

반사거울 설치 방향 조정에 의한 Heliostat 기구오차에서 기인하는 태양추적오차의 보정

박영철*

*서울산업대학교 제어계측공학과(ycpark@snut.ac.kr)

Compensation of Sun Tracking Error caused by the Heliostat Geometrical Error through the Canting of Heliostat Mirror Facets

Park, Young-Chil*

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

Abstract

Canting is the optical alignment of mirror facets of heliostat such that the heliostat could focus the energy as a unit concentrator. Canting could improve the optical performance of heliostat and thus improves the efficiency of heliostat and ultimately improves the efficiency of the solar thermal power plant.

This study discusses the effect of mirror canting, especially off-axis canting, used to compensate the sun tracking error caused by the heliostat geometrical errors. We first show that the canting could compensate the sun tracking error caused by the heliostat geometrical errors. Then we show that the proper canting time could exist, depending on the heliostat location. Finally we show how much the sun tracking performance could be improved by canting, by providing RMS sun tracking error. The limitation and caution of using canting to improve the sun tracking performance are also discussed.

Keywords : 반사거울 설치 방향 조정(Mirror canting), 헬리오스타트(Heliostat), 헬리오스타트 기구오차(Heliostat geometrical error), 태양추적오차 보정(Compensation of sun tracking error)

기 호 설 명

1. 서 론

I : 태양추적오차 평가지수

탑형 태양열 발전시스템(tower type solar

θ_s : 헬리오스타트의 태양광 입사각

thermal power plant)의 헬리오스타트는, 입

투고일자 : 2009년 9월 21일, 심사일자 : 2009년 9월 28일, 게재확정일자 : 2009년 11월 25일
교신저자 : 박영철(ycpark@snut.ac.kr)

사되는 태양에너지를 탑 상단에 위치하는 흡수기(receiver)로 반사시키기 위한 태양열 집광장치이며, 따라서 헬리오스타트의 광학 특성과 태양추적 정밀도는 태양열 발전시스템의 효율을 결정 짓는 중요한 요소들이다.

태양열 발전시스템에서 사용되는 헬리오스타트는 집광을 위하여 구면 또는 포물면의 반사면을 가지고 있으며, 이들 곡면 구조의 헬리오스타트 반사면은 평판 또는 곡면의 반사거울(mirror facet)들을, 그림 1에서와 같이 배열함으로써 만들어진다.

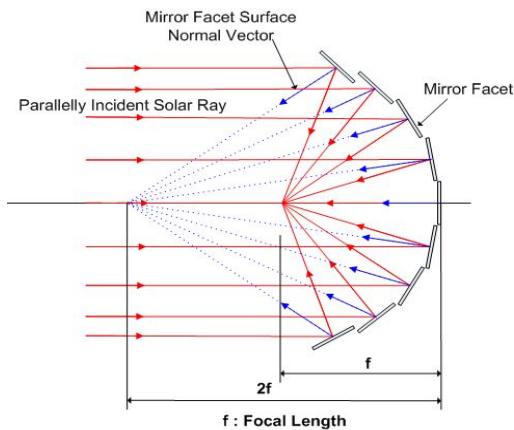


그림 1. 구면(spherical surface) 구조의 반사면을 갖는 헬리오스타트

반사거울 설치 방향 조정(mirror canting)은, 개별 반사거울 설치 각도의 조정을 통하여 헬리오스타트의 반사면을 구면과 같은 당초 설계의 것과 일치시킴으로서, 헬리오스타트의 광학효율을 극대화하기 위한 것으로, on-axis 조정법과 off-axis 조정법이 있다[1,2]. On-axis 조정법은, 헬리오스타트의 반사거울들의 법선 방향 벡터가 그림 1에서와 같이 배열되도록 반사거울의 설치 방향을 조정함으로써, 태양, 흡수기의 중심, 그리고 헬리오스타트의 중심이 모두 동일 직선상에 위치하도록 하는 조정법이다. 이에 반하여 off-axis 조정법은, 헬리오스타트가 태양 추

적을 수행하는 동안 각각의 반사거울의 설치 방향을 개별적으로 조정함으로써, 헬리오스타트로부터 반사되어 흡수기에 도달되는 태양에너지 분산이 최소 분포가 되도록 반사거울의 방향을 조정하는 것이다. Off-axis 조정법에 의해 설치 방향이 조정된 헬리오스타트의 반사면은 당초 헬리오스타트 설계의 그것과는 다른, 즉 정확한 구면 또는 포물면의 구조를 갖지 않게 되고, 따라서 적절한 시간에 적절한 방법으로 조정이 이루어 지지 않을 경우, 설치 방향 조정 이후에 헬리오스타트의 태양에너지 집광 특성이 조정 이전보다 나빠지는 경우가 발생되기도 한다[2].

본 연구는, off-axis 조정법에 의한 반사거울 설치 방향 조정을, 지금까지의 반사거울 설치 방향 조정의 목적이었던 헬리오스타트 광학특성의 향상은 물론, 기구오차로부터 발생하는 태양추적오차의 보정을 위한 수단으로 사용하기 위한 해석을 수행한 것이다.

헬리오스타트 태양추적정밀도는, 헬리오스타트의 기구오차, 광학오차, 그리고 위치계산의 정확성 등과 같은 연산오차에 따라 결정된다[3]. 이 중, 기구오차는 태양추적정밀도에 가장 큰 영향을 미치며, 연산오차에 의한 태양추적오차는 무시할 수 있는 정도인 것으로 알려지고 있다[4]. 본 연구에서는, 헬리오스타트 태양추적정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 기구오차로 인한 태양추적오차가[5,6], 반사거울 설치 방향 조정을 통하여 보정될 수 있는지에 대한 분석을 수행하였다. 아울러 반사거울 설치 방향 조정이 이루어진 헬리오스타트의 태양추적오차를 비교함으로써, 헬리오스타트 위치에 따른 적정한 반사거울 설치 방향 조정시간(canting time)을 결정하였으며, 반사거울 설치 방향 조정을 통한 헬리오스타트의 태양추적성능 향상 정도 및 한계에 관한 해석을 수행하였다[1].

1) 본 연구는 현재 중국 북경 엔칭에 건설되고 있는 1MW급 태양열 발전소를 위한 기술 개발의 일환으로 중국과학원 전공연구소(IEE, CAS)에

2. 태양추적오차의 보정

헬리오스타트의 기구오차로 인하여 발생하는 태양추적오차는, 헬리오스타트의 위치, 시간 그리고 기구오차들의 조합 등에 따라 무작위에 가깝게 변화한다. 그럼에도 불구하고 헬리오스타트의 기구오차에 의한 태양추적오차는, 동일한 규모(order of magnitude)의 기구오차들의 조합에 대하여, 태양 탑 가까이 그리고 헬리오스타트 필드 중심축(그림 2의 y 축)으로부터 멀리 떨어진 지점에 위치하는 헬리오스타트가, 필드 중심축 가까이 그리고 태양 탑으로부터 멀리 떨어져 있는 헬리오스타트보다 큰 태양추적오차를 가진다[5,6].

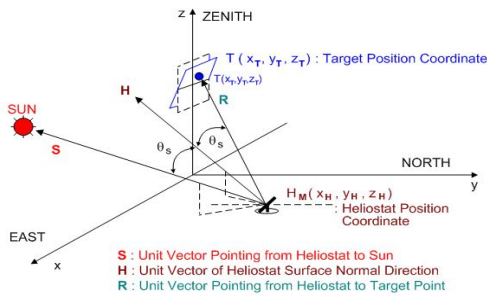


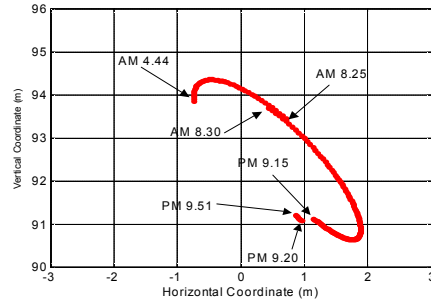
그림 2. 태양열 발전시스템의 좌표 시스템

반사거울 설치 방향 조정에 의한 기구오차에서 기인하는 태양추적오차의 보정 효과를 알아보기 위하여, 우선 위치좌표²⁾ (65.566, 35.163, 6)(m)의 헬리오스타트 No. 100이 표 1³⁾에서와 같은 기구오차들을 가지고, 태양 탑 상단 (0, 0, 93)(m)에 위치하는 흡수기로 태양광을 반사시

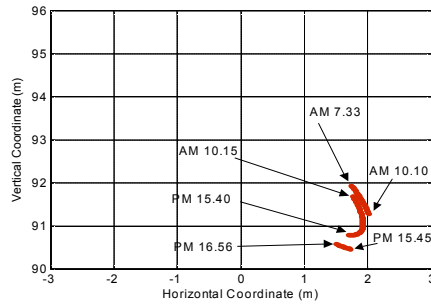
서 수행한 연구 결과이다. 따라서 본 연구에서 사용된 일출 및 일몰 시간을 포함하는 모든 시간은 중국 북경 옌칭(동경 115° 56' 19", 북위 40° 22' 54")의 시간이다.

- 2) 헬리오스타트의 위치 좌표는 그림 2의 태양열 발전시스템 좌표 시스템에서 헬리오스타트 반사면 중심의 좌표이다.
- 3) 태양추적오차의 크기는 추적오차를 유발하는 각각의 기구오차들의 크기 및 조합에 따라 달라진다. 표 1의 최대(또는 최소) 태양추적오차 유발 기구오차들의 조합은, 크기가 +0.05° 또는 -0.05°로 제한된 각각의 기구오차들이 년 평균값에서 최대(또는 최소) 크기의 태양추적오차를 생성하는 조합을 의미한다.

키기 위한 태양추적을 수행하는 동안 발생하는 태양추적오차를 그림 3에 나타내었다[5,6].



2009. 6. 21(Summer Solstice)



2009. 12. 22(Winter Solstice)

그림 3. 헬리오스타트 No. 100의 태양추적오차(반사거울 설치 방향 조정 이전)

표 1. 헬리오스타트 No. 100 (최대 태양추적오차 유발) 및 No. 51(최소 태양추적오차 유발)의 기구오차

기구오차 종류	오차 크기		
	No.100	No.51	
방위각 구동축 설치 오차	동서방향	-0.05°	0.05°
	남북방향	0.05°	-0.05°
고도각 구동축 설치 오차	동서방향	0.05°	-0.05°
	남북방향	-0.05°	0.05°
반사거울 설치 방향 오차	동서방향	0.05°	-0.05°
	남북방향	0.05°	0.05°
구동좌표 기준 설정 오차	방위각	-0.05°	-0.05°
피벗 오프셋 및 피벗 설치 방향 오차	고도각	-0.05°	0.05°
	오프셋 길이	0.3m	0.3m
	상하방향	0.05°	0.05°
기어 백래시	수평방향	0.05°	0.05°
	방위각	0.05°	0.05°
구동축 유격 및 무게편심 유발 오차	고도각	0.05°	0.05°
	발생위치	30.0°	30.0°
무게편심 유발 오차	크기	0.05°	0.05°

그림 3에서와 같이, 비록 각각의 기구오차의 크기가 1 mrad 이하의 비교적 작은 것일 지라도, 이들 오차들이 조합됨으로서 발생하는 태양추적오차는 년 평균값에서 2(m) 이상이 되며, 따라서 해당 헬리오스타트의 집광 성능이 요구되는 성능을 충족시키기 못함으로 인한 태양열 발전시스템의 효율 저하와 같은 다양한 문제를 유발시키게 된다.

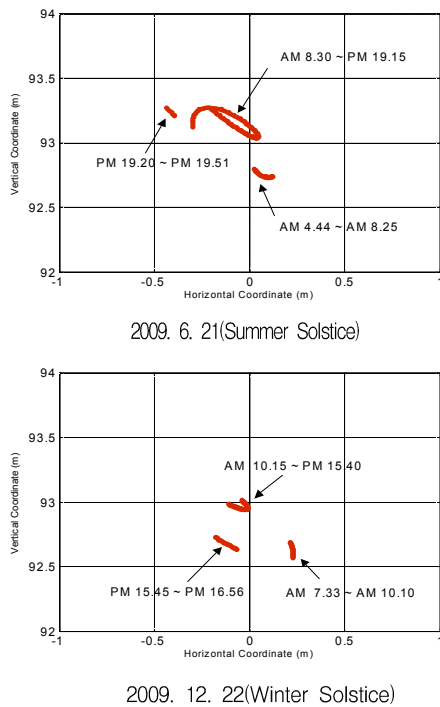


그림 4. 헬리오스타트 No. 100의 태양추적오차 (반사거울 설치 방향을 2009. 3. 22 14:00에서 조정)

그림 4는, 2009년 3월 20일 태양시간⁴⁾ 오후 14:00에서, 표 1에서와 같은 기구 오차들을 가지고 있는 헬리오스타트 No. 100의 태양추적오차를 보정하기 위하여, 반사거울의 설치 방향을 표 2에서와 같이 조정하고, 이와 같이 설치 방향이 조정된 반사거울을 가진 헬리오스타트가 태양추적을 수행하는 동안 생성한 태

양추적오차를 나타낸 것이다. 표 2의 반사거울 설치 방향 조정 값은, 헬리오스타트 No. 100이 2009년 3월 20일 태양시간 14:00에서 기구오차로 인한 태양추적오차를 제거하기 위한 반사거울의 설치 방향이다.

표 2. 헬리오스타트 No. 100의 반사거울 설치 방향 (2009. 3. 20. 태양시간 14:00에서 조정)

방향	조정 이전	조정 이후
동서방향	0.05°	-0.17226°
남북방향	0.05°	-0.02551°

그림 3과 그림 4를 비교하여 보면, 기구오차에서 기인하는 태양추적오차는 헬리오스타트 반사거울 설치 방향 조정에 의하여 보정 될 수 있음을 알 수 있다. 즉 off-axis 조정법에 의한 헬리오스타트 반사거울 설치 방향의 조정은, 헬리오스타트 기구오차로부터 기인하는 태양추적오차의 보정을 위한 수단으로 사용될 수 있으며, 따라서 off-axis 조정법에 의한 반사거울 설치 방향의 조정은 헬리오스타트의 광학특성 향상을 통한 집광 성능의 향상은 물론, 동시에 헬리오스타트 태양추적정밀도를 향상시킴으로서 헬리오스타트의 집열 성능 증대에 크게 기여함을 알 수 있다.

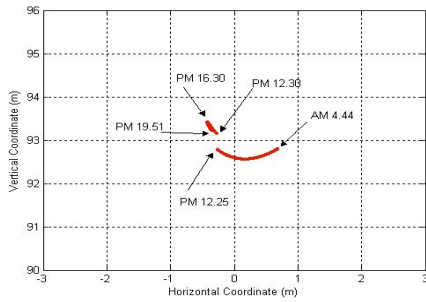
표 3. 헬리오스타트 No. 100의 RMS 태양추적오차 (2009. 3. 20. 태양시간 14:00에서 조정)

일자(2009년)	RMS 태양추적오차 (m)	
	조정 이전	조정 이후
3. 20	2.172	0.148
6. 21	2.060	0.214
9. 23	2.179	0.147
12. 22	2.619	0.197
태양추적오차 평가지수 (I)	2.258	0.177

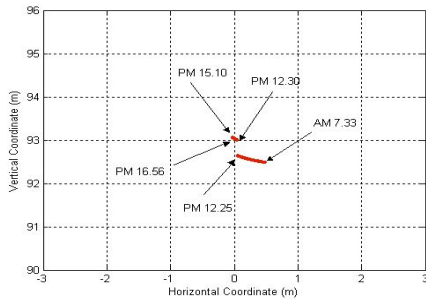
표 3은 헬리오스타트 No. 100이, 표 1의 기구 오차들을 가지고 있는 경우에 대한 반사거울 설치 방향 조정 이전과, 표 2에서와 같

4) 태양시간은 태양의 남중시간을 12:00로 하는 시간이다.

이 반사거울 설치 방향이 조정된 이후의 태양추적오차를 해당일의 RMS 오차와 2009년 3월 20일(춘분), 6월 21일(하지), 9월 23일(추분) 그리고 12월 22일(동지)의 RMS 태양추적오차들의 평균값으로 정의되는 태양추적오차 평가지수 I 로 나타낸 것이다. 표 3을 살펴보면, 표 1과 같은 기구오차들을 가지고 있는 헬리오스타트 No. 100의 경우, 반사거울 설치 방향 조정을 통하여 태양추적정밀도가 태양추적오차 평가지수에서 약 13배 정도 향상되었음을 알 수 있다.



2009. 6. 21(Summer Solstice)



2009. 12. 22(Winter Solstice)

그림 5. 헬리오스타트 No. 51의 태양추적오차 (반사거울 설치 방향 조정 이전)

반사거울 설치 방향 조정에 의한 태양추적오차 보정의 또 다른 효과를 알아보기 위하여, 이번에는, 표 1의 좌측 행에서와 같은 기구오차들을 가지고 있는 위치좌표 (0, 155.066, 6)(m)의 헬리오스타트 No. 51의 태양추적오차를 그림 5에 나타내었다. 그림에

서와 같이, 반사거울 설치 방향 조정 이전에 헬리오스타트 No. 51의 태양추적오차는, 그림 3에서 보여준 헬리오스타트 No. 100과는 다르게, 비교적 작은, 년 평균값 0.389(m) 정도의 태양추적오차 평가지수를 가지고 있다.

표 4. 헬리오스타트 No. 51의 반사거울 설치 방향 조정 이전 및 조정 이후의 태양추적오차 평가지수

조정 시간 (태양시간)	RMS 태양추적오차 (m)				I	
	3.20	6.21	9.23	12.22		
조정 이전	0.381	0.503	0.379	0.294	0.389	
조 정 이 후	3.20 10:00	0.392	0.504	0.391	0.326	0.403
	3.20 12:00	0.358	0.433	0.356	0.349	0.374
	3.20 14:00	0.378	0.452	0.376	0.489	0.424
	6.21 10:00	0.388	0.453	0.386	0.370	0.399
	6.21 12:00	0.406	0.409	0.404	0.455	0.419
	6.21 14:00	0.582	0.444	0.580	0.712	0.580
	9.23 10:00	0.392	0.503	0.391	0.326	0.403
	9.23 12:00	0.358	0.433	0.356	0.349	0.375
	9.23 14:00	0.378	0.452	0.376	0.489	0.420
	12.22 10:00	0.431	0.565	0.431	0.327	0.439
	12.22 12:00	0.372	0.495	0.371	0.296	0.384
	12.22 14:00	0.386	0.505	0.384	0.309	0.396

표 4는, 그림 5에서와 같은 태양추적오차를 가지고 있는 헬리오스타트 No. 51의 반사거울 설치 방향을 각각 다른 시간에서 조정 한 후, 조정이 이루어진 반사거울을 가지고 있는 헬리오스타트가 3월 20일, 6월 21일, 9월 23일 그리고 12월 22일 각각에서 태양추적을 수행하는 동안 생성하는 태양추적오차를 태양추적오차 평가지수 I 로 나타낸 것이다. 즉, 표 4의 태양추적오차 평가지수 I 는, 표 4의 해당 일과 해당 태양시간에 반사거울 설치방향을 기구오차로부터 기인하는 태양추적오차를 상쇄시키기 위한 방향으로 조정 하고, 그와 같이 설치 방향이 조정된 반사거울을 갖는 헬리오스타트가 태양 추적을 수행하는 동안 생성하는 태양추적오차를 평가지수로 계산하여 나타낸 것이다. 표 4를 살펴 보면, 그림 5와 같은 태양추적오차를 갖는 헬리오스타트 No. 51의 경우, 반사거울 설치

방향 조정에 따른 태양추적정밀도 향상 정도가, 그림 3의 헬리오스타트 No. 100과 비교하여, 대단히 미미한 수준이며, 아울러 반사거울 설치 방향의 조정시간에 따라 조정 이후가 조정 이전보다 큰 RMS 태양추적오차를 가지고 있는 경우가 발생하기도 한다.

반사거울 설치 방향 조정 이후가 조정 이전보다 큰 태양추적오차를 갖는 경우는, 헬리오스타트 필드를 구성하는 다양한 헬리오스타트에 대하여 표 4에서와 같은 동일한 계산을 수행하여 확인한 결과, 반사거울 설치 방향 조정 이전의 태양추적오차 평가지수가 0.5(m) 이하의 값을 갖는 헬리오스타트에서 발생하는 경우가 있음이 확인되었다. 이는 바꾸어 말해서, 반사거울 설치 방향 조정을 통한 태양추적오차의 보정은, 그림 3의 헬리오스타트 No. 100에서와 같이 조정 이전의 태양추적오차 평가지수가 큰 값일 경우에 대단히 큰 효과를 보인다. 그러나 태양추적오차 평가지수가 작은 그림 5의 헬리오스타트 No. 51의 경우와 같이, 특히 평가지수가 0.5(m) 이하의 경우에는, 반사거울 설치 방향 조정에 의한 추적오차 보정 효과가 그리 크지 않으며, 아울러 조정 이후의 태양추적오차가 조정 이전의 오차보다 작아지기 위해서는 적절한 조정 시간의 선택과 같은 주의가 필요한 것으로 나타났다.

3. 적정 반사거울 설치 방향 조정시간

헬리오스타트 기구오차로부터 기인하는 태양추적오차는, 헬리오스타트 반사거울의 설치 방향 조정을 통하여 보정될 수 있다. 그럼에도 불구하고, 반사거울 설치 방향 조정을 통한 태양추적오차의 보정은, 조정이 이루어지는 시간에 따라 해당 헬리오스타트의 태양추적오차 보정 정도가 크게 달라질 수 있으며, 경우에 따라서는 조정 이후가 조정 이전보다 큰 태양추적오차를 가지고 있을 수도 있다.

따라서 반사거울 설치 방향의 조정이 적절한 시간에 이루어지는 것이 필요하다.

헬리오스타트의 위치에 따른 적정 반사거울 조정 시간을 결정하기 위하여, 본 연구에서는 우선 헬리오스타트 필드를 그림 6에서와 같이 9개의 구역으로 나누고, 이들 각각의 구역에서 발생하는 태양추적오차의 특성을 대표할 수 있는 위치에 있는 헬리오스타트를 선정하여, 선정된 헬리오스타트의 반사거울 설치 방향 조정에 따른 태양추적정밀도 향상 정도를 계산하고 비교하였다.

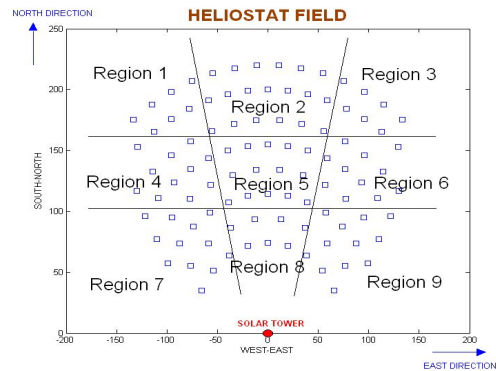


그림 6. 헬리오스타트 필드의 영역 구분

표 5. 헬리오스타트 No. 1의 반사거울 설치 방향 조정 이전 및 조정 이후의 태양추적오차 평가지수

조정 시간 (태양시간)	RMS 태양추적오차 (m)				I	
	3.20	6.21	9.23	12.22		
조정 이전	1.959	1.916	1.963	1.968	1.952	
조정 이후	3.20 10:00	0.268	0.349	0.267	0.340	0.306
	3.20 12:00	0.246	0.374	0.245	0.182	0.262
	3.20 14:00	0.367	0.493	0.366	0.291	0.379
	6.21 10:00	0.436	0.371	0.434	0.536	0.444
	6.21 12:00	0.279	0.354	0.277	0.326	0.309
	6.21 14:00	0.294	0.425	0.294	0.187	0.300
	9.23 10:00	0.269	0.349	0.267	0.341	0.307
	9.23 12:00	0.246	0.374	0.245	0.182	0.262
	9.23 14:00	0.367	0.493	0.366	0.291	0.379
	12.22 10:00	0.252	0.382	0.252	0.169	0.264
	12.22 12:00	0.283	0.416	0.283	0.177	0.290
	12.22 14:00	0.355	0.488	0.354	0.264	0.365

표 5는 영역 1에 설치되어 있는 위치좌표 (-133.196, 175.364, 6)(m)의 헬리오스타트 No. 1이 최대 태양추적오차를 유발하는 기구오차들을 가지고 있는 경우의 태양추적오차 평가지수들이다. 표 5에 따르면, 헬리오스타트 No. 1의 경우, 반사거울 설치 방향 조정이 봄 또는 가을의 태양 남중 시간 즈음 또는 12월 22일 오전 10시 전후를 기준으로 하여 이루어지는 것이 가장 효과적인 것으로 보인다. 아울러 여름철의 반사거울 설치 방향 조정은 겨울철의 조정보다 큰 태양추적오차 평가지수를 가지며, 오전 시간대의 조정이 오후 시간대의 조정보다 태양추적오차를 상쇄시키는 효과가 큰 것으로 나타났다.

이미 언급한 것과 같이, 기구오차에서 기인하는 태양추적오차는 비록 동일한 위치의 헬리오스타트라고 하더라도, 해당 헬리오스타트의 태양추적오차를 유발하는 기구오차들이 어떤 조합으로 이루어져 있는지에 따라 크게 달라진다. 따라서 비록 표 5의 경우와 같은 태양추적오차를 유발하는 기구오차들을 가지고 있는 경우에 대해서는 헬리오스타트 No. 1의 적정 반사거울 설치 방향 조정 시간이 봄 또는 가을의 남중시간 즈음과 겨울의 오전 10시 전후가 되나, 다른 기구오차들의 조합에 대해서는 다른 시간이 적정 시간이 될 수도 있다.

반사거울 설치 방향의 적정 조정 시간 결정은, 헬리오스타트 기구오차들의 다양한 조합에 따른 태양추적오차의 생성 패턴 분석과 그와 같이 생성되는 태양추적오차를 특정 시간에서 보정한 효과를 통계적으로 분석함으로써 얻어 질 수 있을 것이다. 이를 위하여, 우선 헬리오스타트 No. 1에 대하여, 표 1의 기구오차에서 기어 백래시와 구동축 유격 및 무게 편심유발 오차, 그리고 피벗 오프셋의 길이를 표 1에서와 같은 값으로 고정하고, 나머지 10개의 기구오차들이 $+0.05^\circ$ 또는 -0.05° 의 크기를 가지는 $2^{10} = 1024$ 경우에 대하여

2009년 3월 20일, 6월 21일, 9월 23일 그리고 12월 22일 오전 9시부터 오후 15시까지 1시간 간격으로 해당 시간에서의 반사거울 설치 방향을 조정하고, 그와 같이 반사거울 설치 방향이 조정된 헬리오스타트의 태양추적오차 평가지수를 계산하였다.

표 6. 헬리오스타트 No. 1의 태양추적오차 평가지수가 조정 이후에 조정 이전보다 작은 값을 갖는 경우의 수(총 기구오차 조합 경우의 수 1024)

조정 일시	조정 시간						
	9	10	11	12	13	14	15
3.20	992	1008	1024	1000	992	911	908
6.21	992	1004	1008	1008	980	944	844
9.23	992	1008	1024	1000	992	913	908
12.22	1013	1024	1024	1000	976	1008	1011

표 6은 헬리오스타트 No. 1이 가질 수 있는 1024 종류의 기구오차 조합에 대하여, 반사거울 설치 방향 조정 이전과 조정 이후의 태양추적오차 보정 효과를, 조정 이후가 조정 이전보다 태양추적오차 평가지수가 감소한 경우의 수로 표시한 것이다. 즉, 예를 들어서, 표 6의 3월 20일 오전 9시의 992는, 3월 20일 오전 9시에 반사거울 설치 방향 조정이 이루어지면, 조정 이후의 태양추적오차 평가지수가 조정 이전보다 작아지는 경우가 992가지, 그리고 조정 이후가 조정 이전보다 나빠지는 경우가 32가지가 발생된다는 것을 표시하고 있다.

1024 종류의 기구오차들의 조합 각각에 대하여 표 5와 동일한 계산을 수행하고 그 결과들을 표 6의 결과와 함께 종합적으로 분석하여 보면, 헬리오스타트 No. 1의 반사거울 설치 방향 조정은 12월 22일 오전 10시를 기준으로 이루어지는 것이 가장 적절한 것임을 알 수 있다. 아울러 표 6은, 현재 헬리오스타트 No. 1이 어떤 기구오차들을 가지고 있는지 알지 못하는 상황에서, 여름철에 반사거울 설치 방향을 조정하면 설치 방향 조정 이후가 조정 이전보다 큰 태양추적오차를 가

질 수 있을 수 있음을 동시에 나타내고 있다.

헬리오스타트 필드의 다른 영역에 위치하는 헬리오스타트들의 적정 반사거울 설치 조정 시간 결정을 위하여, 헬리오스타트 No. 1에서 수행한 것과 동일한 통계적 분석을 수행하였다. 표 7과 표 8은, 영역 8에 설치되어 있는 위치좌표 (0, 74.4, 6)(m)의 헬리오스타트 No. 96이 최대 태양추적오차를 생성하는 기구오차들을 가지고 있는 경우에 대한 분석 결과이다.

표 7. 헬리오스타트 No. 96의 반사거울 설치 방향 조정 이전 및 조정 이후의 태양추적오차 평가지수

조정 시간 (태양시간)	RMS 태양추적오차 (m)				I	
	3.20	6.21	9.23	12.22		
조정 이전	1.066	1.086	1.066	1.089	1.077	
조정 이후	3.20 10:00	0.216	0.329	0.215	0.185	0.236
	3.20 12:00	0.213	0.337	0.212	0.132	0.224
	3.20 14:00	0.239	0.336	0.237	0.196	0.252
	6.21 10:00	0.259	0.322	0.257	0.262	0.275
	6.21 12:00	0.206	0.316	0.204	0.149	0.219
	6.21 14:00	0.276	0.359	0.275	0.242	0.288
	9.23 10:00	0.216	0.329	0.215	0.185	0.236
	9.23 12:00	0.213	0.337	0.212	0.132	0.221
	9.23 14:00	0.238	0.336	0.237	0.196	0.255
	12.22 10:00	0.231	0.351	0.231	0.144	0.239
	12.22 12:00	0.253	0.369	0.253	0.157	0.258
	12.22 14:00	0.224	0.333	0.222	0.162	0.235

표 8. 헬리오스타트 No. 96의 태양추적오차 평가지수가 조정 이후에 조정 이전보다 작은 값을 갖는 경우의 수(총 기구오차 조합 경우의 수 1024)

조정 일시	조정 시간						
	9	10	11	12	13	14	15
3.20	900	920	982	1016	992	976	976
6.21	840	912	928	928	872	880	888
9.23	901	920	989	1009	992	976	976
12.22	944	1008	1024	1024	1024	1024	1008

표 7과 표 8을 종합적으로 검토하여 보면, 헬리오스타트 필드 중앙 열에 위치하고 있는 헬리오스타트 No. 96의 경우에는, 반사거울 설치 방향 조정이, 비록 태양추적오차 평가 지수에서는, 경우에 따라서는 최적 아닐

수도 있으나, 12월 22일 태양 남중 시간 전후에 이루어지는 것이 가장 적절하며, 헬리오스타트 No. 1과 유사하게 반사거울 설치 방향 조정이 여름철에 이루어질 경우, 조정 이후의 결과가 조정 이전의 결과 보다 나빠질 수 있는 가능성이 높은 것을 알 수 있다.

표 9. 헬리오스타트 No. 58의 반사거울 설치 방향 조정 이전 및 조정 이후의 태양추적오차 평가지수

조정 시간 (태양시간)	RMS 태양추적오차 (m)				I	
	3.20	6.21	9.23	12.22		
조정 이전	0.431	0.485	0.426	0.383	0.431	
조정 이후	3.20 10:00	0.46	0.486	0.421	0.401	0.434
	3.20 12:00	0.328	0.424	0.324	0.262	0.335
	3.20 14:00	0.299	0.413	0.296	0.208	0.304
	6.21 10:00	0.474	0.517	0.468	0.453	0.478
	6.21 12:00	0.327	0.423	0.322	0.264	0.334
	6.21 14:00	0.297	0.412	0.295	0.209	0.303
	9.23 10:00	0.426	0.486	0.421	0.404	0.434
	9.23 12:00	0.328	0.424	0.323	0.262	0.344
	9.23 14:00	0.299	0.413	0.296	0.209	0.306
	12.22 10:00	0.374	0.505	0.374	0.283	0.384
	12.22 12:00	0.319	0.419	0.315	0.239	0.323
	12.22 14:00	0.309	0.422	0.307	0.216	0.314

표 10. 헬리오스타트 No. 58의 태양추적오차 평가지수가 조정 이후에 조정 이전보다 작은 값을 갖는 경우의 수(총 기구오차 조합 경우의 수 1024)

조정 일시	조정 시간						
	9	10	11	12	13	14	15
3.20	888	984	984	1000	1000	992	976
6.21	896	924	960	984	1000	1000	981
9.23	888	984	984	1000	1000	992	977
12.22	952	968	1024	1024	1024	1024	1000

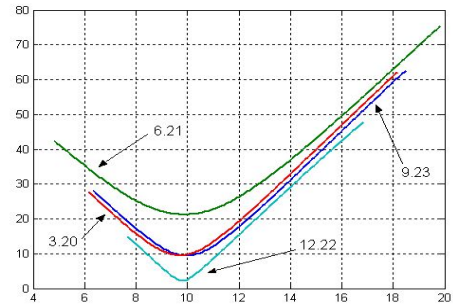
표 9와 표 10은, 다시 영역 6에 위치하는 위치좌표 (121.788, 95.890, 6)(m)의 헬리오스타트 No. 58이 비교적 작은 크기의 태양추적오차를 만드는 기구오차들을 가지고 있는 경우에 대한 분석 결과이다. 표 9와 표 10을 살펴보면, 헬리오스타트 필드 중심축에서 오른쪽에 위치하고 있는 헬리오스타트 No. 58의 경우에는, 반사거울 설치 방향 조정이, 12월 22일 태양시간 오후 14시 전후에 이루어지는

것이 가장 적절함을 알 수 있다.

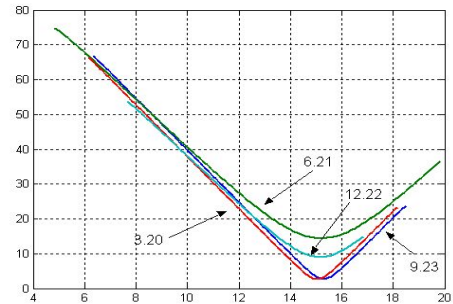
헬리오스타트 설치 위치에 따른 적정 반사거울 조정 시간의 결정을 위하여, 헬리오스타트 No. 1, No. 58 그리고 No. 96에서와 동일한 통계적 분석을 헬리오스타트 필드의 각기 다른 영역에 위치하는 다양한 헬리오스타트를 대상으로 수행하였다. 그 결과를 살펴보면, 헬리오스타트의 위치에 따른 적정 반사거울 설치 방향 조정은, 헬리오스타트가 헬리오스타트 No. 100과 같이 헬리오스타트 필드 중심축의 동쪽에 위치하는 경우에는 12월 22일 태양시간 14시 전후를 기준으로, 중앙 열 가까이 위치한 경우에는 태양시간 12시 전후 그리고 서쪽 즉 태양 탑의 좌측에 위치하고 있는 경우에는 태양시간 오전 10시 전후를 기준으로 반사거울의 설치 방향이 조정되는 것이 가장 좋은 태양추적오차 보정 효과를 나타낸다. 또한 적정 반사거울 설치 방향 조정 시간의 결정을 위한 통계적 분석 결과에 따르면, 적정 반사거울 설치 방향 조정 시간이 해당 헬리오스타트의 태양광 입사각이 최소가 되는 시간과 거의 일치하는 경향을 보였다.

헬리오스타트 위치에 따른 반사거울 설치 방향 적정 조정 시간과, 해당 헬리오스타트의 태양광 입사각 θ_s 가 최소가 되는 시간이 유사하게 일치하는 경향을 다시 한번 확인하기 위하여, 헬리오스타트 No. 1, No. 58 그리고 No. 96의 태양광 입사각 변화를 그림 7에 표시하였다. 그림에서와 같이, 헬리오스타트 반사거울 설치 방향의 적정 조정 시간이 해당 헬리오스타트의 태양광 입사각이 최소가 되는 시간과 유사하게 일치되고 있음을 볼 수 있으며, 따라서 반사거울 설치 방향의 조정이 해당 헬리오스타트의 태양광 입사각이 최소가 되는 시간 부근에서 이루어지는 것이 가장 효과적이라고 결론지을 수 있다. 다만 봄 또는 가을과 겨울과 같은 반사거울 설치 방향 조정 계절의 선택에서, 이미 논의 한 것

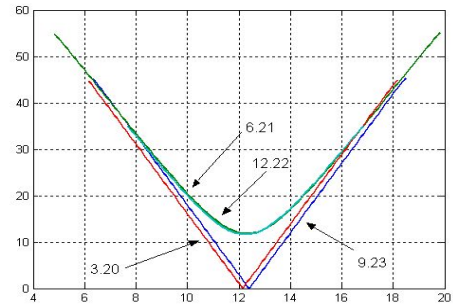
과 같이, 반사거울 설치 방향의 조정은 현재 해당 헬리오스타트가 가지고 있는 기구오차들의 구성을 알고 있지 못한 상태에서 이루어지며, 따라서 조정 이후가 조정 이전보다 작은 태양추적오차 평가지수를 가지고 있도록 하기 위하여 겨울철에 이루어지는 것이 바람직한 것으로 생각된다.



Heliostat No. 1



Heliostat No. 58



Heliostat No. 96

그림 7. 헬리오스타트 No. 1, No. 58, No. 96의 태양광 입사각의 변화

4. 결 론

본 연구는 off-axis 조정법에 따른 헬리오스타트 반사거울 설치 방향 조정을 통하여, 기구오차들에 의하여 생성되는 헬리오스타트의 태양추적오차를 보정하기 위한 것으로서, 반사거울 설치 방향 조정이 태양추적오차 보정에 미치는 효과의 해석과 헬리오스타트 위치에 따른 적정 반사거울 설치 방향 조정시간의 결정을 위한 분석을 수행한 것이다.

본 연구에서는, 우선 반사거울 설치 방향 조정을 통하여 기구오차들에 의한 태양추적오차가 보정 될 수 있음을 제시하였다. 아울러 반사거울 설치 방향 조정에 의한 태양추적오차의 보정은 태양추적오차 평가지수가 0.5(m) 이상의 경우 대단히 큰 효과를 보이나, 그 이하의 경우에는 다만 적정한 조정 시간에 설치 방향이 조정된 헬리오스타트 만이 조정 이후에 조정 이전보다 작은 태양추적오차 평가지수를 가지고 있음을 보여 주었다.

헬리오스타트 위치에 따른 적정 반사거울 설치 방향 조정시간을 결정하기 위하여, 본 연구에서는 헬리오스타트 필드를 9개의 영역으로 구분하고, 각각의 영역으로부터 선택된 헬리오스타트의 태양추적오차 보정 효과를 통계적으로 분석하였다. 분석 결과, 헬리오스타트 반사거울 설치 방향의 조정은 해당 헬리오스타트의 입사각이 최소가 되는 시간에 이루어지는 것이 가장 효과적이며, 여름보다는 겨울에, 그리고 하루 중에서는 태양 탑 동쪽에 위치한 헬리오스타트는 태양시간 오후 2시 전후에, 중앙에 위치한 헬리오스타트는 남중시간 전후에, 그리고 서쪽에 위치한 헬리오스타트는 태양시간 오전 10시 전후에 설치 방향 조정이 이루어지는 것이 가장 효과적임을 알 수 있었다.

본 연구는, 또한 반사거울 설치 방향 조정을 통한 태양추적오차의 보정이 태양추적오차 평가지수를 기준으로 0.3(m) 이하의 태양

추적 정밀도를 제공할 수 없음을 동시에 보여주었으며, 이와 같은 태양추적오차 평가지수는 보정 이후의 태양추적오차가 충분히 작아진 것으로 간주 될 수도 있으나, 헬리오스타트의 태양추적오차는 본 연구에서 고려되지 않은 광학오차 등과 결합될 경우 태양열 발전 시스템의 효율에 영향을 미칠 수 있는 보다 큰 태양추적오차를 만들 수도 있고, 따라서 추적정밀도를 향상시키기 위한 추가적인 연구가 필요함을 제시하기도 하고 있다.

참 고 문 헌

1. Jones, S.A., Edgar, R.M., and Houser, R.M., "Recent Results on the Optical Performance of Solar Two Heliostats", SAND94-2776C, Sandia National Laboratory, 1994
2. Jones, S.A., "Annual Performance Prediction for Off-Axis Aligned Lugo Heliostats at Solar Two", SAND96-0212C, Sandia National Laboratory, 1996
3. PIER:California Energy Commission, "Renewable Energy : Solar two central receiver", October 1999
4. Stone K.W. and Jones S.A., "Analysis of Solar Two Heliostat Tracking Error Sources", SAND99-0239C, 1999
5. Park, Y. C., " Analysis of Sun Tracking Error Caused by the Heliostat Driving Axis Geometrical Error Utilizing the Solar Ray Tracing Technique", Journal of the Korean Solar Energy, Vol. 29, No. 2, 2009, pp. 39-46
6. Park, Y. C., "Analysis of Heliostat Sun Tracking Error due to the Mirror Installation and Drive Mechanism Induced Errors", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 29, No. 3, 2009, pp. 1-10