

## 3 축 힘센서를 이용한 지능형 그리퍼 개발

김갑순<sup>#</sup>

### Development of the Intelligent Gripper Using Two 3-axis Force Sensor

Gab-Soon Kim<sup>#</sup>

#### ABSTRACT

This paper describes the development of the intelligent gripper with two 3-axis force sensor that can measure forces  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  simultaneously, for stably grasping an unknown object. In order to grasp an unknown object using an intelligent gripper safely, it should measure the force in the gripping direction and the force in the gravity direction, and perform the force control using the measured forces. Thus, the intelligent gripper should be composed of 3-axis force sensor that can measure forces  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  at the same time. In this paper, the intelligent gripper with two 3-axis force sensor was manufactured and its characteristic test was carried out. The fabricated gripper could grasp an unknown object stably. Also, the sensing element of 3-axis force sensor was modeled and designed with five parallel-plate beams, and 3-axis force sensor for the intelligent gripper was fabricated. The characteristic test of the made sensor was carried out.

**Key Words** : Intelligent gripper(지능형 그리퍼), 3-axis force sensor(3 축 힘센서), Parallel-plate beam(병렬평판보), Rated strain(정격변형률), Interference error(상호간섭오차)

#### 1. 서론

기존에 발표된 논문들에서 다루어진 그리퍼(gripper)는 물체의 잡는 방향의 힘(grasping force)을 측정하기 위하여 단축 힘센서를 이용하였거나 스트레인게이지(strain-gage)를 그리퍼에 부착하여 제작하였다.<sup>1-4</sup>

이와 같은 그리퍼는 3 방향의 힘  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  를 동시에 측정할 수 없기 때문에 미지물체의 무게를 측정할 수 없고, 이로 인해 물체를 떨어트리거나 파손되지 않도록 안전하게 잡을 수 없다. 로봇이 손가락을 이용하여 미지의 물체를 안전하게 잡기

위해서는 잡는 방향의 힘과 중력방향의 힘을 동시에 측정해야 하고 이 값들을 이용하여 힘제어를 해야 한다. 그러므로 로봇의 그리퍼는 힘  $F_x$ (x 방향의 힘),  $F_y$ ,  $F_z$  를 동시에 측정할 수 있는 3 축 힘센서로 그리퍼를 제작해야 한다.

3 축 힘센서를 이용하여 정확한 힘을 측정하기 위해서는 센서의 상호간섭오차(interference error)가 작아야 한다.<sup>5-7</sup> 상호간섭오차는 비직선성오차(nonlinearity), 재현도오차(repeatability) 등 다른 오차들보다 수십배 혹은 수백배 크다. 그러므로 3 축 힘센서의 정밀정확도는 상호간섭오차만으로 평가하는 것이 일반적이다.<sup>5-7</sup>

☞ 2006년 9월 19일 접수; 게재승인일: 2006년 12월 23일  
# 교신저자, ERI, 경상대학교 제어계측공학과  
Email gskim@gsnu.ac.kr Tel. (055) 751-5372

본 논문에서는 2 개의 3 축 힘센서를 이용하여 지능형 그리퍼를 설계 및 제작하였으며, 그리퍼의 핵심 부품인 힘  $F_x, F_y, F_z$  를 동시에 감지할 수 있는 3 축 힘센서를 개발하였다. 이 센서는 병렬평판보(PPB : parallel-plate beam) 5 개로 구성되는 단일 몸체로 새롭게 모델링되었다. 힘센서의 감지부들을 설계하기 위하여 유한요소해석(finite element method analysis)을 실시하였다. 그리고 스트레인게이지를 부착하여 센서를 제작하였고, 제작된 센서의 특성평가를 실시하였으며, 제작된 센서를 이용하여 지능형 그리퍼를 제작하여 미지물체를 잡는 특성실험을 실시하였다.

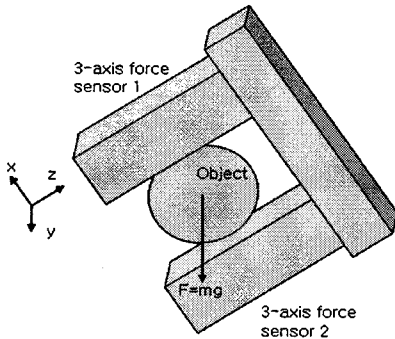


Fig. 1 The grasping shape using the gripper with 3-axis force sensor

## 2. 그리퍼의 잡는 방법

Fig. 1 은 3 축 힘센서로 구성된 그리퍼로 미지물체를 잡은 모습을 나타내고 있다. 그리퍼의 3 축 힘센서 1 의  $x, y, z$  방향의 힘을 각각  $F_{x1}, F_{y1}, F_{z1}$  라 하고, 3 축 힘센서 2 의 힘들을 각각  $F_{x2}, F_{y2}, F_{z2}$  라 하면 미지물체의 무게는 다음과 같은 식에 의해 구할 수 있다.

$$F = mg = \sqrt{(F_{x1} - F_{x2})^2 + (F_{y1} - F_{y2})^2 + (F_{z1} - F_{z2})^2} \quad (1)$$

## 3. 3 축 힘센서

### 3.1 모델링

본 연구에서는  $x, y, z$  방향의 힘  $F_x, F_y, F_z$  를 동시에 감지할 수 있는 3 축 그리퍼 힘센서를 Fig. 2 과 같이 모델링하였다. 3 축 힘센서의 감지부는 5 개의 병렬평판보로 구성되어 있고, PPB1 과 2 는 수평방향, PPB3 과 4 는 수직방향, PPB5 는 전후방

향으로 각각 2 개의 평판보가 평행으로 놓여져 있다. 그리고 PPB1~4 와 PPB5 는 수직으로 구성되어 있고, B1 과 B2 는 고정블록이고 B3 는 힘전달블록이다. 고정블록 B1 과 B2 를 고정하고 힘전달블록 B3 에 힘을 가하면 3 축 힘센서의 각 센서에 힘이 전달된다. 5 개의 PPB 들 중 PPB1 과 PPB2 는 힘  $F_x$ , PPB3 과 PPB4 는 힘  $F_y$ , PPB5 는 힘  $F_z$  를 각각 감지하는 병렬평판보이다. PPB1, PPB2, PPB3 과 PPB4 의 평판보의 크기는 폭  $b_1$ , 두께  $t_1$ , 길이  $l_1$  이고, PPB5 의 평판보의 크기는 폭  $b_2$ , 두께  $t_2$ , 길이  $l_2$  이다.

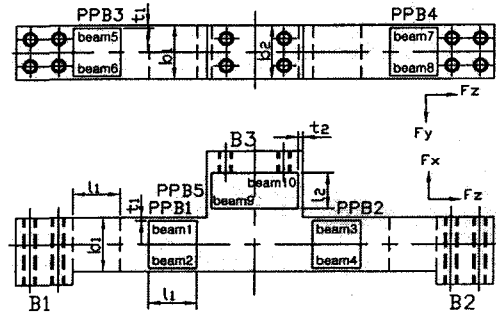


Fig. 2 Model of a 3-axis force sensor

### 3.2 3 축 그리퍼 힘센서의 설계

3 축 힘센서의 감지부의 설계변수는 정격용량, 정격변형률, 보의 폭, 보의 길이, 보의 높이, 등이다. 이 설계변수 중 감지부의 크기인 정격변형률, 보의 폭, 보의 길이, 보의 높이 등, 즉 감지부를 설계하기 위하여 유한요소법(finite element method, FEM)을 이용하여 각 센서의 감지부를 설계하였다.

유한요소해석을 위해 결정되어야 할 설계변수는 센서의 용량은 음료수병 등을 잡을 수 있도록 각 센서  $F_x, F_y, F_z$  모두 20 N, 정격변형률은 센서 감지부의 강도를 고려하여 각 센서 모두  $1000 \mu m/m \pm 100^{-6}$ , 스트레인게이지의 부착위치는 스트레인게이지의 크기  $17.6mm^2(3.2 \times 5.5mm)$ 를 고려하여 보의 길이 방향으로는 모두 보의 양끝 지점으로부터 1.5 mm 떨어진 지점이고, 보의 폭 방향으로는 보의 길이 방향의 중심선상으로 결정하였다. Fig. 3 는 각 센서의 감지부를 유한요소법을 이용하여 해석하기 위한 격자(mesh)를 나타낸 것이다. 격자는 보의 두께가 3 등분, 길이가 0.5mm 간격, 폭이 6 등분을 하였다. 그리고 스트레인게이지의 부착위치에서 변형률이 약  $250 \mu m/m$  가 되

도록 유한요소해석을 반복하여 감지부의 크기인 보의 폭, 두께, 길이 등을 결정하였다.

Fig. 4~6은 각 정격하중 힘  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ (모델좌표계에서)를 가하였을 때 각 센서의 감지부의 변형된 모습을 나타내고 있다. 예상했던 것과 같이 Fig. 4에서와 같이 힘  $F_x$ 가 가해졌을 때는 PPB1과 PPB2만 변형되었고, Fig. 5에서와 같이 힘  $F_y$ 가 가해졌을 때는 PPB3과 PPB4만 변형되었으며, Fig. 6에서와 같이 힘  $F_z$ 가 가해졌을 때는 PPB5만 변형되었다. 그리고 결정된 스트레인게이지 부착위치에서 유한요소법을 이용한 해석결과(변형률)을 얻었다. Fig. 3~6의 크기는 모두 1:1이다.

결정된 설계변수들을 유한요소해석한 결과, 보의 폭  $b_1$ 과  $b_2$  모두 12 mm, 보의 길이  $l_1$ 과  $l_2$ 는 각각 10 mm와 8mm, 보의 두께  $t_1$ 은 0.7 mm,  $t_2$ 는 0.84 mm, 그리고 힘전달블록 B3에서 PPB5의 평판보의 끝까지의 거리  $d_1$ 은 5mm, 힘전달블록의 중심선으로부터 평판보 9의 높이  $t_2$ 의 중심선까지의 거리  $d_2$ 는 9.58mm이었다. 유한요소법에 사용된 소프트웨어는 ANSYS이다. 감지부의 재질은 소용량의 힘센서의 감지부로 많이 사용되는 알루미늄 2024-T351를 사용하였다.

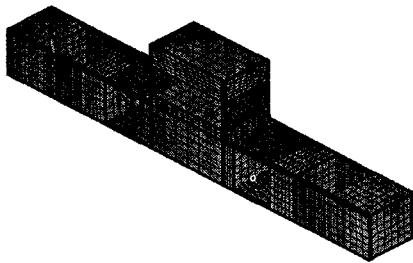


Fig. 3 The finite element meshes of sensing elements for FEM analysis

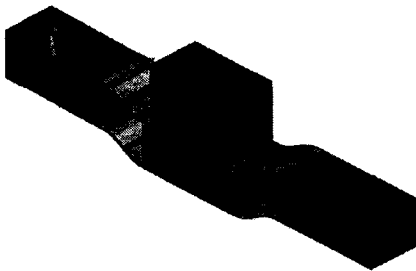


Fig. 4 The deformed shape under force  $F_x$

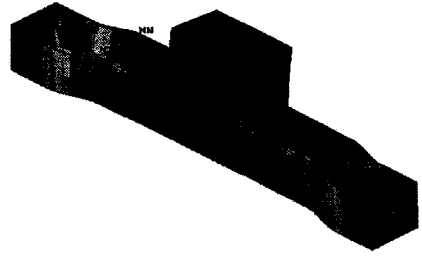


Fig. 5 The deformed shape under force  $F_y$

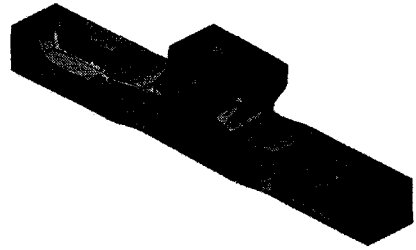


Fig. 6 The deformed shape under force  $F_z$

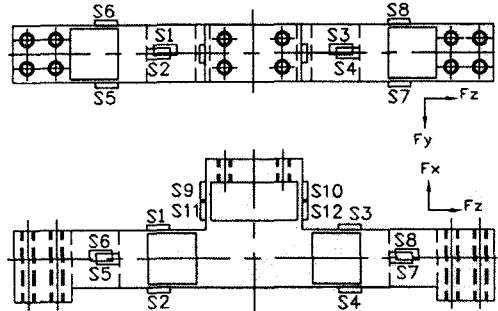


Fig. 7 Locations of strain gages of 3-axis force sensor

### 3.3 변형률해석 및 센서제작

Fig. 7은 3축 힘센서를 제작하기 위한 스트레인게이지 부착위치를 나타낸 것이다. 힘  $F_x$ 를 감지하는 센서의 스트레인게이지는 S1~S4,  $F_y$ 인 경우에는 S5~S8,  $F_z$ 인 경우에는 S9~S12로 선정하였다. 각 힘센서의 정격변형률과 상호간섭오차는 스트레인게이지의 부착위치에서의 변형률을 식 (2)에 의해 계산될 수 있다.<sup>5-7</sup>

$$\varepsilon = \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{C1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{C2} \quad (2)$$

여기서  $\varepsilon$ 은 완전결선회로(휘스톤브리지회로)로부터 계산된 변형률,  $\varepsilon_{T1}$ 은 인장 스트레인게이

지  $T_1$ 의 변형률,  $\epsilon_{T2}$ 는 인장 스트레인지어지  $T_2$ 의 변형률,  $\epsilon_{C1}$ 은 압축 스트레인지어지  $C_1$ 의 변형률,  $\epsilon_{C2}$ 은 압축 스트레인지어지  $C_2$ 의 변형률이다.

각 센서의 스트레인지어지 부착위치에서의 유한요소 해석결과인 변형률들을 식 (2)에 대입하여 계산한 결과 Fx 센서인 경우에는  $938 \mu m/m$ , Fy 센서인 경우는  $936 \mu m/m$ , Fz 센서인 경우에는  $941 \mu m/m$ 을 얻었다. 예상한 정격변형률인  $1000 \mu m/m$ 보다 약간 적게 설계한 것은 감지부의 두께가  $0.7mm$ 이하의 가공이 어려울 뿐만 아니라 안정성에도 문제가 있기 때문에 두께를  $0.7mm$ 로 하였기 때문이다. 3축 힘센서는 Fig. 7에 나타낸 스트레인지어지의 부착위치에 순간접착제(M-bond 200)를 이용하여 스트레인지어지(N2A-13-T001N-350)를 부착하였으며, 완전결선회로(휘스톤브리지회로)를 구성하여 제작되었다. Fig. 8은 제작된 3축 힘센서를 나타내고 있다.

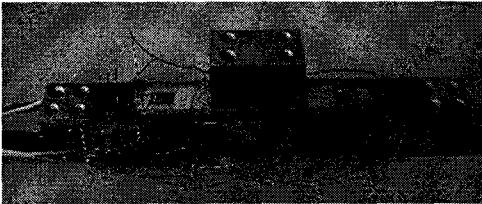


Fig. 8 Fabricated 3-axis force sensor

### 3.4 센서의 특성평가 결과 및 고찰

Fig. 9는 3축 힘센서의 특성실험을 위한 시험장치를 나타내고 있으며, 암(arm), 추(weight), 고정구(fixture), 측정장치(measuring device(DMP40))로 구성되었다. 센서의 특성실험은 특성실험장치를 이용하여 힘 Fx, Fy, Fz를 각각 20 N를 센서에 가하여 각각 3회씩 실시하였으며, 그 값들을 평균하였다. 센서에 힘을 가하는 방법은 센서를 각 방향의 힘에 따라 실험장치의 몸체의 수직면 혹은 수평면에 고정한 후 암의 양쪽 끝에 동일한 무게의 추 1과 추 2를 매단다.

이론식과 특성시험에 의한 정격출력의 단위를 같게 하기 위하여 특성실험에 의한 각 센서의 정격출력의 단위가  $mV/V$ 이므로 이론식에 의한 정격변형률( $\mu m/m$ )을 정격출력( $mV/V$ )으로 바꾸어야 한다. 정격변형률을 정격출력으로 바꾸는 식은 다음과 같다.<sup>5,7</sup>

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{1}{4} K \epsilon \tag{3}$$

여기서,  $E_i$ 는 완전결선회로(휘스톤브리지회로)의 입력전압(V),  $E_o$ 는 완전결선회로의 출력전압(V), K는 스트레인지어지 상수이고, 사용된 스트레인지어지의 게이지상수는 2.03,  $\epsilon$ 는 각 센서의 정격변형률( $\mu m/m$ )이다.

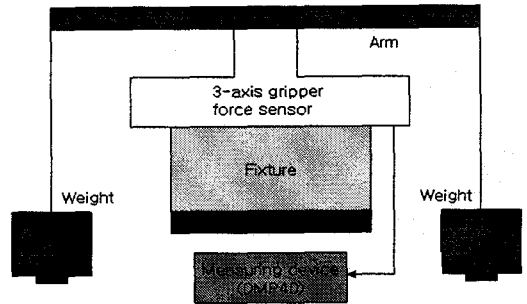


Fig. 9 Experimental set up for 3-axis force sensor

Table 1은 3축 힘센서 1과 2의 각 센서의 정격변형률( $\mu m/m$ )을 식 (3)에 대입하여 계산한 정격출력( $mV/V$ )과 특성시험에 의한 정격출력을 나타내었다. 유한요소해석에 의한 정격출력을 기준으로 실험에 의한 정격출력을 비교한 결과, 최대 6.30%의 오차를 보였다.

Table 2는 3축 힘센서 1과 2의 상호간섭오차를 각각 나타내고 있다. 최대 상호간섭오차는 0.9%이었다. 이와 같이 정격출력오차와 상호간섭오차가 발생된 것은 센서의 가공오차와 스트레인지어지의 부착오차 때문인 것으로 생각된다.

Table 1 Rated strains of 3-axis force sensor 1 and 2 in theory and characteristic test

Sensor	Analysis	Rated train(mV/V)		Error(%)
		Sensor1	Sensor2	
Fx	FEM	0.476		6.30
	Test	0.449	0.446	
Fy	FEM	0.475		4.84
	Test	0.457	0.452	
Fz	FEM	0.478		5.23
	Test	0.493	0.503	

Table 2 Interference error of 3-axis force sensor 1 and 2 in characteristic test

Sensor Force	Fx sensor(%)		Fy sensor(%)		Fz sensor(%)	
	Sen1	Sen2	Sen1	Sen2	Sen1	Sen2
Fx=10N	-	-	0.28	0.29	0.20	0.20
Fy=10N	-0.45	-0.90	-	-	0.20	0.20
Fz=10N	0.22	0.90	-0.28	0.29	-	-

#### 4. 그리퍼 제작

##### 4.1 지능형 그리퍼

미지물체를 안전하게 잡기 위한 로봇의 지능형 그리퍼는 물체의 무게를 측정하고, 잡는 방향의 힘제어를 할 수 있도록 설계 및 제작되어야 한다. Fig. 10 은 본 논문에서 개발한 3 축 힘센서를 이용하여 설계 및 제작한 지능형 그리퍼의 사진을 나타내고 있다. 이것은 제어장치(controller), 모터 드라이브(motor drive), 3 축 힘센서 1(3-axis force sensor 1), 3 축 힘센서 2(3-axis force sensor 2), 잡는 모터(grasping motor), 상하회전모터(up-down rotating motor), 좌우회전모터(left-right rotating motor), 몸체(body), LM 가이드(LM guide, RSR 7WZM) 등으로 구성되어 있다.

제어장치는 3 축 힘센서 1 과 2 로부터 출력되는 힘값을 측정하고 이를 이용하여 미지물체의 무게를 계산하며, 잡는 모터 상하회전모터, 좌우회전모터를 모터 드라이브를 통해 구동시킨다. 그리고 각 모터에 부착된 엔코더의 펄스수를 받는다. 3 축 힘센서 1 과 2 는 본 연구에서 개발한 것이고 LM 가이드에 고정되어 잡는 모터의 구동과 좌우나사의 회전에 의해 잡는 방향으로 동시에 움직인다, 이것은 미지물체를 잡고 그것의 무게를 최대 20N 까지 측정하는데 사용되며, 잡는 방향의 힘 또한 최대 20N 까지 측정할 수 있다.

잡는 모터(RE-max24, 222037)는 3 축 힘센서 1 과 2(그리퍼)를 잡는 방향으로 구동시키는데 사용되고, 사용된 모터의 최대 회전수가 9800rpm, 용량이 11W, 사용전압이 12V 이고, 사용된 감속기(GP22C, 14398)의 감속비는 53:1 이며, 엔코더(MR201940)를 사용하여 펄스를 읽는다. 상하회전모터(RE30, 268193)는 그리퍼와 잡는 모터 등의 기구를 상하로 360° 회전시키는데 사용되고, 사용된

모터의 최대 회전수가 8200rpm, 용량이 60W, 전압이 12V 이고, 사용된 감속기(GP32C, 166940)의 감속비는 66:1 이며, 엔코더(MR225785)를 사용하여 펄스를 읽는다. 좌우회전모터는 그리퍼, 잡는 모터, 상하회전모터 등의 기구를 좌우로 360° 회전시키는데 사용되고, 상하회전모터와 같은 종류를 사용하였다. 사용된 모터, 감속기, 엔코더의 제조 회사는 맥슨(MAXSON) 이다.

본 연구에서 개발한 지능형 그리퍼는 물체를 안전하게 잡은 후 좌우와 상하로 각각 360° 회전할 수 있고, 최대 85mm 까지 잡을 수 있으며, 최대 20N 의 무게를 가진 미지물체를 잡을 수 있다.

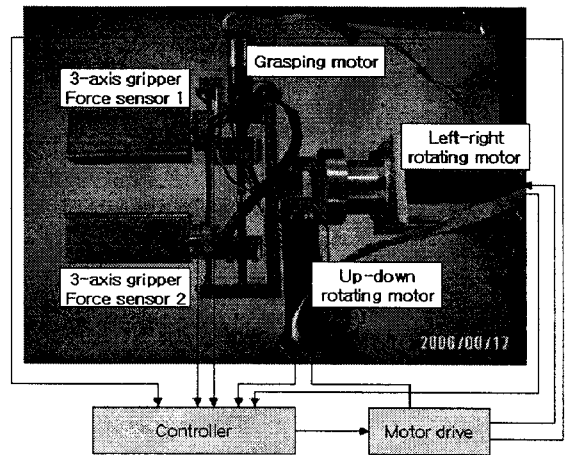


Fig. 10 Gripper with 3-axis force sensor

##### 4.2 그리퍼의 제어장치

Fig. 11 은 지능형 그리퍼의 제어장치의 블록도를 나타내고 있으며, Fig. 12 는 본 연구에서 구성한 제어장치의 사진을 나타내고 있다. 이것은 마이크로프로세서(80C196KC), 잡는 모터(motor 1), 상하회전모터(up-down rotation motor), 좌우회전모터(left-right rotation motor), 3 축 힘센서 1 과 2, 증폭기(amplifier) 등으로 구성되어 있다. 사용된 제어장치는 마이크로프로세서(80C196KC)를 사용하여 제작된 키트를 사용하였다. 이것은 20MHz 로 동작되고 아날로그/디지털 변환기(analog/digital converter), PWM 모터제어기능, 타이머/카운터 등을 보유하고 있으며, 센서의 증폭된 신호를 받아 물체의 무게를 계산하고 잡는 힘 제어를 위한 잡는 힘을 계산한다. 그리고 잡는 모터, 상하회전모터, 좌우회전모터를 구동시키기 위해 각 모터 드라이브에

PWM 포트를 통해 전압을 인가하고, 각 모터에 부착된 엔코더로부터 모터의 회전에 따라 발생하는 펄스를 타이머/카운터 포트를 통해 받아들인다. 모터드라이브는 드라이브 IC(HD74HC14P)를 이용하여 제작된 키트를 사용하였다.

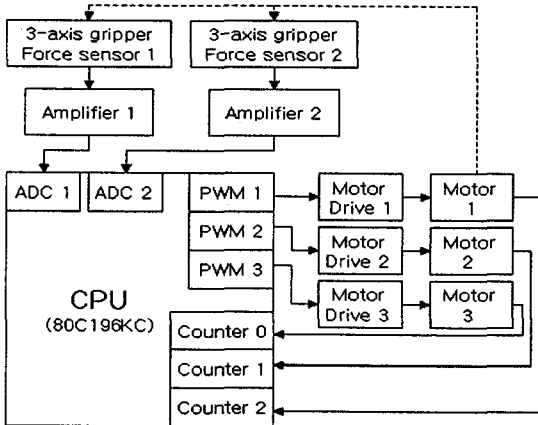


Fig. 11 Block diagram of the gripper's controller

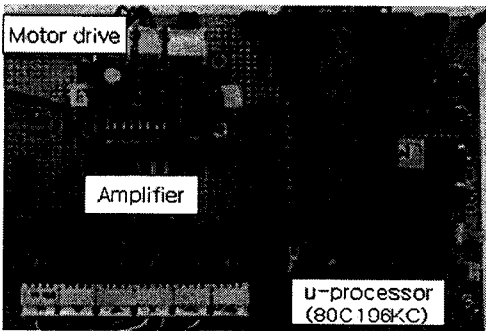


Fig. 12 Photograph of controller of the intelligent gripper

3 축 힘센서 1 과 2 는 물체를 잡았을 때 각각의 힘  $F_{x1}$ ,  $F_{y1}$ ,  $F_{z1}$  과  $F_{x2}$ ,  $F_{y2}$ ,  $F_{z2}$  를 감지하여 증폭기 1 과 2 로 보낸다. Fig. 13 은 설계한 증폭기의 회로도를 나타내고 있고, 증폭기(AD627AN)과 다수의 저항 및 콘덴서로 구성되어 있으며, 3 축 힘센서 1 과 2 가 총 6 개의 힘센서로 구성되어 있으므로 증폭기는 총 6 개를 제작하였다. 저항(R19)은 각 힘센서의 완전결선회로(휘스톤 브리지회로)의 0 점을 변화시키는 가변저항이고, 저항(R18)은 수 mV 의 각 힘센서의 출력을 증폭하기 위한 가변저항이다. 증폭기 1 과 2 에서는 최대 1000 배까지 증폭하여 센서에  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  의 정격

하중인 20N 을 가했을 때 2V 가 출력되도록 하였다.

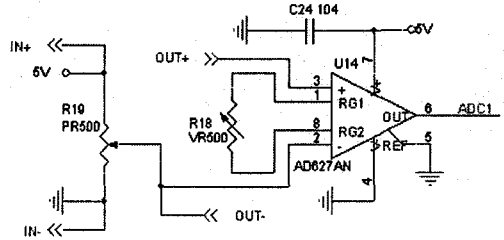


Fig. 13 Electric circuit of amplifier

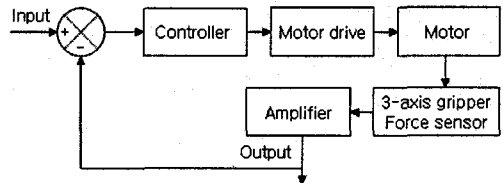


Fig. 14 Block diagram for control system

Fig. 14 는 지능형 그리퍼의 제어 블록도를 나타내고 있으며, 제어기, 모터드라이브, 잡는 모터, 3 축 힘센서 증폭기 등으로 구성되었다. 기준값, 즉 죄는 힘은 물체의 무게가 식 (1)의 계산에 의해 4N 이하는 이하인 경우에는 2N 이고, 그 이상인 것은 물체의 무게를 2 로 나눈 값이다. 제어기에서 모터 드라이브에 인가될 전압이 계산되고, 모터가 구동되어 3 축 힘센서 1 과 2 는 미지물체를 잡으며, 이때 센서로부터 출력되는 신호는 증폭기에서 증폭되어 제어기로 보내진다.

Fig. 15 는 미지물체를 잡는 힘제어를 위한 제어 흐름도를 나타내고 있다. 프로그램 순서는 다음과 같다.

- (1)시스템을 초기화한다.
- (2)제어장치가 잡는 힘 2N(기준값)이 되도록 잡는 모터를 고동시켜 미지물체를 잡는다.
- (3)상하회전모터를 구동하여 그리퍼를 5°로 회전시켜 든다.
- (4)3 축 힘센서 1 과 2 로부터 물체의 무게를 감지한다.
- (5)물체의 무게를 식 (1)에 의해 계산한다.
- (6)계산된 물체의 무게가 0.2N 이하이면 무게가 4N 이상의 물체로 판단하고 기준값을 4N 으로 하고 위의 (2)~(5)과정을 다시 수행한다. 계속 무게값이 없을 경우에는 기준값을 20N 까지 2N 씩 증가시키면서 반복한다.
- (7)계산된 물체의 무게가 0.2N 이상인 경우에는 무게가 0.2~4N 은 잡는 힘 2N 으로 유지하고 그 이상은

물체의 무게를 2로 나누어 계산하여 결정한다. (8) 결정된 잡는 힘을 기준으로 잡는 모터로 물체를 다시 잡는다. (9)상하 및 좌우회전모터를 구동하여 그리퍼를 원하는 위치로 움직인다.

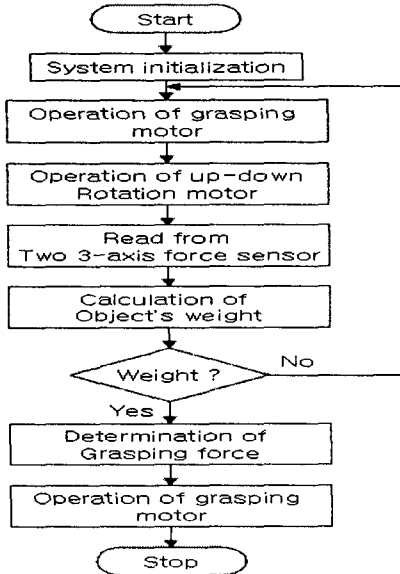


Fig. 15 Flow chart for the control of the intelligent gripper

### 4.3 특성실험 및 고찰

미지물체를 안전하게 잡기 위한 잡는 힘 결정 특성실험을 실시해야 한다. Fig. 16 은 잡는 힘을 결정하기 위한 특성실험장치를 나타내고 있다. 실험방법은 제어장치가 그리퍼를 제어하여 잡는 힘 2~20N 을 2N 단위로 증가시키면서 잡고 각각의 잡는 힘에서 5N 단위의 추를 매달며, 그리퍼와 블록의 접촉면에서 블록이 미끄러짐이 발생할 때 추의 무게를 계산하였다. 그리퍼와 블록의 접촉면적은 800mm<sup>2</sup>(32x25mm)이다. 실험결과 추의 무게는 잡는 힘의 약 2.5 배 이었다. 그래서 잡는 힘은 물체를 안전하게 잡기 위하여 물체의 무게를 2로 눈값으로 결정하였다. 물론 물체를 잡을 때의 접촉면적 달라지면 본 연구에서 결정한 잡는 힘이 불안정한 값이 될 수도 있다.

잡는 힘(x 방향의 힘)은 초기 2N 이고, 식 (1)에 의해 계산된 미지물체의 무게가 0.2~4N 인 경우에는 잡는 힘은 2N 으로 유지된다. 초기 잡는 힘을 2N 으로 결정한 것은 이 힘으로 잡았을 때 달걀이

깨지지 않고 플라스틱 물품통과 같은 물체를 안전하게 잡는 힘으로 실험결과 나타났기 때문이다. 그리고 무게가 4~20N 이상인 경우에는 식 (1)에 의해 계산된 물체의 무게를 2로 나눈 값이 된다.(예; 물체의 무게가 11N 인 경우에는 11N/2=5.5N 임)

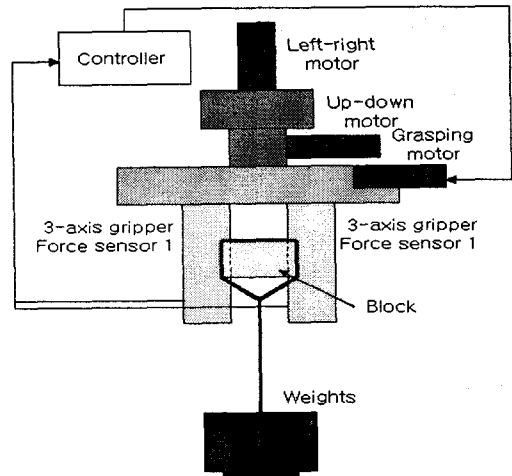


Fig. 16 Block diagram of characteristic test for grasping force of gripper

구성한 제어장치가 미지물체를 잡는 특성실험을 실시하였다. 물체를 잡기 위하여 PI 제어를 실시하였다. PI 제어기의 출력식은 다음과 같다.

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{n=1}^k e(n) \quad (4)$$

여기서  $u(k)$  는 PI 제어기의 k 번째 출력값,  $e(k)$  는 k 번째 오차,  $K_p$  는 비례게인,  $K_i$  는 적분게인,  $\sum_{n=1}^k e(n)$  는 오차의 총합이다.

PI 제어기의 비례게인  $K_p$  과 적분게인  $K_i$  을 구하기 위한 특성실험을 실시하였다. 이들 값들을 구하기 위하여 비례게인 값을 10~90 까지 10 단위로 증가시키면서 적분게인을 0.05~0.40 까지 0.05 단위로 증가시키면서 수동으로 계단응답(unit step response) 특성실험을 실시하였다. 그 결과 비례게인  $K_p$  는 30 이고 적분게인  $K_i$  는 0.15 이다. Fig. 17 은 계단응답 특성실험 결과를 나타내고 있다. 그 결과 오버슈트(overshoot)는 0.1N, 정상상태오차(steady state error)은 0.1N, 상승시간(rising time)는

0.5s 이내이었다. 위와 같은 오차가 발생한 것은 비례게인과 적분게인이 최적의 값이 아니고 제어 장치의 노이즈 때문인 것으로 생각된다. 이와 같은 오차가 매우 적으므로 제어장치가 미지물체를 안전하게 잡는데 큰 영향을 미치지 못할 것으로 생각된다.

개발한 지능형 그리퍼가 미지물체를 안전하게 잡는지를 확인하기 위하여 특성실험을 실시하였다. Fig. 18 는 개발한 지능형 그리퍼가 (a)달걀, (b)플라스틱 폴통, (c)플라스틱 음료수병, (d)추의 물체를 잡은 모습을 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 모두 안전하게 잡는 것을 확인할 수 있다.

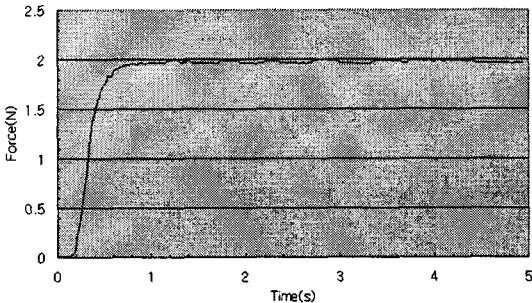


Fig. 17 Unit step response test of the controller

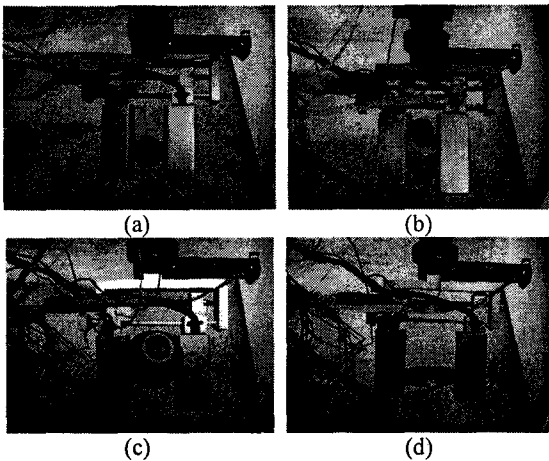


Fig. 18 Photograph of the gripper with objects

### 5. 결론

본 논문에서는 지능형 그리퍼를 구성하기 위한 힘  $F_x, F_y, F_z$  를 동시에 감지할 수 있는 3축 힘센서를 개발하였으며, 2 개의 3축 힘센서를 이용하

여 지능형 그리퍼를 설계 및 제작하였다.

개발한 3축 힘센서는 최대상호간섭오차가 0.9%로 매우 우수함<sup>8</sup>을 확인하였다. 또한 개발한 2개의 3축 힘센서를 이용하여 설계 및 제작한 지능형 그리퍼가 미지물체를 안전하게 잡는 것을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 개발한 3축 힘센서는 미지물체를 안전하게 잡을 수 있는 지능형 그리퍼로 사용될 수 있고, 지능형 그리퍼는 미지물체를 안전하게 잡는데 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

### 참고문헌

1. Domnguez-Lpez, J. A., Damper, R. I., Crowder, R. M. and Harris, C. J., "Adaptive neurofuzzy control of a robotic gripper with on-line machine learning," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.48, No. 2-3, pp.93-110, 2004.
2. Steil, J. J., Rthling, F., Haschke, R. and Ritter, H. "Situated robot learning for multi-modal instruction and imitation of grasping," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.47, No. 2-3, pp.129-141, 2004.
3. Yin, X., Guo, D. and Xie, M., "Handimage segmentation using color and RCE neural network," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.34, No. 4, pp.235-250, 2001.
4. Joseph, C. and Yunhui, "Dynamic simulation of multi-fingered robot hands based on a unified model," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.32, No. 2-3, pp.185-201, 2000.
5. Yabuki, A., "Six-Axis Force/Torque Sensor for Assembly Robots," *FUJTSU Science Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 41-47, 1990.
6. Lee, J., "Apply Force/Torque Sensors to Robotic Applications," *North-Holland Robotics2*, pp. 139-148, 1987.
7. Kim, G. S., "design of 3-component force/moment sensor with force/moment ratio of wide range," *Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 214-221, 2001.
8. ATI INDUSTRIAL AUTOMATION, "Multi-Axis Force/Torque Sensor," *ATI INDUSTRIAL AUTOMATION*, pp.4-45, 2005.