

몬테카를로 광선추적법을 이용한 태양로의 열유속 해석

이현진^{*†} · 김종규^{*} · 이상남^{*} · 강용혁^{*}

^{*} 한국에너지기술연구원 태양열지열연구센터

Heat-Flux Analysis of Solar Furnace Using the Monte Carlo Ray-Tracing Method

Hyun Jin Lee^{*†}, Jong Kyu Kim^{*}, Sang Nam Lee^{*} and Yong Heack Kang^{*}

^{*} Solar Thermal and Geothermal Research Center, Korea Institute of Energy Research

(Received December 16, 2010 ; Revised August 9, 2011 ; Accepted August 10, 2011)

Key Words : Concentration(집광), Heat Flux(열유속), Monte Carlo Ray-Tracing Method(몬테카를로 광선추적법), Solar Furnace(태양로)

초록: 태양의 집광 열유속을 이해하는 것은 태양에너지를 이용하는 시스템의 해석과 설계에 중요하다. 본 연구는 우수한 유연성과 확장성을 가진 몬테카를로 광선추적법에 기반하면서 태양주연감광과 반사판 표면 기울기 에러를 고려하는 알고리즘 개발과 이를 통한 태양 열유속 해석에 초점을 맞추고 있다. 검증을 위해 한국에너지기술연구원 태양로에서 측정된 열유속과 비교했을 때, 모델링 결과가 측정 에러 범위인 10% 이내에서 잘 일치하였다. 개발된 모델을 통해 태양로의 집광 성능을 2 mrad의 추적 정밀도에 최대도 도달 가능한 집광비가 4400 sun으로 평가하였다. 열유속의 측정 위치에 따른 변화와 수광각에 따른 분포를 통해 화학반응기나 보조집광기 설계에 필요한 상세한 정보를 제공하였다.

Abstract: An understanding of the concentrated solar flux is critical for the analysis and design of solar-energy-utilization systems. The current work focuses on the development of an algorithm that uses the Monte Carlo ray-tracing method with excellent flexibility and expandability; this method considers both solar limb darkening and the surface slope error of reflectors, thereby analyzing the solar flux. A comparison of the modeling results with measurements at the solar furnace in Korea Institute of Energy Research (KIER) show good agreement within a measurement uncertainty of 10%. The model evaluates the concentration performance of the KIER solar furnace with a tracking accuracy of 2 mrad and a maximum attainable concentration ratio of 4400 sun. Flux variations according to measurement position and flux distributions depending on acceptance angles provide detailed information for the design of chemical reactors or secondary concentrators.

- 기호설명 -

- e : 광선의 에너지 (W)
- I : 광선의 강도 ($W/m^2/sr$)
- N : 광선의 전체 개수
- n : 반사판의 법선벡터
- q : 열유속 (W/m^2)
- R : 0~1 범위의 난수
- s : 광선의 방향벡터
- s_{i0} : 태양디스크 중심 방향벡터
- θ : 천정각
- σ : 반사판 기울기 에러의 표준편차

- ϕ : 방위각
- 하첨자
- DNI : 직달일사량 (direct normal insolation)
- i : 입사
- FR : 평면반사판 (flat reflector)
- r : 반사

1. 서론

태양로(solar furnace)는 고온 화학반응에 필요한 열에너지를 공급할 수 있도록 태양에너지를 모으는 장치이다. 이와 같은 화학반응으로 얻어지는

† Corresponding Author, hj.lee@kier.re.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

생성물은 태양에너지가 연료의 형태로 전환된 태양연료(solar fuel)가 된다.⁽¹⁾ 현재 태양연료 생산 기술은 주로 메탄과 같은 화석연료를 화학반응하여 수소를 생산하는 것에 초점을 맞추고 있다. 생산된 수소는 연료전지와 같은 별도의 시스템이나 태양열 복합발전(integrated solar combined cycle)에 연료로 사용이 가능하다.

Fig. 1 은 한국에너지기술연구원에 설치된 태양로를 보여준다. 태양빛을 초점부에 모으는 포물반사판과 태양을 추적하면서 포물반사판으로 수평하게 빛을 보내는 평면반사판으로 구성된다. 태양로의 성능은 태양 직달일사량(direct normal insolation)에 대한 초점면에 도달하는 열유속(heat flux)의 비율인 집광비(concentration ratio)로 판단한다. 포물반사판의 초점부에 놓이는 화학반응기를 설계하기 위해서는 집광비뿐만 아니라 더욱 상세한 열유속에 대한 정보가 필요하다. 예를 들어, 다양한 설계인자에 따른 열유속의 공간적 분포나 입사각 분포를 알아야 화학반응기 형상을 결정할 수 있다.

초기 열유속 모델링은 콘광학(cone optics)에 근거하여 작게 나눈 반사판 조각의 형상과 콘형태로 반사된 빛을 킨볼투선하여 얻었다. 하지만, 편이성과 확장성 때문에, 지금은 몬테카를로 광선추적법을(MCRT, Monte Carlo ray-tracing method)를 이용한

열유속 모델링이 대세를 이루고 있다.⁽²⁾ 몬테카를로 광선추적법에 기반한 많은 상용프로그램이 개발되었지만, 반사판의 개수가 많거나 화학반응기 전면부에 보조집광기가 있다면 상용프로그램으로 열유속을 모델링하는 것은 용이하지 않다. 따라서, 본 연구는 몬테카를로 광선추적법을 이용하여 태양로의 열유속을 모델링하는 방법을 개발하고, 이를 통해 태양로 열유속의 변화 특성을 조사하는데 초점을 맞추고 있다.

2. 모델링 개발

2.1 몬테카를로 광선추적법

몬테카를로 광선추적법은 복잡한 광학이나 복사 열전달 현상을 난수(random number)를 이용하여 확률적으로 접근하는 방법이다.⁽³⁾ 몬테카를로 광선추적법에서는 다수의 광선을 생성하여 반사나 흡수와 같은 물리적 현상을 고려하면서 각각을 추적하고, 전체 광선의 추적결과를 바탕으로 모델링 결과를 도출한다. 몬테카를로 광선추적법은 시스템이 복잡하여 다수의 물체에서 다중 반사를 포함하더라도 반복적인 계산으로 모델링 할 수 있다. 본 연구에서는 몬테카를로 광선추적법을 기반하면서 한국에너지기술연구원의 태양로를 대상으로 열유속 모델링 방법을 개발하였다. Fig. 2 는 몬테카를로 광선추적법의 계산 흐름도를 보여준다. 흐름도와 아래에 설명되고 있는 각각의 프로세스를 일반화한다면, 다수의 반사판을 가진 다양한 형태의 태양로에 대한 열유속 해석으로 확장도 가능하다.

2.2 태양광 모델링

Fig. 2 의 흐름도에서 첫 번째 단계는, 태양에서 나오는 광선의 생성으로, 광선의 방향벡터와 광선이 전달하는 에너지를 결정하는 과정이다. 우선 2차원의 태양 디스크(solar disk)를 포함하는 가상의 평면에 국부좌표계를 선정한다. 태양광은 태양의 실제크기를 감안한 태양 디스크 범위 내에서 균일한 방향으로 방사(emission)한다. 태양 디스크의 반각(half angle) θ_{SUN} 값으로 0.266° (4.65 mrad)를 사용하였다. 0~1 범위에서 균일한 분포를 갖는 난수 R 를 이용하면, 국부좌표계에서 광선의 방향벡터를 결정하는 천정각(zenith angle)과 방위각(azimuth angle)은 아래와 같다.

$$\theta_i = \sin^{-1}(\sin \theta_{SUN} \sqrt{R_1}) \tag{1}$$

$$\phi_i = 2\pi R_2 \tag{2}$$

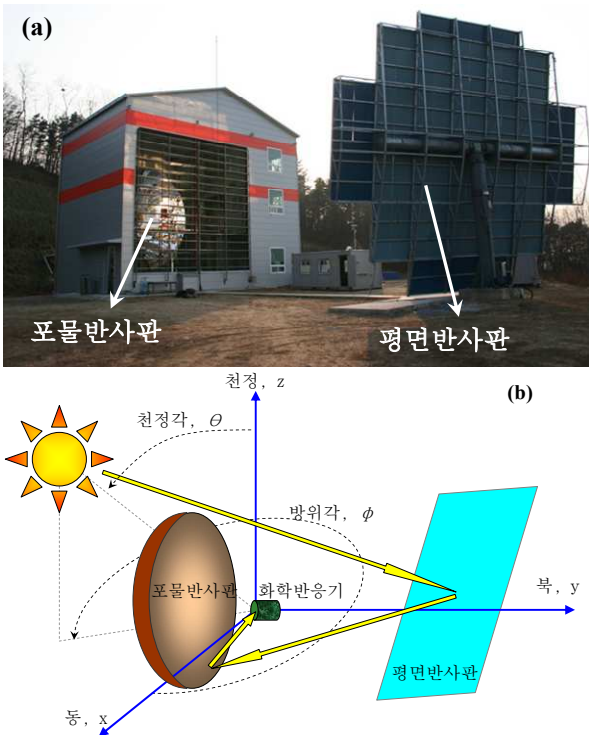


Fig. 1 Solar furnace at KIER: (a) picture, (b) its schematic diagram and global coordinates

언어진 국부좌표계에서 방향벡터를 광원인 태양의 천정각과 방위각만큼 회전변환하면 전역좌표계에서 광선의 방향벡터 s_i 가 된다. 태양의 천정각과 방위각은 위도와 경도를 안다면 시간의 함수로 계산이 가능하다.⁽⁴⁾ 이와 같이 광선추적에 참여하는 물체의 국부좌표계에서 계산된 벡터를 전역좌표계로 회전변환 또는 그 역변환은 광선추적법에서 흔하게 적용된다.

입사광선의 방향을 결정한 다음에는 각각의 입사광선이 전달하는 태양 복사에너지 e_i 를 결정하여야 한다. 태양 광선은 에너지를 태양 디스크에서 골고루 방사하지 않고 중심에서 반경방향으로 멀어질수록 강도가 줄어든다. 주연감광(周緣減光, limb darkening)이라 불리는 현상으로, 태양 디스크의 반각범위에서 빛의 강도는 θ_i 의 함수가 된다. Fig. 3은 몇 가지 주연감광 모델을 보여준다. 가장 간단한 모델은 균일한 강도를 의미하는 필박스(pillbox) 모델로, 주로 해석적 접근에 많이 사용되지만 실제 태양광을 정확하게 표현하지 못한다. Buie의 모델이 가장 최근에 측정된 데이터를 바탕으로 작성되었으므로, 본 연구에서는 Buie가 제시한 모델을 사용하였다. 수식은 아래와 같다.⁽⁷⁾

$$\frac{I_i}{I_0} = \frac{\cos(326\theta_i)}{\cos(308\theta_i)} \quad (3)$$

태양 디스크 영역에서 방사뿐만 아니라 태양 주변의 (circumsolar) 후광(aureole)도 태양 복사에너지를 차지한다. 태양 빛이 대기 중에서 산란하여 발생하며, 대략 2.5° (43.6mrad) 범위에서 영향을 준다. 태양 주변의 효과는 날씨가 맑을 때 대기 상태에 크게 의존하며, 직달일사량이 낮을 때 영향이 크고 일반적으로 10% 정도 이하이다.⁽⁸⁾ 광선이 태양 디스크(0° ~ 0.266°)와 태양 주변(0.266° ~ 2.5°) 중 어디에서 들어오는지 구별하기 위해서는 적어도 태양 디스크 반각만큼의 수광각(acceptance angle)을 가진 직달일사량계(pyrheliometer)가 필요하다. 하지만, 상용화된 직달일사량계의 수광각은 주로 2.5° 정도이므로 별도의 제작이 요구된다. 위 사항들을 감안하여, 본 연구에서는 태양 주변에서 발생하는 입사는 고려하지 않았다. 즉, 측정된 직달일사량이 모두 태양 디스크에서 방사한다고 가정하였다.

일반적으로 광선추적법에서는, 광선의 방향과 에너지뿐만 아니라, 광원의 위치도 결정한 다음 첫 번째 반사면까지 광선 추적을 시행해야 한다. 그러나, 태양복사의 확산(diffuse) 성질을 감안하여,

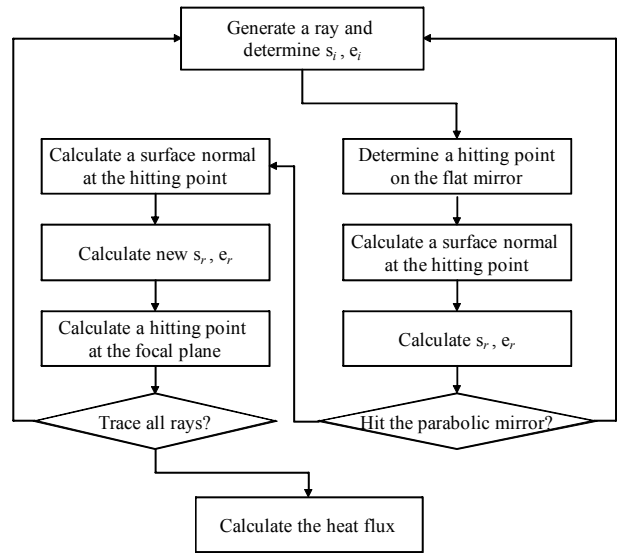


Fig. 2 Flow chart of the Monte Carlo ray-tracing method developed for the KIER solar furnace

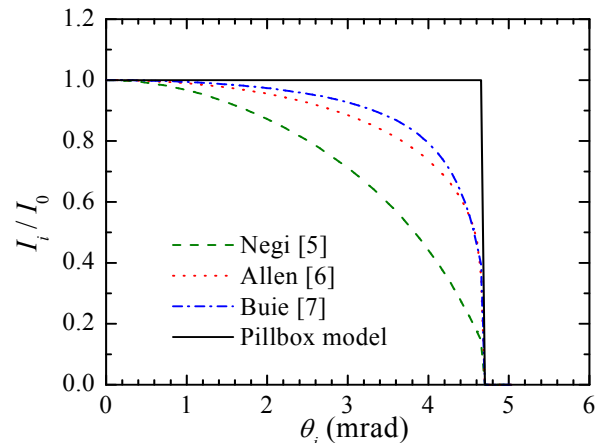


Fig. 3 Comparison of solar limb darkening models

첫 번째 반사면인 평면반사판에 균일한 간격의 지점을 잡고, 각 지점마다 방향벡터 s_i 로 입사되는 광선이 도달하는 것으로 간주하였다.

2.3 반사 모델링

입사광선의 생성과 반사면에 도달지점을 정한 다음, 반사 또는 흡수 현상을 모델링하기 위해서는 도달 지점의 법선벡터를 먼저 구해야 한다. 이 과정에서도 반사면의 법선벡터를 국부좌표계에서 먼저 결정한 후에 전역좌표계로 회전변환한다.

국부좌표계에서 반사판이 이상적으로 원하는 표면 형태로 구현되지 않으므로 기울기 에러를 고려하여 법선벡터를 결정한다. 기울기 에러는 정반사(specular reflection) 법칙에 의해 정의되는 이상적

인 표면의 법선벡터와 실제로 반사된 표면의 법선 벡터 사이의 차이이다. 다양한 종류의 원인으로 기울기 에러가 발생한다. 예를 들어, 반사판 설치 에러, 태양 추적 에러, 구동부의 흔들림이나 편향으로 인한 에러, 반사판 표면 곡률 에러 등이 있다. 이러한 기계적인 에러뿐만 아니라, 모델링에서는 광학적인 에러도 기울기 에러에 포함한다. 표면의 미세한 불순물이나 거칠기에 따라 빛의 산란이 발생하여 반사 방향이 정반사에서 벗어날 수 있다. 이렇게 이상적인 반사 방향에서 벗어나는 현상 모두를 기울기 에러에 반영한다. 왜냐하면, 각각의 에러 원인에 대한 기여 정도를 구분하기 어려운데다가 현상적으로는 반사 방향이 정반사 방향에서 이탈하게 되는 동일한 방식으로 나타나기 때문이다.⁽⁹⁾ 흔히 반사판 기울기 에러는 집광 설비의 추적 정밀도를 나타내는 지표로 사용한다.

원인에 따라 편향된 구동부로 인한 에러 등은 방향성이 있을 수도 있지만, 일반적으로 다양한 원인으로 인해 기울기 에러는 방향성 없이 정규분포를 따른다고 가정한다. 결과적으로 반사판 표면에서 법선벡터를 천정각과 방위각으로 표현한다면, 기울기 $\tan\theta_n$ 는 표준편차 σ 의 정규분포를 따르고 방위각은 균일분포를 따른다. 따라서, 아래와 같이 법선벡터의 천정각과 방위각을 결정한다.

$$\theta_n = \tan^{-1}\left(\sqrt{-2\sigma^2 \ln R_3}\right) \quad (4)$$

$$\phi_n = 2\pi R_4 \quad (5)$$

위에서 얻은 반사판 국부좌표계에서 법선벡터는 평면반사판의 천정각과 방위각을 바탕으로 회전 변환하여 전역좌표계에서 법선벡터 \mathbf{n} 을 구한다. Fig. 1에서 평면반사판 시스템은 태양광선이 포물반사판에 수평으로 입사할 수 있도록 위치한다. 즉, 평면반사판 시스템의 방향 \mathbf{n}_{FR} 은 입사면(plane of incidence) 위에서 반각에 위치하도록 결정하고, 이를 통해 평면반사판의 천정각과 방위각을 계산하여 회전변환에 사용한다. 만일 반사면이 곡면이라면 국부좌표계의 천정각과 방위각은 반사지점마다 달라진다. 일반적으로 반사 표면의 방정식이 $f(x, y, z)=0$ 라면, 법선벡터는 $\nabla f / |\nabla f|$ 로 표현되고 이를 통해 국부좌표계의 천정각과 방위각을 계산한다.

반사가 일어날 때, 입사광선의 진행방향과 전달하는 에너지가 바뀐다. 일반적으로 반사는 직달(direct)과 확산 성분이 존재하므로 이를 표현하는

함수인 양방향반사율(bidirectional reflectance)로 광선의 반사 방향과 반사된 에너지를 결정한다.⁽³⁾ 하지만, 태양집광에서는 직달 성분만이 관심이므로, 정반사 방향벡터 \mathbf{s}_r 를 아래와 같이 결정한다.

$$\mathbf{s}_r = \mathbf{s}_i - 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{s}_i)\mathbf{n} \quad (6)$$

반사 시에 입사광선이 전달하는 에너지에 반사율을 곱해 반사율만큼만 반사광선이 전달하고 나머지는 흡수나 산란 등으로 손실하는 것으로 간주한다. 반사율은 입사각의 함수임을 염두에 두어야 한다. 일반적으로 작은 입사각에 대해서 태양열 집광관의 반사율 변화는 무시할 만 하지만, 입사각이 크거나 표면이 먼지 등으로 심각하게 오염되어 산란과 흡수 효과가 큰 경우는 변화를 고려하여야 한다.

2.4 초점면의 열유속 계산

Fig. 2의 흐름도를 따라, 평면반사판을 떠난 광선은 다시 입사광선이 되어 포물반사판에서 반사되어 유사한 광선추적과정을 거쳐 최종적으로 초점면에 도달한다. 초점면에서 도달지점 별로 광선의 강도를 합하여 열유속 분포 등의 원하는 계산을 수행한다.

몬테카를로 광선추적법에서 전체 입사광선 강도의 합이 실제 태양복사에너지와 같아야 한다. 직달일사량계로 측정된 직달일사량을 알고 있을 때, 추적에 사용한 모든 광선의 입사광선의 에너지는 같아야 한다. 평면반사판에 도달하는 각 광선의 에너지는 평면반사판 시스템의 방향벡터 \mathbf{n}_{FR} 와 태양 광선 방향벡터 \mathbf{s}_i 사이 각의 코사인($-\mathbf{n}_{FR} \cdot \mathbf{s}_i$)을 곱하여 얻어진다. 그런데 태양 디스크의 반각이 0.266° 으로 매우 작으므로 코사인 값이 각각의 광선마다 크게 변하지 않는다. 따라서 태양 디스크의 중심을 가리키는 방향벡터 \mathbf{s}_{i0} 를 대표값으로 이용 가능하다. 평면반사판의 면적이 A 일 때, 아래와 같은 등식이 성립한다. 그리고, 이를 바탕으로 초점면에 도달한 열유속을 환산해야 한다.

$$\sum_N I_i = q_{DNI}'' A (-\mathbf{n}_{FR} \cdot \mathbf{s}_{i0}) \quad (7)$$

몬테카를로 광선추적법에서 추적한 광선의 개수 N 이 충분히 많아서 계산 결과가 광선 개수 상관없어야 한다. 경우에 따라 필요한 광선의 개수가 매우 커서 계산 시간이 증가하는 단점이 있다. 계

산 결과에 평활함수(smoothing function)를 적용하면 확률 계산에서 발생하는 노이즈를 줄일 수 있어서 본 연구에서는 Garcia의 모델을 사용하였다.⁽¹⁰⁾

3. 모델링 검증과 해석

3.1 모델링 결과 검증

Fig. 1에서 한국에너지기술연구원에 설치된 포물반사판의 외경은 4.5 m, 내경은 0.75 m이다. 초점거리는 4.98 m로 설계하여 상응하는 림각(rim angle)은 48°이다. 초점부에 놓인 화학반응기의 간섭을 고려하여 내경 안쪽으로는 반사판을 제거하였다. 실제 평면반사판은 반사된 모든 광선이 포물반사판에 도달할 수 있게 하기 위하여, 0.9 x 0.75 m² 사각형 반사판 180매를 원형에 유사하도록 배치하였다. 그런데 열유속을 모델링에서는 계산상의 편의를 위해 12 x 12 m²의 정사각형으로 간주하였다. 포물반사판과 평면반사판 간 거리는 35 m

이다. 반사판은 3.2 mm 두께의 저철분 유리에 알루미늄을 후면 코팅하여 만들었다.

우선 태양로 해석을 위해 적절한 광선의 개수를 결정하기 위해서, 기울기 에러가 없고 반사율이 0.9인 경우에서 열유속 계산 결과의 수렴성을 조사하였다. Fig. 4는 초점면에서 격자 간격이 1 mm일 때 열유속 분포와 그 중심 단면에서 열유속 프로파일의 변화를 보여준다. 전체 광선 개수가 10⁸일 때 결과와 비교하여, 개수가 10⁷일 때 평활함수 사용에 따라 열유속 프로파일에서 노이즈에 의한 변동이 많이 줄어든다. Fig. 4(b)에서 광선 개수가 10⁸일 때를 기준으로 열유속 값이 500 W/m² 이상인 격자점에 대해, 평활함수를 사용하면 에러의 평균값이 1.9%에서 0.9%로 감소한다.

동일한 방식으로 계산된 에러의 평균값을 다양한 광선의 개수에 대해 Fig. 5에 도시하였다. 에러의 평균이 2% 이하가 되기 위해서, 평활함수 없는 광선 개수가 10⁷이 되어야 하지만 평활함수가 있다면 10⁶개만으로도 가능하다. 즉, 평활함수

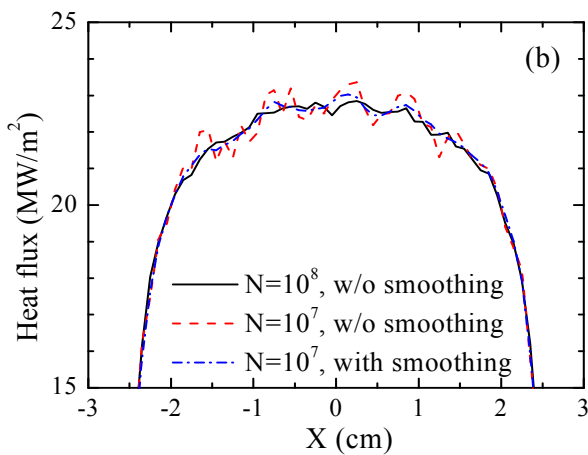
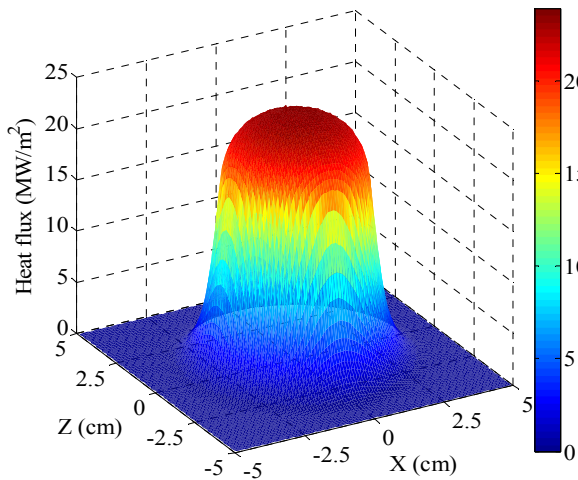


Fig. 4 Heat flux distribution at the focal plane: (a) 3D distribution with 10⁸ rays, (b) effect of the smoothing function

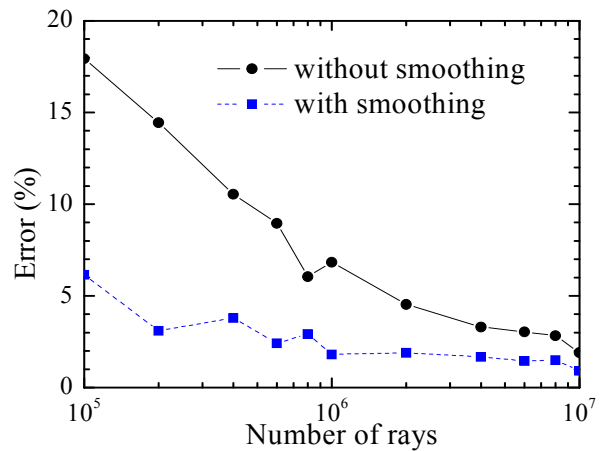


Fig. 5 Convergence depending on the number of rays

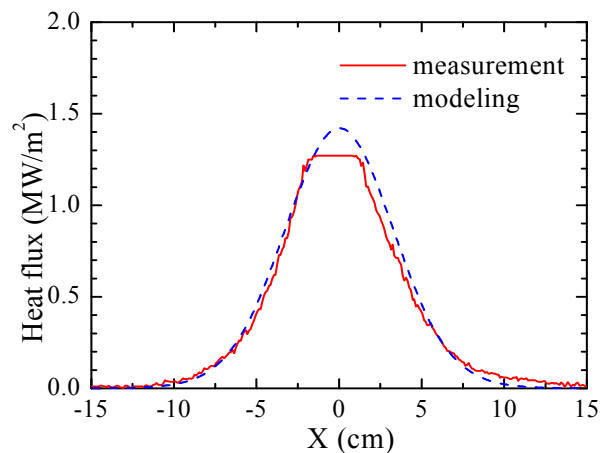


Fig. 6 Heat flux comparison between measurement and modeling

는 계산 결과의 빠른 수렴을 도와주고 있다. 이후로는 에러가 평균적으로 1% 이하가 되도록 10^7 개 광선과 평활함수를 사용하여 열유속을 계산하였다.

Fig. 6은 플럭스 맵핑 (flux mapping)으로 불리는 열유속 분포 측정방법의 결과와 비교를 보여준다.⁽¹¹⁾ 플럭스 맵핑은 한 지점에서 라디오미터 (radiometer)를 이용하여 열유속을 측정하고, 나머지 영역에서는 CCD 카메라로 찍은 빛의 세기를 수치로 변환하여 열유속 분포를 얻는 기술이다. 측정은 2009년 6월 25일 15시 22분에 실시하였고, 당시 직달일사량은 600 W/m^2 이다. 라디오미터는 수광부에 도달한 열유속의 평균값을 주는데, 측정시 초점면에 중앙부에 위치하였기 때문에 Fig. 6의 열유속 측정값은 중앙에서 약 25 mm 범위에서 변하지 않는다. 평면반사판과 포물반사판의 반사율과 기울기 에러를 변수로 하여, 계산된 열유속이 측정값과 유사하도록 반복 계산을 수행하였다. 반사율은 0.65 이고 기울기 에러가 2 mrad 일 때, 열유속 값이 250 W/m^2 이상인 경우에 대해 계산값 에러의 평균이 9.6%가 되었다.

플럭스 맵핑 방법의 측정 에러는 크게 CCD 카메라의 전기 및 광학적 에러, 확산판의 설치 및 광학 에러, 수치 해석 과정의 에러로 구분된다. Ulmer 등은 단일 지점에서 열유속의 최대 에러가 10.6% 만큼 클 수 있음을 보였다.⁽¹²⁾ 측정 에러 범위를 감안하면, 본 연구에서 개발된 방법에 근거한 열유속 모델링 결과가 합리적인 수준이라고 판단된다. 열유속 측정 당시의 반사율 값에 대한 정보가 부족하고 기울기 에러 값의 측정이 어려우므로 모델링에 사용된 값과 실제 값에 대한 비교는 어렵다. 현재, 정확도를 높이도록 열유속 측정 방법을 개선하고 있다. 향후에 반사판의 반사율과 표면 기울기 측정을 계획하고 있으므로, 이후에 개발된 모델에 대해 피팅 파라미터 없이 추가 검증이 가능할 것이다. 현재로서는 모델과 측정을 상호보완적으로 사용함으로써 열유속에 대한 정확한 해석이 가능할 것으로 기대하고 있다.

한편 최대 열유속이 1.42 MW/m^2 이므로 직달일사량 600 W/m^2 으로 나누면, 측정 당시 태양로의 최대 집광비는 2367 sun 이 된다.

3.2 열유속 해석

위에서 검증된 모델링 방법을 바탕으로 한국에너지기술연구원의 태양로에 대한 열유속 분석을 시행하였다. 특별한 언급이 없다면, 태양의 위치는 2010년 6월 21일 정오를 기준으로 계산되었고,

직달일사량은 1 kW/m^2 이다. 두 개 반사판의 반사율값은 0.9 를 사용하였다.

Fig. 7은 반사판 기울기 에러에 따른 초점면에서 열유속의 변화와 차단비(interception ratio)를 비교하고 있다. 차단비는 초점면에 도달하는 전체 열량 대비 초점에 중심이 놓인 원형 평면에 도달하는 열량의 비율이다. 차단비는 특정한 열적 용량이 필요한 화학반응기의 개구부의 크기를 결정하는데 쓰인다. Fig. 7(a)에서 기울기 에러의 증가에 따라 열유속 또는 집광비는 줄어들고 있다. 기울기 에러가 없는 이상적인 태양로에 비해 표준편차 2 mrad의 기울기 에러를 갖는 한국에너지기술연구원 태양로는 최대 열유속이 16.0 MW/m^2 에서 4.4 MW/m^2 로 72% 감소한다. 이는 기울기 에러가 열유속에 상당한 영향을 주는 것을 증명하면서, 태양로의 최대 집광비는 4400 sun 정도임을 제시하고 있다. 한편, 개구부 반지름 5cm의 화학반응기가 있다면, Fig. 7(b)는 기울기 에러의 표준편차가 1 mrad, 2 mrad, 3 mrad 일 때 차단비가 각각 0.93, 0.64, 0.40 임을 보여준다. 기울기 에러가 없을 때

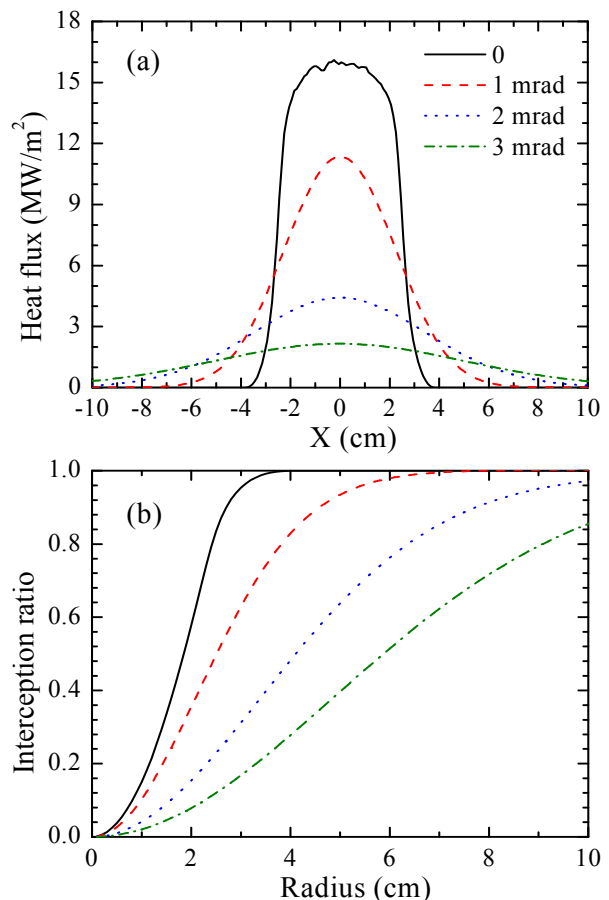


Fig. 7 Slope error effects: (a) heat flux profile, (b) interception ratio

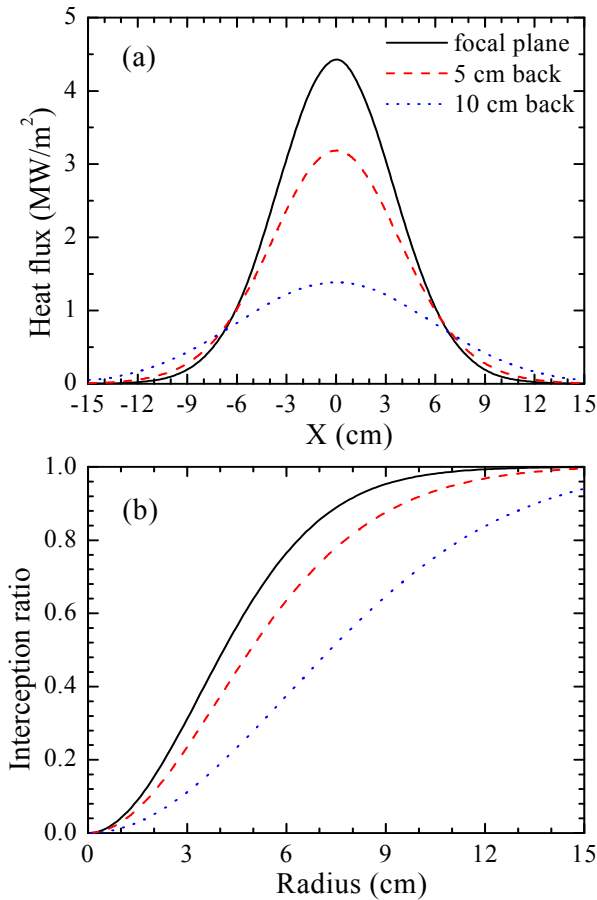


Fig. 8 Effect of deviations from the focal plane: (a) heat flux profile, (b) interception ratio

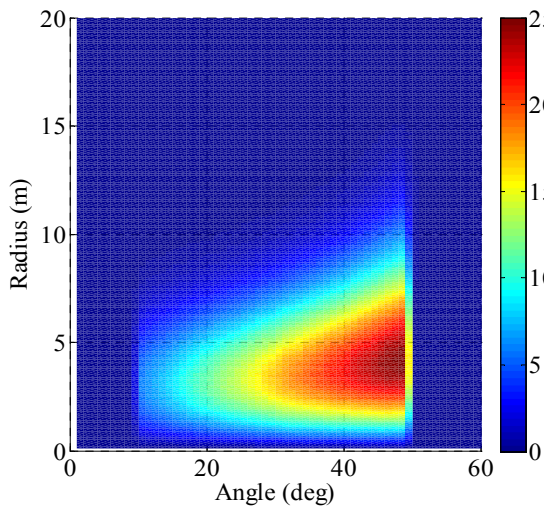


Fig. 9 Angular distribution of rays arriving at the focal plane

전체 집광 열량이 47.3 KW 이므로, 2 mrad 기울기 에러의 태양로에서 화학반응기는 30.2 KW 정도만 사용 가능하다.

열유속 측정 위치 영향성을 조사하기 위해 초점면에서 5 cm 와 10 cm 뒤로 떨어진 가상면에서 열

유속과 차단비를 조사하였다. Fig. 8(a)에서 예상대로 초점면에서 멀어질수록 열유속이 감소한다. 5 cm 와 10 cm 뒤에서 최대 열유속은 초점면 대비 72%와 31%로 줄어든다. Fig. 8(b)에서 반지름 5cm 화학반응기에 대해 차단비는 초점면에서 0.64 이지 만, 5 cm 뒤에서는 0.51로 10 cm 뒤에서는 0.28로 각각 80%와 44% 줄어든다. Fig. 8 에 나타내지는 않았지만, 앞으로 측정 위치가 이동된 경우에도 동일한 거리만큼 뒤로 이동한 계산 결과와 유사한 것으로 나타났다. 참고로 이 계산에서 기울기 에러는 2 mrad 값이 사용되었다. Fig. 8 과 같이 초점면이 아닌 지점에서의 열유속 분포는 화학반응기 설치 에러의 영향뿐만 아니라 반응기 전면 부에 설치된 보조집광기나 밀폐용 유리창에 떨어지는 태양에너지를 구할 때 사용할 수 있다.

지금까지 제시된 열유속이나 차단비는 집광 성능 평가나 화학반응기 설계에 있어서 가장 기본적인 정보이다. 보조집광기나 화학반응기 내부의 동공(cavity) 형상을 설계할 때는 보다 많은 열유속 정보가 필요하다. 태양로의 집광 성능을 높이기 위해 CPC (compound parabolic concentrator) 형태의 보조집광기를 추가로 화학반응기 앞에 설치 한다고 하자. CPC 의 집광 성능을 결정하기 위해 입구부 크기와 수광각을 알아야 한다. 이는 Fig. 9 에 제시된 초점면에서 거리와 집광된 광선의 각에 따른 열유속 분포를 통해 얻어진다. 여기서 각도는 초점면을 극좌표계로 표현했을 때의 각도가 아니라, 초점면의 법선벡터와 입사광선 간의 각도이다. 한국에너지기술연구원 태양로의 포물반사판 외경은 4.5 m, 내경은 0.75 m 이므로, Fig. 9 에서 보듯이, 모든 광선은 약 9° ~ 50° 범위의 수광각에서 초점면에 입사되고 많은 광선이 30° 이상의 각도를 갖는다. 일반적으로 CPC 는 30° 이하 수광각에서 집광 성능이 우수하므로, Fig. 9 에서 열유속 분포는 CPC 를 이용한 추가 집광이 한국에너지기술연구원의 태양로에 효율적이지 못함을 증명한다.

4. 결론

본 연구의 결론을 요약하면 아래와 같다.

- 태양의 직달일사량과 주연감광, 반사판의 기울기 에러와 반사율을 고려한 태양로의 열유속 해석 도구를 개발하였다. 몬테카를로 광선추적법 알고리즘 기반으로 하였으며, 평활함수를 적용하여 계산 결과의 빠른 수렴을 도모하였다.
- 라디오미터와 CCD 카메라를 이용한 열유속 측정값과 비교했을 때, 모델링 에러가 10% 보다

작았다. 측정값의 정확도를 감안한다면, 개발된 알고리즘을 통해 얻어진 열유속 계산값은 타당하다고 볼 수 있다. 현재 열유속 측정 방법의 개선이 진행 중이며, 향후에 개발된 모델의 추가 검증 및 해석을 수행할 것이다.

- 반사판 기울기 에러가 집광 성능에 주는 영향이 지대함을 보였고, 2 mrad 수준으로 한국에너지기술연구원 태양로의 추적 정밀도를 예측하였다. 태양로의 도달 가능한 최대 집광비는 4400 sun 정도이고, 집광 성능 개선에 보조집광기의 추가 설치가 적합하지 않음을 보였다.

- 대부분의 집광형 태양열 발전설비가 평면반사판과 포물반사판의 조합으로 구성되어있기 때문에, 비록 본 연구에서는 태양로에만 초점을 맞추었지만, 개발된 알고리즘을 확장함으로써 다양한 설비에 폭 넓게 적용할 수 있을 것이다.

후 기

박영칠 교수님의 조언에 깊이 감사 드리며, 본 연구는 한국에너지기술연구원의 연구비지원으로 수행되었음을 밝힌다. (과제번호 : GP2010-0002)

참고문헌

- (1) Steinfeld, A., 2005, "Solar Thermochemical Production of Hydrogen – a Review," *Solar Energy*, Vol. 78, pp. 603~615.
- (2) Garcia, P., Ferriere, A. and Bezier, J. J., 2008, "Codes for Solar Flux Calculation Dedicated to Central Receiver System Applications: a Comparative Review," *Solar Energy*, Vol. 82, pp. 189~197.
- (3) Siegel, R. and Howell, J. R., 2002, *Thermal*

Radiation Heat Transfer, 4th ed., Taylor & Francis, New York, pp. 390~406.

- (4) Park, Y. C. and Kang, Y. H., 1998, "Computation of Sun Position for the Sun Tracking Control System of Solar Concentrator," *J. of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 18, No. 4, pp. 87~94.
- (5) Negi, B. S., Bhowmik, N. C., Mathur, S. S. and Kandpal, T. C., 1986, "Ray Trace Evaluation of Solar Concentrators Including Limb Darkening Effects," *Solar Energy*, Vol. 36, No. 3, pp. 293~296.
- (6) Arthur, N. C., 2010, *Allen's Astrophysical Quantities*, Springer, New York, pp. 355~357.
- (7) Buie, D., Monger, A. G. and Dey, C. J., 2003, "Sunshape Distributions for Terrestrial Solar Simulations," *Solar Energy*, Vol. 74, pp. 113~122.
- (8) Neumann, A., Witzke, A., Jones, S. A. and Schmitt, G., 2002, "Representative Terrestrial Solar Brightness Profiles," *J. of Solar Engineering*, Vol. 124, pp. 198~204.
- (9) Romero-Alvarez, M. and Zarza, E., 2007, *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*, Taylor & Francis, Taylor & Francis, New York, Chapter 21.
- (10) Garcia, D., 2010, "Robust Smoothing of Gridded Data in One and Higher Dimensions with Missing Values," *Computational Statistics and Data Analysis*, Vol. 54, pp. 1167~1178.
- (11) Kang, Y. H., 2009, *Report to Korea Research Council for Industrial Science and Technology*, "Development of High-Flux Solar Furnace for Solar Fuel Production," KIER-A92408.
- (12) Ulmer, S., Reinalter, W., Heller, P., Lupfert, E. and Martinez, D., 2002, "Beam Characterization and Improvement with a Flux Mapping System for Dish Concentrators," *J. of Solar Engineering*, Vol. 124, pp. 182~188.