

# 로봇용 6 축 힘/모멘트 센서를 위한 고성능측정기 개발

신희준\*, 김갑순#

## Development of High-Precision Measuring Device for Six-axis Force/Moment Sensor

Hyi-Jun Shin\* and Gab-Soon Kim#

### ABSTRACT

This paper describes the development of a high-precision measuring device with DSP (digital signal processor) for the accurate measurement of the 6-axis force/moment sensor mounted to a humanoid robot's ankle. In order to walk on uneven terrain safely, the foot should perceive the applied forces  $F_x$ ,  $F_y$ , and  $F_z$  and moments  $M_x$ ,  $M_y$ , and  $M_z$  to itself, and control the foot using the measured them. The applied forces and moments should be measured from two 6-axis force/moment sensors mounted to the feet, and the sensor is composed of  $F_x$  sensor,  $F_y$  sensor,  $F_z$  sensor,  $M_x$  sensor,  $M_y$  sensor and  $M_z$  sensor in a body (single block). In order to acquire output values from twelve sensors (two 6-axis force/moment sensor) accurately, the measuring device should get the function of high speed, and should be small in size. The commercialized measuring devices have the function of high speed, unfortunately, they are large in size and heavy in weight. In this paper, the high-precision measuring device for acquiring the output values from two 6-axis force/moment sensors was developed. It is composed of a DSP (150 MHz), a RAM (random access memory), amplifiers, capacities, resistors and so on. And the characteristic test was carried out.

**Key Words** : Measuring device (측정기), Digital signal processor (고성능 신호처리기), 6-axis force/moment sensor (6 축 힘/모멘트센서)

### 1. 서론

인간의 욕망 중의 하나는 인간의 일을 대신할 수 있는 인간과 비슷한 로봇을 만드는 것이고, 이 로봇의 중요한 요소중의 하나가 지능형 손과 발이다.<sup>1,2</sup> 지능형 손은 미지물체를 떨어뜨리거나 파괴되지 않도록 안전하게 잡는 기능이 있어야 하고, 손가락에 부착된 힘센서와 손목에 부착된 6 축 힘/

모멘트센서, 그리고 이들로부터 출력되는 신호를 처리하는 측정기 등으로 구성된다. 지능형 발 또한 로봇이 불규칙한 지면에서 넘어지지 않도록 안전하게 걷는 기능이 있어야 하고, 발목 혹은 발바닥에 6 축 힘/모멘트센서 혹은 힘센서와 측정기 등으로 구성된다.

지능형 발 혹은 손이 그들의 기능을 발휘하기 위해서는 부착되는 6 축 힘/모멘트센서와 측정기의

☞ 접수일: 2007 년 7 월 4 일; 게재승인일: 2007 년 8 월 3 일

\* 경상대학교 제어계측공학과

# 교신저자: 경상대학교 제어계측공학과, ERI

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

성능이 매우 우수해야 한다. 6 축 힘/모멘트센서<sup>3,7</sup>는 힘  $F_x, F_y, F_z$  와 모멘트  $M_x, M_y, M_z$  를 동시에 측정하는 센서이고, 지능형 손에서는 이것을 이용하여 미지물체의 무게를 측정하거나 물체가 손과 접촉하는 방향과 접촉력(잡는 힘)을 측정하며, 지능형 발에서는 로봇이 걸을 때 발에 가해지는 힘과 모멘트를 동시에 측정하여 로봇이 넘어지지 않도록 중심을 유지하는데 사용된다. 이 센서는 다양한 종류가 개발되었고, 이들은 지능형 손 혹은 발에 부착되어 사용될 수 있는 높은 정밀정확도를 가지고 있다. 지능형 발 혹은 손이 빠른 기능을 갖기 위해서는 6 축 힘/모멘트센서의 출력을 빠르게 처리할 수 있는 측정기가 필요하다. 이 측정기는 6 축 힘/모멘트센서의 출력이 6 개이고 손 혹은 발이 2 개 이므로 최소 12 개의 채널을 가지고 있어야 하며, 매우 빠른 속도를 가지고 있어야 한다. 현재 상용화되어 판매되고 있는 6 축 힘/모멘트센서의 측정기는 독일 HBM사에서 제작한 DK38 모델과 DMP40 모델<sup>8</sup>이 있고, 이들은 16 채널을 보유하고 있고 정밀하게 측정할 수 있는 고성능 측정기로 전 세계적으로 정적 정밀힘측정에 널리 사용되고 있다. 그러나 이들은 이동하는 로봇에는 크기(600 mm × 400 mm × 150 mm)가 크고 가격(약 2천만원)이 고가이며 무게(약 10kg)가 무거우므로 사용할 수 없다. 그러므로 로봇의 팔 혹은 발에 부착이 가능한 고성능 6 축 힘/모멘트센서의 측정기 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 2 개의 6 축 힘/모멘트센서의 출력(12 채널)을 빠르게 측정할 수 있는 고성능 측정기를 개발하였다. 이 측정기는 150 MHz의 데이터 처리속도를 가진 DSP, 램, 증폭기, 커패시터, 저항 등으로 구성되었다.

## 2. 6 축 힘/모멘트센서 측정기<sup>9</sup>

### 2.1 6 축 힘/모멘트센서 측정기의 설계

Fig. 1 은 6 축 힘/모멘트 센서 측정기의 블록도를 나타내고 있으며, Fig. 2 는 제작된 6 축 힘/모멘트 센서 측정기를 나타내고 있다. 이 측정기는 DSP(digital signal processor), 외부 메모리(memory), 증폭기부(amplifier), 통신부, 전원부, 스위치부 등으로 구성되었다. DSP 는 30MHz 크리스털을 사용하여 발생된 클럭(clock)을 DSP 내부에서 5 배 증폭시켜 150 MHz 로 동작되고, 내부 플래시롬에 프로

그래밍된 동작 프로그램을 램에 임시로 저장한 상태에서 각각의 명령을 처리하며, A/D 컨버터, 병렬 인터페이스, 직렬 통신 인터페이스 등을 동작 시킨다. A/D 컨버터는 6 축 힘/모멘트 감지센서로부터 출력되는 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸기 위하여 사용되고, 병렬 인터페이스는 LCD 에 신호를 주기 위하여 사용되며, 직렬통신 인터페이스는 컴퓨터 혹은 다른 제어장치와 통신하기 위해 사용된다. 그리고 전원은 DSP 와 다른 주변장치들에 전압 9 V, 5 V, 3.3 V, 1.8 V 를 각각 공급하며, 스위치는 원하는 6 축 힘/모멘트 센서의 각 센서( $F_x$  센서,  $F_y$  센서,  $F_z$  센서,  $M_x$  센서,  $M_y$  센서,  $M_z$  센서)의 측정값을 LCD 에 나타내기 위해 사용된다. 6 축 힘/모멘트 센서<sup>7</sup> 1 과 2 는 추후 연구에서 로봇 발 혹은 손목의 우측과 좌측에 사용될 예정이다. 제작된 6 축 힘/모멘트 센서 측정기의 크기는 120 mm×130 mm 로 로봇에 장착하기에 적당한 크기이다.

Fig. 3 은 DSP(digital signal processor, TMS 320F2812(32bit/150MHz/150MIPS/150MMAC) 회로도를 나타내고 있으며, 사용된 DSP 는 128kword 용량의 플래시 롬 (flash read only memory(ROM)), 1Mword 용량의 램(random access memory(RAM)), 최고 12.5 Mbps 로 변환 가능한 AD 컨버터(12-bit ultra-fast analog/digital converter) 등으로 구성된 텍사스 인스트루먼트사(TI)에서 제작한 고성능의 프로세서의 일종이다. 이것은 전원부로부터 3.3 V 와 1.8 V 의 전압을 받아 동작되고, 크리스털로부터 30 MHz 의 클럭을 받아 내부에서 5 배 증폭하여 150 MHz 로 동작하며, 내부플래시 롬 혹은 외부 확장램에 저장된 프로그램의 명령에 따라 DSP 의 내부에 장착되어 있는 주변장치들을 동작시킨다. 스위치의 동작에 따라 6 축 힘/모멘트 센서 1 과 2 로부터 출력되는 신호를 증폭기에서 증폭시킨 후 이것을 DSP 내부의 AD 컨버터로 받아들이고, 이 신호를 LCD 에 나타냄과 동시에 외부 확장램에 저장 및 CAN 통신과 RS232C 통신을 이용하여 컴퓨터 혹은 다른 제어장치에 보낸다.

Fig. 4 는 외부 확장 메모리(SRAM(static random access memory, K6R4016V1C)를 나타내고 있고, 저장용량은 512 kbyte 이다. 이것은 전원부로부터 3.3 V 의 전압을 받아 동작되며, 프로그램 및 데이터를 저장할 수 있다.

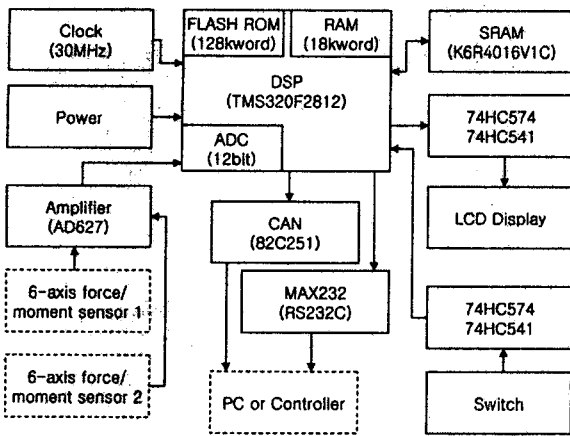


Fig. 1 Block diagram of 6-axis force/moment sensor

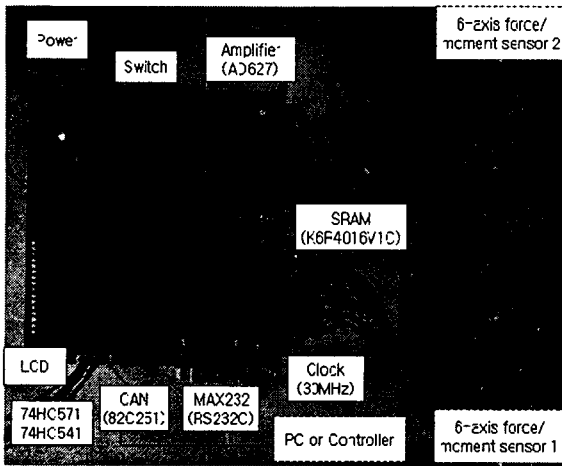


Fig. 2 Photograph of the manufactured measuring device for 6-axis force/moment sensor

Fig. 5 는 전원부와 리셋 회로도를 나타내고 있으며, (a)는 5 V 와 3.3 V 발생, (b)는 1.8 V 와 3.3 V 발생을 위한 것이다. 전원부는 9 V 의 건전지 전원을 받아 LM7805 를 이용하여 5 V 로 변환 시키고, LM1117 를 이용하여 3.3 V 로 변환 시키며, TPS767D318 를 이용하여 5 V 전원을 받아 3.3 V 와 1.8 V 변환시킨다. 건전지로부터 공급된 9 V 는 6 축 힘/모멘트 센서의 입력전압으로 사용되고, 변환된 5 V 전압은 통신관련 IC, LCD 및 스위치관련 IC, 증폭기 등의 구동전압으로 사용되며, 변환된 3.3 V 는 DSP 의 구동전압으로 사용된다. 9 V 입력전압은 전원공급장치(power supply) 혹은 9 V 용 건전지로

부터 공급받을 수도 있으나, 측정기의 노이즈를 줄이기 위해 9 V 용 건전지를 사용한다.

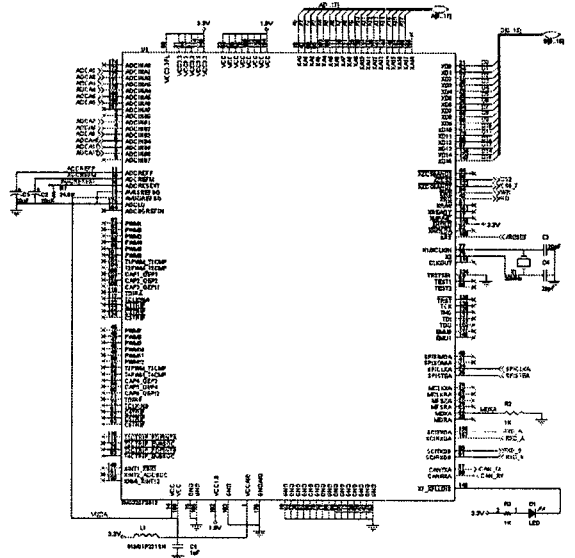


Fig. 3 Circuit of DSP(TMS320F2812)

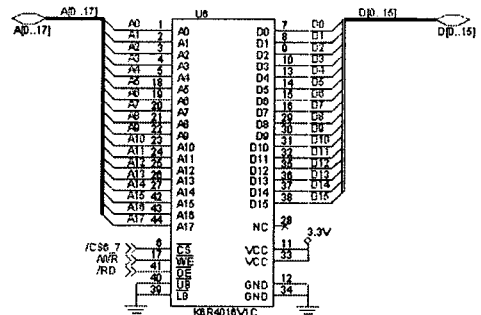
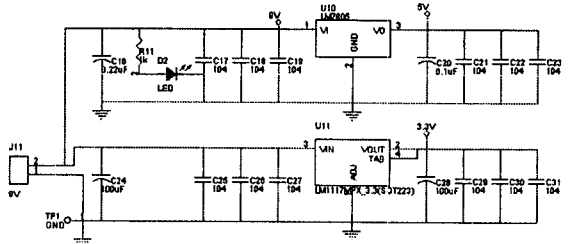
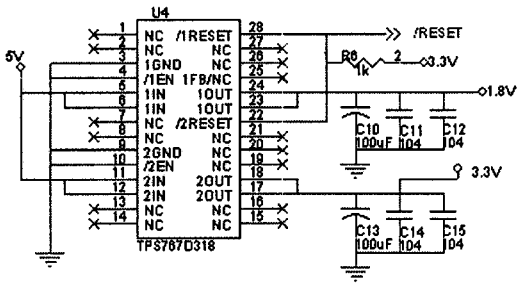


Fig. 4 Memory(RAM)

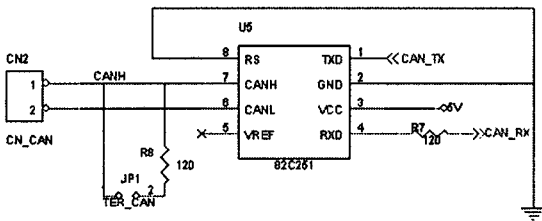


(a) Power for 5V and 3.3V

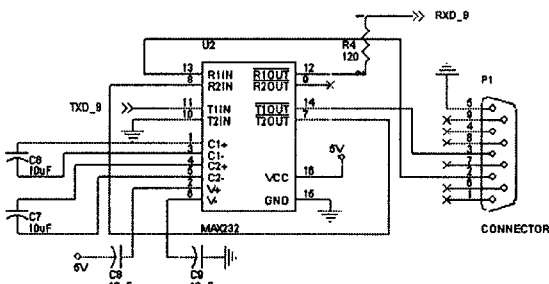


(b) Power for 1.8V and 3.3V

Fig. 5 Circuits of power and reset

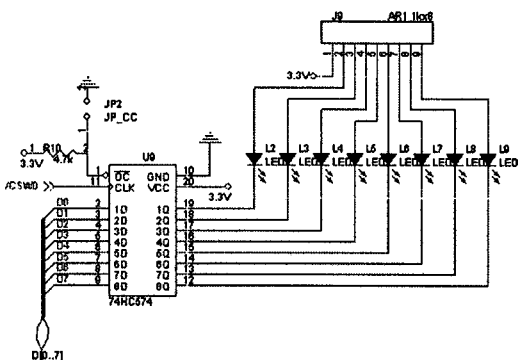


(a) CAN

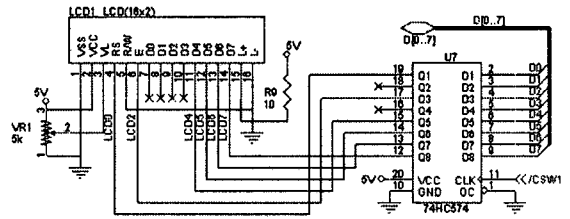


(b) RS232C

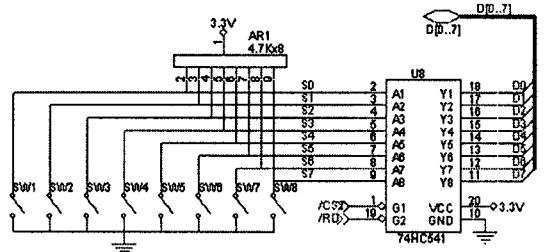
Fig. 6 Circuit of communication



(a) LED display



(b) LCD display



(c) Switch

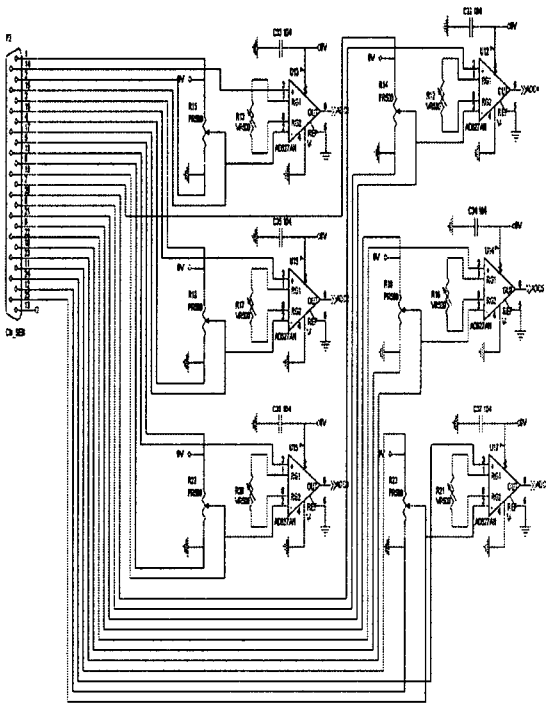
Fig. 7 Display and switch

Fig. 6 은 캔(CAN, 82C251) 시리얼 통신과 RS232C(MAX232) 시리얼 통신의 회로도를 나타내고 있으며, (a)는 CAN 통신, (b)는 RS232C 통신을 위한 것이다. CAN 시리얼 통신은 DSP 내부의 CAN 장치와 외부의 CAN 드라이버 소자(82C251)를 사용하여 컴퓨터 혹은 다른 측정 및 제어장치와 CAN 통신을 하며, 동작전압은 5 V, 최대 접속 대수는 110 대, 최대 통신속도는 1 Mbps 이다. RS232C 시리얼 통신은 DSP 내부의 SCI-B 와 MAX232 드라이버 IC 를 사용하여 컴퓨터 혹은 다른 측정 및 제어장치와 통신하며, 최대 통신속도는 19,600 bps 이다. 통신장치들은 6 축 힘/모멘트 센서의 출력 값을 컴퓨터 혹은 다른 측정 및 제어 장치에 보내기 위해 사용된다.

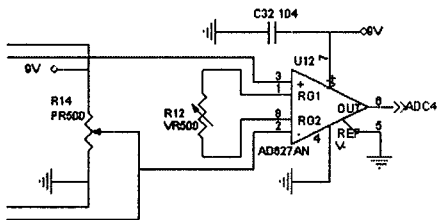
Fig. 7 은 지시 및 스위치장치를 나타내고 있으며, (a)는 LED 표시, (b)는 LCD 표시, (c)는 스위치를 위한 것이다. 지시장치는 74HC574 IC, LCD, LED, 저항 등으로 구성되고, 6 축 힘/모멘트 센서의 출력을 나타내는 LCD 장치와 스위치의 누름상태 및 측정기의 상태를 나타내는 LED 장치로 구분된다. 스위치는 74HC541 IC, 8 개의 스위치로 구성되고, 6 축 힘/모멘트 센서의 각 센서 출력값을 선택할 경우 등을 위해 사용된다.

Fig. 8 은 6 축 힘/모멘트 센서의 신호를 증폭하

는 증폭기를 나타내고 있고, (a)는 6 축 힘/모멘트 센서의 회로도, (b)는 1 개 센서를 위한 회로도이며, AD627, 가변저항, 커패시터 등으로 구성되었다. 증폭기는 6 축 힘/모멘트센서의 출력신호가 최대 0.5mV/V 로 매우 미세하므로 이것을 약 330 배정도 증폭하는데 사용되고, 사용된 증폭기는 아날로그 디바이스 사(Analog Device Company)에서 제작한 계측증폭기용 AD627 이다. AD627 IC 는 증폭기 3 개를 단일 칩으로 집적시켜 제작되었고 외부저항(R1)으로 증폭률을 6~1000 배로 조절할 수 있다.



(a) Amplifier of 6-axis force/moment sensor



(b) a amplifier

Fig. 8 Circuit of amplifier

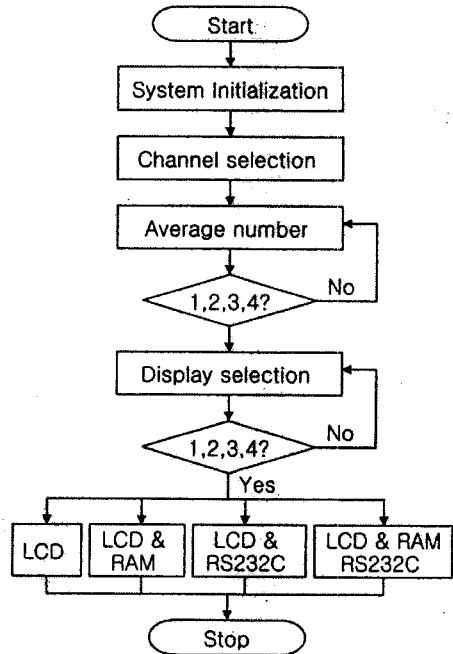


Fig. 9 flow chart of measuring device

### 2.2 데이터 처리를 위한 알고리즘

Fig. 9 는 측정장치의 흐름도를 나타내고 있다. 측정기의 동작흐름은 첫째, 측정기의 전원 스위치를 ON 하면 각 센서의 출력값을 순차적으로 측정하여 LCD 에 출력하는 초기화를 실시한다. 둘째, 측정하고자 하는 센서의 채널을 선택한다. 셋째, 각 센서의 출력값을 몇 번을 읽어 평균할 것인가의 읽는 횟수를 결정한다. 이것은 데이터의 처리속도와 측정값의 안정도를 위해서 선택해야 한다. 넷째, 측정값의 지시를 어떻게 할 것인가를 결정한다. LCD 에만 출력, LCD 에 출력함과 동시에 RAM 저장, LCD 에 출력함과 동시에 RS232C 통신을 이용하여 컴퓨터에 저장 혹은 모니터에 출력, 그리고 LCD 에 출력하고 RAM 에 저장하며 컴퓨터에 송신하는지를 선택한다. 이것은 데이터의 처리속도를 고려하여 선택해야 한다. 데이터 처리속도에 영향을 미치는 요소들은 측정하는 센서의 수, LCD 표시 및 그의 수, 컴퓨터로의 RS232C 통신 및 데이터 수, 평균횟수 등이다.

### 3. 측정기의 특성실험 및 고찰

본 연구에서는 처리속도가 150MHz 인 DSP 를 이용하여 6 축 힘/모멘트 센서의 고성능 측정장치를 설계 및 제작하였다. 측정기는 Fig. 2 의 스위치를 조작함으로써 6 축 힘/모멘트센서 1 과 2 의 Fx 센서 1, Fy 센서 1, Fz 센서 1, Mx 센서 1, My 센서 1, Mz 센서 1, Fx 센서 2, Fy 센서 2, Fz 센서 2, Mx 센서 2, My 센서 2, Mz 센서 2 의 순서로 LCD 에 순차적으로 출력, SRAM 에 저장, 혹은 RS232C 통신을 통해 컴퓨터에 저장됨과 동시에 모니터화면에 나타난다. 그리고 다른 스위치의 조작에 의해 측정값의 출력이 동시에 저장 혹은 지시장치에 나타난다.

측정기의 특성을 파악하기 위해 두 가지 특성 실험을 실시하였으며, 하나는 6 축 힘/모멘트센서의 교정이고, 다른 하나는 측정기의 온도특성실험이다. 센서의 교정은 2 개의 6 축 힘/모멘트센서를 개발한 측정기에 연결하고 다축 힘/모멘트센서 교정기<sup>10</sup>를 이용하여 각 센서의 정격하중 및 모멘트를 가했을 때 정격출력이 1000 mV 가 출력되도록 교정을 실시하였다. 즉, 각 센서의 한쪽 방향으로 정격하중을 가했을 때는 +1000 mV 가 출력되고 반대 방향으로 하중을 가했을 때는 -1000 mV 가 출력되도록 측정기의 증폭기의 가변저항과 영점조정을 위한 가변저항기를 이용하여 조정하여 교정하였다.

정격출력을 1000 mV 로 결정한 것은 사용한 DSP 의 A/D 컨버터(analog to digital converter)의 측정범위가 0~3.3 V(3300 mV)이므로 1.5 V(1500 mV)를 영점(무부하시 출력)으로 하고 (-) 방향으로의 정격출력 -1000 mV 일 경우에는 500 mV, (+) 방향으로의 정격출력 1000 mV 일 경우에는 2500 mV 가 지시되도록 하기 위함이다. 그리고 (-)와 (+)방향으로 각각 500 mV 의 여유가 있도록 하였다.

Table 1 은 개발한 고성능 측정기에 6 축 힘/모멘트센서 1 를 연결하고 다축 힘/모멘트센서 교정기<sup>10</sup>를 이용하여 Fx 센서 1 와 Fy 센서 1 의 정격하중의 500 N, Fz 센서 1 의 정격하중 1000 N, Mx 센서 1 와 My 센서 1 의 정격토크 18 Nm, Mz 센서 1 의 정격토크 8 Nm 의 10%씩을 증가하면서 교정한 결과를 나타내고 있고, Table 2 는 상용화된 DMP40 모델<sup>8</sup>에 6 축 힘/모멘트센서 1 을 연결하고 교정한 결과를 나타내고 있다. 교정은 3 번 측정하여 평균한 것이고, 개발한 측정기와 상용화된 DMP40 측정기 모두 1 mV 이내의 오차를 보이고 있으나 개발한 측정기가 DMP40 측정기에 비해 더 많은 교정점에서 오차를 보이고 있다. 동일한 센서와 연결하고

교정한 결과이므로 개발한 측정기의 오차가 큰 것으로 평가된다. 그러나 개발한 측정기의 오차가 0.1% F.S(full scale) 이하이므로 측정기는 6 축 힘/모멘트센서의 측정에 사용될 수 있을 것으로 생각한다.

Table 1 Results of calibration test of the developed measuring device with 6-axis force/moment sensor 1

Step	Sensor Output(mV)					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
10	1001	1000	1001	1001	1000	1001
9	900	901	901	900	901	901
8	801	799	800	801	799	800
7	700	700	700	700	700	701
6	601	600	601	600	600	600
5	500	499	500	501	501	501
4	399	400	401	400	400	400
3	301	301	300	301	300	301
2	200	200	200	200	200	200
1	100	100	100	100	100	100
0	0	0	0	0	0	0

Table 2 Results of calibration test of the universal measuring device with 6-axis force/moment sensor 1

Step	Sensor Output(mV)					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
10	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	901	900	901	900	900	900
8	800	800	800	800	800	800
7	700	700	700	700	700	700
6	600	600	600	600	599	600
5	500	499	500	500	500	500
4	400	400	400	400	400	400
3	300	300	300	300	300	300
2	200	200	200	200	200	200
1	100	100	100	100	100	100
0	0	0	0	0	0	0

측정기의 온도특성실험(온도 안정도 실험)은 Fig. 2 에서 나타낸 것과 같이 실험장치를 구성하

였고, 6 축 힘/모멘트 센서 1 의 Fx 센서, Fy 센서, Fz 센서, Mx 센서, My 센서, Mz 센서의 출력값을 DSP 의 AD 컨버터 0~5 채널을 이용하여 받고 이것들을 RS232C 통신을 이용하여 컴퓨터로 보내어 저장하였으며, 실험실에서 오후 7 시부터 시작하여 다음 날 오전 7 시까지 12 시간 실시되었으며, 1000 초에 1 번씩 측정하였다.

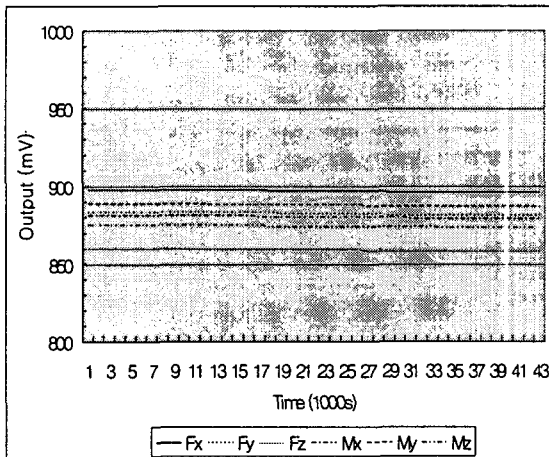


Fig. 10 Results of the characteristic test of measuring device

Fig. 10 은 6 축 힘/모멘트 센서 측정기의 특성 시험 결과를 나타내고 있다. Fx 센서는 12 시간 동안 898 mV 부터 896 mV 까지, Fy 센서는 883 mV 부터 881 mV 까지, Fz 센서는 860 mV 부터 858 mV 까지, Mx 센서는 881 mV 부터 879 mV 까지, My 센서는 889 mV 부터 887 mV 까지, Mz 센서는 875 mV 부터 873 mV 까지 각각 2 mV 씩 감소하는 경향을 보였다. 이때 온도의 변화는 오후 7 시에 23°C 로부터 오전 7 시에 16°C 까지 8°C 감소하였다. 즉 온도 8°C 에 2 mV 변화되었으며, 온도에 따른 출력의 변화율은 0.25 mV/°C 이다.

Fx 센서와 Fy 센서는 정격하중이 500 N 이고, 이들 센서의 정격출력이 1000 mV 이며, 측정기의 온도에 따른 출력의 변화율이 0.25 mV/°C 이므로 온도 변화에 따른 하중의 변화는 0.125 N/°C, 즉 온도 1°C 변화에 따라 0.125 N 변화 됨을 알 수 있다. Fz 센서는 위에서와 같이 계산하면 정격하중이 1000 N 이므로 0.250 N/°C 이고, Mx 센서와 My 센서는 정격모멘트가 18 Nm 이고 Mz 센서는 8 Nm 이므

로 각각 0.0045 Nm/°C 와 0.002 Nm/°C 이었다.

이 오차들은 매우 작아 로봇의 손목 혹은 발목에서의 각 방향의 힘과 모멘트를 측정하고, 이들을 이용하여 제어하는데 큰 영향을 미치지 못할 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 처리속도가 150 MHz 인 DSP 를 이용하여 6 축 힘/모멘트 센서의 고성능 측정장치를 설계 및 제작하였다. 개발된 6 축 힘/모멘트 센서 측정장치는 처리속도가 150 MHz(각 센서의 처리속도 : 12.5 MHz)로 매우 빠르고, 온도변화에 따른 오차가 매우 적은 것으로 확인되었다. 따라서 로봇의 손목 및 발목에 부착되는 6 축 힘/모멘트 센서의 측정장치로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

1. Chappel, P. H. and Elliott, J. A., "Contact force sensor for artificial hands with a digital interface for a controller," Measurement Science and Technology, Vol. 14, No. 8, pp. 1275-1279, 2003.
2. Xiong, C., Li, Y., Xiong, Y., Ding, H. and Huang, O., "Grasp capability analysis of multifingered robot hands," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 27, pp. 211-224, 1999.
3. Kim, G. S. and Lee, H. D., "Development of a six-axis force/moment sensor and its control system for an intelligent robot's gripper," Measurement Science and Technology, Vol. 14, pp. 1265-1274, 2003.
4. Kim, G. S. and Park, J. J., "Development of the 6-axis force/moment sensor for an intelligent robot's gripper," Sensors and Actuators, Vol. 118, pp. 127-134, 2005.
5. ATI INDUSTRIAL AUTOMATION, "Multi-Axis Force/Torque Sensor," ATI INDUSTRIAL

- AUTOMATION, pp. 4-45, 2005.
6. BL AUTOTEC, "BL SENSOR, Multi-axis force/torque sensor (BL-FTS-E020)," BL AUTOTEC, pp. 5-50, 2003.
  7. Kim, G. S. and Yoon, J. W., "Development of 6-axis force/moment sensor considered adult weight for a humanoid robot's foot," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 7, pp. 90-97, 2007.
  8. HBM company, "DMP40 Manual," HBM company, pp. 1-150, 2006.
  9. Kim, G. S., "Development of robot's gripper control using DSP," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 85-92, 2006.
  10. 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 2006 Fall Annual Meeting, pp.1025-1030, 2006.