

# 6분력 힘/모멘트 교정기의 설계 및 불확도 평가

(Design and Evaluation of Uncertainty for 6-component Force/Moment Calibration Machine)

김갑순(한국표준과학연구원), 강대임(한국표준과학연구원), 송후근(한국표준과학연구원)

G.S.Kim(KRISS), D.I.Kang(KRISS), H.G.Song(KRISS)

## ABSTRACT

This paper presents the design and the evaluation of the 6-component force/moment calibration machine which has the maximum capacities of 500 N in forces and 50 Nm in moments. This calibration machine consists of body, fixture, force generating system, moment generating system. The expanded uncertainty of the calibration machine is evaluated by calculating the A type uncertainty,  $u_A$  and B type uncertainty,  $u_B$ . The evaluation results, this system has the expanded uncertainty of less than  $2 \times 10^{-3}$  in respective force and moment components.

**Key Words** : 6-component force/moment calibration machine(6분력 힘/모멘트 교정기), Expanded uncertainty(확장불확도), Measurement uncertainty(측정불확도), Repeatability error(재현도오차), Relative uncertainty(상대불확도)

### 1. 서론

산업사회가 발달함에 따라 자동차산업, 조선산업, 항공우주산업 등에서 힘 및 모멘트 측정은 날로 증가하고 있는 추세이다. 특히 로봇의 힘제어, 공작기계의 힘제어 등과 같은 경우에는 여러방향의 힘과 모멘트를 동시에 측정해야 한다. 여러방향의 힘 및 모멘트는 다분력 로드셀(multi-component load cell)로 측정되며, 다분력 로드셀은 힘측정기로서의 성능을 발휘하기 위하여 6분력 힘/모멘트 교정기(6-component force and moment calibration machine)로 교정된다. 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 도량형 연구소(Instituto Di Metrologia "G. Colonnetti" : IMGC)와 일본 계량연구소(National Research Laboratory of Metrology : NRLM) 등이며, 이것들은 실하중 힘표준기의 원리를 응용하여 제작되었다.<sup>(1)</sup> 힘  $\pm F_z$ 는 실하중 힘표준기와 동일한 방법으로 발생되고 힘  $\pm F_x, \pm F_y, \pm F_z$ 와  $\pm M_x, \pm M_y, \pm M_z$ 는 레버 및 모멘트 암 등의 매개체를 이용하여 발생한다. 국내 산업체에서 다분력 로드셀에 대한 시험 및 교정요구가 증가함에 따라 다분력 로드셀을 교정할 수 있는 6분력 힘/모멘트 교정기의 개발이 시급하다.

따라서 본 논문에서는 힘  $\pm F_x, \pm F_y, \pm F_z$ (최대용량 500 N), 모멘트  $\pm M_x, \pm M_y, \pm M_z$ (최대용량 50

Nm)를 발생시킬 수 있는 6분력 힘/모멘트 교정기를 개발하였으며, 이 교정기의 불확도 평가를 하였다.

### 2. 6분력 힘/모멘트 교정기의 설계 및 제작

Fig. 1은 6분력 힘/모멘트 교정기에서 발생할 수 있는 힘 및 모멘트분력들을 나타내고 있다. 본 논문에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 힘  $\pm F_x, \pm F_y, \pm F_z$ , 모멘트  $\pm M_x, \pm M_y, \pm M_z$ 를 발생시킬 수 있는 6분력 힘/모멘트 교정기를 설계 및 제작하였으며, Fig. 2에 그것의 조립도를 나타내고 있다. 6분력 힘/모멘트 교정기는 컴퓨터, 스텝모터 등으로 추를 중력방향으로 상하 이동시켜 힘과 모멘트를 발생시키도록 하였다.

6분력 힘/모멘트 교정기는 몸체, 교정구, 힘 발생장치, 모멘트 발생장치로 구성되었다. 교정기의 몸체는 교정기 자체의 무게를 지지하며, 전체의 골격은 상부 고정판①과 중간고정판②는 기둥⑬, 중간고정판②와 하부 고정판③은 기둥⑬과 각각 조립하여 구성하였고, 내부 골격은 중간고정판②와 ⑥, 하부고정판③과 중간고정판⑥은 안내기둥⑭과 각각 조립하여 구성하였다. 또한 교정기의 수평을 맞추기 위하여 받침대⑯를 상하로 조절할 수 있도록 하였다.

교정구는 다분력 로드셀을 교정하고 로드셀 위에 설치되어 있는 힘/모멘트 전달장치의 위치를 조절하는데 사용되며, 로드셀고정판④, 볼스크류⑩, 안내기둥⑪, 스텝모터 M1, 타이밍 벨트 등으로 구성되어 있다.

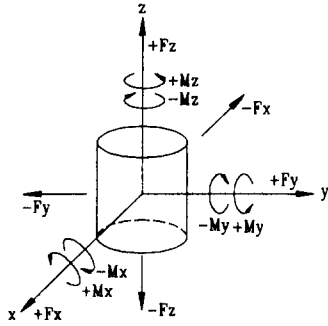


Fig. 1 Schematic diagram of force components and moment components

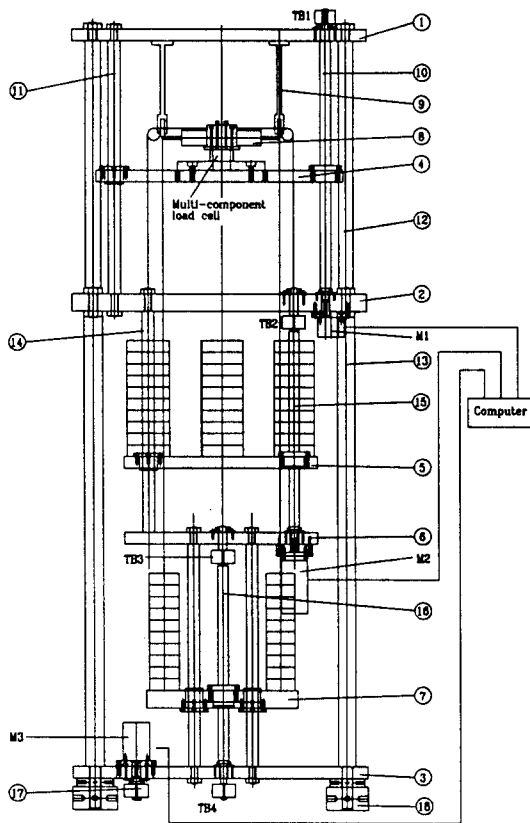


Fig. 2 Front view of force and moment calibration machine.

로드셀고정판(4)은 안내기둥(1)을 따라 스텝모터 M1, 볼스크류(10), 타이밍 벨트 등에 의해 상하로 이동되며, 다분력 로드셀에 힘 및 모멘트가 가해질 때 로드셀고정판(4)가 수평을 유지할 수 있도록 4개의 안내기둥(1)을 설치하였다. 볼스크류(10)은 로드셀고정판(4)가 이동 혹은 정지시 수평을 유지할 수 있도록 로드셀고정판(4)

의 좌우측 중심에 각각 1개씩 모두 2개를 설치하였다.

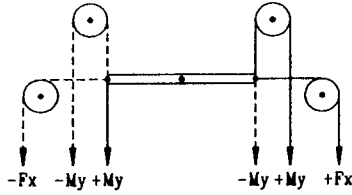
힘 발생장치는 힘  $\pm F_x$ ,  $\pm F_y$ ,  $\pm F_z$ 를 발생시키는 장치이며, 추지지판(5), 힘/모멘트 전달장치(8), 도르래(9), 힘 발생용 추, 안내기둥(14), 볼스크류(15), 스테인레스 와이어, 스텝모터 M2, 타이밍 벨트 등으로 구성되어 있다. 힘은 추지지판(5)가 안내기둥(14)을 따라 스텝모터 M2, 볼스크류(15), 타이밍 벨트에 의해 정해진 거리만큼 이동하면 추에 의해 와이어에 힘이 가해지고, 가해진 힘은 도르래(9)에 의해  $90^\circ$  혹은  $180^\circ$  전환되어 힘/모멘트 전달장치(8)에 전달되어 발생된다.

모멘트 발생장치는 모멘트  $\pm M_x$ ,  $\pm M_y$ ,  $\pm M_z$ 를 각각 발생하는 장치이며, 추지지판(7), 힘/모멘트 전달장치(8), 도르래(9), 모멘트 발생용 추, 안내기둥(14), 볼스크류(16), 스테인레스 와이어, 스텝모터 M3, 타이밍 벨트 등으로 구성되었다. 모멘트는 추지지판(7)이 안내기둥(14)을 따라 스텝모터 M3, 볼스크류(16), 타이밍 벨트에 의해 정해진 거리만큼 이동하면 추에 의해 와이어에 힘이 가해지고, 가해진 힘은 도르래(9)에 의해  $90^\circ$  혹은  $180^\circ$  전환되어 힘/모멘트 전달장치(8)에 전달되어 발생된다. 힘 및 모멘트 발생장치에 사용된 각각 4개씩의 안내기둥(14)은 힘 및 모멘트의 추의 무게에 의해 추지지판(5)와 (7)의 기울어짐을 방지하기 위하여 설치하였으며, 볼스크류(15)와 (16)은 추지지판들의 이동 및 정지시 수평을 유지할 수 있도록 이동판의 좌우측 중심에 각각 1개씩 모두 2개를 설치하였다.

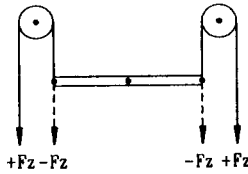
힘/모멘트 전달장치(8)은 한 방향의 힘 혹은 모멘트를 발생시켰을 때 다른 방향의 힘 혹은 모멘트가 발생되지 않도록, 즉 각각의 순수한 힘 혹은 모멘트만 발생되도록 설계하였으며, 각각의 압길이는 200 mm이다. 그것을 Fig. 3에 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 힘  $\pm F_x$ 와 모멘트  $\pm M_y$ 를 발생하는 방법을 나타내고 있으며, 실선은 +방향, 은선은 -방향을 나타낸다. 힘  $\pm F_x$ 는 중력 방향의 힘을 도르래를 이용하여  $90^\circ$  전환하여 각각 발생되고, 모멘트  $\pm M_y$ 는 힘/모멘트 전달장치의 한쪽 압끝에는 중력방향으로 힘을 가하고 다른쪽 압끝에는 도르래를 이용하여 힘을  $180^\circ$  전환하여 가함으로써 발생된다. 힘  $\pm F_y$ 와 모멘트  $\pm M_x$ 도 Fig. 3과 같은 방법으로 발생된다. Fig. 3(b)는 힘  $\pm F_z$ 를 발생하는 방법을 나타내고 있다. 힘  $-F_z$ 는 도르래를 이용하지 않고 중력 방향으로 직접 힘을 가하므로써 발생되며, 힘  $+F_z$ 는 도르래를 이용하여  $180^\circ$  전환하여 발생된다. Fig. 3(c)는 모멘트  $\pm M_z$ 를 발생하는 방법을 나타내고 있다. 모멘트  $\pm M_z$ 는 양쪽 압끝에서 서로 반대 방향으로 힘이 가해지도록 도르래를 이용하여 힘을  $90^\circ$  전환하여 발생된다.

Fig. 4는 힘 발생용 추와 모멘트 발생용 추를 나타내고 있으며, 수직중심선을 기준으로 우측에는 추걸이에 추가 걸린상태, 즉 힘이 가해지는 상태를 나타내고 있

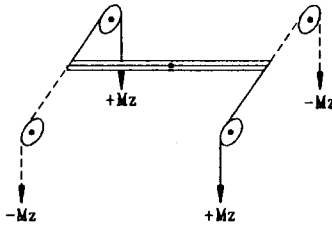
고 좌측에는 힘이 가해지지 않는 상태를 나타내고 있다. 추걸이를 뒷방향으로 이동시키면 각각의 추에 부착되어 있는 덮개에 순차적으로 추가 걸리도록 되어 있으며 추가 10 mm 이동했을 때 다음추가 걸리도록 하였다. 그리고 추들이 서로 접촉하지 않도록 추걸이와 추사이를  $\pm 3$  mm 여유를 주었다.



(a) force  $\pm F_x$  and moment  $\pm M_y$  ( $\pm F_y$  and  $\pm M_x$ )



(b) force  $\pm F_z$



(c) moment  $\pm M_z$

Fig. 3 Transmitting system for the generation of forces and moments.

힘 발생용 추는 5 셋트로 구성되어 있고 힘  $\pm F_x$ 와  $\pm F_y$  발생을 위해 각각 2셋트씩,  $\pm F_z$  발생을 위해 1 셋트가 사용되며 1 셋트는 50 N짜리 추 10개로 구성되어 있다. 모멘트 발생용 추는 12 셋트로 구성되어 있고, 모멘트  $\pm M_x$ ,  $\pm M_y$ ,  $\pm M_z$  발생을 위해 각각 4셋트씩 사용되며 1 셋트는 12.5 Nm짜리 추 10개로 구성되어 있다. 추가 정밀 힘 발생용으로 사용되기 위해서는 추가 설치된 지점의 중력가속도를 이용하여 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,  $\rho_{air}$ 은 공기의 밀도,  $\rho_w$ 는 추 재질의 밀도이다. 본 연구에서 제작한 추들을 보정하기 위해서 한국

표준과학연구원 힘그룹의 중력가속도  $g_{loc}=9.792299$   $m/s^2$ , 공기의 밀도  $\rho_{air}=1.2$   $kg/m^3$ , 추의 밀도  $\rho_w=8.0$   $kg/m^3$ 을 식 (1)에 대입하여 계산한 질량값  $m$ 은 50 N 추는 5.005120 kg이었고, 12.5 N 추는 1.251253 kg이었다.

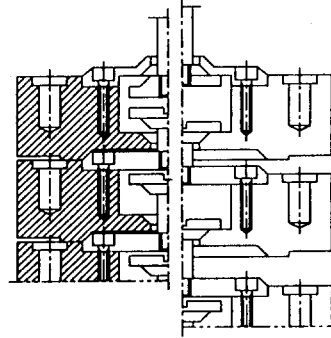


Fig. 4 Schematic diagram of Weights for the generator of forces and moments.

### 3. 교정기의 불확도 평가 및 고찰

6분력 힘/모멘트 교정기의 확장불확도  $U$ 는 A형 불확도  $u_A$ (A 범주 : category-A)와 B형 불확도  $u_B$ (B 범주 : category-B)를 계산하여 평가하였다. A형 불확도  $u_A$ 는 6분력 힘/모멘트 교정기로 6분력 로드셀을 교정한 값들을 이용하여 계산한 확장불확도만을 계산하였으며, B형 불확도  $u_B$ 는 힘/모멘트 전달과정에 의한 불확도  $u_1$ , 추 보정에 의한 불확도  $u_2$ , 베어링 마찰에 의한 불확도  $u_3$ 를 합성하여 계산하였다.<sup>(1,2)</sup>

#### 3.1 A형 불확도 $u_A$ 계산 및 고찰

A형 불확도  $u_A$ 는 6분력 힘/모멘트 교정기로 6분력 로드셀을 교정했을 때 발생하는 재현도오차로 계산하였으며, 계산식은 사각형분포를 이용하면 식 (2)와 같다.

$$u_A = \sqrt{(a_{rep.})^2/3} \quad (2)$$

여기서  $a_{rep.}$ 는 재현도오차이다.

본 연구에서는 A형 불확도  $u_A$ 를 계산하기 위하여 한국표준과학원에서 개발한 6분력 로드셀을 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 N.m를 가하여 사전부하실험 3회 실시후 재현도 오차 측정실험을 각각 3회씩 실시하였다. 재현도오차는 3회 측정값중 최대값과 최소값의 차로 계산하였고, 이것들을 식 (2)에 대입하여 A형 불확도  $u_A$ 를 각각의 힘과 모멘트 분력에서 계산하였으며, 계산한 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  $+F_z$ 와 모멘트성분  $\pm M_x$ ,  $\pm M_y$ 는  $\pm 5 \times 10^{-5}$ 이었다. 재현도오차가 힘교정기의 재현도오차  $5 \times 10^{-5}$ 와 비교할 때 크게 나타난 것은 힘과 모멘트 전환을 위해 사용된 도르래의 마찰 때문이라고 생각된다. 힘성분  $\pm F_x$ ,  $\pm F_y$ 와 모멘트성분  $\pm M_z$ 의 A형 불확도  $u_A$ 는 모두  $5.8 \times 10^{-5}$  이었고, 힘성분  $+F_z$ 와 모멘트성분  $\pm M_x$ ,  $\pm M_y$ 의 A형 불확도  $u_A$ 는 모두  $2.9 \times 10^{-5}$ 이었다.

Table 1 A type uncertainty

성분 불확도	$\pm F_x$ , $\pm F_y$	$+F_z$ , $\pm M_x$	$\pm M_y$	$\pm M_z$
재현도 오차 $u_{rep}$	$\pm 1 \times 10^{-4}$	$\pm 5 \times 10^{-5}$	$\pm 5 \times 10^{-5}$	$\pm 1 \times 10^{-4}$
A형 불확도 $u_A$	$5.8 \times 10^{-5}$	$2.9 \times 10^{-5}$	$2.9 \times 10^{-5}$	$5.8 \times 10^{-5}$

### 3.2 B형 불확도 $u_B$ 계산

#### 3.2.1 힘/모멘트 전달과정에 의한 상대불확도 $u_1$

Fig. 5는 3차원좌표에 임의 힘  $F$ 가 작용했을 때 힘분력과 기울어진 각을 나타내고 있다. 각 분력의 힘  $F_i$ 를 계산하는 식을 유도하면 식 (3)과 같다.

$$F_1 = F \cos \zeta \quad (3)$$

여기서  $F_1$ 은 1방향의 분력이고,  $\zeta$ 은  $\sqrt{\theta^2 + \phi^2}$ 이다.

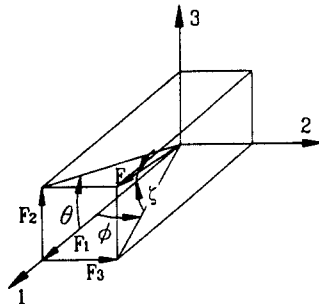


Fig. 5 3-component force in three coordinates

힘/모멘트 전달과정에 의한 상대불확도  $u_1$ 은 힘/모멘트 전달장치의 암의 길이오차, 각도오차 및 설치오차로부터 계산된다. 한국표준과학연구원에서 힘/모멘트 전

달장치를 교정한 결과 암과 암사이의 각도오차는  $0.021^\circ$ 이내이고, 길이오차는  $0.03 \text{ mm}$ 이내이며, 설치오차는 하이트 게이지를 이용하여 와이어의 시작점과 끝점을 측정하여 각도로 환산한 결과  $0.3^\circ$ 이내이었다. 따라서 Fig. 5의 1과 2축의 평면상에서, 힘  $F$ 와 1축사이의 각도오차  $\phi$ 와 1과 3축의 평면상에서, 힘  $F$ 와 1축사이의 각도오차  $\theta$ 는  $0.5^\circ$ 이내이었고 이것으로부터  $F$ 와 1축사이의 각  $\zeta$ 를 계산하면  $0.5^\circ$ 이었으며, 길이오차는  $0.03 \text{ mm}$ 이내이었다. 힘성분  $\pm F_x$ ,  $\pm F_y$ ,  $+F_z$ 의 상대 불확도  $u_1$ 은 위에서 산출한 각도오차  $0.5^\circ$ 를 식 (3)에 대입하여 계산한 결과  $8 \times 10^{-5}$ 이었다. 모멘트성분  $\pm M_x$ ,  $\pm M_y$ ,  $\pm M_z$ 의 불확도  $u_1$ 은 위에서 산출한 각도오차  $0.5^\circ$ 를 식 (3)에 대입하여 계산한 결과  $8 \times 10^{-5}$ 과 길이오차  $0.03 \text{ mm}$ 으로부터 계산한  $4 \times 10^{-5}$ 을 합성하면  $9 \times 10^{-5}$ 이었다.

#### 3.2.2 추 보정에 의한 상대불확도 $u_2$

모든 추들을 추 교정장치를 이용하여 교정한 결과  $5 \times 10^{-6}$ 이었다. 따라서 6분력 힘/모멘트 교정기의 추 보정에 의한 불확도  $u_2$ 는 힘 및 모멘트성분 모두  $5 \times 10^{-6}$ 이다.

#### 3.2.3 베어링 마찰에 의한 상대불확도 $u_3$

베어링 마찰에 의한 상대불확도를 계산하기 위하여 6분력 힘/모멘트 교정기의 폴리에 끈으로 연결된 추걸이 2개를 걸고, 평형을 이루고 있는 한쪽 추걸이에 불평형을 이루어질 때까지 여러개의 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 마찰에 의한 불확도  $u_3$ 를 계산하였다. 힘성분  $\pm F_x$ 와  $\pm F_y$ 의 상대불확도  $u_3$ 는 베어링 1개의 마찰력이  $0.02 \text{ N}$ 인 베어링 1개를 사용하였고 추 1개의 무게가  $50 \text{ N}$ 이므로 모두  $4 \times 10^{-4}$ , 힘성분  $F_z$ 의 상대불확도  $u_3$ 는 베어링 1개의 마찰력이  $0.02 \text{ N}$ 인 베어링 2개를 사용하였고 추 1개의 무게가  $50 \text{ N}$ 이므로  $8 \times 10^{-4}$ , 힘성분  $-F_z$  상대불확도  $u_3$ 는 베어링을 사용하지 않으므로 0, 모멘트성분  $\pm M_x$ ,  $M_y$ 의 상대불확도  $u_3$ 는 베어링 1개의 마찰력이  $0.01 \text{ N}$ 인 베어링 1개를 사용하였고 추 1개의 무게가  $12.5 \text{ N}$ 이므로 모두  $8 \times 10^{-4}$ , 모멘트성분  $\pm M_z$ 의 상대불확도  $u_3$ 는 베어링 1개의 마찰력이  $0.02 \text{ N}$ 인 베어링 2개를 사용하였고 추 1개의 무게가  $12.5 \text{ N}$ 인 추 2개를 사용하였으므로 모두  $8 \times 10^{-4}$ 이었다.

### 3.2.4 B형 불확도 $u_B$ 계산 및 고찰

로드셀 편심고정에 의한 상대불확도  $u_1$ 를 제외한 B형 불확도  $u_B$ 는 식 (4)로부터 계산할 수 있다.

$$u_B = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (4)$$

계산한 힘/모멘트 전달과정에 의한 상대불확도  $u_1$ , 추보정에 의한 상대불확도  $u_2$ , 베어링 마찰에 의한 상대불확도  $u_3$ 를 식 (4)에 대입하여 계산한 B형 불확도  $u_B$ 를 Table 2에 나타내었다. 계산한 상대불확도  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ 를 비교해 볼 때 베어링 마찰에 의한 상대불확도  $u_3$ 가 가장 크게 나타났으며, 이것은 B형 불확도  $u_B$ 에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. B형 불확도  $u_B$ 는 힘 성분  $\pm F_x$ ,  $\pm F_y$ 와 모멘트 성분  $\pm M_x$ ,  $\pm M_y$ 의 B형 불확도  $u_B$ 는 모두  $4.1 \times 10^{-4}$  이었고, 힘 성분  $+F_z$ 와 모멘트 성분  $\pm M_z$ 의 B형 불확도  $u_B$ 는 모두  $8.1 \times 10^{-5}$ 이었다.

Table 2 Uncertainty  $u_B$ .

성분 불확도	$\pm F_x, \pm F_y$	$+F_z$	$\pm M_x, \pm M_y$	$\pm M_z$
$u_1$	$8 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$9 \times 10^{-5}$	$9 \times 10^{-5}$
$u_2$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$
$u_3$	$4 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-4}$
$u_B$	$4.1 \times 10^{-4}$	$8.1 \times 10^{-4}$	$4.1 \times 10^{-4}$	$8.1 \times 10^{-4}$

### 3.3 확장불확도 U 및 고찰

6분력 힘/모멘트 교정기의 합성불확도  $u_c$ 와 확장불확도 U는 식 (5)와 (6)로부터 각각 계산할 수 있다.

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (5)$$

$$U = k \cdot u_c \quad (6)$$

여기서 k는 2이다. A형 불확도  $u_A$ 와 B형 불확도  $u_B$ 를 식 (5)에 대입하여 합성불확도를 구하고 이것을 식 (6)에 대입하여 계산한 확장불확도를 Table 3에 나타내었다. 각각의 힘과 모멘트 성분의 확장불확도는 힘 성분  $\pm F_x$ ,  $\pm F_y$ 는 모두  $8.4 \times 10^{-4}$ , 힘 성분  $+F_z$ 와 모멘트 성분  $\pm M_z$ 는  $1.6 \times 10^{-3}$ ,  $-F_z$ 은 실하중 힘교정기와 같은 확장불확도인  $2 \times 10^{-5}$ , 모멘트 성분  $\pm M_x$ ,  $\pm M_y$ 는  $8.2 \times 10^{-4}$ 이었다. 위의 확장불확도들은 기타 예상치 못한 불확도

를 포함하지 않은 것이다. 이것을 고려한 6분력 힘/모멘트 교정기의 확장불확도는  $2 \times 10^{-3}$ 으로 추정된다. 따라서 본 연구에서 개발한 6분력 힘/모멘트 교정기는 다분력 로드셀을 시험 및 교정하는데 사용될 수 있으리라 생각된다.

Table 3 Expanded uncertainty U.

성분 불확도	$\pm F_x, \pm F_y$	$+F_z$	$\pm M_x, \pm M_y$	$\pm M_z$
A형 불확도 ( $u_A$ )	$5.8 \times 10^{-5}$	$2.9 \times 10^{-5}$	$2.9 \times 10^{-5}$	$5.8 \times 10^{-5}$
B형 불확도 ( $u_B$ )	$4.1 \times 10^{-4}$	$8.1 \times 10^{-4}$	$4.1 \times 10^{-4}$	$8.1 \times 10^{-4}$
합성불확도 ( $u_c$ )	$4.2 \times 10^{-4}$	$8.1 \times 10^{-4}$	$4.1 \times 10^{-4}$	$8.1 \times 10^{-4}$
확장불확도 (U)	$8.4 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-3}$	$8.2 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-3}$

## 4. 결론

본 연구에서는 다분력 로드셀을 교정하기 위한 힘  $\pm F_x$ ,  $\pm F_y$ ,  $\pm F_z$ (최대  $\pm 500$  N)과 모멘트  $\pm M_x$ ,  $\pm M_y$ ,  $\pm M_z$ (최대  $\pm 50$  N.m)를 발생시킬 수 있는 6분력 힘/모멘트 교정기를 설계 및 제작하였으며, 이 교정기의 확장불확도를 계산하였다.

계산된 힘과 모멘트 성분의 확장불확도 U는 힘 성분  $\pm F_x$ ,  $\pm F_y$ 는 모두  $8.4 \times 10^{-4}$ , 힘 성분  $+F_z$ 와 모멘트 성분  $\pm M_z$ 는  $1.6 \times 10^{-3}$ ,  $-F_z$ 은 실하중 힘교정기와 같은 확장불확도로  $2 \times 10^{-5}$ , 모멘트 성분  $\pm M_x$ ,  $\pm M_y$ 는  $8.2 \times 10^{-4}$ 이었다. 기타 예상치 못한 불확도를 고려하면 본 연구에서 개발한 6분력 힘/모멘트 교정기의 확장불확도는  $2 \times 10^{-3}$ 으로 추정된다.

## 참고문헌

1. Ferrero C. et al., "New Automatic Multicomponent Calibration System with Crossed-Flexure Levers", Session Cm.I-31~39,(1990).
2. 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).