

다축 힘/모멘트 센서 교정기의 개발 및 그의 불확도 평가

김갑순[#], 윤정원^{*}

Development of Calibration System for Multi-Axis Force/Moment Sensor and Its Uncertainty Evaluation

Gab-Soon Kim[#] and Jungwon Yoon^{*}

ABSTRACT

This paper describes the development of the calibration system for a multi-axis force/moment sensor and its uncertainty evaluation. This calibration system can generate the continuous forces ($\pm F_x$, $\pm F_y$ and $\pm F_z$) and moments ($\pm M_x$, $\pm M_y$ and $\pm M_z$). Many kinds of multi-axis force/moment sensors in industries should be carried out the characteristic test or the calibration with the calibration system that can generate the forces and the moments. The calibration systems have been already developed are the disadvantages of the low capacity, the generation of step forces(10N, 20N ...) and step moments(1Nm, 2Nm ...) with weights, the high costs in manufacture and so on. In this paper, the calibration system for a multi-axis force/moment sensor that can generate the continuous three forces and three moments was developed. Their ranges are 0~2000N in all force-directions and 0~400Nm in all moment-directions. And the system was evaluated in the expanded relative uncertainty. They were ± 0.0004 in all forces $\pm F_x$, $\pm F_y$ and $\pm F_z$, and ± 0.0004 in all moments $\pm M_x$, $\pm M_y$ and $\pm M_z$.

Key Words : Multi-axis force/moment sensor calibration system (다축 힘/모멘트 센서 교정장치), Expanded relative uncertainty (확장상대불확도), Multi-axis force/moment sensor (다축 힘/모멘트 센서), Calibration (교정), Characteristic test(특성시험)

1. 서론

공작기계산업, 자동차산업, 조선산업, 로봇산업에서 다축 힘/모멘트 센서의 사용은 급속히 증가하고 있는 추세이다. 특히 인간형 로봇의 손목, 발목, 손가락 등에 이 센서가 많이 사용되고 있고 앞으로 더욱 증가될 예정이다. 다축 힘/모멘트 센서는 3 차원 공간상에서 x, y, z 방향의 3 개의 힘 F_x , F_y ,

F_z 와 모멘트 M_x , M_y , M_z 를 감지하는 6 개의 센서 중 2 개 이상의 센서가 한 몸체로 구성된 센서이다. 새롭게 제작된 센서나 1 년 이상 사용된 기존의 센서는 교정 혹은 특성평가 되어야 사용할 수 있다.¹⁻⁵ 이 센서를 교정 혹은 특성평가 하기 위해서는 6 개의 정확한 힘과 모멘트(힘 $\pm F_x$, $\pm F_y$, $\pm F_z$, 모멘트 $\pm M_x$, $\pm M_y$, $\pm M_z$.)를 발생시킬 수 있는 교정기 혹은 시스템이 필요하다.

☛ 접수일: 2007 년 1 월 16 일; 게재승인일: 2007 년 8 월 21 일

교신저자: 경상대학교 제어계측공학과, ERI

E-mail : gskim@gsnu.ac.kr Tel. (055) 751-5372

* 경상대학교 기계항공공학부

이태리 도량형 연구소에서 보유하고 있는 6 축 힘/모멘트 센서 교정기는 힘과 모멘트 발생을 위해 추를 사용하므로 불확도(3×10^{-4})가 좋으나 연속적인 힘을 발생시킬 수 없고, 제작비(수억원) 및 유지비가 고가이며 설치시 넓은 면적(50m^2)을 차지 하는 단점을 가지고 있다. 일본 계량 연구소에서 보유하고 있는 교정기는 수직인 기둥에 다축 힘/모멘트 센서를 부착하고 추와 암을 이용하여 힘과 모멘트를 발생하므로 추의 무게에 따라 정해진 힘과 모멘트만 발생시킬 수 있고 연속적인 힘과 모멘트는 발생시킬 수 없다. 한국표준과학연구원에서 보유하고 있는 6 분력 힘/모멘트 교정기³는 불확도는 매우 좋으나 최대 발생 힘과 모멘트가 각각 500N 과 50Nm 로 적고, 이 또한 추를 이용하여 힘과 모멘트를 발생시키므로 연속적인 힘과 모멘트를 발생시킬 수 없는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 최대 힘과 모멘트 각각 2000N 과 400Nm 를 연속적으로 발생시킬 수 있는 다축 힘/모멘트 센서 교정장치를 개발하였다. 이 교정장치는 정밀하게 힘을 발생시킬 수 있는 힘발생장치부, 다축 힘/모멘트 센서 고정부, 몸체, 제어장치 등으로 구성된다. 그리고 이 교정장치의 확장상대불확도를 계산하기 위한 특성평가가 실시된다.

2. 센서 교정장치의 설계 및 제작

2.1 교정장치의 구조

다축 힘/모멘트 센서 교정장치의 원리는 교정장치로 힘을 발생시켜 다축 힘/모멘트 센서에 힘 혹은 모멘트를 전달하고, 기준로드셀의 값(힘 혹은 모멘트에 상응하는 값)이 측정장치에 출력되면 제어장치를 정지하며, 이때 다축 힘/모멘트 센서의 출력값을 측정장치로 측정한다. 즉 발생하고자 하는 힘 혹은 모멘트에 상응하는 값이 기준 로드셀로부터 출력되었을 때 다축 힘/모멘트 센서의 출력값을 그 힘 혹은 모멘트에 일치시킨다. 이미 알고 있는 기준 로드셀의 출력값에 대한 힘값을 이용하여 직접비교를 함으로써, 다축 힘/모멘트 센서를 교정 혹은 특성평가하는 것이다. 만약 실험에서 기준 로드셀로부터 1.0000mV/V 의 값, 다축 힘/모멘트 센서의 F_x 센서로부터 0.9800mV/V 이 각각 출력되었다면, 기준로드셀의 1.0000mV/V 의 출력값이 500N 인 경우, F_x 센서의 출력값 0.9800mV/V 은 500N 을 의미한다.

Fig. 1 의 (a)와 (b)는 본 연구에서 개발한 다축 힘/모멘트 센서 교정장치를 나타내고 있고, Fig. 2 는 사진을 나타내고 있다. 이 장치는 몸체부(body part), 힘 발생부(force generating part), 다축 힘/모멘트 센서 고정부(fixture of 6-axis force/moment sensor), 암(arm), 다축 힘/모멘트 센서(6-axis force/moment sensor), 측정 및 제어장치(measuring device and controlling system) 등으로 구성된다.

몸체부는 받침판 (1)과 (2), 안내 키 (9)와 (10), 프레임 (11) 등으로 구성되며, 힘 발생부, 다축 힘/모멘트 센서 고정부, 암 등을 지지 및 고정한다. 받침판 (1)과 (2)는 교정장치의 기준이 되는 판이므로 평행도와 평면도를 ± 0.01 이 되도록 정밀가공하였고, 안내 키 (9)와 (10)은 힘 발생부 고정판 (3)을 앞뒤로 이동시킬 때 안내는 하는 키이고 이 키와 힘 발생부의 힘 전달 핀 (6)이 수직도 0.01 이하가 되도록 정밀하게 가공하고 조립하였다. 프레임 (11)은 교정장치의 모든 부품을 지지하고 있고, 정밀 교정 및 특성실험을 위하여 흔들리지 않도록 40mm×40mm 의 사각봉을 나사로 조립하여 제작하였다.

힘 발생부는 고정판 (3), 이송판 (4), 기준 로드셀 고정판 (5), 힘 전달 핀 (6), 기준 로드셀 (12), 모터 (15)로 구성되고, 힘을 발생하여 다축 힘/모멘트 센서에 전달하는 역할을 하며, 발생하는 힘 혹은 모멘트의 종류에 따라 안내키 (9)의 안내를 받아 앞뒤로 이동시킬 수 있다. 고정판 (3)은 모터 (15)를 고정시키고, 이송판 (4)과 기준 로드셀 고정판 (5)은 기준 로드셀 (12)를 고정하고 모터에 의해 좌우로 정밀하게 이송하는데 사용되며, 힘 전달 핀 (6)은 기준 로드셀의 앞에 부착되어 교정하고자 하는 다축 힘/모멘트 센서에 힘과 모멘트를 전달하는데 사용된다. 기준 로드셀 (12)는 4 개의 모델 SB20L, SB50L, SB100L, SB200L(제작회사 : ㈜카스)을 사용하고, 이것의 용량은 각각 200N, 500N, 1000N, 2000N 이며, 교정 혹은 특성실험시 다축 힘/모멘트 센서의 정격용량에 가장 근접하는 기준 로드셀을 사용한다. 이 센서의 정밀정확도를 나타내는 비직선성과 비재현성은 각각 0.01% R.O.(rated output)으로 매우 정밀한 센서이다.

모터 (15)는 모터(모델 : HC-MFS13), 모터 드라이브(모델 : MR-J2S-10A), 감속기(모델 : RH-17B-100-CC-SP), LM 가이드(모델 : KR46110A+340LPO-1700), 리드 스크류 등으로 구성되고, 모터의 회전

은 13208 개의 펄스가 모터 드라이브에 입력되었을 때 1 회전, 감속기의 감속비는 100:1, 리드 스크류의 리드는 10mm, 힘 발생장치의 최대 이동거리는 400mm 이다. 따라서 펄스 1 개당 힘발생장치의 힘 전달 편 (6)의 이동거리는 0.007571 μ m 이다.

다축 힘/모멘트 센서 고정부는 힘 Fz 와 모멘트 Mx, My 를 발생시킬 때 다축 힘/모멘트 센서를 고정시키는 고정구 (7), 힘 Fx, Fy 와 모멘트 Mz 를 발생시킬 때 다축 힘/모멘트 센서를 고정시키는 고정구 (8)로 구성되고, 교정 및 특성평가하고자 하는 다축 힘/모멘트 센서의 크기에 따라 고정구 들은 안내키 (10)을 따라 좌우로 이동된다.

암 (13)은 Fig. 3 에 자세히 나타내고 있고, 다축 힘/모멘트 센서에 고정되며, 힘 발생부로부터 발생하는 힘을 힘 혹은 모멘트로 센서에 전달한다. 암의 길이는 200mm 이고 길이공차가 ± 0.01 이하가 되도록 암을 정밀가공하였다. 힘을 다축 힘/모멘트 센서에 전달하고자 할 때에는 암에 직접 그만큼의 힘을 발생시키면 되지만, 모멘트를 발생시킬 경우에는 암의 길이 200mm 를 고려하여 힘을 암에 발생시켜야 한다. 즉 100Nm 의 모멘트 Mx 를 발생시킬 경우에는 암의 끝에 500N (“모멘트=힘x암길이” 이므로 500N \times 0.2m=100Nm)을 발생시켜야 한다.

다축 힘/모멘트 센서 (14)는 본 연구에서 개발한 다축 힘/모멘트 센서 교정장치를 이용하여 교정 혹은 특성평가된다.

제어장치 (16)은 제어장치를 나타내고 있고, 모터 드라이브에 펄스를 입력하여 모터를 회전시키는 역할을 하며, 자세한 설명은 “2.2 측정 및 제어 장치”에서 한다. 측정장치 (17)은 기준 로드셀 (12)의 출력을 측정하여 정확한 힘을 발생하는 데 사용함과 동시에 다축 힘/모멘트 센서의 출력을 측정하고, 이것은 독일 HBM 사에서 제작한 로드셀 정밀측정장치인 DMP40 이고 최대 8 채널, 6 자리수 지시 등의 장점이 있어 정밀측정장치로 사용된다.

다축 힘/모멘트 센서 교정기의 동작은 컴퓨터로 발생하고자 하는 힘 혹은 모멘트에 상응하는 펄스를 제어장치에 입력시키면, 힘 발생장치부에서 힘을 발생하여 암에 전달되고 다축 힘/모멘트 센서에 고정되어 있는 암에 의해 힘 혹은 모멘트가 다축 힘/모멘트 센서에 전달된다. 이 때 기준 로드셀의 출력이 측정장치 DMP40 통해 측정되고 이것이 컴퓨터에 입력되며 컴퓨터에서는 이 값과 발생하고자 하는 힘 혹은 모멘트에 상응하는 기준값을 비

교하여 기준값에 도달하도록 제어한다. 그리고 다축 힘/모멘트 센서의 출력은 측정장치 DMP40 으로 측정한다.

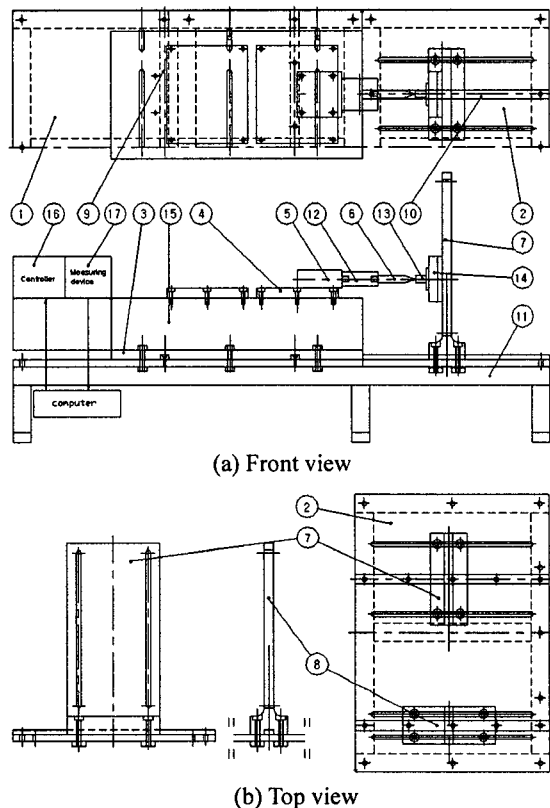


Fig. 1 Assembly drawing of the manufactured multi-axis force/moment sensor calibration system

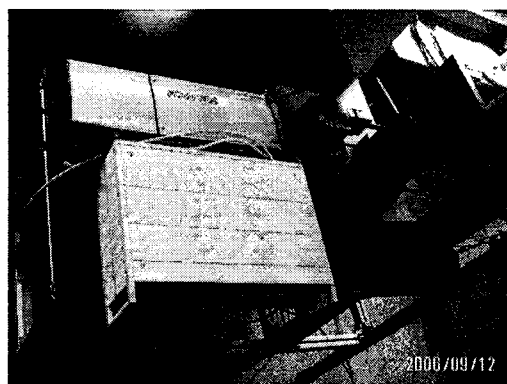


Fig. 2 Photograph of the manufactured multi-axis force/moment sensor calibration system

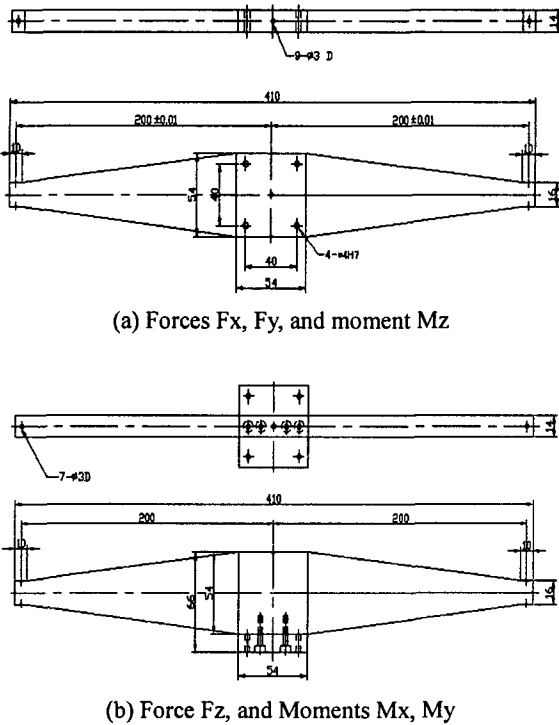


Fig. 3 Assembly drawing of the arms for forces and moments

2.2 측정 및 제어장치

Fig. 4 는 다축 힘/모멘트 센서 교정장치의 제어장치 블록도를 나타내고 있다. 이것은 마이크로프로세서(89C196KC), 모터(HC-MFS13), 모터 드라이브(MR-J2S-10A), 기준 로드셀(SB20L, SB50L, SB100L, SB200L), 측정장치(DMP40), 컴퓨터 등으로 구성된다. 컴퓨터 혹은 스위치로부터 지시되는 명령에 따라 마이크로프로세서가 모터 드라이브에 펄스가 입력되어 모터(감속기 포함)와 모터 드라이브는 1 펄스당 힘 발생장치의 이동거리가 $0.007571\mu\text{m}$ 이 되도록 제어하며, 이에 따라 힘 혹은 모멘트가 기준 로드셀에 발생되고 이 출력값은 측정장치인 DMP40 에서 측정되어 표시됨과 동시에 컴퓨터로 보내진다.

컴퓨터에서는 발생하고자 하는 힘 혹은 모멘트에 상응하는 기준 로드셀 값을 기준으로 측정되어 입력되는 기준 로드셀 값이 같도록 제어한다. 그리고 다축 힘/모멘트 센서로부터 출력되는 값을 측정장치 DMP40 으로 측정하고, 이 측정값을 설정한 힘 혹은 모멘트로 읽는다. 즉 다축 힘/모멘트 센서

의 힘과 모멘트는 기준 로드셀을 직접 비교함으로써 교정 혹은 특성실험이 이루어진다.

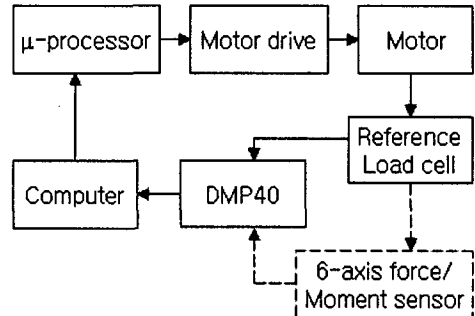


Fig. 4 Block diagram of controlling system of 6-axis force/moment sensor calibration system

2.3 힘/모멘트 발생의 원리

Fig. 5 는 힘 F_x , F_y , F_z 와 모멘트 M_x , M_y , M_z 를 발생하는 원리를 나타내고 있고. (a)는 힘 F_x 와 F_y , (b)는 힘 F_z , (c)는 모멘트 M_x 와 M_y , (d)는 모멘트 M_z 를 각각 나타내고 있으며, Fig. 6 은 이들의 사진을 나타내고 있다. 힘 F_x 는 Fig. 5 의 (a)에서 나타낸 것과 같이 다축 힘/모멘트 센서를 고정부에 고정하고 다축 힘/모멘트 센서의 전면에 부착한 압의 길이방향 끝에 힘 발생장치의 힘 전달 핀을 접촉하고 힘 발생부로 발생된다. 힘 F_y 는 교정 혹은 특성실험을 하고자하는 다축 힘/모멘트 센서를 F_x 의 힘을 발생시킨 위치에서 90° 회전하여 교정시킨 후 힘 발생부를 이용하여 발생된다.

힘 F_z 는 Fig. 5 의 (b)에서 나타낸 것과 같이 교정하고자 하는 다축 힘/모멘트 센서에 고정된 압의 세워진 정면을 누르므로써 발생된다. 모멘트 M_x 는 Fig. 5 의 (c)에서 나타낸 것과 같이 압의 중심으로부터 200mm 떨어진 위치를 눌러서 발생된다. 모멘트 M_y 는 다축 힘/모멘트 센서를 90° 회전시켜 고정부에 고정하고 모멘트 M_x 와 같은 방법으로 발생된다. 모멘트 M_z 는 Fig. 5 의 (d)에 나타낸 것과 같이 다축 힘/모멘트 센서의 전면에 부착한 압이 수직으로 위치하도록 고정하고 압의 중심으로부터 200mm 떨어진 위치를 누름으로써 발생된다.

2.4 교정장치의 특성실험결과

Fig. 7 은 본 연구에서 개발한 다축 힘/모멘트센

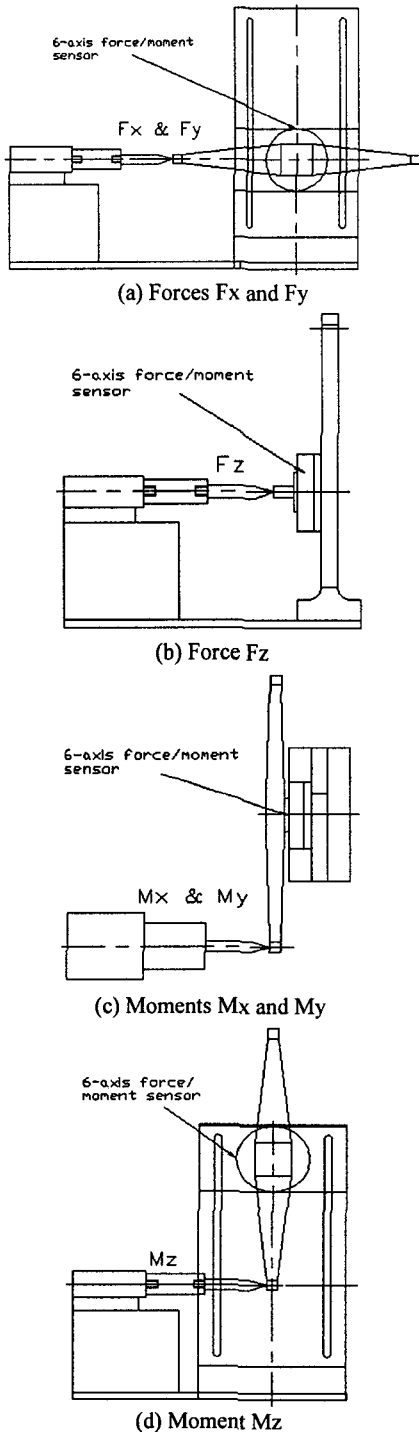


Fig. 5 Assembly drawing on the principle of the generating the forces F_x , F_y , F_z , and the moments M_x , M_y , M_z

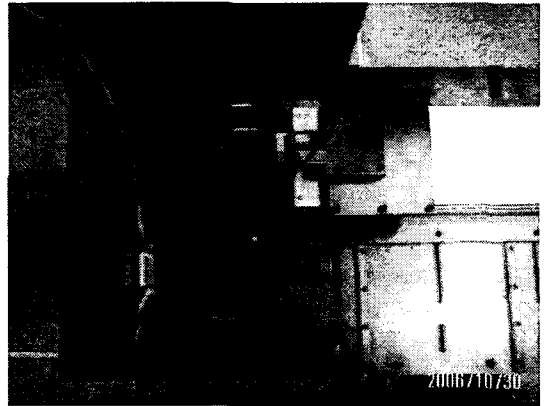
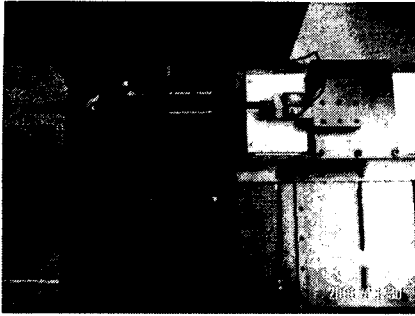


Fig. 6 Photograph of the principle of the generating the forces F_x , F_y , F_z , and the moments M_x , M_y , M_z

서 교정장치를 이용하여 힘 F_x (혹은 F_y) (Fig. 7의 (a)), 힘 F_z (Fig. 7의 (b)), 모멘트 M_x (혹은 M_y) (Fig. 7의 (c)), 모멘트 M_z (Fig. 7의 (d))를 발생시킬 때의 사진을 나타내고 있다. 특성실험결과 사진에서 나타낸 것과 같이 3개 방향의 힘과 3개 방향의 모멘트를 연속적으로 발생시킬 수 있다. 교정장치를 사용할 때 주의할 점은 모멘트 M_x 와 M_y 를 발생시킬 때 힘 F_z 를 센서에 고정된 암에 가하므로 모멘트 M_x 센서, M_y 센서와 힘 F_z 센서에 동시에 출력값이 발생하는 것이다. 그러므로 다축 힘/모멘트 센서의 힘 F_z 의 상호간섭오차⁴를 구하기 위한 편차는 모멘트 M_x 와 M_y 를 발생시 가해진 힘 F_z 에 의해 발생된 F_z 센서의 출력값에서 F_z 센서의 정격출력 값으로부터 가해진 힘 F_z 에 상응하는 값의 차로 계산한다. 즉 F_z 센서의 정격하중이 200N이고 정격출력이 0.5002mV/V 이일 때, 모멘트 M_x 혹은 M_y 를 발생시키기 위해 가한 힘 F_z 가 100N이고 이때 F_z 센서의 출력값이 0.2601mV/V 라며, F_z 센서의 편차는 $0.2601\text{mV/V} - 0.2501\text{mV/V} = 0.0100\text{mV/V}$ 이다. 그리고 모멘트 M_z 를 발생시킬 때도 힘 F_x 혹은 F_y 를 센서에 고정된 암에 가하므로 M_z 센서와 F_x 센서 혹은 F_y 센서에 동시에 출력값이 발생하므로 앞에서 설명한 것과 같이 편차를 구해야 한다.

교정장치의 최대용량은 설계시 결정한 것과 같이 힘 F_x , F_y , F_z 이 모두 2000N 과 모멘트 M_x , M_y , M_z 이 모두 400Nm이다.

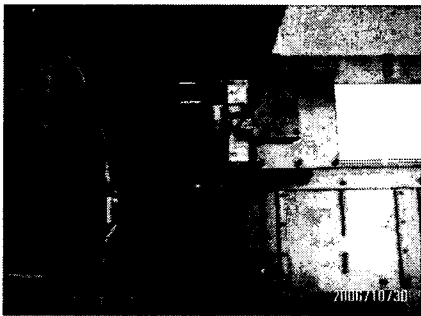
그리고 힘 F_x , F_y , F_z 과 모멘트 M_x , M_y , M_z 발생



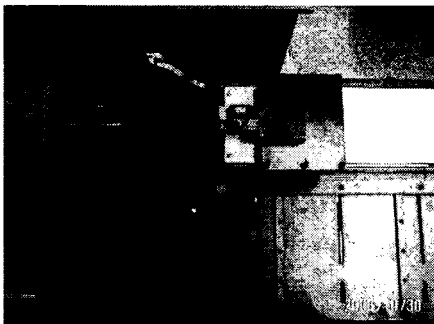
(a) Forces Fx and Fy



(b) Force Fz



(c) Moments Mx and My



(d) Moment Mz

Fig. 7 Photographs of the generating the forces Fx, Fy, Fz, and the moments Mx, My, Mz

실험을 실시하였다. 힘과 모멘트 발생을 위한 각 방향의 힘과 모멘트들은 정격힘 및 모멘트를 1/10 씩 각각 10 개로 나누고 이를 발생하는 실험을 실시하였다. 힘 Fz 의 힘발생은 Fz 의 힘발생 정격용량이 2000N 이므로 기준로드셀 모델 SB200L(정격용량: 2000N, 정격출력:2.0002mV/V)을 사용하였고, 힘 발생은 200N 부터 2000N 까지 200N 간격이고 이때 기준로드셀의 출력단계는 0.20002mV/V 이다. 실험결과, 모든 힘과 모멘트들의 오차는 0.0002mV/V 이내 보였다. 따라서 본 연구에서 개발한 교정장치는 발생하고자 하는 힘과 모멘트를 정확하게 발생시키는 것을 확인 할 수 있었다.

그리고 실제로 교정을 할 경우에는 정해진 힘 혹은 모멘트가 발생되었을 때 모터를 정지하고 그때의 기준로드셀의 값과 센서의 출력값을 거의 동시에 얻어서 선형보간법으로 계산하여 사용하므로 큰 오차가 발생되지 않을 것으로 판단된다.

3. 교정장치의 확장상대불확도 평가 및 고찰

다축 힘/모멘트 센서 교정장치의 정확도는 정확도의 척도로 주어진 확률에서 참값으로 존재하는 범위를 결정하는 정도인 교정장치의 확장상대불확도로 평가한다. 확장상대불확도는 다축 힘/모멘트 센서 교정장치의 모든 불확도 요소를 계산한 후 이것들을 합성하여 나타낸다.

본 연구에서 개발한 다축 힘/모멘트 센서 교정장치의 불확도들은 힘 발생시 사용되는 기준 로드셀의 불확도 u_1 , 모멘트를 발생할 때 사용되는 압의 길이 불확도 u_2 , 힘 발생부 및 다축 힘/모멘트 센서의 고정부의 설치 불확도 u_3 등이고, 이들을 합성하여 합성불확도 u_c 를 구한다. 따라서 다축 힘/모멘트 센서 교정장치의 확장상대불확도 U 는 합성불확도 u_c 를 이용하여 구한다.³⁻⁶

3.1 기준 로드셀의 불확도 u_1

기준 로드셀의 불확도 u_1 는 비재현성 오차(non-repeatability error) e_{nr} , 비직선성 오차(non-linearity) e_{nl} , 크립 오차(creep error) e_{cr} , 왕복특성 오차 e_{ar} 로 계산될 수 있다. 이 불확도를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$u_1 = \sqrt{e_{nr}^2 + e_{nl}^2 + e_{cr}^2 + e_{ar}^2} \quad (1)$$

본 연구에서 사용한 기준 로드셀의 비재현성 오차와 비직선성 오차는 모두 $\pm 0.01\%$ (± 0.0001) 이고, 크립오차는 $\pm 0.03\%$ (± 0.0003), 왕복특성오차는 $\pm 0.01\%$ (± 0.0001)이다. 이 값들은 제조회사(주카스)가 제공한 결과들이다. 이것들을 식 (1)에 대입하여 계산하면 기준 로드셀의 불확도 u_1 은 ± 0.00035 이다.

3.2 암의 길이 불확도 u_2

교정장치의 암은 Fig. 3 의 (a)에서 나타낸 것과 같이 힘 F_x, F_y 와 모멘트 M_z 를 발생시키는데 사용되는 암(길이:200mm)과 (b)에서 나타낸 것과 같이 힘 F_z 와 모멘트 M_x, M_y 를 발생시키는데 사용되는 암으로 구분된다. 암의 길이는 가공시 길이 오차 e_{al} 가 발생되고 이것은 교정장치의 불확도에 포함되어야 한다. 암의 길이 불확도 u_2 를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$u_2 = e_{al} \quad (2)$$

2 개의 암의 길이 오차는 3 회 측정하여 평균하였고, 그 결과 하나는 -0.009mm 이고 다른 하나는 +0.01mm 이었으며, 최종오차는 큰 수치를 채택하므로 $\pm 0.01mm$ 이내이었다. 식 (2)에 이 오차를 대입하여 계산한 암의 길이 불확도 u_2 는 교정장치로 교정하는 단위가 미터(m)단위이기 때문에 암의 길이 오차를 미터 단위로 환산하여 계산하면 ± 0.00001 이다.

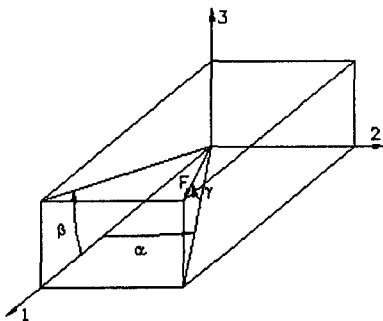


Fig. 8 3-component in three coordinates

3.3 교정장치의 설치 불확도 u_3

교정장치의 설치 오차는 힘 발생부의 힘 전달 편의 중심선과 교정 혹은 특성실험하고자 하는 다축 힘/모멘트 센서의 일치해야 하나 Fig. 7 과 같이

최종 γ 의 각을 이루어진다. 이로 인해 힘 발생부로부터 발생하는 힘 혹은 모멘트가 다축 힘/모멘트 센서에 100% 전달되지 못하므로 오차가 발생된다. 교정장치의 설치 불확도 u_3 를 계산하는 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_3 = 1 - \cos \gamma \quad (3)$$

교정장치의 설치 오차는 α 각과 β 각을 각각 3 회씩 측정하였고, 그 결과값이 α 각은 0.6° , β 각은 0.7° 이었으며, 두 각으로부터 계산한 최종오차는 1° 이내이었다. 이 값을 식 (3)에 대입하여 계산한 교정장치의 설치 불확도 u_3 는 ± 0.00015 이다.

3.4 교정장치의 확장상대불확도 U

다축 힘/모멘트 센서 교정장치의 합성불확도 u_c 와 확장상대불확도 U 는 각각 식 (4)와 (5)에 의해 계산된다.^{3,4}

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

$$U = k \cdot u_c \quad (5)$$

여기서 상수 k는 2 이다.^{3,6}

식 (1)-(3)에서 계산한 불확도들을 식 (4)와 (5)에 대입하여 계산한 합성불확도와 확장상대불확도는 Table 1 과 같다. 본 연구에서 개발한 다축 힘/모멘트 센서 교정장치의 확장상대불확도를 평가한 결과 발생하는 힘 F_x, F_y, F_z 와 모멘트 M_x, M_y, M_z 모두 ± 0.0008 이다. 확장상대불확도가 우수한 이유는 기준 로드셀의 불확도, 암의 길이 불확도, 교정장치의 설치불확도가 작기 때문이며, 힘과 모멘트 성분 모두가 ± 0.0008 로 같은 것은 암의 길이 불확도가 매우 작으므로 이것이 확장상대불확도를 계산할 때 큰 영향을 미치지 못하였기 때문이다.

Table 1 Expanded relative uncertainty of calibration system

M Uncer.	Fx, Fy	Fz	Mx, My	Mz
u_1	± 0.00035	± 0.00035	± 0.00035	± 0.00035
u_2	-	-	± 0.00001	± 0.00001
u_3	± 0.00015	± 0.00015	± 0.00015	± 0.00015
u_c	± 0.00038	± 0.00038	± 0.00038	± 0.00038
U	± 0.0008	± 0.0008	± 0.0008	± 0.0008

본 연구에서 개발한 교정장치를 이용하여 2000N 의 힘을 발생하였다면, 발생한 힘의 오차는 1.6N(2000N× 0.0008)이다. 개발한 다축 힘/모멘트센서 교정장치의 확장상대불확도는 기존 교정장치의 불확도와 비슷한 수준 ¹⁻³ 이므로 다축 힘/모멘트센서 교정 및 특성실험에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 힘 Fx, Fy, Fz 의 정격용량 모두 2000N 과 모멘트 Mx, My, Mz 의 정격용량 모두 400Nm 를 발생할 수 있는 다축 힘/모멘트 센서 교정장치를 개발하고 그것의 확장상대불확도를 평가하였다. 개발한 다축 힘/모멘트 센서 교정장치의 확장상대불확도를 평가한 결과, 발생하는 힘 Fx, Fy, Fz 와 모멘트 Mx, My, Mz 모두 ±0.0008 로 매우 우수함 ¹⁻³ 을 알 수 있었으며, 교정장치는 연속하여 최대의 각 힘과 모멘트를 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구에서 개발한 다축 힘/모멘트 센서 교정장치는 인간형 로봇 및 각종 산업체에서 사용되고 있는 다축 힘/모멘트 센서의 교정 및 특성평가실험에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2007 년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2006-000-10468-0).

참고문헌

1. Ferro, C., "New automatic multi-component calibration system with crossed-flexure levers," Proc. IMEKO TC3 Session Cm.I, pp. 31-39, 1990.
2. Sawla, A., "Guidance for the determination of the best measurement capacity of force calibration machines and uncertainty of calibration results of force measurement device," PTB-Mitteilungen 104, pp. 237-242, 1994.
3. Kim, G. S. and Kang, D. I., "Development of 6-component force/moment calibration machine," J. of KSPE, Vol. 15, No. 9, pp. 127-134, 1998.

4. Kim, G. S., "The development of a six-component force/moment sensor testing machine and evaluation of its uncertainty," Measurement Science and Technology, Vol. 11, pp. 1377-1382, 2000.
5. Kim, G. S., Shin, H. J. and Kim, H. M., "Development of multi-axis force/moment sensor calibration system and its uncertainty evaluation," Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting, pp.1025-1030, 2006.
6. OIML, "Guide to the expression of uncertainty in measurement," OIML, pp. 9-28, 1993.