

〈論 文〉

## 분포센서를 가진 인공지의 $H_\infty$ -힘제어

$H_\infty$ -Force Control of a Artificial Finger with Distributed Force Sensor and Piezoelectric Actuator

이재정\* · 유춘성\* · 홍동표\*\* · 정태진\*\*\* · Seiji Chonan\*\*\*\*  
· 정길도\*\*\*\*\* · 노태수\*\*\*\*\*

Jae-Jung Lee, Chun-Seong Yu, Dong-Pyo Hong, Tae-Jin Chung, Seiji Chonan,  
Kil-To Chong and Tae-Soo No

(1996년 4월 3일 접수 ; 1996년 8월 2일 심사완료)

**Key Words :** Artificial Finger(인공지), Distributed Sensor(분포센서),  $H_\infty$ -controller( $H_\infty$ -제어기), Piezocer-amic(압전소자)

### ABSTRACT

This paper is concerned with the theoretical and experimental study on the force control of a miniature robotic finger that grasps an object at three other positions with the fingertip. The artificial finger is a uniform flexible cantilever beam equipped with a distributed set of compact grasping force sensors. Control action is applied by a piezoceramic bimorph strip placed at the base of the finger. The mathematical model of the assembled electro-mechanical system is developed. The distributed sensors are described by a set of concentrated mass-spring system. The formulated equations of motion are then applied to a control problem in which the finger is commanded to grasp an object. The  $H_\infty$ -controller is introduced to drive the finger. The usefulness of the proposed control technique is verified by simulation and experiment.

### 1. 서 론

로봇이 발전함에 따라 로봇 손의 고기능화, 고정밀화가 점점 요구되고 있다. 작업의 능률성 향상과 작업환경 개선 등은 물론 에너지의 절약을 위한 자동화가 크게 발전하고 있다. 로봇은 다양한 환경에 도입되고, 다양한 물체를 파지하는 기회가 증가하고

있다. 특히, 장래 반도체 생산 공정이나, 생체 공학, 의학 관련 분야에서는 유연하고 부스러지기 쉬운 작은 물체를 파지하는 필요성이 생기며, 살아 있는 생물을 잡는 경우에 살아 있도록 손상을 주지 않고 물체를 잡을 필요가 있다. 이와 같은 바이오 테크놀러지가 있는 작업의 특징은, 미세한 상처나기 쉬운 조직이나 생물체를 무균상태로서 부드럽게 취급하지 않으면 안된다. 이와 같은 모든 작업은 조작하는 사람의 개입으로 잡균에 의한 오염이 최대 원인이 되고 있다. 이와 같은 점에서 보면, 최근에 다종의 바이오 테크놀러지용 로봇 그리퍼의 개발이 수행되어 유연한 수작업이 가능하다고 생각된다.

최근 로봇 손에 관해서 수많은 보고가 되고 있다. 일반적으로 이의 연구는 액츄에이터로서 서보 모터가 사용되며, 동력을 마모가 있는 보 나사에 의해

\*전북대학교 대학원

\*\*정회원, 전북대학교 공과대학 정밀기계공학과

\*\*\*정회원, 군산대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\*\*일본동북대학공학부

\*\*\*\*\*전북대학교 공과대학 제어계측공학과

\*\*\*\*\*전북대학교 공과대학 우주항공공학과

관절로 전달하는 방법이 채용되고 있다. 그러나 이와 같은 구동계는 마모의 compliance나 마찰 backlash에 의해 임의 전달계에 hysteresis나 먼지 발생이 생기며 고속-고정도 위치 결정이나 미소력 제어의 실현이 곤란하며 소형화에도 한계가 있다. K. Ikuta는 형상기억 합금을 액츄에이터로서 사용한 마이크로 그리퍼를 개발하여, 손끝의 변위제어 및 파지력 제어를 행했다. 그러나 형상기억 합금은 환경의 변화(특히 온도의 변화 등)에 의해 영향 받기 쉽다. 고정밀도가 없고 응답속도가 늦는 등 문제가 있다. 이것에 비해 압전소자는 소자의 질량에 비해 발생력이 크고, 힘의 반복성이 좋고, 내열성이 있는 등의 특징을 가지며 기구의 고속고정밀과 소형화가 가능하다. 또한 로봇 손을 청정실 내의 반도체 제조 가공 공정에 사용하도록 한 경우는 마찰에 의한 먼지의 발생이 생기지 않도록 하지 않으면 안되며, 압전소자는 이 조건도 만족하는 구동원의 하나로서 위치 결정에 사용되고 있다.

대상을 파지하기 위해서는 파지력을 정확히 제어할 필요가 있어 이를 위해 힘 제어형 로봇팔, 로봇손에 대한 연구가 많이 있다. 이와 같은 연구에 대한 제어법으로서 주로 PID제어나 최적제어, 적응제어가 적용되고 있다. 최근, 강건한 제어설계를 위해  $H_\infty$ 제어이론이 많이 연구되고 있으며,  $H_\infty$  이론을 사용할 경우 모델로 표현되지 않는 불확실성을 고려한 제어계를 설계하는 일이 가능하다. 파지동작에 관한 많은 연구가 되고 있지만, 전부가 손의 선단에 대해 논술하고 있다. 그러나 인간의 손은 감각점이 많이 분포되고 있기 때문에, 손 전체가 센서 기능을 겸하고 있어서, 손끝의 대부분의 다양한 점에서 대상을 일정력으로 파지하는 일이 가능하다. 그래서 인간의 손과 같은 마이크로 핑거에 분포센서를 부착할 필요가 있다. 마이크로 핑거에 분포센서를 임의로 부착하는 것은 곤란하다. 센서를 0.61 지점, 0.81 지점, 0.01 지점에 대상물과 핑거와의 사이에 설치하여 계측하는 구동제어법을 제안하였다.

이상의 관점에서 볼 때, 본 연구는 압전소자를 액츄에이터로 하는 핑거의 모델에 관하여, 각각 3지점에 접촉점이 위치하도록 한, 분포센서를 가진 핑거의 모델에 대하여, 모델변수(접촉점의 위치변동)의 영향을 고려하고, 공칭모델과 실제제어 대상에 대한 가법적오차를 적용하여, 가법적오차에 대한 중합수와 감도함수에 대한 중합수를 설계하여 제어하는 구동제어법으로서, 이론해석 및 실험에 의해 구동제어 특성을 검토하였다.

## 2. 이론해석

인간의 손은 감각점이 다수 분포되고 있어, 각점의 힘의 정보에 의해 미세한 힘제어가 가능하다. 그러나, 인공손으로 인간의 감각을 실험하기 위해서는 다수의 미소 센서가 필요하며, 센서의 수가 많을수록 실험 시스템이 복잡하다. 본 연구에서는 인공손이 대상을 파지하는 접촉점이 위치가 어디에 있던 지간에 일정력으로 파지하는 인공지제어 구동법을 적용한다.

### 2.1 핑거의 모델화

본 해석에서 취급한 모델은 Fig. 1에 있으며 분포센서를 가진 핑거이다. 이것은 구리 박막보의 근원에 바이옴형 압전소자를 붙인 것으로서, 구리보를 파지영역으로 하여 힘 센서를 1개 가지고 있다. 이 모델에서 압전소자의 길이는 핑거 전체의 약 절반이다. 센서의 설치점은 파지영역의 근원부근, 중앙부근, 선단에 대하여 각각  $x_1=0.6l$ ,  $x_2=0.8l$ ,  $x_3=1.0l$ 로 된다.

### 2.2 핑거의 운동방정식 도출

핑거는 구리보와 세라믹 압전소자로 구성되어, 핑거의 단위길이당의 질량  $\rho A(x)$ , 굽힘강성  $EI(x)$ 는

$$\rho A(x) = \begin{cases} \rho_b A_b & (\text{for } a \leq x \leq l) \\ \rho_p A_p & (\text{for } 0 \leq x \leq a) \end{cases} \quad (1)$$

$$EI(x) = \begin{cases} E_b I_b & (\text{for } a \leq x \leq l) \\ E_p I_p & (\text{for } 0 \leq x \leq a) \end{cases} \quad (2)$$

윗식에 있어서  $\rho_b$ ,  $A_b$ ,  $E_b$  및  $I_b$ 는 구리보의 밀도, 단면적, 종탄성계수 및 단면 2차 모멘트로  $\rho_p$ ,  $A_p$ ,  $E_p$  및  $I_p$ 는 압전소자의 밀도, 단면적, 종탄성계수 및 단면 2차 모멘트이다.

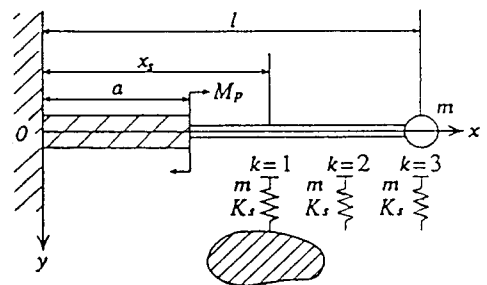


Fig. 1 Analytical model of finger

핑거의 운동방정식은

$$\begin{aligned} & [\rho A(x) + \sum_{s=1}^3 m\delta(x-x_s)] \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \\ & + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EI(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] \\ & = M_p [\delta'(x) - \delta'(x-a)] - F_s \end{aligned} \quad (3)$$

로 얻어진다.

윗식에 따른 핑거의 내부감쇠를 고려하면, 압전소자를 가진 플렉시블 핑거의 운동방정식은

$$\begin{aligned} & [\rho A(x) + \sum_{s=1}^3 m\delta(x-x_s)] \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \\ & + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EI(x) \left( 1 + c \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] \\ & = M_p [\delta'(x) - \delta'(x-a)] - F_s \end{aligned} \quad (4)$$

로 된다. 여기서  $c$ 는 핑거의 내부감쇠계수로 된다. 힘센서를 붙여 핑거에 작용하는  $F_s$ 는

$$F_s = K_s y(x_s, t) = K_s y(x, t) \delta(x-x_s) \quad (5)$$

와 같이 생각된다. 식 (5)를 식 (4)에 대입하면 압전소자를 가진 소형 플렉시블 핑거의 운동방정식은

$$\begin{aligned} & [\rho A(x) + \sum_{s=1}^3 m\delta(x-x_s)] \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \\ & + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EI(x) \left( 1 + c \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] \\ & + K_s y(x, t) \delta(x-x_s) \\ & = M_p [\delta'(x) - \delta'(x-a)] \end{aligned} \quad (6)$$

로 된다.

### 2.3 변위 모드 함수의 결정 및 상태방정식과 출력 방정식

운동방정식 (6)의 해를 구해 계의 모드함수를 구한다. 식 (6)에서 소자에 의한 모멘트  $M_p$ 을 0으로 놓으면 핑거의 자유진동의 운동방정식은

$$\begin{aligned} & [\rho A(x) + \sum_{s=1}^3 m\delta(x-x_s)] \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \\ & + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EI(x) \left( 1 + c \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] \\ & + K_s y(x, t) \delta(x-x_s) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

로 된다. 핑거는 근원에 압전소자를 가진 보이며 단면은 불연속으로 된다. 식 (7)의 해를 다음과 같이 가정한다.

$$y(x, t) = w^j(x) e^{pt} \quad (8)$$

이것을 식 (7)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} & [w^j(x)]_{xxxx} \\ & = \frac{p^2 \rho A(x)}{EI(x)(1+cp)} w^j(x) \\ & + \frac{mp^2}{EI(x)(1+cp)} w^j(x) \delta(x-x_s) \\ & + \frac{K_s}{EI(x)(1+cp)} w^j(x) \delta(x-x_s) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

로 된다. 여기서

$$[w(x)]_{xxxx} = \frac{d^4 w(x)}{dx^4} \quad (10)$$

로 된다. 식 (9)을 라플라스 변환하여 그것을 정리하여 역변환하여 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} W(x) &= A^j S(\xi^j x) + B^j T(\xi^j x) \\ &+ C^j U(\xi^j x) + D^j V(\xi^j x) \\ &+ \sum_{s=1}^3 \alpha^s \xi^s w(x_s) V[\xi^s(x-x_s)] H(x-x_s) \\ &+ \beta^s \xi^s w(x_s) V[\xi^s(x-x_s)] H(x-x_s) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$\begin{aligned} (\xi^j)^4 &= -\frac{(\rho A)^j p^2}{(EI)^j (1+cp)} \\ \alpha^j &= \frac{mp^2}{E_b I_b (1+cp)} \\ \beta^j &= \frac{K_s}{E_b I_b (1+cp)} \\ S(\xi x) &= \frac{1}{2} [\cosh(\xi x) + \cos(\xi x)] \\ T(\xi x) &= \frac{1}{2} [\sinh(\xi x) + \sin(\xi x)] \\ U(\xi x) &= \frac{1}{2} [\cosh(\xi x) - \cos(\xi x)] \\ V(\xi x) &= \frac{1}{2} [\sinh(\xi x) - \sin(\xi x)] \end{aligned} \quad (12)$$

핑거의 모드함수 식 (7)을 사용 식 (6)의 해를

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^N w_n^j(x) f_n(t) \quad j=1, \text{ II} \quad (13)$$

로 하여 식 (13)을 식 (6)에 대입하면

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^N [\rho A(x) + \sum_{s=1}^3 m\delta(x-x_s)] w_n^j(x) \ddot{f}_n(t) \\ & + \sum_{n=1}^N EI(x) [w_n^j(x)]_{xxxx} [f_n(t) + c \dot{f}_n(t)] \\ & + \sum_{n=1}^N K_s w_n^j(x) \delta(x-x_s) f_n(t) \\ & = M_p [\delta'(x) - \delta'(x-a)] \end{aligned} \quad (14)$$

로 되어 식 (14)에 갤러킨법을 적용하여 얻어진 식을 정리하면 매트릭스 표시의 운동방정식이 얻어진다.

$$M\ddot{F}(t) + \Gamma\dot{F}(t) + KF(t) = UM_p(t) \quad (15)$$

여기서  $M$ ,  $\Gamma$ ,  $K$  및  $U$ 의 매트릭스 요소는 각각

$$\begin{aligned} m_{ij} &= \int_0^l [\rho A(x) + \sum_{s=1}^3 m \delta(x-x_s)] w_j(x) w_i(x) dx \\ \gamma_{ij} &= \int_0^l c EI(x) \frac{\partial^4 w_j(x)}{\partial x^4} w_i(x) dx \\ k_{ij} &= \int_0^l \left[ EI(x) \frac{\partial^4 w_j(x)}{\partial x^4} + K_s w_i(x) \delta(x-x_s) \right] w_i(x) dx \\ u_i &= \int_0^l [\delta'(x) - \delta'(x-a)] w_i(x) dx \\ i, j &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (16)$$

로 생각한다. 식 (15)를 연속시간계의 상태방정식으로 표시하면

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A'_c x(t) + B'_c M_p(t) \\ F_s(t) &= C'_c x(t) \end{aligned} \quad (17)$$

로 된다. 여기서

$$\begin{aligned} x(t) &= \begin{bmatrix} F(t) \\ \dot{F}(t) \end{bmatrix} \\ A'_c &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}\Gamma \end{bmatrix} \\ B'_c &= [0 \ M^{-1} \ U]^T \\ C'_c &= K_s [w_1 \ \dots \ w_n, \ 0 \ \dots \ 0] \end{aligned} \quad (18)$$

로 된다. 상태량  $x(t)$ 를  $x(t) = [f_1(t) \ \dot{f}_1(t) \ \dots \ f_N(t) \ \dot{f}_N(t)]^T$ 로 치환하여 식 (17)을 표시하면

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_c x(t) + B_c M_p(t) \\ F_s(t) &= C_c x(t) \end{aligned} \quad (19)$$

로 된다. 여기서  $A_c$ ,  $B_c$ ,  $C_c$ 은  $A'_c$ ,  $B'_c$ ,  $C'_c$ 을 치환한 것으로 된다. 팔을 디지털 제어계로 구동 제어하는 것으로 샘플링 주기  $T$ 로 이산화하면 상태방정식 및 출력방정식은

$$\begin{aligned} x(i+1) &= Ax(i) + BM_p(i) \\ F_s(i) &= Cx(i) \end{aligned} \quad (20)$$

로 된다. 여기서

$$\begin{aligned} A &= \exp[A_c T] \\ B &= \int_0^T \exp[A_c \tau] d\tau B_c \\ C &= C_c \end{aligned} \quad (21)$$

로 된다.

### 3. 핑거 시스템 및 구동제어법

마이크로 핑거는 손 자체가 작으므로, 손 자신에 분포 센서를 부착하는 것은 곤란하다. 이 장은 그것을 위해 센서 부분을 별도로 제작하여, 대상물과 파지하는 경우에는 파지물체와 손 간에 센서집합체를 삽입하여, 이것을 측정하여 정보를 얻어 제어를 행하는 제어법을 제안한다.

Fig. 1에 제안한 모델을 표시한다.  $x_1=0.6l$ ,  $x_2=0.8l$ ,  $x_3=1.0l$ 의 위치에 접촉한 경우의 구동제어 특성에 대해 검토한다.

#### 3.1 접촉력 센서

로봇 핑거가 유연하고 부스러지기 쉬운 작은 물체를 파지하기 위해서는 파지력을 미소하게 제어할 필요가 있어, 미소한 힘을 측정 가능한 고감도, 고정도 접촉력 센서가 필요하다. 본 연구에서는 수 그램 중력을 측정가능한 고정도 힘센서를 시험제작했다. 시험제작한 센서는 두께 0.1mm의 동판과 두께 3mm 고무판 사이에 고감도 반도체 스트레인 게이지(KYOWA KSP-2-E4)를 부착, 동판측에 점접촉이 되도록 압전핀으로 물체를 잡아 그것을 접촉점으로 하여, 게이지의 출력전압에 의해 접촉력을 계측하는 것이다. 센서에 하중을 부하, 제하시, 센서의 출력전압을 측정하여 결과를 Fig. 2에 표시한다. 그림은 0~0.08N(0~8.16g중)의 하중에 대한 센서의 출력전압으로 되어 부하, 제하 모두 6번 측정을 행했다. 그림에 의해 부하, 제하시 모두 선형성이 있어, 수 그램중의 미소한 힘의 계측이 가능하다. 겹 애드저

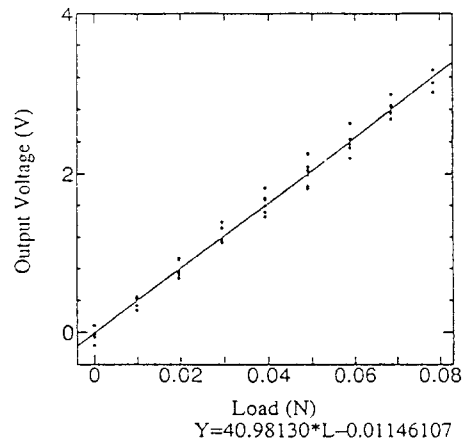


Fig. 2 Characteristic of contact force sensor

스터(gap adjuster)로 센서를 부착한 강제벽과 접촉시킨 강제벽과 센서간의 변위를 갭 애드저스터를 사용하여 0~10  $\mu\text{m}$ 로 눌러 부착한 경우의 출력전압을 측정한다. 이 경우 대상물과 센서 사이에 거리를 갭 애드저스터를 기준으로 하여 움직여서 레이저 변위계를 사용하여 변위를 측정하고, 힘센서의 출력전압을 측정한 결과를 Fig. 3에 표시한다. 그림에 의해 변위와 출력전압에도 선형성이 있음을 알 수 있다. 이것에 의해 센서는 등가스프링으로 모델화한 일은 타당하며, 센서의 스프링 정수  $K_s$ 은 Fig. 2와 Fig. 3에 의해 구하면

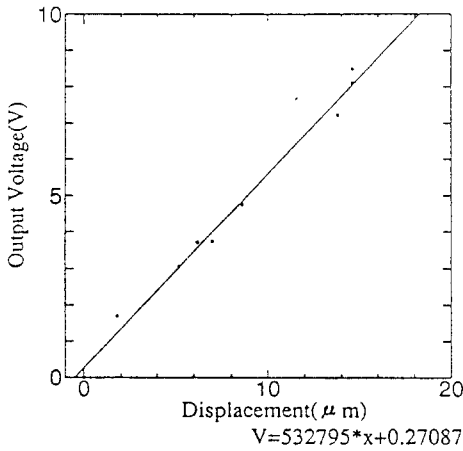


Fig. 3 Characteristic of contact force sensor

Table 1 Physical parameters of finger

	동체보부	압전소자
길이(m)	$51.5 \times 10^{-3}$	$29.7 \times 10^{-3}$
폭(m)	$7.10 \times 10^{-3}$	$12.0 \times 10^{-3}$
두께(m)	$0.33 \times 10^{-3}$	$0.65 \times 10^{-3}$
밀도( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$8.67 \times 10^{-3}$	$8.3 \times 10^{-3}$
Young율( $\text{N}/\text{m}^2$ )	$102.5 \times 10^9$	$58.03 \times 10^9$
내부감쇠율(s)		$2.9836 \times 10^{-5}$
센서질량(kg)		$0.71 \times 10^{-3}$
선단질량(kg)		$1.5 \times 10^{-3}$
스프링 상수( $\text{N}/\text{m}$ )		$13.000 \times 10^3$

Table 2 Natural frequency of clamped-free finger

	이론치	실험치
고유진동수(Hz)	21.7	21.0

$$K_s = 13.000 \times 10^3 (\text{N}/\text{m}) \quad (22)$$

로 된다.

### 3.2 압전소자 및 플렉시블 핑거

핑거의 구리보부와 압전소자의 물성치를 Table 1에 표시한다. 핑거를 일단고정-일단자유 경계조건으로 FFT해석기를 사용 측정된 진동수와, 수치계산에 의해 구한 고유진동수를 Table 2에 표시한다. 내부감쇠계수와 핑거를 자유진동시킨 경우에 얻어진 시간응답 곡선에 의해 대수감쇠율을 구해 결정했다. 센서의 위치를  $x_s=0.6l, 0.8l, 1.0l$ 로 변화시킨 핑거에 접촉하고 있는 경우에 측정된 진동수와, 수치계산에 의해 구한 자유진동수를 Table 3에 표시한다. 그러나  $x_s=1.0l$ 가 접촉점으로 된 경우는 발생변위가 작기 때문에 교류전압 50 Hz의 값이 최대치로 되어, 소음과 혼합되어 진동수가 알 수 없다.

Table 3 Natural frequency of clamped-free spring supported finger

$x_s$ 점	이론치	실험치
1.01	168(Hz)	-
0.81	74.5(Hz)	74.5(Hz)
0.61	30.8(Hz)	34.5(Hz)

Table 4 Theoretical natural frequency at the point of contact

제어사양	지정극
$O_s=10\%, t_s=0.1(\text{sec})$	$-0.8331 \pm 0.1835i$
$O_s=5\%, t_s=0.3(\text{sec})$	$-0.9469 \pm 0.0527i$
$O_s=1\%, t_s=0.5(\text{sec})$	$-0.9685 \pm 0.0210i$

Table 5 PID-Gain at the point of contact

제어사양	PID gain	주요극
$O_s=10\%, t_s=0.1(\text{sec})$	$G_D=0.0011$ $G_V=0.0021$ $G_I=0.03$	$-0.8362 \pm 0.1625i$
$O_s=5\%, t_s=0.3(\text{sec})$	$G_D=0.001$ $G_V=0.002$ $G_I=0.042$	-0.9462
$O_s=1\%, t_s=0.5(\text{sec})$	$G_D=0.001$ $G_V=0.00115$ $G_I=0.076$	-0.9431

그리고 센서를 각각 3점에 접촉시킨 상태로 압전 소자에 함수 발생기를 연결하여,  $20\nu_{p-p}$ 의 정현파 전압을 압전소자에 인가하여 주파수를 변화시킨 경우의 접촉점의 변위를 레이저 변위계(KEYENCE LC2100 LC-2220)로, 접촉력을 앞의 센서에 의해 측정했다. 얻어진 힘 및 변위의 주파수 응답을 Fig. 4~6에 표시한다. 횡축은 주파수, Y축은 발생변위, r축은 발생력이다. 그림중 실선은 발생변위, 파선은 발생력이다.

Fig. 4와 5는 자유진동으로 구한 고유진동수와 폭이 같은 주파수로, 최대치가 보인다. Fig. 6은 센서가  $x_s=1.0l$ 점으로 접촉점으로 된 경우는 1차 고유진동수 152 Hz에 최대치가 보이지만, 118 Hz에도 최대치가 보인다. 이것은 핑거가 일단고정 일단자유의 경우의 2차 고유진동수로 되어, 진동이 발생하기 때

문이다. 힘 센서와 핑거의 접촉 위치에 따라 고유진동수가 다르게 되어, 접촉점이 선단에 가까울수록 고유진동수가 높게 됨을 알 수 있다. 이것에 의해 실험치와 계산치는 일치하고 있어 본 해석방법은 타당함을 알 수 있다.

### 3.3 시스템 구성

본 실험에서 사용한 장치의 개략도를 Fig. 7에 표시한다. 장치는 플렉시블 핑거로 구성시킨 기구부, 접촉점의 힘을 측정한 접촉력 센서, 센서의 정보 전달에 사용하는 프리 앰프, 압전소자의 구동에 사용하는 파워 앰프 및 센서의 정보를 기록해석하여 제어입력을 발생시키는 제어부(A/D 변환기, 컴퓨터, D/A 변환기)에 의해 구성시킨다. 핑거의 접촉점의 힘은 접촉력 센서에 의해 측정한다. 센서 출력은 동적 스트레인 게이지에 의해 증폭시킨 후, A/D 변환기(ADTEK AB-98-05A; 분해능: 12 bit, 출력: 8 ch, 변환시간:  $25(\mu\text{sec}/\text{ch})$ )로 아날로그-디지털 변

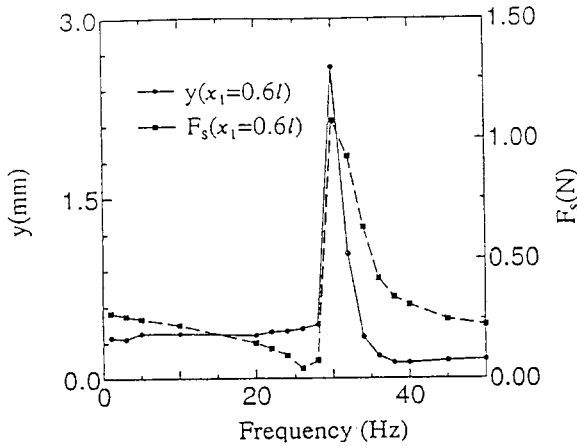


Fig. 4 Frequency spectrum of force and displacement at  $x=0.61$

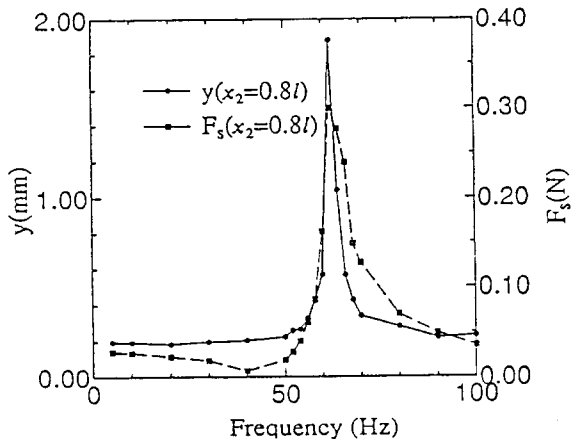


Fig. 5 Frequency spectrum of force and displacement at  $x=0.81$

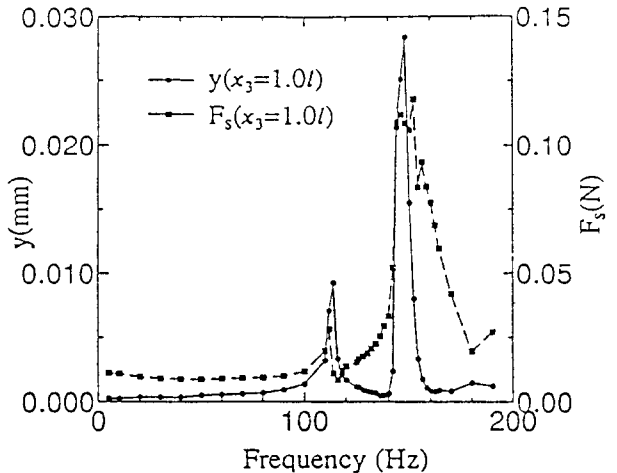


Fig. 6 Response of frequency and displacement

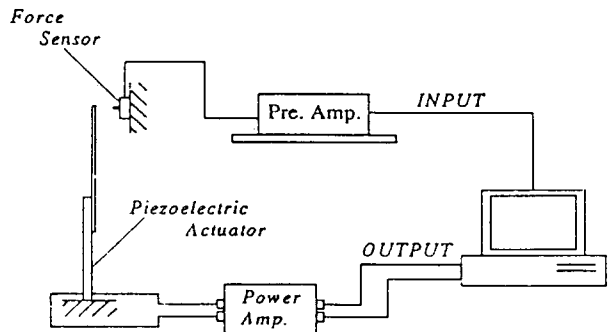


Fig. 7 Experimental setup

환시커 퍼스널 컴퓨터(NEC PC-9801VX; CPU; 80286, 수치계산 coprocessor; 80287)에 보내 연산을 행한다. 연산결과는 D/A 변환기(ADTEK AB-98-06A; 분해능: 12 bit, 출력: 2 ch, 변환시간: 1.35( $\mu$ sec/ch))에 의해  $\pm 5(V)$ 의 아날로그 신호로 변환시켜 파워 앰프로 보낸다. 파워 앰프로 증폭시킨 신호는 압전소자에 가하여 핑거가 구동된다. 실험에서 사용한 제어용 소프트웨어는 c언어 및 어셈블리 언어에 의해 기술하고 있다.

### 3.4 핑거의 구동법

#### (1) $H_\infty$ 제어

접촉점이 변화되어도 페루프로 안정한 제어효과가 얻어지도록 강건 안정한  $H_\infty$  이론을 적용한다.

#### (2) $H_\infty$ Norm

$H_\infty$ 제어에 따른 평가 함수로서  $H_\infty$  Norm이 사용되고 있다. 전달함수 매트릭스  $G(s)$ 의  $H_\infty$  Norm은 다음과 같이 정의한다.

$$\|G(jw)\|_\infty = \sup \bar{\sigma}[G(jw)] \text{ for } -\infty < w < \infty \quad (23)$$

여기서  $\bar{\sigma}[G(jw)]$ 는  $G(s)$ 의 최대 특이치, 결국

$$\bar{\sigma}[G(jw)] = \sqrt{\lambda_{\max}[G^T(-jw)G(jw)]} \quad (24)$$

로 한다. 단  $\lambda_{\max}[A]$ 는 행렬  $A$ 의 고유치의 최대치를 나타낸다.  $G(s)$ 가 스칼라 함수의 경우는 최대특이치는 계인  $|G(jw)|$ 로 되며,  $H_\infty$  Norm은 전부 주파수에 대한 계인의 최대치로 된다.

#### (3) 모델의 오차의 강건 안정조건

이 장에서는 제 2장의 해석 모델을 사용 설계사양에 매개변수 변동에 의한 영향을 고려하여 페루프 설계를 한다. 피지 대상물이 미소생물인 경우 힘센서의 측정 범위의 분해능면에서 센서를 바꿀 필요가 생긴다. 이 경우도 센서의 질량은 변동한다. 그래서 각 개체나 센서에 대하여 한 개 한 개 기구의 모델화를 작성하여 제어계를 설계하는 것은 크나큰 작업이다. 그래서 본 기구에  $H_\infty$  제어를 적용하여 선단 질량의 변동에 대하여 강건성을 가진 제어계를 설계한다. 강건 안정한 제어계 설계 문제의 기초를 달성하는 것은 다음의 스몰 게인(small gain) 정리이다.

스몰게인정리가 페루프 시스템에 대해서 다음식이 성립하며 위상의 지연이나 빠름에 관계치 않고 페루프 시스템은 안정하다.

$$\|G(s)H(s)\|_\infty < 1 \quad (25)$$

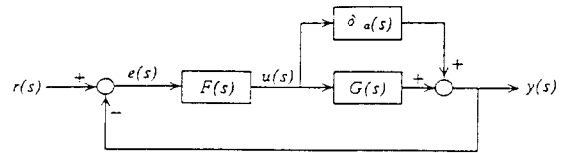


Fig. 8 Closed loop with additive unstructured uncertainty

이 스몰게인의 정리를 사용하여 강건 안정조건이 된다. 설계에 사용한 모델에 가법적 오차의 존재를 고려한다. 이 페루프 시스템은 블록 선도의 변환에 의해 Fig. 8과 같이 표시된다. 전선내의 블록을 한 개 블록  $R(s)$ 로 정하면

$$R(s) = F(s)[I + G_m(s)F(s)]^{-1} \quad (26)$$

로 된다. 스몰게인정리를 적용하고 페루프 시스템이 안정하는 조건은

$$\|\delta_a(s)R(s)\|_\infty < 1 \quad (27)$$

로 된다. 그리고 공칭 모델  $G_m(s)$ 와 실제 제어대상  $G(s)$ 에 대한 가법적 오차  $\delta_a(s)$ 가 있어도, 식 (27)이 만족되면 페루프 시스템은 강건 안정하다. 식 (27)를 평가함수로 하여 제어기  $F(s)$ 를 설계하면, 오차  $\delta_a(s)$ 가 존재하여도 페루프 시스템의 안정은 항상 유지된다. 페루프 설계에 사용한 모델을  $G_m(s)$ 로 하면 가법적 오차  $\delta_a(s)$ 는

$$\delta_a(s) = G(s) - G_m(s) \quad (28)$$

다음에 중함수  $W_2(s)$ 를 도입하여

$$|W_2(jw)| > \delta_a(jw) \quad (29)$$

로 선정하면 중함수  $W_2(s)$ 는

$$\bar{\sigma}[\delta_a(jw)] < \bar{\sigma}[W_2(jw)] \text{ } (-\infty < w < \infty) \quad (30)$$

을 만족한다. 이 중 함수행렬을 사용

$$\|W_2(s)R(s)\|_\infty < 1 \quad (31)$$

을 만족하는 제어기  $F(s)$ 를 설계하면 식 (27)가 성립, 오차  $\delta_a(s)$ 에 대하여 강건 안정한 피드백 시스템이 설계된다.

#### (4) 제어 사양과 감도 함수

Fig. 9로 표시한 피드백 시스템을 고려한다. 목표

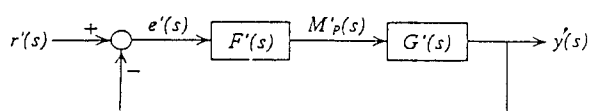


Fig. 9 Blockdiagram of continuous time model

치로부터 오차까지 페루프 전달함수 행렬  $S(s)$ 를 구하면

$$\begin{aligned} e(s) &= S(s)r(s) \\ S(s) &= [I + G(s)F(s)]^{-1} \end{aligned} \quad (32)$$

로 된다. 이 함수는 감도함수이다. 일반적으로는 감도함수 행렬을 작게 한 주파수대에 대해 큰 최대 특이치를 갖는 중합수 행렬  $W_1(s)$ 를 도입하여

$$\|W_1(s)S(s)\|_\infty \leq 1 \quad (33)$$

를 페루프를 설계한 조건으로 한다. 본 연구는 감도함수 행렬  $S(s)$ 에 대한 중합수  $W_1(s)$ 를 결정하기 위해 이하의 방법을 사용한다. 제어사양으로부터 PID 계인을 결정한 방법과 같이 목표치  $r'(s)$ 로부터 출력  $y'(s)$ 까지 페루프전달 함수 행렬  $T'(s)$ 로서 다음과 같은 계 (Fig. 9)을 고려한다.

$$\begin{aligned} y'(s) &= T'(s)r'(s) \\ r'(s) &= [F'_d(s)] \\ y'(s) &= [F'_s(s)] \\ T'(s) &= G'(s)F'_s[I + G'(s)F'(s)]^{-1} \end{aligned} \quad (34)$$

여기에서 2차 진동형식을 선정하면

$$\frac{F'_s(s)}{F'_d(s)} = \frac{w_n^2}{s^2 + s\zeta w_n + w_n^2} \quad (35)$$

로 된다. 여기서  $w_n$ ,  $\zeta$ 는 오버슈트  $O_s$ , 정정시간  $t_s$  (sec), 허용오차  $e$ 로부터 지정하는 매개변수이다. 이 경우 계의 감도함수 행렬  $S'(s)$ 는

$$\begin{aligned} e'(s) &= S'(s)r'(s) \\ r'(s) &= F'_d(s) \\ e'(s) &= [F'_s(s) - F'_d(s)] \\ S'(s) &= I - T'(s) = \frac{s^2 + 2\zeta w_n}{s^2 + s\zeta w_n + w_n^2} \end{aligned} \quad (36)$$

로 된다. 이  $S'(s)$ 를 사용한 중합수행렬  $W_1(s)$ 를

$$W_1^{-1} = 1.05 \times S'(s) \quad (37)$$

로 된다. 식 (33)에 의해

$$\|S'(s)\|_\infty \leq \frac{1}{\|W_1(s)\|_\infty} \quad (38)$$

가 성립하며 식 (37)에 의해

$$\|S(s)\|_\infty = \|S'(s)\|_\infty \quad (39)$$

가 유도된다. 이상과 같이 중합수행렬  $W_1(s)$ 을 설정하면 희망하는 제어사양  $S'(s)$ 을 만족하는 제어기  $F(s)$ 가 설계 가능하다.

(5)  $H_\infty$  페루프의 수치계산 및 실험결과

핑거의 특이치 주파수 응답을 Fig. 10에 표시한다. 이것에 의해 각각의 고유진동수에서 최대를 되어 있어 접촉점의 변화로서 제어대상으로 되는 모델이 잘 변화하는 것을 알 수 있다. 접촉점이 있는 1점의 경우의 모델을 생각해 이것을  $H_\infty$  페루프의 설계에 사용 공칭모델  $G_m(s)$ 로 하여, 2점이 접촉점으로 되는 경우의 모델이 가법적오차  $\delta_a(s)$ 가 된다고 생각한다. 접촉점  $x_1$ 점에 대한 가법적 오차의 특이치  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ 을 주파수 영역에서 각각의 고유진동수에 의한 진동을 제압하도록 전체의 최대점을 이산화하도록 중합수를 다음식과 같이 결정지어, 그것의 주파수 특성을 Fig. 11에 표시한다.

$$W_2(s) = 0.0015 \frac{(s/0.0567 + 1)^2}{(s/15 + 1)^2} \quad (40)$$

그림으로부터 알 수 있는 바와 같이,  $W_2$ 는  $\sigma$ 보다 크게 충분히 가법적 오차를 커버하고 있다. 이 중합수의 가법적 오차에 대한 경우를 보면 각각의 점이 접촉점으로 되는 경우의 1차 고유진동수에 의한 진동이 방지되어 준 정적인 제어로 되어, 작은 제어력으로도 안정하다.

그리고 제어사양에 관한 중합수  $W_1(s)$ 를 결정한다. 제어사양을 오버슈트 10%로 큰 값에 결정한 경우에는 정정시간을 0.1 sec, 오버슈트를 5%로 설정

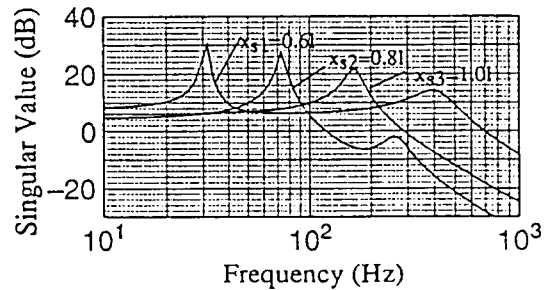


Fig. 10 Frequency response of singular value at the contact point of the finger

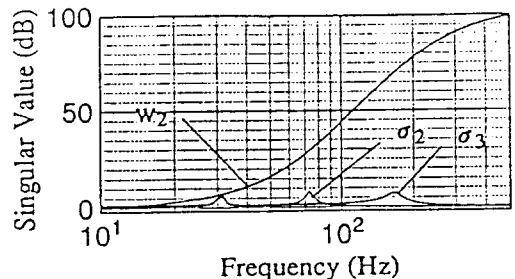


Fig. 11 Weighting function  $W_2$



한 경우에는 정정시간을 0.3 sec, 오버슈트를 1%로 설정한 경우에는 정정시간을 0.5 sec로 했다. 이 경우의 각 제어사양에 대한 중합수  $W_1(s)$ 을 그 최대 특이치의 주파수 특성을 Fig. 12에 표시한다. 중합수  $W_2$ 의 선택방법은 준정적으로 제어하도록 하여 제어 사양은 오버슈트 1%, 정정시간 0.5 sec로 되는 밀폐 루프를 구하는 일이 가능했다. 이상으로 설정한 중합수에 대한 식 (39)을 만족하는 폐루프를 제어계 설계는 MATLAB을 이용하여 구했다. 폐루프를 쌍 1차변화에 의해 샘플링 시간  $T=3$  sec로 이산화하여 이산시간제에 따른 수치계산 및 실험을 행했다. 이 경우의 결과는 Fig. 13로 된다. Fig. 13(a)는 수치계산을 표시하였고 Fig. 13(b)는 실험결과를 표시하였다. Fig. 13은 접촉점이  $x_1=0.6/$ 점으로 되는 모델을 기준으로 하여, 이외의 점에 가법적오차가 있는 중합수  $W_2$ 를 사용 설계한 폐루프를 사용하여 제어한 결과로 된다. 계산 결과는 0.6/점의 접촉력은 약

0.6 sec로 목표치에 도달하고 있어 오버슈트도 작게 되고 있다. 실험결과는 0.6/점의 발생력은 오버슈트는 보이지 않고 정정시간이 약 0.7 sec로 정정시간이 지연되고 있다. 가법적 오차를 커버하는 중합수  $W_2$ 의 조건을 전체를 커버하는 것이 아니고 0.6/점이 고유진동수의 최대치를 커버하도록 결정한다. 제어 사양에 대응하는 감도함수를 구하는 경우 중합수  $W_1$ 을 선정 제어사양을 만족하는 폐루프를 설계한다. 그런 후 중합수  $W_2$ 은 다음과 같은 것이며 이 경우 중합수를 Fig. 14에 표시한다.

$$W_2(s) = 0.001 \frac{(s/0.091051+1)^2}{(s/15+1)^2} \quad (41)$$

중합수를 구하는 제어사양은 오버슈트 10%로 크게 설정한 경우에는 정정시간을 0.1 sec, 오버슈트를 5%로 설정한 경우에는 정정시간을 0.3 sec, 오버슈트를 1%로 설정한 경우에는 정정시간을 0.5 sec로 하였다. Fig. 15은 접촉점이  $x_1=0.6/$ 점이 되는 경우

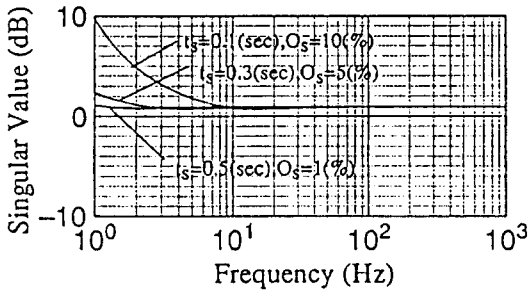


Fig. 12 Frequency response of singular value  $W_1$

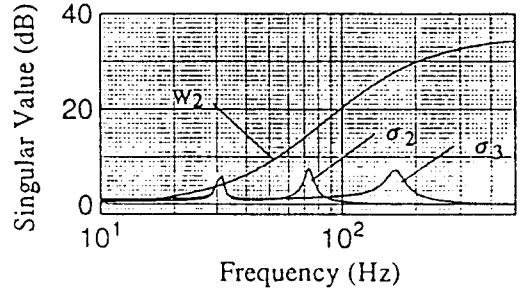


Fig. 14 Weighting function  $W_2$

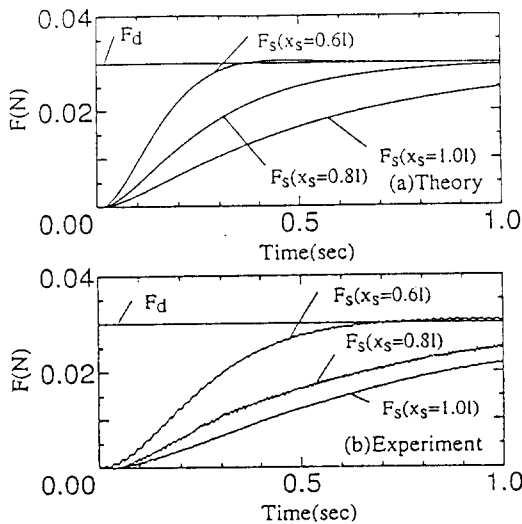


Fig. 13 Response of finger driven by  $H_\infty$  controller ( $O_s=1\%$ ,  $T_s=0.5$ (sec),  $e=\pm 0.5\%$ )

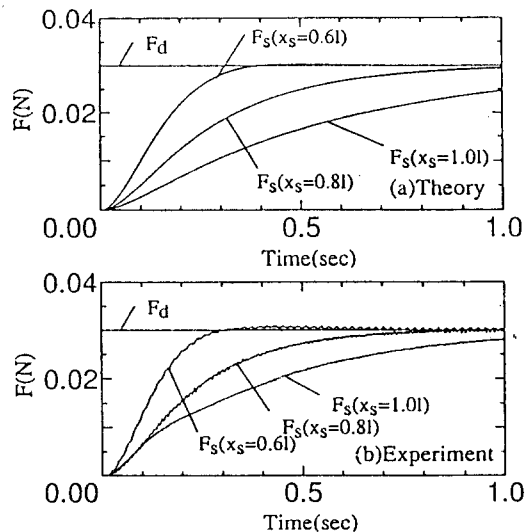


Fig. 15 Response of finger driven by  $H_\infty$  controller ( $O_s=1\%$ ,  $T_s=0.5$ (sec),  $e=\pm 0.5\%$ )

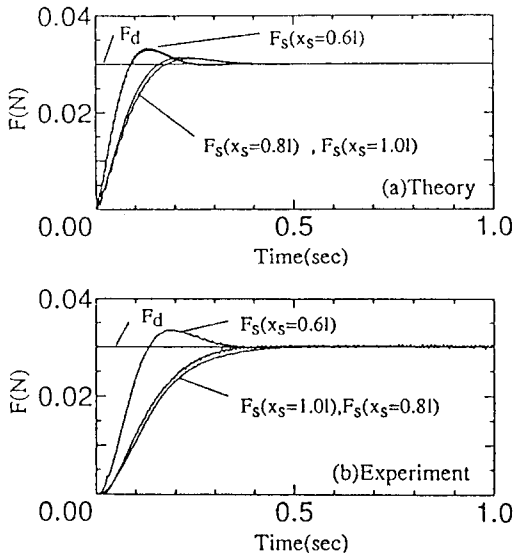


Fig. 16 Response of finger driven by  $H_\infty$  controller ( $O_s = 5\%$ ,  $T_s = 0.3(\text{sec})$ ,  $e = \pm 0.5\%$ )

를 모델화하여 중합수  $W_1$ 을 제어사양, 오버슈트 1%, 정정시간 0.5 sec을 만족하도록 감도함수를 구해 설계한 페루프를 사용하고 제어한 결과이다. 계산결과는 0.6/점의 접촉력은 오버슈트는 없고 약 0.4 sec로 목표치에 도달하고 있다. 0.8/점과 선단 접촉점으로 되는 경우는 제어력이 작고 오버슈트도 없어, 안정하게 1.0 sec내에 목표치에 도달하는 일은 어렵다.

실험결과 0.6/점의 접촉력은 약 0.4 sec로 목표치에 도달하고 있어 오버슈트도 없다. 0.8/점이 접촉점으로 되는 경우는 고차 진동 성분이 보이지만 오버슈트도 없이 0.8 sec로 목표치에 도달하고 있다. 선단이 접촉점으로 되는 경우는 오버슈트는 보이지 않지만 1.0 sec내로 목표치에 도달하는 일은 어렵다.

Fig. 16은 중합수  $W_1$ 을 제어사양, 오버슈트 5% 정정시간 0.3 sec을 만족하도록 하여 감도함수를 구해 설계한 페루프를 사용하여 제어한 결과이다. 계산결과는 0.6/점이 접촉력은 오버슈트가 약 17%, 정정시간을 0.3 sec로 되고 있다. 그밖에 2점이 접촉점이 되는 경우가 오버슈트가 꽤 작게 목표치에 0.35 sec로 도달하고 있다. 실험결과는 0.6/점의 접촉력은 약 0.4 sec로 목표치에 도달하고 있지만, 오버슈트는 11.4%로 되고 있다. 0.8/점과 선단이 접촉점이 되는 경우 오버슈트는 없고 0.4 sec내로 목표치에 도달하고 있다.

Fig. 17은 중합수  $W_1$ 은 제어사양, 오버슈트 10% 정정시간 0.1 sec을 만족한 감도 함수에 의해 구해

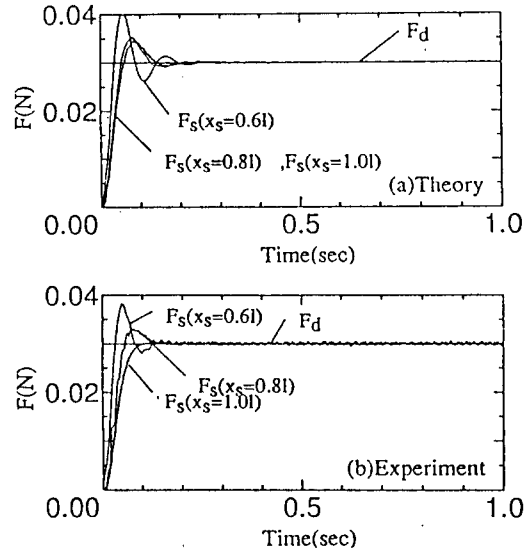


Fig. 17 Response of finger driven by  $H_\infty$  controller ( $O_s = 10\%$ ,  $T_s = 0.1(\text{sec})$ ,  $e = \pm 0.5\%$ )

설계한 closed loop을 사용해 제어한 결과이다. 계산결과는 0.6/점의 오버슈트가 크게 되지 않고 0.2 sec 부근에 목표치에 도달하고 있다. 0.8/점과 선단이 접촉점이 되는 경우 오버슈트는 13%, 정정시간은 0.2 sec로 되고 있어 신속히 제어가 되고 있다. 계산결과는 0.6/점의 접촉력은 오버슈트가 25% 정도로 크게 되고 있어 0.12 sec로 목표치에 도달하고 있다. 0.8/점과 선단 접촉점으로 되는 경우는 오버슈트는 8%, 정정시간은 0.12 sec로 되고 있다. 선단이 접촉점이 되는 경우는 오버슈트가 없게 약 0.12 sec로 목표치에 도달하고 있어, 신속히 제어가 되고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 센서 부분과 핑거를 제작하여, 대상물을 파지하는 경우에 파지물체와 핑거 사이에 힘센서를 삽입하여, 측정된 정보를 얻어 힘제어를 행하는 제어방법을 제안했다. 분포 센서를 가진 인공지로서, 파지영역에 힘센서를 가진 플렉시블 핑거를 모델로 하여, 접촉지점이 변화하는 경우에 대해,  $H_\infty$  제어를 적용하여 이론해석 및 실험을 수행했다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 압전소자를 액츄에이터로 하는 인공지에 대한 운동방정식을 유도하여, 모드 급수 전개법을 적용한 후에, 연속시간계를 샘플링 주기로 이산화하는 방법을 사용했다. 얻어진 수치계산결과와 실험결과는 접촉지점과 관계없이 유사한 경향을 보였다.

(2)  $H_\infty$ 제어를 사용하여 중합수를 잘 선택하여 페루프를 설계하면, 대상물의 변동의 영향에도 파지력을 일정하게 유지하여, 안정한 제어결과가 얻어진다.

(3)  $H_\infty$ 제어에서는 수치계산결과와 실험결과가 상당히 일치하고 있어, 본모델화가 타당함을 알 수 있다.

### 참 고 문 헌

(1) Kada, T. O., 1979, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC-9, 79-89, Object-Handling System for Manual Industry.

(2) Salisbury, J. K. and Craig, J. J., 1982, International Journal of Robotic Research 1, 4-17, Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues.

(3) Dario, P. and Buttazzo, G., 1987, International Journal of Robotic Research 6, 25~48. An Anthropomorphic Robot Finger for Investigating Artificial Tactile Perception.

(4) Parker, J. K. and Paul, F. W., 1987, transactions of the American Society of Mechanical Engineers,

Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 109, 328~334. Controlling Impact Forces in Pneumatic Robot Hand Designs.

(5) Terasaki, H. and Hasegawa, T., 1994, Journal of the Robotics Society of Japan 12, 138~147. Motion Planning for Intelligent Manipulation by Sliding Operations with Parallel Two-Fingered Grippers.

(6) Baartman, J. P. and Storm, T., 1994, Industrial Robot 21, 23~27. Flexible Grippers for Mechanical Assembly.

(7) Ohka, M., Kobayashi, M., Shinokura, T. and Sagisawa, S., 1994, JSME International Journal, Series C37, 138~146. Tactile Expert System Using a Parallel Fingered Hand Fitted with Three-Axis Tactile Sensors.

(8) Okamoto, T., Kitani, O. and Torii, T., Journal of the Society of Agricultural Machinery, Japan 55, 103~110. Robotic Transplanting of Orchid Protocorm in Mericlone Culture.

(9) Shahian, B. and Hassul, M., Control System Design Using Matlab.

(10) Ogata, K., Discrete Time Control Systems.