

특수일사계를 이용한 맑은 날 일사량의 온도 보정

Temperature Correction of Solar Radiation on Clear Sky Using by Modified Pyranometer

조일성* · 정명재*,** · 이규태*,** · 지준범***† · 김부요**

Zo Il-Sung*, Jeong Myeong-Jae*,**, Lee Kyu-Tae*,**, Jee Joon-Bum***†
and Kim Bu-Yo**

(Received 22 October 2014; accepted 11 February 2015)

Abstract : Pyranometer have many uncertainty factors (sensitivity function, thermal offset, other spectral effect, geometric, environment, and equipment etc.) than pyrhemometer. The solution for most of the uncertainty factors have been researched, but the problem for thermal offset is being continued research so far. Under the clear sky, due to the thermal offset of pyranometer, the diffuse and global radiation have been negative value for the nighttime and lower value for the daytime, respectively. In order to understand the uncertainty of the thermal offset effect, solar radiation are observed and analyzed using Ji and Tsay method and data from modified pyranometer.

As a result of performing temperature correction using the modified pyranometer, the slope (dome factor; k) and intercept (r_0) from a linear regression method are 0.064 and $3.457 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{k}^{-1}$, respectively. And the solar radiation is decreased significantly due to the effect of thermal offset during nighttime. The solar radiation from modified pyranometer increased approximately 8% higher than its observed by general pyranometer during daytime. By the way, these results did not generalize because its result is for only single case in clear sky. Accordingly, it is required for accurate results obtained by the various cases (clear, cloudy and rainy) with longterm observations.

Key Words : 천천일사계(Pyranometer), 특수일사계(Modified pyranometer), 온도보정(Thermal offset), 태양복사(Solar radiation), 돔계수(Dome factor)

***† 지준범(교신저자) : 한국외국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단
E-mail : rokmcjbb717@gmail.com, Tel : 070-4617-3764
*조일성 : 강릉원주대학교 복사-위성연구소
*,**정명재 : 강릉원주대학교 복사-위성연구소
강릉원주대학교 대기환경과학과
*,**이규태 : 강릉원주대학교 복사-위성연구소
강릉원주대학교 대기환경과학과
**김부요 : 강릉원주대학교 대기환경과학과

***† Jee Joon-Bum(corresponding author) : Weather Information Service Engine, Hankuk University of Foreign Studies
E-mail : rokmcjbb717@gmail.com, Tel : 070-4617-3764
*Zo Il-Sung : Research Institute for Radiation-Satellite, Gangneung-Wonju National University.
*,**Jeong Myeong-Jae : Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University.
*,**Lee Kyu-Tae : Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University.
**Kim Bu-yo : Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University.

기 호 설 명

T_d^{night}	: 야간에서의 돔의 온도 (°C)
$T_d^{daytime}$: 주간에서의 돔의 온도 (°C)
I	: 관측 일사량 ($W m^{-2}$)
V	: 관측된 전류 (mV)
P_d	: 돔 내부의 기압 (mb)

그리스 문자

σ	: 스테판-볼츠만 상수 [$5.6697 \times 10^{-8} kW m^{-2}K^{-4}$]
----------	---

하첨자

s	: 센서 또는 thermopile
d	: 돔 또는 돔내부

1. 서 론

태양복사는 지구대기를 움직이는 1차적인 원동력이며 지구상의 모든 생명체의 생존을 위한 필수적인 에너지원이다. 태양복사 에너지 및 그 변화는 대기과학 뿐만 아니라 농업, 에너지, 생물, 의료, 건축 및 산업 활동 등에 다양하게 활용되어진다.¹⁾ 지표면에 도달하는 태양에너지를 관측하는 관측기기를 일사계라고 명명하며²⁾ 이를 통하여 지표면에 도달하는 태양에너지의 요소(component) 관측에 따라 직달 일사계와 전천일사계로 나뉜다. 일사량 관측은 WMO (World Meteorological Organization)³⁾ 와 WRC (World Radiation Center)⁴⁾의 규정에 의거하여 관측되고 있으며 정확성이 검증된 자료의 경우 BSRN (Baseline Surface Radiation Network)⁵⁾에 등록되어 전지구의 일사량 변화 연구에 사용된다.

전천일사계는 sensitivity function, thermal offset, other spectral effect, geometric, environmental, equipment 등의 불확실성에 영향을 받기 때문에 장비의 관리 및 취급에 주의해야 한다.⁶⁾ 대부분의 불확실성 요소들에 대한 연구들은 이미 진행되었으나 thermal offset에 대한 문제는 최근 중요하게 연구되어지고 있다. Thermal offset은 전천일사계의 에너지를 관측하는 센서인 열전퇴(thermopile)가 태양에너지뿐만 아니라 주변 온도에 영향을 받아 생기는 오차를 의미한다.

Kato et al.⁷⁾은 밤 동안 하늘이 맑았을 때가 흐릴 때 보다 효과가 더 큼을 보였고, Drummond and Roche⁸⁾는 환기를 통하여 온도를 유지함으로써 이 효과를 감소시킬 수 있다고 하였다. 또한 BSRN 관측지점에 밤 동안 일사계를 상향과 하향으로 설치하여 두 장비의 차이를 분석한 결과 하향으로 설치한 일사계에서 $0 W \cdot m^{-2}$ 에 가까운 관측값이 나타남을 확인하였다.⁹⁾

전지구 모델(Global Circulation Model; GCM)과 BSRN의 일사 관측 자료들을 이용하여 지표면에 흡수되는 일사량의 지구 평균을 비교하였을 때 GCM 결과가 관측 자료에 비해 약 $9 \sim 18 W \cdot m^{-2}$ 정도 큰 것으로 분석되었다.^{10),11),12)} WRC에서 MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) 모델¹³⁾과 연직 입력자료 및 절대복사계와 다양한 일사계들을 이용하여 분석한 결과 일사량 관측자료가 과소추정(underestimation)되고 있음을 밝혔다.¹⁴⁾ 그리고 최근 연구로 최적 일사계의 개선 기술과 보정 방법에 대한 연구를 통하여 thermal offset의 중요성을 확인하였다.^{15),16)} 또한 Ji and Tsay¹⁷⁾는 이러한 thermal offset 문제점을 보완하기 위해 전천일사계 돔의 온도를 측정할 수 있는 특수 일사계를 고안하여 연구를 수행하였으며 이를 통해 밤 동안의 음의 일사량 및 낮 동안의 과소 모의된 일사량을 보정할

수 있는 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 강릉원주대학교 일사 집중관 측소에 Ji and Tsay이 고안한 특수 일사 관측 장비를 설치하여 thermal offset의 효과를 분석하였다. 맑은 날은 흐린 날에 비해 일사계의 온도 증가폭이 커져 일사계의 thermal offset의 효과가 클 것이기 때문에 맑은 날 사례를 이용하여 분석을 수행하였다.

2. 일사계 온도 보정

일사계는 수감부(Sensor)에 도달하는 태양 에너지를 흡수하여 돔 내부의 온도와 장비 케이스 안쪽에 밀폐된 부분의 온도 차로 인해 생기는 미세전류(unit: mV)의 양을 측정한다. 그림 1은 세계복사센터(WRC)에서 5종류의 전천일사계들과 통풍(ventilation) 및 가열(heater) 장치를 이용해 밤시간 동안에 일사량 변화를 실험한 결과이다. CM22와 CM21은 Kipp&Zonen社의 전천일사계들이고 B&W와 PSP는 Eppley社의 전천일사계이다. 또한 B&W와 PSP_Ref의 경우는 통풍 및 가열 장치가 포함되지 않았으며 나머지 세 가지 일사계들에 만 장치가 포함되었다. 00LST부터 02LST까지는 통풍 및 가열 장치가 가동되지 않았으며 02LST부터 03LST까지는 통풍 장치만 가동되었다. 그리고 03LST부터 04LST까지는 통풍 및 가열 장치 모두가 가동되었으며 04LST 이후에는 두 장치 모두를 가동하지 않았다. 관측 기간 동안 B&W 일사계의 경우는 $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 에 가장 가까워 오차가 가장 작았고 이외의 일사계들은 작게는 $0.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 에서 크게는 $7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 까지 오차가 나타났다. 이렇듯 태양에너지(일사량)가 없는 밤동안에 음(-)의 일사량이 관측되는 것은 일사계 주변의 온도가 일사계 내부의 온도보다 낮기 때문이며 이

러한 문제를 해결하기 위해 일사계 온도 보정이 요구된다. 즉 태양에너지가 증가하는 낮 동안에는 일사계의 주변 온도 변화 때문에 실제 관측되어야 하는 일사량과 비교하여 작은 일사량이 관측되며 태양이 없는 밤 시간에는 $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 보다 작은 음(-)의 일사량이 관측된다.

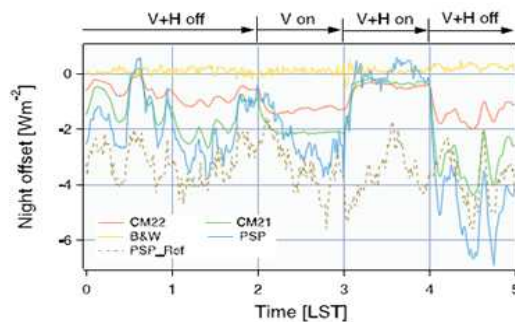


Fig. 1 Night offset measured during the nighttime hours of 3 October 2001. Fig. 2 from Philipona, 2002¹⁴⁾

식 (1)은 일사계에서 관측된 일사량(I)을 산출하는 식으로 여기서 c 는 감도정수(calibration constant, unit: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}/\text{mV}$)이고 V 는 일사계에서 관측된 전류(unit: mV)를 의미하다.

$$I = cV \quad (1)$$

일반적인 일사계는 돔에서 관측되는 미세전류의 양을 측정하는 것으로 이 전류는 온도에 따라 변화하기 때문에 일사량의 오차가 발생되며, 이러한 오차를 줄이기 위해 돔의 온도와 케이스의 온도를 측정하여 일사량을 보정한다. 이때 돔의 온도관측은 매우 어렵기 때문에 상태방정식을 이용하여 돔의 온도를 산출하게 된다. 그림 2는 일사량의 온도 보정을 위하여 사용된 특수 일사계의 그림으로 일반적인 일사계와 다르게 외부 돔(outer dome)과 내부 돔(inner dome) 사이의 기압과 일사계 케이스의 온도 관측을 수행한다.

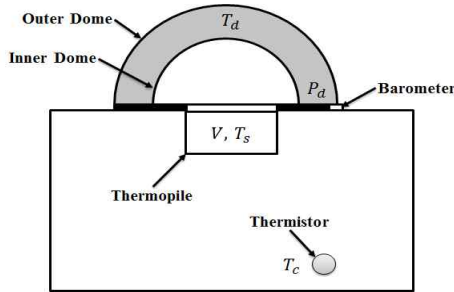


Fig. 2 Schematic diagram of a modified pyranometer

식 (1)에 대하여 상태방정식을 이용한 온도 보정 관련항을 추가하면 식 (2)와 같다.¹⁸⁾

$$I = cV + f\sigma(T_s^4 - T_d^4) \quad (2)$$

여기서 f 는 유리돔에 대한 계수로 일사계 유리돔의 두께 및 굴곡이 장비별로 동일하지 않기 때문에 실내실험을 통해 각각의 장비별 계수가 정하게 된다. 그리고 σ 는 스테판-볼츠만 상수($=5.6697 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)이며 T_s 와 T_d 는 각각 열전퇴(thermopile)의 온도와 돔의 온도이다. 또한 T_s 는 관측되어지지 않고 식 (3)을 이용하여 계산되어 진다.¹⁹⁾

$$(T_s - T_c) = \alpha V \quad (3)$$

여기서 T_c 는 케이스의 온도를 의미하고 α 는 열전퇴(thermopile)의 감도정수($=0.694 \text{ K/mV}$)를 의미한다. 돔의 온도 또한 직접 관측이 어렵기 때문에 상태방정식을 이용하여 구하게 된다. 따라서 식 (4)와 같이 기체상수 r (돔 속은 이상기체가 아니기 때문에 r 은 밀도에 비례하여 변함)과 돔 속의 기압(P_d)을 알게 되면 돔의 온도(T_d)를 계산할 수 있다.

$$P_d = rT_d \quad (4)$$

식 (3)와 식 (4)를 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$I = cV + f\sigma[(T_c + \alpha V)^4 - (P_d/r)^4] \quad (5)$$

즉 상수들(c, f, σ, α, r)과 관측을 통해 수집된 변수들(V, T_c, P_d)을 이용하여 일사계 온도 보정에 관한 식을 유도할 수 있다.

일반 일사계는 감도정수인 c 값만을 산출하나 온도 보정 연구를 위해 만들어진 특수 일사계의 경우는 c 와 f (유리돔에 대한 계수)값을 산출하게 된다. 식 (2)에 양변을 전류량인 V 로 나누어 주면 다음과 같은 식이 된다.

$$I/V = c + f\sigma(T_s^4 - T_d^4)/V \quad (6)$$

여기서 σ 는 스테판-볼츠만 상수이고 Ji et al.의 실내 실험 방법을 통해 I 와 V 그리고 T_s 와 T_d 를 알 수 있어 식 (6)은 식(7)과 같은 간단한 1차 방정식이 된다.

$$y = fx + c \quad (7)$$

여기서 y 는 I/V 이고 x 는 $\sigma(T_s^4 - T_d^4)/V$ 이다.

그림 3 a)는 NASA GFSC(Goddard Space Flight Center)에 설치된 인공 에너지를 방출하는 Grande 장비²⁰⁾와 함께 설치된 특수일사계(PSP, Eppley사)의 사진이다. Grande 장비는 미국 국립표준기술연구소(NIST)에서 사용되는 초정밀 장비로 태양복사와 유사한 파장의 에너지를 방출한다. 이 연구에 사용된 장비는 총 9개의 램프로 구성되어 있으며 그림 3 b)와 같이 on/off를 설정하여 일사계에 도달하는 에너지를 조절하여 관측을 수행하였다.

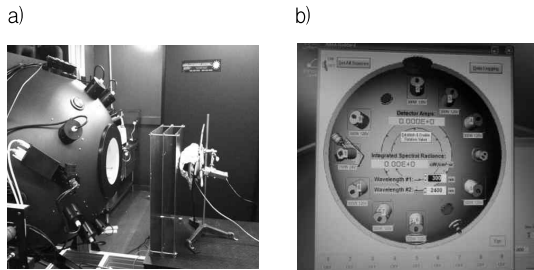


Fig. 3 PSP mounted in front of an integrating sphere(Grande, a) and its monitoring software(b)

Table. 1 C(calculation constant) and f(dome factor) according to lamps status in laboratory test

Status	f	c (Wm ⁻² /mV)
8 Lamps	2.3	114.2
6 Lamps	2.2	114.3
4 Lamps	2.2	114.3
2 Lamps	2.1	114.5

3. 결 과

그림 4는 Grande장비의 램프를 8개 켜고 실내 실험을 수행한 결과로 검은 점선은 관측값을 의미하고 실선은 회귀선을 나타낸 것이다. 또한 이 회귀식을 통해 $c(=114.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}/\text{mV})$ 와 $f(=2.3)$ 값을 각각 산출하였다. 이와 같은 방법으로 램프별(8개, 6개, 4개, 2개) 실험을 수행하였고 그 결과는 표 1과 같다. 각각의 계수 변화는 크지 않았고 모든 관측 자료들을 평균함으로써 최종적인 일사계의 c 와 f 를 산출하였으며 $114.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}/\text{mV}$ 와 2.2 로 나타났다. 이 값들을 이용하여 실외 관측을 수행하여 일사계 온도 보정에 대한 정량적인 값을 산출할 수 있다.

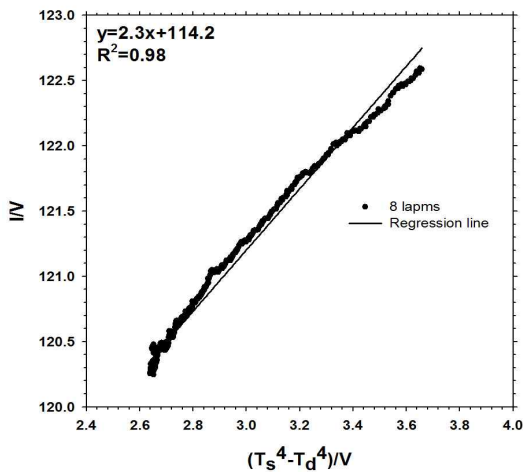


Fig. 4 The relationship between PSP and integrating sphere (Grande) with 8 lamps

온도 보정을 위하여 제작된 특수일사계는 실내 실험을 통하여 c 와 f 값을 산출한 후 야외에 설치하여 관측을 수행하였다. 그림 5 a)는 필드 관측기간 중 강릉원주대학교 일사 집중관측소에 설치된 특수일사계의 사진이며 그림 2의 모식도와 같다. 돔 사이의 기압과 상태방정식을 이용하여 돔의 온도를 산출할 수 있으며 케이스 내부의 온도를 통해 열전퇴(thermopile)의 온도를 관측할 수 있다. 일사 집중관측소는 강릉원주대학교 생명과학2호관 옥상에 위치하며 위도와 경도는 각각 37.77° 와 128.87° 이며 고도는 63.50 m 로 비교적 높아 주변 건물에 의한 차폐의 영향을 받지 않는다. 그러나 그림 5 b)와 같이 집중관측소 남서쪽 부분에 산이 위치하여 16시에서 17시경 수목에 의한 차폐가 발생된다. 따라서 본 연구에서는 차폐시간 동안의 자료를 사용하지 않았다.

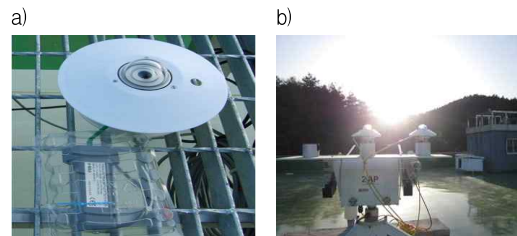


Fig. 5 Photos of modified pyranometer(a) mounted on Gangneung-Wonju National University and observation environment(b) on site by shades of trees on hill

그림 6은 맑은 날 사례로 선정된 2011년 10월 18일 강릉원주대학교 집중관측소에 설치된 Sky-view(Prede社)장비로 관측된 하늘 상태이다. 8시부터 20시까지 2시간 간격의 자료를 나타냈으며 모든 그림에서 구름이 없는 맑은 상태임을 확인할 수 있다. 또한 그림 7은 사례 선정일 5시부터 20시까지 관측된 기상자료를 나타낸 것이다.

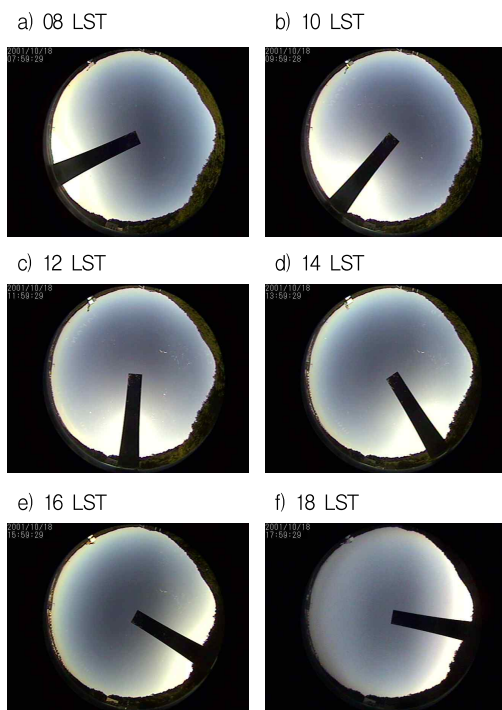


Fig. 6 Total sky images on Gangneung-Wonju National University at October 18 2011

일사계들은 Kipp&Zonen社의 장비들(직달 일사계: CHP1, 전천일사계: CMP21, 태양추적 장치: 2AP)를 이용하였으며 기압과 온습도는 Vaisala社의 장비들(기압계: HMT331, 온습도계: HMP155)을 사용하였다. 일사량은 일출 이후 6시 40분경부터 관측되어졌으며 태양과 직각방향을 유지하면 관측된 직달일사량(a),

black point)은 일출 이후부터 급격히 증가하여 가장 큰 값이 관측되었으며 직달성분(직달 일사량에 $\cos\theta$ 를 곱한 값)과 산란성분(산란일사량과 같음)의 합으로 관측되는 전천일사량(a, red point)은 이보다 작은 값이 관측되었다. 또한 맑은 날의 경우 대기의 에어러솔을 비롯한 흡수기체들의 양이 적기 때문에 산란일사량(a, blue point)의 경우는 $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 이하의 낮은 값으로 관측되었다. 동산에 의한 차폐가 발생하는 16시 20분경부터 대부분의 직달일사량이 차폐되어 $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 에 가까운 값으로 관측되었으며 이로 인해 전천일사량과 산란일사량은 매우 비슷한 값으로 관측되었다. 기압(Fig.7 a, green point)의 경우는 하루 종일 2 hPa 이하의 차이를 보일 정도로 변화폭이 크지 않았고 기온은 일출이후부터 태양에너지의 영향으로 증가하다 늦은 오후부터 차츰 감소하였으며 습도의 경우는 기온과 반대의 경향을 보였다.

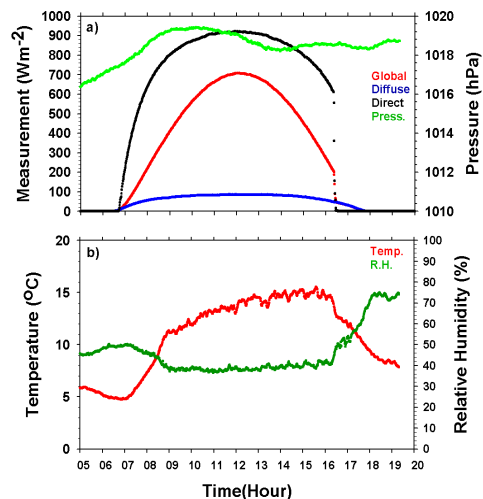


Fig. 7 Time series of meteorological observation data on Gangneung-Wonju National University on October 18 2011. a) Solar radiation(global, diffuse, direct) and pressure, b) temperature and relative humidity, respectively

그림 8은 사례일 동안 관측된 전천일사량만을 나타낸 자료이며 그림 8 a)의 원형내부에서 일사량의 급격한 감소는 앞서 설명한 수목차폐의 영향이다. 그림 8 b)는 그림 8 a)의 자료 중 밤 동안의 일사량 변화를 확대하여 나타낸 것으로 밤 동안에는 태양에너지와 관련된 에너지가 도달하지 않아 관측값은 $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 이 나타나야 하지만 일사계의 오차로 인하여 음(-)의 에너지가 관측되고 있다. 표 2는 음의 에너지가 관측된 일사계를 통해 온도보정을 수행하는 순서를 나타낸 것으로 총 4단계로 구성되어진다.

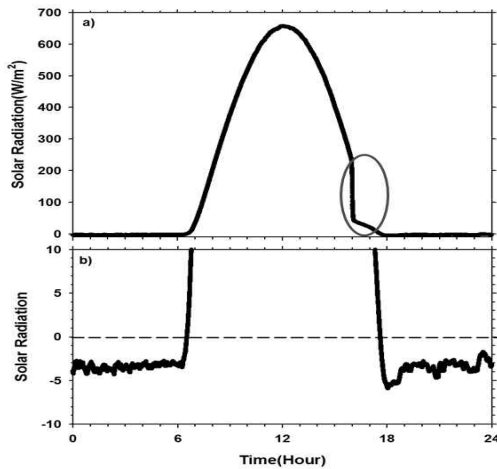


Fig. 8 Solar radiation observed on October 18 2011.
a) all day and b) captured night time

Step 1에서는 일사량이 $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 이 되는 밤 시간에 대하여 T_d^{night} 값을 산출하는 단계로 식 (5)을 이용하여 밤에는 일사량 I 가 $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 이므로 좌변이 0이 되며 이를 이용해 T_d 에 관한 식으로 정리한다. 그림 9는 관측된 일사계 케이스 온도(T_c)와 Step 1로 구해진 밤 동안의 T_d^{night} 을 시계열로 나타낸 그래프이다. 그림에서와 같이 밤에는 돔의 온도가 케이스의 온도보다 작아 둘 사이의 온도차로 인해 음(-)의 전류가 흘러 음의 일사량이 나타나게 된다.

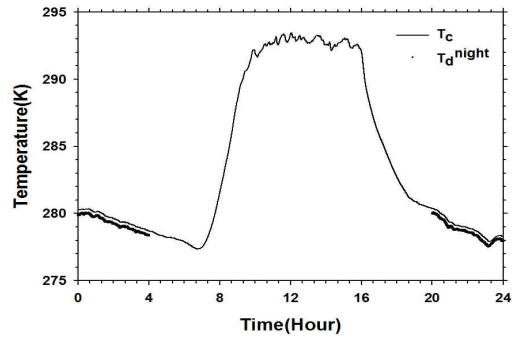


Fig. 9 Time series of case temperature(T_c , red) and dome temperature at nighttime(T_d^{night} , blue) on October 18 2011

Table. 2 Procedure of thermal dome effect(by Ji and Tsay, 2010)¹⁷⁾

Step	Action	Equation
1	밤 동안의 T_d^{night} 산출	$T_d^{night} = [(T_c + \alpha V)^4 + cV/f\sigma]^{1/4}$
2	손실된 기압 보정을 위해 T_d^{night} 을 이용해 r_0 와 k 산출	$P_d / T_d^{night} = r_0 + k(P_d - P_a) / T_d^{night}$
3	r_0 와 k 를 이용해 $T_d^{daytime}$ 산출	$T_d^{daytime} = \frac{(1-k)P_d + kP_a}{r_0}$
4	온도 보정된 일사량 계산	$I = cV + f\sigma(T_s^4 - T_d^4)$

온도보정을 위하여 설치한 기압관측용 호스 주변에서 작은 기압 손실이 발생하게 된다. 이를 보정하기 위해서 돔 안의 기압(P_d)은 식 (8)과 같이 두개의 항으로 정의되면 각 항들은 식 (9)와 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_d = P_0 + \delta P_d \tag{8}$$

$$P_0 = r_0 T_d \tag{9}$$

$$\delta P_d = k(P_d - P_a) \tag{10}$$

여기서 P_0 는 기압 손실이 없을 때 돔의 기

압으로 상태방정식을 이용하여 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 또한 δP_d 는 식 (10)과 같이 호스에 의해 손실된 기압으로 돔 내부와 외부의 기압 차를 의미하며 k 는 돔 계수(dome factor)이고 P_a 는 대기의 기압(air pressure)를 의미한다. 식 (8)에 식 (9)와 식 (10)을 이용해 정리하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_d = r_0 T_d + k(P_a - P_d) \quad (11)$$

여기서 P_d 와 P_a 는 관측되는 변수이고 T_d 는 Step 1에서 산출된 변수로서 식 (11)에 양변을 T_d 로 나누어 1차방정식 형태로 만들어 r_0 (y절편)와 k (기울기)를 산출한다(표 2에 Step 2 참조). 그림 10은 밤 동안의 관측 자료와 방정식을 이용하여 산출된 값으로 돔 계수(dome factor : k)는 0.064이며 r_0 값은 $3.457 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{k}^{-1}$ 였으며 결정계수(R^2)와 표준오차(standard error)는 각각 0.889와 0.0008로 나타났다.

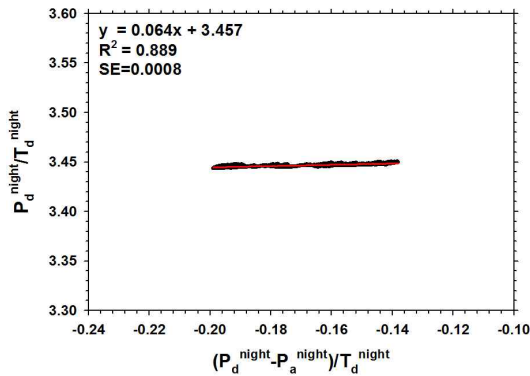


Fig. 10 Estimation of r_0 and k from nighttime measurement

Step 2에서 산출된 2011년 10월 18일에 r_0 와 k 값을 식 (11)에 대입하고 P_d 에 대한 식에서 식 (12)와 같이 T_d 에 대한 식으로 정리하여 낮 동안의 돔의 온도를 산출할 수 있게 된다. 낮

동안에 관측된 돔의 기압(P_d)과 대기의 기압(P_a) 그리고 밤 동안 자료를 이용해 산출된 r_0 와 k 를 통해 그림 9와 같이 낮 동안의 T_d^{daytime} 값이 산출되어 진다.

$$T_d^{\text{daytime}} = \frac{(1-k)P_d + kP_a}{r_0} \quad (12)$$

그림 11은 케이스의 온도(T_c)와 낮 동안의 유리 돔 온도(T_d^{daytime})를 함께 나타낸 것으로 밤과 동일하게 케이스의 온도가 돔의 온도보다 높다는 것을 알 수 있다. 즉 두 온도의 차이 때문에 낮 동안의 일사량이 실제 일사계에 관측되어지는 것보다 낮게 나타나는 것을 알 수 있으며 밤 동안의 온도차보다 낮 동안의 온도 차이가 더 크기 때문에 낮 동안에 감소된 일사량이 밤보다 클 것이라는 것을 유추할 수 있다.

Step 3에서 낮 동안의 유리돔 속 온도를 산출하였으므로 일사계 온도보정식인 식 (2)을 통해 하루 동안의 일사량을 산출할 수 있다.

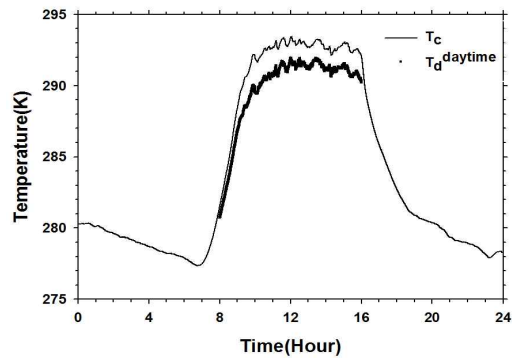


Fig. 11 Time series of case temperature and dome temperature at daytime on October 18 2011

그림 12는 2011년 10월 18일 하루 동안의 일사계 온도보정 변화를 나타낸 것으로 그림

12 a)는 일사계 온도 보정 전(red line)과 후 (blue line)의 일사량을 나타낸 것이고 그림 12 b)는 해가져서 태양복사가 없는 밤 시간에 관측된 일사량 변화를 나타낸 것이다. 그림 12 b)에서 태양광이 없는 야간에는 일사량이 $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 이 되어야하나 전천일사계는 밤에 음(-)의 일사량 값을 나타낸다. 이는 앞에서 설명한 것처럼 유리돔의 온도와 케이스 온도의 차이(유리돔과 케이스 온도 및 두 온도 차)에 의하여 야간에 음(-)의 일사량 값이 나타나기 때문에 일사계 온도 보정이 필요하며 특수일사계의 경우(blue line) $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 에 가까운 값이 관측되는 것을 알 수 있다.

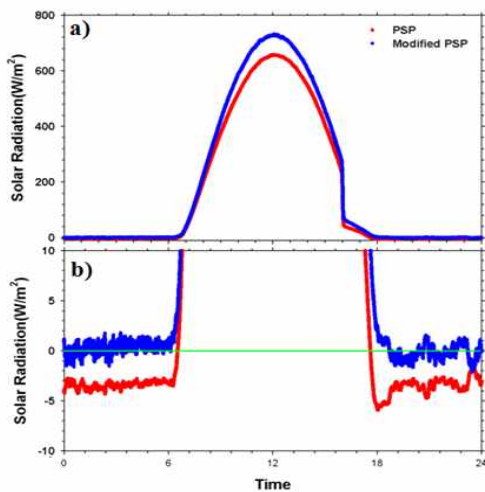


Fig. 12 Time series of data(a) solar radiation, b) captured TDE(Thermal Dome Effect)

4. 결 론

일사계의 thermal offset의 불확실성을 분석하기 위하여 개조된 특수한 일사계를 이용하였고 맑은 날에 대하여 온도보정을 수행하였으며 관측된 일사량 변화를 분석하였다. 관측 자료 분석에 사용된 특수 일사계는 NASA

GFSC의 Ji and Tsay에 의해 개발된 것으로 상대방정식과 외부와 내부 돔 사이의 기압 값을 관측하여 돔의 온도를 계산하였고 thermal offset의 효과는 일사계 내부와 돔의 온도차를 이용하였다. 일사관측장비는 강릉원주대학교 일사집중관측소에 설치되었으며 일사계의 thermal offset의 영향을 가장 많이 받는 맑은 날 사례(2011년 10월 18일)의 자료를 이용하여 일사계 온도 보정을 수행하였다. 사례일의 6시 40분에 태양에너지가 관측되기 시작하였고 일몰까지 구름이 없는 맑은 날이었으나 16시 20분에 수목차폐가 발생되어 16시부터 17시까지의 관측 자료는 분석에 이용하지 않았다.

특수 일사계를 이용한 온도보정은 총 4단계로 수행하였다. Step 1은 일사량이 $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 이 되는 밤 시간에 대하여 T_d^{night} 값을 산출하였다. Step 2는 선형 회귀방법을 통하여 r_0 (y절편)와 k(기울기)를 산출하였고 본 연구의 사례일에 대한 돔 계수(dome factor ;k)는 0.064이며 r_0 값은 $3.457 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{k}^{-1}$ 이었다. Step 3은 일사계 온도 보정식을 이용하여 낮 동안의 2단계의 r_0 와 k를 이용하여 $T_d^{daytime}$ 를 산출하여 Step 4에서 보정된 일사량을 산출하였다.

일사계 온도 보정 이전과 이후의 가장 큰 차이는 밤동안의 일사량 변화가 $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 에 가까워 졌다는 것이다. 보정 이전에는 음의 일사량을 무시하여 $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 으로 보정하였으나 이러한 보정은 일사계의 관측 오차이며 thermal offset 보정을 통해 교정되어야 한다. 또한 이러한 밤 동안의 에너지 변화를 낮 시간에 대입하여 분석해 보면 사례일처럼 맑은 날의 경우 원래 관측된 일사량과 비교하여 약 8% 정도 크게 관측되었다. 이는 선행연구¹⁴⁾에서 언급된 것처럼 매우 큰 오차로 일반적인 일사계 관리 문제로 인한 관측 오차(3~5%)보다 큰 값으로 분석된다.

맑은 날의 경우, 일사계를 통한 일사량 관측에서의 온도보정 효과는 매우 큰 것으로 분석되기 때문에 이 효과에 대한 정량적인 산출방안 및 검증이 요구된다. 기존 일사량 관측의 보정에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 이 연구의 결과는 맑은 날 단일 사례에 대한 결과이기 때문에 장기적인 관측 자료를 이용하여 맑은 날과 흐린날 등을 분류하여 정확한 결과의 도출이 요구된다.

후 기

본 연구는 기상청 기상산업지원 및 활용기술 개발사업(KMIPA 2014-21080)의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

1. Jee. J. B, Zo. I. S, Lee. K. T, and Choi. Y. J, Distribution of photovoltaic energy including topography effect, Journal of Korea Earth Science Society, Vol. 32, No. 2, pp. 190-199, 2011.(in Korea with English abstract)
2. C. G. Abbot and L. B. Aldrich, The pyranometer - An instrument for measuring sky radiation, Smithsonian Miscellaneous Collections, Vol. 66, No. 7, pp. 1-7, 1916.
3. WMO, WMO-8 Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Secretariat of the World Meteorological Organization, 1997. [Available from World Meteorological Organization, Case Postale 2300, CH-1211 Geneva 2, Switzerland.]
4. C. Fröhlich, World Radiometric Reference: WMO/CIMO Final Report, WMO No. 490, pp. 97-100, 1977.
5. L. J. B. McArthur, Baseline Surface Radiation Network (BSRN), Operations Manual, WMO/TD-No. 1274, WCRP/WMO, 2004.
6. A. G. Christian and R. M. Daryl, Modeling solar radiation at the earth surface - Chapter 1 Solar radiation measurement: progress in radiometry for improved modeling, Springer, PP. 12-17, 2007.
7. S. Kato, T. P. Ackerman, E. E. Clothiaux, J. H. Mather, G. G. Mace, M. L. Wesley, F. Murcray and J. Michalsky, Uncertainties in modeled and measured and measured clear-sky surface shortwave irradiance. Journal of Geophysics Earth Research, Vol. 32, No. D22, PP. 25881-25898, 1997.
8. A. J. Drummond and J. J. Roche, Corrections to be applied to measurements made with wppley (and other) spectral radiometers when used with schott colored glass filters, Journal of Applied Meteorology, Vol. 4, pp. 741-744, 1965.
9. M. S. Amie, Prediction and measurement of thermal exchanges within pyranometers, pp. 8, 1999.
10. J. R. Garratt, Incoming shortwave fluxes at the surface - a comparison of GCM results with observations. Journal of Climate, Vol. 7, pp. 72-80, 1994.
11. M. Wild, A. Ohmura, H. Gilgen, E. Roeckner, Validation of GCM simulated radiative fluxes using surface observations, Journal of Climate, Vol. 8, pp. 1309-1324, 1995.
12. M. Wild, A. Ohmura, H. Gilgen, E. Roeckner, M. Giorgetta, J. J. Morcrette, The disposition of radiative energy in the global climate system: GCM versus observational estimates, Climate Dynamics, Vol. 14, pp. 853-869, 1998.
13. A. Berk, G. P. Anderson, P. K. Acharya and E. P. Shettle, "MODTRAN@5.2.1 User's Manual," April 2011, to be published.
14. R. Philipona, Underestimation of Solar Global and Diffuse Radiation Measured at Earth's Surface, Journal of Geophysics Research, Vol. 107, No. D22, pp. 4654, 2002.

15. J. J. Michalsky, R. Dolce, M. Rubes, D. Nelson, T. Stoffel, M. Wesley, M. Split and J. DeLuisi, Optimal measurement of surface shortwave irradiance using current instrumentation. *Journal of Atmospheric Ocean Technical*, Vol. 16, pp. 55-69, 1999.
16. E. G. Dutton, J. J. Michalsky, T. Stoffel, B. W. Forgan, J. Hickey, D. W. Nelson, T. L. Alberta and I. Reda, Measurement of broadband diffuse solar irradiance using current commercial instrumentation with a correction for thermal offset error, *Journal of Atmospheric Ocean Technical*, Vol. 18, pp. 297-314, 2001.
17. Q. Ji and S.C. Tsay, A novel nonintrusive method to resolve the thermal dome effect of pyranometers: instrumentation and observational basis, *Journal of Geophysics Research*, Vol. 115, 2010. doi:10.1029/2009JD013483.
18. Q. Ji,, S. C. Tsay, K. M. Lau, R. A. Hansell, J. J. Butler and J. W. Cooper, A novel nonintrusive method to resolve the thermal dome effect of pyranometers: radiometric calibration and implications. *Journal of Geophysics Research*, Vol. 116, 2011. D24105, doi:10.1029/2011JD016466.
19. B. M. Hickey, *Physical Oceanography*. Pages 19-70 in M. D. Dailey, D. J. Reish and J. W. Anderson (eds), *Ecology of the Southern California Bight*. University of California Press, Berkeley, California, 1993.
20. J. Walker, C. L. Cromer and J. T. McLean, A Technique for Improving the Calibration of Large-area Sphere Sources, *Proc. SPIE*, 1493, pp. 224-230, 1991. doi:10.1117/12.46707.