

추교환식 실하중 힘표준기의 개발

김갑순*, 송후근*, 강대임*, 이정태*, 박연규*

Development of a Deadweight Force Standard Machine with Weight Change Mechanism

Gab-Soon Kim*, Hou-Keun Song*, Dae-Im Kang*, Jeong-Tae Lee*, and Yon-Kyu Park*

ABSTRACT

This paper describes a deadweight force standard machine with the weight change mechanism which can be used as a primary force standards at a national metrology institute. Since commercial deadweight force machine can generate forces by hanging weights to the weight supporter serially, force steps from deadweight force machine are not enough to calibrate force measuring devices of each having different capacity. In order to increase the force steps, we have specially designed a weight mechanism in which the machine can select the necessary weights and generate the load by hanging the selected weights to the weight supporter. The machine can generate the force of the range of 2 kN to 110 kN with force step of 1 kN. All weights have been accurately compensated and calibrated by a mass comparator and its standard uncertainty is less than 2.2×10^{-6} . The relative expanded uncertainty of the machine is 1.3×10^{-5} .

Key Words : Deadweight Force Standard Machine(실하중 힘표준기), Weight(추), Calibration(교정), Relative expanded uncertainty(상대확장불확도), Loading frame(하중틀), Weight supporter(추지지대)

1. 서론

힘측정에 사용되는 힘측정기(force measuring device)는 힘표준기(force standard machine)로 교정되어 사용해야만 신뢰도를 확보할 수 있다. 힘표준기는 유압식 힘표준기(hydraulic force standard machine), 실하중 힘표준기(deadweight force standard machine) 등이 있다. 유압식 힘표준기⁽¹⁾는 파스칼의 원리를 이용하여 제작된 것이

며, 추와 유압시스템으로 힘표준기가 가지고 있는 두 실린더의 단면적비 만큼 하중을 증폭하여 큰 하중을 발생시키는 힘표준기이다. 이것은 용량이 2 MN~20 MN인 대용량 힘표준기로 주로 사용되며, 이것의 상대확장불확도는 2×10^{-4} 이내이다.

실하중 힘표준기⁽²⁾는 표준기의 크기 및 제작비를 고려하여 용량을 4.5 MN 이하로 제작하고, 추를 추걸이에 걸어서 하중을 발생시키며, 이것의 상대확장불확도는 2×10^{-5} 이내이다. 현재 각 국가의 표

* 한국표준과학연구원 역학표준부

준기관에서는 4.5 MN 이하 용량의 실하중 힘표준기를 보유하여 힘측정기의 정밀 교정 및 특성시험에 널리 사용하고 있다. 실하중 힘표준기는 힘표준기에 설치되어 있는 추들을 순차적으로 추걸이에 걸어서 하중을 발생시키므로 힘표준기가 가지고 있는 추의 갯수만큼의 하중수를 발생시킨다. 즉, 실하중 힘표준기로 30단계의 하중을 발생시키기 위해서는 30개의 추가 필요하다. 따라서 많은 단계의 하중발생이 필요한 실하중 힘표준기는 추의 갯수가 많아야되므로 많은 제작비가 소요될 뿐만 아니라 힘표준기의 크기가 커지므로 넓은 설치공간이 필요하다.

본 논문에서는 상술한 실하중 힘표준기의 단점을 보완하여 적은 수량의 추를 이용하여 많은 단계의 하중을 발생시킬 수 있는 추교환식 실하중 힘표준기를 개발하였다. 개발한 실하중 힘표준기는 2 kN부터 110 kN까지 1 kN 단계로 하중을 발생시키기 위하여 선택된 추만 추지지대에 걸어서 하중을 발생시킬 수 있도록 설계되었으며, 주요부품인 하중틀과 추지지대를 정밀설계하였다. 또한 힘표준기의 상대확장불확도에 큰 영향을 미치는 추는 정밀보정 및 교정하였다. 계산한 힘 표준기의 상대확장불확도는 1.3×10^{-5} 이다.

2. 힘표준기의 개념설계

2.1 설계사양

본 연구에서 개발한 추교환식 실하중 힘표준기는 최소 2 kN부터 최대 110 kN까지 1 kN단위로 하중을 발생시킬 수 있고, 추는 13개로 구성되어 있으며, 힘표준기의 크기는 폭이 2100 mm, 높이가 7990 mm이다. 그리고 인장시험을 위한 힘측정기의 설치공간은 폭이 630 mm, 높이가 700 mm이며, 압축시험을 위한 설치공간은 폭이 470 mm, 높이가 700 mm이다.

2.2 힘표준기의 구성

힘표준기는 힘측정기를 설치하고 하중을 발생시킬 수 있는 본체부(main part), 하중을 발생시키기 위하여 힘측정기에 가해진 하중을 유지하거나 추를 교환하기 위하여 전체의 추를 드는데 사용되는 유압부(hydraulic part), 본체부와 유압부를 정확하게 제어하는 제어부(control part)로 구분되며, Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1의 (a)는 본체부를 나타낸 것이

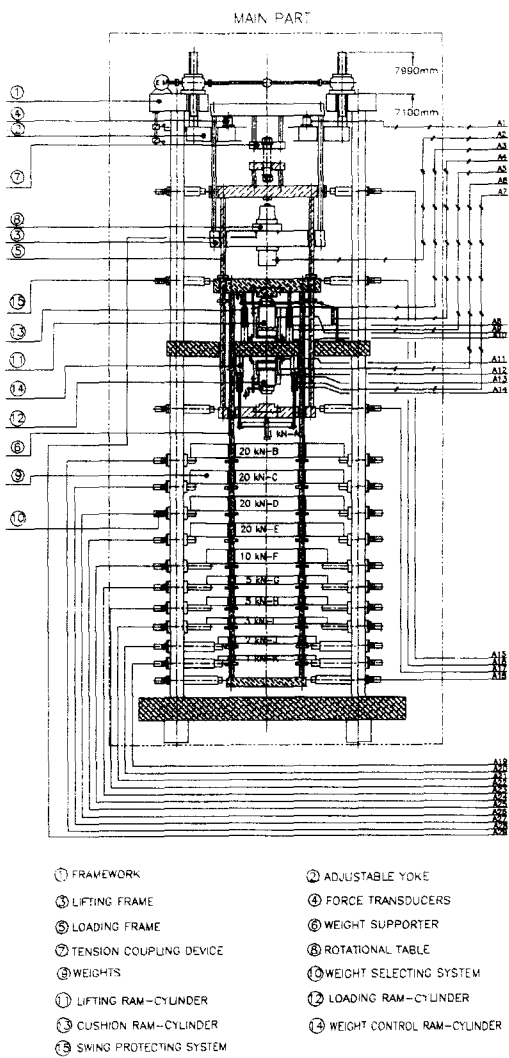
고, (b)는 유압부와 제어부를 나타낸 것이며, 본체부의 부품들과 유압부 및 제어부의 부품들이 연결되는 전기, 유압 및 공기공급라인 표시는 A1~A29로 나타내었다. 개발된 힘표준기는 컴퓨터 프로그램에 의해 선정된 하중을 자동으로 발생시킨다.

2.2.1 본체부

본체부는 Fig. 1의 (a)에서 보는 것과 같이 힘측정장치를 설치하고 실하중을 발생시키는 장치로서 ①기본골격/framework), ②조절요크(adjustable yoke), ③리프팅 프레임(lifting frame), ④힘변환기(force transducer), ⑤로딩 프레임/loading frame), ⑥추지지대(weight supporter), ⑦인장장치(tension coupling device), ⑧회전테이블(rotational table), ⑨추(weight), ⑩추선택장치(weight selecting system), ⑪리프팅램-실린더(lifting ram-cylinder), ⑫로딩램-실린더/loading ram-cylinder), ⑬쿠션램-실린더(cushion ram-cylinder), ⑭추제어램-실린더(weight control ram-cylinder), ⑮흔들림방지장치(swing protecting system) 등으로 구성되었으며, 전체적인 형상은 삼각형 모양이다.

①기본골격은 힘표준기의 전체 하중을 유지할 수 있도록 설계되었고, 상부 크로스빔(upper crossbeam), 중간 크로스빔(middle crossbeam), 하부 크로스빔(lower crossbeam), 3개의 기둥(column) 등으로 구성되었다. 1개의 기둥은 상부기둥과 하부기둥으로 구분되었으며, 전체 형상은 삼각기둥 형태이다. 기본골격은 먼저 하부빔과 3개의 하부기둥을 나사를 이용하여 고정하고 중간빔을 하부기둥에 끼워서 고정하며, 3개의 상부기둥과 3개의 하부기둥을 기둥 자체에 가공된 나사를 이용하여 고정한다. 그리고 상부빔과 상부기둥을 나사를 이용하여 고정한다.

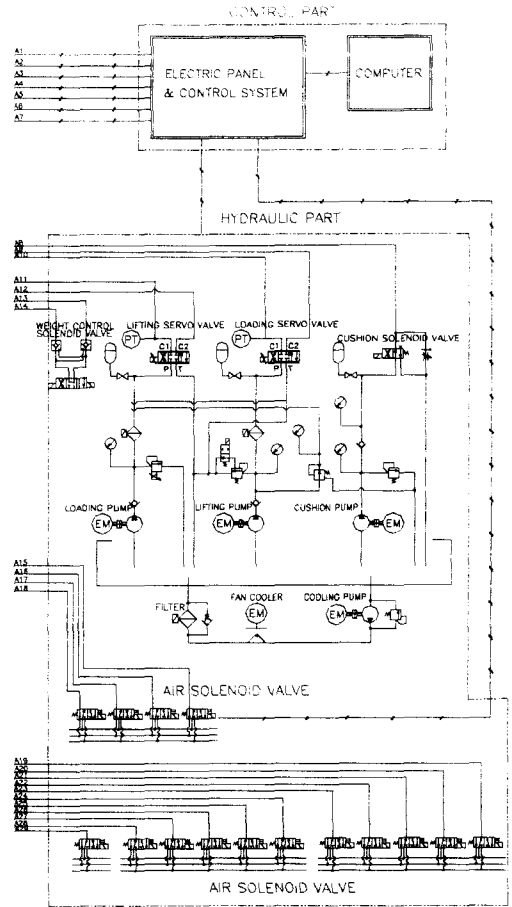
②조절요크는 3개의 상하 이동나사(moving screw), 모터(motor), 크로스빔(cross beam)으로 구성되었고, ①기본골격의 상부 크로스빔에 고정되어 있으며, 모터에 의해 이동나사가 회전하고 이동나사의 회전에 따라 크로스빔이 상하로 이동된다. 조절요크는 ③리프팅 프레임을 상하로 이동시키므로서 시험하고자하는 힘측정기의 상부와 ⑤로딩 프레임의 상부 크로스빔의 간격을 조절하는데 이용된다. 이것의 이동속도는 0.4~3 mm/s이다. ③리프팅 프레임은 상부 크로스빔, 하부 크로스빔, 3개의 봉으로 구성되었으며, ⑧회전 테이블 위에 있는 힘측



(a) main part

정기에 가해지는 하중을 유지하는 기본받침대 역할을 한다. 상부 크로스빔에는 상부 인장지그가 고정되어 있으며, 하부 크로스빔에는 회전 테이블과 회전 테이블을 회전시킬 수 있는 스캠모터가 조립되어 있다. 하부 크로스빔과 회전 테이블의 접촉면은 에어 베어링(air bearing)으로 제작되었으며, 회전 테이블이 회전할 때에는 0.5 MPa의 공기압이 에어 베어링에 공급되고 회전테이블이 회전하지 않을 때에는 공기압이 공급되지 않는다.

④힘변환기는 3개의 로드셀로 구성되어 있으며,



(b) hydraulic and control part

Fig. 1 Schematic diagram of a 100 kN deadweight force standard machine

힘측정기에 가해진 하중을 측정하는데 사용된다. 힘변환기로부터 측정된 값은 새로운 추들을 교환하기 위하여 전체의 추를 들어올릴 때 힘측정기에 가해진 하중을 유지시키기 위하여 구성되는 페루프계의 기준값으로 사용된다.

⑤로딩 프레임은 2 kN의 하중을 발생하는 추로 사용되고, 상부 크로스빔, 하부 크로스빔, 3개의 봉, 6개의 멈춤링으로 구성되었으며, 1개의 봉에는 2개의 멈춤링이 나사로 조립되어 있다. ⑥추지지대의 상부 크로스빔과 접촉되는 멈춤링의 형상은 Fig. 2에서 보는 것과 같이 60° 경사를 가진 콘모양으로

되어있다. 이것은 Fig. 2의 중심선 좌측의 이점쇄선 표시부에서 보는 것과 같이 멈춤링이 크로스빔의 상부면과 접촉하여 하중을 발생시킬 때 혹은 Fig. 2의 중심선 우측의 이점쇄선 표시부에서 보는 것과 같이 멈춤링이 크로스빔의 하부면과 접촉하여 모든 추를 들어올릴 때에 추지지대의 상부 크로스빔의 홀중심과 로딩프레임의 봉 중심이 정확하게 일치하도록 하기 위한 것이다.

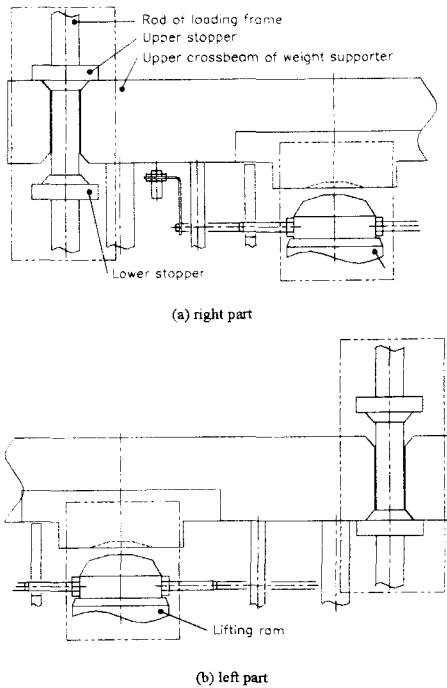


Fig. 2 The contact part between the upper crossbeam of the weight supporter and the stoppers of the loading frame

⑥추지지대는 2 kN의 하중을 발생하는 추로 사용되고, 상부 크로스빔, 하부 크로스빔, 3개의 봉, 30개의 멈춤링으로 구성되었으며, 1개의 봉에는 10개의 멈춤링이 나사로 조립되어 있다. 각각의 멈춤링의 형상은 로딩 프레임에 조립되어 있는 멈춤링과 마찬가지로 60° 경사를 가진 콘모양으로 되어 있다. 이것은 각각의 추를 들어올릴 때에 추의 홀중심과 추지지대의 봉중심이 정확하게 일치하도록 하기 위한 것이다.

⑦인장지그는 인장시험하기 위한 힘측정기를 고정하는 장치로서 상부 인장지그(upper tension

device)와 하부 인장지그(lower tension device)로 구분되어 있다. 상부 인장지그는 리프팅 프레임의 상부 크로스빔에 고정되어 있으며, 하부 인장지그는 로딩 프레임의 상부 크로스빔에 고정되어 있다. 상하부 인장지그의 끝결과 힘측정기와 연결되는 봉과의 접촉면은 구면으로 되어 있다. 이것은 힘측정기의 중심선이 힘표준기의 중심선과 일치하기 쉽게 하기 위해서다.

⑧회전 테이블은 힘측정기를 설치하는 테이블이며, 또한 힘측정기의 방향에 따른 재현도(repeatability)시험을 위해 힘측정기를 회전시킬 때 사용된다. 컴퓨터의 명령에 따라 회전 테이블을 설정된 위치로 회전시킨다.

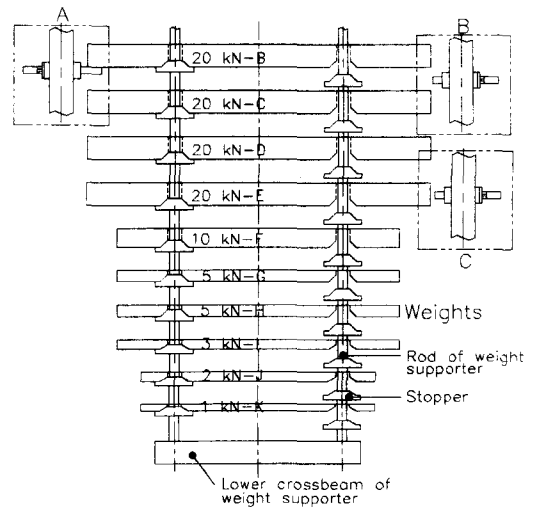


Fig. 3 The assembled shape of the weights and the weight supporter

⑨추는 1 kN 용량의 추 2개, 2 kN 용량의 추 1개, 3 kN 용량의 추 1개, 5 kN 용량의 추 2개, 10 kN 용량의 추 1개, 20 kN 용량의 추 4개로 구성되어 있다. Fig. 3는 추들과 추지지대가 조립된 모습을 나타낸 것이다. Fig. 3의 중심선을 기준으로 왼쪽은 추와 추지지대의 멈춤링이 접촉된 상태를 나타낸 것이고 오른쪽은 추와 추지지대의 멈춤링이 접촉되지 않은 상태를 나타내고 있다. 추와 추지지대의 멈춤링이 접촉되지 않은 상태는 힘표준기가 하중을 발생시킬 때 하중발생을 위하여 선택되지 않은 추가 ⑩추선택장치에 놓여 있는 상태(Fig. 3의 A부)이고, 추와 추지지대의 멈춤링이 접촉되어 있

는 상태는 새로운 하중발생을 위하여 모든 추를 들어올릴 때의 상태(Fig. 3의 B부)와 하중발생을 위하여 추들이 추지지대에 걸려있을 때의 상태(Fig. 3의 C부)이다.

⑩추선택장치는 하우징, 추받침대, 에어램-실린더로 구성되어 있으며, 1개의 추를 지지하기 위하여 3개의 추선택장치가 사용되며, 모두 30개이다. 이것은 기본골격을 구성하는 하부기둥에 볼트로 고정되어 있으며, 하중을 발생시킬 때 하중발생을 위한 추로 선택되지 않은 추들을 지지하고 또한 힘표준기를 동작하지 않을 때 모든 추들을 지지한다. 추와 접촉되어 추를 지지하는 추받침대는 공기압력에 의해 수평으로 미끄럼 운동한다. 하중발생을 위하여 선택되지 않은 추들의 추받침대들은 정방향의 공기압력에 의해 앞으로 나오고 하중발생을 위하여 선택된 추들의 추받침대는 역방향의 공기압력에 의해 뒤로 후퇴된다.

⑪리프팅램-실린더는 기본골격의 중간 크로스빔의 상부면에 부착되어 있으며, 새로운 하중발생을 위한 추를 선택하기 위하여 추지지대와 로딩 프레임에 포함된 모든 추를 리프팅램의 0 mm 위치를 기준으로 49.5 mm까지 상승시키기 위하여 사용된다. 리프팅램을 상승시키기 위해서는 정방향의 압력을 실린더에 공급하고, 램을 하강시키기 위해서는 역방향의 압력을 실린더에 공급한다. 램의 위치 제어는 위치센서(제작사 : MIDORI PRECISIONS, 모델 : LP-100F)와 컴퓨터를 이용하여 한다. 리프팅램의 상부면과 추지지대의 상부 크로스빔의 접촉면은 Fig. 2의 중앙의 이점쇄선부에서 나타난 것과 같이 구면으로 가공되었다. 이것은 추들이 걸려있는 추지지대가 가능한 한 리프팅램의 중심에 올 수 있도록 하기 위해서이다.

⑫로딩램-실린더는 기본골격의 중간 크로스빔의 하부면에 거꾸로 부착되어 있으며, 새로운 하중발생을 위한 추세트를 선택하기 위하여 리프팅램이 모든 추를 들 때 힘측정기에 가해진 하중을 유지시키기 위하여 사용된다. 로딩램을 이용하여 힘측정기에 가해진 하중을 유지시키기 위해서는 정방향의 압력을 실린더에 공급하고 램을 후퇴시키기 위해서는 역방향의 압력을 실린더에 공급한다. 하중을 유지할 때는 ④힘변환기, 서보밸브, 유압장치 등으로 구성된 페루프 제어계를 이용하여 힘변환기로 검출된 값을 기준값으로 제어한다. 로딩램의 상부면과 하중들의 하부 크로스빔의 접촉면은 구면으로

가공되었다. 이것은 추들이 걸려있는 추지지대가 가능한 한 리프팅램의 중심에 올 수 있도록 하기 위해서이다.

⑬쿠션램-실린더는 3개의 유압램-실린더로 구성되어 있으며, 기본골격의 중간 크로스빔의 상부면에 120° 간격으로 부착되어 있다. 이것은 힘표준기가 동작하지 않을 때 추지지대의 상부면과 접촉되어 하중들과 추지지대를 지지하고 있으며, 리프팅램이 하중들, 추지지대 및 모든 추를 들어올리고 내릴 때 리프팅램을 기준으로 이들이 회전하는 것을 방지하는 역할을 한다. 쿠션램의 상부면과 추지지대의 상부 크로스빔의 접촉면은 쿠션램을 기준으로 추지지대의 위치를 정확하게 조절될 수 있도록 각각 구면으로 가공되어 있다.

⑭추제어램-실린더는 3개의 유압램-실린더로 구성되어 있으며, 기본골격의 중간 크로스빔의 하부면에 120° 간격으로 거꾸로 부착되어 있다. 이것은 3 kN의 하중을 발생시키기 위하여 사용된다. 3 kN 하중을 발생시키기 위해서는 정방향의 압력을 실린더에 공급하고 3 kN 하중을 제거하기 위해서는 역방향의 압력을 실린더에 공급하여 램을 후퇴시킨다.

⑮흔들림방지장치는 3개의 흔들림방지장치가 1조로 구성되어 모두 4조, 즉 12개이며, 기본골격의 기둥에 고정되었다. 각 조의 흔들림방지장치는 하중들의 상하부 크로스빔과 추지지대의 상하부 크로스빔과 접촉하여 이들의 흔들림을 제거하는데 사용된다. 이들은 공기의 압력을 이용하여 하중들과 추지지대의 크로스빔들과 접촉 혹은 분리된다.

2.2.2 추의 조합

100 kN 실하중 힘표준기는 각 추를 조합하여 2 kN부터 110 kN까지 1 kN단계로 하중을 발생시킨다. 2 kN의 하중을 발생하기 위한 추의 조합은 하중들(2 kN), 3 kN은 하중들(2kN)+1 kN 추, 4 kN은 하중들(2 kN)+추지지대(2 kN)이고, 5 kN부터 110 kN까지 1 kN단계의 하중 발생을 위한 추 조합은 하중들(2 kN)+추지지대(2 kN)에 1 kN, 2 kN, 3kN, 5 kN 추 각각 2개씩, 10 kN 추 1개, 20 kN 추 4개를 추가한다. 예를들면 67 kN을 발생하기 위한 추의 조합은 하중들(2 kN)+추지지대(2 kN)+3 kN 추+20 kN 추 3개이다.

2.2.3 주요부품 설계

실하중 힘표준기는 2 kN부터 110 kN까지 1 kN 단계로 하중을 발생하여야 한다. 그러기 위해서는 힘측정기에 처음으로 접촉하여 하중을 발생하는 하중들은 2 kN의 하중을 가져야 하며, 4 kN의 하중은 하중틀과 추지지대가 힘측정기에 걸려서 하중을 발생하므로 추지지대 또한 2 kN의 하중을 가져야 한다. 하중틀과 추지지대는 2 kN의 하중을 가지고 있어야 하며, 충분한 강도 및 적은 처짐을 고려하여 설계하여야 한다. Fig. 4의 (a)는 하중틀, (b)는 추지지대, (c)는 각 빔의 단면을 나타낸 것이다. 하중틀의 상부빔(A), 하부빔(B), 추지지대의 상부빔(C), 하중틀의 봉(E), 추지지대의 봉(F)는 추에 의해 최대 110 kN의 하중이 가해진다. 따라서 이들은 충분한 강도 및 적은 처짐이 되도록 설계해야 한다.

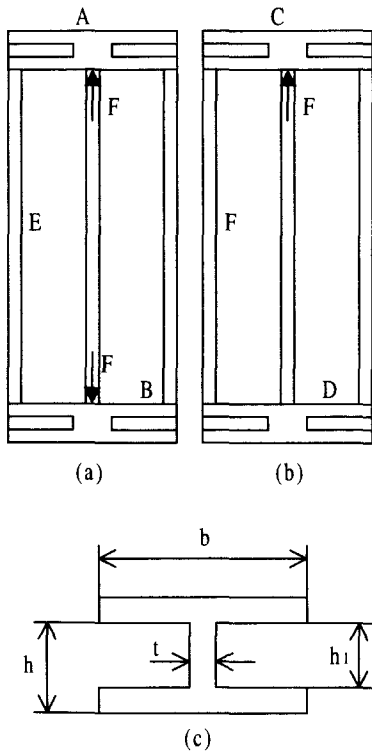


Fig. 4 Loading frame and weight supporter

Fig. 4에서 보는 것과 같이 하중틀의 상부빔(A), 하부빔(B), 추지지대의 상부빔(C)은 단순지지보에 중앙에 힘 F가 가해진 것으로 가정하면 보의 중앙에 작용하는 모멘트 M은 식 (1)로 계산할 수 있고,

$$M = \frac{Fl}{4} \quad (1)$$

여기서 M : 빔의 중앙에 작용되는 모멘트

F : 빔에 가해진 하중(힘)

l : 빔의 길이

빔에 작용되는 최대응력 σ 는 식 (2)로 계산되며,

$$\sigma = \frac{M}{z_p} \quad (2)$$

여기서 σ : 응력

z_p : 극관성 단면1차 모멘트

극관성 단면 1차 모멘트는 식 (3)으로 계산된다.

$$z_p = \frac{bh^2}{6} - \frac{(b-t)h_1^2}{6} \quad (3)$$

그리고 보의 중심에서의 처짐 δ 는 식 (4)에 의해 계산되고,

$$\delta = \frac{Fl^3}{48EI} \quad (4)$$

여기서 E : 빔의 종탄성계수

I : 단면 2차 모멘트

단면 2차 모멘트는 식 (5)로서 계산된다.

$$I = \frac{bh^3}{12} - \frac{(b-t)h_1^3}{12} \quad (5)$$

하중틀과 추지지대의 봉의 응력 σ_R 은 식 (6)에 의해 계산되며,

$$\sigma_R = \frac{F}{A} \quad (6)$$

여기서 σ_R : 봉의 응력

F : 봉에 작용되는 하중

A : 봉의 단면적

봉의 처짐 δ_R 은 식 (7)로 계산될 수 있다.

$$\delta_R = \frac{FL}{AE_R} \quad (7)$$

여기서 L : 봉의 길이

E_R : 봉의 종탄성 계수이다.

하중틀과 추지지대는 각각 2 kN의 하중을 가져야 하고 안전율 10 이상의 강도 및 0.5 mm/m 이내의 처짐을 고려하여 설계해야 하므로 먼저 빔과 봉의 크기를 결정하고 이것으로 하중을 계산한 후 식 (1)~(7)에 의해 응력과 처짐을 계산하였다.

하중틀의 상부빔(A)와 하부빔(B)의 크기는

$b=180$ mm, $h=148$ mm, $h_1=108$ mm, $t=20$ mm, $l=606$ mm이고, 추지지대의 상부빔(C)의 크기는 $b=187$ mm, $h=138$ mm, $h_1=98$ mm, $t=20$ mm, $l=476$ mm이며, 하중틀과 추지지대의 봉의 길이 L 은 각각 2687 mm, 4052 mm이며, 봉의 직경은 모두 $\phi 36$ mm이다. 그리고 가해지는 하중은 110 kN, 종탄성계수는 재질을 모두 SUS304를 사용하였으므로 210000 N/mm²이다.

위에서 나타낸 값들을 식 (1)~(7)에 대입하여 하중틀과 추지지대의 응력과 처짐을 계산하면, 하중틀의 상부 및 하부빔의 응력은 48 N/mm², 처짐은 0.077 mm, 추지지대의 상부빔 응력은 40 N/mm², 처짐은 0.042 mm이었다. 하중틀과 추지지대의 빔이 2개의 빔으로 연결된 단순지지보로 가정하고 계산식을 유도하였으나 실제로는 3개의 빔으로 구성되어 있으므로 빔의 실제 응력과 처짐은 계산된 값에 0.6667을 곱해야 한다. 계산결과 하중틀의 상부빔과 하부빔의 응력은 32 N/mm²이고, 처짐은 0.052 mm이다. 추지지대의 상부빔의 응력은 27 N/mm²이고, 처짐은 0.028 mm이다. 하중틀과 추지지대의 봉의 응력은 40 N/mm²이며, 처짐은 각각 0.46 mm, 0.69 mm이었다.

2.2.4 유압부

유압부는 유압공급장치와 공기압공급장치로 구분되며, 그것은 Fig. 1의 (b)의 하단에 나타내었다. 유압공급장치는 로딩램-실린더를 구동하기 위한 유압장치, 리프팅램-실린더를 구동하기 위한 유압장치, 쿠션램-실린더를 구동하기 위한 유압장치, 추제어램-실린더를 구동하기 위한 유압장치, 필터(filter), 냉각펌프(cooling pump), 어큐물레이터(accumulator) 등으로 구성되어 있다.

로딩램-실린더를 구동하기 위한 유압장치는 로딩서보밸브(loading servo valve), 로딩펌프(loading pump) 등으로 구성되어 있으며, 컴퓨터 및 패널의 명령을 받아 로딩서보밸브를 제어하여 로딩실린더내에 압력을 증가 혹은 감소시킨다. 이것들은 로딩램을 이용하여 힘측정기에 가해진 하중유지를 위하여 구성되는 폐루프계의 요소들이다. 리프팅램-실린더를 구동하기 위한 유압장치는 리프팅서보밸브(lifting servo valve), 리프팅펌프(lifting pump) 등으로 구성되어 있으며, 컴퓨터 및 패널의 명령을 받아 리프팅서보밸브를 제어하여 리프팅실린더내에

압력을 증가 혹은 감소시킨다.

쿠션램-실린더를 구동하기 위한 유압장치는 쿠션솔레노이드밸브(cushion solenoid valve), 쿠션펌프(cushion pump) 등으로 구성되어 있으며, 쿠션램과 추지지대의 상부 크로스빔에 접촉할 때에는 0.5 MPa의 압력을 가하고 힘표준기가 하중을 발생시킬 때 즉, 추지지대의 상부 크로스빔과 하중틀의 하부 멈춤링이 접촉할 때에는 쿠션실린더의 압력을 모두 제거한다. 추제어램-실린더를 구동하기 위한 유압장치는 힘표준기를 이용하여 3 kN을 가할 때만 사용되며, 3 kN의 하중은 1 kN의 추를 하중틀의 핀에 걸어서 발생시킨다. 이것은 추제어솔레노이드밸브(weight control solenoid valve), 리프팅펌프 등으로 구성되어 있으며, 1 kN의 추를 하중틀의 핀에 걸을 때에는 실린더의 압력을 제거하고 1 kN의 추를 하중틀의 핀으로부터 제거할 때에는 0.5 MPa의 압력을 실린더에 공급한다.

필터는 오일탱크에 저장된 오일을 각 펌프에서 흡입할 때 여과하기 위하여 설치되었으며, 또한 리프팅서보밸브와 로딩서보밸브에 유입되는 오일을 여과하기 위해서 각 서보밸브에 설치되었다. 냉각펌프는 오일의 온도를 일정한 온도로 유지시키기 위해서 사용된다. 어큐물레이터는 로딩서보밸브, 리프팅서보밸브 및 쿠션솔레노이드밸브에 부착되어 이들과 연결된 파이프내의 유체의 맥동을 감소시키기 위하여 사용된다.

2.2.5 제어부

힘표준기의 제어는 패널에서의 제어와 컴퓨터에서의 제어로 구분되고, 패널에서는 수동제어와 반자동제어로 힘표준기를 동작시킬 수 있으며, 컴퓨터에서는 수동제어, 반자동제어 및 자동제어로 힘표준기를 동작시킬 수 있다. 수동제어는 로딩램 제어와 리프팅램 제어로 구분된다. 로딩램 제어는 로딩램-실린더, 로딩펌프, 로딩서보밸브 등으로 로딩램을 수동으로 상승 및 하강시킨다.

리프팅램 제어는 리프팅램-실린더, 리프팅펌프, 리프팅서보밸브 등으로 리프팅램을 수동으로 상승 및 하강시킨다. 반자동제어는 원하는 발생하중을 선택하고 동작시작 스위치를 누르면 1단계의 하중이 발생되어 시험하고자하는 힘측정기에 하중을 가하게 된다. 자동제어는 여러 개의 발생하중을 컴퓨터에 내장된 힘표준기 제어를 위해 특별히 제작된 프로그램에 입력시키면 컴퓨터가 힘표준기를 제어

하여 하중을 순차적으로 발생시킨다. 실제 힘측정기를 시험할 때에는 힘표준기 제어중 수동제어는 사용하지 않고 반자동제어와 자동제어를 사용한다. 이들 제어는 한 단계의 하중을 완전히 발생하게 되며, 한 단계의 하중은 아래와 같은 절차에 따라 발생하게 된다.

(1) 리프팅램을 이용하여 추지지대와 모든 추를 30 mm 지점까지 든다. 리프팅램이 추지지대를 들고 올라가는 도중 접촉되었던 하중들의 하부 멈춤링과 추지지대의 상부 크로스빔의 하부면이 떨어지는 순간 로딩램이 힘측정기에 가해진 하중을 유지해야한다. 리프팅램의 위치는 위치센서(LVDT)를 이용하여 제어된다.

(2) 로딩램을 이용한 하중유지는 Fig. 5와 같은 페루프계를 이용한다. 페루프계의 구성은 제어기(controller), 서보증폭기(servo amplifier), 서보밸브(servo valve), 3개의 힘변환기 등으로 구성되며, 기준값(reference)은 힘측정기에 하중이 가해졌을 때 3개의 힘변환기에 출력된 값이다. 외란(disturbance)은 리프팅램이 추지지대를 들고 올라가는 도중 하중들의 하부 멈춤링과 추지지대의 상부 크로스빔이 떨어지는 순간 힘측정기에 가해졌던 하중의 감소이다. 페루프계는 기준값과 힘변환기의 출력값의 차가 제어기에 입력되고 제어기로부터 출력된 전기신호는 서보증폭기에서 증폭되며, 증폭된 전기신호가 서보밸브에 입력된다. 서보밸브는 로딩램-실린더내의 압력을 제어하여 하중을 발생하고 힘변환기는 로딩램-실린더로부터 발생된 하중과 외란으로부터 발생된 하중을 측정하며, 측정된 값은 제어기로 귀환된다.

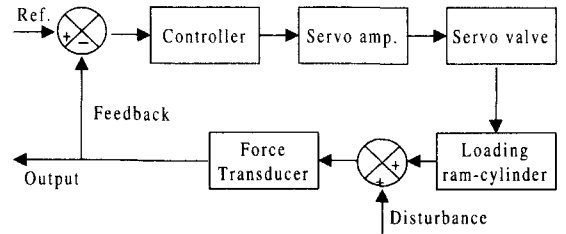


Fig. 5 Closed loop system for maintaining the applied force by all the weights

(3) 힘측정기에 가해져야하는 새로운 추들을 추천택장치를 이용하여 선택한다.

(4) 리프팅램을 이용하여 선정된 추들을 가지고 있는 추지지대를 하강시켜 힘측정기에 가하여 하중을 발생시킨다. 리프팅램이 하강하는 도중 하중들의 하부 멈춤링과 추지지대의 상부 크로스빔의 하부면이 접촉되는 순간 유지하중은 제거되어야한다.

(5) 유지하중은 하중들의 하부 멈춤링과 추지지대의 상부 크로스빔의 하부면이 접촉되는 순간부터 Fig. 5의 페루프계를 이용하여 제거한다. 기준값(reference)은 힘측정기에 하중이 가해졌을 때 3개의 힘변환기에 출력된 값이고, 외란(disturbance)은 리프팅램이 추지지대를 하강시키는 도중 하중들의 하부 멈춤링과 추지지대의 상부 크로스빔의 하부면이 접촉되는 순간 힘측정기에 하중이 가해진다.

3. 추의 보정 및 교정

3.1 추의 질량값 계산

힘표준기에서 힘발생용으로 사용되는 추는 정밀하게 보정 및 교정되어야 한다. 추가 보정 및 교정되기 위해서는 추가 설치된 지점의 중력가속도를 이용하여 추의 힘(하중)을 질량값으로 환산해야 한다. 힘(F)을 계산하는 식은 식 (8)과 같다

$$F = mg_{loc}(1 - \frac{\rho_{air}}{\rho_w}) \tag{8}$$

여기서 F는 힘, m은 추의 질량, g_{loc} 는 추가 설치된 지점의 중력가속도, ρ_{air} 은 공기의 밀도, ρ_w 는 추 재질의 밀도이다.

추 보정을 위한 질량값의 계산식은 식 (8)로부터 유도하면 식 (9)와 같다.

$$m = \frac{F}{g_{loc}(1 - \frac{\rho_{air}}{\rho_w})} \tag{9}$$

실하중 힘표준기의 추가 정확한 힘을 가지기 위해서는 각 추의 질량값(m)을 정확히 계산해야 하며, 질량값은 공기의 밀도 ρ_{air} , 추 재질의 밀도 ρ_w , 추가 설치된 지점의 중력가속도 g_{loc} 를 정확히 측정하고, 이것을 식 (9)에 대입하여 계산해야 한다. 특히 중력가속도는 지역에 따라 다르며, 또한 고도에 따라서도 다르므로 정확하게 측정 혹은 계산되

어야 한다. 따라서 실하중 힘표준기의 각 추의 힘을 계산하기 위해서 이용된 중력가속도는 추가 위치할 지역에서 중력가속도 측정장치를 이용하여 측정한 중력가속도로부터 각 추의 고도에 따른 값을 보상하여 계산되어야 한다. 추의 고도에 따른 중력가속도의 보상식은 $3.086 \times 10^{-6} \times h$ 이다.

Table 1 The mass value of weights

추종류	추고도 (m)	추밀도 (g/cm ³)	중력가속도 (m/s ²)	추질량 (g)
20 kN-B	-0.621	7.903	9.79830157	2041480.061
20 kN-C	-0.976	7.903	9.79830266	2041479.833
20 kN-D	-1.295	7.903	9.7930365	2041479.628
20 kN-E	-1.615	7.903	9.79830463	2041479.422
10 kN-F	-1.916	7.903	9.79830556	1020739.614
5 kN-G	-2.182	7.914	9.79830638	510369.657
5 kN-H	-2.396	7.914	9.79830704	510369.622
3 kN-I	-2.573	7.914	9.79830759	306221.756
2 kN-J	-2.733	7.914	9.79830808	204147.827
1 kN-K	-3.017	7.914	9.79830896	102073.904
1 kN-A	-0.390	7.914	9.79830085	102073.989
하중틀	0.946	7.914	9.79829673	204148.064
추지지대	-1.025	7.914	9.79830281	204147.937

Table 1은 본 연구에서 개발한 실하중 힘표준기의 각 추의 종류, 추의 고도, 추의 밀도, 지역중력가속도, 추의 질량을 나타내었다. 추의 종류는 20 kN 용량인 추 20 kN-B, 20 kN-C, 20 kN-D, 20 kN-E, 10 kN 용량인 추 10 kN-F, 5 kN 용량인 추 5 kN-G, 5 kN-H, 3 kN 용량인 추 3 kN-I, 2 kN 용량인 추 2 kN-J, 1 kN 용량인 추 1 kN-K, 1 kN-A, 하중틀, 추지지대, 추의 고도는 한국표준과학연구원 역학표준부 힘표준실 바닥면으로부터 측정한 값, 추의 밀도는 한국표준과학연구원 역학표준부 질량그룹에서 측정한 값, 중력가속도는 한국표준과학연구원의 역학표준부 힘표준실 위치에서 측정한 지역중력가속도 9.79829965 m/s^2 로부터 추의 고도에 따른 보상식으로부터 계산한 값을 빼서 계산한 값이며, 추의 질량은 식 (9)에 추의 밀도, 공기의 밀도 및 지역중력가속도를 대입하여 계산한 값이다. 추의 질량값 계산결과를 보면 추 20 kN-B, 20 kN-C, 20 kN-D,

20 kN-D가 하중은 모두 같지만 추의 질량값이 각각 다른 것은 추가 위치하는 고도가 각각 다르므로 각 추의 중력가속도 계산시 고도를 고려하였기 때문이다.

3.2 추의 보정 및 교정

실하중 힘표준기의 추로 사용되는 추는 정확하게 보정 및 교정되어야 한다. 추의 보정은 추가공시 추의 정확한 하중으로 가공하기 어려우므로 추에 적당한 크기의 공간(cavity)을 만들고, 추의 질량을 계산값보다 적게 가공하며, 이 공간에 추의 재질과 같은 작은 조각을 채워 추의 하중을 맞추는 것을 말한다. 추의 교정은 보정된 추를 질량비교기를 이용하여 추가 가지고 있는 확장불확도를 계산하기 위하여 실시하는 시험이다.

Table 2 The calibration results of weight

추종류	추용량 (kN)	이름값(g)	참질량(g)	표준 불확도
20 kN-B	20	2041480.06	2041480.94	1.8×10^{-6}
20 kN-C	20	2041479.83	2041479.55	1.8×10^{-6}
20 kN-D	20	2041479.62	2041482.31	1.9×10^{-6}
20 kN-E	20	2041479.42	2041480.58	2.2×10^{-6}
10 kN-F	10	1020739.61	1020740.44	1.5×10^{-6}
5 kN-G	5	510369.65	510369.66	1.5×10^{-6}
5 kN-H	5	510369.62	510369.62	1.5×10^{-6}
3 kN-I	3	306221.75	306222.38	2.1×10^{-6}
2 kN-J	2	204147.82	204147.82	2.2×10^{-6}
1 kN-K	1	102073.90	102073.88	1.7×10^{-6}
1 kN-A	1	102073.98	102074.03	1.1×10^{-6}
하중틀	2	204148.06	204147.66	2.0×10^{-6}
추지지대	2	204147.93	204148.01	1.0×10^{-6}

본 연구에서 개발한 힘표준기에 사용된 20 kN 용량의 추 20 kN-B, 20 kN-C, 20 kN-D, 20 kN-E와 10 kN 용량의 추 10 kN-F는 상대확장불확도 2×10^{-6} 를 가진 5 ton 용량의 질량비교기(mass comparator)를 이용하여 보정 및 교정되었으며, 5 kN 용량의 추 5 kN-G, 5 kN-H, 3 kN-I, 2 kN-J, 1 kN-K, 1 kN-A, 하중틀, 추지지대는 상대확장불확도 1×10^{-6} 를 가진 1 ton 용량의 조벨런스(chyo

balance)를 이용하여 보정 및 교정되었다⁽³⁾. Table 2는 각 추의 종류에 따라 추의 이름값(nominal mass), 참질량(true mass), 확장불확도(expanded uncertainty)를 각각 나타내고 있다. 이름값은 식 (1.2)를 이용하여 계산한 질량값이고, 참질량은 조벨런스 혹은 질량비교기를 이용하여 교정 후 계산된 질량값이다. 참질량과 확장불확도는 분동의 표준교정절차(KASTO-96-04-005-088)⁽³⁾에 따라 계산되었다. 표준기의 표준불확도 u_s 는 각 추의 표준불확도 u_{mi} 를 합성하므로써 구할 수 있으며, 계산식은 식 (10)과 같다.

$$u_s = \sqrt{\sum_{i=0}^n u_{mi}^2} \quad (10)$$

계산결과 표준기의 표준불확도는 6.3×10^{-6} 이었다.

표준기의 상대확장불확도는 신뢰계수 $k=2$ (신뢰수준 95.46%)에 표준기의 표준불확도를 곱하여 계산하며, 계산식은 식 (11)와 같다.

$$U = k \cdot u_s \quad (11)$$

계산결과, 표준기의 상대확장불확도는 1.3×10^{-5} 이었다.

4. 결과 및 고찰

본 논문에서는 추교환식 실하중 힘표준기를 설계하였으며, 힘표준기에 설치된 추를 보정 및 교정하였다. 힘표준기의 전체 형상은 삼각기둥 형태로 구성하였으며, 1 kN단위로 2 kN부터 110 kN까지 발생시키고자하는 임의의 하중의 추들을 선택하고 교환하여 하중을 발생시키도록 설계하였으며, 추들 선택하고 하중을 발생시키는 것을 컴퓨터를 이용하여 자동으로 처리할 수 있도록 설계하였다.

하중들의 상부 및 하부빔의 응력은 32 N/mm^2 , 처짐은 0.052 mm , 추지지대의 상부빔 응력은 27 N/mm^2 , 처짐은 0.028 mm 이었다. 하중들과 추지지대의 봉의 응력은 40 N/mm^2 이며, 처짐은 각각 0.46 mm , 0.69 mm 이었다. 하중들과 추지지대의 빔들과 봉의 응력은 이들의 재질 SUS304의 인장강도인 560 N/mm^2 보다 17배 이상 작으므로 강도면에서는 안전하며, 빔 및 봉의 처짐을 합한 것이 1 mm 이하로 표준기의 동작에 간섭이 발생되지 않는다. 따라서 하중들과 추지지대는 안전하게 설계된 것으로 판단된다. 개발한 힘표준기에 사용된 20 kN 용량의

추 20 kN-B, 20 kN-C, 20 kN-D, 20 kN-E와 10 kN 용량의 추 10 kN-F는 상대확장불확도 2×10^{-6} 를 가진 5 ton 용량의 질량비교기(mass comparator)를 이용하여 보정 및 교정되었으며, 5 kN 용량의 추 5 kN-G, 5 kN-H, 3 kN-I, 2 kN-J, 1 kN-A, 1 kN-K, 하중틀(2 kN) 및 추지지대(2 kN)는 상대확장불확도 1×10^{-6} 를 가진 1 ton 용량의 조벨런스를 이용하여 보정 및 교정되었다. 각 추들의 표준불확도를 이용하여 계산한 표준기의 표준불확도는 6.3×10^{-6} 이내이었으며, 상대확장불확도는 1.3×10^{-5} 이다.

5. 결론

본 논문에서는 1 kN 단위로 2 kN부터 110 kN까지의 하중을 발생시킬 수 있는 추교환식 실하중 힘표준기를 개발하였다. 개발한 실하중 힘표준기는 선택한 추를 교환하여 추지지대에 걸어서 하중을 발생시키도록 설계되었으며, 이와 같은 모든 과정이 자동으로 제어된다. 하중틀과 추지지대의 빔과 봉의 응력은 이들의 재질 SUS 304의 인장강도인 560 N/mm^2 보다 17배 이상 작으므로 안전하게 설계된 것으로 판단된다. 계산한 표준기의 상대확장불확도는 1.3×10^{-5} 이내이었으며, 실하중 힘표준기의 상대확장불확도는 추의 교정결과 및 힘표준기의 부품조립상태를 고려할 때 2×10^{-5} 이내로 추정된다. 정확한 힘표준기의 상대확장불확도를 검증하기 위해서는 선진국에서 보유하고 있는 검증된 실하중 힘표준기와 비교 실험이 실시되어야 한다. 개발한 추교환식 실하중 힘표준기는 상대확장불확도의 검증을 마친 후 각종산업에서 사용되고 있는 각종 힘측정기의 시험검사 및 교정검사에 사용될 예정이다.

참고문헌

1. Cai Zheng-ping, et.al., "Development of the 5 MN(500 tf) Hydraulic FORCE STANDARD MACHINE," pp. 187~192, 1995.
2. A. Gosset and P. Averlant, "The BNM-LNE 50 kN Deadweight Force Standard Machine," PROCEEDINGS of the 15th TC3 on measurement of Force and Mass, pp.23-34, 1996.
3. 도진열외 2명, "분동의 표준교정절차(KASTO-98-04-005-088)," 1996.