

압전 작동기를 이용한 유체 유기 진동의 능동 제어

Active Control of Flow-Induced Vibration Using Piezoelectric Actuators

한재흥*

Jae-Hung Han

Key Words : Active control(능동 제어), Piezoelectric actuator(압전 작동기), Flow-induced vibration(유체 유기 진동), Smart structure(지능 구조)

ABSTRACT

This paper presents some examples of active control of flow-induced vibration using piezoelectric actuators. The flutter phenomenon, which is the dynamic instability of structure due to mutual interaction among inertia, stiffness, and aerodynamic forces, may cause catastrophic structural failure, and therefore the active flutter suppression is one of the main objectives of the aeroelastic control. Active flutter control has been numerically and experimentally studied for swept-back lifting surfaces using piezoelectric actuation. A finite element method, a panel aerodynamic method, and the minimum state space realization are involved in the development of the governing equation, which is efficiently used for the analysis of the system and design of control laws with modern control framework. The active control suppressed flow-induced vibrations and extended the flutter speed around by 10%. Another representative flow-induced vibration phenomenon is the oscillation of blunt bodies due to the vortex shedding. In general, it is quite difficult to set up the numerical model because of the strong non-linearity of the vortex shedding structure. Therefore, we applied adaptive positive position feedback controller, which requires no pre-determined model of the plant, and successfully suppressed the flow-induced vibration.

1. 서론

지구 상의 자연적 혹은 인공의 구조물들은 그 주위의 흐름과 상호 작용하여 진동 현상을 보이는데, 올 여름 태풍 매미에 의한 극심한 피해에서 볼 수 있듯이 경우에 따라 구조물의 성능 저하 및 파손을 유발하기도 한다. 그러므로, 유체/구조 연계 시스템의 진동 안정화 및 제어 기술은 다분야 복합 기술 분야로 다양한 공학적 불안정 진동 현상을 정밀한 컴퓨터 수치 해석 및 가시화를 통해 분석하고, 보다 안정적인 구조물을 확보하는 데 목적이 있다.⁽¹⁾ 대부분의 경우 구조물의 동특성을

파악하고, 구조 변경을 통해 수동적으로 안정성을 증대 시키는 방법들이 사용되고 있으나, 재료, 제어 등 관련 기술이 발달함에 따라 능동 제어 기법을 유체 유발 진동 억제에 사용하려는 시도가 최근 각광을 받고 있다.^(1,2)

특히 지능 재료(smart materials)를 이용한 구조물의 진동 제어에 관한 연구는 꾸준히 증가하고 있으며, 지능 구조물의 여러 기능들을 실현하기 위해서 기능성 재료와 지능 구조물들의 특성에 대한 많은 연구가 이루어 지고 있다.^(3,4) 여러 가지 기능성 재료들 중에서 압전 재료는 간단한 구동 메커니즘, 빠른 응답, 구조물과의 접합성 등 여러 가지 우수한 성질때문에 유망한 작동기로서 관심을 끌고 있다. 센서로는 가속도계나 스트레인 게이지 등 기존 센서 류 외에도 구조물 내부에 삽입 또는 표면에 부착하기 쉽고, 작동 온도 범위가 높으며 직경이 작고 유연하여 원하는 크기의 센서를

* 한국과학기술원 항공우주공학전공
E-mail: jachunghan@kaist.ac.kr
Tel: (042) 869-3723, Fax: (042) 869-3710

제작하기 용이한 광섬유 센서도 많이 연구되고 있는 추세이다.^(5,6) 본 논문에서는 유체 유기 진동의 대표적인 2 가지 유형인 플러터와 와류 유발 진동에 대해 압전 작동기를 이용한 능동 진동 제어를 적용한 사례를 소개하고자 한다. 각 현상에 대한 간단한 소개와 모델링, 실험 장치의 구성 및 실험 결과를 제시하였다.

2. 조종면의 플러터 제어

2.1 플러터 제어 연구 현황

플러터 현상은 구조물의 관성력 및 탄성력, 그리고 구조에 작용하는 공기력의 상호 작용에 의해 어느 일정 속도(플러터 임계 속도) 이상의 유동 흐름에서 나타나는 구조물의 동적 불안정성을 일컫는다. 항공기나 미사일 등 비행체 뿐 아니라 교량 등 토목 구조물, 광 디스크 등 전자 부품과 같이 다양한 분야에서 플러터가 발생된다. 항공 분야의 대표적인 플러터 능동 제어에 대한 연구는 NASA Langley 연구 센터의 AFW (Active Flexible Wing), BACT (Benchmark Active Control Technology), PARTI (Piezoelectric Aeroelastic Response Tailoring Investigation) 프로그램 등을 들 수 있다.⁽⁷⁻⁹⁾ 본 논문에서는 저자가 일본 동북대 유체과학연구소에서 수행한 후퇴각이 있는 평판 조종면의 플러터 제어 풍동 시험에 관해 소개하고자 한다.

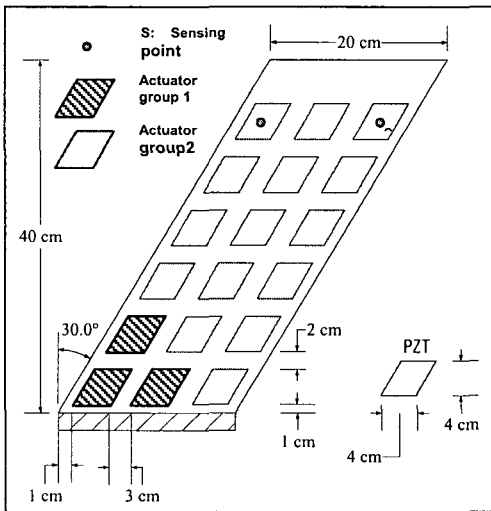


Fig. 1 Configuration of the test model (a swept-back cantilevered plate with surface-bonded PZT's).

2.2 실험 모델

실험 모델은 Fig.1 에 보인 바와 같이 후퇴각이 있는 외팔 평판이며 재질은 알루미늄 ($E = 68.6$ Gpa, $G = 25.5$ Gpa, $\rho = 2700$ Kg/m³) 이다. 평판 양면에 18 개의 압전 작동기(Fuji Ceramics@ C-91; $E = 59$ Gpa, $G = 21.5$ Gpa, $\rho = 7750$ Kg/m³, $d = -330 \times 10^{-12}$ m/V, thickness: 0.2 mm)를 대칭적으로 부착하였다. 풍동 실험은 Fig. 2 와 같이 동북대의 저난류 아음속 풍동에서 시험 영역을 open section 으로 하여 수행하였고, 두대의 레이저 변위 센서와 DSP 제어기를 이용하였다.

플러터 억제를 위한 제어기 설계를 위해서는 정확한 수학 모델이 필요한데, 구조의 동특성 및 압전 재료의 작동 특성은 유한 요소 해석을 통해 구하였으며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$[M]\{\ddot{\eta}\} + [D]\{\dot{\eta}\} + [K]\{\eta\} = \sum_{L=1}^M \{E_L\}V_L(t) \quad (1)$$

식 (1)의 우변항은 압전 작동기에 작용하는 전압 (V_L)에 의한 일반력을 뜻한다. 공력 특성은 DLM (Doublet Lattice Method)를 이용하여, 일반화된 공기력과 모드 좌표 간의 관계를 식 (2)와 같은 형태로 구하였다.

$$\{E\} = q[Q(k, M)]\{\eta\} \quad (2)$$

여기서, q , k , M 은 각각 동압(dynamic pressure), 환산 진동수, 마하 수를 나타내고, $[Q(k, M)]$ 는 비행 조건과 환산 진동수의 복소 함수인 일반화된 공력 행렬(aerodynamic influence coefficient)이다. 주어진 마하수와 밀도에서 $[Q(k, M)]$ 는 여러 환산 진동수에서 계산되는데, 이를 연속적인 주파수 영역에서 표현하기 위해, Karpel⁽¹⁰⁾의 최소 상태법을 이용 식 (3)과 같이 근사화한다.

$$[\hat{Q}(p)] = [A_0] + [A_1]p + [A_2]p^2 + [D](pI - [R])^{-1}[E]p \quad (3)$$

여기서 p 는 무차원화된 라플라스 변수이고, 나머지 행렬들을 최적화 과정을 통해 결정된다. (1)~(3) 식을 종합하면, 실험 모델의 지배 방정식을 얻을 수 있는데, 이를 상태 변수 방정식 형태로 표시하면 식 (4)와 같다.

$$\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + [B]\{u\} \quad (4)$$

여기서 상태 변수 $\{x\}$ 는 모드 변위 및 속도 그리고 공기력 상태를 포함하며, 시스템 행렬 $[A]$ 는

모든 공력 효과, 즉 겉보기 질량(apparent mass), 공력 강성 및 감쇠 항을 포함하며, 외부 유동 속도의 함수이다. 제어력 $\{u\}$ 는 압전 작동기들에 작용하는 전압을 뜻한다. 관심 영역 (플러터 발생 영역)을 묘사하기 위한 일련의 수치 모델을 검토하여 최종적으로 5 개의 구조 변위와 3 개의 공력 극점을 사용하였다.

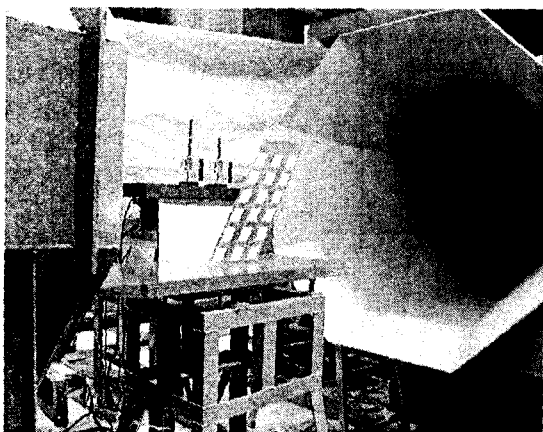


Fig. 2 Wind tunnel test set up.

2.3 압전 작동기 배치 및 제어기 설계

플러터 억제 문제를 제어기 설계 관점에서 살펴보면, 외란 억제(disturbance rejection) 문제로 간주할 수 있는데, 외란(여기서는 공기의 교란)에 의해 가진되는 모드와 제어에 사용하려는 작동기가 영향을 주는 모드가 서로 유사하여야 효율적인 제어 시스템이 구성된다. 시험 시편에 부착한 18 개의 작동기를 독립적으로 사용하지 않고, 2 개의 그룹으로 활용하여 제어 입력의 개수를 2 개로 줄이는 과정에서 유전자 알고리즘을 이용한 최적화⁽¹¹⁾를 통해 Fig. 1 과 같은 작동기의 패턴을 얻었다.

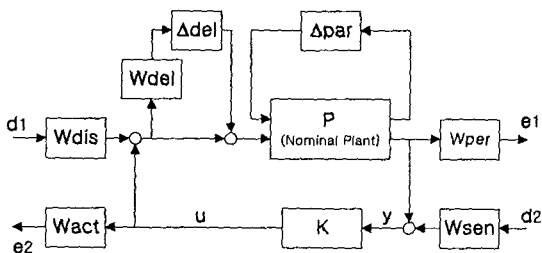


Fig. 3 Block-diagram for the robust controller design.

여러 가지 제어 기법을 이용하여 제어기를 설계하여 시험하였으며, 시스템의 수학 모델은 속도 16.5 m/sec 일 때를 선택하였는데, 이는 비제어시의 플러터 임계 속도 17.1 m/sec 에 매우 근접한 값이다. H_2 제어기는 전형적인 LQG (Linear Quadratic Gaussian) 제어기 설계 기법을 따랐고, 강인 제어 기법 중 H_∞ 및 μ 종합화 (synthesis) 설계 기법을 도입하였는데, 이를 위해 Fig. 3 과 같은 블록도를 구성하고, 각종 가중 함수 (weighting function)를 적절히 선정하였다. 플러터 모드의 경우 주파수는 크게 변화하지 않으면서 감쇠비가 급격히 변화하는 양상을 보이는데, 이를 Parametric 한 시스템의 불확실성으로 모델링하여 μ 제어기 설계 시에 반영하였다. 여기서는 자세한 제어기 설계 과정은 생략하기로 한다.

2.4 결과

Fig. 4, 5 는 대표적인 플러터 제어 결과를 보여주는 데, 센서 1 의 출력을 파워 스펙트럼으로 나타낸 것이다. 비제어 시스템의 플러터 속도보다 약간 낮은 17.0 m/sec 속도에서는 H_2 와 μ 제어기 공히 플러터 모드를 잘 억제하고 있음을 알 수 있다. 또한 플러터 모드의 2, 3 배 하모닉 성분도 관찰되는 데, 플러터 모드를 제어하면 함께 제어됨을 알 수 있다. 그러나, Fig. 5 에서 보듯 제어기 설계 속도보다 상당히 낮은 10.0 m/sec 속도에서는 H_2 제어기의 경우 또 다른 불안정한 모드를 유발함을 알 수 있는데, 유속에 따른 시스템 특성 변화에 기인한다. 반면, μ 제어기는 이 속도에서도 효율적으로 진동을 억제함을 볼 수 있다. Table 1 에서는 제어에 의한 플러터 임계 속도의 증가 추이를 요약하였다.

Table 1 Block-diagram for the robust controller design.

Open /Closed	Method	Flutter Speed (m/sec)	% Improve -ment*
Open Loop	Analysis (V-g)	15.1	
	Analysis (Laplace)	16.6	
	Experiment	17.1	
Closed Loop (Experiment)	SISO LQG	18.2	6.4%
	SISO μ -design	18.2	6.4%
	MIMO LQG	18.8	9.9%
	MIMO μ -design	19.0	11.1%

* With respect to the experimental open loop flutter speed.

3. 와류 유발 진동 제어

3.1 실험 모델

아음속(subsonic flow)에서 구조물은 와류(vortices)를 유발하고, 이러한 vortex street wake 는 구조물의 형상에 관계없이 유사한 형태로 나타난다. Fig. 1 은 레이놀즈수(Re)에 따른 실린더 주위를 지나는 유동의 모습을 나타낸 것이다.⁽¹⁾

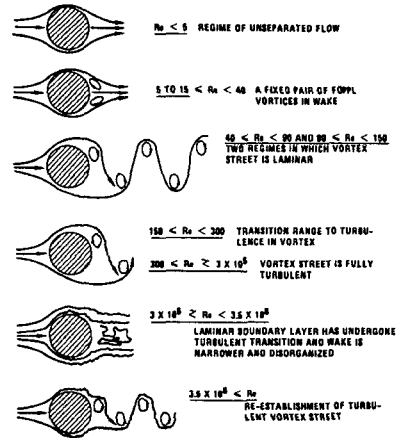


Fig. 6 Regimes of fluid flow across smooth circular cylinder (Lienhard, 1966).

본 연구에서 사용한 실험 모델은 Fig. 7 과 같이 그래파이트/에폭시 복합재 외팔보에 Fuji ceramics 사의 C-82 압전 작동기를 표면에 부착하고, 와류 흐름을 일으키기 위한 실린더를 시편 끝단에 고정하여 구성하였다. 물성치와 제원은 다음과 같다.

$E_1 = 119 \text{ Gpa}$,
 $E_2 = 8.67 \text{ Gpa}$,
 $G_{12} = 5.18 \text{ Gpa}$,
 $\nu_{12} = 0.31$,
 thickness = 0.125 mm,
 lay-up : $[0_7/90_2]_s$,
 $\rho = 1550 \text{ kg/m}^3$,
 실린더 질량 = 26.6819 g

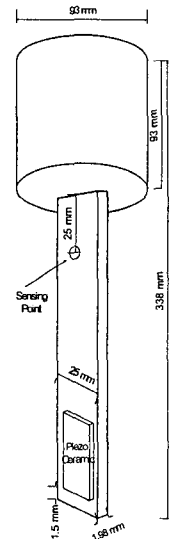
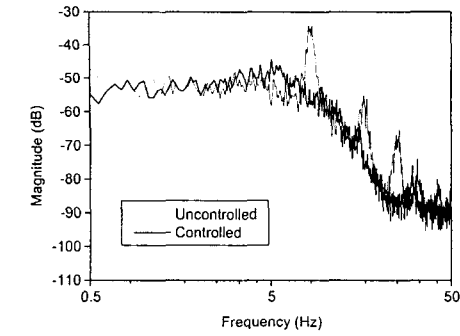
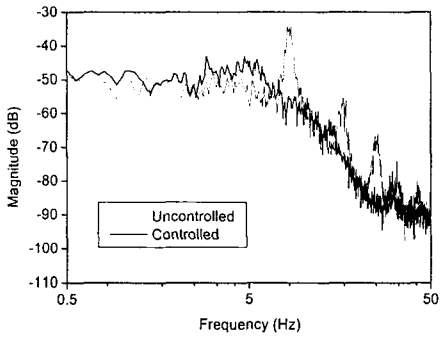


Fig. 7 Composite beam with cylinder.

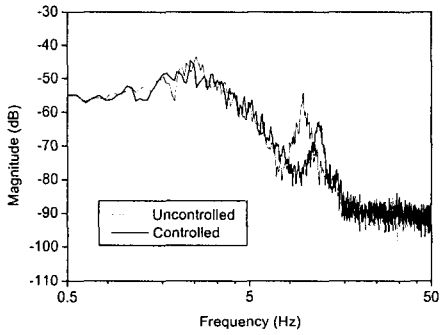


(a) H₂ control

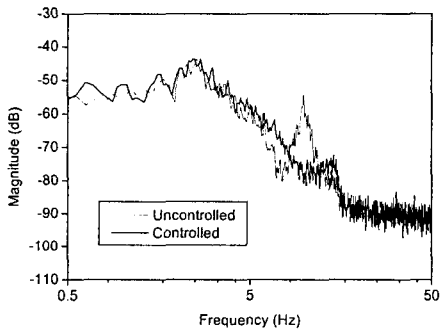


(b) μ control

Fig. 4 Control results at the flow velocity 17.0m/sec.



(a) H₂ control



(b) μ control

Fig. 5 Control results at the flow velocity 10.0m/sec.

3.2 제어기 설계 및 결과

제어기는 수학 모델을 사용하지 않는 적응형 제어기 중 하나인 Adaptive PPF 제어기법을 이용하여 구성하였다.⁽¹²⁾ 풍동 실험은 한국과학기술원 항공우주공학과 풍동에서 수행되었다. 전체 실험 구성도는 Fig. 8 에 나타난 것과 같다. 풍속을 8.5 m/s ~ 11.0 m/s 범위 내에서 변화시키며 제어 실험을 수행하였다.

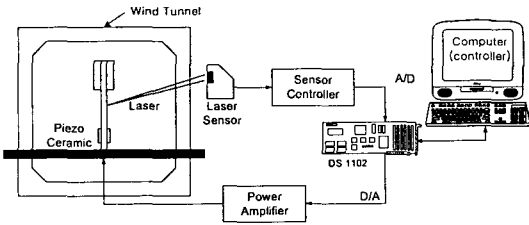


Fig. 8 Wind tunnel setup for vortex-induced vibration control.

풍속을 8.5 m/s ~ 11.0 m/s 범위에서 0.5 m/s 씩 변화시키며 실험한 결과 9.5 m/s 인 경우에는 와류 흘림에 의한 진동이 나타나지만, 그 외의 속도영역에서는 규칙적인 조화 진동이 발생하지 않는 것을 확인하였다. Fig. 9 는 풍속이 9.5 m/s 인 경우 제어기 사용 유무에 따른 파워 스펙트럼을 나타낸다. PPF 제어기를 사용함으로써 25 dB 이상의 진동 저감 효과를 얻을 수 있었다. Adaptive PPF 의 경우 풍속 9.5 m/s 에서 시간 영역에서의 제어 성능을 Fig. 10 에 나타내었다. 실시간 주파수 추정을 통해 구현되는 제어기로 진동이 저감됨을 살펴볼 수 있다.

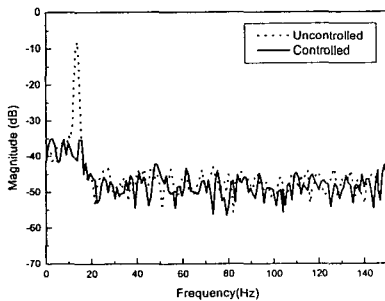


Fig. 9 Control result in wind tunnel test (power spectrum).

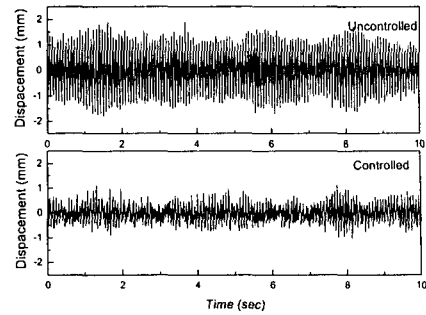


Fig. 10 Adaptive PPF control result in wind tunnel test (time history).

4. 결론

본 논문에서는 유체 유발 진동의 대표적인 현상인 플러터와 와류 유기 진동현상을 압전 작동기를 이용하여 제어한 결과를 보고하였다. 플러터의 제어 실험의 경우, 후퇴각의 있는 외팔 평판을 대상으로 삼았는데, 구조 해석을 위해 유한 요소법, 공기력 해석을 위해 패널법, 공기력 변환을 위해 최소 상태법을 도입하여 상태 변수 방정식을 구성하고, 이를 이용하여 여러 가지 제어기를 설계하고 결과를 비교하였다. 능동 제어 기법을 도입한 결과 플러터 모드를 억제하고 플러터 임계 속도를 향상시킬 수 있었으며, 특히 μ -중합화 설계 기법에 의한 제어기는 시스템의 변화를 체계적인 불확실성으로 고려하여 보다 넓은 유속의 범위에서 안정적으로 시스템을 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 와류 유기 진동은 외팔보에 실린더를 부착한 모델을 대상으로 풍동 시험을 수행하였는데, 적응 제어기의 일종인 Adaptive PPF 제어기를 이용하여, 시스템의 동특성을 잘 모르거나, 와류 유발 진동과 같이 시스템의 주파수가 변화하는 경우에도 제어 성능을 유지할 수 있다.

참고문헌

- (1) Blevins, R. D., Flow-Induced Vibration, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, 1990.
- (2) Dowell, E. H., et al., Modern Course in Aeroelasticity, 2nd ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995.
- (3) Han, J.-H., Rew, K. H., and Lee, I., 1997, "An Experimental Study for Active Vibration Control of Composite Structures with a Piezo-ceramic Actuator and a Piezo-film Sensor," *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, pp. 549-558
- (4) Kim, D.-H., et al., 2003, "Optimal Vibration Control of a Plate Using Optical Fiber Sensor and PZT actuator," *Smart*

Materials and Structures, Vol. 12, pp. 549-558

(5) Hong, C. S., Park, J. W., Ryu, C. Y., and Kang H. K., 1999, "Signal Characteristics of EFPI In the Delaminated Composite," *Proc. of 13th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Kyongju, Korea, pp. 192-195

(6) Park, J. W., Ryu, C. Y., Kang, H. K., and Hong, C. S., 2000, "Detection of buckling and crack growth in the delaminated composites using fiber optic sensor," *Journal of Composite Materials*, Vol. 34, pp. 1602-1623

(7) Mukhopadhyay, V., 1995, "Flutter Suppression Control Law Design and Testing for the Active Flexible Wing," *Journal of Aircraft*, Vol. 32, pp. 45-51

(8) Waszak, M. R., 2001, "Robust Multivariable Flutter Suppression for Benchmark Active Control Technology Wind-Tunnel Model," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 24, pp. 147-153

(9) Heeg, J., Analytical and Experimental Investigation on Flutter Suppression by Piezoelectric Actuation, NASA TP 3241, 1993.

(10) Karpel, M., and Hoadley, S. T., Physically Weighted Approximation of Unsteady Aerodynamic Forces Using Minimum-State Method, NASA TP 3025, 1991.

(11) Han, J.-H., and Lee, I., 1999, "Optimal Placement of Piezoelectric Sensors and Actuators for Vibration Control of a Composite Plate Using Genetic Algorithms," *Smart Materials and Structures*, Vol. 8, pp. 257-267.

(12) Rew, K.-H., Han, J.-H., and Lee, I., 2002, "Multi-Modal Vibration Control Using Adaptive Positive Position Feedback," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 13, pp. 13-20.