

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.12.927>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

선형 프레넬 반사판 시스템의 집광 특성에 대한 수치해석 연구 §

이현진*† · 김종규** · 이상남**

* 국민대학교 기계시스템공학부, ** 한국에너지기술연구원 태양열연구실

Numerical Study of Concentration Characteristics of Linear Fresnel Reflector System

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

* School of Mechanical Systems Engineering, Kookmin Univ.,

** Solar Thermal Laboratory, Korea Institute of Energy Research

(Received May 7, 2015 ; Revised September 16, 2015 ; Accepted September 29, 2015)

Key Words : Solar Concentration(집광), Linear Fresnel Reflector(선형 프레넬 반사판), Solar Thermal Cooling (태양열 냉방), Optical Efficiency(광학 효율), Monte Carlo Ray-Tracing Method(몬테카를로 광선추적법)

초록: 고일사 지역인 사우디아라비아에서 태양열로 구동하는 흡수식 냉동 시스템 개발을 염두에 두고, 본 논문에서는 태양을 추적하는 선형 프레넬 반사판 시스템의 집광 특성을 수치해석 하였다. 몬테카를로 광선추적법을 기반으로 하는 광학 프로그램을 통해 집광 열유속, 집광 효율, 집광 에너지를 일년을 대표하는 춘분, 하지, 추분, 동지 날짜에 계산하였다. 동지를 제외하면, 9 시에서 15 시까지는 집광 성능이 일정한 가운데, 집광 효율도 70% 이상으로 높게 나타났다. 이 시간대에서 흡수기 중심 20% 영역에 모이는 최대 열유속은 하지 때 약 13.0 ~ 14.6 kW/m² 범위에서 변했다. 집광 시스템의 설계 인자 중에서 흡수기 설치 높이, 반사판의 폭, 반사판 사이의 거리가 집광 효율을 조사해 보면, 흡수기 설치 높이는 반사판의 폭에 관계없이 5 m 에서 최적의 성능을 나타냈다. 반사판의 폭이 작을수록 집광 효율이 좋지만, 반사판의 폭은 집광 되는 에너지에 직접적으로 비례하기 때문에 냉동 시스템의 용량에 맞추어 설계가 필요하다. 본 연구는 흡수기의 열전달 해석의 중요한 선행조건이므로 향후에 광학-열전달 연계된 해석을 통해 전체 시스템의 성능을 예측하고 설계하는데 활용할 수 있을 것이다.

Abstract: In this study, we numerically investigated the concentration characteristics of a linear Fresnel reflector system that can drive a solar thermal absorption refrigeration system to be installed in Saudi Arabia. Using an optical modeling program based on the Monte Carlo ray-tracing method, we simulated the concentrated solar flux, concentration efficiency, and concentrated solar energy on four representative days of the year - the vernal equinox, summer solstice, autumnal equinox, and winter solstice. Except the winter solstice, the concentrations were approximately steady from 9 AM to 15 PM, and the concentration efficiencies exceed 70%. Moreover, the maximum solar flux around the solar receiver center changes only within the range of 13.0 ~ 14.6 kW/m². When we investigated the effects of the receiver installation height, reflector width, and reflector gap, the optimal receiver installation height was found to be 5 m. A smaller reflector width had a greater concentration efficiency. However, the design of the reflector width should be based on the capacity of the refrigeration system because it dominantly affects the concentrated solar energy. The present study was an essential prerequisite for thermal analyses of the solar receiver. Thus, an optical-thermal integration study in the future will assist with the performance prediction and design of the entire system.

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 열공학부문 춘계학술대회(2015. 4. 22-24., 부산과라다이소호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, hyunjinlee@kookmin.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

- 기호설명 -

d : 반사판 폭 (m)

g : 반사판 사이의 거리 (m)

- h : 바닥 면으로부터 흡수기 설치 높이 (m)
- I : 직달 일사량, DNI (W/m^2)
- t : 흡수기 두께 (m)
- w : 흡수기 폭 (m)
- η : 집광 효율
- θ_s : 태양의 천정각 ($^\circ$)

1. 서론

환경오염, 기후변화, 화석연료 고갈과 같은 다양한 에너지 문제가 지속 가능한 삶을 위협하고 있는 오늘날, 태양에너지 활용은 전 인류의 끊임 없는 관심사이다. 특히, 중동 및 북아프리카 같이 국가 경제가 화석연료에 크게 의존하면서 일사량이 풍부한 지역에서는 태양에너지 활용에 매우 적극적이다. 다양한 활용 방안 중에서도, 일사량과 냉방 수요의 시간적 일치성을 감안하면, 태양에너지를 이용한 냉방은 에너지 문제 해결에 큰 효과를 낼 수 있다. 보편적으로 태양광 패널로 전기를 생산하여 증기압축식(vapor compression refrigeration) 냉동기를 구동하는 방법이 있지만, 태양광 패널은 고온 지역에서 효율이 떨어지는 단점이 있다. 대안으로 태양열로 증기나 고온수를 생산하여 흡수식 냉동(absorption refrigeration) 기술을 이용하는 방법이 있다. 하지만, 비추적식(non-tracking) 태양열 집열기술을 사용하면, 온수의 온도가 충분히 높지 않아 흡수식 냉동기의 성능이 떨어질 수 있다.

근래에는 주로 전기 생산을 목적으로 태양 추적식(tracking) 집광 시스템(concentration system)에 대한 기술 개발이 활발하게 진행되고 있다. 추적식 집광 시스템은 Fig. 1 에서 보듯이 크게 네 가지로 구분한다.^(1,2) 먼저 구유형(parabolic trough)은 2 차원 포물면을 한 개의 축으로만 태양을 추적하여 선 초점을 형성한다. 반면, 접시형(parabolic dish)은 3 차원 포물면을 두 개의 축으로 추적하여 점 초점을 형성한다. 선형 프레넬형(linear Fresnel)과 중앙 흡수기형(central receiver)은 각각이 구유형과 접시형의 프레넬 형태(Fresnel version)이다. 즉, 반사판의 크기가 커지면 높이도 증가해야 하는데, 이를 방지하기 위해 전체 포물면을 분할하여 바닥 평면에 배치될 수 있도록 만든 구조이다. 프레넬 형태 집광 시스템은 원래의 포물면 형태의 집광 시스템보다 집광비(concentration ratio)는 감소하고, 흡수 시스템(receiver system) -집광된 태양열로 증기를 생산하는 부분-이 추적 시스템과 분리되어 움직이지 않는 특징이 있다.

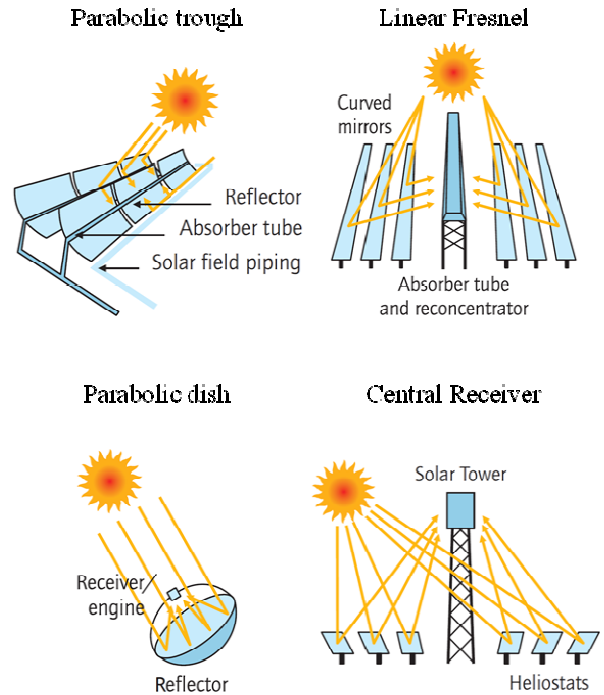


Fig. 1 Sketch of four major types of the sun-tracking concentrator⁽¹⁾

태양 추적식 집광기술을 활용하면, 흡수식 냉동기에 충분히 높은 온도의 온수 공급이 가능하여 높은 성능을 유지할 수 있다. 위 네 가지 집광 방식 중에서 선형 프레넬형은 설치 면적이 작고, 초기 투자비가 낮은 장점이 있다.^(1,2) 무엇보다도, 집광비가 흡수식 냉방이나 산업 공정열을 위한 증기 생산에 적합하다. 선형 프레넬형은 상대적으로 최근에 개발되었고, 타 집광 시스템에 비해 관심을 덜 받았기 때문에 향후에 개발 및 활용의 여지가 많다. 가스를 이용하는 흡수식 냉동기가 상용화되어 있다는 점을 감안하면, 선형 프레넬형 집광기술을 이용한 냉방을 위해서는 흡수식 냉동기에 적합한 태양열 시스템-집광과 증기생산-의 개발과 냉동기와 연계한 운전기술 개발이 중요하다.

본 논문에서는 태양열 시스템 중에서 선형 프레넬 반사판의 설계에 필요한 집광 특성을 수치적으로 연구하려 한다. 몬테카를로 광선추적법(MCRT, Monte Carlo ray-tracing method)을 바탕으로 자체 개발한 프로그램을 사용함으로써 시스템 전체의 집광 효율뿐만 아니라 집광 효율을 결정하는 요소들을 상세하게 해석하였다. 이를 통해 최적화 가능한 설계 변수에 대해서는 최적값을 제시하고, 다른 변수는 설계 방향성을 제시하였다. 먼저 수치 해석 방법에 대한 설명을 하고, 이후에 집광면에서 열유속 분포와 집광 시스템의 광학효율을 중심

으로 계산 결과를 해석하였다. 본 논문을 통해 개발하려는 시스템은 사우디아라비아(Saudi Arabia)에서 실증할 예정이므로, 계산은 사우디아라비아 수도인 리야드(Riyadh)를 설치 위치로 가정하였다.

2. 수치해석 방법

한국에너지기술연구원(KIER)에서는 위에 언급된 네 가지 집광 방식의 집광 성능을 해석할 수 있는 광학 프로그램을 개발하였다. KIER 프로그램에서 사용한 몬테카를로 광선추적법은 해석에 필요한 광학적 요소들을 엄밀하게 고려할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 시스템에 쉽게 확장 가능하므로 집광 시스템 해석에 가장 널리 사용되고 있다.⁽³⁾ 몬테카를로 광선추적법은 난수(random number)를 이용하여 확률적으로 접근하는 몬테카를로 방법과 기하광학(geometric optics)의 관점에서 광선을 추적하면서 반사나 흡수와 같은 광학적 현상을 해석하는 광선추적법을 합성한 방법이다.^(4,5) 계산 방법은 다양한 참고문헌^(4~10)에 잘 알려져 있으므로, 아래에서는 KIER 프로그램에 반영된 현상들을 중심으로 간단하게 소개하도록 하겠다.

태양 광선은 태양의 실제크기와 지구까지의 거리를 감안한 각도 범위-태양 디스크의 반각(half angle) 0.266°, 4.65 mrad-내에서 조사된다. 또한, 태양 디스크의 반각범위에서 태양 광선의 강도(intensity)는 입사 각도가 중심(0°)에서 반경방향(0.266°)으로 멀어질수록 강도가 줄어든다. 이 현상은 주연감광(limb darkening)이라 불린다. KIER 프로그램은 가장 최근에 측정된 데이터를 바탕으로 작성된 Buie 모델⁽¹¹⁾을 통해 태양 광선의 각도와 에너지 분포를 반영하고 있다.

광선의 개수와 각각의 광선이 갖는 에너지는 계산에 따라 임의적으로 변경이 가능하지만, 전체 광선이 갖고 있는 에너지는 실제 일사량에 맞추어 규격화(normalization)되어야 한다. 집광은 직달과 산란 성분으로 이루어진 일사량 중에서 직달 성분만을 이용하기 때문에, 직달 일사량(DNI, direct normal insolation) 값을 이용하여 광선의 에너지를 규격화한다. 본 논문은 직달 일사량 계산을 위해 식 (1)에 주어진 Hottel의 청명일 일사량 모델⁽¹²⁾을 사용하였는데, I_0 는 대기권 밖의 직달 일사량을, I 는 지표면에 도달하는 직달 일사량을, θ_s 는 태양의 천정각(zenith angle)을, A 는 지표면의 고도를 나타낸다. Fig. 2는 일년을 대표하는 4일-춘분(2015/3/21), 하지(2015/6/22), 추분(2015/9/23), 동지(2015/12/22)-을 대상으로 식 (1)을 이용하여 계산

한 직달 일사량의 시간별 변화를 보여준다. 태양 고도각이 10° 이상에 대해서만 고려하였기 때문에 계절에 따라 하루의 길이가 다르다.

$$\frac{I}{I_0} = a_0 + a_1 \exp(-k / \cos \theta_s)$$

$$\text{where } a_0 = 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2 \quad (1)$$

$$a_1 = 0.5055 + 0.00595(6.5 - A)^2$$

$$k = 0.2711 + 0.01858(2.5 - A)^2$$

본 연구에서는 집광 시스템이 사우디아라비아 리야드에 설치될 것을 전제로 수치해석이 진행되었다. 집광 해석에 있어서 지역적 차이를 만드는 가장 큰 요소는 시간의 따른 태양 위치와 수시로 변화하는 지표면의 날씨 상태라 할 수 있다. 태양 위치는 사우디아라비아 리야드의 위도, 경도, 시간을 사용함으로써 계산이 가능하다. 날씨 변화는 장기간 측정된 기상데이터를 사용하는 것이 좋다. 하지만, 사우디아라비아는 청명일이 많을 것으로 가정하고, 설계를 위한 집광 특성의 선행 해석이 본 연구의 목적이므로 식 (1)의 일사량 모델을 통해 직달 일사량을 계산하였다.

태양 광선은 집광 시스템을 지나면서 방향 변화와 에너지 손실을 겪으면서 흡수기-흡수 시스템에서 집광된 빛을 받는 부분에 도달하게 된다. 태양 광선의 경로를 추적하면서 발생하는 현상들을 고려하면, 집광 효율은 코사인(cosine) 효과, 그림자(shadowing) 효과, 반사율(reflectivity) 효과, 막힘(blocking)효과, 흘림(spillage) 효과를 반영해야 함을 알 수 있다.⁽¹³⁾ 반사판들은 개별적으로 태양을 추적하면서 반사된 광선을 흡수기로 보내야 하기 때문에, 태양과 흡수기 사이의 방향에 위치하게 된다. 코사인 효과는, 반사판이 태양 광선에 수직

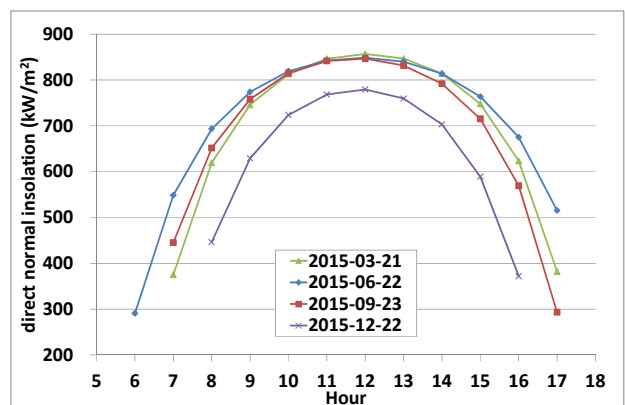


Fig. 2 Calculation of the hourly direct normal insolation in Riyadh, Saudi Arabia

인 평면에 투영된 면적만큼만 태양 광선을 받는 것을 의미한다. 그림자 효과는 태양 광선이 흡수기나 이웃한 반사판에 의해 전부 또는 부분적으로 가려지는 현상이다. 반사율 효과는 문자 그대로 반사 시에 반사판의 반사율만큼만 에너지가 전달됨을 뜻한다. 막힘 효과는 반사판에서 반사된 광선이 이웃한 반사판에 가려져서 흡수기에 도달하지 못하는 현상이다. 마지막으로 흘림 효과는 흡수기 밖으로 광선이 도달하여 작동 유체 가열에 도움이 되지 않는 현상이다. 위에 언급된 효과들을 요약하면, 집광 효율은 식 (2)와 같이 정리가 가능하다.

$$\eta_{opt} = \eta_{cos} \cdot \eta_{shd} \cdot \eta_{ref} \cdot \eta_{blk} \cdot \eta_{spl} \quad (2)$$

식 (2)에 직접적으로 드러나지는 않았지만, 고려해야 할 중요한 광학 현상은 반사판 표면 기울기 오차(surface slope error)에 의한 산란(scattering)이다. 반사판 표면이 이상적인 평면이 아닌 기울기(waviness)를 갖기 때문에 발생하는 산란은 광선을 목표 지점이 아닌 다른 지점으로 향하게 만든다. 2차원 평면에서 표면 기울기(ζ_x 와 ζ_y)는 평균 값이 0 인 정규분포를 따른다고 가정하면 식(3)을 만족한다.

$$P_s(\zeta_x, \zeta_y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\zeta_x^2 + \zeta_y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

여기서 표준편차 σ 는 반사판 표면 기울기 오차를 의미한다. 몬테카를로 방법에서 오차를 갖는 광선이 반사하는 각 지점에서의 반사판 표면 기울기는 식(4)에 보듯이 난수(R)를 이용해 천정각 θ 과 방위각 ϕ 을 통해 얻는다. 보다 자세한 내용은 참고문헌^(13,14)을 참조하면 알 수 있다.

$$\theta = \sqrt{-2\beta^2 \ln R} \quad (4a)$$

$$\phi = 2\pi R \quad (4b)$$

수치해석에 있어서 반사판 표면 기울기 오차는 집광 시스템의 설치나 추적 등에서 발생하는 다양한 종류의 오차를 포괄하면서 집광 오차를 대표하는 파라미터로 간주할 수도 있다.

선형 프레넬 반사판이 태양을 추적하는 축은 남북방향과 동서방향이 가능하다. 남북방향이 일사량이 많은 여름에 좀 더 효과적이므로 개발하려는 시스템은 남북방향으로 설치하여 동서방향으로 회전하면서 태양을 추적할 예정이다. Fig. 3 은 해석하려는 시스템의 개략도를 보여주고 있다. 동쪽은

x 축의 양의 방향이고, 북쪽은 y 축의 양의 방향이다. 반사판의 중심이 놓이는 평면은 x - y 평면과 일치하고 있다. 반사판에서 반사된 태양 광선은 흡수기로 향하는데, 흡수기는 다수의 튜브를 병렬로 연결하여 개발할 예정이므로 직육면체로 간주하였다. 향후에 제시되는 집광 특성의 결과는 흡수기 바닥 평면에 가상으로 존재하는 타겟 표면에서 계산된 값이다.

많은 설계 변수 존재하기 때문에 특정한 설계 변수만을 변경하면서 집광 특성을 파악하기는 어렵다. 그래서, 본 논문에서는 Table 1 에 요약한 것처럼 흡수기 설치 높이, h , 반사판의 폭, d , 반사판 사이의 거리, g 만을 설계 변수로 남기고 나머지 변수들은 고정하였다. 여기에서 공급 가능한 반사판을 기준으로 남북방향의 길이, L 을 30m 로 정하였고, 한 개의 구동 시스템만을 사용하기 위해서 반사판의 개수를 10 개로 한정하였다. 흡수기의 폭과 두께는 사용 예정인 튜브의 크기와 반사판 폭의 범위를 감안하여 결정하였다.

Table 1 Parameters of the base case

	Parameter	Assumption	Value
Receiver	Length, L	Constant	30 m
	Installation height, h	Variable	5 m
	Thickness, t	Constant	0.1 m
	Width, w	Constant	0.4 m
Reflector	Width, d	Variable	0.5 m
	Gap, g	Variable	0.1 m
	First gap, g_0	Constant, $w/2$	0.2 m
	Number	Constant	10

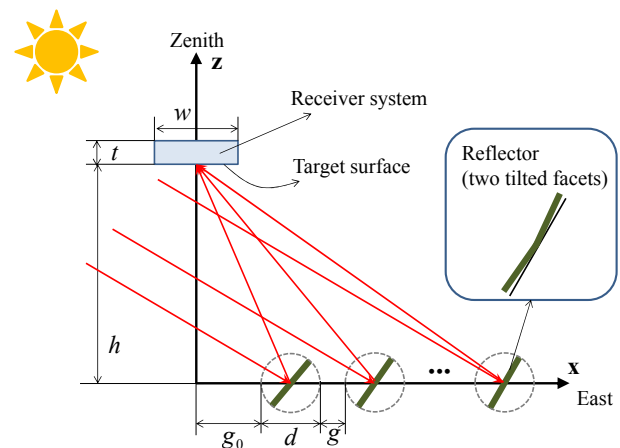


Fig. 3 Schematic diagram of the linear Fresnel reflector system in this paper

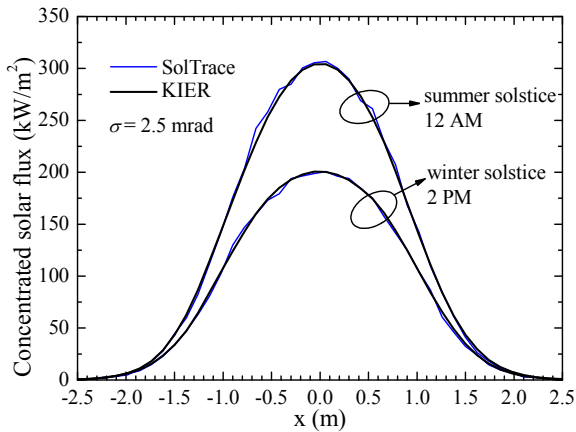


Fig. 4 Validation of the KIER program by a comparison with NREL's SolTrace

반사판 표면은 Fig. 1 에 나타난 것처럼 곡면일 수도 있고 평면일 수도 있다. 반사판은 20년 이상의 내구성을 위해서 유리 후면에 은과 같은 금속을 코팅하여 사용하는데, 곡면일 경우 제작 비용이 상승하거나 설치가 어렵다. 평면이면 집광 면적이 넓어져서, 바꾸어 말하면 집광비가 낮아져서, 이차 집광기(secondary concentrator)를 흡수기에 설치해야 한다. 한국에너지기술연구원에서는 제작 비용을 감안하면서 적절한 집광비를 유지하기 위해서, Fig. 3의 확대 그림처럼 평면 반사판을 이용하여 두 면(facet)을 사용하여 포물면에 근사하는 기울기를 주는 반사판을 주로 이용하고 있다.⁽¹³⁾ 본 논문에서도 두 면으로 이루어진 반사판을 염두에 두고 수치 해석을 수행하였다. 각 반사판마다 타겟과의 거리가 다르기 때문에 두 면의 기울기는 각 반사판마다 다르다. 한편, 반사판 표면 기울기 오차는, 참고문헌을 살펴보면, 통상적으로 2~4 mrad 범위에서 변한다.⁽¹⁴⁾ 본 논문에서는 표면 기울기 오차보다는 다른 설계 변수에 의한 집광 특성에 관심이 있으므로 2 mrad 으로 가정하였다.

참고로 KIER 프로그램은 실험결과와 비교를 통해 접시형 집광 시스템의 성능해석에 사용되었다.^(7,8) 프레넬형 집광 시스템에 대해서는 미국 재생에너지 연구소(NREL, National Renewable Energy Lab)의 집광 해석 프로그램인 SolTrace 와 비교를 통해 개발 과정을 검증하였다. Fig. 4는 하지 12시와 동지 오후 2시에서 비교한 열유속 분포 결과로, 두 프로그램의 결과가 잘 일치하는 것은 필요한 물리적 현상을 동일하게 반영했음을 증명한다.⁽¹³⁾

3. 수치해석 결과

KIER 프로그램의 가장 기본적인 계산 결과는

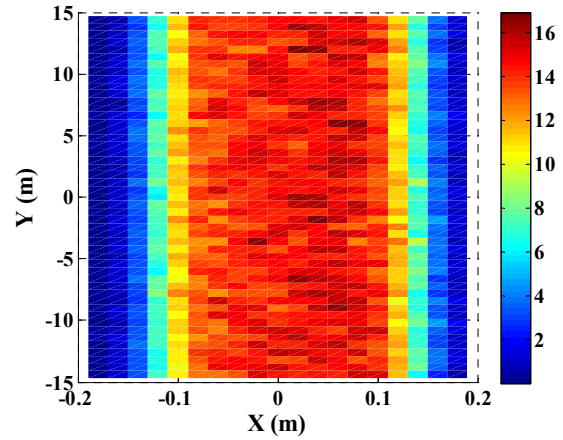


Fig. 5 Concentrated solar flux distribution at 12 PM on the summer solstice

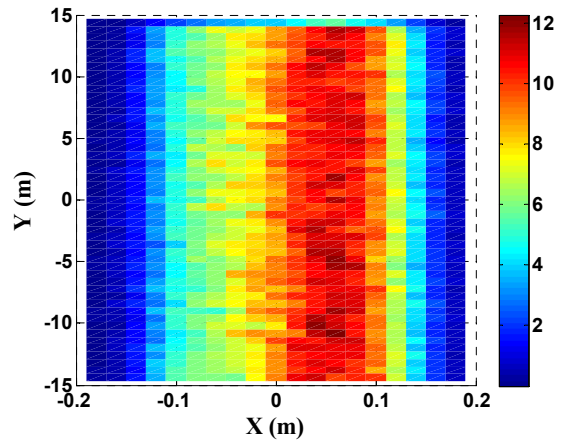


Fig. 6 Concentrated solar flux distribution at 4 PM on the summer solstice

Fig. 5와 Fig. 6에 도시한 바와 같이 흡수기 바닥의 타겟면에 집광되는 열유속 분포이다. 동시에 Table 2와 3에 정리된 바와 같은 집광 효율 값들을 산출한다. Fig. 5와 Fig. 6은 기본 경우(base case)에 대해 하지에서 계산한 집광 열유속 분포를 보여준다. Fig. 5를 보면, 태양의 남중 시간에 가까운 정오에는 열유속 분포가 남북방향(y축)으로 대칭이지만, Fig. 6의 오후 4시가 되면 동쪽에 치우친 열유속 분포가 된다. Table 2를 참조해보면 전체 집광 효율은 정오에 89.6%로 매우 높은 반면, 오후 4시에는 64.6%로 25% 감소한다. 코사인 효율, 그림자 효율, 흘림 효율 모두 감소하는 가운데, 그림자 효율을 감소가 가장 두드러진다.

Fig. 5와 Fig. 6에 제시된 열유속 분포 중에 중심에서의 집광 열유속 값은 증기 출구온도나 흡수기 표면 온도 상승의 관점에서 중요하다. 그래서, 하지 하루 동안에, 중심선(x = 0)을 기준으로 전체 흡수기 폭의 20% 안쪽에 모이는 집광 열유속의

Table 2 Optical efficiency breakdowns of the results in Fig. 4 and Fig. 5

Optical efficiency	Fig. 5	Fig. 6
Net	89.6%	64.6%
Cosine	98.5%	86.1%
Shadowing	98.0%	83.3%
Reflection	93.0%	93.0%
Blocking	100.0%	100.0%
Spillage	99.9%	96.9%

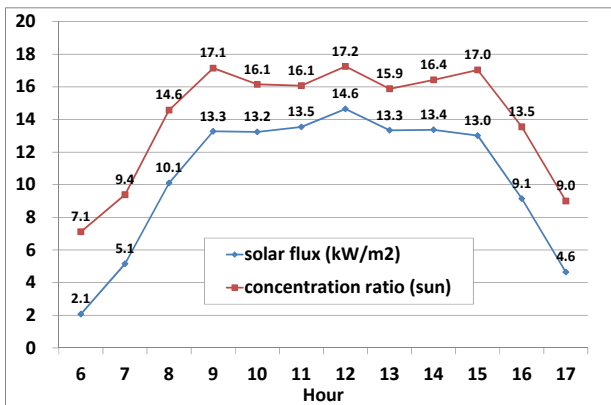


Fig. 7 Average solar flux and concentration ratio at the center line of the receiver on the summer solstice

평균값과 이 값을 Fig. 2 에 제시한 직달 일사량으로 나눈 집광비(concentration ratio)를 Fig. 7 에 도시하였다. 9 시부터 15 시까지는 13.0 ~ 14.6 kW/m² (집광비로는 15.9 ~ 17.2 sun) 수준에서 집광 열유속의 변화가 매우 작기 때문에 정상상태에 가깝게 전체 시스템의 운용이 가능할 것으로 판단된다. 하지만, 9 시 이전과 15 시 이후에는 집광 열유속 값이 급격하게 변하면서, 증기 출구온도 또는 증기 생산량의 변화가 많을 것이다. 15 시 이후에도 냉방 수요는 여전히 많을 것이므로 낮에 추가로 증기를 생산하여 열저장 시스템에 저장해 두거나 화석연료를 추가적으로 사용하여 수요에 대응해야 할 것이다.

기본 경우에 대해 춘분, 하지, 추분, 동지 때 한 시간 간격으로 집광 효율을 계산하여 Fig. 8 에 나타내었다. Fig. 8 을 보면 하지의 집광 효율이 가장 좋고 춘분과 추분의 집광 효율이 대동소이한 가운데, 동지의 집광 효율은 매우 떨어짐을 알 수 있다. 또한, 동지를 제외하고는 9 시부터 15 시까지 집광효율의 변화가 작게 나타났다. 위 시간 동안 하지에는 80% 이상의 높은 집광 효율과, 춘분과

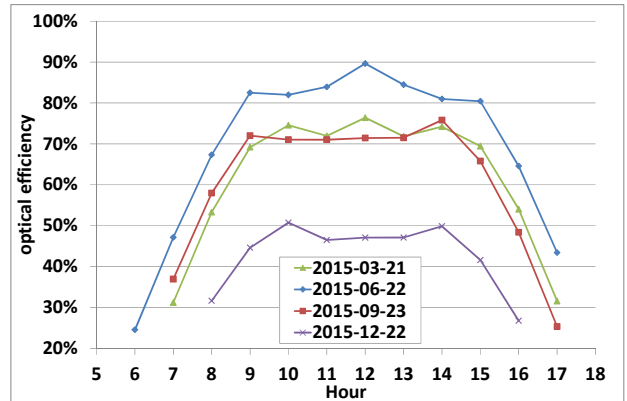


Fig. 8 Hourly variations of the optical efficiency of the base case

추분에도 70%가 넘는 집광 효율이 예상된다. 하지만, 동지에는 집광 효율이 50% 이하로 떨어지면서 냉동 시스템에 공급할 수 있는 열량이 매우 낮을 것으로 예상된다. 일평균 집광 효율은 춘분, 하지, 추분, 동지 순서대로 65.5%, 73.8%, 64.6%, 44.5%로 나타났다. Table 2 와 같은 집광 효율 분석을 수행한 결과, 계절별 집광 효율 차이에 영향을 가장 많이 주는 요소는 코사인 현상, 그림자 현상, 흘림 현상이다. 모두 태양 고도각이 낮아지면서 발생하는 현상이다.

춘분, 하지, 추분, 동지의 일간 집광 성능을 평균한 값을 통해 흡수기 설치 높이, h , 반사판의 폭, d , 반사판 사이의 거리, g 의 영향을 조사하였다. 춘분, 하지, 추분, 동지의 일간 집광 성능을 평균하였다는 점에서 연간 집광 성능으로 근사할 수 있다. 반사판 사이의 거리를 0.1 m 고정된 상태에서 흡수기 설치 높이와 반사판의 폭에 따른 집광 효율의 변화를 Fig. 9 에 도시하였다. 반사판의 폭에 상관없이 흡수기의 높이가 5 m 되기 전까지 효율이 상승하다가 5 m 이후에 감소하는 추세를 보이고 있다. 흡수기 설치 높이가 낮아지면, 흘림 효율은 조금 증가하지만 코사인, 그림자, 막힘 효율이 감소하게 된다. 특히, 막힘 효율의 감소가 큰 편이다. Fig. 9 로부터 흡수기의 높이는 5 m 로 정하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

흡수기의 열전달 해석을 수행하여 생산 가능한 증기 생산량이나 전체 시스템의 성능을 산출하기 위해서는 집광되는 에너지의 값도 필요하기 때문에, Fig. 9 의 동일한 계산들에 대해 집광되는 에너지를 Fig. 10 에 도시하였다. 흡수기 높이가 5 m 일 때, 반사판 폭이 0.5 m 에서 0.6 m 로 20% 증가하면, 집광되는 에너지는 701.1 kWh 에서 823.0 kWh 로 17.4% 증가한다. 반면에 반사판 폭이 0.4 m 로

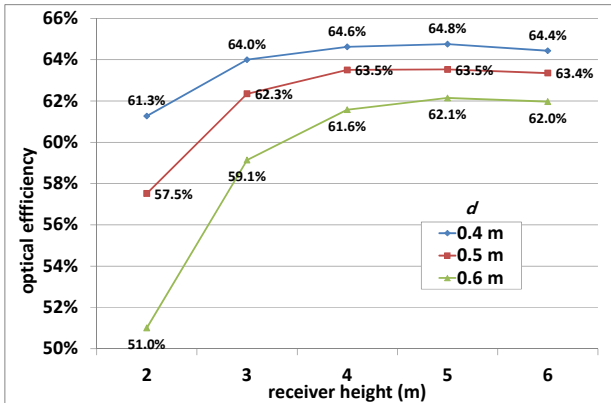


Fig. 9 Effects of the receiver height and the reflector width on the optical efficiency

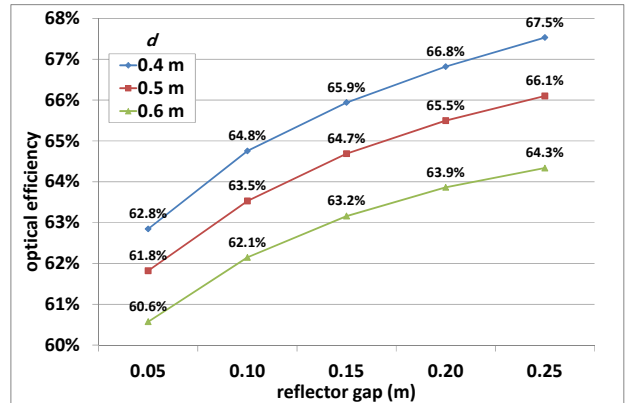


Fig. 11 Effects of the reflector gap and the reflector width on the optical efficiency

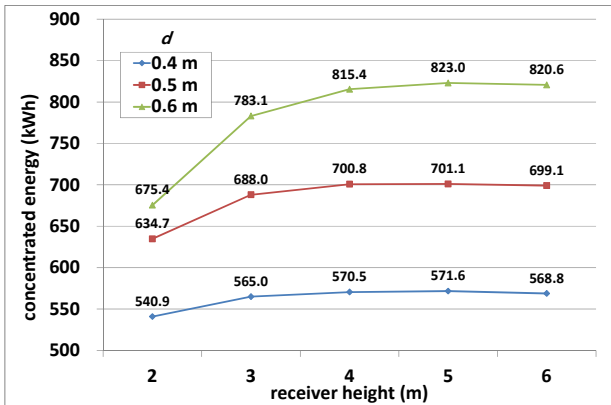


Fig. 10 Effects of the receiver height and the reflector width on the concentrated energy

20% 감소하면, 집광되는 에너지는 18.5% 감소한다. 기본 경우를 중심으로 반사판 폭에 변화를 주었을 때, 반사판 폭에 근사적으로 비례해서 집광 에너지도 변화함을 알 수 있다.

Fig. 11은 흡수기의 높이를 5m로 고정한 상태에서 반사판 사이의 간격과 반사판 폭에 따른 집광 효율 변화를 보여준다. 모든 경우에 있어서 반사판 사이의 간격이 넓어질수록 반사판 간에 간섭의 확률이 떨어지므로 그림자 효율이 개선된다. 간섭의 가능성을 감안해보면, 동일한 반사판 사이의 간격에서는 반사판 폭이 좁을수록 효율이 좋아지는 것을 이해할 수 있다. 반사판 사이의 간격이 넓을수록 효율이 좋아지지만, 전체 시스템의 설치 부지가 넓어지는 것을 의미한다. 또한, 선형 프레넬 반사판 시스템은 반사판들을 하나의 구동부로 구동할 수 있는 장점이 있는데, 중심에 있는 구동부에서 반사판의 위치가 멀어질수록 추적 오차가 커질 수 있다. 반면에, 반사판 사이의 거리가 5cm에서 25cm로 증가할 때, 반사판 폭이 작을수록 집광 효율 증가 폭이 더 큰 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 일사량이 풍부한 중동지역에서 태양열로 구동하는 흡수식 냉동 시스템 개발의 일환으로 진행되었다. 냉동 시스템에 적합한 증기와 고온수를 공급하기 위해 선형 프레넬 집광 시스템의 집광 특성을 한국에너지기술연구원에서 개발한 광학 프로그램을 이용하여 수치적으로 해석하였고 결론을 요약하면 아래와 같다.

- 동지를 제외하고 춘분, 하지, 추분에는 9시부터 15시까지 정상상태에 가깝게 집광 성능이 일정한 상태에서 70% 이상의 집광 효율이 예상된다.
- 이 시간대에서 흡수기 중심 20% 영역 내에 모이는 최대 열유속은 하지 때 약 13.0 ~ 14.6 kW/m² 수준으로 나타났다.
- 집광 효율에 영향을 주는 현상을 분석해 보면, 계절별/시간대별 집광 효율 차이에 영향을 가장 많이 주는 요소는 코사인 현상과 그림자 현상이다.
- 집광 시스템의 설계 인자 중에서 흡수기 설치 높이, 반사판의 폭, 반사판 사이의 거리가 집광 효율을 조사해 보면, 흡수기 설치 높이는 반사판의 폭에 관계없이 5m에서 최적의 성능을 나타냈다.
- 반사판의 폭이 작을수록 집광 효율이 좋지만, 반사판의 폭은 집광 되는 에너지에 직접적으로 비례하기 때문에 냉동 시스템의 용량에 맞추어 설계가 필요하다.

후기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부 재원으로

한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(20148510011190, 20134010200580)입니다.

참고문헌
(References)

- (1) International Energy Agency (IEA) Report, 2010, Technology Roadmap: Concentrating Solar Power, (http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp_roadmap.pdf)
- (2) Lovegrove, K. and Stein, W., 2012, *Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK.
- (3) Garcia, P., Ferriere, A. and Beziau, J. J., 2008, "Codes for Solar Flux Calculation Dedicated to Central Receiver System Applications: a Comparative Review," *Solar Energy*, Vol. 82, pp. 189~197.
- (4) Siegel, R. and Howell, J. R., 2002, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 4th ed., Taylor & Francis, New York.
- (5) Mahan, J. R., 2002, *Radiation Heat Transfer: A Statistical Approach*, J. Wiley, New York.
- (6) Montes, M. J., Rubbia, C., Abbas, R. and Martínez-Val, J. M., 2014, "A Comparative Analysis of Configurations of Linear Fresnel Collectors for Concentrating Solar Power," *Energy*, Vol. 73, pp. 192~203.
- (7) Lee, H. J., Kim, J. K., Lee, S. N. and Kang, Y. H., 2011, "Heat-Flux Analysis of Solar Furnace Using the Monte Carlo Ray-Tracing Method," *Trans. KSME B*, Vol. 35, No. 10, pp. 989~996.
- (8) Lee, H. J., Chai, K. K., Kim, J. K., Lee, S. N., Yoon, H. K., Yu, C. K. and Kang, Y. H., 2014, "Optical Performance Evaluation of a Solar Furnace by Measuring the Highly Concentrated Solar Flux," *Energy*, Vol. 66, pp. 63~69.
- (9) Belhomme, B., Pitz-Paal, R., Schwarzbözl, P. and Ulmer, S., 2009, "A New Fast Ray Tracing Tool for High-Precision Simulation of Heliostat Fields," *J. Sol. Energ. T. ASME*, Vol. 131, paper 031002.
- (10) He, Y.-L., Cui, F.-Q., Cheng, Z.-D., Li, Z.-Y. and Tao, W.-Q., 2013, "Numerical Simulation of Solar Radiation Transmission Process for the Solar Tower Power Plant: From the Heliostat Field to the Pressurized Volumetric Receiver," *App. Therm. Eng.*, Vol. 61, No. 2, pp. 583~595.
- (11) Buie, D., Monger, A. G. and Dey, C. J., 2003, "Sunshape Distributions for Terrestrial Solar Simulations," *Solar Energy*, Vol. 74, pp. 113~122.
- (12) Hottel, H. C., 1976, "A Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation through Clear Atmospheres," *Solar Energy*, Vol. 18, No. 2, pp. 129~134.
- (13) Lee, H. J., Kim, J. K., Lee, S. N. and Kang, Y. H., 2015, "Numerical Study on Optical Performances of the First Central-Receiver Solar Thermal Power Plant in Korea," *J. Mech. Sci. Technol.*, submitted.
- (14) Lee, H. J., 2014, "The Geometric-Optics Relation Between Surface Slope Error and Reflected Ray Error in Solar Concentrators," *Solar Energy*, Vol. 101, pp. 299~307.