

PPF 제어기를 이용한 보 구조물의 다중모드 능동진동제어

Active vibration control of multi-mode for beams using PPF controllers

신창주* · 홍진숙** · 정의봉*** · 정상우****

Changjoo Shin, Chinsuk Hong, Weuibong Jeong and Sangwoo Jeong

1. 서 론

다리와 같은 대형 구조물들은 저주파 진동에 지속적 노출되기 쉬우며 이로 인해 피로파괴가 발생할 수 있다. 외란에 의해 발생하는 저주파 진동은 능동진동제어를 통해 효과적으로 제어할 수 있다. 본 연구에서 양단지지 보 구조물의 능동진동제어를 위해 Positive Position Feedback (PPF) 제어기를 사용하였으며, 구조물의 기여도가 가장 높은 1~3차 모드를 Single Input Single Output (SISO) 형태로 제어하였다.

2. 보 구조물의 운동방정식 및 응답

Fig. 1은 x_p 위치에서 외란으로 작용하는 힘 f_p , x_s 에서 변위응답 d_r 을 이용하여 PPF 제어기 H 가 생성하는 모멘트 T_s 를 x_{s1} 과 x_{s2} 위치에서 동시에 받는 길이가 L 인 양단지지 보를 보여준다. 보 구조물을 Euler-Bernoulli Beam으로 가정하면 운동방정식은 식(1)과 같다.

$$E(1 + j\eta)I \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}(x, t) + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) = f_p(x, t) + \frac{\partial T_s}{\partial x}(x, t) \quad (1)$$

여기서 E 는 Young's modulus, η 는 구조감쇠, I 는 보의 단면관성모멘트, ρ 는 밀도, A 는 보의 단면적, f_p 는 힘 그리고 T_s 는 모멘트이다. x_p 위치에서 외란 힘이, $x_{s1} = x_s - s$ 과 $x_{s2} = x_s + s$ 위치에서 모멘트가 작용하는 보의 거동을 모드중첩법을 이용하여 주파수 영역에서 표현하면 식(2)와 같다.

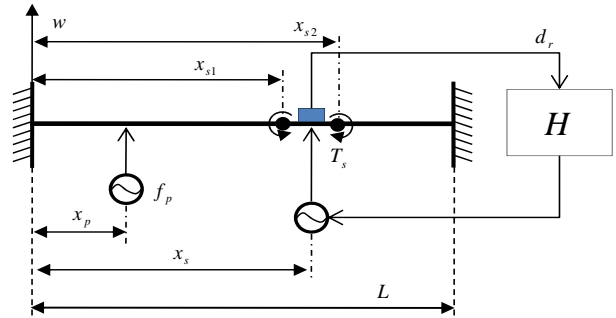


Fig. 1. 외란과 제어력이 동시에 작용하는 양단 지지보 도식도

$$w(x, \omega) = \sum_{n=1}^N \frac{\phi_n(x)}{\rho A L (\omega_n^2 - \omega^2 + 2j\zeta_n \omega_n \omega)} \times \left[f \phi_n(x_p) + T \left\{ \frac{\partial \phi_n}{\partial x}(x_{s1}) - \frac{\partial \phi_n}{\partial x}(x_{s2}) \right\} \right] = \underline{a}^T(\omega) \underline{\phi}(x) \quad (2)$$

여기서 N 은 모드중첩수, ϕ 는 모드형상, ω_n 은 보의 n 차 고유진동수, ζ_n 은 n 차 감쇠비 그리고 \underline{a} 는 변위의 모달진폭 벡터이다. 보 구조물 전체의 운동에너지는 속도의 모달진폭 $\underline{a}(\omega) = j\omega \underline{a}(\omega)$ 와 모드형상의 직교성을 이용하여 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$KE(\omega) = \frac{\rho A}{2} \int_0^L |v(x, \omega)|^2 dx = \frac{\rho A L}{2} \underline{\alpha}^H \underline{\alpha} \quad (3)$$

여기서 KE 는 보 구조물 전체의 운동에너지 그리고 v 는 보 구조물의 속도이다. 특정 주파수 대역에서 운동에너지를 적분함으로써 구조물 전체의 운동에너지를 하나의 값으로 표현한다면 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$IKE = 10 \log_{10} \int_{\omega_1}^{\omega_2} KE(\omega) d\omega, \text{ dB} \quad (4)$$

* 부산대학교 대학원 기계공학부
 ** 울산과학기술대학교 디지털기계학부
 *** 부산대학교 기계공학부
 **** (주)로커스

표 1. 구조물 물성치

Parameter	Value	Unit
ρ	2850	kg/m^3
A	0.00006	m^2
L	0.5	m
ζ_n	0.001	
f	1	N
x_p	0.1	m
x_s	0.35	m
s	0.02	m

여기서 IKE는 하나의 값으로 표현된 구조물 전체의 운동 에너지 그리고 ω_2, ω_1 는 적분하기를 원하는 주파수 상, 하한 주파수이다. Fig. 1에서 보인 양단지지보의 응답, 제어기 설계 성능에 대한 시뮬레이션을 위해 선정된 물성치는 표 1과 같다.

3. Positive Position Feedback Controller (PPF)

3.1 PPF 제어기의 지배방정식

PPF 제어기는 동흡진기와 유사한 형태의 제어기로서 제어하기를 원하는 모드만 선택하여 제어를 수행할 수 있다. PPF 제어기의 지배방정식은 식(5)과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{q} + 2\zeta_n\omega_n\dot{q} + \omega_n^2q &= g\omega_n^2p \\ \ddot{p} + 2\zeta_f\omega_f\dot{p} + \omega_f^2p &= \omega_f^2q \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 q 는 구조물의 모달좌표, ζ_n 은 구조물의 감쇠비, ω_n 은 제어모드에 해당하는 구조물의 고유진동수, g 는 제어게인, p 는 제어기의 응답, ζ_f 는 제어기의 감쇠비 그리고 ω_f 는 설계된 제어기의 고유진동수이다.

3.2 시스템의 개루프 전달함수

제어 시스템의 안정성을 확인하기 위하여 0Hz부터 25.6kHz 주파수 대역의 개루프 전달함수를 Fig. 2와 같이 나타내었다. 제어기는 1~3차 모드를 제어할 수 있도록 튜닝한 PPF 제어기이다. 저주파 3개 모드를 설정한 이유는 Fig. 3과 같이 제어 전 외란에 의한 x_s 위치의 응답이 1~3차 모드에서 가장 크게 영향을 미쳤기 때문이다. Fig. 2의 Nyquist 선도로부터 안정성을 판별한 결과 조건부 안정성을 보이고 있음을 확인하였다. 그리고 제어대상 모드인 1~3차의 개루프 응답이 여타 모드에 비하여 30dB 크게 나타난다. 이는 제어모드 이외의 모드는 제어기 작동시 크게 영향을 미치지 않음을 의미한다.

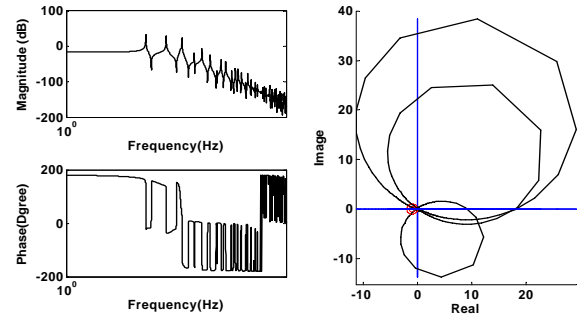


Fig. 2. 제어 시스템의 개루프 전달함수

4. PPF 제어 결과

Fig. 3은 x_s 지점에서 제어 전·후의 변위 응답이다. 제어기가 적용된 모드들은 공진점에서 제어 전 대비 20dB 이상의 진동저감 효과를 가져왔다. 각 제어모드들은 제어기 자유도의 영향에 의해 고유진동수가 5% 내외로 이동되는 것을 확인할 수 있다. 전체 구조물의 운동에너지를 250Hz 주파수 대역까지 적분하여 제어 전 IKE는 36.95dB 였으나 제어 후 14.25dB로 나타나 22.7dB 감소하는 것을 확인하였다.

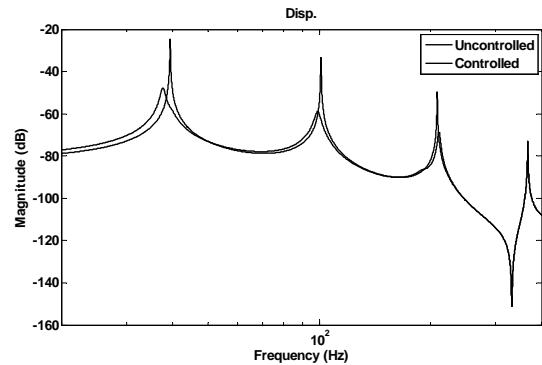


Fig. 3. 양단지지보 x_s 지점에서의 제어 전·후의 변위 응답

5. 결 론

본 연구는 PPF 제어기를 이용하여 양단지지 보 구조물의 다중모드를 능동제어하였다. 개루프 전달함수를 통하여 제어 시스템의 안정성이 확보되는 범위에서 PPF 제어기를 설계하였다. SISO 제어기를 이용하여 여러모드를 튜닝할 수 있었고 그 결과 구조물의 다중 모드를 동시에 제어할 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과입니다.