

# 형상기억합금(SMA)을 이용한 지능구조물 시스템

최 승 복 · 정 재 천 · 박 노 준

(인하대학교 기계공학과)

## 1. 머리 말

최근 컴퓨터 등 첨단 기술의 발달은 재료의 발달과 더불어 구조물 시스템의 경량화와 소형화의 구현을 가능하게 하였고, 현대 산업발전에 많은 공헌을 해 오고 있다. 특히 항공우주 산업분야에서 구조물의 경량화와 소형화 기술은 빼놓을 수 없는 중요한 연구 과제 중의 하나이다. 이러한 기술의 일환으로 이전의 금속 재질에 비해 무게 대 강성 비와 강도 비가 우수한 여러 가지 복합재료의 사용이 날로 증가되고 있다. 그러나 이러한 수동적 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 소위 지능 재료(intelligent materials)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지능 재료는 감지 및 작동 분야에 있어 외부 자극에 적절히 대응할 수 있으며, 마이크로 프로세서와 결합되어 지능적으로 특정한 기능을 선택하고 실행할 수 있는 능력을 가진다. 따라서, 이러한 지능 재료를 장착한 지능 구조물은 그 자체가 두 뇌 계 (brain system-micro-

processor), 신경계(nerve system-sensor) 및 근육계(muscle system-structure and actuator)를 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<sup>(1)</sup>.

현재 이러한 지능 재료 특성을 갖고 있는 매체로는 전기유동유체(ERF; electro-rheological fluids), 압전 재료(PM; piezoelectric materials), 형상기억합금(SMA; shape memory alloy) 등이 있다. ERF는 전기장(electric field)의 공급으로 액체 혹은 고체 상태로의 상변화가 가능하여 유연 구조물 시스템의 감쇠 및 강성 등을 조율(tuning)할 수 있으나 매우 높은 전압 공급을 필요로 한다<sup>(2)</sup>. 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<sup>(3)</sup> 이에 반하여 SMA는 비교적 적은 전력 소모로 큰 모멘트와 변위를 제어할 수 있는 장점이 있다<sup>(4~11)</sup>.

SMA란 일정 온도하에서 변형시킨 재료를 특정 천이 온도(transition temperature) 이상으로 가열하면 원래의 형상으로 되돌아가는

성질을 가진 재료를 말하며, 이러한 성질을 형상기억효과(SME; shape memory effect)라 한다. SME는 1951년 미국 일리노이 대학의 Read 교수팀이 An-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<sup>(4)</sup>. 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 실용되고 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. 최근 Rogers 등에 의하여 정

적 변형, 진동 등 구조적 응답을 제어하기 위한 SMA-섬유 복합재료 (SMA wire embedded composite) 빔 등이 제안되었고<sup>(5)</sup>, Baz 등이 SMA를 구조물의 표면에 부착하여 on-off 제어를 적용, 유연빔의 진동제어에 적용할 수 있음을 발표하였다<sup>(6)</sup>. 또한 국내에서도 유연빔의 과도 진동에 대하여 on-off 제어 알고리즘을 적용하여 SMA의 뛰어난 진동제어 효과를 입증한 바 있다.<sup>(7)</sup>

SMA 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 없다. 따라서 항공우주분야 또는 로봇팔의 그리퍼(gripper) 등에 매우 효과적으로 적용될 수 있다. 예를 들어 경량의 SMA 와이어 작동기를 사용하여 비교적 큰 제어력이 필요한 인공위성에 부착되어 있는 태양전지판의 진동을 효과적으로 제어할 수 있다<sup>(8)</sup>. 또한 유연 구조물에서 발생하는 구조물의 유해한 진동 제어나 의도기기 등의 목적으로 사용되는 마이크로 유연 로봇팔의 제어에 있어 재래의 구동 방식으로는 극히 좁은 공간에서의 사용이 불가능하고, 경량화하기 어려우므로 작동기 자체만으로 구동할 수 있는 SMA 작동기의 사용이 매우 적합하다고 할 수 있다.

본 글에서는 여러 산업 분야에서 많은 매력을 갖고 있는 SMA의 재료 특성을 간단하게 살펴보고, 이를 이용한 지능 구조물 시스템의 동적 모델링 및 제어 기법을 진동 제어 관점에서 고찰한 후, SMA의 잠재적 응용성에 대하여 살펴보고자 한다.

## 2. SMA의 재료특성

### 2.1 SMA의 일반적 특성

SME는 금속의 마르텐사이트(martensite) 상변화에 의하여 결정구조가 변화됨에 따라 일어나는 현상이다. 그림 1에 이러한 형상기억과정을 도식적으로 설명하였다.

그림 1에서 (a)의 원자 배열은 고온상인 오스테나이트(austenite) 상태이며, 이 상을 냉각하게 되면 저온상인 마르텐사이트가 되며, 그 원자 배열은 (b)와 같다. 이 저온 상태에서 재료를 변형시킨 후 가열을 하게 되면 원래의 형태로 되돌아 가게 된다. 여기서  $A_f$ 와  $M_f$ 는 각각 오스테나이트 변태와 마르텐사이트 변태가 완료되는 온도를 말한다. 그림 1에서와 같이 고온상의 형상 하나만을 기억하는 경우를 일방향 형상기억(one-way memory)이라 하고, 고온과 저온의 사이에서 변형 및 회복을 여러번 반복시키면 고온 및 저온의 형상을 모두 기억할 수 있는데 이를 이방향 형상기억(two-way memory)이라 한다.

일반적으로 일방향 형상 회복력은 가열에 의하여 이루어지며, 이

를 다시 냉각시킬 때 저온의 형상으로도 회복된다면 이방향성 형상 회복력을 가지게 되는 것이다. SMA가 나타내는 형상기억효과는 기본적으로 일방향성인 비가역적 현상이며, 이방향성을 나타내기 위하여 조직 내부의 결합 등을 이용하여 인위적으로 응력을 발생시켜야 하므로 일반적으로 냉각시의 형상회복력이 가열시보다 작을 수밖에 없으며, 그 반응속도도 가열시에 비해 느리다. 따라서 로봇팔의 구동이나 그리퍼처럼 왕복 운동에 거의 같은 힘이 요구되는 작동기에는 이방향 SMA의 적용이 제한적이며, 일방향성 SMA와 스프링이나 탄성재료 등을 결합하여 이방향 SME를 얻는 방법이 주로 사용되고 있다.

그림 2에는 형상 회복력을 설명하는 SMA의 히스테리시스 곡선을 나타내었다. 그림 2(a)에서 보듯이 일반적인 금속재료는 탄성 한계를 넘어서면 외력을 제거하여도 영구 변형이 남게 된다. 그림 2(b)는 이러한 영구 변형이 전혀 없는 초탄성(superelasticity) 히스테리시스를 나타낸다. SMA의 특성은 그림 2(c)와 같이 가열을 통하여 의탄성(pseudoelasticity)을 얻게되

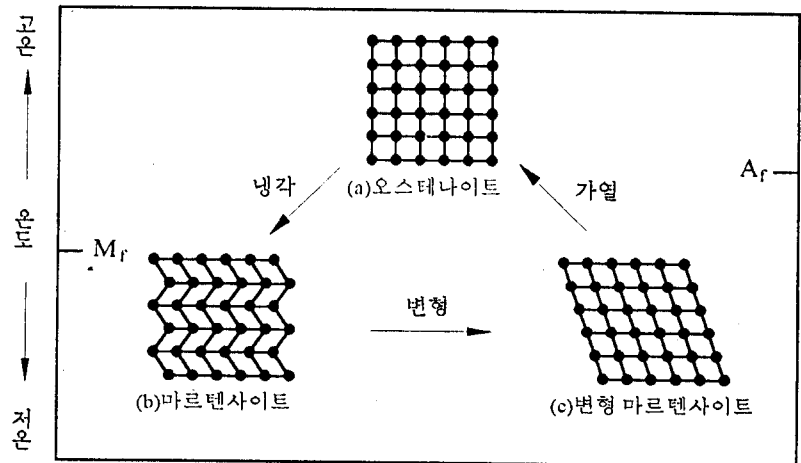


그림 1 SME를 얻기 위한 공정

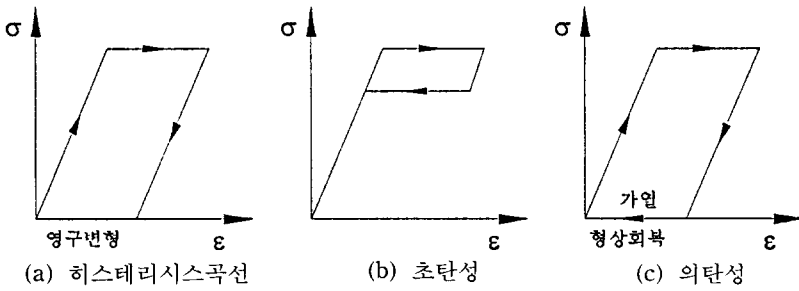


그림 2 SMA의 히스테리시스 루프

어 형상회복효과를 나타내며, 이에 따라 형상회복력을 발생시킨다<sup>(9)</sup>.

### 2.2 SMA 작동기의 특성

앞서 설명한 바와 같이 SMA의 형상회복력을 이용하여 능동적인 진동 및 위치제어분야에 적용하기 위하여는 SMA 작동기의 특성을 먼저 파악하여야 한다. 현재 SME를 나타내기 위하여 SMA의 온도를 변화시키는 방법으로서 가장 보편적으로 사용되는 것은 제어전류를 이용하는 방법이다. 기존의 SMA 중에서 유연 지능 구조물 시스템의 진동제어에 가장 많이 사용되고 있는 니티놀 SMA 작동기의 경우 전류공급에 따른 동적특성을 보면 그림 3과 같다. SMA 작동기에 의하여 발생하는 형상회복력은 그림에서 보는 바와 같이 전류에 따라 지수적으로 증가, 감소하며, 다음과 같은 시간의 함수로 표현할 수 있다.

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

여기서  $f_{\max}$ 는 작동기가 발생시킬 수 있는 최대 제어력을 나타내며,  $\tau_h$ 와  $\tau_c$ 는 각각 가열시 및 냉각시의 시상수(time constant)를 나타낸다. 또한  $t_1$ ,  $t_4$ 는 각각 제어입력이 시작되는 시간과 끝나는 시간을,  $t_2$ ,  $t_3$ 는 제어입력이 계속 유지되는 구간을 나타낸다. 전류 공급시의 동적 거동을 나타내기 위하여 식 (1)을 1차 선형 모델로 가정하면, 입력 전류와 발생력 사이의 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_h \frac{df(t)}{dt} + f(t) = k_i i(t) \quad (2)$$

여기서  $k_i$ 는 입력전류  $i(t)$ 의 영향 계수(input influence coefficient)이다. 따라서 입력전류  $i(t)$ 와 발생

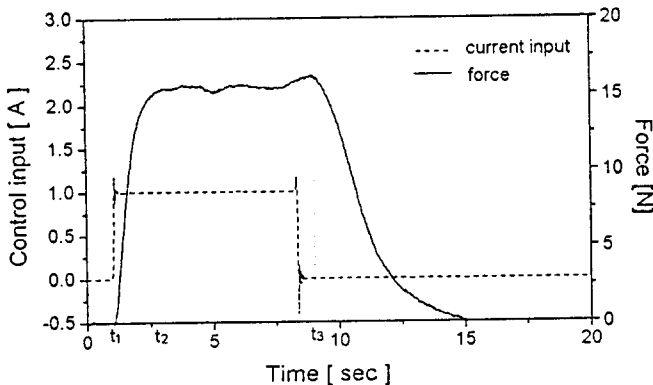


그림 3 SMA 액추에이터의 동적특성

힘  $f(t)$  사이의 관계를 다음의 전달 함수(transfer function) 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{f(s)}{i(s)} = \frac{k_i}{s\tau_h + 1} \quad (3)$$

여기서  $s$ 는 Laplace 변수이다. SMA 작동기의 1차 선형모델에서 가장 중요한 것은 가열시 시상수의 결정이다. 이 값은 입력되는 전류의 크기와 사용되는 하드웨어의 임피던스 등에 영향을 받으며 일반적으로 실험을 통하여 얻는다.

### 3. 시스템 모델링 및 제어기법

#### 3.1 시스템 모델링

현재 연구되고 있는 SMA를 이용한 대표적인 제어 분야로서는 SMA 와이어를 복합재료 속에 삽입시켜 유연 빔의 형상을 제어하거나 유연 빔의 표면 등에 장착하여 능동적으로 진동을 제어하는 것 등을 들 수 있다. 이러한 유연 구조물 시스템의 모델링은 앞절에서 논의된 SMA 작동기의 특성식과 빔 이론 등을 연계시켜 수행할 수 있으며, 대표적인 방법으로 다음을 들 수 있다.

#### (1) 유한요소법에 의한 모델링

Baz 등은 유연 빔의 진동제어를 위해 유한요소법을 이용하여 동적 모델링을 수행하였다<sup>(6)</sup>. 그림 4와 같이 길이  $L_i$ 인 빔 요소를 고려하여 노드점  $i$ 에 외력  $V_i$ 와 모멘트  $M_i$ , 노드점  $j$ 에  $V_j$ 와  $M_j$ 가 각각 작용한다고 생각하고 Bernoulli-Euler 빔 이론을 적용한다. 변위 함수와 경계조건을 대입하여 형상 함수를 구할 수 있으며, 빔요소의 운동에너지, 변형 포텐셜 에너지, 그리고 가상 일로부터 질량 행렬과 강성 행렬을 얻는다. 이렇게 하여 구해진 각 요소의 질량 행렬과 강성 행렬을 조합하면 전체 강성 및

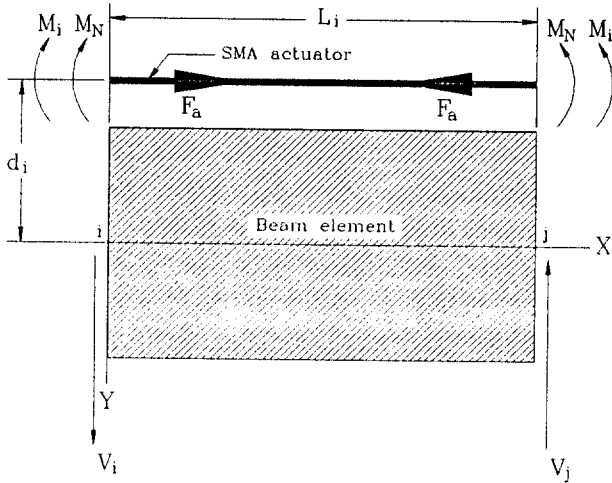


그림 4 SMA 액추에이터와 연계된 빔의 유한요소모델

질량 행렬을 얻을 수 있으며, 따라서 전체 시스템의 동적 모델은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M\delta + K\delta = F \quad (4)$$

여기서  $M$ 과  $K$ 는 전체 시스템의 질량 행렬과 강성 행렬이다. 그리고  $F$ 는 SMA 작동기의 제어력과 외력을 나타내는 힘벡터이고,  $\delta$ 는 변형 벡터를 나타낸다.

(2) 해석적 방법에 의한 모델링

SMA 작동기가 연계된 유연 보 (beam), 유연 플레이트(plate) 및 유연 셸(shell)의 경우 외력에 따른 구성방정식과 시스템의 위치에너지 및 운동에너지 등은 좌표설정과 제어 변위의 정의로부터 쉽게 도출할 수 있다. 이들을 해밀톤 법칙에 적용하게 되면 편미분 형태의 지배방정식과 구조물의 구속형태에 따른 경계조건을 얻을 수 있다. 잘 알려진 바와 같이 편미분 형태의 지배방정식은 무한개의 진동모드를 의미하므로 실제 제어 시스템과 연계하여 실행하기 위해서는 유한개의 주 진동모드가 고려된 제어 시스템 모델을 구성해야 한다. 이는 모드해석(modal analysis)을 통해서 성취할 수 있으며, 감쇠항을 첨가하면 일반적으로 다음과 같이 표

현할 수 있다.

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2q_i = f_i(t) \quad (5)$$

여기서  $\zeta_i$ 와  $\omega_i$ 는 각각  $i$ 번째 진동모드의 감쇠비(damping ratio)와 고유진동수(natural frequency)를 나타내며,  $q_i$ 는 일반화된 모달좌표를,  $f_i$ 는 SMA 작동기가 발생하는  $i$ 번째 모드의 제어력을 나타낸다.

(3) SMA 복합재료 구조물의 모델링

Rogers 등은 복합재료의 내부에 SMA를 와이어 형태로 삽입하여

내부 작동기력에 대한 복합재료 빔의 구조적 응답을 연구하였다<sup>(10)</sup>. SMA 와이어가 빔의 한쪽으로 치우쳐 삽입된다면 그 작동력을 이용하여 빔의 휘어짐을 발생시킬 수 있으며, 이를 이용하여 유연 구조물의 형상제어에 적용할 수 있다. 이러한 시스템의 모델링을 위하여 Lagrangian 스트레인과 Curvature를 정의하고, 가상일로부터 Euler 방정식과 경계조건들을 얻는다. 이렇게 하여 얻어진 식에 후크의 법칙을 적용하고, 복합재료가 대칭적으로 적용되었다고 가정하면 SMA 작동기와 연계된 내부 축방향의 힘과 모멘트를 구할 수 있다.

3.2 능동 제어기법

(1) 일정 및 비례진폭 제어기

유연 구조물의 진동을 제어하기 위하여 Baz 등은 유연 빔의 속도 성분 정보를 이용하여 일정한 제어 전류를 입력하는 on-off 제어기를 설계하였고<sup>(6)</sup>, 국내에서는 Choi 등이 변위성분과 속도성분을 이용하여 구조물의 치우침 현상을 방지한 일정진폭제어기(CAC; constant amplitude controller)와 역진동

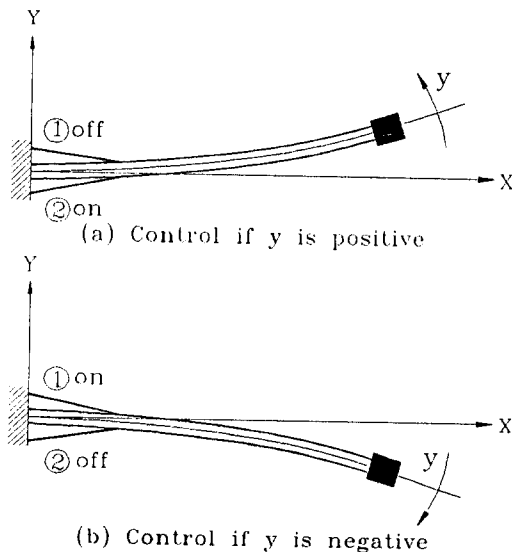


그림 5 일정 진폭 제어기의 작동 알고리즘

현상과 채터링 현상을 개선한 비례진폭제어기(PAC; proportional amplitude controller)를 설계하여 유연 구조물의 진동제어를 수행하였다<sup>(7)</sup>.

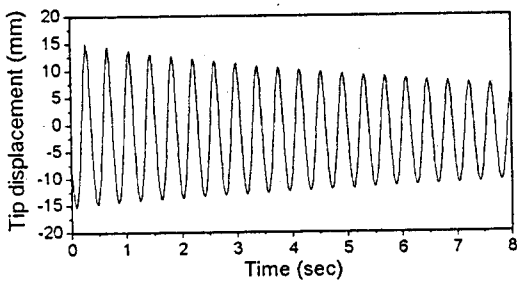
그림 5에 유연외팔보의 진동제어를 위한 CAC의 작동 알고리즘을 나타내었다. 그림에서 보듯이 양의 방향으로 진동이 발생할 때에는 작동기 ②를 작동시키고, 반대로 음의 방향으로 진동이 발생할 때에는 작동기 ①을 작동시켜 유연 구조물의 진동을 제어하게 된다. 그림 6에는 이러한 제어 알고리즘을 유연 구조물 시스템에 적용하여 과도진동제어 실험을 수행한 결과를 나타내었다. 결과에서 보듯이 CAC와

PAC 모두 비슷한 제진 효과를 보이나, PAC의 경우 제어말미의 작은 변위에 비례하는 작은 제어전류의 공급으로 채터링 현상이 제거된 것을 볼 수 있다.

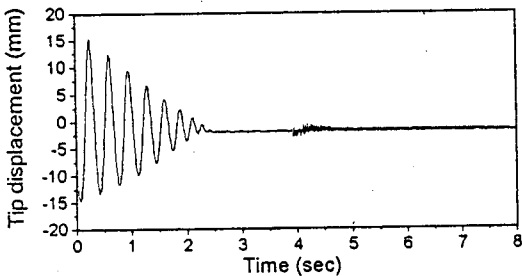
(2) 슬라이딩 모드 제어기

Choi 등은 변수 변화 및 외란에 대해 강건한 장점을 지닌 슬라이딩 모드 제어기(SMC; sliding mode controller)를 구성하였고, 외부 가진을 일종의 외란으로 가정하여 유연 구조물 시스템에 대한 강제진동제어 실험을 수행하였다<sup>(11)</sup>. 슬라이딩 모드는 알맞은 불연속 제어기를 사용함으로써 구성할 수 있으며, 이를 위하여 유연 구조물 시스템의 동적 지배방정식을 상태 공

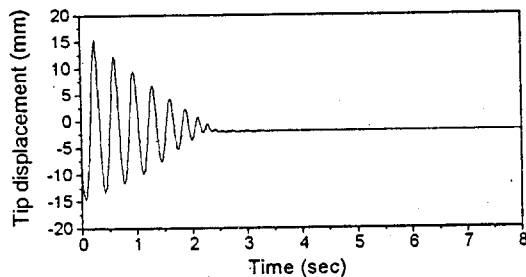
간 모델로 구성한다. 이러한 제어 시스템에 대해서는 SMA 작동기만이 제어 입력으로 작용하기 때문에 단일 슬라이딩 평면을 설정할 수 있으며, 슬라이딩 평면상에서 슬라이딩 조건이 만족되도록 제어기를 설계하게 된다. 그림 7은 가진 유연 구조물 시스템에 슬라이딩 모드 제어기를 적용하여 강제진동 제어 실험을 수행한 결과이다. 그림에서 보듯이 SMC의 사용으로 비교적 큰 변위의 진동이 매우 빠르게 제진됨을 알 수 있으며, 제어 말미의 급격한 입력 방향의 변화에 대하여도 안정적인 제어 입력이 슬라이딩 평면에 대하여 대칭적으로 공급되는 것을 볼 수 있다. 따라서 진동



(a) open-loop

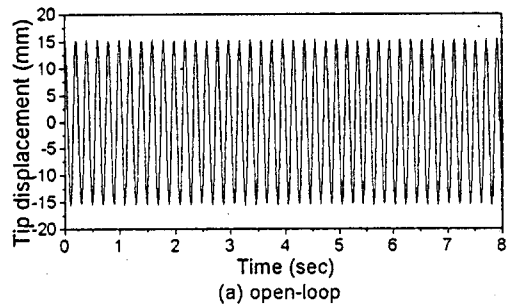


(b) closed-loop with the CAC

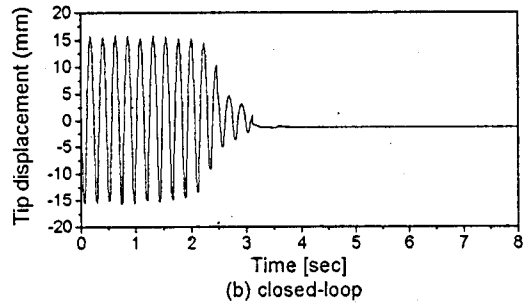


(c) closed-loop with the PAC

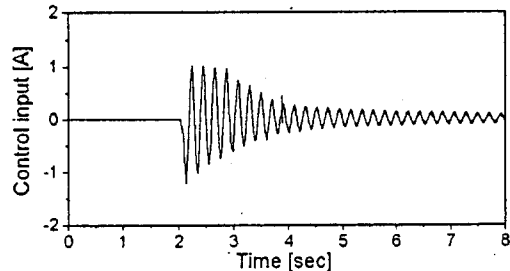
그림 6 일정 및 진폭 제어기를 이용한 과도 진동제어 응답



(a) open-loop



(b) closed-loop



(c) control input history

그림 7 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 강제 진동제어 응답

제어에 유해한 정상상태의 채터링과 지연현상이 유발되지 않았음을 알 수 있다.

(3) LQG/LTR 제어기

SMA 작동기의 모델 불확실성을 보상해 주기 위한 LQG/LTR 제어기를 설계하여 유연 구조물 시스템의 진동제어를 수행한 연구보고도 있다<sup>(8)</sup>. 유한요소모델에 근거한 다입력 다출력 제어모델을 구성한 후, 외란과 기준 입력에 대한 전달함수를 도출한다. 이로부터 입력명령에 잘 적응하며, 시스템과 센서에 작용하는 외부 교란에 강건하도록 주파수 영역에서 제어기를 설계한다. 특히 입력명령을 잘 따르기 위해서는 저주파수대에서 출력은 기준 입력과 거의 동일해야하며, 센서에 도입되는 교란을 효과적으로 제거하기 위해서는 고주파 대역에서 출력은 거의 영(zero)에 가까워야 한다. 페루프 성능이 이러한 조건을 만족하도록 singular value 개념을 도입하여 주 이득(principal gain)과 위상 마진(phase margin)을 설정한다.

4. 잠재적 응용성

현재 연구되고 있는 SMA의 응용분야는 단순히 SMA의 형상회복력을 이용하여 구조물의 감쇠나 형상을 변화시킬 수 있는 수동적 제어를 뛰어넘어 각종 지능 유연 구조물의 능동 진동제어나 로봇 그리퍼의 위치제어, 건물 등의 진동제어, 인공위성 태양전지판의 진동제어, 파괴 제어 등 그 응용범위가 매우 광범위하며 다양하다.

마이크로 로봇을 구동함에 있어 작동기의 소형화와 경량화는 매우 중요한 문제이므로 SMA 작동기의 적용이 매우 적합하다고 할 수 있다. 그림 8에 이러한 개념을 이용한 마이크로 로봇의 개략도를 나타

내었다<sup>(12)</sup>. 그림에서 로봇의 shoulder와 arm부분은 SMA 와이어를 작동기로 이용하여 구동하며, 반대방향의 구동을 위하여는 바이어스 스프링을 사용한다. 또한 그리퍼에는 좁은 공간에서 비교적 큰 변위를 제어할 수 있는 SMA 스프링을 사용하여 위치 및 요구되는 힘을 제어한다. 한편, Choi 등은 SMA 작동기를 장착한 유연 빔에 SMC를 적용하여 선단위치에 대한 추적 제어(tracking control)를 수행하여 로봇 그리퍼의 위치추적제어에 대한 가능성을 입증하였다<sup>(11)</sup>.

그림 9는 SMA 작동기를 갖는 인공위성의 태양전지판에 대한 개략도이다. 태양 전지판은 우주 공간상에서 태양열을 이용하여 직접 SMA를 구동시키거나, 태양열 축전지에 의하여 SMA를 구동시킬 수 있으므로 외부에서 에너지를 공급할 필요가 전혀 없다. 따라서 인공위성과 같이 계속적인 외부 에너지의 공급이 어려운 우주 구조물의 응용에 매우 큰 잇점이 있다. 이승우는 LQG/LTR 제어기를 SMA 지능 구조물에 적용하여 인공위성의 태양 전지판 진동을 제어

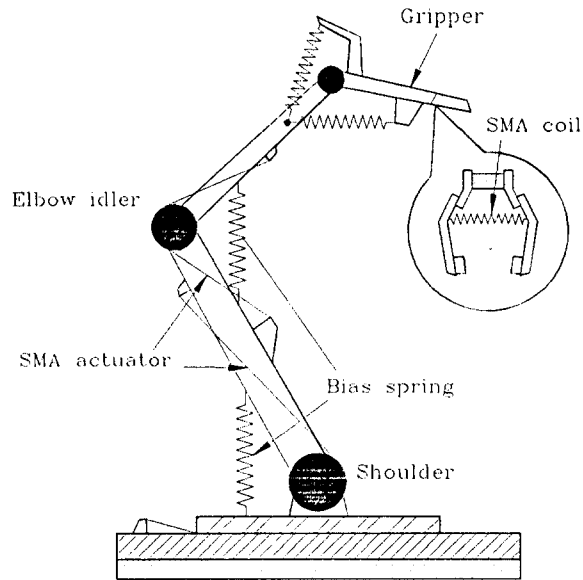


그림 8 SMA 액추에이터를 이용한 마이크로 로봇의 메카니즘

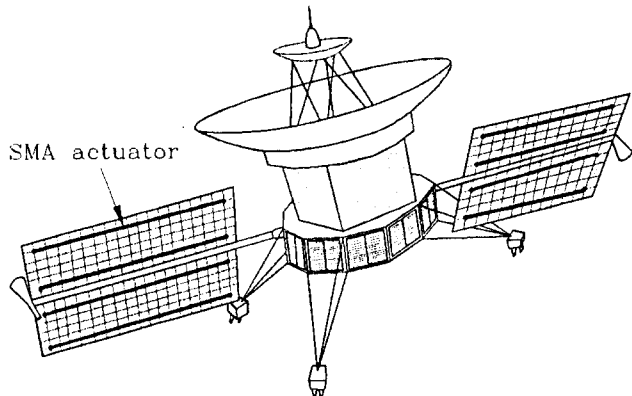


그림 9 SMA 액추에이터를 특징으로 하는 인공위성의 태양전지판

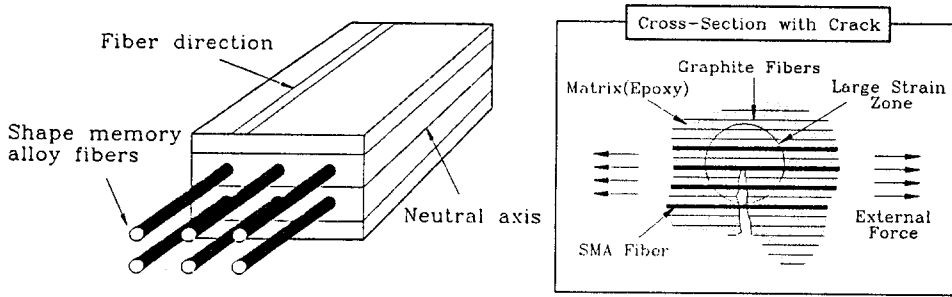


그림 10 크랙전과 방지를 위한 SMA 지능 복합재료 구조물

하고자 하였다<sup>(8)</sup>. 두개의 입출력을 갖는 태양전지판 형상의 구조물에 대한 진동제어를 수행하기 위해 세 개의 집중 질량으로 이루어진 구조물을 제작 하였으며, 수학적 모델로서 1차 선형 미분방정식을 사용하고 이에 대한 모델의 불확실성을 건설한 제어기로서 보상하였다. 이 결과로 부터 위성체의 자세가 변경될 때 발생하는 태양전지판의 진동을 SMA를 통하여 효과적으로 제어할 수 있다는 가능성을 제시하였다.

그림 10에는 복합재료 사이에 SMA 섬유를 크랙의 성장방향과 직각으로 삽입하여 재료에서 발생하는 크랙의 성장을 막는 원리를 나타내었다. 그림에서 보듯이 SMA 섬유가 외력의 방향과 반대 방향으로 힘을 발생시켜 크랙이 성장하는 것을 막을 수 있게 되며 크랙의 형태도 제어할 수 있다<sup>(12)</sup>.

SMA는 와이어 형태 및 플레이트 형태로 제작되며, 와이어의 지름과 플레이트의 두께에 따라 매우 큰 제어력을 발휘할 수 있으므로 이를 이용하여 건물 등의 대형 구조물의 진동제어에도 응용할 수 있다. 이 밖에도 미리 압축 변형된 SMA를 삽입한 후 가열에 의해 원래의 형상을 회복하게 함으로써 암반분쇄 등에 응용할 수 있으며, SMA로 접합하고자 하는 파이프보다 약간 작은 크기의 지름으로 커

플러를 만들어 변형시킨 후, 두개의 파이프를 연결하고 가열하면 완벽한 커플링을 할 수 있는 메카니즘 개발도 가능하다. 또한 온도조절 스위치, 온도에 따른 질량 변화를 측정기 등 여러 산업 분야에서 적용가능성을 찾을 수 있다.

### 5. 맺 음 말

이상에서 살펴본 바와 같이 SMA 작동기는 전류 입력만으로 유연 구조물 시스템의 형상이나 진동을 제어할 수 있으므로 작동기의 구조를 매우 간단히 할 수 있으며, 또한 작동기의 무게에 비하여 큰 힘이나 변위를 제어할 수 있다는 장점이 있다. 이를 이용하여 각종 제조분야 및 첨단 항공 우주 산업에 이르기까지 매우 다양한 분야에 응용이 가능하다. 그러나, 현재 우리나라의 경우 SMA에 대한 연구는 미미한 상태이다. 새로운 SMA 재료와 이를 응용한 메카니즘에 대한 연구와 개발이 절실하며 이를 위한 과감한 투자가 요구된다. 또한 정확하고 건설한 제어를 위하여 SMA 작동기의 다양한 특성을 보다 심도있게 파악하고, 강건한 제어기를 적용하여 외부 환경의 영향을 최소화하는 연구가 필요하다. 나아가서 제어 메카니즘의 구동 장치 등의 적용을 위한 이방향성 SMA의 특성과 제어기법에 대한

연구도 병행해서 수행되어야 할 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

- (1) 최승복, 1992, "지능 복합재료의 구성과 특성", 한국항공우주학회지, 제 20권, 제 4호, pp. 117~129.
- (2) Choi, S.B., Park, Y.K. and Suh, M.S., 1994, "Elastodynamic Characteristics of Hollow Cantilevered Beams Containing an Electro-Rheological Fluid: Experimental Results", AIAA Journal, Vol. 32, No. 2, pp. 438~440.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) C.A. Rogers, 1990, "Active Vibration and Structural Acous-

- tic Control of Shape Memory Alloy Hybrid Composites : Experimental Results”, J. of Acoustic Soc. Am. Vol. 88, No. 6, pp. 2803~2811.
- (6) 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.
- (7) 황인수, 박노준, 최승복, 정재천, 1994, “SMA 액츄에이터를 이용한 유연구조물의 진동제어 : 실험적 고찰”, 한국항공우주학회 추계학술대회 발표논문집, pp. 420~424.
- (8) 이승우, 1993, “LQG/LTR 제어를 이용한 인공위성 태양전지판 형상의 SMA 지능 구조물 진동제어에 대한 실험적 고찰”, 한국항공우주학회지, 제 21권, 제 5호, pp. 67~75.
- (9) C.M. Wayman, 1980, 日本金屬學會會報, Vol. 19, No. 5, pp. 323~332.
- (10) Z. Cahudhry, C. A. Rogers, 1991, “Response of Composite Beams to an Internal Actuator Force”, AIAA paper-91-1166-cp, pp. 186~193.
- (11) 박노준, 최승복, 정재천, 1995, “형상기억합금 작동기를 이용한 유연구조물의 진동 및 추적제어”, 대한기계학회 추계학술대회 발표논문집.
- (12) M.V. Gandhi and B.S. Thompson, 1992, “Smart Materials and Structures”, Chapman & Hall.

## 싱가포르 음향학회 학술대회 안내

◆ 일 시 : 1996년 1월 10일 - 11일(2일간)

◆ 장 소 : Novotel Orchid, Singapore

◆ 초록마감 : 1995년 9월 30일

◆ 내 용 :

* General Acoustics	* Physical Acoustics
* Bioacoustics	* Ultrasonic Testing of Materials
* Ultrasonic Medical Applications	* Acoustic Microscopy
* Underwater Acoustics	* Architectural Acoustics
* Noise and Vibration	* Speech and Communication
* Psychological and Physiological Acoustics	* Transduction and Measurements

◆ 연 락 처 : Dr. W. S. GAN  
 C/O Acoustical Services Pte Ltd  
 209-212 Innovation Center  
 NTU, Nanyang Avenue  
 Singapore 2263, Republic of Singapore  
 FAX : (+65) 7913665 TEL : (+65) 7913242

◆ 문 의 처 : 학회 사무국[(02)563-4851]으로 연락주시면 Call for Paper를 보내드립니다.