

< 논 문 >

유연한 구조물의 확률론적 제어에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Stochastic Control of a Flexible Structural System

김 대 중* · 허 훈**
Dae Jung Kim* and Hoon Heo**

(1998년 12월 14일 접수 : 1999년 4월 30일 심사완료)

Key Words : Dynamic Moment Equation(동적모멘트 방정식), PSD(Power Spectral Density)(힘 스펙트랄 밀도), Monte-Carlo Method(몬테카를로 기법), Ito's Stochastic Differential Equation(Ito의 확률미분 방정식), F-P-K Equation(F-P-K방정식), Heo-Control Technique(허-제어기법)

ABSTRACT

Newly developed control methodology applied to dynamic system under random disturbance is investigated and its performance is verified experimentally. Flexible cantilever beam sticked with piezofilm sensor and piezoceramic actuator is modelled in physical domain. Dynamic moment equation for the system is derived via Ito's stochastic differential equation and F-P-K equation. Also system's characteristics in stochastic domain is analyzed simultaneously. LQG controller is designed and used in physical and stochastic domain as well. It is shown experimentally that randomly excited beam on the base is controlled effectively by designed LQG controller in physical domain. By comparing the result with that of LQG controller designed in stochastic domain, it is shown that new control method, what we called 「Heo-stochastic controller design technique」, has better performance than conventional ones as a controller.

1. 서 론

최근 항공 우주 및 공학분야 전반에 걸쳐 에너지 효율향상과 다기능의 시스템 통합 환경 개발을 위해 구조물의 경량화 대형화 추세가 계속되고 있고, 이로 인해 구조물의 유연성이 증가하여 기존의 수동적 진동제어는 한계에 부딪치게 되었다. 이에 구조물

자체에 별도의 감지기 및 작동기를 부착하여 제어하거나 더 나아가 제어회로 자체를 구조물에 포함시킨 지능구조물의 개발로 진동을 능동적으로 제어하고자 하는 노력이 계속되고 있다. 그러나 자연계에서의 동적시스템들은 실제에 있어 그 초기조건을 알 수 없는 경우가 대부분이고, 또한 이러한 외란은 임의적이고, 비결정적이므로 기존의 연구로는 적절한 적용이 어렵다고 할 수 있다. 특히, 구조물과 유체상호간의 간섭이 일어나는 공탄성이나 수탄성의 경우 유체에 의한 외부에서의 가진은 실제로 시스템의 동적 좌표계에 증속되는 시스템 파라메타가 가진되는 형

* 고려대학교 제어계측공학과 Mechatronics연구실

** 정희원, 고려대학교 제어계측공학과

태의 동적시스템으로 구성된다. 본 논문에서는 유연한 구조물에 가진되는 외란의 형태가 확률적이고 비결정적이어서 예측하기 어려운 경우에 응용될 수 있는 제어 기법을 제안하고, 이를 실험적으로 확인하고자 한다.

2. 확률영역에서의 제어 (許-確率制御方法⁽¹⁾)

공기 중을 비행하는 항공기나, 해상 위에 있어 파도나 바람의 교란을 받는 해상구조물과 같은 시스템의 지배방정식에 나타나는 가진 외란은 실제 물리영역에서는 임의로 변하는 시간의 함수로 나타나고, 이는 범용적인 제어방식의 적용을 어렵게 한다. 그러나 이러한 실물리영역의 지배 방정식을 확률영역으로 변환 시키면 이러한 문제를 해결할 수 있다. 먼저 실제물리영역에서 얻은 지배방정식을 Ito의 확률 미분 방정식과 F-P-K 방정식을 이용하여 확률영역으로 변환한다. 이 확률영역에서 비결정적인 외란은 그 외란이 가지는 PSD로 표현되는 상수로서 나타난다. 또한 이 경우, 확률영역으로 변환된 시스템의 지배방정식(동적 모멘트 방정식)은 선형이고 결정적인 외란을 가지므로, 쉽게 기존의 제어이론을 이용하여 제어할 수 있다. 다음으로 설계자가 택한 제어기법을 사용하여 원하는 응답을 얻을 수 있는 제어입력을 구한다. 이 확률영역에서 구한 제어입력은 변환된 외란이 PSD의 형태로 나타나는 것처럼 역시 PSD로서 나타난다. 마지막으로 이 제어신호로서 구한 PSD를 사용하여 몬테카를로(Monte-Carlo) 시뮬레이션 등을 이용하여 실제물리영역에서 시계열형태의 제어입력을 발생시킨 후 시스템의 제어에 적용한다^(2,3). 이후 이러한 제어기법을 Heo-확률제어방법이라 명하고자 한다⁽¹⁾. 다음은 그 간략한 개념도이다.

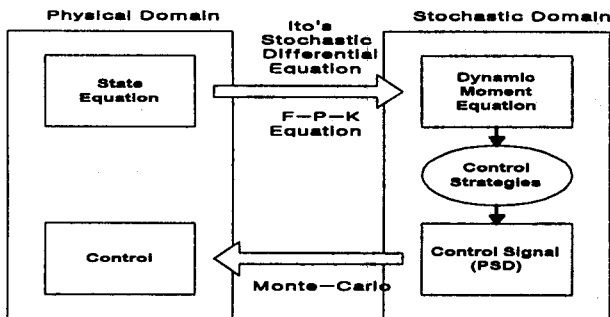


Fig. 1 Conceptual diagram of Heo-stochastic controller design technique

3. 시스템 방정식

3.1 실제 물리 영역에서의 시스템 방정식

본구조물인 알루미늄빔에 작동기용의 압전세라믹(piezoceramic)과 감지기용의 압전필름(piezofilm)이 부착된 형태의 복합재료빔을 제어의 대상으로 삼고자 한다. 이때 빔의 기저부분에 랜덤 가진이 가해지게 되며 이의 개략적인 형상은 Fig. 2와 같다⁽⁴⁾.

복합재료빔의 운동방정식을 유도하기위한 여러 방법중 가장 널리 쓰이는 Hamilton의 법칙을 사용하고 압전재료들이 본 구조물에 완벽하게 부착된 형태라 가정하면 식 (1)과 같은 빔의 지배방정식을 얻을 수 있다. 여기서 $z(t)$ 는 시스템에 가해지는 외란, $V(t)$ 는 제어입력 그리고 $u(x, t)$ 는 보의 휨 변위를 의미한다. 또한 E, I, A, ρ 는 각각 Young's modulus, 보의 단면적의 관성모멘트, 보의 단면적 그리고 보의 밀도를 나타내며 식 (2)의 관계를 만족한다. 아래첨자 $b, p.c, p.f$ 는 각각 빔, 압전세라믹, 압전필름을 의미한다.

$$\rho A \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x, t) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, t) \right) = -\rho A \frac{d^2}{dt^2} z(t) + c_p V(t) \delta'(x-L_1) \quad (1)$$

$$E(x) I(x) = \begin{cases} E_b I_b + E_{p.c} I_{p.c} + E_{p.f} I_{p.f} & \text{for } 0 \leq x \leq 0.2L \\ E_b I_b + E_{p.f} I_{p.f} & \text{for } 0.2L < x \leq L \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho(x) A(x) = \begin{cases} \rho_b A_b + \rho_{p.c} A_{p.c} + \rho_{p.f} A_{p.f} & \text{for } 0 \leq x \leq 0.2L \\ \rho_b A_b + \rho_{p.f} A_{p.f} & \text{for } 0.2L < x \leq L \end{cases}$$

위 식에 모드형상함수를 가중치로 선택하는 Galerkin 기법을 적용하고, 이를 전개하면 제어이론에 적합한 다음과 같은 상미분 방정식을 얻을 수 있다⁽³⁾. 여기서 M, K 는 시스템의 질량, 강성 행렬을, \bar{P}, \bar{B} 는 외란, 제어입력과 관련된 벡터를 그리고 $q_i(t)$ 는 일

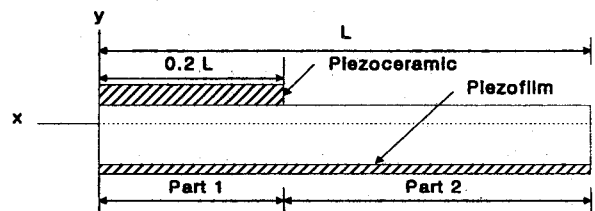


Fig. 2 The schematic of composite beam

반화된 i 번째 모달좌표를 나타낸다.

$$[M]\ddot{q}_i(t) + [K]q_i(t) = [\bar{P}]\dot{z}(t) + [\bar{B}]V(t) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} M_{ij} &= \rho A \int_0^L \phi_i(x) \phi_j(x) dx \\ K_{ij} &= EI \int_0^L \phi_i''(x) \phi_j''(x) dx \\ \bar{P}_i &= -\rho A \int_0^L \phi_i dx \\ \bar{B}_i &= c_p \frac{d}{dx} \phi_i(L) \end{aligned}$$

위 식은 다음과 같이 고유주파수의 항으로 표현되는 모달방정식으로 쓸 수 있으며, 여기서 ζ 는 시스템의 감쇠계수로서 실험적인 측정에 의해 구해진다.

$$\ddot{q}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = p_i \dot{z}(t) + b_i V(t) \quad (4)$$

3.2 확률영역에서의 시스템 방정식

외팔보의 한쪽 끝단에 가해지는 기반가진잡음과 제어입력을 평균이 0이고, 비상관(uncorrelated)인 가우시안(Gaussian) 형태의 백색잡음과정, 즉 브라운(Brown) 운동의 미분형태로 나타낼 수 있고, 또한 다음과 같은 특성을 갖는 뷔너(Wiener) 과정으로 가정한다. 여기서 $B_z(t)$ 와 $B_V(t)$ 는 브라운운동 과정임을, D_z 와 D_V 는 각 신호의 PSD를 나타낸다.

$$\dot{z}(t) = \frac{dB_z(t)}{dt}, \quad V(t) = \frac{dB_V(t)}{dt} \quad (5)$$

$$E[dB_z^2(t)] = 2\pi D_z \Delta t, \quad E[dB_V^2(t)] = 2\pi D_V \Delta t$$

동적 모멘트방정식을 얻기 위해 먼저 식 (5)를 Ito의 확률 미분 방정식으로 쓰면 다음과 같다. 이는 식 (6)과 같은 변수의 변환에 의해 이루어진다. 본 논문에서는 공학적으로 유효한 두 번째 모드까지만 수식을 전개하고자 한다.

$$\{q_1 \ q_2 \ \dot{q}_1 \ \dot{q}_2\}^T \Rightarrow \{x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4\}^T \quad (6)$$

$$\begin{aligned} dx_1 &= x_3 dt \\ dx_2 &= x_4 dt \\ dx_3 &= \{-\omega_1^2 x_1 - 2\zeta \omega_1 x_3 + p_1 \dot{z}(t) + b_1 V(t)\} dt \\ &= \{-\omega_1^2 x_1 - 2\zeta \omega_1 x_3\} dt + p_1 dB_z + b_1 dB_V \\ dx_4 &= \{-\omega_2^2 x_2 - 2\zeta \omega_2 x_4 + p_2 \dot{z}(t) + b_2 V(t)\} dt \\ &= \{-\omega_2^2 x_2 - 2\zeta \omega_2 x_4\} dt + p_2 dB_z + b_2 dB_V \end{aligned} \quad (7)$$

위 식은 F-P-K방정식을 이용하여 응답 모멘트에 관한 미분방정식으로 유도된다. 마코프과정은 이 Ito의 확률미분방정식을 구성하고, 그 해는 F-P-K 방정식에 의해 지배되는 전이확률밀도함수에 의해 특

성화된다. 다음의 F-P-K 방정식은 시스템의 Ito의 확률미분방정식로부터 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(x, t)}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_1} \{x_3 P(x, t)\} - \frac{\partial}{\partial x_2} \{x_4 P(x, t)\} \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial x_3} \{(-\omega_1^2 x_1 - 2\zeta \omega_1 x_3) P(x, t)\} \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial x_4} \{(-\omega_2^2 x_2 - 2\zeta \omega_2 x_4) P(x, t)\} \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \{2\pi(p_1^2 D_z + b_1^2 D_V) P(x, t)\} \quad (8) \\ &\quad + \frac{1}{2} 2 \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial x_4} \{2\pi(p_1 p_2 D_z + b_1 b_2 D_V) P(x, t)\} \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x_4^2} \{2\pi(p_2^2 D_z + b_2^2 D_V) P(x, t)\} \end{aligned}$$

F-P-K방정식에 상태들의 곱으로 표현되는 스칼라 함수 $\Phi(t)$ 를 곱한 식을 전체영역에 대해 4중적분을 통해 풀면 제안된 시스템에 대한 다음과 같은 동적모멘트방정식의 일반식을 얻을 수 있다^(5,6).

$$\Phi(x) = x_1^i x_2^j x_3^k x_4^l \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{i,j,k,l} &= i m_{i-1,j,k,l} + j m_{i,j-1,k,l} \\ &\quad - 2(2\zeta \omega_1 k + 2\zeta \omega_2 l) m_{i,j,k,l} \\ &\quad - \omega_1^2 k m_{i+1,j,k-1,l} - \omega_2^2 m_{i,j+1,k,l-1} \quad (10) \\ &\quad + \pi(p_1^2 D_z + b_1^2 D_V) k(k-1) m_{i,j,k-2,l} \\ &\quad + \pi(p_2^2 D_z + b_2^2 D_V) l(l-1) m_{i,j,k,l-2} \\ &\quad + 2\pi(p_1 p_2 D_z + b_1 b_2 D_V) k l m_{i,j,k-1,l-1} \end{aligned}$$

동적모멘트방정식의 각 상태는 상태 자신과 각 상태 서로들 간의 평균값과 제곱평균값을 의미한다.

$$\begin{aligned} m_{i,j,k,l} &= \int \int \int \int_{-\infty}^{+\infty} x_1^i x_2^j x_3^k x_4^l dx_1 dx_2 dx_3 dx_4 \quad (11) \\ &= E[x_1^i x_2^j x_3^k x_4^l] \end{aligned}$$

본 논문에서는 빔의 진동에 있어 가장 주된 역할을 하는 첫 번째 모드만을 제어의 대상으로 삼고자 한다. 따라서 위에서 제시된 동적 모멘트 방정식을 첫 번째 모드만을 포함하는 방정식으로 정리하면 다음과 같은 1차 모멘트 방정식과 2차 모멘트 방정식을 얻을 수 있다. 여기서 D_z 는 인가된 외란의 PSD이고, D_V 는 제어입력의 PSD이다.

- 1차 모멘트 방정식

$$\begin{aligned} \dot{m}_{10} &= m_{01} \\ \dot{m}_{01} &= -\omega^2 m_{10} - 4\zeta \omega m_{01} \end{aligned} \quad (12)$$

- 2차 모멘트 방정식

$$\begin{aligned} \dot{m}_{11} &= -\omega^2 m_{20} - 4\zeta \omega m_{11} + m_{02} \\ \dot{m}_{20} &= 2m_{11} \\ \dot{m}_{02} &= -2\zeta \omega m_{02} + 2\pi(p^2 D_z + b^2 D_V) \end{aligned} \quad (13)$$

1차 모멘트 방정식과 2차 모멘트 방정식은 서로 연계(coupled)되어있지 않으므로 서로에게 영향을 주지 않음을 위 식으로부터 알 수 있다. 또한 입력을 평균 0인 백색잡음으로 가정했으므로 1차 모멘트 방정식은 정상상태에서 0으로 수렴하리라는 것을 쉽게 알 수 있다. 이는 시스템의 출력이 그 입력의 특성과 다르지 않게 나타나는, 선형시스템의 특징이기도 하다. 어떤 확률시스템의 거동에 대한 공학적인 파악은 원하는 상태의 제곱평균치(mean square value)에 의해 알 수 있을 것이다. 2차 모멘트 방정식은 각 상태 자신들의, 그리고 각각 상태 서로들의 제곱평균치로서 이들의 시간에 따른 변화에 대한 기술이다.

4. 제어기 설계

LQG 제어방법은 플랜트에 대하여 최적추정 및 제어이론을 이용한 모델기준 보상기를 설계하여 출력 피드백 제어시스템을 구성하는 것이다⁽⁷⁻⁸⁾. 센서잡음이 첨가된 동적시스템을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + N\dot{z}(t) \\ y(t) &= Cx(t) + \theta(t) \end{aligned} \quad (14)$$

이 때 상태추정오차의 초기상태 $\hat{x}(0)$ 와 기반가진잡음 $\dot{z}(t)$ 그리고 센서잡음 $\theta(t)$ 가 서로 비상관이라 가정하면, 제어입력 $u(t)$ 와 측정된출력 $y(t)$ 를 입력으로하는 칼만필터(Kalman Filter)에 대한 동력학식은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + H[y(t) - C\hat{x}(t)] \quad (15)$$

여기서 H 는 칼만필터게인으로 상태추정오차의 상호분산행렬을 최소화하도록 선정되어지며,

$$P = E[(x - \hat{x})^T(x - \hat{x})] \quad (16)$$

이는 다음의 Riccati방정식의 해로부터 얻을 수 있다.

$$\dot{P} = AP + PA^T + LEL^T - PC^T\Theta^{-1}CP = 0 \quad (17)$$

$$H = PC^T\Theta^{-1} \quad (18)$$

정상상태에서 출력이 0이 되는 시스템을 설계하기 위하여 가격함수 J 를 다음과 같이 정의한다.

$$J = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} (x^T Qx + u^T Ru) dt \quad (19)$$

실시간에서 시스템의 모든 상태를 측정할 수 있다면 최적제어입력 $u(t)$ 는 다음과 같이 feedback 형태로 나타낼 수 있다.

$$u(t) = -G\hat{x}(t) \quad (20)$$

여기서 제어게인 G 는 다음과 같으며

$$G = R^{-1}B^TK \quad (21)$$

K 는 다음과 같은 Riccati 방정식의 해이다.

$$KA + A^TK + Q - KBR^{-1}B^TK = 0 \quad (22)$$

5. 실험방법 및 결과

불규칙 외란을 받는 보의 제어에 앞서 설계된 LQG 제어기의 성능을 알아보기 위해 복합재료보에 임펄스(impulse)교란이 가해진 경우와 복합재료보의 첫 번째 모드를 공진시킨 경우에 대한 진동제어 실험을 수행하였다. 샘플링주파수는 1 kHz로 설정하였고, 이후 계속되는 실험에서 모두 동일하다.

임펄스의외란이 가해진 경우 이에 대한 제어를 수행한 결과는 Fig. 3과 같으며 보의 진동을 훌륭하게 제어함을 확인할 수 있다. 제어시 후반부에 약간의 여진이 남아 있으나 이는 보의 첫 번째 모드만을 제어의 대상으로 삼았기 때문에 나타나는 두 번째 모드 이상의 응답이라고 생각된다.

보의 첫 번째 모드 공진 실험은 함수발생기에서 보의 첫 번째 고유진동수를 갖는 정현파 신호를 발생하게 하고 이 신호로 가진기를 구동하였다. 시스템의 공진에 의해 잔류 진동이 계속되나 보의 진폭을 대폭적으로 감쇠 시킴을 확인할 수 있다(Fig. 4,5).

복합재료보의 기저부분에 램덤가진이 인가된 경

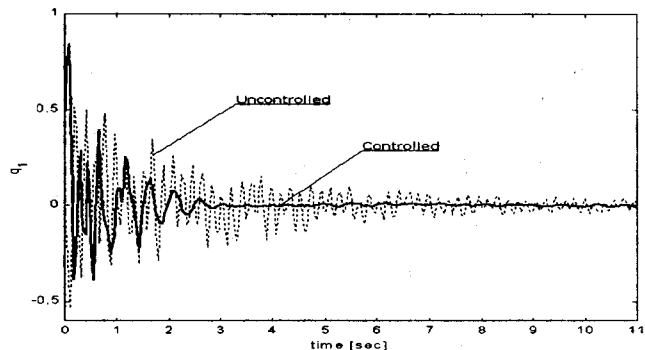


Fig. 3 1st bending modal response under impulse disturbance

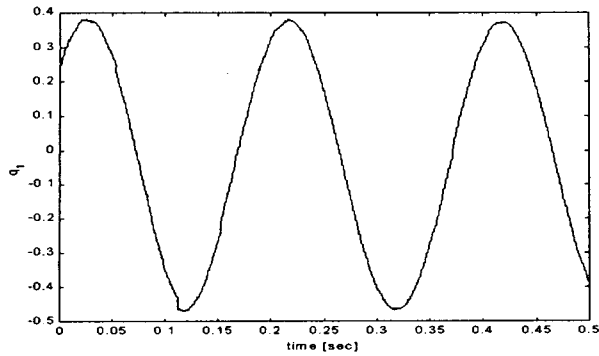


Fig. 4 Uncontrolled modal response for the first mode resonance

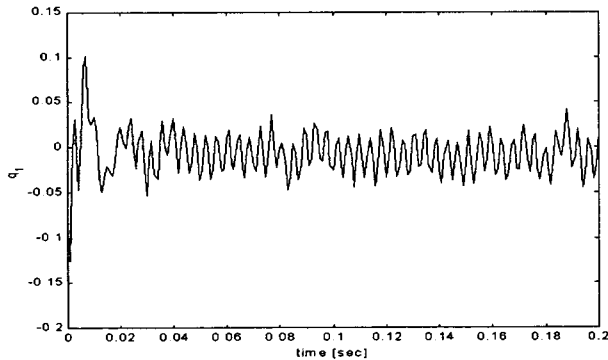


Fig. 5 Controlled modal response for the first mode resonance

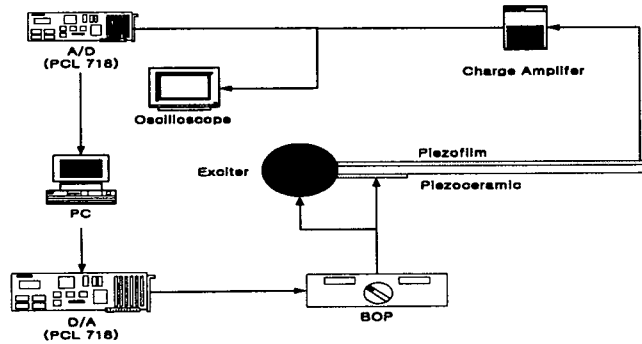


Fig. 6 An overview of the experimental setup

우, 보의 진동제어 실험은 다음과 같이 수행하였다. 먼저 몬테카를로기법을 이용하여 PSD가 0.1이고 70 Hz이하의 제한된 주파수 대역을 갖는 백색잡음 형태의 랜덤노이즈를 만들고 이 신호를 증폭기를 통해 가진기에 연결, 보를 진동시킨다. 보에 부착된 압전필름은 이러한 보의 진동을 전압형태로 변환하여 신호를 발생시키게되고, 이 신호는 전하증폭기와 필터를 거쳐 아날로그-디지털 변환기로 전해진다. Heo-LQG 제어기에서는 빔에 가해지는 외력을

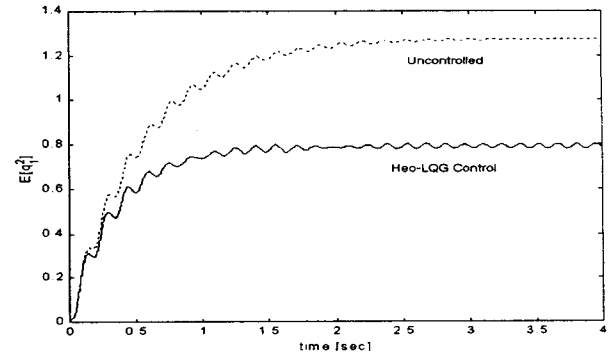


Fig. 7 Mean square modal responses for a beam in stochastic domain (simulation)

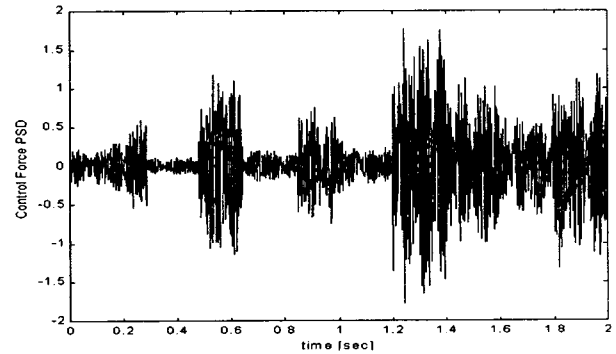


Fig. 8 Control input(Heo-LQG) in stochastic domain (simulation)

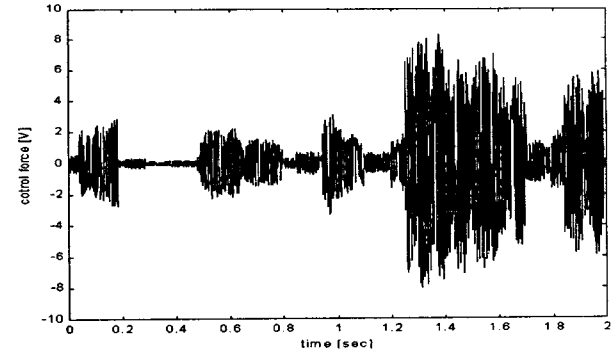


Fig. 9 Control input(Heo-LQG) in physical domain (before amplification)

PSD형태로 인지하여 이에 대한 제어입력을 확률영역에서의 PSD형태로 생성하고, 이는 다시 몬테카를로기법에 의해 실물리영역에서의 제어입력으로 변환된다. 하지만 몬테카를로기법을 통해 제어입력을 구하는 과정으로 인한 시간지연 때문에 실시간으로는 보의 진동을 제어할 수 없었다. 따라서 본 논문에서는 off-line상태에서 모의실험(Fig. 7)을 통해 제어입력을 PSD형태로 얻고(Fig. 8) 이를 실물리영역에

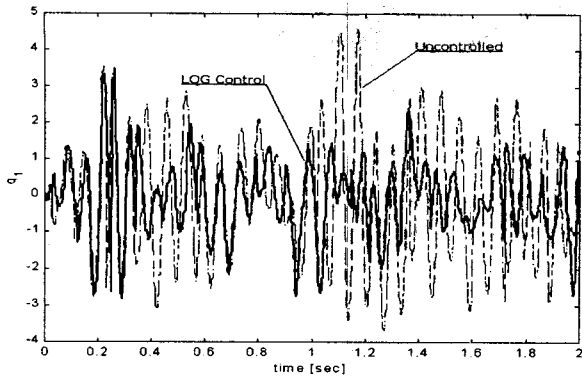


Fig. 10 Modal response via LQG controller in physical domain

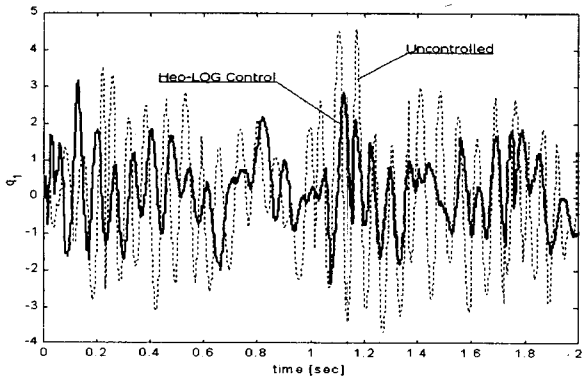


Fig. 11 Modal response via Heo-LQG controller in physical domain

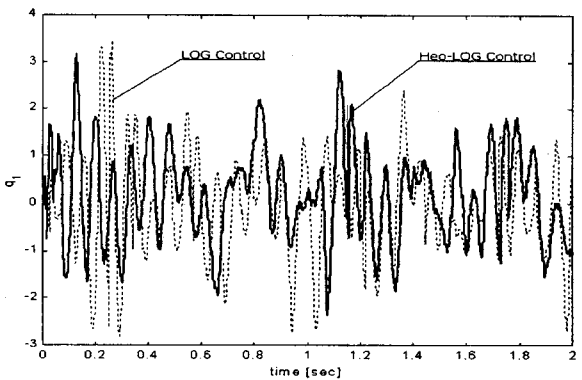


Fig. 12 Comparison of LQG controller with Heo-LQG controller in transient period

Table 1 Mean square values of the beam response

실험결과	제공평균값	비교
비제어	1.7361	1
LQG 제어	1.0539	0.6070
Heo-LQG 제어	1.0117	0.5827

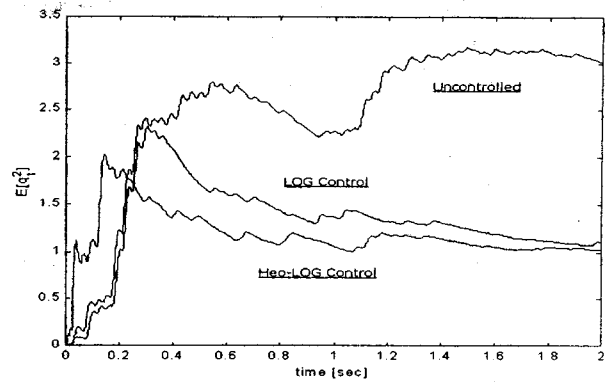


Fig. 13 Mean square response in transient period

서의 제어신호(Fig. 9)로 변환하여 사용하였다. 즉 랜덤노이즈와 제어신호를 시계열 신호형태로 생성한 후 이를 동시에 구조물에 가해줌으로서 확률론적 동적시스템에 대한 Heo-LQG 제어기의 성능을 관찰하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 실험영역에서의 보 끝단 응답의 실험 결과를 비교한 것이다. 먼저 Fig. 10은 실험영역에서 LQG 제어기만을 사용하였을 때의 보 끝단의 응답을 비제어시와 비교한 것이고, Fig. 11은 확률영역에서 구한 제어입력 PSD를 몬테카를로 기법으로 실험영역에서의 제어입력으로 변환한 후 이를 제어에 사용한 경우의 응답이다. Fig. 12는 Heo-LQG 제어기와 LQG 제어기를 사용한 경우 각각의 보 끝단의 응답을 비교한 것이다. 제공평균응답을 비교해본 결과 실험영역에서 LQG 제어기를 사용했을 시에는 비제어시보다 약 40% 정도의 제어효과를 얻을 수 있었으며, Heo-LQG 제어기로 보를 제어한 경우에는 약 42% 정도의 제어효과를 볼 수 있었다(Fig. 13),(Table 1). 실제로 랜덤 가진이가해지는 시스템에 있어 제공평균응답을 고찰할 경우 과도상태의 값보다는 정상상태에서의 값이 더 중요하다. 두 제어기 모두 과도상태에서는 비제어시와 별 차이를 보이지 않지만 정상상태에서는 그 제어효과를 뚜렷하게 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 이미 잘 알려진 LQG 제어기를 사용하여 실험영역에서의 보의 진동제어를 실험하였고 이 결과를 확률영역에서 얻은 제어 PSD를 제어입력으로 사용한 Heo-제어기법의 결과와 비교하여 Heo-제어기법이 제어기로서 보다 나은 성능을 갖음을 실험을 통하여 알았다. 이로서 시스템에 가해지

는 외란의 형태가 확률적이고 예측하기 어려운 경우에 있어 그동안 설계에 어려움이 따랐던 문제들을 제안된 Heo-확률제어방법으로 접근해 볼 수 있음을 확인할 수 있었다. 또 본 논문에서는 확률영역에서의 PSD를 실물리영역에서 시계열 신호로 변환하기 위해 몬테카를로기법을 사용하였고, 이로 인한 시간 지연으로 인해 실험을 실시간으로는 수행할 수 없었으나, DSP (Digital Signal Processor) 보드를 이용하여 시뮬레이션(simulation)시간을 줄인다면 이 문제도 해결할 수 있으리라 본다. 더 나아가 보다 근본적으로는 몬테카를로기법을 대신할 새로운 방식의 신호변환에 대한 연구도 수행할 필요가 있겠다. 또한 시스템 모델링시 본래의 알루미늄보와 압전재료 사이에 존재하는 접착층이 충분히 얇아서 두 재료가 완전히 결합된 상태라고 가정하여 모델링하였으나 정밀한 시스템의 경우 이로 인한 shear lag, 즉 압전작동기의 양 끝단부위에서 주구조물과 압전작동기 사이의 변형률이 달라지는 현상이 발생할 수 있으므로⁽⁹⁾ 이에 대한 주의가 요구된다. 본 논문에서 실험을 통해 그 성능을 검증한 Heo 제어기법은 시스템의 외란으로 백색잡음만을 고려하고 있다. 차후에는 외란의 형태가 유색잡음인 경우에 대한 Heo 제어기법의 개발이 요구된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지원으로 수행된 연구(과제번호: 96-0200-07-01-3)의 일부이며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

(1) 허 훈, 한정엽, 김대중, 조윤현, 1999, "確率領域

에서의 制御機(許-確率制御機, Heo-Stochastic Controller) 설계방법," 대한민국특허출원 1999-17049.

- (2) Kim, M. S., Han, J. Y. and Heo, H., 1995, "A New Approach to Stochastic Control of Randomly disturbed System (I)," Proc of the 1st International Workshop on Advanced on Mechatronics, Dec., Cheju-Do, Korea.
- (3) 김대중, 1999, "확률론적 동력학계의 제어에 대한 실험적 연구", 고려대학교 대학원 석사 논문.
- (4) Edward F. Crawly, Javier de Luis, 1997, "Use of Piezoceramic Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, pp. 1373~1385.
- (5) Ibrahim, R.A., Soundararajan, A., and Heo, H., 1985, "Stochastic Response of Nonlinear Dynamic Systems Based on a Non-Gaussian Closure," ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 52, pp. 965~970.
- (6) Crandall, S.H., and Zhu, W.Q., 1983, "Random Vibration: A Survey of Recent Developments," Journal of Applied Mechanics, Vol. 50, pp. 953~962.
- (7) D. E. Kirk., 1970, "Optimal Control Theory," Prentice Hall.
- (8) 신태식, 박문규, 1998, "수정 LQG 제어기를 이용한 지능 구조물의 능동진동제어," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 664~669.
- (9) Crawley E.F., and de Luis, 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol. 25, No. 10.