

PPF/Adaptive PPF 제어를 이용한 실린더를 부착한 복합재 보의 와류 유발 진동 제어

장영환* • 김도형* • 양승만* • 박기연* • 류근호** • 이 인***

PPF/Adaptive PPF Control of Vortex-induced Vibration of Composite Beam with Rigid Cylinder

Young-Hwan Chang, Do-Hyung Kim, Seung-Man Yang, Ki-Yeon Park, Keun-Ho Rew and In Lee

Key Words : PPF/Adaptive PPF Controller, Vortex-Induced Vibration(와류 유발진동)

ABSTRACT

For lightweight and flexible structures, it is important to suppress the vibrations induced by interactions between fluid and structures. This paper presents the PPF/Adaptive control of the vortex-induced vibration of composite beam with rigid cylinder in which the fluid force is considered as an external excitation on the structure. For the problems considered here, the excitation frequency (vortex-shedding frequency) is assumed to be equal to the natural frequency of the structure. A pair of piezoceramic devices attached bottom of the composite structure was used as actuators. Simulation and experiment were carried out with the designed controller and effectiveness of the PPF/Adaptive PPF control was verified by both experimental and simulation results.

1. 서 론

와류유발진동(vortex-induced vibration), 갤로핑(galloping), 플러터(flutter)와 같은 불안정한 진동 현상은 구조물과 인접한 유동간의 상호작용으로 인해 높은 빌딩 구조물, 해안가의 구조물, 비행기 등에서 빈번하게 나타난다. 특히 구조물이 빠른 속도로 움직이는 경우에, 이러한 불안정한 진동이 쉽게 나타나고, 구조적으로 치명적인 영향을 주게 된다. 따라서 능동 제어(active control)에 기초한 유체유발진동(flow-induced vibration) 억제 기술이 중요시 되고 있다.⁽¹⁾

수 십년 전부터 이러한 유체유발진동에 대해 수많은 연구가 이루어져 왔으며, 이러한 연구에 있어서, 가장 어려운 점은 구조물에 영향을 끼치는 유체유발진동의 비선형성과 불규칙성이다

본 연구에서는 실린더를 부착한 복합재 보 구조물에 대해 와류 흘림에 의해 유발되는 진동의 능동제어를 수행하였다. 여기서는 앞서 언급한 유체유발진동의 비선형성과 불규칙한 특성 현상을 고려하여, 구조물 모델링 오차에 대해서도 비교적 강건한 PPF 제어기(Positive Position Feedback Controller)를 사용하였다. 또한 풍속의 변화에 따른 구조물의 고유 진동수 변화로 인한 시스템의 특성이 변하는 경우에도 진동제어 성능을 유지하기 위하여, 주파수 추정을 통해 제어기의 특성을 바꾸는 적응 PPF 제어기(Adaptive Positive Position Feedback Controller)를 사용하여 제어 실험을 수행하였다.

* 한국과학기술원 항공우주공학전공 대학원
** 미래산업(주) 미래연구센터
*** 한국과학기술원 항공우주공학전공

2. 이론적 배경

2.1 와류유발진동(vortex-induced vibration)

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.⁽²⁾

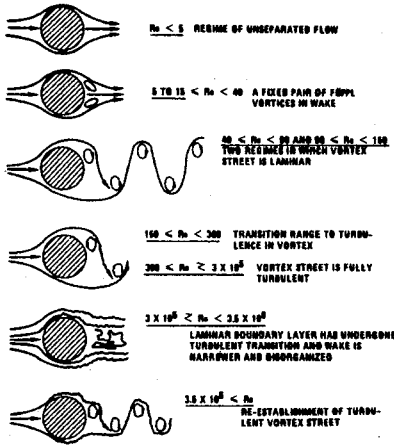


Fig. 1 Regimes of fluid flow across smooth circular cylinder (Lienhard, 1966).

Strouhal 수(S)는 무차원화된 비례상수로서, 와류 흘림 주파수에 영향을 준다.

$$f_s = \frac{SU}{D} \quad (1)$$

여기서, f_s 는 와류 흘림 주파수, U 는 자유 흐름 유속, D 는 실린더 지름이다.

아음속 영역에 있는 실린더인 경우 S 는 Re 의 함수이다. 천이 영역에서 매우 매끈한 표면의 실린더에서는 무질서(chaotic, disorganized)한 고주파 형태의 와류가 나타나고, S 가 0.5까지 분포한다. 반면에 거친 표면 실린더인 경우 질서 정연한(organized) 주기적인 형태의 와류가 나타나고, $S \approx 0.25$ 정도가 된다. 천이영역에서 와류유발진동은 일반적으로 $S \approx 0.2$ 에서 나타난다.

2.2 PPF 제어(Positive Position Feedback Control)

PPF 제어기는 식(2)와 같은 2차 IIR 필터 형태로 표현된다.

$$H_{PPF}(s) = \frac{K\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f\omega_f s + \omega_f^2} \quad (2)$$

여기서, ζ_f 는 필터의 감쇠비, ω_f 는 필터의 공진 주파수, K 는 제어 이득이다.

1차 굽힘(Bending)모드를 제어하기 위해 필터의 공진주파수는 구조물의 1차 고유 진동수와 동일하게 설정하였고, 감쇠비는 0.3으로 설정하였다. 여기서 사용한 1차 고유진동수는 구조물의 랜덤 가진(random vibration) 실험을 통하여 얻은 결과이다.

$$\omega_f = 2\pi \times 13.3(\text{rad/sec}), \zeta = 0.3 \quad (3)$$

PPF 제어기는 주파수 영역에서 살펴보면 특정 주파수 대역에 대해서만 속도 되먹임을 수행함으로써 손쉽게 인여를 방지할 수 있다. 본 연구에서는 고유진동수의 변화에 대한 강건성을 중요시하여 ζ_f 를 0.3으로 하였다. 이와 같은 필터를 사용함으로써 모드 공간에서 일반화된 변위 신호가 입력되면, 구조물의 고유 진동수 부근에서 필터에 의해 위상이 -90° 정도로 발생하여 결국에는 반속도 되먹임(negative velocity feedback)의 효과가 있다. 또한 고주파 영역의 제어 성분을 발생시키지 않게 하는 장점이 있다.

2.3 주파수 추정

잡음이 섞인 다중 정현파(multiple sinusoidal wave)의 주파수 추정 방법은 적응 신호처리(adaptive signal processing)분야에서 활발히 연구되어 왔다. 다중 정현파의 주파수 추정은 식(4)와 같이 백색잡음이 섞인 다중 정현파 신호에 대해서, p 개의 정규화된(normalized) 주파수 $\omega_i (= 2\pi f_i T_s)$ 를 찾는 문제이다.

$$x(n) = \sum_{i=1}^p U_i \sin(\omega_i(n)nT_s + \phi_i) + \xi(n) \quad (4)$$

본 연구에서는 회귀 최소 자승법(RLS : recursive least square)으로 시스템 파라미터(parameter)를 추정하고, 베어스토우 방법(Bairstow method)으로 특성 방정식을 비연성화(decouple)하고 고유진동수를 구하는 방법을 사용하였다.⁽³⁾

RLS 법의 장점은 회귀적인 방법을 사용함으로써 시스템의 특성 방정식의 변화를 구할 때 각 스

탭의 값을 기준으로 다음 스텝의 특성 방정식의 변화를 구함으로써 적은 계산량으로도 특성 방정식의 변화를 연속적으로 보여줄 수 있다는 점이다. 또한 RLS 법은 수렴성이 이미 증명되어 있고, 망각계수(forgetting factor)를 통하여 각 시스템에 맞도록 수렴도와 신뢰도를 적당히 조절하는 것이 가능하다.

Bairstow 방법은 Bairstow 와 Hitchcock 에 의해 고안된 수치적 방법으로, 반복적인 방법으로 짝수 차 고차 다항 방정식을 인수 분해하는 방법이다. Bairstow 법은 실수 계산만 수행하면서도 고차 방정식의 복소수 근을 구하여 메모리를 절약할 수 있고, 또한 복소수 근으로의 수렴성이 뛰어나고 전 스텝의 값을 이용하는 회귀적인 특성이 있어서 계산량이 적다는 큰 장점이 있다.⁽³⁾

3. 실험 방법

3.1 시편의 성형

실험에 사용된 시편은 (주)한국화이바 사의 CU-125 NS 그래파이트/에폭시(graphite/epoxy) 프리프레그(prepreg)를 적층한 후 한국과학기술원 항공우주공학과와 오토클레이브(Autoclave)를 이용하여 성형(curing)하였다. 작동기는 Fuji ceramics 사의 C-82 를 사용하여, 에폭시 접착제로 복합재 시편의 표면에 부착하였다. 와류 흐름을 일으키기 위한 실린더를 시편 끝단에 고정시키고, 완성된 시편을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 복합재의 물성치는 다음과 같고, 제작된 시편 형상은 Fig.2 에 나타내었다.

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

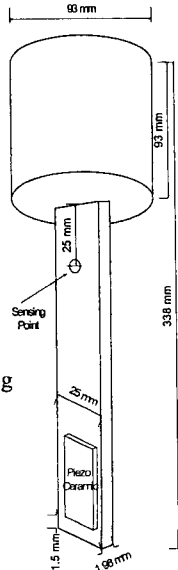


Fig. 2 Composite structure with cylinder.

모델의 물성치와 시편의 치수를 이용하여 1 차 굽힘(bending)모드의 고유진동수를 집중질량이 있는 빔(Beam)으로 가정하여 계산할 경우 13.7 Hz 이고, 랜덤 가진 실험을 통해 구한 구조물의 공진 주파수는 13.3 Hz 이다. 미소한 차이는 부착된 실린더가 완전한 집중질량은 아니며 계산의 경우 감쇠를 고려하지 않는 것이 주된 원인으로 고려된다.

3.2 제어기 설계

PPF 제어기 설계에 관련된 내용은 앞서 2.2 절에서 설명한 것과 같고, 제어기의 이득은 0.5 이다. Adaptive PPF 제어기는 앞서 회귀 최소 자승법과 Bairstow 이론에 의한 주파수 추정방법을 통하여 구한 주파수에 따라 PPF 제어기를 설계하도록 구성하여, C 언어 이용하여 프로그래밍하여 Matlab 의 S-function 을 사용하여 구성하였다. 채집 시간(T_s)은 0.005 초로 하였고, 제어기 이득은 0.5 로 하였다. 또한 Adaptive PPF 제어기에 사용되는 주파수 추정 방법의 검증을 위해, 정현파 신호에 대해 시뮬레이션(simulation)을 통해 주파수 추정 성능을 확인하였다.

3.3 풍동 실험

풍동 실험에 앞서, 이미 설계된 PPF 제어기의 성능 확인을 위해 자유진동(Free vibration)실험을 수행하였다.

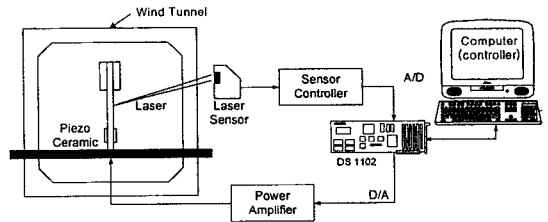


Fig. 3 Diagram of experimental set-up.

풍동 실험은 한국과학기술원 항공우주공학과 풍동에서 수행되었다. 전체 실험 구성도는 Fig. 3 에 나타난 것과 같다. 풍속을 8.5 m/s ~ 11.0 m/s 범위 내에서 변화시키며 PPF 제어기를 이용한 제어 실험을 수행하였고, 동일한 조건에서 Adaptive PPF 제어기를 이용한 진동 제어 실험을 수행 하였다.

4. 실험 결과

4.1 자유진동실험 및 시뮬레이션 결과

PPF 제어기의 경우, 1 차 고유진동수에 맞도록 설계되었기 때문에 제어기가 잘 작동되었다. Fig. 4

는 Adaptive PPF 제어를 사용할 때 주파수 추정 여부를 시뮬레이션 한 결과이다. 입력 신호는 주파수가 변화하는 sine 신호로 구조물이 vortex shedding 에 의해 진동할 때 제어를 하여 구조물의 진동이 제어된 경우의 신호를 임의로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 제어를 1 초에 키고 나서 조금 뒤에 12 Hz 를 추정하였고, 주파수가 변화하는 2 초부터 새로운 주파수를 추정하여 13 Hz 로 수렴함을 확인할 수 있다.

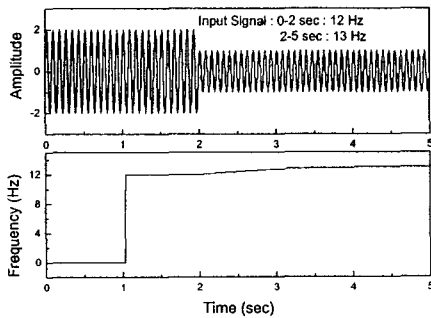


Fig. 4 Frequency estimation using Adaptive PPF (simulation).

4.2 PPF 제어 실험 결과

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. 5 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.

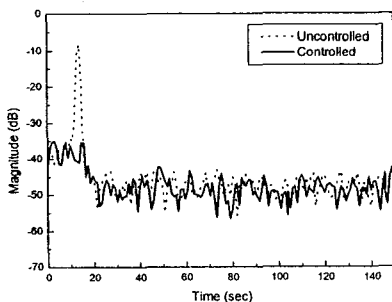


Fig. 5 PPF control result in wind tunnel test (power spectrum).

4.3 Adaptive PPF 제어 실험 결과

Adaptive PPF 의 경우 풍속 9.5 m/s 에서 시간 영역에서의 제어 성능을 Fig. 6 에 나타내었다. 실시간 주파수 추정을 통해 구현되는 제어기로 진동이 저감 됨을 살펴볼 수 있다.

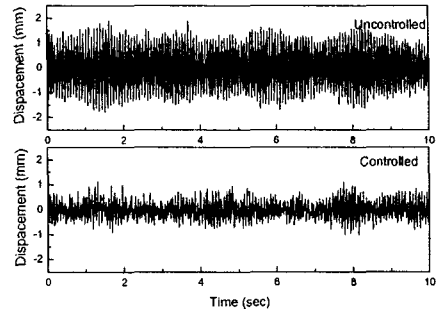


Fig. 6 Adaptive PPF control result in wind tunnel test (time history).

5. 결론

본 연구에서는 와류 흘림에 의해 발생하는 구조물의 진동현상에 대한 제어 실험을 수행하였다. PPF 제어기는 구조물의 고유진동수를 알고 있는 경우 사용가능하며, 뛰어난 제어 성능을 나타내었다. Adaptive PPF 제어기는 구조물의 고유 진동수를 모르고 있는 경우에도 제어기를 설계할 수 있으며, 와류 유발 진동과 같이 주파수가 변화하는 경우에도 제어 성능을 유지할 수 있다.

후 기

본 연구는 2000 년도 과학기술부 국가지정연구실사업(2000-N-NL-01-C-250)의 지원으로 수행된 연구결과의 일부이며, 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) J.Tani, J. Qiu and Y. Liu, "Robust control of vortex-induced vibration of a rigid cylinder supported by an elastic beam using μ -synthesis," *Journal of Fluid and Structures*, Vol. 13, 1999, pp 865-875.
- (2) Robert D. Blevins, "Flow-Induced vibration" 2nd Edition., VAN NOSTRAND REINHOD, New York
- (3) Keun-Ho Rew, Jae-Hung Han, and In Lee, "Adaptive Multi-Modal Vibration Control of Wing-Like Composite Structure Using Adaptive Positive Position Feedback," The 41st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structure, Structural Dynamics, and Material Conference, Atlanta USA., Apr.2000, Paper No.2000-1422.