

# 태양추적장치를 위한 태양위치계산에서의 제언

박영철<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 전기정보공학과

## Comments on the Computation of Sun Position for Sun Tracking System

Park Young Chil<sup>†</sup>

Department of Electrical & Information Engineering, Seoul National University of Science & Technology.

<sup>†</sup>Corresponding author: [ycpark@seoultech.ac.kr](mailto:ycpark@seoultech.ac.kr)

### Abstract

As the usage of sun tracking system in solar energy utilization facility increases, requirement of more accurate computation of sun position has also been increased. Accordingly, various algorithms to compute the sun position have been proposed in the literature and some of them insist that their algorithms guarantee less than 0.01 degree computational error. However, mostly, the true meaning of accuracy argued in their publication is not clearly explained. In addition to that, they do not clearly state under what condition the accuracy they proposed can be guaranteed. Such ambiguity may induce misunderstanding on the accuracy of the computed sun position and ultimately may make misguided notion on the actual sun tracking system's sun tracking accuracy. This work presents some comments related to the implementation of sun position computational algorithm for the sun tracking system. We first introduce the algorithms proposed in the literature. And then, from sun tracking system user's point of view, we explain the true meaning of accuracy of computed sun position. We also discuss how to select the proper algorithm for the actual implementation. We finally discuss how the input factors used in computation of sun position, like time, position etc, affect the computed sun position accuracy.

**Keywords:** 태양추적시스템(Sun tracking system), 태양위치계산(Computation of sun position), 태양위치계산의 정확성(Accuracy of computed sun position)

### 1. 서론

태양추적장치를 갖춘 태양광발전시스템 또는 집광식 태양열집열시스템의 활용이 증대되면서 태양위치 계산의 정확성에 대한 요구도 동시에 증가되어왔다. 이는, 태양위치 계산의 정확도가 태양열집열시스템과 같은 태양열활용시스템의 집열효율에 직접적으로 영향을 미치는 것이며, 따라서 보다 정확하고 동시에 계산의 신속성이 보장되는 태양위치계산 알고리즘에 대한 필요성이 태양열활용시스템의 사용 증가와 더불어 지속적으로 증대되어 왔기 때문이다.

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.36, No.6, pp.47-59, December 2016  
<https://doi.org/10.7836/kjes.2016.36.6.047>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 12 October 2016

Revised: 21 November 2016

Accepted: 23 November 2016

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

태양열활용시스템에서 사용 가능한 태양위치계산 알고리즘들은 참고문헌에 다양한 형태로 존재한다<sup>1-8)</sup>. 그런데 이들 알고리즘들은 지구의 자전과 공전에 따른 지구의 위치 변화와 이들 과정에서 발생하는 지구의 단주기적 미세불규칙 운동을 해석적 표현한 천문학의 관계식들<sup>9)</sup>을 태양열활용시스템에서 적용 가능한 형태로 단순화 또는 근사화함으로써 얻어진 것들이며, 따라서 이들 태양위치계산 알고리즘의 정확성은 각각의 알고리즘들이 사용하는 단순화 또는 근사화 정도에 따라 달라진다.

현재 참고문헌에 발표되어 있는 태양열활용시스템에 적용 가능한 태양위치계산 알고리즘들은, 방위각과 고도각으로 표시되는 태양위치에서, 0.2°~0.0003°의 오차 범위 내의 계산 정확도를 갖는 알고리즘들이다. 그런데 이들 계산 정확도는 엄밀한 의미에서, 실제 태양위치를 기준으로 평가한 절대적 의미의 정확도가 아니다. 동시에 이들 알고리즘 대부분이, 제시한 계산오차에 대한 정확한 의미를 명확하게 설명하지 않고 있음으로 인하여, 태양열활용시스템의 현장 사용자가 참고문헌에 제시된 계산오차를 마치 태양위치에 대한 절대오차인 것처럼 인식하게 하는 오류를 만들 가능성을 내포하고 있는 것들이다. 즉, 참고문헌에 제시된 태양위치 계산오차에 대한 정확한 이해가 뒷받침되지 못한 사용자의 경우, 문헌에 제시된 태양위치계산의 정확도를 절대정확도로 받아들이고, 따라서 설계 또는 운영되는 태양추적시스템의 추적정밀도에 대한 잘못된 인식을 바탕으로 시스템의 효율을 추정하거나 또는 잘못된 시스템 운영을 수행 할 수도 있다는 것이다.

본 연구는 이에 참고문헌에서 제시된 태양위치계산 알고리즘의 계산정확도를 태양열활용시스템의 현장 운영자 측면에서 설명함으로써, 태양위치계산의 정확도에 대한 이해를 높이고, 이를 통하여 보다 정확한 태양열활용시스템의 설계 및 운영이 이루어 질 수 있도록 하게 하기 위한 목적으로 수행된 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 우선 참고문헌에 제시된 태양위치계산 알고리즘 계산 정확도의 정확한 의미를 해석한다. 이를 근거로 본 연구는 태양열활용시스템의 설계 또는 운영자가 바른 태양위치계산 알고리즘을 선택하고 사용하도록 하기 위한 제언들을 제시하며, 마지막으로 태양위치계산에서의 입력변수로 사용되는 시간, 위치, 온도, 대기압 및 해발고도와 같은 인자들이 태양위치계산의 정확도에 미치는 영향을 분석함으로써 계산된 태양위치가 태양열활용시스템에서 보다 정확하게 사용되기 위한 제언들을 제시한다.

## 2. 태양위치계산 알고리즘의 정확도 이해 및 선택에 관한 제언

태양열활용시스템에서 사용 가능한 태양위치계산 알고리즘은 Walrean<sup>1)</sup>으로부터 Michalsky<sup>2)</sup>, Reda and Andrea<sup>4)</sup> 그리고 Grena 알고리즘<sup>6)</sup>에 이르기까지 다양한 형태의 것들이 있다.

**Table 1** Time validity and maximum computational uncertainty in azimuth and elevation for typical algorithms published in the literature

Algorithm	Publication Year	Time Validity	Maximum Uncertainty
Walrean	1978		0.01°
Michalsky	1988	1950 ~ 2050	0.0139°
Blanco-Muriel et. al.	2001	1995 ~ 2050	0.0111°
Reda and Andrea(SPA)	2008	-2000 ~ 6000	0.0003°

**Table 1** Time validity and maximum computational uncertainty in azimuth and elevation for typical algorithms published in the literature (Continued)

	Algorithm	Publication year	Time validity	Maximum uncertainty
	Blanc and Wald	2012	1980 ~ 2030	0.0015°
	Algorithm 1			0.19°
	Algorithm 2			0.038°
Grena	Algorithm 3	2012	2010 ~ 2110	0.0125°
	Algorithm 4			0.0094°
	Algorithm 5			0.0027°

Table 1은 이들 알고리즘들이 보장하는 태양위치계산에서의 최대오차와 알고리즘의 적용 가능기간을 정리한 것으로, 대부분의 알고리즘이 최대 0.01° 전후 또는 그것보다 작은 태양위치계산 오차를 가지고 있다.

그런데 Table 1의 오차를 이해하는 과정에서 한가지 인식의 오류가 발생할 소지가 있다. 바꾸어 말해서, Table 1의 각각의 알고리즘이 제시한 최대오차가 무엇을 기준으로 평가된 것인지에 대한 명확한 설명이 부족함으로 인해, 일부 태양열활용시스템의 현장사용자가 이들 제시된 오차를 실제 태양위치를 기준으로 하는 절대오차로 받아들일 가능성이 있을 수 있다는 것이다. 그러나 다음에서 설명하는 것과 같이, Table 1의 최대오차는 비록 그 차이가 미세한 것이기는 하나, 실제 태양위치에 대한 해당 알고리즘의 계산오차가 아니다. 특히 태양광의 지구 대기권 통과에 따른 굴절효과까지를 고려한다면, Table 1에서 제시된 태양위치 계산오차는 더욱 더 실제 태양위치에 대한 해당 알고리즘의 오차가 아니다.

## 2.1 태양위치계산 알고리즘의 계산오차

참고문헌에 제시된 태양위치계산 알고리즘들의 계산오차는 그 오차를 평가하는 기준 설정 방법에 따라 크게 두가지 형태로 구분된다. 그 중 첫 번째가 해당 알고리즘에 의하여 계산된 태양위치의 정확성을 역사(Almanac)를 기준으로 평가한 경우이다. Walrean<sup>1)</sup>이 미국 천문력 및 항해력(American Ephemeris and Nautical Almanac)에 수록된 태양위치를 기준으로 계산된 태양위치의 오차를 평가한 것이 그 예이다. 그런데 여기서 문제가 되는 것은, 해당 알고리즘의 평가 기준으로 삼은 역사의 태양위치가 실제 태양위치를 나타내는 것이 아니라는 것이다. 바꾸어 말해서, 역사의 태양위치가 또 다른 태양위치계산 알고리즘을 사용하여 계산된 것이며, 따라서 해당 태양위치계산 알고리즘은 비록 그 크기가 무시할 정도로 작더라도, 역사의 태양위치계산을 위해 사용된 알고리즘이 갖는 계산오차와 해당 알고리즘이 역사의 태양위치를 기준으로 평가한 오차의 합으로 표시되는 계산오차를 갖는다는 것이다.

태양위치계산 알고리즘의 오차 산정 방법의 두 번째는, 태양열활용시스템의 사용자 측면에서, 실제 태양위치를 충분히 근사하고 있다고 간주되는 특정 태양위치계산 알고리즘을 기준으로 해당 알고리즘의 오차를 계산하는 방법이다. Grena 알고리즘<sup>6)</sup>이 대표적인 예로서, Grena 알고리즘은 Reda and Andrea 알고리즘<sup>4)</sup>에서 계산된 태양위치를 기준으로 오차를 평가하고 있다.

역서에 수록된 태양위치는 관측된 실제 태양위치를 기반으로 하여 유도된 수식들과 지구의 자전 및 공전에서 발생하는 다양한 미세 비주기적 단진동 현상을 급수적으로 표현한 수식들을 사용하여 계산된 것들이다. VSOP로 알려진 Bretagon and Francou 알고리즘<sup>9)</sup>과 같은 것이 역서의 태양위치계산에서 사용되며, Bretagon and Francou 알고리즘은 BC 2000년부터 AD 6000년까지 실제 태양의 위치를 최대 0.0000028° 오차 내에서 추정할 수 있는 알고리즘이라고 알려져 있다. 결국 엄밀한 의미에서, 역서를 기준으로 평가된 태양위치계산 알고리즘의 계산오차는 실제 태양위치를 기준으로 하는 절대오차가 아니다. 그럼에도 불구하고 역서의 태양위치가 실제 태양위치에 대해 무시할 수 있는 지극히 작은 오차를 가지며, 따라서 태양열활용시스템의 사용자가 역서를 기준으로 평가한 해당 알고리즘의 오차를 실제 태양위치에 대한 절대오차로 간주하여 사용하고 있을 따름인 것이다.

특정 태양위치계산 알고리즘을 기준으로 해당 알고리즘의 계산오차를 산정하는 알고리즘들은, VSOP87 수식<sup>9)</sup>을 단 순화한 Meeus 수식<sup>10)</sup>을 사용하여 구성되었으며, 동시에 Bretagon and Francou 알고리즘<sup>9)</sup>을 기준으로 최대 0.0003°의 계산오차를 갖는 Reda and Andrea 알고리즘<sup>4)</sup>을 평가기준으로 일반적으로 사용한다. 따라서 엄밀한 의미에서 Reda and Andrea 알고리즘은 근본적으로 최대 0.0003° + 0.0000028°의 계산 불확실성을 가지고 있으며, 결국 Reda and Andrea 알고리즘을 오차산정의 기준으로 사용한 알고리즘의 계산오차는 또 다시 실제 태양위치에 대한 절대오차가 될 수 없다. 그럼에도 불구하고, 첫 번째 경우와 동일하게 태양열활용시스템의 실제적 사용자 측면에서 보면, 0.0003028°의 계산 불확실성은 무시할 수 있을 정도로 작은 것이며, 따라서 Reda and Andrea 알고리즘을 기준으로 평가한 계산오차를 실제 태양위치에 대한 절대오차로 현장 사용자가 다만 받아들이고 또 사용하고 있을 따름이다.

## 2.2 지구 대기의 굴절을 포함한 태양위치계산의 오차

태양위치계산 알고리즘은 굴절(refraction)을 고려하지 않은 상태에서 관측자중심좌표계(topocentric coordinate system)에서의 태양위치를 우선 계산하고, 그 후에 태양광이 지구 대기권을 통과하는 동안 발생하는 굴절에 의한 위치 왜곡을 추가함으로써 지표면의 관측자가 인식하는 태양위치를 계산하는 방법을 사용하고 있다.

만약 굴절효과가 없다면 태양위치계산 알고리즘의 계산오차는 2.1에서 설명한 것으로 정의될 수 있다. 그러나 태양광은 실제적으로 대기권을 통과하여 지표에 도달한다. 이는 특정 태양위치계산 알고리즘의 계산오차는 앞절에서 설명한 계산오차에 더하여 굴절에 따른 태양의 겉보기 위치계산을 위해 사용되는 수식에 따라 다시 달라진다는 것이다.

태양광의 지구 대기 통과에 따른 굴절의 정도는 압력과 온도로 표시되는 대기의 상태에 따라 다르다. 또한 태양광의 굴절은 태양의 방위각에는 거의 영향을 미치지 않는 반면 고도각에는 큰 영향을 미치며, 특히 태양의 고도가 낮은 영역에서는 무시할 수 없을 정도의 큰 영향을 미친다<sup>11-15)</sup>.

현재 참고문헌에서 제시된 대부분의 태양위치계산 알고리즘들은 비록 그 형태는 다르나, 기본적으로 Meeus<sup>10)</sup>에서 제

1 천문학에서는 지표에서 관측된 태양을 포함하는 행성의 위치, 즉 겉보기 위치로부터 실제적 위치로 보정하기 위하여 빛의 대기 굴절 현상을 이해하고 활용한다. 그러나 태양열활용시스템의 사용자에게는 지표면에서 관측된 겉보기 태양위치가 실제적으로 필요한 것이며 따라서 굴절에 의한 변형된 태양위치, 즉 겉보기 태양위치의 계산이 중요하다.

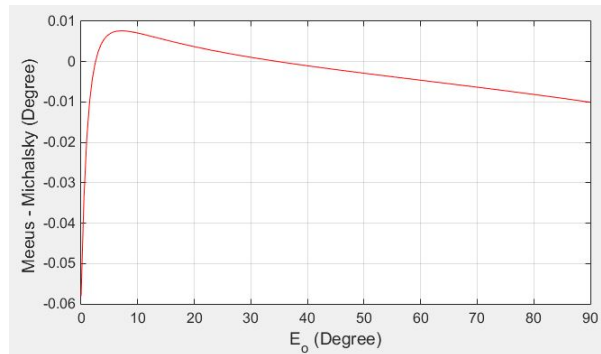
공한 굴절량  $\nabla E$ (degree)를 계산하는 식(1)과 같은 수식을 사용한다.

$$\nabla E = \frac{P}{1010} \frac{283}{273 + T} \frac{1.02}{60 \times \tan\left(E_o + \frac{10.3}{E_o + 5.11}\right)} \quad (1)$$

식(1)의  $P$ 는 밀리바(mb)로 표시된 기압을,  $T$ 는 대기온도(°C)를 그리고  $E_o$ 는 각도(degree)로 표시된 굴절을 고려하지 않고 계산된 태양의 고도각을 각각 나타낸다.

또한 Michalsky 알고리즘<sup>2)</sup>은 해발 고도 0 m에서 15.2°C, 1013.2 mb의 미국표준대기(U.S. Standard Atmosphere)에서 발생하는 태양광의 굴절량으로부터 산정된 식(2)와 같은 수식을 사용한다.

$$\nabla E = 3.5156 \frac{0.1594 + 0.0196E_o + 0.0002E_o^2}{1 + 0.505E_o + 0.0845E_o^2} \quad (2)$$

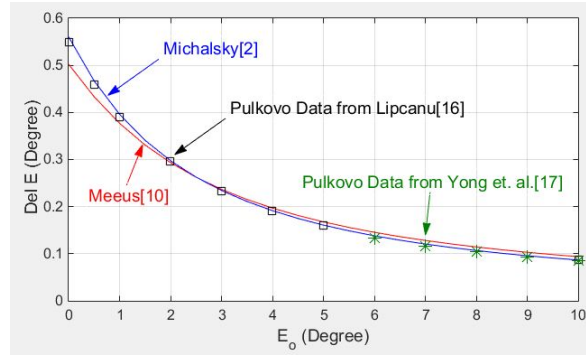


**Fig. 1** Difference in magnitude between the value computed by equation in Meeus algorithm and the value computed by equation in Michalsky algorithm

Fig. 1은 굴절이 고려되지 않은 태양의 고도각  $E_o$ 가  $0^\circ$ 에서부터  $90^\circ$ 까지 변화하는 동안  $0^\circ$ , 1013.2 mb의 대기 상태에서 식(1)과 식(2)를 사용하여 계산된 값의 차이를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 식(1)과 식(2)에 의한 계산값의 차이는 Table 1에서 제시된 최대오차와 비교하여 무시할 수 없는 크기를 갖는다. 이는, 특정한 태양위치계산 알고리즘의 정확성을 평가하기 위하여 다른 기준 알고리즘을 사용하는 경우, 만약 두 알고리즘 모두가 동일한 수식을 사용하여 굴절량을 계산한다면, 그와 같은 경우의 계산오차는 결국 굴절이 고려되지 않은 경우에 계산된 태양 고도각의 오차가 전체 계산오차가 되는 경우에 해당되고, 따라서 태양열활용시스템의 현장 사용자 측면의 실제 오차가 될 수 없는 상황에 도달하게 된

<sup>2)</sup> Table 1의 태양위치계산 알고리즘들은 모두 계산 정확성 평가를 위한 기준 알고리즘과 해당 알고리즘이 동일한 굴절량 계산식을 사용한다.

다. 반면 만약 평가와 기준으로 사용되는 알고리즘이 각각 다른 계산식을 사용한다면, 그와 같은 경우, Fig. 1에서와 같이, 계산오차가 Table 1의 최대오차를 크게 상회하는 것이 될 수 있으며, 따라서 참고문헌의 태양위치계산 알고리즘들이 제시하는 계산오차가 정확하지 않게 되는 상황이 될 수도 있다.



**Fig. 2** Magnitude of refraction computed by equations in Meeus algorithm, Michalsky algorithm and in Pulkovo table at low sun elevation angle

Fig. 2는 또한 식(1)과 식(2)를 사용하여 계산된 굴절량의 상대적 정확성을 비교하기 위한 것으로, 천문학에서의 사용을 목적으로 실제 측정된 값으로부터 해발고도 0 m, 0°, 1013.2 mb의 대기상태로 환산된 굴절량이 수록되어 있는 Pulkovo 대기 굴절표(Pulkovo atmospheric refraction table)의 값을 동시에 표시하고 있다<sup>3</sup>. 그림에서와 같이 태양의 고도가 아주 낮은 영역에서는 식(1)을 사용하여 계산된 굴절량이 실제 측정된 것보다 작으며, 그 차이는 태양 고도각이 커짐에 따라 점차 작아진다. 거기에 비하여 식(2)에 의하여 계산된 굴절량은 측정된 값과 비교적 정확하게 일치하는 경향을 보인다. 따라서 Fig. 2의 경우만을 고려하면, 식(2)가 식(1)의 경우보다 태양의 고도가 낮은 영역에서 굴절량을 보다 정확하게 계산하고 있는 것으로 볼 수 있다. 그러나 식(2)는 온도 및 압력 변화에 따른 굴절량의 변화를 포함할 수 없는 구조이다. 이에 본 연구는, 우선 해발고도 0 m, 0°, 1013.2 mb 상태에서 지구 대기 통과에 따른 태양광의 굴절량  $R$ 을 식(2)와 유사한 식(3)을 사용하여 계산하고, 온도 및 압력의 변화에 따른 굴절량의 변화량을 다시 식(4)에서와 같이 보정하는 방법으로 보다 정확한 굴절량이 계산될 수 있도록 하는 방안을 제안한다. 식(3)의  $E_o$ 는 태양위치계산 알고리즘의 첫단계에서 계산된, 굴절을 고려하지 않은 상태에서 관측자중심좌표계에서의 태양위치를 나타내며, 동시에 식(3)의 계수 3.7114=1013.2/273은 0°C, 1013.2 mb의 대기상태에서 얻어진 것이다.

$$R = 3.7114 \frac{0.1594 + 0.0196 E_o + 0.0002 E_o^2}{1 + 0.505 E_o + 0.0845 E_o^2} \quad (3)$$

<sup>3</sup> Fig. 2에서 표시된 Pulkovo Table의 값은 참고문헌<sup>16)</sup>과 참고문헌<sup>17)</sup>으로부터 인용한 것으로 참고문헌<sup>16)</sup>의 값은 북위 30°에서의 굴절량이다.

$$\nabla E = \frac{P}{1013.25} \frac{273}{273 + T} R \quad (4)$$

### 2.3 일출 및 일몰시간 계산에 관한 제언

태양열활용시스템의 운전 개시 및 종료시점의 기준으로 사용되는 일출 및 일몰시간은, 참고문헌<sup>12)</sup>에서 제시된 것과 같이, 지구 대기에 의한 굴절이 고려되지 않은 상태에서 계산된 태양의 고도각이  $-0.8333^\circ$ 가 되는 지점으로 하는 것이 가장 합리적이다. 이는 지구에서 관측된 태양의 크기를 표시하는 태양(solar disk)의 반지름이  $0.2667^\circ$  점과 일출 또는 일몰 시각에서 표준상태의 대기를 통과하는 태양광의 굴절량이  $0.5667^\circ$ <sup>12)</sup>임을 근거로 한 것이다. 일부 자료에서와 같이 굴절이 포함된 이후의 태양 고도각이  $-0.2667^\circ$ 가 되는 시점을 일출 또는 일몰시각으로 설정하는 방안은, 굴절량 계산의 불확실성을 고려한다면 보다 큰 계산 오차를 유발할 수 있는 여지가 있어 사용하지 않는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

### 2.4 태양위치계산 알고리즘의 선택

태양열활용시스템을 위한 태양위치계산 알고리즘의 선택은 해당 시스템이 요구하는 계산의 정확도와 해당 시스템을 운전하는 제어시스템의 역량에 따라 달라질 수 있다.

일반적으로 태양추적을 수행하는 태양광발전시스템에서 요구되는 태양추적정밀도는 그리 높지 않다<sup>8)</sup>. 그러나 집광식 태양열집열시스템과 같은 태양열활용시스템에서는 비교적 높은 계산 정밀도가 요구된다. 물론 태양추적시스템의 추적장치가 갖는 기계적 특성을 고려한다면  $0.01^\circ$  전후의 계산 정확성을 갖는 알고리즘이면 충분할 수도 있다, 그럼에도 불구하고, 보다 높은 계산 정확성을 갖는 알고리즘의 사용이 결코 해가 되는 경우일 수는 없으며, 그와 같은 관점에서, 본 연구는 집광식 태양열집열시스템의 경우 Reda and Andrea 알고리즘의 사용이 바람직하다는 의견을 제시한다. 다만 태양추적시스템을 운영하는 제어기의 연산속도 또는 메모리와 같은 제어기 역량에 문제가 될 소지가 있는 경우 Grena 알고리즘 중의 하나를 선택하는 것도 바람직할 것이다. 그러나 현재 시중에 유통되는 범용모션제어기 또는 개인용컴퓨터가 Reda and Andrea 알고리즘 또는 Grena 알고리즘이 발표되던 시기와 비교하여 비교할 수 없을 정도의 빠른 연산속도 및 대용량 프로그램 메모리를 가지고 있다. 따라서 비록 Reda and Andrea 알고리즘이 많은 계산량과 큰 프로그램 메모리를 요구하는 것이 사실이기도 하나, 지금의 시점에서 태양열활용시스템을 운영하는 현장에서 사용되기에 어려움이 있을 것으로 본 연구는 생각하지 않는다.

Table 2는 태양위치계산 알고리즘의 계산 속도를 비교할 목적으로 Reda and Andrea 알고리즘의 계산시간을 기준으로 다른 알고리즘의 계산시간을 평가한 것이다. 표에서와 같이 Reda and Andrea 알고리즘은 다른 알고리즘과 비교하여 10배 이상의 많은 계산량을 요구하고 있다. 그러나 Reda and Andrea 알고리즘의 실제적 계산시간이 본 연구에서 사용된 개인용 컴퓨터에서 다만  $0.02 \text{ msec}$  정도의 충분히 짧은 시간인 점을 고려한다면, 연산속도의 제약으로 인한 알고리즘의 선택문제는 더 이상 없는 것으로 받아들일 수도 있을 것이다.

**Table 2** Relative computational cost compared with Reda and Andrea algorithm(SPA)

	Algorithm	Relative Computational Cost (Average)
	Michalsky	0.098
	Reda and Andrea (SPA)	1
Grena	Algorithm 1	0.057
	Algorithm 2	0.069
	Algorithm 3	0.075
	Algorithm 4	0.080
	Algorithm 5	0.086

### 3. 태양위치계산 알고리즘의 입력인자 오류에 대한 계산오차의 분석

태양위치계산의 모든 알고리즘은 시간과 위치를 기본 입력으로 하고, 추가적으로 일부 알고리즘에서 온도, 대기압 및 해발고도를 입력인자로 사용한다. 여기서는 Reda and Andrea 알고리즘과 식(3) 및 식(4)를 사용하여, 서울(경북공 기준 경도 126.974852°, 위도 37.579617°)에서, 2016년부터 2050년까지의 기간 동안 입력인자 오류에 따른 태양위치계산 알고리즘의 계산오차를 분석한다.

#### 3.1 입력시간 오류

Table 3은 태양위치계산을 위한 시간이 각각 1, 5, 10, 30, 60초의 오류를 가질 경우, 이들 입력시간 오류로 인한 계산된 태양위치가 갖는 최대오차를 나타낸 것이다.

현장에서 사용되는 태양열활용시스템의 대부분은 제어시스템의 일부로 사용되는 개인용컴퓨터 또는 독립형 제어장치에 설정되어 있는 시간을 태양위치계산을 위한 시간으로 사용한다. 그런데 이들 제어장치에 설정된 시간이, 사용기간이 경과함에 따라 수초 또는 수십초의 오차를 갖게 되는 경우가 빈번하게 발생하며, 그와 같은 경우 발생하는 입력시간 오류에 의한 알고리즘의 계산오차는, Table 3에서와 같이, Table 1의 해당 알고리즘이 보장하는 최대오차를 수십 또는 수백 배를 상회하는 것이 된다.

**Table 3** Maximum computation error in degree when the input time has error of 1, 5, 10, 30 and 60 seconds for 2016 ~ 2050

	Input Time Error (second)				
	1	5	10	30	60
Azimuth	0.01559	0.07795	0.15591	0.46774	0.93547
Elevation	0.00330	0.01649	0.03299	0.09896	0.19791

Table 3의 2016년부터 2050년까지 계산된 입력시간 오류에 따른 계산 최대오차는, 방위각의 경우 2026년 6월 21일 정오 부근에서 발생하였으며, 고도각에서는 입력시간오차의 크기에 따라 각각 2016년, 2022년, 2027년 그리고 2043년 5월 20일 전후의 일출 또는 일몰시간 부근에서 발생하였다.



### 3.2 입력위치 오류

**Table 4** Maximum computation error in degree when the input location has error of 0.001°, 0.01°, 0.05° and 0.1° for 2016 ~ 2050

	Input Location (Longitude and Latitude) Error (degree)			
	0.001	0.01	0.05	0.1
Azimuth	0.00475	0.04753	0.23731	0.47382
Elevation	0.00128	0.01275	0.06377	0.12751

Table 4는 태양위치를 계산하는 지점의 위치가 경도(longitude)와 위도(latitude)에서 동시에 0.001°(직선거리 0.14 km에 해당), 0.01°(직선거리 1.41 km에 해당), 0.05°, 그리고 0.1°(직선거리 14.06 km에 해당)의 오차를 갖는 경우에 대하여, 2016년부터 2050년까지 계산된 태양위치가 갖는 최대오차를 나타낸 것이다.

입력위치 오류에 따른 계산된 태양위치의 오차 역시, 입력시간 오류의 경우와 동일하게, Table 1에서 제시된 해당 알고리즘의 최대오차보다 대단히 큰 값을 가진다.

입력위치 오류에 따른 계산된 태양위치오차의 최대값은 방위각에서, 입력시간 오류의 경우와 유사하게, 2025년 6월 21일 정오부근에서 발행하였으며, 고도각에서도 유사한 시점의 일출 또는 일몰시각 부근에서 발생되었다.

### 3.3 해발고도, 대기압 및 온도의 입력오류

**Table 5** Maximum computation error in degree when the input air pressure has error of 50, 100, 150 and 200 mb for 2016 ~ 2050

	Input Air Pressure Error (mb)			
	50	100	150	200
Elevation	0.03241	0.06481	0.09722	0.12963

**Table 6** Maximum computation error in degree when the input temperature has error of -10, -5, 5 and 10°C for 2016 ~ 2050

	Input Temperature Error(°C)			
	-10	-5	5	10
Elevation	0.02497	0.01225	0.01181	0.02321

태양위치계산 알고리즘을 굴절이 고려되지 않은 상태의 위치계산과 굴절에 의한 계산된 위치의 보정이라는 두 단계로 나눌 경우, 첫 번째 과정에서 사용된 해발고도는 계산된 태양위치에 거의 영향을 미치지 않는다. Table 1의 태양위치계산 알고리즘에서 해발고도를 직접 사용하는 알고리즘은 Reda and Andrea 알고리즘이 유일한 것도 그와 같은 이유에서 기인된 것으로 보이며, 따라서 해발고도의 변화에 따른 대기압의 변화가 태양위치계산의 두 번째 과정에서 고려된다면, 태양열활용시스템 운영자는 해발고도 입력오류로 인한 계산된 태양위치계산 오차는 없는 것으로 단정하여도 무방할 것이다.

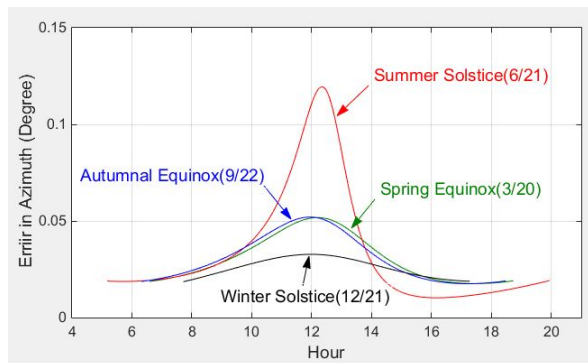
대기압 및 온도는 태양위치계산 알고리즘에서 굴절량을 계산하기 위한 곳에서만 사용되며, 따라서 입력 대기압 및 온

도에서의 오류는 태양 고도각에서의 계산오차만을 유발한다. Table 5와 Table 6은 각각 대기압과 온도 입력오류로 인한 2050년까지 계산된 태양위치의 최대오차를 나타낸 것이다. Table 5와 Table 6을 살펴보면, 대기압 또는 온도 입력오차에 따른 계산된 고도각에서의 오차는 그 크기가 무시할 수 없을 정도로 크다. 다만 이들 최대오차가 2020년 1월 7일 부근의 일출 또는 일몰 시간대 부근에서 발생하였으며, 따라서 집광식 태양열활용시스템에서의 사용이라는 관점에서 그리 중요하지 않은 오차로 간주 될 수도 있을 것이다.

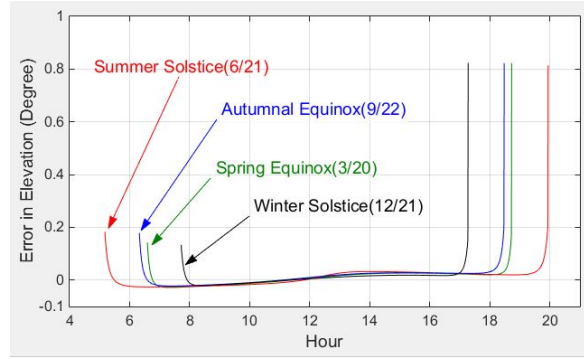
### 3.4 입력인자 오류로 인한 태양위치계산 오차들의 수용에 대한 제언

굴절이 고려되지 않은 태양위치계산 알고리즘의 첫 단계에서 계산된 태양위치오차는 집열시스템을 포함하는 태양열활용시스템의 현장 운용자에게 실제적 문제가 될 정도로 크지는 않다. 동시에 대기압 및 온도의 입력오류로부터 기인하거나 또는 운영자가 선택한 굴절량 계산식이 갖는 오차로부터 기인되는 고도각에서의 계산오차 역시 태양의 고도가 충분히 높아지면 더 이상 문제가 되지 않을 정도로 작아진다.

그러나 입력시간 및 입력위치의 오류는, 물론 그 오류의 크기에 따라 달라지기는 하나, Table 3과 Table 4에서와 같이 무시할 수 없을 정도의 계산오차를 유발한다. 결국 태양열활용시스템의 현장 운영자는 태양위치계산에서 사용되는 시간과 태양열활용시스템이 설치되어 있는 위치의 정확성이 대단히 중요하다는 인식을 가져야 하며, 특히 계산 시간의 정확성을 유지하는 것이 정확한 태양위치계산을 위한 필수 조건임을 인지하고 시스템을 운영하여야 한다. 현재 미국, 스페인 등지에서 상용화 운전을 수행하는 PTC (parabolic trough concentrator) 태양열발전시스템은, PTC가 수 km에 이르는 방대한 영역에 걸쳐 설치되어 있으며, 따라서 입력위치 오류로부터 기인하는 계산된 태양위치 오차를 최소화하기 위하여 PTC 태양추적제어시스템은 PTC 개별적으로 독립된 위치좌표를 사용하고 있는 것으로 알려지고 있다.



**Fig. 3** Computational error in azimuth when input time has 5 second error, input longitude and input latitude both have 0.01° error.



**Fig. 4** Computational error in elevation when input time has 5 second error, input longitude and input latitude both have  $0.01^\circ$  error.

Fig. 3과 Fig. 4는 복합적인 입력인자들의 오류에 따른 계산된 태양위치의 오차를 보여주기 위하여, 2016년 서울에서, 춘분(3월 평균온도  $5.7^\circ$ , 평균기압 1019.6 mb), 하지(6월 평균온도  $22.2^\circ$ , 평균기압 1007.6 mb), 추분(9월 평균온도  $21.2^\circ$ , 평균기압 1013.7 mb), 그리고 동지(12월 평균온도  $0.4^\circ$ , 평균기압 1024.9 mb)에, 연중 서울 평균온도  $12.53^\circ$  및 평균기압 1016.4 mb을 사용하고, 시간과 위치오차가 없는 경우에 계산된 태양위치를 기준으로 하여, 계산시간에서 5초, 경도 및 위도에서 각각  $0.01^\circ$  그리고 대기압과 온도에서 년 평균값이 아닌 해당 월의 평균값을 사용하여 계산된 태양위치가 갖는 계산오차를 방위각에서의 오차와 고도각에서의 오차로 나누어서 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 입력인자들의 오차에 의한 태양위치 계산오차는 방위각의 경우 정오 부근에서 최대값을 가지며, 고도각에서는 일몰 부근에서 최대오차를 갖는다. 태양열활용시스템의 운전시간을 만약 태양의 고도가 충분히 높은 시간대로 한정한다면<sup>4</sup>, 입력인자 오류에 따른 고도각에서의 계산오차는 무시할 수 있을 것이다. 그러나 입력인자 오류에 따른 방위각에서의 계산오차는 태양의 고도가 가장 높은 시간 부근에서 최대값을 가지며 동시에 발생한 오차의 크기 역시 무시할 수 없을 정도이다. Fig. 3과 Fig. 4를 통하여 다시 한번 태양위치계산을 위한 정확한 위치정보의 사용과 계산시간의 정확성을 유지하는 것이 대단히 중요하다는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 참고문헌에 발표되어 있는 태양열활용시스템에서 적용 가능한 태양위치계산 알고리즘들을 소개한 것이다. 동시에 이들 알고리즘들이 제시하는 계산오차의 의미를 명확히 함으로써, 현장 사용자가 태양열활용시스템을 보다 정확하게 설계 또는 운영할 수 있도록 하게 하기 위한 것들에 관해 제언한 것이다.

본 연구는, 우선 참고문헌의 태양위치계산 알고리즘들의 계산오차는, 태양광의 지구 대기에 의한 굴절이 고려되지 않은 상태에서, 또 다른 태양위치계산 알고리즘을 기준으로 하여 상대적으로 평가한 것이며, 따라서 실제 태양위치에 대한

<sup>4</sup> 집광식 태양열집열시스템의 경우, 태양의 고도가  $5^\circ$  또는 부근 보다 낮을 경우 실제 집열기에 도달되는 일사량의 크기도 작을 뿐만 아니라 집열기의 집광효율 역시 대단히 낮아짐으로 인하여 시스템을 동작시키기에 적합하지 않는 것이 일반적이다.

절대오차가 아니라는 것을 이해하는 것이 중요하다고 제안한다. 다만 이들 기준으로 사용된 알고리즘의 계산오차가 태양열활용시스템의 현장 사용자 측면에서 보면, 실제 태양위치에 대해 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서 참고문헌에 제시된 알고리즘의 계산오차가 그와 같은 관점에서 실제 태양의 위치를 기준으로 평가한 절대오차로 간주될 수 있고, 또 그리 사용되고 있을 따름이라고 인식하는 것이 필요하다고 제안하는 것이다.

두 번째로, 본 연구는 태양위치계산 알고리즘에 의하여 계산된 태양위치는, 실제 태양열활용시스템에서 사용되는 태양의 겉보기 위치와 비교하여 상대적으로 큰 차이가 있을 수도 있으며, 특히 태양의 고도가 낮은 영역에서 큰 차이가 있다는 사실을 인지하는 것이 필요하다고 제안한다. 만약 태양열활용시스템을 태양의 고도가 충분히 높은 영역에서만 사용하는 경우 굴절에 따른 태양위치계산 오차는 무시할 수 있을 것이다. 그럼에도 불구하고, 정확한 현상의 이해와 이에 기반한 시스템의 운전이 보다 정확한 태양열활용시스템의 개발 및 운영을 위해 필요할 것으로 사료되어 이상과 같이 제안하는 것이다.

본 연구는 또한 태양위치계산 알고리즘의 입력으로 사용되는 시간, 위치, 대기압, 온도 그리고 해발고도의 입력오류에 따른 계산오차를 분석하였다. 태양위치계산에서 사용되는 시간 및 위치는 비교적 작은 입력오류에도 불구하고 무시할 수 없을 정도의 큰 계산오차를 만든다. 이에 본 연구는, 태양열활용시스템의 운영자는 태양위치계산에서 사용되는 시간의 정확성을 유지하는 것이 대단히 중요하며 동시에 정확한 위치 사용의 중요성을 인식하는 것이 필요함을 제안한다.

## 후기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다(2016-1222).

## REFERENCES

1. Walraven, R., Calculating the Position of the Sun, *Solar Energy*, Vol. 20, No. 5, pp. 393-397, 1978.
2. Michalsky, J. J., The Astronomical Almanac's Algorithm for Approximate Solar Position (1950-2050), *Solar Energy*, Vol. 40, No. 3, pp. 227-235, 1988.
3. Blanco-Muriel, M., Alarcon-Padilla, D. C., Lopea-Moratalla, T., and Lara-Coria, M., Computing the Solar Vector, *Solar Energy*, Vol. 70, No. 5, pp. 431-441, 2001.
4. Reda, I. and Andreas, A., Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications, NREL/TP-560-34302, 2008.
5. Blanc, Ph. and Wald, L., The SG2 Algorithm for a Fast and Accurate Computation of the Position of the Sun for Multi-Decadal Time Period, *Solar Energy*, Vol. 86, No. 10, pp. 3072-3083, 2012.
6. Grena, R., Five New Algorithms for the Computation of Sun Position from 2010 to 2110, *Solar Energy*, Vol. 86, No. 5, pp. 1323-1337, 2012.
7. Armstrong, P. and Izygon, M., An Innovative Software for Analysis of Sun Position Algorithms, *Energy Procedia*, Vol. 49, pp. 2444-2453, 2014.
8. Seong, J. C., Sun Position Calculator(SPC) for Landsat Imagery with Geodetic, *Computers & Geosciences* Vol. 85, Part A, pp. 68-74, 2015.

9. Bretagnon, P. and Francou, G., Planetary Theories in Rectangular and Spherical Variables. VSOP 87 Solutions, Astronomy and Astrophysics Vol. 202, No. 1-2, pp. 309-315, 1988.
10. Meeus, J. Astronomical Algorithms, Second Ed. Willmann-Bell Inc., Richmond, VA, USA, 1998.
11. Muir, L. R., Comments on 'The Effect of Atmospheric Refraction in the Solar Azimuth', Solar Energy, Vol. 30, No. 3, p. 295, 1983.
12. Ilyas, M., Solar Position Programs: Refraction, Sidereal Time and Sunset/Sunrise, Solar Energy, Vol. 31, No. 4, pp. 437-438, 1983.
13. Wilkinson, B. J., Re: 'Solar Position Programs: Refraction, Sidereal Time and Sunset/Sunrise', Solar Energy, Vol. 33, No. 3-4, p. 383, 1984.
14. Pascoe, D. J. B., Comments on 'Solar Position Programs: Refraction Sidereal and Sunset/Sunrise', Solar Energy, Vol. 34, No. 2, pp. 205-206, 1984.
15. Spencer, J. W., Comments on 'Solar Position Programs: Refraction Sidereal and Sunset/Sunrise', Solar Energy, Vol. 35, No. 4, pp. 385, 1984.
16. Lipcanu, M., A Direct Method for the Calculation of Astronomical Refraction, Proc. of the Romanian Academy, Series 4, Vol. 6, No. 2, 2005.
17. Yu, Y., Qi, Z. X., Mao, Y. D., Tang, Z. H., and Zhao, M., The Method of Differential Measurement of Astronomical Refraction and Results of Trial Observations, Chinese Astronomy and Astrophysics, Vol. 33 Issue 3, pp. 322-332, 2009.
18. Rustemli, S., Dincer, F., Unal, E., Karaaslan, M., and Sabah, C., The Analysis on Sun Tracking and Cooling Systems for Photovoltaic Panels, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 22, pp. 598-603, 2013.