다채널 태양열 흡수기의 열전달 해석을 위한 집광 열유속 모델링

이현진*, 김종규*, 이상남*, 강용혁*

*한국에너지기술연구원 신재생에너지본부 태양열지열연구센터
(hj.lee@kier.re.kr, rnokim@kier.re.kr, snlee@kier.re.kr, yhkang@kier.re.kr)

Concentrated Solar Flux Modeling for the Heat Transfer Analysis of Multi-Channeled Solar Receivers

Lee, Hyun-Jin* Kim, Jong-Kyu* Lee, Sang-Nam* Kang, Yong-Heack*

*Solar Thermal and Geothermal Research Center, Korea Institute of Energy Research
(hj.lee@kier.re.kr, rnokim@kier.re.kr, snlee@kier.re.kr, yhkang@kier.re.kr)

Abstract

The volumetric solar receiver is a key element of solar power plants using air. The solar flux distribution inside the receiver should be a priori known for its heat transfer analysis. Previous works have not considered characteristics of the solar flux although they change with radiative properties of receiver materials and receiver geometries. A numerical method, which is based on the Monte Carlo ray-tracing method, was developed in the current work. The solar flux distributions inside multi-channeled volumetric solar receivers were calculated when light is concentrated at the KIER solar furnace. It turned out that 99 percentage of the concentrated solar energy is absorbed within 15 mm channel length for the channel radius smaller than 1.5 mm. If the concentrated light is assumed to be diffuse, the absorbed solar energy at the channel entrance region is overpredicted while the light penetrates more deeply into the channel. Once the presented results are imported into the heat transfer analysis, one could examine effects of material property and geometry of the receiver on air temperature profiles.

Keywords : 다채널 태양열 흡수기(Multi-Channeled Solar Receiver), 집광 열유속(Concentrated Solar Flux), 몬테카를로 광선추적법(Monte Carlo Ray-Tracing Method)

1. 서 론

집광된 태양 에너지를 작동 매체에 전달하는 태양열 흡수기는 태양열 발전 기술의 핵심이다. 공기를 작동 매체로 쓰는 발전 방식을 위해 최근에는 체적식 태양열 흡수기(volumetric solar receiver)에 대한 연구가 활발하다.¹⁻⁷

체적식 흡수기에서 공기는 고집광 태양 복사 에너지로 가열된 다공성 흡수 소재 사이를 통과하면서 데워진다. 흡수기의 설계 및 성능평가를 위해 필요한 열전달 해석은 전도, 대류, 복사의 모든 현상을 고려해야 하므로, 기존의 연구들은 많은 가정을 사용하였다. 흡수기에서 열원인 집광된 태양 에너지 관련하여서도 예외는 아니다. 실제 다양한 집광 방식에 따라 흡수기 전면부에 도달하는 태양 열유속 분포가 다름에도 불구하고 많은 연구가 이를 확산 광원(diffuse light source)으로부터의 복사 에너지로 가정한다.¹⁻³ 더욱이, 확산 광원 가정을 쓰면서도, 흡수 소재의 물성이나 형상 변화에 따른 영향을 집광 열유속 모델링과 흡수기 열전달 모델링 모두에 일관성 있게 반영하는 연구도 거의 없다.

일관성 있으면서 적은 수의 가정을 사용하는 흡수기 열전달 해석을 염두에 두고, 본 연구는 집광 방식, 흡수 소재 물성 및 형상에 따라 흡수 소재 내부에 흡수되는 태양 열유속 변화를 조사하는 것에 초점을 두고 있다. 이를 위해 다채널(multi-channel) 형태의 체적식 흡수기를 대상으로, 몬테카를로 광선추적법(Monte Carlo ray-tracing method)에 기반한 채널 내부 열유속 계산 방법을 제시하였다. 개발된 방법을 통해 확산 광원과 한국에너지기술연구원(KIER) 태양로에 대해 열유속 분포를 계산하여 비교하였다.

2. 계산 방법

2.1 다채널 체적식 태양열 흡수기

체적식 태양열 흡수기는 공기가 통과할 수

있도록 다채널, 포말(foam), 메쉬(mesh) 등의 다공성 형태로 제작한다. 흡수기 소재는 높은 태양열 흡수율, 높은 열전도도, 열적 및 기계적 안정성, 내산화성, 내구성 등을 만족해야 한다.⁴ 그래서, 주로 SiC(silicon carbide) 또는 SiSiC(silicon-infiltrated silicon carbide)가 이용되는데, 근래에는 압출성형을 통해 그림 1과 같은 다채널 형태로 제작하는 기술이 발전하고 있다.⁵⁻⁶

그림 1. 다채널 형태 흡수 소재 및 체적식 흡수기

대부분의 다채널 체적식 흡수기의 열전달 해석에서 흡수기 전면부에 도달하는 태양 열유속의 분포는 균일하다고 가정한다.¹⁻² 이 가정은 단일 채널에 대해 독립적인 해석을 가능하게 한다. 그러면, Fluent와 같은 상용 프로그램을 통해 해석하거나, 추가적인 가정을 통해 채널 길이 방향의 1차원 열전달 문제로 간주할 수 있다. 채널 내부에서 흡수되는 태양 열유속 분포는 전도, 대류, 복사의 연립방정식으로 구성된 지배방정식에 열원으로서 포함된다.

압출을 통한 제작 시 금형에 따라 채널의 형상은 사각, 원형, 육각형 등이 가능하다. 본 연구에서 개발된 계산 방법이 채널의 형상에 관계없이 적용 가능하다. 하지만, 열전달 해석에서 흡수기 채널을 1차원 문제로 간주한다면, 상응하는 수력 반경을 가진 원형 채널로 통일하여 해석할 수 있다. 따라서, 아래 부분에서는 원형 채널을 대상으로 계산 방법을 서술하고 있다.

2.2 확산 광원

본 연구에서는 몬테카를로 광선추적법을

적용하여 채널 내부의 태양 열유속 분포를 계산하였다. 몬테카를로 광선추적법은 난수(random number)를 이용하여 확률적으로 광학이나 복사 열전달 현상을 모델링하는 방법이다. 다수의 광선을 생성하여 반사나 흡수와 같은 물리적 현상을 고려하면서 각각의 광선을 추적한 뒤, 광선 전체의 추적결과를 바탕으로 결과를 도출한다.⁸⁻⁹

그림 2. 광선 추적의 흐름도

그림 2는 광선 추적의 흐름도를 요약하고 있다. 첫 번째 단계는, 광선이 생성되는 위치 $\mathbf{r}_i$ 를 가상의 채널 입구 평면(그림 3에서 x - y 평면)에서 결정하는 과정이다. 공간상에서 균일한 지점에서 광선이 생성된다고 보면, 원통 좌표계를 바탕으로 식 (1)이 된다.

$$\mathbf{r}_i = (R\sqrt{\zeta_1}, 2\pi\zeta_2, 0) \quad (1)$$

여기서 모든 ζ 는 0에서 1범위에서 균일한 분포를 갖는 난수이다.

확산 광원으로부터 방사되는 광선은 모두 동일한 에너지 e_i 를 갖는데, 계산 편의를 위

해 값 1로 사용한다. 한편, 광선의 방향벡터 $\mathbf{s}_i$ 를 결정하는 천정각(zenith angle)과 방위각(azimuth angle)은 아래와 같다.

$$\theta_i = \sin^{-1}(\sqrt{\zeta_3}) \quad (2)$$

$$\phi_i = 2\pi\zeta_4 \quad (3)$$

그림 3. 광선 추적이 시행되는 채널 내부의 개략도

위에서 결정된 $\mathbf{r}_i$ 와 $\mathbf{s}_i$ 를 바탕으로 채널 내부의 표면과 만나는 교점을 구해서 반사되는 지점 $\mathbf{r}_r$ 을 계산할 수 있다. 반사될 때, 입사 광선은 표면의 흡수율 α 에 비례해서 흡수기 소재에 에너지를 전달하고, 반사율에 해당하는 나머지 부분($1-\alpha$)만을 갖고 반사된다. 반사된 광선의 방향벡터 $\mathbf{s}_r$ 계산은 소재표면에서 반사가 어떻게 발생하는지에 따라 달라진다. 일반적으로 열전달 모델에서 채널 내부 표면 간 복사를 고려할 때, 확산 반사를 가정한다. 그래서, 일관성 있는 해석을 위해 동일한 가정을 열유속 모델링에서도 사용하였다. 확산 반사의 경우에는 입사 광선의 방향에 상관없이 식 (2)과 (3)과 동일한 방식으로 $\mathbf{s}_r$ 이 계산된다.

반사 이후 갱신된 위치와 방향벡터를 기준으로 추적을 다시 수행한다. 추적하는 광선의

에너지가 너무 작아지거나 광선이 채널의 길이 방향으로 탈출할 때까지 다중 반사를 고려하면서 추적을 지속한다. 그리고 나서 그림 2의 흐름도를 따라 다음 광선을 생성하여 동일한 과정을 되풀이 한다. 충분한 개수의 광선 추적을 수행하고 흡수된 에너지와 위치를 이용하여 채널 내부에서 흡수되는 태양 복사 에너지 분포를 채널 길이 방향으로 구한다.

그림 4. KIER 태양로의 초점면에서 광선의 위치와 입사 각도에 따른 열유속 분포

2.3 KIER 태양로

확산 광원 가정이 아닌 실제 집광 방식에 의한 열유속 분포의 차이를 보이기 위해 KIER 태양로를 대상으로 채널 내부 열유속 계산 방법을 개발하였다. 참고문헌9에 개발된 알고

리즘에서 태양에서 시작된 광선의 추적을 초점면에서 종료하지 않고, 다채널 흡수기가 존재한다고 가정한 다음 각 채널 내부까지 추적을 시행하면 채널 내부에서 태양 열유속을 구할 수 있다. 하지만, 이 방법은 채널 입구 크기가 작아서 (주로 2 mm 이하) 채널 내부로 들어오는 광선의 개수 또한 작다. 결과적으로 의미 있는 결과를 얻기 위해서는 전체적으로 사용되는 광선의 개수가 매우 커야 하고 계산 시간이 증가하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 참고문헌9에 개발된 방법으로 채널 입구에 해당하는 가상 평면에서의 집광 열유속 분포를 먼저 구하고, 이 분포에 근거하여 광선들을 충분한 개수만큼 새로이 생성하여 추적을 시행하는 방법을 제시하고 있다. 즉, 광선 추적을 두 단계로 나누어 시행하였다. 제시된 방법은 흡수 소재의 물성이나 형상이 변할 때, 두 번째 단계인 초점면에서부터 광선 추적을 시행하므로 시간 절약이 가능하다.

초점면 중심에 위치한 단일 채널에 대해, 가상적인 입구 평면에 위치한 그림 3의 개략도와 일치하도록 국부적인 원통 좌표계를 생각해 보자. 그림 4(a)는 KIER 태양로 초점면에 들어오는 광선의 위치와 입사각도에 따른 열유속 분포이다. 여기서 입사각도는 초점면의 법선벡터 (국부 좌표계에서 z 축)와 입사광선 간의 각도이다. 그림 4(b)는 그림 4(a) 중에서 반지름 0.5, 1.0, 1.5 mm 경우만을 2차원 그래프로 보여준다. 광선이 입사되는 위치에 따라 입사각도에 따른 열유속 분포가 달라진다. 예를 들어, 초점면에 반경 R 이 1.5 mm 채널로 구성된 흡수기가 놓였다 가정하자. 그러면, 채널 입구에서 광선이 $|r| \leq 0.5$ 영역을 지나면, 초록색 점선이 나타내는 입사각도에 따른 열유속 분포를 따를 것이다. 유사하게 $0.5 < |r| \leq 1.0$ 영역이라면 빨간색 점선을, $1.0 < |r| \leq 1.5$ 영역에서는 파란색 실선을 각각 따를 것이다. 요약하자면, 그림 4의

분포는 광선 추적을 두 단계로 분리했을 때, 초점면에서 시작하는 두 번째 단계에서 광선이 생성되는 위치와 방향을 결정하는 함수이다. 그림 4의 결과는 KIER 태양로의 특성으로 다른 집광 방식을 사용한다면 분포는 달라질 것이다. 예를 들어, 그림 4에서 입사각의 범위는 $9^\circ \sim 49^\circ$ 에 국한되어 있다. 이는 KIER 태양로에서 포물반사판이 외경은 4.5 m, 내경은 0.75 m, 초점거리 4.98 m로 설계되었기 때문이다.

그림 4의 분포를 만족하는 광선의 방향벡터는 난수를 이용하여 샘플링 하는 방법 중에 acceptance - rejection 기법을 사용하였다. 10 먼저 식 (1)과 동일하게 $\mathbf{r}_i$ 를 선정하고, 임의의 θ_i 를 아래와 같이 계산한다. 여기서 θ_{MAX} 는 입사각의 최대값으로 그림 4에서는 49° 이다.

$$\theta_i = \sin^{-1}(\sin(\theta_{MAX})\sqrt{\zeta_5}) \quad (4)$$

생성된 광선의 $\mathbf{r}_i$ 와 θ_i 가 부등식 (5)를 만족하면 받아들이고(acceptance), 아니면 기각하고(rejection) 다시 광선을 생성한다.

$$f(\mathbf{r}_i, \theta_i)/f_{MAX} \leq \zeta_6 \quad (5)$$

위에서 함수 f 는 그림 4에 주어진 열유속 분포를 나타내고 f_{MAX} 는 최대값이다. 이렇게 결정된 $\mathbf{r}_i$ 와 θ_i 는 그림 4의 분포를 만족한다. 방향벡터의 방위각에 대해서는 등방성 가정을 사용할 수 있으므로, 식 (3)과 동일하게 계산하면 최종적으로 KIER 태양로에서 집광된 광선에 의한 $\mathbf{s}_i$ 가 결정된다.

그림 2의 흐름도의 두 번째 단계까지 위와 같이 광선의 방향벡터를 계산하면, 나머지는 확산 광원 가정과 동일한 절차를 따르면서 광선 추적을 시행하게 된다.

3. 결과 및 검토

개발된 방법을 통해 채널 내부에 조사되는 태양 열유속을 확산 광원과 KIER 태양로에 대해 계산하여 비교하였다. 채널의 전체 길이 L 은 100 mm까지 광선 추적을 시행하였고, 1000개의 노드를 사용하여 0.1 mm 간격으로 열유속을 저장하였다. 전체 광선의 개수를 10^6 만큼 사용하여 계산 결과 0.5% 이내에서 수렴되도록 하였다. 흡수기 전면부에 집광된 열유속의 크기가 1MW/m^2 으로 간주하여 계산된 채널 내부 열유속을 무차원화하였다.

그림 5. 반경 1mm 채널에서 깊이에 따라 채널 내부에 흡수된 태양 열유속 변화

먼저 반경이 1 mm인 채널에 대해서, 흡수 소재인 SiSiC의 광학 물성인 흡수율 α 의 변화를 반영하면서, 채널 내부에 흡수되는 태양 열유속을 채널 깊이의 함수로 그림 5에 나타내었다. SiSiC 제작 시에 Si 침투량에 따라 값이 변하지만, 일반적으로 SiSiC는 높은 흡수율을 나타내므로 흡수율 0.8 ~ 1 범위만 고려하였다. 확산 광원과 KIER 태양로 모두 매우 짧은 깊이에서 태양 복사 에너지가 흡수된다. 광원에 상관없이 약 3 mm 정도면 태양 복사 에너지의 90%가 흡수된다. 99% 흡수되는 깊이는 확산 광원은 약 10 mm, KIER 태양로는 약 6.5 mm이다. 깊이가 약 1 mm보

다 작을 때는 확산 광원에 의한 열유속이 높지만, 그 이상에서는 반대이다. 확산 광원은 모든 각도 범위에서 코사인 값에 비례하면서 방사하는 반면, KIER 태양로는 그림 4에 주어진 분포대로 $9^\circ \sim 49^\circ$ 범위에서 집중적으로 방사하기 때문이다. 태양에너지가 보다 깊은 위치에서 흡수된다면, 흡수 소재의 온도 한계 측면에서나 공기로 열전달 측면에서 유리할 것이다. 그림 5에서 KIER 태양로와 확산 광원에 대해서 깊이에 따른 흡수된 열유속이 약 1 mm 근방에서 역전이 되므로 어느 것이 유리하다고 판단하기는 어렵다. 실제 열전달 모델에 계산된 결과를 대입하여 둘 사이의 차이를 조사할 필요가 있다.

흡수율이 작아질수록 반사된 빛이 흡수되고 남은 에너지를 가지고 채널 속으로 더 깊이 들어간다. 결과적으로 흡수기 전면부에서 열유속은 작고 상대적으로 흡수기 안쪽에서 높은 열유속을 나타낸다. 하지만, 흡수율 차이가 크지 않으므로 열유속 변화는 크지 않다. 흡수율이 1이 아닌 경우 반사된 빛의 일부는 흡수되지 않고 채널 전면이나 끝을 통해 빠져 나올 수 있다. 흡수율이 0.9인 경우 약 2%, 0.8인 경우 약 5%가 흡수되지 않는다.

그림 6. 흡수율 0.9 채널에서 깊이에 따라 채널 내부에 흡수된 태양 열유속 변화

그림 6은, SiSiC의 흡수율 0.9일 때 채널 크

기를 바꾸면서, 흡수된 태양 열유속 분포의 변화를 보여주고 있다. 채널 크기가 증가할수록 채널 입구를 통해 내부로 유입되는 전체 태양 복사 에너지와 채널 내부에서 흡수되는 열유속 값도 증가한다. 그림 5와 마찬가지로, 동일한 반경에 대해 확산 광원 보다는 KIER 태양로에서 집광된 빛이 더 깊이 조사함을 알 수 있다. 반경이 커질수록 태양 에너지가 흡수되는 깊이도 증가하는데, 반경 0.5, 1.0, 1.5 mm에 대해 90%의 흡수 깊이는 각각 약 4.5, 3.0, 1.5 mm가 된다. 반경 1.5 mm일지라도 99% 흡수깊이는 15 mm 정도이므로 채널의 길이 100 mm는 태양 복사 에너지를 흡수하기에는 충분히 크다.

실제 집광 방식에 따른 열유속 변화를 보기 위해 본 연구는 KIER 태양로만을 고려하였다. 하지만, 태양로의 설계가 달라지거나 타워형 집광 방식이라면, 그림 4에서 주어진 입사각 분포가 바뀌면서 채널 내부 열유속 분포도 변할 것이다.

본 연구에서는 원형 채널 형상만을 고려하여, 열유속 분포가 간단하게 1차원 함수로 계산되었다. 채널 형상이 바뀐다면 그에 상응하도록 열유속 분포는 다차원 함수가 되면서 바뀔 것이다. 형상은 열전달 모델에서 결정한 다음 이에 따라 열유속을 계산하여야 한다. 일반적으로 흡수기 채널에서 입구 대비 길이의 형상비가 매우 크고 소재의 흡수율이 크므로, 전반적으로 채널 입구에 집중되는 흡수 열유속 분포를 나타낼 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 다채널 체적식 태양열 흡수기의 열전달 해석에 필요한 흡수기 내부 집광 열유속의 분포를 계산하는 방법을 몬테카를로 광선추적법을 이용하여 개발하였다. 계산 효율을 위해 광선 추적을 두 단계로 나누어 시행하였다. 확산 광원 가정과 KIER 태양로

에서 집광된 태양 에너지에 대해 열유속 차이를 비교하였다. KIER 태양로는 설계 특성으로 인해 $9^{\circ} \sim 49^{\circ}$ 범위에서만 빛이 조사되므로, 확산 광원에 비해 전면부에서 흡수된 열유속이 작고 좀 더 깊이까지 흡수가 진행되었다. 채널 입구 반경이 1.5 mm 보다 작을 때, 태양 에너지는 15 mm 이하 채널 깊이에서 99% 이상 흡수되었다.

개발된 방법은 다양한 집광방식에 대해 흡수 소재의 광학 물성이나 형상 변화에 따라 변하는 흡수된 태양 열유속 변화를 예측 가능하다. 얻어진 결과를 열전달 해석에 반영한다면, 작동 매체인 공기의 출구 온도를 계산하여 흡수기의 성능을 평가할 수 있다. 향후에 열전달 모델링을 통해 집광 방식에 따른 흡수기 성능 평가 및 설계에 본 연구에서 개발된 방법을 활용할 예정이다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. Carotenuto, A. et al., Solar Energy, 1991, Vol. 46, pp. 241-248.
2. Carcia-Casals, X. and Ajona, J. I., Solar Energy, 1999, Vol. 67, pp. 265-286.
3. Pitz-Paal, R. et al. Solar Energy, 1997, Vol. 60, pp. 135~150.
4. Fend, T. et al., Solar Energy Materials & Solar Cells, 2004, Vol. 84, pp. 291-304.
5. Fend, T. et al., Energy, 2004, Vol. 29, pp. 823-833.
6. Agrafiotis, C. C. et al., Solar Energy Materials & Solar Cells, 2007, Vol. 91, pp. 474-488.
7. Albanakis, C. et al., Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, Vol. 33, pp. 246 - 252.
8. Siegel, R. and Howell, J. R., Thermal Radiation Heat Transfer, 4th ed., Taylor & Francis, New York, 2002.
9. 이현진 외, 태양에너지학회 추계학술발표대회 논문집, 2010, Vol. 30, pp. 153-158.
10. Press, W. H. et al., Numerical Recipes in C, 2nd ed., Cambridge, UK, 1992.