

Tip mass를 갖는 병진운동 1-링크 탄성암 선단의 위치제어

°이영춘*, 방두열*, 이성철**

* 전북대학교 대학원 기계공학과, ** 전북대학교 공과대학 기계공학과

Tip Position Control of Translational 1-Link Flexible Arm with Tip Mass

°Youngchoon Lee, Duyoul Pang, Seong-Cheol Lee

Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University

ABSTRACT

The tip of the flexible robot arm has to be controlled by the active control reducing vibration because it has residual vibration after getting to desired position. This paper presents an end-point position control of a 1-link flexible robot arm having tip mass by the PID control algorithm. The system is composed of a flexible arm with tip mass, dc servomotor and ballscrew mechanism under translational motion. The feedback signal composed of the tip displacement measured by laser sensor, estimated velocity and acceleration is used to control the base motion. Theoretical results are obtained by applying the Laplace transform and the numerical inversion method to the governing equations. After the flexible robot arm reaches to the desired position, the residual vibration is controlled by the PID algorithm. This paper gives the simulation and experimental results of end-point responses according to changing tip-mass and arm length. And this algorithm shows good effects of reducing the residual vibration. Approximately, theoretical response is in good agreement with experimental one.

1. 서론

서보모터가 유연한 구조물을 구동할 경우, 서보모터의 밴드폭보다는 구조물의 고유 진동수가 운동결과에 오차에 많은 영향을 미친다. 현재 산업용 로봇은 서보 드라이브가 비교적 낮은 속도를 갖는 반면 구조물들은 강체로 구성되어 있어 오버슈트를 비롯한 여러 오차들은 주로 서보 드라이브에 의해서 발생한다. 그러나, 생산성 향상을 위한 운동의 고속화에 따라 매니플레이터의 경량화와 선단위치 결정의 정확성이 요구되고 있다.

이와같은 경량의 유연한 매니플레이터를 제어하는 최대 문제점은 가속 및 감속시에 받는 관성력보다도 매니플레이터의 낮은 강성에 기인하는 잔류진동의 발생이다. 따라서, 고속의 정확한 위치결정으로 선단에 나타나는 잔류진동을 효율적으로 제어하는 연구가 요구된다.

최근에 발표된 논문으로, Chonan⁽¹⁾은 2개의 유연한 탄

성암에 피드백 제어를 적용하여 연구하였고, 개회로 제어를 적용한 결과가 Skaar⁽²⁾, Wang⁽³⁾ 등에 의해 발표되었다. 이들은 이론해석을 위해서 모우드 해석법^(2,3,4), 유한요소법⁽⁵⁾, Rayleigh-Ritz Method⁽⁶⁾ 등을 사용하고 있다. 대부분 이들은 회전운동을 대상으로 한 연구이다.

한편, 병진운동에 관한 연구로서, Lee^(7,8)와 程⁽⁹⁾ 등은 역동력학과 PD제어를 사용하여 단일링크 병진운동을 하는 탄성암 선단의 위치제어를 연구하였다. 이들은 베르누이-오일러법 방정식을 사용하고 라플라스 변환과 수치역변환법⁽¹⁰⁾을 적용하여 운동방정식을 유도하고 수치계산으로 모터구동 전압을 얻어 제작한 모델에 적용하여 실험결과를 비교하였다.

본 논문에서는 비례-적분-미분제어를 적용하여 병진 운동하는 1-링크 탄성암 선단을 초기위치에서 목표위치로 이동시킬 때 발생하는 선단의 잔류진동을 감소시키고 신속하게 목표위치에 도달시키기 위하여 비례, 적분, 미분게인을 변수로 하여 이의 변화에 따른 선단의 잔류진동 감소에 대한 특성을 다루었다. 여기서, Extended Hamilton's Principle로 구한 병진운동계의 운동방정식에 Laplace 변환을 적용하고 수치역변환을 사용하여 수치해를 얻었다. 실험에서는 다양한 선단 길량을 갖는 탄성암 선단변위를 레이저 변위센서로 측정하고, 이 데이터로부터 계산된 피드백 신호로 오차신호를 감소시키도록 직류서보모터를 구동하여, 베이스 운동을 통하여 선단의 위치를 제어하였다.

2. 이론 해석

본 연구에 사용된 병진운동하는 1-링크 탄성암의 시스템은 그림 1(a)와 같이 직류서보모터, 볼나사 병진운동기구, 탄성암 및 선단길량으로 구성된다. 여기서 탄성암은 회전관성과 전단변형을 무시한 베르누이-오일러 빔으로 탄성암이 X-Y평면에서만 진동하고, 시스템에 작용하는 중력 변화는 무시하는 것으로 가정하였다.

링크의 각 요소는 전단력 V 와 굽힘 모우먼트 M에 의하여 상호운동을 전달한다. 그림 1(a)상에서 암의 절대변위를 $W(x,t)$, 암 고정점으로부터 x위치에서의 상대변위를 $W(x,t)$, 병진운동에 의한 암 베이스부의 변위를 $Wb(x,t)$ 라 할 경우 다음의 관계식이 된다.

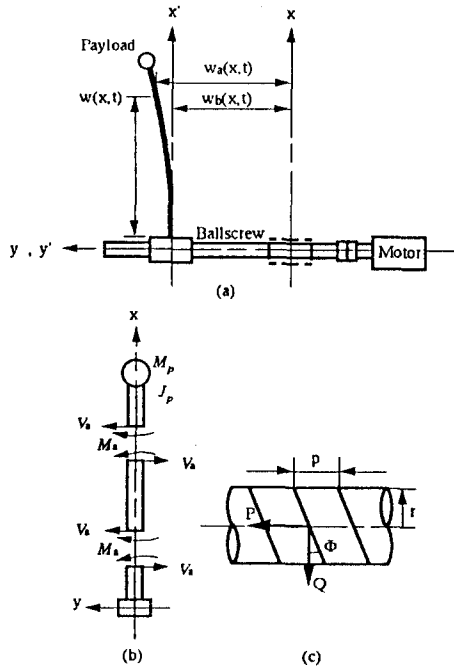


Fig.1 A sketch of the flexible beam and details of ballscrew with system variables

$$W_a(x,t) = W(x,t) + W_b(x,t) \quad (1)$$

주어진 시스템 모델에 Extended Hamilton's Principle 을 적용, 정리하면 토보트 압에 관한 베르누이-오일러방정 식을 아래와 같이 얻는다.

$$\rho A \frac{\partial^2}{\partial t^2} W(x,t) + EI(1 + c \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^4}{\partial x^4} W(x,t) = 0 \quad (2)$$

여기서, E는 암의 Young率, ρ는 밀도, A는 단면적, I 는 단면 모멘트, t는 시간(sec), c는 암 내부의 감쇠계수, 그리고 x는 탄성암이 이동한 거리이다.

한편, 3개의 경계조건식과 베이스에 대한 힘의 평형식 을 다음과 같이 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial x} W(0,t) = 0 \quad (3)$$

$$EI(1 + c \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^2}{\partial x^2} W(L,t) = -J_p \frac{\partial^2}{\partial t^2} \frac{\partial}{\partial x} W(L,t) \quad (4)$$

$$EI(1 + c \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^3}{\partial x^3} W(L,t) = M_p \frac{\partial^2}{\partial t^2} W(L,t) \quad (5)$$

$$M_b \frac{\partial^2}{\partial t^2} W(0,t) - C_b \frac{\partial}{\partial t} W(0,t) - EI(1 + c \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^3}{\partial t^3} W(0,t) + Q(t) \quad (6)$$

여기서, M_p 는 선단부하의 질량, J_p 는 선단부하의 극 관성모멘트, M_b 는 베이스의 질량, C_b 는 베이스에서의 감쇠계수이다.

또한, 그림 1(c)에서 볼나사와 베이스간의 힘 평형방정 식 및 모터축의 회전에 의한 베이스의 병진운동에 관한 관계식은 다음과 같다.

$$P(t) - Q(t) \cdot \tan(\phi + \varphi) = Q(t) \cdot \frac{\mu \cdot \cos\phi + \sin\phi}{\cos\phi - \mu \sin\phi} \quad (7)$$

$$\theta(t) = \frac{2\pi}{p} w(0,t) \quad (8)$$

여기서, P(t)는 볼나사에서 원주방향으로 작용하는 힘, Q(t)는 볼나사를 통하여 베이스에 작용하는 축방향의 힘, $\mu(=\tan\phi)$ 는 베이스와 나사사이의 마찰계수, ϕ 는 리드각, φ 는 마찰각, $\theta(t)$ 는 모터축의 회전각, p는 나사의 피치이다. 베이스를 구동시키는 모터 토크 T(t)는 K_t 를 모터 토크 상수라 할때 다음과 같다.

$$T(t) = K_t \cdot i_a(t) \quad (9)$$

이때, 모터와 커플링으로 연결된 볼나사 기구에 대한 모멘트 평형식은

$$(J_m + J_c + J_s) \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = -C_m \frac{d\theta(t)}{dt} - P(t) \cdot r + T(t) \quad (10)$$

이되고, 여기서 J_m , J_c , J_s 는 각각 모터축, 커플링 및 볼 나사의 극관성 모멘트, C_m 은 모터와 볼나사의 감쇠계 수, r은 볼나사의 피치 반경이다. 한편, 모터전기자 회 로에서 전류에 관한 식을 다음과 같이 얻는다.

$$\frac{L_a}{R_a} \frac{di_a(t)}{dt} + i_a(t) + \frac{K_b}{R_a} \frac{d\theta(t)}{dt} - G_p [W_d(L,t) - W(L,t)] + G_d \frac{\partial [W_d(L,t) - W(L,t)]}{\partial t} + G_i \int [W_d(L,t) - W(L,t)] dt \quad (11)$$

여기서, $i_a(t)$ 는 전기자전류, L_a 는 전기자 인덕턴스, R_a 는 전기자 저항, K_b 는 역기전력 상수, G_p 는 비례게인, G_d 는 미분게인, G_i 는 적분게인이다.

이제, 식(2)의 일반해는 라플라스 변환을 사용하여 구 하면 다음과 같다.

$$W(x,s) = \alpha \cos\zeta x + \beta \sin\zeta x + \gamma \cosh\zeta x + \delta \sinh\zeta x \quad (12)$$

$$\text{여기에서, } \zeta^4 = -\frac{\rho A \cdot s^2}{EI(1 + cs)}$$

이고, s는 라플라스 변환변수 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 는 경계조건으 로 부터 결정되는 상수이다.

여기서 식(3)-(5)에 대해 초기조건을 零으로 하고 라플 라스 변환하면 다음 식들을 얻는다.

$$\frac{dW(0,s)}{dx} = 0 \quad (13)$$

$$EI(1 + cs) \frac{d^2 W(L,s)}{dx^2} = -J_p \frac{dW(L,s)}{dx} s^2 \quad (14)$$

$$EI(1 + cs) \frac{d^3 W(L,s)}{dx^3} = M_p \cdot W(L,s) s^2 \quad (15)$$

식(13)-(15)를 식(12)에 대입하면 미지상수 α, β, γ 에 대한 2개의 방정식을 얻는다. 또한 식(6)-(11)을 라플라스 변환하고 식(13)-(15)의 경계조건을 이용하면 미지상수 α, β, γ 에 대한 방정식을 얻고, 이를 행렬형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_t(G_p + G_d \cdot s + G_i / s) W_d(L,s) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기에서, a_{ij} ($i,j=1,2,3$)의 값은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_{11} &= M_p + K_e \cos \zeta L \\ a_{12} &= -2 C_e \zeta^3 EI(1 + cs) + K_e(\sin \zeta L - \sinh \zeta L) \\ a_{13} &= M_p + K_e \cosh \zeta L \\ a_{21} &= -J_p s^2 \zeta \sin \zeta L - EI(1+cs) \zeta^2 \cos \zeta L \\ a_{22} &= J_p s^2 \zeta (\cos \zeta L - \cosh \zeta L) - EI(1+cs) \zeta^2 (\sin \zeta L + \sinh \zeta L) \\ a_{23} &= J_p s^2 \zeta \sinh \zeta L - EI(1+cs) \zeta^2 \cosh \zeta L \\ a_{31} &= M_p s^2 \cos \zeta L - EI(1+cs) \zeta^3 \sin \zeta L \\ a_{32} &= M_p s^2 (\sin \zeta L - \sinh \zeta L) + EI(1+cs) \zeta^3 (\cos \zeta L + \cosh \zeta L) \\ a_{33} &= M_p s^2 \cos \zeta L - EI(1+cs) \zeta^3 \sin \zeta L \end{aligned}$$

그리고,

$$\begin{aligned} C_e &= r \cdot \tan(\phi + \varphi)(L_a s / R_a + 1) \\ M_e &= 2\pi / p(L_a s / R_a + 1)(J_m + J_c + J_s) s^2 + C_m s \\ &\quad + C_e(M_p s^2 + C_b s) + 2\pi / p(K_t K_b p^2 / R_a) \\ K_e &= K_t(G_p + G_d s + G_i / s) \end{aligned}$$

이다. 따라서, 식(16)의 미지상수 α, β, γ 는 다음과 같이 구해진다.

$$[\alpha, \beta, \gamma]^T = K_t(G_p + G_d s + G_i / s) W_d(L,s) \cdot \begin{bmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\beta \\ \Delta\gamma \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

여기서, $\Delta, \Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$ 는 각각 다음과 같이 정의되는 행렬식이다.

$$\Delta = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad \begin{aligned} \Delta\alpha &= a_{22}a_{23} - a_{23}a_{32} \\ \Delta\beta &= a_{23}a_{31} - a_{21}a_{33} \\ \Delta\gamma &= a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31} \end{aligned}$$

식(12)-(17)로부터 압선단 변위는 다음과 같다.

$$W(L,s) = [\Delta\alpha \cos \zeta L + \Delta\beta(\sin \zeta L - \sinh \zeta L) + \Delta\gamma \cosh \zeta L] \cdot K_t(G_p + G_d s + G_i / s) W_d(L,s) / \Delta \quad (18)$$

여기에서, 목표변위를 계단함수 입력 $W_d(L,s) = W_d^* / s$ 로 취하면 목표값에 대한 압선단의 변위는 다음과 같다.

$$\frac{W(L,s)}{W_d^*} = [\Delta\alpha \cos \zeta L + \Delta\beta(\sin \zeta L - \sinh \zeta L) + \Delta\gamma \cosh \zeta L] \cdot K_t(G_p + G_d s + G_i / s) / \Delta \quad (19)$$

본 논문에서는 Weeks⁽¹⁰⁾가 제안한 수치역변환 알고리즘을 이용하여 (19)식을 역변환하였다.

3. 실험 장치

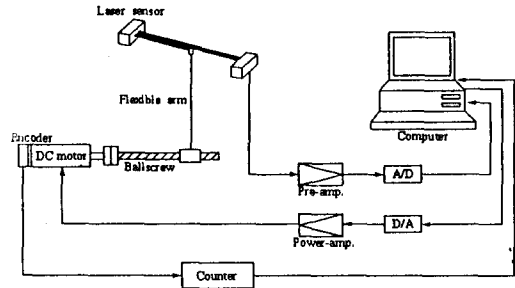


Fig.2 Experimental schematic diagram.

그림 2는 본 연구에 사용한 실험장치의 개략도이다. 탄성암을 제어하기 위한 실험에서 먼저 선단의 위치변위는 발광부와 수광부로 구성되는 레이저 변위센서(Keyence LX-130)를 공간상에 고정시킴으로써 탄성암 선단이 진동할 때 차단되는 광선의 양에 비례하여 발생하는 전압신호량을 검출함으로써 측정되고, 검출 변환된 이신호는 프리앰프(출력: -5~5VDC)를 통한 후 A/D변환기(Nanotec, Labin Master)에 의하여 10ms 주기의 샘플링시간으로 컴퓨터(386DX)에 입력되어 실제변위로 환산된다. 컴퓨터로부터 출력되는 오차신호는 기준신호와 피드백신호로부터 구해지며, 직류서보모터(Sanyo Denki U508T, 80W)를 구동시켜 압선단의 변위를 제어하기 위하여 12bit D/A 변환기를 거쳐 전압신호로 되고, 모터드라이브를 통하여 전류로 변환된 후 직류서보모터를 구동한다. 단위회전당 1000개의 펄스를 발생하는 증분(Incremental)형 엔코더가 탄성암 베이스를 병진운동시키는데 사용하는 서보모터에 부착되어 있으며, HCTL-2020 IC와 74LS90으로 제작된 Up-Down 카운터를 펄스측정용으로 사용하여 24bit 데이터를 처리하도록 하여, 4000pulse/rev의 분해능을 갖도록 하였다. 그러므로 본 실험에 이용한 볼나사의 Lead가 4mm 이므로 변위 분해능은 1/1000mm가 되고 있다.

실험에서 사용한 탄성암은 높이 20mm, 너비 2mm인 사각단면의 알루미늄 빔으로 길이는 450mm, 850mm의 두 종류로 사용하였으며, 선단부하질량 M_p 는 각각 25g, 50g, 75g으로 택하였다. 따라서 각각의 길이와 질량에 대하여 암의 고유진동수 및 선단질량의 극관성모우먼트가 계산된다. 본 실험에서 사용한 탄성암과 직류서보모터 및 볼나사기구에 대한 물리변수들은 표1과 같다. 실험식에서 사용한 비례, 적분, 미분계인은 각각 $G_p=0.15Sp$ (A/m), $G_i=0.1Si$ (A/m.s), $G_d=0.5Sd$ (A.s/m)이며, S_p, S_d, S_i

는 이론식에서의 변수값이 된다. 여기서 상수 0.15, 0.1, 0.5는 레이저 변위센서, D/A 변환기 및 모터드라이브의 증폭비 값을 곱한 전체의 상수값들이다.

표1. 시스템 물리변수

DC Servomotor

armature inductance	$L_a=5.50 \times 10^{-3}$ (V.s/A)
armature resistance	$R_a=8.70$ (Ω)
motor torque constant	$K_t=1.8816 \times 10^{-1}$ (N.m/A)
polar moment of inertia	$J_m=5.820 \times 10^{-5}$ (kg.m ²)
damping coefficient of motor shaft and ballscrew	$C_m=2.984 \times 10^{-3}$ (N.m.s/rad)

Ballscrew

mass of base	$M_b=6.3869 \times 10^{-1}$ (kg)
polar moment of inertia	$J_s=1.4083 \times 10^{-5}$ (kg.m ²)
polar moment of inertia of coupling	$J_c=9.5450 \times 10^{-5}$ (kg.m ²)
damping coefficient between base and ballscrew	$C_b=6.5320 \times 10^{-3}$ (N.s/m)
pitch of the thread	$p=4.0 \times 10^{-3}$ (m)
radius of pitch circle	$r=6.375 \times 10^{-3}$ (m)
lead angle	$\phi=9.9531 \times 10^{-2}$ (rad)
friction angle	$\varphi=3.50 \times 10^{-3}$ (rad)

Flexible arm

density	$\rho=2.447 \times 10^{-3}$ (kg/m ³)
Young's modulus	$E=6.57 \times 10^{10}$ (N/m ²)
cross sectional area	$A=4.0401 \times 10^{-5}$ (m ²)
internal damping coefficient	$c=1.21 \times 10^{-4}$ (s)

4. 이론 및 실험결과

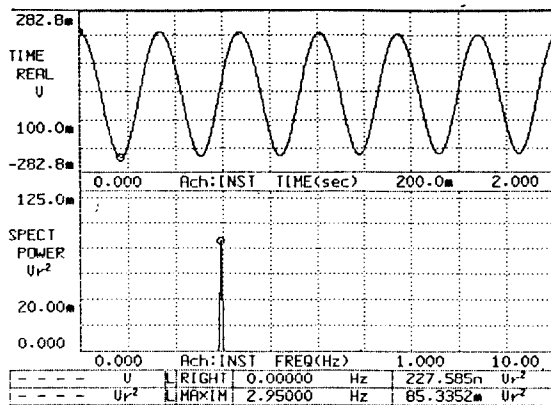


Fig.3 The approximate step response and spectrum of tip without control.

실험에서 사용한 목표선단위치 W_d^* 는 50mm로 사용하였다. 그림3은 탄성암의 길이 450mm, 선단질량 75g인 시

스템을 선단에 제어동작을 가하지 않고 탄성암 베이스를 구동시켜 가장 빨리 선단이 목표위치에 도달하도록 근사적인 계단함수를 입력시켰을때, FFT주파수 분석기(AD 3524)를 사용하여 측정된 목표위치에서의 선단변위 결과를 보여주며 베이스가 목표위치에 도달한 후 선단은 약간의 감쇠가 수반되는 자유진동이 계속되고 있는데, 이는 탄성암 내부감쇠에 의하여, 스펙트럼상에서 탄성암의 고유진동수는 2.95Hz로 측정되었다.

그림 4와 5는 이와같이 심한 자유진동을 나타내는 탄성암 선단에 각각 비례제어, 비례-미분제어, 비례-적분-미분제어를 사용하여 실험결과를 나타낸 것으로 탄성암의 길이 850mm에 대한 선단질량을 갖지않는 경우와 50g인 경우의 실험결과이며, 특히 적분제어에 의한 잔류진동의 감소가 현저함을 보인다.

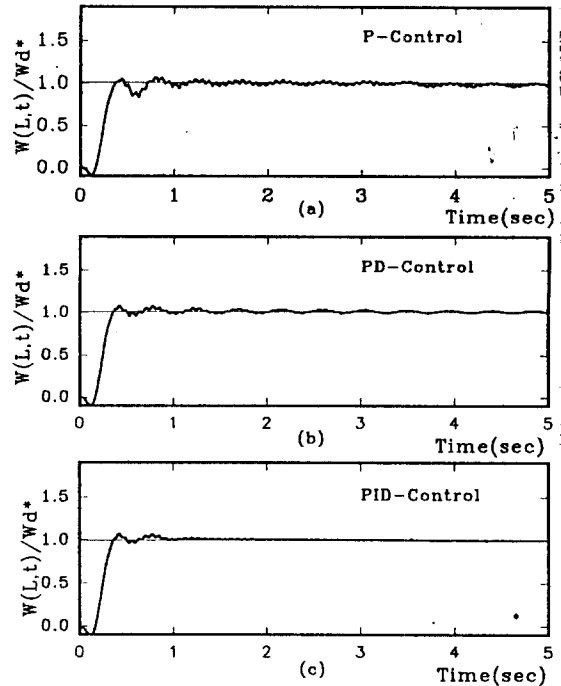


Fig.4 Tip displacement according to (a) P-control, (b) PD control and (c) PID control at $G_p=24A/m$, $G_d=0.82A.s/m$ and $G_i=0.032A.s/m$ ($L=850mm$, $M_p=0g$, $f_n=2.25Hz$, Experimental results)

그림 6, 7은 탄성암의 길이를 450mm로 고정시키고 선단질량을 각각 $M_p=25g$, $75g$ 으로 변화시켰을 때의 수치계산과 실험결과이며, 그림 8, 9는 탄성암의 길이를 850mm로 고정시키고 선단질량을 각각 $M_p=25g$, $75g$ 으로 했을 때의 수치계산 및 실험결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 주어진 비례-적분-미분계인 값에 의하여 암선단이 목표위치에 빨리 수렴함과 미세 잔류진동까지도 감쇠되어 선단의 위치제어가 보다 더 정확하게 이루어짐을 알 수 있다.

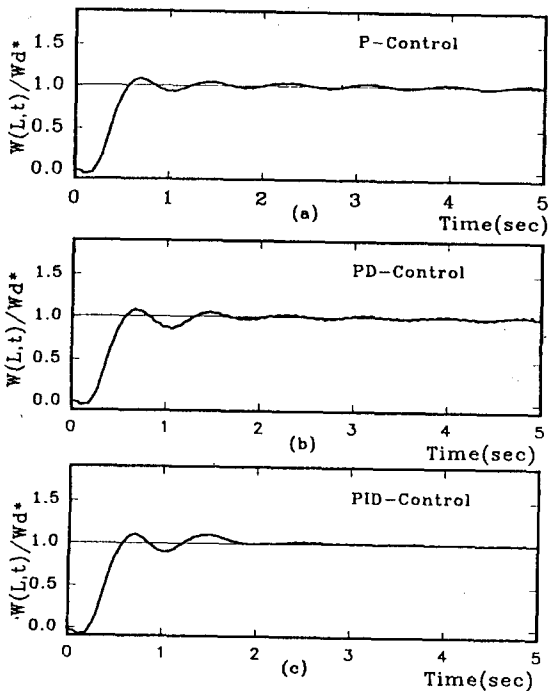


Fig.5 Tip displacement according to (a) P-control, (b) PD control and (c) PID control at $G_p=15A/m$, $G_d=0.55A.s/m$ and $G_i=0.0217 A/s.m$ ($L=850mm$, $M_p=50g$, $f_n=1.225 Hz$, Experimental results)

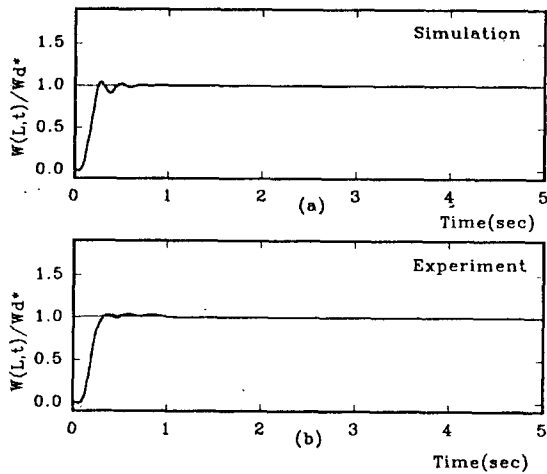


Fig.6 Tip displacement controlled by using PID Gain at $G_p=38 A/m$, $G_d=0.3 A.s/m$ and $G_i=0.0478 A/s.m$ (a) theoretical result, (b)experimental result. ($L=450mm$, $M_p=25g$, $f_n=3.8Hz$)

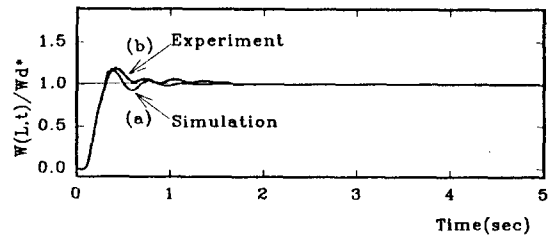


Fig.7 Tip displacement controlled by using PID Gain at $G_p=30 A/m$, $G_d=1.1 A.s/m$ and $G_i=0.0571 A/s.m$ (a) theoretical result, (b)experimental result. ($L=450mm$, $M_p=75g$, $f_n=3Hz$)

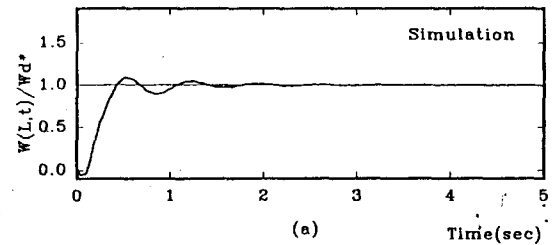


Fig.8 Tip displacement controlled by using PID Gain at $G_p=15.2 A/m$, $G_d=0.63 A.s/m$, and $G_i=0.02351 A/s.m$ (a) theoretical result, (b)experimental result. ($L=850mm$, $M_p=25g$, $f_n=1.3Hz$)

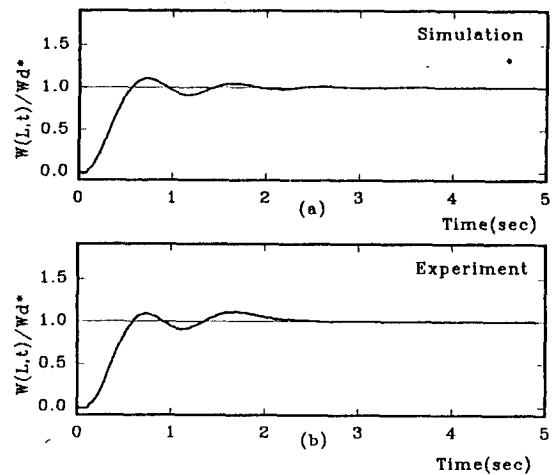


Fig.9 Tip displacement controlled by using PID Gain at $G_p=12.3 A/m$, $G_d=0.5 A.s/m$ and $G_i=0.012 A/s.m$ (a) theoretical result (b)experimental result. ($L=850mm$, $M_p=75g$, $f_n=1.05Hz$)

5. 결론

비례-적분-미분제어를 사용하여 길이와 선단길량의 변화를 갖는 1-Link 탄성암 선단을 50mm만큼 초기위치에서 목표위치까지 병진이동시킬 경우 발생하는 암 선단의 잔류진동과 위치결정 정도를 연구하였다. 비례-적분-미분제어에서 적분개인은 기존의 비례-미분제어보다 탄성암 선단의 잔류진동을 신속히 감소시키는 제어성을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한, 비례-적분-미분제어는 선단 길량과 암의 길이 변화에 따른 탄성암 선단의 신속한 위치제어에 효과적이며 수치계산값과 실험값에도 잘 일치함을 보인다.

REFERENCES

- [1] S.Chonan and A.Umeno, "Closed-loop end-point control of a two-link flexible arm with a payload," J. of Sound and Vibration, Vol.3, No.133, pp.483-495, 1989.
- [2] S.B. Skaar and D.Tucker, "Point Control of a One Link Flexible Manipulator," Trans. of ASME, J. of Applied Mechanics, Vol.53, pp.23-27, 1986.
- [3] S.H.Wang, T.C.Hsia, and J.L.Wiederich, "Open-Loop Control of a Flexible Robot Manipulator," Int'l J. of Robotics and Automation, Vol.1, No.2, pp.54-57, 1986.
- [4] H.Kanoh, S.Tzafestas, H.G.Lee and J.Kalat, "Modelling and Control of a Flexible Robot Arms," Proceedings of 25th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 1866-1870, 1986.
- [5] Edurado Bayo, "A finite-Element approach to Control the End-Point Motion of a Single-Link Flexible Robot," J. of Robotics System, Vol.4, No.1, pp. 63-75, 1986.
- [6] A.Truckenbroudt, "Truncation Problems in the Dynamics and Control of Flexible Mechanical System," IFAC Control Science and Technology 8th Triennial World Congress, pp.1909-1914, 1981.
- [7] S.Lee, S.Chonan, and H.Inooka, "End-Point Positioning of One-Link Flexible Arm under Translational Motion," '90 KACC, Vol.2, pp.890-895, 1990.
- [8] S.C.Lee, D.Y.Pang, S.Chonan, and H.Inooka, "Tip Position Control of 1-Link Flexible Arm by Inverse Dynamics," '91 KACC, Vol.2, pp.1453-1458, 1991.
- [9] 程勳, 李聖哲, 長南征二, 猪岡光. "선단 길량을 갖는 병진운동 단일링크 탄성암 선단의 closed-loop 제어," 한국정밀공학회, '92춘계 학술대회 초록집, pp. 185-189, 1992.
- [10] W.T. Weeks, "Numerical Inversion of Laplace Transforms Using Laguerre Functions," J. of the Association for Computing Machinery, Vol.13, No.3, pp.419-426, 1966.