

고온용 태양열 복합 흡수기의 열특성 분석 연구

강 명철¹⁾, 김진수²⁾, 강 용혁³⁾, 김 낙주⁴⁾, 유 성연⁵⁾

A Study on Thermal Characteristics of Hybrid Solar Receiver for Dish Concentrating System

Myeongcheol Kang, Jinsoo, Yongheack Kang, Nackjoo Kim, Seongyeon Yoo

Key words : Solar Concentrating System(집광형 태양열 시스템), Hybrid Solar Receiver(복합 태양열 흡수기), Natural convection heat loss(자연대류 열손실)

Abstract : To improve economic of solar power generation, stirling engine is required continuous operation and the receiver has to be provided with an additional combustion system. The hybrid receiver with a specially adapted combustion system is possible to 24 hr/day operation by solar and gas-fired. The inner cavity and external wall serve as absorber surfaces using collected irradiation and heat transfer surfaces for the gas heat flow, respectively. The hybrid receiver was designed and fabricated for the dish/stirling system. The analytical method for predicting natural convective heat loss from receiver is used. The Koenig and Marvin model is used to estimate convection heat loss and heat transfer coefficient.

Nomenclature

A_a	: Aperture area(m ²)
$C_{p,c}$: Specific heat of the fluid(J/kg-K)
D	: Diameter of receiver(m)
D_{co}	: Mean hydraulic diameter(m)
G_{bn}	: Direct normal insolation(W/m ²)
h_0	: Heat transfer coefficient(W/m ² .K)
k_c	: Thermal conductivity(W/m.K)
M	: Mass flow rate(kg/s)
N_u	: Nusselt number
P_r	: Prandtl number
Q_c	: Total Heat transfer rate(J)
Q_{loss}	: Total heat loss(J)
R_e	: Reynolds number
$T_{c,in}$: Inlet temperature(°C)
$T_{c,out}$: Outlet temperature(°C)
U	: Overall heat loss coefficient
η	: Efficiency of concentrator

η_a	: Efficiency of receiver
ρ_r	: Reflectivity of reflector
ρ_w	: Density of fluid(kg/m ³)

1. 서론

1970년대 에너지 위기 이후 신재생에너지원인 태양에너지의 연구, 개발의 필요성이 제기되었고 근래에는 환경오염과 화석연료 사용에 따른 이산화탄소, 메탄 등 온실가스 배출을 방지하기 위한 방안으로 재생에너지 연구에 심혈을 기울이고 있다. 산업국가에서는 에너지원 확보가 가장

- 1) 한국에너지기술연구원 태양열·수력연구센터
E-mail : mckang21@kier.re.kr
Tel : (042)860-3511 Fax : (042)860-3739
- 2) 한국에너지기술연구원 태양열·수력연구센터
E-mail : jnskim@kier.re.kr
Tel : (042)860-3549 Fax : (042)860-3739
- 3) 한국에너지기술연구원 태양열·수력연구센터
E-mail : yhkang@kier.re.kr
Tel : (042)860-3518 Fax : (042)860-3739
- 4) 서울산업대학교 정밀화학과
E-mail : nackjoo@snut.ac.kr
Tel : (02)970-6669
- 5) 충남대학교 기계설계공학과
E-mail : syyoo@cnu.ac.kr
Tel : (042)821-6646

중요한 문제로 대두되고 있으며, 에너지 수입국 입장에서는 에너지 비용이 국가예산의 상당 부분을 차지하고 있기 때문에 국가적인 에너지안보와 환경문제를 동시에 해결할 수 있는 대안으로 태양에너지 이용기술 개발에 노력을 경주하고 있는 실정이다.

Dish형 태양열 집광시스템은 핵심 부분인 집광부와 집열부로 나눌 수 있고 집광부는 반사경을 이용하여 태양 빛을 초점지역으로 집광되도록 설계되고 집열부의 흡수기는 집광된 빛을 최대한 흡수하도록 설계된다. 집광기의 핵심요소 기술인 흡수기는 상용화된 기술로는 설계가 어려울 뿐만 아니라 기술이전이 불가능하므로 향후 태양열 발전을 위해서는 반드시 해결해야 하는 부분이다.

태양열 발전은 에너지 밀도가 낮은 태양에너지를 이용함으로써 지역적이고 계절적인 영향에 좌우되기 때문에 경제성을 향상시키기 위해서는 별도의 연료를 부가적으로 사용할 수 있는 복합시스템을 구성하는 것이 많은 이점이 있다. 복합 태양열 흡수기는 내부 동공으로는 태양열 에너지를 사용하고 외부 원주 방향으로 다른 열원을 사용하는 개념이다. 복합 열원으로는 보통 NG(Natural Gas)을 사용하고 있으며 미활용 에너지인 LFG(Landfilled Gas)도 고려되고 있다.

본 연구에서 개발하는 흡수기는 이중 원통 구조의 소형 복합 흡수기로 태양열과 가스에 의한 연소열을 이용하는 형태이다. 소형 복합 태양열 흡수기를 설계/제작하고 스테어링 엔진의 열원 공급장치로 사용하기 위한 정상적인 작동특성을 규명하고자 한다.

2. 흡수기 설계 및 제작

집열기 효율은 흡수기에서 작동유체가 얻은 태양복사량을 반사경의 개구부에 입사하는 태양복사량으로 나누어 계산되어지는데 정상상태라고

가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = \eta_a \cdot \rho_r \quad (1)$$

여기서, 흡수기 효율 η_a 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_a = 1 - \frac{Q_{loss}}{G_{bn} \cdot A_a \cdot \rho_r} \quad (2)$$

윗식에서 Q_{loss} 는 흡수기에서 모든 방향으로 손실되는 총열손실량이고 G_{bn} 은 반사경 개구부에 입사되는 직달일사량을 나타낸다.

흡수기에서 작동유체에 의해 얻어지는 열량은 다음과 같다.

$$Q_c = M \cdot C_{p,c} \cdot (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (3)$$

작동유체는 스테어링엔진의 실린더에 충전되는 작동유체량을 산정하여 계산되어지고 작동유체의 속도는 다음식으로 계산되어진다.

$$v_c = \frac{M}{\rho_w \cdot A_a} \quad (4)$$

레이놀드수는 작동유체의 속도와 상당직경에 대한 함수로 정의되며 다음과 같다.

$$Re_c = \frac{v_c \cdot D_{\omega}}{\nu_c} \quad (5)$$

여기서, 상당직경 D_{ω} 는 흡수기의 상당직경

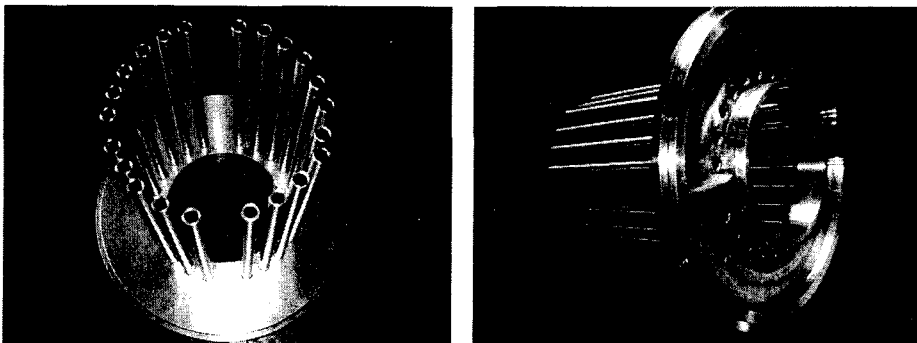


그림 1. 작동유체 유동관 및 분배관

이고 v_c 는 작동유체의 동점성계수를 나타낸다. 레이놀드수가 계산되면 흡수기에서의 작동유체가 층류와 난류로서 유동이 형성되는지를 판가름할 수 있고 Nu number를 계산하는데 이용된다.

$$N_c = 0.023 Re_c^{0.8} Pr_c^{0.4} \quad (6)$$

$$N_c = \frac{h_o D}{k_c} \quad (7)$$

위식을 이용하여 흡수기의 작동유체측과 벽면에서의 열전달계수를 계산할 수 있고 총괄열전달계수와 열저항계수를 이용하여 흡수기의 작동유체측의 열전달면적을 계산할 수 있다.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{D_1}{2k_w} \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right) + \frac{1}{h_h} \left(\frac{D_1}{D_2}\right) \quad (8)$$

$$Q_{gam} = UA \Delta T_{LM} \quad (9)$$

위의 계산식에 의해서 산정된 열교환면적을 이용하여 소형흡수기의 전체적인 형태는 아래 그림과 같이 설계되었다. 그림 1은 작동유체의 유동로를 확보하기 위해 설치된 유동관과 유동관으로 유체를 일정하게 분배하기 위한 분배관을 보여주고 있다. 그림 2는 두 개의 유동회로를 갖도록 제작된 소형 복합 태양열 흡수기이다.

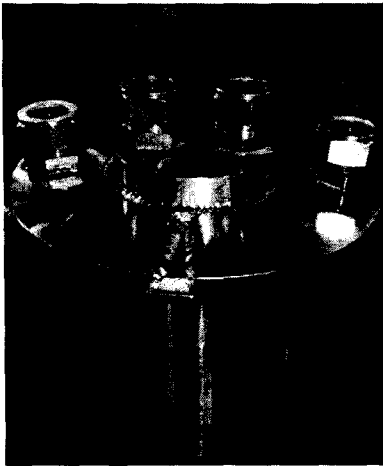


그림 2. 소형 복합 태양열 흡수기

3. 결과 및 고찰

태양열 흡수기는 동공(Cavity)형태의 흡수기를 사용한다. 본 연구에서 설계/제작된 소형 복합 흡수기는 동공으로는 태양열을 집광하여 작동하고 외부 원주방향으로는 가스의 연소열을 사용할 수 있도록 제작되었다.

태양열 흡수부인 동공의 직경은 0.1m로 결정하였고 열을 흡수할 작동유체는 2개의 유동로를 만들어 개별적으로 흐르는 구조이다. 이는 향후 적용할 스티어링엔진의 형태를 기본으로 하여 가스측 유동로를 결정하였다. 입구측 가스유동로는 일정하게 작동유체를 흘려 보내기 위해 분배관을 설치하였고 분배관에서 관형 유동로로 작동유체가 흘러 들어간 후 열을 흡수하면서 단일관으로 모아지는 구조로 제작되었다. 연소측 연소열 유동로를 포함한 직경은 0.23m로 결정하였다.

흡수기의 획득 열용량은 2kW로 산정하여 적정 온도 650℃을 가스출구측에서 흡수할 수 있도록 설계/제작 되었다.

3.1 열전달 계수

흡수기의 열전달 면적과 열전달 계수를 산정하기 위해 작성된 계산식을 이용하여 parametric study를 수행하였다.

그림 3은 작동온도에 따른 작동유체의 유량 변화를 보여주는 그림이다. 작동온도가 증가할수록 작동유체량이 감소하는 경향을 보여준다.

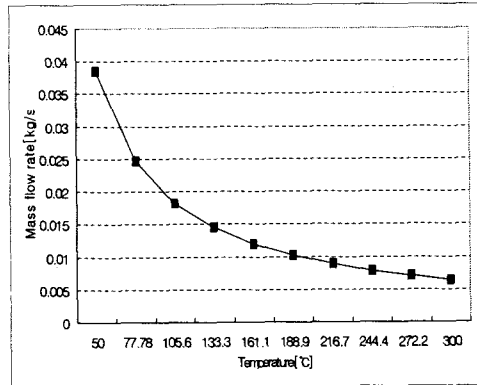


그림 3. 온도에 따른 작동유체량

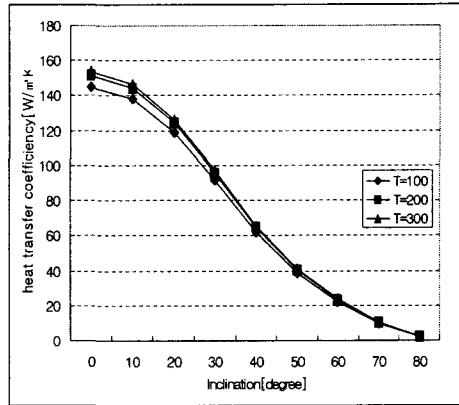
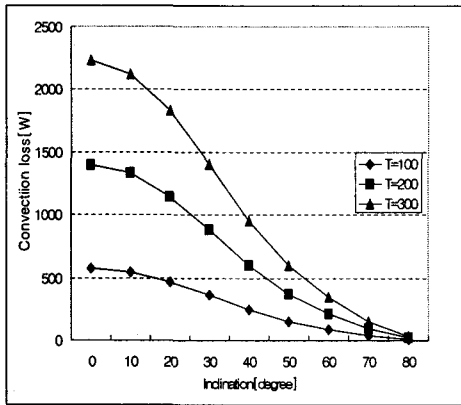


그림 5. 각도에 따른 대류 열손실 및 대류 열전달 계수(Koenig & Marvin)

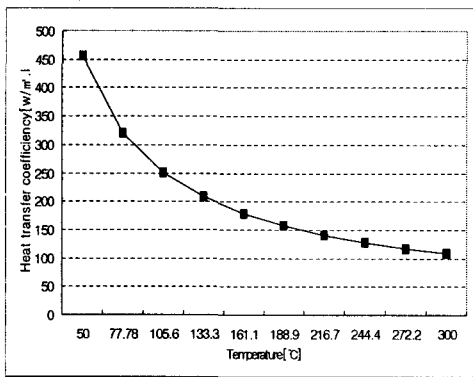


그림 4. 온도에 따른 열전달 계수 변화

그림 4는 작동온도에 따른 작동유체측 열전달 계수의 변화를 보여주는 그림이다.

3.2 대류 열손실

태양열 흡수기는 일반적으로 고온에서 작동하기 때문에 흡수기에서 발생하는 열손실에 대한 예측이 필요하다. 동공형 태양열 흡수기는 진도, 대류, 복사 열전달이 동시에 발생하는데 그 중 대류에 의한 열손실이 많은 부분을 차지한다.

대류 열손실에 대한 서로 다른 흡수기에 대하여 서로 다른 실험식들이 제시되었다. 그 중 Koenig & Marvin이 제안한 실험식, Clausing이 제안한 실험식, Stine & McDonald가 제안한 식이 대표적이다.

Koenig & Marvin가 대류 열손실을 구하기 위해 제안한 식은 다음과 같다.

$$Nu_L = 0.52 * P(\phi) l_c^{1.75} (Gr_L Pr)^{1/4} \quad (10)$$

$$P(\phi) = \cos^{3.2}\phi \quad 0 \leq \phi \leq 45 \quad (11)$$

$$P(\phi) = 0.707 \cos^{2.2}\phi \quad 45 \leq \phi \leq 90 \quad (12)$$

Clausing은 흡수기의 개구부를 통한 대류 열손실과 흡수기 개구부내에서의 대류 열손실을 구분하여 구하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$q_{total} = q_a + q_c \quad (13)$$

$$Nu_L = 0.10 (Gr Pr)^{1/3} \quad (14)$$

Stine & McDonald는 다음과 같이 대류 열전달을 구하는 식을 제안하였다.

$$N_L = 0.088 Gr^{1/3} \left(\frac{T_w}{T_\infty}\right)^{0.18} (\cos \phi)^{2.47} \left(\frac{d}{L}\right)^s \quad (15)$$

$$s = 1.12 - 0.98 \left(\frac{d}{L}\right) \quad (16)$$

위와 같이 제안된 식을 이용하여 흡수기에서의 대류 열손실량을 구하였다. 그림 5는 Koenig & Marvin 모델을 이용하여 구한 대류 총 열손실량과 열전달 계수를 나타내는 그림이다.

4. 결론

본 연구에서의 복합 태양열 흡수기는 이중 원통 구조의 소형 복합 흡수기로 태양열과 가스에 의한 연소열을 이용하는 형태로 소형 복합 태

양열 흡수기를 설계/제작하였다. 그리고 스테링 엔진의 열원 공급장치로 사용하기 위한 정상적인 작동특성을 규명하고자 작동유체측 열전달계수를 측정하였다. 흡수기의 최적의 형상을 결정하기 위해서는 열손실 예측이 필요하므로 기존 제안된 Koenig & McDonald의 실험식을 이용하여 총열손실량과 열전달계수를 예측하였다.

참고문헌

1. T. Taumoeofolau and K. Lovegrove, An Experimental Study of Natural Convection Heat loss from a Solar Concentrator Cavity Receiver at Varying Orientation, Proceedings of Australian and New Zealand Solar Energy Society, 2002.
2. T. Taumoeofolau et al., Experimental Investigation of Natural Convection Heat Loss from a Model Solar Concentrator Cavity Receiver, J. of Solar Energy Engineering, 2004, Vol. 126, pp. 801-807.
3. A. M. Clausing, An Analysis of Convective Losses from Cavity Solar central Receiver, Solar Energy, 1981, Vol. 27, No. 4, pp. 295-300.
4. James A. et al., Thermal Performance of Solar Concentrator/Cavity Receiver System, Solar Energy, 1985, Vol. 34, No. 2, pp. 135-142.
5. McDonald C. G., Heat Loss from an Open Cavity, Sandia National Laboratories, California, 1995.
6. 류시열 등, 접시형 태양열 집광시스템용 흡수기의 열손실 해석, 태양에너지, 2000, Vol. 20, No. 3, pp. 61-73.