

계절에 따른 실험실 환경변화를 이용한 토크측정기의 온도 및 습도 감도계수 결정

The Determination of Temperature and Humidity Sensitivity Coefficients of Torque Transducers using Seasonal Climatic Changes of Ambient Conditions in the Laboratory

무루게타^{1,2}, 김민석^{1,2,✉}, 박연규^{1,2}, 이호영¹
Mulugeta Derebew^{1,2}, Min Seok Kim^{1,2,✉}, Yon Kyu Park^{1,2}, and Ho Young Lee¹

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

2 과학기술연합대학원대학교 측정과학전공 (Science of Measurement, University of Science & Technology)

✉ Corresponding author: minsk@kriss.re.kr, Tel: +82-42-868-5242

Manuscript received: 2014.11.18 / Revised: 2014.12.16 / Accepted: 2014.12.18

This paper presents a new method to determine sensitivity coefficients of temperature and humidity of torque transducers by using a natural and seasonal variation of ambient conditions at the laboratory. We had measured the sensitivities of the torque transducers over almost one year using the KRISS 2 kN m torque standard machine. The sensitivity data acquired at various ambient conditions were processed using our measurement model to extract the sensitivity coefficients of temperature and humidity simultaneously with high precision. A comparison with a previous method using an environmental control chamber was carried out to test the feasibility of using our new method. Two results agreed within the uncertainty. We revealed that the torque measuring errors could be 8 times higher than the measurement and calibration capability of KRISS torque standard machine if the sensitivity changes due to the temperature and humidity are not properly corrected during a calibration.

Key Words: Torque transducer (토크측정기), Torque measuring device (토크측정기), Sensitivity coefficients of the humidity (온습도감도계수)

1. 서론

나사나 볼트를 조립할 때 비트는 힘이나 회전체의 동력을 나타내는 토크(torque)는 산업에 매우 중요한 물리량 중에 하나이다. 볼트의 조립력을 일정하게 유지하기 위해선 적정 토크를 가해 조여

야 하며 만약 적정 토크보다 적은 토크로 조이면 조립력이 약하여 금방 볼트가 풀리게 되며 더 많은 토크로 조이면 볼트의 인장강도를 넘어서 쉽게 파단이 될 수 있다. 따라서 산업현장에서는 품질 관리를 위하여 주기적으로 토크를 가하는 토크렌치나 각종 토크측정기를 교정하고 있다.

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

토크의 측정표준을 확립하기 위해 한국표준과학연구원(KRISS, Korea Research Institute of Standards and Science)은 2004년에 2 kN·m 용량의 실하중 토크표준기를 구축하여 국내외 토크교정기관과 산업체에 보급하고 있다.^{1,2} 토크를 보급하는 방식으로는 산업체나 교정기관에서 사용하고 있는 토크측정기를 직접 표준기를 이용하여 교정하거나 교정의뢰대상이 시험기나 교정기와 같이 이동이 불가능할 경우에는 매우 정밀한 토크측정기(일명, 전달용 토크표준기)를 사용하여 표준기에서의 교정값(즉, 표준기에서 전달용 토크표준기를 교정한 값)과 교정기 또는 시험기의 교정값(즉, 교정기 또는 시험기에서 전달용 토크표준기를 측정된 값)을 비교하게 된다.

대부분의 토크측정기는 힘측정기와 마찬가지로 탄성체 감지부에 적절하게 토크가 작용되도록 하고 토크에 의한 변형량을 스트레인게이지(strain gauge)로 읽어들이는 방식을 취한다. 스트레인게이지는 스트레인뿐만 아니라 온도에 따라서 저항이 변한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 휘스톤브리지(Wheatstone bridge) 회로와 적절한 온도보상기법을 사용하여 온도에 따른 영향을 최소화하도록 제작되지만 여전히 온도에 따른 감도변화가 존재한다. 한편 습도에 따른 감도변화도 존재한다. 스트레인게이지 저항 자체는 습도에 따라 변화가 없지만 스트레인게이지의 임피던스는 습도에 따른 정전용량 변화에 따라 바뀌게 된다. 정밀하게 휘스톤브리지 회로의 저항을 측정하려면 잡음 저감을 위해 DC 전압으로 인가하기 보다는 AC 전압을 인가하는 bridge 증폭기를 사용하게 되는데 AC 전압의 출력은 임피던스의 영향을 받으므로 습도에 따라 출력감도가 변화하게 된다.³ 따라서 KRISS의 토크표준이 정확하게 소급이 되기 위해선 두 경우 모두 KRISS 실험실의 환경조건과 실제로 사용할 곳(산업체 또는 교정업체의 실험실)의 환경조건이 같다는 가정이 필요하다.

전달용 토크표준기의 온도와 습도 영향을 알아보기 위한 기존 방법으로는 토크표준기가 위치한 실험실 전체 공간의 온도와 습도를 바꾸는 방법,⁴ 토크표준기를 감싸는 특별한 온습도 조절이 가능한 공간³을 만드는 것이다. 첫 번째 방법의 경우 가장 간단한 방법이나 공간이 큰 실험실의 온습도를 인위적으로 조절하기 힘들뿐더러 많은 시간이 소요된다. 또한 같은 공간에 있는 다른 표준기들에게도 영향을 끼치므로 온도조절기간 동안 다른

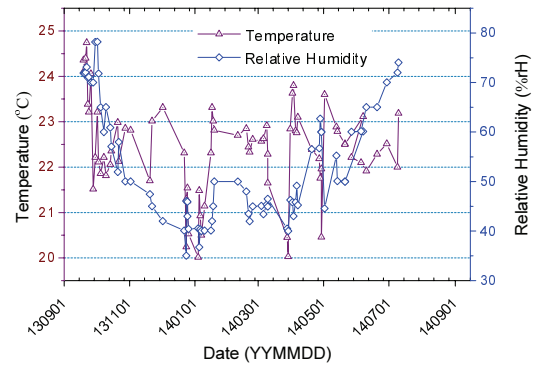


Fig. 1 Variations of the climatic conditions at the laboratory over the measurement period

표준기들의 교정서비스를 하지 못하는 단점이 존재한다. 두 번째 방법이 가장 바람직하나 토크표준기 전체를 둘러싸는 온습도 조절 방을 갖추는 데에는 많은 비용이 들며 대용량 토크표준기 같은 경우에는 공간 자체가 크므로 더욱더 많은 비용이 소요된다. 토크측정기 일부만을 감싸는 공간을 만들어 인위적으로 조절하는 방식을 사용할 수 있으나 토크측정기와 토크표준기는 토크를 전달하는 부분이 기계적으로 맞닿아 있어 열이 이동할 수 있으므로 토크측정기 주변의 온도만을 올리거나 내린다고 토크측정기 자체의 온도는 잘 바뀌지 않는 문제점이 존재한다. 습도의 경우는 토크측정기 주변의 환경을 국부적으로 바꾸어 실험이 가능하다.⁵

본 논문에서는 토크측정기의 온습도 감도계수를 구하기 위한 기존 방법들의 단점을 보완할 수 있는 새로운 방법을 제시하고 기존 방식과의 비교를 통해 이를 검증하고자 한다.

2. 실험실 공기의 계절에 따른 온습도 변화

대한민국의 기후는 사계절이 뚜렷하며 계절에 따른 온도와 습도 변화도 큰 편이다. KRISS 역학동의 실험실은 공간이 매우 커 항상 환온환습을 유지함에도 불구하고 계절에 변화에 따라 서서히 Fig. 1에서와 같이 변한다. Fig. 1은 약 1년 동안의 실험실 온습도를 기록한 것으로 온도와 상대습도가 각각 약 $(22.5 \pm 2.5)^\circ\text{C}$, $(55 \pm 20)\%RH$ 범위로 변하는 것을 알 수 있다. 이는 정확하게 토크측정기의 온습도 감도계수를 구하기에 충분한 변화량이다. 따라서 실험실의 자연스런 계절에 따른 온도변화를 이용하여 1년간 토크측정기를 교정한 데이

터를 처리하면 온습도 감도계수를 동시에 구할 수 있다.

이 방법의 장점은 특별한 환경 시설이나 장비가 없어도 되며 인위적으로 환경을 조절하는 다른 방법에 비해 기기의 안정화 시간이 필요 없다는 것이다. 즉, 토크측정기와 토크표준기는 특정한 온습도 조건에서 항상 준평형 상태에 있다고 간주할 수 있다. 실험실 환경이 장기적으로 보면 많이 바뀌지만 측정시간 약 2시간 기준으로 온습도 변화는 각각 각각 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\text{ \%rH}$ 이내로 무시할만한 수준이기 때문이다.

3. 온습도 감도계수 측정 실험

3.1 측정장비

토크측정기는 1000 N·m 용량의 전달용 표준기급의 독일HBM사의 TN모델(정밀도 TOP등급)과 독일GTM사의 DmTN모델(정밀도 VN등급) 2 종류를 선정하였다. 토크측정기의 지시장치는 AC인가 전압을 사용하는 고정밀 HBM사의 DMP40 모델을 사용하였다. DMP40의 측정조건은 인가전압 5 V, 측정범위 2.5 mV/V, 필터 0.1 Hz Bessel, 그리고 분해능 0.000001 mV/V이었다. 두 토크측정기 모두 KRISS 힘 연구실에 설치되어있는 2 kN·m 실하중 토크표준기를 이용하여 교정하였다.

3.2 측정 프로토콜

토크측정기의 교정 결과는 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 온습도 감도계수를 구하는 것이 목적이므로 다른 요인에 대한 영향을 최소화하며 온도 및 습도에 의한 영향만이 결과로 출력되도록 측정 프로토콜을 정해야 한다. 토크측정기의 측정결과에 영향을 주는 요인으로는 크립(즉, 하중이 일정하게 가해진 상태에서 출력값이 시간에 따라 변화하는 현상), 토크측정기의 장착 방향, 지시계의 특성, 토크암의 온도에 따른 길이 변화, 토크측정기의 드리프트(drift, 즉 토크측정기가 시간이 지남에 따라 하중에 대한 출력값이 바뀌는 현상, 경년변화)를 들 수 있다. 이런 요인을 고려하여 제거하거나 출력값을 보정해 주어야만 순수하게 온도와 습도에 의한 출력변화를 구할 수 있다.

먼저 크립에 의한 영향을 최소화하기 위해 6분 간격으로 영점과 하중값을 읽었다. 하중이 가해지거나 또는 하중이 제거된 직전에 크립에 의한 출

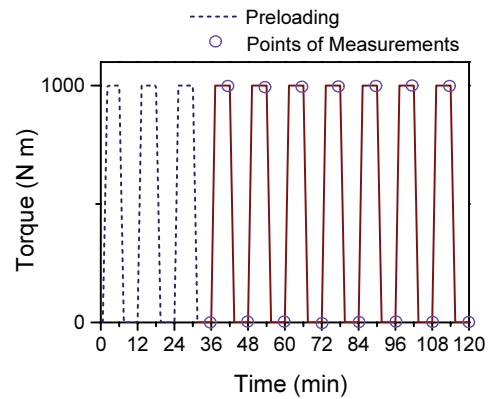


Fig. 2 Loading schedule for the measurement of sensitivities of the 1000 N m-capacity torque transfer standards

력변화가 심하기 때문에 6분 정도 기다리면 출력 변화가 매우 적다. 이는 토크 핵심비교⁴ (Key Comparison, 국가간 표준 동등성을 확인하기 위한 비교시험)에서 사용하였던 절차와 같다. 한편, 토크측정기의 장착방향에 따른 출력변화를 최소화하기 위해 항상 일정한 방향으로 토크측정기를 장착하였다.

Fig. 2는 측정시리즈를 나타낸 그림으로 처음의 3번은 사전부하로 토크측정기의 출력을 안정화시키기 위한 절차이다. 사전부하 이후의 7번 측정 데이터의 평균으로 특정 환경조건에서의 출력값을 취하였다. 물론 7번 측정 데이터 취득 시의 온습도 값을 같이 기록하여 마찬가지로 평균을 취하였다. 지난1년간의 측정에서 항상 같은 지시계(중폭기)를 사용하였는데 이는 지시계 특성에 따른 출력변화를 최소화하기 위함이다. 측정시리즈를 시작하기 전 항상 지시계의 자가교정기능을 이용하여 출력을 항상 교정하였다.

토크암의 온도에 따른 길이 변화 또한 고려해야 한다. 길이가 바뀌면 발생하는 토크 자체가 바뀌므로 보정해 주어야 한다. KRISS 토크표준기의 토크암(레버)은 인바(Invar) 재료로 만들어져 약 $1.2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ (1.2 ppm/ $^{\circ}\text{C}$)의 낮은 열팽창계수를 갖는다. 본 실험에서 온도 변화 범위는 $\pm 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 온도에 따른 토크암 길이 변화는 크지 않지만 오차를 최소화하기 위해 측정된 토크값을 보정하여 사용하였다.

토크측정기는 질량표준의 표준분동과 같이 절대량을 갖고 있는 전달용 표준기가 아니므로 특별

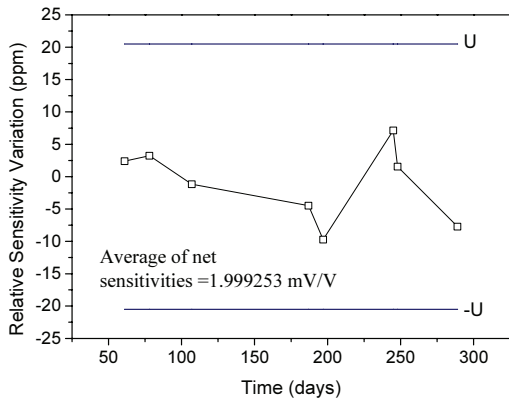


Fig. 3 Variation of the sensitivity measured at similar climatic conditions over a measuring period of approximately 1 year

하게 장비를 잘못 취급하지 않더라도 출력은 오랜 시간에 걸쳐 서서히 바뀔 수 있다. 본 측정은 1년에 걸친 오랜 기간에 이루어지므로 경년변화에 의한 드리프트를 관찰하여 보정해 주어야 한다. 이는 1년 중 공기환경이 비슷한 시점에서 측정된 데이터를 비교해 봄으로써 확인할 수 있다. Fig. 3은 GTM 토크측정기의 1년 중 비슷한 환경(온도편차 ±0.2 °C 이내, 상대습도편차 ±2 %rH)에서 측정된 데이터를 나타낸 것으로 측정값 간의 편차는 모두 ±10 ppm 이내로 온습도 감도계수 측정에 영향을 줄 정도의 경년변화는 없는 것으로 판단되었다.

4. 온습도 감도계수 측정 결과

4.1 측정 모델

온도 및 습도에 의한 토크측정기의 감도변화 ΔD는 식(1)과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\Delta D = c_T \Delta T + c_H \Delta H \quad (1)$$

여기서, c_T 와 c_H 는 각각 온도감도계수, 습도감도계수이며 ΔT 와 ΔH 는 각각 측정데이터 세트의 평균 온도와 습도와의 온도 및 습도 편차이다. n개의 측정데이터 세트의 오차의 제곱의 합을 최소화 하는 최소자승법(least squared method)를 이용하여 c_T 와 c_H 를 구한다. 오차의 제곱의 합은 식(2)와 같이 표현할 수 있으며 식(2)를 각각 c_T 와 c_H 로 편미분하여 편미분 값이 0이 되도록 하는 c_T 와 c_H 를 구하면 각각 식(3)과 (4)와 같이 나타난다.

Table 1 Temperature and humidity coefficients of sensitivity of the torque transducers

Transducers	Influencing factor	Sensitivity coefficients	Expanded uncertainty
GTM	temperature	$7.9 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$	$4.9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
	humidity	$4.8 \times 10^{-7} / \%\text{rH}$	$3.6 \times 10^{-7} / \%\text{rH}$
HBM	temperature	$9.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$1.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
	humidity	$-9.9 \times 10^{-7} / \%\text{rH}$	$1.7 \times 10^{-7} / \%\text{rH}$

$$E = \sum_{k=1}^n e_k^2 = \sum_{k=1}^n (\Delta D_k - c_T \Delta T_k - c_H \Delta H_k)^2 \quad (2)$$

$$c_T = \frac{s_{\Delta D}}{s_{\Delta T}} \left(\frac{r_{\Delta D \Delta T} - r_{\Delta D \Delta H} r_{\Delta T \Delta H}}{1 - r_{\Delta T \Delta H}^2} \right) \quad (3)$$

$$c_H = \frac{s_{\Delta D}}{s_{\Delta H}} \left(\frac{r_{\Delta D \Delta H} - r_{\Delta D \Delta T} r_{\Delta T \Delta H}}{1 - r_{\Delta T \Delta H}^2} \right) \quad (4)$$

여기서, $s_{\Delta D}$, $s_{\Delta T}$, $s_{\Delta H}$ 는 각각 ΔD, ΔT, ΔH의 실험 표준편차이며 $r_{\Delta D \Delta T}$ 는 각 입력량 사이의 상관계수로 식(5)와 같이 표현된다. $r_{\Delta D \Delta H}$, $r_{\Delta T \Delta H}$ 도 마찬가지로 아래 첨자에 맞추어 식(5)의 기호만 바꾸면 된다.

$$r_{\Delta D \Delta T} = \frac{\sum_{k=1}^n \Delta D \Delta T}{(n-1)s_{\Delta D} s_{\Delta T}} \quad (5)$$

온도와 습도 감도계수의 표준불확도 $u(c_T)$ 와 $u(c_H)$ 는 최소자승법을 이용한 온습도 감도계수 결정에서의 불확도 성분과 측정시의 온도 변화량 ±0.2 °C, 습도 변화량 ±2 %rH를 직사각형 분포로 그리고 토크측정기 출력의 반복도를 t-분포로 가정하여 Monte Carlo Simulation을 이용해 계산하였다.⁶

4.2 측정 결과

Table 1은 두 전달용 토크표준기의 온습도 감도계수를 구한 결과를 나타낸다.

Fig. 4(a)와 4(b)는 각각 GTM, HBM 전달용 표준기의 측정값을 보정하기 전과 보정한 후를 나타낸 것이다. GTM 전달용 표준기의 경우 보정전과 후 약 8배 정도 측정값 간의 편차가 줄어들음을 알 수 있고 HBM의 경우 약 4배만큼 줄어드는 효과를 보였다.

측정결과 GTM 전달용 표준기의 온도감도계수는 제조사에 제시한 성능 지표 ($< 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$)보다 약 8배 크게 나타났다. 습도 감도계수는 제조사의

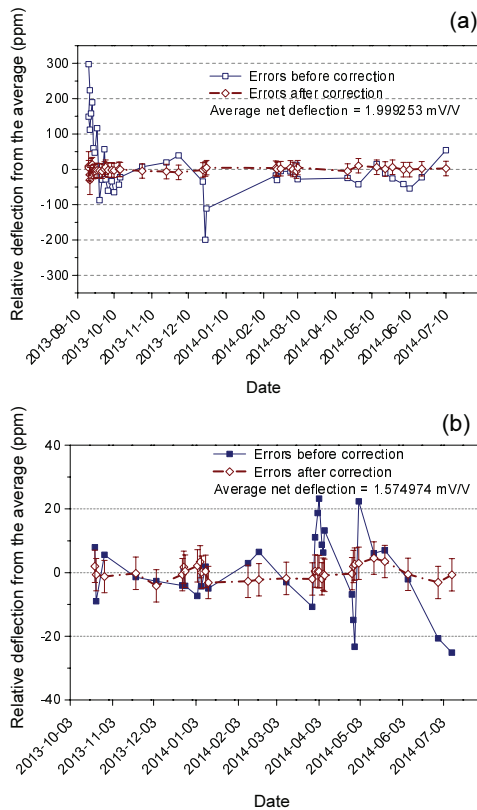


Fig. 4 Deflection variations before and after correction for the temperature and humidity effects of the (a) GTM torque transfer standard and (b) HBM torque transfer standard

성능 지표에 제시되지 않았다. 습도에 대한 계수는 온도에 대한 계수보다 상대적으로 작아 보이나 실험실 환경의 습도 조절은 온도보다 더 어렵고 교정실 사이에 20% ~ 30% 상대습도편차는 쉽게 발생하기 때문에 무시할 수 없는 양이다. 더욱이 온도와 습도에 의한 영향이 같이 나타나므로 만약 실험실 환경에 의해 오는 측정값의 편차는 더욱 크게 나타날 수 있다.

KRISS의 실하중 토크표준기의 교정측정능력이 5×10^{-5} 임을 감안할 때 만약 KRISS 교정실과 산업체 또는 교정업체의 교정실의 온도 편차가 2°C, 습도 편차가 30%RH 존재하며 GTM 전달용 표준기를 사용한다면 온습도에 의한 교정값 상대편차가 약 30×10^{-5} 발생하므로 KRISS 교정측정능력의 6 배 정도 편차를 갖게 된다. 이 경우 반드시 온습도 감도계수를 이용하여 보정해야 한다.

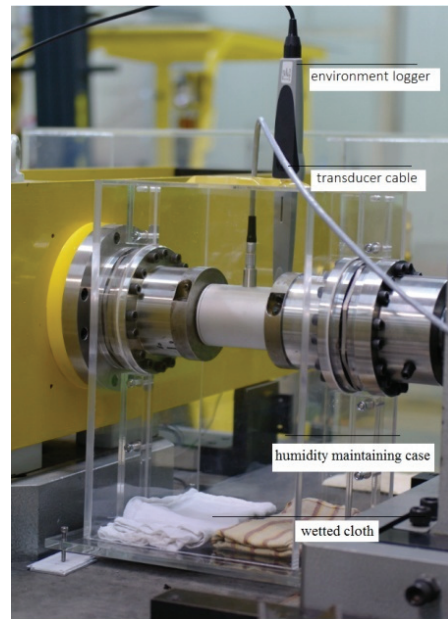


Fig. 5 In-situ humidification of the torque transfer standard using a local casing

5. 비교를 통한 검증

온습도 감도계수를 구하는 본 방법을 검증하기 위해 기존에 사용되었던 방법⁵⁾을 이용하여 같은 전달용 표준기의 습도 감도계수를 구하고 비교하였다. Fig. 5와 같이 토크측정기를 감싸는 아크릴 케이스를 토크표준기에 설치하고 아크릴 박스 안에 젖은 수건을 넣어 습도를 올리거나 방습제를 넣어 습도를 낮추는 방법을 사용하여 국부적으로 토크측정기의 주변 습도를 인위적으로 조절하였다.

아크릴 박스 안에는 온습도 센서를 설치하여 토크측정기 주변 공기의 온습도를 측정하였다. 젖은 수건이나 방습제를 넣고 습도가 일정하게 유지 될 때까지 기다린 다음 측정기가 변화된 습도에 안정화된 것을 확인한 후에 측정을 시작하였다. 방습제와 젖은 수건을 조합하여 적절하게 18%RH ~80%RH 까지 6단계로 습도를 변화시킬 수 있었다.

앞서 언급하였듯이 온도는 토크측정기와 토크표준기가 어댑터를 통하여 열전달이 일어나므로 국부적으로 토크측정기 주변의 온도를 조절한다고 해서 토크측정기의 온도가 변하지 않으므로 이 방법으로 온도감도계수를 구하긴 힘들다.

Fig. 6은 상대습도 변화에 따른 출력 변화를 본 연구에서 개발한 방법과 기존 방법으로 측정된 것

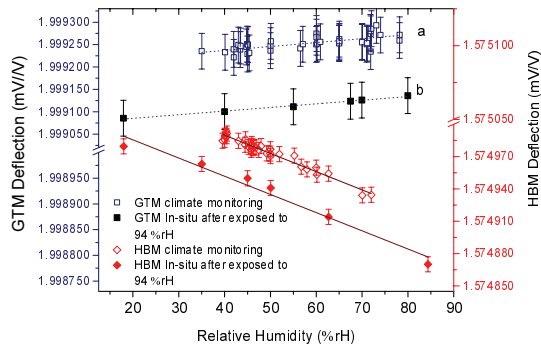


Fig. 6 Comparison of the humidity effect measured by monitoring the change of ambient conditions and by in-situ humidification for the two torque transfer standards

을 비교한 그래프이다. 출력값의 상대습도에 따른 변화율(즉, 그래프의 기울기)은 어느 방법으로 구하나 같음을 볼 수 있다. 인위적으로 습도를 조절하여 얻은 습도감도계수는 GTM 전달용 표준기의 경우 $4.1 \times 10^{-7}/\%rH$, HBM 전달용 표준기의 경우 $-1.1 \times 10^{-6}/\%rH$ 로 앞서 구한 값과 불확도 내에서 일치한다.

Fig. 6에서 각기 다른 방법으로 측정된 두 절대 출력값(그래프에서 a와 b) 사이에 일정한 편차(offset)는 90 %rH 이상 습도에 노출되었을 때 토크 측정기의 영점 출력(즉, 하중이 없을 때의 출력값)이 크게 변하여 발생한 것이다. 다시 건조시키고 시간이 지나도 영점 출력값은 복원되지 않았으나 습도나 온도 감도계수는 바뀌지 않았다.

6. 결론

본 논문에서는 국가토크표준 소급의 정확도 향상을 위하여 전달용 표준기로 사용하고 있는 고정밀 토크측정기의 온습도 감도계수를 구하는 새로운 방법을 제안하고 이를 기존 방법과 비교 실험을 통해 검증하였다. 새로운 방법은 사계절에 따른 실험실의 자연스런 환경변화를 이용하여 다양한 온습도 환경에서 토크측정기의 감도를 측정하고 측정모델을 통해 데이터를 처리하여 온습도 감도계수를 동시에 구하는 방법이다. 이 방법은 기존 방법에 비해 특별한 장비가 필요 없으며 주기적으로 행하는 일상적인 교정 데이터를 활용하면 되므로 경제적이고 효율적인 장점이 있다.

후 기

이 논문은 2014년 한국표준과학연구원 주요사업 재원으로 지원을 받아 수행된 연구임. (한국표준과학연구원 - 14011003)

REFERENCES

1. Park, Y. K., Kim, M. S., Kim, J. H., and Kang, D. I., "Torque Standards and Evaluation," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 21, No. 9, pp. 26-31, 2004.
2. Kim, M. S., Park, Y. K., Kim, J. H., and Kang, D. I., "2 kNm Deadweight Torque Standard Machine in KRISS," Proc. of Autumn Conference, pp. 656-659, 2004.
3. Sanponpute, T. and Arksonnarong, N., "Temperature and Humidity Dependence on Stability of Torque Measuring Devices," Proc. of IMEKO 22nd TC3 conference, Paper No. 22, 2014.
4. Röske, D., "Final Report on the Torque Key Comparison CCM.T-K1," Metrologia, Vol. 46, Paper No. 07002, 2009.
5. Bruge, A., "Simplified Measurements of the Humidity Coefficient of Torque Transducers in Calibration Laboratories," Acta IMEKO, Vol. 3, No. 2, pp. 32-38, 2014.
6. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, "Supplement 1 to the 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement'—Propagation of Distributions using a Monte Carlo Method," Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM, Vol. 101, 2008.