

〈技術論文〉

# 형상기억합금 액추에이터를 이용한 강건한 진동제어

이승우\* · L. R. Koval\*\* · 김재명\*\*\*

(1994년 4월 19일 접수)

## Robust Control of Vibration Using Shape Memory Alloy Actuator

S. W. Rhee, Koval, L. R. and J. M. Kim

**Key Words :** Robust Control of Vibration(강건한 진동제어), Shape Memory Alloy(형상기억합금), Nitinol Wire(나이티놀 와이어), LQG/LTR(최적 루프전달회복기법)

### Abstract

The use of the shape memory alloy, Nitinol wire, is investigated as an actuator for enhancing the damping in structural vibration systems. The first-order mathematical model of the Nitinol wire is obtained from the experimental data for an actuator. Finite element method is utilized for the strain gage sensor model, which is installed at the root of cantilever beam. A simple system, cantilever beam, is built as a flexible structural system to implement a control law with the Nitinol wire actuator. The system model including sensor and actuator is derived, which agrees with the experimental results. The actuator dynamics is augmented with the system so as to design PI controller and the one of robust controllers, LQG/LTR controller, and the control laws are implemented experimentally. The experimental study shows the feasibility of utilizing the Nitinol wire as an actuator for the purpose of vibration control.

### 1. 서 론

지난 30년동안 인공위성, 우주선, 가연성 로보트팔 등에 대한 꾸준한 연구에 힘입어 구조물에 대한 진동제어분야에 상당한 발전을 가져왔다. 대부분 연구는 이론의 정립과 컴퓨터 시뮬레이션에 집중되어 왔으나 실제적인 실험연구는 실시스템에 대한 디지털 제어기의 실제적인 수행, 주변기기 등에 대한 연구가 포함되어야 하므로 실험연구는 거의 찾아보기 힘든 실정이다.

대부분의 선형계는 현재까지 발전된 LQR이론을 이용하여 제어할 수 있다는 것은 이미 잘 알려진

사실이지만 모든 상태변수가 필요하다는 단점이 있다. 이 단점을 보완하기 위하여 모든 상태변수를 추정하는 관측기를 일단 도입하면, 시스템 모델계수의 작은 변화 등의 불확실성에 대하여 페루프가 상당히 민감하게 반응하며 종종 불안정상태로 시스템을 만들기 때문에 LQR 이론이 제어시스템을 설계하는 엔지니어에게 환영받지 못한 것이 사실이고 이 문제를 극복하기 위하여 Doyle 등<sup>(1)</sup>은 LQR이론을 기초하여 시스템의 불확실성을 고려한 모델링 기법을 이용하여 LQG/LTR이라는 새로운 제어기 설계방법을 제시하였다.

가연성 구조물(flexible structures)의 진동제어분야에서 액추에이터에 대한 연구 또한 중요한 분야로서 지금까지 프로브 매스(proof mass) 액추에이터, 자기력(magnetic force) 액추에이터, 제어모멘트 자이로(control moment gyro), 분사기, 압전세

\*정회원, 한국전자통신연구소

\*\*Univ. of Missouri-Rolla, U. S. A.

\*\*\*한국전자통신연구소

라믹(piezoceramic) 액추에이터 등 많은 종류의 액추에이터를 일부는 실험실에서, 일부는 실제 시스템에서 진동제어에 시도되어 왔지만 가격이 비싸거나 또는 액추에이터의 무게가 무거워 시스템의 특성을 변화시킨다는 점이 여러 사람에 의해 지적되어 왔다.<sup>(2)</sup> 본 연구에서 이 문제를 극복하기 위해 지능재질(smart materiel)의 한 종류인 형상기억합금, Nitinol wire를 액추에이터로 이용한 목적으로 Nitinol wire의 동특성에 대해 연구하였는데, Nitinol wire는 무게가 가벼워서 가연성 구조물의 진동제어를 위한 액추에이터로 사용할 경우 시스템의 특성을 거의 변화시키지 않는 장점이 있다.

현재까지 알려진 지능재질에는 여러 종류의 형상기억합금을 비롯하여 압전세라믹, 압전필름, ER유체(electro-rheological fluid) 등이 있으며, Fe-Ni-Co, Fe-Mn-Si, In-Tl, Ni-Ti합금 등 여러 가지 종류의 형상기억합금이 있으나 기계적 특성 및 상변화 온도 등 실용성에서 Ni-Ti합금인 Nitinol이 우수한 것으로 알려져 있다. Nitinol은 Ni와 Ti의 혼합비(무게기준)에 따라 상변화온도가 변하는데 섭씨 40도에서 50도 사이에서 상변화를 일으키는 Nitinol(혼합비 : 53-57% 니켈)을 가장 많이 사용한다. 형상기억합금인 Nitinol은 1960년대에 미해군성 연구소에서 개발된 것으로 온도변화에 따라 상변화를 일으켜 열에너지를 기계적인 일로 변환시키는 변환기의 역할을 하기때문에 많은 학자들의 관심의 대상이 되었지만 제어분야 이용된 것은 80년대부터 시작된 것으로 알려졌으며, 현재까지는 온실내부의 공기 온도변화에 따라 온실창문을 개폐시키거나 외팔보의 진동제어를 위해 Nitinol wire를 on-off제어기<sup>(3,4)</sup> 형태로 이용된 것에 불과하였다.

본 연구의 목적은 지금까지 Nitinol wire에 적용된 on-off형태의 제어방식에서 벗어나 더 성능이 우수한 제어이론을 Nitinol wire를 액추에이터로 사용된 가연성 구조물의 진동제어를 위해 적용할 수 있는지 실험에 의해 살펴보는 데 있다. 이를 위해 외팔보를 알루미늄판으로 제작하고 스트레인 게이지를 센서로 사용하였다. Fig. 1은 설치된 실험 장치중 외팔보 시스템의 사진을 보여준 것이다.

## 2. 실험장치

본 실험에서 사용된 외팔보의 재질은 알루미늄이

고, 길이는 120 cm, 두께는 0.317 cm, 폭은 15.2 cm이다. 외팔보의 고유진동수를 줄이기 위해 2.92 kg 집중질량을 보끝에 설치하였다.

Fig. 2는 실험장치의 블록선도이며 보의 굽힘 정도에 따라 표면의 스트레인을 측정하기 위한 센서로서 스트레인 게이지를 보의 지지점에 가깝게 부착하였고 액추에이터인 형상기억합금은 지름이 0.0254 cm이며 3퍼센트의 초기 영구 스트레인을 준 후 보의 양면에 부착하여 작동모멘트를 발생시킬 수 있도록 설치하였다. PI 및 LQG/LTR 디지털 제어기는 연속형으로 제어기를 설계후 286-CPU 개인용 컴퓨터에서 수행하기 위해 터스틴방법으로 디지털화하였다. DT2801A(data translation)를 아날로그-디지털회로로 사용하였으며, 페루프를 형성하기 위해 스트레인 게이지는 고주파대역의 노이즈를 제거시키기 위한 저주파수대역 필터가 포함된 브리지회로에 연결하고 이회로는 개인용 컴퓨터의 아날로그-디지털포트에, 그리고 디지털-아날로그포트는 서보증폭기에 연결되어 액추에이터인 형상기억합금에 요구전력을 공급하여 보끝단에 모멘트를 발생시키도록 하였다. 페루프 제어실험을 할 때 보

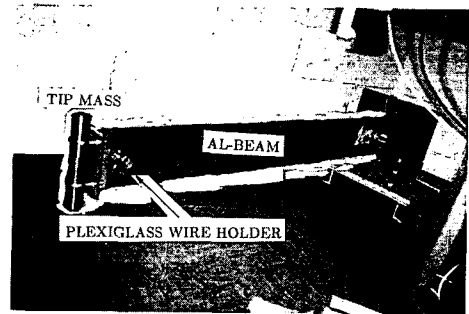


Fig. 1 Cantilever-beam test bed

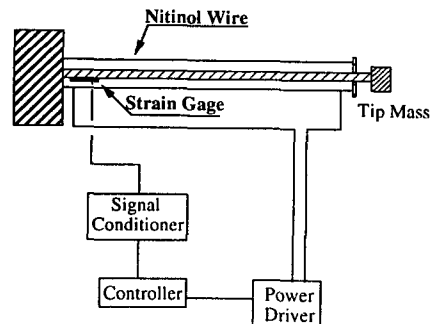


Fig. 2 Experimental set-up of output feedback control

의 자유진동을 위하여 보끝단을 약 15 cm 초기변위를 주었고 즉시 페루프 제어기를 작동시켜 능동적 진동의 감쇠현상을 관측하였다.

### 3. 외팔보의 유한요소 모델

외팔보는 간단한 형상을 갖고 있기 때문에 클래식 동력학 해석방법에 의해 시스템 모델이 유도될 수도 있지만 본 연구의 궁극적인 목표는 복잡한 다자유도계 구조물에 대한 진동제어이기 때문에 다자유도계 구조물에서 일반적으로 사용되는 유한요소법을 시스템 모델유도에 사용하였다. 유한요소법에서 요소의 수가 많으면 더 정확한 결과를 얻을 수 있지만 본 연구의 목적에 맞게 Fig. 3에서 보는 바와 같이 간단한 세요소(three elements) 모델을 사용하였다. Fig. 3에서  $y_i, u_i, \theta_i$ 는 각 노드의 수직 방향, 수평방향의 변위벡터 및 각변위벡터를 의미한다. 시스템 모델의 정확도를 기하기 위해 유한요소법에 의해 얻은 고유진동수에 대한 해석결과를 충격진동실험(impact hammer method) 결과와 비교 검토하였다. 유한요소 해석결과 시스템의 1차 고유진동수는 0.623 Hz였는데 실험결과는 0.581 Hz였는데 유한요소해석에 포함되지 않은 장치때문에 보끝 집중질량 증가의 영향으로 실험치가 다소 낮게 나타났다. 감쇠계수를 무시한 구조물의 일반 진동방정식을 표시하면,

$$M_b \frac{d^2 Y}{dt^2} + KY = m_a(t) \quad (1)$$

여기서,  $Y$ 는 수직변위벡터,  $M_b, K$ 는 각각 보의 질량 및 강성행렬을 표시한 것이다. 또한 질량과 강성행렬의 각 요소는 다음과 같이 표시되는데

$$M_{ij} = \int N_i(x) m N_j(x) dx \quad (2)$$

$$M_{ij} = \int \left( \frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2} \right) EI \left( \frac{\partial^2 N_j}{\partial x^2} \right) dx$$

여기서,  $N_i, N_j$ 는 형상함수,  $m$ 은 단위 길이당 질량, 그리고  $m_a(t)$ 는 액추에이터에 의해 보의 끝점에 작용되는 모멘트 벡터를 표시한다. 식(1)을 모

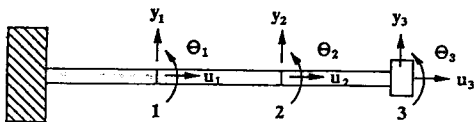


Fig. 3 Finite element model of beam

드행렬  $T$ 를 이용한 좌표변환을 통하여 비연성시다면

$$T^T M_b T \dot{q} + T^T K T q = T^T m_a(t) \quad (3)$$

여기서,  $T = [t_{i1} \ t_{i2} \ t_{i3} \ t_{i4} \ t_{i5} \ t_{i6}]$ ,  $i=1 \dots 6$ 이다.

감쇠계수의 비연성을 가정한 후, 감쇠계수를 계산하는 방법중의 하나인 대수감쇄(logarithmic decrement)방법에 의해 얻은 기본모드의 감쇠계수  $\zeta=0.003$ 를 기본식에 도입하고 기본모드 진동이 우세하다고 가정하여 2차 고유진동수 이상을 무시하면 식(4)로 표현된다.

$$\frac{d^2 q_1}{dt^2} + 2\zeta\omega_1 \frac{dq_1}{dt} + \omega_1^2 q_1 = t_{61} m_a(t) \quad (4)$$

### 4. 센서의 수학적 모델

스트레인 게이지를 본 시스템에서 센서로 사용하였으며 이에 대한 수학적 모델을 유도하기 위해 유한요소법을 사용하였다. 순수 굽힘문제에서 스트레인 게이지가  $x=x_s$ 에 설치되어 있을 때, 스트레인은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon(x_s) = -z \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=x_s}$$

$$= -z (N_1'' y_1 + N_2'' \theta_1 + N_3'' y_2 + N_4'' \theta_2) \quad (5)$$

여기서, (\*)"는 이차 미분항이며,  $z$ 는 중간면에서 표면까지의 거리,  $N_i$ 는 형상함수,  $y_i, \theta_i$ 는 유한요소 양끝단의 변위벡터와 각변위벡터를 나타낸 것이다. 식(5)는 모달행렬을 이용하여 모달좌표계로 변환시킬 수 있으므로 식(6)으로 표시된다.

$$\epsilon(t) = -z N'' T_a R x = C_s x \quad (6)$$

여기서,  $T_a, R$ 은 각각 모달행렬, 모드 추출행렬이며,  $x = [q_1 \dots q_6]^T$ 이다. 따라서 기본진동 모드가 우세하다고 가정하면, 스테레인량에 비례하는 출력 전압은 비례계수  $\alpha_s$ 를 이용하여 식(7)의 형태로 표시할 수 있다.

$$v_s = -\alpha_s z [N_3''(x_s) N_4''(x_s)] [t_{11} \ t_{21}]^T q_1$$

$$= A_s q_1 \quad (7)$$

그러므로 식(4)와 식(7)에서 식(8)의 최종 시스템 식을 얻었다.

$$\frac{d^2 v_s}{dt^2} + 2\zeta\omega_1 \frac{dv_s}{dt} + \omega_1^2 v_s = t_{61} A_s m_a(t) \quad (8)$$

여기서, 유한요소해석 프로그램인 NASTRAN

을 이용하여  $t_{61}=1.684$ ,  $A_s=2.5e-2$ 의 값이 계산되었다.  $m_a(t)$ 는 보끝에 작용되는 액추에이터인 형상기억합금인 Nitinol wire에 의한 작용모멘트이다. 식(8)에서  $t_{61}A_s$ 의 값을 이론적으로 계산할 수 있지만 계단함수 응답곡선(step input response)에 의해 실험적으로 직접 계수값을 얻을 수 있다. 본 시스템에서 모멘트 팔의 길이가 약 1.5 inch(37 mm)이고 12 N 크기의 힘이 액추에이터를 통해 작용될 때 11mV의 센서 출력전압을 얻어 0.0624의 실험 계수값(이론 계수값은 0.063)을 얻었다. 본 실험에서는 이론 계수값 대신 실험 계수값을 사용하여 식(9)를 시스템 모델의 결과식으로 채택하였다.

$$\frac{d^2 v_s}{dt^2} + 0.0235 \frac{dv_s}{dt} + 15.31 v_s = 0.0624 f(t) \quad (9)$$

여기서,  $v_s$ 는 센서의 출력전압,  $f(t)$ 는 형상기억합금의 수축력이다. 따라서, 시스템의 전달함수는 식(10)의 형태로 표현된다.

$$G_p(s) = \frac{V(s)}{F(s)} = \frac{0.0624}{(s^2 + 0.0235s + 15.31)} \quad (10)$$

### 5. 액추에이터의 수학적 모델

Wire형태의 형상기억합금인 Nitinol wire를 제어분야에서 액추에이터로 사용하기 위해 참고(5)에서 실험에 의해 수학적 모델을 찾는데 성공하였으며 이를 간략히 소개하면 다음과 같다. Fig. 4는 Nitinol wire에 대한 전형적인 계단입력 응답곡선을 실험을 통하여 얻은 결과이며 입력은 전력, 출력은 Nitinol wire의 수축력이다. Fig. 4는 Nitinol wire를 이미 언급한 바와 같이 3% 소성변위를 준 후 양단을 고정하고 일정전력을 계단입력 형태로 가해 Nitinol wire를 가열하여 정상상태에 도달한 후 공급되는 전력을 중지시켰을 때 얻을 수 있는 전형적인 곡선이다. 이 계단입력 응답곡선에서 1차 선형모델을 가정하여 다음과 같은 식을 얻었다.

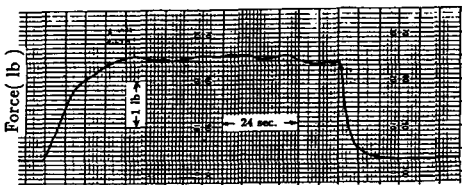


Fig. 4 Typical step response of a nitinol wire

$$\tau \frac{dF(t)}{dt} + F(t) = a_s P \quad (11)$$

여기서,  $\tau$ =time constant(sec),  $a_s$ 는 공급되는 전력에 대한 수축력의 비례상수(1bf/watts),  $F(t)$ 는 액추에이터에서 발생하는 수축력(1bf),  $P$ 는 공급되는 전력(watts) :  $P = \frac{v_s^2}{r}$ ,  $v_s$ 는 액추에이터에 공급되는 전압,  $r$ 은 Nitinol wire의 저항치이다. 따라서 식(11)은

$$\tau \frac{dF(t)}{dt} + F(t) = a_s K^2 \frac{v_{pc}^2}{r} \quad (12)$$

여기서,  $K = \frac{v_s}{v_{pc}}$ 는 증폭계수이며,  $v_{pc}$ 는 디지털-아날로그포트에 연결된 서보증폭기의 입력 전압이다.  $F(t)$ ,  $v_{pc}$ 는 시스템의 운용점에 대하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F(t) = f_0 + f(t) \quad (13)$$

$$v_{pc} = v_0 + v(t)$$

여기에서  $v_0$ ,  $f_0$ 는 입력전압과 형상기억합금 액추에이터 출력의 운용점이며  $v(t)$ ,  $f(t)$ 는 운용점에 대한 섭동이다. 따라서, 식(12)는 다음과 같이 된다.

$$\tau \frac{df(t)}{dt} + f(t) = 2a_s K^2 \frac{v_0}{r} v(t) \quad (14)$$

여기서,  $\alpha = \frac{F_{actual}}{F_{data}}$ : 계단 응답 비율,  $F_{actual}$ 은 Nitinol wire를 시스템에 설치한 후 계단응답의 정상상태값,  $F_{data}$ 는 Nitinol wire를 시스템에 설치하기 전 계단응답의 정상상태값이다.

따라서 운용점을 기준으로 입력되는 전압과 출력되는 수축력사이의 관계를 전달함수 형태로 바꾸면 식(15)와 같이 간략화된다.

$$\frac{F(s)}{V(s)} = \frac{2a_s K^2 v_0 / r \tau}{s + 1/\tau} \quad (15)$$

식(15)에 실험을 통해 얻은  $\alpha=0.45$ ,  $a_s=1.25$  lbf/watts,  $K=2.2$ ,  $v_0=2.5$  volts,  $\tau=5$  sec,  $r=18 \Omega$ 을 대입하면 액추에이터의 전달함수는

$$G(s) = \frac{0.5}{s + 0.2} \quad (16)$$

또한 시스템과 액추에이터를 직렬 연결시킨 개루프 전달함수를  $G_T(s)$ 라 하면

$$G_T(s) = \frac{0.15}{(s + 0.2)} \frac{0.0624}{(s^2 + 0.0235s + 15.31)} \quad (17)$$

이상과 같이 얻어진 개루프 전달함수의 타당성을 검토하기 위하여 실 시스템의 보드선도(bode plot)

와 수학적 모델인 식(17)의 보드선도(bode plot)를 비교 검토하였다. Figs. 5, 6은 각각의 보드를 보여 주고 있다. Fig. 2에서 제어기부분 대신 수도랜덤 노이즈를 발생시키는 프로그램으로 대체시켰으며 스트레인 게이지의 출력부분을 HP 스펙트럼 분석기에 연결하여 수도랜덤(pseudo-random) 노이즈에 대한 시스템의 주파수 응답곡선인 Fig. 6을 얻을 수 있었다.

실험을 통해 얻은 주파수 응답곡선의 측정신뢰도는 식(18)로 정의되는 상호밀접치(coherence)<sup>(6)</sup>에 의해 측정될 수 있는데  $\gamma^2$ 가 1에 가까울수록 측정 신뢰도가 높으며, 일반적으로 이 값은 스펙트럼 분석기에서 자동적으로 계산된다.

$$\gamma^2 = \frac{|G_{YX}|^2}{G_{XX}G_{YY}} \quad (18)$$

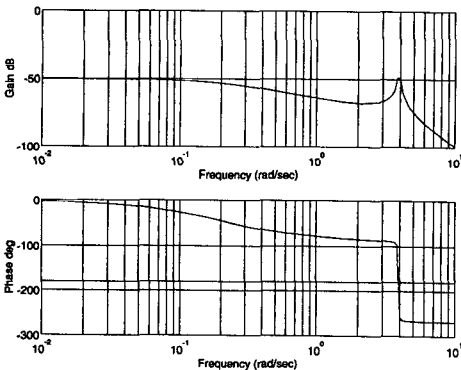


Fig. 5 Bode plot of mathematical model of cantilever-beam system with actuator

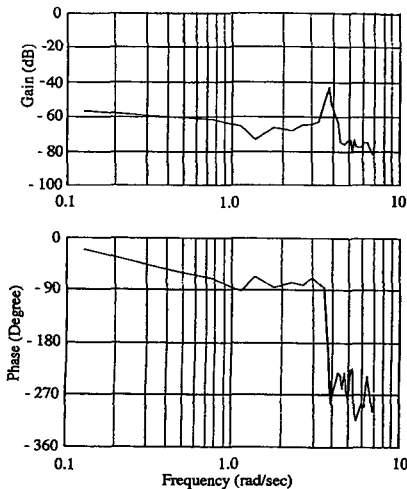


Fig. 6 Bode plot of actual system

여기서,  $X(S)$ ,  $Y(S)$ ,  $(*)^*$ 가 각각 입출력의 라플라스변환, 그리고 공액 전치행렬이라 하면,

$$G_{XY} = Y(s)X^*(s),$$

$G_{XX} = X(s)X^*(s)$ ,  $G_{YY} = Y(s)Y^*(s)$ 는 각각 입력 출력 코코스 스펙트럼, 입력 그리고 출력 오토 스펙트럼이다. 주파수 응답곡선을 위한 실험데이터 수집에서 4 rad/sec미만의 저주파수대역에서 실험 결과는 상호밀접치가 0.8이상인 반면, 4 rad/sec이상 7 rad/sec 미만에서 0.5정도의 실험데이터를 얻었으며 주파수 7 rad/sec 이상에서 0.2의 낮은 상호 밀접치를 얻어 7 rad/sec 이상의 결과를 실험데이터에서 제외시킨 후 Fig. 6을 작성하였다.

## 6. 강건한 제어기 설계

### 6.1 강건한 제어기준

Fig. 7에서 시스템의 출력점과 입력점에서 각각 외부교란, 또는 기준입력에 대하여 다음 두 식을 얻을 수 있다.

$$y(s) = [I + GK]^{-1}GKr(s) - [I + GK]^{-1}GKv + [I + GK]^{-1}d_0 + [I + GK]^{-1}Gd_i \quad (19)$$

그리고

$$u(s) = [I + KG]^{-1}Kr(s) - [I + KG]^{-1}Kv + [I + KG]^{-1}Kd_0 + [I + KG]^{-1}d_i \quad (20)$$

여기서,  $r(s)$ ,  $v$ ,  $d_i$ ,  $d_0$ 는 기준입력, 측정잡음, 시스템의 입출력 교란을 나타낸다. 시스템 출력점에서 페루프의 성능을 나타낼 수 있는 몇가지 식을 정의하면, 회기차이(return difference)는

$$R_{do}(s) = I + GK \quad (21)$$

감응함수(sensitivity function)는

$$S_0(s) = (I + GK)^{-1} \quad (22)$$

그리고 페루프 전달함수는 식(23)에 의해 정의된다.

$$T_0(s) = S_0GK \quad (23)$$

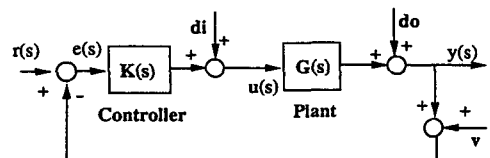


Fig. 7 General block diagram of closed-loop system

페루프가 좋은 성능을 갖기 위해서

첫째, 입력명령을 잘 따라야 하며,

둘째, 시스템에 유입되는 외부교란이 잘 제거되어야 하고,

셋째, 센서에서 도입되는 교란을 잘 제거해야 한다.

이러한 페루프의 성능은 특이치(singular value)의 개념을 도입하여 다음과 같이 개루프의 주계인(principal gain)으로 표시할 수 있다.

(1) 입력명령을 잘 따르기 위해 저주파수대에서  $y(s) \approx r(s)$ 를 만족해야 하므로

$$\max.\sigma(T_0) = \max.\sigma([I + GK]^{-1}GK) \approx 1, \quad \forall \omega \in \Omega_r \quad (24)$$

여기서,  $\max.\sigma(*)$ 는 최고 특이치(singular value).

(2) 시스템에 유입되는 외부교란이 잘 제거되어야 하므로  $d_0, d_i$ 에 대해 저주파수대에서  $y(s) \approx 0$ 이 요구된다.

$$y(s) = [I + GK]^{-1}d_0 + [I + GK]^{-1}Gd_i = S_0d_0 + S_0Gd_i \quad (25)$$

그러므로, 만약 시스템의 전달함수의 분모차수가 분자차수보다 클때(strictly proper), 외란이 잘 제거될 조건은

$$\max.\sigma(S_0) = \max.\sigma([I + GK]^{-1}) \ll 1, \quad \forall \omega \in \Omega_d \quad (26)$$

(3) 센서에서 도입되는 교란을 잘 제거하기 위해서 고주파수대의 센서교란에 대해  $y(s) \approx 0$ 의 조건을 만족시켜야 하므로 식(27)로 표현될 수 있다.

$$y(s) = [I + GK]^{-1}GKv$$

$$\max.\sigma(T_0) = \max.\sigma([I + GK]^{-1}GK) \ll 1, \quad \forall \omega \in \Omega_s \quad (27)$$

6.2 견실한 제어기 설계

견실한 제어기 설계방법에 대해 많은 연구자들이 지난 10여년 간 여러 방법을 제시하여 왔다. 여러 가지 방법중 본 연구는 LQG/LTR 제어기를 사용하였다. LQG/LTR 제어기의 구조는 기존 칼만필터(Kalman filter) 형태의 관측기를 갖고있는 LQR방식의 제어기이므로 기존 LQG이론에서 크게 벗어나지 않는 수정된 LQG제어기 설계방법이라 할 수 있다. 설계방법은 참고(7)에 잘 설명되어 있으므로 본 지에서는 생략하고 본 연구에서 사용한

제어기 설계순서를 요약하면 다음과 같다.

(1) 액추에이터의 전달함수를 시스템 입력부분에 직렬 연결한다.

(2) 정상상태에서 오차가 영이 되도록 적분기를 통합시스템(액추에이터와 외팔보)의 입력에 직렬 연결한다.

적분기를 포함한 통합시스템을 상태변수로 표시하면

$$\dot{X} = AX + BU + \Gamma w$$

$$Y = CX + v \quad (28)$$

여기서,  $A \in R^{4 \times 4}, B \in R^{4 \times 1}, C \in R^{1 \times 4}, \Gamma \in R^{4 \times 1}$ 는 시스템, 입력, 출력, 시스템 교란행렬이며,  $w, v$ 는 시스템, 계측교란을 나타낸다.

(3) 칼만필터 설계방식에 의해 목표루프  $(C[sI - A]^{-1}K_f)$ 를 설계한다. 여기서  $K_f$ 는 칼만필터 게인이다.

(4) 강건성을 회복시키면서 LQR 상태 피드백 제어기를 설계한다. 상태피드백 게인이  $K_c = \frac{1}{\rho} B^T P_c$ 이고,  $P_c$ 가 Ricatti식의 해이면 LQG/LTR 제어기는  $K(s) = K_c[sI - A + BK_c + K_f C]^{-1}K_f$ 로 표시되고, 다음의 수렴관계를 갖는다.

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} G(s)K(s) \rightarrow C[sI - A]^{-1}K_f \quad (29)$$

Fig. 8은 본 시스템의 페루프 전달함수와 감응도 곡선의 특이치(singular value) 선도를 나타낸 것인데 이 두 곡선에서 0.4 rad/sec 이하에서 시스템의 외부교란과 10 rad/sec 이상의 센서교란에 대하여 -15 dB 이하로 교란을 축소시키는 것을 볼 수 있다.

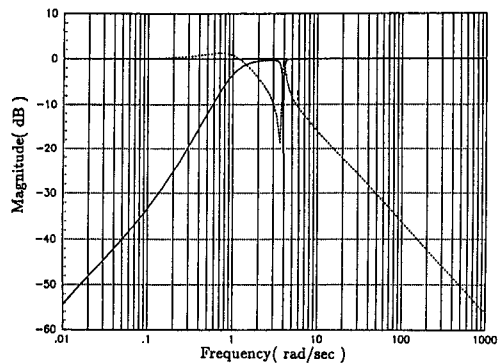


Fig. 8 Singular value plot of sensitivity (solid line) and closed-loop function (dotted line)

### 7. 수치해석결과와 실험결과의 비교

Figs. 9, 10, 11은 시스템이 자유진동을 할 때 각각 개루프 및 PI, LQG/LTR 제어기를 이용한 폐

루프의 응답을 시뮬레이션으로 보여준 그림인데 PI 제어기의 P-게인과 I-게인은 각각 -200, 100을 사용하였으며, 10 퍼센트 안정시간은 개루프의 경우 220초 소요되는데 반해 폐루프의 경우 각각 36초, 19초를 기록하였다. Figs. 12, 13, 14은 각각 개루프, PI, LQG/LTR 제어기를 이용한 폐루프 응답에 대한 실험결과를 보여준 것이며 PI, LQG/LTR 제어기 폐루프의 경우 10 퍼센트 안정시간이 각각 34초, 17초를 기록하여 수치해석에 의해 얻은 결과와 상당히 일치함을 보임으로써 상기에 유도된 액추에이터의 수학적 모델을 여러가지 다른 시스템과 제어기설계에 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

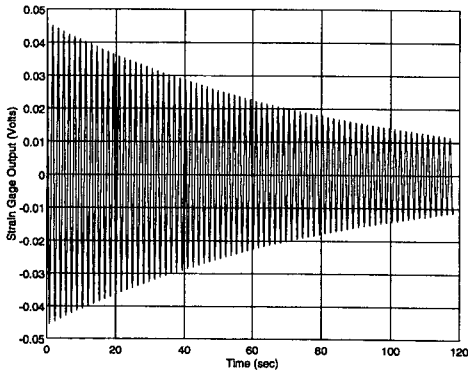


Fig. 9 Simulation result of the open-loop system

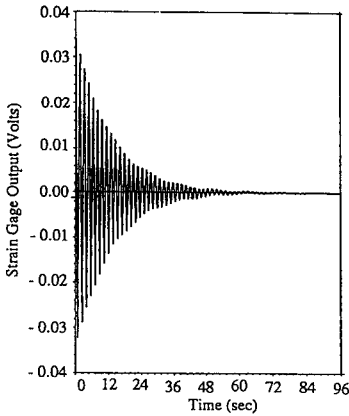


Fig. 10 Simulation result of the closed-loop system with PI controller

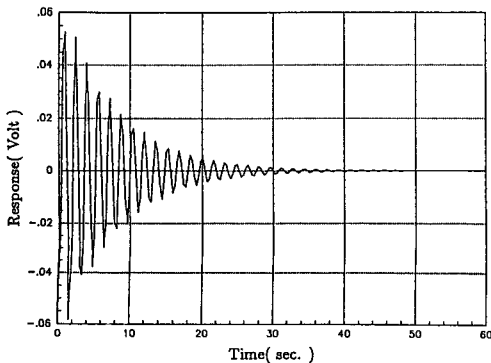


Fig. 11 Simulation result of the closed-loop system with LQG/LTR controller

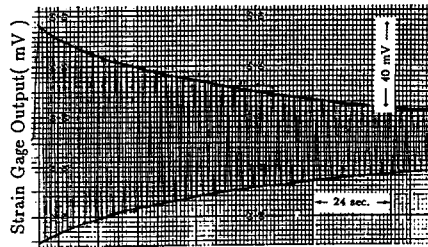


Fig. 12 Experimental result of the open-loop system

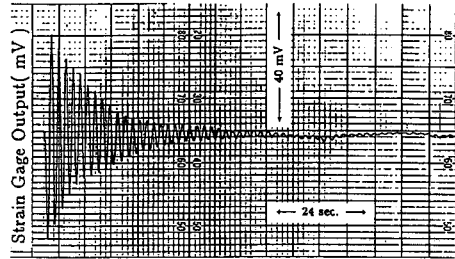


Fig. 13 Experimental result of the closed-loop system with PI controller

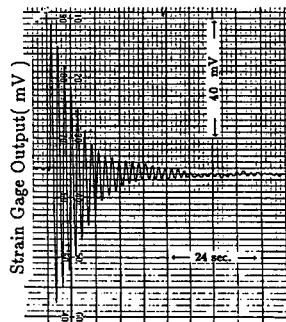


Fig. 14 Experimental result of the closed-loop system with LQG/LTR controller

## 8. 결 론

형상기억합금인 Nitinol wire를 구조물 진동제어에 이용할 수 있는지 검토하기 위해 외팔보를 제작하였으며 시스템과 액추에이터의 모델을 각각 유한요소법과 실험을 통해 찾은 후 PI 제어기, 강건한 제어기인 LQG/LTR 제어기를 설계하였다. 형상기억합금은 입력전력에 대해 time constant(sec)가 변하는 성질을 갖고 있으나 제한된 범위내에서 일차 선형 미분방정식의 수학적 모델을 사용하였으며, 형상기억합금의 느린반응을 보상하기 위하여 액추에이터의 전달함수를 시스템에 직렬 연결해 디지털 제어기를 이용한 진동제어를 성공적으로 수행하여 형상기억합금을 진동제어에 이용할 수 있다는 것을 보여주었다. 본 실험연구 결과로부터 추론할 수 있는 사항은 가연성 로봇팔이 지지점을 중심으로 회전운동을 하다가 정지할 때 발생하는 진동, 또는 태양열에 의한 온도상승을 막을 수 있다면 위성체의 자세가 변경될 때 발생하는 태양 전지판의 진동을 과거 무거운 모터형태의 액추에이터에서 탈피하여 형상기억합금을 이용한 효과적인 제어를 할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 또한 실험에 소요된 경비는 약 300만원 정도이므로 본 실험장치를 계측제어분야의 교육용으로 사용한다면 더 큰 효과를 얻을 수도 있다고 생각된다.

## 참고문헌

- (1) Doyle, J. C. and Stein, G., 1981, "Multivariable Feedback Design : Concepts for Classical/Modern Synthesis," *IEEE Trans. on AC*, Vol. AC-26, No. 1, pp. 4~16.
- (2) Fanson, J. L., Blackwod, G. H. and Chu, C. -C., 1989, "Active-Member Control of Precision Structures," *AIAA 89-1329*, pp. 1480~1494.
- (3) Ikegami, R. and Wilson, D. G., 1990, "Active Vibration Control Using Nitinol and Piezoelectric Ceramics," *J. of Intelligent Mater. Syst. and Struct.*, 1, pp. 189~205.
- (4) Baz, A. and Iman, K., 1990, "Active Control of Flexible Beams Using Shape Memory Actuators," *J. of Sound and Vibration*, 140(30), pp. 437~456.
- (5) 이승우, 1992, "Robust Control of Smart Structures," Ph. D. Thesis, Univ. of Missouri-Rolla, U. S. A.
- (6) Ewins, D.J., 1984, *Modal Testing : Theory and Practice*, Research Studies Press, Lethworth, England.
- (7) Maciejowski, J. M., 1989, *Multivariable Feedback Design*, Addison-Wesley.