

## 솔라패널을 이용한 라디오존데 온도센서의 일사보정

박명석<sup>1)\*</sup> · 이진욱<sup>1)</sup> · 정세진<sup>2)</sup> · 장재원<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>SJ MNC(주) 연구소, <sup>2)</sup>NOAA SNC(주) 연구소

(접수일: 2019년 5월 8일, 수정일: 2019년 7월 2일, 게재확정일: 2019년 7월 2일)

### Compensation for The Solar Radiation Effect of Radiosonde's Temperature Sensor Using Solar Panel

Myeong-Seok Park<sup>1)\*</sup>, Jin-Wook Lee<sup>1)</sup>, Se-Jin Jeung<sup>2)</sup>, and Jea-Won Jang<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Research Institute of SJMNC Co., Ltd., Seoul, Korea

<sup>2)</sup>Research Institute of NOAA SNC Co., Ltd., Seoul, Korea

(Manuscript received 8 May 2019; revised 2 July 2019; accepted 2 July 2019)

**Abstract** For the upper air observations, a temperature measurement using radiosonde is a common method, and the compensation of solar radiation effects in the radiosonde temperature sensor is an important factor. In this paper, we present various experiments and compensation methods of the radiosonde temperature sensor to overcome the errors caused by the movement of the radiosonde rotation, etc. The methods and procedures of this study are as follows. First, we used the solar simulator to analyze the temperature variation and solar effect of the temperature sensor in the radiosonde according to the insolation. We also analyzed the temperature variation and solar effect of the temperature sensor according to the incident angle between the solar simulator and radiosonde. Second, we measured and analyzed solar radiation absorbed by solar cells attached to radiosonde. Third, we present combined compensate solution of the first and the second experiment results, to overcome errors caused by insolation effects in the radiosonde temperature sensors. Fourth, we compared that the reference temperature in similar environment with the upper air conditions, to verify the new radiated compensation performance of the radiosonde temperature sensor. Finally, the radiosonde fabricated in this study was raised to the atmosphere, and the laser correction algorithm proposed through experiments was reviewed. As a result of the radiosonde SRS-10 produced in this study, the temperature deviation from Vaisala RS92 was 0.057°C in nighttime observation, 0.17°C in daytime observation, It is expected that the GRUAN under WMO will be able to obtain a high test rating of 5.0.

**Key words:** Radiosonde, upper air observation, solar radiation effect, temperature sensor

## 1. 서 론

고층대기에서 측정된 온도 및 습도 등의 관측자료는 일기예보와 기후예측에 중요한 요소로, 세계기상

기구(World Meteorological Organization; WMO)에서는 범지구관측시스템(Global Climate Observing System; GCOS) 산하 기준 고층기상네트워크(The Global Climate Observing System Reference Upper-Air Network; GRUAN)를 통하여, 고층대기에서의 온도 및 습도 측정의 중요성을 강조하고 있으며, 전세계적으로 1,700소 이상의 지점에서 매일 2회씩 라디오존데를 이용하여 측정하고 있다(GCOS, 2007, 2013). 이러한 라디오존데의 성능평가에 관련하여 세계기상기구에서 주관

\*Corresponding Author: Myeong-Seok Park, Director of Research Institute, #1814, 18th Fl, Dearyoung-19th Bldg., 70, Gasan digital 2-ro, Geumcheon-gu, Seoul 08589, Korea.  
Phone: +82-70-4772-4324, Fax: +82-2-70-4009-8713  
E-mail: mspp.1013@gmail.com

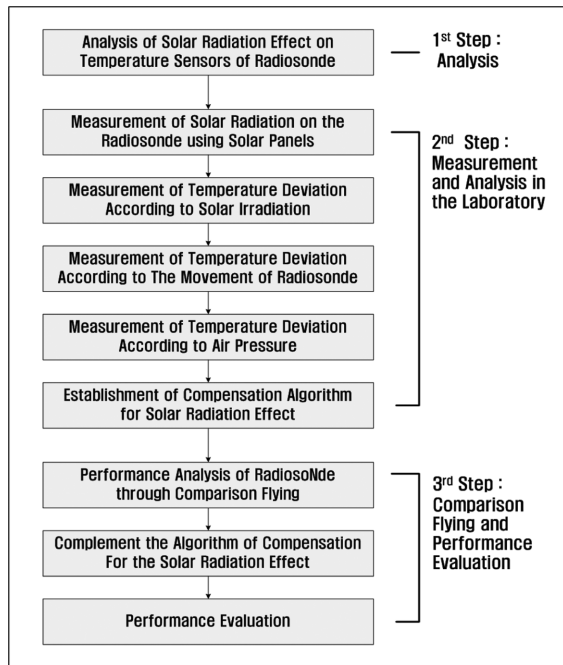


Fig. 1. Research flowchart of compensation for the solar radiation effect.

한 제8회 라디오존데 국제비교 결과 보고서에 의하면, 참가한 제조사들이 측정 한 온도 편차는 밤시간에는 -0.4~+0.5 K이고, 낮시간에는 -0.7~+1.0 K로, 온도의 편차가 제조사들마다 상이한 이유는 태양에 의한 일사영향에 대한 온도센서의 부정확한 일사보정으로 보고하였고, 일사보정의 중요성을 강조하였다(Nash et al., 2011).

일사보정의 일반적인 기법은 라디오존데와 태양과의 고각과 방위각, 라디오존데 비양위치와 시간 그리고 상승 고도로 일사량을 계산하여 온도센서에서 측정된 온도를 소프트웨어로 보상한다(Nash, 2015). 그러나 라디오존데 온도센서의 일사영향은 온도센서의 형태와 라디오존데와 태양과의 고각과 방위각에 따라 다르며(Scmidlin et al., 1986), 특히 라디오존데 비양환경에서는 온도센서가 노출된 대기환경에 의한 대류, 전도, 복사 등의 영향으로 인해 측정 온도가 실제 값과 차이가 발생하며, 고도가 상승함에 따라 급격히 증가됨을 확인하였다(Luers, 1990). 또한 태양 복사에너지와 온도센서의 온도 증가의 관계를 정립 하였으나 대기환경 변화로 인하여 예측된 일사영향이 달라질 수 있음을 강조하고 있다(Philipona et al., 2013).

선행된 연구들에서 일사보정을 수행하기 위해서는 온도센서 실험과 일사량 산출이 정확히 수행되어야

함을 지적하고 있다. 그러나 이러한 경우에도 라디오존데 비양 중에 발생하는 대기환경 변화와 예상치 못한 움직임으로 인한 일사량 변화를 반영하지 못하여 온도 차이가 발생할 수 있어, 정확한 일사량 산출과 일사보정 기법에 대한 필요성과 지속적인 연구가 진행되고 있다.

이에 본 연구에서는 라디오존데 비양 중의 대기환경 변화 및 라디오존데의 움직임에도 온도센서에 전달되는 일사량을 정확하게 측정하여 일사보정을 수행하는 기법으로, 온도센서와 인접하게 부착된 솔라패널을 통해 측정된 일사량으로 일사보정을 수행한다. 본 연구에서는 솔라패널을 이용한 일사량 측정실험, 온도센서의 일사영향 실험 그리고 낮은 기압에서의 일사영향 실험을 수행하였고, 끝으로 비교비양을 통해서 라디오존데 온도센서의 성능분석을 수행하여, 본 연구의 제시된 기법을 평가하고, 향후 연구진행 방향에 대하여 서술한다. Figure 1은 본 연구의 연구 흐름을 나타낸 것이다.

## 2. 연구 방법 및 실험 구성

### 2.1 온도센서의 일사영향 및 일사보정

라디오존데 온도센서에서 측정하는 온도는 여러가지 요인에 의해 오차가 발생할 수 있으므로, 온도센서인 서미스터의 온도측정에 영향을 미치는 인자들은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$mC \left( \frac{dT}{dt} \right) = Q_{abs} - Q_{emit} + Q_{conv} + Q_{elec} + Q_{cond} \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 질량,  $C$ 는 서미스터의 열 수용력,  $Q_{abs}$ 는 태양 복사에 의해 흡수(Absorbed Radiation)되는 열,  $Q_{emit}$ 는 복사에 의해 방출(Emitted Radiation)되는 열,  $Q_{conv}$ 는 대류에 의한 열(Thermal Convection),  $Q_{elec}$ 는 전기적인 저항에 의해 발생하는 열(Resistance Heating),  $Q_{cond}$ 는 전도에 의한 열(Thermal Conduction)로써 일반적인 서미스터의 열 평형방정식이다. 열 평형방정식에서 서미스터에 큰 영향을 미치는 인자는  $Q_{abs}$ 이며, 이는 서미스터에 가장 민감하게 작용하는 일사영향으로 라디오존데 온도센서에 오차를 발생시킨다. 본 연구에서 제작된 라디오존데 온도센서인 서미스터의  $Q_{abs}$ 는 식 (2)와 같은 방법으로 일사영향을 해석하고 있다(Luers, 1990).

$$Q_{abs} = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{\phi=0}^{\pi} \overline{A_p}(\theta) \int_{\lambda}^{\infty} \alpha(\lambda) I(\theta, \phi, \lambda) d\lambda \sin \theta d\theta d\phi \quad (2)$$

여기서  $\overline{A_p}(\theta)$ 는 라디오존데 온도센서(서미스터)가 외부에 노출되는 면적,  $\alpha(\lambda)$ 는 파장에 따른 서미스터의 흡수 계수,  $I(\theta, \phi, \lambda)$ 는 고각  $\theta$ 와 방위각  $\phi$  그리고

과장  $\lambda$ 의 방향으로부터 영향을 미치는 과장의 복사강도이다. 여기서 고각( $\theta$ )과 방위각( $\phi$ )은 서미스터와 태양과의 위치로부터 계산되는 것으로,  $Q_{obs}$ 은 태양과 서미스터의 위치에 관련이 있다는 것을 알 수 있다 (Luers, 1990).

이러한 일사영향에 의한 측정오차를 보정하기 위하여, 대부분의 제조사들은 라디오존데의 GPS 정보에 근거하여, 태양과의 고각( $\theta$ )과 방위각( $\phi$ )을 계산하여 일사량을 예측하는 소프트웨어적인 방법으로 일사보정 및 검증한다(Fitzgibbon and Facundo, 2003). 이러한 경우 구름층, 강우 등의 예상하지 못한 대기환경 변화와 라디오존데 회전 등의 움직임 등으로 변화된 일사량을 반영하지 못하여, 일사보정이 정확하지 못하고 밤시간보다 낮시간의 편차가 크다고 보고하였다 (Philipona et al., 2013). 이러한 온도센서의 일사영향에 의한 오차를 저감하기 위하여, 온도센서에 여러가지 코팅을 적용한 기법(Scmidlin et al., 1986), 소형화된 F-Thermocap 용량성 온도센서를 적용한 기법(Luers, 1997), 얇은 구리-콘스탄탄 열전대 온도센서를 적용한 기법(Ruffieux and Joss, 2003) 그리고 최근에는 두 개의 온도센서를 이용한 기법(Lee et al., 2018) 등으로 일사영향 분석과 일사보정의 정확성을 향상을 이려는 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

본 연구에서는 기존의 일사량 예측에 따른 일사보정기법과 달리, 솔라패널을 이용하여 측정된 일사량으로 일사보정 수행하는 기법으로, 예상하지 못한 외부환경 변화로 인한 일사량 변화를 실시간으로 반영하여 일사보정을 수행하므로 정확한 일사보정 가능하다.

### 2.2 라디오존데의 붐과 온도센서

라디오존데에서 붐(Boom)은 온도 및 습도 센서가 부착된 막대와 같은 형태로, 대기의 온도 및 습도 센서를 통한 측정과 센서들을 외부환경에서 보호하는 역할을 한다. 본 연구개발에서 제작된 붐은 온도센서와 습도센서 그리고 태양의 일사량 측정을 위한 솔라

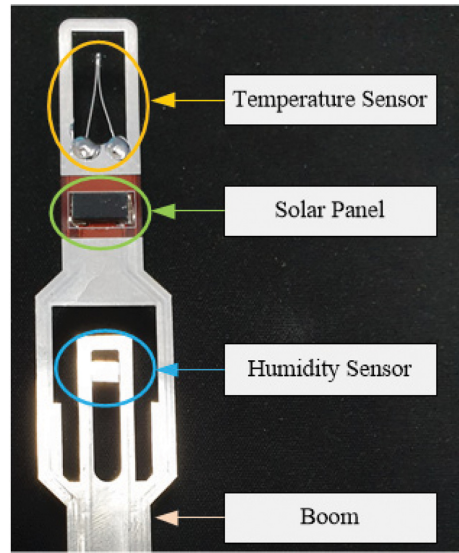


Fig. 2. Shape of Radiosonde's Boom.

패널을 붐의 앞면과 뒷면에 각각 부착되어 있다. 그리고 붐은 열 흡수율이 낮추기 위해 니켈 코팅하였다 (Fig. 2).

라디오존데의 붐(Boom)에 부착된 온도센서는 NTC (Negative Temperature Coefficient-thermic resistor) 서미스터로, 동작온도는  $-100\sim 50^{\circ}\text{C}$ 로, 저항값 오차는  $\pm 1\%$ , Dissipation factor  $0.4\sim 0.5\text{ mW }^{\circ}\text{C}^{-1}$  그리고  $0^{\circ}\text{C}$ 에서의 저항값으로  $8.12\text{ k}\Omega$ 의 특성을 가지고 있다 (Table 1).

라디오존데에 장착된 온도센서 서미스터의 측정값에 대한 신뢰성을 확인하기 위하여, ISO/IEC 17025 규정으로 불확도를 KOLAS (Korea Laboratory Accreditation Scheme) 선입평가사를 통하여 한국표준과학원에서 평가를 수행한 결과, 온도센서의 확장불확도가  $0.24^{\circ}\text{C}$ 로 라디오존데에 적용하기 적합하다. Table 2는 온도센서의 확장불확도 평가 결과를 나타낸 것이다(MTIE, 2017).

Table 1. Electrical characteristics of the temperature sensor.

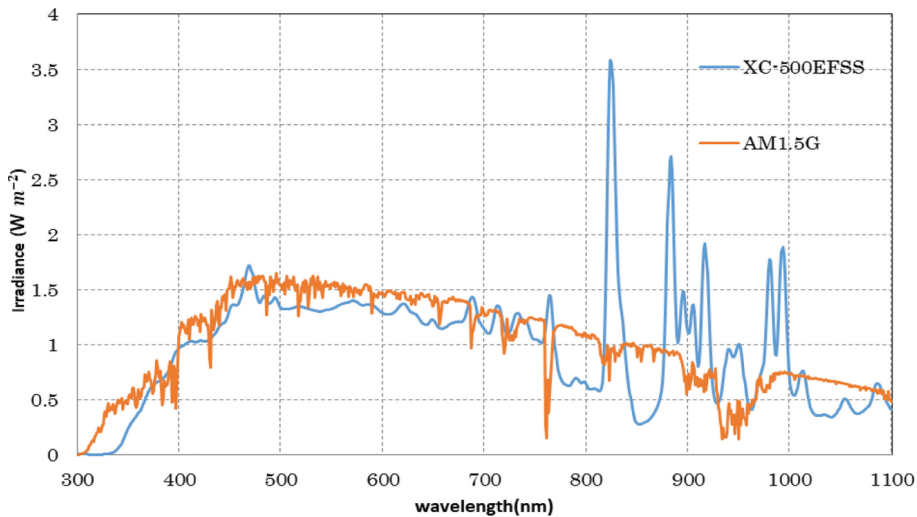
Item		Specification
Temperature-resistance characteristics	Resistance@ $0^{\circ}\text{C}$	8.12 k $\Omega$
	Resistance tolerance	$\pm 1.0\%$
	B constant	3390 K ( $0^{\circ}\text{C } 25^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
	B constant tolerance	$\pm 0.5\%$
Time constant ( $\tau$ )		0.18~0.20 sec (in stirred oil)
Dissipation factor ( $\delta$ )		0.4~0.5 mW $^{\circ}\text{C}^{-1}$ (in still air)
Operating Temp.		$-100^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$

**Table 2.** Uncertainty of the temperature sensor.

Uncertainty factors	Standard uncertainty
Correction uncertainty of reference thermometer ( $k = 1$ )	0.025°C
Temperature stability of chamber ( $k = 1$ )	0.001°C
Space temperature distribution of chamber ( $0.07/(\sqrt{3})^{-1}$ )	0.03°C
Repeatability of thermistor temperature sensor ( $0.35/3^{-1}$ )	0.1°C
Interpolation error of thermistor	0.06°C
Combined standard uncertainty, $U_c$	0.12°C
Expanded uncertainty, $U_{95}$ ( $k = 2$ )	0.24°C

**Table 3.** Specification of the solar simulator.

Item	Specification	Remark
Lamp power	500W Xenon	
Spectral match classification	A	KS C IEC 60904
Beam non-uniformity	B	KS C IEC 60904
Temporal instability	A	KS C IEC 60904



**Fig. 3.** Solar simulator spectrum compared with ASTM AM1.5G solar spectrum.

**2.3 온도센서의 일사영향 측정시스템 구성 및 측정 방법**

일사량에 따른 온도센서의 오차를 측정하기 위하여, 본 연구의 태양을 모사할 수 있는 솔라시뮬레이터는 International Electrotechnical Commission (IEC) 60904-9의 규정에 의거, 실험실에서의 요구 등급인 ‘BBB’ 이상의 제품으로 선정하였으며, 사양은 Table 3과 같이 ‘ABA’ 등급을 획득한 제품이다. 또한 태양 모듈의 표준 테스트 등급인 American Society for Testing and Materials (ASTM) AM1.5 (Air Mass)의 스펙트럼과 비교 결과 매우 높은 재현성을 나타냄을 확인하였다 (Fig. 3).

라디오존데 온도센서의 다양한 실험을 위하여, 두 개의 붐과 일사계 그리고 기준온도계가 장착된 테스트지그를 제작하였다. 테스트지그에 장착된 일사계는 온도센서에 전달되는 일사량을 측정하고, 기준온도계는 일사영향을 받지 않는 공간에 설치하여 실험에서의 기준온도로 사용된다(Fig. 4a).

첫번째 실험은 온도센서의 일사영향을 분석하는 것으로, 일사량과 온도변화에 따른 온도센서의 오차를 측정하기 위한 실험의 구성은 Fig. 4b와 같다. 라디오존데 온도센서가 장착된 테스트지그를 항온항습기 내부에 설치하여 고층대기에서의 온도를 모사하였으며, 항온항습기 측면의 구멍으로 솔라시뮬레이터에서 방

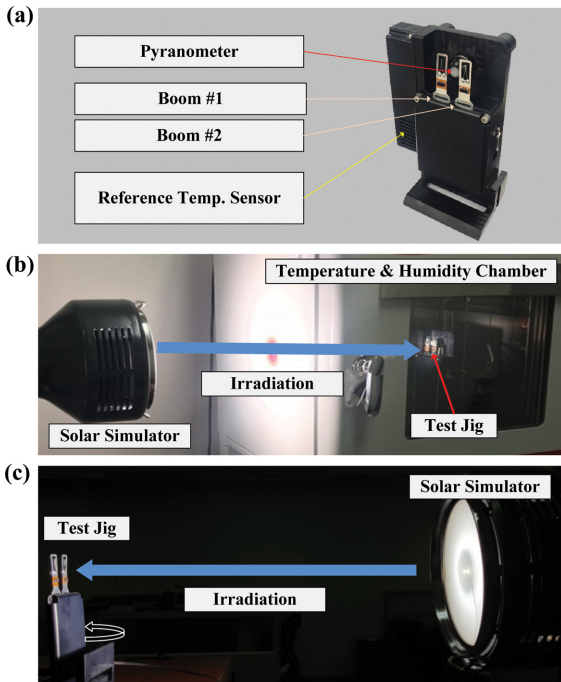


Fig. 4. (a) Shape of the test jig, (b) experiment on the effect of solar irradiation, (c) experiment on the temperature sensor movement.

사된 일사가 테스트지그까지 충분히 전달되도록 실험을 구성하였다. 솔라시뮬레이터에서 방사된 일사는 테스트지그의 일사계로 측정하고, 라디오존데 온도센서에서 측정된 온도와 테스트지그의 기준온도계의 측정된 온도를 비교하여 온도변화와 일사량 변화에 따른 일사영향을 분석하게 된다.

두번째 실험은 라디오존데 온도센서 움직임에 따른 일사영향 분석하는 것으로, 라디오존데와 태양과의 일사각의 변화에 따른 온도센서의 오차를 측정하기 위한 실험의 구성은 Fig. 4c와 같다. 라디오존데 온도센서가 장착된 테스트지그와 솔라시뮬레이터를 일정한 거리에 설치하여, 태양의 일사를 모사하였다. 라디오존데의 회전에 의한 온도센서 온도변화와 테스트지그의 기준온도계 온도를 비교하여, 라디오존데의 움직임으로 인한 일사영향을 분석하게 된다. 이 실험에는 라디오존데 상승하는 속도와 비슷한 환경으로 만들기 위해서, 송풍기를 이용하여  $5\sim 6\text{ m s}^{-1}$  풍속의 바람을 테스트지그로 향하게 환경을 구성하였다.

끝으로 최근 연구에서는 낮은 기압에서의 일사보정의 중요성을 강조하고 있기 때문에(Lee et al., 2016), 한국표준과학연구원의 고층기상모사시스템(Upper Air Simulator)를 이용하여 저기압에서의 일사영향 실험을



Fig. 5. Upper air simulator.

수행하였다. 고층기상모사시스템은 라디오존데 성능 시험을 위해 제작된 시스템으로 온도, 습도, 기압 그리고 일사량을 고층기상환경과 유사하게 구현한 시스템이다. 본 연구에서는 고층기상모사시스템을 이용한 실험에서는 기압은  $100\sim 7\text{ hPa}$  변화시키고, 온도는  $-60\sim +20^\circ\text{C}$  변화시켰으며, 솔라시뮬레이터를 통한 일사량은  $900\text{ W m}^{-2}$ 로 설정한 상태로, 온도센서의 일사영향을 측정하였다. Figure 5은 고층기상모사시스템의 전경이다.

본 실험에서는 온도 및 기압 그리고 일사량 변화에 따른 라디오존데 온도센서와 고층기상모사시스템의 기준온도계의 온도를 비교하여, 저기압에서의 온도와 일사량에 따른 일사영향을 분석하게 된다.

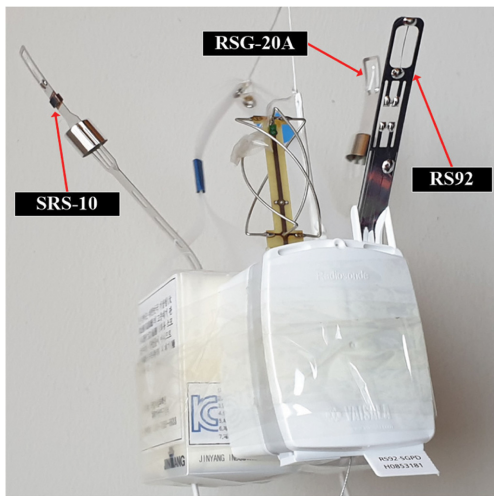
## 2.4 라디오존데 비교비양

실험실에서 수행된 여러가지 결과와 일사보정계수의 최종성능을 평가하기 위하여, 기존 라디오존데 제품과 본 연구에서 제작된 SRS-10 라디오존데를 동시에 비양하여 성능을 비교하였다. 성능비교를 위한 기준제품은 바이셀라(Vaisala)의 RS92 제품과 진양공업(Jinyang)의 RGG-20A 제품으로 2010년 세계기상기구(WMO)에서 주관한 제8회 라디오존데 국제비교에서 성능을 입증받은 것이다. 제품에 대한 정보는 Table 4와 같이, 온도센서 및 습도센서의 형태 그리고 2010년 수행된 라디오존데 국제비교에서의 시험등급(GRUAN Test Grade)을 표기하였다. 시험등급이 5.0인 경우에는 GRUAN에서 사용할 수 있는 등급이고, 시험등급이 4.0인 경우에는 Commission for Instruments and Methods of Observation (CI MO) Guide에서 권고한 기상 측정 및 관측의 요구사항은 만족하나 GRUAN에서 사용하기에는 몇몇 부족한 부분이 있다고 평가하고 있다(Nash et al., 2011). Table 4에서 바이셀라의 RS92 제품은 시험등급이 5.0으로써, 본 연구에서 개



**Table 4.** Specification of radiosondes.

	Company	Jinyang	Vaisala	SJMNC
	Radiosonde	RSG-20A	RS92	SRS-10
	Temp. sensor	NTC thermistor	Capacitive wire	NTC thermistor
	Humidity sensor	Thin film capacitor (E + E)	Thin film capacitor, heated twin sensor Polymer for low R.H.	Thin film capacitor (E + E)
GRUAN test grade	Temperature, Night; Height < 16 Km	4.75	5.0	-
	Temperature, Night; Height > 16 Km	3.75	5.0	-
	Temperature, Day; Height < 16 Km	4.5	5.0	-
	Temperature, Day; Height > 16 Km	3.5	5.0	-



**Fig. 6.** Shape of radiosondes for flying.

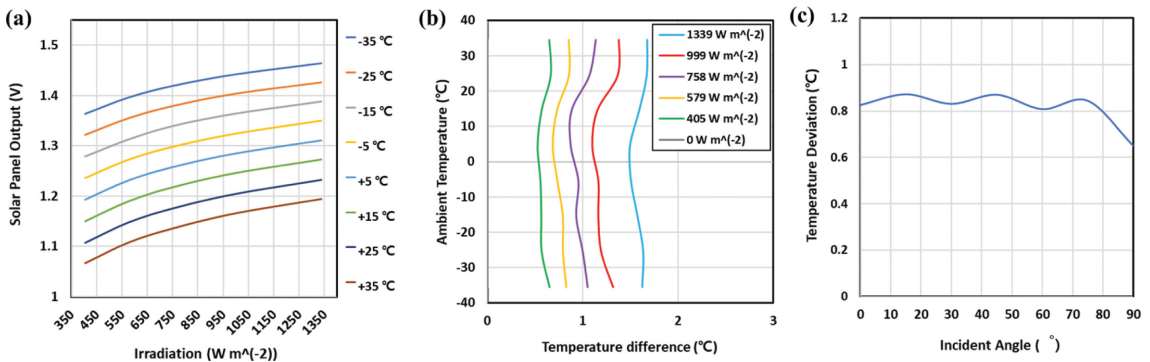
성능평가를 위해서 준비된 3개의 제품을 Fig. 6과 같이 라디오존데 상호간에 간섭이 없도록 120° 간격으로 장착하였다. 이렇게 구성된 라디오존데들을 규정된 비양속도를 지키도록 1000 g의 풍선에 매달아 사용하였고, 총 비양횟수는 6회로 낮시간(Day Time, 0000 UTC)와 밤시간(Night Time, 1200 UTC)에 각각 3회 비양을 수행하였다. 비양은 강원도 동해 인근에서 2019년 2월 18일부터 2월 22일까지 수행하였다.

**3. 측정결과 분석 및 일사보정 알고리즘**

**3.1 일사량에 따른 솔라패널의 특성 측정결과 및 분석**

본 연구에서의 일사보정기법은 솔라패널을 통한 일사량 측정을 기반으로, 솔라패널의 특성이 매우 중요하다. 솔라패널의 측정실험을 위하여, Fig. 4b와 같이 구성된 측정시스템에서 솔라시뮬레이터의 일사량을 1339 W m<sup>-2</sup>, 999 W m<sup>-2</sup>, 758 W m<sup>-2</sup>, 579 W m<sup>-2</sup>, 405 W m<sup>-2</sup> 그리고 일사량이 없는 0 W m<sup>-2</sup>로 설정하였다. 그리고 항온항습기의 습도는 30% 그리고 온도는 -40°C에서 +35°C까지 변화시켜 측정하였다. 일사

발된 라디오존데 SRS-10의 성능평가에 대한 기준으로 사용하였다.



**Fig. 7.** (a) Output of solar panel according to solar irradiation and ambient temperature, (b) temperature deviations due to solar irradiation and ambient temperature, (c) temperature deviations due to Radiosonde’s motion.

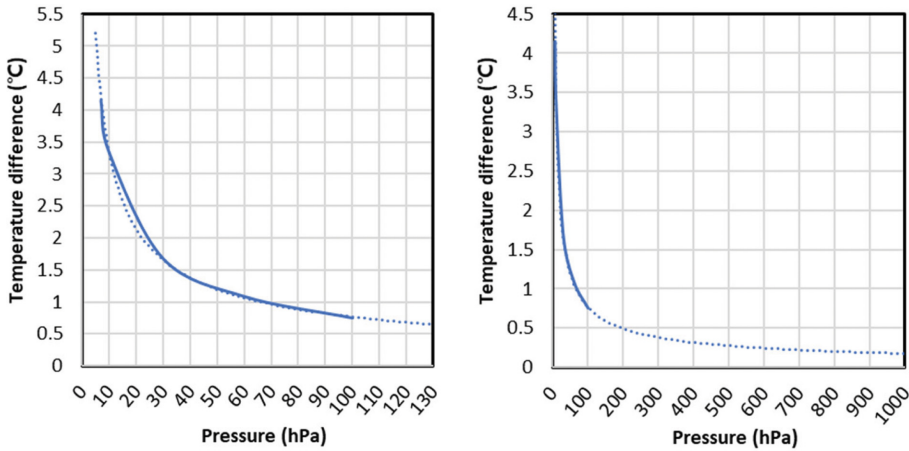


Fig. 8. Measurement result of temperature according to air pressure.

량에 따른 솔라패널에 대한 측정결과는 다음과 같다.

Figure 7a의 측정결과는 일사량과 온도에 따른 라디오존데 붐에 부착된 솔라패널의 출력전압으로, 일사량이 증가함에 따라서 증가하지만, 온도가 낮아짐에 따라 출력전압이 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 솔라패널의 일반적인 특징으로, 출력전압으로 일사량을 계산하기 위해서는 측정시점에서 온도 센서의 온도가 고려되어야 한다. 본 연구에서의 일사량은 일사보정수행 전에 측정된 온도를 사용하여 계산한다.

Figure 7b의 측정결과는 일사량과 온도에 따른 라디오존데 온도센서와 테스트지그 기준온도계와의 온도편차를 나타낸 것이다. 온도편차는 일사량이 증가함에 따라 비례적으로 증가하며, 일사량이 최대인 1339 W m<sup>-2</sup> 경우에는 평균 1.6°C였다. 일사량이 없는 경우에는 기준온도센서와 동일하다. 측정결과에 의하면 일사량에 따른 라디오존데 온도센서의 오차는 일사량이 증가함에 따라 정비례하는 것을 확인하였다.

### 3.2 라디오존데 회전에 따른 온도센서 오차 측정결과 및 분석

일반적으로 라디오존데가 비양중에는 다양한 움직임으로 인해 태양으로부터의 일사량이 변화된다. 이러한 변화에 대한 온도센서의 오차를 분석하고자, Fig. 4c와 같이 측정시스템을 구성하여 라디오존데 온도센서가 부착된 테스트지그를 회전시켜 기준온도센서와 라디오존데 온도센서의 오차를 측정하였다. 측정시 솔라시뮬레이터의 일사량은 1339 W m<sup>-2</sup>로 설정하였고, 실내 온도는 23°C, 습도는 60%였다.

측정결과는 Fig. 7c와 같으며, 동일한 일사량에서 라디오존데 온도센서가 포함된 테스트지그를 15° 단위

로 회전시키면서 기준온도계와의 편차를 보여주고 있다. 온도센서의 구조는 정면으로부터 좌측과 우측 모두 동일한 형태로 0~90° 회전시켜 측정하였다. 측정결과에서 온도편차의 최대값은 0.87°C이고, 최소값은 0.65°C으로, 최소값은 테스트지그와 솔라시뮬레이터가 이루는 각도가 90° 일 때로, Fig. 2의 라디오존데 붐에서 온도센서를 보호하는 측면판에 의해 일사량이 감소되는 것으로 확인되었다. 본 측정에서 최대값과 최소값의 차이는 0.22°C로, 라디오존데의 회전에 의한 일사량 변화에 의해 온도의 차이가 발생함을 확인하였다.

### 3.3 기압에 따른 온도센서 오차 측정결과 및 분석

한국표준과학연구원의 고층기상모사시스템을 이용하여, 기압과 일사량 변화에 따른 라디오존데 온도센서의 일사영향에 대하여 실험하였다. 고층기상모사시스템에서 솔라시뮬레이터의 일사량을 900 W m<sup>-2</sup>로 설정한 후, 기압과 온도변화에 따른 고층기상모사시스템의 기준온도와 라디오존데 온도센서의 측정온도의 편차를 측정하는 것으로, 측정실험에서는 기압을 7~100 hPa로 변화시키고, 온도는 -60~+20°C로 변화시켜 수행하였다. 더불어 실제 라디오존데의 비양에서의 상승속도를 구현하기 위해, 5~6 m s<sup>-1</sup> 풍속을 발생시켰다.

Figure 8은 고층기상모사시스템의 기준온도와 라디오존데 온도센서의 온도편차를 측정한 결과로, 실선은 실제 측정된 것이며, 점선은 측정된 결과를 확장한 것으로 실제 라디오존데 비양에서 적용하기 위한 것이다. 측정결과 라디오존데 온도센서의 일사영향으로 기압 7 hPa에서는 4.15°C, 기압 100 hPa에서는 0.75°C 정도의 편차가 측정되었다. 측정된 편차를 기준으로 기압 1000 hPa 확장하였을 때, 온도편차는 0.18°C로 예상된다. 본 실험은 라디오존데가 상승하는

**Table 5.** Compensation factor of solar irradiation.

Temperature (°C)	Solar irradiation power (W m <sup>-2</sup> )					
	1339	999	758	579	405	0
-35.585	1.625	1.320	1.055	0.827	0.652	0.000
-25.536	1.635	1.195	1.004	0.792	0.572	0.000
-15.501	1.575	1.165	0.935	0.791	0.567	0.000
-5.515	1.506	1.166	0.958	0.733	0.559	0.000
4.528	1.496	1.103	0.877	0.683	0.531	0.000
14.599	1.593	1.155	0.886	0.728	0.570	0.000
24.516	1.672	1.367	1.075	0.854	0.664	0.000
34.568	1.677	1.379	1.141	0.852	0.649	0.000
Deviation average	1.60	1.23	0.99	0.78	0.60	0.00

동안 변화하는 기압에 따라 온도센서가 변화되는 것을 실험으로 측정된 것으로, 기압이 낮아질수록 일사 영향으로 인한 온도센서의 편차가 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 낮은 기압에서의 희박해진 공기는 온도센서의 대류에 의한 열 전달을 감소시키기 때문이다(Luers, 1990). 특히 100 hPa 이하부터 낮은 기압에서는 태양의 일사 영향으로 인한 온도센서가 측정오차가 급격히 증가하는 것을 확인하였고, 고층대기에서의 온도측정에서는 일사보정이 필수적이라는 것을 확인되었다. 본 실험결과는 라디오존데의 관측소프트웨어의 일사보정 알고리즘에 적용하게 된다.

**3.4 일사량에 따른 일사보정계수**

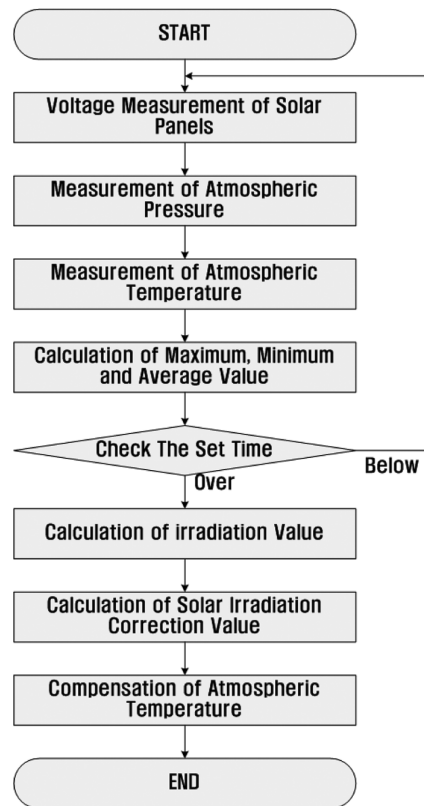
솔라패널에 관한 실험과 일사량에 따른 온도센서의 오차 실험을 통하여, 본 연구에서 제작된 라디오존데 온도센서와 테스트지그의 기준온도센서와의 편차를 본 연구에서의 일사보정계수라고 표현하고 Table 5와 같이 정리하였다.

Table 5에서 솔라출력(Solar Irradiation Power)은 솔라시뮬레이터의 일사량으로 테스트지그의 일사계로 측정된 일사량이고, 온도는 테스트지그의 기준온도계의 온도이다. 각각의 온도에서 다양한 일사량에 대한 기준온도계와 라디오존데 온도센서의 편차를 표시한 것이다. 측정결과, 편차는 온도변화에 큰 영향을 받지 않았으며, 일사량의 변화에 비례하며 편차가 증가하였다. 일사보정계수는 일사량에 대한 보정계수로 실제 비양에서 적용하고, 유사한 온도센서에서 활용이 가능하다.

**3.5 솔라패널을 이용한 일사보정 알고리즘**

실험실에서의 여러가지 실험으로 라디오존데 온도센서의 일사영향을 분석한 결과와 실제 비양을 통해 검증한 일사보정 알고리즘은 Fig. 9와 같다.

본 연구에서의 일사보정 알고리즘은 라디오존데에



**Fig. 9.** Algorithm of compensation for the solar radiation effect using solar panel.

부착된 솔라패널의 출력전압, 기압센서의 기압 그리고 온도센서에서 측정된 대기온도를 이용한다. 이러한 요소들은 분당 10회 이상의 속도로 이루어지며, 일정시간 동안 측정된 값의 평균, 최대, 최소를 계산하여 알고리즘에 적용된다. 솔라패널 출력전압과 대기온도로 일사량을 계산하고, 계산된 일사량과 기압 그리고 대



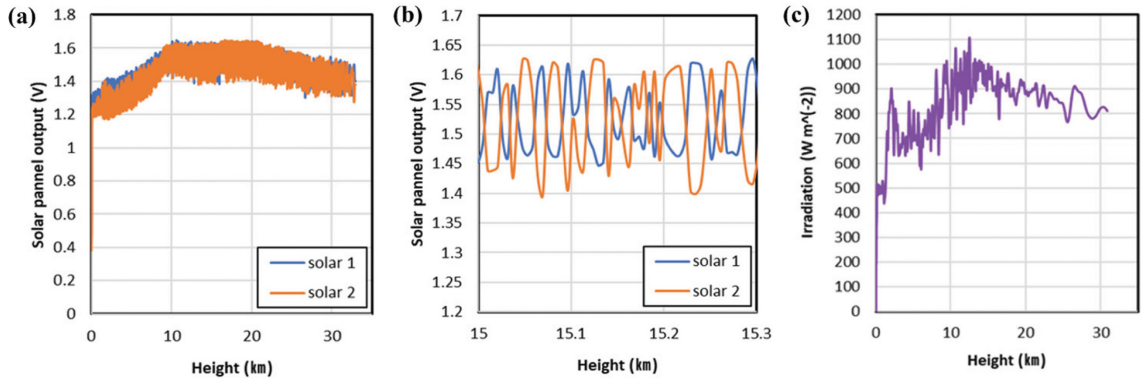


Fig. 10. (a, b) Measurement results of solar panel during the flying, (c) calculation results of solar irradiation.

기온도를 통하여 일사보정값(Solar Irradiation Correction Value)을 계산한다. 일사보정값의 계산시, 본 연구에서 제시한 일사보정계수와 기압에 따른 온도편차를 적용한다.

끝으로 일사보정값으로 대기온도를 보정하는 것으로 한번의 측정에 대한 알고리즘이 종료된다. 본 알고리즘은 고층대기관측을 위한 라디오존데 시스템의 관측소프트웨어에 포함된 것으로, 라디오존데 비양시 실시간으로 수행된다.

#### 4. 라디오존데 비교비양 및 성능분석

##### 4.1 일사량 측정 및 분석

라디오존데의 일사량은 봄에 부착된 2개의 솔라패널의 출력전압을 측정하여 일사량을 계산한다.

Figures 10a, b는 낮시간에 비양한 라디오존데의 솔라패널 측정값이다. 측정결과에서 초기 설정 제외하면 대부분 솔라패널의 출력전압이 높게 보이며, 두개의 솔라패널의 출력전압이 교차하면서 최대값을 보이고 있다. 이 현상은 라디오존데 봄에 양면에 부착된 솔라패널의 출력전압이 일사량의 변화에 의해 발생하는 것으로, 라디오존데가 실제 비양에서는 수많은 회전하는 것을 확인하였다. Figure 10b는 일부 구간을 확대한 것으로 봄의 양면에 부착된 솔라패널 1 (Solar 1)과 솔라패널 2 (Solar 2)의 출력전압이 교차하는 것을 명확히 볼 수 있다.

솔라패널들의 출력전압으로 계산된 일사량은 Fig. 10c와 같으며, 전체 평균 일사량은  $851 \text{ W m}^{-2}$ , 최대 일사량은  $1110 \text{ W m}^{-2}$ 로 일사량의 변화는 기상환경 변화 및 라디오존데의 움직임으로부터 기인한 것이다. 본 연구에서 솔라패널을 이용한 일사량 계산 결과는 기존의 태양 일사량에 대한 측정과 유사하였다(Philipona et al., 2012). 계산된 일사량은 라디오존데 온도센서

의 일사보정 알고리즘에 적용하였다.

##### 4.2 밤시간(Night Time)의 비교비양 결과 및 분석

밤시간의 비교비양의 결과는 총3회로, 바이셀라의 RS92 제품과 진양공업의 RGG-20A 제품 그리고 본 연구에서 제작된 SRS-10를 동시에 비양하였으며, 결과 및 분석은 전체 비양 중에 3개 제품의 자료의 손실이 적은 것을 사용하였다. 비교비양 분석에서는 대상제품간의 비양시간을 기준으로 정렬하여 결과를 비교하였다(Fitzgibbon and Facundo, 2003).

Figure 11a는 밤시간의 라디오존데 온도 측정결과로, SRS-10(0)는 본 연구에서 제작된 라디오존데 온도센서의 일사보정 수행하기 전의 원시자료이다. RS92와 SRS-10(0) 그리고 RSG-20A의 측정결과는 유사한 경향을 보이고 있으나, 라디오존데의 고도가 상승하면서 제품간의 측정온도의 편차가 나타났다.

Figure 11b는 바이셀라의 RS92를 기준으로 본 연구에서 제작된 SRS-10, RSG-20의 편차를 보여주고 있다. 본 연구에 제작된 SRS-10(0)는 솔라패널에서 검출된 일사량이 거의 없어, 일사보정을 수행하지 않은 상태로 SRS-10(0)의 측정값에서 15 km 근방에서의 데이터 소실을 제외하면, 기준인 RS92와의 편차는  $0.057^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 결과적으로 밤시간의 라디오존데 온도측정에서는 일사량이 거의 없어, 일사보정이 필요하지 않음을 확인하였다.

##### 4.3 낮시간(Day Time)의 비교비양 결과 및 분석

낮시간의 비교비양의 결과는 총3회로, 바이셀라의 RS92 제품과 진양공업의 RGG-20A 제품 그리고 본 연구에서 제작된 SRS-10를 동시에 비양하였으며, 결과 및 분석은 전체 비양 중에 3개 제품의 자료의 손실이 적은 것을 사용하였다.

Figure 12는 낮시간의 라디오존데 온도 측정결과이

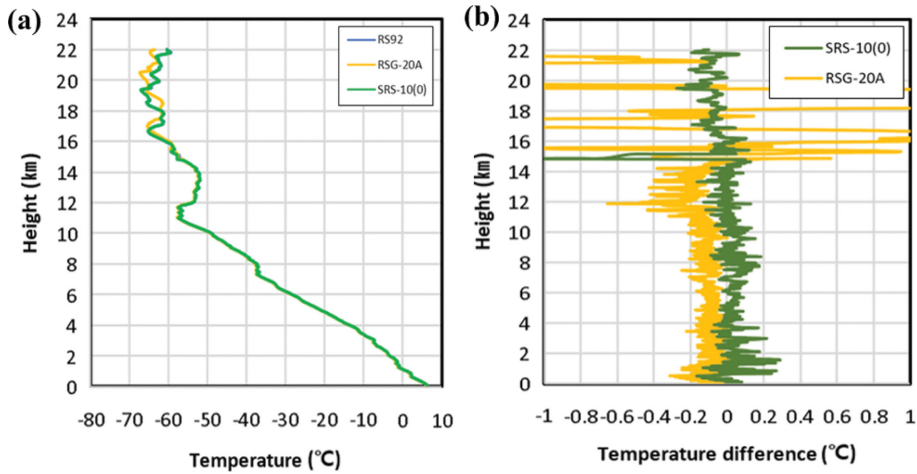


Fig. 11. (a) Measurement results of the temperature of radiosondes (night time), (b) temperature deviation profile of night time.

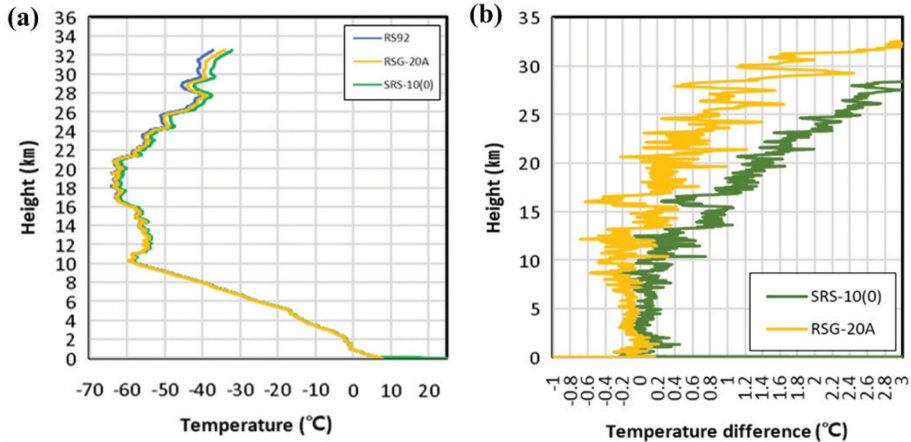


Fig. 12. (a) Measurement results of the temperature of radiosondes (day time), (b) temperature deviation profile of day time (original).

다. 그림에서의 SRS-10(0)는 본 연구에서 제작된 라디오존데 온도를 측정 한 것으로, 일사보정 수행하기 전에 원시자료이다. RS92, RGG-20A 그리고 SRS-10(0)의 측정결과는 유사한 경향을 보이고 있으나, 고도가 상승하면서 제품간의 측정온도의 편차가 증가하고 있다. Figure 12b는 바이셀라의 RS92를 기준으로 RGG-20A와 SRS-10(0)의 편차를 나타낸 것으로, 고도가 상승하면서 편차가 증가하는 현상을 보여 주고 있으며, 10 km 이상에서 편차가 증가하는 추세이다. 이 현상은 기압 변화에 따른 것으로, 고도 33 km에서 최대편차는 3.7°C로 나타났다. 측정결과를 통해, 라디오존데 온도센서에서는 일사보정이 필수적인 요소를 확인하였다.

본 연구에서의 일사보정의 첫번째 단계는 실험실에

서 획득한 일사보정계수를 적용하고, 두번째 단계는 기압에 따른 온도센서 오차측정결과를 적용하게 된다. Figure 13a는 본 연구에서 제작된 SRS-10 라디오존데에 첫번째 단계의 일사보정계수를 적용하기 전(SRS-10(0))과 적용 후(SRS-10(1))의 편차를 비교한 것으로, SRS-10(1)는 일사보정계수의 가중치를 축소하여 적용된 것이다. 여기서 기준은 바이셀라의 RS92 라디오존데이다.

Figure 13a에서 일사보정계수를 적용하기 전의 SRS-10(0)의 절대값 평균 편차는 0.62°C이고, 적용 후의 SRS-10(1)의 절대값 평균 편차는 0.52°C로, 실험실에서 산출된 일사보정계수를 통한 개선효과는 0.1°C로 나타났다. 결과적으로 실험실에서 산출된 일사보정계수의 적용으로 고도 10 km 이하에서는 온도센서의 일

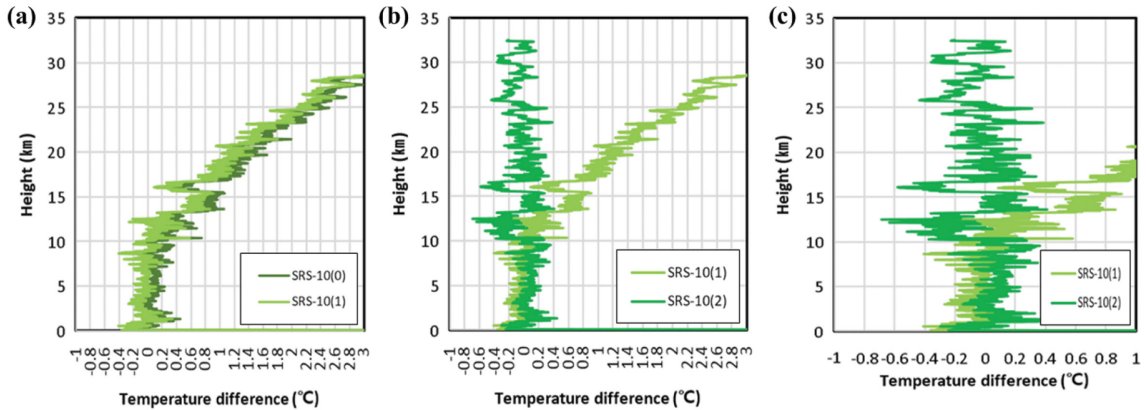


Fig. 13. Temperature difference profile of day time (1<sup>st</sup> correction (a), 2<sup>nd</sup> correction (b, c)).

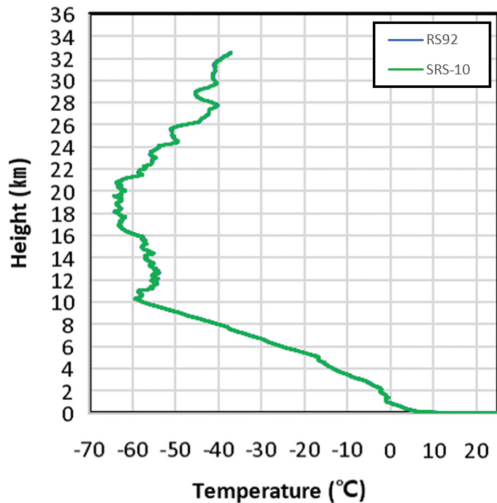


Fig. 14. Temperature profile of day time (SRS-10 & RS92).

사보정 효과가 있으나, 고도 10 km 이상의 저기압에서는 본 연구의 일사보정계수만으로는 한계가 있었다. 이러한 한계를 극복하기 위해 두번째 단계로, 기압에 따른 온도센서 오차의 실험결과를 적용하였다.

Figures 13b, c는 첫번째 단계와 두번째 단계 일사보정을 적용한 결과이다. Figure 13의 결과에서 첫번째 단계의 일사보정 SRS-10(1)의 절대값 평균 편차는 0.52°C이고, 두번째 단계의 일사보정 SRS-10(2)의 절대값 평균 편차는 0.17°C이다. 첫번째와 두번째 단계의 일사보정을 통하여, 온도측정 기준인 바이셀라의 RS92와의 절대값 평균 편차 온도를 0.62°C에서 0.17°C로 감소할 수 있었다.

Figure 14는 본 연구에서 제작하여 일사보정을 수행한 SRS-10과 바이셀라의 RS92 라디오존데의 낮시간의 온도측정 결과이다. 그 결과 바이셀라의 RS92와

거의 동일한 온도측정 결과를 보였으며, 전체 2시간 동안의 비양 측정구간에서 고도 32.97 km까지 상승하여 최저 기압은 7.3 hPa로 측정되었으며, 측정시 온도는 22.8°C로 시작으로 최저온도는 -63.8°C를 기록하였다. 전체 측정구간에서 바이셀라의 RS92와의 온도 편차는 0.17°C로, 라디오존데 국제비교 결과와 비교하였을 때 GRUAN에서의 시험등급 5.0을 획득할 수 있는 수준이라 사료된다.

### 5. 결론 및 토의

본 연구는 고층대기관측에 필수적인 라디오존데 온도센서의 일사보정에 관한 것으로 기존의 일사보정 기법들과 달리, 라디오존데에 부착된 솔라패널을 이용하여 직접 태양의 일사량을 측정하여 보정하는 기법이다. 제시한 기법의 일사보정을 위하여, 솔라패널의 특성을 확인하는 실험과 라디오존데 온도센서의 일사영향에 대한 실험 그리고 낮은 기압에서 온도와 일사량에 따른 온도센서에 대한 실험을 통해 온도센서 오차를 측정하였다.

실험결과, 항온항습기에서의 일사량에 따른 온도센서의 오차는 일사량이 증가함에 따라 비례적으로 증가하여, 일사량이 최대인 1339 W m<sup>-2</sup> 경우의 평균 오차는 1.6°C로 측정되었다. 측정된 결과를 토대로 본 연구에 제작된 라디오존데 SRS-10의 일사보정계수를 정리하였다. 그리고 한국표준과학연구원의 고층기상 모시시스템으로 기압에 따른 온도센서의 오차를 측정된 결과, 기압 100 hPa에서는 0.75°C, 기압 7 hPa에서는 4.15°C로, 100 hPa 이하의 기압에서는 태양의 일사영향으로 인한 온도센서 측정오차가 급격히 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 실험결과 토대로 Fig. 14와 라디오존데 온도센서의 일사보정 알고리즘을 정립하고, 바이셀라의 RS92, 진양공업의 RSG-20A 그리고

본 연구에서 제작된 SRS-10 라디오존데의 비교비양을 통해서 성능평가를 수행하였다.

비교비양을 통한 성능평가 결과, 본 연구에서 제작된 라디오존데 SRS-10는 밤 시간 동안의 비양에서는 바이셀라의 RS92와의 온도 편차가  $0.057^{\circ}\text{C}$ 이며, 낮 시간 동안의 비양에서는  $0.17^{\circ}\text{C}$ 로, 세계기상기구(WMO) 산하 GRUAN에서의 시험등급이 5.0을 획득할 수 있는 수준으로 사료된다.

본 연구에서의 일사영향을 분석과 솔라패널을 이용한 일사보정을 위해 실험실에서의 실험과 비교비양을 수행하여, 일사보정계수와 일사보정알고리즘을 제시하였다. 그러나 연구 초기에 제시한 일사보정계수는 100 hPa 이하 낮은 기압에서의 적용은 한계가 있었다. 그 원인은 초기 연구에서 기압에 대한 고려를 하지 못한 것으로, 향후 연구에서는 기압을 고려한 일사보정계수를 정립할 계획이다. 그리고 선행연구들에서 지적한 대기 환경변화와 예상치 못한 움직임으로 인한 일사량 변화에 대한 온도센서의 오차는 솔라패널을 이용한 일사량 측정으로, 기존의 복잡한 소프트웨어적인 일사보정기법보다 간단하게 오차를 감소하였다. 향후 본 연구팀은 본 연구를 기반으로 라디오존데 온도센서의 일사영향 분석과 일사보정 기법을 고도화시켜 라디오존데 국제비교비양 대회에 참석할 예정이다.

### 감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 2018년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(10067387).

### REFERENCES

- Fitzgibbon, J., and J. Facundo, 2003: Developing a technique for verifying radiosonde solar radiation correction algorithms. American Meteorological Society, 8.2 [Available online at <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/54317.pdf>].
- GCOS, 2007: GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN): Justification, requirements, siting and instrumentation options. World Meteorological Organization GCOS-112 WMO/TD No. 1379, 42 pp.
- \_\_\_\_\_, 2013: The GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN) GUIDE. World Meteorological Organization Wigos Tech. Rep. No. 2013-03, GCOS-171, 116 pp.
- Luers, J. K., 1990: Estimating the temperature error of the radiosonde rod thermistor under different environments. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **7**, 882-895.
- \_\_\_\_\_, 1997: Temperature error of the Vaisala RS90 radiosonde. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **14**, 1520-1532.
- Lee, S.-W., B. I. Choi, J. C. Kim, S.-B. Woo, S. Park, S. G. Yang, and Y.-G. Kim, 2016: Importance of air pressure in the compensation for the solar radiation effect on temperature sensors of radiosondes. *Meteor. Appl.*, **23**, 691-697, doi:10.1002/met.1592.
- \_\_\_\_\_, E. U. Park, B. I. Choi, J. C. Kim, S.-B. Woo, S. C. Park, S. G. Yang, and Y.-G. Kim, 2018: Dual temperature sensors with different emissivities in radiosondes for the compensation of solar irradiation effects with varying air pressure. *Meteor. Appl.*, **25**, 49-55, doi:10.1002/met.1668.
- MTIE, 2017: 2nd Report of Development of High Speed and High Precision Radiosonde. Ministry of Trade, Industry & Energy, pp. 58 (in Korean).
- Nash, J., 2015: Measurement of upper-air pressure, temperature and humidity. World Meteorological Organization IOM Rep. No. 121, 87 pp.
- \_\_\_\_\_, T. Oakley, H. Vömel, and L. Wei, 2011: WMO intercomparison of high quality radiosonde systems. World Meteorological Organization WMO/TD No. 1580, IOM Rep. No. 107, 238 pp.
- Philipona, R., A. Kräuchi, and E. Brocard, 2012: Solar and thermal radiation profiles and radiative forcing measured through the atmosphere. *Geophysical Research Letters*, **39**, L13806, doi:10.1029/2012GL052087.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, G. Romanens, G. Levrat, P. Ruppert, E. Brocard, P. Jeannot, D. Ruffieux, and B. Calpini, 2013: Solar and thermal radiation errors on upper-air radiosonde temperature measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **30**, 2382-2393, doi:10.1175/JTECH-D-13-00047.1.
- Ruffieux, D., and J. Joss, 2003: Influence of radiation on the temperature sensor mounted on the Swiss radiosonde. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **20**, 1576-1582.
- Scmidlin, F. J., J. K. Luers, and P. D. Huffman, 1986: Preliminary Estimates of Radiosonde Thermistor Errors. NASA Tech. Rep. NASA-TP-2637, 19 pp.