

광특성분석시스템(BCS)을 이용한 헬리오스타트 태양추적오차의 측정 및 보정

Measurement and Compensation of Heliostat Sun Tracking Error Using BCS (Beam Characterization System)

홍 유 표, 박 영 칠*
(Yoo Pyo Hong¹ and Young Chil Park²)

¹Hyundai MOBIS

²Seoul National University of Science and Technology

Abstract: Heliostat, as a concentrator to reflect the incident solar energy to the receiver, is the most important system in the tower-type solar thermal power plant since it determines the efficiency and ultimately the overall performance of solar thermal power plant. Thus, a good sun tracking ability as well as a good optical property of it are required. Heliostat sun tracking system uses usually an open loop control system. Thus the sun tracking error caused by heliostat's geometrical error, optical error and computational error cannot be compensated. Recently use of sun tracking error model to compensate the sun tracking error has been proposed, where the error model is obtained from the measured ones. This work is a development of heliostat sun tracking error measurement and compensation method using BCS (Beam Characterization System). We first developed an image processing system to measure the sun tracking error optically. Then the measured error is modeled in linear polynomial form and neural network form trained by the extended Kalman filter respectively. Finally error models are used to compensate the sun tracking error. We also developed the necessary image processing algorithms so that the heliostat optical properties such as maximum heat flux intensity, heat flux distribution and total reflected heat energy could be analyzed. Experimentally obtained data shows that the heliostat sun tracking accuracy could be dramatically improved using either linear polynomial type error model or neural network type error model. Neural network type error model is somewhat better in improving the sun tracking performance. Nevertheless, since the difference between two error models in compensation of sun tracking error is small, a linear error model is preferred in actual implementation due to its simplicity.

Keywords: BCS (Beam Characterization System), tower type solar thermal power plant, heliostat, sun tracking error compensation

I. 서론

타워형 태양열발전시스템(tower type solar thermal power system)의 헬리오스타트(heliostat)는 입사되는 태양열에너지를 타워상단에 설치된 태양열 흡수기(solar receiver)로 반사시키기 위한 태양열 집광장치로서, 헬리오스타트의 태양추적정밀도는 태양열발전시스템의 전체적인 성능과 효율을 결정하는 중요한 요인이다.

헬리오스타트의 태양추적정밀도는, 헬리오스타트의 기구오차, 반사거울의 수차(aberration) 및 곡면오차, 반사된 태양광이 흡수기에 도달되는 동안 발생하는 산란 및 굴절과 같은 광학오차 그리고 태양위치 계산 오차와 같은 연산오차 등에 영향을 받는다[1,2]. 현재 실용화 또는 상업화된 타워형 태양열발전시스템에서 사용되고 있는 대부분의 헬리오스

타트는 개루프(open loop) 제어방식에 의한 태양추적을 수행하고 있으며, 따라서 헬리오스타트는 기구오차, 광학오차 및 연산오차에 의하여 유발되는 태양추적오차가 보정되지 않는 형태의 제어시스템에 의한 태양추적을 수행하고 있다.

개루프 제어방식으로 태양추적을 수행하는 헬리오스타트의 태양추적정밀도를 향상시키기 위한 노력으로 헬리오스타트의 기구오차로부터 기인하는 태양추적오차의 해석[3-5], 오차모델을 이용한 태양추적오차의 보정을 위한 연구[6] 등이 수행되었다. 그러나 이들 선행연구들은 헬리오스타트의 태양추적정밀도를 향상시키기 위한 방안들을 다만 해석적으로 제시하였으며, 따라서 이들 선행연구결과들을 실제 적용시키기 위한 헬리오스타트 태양추적오차측정시스템의 개발과 같은 추가적인 노력을 필요로 한다.

본 연구는 개루프 제어방식으로 태양추적을 수행하는 헬리오스타트의 태양추적정밀도 향상을 위하여, 헬리오스타트 태양추적오차를 광학적으로 측정하고 모델링하여 보정하는 광특성분석시스템(BCS: Beam Characterization System) [7-9]의 개발에 관한 것이다. 광특성분석시스템은 당초 헬리오스타트의 집광특성분석을 목적으로 개발되었고 또한 사용되었다[8,9]. 본 연구는, 광특성분석시스템을 현재 대구에 건

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 2. 9., 수정: 2012. 3. 19., 채택확정: 2012. 3. 27.

홍유표: 현대모비스(nevermindme@hanmail.net)

박영칠: 서울과학기술대학교 전기정보시스템공학과

(ycpark@seoultech.ac.kr)

※ 본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구 지원비로 수행되었음.

설된 200KW급 태양열발전시스템[10]의 헬리오스타트 집광 특성 분석을 위한 목적뿐만 아니라, 동시에 헬리오스타트 태양추적오차를 측정하고 모델링하여 헬리오스타트가 구조적으로 가지고 있는 태양추적오차를 보정하기 위한 선행연구[5,6]의 해석적인 과정을 실험적으로 구현한 것이다. 즉 본 연구는 헬리오스타트 집광특성분석을 당초 목적으로 하는 광특성분석시스템이 헬리오스타트 태양추적정밀도 향상을 위한 목적으로도 사용될 수 있음을 제안하고, 이를 위하여 광특성분석시스템에 의하여 측정된 헬리오스타트의 태양추적오차를 선형오차모델과 확장칼만필터 알고리즘에 의하여 학습된 뉴럴네트워크 형태의 모델로 각각 모델링하여 헬리오스타트의 태양추적오차를 보정함으로써 헬리오스타트의 태양추적정밀도가 향상될 수 있음을 실험적으로 비교하고 분석하였다.

II. 광특성분석시스템

광특성분석시스템은, 일반적으로 그림 1과 같은 기본구조를 가진다. 즉 광특성분석시스템은, 헬리오스타트로부터 반사되어 집열기(receiver) 하단에 설치되어 있는 열유속측정면(heat flux mapping target)에 도달된 태양열에너지를 CCD 카메라를 사용하여 영상으로 취득하고 이를 분석함으로써, 헬리오스타트 태양추적오차의 측정은 물론 헬리오스타트로부터 반사되는 태양열의 열유속강도(heat flux intensity), 열유속분포(heat flux distribution) 그리고 총집열량(total beam power)의 분석과 같은 헬리오스타트 집열특성 분석을 가능하게 하는 광학측정시스템이다.

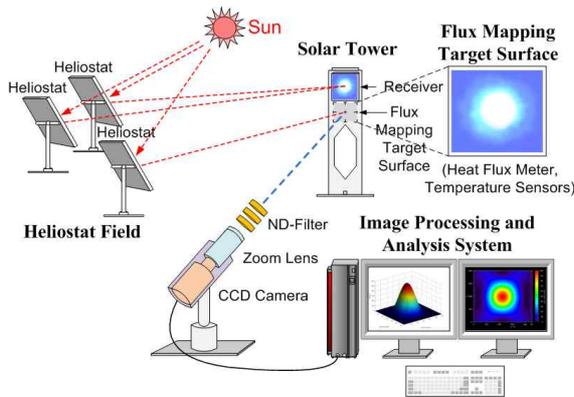


그림 1. 광특성분석시스템의 기본 구조.
Fig. 1. Schematic diagram of beam characterization system.

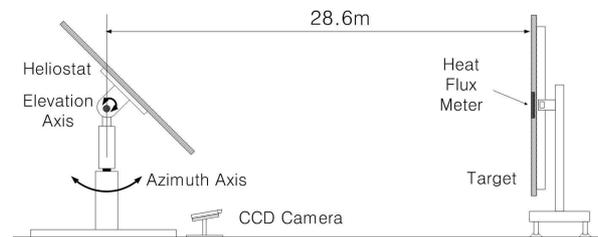


그림 2. 실험용 광특성분석시스템의 구조.
Fig. 2. Schematic diagram of experimental beam characterization system.

그림 2는 본 연구에서 사용된 실험용 광특성분석시스템의 구조[11]를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 본 연구의 광특성분석시스템은, 태양의 방위각과 고도각 추적을 수행하는 헬리오스타트와 열유속측정면, CCD 카메라 그리고 카메라에 의하여 얻어진 밝기로 표시된 영상정보를 열에너지 정보로 변환시키기 위한 열유속측정기(heat flux meter) 및 열전대(thermocouple)로 구성되어 있다.

1. 헬리오스타트

실험용 광특성분석시스템의 헬리오스타트는, 현재 대구에 건설된 200KW급 태양열발전시스템 헬리오스타트[10]의 축소 모형으로, 그림 3에서와 같이 방위각과 고도각 회전축에 의하여 변화하는 태양위치를 추종한다.

헬리오스타트 반사거울면은 $0.45 \times 0.45 [m]$ 크기의 정사각형 평면거울(mirror facet) 4개가 그림 3에서와 같이 거울장착프레임에 구면형으로 장착됨으로써 집광이 이루어지도록 하는 구조를 가지고 있다. 또한 헬리오스타트의 태양추적제어기는 DSP와 FPGA를 사용하여 구성된 AC 서보모터 제어기[12]로써 현재 시간, 헬리오스타트가 설치되어 있는 지점의 위도 및 경도, 그리고 측정면의 목표반사지점을 사용하여 계산된 헬리오스타트의 방위각과 고도각으로 헬리오스타트를 구동시키는 역할을 수행한다.

2. 열유속측정면

그림 4는 실험용 광특성분석시스템에서 사용된 열유속측정면의 구조를 나타낸 것으로, 내열성이 강한 세라믹보드 4장을 사용하여 $2[m] \times 2[m]$ 의 크기를 갖는다. 또한 열유속측정면은 CCD 카메라를 사용하여 취득한 영상정보를 열에너지 정보로 변환시키기 위한 계측기로서 측정면 중앙에 설치된 열유속측정기를 가지고 있으며, 아울러 반사된 태양

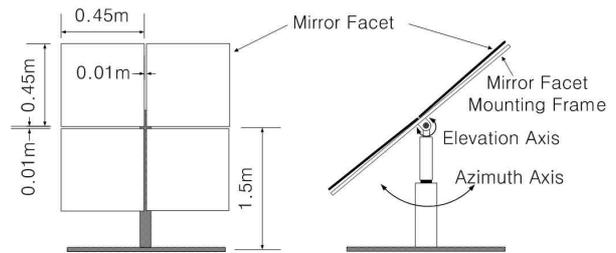


그림 3. 헬리오스타트의 구조.
Fig. 3. Schematic diagram of heliostat.

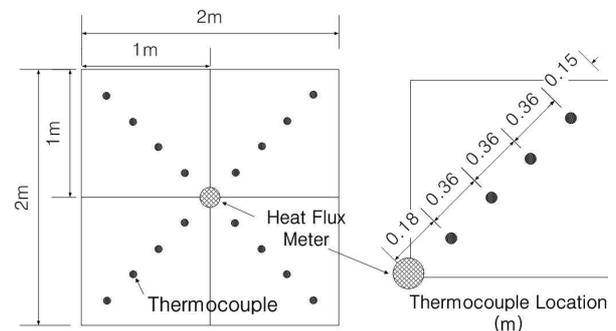


그림 4. 열유속측정면의 구조.
Fig. 4. Schematic diagram of heat flux mapping target.

열에 의한 측정면의 온도 변화를 측정하기 위한 16개의 열 전대를 가지고 있다.

3. 광학측정시스템

본 연구에서 사용된 광학측정시스템은, 640×480 픽셀, 8 비트 분해능을 갖는 CCD 카메라와 줌렌즈(초점거리 $13 \sim 280$ [mm]) 그리고 CCD 센서의 손상을 방지하기 위한 목적으로 줌렌즈 전방에 부착된 4장의 필터(ND400 필터 2장, ND8 필터 1장, ND4 필터 1장)로 구성되어 있다.

CCD 카메라에 의하여 촬영된 영상데이터는, USB 통신을 통하여 영상처리컴퓨터로 보내지며, 영상처리컴퓨터로 보내진 영상정보는 Microsoft Visual Studio 6.0을 이용하여 개발된 영상취득모듈(frame grab module)에 의하여 5초마다 비트맵(bitmap) 형식의 그림 파일로 저장된다.

III. 영상처리(Image Processing)

비트맵 형식으로 저장된 영상데이터의 처리와 이에 따른 헬리오스타트의 태양추적오차의 측정, 보정 및 집광특성분석을 위하여 다음과 같은 영상처리알고리즘들이 사용되었다.

1. CCD 센서 바이어스(bias) 측정

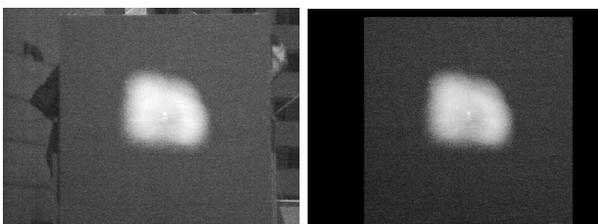
측정된 영상데이터에 포함되어 있는 CCD 센서 바이어스의 측정을 위하여, 본 연구에서는 카메라로 들어오는 모든 빛이 완전히 차단된 상태가 1시간 이상 경과된 이후 5초 간격으로 얻어진 영상데이터 10장을 취득하였다. 그 후 취득된 영상데이터 각각의 픽셀에서의 밝기 값의 평균을 계산하여, 본 연구에서 사용된 CCD 카메라는 최소 24로부터 최대 38 그리고 평균 27의 센서 바이어스 값을 가지고 있음을 확인하였다.

2. 카메라 보정(calibration)

취득된 영상데이터로부터 추출한 픽셀단위의 태양추적오차를 거리단위(mm)로 환산하는 변환계수(conversion factor)를 얻어내기 위한 카메라 보정은 그림 5에서와 같이 수행되었다. 즉 본 연구의 카메라 보정은, 광특성분석시스템을 사용하여 획득한 영상데이터인 그림 5(a)로부터, 열유속측정면이 x 방향에서는 125 픽셀에서부터 568 픽셀까지, 그리고 z 방향에서는 27 픽셀에서 470 픽셀 범위에 존재함을 그림 5(b)와 같이 확인하고, 이들 픽셀단위의 열유속측정면의 크기를 실제 열유속측정면의 크기로 나눔으로써 영상데이터 1 픽셀 당 4.51 [mm]의 변환계수를 도출하였다.

3. 중심점 검출

측정면에 반사된 태양열 분포의 중심점은 헬리오스타트



(a) Captured image

(b) Heat flux mapping target

그림 5. 카메라 보정(픽셀 당 거리 변환계수의 계산).

Fig. 5. Camera calibration(computation of conversion factor).

의 태양추적정밀도를 측정하기 위한 기준으로 사용되는 지점이다. 즉 헬리오스타트 태양추적오차는 헬리오스타트 방위각과 고도각 연산에서 사용된 목표지점(열유속측정면의 중심점)과 실제 반사된 태양열 분포의 중심점의 차이로써 표시된다.

측정면에 반사된 태양열 분포의 중심점으로, 본 연구에서는 단순 기하학적 중심이 아닌, 식 (2)에서와 같이 계산된 지점을 반사된 태양열 분포의 중심점으로 사용하였다. 즉 본 연구에서는 반사된 태양열 분포의 중심점을 추출하기 위하여 식 (2)에서와 같이 각각의 픽셀이 갖는 밝기 값 $P(x,y)$ 을 가중치로 하여 계산된 지점을 반사된 태양열 분포의 중심점으로 하였다.

$$N = \{(x,y) \mid P(x,y) > P_{thres}\} \quad (1)$$

$$x_c = \frac{\sum_y [\sum_x x P(x,y)]}{n}, \quad y_c = \frac{\sum_x [\sum_y y P(x,y)]}{n}, \quad x,y \in N \quad (2)$$

식 (1)의 P_{thres} 는 측정면에서 헬리오스타트로부터 반사된 태양열이 도달되지 않는 부분들의 평균 밝기를 나타내며, 식 (2)의 n 은 N 에 포함되어 있는 픽셀의 수 또는 측정면에서 밝기가 P_{thres} 보다 큰 픽셀의 수를 나타낸다.

반사된 태양열 분포의 중심은, 따라서 식 (1)과 식 (2)에서와 같이, 취득된 영상에서 헬리오스타트로부터 반사된 태양열이 도달되지 못한 부분의 평균 밝기 P_{thres} 을 우선 계산하고, 이를 사용하여 헬리오스타트로부터 반사된 태양열 에너지의 기하학적 분포를 식 (1)에서와 같이 구분한 이후에 식 (2)에서와 같이 가중치를 주어 계산한다.

4. 헬리오스타트 집광특성 분석

헬리오스타트의 집광특성분석은 헬리오스타트로부터 반사된 태양열의 열유속분포(heat flux distribution), 열유속강도(heat flux intensity) 그리고 반사된 열에너지의 총량(total heat energy)을 통하여 분석된다.

CCD 카메라에 의하여 얻어진 영상데이터로부터 반사된 열에너지 정보를 얻어내기 위해서는, 영상데이터의 밝기 정보를 열에너지 정보로 변환하는 것이 필요하다. 식 (3)은 본 연구에서 사용된 측정면 상의 임의지점 (x,y) 에서의 영상의 밝기 $P(x,y)$ 를 열유속강도 $I(x,y)$ 로 변환하는 과정을 나타낸 것이다. 즉 본 연구에서는 측정면 중앙에 설치되어 있는 열유속측정기의 열유속측정값 I_M 과 열유속측정기 표면의 밝기값 P_M 을 식 (3)에서와 같이 사용하여 측정면 전체의 열유속강도 $I(x,y)$ 를 계산하였다. 식 (4)의 Q 는 헬리오스타트로부터 반사된 태양열에너지의 총량이다. 또한 식 (3)의 α 는 헬리오스타트로부터 반사된 태양열이 도달되지 않는 측정면 부분의 평균 열유속강도를 나타내며, β 는 CCD 센서의 바이어스 평균값을 나타낸다.

$$I(x,y) = [P(x,y) - \beta] \times \left[\frac{I_M - \alpha}{P_M - \beta} \right] + \alpha [W/m^2], \quad x,y \in N \quad (3)$$

$$Q = \sum_y \sum_x [(0.00451)^2 I(x,y)] [W], \quad x,y \in N \quad (4)$$

IV. 집광특성 분석 및 태양추적오차보정

1. 집광특성 분석

광특성분석시스템을 이용한 헬리오스타트의 집광특성분석을 위하여, 표 1에서와 같은 기상조건에서 헬리오스타트가 오전 9시 30분부터 오후 16시 30분까지 태양추적을 수행하는 동안 반사시킨 태양열 분포를 광학적으로 측정하고 분석하였다.

그림 6은 열전대와 열유속측정기에 의하여 측정된 측정면의 온도와 측정면 중심부에 도달된 열유속강도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 측정면에서 헬리오스타트로부터 반사된 태양열이 도달되는 지점의 온도는 최고 25.75°까지 상승되었으며, 반대로 반사된 태양열이 도달되지 못하는 지점의 최저 온도는 외기온도와 유사한 -2.1°를 나타내었다. 또한 측정면 중심에 도달된 태양열의 열유속강도는, 그림 6(b)에서와 같이, 구름에 의한 일시적 태양의 가림과 같은 원인으로 요동치고 있으며, 실험일의 기상조건에서 실험기간동안 최대 1,445.9[W/m²] 그리고 평균 984.31[W/m²]

표 1. 실험일(2010년 12월 9일) 기상조건.

Table 1. Meteorological data on experimental date.

요소		측정값
평균 수평면 전일사량		126.8 W/m ²
기온	최고	2.3°
	평균	-1.8°
	최저	-4.3°
평균 풍속		2.3m/s

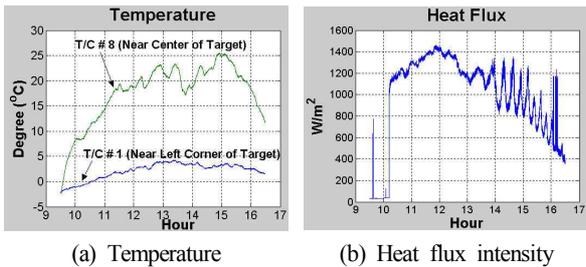


그림 6. 측정면의 온도 및 측정면 중심의 열유속강도.

Fig. 6. Temperature and heat flux intensity on the target.

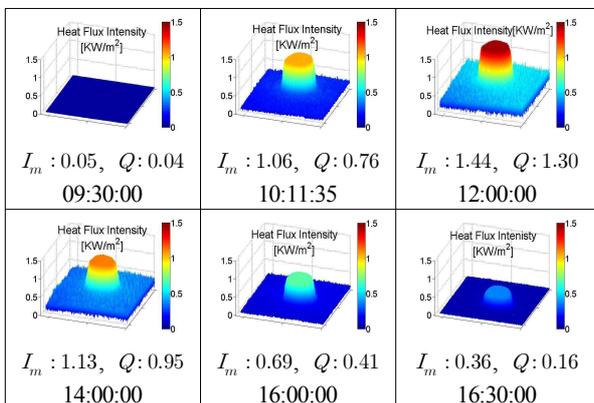


그림 7. 헬리오스타트의 집열특성.

Fig. 7. Heliostat heat energy concentration property.

의 열유속강도를 갖는 것으로 나타났다.

그림 7은 측정된 영상데이터와 열유속측정기에 의하여 측정된 측정면 중심에서의 열유속강도를 이용하여 계산된 시간대별 측정면의 열유속분포를 나타낸 것이다. 실험일 당시 오전 이른 시간 중에는 태양이 짙은 구름에 가리워져 있었으며, 따라서 그림 7의 오전 9시 30분에서의 열유속분포와 같은 측정이 이루어졌다. 그림 7의 I_m [KW/m²]은 각 시간에서의 측정면에 도달된 최대 열유속강도를 표시하며 Q [KW]는 헬리오스타트로부터 반사된 태양열의 총량을 나타낸다.

2. 태양추적오차보정

개루프 제어알고리즘에 의한 태양추적을 수행하는 헬리오스타트의 태양추적오차를 측정하고 모델링하여 그림 8에서와 같이 사용함[13]으로 헬리오스타트의 태양추적 정밀도가 향상될 수 있음을 실험하였다.

2.1 태양추적오차보정이 없는 경우의 태양추적오차

그림 9와 그림 10은 오차보정이 없는 태양추적알고리즘에 의하여 태양추적을 수행하는 헬리오스타트가, 오전 9시 30분부터 오후 16시 30분까지 태양추적을 수행하는 동안 측정된 오차를 나타낸 것이다. 이미 전술한 것과 같이, 헬

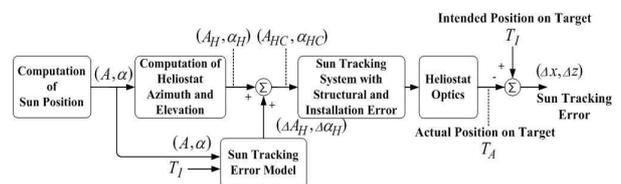


그림 8. 태양추적오차보정을 갖는 태양추적알고리즘.

Fig. 8. Sun tracking algorithm with error compensation.

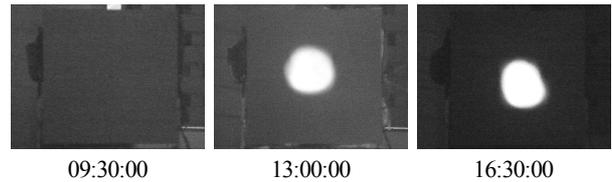


그림 9. 반사된 태양열 영상(오차보정이 없는 경우).

Fig. 9. Image of reflected solar energy on the target(no error compensation case).

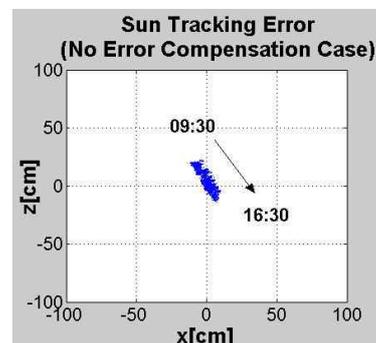


그림 10. 태양추적오차(오차보정이 없는 경우).

Fig. 10. Sun tracking error(no error compensation case).

리오스타트의 태양추적오차는 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 얻어진 헬리오스타트가 반사시킨 태양열 분포의 중심점과 측정면 중심좌표의 차이로써 표시되며, 따라서 태양추적오차는, 그림 9의 9시30분에서와 같이, 태양이 구름에 가리워져 있음으로 인하여 헬리오스타트가 태양열을 반사시키지 못하는 경우를 제외한 나머지 시간에서 측정되었다.

헬리오스타트의 태양추적오차는, 그림 10에서와 같이 시간 또는 태양의 위치에 따라 변화하며, 실험에 사용된 헬리오스타트는, 오차보정이 없는 개루프 제어알고리즘에 의해 태양추적을 수행하는 동안 측정면의 x 축 방향과 z 축 방향에서 각각 평균(RMS) 4.73[cm]과 10.53[cm] 그리고 최대 11.79[cm]과 22.64[cm]의 태양추적오차를 갖는 것으로 나타났다.

2.2 선형모델을 사용한 경우의 태양추적오차

태양추적오차를 감소시키기 위한 그림 8과 같은 오차보정을 갖는 태양추적알고리즘에서의 오차모델로써, 그림 10의 태양추적오차를, 식 (5), 식(6) 그리고 식 (7)에서와 같이 4차 선형방정식으로 나타내었다.

$$E_x = (1.597e - 10)A^4 + (2.376e - 07)A^3 - 0.0002015A^2 + 0.0445A - 2.996 \tag{5}$$

$$E_{zU} = (5.128e - 05)E^4 - 0.004665E^3 + 0.1565E^2 - 2.3016E + 12.75(\text{before solar noon}) \tag{6}$$

$$E_{zD} = (-9.232e - 06)E^4 + 0.0007076E^3 - 0.01859E^2 + 0.2013E - 0.7927(\text{after solar noon}) \tag{7}$$

식 (5)의 A 는 태양방위각을 그리고 식 (6)과 식 (7)의 E 는 태양의 고도각을 나타내며, 식 (5)의 E_x 는 태양의 방위각 변화에 따른 측정면 x 축 방향에서의 태양추적오차를, 그리고 식 (6)과 식 (7)의 E_{zU} (태양남중시간 이전 오차) 및

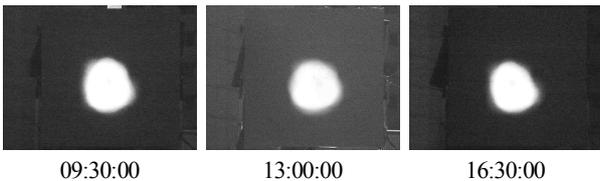


그림 11. 반사된 태양열 영상(선형모델을 사용한 경우).

Fig. 11. Image of reflected solar energy on the target(use of liner model case).

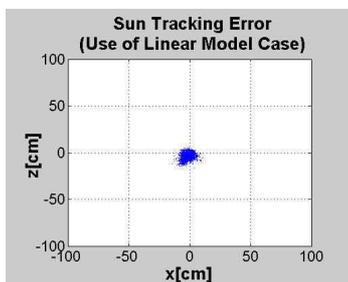


그림 12. 태양추적오차(선형모델을 사용한 경우).

Fig. 12. Sun tracking error(use of liner model case).

E_{zD} (태양남중시간 이후 오차)는 태양의 고도각 변화에 따른 측정면 z 축 방향에서의 태양추적오차를 나타낸다. 따라서 선형모델을 사용하여 추적오차를 보정하는 태양추적알고리즘에 의한 헬리오스타트의 태양추적은, 현재시간에서의 태양추적오차를 식 (5)와 식 (6) 또는 식 (7)을 사용하여 예측하고, 이와 같이 예측된 오차가 보상되는 헬리오스타트의 방위각과 고도각을 계산하여 헬리오스타트를 구동시킴으로써, 헬리오스타트가 가지고 있는 기구학적, 광학적 그리고 각종 연산오차로부터 기인하는 태양추적오차를 감소시키는 방식이다[13].

그림 11과 그림 12는 선형모델을 이용하여 태양추적오차를 보정하는 경우의 태양추적오차를 나타낸 것으로, 헬리오스타트의 태양추적오차는 측정면의 x 축 방향과 z 축 방향에서 각각 평균(RMS) 2.61[cm]과 3.92[cm] 그리고 최대 14.15[cm]와 16.36[cm]의 태양추적오차를 갖는 것으로 측정되었다.

그림 10과 그림 12를 비교하여 보면, 선형모델을 사용한 경우의 태양추적오차는, 오차보정이 이루어지지 않는 경우와 비교하여 크게 감소하였음을 알 수 있다. 그러나 최대오차는, 비록 감소하였으나 여전히 큰 값을 가지고 있으며, 이는 실험일(2010년 12월 24일) 당시 순간 풍속이 10.9[m/s]에 이르는 것과 같이 간헐적으로 바람이 심하게 불었고 따라서 헬리오스타트가 순간적으로 심하게 흔들리는 경우가 발생되었기 때문이다.

2.3 뉴럴네트워크모델을 사용한 경우의 태양추적오차

비선형성을 갖는 헬리오스타트 태양추적오차의 모델로써 확장칼만필터 알고리즘에 의하여 학습된 뉴럴네트워크모델은, 그림 13에서와 같이, 은닉층 2개를 포함한 4개의 층으

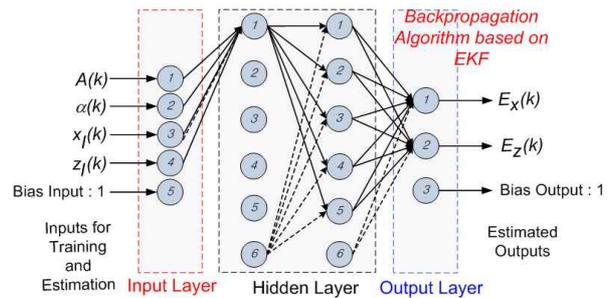


그림 13. 다층뉴럴네트워크모델의 구조.

Fig. 13. Structure of multilayered neural network model.

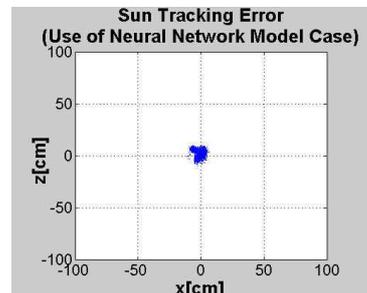


그림 14. 태양추적오차(뉴럴네트워크모델을 사용한 경우).

Fig. 14. Sun tracking error(use of neural network model case).

표 2. 태양추적정밀도 비교.

Table 2. Comparison of sun tracking accuracy.

항목	실험결과[cm]					
	No Compensation		Linear		Neural Network	
	x	z	x	z	x	z
평균오차	4.73	10.53	2.61	3.92	2.40	3.43
최대오차	11.79	22.64	14.15	16.36	12.89	11.06

로 구성되어 있으며, 각 층 노드의 개수는 선행연구[13]에서 확인된 우수한 모델링 성능을 보이는 4·6·6·3의 구조를 가지고 있다. 그림 13의 입력층의 $A(k)$ 와 $\alpha(k)$ 는 각각 태양의 방위각과 고도각을 나타내며, $x_f(k)$ 와 $z_f(k)$ 는 측정면 목표지점의 x, z 좌표를 나타낸다. 또한 $E_x(k)$ 와 $E_z(k)$ 는 각각 측정면의 x, z 방향에서의 태양추적오차이다.

그림 14는, 그림 10의 태양추적오차로 학습된 뉴럴네트워킹모델을 사용하여 추적오차가 보정되는 경우의 태양추적오차를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 뉴럴네트워킹모델을 사용한 경우의 태양추적오차는, 측정면의 x 축 방향과 z 축 방향에서 각각 평균(RMS) 2.40[cm]과 3.43[cm] 그리고 최대 12.89[cm]와 11.06[cm]으로 측정되었다.

2.4 태양추적정밀도 비교

표 2는 오차보정 알고리즘을 사용하는 헬리오스타트의 태양추적정밀도를, 개루프 방식의 태양추적알고리즘을 사용하는 헬리오스타트의 태양추적정밀도와 비교한 것이다. 표에서와 같이, 오차모델을 이용하여 태양추적오차의 보정이 이루어지고 있는 태양추적알고리즘을 사용하는 경우가 오차모델을 사용하지 않는 경우와 비교하여 대단히 우수한 태양추적정밀도를 가진다. 다만 최대오차에서는, 실험에 사용된 헬리오스타트의 규모가 비교적 작고 가벼우며 따라서 장착된 거울면이 바람에 의하여 많이 흔들리는 경우가 발생됨에 따라 오차보정이 이루어지지 않는 경우와 비교하여 크게 향상된 결과가 도출되지는 않았다.

V. 결론

헬리오스타트의 태양추적정밀도는 태양열발전시스템의 효율과 성능을 결정하는 중요한 것으로, 헬리오스타트의 태양추적정밀도를 향상시키기 위한 오차모델의 사용이 선행연구에서 제안되었다. 본 연구는 그와 같이 해석적으로 제안된 선행연구의 결과를 실험적으로 구현하기 위한 광특성분석시스템(BCS)의 개발과 적용에 관한 것이다.

본 연구는, 따라서 우선 헬리오스타트의 집광특성을 분석하고 동시에 헬리오스타트의 태양추적오차를 측정하기 위한 광학측정시스템을 개발하였으며, 측정된 태양추적오차를 선형 또는 뉴럴네트워킹으로 모델링하여 보정함으로써, 개루프 제어방식의 태양추적알고리즘에 의한 태양추적을 수행하는 헬리오스타트의 태양추적정밀도가 크게 향상될 수 있음을 실험적으로 비교하고 분석하였다.

선형모델과 뉴럴네트워킹모델의 사용에 따른 태양추적정밀도는 태양추적오차의 비선형성이 반영된 뉴럴네트워킹모델이 선형모델보다 우수한 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 이들 모델의 사용에 따른 태양추적정밀도의 향상 정

도가 근소한 차이를 보였으며, 따라서 연산과정이 상대적으로 간단한 선형오차모델이 현장 적용에 보다 적합할 것으로 판단되었다.

본 연구에서 개발된 광특성분석시스템을 현재 시험운전을 수행하고 있는 200 KW급 태양열발전시스템에 적용하고 있으며, 실증용 태양열발전시스템에서 얻어진 광특성분석시스템의 성능에 대한 실험적 자료를 통하여 본 연구에서 개발된 광특성분석시스템의 실용성을 추가적으로 확보하고 있다.

참고문헌

- [1] PIER-California Energy Commission, "Renewable Energy: Solar Two Central Receiver," Oct. 1999.
- [2] K. W. Stone and S. A. Hones, "Analysis of solar two heliostat tracking error sources," SAND99-0239C, 1999.
- [3] Y. C. Park, "Analysis of sun tracking error caused by the heliostat driving axis geometrical error utilizing the solar ray tracking technique," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, vol. 29, no. 2, pp. 39-46, 2009.
- [4] Y. C. Park, "Analysis of heliostat sun tracking error due to the mirror installation and drive mechanism induced error," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, vol. 29, no. 3, 2009.
- [5] O. Aliman, I. Duat, M. Isa, and M. R. Adzman, "Tracking error analysis of a rotation-elevation mode heliostat," *American Journal of Applied Science*, vol. 4, no. 3, pp. 176-180, 2007.
- [6] S. E. Lee, "Compensation of heliostat sun tracking error using multilayer neural network based on the extended Kalman filter," *Master Thesis, Seoul National University of Technology*, 2010.
- [7] M. Kiera and W. Schiel., "Measurement and analysis of heliostat images," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 111, no. 3, 1989.
- [8] J. W. Strachan, "Revisiting the BCS, a measurement system for characterizing the optics of solar collectors," Sandia National Laboratories, SAND92-2789C, 1993.
- [9] J. W. Strachan and R. M. Houser, "Testing and evaluation of large-area heliostats for solar thermal application," Solar Thermal Test Department Report, Sandia National Laboratories, 1993.
- [10] M. H. Park, "Introduction of power tower project," *The Magazine of Korean Solar Energy Society (in Korean)*, vol. 9, no. 2, pp. 14-18, 2010.
- [11] Y. P. Hong, "Measurement and analysis of heliostat sun tracking error using image processing," *Master Thesis, Seoul National University of Science and Technology*, Feb. 2011.
- [12] D. H. Seo and Y. C. Park, "Analysis of sun tracking performance of various types of sun tracking system used in parabolic dish type solar thermal power plant,"

Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean), vol. 17, no. 4, pp. 388-396, 2011.

- [13] S. E. Lee and Y. C. Park, "Modeling of heliostat sun tracking error using multilayered neural network trained by the extended Kalman filter," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 7, pp. 711-719, 2010.



홍 유 표

2009년 서울과학기술대학교 제어계측공학과(공학사). 2011년 서울과학기술대학교 제어계측공학과(공학석사). 현재 현대모비스 연구원. 관심분야는 동적 시스템 제어응용, 영상처리, 메카트로닉스.

박 영 칠

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제16권 제7호 참조.