

# 200kW 탑형 태양열발전시스템의 Heliostat Field 설계

박영철

서울과학기술대학교 정보통신대학 전기정보시스템공학과(ycpark@seoultech.ac.kr)

## Design of Heliostat Field for 200kW Tower Type Solar Thermal Power Plant

Park, Young Chil

Dept. of Electrical Engineering and Information Technology,  
Seoul National University of Science and Technology(ycpark@seoultech.ac.kr)

### Abstract

Heliostat field is the most important subsystem in the tower type solar thermal power plant since its optical performance affects the total system efficiency most significantly while the construction cost of it is the major part of total construction cost in such a power plant. Thus a well designed heliostat field to maximize the optical efficiency as well as to minimize the land usage is very important.

This work presents methodology, procedures and result of heliostat field design for 200kW solar thermal power plant built recently in Daegu, Korea. A 2x2(m) rectangular shaped receiver located at 43(m) high and tilted 28° toward heliostat field, 450 of heliostats of which the reflective surface is formed by 4 of 1x1(m) flat plate mirror facet, and the land area having about 140x120(m) size are used to form the heliostat field.

A procedure to deploy 450 heliostats in radial staggered nonblocking formation is developed. Also the procedures to compute the cosine effect, intercept ratio, blocking and shading ratio in the field are developed. Finally the heliostat field is designed by finding the optimal radial distance and azimuthal spacing in radial staggered nonblocking formation such that the designed heliostat field optical efficiency could be maximized.

The designed heliostat field has 77.1% of annual average optical efficiency, which is obtained by annually averaging the optical efficiencies computed between the time of where sun elevation angle becomes 10° after sunrise and the time of where sun elevation angle becomes 10° before sunset in each day.

Keywords : 탑형 태양열발전시스템(Tower type solar thermal power plant), 헬리오스타트 필드 설계(Heliostat field design), 헬리오스타트 필드광학효율(Heliostat field optical efficiency)

## 1. 서 론

탑형 태양열발전시스템(tower type solar thermal power plant)의 헬리오스타트 필드(heliostat field)는 태양추적을 수행하는 수백 또는 수천의 헬리오스타트들로 구성되어 있는 탑형 태양열발전시스템의 부분시스템(subsystem)으로, 건설비용에서 뿐만이 아니라, 필드광학효율(optical efficiency)이 태양열발전시스템 전체효율에 가장 큰 영향을 미치는 것과 같은 대단히 중요한 부분이다.

헬리오스타트 필드광학효율은, 흡수기의 구조와 위치, 필드를 구성하는 개별 헬리오스타트의 구조 그리고 헬리오스타트들의 배치에 따른 주변 헬리오스타트와의 간섭 효과 등에 따라 달라진다. 헬리오스타트 필드 설계는, 따라서, 흡수기 개구부 구조, 설치 위치 및 설치 방향 설계로부터 시작하여, 헬리오스타트의 구조 설계 그리고 요구되는 수량의 헬리오스타트들의 배치에 이르기까지 다양하고 복합적인 과정을 포함한다.

본 연구는 국내에서 건설된 200kW 탑형 태양열발전시스템[1]의 헬리오스타트 필드 설계에 관한 것이다. 헬리오스타트 필드는 일반적으로 필드광학효율을 극대화하고 동시에 필드 건설부지 면적의 최소화가 이루어지는 구조로 설계된다. 그러나 일부에서는, 부지 활용 효율의 극대화에 따른 필드광학효율의 저하 문제를 극복하기 위하여, 조건이 허용하는 범위 내에서 부지 활용효율 보다는 광학효율의 극대화가 우선적으로 이루어지도록 하는 설계가 수행되기도 한다[2,3,4].

본 연구는 공기식 흡수기를 사용하며,  $1 \times 1(m)$  크기의 평판 거울 4개를 구형 프레임에 장착하여 반사면을 형성한 헬리오스타트[5] 450개로 구성되는 헬리오스타트 필드의 설계를, 필드광학효율의 극대화 측면에서 수행한 것이다. 즉 본 연구는 필드를 구성하는 모든 개별 헬리오스타트로부터 반사된 태양

광이 주변 헬리오스타트에 의하여 막힘없이 흡수기에 도달되는 비막힘(nonblocking) 구조의 필드로 구성되는 과정을 우선 개발하였다. 동시에 본 연구는 필드 설계에서 요구되는 필드광학효율의 계산을 위하여, 코사인 효과(cosine effect), 흡수율(intercept ratio), 그리고 탑 또는 주변 헬리오스타트의 그림자로 인한 집열 손실율을 계산하기 위한 과정을 개발하였다. 그 후 본 연구는 필드 구성 부지조건이 허용하는 범위 내에서, 필드광학효율이 극대화되는 비막힘 구조의 필드 열간간격(radial distance)과 좌우간격(azimuthal spacing)을 찾음으로써 200kW 태양열발전시스템을 위한 헬리오스타트 필드의 설계를 수행한 것이다.

## 2. 헬리오스타트 필드 설계 초기 조건

그림 1은 본 연구에서 사용한 헬리오스타트 필드 설계 과정을 도식적으로 나타낸 것이다.

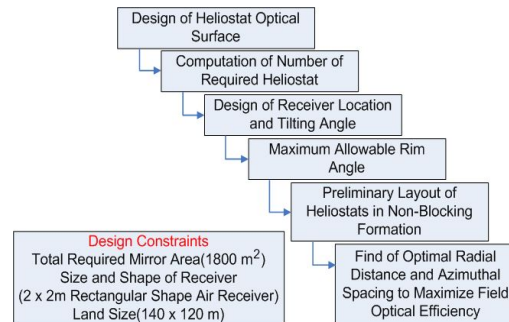


Fig. 1 Heliostat field design procedure

본 연구의 경우에는, 대구지방의 일사조건에서 건설되는 태양열발전시스템이 정상상태 운전에서 200kW의 발전을 위한 열에너지제공 조건으로부터 결정된 헬리오스타트의 총 반사면적(total mirror area)  $1,800(m^2)$ 와 흡수기 동작조건으로부터 결정된 흡수기 개구부의 크기  $2 \times 2(m)$ 가 필드 설계의 초기값으로 사용되었다.



Fig. 2 Landscape of heliostat field construction site

본 연구는 또한 그림 2에서와 같은 부지를 헬리오스타트 필드 구성을 위한 건설부지로 사용하였다. 아울러 본 연구는 선행연구[5]에서 결정된  $4(m^2)$ 의 반사면적을 갖는 헬리오스타트를 사용하며, 따라서 필드 구성에서 요구되는 총 헬리오스타트의 수는 450개이다. 마지막으로 본 연구는 선행연구[6]에서 결정된 흡수기 설치 높이  $43(m)$ , 설치 각도  $28^\circ$  그리고 헬리오스타트 필드의 최대 허용 림 각도  $45^\circ$ 를 필드 설계의 초기조건으로 하였다.

### 3. 비막힘 구조의 헬리오스타트 필드 구성

#### 3.1 헬리오스타트 필드 구조 선택

헬리오스타트 필드는 헬리오스타트가 배치되는 형태에 따라 parallel cornfield, parallel staggered, radial cornfield 및 radial staggered 구조로 나뉜다[2]. 비록 미국 Sandia 국립연구소에서 운영되고 있는 탑형태양열발전시스템[7]이 parallel staggered 구조를 가지고 있기는 하나, 현재 상용 또는 기타 실증시험용 탑형태양열발전시스템은 모두 radial staggered 구조의 필드를 사용하고 있다. 이는 radial staggered 구조의 헬리오스타트 필드가 동일 조건에서 가장 높은 필드광학효율을 제공하기 때문이며[2], 따라서 radial staggered 구조를 본 연구에서 설계되는 헬리오스타트 필드의 구조로 선택하였다.

#### 3.2 최소간격 비막힘 헬리오스타트 필드

최소간격 비막힘 헬리오스타트 필드는, 필드광학효율과는 무관하게, 다만 개별 헬리오

스타트가 주변 헬리오스타트와 동작 중 간섭이 일어나지 않도록 하며, 동시에 개별 헬리오스타트에서 반사된 태양광이 흡수기에 도달되는 동안 주변 헬리오스타트에 의하여 막힘이 발생하지 않는 조건을 충족하는 최소간격으로 배치된 필드이다.

최소간격의 비막힘 헬리오스타트 필드는 헬리오스타트의 구조, 흡수기의 구조 그리고 부지 구조로부터 기하학적 해석 과정을 통하여 구성된다. 본 연구는 참고문헌[8]의 해석 과정을 본 연구에서 설계하는 태양열발전시스템의 건설 조건에 맞추어 다음과 같이 변경하고 적용함으로써 최소간격을 갖는 비막힘 구조의 헬리오스타트 필드를 형성하였다.

① 탑으로부터 필드 첫번째 열(first ring)까지의 거리  $R_1$ 은 흡수기 중심의 높이  $H_r$ 과 동일하게 설정한다. 동시에 첫번째 열의 헬리오스타트들은 헬리오스타트를 그림 3에서와 같이 헬리오스타트 반사면 가로 길이  $h_w$ 의 2배를 지름으로 하는 원으로 나타내었을 때, 그와 같은 원이 서로 접하여 배치되도록 설치된다.

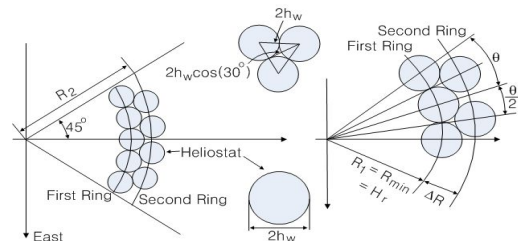


Fig. 3 Deployment of heliostats in the first ring and the second ring

첫번째 열에 배치되는 헬리오스타트의 수  $n_1$ 은, 따라서, 식 (1)에서와 같이 정의되며, 식 (1)의  $\theta_{max}$ 는 필드 구성에서 허용된 최대 림 각도이다.

$$\theta = \frac{2h_w}{R_1}, \quad n_1 = 2 \times \text{integer}\left(\frac{\theta_{max}}{\theta}\right) + 1 \quad (1)$$

② 두번째 열(second ring)의 헬리오스타트는 그림 3에서와 같이 배열되며, 따라서 탑으로부터 두번째 열까지의 거리  $R_2$ 는 식 (2)에서와 같이 정의된다. 또한 필드의 두번째 열에 배치되는 헬리오스타트의 수  $n_2$ 는 식 (3)에서와 같이 계산된다.

$$R_2 = R_1 + \nabla R = R_1 + 2h_w \cos(30^\circ) \quad (2)$$

$$n_2 = 2 \times \text{integer}\left(\frac{\theta_{\max} - \theta/2}{\theta}\right) + 2 \quad (3)$$

③ 세번째 열의 헬리오스타트는, 그림 4에서와 같이, 탑과 첫 번째 열의 헬리오스타트 중심을 연결하는 방사선 상에 위치하며 동시에 헬리오스타트로부터 반사된 태양광이 첫번째 열에 있는 헬리오스타트에 의하여 막힘없이 흡수기에 도달되는 조건을 충족하는 거리에 위치한다. 탑으로부터 세번째 열까지의 거리  $R_3$  계산 위하여, 그림 4에서와 같이, 흡수기 하단 중심점  $A(0, 0, H_r - r_h/2)$ 로부터 첫번째 열에 위치하는 헬리오스타트를 표시하는 원의 접점  $C$ 를 지나 지면의 점  $B(0, R_{AB}, 0)$ 에 도달하는 직선을 그린다. 세번째 열의 헬리오스타트는 이와 같이 얻어진 직선에 헬리오스타트를 나타내는 원이 점  $D$ 에서 접하도록 배치되며, 따라서  $R_3$ 는 그림 4에서와 같은 기하학적 관계에

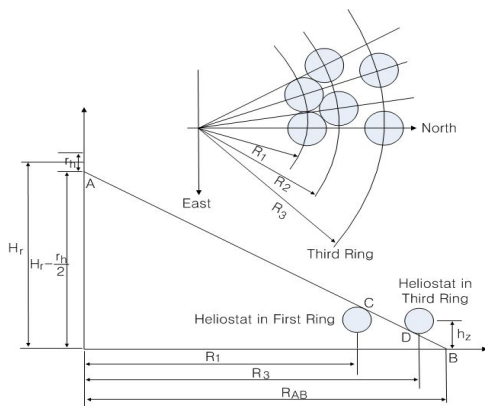


Fig. 4 Deployment of heliostats in the third ring

따라 식 (5)와 같이 정의된다. 식 (4)와 식 (5)의  $h_h$ 와  $h_z$ 는 각각 헬리오스타트 반사면의 세로 길이와 반사면 중심까지의 높이를 나타내며,  $r_h$ 는 흡수기 세로방향의 길이를 나타낸다.

$$R_{AB} = \frac{-b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \quad (4)$$

$$a_1 = \left(\frac{h_h}{2}\right)^2 - \left[\left(H_r - \frac{r_h}{2}\right) - h_z\right]^2$$

$$b_1 = 2R_1\left(H_r - \frac{r_h}{2}\right)\left(H_r - \frac{r_h}{2} - h_z\right)$$

$$c_1 = \left(H_r - \frac{r_h}{2}\right)^2 \left[\left(\frac{h_h}{2}\right)^2 - R_1^2\right]$$

$$R_3 = \frac{-b_2 - \sqrt{b_2^2 - 4a_2c_2}}{2a_2} \quad (5)$$

$$a_2 = \left(H_r - \frac{r_h}{2}\right)^2$$

$$b_2 = -2R_{AB}\left(H_r - \frac{r_h}{2} - h_z\right)\left(H_r - \frac{r_h}{2}\right)$$

$$c_2 = R_{AB}^2\left(H_r - \frac{r_h}{2} - h_z\right)^2$$

$$- \left(\frac{h_h}{2}\right)^2 \left[\left(H_r - \frac{r_h}{2}\right)^2 + R_{AB}^2\right]$$

④ 네번째 열의 헬리오스타트는, 다시 헬리오스타트로부터 반사된 태양광이 두번째 열에 있는 헬리오스타트에 의하여 막힘없이 흡수기에 도달되는 조건을 충족시키는 거리에 배치되며, 따라서 탑으로부터 네번째 열까지의 거리  $R_4$ 는 식 (4)와 식 (5)에서  $R_1$  대신  $R_2$ 를 사용하여 계산된다. 이후 탑으로부터 필드 모든 열까지의 거리는  $R_3$  또는  $R_4$ 의 계산과 동일한 과정을 연속적으로 적용함으로써 결정된다.

⑤ 헬리오스타트를 이상의 과정에서와 같이 순차적으로 배치하면, 각각의 헬리오스타트는 그림 4에서와 같이 탑과 첫번째 열 그리고 탑과 두번째 열에 위치하는 헬리오스타트들의 중심과 연결되는 방사선상에 지속적인

로 놓이게 되며, 따라서 어느 열부터는 배치된 헬리오스타트들 사이의 좌우간격이 불필요하게 벌어지게 된다. 최소간격을 갖는 비막힘 헬리오스타트 필드의 구성 과정은, 만약 새로운 열에 배치되는 헬리오스타트가 기존에 정의된 방사선상에 지속적으로 위치하는 경우와 새로이 첫번째 열로 시작되는 경우를 식 (6)에서 정의되는 부지 활용효율  $\delta$ 를 사용하여 그림 5에서와 같이 비교함으로써, 새로운 열에 배치되는 헬리오스타트의 좌우간격이 불필요하게 벌어지는 것을 방지하는 과정을 포함하고 있다.

$$\delta = \frac{N_n [h_w \times h_h]}{\theta_{max} [(R_{i+2} + h_w)^2 - (R_{i+1} + h_w)^2]} \quad (6)$$

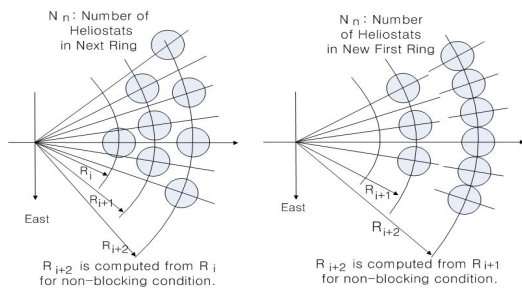


Fig. 5 Computation of land usage efficiency  $\delta$

그림 6은 본 연구의 200kW 태양열발전시스템 건설 부지에 이상의 과정을 적용하여 얻어진 좌우대칭이면서 동시에 최소간격의 비막힘 헬리오스타트 필드를 나타낸 것이다.

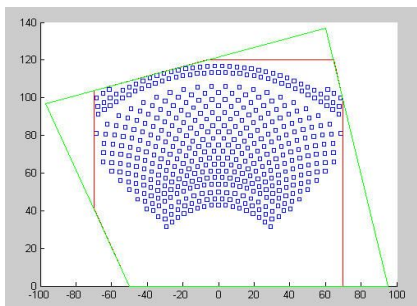


Fig. 6 Minimal spacing nonblocking heliostat field

#### 4. 헬리오스타트 필드광학효율

헬리오스타트 필드광학효율은 필드의 집광효율을 나타내는 것으로서 식 (7)에서와 같이 정의되며, 필드 설계는 필드 구성에 사용되는  $N$ 개의 헬리오스타트를 필드광학효율  $\eta_f$ 를 극대화하는 구조로 개별 헬리오스타트의 설치 위치를 결정하는 것이다.

$$\eta_f = \frac{\sum (\eta_{ref} \times \eta_{cos} \times (1 - \eta_{bs}) \times \eta_{atm} \times \eta_{int})}{N} \quad (7)$$

식 (7)의  $\eta_{ref}$ 는 헬리오스타트 반사면의 반사율(reflectivity)을 나타내며,  $\eta_{cos}$ 는 코사인 효과를, 그리고  $\eta_{bs}$ 는 막힘 또는 그림자로 인한 손실율(blocking and shading ratio)을 나타낸다. 또한  $\eta_{atm}$ 는 반사된 태양광 에너지가 흡수기에 도달되기 까지 공기층을 통과하는 동안 감소되는 비율을 나타내며, 마지막으로  $\eta_{int}$ 는 반사된 에너지 중 흡수기 개구부 안으로 도달되는 비율을 표시하는 흡수율(intercept ratio)이다.

200kW 태양열발전시스템에서 사용된 헬리오스타트 반사거울의 반사율  $\eta_{ref}$ 는 0.93의 값[5]을 가지며,  $\eta_{atm}$ 은 흡수기와 설치되는 헬리오스타트 간의 거리가 본 연구에서 사용되는 부지의 경우 비교적 짧고 따라서 공기층을 통과하는 동안 감쇄되는 열에너지는 없는 것으로 가정하였다[9].

##### 4.1 코사인 효과

코사인 효과  $\eta_{cos}$ 는 헬리오스타트로 입사되는 태양광선과 헬리오스타트 반사면의 법선이 이루는 각의 코사인 값으로써, 시간 및 설치 위치 변화에 따른 헬리오스타트 유효 반사면적의 비율을 나타내는 값이다.

그림 7은 본 연구의 헬리오스타트 필드 건설 예정부지 개별 위치에서의 년평균 코사인 효과를 나타낸 것이다.

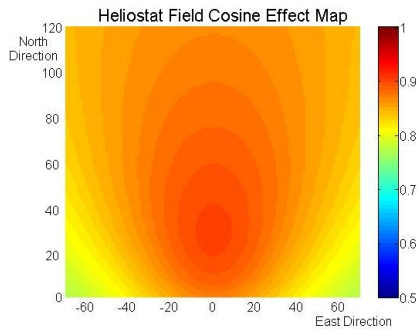


Fig. 7 Annual average cosine effect map

#### 4.2 흡수율

헬리오스타트에서 반사된 태양열에너지 중에서 실제 흡수기 개구부 입구 안으로 도달되는 에너지의 비율을 표시하는 흡수율  $\eta_{int}$  역시 헬리오스타트의 위치 및 시간에 따라 변화한다.

그림 8은 헬리오스타트 필드 건설 예정 부지를  $5 \times 5(m)$  크기의 격자로 나누고 이들 각각의 격자점에 헬리오스타트가 설치되는 경우에 대한 년평균 흡수율을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 부지 중심축 부근에 위치하는 헬리오스타트의 년평균 흡수율은 1.0에 가까운 값을 가지며, 이에 반하여 부지의 모서리와 가장자리 특히 탑에 가까이 있는 가장자리에서의 흡수율이 상대적으로 낮다.

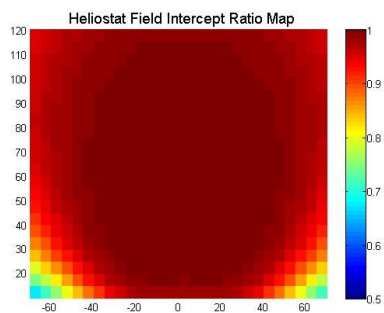


Fig. 8 Annual average intercept ratio map

#### 4.3 막힘 및 그림자에 의한 손실율

막힘 및 그림자에 의한 손실율  $\eta_{bs}$ 는 반사

된 태양에너지가 주변 헬리오스타트에 막힘으로써 흡수기에 도달되지 못하는 손실율과 탑 또는 주변 헬리오스타트의 그림자로 인한 반사면적의 감소에 따른 손실율을 나타낸다.

본 연구에서는 막힘 및 그림자에 의한 손실율 계산을 위하여 선행연구[10]에서 제안된 과정을 다음과 같이 보완 적용하였다.

##### (1) 막힘에 의한 손실율

본 연구에서 설계되는 헬리오스타트 필드는 비막힘 구조를 가지며, 따라서 막힘에 의한 손실율의 계산을 필요로 하지 않는다. 그림에도 불구하고, 본 연구는 향후 부지 활용 효율의 극대화가 설계 기준으로 사용될 경우 또는 최적화 과정에서 발생할 수도 있는 막힘에 의한 손실율의 계산이 필요한 경우에 대비하기 위하여 막힘에 의한 손실율 계산 과정을 포함하여 개발하였다.

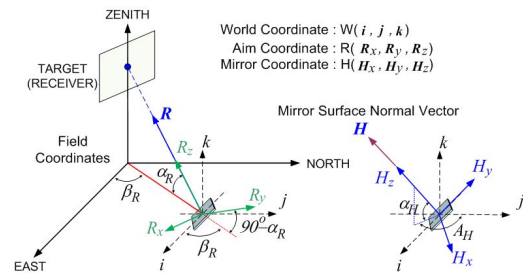


Fig. 9 Coordinate systems used in the computation of blocking loss

그림 9는 막힘에 의한 손실율 계산에서 사용된 좌표계를 나타낸다. 기준좌표계(world coordinate)는 손실율을 계산하는 기준 헬리오스타트(base heliostat) 반사면의 중심에 위치하고 필드좌표계(field coordinate)와 동일한 방향을 갖는 좌표계이다. 목표방향좌표계(aim coordinate)는 헬리오스타트 반사면 중심으로부터 탑의 흡수기 중심을 연결하는 방향을 좌표계의  $z$  방향으로 하고, 동시에  $x$  방향을 표시하는 단위벡터  $R_w$ 가 그림 9의  $R$  벡

터와 필드좌표계의 천정축(zenith axis)에 의하여 형성되는 평면 위에 놓이도록 설정된 좌표계이다. 거울좌표계(mirror coordinate)는 헬리오스타트의 반사면 중심에 위치하고 반사면의 법선 방향을  $z$  방향 그리고  $y$  방향이 반사면의 세로방향과 평행하게 설정된 좌표계이다.

그림 9에서 표시된 좌표계 간의 상호 변환 행렬은 식 (8)과 식 (9)와 같이 표시된다.

$${}^R_W Rot = \begin{pmatrix} \sin\beta_R & -\cos\beta_R & 0 \\ \sin\alpha_R \cos\beta_R & \sin\alpha_R \sin\beta_R & \cos\alpha_R \\ -\cos\alpha_R \cos\beta_R & -\cos\alpha_R \sin\beta_R & \sin\alpha_R \end{pmatrix} \quad (8)$$

$${}^H_W Rot = \begin{pmatrix} -\cos A_H & \sin A_H & 0 \\ -\sin\alpha_H \sin A_H & -\sin\alpha_H \cos A_H & \cos\alpha_H \\ \cos\alpha_H \sin A_H & -\cos\alpha_H \cos A_H & \sin\alpha_H \end{pmatrix} \quad (9)$$

그림 10은 주변 헬리오스타트 중에서 실제 막힘을 유발하는 헬리오스타트의 판별을 위해 사용된 좌표들을 나타낸 것이다. 기준 헬리오스타트(base heliostat)의 중심  $(x_b, y_b, z_b)$  에 원점을 두고 있는 기준좌표계에 주변 헬리오스타트의 중심점  $(x_s, y_s, z_s)$  을 표시하고, 이를 다시 식 (10)를 사용하여 목표방향좌표계로 변환하였을 때 나타나는  $R_z$  방향의 값  $z_R$  을 계산한다. 만약 계산된  $z_R$  가 양의 값을 가지면 이는 해당 주변 헬리오스타트가 기준 헬리오스타트보다 탑을 기준으로 전방에 위치하고 있음을 의미하며, 따라서 막힘을 유발할 가능성이 있는 헬리오스타트가 된다.

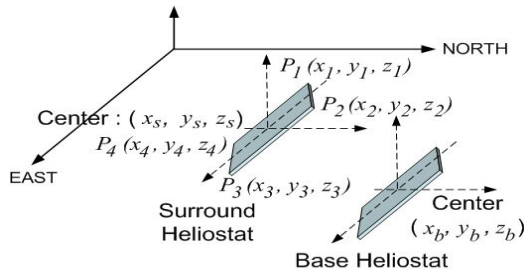


Fig. 10 Position coordinates used in the computation of blocking loss

$$\begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{pmatrix} = {}^R_W Rot \begin{pmatrix} x_s - x_b \\ y_s - y_b \\ z_s - z_b \end{pmatrix} \quad (10)$$

식 (10)을 사용하여 확인된 막힘을 유발시킬 가능성이 있는 헬리오스타트들에 대하여, 연산의 다음 단계는 선별된 주변 헬리오스타트의 모서리 꼭지점  $P_1, P_2, P_3, P_4$  각각을 식 (11)과 식 (12)에서와 같이 기준 헬리오스타트의 목표방향좌표계와 거울좌표계로 각각 변환한다.

$$\begin{pmatrix} x_{Ri} \\ y_{Ri} \\ z_{Ri} \end{pmatrix} = {}^R_W Rot \begin{pmatrix} x_i - x_b \\ y_i - y_b \\ z_i - z_b \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} x_{Hi} \\ y_{Hi} \\ z_{Hi} \end{pmatrix} = {}^H_W Rot \begin{pmatrix} x_i - x_b \\ y_i - y_b \\ z_i - z_b \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (12)$$

식 (12)에 의하여 계산된  $z_{H1}, z_{H2}, z_{H3}, z_{H4}$  를 사용하여, 모서리 꼭지점 각각이 기준 헬리오스타트의 목표방향좌표계의  $z$  축을 따라 거울면 위에 사상(projection)되었을 때 나타나는 점들을 식 (13)에서와 같이 다시 목표방향좌표계에서 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} x_{Pi} \\ y_{Pi} \\ z_{Pi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{Ri} \\ y_{Ri} \\ z_{Ri} - \frac{z_{Hi}}{\cos(\theta_B)} \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (13)$$

식 (13)의  $\theta_B$  는 목표방향좌표계와 거울좌표계가 이루는 각도로서, 그림 9에서 정의된  $R$  벡터와  $H$  벡터로부터 식 (14)에서와 같이 정의된다.

$$\theta_B = \cos^{-1}(R \cdot H) \quad (14)$$

마지막으로 기준 헬리오스타트의 거울면 위에 있으면서 목표방향좌표계에 표시되어

있는 식 (13)에 의하여 정의된 점들을 거울좌표계로 식 (15)에서와 같이 변환한다.

$$\begin{pmatrix} x_{Mi} \\ y_{Mi} \\ 0 \end{pmatrix} = {}^H_W Rot {}^W_R Rot \begin{pmatrix} x_{Pi} \\ y_{Pi} \\ z_{Pi} \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

식 (15)에 의하여 정의된 4개의 점들은 막힘을 유발시킬 가능성이 있는 주변 헬리오스타트의 4 모서리 꼭지점들이 기준 헬리오스타트의 거울면에 사상되었을 때 나타나는 좌표들이다. 따라서 만약 헬리오스타트에서 반사되어 흡수기에 도달되는 열에너지의 계산에서 사용되는 반사거울면의 요소가 식 (15)에서 정의된 4 점에 의하여 형성되는 사각형 속에 위치하면 해당 거울요소로부터 반사된 열에너지는 막힘에 의하여 흡수기에 도달되지 못하게 된다.

막힘에 의한 손실율은 막힘을 유발시킬 가능성이 있는 모든 주변 헬리오스타트에 대하여 순차적으로 식 (10)으로부터 식 (15)를 적용시킴으로써 얻어지는 막힘이 발생하는 거울요소에 대한 전체 거울요소의 면적 비율로서 얻어진다.

(2) 그림자에 의한 손실율

그림 11은 그림자에 의한 손실율을 계산하기 위하여 사용되는 좌표계를 나타낸 것으로, 그림 11의 기준좌표계와 거울좌표계는 그림 9의 막힘에 의한 손실율 계산에서 사용된 것과 동일한 것이다.

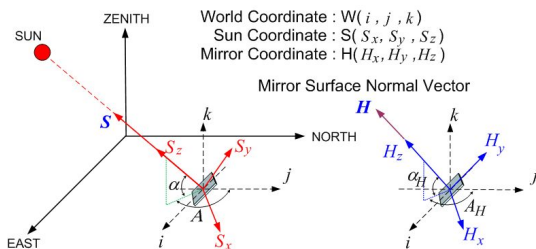


Fig. 11 Coordinate systems used in the computation of shading loss

그림자에 의한 손실율의 계산은, 막힘에 의한 손실율의 계산과 유사하게 이루어지며, 그림자에 의한 손실율 계산에서 필요로 하는 태양좌표계(sun coordinate)와 기준좌표계의 변환 행렬은 식 (16)과 같이 정의된다.

$${}^S_W Rot = \begin{pmatrix} -\cos A & \sin A & 0 \\ -\sin A \sin \alpha & -\cos A \sin \alpha & \cos \alpha \\ \sin A \cos \alpha & \cos A \cos \alpha & \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (16)$$

아울러 선별된 주변 헬리오스타트들 중에서 실제 그림자를 드리울 가능성이 있는 헬리오스타트를 구별해 내기 위하여 식 (17)을 사용하여 각각의 주변 헬리오스타트에 대한  $z_S$  값을 계산한다. 만약 계산된  $z_S$ 가 양의 값을 가지면, 이는 해당 주변 헬리오스타트가 태양 방향을 향하여 기준 헬리오스타트보다 앞쪽에 위치함을 의미하며 따라서 그림자에 의한 손실을 유발시킬 가능성이 있는 헬리오스타트가 된다.

$$\begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{pmatrix} = {}^S_W Rot \begin{pmatrix} x_s - x_b \\ y_s - y_b \\ z_s - z_b \end{pmatrix} \quad (17)$$

식 (17)으로 확인된 그림자를 드리울 가능성이 있는 주변 헬리오스타트들에 대하여, 다음 단계로 해당 주변 헬리오스타트의 모서리 꼭지점  $P_1, P_2, P_3, P_4$  각각을 식 (18)에서와 같이 기준 헬리오스타트의 태양좌표계로 변환한다.

$$\begin{pmatrix} x_{Si} \\ y_{Si} \\ z_{Si} \end{pmatrix} = {}^S_W Rot \begin{pmatrix} x_i - x_b \\ y_i - y_b \\ z_i - z_b \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (18)$$

동시에 주변 헬리오스타트의 모서리 꼭지점 각각을, 식 (12)에서 정의된  $z_{H1}, z_{H2}, z_{H3}, z_{H4}$ 를 사용하여 식 (19)에서와 같이 기준 헬리오스타트의 태양좌표계의  $z$  축을 따라 기준 헬리오스타트로 사상하고, 이와 같이 사상된 점들을 다시 기준 헬리오스타트의 태양좌



표계에서 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \\ z_{Ti} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{Si} \\ y_{Si} \\ z_{Si} - \frac{z_{Hi}}{\cos(\theta_S)} \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (19)$$

식 (19)의  $\theta_S$ 는 태양좌표계와 거울좌표계가 이루는 각으로, 그림 11의 단위벡터  $\mathbf{S}$ 와  $\mathbf{H}$ 로부터 식 (20)에서와 같이 정의된다.

$$\theta_S = \cos^{-1}(\mathbf{S} \cdot \mathbf{H}) \quad (20)$$

마지막으로 기준 헬리오스타트의 거울면 위에 있으면서 태양좌표계에 표시되어 있는 식 (19)에 의하여 정의된 점들을 거울좌표계로 변환한다.

$$\begin{pmatrix} x_{Mi} \\ y_{Mi} \\ 0 \end{pmatrix} = {}^H_W Rot_S^W Rot \begin{pmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \\ z_{Ti} \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (21)$$

만약 기준 헬리오스타트의 거울요소가 식 (21)에 의하여 정의되는 4개의 점으로 형성되는 사각형 내에 위치하면 해당 거울요소는 주변 헬리오스타트의 그림자에 의하여 가려져 있는 상태가 된다. 따라서 그림자에 의한 손실율은 주변 헬리오스타트들의 그림자에 의하여 태양이 가려져 있는 거울요소들 모두를 구별하고 이를 다시 전체 거울요소의 면적으로 나눔으로서 얻어진다.

탑의 그림자로 인한 손실율은 탑의 전면을 구성하는 평면의 4 꼭지점 좌표를 사용하여 주변 헬리오스타트에 의한 손실율 계산과정과 동일하게 계산함으로써 얻어진다.

### 5. 헬리오스타트 필드 설계

본 연구에서 설계된 헬리오스타트 필드는 부지 활용효율보다는 필드광학효율이 우선시

되는 조건으로 설계되었다. 바꾸어 말해서, 본 연구에서 설계된 헬리오스타트 필드는 광학효율 극대화를 위하여 우선 비막힘 구조를 기본 구조로 하되 식 (7)에서 정의된 필드광학효율이 극대화되도록 하는 헬리오스타트의 열간 간격과 좌우간격을 찾아냄으로서 이루어졌다.

헬리오스타트 구조와 흡수기 설치위치, 개구부의 크기 그리고 필드 최대 허용 림 각도 등의 조건들이 이미 필드의 흡수율을 그림 8에서와 같이 충분히 큰 값을 갖도록 하고 있으며, 따라서 설계 과정에서 열간 간격과 좌우간격 변화에 따른 년평균 흡수율의 변화는 대단히 작았다. 동시에 필드광학효율에 큰 영향을 미치는 코싸인 효과 역시 필드 최대 허용 림 각인  $45^\circ$  이내의 부지만으로 구성되는 필드의 경우 열간 간격 및 좌우간격 변화에 따라 큰 변화가 없음이 확인되었다. 마지막으로 필드광학효율에 코싸인 효과와 대등한 영향을 미치는 그림자에 의한 손실율은 태양의 고도가 낮은 시간 동안 큰 값을 가지며, 따라서 이의 최소화를 위한 필드의 열간 간격 및 좌우간격의 조정이 설계과정에서 이루어졌다.

그림 12는 이상의 과정을 통하여 설계된 200kW 태양열발전시스템의 헬리오스타트 필드를 나타낸 것이다.

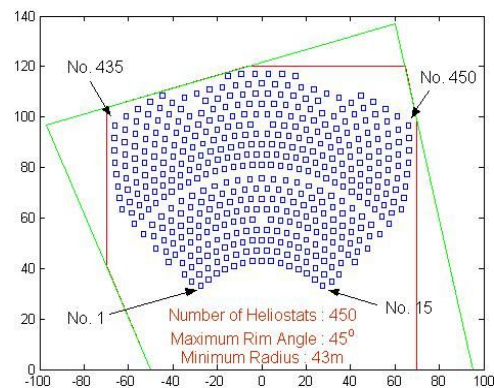


Fig. 12 Designed heliostat field for 200kW solar thermal power plant

그림 13은 설계된 헬리오스타트 필드의 년 중 광학효율 변화를 나타낸 것으로, 77.1%의 연평균 광학효율을 가지고 있으며, 이는 참고 문헌[2]에서 알려진 60~70%의 연평균 필드 광학효율을 갖는 다른 탑형 태양열발전시스템과 비교하여 대단히 높은 효율이다.

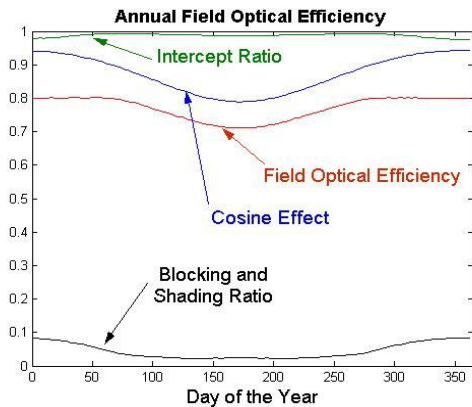


Fig. 13 Annual heliostat field optical efficiency

식 (7)을 사용하여 계산된 필드광학효율은 계산에서 사용된 시간 간격에 따라, 비록 그 차이가 크지는 않으나, 약간의 차이가 발생되게 된다. 본 연구에서는 필드광학효율 계산을 위하여, 년중 3일 간격으로 선택된 날짜에서 매일 태양일출이후 태양의 고도각이  $10^\circ$ 가 되는 시간으로부터 일몰전 고도각이  $10^\circ$ 가 되는 시간사이를 남중시간을 기준으로 15개로 구분하여 계산한 모든 값을 사용하여 평균하였다.

그림 13을 살펴보면 설계된 헬리오스타트 필드의 광학효율은 여름철이 낮고 겨울철이 높다. 이는 여름철의 태양궤적에 따른 코사인 손실이 겨울철 보다 상대적으로 대단히 높기 때문이다. 그러나 막힘 및 그림자에 의한 손실율은 겨울철이 여름철 보다 높은 값을 갖는다. 이는 겨울철의 태양고도가 여름철에 비하여 낮고 따라서 탑과 주변 헬리오스타트의 그림자에 의한 집열 손실이 겨울철이 여름철 보다 높기 때문이다.

## 6. 결 론

본 연구는 국내에서 건설된 200kW 탑형 태양열발전시스템의 헬리오스타트 필드를 설계한 것으로, 본 연구에서는 우선 선행연구결과들을 보완하여 최소간격을 갖는 비막힘 구조의 필드 구성을 위한 과정과 필드광학효율의 계산을 위한 모든 과정을 개발하였다. 그 후 본 연구는 필드 건설 부지의 구속조건을 충족시키면서 필드광학효율이 극대화시키는 비막힘 구조의 열간 간격 및 좌우간격을 찾아냄으로서 77.1%의 연평균 필드광학효율을 갖는 헬리오스타트 필드를 설계하였다.

본 연구에서 개발된 헬리오스타트 필드 설계 과정은, 비록 외국에 이미 많은 종류의 필드 설계 프로그램[11]이 존재하고 있으나 국내에 공개된 것이 없으며, 따라서 국내 탑형 태양 열발전시스템 건설 기술의 국산화에 기여할 것으로 기대된다.

## 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. M.H. Park, "Introduction of Daegu City Gas Power Tower Project", The Magazine of Korean Solar Energy Society, Vol. 9, No. 2, 2010, pp. 14-18
2. X. Wei, "Study on the Heliostat Filed Design in the Solar Thermal Power Plant", Ph.D Dissertation, Chinese Academy of Sciences, China, May, 2009
3. M. Sanchez and M. Romero, "Methodology for Generation of Heliostat Field Layout in Central Receiver Systems based on Yearly Normalized Energy Surfaces",

- Solar Energy 20, 2006, pp. 861-874
4. Steve Schell, "Design and Evaluation of esolar's Heliostat Fields", Solar Energy 85, 2011, pp. 614-619
  5. Y.C. Park, "Design of Structure of Heliostat Reflective Surface for 200kW Tower Type Solar Thermal Power Plant", J. of the Korean Solar Energy Society, Vol. 31, No. 2, 2011, pp. 53-62
  6. Y.C. Park, "Analysis of Energy Concentration Characteristics of Heliostat used in 200kW Tower Type Solar Thermal Power Plant", J. of the Korean Solar Energy Society, Vol. 31, No. 3, 2011, pp. 80-88
  7. [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_solar\\_thermal\\_power\\_stations](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations)
  8. F.M.F. Siala and M.E. Elayeb, "Mathematical Formulation of a Graphical Method for a Nonblocking Heliostat Field Layout", Solar Energy 23, 2001, pp. 77-92
  9. M. Schmitz, P. Schwarzbo, R. Buck et. al, "Assessment of Potential Improvement due to Multiple Apertures in Central Receiver Systems with Secondary Concentrators", Solar Energy, 80, 2006, pp. 111-120
  10. R.H. McFee, "Power Collection Reduction by Mirror Surface Nonflatness and Tracking Error for a Central Receiver Solar Power System", Applied Optics, Vol. 14 No. 7, 1975, pp. 1493-1502
  11. Clifford Ho, "Software and Codes for Analysis of Concentrating Solar Power Technologies", SANDIA Report, SAND 2008-8053, 2008