

내장형 힘 변환기를 이용한 대용량 힘 표준기 개발

강대임* · 이정태* · 송후근* · 김엄기**
(1999년 3월 6일 접수)

Development of a Large Force Standard Machine with Built-in Force Transducers

Dae-Im Kang, Jeong-Tae Lee, Hou-Keun Song and Am-Kee Kim

Key Words: Built-in Force Transducer(내장형 힘 변환기), Force Standard Machine(힘 표준기), Calibration(교정), Uncertainty(불확도), Deadweight Force(실하중 힘)

Abstract

Force measuring devices should be calibrated to guarantee their test results. In order to establish the force standards in Korea, deadweight machines of 5 kN, 20 kN, 100 kN and 500 kN capacity and a hydraulic force standard machine of 2 MN capacity were installed at the Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS). As heavy industries in Korea have been developed, we should measure large forces over 2 MN capacity precisely in industries. We developed a 10 MN force standard machine with built-in force transducers which is more compact and cheaper than hydraulic force standard machines which have been widely used as large force standards in most national metrology laboratories. Test results reveal that the relative expanded uncertainty of the force machine is less than 4.1×10^{-4} in the range of 1 MN~4.5 MN.

1. 서 론

정확한 힘의 발생은 질량값이 m인 추와 그것에 작용하는 중력에 의해 실현될 수 있다. 이와 같이 질량값을 정확히 알고 있는 추의 무게를 힘 측정 기기에 직접 가할 수 있도록 제작된 장치를 실하중 힘 표준기(deadweight force standard machine)라고 부른다. 실하중 힘 표준기가 이상적으로 제작되었을 때 발생하는 힘의 상대 불확도(relative uncertainty)는 2×10^{-5} 이내인 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 실하중 힘 표준기는 추의 무게로 힘을 직접 발생시키므로 힘 표준기의 안정성, 설치공간 등의 이유

로 제작할 수 있는 표준기의 용량은 한계가 있다.⁽²⁾

대부분의 국가표준기관에서는 50 N~1 MN의 힘 범위에서 실하중 힘 표준기로 국가표준을 유지하고 있다. 1 MN을 초과하는 힘의 국가표준은 유압 배율장치와 실하중을 결합한 유압식 힘 표준기(hydraulic force standard machine)로 유지하고 있다. 이 표준기는 파스칼의 원리를 이용한 것이다. 단면적이 서로 다른 두 조의 유압실린더를 유압배판으로 연결하여 균형을 이룬 상태에서 단면적이 작은 실린더에 질량값인 m인 추의 무게를 가하면 단면적이 큰 실린더에 추의 무게와 실린더 단면적의 비를 곱한 크기의 힘이 가해진다. 유압식 힘 표준기가 이상적으로 제작되었을 때 발생하는 힘의 상대 불확도는 2×10^{-4} 이내인 것으로 알려져 있다.⁽³⁾

대부분의 국가표준기관에서는 2 MN~20 MN의 힘 범위에서 유압식 힘 표준기로 국가표준을 유지

* 회원, 한국표준과학연구원 역학표준부
E-mail : dikang@krissol.kriss.re.kr
TEL : (042)868-5245 FAX : (042)868-5249

** 회원, 광주대학교 기계공학과

하고 있다. 유압식 힘 표준기는 대용량 힘을 정확하게 발생시킬 수 있는 장점이 있으나 제작단가가 비싼 단점이 있다.

힘 측정에 사용되는 힘 측정기기는 국가 표준인 힘 표준기로부터 교정을 받아 사용해야만 측정 결과의 신뢰도를 확보할 수 있다. 한국의 국가표준기관인 한국표준과학연구원에서는 5 kN, 20 kN, 100 kN, 500 kN 용량의 실하중 힘 표준기, 2 MN 용량의 유압식 힘 표준기로 힘의 국가표준을 유지하고 있다. 최근에 국내 산업이 대형화, 정밀화됨에 따라 2 MN 이상의 대용량 힘을 정확하게 측정해야 할 필요성이 증가하고 있다.

본 연구에서는 산업체에서 보유하고 있는 0.2 MN~10 MN 범위의 대용량 힘 측정기를 교정(calibration) 또는 시험하는데 사용할 수 있는 대용량 힘 표준기를 개발하고자 한다. 개발하고자 하는 힘 표준기는 실하중으로 힘을 직접 발생시키는 구조가 아니고 내장형 힘 변환기를 갖는 힘 비교기로서 힘 표준 소급성(traceability)은 build-up 힘 측정 시스템으로 된 전달용 표준기(force transfer standard)로 유지된다.⁽⁴⁾

2. 힘표준기 설계 및 제작

2.1 구조 및 작동원리

개발하고자 하는 10 MN 힘 표준기 구조의 개략도는 Fig. 1과 같다. 힘 표준기는 4개의 기둥(column), 각각의 기둥에 내장된 힘 변환기(built-in force transducer), 유압 펌프 시스템, 서보 밸브 및 제어 시스템, 데이터 취득 및 해석 시스템으로 구성되어 있다. 유압 펌프에 의해 실린더에 압력을 가하면 이 압력에 의해 발생된 압축 하중이 교정 대상 힘 측정기(force measuring device)에 전달된다. 이 때 하중틀(load frame)을 구성하는 기둥은 인장 반력을 받게 되고 인장 반력의 크기는 교정 대상 힘 측정기에 전달된 압축 하중과 같다고 가정할 수 있다. 따라서 인장 반력을 받는 기둥을 힘 변환기의 감지부(sensing element)로 사용할 수 있다. 감지부의 변형률을 측정하기 위해 기둥의 원주상에 스트레인게이지를 부착하였으며 이것을 이용하여 내장형 힘 변환기를 제작하였다. 힘 측정기에 걸리는 하중은 내장형 힘 변환기, 펌프 시스템, 서보 밸브 및 제어 시스템에 의해 조절된다.

내장형 힘 변환기를 이용하여 시험대상 힘 측정

기에 가해지는 힘을 측정하기 위해서는 내장형 힘 변환기를 교정해야만 한다. 내장형 힘 변환기의 총 용량이 10 MN이므로 이것을 교정하기 위해서는 10 MN 용량의 고정밀 힘 변환기가 필요하다. 10 MN 힘 변환기도 국가표준으로부터 소급성(traceability)을 유지하기 위해서 교정을 받아야 하므로 10 MN 용량의 힘 변환기를 교정할 수 있는 또 다른 힘 표준기가 필요하다는 결론에 도달한다. 이것을 해결하기 위하여 본 연구팀에서는 9.9 MN 용량의 build-up기법을 이용한 힘 측정 시스템을 개발하였다.⁽⁴⁾

힘 측정 시스템은 1.1 MN 용량의 힘 변환기 9개로 구성되어 있으며 국가표준으로부터 소급성을 유지하기 위하여 Fig. 2의 소급체계에 따라 9개의 1.1 MN 힘 변환기 각각을 교정하였다. 즉 1.1 MN 힘 변환기의 100 kN~500 kN 범위는 상대 불확도가 2×10^{-5} 인 500 kN 실하중 힘 표준기로 교정을 받았으며 500 kN~1.1 MN 범위는 상대 불확도가 2×10^{-4} 인 2 MN 유압식 힘 표준기로 교정을 받았다. 따라서 1.1 MN 힘 변환기 9개로 구성된 힘 측정 시스템의 교정범위(calibration range)는 0.9 MN~9.9 MN이 되고 이것을 이용하여 개발된 힘 표준기를 교정하였다.

2.2 하중 발생장치 설계 및 제작

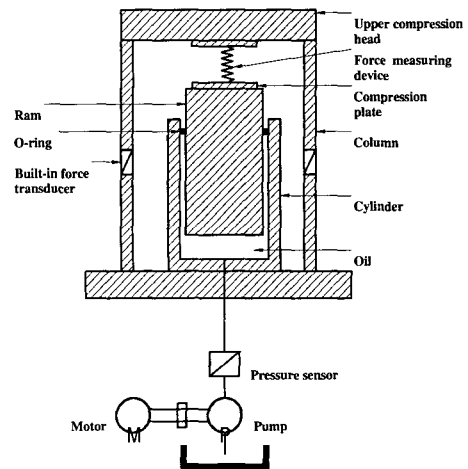


Fig. 1 Principle of 10 MN force standard machine

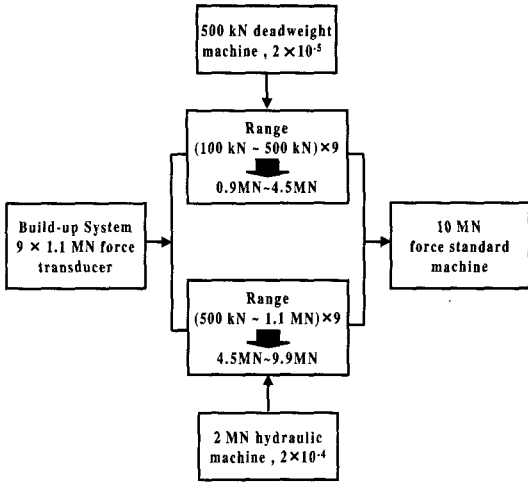


Fig. 2 Traceability chain for 10 MN force standard machine

하중 발생장치는 하중틀, 램/실린더 그리고 펌프 등의 유압 발생장치로 구성되어 있다. 하중틀은 4개의 기둥, 상부 지지판(top head), 하부 지지판(bed) 및 압축판(compression plate)으로 구성되어 있다. 상부 지지판과 하부 지지판은 4개의 기둥과 볼트로 체결되었다. 유압 실린더는 하부 지지판 위에 볼트로 체결하였다. 하부 지지판의 윗면은 유압 실린더가 장착될 수 있도록 평면으로 설계하였고 하부 지지판의 아래 면은 하부 지지판의 굽힘강성을 크게 하기 위해서 판의 중앙부위가 볼록한 형상이 되도록 설계하였다. 반면에 상부 지지판의 아래 면은 압축용 로드 플레이트가 장착될 수 있도록 평면으로 설계하였고 상부 지지판의 윗면은 상부 지지판의 굽힘강성을 크게 하기 위해서 판의 중앙부분이 볼록한 형상이 되도록 설계하였다.

내장형 힘 변환기의 감지부로 사용될 기둥은 지름이 170 mm이고 길이가 3.7 m이며 기둥의 재질은 니켈-크롬-몰리브덴강인 SNCM 8을 단조처리하여 사용하였다. 감지부로서의 기계적 성질을 갖도록 담금질과 뜨임 열처리를 하였으며 열처리 후의 경도가 HRC 40±2가 되도록 하였다. 기둥의 표면조도가 1.6~0.8 s이며 진직도가 0.05 이내가 되도록 정밀 가공하였다.

실린더는 단조강으로 일체형 구조로 설계하였으며 조립상태에서의 램/실린더의 평행도가 0.1 mm 이내가 되도록 하였다. 유압램의 직경은 본 연구에서 개발한 힘 표준기의 최대용량, 유압램의 자중

그리고 유압장치를 고려하여 700 mm로 결정하였다. 실린더는 유압램에 10 MN 이상의 힘을 발생시키는데 필요한 압력에 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 실린더 두께 t 는 식 (1)을 이용하여 구하였다.⁽⁵⁾

$$t = \frac{D}{2} \left(\sqrt{\frac{\sigma_t + 0.4P}{\sigma_t - 1.3P}} - 1 \right) \quad (1)$$

여기서 D 는 실린더 내경, P 는 실린더의 내압력, σ_t 는 실린더 재료의 인장응력이다. 실린더 내경 D 는 유압램의 직경과 같으므로 700 mm이고 인장응력 σ_t 는 단조강의 응력(100~200 MPa)범위내 즉 100.45 MPa로 결정하였으며 실린더 내압력 P 는 유압램에 작용되는 최대하중 10 MN과 자중을 고려하여 29.4 MPa로 하였다. 위의 요소들을 식 (1)에 대입하여 실린더 두께 t 를 구하면 120 mm이다. 따라서 실린더 외경은 940 mm가 된다.

패킹 시스템은 유압오일이 유압램과 실린더 사이로부터 외부로 유출되는 것을 방지하고 유압램이 실린더 축선상에서 상, 하로 움직일 때 실린더 내벽과의 마찰을 줄일 수 있도록 설계하였다. 패킹은 스텝실 오일링(stepseal oil ring) 3개와 웨어링(wear ring) 4개로 구성되어 있다. 실린더 상단에 위치한 스텝실 오일링 1개는 외부로부터 유압램과 실린더 사이로 이물질이 들어오는 것을 방지하기 위하여 설치되었으며, 스텝실 오일링 2개는 실린더 내의 오일이 높은 압력에도 불구하고 밖으로 새어나가는 것을 방지하기 위하여 설치되었다. 스텝실 오일링의 재질은 고압에서 견딜 수 있는 TURCON이다. 유압램과 실린더 내벽이 서로 직접적인 마찰을 하지 않도록 웨어링 4개를 설치하였다.

2.3 힘 제어회로 설계

힘 표준기의 제어회로 블록도는 Fig. 3과 같다. 기둥에 설치된 내장형 힘 변환기는 고정밀 지지장치인 DK-38과 연결되어 있다. DK-38에서 나오는 디지털 신호는 GPIB보드(National instruments사의 NI-488.2)에 의해 컴퓨터로 보내지며 이 값과 컴퓨터에서 입력된 표준 힘과를 비교하게 된다. 기준출력 그리고 기준출력과 측정출력의 차를 합한 값이 D/A보드를 거쳐 일정한 전압으로 비교기에 전달된다. 또한 힘 표준기에 내장된 별도의 힘 변환기의

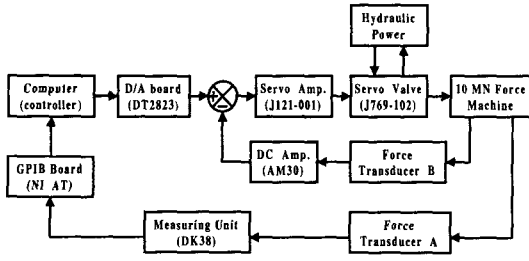


Fig. 3 Block diagram of control system for the force standard machine

출력이 증폭기를 거쳐 비교기에 전달된다. 이 두 개의 값을 비교하여 그 차만큼 서보밸브를 제어한다. 이와 같이 제어루프를 2개 사용한 이유는 내장형 힘 변환기의 지시장치로 사용한 DK 38은 분해능, 정밀도 및 정확도는 우수하여 주로 정적인 정밀측정에 사용되나 응답속도가 느려 제어용으로 사용하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 속도가 빠른 하중증폭기에 의해 감지되는 내장형 힘 변환기의 출력과 D/A 보드에 의해 출력되는 신호를 비교하여 서보 밸브를 제어하게 된다. 또한 컴퓨터에서는 입력된 기준출력과 내장형 힘 변환기의 출력이 동일하도록 즉 입력된 기준출력만이 D/A 보드에 전달되도록 계속 제어하게 된다. 유압 부품들에 기인하는 압력손실을 방지하기 위하여 서보밸브를 이용한 압력 정밀제어 시스템을 도입하였다. 모터에 의해 펌프가 구동되면 릴리프 밸브 및 솔레노이드 밸브에 의해 오일의 압력이 29 MPa로 일정하게 유지된다. 이 압력은 다시 서보 밸브에 의해 실린더 내의 압력을 원하는 값으로 정밀하게 조정된다.

2.4 내장형 힘 변환기 제작

10 MN 힘 표준기의 표준 힘(standard force)으로 사용될 내장형 힘 변환기를 제작하였다. 힘 표준기의 하중장치는 4개의 기둥으로 구성되어 있으므로 각각의 기둥을 2.5 MN 힘 변환기용 감지부로 사용할 수 있다. 사용되는 스트레인게이지의 게이지 상수를 고려하여 힘 변환기 각각의 정격출력이 0.65 mV/V가 되도록 기둥의 직경을 선정하였으며, 그 결과 기둥의 직경은 170 mm이다. 스트레인게이지 부착위치로는 끝효과의 영향을 배제하기 위하여 기둥의 중앙을 선택하였다. 각각의 기둥에 스트레인게이지를 원주방향으로 4개, 축 방향으로 4개

를 부착하였다. 사용된 스트레인게이지는 N2A-06-T004N-350으로서 온도변화에 따른 영점이 보상되며 크리프 보상(크리프 코드 N)이 가능한 게이지이다. 접촉제로는 상온에서 경화되는 M-Bond 200을 사용하였다. 온도변화에 따른 감도변화를 보상하기 위하여 30 Ω의 저항값을 갖는 Balco 게이지를 브리지 입력단 각각에 한 개씩 부착하였다. 또한 콘스탄탄 와이어를 사용하여 4개의 내장형 힘 변환기의 무부하 상태에서의 브리지 출력을 정격출력의 1 %로 조정하였으며 브리지의 출력저항 및 입력저항의 편차가 0.01 % 이내가 되도록 조정하였다. 내장형 힘 변환기 각각의 출력을 동시에 측정하기 위해 병렬 브리지회로를 사용하였다.⁽⁷⁾ 또한 표준 힘으로 사용되는 힘 변환기 세트와는 별도로 동일한 방법으로 힘 제어용 힘 변환기 세트를 제작하였다.

3. 특성실험

3.1 실험장치

실험에 사용된 장치는 아래와 같다.

- ▶ 힘 표준기
 - 형식 : 실하중 힘 표준기
 - 용량 : 500 kN
 - 상대 불확도 : 2×10^{-5} (k=2)
 - 용도 : 1.1 MN 힘 변환기의 특성평가
- ▶ 고정도 지시계
 - 정확도 수준 : 0.005 %
 - Model No. : DK38S6
 - 최대 분해능 : $\pm 1,000,000$
 - 용도 : 힘 변환기의 신호 측정용
- ▶ Build-up 힘 측정 시스템⁽⁴⁾
 - 상대 불확도 : 2×10^{-4} (k=2)
 - 용도 : 힘 표준기 교정용
 - 특징 : 1.1 MN 힘변환기 9개로 구성 (자체 제작)
- ▶ 10 MN 힘 변환기⁽⁷⁾
 - 정밀도 : 0.01 % 이내
 - 용도 : 힘 표준기 방향성 시험
 - 특징 : 자체 제작
- ▶ 4.5 MN 교정링
 - 정밀도 : 0.02 % 이내
 - 용도 : 일본 계량연구소 힘 표준기와의 상호비교시험용

3.2 실험방법

힘 표준기의 특성 실험방법은 힘 측정기 표준 교정 절차, DIN 규격을 참조하여 정하였다. 내장형 힘 변환기의 거동을 안정시키기 위하여 정격 용량 까지 20회의 사전 부하를 실시하였다. 내장형 힘 변환기의 크리프 오차는 개발하고자 하는 힘 표준기의 오차 요인이 된다. 개발된 힘 표준기의 구조상 내장형 힘 변환기의 크리프 시험을 수행할 수 없다. 일반적으로 힘 변환기의 크리프 특성은 크리프 회복 특성과 유사한 경향을 보이고 오차의 절대값도 비슷한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 내장형 힘 변환기의 크리프 회복특성을 시험하였다. 하중 유지시간은 정격용량에서 30분이며 하중을 제거한 후 30분 동안 힘 변환기의 출력을 측정하였다.

힘 표준기의 방향성을 평가할 수 있는 방법이 아직까지 정립되어 있지 않다. 본 연구에서는 10 MN 정밀 힘 변환기를 이용하여 일본 계량연구소에서 보유하고 있는 20 MN 유압식 힘 표준기(상대불확도가 2×10^{-4} 이내)와 간접비교하였다. 또한 힘 변환기 설치방향의 편심오차에 따른 힘의 전달 오차를 조사하였다. 10 MN 정밀 힘 변환기를 힘 표준기의 중심 축을 기준으로 $x=1 \text{ mm}$, $y=1 \text{ mm}$ 편심되게 설치하여 힘 변환기의 출력특성을 시험하였다. 아울러 힘 표준기의 제어 안정도를 시험하였다. 힘 표준기의 불확도 요인을 분석하고 확장불확도(expanded uncertainty)를 구하였으며 그것을 검증하기 위하여 4.5 MN 교정링(proving ring)을 사용하여 일본 계량연구소의 20 MN 힘 표준기와 상호 비교시험을 실시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 내장형 힘 변환기의 크리프 회복특성

Fig. 4는 N2A-04-T004N-350의 스트레인게이지로 제작된 내장형 힘 변환기의 크리프 회복특성을 보여주고 있다. 30분 동안 약 0.065%의 오차를 보이고 있다. 이 결과로부터 내장형 힘 변환기의 크리프 특성은 크리프 회복특성과 정반대로 시간의 경과함에 따라 출력이 감소하는 거동을 보일 것이며 오차값의 절대값은 거의 동일할 것으로 예측된다. 스트레인게이지의 크리프 코드 변화에 따른 힘 변환기의 크리프 특성을 조사하기 위해 스트레인게이지의 코드를 N2A-04-T004N-350에서

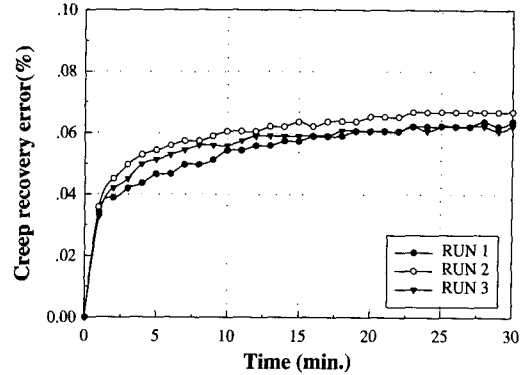


Fig. 4 Creep recovery behavior of a built-in force transducer in the force machine

N2A-04-T004R-350으로 바꾸어 실험하였다. 그 결과 내장형 힘 변환기의 크리프 오차가 약 0.05%로 나타나 스트레인게이지의 크리프 코드 선정에 따라 크리프 오차를 약간 줄일 수 있음을 확인하였다. 그러나 크리프 코드의 변경으로는 크리프 오차의 보상에 한계가 있음을 알 수 있었다.

정밀 힘 변환기의 크리프 오차가 0.02%인 점을 고려한다면 본 연구에서 제작한 내장형 힘 변환기의 크리프 오차는 큰 값이다. 내장형 힘 변환기의 크리프 오차가 큰 이유는 스트레인게이지를 부착하는데 사용된 접착제의 영향으로 생각된다. 일반적으로 힘 변환기를 제작할 때 크리프 오차를 줄이기 위해 스트레인게이지를 고온경화형 접착제로 부착한다. 본 연구에서는 감지부인 기둥의 크기가 3.7 m 이므로 스트레인게이지를 부착할 때 고온경화형 접착제 대신 일반 응력해석시 사용되는 상온경화형 접착제를 사용하였다. 따라서 내장형 힘 변환기의 크리프 특성을 향상시키기 위해서는 기둥에 열을 가할 수 있는 열 부하장치를 개발하여 스트레인게이지를 고온경화형 접착제로 부착해야 할 것으로 생각된다.

4.2 힘 제어 안정도특성

Fig. 5는 힘 표준기의 힘 제어의 안정도를 나타내고 있다. 2 MN의 경우 5분 동안의 제어 안정도의 상대편차는 $\pm 0.025\%$ 이며 10 MN의 경우는 $\pm 0.01\%$ 이내이다. 힘 제어의 안정도는 정격용량에 접근할수록 좋은 특성을 보이고 있다. 그 이유는 유압밸브 및 내장형 힘 센서에서 얻을 수 있는 제어의 안정도는 유압밸브의 제어 성능 및 힘 변환기의 지시장치의 분해능(resolution)에 크게 의존하

게 되는데 내장형 힘 변환기의 정격출력이 0.65 mV/V 이고 낮은 하중에서는 힘 변환기의 출력이 정격출력에서의 출력보다 작으므로 1 MN에서의 상대적인 제어 안정도는 10 MN보다 나빠지게 되기 때문이다.

4.3 힘 표준기의 방향성 특성

힘 표준기는 일반적으로 각 부품의 가공오차, 기동 변형의 불균일성 등에 의해 비대칭 변형거동을 보이며 이것이 힘 표준기의 방향성을 야기시킨다. 힘 표준기의 방향성을 평가할 수 있는 방법이 아직까지 정립되어 있지 않다. 본 연구에서는 10 MN 용량의 정밀 힘 변환기를 이용하여 일본 계량연구소에서 보유하고 있는 20 MN 유압식 힘 표준기

(상대불확도가 2×10^{-4} 이내)와 간접비교하였다.

Fig. 6은 본 연구에서 개발한 10 MN 힘 표준기 상에서 10 MN 정밀 힘 변환기의 설치방향을 90°씩 바꾸면서 시험했을 때 힘 변환기의 출력거동을 보여주고 있으며 Fig. 7은 일본 계량연구소의 20 MN 힘 표준기에서의 시험결과이다.⁽⁷⁾ 10 MN 힘 표준기에서 시험한 힘 변환기의 방향특성이 20 MN 힘 표준기에서 시험한 결과보다 양호한 결과를 보이고 있다. 일반적으로 힘 변환기의 방향특성은 힘 표준기의 비대칭성과의 상호작용의 결과로서 나타나므로 이 결과만을 가지고 10 MN 힘 표준기의 방향성이 20 MN 유압식 힘 표준기보다 우수하다고 단정할 수는 없으나 거의 대등한 수준이

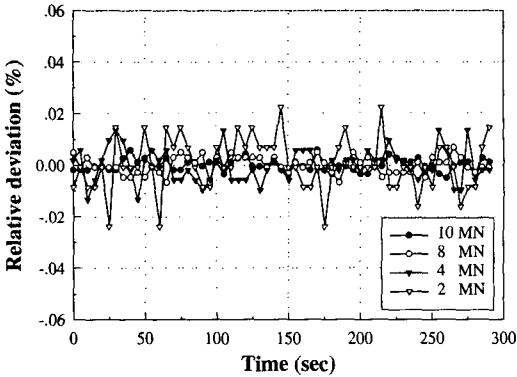


Fig. 5 Stability of force control in the force machine

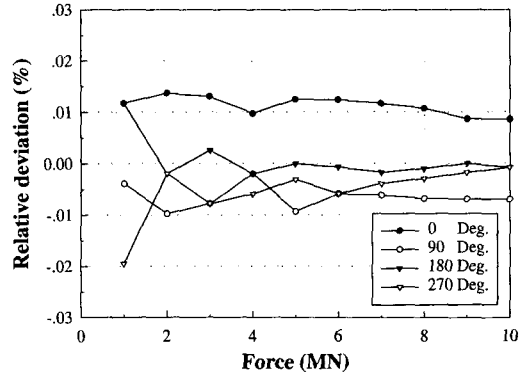


Fig. 6 Rotational behavior of 10 MN force transducer on the KRISS 10 MN force standard machine

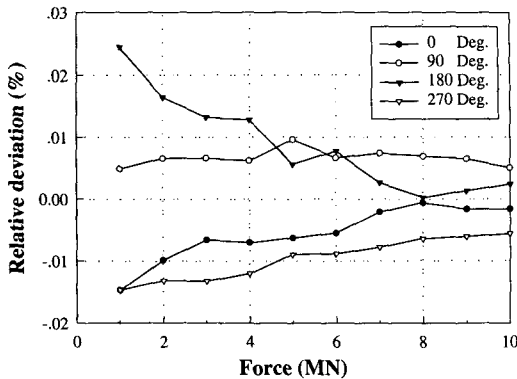


Fig. 7 Rotational behavior of 10 MN force transducer on the NRLM 20 MN hydraulic force standard machine

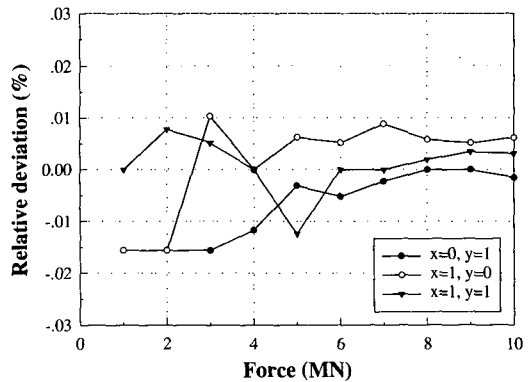


Fig. 8 Relative deviation of output of force transducer with the variation of its setting position

라고 추정할 수 있다.

10 MN 힘 표준기의 방향특성을 좀 더 고찰하기 위하여 앞서 사용한 10 MN 힘 변환기의 설치방향을 힘 표준기의 중심축을 기준으로 $x=0$ mm, $y=0$ mm의 상태, $x=0$ mm, $y=1$ mm의 상태, $x=1$ mm, $y=0$ mm의 상태, $x=1$ mm, $y=1$ mm의 상태로 바꾸면서 시험하였다. $x=0$ mm, $y=0$ mm의 상태로 기준으로 각 설치방향에서 힘 변환기의 출력편차를 구한 결과는 Fig. 8과 같다. 힘 변환기 설치위치 편심에 따른 힘 변환기의 출력편차는 ± 0.015 % 이내로 비교적 작게 나타나고 있다.

4.4 힘 표준기의 불확도 분석

개발된 힘 표준기의 불확도 u_c 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_c = \sqrt{u_{ts}^2 + u_{bft}^2 + u_{msta}^2 + u_{mro}^2 + u_{bft_inst}^2} \quad (2)$$

여기에서

- u_{ts} : 전달용 표준기의 불확도
- u_{bft} : 내장형 힘 변환기의 불확도
- u_{msta} : 제어 안정도에 의한 불확도 (삼각형분포로 가정)
- u_{mro} : 힘 표준기 방향성에 의한 불확도 (사각형분포로 가정)
- u_{bft_inst} : 내장형 힘 변환기의 감도 드리프트에 의한 불확도 (삼각형분포로 가정)

전달용 표준기는 본 연구실에서 개발한 build-up

힘 측정 시스템을 사용하였다.⁽⁴⁾ 내장형 힘 변환기의 불확도 u_{bft} 는 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.⁽⁸⁾

$$u_{bft} = \sqrt{u_{zero}^2 + u_{res}^2 + u_{creep}^2 + u_{cuit}^2 + u_{temp}^2} \quad (3)$$

여기에서

- u_{zero} : 영점 미복귀량에 의한 불확도 (사각형분포로 가정)
- u_{res} : 지시장치의 분해능오차에 의한 불확도 (사각형분포로 가정)
- u_{creep} : 크리프오차에 의한 불확도 (삼각형분포로 가정)
- u_{cuit} : 병렬회로 사용에 의한 불확도 (사각형분포로 가정)
- u_{temp} : 온도변화에 따른 감도변화에 의한 불확도 (사각형분포로 가정)

지시장치의 분해능은 0.00001 mV/V이다. 병렬회로 사용에 의한 오차는 0.01% 이내가 되도록 힘 변환기의 출력저항 및 감도를 조정하였다.⁽⁶⁾ 온도변화에 따른 감도변화의 경우 실험실의 온도유지 상태를 고려하여 4℃의 온도편차가 있는 것으로 가정하였고 내장형 힘 변환기의 온도변화에 따른 감도계수는 본 연구실에서 제작한 정밀 힘 변환기와 동일하다고 가정하여 $\pm 0.002\%$ of load/℃를 사용하였다. 내장형 힘 변환기의 불확도 성분 및 불확도 u_{bft} 를 구한 결과는 Table 1과 같으며, 힘 표준기의 불확도 성분, 불확도 u_c 및 확장불확도 (expanded uncertainty, 신뢰계수 95%, $k=2$) U 를 구

Table 1 Uncertainty budgets of built-in force transducers

Force (MN)	u_{zero}^2	u_{res}^2	u_{creep}^2	u_{cuit}^2	u_{temp}^2	u_{bft}^2
0.5	2×10^{-9}	6.8×10^{-9}	2×10^{-8}	8.3×10^{-10}	5.3×10^{-10}	3×10^{-8}
1.0	2×10^{-9}	1.7×10^{-10}	2×10^{-8}	8.3×10^{-10}	5.3×10^{-10}	2.4×10^{-8}
1.5	2×10^{-9}	7.5×10^{-11}	2×10^{-8}	8.3×10^{-10}	5.3×10^{-10}	2.3×10^{-8}
2.0	2×10^{-9}	4.3×10^{-11}	2×10^{-8}	8.3×10^{-10}	5.3×10^{-10}	2.3×10^{-8}
2.5	2×10^{-9}	2.7×10^{-11}	2×10^{-8}	8.3×10^{-10}	5.3×10^{-10}	2.3×10^{-8}
3.0	2×10^{-9}	1.9×10^{-11}	2×10^{-8}	8.3×10^{-10}	5.3×10^{-10}	2.3×10^{-8}
3.5	2×10^{-9}	1.4×10^{-11}	2×10^{-8}	8.3×10^{-10}	5.3×10^{-10}	2.3×10^{-8}
4.0	2×10^{-9}	1.1×10^{-11}	2×10^{-8}	8.3×10^{-10}	5.3×10^{-10}	2.3×10^{-8}
4.5	2×10^{-9}	8.4×10^{-12}	2×10^{-8}	8.3×10^{-10}	5.3×10^{-10}	2.3×10^{-8}

Table 2 Uncertainty budgets and expanded uncertainty of 10 MN force machine

Force (MN)	u_{fs}^2	u_{bft}^2	u_{msta}^2	u_{mro}^2	$u_{bft_inst}^2$	u_c	U	hydraulic force machine
0.5	3×10^{-9}	3×10^{-8}	2.5×10^{-7}	8×10^{-9}	4.2×10^{-10}	5.4×10^{-4}	1.1×10^{-3}	2×10^{-4}
1.0	3×10^{-9}	2.4×10^{-8}	7×10^{-9}	8×10^{-9}	4.2×10^{-10}	2.1×10^{-4}	4.1×10^{-4}	2×10^{-4}
1.5	2×10^{-9}	2.3×10^{-8}	7×10^{-9}	8×10^{-9}	4.2×10^{-10}	2.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}	2×10^{-4}
2.0	2×10^{-9}	2.3×10^{-8}	2×10^{-9}	8×10^{-9}	4.2×10^{-10}	1.9×10^{-4}	3.8×10^{-4}	2×10^{-4}
2.5	2×10^{-9}	2.3×10^{-8}	2×10^{-9}	8×10^{-9}	4.2×10^{-10}	1.9×10^{-4}	3.8×10^{-4}	2×10^{-4}
3.0	2×10^{-9}	2.3×10^{-8}	2×10^{-9}	8×10^{-9}	4.2×10^{-10}	1.9×10^{-4}	3.8×10^{-4}	2×10^{-4}
3.5	2×10^{-9}	2.3×10^{-8}	2×10^{-9}	8×10^{-9}	4.2×10^{-10}	1.9×10^{-4}	3.8×10^{-4}	2×10^{-4}
4.0	1×10^{-9}	2.3×10^{-8}	2×10^{-9}	8×10^{-9}	4.2×10^{-10}	1.8×10^{-4}	3.6×10^{-4}	2×10^{-4}
4.5	1×10^{-9}	2.3×10^{-8}	2×10^{-9}	8×10^{-9}	4.2×10^{-10}	1.8×10^{-4}	3.6×10^{-4}	2×10^{-4}

한 결과는 Table 2와 같다. 힘 표준기의 가장 큰 불확도 성분은 1 MN~4.5 MN 범위에서 내장형 힘 변환기의 불확도이며 내장형 힘 변환기의 가장 큰 불확도 성분은 크리프 오차에 의한 불확도 성분이다. 따라서 힘 표준기의 불확도를 줄이기 위해서는 내장형 힘 변환기의 크리프 성능 개선이 이루어져야 하며 현재 이에 대한 연구가 진행중이다.⁽⁹⁾

0.5 MN 하중에서는 하중 제어의 안정도가 가장 큰 불확도 요인으로 나타났다. 1 MN~4.5 MN 하중 범위에서 힘 표준기의 확장 불확도는 4.1×10^{-4} 이 내이다. 힘 표준기 불확도 평가결과를 검증하기 위해서 4.5 MN 정밀 교정링을 사용하여 일본계량연구소의 20 MN 유압식 힘 표준기와 본 연구에서 개발한 힘 표준기를 비교하였으며 그 결과는 Fig. 9와 같다. 1 MN~4.5 MN 하중범위에서의 상대편차가 $\pm 0.035\%$ 이내로 잘 일치하고 있다.

본 연구에서 개발한 대용량 힘 표준기는 기존 외국의 표준기관에서 대용량 힘 표준기로 많이 사용하고 있는 유압식 힘 표준기와 비교해보면 다음의 특징을 갖는다. 개발된 힘 표준기는 실하중을 이용하여 힘을 발생시키는 방식이 아니므로 정확도가 약 1/2로 떨어지고 내장형 힘 변환기를 1년 주기로 교정해 주어야 하는 단점이 있다. 그러나 개발된 힘 표준기는 구조가 간단하여 설치 공간이 작고 제작단가가 1/10 이하이며 교정 또는 시험에 소요되는 시간이 짧은 장점을 갖고 있다.

앞으로 10 MN 전달용 표준기의 불확도 평가를 4.5 MN~10 MN 하중범위에 대해 수행한 후 본 연구에서 개발한 힘 표준기의 4.5 MN~10 MN 범위의 불확도를 평가할 예정이다. 본 연구에서 개발

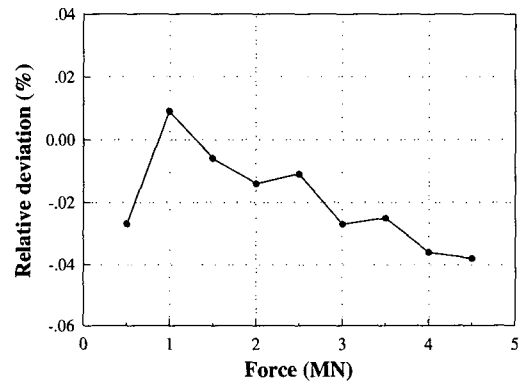


Fig. 9 Relative deviation of force between 10 MN force machine of the KRISS and 20 MN force machine of the NRLM by 4.5 MN proving ring

한 힘 표준기는 대용량 힘의 국가표준으로 사용할 수 있으며 산업체에서 보유하고 있는 힘 센서, 힘 측정기, 유압 잭 등의 교정 및 시험에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 본 힘 표준기의 개발로 독일, 영국, 일본, 중국에 이어 5번째로 10 MN 용량의 대용량 힘 표준기를 보유하게 되었다.

5. 결론

본 연구에서는 대용량 힘의 국가표준용으로 사용할 수 있는 내장형 힘 변환기를 갖는 대용량 힘 표준기를 개발하였으며 얻어진 결론은 아래와 같다.

- (1) 내장형 힘 변환기의 크리프 회복특성은 30분

동안 약 0.065%의 오차를 보였다. 힘 표준기의 제어 안정도는 2 MN의 경우 5분 동안 $\pm 0.025\%$ 이었으며 10 MN의 경우 $\pm 0.01\%$ 이내이었다. 힘 변환기 설치위치 편심($x=1\text{ mm}$, $y=1\text{ mm}$)에 따른 힘 변환기의 출력편차는 $\pm 0.015\%$ 이내로 나타났다.

(2) 힘 표준기의 불확도는 1 MN~4.5 MN 범위에서 상대불확도는 4.1×10^{-4} 이내이다. 본 연구에서 보유하고 있는 4.5 MN 교정링을 사용하여 일본계량연구소의 유압식 힘 표준기와 본 연구에서 개발한 힘 표준기를 비교교정한 결과는 500 kN~4.5 MN 하중범위에서의 상대편차가 $\pm 0.035\%$ 이내로 잘 일치하고 있다.

(3) 10 MN build-up 방식 힘 표준기의 개발로 대용량 힘의 국가표준을 확립할 수 있게 되었으며 산업체에서 보유하고 있는 각종 대용량 및 힘 측정기, 힘 변환기 및 유압 잭의 검교정 및 시험이 가능하게 되었다.

참고문헌

- (1) Peters. M, 1989, "Experiences and Results of International Comparison Measurements of Forces up to 1 MN," *PTB-Mitteilungen* 99, pp. 343~350.
- (2) Weiler. W. W, and Sawla. A, 1978, "Force Standard Machine of the National Institutes for Metrology", *PTB-Me-22*, pp. 110~111.
- (3) Hida. N, Tojo. T, Maejima. H and Murata. M, 1984, "Performance of Newly Developed 20 MN Hydraulic Force Standard Machine," *Proceeding of the Conference of IMEKO TC-3 on Measurement of Force and Mass*, Kobe, pp. 193~198.
- (4) 강대임, 송후근, 1997, "Build-up 기법을 이용한 대용량 힘측정 시스템 개발," 대한기계학회논문집 (A), 제21권, 제3호, pp. 477~484.
- (5) 小栗富士雄, 小栗達男, 1991, "표준 기계설계도 표현람," 대광서림, 서울, pp. 8-1~8-4.
- (6) Wieringa. H, 1984, "Design of a 1.65 and 4.95 MN Transfer Standards Based on the Build-up Procedure," *Proceeding of the Conference of IMEKO TC-3 on Measurement of Force and Mass*, Kobe, pp. 205~208.
- (7) 강대임, 송후근, 이정태, 1994, "30 MN 스트레인지에이지 방식 힘 센서의 제작 및 특성," 센서학회지, 제3권, 제2호, pp. 24~32.
- (8) Sawla. A, 1994, "Guidance for the Determination of the Best Measurement Capability of Force Calibration Machines and Uncertainty of Calibration Results of Force Measuring Devices," *PTB Mitteilungen* 104 4/94, pp. 237~242.
- (9) 이정태, 1999, "내장형 힘 변환기를 이용한 대용량 힘 표준기 개발에 관한 연구," 공주대학교 석사학위 논문.