

분류식 습도 발생 장치 개발 및 라디오존데 습도센서 저온 효과 보정에 활용 연구

장은정^{1,2} · 이영석¹ · 최병일¹ · 최윤석² · 이상욱^{1,3,+}

Development of a divided-flow humidity generator and its use for studying low-temperature effects on radiosonde humidity sensors

Eun-Jeong Jang^{1,2}, Young-Suk Lee¹, Byung-Il Choi¹, Yoonseuk Choi², and Sang-Wook Lee^{1,3,+}

Abstract

Humidity is an important physical quantity that is closely related with the quality of everyday life as well as the quality control of products in various industries. Here, we have developed a divided-flow type humidity generator of which humidity generation is faster than the saturator-based humidity generator in ppm level. The operation principle of the divided-flow humidity generator is first introduced. Then, the performance of the divided-flow humidity generator is verified by testing the radiosonde humidity sensor at low temperature. As a result, the humidity generated from the divided-flow humidity generator is consistent with the saturator-based precision humidity generator within 1.6% relative humidity in the range from 10% to 40% at -45 °C. It is also found that the radiosonde humidity sensor shows measurement errors by 3% - 5% at -45 °C when it is only calibrated at room temperature. The response times of radiosonde humidity sensor using the divided-flow humidity generator are between about 2 and 9 minutes, whereas those by the saturator-based humidity generator are about 20 minutes. In this regard, the divided-flow humidity generator has a merit in terms of fast humidity changes for the calibration of radiosonde humidity sensors at low-temperatures.

Keywords : Humidity generator, Radiosonde, Humidity sensor.

1. 서 론

습도 제어는 일상생활에서 쾌적한 실내 환경을 유지하는데 중요할 뿐만 아니라 식품, 가스, 반도체 등 다양한 산업 분야에서 생산 품질을 안정적으로 관리하는데 필수적이다. 특히 공정 가스의 수분 농도가 ppm (part per million) 및 그 이하로 관리되어야 하는 산업군에서는 불필요한 수분 흡착으로 인해 제품의 품질과 안정성이 저하될 우려가 있다. 예를 들어, 반도체 및 디

스플레이 같은 첨단 산업에서 가스 내 수분은 미세 패터닝 공정 시 불량률 유발할 수 있으며, 생산된 제품 내부에 흡착되거나 투과된 수분은 전자 소자의 수명을 단축시킬 수 있다 [1,2].

또한 대기의 습도는 일기 및 기후 변화 예측 모델의 초기 입력값으로 작용하므로 상시적으로 측정하고 있다. 그 중에 고층 대기의 온습도를 측정하기 위해서는 라디오존데가 사용된다. 라디오존데는 풍선에 매달려 고도 35 km까지 상승하며 온도, 습도, 기압, 풍향, 풍속 등을 측정하여 지상으로 송신하는 고층 기상 관측 장비이다 [3]. 라디오존데를 이용한 측정은 인공 위성 및 유인, 무인 항공기를 이용한 여러 측정 기술 중에서 가장 정확하다고 알려져 다른 측정값을 보정하기 위한 기준으로 쓰이고 있다 [4]. 하지만, 기온이 -70 °C 이하로 떨어지는 고층 대기의 환경에서 발생하는 습도센서의 특성 변화에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 라디오존데를 이용한 습도 측정의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 지상에서 고층 대기의 저온 및 저습과 유사한 환경을 만들어 습도센서를 테스트하는 것이 필수적이다 [5,6].

습도와 관련된 센서의 교정이나 제품의 성능 테스트를 하기 위해서는 테스트하고자 하는 센서와 제품이 들어있는 시험조 내부에 원하는 습도를 정확하게 발생시켜야 한다. 특히, ppm 수준의 저습을 정확하게 발생하기 위해서는 주로 포화조 기반의 정밀 습도 발생 장치가 많이 사용된다. 이 발생 장치의 작동 원

¹ 한국표준과학연구원 물리표준본부(Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

267 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

² 한밭대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Hanbat National University)

125 Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Korea

³ 과학기술연합대학원대학교 측정과학과(Science of Measurement, University of Science and Technology)

217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

⁺Corresponding author: sangwook@kriss.re.kr

(Received: Jun. 14, 2021, Revised: Jul. 9, 2021, Accepted: Jul. 14, 2021)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

리는 온도와 압력이 제어되는 포화조 내부로 가스가 입력되면 포화조 속의 물 또는 얼음 위를 지나가며 점차 수증기로 포화되는 현상에 기반한다. 포화수증기압은 온도와 압력의 함수이므로 포화조 내부의 온도와 압력을 제어함으로써 가스 내부의 절대 수분량을 정밀하게 제어할 수 있다 [7,8]. 이와 같이 절대 수분량이 잘 정의된 가스를 일정한 온도로 유지되고 있는 시험조로 보내어 센서나 제품을 테스트할 수 있다. 포화조 기반의 정밀 습도 발생 장치는 정확도가 높다는 장점이 있지만, 액체 항온조에 담긴 포화조의 온도를 변화하고 안정시켜야 하므로 습도 발생에 긴 시간이 소요된다는 단점이 있다. 포화조 온도의 변화 없이 압력 변화만으로도 빠르게 습도를 변화시킬 수 있지만, 수동으로 밸브를 조절하며 압력의 변화를 관찰해야 하므로 번거롭다 [9].

본 논문에서는, 포화조 기반의 정밀 습도 발생 장치보다 정확도는 낮지만 ppm 수준의 습도를 빠르게 발생시킬 수 있는 분류식 습도 발생 장치를 개발하여 저온에서의 라디오존데 습도 센서 테스트에 응용하였다. 분류식 습도 발생 장치의 작동 원리는 수증기가 포화된 가스와 건조 가스를 정해진 비율로 혼합하여 원하는 습도를 빠르게 발생시키는 방식이다. 이와 같은 분류식 습도 발생 장치로부터 발생된 습도의 정확도를 확보하기 위해 포화조 기반의 정밀 습도 발생 장치와 비교하여 그 차이를 보정하였다. 이렇게 교정된 분류식 습도 발생 장치를 활용하여 고층 대기를 모사한 저온 환경에서 라디오존데 습도센서를 테스트했다. 라디오존데 습도센서 측정값을 통해 분류식 습도 발생 장치의 정확도와 습도 발생 속도를 확인하였다. 이로써, 라디오존데 습도센서 교정을 위해 고가의 정밀 습도 발생 장치 대신 저가의 분류식 습도 발생 장치의 사용이 가능하다는 것을 확인하였다.

2. 연구 방법

2.1 실험 장치 구성

실험에 사용된 습도 발생 장치와 라디오존데 시험조의 개념도를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 미니 포화조(Mini saturator)를 포함하고 있는 분류식 습도 발생 장치(왼쪽 상단)와 열교환기(Heat exchanger) 및 포화조(Saturator)를 갖는 정밀 습도 발생 장치(왼쪽 하단)가 병렬로 연결되어 발생 습도값을 비교할 수 있도록 구성했다. 각 발생 장치에서 발생된 수분량은 라디오존데 시험조의 가스 출력단에 위치한 냉각 거울 노점계(Chilled-mirror hygrometer)로 측정해 서로 비교했다. 실험에 사용된 입력 가스는 수십 ppb(part per billion) 수준의 수분량을 갖는 건조한 질소로서 액체질소의 기화를 통해 발생시켰다. 가스의 유량을 제어하기 위해서 두 개의 질량 유량 제어기(Mass flow controller, MFC)가 사용되었다.

2.2 실험 장비

2.2.1 분류식 습도 발생 장치

본 연구에서 개발한 분류식 습도 발생 장치는 수증기가 포화된 가스와 건조 가스의 혼합을 통해 원하는 습도를 발생시키는 장치이다. 분류식 습도 발생 장치는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 하단의 물이 담긴 미니 포화조(Mini saturator), 수증기로 포화된 가스의 출구 세 개(밸브로 선택) 및 이 포화 가스와 섞이기 위한 건조 가스 입력단(Dry gas in)과 혼합된 가스의 최종 출력단(Mixed gas out)으로 이루어져 있다.

미니 포화조를 포함한 분류식 습도 발생 장치의 온도는 순환식 열교환 장치를 이용해 제어하였다. 따라서 미니 포화조로 입력된 건조 가스는 포화조 안의 온도와 압력에 따라 최대로 갖을 수 있는 수증기압인 포화수증기압(e_{sat})을 갖게 된다. 이 포화수증기압을 포화조 안에서 측정된 대기압으로 나누어 수분 농도(C_{sat})를 구하였다. 예를 들어, 포화조 안이 대기압이고 온도가 20 °C 라면 대략 23000 ppm의 수분 농도를 갖는다. 사용한 건조 가스의 농도(C_{dry})가 대략 0.02 ppm 수준이므로 이는 매우 큰 수분량이다. MFC 1과 2를 사용하여 각 포화 가스의 유량(F_{sat})과 건조 가스의 유량(F_{dry})을 제어하여 두 가스의 혼합 비율을 통해 다음 식(1)과 같이 가스의 최종 수분 농도(x_w)를 계산하였다.

$$x_w = C_{sat} \cdot F_{sat} / (C_{sat} \cdot F_{sat} + C_{dry} \cdot F_{dry}) \quad (1)$$

건조 가스의 유량(F_{dry})은 5 L/min로 유지하였고, 포화 가스의 유량(F_{sat})은 0 - 20 cc/min 범위에서 조절하여 고층 대기의 습도를 모사한 ppm 수준의 수분량을 발생시킬 수 있었다. 식 (1)은 LabVIEW 소프트웨어를 이용해 측정 프로그램에 적용하였다.

2.2.2 포화조 기반 정밀 습도 발생 장치

포화조 기반 정밀 습도 발생 장치는 Fig. 1(c)와 같이 항온조(Bath)안에 담긴 열교환기(Heat exchanger)와 포화조(Saturator)로 구성되어 있다. 발생 장치로 입력된 건조 가스는 먼저 열교환기를 통과하며 항온조의 설정된 온도로 맞춰진 후 포화조로 들어간다. 포화조 안에는 여러 개의 부판(Saturator plate)이 있는데, 이 부판에는 흠이 새겨져 있어 입력된 가스가 따라 흐르게 된다. 이 흠에는 온도에 따라 물이나 얼음이 채워져 있어 부판 위로 흐르는 건조 가스는 해당 온도와 압력에 따라 점차 수증기로 포화된다. 이 포화수증기압을 이용해 가스의 수분 농도(x_w)를 다음 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$x_w = [e_{sat}(T_s) \cdot f(T_s, P_s)] / P_s \quad (2)$$

여기서 T_s 와 P_s 는 각각 포화조의 온도와 압력, $e_{sat}(T_s)$ 는 포화조의 온도에 따른 물 또는 얼음에 대한 포화수증기압을 나타내

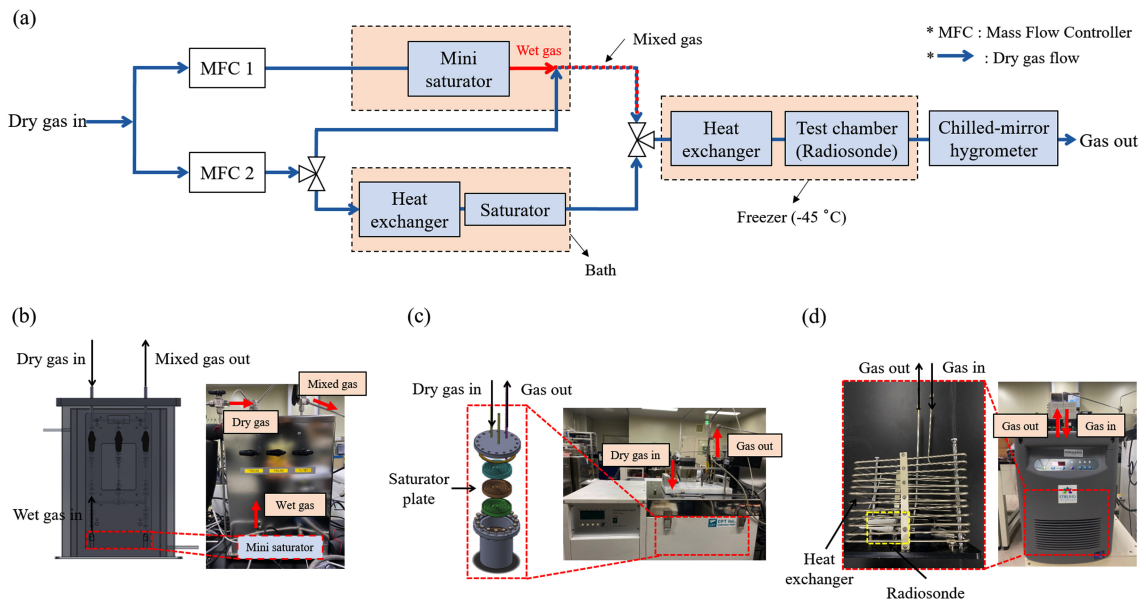


Fig. 1. (a) Schematic diagram of humidity generators and test chamber of radiosonde humidity sensor, (b) divided-flow humidity generator, (c) saturator-based precision humidity generator, and (d) radiosonde test chamber.

며, $f(T_s, P_s)$ 는 가스의 비이상기체적 행동에 대한 보정을 위한 부가 계수이다. 포화수증기압은 국제 온도 표준(ITS-90)에 입각하여 업데이트 된 Wexler의 방정식을 사용하였고 [10], 부가 계수는 Greenspan의 공식을 사용하였다 [11]. 포화조로 유입되는 건조 가스의 유량은 MFC 2를 통해 0.5 L/min으로 유지되었다. 식 (2)는 LabVIEW 소프트웨어를 이용해 측정 프로그램에 적용하였다.

2.2.3 라디오존데 시험조와 냉각 거울 노점계

습도 발생 장치로부터 발생된 수분 농도가 잘 정의된 가스는 Fig. 1(d)와 같이 냉동고(Freezer)에 담긴 라디오존데 시험조로 들어간다. 먼저 열교환기(Heat exchanger)를 거치며 냉동고 안의 온도로 맞춰진 후 라디오존데 센서가 설치된 시험조로 들어간다. 라디오존데 습도센서는 습도에 따라 정전용량이 변한다. 이를 라디오존데 본체에 있는 ADC(Analog Digital Converter) 칩을 이용하여 측정한다. 시험조 출구에는 냉각 거울 노점계(373LX, RH systems)가 설치되어 있어 시험조로부터 나오는 습공기의 수분 농도를 측정한다. 시험조 안의 상대 습도(Relative humidity, RH)는 시험조 안의 온도(T)와 압력(P)에 따라 결정되는 포화수증기압, 그리고 유입되는 현재의 수분 농도(x_w)에 따라 다음 식(3)에 의해 결정된다.

$$RH = x_w \cdot P_f / [e_{sat}(T) \cdot f(T, P)] \times 100 (\%) \quad (3)$$

식 (3)은 LabVIEW 소프트웨어를 이용해 측정 프로그램에 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분류식 습도 발생 장치

3.1.1 냉각 거울 노점계 교정

냉각 거울 노점계(Chilled-mirror hygrometer)는 거울 위로 기체가 흘러갈 때 서서히 거울 온도를 내리면서 거울 표면에 결로가 생기는 온도를 측정하여 이슬점(노점) 혹은 서리점(상점)을 측정하는 기기이다. 이러한 노점계는 정밀 습도 발생 장치와 연결하여 발생 장치의 기준 노점과 노점계의 측정값을 비교하는 방식으로 교정하여 정확도를 향상시킬 수 있다. Fig. 2(a)는 정밀 습도 발생 장치로 발생시킨 기준 상점(검정색 실선)과 냉각 거울 노점계로 측정된 상점(파란색 점선)을 비교한 것이다. 정밀 습도 발생 장치에서 냉각 거울 노점계로 흐르는 기체의 유량은 제조사 권장량인 0.5 L/min 수준이었고, 이때 시험조의 온도는 20.7 °C이었다. 냉각 거울 노점계의 측정값이 정밀 습도 발생 장치의 기준값의 변화를 잘 따라가나 미세하게 큰 값을 지시하는 것을 확인하였다. Fig. 2(b)에 이와 같은 차이를 수분 농도(ppm)로 환산하여 나타내었다. 이를 3차 다항식으로 피팅하여 이후 냉각 거울 노점계의 측정값을 보정하여 사용하였다. 이는 정밀 습도 발생 장치의 기준값을 냉각 거울 노점계에 전달하여 분류식 습도 발생 장치를 교정하기 위함이다.

3.1.2 분류식 습도 발생 장치 교정

분류식 습도 발생 장치는 미니 포화조로 입력된 매우 작은 유

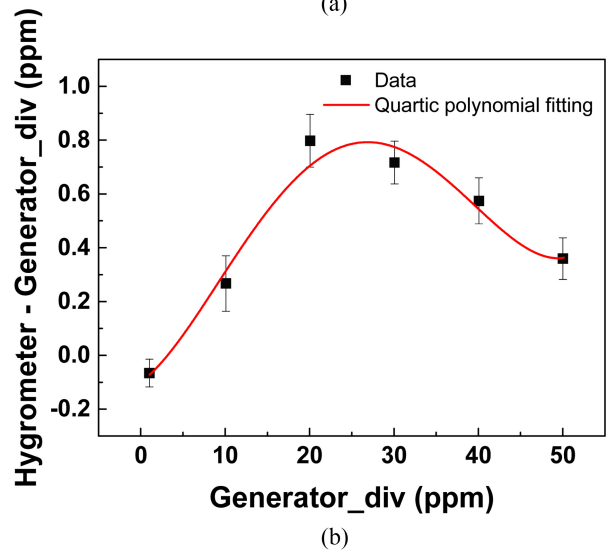
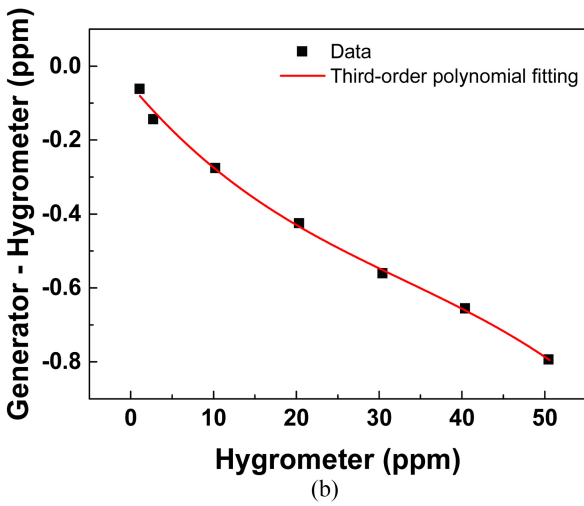
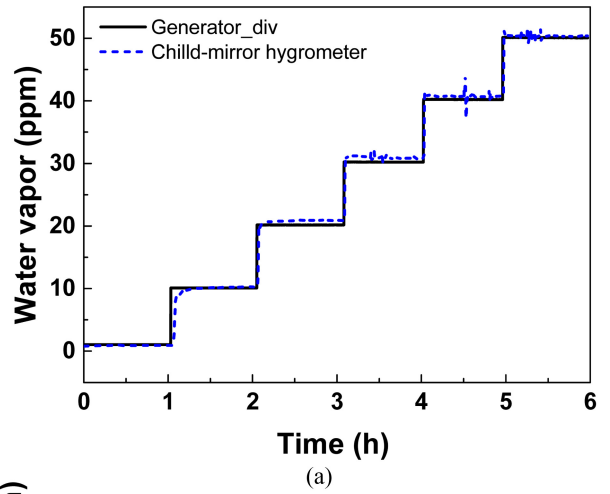
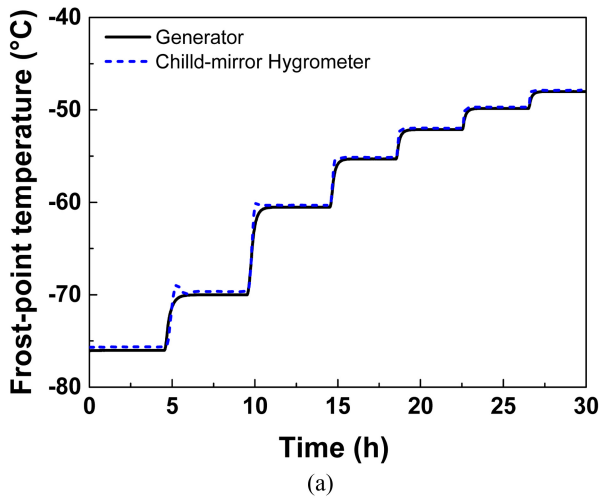


Fig. 2. (a) Frost-point generated by the saturator-based precision humidity generator and measured by a chilld-mirror hygrometer and (b) third-order polynomial fitting of the difference between the precision humidity generator and the chilld-mirror hygrometer.

Fig. 3. (a) Water vapor generated by the divided-flow humidity generator and measured by the chilld-mirror hygrometer and (b) quartic polynomial fitting of the difference between the divided-flow humidity generator and the chilld-mirror hygrometer.

량(수 cc/min)의 가스와 큰 유량(5 L/min)의 건조 가스가 서로 섞여 ppm 수준의 수분량을 발생하도록 설계되었다. 이는 미니 포화조로 입력된 작은 유량의 가스가 수증기로 충분히 포화된다는 가정에 기반한다. 하지만 분당 수 cc의 작은 유량만으로는 가스 내 수증기 포화 유무를 확인할 수 없는 한계가 있다. 따라서 분류식 습도 발생 장치의 정확도는 포화된 가스와 건조 가스가 섞인 최종 가스의 수분량을 측정하여 확인하여야 한다. 앞서 정밀 습도 발생 장치의 기준값으로 교정된 냉각 거울 노점계를 활용해 분류식 습도 발생 장치의 수분 발생 값을 교정하였다. Fig. 3(a)는 식 (1)로 계산된 분류식 습도 발생 장치의 수분 농도(검정색 실선)와 발생 장치로부터 나온 최종 가스를 냉각 거울 노점계(파란색 점선)로 측정한 것이다. 이때 냉각 거울 노점계의 측정값은 Fig. 2(b)의 교정 곡선을 적용한 결과이다. 냉각 거울 노점계로 측정한 수분 농도 값에서 분류식 습도 발

생 장치로 발생시킨 수분 농도 값을 뺀 값을 Fig. 3(b)에 나타내었다. 그래프의 오차 막대는 3번 측정한 값의 평균에 대한 표준 편차를 나타낸 값이다. 수분 농도가 0 ppm부터 20 ppm까지 증가할 때 두 값의 차이가 증가하다가 50 ppm까지 수분 농도가 더 증가하면 두 값이 차이가 다시 감소하였다. 두 값의 차이를 나타낸 그래프는 4차 다항식으로 피팅하여 분류식 습도 발생 장치에 대한 교정 공식을 구하였다. 이렇게 구한 분류식 습도 발생 장치의 교정 값은 추후 저온에서 라디오존데 습도센서의 교정에 활용하였다.

3.2 라디오존데 습도센서 교정

라디오존데는 고층 대기의 저온에서도 습도를 측정해야 하지만 주로 상온에서 교정한 공식을 저온에서도 적용시키는 경우

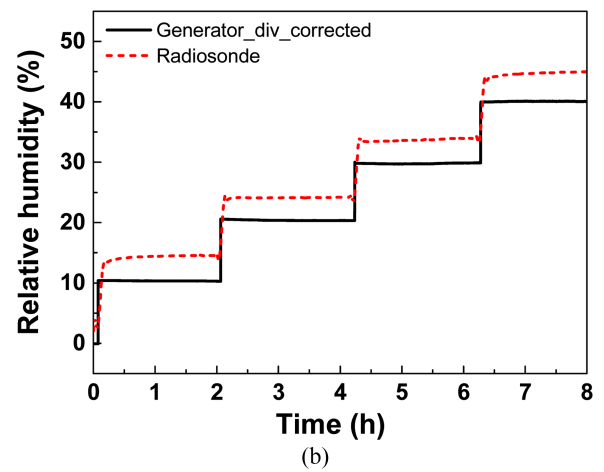
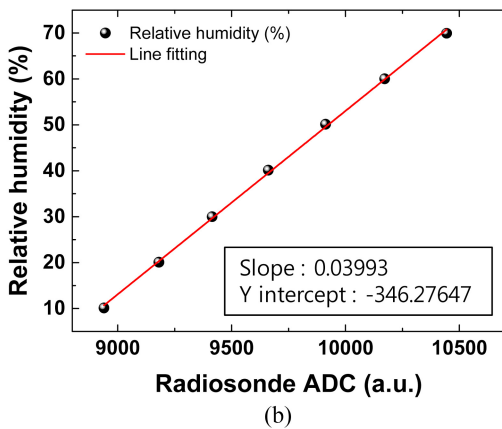
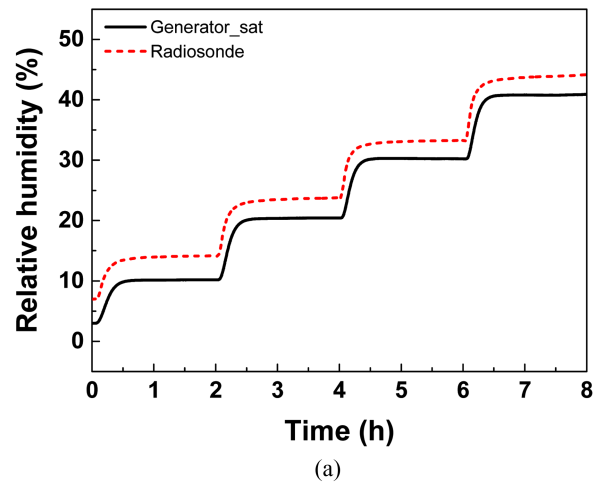
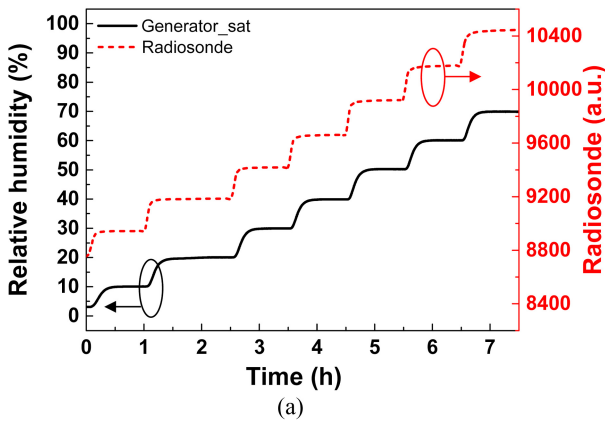


Fig. 4. Relative humidity calibration of the radiosonde humidity sensor at room temperature. (a) Relative humidity change by the precision humidity generator and the corresponding ADC value measured by the radiosonde humidity sensor and (b) the reference relative humidity value of the generator as a function of the ADC value of the radiosonde humidity sensor and the calibration curve by linear fitting.

가 많다. Fig. 4는 우선 상온에서 라디오존데 교정 곡선을 구하는 과정을 나타낸다. Fig. 4(a)와 같이 정밀 습도 발생 장치의 포화조 온도를 조절하여 라디오존데 센서가 들어있는 시험조로 흘러보내는 가스 내 수분량을 제어하였다. 이때, 시험조의 온도는 26.7 °C 이고 대기압 상태로 유지되었다. 시험조 안의 기준 상대 습도를 10%에서 70%까지 10% 간격으로 변화시키며 (왼쪽 검정색 y축), 라디오존데 습도센서의 정전용량에 준하는 ADC 값을 측정하였다(오른쪽 붉은색 y축). Fig. 4(b)와 같이 습도센서 ADC값은 기준 상대 습도 변화에 따라 대체로 선형적으로 변하였다. 이 두 값을 일대일로 매칭시키는 교정 곡선을 구하기 위해서 1차 선형식으로 피팅하였다. 이렇게 획득한 교정식은 라디오존데가 저온에서 습도를 측정하는데 적용되었다.

Fig. 5와 같이 위의 라디오존데 습도센서로 -45 °C 저온에서 두 습도 발생 장치로부터 발생한 습도의 변화를 측정하였다. 각 발생 장치의 기준 상대 습도는 10%부터 40%까지 10% 간격으로 변화시켰다. 이때, 상대 습도는 기상 분야에서 상대 습도를

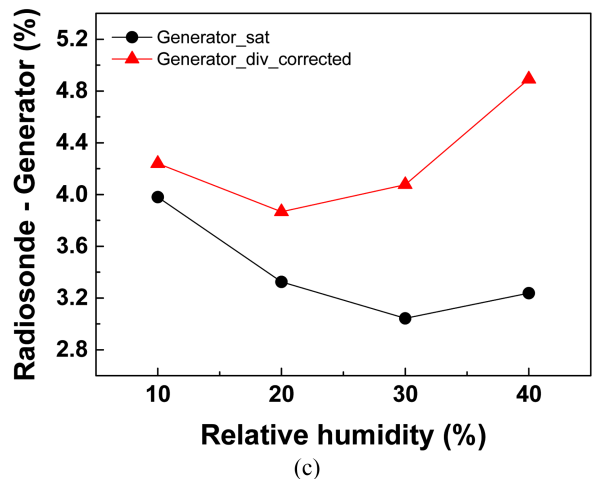


Fig. 5. (a) Relative humidity generated by precision humidity generator and humidity sensor measurement of radiosonde, (b) relative humidity generated by divided-flow humidity generator and humidity sensor measurement of radiosonde, and (c) difference between the measured value of the radiosonde and the reference relative humidity of each generator.

계산하는 방식인 과냉각 물의(얼음 대신) 포화수증기압을 이용했다. 각 발생 장치에서 발생한 가스의 상점 온도가 시험조의 온도보다 높을 경우 결로 현상이 발생하여 시험조 안의 습도가

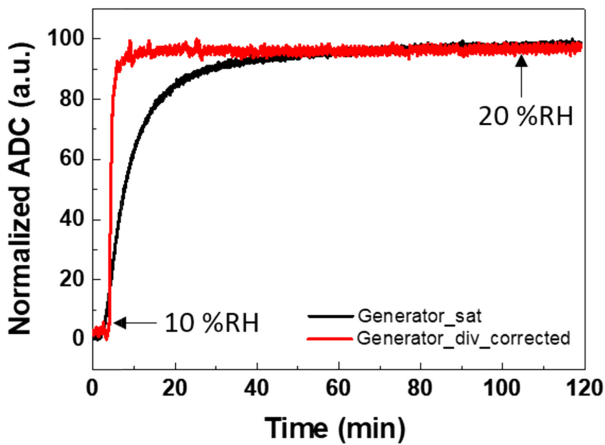


Fig. 6. Normalized ADC value of radiosonde humidity sensor when measuring 10% to 20% change of reference relative humidity.

왜곡될 수 있다. 시험조 온도인 -45°C 에서 발생할 수 있는 한계 상대 습도는 약 60% 준이지만 여기에서는 고층 대기의 저습 환경을 고려하여 40% 까지만 발생시켰다.

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 각 습도 발생 장치로 발생시킨 기준 상대 습도와 라디오존데 습도센서의 측정값을 나타낸다. 라디오존데 습도센서 측정값은 Fig. 4(b)에서 구한 상온 교정 공식을 적용하여 구한 것이다. 시험조 온도가 -45°C 일 때 라디오존데 습도센서로 측정된 상대 습도 값(빨간색 점선)이 두 습도 발생 장치로 발생시킨 기준 상대 습도 값(검정색 실선)보다 높게 측정되는 것을 확인할 수 있다. 정밀 습도 발생 장치의 기준 상대 습도 보다 약 3% - 4% 정도, 분류식 습도 발생 장치의 기준 상대 습도 보다 약 4% - 5% 정도 높게 측정 되었다. 이로써 상온에서 획득한 교정 공식을 저온에 그대로 적용하면 라디오존데 측정값에 오차가 발생한다는 것을 확인하였다.

라디오존데 습도센서로 측정된 값에서 기준 상대 습도를 빼 값을 Fig. 5(c)에 나타내었다. 기준 상대 습도가 10%에서 40%까지 증가할 때, 라디오존데 측정값과 기준 상대 습도와의 차이가 점차 감소하다가 증가하는 경향을 보여 2차 다항식으로 피팅하였다. 이 피팅식을 라디오존데 측정값에서 빼면 해당 온도에서의 습도 측정 오차를 보정할 수 있다.

라디오존데 습도센서의 측정값으로 확인된 두 발생 장치 간의 차이는 최대 1.6% 수준이었다. 상대 습도가 높아질수록 분류식 습도 발생 장치가 정밀 습도 발생 장치 기준 수분량과 비교하여 더 높은 수분량을 발생시키는 것을 의미한다. 이와 같은 원인은 식(1)에서 미니 포화조를 통과하는 유량(F_{sat})과 수분 농도(C_{sat})의 정확성에 기인할 것이다. 유량의 경우, MFC 지시 값보다 실제 유량이 조금 더 크다면 위와 같은 현상이 발생할 수 있다. 또한 수분 농도의 경우는 미니 포화조 내에 온도 구배가 존재한다면 위와 같은 현상이 발생할 수도 있다. 명확한 원인을 찾기 위해서는 더 깊이 있는 연구가 필요하다.

두 습도 발생 장치가 습도를 얼마나 빠르게 변화시킬 수 있

Table 1. Comparison of response time of radiosonde humidity sensor.

Relative humidity	Generator_sat	Generator_div_corrected
0% - 10%	23.4 min	8.7 min
10% - 20%	22 min	2 min
20% - 30%	18.9 min	2.1 min
30% - 40%	23.1 min	8 min

는지 비교하기 위해서 Fig. 6과 같이 라디오존데 습도센서의 ADC값을 정규화(Normalized)시킨 곡선을 나타내었다. 이때 응답 시간은 정규화된 ADC값이 10에서 90까지 변할 때까지 걸린 시간으로 정의한다. 예를 들어, 라디오존데 습도센서가 기준 상대 습도 10%에서 20%로 변화를 측정할 때, 정밀 습도 발생 장치는 22분이 소요되었고, 분류식 습도 발생 장치는 2분이 소요되는 것을 확인하였다. 이 외에 20%, 30%, 40%로 변화시킬 때 두 발생 장치로부터 측정된 라디오존데 습도센서의 응답 시간을 비교한 것을 Table 1에 나타내었다. 분류식 습도 발생 장치는 정밀 습도 발생 장치에 비해 10%까지 변화 시 14.7분, 20%까지 변화 시 20분, 30%까지 변화 시 16.8분 40%까지 변화 시 22.3분이 단축되었다. 따라서 본 연구에서 개발한 분류식 습도 발생 장치를 라디오존데 습도센서의 저온 상대 습도 교정에 활용하면 정밀 습도 발생 장치에 비해 상대 습도를 더 빠르게 변화시킬 수 있다는 장점이 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 1 ppm - 50 ppm 범위의 수분량을 빠르게 발생시킬 수 있는 분류식 습도 발생 장치를 개발하여 라디오존데 습도센서의 저온 상대 습도 교정에의 활용을 모색했다. 분류식 습도 발생 장치의 정확도를 향상시키기 위해서 정밀 습도 발생 장치로 교정된 냉각 거울 노점계를 이용하여 교정하였다.

라디오존데 습도센서를 상온에서 교정하여 상온 교정 공식을 획득한 뒤, 고층 대기를 모사한 -45°C 에서 상대 습도 측정에 적용하였다. 그 결과, 두 발생 장치로부터 발생시킨 기준 상대 습도 대비 3% - 5% 가량 높은 값을 측정하였다. 이는 상온 교정 공식을 저온에 그대로 적용할 경우 측정 오차가 발생함을 의미한다. 라디오존데 습도 측정값으로 확인된 두 발생 장치 간의 차이는 최대 1.6% 이내였다.

저온에서 라디오존데 습도센서의 응답 시간을 활용하여 습도 발생 장치 간의 습도 변화 시간을 비교하였다. 그 결과 분류식 습도 발생 장치가 정밀 습도 발생 장치에 비해 원하는 습도를 빠르게 변화시킬 수 있어 상용 센서의 교정하는데 유리한 성능을 갖추고 있음을 확인할 수 있었다.

일반적으로 Fig. 4(b)와 같이 구한 라디오존데 습도센서의 교정식의 기울기는 $(-20 - 20)^{\circ}\text{C}$ 구간에서는 변화가 거의 없으나, -

20 °C 이하로 내려갈수록 기울기가 더 커지는 경향을 보인다. 이는 온도가 내려갈수록 센서에 최대 흡착될 수 있는 수분량이 증가하기 때문이다. 또한 20 °C 이상의 고온에서도 기울기가 커지는 경향을 보이는데, 고온에서는 기체 중에 포함된 수분량이 많아 센서에 흡착되는 수분량도 많기 때문이다. 향후, 미세먼지나 이산화탄소 배출이 많은 굴뚝에서 수분량 측정을 위해 고온에서 상대습도 센서의 평가 기술도 필요할 것으로 전망된다.

감사의 글

이 연구는 한국표준과학연구원의 기관고유사업인 연직기상 온습도 정밀측정기술 개발(GP2021-0005-02)의 지원을 받아 수행되었다.

REFERENCES

- [1] H. H. Funke, B. L. Grissom, C. E. McGrew, and M. W. Raynor, "Techniques for the measurement of trace moisture in high-purity electronic specialty gases", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 74, No. 9, pp. 3909-3933, 2003.
- [2] J. S. Park, H. Chae, H. K. Chung, and S. I. Lee, "Thin film encapsulation for flexible AM-OLED: a review", *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 26, No. 3, pp. 034001, 2011.
- [3] R. J. Dirksen, M. Sommer, F. J. Immler, D. F. Hurst, R. Kivi, and H. Vömel, "Reference quality upper-air measurements: GRUAN data processing for the Vaisala RS92 radiosonde", *Atmos. Meas. Tech.*, Vol. 7, No. 12, pp. 4463-4490, 2014.
- [4] C. Cardinali, L. Isaksen, and E. Andersson, "Use and impact of automated aircraft data in a global 4DVAR data assimilation system", *Mon. Weather. Rev.*, Vol. 131, No. 8, pp. 1865-1877, 2003.
- [5] S. W. Lee., B. I. Choi, S. B. Woo, J. C. Kim, and Y. G. Kim, "Development of a low-temperature low-pressure humidity chamber for calibration of radiosonde humidity sensors", *Metrologia*, Vol. 56, No. 2, pp. 025009, 2019.
- [6] S. W. Lee, B. I. Choi, S. B. Woo, J. C. Kim., and Y. G. Kim, "Calibration of a radiosonde humidity sensor at low temperature and low pressure", *Metrologia*, Vol. 56, No. 5, pp. 055008, 2019.
- [7] B. I. Choi, H. S. Nham, S. B. Woo, J. C. Kim, and S. Y. Kwon, "The new KRISS low frost-point humidity generator", *Int. J. Thermophys*, Vol. 29, No. 5, pp. 1578-1588, 2008.
- [8] B. I. Choi, S. W. Lee, J. C. Kim, and S. B. Woo, "Extension of Humidity Standards to -105 °C Frost Point", *Int. J. Thermophys*, Vol. 36, No. 8, pp. 2231-2241, 2015.
- [9] B. I. Choi, S. W. Lee, S. B. Woo, J. C. Kim, Y. G. Kim, and S. G. Yang, "Evaluation of radiosonde humidity sensors at low temperature using ultralow-temperature humidity chamber", *Adv. Sci. Res.*, Vol. 15, pp. 207-212, 2018.
- [10] B. Hardy, *Proceedings of the third international symposium on humidity and moisture*, Teddington, London, England, Vol. 1, pp. 206-213, 1998.
- [11] L. Greenspan, "Functional equations for the enhancement factors for CO₂-free moist air", *Natl. Bur. Stand. - A. Physics and Chemistry*, Vol. 80, No. 1, pp. 41-44, 1976.