

그루브형 히트파이프를 갖는 이중진공관형 태양열 집열기의 열전달특성에 관한 실험적 연구

김 병 기*†, 정 경 택*, 장 환 영*, 서 정 세**
 경상대학교 대학원*, 경상대학교 기계공학과**

An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics of a Grooved Heat Pipe for Solar Collector

Kim, Byoung-gi*†, Chung, Kyung-taek*, Jang, Hwan-young*, Suh, Jeon-se**

*School of Mechanical and aerospace Engineering, Graduate School, Gyeongsang Nat'l University

**School of Mechanical and aerospace Engineering, Gyeongsang Nat'l University

ABSTRACT: This study investigated heat transfer characteristics between absorber and heat pipe used to extract heat from concentric evacuated tubular collectors. In order to experiment, T-type thermocouples are attached to a evaporator of heat pipe and absorber of inner tube. A wall temperature distribution of absorber and heat pipe were carried out by experimental method under actual various ir-radiance and outdoor conditions. As a result, As to increase an irradiance, a wall temperature of absorber and heat pipe is gradually increased. The heat pipe was required about 20min to obtain steady state operation after start up and operates stable during various irradiance conditions. And the collector efficiency was about 50~70% when a mass flow rate is about 1.3 l/min.

Key words: Heat Pipe(히트파이프), Grooved Wick(그루브 워), Solar Collector(태양열 집열기)

기 호 설 명

A_c : Collector area [m²]

A_r : Absorber area [m²]

A_t : Projected area of a outer glass tube [m²]

c_p : Specific heat of water [J/kg·°C]

F_R : Heat removal factor

I_c : Solar irradiation on a collector surface [W/m²]

I_{eff} : Effective solar irradiation [W/m²]

mc : Effective heat capacity of collector [J/m²·°C]

\dot{m}_c : Mass flow rate [kg/s]

Q_L : Heat loss from a collector [W]

q_u : Energy delivery rate of collector [W]

T_{in} : Inlet working fluid temperature of collector [°C]

T_{out} : Outlet working fluid temperature of collector [°C]

\bar{T}_r : Mean temperature of absorber [°C]

U_c : Heat loss coefficient of absorber surface [W/m²·°C]

U_{eff} : Effective heat loss coefficient of absorber surface [W/m²·°C]

† Corresponding author

Tel.:+82-55-751-5312;fax:+82-55-757-5622

E-mail address: jssuh@gnu.ac.kr

U_i : Overall heat loss coefficient [W/m²·°C]
 α_r : Solar absorptance
 η_c : Collector efficiency [%]
 τ_s : Solar transmittance

1. 서론

현재 우리나라는 에너지원으로 화석연료나 원자력에 의존하여 모든 에너지를 해외에 의존하고 있다. 근래에 정부에서는 이들 1차에너지의 안정적 공급과 절약을 위해 정부에서는 연면적 3000m² 이상의 새로운 건물을 신축할 때 예산의 일정비율을 대체에너지 설비의 설치를 의무화하고 있다⁽¹⁾. 현재 세계 각국에서는 여러 가지 고효율 태양열 집열기와 요소 기술들의 개발을 위해 많은 연구를 진행 중에 있는데 온수 생산용 태양열 집열기는 크게 평판형과 진공관형으로 구분할 수 있다. 평판형 태양열 집열기는 유리덮개를 갖는 흑색표면의 집열평판을 이용하여 태양복사 에너지를 열에너지로 변환시키며, 약 60~80°C 범위의 저온의 열에너지를 얻을 수 있다. 한편, 축열수의 온도가 상승하여 집열면의 온도가 높을 때 집열면에서의 대류, 복사 손실이 증가하여 중, 고온의 에너지를 생산할 수 없다. 진공관형 태양열 집열기는 집열면과 외부와의 공간을 진공시킴으로써 대류에 의한 손실을 억제시킨 형태로써 주로 반사판이나 광학적 렌즈를 이용하여 복사열을 집중시켜 복사 에너지 밀도를 증가시킴으로써 약 110~180°C 범위의 중온의 열에너지를 얻을 수 있다⁽²⁾. 특히 다른 집열기보다 가장 상용화가 쉽고 많은 연구가 진행되어 왔던 진공관형 집열기에 대한 관심은 점점 증가되고 있고 업체에서는 집열기의 성능검증을 위해 많은 어려움을 겪고 있는게 사실이다.

본 연구에서는 ASHRAE STANDARD를 근거로 하여 태양열 집열기의 효율특성을 파악해 보고자 하며, 추가적으로 진공관내에 삽입되어 있는 히트파이프의 열전달 특성도 파악해 보고자 한다. 이는 집열기 성능테스트에 있어 기본적인 설계자료에 많은 도움이 될 것으로 예상된다.

2. 이론적 고찰⁽¹⁾

진공관식 집열기의 열손실은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_L = U_c A_r (\bar{T}_r - T_a) \quad (1)$$

여기서 U_c 는 이중진공관의 열손실계수, T_a 는 외기온도, A_r 과 \bar{T}_r 은 크롬으로 선택적 흡수 코팅된 내부 유리관의 바깥 표면적과 평균온도를 각각 의미한다.

비정상상태에서 태양복사에너지로부터 집열기가 얻는 집열에너지(energy delivery rate)는 집열기로 입사된 태양복사에너지와 주위로의 열손실의 차이로 나타낼 수 있으며 식 (2)과 같다.

$$q_u = \tau_c \alpha_r I_{eff} A_t - U_c A_r (\bar{T}_r - T_a) - (mc) \frac{d\bar{T}_r}{dt} \quad (2)$$

여기서 I_{eff} 는 집열기에 실제 입사한 일사량, A_t 는 외부유리관의 투영면적 그리고 $(mc) \frac{d\bar{T}_r}{dt}$ 는 흡수기내에 구리관과 내부유리관을 조합시키는 알루미늄 금속박판을 포함한 집열기의 시간당 열용량의 변화이다. 위의 집열에너지는 집열기를 통과하는 유체의 질량유량을, 집열기의 입·출구 유체온도차에 의해 구할 수 있으며, 식 (3)과 같이 달리 표현할 수 있다.

$$q_u = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

식 (2)를 \bar{T}_r 대신 집열기의 입구 유체온도 T_{in} 으로 표현하기 위해 집열기 최대 열전달과 실제 열전달의 비인 열제거비(heat removal factor)를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) + (mc) \frac{d\bar{T}_r}{dt}}{A_c [I_c (\tau_s \alpha_r) - U_c (T_{in} - T_a)]} \quad (4)$$

식 (3)와 (4)를 식 (2)에 대입하면 집열에너지는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$q_u = A_c F_R [I_c (\tau_s \alpha_r) - U_c (T_{in} - T_a)] \quad (5)$$

냉난방용 태양열 시스템의 성능은 집열기의 집열효율에 대부분 의존된다. 본 연구에 사용된 이중진공관형 집열기의 집열효율은 식 (6)과 같이 정의될 수 있다.

$$\eta_c = \frac{q_u + (mc) \frac{d\overline{T}_r}{dt}}{A_c I_c} = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) + \frac{d\overline{T}_r}{dt}}{A_c I_c} \quad (6)$$

식 (4)를 식 (6)에 대입하여 정리하면 식 (7)과 같으며, 이를 Hottel-Whillier-Bliss 방정식이라고 부른다. 이 방정식은 집열관 내부온도와 외기온도가 같은 상태에서 시작하여 집열관 내부온도가 상승하면서 발생하는 열손실의 정도를 표현하고 있다.

$$\eta_c = F_R(\tau_s \alpha_r) - F_R U_c \frac{T_{in} - T_a}{I_c} \quad (7)$$

집열기 작동범위에서 F_R 과 U_c 가 크게 변하지 않는다고 가정하면 $F_R(\tau_s \alpha_r)$ 와 $F_R U_c$ 를 상수로 볼 수 있다. 이 경우에 식 (7)의 집열효율은 $(T_{in} - T_a)/I_c$ 에 따라 변하는 일차식으로 생각할 수 있다. 이때 $F_R(\tau_s \alpha_r)$ 과 $F_R U_c$ 은 직교좌표계에서 y축 절편값과 기울기에 해당한다. 일반적으로 집열효율은 $F_R(\tau_s \alpha_r)$ 은 클수록 $F_R U_c$ 은 작을수록 우수한 집열기라 할 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에 사용된 이중진공관형 태양열 집열기의 성능시험장치는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 2는 히트파이프에 T-type의 열전대를 부착한 사진이다. 본 연구에 사용된 집열기는 내부에 히트파이프가 삽입된 형태이고 실험장치의 사양은 Table 1과 같다. 집열기와 일사량계의 경사각은 설치지점의 위도와 동일한 35° 각도로 경사시켜 정남으로 설치하였다. 집열기 입구 및 출구의 집열매체의 온도, 외기온도 및 축열조 온도를 측정하기 위하여 열전대 T-type을 설치하였으며, 실

Table 1 Specification of solar collector

항목	값	
집열면적	1.081 [m ²]	
축열조 용량	100 ℓ	
집열기 설치각도	35 °	
집열매체	물	
이중진공관	외측유리관 직경	47 × 10 ⁻³ m
	내측유리관 직경	37 × 10 ⁻³ m
	외측유리관투과율	0.91
	내측유리관흡수율	0.94
	선택흡수표면	Al-N/Al
	진공도	5 × 10 ⁻³ Pa
히트파이프	진공관수	16 개
	전체길이	1,500 × 10 ⁻³ m
	작동유체	물
	외경	7.94 × 10 ⁻³ m
	재질	동(Copper)

험에 사용된 축열조는 100 ℓ의 용량으로 설치하였고 50mm두께로 보온하여 외부와의 열손실을 최소화되도록 설치하였다⁽³⁾.

3.2 실험방법

집열기의 효율특성을 결정하기 위해 바람의 영향이 적고 청명한 날에 실외 옥상에서 실험이 수행되었고 유량을 분당 1.3 ℓ로 일정하게 유지시키면서 manifold의 입구, 출구온도, 외기온도를 측정하였다. 집열기의 효율곡선을 얻기 위해 최소한 4개의 순간효율 점이 필요로 하게 되는데 입구온도가 외기온도보다 약 3°C 높은 상태에서 계산된 유량을 흘려보내 출구온도가 일정한 상태가 되는 정상상태에 이르면 10분 동안 데이터를 취득하고 평균하여 순간효율 한 점을 구하고 이와 동일한 방법으로 나머지 점들도 외기온도보다 20°C, 40°C 및 60°C 높은 입구온도를 선택하여 집열기 효율특성을 구하였다.

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 이중진공관내에 히트파이프가 삽입된 태양열 집열기를 3월중 옥외 실험을 통해 실제 비정상상태에서의 히트파이프의 열전달특성과 집열기의 성능테스트를 수행하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 3월27일 하루 동안의 데이터를 나타낸

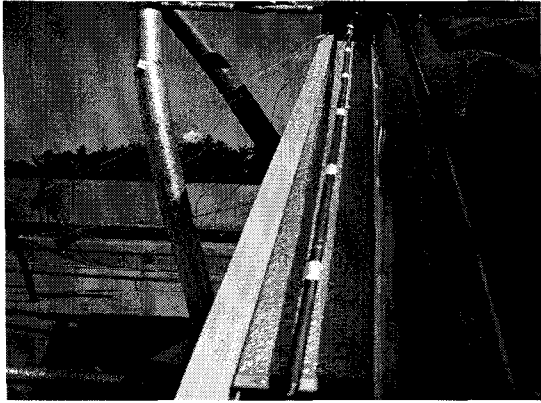


Fig. 2 Photograph of locations of thermocouple.

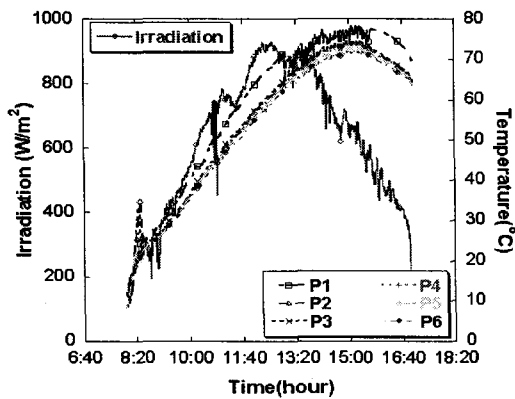


Fig. 4 Time variations of temperatures of heat pipe wall and irradiation.

그래프이다. Fig. 4는 집열기에 태양복사가 입사되기 시작한 후 일사량에 따른 이중진공관 내의 히트파이프 증발부 벽면 온도변화를 나타낸 그래프이다. 증발부에는 6개의 열전대가 부착되어 있는데 일사량이 적은 오전에는 히트파이프 벽면 온도가 서서히 올라가고 있고 최초 20분 동안은 불안정한 작동을 하다가 그 이후에는 안정적으로 작동을 하면서 온도가 상승하였다. 그리고 히트파이프 벽면온도는 일사량이 최고치인 900 W/m^2 일 때 73°C 까지 올라갔다. 그리고 일사량이 많이 떨어졌는데도 불구하고 히트파이프의 온도는 계속 올라가다가 오후 5시경부터 서서히 온도가 식는 것을 확인하였다. Fig. 5는 일사량에 따른 manifold 입구와 출구온도 그리고 외기온도를 나타낸 그래프이다. 이를 통해 일반적인 태양열 집열기의 전체적인 작동 상황을 파악해 볼 수

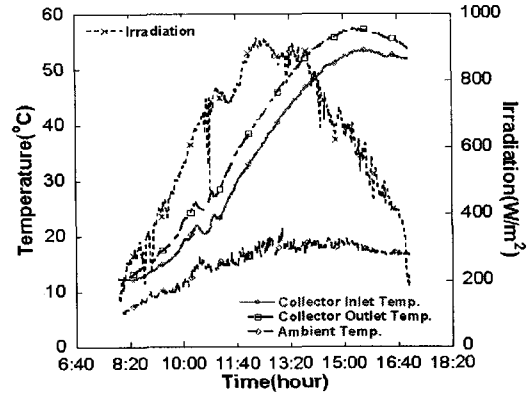


Fig. 5 Time variations of temperatures of collector inlet, outlet and ambient with irradiation.

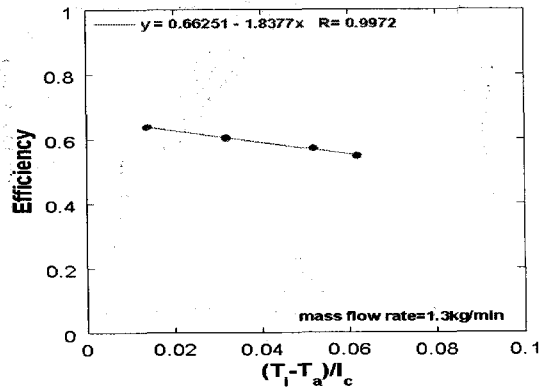


Fig. 6 Efficiency curve of solar collector.

있는데 집열기 효율곡선을 구하기 위해서는 manifold 입구온도와 외기온도 그리고 일사량의 조건이 잘 맞아져야만 보다 적절한 효율곡선을 구할 수 있다. Fig. 5에서 외기온도의 변화는 일사량이 700 W/m^2 이상인 구간에서는 거의 변화가 없고 manifold 입구와 출구 온도차도 거의 $5\sim 6^\circ\text{C}$ 정도의 차이를 유지하고 있다. 이는 맑은 날씨의 일반적인 집열기의 각 부위의 온도 분포를 잘 표현해 주고 있다. Fig. 6은 일사량의 변화가 비교적 안정된 맑은 날씨의 실험치를 대상으로 각 순간효율을 계산하여 나타낸 그래프이다. x축이 0일 때 최고효율은 66%로 나타났고 집열매체의 입구온도와 외기온도와 온도차이에 따른 열손실을 나타내는 기울기 $F_R U_c$ 는 1.8 정도로 나타났다. 실제 성능실험에서 진공관형인

경우 효율을 나타내는 y 축의 절편값은 0.62이상 이 되어야 하고 열손실율을 나타내는 기울기 $F_R U_c$ 는 3.0이하가 되어야 하는데 이에 는 충족하 는 결과가 나왔다.

5. 결론

본 연구에서는 이중진공관내에 그루브형 히트 파이프가 삽입된 태양열 집열기를 비정상상태에 서 일사량에 따른 히트파이프의 열전달특성과 집 열기의 기초성능 데이터를 구하여 보았다. 그리 고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일사량 변화에 따른 진공관 내부의 히트파이프 벽면온도는 최초 20분 동안은 불안정한 작 동을 보이다가 그 이후 정상적인 작동형태를 보 이면서 최대 75℃정도까지 온도가 상승하였다.

(2) 태양열 집열기에 순환하는 작동유체의 유 량이 1.3 l/min일 때, 본 실험의 이중진공관식 집열기의 집열효율은 50~70%범위로서 최대 집 열효율은 대략 66%이었으며 효율 관계식은

$$\eta_c = 0.66251 - 1.8377 \frac{T_{in} - T_a}{I_c} \text{ 이었다.}$$

후 기

본 연구의 일부는 2단계 BK21 대학원 육성사 업, 지방대학 혁신역량강화사업의 지원으로 이루 어 졌으며, (주)세운전재 관계자에게 감사드린다.

참고문헌

1. Y.W. Yoon, K.W. Kim, 2005, "Study on Performance Testing of Concentric Evacuated Tube Solar Energy Collector System", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 25, No. 2, pp19~26.
2. C.J. Kim, J.S. Lee, 1996, "A Fundamental Study on the Heat Transfer Characteristics of a Dewar-Type Evacuated Glass Tube Solar Collector with a Heat Pipe Located at the Center", Solar Energy, Vol. 16, No. 1, pp39~49.
3. K.T. Chung, B.G. Kim, H.W. Jang, J.S. Suh, 2006, "An Experimental Study with the Array of Concentric Evacuated Tube Solar Collector with Heat Pipe", KSES.
4. C.H. Bae, C.H. Kang, J.S. Suh, 2004, "An Experimental Study on the Thermal Performance Comparison of Solar Collectors with Type of Heat Pipe", Journal of KASBIR Vol. 4, No. 4, pp17~24.
5. J.H. Hyun, W.G. Chun, 2003, "A Comparative Analysis on the Thermal Performance of Solar Vacuum Collector Tubes", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 23, No. 3, pp15~22
6. Mehmet Esen, Hikmet Esen, 2005, "Experimental investigation of a two-phase closed thermosyphon solar water heater", Solar Energy.
7. W.G. Chun, Y.H. Kang, M.S. Jeon, H.Y. Kwak, 1995, "An experimental Study on the Utilization of Heat Pipes for Solar Water Heaters", Solar Energy, Vol. 15, No. 2, pp3~11.
8. ASHRAE, ASHRAE Handbook 1993 Fundamentals, ASHRAE, 1993.