

Self-Sensing 작동기를 이용한 복합재 보의 강인제어 시뮬레이션

권대규*(전북대 국제사업단), 최병용**(전북대원), 이성철*** (전북대, 자동차신기술연구소)

Robust Control Simulation of a Composite Beam using Self-Sensing Actuators

Tae Kyu Kwon* (NAHTEC, Chonbuk Univ.), Byeong Yong Choi**(Graduate School Chonbuk Univ.), and Seong Cheol Lee***(Prof. Chonbuk Univ. AHTRI)

ABSTRACT

This paper presents the robust control simulation of a composite beam using self-sensing actuators(SSA). The self-sensing actuator is a new concept for intelligent material, where a single piezoelectric element simultaneously functions as both a sensor and an actuator. In a practical implementation of the self-sensing actuator an electrical bridge circuit is used to measure strain. The circuit could provide significant information about strain in the element if it were well-balanced. Our aim is design a robust controller which guarantees that the performance of a self-sensing actuator is robust against perturbation of the bridge balance and to confirm the advantages of this technique. Simulation results show that the self-sensing actuator driven by the designed controller exhibits excellent performance in suppressing the vibration of a composite beam.

Key Words . Robust Control(강인제어) , H_∞ controller(H_∞ 제어기), Composite Beam(복합재 보), Structured Uncertainty(구조화된 불확실성), Self-sensing Actuator(자기-감지 액츄에이터)

1. 서론

압전 세라믹 등의 압전소자는 변형을 일으키면 전압을 발생하는 압전효과와 그것을 역으로 전압을 인가하면 변형률을 발생하는 역압전효과의 양방향성을 가지고 있어서 역압전효과를 이용하면 액츄에이터 또는 압전효과를 이용하면 센서로서의 효과를 얻을 수 있다. 최근에는 한 방향 압전 소자의 센서와 액츄에이터 양방향성의 기능을 동시에 갖는 자기-감지 액츄에이터(self-sensing actuator: SSA) 개념이 재료역학의 분야로부터 제안되어 그 방법을 이용한 유연 구조물의 진동제어에 관한 연구가 진행되어져 왔다¹⁻³⁾.

SSA는 센서와 액츄에이터의 완전한 동시배치를 실현할 수 있어서 본질적으로 유연성 구조물의 진동제어에 효과가 있고, 센서 액츄에이터를 개별적으로 이용할 필요가 없기 때문에 제어계의 소형 경량화를 실현할 수 있다.

본 논문에서는 SSA를 이용한 복합재 보의 강인제어 시뮬레이션을 통하여 지능형 외팔보의 진동제

어의 성능을 고찰한다. 또한, 유연 구조물의 밸런스의 무너짐에 대해서 강인한 진동억제 성능을 갖는 제어기를 설계하는 것으로부터 SSA에 의한 진동제어 시뮬레이션을 통하여 지능구조물의 안정성을 고찰하였다.

2. 제어대상의 모델화

2.1 보의 구조

본 연구의 모델링에는 유리섬유가 강화된 열가소성 복합재 외팔보에 SSA로서 PZT 세라믹을 사용하였으며, 전체 개략도는 Fig. 1과 같다.

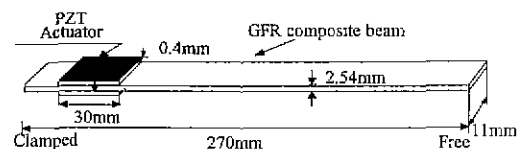


Fig. 1 Configuration of a composite beam

또한 전체 시스템의 구성은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 2개의 압전소자중 1개는 SSA로서 제어에 사용

하고, 다른 1개는 외란을 가하기 위한 가진용 액츄에이터로서 이용했다. 그리고, 본 시스템에 사용하고 있는 매개변수는 Table 1에 표기했다.

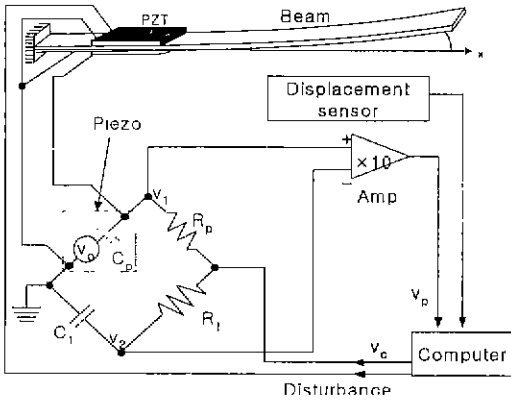


Fig. 2 Configuration of a control system

Table 1 Values of parameters

Parameter	Value	unit
L	Length of beam	270 mm
b	Width of beam	11 mm
t_b	Thickness of beam	2.54 mm
t_p	Thickness of piezo	0.4 mm
C_p	Capacitance of controller	85 nF
C_t	Capacitance of condenser	170 nF
R_p	Resistance	4.0 K Ω
R_t	Resistance	2.0 K Ω
E_b	Young's modulus of beam	0.3×10^{10} N/m ²

2.2 브리지 회로의 역할과 특성

Fig. 1과 같은 시스템에서 압전의 전기적 등가회로를 살펴보면 외팔보로서 역학적 진동이 발생하는 저주파 영역에 대해서 변형에 의한 전압원 $v_p(t)$ 와 콘덴서 C_p 를 직렬 결합했던 것과 등가인 것으로 주파수 영역에서 제어를 하기 위해 그 회로를 압전의 전기적 등가회로로 이용한다.

압전소자를 동시에 센서 액츄에이터로서 이용할 경우, 압전소자에 액츄에이터를 위한 제어전압 $v_c(t)$ 를 인가하는 것과 동시에 $v_p(t)$ 를 측정하는 것이 불가능하다. 그래서, 압전소자를 포함하는 브리지 회로를 구성하여 검출신호 $v_s(t)$ 를 얻었다. 이와 같은 회로로써는 변형속도를 검출하는 "RC 브리지 회로"와 변형을 검출하는 "CC 브리지 회로"가 있지만 진동제어에 있어서는 속도를 피드백하는 것으로부터 진폭을 억제하고 감쇠를 빠르게 하는 것이 기대되지기 때문에 본 연구에서는 RC 브리지 회로를 이용

하여 수행했다.

Fig. 2과 같이 저항과 콘덴서로부터 브리지 회로를 구성하면 전압 $v_1(t), v_2(t)$ 를 다음과 같이 된다

$$V_1(s) = \frac{1}{C_p R_p s + 1} (V_c(s) - V_p(s)) \quad (1)$$

$$V_2(s) = \frac{1}{C_1 R_1 s + 1} V_c(s) \quad (2)$$

여기서, 센서전압을 $v_s(t) = v_1(t) - v_2(t)$ 로 정의하고, $C_1 R_1 = C_p R_p$ 로 되기 위해서 브리지 회로의 밸런스를 유지하면,

$$V_s(s) = \frac{C_p R_p s}{C_p R_p s + 1} V_p(s) \quad (3)$$

와 같이 $v_c(t)$ 의 영향을 제거하고, 압전소자의 변형에 관한 양 $V_p(t)$ 만을 검출할 수가 있다. 그리고, 제어를 이용한 고주파가 $\omega \ll 1/C_p R_p$ 이 되도록 R_p 를 선정하면,

$$v_s(t) \triangleq C_p R_p \dot{v}_p(t) \quad (4)$$

가 되고, 변형 속도에 비례하는 신호를 얻을 수가 있다. 그러나, 회로에 있어서 $C_1 R_1 = C_p R_p$ 를 정확하게 만족하는 것은 상당히 어렵고, 브리지 회로의 밸런스가 무너지면 종래의 변형 속도 피드백 등에는 제어 성능이 떨어지고, 시스템이 불안정하게 된다

2.3 보의 운동 방정식

Fig. 1에 표시한 지능외팔보가 축 방향으로 진동할 경우의 운동방정식은 Bernoulli-Euler 보 이론으로 가정하면 식 (5)와 같이 유도된다.

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + CEI \frac{\partial^5 v(x,t)}{\partial x^4 \partial t} + \rho A \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = M(t) [\delta'(x-x_1) - \delta'(x-x_2)] \quad (5)$$

식 (5)의 해는 변수분리 및 모드로 전개하면 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$v(x,t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) q_i(t) \quad (6)$$

여기서, n 은 주요 작동 진동모드수, $q_i(t)$ 는 일반화된 모달좌표(generalized modal coordinate)이고, $\phi_i(x)$ 는 모달함수이다. 이것을 이용하면 최종적인 i 차 모드의 운동 방정식은 $\cos \beta, L \cosh \beta, L = -1$ 을 만족하는

β 에 대해서 작은 것부터 $i=1, 2, \dots$ 가 되고, 다음과 같이 구해진다.

$$\Phi_i(x) = \frac{N_i}{\sin \beta_i L - \sinh \beta_i L} \times (\sin \beta_i L - \sinh \beta_i L)(\sin \beta_i x - \sinh \beta_i x) \times (\cos \beta_i L - \cosh \beta_i L)(\cos \beta_i x - \cosh \beta_i x) \quad (7)$$

이때 β_i 는 $\beta_i^4 = \frac{\rho A \omega_i^2}{EI}$ 를 만족하는 상수이며, ω_i 는 외팔보의 고유진동수이다. 모드 해석을 이용해서 구한 운동방정식은 식(8)과 같은 비연계(uncoupling) 상미분방정식으로 유도된다

$$\ddot{q}_i + C \omega_i^2 + \omega_i^2 q_i = M(\Phi'_i(x_2) - \Phi'_i(x_1)) \quad (8)$$

여기서, N_i : 정규화정수, ω_i : i 차 모드 공진각 주파수이며, 엄밀히는 모드 i 는 무수히 존재하지만 실제에 적용되는 것은 곤란하며, 단순보 이론에는 고차 모드를 정확하게 정식화 할 수 없어 모델화 과정에는 모드 n 으로 분해하고 있다.

3. 제어기 설계

3.1 제어기 구성

본 연구에는 제어대상의 각 요소에 대해서 모델화했으며 제어성능에 큰 영향을 주는 압전소자의 캐퍼시턴스의 불확실성을 고려하고, 보의 물리적 변수의 오차와 노이즈의 영향을 구조화되지 않는 불확실성으로 포함시켜 구성했다. 모델화의 경우 RC 브리지 회로의 요소인 압전소자의 캐퍼시턴스 C_b 의 불확실성을 직접 고려하는 것 대신에 C_b 의 변동에 의한 그 역수가 K_{10} 을 공칭값으로 모델링하여 RC 브리지 회로를 모델화하였다.

전장에서 구했던 운동방정식 (8)을 이용하여 굽힘 모멘트 $M(t)$ 로부터 인가전압 $v_a(t)$ 에 변형하고, 또 출력을 굽힘각 $y'(x_2)$ 및 시간미분 $\dot{y}'(x_2)$ 로 하여 그 상태변수 벡터 q 와 출력벡터 y 를 식(12), (13)로 정의하면 식(14), (15)와 같이 정상상태 방정식이 얻어진다.

$$q = \triangle [q_1 q_2 \dots q_n q_{n+1} q_{n+2} \dots q_{2n}]^T \quad (12)$$

$$y = \triangle [y'(x_2) \dot{y}'(x_2)]^T \quad (13)$$

$$\dot{q} = A_s q + B_s v_a \quad (14)$$

$$y = C_s q \quad (15)$$

여기서,

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\omega_1^2 & \dots & 0 & -C\omega_1^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \omega_n^2 & 0 & \dots & -C\omega_n^2 \end{bmatrix}$$

$$B_s = [0 \dots 0 K_a \Phi'_1(L) \dots K_a \Phi'_n(L)]^T$$

$$C_s = \begin{bmatrix} \Phi'_1(L) & \dots & \Phi'_n(L) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \Phi'_1(L) & \dots & \Phi'_n(L) \end{bmatrix}$$

본 연구에는 감쇠에 관한 정수 C 는 무체어로 진동실험을 수행한 결과, 결국 1차 모드의 자유진동으로부터 구한 값을 이용한다. 다음에 보의 모델에 관해서 불확실성을 고려한다. 공칭모델 G_{nom} 에 대한 불확실성을 표시하기 위해서 입력 승법적 섭동을 적용하면 실모델 G 는 다음과 같다.

$$G = G_{nom}(1 + W_G \Delta G) \quad (16)$$

여기서, $\Delta G \in C, \|\Delta G\|^\infty \leq 1$ 와 같이 표현될 수가 있다.

3.2 확대 플랜트의 구성

각 시스템 RC회로와 외팔지능보를 상호 결합하는 것과 동시에 제어사양에 관한 요소를 부가해서 확대 플랜트를 구성했다. 그 블록선도를 Fig 3에 표시한다. 시스템의 입력력 모델화 오차에 관한 확대 입력으로 ω_2 가 확대출력으로 x_2 가 구해진다. 그리고, 보의 모델화 오차로써 그 블록선도 중의 W_G 는 실제의 변동을 고려해서 고주파에는 비교적 큰 불확실성에도 대응할 수 있도록 구성하였다.

Fig. 3에서 d_1 는 진동을 감소시키는 외란 입력 d_2 는 제어기 설계상 수학적인 제약으로부터 가상적으로 부가했던 외란 입력을 표시한다. 또 e_1, e_2 는 설계를 위한 가중치를 가한 후의 제어량, 즉 $e_1 = W_{d1} y'(L)$, $e_2 = W_{d2} \dot{y}'(L)$ 이다. $W_{d1}, W_{d2}, W_{e1}, W_{e2}$ 는 하첨자가 표시하는 신호에서의 설계사양을 주파수 대역으로 규정하는 가중함수를 표시한다. 본 연구에는 이와 같은 확대계에 대해서 외란 d_1 에 대해서 e_1 및 e_2 를 작게 하는 것을 제어 목적으로 한다. 즉, 브리지 회로의 밸런스가 무너지는 보의 모델화 오차가 존재하고, 또 진동을 발생하는 것과 같이 외란이 가해졌는데도 보의 진동을 제어한다. 결국, 보의 변형과 속도를 작게 하는 것이다.

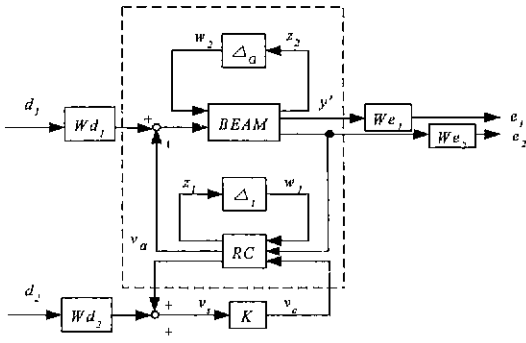


Fig 3 Block diagram of augmented plant

4. 고찰 및 토론

전절에서 구했던 확장 플랜트보다 H_∞ 의 강인성을 이용한 제어를 고려했다. 본 제어기는 1차 모드 공진 주파수의 근접하게 이득이 높아지고, 주파수영역에는 모델화 오차 및 설계사양의 영향에서 이득이 낮아지고, 특히, 2차 모드의 주파수에는 스펙 오버를 방지하기 위해서 다른 주파수 영역보다도 이득이 억제되어지도록 구성하였다.

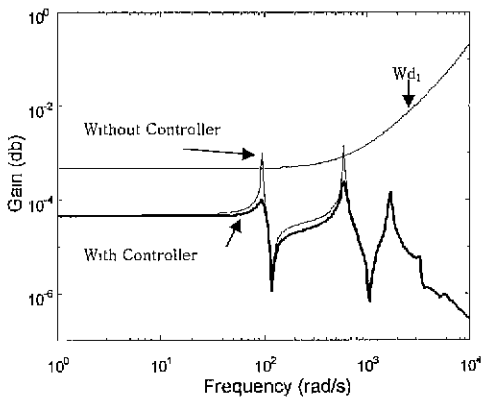


Fig. 4 Gain plot of with & without controller

구했던 제어기는 고차이므로 우선 Hankel-Norm 근사에 의해서 강인한 성능을 만족하기 위해서 12차 까지 저차원화 했다. 다음에 개인 컴퓨터에 의한 실제 실행을 고려해서 이산화를 수행했다. Fig. 4는 제어시와 무제어시의 주파수 응답함수를 표시하고 있다. 여기서 시뮬레이션에 의한 종래 제어방법인 속도 피드백과 제진 성능을 비교해보면 정상진폭에 대해서는 1차 모드 및 2차 모드도 상당히 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 강인 제어를 이용할 경우, 브리지회로의 밸런스의 무너짐에 대해서 강인한 제

어성능이 얻어지는 것을 확인했다.

5. 결론

본 연구에는 종래까지 원리적으로 제안되어져 왔던 SSA를 이용한 외팔보의 제진제어에 관한 시뮬레이션을 시도했다.

SSA를 실현하는 것은 결과적으로 불가능하지 않고, 종래의 속도 피드백에 의해서도 제진효과를 충분히 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한 본 논문에서 설계했던 제어기가 브리지 회로의 밸런스의 무너짐에 대해서도 강인하고, 매우 뛰어난 제진 성능이 얻어지는 것을 확인했다.

이에 본 논문에서 제한한 SSA는 센서 액츄에이터 사이에 동특성이 존재하지 않기 때문에 지능외팔보의 제진제어에 본질적으로 뛰어나고, 여러 가지 다른 소재를 이용할 필요가 없기 때문에 제어계의 소형·경량화를 실현할 수 있다.

참고문헌

1. Dosch, J., et. al., "A Self-Sensing Piezoelectric Actuator for Colocated Control", J. Intel. Mater. Syst. Struct., Vol. 3 pp. 166-185, 1992.
2. Anderson, E. H., et. al " Self-Sensing Piezoelectric Actuator(Analysis and Application to Controlled Structure), Proc. 33rd Struct. Dynam. Mater. Conf., pp2141-2155, 1992.
3. K. Oshima, T. Takigami and Y. Hayakawa, " Robust vibration Control of Cantilever Beam Using Self-Sensing Actuator", Vol 62, No. 604, pp. 75-82, 1996.
4. J. Hollkamp, F. Starchville, "A Self-Tuning Piezoelectric Vibration Absorber", J. Intel. Mater. Syst. Struct., Vol. 5 pp. 559-566, 1994.