<학술논문> **DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2011.35.12.1383** ISSN 1226-4881

다채널 체적식 태양열 흡수기에서 열전달 수치해석§

이현진*† · 김종규* · 이상남* · 강용혁*
* 한국에너지기술연구원 태양열지열센터

Numerical Analysis of Heat Transfer in Multichannel Volumetric Solar Receivers

Hyun Jin Lee*†, Jong Kyu Kim*, Sang Nam Lee* and Yong Heack Kang*
* Solar Thermal and Geothermal Center, Korea Institute of Energy Research

(Received May 17, 2011; Revised August 22, 2011; Accepted August 25, 2011)

Key Words : Volumetric Solar Receiver(체적식 태양열 흡수기), Concentrated Solar Flux(집광 태양열유속), Monte Carlo Ray-Tracing Method(몬테카를로 광선추적법)

초록: 본 연구는 태양열 발전에 사용하는 공기식 다채널 체적식 흡수기의 일관성 있는 열전달 해석에 초점을 두고 있다. 이를 위해 흡수 소재 물성과 채널 형상 변화의 영향을 몬테카를로 광선추적법에 기반한 광학 모델과 전도, 대류, 복사를 고려한 1 차원 열전달 모델에 동시에 반영하였다. 광학 모델 결과는 채널 반경 대비 길이의 형상비가 매우 커서 대부분의 태양 에너지는 15 mm 이내의 짧은 길이에서 흡수됨을 증명하고 있다. 복사 열손실 분류를 통해 채널의 낮은 흡수율에서는 방사 손실은 줄지만 반사 손실이 증가하여 흡수기 효율이 감소하는 것을 보였다. 큰 채널 반경이나 작은 질량 유량으로 인해 흡수기 평균 온도가 상승할 때, 방사 손실과 반사 손실 모두 증가하지만 방사 손실의 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

Abstract: The current study focuses on the consistent analysis of heat transfer in multichannel volumetric solar receivers used for concentrating solar power. Changes in the properties of the absorbing material and channel dimensions are considered in an optical model based on the Monte Carlo ray-tracing method and in a one-dimensional heat transfer model that includes conduction, convection, and radiation. The optical model results show that most of the solar radiation energy is absorbed within a very small channel length of around 15 mm because of the large length-to-radius ratio. Classification of radiation losses reveals that at low absorptivity, increased reflection losses cause reduction of the receiver efficiency, notwithstanding the decrease in the emission loss. As the average temperature increases because of the large channel radius or small mass flow rate, both emission and reflection losses increase but the effect of emission losses prevails.

- 기호설명 -

$\dot{m}$: 공기의 질량 유량(mg/s)
q_r : 채널 내부 벽 간 복사 열전달(W/m^2)
q_s : 채널 내부에 흡수된 태양 열유속(W/m^2)
$q_{s,f}$: 흡수기 전면에 조사되는 태양 열유속 (W/m^2)
R : 채널 반지름(mm)
$\mathbf{r}$: 광선의 위치벡터
$\mathbf{s}$: 광선의 방향벡터
T : 채널 벽 온도(K)
T_g : 공기 온도(K)
α : SiSiC 의 흡수율
ζ : 0~1 범위의 난수

§ 이 논문은 2011 년도 대한기계학회 열공학부문 춘계학술대회(2011. 5. 12.-13., 롯데부여리조트) 발표논문임
† Corresponding Author, hj.lee@kier.re.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

태양열 발전(concentrating solar power) 기술은 태양 복사 에너지를 고집광하여 만들어진 고온의 증기나 공기를 기존의 발전방식에 적용하는 재생에너지 기술이다.(1) 공기를 활용하는 태양열 발전의 핵심 요소는 체적식 태양열 흡수기(volumetric solar

receiver)이다. Fig.1 에서 보듯이 흡수기는 고집광 태양 복사 에너지를 공기로 전달하는 열교환기의 역할을 한다. 흡수 소재는 높은 태양열 흡수율, 높은 열전도도, 열적 및 기계적 안정성, 내산화성, 내구성 등을 만족해야 한다. 또한, 공기가 잘 통과하면서 접촉 면적이 넓은 다공성 형태로 제작이 용이해야 한다. 그래서, SiC(silicon carbide) 또는 SiSiC(silicon-infiltrated silicon carbide)가 주로 이용된다.[1~4] 제작 방법에 따라 포말(foam), 메쉬(mesh) 등 형태도 가능하지만, 다채널 형태로 제작하면 기존의 디젤 매연 저감 장치(diesel particulate filter)에 적용되는 압출성형 방법을 활용할 수 있는 장점이 있다.

체적식 흡수기의 열전달 해석은 입력에 해당하는 흡수된 태양 열유속 분포를 먼저 알고, 이를 포함하는 전도, 대류, 복사의 연립 방정식을 풀어야 한다. 흡수 소재의 광학 물성이나 형상이 변할 때, 열전달 지배 방정식뿐만 아니라 태양 열유속 분포에도 그 변화의 영향을 고려해야 한다. 하지만, 기존 대부분의 열전달 해석들은 태양 열유속 분포 변화를 무시하거나 명확하게 변화의 정도를 규명하지 않았다.[4~9] 결과적으로 이와 같은 연구들은 부정확하거나 일치되지 않는 입력 열량을 바탕으로 흡수기의 열전달 해석을 수행한 것이다.

본 연구는 일관성 있는 흡수기 열전달 해석을 목표로 하고 있다. 이를 위해 다채널 체적식 태양열 흡수기를 대상으로 광학 모델을 이용하여 채널 내부 벽에 흡수되는 태양 열유속 분포를 먼저 구하였다. 그리고 얻어진 결과를 입력으로 받아들인 1 차원 열전달 지배 방정식을 수치적으로 풀었다. 흡수 소재의 흡수율과 채널 입구 크기가 변할 때, 흡수된 태양 열유속, 채널 벽과 채널 내부 공기 온도, 흡수기 효율 등이 어떻게 변하는지 분석하였다. 일관성 있는 광학적/열적 모델을 기반으로 복사 열손실 종류를 체계적으로 분류하고 상대적인 영향성을 조사하였다. 덧붙여서 복사 열전달을 무시하거나 온도에 따른 물성 변화를 무시한 간단한 가정들에 대한 평가 결과도 제시하였다.

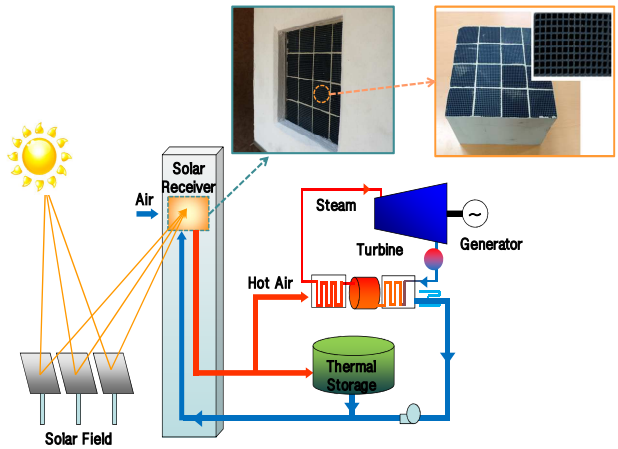

Fig. 1 Schematic diagram of a concentrating solar power plant and a multi-channel volumetric solar receiver

2. 수치해석 모델

2.1 열전달 모델

체적식 흡수기의 열전달 관련하여 2 차원 해석 연구도[4,5] 있지만, 대부분은 1 차원에[6~9] 국한되어 있다. 본 연구의 초점은 새로운 열전달 모델의 개발이 아니라 광학적/열적으로 일관성 있는 해석에 있으므로 널리 사용되고 있는 1 차원 열전달 모델을 사용하였다. 2 차원 해석은 적절한 열전달 모델을 선정하고 상응하는 태양 열유속을 얻도록 광학 모델을 수정하면 확장 가능하다.

본 연구는, 다채널 형태의 체적식 흡수기에 적합한, 각각의 채널을 독립적으로 다루는 1 차원 열전달 모델을 채택하였다.[6~8] 여기서 핵심 가정은 흡수기 전면부에 도달하는 태양 열유속 크기는 균일하다는 것이다. 균일 열유속은 태양열 발전에서 주요한 집광 전략으로서, 2 차 집광기(secondary concentrator)나 다초점(multi-focus) 반사판 등의 기술이 적용되는 경우에는 근사화하여 생각할 수 있다. 균일 열유속 가정은 채널 옆면이 충분히 단열된 상황에서 단일 채널에 대해 독립적인 해석을 가능하게 한다. 단일 채널은 길이가 반지름보다 매우 크므로($L \gg R$), z 축 방향의 1 차원 열전달 문제로 단순해 진다. 채널의 형상은 사각, 원형, 육각형 등이 존재하지만, Fig. 2 에 제시된 것처럼 상응하는 수력 반경을 가진 원형 채널로 통일하여

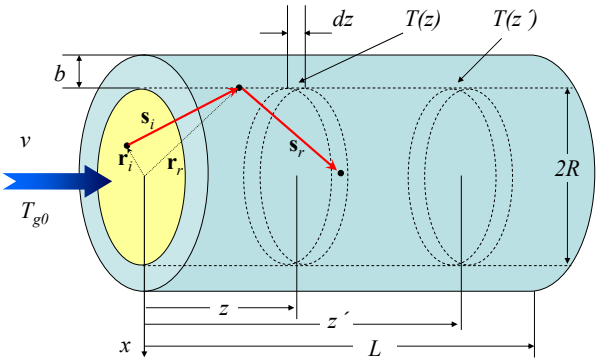

Fig. 2 Schematic diagram of a single channel for heat transfer and optical models

해석 가능하다.

정상상태에서 지배 방정식은 흡수된 태양 열유속을 열원으로 포함하는 3 개의 연립 방정식으로 표현된다. 먼저 채널 벽과 채널 내부를 흐르는 공기를 대상으로 각각에 에너지 보존법칙을 적용하면 아래 두 식이 얻어진다.

$$q_r = q_s - h\left(T - T_g\right) + \frac{d}{dz}\left(k\frac{dT}{dz}\right)\frac{A_c}{P} \tag{1}$$

$$\frac{dT_g}{dz} = \frac{2h}{\rho v c_p R}\left(T - T_g\right) \tag{2}$$

여기서 T 와 T_g 는 각각 채널 벽과 내부 공기의 온도를 나타낸다. 그리고, q_s 는 채널 내부 벽에서 흡수된 태양 열유속을 의미한다. 채널의 입구와 출구를 포함한 채널 내부에서 벽들 간에서 발생하는 복사 열전달을 표현하는 q_r 은 형상 계수(view factor) F 를 이용하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}&\frac{q_r}{\varepsilon} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\int_0^L q_r\left(z'\right)dF_{dz-dz'} - \sigma T^4 \\ &= -\int_0^L \sigma T^4\left(z'\right)dF_{dz-dz'} - \sigma T_I^4 F_{dz-I} - \sigma T_O^4 F_{dz-O}\end{aligned} \tag{3}$$

위 지배 방정식들에서 알 수 있듯이, 공기는 빛을 흡수하지 않으며, 채널 벽은 회색체(gray body)로 간주하였다. 지배 방정식을 풀기 위한 경계 조건은 아래와 같다.

$$T_g\left(0\right) = T_{g,0} \tag{4}$$

$$-k\left(0\right)\frac{dT}{dz}\bigg)_{z=0} = \alpha q_{s,f} - q_{r,f} - h_f\left\{T\left(0\right) - T_{g,0}\right\} \tag{5}$$

$$k\left(L\right)\frac{dT}{dz}\bigg)_{z=L} = 0 \tag{6}$$

식 (1) ~(6)은 적절한 무차원화 과정을 거친 뒤, 유한 차분법(finite difference method)을 이용하여 수치적으로 풀 수 있다. 초기 온도 분포를 추정하여 주어진 물성을 바탕으로, 비선형 연립 방정식의 해는 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson)을 반복적으로 적용하여 얻는다. 얻어진 온도에서 물성값을 지속적으로 갱신하면서 온도 분포가 0.1% 내로 수렴할 때까지 비선형 연립 방정식 풀이 과정을 반복한다. 구체적인 수식 전개나 계산 알고리즘은 참고문헌[6,10]에 자세하게 나와있다. SiSiC 의 열전도도는 상온에서 120 W/mK, 1300 ℃ 에서 40 W/mK 값을 선형 보간하여 이용하였다. 대류 열전도 계수는 미리 알려진 것이어야 하는데, Carotenuto 등[6]이 제시한 상관식을 사용하였다.

2.2 광학 모델

일반적으로 태양열유속에 관한 광학 모델은 몬테카를로 광선추적법을 사용한다. 몬테카를로 광선추적법은 난수(random number)를 이용하여 확률적으로 광학이나 복사 열전달 현상을 모델링한다.[10,11] 다수의 광선을 생성하여 반사나 흡수와 같은 물리적 현상을 고려하면서 각각의 광선을 추적한 뒤, 광선 전체의 추적 결과를 바탕으로 결과를 도출한다.

일반적으로 광선추적법을 이용한 광학 모델은 광선 추적을 집광기에서부터 시작한다, 예를 들어 Lee 등[12]의 연구 참조. 하지만, 이와 같은 방식은 본 연구의 단일 채널 내부에서 열유속을 구하는데 적용하기 어렵다. 왜냐하면, 집광 면적 대비 작은 채널 입구 면적으로 인해 추적해야 하는 광선의 수가 매우 커야 하기 때문이다. 그래서, 대부분의 열전달 모델 연구에서는 흡수기 전면부에 도달한 태양 열유속의 각 분포(angular distribution)에 대해 일반적인 가정인 확산 방사(diffuse emission)가정을 사용한다.[4-9] 본 연구에서도 채널 전면부(Fig. 2 에서 x-y 평면)에서 확산 방사가 일어난다고 가정하고 광선 추적을 채널 전면부에서 시작하여 채널 내부 벽에 흡수된 태양 열유속 분포를 모델링하였다. 하지만, 실제 태양 열유속의 각 분포는 확산 방사가 아니며 집광하는 방식에 따라 다르다는 것을 염두에 두어야 한다.[13]

광선 추적 첫 번째 단계는 광선이 생성되는 위치 $\mathbf{r}_i$ 를 가상의 채널 입구 평면에서 결정하는 과정이다. 공간상에서 균일한 지점에서 광선이 생성된다고 보면, 원통좌표계를 바탕으로 식 (7)이 된다.

$$\mathbf{r}_i = \left(R\sqrt{\zeta_1}, 2\pi\zeta_2, 0\right) \tag{7}$$

여기서 ζ 는 0 에서 1 범위에서 균일한 분포를 갖는 난수이다.

확산 광원에서 방사되는 광선은 방사 각도의 코사인 값에 비례하는 에너지를 갖는다. 이는 동일한 에너지를 갖는 광선들이 식 (8)과 (9)의 각 분포로 방사하는 광원으로 바꾸어 생각할 수 있다. 따라서, 광선의 방향벡터 $\mathbf{s}_i$ 를 결정하는 천정각(zenith angle)과 방위각(azimuth angle)은 아래와 같이 결정하고, 광선의 에너지는 계산 편의를 위해 값 1 로 설정하였다.

$$\theta_i = \sin^{-1}\left(\sqrt{\zeta_3}\right) \quad (8)$$

$$\phi_i = 2\pi\zeta_4 \quad (9)$$

위에서 결정된 $\mathbf{r}_i$와 $\mathbf{s}_i$를 바탕으로 채널 내부의 원통형 벽과 만나는 교점을 기하학적으로 구하면, 반사되는 지점 $\mathbf{r}_r$이 된다. 반사될 때, 입사 광선은 표면의 흡수율 α에 비례해서 흡수 소재에 에너지를 전달하고, 반사율에 해당하는 나머지 부분 $(1-\alpha)$ 만을 갖고 반사된다. 대략 0.4 ~ 2.5 μm 범위의 태양스펙트럼에 대한 흡수율로 국한되어야 하지만, 회색체 가정을 사용하였으므로 적외선 범위의 열복사 스펙트럼에 상관없이 같은 값을 사용하였다. 결과적으로 α는 식 (3)에 나타난 ε와 동일한 값이 되었다($\alpha = \varepsilon$). 반사된 광선의 방향벡터 $\mathbf{s}_r$ 계산은 소재 표면에서 반사가 어떻게 발생하는지에 따라 달라진다. 식 (3)을 유도하는 과정에서 이미 적용된 가정과 일치하기 위해 확산반사를 이용하였다. 확산 반사의 경우에는 입사광선의 방향에 상관없이 식 (8)과 (9)를 이용하여 $\mathbf{s}_i$와 동일한 방식으로 $\mathbf{s}_r$이 계산된다.

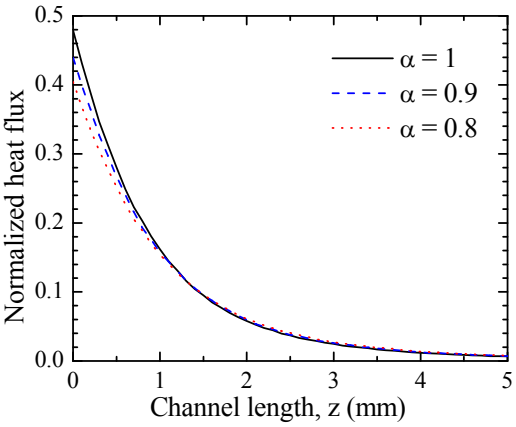

Fig. 3 Variations of the solar flux distribution absorbed at inner walls q_s for the channel radius of 1 mm

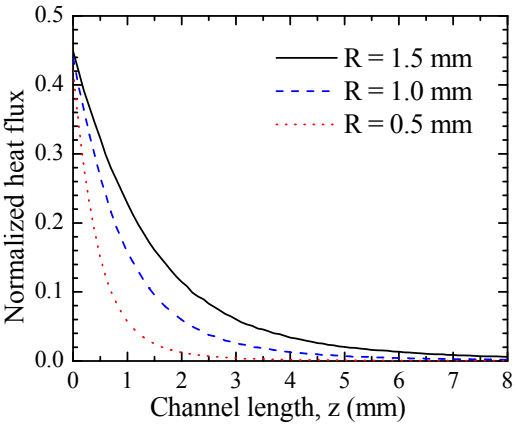

Fig. 4 Variations of the solar flux distribution absorbed at inner walls q_s for the SiSiC absorptivity of 0.9

반사 이후 갱신된 위치 $\mathbf{r}_r$와 방향벡터 $\mathbf{s}_r$를 입사 광선으로 간주하여 추적을 다시 수행한다. 추적하는 광선의 에너지가 너무 작아지거나($<10^{-6}$) 광선이 채널 입구나 출구로 탈출할 때까지 다중반사를 고려하면서 추적을 지속한다. 그리고 나서 다음 광선을 생성하여 동일한 과정을 되풀이 한다. 충분한 개수의 광선 추적을 수행하고 흡수된 에너지와 위치를 이용하여 채널 벽에 조사되는 태양복사 에너지 분포를 구한다.

3. 결과 및 검토

3.1 흡수기 내부 태양 열유속

개발된 광학 모델을 이용하여 채널의 전체 길이 100 mm 까지 광선 추적을 시행하였고, 3000 개의 노드를 사용하여 0.033 mm 간격으로 열유속을 저장하였다. 전체 10^6 개 광선을 사용하여 광학 모델 계산 결과가 0.5% 이내에서 수렴되도록 하였다. 흡수기 전면에 조사되는 열유속 $q_{s,f}$ 값을 1 MW/m^2 으로 간주하여 계산된 채널 내부에서 흡수된 열유속 분포를 이 값으로 무차원화 하였다.

먼저 반경이 1 mm 인 채널에 대해서 채널 내부 벽에 흡수된 태양 열유속 분포를 채널 깊이의 함수로 Fig. 3 에 나타내었다. 일반적으로 SiSiC 는 높은 흡수율을 나타내지만, SiSiC 제작 시에 Si 침투량에 따라 값이 변하므로 흡수율 0.8 ~ 1 범위를 고려하였다. 검토된 흡수율에 대해, 모두 매우 짧은 깊이에서 태양 복사 에너지가 흡수된다. 흡수율에 상관없이 약 3 mm 정도면 태양 복사 에너지의 90%가 흡수되고, 약 10 mm 이내에 99%가 흡수된다. 흡수율이 작아질수록 반사된 빛이 흡수되고 남은 에너지를 가지고 채널 속으로 더 깊이 들어간다. 결과적으로 흡수기 전면부에서 열유속은 작고 상대적으로 흡수기 안쪽에서 높은 열유속을 나타낸다. 흡수기 전면($z = 0$)에서 열유속은 $\alpha = 1$ 경우 대비 $\alpha = 0.9$ 에서 92.1%로, $\alpha = 0.8$ 에서 85.2%로 감소하였다. 하지만, 전반적으로 흡수율에 따른 열유속 변화는 크지 않다. 이는 흡수율 값이 전반적으로 크기 때문이기도 하지만, 채널의 반경 대비 길이의 비가 커서 채널이 공동(cavity)의 역할을 하기 때문이다. 흡수율이 1 이

아닌 경우, 채널 안으로 들어간 빛일지라도 확산 반사 이후 일부는 흡수되지 않고 채널 전면이나 끝을 통해 빠져 나온다. 흡수율이 0.9 인 경우 약 2.5%, 0.8 인 경우 약 5.3%가 흡수되지 않았다.

SiSiC 흡수율 0.9 에서 다른 채널 크기에 대한 태양 열유속 변화를 Fig. 4 에 도시하였다. 채널 반경이 증가할수록 채널 내부로 유입되는 전체 태양 에너지와 이에 따라 채널 벽에 흡수되는 열유속 값도 증가한다. 당연히 큰 반경에서 태양 에너지가 흡수되는 깊이가 크다. 하지만, 반경 대비 길이의 비에 따라 흡수되는 정도는 변화가 없다. 즉, 반경의 3 배 정도의 깊이에서 태양 에너지의 90%가, 10 배 정도에서 99%가 흡수된다.

Fig. 3 과 4 는 확산 광원 가정하에서는 태양 열유속이 침투되는 깊이가 매우 짧은 것을 보여준다. 실제로 집광된 태양 열유속 분포는 집광 형태에 따라 다르겠지만, 반경 대비 큰 길이의 채널 형상과 SiSiC 의 높은 흡수율을 감안한다면 침투 깊이 측면에서는 확산 광원 가정과 실제 방식간 차이는 크지 않을 것이다. 따라서, 흡수기의 앞쪽에서 고온이 예상되고, 이 온도에서 물성값에 따라 흡수기의 성능이 많이 좌우될 것이다.

Table 1 Base case for heat transfer simulation

Channel radius, R	1 mm
Channel length, L	100 mm
Wall thickness, b	0.2 mm
Mass flow rate, m	10 mg/s
Frontal solar flux, $q_{s,f}$	1 MW/m^2
Ambient temperature, T_{amb}	298 K
Air inlet temperature, T_{g0}	298 K

3.2 흡수기 열전달 해석

위에서 계산된 태양 열유속을 열전달 모델에 입력하여 채널 벽과 내부 공기의 온도 분포를 조사하였다. 물성과 형상의 조합에 따라 다양한 경우가 가능하므로 Table 1 에 제시된 경우를 기본으로 하여 관심 있는 인자의 영향을 검토하였다. 광학 모델과 동일하게 3000 개 노드로 분할하여 계산했을 때, 계산 결과가 전체 에너지 보존 측면에서 1.0% 정도임을 확인하였다.

Fig. 5 는 Fig. 3 에 제시된 태양 열유속 분포 조건에서 발생하는 채널 벽과 공기의 온도 분포를 보여주고 있다. 높은 흡수율에서 벽과 공기의 온도도 그리고 효율도 높다. 흑체 SiSiC 대비해서 흡수율이 0.8 로 감소하면, 벽 온도는 최대로 51℃, 5.3% 줄어든다. 효율도 94.5%에서 8.1% 감소한 86.4%가 된다. 고온 상태이므로 대류 열손실 보다 복사 열손실이 훨씬 더 크다. 복사 열손실은 고온에서 발생하는 자체 방사 손실(emission loss)과 태양 복사에너지를 전부 흡수하지 못하고 발생하는 반사 손실(reflection loss)이 있다. 방사 손실과 반사 손실은 각각 열전달 모델과 광학 모델의 결과로 얻는다. 채널에서 방사 손실이나 반사 손실은 발생하는 위치에 따라 두 부분으로 – Fig. 2 에서 채널 내부 공동과 채널 전면에 노출된 두께 b 부분으로 – 분류 가능하다. Fig. 5 에서 흡수율이 줄어들수록 상대적 저온으로 인해 방사 손실은 줄어들지만, 반사 손실은 늘어난다. 방사 손실 감소 보다 반사 손실의 증가가 더 커서, 전체적으로 손실 증가가 발생한다.

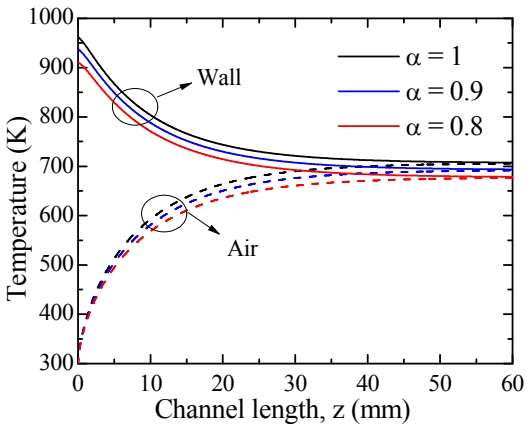

Fig. 5 Temperature distributions of channel wall and air under the solar fluxes in Fig. 3

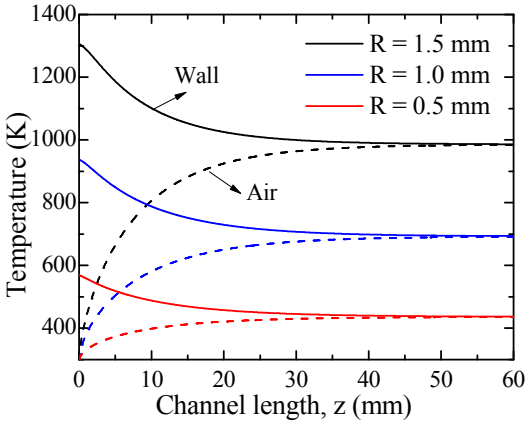

Fig. 6 Temperature distributions of channel wall and air under the solar fluxes in Fig. 4

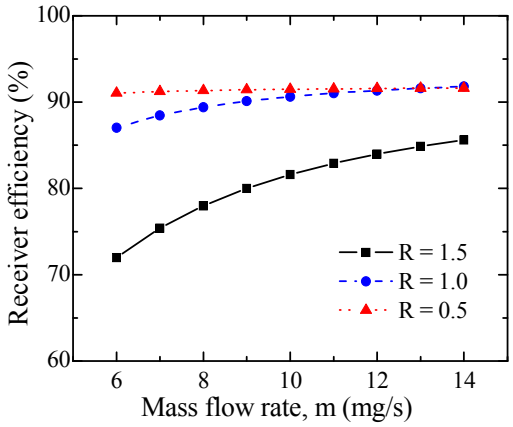

Fig. 7 Dependence of the receiver efficiency on air mass flow rate

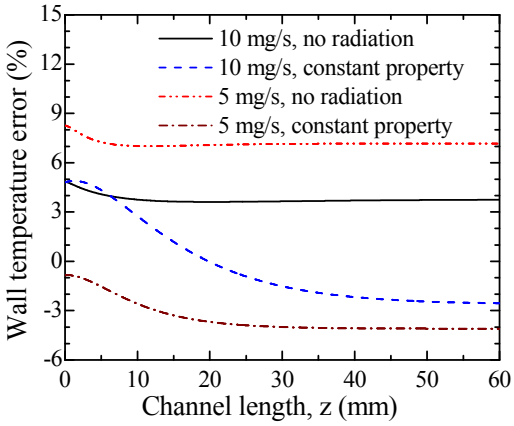

Fig. 8 Wall temperature errors by the constant property assumption and by the ignorance of radiation

Fig. 6 은 Fig. 4 에 제시된 태양 열유속 분포를 이용하여 채널 크기에 따른 열전달 영향을 조사한 결과이다. 채널 크기 증가는 채널 내부로 들어오는 태양 에너지의 증가를 의미하므로, 동일한 질량 유량에 대해 채널 벽과 공기의 온도가 높다. 반경이 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm 일 때, 공기 출구 온도는 각각 436.3.0 K, 692.8 K, 985.8 K 가 된다. 공기 출구 온도가 증가하면 발전 설비로 전달 열량은 많아지지만, 흡수기 전면부의 온도가 상승하므로 재료의 열적 안정성이나 복사 열손실 측면에서는 부정적인 효과를 가져온다. 반경 0.5 mm 대비 1.5 mm 일 때, 효율은 91.5%에서 9.9% 줄어 81.6%가 된다. 방사 손실의 증가가 많은 부분을 차지하는데, 특히 채널 내부 공동에서 두드러진다. 위에서 언급했듯이 반경에 상관없이 15 mm 이내의 짧은 거리에서 태양 열유속은 대부분 흡수되므로, 채널 깊이 약 60 mm 이후부터는 벽과 공기의 온도 차가 거의 없어진다. 결과적으로 채널 깊이는 열전달 관점에서 보면 60 mm 정도면 적당하다.

Fig. 6 에서 사용된 채널 반경에 대해 흡수기의 효율을 질량 유량의 함수로 Fig. 7 에 도시하였다. 예상대로 주어진 채널 반경에서 질량 유량이 증가할 때, 평균적인 흡수기 온도가 줄어들기 때문에 복사 손실이 감소하여 흡수기 효율이 증가하는 추세를 보여주고 있다. 그리고, 동일한 원리로, 질량 유량이 정해지면 작은 채널 반경에서 효율이 크다. 반경 1.5 mm 에서는 방사 손실이 지배적이지만, 반경 0.5 mm 에서는 반사 손실의 역할이 더 크다. 작은 채널 반경이 효율에 도움이 되지만, 채널두께도 같이 작아져야 하므로 제작 가능성의 문제가 발생한다. 뿐만 아니라, 작은 채널 크기로 인해 압력 손실과 같은 문제가 추가될 수도 있다. 덧붙여서, 일반적으로 흡수기 설계에 있어서 질량 유량과 공기의 출구 온도는 발전부의 용량에 따라 주어진다. 또한 집광부의 면적은 투자비와 관련이 있다. 투자비를 낮추면서 공기의 유량과 온도를 동시에 요구 조건 대로 맞추는 것이 항상 가능한 것은 아니다. 제시되지는 않았지만, 추가적인 해석을 통해 채널의 반경과 질량 유량이 흡수기의 성능에 큰 영향을 주는 인자로 나타났다. 결과적으로 흡수기 설계에 있어서 채널의 반경과 질량 유량을 설계 사양에 맞춰 최적화하는 것이 중요하다.

온도에 따른 물성 변화를 고려하면서 식 (1)~(6)을 반복적 수치 계산을 통해 푸는 과정은 수고스러운 일임에 틀림 없다. 그래서, 시간과 노력을 절약하기 위해 추가적인 가정을 더해 해석하려는 시도가 종종 있다.[5] 흔히 사용하는 상수 물성에 대한 가정과 복사 열전달을 생략하는 가정을 벽 온도 차이의 관점에서 평가하여 Fig. 8 에 제시하였다. 상수 물성 가정에서는 이전 단계에서 얻어진 온도 분포에 따른 물성을 얻고 이 값들의 평균값을 사용하였다. 10 mg/s 질량 유량에서(온도 분포는 Fig. 6 참조) 두 가정 모두 최대 온도 45 K 정도, 약 5% 오차 이내로 비교적 작게 나타났다. 하지만, 질량 유량이 5 mg/s 로 줄면 채널 벽의 평균 온도가 상승하여 두 가정에 의한 오차가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 복사 열전달을 고려하지 않으면 최대 97.2 K(9.8%) 오차가 상수 물성을 가정하면 최대 41.4 K(4.1%) 오차가 각각 발생하였다. 상대적으로 상수 물성 가정이 보다 정확하다. Fig. 8 에 주어진 경우와 유사한 경우에 대해서는 약 5% 오차를 감수하면서 상수 물성 가정을 사용할 수 있지만, 태양 열유속이 크거나 질량 유량 등이 작

아서 흡수기 온도가 높은 경우에 대해서는 개별적인 평가가 수반되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 몬테카를로 광선추적법으로 계산한 흡수기 내부의 태양 열유속 분포를 1 차원 열전달 지배 방정식에 입력하는 방법으로 다채널 체적식 흡수기의 열전달을 해석하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

• 흡수기 물성이나 형상 변화의 영향을 광학 모델과 열전달 모델에 동시에 반영하였다. 이를 통해 일관성 있는 흡수기 열전달 해석과 체계적인 복사 열손실 분류가 가능하였다.

• 흡수 소재의 흡수율이나 채널 반경의 일반적인 값 범위에서, 각각 0.8 ~ 1 과 0.5 ~ 1.5 mm, 채널 내부에 조사되는 태양 열유속은 15 mm 이내의 짧은 길이에서 대부분 흡수된다.

• 낮은 흡수율에서는 흡수기 자체의 방사 손실이 아닌 태양 에너지에 대한 반사 손실로 인해 흡수기 효율이 감소한다.

• 채널의 반경이 크거나 질량 유량이 작을 때, 높은 흡수기 평균 온도에서 방사 손실이 지배적으로 상승하여 흡수기 효율이 감소한다.

• 채널 벽 평균 온도가 1000 K 이하에서 약 5% 오차 범위로 상수 물성 가정을 사용할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 지원으로 수행되었음을 밝힌다.(과제번호: GP2011-0005-01)

참고문헌

(1) Romero-Alvarez, M. and Zarza, E., 2007, *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*, Taylor & Francis, Taylor & Francis, New York, Chapter 21.

(2) Fend, T., Hoffschmidt, B., Pitz-Paal, R., Reutter, O. and Rietbrock, P., 2004, "Porous Materials as Open Volumetric Solar Receivers: Experimental Determination of Thermophysical and Heat Transfer Properties," *Energy*, Vol. 29, pp. 823~833.

(3) Agrafiotis, C. C., Mavroidis, I., Konstandopoulos, A. G., Hoffschmidt, B., Stobbe, P., Romero, M. and Fernandez-Quero, V., 2007, "Evaluation of Porous Silicon Carbide Monolithic Honeycombs as Volumetric Receivers/Collectors of Concentrated Solar Radiation," *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, Vol. 91, pp. 474~488.

(4) Pitz-Paal, R., Hoffschmidt, B., Bohmer, M. and Becker, M., 1997, "Experimental and Numerical Evaluation of the Performance and Flow Stability of Different Types of Open Volumetric Absorbers under Non-Homogeneous Irradiation," *Sol. Energy*, Vol. 60, Nos. 3-4, pp. 135~150.

(5) Xu, C., Song, Z., Chen, L, and Zhen, Y., 2011, "Numerical Investigation on Porous Media Heat Transfer in a Solar Tower Receiver," *Renew. Energ.*, Vol. 36, pp. 1138~1144.

(6) Carotenuto, A., Ruocco, G. and Reale, F., 1991, "Heat Exchange in a Multi-Cavity Volumetric Solar Receiver," *Sol. Energy*, Vol. 46, No. 4, pp. 241~248.

(7) Carotenuto, A., Reale, F., Ruocco, G., Nocera, R. and Bonomo, F., 1993, "Thermal Behavior of a Multi-Cavity Volumetric Solar Receiver: Design and Tests Results," *Sol. Energy*, Vol. 50, No. 2, pp. 113~121.

(8) Carcia-Casals, X. and Ajona, J. I., 1999, "The Duct Selectivity Volumetric Receivers: Potential for Different Selectivity Strategies and Stability Issues," *Sol. Energy*, Vol. 67, Nos. 4-6, pp. 265~286.

(9) Bai, F., 2010, "One Dimensional Thermal Analysis of Silicon Carbide Ceramic Foam Used for Solar Air Receiver," *Int. J. of Therm. Sci.*, Vol. 49, pp. 2400~2404.

(10) Siegel, R. and Howell, J. R., 2002, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 4th ed., Taylor & Francis, New York, pp. 371~390.

(11) Byun, D. Y., Lee, C. J. and Chang, S. Y., 2004, " Radiative Heat Transfer in Discretely Heated Irregular Geometry with an Absorbing, Emitting, and An-isotropically Scattering Medium Using Combined Monte-Carlo and Finite Volume Method," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 5, pp. 580~586.

(12) Lee, H. J., Kim, J. K., Lee, S. N. and Kang, Y. H., 2011, "Heat Flux Analysis of a Solar Furnace Using the Monte Carlo Ray-Tracing Method," *Trans. of the KSME(B)*, in press.

(13) Lee, H. J., Kim, J. K., Lee, S. N. and Kang, Y. H., 2011, "Concentrated Solar Flux Modeling for the Heat Transfer Analysis of Multi-Channeled Solar Receivers," *J. of the KSES*, in press.