

다축 힘/모멘트센서의 불확도평가 및 응용에 관한 연구

김갑순(경상대학교 제어계측공학과, 생산기술연구소)

Uncertainty Evaluation of a Multi-axis Force/Moment Sensor and Its Application

G. S. Kim(Control & Instrumentation Eng. Dept. GSNU)

ABSTRACT

This paper describes the calibration method and the evaluation method of relative expanded uncertainty for a multi-axis force/moment sensor. This sensor should be calibrated to be use in the industry. Now, the confidence of the calibration result is expressed with interference error. But it is no inaccurate, because an interference error, besides, a reproducibility error of the sensor, a error of the six-axis force/moment sensor calibrator, and so on. Thus, in order to accurately evaluate the relative expanded uncertainty of it, the concept of the uncertainty should be induced, and these errors must be contained in the relative expanded uncertainty. In this paper, the calibration method is exhibited and the evaluation method of the relative expanded uncertainty is also exhibited. And, a six-axis force/moment sensor was calibrated and the relative expanded uncertainty was evaluated.

Key Words : Relative expanded uncertainty(상대확장불확도), Interference error(상호간섭오차), Multi-component force/moment sensor(다축 힘/모멘트센서), Rated output(정격출력), Calibration(교정).

1. 서론

다축 힘/모멘트센서는 여러 방향의 힘과 모멘트를 동시에 측정하는 센서이다. 다축 힘/모멘트센서는 다축 힘/모멘트센서 교정기로 교정되어 신뢰성이 확보되어야 사용될 수 있다. 교정된 다축 힘/모멘트센서는 그 결과를 사용자가 믿고 사용할 수 있는 신뢰도를 정량적인 값으로 나타내어야 한다. 측정결과와 신뢰도를 상호간섭오차 분석으로 현재까지 표현하고 있으나 그 표현방법이 정확하지 않기 때문에 과학적인 분석으로 보다 정확성을 높이기 위하여 불확도개념을 도입해야 한다[1,2,3]. 표준을 위한 국제기구(International Organization for Standardization)는 측정결과와 신뢰도를 불확도로 표현하는 것을 권고하고 있다.

따라서 본 논문에서는 각 센서를 각각의 교정점에서 증가 및 감소순으로 3 번씩 실시하는 교정방법을 제시하였고, A 형 표준불확도와 B 형 표준불확도를 합성한 합성표준불확도에 신뢰계수를 곱한 것에 히스테리시스에 의한 표준불확도와 상호간섭오차를 더하여 계산하는 상대확장불확도를 계산하

는 불확도 평가방법을 제시하였다. 그리고 이 교정방법을 이용하여 6 축 힘/모멘트센서를 교정하였고, 교정한 결과를 이용하여 상대확장불확도를 평가하였다.

2. 불확도 평가이론

불확도는 측정결과에 관하여, 측정량을 합리적으로 측정한 값의 분산특성을 나타내는 파라미터로 정의한다[1,2].

2.1 A 형 표준불확도

A 형 표준불확도는 한 시리즈의 반복측정 결과를 통계적 방법으로 평가한 성분을 이용하여 계산한다.

2.1.1 교정하중점에서의 순지시값 $d_{h,j}$

h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 교정하중점 i 단계의 j 번째 반복측정에서 다축 힘/모멘트센서의 순 지시값은 식 (1)에 의해 계산된다.

$$d_{h,j} = d'_{h,y} - d_{h,0j} \quad (h=1, \dots, 6, i=1, \dots, j=1, \dots) \quad (1)$$

여기서, $d_{h,y}$ 는 h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 교정하중점 i 단계의 j 번째 반복측정에서의 순 지시값, $d'_{h,y}$ 는 h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 교정하중점 i 단계의 j 번째 반복측정에서 지시계에 표시된 지시값, $d_{h,0j}$ 는 h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 하중을 가하기 전 무하중상태에서 지시계에 표시된 지시값이다. 그리고 i 는 교정하중점의 순서, j 는 각 하중점에서의 교정횟수를 각각 나타내며, h 는 힘 혹은 모멘트센서를 나타낸다.

2.1.2 평균값 $\overline{d_{h,i}}$

h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 교정하중점 i 단계에서의 평균값은 식 (2)에 의해 계산되며, 이때 분해능을 고려해야한다.

$$\overline{d_{h,i}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{h,i,j} \quad (h=1, \dots, 6, i=1, \dots, j=1, \dots) \quad (2)$$

여기서, $\overline{d_{h,i}}$ 는 h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 교정하중점 i 단계에서의 순 지시값의 평균값, n 은 h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 교정하중점 i 단계에서의 반복 측정수이다.

2.1.3 표준편차 $S_{h,i}$

h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 교정하중점 i 단계에서 다축 힘/모멘트센서의 표준편차 $S_{h,i}$ 는 식 (3)에 의해 계산될 수 있다.

$$S_{h,i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (d_{h,i,j} - \overline{d_{h,i}})^2}{n-1}} \quad (h=1, \dots, 6, i=1, \dots, j=1, \dots) \quad (3)$$

2.1.4 A 형 표준불확도 $u_{A,h}$

h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 교정하중점 i 단계에서의 반복측정결과의 A 형 표준불확도 $u_{A,h}$ 는 표준편차 $S_{h,i}$, 교정하중점 i 단계에서의 반복측정수 n 에 의해 계산되며, 식 (4)에 의해 계산될 수 있다.

$$u_{A,h} = \left| \frac{S_{h,i}}{\sqrt{n}} \right|_{\max} \quad (h=1, 2, \dots, 6, i=1, 2, \dots) \quad (4)$$

2.2 B 형 표준불확도

B 형 표준불확도는 A 형 표준불확도를 계산하는 방법 의로 계산된다.

2.2.1 다축 힘/모멘트센서 교정기의 표준불확도 $u_{CM,h}$

h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 교정하중점 i

단계에서의 다축 힘/모멘트센서 교정기의 표준불확도 $u_{CM,h}$ 는 다축 힘/모멘트센서 교정기의 상대확장 불확도 $U_{CM,h}$, 신뢰계수 k 및 기기지시값의 평균값 $\overline{d_{h,i}}$ 으로 계산된다.

$$u_{CM,h} = \frac{U_{CM,h}}{k} \times \overline{d_{h,i}} \quad (h=1, \dots, 6, i=1, \dots) \quad (5)$$

여기서, $\overline{d_{h,i}}$ 는 각 센서의 정격출력의 평균값이며, 국가표준기관은 일반적으로 신뢰계수 $k=2(99.74\%)$ 을 사용한다.

2.2.2 지시계의 분해능에 의한 표준불확도 u_r

지시계의 분해능에 의한 표준불확도 u_r 는 사각형분포(rectangular probability distribution)로 가정할 수 있으므로 식 (6)으로 계산될 수 있다.

$$u_r = \sqrt{\frac{r^2}{12}} \quad (6)$$

여기서, r 은 지시계의 분해능이다.

2.2.3 영점 표준불확도 $u_{z,h}$

h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 영점 표준불확도 $u_{z,h}$ 는 각 교정시리즈의 전과 후의 지시값을 이용하여 계산된다. 영점 표준불확도 $u_{z,h}$ 는 사각형분포(rectangular probability distribution)로 가정할 수 있으므로 식 (7)으로 계산될 수 있다.

$$u_{z,h} = \sqrt{\frac{(d_{h,\beta} - d_{h,0j})^2}{12}} \quad (h=1, \dots, 6, j=1, \dots) \quad (7)$$

여기서, $d_{h,\beta}$ 는 h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 교정시리즈 1, 2, 3 에서 하중을 제거한 후 측정된 지시값, $d_{h,0j}$ 는 h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 교정시리즈 1, 2, 3 에서 교정을 시작하기 전에 측정된 지시값이다.

2.2.4 B 형 표준불확도 $u_{B,h}$

B 형 표준불확도 $u_{B,h}$ 는 다축 힘/모멘트센서 교정기의 표준불확도 $u_{CM,h}$, 지시계의 분해능에 의한 표준불확도 u_r , 영점 표준불확도 $u_{z,h}$ 로 계산되며, 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{B,h} = \sqrt{u_{CM,h}^2 + u_r^2 + u_{z,h}^2} \quad (8)$$

2.3 합성 표준불확도

합성 표준불확도 $u_{c,h}$ 는 A 형 표준불확도 $u_{A,h}$ 와 B 형 표준불확도 $u_{B,h}$ 로서 계산되며, 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$u_{c,h} = \sqrt{u_{A,h}^2 + u_{B,h}^2} \quad (9)$$

2.4 히스테리시스에 의한 표준불확도 $u_{hys,h}$

히스테리시스에 의한 표준불확도 $u_{hys,h}$ 는 다축 힘/모멘트센서의 증가순 순지시값과 감소순 순지시값의 차로써 계산되며, 식 (10)로 계산될 수 있다.

$$u_{hys,h} = \left| (d_{h,y} - d_{h,y}'')_{\max} \right| \quad (h=1, \dots, 6, i=1, \dots, j=1, \dots) \quad (10)$$

여기서, $d_{h,y}$ 는 h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 교정하중점 i 단계의 j 번째 반복측정에서의 증가순 순지시값, $d_{h,y}''$ 는 h 방향의 힘 혹은 모멘트센서에서, 교정하중점 i 단계의 j 번째 반복측정에서의 감소순 순지시값이다.

2.5 상호간섭오차에 의한 표준불확도 $u_{int,h}$

상호간섭오차로부터 계산되는 불확도를 상호간섭오차에 의한 표준불확도 $u_{int,h}$ 라고 하며, 계산식은 식 (11)과 같다.

$$u_{int,h} = \left| e_{int,h,h'} \right|_{\max} \quad (h=1, \dots, 6, h'=1, \dots, 6) \quad (11)$$

여기서, $e_{int,h,h'}$ 은 다축 힘/모멘트센서의 상호간섭오차를 나타낸다. $e_{int,1,1'}$, ..., $e_{int,6,6'}$ 은 각 힘 혹은 모멘트를 가했을 때 각 센서의 정격출력을 나타내므로 상호간섭오차가 아니고, $e_{int,1,2'}$ 는 힘 Fx 를 가했을 때 Fy 힘센서로부터 출력되는 상호간섭오차이며, $e_{int,2,1'}$ 는 힘 Fy 를 가했을 때 Fx 힘센서로부터 출력되는 상호간섭오차이다.

2.6 상대확장불확도

상대확장불확도 U_h 는 합성표준불확도 $u_{c,h}$ 에 신뢰계수 k를 곱한 것에 상대확장불확도에 직접적인 영향을 미치는 히스테리시스에 의한 표준불확도 $u_{hys,h}$, 비직선성오차에 의한 표준불확도 $u_{nl,h}$, 상호간섭오차에 의한 표준불확도 $u_{int,h}$ 를 더하여 계산하며, 식 (12-a)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_h = \left| u_{hys,h} + u_{nl,h} + k \times u_{c,h} \right|_{\max} \quad (12-a)$$

국가표준기관은 일반적으로 신뢰계수 $k=2(99.74\%)$ 을 사용한다. 상대확장불확도 U_h 의 단위는 지시계의 지시값이고, 백분율(%)로 나타내는 식은 식 (12-b)와 같으며,

$$U'_h = \frac{U_h}{d_{h,R}} \times 100(\%) \quad (12-b)$$

힘 단위(N) 및 모멘트 단위(Nm)로 나타내면 식 (12-c)와 같다.

$$U'_h = \frac{U_h}{d_{h,R}} \times L_{F,M} \quad (N \text{ or } Nm) \quad (12-c)$$

여기서, $\overline{d_{h,R}}$ 는 각 센서의 정격출력이며, $L_{F,M}$ 는 각 센서의 정격힘 혹은 정격모멘트이다.

3. 교정 방법

교정은 다축 힘/모멘트센서 교정기를 이용하여 교정방법에 의해 다축 힘/모멘트센서에 힘 혹은 모멘트를 발생시키고 이것으로부터 출력되는 지시값을 이용하여 불확도를 평가하여 이 센서를 사용할 수 있도록 처리하는 것을 말한다. 이를 위해서는 신뢰성이 있는 교정방법이 필요하다.

다축 힘/모멘트센서의 교정점은 5 개 이상을 선택해야 하며 가능한 한 전체 하중범위에서 골고루 분포되어야 한다. 5 개의 서로 다른 교정점을 선택하였을 경우에는 각 센서의 정격용량의 20 %씩 증가시켜 선택한다.

사전부하시험은 다축 힘/모멘트센서의 재현도, 기기상태 등을 점검하기 위하여 정격하중을 가하여 3 회 실시하며, 그것의 시리즈를 Fig. 1 의 (a)에 나타내었다. 무하중상태에서는 2 분간 유지하며, 정격하중에서는 30 초간 유지한다. 사전부하시험값은 정격하중이 작용된 후 및 제거된 후 30 초가 경과된 후에 기록한다.

교정은 사전부하가 끝나고 2 분이 경과된 후에 시작하고, 3 회이상 실시하며, 그것의 시리즈를 Fig. 1 의 (b)에 나타내었다. 무하중상태에서는 2 분을 유지하고, 교정하중 부하상태에서는 30 초간 유지하며, 출력값은 교정하중이 부과된 후 및 제거된 후 30 초가 경과된 후에 기록한다.

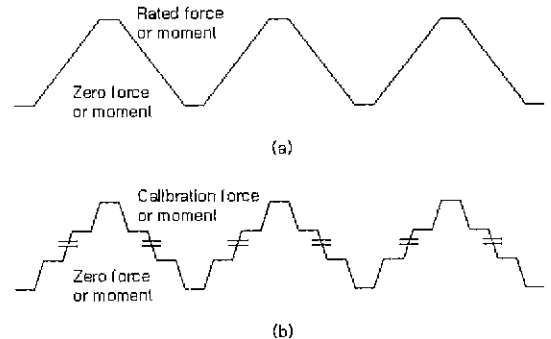


Fig. 1 Calibration series

4. 불확도 계산결과 및 고찰

교정된 6 축 힘/모멘트센서는 정격출력이 Fx 센서, Fy 센서, Fz 센서가 각각 100 N 이고 모멘트 Mx

센서, My 센서, Mz 센서가 각각 1 Nm 이다. 각 센서의 교정점은 정격하중을 균일하게 5 등분하여 선정하였으므로 Fx 센서, Fy 센서, Fz 센서가 20 N, 40 N, 60 N, 80 N, 100 N 이고 Mx 센서, My 센서, Mz 센서가 0.2 Nm, 0.4 Nm, 0.6 Nm, 0.8 Nm, 1.0 Nm 이다. 교정은 다축 힘/모멘트센서 교정기를 이용하여 증가순 및 감소순으로 3 회 실시되었으며, 출력값은 각 교정점에서 3 회 측정되었다.

A 형 표준불확도는 표준편차 식 (3)과 A 형 표준불확도 (4)를 이용하여 계산되고, B 형 표준불확도는 다축 힘/모멘트센서 교정기의 표준불확도 식 (5), 지시계의 분해능에 의한 표준불확도 식 (6), 영점 표준불확도 식 (7), B 형 표준불확도 식 (8)을 이용하여 계산된다. 다축 힘/모멘트센서 교정기의 표준불확도를 계산할 때 사용되는 다축 힘/모멘트센서 교정기의 상대확장불확도는 교정기의 Fx 성분이 0.00086, Fy 가 0.00086, Fz 가 0.000012, Mx 가 0.00186, My 가 0.00086, Mz 가 0.0017 이고, 신뢰계수 k 는 2 이다. 지시계의 분해능에 의한 표준불확도를 계산할 때 사용되는 지시계의 분해능은 0.00001 mV/V 이다.

합성표준불확도는 식 (9)과 같이 A 형 표준불확도와 B 형 표준불확도를 합성하여 계산되며, 히스테리시스에 의한 표준불확도, 상호간섭오차에 의한 표준불확도는 각각 식 (10)과 (11)에 의해 계산된다. 마지막으로 상대확장불확도는 식 (12-a)~(12-c)와 같이 합성표준불확도에 신뢰계수 k=2 를 곱한 것에 히스테리시스에 의한 표준불확도, 상호간섭오차에 의한 표준불확도를 더하여 계산한다.

Table 1 은 불확도 평가식에 의해 계산된 상대확장불확도와 상호간섭오차를 나타내었다. 상대확장불확도는 Fx 센서가 0.91 %, Fy 센서가 1.22 %, Fz 센서가 1.67 %, Mx 센서가 1.68 %, My 센서가 2.78 %, Mz 센서가 1.20 %이었다. 교정한 다축 힘/모멘트센서의 상대확장불확도는 2.78 % 이하이다. 상호간섭오차는 지금까지 센서의 불확도를 대신 사용되었다. 상호간섭오차의 최대값은 Fx 센서가 0.69 %, Fy 센서가 0.98 %, Fz 센서가 1.48 %, Mx 센서가 1.55 %, My 센서가 2.48 %, Mz 센서가 0.86 % 이었다.

그러므로 현재 사용되는 센서의 상호간섭오차로 대신하는 불확도는 교정한 다축 힘/모멘트센서의 경우 Fx 센서가 0.22 %, Fy 센서가 0.24 %, Fz 센서가 0.19 %, Mx 센서가 0.13 %, My 센서가 0.30 %, Mz 센서가 0.34 % 만큼 적게 표시되었다. 즉 최대 0.34 % 적게 표시된 것이다. 이것은 센서의 교정시 상호간섭오차 이외에 재현도오차, 다축 힘/모멘트센서 교정기의 오차(상대불확도), 지시계의 분해능에 의한 오차, 영점미복귀에 의한 오차, 히스테리시스

오차 등이 추가로 발생되었고, 이것들을 표준불확도로 변환하여 상호간섭오차 계산시 포함되었기 때문이다.

Table 1 Relative expanded uncertainty and interference error of the sensors

Sensor	Interference Error(%)	Relative uncertainty (mV/V)	Relative uncertainty (%)	Relative uncertainty (N or Nm)
Fx	0.69	0.00481	0.91	0.9122
Fy	0.98	0.00585	1.22	1.2198
Fz	1.48	0.00801	1.67	1.6671
Mx	1.55	0.01087	1.68	0.0168
My	2.48	0.01814	2.78	0.0278
Mz	0.86	0.00733	1.20	0.0120

5. 결론

본 논문에서는 다축 힘/모멘트센서의 상대확장불확도를 평가하는 방법을 제시하고, 예로서 6 축 힘/모멘트센서의 상대확장불확도를 계산하였다.

현재 사용되는 센서의 상호간섭오차로 대신하는 불확도는 교정한 다축 힘/모멘트센서의 경우 Fx 센서가 0.22 %, Fy 센서가 0.24 %, Fz 센서가 0.19 %, Mx 센서가 0.13 %, My 센서가 0.30 %, Mz 센서가 0.34 % 만큼 적게 표시되었다. 그러므로 다축 힘/모멘트센서의 상대확장불확도 평가는 A 형 표준불확도, B 형 표준불확도인 다축 힘/모멘트센서 교정기의 표준불확도, 지시계의 분해능에 의한 표준불확도, 영점 표준불확도, 히스테리시스에 의한 표준불확도 등의 성분이 상대확장불확도가 상호간섭오차에 추가되어야 한다.

따라서 본 논문에서 제시한 불확도 평가방법은 다축 힘/모멘트센서의 상대확장불확도를 평가하는 데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- OIML. "Guide to the expression of uncertainty in measurement", International organization for standardization, pp. 21~54, 1993.
- N. S. Jong, et al., "KRISS Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement(KRISS-98-096-SF)," pp. 1~31, 1998.
- A. Sawla, "Guidance for the determination of the best measurement capability of force calibration machines and uncertainty of calibration results of force measuring device," PTB-Mitteilungen 104 4/94.