

고온 히트파이프식 태양열 흡수기의 내부형상 변화에 따른 열전달 특성의 수치해석

*박 영학¹⁾, 부 준홍²⁾, **강 용혁³⁾

Numerical Analysis on Heat Transfer Characteristics of a Heat Pipe Type Solar Thermal Receiver According to Internal Geometry Variation

*Young Hark Park, Joon Hong Boo, **Yong Heack Kang

Key words : Solar thermal receiver(태양열 흡수기), High-temperature heat pipe(고온 히트파이프), Concentration ratio(집광비), Numerical analysis(수치해석)

Abstract : A numerical analysis was conducted to predict the heat transfer characteristics of a solar receiver which is subject to very high heat fluxes and temperatures for solar thermal applications. The concentration ratio of the solar receiver ranges 1000 and the concentrated heat is required to be transported to a certain distance for specific applications. This study deals with a solar receiver according to internal geometry variation incorporating high-temperature heat pipe. The isothermal characteristics in the receiver section is of major concern. The diameter of the solar thermal receiver was 120 mm and the length was 400 mm and the angle of receiver end wall set 90°, 60°, 45°, 30°. And the diameter of the heat pipe was 12.7 mm, 48 axial channels of the same dimensions were attached to the outer wall of the receiver with even spacing in the circumferential direction. The channels are changed to high-temperature sodium heat pipes. Commercial softwares were employed to deal with the radiative heat transfer inside the receiver cavity and the convection heat transfer along the channels. The numerical results are compared and analyzed from the view point of high-temperature solar receiver.

Nomenclature

d : diameter, mm
k_{eff} : effectiveness thermal conductivity, W/m-K
R : radius, mm
T : temperature, K
Q : thermal load, W

subscrip

α : angle of receiver end wall
deg : degree
CR : concentration ratio
eff : effectiveness
rad : radiation

효과적으로 활용하기 위해서는 고온 고밀도의 열 유속을 효과적으로 전달할 수 있는 열전달 기술이 필요하다. 문헌상으로 태양열 흡수기 내부에 사용되어 온 대표적인 열전달 수단은 물을 이용하여 직접 증기를 발생시켜 증기터빈을 구동하거나 용융염(molten-salt)의 강제순환방식에 의한 열 이송 방식⁽¹⁾과 히트파이프에 의한 열 이송 방식⁽²⁾을 들 수 있다.

본 연구에서 실린더 형 태양열 흡수기 입구에서 집광된 태양열이 흡수기에 흡수되는 복사열 전달 해석의 수행과 흡수기 내부의 내벽(side wall) 및 내부에 저장된 열을 태양열 반응로나 스텔링 엔진과 같은 발전시스템으로의 열 이송 방식으로써 히트파이프 식 열 이송 방법을 채택하여 복사 및 전도에 관한 수치적 열 해석을 다루었다. 더 나아가 흡수기의 내부형상을 변화시켜 히트파이프 식 열 이송 방법을 채택하였을

1. 서론

고밀도로 집광된 태양에너지를 태양열 흡수기를 통해 스텔링 엔진을 사용하는 발전시스템에 전달하거나 수소 생산을 위한 태양열반응로에서

- 1) 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원
- 2) 한국항공대학교 공과대학 항공우주 및 기계공학부
E-mail : jhboo@kau.ac.kr
Tel : (02)300-0107 Fax : (02)3158-2191
- 3) 한국에너지기술연구원

경우에 나타나는 열손실 및 열전달 특성을 정량적으로 비교함으로써 효과적인 흡수기 내부 형상과 발전시스템의 구성을 위한 해석결과를 제시하고자 하였다. 특히 태양열 반응로와 같은 발전시스템은 반응로 내벽의 등온상태가 우수할수록 효율이 높은 화학반응을 유도하여 효율적인 가용에너지를 생성할 수 있기 때문에 흡수기 내벽과 반응로 내벽의 등온성능은 매우 중요한 의미를 갖는다⁽³⁾.

2. 태양열 흡수기의 모델링

Fig. 1에 대표적인 태양열 흡수기의 형상을 보이고 있다. 태양열 흡수기는 내부 동공(cavity)의 형태에 따라 기본적으로 실린더(cylindrical)형, 콘(conical) 및 돔(dome)형 등으로 분류되며, 실제로는 그 이상으로 매우 다양한 것으로 알려져 있다. 통상적으로, 집광된 태양에너지는 흡수기 입구(aperture)를 통하여 내부의 동공으로 들어간 후 내벽에 흡수된다. 내벽 주위에는 고온 히트파이프가 설치되어 전달된 열을 일정 거리만큼 이송시켜 필요한 부분에 공급하도록 되어 있다.

본 연구에서는 실린더 형의 동공을 갖는 태양열 흡수기의 직경 240 mm, 길이 400 mm의 스테인리스 스틸 316 L 이며 흡수기의 후벽(end wall)의 각도 α 를 90°, 60°, 45°, 30°로 설정하여 흡수기의 내부형상을 변화시켰다. 흡수기 내벽과 내부에 저장된 열을 화학반응로라고 가정할 수 있는 히트싱크(heat sink)로 이송하기 위하여 직경 12.7 mm의 채널을 48개를 원주방향으로 균일하게 모델링 하여 히트파이프가 배치 되도록 하였으며 히트파이프 방식에 대한 수치적 모델링 기법은 문헌⁽⁴⁾에 의해 유효열전도율을 적용하였다.

히트싱크는 실제에 있어서는 스텔링엔진의 헤드 등 고온열원의 공급 대상이 되는 부분이다. 구체적인 열 이송 거리와 열전달 면적 등은 설계에 따라 달라질 수 있으나, 현재는 우선 흡수기와 동일한 길이를 가지고 있으며, 균일 열 유속으로 열을 흡수한다고 가정하였다. 열원의 역할을 하는 흡수기 내벽과 열침 사이의 직접 접촉은 없고, 모든 열은 흡수기 내벽에서 반경 방향으로 전달되어 여기에 부착된 히트파이프의

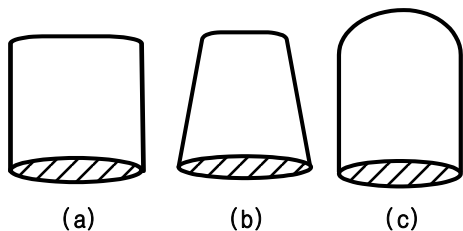


Fig. 1 Schematic of a typical solar receivers cavity:
(a) cylindrical type, (b) conical type
(c) dome type (From Ref. (5))

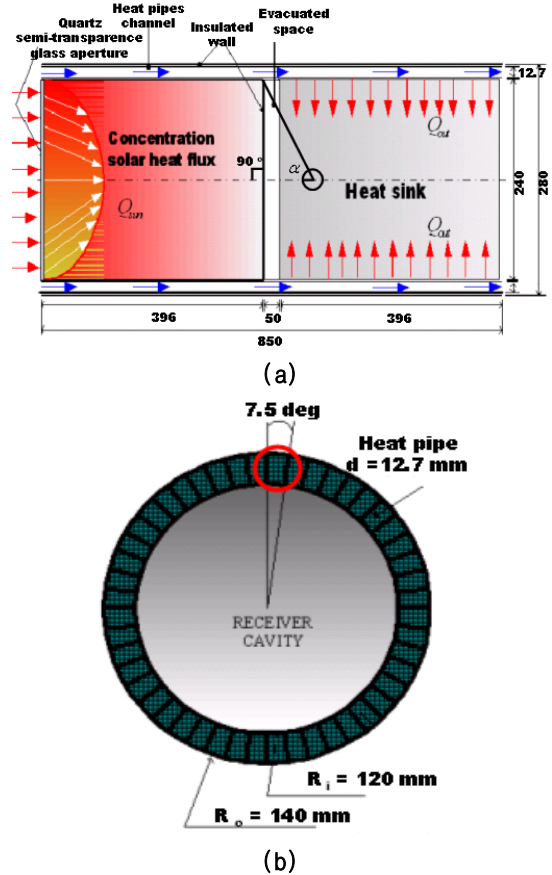


Fig. 2 High-Temperature solar receiver model :
(a) side view, (b) front view

작동유체를 통해 히트싱크의 벽면으로 전달된다고 하였다. 따라서 흡수기와 히트싱크 사이에는 공동을 두어 단열로 취급하였다.

수치적 해석모델은 대칭성을 고려하고, 가능한 단순화하여 계산에 필요한 메모리의 용량과 계산 시간을 절약하도록 하였다. 수치해석의 모델은 Fig. 2 (b)에 표시한 바와 같이 실제 계산 대상의 1/48 영역에 해당된다.

3. 수치해석을 위한 경계조건 설정

Fig. 2 (a)에서 보인 바와 같이 태양열 흡수기 전방에는 고온에 견딜 수 있는 석영유리로 투명한 창을 만들어 설치한다. 이 창을 통해 집광된 태양열이 입사된다. 흡수기 내부로의 태양광의 조사방향은 흡수기 입구 중심을 기준으로 천정각(zenith angle) 및 방위각(azimuth angle)이 모두 45°로 균일하게 입사되는 것으로 가정⁽⁵⁾하였는데, 이는 태양광이 흡수기 입구 수직으로 입사된다고 할 경우에는 흡수기 후벽에 반사되어 밖으로 유출되는 손실이 많아 이것을 줄이기 위함이다.

흡수기 재료의 흡수율을 균일하게 0.97로 설정하였으며, 방사율(emissivity)은 균일하게 0.1로 설정함으로써 선택적 코팅의 효과를 첨가

하였다. 집광된 태양열의 복사열유속은 직달일
 량이 800 W/m^2 으로 알려진바 손실을 고려하여
 720 W/m^2 을 기준으로 집광비를 1000으로 고정하
 였고, 히트파이프의 적용은 Fig. 2 (b)의 채널
 영역을 고체물질로 가정한 후 고체물질의 유효
 열전도도를 5000 W/m-K 설정하여 계산을 수행하
 였다.

본 연구에서 설정한 모델에 대한 수치해석은
 FLUENT(version 6.2)를 사용하였으며, 복사열전
 달 해석에 사용한 수치해석 기법으로는 S-N 구
 분중좌표기법을 사용하였다.

4. 수치모사 결과

수치해석을 진행하기 전에 적합한 그리드의
 크기와 수를 결정하기 위해 수렴성을 검토하였
 다. 수렴성은 특정 위치에서의 수치해가 사용한
 그리드의 숫자(또는 크기)에 의해 얼마나 달라
 지는 지를 상대오차로 분석하였으며, 그리드 크
 기에 따른 그리드의 개수를 Table 1에, 분석결
 과를 Fig. 4에 나타내었다. 상대오차를 분석한
 위치는 흡수기 내부의 열매체와 접촉하는 벽면
 의 중앙부와 끝부분 그리고 히트싱크의 중앙부
 분을 택하였다. 그리드의 크기를 6에서부터 1씩
 줄여가며 계산한 결과 상대오차는 0.12 %, 0.05
 %, 0.04 %, 0.02 % 그리고 0.015 %로 감소한다.
 그리드의 크기가 3인 경우부터 그리드의 크기를
 더 작게 하더라도 온도분포의 차이가 0.02 % 이
 하로 나타나므로 그리드의 크기를 3으로 선정하
 여 해석하였다.

Fig. 4는 집광비 1000, 히트파이프의 유효열
 전도도 5000 W/m-K 에서의 흡수기 내벽의 축 방
 향 위치에 따른 복사열유속을 나타낸다. 복사열

Table 1 The number of grids against grid size

Grid size	2	3	4	5	6
The number of grids	147298	44039	20471	10388	7612

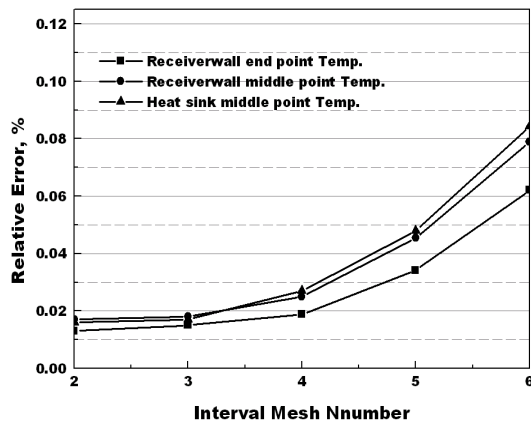


Fig. 3 Relative error against grid size

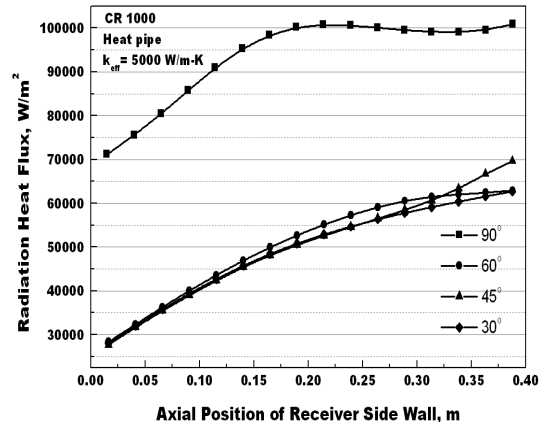


Fig. 4 Radiation heat flux along the axial position of receiver side wall

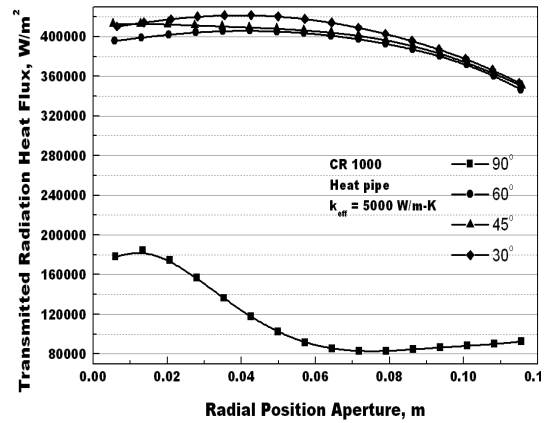


Fig. 5 Transmitted Radiation heat flux along the radial position of aperture

유속은 입사된 복사열유속(Incidence radia-
 tion)에서 흡수기 내벽으로 흡수된 복사에너지
 를 말한다.

복사열유속은 흡수기 입구에서부터 축 방
 향으로 순차적으로 증가하는 경향을 보인다. 흡수기
 전체의 복사열유속 평균값은 흡수기 후벽의 기
 울기가 클수록 높게 나타났으며, 정량적으로 파
 악하면 후벽의 기울기가 30° 일 때를 기준으로
 45° 일 때, 1.8 %, 60° 일 때, 2.8 %, 90° 일
 때, 89% 증가하였다.

흡수기 후벽의 기울기가 클수록 흡수기 내벽
 에 흡수되는 복사열유속 량이 증가하므로 내벽
 의 온도 또한 흡수기 후벽의 기울기가 클수록
 증가함을 예상할 수 있다.

Fig. 5는 집광비 1000, 히트파이프의 유효열
 전도도 5000 W/m-K 에서의 흡수기 입구를 통
 하여 들어온 복사열유속이 흡수기 내벽과 후벽에
 흡수되지 못하고 반사되어 흡수기 입구로 투과
 (transmission)하는 복사열유속을 나타내었다.

흡수기 입구 전체의 복사열유속 평균값은
 흡수기 후벽의 기울기가 작을수록 증가하는 경
 향을 나타냈다. 세부적으로 파악해 보면 후벽의
 기울기가 90° 일 때를 기준으로 60° 일 때, 241

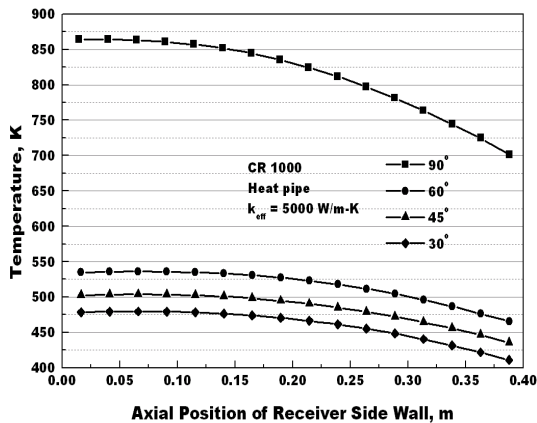


Fig. 6 Axial temperature distribution of receiver side wall

%, 45° 일 때, 246 %, 30° 일 때, 252 % 증가하였다.

흡수기 후벽의 기울기가 작을수록 흡수기 내벽과 후벽에 반사되어 흡수기 입구로 빠져나가는 복사열유속 량이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6에 집광비 1000, 유효열전도도 5000 W/m-K를 적용한 히트파이프를 삽입한 경우 흡수기 후벽의 각도에 따른 흡수기 내벽의 축 방향 온도분포를 나타내었다.

흡수기 내벽 전체의 온도는 흡수기 후벽의 기울기가 클수록 증가하며 정량적으로 비교해보면 기울기 30°일 때를 기준으로 45° 일 때, 5.3 %, 60° 일 때, 12.2 %, 90° 일 때, 77 % 증가하였다.

흡수기 내벽 전체의 등온성은 기울기가 작을수록 우수하며 최고온도와 최저온도의 차이는 기울기가 30° 일 때, 67.1 K, 45° 일 때, 67.3 K, 60° 일 때, 69.4 K, 90° 일 때, 163.2 K을 나타내었다.

4. 결론

고온 히트파이프를 적용한 태양열 흡수기의 내부형상 변화에 따른 열전달 특성을 파악하기 위하여 수치적으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 흡수기 후벽의 기울기가 클수록, 흡수기 내벽으로 흡수되는 복사열유속이 증가하였으며, 기울기 90° 일 때, 기울기 30° 일 때보다 89% 증가하였다.

(2) 흡수기 후벽의 기울기가 작을수록, 흡수기 입구로 투과되는 복사열유속이 증가하였으며, 기울기 30° 일 때, 기울기 90° 일 때 보다 252 % 더 많이 빠져나갔다.

(3) 흡수기 후벽의 기울기가 클수록, 흡수기 내벽이 고온을 형성하였으며, 기울기 90° 일 때, 기울기 30°일 때보다 352 K 이상의 고온 환경을 형성하였다. 따라서 흡수기 후벽의 기울기가 작을수록, 복사열손실이 증가함을 알 수 있다.

References

- [1] Ryu S. Y., Seo T. B., Kang Y. H. and Kim J. B., 2000, "An Analysis of Heat Losses from a Receiver for a Dish-Type Solar Energy Collecting System," Trans. of The Korea Solar Energy Society, Vol. 20, No. 3, pp. 61-73.
- [2] Bergan, N. E., 1986, "Testing of the Molten Salt Electric Experimental Solar Central Receiver in an External Configuration," National Laboratories report SAND86-8010.
- [3] Abanades, S and Flamant, G., 2007, "Experimental study and modeling of a high - temperature solar chemical reactor for hydrogen production from methane cracking," International Journal of Hydrogen Energy, Vol 32, Issues 10-11, pp. 1508-1515
- [4] Yoon, Y. H., Boo, J. H., 2005, "Experiment and Simulation on the Thermal Performance of a High-temperature Cylindrical Heat Pipe," Trans. of the KSME, pp. 130-135.
- [5] Hiroshi, H., Yoshio., Y., Aki, S. and Yutaka T., 2006, "Study on Design of Molten Salt Solar Receivers for Beam-Down Solar Concentrator," International Journal of Solar Energy, Vol 80, pp. 1255-1262