접시형 태양열 발전시스템에서 사용하는 여러 가지 형태의 태양추적시스템의 태양추적성능 분석

Analysis of Sun Tracking Performance of Various Types of Sun Tracking System used in Parabolic Dish Type Solar Thermal Power Plant

서 동 혁, 박 영 칠*

(Dong Hyeok Seo¹ and Young Chil Park²)

¹I&C Technology

²Seoul National University of Science and Technology

Abstract: Sun tracking system is the most important subsystem in parabolic dish type solar thermal power plant, since it determines the amount of thermal energy to be collected, thus affects the efficiency of solar thermal power plant most significantly. Various types of sun tracking systems are currently used. Among them, use of photo sensors to located the sun(which is called sensor type) and use of astronomical algorithm to compute the sun position(which is called program type) are two of the mostly used methods. Recently some uses CCD sensor, like CCD camera, which is called image processing type sun tracking system. This work is concerned with the analysis of sun tracking performance of various types of sun tracking systems currently used in the parabolic dish type solar thermal power plant. We first developed a sun tracking error measurement system. Then, we evaluate the performance of five different types of sun tracking systems, sensor type, program type, hybrid type(use of sensor and computed sun position simultaneously), tracking error compensated program type and image processing type. Experimentally obtained data shows that the tracking error compensated program type sun tracking system is very effective and could provide a good sun tracking performance. Also the data obtained shows that the performance of sensor type sun tracking system is being affected by the cloud significantly, while the performance of a program type sun tracking system is being affected by the sun tracking system's mechanical and installation errors very much. Finally image processing type sun tracking system can provide accurate sun tracking performance, but costs more and requires more computational time.

Keywords: dish type solar thermal power plant, sensor type sun tracking system, program type sun tracking system, hybrid type sun tracking system, tracking error compensated program type sun tracking system, image processing type sun tracking system

I. 서론

저밀도 에너지원인 태양열을 고밀도화하기 위한 중고온 태양열 활용시스템의 집광식 태양열 집열기는, 태양추적시스템에 의한 지속적인 태양추적을 수행하며, 태양추적시스템은 고온 태양열 활용시스템의 집광에너지량을 결정하는 따라서 전체 시스템의 효율을 결정하는 대단히 중요한 요소 시스템이다.

현재 실용화 또는 상용화된 접시형 태양열 발전시스템(parabolic dish type solar thermal power plant)은 다양한 형태의 태양추적시스템을 사용하고 있다. 그 중에서 특히 광센서를 이용하여 태양의 위치를 인식하고 이를 태양추적신호로 사용하는 센서식 태양추적시스템[1-4]과 천문학에서

사용되는 태양위치 계산식을 사용하여 태양위치를 계산함[5]으로서 태양추적을 수행하는 프로그래밍식 태양추적시스템[6,7]이 가장 널리 사용되고 있다. 최근에는 CCD 카메라와 같은 CCD 센서를 사용하여 태양의 영상을 취득 분석함으로써 태양위치를 판별하는 영상처리방식의 태양추적시스템[8,9]이 일부에서 사용되고 있기도 하다.

접시형 태양열 발전시스템에서 사용되고 있는 이들 태양추적시스템은 동작 조건에 따라 각기 장점과 단점을 가지고 있다. 따라서 어떤 상황에서 우수한 태양추적 성능을 보이는 태양추적시스템이 다른 조건에서는 요구되는 태양추적 정밀도를 제공하지 못한 것과 같은 문제점을 가지고 있을 수도 있다.

태양추적시스템의 태양추적정밀도의 정량적 평가와 태양추적시스템의 동작 조건에 따른 동작특성의 분석은, 태양추적시스템의 선택 및 적용에서 대단히 중요한 것이다. 현재 비록 다양한 형태의 태양추적시스템이 개발되었고 또한 활용되고는 있으나, 이들 태양추적시스템의 태양추적정밀도는 대부분 정성적[10-12]으로 표현되어 있으며, 아울러 동작 조건에 따른 태양추적시스템의 추적 정밀도에 대한 정량적

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 10. 28., 수정: 2011. 1. 10., 채택확정: 2011. 3. 18.

서동혁: 아이엔씨테크놀로지(mesia816@nate.com)

박영칠: 서울과학기술대학교 제어측정공학과(ycpark@snut.ac.kr)

※ 본 논문은 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임(2008-N-SO12-P-01).

분석이 정확하게 이루어지지 않고 있다.

본 연구는 접시형 태양열 발전시스템에서 사용되고 있는 다양한 태양추적시스템의 태양추적정밀도를 정량적으로 측정하고 이를 기반으로 각각의 태양추적시스템이 가지고 있는 특성을 분석한 것이다.

본 연구에서는 우선 태양추적오차를 측정하기 위한 CCD 카메라 기반의 태양추적오차측정시스템을 개발하였다. 동시에 본 연구는, 개발된 태양추적오차측정시스템을 사용하여, 현재 접시형 태양열 발전시스템에서 사용되고 있는 센서식, 프로그램식, 복합방식, 영상처리방식, 그리고 오차보정 프로그램식과 같은 5가지 종류의 태양추적시스템의 태양추적오차를 실험적으로 측정하고 분석함으로써, 각각의 태양추적시스템이 가지고 있는 특성을 정량적으로 분석하였다.

II. 태양추적성능 분석을 위한 태양추적시스템의 구성

접시형 태양열 발전시스템은 접시형 태양열 집열기의 초점에 위치하고 있는 스테링 엔진(stirling engine)을 집광된 태양열로 구동시킴으로서 발전을 수행하는 시스템이다. 그림 1은 국내에서 개발된 10KW급 접시형 태양열 발전시스템[13]으로, 집열기는 태양의 방위각과 고도각 변화를 추종하기 위한 2축 구동시스템에 의한 태양추적을 수행한다.

1. 태양추적장치

접시형 태양열 집열기의 태양추적장치는 서보모터와 감속기로 이루어진 구동부와 이의 제어를 위한 제어기로 구성되어 있다. 그림 2는 태양추적시스템의 태양추적성능을 측정하고 평가하기 위하여 본 연구에서 제작한 태양추적장치[14]의 구조를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 본 연구에서 사용한 태양추적장치는, 태양의 방위각과 고도각 변화를 추종하는 2축 태양추적장치로서, 지표면에 수직인 방위각 회전축(azimuth axis)을 기준으로 회전하며, 또한 지표면에 수평하고 설치되는 지점의 동서를 연결하는 고도각 회전축(elevation axis)을 기준으로 회전함으로써 변화하는 태양의 위치를 추적한다.

그림 1. 접시형 태양열 발전시스템(10KW).

Fig. 1. Parabolic dish type solar thermal power plant(10KW).

그림 2. 실험용 태양추적장치.

Fig. 2. Experimental sun tracking system.

표 1. 실험용 태양추적장치의 제원.

Table 1. Specification of experimental sun tracking system.

항목	제원
추적방식	Azimuth / Elevation
구동모터	100W AC Servo Motor(정격 3000 RPM)
감속기	방위각:2단 25075:1, 고도각:2단 5000:1
구동범위	방위각: +10° ~ +350°, 고도각: -15° ~ +90°

그림 3. 태양추적제어기의 구조

Fig. 3. Block diagram of sun tracking controller.

그림 3은 태양추적장치의 태양추적제어를 위하여 본 연구에서 개발한 제어기[14]의 구조를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 태양추적제어기는 AC 서보모터의 위치 및 속도 제어를 위한 제어기로서, DSP와 FPGA를 사용하여 구현되었다. 또한 태양추적제어기는 태양추적장치에 설치되어 있는 근접센서와 입출력 스위치를 통제하기 위한 입출력 모듈을 포함하고 있다.

2. 태양추적시스템의 구조 및 동작 원리

2.1 센서식 태양추적시스템

접시형 태양열 집열기의 태양추적시스템에서 가장 범용적으로 사용되고 있는 센서식 태양추적시스템은 주로 광센서를 이용하여 태양의 위치를 판별함으로써 집열기가 태양추적을 수행하는 방식이다.

그림 4. 태양추적센서의 구조 및 동작원리.

Fig. 4. Schematic diagram of sun tracking sensor and operational principle.

그림 4는 본 연구에서 사용된 태양추적센서의 구조 및 동작원리[14]를 나타낸 것이다. 그림 4(a)에서와 같이 태양추적센서가 태양을 정면으로 향하고 있을 때, 태양광선은 태양추적센서의 법선 방향으로 입사되며, 이와 같은 경우 광센서 A와 B로부터 발생하는 전압은 같아지게 되고, 따라서 태양추적장치는 방위각에서의 태양추적을 중지한다. 그러나 태양추적센서로 입사되는 태양광선이 그림 4(b)와 같이 센서의 법선 방향과 경사각을 가지고 있으면, 광센서 A와 B로부터 발생하는 전압은 다르게 되며, 이와 같은 경우 태양추적장치는 방위각 추적을 위한 구동모터를 회전시켜 광센서 A와 B로부터 발생하는 전압이 동일한 값을 가질 때까지 집열기를 회전시켜 태양추적을 수행한다. 태양 고도각 변화에 따른 태양추적은 광센서 C와 D를 사용하여 방위각 추적축과 동일한 원리로 고도각 추적축 구동모터를 회전시켜 태양을 추적한다.

센서식 태양추적시스템은 구조가 비교적 간단하면서도 높은 태양추적 정확도를 제공하며, 따라서 접시형 태양열 발전시스템에서 널리 사용되고 있다. 그러나 센서식 태양추적시스템은 태양이 일시적으로 구름에 가리어진 경우 또는 구름 등에 의한 빛의 산란 및 반사 등이 일어날 경우 오동작할 수 있는 문제점을 가지고 있기도 하다.

2.2 프로그램식 태양추적시스템

프로그램식 태양추적시스템은, 태양위치 계산식을 사용하여 현재 시간의 태양의 방위각과 고도각을 계산하고, 이를 태양추적장치의 제어입력신호로 사용하는 방식의 태양추적시스템이다.

그림 5는 본 연구에서 사용된 프로그램식 태양추적시스템의 동작원리를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 태양추적제어기는 RTC (Real Time Clock)에 의하여 생성되는 현재시간과 태양열 집열기가 설치되어 있는 지점의 위도 및 경도를 사용하여 현재 시간에서의 태양 방위각 A 와 고도각 E 를 계산한다. 계산된 태양의 방위각과 고도각은 다시 현재 집열기 방위각 H_A 및 고도각 H_E 와 각각 비교되고, 이와 같이 연산된 방위각 또는 고도각에서의 차 δA 및 δE 가 각각의 설정값 이상이 되면 태양추적제어기는 해당 추적축을 동작시켜 집열기의 태양추적을 수행한다.

프로그램식 태양추적시스템은 구름의 영향 등과 무관하게 동작할 수 있는 장점이 있다. 그러나 태양추적장치가 가지고 있는 설치오차를 포함하는 기구오차와 집열기의 광학오차 등을 보정하지 못하는 단점이 있으며, 이는 프로그램식 태양추적시스템이 개루프(open loop) 형태의 제어시스템으로 동작하기 때문이다.

그림 5. 프로그램식 태양추적시스템의 동작원리.

Fig. 5. Operational principle of program type sun tracking system.

2.3 복합방식 태양추적시스템

태양추적을 위한 태양추적센서와 계산된 태양위치를 복합 또는 융합하여 사용하는 복합방식 태양추적시스템은, 센서식 태양추적시스템과 프로그램식 태양추적시스템의 문제점을 극복하기 위한 방식으로 특히 일부 접시형 태양열 집열기의 태양추적시스템[13,15]에서 현재 사용되고 있는 것으로 알려지고 있다.

복합방식 태양추적시스템에는, 태양추적센서의 신호와 계산된 태양위치의 복합 또는 융합 방식에 따라 다양한 형태의 태양추적 알고리즘이 존재할 수 있다. 본 연구에서는, 태양추적센서를 우선으로 하고, 구름 등에 의한 영향으로 집열기에 도달되는 태양에너지의 양이 설정 값 이하로 떨어지거나 또는 빛의 반사 및 산란에 의하여 집열기가 당초 정해진 추적 범위 이상을 벗어나는 경우에 계산된 태양위치를 사용하는 것과 같은, 신호의 융합보다는, 환경에 따라 개별 신호를 선별적으로 사용하는 형태의 복합방식 태양추적시스템을 사용하였다.

2.4 영상처리방식 태양추적시스템

영상처리방식 태양추적시스템은, CCD 소자를 사용하는 센서, 즉 CCD 카메라에 의하여 취득된 태양 영상의 중심이 촬영된 영상의 중심에 일치되도록 함으로서 변화하는 태양의 위치를 추적하는 시스템이다.

그림 6은 본 연구에서 사용한 CCD 카메라와 이를 이용하여 취득한 태양의 영상을 나타낸 것이다. CCD 카메라에 의한 태양영상의 취득은 CCD 카메라의 CCD 소자 보호를 위한 다량의 ND 필터를 필요로 하며, 동시에 태양 영상의 크기를 조절하기 위한 줌(zoom) 기능이 요구된다.

영상처리방식 태양추적시스템의 태양추적정밀도는, 사용되는 영상처리장비의 정밀도와 영상처리 알고리즘의 정확성 및 효율성에 따라 달라지게 될 것이다. 바꾸어 말해서 영상처리방식 태양추적시스템의 태양추적정밀도는 어떤 영상처리장치와 어떤 알고리즘을 사용하느냐에 따라 크게 달라지게 되는데, 본 연구에서는 DSP, FPGA 그리고 image A/D chip(SAA7111A)을 사용하여 제작한 그림 7과 같은 구조의 독립형 영상처리시스템[14]을 사용하였다. 아울러 영상처리 알고리즘 역시 실제 태양추적시스템 활용 현장의 기술적 상황 등을 고려하여 비교적 단순한 영상처리 알고리즘을 사용하였다. 이는 CCD 카메라에 의하여 얻어진 영상을 이진화를 시키고, 이진화된 영상을 gradient edge detection 방법을 이용하여 외곽선을 추출한 후, 다시 Hough transform [16]을 사용하여 태양의 중심점을 찾아내는 형태의 알고리즘이다.

그림 6. 영상처리방식 태양추적시스템.

Fig. 6. Image processing type sun tracking system.

그림 7. 영상처리보드의 구조.

Fig. 7. Block diagram of image processing board.

그림 8. 오차보정 프로그램식 태양추적시스템의 동작원리.

Fig. 8. Operational principle of tracking error compensated program type sun tracking system.

2.5 오차보정 프로그램식 태양추적시스템

오차보정 프로그램식 태양추적시스템은, 프로그램식 태양추적시스템이 가지고 있는 문제점인 기구오차 및 광학오차로부터 기인하는 태양추적오차를, 오차모델을 사용하여 보정한 태양추적시스템이다.

그림 8은 본 연구에서 사용한 오차보정 프로그램식 태양추적시스템의 태양추적 알고리즘을 도식적으로 나타낸 것이다. 즉 본 연구에서 사용된 오차보정 프로그램식 태양추적시스템은, 태양추적시스템이 프로그램식에 의하여 태양추적을 수행하는 동안 측정된 태양추적오차를 모델링하고, 이를 그림 8에서와 같이 사용하여 태양추적시스템이 가지고 있는 기구적 그리고 광학적 오차로부터 유발되는 태양추적오차를 보정함으로써 태양추적시스템의 태양추적오차를 최소화하는 방식이다.

태양추적오차 모델은, 측정된 태양추적오차를 모델링하는 방법에 따라 다양한 형태를 가질 수 있다[17]. 본 연구에서는 측정된 태양추적오차를 방위각 오차 및 고도각 오차로 분할하고, 이들 각각의 오차들을 4차 다항식으로 표시한 오차모델을 사용하였다.

III. 태양추적오차 측정시스템

태양추적오차 측정시스템은 집열기의 태양추적오차를 정량적으로 측정하기 위한 것으로, 본 연구에서는 태양추적을 수행하는 집열기에 설치된 CCD 카메라에 의하여 촬영된 태양의 상대적 위치를 계측함으로써 집열기의 태양추적오차를 측정하였다.

그림 9는 본 연구에서 사용한 태양추적오차 측정시스템의 기본 동작원리를 나타낸 것이다. 집열기의 집열면에 법

그림 9. 태양추적오차로 인한 영상 속의 태양위치의 변화.

Fig. 9. Sun position change in image due to sun tracking error.

그림 10. 픽셀당 변환계수(픽셀 당 태양추적오차)의 계산 원리.

Fig. 10. Principle of computation of conversion factor (sun tracking error per image pixel).

선방향으로 설치되어 있는 CCD 카메라가, 만약 태양추적오차가 전혀 없는 집열기에 설치되어 있었다면, CCD 카메라에 의하여 촬영된 태양의 위치는 집열기가 태양추적을 수행하는 동안 변화하지 않아야 한다. 그러나 태양추적오차를 갖는 집열기에 장착되어 있는 CCD 카메라에 의하여 촬영된 태양은, 그림 9에서와 같이 영상 속에서 위치가 변화하게 되며, 따라서 영상 속에서의 태양위치 변화를 측정하고 이를 집열기의 방위각 및 고도각 추적 오차로 환산하면 태양열 집열기의 태양추적오차를 측정할 수 있게 된다. 물론 영상 속의 태양위치는, CCD 카메라의 설치 방향오차에 따른 광학오차와 추적조건을 결정하는 최소 광센서값의 차이 또는 그림 5에서와 같이 연산된 ΔA 및 ΔE 의 최소 설정값의 크기 등에 따라 변화하게 된다. 본 연구에서는 CCD 카메라의 설치방향오차에 따른 영상 속의 태양위치변화가 최소화될 수 있도록 CCD 카메라를 설치하였으며, 아울러 태양추적 구동모터의 기동여부를 결정하는 태양위치 변화의 최소값을 0.01° 로 설정함으로써 추적조건 설정에 따른 영상 속의 태양위치 변화가 측정되는 태양추적오차에 영향을 미치지 않도록 하였다.

영상 속에 나타난 픽셀(pixel) 단위의 태양위치 변화를 각도 단위의 태양추적오차로 환산하기 위한 픽셀당 변환계수는 그림 10에서와 같은 원리를 사용하여 계산하였다. 그림에서와 같이, CCD 카메라가 설치되어 있는 집열기를 임의의 위치에 고정시키고, 시간 변화에 따른 영상 속에서의 태양위치 변화를 픽셀 단위 δx_{12} , δx_{13} 및 δy_{12} , δy_{13} 로 측정하였다. 동시에 동일한 시간 동안 변화된 태양의 방위각 변화 δA_{12} , δA_{13} 와 고도각 변화 δE_{12} , δE_{13} 를 계산하여 이를 측정된 픽셀단위의 변화 δx_{12} , δx_{13} 및 δy_{12} , δy_{13} 로 각각 나눔으로써, 영상의 픽셀 당 태양 위치 변화의 각도, 즉 태양추적시스템의 태양추적정밀도 계산을 위한 픽셀당 변환계수가 얻어질 수 있도록 하였다.

그림 11. 방위각 및 고도각 픽셀당 변환계수(degree/pixel).
Fig. 11. Conversion factor (degree/pixel).

그림 11은 2010년 6월 10일 오전 9시부터 오후 6시까지 그림 10에서와 같은 동작을 지속적으로 반복하면서 얻어진 영상을 분석하여 계산된 픽셀당 변환계수를 태양의 방위각과 고도각에 따라 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 태양추적시스템의 추적오차를 계산하기 위한 방위각 및 고도각 픽셀당 변환계수는 집열기의 위치에 따라 크게 다르다. 만약 태양추적오차 측정을 위한 CCD 카메라가 정확하게 집열면 법선방향에 설치되어 있고, 아울러 태양추적장치의 기구오차로 인한 태양추적오차가 위치에 따라 변화하지 않는다면, 계산된 변환계수는 일정한 값이 될 것이다. 그러나 실제 사용된 태양추적장치의 경우, 카메라의 설치 방향 오차가 비록 작으나 존재하고, 동시에 기구 오차가 집열기의 위치에 따라 변화하는 특성을 가지고 있으며, 따라서 이와 같은 카메라 광학오차 및 기구오차의 비선형성이 그림 11과 같이 변환계수가 태양의 위치에 따라 변화하는 결과를 초래한 것으로 보인다.

$$C_A = -1.139e(-9)A^4 - 8.485e(-7)A^3 + 2.105e(-4)A^2 - 1.961e(-2)A + 0.6664 \quad (1)$$

$$C_E = 9.111e(-10)E^4 - 8.803e(-8)E^3 + 5.35e(-7)E^2 + 1.318e(-4)E - 0.0618 \quad (2)$$

태양추적오차 계산을 위한 픽셀당 변환계수가 집열기의 위치에 따라 변화함에 따라, 본 연구에서는 특정 위치에서의 태양추적오차 계산을 위한 픽셀당 변환계수 C_A (방위각 변환계수), C_E (고도각 변환계수)를 식 (1) 및 식 (2)와 같은 4차 다항식으로 표시하고, 이와 같이 얻어진 다항식을 사용하여 집열기가 태양추적을 수행하는 동안 얻어진 영상 속에서의 픽셀단위의 태양위치 변화값을 각도 단위의 방위각 및 고도각에서의 태양추적오차로 환산하였다.

IV. 태양추적성능의 비교 분석

접시형 태양열 발전시스템에서 사용되고 있는 다양한 태양추적시스템의 태양추적오차를 측정하고, 이들 각각의 태양추적시스템이 가지고 있는 특성을 정량적으로 비교하기 위하여, 본 연구에서는 오전 9시부터 오후 6시까지 그림 2의 실험용 태양추적장치가 태양추적을 수행하는 동안 매 5분 간격으로 CCD 카메라에 의하여 촬영된 영상을 저장하고, 저장된 영상 중에서 태양이 짙은 구름에 완전히 가려 보이지 않는 경우의 영상을 제외한 모든 영상을 비교 분석하였다. 아울러 일사 조건에 따른 태양추적장치의 특성을 파악하기 위하여 아주 맑고 화창한 날, 구름이 조금 있는 날 그리고 구름이 비교적 많이 있는 날 각각에 대한 태양추적시험을 수행하였다.

1. 센서식 태양추적시스템

센서식 태양추적시스템은 센서로 입사되는 태양광의 방향 변화를 감지하여 동작하는 시스템이다. 따라서 태양광이 구름 등에 의하여 산란이 일어나는 경우에는 센서로 입사되는 태양광의 방향이 일시적으로 불규칙하게 변화할 수 있으며, 이와 같은 경우가 발생하면 센서식 태양추적시스템은 오동작을 포함하여 일시적으로 대단히 낮은 태양추적정밀도를 갖게 된다.

그림 13, 그림 14, 그리고 그림 15는 본 연구에서 사용된 센서식 태양추적시스템의 태양추적오차를 나타낸 것이다. 센서식 태양추적시스템은 그림 13에서와 같이 맑은 날 상

그림 12. 구름의 량에 따른 태양 영상.

Fig. 12. Sun image under the different cloud conditions.

그림 13. 맑은 날 센서식 태양추적시스템의 태양추적오차.

Fig. 13. Sun tracking error of sensor type sun tracking system on clear day.

대적으로 높은 태양추적정밀도를 가지고 있다. 그러나 그림 14와 그림 15에서와 같이, 구름이 있는 날의 태양추적정밀도는 비교적 낮다. 특히 태양이 일시적으로 구름에 의하여 완전히 가리워졌다가 다시 나타나는 것과 같은 현상을 반복한 그림 15와 같은 일사조건의 경우에는, 태양광의 산란과 태양추적시스템이 동작하기위한 기준 일사량의 미달로 인해 시스템이 오동작하거나 또는 추적 대기상태로 들어감에 따라 태양추적오차가 대단히 크게 발생하고 있음을 볼 수 있다.

(a) Azimuth

(b) Elevation

그림 14. 옅은 구름이 있는 날 센서식 태양추적시스템의 태양추적오차.

Fig. 14. Sun tracking error of sensor type sun tracking system on a little cloudy day.

(a) Azimuth

(b) Elevation

그림 15. 짙은 구름이 있는 날 센서식 태양추적시스템의 태양추적오차.

Fig. 15. Sun tracking error of sensor type sun tracking system on heavy cloudy day.

2. 프로그램식 태양추적시스템

프로그램식 태양추적시스템은 계산된 태양위치를 사용하여 개루프 방식으로 태양추적을 수행하는 시스템이다. 따라서 일사조건 보다는 태양추적장치가 가지고 있는 기구오차 및 집열면의 광학적 오차에 따라 태양추적오차가 결정되는 태양추적시스템이다.

그림 16은, 본 연구에서 사용된 태양추적장치를 사용하여, 그림 5의 δA 및 δE 가 각각 0.01° 이상이 되는 순간 집열기의 방위각 및 고도각 구동축을 기동하여 태양추적을 수행하는 동안 발생된 태양추적오차이다. 그림에서와 같이 태양추적오차는 외부 일사조건에 관계없이 일정한 패턴을 가지고 있으며, 이는 프로그램식 태양추적시스템의 태양추적오차가 일사 조건보다는 태양추적시스템이 가지고 있는

(a) Azimuth

(b) Elevation

그림 16. 프로그램식 태양추적시스템의 태양추적오차.

Fig. 16. Sun tracking error of program type sun tracking system.

(a) Azimuth

(b) Elevation

그림 17. 복합방식 태양추적시스템의 태양추적오차.

Fig. 17. Sun tracking error of hybrid type sun tracking system.

기구적 오차에 따라 결정되기 때문이다.

3. 복합방식 태양추적시스템

본 연구에서 사용한 복합식 태양추적시스템은, 태양추적 센서에 의하여 판별된 태양의 위치와 계산된 태양위치를 선택적으로 사용하는 방식의 태양추적시스템이다. 즉 본 연구에서 사용한 복합식 태양추적시스템은, 일사량이 기준값 이상이면 태양추적센서에 의한 태양추적을 수행하고, 일사량이 기준값 이하이거나 또는 태양추적센서에 의하여 태양추적이 수행되는 동안 집열기의 위치가 계산된 위치로부터 설정값 이상으로 벗어나는 경우에는 프로그램식으로 태양을 추적하는 형태의 태양추적시스템이다.

그림 17은 비교적 구름이 적은 날(실험 1)과 구름이 많은 날(실험 2) 복합방식 태양추적시스템에 의하여 태양추적을 수행하는 동안 발생한 태양추적오차를 나타낸 것이다. 그림 17의 실험 1은, 오전 10시 이전과 오후 4시 이후에는 구름이 많지는 않았지만 열은 안개가 끼어 있었고, 따라서 센서에 도달되는 일사량이 기준값에 미달되어 프로그램식으로 태양 추적이 이루어졌고, 오전 10시와 오후 4시 사이에는 일사조건이 좋아 센서식으로 태양추적이 이루어진 경우이다. 그림에서와 같이 일사 조건이 좋은 경우 센서식 태양추적시스템은 비교적 높은 태양추적정밀도를 보여주었다. 그러나 일사 조건이 좋지 않았던 오전 10시 이전과 오후 4시 이후에는 프로그램식 태양추적시스템에 의한 태양추적이 이루어졌으며, 따라서 태양추적장치가 가지고 있는 기구 오차에 의한 태양추적오차가 반영되어 낮은 태양추적정밀도를 형성하였다.

또한 그림 17의 실험 2는 비교적 구름이 많은 날 수행된 것으로, 오후 2시 이후에는 구름이 많아져 센서에 도달되는 일사량이 기준 값 이하로 떨어지고 따라서 프로그램식으로 태양추적이 이루어졌으며, 오후 2시 이전에는 일사 조건이 비록 기준 값 이상이지만은 하나 일시적으로 짙은 구름에 의하여 태양이 가려지기도 하는 것과 같은 일사 조건이었으며, 따라서 센서식과 프로그램식이 혼용되어 사용되면서 수행된 태양추적시험의 태양추적오차이다.

본 연구에서 사용된 복합식 태양추적시스템은 완전한 의미의 복합이기 보다는 신호의 선별적 사용이고, 따라서 센서식과 프로그램식 태양추적시스템이 가지고 있는 문제점을 완전하게 해소하지 못하는 결과를 보여주었다. 물론 복합식 태양추적시스템의 태양추적정밀도는 신호의 복합 또는 융합 방식에 따라 크게 달라질 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고 본 연구의 경우에는, 일사조건 그리고 기구오차로부터 야기되는 태양추적오차를 완전하게 상쇄시킬 수 있는 방법이 복합식 태양추적시스템의 기본 알고리즘에 포함되어 있지 않았다. 이는 결국 그림 17에서와 같이, 복합식 태양추적시스템이 여전히 일사 조건에 따라 크게 달라지는 태양추적정밀도를 보여주고, 아울러 기구적 오차에 의한 태양추적오차를 완전하게 해소하기에도 어려운 동작 특성을 보여 주었다.

4. 영상처리방식 태양추적시스템

그림 18은, 그림 7과 같은 본 연구에서 개발한 영상처리 하드웨어와 Hough transform에 의하여 태양의 중심점을 추

(a) Azimuth

(b) Elevation

그림 18. 영상처리방식 태양추적시스템의 태양추적오차.

Fig. 18. Sun tracking error of image processing type sun tracking system.

출하는 영상처리 알고리즘을 사용하는 영상처리방식의 태양추적시스템이 갖는 태양추적오차를 나타낸 것이다.

영상처리방식 태양추적시스템의 추적정밀도는 영상의 취득 및 처리를 위한 영상처리시스템의 성능에 따라 달라진다. 현재 본 연구에서 사용하고 있는 영상처리 알고리즘은, 이미 전술한 것과 같이, 이진화된 영상에 gradient edge detection 방법을 사용하여 태양의 외곽선을 추출하고, 다시 Hough transform을 사용하여 태양의 중심점을 찾아내는 형태의 알고리즘이다. 맑은 날 640×480 픽셀의 분해능을 갖는 CCD 카메라에 의하여 얻어진 영상에서의 태양의 반지름은 최대 40픽셀로, 본 연구에서 사용된 영상처리 알고리즘을 사용하여 반지름 40픽셀 범위의 태양 중심점을 찾아내는 과정은 평균 30초 이상의 비교적 오랜 연산 시간을 필요로 하였다. 특히 태양이 구름에 의해 일부분이 가리워짐으로서 외곽선 추출에 의하여 얻어진 태양의 영상이 원이 아닌 원의 일부분만으로 구성되어 있는 경우 Hough transform에 의한 중심점 추출은 1분 이상의 처리시간을 필요로 하기도 하였다.

그림 18의 오전시간 특히 정오 부근의 방위각 태양추적 오차는, 영상처리방식 태양추적시스템이 폐루프(closed loop) 제어시스템임에도 불구하고, 큰 값으로 가지고 있다. 이는 정오 시간 부근에서 태양의 방위각 변화가 1°/분 이상으로 대단히 빠르게 변화하고 있음에도 불구하고 본 연구에서 사용한 영상처리 알고리즘은 태양의 중심점 추출을 위해 평균 30초 이상의 처리시간을 사용하였고, 따라서 연산시간에 따른 태양추적이 지연됨으로서 큰 태양추적오차가 발생되었다.

5. 오차보정 프로그램식 태양추적시스템

그림 19는, 그림 16의 프로그램식 태양추적시스템이 맑은 날(clear day) 생성한 태양추적오차를 식 (3), 식 (4) 그리고 식 (5)에서와 같이 4차 다항식으로 모델링하고, 이와 같

그림 19. 오차보정 프로그램식 태양추적시스템의 태양추적 오차.

Fig. 19. Sun tracking error of tracking error compensated program type sun tracking system.

이 모델링된 태양추적오차를 그림 8에서와 같은 방식으로 사용하여, 태양추적장치가 가지고 있는 기구 또는 광학오차로부터 유발되는 태양추적오차를 보정한 오차보정 프로그램식 태양추적시스템의 태양추적오차이다.

$$A_e = -7.95e(-8)A^4 + 5.67e(-5)A^3 - 1.49e(-2)A^2 + 1.34A - 40.99 \quad (3)$$

$$E_e = -2.74e(-5)E^4 - 6.28e(-3)E^3 + 5.39e(-1)E^2 - 20.49E + 289.9 \text{ (남중시간이전)} \quad (4)$$

$$E_e = 1.98e(-6)E^4 + 3.38e(-4)E^3 - 2.12e(-2)E^2 + 0.574E - 4.13 \text{ (남중시간이후)} \quad (5)$$

식 (4)는 태양 방위각(A)에서의 태양추적오차모델이며, 식 (5)와 (6)은 태양 고도각(E)에서의 태양추적오차 모델로서, 오차보정을 위한 현재 시간이 태양의 남중 시간 이전이면 식 (4)의 모델을 사용하고, 남중 시간 이후이면 식 (5)의 모델을 사용한다.

그림 19에서와 같이, 오차보정이 이루어진 프로그램식 태양추적시스템의 태양추적오차는 태양추적장치의 기구적 오차와 무관하며 비교적 작은 오차를 갖는다. 이는 오차보정 프로그램식 태양추적장치가 개루프 방식의 추적제어시스템이긴 하나, 태양추적장치가 가지고 있는 위치에 따른 오차를 보정함으로써 폐루프 제어시스템의 특성을 가지고 있으며, 따라서 일사 조건 및 추적장치의 구조적 오차의 영향이 최소화된 비교적 작은 태양추적오차를 갖기 때문이다.

오차보정 프로그램식 태양추적시스템은 사용되는 오차 모델의 정확성에 따라 생성되는 태양추적오차가 달라지게 될 것이다. 오차보정을 위한 태양추적오차 모델은, 태양추적장치의 구조적 오차가 시간에 따라 변화하는 것이 일반적이기 때문에 주기적인 갱신을 필요로 한다.

V. 결론

접시형 태양열 발전시스템의 태양추적시스템은 태양열 발전시스템의 효율을, 따라서 실용화 여부를 결정하는 대단히 중요한 요소시스템으로, 모든 조건에서 정확한 태양추적정밀도를 제공할 수 있는 시스템이어야 한다.

본 연구는 현재 실용 또는 시험 운용되고 있는 접시형 태양열 발전시스템에서 사용되고 있는 여러 가지 형태의 태양추적시스템의 태양추적정밀도를 정량적으로 측정하고, 이를 기반으로 각각의 태양추적시스템이 갖는 특성을 분석한 것이다.

본 연구에서 얻어진 결과에 의하면, 현재 가장 널리 사용되고 있는 센서식 태양추적시스템과 프로그램식 태양추적시스템은 각각 일사 조건과 추적장치의 기구적 그리고 광학적 오차에 의하여 크게 달라지는 태양추적정밀도를 가진다. 아울러 영상처리방식의 태양추적시스템은 영상처리시스템의 성능과 영상처리 알고리즘의 효율성에 따라 태양추적정밀도가 달라지며, 신호의 융합보다는 신호의 선별적 사용에 의한 복합방식의 태양추적시스템은 센서식 태양추적시스템과 프로그램식 태양추적시스템이 가지고 있는 문제점을 근본적으로 해결하지 못하는 특성을 가지고 있다.

태양추적장치의 기구적 그리고 광학적 오차로부터 유발되는 태양추적오차를 측정하고 모델링하여 사용하는 오차보정 프로그램식 태양추적시스템은, 다른 태양추적시스템이 가지고 있는 일사 조건 또는 추적장치의 구조적 오차에 따른 태양추적정밀도의 변화 등과 같은 문제점들을 해결할 수 있는 비교적 적용이 간편한 태양추적시스템이다. 다만 태양추적장치가 가지고 있는 오차로부터 기인되는 태양추적오차를 측정하고 이를 모델링하기 위한 과정이 추가로 필요로 하며, 따라서 이 역시 오차보정 프로그램식 태양추적시스템의 적용 과정에서 어려운 점으로 남을 수 있다.

태양추적시스템의 태양추적정밀도는 사용되는 센서, 기구 및 알고리즘의 정확성과 효율성에 따라 달라지게 될 것이다. 만약 보다 정확한 태양추적센서를 사용하거나, 기구적으로 광학적으로 보다 정밀한 태양추적장치를 사용하거나, 보다 정확하고 빠른 성능을 갖는 영상처리시스템 및 알고리즘을 사용하거나, 또는 보다 진보된 신호 융합 알고리즘을 사용한다면, 이와 같은 경우의 각각의 태양추적시스템이 갖는 태양추적오차는 본 연구에서 측정된 수치와는 크게 다른 크기의 값이 될 수도 있을 것이다. 이는 바꾸어 말해서, 본 연구에서 측정된 각각의 태양추적시스템이 갖는 태양추적오차의 절대값을 기준으로 특정 형태의 태양추적시스템이 다른 형태의 태양추적시스템보다 우수하다고 결론 짓기에는 어려운 점이 있을 수 있다는 것을 의미한다. 그럼에도 불구하고, 본 연구는 이들 각각의 태양추적시스템이 갖는 태양추적오차를 정량적으로 측정하고 분석함으로써 각각의 태양추적시스템이 갖는 특성을 파악할 수 있게 하였으며, 아울러 각각의 태양추적시스템이 가지고 있는 문제점을 극복하기 위한 새로운 형태 또는 보완된 태양추적시스템의 개발을 위한 선행 연구의 결과로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] Sode-Shinni and N. Rumart, "A shadow method for automatic tracking," *Solar Energy*, vol. 37, no. 3, pp. 245-247, May 1986.
- [2] W. A. Lynch and Z. M. Salameh, "Simple electro-optically controlled dual axis sun tracker," *Solar Energy*, vol. 45, no. 2, pp. 65-69, Mar. 1990.
- [3] Y. C. Park and Y. H. Kang, "A performance evaluation of sensor type sun tracking system," *J. of the Korean Solar Energy Society*, vol. 21, no. 4, Aug. 2001.
- [4] P. Roth, A. Georgiev, and H. Boudinov, "Design and construction of a system for sun tracking," *Renewable Energy*, vol. 29, no. 3, pp. 393-402, Mar. 2004.
- [5] J. Meeus, *Astronomical Algorithms*, Willmann-Bell Inc. 1991.
- [6] Y. C. Park and Y. H. Kang, "Computation of sun position for the sun tracking control system of solar concentrator," *J. of the Korean Solar Energy Society*, vol. 18, no. 4, Aug. 1998.
- [7] B. P. Edwards, "Computer based sun following system," *Solar Energy*, vol. 21, no. 6, pp. 491-496, Nov. 1978.
- [8] S. P. Hong et. al., "A study of tracking the sun using image_processing," *CICS*, pp. 321-326, 2006.
- [9] D. Fontani et. al., "A pinhole camera to track the sun position," *Proc. of ISES World Congress*, pp. 1759-1763, 2007.
- [10] C. F. Gay, J. W. Yerkes, and J. H. Wilson, "Performance advantages of two-axis tracking for large flat plate photovoltaic energy systems," *16th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, pp. 1368-1371, 1982.
- [11] A. N. Khalifa and S. S. Al-Mutawalli, "Effect of two axis sun tracking on the performance of compound parabolic concentrator," *Energy Conversion and Management*, vol. 39, no. 10, pp. 1073-1079, Jul. 1998.
- [12] M. S. Al-Sond et. al., "A parabolic solar cooker with automatic two axes sun tracking system," *Applied Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 463-470, Feb. 2010.
- [13] Y. H. Kang et al., "Demonstration research on solar thermal power using dish type concentrator," Korea Institute of Energy Research, Report, 2005.
- [14] D. H. Seo, "A study on the analysis of sun tracking performances for various sun tracking systems," Master Thesis, Seoul National University of Technology, Aug. 2010.
- [15] F. R. Rubio et al., "Application of new control strategy for sun tracking," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, no. 7, pp. 2174-2184, July 2007.
- [16] K. R. Castleman, *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 1996.
- [17] 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, Feb. 2010.

서 동 혁

2008년 서울산업대 제어계측공학과(공학사). 2010년 서울산업대 제어계측공학과(공학석사). 현재 아이앤씨테크놀로지 연구원. 관심분야는 제어기 설계, 동적 시스템 모델링 및 제어응용, 메카트로닉스.

박 영 철

제어·로봇·시스템학회 논문지 제16권 제7호 참조