

한국표준과학연구원의 실하중 토크 표준기

김민석*(한국표준과학연구원), 박연규 (한국표준과학연구원), 김종호(한국표준과학연구원)
강대임(한국표준과학연구원)

2 kNm Deadweight Torque Standard Machine in KRISS

M. S. Kim(KRISS), Y. K. Park(KRISS), J.H. Kim(KRISS), D. I. Kang (KRISS)

ABSTRACT

As the demand for traceable calibrations of torque measuring devices has considerably increased both in the production sector and in research institutes, suitable standard machines had to be developed at the Korea Research Institute of Standards and Science. Owing to its special design, the small uncertainty of measurement required for the realization of the static torque can be reached (relative uncertainty of measurement $< 5 \times 10^{-5}$ in the measurement range between 500 and 2000 Nm, and $< 1 \times 10^{-4}$ in the measurement range from 10 to 500 Nm). The relative discrepancy between our torque calibration results of 2 kNm and PTB's (Physikalisch Technische Bundesanstalt, Germany) results was less than 2×10^{-5} , which confirming our uncertainty estimation.

Key Words : Torque standard (토크 표준), Transfer standard (전달용 표준), Torque transducer (토크 측정기), Calibration (교정), Deadweight (실하중)

1. 서론

토크는 나사나 볼트를 조이거나 동력을 전달하는 데 사용되는 물리량으로 정확한 토크의 측정은 제품의 품질관리와 안전 및 성능 향상에 필수적이다. 토크 측정을 위해서는 각종 토크 측정기가 활용된다. 국내 다수의 산업체를 방문 조사한 결과, 기계 조립 업체들은 다수의 토크 측정기들을 보유하고 있었다. 국내 굴지의 자동차 공장 중 하나의 현황을 살펴보면, 보유하고 있는 토크 센서의 총수는 약 500 개 정도이며, 이는 상기 공장에서 보유중인 총 센서의 약 15 %에 해당할 정도로 그 중요성이 높았다. 토크 측정의 정확도는 측정의 정밀한 평가를 통해 확보될 수 있다. 이는 우선적으로 토크 측정기의 정밀한 평가를 통해 이루어진다. 산업체들이 보유하고 있는 각종 토크 측정기들은 주기적인 교정을 받아야 한다. 현재 진행중인 국가간 상호인정협약(MRA)에 따라 토크 측정의 정확한 평가는 날로 그 중요성을 더해가고 있다.

앞 절에서 언급하였듯이 제품의 엄격한 품질관리를 위해서는 정확한 토크 측정이 바탕이 되어야

하고 이를 위해선 토크 측정기의 정밀한 평가가 선행되어야 한다. 토크 측정기의 정밀한 평가는 정확한 토크를 발생시킬 수 있는 표준기(또는 교정기)를 통하여 이루어진다. 즉, 토크 표준기의 정확도에 따라 그 나라의 토크 평가 수준이 결정되게 된다. 현재 한국표준과학연구원이 보유하고 있는 1 kNm 토크표준기는 확장 불확도가 10 ~ 100 Nm의 용량에 대해 4.3×10^{-3} 이고 100 ~ 1000 Nm의 범위에서 5.4×10^{-4} 정도이다. 이는 국가 표준기로 활용되기에는 부적합한 수준이며 따라서 본 연구팀에서는 5×10^{-5} 의 상대불확도를 목표로 2 kNm 용량의 실하중 토크 표준기를 개발하였다.

본 논문에서는 전반적인 실하중 표준기의 구조 및 원리에 대해 언급하고 2 kNm 토크 표준기의 개발과정 그리고 표준기를 이용한 토크 측정기의 교정 결과 및 독일연방기술청(PTB, Physikalisch Technische Bundesanstalt, Germany)의 교정값과의 비교 결과에 대해 토론하겠다.

2. 실하중 토크 표준기

2.1 원리 및 구조

실하중 토크 표준기는 정확한 질량값을 갖는 분동의 무게를 토크암에 가함으로써 발생한 실토크를 토크 측정기에 가할 수 있도록 제작된 장치로서, 토크표준기 중에서 가장 높은 정확도를 갖는다.

Fig. 1 에 실하중 토크표준기의 개략도를 나타내었다. 이것은 추, 추 구동부, 몸체, 공기 베어링, 토크암, 카운터 베어링, 카운터 베어링 드라이브, 위치센서, 제어장치 등으로 구성되어 있다. 자세한 내용은 참고문헌[1]에 소개되어 있으니 참조하기 바란다. Fig. 1 에서 실하중을 발생시키기 위한 추는 중력을 이용한 정확한 힘의 발생을 위하여 질량 표준으로부터 보급을 받아야 하며 토크암 역시 길이 표준으로부터 보급을 받아야 한다. 특히, 토크암은 온도변화에 따른 토크암의 길이 변화의 영향을 최소화하고자 인바(invvar)를 사용한다.

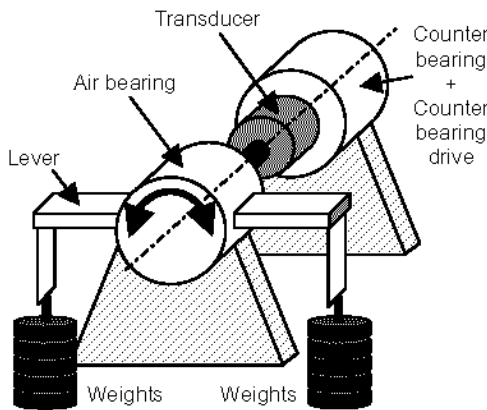


Fig. 1 Schematic diagram of deadweight torque standard machine

토크암의 중심축에는 공기 베어링을 사용하여 마찰력을 최소화 한다. 토크표준기의 뒤쪽에 있는 카운터 베어링을 이용하여 토크 발생의 뒤축을 고정하며, 동시에 베어링의 미세 조정을 통해 토크축을 제외한 다른 방향의 힘/모멘트 성분이 토크 측정기에 가해지지 않도록 축의 중심축을 일치시킨다. 하중에 의한 토크 측정기의 탄성 회전 변형으로 토크암의 수평이 깨질 경우 유효 토크암의 길이가 짧아져 발생하는 토크의 절대량이 줄어들므로 토크 평가 시 토크암은 항상 수평을 유지해야 하며, 이는 카운터 베어링 드라이브를 이용한 제어를 통해 달성된다.

토크측정기 전후에 플렉서블 커플링(flexible coupling)을 사용하여 축 정렬이 잘못되더라도 토크 측정기에 순수한 토크만이 인가될 수 있게 한다.

토크 측정기의 결합 방법에는 여러가지 방법이 있으나 대부분의 국가 토크표준기들은 토크측정기의 결합을 위해 마찰 조인트(friction joint)를 사용한다. 마찰 조인트는 유압 등을 이용하여 원형 샤프트 전체를 강하게 조여 토크 측정기를 결합할 수 있게 한다.

2.2 한국표준과학연구원 실하중 토크 표준기

Fig. 2 는 한국표준과학연구원에 설치된 2 kNm 용량의 실하중 토크표준기를 나타낸다. 본 토크표준기의 시계 방향 추는 조합식으로 구성되어 있으며, 반시계 방향 추는 순차식으로 구성되어 있다. 조합식 방식은 여러 개의 추들 중 원하는 것들만 선택하여 인가할 수 있는 방식이고, 순차식 방법은 쌓여있는 추들 중 위의 것부터 순차적으로 인가할 수 있는 방법이다. Fig. 3 에 나타내었듯이 조합식 추는 400 N 추 4 개, 200 N 추 2 개, 100 N 추 1 개, 50 N 추 1 개, 20 N 추 2 개, 10 N 추 1 개로 구성되어 있으며, 최소 10 N 부터 최대 2200 N 까지 매 10 N 간격으로 힘을 발생시킬 수 있다. 순차식 추는 위로부터 200 N 추 5 개, 500 N 추 2 개, 다시 200 N 추 1 개로 구성되어 있다. 토크표준기에서 발생하는 토크는 시계 방향 토크와 반시계 방향 토크의 차이가 된다. 따라서, 시계 방향의 조합식 추와 반시계 방향의 순차식 추를 상호 조합하여, 시계 방향과 반시계 양 방향으로 10 Nm 에서 2200 Nm 까지 매 10 Nm 간격으로 토크를 발생시킬 수 있다.

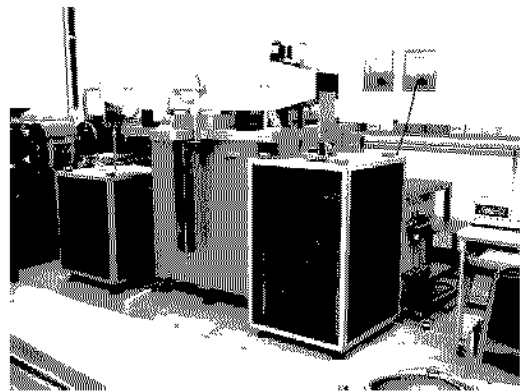


Fig. 2 2 kNm deadweight torque standard machine in KRISS

토크암의 가운데에 토크암을 마찰없이 지지해주는 에어 베어링을 설치하였다. 사용한 베어링은 Kugler사의 ZL210/254 모델이었으며 견딜 수 있는 최대 수직방향의 하중은 3.8 kN이다. 즉, 최대 약 340 kg의 무게를 견딜 수 있다. 따라서 시계 방향으로 2 kNm의 토크를 가할 때는 조합식 추만으로도

가능하므로 베어링에 최대 허용하중 3.8 kN보다 작은 약 3.0 kN (토크암의 자중 포함)의 하중이 걸린다. 하지만 시계 반대방향으로 2 kNm의 토크를 가할 때는 조합식과 순차식 추를 모두 사용하여야 하므로 전체 수직방향의 하중이 3.8 kN이 넘지 않도록 조합에 신경 써야 한다. 공압 베어링의 민감도를 테스트하기 위해 한쪽 암에 매우 작은 질량을 갖는 분동을 올려놓고 토크 센서의 출력값을 확인해본 결과 분동 100 mg이하에도 출력값이 변하는 것을 확인하였다. 이는 베어링에 의한 상대오차가 5×10^{-6} 이하임을 말해준다.

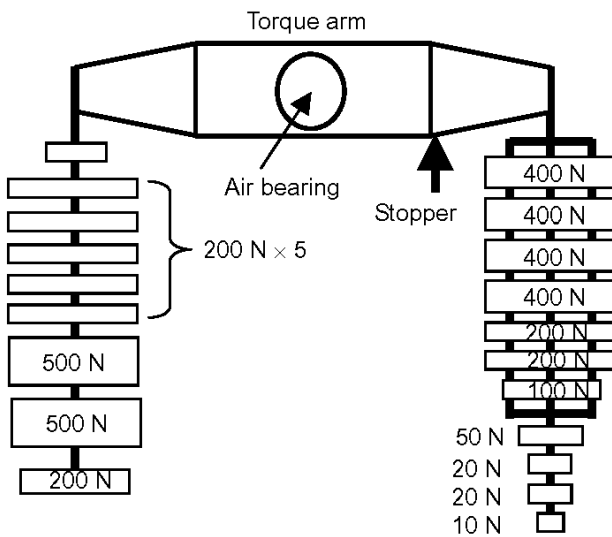


Fig. 3 Weights configuration of 2 kNm torque standard machine

토크암의 길이는 양 방향으로 1 m 씩이며 앞에서 언급하였듯이 온도팽창에 의한 오차를 최소화하기 위해 인바(invar)를 사용하여 가공하였다. 두께가 25 mm인 두 개의 판을 조립한 형태이며 2500 N의 하중에 대하여 약 0.076 mm의 굽힘 처짐이 발생한다. 토크암의 길이는 바로 발생하려는 토크값에 비례하는 양이므로 분동의 정확도와 함께 토크의 정확도를 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 최대한 정확하게 암의 길이를 1 m로 가공해야 한다. 가령 가공오차가 0.1 mm이면 이로 인해 발생하는 토크의 상대 오차는 1×10^{-4} 로 매우 크므로 암 길이의 정확한 가공과 측정은 필수적이다. 이를 위하여 스틸 밴드로 체결되는 암의 맨 끝은 연삭가공을 하였고 Fig. 4 처럼 연삭가공 후 정밀 삼차원 측정기로 공압 베어링을 조립한 상태에서 베어링의 센터와 암 끝과의 거리를 측정하였다. 사용한 스틸 밴드의 두께가 50 μ m이므로 1000 mm로 정확히 맞추기 위해선 베어링 센터로부터 암 끝까지의 공칭 치

수가 999.975 mm 이어야 한다. 측정된 결과 오른쪽 암은 999.9816 mm, 왼쪽 암은 999.9796 mm로 공칭 치수보다 크지만 차이는 모두 7 μ m 이내로 암의 길이에 의한 불확도는 1×10^{-5} 이내이다.

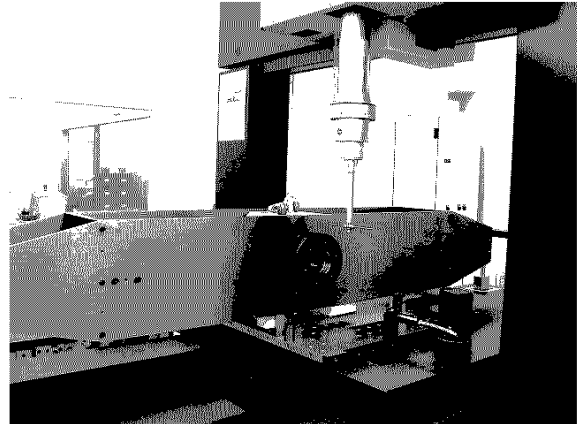


Fig. 4 Length measurement of the torque arm using three dimensional coordinate measuring machine

하중이 바뀔 때 건단계의 토크 유지를 위해 토크암의 오른쪽에 암 고정장치를 장착하였으며 기계를 정지시켜 놓을 때도 암을 고정시켜 안정장치의 역할도 한다. 토크암의 수평유지를 위해 암의 오른쪽에 레이저 변위센서(LK-031, KEYENCE)를 장착하여 암의 기울어짐을 측정한다. 측정값은 수평유지 제어의 피드백 신호로 사용한다. 반복해서 수평 제어 성능을 테스트 한 결과, 암의 끝의 위치 반복성은 $\pm 20 \mu$ m 이내이다. 이는 각도로 환산하면 4 초 이내이며 이로 인한 코사인 오차는 10^{-6} 이내이다.

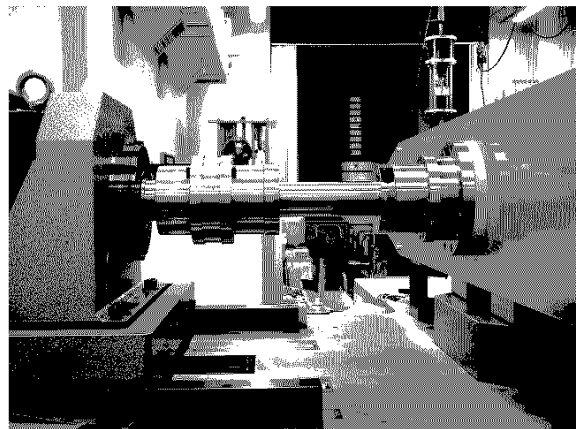


Fig. 5 Alignment of counter bearing axis to air bearing axis with a cylindrical centering bar

오차의 중요한 요인으로 작용하는 것 중에 하나는 공압 베어링 축과 카운터 베어링 축 정렬 상태이다. 물론 플렉서블 커플링이 중간에 있어 정렬

오차를 보상해 주지만 정밀 측정을 위해선 최대한 축을 일치시켜야 한다. 이를 위해 Fig. 5 처럼 원통형 센터링 바를 가공하여 양쪽 베어링 구멍으로 연결이 되도록 카운터 베어링 축을 조정하였다.

3. 실험결과

제작된 토크 표준기를 이용하여 전달용 토크 표준기로 사용되는 정밀 급 토크 측정기를 교정하였다. 사용한 토크 측정기는 HBM 사의 TN 시리즈로 용량은 2000 Nm 이었다. 이 측정기는 또한 독일 표준기관인 PTB 에서 교정을 받은 것으로 간접적으로 독일의 토크 표준기와 한국표준과학연구원에서 제작한 토크 표준기를 비교할 수도 있다. Fig. 6 는 토크 측정기의 교정 결과를 나타낸다. 기준선에서 벗어난 양(즉, 토크 측정기의 비선형성)을 표시한 것이다. 0, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1600, 1800, 2000 Nm 의 10 개 하중을 각각 시계방향과 반 시계 방향으로 가해 교정하였으며 측정 순서는 다음과 같다. 처음에 토크 측정기를 장착한 후(0°) 교정에 들어가기 전 최대 하중 2000 Nm 까지 가하는 사전 부하를 3 번 수행하여 측정기를 안정화 시키고 앞서 언급한 10 개의 하중을 증가 순으로 가하고 토크 측정기를 120° 회전하여 다시 증가 순으로 하중을 가하고 세 번째 측정에서는 측정기를 240° 회전한 후 이력을 측정하기 위해 증가감소 순서로 하중을 가해 데이터를 획득하였다. 측정기를 회전한 후 새로 장착했을 때 발생하는 변화를 최소화 하고자 마찬가지로 사전부하를 1 회 실시하였다. 측정결과 비선형성과 반복능 그리고 이력 특성이 최대출력 대비 $\pm 0.005\%$ 이내로 측정기가 매우 우수함을 알 수 있다.

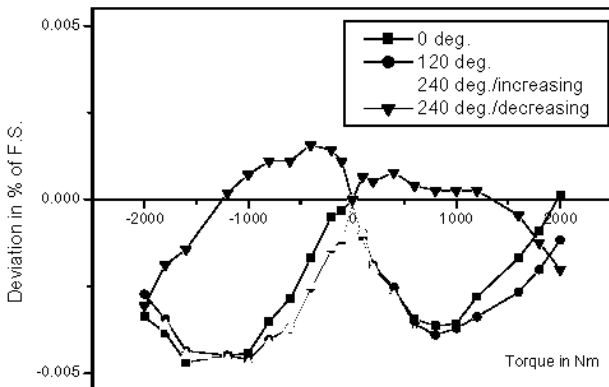


Fig. 6 Calibration result of the transfer standard TN/2000 Nm, deviations from reference line

또한 각 하중에 대한 토크 측정기의 출력을 PTB 의 교정결과와 비교하여 상대 편차를 구하였다. Fig.

7 은 그 결과를 나타내는 그림으로 최대 편차는 반 시계 방향의 200 Nm에서 4.5×10^{-5} 이었다. 이 외의 하중점에서는 모두 2.5×10^{-5} 이하의 편차를 보였다. 이는 매우 작은 편차이며 개발된 토크표준기가 정확한 토크를 발생함을 간접적으로 확인할 수 있다.

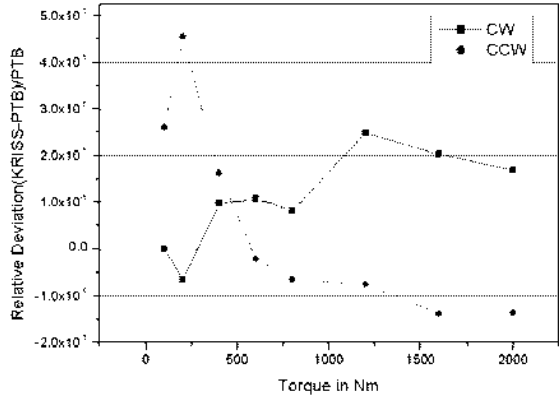


Fig. 7 Relative deviation between KRISS and PTB torque measurement result.

4. 결론 및 향후계획

한국표준과학연구원에서는 국내의 토크 측정 정확도 향상 및 보급을 위해 2 kNm의 실하중 토크 표준기를 제작하고 토크 측정기를 교정하였다. 또한 전달용 표준기를 이용하여 PTB의 토크표준기와 비교를 한 결과 $\pm 5 \times 10^{-5}$ 이내의 편차를 보였다. 향후 토크 표준기의 불확도 계산을 통해 최고측정능력을 선언하고 국내에 교정 서비스를 시행할 예정에 있다.

참고문헌

1. 박연규, 김민석, 김중호, 강대임, “토크 표준 및 평가 연구동향,” 한국 정밀공학회지, 제 21 권, 제 9 호, pp. 26-31, 2004.
2. Adolf, K., Mauersberger, D., and Peschel, D., “Specifications and Uncertainty of Measurement of the PTB’s 1 kNm Torque Standard Machine,” Proc. of 14th IMEKO TC3 Conference, pp. 174 - 177, 1995.
3. Peschel, D., “The State of the Art and Future Development of Metrology in the Field of Torque Measurement in Germany,” Proc. of 14th IMEKO World Congress, pp. 65 - 71, 1997.