

◆특집◆ 힘 측정 및 응용

한국의 힘표준 능력

강대임*, 박연규**, 김종호**, 김민석**

Capability of force standards at KRISS

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

Key Words : 힘 측정(force measurement), 힘 표준(force standard), 실하중(deadweight), 유압배율방식(hydraulic amplification), 빌드업방식(build-up), 핵심비교(key comparison)

1. 서론

일상생활과 산업현장에서 측정되는 힘의 범위를 정리해 보면 Fig. 1 과 같다. 힘의 SI 단위인 1 뉴턴(N : 단위 질량 1 kg 에 대해 1 m/s² 의 가속도를 생기게 하는 힘의 크기임. 정성적으로는 사과 반쪽을 손에 들고 있을 때 느끼는 중력의 크기가 약 1 N 임)을 기준으로 크기는 수십 MN(10⁶ N) 크기의 우주선에서 발생하는 추진력에서부터 작게는 수 pN(10⁻¹² N) 크기의 원자들 사이의 결합력까지 그 범위가 매우 광범위하다. 힘 측정은 상업용 저울, 산업용 저울, 재료시험기, 힘 측정기와 같은 계측기산업분야, 자동화 및 물류관리와 같은 프로세스분야, 구조물 거동 해석, 항공기 및 선박 모형시험, 교량관리, 첨단교통시스템의 교통량 제어와 같은 산업안전분야 그리고 가상환경하에서의 촉각 제시, 마이크로 내시경의 촉각감지, 로봇이나 로켓의 미세 정밀제어 등 첨단산업분야, 원자현미경과 나노인덴터 등의 NT 분야 그리고 생체분자력 측정 등의 BT 분야 등 우리 일상생활에서부터 전통산업분야 및 신기술분야에 직접 또는 간접으로 활용되고 있다.

힘 측정 기술 중 널리 사용되는 기술들을 단계별로 정리하면 Fig. 2 와 같다. 여기에서 요소 기술은 스트레인게이지 기술, 피에조 기술 등과 같이 힘 측정을 위한 기본 기술을 의미하며 그 자체로서 힘 측정에 직접 사용되기도 한다. 단위 기술은 요소 기술들의 조합으로 구성되며 각종 힘의 측정에 직접적으로 사용되는 기술이다.

힘의 정확한 측정을 위해서는 Fig. 2 의 단위 기술들인 힘 센서의 특성을 평가할 수 있는 힘의 표준이 필요하다. 힘 표준기는 힘을 발생시키는 장치로서 힘의 표준을 제공하는 역할을 한다. 힘 표준기는 힘의 발생범위에 따라 실하중 방식, 유압배율 방식, 빌드업 방식, 전자력 방식 등이 있다. 1 N 에서 1 MN 범위에서는 주로 실하중 방식이 많이 사용되고 1 MN 를 초과하는 대용량 힘표준의 경우 유압배율 방식이나 빌드업 방식이 주로 사용된다. 최근에 측정의 필요성이 많이 대두되는 마이크로 뉴턴 이하에서 나노 뉴턴 영역까지는 분동을 이용한 실하중의 적용이 곤란하므로 전자력 방식을 이용한 힘표준기 개발연구들이 진행되고 있다.

본 글에서는 국가측정표준대표기관인 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science ; KRISS)의 힘표준 현황을 살펴보고, 선진표준기관들의 비교를 통하여 우리나라의 힘표준 수준을 평가하였다. 한국의 힘표준 능력은 세계 5 위 이내로 평가되었다.

* 한국표준과학연구원 물리표준부
Tel. 042-868-5010, Fax. 042-868-5012
Email dikang@kriss.re.kr

힘/토크의 표준 및 측정기술, 역학센서 설계, MEMS 를 이용한 인공피부센서 개발에 관심을 갖고 있다.

**한국표준과학연구원 물리표준부

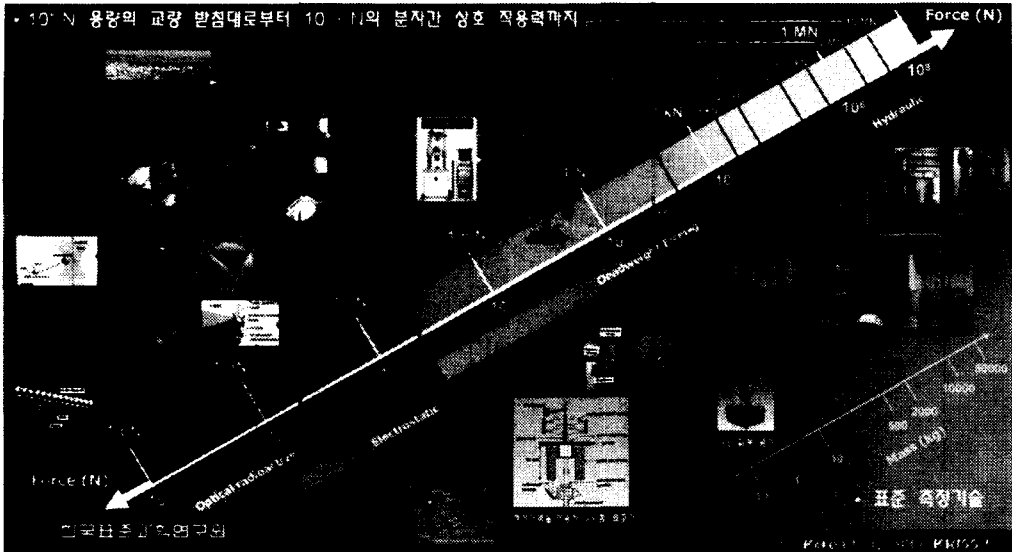


Fig. 1 Range of force measurements and standards

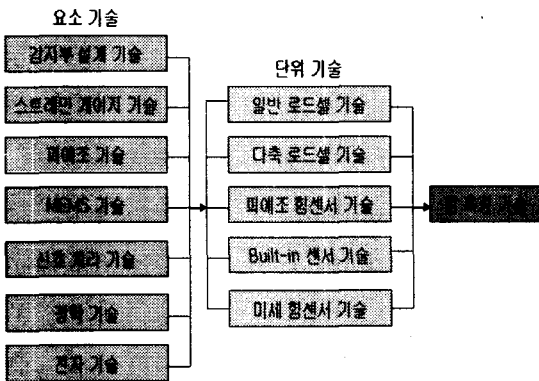


Fig. 2 Technique for force measurements

2. 한국표준과학연구원의 힘표준 능력

한국표준과학연구원은 5 대의 실하중 힘표준기 그리고 유압식 힘표준기, 빌드업 힘표준기를 각각 1 대씩 보유하고 있으며 현장 측정 및 교정에 사용되는 15 MN 과 30 MN 빌드업 힘측정기를 보유하고 있다.

2.1 실하중 힘표준기(deadweight force standard machine)

실하중 힘표준기는 정확한 질량값을 갖는 분

동의 무게를 힘 센서에 직접 부하할 수 있도록 제작된 장치로서 힘표준기 중에서 정확도가 가장 높다. 분동의 무게는 분동의 질량값과 중력가속도의 곱이므로 힘 표준기가 설치될 지점의 중력가속도와 분동의 질량값을 알면 계산될 수 있다. 한편 공기의 부력은 분동의 무게가 작용하는 방향과 반대로 영향을 미치므로 실제 분동의 무게는 부력만큼 감소된 값이 된다. 따라서 질량값이 m 인 분동이 발생하는 힘 F 는 식 (1)과 같다.

$$F = mg_{\log} \left(1 - \frac{\rho_{air}}{\rho_w}\right) \quad (1)$$

g_{loc} = 분동이 설치된 장소의 지역 중력가속도 값

ρ_{air} = 공기의 밀도값

ρ_w = 분동의 밀도값

실하중 힘표준기의 불확도(uncertainty)는 분동의 질량 측정에서 오는 불확도, 중력가속도 측정 불확도, 공기부력 보정 불확도, 힘표준기의 비대칭 구조 및 비대칭 변형에 오는 불확도 등의 조합으로 표시된다. 현재의 측정기술 수준으로 볼 때 실하중 힘표준기의 상대불확도를 2×10^{-5} 수준으로 유지할 수 있다.

대부분 국가표준기관에서는 실하중 힘표준기로 국가표준을 유지하고 있다. 한국표준과학연구원은 200 N, 5 kN, 20 kN, 100 kN, 500 kN 용량의 실

하중 힘표준기를 보유하고 있으며, 상대불확도는 2×10^{-5} 이다. Fig. 3 은 KRISS 보유 100 kN 실하중 표준기이다.

실하중 힘표준기는 분동의 무게로 힘을 직접 발생시키므로 힘표준기의 구조적 특성 및 크기 때문에 용량에 제한이 따른다. 미국 표준기술원이 보유하고 있는 4.4 MN 용량이 세계 최대용량이다.

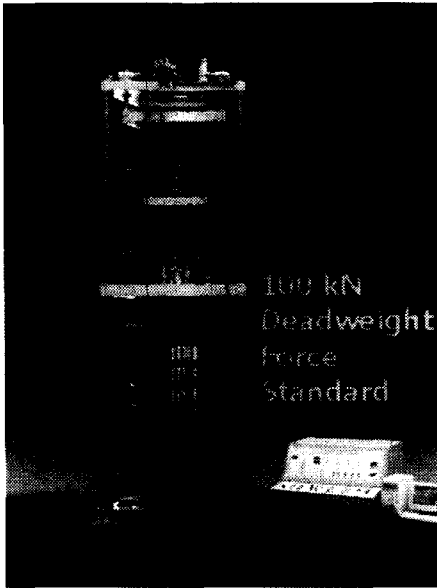


Fig. 3 100 kN force standard machine at KRISS

2.2 유압식 힘표준기

유압식 힘 표준기는 Fig. 4 와 같이 실하중 힘표준기를 유압 배율시켜 대용량 힘을 발생시키는 장치이다. 계측 시스템(measuring system)에서 실하중 힘은 유압 피스톤-실린더 시스템에 의해서 발생되는 힘과 평형상태에 있고, 피스톤의 가속도가 0 이면 실하중 힘의 크기와 피스톤-실린더에 의한 힘의 크기는 같다고 가정할 수 있다. 실린더와 피스톤 간의 마찰 효과를 줄이기 위해서 피스톤-실린더 시스템은 밀폐되어 있지 않으며 실린더가 피스톤 주위를 회전하고 있다. 피스톤-실린더 시스템의 유효 단면적과 실하중에 의해 결정되는 유압이 교정 시스템(working system)이라고 불리는 제 2 의 피스톤-실린더 시스템에도 동일하게 작용한다. 따라서 교정 시스템에 의해 발생되는 힘 F 는 식 (2)과 같이 두 개의 피스톤-실린더 시스템들의 유효 단면적 증폭비 Q 및 실하중에 의해 발

생되는 힘의 곱으로 표현할 수 있다.

$$F = mg_{\log} \left(1 - \frac{\rho_{air}}{\rho_w}\right) Q \quad (2)$$

이때 양쪽 피스톤-실린더 시스템의 누유(oil leakage)는 고속 유압 서보밸브 시스템이나 유압 서보모터 등을 이용하여 보상되어진다.

유압식 힘표준기의 불확도는 실하중 힘표준기의 불확도 성분들을 포함하여 피스톤-실린더의 유효단면적 증폭비 결정 불확도, 유압 제어 정밀도 등의 조합으로 표시된다. 현재의 측정기술 수준으로 볼 때 유압식 힘표준기의 상대불확도를 1×10^{-4} 수준으로 유지할 수 있다. 유압식 힘표준기는 대용량 힘표준기로 많이 활용되고 있으며 일본 계량연구소는 20 MN 용량을 보유하고 있으며 독일연방물리청은 16.5 MN 용량을 보유하고 있다. KRISS 는 2.2 MN 용량을 보유하고 있으며 상대불확도는 1×10^{-4} 이다.

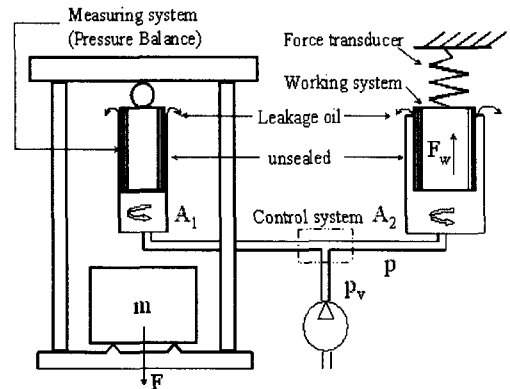


Fig. 4 Diagram of hydraulic force standard machine

2.3 빌드업식 힘표준기

대용량 힘 표준을 유지하는 또 다른 방법으로 는 빌드업 힘 측정 시스템과 정밀 유압장치를 조합한 빌드업식 힘표준기가 있다. 이것은 현재 이용 가능한 힘표준기로부터 교정을 받은 여러개의 힘센서를 병렬로 배열하여 빌드업 시스템을 구성하고 이것을 힘의 표준으로 사용하는 것이다. 유압식 힘표준기에 비해 정확도는 다소 떨어지나 힘표준기의 구조가 간단하여 제작비 및 유지비가 저렴하다. 영국 물리연구소 및 프랑스 표준연구소에

서 10 MN 용량을 보유하고 있다. KRISS 도 10 MN 용량(Fig. 5 참조)을 보유하고 있으며 상대불확도는 2×10^{-4} 이다.

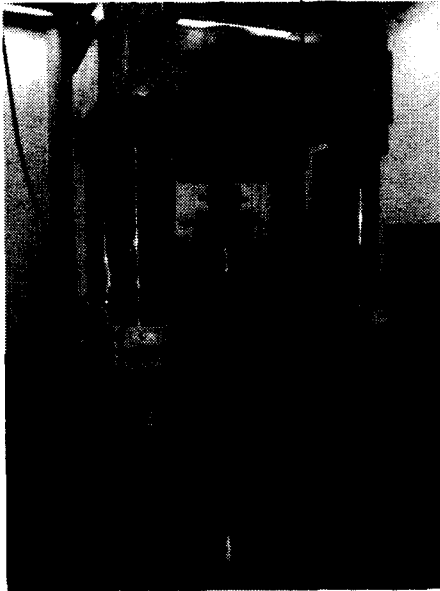


Fig. 5 10 MN build-up force standard machine at KRISS

2.4 빌드업식 힘측정기

국내 산업현장에는 10 MN 용량을 초과하는 재료시험기 또는 구조물 시험기들이 15 대 정도 있다. KRISS 는 이들 시험기의 교정에 사용할 수 있는 상대불확도 1×10^{-3} 인 15 MN 및 30 MN 용량의 빌드업 힘교정기를 보유하고 있다. Fig. 6 은 30 MN 빌드업 힘측정기를 보여준다.

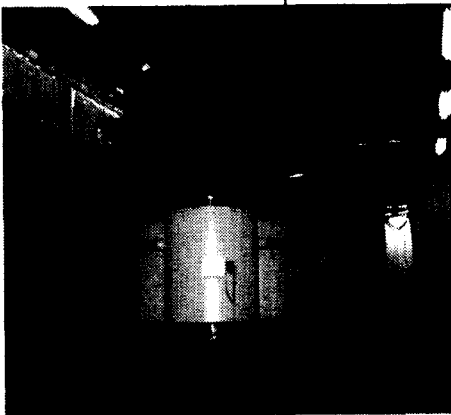


Fig. 6 30 MN build-up force measuring system at KR KRISS

3. 선진표준기관의 힘표준 능력

미국의 표준기관인 표준기술원(NIST)은 힘의 표준을 실하중 힘표준기로 유지하고 있으며 보유하고 있는 힘표준기의 용량은 10 kN, 100 kN, 500 kN, 1.3 MN, 4.5 MN 이며 그것들의 상대불확도는 2×10^{-5} 이다.

독일의 표준기관인 독일연방물리청(PTB)은 상대불확도 2×10^{-5} 을 갖는 200 N, 2 kN, 20 kN, 100 kN, 1 MN, 2 MN 용량의 실하중 힘표준기를 보유하고 있으며, 대용량 힘표준기로는 상대불확도가 1×10^{-4} 인 5 MN 및 16.5 MN 유압식 힘표준기를 보유하고 있다.

일본의 표준기관인 계량연구소(NMIJ)는 상대불확도 2×10^{-5} 을 갖는 5 kN, 20 kN, 50 kN, 540 kN 용량의 실하중 힘표준기를 보유하고 있으며 대용량 힘표준기로는 상대불확도가 1×10^{-4} 인 5 MN 및 20 MN 유압식 힘표준기를 보유하고 있다.

영국의 표준기관인 물리연구소(NPL)은 상대불확도 2×10^{-5} 을 갖는 2 kN, 20 kN, 100 kN, 1.2 MN 용량의 실하중 힘표준기를 보유하고 있으며 대용량 힘표준기로는 상대불확도가 5×10^{-4} 인 5 MN 유압식 힘표준기와 상대불확도가 1.5×10^{-3} 인 30 MN 빌드업 힘표준기를 보유하고 있다.

프랑스의 표준기관인 계량연구소(BNM-LNE)는 상대불확도 2×10^{-5} 을 갖는 2 kN, 50 kN, 500 kN 용량의 실하중 힘표준기를 보유하고 있으며 대용량 힘표준기로는 상대불확도가 2×10^{-4} 인 1 MN 빌드업 힘표준기, 상대불확도가 3×10^{-4} 인 3 MN, 상대불확도가 5×10^{-4} 인 9 MN 빌드업 힘표준기를 보유하고 있다.

독일과 미국이 최고의 측정능력을 보유하고 있으며 일본, 영국, 프랑스가 그 뒤를 따르고 있다. 한국은 영국, 프랑스와 비슷한 수준으로 평가된다.

4. 핵심비교를 통한 힘표준 능력 검증

각국의 표준기관에서는 자국의 산업과 경제에 적합한 힘표준기들을 확보하여 힘표준을 유지하고 있다. 또한 불확도 분석을 통하여 각 표준기들의 불확도를 평가하고 그 결과를 발표하고 있다. 그러나 각 표준기관에서 발표하는 힘표준 능력이 적절한지 그리고 그 동등성의 정도(degree of

equivalence)가 어떠한지를 객관적으로 평가하는 것이 필요하다. 국제도량형위원회에서는 이와 같은 평가를 위하여 핵심측정 국제비교(key comparison : KC) 제도를 도입하여 운영 중에 있다. 핵심측정비교란 각국의 표준을 상호비교하여 각국의 측정능력을 객관적으로 검증하는 것을 의미한다. 대부분의 국가들이 국가표준기관을 운영하고 있으므로 동시에 모든 국가들이 참여하여 상호비교를 실시하는 것이 현실적으로 어렵다. 국제도량형위원회에서는 Fig. 7 과 같이 KC 를 표준기관의 측정능력과 지역별 안배를 고려하여 BIPM(국제도량형총국) KC, 지역별(RMO) KC 그리고 기관별 일대일 KC 로 구분하였다. BIPM KC 에는 세계 최고수준의 능력을 보유하는 있는 표준기관 15 내외가 참여하게 되며 각 지역별(아시아-오세아니아지역, 유럽지역, 북아메리카-남아메리카지역, 아프리카지역) KC 에는 BIPM KC 참여 국가중 1~2 개 국가가 참여토록 하여 모든 국가들의 측정능력을 직, 간접으로 상호비교할 수 있도록 하였다.

힘표준의 경우 10 kN, 100 kN, 1 MN, 4 MN 용량 즉 4 개의 측정 범위에 대해서 BIPM KC 가 진행되고 있다. BIPM KC 에 참여하는 국가들은 다음과 같다.

- 10 kN 범위(17 개 국가) : 미국, 브라질, 멕시코, 터키, 독일, 스페인, 영국, 이태리, 벨기에, 네덜란드, 핀란드, 한국, 중국, 일본, 프랑스, 싱가포르, 호주
- 100 kN 범위(17 개 국가) : 미국, 브라질, 멕시코, 터키, 독일, 스페인, 영국, 이태리, 벨기에, 핀란드, 한국, 중국, 일본, 프랑스, 인도, 남아공, 말레이시아
- 1 MN 범위(15 개 국가) : 미국, 독일, 이태리, 영국, 러시아, 중국, 캐나다, 프랑스, 스페인, 폴란드, 이태리, 중국, 한국, 일본, 호주
- 4 MN 범위(8 개 국가) : 미국, 독일, 영국, 한국, 일본, 중국, 폴란드, 프랑스

4 개의 측정 KC 모두에 참여하는 국가로는 독일, 미국, 일본, 프랑스, 영국, 한국, 중국 7 개 국가이다. 한국과 중국을 제외하면 모두 선진공업국으로서 세계 경제를 주도하는 국가들이다. 현재 10 kN 범위의 KC 는 측정이 완료되어 1 차 결과가 나온 상태이며 KRISS 결과가 우수한 것으

로 나타났다. 4 MN, 1 MN, 100 kN 는 현재 측정이 진행중에 있다. KC 참여 현황을 기준으로 하면 한국의 힘표준 능력은 선진국 수준으로 평가할 수 있다.

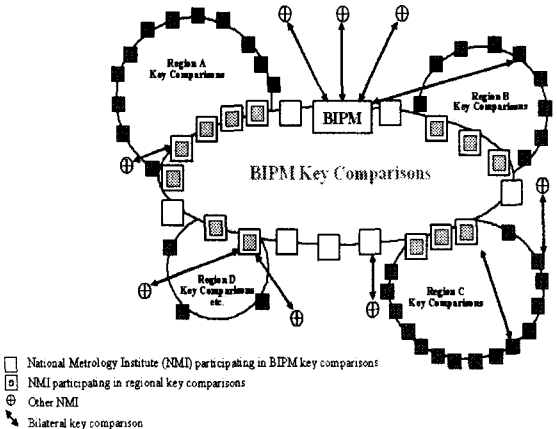


Fig. 7 Concept of key comparisons

5. 결론

한국의 힘 표준 현황을 살펴보고, 선진표준기관들과 비교한 결과 한국의 힘표준 능력은 세계 5 위 이내인 것으로 평가되었다. KRISS 의 힘표준 능력은 산업체 및 연구기관에서 필요로 하는 힘 측정 범위와 정확도를 충분히 충족시킬 것으로 기대된다. KRISS 의 선진 측정기술을 산업체와 연구기관에 이전하고 현장의 애로를 해결해 줄 목적으로 현재 측정클럽 (<http://metclub.kriss.re.kr/>)을 운영 중에 있다. 측정클럽의 활성화를 통하여 산업체와 현장의 측정능력을 선진국 수준으로 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 강대임 등, “국가지정연구실 힘 측정 및 평가기술 연구 최종평가보고서(인쇄중),” 2004