

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 18, No. 4, 1998

집광식 태양열 집열기의 태양추적장치를 위한 태양위치계산

박영철*, 강용혁**

* 서울산업대학교 제어계측공학과

** 한국에너지기술연구소

Computation of Sun Position for the Sun Tracking Control System of Solar Concentrator

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

* *Seoul National University of Technology*

** *Korea Institute of Energy Research*

ABSTRACT

This work presents a method to compute the sun position(azimuth and elevation), sunrise and sunset times. Accurate computation of sun position is very important to the precise tracking of the sun for the solar concentrator, which enables the maximum collection of solar energy.

Methods to compute the sun position are available in the literature already. However most of them do not have accuracy verification, thus makes hard in selecting the most accurate sun position computation method.

We first select the most accurate sun position computation method among the methods presented in the literature by comparing the computed sun position with Korean Almanac of Korea Astronomy Observatory. Then a procedure to compute the sunrise and sunset times is presented. Computed sun position shows 0.02° , 0.6° and one minute differences in azimuth, elevation and sunrise/sunset times respectively compared with Korean Almanac.

1. 서 론

중고온 태양열 활용시스템에서 사용되는 태양열 집열기는 지속적인 태양추적을 수행한다. 이는 중고온 태양열 활용시스템은, 저밀도 에너지원인 태양열을 고밀도화하기 위하여 집광식 집열기를 사용하며, 집광식 집열기의 효율은 집열기의 태양추적 여부 및 성능에 따라 크게 달라지기 때문이다.

태양위치계산은 프로그램식 또는 혼합식 태양추적장치의 입력신호로 사용되는 태양의 위치를 천문학에서 정의된 지구의 운동 관계식을 사용하여 계산하는 것이다. 그러나 천문학에서 사용되는 태양위치계산식은 대단히 복잡하며^[1], 또한 계산된 태양의 위치는 일반적으로 테이블 형태의 방대한 자료로 제시된다. 따라서 마이크로프로세서를 중앙연산장치로 사용하는 태양추적장치는 이와 같은 방대한 데이터 또는 복잡한 연산식을 사용하여 태양의 위치를 실시간으로 산정 할 수 없으며, 따라서 충분한 정확도를 가지면서, 또한 마이크로프로세서에 의한 실시간 연산이 가능한 태양위치계산법이 필요하다.

마이크로프로세서를 사용하는 태양추적장치를 위한 태양위치계산법은 다양한 형태로 외국문헌에서 제시되어 있다. Spencer^[2], Iqbal^[3], Cooper^[4]는 최대 약 2°의 오차를 갖는 태양위치계산식을 제시하였다. Walraven^[5]에 의하여 제안된 태양위치계산식은 Wilkinson^[6], Muir^[7], Kambezidis 등^[8,9]에 의하여 수정, 보완되었으며, 보완된 Walraven의 태양위치계산식은 0.01°의 정확성을 갖는 것으로 이들 문헌에서 기술되어 있다. 또한 Michalsky^[10]는 Walraven 보다 정확성이 향상된 새로운 태양위치계산식을 발표하였다.

그러나 이상의 문헌에서 제시된 태양위치의 정확도는 태양의 위치를 천구(celestial sphere) 좌표계를 기준으로하는 적경(right ascension) 및 적위(declination)에 대한 정확도이다. 이는 태양

추적장치가 사용하는 방위각(azimuth) 및 고도각(elevation)에 대한 정확도를 나타내는 것이 아니며, 따라서 제시된 태양위치 계산값이 태양추적장치의 추적제어 신호로 사용될 경우의 정확성에 대한 검증이 필요하다.

본 연구는 혼합식 태양추적장치에서 활용하기 위하여, 외국문헌에서 제시된 태양위치계산법들을 조사, 분석하고, 이들 중 가장 정확도가 높은 것을 선정하여, 방위각 및 고도각을 사용하는 태양추적장치의 입력신호로서의 태양위치계산을 위한 프로그램 개발을 목적으로 하였다. 우선 문헌에서 제시된 적경 및 적위 계산을 위한 태양위치계산식 중 가장 정확도가 높은 계산식을 선정하고, 이를 사용하여 방위각 및 고도각으로 표시되는 태양위치를 계산하였으며, 계산된 태양위치를 국립천문대자료와 비교하여, 계산의 정확성을 검증하였다. 또한 일출, 일몰시간은 태양추적개시 및 종료를 위하여 요구된다. 본 연구에서는 일출 및 일몰시간을 태양위치계산 프로그램을 사용하여 계산하였으며, 천문대자료와 비교하여 계산된 일출 및 일몰시간의 정확성을 검증하였다.

우선 2장에서 태양위치계산 과정을 간략히 설명하고, 3장에서 계산된 태양위치와 천문대 발표자료를 비교하여 계산 결과의 정확성을 검증하였다. 4장에서는 일출 및 일몰시간 계산을 위한 알고리즘 및 계산의 정확성을 설명하였다.

2. 태양위치계산

2.1 적경 및 적위

태양추적장치에서 요구되는 방위각 및 고도각은 우선 천구좌표계의 태양위치를 표시하는 적경 및 적위의 계산으로부터 시작된다. 천구상의 황도를 따라 이동하는 태양의 위치를 표시하는 적경은 천구의 춘분점을 통과하는 춘분시권(hour circle of vernal equinox)으로부터 현재 태양의

위치를 지나는 태양시권(hour circle of sun)까지의 각을 천구상의 동쪽방향을 따라 측정된 각이다. 또한 적위는 천구 적도면과 태양과 지구의 중심을 연결하는 선이 이루는 각으로, 태양이 북반구에 위치할 때 양(positive), 남반구에 위치할 때 음(negative)의 값을 가지고, 년 중 약 $\pm 23.5^\circ$ 이내의 값을 갖는다.

천문학에서 사용되는 적경 및 적위의 계산식은, 율리우스적일(Julian date), 천구상 태양평균경도(mean longitude), 평균근점이각(mean anomaly), 황도상 태양경도(ecliptic longitude) 및 황도경사각(obliquity of ecliptic)을 사용하여 정의된다.^[1]

천구좌표계를 기준으로 하여 계산된 태양의 위치는, 다시 태양추적시스템에서 요구되는 방위각 및 고도각으로 환산되며, 이때 영국 Greenwich 평균항성시간(Greenwich mean sidereal time), 집열기가 설치되어 있는 지점의 평균항성시간(local mean sidereal time) 및 시간각(hour angle)과 집열기 설치 지점의 위도(latitude)가 사용된다.

2.2 방위각 및 고도각

태양추적장치의 입력신호로 사용되는 태양위치는 지구 표면 좌표계에서의 태양 고도각 및 방위각을 사용하여 표시된다. 태양 고도각은 태양과 집열기가 설치되어 있는 지점을 연결하는 직선이, 지구표면과 이루는 각이다. 또한 방위각은 태양의 위치를 지표면에 투영시켰을 때 투영된 태양과 좌표의 원점이 이루는 직선이 좌표상의 정북으로부터 시계 방향으로 측정된 각이다.

2.3 산란효과의 보정

태양빛이 지구 대기권을 통과하는 동안 공기 또는 기타 입자와 충돌하여 발생하는 산란효과(refraction effect)는 태양 고도각 산정에 큰 영향을 미친다.^[1,6,7,10] 태양광선은 일출 또는 일몰시간 부근에서 많은 산란효과를 발생시키며, 이는

태양광선이 지구대기권을 통과하는 거리가 일출 또는 일몰시간 부근에서 정오보다 길어지기 때문이다.

따라서 태양 광선의 산란 효과를 무시한 태양 위치계산은 특히 일출 또는 일몰시간 부근에서 태양의 고도각에서 많은 오차를 유발시키게 된다.

산란효과에 의한 태양위치의 보정은 다음에서 제시된 것과 같은 관계식을 사용하여 태양의 고도각을 보정한다.^[10] 우선 태양광선의 산란효과를 고려하지 않은 태양 고도각이 태양의 지름에 해당되는 -0.56° 보다 작아지면 보정값 D 를 0.56° 로 하고, -0.56° 보다 커지면 다음과 같은 관계식을 이용하여 각도(degree)로 표시되는 보정값 D 를 계산한다.

$$D = 3.51561(0.1594 + 0.0196E + 0.0002E^2)/(1 + 0.505E + 0.0845E^2) \quad (1)$$

식 (1)에서 사용된 E 는 산란효과를 고려하지 않은 경우의 태양 고도각을 각도로 표시한 값이고, 이와 같이 얻어진 보정값 D 를, 다시 산란을 고려하지 않은 태양 고도각에 더하여 얻어진 값을 산란을 고려한 최종 태양 고도각으로 한다.

3. 태양위치계산 결과의 정확성

태양위치계산식의 정확성은, 계산된 태양위치를 국립천문대자료(Korean Almanac)^[11]와 비교하여 검증된다.^[10] 이 장에서는 참고문헌에서 제시된 태양위치계산식들 중에서, 가장 정확도가 높은 Walraven^[5] 및 Michalsky^[10] 계산식을 사용하여 태양위치를 계산하고, 계산된 태양위치를 국립천문대자료와 비교하여 정확성을 검증한다.

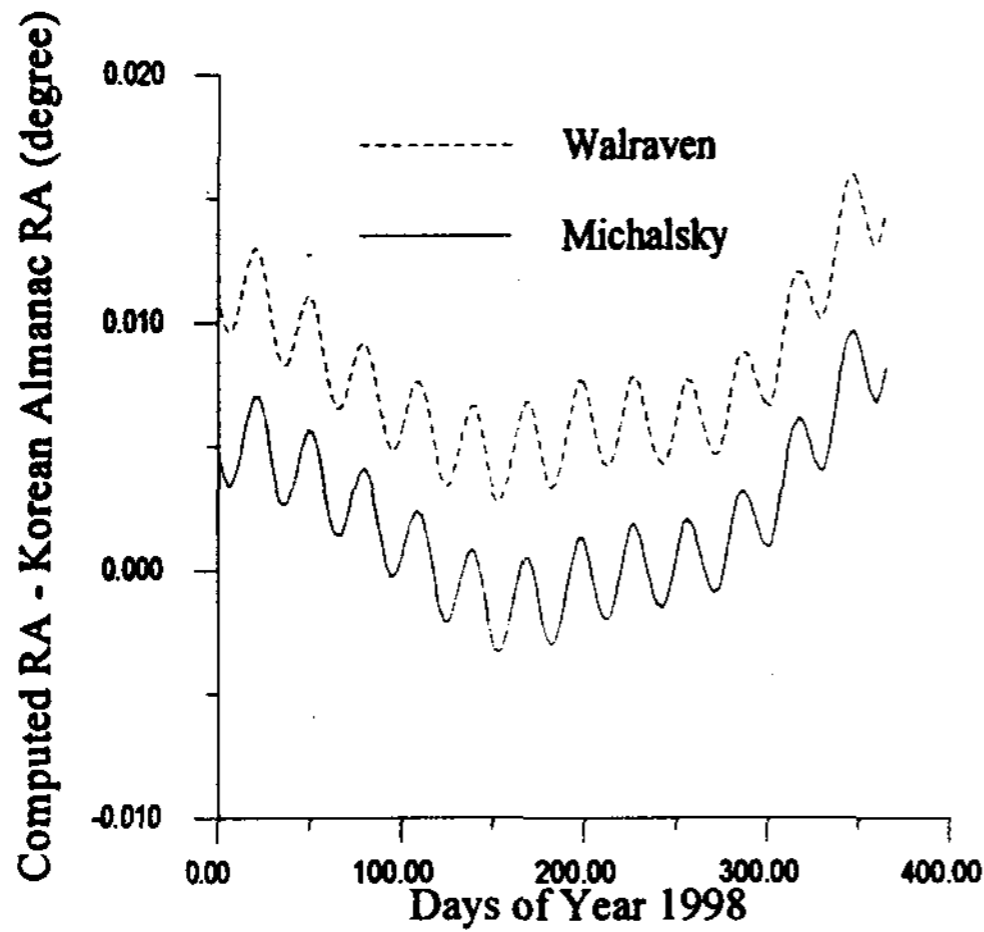


Fig. 1. Accuracy of computed right ascension

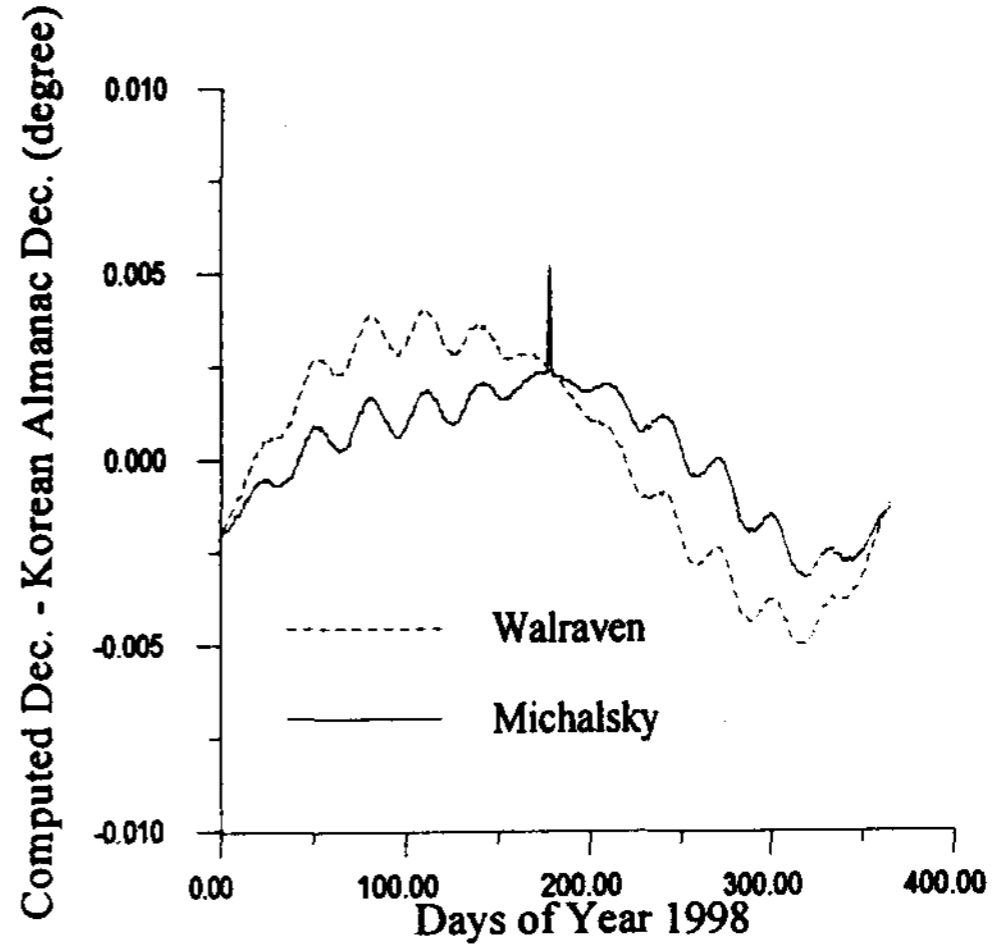


Fig. 2. Accuracy of computed declination

3.1 적경 및 적위 계산의 정확성

Walraven^[5] 및 Michalsky^[10]는 그들의 연구에서 제시된 태양위치계산식을 사용하여 2050년까지 0.01°의 정확도를 갖는 태양위치의 계산이 가능하다고 주장하였다.

Fig. 1 및 Fig. 2는 Walraven 및 Michalsky 계산식을 사용하여 적경 및 적위를 1998년 매일 오전 9시(한국 표준시)에서 계산한 값과 국립천문대자료^[11]를 비교한 것이다. 그림에서와 같이, Walraven 태양위치계산식은 적경의 경우 최대 0.0159°의 오차를 가지며, 이는 Walraven에 의하여 제시된 최대 0.01°의 오차 범위를 벗어나는 값이다. 그러나 Michalsky 계산식은 천문대자료와 비교하여 적경 및 적위 모두에서 0.01°이내의 오차를 갖는 것으로 나타났다.

3.2 방위각 및 고도각 계산의 정확성

Fig. 3은 1998년 년중 매일 12시에 계산된 서울지방(동경 126.9833°, 북위 37.5667°)에서의 방위각을 천문대 자료와 비교한 것이다. 또한 Fig. 4는 계산된 고도각을 비교한 것이다. 계산된 방위각은 천문대자료와 비교하여 일중 태양의 고도가 높은 정오 부근에서 큰 오차를 보였으며, 고도각

은 태양의 고도가 낮은 일출 및 일몰시간 부근에서 비교적 큰 오차를 나타내었고, 따라서 방위각의 경우 12시에서의 비교 자료만을, 고도각의 경우 일몰시간 부근인 18시에서의 비교 자료를 제시하였다.

Fig. 3 및 Fig. 4에서와 같이 Walraven 및 Michalsky 태양위치계산식을 사용하여 계산된 방위각 및 고도각은 천문대 자료와 비교하여 많은 차이를 보였으며, Walraven 계산식은 방위각 계산에서 최대 0.0173°, 고도각 계산에서 최대 0.5723°의 오차를 보였고, Michalsky 계산식은 방위각에서 최대 0.0155°, 고도각에서 최대 0.5700°의 오차를 나타내었다.

Fig. 3 및 Fig. 4에서 제시된 계산값의 정확성을 다시 검증하기 위하여 산란효과 보정을 무시한 Michalsky 계산식을 사용하여 방위각 및 고도각을 계산하고 이들을 다시 천문대자료와 비교하였다.

Fig. 5 및 Fig. 6은 산란효과 보정이 이루어지지 않은 계산된 방위각 및 고도각을 천문대자료와 비교한 것이며, 그림에서와 같이 산란효과를 무시하였을 경우, 방위각은 최대 0.0155°, 고도각은 최대 0.0113°의 오차를 나타내었다.

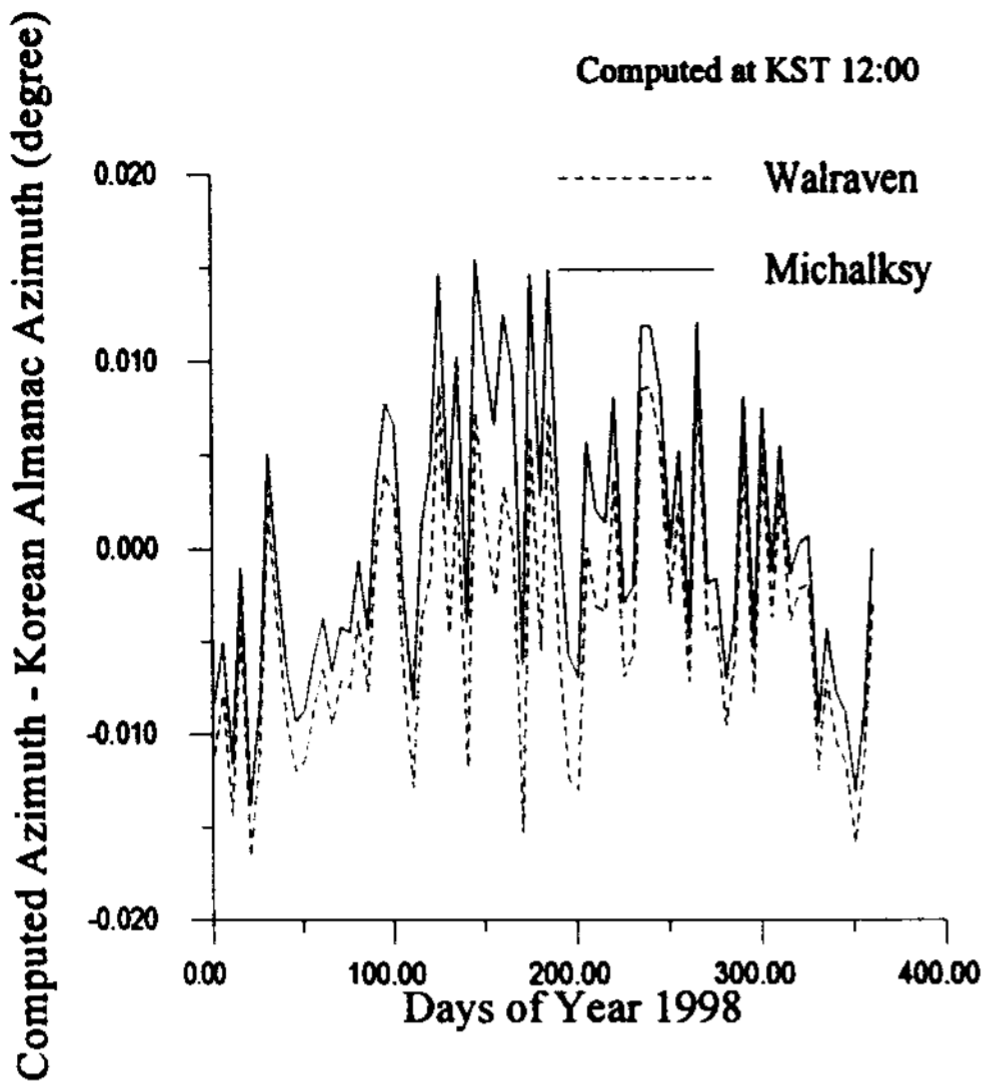


Fig. 3. Accuracy of computed azimuth

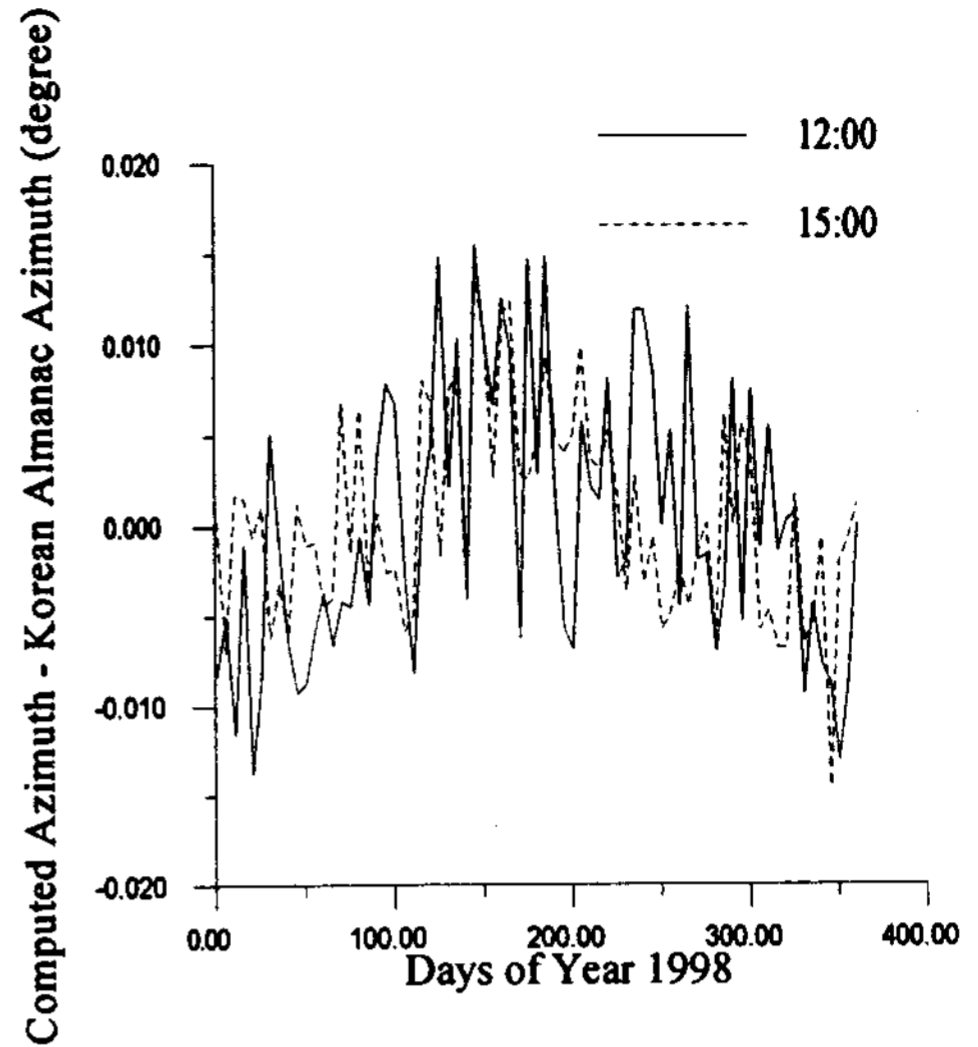


Fig. 5. Accuracy of computed azimuth (computed without refraction correction and using Michalsky algorithm)

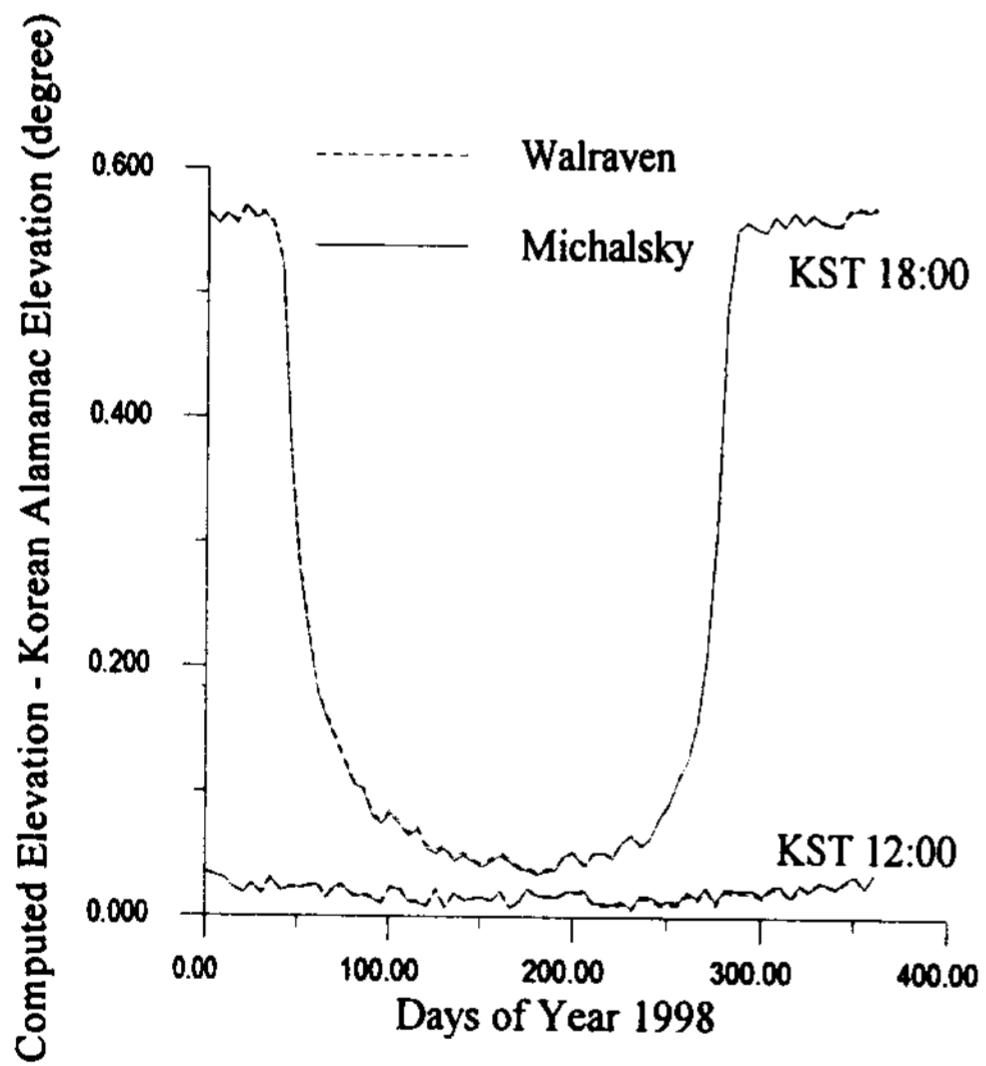


Fig. 4. Accuracy of computed elevation

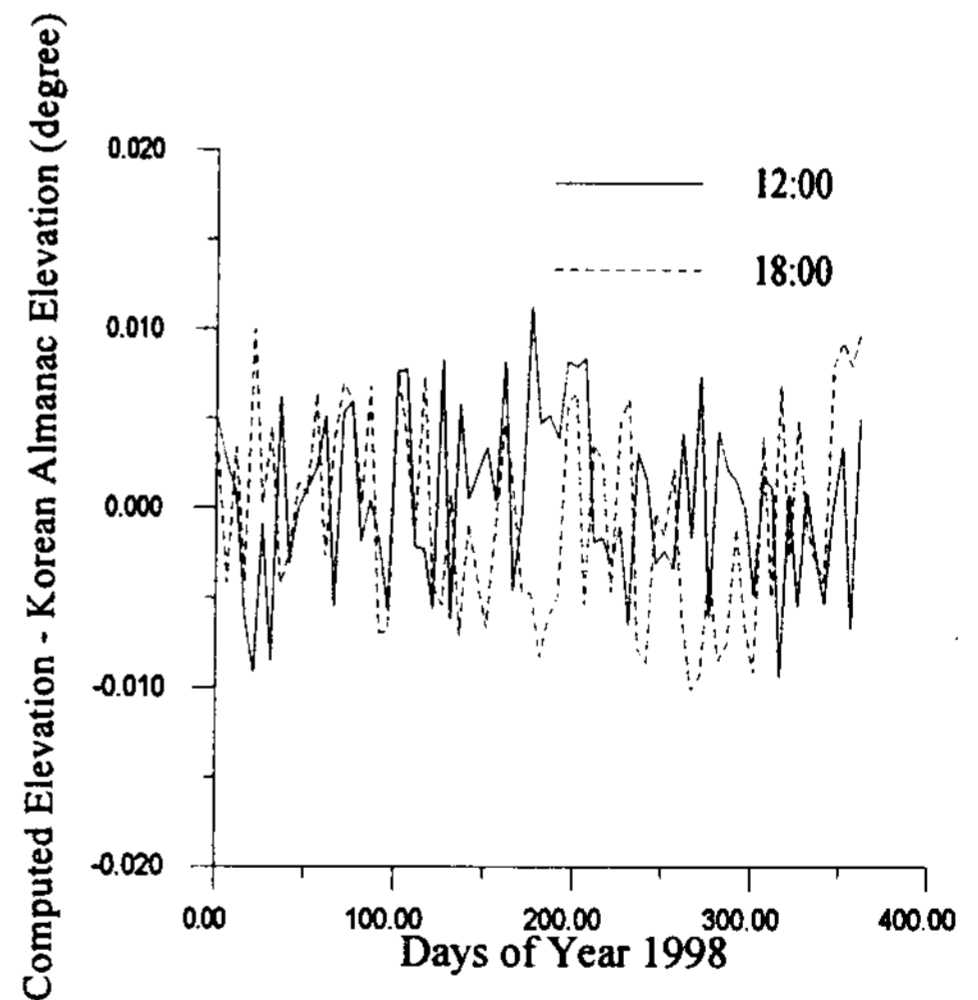


Fig. 6. Accuracy of computed elevation (computed without refraction correction and using Michalsky algorithm)

태양추적장치에서 사용되는 태양의 위치는 태양열 집열기가 설치되어 있는 지점에서 관측된 태양의 방위각 및 고도각이다. 이는 바꾸어 말해서 태양추적장치에서 요구되는 태양의 위치는 태양광선의 산란효과가 보정된 태양의 위치이며, 따라서 Fig. 5 및 Fig. 6에서 제시된 산란효과를 보정하지 않은 방위각 및 고도각이 비록 천문대

발표자료와 비교하여 작은 오차를 가지고는 있기는 하나, 실제 태양추적장치에서 사용되는 방위각 및 고도각은 Fig. 3 및 Fig. 4에서 제시된 것을 사용한다.

4. 일출, 일몰시간의 계산 및 정확성

태양의 일출 및 일몰시간은 온도, 고도 및 지구의 겉보기 적경, 겉보기 적위, 겉보기 항성시간 등과 같은 여러 가지 복잡한 인자들에 의하여 결정된다.^[1] 그러나 마이크로프로세서를 중앙연산장치로 하는 태양추적장치는 그와 같은 복잡한 인자를 고려하여 일출 및 일몰시간을 계산할 수 없는 것이 일반적이다.

일출 및 일몰시간은 일반적으로 태양의 상단 끝점이 지표면에 도달하는 시간으로 정의된다.^[11] 따라서 태양의 중심이 지표면보다 태양의 반지름에 해당되는 각도만큼 낮은 지점에 도달하는 시간을 일출시간으로 설정하고, 태양의 중심이 지표면으로부터 태양의 반지름에 해당되는 각도만큼 내려간 시간을 일몰시간으로 설정한다.

천문학에서 사용되는 태양의 반지름은 0.2667° 이다.^[1] 또한 일출, 일몰시간 부근에서의 태양광선의 산란효과는 0.5667° 에 해당되는 것으로 알려지고 있다.^[1] 따라서 일출 및 일몰시간은 산란효과를 보정하지 않은 태양의 중심이 지표면을 기준으로 하여 -0.8333° 에 위치하는 오전 및 오후 시간으로 정의된다.

Fig. 7 및 Fig. 8은 산란효과를 보정하지 않은 고도각이 -0.8333° 에 도달되는 시간을 iteration에 의하여 찾아내어, 이를 일출 및 일몰시간으로 설정하고, 설정된 시간을 천문대 발표자료와 비교한 것이다. 또한 Fig. 7 및 Fig. 8은 산란효과가 보정된 일출 및 일몰시간(태양중심의 고도가 -0.2667° 가 되는 시간)을 천문대자료와 비교한 것도 함께 포함하고 있다. 그림에서와 같이 계산된 일출 및 일몰시간은 분(minute)까지만으로 제시된 천문대 발표자료와 비교하여 최대 1분의 오차를 가지며, 산란효과가 보정된 태양고도각을 사용하여 계산된 일출 및 일몰시간은 최대 3분의 오차를 가진다.

5. 결 론

정확한 태양위치의 계산은 집광식 집열기의 정확한 태양 추적을 통한 효율향상을 위하여 요구되는 대단히 중요한 것이다. 본 연구는 혼합식 태양추적장치의 입력신호로 사용되는 태양의 방위각 및 고도각 계산을 위한 프로그램 개발에 관한 것이다. 우선 외국문헌에서 제시된 다양한 태

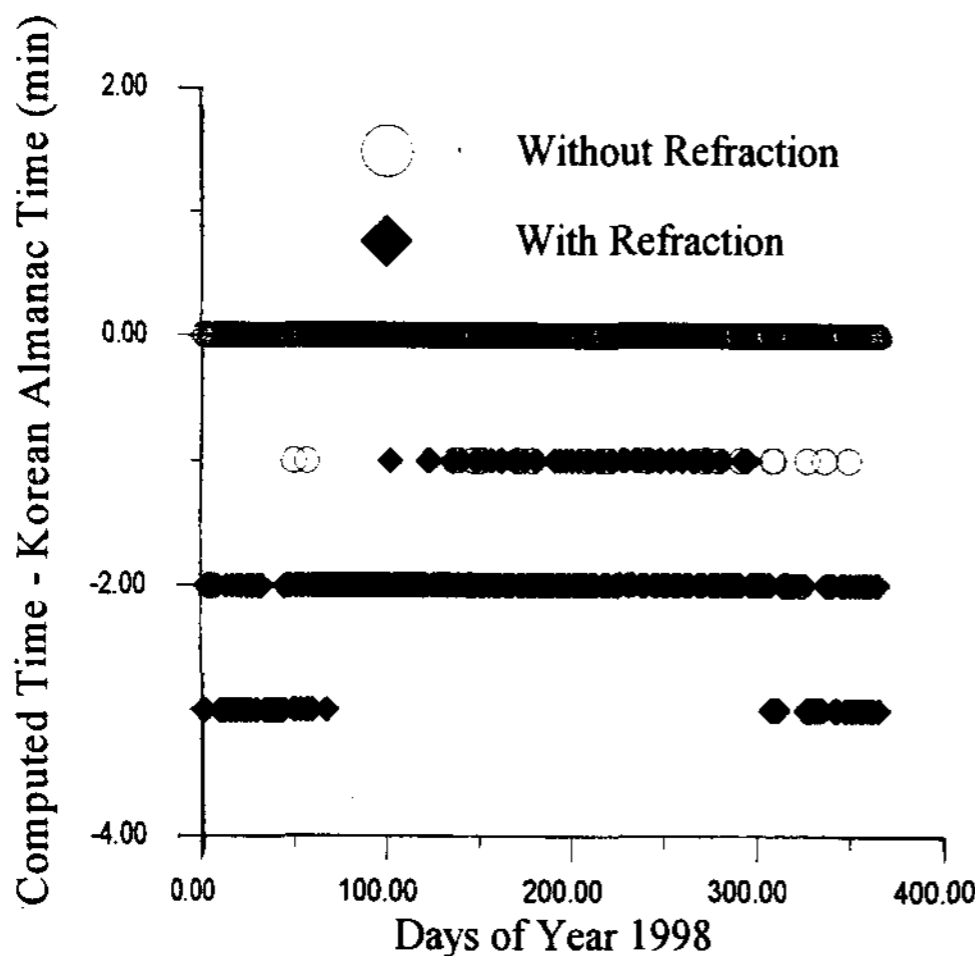


Fig. 7. Accuracy of computed sunrise time

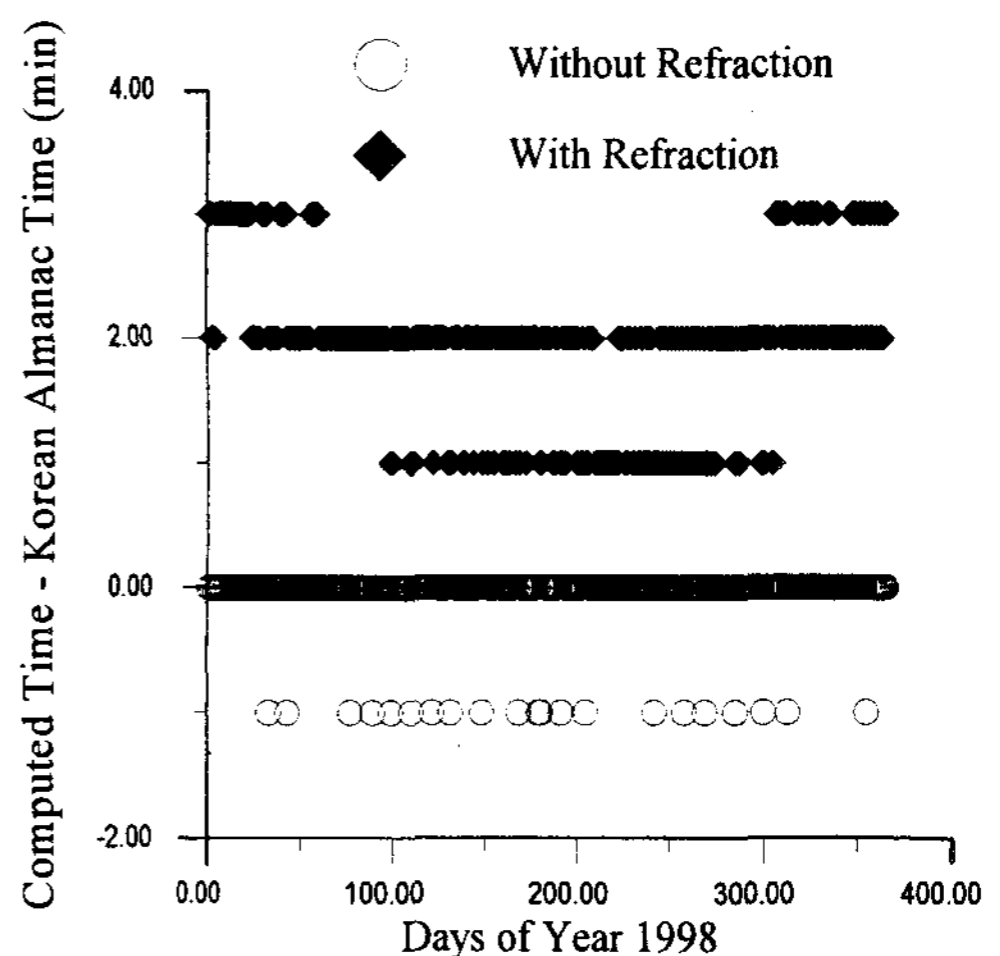


Fig. 8. Accuracy of computed sunset time

양위치계산식을 조사, 분석하여 가장 높은 정확도를 가지는 Walraven 및 Michalsky 계산식을 선정하였다. 선정된 태양위치계산식을 이용하여 태양의 적경, 적위, 방위각 및 고도각을 계산하고, 이를 국립천문대자료와 비교하여 계산의 정확성을 검증하였다.

본 연구에서 사용한 태양위치계산식은 천문대 발표 자료와 비교하여, 방위각에서 최대 0.02°, 고도각에서 최대 0.6°이내의 오차를 갖는다.

비록 산란효과를 보정하지 않은 태양위치 계산 값이 천문대 자료와 대단히 일치하기는 하나, 태양추적장치를 위한 방위각 및 고도각은 산란효과가 보정된 것을 사용하는 것이 타당할 것으로 사려된다. 또한 본 연구에서 계산된 태양의 일출 및 일몰시간은 국립천문대 자료와 비교하여 최대 1분 이내의 오차를 가지며, 이는 태양추적장치의 추적개시 및 종료를 표시하는 시간으로서 충분한 정확도를 갖는 것으로 사려된다.

calculation of the solar position, Solar Energy, Vol. 27, pp.67~68

7. L.R. Muir, 1983, Comments on the effect of atmospheric refraction in the solar azimuth, Solar Energy, Vol. 30, p. 295
8. H.D. Kambezidis and N.S. Papanikolaou, 1990, Solar position and atmospheric refraction, Solar Energy, Vol. 44, No. 3, pp.143~144
9. H.D. Kambezidis and A.E. Tsangrassoulis, 1993, Solar position and right ascension, Solar Energy, Vol. 50, No. 5, pp.415~416
10. J.J. Michalsky, 1988, The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050), Solar Energy, Vol. 40, No. 3, pp.227~235
11. 천문대, 1997, 1998, 역서, 남산당

참 고 문 헌

1. J. Meeus, 1991, Astronomical Algorithms, Willmann-Bell Inc. 1991
2. J.W. Spencer, 1971, Fourier series representation of the position of the sun, Search 2, 172
3. M. Iqbal, 1983, An Introduction to Solar Radiation, Academic Press
4. P.I. Cooper, 1969, The absorption of solar radiation in solar stills, Solar Energy 12, pp.333~346
5. R. Walraven, 1978, Calculating the position of the sun, Solar Energy, Vol. 20, pp.393~397
6. B.J. Wilkinson, 1981, An improved FORTRAN program for the rapid

별첨 태양위치계산식⁽¹⁰⁾

- (1) 율리시스적일 Jd
 $\delta y = year - 1949$
 $leap = \text{integer portion of } (\delta y / 4)$
 $day = \text{day of the year (예: Feb.1} = 32)$
 $hour = UT \text{ in hours}$
 $Jd = 2432916.5 - 365 \delta y + leap + day + hour / 24$
- (2) 2000. 1. 1을 기준으로 한 경과 시간 n
 $n = Jd - 2451545.0$
- (3) 평균경도(mean longitude) L
 $L = 280.460 + 0.9856474n \quad (0^\circ \leq L \leq 360^\circ)$
- (4) 평균 근점이각(mean anomaly)
 $g = 357.528 + 0.9856003n \quad (0^\circ \leq g \leq 360^\circ)$
- (5) 황도 경도(ecliptic longitude) l
 $l = L + 1.915 \sin(g) + 0.02 \sin(2g)$
 $(0^\circ \leq l \leq 360^\circ)$

- (6) 황도 경사각(obliquity of ecliptic) ep
 $ep = 23.439 - 0.0000004n$ (degree)
- (7) 적경(right ascension) ra
 $\tan(ra) = \cos(ep) \sin(l) / \cos(l)$
 $(0^\circ \leq ra \leq 360^\circ)$
- (8) 적위 (declination) dec
 $\sin(dec) = \sin(ep) \sin(l)$
 $(-90^\circ \leq dec \leq 90^\circ)$
- (9) Greenwich 평균항성시(mean sidereal time)
 $gmst$
 $gmst = 6.697375 + 0.0657098242n + hour$
 $(0 \leq gmst < 24)$ (hour)
- (10) 집열기 설치 지점 평균항성시간(local mean sidereal time) $lmst$
 $lmst = gmst - longitude/15$ ($0 \leq lmst < 24$)
 (예: 서울지방의 위도 : -126.98333)
- (11) 시간각(hour angle) ha
 $ha = lmst - ra$ ($-12 < ha < 12$) (hour)
- (12) 태양 고도각(elevation) el
 $\sin(el) = \sin(dec) \sin(lat) + \cos(dec) \cos(lat) \cos(ha)$ (lat : latitude)
- (13) 태양 방위각(azimuth) az
 $\sin(az) = -\cos(dec) \sin(ha) / \cos(el)$
 if $\sin(el) \geq \sin(dec) / \sin(lat)$
 then $az = 180^\circ - az$
 if $\sin(el) \leq \sin(dec) / \sin(lat)$ and $ha > 0$
 then $az = 360^\circ + az$