

200kW 탑형 태양열발전시스템을 위한 Heliostat 반사면 구조 설계

박영철*

*서울과학기술대학교 제어계측공학과(ycpark@snut.ac.kr)

Design of Structure of Heliostat Reflective Surface for 200kW Tower Type Solar Thermal Power Plant

Park, Young-Chil*

*Department of Control and Instrumentation Engineering
Seoul National University of Science and Technology(ycpark@seoultech.ac.kr)

Abstract

Heliostat in the tower type solar thermal power plant is a sun tracking mirror system to reflect the solar energy to the receiver and the optical performance of it affects to the efficiency of whole power plant most significantly. Thus a proper design of structure of the heliostat reflective surface could be the most important step in the construction of such power plant.

The work presented here is a design of structure of optical surface of heliostat, which will be used in 200kW solar thermal power plant. The receiver located at 43(m) high from ground in tower has 2x2(m) rectangular shape. We first developed the software tool to simulate the energy concentration characteristics of heliostat using the ray tracing technique. Then, the shape of heliostat reflective surface is designed with the consideration of heliostat's energy concentration characteristics, production cost and productivity. The designed heliostat's reflective surface has a structure formed by canting four of 1x1(m) rectangular flat plate mirror facet and the center of each mirror facet is located on the spherical surface, where the spherical surface is formulated by the mirror facet mounting frame.

Keywords : 탑형 태양열발전시스템(Tower type solar thermal power plant), 헬리오스타트(Heliostat), 헬리오스타트 반사면(Heliostat reflective surface), 집열특성(Heliostat's heat concentration characteristics)

기 호 설 명

A, α	: 태양 방위각 및 고도각
A_H, α_H	: 헬리오스타트 방위각 및 고도각
$c\theta, s\theta$: $\cos(\theta), \sin(\theta)$
$C_e(C_{ex}, C_{ey}, C_{ez})$: 거울요소 중심좌표
$C_m(C_{mx}, C_{my}, C_{mz})$: 반사거울 중심좌표
$E(x, z), E_i(x, z)$: 헬리오스타트 및 거울요소의 열유속분포
E_{i-flux}	: 흡수기요소에서의 열유속
f	: 초점거리
H, H_{init}	: 헬리오스타트 법선벡터
H_M	: 헬리오스타트 중심좌표
$H_{e-rinit}, H_{e-init}, H_c$: 거울요소 중심 법선벡터
$H_{m-rinit}, H_m$: 반사거울 중심 법선벡터
I_o	: 법선면 직달일사량
i, j, k	: x, y, z 축 방향 단위벡터
$L_x \times L_z$: 반사거울의 크기
$M_e \times N_e$: 반사거울 1개에서의 거울요소 수
$M_m \times N_m$: 헬리오스타트에 구성에 사용된 반사거울의 수
$M_T \times N_T$: 흡수기 요소의 수
R	: 헬리오스타트로부터 흡수기를 향하는 단위벡터
$Rot(K, \theta)$: 회전축 K 를 기준으로 각도 θ 만큼 회전하는 회전변환행렬
$RotAE, RotM$: 회전변환행렬
r_e, r_m	: 거리표시 상대벡터
S	: 헬리오스타트로부터 태양을 향하는 단위벡터
η_{rint}	: 흡수기의 흡수율
θ_e, θ_s	: 태양광선 입사각
θ_T	: 흡수기 설치 각도

1. 서 론

탑형 태양열발전시스템(tower type solar thermal power plant)의 헬리오스타트(heliostat)는 지표면으로 입사되는 태양열을 탑 상단에 위치하는 흡수기(receiver)로 반사시키기 위한 집광장치로서, 헬리오스타트의 집열특성은 태양열발전시스템의 효율을 결정하는 중요한 요소이다.

헬리오스타트의 집열특성은 헬리오스타트의 크기를 포함하는 반사면의 구조에 따라 달라진다. 현재 상용발전을 수행하고 있는 대부분의 탑형 태양열발전시스템[1,2]은 100m² 규모의 초대형 헬리오스타트를 사용하고 있다. 그러나 이와 같은 대형 헬리오스타트의 사용은 흡수기의 크기를 또한 대단히 크게 하며, 따라서 흡수기에 도달되는 열에너지 밀도가 낮아지게 되고, 이는 다시 흡수기에서의 동작유체의 최고온도를 떨어뜨림으로서 결국에는 태양열발전시스템의 효율을 전체적으로 낮추는 결과를 초래하기도 한다.

헬리오스타트의 집열특성은 또한 헬리오스타트의 반사거울(mirror facet)의 곡면 형상에 따라 크게 달라진다. 선행연구에 따르면, 거울면 수차(aberration) 및 비점수차(astigmatism)가 보상된 포물면(parabolic surface) 형상의 반사면을 갖는 헬리오스타트가 가장 우수한 집광특성을 가지고 있다[3,4]. 그러나 현재 상업발전을 수행하고 있는 모든 탑형 태양열발전시스템의 헬리오스타트는 평판거울(flat plate mirror facet)들을 조합(canting)하여 반사면이 불연속 구형이 되도록 하는 구조를 가지고 있다. 이는 헬리오스타트의 반사거울을 해석적 연구결과가 요구하는 정확도를 갖는 곡면으로 제작하기 위한 비용과 생산성이 현실과 큰 차이가 있기 때문이며, 따라서 비록 최적은 아니더라도 경제성이 고려된 구조로 헬리오스타트 반사면이 설계되고 있기 때문이다.

태양열발전시스템의 건설은 헬리오스타트 반사면의 구조 설계를 필요로 하며, 헬리오스

타트 반사면의 구조 설계는 헬리오스타트의 집광특성해석을 필요로 한다. 헬리오스타트의 설계 또는 태양열발전시스템의 효율 해석을 위한 헬리오스타트 집광특성해석에 관한 다양한 연구[5,6,7]가 수행되었다. 그러나 이들 선행연구들은 정형화된 곡면을 갖는 헬리오스타트의 집광특성을 해석적으로 분석한 것으로서, 현재 사용되고 있는 헬리오스타트의 경우와 같은 반사거울들의 조합에 의하여 형성된 불연속 곡면을 갖는 헬리오스타트의 집광특성해석에서 직접 사용되기에는 어려움이 있는 연구결과이다. 또한 상업용 또는 실험용 탑형 태양열발전시스템의 헬리오스타트 필드 설계를 위한 다양한 프로그램[8,9]들이 최근 개발되었다. 그러나 비록 이들 프로그램들이 헬리오스타트의 집광특성해석을 위한 부분을 포함하고 있기는 하나, 태양열발전시스템의 건설을 위한 핵심기술로서 계산과정은 물론 프로그램 소스가 일체 외부에 공개되어 있지 않다.

본 연구는 공기를 작동유체로 사용하며, 높이 43(m) 지점에 위치하는 2×2(m) 크기의 사각형 모양의 흡수기를 갖는 200kW 탑형 태양열발전시스템에서 사용될 헬리오스타트 반사면의 구조를 설계한 것이다. 이를 위하여 본 연구는 반사거울들의 조합으로 형성되는 반사면을 갖는 헬리오스타트의 집광특성해석을 위한 프로그램을 궤적추적기법(ray tracing technique)을 기반으로 개발하고, 이를 이용하여 실제 제작과정의 현실적 제약조건을 충족시킬 수 있는 구조를 갖는 헬리오스타트 반사면의 구조를 결정하였다.

2. 집광특성해석 프로그램

헬리오스타트 집광특성해석은 헬리오스타트로부터 반사되어 흡수기에 도달되는 헬리오스타트 열유속분포(heliostat heat flux distribution) $E(x,z)$ 를 사용하여 수행한다.

궤적추적기법을 사용하여 반사거울들의 조

합으로 형성된 불연속 곡면 구조를 갖는 헬리오스타트의 열유속분포를 계산하기 위하여, 우선 각각의 반사거울을 그림 1에서와 같이 $\Delta x_e \times \Delta z_e(m)$ 크기의 거울요소(mirror element)들로 분할한다. 그 후 헬리오스타트가 태양추적을 수행하는 동안 이들 각각의 거울요소들로부터 반사되어 흡수기에 도달되는 그림 2에서와 같은 거울요소의 열유속분포(mirror element heat flux distribution) $E_i(x,z)$ 를 계산한다. 마지막으로 헬리오스타트를 구성하는 모든 거울요소들로부터 반사된 각각의 $E_i(x,z)$ 를 식 (1)에서와 같이 누적함으로써 헬리오스타트의 열유속분포를 계산한다.

$$E(x,z) = \sum_{i=1}^{M_m \times N_m \times M_e \times N_e} E_i(x,z) \quad (1)$$

식 (1)의 $M_m \times N_m$ 은 헬리오스타트 반사면을 구성하기 위해 사용된 반사거울의 수를 나타내며, $M_e \times N_e$ 는 1개의 반사거울 속에서 나누어진 거울요소들의 수를 나타낸다.

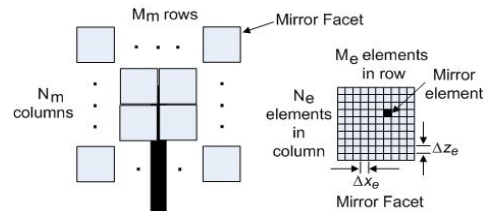


그림 1. 반사거울의 조합(canting)으로 구성된 헬리오스타트와 거울요소

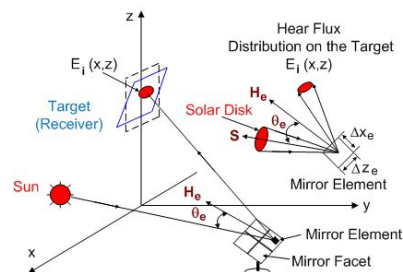


그림 2. 거울요소의 열유속분포

2.1 헬리오스타트 법선벡터

거울요소의 열유속분포 $E_i(x,z)$ 의 계산은, 우선 태양추적을 수행하는 헬리오스타트 법선벡터 \mathbf{H} 의 계산을 필요로 한다. 헬리오스타트 법선벡터는, 헬리오스타트가 사용하는 반사거울 또는 반사거울 장착 프레임의 곡면형상 여부와 무관하게, 헬리오스타트 중심점이 갖는 단위벡터로서 정의되며, 태양추적을 수행하는 헬리오스타트의 자세를 표시하는 단위벡터이다.

그림 3은 방위각-고도각 추적 방식의 헬리오스타트 법선벡터 \mathbf{H} 를 헬리오스타트 방위각 A_H 와 고도각 α_H 로 나타낸 것이다. 법선벡터 \mathbf{H} 는 태양의 위치를 표시하는 단위벡터 \mathbf{S} 와 헬리오스타트 중심위치 \mathbf{H}_M 으로부터 흡수기의 목표지점을 향하는 단위벡터 \mathbf{R} 를 사용하여 식 (2)와 식 (3)에서와 같이 계산된다[10].

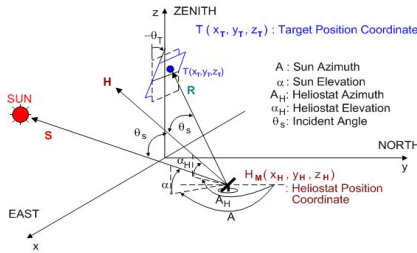


그림 3. 헬리오스타트 법선벡터

$$\alpha_H = \text{asin}\left(\frac{R_z + s\alpha}{2c\theta_s}\right) \quad (2)$$

$$A_H = \text{atan2}\left(\frac{R_x + \alpha s A}{2c\theta_s c\alpha_H}, \frac{R_y + \alpha c A}{2c\theta_s c\alpha_H}\right) \quad (3)$$

방위각 A_H 와 고도각 α_H 를 갖는 헬리오스타트 반사면 법선벡터 \mathbf{H} 는, 따라서 식 (4)에서와 같이, 최초 정남을 향하고 있는 단위벡터 $(0, -1, 0)^T$, 즉 $-\mathbf{j}$ 가 헬리오스타트 방위각 회전축인 z 축을 기준으로 $(180 - A_H)^\circ$ 만큼 회전하고, 다시 고도각 회전축인 $-x$ 축을 기준으로 $(\alpha_H)^\circ$ 만큼 회전한 것이다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \text{Rot}(\mathbf{k}, 180 - A_H) \cdot \text{Rot}(\mathbf{i}, -\alpha_H) \cdot (-\mathbf{j}) \\ &= \text{RotAE} \cdot (-\mathbf{j}) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)의 $\text{Rot}(\mathbf{i}, \theta)$, $\text{Rot}(\mathbf{k}, \theta)$ 는, x 축, z 축을 기준으로 각도 θ 만큼 회전하는 회전변환행렬로서 다음과 같이 정의 된다.

$$\text{Rot}(\mathbf{i}, \theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & -s\theta \\ 0 & s\theta & c\theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\text{Rot}(\mathbf{k}, \theta) = \begin{pmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

2.2 거울요소의 법선벡터

거울요소의 열유속분포 $E_i(x,z)$ 의 계산은, 또한 헬리오스타트가 태양추적을 수행하는 동안 변화하는 거울요소의 법선벡터 계산을 필요로 한다. 거울요소의 법선벡터는 거울요소의 중심점이 갖는 법선벡터로 정의한다.

그림 4는 거울요소의 법선벡터와 거울요소의 중심을 계산하는 과정을 설명하기 위한 것으로, 초점거리 f 를 갖는 4개의 구면반사거울(spherically shaped mirror facet)과 반지름 $2f$ 를 갖는 구형의 반사거울 장착 프레임(spherically shaped frame)을 사용하는 헬리오스타트를 나타낸 것이다.

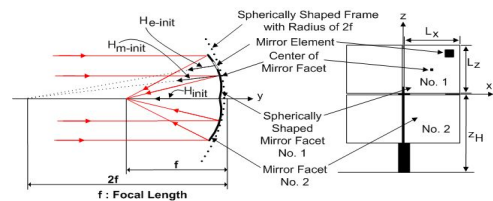


그림 4. 구형 장착 프레임과 구면반사거울을 사용하는 헬리오스타

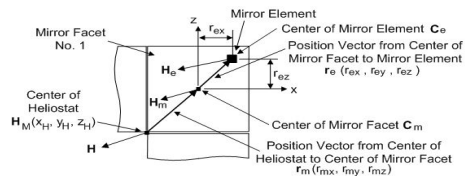


그림 5. 반사거울 및 거울요소의 중심

최초 정남을 향하고 있는 반사거울 중심의 법선벡터 $\mathbf{H}_{m-init}(H_{m-initx}, H_{m-inity}, H_{m-initz})$ 는, 그림 4에서와 같이, 반사거울 중심 \mathbf{C}_m 이 반사거울 장착 프레임과 접촉하는 지점에서의 프레임의 법선벡터와 동일한 것이다. 만약 헬리오스타트가 그림 4에서와 같은 구형의 반사거울 장착 프레임을 사용하는 경우라면, 반사거울 중심에서의 법선벡터는 식 (7)과 같이 표시된다.

$$\mathbf{H}_{m-init} = \frac{-r_{mx}\mathbf{i} - (2f + r_{my})\mathbf{j} - r_{mz}\mathbf{k}}{\sqrt{r_{mx}^2 + (2f + r_{my})^2 + r_{mz}^2}} \quad (7)$$

만약 헬리오스타트 반사거울 장착 프레임이 평면형의 구조를 가지고 있다면, 식 (7)의 \mathbf{H}_{m-init} 은 단순히 $(0, -1, 0)^T$ 로 된다.

거울요소의 법선벡터를 계산하기 위하여 우선 반사거울 1개를 독립적으로 생각한다. 즉 거울요소의 법선벡터를, 그림 5에서와 같이, 우선 반사거울의 중심에 위치하는 좌표계를 기준으로 표시하면, 구면반사거울 속에 위치하는 거울요소의 법선벡터 $\mathbf{H}_{e-rinit}$ 는 식 (8)과 같이 표시된다. 물론 만약 반사거울이 평면형일 경우에는 $\mathbf{H}_{e-rinit}$ 는 $(0, -1, 0)^T$ 가 된다.

$$\mathbf{H}_{e-rinit} = \frac{-r_{ex}\mathbf{i} - (2f + r_{ey})\mathbf{j} - r_{ez}\mathbf{k}}{\sqrt{r_{ex}^2 + (2f + r_{ey})^2 + r_{ez}^2}} \quad (8)$$

식 (8)에 표시된 거울요소의 법선벡터 $\mathbf{H}_{e-rinit}$ 는 반사거울 자체가 독립적으로 정남을 향하고 있는 경우의 법선벡터이다. 그러나 비록 헬리오스타트 자체는 정남을 향하고 있다고 하더라도 반사거울은 곡면형의 프레임에 장착되어 있기 때문에 더 이상 정남을 향하고 있지 않게 된다. 따라서 반사거울의 장착에 따른 방향의 변화를 거울요소 법선벡터의 계산에 포함시키는 것이 필요하다.

반사거울의 장착에 따른 거울요소 법선벡터의 변화를 계산하기 위하여, 곡면 프레임에

장착된 경우의 반사거울 법선벡터 \mathbf{H}_{m-init} 와 정남을 향하고 있는 반사거울의 법선벡터 즉 $-\mathbf{j}$ 와의 변환행렬 $RotM$ 을 계산하면 식 (9)와 같이 표시된다.

$$RotM = \begin{pmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1c\theta_2 & s\theta_1s\theta_2 \\ s\theta_1 & c\theta_1c\theta_2 & -c\theta_1s\theta_2 \\ 0 & s\theta_2 & c\theta_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

식 (9)의 θ_1 과 θ_2 는 \mathbf{H}_{m-init} 의 방향을 표시하는 각도로서, \mathbf{H}_{m-init} 의 x, y, z 성분인 $H_{m-initx}, H_{m-inity}, H_{m-initz}$ 을 사용하여 다음과 같이 정의된다.

$$\theta_1 = -atan(H_{m-initx}/H_{m-inity}) \quad (10)$$

$$\theta_2 = -atan(H_{m-initz}/\sqrt{H_{m-initx}^2 + H_{m-inity}^2}) \quad (11)$$

정남을 바라보고 있는 헬리오스타트에 장착된 반사거울의 거울요소 법선벡터는, 이제 식 (8)과 식 (9)를 사용하여 식 (12)과 같이 표시된다.

$$\mathbf{H}_{e-init} = RotM \cdot \mathbf{H}_{e-rinit} \quad (12)$$

마지막으로 헬리오스타트가 태양추적을 수행하는 동안 거울요소의 법선벡터는 식 (4)에서 정의된 $RotAE$ 와 식 (12)를 사용하여 다음의 식 (13)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{H}_e = RotAE \cdot \mathbf{H}_{e-init} \quad (13)$$

2.3 거울요소의 중심좌표

태양추적을 수행하는 헬리오스타트 거울요소의 중심좌표 \mathbf{C}_e 역시 거울요소의 법선벡터 계산과정과 유사한 과정을 통하여 얻을 수 있다. 최초 헬리오스타트가 정남을 향하고 있을 때, 열유속분포를 계산하기 위한 거울요소속해 있는 반사거울의 중심 \mathbf{C}_{m-init} 은, 그림 5에서와 같이, 식 (14)로 정의된다.

$$\mathbf{C}_{m-init} = \mathbf{H}_M + \mathbf{r}_m = \mathbf{H}_M + (r_{mx}, r_{my}, r_{mz})^T \quad (14)$$

만약 헬리오스타트가 그림 4에서와 같은 구형의 반사거울 장착 프레임을 사용하는 경우라면, 반사거울 No. 1의 중심과 헬리오스타트 중심과의 상대위치를 나타내는 상대위치 벡터 \mathbf{r}_m 은 식 (15)와 같이 표시된다. 그러나 만약 헬리오스타트가 평면형의 반사거울 장착 프레임을 사용하고 있다면 상대위치벡터 \mathbf{r}_m 은 $(L_x/2, 0, L_z/2)$ 이 된다.

$$\mathbf{r}_m = (L_x/2, \sqrt{4f^2 - L_x^2/4 - L_z^2/4} - 2f, L_z/2) \quad (15)$$

또한, 헬리오스타트가 정남을 향하고 있을 때, 거울요소의 중심 \mathbf{C}_{e-init} 는, 그림 5에서와 같이, 반사거울의 중심 \mathbf{C}_{m-init} 과 반사거울의 중심으로부터 거울요소의 중심을 연결하는 상대위치벡터 \mathbf{r}_e 를 사용하여 식 (16)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{C}_{e-init} = \mathbf{C}_{m-init} + \text{Rot}M \cdot \mathbf{r}_e \quad (16)$$

식 (16)의 $\text{Rot}M$ 은 식 (9)에서 정의된 것과 같이, 반사거울이 반사거울 장착 프레임에 설치됨에 따라 달라지는 상대위치벡터 \mathbf{r}_e 를 계산하기 위한 것이다. 만약 헬리오스타트의 반사거울이 구면일 경우, 식 (14)의 상대위치벡터 \mathbf{r}_e 은 식 (17)과 같이 정의된다. 그러나 만약 반사거울이 평판형이면 식 (17)의 상대위치벡터 \mathbf{r}_e 는 $(r_{ex}, 0, r_{ez})$ 로 표시되며, r_{ex} 및 r_{ez} 는, 그림 5에서와 같이, 반사거울의 중심에서 본 거울요소의 x 및 z 좌표이다.

$$\mathbf{r}_e = (r_{ex}, \sqrt{4f^2 - r_{ex}^2 - r_{ez}^2} - 2f, r_{ez}) \quad (17)$$

헬리오스타트 중심 \mathbf{H}_M 은 헬리오스타트가 태양추적을 수행하는 동안 변화하지 않는다. 이에 반하여 거울요소 중심의 위치를 결정하

는 상대위치벡터 \mathbf{r}_m 과 \mathbf{r}_e 은 헬리오스타트의 태양추적에 따라 변화하며, 따라서 헬리오스타트가 태양추적을 수행하는 동안의 거울요소 중심은 식 (18)과 같이 표시된다.

$$\mathbf{C}_e = \mathbf{H}_M + \text{Rot}AE \cdot (\mathbf{r}_m + \text{Rot}M \cdot \mathbf{r}_e) \quad (18)$$

2.4 거울요소의 열유속분포

거울요소의 열유속분포 $E_i(x, z)$ 의 계산을 위하여, 그림 6에서와 같이, 태양의 크기가 유한하기 때문에 발생하는 태양원뿔(solar cone) 효과를 고려하는 것이 필요하다.

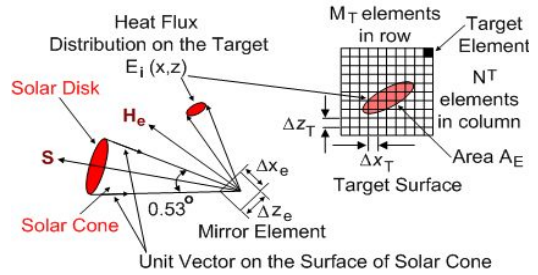


그림 6. 태양디스크, 태양원뿔 및 흡수기에서의 거울요소 열유속분포

만약 태양이 점광원(point source)이라면, 거울요소의 열유속분포는 거울요소의 각 꼭지점으로부터 반사되어 흡수기에 도달되는 광선들이 형성하는 사각형 속에 균일한 값을 갖는 분포가 될 것이다. 그러나 지구에서 바라본 태양은 유한한 크기를 갖는 디스크(solar disk)이며, 따라서 태양으로부터 입사되는 태양열은, 그림 6에서와 같이 0.53°의 중심각을 갖는 태양원뿔을 형성하여 거울요소로 입사된다.

유한한 크기의 태양으로부터 입사되고 반사되어 흡수기에 형성된 거울요소 열유속분포의 기하학적 형상은, 거울요소의 크기에 따라 타원형 또는 구형 모퉁이를 갖는 사각형과 같은 모양을 갖는다[11]. 만약 헬리오스타트의 집광특성해석을 위한 거울요소가 충분히

작으면, 거울요소 열유속분포의 기하학적 형상은, 그림 6에서와 같이, 거울요소 중심으로 부터 반사되어 흡수기에 형성되는 원형 또는 타원형과 같은 모양이 될 것이다.

충분히 작은 거울요소의 열유속분포를 계산하기 위하여, 그림 6에서와 같은 태양원뿔의 표면에 위치하는 36개의 단위 벡터를 찾고, 이들 단위벡터 각각을 따라 입사되어 거울요소 중심에서 반사된 후 흡수기에 도달되는 지점을 계산한다. 즉 거울요소 열유속분포의 기하학적 형상을 나타내는 원 또는 타원은, 거울요소 중심에서 반사된 36개의 광선들이 흡수기 표면과 만나는 지점을 순차적으로 연결함으로써 얻는다.

거울요소의 열유속분포를 계산하기 위한 두 번째 과정은 거울요소로부터 반사되는 총 열에너지의 량을 계산하는 것이다. 태양으로부터 입사되는 태양열유속의 세기(solar flux intensity)는 태양디스크 중심으로 부터 반지름이 증가함에 따라 감소한다[7]. 그러나 반지름의 변화에 따른 태양열유속 세기의 변화량이 대단히 작으며, 따라서 태양열유속의 세기는 태양디스크 상의 위치와 무관하게 일정하다고 가정하는 것이 일반적이다.

식 (19)는 태양열유속의 세기가 태양디스크의 반지름과 무관하게 일정한 값을 갖는 경우, 법선벡터 \mathbf{H}_e 그리고 $\Delta x_e \times \Delta z_e (m)$ 크기를 갖는 거울요소로부터 반사되어 흡수기에 도달되는 총열에너지의 량을 나타낸 것이다.

$$\int_x \int_z E_i(x,z) dx dz = I_o (\mathbf{S} \cdot \mathbf{H}_e) \Delta x_e \Delta z_e \quad (19)$$

거울요소의 열유속분포 $E_i(x,z)$ 를 계산하기 위한 마지막 과정으로, 흡수기 표면을, 그림 6에서와 같이, $M_T \times N_T$ 개의 흡수기 요소(target element)들로 나누고, 이들 각각의 요소들의 중심의 위치를 조사한다. 만약 흡수기 요소 중심이 거울요소의 열유속분포의 기하

학적 형상 안에 위치하면, 해당 흡수기 요소의 열유속을 식 (20)에서와 같이 할당하고, 그렇지 못하면 0으로 설정한다.

$$E_{i-flux} = \frac{I_o (\mathbf{S} \cdot \mathbf{H}_e) \Delta x_e \Delta z_e}{A_E} \quad (20)$$

식 (20)의 A_E 는 흡수기에 형성된 거울요소 열유속분포의 기하학적 형상의 면적을 나타낸 것으로, 형상 내에 위치하는 흡수기 요소의 수를 흡수기 요소의 면적 $\Delta x_T \Delta z_T (m^2)$ 에 곱하여 얻어지는 값이다.

3. 헬리오스타트 반사면 구조 설계

지상으로부터 43(m) 높이에서 수직면으로부터 헬리오스타트 필드를 향하여 28° 기울어진 $2 \times 2 (m)$ 크기의 사각형 모양 흡수기를 사용하는 200kW 탑형 태양열발전시스템을 위한 헬리오스타트 반사면의 구조는, 식 (21)에서 정의되는 흡수율(intercept ratio) η_{rint} 를 극대화할 수 있는 구조로 설계한다. 즉 헬리오스타트 반사면의 크기 및 곡면 형상은, 실제 제작 가능하면서 동시에 흡수율이 최대가 될 수 있도록 설계한다.

$$\eta_{rint} = \frac{\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 E(x,z) dx dz}{\int_x \int_z E(x,z) dx dz} \quad (21)$$

3.1 반사거울 및 장착프레임의 설계 조건

헬리오스타트 반사거울의 형상은 수차 및 비점수차가 보상된 포물면이 가장 우수한 집광특성을 갖는다. 그러나 그와 같은 형상의 거울면을 성형하고 생산하여 헬리오스타트의 반사거울로 사용하는 것은, 태양열발전시스템의 건설 비용 등을 고려하여 볼 때 현실적으로 부적절한 것으로 알려지고 있다.

표 1. 반사거울의 크기 및 형상조건

유리 종류	저철분 유리
크기 및 두께	두께 4(mm), 1×1(m)크기의 정사각형
코팅재료	은(silver)
반사율	93.5%
곡면형상	평판, 구면, 원통형

표 1은 200kW 탑형 태양열발전시스템에서 사용될 반사거울의 크기 및 형상 조건을 나타낸 것이다. 표에서와 같이, 헬리오스타트의 반사면을 구성하는 반사거울은, 생산 비용과 형상의 성형 정밀도 등을 고려하여 당초 유리 공장에서 생산된 정사각형 저철분 유리를 크기 변경없이 사용하며, 다만 집광을 위하여 구면 또는 원통형으로 곡면형상이 성형되어 사용될 수 있음을 조건으로 하였다.

반사거울의 장착을 위한 장착 프레임의 형상은 반사거울의 경우에서보다는 자유롭게 설정될 수 있다. 이는 비록 반사거울 장착 프레임이 구형의 형상을 갖는다고 하여도, 실제 제작에서는 장착 프레임을, 그림 7에서와 같이 평면(flat plate base)으로 제작하며, 다만 반사거울의 중심이 구면상에 위치하도록 하고, 동시에 거울중심의 법선벡터가 구형의 중심을 향하는 방향이 되도록 하는 구조를 갖는다는 것을 의미하기 때문이다.

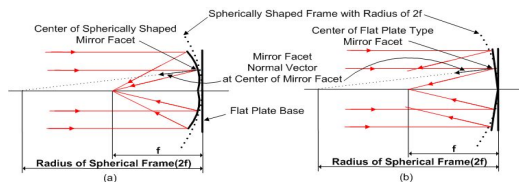


그림 7. 구형 장착 프레임에 설치된 (a) 구면반사거울과 (b) 평판반사거울

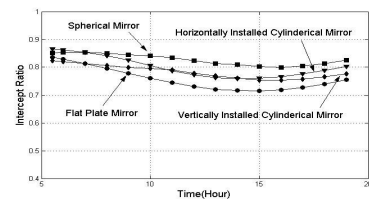
3.2 반사면의 구조 설계

헬리오스타트의 집열특성은 헬리오스타트의 구조 및 설치 위치에 따라 변화한다. 바꾸어 말해서 헬리오스타트 설치위치에 따른 헬리오스타트의 흡수율은, 헬리오스타트가 태양탑으로부터 멀리 위치할수록 떨어지며, 아울러 태양 이동경로가 가장 긴 하지(summer

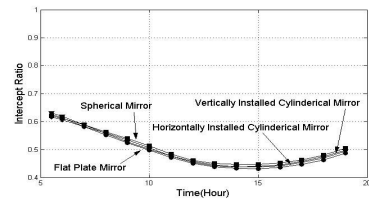
solstice)에 가장 낮은 흡수율을 가진다.

200kW 탑형 태양열발전시스템 건설 부지는 140×120(m)의 사각형 면적으로, 그림 3에서와 같이, 태양탑은 부지의 최남단 중앙에 해당되는 (0,0)(m)에 위치한다. 아울러 헬리오스타트 필드에 해당되는 태양탑 북쪽에서 집광효율이 가장 낮은 곳은 헬리오스타트 필드의 북쪽 모퉁이에 해당되는 (70,120)(m) 지점이다. 따라서 만약 (70,120)(m)에 위치하는 헬리오스타트의 반사면을 흡수율이 극대화되는 구조로 설계하면, 이에 따라 전체 헬리오스타트 필드의 집광효율이 극대화될 수 있을 것이다.

그림 8과 그림 9는, 2011년 6월 22일(하지) 일출이후 30분이 경과된 시간부터 일몰이전 30분까지 매시간에서, (70,120)(m)에 위치하는 헬리오스타트의 장착 프레임 구조, 반사거울의 수 그리고 반사거울의 형상 변화에 따른 흡수율의 변화를 나타낸 것이다¹⁾.



(a) 반사거울 4개를 2×2로 배열

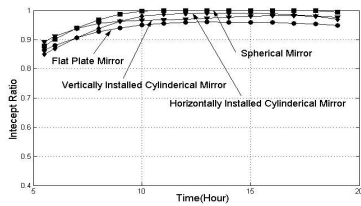


(b) 반사거울 9개를 3×3로 배열

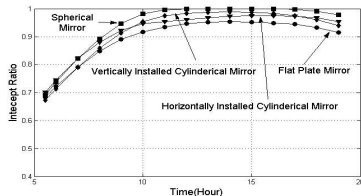
그림 8. 평면(flat plate) 장착 프레임에 설치된 거울 형상 변화에 따른 흡수율의 변화

1) 수평 원통형 장착 프레임 및 수직 원통형 장착 프레임에서의 반사거울 형상 변화에 따른 흡수율은 그림 9의 구형 장착 프레임에 설치된 동일 형태의 반사거울이 갖는 흡수율 보다 낮다. 그림 8과 그림 9의 목적은 장착프레임 및 반사거울의 형상에 따른 흡수율을 상호 비교하여 가장 높은 흡수율을 갖는 장착 프레임의 구조 및 반사거울의 조합을 선택하기 위한 것이며, 따라서 수평 원통형 장착 프레임 및 수직 원통형 장착 프레임에서의 반사거울 형상 변화에 따른 흡수율은 그림으로 표시하지 않았다.

그림 8과 그림 9를 분석하여 보면, 우선 헬리오스타트 반사거울 장착 프레임의 구조는 구형이 되는 것이 중요하다. 아울러 헬리오스타트의 반사면을 구성하기 위한 반사거울의 수는, 헬리오스타의 태양추적오차, 반사거울의 표면 균일도에 따른 분산 효과 그리고 오전 10시 이전의 흡수율 등을 고려하여 최대 4개를 2×2의 형태로 장착하는 것이 중요하다. 이는, 표 2에서와 같이, 구형 장착 프레임에 반사거울 4개를 2×2의 형태로 장착한 헬리오스타트의 경우 만이 일평균 95% 정도의 흡수율을 제공할 수 있기 때문이다. 또한 표 3은 2011. 6. 22. 일중 헬리오스타트의 흡수율이 90% 이상 되는 시간의 총 일조시간에 대한 비율을 나타낸 것이다.



(a) 반사거울 4개를 2×2로 배열



(b) 반사거울 9개를 3×3로 배열

그림 9. 구형 장착 프레임에 설치된 반사거울 형상 변화에 따른 흡수율의 변화

표 2. 2011.6.22 일평균 흡수율

장착프레임 반사거울형태	평면형				구형				
	F	H	V	S	F	H	V	S	
반사거울 배치구조	2×2	0.76	0.83	0.78	0.80	0.94	0.96	0.96	0.98
	3×3	0.5	0.51	0.5	0.5	0.89	0.94	0.91	0.91

F:평판 H:수평원통형 V:수직원통형 S:구면

표 3. 2011.6.22 일중 흡수율 0.9 이상 시간 비율

장착프레임 반사거울형태	배치구조	평면형				구형			
		F	H	V	S	F	H	V	S
2×2		0.0	0.0	0.0	0.0	0.87	0.93	0.87	0.93
3×3		0.0	0.0	0.0	0.0	0.67	0.73	0.73	0.73

F:평판 H:수평원통형 V:수직원통형 S:구면

또한 그림 9 (a)를 보다 세부적으로 다시 분석하여 보면, 구면 반사거울의 흡수율이 가장 높고 평판 반사거울의 흡수율이 가장 낮다. 그러나 이들 흡수율의 차이가 크지 않다. 따라서 만약 구면 반사거울을 제작하기 위한 경비와 제작된 구면의 곡면정확성 등의 문제점을 고려하여 본다면, 비록 흡수율이 조금 떨어지기는 하나 평판 반사거울의 사용이 구면 반사거울의 사용 보다 현실적인 것으로 보인다.

그림 10은 구형 반사거울 장착 프레임과 평판 반사거울로 반사면을 형성한 헬리오스타트의 춘분 및 하지 그리고 위치 변화에 따른 흡수율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 장착 프레임이 구형이고, 반사거울이 평판형이며, 4개의 반사거울을 2×2의 형태로 장착한 헬리오스타트의 흡수율은 이른 오전 시간대를 제외하고는 대부분 95% 이상을 유지하고 있다.

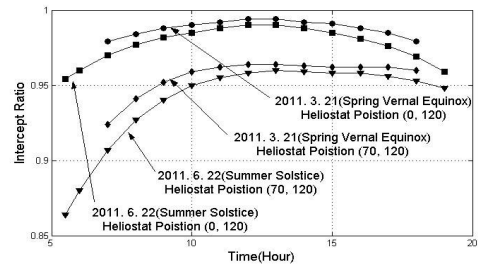


그림 10. 구형 장착 프레임, 4개의 평판 반사거울을 갖는 헬리오스타트의 흡수율

4. 결 론

본 연구는 200kW 탑형 태양열발전시스템에서 사용될 헬리오스타트 반사면의 구조를

헬리오스타트에서 반사된 열에너지가 흡수기에 도달되는 비율을 표시하는 흡수율을 기준으로 설계한 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 우선 헬리오스타트의 집열특성 분석을 위한 프로그램을 태양광선 궤적추적기법을 기반으로 개발하였으며, 개발된 프로그램을 활용하여 반사거울 장착 프레임과 반사거울의 곡면 형상 변화에 따른 흡수율의 변화를 분석하였다.

본 연구에서 사용한 설계기준이 되는 헬리오스타트의 흡수율은, 가장 낮은 흡수율을 갖는 하지에 평균 95% 이상이 되어야 하며, 또한 일중 90% 이상의 흡수율을 갖는 시간의 비율이 일조시간 대비 90% 이상이 되는 것이다.

그럼에도 불구하고 본 연구에서 결정된 200kW 탑형 태양열발전시스템을 위한 헬리오스타트 반사면의 구조는, 구형의 반사거울 장착 프레임과 4개의 $1 \times 1(m)$ 크기 평판 반사거울을 2×2 의 형태로 장착하여 반사면을 형성하는 것이다. 이는 비록 평판 반사거울의 사용에 따른 흡수율이 당초 목표값에 정확하게 도달하지 못하더라도 대단히 근접한 값을 가지며, 아울러 반사거울 제작 경비 그리고 생산과정에서의 거울 곡면의 정밀도 유지 문제 등을 종합적으로 고려하여 구면 보다는 평판 반사거울의 사용이 현실적으로 보다 합리적이라고 판단하였기 때문이다.

현재 본 연구에서 결정된 반사면 구조를 갖는 헬리오스타트가 제작되고 있으며, 아울러 헬리오스타트 필드 설계를 위하여, 년중 시간 변화 및 위치의 변화에 따른 헬리오스타트의 흡수율, 집열 열유속 그리고 집열에너지 량의 변화 분석 등과 같은 헬리오스타트 집열특성에 대한 연구가 진행되고 있다.

참 고 문 헌

1. PIER/California Energy Commission, "Renewable Energy : Solar two central receiver", October 1999
2. http://en.wikipedia.org/wiki/PS10_Solar_Power_Plant
3. Y.T. Chen, B.H. Lim and C.S. Lim, "Off-axis aberration correction surface in solar energy application", Solar Energy, Vol. 80, 2006, pp. 268-271
4. R. Zaibel, E. Dagan, J. Karni and H. Ries, "An astigmatic corrected target aligned heliostat for high concentration", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 37, 1995, pp. 191-202
5. F.J. Collard, A. Gomez and J.A. Turegano, "An analytic function for the flux density due to sunlight reflected from a heliostat", Solar Energy, Vol. 37, 1986, pp. 215-234
6. F.W. Lipps and M.D. Walzel, "An analytic evaluation of the flux density due to sunlight reflected from a flat mirror having a polygonal boundary", Solar Energy, Vol. 21, 1978, pp. 113-121
7. J.C. Henne and J.L. Abatut, "An analytical method for reflected flux density calculations", Solar Energy, Vol. 32, 1984, pp. 357-363
8. P. Garcia, A. Ferriere and J. Bezan, "Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: A comparative review", Solar Energy, Vol. 82, 2008, pp. 189-197
9. Wei Xiudong, "Study on the heliostat field design in the solar tower power plant", Ph. D Dissertation, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, China, May 2009
10. 박영철, "Heliostat 제어시스템", 한국태양에너지학회논문집, Vol. 29, No. 1, 2009, pp. 50-57
11. E.A. Igel and R.L. Hughes, "Optical analysis of solar facility heliostats", Solar Energy, Vol. 22, 1979, pp. 283-295