

SI-traceable Calibration of a Transmissometer for Meteorological Optical Range (MOR) Observation

Seongchong Park[†], Dong-Hoon Lee, and Yong-Gyoo Kim

Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, 267 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-340, Korea

(Received January 20, 2015; Revised manuscript February 17, 2015; Accepted March 4, 2015)

This work demonstrates the indoor SI-traceable calibration of a transmissometer with a 75-m baseline for the measurement of visibility in MOR (Meteorological Optical Range). The calibration is performed using a set of neutral density (ND) filters (OD 0.1-2.5) and a set of high-transmission quartz glass plates (a bare quartz glass plate and antireflective-coated quartz glass plates), the collection consisting of 20 artifacts in total. The luminous transmittance values of the reference artifacts had been calibrated traceable to the KRISS spectral transmittance scale, which ranges from 0.2 % to 99.5 %. The transmissometer to be calibrated typically consists of a loosely collimated light source based on a white LED (CCT ~5000 K) and a luminous intensity detector with a CIE 1924 $V(\lambda)$ spectral response. As a result of calibration, we obtained the MOR error and its uncertainty for the transmissometer in 20 m - 40 km of MOR. Based on the results, we investigated the applicability of the calibration method and the conformity of the transmissometer to the ICAO's (International Civil Aviation Organization) accuracy requirement for meteorological visibility measurement. We expect that this work will establish the standard procedure for the SI-traceable calibration of a transmissometer.

Keywords: Visibility measurement, Luminous transmittance, Transmissometer

OCIS codes: (010.1320) Atmospheric transmittance; (010.3920) Meteorology; (120.5240) Photometry

기상관측용 투과형 시정계의 국제단위계에 소급하는 교정

박성종[†] · 이동훈 · 김용규

한국표준과학연구원 기반표준본부

☎ 305-340 대전광역시 유성구 가정로 267

(2015년 1월 20일 받음, 2015년 2월 17일 수정본 받음, 2015년 3월 4일 게재 확정)

본 논문은 일정 두께를 정하여 대기의 시감투과율을 측정함으로써 시정거리의 표준화된 양인 기상학적 광학거리(Meteorological Optical Range, MOR)를 관측하는, 기상관측용 투과계의 국제단위계에 소급하는 실내 교정방법과 그 교정 예를 소개하고 있다. 국제단위계 유도량 중 하나인 시감투과율 눈금을 교정대상 투과계에 전달해주기 위한 기준물질로서 시감투과율 0.2 % ~ 99.5 % 범위의 OD 0.1 ~ 2.5 의 ND 필터와 석영유리, 무반사처리된 석영유리 등 총 20종을 이용하였고, 이 기준물질의 분광투과율은 한국표준과학연구원의 분광투과율 표준기를 이용하여 교정된 것이다. 교정 대상 투과계는 기준거리 - 수광부와 검출부 사이의 거리가 75 m 이고 측정광으로는 색온도 약 5000 K의 백색 LED를 이용하고, 광검출기로는 CIE 1924 $V(\lambda)$ 분광응답을 갖는 광도계를 이용하는 방식이다. 교정은 기준물질을 투과계 사이에 위치하여 투과계가 표출하는 시감투과율 및 MOR 값을 기준값과 비교하는 방식으로 이루어졌으며, 교정 결과 20 m ~ 40 km 범위의 MOR에 대하여 MOR 오차와 그 불확도를 산출 할 수 있었다. 교정 결과를 토대로 본 연구에서 소개하는 교정방법과 교정결과가 국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization, ICAO)의 시정관측의 정확도 요건에 부합할 수 있는지를 고찰하였다.

Keywords: 시정측정, 시감투과율, 투과계

OCIS codes: (010.1320) Atmospheric transmittance; (010.3920) Meteorology; (120.5240) Photometry

[†]E-mail: spark@kriss.re.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

시정(視程, visibility)은 항공 및 해상 교통의 안전과 밀접하게 관련되어있는 기상 관측량으로 지물을 육안으로 식별할 수 있는 정도를 의미하며, 관측자에 따라 정도를 달리하는 다분히 주관적인 양이다^{1), 2)}. 주간(주간)의 시정은 Koschmieder 법칙에 따라 수평방향으로 먼 거리의 지물을 보통 육안으로 식별할 수 있는 최대거리로 정의하고, 야간의 시정은 Allard의 법칙에 따라 주간과 같은 밝은 상태를 가정하였을 때 목표물을 식별할 수 있는 최대거리로 정의한다¹⁾. 이러한 시정은 대기 중 부유물질인 안개, 먼지, 황사, 강수, 하층운 등 시정 방해물질에 따른 혼탁도와 주변 광휘도에 좌우된다²⁾.

과거, 시정은 훈련된 관측원의 눈을 통해 관측이 수행되었으나, 현대적 기상관측이 보편화 된 지금은 국제기상기구(World Meteorological Organization, WMO)를 중심으로 대기의 광감쇠율에 기반한 기상학적 광학거리(Metrological Optical Range, MOR; 단위 m)를 정의하여 시정을 표준화하였고, 원리적으로 측정학적 토대 위에서 객관화되고 자동화된 시정 측정이 가능하게 되었다. 구체적으로 WMO는 MOR을 2700 K 색온도의 평행광선이 대기 중을 지날 때, 광선속이 시작점의 5 %로 줄어드는 거리로 정의하고 있다²⁾.

한편, 재래의 기상관측은 주로 국지적인 기상예측을 목적으로 하였기 때문에 관측값의 상호교환성 및 표준소급성을 비중있게 고려하지 않았다. 그러나 전지구적으로 기후변화의 도전에 직면한 현재는 기후변화의 추세를 신뢰성 있게 정확히 읽어내는 것이 무엇보다 중요해져 서로 다른 지역에서 보고되는 관측값들이 국제단위계와 같은 일관된 토대 위에 보편적이고 상호교환될 수 있길 요구한다. 이러한 이유로 WMO와 국제도량형국(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)은 공동으로 기상관측의 국제단위계 소급성 확보를 위해 협력해오고 있으며³⁾, 한국의 경우도 이러한 노력의 일환으로 기상관측표준화법을 제정하여 기상관측망에 배치되는 기상측기기가 국제적으로 공인된 품질시스템하에서 검정과 교정이 이뤄질 수 있도록 하고, 검교정기술이 마련되지 않은 경우 해당 관측기기에 대한 검교정 기술을 개발하는 것을 촉진하여, 점차 국제단위계로 소급하는 기상관측이 이뤄질 수 있도록 제도화 하였다⁴⁾.

시정관측은 앞서 언급한 바 처럼 검교정 기술이 준비되지 않은 분야 중 하나로, 해당 측기에 대해 검정과 교정이 이뤄지지 못하고 있는 상태이다. 본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 수행되었고, 구체적으로 시정관측용 기상측기기를 국제단위계와 연결될 수 있도록 교정하는 방법을 개발하고 구현하였다.

본 논문에서는 투과계 방식의 시정관측기기의 MOR을 국제단위계의 분광투과율 눈금으로부터 유도하는 방법을 소개하고 그 자세한 절차와 교정의 불확도를 제시하고자 한다. 먼저 2절에서 MOR의 정의와 MOR 눈금이 어떻게 국제단위계와 연결되는 지에 대해서 소개하고, 3절에서는 교정하고자 하는 교정대상 투과계에 대한 개략적인 소개, 4절에선 MOR

기준물과 전체적인 교정방법, 5절에서는 교정불확도 평가방법 및 교정결과를 제시하는 순으로 구성하였다. 덧붙여, 본 논문을 구성하고 있는 내용 중 일부가 2014 국제기상기구의 기상 및 환경 관측기기 및 관측방법에 관한 기술 컨퍼런스에서 발표되었음을 밝혀둔다⁵⁾.

II. MOR의 정의와 국제단위계와의 연결

서론에서 짧게 그 정의를 소개한 바 처럼, WMO가 정의한 기상학적 광학거리 MOR (단위: m)은 시정을 표준화한 양으로 2700 K 색온도의 평행광선이 대기 중을 지날 때, 광선속이 5 % (= 0.05)로 줄어드는 거리로 정의된다. 대기의 2700 K 색온도의 평행광선에 대한 광감쇠계수 (Extinction COefficient, EXCO; 단위 m^{-1})를 α 라고 하고, MOR을 L 이라고 하면, WMO의 MOR 정의는 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$0.05 = \exp(-\alpha L), L \cong \frac{2.996}{\alpha} \quad (1)$$

식 (1)에서 보듯이, MOR은 EXCO의 함수로 표현되어, EXCO의 측정을 통해 MOR을 계산하게 된다.

EXCO는 보통 정해진 두께의 매질 즉 대기의 투과율을 측정함으로써 계산할 수 있다. 균질하고 등방성인 매질을 가정하고, 그 매질의 두께를 B 라고 할 때, 매질의 광투과율은 Beer-Lambert 법칙에 따라 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$T = \exp(-\alpha B), \alpha = -\frac{\ln T}{B} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)로부터 식 (3)과 같이 MOR, L 은 매질의 두께 B 와 광투과율 T 로 표현된다.

$$L = -2.996 \frac{B}{\ln T} \quad (3)$$

여기서 광투과율 T 는 WMO MOR의 정의에 따라 측정광으로는 색온도 2700 K의 백열광, 검출기로는 광도계를 사용하여 측정하여야 하는 것으로, 국제단위계의 유도량 중 하나인 시감투과율 (luminous transmittance)과 동등한 물리량이다.

좀 더 정확하게 시감투과율은 식 (4)와 같이 정의되는데, 매질의 분광투과율 (spectral transmittance)이 $T_\lambda(\lambda)$ 라고 하면 시감투과율 T_v 는

1) 광선속(luminous flux)은 표준화된 사람 눈의 시감인 CIE 1924 $V(\lambda)$ 표준관측자의 파장별 시감효율이 고려된 빛의 양을 헤아리는 광 측정량으로 단위는 lm이다. 따라서 이 측정은 시감이 고려되어 lm에 비례하는 신호를 얻을 수 있는 광검출기인 광도계를 이용하여 이뤄져야 한다. 참고로 광학적 복사 측정 분야의 복사선속 (radiant flux: 단위 W)에 대응하는 양이다.

$$T_v = \frac{\int_{380}^{780} T_e(\lambda) S_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

이다. 여기서 파장범위 (380-780)의 단위는 nm이고, $S_A(\lambda)$ 는 국제조명위원회에서 정의한 색온도 약 2860 K의 CIE A 표준광원의 분광분포^[6], $V(\lambda)$ 는 CIE 1924 $V(\lambda)$ 이다. 식 (3)의 T 와 식 (4)의 T_v 사이에는 광원의 색온도에 있어 2700 K와 2860 K이라는 약간의 차이가 있긴 하지만, 가시광선 영역에서 파장선택성이 거의 없는 대기의 광학적 특성 상^[7], 약 160 K 정도의 색온도 차이에서 기인하는 투과율의 차이는 5/10000 미만으로 무시할 수 있을 정도이다. 따라서 $T \approx T_v$ 로 근사할 수 있으며, 이로부터 MOR 측정은 국제단위계의 유도 단위 중 하나인 시감투과율 눈금과 연결될 수 있음을 보였다. 다음 절에서는 식 (3)의 측정의 수학적 모델을 실제 관측기기로 구현한 시정관측장비인 투과계 (transmissometer)에 대해 살펴보도록 하겠다.

III. 교정대상 투과형 시정계

식 (3)에서와 같이, 정해진 두께의 대기에 대한 시감투과율의 측정을 통해 MOR의 측정이 가능할 수 있다. 이러한 원리를 그대로 관측기기로 구현한 것이 투과계 혹은 투과형 시정계이다. Figure 1에서 보듯이, 송신부(광원부)와 수신부(검출부)로 구성되며, 각각은 일정한 거리만큼 이격되어 설치된다. 보통 투과계 방식 시정 관측기기에서는 이 이격거리를 기준거리(baseline)라고 부른다. WMO의 MOR 정의와 잘 부합하기 위해서는 송신부가 내는 빛은 색온도 약 2700 K의 백열광이어야 하고, 수신부의 검출기는 사람 눈의 파장별 시감인 CIE 1924 $V(\lambda)$ 가 잘 구현된 광도계로 구성되어야 한다.

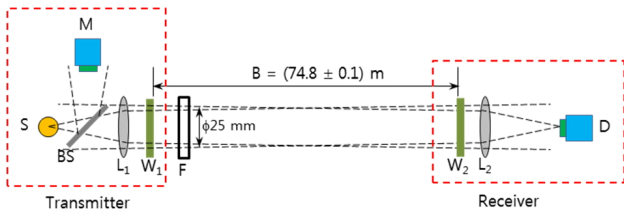


FIG. 1. Schematic diagram of the transmissometer to be calibrated where the essential parts are only depicted. The symbols of S, M, BS, L1, W1, L2, W2, D, and B denotes an white LED of CCT ~ 5000 K, a monitor photometer in the transmitter module, a beam splitter, a projection lens in the transmitter module, a window in the transmitter module, an imaging lens in the receiver module, a window in the receiver module, a photometer in the receiver module, and baseline (the distance between the receiver module and the transmitter module) of about 75 m, respectively. The diameter of light cone from the transmitter is 25 mm at the vicinity of the transmitter window, or 1000 mm at the vicinity of the receiver window.

그러나, 대기의 경우는 가시광선 영역에서 파장선택성이 거의 없기 때문에 두 가지 요건을 모두 엄밀히 만족하지 못하더라도 쓸만한 정확도 수준의 MOR 관측이 가능할 수 있다. 실제로 상용화된 투과계들은 다양한 광원과 검출기를 이용하고 있고, 특히 광원의 경우는 대부분 백열등이 아닌, 소형화와 저전력, 손쉬운 변조가 가능한 백색 LED를 이용하고 있다.

이러한 투과계의 성능에 영향을 주는 요인은 첫째, 먼지나 유·수분과 같은 시정방해 물질에 따른 송신창 및 수신창의 오염, 둘째, 광원 출력 및 검출기 감응도의 온도 의존성 및 표유, 셋째, 검출기 출력 광전류 신호 증폭기 및 아날로그-디지털 변환기의 비선형성 및 온도의존성, 넷째, 침습에 의한 광소자 및 전자소자의 열화 등을 꼽을 수 있다.

투과형 시정계는 실험실과 같은 잘 통제된 공간에서 동작하는 것이 아니라, 사계절 및 주야간의 주변 광조도, 시정, 온도 및 습도 변화를 실외에서 직접 겪기 때문에 각각 요인 모두는 적절히 보상하거나 구조적으로 발생을 억제할 수 있어야만 실용적인 시정계로 사용할 수 있다. 실제로 여러 상용 투과계는 오염을 최소화하고 모니터링하고 보정하는 수단과 광원 및 검출기의 향온 수단 혹은 온도의존성 보상수단을 탑재하고 있으며, 침습을 막는 구조를 취한다^[8, 9].

본 연구에서는 이와 같은 투과계 방식의 시정계 한 종을 선택하여 MOR을 교정하는 방법을 소개하고, 그 교정과정은 상세히 기술하고자 한다. Figure 1에서 보이는 것처럼 본 교정대상 투과계는 명목 기준거리 75 m 만큼 송신부와 수신부가 이격되도록 설계되어 있으며, 광원으로 색온도 약 5000 K의 백색 LED를 사용하며, 검출기로는 WMO의 정의와 부합되게 광도계를 사용한다. 측정광의 단면은 거의 원형에 가까우며, 송신부에서 5 cm 정도 떨어진 위치에서 측정광의 직경은 약 25 mm 정도이다. 본 투과계는 송신부 LED 광출력의 표유에 따른 영향을 최소화하기 위해 광원의 바로 앞에 빔가르개(BS) 두어 투과되는 광의 일부를, LED 광출력보다 표유가 훨씬 적은 모니터광도계(M)을 이용하여 측정하여, 출력신호로 I_D 가 아닌 I_D/I_M 을 취하도록 되어있다. 여기서, I_D 는 수신부 광도계의 광전류 신호, I_M 는 송신부 모니터 광도계의 광전류를 나타내는 기호이다.

다음 절에서는 본 투과계를 교정하기 위해서 필요한 측정 표준 및 표준물질과 상세한 교정 절차를 기술하도록 한다.

IV. MOR 기준물과 투과계 교정절차

2절에서 기술한 바와 같이, MOR의 기준은 국제단위계에서 유도된 측정량인 시감투과율을 이용하여 확립할 수 있다. 식 (4)에서 보듯이 분광투과율이 교정된 파장선택성이 적은 광감쇠필터가 있다면 시감투과율을 계산할 수 있고, 식 (3)을 이용하여 해당 광감쇠필터에 MOR 값을 부여하고, 이를 표준물질로 이용할 수 있게 된다. 즉, 이렇게 시감투과율과 MOR 값이 부여된 광감쇠필터를 교정대상 투과계의 송신부와 수신부 사이에 위치시키면, 투과계는 광감쇠필터의 시감

투과율을 측정하게 되고, 역시 식 (3)에 따라 MOR 값을 표출하게 된다. 이 때, 표준물질에 부여된 MOR 값과 교정대상 투과계가 표출하는 MOR 지시값을 비교함으로써 교정이 이뤄질 수 있다.

먼저, MOR 기준기가 되는 표준물질과 그 표준물질을 교정하는 방법에 대해서 살펴보도록 한다. MOR 기준기로 사용할 만한 광감쇠필터로는 투과율의 정도에 따라 ND 필터 (neutral density filter)와 순수 석영유리 (bare quartz), 무반사 처리된 석영유리 (antireflection coated quartz)등이 있다. 본 연구에서 MOR 기준기로 사용한 표준물질은 50 mm × 50 mm 흡수형 ND 필터 14 종 (Edmund Industrial Optics, Model #63-470 Absorptive Neutral Density Filter Kit OD 0.1 ~ OD 2.5), 50 mm × 50 mm 석영유리 1종 (Edmund Industrial Optics, Model #47-231 Fused Silica Window), 50 mm × 50 mm 빔가라게 코팅된 석영유리 3종 (CVI Melles Griot, Model BBS 450-600, 명목 투과율 95 %, 97 %, 99 %), 50 mm × 50 mm 무반사처리된 석영유리 2종 (Lambda Research Optics, Model BBAR1-400-700과 BBAR2-400-700)이다¹⁰⁾.

위에서 나열한 표준물질은 투과계의 교정에 앞서 한국표준과학연구원의 분광투과율 기준기를 이용하여 분광투과율을 교정하였다.

Figure 2는 국내 분광투과율 최상위 기준 측정장치로, Hg/Xe 방전등 (Hg/Xe discharge lamp)과 텅스텐 할로겐 전구 (tungsten halogen lamp)로 구성된 광원부, 이중단색화장기 (double-grating monochromator), 시준광학계, 샘플 거치용 자동 이송대, 그리고 실리콘 광다이오드 포획 검출기 (silicon photodiode trap detector)¹¹⁾로 구성되어있다. 광원부의 전구 (Hg/Xe 방전등 혹은 할로겐전구)에서 나온 빛이 이중 단색화장치를 통해 단색화되고 한 개의 구면경과 두 개의 평면경을 이용해 평행광으로 시준 한 뒤, 자동이송대에 거치된 50 mm × 50

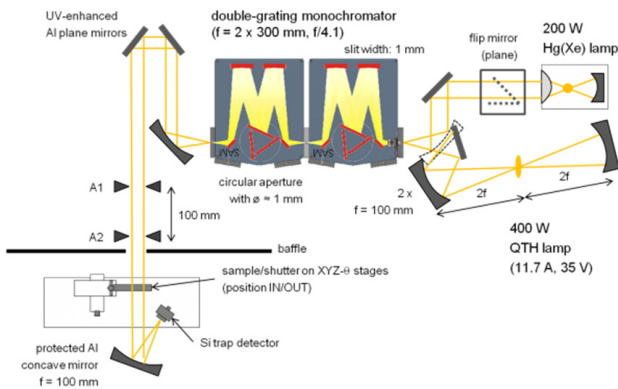


FIG. 2. Schematic diagram of the reference instrument for spectral transmittance measurement maintained by KRISS which constitutes one of the national measurement standards related to the material color related quantities. The system is composed of a light source module composed of a Hg/Xe discharge lamp and a tungsten halogen lamp, a double monochromator, a set of collimating optics, a sample mount on an automatic translator, and a silicon photodiode trap detector.

mm의 측정대상 MOR 기준물에 입사된다. 한번은 이렇게 MOR 기준물을 통과한 빛을 실리콘 광다이오드 포획 검출기로 광전류를 측정하고, 다른 한 번은 자동이송대를 움직여 MOR 기준물을 광축 상에서 비켜 치우고 다시 실리콘 광다이오드 포획 검출기로 광전류를 측정한 뒤 두 신호의 비를 취하여 각 파장별 투과율, 즉 분광투과율을 측정하게 된다. 본 측정은 MOR 기준기의 시감투과율을 측정하기 위한 것으로 380 nm ~ 780 nm 영역에서만 측정하는 것으로 충분하여 광원은 할로겐 전구만을 이용하였다. 만약, 380 nm 이하 자외선에 대한 분광투과율의 측정을 위해서는 광원으로 Hg(Xe) 방전등으로 이용하여야 한다. KRISS의 분광투과율 측정장치의 불확도는 시감투과율로 환산 시 98 % 시감투과율에 대해

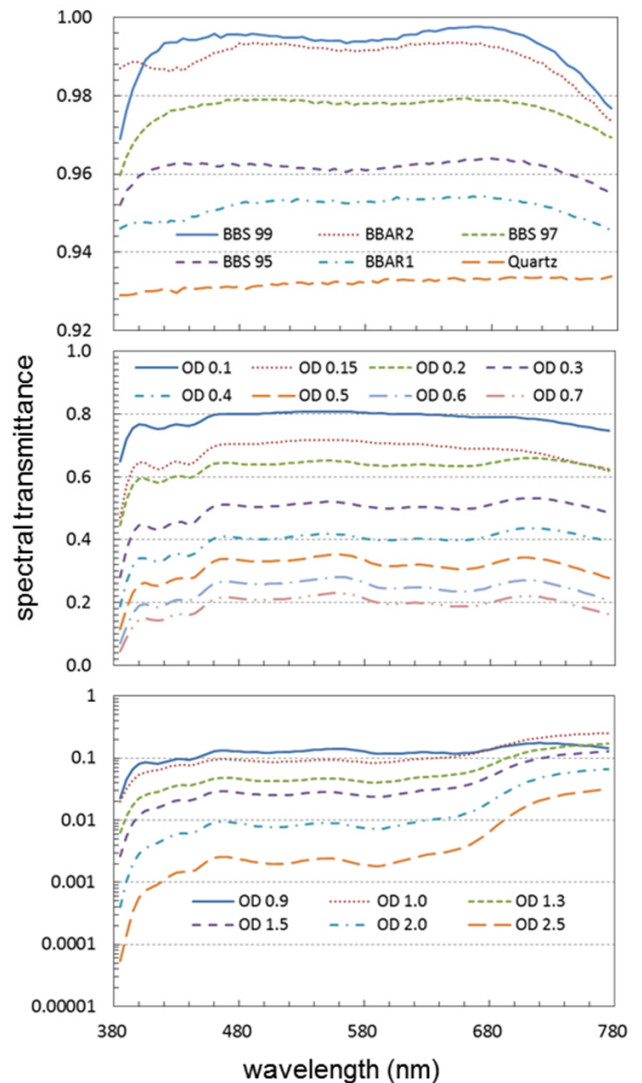


FIG. 3. Spectral transmittance values of 20 reference artefacts measured using the reference spectral transmittance measuring instrument. In this figure, the spectral transmittance curves are presented in the descending order of luminous transmittance value, whose luminous transmittance values and MOR values are tabulated in Table 1 and Table 2.

서 0.22 % ($k = 2$, 신뢰수준 약 95 %)이다.

Figure 3은 이렇게 KRISS 분광투과율 기준기를 이용하여 20종 MOR 기준물 모두에 대해 분광투과율을 측정된 결과이다. 약간의 파장 선택성을 보이기는 하지만, 대체로 파장에 대해서 균일한 분광투과율 분포를 보여주고 있다. 가장 투과율이 높은 기준물은 BBS 99 (명목 투과율 99 %)로 빔가르개 코팅이 되어있는 석영유리이며, 가장 낮은 투과율을 갖는 기준물은 OD 2.5 흡수형 ND 필터 (명목투과율 $10^{-2.5}$)이다.

Figure 3에서 얻어진 분광투과율 값으로부터 이 후 식 (4)와 식 (3)을 이용하여 시감투과율과 MOR을 값을 각각 계산하였다 (Table 1, 2). MOR 값 계산시 기준거리 B 는 교정대상 투과계의 이격거리를 직접 실측하여 사용하였다. 추 후에 자세히 서술하겠지만, 투과계를 교정장소에 설치하였을 때, 기준거리를 실측한 값은 $B = 74.8 \text{ m} \pm 0.1 \text{ m}$ 이며, 이 값의 불확도는 신뢰수준 약 95 %에 해당한다.

Table 1에서 나타나듯이 본 연구에서 사용한 기준물들은 전체적으로 0.2 % ~ 99.5 % 범위의 시감투과율을 보이며, 이는 37 m ~ 41367 m 범위의 MOR에 해당한다 (Table 2). 이 정도 MOR범위면 기상관측 시 나타나는 거의 모든 시정상황이 포함된다고 볼 수 있다. 기준물의 시감투과율 및 MOR의

불확도는 다음 절에서 자세히 다루기로 하겠다.

MOR 기준물이 준비된 후, 실제 투과계의 교정을 위해 투과계는 $120 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 13 \text{ m}$ 대형 실내암실^[12]로 옮겨 실제 동작조건과 동일하게 송신부와 수신부를 정렬하고, 이격 설치하였다 (기준거리 실측값 $B = 74.8 \text{ m} \pm 0.1 \text{ m}$). 송신부의 약 5 cm 앞에, MOR 기준물을 장착할 수 있는 거치대가 마련되어 있으며 (Fig. 1), 거치대에 순차적으로 MOR 기준물을 장착하면서 그 때 투과계가 표출하는 시감투과율 지시값과 MOR 지시값을 읽음으로써 교정이 수행된다. 시감투과율 값과 MOR 지시값은 5회 이상 반복해서 읽어내고, 평균값과 표준편차를 계산하여 이 후 불확도 계산에 활용하도록 한다.

교정에 앞서, 투과계는 투과율 0 % 점과 투과율 100 %를 조정하였다. 투과율 0 %는 수신부 수신창을 암막으로 가렸을 때, 시감투과율 지시값이 0 %가 되도록 조정하였고, 투과율 100 %는 거치대에 아무것도 장착하지 않아 송신부와 수신부 사이에 아무런 시정 방해요소가 없을 때의 시감투과율 지시값이 100 %가 되도록 하였다.

3절 (Fig. 1)에서 기술한 바 처럼 본 교정대상 투과계는 송신부 광원의 표유를 보정하기 위해 송신부에서 투과되는 빛

TABLE 1. Luminous transmittance calibration results of the 75 m-baseline transmissometer. The results are tabulated in the descending order of luminous transmittance value: REF transmittance values and their combined standard uncertainties in “REF Artefacts” column, DUT transmittance values and their combined uncertainties in “DUT transmissometer” column, and errors (DUT-REF) and their expanded uncertainties ($k = 2$) in “Calibration results” column

Reference Artefacts	REF Artefacts		DUT Transmissometer		Calibration results	
	Transmittance	Standard uncertainty	Transmittance	Standard uncertainty	Error (DUT-REF)	Uncertainty ($k = 2$)
BBS 99	99.5 %	0.11 %	99.4 %	0.10 %	-0.01 %	0.30 %
BBAR2	99.2 %	0.11 %	99.2 %	0.10 %	0.01 %	0.30 %
BBS 97	97.8 %	0.11 %	97.8 %	0.10 %	-0.04 %	0.29 %
BBS 95	96.2 %	0.11 %	96.1 %	0.10 %	-0.03 %	0.29 %
BBAR1	95.3 %	0.11 %	95.3 %	0.10 %	0.00 %	0.28 %
Quartz	93.2 %	0.11 %	93.2 %	0.09 %	-0.01 %	0.28 %
OD 0.1	80.4 %	0.09 %	80.3 %	0.08 %	-0.07 %	0.24 %
OD 0.15	71.0 %	0.08 %	70.8 %	0.07 %	-0.17 %	0.22 %
OD 0.2	64.2 %	0.07 %	64.2 %	0.07 %	-0.02 %	0.20 %
OD 0.3	50.9 %	0.06 %	50.9 %	0.06 %	0.03 %	0.16 %
OD 0.4	40.7 %	0.05 %	40.7 %	0.05 %	-0.03 %	0.13 %
OD 0.5	33.3 %	0.04 %	33.4 %	0.04 %	0.13 %	0.11 %
OD 0.6	26.1 %	0.03 %	26.2 %	0.04 %	0.11 %	0.10 %
OD 0.7	21.1 %	0.04 %	21.2 %	0.03 %	0.09 %	0.08 %
OD 0.9	12.8 %	0.02 %	12.8 %	0.02 %	-0.04 %	0.05 %
OD 1.0	9.15 %	0.01 %	8.93 %	0.02 %	-0.19 %	0.04 %
OD 1.3	4.52 %	0.01 %	4.33 %	0.01 %	-0.17 %	0.02 %
OD 1.5	2.72 %	0.00 %	2.54 %	0.01 %	-0.18 %	0.02 %
OD 2.0	0.86 %	0.00 %	0.76 %	0.01 %	-0.10 %	0.01 %
OD 2.5	0.23 %	0.00 %	0.20 %	0.01 %	0.04 %	0.01 %

TABLE 2. MOR calibration results of the 75 m-baseline transmissometer. The results are tabulated in the descending order of MOR value: REF MOR values and their combined standard uncertainties in “REF Artefacts” column, DUT MOR values and their combined uncertainties in “DUT transmissometer” column, and errors (DUT-REF) and their expanded uncertainties ($k = 2$) in “Calibration results” column

Reference Artefacts	REF Artefacts		DUT Transmissometer		Calibration results	
	MOR (m)	Standard uncertainty	MOR (m)	Standard uncertainty	Error (DUT-REF)	Uncertainty ($k = 2$)
BBS 99	41367.4	8431.9	40471.9	7337.1	-895.5	22354.5
BBAR2	29250.0	4225.1	29515.3	3875.0	265.3	11466.0
BBS 97	10310.0	532.4	10144.7	458.6	-165.3	1405.4
BBS 95	5691.7	165.2	5654.0	142.5	-37.7	436.2
BBAR1	4665.3	106.9	4673.4	97.3	8.1	289.0
Quartz	3203.3	51.38	3203.8	45.8	0.5	137.7
OD 0.1	1026.5	5.28	1024.9	4.7	-1.5	14.2
OD 0.15	655.5	2.17	652.5	2.0	-3.0	5.8
OD 0.2	506.7	1.30	507.6	1.2	0.9	3.6
OD 0.3	332.3	0.57	333.4	0.6	1.1	1.7
OD 0.4	249.8	0.33	250.2	0.4	0.4	1.1
OD 0.5	204.1	0.22	205.3	0.4	1.2	0.9
OD 0.6	167.3	0.15	168.2	0.3	0.9	0.7
OD 0.7	144.4	0.12	145.2	0.3	0.8	0.7
OD 0.9	109.4	0.07	109.5	0.3	0.1	0.6
OD 1.0	93.7	0.06	93.1	0.3	-0.6	0.6
OD 1.3	72.4	0.04	71.7	0.3	-0.7	0.6
OD 1.5	62.3	0.03	61.3	0.3	-1.0	0.6
OD 2.0	47.2	0.02	46.1	0.3	-1.1	0.6
OD 2.5	37.0	0.02	36.1	0.3	-0.9	0.7

의 일부를 빔가르개로 갈라 모니터 광도계로 광출력의 표유를 측정하고, 수신부 광도계가 읽는 신호를 모니터 신호로 나누어 주어, 이 값을 투과율 지시값으로 이용하게 된다. 이러한 이유로 수신창 앞에 기준물이 설치될 경우, 기준물의 유한한 반사율로 인해 기준물 왼쪽 면에서 반사된 빛이 되반사되어 모니터 신호를 일정정도 증가시킴으로써 실제 투과계가 읽는 투과율 값이 실제 보다 감소하게 된다. 이렇게 되 반사된 빛의 영향을 확인하기 위해 모든 기준물에 대해 기준물 설치 시 모니터 광도계의 신호 증가량을 측정하였고, 이를 이용하여 교정대상 투과계 지시값을 보정하였다. 기준물 중 OD 0.15, OD 0.3, OD 0.4의 경우는 1.001의 보정인자를, 기준물 중 OD 1.0, OD 1.3의 경우는 1.003의 보정인자를 적용하였고, 그 밖의 기준물에 대해서는 그 영향이 0.1 % 미만 이어서 보정인자를 적용하지 않았다.

V. 교정불확도 평가 및 교정결과

앞 절에서 서술한 바와 같이 투과계의 교정은 사전에 시감투과율이 교정되고 MOR 기준값이 산출된 기준물질을 투과계에 장착한 후, 투과계의 시감투과율 및 MOR 지시값을 읽

어 그 값을 기준물질에 부여된 시감투과율 및 MOR 값과 비교함으로써 이루어진다. 교정결과의 제시에 앞서서 본 교정의 불확도를 평가하는 방법을 살펴보도록 한다. 불확도 평가 방법은 한국표준과학연구원에서 발간한 측정불확도 표현 지침을 따른다^[3].

먼저, 투과율 교정과 MOR 교정의 수학적 모델을 살펴보도록 한다. 교정결과인 시감투과율의 오차 ΔT 와 MOR의 오차 ΔL 는 각각 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$\Delta T = T_{DUT} - T_{REF}, \quad \Delta L = L_{DUT} - L_{REF} \quad (5)$$

여기서 ΔT 는 투과율 오차, T_{DUT} 는 교정대상 투과계의 투과율 지시값, T_{REF} 는 기준물의 투과율, L_{DUT} 은 교정대상 투과계의 MOR 지시값, L_{REF} 는 기준물의 MOR값이다. 식 (5)로부터 식 (6)과 같이 불확도 전파식을 세울 수 있다. 여기서 u 는 표준 불확도, u_c 는 합성표준불확도를 표현하는 기호이다.

$$\begin{aligned} u_c^2(\Delta T) &= u^2(T_{DUT}) + u^2(T_{REF}), \\ u_c^2(\Delta L) &= u^2(L_{DUT}) + u^2(L_{REF}) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (3)의 관계식으로부터 식 (6) 중 L_{REF} 에 대한 불확도는 다시 식 (7)과 같이 시감투과율 및 시감투과율에 대한 불확도, 기준거리에 대한 불확도로 표현할 수 있다.

$$u^2(L_{REF}) = \left(\frac{2.996B}{(\ln T_{REF})^2} \frac{u(T_{REF})}{T_{REF}} \right)^2 + \left(\frac{2.996}{\ln T_{REF}} u(B) \right)^2 \quad (7)$$

5.1. T_{REF} 의 표준불확도

T_{REF} 의 불확도로는 투과율 측정 시 반복성, 파장정확성, 기준물의 공간적 균일도, 측정기기의 선형성을 대표적으로 꼽을 수 있다. 아래에서 제시하는 예시는 석영유리 ($T_{REF} = 93.3\%$)에 대한 것으로 다른 종류의 기준물에 대해서도 동일한 방식으로 평가할 수 있다.

5.2. 반복성 불확도 (첨자 rep)

먼저 반복성 불확도는 분광투과율 $T_{e,i}$ (i 는 파장 인덱스) 측정 시 광전류의 반복측정을 통해 평가할 수 있다. 반복성 불확도를 380 nm ~ 780 nm 파장범위에서 평가하여 $u(T_{e,i})$ 로 얻어졌다고 하면, 이 때 시감투과율의 반복성 불확도는 서로 다른 파장 간 상관관계가 없기 때문에 식 (4)로부터 식 (8)과 같이 표준불확도를 구할 수 있다^[14, 15]. 단, S_{A_i} 는 CIE-A 표준광원의 분광분포, V 는 CIE 1924 $V(\lambda)$ 이다.

$$u^2(T) = \frac{1}{\left(\sum_i S_{A_i} V_i \right)^2} \sum_i (S_{A_i} V_i)^2 u^2(T_{e,i}) \quad (8)$$

석영유리에 대해 계산해 보면, 이 값은 표준불확도로 0.01%에 해당한다.

5.3. 파장 정확성 (첨자 wav)

파장정확성은 분광투과율 $T_{e,i}$ (i 는 파장 인덱스) 측정 시 측정 시스템을 구성하는 분광계의 파장오차에 기인한다. 파장 정확성에 따른 불확도를 380 nm ~ 780 nm 파장범위에서 평가하여 $u(T_{e,i})$ 로 얻어졌다고 하면, 이 때 시감투과율의 파장정확성 불확도는 파장 간 상관관계가 있기 때문에 식 (4)로부터 식 (9)와 같이 표준불확도를 구할 수 있다^[14, 15].

$$u(T) = \frac{1}{\left(\sum_i S_{A_i} V_i \right)} \sum_i S_{A_i} V_i u(T_{e,i}) \quad (9)$$

석영유리에 대해 계산해 보면, 이 값은 표준불확도로 0.0004%에 해당한다.

5.4. 기준물의 투과율 공간 균일도 (첨자 uni)

기준물로 사용하는 ND 필터와 코팅 처리된 석영유리 등은

유리의 제조공차나 코팅 공정의 공차로 인해 위치별로 투과율이 약간씩 다를 수 있다. 3절에서 기술한 바와 같이 기준물을 통과하는 측정광의 직경은 약 25 mm 정도이기 때문에, 기준물 중 몇 개를 선택하여 시감투과율을 측정하여 불확도를 평가하였다. 그 결과, 모든 경우 불균일한 정도가 명목 시감투과율의 1/1000을 넘지 않아, 1/1000을 최대값으로 잡아 표준불확도를 환산하였다. 석영유리의 경우 명목 시감투과율이 93.2% 정도로 이를 표준불확도로 환산하면, 약 0.1%에 해당한다.

5.5. 실리콘 광다이오드 포획 검출기의 선형성 (첨자 lin)

분광투과율 표준기에는 측정광이 기준물을 통과할 때 광신호와 통과하지 않을 때 광신호를 검출하는 실리콘 광다이오드 포획검출기가 내장되어있는데, 이러한 광검출기는 입사광의 세기에 따른 약간의 비선형성이 존재한다. OD 2.5까지를 고려하여, 최대 선형성 불확도를 명목 시감투과율의 5/10000 정도로 평가하였으며^[16, 17], 이를 각 기준물의 표준불확도로 환산하였다. 석영유리의 경우 명목 시감투과율이 93.2% 정도로 이를 표준불확도로 환산하면, 0.05%이다.

5.6. T_{REF} 의 합성표준불확도

앞서 구한 각 불확도 성분을 다음 식 (10)과 같이 합성하여 합성표준불확도를 계산할 수 있다.

$$u^2(T_{REF}) = u^2(T_{REF})_{rep} + u^2(T_{REF})_{wav} + u^2(T_{REF})_{uni} + u^2(T_{REF})_{lin} \quad (10)$$

실제 석영유리에 대해서 적용해보면, 표준불확도는 약 0.11%가 된다. 각 기준물의 시감투과율 기준값과 불확도는 Table 1에 제시하였다.

5.7. T_{REF} 의 표준불확도

5.7.1. 투과율의 불확도로부터 전파된 불확도 (첨자 T)

기준물의 MOR 값은 식 (3)과 같이 기준물의 시감투과율로부터 계산된다. 따라서, 식 (7)의 첫째 항과 같이 기준물의 시감투과율의 불확도를 MOR 기준값의 불확도로 전파시킨다. 참고로 MOR 기준값의 불확도는 대부분 시감투과율 측정으로부터 온다. 석영유리 (시감투과율 93.2%, MOR 기준값 3203 m)의 경우, 시감투과율의 표준불확도가 약 0.11%가 되어, 식 (7)의 첫째 항에 따르면 투과율 불확도로부터 전파된 표준불확도는 51.4 m가 된다.

5.7.2. 기준거리 측정의 불확도 (첨자 B)

기준거리 측정의 불확도는 투과율 교정에는 관계하지 않고, MOR 교정의 불확도에만 포함된다. 기준거리 측정의 불확도가 확장불확도로 0.1 m 이므로 L_{REF} 의 표준불확도로는 이값의 절반인 0.05 m를 고려하면 된다. 석영유리의 경우,

MOR 기준값이 3203 m이므로 식 (7)의 둘째 항으로부터 기준거리 측정에 의한 표준불확도는 2.1 m가 된다.

5.8. L_{REF} 의 합성표준불확도

식 (7)에 따라 평가한 각 불확도 성분을 식 (11)와 같이 합성하여 합성표준불확도를 계산할 수 있다.

$$u^2(L_{DUT}) = u^2(L_{REF})_T + u^2(L_{REF})_B \quad (11)$$

실제 석영유리에 대해서 적용해보면, 표준불확도는 약 51.4 m가 된다. 각 기준물의 MOR 기준값과 불확도는 Table 1에 제시하였다.

5.9. T_{DUT} 의 표준불확도

5.9.1. 지시값의 반복성 불확도 (첨자 rep)

교정대상 투과계의 투과율 지시값을 반복적으로 5회 이상 읽고, 평균의 표준편차를 계산하여 표준불확도를 계산한다. 예로 석영유리를 장착하여 지시값을 읽었을 경우, 평균값은 93.2 %, 표준편차는 0.02 %, 표준불확도는 0.01 % 였다.

5.9.2. 기준물 장착 시 각도 정렬 불확도 (첨자 ang)

기준물을 거치대에 장착 시 수직 정렬에 불확도가 발생하게 된다. 이럴 경우, 기준물이 기울여지는 효과에 따라 투과율이 감소하게 되어 명목 투과율 값보다 작은 투과율을 보이게 된다. 각도 정렬의 표준불확도를 최대 2°정도로 추정하면, 투과율의 표준불확도는 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$u(T) \approx |T - T^{1/\cos^2}| \quad (12)$$

예로 석영유리의 경우, 약 0.004 %에 해당하는 불확도가 발생한다.

5.10. T_{DUT} 의 합성표준불확도

앞서 구한 각 불확도 성분을 식 (13)과 같이 합성하여 합성 표준불확도를 계산할 수 있다.

$$u^2(T_{DUT}) = u^2(T_{DUT})_{rep} + u^2(T_{DUT})_{ang} \quad (13)$$

실제 석영유리에 대해서 적용해보면, 표준불확도는 약 0.1 %가 된다. 각 기준물에 대한 교정대상 투과계의 지시값과 불확도는 Table 1에 제시하였다.

5.11. L_{DUT} 의 표준불확도

투과율의 불확도부터 전파된 불확도 (첨자 T)

교정대상 투과계의 MOR 지시값은 내부적으로 식 (3)과

같은 관계식으로 투과율 지시값으로부터 계산된다. 따라서, L_{REF} 의 불확도 평가 시와 동일한 방식으로 식 (7)과 같이 교정대상기기의 시감투과율 지시값의 불확도를 MOR 지시값의 불확도로 전파시키면 된다. 석영유리 (시감투과율 지시값 93.2 %, MOR 지시값 3204 m)의 경우, 시감투과율 지시값의 합성표준불확도가 약 0.10 %가 되어, 식 (7)에 따르면 투과율 불확도로부터 전파된 표준불확도는 45.8 m가 된다.

5.11.1. 지시값의 분해능 불확도 (첨자 res)

교정대상 투과계가 표출하는 MOR 지시값의 최소 단위는 1 m이다. 직사각형 분포를 가정하여^[12], 표준불확도는 모든 기준물에 대해 식 (14)에 따라 약 0.3 m가 된다.

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1 \text{ m}}{2} \approx 0.3 \text{ m} \quad (14)$$

5.11.2. L_{DUT} 의 합성표준불확도

앞서 구한 각 불확도 성분을 다음 식 (15)과 같이 합성하여 합성표준불확도를 계산할 수 있다.

$$u^2(L_{DUT}) = u^2(L_{DUT})_T + u^2(L_{DUT})_{res} \quad (15)$$

실제 석영유리에 대해서 적용해보면, 표준불확도는 약 45.8 m가 된다. 각 기준물에 대한 교정대상 투과계의 MOR 지시값과 불확도는 Table 2에 제시하였다.

5.12. 교정결과 및 교정불확도의 계산

식 (5)에 따라 교정대상 투과계의 시감투과율 오차와 MOR 오차를 계산하며, 지금까지 서술한 불확도 산출과정을 통해 계산된 성분들을 식 (6) 대입하여 각 오차의 합성표준불확도를 산출한다. 본 교정의 경우 전체적으로 자유도가 10 보다 크고, 확률분포를 정규분포로 근사할 수 있어 신뢰수준 약 95 %에 해당하는 포함인자 $k = 2$ 를 합성표준불확도에 곱하여 교정불확도를 보고한다^[12]. 시감투과율과 MOR 교정결과 및 그 불확도는 Table 1과 2에 각각 제시하였다.

VI. 결론 및 토의

기상관측용 투과식 시정계인 75 m 기준거리의 투과계 한 종을 실내환경 조건에서 국제단위계에 소급하여 교정된 시감투과율 기준물을 이용하여 시감투과율 0.2 % ~ 99.5 % 범위 및 MOR 37 m ~ 41000 m 범위에서 교정을 수행하였다. 그 결과 전 측정영역에서 지시값의 기준값 대비 오차는 교정 불확도 안에 포함되는 결과를 Table 1과 Table 2와 같이 얻었다.

한편, 국제기상기구(WMO) 및 국제민간항공기구(ICAO)가 권고하는 MOR 측정 시정계의 정확도 성능 기준은

- MOR < 600 m 경우, 오차 50 m 이내
- 600 m ≤ MOR < 1500 m 경우, 오차 10 % 이내
- MOR > 1500 m 경우, 오차 20 % 이내

로 알려져 있는데^[1], 본 교정방법 및 교정결과에 국제기준 부합성을 쉽게 살펴볼 수 있도록 Fig. 4와 같이 도시하였다.

Figure 4에는 MOR 오차(편의를 위해 절대값만을 도시함)와 교정불확도인 MOR 오차의 불확도 (신뢰수준 약 95 %), 그리고 앞서 기술한 ICAO 정확도 성능 기준을 함께 도시하였다. 먼저, 본 교정방법의 유효성은 교정불확도와 ICAO 기준을 비교함으로써 판단할 수 있을 것이다. 두 값을 비교해보면 대략 MOR 10 km 까지는 ICAO 정확도 기준에 비해 교정불확도가 충분히 작은 것으로 나타나, 본 교정방법은 MOR 20 m ~ 10 km 범위에서 어떤 투과계 방식 시정계가 ICAO 정확도 기준에 부합하는지 평가하는데 유효하게 적용할 수 있는 것으로 확인되었다. 다만, 10 km를 초과한 적색 O로 표시된 이 후의 범위에서는 본 방법의 불확도가 ICAO 요건보다도 크기 때문에 본 교정방법을 통해 해당 범위에서 ICAO 성능기준 적합 여부를 알 수 없는 한계가 있다. 이의 극복을 위해서는 더 낮은 수준의 시감투과율 표준이 필요하지만, 투과계의 동작원리 상 투과율이 매우 높은 고시정에서의 MOR 측정 불확도가 급격히 증가하기 때문에 현저한 개선은 현실적으로 어렵다. 보통 10 km 이상의 고시정에 대해서는 산란강도 측정방식의 시정계가 더 정확하고 널리 쓰이는 것으로 알려져 있어, 고시정에 대한 교정은 교정대상 기기의 종류를 바꾸어 따로이 연구가 필요할 것으로 판단된다. 다음으로 본 교정대상기기의 ICAO 성능기준 적합성을 MOR 오차와 ICAO 성능기준의 비교를 통해 쉽게 살펴볼 수 있다. MOR 오차는 교정이 이뤄진 전체 MOR 범위에서 ICAO 허용 범위 안에 있는 것으로 나타난다. 결과적으로 본 교정대상기기는 MOR 측정 정확도 면에서 ICAO의 성능기

준에 부합한다고 볼 수 있다. 다만, 이는 실내환경에서 단기간에 걸친 교정결과이며, 실제 시정관측 성능을 알기 위해서는 본 기기를 실외 현장에서 운용할 경우 발생할 수 있는 기상조건, 오염, 광학적 특성 및 기계적 특성의 장기간에 걸친 변화 등 다양한 추가적 오차 및 불확도 요인을 별도로 평가해야 함을 밝혀둔다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2013-2010)과 한국공항공사의 지원을 통해 수행되었습니다. 덧붙여, 대형 실내암실을 활용할 수 있도록 도움을 주신 한국광기술원 LED 실증평가센터 조용익, 이운철, 채성기님께 감사를 드립니다.

References

1. International Civil Aviation Organization (ICAO), *Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices*, Doc 9328, AN/908 3rd Edition (2005).
2. World Meteorological Organization (WMO), *CIMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, Chapter 9, WMO-No. 8 (2008).
3. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), *Agreement between the World Meteorological Organization and the International Committee for Weights and Measures*, <http://www.bipm.org/utls/common/pdf/liaisons/Agreement-CIPM-WMO.pdf>
4. Weather Observation Standardization Act (KMA, 2014); Regulation on Verification of Meteorological Instruments (KMA, 2012).
5. S. Park, D.-H. Lee, and Y.-G. Kim, *SI-traceable Calibration of a Transmissometer for Visibility Measurement*, TECO-2014, WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation, P2(5) (Saint Petersburg, Russian Federation, 07-09 July 2014).
6. CIE 15:2004, *Colorimetry*, 3rd ed. (Commission Internationale de l'Eclairage, 2004).
7. A. Arnulf, J. Bricard, E. Curé, and C. Véret, "Transmission by haze and fog in the spectral region 0.35 to 10 microns," *J. Opt. Soc. Am.* **47**, 491-497 (1957).
8. VAISALA LT-31, <http://www.vaisala.com/en/products/visibilitysensors/Pages/LT31.aspx>
9. OPTEC LPV-3, <http://www.optecinc.com/visibility/lpv-3.htm>
10. Note that the product names in this paper are provided only for clear description on our work, thus the authors do not claim any types of preferences on those products.
11. N. P. Fox, "Trap detectors and their properties," *Metrologia* **28**, 197 (1991).
12. Test Facility for LED Road Lighting, LED Demonstration Test & Measurement Center, KOPTI, <http://ldc.kopti.re.kr>
13. KRISS/SP-2010-105, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (KRISS, 2010).

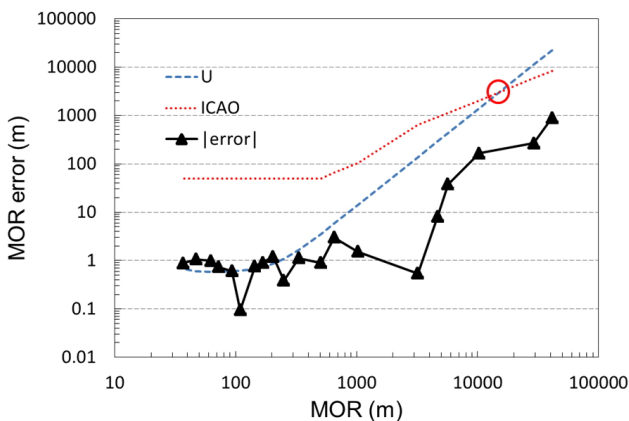


FIG. 4. MOR calibration results on which the absolute values of MOR error and their expanded uncertainty are plotted together with the ICAO accuracy requirements. The mark "O" indicates the point where the calibration uncertainty gets larger than the ICAO criteria. Note that the ICAO criteria refer to Ref.^[1].

14. S. Park, D.-H. Lee, Y.-W. Kim, and S.-N. Park, "Uncertainty evaluation of color measurement on light sources and display devices," *Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **20**, 110-117 (2009).
15. S. Park, D.-H. Lee, Y.-W. Kim, and S.-N. Park, "Uncertainty evaluation for the spectroradiometric measurement of the averaged light-emitting diode intensity," *Appl. Opt.* **46**, 2851-8 (2007).
16. D.-J. Shin, S. Park, K.-L. Jeong, S.-N. Park, and D.-H. Lee, "High-accuracy measurement of linearity of optical detectors based on flux addition of LEDs in an integrating sphere," *Metrologia* **51**, 25 (2014).
17. R. Goebel and M. Stock, "Nonlinearity and polarization effects in silicon trap detectors," *Metrologia* **35**, 413 (1998).