

## Force Sensing Resistor를 이용한 힘/모멘트 센서 개발

### Development of Force/Moment Sensor using Force Sensing Resistor

최 명 환\*                      이 우 원\*\*  
Choi, Myoung-Hwan      Lee, Woo-Won

#### Abstract

A low cost force/moment sensor that can be used in the robot teaching task is presented. Force Sensing Resistor is used as the transducer. The principle of force/moment detection is explained, the architecture of the sensor is shown, and the measurement of the force/moment is presented. The force/moment sensor shown in this work is not meant to be used in a precise force/moment control, but it is intended to be used in the robot teaching where low accuracy can be tolerated.

키워드 : 힘/모멘트, 센서, 힘, 모멘트, FSR, 교시작업  
Keywords : Force, Moment, Sensor, FSR, Teaching

#### 1. 서 론

최근에는 인간의 생활에 보다 더 편리하게 도움을 줄 수 있는 서비스 로봇분야가 로봇 연구의 관심 대상이 되고 있다. 적용 예로는 가사로봇, 간호로봇, 의료보조로봇, 장애인 보조로봇 등 공장환경에 국한되지 않으며, 일반인의 삶에 직접적인 도움을 줄 수 있는 로봇의 응용분야이다. 이러한 로봇의 동작을 제어하고, 원하는 작업을 수행할 수 있도록 하는 것이 로봇교시방법이다. 이와 같은 로봇 교시방법 중 최근 들어서 발전하고 있는 것이 직접적으로 로봇의 Tool을 잡고 움직여서 로봇을 교시하는 방법이다. 이 방법을 사용한 대표적인 로봇은 일본 Yaskawa사의 'MOTOMAN-ET' 로

봇이다. 그림 1은 작업자가 용접용 로봇을 이용하여 로봇이 용접을 할 수 있도록 교시하는 작업을 나타내고 있다. 이 로봇은 힘/모멘트 센서를 로봇 Joint의 끝에 부착되어 있는 Tool(공구, 예를 들면 용접장치)에 부착하고, 그 센서에 손잡이를 부착하여, 작업자가 손잡이를 밀고 당길 수 있도록 하였다. 작업자가 손잡이를 잡고 밀고 당기면 로봇이 따라서 밀고 당겨지는 방법으로 로봇을 교시한다. 이 방법은 힘/모멘트 센서에 부착된 좌표계의 공간에서 운동이 발생하고, 센서는 로봇과 함께 이동하므로 Tool 좌표공간 운동과 같은 방식이다. 또한 작업자가 원하는 방향으로 로봇을 쉽게 움직일 수 있는 매우 편리한 방법이다. 반면, 힘/모멘트 센서의 매우 높은 가격 때문에 실용화에 걸림돌이 되고 있으며, 작업자가 로봇에 부착된 손잡이를 잡고 작업해야 하기 때문에 로봇의 동작에 오류가 발생하여 고속운동으로 작업자에게 부딪힐 경우 사고가 발생할 수 있어서 작업자들이 기피하는 안전성

\* 강원대학교 전기전자정보통신공학부 교수, 공학박사  
\*\* 강원대학교 대학원 제어계측공학과 석사과정

이 낮은 방법이다.

이와 같이 현재 사용되고 있는 힘/모멘트 센서의 경우는 힘/모멘트의 측정을 위해서 고정밀의 Strain-gauge를 사용하여, 정밀한 제어가 가능한 반면에 힘/모멘트 센서의 가격이 너무 비싸서 널리 사용되고 있지는 않다.

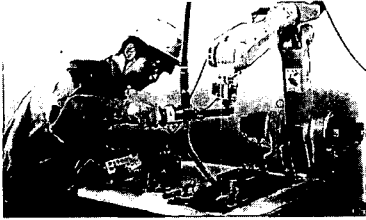


그림 1. Yaskawa 사의 Motoman 로봇, (작업자가 힘/모멘트 센서를 잡고 원하는 작업을 하고있다.)

본 논문에서는 Force Sensing Resistor(FSR)를 사용하여 개발한 힘/모멘트 센서를 보여준다. 또한 FSR을 이용하여 힘/모멘트를 검출하는 원리를 설명하고, 측정된 FSR 센서 값을 이용하여 힘/모멘트를 계산하고, 성능을 분석한 것을 보여준다.

본 논문에서 제안된 센서는 FSR을 사용하므로 정확한 힘/모멘트의 측정에는 사용되지 않으나, 기존의 Strain-gauge를 사용한 힘/모멘트 센서의 단점인 고가의 문제를 해결하여 낮은 가격에 제작할 수 있다.

## 2. 힘/모멘트 센서 시스템

본 논문에서 제안된 센서시스템은 그림 2.에서 보여주는 것과 같은 구성으로 제작되었다.

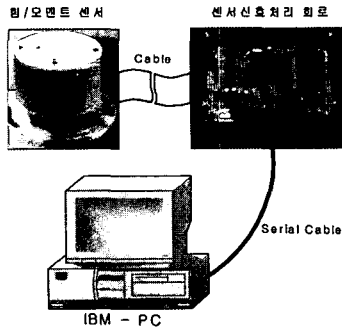


그림 2. 힘/모멘트 센서 시스템 구성도

그림 2에서처럼 힘/모멘트 센서로부터 발생되는

12개의 FSR의 센서신호는 병렬 Cable을 통해서 센서 신호처리 회로로 입력되고, 센서신호처리 회로에서는 8Bit One-Chip Microprocessor가 입력된 신호들을 처리하여 Serial Cable을 통해서 IBM-PC로 처리된 신호를 보내게 된다. 이렇게 처리된 신호는 IBM-PC의 프로그램에 의해서 힘/모멘트의 값으로 변환되어 화면에 출력된다.

## 3. 힘/모멘트 센서 기구

본 논문에서 제안된 힘/모멘트 센서는 그림 3.과 같이 4개의 Part로 설계하여 제작되었다. 그림 3(a)는 제작된 힘/모멘트 센서의 기본 BASE부분 이면서 FSR 센서가 위치할 기구인데, 6개의 면에 각각 2개씩의 FSR 센서가 위치한다. 각 면의 중앙에 뚫린 구멍은 FSR 센서의 전선이 빠져나갈 구멍이다. FSR 센서의 위치는 마주하는 면에 대해서 한 면에 가로로 놓이면 이에 접한 면에는 세로로 놓이도록 하고 있는데, 이는 그림 5와 같은 형태를 갖는다. 그림 3(b)는 교시자가 손으로 잡고 움직이게 될 부분으로써 이 원통을 그림 3(a)의 정육면체 부분에 삽입하게 된다. 원통의 안쪽 면에는 FSR 센서를 눌러주는 나사머리 형태의 접점이 위치하게 되는데, 그림 3(a)의 6개의 면에 위치한 FSR 센서의 위치와 같은 방향으로 각각 2개씩의 나사머리 형태의 FSR 센서 접점이 위치하게 된다. 그림 3(c)와 그림 3(d)는 Handle과 결합될 부분으로써 위 뚜껑과 아래 뚜껑에 해당한다. 그림을 보면 원형의 중앙을 중심으로 90도의 각을 이루면서 뚫린 4개의 구멍(바깥쪽)과 180도의 각을 이루면서 뚫린 2개의 구멍(안쪽)이 있다. 여기서 바깥쪽 4개의 구멍들은 Handle과 결합 시에 고정나사가 들어갈 구멍이고, 안쪽 2개의 구멍들은 2개의 나사머리 형태의 FSR 접점이 들어가게 될 구멍이다.

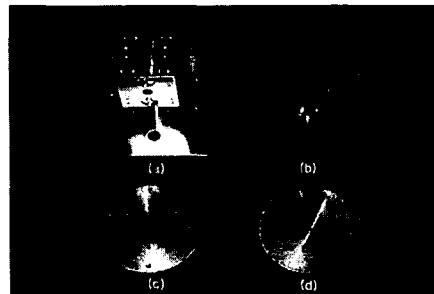


그림 3. 제작된 힘/모멘트 센서 Part별 모습사진

그림 4는 그림 3(a)의 육면체의 각 면에 2개씩 위치한 FSR 센서의 생김새와 FSR센서가 결합될

## Force Sensing Resistor를 이용한 힘/모멘트 센서 개발

FSR 모듈을 나타내고 있으며, 50원 짜리 동전과 실물 크기를 비교한다.

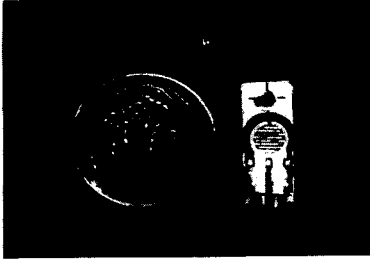


그림 4. FSR 센서 모듈과 50원 짜리 동전의 실물 크기 비교 사진

그림 5는 FSR Cube에서의 Force Sensing Resistor(FSR)의 배치를 보여준다. 정육면체의 서로 마주보는 두 면의 FSR의 배치 형태는 동일하며 서로 마주 보도록 배치된다. 마주보는 두 면에 위치한 4개의 FSR이 형성하는 평면은 서로 직교한다. 즉, A 면과 그 마주보는 면의 FSR 4개가 형성하는 평면과, B 면, C 면에서 형성되는 평면은 FSR의 내부 중앙 점에서 서로 직교한다.

그림 5에서 B면을 들여다 본 경우를 중심으로 본 센서의 힘/모멘트 검출 원리를 설명하면 다음과 같다. 먼저, 힘의 검출원리를 설명한다. 그림 6(a)는 힘/모멘트가 가해지지 않은 평형상태를 보여준다. 각 FSR은 FSR Cube내부의 각 면에 2개씩 있는 스프링의 힘에 의해서 FSR cube 는 Handle의 내부에서 평형을 이룬다. 그림 6(b)는 Z 방향으로 힘이 가해져서 Handle이 Z 방향으로 이동하여 2개의 FSR이 늘려진 상태가 된 경우를 보여주고 있으며, 그림 6(c)는 Z 방향으로 힘이 가해져서 Handle이 Z 방향으로 이동하였으나 1개의 FSR만 늘려진 상태가 된 경우를 보여준다. 이상과 같이 FSR의 상태에서부터 Z 방향의 힘이 가해졌는지의 여부를 알 수 있다. 기타 X 방향과 Y 방향의 힘을 검출하는 원리도 동일한 방법으로 검출 가능하다.

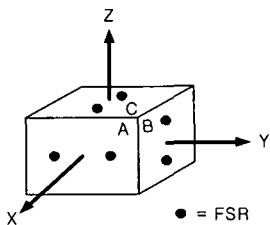


그림 5. FSR Cube에서 FSR의 배치형태

다음으로 Y 방향의 모멘트 검출원리를 설명한다. 그림 6(d)는 힘/모멘트가 가해지지 않은 평형상태를 보여준다. Y 방향으로 모멘트가 발생하여 FSR cube 가 Y 방향을 축으로 회전하면 그림 6(e)에서 보여주는 바와 같이 FSR cube 의 마주보는 면의 대각선 방향의 FSR 2개가 Handle의 내면과 접촉이 발생하여 늘려진 상태가 된다. 이상과 같이 FSR의 상태에서부터 Y 방향의 모멘트가 가해졌는지의 여부를 알 수 있다. 기타 X 방향과 Z 방향의 모멘트를 검출하는 원리도 동일한 방법으로 검출 가능하다.

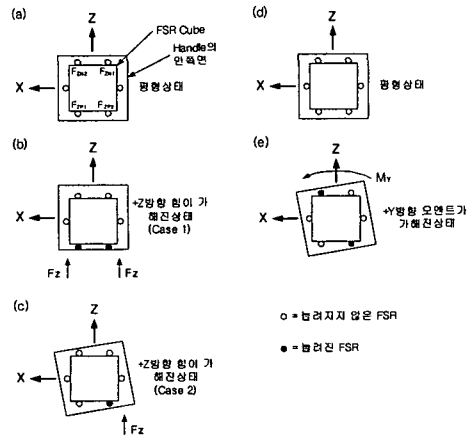


그림 7. Sensor Cube를 이용한 힘/모멘트 검출 원리

### 4. Force Sensing Resistor(FSR) 센서

본 논문에서 사용된 Force Sensing Resistor(FSR)의 원리를 살펴보면 다음과 같다. FSR은 가해진 힘에 따라 저항이 변화하는 Transducer로서 strain-gauge등이 힘의 정밀한 측정의 용도에 사용되는 것과 다르게 FSR은 그 측정의 정밀도가 다소 낮은 것이 특징이다. 그러나 본 논문에서는 로봇의 교시작업에 사용될 수 있는 힘/모멘트 센서를 낮은 가격으로 제작하기 위한 목적으로 FSR 소자를 이용한 힘/모멘트 센서를 연구한다.

FSR(Force Sensing Resistor)는 그림 7에서와 같이 3개 층의 Polymer Thick Film (PTF)으로 구성되어 있으며, 상층부에는 반도체성분이 PTF 표면에 인쇄되어 있고, 중간층은 하층부와 상층부 사이에 미세한 공간을 확보하기 위한 Spacer 이며, 하층부에는 그림의 active area에서 보여주는 형태로 두 개의 전극이 인쇄 되어있으며, 이 두 개의 전

극은 서로 분리되어 있으므로 두 전극의 저항은 무한대 값을 가진다. Active area에 힘이 가해지면 상층부의 면이 flexible 하므로 눌러지는 힘에 따라 하층부와 접촉이 발생하는 면적이 변화하며, 하층부의 active area에서 서로 전기적으로 연결되는 면적이 변화한다. 힘이 크게 가해질수록 접촉 면적은 넓어지고, 두 전극 사이의 전기적 저항 값은 감소한다. 이상과 같이 가해진 힘과 저항 값 사이의 관계가 그림 8에 나타나 있다.

FSR(Force Sensing Resistor)은 자체의 저항 값을 가지고 있는데, 이 저항 값은 Active 영역에 가해지는 힘의 크기에 따라서 반비례하는 특성을 가지고 있다. 그림 8은 FSR에 가해지는 힘과 저항과의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 보면 알 수 있듯이 힘이 증가함으로써 그 저항치는 감소되는 것을 볼 수 있다. 그리고, 이러한 감소되는 곡선은 선형성을 띤다는 것을 알 수 있다.

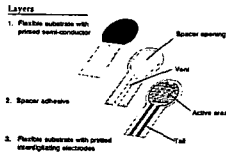


그림 7. FSR 센서의 구조

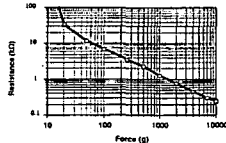


그림 8. FSR 센서의 특성 곡선

그림 4에서 보듯이 선이 연결된 FSR 센서를 가공하여 FSR 모듈 BASE에 부착시켜 만든 것이 FSR 모듈이다. 그림 4에서 보면, FSR의 전극을 연결하였는데, FSR의 회로는 Polymer Thick Film(PTF)위에 전극회로가 은박 형태로 인쇄되어 있으며, 이 때문에 전선을 연결하기 위한 납땀이 불가능하다. 따라서 이 선을 연결할 때 사용된 접착제가 '실버 페이스트'이다. 실버 페이스트는 반도체 분야에서 사용되는 도전성 접착제로, FSR에 전선을 연결하기 위해서는 반드시 필요한 재료이다.

그림 9는 본 논문에서 사용한 FSR에 힘을 가하게 되는 방법을 나타내고 있다. 사용된 FSR에 힘을 가하는 방법은 FSR의 active area에 나사머리를 이용하여 힘을 가하는 방법이다.

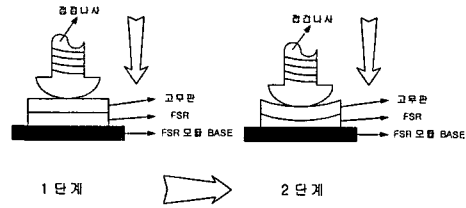


그림 10. FSR에 힘을 가하는 방법

### 5. 센서 신호처리 회로

그림10은 8bit One-chip Microprocessor(MCU)를 이용하여 다수의 FSR을 측정하는 방법을 간략화 하여 나타낸다. 회로에서 FSR은 한 번에 한 개씩 그 저항 값이 측정된다. FSR 측정의 기본원리는 Capacitor C1 이 reset 된 이후 특정한 전압까지 충전되는 시간을 측정하는 것이다(Capacitor Charge Circuit). Capacitor C1으로 공급되는 전류는 저항 R을 통해서 항상 공급되며, FSR에 연결된 MPU의 출력 값에 따라 추가적인 전류가 C1에 공급될 수 있다. 측정을 원하는 FSR에 연결된 출력 port를 HIGH로 만들고, 나머지 모든 FSR에 연결된 출력은 LOW로 만든 다음, RESET 출력 값에 LOW를 출력하면 C1은 방전된다. 다음 RESET를 HIGH로 올리면 C1에 충전이 시작되고, C1의 충전전압이 Digital HIGH에 해당하는 전압에 이르면 MCU 이 INPUT 입력은 HIGH값을 입력하게 된다. 따라서, RESET를 HIGH로 올린 후 INPUT값이 HIGH가 될 때까지의 시간을 MCU에서 카운트하면 FSR의 저항 값을 간접 측정할 수 있다.

그림 10에서 Rmax와 Rmin는 FSR 측정용 Calibration 하는데 사용된다. Rmax를 이용하여 C1을 충전하는데 소요된 카운트 값을 maximum 카운트 값으로 사용하고, Rmin을 이용하여 C1을 충전하는데 사용된 카운트 값을 minimum 카운트 값으로 사용한다. Rmax와 Rmin은 FSR의 저항 변화 값의 변화 영역으로 사용된다.

그림 11은 제작된 센서 신호처리 회로이다. MCU는 8052를 선택하였는데, 그 이유는 첫째로 입력 port의 개수가 FSR을 연결하는데 적합한 수만큼 보유하고 있고, 둘째로 Serial 통신이 가능하며, 셋째로 센서 신호처리 프로그램 개발이 편리한 C언어가 지원되기 때문이다. Serial data 전송은 Max 232를 통해 이루어지고, PC의 serial port(COM2)에 연결되어 이루어진다. 전송속도는 9600BPS의 serial 통신의 전송속도를 유지한다.

## Force Sensing Resistor를 이용한 힘/모멘트 센서 개발

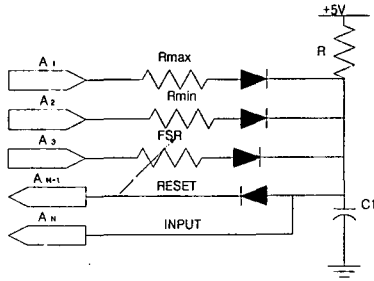


그림 10. 간략화 되어진 FSR 연결 회로

FSR과 MCU의 사이에 Buffer를 사용하여 기준 출력 전압과 전류를 TTL 수준으로 맞추어 줌으로써 일정한 세기의 전류를 기준으로 삼을 수 있도록 하였다.

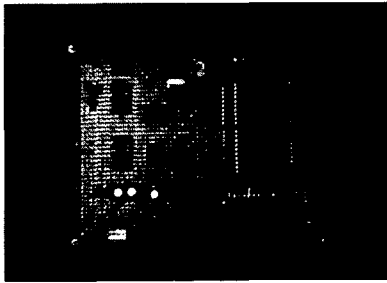


그림 12. 센서 신호처리 회로

센서 신호처리 회로는 힘/모멘트 센서로부터 받은 신호를 PC로 전달하기 위하여 PDU(Serial Port Data Unit)을 통한다. 이 때 PC로 보내지는 데이터의 Frame 구조는 그림 12에서 보여주고 있다. 그림과 같은 구조로 데이터를 전송하는데, 가장 간단한 프로토콜 형태인 Unidirection 형태를 사용하므로, 이 경우 Controller쪽에서 전송한 PDU를 PC에서 받았는지, 못 받았는지 확인하지 않으며, 전송속도는 약 20ms 이다.

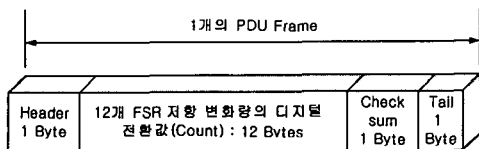


그림 13. 1개의 PDU Frame의 구성

### 6. 힘/모멘트 센서의 성능 분석

본 논문에서 제작된 힘/모멘트 센서의 성능을

분석하기 위하여 그림 6의 힘/모멘트 검출원리를 이용한다. 그림 6은 힘/모멘트 센서의 외부에서 가해진 힘에 대해서 접촉되는 Force Sensing Resistor(FSR)를 나타내었다. 그림 6(a)에는 FSR Cube에 부착된 FSR들에 대해서 Label을 붙였다. 그리고, 그림 6(b)와 그림 6(c)는 +Z 방향의 힘이 가해졌을 때 힘이 가해지는 FSR을 나타낸다. +Z방향의 힘이 가해지는 경우 그림에서처럼 두 개의 FSR에 모두 힘이 가해지는 경우와 하나의 FSR에만 힘이 가해지는 경우가 있다. 이는 외부 Handle를 잡고 힘을 가하는 사람의 가해지는 힘과 방향에 따라서 달리 나타날 수 있다. 그림 6(e)는 Y축을 중심으로 +방향으로 Handle를 잡고 힘을 가했을 때 발생하는 FSR의 접촉을 나타낸다. 이러한 검출 방법에 따라서, 다음과 같은 힘과 모멘트의 계산식이 나오게 된다.

$$F_Z = F_{ZP1} + F_{ZP2} - F_{ZM1} - F_{ZM2} \dots\dots\dots(1)$$

$$M_Y = \frac{1}{2} D_Y [F_{ZM2} + F_{ZP2} - F_{ZM1} - F_{ZP1}] \dots(2)$$

식(1)에서 +Z방향으로 가해진 힘의 총량  $F_Z$ 는 힘이 가해진 FSR Cube 면에 있는 FSR의 Force에서 마주하는 FSR Cube 면에 있는 FSR의 Force값을 빼줌으로써 구해진다. 식(2)에서  $D_Y$ 는 마주하는 면의 서로 대각선상에 있는 두 FSR 사이의 거리를 나타낸다. 그림6(e)에서 보는 바와 같이 Y축을 중심으로 +방향으로 모멘트를 주었을 때 나오는 식은 식(2)와 같다.

힘/모멘트 센서의 CUBE면에 부착된 12개 FSR의 성능을 알아보는 실험을 실시하였다. 이 실험에서는 힘/모멘트 센서의 좌표축에 대한 방향에 따라서 무게를 쟀 수 있는 추를 이용하여 200g ~ 2Kg까지의 힘을 가했을 때 나타나는 FSR의 저항의 변화를 측정하였다. Force를 측정하기 위해서는 그림 13과 같이 힘/모멘트 센서를 옆으로 고정시키고 이동부 손잡이의 중앙을 지나도록 하는 끈을 걸고 그 끈의 끝에 각각의 추(400g~2Kg)를 매달아서 그 때의 FSR에서 나오는 출력 값을 얻도록 한다. Moment를 측정하기 위해서는 그림 14처럼 힘/모멘트 센서를 평면바닥에 고정시키고, 추를 매달은 끈을 힘/모멘트 센서 Handle의 양쪽에 각각 고정시키고, 도르래를 이용하여 끈을 수평으로 유지하면서 양쪽의 무게가 같도록 하여 200g부터 2Kg까지 200g 단위로 무게를 올려가며 측정을 하였다. 여기서 측정된 FSR의 저항변화는 8051MCU를 통해서 Counter 값으로 출력이 된다. PC에서는 이 Counter 값을 받아서 다시 힘의 량으로 변화시킴으로써 FSR을 누르는 힘의 량을 계산하게 된다.

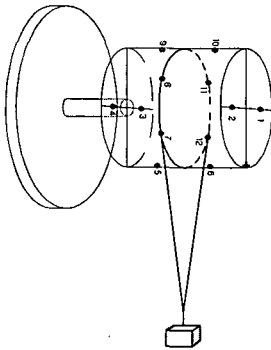


그림 13. Force를 측정하기 위한 실험

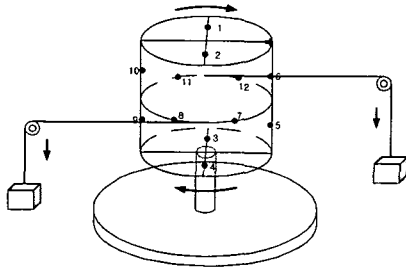


그림 14. Moment를 측정하기 위한 실험

이상과 같은 실험을 통해서 나온 결과 값을 분석해 봄으로써 본 논문에서 개발한 힘/모멘트 센서의 성능을 분석할 수 있다. 그림 15와 그림 16은 각각 Force와 Moment 측정실험에서 얻은 결과이다.

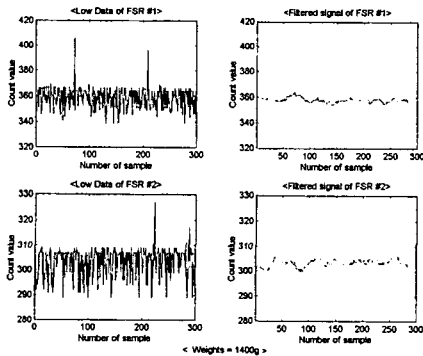


그림 15. Force 측정실험의 Raw Data 신호와 Low Pass Filter된 신호

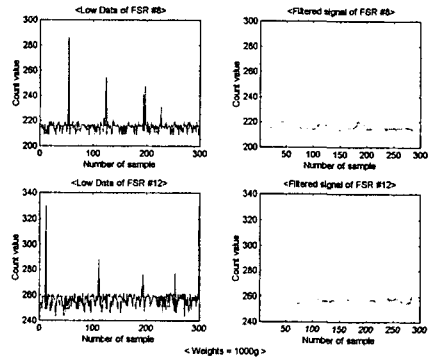


그림 16. Moment 측정실험의 Raw Data 신호와 Low Pass Filter된 신호

이러한 신호를 이용하여 실제 계산에 의해서 나오는 Force/Moment와 실험 결과로 나오는 Force/Moment에 대한 에러율을 계산해 봄으로써 힘/모멘트 센서에 대한 성능을 분석할 수가 있다.

그림 17과 그림 18은 각각 실제 힘과 모멘트 vs 측정된 힘과 모멘트의 값을 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 가로축은 실제 힘과 모멘트를 나타내고, 세로축은 측정된 힘과 모멘트를 나타낸다. 그래프에서 보듯이 힘과 모멘트가 증가할수록 측정된 힘과 모멘트도 증가함을 알 수 있다. 그러나, 측정된 힘과 모멘트의 값은 계산된 실제 힘과 모멘트의 값과는 차이를 보이는데, 이렇게 차이를 보이는 것은 Force Sensing Resistor(FSR)의 특성이 정밀하지는 않기 때문이며, 제작된 힘/모멘트 센서의 기구적인 오차와 FSR의 Active 영역을 누르는 볼트머리의 위치 오차도 포함되어 있기 때문이다.

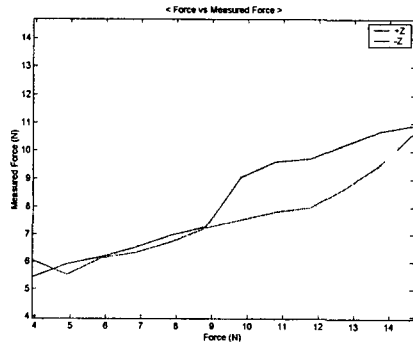


그림 17. 실제 Force vs 측정된 Force

## Force Sensing Resistor를 이용한 힘/모멘트 센서 개발

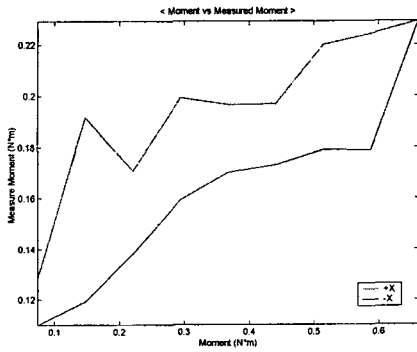


그림 18. 실제 Moment vs 측정된 Moment

그림 19와 그림 20을 보면 각각 Z방향의 힘에 대한 응답특성(에러곡선)과 X축의 모멘트에 대한 응답특성(에러 곡선)을 나타낸다. 그림에서처럼 각각 에러가 크게 나타나는데, 앞에서도 언급했듯이 이는 Force Sensing Resistor(FSR)의 자체특성이 그렇게 정밀하지 않는데다가, 힘/모멘트 센서의 기구적인 오차와, FSR의 Active 영역에 힘이 가해지는 볼트머리의 깊이가 각각 조금씩 차이가 남으로써 위와 같은 응답특성을 갖게 된다. 그림 19에서 보면 6N의 Force가 가해졌을 때에 가장 좋은 응답특성을 보이고, 나머지 영역에서는 오차가 증가함을 보인다. 그림 20에서는 0.15와 0.2 사이에서 가장 좋은 응답특성을 보이고, 나머지 영역에서는 오차가 증가함을 보인다. 따라서 이러한 결과로 볼 때 본 논문에서 제안된 힘/모멘트 센서에 사용된 Force Sensing Resistor(FSR)은 정밀한 제어를 요하는 것에는 사용할 수 없음을 확인할 수 있다. 그러나, 그림 17과 그림 19에서 보듯이 측정된 힘과 모멘트 그래프는 전체적으로 linear한 증가를 보여줌으로써, 상대적 차이값을 균일히 얻는 데는 문제가 없다. 본 논문에서 제안한 6관절 로봇의 교시는 정밀한 값을 요하지 않고, 단지 교시자의 직관적인 힘과 모멘트의 연속된 변화값의 전달이 필요하게 됨으로써 교시자에게는 가하는 힘에 대한 응답 특성이 정확하지 않아도 제작된 센서를 이용하여 교시작업을 할 수가 있다. 이러한 특성을 이용하여 기존의 Strain-gauge를 사용하는 고가의 힘/모멘트 센서를 이용한 로봇교시를 대체해서 저가의 Force Sensing Resistor(FSR)를 사용하여 개발한 본 논문의 힘/모멘트 센서를 이용하는 6관절 로봇 교시가 가능하다.

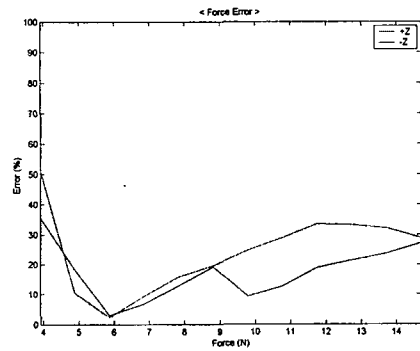


그림 19. Z방향의 힘에 대한 응답특성

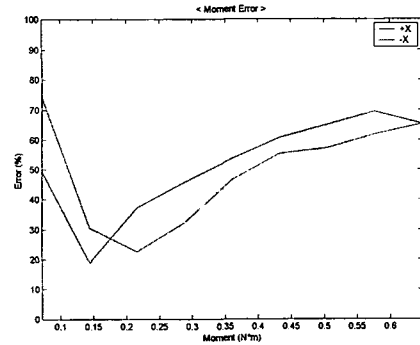


그림 20. X축에 대한 모멘트 응답특성

## 7. 결론

지금까지 본 논문에서는 기존에 Strain-gauge를 사용한 고가의 센서를 사용한 로봇의 특징을 살펴 보았다. 그리고, 개발된 저가의 힘/모멘트 센서의 설계부터 기구제작, 힘/모멘트의 검출원리, FSR의 특성/원리, 센서 신호처리 회로의 구성 및 동작원리, 힘/모멘트 센서의 성능 분석 등에 대해서도 살펴 보았다. 본 논문에서 개발된 힘/모멘트 센서는 센서에 가해진 힘에 따라서 그 저항값이 변화하는 Force Sensing Resistor(FSR)를 사용하였고, 사용된 FSR은 정밀한 측정을 요구하는 데에는 적당치 않지만, 그 출력 값의 변화가 본 논문에서 개발한 힘/모멘트 센서에 사용되기에는 충분하였다. 센서에 사용된 FSR의 저항 값을 읽기 위해서는 8bit One chip 마이크로프로세서가 사용되었으며, Capacitor Charging Circuit을 이용하여 값을 측정하여 FSR의 저항값을 가해진 Force값으로 변환하

는 식을 이용하여 Force를 계산하였다.

실제 힘/모멘트 신호와 측정된 힘/모멘트 신호를 비교 분석하여 봄으로써 본 논문에서 개발된 힘/모멘트 센서를 이용하여 교시작업을 할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 개발된 힘/모멘트 센서는 기존에 Strain-gauge를 사용한 고가의 힘/모멘트 센서를 대체하여 사용될 수 있으며, 이는 저가의 힘/모멘트 센서를 사용함으로써 고가의 힘/모멘트 센서를 사용할 수 없었던 곳에서도 쉽게 교시작업에 사용할 수가 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] MOTOMAN-ET System, 安川電機, Japan, 1995
- [2] Gerd Hirzinger, "Advances in Robotics - An European Perspective", Plenary Lecture, IEEE International Conference on Robotics and Automation, May, 1998, Leuven, Belgium
- [3] 최명환, "COSMO-로봇 교시를 위한 저가형 힘/토크 센서", 97 한국자동제어학술회의, pp. 1621-1624, 서울, 1997
- [4] 최명환, "초저가형 힘/모멘트 센서 COSMO를 이용한 직관적 교시방법", 98 한국자동제어학술회의, 부산, 1998
- [5] JOHN J. CRAIG, "Introduction to ROBOTICS : Mechanics and Control second edition", Addison-Wesley Publishing Company. Inc, 1989
- [6] Small Industrial Robot System Technical Manual, A460 series, CRS Plus inc., 1990