

압전재료를 이용한 산업용 로봇
매니플레이터의 동탄성 제어

최 승 복*, 정 재 천*, 최 인 수**, 이 태 훈**

Elastodynamic Control of Industrial Robotic
Manipulators Using Piezoelectric Materials

S. B. Choi*, C. C. Cheong*, I. S. Choi**, T. H. Lee**

ABSTRACT

This paper presents the dynamic modeling and control methodology to arrest structural deflections of industrial robotic manipulators featuring elastic members retrofitted with surface bonded pizeoelectric actuators and sensors. The dynamic modeling is accomplished by employing a variational theorem, prior to developing a finite element formulation. This finite element formulation accounts for both original robot member elements and also bonded piezoelectric material elements. The governing equation of motion is then modified by condensing the electric potential vectors and subsequently two different negative velocity feedback controllers are established ; a constant-gain feedback controller and a constant-amplitude feedback controller. By adopting a Model P50 articulating industrial robot manufactured by Gernal Electric Company, computer simulations are undertaken in order to demonstrate superior performance characteristics to be accrued from this proposed methodology such as smaller deflections at the end-effector.

Key Words : Piezoelectric Actuator and Sensor(압전 작동기 및 감지기), Robotic Manipulator(로봇 매니플레이터), Vibration Control(진동제어), Variational Theorem(변분이론), Finite Element Method(유한요소법).

1. 서 론

최근 유연 생산 시스템 상에서 생산성 증가와 연계하여 고속 작동 속도, 높은 위치정확도 그리고 구동 메카니즘의 적은 마찰 등을 특징으로 하는 고 기능의 산업

용 로봇 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 생산 현장에서 사용되는 대부분의 기존 로봇은 강제(rigid-body) 모델로서 설계되고 제작되나, 자체 중량과 가반 중량으로 인한 로봇팔의 구조적 굽힘현상은 피할 수 없으며 따라서 높은 위치 정확도를 가져올수 없다.

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 대학원 기계공학과

이는 고속 작동시 관성력의 급격한 증가로 더욱 심각한 문제로 대두되며 이로 인하여 기존 로봇의 작동 속도와 가반 중량은 많은 제한성을 갖고 있는 실정이다. 이러한 문제의 해결을 위해 유연링크 로봇트랩로 이루어진 로봇트 메카니즘의 동탄성 해석에 대한 연구가 구조물의 경량화 측면에서 활발히 추진되고 있다.

알루미늄 및 철과 같은 기존의 상업용 금속재료로 구성된 유연링크 메카니즘의 최적 설계를 통하여 구조물의 경량화와 진동감소 효과를 얻고 있으며, (1,2) 나아가서 기존의 금속 재질에 비해 무게 대 강도 및 강성비가 우수하며 또한 댐핑 효과가 매우 우수한 복합재료를 이용한 유연링크 설계가 제시되고 있다. (3-5) 특히 복합재료의 사용은 로봇트의 고속 운전시 상대적인 관성력의 감소 및 댐핑 증가로 로봇트팔의 끝단(end-effector)에서 높은 위치 정확도를 얻을 수 있다. 최근에는 첨단기술의 일환으로 '스마트(smart)' 재료와 연계된 구조물로 구성되는 유연링크 메카니즘에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 이 구조물은 구조물 자체가 센싱 및 액츄에이팅 능력을 보유하고 있어 외부 및 내부의 조건 변화에 능동적으로 대처하여 고성능의 효과를 얻을 수 있는 것이 최대 장점이라 할 수 있다. (6) 이러한 기능은 외부에서 공급되는 전압 또는 열을 통해 구조물의 질량, 강성 및 댐핑효과를 제어함으로써 가능하다. 현재 스마트 구조물을 형성하는 매체로는 압전재료, (7-9) 형상기억합금, (10, 11) 전기유동유체 (12, 13) 및 광섬유 (14, 15) 등을 들 수 있다.

본 논문은 압전재료를 작동기(actuator) 및 감지기(sensor)로 사용하여 기존 산업용 로봇트의 고속운전시 발생하는 진동을 제어하는데 그 연구 목적을 두었다. 잘 알려진 바와 같이 압전재료는 전압을 가함으로써 기계적 변형이 발생되고 이와 반대로 기계적 변형으로 전압이 발생하여 작동기 및 감지기 역할을 할 수 있다. 압전재료를 상하로 표면접착한 로봇트팔로 구성된 메카니즘의 동적 모델링을 위해 변분이론(variational theorem)을 적용하였다. 변분이론에서 도출된 지배 방정식과 경계조건을 이용한 해는 수치적 해석방법의 도입 없이는 거의 불가능하므로 근사해를 구하기 위해 유한요소법을 사용하였다. 전기적 준위벡터를 축소함으로써 운동방정식을 간략화 하였으며, 이로부터 피드백(feedback) 제어를 설계하였다. 제어기는 속도성분의 정보를 바탕으로 구성되었으며, 전압공급 형태에 따라 CGFC(constant-gain feedback controller)와 CAFC

(constant-amplitude feedback controller)로 분류하였다. 제안된 방법의 효율성을 입증하기 위해 미국 General Electric 사의 P50 다관절 로봇트를 설정하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 제안된 방법을 통하여 로봇트의 가속 및 감속 운동하에서 우수한 진동제어 효과를 얻었으며 특히 로봇트의 정지시 끝단에서의 매우 빠른 정정시간(settling time)을 얻었다. 한편 적용된 두 제어기의 성능비교 결과 동일 최대 피드백 전압 공급시 CAFC가 CGFC보다 우수한 진동제어 효과를 보였다.

2. 변분이론

Fig. 1에 나타난 공간 메카니즘을 구성하는 압전재료로 만들어진 탄성부재에 대한 변분 수식을 유도한다. Fig. 1에서 축 OXYZ는 관성 기준좌표계를 나타내고 있으며, oxyz는 변형되지 않은 기준 상태에서 동체(body)에 고정된 좌표계이다. 따라서, 시간 t에서 연속체 내의 임의의 한점 P는 다음과 같은 위치벡터로 표현한다.

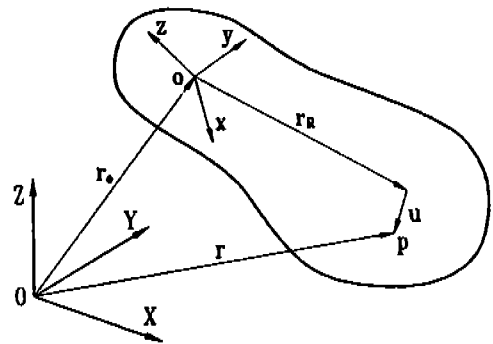


Fig. 1 Definition of axes systems and position vectors

$$r_i = r_{oi} + r_{Ri} + u_i \quad (1)$$

여기서 r_{oi} 는 관성좌표계의 원점으로 부터 측정된 위치 벡터이고 r_{Ri} 는 동체에 고정된 좌표계의 원점으로부터 측정된 P점의 위치벡터, 그리고 u_i 는 변형변위 벡터이다. r_i 의 시간에 따른 변화와 관계된 속도는 \dot{r}_i 로 나타내고, Lagrangian 응력텐서를 사용하여 이 시스템의 동탄성 응답을 지배하는 범함수(functional)를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 J = \int_{t_0}^{t_1} \left\{ \int_V \left[(T-H) + X_i r_i + \frac{1}{2} \gamma_{ij} (\tau_{ij} \right. \right. \\
 - C_{ijk} \gamma_{kl} + d_{kij} E_k) - \frac{1}{2} E_i (D_i - d_{ijk} \gamma_{jk} - \epsilon_{ij} E_j) \\
 + \tau_{ij} (\gamma_{ij} - \frac{1}{2} (u_{ij} + u_{ji})) - D_i (E_i - \phi_i) - \rho p_i [p_i \\
 - (r_{\alpha i}^* + \bar{u}_i + e_{ijk} \psi_j (r_{\alpha k} + r_{Rk} + u_k))] \left. \right\} dV \\
 + \int_{S_1} \bar{g}_i r_i dS - \int_{S_2} g_i (\bar{u}_i - u_i) dS \\
 + \int_S \phi \bar{\sigma} dS \left. \right\} dt \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서 $T (= \frac{1}{2} \rho P_i P_i)$ 는 운동에너지 밀도를 나타내고 $H (= \frac{1}{2} \tau_{ij} \gamma_{ij} - \frac{1}{2} E_i D_i)$ 는 전기엔탈피 밀도이다. 한편, X_i 는 체적력(body force)이고, g_i 는 S_2 영역에 작용하는 표면작용력(surface traction)이다. C_{ijkl} 은 일반화된 Hooke's Law에 대한 탄성계수 텐서이며, 이 텐서는 Lagrangian 응력텐서 τ_{ij} 와 변형율텐서 γ_{ij} 사이를 관계시킨다. 동적좌표계의 각속도 성분은 ψ_i 로 나타내며, e_{ijk} 는 alternating tensor 이다. 표면작용 충전력(surface charge)인 σ 에 의해 발생하는 전기 포텐셜 및 전기장 세기는 각각 ϕ_i , E_i 로 나타내는 반면에, D_i 는 전기적 변위를 나타낸다. 압전 변형율 상수(piezoelectric strain constant)는 d_{ijk} 로 나타내며, ϵ_{ij} 는 압전재료의 절연허용 상수(dielectric permittivity)이다. 이 범함수 표현에서는 세가지 기호가 사용되었다. 즉, (*)는 동적 좌표계 $oxyz$ 에 대한 시간변화율, ($\dot{}$)는 절대 좌표계에 대한 시간변화율 그리고 ($\bar{}$)는 공간미분을 나타낸다. 식(2)에서 (-)는 규정된 양을 의미하고, S_1 은 규정된(prescribed) 표면장력 영역을 나타내며, S_2 는 규정된 표면변위(surface displacement) 영역을 나타낸다. S_1 과 S_2 의 합은 체적 V 를 갖는 연속체의 전표면적 S 로 정의된다. 이를 위해 범함수 J 의 1계 변분을 취하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \delta J = 0 = \int_{t_0}^{t_1} \left\{ \int_V \frac{1}{2} \delta \gamma_{ij} (\tau_{ij} - C_{ijk} \gamma_{kl} + d_{kij} E_k) \right. \\
 dV + \int_V \delta \tau_{ij} (\gamma_{ij} - \frac{1}{2} (u_{ij} + u_{ji})) dV \\
 - \int_V \rho \delta p_i [p_i - (r_{\alpha i}^* + \bar{u}_i + e_{ijk} \psi_j (r_{\alpha k} \\
 + r_{Rk} + u_k))] dV + \int_V \delta u_i (X_i + \tau_{ij} - \rho p_i)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 dS + \int_S \delta \phi (\bar{\sigma} - D_i n_i) dS + \delta r_{\alpha i} \left\{ \int_V X_i \right. \\
 dV + \int_{S_1} \bar{g}_i dS - \int_V \rho p_i dV \left. \right\} \\
 + \delta \psi_j \left\{ \int_V e_{ijk} X_i (r_{\alpha k} + r_{Rk} + u_k) dV \right. \\
 + \int_{S_1} e_{ijk} \bar{g}_i (r_{\alpha k} + r_{Rk} + u_k) dS \\
 \left. - \int_V e_{ijk} \rho p_i (r_{\alpha k} + r_{Rk} + u_k) dV \right\} dt \quad (3)
 \end{aligned}$$

이 식에서 n_i 는 표면 S 로부터 외부로 향하는 단위벡터의 성분이다. 만일 식(3)의 시스템 파라미터 γ_{ij} , τ_{ij} , p_i , u_i , ϕ , E_i , D_i , $r_{\alpha i}$, ψ_i 등에 대해서 각각 임의의 독립적인 변분을 취할 수 있다고 한다면, 시스템 운동을 지배하는 장방정식(field equation)과 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

평형방정식

$$\begin{aligned}
 X_i + \tau_{ij,k} - \rho p_i = 0 \\
 D_{i,i} = 0 \quad (4)
 \end{aligned}$$

구성관계식

$$\begin{aligned}
 \tau_{ij} = C_{ijk} \gamma_{kl} - d_{kij} E_k \\
 D_i = d_{ijk} \gamma_{jk} + \epsilon_{ij} E_j \quad (5)
 \end{aligned}$$

변형률-변위 관계식

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{2} (u_{ij} + u_{ji}) \quad (6)$$

장-포텐셜 관계식

$$E_i = -\phi_{,i} \quad (7)$$

경계 조건

$$\begin{aligned}
 u_i = \bar{u}_i \quad \text{on } S_2 \\
 \tau_{ij} = \bar{g}_i \quad \text{on } S_1 \\
 D_i n_i = \bar{\sigma} \quad \text{on } S \quad (8)
 \end{aligned}$$

3. 유한요소식

식(3)은 연속체 모델에 대한 표현이며, 시스템의 해석을 위한 지배방정식의 해를 얻기 위해서는 유한요소식의 도입이 거의 필수적이라 할 수 있다. 따라서 유연링

크 운동의 응답은 이산된 절점변위항을 부재의 전 강체 운동상에 관계시킴으로써 결정된다. 한 요소내 임의점에서의 일반적인 변위벡터 $\{u^e\}$ 는 절점변위 벡터 $\{U^e\}$ 를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{u^e\} = [N] \{U^e\} \quad (9)$$

여기서 $[N]$ 은 형상함수 행렬이고, 첨자 e 는 요소단위를 의미한다. 한편, 한 요소내 임의점에서의 전기준위 벡터 $\{\phi^e\}$ 는 다음과 같은 공간적 분포를 갖는다고 가정할 수 있다.

$$\{\phi^e\} = [N_e] \{\phi^e\}. \quad (10)$$

여기서 $[N_e]$ 은 전기적 준위에 대한 보간함수를 나타내는 행렬이며, $\{\phi\}$ 는 절점준위벡터이다. 그리고 한 요소내 임의점에서의 속도 p 는 절점속도 벡터 $\{P\}$ 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{p^e\} = [M] \{P^e\}, \quad (11)$$

따라서 식(3)의 세번째항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & - \int_{V^e} \rho (\delta P^e)^T [M]^T [M] (\{P^e\} \\ & - \{P_R^e\} - \{\dot{U}^e\}) dV \end{aligned} \quad (12)$$

링크의 강체운동과 관련된 속도장은 $[N] \times \{P\}$ 로 표현되며, 이것은 시스템 메카니즘의 폐회로 운동방정식 (equation of closure)을 포함하게 된다. 행렬표현을 도입하여 단일 유한요소에 대한 변분방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta J^e = 0 = & \int_{t_0}^{t_1} \left\{ \int_{V^e} \frac{1}{2} (\delta \gamma)^T (\tau) - [C] (\gamma) \right. \\ & + [d] (E) dV + \int_{V^e} (\delta \tau)^T (\gamma) - [L_1] [N] \\ & (U) dV - \int_{V^e} \rho (\delta P)^T [M]^T [M] (\{P\} - \{P_R\} \\ & - \{U\}) dV + (\delta U)^T (-[K^e] (U) - [K_e^e] (\phi) \\ & - [M^e] (P) + \int_{V^e} [M]^T (X) dV \\ & \left. + \int_{S_{in} S_e} [M]^T (\bar{g}) dS \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + [R_e^e] (U) + \int_{S_{in} S_e} [N_e]^T \bar{\sigma} dS) - \int_{V^e} \frac{1}{2} \\ & (\delta E)^T ((D) - [d] (\gamma) - [e] (E)) dV \\ & - \int_{S_{in} S_e} (\delta g)^T [N] ((\bar{U}) - (U)) dS \\ & + (\delta r_o)^T \left[\int_{V^e} (X) dV + \int_{S_{in} S_e} (\bar{g}) dS \right. \\ & \left. - \int_{V^e} \rho [M] (P) dV \right] + \delta \psi \cdot \left[\int_{V^e} (r \times X) \right. \\ & \left. dV + \int_{S_{in} S_e} (r \times \bar{g}) dS \right. \\ & \left. - \int_{V^e} (r \times \rho \dot{p}) dV \right] dt \end{aligned} \quad (13)$$

여기서

$$\begin{aligned} [K^e] &= \int_{V^e} ([L_2] [M])^T [C] ([L_2] [M]) dV \\ [K_e^e] &= \int_{V^e} ([L_2] [M])^T [d] ([L_3] [N_e]) dV \\ [M^e] &= \int_{V^e} \rho [M]^T [M] dV \\ [R^e] &= \int_{V^e} ([L_3] [N_e])^T [e] ([L_3] [N_e]) dV \\ [R_e^e] &= \int_{V^e} ([L_3] [N_e])^T [d] ([L_1] [M]) dV \end{aligned} \quad (14)$$

식(13)에서 굵은 문자는 벡터량을 의미하며, 식(14)에서 $[L_i]$ 는 해당 미분변산자를 나타낸다.

식(13)으로부터 변위벡터 $\{U\}$ 와 전기준위벡터 $\{\phi\}$ 를 지배하는 운동방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[K^e] (U) + [K_e^e] (\phi) + [M^e] (\dot{U}) = (F^e) \quad (15)$$

$$[R^e] (\phi) - [R_e^e] (U) = (Q^e) \quad (16)$$

여기서

$$\begin{aligned} (F^e) &= \int_{V^e} [N]^T (X) dV + \int_{S_{in} S_e} [N]^T \\ & (\bar{g}) dS - [M^e] (\dot{P}_R) \end{aligned} \quad (17)$$

$$(Q^e) = \int_{S_{in} S_e} [N_e]^T \bar{\sigma} dS \quad (18)$$

지배방정식 (15)와 (16)으로부터 변위장 및 전기장이 결합되어 있는 사실을 알수 있다. 비례대법

(proportional damping), 즉 $[C_d^*] = \alpha[M^*] + \beta[K^*]$ (9)를 가정한후 국부 및 전체좌표계 사이를 연계하는 변환행렬의 도입으로 다음과 같은 운동 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [M] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\dot{U}) \\ (\dot{\phi}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_d] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (U) \\ (\phi) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K_c] \\ [R_c] & [R] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (U) \\ (\phi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (F) \\ (Q) \end{bmatrix} \quad (19)$$

식(19)에서 힘(F) 항은 매니퓰레이터에 가해지는 세가지의 서로 다른 하중을 포함하고 있음을 식(17)로 부터 알 수 있다. 첫번째 힘성분은 기계적 링크메카니즘의 유한요소 해석을 위해 설정된 전체좌표계에서 측정되는 체적력이다. 전형적으로 이 힘들은 분포질량의 부재들로 이루어진 기계적 시스템과 연관된 중력하중을 나타낸다. 두번째 힘성분은 외력하중으로서, 시스템 해석과정중 로보트팔의 끝단에 걸리는 가반중량을 말한다. 세번째 힘성분인 관성하중은 로보트 각 부재의 분절들과 연계된 관성하중이다. 이 세가지 힘성분으로 구성되는 역장(force field)의 상대적 크기는 해석에 적용되는 매니퓰레이터의 특성 및 그것의 작동모드에 의존한다. 예를들어 관성하중은 저속운전에서는 중요한 인자가 아닌 반면에, 고속운전 모드에서는 역장함수를 지배하는 중요변수가 된다. 한편 (Q)는 적절한 제어 알고리즘에 의해 결정되는 피드백전압을 나타내는 전기적 가진력이다.

4. 제어기설계

압전재료를 진동문제에 적용한 대부분의 경우에 있어서 변위-시간 관계는 전기적 준위벡터에 대한 해당 출력보다 더욱 중요하다. 만일 동적 정보감지가 요구되지 않는다면 각 시간간격마다 전기적 준위벡터를 구할 필요는 없다. 따라서 계산 시간을 줄이기 위해 전기적 준위벡터는 시간영역 적분에 있어서 함축될 수 있다. 그러나 만일 동적 정보감지가 요구되면 다시 얻을 수 있다. 식(19)의 정적(static) 경우로부터 조화 변화행렬(congruent transformation matrix) $[T_c]$ (9)를 다음과 같이 설정한다.

$$[T_c] = [[I], -[K_c][R]^{-1}] \quad (20)$$

따라서 $[T_c]$ 를 식 (19)의 정적인 경우만을 고려한식의

양변에 곱한후 $\{\phi\}$ 좌표에 대한 DOF (degree-of-freedom) condensation을 실시하면, 동적 지배방정식 (19)는 다음과 같이 재 표현된다.

$$\begin{aligned} [M](\dot{U}) + [C_d](\dot{U}) + [K^*](U) \\ = (F) - [K_c][R]^{-1}(Q) \end{aligned} \quad (21)$$

여기서

$$[K^*] = [K] - [K_c][R]^{-1}[R_c] \quad (22)$$

식(21)로부터 두개의 외력성분, 즉 기계적힘 과 전기적 힘 성분이 존재함을 알 수 있다. 한편, 센서출력을 나타내는 전기적 준위벡터는 다음과 같이 취해진다.

$$(\phi) = [R]^{-1}[-[R_c](U)] \quad (23)$$

앞에서 언급한 바와 같이 지배방정식(21)에 있는 전기력항은 피드백력(Q_f)로서 고려될 수 있어 다음과 같이 표현된다.

$$(Q_f) = [K_c][R]^{-1}(Q) \quad (24)$$

따라서, 식(23)으로 주어지는 출력신호의 관점으로부터, 피드백력은 다음과 같이 주어진다.

$$(Q_f) = [K_c][R]^{-1}[G][R]^{-1}[-[R_c](U)] \quad (25)$$

여기서(G)는 피드백 게인 행렬이다. 이 피드백력을 시스템 방정식(21)에 대입하면 운동지배방정식은 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} [M](\dot{U}) + [C_d](\dot{U}) + [K^*](U) \\ = (F) + [[K_c][R]^{-1}[G][R]^{-1}[R_c](U)] \end{aligned} \quad (26)$$

압전작동기에 공급되는 피드백 전압에 의해 발생된 제어력은 제안된 시스템의 댐핑을 증가시켜 유연구조물의 진동을 억제하고자 하는것으로 피드백 제어력은 속도 성분정보에 의존한다. 이에대한 구체적 설명과 이론적 해석은 기존의 참고문헌에 잘 나타나 있다. (7-9) 따라서, 두개의 서로 다른 피드백제어기, 즉 CGFC와 CAFC가 도출되며, 이들의 수학적 표현은 다음과 같다.

i) CGFC :

$$(Q) = -[G^*](\dot{U}) \quad (27)$$

ii) CAFC :

$$(Q) = -[G^*] \operatorname{sgn}[(\dot{U})] \quad (28)$$

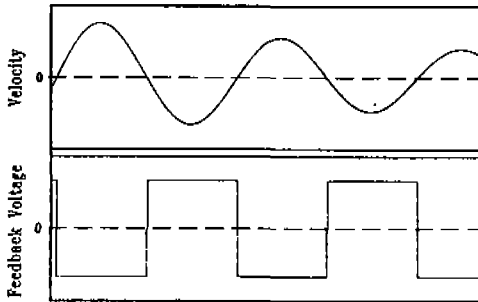
위에서, $[G^*]$ 는 다음과 같이 표현되는 수정 피드백게인 행렬이다.

$$[G^*] = -[K_d][R]^{-1}[G][R]^{-1}[R_d] \quad (29)$$

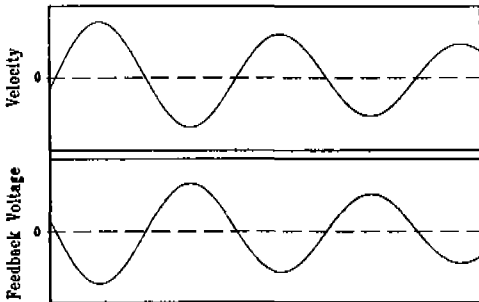
그리고 sgn 은 signum 함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\operatorname{sgn}[(\dot{U})] = \begin{cases} +1, & (\dot{U}) > 0 \\ 0, & (\dot{U}) = 0 \\ -1, & (\dot{U}) < 0 \end{cases} \quad (30)$$

Fig. 2는 상기 두형태의 피드백제어 알고리즘에 대한 도식적 표현이다. 일반적으로 CAFC는 CGFC보다 진동 감소에 대한 제어효과가 우수하며, 그 이유는 동일 최대 피드백 전압에 대해 보다 더 넓은 면적(제어력)을



(a) CAFC



(b) CGFC

Fig. 2 Two feedback control algorithms

갖기 때문이다. 한편 시스템 (21)에서 피드백 제어기 Q를 작동시키지 않았을 경우에 시스템은 구조물 비례댐핑의 존재로 인하여 안정하며, 제어기 (27)과 (28)의 사용으로 시스템의 댐핑은 더욱 증가하여 주어진 로봇트 운동궤적에 대하여 시스템의 안정도는 향상된다. 따라서 제안된 시스템의 안정도는 제어기의 사용으로 언제나 보장될 수 있다.

5. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 연구에서 제안된 방법의 효율성을 입증하기 위해 Fig. 3에 나타난 미국 General Electric사에서 제작한 P50 5축 다관절 로봇트를 설정하였다. 이 로봇트의 총 무게는 350kg이고, 1.3m의 최대 리치(reach)를 갖고 있으며 최대 가반중량 10-kg 적용시 최대 작동속도 1100mm/s를 갖는다. 이 로봇트의 주된 용도는 용접과 물건운반이며 그림에서는 보는 바와같이 하나의 lower arm과 forearm 및 두개의 upper arm으로 구성된 평행구동 메카니즘(parallel drive mechanism)이다. 본 연구에서는 lower arm은 강체로 가정하고 나머지 arm은 축(axial)방향 및 횡(transverse)방향으로 구조적 변형이 발생하는 Euler-Bernoulli beam으로 가정하였다. 이 변형장을 유한요소 모델로 나타내 것이 Fig. 4이며, 이로부터 궁극적인 목적은 forearm 끝단(end-effector)에서 발생하는 횡(transverse)방향 진동을 제어하고자 하는 것임을 알 수 있다. Fig. 4로부터 알 수 있듯이 제안된 유한 요소모델은 22DOF를 갖고 있으며, forearm은 3개의 요소, upper arm은 2개의 요소로 이산되어 있다. 한편 압전 작동기와 감지기는 그림에서 보는바와 같이 3곳에 부착하였으며, 이는 병치(colocated) 다입력-다출력 제어 시스템으로 간주할 수 있다. 압전작동기의 부착위치는 피드백 전압공급에 의해 발생하는 구조물 굽힘모멘트의 크기에 따라 결정되며, 이는 설정된 로봇트의 운동궤적, 진동가진형태 그리고 시스템의 경계조건 등의 함수가 된다. 본 연구에서 설정된 로봇트의 운동시 forearm의 끝단에서 가장 큰 구조적 변형이 발생하여 피봇(pivot)경계 부근에서 가장 큰 모멘트가 발생되기 때문에 forearm의 압전작동기를 이곳에서 끝단쪽으로 분포되게 부착하였으며 upper arm의 경우도 피봇 O를 중심으로 회전하는 운동궤적을 고려하여 압전작동기 위치를 결정하였다. 그러나 주어진 로봇트 궤적에 대하여 forearm의 끝단에서

가장 우수한 진동제어효과를 얻기 위해서는 최적문제방법(optimal problem approach)을 도입하여 해결해야 될 것으로 생각된다. 이는 본 연구의 향후 연구과제로 추진중에 있고 여기서는 고려하지 않는다.

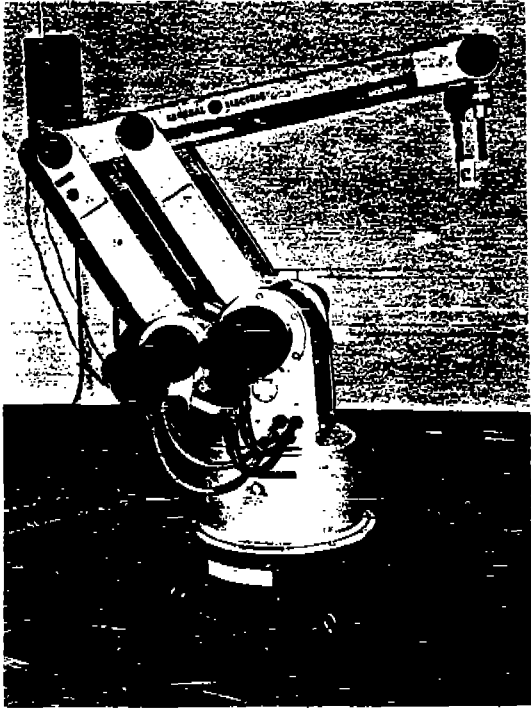


Fig. 3 General Electric Company P50 robot

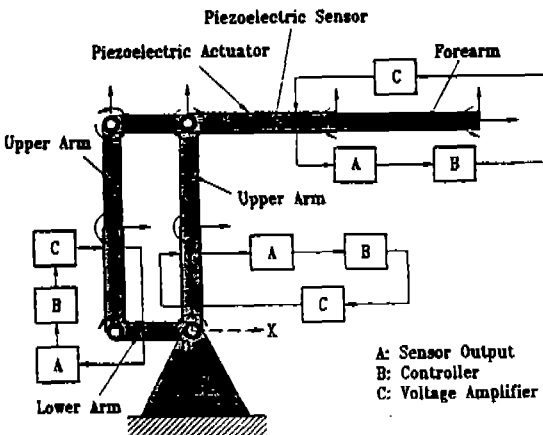


Fig. 4 A control system with finite element model.

컴퓨터 시뮬레이션을 위해 기존 참고문헌(13)에서 사용한 로봇팔의 기하학적 제원과 운동계적을 선택하였다. 즉 beam의 형태는 속이 빈 4 각단면으로 가정하였으며 길이와 형상 크기는 다음과 같다. Forearm의 경우 길이는 1070mm, 외곽단면은 100mm×140mm(횡방향) 그리고 벽두께는 9mm로 설정했다. 이에 상응하는 치수로 upper arm의 경우는 600mm, 106mm×180mm, 8mm 그리고 lower arm의 겨우는 220mm, 97mm×145mm, 9mm로 각각 주어졌다. 한편 재질은 모두 알루미늄으로 가정하여 탄성계수는 68.94Gpa, 밀도는 $2.67 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, 그리고 비례감쇠 특성을 나타내는 Rayleigh 상수는 $\alpha=0$, $\beta=0.58 \times 10^{-4}$ 로 택하였다. 한편 본 연구에서 사용한 압전재료는 기존 상품화 되어 있는 세라믹 형태의 일종으로서 주요특성을 보면 Table 1과 같다. 가반중량 5kg을 부가하여 로봇트 운동계적을 위한 초기형상을 설정하였으며, 이는 Fig. 3에서 lower arm이 음의 OX축으로 40°각을 이루고 있고 upper arm의 경우 양의 OX축으로 40° 기울어져 있다고 가정하였다. 그리고 이들 arm은 165 rad/sec^2 크기의 가속 및 감속을 갖고 반시계 방향으로 48° 회전운동함을 택하였다.

Table 1. Dimensions and principal properties of employed piezoelectric material

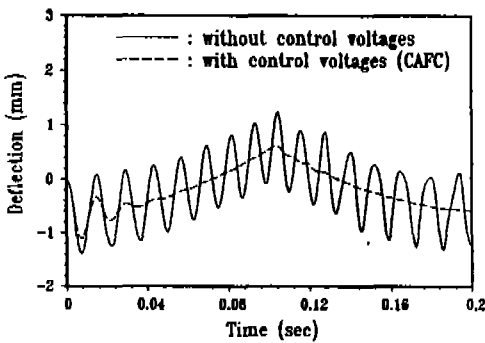
Thickness (mm)	4
Width (mm)	100 (forearm) 106 (upper arm)
Length (mm)	400 (forearm) 300 (upper arm)
Density (10^3kg/m^3)	7.45
Young's modulus (GPa)	64
Poisson's ratio	0.30
Piezoelectric strain constant (10^{-12}m/V)	$d_{31}=260$ $d_{32}=260$ $d_{32}=580$
Dielectric permittivity (C/m^2)	$\epsilon_{31}=0.078$ $\epsilon_{32}=0.078$ $\epsilon_{32}=0.000$

Fig. 5는 forearm 끝단에서 발생한 진동현상을 나타낸 것으로 제어기 사용의 뚜렷한 진동제어 효과를 볼수

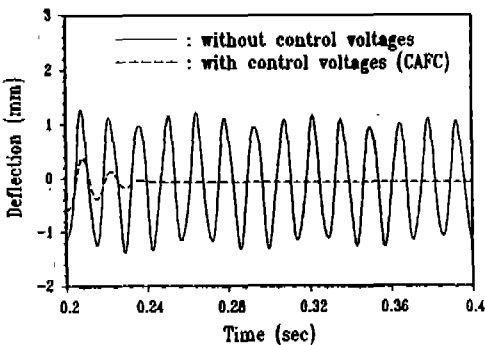
있다. CAFC의 경우 600volts의 최대 피드백 전압을 세 액츄에이터에 공급하였다. 사용된 압전재료의 경우 300V/mm의 breakvoltage 부하시 약 10 μ A의 전류값이 요구되므로 Fig. 5에 나타난 진동제어효과를 얻기위해 요구되는 전류는 약 6 $\times 10^{-3}$ watt로 매우 적다.

그림에서 보듯이, 가속 및 감속 운전시 제어기 사용에 의해 초기 과도시간을 제외하고는 지배적 진동모드에 의해 발생된 변형은 거의 제거되었으며 고속운동에 따른 관성력에 의한 변형만이 남아있는 것을 알수 있다. 한편 로봇의 운동정지시 제어기의 사용으로 인해 빠른 정정시간을 얻을 수 있어 괄목할만한 로봇의 성능향상을 가져왔다고 할 수 있다. 완전정정후 변형의 크기가 정확히 영이 되지 않는 이유는 로봇트 중량과 연계된 중력장 때문이다. Fig. 6은 가속상태에서 감속상태로 전

환시 CAFC 사용에 의한 진폭감소를 피드백 전압 크기에 따라 나타낸 것으로 약 200 volts까지는 거의 선형적으로 많은 향상을 보이다가 그 이후로는 관성력에 의한 변형 때문에 큰 제어효과가 없음을 알수 있다. 물론 적용된 작동기의 두께 및 최대 허용전압에 따라 이러한 경향은 바뀔 수 있다. 한편 Fig. 7은 동일 크기의 최대 피드백 전압 600 volts 적용시 두 제어기 CAFC와 CGFC의 진동제어 효과를 비교한 것으로서 예상한대로 CAFC가 보다 우수한 성능을 보여준다. 이는 CAFC가 시간 전압 영역에서 보다 넓은 면적 다시 말해서 보다 큰 제어력이 공급되기 때문이다.



(a) acceleration and deceleration phases



(b) settling phase

Fig.5 Transverse deflections at the robot end-effector

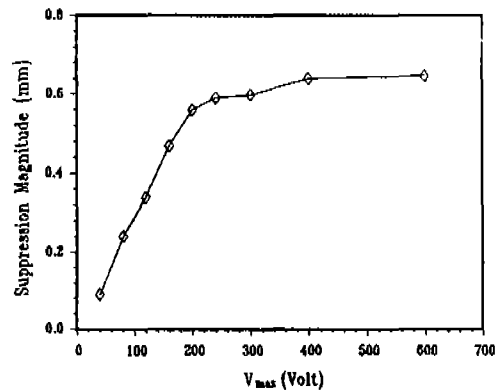
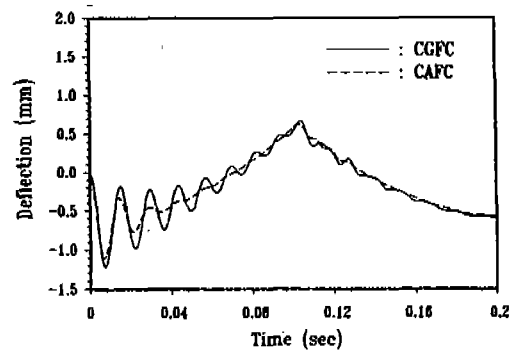
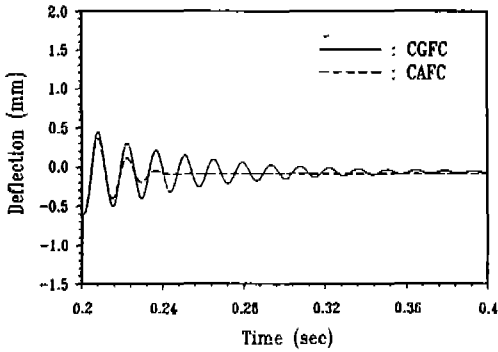


Fig.6 Suppression magnitude when the acceleration phase changes to the deceleration phase



(a) acceleration and deceleration phases



(b) settling phase

Fig.7 Comparison of controlled transverse deflections at the robot end-effector

6. 결 론

산업용 로봇 매니퓰레이터의 고속운전시 발생하는 구조적 변형을 제어하기 위해 압전 작동기와 감지기를 사용하는 방법을 제안하였다. 압전재료와 연계된 유연링크를 갖는 로봇 매카니즘의 동탄성 해석 및 제어를 위한 모델을 도출하기 위해 변분이론과 유한요소법을 이용하였다. 전기적 준위백터를 합성한 지배방정식으로부터 기존의 CAFC 및 CGFC 제어기를 설정하였으며 이 제어기의 효율성을 입증하기 위해 5축 다관절 로봇을 선택하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 제안된 압전 액츄에이터 및 센서기법의 적용으로 고속운전시 로봇 팔의 끝단에서 발생된 바람직 하지 않은 진동을 현저하게 감소시킬수 있었으며, 로봇의 운동정지시 매우 빠른 정정시간을 가져와 높은 위치 정확도를 가져올 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구의 일부는 1992년도 인하대학교 학술연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Imam, I., Sandor, G. N., "High-Speed Mechanism Design-A General Analytical

Approach", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 97, pp.609~628, 1975.
 2. Cleghorn, W. L., Fenton, R. G., and Tabarrok, B., "Optimum Design of High-Speed Flexible Mechanisms", Mechanism and Machine Theory, Vo. 16, No. 4, pp.399~406, 1981
 3. Thompson, B. S., Zuccaro, D., Gamache, D., and Gandhi, M. V., "An Experimental and Analytical Study of a Four Bar Mechanism with Links Fabricated from a Fiber-Reinforced Composite Material", Mechanism and Machine Theory, Vol. 18, No. 2, pp.165~171, 1983
 4. Thompson, B. S., Zuccaro, D., Gamache, D., and Gandhi, M. V., "An Experimental and Analytical Study of the Dynamic Response of a Linkage Fabricated from a Unidirectional Fiber-Reinforced Composite Laminate", ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 105, No. 3, Sept. pp.528~536, 1983
 5. Thompson, B. S. and Sung, C. K., "A Variational Formulation for the Dynamic Viscoelectric Finite Element analysis of Robotic Manipulators Constructed from Composite Materials", ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 106, pp.183~190, 1984
 6. Gandhi, M. V. and Thompson, B. S., Smart Material and Structures Chapman and Hall, London, 1992
 7. Plump, J. M., Hubbard Jr., J. E. and Bailey, T., "Nonlinear Control of a Distributed System: Simulation and experimental Results", ASME Journal of dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 109, pp.133~139, 1987
 8. Tzou, H. S., "Distributed Modal Identification and Vibration Control of Continua: Theory and Applications", ASME

- Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, pp.494~499, 1991
9. Tzou, H. S. and Tseng, C. I., "Distributed Piezoelectric Sensor/Actuator Design for Dynamic Measurement/Control of Distributed Parameter Systems : A Piezoelectric Finite Element Approach", Journal of Sound and Vibration, Vol. 138, No. 1, pp.17~34, 1990
 10. Rogers, C. A., "Active Vibration and Structural Acoustic Control of Shape Memory Alloy Hybrid Composites : Experimental Results", Journal of Acoustics Society of America, Vol. 88, pp.2803~2811, 1990
 11. Rogers, C. A., Liang, C. and Jia, J., "Structural Modification of Simply-Supported Laminated Plates using Embedded Shape Memory Alloy Fibers", Computers and Structures, Vol. 38, pp.569~580, 1991
 12. Choi, S. B. Thompson, B. S. and Gandhi, M. V., "An Experimental Investigation on Smart Laminated Composite Structures Featuring embedded Electro-Rheological Fluid Domains for Vibration-Control Applications", Composites Engineering, Vol. 2, No. 5-7, pp.543~559, 1992
 13. Gandhi, M. V., Thompson, B. S., Shakir, S., "Electro-Rheological-Fluid-Based Articulating Robotic Systems", ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Vol. 111, No. 3, pp.328~336, 1989.
 14. Main, R. P., "Fiber Optic Sensors-Future Light", Sensor Review (England), Vol. 66, No. 6, pp.79~81, 1985
 15. Rogowski, R. S., Heyman, J. S. and Clous, R. O., "The Evolution of Smart Composite Materials", NASA Tech Briefs, Vol. 12, No. 10, pp.20~22, 1988