

열응력을 이용한 보의 강인-최적 진동제어 Robust-Optimal Vibration Control of a Beam Using Thermal Stress

권 태철* 이 우식** 김 진걸***
Kwon, Tae-Churl Lee, Usik Kim, Jin-Geol

ABSTRACT

The vibration damping of structure is increased by thermal actuator. The thermal actuator causes thermal stress across the section of structure. The several kinds of control theories are proposed and the proposed control theories are successful in increasing vibration damping. This scheme can be effectively applied to large space structure [LSS] having very low natural frequencies.

1. 서 론

원하지 않는 과도한 진동이 구조물에 발생했을 때 빠른 시간 내에 이를 효과적으로 제어하기 위한 연구가 다양하게 진행되어 오고 있다. 진동을 제어하기 위한 방법에 따라 크게 수동 제어와 능동 제어로 구분할 수 있다. 단순한 수동형 방진기구 등을 이용한 수동제어방법은 일반적으로 신속하고 정밀한 제어효과를 얻기 어려우므로 특수한 경우를 제외하고는 능동제어방법이 널리 이용되고 있다.

요즘 많이 연구되고 있는 구조물의 능동제어방법은 압전 소자를 액츄에이터 (Actuator) 나 센서 (Sensor)로 사용하는 방법이다.[1] 압전 소자란 전압을 받게 되면 그에 상응하는 응력을 발생시키는 것으로 그 적용범위가 넓다. 본 논문에서 다루고자 하는 제어방법은 압전소자 대신에 열응력을 액츄에이터 수단으로 이용하는 것으로 Edberg 가 이미 다룬 바 있었으나 이론상의 문제가 있었으며 제어부분이 미흡했다.[2]

본 논문에서 사용된 썬열 액츄에이터 (Thermal Atuator) 는 열펌프와 유사한 것으로서 전압을 받게 되면 한 쪽 에서 열을 빼앗아 다른 쪽으로 보낸다. 그렇게 되면 한 쪽은 가열되어 팽창하고 다른 한 쪽은 냉각되어 수축하므로 구조물에 열변형에 의한 모멘트가 걸리게 된다. 전압의 부호가 바뀔 때 따라 모멘트의 방향도 바뀌므로 이 썬열 액츄에이터를 효과적인 제어수단으로 사용할 수 있다.

고전적인 방법인 보상기 설계에 의한 제어방법과 현대적 방법인 최적제어방법을 모두 적용해 보았으며 특히 전자의 경우는 Root Locus (RL)방법을 이용했다. 수학적 모델링 과정에서의 오차에 기인한 시스템의 불확실성을 고려한 경우에 대해서 불확실한 요소가 있음에도 불구하고 결국 시스템이 안정하게 되기 위한 불확실자 (Uncertainty) 의 최대 한계치를 구해 보았다.

* 인하대학교 기계공학과 석사과정
** 인하대학교 기계공학과 교수
*** 인하대학교 자동화공학과 교수

2. 시스템의 수학적 모델링

2-1. 액츄에이터 해석

보의 상하 양면은 단열되어 있고 씨멀 액츄에이터를 그 사이에 집어 넣었다. 그림 1 은 보의 단면과 측면을 그린 것이다. 그림 1 에 보인 보의 상단의 빗금 친 부분 아래로 (면적 S) 열유속 Q 가 단위계단함수로 공급될 경우 보의 상단에서의 온도분포는 다음과 같다.[3]

$$T_{step}(z,t) = \frac{t}{\rho c h S} + \frac{h}{KS} \left\{ \frac{3z^2 - h^2}{6h^2} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} e^{-\beta_n t} \cos \frac{n\pi z}{h} \right\} \quad (2-1)$$

여기서 T_{step} 은 열이 단위계단함수로 공급될 때의 온도분포이고 $\beta_n = kn^2\pi^2/h^2$ 이다. 그러나 보가 진동하는 동안 공급되어지는 열유속은 단위계단함수의 형태가 아니고 더욱 일반적인 형태의 함수이다. 따라서 Convolution integral을 이용해야 한다.

$$T_{impulse}(z,t) = \partial T_{step}(z,t) / \partial t = \frac{1}{\rho c h S} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-\beta_n t} \cos \frac{n\pi z}{h} \right\} \quad (2-2)$$

여기서 $T_{impulse}$ 는 열이 단위충격함수로 공급될 때의 온도분포이다. 일반적 형태의 열유속 Q 에 대한 보에서의 온도분포는 다음과 같다.

$$T(z,t) = \int_0^t T_{impulse}(z, t-\tau) Q(\tau) d\tau \quad (2-3)$$

제어제를 구성하기 위해 식(2-3)를 Laplace 변환시킨 후 정리하면 다음의 식을 얻는다.

$$T(z,s)/Q(s) = T_{impulse}(z,s) \quad (2-4)$$

보 상단에 열이 공급되면 그 부분은 가열되어 팽창하며 결국 모멘트를 발생시킨다. 그 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{M}_T(t) = \iint E \alpha T(z,t) z dA \quad (2-5)$$

여기서 $\dot{M}_T(t)$ 는 열응력에 의한 굽힘모멘트이고 E 는 영의 계수 (Young' modulus)이며 α 는 열팽창 계수이다. 보 상단이 가열되는 만큼 보 하단은 냉각되어지므로 결국 보에 발생하는 총 굽힘모멘트는 식(2-5)을 2배한 것이 된다.

$$M_T(t) = 2 \dot{M}_T(t) = 2E\alpha \iint T(z,t) z dA \quad (2-6)$$

식 (2-6)을 Laplace 변환시킨 후 식 (2-4) 을 대입하여 다음을 얻는다.

$$M_T(s) = 2E\alpha Q(s) \iint T_{impulse}(z,s) z dA \quad (2-7)$$

씨멀 액츄에이터는 전압을 입력으로 하여 열유속을 출력한다. 이 논문에서 사용한 씨멀 액츄에이터는 전압과 열유속이 서로 비례관계에 있으며 n_s 개 (본 논문에서는 3개) 의 씨멀 액츄에이터를 직렬로 연결했으므로 하나의 씨멀 액츄에이터에서 발생하는 열유속은 다음과 같다.

$$Q(t) = C_{qv} V(t) = C_{qv} V_c(t)/n_s \quad (2-8)$$

여기서 C_{qv} 는 변환 계수로서 상수이고 V_c 는 모든 액츄에이터에 걸리는 전압이다. 식 (2-8)를 Laplace 변환시킨 후 (2-7)에 대입하여 정리하면

$$\frac{M_T(s)}{V_c(s)} = \frac{2abC_{qv}dE}{\rho c n_s S} \left(\frac{1}{s} - \frac{4h}{\pi^2 d} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1/n^2}{s + \beta_n} \right) \quad (2-9)$$

식 (2-9)로 부터 괄호안의 두번째 항의 시상수 $T_c (=1/\beta_n)$ 는 여러 물성치들을 대입한 결과 그 값이 1보다 엄청나게 작음을 알았다. 따라서 대부분의 시간 영역에 대하여 식 (2-9)의 괄호안의 두 번째 항은 무시할 수 있다. 즉

$$\frac{M_T(s)}{V_c(s)} = \frac{2abC_{qv}dE}{\rho c_n S} \frac{1}{s} \quad (2-10)$$

2-2. 센서 해석

센서의 종류는 여러가지가 있지만 구현등에 있어서의 편리성때문에 가속도계를 선택했다. 가속도계는 가속도에 비례하는 만큼의 전압을 출력시키며 그 수학적 관계는 다음과 같다.

$$V_s(t) = G_s \ddot{w}(t) \quad (2-11)$$

여기서 $V_s(t)$ 는 센서전압이며 G_s 는 비례상수이다. 식 (2-11)을 Laplace 변환시키면

$$V_s(s) = G_s [s^2 w(s)] = G_s [s^2 \phi(x_s) \xi(s)] \quad (2-12)$$

이 된다. 여기서 x_s 는 센서의 위치이다. 따라서

$$V_s(s)/\xi(s) = G_s \phi(x_s) s^2 \quad (2-13)$$

2-3. 보의 해석

그림 2와 같이 써멀 액츄에이터는 x_1 과 x_2 사이에서 끝고루 분포되어 있으며 센서의 위치는 x_s 이다. 보의 z 방향 변위를 $w(x,t)$ 라 했을 때 열 구배에 의한 균일 분포 모멘트를 갖는 보에 대한 운동방정식은 다음과 같다.[4]

$$m(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right] = \frac{\partial^2 M_T(x,t)}{\partial x^2} \quad (2-14)$$

여기서 $M_T(x,t)$ 는 열 구배에 의해서 야기되어지는 굽힘 모멘트로서 그 크기는 열 구배가 발생하는 x_1 과 x_2 사이에서 일정하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M_T(x,t) = M_T(t) \{H(x_1) - H(x_2)\} \quad (2-15)$$

여기서 H 는 계단함수이다. 식 (2-14)의 편미분 방정식의 해는 정규모우드(normal mode)에 대한 전개로부터 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$w(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \xi_n(t) \phi_n(x) \quad (2-16)$$

여기서 정규모우드는 다음의 관계식을 만족한다.

$$\int_0^l \phi_m(x) m(x) \phi_n(x) dx = \delta_{mn} \quad , \quad \int_0^l \phi_m(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \phi_m(x) \right] dx = \omega_m^2 \quad (2-17)$$

주어진 편미분 운동 방정식 (2-14)는 식 (2-17)의 두 식을 활용하여 다음과 같은 식으로 유도될 수 있다.

$$\ddot{\xi}_m(t) + \omega_m^2 \xi_m(t) = M_T(t) \{\phi'_m(x_2) - \phi'_m(x_1)\} \quad (2-18)$$

보는 그 자체가 low-pass 필터와 같은 역할을 한다. 특히 보 끝에 질량을 부착한 경우에는 더더욱 그렇다. 즉 첫 번째 고유진동수가 두 번째 이상의 고유진동수 보다 훨씬 작은 값을 갖으므로 1자유도 계로 모델링해도 무방하다. 따라서 식 (2-18)에서 첫 번째 주파수와 모우드만을 고려했다. 또한 진동감쇠가 고려되지 않은 보에 대한 불완전한 모델링(식 2-14) 때문에 식 (2-18)는 진동감쇠항을 포함하고 있지 않다. 보의 실제 특성에 근접시키기 위해서 식 (2-18)에 진동감쇠항

$2\zeta\omega\xi(t)$ 를 보상해 주었다. 이상으로부터 식 (2-18) 는 다음과 같이 된다.

$$\xi(t) + 2\zeta\omega\xi(t) + \omega^2\xi(t) = M_T(t)\{\phi'(x_2) - \phi'(x_1)\} \quad (2-19)$$

여기서 편의상 첨자를 생략했다. 식(2-19)를 Laplace 변환 시킨 후 정리하여 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\xi(s)}{M_T(s)} = \frac{M_T(s)\{\phi'(x_2) - \phi'(x_1)\}}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \quad (2-20)$$

3. 보상기 설계에 의한 제어

Table에 기술된 진동제어계의 물성치를 대입하면 써멀 액츄에이터, 센서, 보에 대한 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$M_T(s)/V_{\alpha}(s) = 0.0342 / s \quad (A)$$

$$V_s(s)/\xi(s) = 0.0353 s^2 \quad (B)$$

$$\xi(s)/M_T(s) = 1.5403/(s^2 + 0.0483s + 8.8804) \quad (C)$$

이제 제어기(controller)만 설계하면 완전한 폐루프 계를 구성할 수 있다. 주어진 제어계의 성능을 향상시키기 위한 제어기의 종류는 여러가지가 있지만 이 논문에서는 보상기 설계에 의한 제어방법을 선택했다. 보상기는 그림 3과 같이 귀환과정 중에 놓았으며 다음과 같은 지상보상기를 설정했다.

$$-K_c (s+11)^2 / (s+1)^2 \quad (3-1)$$

여기서 K_c 는 보상기의 게인이다. 그림 3의 블록 다이어그램(block diagram)에 대한 개루프 전달함수(OLTF)는 다음과 같다.

$$OLTF = ABCD = -K_c \frac{0.0019s(s+11)^2}{(s^2 + 0.0483s + 8.8804)(s+1)^2} \quad (3-2)$$

그림 4의 RL로 부터 $K_c=48$ 로 설계한 경우 폐루프 극점은 모두 s-평면의 왼쪽면(LHP)에 존재하여 제어계는 안정하다. 그러나 $K_c=100$ 으로 설계한 경우 폐루프 극점중의 일부가 s-평면의 오른쪽면(RHP)에 존재하게 되어 제어계는 불안정하게 된다. $K_c=0$ (즉 제어하지 않음)에 대한 계의 충격 응답 곡선(그림 5) 과 $K_c=48$ 에 대한 계의 충격 응답 곡선(그림 6) 으로부터 제어가 성공적이었음을 알 수 있다.

4. 최적 제어

4-1. 연속적 표현

그림 3의 피드 포워드(feedforward)과정 중에 있는 전달함수들로 부터 다음과 같은 가제어성 표준형(controllable canonical form) 벡터방정식을 얻는다.

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) \quad y(t) = C x(t) \quad (4-1)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -8.8804 & -0.0483 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C = [0 \quad 0.0019]$$

이 시스템은 제어가능함과 동시에 관측가능하기 때문에 설계자는 최적귀환계인과 관측기를 설계하는 데 있어 아무런 제약도 받지 않는다. Linear Quadratic(LQ) 제어방법으로 최적계인을 구했

으며 가격함수는 다음과 같다.[5]

$$J = \int_0^{\infty} \{x^T Q x + u^T R u\} dt \quad (4-2)$$

여기서 Q 는 상태가중함수이고 R 은 제어가중함수로서 시행착오방법으로 결정되는 값이다.

Q 의 요소들 중 q_{11} , q_{22} 그리고 R 을 파라미터로 하여 이 중 두개를 고정시키고 나머지 한 개를 변화시켜 본 결과 진동감쇠를 증가시키기 위해서는 q_{11} 은 작게, q_{22} 는 크게 그리고 R 은 작게 값을 설정해야 함을 알았다. 위의 사실로부터 이 논문에서는 Q 와 R 의 값을 다음과 같이 선택했다.

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}, \quad R = [0.2]$$

이에 해당하는 최적계인 G 는 다음과 같다.

$$G = [15.18 \quad 8.92]$$

페루프 계의 고유치와 감쇠비는 $A-BG$ 로부터 $-4.48 \pm 1.99 i$ 과 0.9138 임을 알 수 있다.

상태변수들 중의 일부가 측정불가능하므로 축소차수관측기(Reduced-order observer)를 설계했다. 참고문헌 6로부터 축소차수관측기의 상태 방정식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{z} = (\overline{A}_{22} - L\overline{A}_{12})z + \{(\overline{A}_{22} - L\overline{A}_{12})L + (\overline{A}_{21} - L\overline{A}_{11})\}y + (\overline{B}_2 - L\overline{B}_1)u \quad (4-3)$$

여기서 L 은 관측기의 게인이다. Error Equation은 다음과 같다.

$$\dot{\varepsilon} = (\overline{A}_{22} - L\overline{A}_{12})\varepsilon \quad (4-4)$$

Error Equation의 고유치를 -17 로 설정했으므로 $L = -1006$ 이다.

식 (4-1),(4-3)에 초기조건 $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 105.3$, $z(0) = 0$ 을 부여하여 출력곡선과 상태곡선을 구한 것이 그림 8 과 9 이다. 그림 8로부터 보는 진동하지 않은 채 빠른 시간내에 정지함을 알 수 있으며 그림 9로부터 관측기의 설계가 성공적임을 확인할 수 있다.

4-2. 이산적 표현

벡터 방정식 (4-1)를 이산형태(Discrete form)로 변환시켜 주면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다 (샘플링 시간 T 는 0.01초로 설정했다.)

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k) \quad y(k) = H x(k) \quad (4-5)$$

여기서

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.9996 & 0.010 \\ -0.0888 & 0.9991 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.010 \end{bmatrix}, \quad H = [0 \quad 0.0019]$$

이 시스템은 제어가능함과 동시에 관측가능하다. Q 와 R 은 위의 연속적 표현에서의와 같은 값을 선택했다. 최적계인을 구하면 다음과 같다.

$$G = [13.78 \quad 8.67]$$

페루프 계의 고유치는 $0.956 \pm 0.0191 i$ 로서 z -평면상의 값이다. 앞에서와 같이 일부 상태변수만 추정하면 되므로 축소차수관측기를 설계했으며 이후의 과정은 연속적 표현에서의와 동일하다. 단지 미분식이 차분식으로 표시되는 것만 다를 뿐이다. 축소차수관측기의 상태 방정식은 다음과 같이 얻어진다.[7]

$$z(k+1) = (\overline{\Phi}_{22} - L\overline{\Phi}_{12})z(k) + \{(\overline{\Phi}_{22} - L\overline{\Phi}_{12})L + (\overline{\Phi}_{21} - L\overline{\Phi}_{11})\}y(k) + (\overline{\Gamma}_2 - L\overline{\Gamma}_1)u(k) \quad (4-6)$$

Error equation 은 다음과 같다.

$$\varepsilon(k+1) = (\overline{\Phi_{22}} - L\overline{\Phi_{12}}) \varepsilon(k) \quad (4-7)$$

Error equation 의 고유치를 0.8437 로 설정했으므로 관측기의 게인 $L=-779.5$ 이다.
가 된다. 식 (4-5),(4-6)에 초기조건을 부여하여 풀어 그림 10,11을 얻었다.

5. 감인 제어

식 (4-1) 로 표현되는 계는 실제의 계와는 상당히 다르며 그 주요한 이유는 수학적 모델링 과정에서 많은 가정들에 기인한다. 모델링 오차에 의한 시스템의 불확실성 까지를 포함하는 상태 벡터방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = (A+\Delta A) x(t) + (B+\Delta B) u(t) \quad (5-1)$$

시스템의 불확실성을 나타내는 ΔA 와 ΔB 는 다음과 같이 가정했다.

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & r(t) \\ 2r(t) & 0 \end{bmatrix}, \quad \Delta B = \begin{bmatrix} s(t) \\ 2s(t) \end{bmatrix}$$

여기서 불확실자 $r(t)$ 와 $s(t)$ 는 각각 상수 ρ_r 과 ρ_s 를 한계치로 같은 값이다. 즉

$$r(t) = \{ r(t) : |r(t)| \leq \rho_r = constant > 0 \}$$

$$s(t) = \{ s(t) : |s(t)| \leq \rho_s = constant > 0 \}$$

이상의 것으로 부터 참고문헌 8에 있는 정리3 을 이용하여 불확실한 요소가 있음에도 불구하고 식 (5-1)의 시스템을 안정하게 하기 위한 ρ_r 과 ρ_s 의 범위를 구했다.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = [2], \quad K = \begin{bmatrix} 3.097 & 0.055 \\ 0.055 & 0.328 \end{bmatrix}, \quad G = [0.546 \ 3.283]$$

여기서 K 는 Riccati Equation의 해이고 G 는 최적제인이다. Q 를 단위행렬로 설정한 이유는 정리 3 의 부등식의 오른쪽 항을 최대가 되도록 하여 불확실자의 한계치 ρ_r 과 ρ_s 의 범위를 확장시키기 위한 것이다. 이상의 값들을 정리3에 대입하여 최종적으로 다음과 같이 ρ_r 과 ρ_s 에 관한 두 개의 부등식을 얻을 수 있다.

$$1.014\rho_r + 1.014\rho_s \{ (1-2.166\rho_s)^{-1} 2\rho_r + 8.8812 \} < 0.161, \quad \rho_s < 0.46 \quad (5-2)$$

식 (5-2)로 부터 ρ_r 과 ρ_s 의 최대 허용범위에 대한 곡선을 얻을 수 있다. (그림 12)

6. 결론

본 연구에서는 열용력을 이용해 진동제어를 수행하기 위한 여러가지 제어 알고리즘을 고찰하였다. 진동제어성능을 향상시키기 위해 출력을 귀환시켰으며 귀환과정 중에 지상보상기를 설계하기도 하고 최적제인을 설계하기도 했다. 두 방법 모두 구조물의 진동제어성능을 크게 증대시켰다. 최적 제어에서는 측정 불가능한 상태변수들을 추정하기 위해 관측기를 구성해 보았으며 그림 9,11에서 볼 수 있듯이 상당히 빠른 시간 안에 (0.5초 이하) 추정 상태변수가 실제상태변수를 쫓아감을 고찰하였다.

참고 문헌

- [1] 김중선, 1992, "압전소자를 액츄에이터로 이용한 탄성보 진동의 능동제어", 한국소음진동공학 회지, 제2권 제3호, p173-180

- [2] D.L. Edberg, "Control of Flexible Structures by Applied Thermal Gradients", AIAA Journal Vol.25, No.6, p877-883
- [3] H.S.Carslaw, J.C.Jaeger, 1959 "Conduction of Heat in Solids", Oxford Univ. Press, p112
- [4] B.A. Boley, J.H. Weiner, 1960, "Theory of Thermal Stresses", John Wiley & Sons, p338
- [5] 김종식, "선형제어시스템공학", 청문각, p405-410
- [6] C.T. Chen, "Linear System Theory and Design", Hot-Saunders, p361-363
- [7] G.F. Franklin, J.D. Powell, M.L. Workman, "Digital Control of Dynamic System", AddisonWesley, p261-262
- [8] Y.H. Chen, 1987, "On the Robustness of Mismatched Uncertain Dynamical System", Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol.109, p29-35

Table

$b=0.0381 \text{ m}$	$C_{qv}=3.45 \text{ W/V}$	$c=963 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K}$	$d=7.874 \times 10^{-4} \text{ m}$
$E=73.1 \text{ Gpa}$	$G_s=0.05 \text{ Vs}^2/\text{m}$	$h=1.956 \times 10^{-4} \text{ m}$	$K=156 \text{ kg m s}^3/\text{K}$
$l=0.606 \text{ m}$	$l_a=0.0362 \text{ m}$	$n_s=3$	$x_1=0.0163 \text{ m}$
$x_2=0.451 \text{ m}$	$x_s=0.606 \text{ m}$	$\alpha=2.43 \times 10^{-5}/\text{K}$	$\zeta=0.0081$
$\kappa=6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	$\omega=2.98 \text{ rad/s}$	$\rho=2700 \text{ kg/m}^3$	$S=bl_a$
$\phi(x_s)=0.7065$	$\phi'(x_1)=0.0930$	$\phi'(x_2)=1.6333$	
$\bar{A}=\begin{bmatrix} -0.0483 & -0.0169 \\ 526.3 & 0 \end{bmatrix}$	$\bar{\phi}=\begin{bmatrix} 0.9991 & -0.0002 \\ 5.2632 & 0.9996 \end{bmatrix}$	$\bar{B}=\begin{bmatrix} 0.0019 \\ 0 \end{bmatrix}$	
$\bar{\Gamma}=\begin{bmatrix} 0.1900 \\ 0 \end{bmatrix} \times 10^{-4}$	$Q_1=\begin{bmatrix} 0 \\ 526.3 \end{bmatrix}$	$Q_2=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	

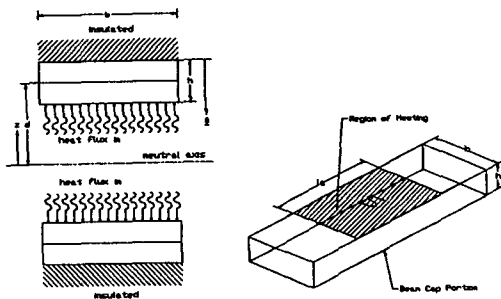


그림 1. 보의 단면과 측면

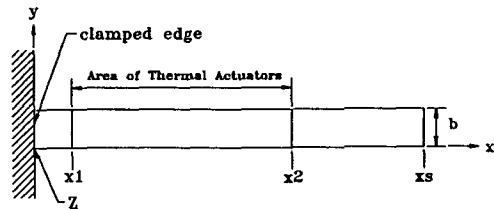


그림 2. 보의 전체 모양

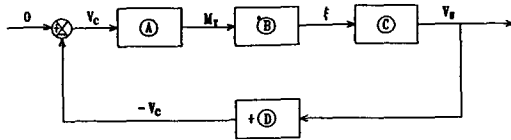


그림 3. Block Diagram

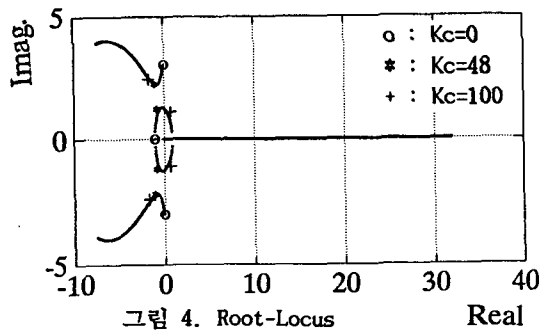


그림 4. Root-Locus

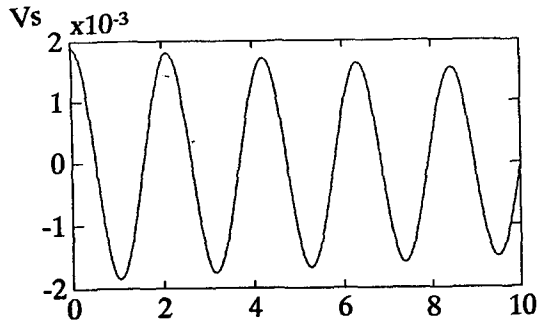


그림 5. 충격응답곡선 ($K_c=0$) Time (sec)

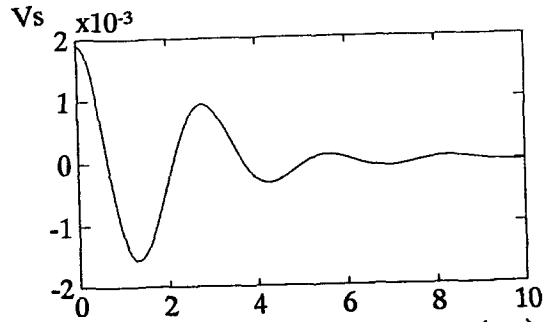


그림 6. 충격응답곡선 ($K_c=48$) Time (sec)

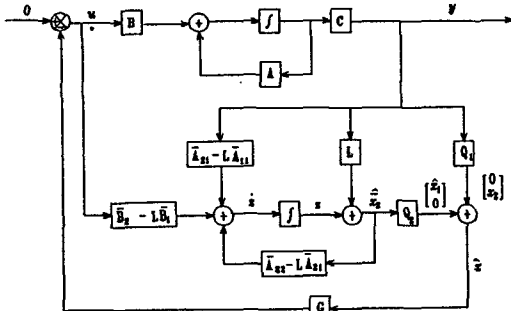


그림 7. 관측기에 대한 Block Diagram

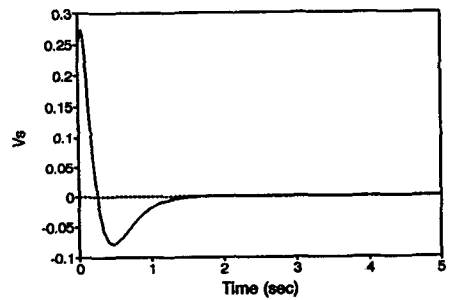


그림 8. 초기조건에 의한 응답 (연속계)

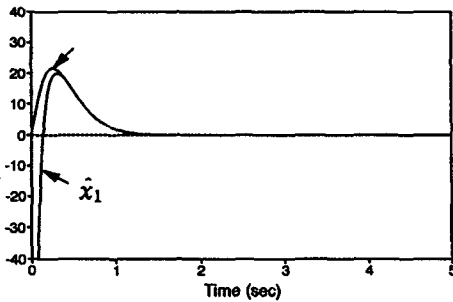


그림 9. 실제상태변수와 추정상태변수의 비교 (연속계)

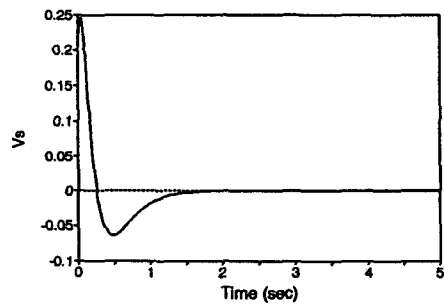


그림 10. 초기조건에 의한 응답 (이산계)

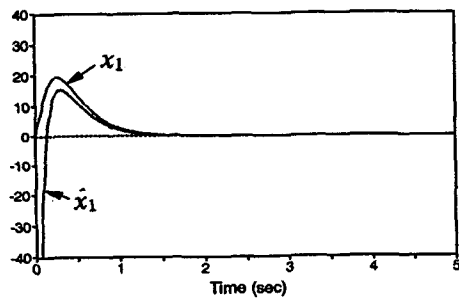


그림 11. 실제상태변수와 추정상태변수의 비교 (이산계)

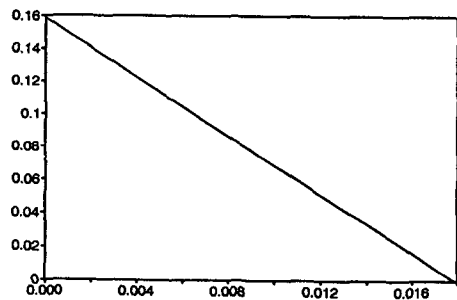


그림 12. ρ_r 과 ρ_s 의 허용가능영역