

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 25, No. 1, 2005

이중 진공관형 태양열 집열기의 집열관 내부 형상과 운전 조건이 성능 변화에 미치는 영향

최은용*, 김 용**, 서태범***

*인하대학교 대학원 기계공학과(eja9637@hotmail.com), **인하대학교 대학원 기계공학과(adue@origio.com),
***인하대학교 기계공학과(seotb@inha.ac.kr)

Effects of Absorber Tube Shape and Operating Conditions on Thermal Performance of All-Glass Evacuated Tube Solar Collectors

Choi, Eun-Young*, Kim, Yong**, Seo, Tae-Beom***

*Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Inha University(eja9637@hotmail.com),

**Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Inha University(adue@origio.com)

***Dept. of Mechanical Eng., Inha University(seotb@inha.ac.kr)

Abstract

All-glass evacuated tube solar collectors consist of glass evacuated tubes and absorber tubes. Solar thermal energy from the sun is transferred to the working fluid through the glass evacuated tube and the absorber tube. Several collectors which have different absorber tubes are tested to find the effects of the absorber tube shapes and the operating conditions such as the incident heat flux and the flow rate. As the results, the efficiency of the collector which has a finned tube U tube is about 2~5% higher than that of the others in all cases on an average. And the collector has a finned U tube has the highest efficiency at the high flow rate and the low incident heat flux. In this condition, the outlet mean temperature is low and the heat loss becomes small. Also, it is known that the fin effect is greater than the shade effect.

Keywords : 흡열관 형상(absorber tube shape), 진공관형 태양열 집열기(all-glass evacuated tube solar collector)

기 호 설 명

- T_{mo} : 출구평균온도 [K]
- T_{mi} : 입구평균온도 [K]
- T_r : 흡열관 온도 [K]
- T_a : 대기온도 [K]
- q_L : 흡열관 열손실[W/m²·K]
- Uc : 흡충열저항 [W/m·K]
- R_1 : 흡열관에서 유리관으로의 복사저항[W/m·K]
- R_2 : 유리관 전도저항 [W/m·K]
- R_3 : 대기로의 대류 및 복사 저항 [W/m·K]
- σ : Stefan-Boltzmann 상수 5.67×10^{-8} [W/m²K⁴]
- h_c : 대류 열전달계수 [W/m·K]
- k_T : 청정계수
- k : 전도도 [W/m·K]

1. 서 론

이중 진공관형 태양열 집열기는 흡수관과 외부 유동 공기와의 접촉을 진공으로 차단함으로써 대류 및 복사에 의한 손실을 줄이고, 흡수관에 흡수율을 높이고 방사율을 낮추는 선택 흡수 코팅을 하여 높은 효율을 유지하고 있다. 한편, 이중 진공관형 집열기의 성능은 다른 형태의 집열기와 같이 설계와 작동상태에 따라 크게 변하는 특징이 있다. 지금까지 진공관형 태양열 집열기에 대한 연구가 상당히 진척되어 왔지만, 흡수관의 형상 변화에 따른 집열기의 성능 변화가 상당히 큼에도 불구하고⁽¹⁾, 아직까지 흡수관의 형상 변화에 따른 집열기의 성능 변화에 대한 연구는 부족한 편이다. 집열기에 미치는 설계변수와 운전조건의 영향을 살펴보기 위하여 공기를 작동유체로 사용하는 이중관형 집열기에 대한 실험 및 수치해석 연구⁽²⁾가 수행되고 있긴 하나 아직은 많이 부족한 편이다.

본 연구에서는 작동 유체가 물인 이중 진공관형 집열기의 흡수관 형상과 운전조건이 집열기 성능에

미치는 영향을 조사하였다. 세 가지 서로 다른 형상의 흡수관을 제작하여 실험적으로 집열기의 성능을 측정하였다. 이를 통해 흡수관의 설계 변경이 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 하였으며, 운전 조건에 따른 적절한 흡수관 형상의 설계에 유용한 설계데이터를 확보하고자 하였다.

2. 실험 장치

그림 1에 실험장치의 사진을 나타내었다. 주요 실험장치 구성은 저온 순환 수조, 유량계, 집열기, 인공광원이다. 작동유체인 물은 저온순환 수조 내의 펌프에 의해 니들밸브와 유량계를 통과하여 집열기로 들어가게 된다. 집열기에서 광원의 열을 흡수한 물이 순환 수조로 되돌아가는 폐회로(closed-loop) 시스템이다.

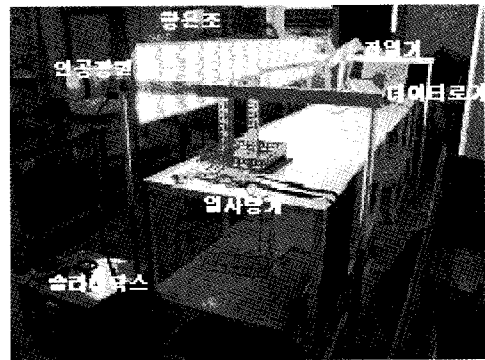


그림 1. 실험장치 사진

2.1 시스템 구성

저온 순환 수조는 Jeio Tech의 RW-3025G를 사용하였고 냉각능력은 800 W이며 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 의 정확도를 가지고 있다. 유량은 소형면적식 수직형 Flowcell Flowmeter로 측정되었으며, 정확도는 ± 0.001 lpm이다. 유량측정의 정확성을 유지하기 위해 집열기 출구 유량을 메스실린더로 측정하여 보정하였다. 집열기는 이중진공유리관과 흡열관으로 구성되어 있으며, 전체길이는 1.2 m이고 외경은

42 mm이다. 태양열 역할을 하는 인공광원은 150 W의 할로겐램프 42개를 가로 3 EA × 세로 14 EA로 구성하여 사용하였고 단상 220V 10 kW 슬라이더스로 광원의 세기를 제어하였다. 일사량은 BABUC/E로 $\pm 0.5 \text{ W/m}^2$ 범위에서 직달일사량을 측정하였다.

2.2 집열기 구성

집열기의 구성은 이중 진공 유리관과 흡열관으로 나눌 수 있다. 이중 진공 유리관의 외경은 42 mm, 내경은 34 mm이며 바깥쪽 유리관의 두께는 1.4 mm, 안쪽 유리관의 두께는 1.8 mm이다. 유리관 사이의 압력은 $5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 보다 작은 압력으로 되어 있다.⁽³⁾

그림 2에 나타낸 바와 같이 흡열관은 외경 12.7 mm, 두께가 1 mm인 구리관을 사용하였고, 길이 1,180 mm인 직관과 U자 연결관을 동으로 용접하여 U자 형상의 흡열관을 구성하였다. 흡열관 전체 길이는 1,200 mm이다. 집열기 끝단에 고무캡을 사용하여 외기와 안쪽 유리관과 흡열관 사이 공간의 공기를 차단하였다.

집열기 표면 온도를 측정하기 위하여 T형 열전대(Thermocouple-T)를 부착하였다. 입구와의 길이 방향 거리를 기준으로 각각 50 mm, 300 mm, 600 mm, 900 mm, 1,150 mm되는 각 위치에서 광원에 수직 한 곳과 반대편에 2개의 열전대를 에폭시로 부착하였다.

2.3 집열기 형상

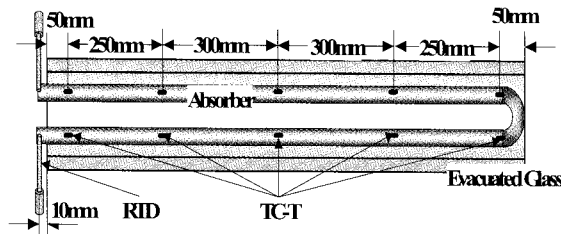


그림 2. 측정위치 및 센서

집열기는 세 가지 종류의 형상을 사용하였다. 각각 M-1, M-2, M-3로 구분하며 흡열관 재질은 모두 구리이고 U자 모양이다. 모든 집열기에 사용된 이중 진공관은 외경 42 mm, 내경 34 mm인 유리재질이며 흡수관은 진공관 중앙에 설치되었다. 각각의 흡열관의 모든 외부 표면은 복사손실을 줄이기 위해 흡수율을 높이고 방사율을 낮추는 선택 흡수 코팅(Selective Absorbing Coating)을 하였다.

그림 3은 M-1의 단면 모습이다. M-1은 외경이 12.7 mm이고 두께가 1 mm인 동관을 사용하여 전체 길이 1,200 mm인 U자 형태의 흡열관이며, 직관사이의 간격은 5 mm이다. 흡열관과 진공관 사이는 공기로 채워져 있으며 끝단에는 진공관 내부 공기와 실험실 외기를 차단하기 위해 고무캡을 외부 유리관과 에폭시를 사용하여 결합시켰다. 흡열관 외부에 부착된 열전대는 그림자 발생으로 인한 오차를 줄이기 위해 흡열관 하부를 통과하게 설치되어 있고 입구를 통해 Data Logger Module에 연결되어 있다. M-2는 M-1의 직관사이의 간격을 없애고 그 사이를 동용접으로 접합하였다. M-3는 M-1과 동일한 형상의 흡열관 상부에 폭 26 mm, 두께 2 mm의 평판 튜브를 길이방향으로 부착하였다. 튜브의 길이는 흡열관 길이와 동일한 1,200 mm이다. 세 가지 흡수관의 주요 치수를 표 1에 요약하였다.

표 1. 집열기 사양

구분 형상	길이 [mm]	폭 [mm]	높이 [mm]	코팅면적 [m ²]	비 고
M-1	1,200	30.4	12.7	0.047878	
M-2	1,200	25.4	12.7	0.047878	접합
M-3	1,200	30.4	14.7	0.079078	흰부착

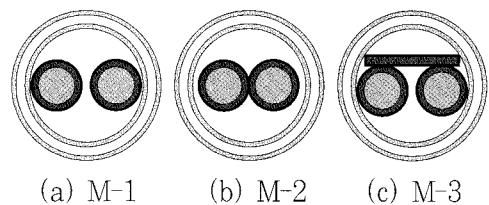


그림 3. 집열기 단면형상

3. 측정 방법 및 이론

집열기의 형상 변화가 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 유사한 형상의 집열기를 비교하였다. 관 사이를 용접하였을 때와 흰을 부착하였을 때의 효율변화를 살펴보고 관 사이 전도와 흰에서 관으로의 열전달을 비교하여 성능에 미치는 영향을 정량화하였다.

실험 시 작동 변수로는 집열기에 공급되는 물의 유량과 슬라이다스로 조절되는 인공광원의 일사량이며, 이에 따른 입·출구 온도차의 변화를 바탕으로 집열기의 성능을 알아보았다.

3.1 온도, 유량, 일사량 측정

입구온도를 저온순환수조 및 실험실 내에 설치되어 있는 공기 순환 장치를 이용하여 동일한 상태로 유지하며 10분간 정상상태가 유지된 후에 측정하였다. 입·출구 온도 측정센서로는 저항온도센서(RTD)와 T형 열전대(T-type thermocouple)를 사용하였고 정상상태에서 센서 측정값 차이를 보정하였다. 흡열관 표면은 측정부위의 선택흡수 코팅을 제거하고 표면처리를 한 뒤 열전대를 예폭사로 부착하였고, 유리관내부 및 외부는 입구로부터 50 mm인 지점에 열전대를 상하좌우에 부착하여 $\pm 0.005^\circ\text{C}$ 범위 내에서 측정하였다. 흡열관 평균온도는 각 위치에서 측정된 20개의 온도를 평균한 값으로 사용하였고 유리관 내부와 외부온도도 각각 4개의 온도의 평균값을 사용하였다.

일사량은 인공광원에 연결된 슬라이다스의 전압을 변화시키며 각각 156 W, 180 W, 210 W에서 ± 0.5 W의 범위 내에서 멀티미터로 측정하였고 이에 따른 일사량은 인공광원과 집열기의 수직거리인 300 mm공간에서 BABUC/E 일사량계를 고정하고 1시간 동안 집열기의 길이방향 100 mm 간격으로 13 곳에서 측정된 정상상태 직달일사량을 사용하였다. ± 0.5 W/m²의 정확도로 측정된 직달일사량은 청정도를 고려한 값으로 보정하여 계산하였다.⁽⁴⁾

집열기의 유입 유량은 저온순환수조의 출구 니들 밸브에서 1차적으로 조절되며 집열기 입구에 연결된 소형 면적식 유량계에서 2차적으로 각각 0.05 lpm, 0.1 lpm, 0.15 lpm으로 조절되었다. 유량계에서 측정된 유량의 정확성을 위해서 집열기 출구의 물을 5분 간격으로 메스실린더를 사용하여 측정하였다. 계산에 사용한 데이터는 온도가 정상상태일 경우의 10분간의 데이터를 사용하였다.

3.2 효율 및 손실계산

집열기의 효율은 가장 일반적인 효율식을 적용하였다. 인공광원에서 300 mm 떨어진 곳에서 측정된 일사량에 대한 집열기 내 작동유체가 흡수한 열량을 효율로 정의하였다.

$$\eta = \frac{mC_p(T_{mo} - T_{mi})}{I} \quad (1)$$

위식에서 T_{mo} 는 출구 평균온도를 T_{mi} 는 입구 평균 온도를 나타내고 분모항에 있는 I 는 인공광원으로부터의 일사량을 측정된 값에 청정계수를 곱하여 보정한 값을 사용하였다. C_p 값은 입구와 출구온도의 평균값을 기준으로 한다.

$$\frac{I_d}{I} \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T & \text{for } k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 & \text{for } 0.22 < k_T \leq 0.8 \\ 0.165 & \text{for } k_T > 0.80 \end{cases} \quad (2)$$

위 식에서 I_d 는 산란 일사량이고 I 는 전체 일사량을 나타낸다. k_T 는 시간별 청정계수이다. 실험에서는 청정계수가 0.8 이상이므로 0.165값을 사용하였다.

집열기에서의 손실은 크게 흡열관에서 유리관사이의 복사 손실, 유리관을 통한 전도 손실, 외기로의 대류 및 복사 손실로 나눌 수 있다.⁽³⁾⁽⁵⁾

다음은 집열기의 손실을 나타낸 식이다. q_L 은 집열기 단위 면적당 열손실율을 나타내고, U_c 는 전체

열저항을 나타낸다. T_r 은 receiver 또는 흡수기의 온도이며 T_a 는 대기 온도이다.

$$q_r = U_c \times (T_r - T_a) \tag{3}$$

$$\frac{1}{U_c} = R_1 + R_2 + R_3 \tag{4}$$

다음 식은 각 열저항을 계산식이다.

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1}{\varepsilon_e} - 1} \sigma (T_r + T_{ei})(T_r^2 + T_{ei}^2) \tag{5}$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{2k}{D_r \ln(D_{eo}/D_{ei})} \tag{6}$$

$$\frac{1}{R_3} = [h_c + \sigma \varepsilon_e (T_{eo} + T_a)(T_{eo}^2 + T_a^2)] \frac{D_{eo}}{D_r} \tag{7}$$

R_1 은 흡열관에서 이중 유리관으로의 복사 열저항, R_2 는 유리를 통한 전도 열저항, R_3 는 대기와의 대류 및 복사 열저항이다. σ 는 Stefan-Boltzmann 상수로 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ 이고, T_r 은 흡열관의 절대 온도, T_{ei} 은 이중유리관의 내부 절대온도, T_{eo} 은 이중유리관 외부 절대온도, T_a 는 대기의 절대온도를 가리킨다. D_r 은 receiver 즉 absorber tube의 외경, D_{eo} 는 이중 유리관의 외경이며, D_{ei} 는 이중유리관의 내경이다. 는 이중 유리관의 전도도를 나타낸다. 표 2는 계산에 사용된 주요 복사 물성치를 나타낸 것이다.

표 2. 복사 물성치

구분	Emissivity	Absorptivity	Transmissivity	Reflectivity
유리관	·	0.018	0.907	0.075
흡열관	0.06	0.93	0	0.063

4. 실험결과

본 연구에서는 이중 진공관형 태양열 집열기의 최적 형상 설계를 위해 U자관, U자관을 용접, U자관에 흰을 부착하여 용접 및 흰 부착이 집열기 성능 변화에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

능 변화에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

그림 4(a)는 유량이 0.05 lpm일 때 각각의 일사량에 따른 집열기별 효율을 막대그래프로 나타낸 것이다. 유량이 0.05 lpm, 일사량이 438 W/m²인 경우 가장 높은 효율을 보이는 것은 M-3이다. 그러나 일사량이 654 W/m²와 963W/m²인 경우에는 M-1이 가장 높은 효율을 나타내고 있다. 이 결과로부터 일사량 변화를 고려할 경우 M-1 형상의 집열기는 일사량 변화에 가장 둔감함을 알 수 있다. 반면, 유량이 0.05 lpm일 경우에 M-2 형상의 집열기가 가장 낮은 효율을 나타내므로 M-2 형상은 적은 유량에 부적합하다.

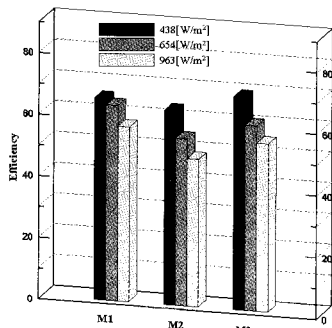
그림 4(b)는 유량이 0.1 lpm일 때 서로 다른 일사량에 따른 집열기별 효율을 막대그래프로 나타낸 것이다. M-2와 M-3 형상이 높은 효율을 보이고 있고, M-1은 가장 낮은 효율을 보이고 있다. M-3은 일사량이 438 W/m²인 경우 가장 높은 효율을 보이지만 일사량이 증가함에 따른 효율 감소폭이 다른 집열기보다 크다. 각각의 효율 감소폭을 보면 M-1은 7.5%, M-2는 16.5%, M-3은 20.3%의 효율 감소가 나타난다.

그림 4(c)는 유량이 0.15 lpm인 경우에 서로 다른 일사량에 대한 세 가지 집열기의 성능을 서로 비교한 그래프이다. 유량이 가장 큰 경우이므로 집열기 평균 온도가 가장 낮기 때문에 집열기에서 발생하는 열손실이 작아지기 때문에 세 집열기 모두 가장 높은 효율을 나타내고 있다. 일사량 변화에 따라 가장 큰 효율 감소를 보이는 것은 M-3으로 17.6%의 효율 감소를 나타내고 있으며, M-1이 7.5%로 가장 적게 감소한다. M-2가 전체적으로 가장 높은 효율을 보이고 M-3, M-1 순으로 효율이 낮아진다.

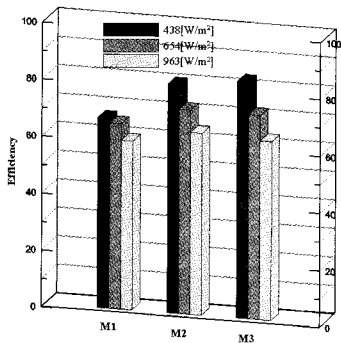
따라서 유량이 적은 경우에는 U자관을 사용한 경우에 출구온도 및 흡열관 평균온도가 높고 효율이 크게 나오지만, 유량을 증가시키면 입구와 출구를 용접을 한 경우와 흡수기에 흰을 설치한 경우가 높은 효율을 나타낸다. 또한, 동일한 유량에

서 일사량이 증가할수록 효율감소 폭이 상대적으로 크게 나타난다. 가장 큰 효율 변화를 보이는 것은 M-3이고, 가장 높은 효율은 유량이 0.15 lpm일 때 M-2임을 알 수 있다.

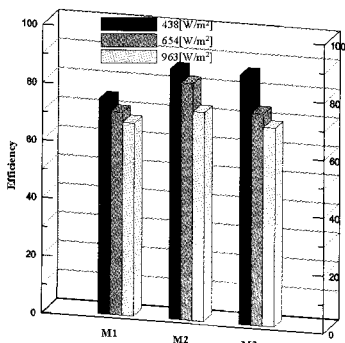
표 3~5는 각 유량에 대한 일사량 변화에 따른 집열기의 효율이다.



(a) 0.05 lpm



(b) 0.1 lpm



(c) 0.15 lpm

그림 4. 집열기 효율

표 3. 유량이 0.05 lpm일 때의 효율 변화(%)

일사량(W/m ²)	M-1	M-2	M-3
438	65.44	63.02	69.16
654	63.34	54.18	60.12
963	56.68	47.86	54.58

표 4. 유량이 0.1 lpm일 때의 효율 변화(%)

일사량(W/m ²)	M-1	M-2	M-3
438	66.70	80.29	83.10
654	64.97	71.61	71.66
963	59.22	63.83	62.82

표 5. 유량이 0.15 lpm일 때의 효율 변화(%)

일사량(W/m ²)	M-1	M-2	M-3
438	74.48	86.39	86.34
654	70.20	81.98	73.45
963	66.84	72.39	68.81

5. 결론

이 연구에서는 이중 진공관형 태양열 집열기의 최적 형상 설계를 위해 U자관, U자관을 용접, U자관에 환을 부착하여 용접 및 환 부착이 집열기 성능 변화에 어떤 영향을 보이는지에 대해 연구하였다.

U자관을 용접함으로써 물이 공급되는 관과 태양열이 물에 흡수되어 나가는 관사이의 전도 열전달을 발생시킨다. 이 전도 열전달은 유량이 적은 경우에는 효율을 감소시키는 원인이 되지만 유량이 큰 경우에는 다른 흡수관 형상보다 높은 효율을 나타내는 원인이 된다.

U자관에 환을 부착한 경우는 집열 면적을 증가시키고 전도도가 큰 평판 구리환과 U자관 사이의 열전달을 통하여 집열기의 성능을 증가시킨다. 그러나 이러한 형태는 작동유량의 변화에는 둔감한 반면 일사량 증가 시 상대적 효율감소가 크게 나타난다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호 : R0001-21-12345)

참 고 문 헌

1. R. Perez, R. Seals, J. Anderson and D. Menicucci, Calculating solar radiation received by tubular collectors, Journal of Solar Energy Engineering 117, 1995, pp. 341-344.
2. Kim yong, Seo Tae Beom, Kang Yong Hyuk, Thermal Performance Comparisons of Glass Evacuated Solar Collectors Using Different Absorbing Tubes, Journal of the Korean Solar Energy Society Vol. 24, 2004, pp.39-45
3. Gui Yuzong, Xue Zuqing, Zhou Xiaowen, Yin Zhiqiang Determination of Emittance of Selective Absorbing Surface, Solar Energy Vol. 64, 1998, pp. 241-243.
4. John A Duffie, William A Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes Second Edition, 1991.
5. D. Yogi Goswami, Frank Kreith, Janf. Kreider, Principles of Solar Engineering Second Edition, 1999.