

# 태양광선 궤적추적기법을 이용한 Heliostat 구동축 기구오차에서 기인하는 태양추적오차의 분석

박영철\*

\*서울산업대학교 제어계측공학과(ycpark@snut.ac.kr)

## Analysis of Sun Tracking Error Caused by the Heliostat Driving Axis Geometrical Error Utilizing the Solar Ray Tracing Technique

Park, Young-Chil\*

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

### Abstract

Heliostat, as a mirror system tracking the sun's movement, is the most important subsystem determining the efficiency of solar thermal power plant. Thus the accurate sun tracking performance under the various hazardous operating condition, is required.

This study presents a methodology of development of the solar ray tracing technique and the application of it in the analysis of sun tracking error due to the heliostat geometrical errors. The geometrical errors considered here are the azimuth axis tilting error and the elevation axis tilting error.

We first analyze the geometry of solar ray reflected from the heliostat. Then the point on the receiver, where the solar ray reflected from the heliostat is landed, is computed and compared with the original intended point, which represents the sun tracking error. The result obtained shows that the effect of geometrical error on the sun tracking performance is varying with time(season) and the heliostat location. It also shows that the heliostat located near the solar tower has larger sun tracking error than that of the heliostat located farther.

Keywords : 태양광선 궤적추적기법(Solar ray tracing technique), 헬리오스타트(Heliostat), 헬리오스타트 기구오차(Heliostat geometrical error), 태양추적오차(Sun tracking error)

### 기 호 설 명

$A_H, \alpha_H$  : 헬리오스타트 방위각 및 고도각

$A, \alpha$  : 태양 방위각 및 고도각

투고일자 : 2009년 2월 25일, 심사일자 : 2009년 3월 9일, 게재확정일자 : 2009년 4월 6일  
교신저자 : 박영철(ycpark@snut.ac.kr)

- $R, R_e$  : 헬리오스타트로부터 흡수기를 향하는 태양광선 방향의 단위벡터
- $S$  : 헬리오스타트로부터 태양을 향하는 단위벡터
- $H, H_e$  : 헬리오스타트 반사거울면 법선방향 단위벡터
- $\theta_s, \theta_e$  : 태양광선 입사각
- $c\theta, s\theta$  :  $\cos(\theta), \sin(\theta)$
- $Rot(K, \theta)$  : 회전축  $K$ 를 기준으로 각도  $\theta$  회전하는 회전변환행렬
- $i, j, k$  : x, y, z 축 방향 단위벡터
- $K_A, K_E$  : 설치오차를 갖는 헬리오스타트 방위각 및 고도각 구동축의 단위 벡터
- $H_M$  : 헬리오스타트 설치위치좌표
- $T, T_e$  : 흡수기 상의 반사 목표위치 및 실제 반사광 도달위치
- $\theta_T$  : 흡수기 설치 각도
- $\theta_{AE}, \theta_{AS}$  : 방위각 구동축 설치오차
- $\theta_{EE}, \theta_{ES}$  : 고도각 구동축 설치오차
- $L$  : 헬리오스타트로부터 흡수기 반사광 도달지점까지 거리
- $()^T$  : 전치(transpose) 벡터

## 1. 서 론

탑형 태양열 발전시스템(tower type solar thermal power plant)의 헬리오스타트(heliostat)는 태양열 에너지를 탑 상단에 위치하는 흡수기(solar receiver)로 반사시키기 위한 거울을 가진 태양열 집광장치로서, 헬리오스타트 제어시스템에 의하여 태양추적을 수행한다. 헬리오스타트의 태양추적정밀도는, 헬리오스타트가 태양열을 흡수기로 반사시키는 열에너지의 양과 질을 결정하며, 따라서 태양열 발전시스템의 효율을 결정하는 중요한 인자이다.

헬리오스타트 태양추적정밀도는, 헬리오스

타트 방위각과 고도각 구동축의 설치오차, 반사거울의 설치오차 등과 같은 기구오차, 반사거울의 곡면오차, 수차(aberration) 그리고 반사된 광의 산란 및 굴절에 따른 오차 등과 같은 광학오차, 마지막으로 태양위치계산 및 헬리오스타트 방위각과 고도각 계산의 정확성 등과 같은 연산오차에 영향을 받는다[1]. 일반적으로 태양추적정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 오차는 기구오차이며, 연산오차에 의한 태양추적오차는 무시할 수 있는 정도인 것으로 알려지고 있다[2].

본 연구는, 헬리오스타트 기구오차로 인하여 발생하는 태양추적오차의 분석을 위하여, 헬리오스타트로 입사되어 흡수기로 반사되는 광학오차를 갖지 않는 태양광선(solar ray)의 궤적추적기법(ray tracing technique)을 개발하고, 이를 활용하여 헬리오스타트 구동축 설치오차에서 기인하는 태양추적오차의 크기 및 생성구조를 해석한 것이다.

헬리오스타트 기구오차로 인한 태양추적오차에 관한 연구는, Stone 등[2]에 의하여 방위각 구동축 설치오차, 반사거울 설치방향오차 그리고 구동좌표 기준설정오차에 따른 태양추적오차가 분석되었으며, Chong 등[3]에 의한 방위각 구동축 설치오차에 따른 태양추적오차의 제시, 그리고 Stone 등[2]의 연구에서 사용된 기구오차에서 기인하는 태양추적오차의 최소화 방안이 Jones 등[4]에 의하여 제안되었다.

태양추적오차의 생성 구조에 대한 정확한 이해는 헬리오스타트의 태양추적정밀도 향상을 위한 방안 수립의 첫 단계로서 중요한 의미를 가진다. 본 연구는, 제한적 경우의 기구오차에 대한 태양추적오차를 제시한 Stone 등[2]의 연구 결과를 확장하여, 헬리오스타트의 모든 종류의 기구오차<sup>1)</sup>에서 기인하는 태양추적오차의 분석을 위하여, 헬리오스타트

1) 헬리오스타트의 기구오차에는, 방위각과 고도각 구동축 설치오차, 반사거울 설치오차, 헬리오스타트 위치오차 그리고 기준좌표 설정오차, 기어 백래시 등과 같은 구동 메커니즘 유발 기구오차 등이 있다.

에서 반사되어 집열기에 도달되는 태양광선의 궤적추적기법을 개발하고, 이를 이용하여 우선 헬리오스타트 방위각 및 고도각 구동축 설치오차가 태양추적오차에 미치는 영향을 해석한 것이다.

## 2. 태양광선의 궤적추적

헬리오스타트로부터 반사되어 흡수기의 목표지점에 도달하는 광학오차를 갖지 않는 태양광선의 궤적을 추적하기 위하여, 태양위치, 헬리오스타트, 그리고 목표지점을 그림 1에서와 같이 설정하였다. 즉 헬리오스타트는 방위각-고도각 추적 방식에 의하여 변화하는 태양위치를 추종하며, 태양추적을 위한 헬리오스타트 방위각  $A_H$  와 고도각  $\alpha_H$  는, 태양의 방위각  $A$  와 고도각  $\alpha$  로부터 계산된 태양위치를 표시하는 단위벡터  $\mathbf{S}$  와 헬리오스타트 반사거울의 중심으로부터 흡수기의 목표지점을 향하는 단위벡터  $\mathbf{R}$  을 사용하여 계산된 헬리오스타트 반사거울면의 법선방향을 나타내는 단위벡터  $\mathbf{H}$  로부터, 식 (1)~(5)에서와 같이 계산된다[5].

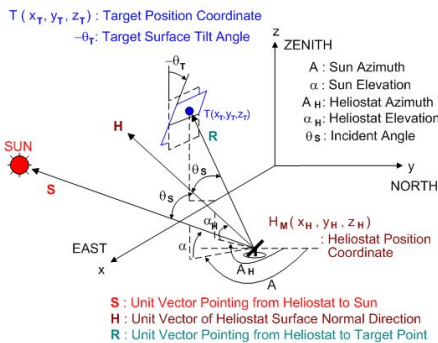


그림 1. 태양, 헬리오스타트 및 목표지점 위치

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H} &= H_x \mathbf{i} + H_y \mathbf{j} + H_z \mathbf{k} \\
 &= \cos \alpha_H \sin A_H \mathbf{i} + \cos \alpha_H \cos A_H \mathbf{j} + \sin \alpha_H \mathbf{k} \\
 &= \frac{\mathbf{R} + \mathbf{S}}{2 \cos \theta_s}
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\alpha_H = \arcsin\left(\frac{R_z + \sin \alpha}{2 \cos \theta_s}\right) \quad (2)$$

$$\sin A_H = \frac{R_c + \cos \alpha \sin A}{2 \cos \theta_s \cos \alpha_H} \quad (3)$$

$$\cos A_H = \frac{R_n + \cos \alpha \cos A}{2 \cos \theta_s \cos \alpha_H} \quad (4)$$

$$A_H = \operatorname{atan2}(\sin A_H, \cos A_H) \quad (5)$$

헬리오스타트의 기구오차가 없는 경우, 방위각  $A_H$  와 고도각  $\alpha_H$  를 갖는 헬리오스타트의 반사거울면 법선방향 단위벡터  $\mathbf{H}_e$  는, 식 (6)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.

$$\mathbf{H}_e = \operatorname{Rot}(\mathbf{k}, 180 - A_H) \cdot \operatorname{Rot}(\mathbf{i}, -\alpha_H) \cdot (-\mathbf{j}) \quad (6)$$

식 (6)의  $\operatorname{Rot}(\mathbf{i}, \theta)$ ,  $\operatorname{Rot}(\mathbf{k}, \theta)$ 는, 각도  $\theta$ 를 좌표의 x 축, z 축을 기준으로 회전시킨 각각의 회전 변환행렬로서, y 축을 기준으로 하는 회전변환 행렬  $\operatorname{Rot}(\mathbf{j}, \theta)$ 와 함께 다음과 같이 정의된다.

$$\operatorname{Rot}(\mathbf{i}, \theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & -s\theta \\ 0 & s\theta & c\theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\operatorname{Rot}(\mathbf{j}, \theta) = \begin{pmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\operatorname{Rot}(\mathbf{k}, \theta) = \begin{pmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

또한 헬리오스타트가 방위각  $A_H$  와 고도각  $\alpha_H$  를 갖는 자세에서, 입사되는 태양광선을 흡수기로 반사시키고 있으면, 이 때 헬리오스타트로부터 반사되어 흡수기를 향하는 태양광선의 방향을 나타내는 단위벡터  $\mathbf{R}_e$  는, 그림 2에서와 같은 과정으로, 식 (10)에서와 같이 정의된다. 만약 헬리오스타트의

기구오차가 없는 경우라면, 그림 1의  $R$ 에 의하여 정의된 목표지점으로 태양광선을 반사시키기 위한  $H$ 를 식 (1)에서와 같이  $S$ 와  $R$ 을 사용하여 계산하고, 계산된  $H$ 로부터 헬리오스타트 방위각과 고도각을 식 (2)와 식 (5)를 사용하여 계산한 후, 헬리오스타트를 회전시키면, 회전된 헬리오스타트의 반사거울면 법선방향 단위벡터를 나타내는 식 (6)에 의한  $H_e$ 는 당초  $H$ 와 같아지게 될 것이며, 따라서 식 (10)에서 계산된  $R_e$ 역시 당초의  $R$ 과 동일한 것이 될 것이다.

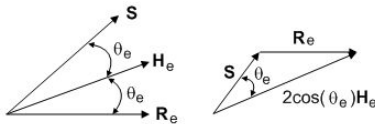


그림 2. 반사 태양광선의 방향 벡터  $R_e$

$$R_e = 2\cos(\theta_e)H_e - S \quad (10)$$

반사거울 중심좌표  $H_M(x_H, y_H, z_H)$ 을 갖는 헬리오스타트로부터 반사되어 그림 3에서와 같은 중심좌표  $T_c(x_{Tc}, y_{Tc}, z_{Tc})$ 를 가지고, x축을 기준으로  $-\theta_T$ 만큼 회전한 개구부를 갖는 흡수기로, 단위벡터  $R_e$ 의 방향을 갖는 태양광선이 흡수기에 도달되는 지점의 좌표  $T_e(x_{Te}, y_{Te}, z_{Te})$ 는, 흡수기 개구부의 평면을 나타내는 식 (11)과 단위 벡터  $R_e$ 를 정의하는 식 (12)를 상호 연립하여 식(13)~(14)에서와 같이 정의된다.

$$c\theta_T(y - y_{Tc}) - s\theta_T(z - z_{Tc}) = 0 \quad (11)$$

$$R_e = R_{ex}i + R_{ey}j + R_{ez}k = \frac{(x_{Te} - x_H)i + (y_{Te} - y_H)j + (z_{Te} - z_H)k}{L} \quad (12)$$

$$L = \frac{(y_H - y_{Tc}) + (s\theta_T/c\theta_T)(z_{Tc} - z_H)}{(s\theta_T/c\theta_T)R_{ez} - R_{ey}} \quad (13)$$

$$x_{Te} = x_H + R_{ex}L, \quad y_{Te} = y_H + R_{ey}L, \quad z_{Te} = z_H + R_{ez}L \quad (14)$$

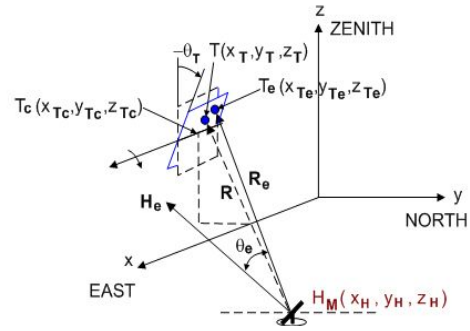


그림 3. 흡수기 개구부 평면과 반사광선의 교차점

이미 기술한 것과 같이, 만약 헬리오스타트의 기구오차가 없는 경우라면, 식 (14)에 의하여 계산된 헬리오스타트로부터 반사된 태양광선이 흡수기에 도달되는 지점  $T_e(x_{Te}, y_{Te}, z_{Te})$ 는, 당초의 목표지점  $T(x_T, y_T, z_T)$ 와 동일한 지점이 될 것이다. 그러나 헬리오스타트의 기구오차가 있는 경우에는, 최초 설정된 목표지점  $T(x_T, y_T, z_T)$ 로 태양광선을 반사시키기 위하여, 식 (1)~(5)를 사용하여 계산된 헬리오스타트의 방위각 및 고도각으로 헬리오스타트가 회전하더라도, 회전이후의 헬리오스타트 반사거울면의 법선방향을 표시하는 단위벡터  $H_e$ 는, 더 이상 당초 헬리오스타트 방위각 및 고도각 계산에서 사용된  $H$ 와 같지 않게 될 것이며, 따라서 헬리오스타트로부터 반사되어 흡수기로 향하는 태양광선의 방향을 나타내는 단위벡터  $R_e$ 역시 당초의  $R$ 과 다르고, 결국에는 식 (13)~(14)에 의하여 계산된 태양광선의 흡수기 도달 지점이 당초 목표 지점과 달라지게 될 것이다.

헬리오스타트 기구오차로 인한 태양추적 오차의 분석은, 일출부터 일몰까지 헬리오스타트가 태양추적을 수행하는 동안, 태양광선이 헬리오스타트로부터 반사되어 흡수기에 도달되는 지점을 태양광선 궤적추적을 통하여 연속적으로 계산하고, 이를 당초 목표 지점과 비교함으로써 이루어진다.

### 3. 헬리오스타트 구동축 설치오차에 의한 태양추적오차 분석

#### 3.1 방위각 구동축 설치오차의 영향

태양추적을 위한 헬리오스타트 방위각  $A_H$  는, 지표면에 수직한 축, 즉 헬리오스타트를 동쪽-북쪽-천정을 사용하는 기준좌표계의  $z$  축을 기준으로 하는 회전각도이다. 그러나 만약 헬리오스타트의 방위각 구동축이 설치오차로 인하여 지표면에 수직한  $z$  축과 동일한 방향을 갖지 않는 경사진 축일 경우, 이와 같이 경사를 갖는 회전축을 기준으로 태양추적을 위해 계산된 방위각  $A_H$  만큼 헬리오스타트를 회전시키면, 회전된 헬리오스타트 반사거울면 법선방향 단위벡터  $H_e$  는 당초 목표로 하는  $H$  와는 다르게 될 것이다.

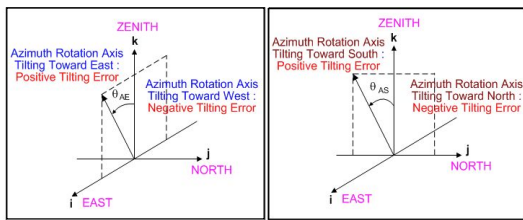


그림 4. 헬리오스타트 방위각 구동축 설치오차

설치오차를 갖는 방위각 구동축으로 인한 태양추적오차 해석을 위하여, 헬리오스타트 방위각 구동축이, 그림 4에서와 같이, 동서 방향으로  $\theta_{AE}$ , 남북 방향으로  $\theta_{AS}$  만큼 기울어져 있는 경우를 가정한다. 그러면 헬리오스타트 방위각 구동축의 방향을 표시하는 단위벡터  $K_A$ 는 식 (15)에서와 같이 정의된다.

$$K_A = Rot(j, \theta_{AE}) \cdot Rot(i, \theta_{AS}) \cdot k$$

$$= K_{Ax}i + K_{Ay}j + K_{Az}k \quad (15)$$

헬리오스타트가 식 (15)에 의하여 정의된  $K_A$  를 방위각 구동축으로 하여 각도  $A_H$  만큼 회전하면, 회전 이후 헬리오스타트 반사거울

면 법선방향 단위벡터  $H_e$  는 식 (16)에서와 같이 정의되며, 식 (16)의  $Rot(K_A, \theta)$ 는 임의의 방향을 갖는 회전축  $K_A$  를 기준으로 하는 회전변환행렬을 나타내는 것으로,  $\beta = 1 - c\theta$  를 사용하여 식 (17)과 같이 정의된다[6].

$$H_e = Rot(K_A, 180 - A_H) \cdot Rot(i, -\alpha_H) \cdot (-j) \quad (16)$$

$$Rot(K_A, \theta) = \begin{pmatrix} K_{Ax}^2 \beta + c\theta & & & \\ K_{Ax} K_{Ay} \beta + K_{Az} s\theta & & & \\ K_{Ax} K_{Az} \beta - K_{Ay} s\theta & & & \\ K_{Ay} K_{Ax} \beta - K_{Az} s\theta & K_{Az} K_{Ax} \beta + K_{Ay} s\theta & & \\ K_{Ay}^2 \beta + c\theta & K_{Az} K_{Ay} \beta - K_{Ax} s\theta & & \\ K_{Ay} K_{Az} \beta + K_{Ax} s\theta & K_{Az}^2 \beta + c\theta & & \end{pmatrix} \quad (17)$$

경사진 방위각 구동축을 갖는 헬리오스타트의 태양추적오차 계산은, 우선 현재 시간의 태양위치  $S$  와 흡수기 목표지점을 향하는 단위벡터  $R$  로부터 식 (2)와 식 (5)를 사용하여 헬리오스타트 방위각  $A_H$  와 고도각  $\alpha_H$  를 계산하고, 계산된 방위각과 고도각 만큼 헬리오스타트가 회전한 이후의 반사거울면 법선방향을 나타내는 단위벡터  $H_e$  를 식 (16)을 사용하여 계산하며, 이를 다시 식 (10)에 대입함으로써 경사진 구동축을 가지고 회전하는 헬리오스타트로부터 반사되는 태양광선의 방향  $R_e$  를 계산한다. 마지막으로 반사된 태양광선이 흡수기와 만나는 지점을 식 (13)~(14)를 사용하여 계산한다.

그림 5, 그림 6, 그림 7 및 그림 8은, 동쪽 방향으로  $0.05^\circ$ , 북쪽 방향으로  $0.05^\circ$  기울어진 방위각 구동축을 갖는 위치좌표  $(-133.196, 175.364, 6)(m)$  의 헬리오스타트 No. 1, 위치좌표  $(0, 200.213, 6)(m)$  의 헬리오스타트 No. 22, 위치좌표  $(-65.566, 35.163, 6)(m)$  의 헬리오스타트 No. 92, 그리고 위치좌표  $(65.566, 35.163, 6)(m)$  의 헬리오스타트 No. 100이, 2008년 3월 22일, 6월 21일, 12월 21일, 수직하게 설치( $\theta_T = 0$ )되어 있는 흡수기 목표지점  $(0, 0, 93)(m)$  으로 일출부터 일몰까지 태양광선을 반사시키는 동안 발생된 태양추적

오차를 각각 나타낸 것이다<sup>2)</sup>.

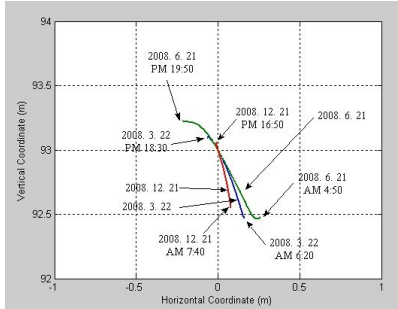


그림 5. 헬리오스타트 No. 1의 방위각 구동축 설치오차에 의한 태양추적오차

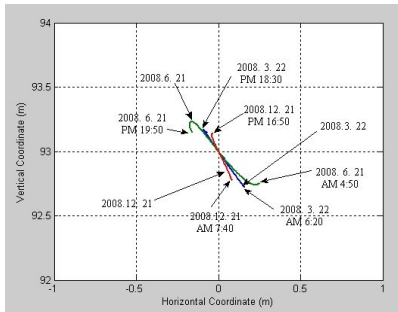


그림 6. 헬리오스타트 No. 22의 방위각 구동축 설치오차에 의한 태양추적오차

헬리오스타트 방위각 구동축 설치오차로 인한 태양추적오차는, 시간(계절)과 헬리오스타트 설치 위치에 따라 변화한다. 또한 동일한 크기의 기구오차에 대하여, 헬리오스타트 No. 1과 No. 92를 비교하여 보면, 태양 탑 가까이 위치하는 헬리오스타트가 먼 곳에 위치하는 헬리오스타트 보다 더 큰 태양추적오차를 가진다. 아울러 헬리오스타트 No. 22와 헬리오스타트 No. 92를 비교하여 보면, 헬리오스타트 설치위치가 헬리오스타트 필드 중심축(y 축)으로부터 x 방향으로 멀어짐에 따라 또한 태양추적오차가 증가한다. 헬리오스

2) 본 연구는 현재 중국 북경 엔칭에 건설되고 있는 1MW급 태양열 발전소를 위한 기술 개발의 일환으로 추진되었으며, 따라서 본 연구에서 사용된 일출 및 일몰시간은 2008년 해당일 중국 북경 엔칭 (동경 115° 56' 19", 북위 40° 22' 54")에서의 일출 및 일몰 시간임.

타트 필드 중심인 y 축을 기준으로 하여 대칭적으로 설치되어 있는 헬리오스타트 No. 92와 No. 100을 비교하여 보면, 동일한 크기의 방위각 구동축 설치오차에 의한 태양추적오차는 흡수기 목표지점을 기준으로 하여 대칭적으로 발생하는 것을 볼 수 있다.

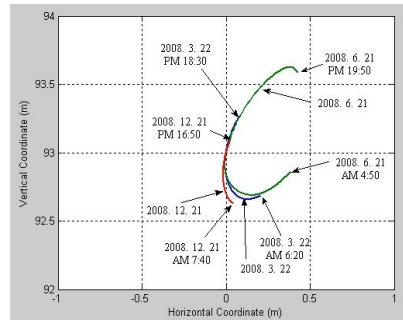


그림 7. 헬리오스타트 No. 92의 방위각 구동축 설치오차에 의한 태양추적오차

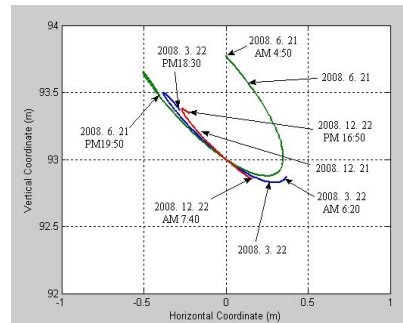


그림 8. 헬리오스타트 No. 100의 방위각 구동축 설치오차에 의한 태양추적오차

태양 탑 가까이 위치하는 헬리오스타트가 멀리 위치하는 헬리오스타트 보다, 또한 중심축에서 x 축 방향으로 멀리 떨어져 있는 헬리오스타트가 중심축 가까이 있는 헬리오스타트보다 큰 태양추적오차를 갖는 이유는, 그림 9에서와 같이, 태양 탑 가까이에 위치하는 헬리오스타트 또는 중심축에서 x 방향으로 멀리 떨어져 있는 헬리오스타트는, 태양추적을 위하여 보다 넓은 범위의 방위각 및 고도각 추적을 수행하여야 하며, 따라서 구동축 설치오차로 인한 효과가

증폭되는 현상이 나타나기 때문이다.

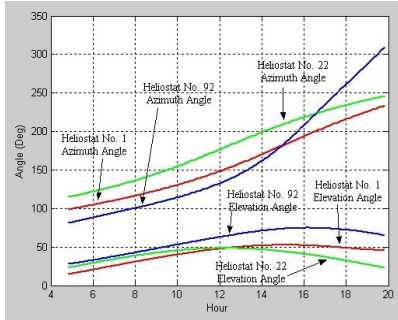


그림 9. 2008. 6. 21. 헬리오스타트 No. 1, No. 22, No. 92의 태양추적을 위한 방위각 및 고도각 변화

### 3.2 고도각 구동축 설치오차의 영향

헬리오스타트 고도각 구동축의 설치오차는 그림 10에서와 같이, 고도각 구동축 방향이 기준좌표계의 x 축과 일치하지 못하는 오차이다.

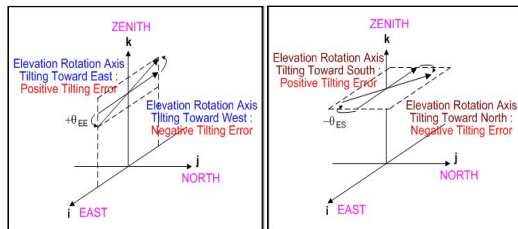


그림 10. 헬리오스타트 고도각 구동축 설치오차

헬리오스타트 방위각 구동축의 설치오차 경우와 동일하게, 만약 헬리오스타트 고도각 구동축이 x 축과 동일한 방향을 갖지 못하는 설치오차를 가지고 있는 경우, 이와 같은 고도각 구동축을 기준으로 당초 계산된 고도각  $\alpha_H$  만큼 헬리오스타트를 회전시키면, 회전된 헬리오스타트 반사거울면 법선방향 단위벡터  $H_e$  는 당초 목표지점으로 태양광선을 반사시키기 위한  $H$  와는 다르게 될 것이다.

식 (18)은, 그림 10에서와 같이, 고도각 구동축이 동서 방향으로  $\theta_{EE}$  기울어져 있으며, 남북 방향으로  $\theta_{ES}$  만큼 회전되어 있는 경우의 헬리오스타트 고도각 구동축의 방향을 표

시하는 단위벡터  $K_E$  를 나타낸다.

$$K_E = Rot(j, \theta_{EE}) \cdot Rot(k, \theta_{ES}) \cdot (-i) = K_{E_x}i + K_{E_y}j + K_{E_z}k \quad (18)$$

또한 헬리오스타트가 설치오차를 갖는 고도각 구동축인  $K_E$  를 기준으로  $\alpha_H$  만큼 회전하면, 회전 이후 헬리오스타트 반사거울면 법선방향 단위벡터  $H_e$  는 식 (19)에서와 같이 정의된다. 식 (19)의  $Rot(K_E, \theta)$ 는 임의의 방향을 갖는 회전축  $K_E$  를 기준으로 각도  $\theta$  만큼 회전하는 경우의 회전변환행렬을 나타내는 것으로, 식 (17)에서  $K_A$  대신  $K_E$  를 사용하여 얻어진 회전변환행렬이다.

$$H_e = Rot(k, 180 - \alpha_H) \cdot Rot(K_E, \alpha_H) \cdot (-j) \quad (19)$$

설치오차가 있는 고도각 구동축을 갖는 헬리오스타트의 태양추적오차 계산은, 방위각 구동축 설치오차의 경우와 동일하게 수행되며, 다만 계산된 방위각과 고도각 만큼 헬리오스타트를 회전시킨 이후의 반사거울면 법선방향을 나타내는 단위벡터  $H_e$  계산을 위하여 식 (19)를 사용하는 것이 다르다.

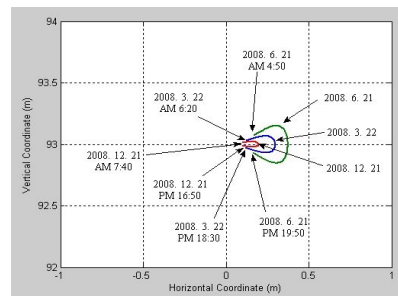


그림 11. 헬리오스타트 No. 22의 고도각 구동축 설치오차에 의한 태양추적오차

그림 11과 그림 12는 동쪽 방향으로  $0.05^\circ$  기울어져 있고, 북쪽 방향으로  $0.05^\circ$  회전되어 있는 고도각 구동축을 갖는 위치좌표 (0, 200.213, 6)(m)의 헬리오스타트 No. 22와 위



치좌표 (-65.566, 35.163, 6)(m)의 헬리오스타트 No. 92가, 2008년 3월 22일, 6월 21일, 12월 21일, 수직하게 설치( $\theta_T=0$ )되어 있는 흡수기 목표지점 (0, 0, 93)(m)으로 일출부터 일몰까지 태양광선을 반사시키는 동안 발생된 태양추적오차를 각각 나타낸 것이다.

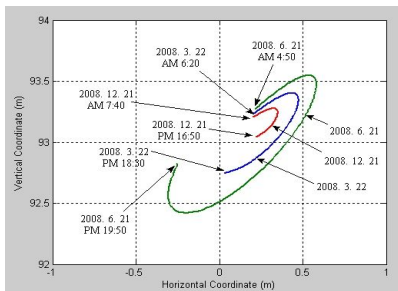


그림 12. 헬리오스타트 No. 92의 고도각 구동축 설치오차에 의한 태양추적오차

#### 4. 결 론

본 연구는 헬리오스타트 기구오차가 태양추적오차에 미치는 영향을 분석하고, 이를 기반으로 기구오차에 의한 태양추적오차의 최소화 방안 수립을 위한 연구의 첫 단계로서, 헬리오스타트로부터 반사되는 광학오차를 갖지 않는 태양광선의 궤적추적기법을 개발하고, 이를 이용하여 방위각 및 고도각 구동축 설치오차가 태양추적오차에 미치는 영향 분석한 것이다.

본 연구에서는, 우선 태양광선 궤적추적기법의 개발을 위하여 방위각-고도각 추적을 수행하는 헬리오스타트 반사광선의 기구적 해석을 수행하였으며, 이를 활용하여 기구오차를 갖는 헬리오스타트가 일출부터 일몰까지 태양추적을 수행하는 동안 생성되는 태양추적오차의 계산방법을 제안하였고, 마지막으로 제안된 태양추적오차 계산 방법을 방위각 및 고도각 구동축 설치오차에 의한 태양추적오차의 크기 및 생성 구조를 분석하는데 사용하였다.

방위각 구동축 및 고도각 구동축 설치오차에서 기인하는 태양추적오차는, 시간(계절)

과 헬리오스타트 설치위치에 따라 달라지며, 아울러 헬리오스타트가 태양 탑으로부터 가까이, 그리고 헬리오스타트 필드 중심축인 y축으로부터 x 방향으로 멀리 떨어져 있을수록 큰 오차를 가지고 있는 것으로 나타났다. 이는 일반적인 생각, 즉 태양 탑으로부터 먼 거리에 위치하는 헬리오스타트의 태양추적오차가 가까이 위치한 것 보다 큰 오차를 가질 것이라는 생각과는 반대되는 것이다.

본 연구에서 개발된 태양광선 궤적추적기법을 이용한 구동축 설치오차 이외의 다른 기구오차에서 기인하는 태양추적오차에 대한 해석을 현재 수행하고 있으며, 아울러 CCD 카메라를 사용하여 집열기로 반사되는 태양광선을 직접 측정하고 이를 기반으로 본 연구의 결과를 실험적으로 검증하는 연구도 현재 진행되고 있다.

#### 참 고 문 헌

1. PIER:California Energy Commission, "Renewable Energy : Solar two central receiver", October 1999
2. Stone K.W. and Jones S.A., "Analysis of Solar Two Heliostat Tracking Error Sources", SAND99-0239C, 1999
3. Chong, K.K. and Wong, C.W., "General Formula for On Axis Sun Tracking System and Its Application in Improving Tracking Accuracy of Solar Collector", Solar Energy, 2008
4. Jones, S.A. and Stone, K.W., "Analysis of Strategies to Improve Heliostat Tracking at Solar Two", SAND99-0092C, 1999
5. Park, Y. C., "Heliostat Control System", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 29, No. 1, 2009, pp. 50~57
6. Craig, J. J., Introduction to Robotics, Addison Wesley, 1986