

공탄성시스템의 확률론적 제어에 대한 실험적 연구

김대중* · 박상태** · 정재욱** · 허 훈***
(1999년 1월 27일 접수)

An Experimental Study on the Stochastic Control of a Aeroelastic System

Dae jung Kim, Sang Tae Park, Jae Wook Chung and Hoon Heo

Key Words : PSD(Power Spectral Density), Monte-Carlo Method, Ito's Stochastic Differential Equation, F-P-K Equation, Dynamic Moment Equation, Heo-Stochastic Control Technique

Abstract

A Newly proposed control methodology applied to the aeroelastic system experiencing flutter is investigated and its performance is verified experimentally. The 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. It is shown experimentally that the vibration of beam 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 the new control method, called Heo-stochastic control technique, has better performance as a controller.

기호설명

$p(=c/2)$: 항공익의 반익현
 α : 복합재료보의 비틀림(torsional) 변위
 $\beta(x, t)$: 복합재료보의 휨(bending) 변위
 $\phi_i(x)$: 모드형 함수
 $\varphi(x)$: 구간 1과 2의 모드형 함수
 $q_i(t)$: 일반화된 i번째 모달 좌표
 q : 모달 변위
 \dot{q} : 모달 속도
 k_a : 비틀림 강성도(torsional stiffness)
 ρ_a : 공기 밀도
 F : 공기역학적 유도 외력
 F_1 : 공력 관성

F_2 : 공력 감쇠
 U : 풍동내 공기의 속도
 \tilde{c} : 시스템의 구조적 감쇠계수
 $C(k)$: Theodorsen's 함수
 \bar{B} : 제어입력과 관련된 벡터
 \hat{b} : 표준화된 모달제어입력의 계인 벡터
 $V(t)$: 시스템에 가해지는 제어입력
 \hat{c} : 표준화된 모달 구조감쇠계수
 \hat{k} : 표준화된 모달 구조강성도계수
 g_ξ : 표준화된 모달 공력감쇠계수
 B_ξ : 시스템 외란의 브라운 과정
 B_V : 제어입력의 브라운 과정
 D_ξ : 시스템에 가해지는 외란의 PSD
 D_V : 시스템에 가해지는 제어입력의 PSD
 L : 복합재료보의 길이
 M : 시스템 질량 행렬
 K : 시스템 강성 행렬

* 고려대학교 제어계측공학과 Mechatronics 연구실 연구원

** 고려대학교 대학원 제어계측공학과

*** 회원, 고려대학교 교수 제어계측공학과

- $P(x,t)$: 전이확률밀도함수
- m_{10} : 평균 모달 변위
- m_{01} : 평균 모달 속도
- m_{11} : 변위와 속도의 평균 모달
- m_{20} : 제곱평균 모달 변위
- m_{02} : 제곱평균 모달 속도

1. 서론

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 방법으로는 효율적인 결과를 획득하는데 한계가 있다고 할 수 있다. 특히, 구조물과 유체상호간의 간섭이 일어나는 공탄성(aeroelasticity)이나 수탄성(hydroelasticity)의 경우 유체에 의한 외부에서의 가진은 실제로 시스템의 동적 좌표계에 종속되는 형태를 나타낸다. 따라서 이 경우 시스템은 더 이상 외부가진에 의한 동적시스템이 아니라 시스템 파라미터가 가진되는 형태의 동적시스템으로 구성된다. 특히 이때의 가진 형태가 불규칙한 형태인 경우를 본 논문에서는 연구의 대상으로 삼았다. 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 주구조물인 알루미늄보에 작동기용의 압전세라믹(piezoceramic)과 감지기용의 압전필름(piezofilm)이 부착된 형태의 복합재료보⁽³⁾를 제어의 대상으로 하였으며 이 복합재료보를 풍동내에 설치하여 격심한 난류유동에 노출된 항공익으로 모델링하였다.

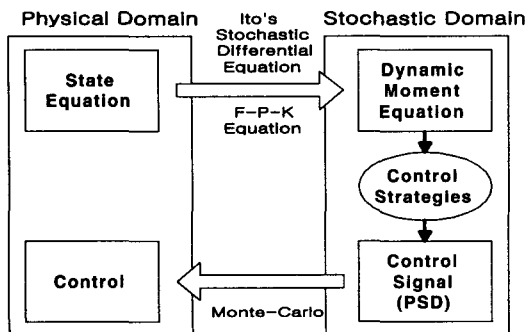


Fig. 1 Conceptual diagram of Heo-control technique.

불규칙적인 외부가진을 받는 동적시스템은 실제 물리 영역에서 임의로 변하는 시간의 함수로 나타나고, 이는 범용적인 제어방식의 적용을 어렵게 한다. 그러나 이러한 실제 물리계의 지배방정식을 확률영역으로 변환시켰을 경우 시간의 함수로 나타나는 불규칙한 외란이 시간에 독립적인 PSD(Power Spectral Density)로 변환되며, 이는 상수의 형태를 띄게 됨으로써 기존의 제어기법을 적용하기에 용이하다. 본 논문에서는 기존에 잘 알려진 LQG 제어기법을 사용하여 확률영역에서의 제어기를 설계하고 이 때 얻어진 제어입력을 몬테카를로(Monte Carlo)기법을 통해 실제 물리계로 변환하여 구조물의 진동을 제어하고자 한다.⁽²⁾

2. 공탄성시스템의 수학적모델

자연계에서 동적시스템들은 다양한 형태의 외부 가진에 노출되는 바, 특히 유연한 구조물과 유체간의 상호간섭이 일어나는 공탄성이나 수탄성의 경우는 특이한 예가 되겠다. 이러한 경우에는 유체에 의한 외부에서의 가진은 실제로 시스템의 동작 좌표계에 종속되는 형태로 나타난다. 따라서 이 경우 시스템은 더 이상 외부가진에 의한 동적시스템이 아니라 시스템 파라미터가 가진되는 형태의 동적시스템으로 구성된다. 특히 이때의 가진 형태가 불규칙한 형태인 경우를 본 논문에서는 연구의 대상으로 삼았다.

본 논문에서는 Fig. 2와 같이 주구조물인 알루미늄보에 작동기용의 압전세라믹(piezoceramic)과 감지기용의 압전필름(piezofilm)이 부착된 형태의 복합재료보⁽³⁾를 제어의 대상으로 하였으며 이 복합재료보를 풍동내에 설치하여 격심한 난류유동에 노출된 항공익으로 모델링하였다.

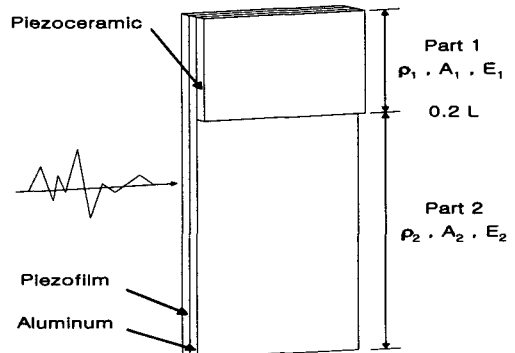


Fig. 2 The composite beam.

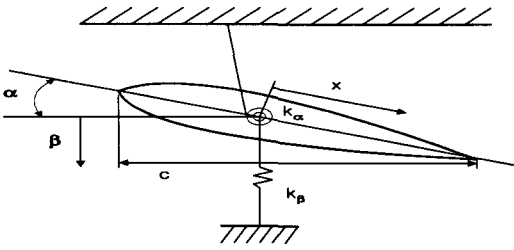


Fig. 3 The schematic of an aeroelastic system.

Fig. 2는 대표단면(typical section)모델로 간략화할 수 있으며, 이 모델은 날개의 횡단면 방향으로 잘려진 strip방식으로 폭은 단위 크기로 하고 날개에 가해지는 공기력은 종방향으로 균일하다고 가정하였다. 간략화된 모델은 Fig.3과 같다.⁽⁴⁾

위와 같은 시스템에서 복합재료보의 휨 변위 $\beta(x, t)$ 는 모달영역에서 두 개의 무한급수의 곱으로 표현할 수 있고,

$$\beta(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t) \quad (1)$$

k_a 가 매우 큰 경우로서 $\alpha = \dot{\alpha} = 0$ 이라 가정하면, 이때의 운동방정식은 다음과 같이 휨 모드만이 포함된 형태로 표현할 수 있다.⁽⁴⁾

$$M \ddot{q}_i(t) + \tilde{c} \dot{q}_i(t) + K q_i(t) = -F + \bar{B}V(t) \quad (2)$$

여기서 F 는 공기역학적 유도외력으로 다음과 같이 쓸 수 있으며,

$$\begin{aligned} F &= \pi \rho_a b^2 \left[\int_0^{0.2L} \varphi_{1i}(x) \varphi_{1j}(x) dx + \int_0^{L-0.2L} \varphi_{2i}(x) \varphi_{2j}(x) dx \right] \ddot{q} \\ &+ 2\pi \rho_a b UC(k) \left[\int_0^{0.2L} \varphi_{1i}(x) \varphi_{1j}(x) dx + \int_0^{L-0.2L} \varphi_{2i}(x) \varphi_{2j}(x) dx \right] \dot{q} \\ &= F_1 \ddot{q} + UC(k) F_2 \dot{q} \end{aligned} \quad (3)$$

풍동내부의 공기의 속도는 Fig.7과 같이 매순간 변화하는 난류의 형태를 가진 경우를 고려하고자 한다. 따라서 식(3)은 주파수항인 $C(k)$ 를 1로 가정하는 준정상공력하중(Quasi-steady aerodynamic load)의 접근방식으로 해석하면, 다음과 같이 시스템의 감쇠항이 가진되는 형태의 동적시스템으로 재구성할 수 있다.

$$[M + F_1] \ddot{q}_i(t) + [\tilde{c} + UF_2] \dot{q}_i(t) + K q_i(t) = \bar{B}V(t) \quad (4)$$

여기에 보의 첫 번째 휨 모드만을 제어대상으로 보면 위 식을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\ddot{q}_i(t) + [\hat{c} + g_\zeta] \dot{q}_i(t) + \hat{k} q_i(t) = \hat{b}V(t) \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} \hat{c} &= \frac{\tilde{c}}{M + F_1}, & g_\zeta &= \frac{UF_2}{M + F_1} \\ \hat{k} &= \frac{K}{M + F_1}, & \hat{b} &= \frac{\bar{B}}{M + F_1} \end{aligned} \quad (6)$$

확률영역에서의 모멘트방정식을 얻기 위해, 먼저 풍동내부의 난류유동과 제어입력을 평균이 0이고 비상관(uncorrelated)인 정상(Gaussian)형태의 백색잡음과정이라 가정하자. 여기서 $B_\zeta(t)$ 와 $B_V(t)$ 는 시스템에 가해지는 외란과 제어입력이 브라운 운동 과정임을 D_ζ 와 D_V 는 각 신호의 PSD를 나타낸다.

$$\begin{aligned} g_\zeta(t) &= \frac{dB_\zeta(t)}{dt}, & E[dB_\zeta^2(t)] &= 2\pi D_\zeta dt \\ V(t) &= \frac{dB_V(t)}{dt}, & E[dB_V^2(t)] &= 2\pi D_V dt \end{aligned} \quad (7)$$

연속 랜덤과정의 어떤 순간의 양태가 그 전 과정의 부가적인 정보에 의해 변화하지 않을 때 그 과정을 마코프과정(Markov process)이라 하며, 일반적으로 Ito의 확률미분방정식은 이러한 마코프 과정으로 구성되어 있다. 제한된 복합재료보에 대해서는 식 (8)과 같은 변수변환을 통해 확률미분방정식을 얻을 수 있다.^(5,6)

$$\{q_1 \ \dot{q}_1\}^T \Rightarrow \{x_1 \ x_2\}^T \quad (8)$$

$$\begin{aligned} dx_1 &= x_2 dt \\ dx_2 &= \{-\hat{k}x_1 - [\hat{c} + g_\zeta]x_2 + \hat{b}V(t)\} dt \end{aligned} \quad (9)$$

위 식은 F-P-K(Fokker-Planck-Kolmogorov) 방정식을 이용하여 응답 모멘트에 관한 미분방정식으로 유도된다. 마코프과정은 이 Ito의 확률미분방정식을 구성하고, 그 해는 F-P-K 방정식에 의해 지배되는 전이확률밀도함수에 의해 특성화된다. 본 시스템에 대한 F-P-K 방정식은 시스템의 Ito의 확률미분방정식로부터 다음식 (10)과 같이 구해진다. 여기서 $P(x, t)$ 는 전이확률(transition probability) 밀도함수 $P\{x(t_{n-1})|x(t_n)\}$ 이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(x, t)}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_1} \{x_2 P(x, t)\} \\ &- \frac{\partial}{\partial x_2} \{(-\hat{k}x_1 - \hat{c}x_2) P(x, t)\} \\ &+ \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \{x_2^2 D_\zeta + \hat{b}^2 D_V P(x, t)\} \end{aligned} \quad (10)$$

F-P-K방정식에 상태들의 곱으로 표현되는 스칼라 함수 $\phi(x)$ 를 곱한 후

$$\mathcal{O}(x) = x_1^i x_2^j \quad (11)$$

이를 전체영역에 대해 적분을 하면 제안된 시

시스템에 대한 다음과 같은 동적모멘트방정식을 얻을 수 있다. 여기서 동적모멘트방정식의 각 상태는 상태 자신과 각 상태 상호간의 평균값과 제곱평균값을 의미한다.

$$m_{i,j} = \int \int_{-\infty}^{+\infty} x_1^i x_2^j P(x, t) dx_1 dx_2 = E[x_1^i x_2^j] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{10} &= m_{01} \\ \dot{m}_{01} &= \hat{c} m_{01} + \hat{k} m_{10} \\ \dot{m}_{11} &= m_{02} + \hat{c} m_{11} + \hat{k} m_{20} \\ \dot{m}_{20} &= 2m_{11} \\ \dot{m}_{02} &= 2\hat{k} m_{11} + 2(\hat{c} + 2\pi D_\zeta) m_{02} + 4\pi \hat{b}^2 D_v \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서 1차 모멘트 방정식과 2차 모멘트 방정식은 연계(coupled)되어있지 않으므로 서로에게 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 또한 입력을 평균 0인 백색잡음으로 가정했으므로 1차 모멘트 방정식은 정상상태에서 0으로 수렴하리라는 것을 쉽게 생각할 수 있다. 이는 시스템의 출력이 그 입력의 특성과 다르지 않게 나타나는 선형시스템의 특징이기도 하다. 어떤 시스템의 거동은 원하는 상태의 제곱평균치(mean square value)에 의해 알 수 있다. 2차 모멘트 방정식은 각 상태 자신들의, 그리고 각각 상태 서로들의 제곱평균치로서 이들의 시간에 따른 변화에 대한 기술이다. 또한 위 식에서 D_ζ 는 풍동내 공기흐름중 난류 유동의 감쇠성분에 대한 PSD로 이는 상수이다. 따라서 실제물리영역에서의 파라메트릭 시스템이 확률영역으로 변환하였을 경우 비파라메트릭(nonparametric) 시스템이 됨을 확인 할 수 있다. 이는 시스템에 가해지는 외란이 확률적이고 비결정적인 경우 이러한 시스템을 확률영역으로 변환하여 제어기법의 적용을 용이하게 할 수 있는 것과 마찬가지로 실제물리영역에서 파라메트릭 시스템을 해석하는데 큰 편리함을 제공해 준다.

3. 제어기 설계

Heo-확률제어기법은 실제물리영역에서의 시스템 방정식을 확률영역에서의 동적모멘트방정식으로 변환한 후 제어기를 설계한다. 이때 제어기는 기존의 모든 제어기법들을 설계, 사용할 수 있다. 가령 확률영역에서 PI제어기가 설계되었다면 이는 결국 Heo-PI 제어기를 설계한 것이다. 본 논문에서는 이와 같이 확률영역에서 이루어지는 제어기법의 성능을 평가하기 위해 가장 일반적인 경

우의 LQG제어기를 비교의 대상으로 선정하고 이 제어기를 이용해 실제물리영역에서의 제어와 확률영역에서의 제어를 수행하고자 한다.

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

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

이 때 상태추정오차의 초기상태 $\hat{x}(0)$ 와 기반 가진잡음 $\dot{z}(t)$ 그리고 센서잡음 $\theta(t)$ 가 서로 비상관이라 가정하면, 제어입력 $u(t)$ 와 측정된 출력 $y(t)$ 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,

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

다음 Riccati 방정식의 해로부터 얻을 수 있다.

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

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

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

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

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.

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

이상의 과정을 확률영역에서의 지배적인 동적모멘트방정식에 적용하여 Heo-LQG 제어기를 설계하였다.

4. 실험방법 및 결과

제안된 복합재료보를 풍동내에 설치하여 난류

Table 1 The properties of aluminum beam.

Parameter	Value
Length, L_b	0.284 [m]
Width, b	0.05 [m]
Thickness, t_b	0.38×10^{-3} [m]
Density, ρ_b	1.2661 [kg/m ³]
Young's Modulus, E_b	4.7538 [GPa]

Table 2 The properties of piezoceramic.

Parameter	Value
Length, $L_{p,c}$	0.0568 [m]
Width, b	0.05 [m]
Thickness, $t_{p,c}$	0.254×10^{-3} [m]
Density, $\rho_{p,c}$	3.26×10^3 [kg/m ³]
Young's Modulus, $E_{p,c}$	61 [GPa]
Strain constant, d_{31}	-171×10^{-12} [C/N]

Table 3 The properties of piezofilm.

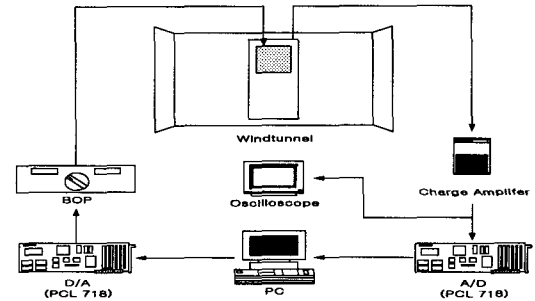
Parameter	Value
Length, $L_{p,f}$	0.284 [m]
Width, b	0.05 [m]
Thickness, $t_{p,f}$	110 [μ m]
Density, $\rho_{p,f}$	1.78×10^3 [kg/m ³]
Young's Modulus, $E_{p,f}$	2 [GPa]
Strain constant, d_{31}	23×10^{-12} [C/N]
Stress constant, g_{31}	216×10^{-3} [Vm/N]
Electromechanical	0.12
Coupling Factor, k_{31}	

에 노출된 유연한 항공익으로 가정하여 이에 대한 제어실험을 수행하였다. 앞서 2장에서 언급했듯이 이 경우 시스템은 더 이상 외부가진에 의한 동적시스템이 아니라 시스템 파라미터가 가진되는 형태의 동적시스템으로 구성된다. 본 연구의 실험에서 사용된 알루미늄보와 압전세라믹, 압전 필름의 제원은 Table 1,2,3과 같다.

실험장치의 배치는 Fig. 4와 같으며⁽⁸⁾ 이 때 사용된 풍동은 흡입식 비순환 방식의 개방형 풍동이였다(Fig. 5). 항공익은 날개의 끝단이 아래를 향하도록 설치하였으며, 풍동내부에 난류를 형성하기 위해 1cm간격의 격자(mesh)를 풍동흡입구쪽에 설치하였다. 이 때, 풍동내 공기의 속도는 핫 와이어(hotwire)와 속도측정기를 사용하여 측정하였다. Fig. 6은 Flutter가 발생할 때 풍동 정 중앙 부분에서 측정된 공기흐름의 속도성분 변화형상으로 평균속도 20.8m/s였으며, 실험시에는 이러한

Table 4 The mean square value of a response of airfoil under random flutter.

	Mean square value	Ratio
Uncontrolled	2.3880	1
LQG controlled	1.2887	0.5397
Heo-LQG controlled	0.9348	0.3915

**Fig. 4** Schematic diagram of experimental setup.

바람이 보의 종단면에 균일하게 작용한다고 가정하였다. Fig. 7은 이러한 난류의 속도변화성분에 대한 PSD를 나타내며, 이것의 평균값을 시스템에 가해지는 외란의 PSD 값으로 사용하였다. Fig. 8은 난류아래서 Flutter가 발생한 항공익의 불안정한 응답을 보여주고 있다. Fig. 9와 Fig. 10은 모의실험결과 얻어진 시스템의 제곱평균응답과 그때의 제어입력 PSD를 나타낸다. 항공익에 가해지는 공기의 흐름이 매우 불규칙하여 가진기를 거처에 설치한 보의 제어에서처럼⁽⁹⁾ 제어시와 비제어시의 경우를 비교하여 일반적인 경우의 응답들을 살펴보면 다음과 같다. Fig. 11의 첫 번째 그림은 비제어시 난류에 노출된 항공익 끝단의 응답으로 한 쪽으로 약간 치우친 형상을 볼 수 있다. 이는 제작된 항공익을 풍동에 고정할 때 그 중심선이 공기의 진행방향과 일치하여야 하나 이를 맞추어 고정하기가 매우 어려웠고 따라서 항공익이 전반적으로 약간 휘어진 형태를 나타내기 때문이다. 두 번째와 세 번째 그림은 각각 LQG 제어기를 사용할 때와 Heo-LQG 제어기를 사용했을 경우의 응답으로 비제어시에 나타나는 항공익의 치우침을 점차로 극복해 나감은 물론 진동을 억제하고 있음을 살펴볼 수 있다. 제곱평균응답을 살펴보면 이를 보다 확실히 볼 수 있으며 LQG 제어시는 약 46%, Heo-LQG 제어기 사용시는 약 61%정도의 제어효과를 볼 수 있었다(Fig. 12).

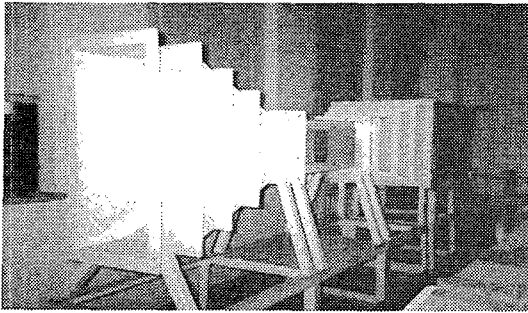


Fig. 5 An open-loop type windtunnel.

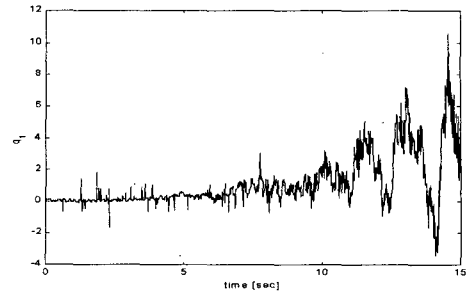


Fig. 8 Flutter response of an airfoil in turbulent airflow.

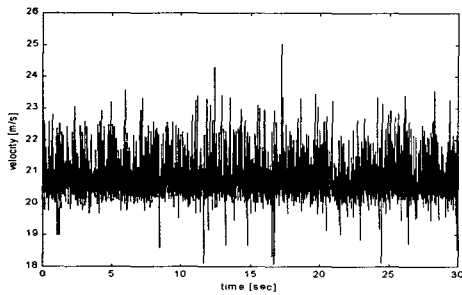


Fig. 6 Turbulent airflow in windtunnel. (mean velocity is 20.8m/s)

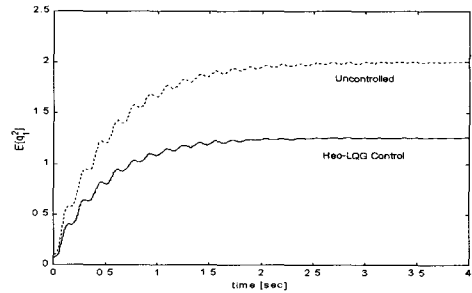


Fig. 9 The mean square response of an airfoil in stochastic domain. (by simulation)

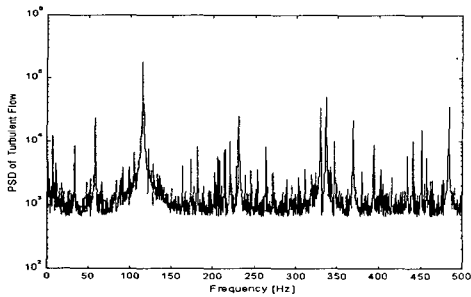


Fig. 7 The PSD of turbulent airflow.

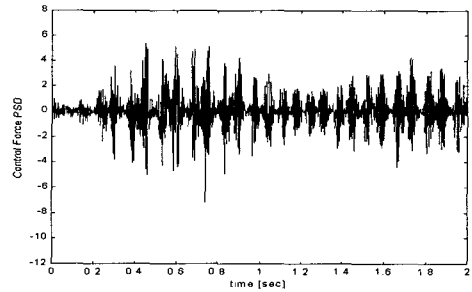


Fig. 10 The PSD of control force in stochastic domain. (by simulation)

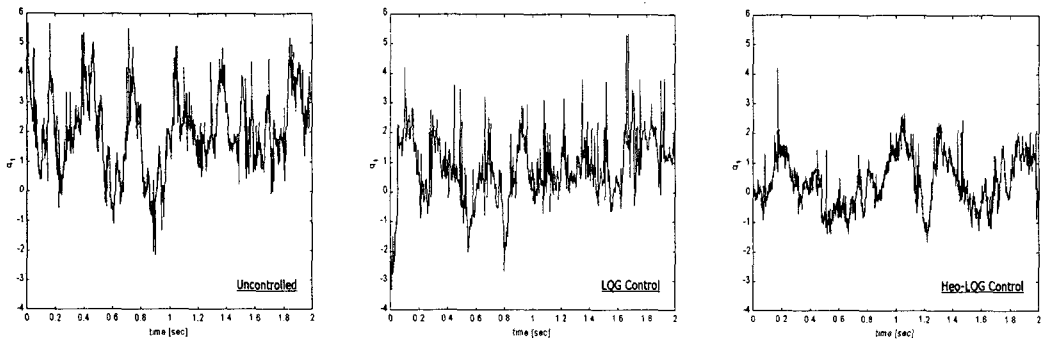


Fig. 11 The comparison of tip response of an airfoil under flutter in physical domain.

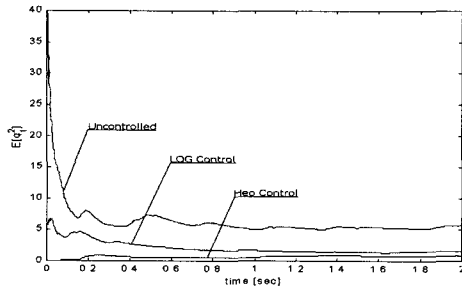


Fig. 12 The comparison of mean square response of an airfoil under flutter.

5. 결론

풍동내에서 복합재료보로 구성된 항공익은 유체와의 상호간섭이 일어나는 공탄성현상이 발생되는바 이 경우 시스템의 파라미터가 가진되는 형태의 랜덤파라메트릭 시스템이 됨을 살펴보았다. 이미 잘 알려진 LQG 제어기를 사용하여 실물리영역에서의 보의 진동제어를 실험하였고 이 결과를 확률영역에서 얻은 제어 PSD를 제어입력으로 사용한 Heo-제어기법의 결과와 비교하여 Heo-제어기법이 제어기로서 훌륭한 성능을 보임을 실험을 통하여 살펴보았다. 이로서 시스템에 가해지는 외란이나 내란의 형태가 확률적이고 예측하기 어려운 경우에 있어 그동안 통상적인 방법으로 취급하였던 문제들을 제안된 Heo-제어기법으로 접근해 보다 나은 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 실험을 통해 그 성능을 검증한 Heo 제어기법은 시스템의 외란으로 백색잡음만을 고려하고 있다. 차후 교란의 형태가 유색잡음(colored noise)인 경우에 대한 Heo-제어기법의 개발이 요구되며 이에 대한 연구가 진행중에 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(96-0200-07-01-3) 지원으로 수행되었으며 실험에

대한 도움을 주신 동국대학교 기계공학과 객문규 교수님과 고려대학교 기계공학과 최영돈 교수님께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 허 훈, 한정엽, 김대중, 조운현, 1999, "確率領域에서의 制御機 (許-確率制御機, Heo-Stochastic Controller)설계방법," 대한민국특허출원 1999-17048
- (2) 김대중, 1999, "확률론적 동력학계의 제어에 대한 실험적 연구," 고려대학교 대학원 석사학위논문.
- (3) Edward F. Crawly and Javier de Luis, 1987, "Use of Piezoceramic Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA, Vol. 25, No 10, pp. 1373~1385.
- (4) Edward F. Crawly, Howard C. Curtiss Jr., David A. Peters, Robert H. Scanlan, and Fernando Sisto, A Modern Course in Aeroelasticity, Kluwer Academic Publishers, pp. 65~87.
- (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) 김대중, 허훈, 1998, "확률론적 동력학계의 제어에 대한 실험적 연구 (I)," 한국소음진동공학회 추계학술대회.
- (7) D. E. Kirk., 1970, *Optimal Control Theory*, Prentice Hall.
- (8) 박수홍, 홍진석, 김홍섭, 신준, 오재응, 1998, "Filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 음향 가진된 밀폐계 평판의 능동진동제어," 대한기계학회 논문집, A 권 제 22권 제 10호, pp.1792~1797.
- (9) Hoon Heo, Dae Jung Kim, " Stochastic Control of Flexible Structure Experiencing Random Flutter," (under review : A.S.M.E, Journal of Dynamic Systems. Measurement and Control).