

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
*Journal of the Korean Solar Energy Society*  
Vol. 21, No. 4, 2001

## 센서식 태양추적시스템의 추적정밀도 평가

박영철\*, 강용혁\*\*

\* 서울산업대학교 제어계측공학과

\*\* 한국에너지기술연구소

## A Performance Evaluation of Sensor Type Sun Tracking System

Y.C. Park\*, Y.H. Kang\*\*

\* *Seoul National University of Technology*

\*\* *Korea Institute of Energy Research*

### Abstract

A parabolic dish concentrator used in a high temperature application of solar energy tracks the sun's movement by two axis sun tracking system. In such a system, sun tracking performance affects the system efficiency directly. Generally the higher the tracking accuracy is, the better the system performance is. A large number of parabolic dish type concentrators has been developed and implemented in the world. However none of them clearly provided a qualitative method of how the accuracy of the sun tracking system can be evaluated. The work presented here is the evaluation of sun tracking performance of parabolic dish concentrator, which follows the sun's movement by the sensor, using a computer vision system. We install a camera on the parabolic dish concentrator. While the concentrator follows the sun, sun's images are captured continuously. Then the performance of sun tracking system was evaluated by analyzing the variation of the position of the sun in the captured images.

### 1. 서 론

무한 청정에너지 자원인 태양열은 대부분 수입에 의존하고 있는 국내 에너지 공급원의 한계성을 극복할 수 있는 에너지원 일뿐만 아니라 대기오염방지 협약에 대처할 수 있는 차세대 에너지원으로서 점차 중요성을 더해가고 있는 중요한 대체에너지 자원이다. 태양열 활용에 관한 연구는 국내외적으로 많은 분야에서 활발히 진행되고 있으나 저밀도 에너지원으로서 태양열을 고효율화시키기 위한 기기의 개발은 실용화를 위한 많은 노력이 아직은 필요로 한 단계에 있다.

Parabolic dish형 집광식 태양열 집열기는 태양열 발전시스템과 같은 고온 태양열 활용시스템을 위한 집열기로 2축 태양추적시스템에 의한 태양추적을 수행한다. 일반적으로 집광식 태양열 집열기의 성능 및 효율은 태양추적시스템의 태양추적성능에 따라 크게 달라지게 된다. 현재 미국, 호주, 일본 등 대체에너지 개발의 선진국에서 태양추적을 수행하는 여러 종류의 집광식 태양열 집열시스템이 개발되고 또한 운용<sup>1)</sup>중에 있지만 이들 시스템에 직접적인 영향을 미치는 태양추적시스템의 추적 정밀도를 평가하는 정형화된 방법은 제안되지 못하고 있다.

본 연구는 컴퓨터 비전 시스템을 이용하여 센서식 태양추적시스템의 태양추적정밀도를 평가한 것으로 카메라를 parabolic dish형 태양열 집열기에 부착하고, 태양추적시스템에 의하여 집열기가 태양을 추적하는 동안 취득한 태양 영상을 분석함으로써 태양 추적시스템의 추적정밀도를 평가하는 방식을 제안한 것이다.

방위각 및 고도각의 변화로 표시되는 태양 이동을 영상좌표계의 픽셀 변화량으로 변환하기 위한 카메라 교정(calibration)<sup>2)</sup>을 수행하였고, parabolic dish형 태양열 집열기가 태양추적시스템에 의하여 태양을 추적하는 동안 얻어진 태양 영상으로부터 태양 위치의 변화를 얻어내어 이를

실제 태양 이동각과 매칭 함으로서 태양추적시스템의 태양추적정밀도를 평가하였다.

### 2. 태양추적시스템의 구성

본 연구에서 사용된 태양추적 시스템은 그림 1과 같이 태양추적시스템<sup>3)</sup>과 비전시스템의 두 가지 부분으로 이루어져 있다. 태양 추적시스템의 동작은 그림 2와 같이 5개의 광센서(photodiode)에서 전류-전압 차동회로 및 A/D 변환을 거쳐 방위각(azimuth-센서 A, B)·고도각(elevation-센서 C, D) 센서의 차이 값으로 나타난 신호를 사용하여 방위각 및 고도각 구동축의 모터를 구

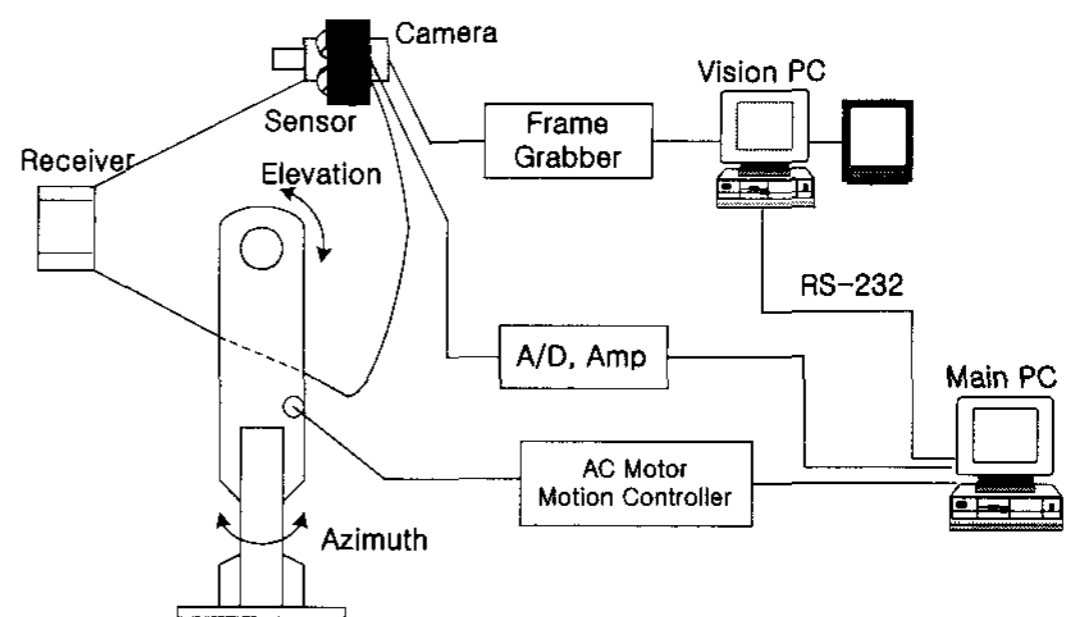


Fig. 1. Schematic diagram of sun tracking system

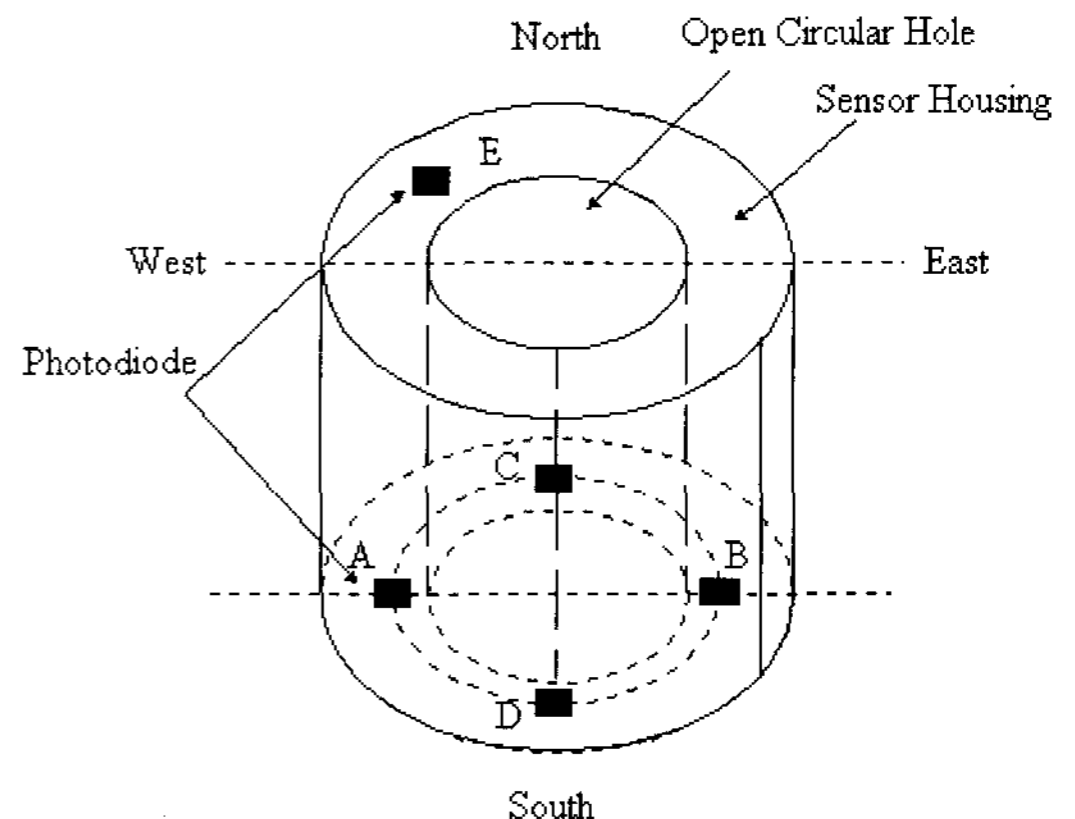


Fig. 2. Sun tracking sensor

동시키는 방식이다. 본 연구에서 사용된 비전 시스템의 제원은 다음과 같다.

- 카메라 : SONY XC-77, 768(H)×493(V),  
Pixel Size 11 μm×13 μm
- 렌즈 : AVEVIR TV ZOOM LENS,  
12.5-75mm, F1.8
- 편광필터 : TOPAZ, ND4, 52mm
- 프레임 그레버 : 삼성전자 FARA MVB-02

### 3. 카메라 Calibration

카메라의 오차보정은 카메라 자체의 광학적 특성과 내부 구조 특성을 나타내는 내부인자(internal parameter)와 물체가 놓여있는 실세계 좌표계를 기준으로 한 카메라의 3차원적인 위치 및 방향을 나타내는 외부인자(external parameter)를 결정하는 과정<sup>2,4)</sup>이다. 카메라의 내부 인자로는 초점거리, CCD소자, 프레임 그레버 간의 화소크기, 축적(scale factor), 렌즈 왜곡을 등이며 외부인자는 카메라의 위치좌표(x,y,z)와 방향으로서 X,Y,Z축을 기준으로 하는 회전각도가 포함된다.

본 연구에서의 카메라 오차보정은 먼저 카메라의 설치방향의 회전여부를 보상하고, 실제 태양의 이동각과 영상의 픽셀을 매칭하였다. 카메라 내부 인자는 비전시스템의 카메라 및 렌즈의 제원에 의한 값을 그대로 적용하였으며, 렌즈 요소의 왜곡량 및 결함<sup>5)</sup>은 무시하였다. 카메라 외부인자의 경우 카메라는 태양과 함께 지속적으로 움직이는 상태에 있으므로 카메라의 좌표값은 고려하지 않았다<sup>6)</sup>. 다만, 추적 시스템에 카메라를 부착시 센서의 방향과 카메라의 방향이 일치하도록 camera/sensor bracket 설계 및 고정시 주의하였다. 다시 말하자면 추적시스템의 상하좌우의 각기 4개의 센서는 지평면과 평행 및 수직이 되도록

설치되어 있고, 추적시 센서의 방향은 태양의 직사광선과 일직선이 되므로 카메라 역시 그와 같도록 설치되었다. 그럼에도 bracket 가공오차와 추적 시스템 자체 기울어짐 등으로 인하여 카메라의 설치방향이 약간이라도 틀어질 수 있으므로 이를 보상해 주어야 한다. 카메라의 틀어진 방향의 보상은 추적시스템의 적절한 동작과 태양 영상 분석을 통한 실험으로 산출하였다.

그림 3(b)에서 보는 바와 같이 카메라 좌표계의 Z축 방향의 회전은 실제 측정시 오차를 유발시키는 가장 중요한 요인이 된다. 태양의 방위각, 고도각중 어느 한 방향 운동에 대해서 영상에서

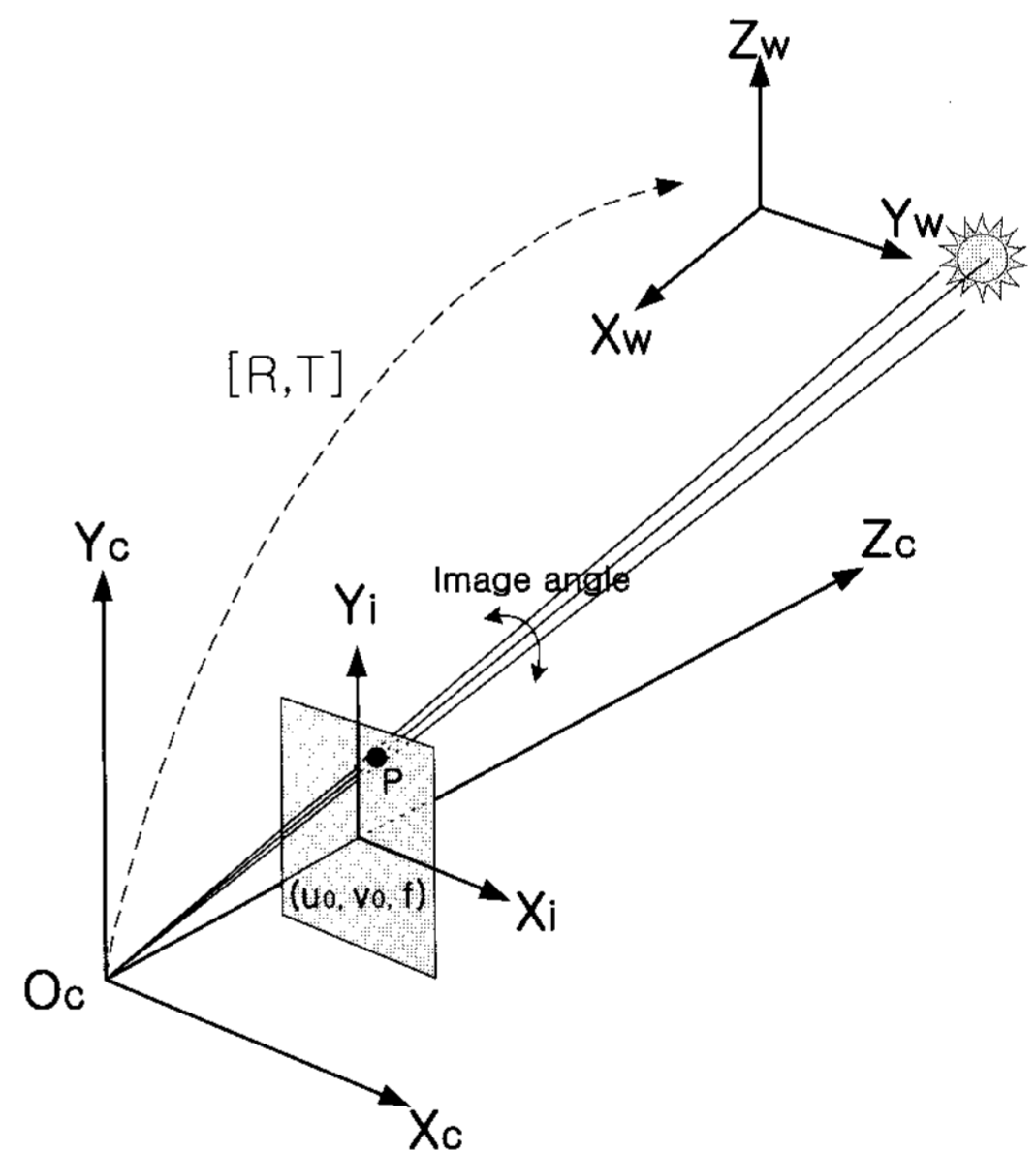


Fig. 3(a). A transformation between world coordinate, camera coordinate and image coordinate

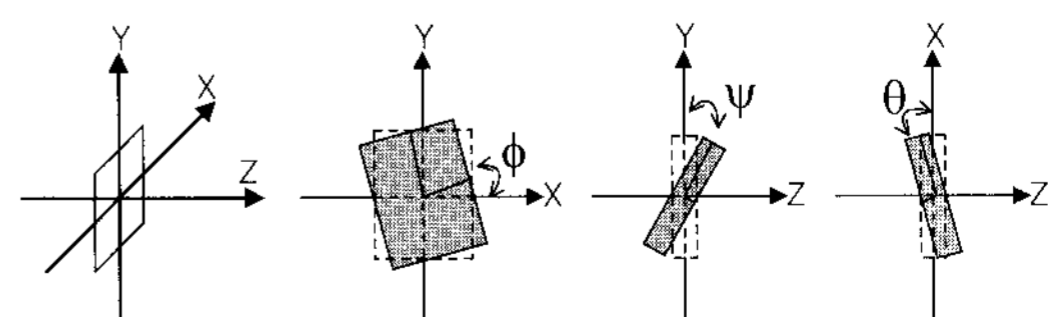


Fig. 3(b). Rotation of camera coordinate

는 X, Y축상의 운동으로 혼합되어 나타나기 때문이다. Z축 회전각 추출은 비전모니터 상하좌우의 각기 모서리 방향에 태양의 영상을 위치시키고, 시스템을 방위각/고도각으로 각각 수동 운전하면서 짧은 시간간격으로 영상을 취득, 식 (1)과 같이 중심점의 이동 궤적을 분석(최소자승법에 의한 곡선의근사)하여 기울어진 각도를 얻어냈다. 이때, 그 동안 실제 태양이 움직인 방위각 및 고도각( $\Delta A^\circ$ ,  $\Delta E^\circ$ )을 보상하여 종적인 회전각을 추출한다.

$$\begin{aligned} an + b \sum X_j &= \sum Y_j \\ a \sum X_j + b \sum X_j^2 &= \sum Y_j^2 \\ \phi_{A,E} &= \tan^{-1} \left( \frac{a}{b} \right) - \Delta(A^\circ, E^\circ) \end{aligned} \quad (1)$$

X, Y축을 기준으로 한 회전은 태양이동각에 따른 각 축별 픽셀의 이동거리의 길고 짧음에 영향을 미친다. 실제 태양의 이동각은 영상의 각 축상 이동거리와 같은 증가비율이 되어야 하지만 그림 3(b)에서처럼 X, Y축 회전으로 인해 기울어진 CCD에 투영되어 나타나기 때문이다. X, Y축 방향의 회전 추출은 시스템이 추적중인 상황에서 센서값의 차이가 '0'에 접근하는 추적완료(시스템 정지)가 되었을 때, 다음 식 (2)와 같이 얻어낼 수 있다.(여기서 u,v는 CCD 한 소자의 크기,  $W_a$ ,  $W_c$ 는 한 픽셀당 화각이다.)

$$(\phi, \theta) = \cos^{-1} \left( \frac{u(dy, dx)(W_c, W_a)}{v(dE, dA)} \right) \quad (2)$$

Calibration과정에서 태양의 이동각을 (X,Y축 회전을 가정하고) 영상의 픽셀길이 변화로 나눈 값은 본 연구의 실험과정에서 실제 태양의 이동각에 다시 곱하게 되어 결국 얻어지는 한 픽셀당 태양의 이동각은 X,Y축 회전을 무시한 값과 같게된다. 그렇기 때문에 카메라 좌표계의 X,Y축 회전은 무의미하게 된다.

이처럼 각 축의 회전각을 통하여 보정하려는 한 픽셀당 태양의 이동각은 렌즈 전방으로부터 몇도 이내의 피사체를 촬상하는가를 뜻하는 것으로 보통 '화각(image angle)'이라 통칭된다. 일반적인 화각을 구하는 방법은 식 (3)과 같다. (여기서 Hmax, Vmax는 픽셀수, f는 초점거리를 나타낸다)

$$W_{AE} = 2 \times \tan^{-1} \{ (u,v) \times (H,V)_{\max} / 2 \times f \} \quad (3)$$

위의 식 (3)은 렌즈의 왜곡 및 초점거리의 부정확성으로 인해 정밀한 값을 기대할 수 없다. 그래서 본 연구에서는 화각 공식을 통한 한 픽셀당 화각을 실제 추적정밀도를 측정하는 분해능(resolution)으로 적용하지 않고, 본 추적시스템 환경에 맞추어 지금껏 기술하였던 사항을 종합한 카메라의 Z축 회전각도를 대입, 그림 3(a)에서와 같은 임의의 world 좌표계에 대한 영상의 perspective projection matrix를 식 (4), (5)와 같이 정의하였다.

$$P = A[R(\phi)] \quad (4)$$

여기서 **R**은 카메라 외부 파라메타 이고, **A**는 다음과 같이 정의된다.

$$A = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

이와 같은 좌표변환은 추적시스템의 최초 추적완료 지점에서 시스템을 정지시켜 놓고, 짧은 시간간격(3초)으로 영상을 캡처하고 얻은 태양 이동궤적 데이터에 적용시킨다. 카메라의 Z축 회전각은 least square curve fitting에 의한 결과로 'y = -266.104762x - 4104.821905'의 직선 방정식이 얻어지고, 회전각은 0.0236°가 된다. Calibration과정에서 얻어진 태양의 이동 궤적은 그림 4와 같으며, 이와 같이 변환된 좌표를 적용

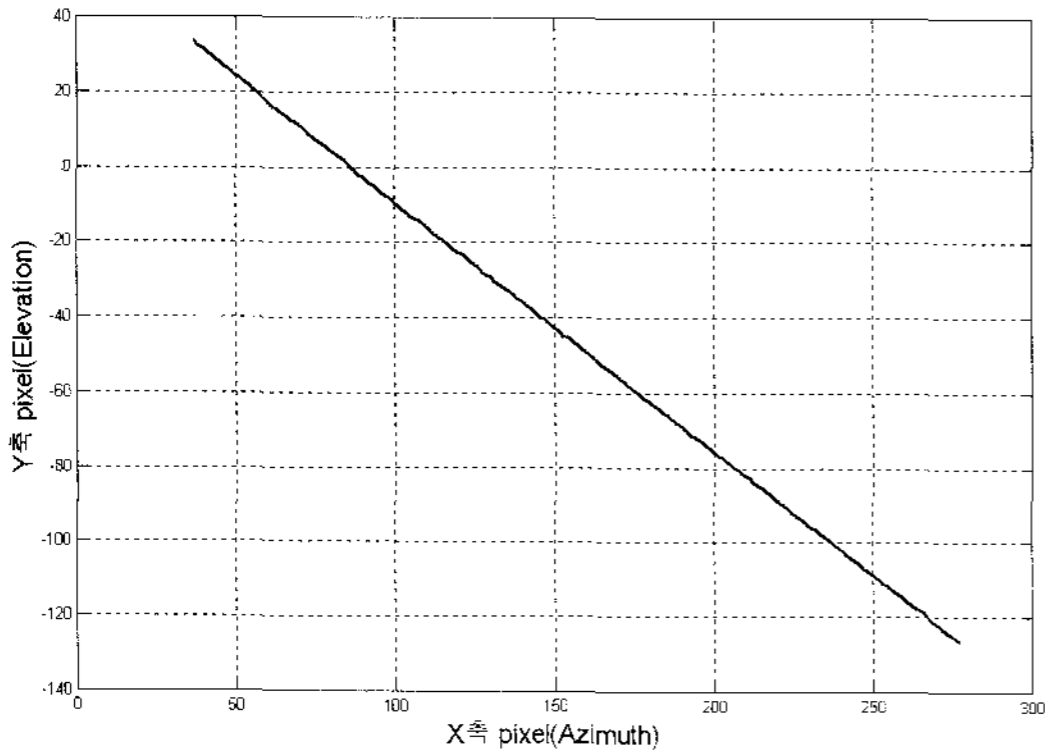


Fig. 4. Sun movement for camera calibration

한 결과로 영상의 가로, 세로 한 픽셀에 해당하는 태양의 방위각은  $0.015^\circ$ , 고도각은  $0.011^\circ$ 가 된다.

#### 4. 데이터 취득

태양 추적 시스템이 태양을 추적하는 동안 비전 모니터에는 태양의 영상이 나타나게 된다. 태양 빛이 강렬하여 렌즈에는 편광필터를 부착, 배경화면은 검고 태양은 희게 나타나게 되므로 효율적인 영상처리를 위해서 inverse image로 처리하였다. 그림 6은 본래 카메라로 들어오는 영상

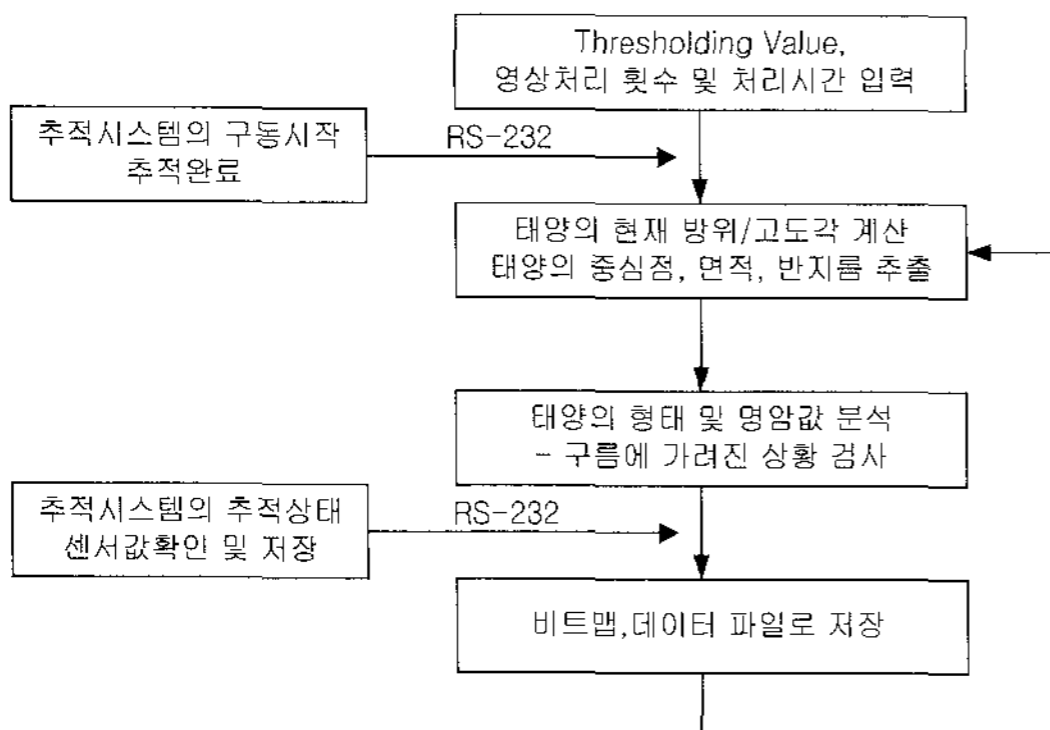


Fig. 5. A block diagram of data acquisition process

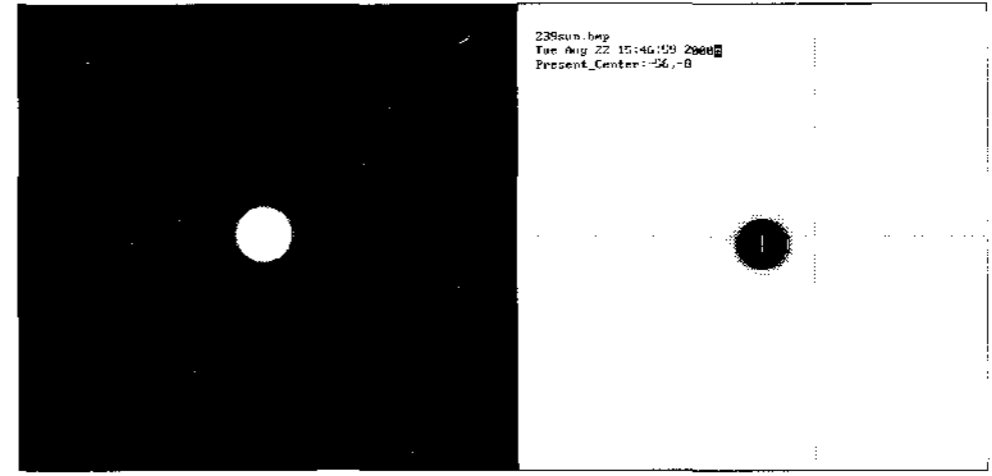


Fig. 6. Images before and after the inverse transformation

과 매 시간별 처리된 이후의 영상을 나타낸 것이다. 영상처리 및 데이터기록의 순서는 그림 5에서 보는 것과 같이 추적시스템 main PC와의 RS-232통신으로 추적상태를 체크하며 매 시간별 태양 위치 계산식에 의하여 태양의 방위각·고도각을 구하고, 동시에 영상처리 알고리즘을 통해 태양의 중심점 및 면적, 반지름을 구한다. 이후 태양의 형태(진원도)와 명암값(contrast value)의 분석을 통해 태양이 구름에 가렸는지를 검사하여 데이터를 취득한다.

#### 5. 실험 및 추적오차 해석 결과

센서식 태양추적시스템의 추적신호는 위에서 기술한 바와 같이 4개의 photodiode중 방위각상 태양위치 감별의 역할을 하는 A, B 그리고 고도각상으로는 C, D의 차이값을 통해 만들어진다. 그렇기 때문에 센서 자체의 오작동이 일어나거나 센서로 들어오는 빛이 불규칙할 경우에는 센서값의 신뢰도가 떨어질 수밖에 없고, 이는 곧 태양 추적의 불안정함으로 나타나게 된다. 그림 7에서 처럼 구름이 낀 상황에서는 태양 광이 구름에 의하여 산란이 일어나게 되고, 센서로 입사하는 빛이 불규칙적이 된다. 이럴 경우 센서값 차이로 파악한 태양의 위치는 실제 태양의 위치와 많은 차이를 보이게 된다.

태양 추적시스템의 추적정밀도 측정에 있어 최

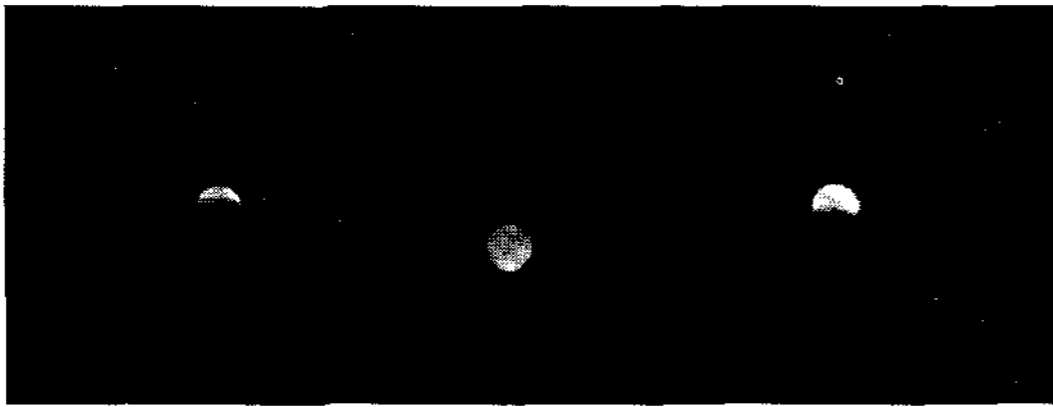


Fig. 7. Cloud covered sun image

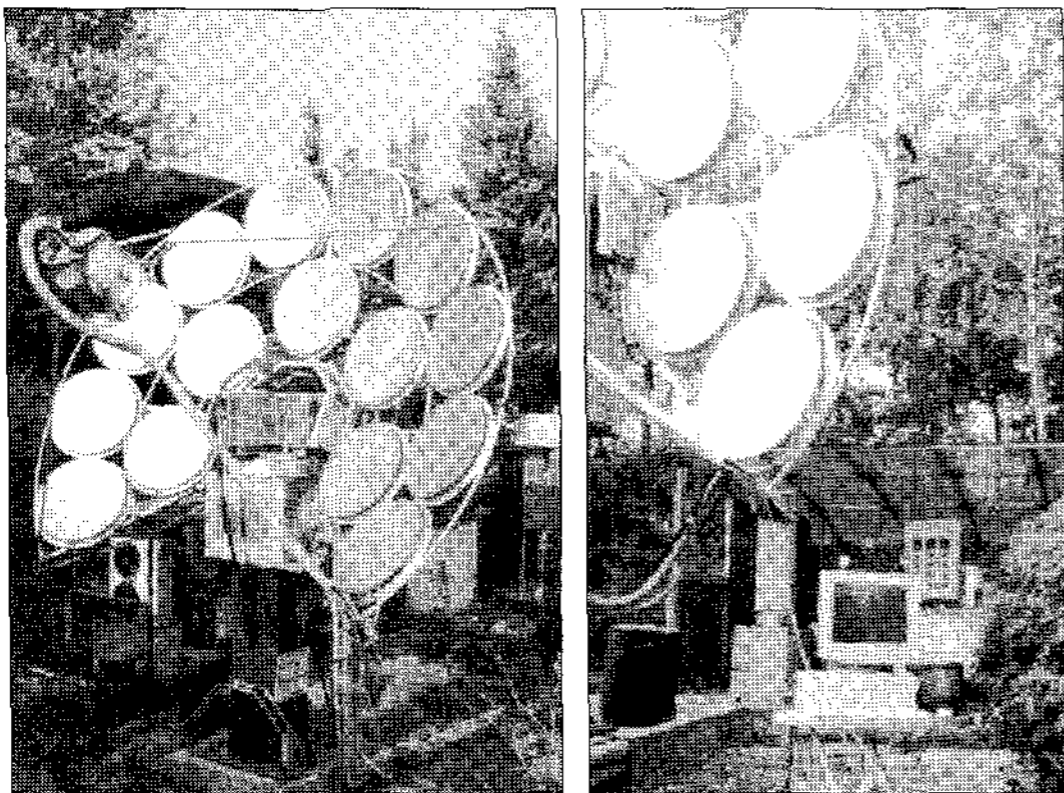


Fig. 8. Photography of sun tracking system

적의 조건은 아주 맑고 화창한 날이다. 하지만 우리나라 일기도상 구름 한점 없는 맑은 날은 좀처럼 있기 어려우므로 본 실험에서는 잠시동안이라도 구름이 없었던 상황과 하루종일(오전 11시경부터 오후 4시)의 상황으로 나누어 일정시간(1분) 간격으로 시스템이 태양을 추적하는 동안 태양의 이동 궤적 데이터와 비트맵영상을 기록하고 저장하였다. 그림 8은 본 연구에서 사용된 태양추적 시스템의 사진이다.

그림 9는 태양이 구름에 가리지 않은 상황에서의 약 1시간 정도의 태양추적을 수행한 결과이다. 상측의 그래프는 태양의 중심점이 영상의 X축상(방위각) 매 시간별 이동한 궤적을 나타낸 것이고, 하측의 그래프는 Y축상(고도각)의 이동 궤적을 나타낸 것이다. 방위각상에서는  $-28.7 \sim -42.6$  픽셀사이의 변화로 최대 13.9 픽셀의 오차범위가 나타났고, 고도각상에서는 최대  $23.6 \sim 14.1$  픽셀사이의 변화로 9.5픽셀의 오차범위를 기록하였

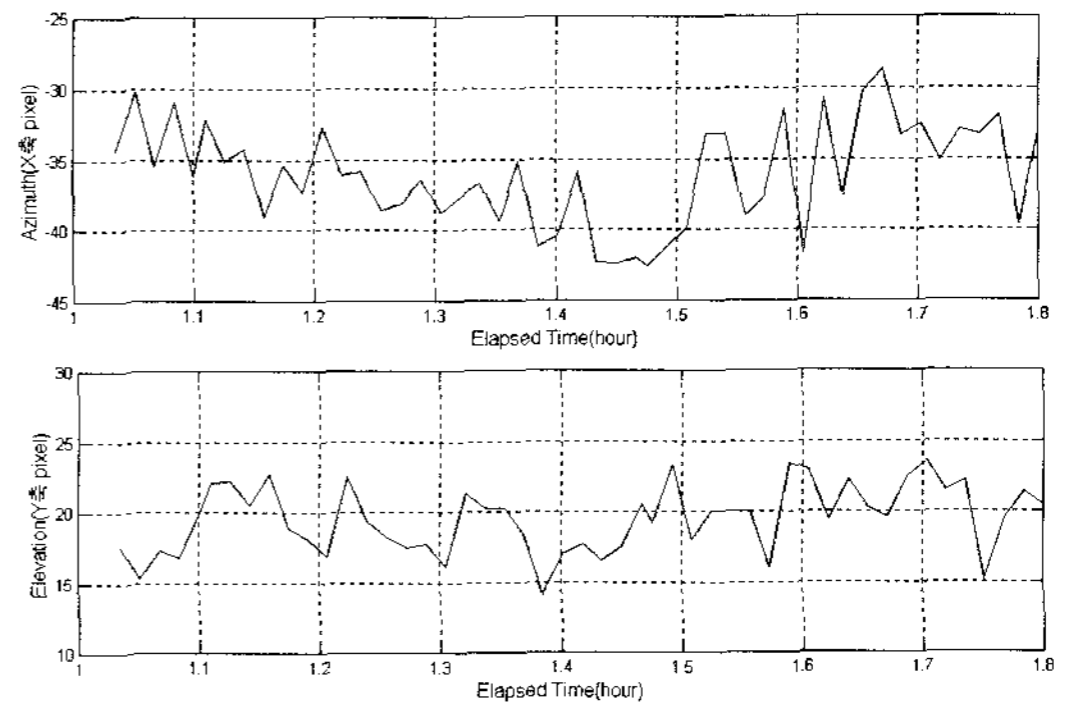


Fig. 9. Sun movement in azimuth and elevation without any cloud covered situation

다. 앞의 '3장 카메라 오차보정'에서 언급한 영상의 한 픽셀에 해당되는 태양의 이동각을 산출한 결과 방위각상으로는  $0.015^\circ/\text{pixel}$  이고, 고도각상으로는  $0.011^\circ/\text{pixel}$  이므로 이를 위의 오차범위에 적용하면 방위각상의 추적정밀도는  $0.208^\circ$ 의 오차를 가지고, 고도각상의 추적정밀도는  $0.104^\circ$ 의 오차를 가지게 된다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 사용된 집광식 태양열 집열시스템의 태양광이 모이는 집열기의 크기가 방위각/고도각으로 각각 약  $1^\circ$  정도의 허용각도를 가지고 있는 점을 감안한다면 본 연구에서 사용된 태양추적시스템은 안정된 태양 추적을 행하고 있다고 판단할 수 있다.

그림 10은 일반적으로 맑다고 하는 기상 상황에서 구름 등의 제약조건에 개의치 않은 약 5시간 동안의 추적결과이다. 픽셀 차가 갑자기 크게 나타나는 상황은 태양이 구름을 통과하거나 잠시 구름 속에 머물러 있어 나타난 것이다. 그렇기 때문에 X,Y축 곳곳에서 나타나는 오차 픽셀 범위는 구름에 가린 결과로 인한 것이므로 실상의 미 없는 수치이다. 추적시스템에서는 구름에 가린 경우의 판단을 sensor bracket의 외부에 부착되어 있는 센서값이 일정값 이하일 때로 한정지어 놓았다. 이유는 태양이 구름에 가린 경우는 추적할 만한 상태가 되지 않을뿐더러 집광의 효율

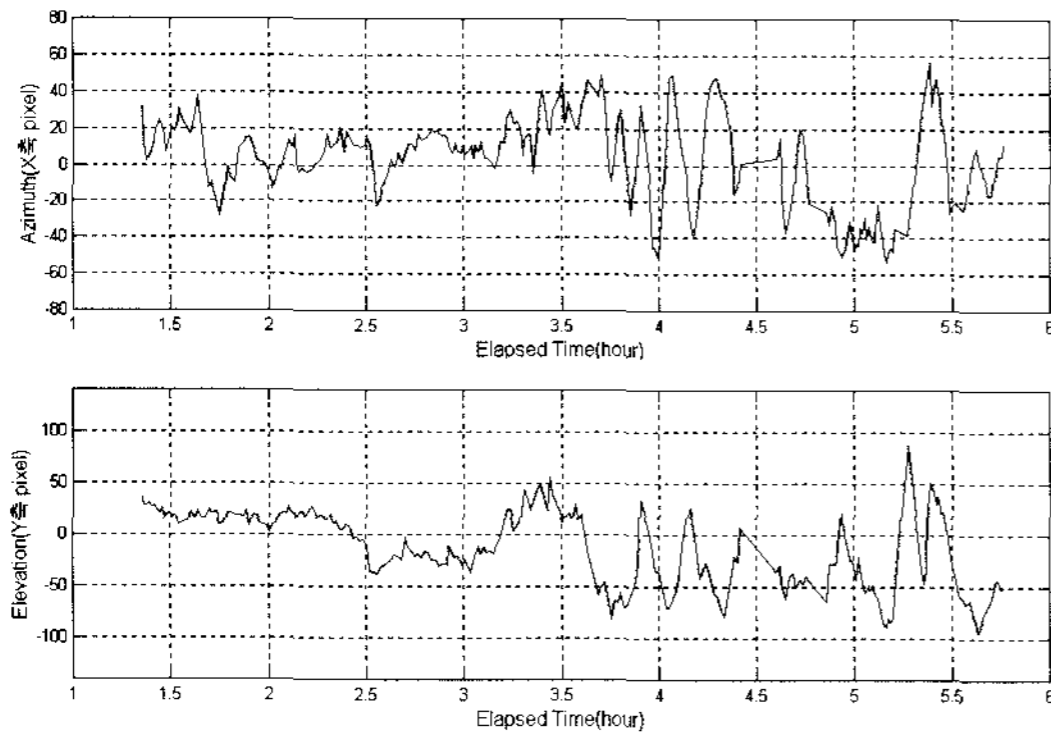


Fig. 10. Sun movement in azimuth and elevation with occasionally cloud covered situation

도 낮다고 판단한 실험의 결과였다. 본 연구의 실험은 추적정밀도의 평가를 위한 것이었으므로 추적시스템 자체의 집광 효율과 상관 있는(일정 값 이하로 정해놓은) 센서 값은 무시하여 구름에 가린 상황이라도 추적을 계속 실시하였다. 결국 태양이 구름에 가린 상황에서의 이와 같은 데이터는 센서식만으로 추적하는 시스템의 한계를 나타내는 것이라 할 수 있다.

## 6. 결 론

미래의 자원으로서 태양열 활용시스템은 점차 그 필요성이 증대될 것이며, 좀 더 고효율을 얻기 위한 기기의 개발이 가속화 될 것이다. 본 연구는 태양열 발전 시스템과 같은 고온 태양열 활용시스템을 위한 parabolic dish 형 태양열 집열기에서 사용되는 2축 태양추적시스템의 태양 추적정밀도를 컴퓨터 비전시스템을 이용하여 평가한 것이다.

본 연구에서 사용된 센서식 태양추적시스템은 방위각에서 최대  $0.208^\circ$ , 고도각에서 최대  $0.104^\circ$ 의 추적 오차를 가지고 있으며, 이는 집광식 태양열 집열기의 추적 허용오차와 비교하여 충분히

정확한 태양추적이 이루어지고 있음을 나타낸 것이다. 그러나 본 연구에서 얻어진 또 다른 결과는 센서만을 사용하는 태양 추적시스템은 태양을 추적하는데 있어 한계점이 있음이 실험적으로 확인된 것이다. 이는 우리 나라의 시계상 구름 한 점 없는 맑은 날이 드문 상황에서, 센서만을 사용한 태양 추적은 구름에 의한 태양 빛의 산란으로 추적 센서가 정확한 태양의 위치를 확인할 수 없기 때문이다.

센서식 태양추적시스템의 문제점을 보완하기 위하여 현재 설치된 프로그램식 태양추적 시스템과 프로그램과 센서를 동시에 사용하는 혼합형 태양추적 시스템에 대한 컴퓨터 비전 시스템을 사용하는 태양추적정밀도의 평가에 관한 실험이 현재 진행되고 있다.

## 참 고 문 헌

1. Leonard D. Jaffe, "Test result on parabolic dish concentrators for solar thermal power systems." Solar Energy Vol. 42. NO. 2. pp. 173~187, 1989.
2. R.Y.Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using Off-the-Shelf TV camera and lenses." IEEE J. Robotics and Automation, vol. RA-3, NO. 4, pp. 323~344, Aug. 1987.
3. 박영철, 강용혁, "Parabolic Dish형 태양열 집열기를 위한 2축 태양추적장치의 개발에 관한 연구", 태양에너지, Vol. 19, No. 4, pp. 81~91, 1999.
4. Jim Z C Lai, "On the sensitivity of camera calibration", Image and Vision Computing, vol. 11, NO. 10, Dec., 1993.
5. J.Weng, P. Cohen and M. Herniou,

“Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation”, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, NO. 10, pp. 965~980, 1992.

6. P.Puget and T. Skordas, “Calibration of a

mobile robot with application to visual navigation”, Proc. IEEE Work. Visual Motion, Irvine, Calibration, pp. 306~313, March(1989).