

본 연구의 일부는 1995년도 인하대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

형상기억합금 작동기를 이용한 스마트 구조물의 진동 및 위치 추적제어

박노준*, 최승복**, 정재천**

Vibration and Position Tracking Control of a Smart Structure Using SMA Actuators

N. J. Park*, S. B. Choi** and C. C. Cheong**

ABSTRACT

This paper presents vibration and position tracking control of a smart structure using shape memory alloy(SMA) actuators. A governing equation of motion of the proposed structure is obtained via Hamilton's principle. The dynamic characteristics of the SMA actuator are experimentally identified and incorporated with the governing equation to furnish a control system model. Subsequently, a sliding mode controller which has inherent robustness to external disturbances is formulated on the basis of the sliding mode condition. The controller is then implemented for the control of forced vibration with relatively large tip displacement, and also for the position tracking control of desired trajectories with low-frequency sine and square waves.

Key Words : Shape Memory Alloy (형상기억합금), Forced Vibration Control (강제 진동 제어), Position Tracking Control (위치 추적제어), Sliding Mode Control (슬라이딩 모드 제어)

1. 서론

최근 컴퓨터 등 첨단 기술의 발달은 재료의 발달과 더불어 구조물 시스템의 경량화와 소형화의 구현을 가능하게 하였고, 현대 산업발전에 많은 공헌을 해 오고 있다. 특히, 정밀산업 및 항공우주 산업분야에서 구조물의 경량화와 소형화 기술은 빼놓을 수 없는 중요한 연구 과제 중의 하나이다. 이러한 기술의 일환으로 이전의 금속 재료에 비해 무게 대 강성비와 강도비가 우수한 여러 가지 복합재료의 사용이 날로 증가되고 있다. 그러나 이러한 수

동적 구조물(passive structure)은 내부의 하중 조건 변화 혹은 외부의 환경 조건 변화 등에 매우 민감하며, 구조물과 연계된 시스템의 갑작스런 파괴를 초래할 수 있다.

이러한 단점을 혁신적으로 개선하기 위해 최근 들어 유연 구조물과 연계하여 소위 지능 재료(smart or intelligent material)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁾⁽²⁾. 지능 재료는 감지 및 작동 능력이 있어 외부 자극에 적절히 대응할 수 있으며, 마이크로 프로세서와 결합되어 지능적으로 특정한 기능을 선택하고 실행할 수 있는 특성을 가진다. 따라서, 이러한 지능 재료를 장착한 스

* 삼성중공업(주)
** 인하대학교 기계공학과(정희원)

마트구조물(smart structure)은 그 자체가 두뇌계, 신경계 및 근육계를 형성하여 구조물의 내부 및 외부에서 일어나는 모든 현상을 감지할 수 있으며, 환경 변화에 따라 적절한 제어기와 연계된 작동기의 작용으로 항상 최적의 성능 상태를 유지할 수 있다.

현재 이러한 지능 재료 특성을 갖고 있는 매체로는 전기유동유체(electro-rheological fluid: ERF), 압전 재료(piezoelectric material: PM), 형상기억합금(shape memory alloy: SMA) 등이 있다. ERF는 전기장(electric field)의 공급으로 액체 혹은 고체 상태로의 상변화가 가능하여 유연 구조물 시스템의 감쇠 및 강성 등을 조절(tuning)할 수 있으나, 매우 높은 전압 공급을 필요로 한다⁽³⁾. PM은 극전화 현상을 통해 매우 빠른 반응 속도로 감지기 및 작동기의 기능을 발휘할 수 있으나, 제어력의 부족으로 큰 모멘트와 변위에 대한 진동제어에는 적용할 수 없다⁽⁴⁾. 이에 반하여 SMA는 비교적 적은 전력 소모로 큰 모멘트와 변위를 제어할 수 있는 장점이 있다^{(5)~(12)}.

SMA란 일정 온도하에서 변형시킨 재료를 특정 천이 온도(transition temperature) 이상으로 가열하면 원래의 형상으로 되돌아가는 성질을 가진 재료를 말하며, 이러한 성질을 형상기억효과(shape memory effect)라 한다⁽⁵⁾. 형상기억효과는 1951년 미국 일리노이 대학의 Read 교수팀이 Au-Cd 합금과 In-Ti 합금에서 발견한 것이 최초라 할 수 있으나 당시에는 별로 주목을 받지 못하였다. 그 후 1963년 미 해군 병기 연구소(Naval Ordnance)의 Buehler 박사가 이끄는 연구진에 의해서 Ni-Ti 합금이 뛰어난 형상기억성을 가짐이 발견된 후, 학계 및 산업계의 큰 관심을 일으켜 SMA에 대한 연구가 활발히 수행되기 시작하였으며, Nickel-Titanium Naval Ordnance Lab.의 약자를 따서 니티놀(nitinol)이라 불려지고 있다⁽⁶⁾. 이후 많은 관심과 투자에 힘입어 현재는 여러 산업 분야에서 응용 개발이 추진되고 있다. 예를 들어 각종 의료 기기, 파이프 커플링, 건물 파괴, 암반 분쇄, 안경테 등에 이르기까지 다양한 분야에서 실용화되고 있다.

그러나, SMA가 본격적인 지능 재료로서 유연 구조물 시스템과 연계되어 감지기 및 작동기로 사용되기 시작한 것은 1980년대 이후인 최근의 일이며, 1990년대 이후 능동적(active)인 진동제어 분야에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다. Saunders⁽⁸⁾ 등에 의하여 정적 변형 및 진동 등 구조적 응답을 제어하기 위한 SMA-섬유 복합재

료 보 등이 제안되었고, Anders⁽⁹⁾ 등은 음향의 전파를 제어하기 위한 SMA 복합재료 보를 제안하였다. 또한 Baz⁽¹⁰⁾ 등은 형상기억합금을 구조물의 표면에 부착하여 on-off 제어를 적용, 유연보의 진동제어에 적용할 수 있음을 발표하였다. 국내에서도 이승우 등⁽¹¹⁾이 SMA 작동기를 사용하여 LQG/LTR 강건 제어를 적용, 인공위성 태양 전지판의 진동제어에 적용할 수 있음을 입증한 바 있고, 최승복⁽¹²⁾ 등은 유연보의 자유 진동(free vibration)에 대하여 일정진폭 제어기, 비례진폭 제어기, 슬라이딩 모드 제어기 등을 적용하여 형상기억합금의 뛰어난 진동제어 효과를 입증한 바 있다.

형상기억합금 작동기는 큰 모멘트와 변위를 제어할 수 있으며, 소음이 적고 구동부가 간단하여 작동기 자체의 무게를 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 작동기 자체의 상변화에 의해 구동되므로 마찰이나 이에 수반되는 윤활, 실링(sealing) 등에 대한 문제가 없으며, 작동 메커니즘을 간단하게 구성할 수 있고 분포형 작동기로서 부드러운 동작을 실현할 수 있다. 따라서 진공상태에서의 실링이 문제가 되는 항공우주분야 또는 로봇팔의 그리퍼(gripper) 등에 매우 효과적으로 적용될 수 있다. 또한 유연 구조물에서 발생하는 구조물의 유해한 진동 제어나 의료 기기 등의 목적으로 사용되는 마이크로 유연 로봇팔의 제어에 있어 재래의 구동 방식으로는 극히 좁은 공간에서의 사용이 불가능하고, 경량화하기 어려우므로 작동기 자체만으로 구동할 수 있는 형상기억합금 작동기의 사용이 매우 적합하다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 외부 자유진동제어⁽¹²⁾에 대한 확장연구로서 가진원을 포함한 유연 구조물에 형상기억합금 작동기를 장착하여 강제 진동을 능동적으로 제어함으로써, 형상기억합금이 외부 가진을 받는 시스템에서도 우수한 제어 효과가 있음을 입증하고자 한다. 또한, 유연 구조물의 선단위치 추적제어(tip position tracking control)를 수행하여 유연 로봇팔에 부착되는 그리퍼의 위치 추적제어에 대한 적용 가능성도 제시하고자 한다. 이를 위하여 유연 구조물 시스템의 동적 지배 방정식을 유도하고, 제어기 설계를 위해 주 진동모드인 1차 모드를 고려하여 상태 방정식을 도출하였다. 상태 제어 시스템 모델로부터 슬라이딩 모드 제어를 설계하였으며, 제안된 제어기의 실험적 구현을 통해 강제진동 및 추적제어 성능을 고찰하고 실제 시스템에 대한 적용 가능성을 제시하였다.

2. 동적 모델링

본 연구에서 고려된 SMA 작동기가 장착된 유연 구조물 시스템은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 그림에서 보듯이 길이가 L 이고, 선단질량을 가진 유연 구조물이 x - y 평면상에서 진동하며, y 방향의 진동을 제어하기 위하여 2개의 SMA 작동기를 보의 중립축에 대하여 고정단으로부터 L_1 의 위치에 대칭으로 설치하였다.

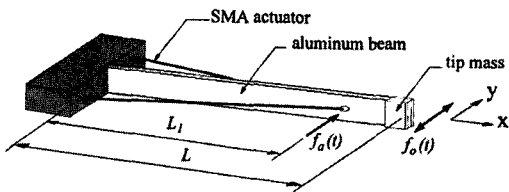


Fig.1 A smart flexible structure with SMA actuators

주어진 시스템을 외팔보로 가정하고, 형상기억합금 작동기에 의한 제어력이 L_1 의 위치에 작용한다고 고려하면 시스템의 운동에너지와 위치에너지를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} \left\{ \int_0^L \rho A \left(\frac{\partial y(x,t)}{\partial t} \right)^2 dx + m \left(\frac{\partial y(x,t)}{\partial t} \right)^2 \Big|_{x=L} \right\}$$

$$V = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{1}{EI} \left\{ EI \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} + f_a(t) \delta(x - L_1) \right\}^2 dx \quad (1)$$

여기서 ρ 와 A 는 각각 유연보의 밀도와 단면적을 나타내며, $f_a(t)$ 는 형상기억합금 작동기의 유효 제어력을, $\delta(x - L_1)$ 은 작동기의 힘이 고정단으로부터 L_1 의 위치에서 작용함을 각각 나타낸 것이다. 그리고, m 은 선단질량을 나타낸다. 한편, 모델링 과정에서 탄성계수 E 와 관성모멘트 I 는 Baz 등이 사용한 것과 같이 중립축에 대해 유효굽힘강성을 사용하였다. 즉, 유연보와 SMA 작동기의 탄성계수와 관성 모멘트를 각각 합하여 유효값을 사용하였으며 ($EI = E_1 I_1 + E_2 I_2$, 첨자 1: 알루미늄 빔, 첨자 2: SMA 작동기), 작동기의 ρ 와 A 값은 매우 작으므로 무시하였다. 또한 열팽창에 의하여 발생하는 힘은 SMA 작동기의 상변화에 의한 발생력에 비하여 매우 작으므로 무시하였다. 식 (1)의 시스템 에너지와 외부 가진력을 해

밀톤의 원리에 적용하면 다음과 같은 지배 방정식과 경계 조건들을 얻을 수 있다.

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} - f_o(t) \delta(x - L) = 0 \quad (2)$$

$$y(x,t) \Big|_{x=0} = 0$$

$$\frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$$

$$EI \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \Big|_{x=L_1} = -f_a(t) \delta(x - L_1)$$

$$EI \frac{\partial^3 y(x,t)}{\partial x^3} \Big|_{x=L} = m \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \Big|_{x=L} \quad (3)$$

여기서 $f_o(t)$ 는 유연 구조물의 끝단에서 작용하는 외부 가진력을 나타낸 것으로 일정한 값을 가지며 그 크기가 제한되어 있다.

식 (2)로 표현되는 지배 방정식은 편미분 형태이므로 제어기 설계를 위하여 유한개의 진동모드로 이루어진 시스템 모델을 구성해야 한다. 이를 위해 모드 해석을 수행하고, 감쇠항을 첨가하면 다음과 같은 상미분 형태의 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{q}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \left(1 / \int_0^L \Phi_i^2(x) \rho A dx \right) \cdot \left(f_o(t) - f_a(t) \cdot \int_0^L \frac{\partial^2 \Phi_i(x)}{\partial x^2} dx \right) \quad (4)$$

여기서 ζ_i 와 ω_i 는 각각 i 번째 진동모드의 감쇠비와 고유진동수를 나타내며, $q_i(t)$ 는 i 번째 모드의 일반화된 모달좌표를 나타낸다. 식 (4)의 우변은 유연 구조물에 작용하는 외력과 형상기억합금 작동기가 발생하는 제어력을 나타낸 것이며, $\Phi_i(x)$ 는 i 번째 모드의 형상 함수이다.

형상기억합금 작동기의 발생력과 입력 전류 사이의 관계는 일반적으로 실험을 통하여 구할 수 있다. Fig. 2에 본 연구에서 사용한 형상기억합금 작동기의 발생력과 입력 전류와의 관계를 나타내었다. 작동기의 발생력은 공급되는 전류에 따라 지수적으로 증가, 감소하며 이는 다음과 같은 시간의 함수로 표현할 수 있다.

$$f_a(t) = \begin{cases} 0 & , 0 < t \leq t_1 \\ f_{a\max}[1 - e^{-(t-t_1)/\tau_h}] & , t_1 < t \leq t_2 \\ f_{a\max} & , t_2 < t \leq t_3 \\ f_{a\max}[e^{-(t-t_3)/\tau_c}] & , t_3 < t \leq t_4 \\ 0 & , t > t_4 \end{cases} \quad (5)$$

여기서 $f_{a\max}$ 는 작동기가 발생시킬 수 있는 최대힘을 나타내며, τ_h 와 τ_c 는 각각 가열시 및 냉각시의 시상수 (time constant)를 나타낸다. 또한 t_1, t_4 는 각각 제어 입력이 시작되는 시간과 끝나는 시간을, t_2, t_3 는 제어 입력이 계속 유지되는 구간을 나타낸다. 이러한 SMA 작동기의 지배변수들은 입력되는 전류크기에 의해 달라지며, 제어기 구현전에 부가된 실험조건하에서 반드시 파악되어야 한다. 전류 공급시 작동기의 동적 거동을 나타내는 것은 식 (5)의 두 번째 경우로 생각할 수 있으며, 이는 1차 선형 모델로 간주할 수 있다. 다시말하여, 입력 전류와 발생력 사이의 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_h \frac{df_a(t)}{dt} + f_a(t) = k_i i(t) \quad (6)$$

여기서 k_i 는 입력전류 $i(t)$ 의 영향계수이다.

본 연구에서는 Baz 등⁽¹⁰⁾이 수행한 바와 같이 주 진동 모드인 1차 굽힘모드(bending mode)에 대하여만 제어를 수행하였다. 이 경우 제어의 대상이 되는 주파수 범위 (4.14Hz) 내에서는 SMA 작동기의 반응 속도(0.04sec)가 현저히 빠르므로 식 (6)에서 작동기의 시상수 τ_h 에 의한 영향은 거의 무시할 수 있다. 따라서, 식 (4)와 (5), 그리고 (6)으로부터 다음과 같은 제 1차 모드 제어 시스템을 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1(t) + 2\zeta_1\omega_1\dot{q}_1(t) + \omega_1^2q_1(t) \\ = \left(1/\int_0^L \Phi_1^2(x)\rho A dx\right) \cdot \\ \left(f_0(t) - \hat{k}_i i(t) \int_0^L \frac{\partial^2 \Phi_1(x)}{\partial x^2} dx\right) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 \hat{k}_i 는 제 1차 진동 모드에 대한 변형제어입력 영향계수이다.

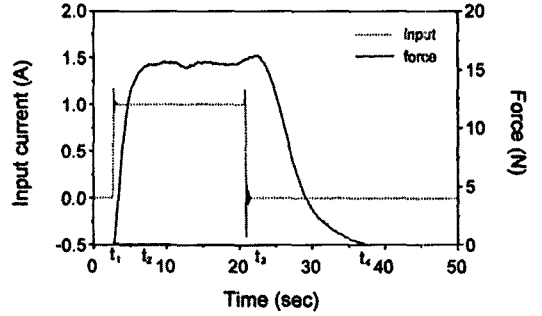


Fig.2 Characteristics of the SMA actuator

3. 제어기 설계

3.1 강제 진동 제어

본 연구에서는 변수 변화 및 외란에 대해 강인성을 지닌 슬라이딩 모드 제어기를 구성하였고, 강제진동을 발생시키기 위한 외부 가진을 일종의 일정한 외란으로 가정하였다. 슬라이딩 모드는 알맞은 불연속 제어기를 사용함으로써 얻을 수 있으며, 이를 위하여 앞에서 제안된 구조물의 동적 지배 방정식을 다음과 같은 상태 공간 시스템으로 표현한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= -\omega_1^2 x_1(t) - 2\zeta_1\omega_1 x_2(t) + bu(t) + df_0(t) \\ x(t_0) &= x_0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $[x_1(t), x_2(t)]^T = [q_1(t), \dot{q}_1(t)]^T$, $u(t) = i(t)$,

$$b = -(\hat{k}_i / \int_0^L \Phi_1^2(x)\rho A dx) \cdot \left(\int_0^L \frac{\partial^2 \Phi_1(x)}{\partial x^2} dx\right), \quad d = 1 / \left(\int_0^L \Phi_1^2(x)\rho A dx\right)$$

를 각각 나타내며, x_0 는 초기시간 t_0 에서의 초기 조건을 나타낸다.

본 시스템은 형상기억합금 작동기만이 제어 입력으로 작용하므로 다음과 같은 단일 슬라이딩 평면을 설정할 수 있다.

$$s(x(t)) = cx_1(t) + x_2(t), \quad c > 0 \quad (9)$$

여기서 c 는 슬라이딩 평면계수를 나타낸다. 슬라이딩 모드 제어기의 설계를 위해 먼저 s 의 시간에 대한 미분치를 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(x(t)) &= c\dot{x}_1(t) + \dot{x}_2(t) \\ &= cx_2(t) - \omega_1^2 x_1(t) - 2\zeta_1\omega_1 x_2(t) \\ &\quad + df_0(t) + bu(t) \end{aligned} \quad (10)$$

평면 $s(x(t)) = 0$ 을 기준으로 양방향으로의 상태제어가 모두 이 평면을 향하게 될 때 슬라이딩 모드 운동이 발생하게 된다. 슬라이딩 평면상에서 이러한 슬라이딩 모드가 발생할 조건, 즉 슬라이딩 모드 존재조건은 다음과 같다.

$$s(x(t))\dot{s}(x(t)) < 0 \quad (11)$$

식 (8)과 (9), (10)을 이용하여 등가제어입력을 결정하고, 슬라이딩 존재조건 (11)을 만족하도록 불연속 제어기 $u(t)$ 를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$u(t) = -(1/b)[-\omega_1^2 x_1(t) + (c - 2\xi_1 \omega_1)x_2(t) + k \cdot \text{sgn}(s)], \quad k > d | f_0(t) | \quad (12)$$

그러나, 이러한 불연속 제어기의 실험적 구현시 채터링(chattering)의 증가로 인한 역진동 현상이 발생할 가능성이 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 제어기 (12)의 부호함수 대신에 다음과 같은 포화함수를 사용한 제어기를 구현할 수 있다.⁽¹³⁾

$$u(t) = -(1/b)[-\omega_1^2 x_1(t) + (c - 2\xi_1 \omega_1)x_2(t) + k \cdot \text{sat}(s)], \quad k > d | f_0(t) | \quad (13)$$

여기서,

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} s/\varepsilon & : |s| \leq \varepsilon \\ \text{sgn}(s) & : |s| > \varepsilon \end{cases}$$

상기식에서 ε 은 슬라이딩 평면의 경계층 두께를 나타낸다.

3.2 위치 추적 제어

앞절에서 유도된 상태공간 시스템 모델 (8)로부터 유연 구조물의 선단위치에 대한 추적제어를 수행하기 위한 제어기를 설계한다. 임의의 초기 위치로부터 선단위치를 추적하기 위해서는 추적오차를 영(zero)으로 보내야 하므로 먼저 선단위치오차를 다음과 같이 정의한다.

$$e(t) = y_a(t) - y_d(t) = \Phi_1(L)x_1(t) - y_d(t) \quad (14)$$

여기서 $y_a(t)$ 는 실제 선단위치를, $y_d(t)$ 는 요구 선단위치(desired tip position)를 각각 나타내며, $\Phi_1(L)$

은 $x = L$ 에서의 1차 모드 형상함수이다. 슬라이딩 모드 제어기를 설계하기 위하여 오차의 미분치를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{y}_a(t) - \dot{y}_d(t) \\ &= \Phi_1(L)x_2(t) - \dot{y}_d(t) \end{aligned} \quad (15)$$

제어 입력은 형상기억합금 작동기만으로 주어지므로 앞절에서와 같이 단일 슬라이딩 평면을 오차 상태공간에서 설정한다.

$$\begin{aligned} s(e(t)) &= ce(t) + \dot{e}(t) \\ &= c(\Phi_1(L)x_1(t) - y_d(t)) \\ &\quad + (\Phi_1(L)x_2(t) - \dot{y}_d(t)) \end{aligned} \quad (16)$$

또한 s 의 시간에 대한 미분치는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(e(t)) &= c(\Phi_1(L)x_2(t) - \dot{y}_d(t)) + (\Phi_1(L)x_2(t) - \ddot{y}_d(t)) \\ &= c(\Phi(L)x_2(t) - \dot{y}_d(t)) \\ &\quad + \Phi_1(L)[-\omega_1^2 x_1(t) - 2\xi_1 \omega_1 x_2(t) \\ &\quad + bu(t) + df_0(t)] - \ddot{y}_d(t) \end{aligned} \quad (17)$$

따라서 슬라이딩 모드 존재조건 (11)을 만족시키는 불연속 제어기 $u(t)$ 를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} u(t) &= -(1/b)[c(\Phi_1(L)x_2(t) - \dot{y}_d(t)) \\ &\quad + \{\Phi_1(L)(-\omega_1^2 x_1(t) - 2\xi_1 \omega_1 x_2(t)) - \ddot{y}_d(t)\} \\ &\quad + k \cdot \text{sgn}(s)], \quad k > d | \Phi_1(L)f_0(t) | \end{aligned} \quad (18)$$

앞절에서와 마찬가지로 채터링을 제거하기 위하여 포화함수를 사용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(t) &= -(1/b)[c(\Phi_1(L)x_2(t) - \dot{y}_d(t)) \\ &\quad + \{\Phi_1(L)(-\omega_1^2 x_1(t) - 2\xi_1 \omega_1 x_2(t)) - \ddot{y}_d(t)\} \\ &\quad + k \cdot \text{sat}(s)], \quad k > d | \Phi_1(L)f_0(t) | \end{aligned} \quad (19)$$

4. 실험 장치 및 방법

Fig. 3은 강제 진동에 대한 진동제어와 선단위치의 추적제어 실험을 위하여 구성한 실험 장치이다. 가진 방법으로서는 직류 전원 공급기로 전원을 공급하여 직류 전동기에 편심되어 부착된 자석을 회전시켜 유연 구조물의 선단

을 가진시키는 방법을 사용하였다. 이를 이용하면 끝단에서의 경계조건들을 정확하게 만족시킬 수 있는 장점이 있다. 가진은 최대 변위 $\pm 15\text{mm}$, 가진 주파수는 4.14Hz 가 되게 조절하였다. 유연 외팔보의 길이 400mm , 폭 23mm , 두께 1.18mm , 탄성계수 70GPa 을 갖는 알루미늄 재질을 사용하였다. 가진원으로 자장을 이용하므로 질량 12.3g 의 철재를 유연 구조물의 끝단 양쪽에 선단 질량으로 부착하였다. 이는 실제 유연 로봇팔의 선단 위치 제어에 응용함에 있어 그리퍼의 자중 또는 가반중량을 고려하는 효과와 같다.

또한 본 실험에 사용된 형상기억합금 작동기는 길이 370mm , 직경 0.76mm , 마르텐사이트 상에서의 탄성계수 42GPa 이며, 36°C 의 천이 온도를 갖는다. 형상기억효과를 얻기 위하여 5%의 초기소성 스트레인을 부가하였다. 작동기는 유연 구조물의 고정단으로부터 360mm 의 위치에 고정시켰으며, 양쪽 장력의 편심을 막기 위하여 풀리(pully)를 이용한 길이 조절 장치를 부착하였다. 선단의 변위는 비접촉식 변위센서(noncontacting proximator)를 통하여 측정하였으며, 이 신호가 저주파수 필터(low-pass filter)를 통하여 신호 분석기에 저장된다. 또한 이 신호는 A/D 컨버터를 거쳐 제어기로 보내지며, 제어기에서는 변위 정보에 따라 제어력을 입력할 작동기의 선정 및 전류의 크기를 결정하여 이 신호를 D/A 컨버터로 보낸다. D/A 컨버터로부터 전류 공급기로 출력 전류의 크기에 해당하는 전압이 공급되며, 릴레이 스위치를 동작시켜 제어력을 형상기억합금 작동기로 보내게 된다. A/D 및 D/A 컨버터는 12bit의 데이터를 처리할 수 있는 DAS-20을 사용하였으며, 제어기는 IBM PC 486을 이용하였고, 디지털 컴퓨터의 샘플링에 의한 오차를 최소화하고자 제어기 내의 모든 샘플링 속도는 실시간 제어가 가능한 범위내에서 충분히 높은 값(1000Hz)으로 설정하였다.

위치 추적제어 실험을 위하여 추적제어의 요구 궤적을 동적신호분석기(dynamic signal analyzer)로부터 사인파(sinusoidal wave)와 사각파(square wave)를 발생시켜 사용하였으며, Fig. 3의 실험 장치에서 가진부를 제외하였다. 발생된 요구 궤적은 신호분석기에 저장되는 동시에 A/D 컨버터를 통하여 제어기로 보내진다. 또한 선단의 변위는 비접촉식 변위센서에 의해 측정되어 역시 제어기로 보내진다. 제어기에서는 이 궤적에 따라 추적 오차를 영으로 하는 알맞은 제어 입력을 발생시킨다. 이 신호가 다시 D/A 컨버터를 통하여 제어 전류에 해당하는

전압을 공급하게 되며, 릴레이 스위치를 통하여 알맞은 제어력을 작동기로 공급하게 된다. Table 1에 본 실험에서 사용된 알루미늄 보와 SMA 작동기의 물성치를 각각 나타내었다.

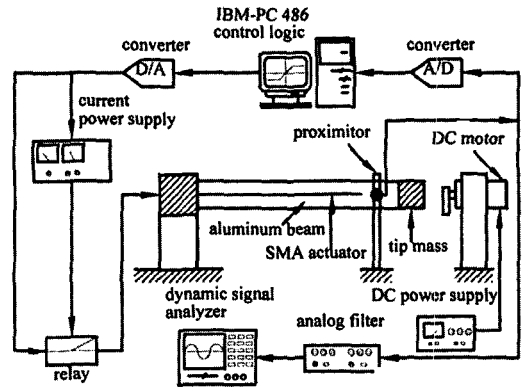


Fig. 3 Experimental apparatus for vibration and position tracking control

Table 1. Mechanical properties of the aluminum beam and SMA actuator

Aluminum Beam	
Young's modulus	70 GPa
density	2890 kg/m ³
thickness	1.18 mm
width	23 mm
length	400 mm
tip mass	12.3 g
SMA Actuator	
Young's modulus	42 GPa
density	2340 kg/m ³
diameter	0.76 mm
length	370 mm
transition temperature	36 °C
prestrain	5 %

5. 제어결과 및 고찰

본 연구에서는 최적의 제어성능을 얻기 위하여 슬라이딩 모드 제어기의 주요 변수인 불연속 제어이득 k 와 슬라이딩 서피스의 기울기 c 를 최적 계수 결정법⁽¹³⁾에 의하여 구하고, 이를 시뮬레이션과 실험에 공통적으로 적용하였다. 또한 채터링 현상을 방지하고자 포화함수를 사용하였

으며, 앞에서 구한 최적의 제어이득 k 값 0.7과 c 값 6.9에 대하여 경계층 두께 ϵ 값 0.01을 선택하여 사용하였다. Fig. 4(a)는 최대 진폭 15mm, 가진 주파수 4.14Hz로 유연 구조물을 가진하였을 때의 강제 진동제어에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 결과로부터 약 2.5초 후에는 제진이 거의 완료되는 것을 볼 수 있으며, 슬라이딩 모드 제어기의 작용으로 슬라이딩 평면에 대하여 대칭적인 제어입력이 안정적으로 공급되어 제어가 우수하게 이루어짐을 알 수 있다. 제어입력은 역진동을 발생시키지 않는 범위를 실험적으로 결정하여 최대 입력이 1A가 되도록 하였으며, 이 때 슬라이딩 평면도 안정적으로 수렴함을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 동일한 조건 하에서의 실험 결과를 나타낸다. 시뮬레이션에서와 마찬가지로 약 2.5초 후에 제진이 이루어지며, 안정적인 제어가 수행됨을 볼 수 있다. 또한 포화함수의 사용으로 채터링 현상도 거의 제거되었음을 알 수 있다.

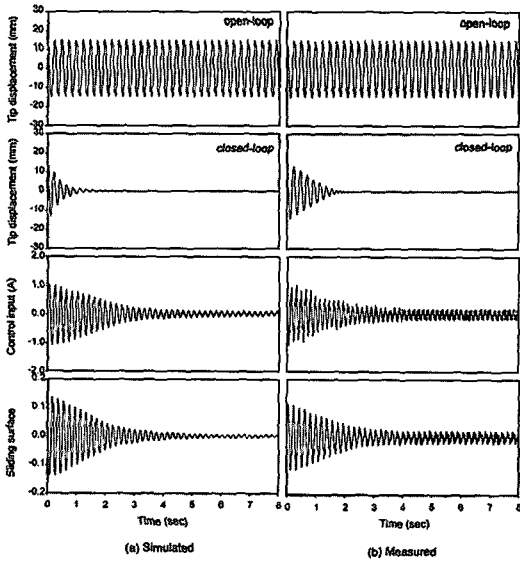


Fig.4 Control responses of the forced vibration

Fig. 5는 0.73Hz의 정현파를 요구선단계적으로 설정하여 최대변위 10mm의 선단추적제어를 수행한 시뮬레이션 및 실험결과이다. 모든 제어변수 값은 강제진동제어의 경우와 동일하게 사용하였다. 제어초기에는 약 3mm 정도의 추적오차가 발생하나 약 1.2초 이후에는 추적이 매우 양호하게 이루어짐을 알 수 있다. 또한, 추적오차 궤적으로부터 선단변위가 최대가 되는 정점 부근에서 주기적으로 미소한 오차가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는

냉각시 SMA 작동기의 반응속도가 급격한 운동방향 전환에 필요한 속도를 충분히 따라가지 못하였기 때문이다. 다시말하여, 한 쪽 작동기의 제어력이 완전히 제거되기 전에 다른 쪽의 작동기에 의해 반대 방향의 선단운동을 위한 제어력이 공급되기 때문이다.

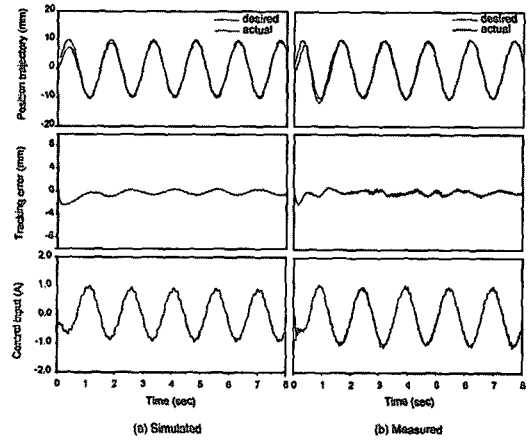


Fig. 5 Tracking control responses for the 0.73Hz sinusoidal position trajectory

Fig. 6(a)는 0.375Hz의 사각파를 요구계적으로 설정하였을 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 사인파에서의 경우와는 달리 급격한 제어력의 변화로 인하여 방향이 변하는 부분에서 약간의 오버슈트가 발생함을 볼 수 있다. Fig. 6(b)는 동일한 조건 하에서의 실험결과를 나타낸다. 시뮬레이션에서와 마찬가지로 추적이 잘 이루어지고

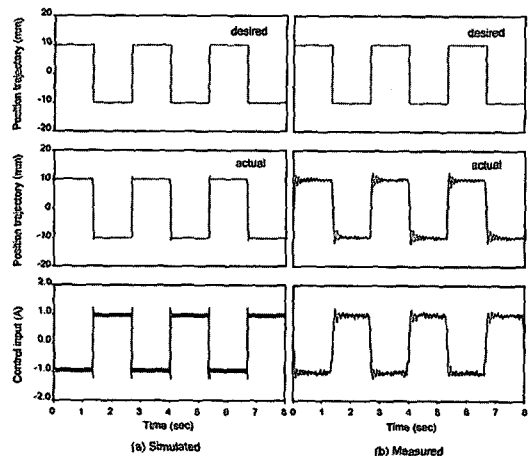


Fig. 6 Tracking control responses for the 0.375Hz square position trajectory

있다. 이러한 추적제어결과는 SMA 작동기가 비교적 넓은 작업범위가 필요한 로봇그리퍼 등에 유용하게 적용될 수 있는 높은 가능성을 제시한다.

Fig. 7은 SMA 작동기의 느린 반응속도가 진동제어보다는 정확한 제어 입력을 요하는 추적제어에서 더 큰 영향을 미치고 있음을 보여준다. 즉, 강제진동제어에서는 4.14Hz로 가진진 진동이 훌륭히 제어된 반면에, 위치추적제어에서는 1Hz 정현파 요구궤적에서도 SMA 작동기가 제 성능을 발휘하지 못하고 있다. 이는 반대쪽 SMA 작동기의 냉각지연으로 인한 잔류 힘에 의해 정확한 제어 입력이 들어가지 못하였기 때문이며, 강제진동제어에서는 이러한 냉각지연이 오히려 과도제어를 보상하는 쪽으로 작용하였다. 따라서 SMA 작동기를 이용한 로봇 그리퍼를 구성하여 정밀한 추적제어를 수행하고자 할 때는, 사용되는 SMA의 동적 특성과 요구궤적의 주파수 범위 관계를 주의 깊게 고려해야 한다.

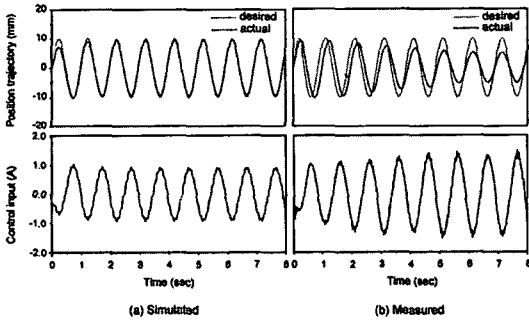


Fig. 7 Tracking control responses for the 1Hz sinusoidal position trajectory

6. 결 론

본 연구에서는 유연 스마트 구조물의 능동적인 강제 진동제어 및 선단의 위치 추적제어를 수행하기 위하여 형상 기억합금 작동기를 사용하였다. 형상기억합금 작동기의 동적 특성을 파악하고 이와 연계된 유연 구조물 시스템의 동적 지배 방정식을 도출하였다. 효과적인 제어성능을 얻기 위하여 외란과 변수변화에 대해 강건한 특성을 갖고 있는 슬라이딩모드 제어를 설계하였다. 제안된 제어를 적용하여 강제 진동제어 및 선단 위치 추적제어에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 또한 이를 실험적으로 구현하여 시뮬레이션의 결과와 비교·고찰하였다. 제

어 결과로부터 형상기억합금 작동기가 비교적 낮은 주파수 범위 내에서 큰 선단변위의 강제 진동 및 추적제어에 우수한 제어 성능이 발휘됨을 입증하였다. 향후 실제 시스템에 적용함에 있어 보다 정확하고 빠른 추적제어를 위해서는 냉각시의 영향을 최소화 하기 위하여 양방향 SMA에 대한 연구와 강제 냉각방식에 대한 연구가 심도 있게 수행되어야 할 것이며, 외란이나 변수변화에 대하여 다양한 실험도 수행되어야 할 것이다. 나아가서 작동기의 설치 방법이나 위치, 제어기의 종류, 제어입력 방법 등에 있어 최적의 조건을 찾기 위한 보다 광범위한 연구도 필요할 것이다.

참 고 문 헌

1. M. V. Gandhi and B. S. Thompson, 1992, "Smart Materials and Structures", Chapman & Hall.
2. 최승복, 1992, "지능 복합재료의 구성과 특성", 한국항공우주학회지, 제 20권, 제 4호, pp. 117-129.
3. S. B. Choi, Y. K. Park, and M. S. Suh, 1994, "Elastodynamic Characteristics of Hollow Cantilevered Beams Containing an Electro-Rheological Fluid : Experimental Results", AIAA Journal, Vol. 32, No. 2, pp. 438-440.
4. H. S. Tzou and C. I. Tseng, 1990, "Distributed Piezoelectric Sensor/Actuator Design for Dynamic Measurement/Control of Distributed Parameter Systems : A Piezoelectric Finite Element Approach", Journal of Sound and Vibration, Vol. 138, No. 1, pp. 17-34.
5. C. A. Rogers, 1990, "Active Vibration and Structural Acoustic Control of Shape Memory Alloy Hybrid Composites : Experimental Results", J. of Acoustic Soc. Am. Vol. 88, No. 6, pp.2803-2811.
6. C. M. Jackson, H. J. Wagner, and R. J. Wasilewski, 1972, "55-Nitinol-the Alloy with a Memory : Its Physical Metallurgy, Properties, and Applications", NASA-SP 5110.
7. C. M. Wayman, 1980, 日本金屬學會會報, Vol.

- 19, No. 5, pp. 323-332.
8. W. R. Saunders, H. H. Robertshaw, C. A. Rogers, 1990, "Experimental Studies of Structural Acoustic Control for a Shape Memory Alloy Composite Beam", AIAA Paper 90-1090-CP, pp. 2274-2282.
9. W. S. Anders, C. A. Rogers and C. R. Fuller, 1991, "Control of Sound Radiation from Shape Memory Alloy Hybrid Composite Panels by Adaptive Resonance Tuning", AIAA, 1163-CP, pp. 159-168.
10. A. Baz, K. Imam and J. McCoy, 1990, "Active Vibration Control of Flexible Beams Using Shape Memory Actuators", Journal of Sound and Vibration, Vol.140, No. 3, pp.437-456.
11. 이승우, L. R. Koval, 김재명, 1995, "형상기억합금 액추에이터를 이용한 강건한 진동제어", 대한기계학회 논문집, 제 19권, 제 1호, pp. 263-270.
12. 최승복, 정재천, 황인수, 1995, "SMA 작동기를 이용한 유연 외팔보의 진동제어", 한국정밀공학회지, 제 12권, 제 9호, pp. 167-174.
13. S. B. Choi and D. W. Park, 1994, "Moving Sliding Surfaces for Fast Tracking Control of Second-Order Dynamical Systems", ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 116, No. 1, pp. 154-158.