

◆특집◆ 힘 측정 및 응용

토크 표준 및 평가 연구 동향

박연규\*, 김민석\*\*, 김종호\*\*, 강대임\*\*

Torque Standards and Evaluation

Yon-Kyu Park\*, Min-Seok Kim\*\*, Jong-Ho Kim\*\* and Dae-Im Kang\*\*

Key Words : Torque(토크), Torque evaluation(토크 평가), Torque standard machine(토크표준기), Torque calibration machine(토크교정기), Reference torque wrench(기준 토크렌치)

1. 서론

일반적인 공업 제품은 다수의 부품들로 이루어져 있다. TV 등과 같은 가전제품은 천여개, 자동차는 만여개, 그리고 항공기는 십만여개의 부품으로 구성된다. 여러개의 부품은 다양한 방법으로 조립되어 완제품을 이룬다. 자동차의 제조와 같은 기계공업 분야에서 가장 일반적인 조립방법은 볼트 또는 나사를 이용하는 방법이다.

조립의 정확도는 완성품의 성능에 직접적인 영향을 미친다. 단일 부품의 정확도가 아무리 높아도, 조립과정의 오차는 완제품의 오차로 반영되기 때문이다. 볼트 조립의 정확도는 조립 시 조임력의 정확한 통제에 달려있다. 일반 중기계에 사용되는 디젤 엔진의 경우, 엔진의 누유 방지를 이루기 위해서는 볼트의 조임력이 정확하게 통제되어야 한다. 이는 일반 승용차의 엔진 역시 마찬가지이며, 자동차 공장에서는 이를 통제하기 위하여 센서가 장착된 자동 조임장치를 사용하고 있다. 자동차의 경우, 엔진 이외에도 승객의 안전과 관련된 주요 부품의 조립 시에는 조임력을 정확히 통제하고 있다. 최근, 산업의 정밀화에 따라 조립

의 정확도에 대한 요구가 점차 증가하고 있다.

토크는 비틀림력 또는 우력이라고 하며, 각종 나사의 조립력이나 회전체의 동력을 나타내는 물리량이다. 따라서, 전술한 바와 같은 정밀 조립의 정확도를 향상시키기 위해서는 토크 측정 및 평가의 정밀도가 필수적임을 알 수 있다. 다양한 분야의 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 총센서의 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.

본 논문에서는 토크 측정기의 평가 기술을 소개하고자 한다. 토크 물리량 구현의 최고 정점인 토크표준기의 구조 및 국내외 현황에 대해 기술할 것이다. 또한, 실제 산업체에서 활용되는 토크 측정기들에 대한 직접적 평가를 수행하는 토크교정기 및 이의 현황에 대해 기술하고자 한다.

\* 한국표준과학연구원 물리표준부  
Tel. 042-868-5240, Fax. 042-868-5240  
Email: ykpark@kriss.re.kr

힘/토크의 측정 및 평가, 특히, 관련 국가표준의 확립에 매진 중이다. 또한, 각종 힘의 측정과 관련된 응용 연구활동을 하고 있다.

\*\* 한국표준과학연구원 물리표준부

## 2. 실하중 토크표준기

### 2.1 실하중 토크표준기의 구조

실하중 토크표준기는 정확한 질량값을 갖는 분동의 무게를 토크 암에 가함으로써 발생한 실토크를 토크 측정기에 가할 수 있도록 제작된 장치로서, 토크표준기 중에서 가장 높은 정확도를 갖는 토크표준기이다.

실하중 토크표준기는 피교정 기기인 토크 측정기의 중심 축과 운반대 위에 설치된 고정축 사이에 연결한 후, 토크 암의 끝에 위치한 하중 결이에 추를 가해줌으로써 토크 측정기의 중심축에 회전 모멘트를 발생시킬 수 있다.

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. Fig. 1 에서 실하중을 발생시키기 위한 추는 중력을 이용한 정확한 힘의 발생을 위하여 질량표준으로부터 소급을 받아야 한다. 추의 질량값은 토크의 SI 단위인 Nm 를 반영할 수 있도록 결정되어야 한다.

토크암 역시 길이표준으로부터 소급을 받아야 한다. 특히, 토크암은 온도변화에 따른 토크암의 길이 변화의 영향을 최소화하고자 열팽창 계수가 일반 스테인레스 스틸의 1/10 에 불과한 인바(invar) 재질의 스틸을 사용한다.

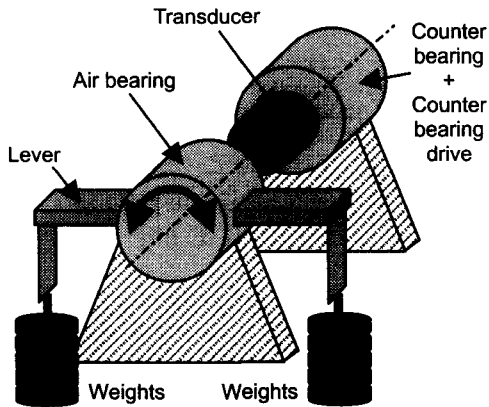


Fig. 1 Schematic diagram of deadweight torque standard machine

토크암의 중심축에는 공기 베어링을 사용하여 마찰력을 최소화 한다. 볼 베어링 등을 사용할 경우, 베어링에서 발생하는 마찰이 토크표준기의 가장 주요한 불확도 성분이다. 특히, 낮은 토크 범위에서는 볼 베어링의 마찰이 대부분의 불확도 성분을 차지한다. 볼 베어링을 사용한 토크표준기의 상대 불확도는 최대  $5 \times 10^{-3}$  에 이른다.

토크표준기의 뒤쪽에는 카운터 베어링과 카운터 베어링 드라이브가 존재한다. 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. 토크표준기를 이용한 토크 측정기의 평가 시, 실하중을 이용하여 발생한 토크가 토크 측정기에 인가된다. 이 때, 토크 측정기에는 탄성 회전 변형이 야기되며, 이로 인하여 토크암의 수평이 깨지게 된다. 토크암의 수평이 깨질 경우 유효 토크암의 길이가 짧아져 발생하는 토크의 절대량이 줄어든다. 따라서, 토크 평가 시 토크암은 항상 수평을 유지해야 하며, 이는 카운터 베어링 드라이브를 이용한 제어를 통해 달성된다.

토크 측정기를 토크표준기에 장착할 때, 토크 중심축의 미세한 불일치는 토크 측정기로서의 모멘트 성분 인가를 야기시킨다. 이를 방지하기 위하여 토크측정기 전후에 플렉서블 커플링(flexible coupling)을 사용한다. 플렉서블 커플링은 토크에 대해서만 높은 강성을 가지며 나머지의 힘/모멘트 성분에는 유연하게 반응하여, 토크 측정기에 순수한 토크만이 인가될 수 있게 한다.

토크 측정기의 결합 방법에는 플랜지(flange)와 볼트를 이용하는 방법, 사각형의 샤프트를 이용하는 방법, 키홀을 이용하는 방법 등이 있다. 이 중 샤프트 형태의 토크 측정기들은 대부분 사각형 또는 키홀 형태로 되어있다. 그러나, 상기 토크 결합 방법들을 사용할 경우, 토크의 전달이 샤프트에 국지적으로 작용하고, 이로 인하여 토크 측정기 평가의 정밀도를 크게 떨어트린다. 따라서, 바람직한 토크 측정기의 결합 방법은 전체 샤프트 전체를 통해 토크가 전달되는 방법임을 알 수 있다. 현재, 대부분의 국가 토크표준기들은 토크측정기의 결합을 위해 마찰 조인트(friction joint)를 사용한다. 마찰 조인트는 유압 등을 이용하여 원

형 샤프트 전체를 강하게 조여 토크 측정기를 결합할 수 있게 한다. 마찰 조인트를 사용할 경우, 사각형 샤프트나 키홀을 이용하는 경우에 비해 평가의 정확도를 100 배 정도 향상시킬 수 있다.

## 2.2 2 kNm 실하중 토크표준기

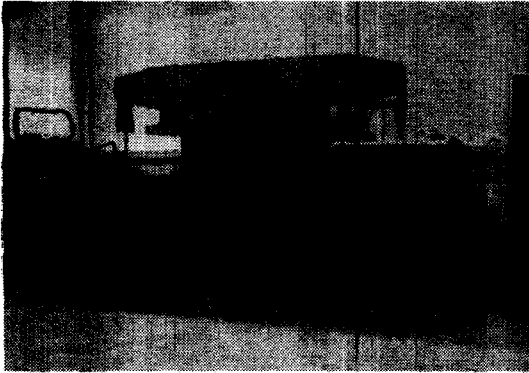


Fig. 2 2 kNm deadweight torque standard machine in KRISS

Fig. 2 는 한국표준과학연구원에 설치된 2 kNm 용량의 실하중 토크표준기를 나타낸다. 토크암의 길이는 양 방향으로 1 m 씩이다. 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. 순차식 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.

본 토크표준기의 모든 동작은 PC 와 PLC 를 통해 자동제어된다. 따라서, 토크표준기의 평가는 토크 측정기의 설치 각도를 바꾸는 작업 외에는

주어진 설정에 따라 자동적으로 이루어진다.

본 토크표준기의 상대 불확도는  $5 \times 10^{-5}$  이며, 2005 년에 수행될 토크분야의 국가간 핵심비교(key comparison)에 참여하여 한국의 국가 토크 표준 능력을 국제적으로 인정받게 될 것이다.

한국표준과학연구원에서는 상기 실하중 토크표준기 외에 100 Nm 용량의 실하중 토크표준기를 개발 중에 있으며, 50 kNm 용량의 토크표준기를 개발하여 대용량 토크 평가의 요구에 대응하고자 한다.

## 2.3 토크표준 국제 동향

독일의 표준연구기관인 PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)에서는 1 kNm 및 20 kNm 용량의 실하중 토크표준기를 개발하여 운용중이다.<sup>1,2</sup>

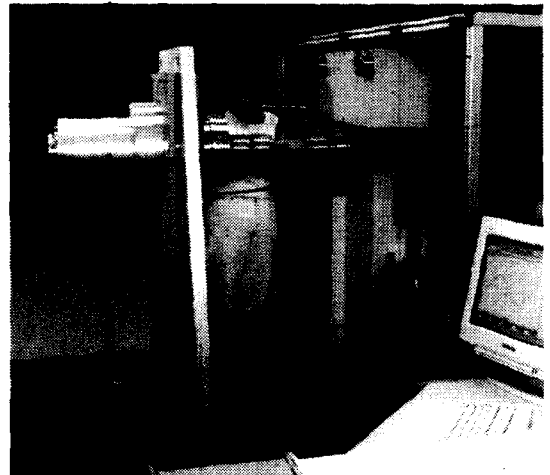


Fig. 3 1 kNm deadweight torque standard machine in PTB

Fig. 3 은 PTB 1 kNm 실하중 토크표준기를 나타낸다. 본 표준기의 암길이는 50 cm 이며, 추는 시계 및 반시계 양 방향으로 순차식 방식이다. Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 순차식 추는 용량을 달리하는 여러 개의 세트들로 구성되어 있으며, 각 추의 세트들은 회전 원반 위에 올려져 있다. 회전 원반을 회전시켜 원하는 용량의 추 세트를 토크암에 인가함으로써, 토크 측정기의 평가에 적절한 토크를 발생시킬 수 있다. 본 실하중 토크표준기의 상대 불확도는  $2 \times 10^{-5}$  으로 선언되었다.

PTB 20 kNm 실하중 토크표준기의 암길이는 1 m 이다. 본 토크표준기의 추 구성은 시계방향의 경우 조합식으로 되어 있으며, 반시계 방향의 경우 순차식으로 구성되어 있다. 본 표준기의 상대 불확도는  $2 \times 10^{-5}$  으로 선언되었다.

PTB 는 전술한 2 대의 실하중 토크표준기 외에 대용량의 비교식 토크표준기를 개발 중이다. 정밀 힘 측정기를 기반으로 토크의 발생량을 제어하는 방식으로 1 MNm 용량에  $1 \times 10^{-3}$  의 상대 불확도를 목표로 하고 있다. Fig. 4 는 1 MNm 비교식 토크표준기의 사진을 나타낸다.

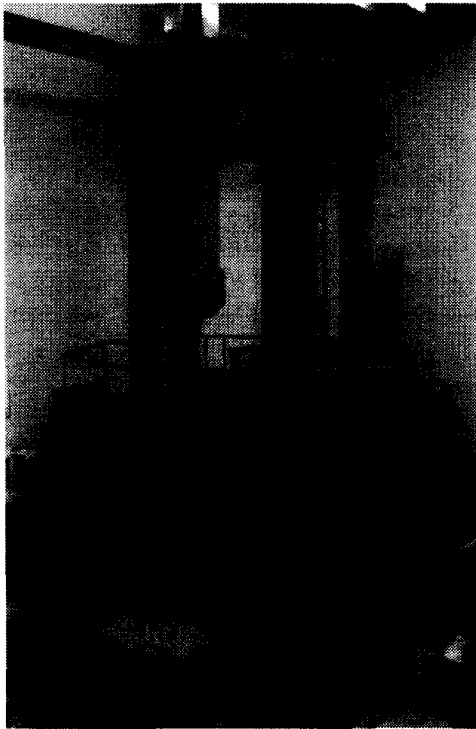


Fig. 4 1 MNm torque standard machine in PTB

일본의 표준연구기관인 NMIJ(National Metrology Institute of Japan)에서는 1 kNm 와 20 kNm 두대의 실하중 토크표준기를 보유하고 있다. 두 표준기 모두  $5 \times 10^{-5}$  의 상대 불확도를 갖는다.<sup>3</sup>

영국의 표준연구기관인 NPL(National Physical Laboratory)은 2 kNm 용량의 실하중 토크표준기 개발을 2004 년 완성을 목표로 진행 중이다.

국가간 상호인정협약(MRA)에 따른 토크 분야

의 핵심비교가 2005 년 수행 예정이다. 1 kNm, 20 kNm 두 개의 범위에 걸쳐 추진될 예정이며, 독일의 PTB 가 주관한다. 1 kNm 의 범위에는 한국, 독일, 영국, 일본을 비롯한 총 7 개국이 참여할 예정이며, 20 kNm 의 범위에서는 독일, 일본, 프랑스 등 총 6 개국이 참여할 예정이다.

### 3. 토크교정기

#### 3.1 토크암과 추를 이용한 평가

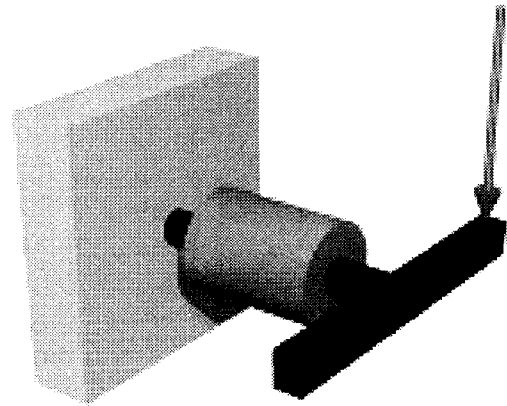


Fig. 5 Torque calibration using unsupported beam

국내의 여러 토크 교정기관에서 토크 평가를 위해 주로 사용되는 방법이 Fig. 5 에 나타낸 것과 같은 단순 토크암과 추를 이용하는 방법이다. 이 방법을 구현하기 위해서는 토크암과 추만 구비하면 되므로 경제적이고 간편한 방법이나, 평가 대상이 되는 토크 측정기에 토크 뿐 아니라, 수직력 및 모멘트가 인가된다는 치명적인 결함을 갖는다. 토크 측정기가 토크 뿐 아니라, 다른 힘/모멘트 성분에 반응하여 그 출력에 오차가 발생하기 때문이다. 최근 국제학회를 통해 보고된 자료에 의하면, 동일한 토크 측정기에 대하여 토크표준기를 이용한 평가 때와 토크암+추를 이용한 평가 시의 편차가 최대 1 %에 이르고 있다. 따라서, 본 방법은 토크의 정밀한 평가를 위해서는 지양되어야 할 방법이다. 따라서, 빠른 시일 내에 이를 대체할 토크 교정 방법의 도입이 필요하며, 이를 위한 해결 방

안이 다음 절에서 기술할 비교식 토크교정기이다.

### 3.2 비교식 토크교정기

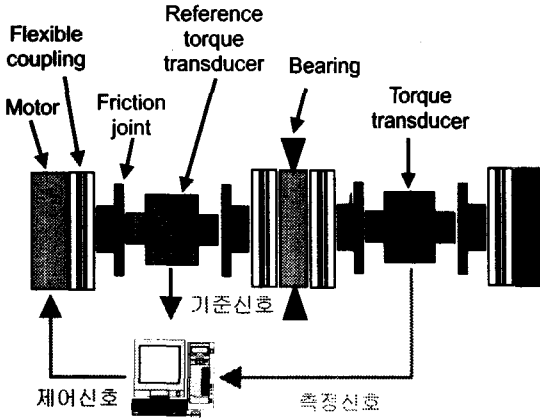


Fig. 6 Schematic diagram of comparative torque calibration machine

Fig. 6 은 비교식 토크교정기의 개념도를 나타낸다. 정렬된 축상에 모터, 플렉서블 커플링, 마찰조인트, 기준 토크 측정기, 토크 측정기 등을 배열하고, 모터를 통해 토크를 인가하면서 기준 토크 측정기와 토크 측정기의 신호를 측정 비교하여 토크 측정기의 평가를 수행하는 장치이다. 이 때, 기준 토크 측정기는 사전에 실하중 토크표준기 등을 이용한 평가를 받아야 한다.

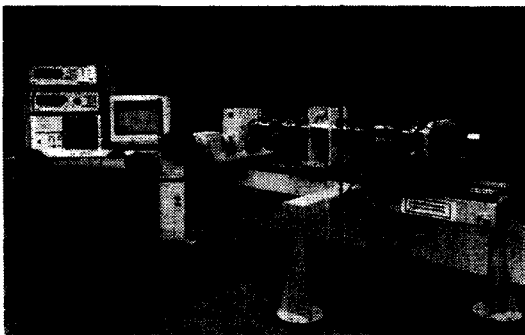


Fig. 7 2 kNm comparative torque calibration machine in PTB

비교식 토크교정기는 상대적으로 저렴한 가격 외에도 응용의 다양성으로 인해, 독일과 같은 토

크 표준 분야의 선진국에서도 적극 활용하고 있는 방법이다. 독일 PTB 에서는 20 Nm 와 2 kNm 용량의 비교식 토크교정기를 운용 중이며, 현재 5 kNm 용량의 비교식 토크교정기를 개발하고 있다. Fig. 7 은 독일 PTB 의 2 kNm 비교식 토크교정기를 나타낸다.<sup>2,4,5</sup>

현재 국내의 비교식 토크교정기 보급 현황은 극히 부진한 상황이다. 비교식 토크교정기는 단순 토크암+추를 이용한 토크 평가 방법을 대체할 수 있는 유용한 방법이기 때문에, 앞으로 이의 국내 보급을 통한 정밀한 토크 평가의 보급 및 이를 통한 국내 관련 산업의 정밀도 향상이 요구된다.

### 3.3 기준 토크렌치

토크렌치는 렌치와 토크측정기가 결합된 것으로서, 볼트 조립 시 조임력의 통제를 위해 사용된다. 대규모 기계 조립 공장에는 다수의 토크렌치가 존재하며, 또한 이를 평가하기 위한 토크렌치 교정기가 존재한다.

토크렌치 교정기는 내부에 전기식 토크측정기를 장착한 후, 이의 신호를 기준으로 토크렌치를 평가한다. 현재, 토크렌치 교정기를 위한 교정 방법이 존재하지 않으며, 토크렌치 교정기 내의 토크 측정기만을 탈착하여 교정하고 있는 상황이다. 따라서, 이를 효율적으로 교정할 수 있는 방법의 도입이 필요하다.

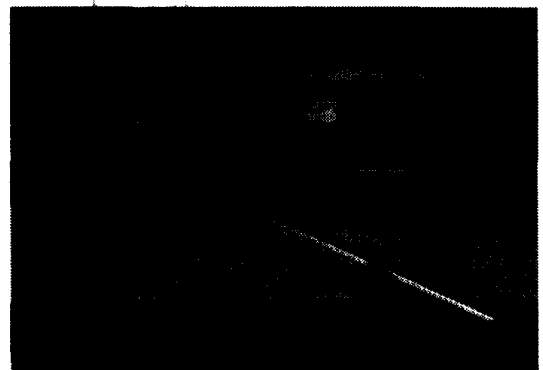


Fig. 8 Reference torque wrench

독일과 같은 선진국에서는 정밀 토크 측정기와 렌치가 결합된 형태의 기준 토크렌치(reference torque wrench)를 사용하여 현장의 토크렌치 교정기를 쉽게 교정하고 있다.<sup>6</sup> Fig. 8 은 독일 HBM 사

의 기준 토크렌치를 나타낸다. 앞절에서 기술한 비교식 토크교정기와 더불어 기준 토크렌치의 국내 보급 역시 부진한 상황이다. 현실적으로 토크렌치 교정기를 평가할 수 있는 유용한 방법임을 고려할 때, 기준 토크렌치의 국내 보급이 절실히 요구된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 토크 측정의 평가를 위한 토크표준기 및 토크교정기에 대하여 기술하였고, 이와 관련된 국제동향을 소개하였다.

한국표준과학연구원에서 담당하고 있는 국가 토크표준의 확립과 관련하여, 국제적 수준의 2 kNm 실하중 토크표준기의 개발을 시작으로 하여 활발한 연구가 진행중이다. 그 결과 국가간 핵심 비교에 참여할 수 있는 역량을 확보하였다. 향후, 100 Nm 용량의 실하중 토크표준기와 50 kNm 용량의 토크표준기의 개발을 통해 광범위의 국가 토크표준을 확립할 계획이다.

그러나, 토크의 실질적인 국내 보급을 위한 토크교정기는 그 보급 수준이 미미한 상황이다. 토크의 효율적인 보급을 위한 비교식 토크교정기 및 기준 토크렌치의 조속한 개발 및 국내 도입이 필요하다.

#### 참고문헌

1. Adolf, K., Mauersberger, D. and Peschel, D., "Specifications and Uncertainty of Measurement of the PTB's 1 kNm Torque Standard Machine," Proc. of 14<sup>th</sup> IMEKO TC3 Conference, pp. 174 - 177, 1995.
2. Peschel, D., "The State of the Art and Future Development of Metrology in the Field of Torque Measurement in Germany," Proc. of 14<sup>th</sup> IMEKO World Congress, pp. 65 - 71, 1997.
3. Ohgushi, K., Tojo, T. and Furuta, A., "Development of the 1 kNm Torque Standard Machine," Proc. of 16<sup>th</sup> IMEKO World Congress, pp. 217 - 223, 2000.
4. Peschel, D., "Proposal for the Design of Torque Calibration Machines using the Principle of a Component System," Pro. of 15<sup>th</sup> IMEKO TC3 Conference, pp. 251 - 254, 1996.
5. Peschel, D. and Bruge, A., "Calibration of Torque Measuring Devices - Step-by-Step or Continuous Procedure," Pro. of 16<sup>th</sup> IMEKO TC3 Conference, pp. 275 - 279, 1998.
6. Static Calibration of Reference Torque Wrenches, DKD guide DKD-R 3-7, 1995.