

하절기 태양열 시스템 적용을 위한 이중진공관 히트파이프형 집열기 열성능의 실험적 연구

강창호[†], 배찬효*, 홍정규*, 서정세**

An Experimental Study for Apply Solar System on Thermal Performance of Heat Pipe Type Solar Collector using a Glass Concentric Evacuated Tube in a Summer

C.H. Kang[†], C.H. Bae*, J.K. Hong* and J.S. Suh**

Key Words: Collector Efficiency(집열효율), Concentric Evacuated Tube Collector(이중진공관),
Heat Pipe(히트파이프), Solar Collector(집열기)

Abstract

This paper has been carried out to find the thermal efficiency and operating characteristics of heat pipe type solar collector using a glass concentric evacuated tube(CETC) during summer. In an experiment the flow rate of water in collector are 1.5l/min. Collector efficiency is 50~60% during time. The solar radiation appeared in a clear day is efficiency high. Efficiency curve fitted first order polynomial show that $F_R(\tau\alpha)$ and $F_R U_L=1.316$ is 0.601 and 1.316 respectively.

기호설명

A_C	집열 면적[m ²]	T_p	집열관 평균 온도[°C]
C_P	정압 비열[kJ/kgK]	T_o	집열기 출구 온도[°C]
F_R	열전달비(heat removal factor)	Q_u	집열 에너지[W]
G_T	일사량[W/m ²]	U_L	열손실 계수[W/m ² °C]
S	흡수 에너지[W]		
T_a	대기 온도[°C]		
T_i	집열기 입구 온도[°C]		

그리스 문자

α	흡수판 흡수율
η	집열 효율
τ	이중진공관 투과율

† 경상대학교 대학원

E-mail : indam@gshp.gsnu.ac.kr

TEL : (055)752-5236

* 경상대학교 대학원

** 경상대학교

1. 서론

국내에서는 최근 들어 유가상승 추세에 대응

하기 위한 대체 연료의 확보 및 환경 문제의 대두로 인하여 대체에너지 기술개발과 보급, 확산에 관한 중요성이 강조되고 있고, 이에 맞춰 정부정책 또한 대체에너지에 대한 지원이 이루어지고 있다. 이러한 대체 에너지로서 태양열은 그 양과 질적인 면에서 무한하며 무공해인 에너지원으로서 다양한 이용분야가 개발되어 상용화되고 있다. 이 중 태양열 집열기는 태양복사 에너지를 집열하여 이용하기 위한 장치로서 그 이용목적과 적용온도에 따라 여러 가지 형태를 갖고 있다.

국내의 경우 평판형 태양열 집열기를 이용한 온수급탕 시스템이 보급되어 있으나, 평판형 집열기는 대류열손실이 크고 산업용 중고온 영역에서의 적용이 힘들다. 따라서 태양에너지의 효율적인 사용을 위해 산업용 및 가정용 이용에 적합한 고효율 태양열 집열기의 개발이 요구되고 있으며, 그 중 우리나라의 여러 가지 환경을 고려하여 볼 때, 산업용 및 가정용으로 이용가능한 중고온용 태양열 집열기는 진공관형이라고 볼 수 있다.

진공관식에 대한 연구는 Chun⁽¹⁾ 등이 진공복사관식 집열기의 성능 실측 및 최적화를 연구하였고, Kim⁽²⁾ 등은 진공관형 집열기의 열성능에 대해 해석하였다. Kwak⁽³⁾ 등은 단일 진공관속에 히트파이프를 내장한 집열기를 실험하였고, Motison⁽⁴⁾ 등은 작동매체인 물이 진공관을 직접 순환하는 형태의 집열기에 대해 실험하였다. 본 연구에서는 히트파이프형 이중진공관을 사용한 태양열 집열기의 여름철 동안의 온도 변화 특성을 파악하고, 집열기의 효율 등을 실험적으로 알아보고 집열 성능을 파악하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 히트파이프형 이중진공관 태양열 집열기

일반적인 진공관형 태양열 집열기는 Fig. 1 과 같이 두 가지 형태로 나눌 수 있다.

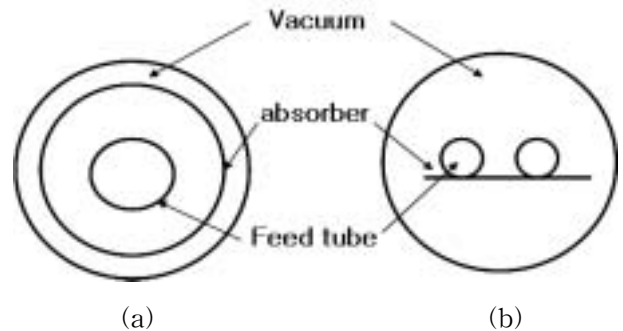


Fig. 1 Illustration of two fundamental evacuated tubular collectors.

Fig. 1(a)는 Dewar-Type 진공관 집열기 (Concentric Evacuated Tube Collector)를 나타낸 것으로서 직경이 다른 두 유리관이 결합되어 그 사이의 공간을 진공시킨 형태이다. Fig. 1(b)는 진공관내에 금속 표면의 집열면을 갖는 집열기 형태로서 열은 집열면에서 열회수 장치에 의해 전달되어 축열조로 이송된다.

본 연구에 사용된 집열기는 Dewar-Type 진공관 집열기로서 유리관내에 히트파이프를 설치하여 내부 유리관에 흡수된 태양복사에너지가 열파이프에 의해 축열수로 이송되는 형태이다. 집열 유리면과 내부 금속판과의 열전달에 관한 연구에서 대류에 의한 영향은 무시할 수 있으며, 주로 공기층의 전도와 복사에 의해 열전달이 이루어진다.⁽⁵⁾ 이러한 공기층에 의한 열저항을 줄이고 전도에 의한 효과를 높이기 위해 여러 형태의 핀을 사용하여 집열기의 성능을 개선할 수 있고, 본 연구에서는 알루미늄 호일로 히트 파이프를 둘러싸 핀 역할을 하도록 하였다.

본 실험에 사용된 히트파이프형 이중진공관 태양열 집열기의 장점으로서는 태양 복사광의 직달성분과 산란성분을 유효하게 이용할 수 있고, 내부에 이중진공관이 존재하기 때문에 고체의 표면으로부터 전도와 대류에 의한 에너지 손실을 감소시킬 수 있으며, 평판형에 비해 설치면적을 줄일 수 있다. 또한 선택 흡수 코팅을 통한 복사 열손실 또한 줄일 수 있는 특징을 가지고 있다. 내부에 삽입된 히트파이프의 우수한 열전달능력을 활용함으로써 기존의 진공관식에서 작동매체를 직접 순환시키면서 발생하는 열쇼크 문제와 동파 문제를 보완할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 히트파이프의 열다이오드(thermal diode) 기능

으로 축열수의 온도가 집열관의 온도보다 높을 때 열의 역류에 의한 열손실을 억제한다. 이로 인해 히트파이프형 이중진공관형 태양열 집열기는 중온 및 고온 상태에서뿐만 아니라 추운 지역 및 비정상 상태의 날씨 조건에서도 적용될 수 있다.

2.2 집열 효율

집열 성능을 계산하는 관련 식은 평판형 집열기에 대한 식을 기본으로 하여, 관련식을 정리하면 다음과 같다.

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_C G_T} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Q_u &= A_C [S - U_L(T_p - T_a)] \\ &= \dot{m} C_P (T_o - T_i) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 Q_u 는 집열기 실제 집열량이며, 흡열관의 평균 온도 및 대기 온도 등으로부터 구할 수 있으며, 동시에 순환매체의 질량유량, 집열기 입·출구온도로부터도 구할 수 있다. 한편, 흡열관의 평균온도 T_p 대신 집열기의 입구온도로 T_i 로 표현하기 위해, 집열기 최대 열전달량과 실제열전달비인 F_R 을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_R = \frac{\dot{m} C_P (T_o - T_i)}{A_C [G_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)]} \quad (3)$$

집열기의 실제 집열량 Q_u 를 식(2)로부터 F_R 을 이용하여 정리하면 다음의 식과 같다.

$$Q_u = A_C F_R [G_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (4)$$

집열기 효율 η_i 를 식(4)를 이용해 나타내면 다음과 같다.

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_C G_T} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{T_i - T_a}{G_T} \quad (5)$$

위 식에서 보듯이 F_R 과 U_L 의 곱의 항은 집열기의 손실에 관련된 항이라 할 수 있으며 $F_R(\tau\alpha)$ 는 집열기의 열 획득에 관련된 항이라 할 수 있다. 실제적으로 집열기 열 성능은 일사량과 대기온도, 작동유체 유입온도와 연계된 순간 효율 값에 의해 결정된다. 태양열 집열기에 입사되는 일사량에 대한 집열기 헤드에 흐르는 열매체에 가해지는 에너지의 비를 실험적으로 측정하여 효율을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \eta_i &= \frac{Q_u}{A_C G_T} = \frac{\dot{m} C_P (T_o - T_i)}{A_C G_T} \\ &= \frac{\dot{m} C_P \int \Delta T dt}{A \int G_T dt} \end{aligned} \quad (6)$$

전열 매체의 유속을 일정하게 유지하면서 작동하는 태양열 집열기에서 $F_R(\tau\alpha)$ 및 U_L 등은 거의 일정하여 상수로 가정한다면 집열효율 η_i 는 식(5)에서 $(T_i - T_a)/G_T$ 의 조건에 따라 변화는 일차식으로 나타낼 수 있다. 이 때 $F_R(\tau\alpha)$ 값은 Y축 절편값이 되며, $F_R U_L$ 은 기울기에 해당한다. 효율에서 일반적으로 $F_R(\tau\alpha)$ 은 클수록 $F_R U_L$ 값은 작을수록 우수한 집열기라고 할 수 있다.⁽⁵⁾

3. 실험

3.1 실험장치

본 연구에 사용된 집열기의 개략적인 구성은 Fig. 2에 나타내었다. 집열기는 주위로부터 일사의 방해받지 않는 옥외에 설치되었고, 7개의 이중진공유리관 속에 전열면적을 크게 하기 위해 알루미늄 호일로 싸여진 히트파이프를 삽입하였고, 집열기의 위치와 경사각은 GPS 측량으로 구한 설치지점 위도와 동일한 35°각도로 경사시켜

설치하였으며 계절에 따라 경사각을 조절할 수 있도록 집열대를 제작하였다. 일사량계는 집열기의 설치 각도와 동일하게 하였다. 히트파이프의 응축부를 열매체 입/출구를 갖는 집열기 헤드에 장착하여 실험하였다. 특히 집열기 헤드의 출구의 경우 집열기 헤드보다 가급적 위로 굴곡을 주어 배관을 형성시켜 줌으로써 가급적 집열기 헤드 내에 열매체가 차서 흐르도록 하였고, 출구 배관에 공기변을 장착하여 기포를 제거해 주었다.

시스템의 자세한 제원은 Table 1에 정리하였다. 본 실험에서 전체 시스템은 ASHREA Standard 93-77을 기본으로 Fig. 3와 같이 구성되었으며 강제 대류식으로 순환된다. 실험에 사용된 히트파이프형 이중진공관식 태양열 집열기는 Fig. 4에 나타난 것과 같으며, 히트파이프를 알루미늄 호일로 둘러싼 그림이고, 내부에 욱이 없는 써모싸이폰식으로 재질은 구리이고 작동유체로 12cc 물이 사용되었다.



Fig. 2 Photograph of the collector used in this study.

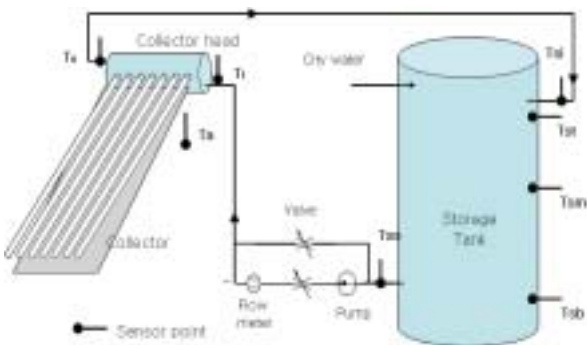


Fig. 3 Schematic diagram of solar collector system.



Fig. 4 Configuration of CETC.

Table 1 Geometric dimension of system

Parameter	Specification
Absorber Area(A)	1500 × 490 [mm ²]
Collector Head	10 [ℓ]
Storage Tank Volume	240[ℓ]
Glass Concentric Evacuated Tube	φ47 [mm]
Selective Surface	Black chrome coating
Heat Pipe	Total Length 1500 [mm] Evaporator length 1250 [mm] Condenser length 130 [mm] Adiabatic length 120 [mm] Pipe Diameter(O.D) 8.67 [mm] Pipe Diameter(I.D) 7.17 [mm]
Thermocouple	T-type

3.2 실험 방법

시스템의 주요 측정점은 Fig. 3에 나타나 있으며, 측정은 여름철 집열 특성을 알아보기 위해 7월 26일부터 한 달간 진행되었다. 실험은 집열기의 온도변화 특성과 효율에 초점을 두어 수행하였고, 선행연구⁽⁶⁾에서 다양한 유량에 대해 유량이 1.5kg/min 일 때 본 시스템이 가장 효율이 우수하게 나타났다. 이러한 데이터를 바탕으로 여름철의 집열 특성을 알아보기 위해 유량을 1.5kg/min 으로 고정시키고 지속적으로 관찰하였다. 자료의 수집은 각 측정 위치에서의 자료를 매 1분마다 수집하여 한 시간 평균으로 정리하였다. 열전대는 설치에 앞서서 측정에러를 줄이기 위해 열전대 보정작업을 수행하였고, 보정된 열전대는 ±0.5℃ 이내의 오차 범위를 갖도록 보정하였다. 집열량의 산정은 일사량이 적정수준이 되는 오전 10시부터 오후 5시까지로 집계하였다.

4. 결과 및 토의

Fig. 5는 한달 동안의 일사량과 집열량을 나타내고 있다. 여름철의 일사량은 하루 최고 22MJ 까지 나타났고, 일사량이 높을수록 집열량이 높게 나타났다. 그림에서 일사량이 낮게 나타난 부분은 낮 동안 비가 왔던 날이었다.

Fig. 6는 한달 동안의 일사량과 효율의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 일사량이 좋았던 날에는 효율 역시 우수하게 나타났고, Fig. 7에서 이 사실을 다시 한번 확인 할 수 있었다. 비가 왔던 날의 효율은 실제 집열량이 없었기 때문에 아주 낮은 수치를 나타냈다. 집열기의 효율은 여름철 한달 동안 50~60% 정도로 유지 되었다.

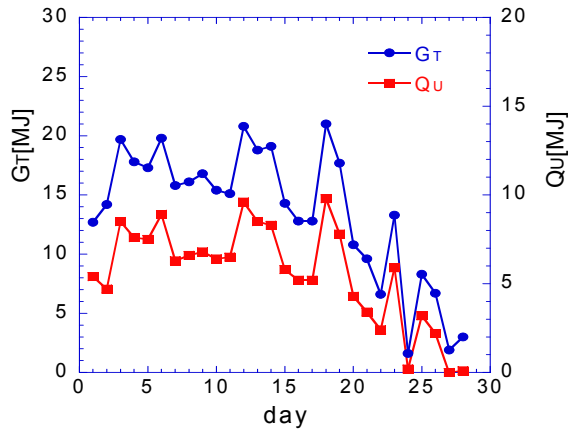


Fig. 5 Solar radiation and useful energy

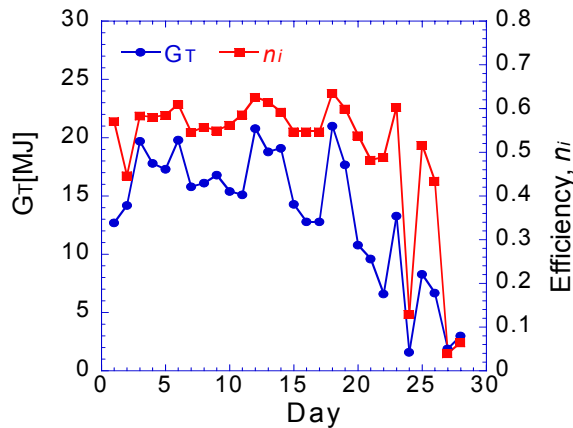


Fig. 6 Solar radiation and mean daily collector efficiency

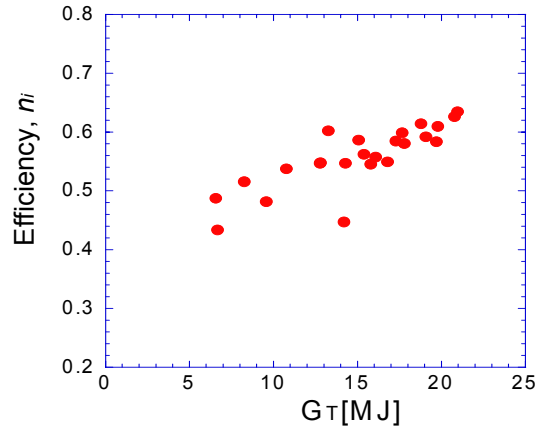


Fig. 7 Collector efficiency with solar radiation

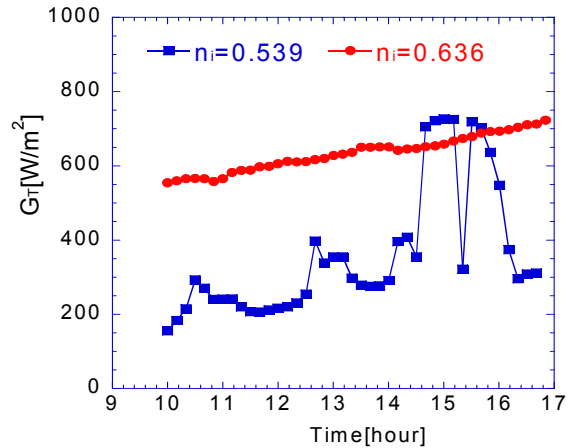


Fig. 8 Comparison of solar radiation during a day

Fig. 8은 실험 기간 중 효율이 가장 우수했던 날과 그렇지 못한 날의 일사량을 나타낸 것이다. 효율이 우수했던 날은 일사량이 낮 시간동안 고르게 유지되었고, 효율이 낮았던 날은 일사량이 심하게 변화했다. Fig. 9은 효율이 높았던 날과 낮았던 날의 집열기 헤드 입출구 온도와 외기 온도를 나타내고 있다. 효율이 높았던 날은 전형적인 태양열 집열기의 특성을 나타내고 있고, 낮았던 날은 일사량의 변화에 따라 출구 온도가 변화고 있다.

Fig. 10는 실험 기간 동안의 집열기 효율 곡선이다. 태양열 집열기의 효율식에서 $F_R(\tau\alpha) = 0.601$, $F_R U_L = 1.316$ 로 나타났다. 일반적인 평판형 태양열 집열기의 효율식의 $F_R U_L$ 값이 5.0~6.0 정도인 점을 감안할 때 이중진공관형 집열기의 열손실이 확연히 작다는 것을 알 수 있다.

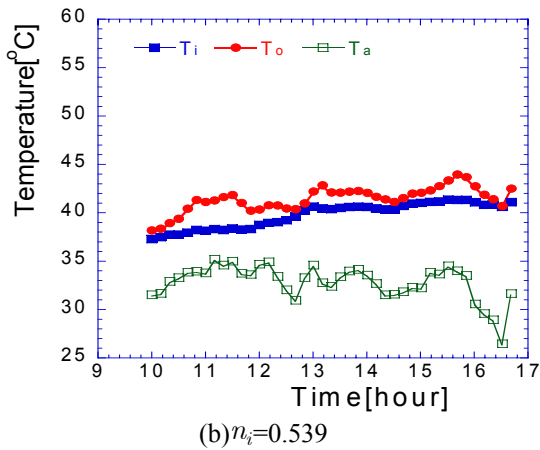
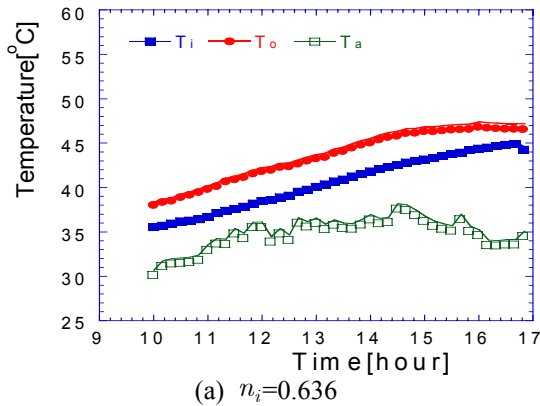


Fig. 9 Variation of temperature of the solar collector efficiency with system

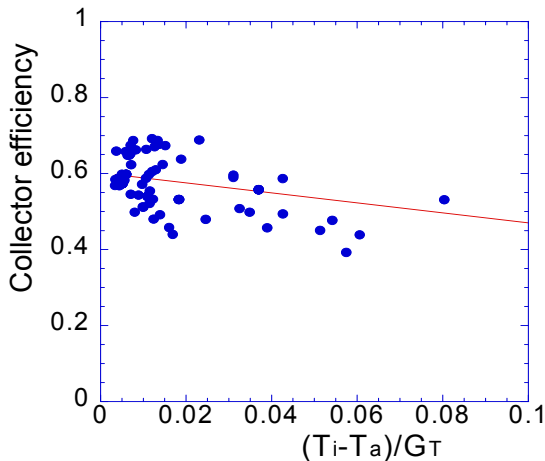


Fig. 10 The thermal efficiency of collector

5. 결론

하절기 태양열 집열기로서 히트파이프형 이중진공관을 사용한 실험을 하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 실험 동안의 집열기의 효율은 50~60%를 유지하였고, $F_R(\tau\alpha)$ 은 0.601, $F_R U_L$ 1.316 이다.
2. 일사량이 많을수록 집열기 효율은 증가하였다.
3. 일사량이 적은 날에도 50% 대의 효율을 유지하였다.
4. 히트파이프형 이중진공관 집열기는 일반적인 사용 범위 내에서 평판형에 비해 집열 능력뿐만 아니라 열수송 능력이 우수하게 나타났다.

후 기

본 연구의 일부는 BK21 지역대학육성사업, 항공기부품기술연구센터 및 산업자원부의 지역혁신인력양성사업, NURI의 지원으로 이루어 졌으며, (주)세운전재의 협력에 감사드립니다.

참고문헌

1. W.G. Chun, S.H. Kang, K.H. Kim, Y.K. Lee and R.W. Chang, 2001, Study on the Optical Performance of Evacuated Solar Collector, Journal of the Korea Solar Energy Society, Vol. 21, NO. 41.
2. Y. Kim, T.B. Seo, and Y.H. Kang, 2003, An Analysis of the Thermal Performance of the Glass Evacuated Tube Solar Collector, Journal of Korean Solar Energy Society, Vol. 23 NO. 2.
3. H.Y. Kwak, 2000, Development of Evacuated Tube Solar Collector for Industrial Process Heat, RP.
4. G.L. Morrison, I. Budihardjo and M. Bhnia, 2004, Water-in-glass Evacuated Tube Solar Water Heaters, Solar energy, Vol. 76. Issues 1-3, pp.135-1403.
5. Schmid, R, Collins, R. E., AND Pailthorpe , B. A., 1990, Heat Transport in Dewar-Type Evacuated Tubular Collector, J of Solar Energy, 45, 291
6. C.H. Kang, C.H. Bae, J.K. Hong and J.S. Suh, 2004, An Experimental Study on Thermal Performance of Heat Pipe Type Solar Collector using a Glass Concentric Evacuated Tube, SAREK