시 재흡수시킬 수 있도록 집열기를 설계하는것이 필요하다. 집열면에서의 열전 달 경로는 다음과 같다. 2중 진공 유리관의 외부 유리관은 태양 복사에너지 를 투과시키고 내부 유리관의 바깥 표면은 선택적 흡수막 처리를 하여 흡수 율을 높이며, 또한 장파손실에 의한 복사에너지 손실을 줄인다. 또 두 유리 관사이의 공간을 진공상태로 유지함으로써 집열면으로부터의 전도와 대류에 의한 열손실을 억제시킨다. 열파이프는 2중 유리관의 내면에 흡수된 열에너 지를 축열수로 이송시키는 역할을 하기 때문에 적절한 설계가 필요하다. 본 실험에 사용된 열파이프는 집열기용 열파이프의 설계 및 제작에 대한 이태 형의 연구결과(2)를 기본적으로 적용하였으며 상세한 제원은 Table 1과 같 다. 한편 집열관과 열파이프 사이의 열저항을 줄이기 위하여 fin을 설치한 실험에서는 열파이프는 외경 9mm의 크기를 갖도록 설계되었다.

Table 1 Specs of the heat pipe designed for the experiment

Component	Material	Dimension(mm)
Container	Copper	Outer Diameter : 19 Inner Diameter : 17 Length of Evaporaor : 1400 Length of Adiabatic : 450 Length of Condenser : 150
Wick	Stainless Steel	Mesh number : 100 Roll number : 2 Wick length : 1850
Working Fluid	Ethanol	Purity : 99.99% Fill charge : 67 ml

3. 열회로 해석

3.1 열손실

그림 3은 열회로 경로를 나타내고 있다. 여기서 집열면에 입사되는 에너지는 직달성분(I_b)과 산란성분(I_d)외에 반사판에서 재반사(I_r)되는 성분으로 이루어지며, 이것을 유효 일사량(I_{eff})으로 정의하고 있다.⁽³⁾ 집열면에서의 I_b와 I_d의 합인 성분은 Pyranometer로 측정할 수 있으나 I_r성분은 태양위치 및 집열기 구조에 따라 변화하며, 이에대한 해석은 아직 이루어지지 않았다. 해석을 단순화하기 위하여 본 집열기의 집광비가 0.955이기 때문에 반사 손실을 무시하고 I_{eff} ≅ I_b+I_d로 추정하여 취급하였다. 입사되는 태양복사 에너지가 직접적 혹은 반사판의 반사에 의하여 투명한 외부 유리관에 입사되면 일부 흡수, 반사되고 그 나머지가 집열면인 내부 유리관에 흡수되어 집열면의 온도는 상승한다. 집열면으로부터 외부로의 열손실은 집열 유리면으로부터 외부 유리관으로의 장파 복사에 의한 열전달양으로써 아래와 같이 표시된다.

$$Q_{IR,r/env.} = \frac{\sigma A_r (T_r^4 - T_{env.}^4)}{(1/\epsilon_r) + A_r/A_{env.}(1/\epsilon_{env.} - 1)} \quad (3-1)$$

여기서 σ = Stephan-Boltzmann Constant, ϵ = Emissivity

집열기의 외부 유리관과 천구면과의 장파에 의한 열교환은 식(3-1)을 응용하여 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$Q_{IR,env./s} = \epsilon_{env.} \sigma A_{env.} (T_{env.}^4 - T_{SKY}^4)$$

이때 T_{SKY}는 지상의 대기온도를 사용한 다음식을 이용하여 결정할 수 있다.

(4)

$$T_{SKY} = 0.0552 T_a^{1.5}$$

그리고 외부 유리관과 주위의 바람사이의 대류에 의한 열손실 아래의 식에 의해 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$Q_{conv.,env./a} = h_{env./a} A_e (T_{env.} - T_a)$$

$h_{env./a}$ 는 풍속의 크기에 따라 다음식을 사용하여 구할 수 있다.⁽⁴⁾

$$h_{env./a} = 5.7 + 3.8V, \quad V = \text{Wind Speed}$$

3.2 집열 유리면과 열파이프사이의 열전달

내부 유리관과 열파이프 사이의 열전달경로는 전도, 대류 및 복사에 의해 이루어진다. 실험결과 집열기의 내부 유리면과 열파이프와의 평균 온도차는 약 45~50°C이며, 이경우 Ra=125 ≪ 1000 이기 때문에 대류에 의한 열전달은 매우 작다. 그러므로 내부 유리관과 열파이프 사이의 열전달은 전도와 복사에 의해 이루어지며, 반경방향의 단순한 1차원 전도와 복사 열전달로 이상화할 수 있으며, 다음과 같이 각 표시할 수 있다.⁽⁶⁾

$$Q_{cond.} = \frac{2\pi k l (T_r - T_{HP})}{\ln(d_2/d_1)}, \quad Q_{rad.} = \frac{\sigma \pi d_1 l (T_r^4 - T_{HP}^4)}{(1/\epsilon_{HP}) + d_1/d_2(1/\epsilon_G - 1)}$$

여기서 d₁, d₂는 각각 열파이프와 내부 유리관 직경을 나타낸다. 그림 4는 fin을 설치한 경우의 집열기와 열파이프의 구성개요를 보여주고 있다. fin은 두께 0.1mm, 폭 30mm의 구리판을 사용하였다. 접촉저항의 복잡성을 고려하여 여기서는 해석을 수행하지 않고 실험적으로만 문제의 성질을 파악하였다.

4. 실험장치 및 실험방법

그림 5는 태양열 집열기 성능실험장치의 개요를 나타내고 있다. 집열판의 방향은 정남향이며 수평면에 대해 45°의 경사각을 갖도록 고정하였으며, 순간 일사량계는 집열기와 동일한 평면상에 놓이도록 설치하였다. 순간 일사량 측정에는 Pyranometer (Eppley Laboratory INC, U.S.A), 온도와 일사량 측정 및 기록은 Data Logger (Fluke 2240S, JAPAN)를 사용하였다. 집열기의 성능실험은 냉각수 입구온도와 유량을 일정하게 유지시켜주는 상태에서 쾌청하고 일사량이 좋은날 실제 태양 복사하에서 실험을 통하여 수행하였다. 냉각수 입구온도는 항온수조를 사용하여 온도를 일정하게 유지시켜 주었으며, 넓은 온도범위에 대해서 실험을 수행하였다. 냉각수 유량은 150ml/min 이 되도록 유량계를 사용하여 일정하게 유지시켜 주었다.

5. 결과 및 고찰

5.1 집열기의 작동과정

그림 6은 집열기에 태양복사가 입사되기 시작한 초기 약 25분간의 태양복사, 2중 유리관의 온도, 열파이프 벽의 온도 및 냉각수 출구온도의 변화를 나타내고 있다. 그림으로부터 태양복사가 입사된 후 약 2분 경과 후 열이 열파이프로 전달되어 열파이프 단열부 벽의 온도가 상승과 함께, 냉각수 출구온도 상승이 시작됨을 볼 수 있다. 그리고 열파이프가 정상적인 작동에도달되면(약 16분후) 전체 집열기가 정상상태로 작동됨을 볼 수 있다. 한편 그림 7은 태양복사가 구름의 영향으로 변화하는 과정동안의 작동상태를 나타낸다. 약 10분 동안의 태양복사의 불규칙한 변화에 대해서도 열파이프의 작동상태에 큰 변화가 목격되지 않았으며, 이후 태양복사의 증가(14분)에 따라 열전달율이 상승하고 있다.

5.2 내부 유리관 온도분포

2중 진공 유리관의 내부 유리관의 내면에 원주 방향으로 60° 간격으로의 온도분포는 태양복사의 입사각도 변화에 따른 영향을 검토하였다. 집열기 대칭축과 태양복사 입사각과의 사이각 $\theta=0, -45$ 두 경우의 결과가 각각 8-(a), (b)이다. 입사각도 변화에 따라 다소 차이는 있지만 유리관의 윗면이 아랫면보다 15°C 정도 높은 온도를 나타내고있고, 최대온도는 태양복사의 직달성분이 입사되는 점에서 나타난다. 이것은 반사면에서 재반사되어 입사되는 복사강도가 직접전달되는 복사보다 감쇠되어 있음을 나타낸다. 이것은 반사판과 집열면인 내부 유리면과의 간격이 외부 유리관으로 인하여 생기는 데 반사판에 입사되는 상당량이 이룸으로 인하여 외부로 반사되어 버리기 때문이다. 이 결과는 원형관의 집열면을 반사판에 틈이 없이 부착시킨 경우의 집광형 집열기에서 입사각도가 0~30°일때 보통 유리관의 아래부분이 윗부분보다 더 많은 태양광선의 열속이 분포되는 경우(7)와 구분이 된다.

5.3 내부 유리면과 열파이프의 열전달

그림 9는 19mm 열파이프가 집열면인 유리관 중앙에 위치한 경우 열파이프와 집열면 유리관의 이론적인 열전달률과 이때 열파이프의 응축부로 전달된 열전달률을 실험을 통하여 얻은 결과와 비교한것이다. $Q_{cond.}$, $Q_{rad.}$ 는 각각 전도와 복사에 의한 내부 유리면으로부터 열파이프에 전달된 열량이며, $Q_{gr.}$ 은 이 두 성분의 합으로써 실험에 의하여 얻은 결과와 해석적 결과는 비교적 일치함을 보여주고 있다. 그림에서 내부 유리관과 열파이프사이의 열전달은 공기층에 의한 전도와 복사효과의 비가 약 2:1을 나타내고 있다.

5.4 집열기 효율

집열기의 효율은 입사되는 태양에너지에 대해 사용할 수 있는 유용한 열에너지의 비로 나타낸다. 본 실험에서는 아래 식으로 계산하였다.

$$\eta = \frac{m \times C_p \times (T_o - T_i)}{I \times A}$$

여기서 $m, C_p, (T_o - T_i)$ 는 각각 냉각수 유량, 비열 및 입, 출구온도이

다. 그림 10은 이상에서 고찰한 경우의 집열기와 그리고 열파이프와 유리관 사이에 fin을 설치하여 열전달 경로를 전도에 의존하도록한 경우의 열효율을 비교하였다. 또한 fin과 유리관 사이의 열접촉저항을 줄이기 위하여 솜으로 채운 경우의 측정치도 함께 비교하였다. 이 결과 단순한 집열면과 열파이프 사이의 공기층에 의한 열전달이 이루어지는 경우가 가장 낮은 열효율을 보여주었다. 그리고 fin을 설치한 경우가 현저히 열효율이 상승되었다. 이러한 결과로부터 유리면과 열파이프 사이에 열저항을 감소시킴으로써 집열 유리면의 온도가 강해지기 때문에 대기로의 열손실이 감소되는데 따른 영향이다. 따라서 fin과 유리면사이의 열접촉저항을 개선함으로써 주어진 집열기에서 보다 개선된 집열효율을 기대할 수 있을것으로 생각된다.

6. 결론

1. 초기시동 구간에서 약 2분 정도의 시간지연이 나타나며, 정상작동에 도달되는데 약 15분 정도가 소요되고, 일사량의 불규칙한 변화에 대해서도 안정된 작동을 나타내고 있다.
2. 집열유리관에서의 온도분포는 태양복사의 입사각에 따라 영향을 받으며, 상부가 하부보다 최대 약 15°C정도 크게 나타난다. 이것은 반사판으로 반사되는 태양복사의 손실이 적지않음을 나타낸다.
3. 유리면과 열파이프 열전달은 공기층의 전도와 복사에 지배되며, 매우 큰 열저항을 나타낸다. 이 결과 집열효율은 50% 미만의 값을 나타내었으며, 열전달 해석결과는 실험치와 잘 일치하였다.
4. 유리면과 열파이프 사이에 fin을 사용하는 경우 열저항을 현저히 감소시킬 수 있으며, 집열효율이 70~50% 범위로 증가되었다.

참고 문헌

1. J. J. O'Gallagher, A. Rabl, R. Winston and W. McIntire, "Absorption Enhancement in Solar Collectors by Multiple Reflection", Solar Energy Vol.24, pp 323-326, 1980
2. 이태형, "태양열 집열기에 적용할 열파이프의 제작과 성능실험", 성균관 대학교, 석사학위논문, 1990
3. "Solar Energy Utilization Handbook", Japan Solar Energy Society, 1985
4. John A. Duffie and William A. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Process", John Willy and Sons, New York, 1974
5. J. R. Frissora and D. M. Platt, "Drainable Evacuated Collector with Compound Parabolic Cusp Reflector", Solar Energy and conservation
6. R. Schmid, R. E. Collins, and B. A. Pailthorpe, "Heat Transport in Dewar-Type Evacuated Tubular Collectors", Solar Energy Vol.45, pp 291-300, 1990
7. Ugar Ortabasi and Francis P. Fehlner, "Cusp Mirror Heat Pipe Evacuated Tubular Solar Thermal Collector", Solar Energy Vol.24, pp 477-489, 1980

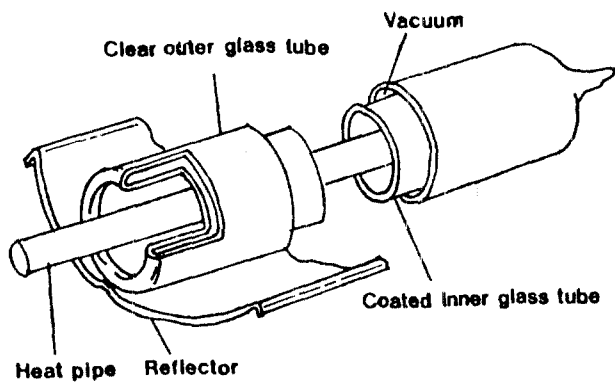


Fig.1 Structure of evacuated solar collector.

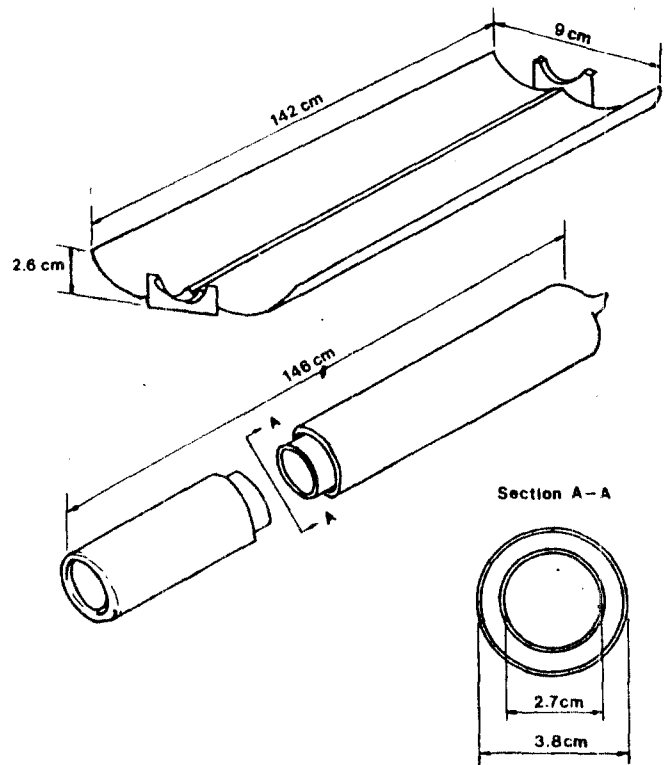


Fig.2 Structure of reflector and evacuated tube.

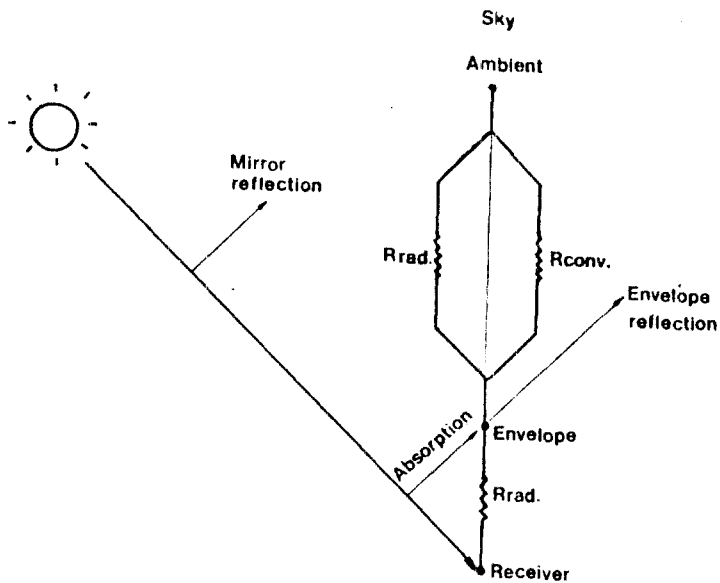


Fig.3 Thermal network for evacuated solar collector.

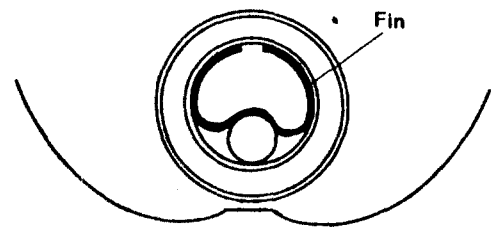


Fig.4 Structure of evacuated solar collector with fin.

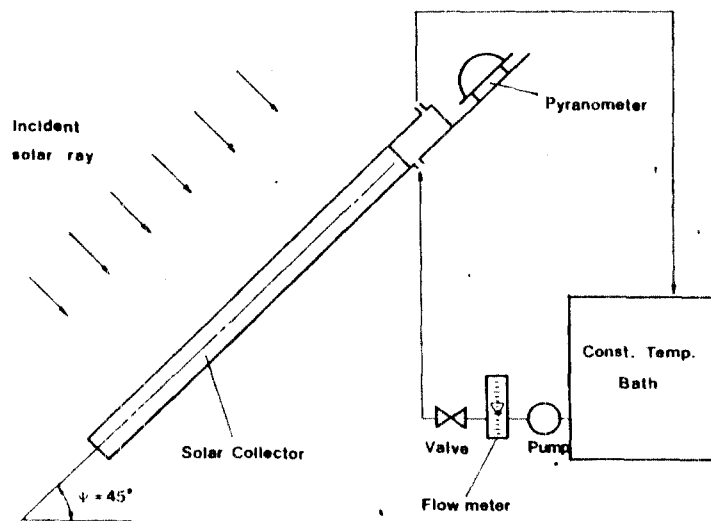


Fig.5 Schematic of experimental apparatus for performance testing of solar collector.

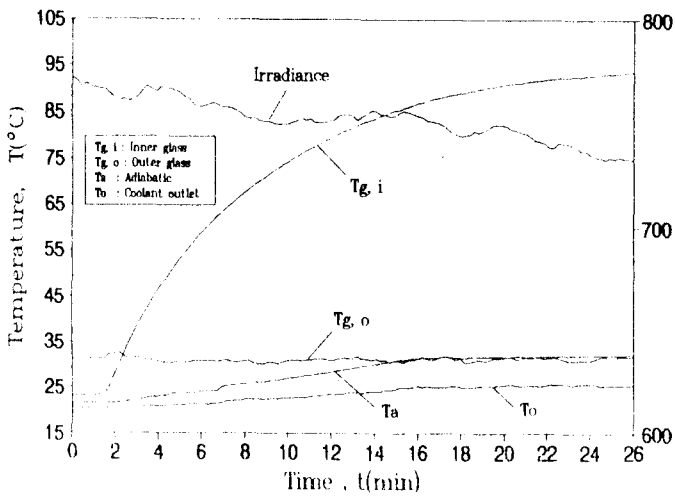


Fig. 6 Time variations of irradiance and temperatures of heat pipe wall and coolant and glass tube at start operation.
 (Coolant rate : 150 ml/min, Ambient temperature : 30.5 $^{\circ}\text{C}$
 Irradiance was measured in the plane of the collector)

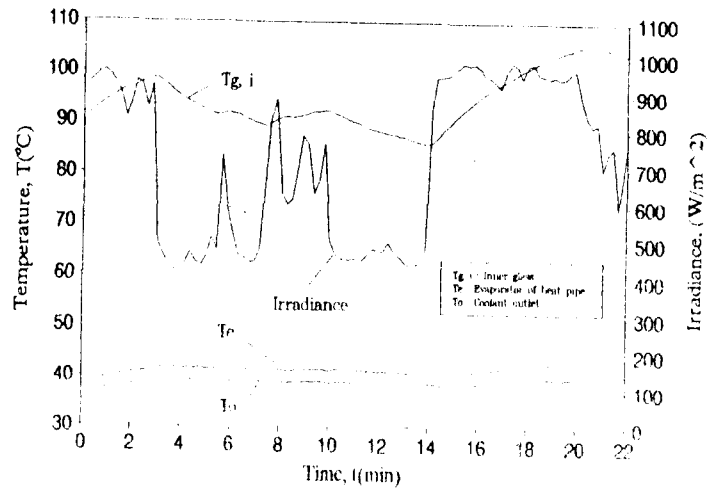


Fig. 7 Time variations of temperatures of heat pipe wall, coolant and receiving glass tube while solar radiation varied by the passage of clouds
 (Coolant rate : 150 ml/min, Ambient temperature : 27 $^{\circ}\text{C}$
 Irradiance was measured in the plane of the collector)

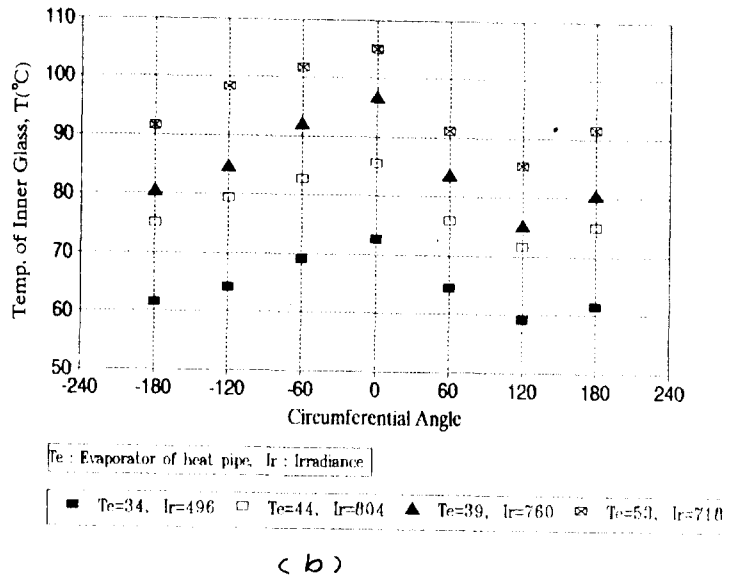
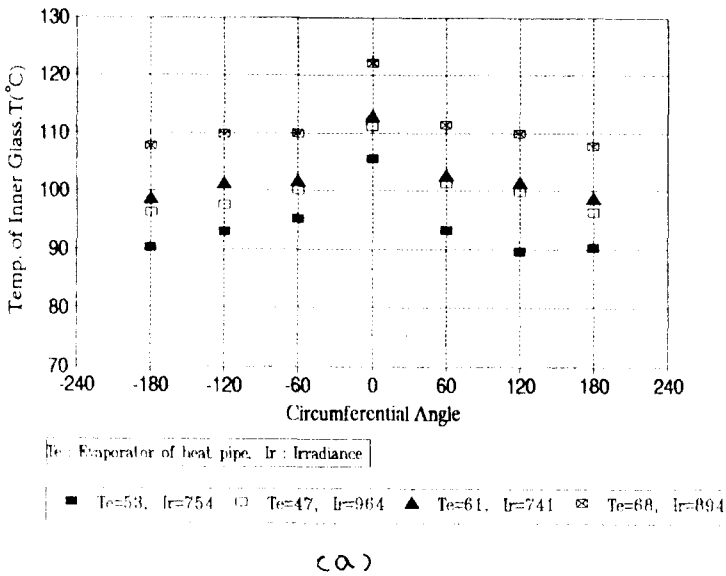


Fig. 8 Radial temperature distribution on inner glass tube.
 a) For Incident angle $\theta = 0$, b) For Incident angle $\theta = -45$
 (Coolant rate : 150 ml/min, Ambient temperature : 29 $^{\circ}\text{C}$)

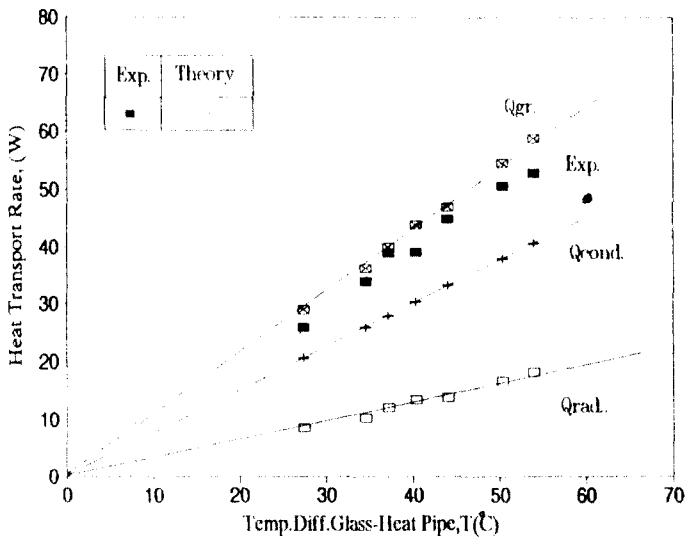


Fig.9 Calculated and measured heat transport rate from inner glass tube to heat pipe.

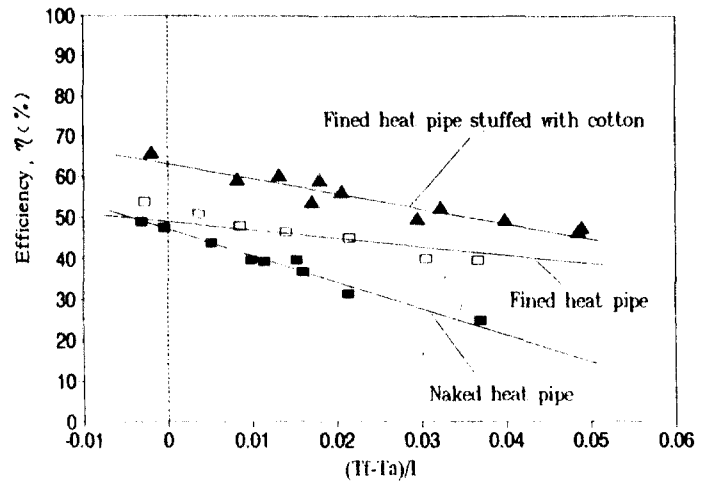


Fig.10 Collector efficiency versus variation of coolant temperature and solar intensity.