

6분력 힘/모멘트 교정기의 개발

김갑순*, 강대임*

Development of 6-component Force/Moment Calibration Machine

G. S. Kim*, D. I. Kang*

ABSTRACT

This paper describes the design of a 6-component force/moment calibration machine with having the maximum capacities of 500 N in forces and 50 Nm in moments. To be used for the characteristic of a multi-component load cell, this machine consists of a body, a fixture, a force generating system, a moment generating system and weights. We have also evaluated the accuracy of the calibration machine. Test results show that the expanded relative uncertainty for force components $\pm F_x$, $\pm F_y$ and moment components $\pm M_x$, $\pm M_y$ are less than 8.6×10^{-4} , and force components $+F_z$, $-F_z$ and moment components $\pm M_z$ is less than 1.6×10^{-3} , 2.0×10^{-5} , 1.7×10^{-3} respectively.

Key Words : 6-component force/moment calibration machine(6분력 힘/모멘트 교정기), Expanded relative uncertainty(확장상대불확도), Repeatability error(재현도오차), 정확도(accuracy)

1. 서론

산업이 발달함에 따라 자동차산업, 조선산업, 항공우주 산업 등에서 힘 및 모멘트 측정의 필요성이 날로 증가하고 있는 추세이다. 특히 로봇이나 공작기계를 정밀 제어하기 위해서는 여러 방향의 힘과 모멘트를 동시에 측정해야 한다. 여러 방향의 힘 및 모멘트는 다분력 로드셀(multi-component load cell)로 측정되며⁽¹⁾, 다분력 로드셀은 힘측정기로서의 제 성능을 발휘하기 위하여 6분력 힘/모멘트 교정기(6-component force and moment calibration machine)로 교정되어야 한다^(2,3,4).

6분력 힘/모멘트 교정기는 힘 $\pm F_x$, $\pm F_y$, $\pm F_z$, 모멘트 $\pm M_x$, $\pm M_y$, $\pm M_z$ 를 발생시킬 수 있는 교정기이다. 현재 6분력 힘/모멘트 교정기를 보유하고 있는 연구소는 이태리 도량형연구소(Instituto Di Metrologia "G. Colonnetti" : IMGC)와 일본 계량연구소(National Research Laboratory of Metrology : NRLM) 등이다. 이태리 도량형연구소에서 보유하고 있는 교정기는 정확도를 나타낼 수 있는 불확도가 3×10^{-4} 이내로 매우 정확하나 제작비 및 유지비가 비싸고, 50 m² 이상의 넓은 면적을 차지하는 것과 각각의 힘 혹은 모멘트를 가하기 위하여 교정기의 부품을 여러 번 교환 혹은 재 설정해야

* 한국표준과학연구원 역학연구부

하는 단점이 있다. 일본 계량연구소에서 보유하고 있는 교정기는 수직으로 세워진 기둥에 다분력 로드셀을 직각으로 메달고 추와 추걸이를 이용하여 힘 및 모멘트를 로드셀에 가하며, 이것은 한 방향 이상의 힘 혹은 모멘트를 가할 수 없는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 기존의 6분력 힘/모멘트 교정기의 단점을 보완하여 두 방향 이상의 힘 혹은 모멘트를 동시에 가할 수 있으며, 시험대상 다분력 로드셀을 한번 설치하므로써 힘 성분 $\pm F_x, \pm F_y, \pm F_z$ 와 모멘트 성분 $\pm M_x, \pm M_y, \pm M_z$ 를 독립적으로 또는 복합적으로 발생시킬 수 있는 6분력 힘/모멘트 교정기를 개발하였다. 이 교정기는 x, y, z 방향의 힘 성분 $\pm F_x, \pm F_y, \pm F_z$ 은 최대 500 N까지, 모멘트 성분 $\pm M_x, \pm M_y, \pm M_z$ 는 최대 50 Nm 까지를 발생시킬 수 있다.

2. 6분력 힘/모멘트 교정기의 설계 및 제작

2.1 교정기의 구조

Fig. 1은 6분력 힘/모멘트 교정기에서 발생할 수 있는 힘 및 모멘트분력들을 나타내고 있다. 본 논문에서는 힘 $\pm F_x, \pm F_y, \pm F_z$ 와 모멘트 $\pm M_x, \pm M_y, \pm M_z$ 를 발생시킬 수 있는 6분력 힘/모멘트 교정기를 설계 및 제작하였으며, 그것의 조립도는 Fig. 2와 같다. 6분력 힘/모멘트 교정기는 몸체, 고정구, 힘 발생장치, 모멘트 발생장치, 힘/모멘트 전달장치, 추로 구성되었다.

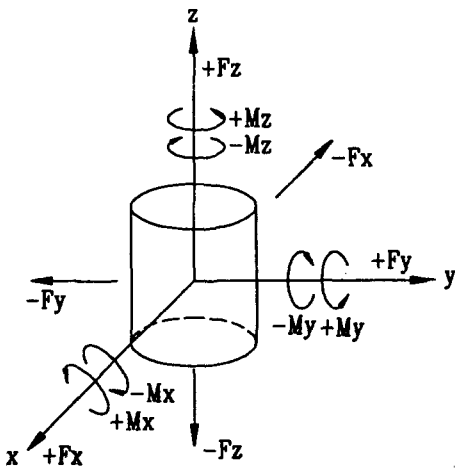


Fig. 1 Schematic diagram of force components and moment components

교정기의 몸체는 교정기 자체의 무게를 지지하며, 전체의 골격은 상부고정판(B1)과 중간고정판(B2)은 기둥(B4), 중간고정판(B2)과 하부고정판(B3)은 기둥(B5)과 각각 조립하여 구성하였고, 내부 골격은 중간고정판(B2)과 중간고정판(B6), 하부고정판(B3)과 중간고정판(B6)은 안내기둥(B7)과 각각 조립하여 구성하였다. 또한 교정기의 수평을 맞추기 위하여 받침대(B8)를 상하로 조절할 수 있도록 하였다.

교정기는 다분력 로드셀을 고정하고 로드셀 위에 설치되어 있는 힘/모멘트 전달장치의 위치를 조절하는데 사용되며, 로드셀고정판(L1), 볼스크류(L2), 안내기둥(L3), 스텝모터 M1(L4), 타이밍 벨트(L5) 등으로 구성되어 있다.

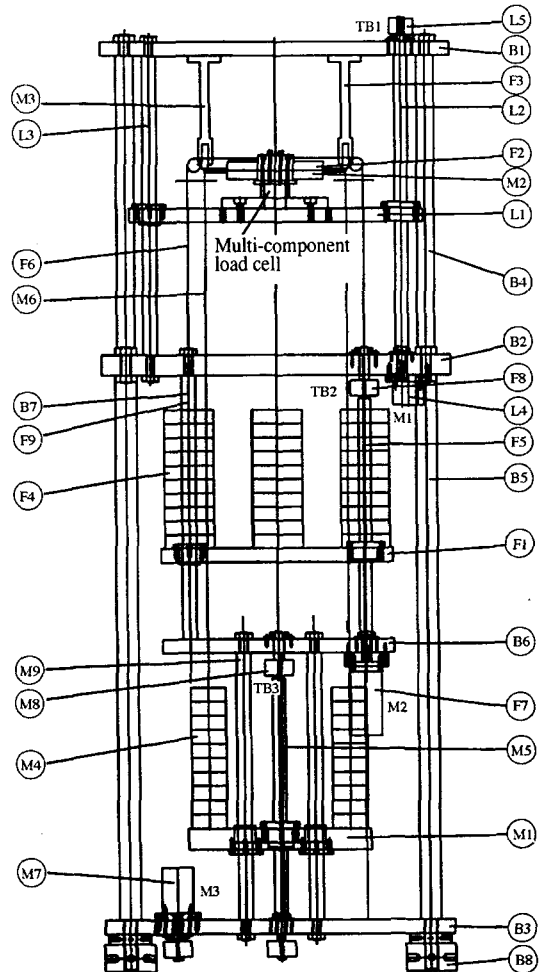


Fig. 2 Front view of force and moment calibration machine

로드셀고정판(L1)은 안내기둥(L3)을 따라 스텝모터 M1(L4), 볼스크류(L2), 타이밍 벨트 TB1(L5) 등에 의해 상하로 이동되며, 다분력 로드셀에 힘 및 모멘트가 가해질 때 로드셀고정판(L1)이 수평을 유지할 수 있도록 4개의 안내기둥(L3)을 설치하였다. 볼스크류(L2)는 로드셀고정판(L1)이 이동 혹은 정지시 수평을 유지할 수 있도록 로드셀고정판(L1)의 좌우측 중심에 각각 1개씩 모두 2개를 설치하였다.

힘 발생장치는 힘 $\pm F_x, \pm F_y, \pm F_z$ 를 발생시키는 장치이며, 추지지판(F1), 힘/모멘트 전달장치(F2), 도르래(F3), 힘 발생용 추(F4), 안내기둥(F9), 볼스크류(F5), 스테인레스 와이어(F6), 스텝모터 M2(F7), 타이밍 벨트 TB2(F8) 등으로 구성되어 있다. 힘은 추지지판(F1)이 안내기둥(F9)을 따라 스텝모터 M2(F7), 볼스크류(F5), 타이밍 벨트 TB2(F8)에 의해 정해진 거리만큼 이동하면 추에 의해 와이어에 힘이 가해지고, 가해진 힘은 도르래(F3)에 의해 90° 혹은 180° 전환되어 힘/모멘트 전달장치(F2)에 전달되어 발생된다.

모멘트 발생장치는 모멘트 $\pm M_x, \pm M_y, \pm M_z$ 를 각각 발생하는 장치이며, 추지지판(M1), 힘/모멘트 전달장치(M2), 도르래(M3), 모멘트 발생용 추(M4), 안내기둥(M9), 볼스크류(M5), 스테인레스 와이어(M6), 스텝모터 M3(M7), 타이밍 벨트 TB3(M8) 등으로 구성되었다. 모멘트는 추지지판(M1)이 안내기둥(M9)을 따라 스텝모터 M3(M7), 볼스크류(M5), 타이밍 벨트 TB3(M8)에 의해 정해진 거리만큼 이동하면 추에 의해 와이어에 힘이 가해지고, 가해진 힘은 도르래(M3)에 의해 90° 혹은 180° 전환되어 힘/모멘트 전달장치(M2)에 전달되어 발생된다. 힘 발생장치에 사용된 4개의 안내기둥(F5)과 모멘트 발생장치에 사용된 4개의 안내기둥(M9)은 힘 및 모멘트의 추의 무게에 의해 추지지판(F1)과 추지지판(M1)의 기울어짐을 방지하기 위하여 설치하였으며, 볼스크류(F6)와 볼스크류(M5)는 추지지판들의 이동 및 정지시 수평을 유지할 수 있도록 이동판의 좌우측 중심에 각각 1개씩 모두 2개를 설치하였다. Fig. 3은 개발된 6분력 힘/모멘트 교정기의 사진을 보이고 있다.

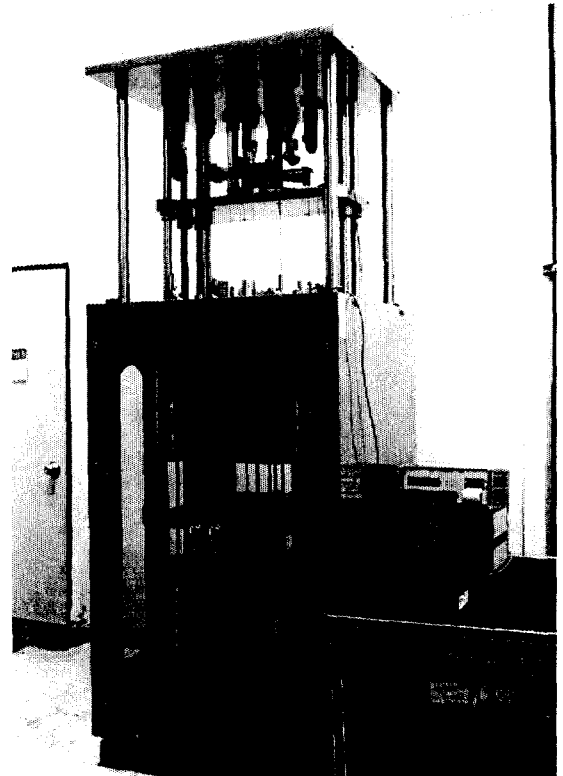


Fig. 3 Photograph of 6-component force/moment calibration machine

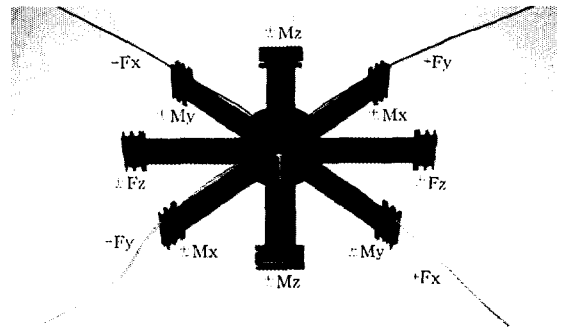


Fig. 4 Transmitting system for the generation of forces and moments

2.2 힘/모멘트 전달장치

힘/모멘트 전달장치는 다분력 로드셀 위에 설치한 후 힘 $\pm F_x, \pm F_y, \pm F_z$ 와 모멘트 $\pm M_x, \pm M_y, \pm M_z$ 를 발생시킬 수 있도록 Fig. 4와 같이 특수하게 설계하였다. 이것은 한 방향의 힘 혹은 모멘트를 발생시켰을 때 다른

방향의 힘 혹은 모멘트가 발생되지 않도록 설계하였으며, 각각의 암길이는 200 mm이다. 이 힘/모멘트 발생장치를 이용하여 각각의 힘/모멘트를 발생하는 원리를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5의 (a)는 힘 $\pm F_x$ 를 발생하는 원리를 나타내고

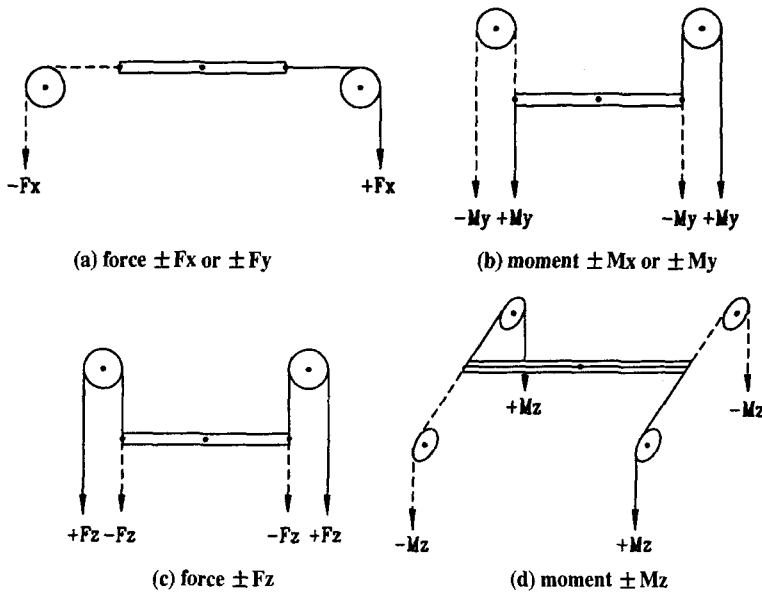


Fig. 5 Principle of the generation of forces and moments

있으며, 실선은 +방향, 은선은 -방향을 나타낸다. 힘 $\pm F_x$ 는 중력방향의 힘을 도르래를 이용하여 90° 전환하여 각각 발생된다. 힘 $\pm F_y$ 도 Fig. 5의 (a)와 같은 원리로 발생된다. Fig. 5의 (b)는 모멘트 $\pm M_y$ 를 발생하는 원리를 나타내고 있으며, 실선은 +방향, 은선은 -방향을 나타낸다. 모멘트 $\pm M_y$ 는 힘/모멘트 전달장치의 한쪽 암 끝에는 중력방향으로 힘을 가하고 다른 쪽 암 끝에는 도르래를 이용하여 힘을 180° 전환하여 가함으로써 발생된다. 모멘트 $\pm M_y$ 도 Fig. 5의 (b)와 같은 원리로 발생된다.

Fig. 5의 (c)는 힘 $\pm F_z$ 를 발생하는 원리를 나타내고 있다. 힘 $-F_z$ 는 도르래를 이용하지 않고 중력 방향으로 직접 힘을 가하므로써 발생되며, 힘 $+F_z$ 는 도르래를 이용하여 180° 전환하여 발생된다. Fig. 5의 (d)는 모멘트 $\pm M_z$ 를 발생하는 원리를 나타내고 있다. 모멘트 $\pm M_z$ 는 양쪽 암 끝에서 서로 반대 방향으로 힘이 가해지도록 도르래를 이용하여 힘을 90° 전환하여 발생된다.

2.3 힘 및 모멘트 발생용 추

Fig. 6은 힘 발생용 추와 모멘트 발생용 추를 나타내고 있으며, 수직중심선을 기준으로 우측에는 추걸이에 추가 걸린 상태, 즉 힘이 가해지는 상태를 나타내고 있고 좌측에는 힘이 가해지지 않는 상태를 나타내고 있다. 추걸이

를 위 방향으로 이동시키면 각각의 추에 부착되어 있는 덮개에 순차적으로 추가 걸리도록 되어 있으며 추가 10 mm 이동했을 때 다음추가 걸리도록 하였다. 그리고 추들이 서로 접촉하지 않도록 추걸이와 추사이를 ± 3 mm 여유를 주었다.

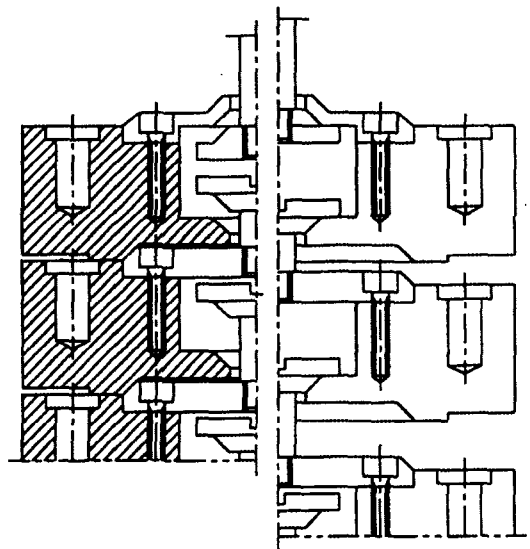


Fig. 6 Schematic diagram of weights for the generation of forces and moments

힘 발생용 추는 5 세트로 구성되어 있고 힘 $\pm F_x$ 와 $\pm F_y$ 발생을 위해 각각 2세트씩, $\pm F_z$ 발생을 위해 1세트가 사용되며 1 세트는 50 N짜리 추 10개로 구성되어 있다. 모멘트 발생용 추는 12 세트로 구성되어 있고, 모멘트 $\pm M_x$, $\pm M_y$, $\pm M_z$ 발생을 위해 각각 4세트씩 사용되며 1 세트는 12.5 N짜리 추 10개로 구성되어 있다.

3. 추의 질량보정

추가 정밀 힘 발생용으로 사용되기 위해서는 추가 설치된 지점의 중력가속도를 고려하여 보정되어야 한다. 보정을 위한 힘 F 는 식 (1)과 같다.

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

여기서 m 은 추의 질량, g_{loc} 는 추가 설치된 지점의 중력가속도, ρ_{air} 는 공기의 밀도, ρ_w 는 추 재질의 밀도이다. 본 연구에서 제작한 추들을 보정하기 위해서 한국표준과 학연구원 힘그룹의 중력가속도 $g_{loc} = 9.798299 \text{ m/s}^2$, 공기의 밀도 $\rho_{air} = 1.2 \text{ kg/m}^3$, 추의 밀도 $\rho_w = 8000 \text{ kg/m}^3$ 을 식 (1)에 대입하여 계산한 질량값 m 은 50 N 용량의 추의 경우 5.103692 kg이었고, 12.5 N 용량의 추의 경우 1.275923 kg이었다.

4. 교정기의 정확도 평가 및 고찰

6분력 힘/모멘트 교정기의 정확도는 정확도의 척도로 주어진 확률에서 참값이 존재하는 범위를 결정하는 정도인 교정기의 확장상대불확도로 평가한다.^(3,4,5,7) 6분력 힘/모멘트 교정기의 확장상대불확도 U 는 A형 불확도 u_A (A-type uncertainty)와 B형 불확도 u_B (B-type uncertainty)를 계산하고 이 불확도들을 합성한 합성불확도를 계산하여 평가하였다. A형 불확도는 한 시리즈의 반복 측정 결과를 통계적 방법으로 평가한 성분이고, B형 불확도는 A형 불확도를 평가한 이외의 다른 방법으로 평가된 성분이다.⁽⁷⁾ 따라서 본 논문에서는 A형 불확도 u_A 는 6분력 힘/모멘트 교정기로 6분력 로드셀을 특성시험한 값들을 이용하여 계산하였고, B형 불확도 u_B 는 힘/모멘트 전달 과정에서 발생한 불확도 u_1 , 추 보정에서 발생한 불확도 u_2 , 베어링 마찰에서 발생한 불확도 u_3 을 합성하여 계산하였다.^(3,4,5,7)

4.1 A형 불확도 u_A 계산 및 고찰

A형 불확도 u_A 를 계산하기 위하여 6분력 힘/모멘트 교정기로 6분력 로드셀을 특성시험한 데이터들을 이용하여 재현도오차로 계산하여야 한다. 재현도오차 a_{rep} 는 식 (2)로 계산된다.^(3,4)

$$a_{rep} = \frac{X_{max} - X_{min}}{\bar{X}} \quad (2)$$

여기서 \bar{X} 는 한 하중점에서 3회 측정된 값을 평균한 것이며, $\bar{X} = (X_1 + X_2 + X_3)/3$ 이다. X_{max} 는 3회 측정된 값중 최대값이고, X_{min} 은 최소값이다. A형 불확도 u_A 는 분산을 사각형분포로 가정하면 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$u_A = \frac{\sqrt{a_{rep}^2}}{12} \quad (3)$$

본 연구에서는 재현도오차 a_{rep} 를 계산하기 위하여 한국표준과학원에서 개발한 6분력 로드셀⁽¹⁾을 힘 $\pm F_x$, $\pm F_y$, $\pm F_z$ 각각 150 N과 모멘트 $\pm M_x$, $\pm M_y$, $\pm M_z$ 각각 20 Nm를 가하여 사전부하실험 3회 실시 후 재현도오차 측정실험을 각각 3회씩 실시하였다.⁽⁶⁾ 측정된 실험값들을 식 (2)에 대입하여 재현도오차를 계산하였다. 이것들을 식 (3)에 대입하여 A형 불확도 u_A 를 각 힘과 모멘트 분력에서 계산하였으며, 계산한 재현도오차들과 불확도들을 Table 1에 나타내었다. 재현도오차는 6분력 힘/모멘트 교정기의 힘성분 $\pm F_x$, $\pm F_y$ 와 모멘트성분 $\pm M_z$ 는 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 이었고, 힘성분 $\pm F_z$ 와 모멘트성분 $\pm M_x$, $\pm M_y$ 는 $\pm 5 \times 10^{-5}$ 이었다. 힘성분 $\pm F_x$, $\pm F_y$ 와 모멘트성분 $\pm M_z$ 의 A형 불확도 u_A 는 모두 2.9×10^{-5} 이었고, 힘성분 $\pm F_z$ 와 모멘트성분 $\pm M_x$, $\pm M_y$ 의 A형 불확도 u_A 는 모두 1.5×10^{-5} 이었다. 여기에서 얻어진 재현도오차는 교정기의 재현도오차와 시험에 사용된 6분력 로드셀의 재현도오차가 혼합된 것이다. 힘 교정기의 재현도오차를 별도로 측정할 수 있는 방법이 아직까지 개발되지 않았다. 따라서 교정기의 재현도오차는 여기에서 얻어진 재현도오차보다 작을 것으로 추정된다.

Table 1 A-type uncertainty u_A

성분	$\pm F_x, \pm F_y$	$\pm F_z, \pm M_x$	$\pm M_y$	$\pm M_z$
불확도				
재현도 오차 a_{rep}	$\pm 1 \times 10^{-4}$	$\pm 5 \times 10^{-5}$	$\pm 5 \times 10^{-5}$	$\pm 1 \times 10^{-4}$
A형 불확도 u_A	2.9×10^{-5}	1.5×10^{-5}	1.5×10^{-5}	2.9×10^{-5}

4.2 B형 불확도 u_B 계산

4.2.1 힘/모멘트 전달과정에서 발생한 불확도 u_1

Fig. 7은 3차원좌표에 임의 힘 F가 작용했을 때 힘분력과 기울어진 각을 나타내고 있다. 기울어진 각은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\zeta = \sqrt{\theta^2 + \phi^2} \quad (4)$$

여기서 θ 는 1축과 2축의 평면에서 1축과 힘 F 사이의 각도, ϕ 는 1축과 3축의 평면에서 1축과 힘 F 사이의 각도, ζ 는 1축과 힘 F 사이의 각도이다.

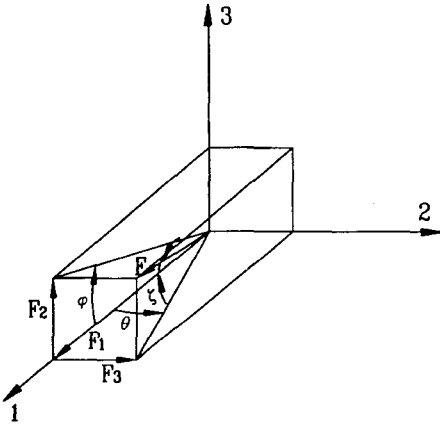


Fig. 7 3-component force in three coordinates

힘/모멘트 전달과정에서 발생한 불확도 u_1 은 힘/모멘트 전달장치의 암의 길이오차에 의한 불확도의 분산과 암과 암 사이의 각도오차 및 설치오차에 의한 불확도의 분산을 합성하여 계산하며, 식 (5)와 같다.

$$u_1 = \sqrt{u_l^2 + u_a^2} \quad (5)$$

여기서 u_l^2 은 길이오차에 의한 불확도의 분산, u_a^2 은 각도오차에 의한 분산을 나타낸다.

암의 길이오차에 의한 불확도는 식 (6)에 의해 계산할 수 있고,

$$u_l = \frac{l_e}{L} \quad (6)$$

여기서 L 은 모멘트 암의 길이이고 l_e 는 암의 길이오차이다.

암과 암 사이의 각도오차 및 설치오차에 의한 불확도는 식 (7)에 의해 계산할 수 있다.

$$u_a = (1 - \cos \zeta) \quad (7)$$

한국표준과학연구원에서 힘/모멘트 전달장치를 교정한 결과 암과 암 사이의 각도오차 θ_1 은 0.021° 이내이고, 설치각도오차는 하이트 게이지를 이용하여 와이어의 시작점과 끝점을 측정하여 각도로 환산한 결과 θ_2 와 ϕ 가 0.3° 이내이었다. 따라서 Fig. 7의 1과 2축의 평면상에서 힘 F와 1축사이의 각도오차 θ 는 θ_1 과 θ_2 를 합한 값인 0.321° 이내이고 1과 3축의 평면상에서 힘 F와 1축사이의 각도오차 ϕ 는 0.3° 이내이었다. 이것들을 식 (4)에 대입하여 F와 1축사이의 각 ζ 를 계산하면 0.5° 이내이다. 모멘트 암의 길이오차는 가공에 의한 오차와 온도변화에 따라 암의 길이가 변화하므로써 발생하는 오차로 구분할 수 있다. 가공오차는 암 길이를 교정한 결과 0.03 mm 이 하이었다. 온도변화에 따른 암의 길이오차는 암의 재료인 알루미늄의 선팽창계수 $2.39 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 에 암의 길이 200 mm 를 곱하여 계산한 결과 0.00478 mm 이었다.

따라서 암의 길이오차에 의한 불확도는 암의 길이오차 0.03478 mm 와 암의 길이 200 mm 를 식 (7)에 대입하여 계산한 결과 1.7×10^{-4} 이었고, 암과 암 사이의 각도오차 및 설치오차에 의한 불확도는 각도오차 0.5° 를 식 (7)에 대입하여 계산한 결과 3.8×10^{-5} 이었다. 6분력 힘/모멘트 교정기를 이용하여 힘성분 $\pm F_x, \pm F_y, \pm F_z$ 를 발생할 경우에는 힘/모멘트 전달장치의 구조상 암과 암 사이의 각도오차 및 설치오차에 의한 불확도만 존재하고, 모멘트성분 $\pm M_x, \pm M_y, \pm M_z$ 를 발생할 경우에는 암 길이오차에 의한 불확도와 암과 암 사이의 각도오차 및 설치오차에 의한 불확도가 존재한다.

힘성분 $\pm F_x, \pm F_y, \pm F_z$ 의 불확도 u_1 은 각도에 의한 불확도를 식 (5)에 대입하여 계산한 결과 1.7×10^{-4} 이었고, 모멘트성분 $\pm M_x, \pm M_y, \pm M_z$ 의 불확도 u_1 은 길이오차에 의한 불확도와 각도오차에 의한 불확도를 식 (5)에 대입하여 계산한 결과 1.8×10^{-4} 이었다.

4.2.2 추 보정에서 발생한 상대불확도 u_2

모든 추들은 한국표준과학연구원서 보정 및 교정되었다. 교정결과 6분력 힘/모멘트 교정기의 추 보정에서 발생한 불확도 u_2 는 힘 및 모멘트성분 모두 5×10^{-6} 이었다.

4.2.3 베어링 마찰에서 발생한 불확도 u_3

베어링 마찰에서 발생한 불확도 u_3 을 계산하기 위하여 6분력 힘/모멘트 교정기의 폴리에 끈으로 연결된 추걸이 2개를 걸고, 평형을 이루고 있는 한쪽 추걸이에 불평형을 이루어질 때까지 여러 개의 작은 추들을 올린 후 그들을 전자저울로 무게를 측정하였다. 또한 반대쪽 추걸이에도 같은 방법으로 실험을 실시하였고, 양쪽 모두 각각 3회씩 측정하였으며, 마찰력은 양쪽 모두의 측정값을 평균하여 계산하였다. 마찰력을 이용하여 각각의 힘과 모멘트성분에서 베어링 마찰에서 발생한 불확도 u_3 을 계산하였다. 힘성분 $\pm F_x$ 와 $\pm F_y$ 의 불확도 u_3 은 베어링 1개의 마찰력이 0.02 N인 베어링 1개를 사용하였고 추 1개의 무게가 50 N이므로 0.02 N을 50 N으로 나누어 계산한 결과 모두 4×10^{-4} 이었고, 힘성분 $+F_z$ 의 불확도 u_3 은 베어링 1개의 마찰력이 0.02 N인 베어링 2개를 사용하였고 추 1개의 무게가 50 N이므로 0.04 N을 50 N으로 나누어 계산한 결과 8×10^{-4} 이었으며, 힘성분 $-F_z$ 불확도 u_3 은 베어링을 사용하지 않으므로 0이었다. 그리고 모멘트성분 $\pm M_x, M_y$ 의 불확도 u_3 은 베어링 1개의 마찰력이 0.01 N인 베어링 1개를 사용하였고 추 1개의 무게가 12.5 N이므로 0.01 N을 12.5 N으로 나누어 계산한 결과 모두 8×10^{-4} 이었고, 모멘트성분 $\pm M_z$ 의 불확도 u_3 은 베어링 1개의 마찰력이 0.02 N인 베어링 2개를 사용하였고 추 1개의 무게가 12.5 N인 추 2개를 사용하였으므로 0.04 N을 25 N으로 나누어 계산한 결과 모두 8×10^{-4} 이었다.

4.2.4 B형 불확도 u_B 계산 및 고찰

B형 불확도 u_B 는 식 (8)로부터 계산할 수 있다.

$$u_B = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (8)$$

계산한 힘/모멘트 전달과정에서 발생한 불확도 u_1 , 추 보정에서 발생한 불확도 u_2 , 베어링 마찰에서 발생한 불확도 u_3 를 식 (8)에 대입하여 계산한 B형 불확도 u_B 를 Table 2에 나타내었다. 계산한 불확도 u_1, u_2, u_3 를 비교해 볼 때 베어링 마찰에서 발생한 불확도 u_3 가 가장 크게 나타났으며, 이것은 B형 불확도 u_B 에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서 불확도를 향상시키기 위해서는 사용한 볼베어링을 유압베어링 혹은 공기베어링으로 교환해야 할 것으로 생각된다. B형 불확도 u^B 는 힘성분 $\pm F_x, \pm F_y$ 와 모멘트성분 $\pm M_x, \pm M_y$ 인 경우에는 $4.3 \times$

10^{-4} , 힘성분 $+F_z$ 와 모멘트성분 $\pm M_z$ 인 경우에는 8.2×10^{-4} 이었다. 그리고 힘성분 $-F_z$ 인 경우에는 도르래와 스테인레스 와이어를 사용하지 않았기 때문에 모두 0이었다.

Table 2 B-type uncertainty u_B

성분 불확도	$\pm F_x, \pm F_y$	$+F_z$	$-F_z$	$\pm M_x, \pm M_y$	$\pm M_z$
u_1	1.7×10^{-4}	1.7×10^{-4}	0	1.8×10^{-4}	1.8×10^{-4}
u_2	5×10^{-6}	5×10^{-6}	0	5×10^{-6}	5×10^{-6}
u_3	4×10^{-4}	8×10^{-4}	0	4×10^{-4}	8×10^{-4}
u_B	4.3×10^{-4}	8.2×10^{-4}	0	4.3×10^{-4}	8.2×10^{-4}

4.3 확장상대불확도 U 및 고찰

6분력 힘/모멘트 교정기의 합성불확도 u_c 와 확장상대 불확도 U는 식 (9)와 (10)으로부터 각각 계산할 수 있다.

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (9)$$

$$U = k \cdot u_c \quad (10)$$

여기서 k는 2이다.⁽⁶⁾ A형 불확도 u_A 와 B형 불확도 u_B 를 식 (9)에 대입하여 합성불확도를 구하고 이것을 식 (10)에 대입하여 확장상대불확도를 계산할 수 있다. 계산한 확장상대불확도를 Table 3에 나타내었다. 각각의 힘과 모멘트성분의 확장상대불확도는 힘성분 $\pm F_x, \pm F_y$ 와 모멘트성분 $\pm M_x, \pm M_y$ 는 모두 8.6×10^{-4} , 힘성분 $+F_z$ 는 1.6×10^{-3} , 모멘트성분 $\pm M_z$ 는 1.7×10^{-3} , $-F_z$ 는 실하중 힘교정기와 같은 확장상대불확도인 2.0×10^{-3} 이었다. 위의 확장상대불확도들은 다분력 로드셀과 힘/모멘트 전달장치의 편심고정 등 예상치 못한 불확도를

Table 3 Expanded relative uncertainty U

성분 불확도	$\pm F_x, \pm F_y$	$+F_z$	$-F_z$	$\pm M_x, \pm M_y$	$\pm M_z$
A형 불확도 u_A	2.9×10^{-5}	1.5×10^{-5}	2.0×10^{-5}	1.5×10^{-5}	2.9×10^{-5}
B형 불확도 u_B	4.3×10^{-4}	8.2×10^{-4}	2.0×10^{-3}	4.3×10^{-4}	8.2×10^{-4}
합성불확도 u_c	4.3×10^{-4}	8.2×10^{-4}	2.0×10^{-3}	4.3×10^{-4}	8.2×10^{-4}
확장상대불확도 U	8.6×10^{-4}	1.6×10^{-3}	2.0×10^{-3}	8.6×10^{-4}	1.7×10^{-3}

포함하지 않은 것이다. 이것을 고려한 6분력 힘/모멘트 교정기의 확장상대불확도는 2.0×10^{-3} 으로 추정된다. 따라서 본 연구에서 개발한 6분력 힘/모멘트 교정기는 현재 상용화되어 있는 다분력 로드셀의 상호간섭오차가 3%정도이므로 다분력 로드셀을 시험 및 교정하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 다분력 로드셀을 교정하기 위한 힘 $\pm F_x, \pm F_y, \pm F_z$ (정격용량 500 N)과 모멘트 $\pm M_x, \pm M_y, \pm M_z$ (정격용량 50 Nm)를 발생시킬 수 있는 6분력 힘/모멘트 교정기를 개발하였으며, 이 교정기의 정확도를 평가하였다.

개발된 힘 교정기의 확장상대불확도 U 는 힘성분 $\pm F_x, \pm F_y$ 와 모멘트성분 $\pm M_x, \pm M_y$ 는 모두 8.6×10^{-4} , 힘성분 $\pm F_z$ 는 1.6×10^{-3} , 모멘트성분 $\pm M_z$ 는 1.7×10^{-3} , $-F_z$ 은 2.0×10^{-3} 이었다. 다분력 로드셀과 힘/모멘트 전달장치의 편심고정 등 예상치 못한 불확도를 고려하면 본 논문에서 개발한 6분력 힘/모멘트 교정기의 확장상대불확도는 2×10^{-3} 으로 추정된다. 따라서 본 연구에서 개발한 6분력 힘/모멘트 교정기는 현재 상용화되어 있는 다분력 로드셀의 상호간섭오차가 3%정도이므로 다분력 로드셀을 시험 및 교정하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 강대임, 김갑순, 정수연, 주진원, "실험계획법을 이용한 쌍안경식 6축 로드셀의 설계 및 상호간섭오차 평가," 대한기계학회논문집(A), 제12권 제11호, pp. 1921~1930, 1997.
2. 강대임의 5명, "한·이태리 국제공동 자동제어용 다축 Dynamometer의 개발(KRISS-96-092-IR)," 과학기술처, pp. 39~49, 1996.
3. 김갑순, 강대임, 송후근, "6분력 힘/모멘트 교정기의 설계 및 불확도 평가," 한국정밀공학회 97춘계 학술대회논문집, pp. 68~72, 1997.
4. Ferrero C. et al., "New Automatic Multi-component Calibration System with Crossed-Flexure Levers," Session Cm.I, pp. 31~39, 1990.
5. Sawla, A., "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, pp. 237~242, 1994.
6. 김갑순의 4명, "전기식 힘 측정기의 표준교정절차," 한국측정기기교정협회, pp. 3~15, 1997.
7. OIML, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement," OIML, pp. 9~28, 1993.