

형상계수와 태양추적장치를 이용한 헬리오스타트 제어 시스템 개발[§]

이동일* · 전우진* · 백승욱*[†]

* 한국과학기술원 항공우주공학과

Development of Optimal Control of Heliostat System Using Configuration Factor and Solar Tracking Device

Dong Il Lee*, Woo Jin Jeon* and Seung Wook Baek*[†]

* Dept. of Aerospace Engineering, KAIST.

(Received June 4, 2012 ; Revised August 29, 2012 ; Accepted August 31, 2012)

Key Words: Heliostat(헬리오스타트), Illuminance Sensor(조도센서), Solar Tracking Device(태양추적장치), Configuration Factor(형상계수), Simulink(시뮬링크)

초록: 본 연구의 목적은 형상계수와 태양추적장치를 이용하여 헬리오스타트에서 흡수기로 복사열전달이 최대화 될 수 있는 시스템을 개발하는 것이다. 헬리오스타트에서 타워 상단에 위치한 흡수기로의 열전달은 대부분 복사에 의해 일어나기 때문에, 복사 열전달에서 사용되는 형상계수를 헬리오스타트 제어에 이용하였다. 태양 추적 및 태양 위치 계산은 CdS 센서와 시뮬링크 프로그램을 이용하였다. 시뮬링크 프로그램을 이용하여 실시간으로 헬리오스타트, 흡수기, 태양 사이의 형상계수가 최대화되는 알고리즘을 적용함으로써, 헬리오스타트에서 흡수기로의 복사 열전달이 최대화 될 수 있도록 하였다. 또한 다양한 조건에 따른 헬리오스타트 제어에 필요한 각을 시뮬레이션 함으로써 각 조건에 필요한 각을 도출할 수 있었다.

Abstract: This study aims to develop a system that maximizes the radiative heat transfer from the heliostat to the receiver by using the configuration factor and a solar tracking device. As the heat transfer from the heliostat to the receiver is delivered by solar radiation, the configuration factor commonly utilized for radiation is applied to control the heliostat. Tracking the sun and calculating its position are possible by using an illuminance sensor (CdS) and Simulink. By applying optimized algorithms programmed using Simulink that maximize the configuration factors among the heliostat, receiver, and sun in real time, the solar absorption efficiency of the receiver can be maximized. Simulations were performed on how to change the angle required to control the elevation and azimuthal angle of the heliostat during the daytime with respect to various distances.

- 기호설명 -

S	: 헬리오스타트 중심에서 태양 방향의 단위 벡터	e_H	: 헬리오스타트의 고도각
H	: 헬리오스타트에서의 법선방향 단위 벡터	A_H	: 헬리오스타트의 방위각
R	: 헬리오스타트 중심에서 흡수기 방향의 단위 벡터	θ_2	: 헬리오스타트의 입사각
e	: 태양의 고도각		
A	: 태양의 방위각		

1. 서론

화석연료의 고갈과 일본 원전 사고 이후 신재생 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 신재생에너지 중에서도 타워형 태양열 발전은 기존 발전소를 대체할 수 있는 높은 잠재력과 장점들을 가지고 있다.⁽¹⁾ 타워형 태양열 발전소는 수백개의 헬리오스타트, 흡수기, 저장기, 발전 사이클로 구성된다. 수백개의 헬리오스타트는 태양열복사에너지를 타

[§] 이 논문은 2012년도 대한기계학회 에너지 및 동력공학 부문 춘계학술대회(2012. 5. 17.-18., 재료연구소) 발표논문임

[†] Corresponding Author, swbaek@kaist.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

위상단에 위치한 흡수기로 전달한다. 흡수기의 온도는 500~1000°C 가량 상승하게 되며 스팀 터빈 사이클을 작동시킬 수 있는 높은 온도의 증기를 생산할 수 있다. 헬리오스타트 최적화 제어는 타워형 태양열 발전소의 효율과 성능을 결정하는 가장 중요한 요소로 알려져 있다.⁽²⁻⁸⁾ 따라서 본 연구는 형상계수와 태양추적장치를 이용하여 헬리오스타트에서 흡수기로 복사열전달이 최대화 될 수 있는 연구를 진행하였다.

2. 헬리오스타트 제어 시스템

2.1 형상계수(Configuration Factor)

복사열전달에서 자주 사용되는 형상 계수(Configuration Factor)는 두 표면 사이의 거리와 입사각에 의해 결정된다. Fig. 1 은 표면 A1 에서 나온 전체 복사에너지 중에서 표면 A2 로 전달되는 부분 복사에너지를 나타내며 식 (1)과 같이 표현 될 수 있다. B_1A_1 은 표면 A1 에서 방출되는 전체 복사에너지로서 상수이며 F_{1-2} 는 표면 A1 에서 나온 전체 복사에너지 중에서 표면 A2 에 도달하는 부분 복사에너지를 나타낸다. 따라서 표면 A2 에 도달하는 복사에너지는 F_{1-2} 가 최대가 될 때 최대화 될 수 있다.

$$q_{1 \rightarrow 2} = B_1 A_1 F_{1 \rightarrow 2}. \tag{1}$$

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi d^2} dA_2 dA_1. \tag{2}$$

$$Y = \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3. \tag{3}$$

식 (2)는 형상계수의 정의를 나타내며 이를 바탕으로 식 (3)을 유도할 수 있다. 식 (3)에서 Y 는 두 형상계수의 곱을 나타낸다. 태양과 헬리오스타트 사이의 거리, 헬리오스타트와 흡수기 사이의 거리는 상수이기 때문에 식 (3)에서는 태양, 헬리오스타트, 흡수기의 입사각만이 고려된다. 위 식에

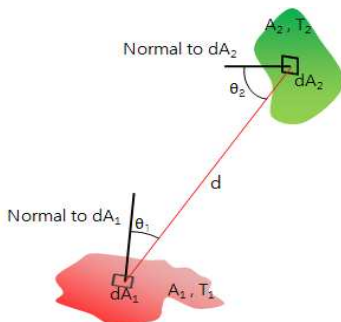


Fig. 1 Schematic diagram of configuration factor

서 2 가지 가정을 사용한다. 첫째, 태양의 크기가 크므로 θ_1 을 0 으로 가정한다. 둘째, 흡수기 표면에서의 입사각 θ_3 는 헬리오스타트 위치에 의해 정해지기 때문에 상수로 가정한다. 따라서 본 연구는 태양의 움직임에 따른 Y 값을 최대화하는 헬리오스타트에서의 입사각 θ_2 를 계산하여 복사열전달을 최대화하고자 한다.

2.2 헬리오스타트 방위각과 고도각 계산

Fig. 2 는 태양과 헬리오스타트의 방위각과 고도각을 나타낸다. 식 (4), (5), (6)은 Fig. 2 에서 극좌표를 이용함으로써 아래와 같이 유도할 수 있다.⁽⁹⁾ 식 (4)의 S 는 헬리오스타트 중심에서 태양 방향으로의 단위벡터를 나타낸다. 식 (5)의 H 는 헬리오스타트에서의 법선방향 단위 벡터를 나타낸다. 마지막으로 식 (6)의 R 은 헬리오스타트 중심에서 흡수기 방향의 단위 벡터를 나타낸다.

$$S = S_x i + S_y j + S_z k = \cos e \sin A i + \cos e \cos A j + \sin e k. \tag{4}$$

$$H = H_x i + H_y j + H_z k = \cos e_H \sin A_H j + \cos e_H \cos A_H j + \sin e_H k. \tag{5}$$

$$R = \frac{(x_R - x_H) i + (y_R - y_H) j + (z_R - z_H) k}{\sqrt{(x_R - x_H)^2 + (y_R - y_H)^2 + (z_R - z_H)^2}} = R_x i + R_y j + R_z k. \tag{6}$$

$$\cos(2\theta_2) = R \cdot S = R_x S_x + R_y S_y + R_z S_z = R_x \cos e \sin A + R_y \cos e \cos A + R_z \sin e. \tag{7}$$

$$\theta_2 = \frac{\cos^{-1}(R_x \cos e \sin A + R_y \cos e \cos A + R_z \sin e)}{2}. \tag{8}$$

식 (7)은 헬리오스타트 중심으로부터 흡수기 방향의 단위벡터와 헬리오스타트 중심으로부터 태양

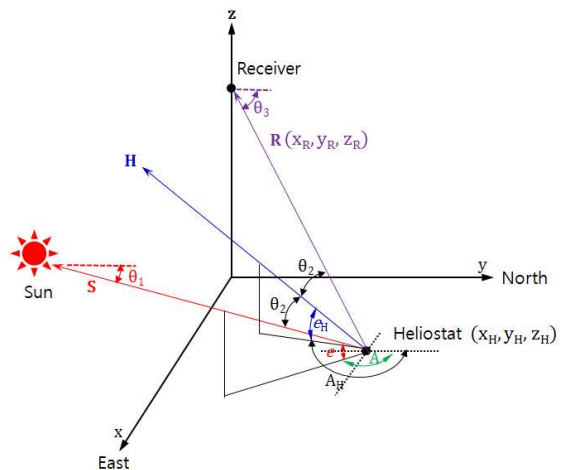


Fig. 2 Schematic diagram of two configuration factors

방향의 단위벡터 내적을 나타낸다. 내적을 이용함으로써 식 (8)에서 헬리오스타트에서의 입사각 θ_2 를 유도할 수 있다.

$$H = \frac{R+S}{2 \cos \theta_2} = \frac{(R_x+S_x)i+(R_y+S_y)j+(R_z+S_z)k}{2 \cos \theta_2} \quad (9)$$

$$\sin A_H = \frac{R_x + \cos e \sin A}{2 \cos \theta_2 \cos e_H} \quad (10)$$

$$\cos A_H = \frac{R_y + \cos e \cos A}{2 \cos \theta_2 \cos e_H} \quad (11)$$

$$\sin e_H = \frac{R_z + \sin e}{2 \cos \theta_2} \quad (12)$$

$$A_H = a \tan 2(\sin A_H, \cos A_H) \quad (13)$$

$$e_H = \sin^{-1}\left(\frac{R_z + \sin e}{2 \cos \theta_2}\right) \quad (14)$$

식 (9)는 Fig. 2 에서 코사인 제 2 법칙을 이용하여 유도할 수 있다. 식 (10), (11), (12)는 식 (4), (5), (9)를 이용함으로써 유도할 수 있다. 식 (13), (14)는 헬리오스타트 제어에 필요한 방위각과 고도각을 나타내며 식 (10), (11), (12)의 역함수를 이용하여 유도할 수 있다. 위에서 설명한 식 (4)~(14)는 시뮬링크로 프로그램화 되었다.

2.3 제어 시스템

제어 알고리즘 개략도는 다음과 같다. 태양 위치 설정을 위해 두 개의 방위각용 조도센서와 두 개의 고도각용 조도센서를 이용한다. 시뮬링크 프로그램

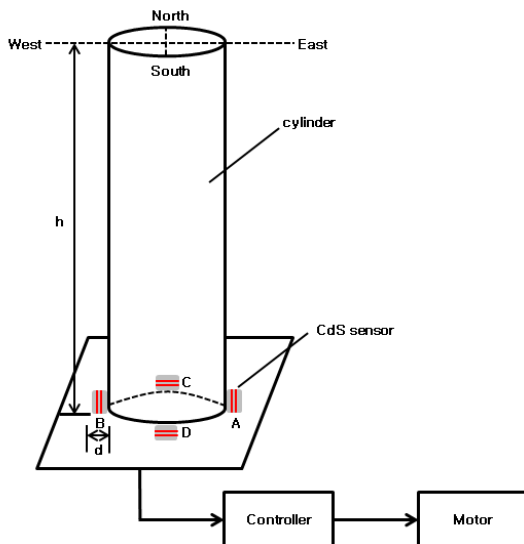


Fig. 3 Schematic diagram of solar tracking device

은 1 초 간격으로 위 4 개의 조도센서로부터 받은 신호를 이용하여 태양의 방위각과 고도각을 계산한다. 태양의 위치를 계산한 후에, 시뮬링크 프로그램은 식 (8)을 이용하여 형상계수를 최대화하는 θ_2 를 계산한다. 위의 θ_2 는 최종적으로 헬리오스타트의 방위각과 고도각을 제어하는데 이용된다.

2.4 태양 추적 장치

Fig. 3 은 태양 추적 장치의 개략도로서 제어기, 스텝핑 모터, 4 개의 조도 센서로 구성되어 있다. 제어기는 시뮬링크 프로그램을 이용하여 태양의 위치를 계산하고 스텝핑 모터를 작동시킨다. 스텝핑 모터는 정확한 위치 제어를 위해 사용되었으며 사양은 24 V, 0.072°, 5 상이다. 태양의 위치가 변함에 따라 태양추적장치의 원기둥 그림자 형상은 변하게 되고 원기둥 바깥에 동, 서, 남, 북으로 접해 있는 조도센서는 빛의 밝기를 감지하게 된다. 빛의 밝기에 따라 변하게 되는 조도센서의 전압값은 아날로그-디지털 변환기로 입력되어 제어기로 전송된다. 4 개의 조도센서 중에서 A, B 는 방위각 감지용이며 C, D 는 고도각 감지용이다.

원기둥의 높이는 다음과 같이 계산된다. h 를 원기둥의 높이, d 를 조도센서의 지름이라고 가정하면 삼각함수를 이용하여 $\tan \theta = \frac{d}{h}$ 과 같이 구할 수 있다. 원기둥 그림자가 1° 이내로 생성된다면 h 의 높이는 $h = \frac{d}{\tan 1^\circ} \approx \frac{0.003}{0.017} \approx 0.176m$ 에 의해서 구할 수 있다. 조도센서 R1 과 저항 R2 를 회로에 연결한다면, 출력 전압은 $V_{out} = \frac{R2}{R2+R1} \cdot V_{in}$ 로 계산된다. 위 식을 이용하면, 밝은 곳에서는 저항 R1 의 감소로

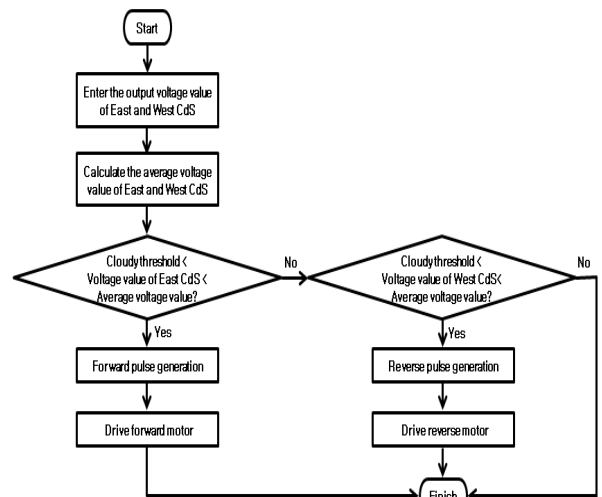


Fig. 4 Structural diagram of the control of azimuthal or elevation angle

출력 전압이 증가하고 어두운 곳에서는 저항 R1의 증가로 출력 전압이 감소하게 된다.

2.5 알고리즘

Fig. 4는 방위각과 고도각 제어 알고리즘이다. 동, 서에 위치한 조도센서가 전압값을 감지하면, 두 조도센서의 평균값이 계산되어 문턱값으로 설정된다. 태양이 서쪽으로 이동함에 따라 동쪽에 원기둥 그림자가 생성되면 동쪽에 위치한 조도센서의 전압값이 서쪽에 위치한 조도센서의 전압값보다 작아지게 된다. 동쪽에 위치한 조도센서의 전압값이 문턱값보다 낮고 흐림 판단기준 문턱값보다 높다면 참값을 발생하게 되어 태양추적장치의 모터를 서쪽방향으로 작동시켜 두 조도센서 A, B 전압값이 같아지게 만든다. 하지만 문턱값(동-서, 남-북의 평균 전압값)이 흐림 판단 기준 문턱값보다 낮게 된다면 태양 추적을 중지하게 된다. 고도각 제어 알고리즘 역시 위와 동일하다.

방위각과 고도각 계산 알고리즘은 다음과 같다. 첫째, 모터가 서쪽방향으로 움직일 때마다 발생하는 펄스 개수를 덧셈한다. 둘째, 서쪽방향으로 움직인 각은 위에서 계산한 총 펄스 개수에 펄스당 움직이는 모터의 각을 곱하여 계산한다. 셋째, 서쪽방향으로 움직인 각에서 동쪽방향으로 움직인 각을 뺄셈한다. 넷째, 최종적으로 움직인 방위각은 초기 설정한 각을 덧셈 함으로서 계산된다. 고도각 계산 알고리즘 역시 위와 동일하다.

시스템 종료는 동, 서, 남, 북 방향의 조도센서 평균값이 종료판단 기준 문턱값보다 낮게 되면 원상복귀 펄스수를 발생시켜 태양추적장치를 원상복귀 시킨 다음 태양 추적 장치를 종료시킨다.

3. 실험 결과

태양추적장치를 통해 계산한 방위각과 고도각을

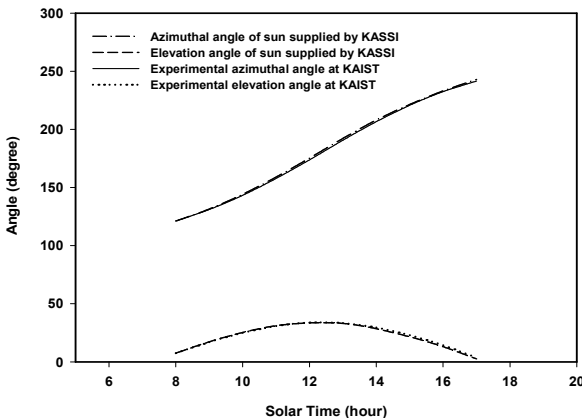


Fig. 5 Comparison of actual values and experimental data

한국천문연구원에서 얻은 값과 비교하였다. Fig. 5와 같이 오전 8시부터 오후 5시까지 비교한 결과 최대 오차는 1° 이내였다. 이를 통해 태양 추적 장치에 사용된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

3.1 위치에 따른 입사각 θ_2 변화값

Fig. 6은 오전 7시부터 오후 6시까지 x 축과 y 축 위치에 따른 헬리오스타트의 입사각 θ_2 변화를 각각 나타낸다. 태양은 봄, 가을을 기준으로 했을 때 고도각은 0°~52°, 방위각은 90°~270°로 움직인다. 헬리오스타트 세 지점의 위치벡터는 미터 단위로 z 축의 1은 헬리오스타트 높이를 나타낸다. 흡수기의 위치벡터는 (0,0,100)이다. Fig. 6(a)에서 동쪽에 위치한 헬리오스타트 일수록 입사각 θ_2 최소값을 나타내는 시각이 서쪽에 위치한 헬리오스타트보다 빠른 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)에서는 흡수기와 헬리오스타트 사이의 거리가 증가할수록

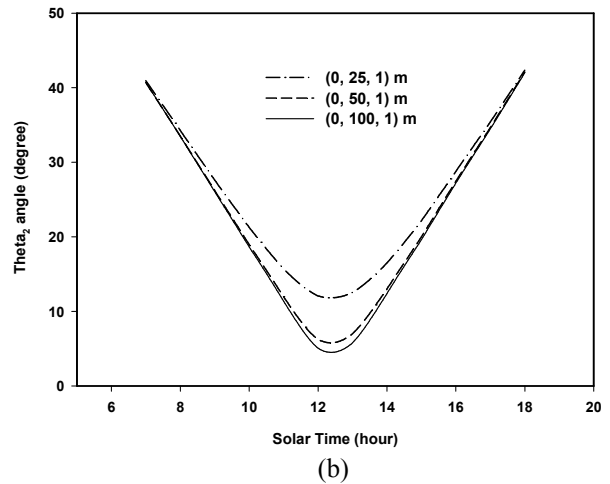
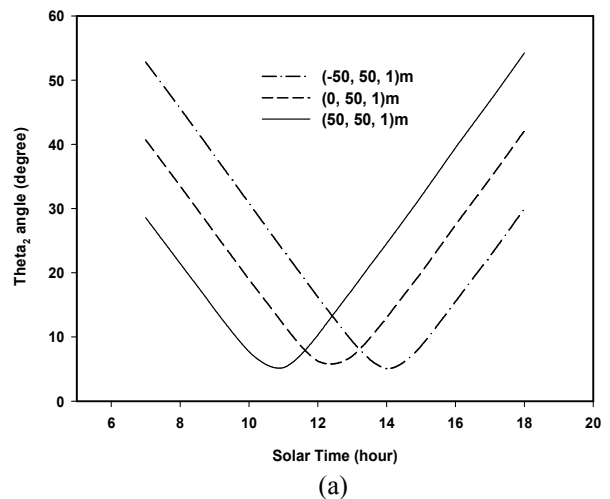


Fig. 6 Incidence angle versus solar time for different distances from receiver to heliostat (spring or autumn)

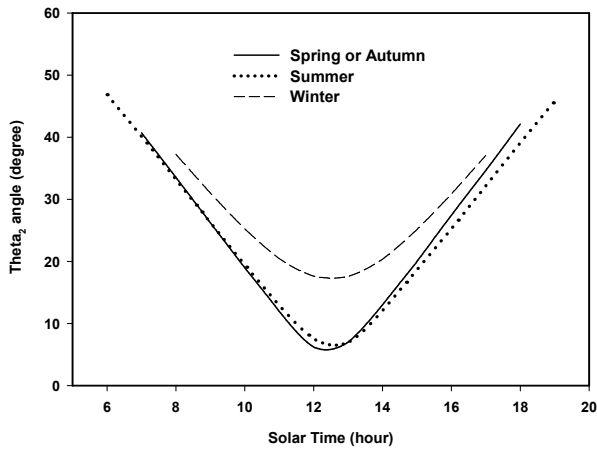


Fig. 7 Incidence angle versus solar time for different seasons

오전부터 오후까지 입사각 θ_2 의 변화값은 커지지만 남중고도에서의 절대값은 작아지게 된다. ‘V’ 곡선은 단위벡터 R 과 단위벡터 S 의 내적이 남중고도에서 최소값을 가짐을 보여준다.

3.2 계절에 따른 입사각 θ_2 변화값

Fig. 7은 계절에 따른 헬리오스타트의 입사각 θ_2 변화를 나타낸다. 헬리오스타트의 위치벡터는 (0,50,1)이고 흡수기의 위치벡터는 (0,0,100)이다. 계절에 따라 낮의 길이가 다르므로 남중고도 시각은 계절에 따라 다르다. Fig. 7에서는 겨울의 고도각이 다른 계절에 비해 작아서 입사각 θ_2 변화값이 작음을 알 수 있다. 또한 입사각 θ_2 최소값을 나타내는 시각은 여름보다 겨울이 빠른 것을 알 수 있다. Fig. 6에서와 마찬가지로 ‘V’ 곡선은 단위벡터 R 과 단위벡터 S 의 내적이 남중고도에서 최소값을 가짐을 보여준다.

3.3 헬리오스타트의 방위각과 고도각

Fig. 8은 오전 7시부터 오후 6시까지 헬리오스타트 제어에 필요한 방위각과 고도각을 나타낸다. 헬리오스타트 세 지점의 위치벡터는 각각 (0,25,1), (0,50,1), (0,100,1)로서 미터 단위이고 z 축의 1은 헬리오스타트 높이를 나타낸다. 흡수기의 위치벡터는 (0,0,100)이다. 헬리오스타트 제어에 필요한 방위각과 고도각은 식 (13), (14)를 이용하여 계산한다. Fig. 8(a)에서 방위각 제어에 필요한 각은 헬리오스타트와 흡수기 사이의 거리가 증가함에 따라 변화각이 작아짐을 알 수 있으며 남중고도에서는 거리에 관계없이 같은 방위각을 가진다. 또한 일출에서 최소 방위각을 가지고 일몰에 최대 방위각을 가짐을 알 수 있다. Fig. 8(b)에서는 헬리오스

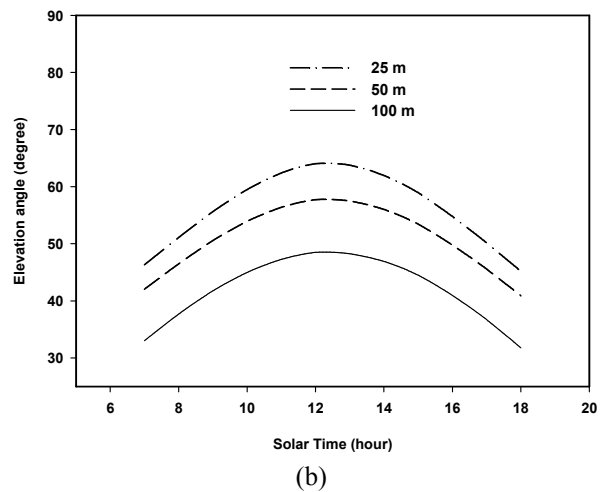
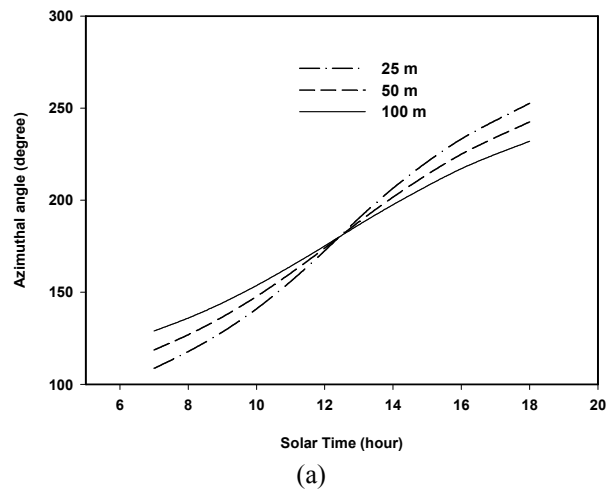


Fig. 8 Azimuthal and elevation angle of the heliostat versus solar time (spring or autumn)

타트 제어에 필요한 고도각이 헬리오스타트와 흡수기 사이의 거리가 증가할수록 감소함을 알 수 있으며 남중고도에서 최대 고도각을 가지고 일출과 일몰에서 최소 고도각을 가짐을 알 수 있다. Fig. 8(a), (b)를 비교해보면 최대 방위각과 최소 방위각 차이가 최대 고도각과 최소 고도각 차이보다 큰 것을 알 수 있다.

3.4 헬리오스타트 검증

Fig. 9는 오전 10시부터 오후 5시까지 시간에 따른 헬리오스타트와 태양추적장치의 위치 변화를 나타낸 실험 결과이다. Fig. 9에서 오른쪽이 동쪽 방향을 나타내며 왼쪽이 서쪽방향을 나타낸다. Fig. 9의 왼쪽에 위치한 헬리오스타트와 오른쪽에 위치한 태양추적장치는 태양의 위치가 동쪽에서 서쪽으로 이동함에 따라 프로그램화된 알고리즘에 의하여 자동으로 제어되었다.



Fig. 9 Transient motion of heliostat depending on the time

헬리오스타트 설계는 다음과 같다. 방위각 모터의 회전축에 반사경의 중심이 놓여져 있으며 고도각 모터와 반사경은 벨트로 연결되어 일대일 비율로 작동하게 된다. 헬리오스타트의 반사경 지름은 0.18m 이며 외형은 아크릴로 제작하여 무게를 가볍게 해주었다.

Fig. 10 은 설정된 흡수기의 위치벡터를 나타낸다. 상단에 위치한 검정색 십자가 중심을 흡수기라고 가정하였으며 헬리오스타트는 설정된 흡수기 위치벡터로 복사열에너지를 전달하게 된다.

Fig. 11 은 오전 10 시부터 오후 5 시까지 헬리오스타트가 태양으로부터의 복사열에너지를 설정된 흡수기 위치벡터로 전달한 결과를 나타낸다. 시간의 변화에 따라 복사열에너지가 설정된 흡수기 위치벡터(검정색 십자가 중심)를 벗어나지 않고 전달 됨을 알 수 있다. 위 실험을 통해 본 논문에 적용된 헬리오스타트 제어 알고리즘 및 설계의 타당성을 검증하였다.



Fig. 10 Tentative receiver

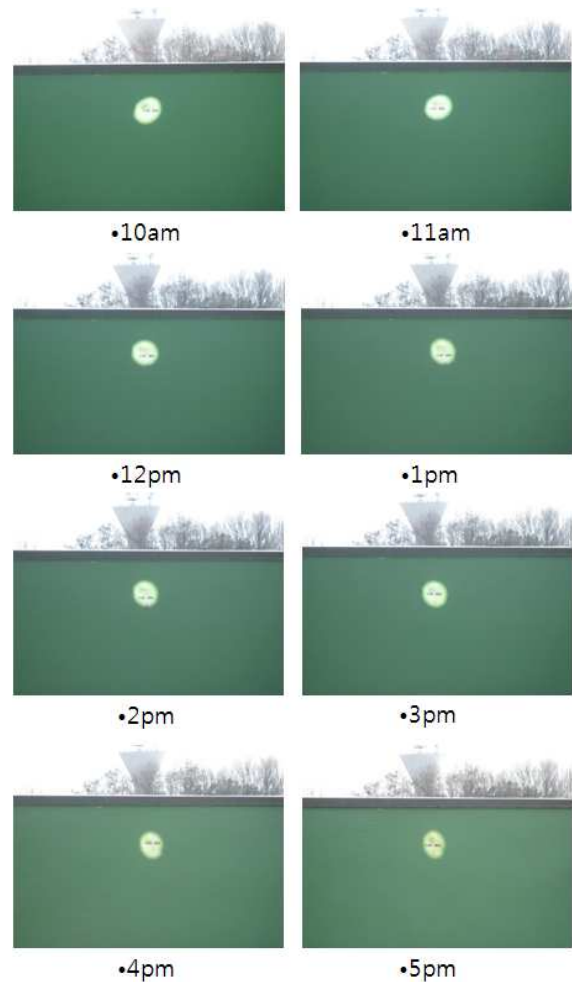


Fig. 11 Radiation heat transfer from heliostat to receiver depending on the time

4. 결 론

태양의 움직임에 따른 태양, 헬리오스타트, 흡수기 사이의 형상계수(Configuration Factor)를 최대화하여 헬리오스타트에서 흡수기로 복사열전달이 최대화 되도록 하는 헬리오스타트 최적화 제어 시스

템을 구현하였다.

태양추적장치에서의 태양 추적, 태양 위치 계산, 태양추적장치의 원상복귀, 시스템 종료는 시뮬링 크를 이용하여 프로그램화 하였다. 태양추적장치를 통해 계산한 방위각과 고도각은 한국천문연구원에서 얻은 값과 비교함으로써 태양 추적 장치에 사용된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

다양한 조건에 따른 헬리오스타트 제어에 필요한 각을 시뮬레이션 함으로서 각 조건에 필요한 각을 도출할 수 있었다. 동쪽에 위치한 헬리오스타트 일수록 입사각 θ_2 최소값을 나타내는 시각이 빠른 것을 알 수 있었으며 흡수기와 헬리오스타트 사이의 거리가 증가할수록 헬리오스타트 입사각 θ_2 의 변화값은 커졌지만 남중고도에서의 절대값은 작아졌다.

헬리오스타트 제어에 필요한 방위각은 헬리오스타트와 흡수기 사이의 거리가 증가함에 따라 변화각이 작아짐을 알 수 있었으며 헬리오스타트 제어에 필요한 고도각은 헬리오스타트와 흡수기 사이의 거리가 증가할수록 감소하였다.

마지막으로 헬리오스타트에서 흡수기로의 복사열전달 실험을 통해서 적용된 제어 알고리즘 및 설계의 타당성을 검증하였다. 형상계수와 태양추적장치를 이용하여 헬리오스타트를 제어하는 본 시스템의 장점은 미리 설정된 궤적을 이용하는 것이 아니기 때문에 어느 위치에 설치하더라도 작동할 수 있다는 점이다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 “에너지 자원 인력 양성사업”의 지원으로 수행되었으며

이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- (1) Schwer, R. K. and Riddel, M., 2004, “The Potential Economic Impact of Constructing and Operating Solar Power Generation Facilities in Nevada,” *Subcontractor Report-550-35037*.
- (2) Vant-Hull, L. L. and Hildebrandt, A. F., 1976, “Solar Thermal Power System Based on Optical Transmission,” *Solar Energy*, Vol. 18, pp. 31~39.
- (3) Edwards, B. P., 1978, “Computer Based Sun Following System,” *Solar Energy*, Vol. 21, pp. 491~496.
- (4) Lynch, W. A. and Salameh, Z. M., 1990, “Simple Electro-Optically Controlled Dual-Axis Sun Tracker,” *Solar Energy*, Vol. 45, No. 2, pp. 65~69.
- (5) Kalogirou, S. A., 1996, “Design and Construction of a One-Axis Sun-Tracking System,” *Solar Energy*, Vol. 57, No. 6, pp. 465~469.
- (6) Roth, P., Georgiev, A. and Boudinov, H., 2004, “Design and Construction of a System for Sun-Tracking,” *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 393~402.
- (7) Comsit, M. and Visa, I., 2007, "Design of the Linkages Type Tracking Mechanisms of the Solar Energy Conversion Systems by Using Multi Body Systems Method," *12th International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science World Congress*.
- (8) Arbab, H., Jazi, B. and Rezagholizadeh, M., 2009, “A Computer Tracking System of Solar Dish with Two-Axis Degree Freedoms Based on Picture Processing of Bar Shadow,” *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 1114~1118.
- (9) Park, Y. C., 2009, “Heliostat Control System,” *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 29, No. 1, pp. 50~57.