

압전소자를 이용한 수평 병렬형 머니플레이터의 능동 진동 제어

강봉수[#]

Active Vibration Control of a Planar Parallel Manipulator using Piezoelectric Materials

Bong Soo Kang[#]

ABSTRACT

This paper presents a new approach for the use of smart materials, piezoelectric materials of PVDF and PZT, for vibration attenuation of a planar parallel manipulator. Since lightweight linkages of parallel manipulators deform under high acceleration/deceleration, an active damper is needed to attenuate vibration due to structural flexibility of linkages. Based on the dynamic model of a planar parallel manipulator, an active damping controller is developed, which consists of a PD feedback control scheme, applied to linear electrical motors, and a linear velocity feedback (L-type) scheme applied to either PVDF layer or PZT actuator(s). Simulation results show that piezoelectric materials yield good damping performance, resulting in precise manipulations of a planar parallel manipulator.

Key Words : Piezoelectric materials(압전소자), Parallel Manipulator(병렬형 머니플레이터), Structural Flexibility (구조적 연성), Vibration Control(진동 제어)

1. 서론

산업계에서는 제품의 생산성을 높이기 위하여 고속의 움직임을 요구하므로, 로봇의 링크는 점점 경량화되어 높은 가속도에서는 링크의 변형(deformation)이 일어난다. 또한 로봇이 목표점에 도달한 후에도 링크의 변형에 의한 진동이 계속 잔존하므로 다음 단계로의 작업을 진행할 수가 없다. 유연한 링크(structurally flexible link)를 가진 로봇의 진동문제는 그 작업형태에 따라서 다양하게 연구가 진행되어 왔다. 링크의 연성을 고려한 직

렬형 로봇의 해석을 시작으로¹, 링크 연성을 가진 직렬형 로봇이 외부환경에 접하여 제한적 움직임(constraint manipulation)을 하는 경우^{2,3}, 링크 연성을 가진 두개 이상의 직렬형 로봇이 공동으로 작업을 수행하는 등⁴ 여러 경우에 대해서 연구가 이루어졌다. 제한적 움직임을 갖는 직렬형 로봇이나 두개 이상의 직렬형 로봇이 하나의 대상물을 공동으로 파지 할 경우는 전체 계로 본다면 한 개 이상의 폐회로 구조를 가지므로 병렬형 로봇과 기구학적으로 흡사하다. 그러나 링크 연성을 가진 병렬형 로봇에 대한 동역학 해석 그리고 진동으로

¹ 2002년 8월 30일 접수
[#] 교신저자, 한남대학교 기계공학과
Email bskang@hannam.ac.kr Tel. (042) 629-7983

생긴 문제를 해결하기 위한 연구는 미비하다.^{5,6}

본 논문은 링크 연성을 가진 수평 병렬형 (planar parallel) 로봇에 대한 동역학식을⁶ 바탕으로 병렬형 로봇의 진동으로 생기는 문제점을 해결하기 위하여, 압전소자(piezoelectric material)를 이용한 능동 진동 제어방법을 제시하고자 한다. 압전소자는 유연한 링크의 표면에 부착되어, 소자에 가해진 전압에 비례하며 전단력(shear force)를 발생시키며, 발생한 전단력은 링크의 변형으로 생기는 전단력을 상쇄시키므로써 링크의 진동을 억제할 수 있다.⁷ 압전 소자로는 PVDF(piezoelectric material, polyvinylidene fluoride)와 PZT(piezoelectric material, lead zirconium titanate) 두가지 서로 다른 재료를 사용하여 각각 능동 진동 제어를 구성하였고, 그 성능을 전산모의 실험하였다.

링크 연성을 갖는 수평 병렬형 로봇을 구동하기 위한 구동부는 크게 두 부분으로 구성된다. 첫 번째 부분은 로봇 링크의 조인트를 구동하는 선형 구동기로서 PD(proportional and derivative) 피드백 제어기로 제어된다. 두 번째 부분은 로봇 링크에서 발생하는 진동을 제거하기 위한 압전소자로서, 가해지는 전압은 선형 속도(linear velocity) 피드백 제어기⁸로 제어된다. 따라서 병렬형 로봇의 끝단(end-effector)에 해당하는 플랫폼이 주어진 궤적을 따라 빠르게 움직이는 동안 그리고 목표점에 도달한 후에도 PVDF 혹은 PZT 압전소자는 링크에 발생하는 진동을 상쇄함으로써 플랫폼이 정확히 궤적을 추종하게 하며 목표점에 도달한 후에는 다음 단계의 작업을 곧바로 진행 할 수 있도록 한다.

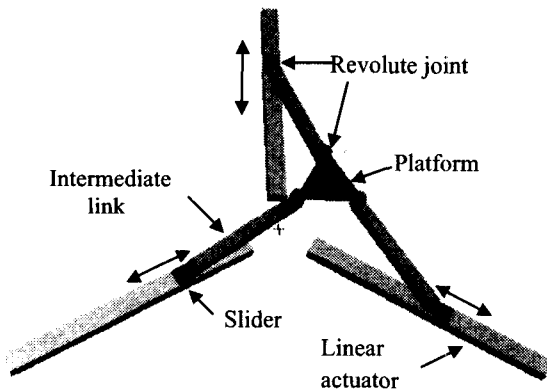


Fig. 1 Configuration of planar parallel manipulator with motion of slides indicated

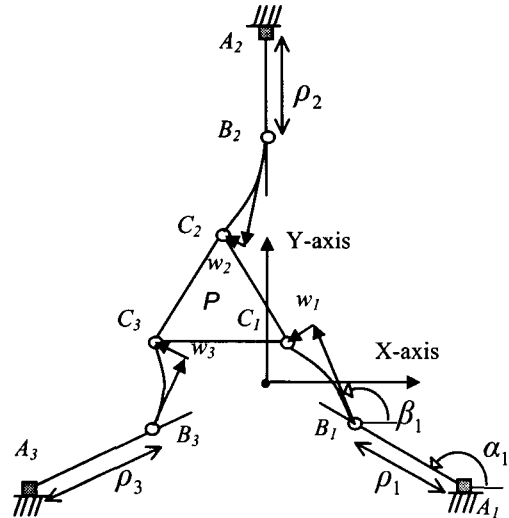


Fig. 2 Schematic illustrating the coordinates of the parallel manipulator. Note the linkages B_iC_i , $i=1,2,3$ are shown with exaggerated deformations

2. 수평 병렬형 로봇의 동역학 해석

그림 1 은 수평 병렬형 로봇의 구조를 보여주고 있다. 로봇 끝단에 해당하는 플랫폼이 3 개의 중간링크(intermediate link)에 의하여 지지되며 3 개의 중간링크들은 각각 3 개의 슬라이더(slides)에 연결된다. 슬라이더는 선형 구동기, 혹은 볼스크루우(ball-screw)에 회전모터를 연결한 선형 운동기구에 연결되어 직선경로를 운행한다.

구동기로부터 플랫폼까지는 직진조인트(prismatic joint)와 두개의 연속적인 회전조인트(revolute joint)로 구성되어 PRR(prismatic-revolute-revolute)구조라 한다. 밑줄(underline)에 해당하는 조인트가 실제 구동이 이루어지는 능동 조인트(active joint)를 표시한다. 플랫폼의 위치와 방위는 중간링크의 움직임에 의해서 복합적으로 영향을 받으므로 직렬형 로봇에 비하여 동역학식이 복잡하고 제어가 어렵다.

그림 1 에서 보여진 로봇의 중간링크를 강체(rigid body)로 가정하지 않고 유연한(flexible) 재료로 가정할 경우, 로봇의 동역학을 유도하기 위해서는 중간링크의 변형을 모델링 해야한다. 연성을 가진 재료는 FEM(finite element method)이나

assumed modes method 을 이용하여 모델링 할 수 있다. 본 연구에서는 빔(beam)과 같은 단순한 형태의 재료에 적합한 assumed modes method 를 이용하여, 중간링크의 변형을 다음과 같이 표현한다.

$$w_i(x,t) = \sum_{j=1}^r \eta(t)_{ij} \psi_j(\xi) \quad i=1,2,3 \quad (1)$$

여기서: $\xi = x/l$, l : 링크길이.

x 좌표는 변형이 일어나지 않을 경우 그림 2 에서 중간링크의 B_i 에서 C_i 으로 향하는 방향이며, ξ 는 x 를 링크길이로 나누었기 때문에 0 과 1 사이의 값을 가진다. $\psi(\xi)$ 는 무차함수인 형상함수(shape function)로 유연한 링크의 경계조건에 부합하도록 그 형태를 선정해야 한다. 함수 $\eta(t)$ 는 시간에 대한 함수로 로봇의 동역학을 나타내는 일반 좌표계에 포함되어 로봇에 구동력을 포함한 외부 힘이나 토크가 가해졌을 때, 로봇의 동역학식을 통해서 구해지는 중간링크의 시간에 따른 변형값이다. 따라서 η_{ij} 는 i 번째 링크의 j 번째 진동모드를 나타낸다. r 은 유연한 재료의 모델링에 사용되는 모드수(number of modes)로서, 모드수가 많을수록 변형을 정확하게 예측할 수 있으나 계산량이 많아지게 된다.

유연한 성질을 갖는 중간링크의 경계조건은 그림 2 에서 보듯이 B_i 점에서는 회전만이 가능하고 플랫폼과 연결되는 C_i 점에서는 자유롭게 움직인다고 가정하여, 이에 해당하는 형상함수는 다음과 같다.⁹

$$\psi_j(\xi) = \frac{1}{2 \sin(\gamma_j)} \left[\sin(\gamma_j \xi) + \frac{\sin(\gamma_j)}{\sinh(\gamma_j)} \sinh(\gamma_j \xi) \right]$$

$$\text{여기서: } \gamma_j = (j + 0.25)\pi \quad j=1,2,\dots,r \quad (2)$$

그림 3 의 상단은 세번째 모드까지의 형상함수를 나타내며, 하단은 형상함수를 x 에 대하여 미분한 함수를 나타내고 있다.

중간링크의 변형을 기술하는 좌표를 포함하여 로봇의 운동을 기술하기 위한 일반 좌표계는 다음과 같다.

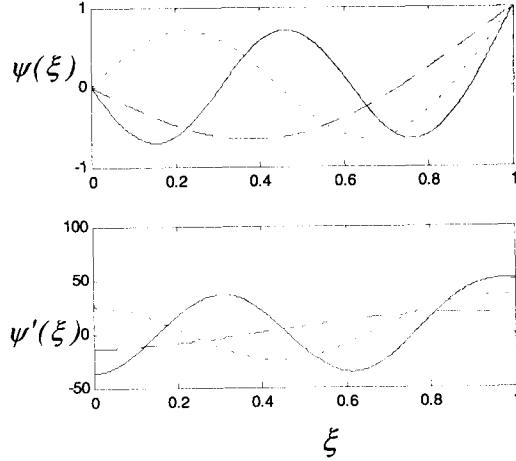


Fig. 3 First three mode shapes of straight beam and its derivatives with respect to x (dashed line: first, dotted line: second, solid line: third)

$$\mathbf{X} := [\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\beta}, \mathbf{X}_p, \boldsymbol{\eta}]^T \in \mathbb{R}^{9+3r} \quad (3)$$

$$\text{여기서: } \boldsymbol{\rho} := [\rho_1, \rho_2, \rho_3]^T \in \mathbb{R}^3$$

$$\boldsymbol{\beta} := [\beta_1, \beta_2, \beta_3]^T \in \mathbb{R}^3$$

$$\mathbf{X}_p := [x_p, y_p, \phi]^T \in \mathbb{R}^3$$

$$\boldsymbol{\eta} := [\eta_{11} \dots \eta_{21} \dots \eta_{31} \dots \eta_{3r}]^T \in \mathbb{R}^{3r}$$

(x_p, y_p) 는 그림 2 에서 기준 좌표계(reference frame)에서 측정한 P 점의 좌표이며, ϕ 는 플랫폼이 Z 축에 -지면에서 나오는 방향-대해서 기준좌표계에 대한 회전각이다. 기준좌표계, X - Y , 의 원점은 세계의 선형구동기를 나타내는 선분을 계속 연장하였을 때 만나는 점이다.

링크의 연성을 제외할 경우 일반 좌표계는 9 개의 좌표들로 구성된다. 로봇의 자유도(degree of freedom)는 3 임을 고려하면 6 개의 종속적인 좌표들이 추가로 첨가되었다. 이로 인하여 Lagrangian 방법을 통해서 동역학식을 유도하는 과정에서 6 개의 기구학 조건식(constraint equations)과 이에 결합하는 Lagrange multiplier 가 도입된다.

먼저 슬라이더의 질량을 m_s 라고 정의하면 3 개의 슬라이더의 운동에너지(kinetic energy)는 다음과 같다.

$$T_s = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} m_s \dot{\rho}_i^2 \quad (4)$$

중간 링크의 단위길이 당 질량을 균일하게 ρ_A 라 하면 링크들의 운동에너지 합은 다음과 같다.

$$T_L = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} \int \rho_A [\dot{\rho}_i^2 + (x\dot{\beta}_i + \dot{w}_i)^2 + 2\dot{\rho}_i(x\dot{\beta}_i + \dot{w}_i) \sin(\alpha_i - \beta_i)] dx \quad (5)$$

플랫폼의 운동에너지는 다음과 같다.

$$T_P = \frac{1}{2} m_P (\dot{x}_P^2 + \dot{y}_P^2) + \frac{1}{2} I_P \dot{\phi}^2 \quad (6)$$

여기서 m_P 와 I_P 는 각각 플랫폼의 질량과 무게중심에서의 관성모멘트(mass moment of inertia)를 나타낸다. 로봇은 중력의 방향과 수직인 평면에서만 움직인다고 가정하면 중력에 의한 위치에너지(potential energy)의 변화는 운동전후에 발생하지 않으며 각 조인트에서의 마찰도 무시한다. 따라서 전체 시스템 위치에너지의 변화는 중간링크의 변형에 의한 에너지로서 다음과 같이 표현된다.

$$V = \sum_{i=1}^3 \int EI \left(\frac{d^2 w_i}{dx^2} \right)^2 dx \quad (7)$$

여기서 E 는 링크의 탄성변형률(elastic modulus), I 는 링크 단면적의 면적 관성모멘트(area moment of inertia)를 나타낸다. 그림 2 에서 보여준 병렬형 로봇의 구조에서 3 개의 링크들에 대한 기구학 제한식을 유도하면 다음과 같다.

$$\Gamma_{2i-1} := \rho_i \cos \alpha_i + l \cos \beta_i - \sum_{j=1}^r \eta_{ij} \sin \beta_j - x_P - x_{ci} = 0, \quad i=1,2,3 \quad (8)$$

$$\Gamma_{2i} := \rho_i \sin \alpha_i + l \sin \beta_i + \sum_{j=1}^r \eta_{ij} \cos \beta_j - y_P - y_{ci} = 0, \quad i=1,2,3 \quad (9)$$

기구학 제한식과 Lagrange multiplier 를 도입하여 수평 병렬형 로봇의 Lagrangian 방정식을 표현하면

다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{X}_i} \right) - \frac{\partial (T-V)}{\partial X_i} = Q_i + \sum_{k=1}^6 \lambda_k \frac{\partial \Gamma_k}{\partial X_i}, \quad i=1,2,\dots, 9+3r \quad (10)$$

여기서 Q_i 는 해당되는 일반좌표에 작용하는 일반 힘(generalized force), λ_k 는 k 번째 Lagrange multiplier, 그리고 T 는 전체 운동에너지로 식(4)(5)(6)의 합에 해당된다. 일반좌표계에는 슬라이더, 중간링크, 플랫폼의 운동을 기술하기 위한 9 개의 좌표들과 중간 링크의 변형을 기술하고 있는 $3r$ 개의 좌표가 있으며, 식(10)은 $9+3r$ 개의 방정식을 나타낸다. 식(4)에서 식(9)까지의 식들을 식(10)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 & M_{14} \\ M_{12}^T & M_{22} & 0 & M_{24} \\ 0 & 0 & M_{33} & 0 \\ M_{14}^T & M_{24}^T & 0 & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\rho} \\ \ddot{\beta} \\ \ddot{X}_P \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 0 \\ V_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \\ \beta \\ X_P \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{\Gamma 1} \\ J_{\Gamma 2} \\ J_{\Gamma 3} \\ J_{\Gamma 4} \end{bmatrix} \lambda \quad (11)$$

여기서: $M_{11} \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$, $M_{12} \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$, $M_{14} \in \mathfrak{R}^{3 \times 3r}$,
 $M_{22} \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$, $M_{24} \in \mathfrak{R}^{3 \times 3r}$, $M_{33} \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$,
 $M_{44} \in \mathfrak{R}^{3r \times 3r}$: 관성 행렬 (inertia matrices)
 $V_1 \in \mathfrak{R}^3$, $V_2 \in \mathfrak{R}^3$, $V_4 \in \mathfrak{R}^{3r}$: Coriolis 와 centrifugal 성분들을 포함한 벡터
 $K \in \mathfrak{R}^{3r \times 3r}$: 링크의 강성행렬(stiffness matrix)
 $\lambda \in \mathfrak{R}^6$: Lagrange multiplier 을 포함한 벡터
 $J_{\Gamma 1} \in \mathfrak{R}^{3 \times 6}$, $J_{\Gamma 2} \in \mathfrak{R}^{3 \times 6}$, $J_{\Gamma 3} \in \mathfrak{R}^{3 \times 6}$,
 $J_{\Gamma 4} \in \mathfrak{R}^{3r \times 6}$: 일반좌표에 대한 제한식의 편미분(partial derivatives)
 $U := [u_1 \ u_2 \ u_3 \ 0 \ \dots \ 0]^T \in \mathfrak{R}^9$: 선형구동기에 가해지는 제어입력 벡터

각 행렬과 벡터의 세부사항은 참고문헌⁶에 나

타난다.

3. 제어기 설계

유연한 링크를 가진 수평 병렬형 로봇의 제어기는 크게 두 부분으로 나뉘어진다. 먼저 중간링크의 연성이 없다고 가정할 경우, 플랫폼이 원하는 궤적을 추정하기 위해서는 역기구학을 통해서 나온 각 슬라이더의 위치를 정확히 제어해야 한다. 따라서 각 슬라이더를 구동하는 세 개의 직선형 선형구동기에 작용하는 제어입력은 플랫폼의 궤적 추종을 위한 입력으로 다음과 같이 일반적인 PD 피드백 제어기를 사용하였다.

$$u_i(t) = -k_p(\rho_{di} - \rho_i) - k_d(\dot{\rho}_{di} - \dot{\rho}_i), \quad i=1,2,3 \quad (12)$$

여기서 ρ_{di} 와 $\dot{\rho}_{di}$ 는 각각 주어진 궤적을 추종하기 위한 슬라이더의 위치 및 속도 목표값이다. 두번째 부분은 로봇의 가속 및 감속으로 인하여 발생하는 관성력에 의하여 중간 링크가 진동할 경우 이를 상쇄시키기 위해서 중간링크의 표면에 장착되는 압전소자와, 압전소자에 전압을 가해주는 제어기로 구성된다. 링크의 변형이나 진동에 의해서 발생한 전단력을 상쇄하도록 압전소자에 가해지는 전압을 제어할 경우 링크의 진동을 억제할 수 있다. 다음절에는 서로 다른 재질로 구성된 압전소자 PVDF 와 PZT 에 대해서 소개한다.

3.1 PVDF

그림 4(a)와 같이 PVDF 층을 중간링크의 한쪽면에 부착했을 때 압전소자에 가해지는 전압, V_i , 에 의해서 행해진 가상일(virtual work)은 다음과 같다.

$$\delta W_{PVDF} = cV_i(t) \sum_{j=1}^r \psi'_j(l) \delta \eta_{ij} \quad (13)$$

여기서 c 는 압전소자의 성질과 링크 재료의 성질에 의해서 결정되는 상수값으로, 압전소자에 가해진 단위 전압에 대한 모멘트값이다.¹⁰ 링크의 진동에 의한 전단력을 상쇄하기 위해서 전압입력을 다음과 같이 선정한다면,

$$V_i(t) = -k_l \dot{w}'_i(l, t) \quad i=1,2,3 \quad (14)$$

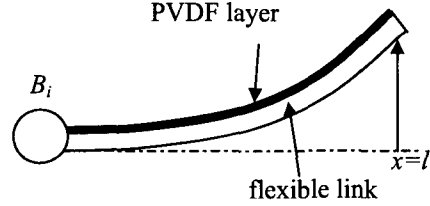


Fig. 4(a) Intermediate link with PVDF layer

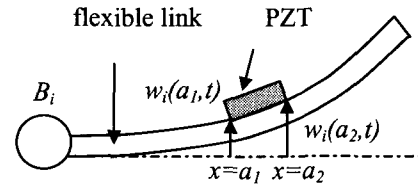


Fig. 4(b) Intermediate link with PZT actuator

게인, k_l 가 양수(positive value)인 조건에서 링크에서 발생한 진동을 안정하게 감쇠할 수 있다. 하지만 링크 변형 기울기의 시간에 대한 변화율, $\dot{w}'_i(l, t)$ 을 얻는 것은 현재의 센서를 가지고는 어렵다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 제시된 L-type (linear velocity type) 제어기는⁸ 다음과 같다.

$$V_i(t) = -k_l \dot{w}_i(l, t) \quad i=1,2,3 \quad (15)$$

식(14)와 식(15)을 비교하면 링크 변형 기울기에 대한 변화율, $\dot{w}'_i(l, t)$ 대신에 링크 변형에 대한 변화율, $\dot{w}_i(l, t)$ 로 대체하였기 때문에, 가속도계(accelerometer)를 가지고 $\dot{w}_i(l, t)$ 를 측정 후 적분을 수행하면 식(15)으로 표현된 제어입력을 계산할 수 있다. 다행히도 유연한 중간링크의 모델링을 위해서 선정된 형상함수의 경계조건을 살펴보면, $x=l$ 에 해당하는 C 점에서 형상함수와, $\varphi_j(x=l)$, 형상함수의 길이방향에 대한 미분, $\varphi'_j(x=l)$ 은 모든 모드에 있어서 동일한 부호를 갖고 있기 때문에 L-type 제어기로 대체하여도 시스템의 안정성을 유지할 수 있다.

3.2 PZT

PZT 는 작은 크기로 제조가 되기 때문에 링크

위에 여러 개의 압전소자를 부착하여 진동 감쇠효과를 배가시킬수가 있다. 본 연구에서는 링크의 길이를 고려하여 하나의 PZT 를 부착하여 진동 감쇠성능을 시험하였다. PZT 가 그림 4(b)와 같이 링크를 따라 a_1 과 a_2 사이에 부착이 되었을 때 압전소자에 가해지는 전압에 의해서 행해진 가상일은 다음과 같다.

$$\delta W_{PZT} = cV_i(t) \sum_{j=1}^r [\psi'_j(a_2) - \psi'_j(a_1)] \delta \eta_{ij} \quad (16)$$

PVDF 의 경우와 같이 L-type 제어기를 구현하면 다음과 같다.

$$V_i(t) = -k_i [\dot{w}_i(a_2, t) - \dot{w}_i(a_1, t)], i=1,2,3 \quad (17)$$

PVDF 와는 달리 PZT 에 L-type 제어기를 사용할 경우 문제점이 존재한다. 제어 시스템의 안정성을 보장하기 위해서는 $x \in [a_1, a_2]$ 영역에서 모든 모드의 $\psi_j(x)$ 와 $\psi'_j(x)$ 가 동일한 형태를 가져야 한다;

$$(\psi_j(a_2) - \psi_j(a_1))(\psi'_j(a_2) - \psi'_j(a_1)) \geq 0 \quad (18)$$

그러나 모드수가 증가하면 그림 3 에서 알 수 있듯이 조건을 만족하는 영역이 점점 작아져서 결국은 PZT 크기보다도 작아지게 되어 조건을 만족하는 영역을 찾을 수 없다. 그러나 진동의 진폭은 일반적으로 첫번째 혹은 앞선 진동모드(vibration modes)들에 의해 그 크기의 대부분이 결정되므로, 앞선 모드들에 대한 안정성 조건을 만족하는 영역에 PZT 를 부착한다면 L-type 제어기로도 진동을 감쇠시킬 수 있다. 더욱이 PZT 는 PVDF 에 비해 밀도가 크지만, 높은 응력계수를 가지고 있어서 -단위 전압 당 더 큰 전단력을 낼 수 있으므로- 높은 진동 감쇠효과를 낼 수 있다.

4. 전산모의 실험

압전소자를 이용한 수평 병렬형 로봇의 진동 감쇠효과를 시험하기 위하여 2 장에서 유도한 동역학식을 이용하여 전산 모의 실험을 수행하였다. 전산 모의 실험에서는 세번째 모드까지 모델링하

여 로봇의 진동현상을 관찰하였으며, 로봇의 동역학식, 식(10),을 적분하기 위하여 0.1 millisecond 간격으로 4 차 Runge-Kutta 방법을 이용하였다. 수평 병렬형 로봇의 플랫폼이 추종해야할 궤적은 다음과 같다.

$$x_p = \frac{x_f}{t_f} t - \frac{x_f}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{t_f} t\right) \quad (19)$$

식(19)에서 표현된 궤적은 출발점과 목표점에서 부드러운 곡선을 가지므로 로봇의 급격한 감속을 피할 수 있다. 수평 병렬형 로봇의 잠재적 주된 응용 분야는 고밀도 집적회로에서 와이어 본딩(wire bonding)과 같은 고속, 고정밀이 요구되는 전자산업이므로, 플랫폼의 이동구간은 짧지만 빠른시간에 이루어진다. 따라서 플랫폼의 이동거리는 기준좌표계의 원점에서 출발하여 X 축을 따라 2 mm (x_f) 로, 이동시간은 10 msec (t_f)로 선정하였다.

전산모의실험에 사용된 수평 병렬형 로봇의 주요 제원(specifications)은 표 1 에 나와 있으며, 식(12), 식(15), 식(17)에서 기술된 피드백 제어기의 게인은 표 2 에 표시하였다. PVDF 층에 가해지는 전압을 조절하는 L-type 제어기의 게인은 PVDF 층에 가해지는 전압이 600V 이내가 되도록 게인, k_i , 을 설정하였으며, PZT 감쇠기를 위한 제어기의 경우는 진동 모드가 발산하지 않도록 게인을 설정하였다. 모든 제어기에 있어서 샘플링 주기(sampling rate)는 1 millisecond 이다. 사용된 압전소자의 특성은 표 3 에 나타내었으며, PZT 감쇠기는 로봇 링크의 길이와 안정성 조건을 고려하여 $\xi \in [0.66, 0.91]$ 위치에 한 개만을 부착하였으며, 이 경우 세번째 모드까지는 식(18)의 조건을 만족한다.

그림 5 에서 그림 8 까지는 PVDF 층을 중간링크의 표면에 부착한 후 궤적 추종을 수행한 결과이다. 그림 5 는 주어진 궤적을 추종해야 하는 플랫폼의 중심에서 궤적추종오차를 보여주고 있다. 시작점에서의 가속으로 인하여 초기 출발시 큰 오차를 보여주고 있으며 목표점에 도달한 후에도 (20ms) 링크의 진동으로 인하여 플랫폼은 주기적인 궤적오차를 보인다. 그러나 PVDF 층을 이용한 능동제어기를 사용할 경우 그림 5 의 실선에서 보여주듯이 오차의 크기가 시간에 따라 점점 줄어 들고 있다. 그림 6 은 링크의 변형이 가장 크게 일어

나는 링크의 끝단, C_i , 점에서 변형의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 세개의 링크들 모두 압전소자의 작용으로 인하여 변형이 점점 작아지고 있으며, 이로 인하여 세개의 링크가 지지하는 플랫폼의 진동도 점점 줄어들게 된다. 그림 7 은 첫번째 링크에서의 변형값을 진동모드순으로 분리한 것으로 세번째까지의 진동모드를 살펴보면 모든 모드에서 진폭이 점점 줄어들고 있으며 크기로 보면 첫번째 모드가 두번째 모드에 비하여 20 배, 세번째 모드에 비하여 100 배 정도 큰 값을 가진다. 그림 8 은 1 축 구동기에 가해지는 제어입력으로서 상단은 플랫폼을 정해진 위치로 이동하는데 필요한 선형구동기의 입력을 나타내며, 하단은 링크에서 발생한 진동을 억제하기 위해서 압전소자에 가해지는 전압 입력이다. 선형 구동기는 주로 궤적추종구간 - 시작에서 20ms 까지- 에서 작동을 하고, PVDF 층을 이용한 제어기는 시작부터 진동이 완전히 감쇠될 때까지 작동하며 그 크기가 진동의 진폭이 작아짐에 따라 점점 줄어들고 있다.

그림 9 에서 그림 13 까지는 PZT 를 이용한 실험결과이다. 그림 5 와 그림 9 를 비교하면 PZT 를 이용한 제어기가 PVDF 를 이용한 제어기보다 진동감쇠에 있어서 우수한 성능을 내고 있음을 알 수 있다. 이는 PZT 가 높은 응력계수를 가짐으로서 단위 전압 당 더 큰 전단력을 낼 수 있기 때문이다. 그림 10 에서 보듯이 80ms 가 되면 세개의 링크에서 생기는 변형을 모두 상쇄시킬 수 있으며 그림 11 에서도 각 진동모드가 0 으로 수렴하고 있음을 보여주고 있다. 그림 12 는 가해진 제어입력으로서 그림 7 의 하단과 비교하면 압전소자에 가해지는 전압은 오히려 PZT 가 더 작음을 알 수 있다. 결과에서 보듯이 PZT 를 이용한 능동제어기가 본 응용에서는 더 좋은 성능을 내고 있지만 3 장에서 기술한 바와 같이 제어시스템의 안정성을 유지하기 위해서는 압전소자가 부착된 위치에서, $x \in [a_1, a_2]$, 형상함수, $\psi_j(x)$, 와 형상함수의 미분, $\psi'_j(x)$, 이 앞선 진동모드에서 동일한 형태를 가져야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 유연한 링크를 가진 수평 병렬형 로봇의 고속운행시 발생하는 진동을 효율적으로 제거하기 위하여 압전소자를 이용한 능동 제어

기를 제안하였다. 압전소자는 PVDF 층으로 이루어진 재료와 PZT 로 이루어진 재료를 사용하였으며, 두 가지 압전소자의 정밀한 구동을 위하여 L-type 제어기를 설계하였다. 전산모의실험을 통해서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 압전소자는 가해진 전압에 따라 유연한 링크의 변형을 상쇄하는 전단력을 생성하여 링크의 진동을 억제할 수 있다. 따라서 수평 병렬형 로봇의 말단장치에 해당하는 플랫폼의 안정된 궤적추종을 수행할 수 있다.
- (2) L-type 제어기를 이용하여 압전소자에 가해지는 전압을 제어하는 경우 PZT 감쇠기의 위치는 안정성 조건에 부합되도록 설정해야 한다.
- (3) 로봇의 진동제어에서는 높은 응력계수를 갖는 PZT 감쇠기가 PVDF 층에 비하여 좋은 진동 감쇠 성능을 보였다.

향후 계획은 유연한 링크를 가진 수평 병렬형 로봇에 제안된 능동 제어기를 적용하여 실제 실험을 수행하고자 한다.

후 기

본 연구는 2002 년도 한남대학교 교비학술연구비지원으로 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Low, K. H. and Vidyasagar, M., "A Lagrangian formulation of the dynamic model for flexible manipulator systems," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 110, pp. 175-181, 1988.
2. Hu, F. L. and Ulsoy, A. G., "Dynamic modeling of constrained flexible robot arms for controller design," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 114, pp. 56-65, 1994.
3. 김진수, "구조적 컴플라이언스 모델링을 이용한 구속받는 유연 매니플레이터의 위치/힘제어," 한국정밀공학회지, Vol. 19, No. 10, pp. 114-119, 2002.
4. Krishnamurthy, K. and Yang, L., "Dynamic modeling and simulation of two cooperating structurally-flexible robotic manipulators," Robotica, Vol. 13, pp. 375-384, 1995.

5. Fattah, A., et al., "Dynamics of a 3-DOF spatial parallel manipulator with flexible links," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nagoya Japan, pp. 627-632, 1995.
6. Kang, B. and Mills, J. K., "Dynamic modeling of structurally-flexible planar parallel manipulator," Robotica, Vol. 20, No. 3, pp. 329-339, 2002.
7. 광문규, "압전세라믹을 이용한 지능 구조물의 능동 진동 제어," 한국정밀공학회지, Vol. 18, No. 12, pp. 30-46, 2001.
8. Sun, D. and Mills, J. K., "PZT actuator placement for structural vibration damping of high speed manufacturing equipment," Proc. of the American Cont. Conf., San Diego, pp. 1107-1111, 1999.
9. Genta, G. Vibration of structures and machines, Springer-Verlag New York, Inc., 1993.
10. Bailey, T. and Hubbard, J. E. Jr., " Distributed piezoelectric-polymer active vibration control of a cantilever beam," J. Guidance, Control and Dynamics, Vol. 8, No. 5, pp. 605-611, 1985.

Table 1 Specification of the planar parallel manipulator

Platform	side length	100 mm
	mass	0.2 kg
Slider	mass	0.2 kg
Linear	stroke	400 mm
actuator	incline angle	150°, 270°, 30°
Intermedia	length	200 mm
te link	density	2770 kg/m ³
	modulus	73 GPa
	cross-section	25 mm(W) * 1.5mm(H)

Table 2 Feedback control gains

k_p	10,000 N/m
k_d	500 N-sec/m
k_f	4,000 V-sec/m for PVDF 1,500 V-sec/m for PZT

Table 3 Parameters of piezoelectric materials

	PVDF	PZT
modulus	2 GPa	63 GPa
length	200 mm	50 mm
thickness	0.28 mm	0.75 mm
width	25 mm	25 mm
density	1800 kg/m ³	7600 kg/m ³
d_{31}	22 * 10 ⁻¹² m/V	110 * 10 ⁻¹² m/V

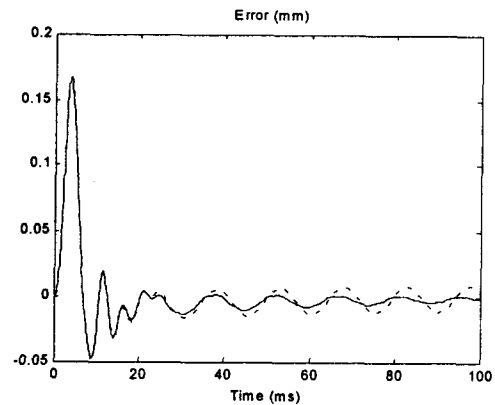


Fig. 5 Error profile of the platform
(dotted line: no damping, solid line: with PVDF layer)

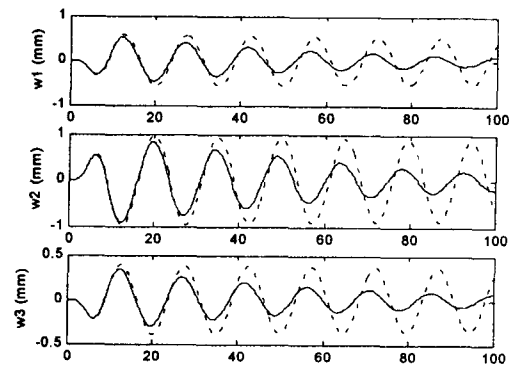


Fig. 6 Flexible deformation of each intermediate link
(dotted line: no damping, solid line: with PVDF layer)

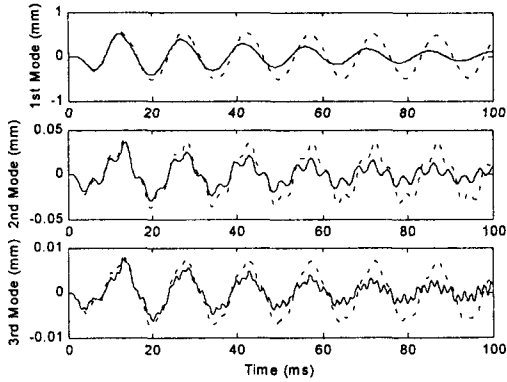


Fig. 7 The first three vibration modes of the first link (dotted line: no damping, solid line: with PVDF layer)

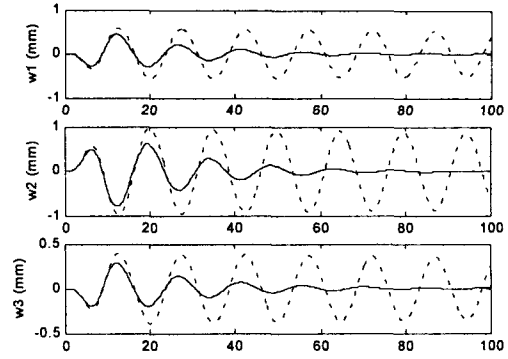


Fig. 10 Flexible deformation of each intermediate link (dotted line: no damping, solid line: with PZT actuator)

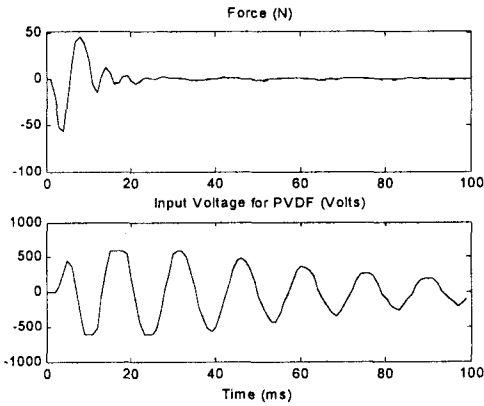


Fig. 8 Control inputs for the 1st actuator (dotted line: no damping, solid line: with PVDF layer)

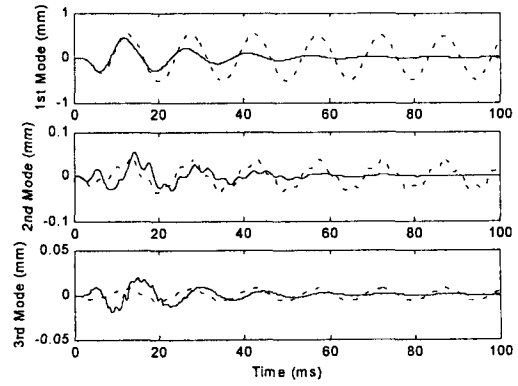


Fig. 11 The first three vibration modes of the first link (dotted line: no damping, solid line: with PZT actuator)

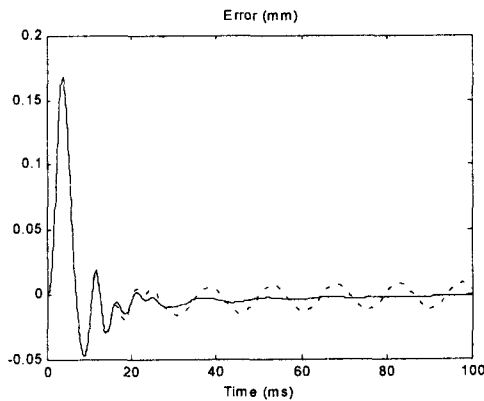


Fig. 9 Error profile of platform (dotted line: no damping, solid line: with PZT actuator)

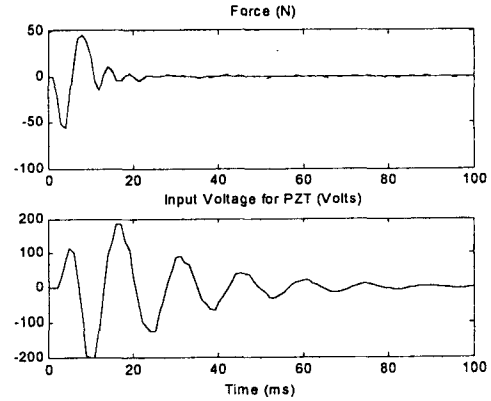


Fig. 12 Control input for the 1st intermediate link (dotted line: no damping, solid line: with PZT actuator)