

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 21, No. 3, 2001

일사계 교정을 위한 불확실성 분석에 관한 연구

조덕기*, 전일수*, 전명석*, 강용혁*, 오정무*

* 한국에너지기술연구원

A Study on the Uncertainty Analysis for Thermopile Pyranometer Calibrations

D.K.Jo*, I.S.Chun*, M.S.Jeon*, Y.H.Kang*, C.M.Auh*

* *Korea Institute of Energy Research*

Abstract

The major purpose of this paper is to develop an uncertainty estimate for the calibration of thermopile instruments used to measure solar radiation parameters. We briefly describe the solar radiation parameters most often measured, instrumentation, reference standards, and calibration techniques. The bulk of the paper describes elemental sources of error and their magnitude. We then apply a standard error analysis methodology to combine these elemental error estimates into a statement of total uncertainty for the instrument calibration factor. Our results allow one to evaluate the accuracy of a radiometric measurement using thermopile instrumentation in the light of the application, such as engineering test evaluation or for validation of theoretical models.

1. 서론

지난 십여년간 우리나라의 일사량 자료¹⁾를 분석한 결과를 보면 일부 지역에서 자료의 질적수

준은 낮은 상태인 것으로 나타났다. 이와 같은 원인은 측정기기의 관리와 유지, 그리고 장비에 대한 안정적 교정의 불충분 등에 상당한 영향을 받은 것으로 보인다. 그러므로 모든 측정이 그러하

뜻이 보다 정확한 데이터는 보다 정밀하고 질적 관리가 잘 유지되고 있는 측정기기로부터 기대할 수 있다. 특히 장시간을 두고 측정해야 하는 경우 측정기기에 대한 유지관리가 더욱 철저해야 할 것이다. 그러나 대개의 경우 측정기간이 길어지면 측정업무가 일상적인 것이 되어 자칫 유지관리에 소홀해 지는 경우가 많다. 따라서 본 연구는 현재 전국 주요 지역에서 설치 운영되고 있는 한국에너지기술연구원의 일사량 측정네트워크의 질적관리를 위하여 측정기기의 교정방법과 관련 기술연구를 중심으로 수행되었다.

2. 이론적 배경

2.1 태양입사차단법

태양입사차단법²⁾에 의한 교정기술은 표준직달일사계에 의해 측정된 일사량(direct normal radiation)과 교정하려는 수평면일사계에 의해 측정되어 계산된 법선면 직달일사량 성분을 서로 비교하는 것으로 일정한 조건하에서 측정임무를 수행할 경우 적용될 수 있는 측정기기 고유의 감도특성치를 산출하는데 쓰이며, 이때의 기상조건은 청명한 상태에서 실시되어야 한다. 교정방법은 우선 교정하려는 수평면일사계로부터 전일사량(global radiation)과 일사의 직달성분을 제거하기 위해 반사가 적은 차광판을 사용하여 산란일사량(diffuse radiation)을 측정후에 다시 연속적으로 표준직달일사계에 의해 직달일사량을 측정하여야 한다. 이때 새로이 산출되는 감도특성치인 교정계수 R은 식 (1)에 의해 산출할 수 있다.

$$G_b \cos \theta_z = 1 / R (V_{us} - V_s) \quad (1)$$

$$R = (V_{us} - V_s) / (G_b \cos \theta_z)$$

여기서, G_b : 기준기인 표준 직달일사계에 의해 측정된 직달일사량(W/m^2)

θ_z : 천정각(zenith angle)

V_{us} : 수평면일사계에서 측정 전일사량 출력전압(mV)

V_s : 수평면일사계를 차폐하여 측정된 산란일사량 출력전압(mV)

이며, 교정계수 R은 V/Wm^{-2} 의 단위로 정의된다. 또한 천정각 θ_z 은 관측장소의 정확한 위도와 측정일의 일적위 등을 사용하여 식 (2)에 의해 산출할 수 있다.

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega + \sin \rho \cdot \sin \phi \quad (2)$$

여기서, δ : 일적위

$$= 23.45 \sin [360 (284 + n/365)]$$

n : 통산일

ϕ : 측정지역의 위도

ω : 시간각($\omega/hr = 15^\circ$, AM -, PM +)

이다.

2.2 표준기기에 의한 비교법

표준기기와 비교를 통한 수평면일사계의 교정방법^{3,4)}은 표준수평면일사계를 기준기로 설정하고, 이 기기의 출력에 대한 피검정기, 즉 교정을 필요로 하는 수평면일사계의 출력을 서로 비교하는 방법으로 비교적 청명한 날에 걸쳐 연속적으로 비교관측을 통하여 개략적인 피검정기의 평균 교정계수를 구할 수 있다. 이 방법에 의한 일사계의 교정은 태양입사차단법에 의한 교정시 보다 다소 대기상태의 영향을 적게 받으며, 또한 통상적으로 피검정기의 교정을 위해 데이터수집장치(data acquisition system)를 사용하여 표준기기와 피검정기에서 출력되는 신호를 연속적으로 측정하여 산출된 각 기기의 신호에 대한 변화도를 서로 비교함으로써 표준기기에 대한 피검정기의 평균 교정계수의 비로 나타나게 된다.

그러나, 이 방법은 온도차(temperature

difference)뿐만 아니라 시간감응(time reponse), 비선형(non-linearity), 그리고 방위각과 천정거리에 따른 감도(sensitivity) 등에 수평면일사계의 변화를 예측하기에는 태양입사차단법에 의한 교정시 보다는 상당한 어려움이 뒤따르나, 반면에 여러 개의 피검정기를 동시에 교정이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

표준기기와 비교에 의한 교정은 우선 회귀법(regression method)과 비례법(ratio method)에 의거 피검정기의 교정계수를 산출하여야 한다. 이에 대한 관계식은 식 (3)과 같다.

$$C_{test} = a + b C_{ref} \quad (3)$$

$$R_{test} = \epsilon_{mV_{test}} / \epsilon_{mV_{ref}} (R_{ref})$$

여기서,

- C_{test}, C_{ref} : 피검정기와 표준기기에서 각각 측정된 전일사량의 출력전압(mV)
- a, b : 비교시험기간 동안 피검정기와 표준기기에서 연속적으로 출력되

는 매 10분 간격의 평균 전압값으로부터 최소자승법에 의하여 산출되는 교정상수로 a 는 절편, b 는 기울기를 나타냄.

R_{test}, R_{ref} : 새로이 산출된 피검정기 감도특성치와 표준기기 고유의 감도 특성치(V/Wm^{-2})

$\epsilon_{mV_{test}}, \epsilon_{mV_{ref}}$: 비교시험 기간동안의 피검정기와 표준기기에서 측정된 전일사량의 평균 출력전압(mV)

이다.

3. 실험결과 및 고찰

한국에너지기술연구원(KIER)은 일사량 측정네트워크에서 운영중인 수평면일사계의 정기적인 교정을 실시하고자 전 절에서 설명한 두 가지 교정방법, 즉 태양입사차단법과 표준기기와의 비교법에 의한 일사계의 교정실험 최근에 미국 애프

Table 1. CAVITY형 표준기기 절대 직달일사계의 규격

구 분	규 격
모 델 명	미국 애프리사 AHF
감 도	0.0210 mV/mW(전면), 0.0209 mV/mW(후면)
열 전 대 형 태	콘스탄탄(constantan) 위에 구리를 입힌 금속에 60접점 원형권선
수 감 부 도 장	Specular Chemglaze Z302
수 감 부 히 터	저항이 일정한 전선으로 감긴 코일형태
열 전 대 저 항	341.6 Ω
전면 히터 저항	155.1 Ω
후면 히터 저항	154.3 Ω
히터선보상저항	0.066 Ω
구 경 면 적 (Pseudo-Precision)	0.50102 cm ² (각 전후면)

Table 2. CAVITY형 표준기기 절대 수평면일사계의 규격

구 분	규 격
모 델 명	미국 애플리사 SCP
감 도	0.1085 mV/mW-cm ⁻²
열 전 대 형 태	콘스탄탄(constantan) 위에 구리를 입힌 금속에 60접점 원형권선
수 감 부 도 장	Person 흑색 광학도료 처리
수 감 부 히 터	저항이 일정한 전선으로 감긴 코일형태
열 전 대 저 항	350.0 Ω
전면 히터 저항	150.8 Ω
후면 히터 저항	151.0 Ω
구 경 면 적 (Pseudo-Precision)	0.4886 cm ²

Table 3. 한국에너지기술연구원 일사량 측정네트워크에서 운영중인 수평면일사계의 규격

구 분	규 격
모 델 명	미국 애플리사 PSP
감 도	약 9.00 × 10 ⁻⁶ V/Wm ⁻²
임 피 던 스	650 Ω
감 지 부	1 cm ⁻² 의 원형 (Person 흑색 광학도료 처리)
온 도 의 존 도	±1% (대기온도 -20 ~ +40℃)
직 선 도	±0.5% (0 ~ 2,800 W/m ⁻²)
반 응 시 간	1 초
각 특 성	±1%(천정각 0° ~ 70℃), ±3%(천정각 70° ~ 80℃)
방 위 특 성	영향을 받지 않음
기 계 적 특 성	최대 20 g's
교 정	약 1 cal/cm ⁻² .min (대기온도 +25℃)

리사에서 수입된 CAVITY형 절대 적달일사계와 수평면일사계를 표준기기⁵⁾로 설정하여 실시하였다. 교정을 위한 표준기기와 당 연구원의 일사량

측정네트워크에서 운영중인 교정대상 일사계⁵⁾에 대한 규격은 각각 표 1, 2와 표 3과 같다.

또한, 태양입사차폐법과 표준기기와 비교법에의

Table 4. 태양입사차단법에 의한 표준기기와의 비교측정 데이터

항목 시간	태양 천정각		전 압 (mV)				일 사 량 (W/m ²)						교정계수 R ($\mu\text{V/Wm}^2$)
	θ_z	$\cos \theta_z$	교정대상 일사계 (피검정기)			표준 기기 G_s	교정대상 일사계 (피검정기)				표준 기기 G_0	$(H-D / \cos \theta_z) - G_0$	
			V_{us}	V_s	$V_{us}-V_s$		H	D	H-D	$(H-D / \cos \theta_z)$			
09:00	43° 19'	0.7276	7.119	2.251	4.948	5.503	745	235	510	701	651	+50	10.45
10:00	31° 53'	0.8491	8.306	2.722	5.584	5.566	869	285	584	688	658	+30	9.99
11:00	22° 16'	0.9254	8.765	2.635	6.130	6.109	917	276	641	692	723	-31	9.16
12:00	18°	0.9511	9.543	2.943	6.600	6.419	998	308	690	725	760	-35	9.13
12:40	20°	0.9397	9.934	3.592	6.342	5.803	1039	376	663	706	687	+19	9.82
13:39	30°	0.8660	8.980	3.076	5.904	5.932	939	322	617	712	702	+10	9.71
14:43	40°	0.7660	6.998	2.221	4.777	5.417	732	232	500	653	641	+12	9.73
15:34	50°	0.6428	5.852	2.435	3.417	4.863	612	255	357	555	576	-21	9.23
16:23	60°	0.5000	4.252	1.371	2.881	4.676	445	143	302	604	553	+51	10.42
17:13	70°	0.3420	2.832	1.070	1.762	3.855	296	112	184	538	456	+82	11.30

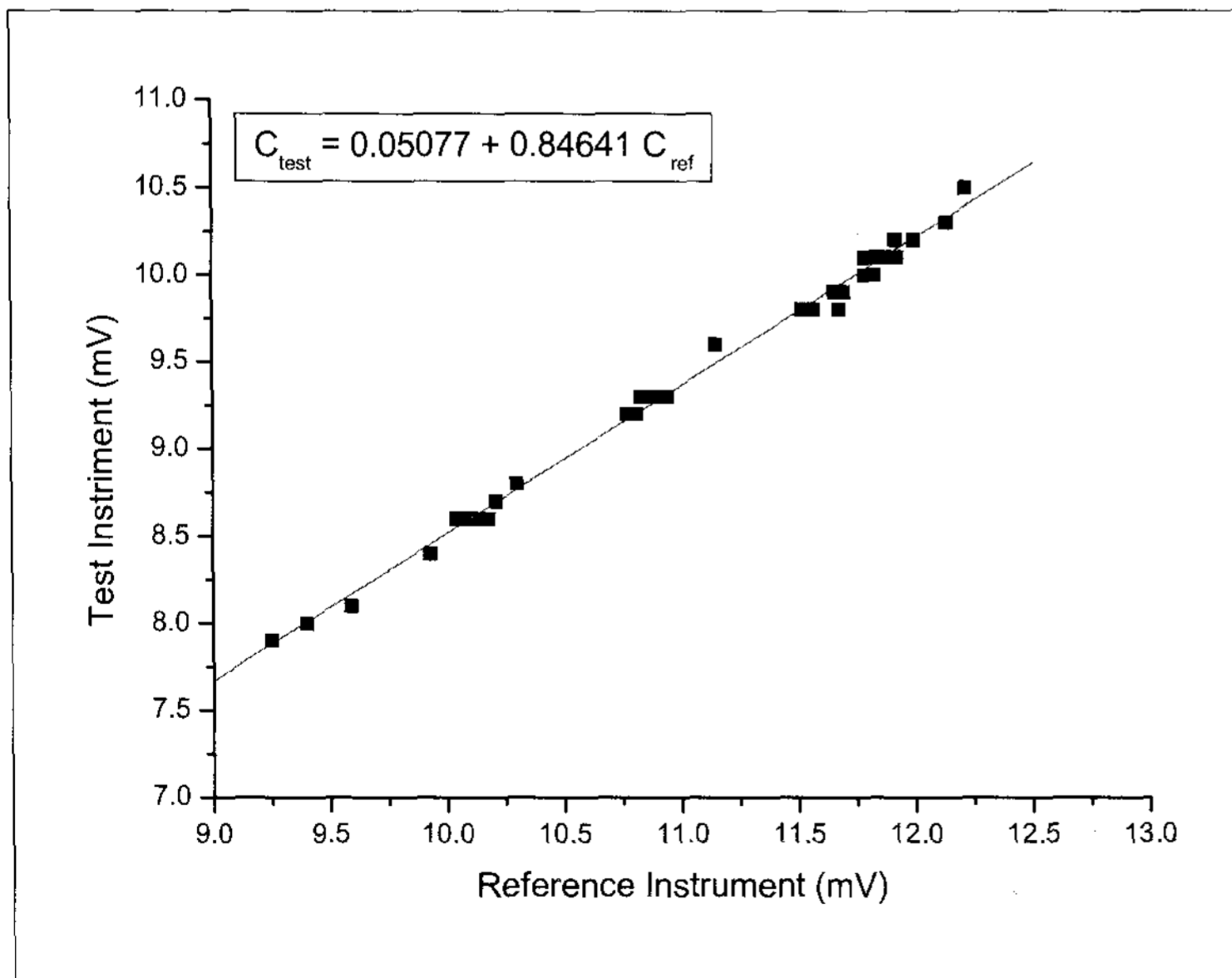


Fig. 1. 표준기기와의 비교법에 의한 표준기기와 피검정기 출력사이의 상관관계

한 각각의 교정전 감도특성치에 대한 측정값과 교정후 감도특성치에 대한 측정값의 비교는 표 4

와 표 5에 제시하였으며 교정결과는 그림 1과 그림 2에 제시하였다. 여기서 실험된 교정대상 일사

Table 5. 표준기기와의 비교법에 의한 측정데이터

측정시간	표준기기 (A)	교정대상 일사계 (B)		발생오차 (A/B)	
		교정 전	교정 후	교정전	교정후
09:10	9.40mV(86.64mWcm ⁻²)	8.00mV(83.68mWcm ⁻²)	8.00mV(86.67mWcm ⁻²)	1.035	1.000
09:20	9.25 (85.25)	7.9 (82.64)	7.9 (85.89)	1.032	0.996
09:30	9.59 (88.39)	8.1 (84.73)	8.1 (87.76)	1.043	1.007
09:40	9.93 (91.52)	8.4 (87.87)	8.4 (91.01)	1.042	1.006
09:50	10.06 (92.76)	8.6 (89.96)	8.6 (93.17)	1.031	0.995
10:00	11.15 (102.76)	9.6 (100.42)	9.6 (104.10)	1.023	0.998
10:10	12.22 (112.63)	10.5 (109.83)	10.5 (113.76)	1.025	0.990
10:20	12.00 (110.60)	10.2 (106.69)	10.2 (110.51)	1.037	1.001
10:30	11.81 (108.85)	10.1 (105.65)	10.1 (109.43)	1.030	0.995
10:40	11.52 (106.18)	9.8 (102.51)	9.8 (106.18)	1.036	1.000
10:50	11.70 (107.83)	9.9 (103.56)	9.9 (107.26)	1.041	1.005
11:00	11.67 (107.56)	9.9 (103.56)	9.9 (107.26)	1.039	1.003
11:10	11.66 (107.47)	9.9 (103.56)	9.9 (107.26)	1.038	1.002
11:20	11.67 (107.56)	9.9 (103.56)	9.9 (107.26)	1.039	1.003
11:30	11.67 (107.56)	9.9 (103.56)	9.9 (107.26)	1.039	1.003
11:40	11.79 (108.66)	10.0 (104.60)	10.0 (108.34)	1.039	1.003
11:50	11.93 (109.95)	10.1 (105.65)	10.1 (109.43)	1.041	1.005
12:00	11.68 (107.65)	9.8 (102.51)	9.8 (106.18)	1.050	1.014
12:10	11.57 (106.64)	9.8 (102.51)	9.8 (106.18)	1.040	1.004
12:20	11.66 (107.47)	9.9 (103.56)	9.9 (107.26)	1.038	1.002
12:30	12.14 (111.89)	10.3 (107.74)	10.3 (111.59)	1.039	1.003
12:40	11.83 (109.03)	10.1 (105.65)	10.1 (109.43)	1.032	0.996
12:50	11.85 (109.22)	10.1 (105.65)	10.1 (109.43)	1.034	0.998
13:00	11.91 (109.77)	10.1 (105.65)	10.1 (109.43)	1.039	1.003
13:10	11.89 (109.59)	10.1 (105.65)	10.1 (109.43)	1.037	1.001
13:20	11.83 (109.03)	10.0 (104.60)	10.0 (109.43)	1.042	1.006
13:30	11.79 (108.66)	10.1 (105.65)	10.1 (109.43)	1.028	0.993
13:40	11.92 (109.86)	10.2 (106.69)	10.2 (110.51)	1.030	0.994
13:50	10.83 (99.82)	9.3 (97.28)	9.3 (100.76)	1.026	0.991
14:00	10.87 (100.18)	9.3 (97.28)	9.3 (100.76)	1.030	0.994
14:10	10.90 (100.46)	9.3 (97.28)	9.3 (100.76)	1.033	0.997
14:20	10.92 (100.65)	9.3 (97.28)	9.3 (100.76)	1.035	0.999
14:30	10.94 (100.83)	9.3 (97.28)	9.3 (100.76)	1.036	1.001
14:40	10.92 (100.65)	9.3 (97.28)	9.3 (100.76)	1.035	0.999
14:50	10.90 (100.46)	9.3 (97.28)	9.3 (100.76)	1.033	0.997
15:00	10.89 (100.37)	9.3 (97.28)	9.3 (100.76)	1.032	0.996
15:10	10.81 (99.63)	9.2 (96.23)	9.2 (99.67)	1.035	1.000
15:20	10.77 (99.26)	9.2 (96.23)	9.2 (99.67)	1.031	0.996
15:30	10.30 (94.93)	8.8 (92.05)	8.8 (95.34)	1.031	0.996
15:40	10.21 (94.10)	8.7 (91.00)	8.7 (94.26)	1.034	0.998
15:50	10.18 (93.82)	8.6 (89.96)	8.6 (93.17)	1.043	1.007
16:00	10.16 (93.64)	8.6 (89.96)	8.6 (93.17)	1.041	1.005
16:10	10.13 (93.36)	8.6 (89.96)	8.6 (93.17)	1.038	1.002
16:20	10.12 (93.27)	8.6 (89.96)	8.6 (93.17)	1.037	1.001
16:30	10.08 (92.90)	8.6 (89.96)	8.6 (93.17)	1.033	0.997
16:40	10.04 (92.53)	8.6 (89.96)	8.6 (93.17)	1.029	0.993
16:50	10.08 (92.90)	8.6 (89.96)	8.6 (93.17)	1.033	0.997
17:00	10.11 (93.18)	8.6 (89.96)	8.6 (93.17)	1.036	1.000
평균	11.03mV(101.66mWcm ⁻²)	9.38mV(98.12mWcm ⁻²)	9.38mV(101.63mWcm ⁻²)	1.000	1.000
감도특성치		9.56×10 ⁻⁶ V/Wm ⁻²	9.23×10 ⁻⁶ V/Wm ⁻²		

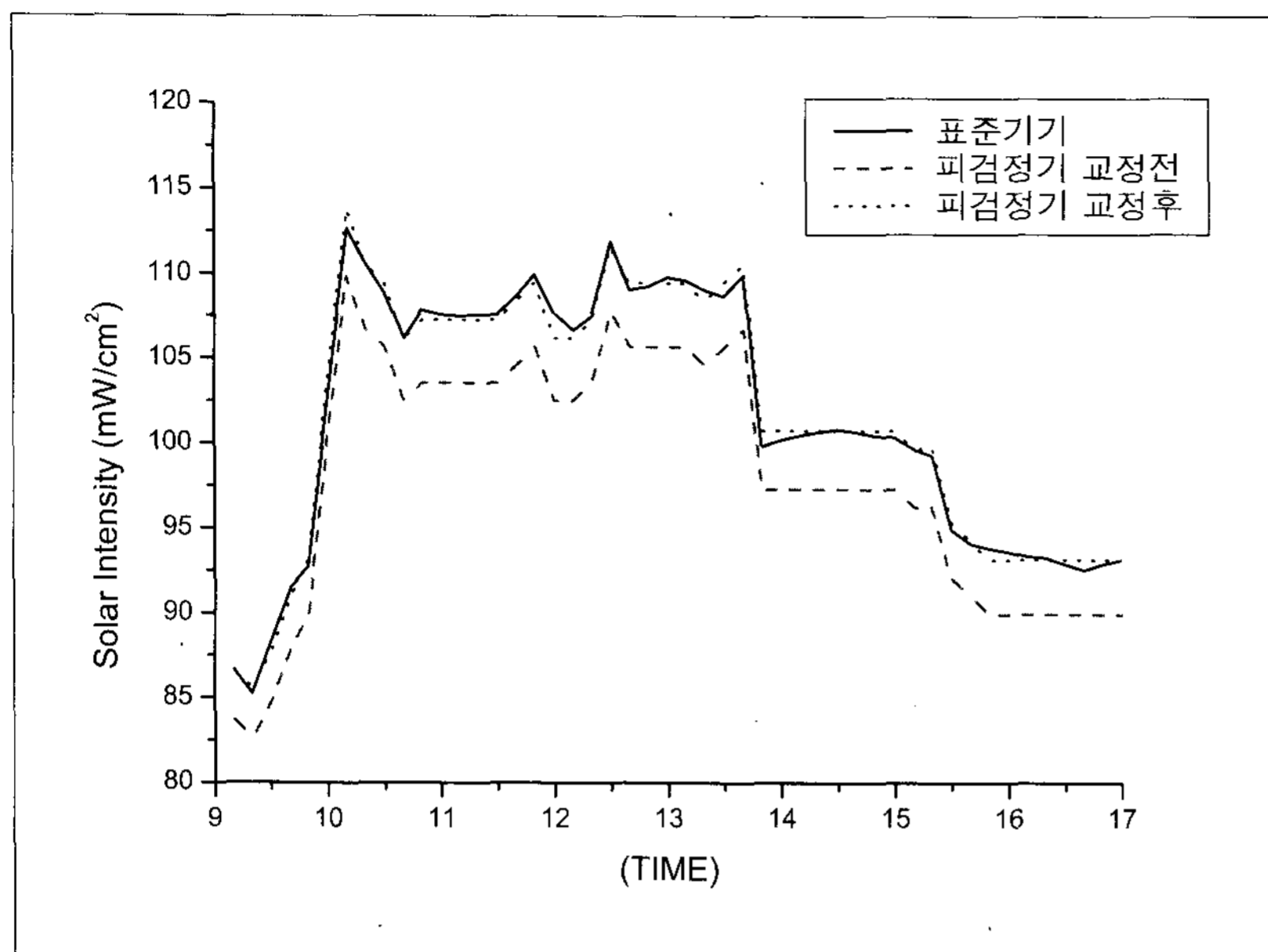


Fig. 2. 표준기기와의 비교법에 의한 일사계 교정 결과

계의 고유 감도특성치는 약 $9.56 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$ 이었으나 태양입사차단법에서 새로이 산출된 감도특성치는 일몰시경을 제외하고는 $8.92 \sim 9.80 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$ 사이를 나타내었으며, 표준기기와의 비교법에 의해 새로이 산출된 감도특성치는 $9.23 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$ 을 나타내었다. 따라서 통상적으로 태양입사차단법은 일정한 시간대 측정을 위한 일사계를 교정시에 요구되며, 표준기기와의 비교법은 일출부터 일몰까지 하루 온종일 측정을 요하는 일사계의 정기적인 교정을 위해 사용되어야 한다.

그러나, 표 5에서 보는바와 같이 이 교정방법에 의해 새로이 산출된 수평면일사계의 감도특성치는 제작회사에서 처음에 설정한 감도특성치와는 다소 차이를 나타내고 있다. 이와 같은 주원인은 교정대상 수평면일사계가 장기간 노천에 노출되어 설치, 운영됨으로서 기상변화에 따른 센서(sensor)의 노후에 기인한 것으로 판단되며, 따라서 운영중인 일사계는 최소한 1년에 한번씩 정기적인 교정⁶⁾을 실시하는 것이 바람직하다.

5. 결 론

한국에너지기술연구원(KIER)에서는 일사량 측정네트워크에서 운영중인 수평면일사계의 정기적인 교정을 실시하고자 태양입사차단법과 표준기기와의 비교법에 의한 일사계의 교정실험 최근에 미국 애프리사에서 수입된 CAVITY형 절대 직달일사계와 수평면일사계를 표준기기로 설정하여 실시한 분석결과를 살펴보면,

- 1) 실험된 교정대상 일사계의 초기 감도특성치는 약 $9.56 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$ 이었으나 태양입사차단법에 의한 실험에서 새로이 산출된 감도특성치는 일몰시경을 제외하고는 $8.92 \sim 9.80 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$ 사이를 나타내었으며, 표준기기와의 비교법에 의해 새로이 산출된 감도특성치는 $9.23 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$ 을 나타내었다.
- 2) 또한, 태양입사차단법은 일정한 시간대 측정을 위한 일사계를 교정시에 사용되어야 하며, 표준기기와의 비교법은 일출부터 일몰까지 하루 온종일 측정을 요하는 일사계의 정

기적인 교정을 위해 사용하는 것이 보다 바람직한 것으로 나타났다.

- 3) 이와 같은 교정방법에 의해 새로이 산출된 수평면일사계의 감도특성치는 제작회사에서 처음에 설정한 감도특성치와는 다소 차이를 나타내었다. 이와 같이 일사계의 감도특성치가 변화하는 주원인은 교정대상 수평면일사계가 장기간 노천에 노출되어 설치, 운영됨으로서 기상변화에 따른 센서(sensor)의 노후에 기인한 것으로 판단되며, 따라서 일사량 측정네트워크에서 운영중인 일사계는 최소한 1년에 한번씩 정기적인 교정이 필요한 것으로 나타났다.

그러나, 과거의 경우에는 표준기기조차 예산상의 문제로 확보할 수 없었기 때문에 정상적인 교정작업이 이루어질 수 없었다. 이에 따라 앞으로 당 연구원은 전국적인 측정사업에 대한 정확도 유지는 물론, 일사에너지의 분석을 위하여 표준기기에 의한 비교실험뿐만 아니라 태양입사차단법에 의한 실험도 수행할 수 있도록 총괄적인 교정

시스템을 확보하여 운영하는데 주력할 계획이다.

참 고 문 헌

1. 기상청, 기상년·월보, (1982~2000).
2. D.J.B. Pascoe, Pyranometer Calibration, Pascoe Solar Services, 1994.
3. P. Ambrosetti, et al., Results of an Outdoor and Indoor Pyranometer Comparison, International Energy Agency, 1986.
4. Daryl R. Myers, Uncertainty Analysis for Thermopile Pyranometer and Pyrhemometer Calibrations Performed by SERI, Solar Energy Research Institute, 1988.
5. J.A. Duffie and W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process, Wiley New York, pp. 3~145, 1991.
6. I. Reda, Broadband Outdoor Radiometer Calibration, SRRL NREL, 1999.