 <p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">특 집</p> <p style="text-align: center;">스마트 재료 시스템 기술</p>	<h2 style="text-align: center;">지능 재료 시스템에 사용되는 형상기억합금의 특성과 적용</h2> <p style="text-align: center;">김상현*, 조맹호 (서울대학교 기계항공공학부)</p>
--	--

1. 머리말

형상기억합금(shape memory alloy : SMA)은 독특한 재료 특성 때문에 공학적으로 많은 관심을 끌고 있다. 형상기억합금의 고유한 특성들(unique properties)로 인해서 항공우주, 생체의학과 같은 다양한 분야에서 광범위한 적용연구가 진행되고 있다. 형상기억합금의 기계적인 성질과 거동에 대한 선행연구는 이미 많이 수행되었으나 상대적으로 능동적인 형상제어를 위한 작동기로서의 연구와 진동제어기로서의 연구는 부족한 편이다. 신뢰성있는 형상기억합금의 구성방정식 개발과 형상기억합금과 모구조물(primary structure)간의 상호거동은 아직도 중요한 연구주제로 남아있다.

최근에 선(wire), 박판(thin film), 그리고 스텐트(stent) 형태의 형상기억합금 작동기의 개발은 재료과학과 지능구조물의 영역에서 계속적으로 진행되어왔다. 이러한 재료를 사용하고자는 하는 이유는 형상기억합금 고유의 재료, 기계적, 열적, 열-기계적 그리고 동적 특성들 때문이다.

최근의 형상기억합금 재료의 개발은 과학적인 분야와 기술적인 분야로 크게 양분될 수 있다. 다시 말해서 재료과학분야와 실용 공학 적용분야

로 구분될 수 있다는 것이다. 전자는 재료의 구성과 트레이닝(training) 과정을 향상시킴에 의해 상변이 온도 제어와 전기적, 기계적 특성의 변화에 집중하였다. 반면에 후자는 실제 생체 공학과 의료적 적용에 집중되어졌다. 일찍이 생체의학 장치나 의학장치의 설계를 위한 형상기억합금의 성공적인 사용이 보고되어왔다. 여러가지 설계들 중에는 마이크로 펌프(pump), 마이크로 그리퍼(gripper), 휘어질 수 있는 형상기억합금 능동 카테터(catheter), 마이크로/나노 마찰 장치 그리고 MEMS 형상기억합금 박판으로써 형상기억합금 재료를 사용하였다. 이러한 성과는 모구조 요소에 이러한 재료를 사용함으로써 그 활용도가 우수함을 보여주었다.

형상기억합금 재료는 큰 회복 변형률과 힘을 낼 수 있는 형상기억효과와 주위 조건에 따른 초탄성 거동과 같은 고유한 기계적, 기하학적 특성들을 가진다. Birman⁽¹⁾과 Humbeeck⁽²⁾는 형상기억합금의 특성에 대한 전반적인 이해와 연구동향에 대해 소개하고 있다.

이 글에서는 지능재료시스템에서 사용되는 형상기억합금의 고유한 재료 특성에 대하여 언급하고 나아가 형상기억합금을 이용한 작동기 그리고 진동제어 장치에 대하여 살펴보고자 한다.

* E-mail : mhcho@snu.ac.kr, Tel : (02)880-1693

특히 진동제어와 관련하여서는 최근 연구동향에 대하여 상세히 언급하였다. 2절에는 형상기억합금의 특성과 구성방정식에 대하여, 3절에서는 형상기억합금을 이용한 작동기에 대한 예를, 4절에서는 현재까지 연구되고 발표된 형상기억합금을 이용한 진동제어에 대한 동향을 기술하였다.

2. 형상기억합금의 특성과 구성방정식

2.1 형상기억합금의 고유한 특성들

형상기억합금에 대한 전반적인 이해는 Rogers 등⁽³⁾, Wada 등⁽⁴⁾, Hanagud 등⁽⁵⁾, Crawley⁽⁶⁾, Gandhi & Thompson⁽⁷⁾의 논문들을 통하여 얻을 수 있다. 형상기억합금의 형상 설명은 Wayman & Shimizu^(8,10), Krishnan 등⁽¹¹⁾, Rodriguez & Brown⁽¹²⁾, Wayman & Duerig⁽⁹⁾의 논문을 통하여 찾아 볼 수 있다. Perkins⁽¹³⁾에 의해 편집된 논문 모음집, Cross 등⁽¹⁴⁾, Jackson 등⁽¹⁵⁾ 그리고 Baumgart 등⁽¹⁶⁾의 NASA 보고서는 형상기억합금 특성에 대해 잘 설명하고 있다. 형상기억합금의 전반적인 개요는 Funakubo⁽¹⁷⁾ 논문에서 찾을 수 있고 Shaw & Kyriakides⁽¹⁸⁾, Paine & Rogers⁽¹⁹⁾는 형상기억합금-복합재료 구조물의 개요에 대해 발표하였다. 언급된 자료를 바탕으로 형상기억합금 특성을 요약하면 다음과 같다.

형상기억합금을 상변이 시키는 방법에는 두가지 방법이 있는데 한가지는 온도만을 이용하는 것이고 다른 하나는 형상기억합금에 응력만을 증가시키는 방법이다. 이는 그림 1에 잘 나타나 있으며 미세구조적 관점에서 형상기억합금의 거동을 설명해 놓았다.

첫째로 온도만을 작동하여 상변이 시킬 경우 형상기억합금은 네가지 온도 즉, 마르텐사이트 끝온도(M_f), 시작온도(M_s), 오스테나이트 시작온도(A_s), 끝온도(A_f)로 특성되어진다. 이들 각각의

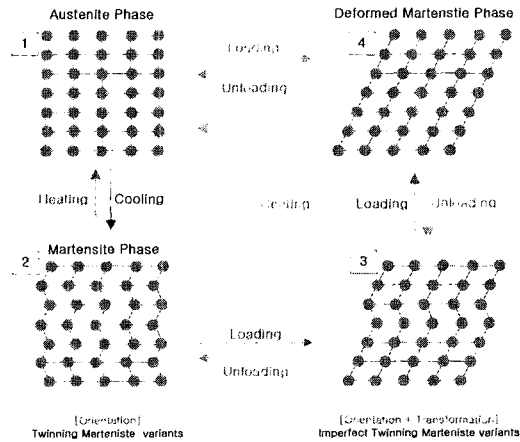


그림 1 미세구조적 관점에서 형상기억합금 상변이

온도의 시작과 끝으로부터 상변이가 이루어지는 것이다.

둘째로 응력만을 증가시켜 형상기억합금을 상변이 시키는 방법은 주어진 온도에서 형상기억합금에 응력을 증가시켜 기울어진(detwinned) 마르텐사이트로 상변이 시키는 것이다. 이때 상변이의 거동은 소성변형의 거동과 유사하다. 이런 변형은 상대적으로 온도환경에 알맞은 하중 즉, 항복응력이 요구되어진다. 이는 재료가 온도에 따라 항복응력이 다르기 때문이다.

거동의 측면에서 형상기억합금을 일반구조물에 적용함에 있어 보통 형상기억합금의 형상기억효과(shape memory effect)와 초탄성거동(superelasticity)을 이용한다. 이를 설명하면 다음과 같다.

첫째로 형상기억효과(그림 2(a))란 형상기억합금의 온도 범위가 오스테나이트 끝온도와 마르텐사이트 시작온도 사이의 임의의 온도환경에서 최초로 오스테나이트 상에 놓여있을 때 응력을 증가시켜 기울어진 마르텐사이트상으로 상변이하면서 큰 잔류변형률을 얻을 수 있다. 이를 전방향 상변이 (forward transformation, martensite transformation) 과정이라고 하며 이때 온도를 오

스테나이트 끝온도 이상으로 올려주면 재료가 오스테나이트상으로 변하면서 전방향 상변이 과정에서 발생한 잔류변형률이 소멸되어 원래의 형상으로 되돌아가게 된다. 이를 후방향 상변이(reverse transformation) 과정이라고 하며 이때 회복하는 변형률(최대 9%)을 이용하여 큰 힘을 얻을 수 있다. 이때 얻을 수 있는 최대 회복응력은 NiTiInol의 경우 500~900 MPa, Cu-Al-Ni은 300~400 MPa, Cu-Zn-Al-Mn은 550~ 650 MPa정도를 얻을 수 있다. 대부분의 공학적인 응용은 이를 이용하려고 하는 것이다.

둘째로 초탄성거동(그림 2(b))은 앞에서 언급된 형상기억효과의 온도범위가 아닌 오스테나이트 끝온도 보다 높은 온도 환경에서 최초의 오스테나이트 상에서 응력을 증가시켰을 경우 기울어진 마르텐사이트 상으로 상변이하게 되고 현재환경이 고온이므로 응력을 제거시키는 과정에서 후방향 상변이가 발생하여 원래의 형상으로 되돌아가는 현상이다. 이때 응력-변형률 선도에서 이력현상(hysteresis)이 발생한다. 이유는 오스테나이트상과 기울어진 마르텐사이트상에서 각기 다른 항복응력을 가지고 있기 때문이다. 즉, 형상기억합금 재료가 상변이 과정에서 에너지를 발산 또는 흡수하기 때문이다.

그러나 앞에서 언급한 온도만을 증가시키거나, 응력만을 증가시켜서 구조물에 적용하면 형상만 변화시킬뿐 구조물이 다시 원래의 형상으로 되돌아 올 수 없다. 이는 형상기억합금의 일방향 효과(one way effect)만을 이용하였기 때문이다. 따라서 형상기억합금을 구조물에 작동기로 적용시킬 때 구조물을 원래의 형상으로 되돌리는 방법은 응력과 온도를 연동하여(coupled) 작동시켜야한다. 이를 양방향 효과(two way effect, 그림 2(c))라 하는데 이는 응력-변형률 선도가 온도에 따라 다르게 나타나는 형상기억합금의 성질을 이용한 것이다.

이와 같이 형상기억효과와 초탄성은 온도와

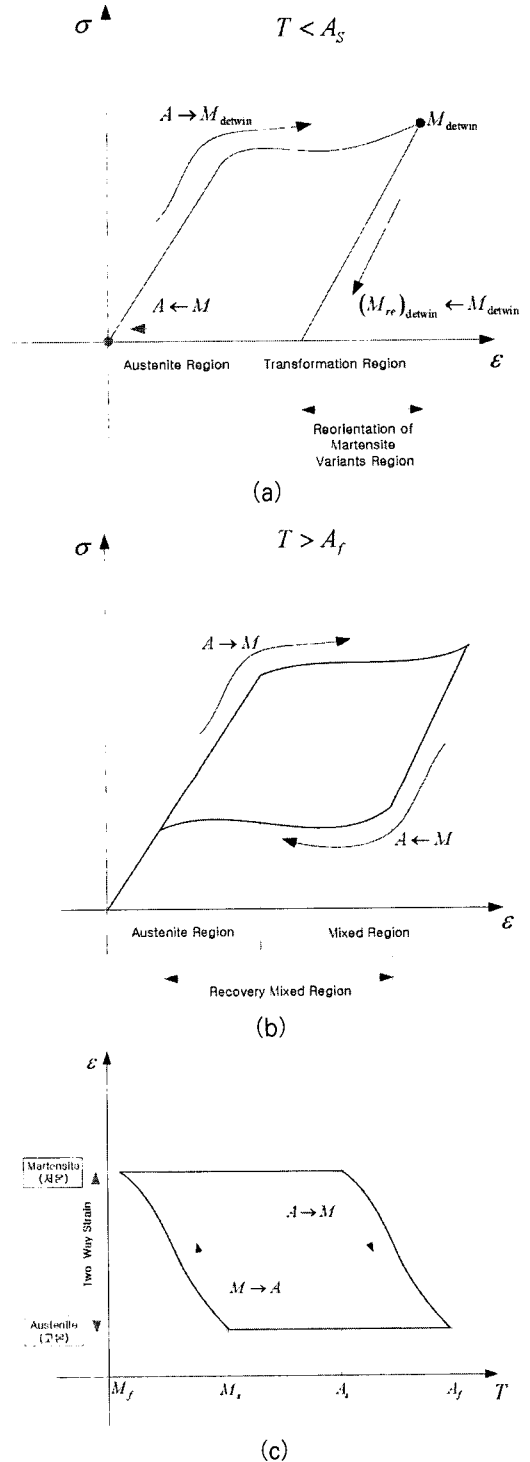


그림 2 (a) 형상기억효과(SME ; shape memory effect) 거동, (b) 초탄성(pseudo-elastic or super-elastic) 거동, (c) 양방향 형상기억효과(TWSME ; two-way SME) 거동

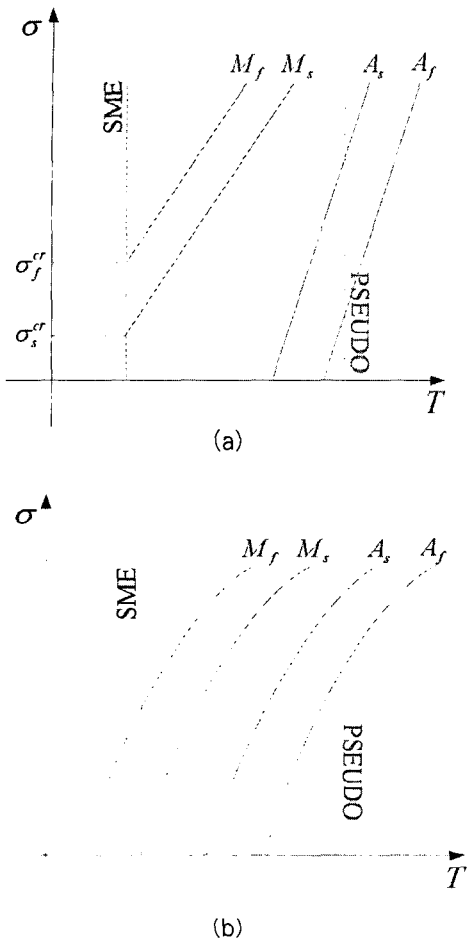


그림 3 형상기억합금 재료에 따른 응력-온도 곡선들

관계된 형상기억합금의 특성이다. 이러한 특성을 나타내기 위해서 현재까지 크게 두가지의 응력-온도 곡선이 제안되었다. 그림 3(a)는 어떤 온도 이하에서는 형상기억효과만이 발생하는 재료를 나타내고 그림 3(b)는 응력이 없는 상태에서 양방향 거동을 표현할 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 이러한 그림은 재료의 결정과정, 열처리 조건, 트레이닝(training) 그리고 시간증분에 따른 효과(rate effect)등에 의해서 각각의 상변이 온도는 서로 순서를 달리 할 수도 있고 곡선의 모양도 많이 달라질 수 있다. 이러한 대표적인 문제점으로 인하여 다음에 소개될 구성방정식은 대

체로 정확하게 거동을 묘사하지 못하며 지속적인 구성방정식의 보완이 요구되어진다.

2.2 형상기억합금 구성방정식

지금까지 형상기억합금의 특성에 대하여 알아 보았다. 이러한 특성을 고려하여 제안된 형상기억합금 구성방정식에 대하여 정리해 보면 다음과 같다.

형상기억합금의 현상학적 또는 열-기계적인 구성방정식은 다음과 같이 크게 5가지로 구분할 수 있다. 이를 나열하면 Tanaka 모델⁽²⁰⁾, Lian & Rogers 모델^(21,22), Brinson 모델^(23,24), Boyd-Lagoudas 모델^(25,26), Abeyaratne 모델^(27,28) 등이 있다.

첫째로 Tanaka 모델은 에너지 평형 방정식 (energy balance equation)과 Clausius-Duhem 부등식 (iequality)에 기초한 일반적인 3차원 이론에 기초하여 개발되었고 향후 형상기억합금 구성방식을 발전시키는 큰 계기가 되었다. 이 모델이 다른 모델과 구별되는 것은 상변이에 있어서 마르텐 사이트상으로의 상변이정도를 나타내는 마르텐 사이트 체적비를 하나의 매개변수로 축소하여 사용하였고, 탄성과 열탄성(thermoelastic) 계수를 마르텐사이트 체적비에 비례한다고 가정하였다. 실험을 통해서 이 모델의 타당성을 뒷받침하고 있지만 이 모델의 단점은 상변이 시작과 끝의 조건이 언급되어있지 않다는 것이다.

둘째로 Liang & Rogers 모델은 Tanaka 모델을 유한지수형태 상변이 방정식으로 수정보완한 것이다. 이를 바탕으로 열역학 제1,2법칙과 헬름홀츠 자유에너지(Helmholtz free energy)를 이용하여 3차원 구성방정식을 도출하였다. 이 모델에서는 단지 3가지 변수인 등가 변형률(equivalent strain), 절대온도, 마르텐사이트 체적비를 가지고 일반적인 형상기억합금의 상태를 표현하였다. 이 모델에 근거하여 형상기억합금의 양방향 효과 (two-way shape memory effect)와 비틀림 문제를 수치해석하여 제시하였다.

특집

셋째로 Brinson 모델은 앞서 제시된 두 이론을 이용하여 시간적 증분형태의 구성방정식을 사용하였다. 여기서 다른 이론과 구별되는 것은 마르텐사이트 체적비를 온도증분에 따른 것(TIM)과 응력증분에 따른 것(SIM)으로 분리시켰다는 것이다. 즉, 재료매개변수(material parameter)는 앞서 언급된 두 이론을 따르지만 등온과정에 응력-변형률선도는 응력증분에 따른 상변이 방정식만으로 결정되어진다는 것이다.

넷째로 Lagoudas 모델은 Tanaka와 Liang-Rogers 모델을 수정보완하여 3차원 형상기억합금 거동을 해석할 수 있도록 하였다. 이 모델은 Liang-Rogers가 제안한 모델과 운동학적 상변이 가정이 유사하지만 상변이 구간에서 에너지 발산을 담당하는 경화함수(hardening function)를 지수함수가 아닌 변곡점을 가진 다항식으로 표현하였다. 또한 탄성영역과 상변이 영역을 구분하여 해당온도에서 임계응력 전에는 탄성구간으로 거동하다가 임계응력을 넘어서면 상변이 영역으로 거동하도록 모델링하였다. 이는 재료의 소성 거동과 매우 유사한 이론이다. 이때 상변이 구간의 재료의 물성치는 혼합법칙(rule of mixtures)에 의해 오스테나이트상, 마르텐사이트상의 물성치와 마르텐사이트 체적비로 표현하였다. 이와

더불어 에너지 발산을 이용하여 탄성영역과 상변이 영역사이의 일관성(consistency)을 표시하였다. 이 이론의 장점은 임의의 온도에 대하여 형상기억합금의 거동을 표현할 수 있다는 것이다.

끝으로 Abeyaratne 모델은 세 개의 선으로 이루어진 응력-변형률선도로 1차원 열탄성을 묘사하였다. 이 곡선은 영에서 증가하는 변형률과 같이 초기 응력의 증가에 대응하는 세 개의 일직선상의 부분들로 구성되어있다. 이 모델에서는 형상기억합금에 작용되는 응력이 일정할지라도 변형률은 국부 온도의 불연속 함수(piecewise function)가 되며 변형률의 불연속성은 상(phase)의 경계를 표현한다. 이 모델은 열-기계 연동(coupling)을 설명하고, clausius-clapeyron 부등식(inequality)를 만족한다. 상 경계의 전파속도로 동역학과의 연계를 표현하였고 결정핵 생성 기준(nucleation criterion)은 천이 조건(transition condition)과 일치한다. 이 모델의 수치해석으로 응력증분 상변이 과정에서 매우 빠르게 일어나는 변형률의 변화를 설명하였고 등온과정일지라도 열원(heat source)처럼 상 경계가 움직임을 보여주었다. 이는 상변이 동안 열이 흡수되고 방출됨을 의미한다. 이런 이유로 형상기억합금의

특집

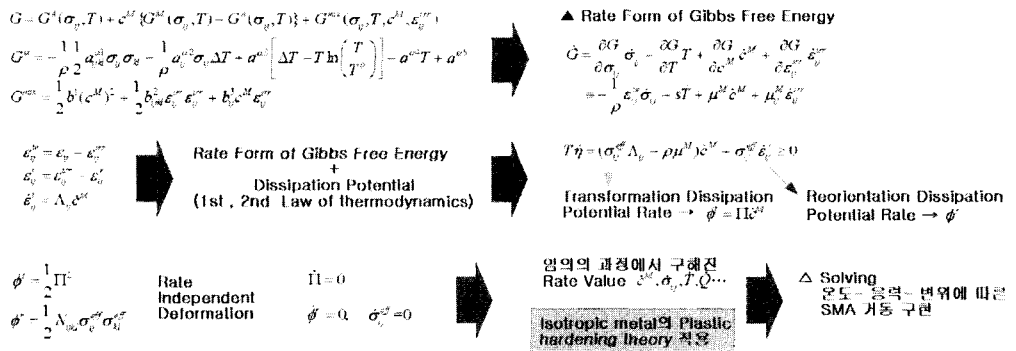
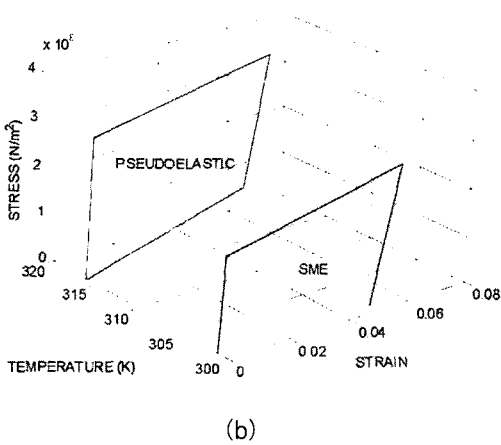
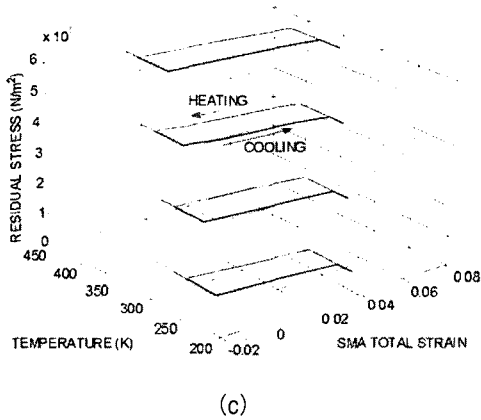


그림 4 Lagoudas에 의해 제안된 형상기억합금 구성방정식



(b)



(c)

그림 5 구성방정식으로 시뮬레이션한 초탄성, 형상기억 효과 거동과 양방향 형상기억효과

상변이 과정에 국부적으로 상변이 전파현상을 파악할 수 있다.

앞에서 언급된 형상기억합금의 특성과 거동방정식을 토대로 일반구조물에 대하여 적용 가능성을 살펴보면 다음과 같다.

형상기억합금의 온도에 따른 탄성계수의 차이를 이용하여 좌굴, 진동, 소음의 제어를 할 수 있고, 상변이 변형률과 온도를 이용하여 구조물의 형상과 굽힘(bending)을 제어, 형상기억합금을 삽입한 복합재료의 충격저항 또는 강성의 향상, 구조물의 피로파괴 등 여러방면에 적용될 수 있다. 이는 앞서 언급된 구성방정식을 토대로 현재 많은 연구가 수행중에 있다.

3. 형상기억합금을 이용한 작동기

앞에서 설명된 형상기억합금의 특성을 이용하여 실제 구조물에 적용한 사례를 들어보고자 한다. 그림 6(a)는 F-15 전투기의 형상기억합금 작동기를 부착한 공기흡입구와 지능 덕트를 보여주고 있으며, 그림 6(b)는 형상기억합금을 이용하여 형상적응 날개를 제작한 것을 보여주고 있다. 왼쪽의 첫 번째 그림은 형상기억합금을 작동시키기 전의 모양이고 두 번째 그림은 형상기억합금을 작동시킨 모양이다. 이렇듯 항공기가 비행상황에 맞게 날개단면 형상을 바꾸어 주면 비행성능 향상과 연료 소모량도 줄어들 것이다. 그림 6(c)은 형상기억합금을 이용한 저충격, 비폭발식 분리장치를 보여주고 있다. 그림 6(d)-(h)은 MEMS 구조물에서 형상기억합금을 이용한 작동기를 보여주고 있다. 그림 7은 필자의 연구실에서 수행한 작동기의 수치해석 결과를 보여주고 있다. 주구조물은 복합재료로 되어있고 형상기억합금선을 외부적으로 고정시킨 작동기를 보여주고 있다. 이는 잔류응력을 이용하면 구조물을 초기의 상태로 되돌릴 수 있음을 보여준다⁽²⁹⁾.

4. 형상기억합금을 이용한 진동제어

4.1 형상기억합금 구성방정식을 이용한 진동제어

Masuda 등⁽³⁰⁾은 초탄성 형상기억합금의 이력 루프(hysteresis loop)의 모양이 감쇠 장치로서 성능에 영향을 주는지를 알아보고 형상 최적화의 유용한 측면을 고찰하였다. 첫단계로써 형상기억합금 요소를 가진 비감쇠 SDOF(single degree of freedom) 시스템을 연구하였다. 형상기억합금의 이력특성은 재료의 국부특성(local properties)을 나타내는 응력-변형률 곡선 대신에 전체적인 관점(global viewpoint)으로서 힘-변위 곡선을 이용하였다. 이는 재료의 특성들로 구성된 형상기억

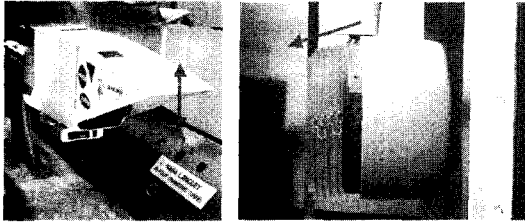


그림 6 (a) Smart air inlet and smart duct

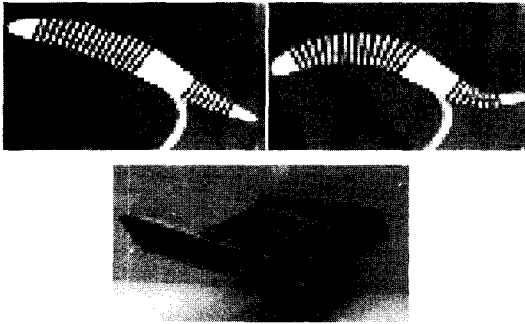


그림 6 (b) Adaptive wing using SMA



그림 6 (c) Non-pyrotechnic release device (aerospace Inc.)

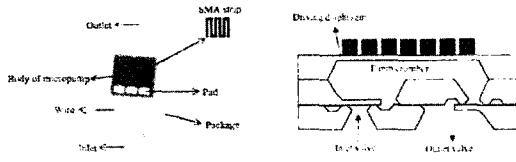


그림 6 (d) Micro-pump using SMA

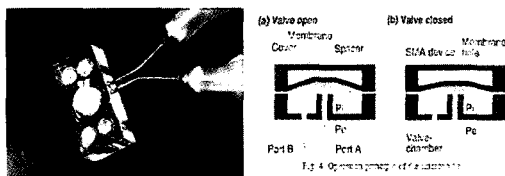


그림 6 (e) Micro-valve using SMA

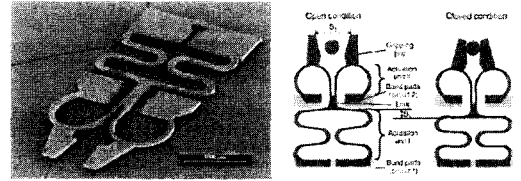


그림 6 (f) Micro-gripper using SMA

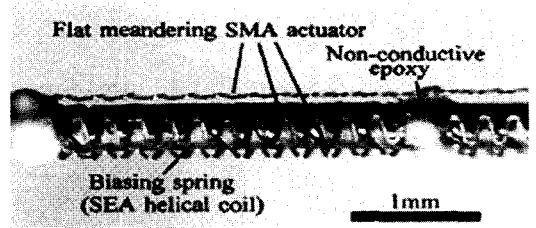


그림 6 (g) Micro-wrapper using SMA

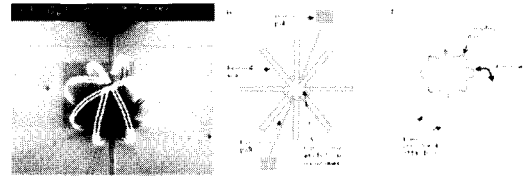


그림 6 (h) Stent using SMA

합금의 전체적인 효과 뿐만 아니라 단면 또는 길이와 같은 기하학적 차원의 효과, 기계장치의 운동학적 효과를 고려할 수 있기 때문이다. 이 장치의 동적 성능은 감쇠효과에 초점을 맞추기 위해 공명점에서 정상류 상태 응답에 의해 평가하였다. 등가 선형 접근법(equivalent linearization approach)을 사용한 이론적인 수식화가 이력모양과 감쇠효과 사이의 기초적인 상호관계가 있음을 보고하였다.

Collet 등⁽³¹⁾은 시스템의 동적거동에서 응력증가에 의한 상변이 효과를 고려하였다. 형상기억합금 외팔보에 주어진 동적하중에 대하여 진동수를 증가시키고 감소시키는 과정을 통하여 보 끝단에서 진폭을 실험과 시뮬레이션을 통하여 보여주고 있으며 형상기억합금은 제어될 수 있는

특집

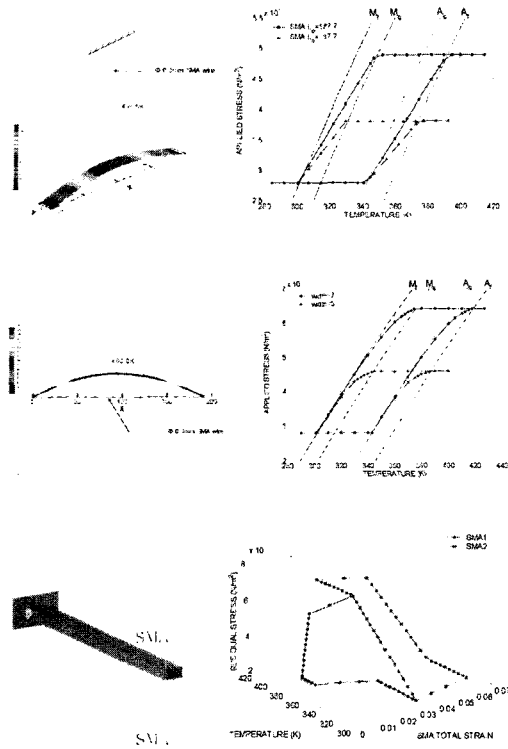


그림 7 필자의 실험실에서 제안한 작동기의 시뮬레이션 결과

굽힘 감쇠기로서 좋은 재료가 아니라고 결론을 내리고 있다. 그러나 이는 하중 즉, 응력의 증가에 의한 형상기억합금의 상변이 특성만을 고려하였기 때문이고 온도에 의한 효과를 고려한다면 좋은 감쇠기로서 활용될 수 있을 것이다.

Sun & Rajapakse⁽³²⁾는 형상기억합금 구성방정식의 하나인 Brinson 모델에 간단한 수정을 통하여 하중 주파수(load frequency)의 효과를 포함하도록 구성방정식을 수정 제안하였다. 이 모델은 주기반복 변형률(cyclic strains)에 지배되는 형상기억합금선의 실험적 결과 거동에 기초하기 때문에 수치적 시뮬레이션은 실험결과와 우수한 일치성을 보여준다. 하중 주파수, 온도, 정적 변형률 맞비김(static strain offset) 그리고 초탄성 이력 루프에서 변형률 크기의 효과 그리고 에너지 발산을 연구하였다. 형상기억합금 요소를 가진

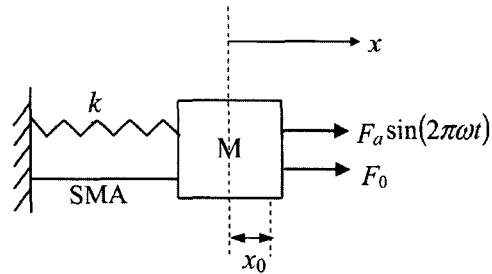


그림 8 형상기억합금 요소를 가진 SDOF 시스템 (by Sun & Rafapakse)

SDOF(그림 8) 시스템의 동적 응답은 수정된 구성방정식과 Newmark scheme에 의해 계산되었다. 변위 그리고 형상기억합금 요소의 응력-시간 이력의 기본적인 형상들이 연구되어졌고 SDOF의 주파수-응답 곡선을 조사하였다.

4.2 형상기억합금을 Absorber로 이용한 진동제어

Williams 등^(33, 34)은 불연속적으로 조절된 형상기억합금 ATVA(adaptive tuned vibration absorber)를 개발하기 위해 형상기억합금의 다양한 탄성계수를 사용하였다. 동일한 작은 원형단면 NiTi 보 한 쌍이 주된 구조물(primary mass)에 심겨져 있고 끝단에 추를 탑재한 형상기억합금 ATVA를 연구하였다. 각 형상기억합금 보에 전기적으로 열을 가함으로써 각 보를 저온과 고온사이의 온도로 변화시켰다. 형상기억합금 ATVA를 탑재한 것과 않은 것에 대한 기본시스템의 진동응답은 그림 9에 그려져 있다. 이 그림 9는 각 외부자극 진동수에서 조절된 외부자극에서 시스템의 정상류 상태 성능을 표현하고 있다. 여기서 형상기억합금 ATVA는 외부자극 진동수를 알고있는 상황에서 적용된 것이다. 만약 외부자극 진동수를 모른다면 또는 그들이 표류한다면 분리적으로 조절되는 형상기억합금 ATVA는 중간 진동수에서 발생하는 주어진 설계와 감소된 성능을 위해 조절된 많은 조건들 때문에 알맞은 해가 될 수 없다고 언

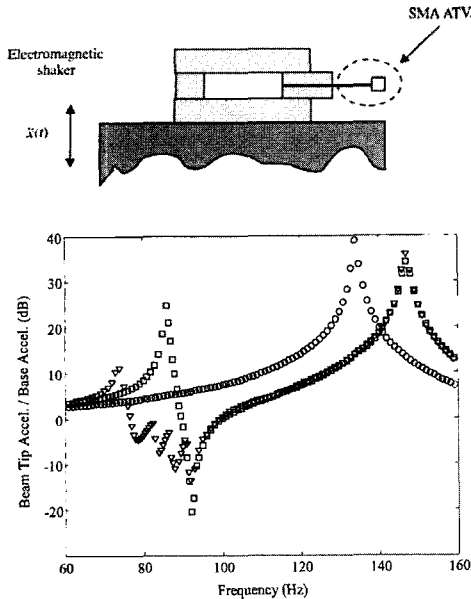


그림 9 끝단 추가 달린 형상기억합금 외팔보 TVA와 시스템 성능 (by Williams 등)

급하였다. 형상기억합금 ATVA의 연속적인 조절을 달성하기 위해 온도조절을 사용하였다. 상변이 온도 범위내에서 중간 온도로 형상기억합금 요소를 가열함에 의해 장치의 고유진동수를 부분적으로 이동시킴을 보여주었다.

4.3 형상기억합금이 삽입된 구조물의 진동해석

Lau⁽³⁵⁾는 형상기억합금 작동기의 일반적인 형태인 NiTi 형상기억합금을 구조물의 동적 응답을 조절하기 위해 복합재 구조물에 삽입하였다. 서로다른 형상기억합금 복합재 보의 감쇠비는 실험적 접근을 통하여 측정하였다. 고유 진동수는 기변형률(prestrain)을 주지 않은 형상기억합금이 삽입된 복합재 보의 오스테나이트 끝온도 이상에서 약간 변화하나 기변형률을 준 형상기억합금을 삽입한 복합재 보의 고유진동수는 증가함을 보여주었다. 그리고 형상기억합금 복합재 보에서 기변형률을 준 것과 주지 않은 삽입된 형상기억합금선의 온도를 증가시키면 감쇠비는

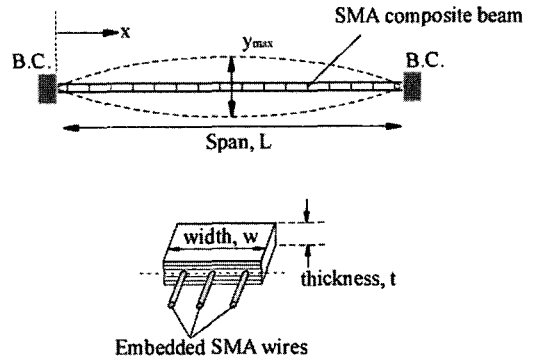


그림 10 형상기억합금이 복합재 보 (by Lau)

증가됨을 보고하였다.

Ghomshei 등⁽³⁶⁾은 두꺼운 형상기억합금 복합재 보의 동적 응답을 위한 비선형 순간 유한요소 모델을 제시하였다. 모재(matrix material)와 삽입된 형상기억합금 리본 또는 선을 가진 두꺼운 3차원 보를 연구하였다. 보의 거동을 예측하기 위해 고차 전단변형 이론과 von-Karman 변형률장을 도입하였고 형상기억합금 거동을 위해서 Brinson 모델을 사용하였다. 유한요소 모델은 수동 그리고 능동 성능 모두를 예측할 수 있도록 개발되었다. 폴리카보네이트 모재층과 모재의 중립면에 삽입된 형상기억합금 리본으로 구성된 보에 대하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과는 형상기억합금층을 작동했을 때 보의 효과적인 진동억제를 잘 설명한다. 형상기억합금 복합재 보의 능동 진동 응답에서 재료 그리고 기하학적 특성의 효과를 살펴봄으로써 매개변수 연구(parametric study)를 수행하였다. 이 연구에서는 형상기억합금 자체의 동적특성을 고려한 것이 아니고 복합재 보에서 탄성계수를 증가시키거나 기변형률에 의해서 복합재 보에 하중을 주는 요소로 작용되었다.

Chen & Levy⁽³⁷⁾는 진동수, 상실인자(loss factor) 그리고 구속되어진 점탄성층과 형상기억합금층을 가진 보의 굽힘 제어에 대한 온도 효과를 연구하였다. 형상기억합금 작동기 층의 온도는 이러

한 구조물의 진동수와 상실인자 결정에 매우 중요하다. 온도에 의해서 영향을 받는 감쇠층의 전단 탄성계수와 층의 높이의 효과도 검토하였다. 따라서 온도는 매우 중요한 역할을 하기 때문에 시스템 제어에 대한 온도 효과를 평가하는 것이 절실하다고 언급하였다. 능동제어에 대한 결과가 이 논문에서 검토되어 있고 이론적인 1차원 보 이론, 열전달 그리고 형상기억합금 구성방정식이 사용되었다.

Ostachowicz & Kaczmarczyk⁽³⁸⁾는 공력하중에 놓인 층간분리부가 있는 다층 복합재 평판의 동적 특성을 해석하였다. 형상기억합금 선이 삽입된 시스템의 동적특성을 예측하기 위해 유한요소 모델을 제안하였다. 초음속 흐름속에 놓인 평판의 고유진동수에서 층간분리부의 효과를 조사하였다. 그리고 플러터 불안정 경계를 결정하였다. 개발된 수치적 모델은 형상기억합금선이 이러한 경계를 수정하기 위해 적용 되어질 수 있다는 것을 보여준다. 따라서 형상기억합금이 기초된 제어 시스템은 플러터 현상 때문에 복합재 구조물의 해로운 동적 응답을 감소시키도록 설계 되어질 수 있다고 언급하였다. 여기서 형상기억합금은 기 실험된 온도와 탄성계수, 기변형률이 고정된 상태에서 온도에 따른 복원력을 이용하여 복합재 평판에 수치적으로 적용함으로써 시뮬레이션이 이루어졌다. 이는 많은 가정을 수반하는 것으로 모구조물의 변형에서 형상기억합금의 변화를 고려하지 않아 형상기억합금 재료 특성을 제대로 반영하지 못한 단점을 가지고 있다. 특히 상변이 구간에서는 작은 응력에도 큰 변형이 발생하기 때문에 진동특성이 나빠질 수도 있으나 이에 대한 언급은 이루어져 있지 않다.

Park 등⁽³⁹⁾은 형상기억합금선이 삽입된 열에 의해 좌굴이 발생하는 복합재 평판의 진동거동을 조사하였다. 1차 전단변형 평판이론에 기초한 비선형 유한요소 방정식이 형상기억합금선이 삽입된 적층 복합재 평판 해석을 위해 주어졌다. 온

도에 의존하는 형상기억합금과 복합재 모재의 물성치를 위해 최초의 변형과 응력의 영향을 고려되도록 증분 방법(incremental method)이 채택되었고 큰 열변형과 임계온도를 예측하기 위하여 매칭 방법을 사용하였다. 전좌굴(pre-buckled) 그리고 후좌굴(post-buckled)된 영역에서 형상기억합금선이 삽입된 적층 복합재 평판의 진동특성을 수치해석을 통하여 보여주고 있다.

4.4 형상기억합금이 외부에서 부착된 구조물의 진동제어

Gandhi & Chapuis⁽⁴⁰⁾는 한쪽 끝에 추가 달린 외팔보의 굽힘(flexural) 진동의 수동 감쇠를 위해 초탄성 거동을 가지는 형상기억합금선의 효능성을 시험하였다. 시스템의 유한요소 모델을 개발하였고 실험적 결과와 비교검증 하였다. 형상기억합금 거동은 진폭에 의존하는 복합 탄성계수를 이용하여 모델링 하였다. 형상기억합금이 임의하중 이상에서 상변이가 발생하여 에너지가 발산되기 때문에 형상기억합금선에 의한 감쇠는 형상기억합금의 변형률이 크게 발생할수록 외부 자극력의 크기가 커짐에 의해 증가되어 짐을 수치적으로 보여주었다. 선의 단면적을 증가시키는 것은 낮은 외부 자극력 크기에 대해 감쇠 효과가 더욱 크나 더 큰 진폭에서 감쇠효과는 감소한다. 보와 형상기억합금선과의 각도는 영향을 미치는 매개변수이고 10~20°에 값에서 최대로 감쇠됨을 발견하였다. 시스템의 감쇠는 형

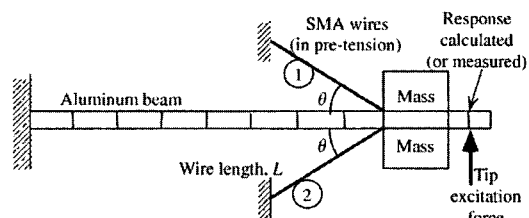


그림 11 형상기억합금이 외부에서 부착된 구조물 (by Gandhi & Chapuis)

상기억합금의 길이에 크지 않게 의존하며 끝단 추의 질량에 의해서 영향을 받지 않는다고 보고 하였다. 그러나 형상기억합금은 온도에 대단히 민감한 재료이지만 이 연구에서는 형상기억합금의 온도에 대한 결과는 언급하지 않았다.

5. 맺음말

지금까지 형상기억합금의 독특한 특성들, 이들의 정적 특성을 적용한 작동기와 동적 특성을 적용한 진동제어장치에 대하여 검토하였다. 앞서 기술한 검토를 통해 보다라도 형상기억합금은 다양한 공학분야에 적용될 수 있는 아주 우수한 재료임에는 틀림없다. 그러나 아쉬운 점을 몇 가지 들어보면 형상기억합금의 특성에 대한 표준화와 안정화(stability)가 이루어지지 않았다는 것이다. 본론에서도 언급하였듯이 형상기억합금은 결정화 과정, 열처리 조건, 트레이닝 그리고 시간에 따른 효과에 의해서 그 특성들이 매우 다양하게 변할 수 있다. 심지어 동일한 재료에서 다른 특성을 나타낼 수도 있다. 그리고 작동기와 진동제어에서 심각한 단점이 되는 영구변형이 작동이 반복되는 동안에 계속적으로 축적된다는 것이다. 이와같이 형상기억합금은 그 특성상 높은 잠재력과 아울러 현 상태에서는 적용에 한계를 가지고 있다. 따라서 재료적인 측면에서 더욱 적용가능하고 성능이 좋은 재료 개발이 요구되어진다. 신뢰도 높은 재료가 개발된다면 더욱 정교하고 신뢰할 수 있는 형상기억합금 적용체를 만들 수 있을 것이고 그 작동 거동 예측도 더욱 높은 신뢰도를 가질 것이다.▲

후 기

이 글은 산업자원부의 21C 프론티어사업중 "스마트 무인기 기술개발사업"의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Birman V., 1997. Review of Mechanics of Shape Memory Alloy Structures. Applied Mechanics Review. 50, pp. 629~645.
- (2) Humbeeck J. V., Shape Memory Alloys : a Material and a Technology. Adv Eng Mater. 3, pp. 837~850.
S. R. White, J. B. Berman, 1998. Thermo-Mechanical Srsponse of SMA Composite Beams with Embedded Nitinol Wires in an Epoxy Matrix. J. Int. Mater Sys Struct. 9, pp. 391~400.
- (3) Rogers C. A., Barker D. K., and Jaeger D. A., 1998, Introduction to Smart Materials and Structures, Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues(Selected Papers Presented at the US Army Research Office Workshop on Smart Materials, Structures and Mathematical Issues), C. A. Rogers(ed), Technomic, Lancaster, pp.17~28.
- (4) Wada B. K., Fanson J. L., and Crawley E. F., 1990. Adaptive Structures, J Intelligent Mat Syst Struct 1, pp.157~174.
- (5) Hanagud S., Nagesh Habu G. L., and Zhang J., 1992, Smart Structures-An Overview, Developments in Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 16, B Antar et al.(eds), Univ of Tennessee Space Inst, Tullahoma T. N., II .20.1~ II .20.9.
- (6) Crawley E. F., 1994, Intelligent Structures for Aerospace : a Technology Overview and Assessment, AIAA J 32, pp.1689~1699.
- (7) Gandhi M. V. and Thompson B. S., 1992, Smart Material Structures, Chapman & Hall, London.
- (8) Wayman C. M., 1975. Deformation,

- Mechanisms and Other Characteristics of Shape Memory Alloys, Shape Memory Effects in Alloys, J perkins, Plenum Press, New York, pp.1~27.
- (9) Wayman C. M. and Duerig T. W., 1990, Introduction to Martensite and Shape Memory, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, T. W. Duerig et al(eds), Butterworth-Heinemann, London, pp.3~20.
- (10) Wayman C. M. and Shimizu K., 1992, Shape Memory(marmem) Effect in Alloys, Metal Sci J 6, pp.175~183.
- (11) Krishnan R. V., Delaey L., Tas H. and Warlimont H., 1974, Review, Thermoplasticity, Pseudoelasticity and the Shape Memory Effects Associated with Martensitic Transformation, J Mat Sci 9, pp.1535~1544.
- (12) Rodrigueus C. and Brown L. C., 1975, Mechanical Properties of SME Alloys, Shape Memory Effects in Alloys, J perkins(ed), Plenum Press, New York, pp.29~58.
- (13) Perkins J.(Ed.), 1975, Shape Memory Effects in Alloys, Plenum Press, New York.
- (14) Cross W. B., Kariotis A. H., and Stimler F. J., 1970, Nitinol Characterization Study, NASA CR-1433.
- (15) Jackson C. M., Wangner J. J., and Wasilewski R. J., 1972, 55-Nitinol-The Alloy with a Memory : Its Physical Metallurgy, Properties, and Applications, NASA SP-5110.
- (16) Baumgart F., Jorde J., and Reiss H. G., 1976, Technische Mitteilunger Krupp, Forschung-Sberichte, Vol.34, July, Translation from German : Memory Alloys-properties, Phenomenological Theory and Applications, NASA TM-77904.
- (17) Funakubo H., Shape Memory Alloys, 1987, Cordon and Bleach, New York.
- (16) Shaw J. A. and Kyriakides S., 1995, Thermomechanical Aspects of Nitinol, J Mech Phys Solids 43, pp.1243~1281.
- (18) Paine J. S. N. and Rogers C. A., 1994, Review of Multi-functional SMA Hybrid Composite Material and Their Applications, Adaptive Structures and Compsite Materials : Analysis and Application, E. Garcia, H. Cudney.
- (19) Paine J. S. N., Rogers C. A., and Smith R. A., 1994, Adaptive Composite Materials with Shape Memory Alloy Actuators for Cylinders and Pressure Vessel, Proc of 1994 SPIE Smart Structures and Intelligent Systems Symp, Smart Structures and Intelligent Systems, NW hagoon(ed), Vol.2 2190, pp.390~401.
- (20) Tanaka K., Kobayashi S. and Sato Y., 1986, Thermomechanics of Transformation Pseudoelasticity and Shape Memory Effect in Alloys, Int J Plasticity 2, pp.59~72.
- (21) Liang C. and Rogers C. A., 1990, One-Dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape Memory Materials, J Intelligent Mat Syst Struc 1, pp.207~234.
- (22) Liang C. and Rogers C. A., 1992, Design of Shape Memory Alloy Actuators", J Mech Design 114, pp.223~230.
- (23) Brinson L. C., 1993, One-dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys : Thermomechanical Derivation with Non-constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable, J Intelligent Mat Syst Struct 4, pp.229~242.
- (24) Brinson L. C. and Lammering R., 1993, Finite Element Analysis of the Behavior of Shape Memory Alloys and their Application, Int J Solids Struct 30, pp.3261~3280.

- (25) Boyd, J. G. and D. C. Lagoudas, 1996, A Thermodynamic Constitutive Model for the Shape Memory Alloy Materials Part I, the Monolithic Shape Memory Alloy, *International Journal of Plasticity* 12, pp.805~842.
- (26) Lagoudas, D. C., Z. Bo and M. A. Qidwai, 1996, A Unified Thermodynamic Constitutive Model for Sma and Finite Element Analysis of Active Metal Matrix Composite, *Mechanics of Composite Materials and Structures* 3, pp.153~179.
- (27) Abeyaratne R. and Knowles J. K, 1993, One-dimensional Continuum Model for Shape Memory Alloys, *Int J Solids Struct* 31, pp. 2229~2249.
- (28) Abeyaratne R. and Kim S. J., 1997, Cyclic Effects in Shape-memory Alloys : A One-Dimensional Continuum Model, *Int J Solids Struct* 34, pp.3273~3289.
- (29) Cho M., Kim S., 2005, Structural Morphing Using Two-way Shape Memory Effect of SMA. *Int J. Solid and Structures*. 42, pp.1759~1776.
- (30) Masuda A., Noori M., 2002, Optimization of Hysteretic Characteristics of Damping Devices based on Pseudoelastic Shape Memory Alloys. *Int. J. Non-Linear Mech.* 37, pp.1375~1386.
- (31) Collet M., Fiktete E., LExcellent C., 2001, Analysis of the Behavior of a Shape Memory Alloy Beam under Dynamical Loading. *Eur. J. Mech. A/Solids*. 20, pp.615~630.
- (32) Sun S., Rajapakse R. K. N. D., 2003, Simulation of Pseudoelastic Behaviour of SMA under Cyclic Loading. *Computational Materials Science*. 28, pp.663~674.
- (33) Williams K. A., Chiu G. T., Bernhard R. J., 2005, Dynamic Modeling of a Shape Memory Alloy Adaptive Tuned Vibration Absorber. *J. Sound and Vibration*. 280, pp.211~234.
- (34) Williams K. A., Chiu G. T.-C., Bernahard R. J., 2002, Adaptive-passive Absorbers Using Shape Memory Alloys. *J. Sound and Vibration*. 249, pp.835~848.
- (35) Lau K. T., 2002, Vibration Characteristics of SMA Composite Beams with Different Boundary Conditions. *Materials and Design*. 23, pp.741~749.
- (36) Ghomshei M. M., Tabandeh N., Ghazavi A., Gordaninejad F., 2005, Nonlinear Transient Response of a Thick Composite Beam with Shape Memory Alloy Layers. *Composites : Part B*. 36, pp.9~24.
- (37) Chen Q., Levy C., 1999, Vibration Analysis and Control of Flexible Beam by Using Smart Damping Structures. *Composites : Part B*. 30, pp.395~406.
- (38) Ostachowicz W. M., Kaczmarczyk S., 2001, Vibration of Composite Plates with SMA Fibres in a Gas Stream with Defects of the Type of Delamination. *Composite Structures*. 54, pp. 305~311.
- (39) Park J., Kim J., Moon S., 2004, Vibration of Thermally Post-buckled Composite Plates Embedded with Shape Memory Alloy Fibers. *Composite Structures*. 63, pp.179~188.
- (40) Gandhi F., Chapuis G., 2002, Passive Damping Augmentation of a Vibrating Beam Using Pseudoelastic Shape Memory Alloy Wires. *J. Sound and Vibration*. 250, pp.519~539.