

◆특집◆ 응용역학 CAE 엔지니어링

# 마이크로 머니플레이션을 위한 미세 힘 측정향상 기법

하승화\*, 최병준\*, 인용석\*, Tri Cong Phung\*, 이상무\*\*, 구자춘\*, 최혁렬\*

## Micro-Force Sensing for a Micro Manipulation System

Seung Hwa Ha\*, Byung June Choi\*, Yong Suk Ihn\*, Tri Cong Phung\*, Sang Moo Lee\*\*, J. C. Koo\* and H. R. Choi\*

**Key Words** : Micro manipulation(미세 조작), Micro force measurement(미세 힘 측정), Strain gauge(변형 게이지)

### 1. 서론

현재 초정밀 초소형 기계와 조립시스템의 시장 동향을 살펴보면, 지속적으로 제품이 소형화되어 가고 상품들의 기능들이 끊임없이 통합되어 다기능화 되어가고 있는 추세에 있다.<sup>1,4</sup> 미래형 머신을 요구하는 초소형 부품들은 여러 공정과정을 거치면서 만들어지는데 이러한 공정과정은 매우 정밀한 위치의 응답성과 정교하고 복잡한 컨트롤을 통해서 빠른 정렬 공정을 가진 다기능 처리성능을 요구하게 되어감에 따라 점점 비용이 증가되어가고 있고 미소공정처리과정 중 조립공정을 수행 시 초소형 도구 즉, 초소형 그립퍼를 물체의 표면 또는 작업물체의 면과의 사이에 정확하게 정렬시키는 등의 복잡하고도 정밀한 작업의 요구가 또한 증대되고 있다.<sup>2</sup>

이러함에 micro/nano manipulation에 대한 위치와 힘 측정 기술을 개발하고 연구함으로써 기반기술을 갖출 수 있게 된다.

따라서 이러한 기술은 정밀 구동 시스템 측정 기술의 개발을 무엇보다도 요구하게 되고 따라서 정밀측정 기술을 기반으로 한 vision과 Force sensing 시스템으로부터 피드백된 정보를 획득하고 제어 알고리즘을 구현하는 초정밀 로봇 시스템의 구동 기술을 개발하고 있다. 이는 차세대 IT 제품 시장 및 다분야 시장의 기술변화에 능동적인 대응을 할 수 있는 기반 분야로 자리잡을 수 있을 것이다.

본 논문에서는 저가의 센서를 이용하여 구조적인 변형과 센서의 최적화된 위치구현으로 정밀하고 감도가 매우 높은 예를 들어,  $\mu\text{N}$  또는  $\text{nN}$  단위의 측정이 가능한 힘 측정 프로브를 개발하고 개선함으로써 기반이 되는 정밀 측정 기술을 확보하고 이를 위치제어 알고리즘을 구축한 Vision system과의 통합하여 이를 개발 중인 정밀 로봇 머니플레이션 시스템과 통합될 예정이다.

이 힘 측정 프로브는 듀얼의 반도체형 스트레인 게이지를 이용하여 마이크로 혹은 나노 크기의 물체와 접촉 시에 발생하는 힘과 위치에 대한 정보를 습득할 수 있도록 구현되었고 보다 감도 높은 결과를 습득하기 위해서 게이지의 위치는 이론적으로 계산하고 유한요소해석 및 실험을 실시함으로써 가장 최적화된 위치상에 구현시켰다.

\* 성균관대학교 공과대학 기계공학부  
\*\* 한국생산기술연구원  
Tel. 031-290-7928, Fax. 031-290-7507  
Email : hrchoi@me.skku.ac.kr

## 2. 정밀 로봇 머니플레이션 시스템의 힘 측정 센서의 구조 및 시스템 최적화

### 2.1 반도체형 스트레인 게이지의 특성

마이크로 힘 측정이 가능한 센서를 개발하기 위해서 반도체형 스트레인 게이지를 사용하게 되는데, 이는 다른 센서에 비해서 작은 물체에 부착하기에 용이하고, 출력되는 신호값을 빠르게 확인할 수 있으며, 선형적인 특성 때문에 Calibration이 용이하기 때문이다.

하지만, 게이지는 크게 시스템 및 환경, 신호 습득 과정, 시스템의 입력과 출력, 데이터의 처리과정에 따라 변형률을 측정하는데 영향을 받게 된다. 살펴보면, 시스템 및 환경에는 사용목적에 따른 게이지, 접촉용 본드, 시스템의 보호 및 내외부의 환경에 따라서 영향을 받게 되고, 신호 습득 과정에서는 리드 와이어, 연결 상태에 영향을 받으며, 시스템의 입력과 출력에서는 휘스톤 브릿지의 제작상태, 휘스톤 브릿지의 전원, 전기적인 노이즈에 영향을 받게 된다. 마지막으로 데이터 처리과정에서는 게이지의 위치, Calibration, 재료의 특성 등의 영향이 있다. 이 밖에 부수적인 많은 요인들이 신호에 영향을 미치고 있지만, 소개한 대표적인 영향들을 기반으로 문제점들의 해결방안을 찾아보며 센서를 제작하였다.

### 2.2 힘 측정 센서의 구조

개발된 힘 측정 센서는 Dual 타입의 반도체형 스트레인 게이지를 사용함으로써 작동시키고자 하는 물체와 접촉하는 텅스텐 팁을 통해서 전달되는 일정 지점에서 작용한 임의의 힘을 측정하고 그 때의 위치값을 구현하게 된다.<sup>4,6</sup> Fig.1에서는 스트레인 게이지가 부착되는 위치와 전체적인 구조를 볼 수 있으며, 이에 적용되는 계산식은 아래와 같다. 여기에서  $h$ 는 보의 두께 값을 나타내고,  $E$ 값은 탄성계수 값을 나타내며,  $I$ 는 관성모멘트 값을 나타낸다.

그리고  $x$ 는 고정부로부터 임의의 힘이 작용하는 위치이고,  $x_1$ 는 고정부로부터 첫 번째 스트레인 게이지가 위치하는 지점이며,  $x_2$ 는 고정부로부터 두 번째 스트레인 게이지가 위치하는 지점이다.)

$$\epsilon_1 = \frac{M_1 y}{EI} = \frac{h}{2EI} F(x - x_1) \quad (1)$$

$$\epsilon_2 = \frac{M_2 y}{EI} = \frac{h}{2EI} F(x - x_2) \quad (2)$$

(1)과 (2)식에 의해서 각 위치상의 변형률값이 측정되어지고 이 값은 다음과 같은 (3)과 (4)의식으로 유도되어 최종적으로 적용된 힘과 거리 값을 계산할 수 있게 된다. 여기에서 센서팁은 두 개의 서로 다른 재료로 구성되어 있어  $E_1$ 과  $E_2$ 으로 구분된다.

$$F = \frac{bh^2}{6(x_2 - x_1)} (E_1 \epsilon_1 - E_2 \epsilon_2) \quad (3)$$

$$x = x_1 + \frac{E_1 \epsilon_1}{E_1 \epsilon_1 - E_2 \epsilon_2} (x_2 - x_1) \quad (4)$$

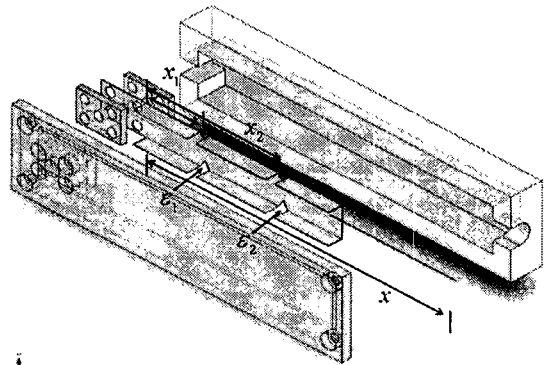


Fig. 1 Schematics for micro force sensing with semiconductor strain gauge

Fig. 1의 구조는 외부로부터 작용하는 요인들에 대하여 영향을 최소화하고 각 위치상에 부착되어있는 반도체형 게이지로부터 측정할 때에 감도를 극대화시킬 수 있도록 고려되어 제작되었다. 즉, 이는 게이지가 부착되는 센서 플레이트가 매우 얇고 (0.1mm) 쉽게 구부러지는 성질을 가지고 있어서 구조적으로 발생하는 진동 및 여러 외부 요인들은 센서에 많은 영향을 끼치게 된다. 따라서 이러한 구조적인 문제점을 해결하기 위해서 고정판에 매우 얇은 고무판을 덧붙여 플레이트의 움직임을 최소화했으며, 'V형' 노치를 최적화된 위치상에 만들어 변형률이 집중될 수 있도록 하였으며, 'C'자형 단면을 형성시켜 플레이트의 강성을 높여 자체적으로 휘어지는 문제점을 해결하였다. 또한 해석프로그램

을 이용하여 보를 시뮬레이션 하였다. 이러한 수행을 함으로써 'V' notch의 깊이와 너비의 최적화된 길이를 결정하여 신호를 측정할 때 보다 감도를 높일 수 있도록 하였다. 그 결과는 아래의 Fig. 2와 같으며, 마지막으로 센서에 커버를 입혀 센서의 틈에 일정 이상의 힘을 가할 수 없도록 함으로서 플레이트의 소성변형을 방지 및 게이지의 손상을 방지하였다.

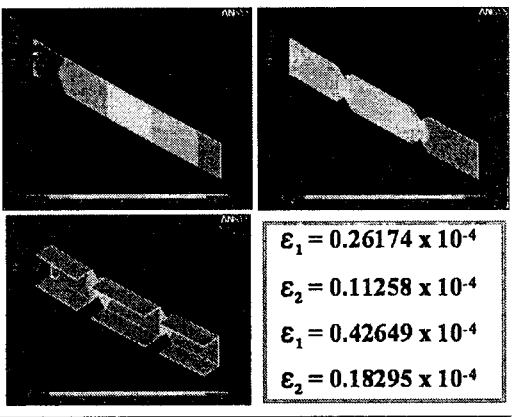


Fig. 2 The simulation results to compare the strain values

### 2.3 센서의 최적화

센서의 위치에 따라서 측정 신호의 값은 달라지는데 예를 들어, 임의의 지점에 힘을 가했을 때 발생하는 측정 변형률 값은 게이지의 위치에 따라서 달라진다. 따라서 작용하는 임의의 힘에 따라 측정되는 변형률 값을 감도 높게 측정할 수 있도록 하기 위한 최적화된 위치구현은 매우 중요하고 또한 이를 구현시킴으로서 시스템의 안정화와 출력신호 값의 정확성을 극대화 시킬 수 있어서 미세측정용 센서를 개발하고 개선하는데 있어서 매우 중요하다. 최적화된 위치는 1D상에서 (5)의 Euler-Bernoulli식을 통해서 보의 횡축진동 동역학을 해석하고 이를 공간상 모델의 상태방정식인 (6)의 식에 적용시켜 보의 끝에 가한 일정량의 힘을 측정하는 최적화된 위치값을 유도하여 구현하였다.<sup>5</sup>

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + 2\zeta \frac{\partial y}{\partial t} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서  $u(t) = [F(t) \ M(t)]^T$ 는 측정될 힘과 모멘트의 입력벡터이고,  $y = [s_1(t) \ s_2(t)]^T$ 는  $x_1$ 과  $x_2$ 에 위치한 게이지로부터 측정신호벡터이다. 행렬  $A \in R^{2N \times 2N}$ ,  $B \in R^{2 \times 2N}$  그리고  $C \in R^{2 \times 2N}$ 는 다음과 같이 계산 된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I_N \\ -\left(\frac{EI}{m}\right)\Lambda^4 - 2\frac{\xi}{m}I_N & \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/m Y_1(L) & \dots & 1/m Y_N(L) \\ 0_{2 \times N} \mid m Y_1 L \frac{\partial^2 Y_1(L)}{\partial x^2} & \dots & 1 \mid \frac{\partial^2 Y_N(L)}{\partial x^2} \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 Y_1(x_1)}{\partial x^2} & \dots & \frac{\partial^2 Y_N(x_1)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 Y_1(x_2)}{\partial x^2} & \dots & \frac{\partial^2 Y_N(x_2)}{\partial x^2} \end{bmatrix} \mid 0_{2 \times N}$$

$$\|U_0 - U\| \leq \sigma_{\min}^{-1}(M)(\|\delta_Y\| + \|\delta_M\| \cdot \|U_0\|) \quad (7)$$

여기서  $Y$ 는 출력값을 나타내고,  $U_0$ 와  $U$ 는 실제 입력 값과 측정 입력값을 나타낸다.  $U_0$ 와  $U$ 사이의 차이는 에러로 볼 수 있고 이는 측정행렬  $M$ 의 최소 특이값  $\sigma_{\min}$ 을 극대화시킴으로서 그 차이를 줄일 수 있다. 이는 식(7)에서 살펴볼 수 있다. 이에 더불어 안정적인 신호값을 측정하기 위해서 전달함수  $G(s) = C(sI - A)^{-1}B$ 를 이용해 각 게이지의 안정적인 위치지점을 수학적 해석으로 유도했다. 아래 Fig. 3과 4를 살펴보면, 최소 특이값이 최대가 되는 지점을 토대로 각각의 게이지의 최적 위치를 추정할 수 있다.

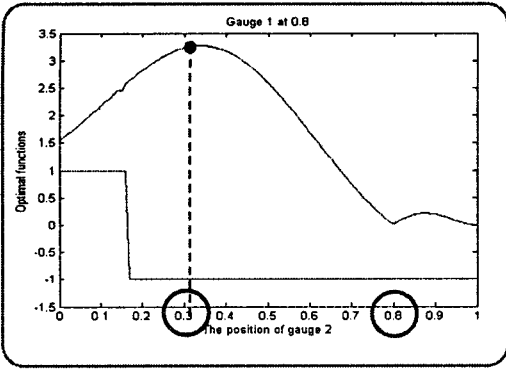


Fig. 3 The optimal position of gauge 1

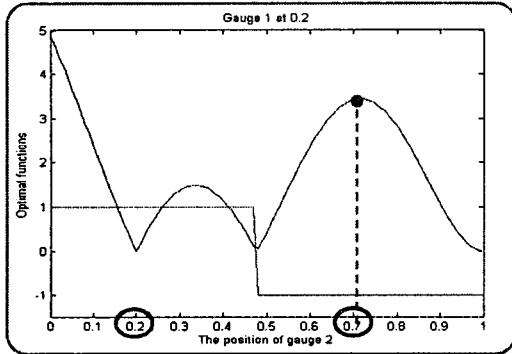


Fig. 4 The Optimal position of gauge 2

이를 최종적으로 3D상태에서의 가장 최적화된 위치값을 찾아 현재의 센서에 확대 적용시켰다. Fig. 5에서 3D상에서 센서의 최적 위치 해석결과에 대한 그림을 볼 수 있다.

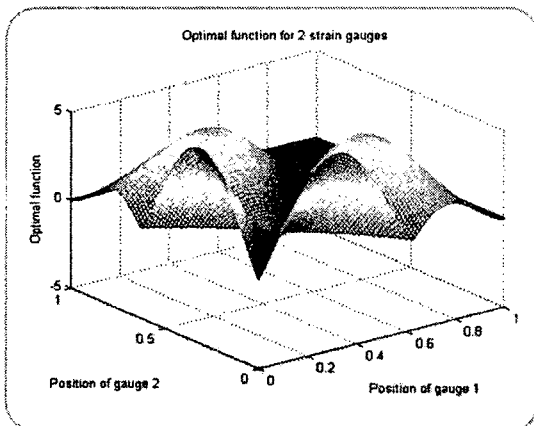


Fig. 5 Optimal function of two strain gauges

이는 Fig.6에서와 같이 ANSYS 구조해석프로그램을 통해서 해석하였고 그 결과에 대한 신뢰성을 확인하기 위해서 계산된 값과의 오차율을 계산하였다. 따라서 그 결과를 보면,  $F_x = 0.1125\%$ ,  $F_y = 0.009\%$ ,  $F_z = 0.0014\%$ 과 거리  $X = 0.0018\%$ 의 오차율이 발생되었다.

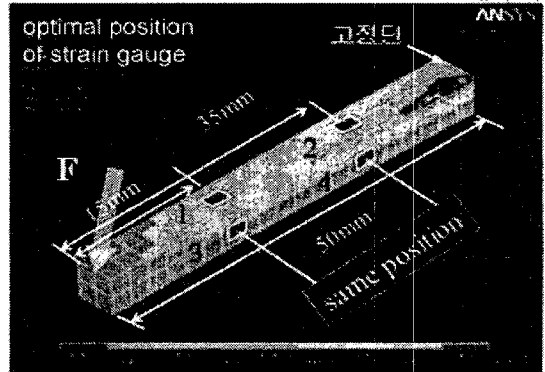


Fig. 6 Optimal position of strain gauge for 3D measurement

위의 개발된 센서는 현재 개발 중인 정밀 로봇 머니플레이션 시스템에 통합될 예정이며, 4자유도를 가지는 초정밀 시스템의 머니플레이터상에 임베드되어 마이크로 비전을 통해서 인식된 물체에 대한 정보와 통합되고 이를 바탕으로 한 정보를 통해서 목표하고자 하는 지점으로 정확히 위치시키는 작업을 실시함으로써 물체의 손상을 방지하여 원하는 위치상으로 안전하게 물체를 위치시키는 시스템을 구축하는 데 궁극적인 목적이 있다. Fig. 7은 개발 중인 정밀 로봇 머니플레이션 시스템이다..

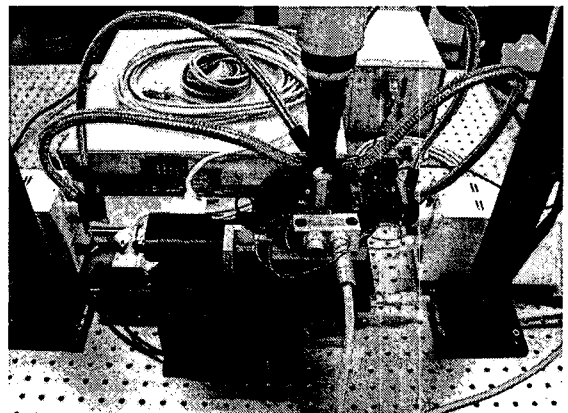


Fig. 7 high precision robot manipulation system

### 3. 실험

실험은 다음과 같은 단계로 측정을 실시하였다. 우선, 작은 물체를 저울(Mettler-Toledo)위에 올리고, 동일한 물체를 제작된 힘 측정 센서에 올려 측정된 값을 교정과정을 통해서 출력된 최종 실험 결과값을 실제의 값과 비교하여 증명하였다.

이 신호는 다음과 같은 경로로 최종 데이터를 확인하게 되는데, 우선 두 개의 스트레인 게이지로부터 측정된 신호값은 자체 제작된 아날로그 OP-Amp를 거쳐 신호가 증폭되고, 이 값은 NI社의 DAQ보드를 통해서 PC상으로 전달되어 구현되어진 알고리즘을 통해 최종적으로 GUI형태로 최종 값을 확인하게 된다. 측정된 신호값은 노이즈를 포함하고 있어 FFT분석을 통해 이 값을 해석하고 OP-Amp상에 수개의 Low Pass Filter를 구현하여 노이즈를 제거하였다. 또한 상위 개발된 구조에서 설딩 역할을 할 수 있도록 커버를 제작함으로써 외부로부터 작용하는 영향을 최소화 시켰다. 현재 사용하고 있는 반도체형 스트레인 게이지는 Kyowa 社의 KSPH-4-2K-E4타입을 사용하고 있으며, 반도체형 게이지는 일반적으로 사용하고 있는 foil타입의 게이지에 비해서 게이지 팩터값이 크기 때문에 sensitivity가 우수하여, 작은 힘을 측정하는데 있어서 보다 효과적이라고 할 수 있다.<sup>3</sup> 하지만 크게 온도와 게이지의 압착상태, 회로의 노이즈 및 주변 환경 예를 들어, 진동이나 움직임에 따른 바람의 영향 등은 마이크로 힘을 측정하는데 오차요인으로 작용한다.

따라서, 저울과 현미경 및 각종 정밀도구를 이용하여 센서 팁에 반도체형 게이지를 부착하는 과정에서 발생될 수 있는 오차를 최소화할 수 있도록 했고, 회로를 통해서 발생하는 노이즈를 제거하고 이를 안정화시키기 위해 회로를 설딩처리 하였다. 센서의 커버에는 실리콘 코팅을 하여 센서의 리드와이어에서 발생할 수 있는 합선문제를 처리하였고, 각 조인트 부분에서 발생할 수 있는 에러를 줄이기 위해 코팅처리 하였다. 그리고 회로는 각 게이지에서 출력되는 신호가 서로에게 영향을 미칠 수 있음을 감안하여 독립적으로 회로를 구성하였다. 실제로 1mg이하의 무게를 측정하는 저울의 경우 온도와 진동 등에 대한 강인성을 가지기 위해서 이중으로 커버를 제작하여 측정 지역을 진공상태에 가깝도록 만들고 있으며, 이외 온

도에 대한 교정 및 필터기능을 갖추어 시판하고 있다. 따라서 1 $\mu$ N이하의 힘을 측정하기 위해서는 특별한 외부환경을 조성해야 할 필요가 있다. Fig. 8은 실제 측정 센서의 사진을 볼 수 있다.

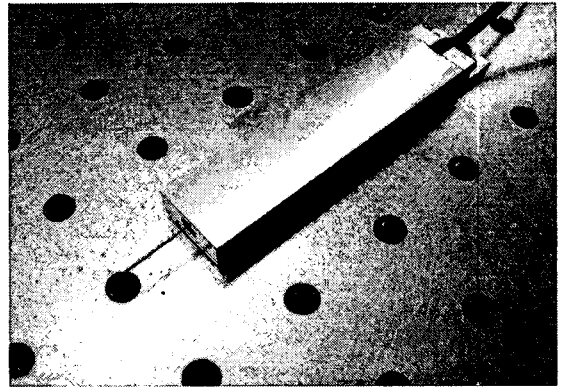


Fig. 8 Product to measure force and distance

아래의 결과는 임의의 작은 물체부터 단계별로 약간씩 큰 물체를 저울에서 측정한 결과값과 동일한 물체를 제작된 센서에 같은 단계로 올려 측정한 결과를 아래의 Table 1과 2에 기술하였다. 결과를 살펴보면, 힘 측정 상에서 발생하는 에러는 이미 언급한 바와 같이 측정 환경에서 발생 문제점에서 발생되며, 이는 앞으로 측정환경 개선을 통해서 극복되어야 할 과제이다.

Table 1 comparison of measured force value

No.	Actual applied force ( $\mu$ N)	Measured force ( $\mu$ N)	Error (%)
1	0.882	0.824	6.57
2	0.98	0.927	5.4
3	2.156	2.059	4.49
4	6.958	6.589	5.3
5	8.134	7.825	3.79
Average			5.11

Table 2 comparison of measured distance value

No.	Actual distance (mm)	Measured distance (mm)	Error (%)
1	88.50	90.34	2.03
2	88	90.79	3.17
3	87.50	90.87	3.85
4	89	88.08	1.03
5	87.50	88.37	0.99
Average			2.22

#### 4. 결 론

본 연구는 불량 배치된 부품의 검출 및 정렬 작업을 수행하기 위한 정밀 머니플레이션 기술을 개발하기 위해서 스트레인 게이지와 다축 F/T 센서를 이용하여 불량 배치 부품의 접촉력 및 접촉 위치 정보를 획득하는 센싱 시스템을 개발하는 단계부터 시작하게 되었다. 이로부터 정밀한 조립과정 및 목표지점에 정확히 위치시킬 수 있는 정밀 머니플레이션 시스템으로 개선되는 과정에서 측정 센서도 또한 보다 작은 물체의 힘을 측정할 수 있는 마이크로 단위의 측정 센서로 개선이 필요했다. 따라서 구조적인 개선 및 최적화된 위치를 구현하여 보다 작은 힘을 안정적으로 측정 할 수 있도록 제작하여 개선하였다. 이는 향후 실시간으로 마이크로 머니플레이션 작동이 가능한 로봇 시스템에 임베드되어 수  $\mu\text{N}$ 의 힘을 측정할 수 있는 마이크로/나노 측정 시스템을 구축할 예정이다. 더불어 현재 Vision 시스템을 기반으로 개발된 pseudo real time 위치 추정 알고리즘을 통해서 매니플레이터와 임의 형상 물체 그리고 최종 목표 지점의 위치 정보를 인식하여 획득하게 된다. 이로써 개발된 힘 센서로부터의 정보와 실시간으로 통합 비교됨으로서 정밀 위치/힘 제어 기술을 갖춘 정밀 로봇 머니플레이션을 구축하게 될 것이다.

마이크로 힘 측정 실험을 통해 나타난 문제점들 즉, 게이지의 특성에 따른 신호상태, 게이지의 부착 상태, 통합회로에서 발생하는 노이즈, 및 측정시에 발생하는 내외부적인 환경요소 등을 일목요연하게 정리하고 대체방안을 모색해 봄으로서 향후 구축될 시스템에 적합한 안정하고도 정밀한 센서를 개발할 수 있도록 연구할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 성장동력 증기거점/차세대 신기술개발사업의 일환인 “지능형 극 초정밀 생산 로봇 기술 개발”의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Shen, Y., Xi, N. And Li, W. J., “Force-guided assembly of micro mirrors,” International

Conference on Intelligent Robots and System, Vol. 3, pp. 2149-2145, 2003,(IROS 2003),

2. Winder, E., Shen, Y., Xi, N., Sheng, W., Wejiniya, U. C. and Pomeroy, A., “Optimal Control Based Active Force Sensing System for Micromanipulation,” Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 402-407, 2005.
3. Bicchi, A., Salisbury, J. K. and Brock, D.L., “Contact sensing from Force Measurements,” International Journal of Robotics Rearsch, Vol. 12, No. 3, pp. 249-262, 1993.
4. Choi, B. J., Ryu, S. H., Ha, S. H., Cong, T. C., Koo, J. C., Park, S. D., Lee, S. L. and Choi, H. R., “Development of Multi-axial Mcriro Force Measurement Method for Electronic Device Assembly,” SCIE-ICASE International Joint Conference, pp. 1380~1384, 2006.
5. Bicchi, A., Caiti, A. and Prattichizzo, D., “Optimal design of dynamic multi-axis force/torque sensor,” Proceedings of the 38th, Conference on Decision and Control, Phoenix, Arizona USA, Vol.3, pp.2981-2986, 1999.
6. 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,” Institute of Physics Publishing, Measurement Science and Technology, pp. 1265-1274, 2003.
7. Sun, Yu, Potasek, D. P., Plyabongkam, D., Rajamani, R. and Nelson, B. J., “Actively Servoed Multi-Axis Microforce Sensors,” Internatioinal Conference on Robotics & Automation Taipei, Taiwans, Vol. 1, pp. 294-299, 2003.
8. Carrozza, M. C, Eisinbeg, A., Menciassi, A., Campolo, D., Micera, S. and Dario, P., “Towards a force-controlled microgripper for assembling biomedical microdevices,” Jorunal of Microméchanics and Microengineering, Vol.10, No.2, pp.271-276, 2000.