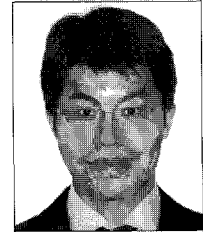


# 형상기억합금

## Shape Memory Alloys



노진호\*

\* 한국항공대학교 항공우주기계공학부 조교수

형상기억합금(Shape Memory Alloys : SMAs)은 소성 변형없이 약 10%정도의 매우 큰 변형을 유지하거나 복원할 수 있고, 온도 변화에 따라 큰 변형 뒤 원래의 형상으로 되돌아가는 매우 흥미로운 재료이다. 이런 독특한 특성은 외부에서 작용하는 힘과 온도에 따라, 내부 결정들의 상(phase) 변화에 의해서 일어나게 된다. 스마트 재료와 구조기술의 실용적인 관심의 증가로 과거 10여년 동안 형상기억합금에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 이런 연구의 결과로 형상기억합금의 내부 결정체에 대한 정보, 형상기억합금의 거시적(macroscopic)/미시적(microscopic) 거동에 대한 이해, 그리고 새로운 합금으로의 개발 등 많은 연구들이 수행되어졌고, 이런 연구들은 매우 폭넓은 분야에 적용되어지고 있다<sup>1)</sup>.

기존의 작동기에 비해 형상기억합금을 이용한 작동기의 장점은 작은 구조적 형상으로 제작할 수 있고 외부 온도의 변화로 간단하게 작동기의 운동과 힘을 제어할 수 있다는 것이다. 열 변화가 기계적 구동 장치의 원리로 쓰이는 응용기구 장치에서는 추가적인 외부 에너지원 없이도 형상기억합금을 작동시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한, 형상기억합금의 배열을 조절하여 작은 온도 변화로 형상기억합금의 상(phase) 변화를 얻을 수 있고, 이를 통하여 원하는 운동과 힘을 얻을 수 있다. 형상기억합금이 가지고 있는 매우 큰 복원(recovery) 변형력은 가변 형상 구조물을 설계하는데

있어 매우 유용하게 이용되어질 수 있다. 일반적으로 사용되고 있는 기계적인 작동기에 비해 형상기억합금은 상대적으로 무게가 가볍고 무게 비에 따른 매우 큰 작동력을 가지고 있다. 여러 스마트 재료 작동기의 단위 무게당의 작동에너지의 비교를 그림 1에서 보여주고 있다. 형상기억합금이 다른 스마트 재료들에 비해 100배 이상의 매우 큰 작동 에너지를 가지고 있음을 알 수 있다.

형상기억합금의 열-기계적 거동 특성은 응력과 온도의 함수로 내부 상(phase) 변화에 의해 결정된다. 작용하는 응력 없이 높은 온도 상태에서의 형상기억합금은 오스테나이트(austenite) 상에 존재하게 되고, 온도를 점점 낮춤에 따라 마르텐사이트(martensite)로 상 변형이 일어나게 된다. 형상

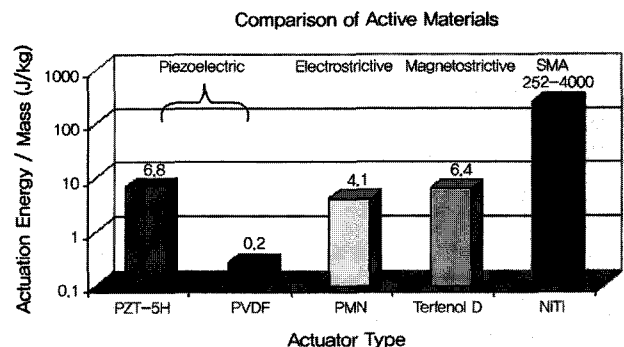


그림 1 스마트 재료들의 작동력 비교

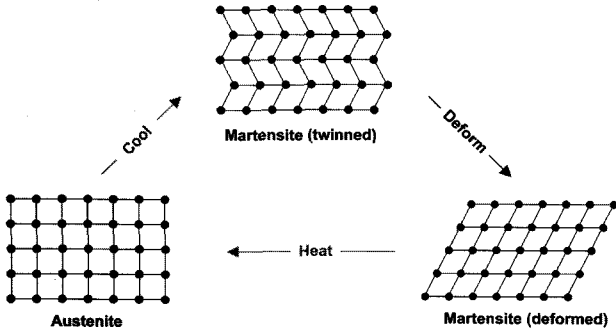


그림 2 형상기억효과의 개략도

기억합금의 대표적인 특성 중 형상기억효과(Shape Memory Effect : SME)는 매우 큰 구조적 변형 뒤에도, 주위 온도를 올려줌에 따라 변형 전의 원래의 형상으로 되돌아가는 현상으로서, 도시적인 과정이 그림 2에 나타나 있다. 응력이 없는 상태에서 오스테나이트에서 마르텐사이트 상 변형에는 트윈드(twinned) 마르텐사이트 상으로 체적변화없이 상 변형이 일어난다. 결정학(crystallography)적으로 모든 마르텐사이트 형태는 동등하고, 단지 결정 방향만 달라지게 된다. 형상기억합금이 매우 큰 복원력을 얻는 것은 이런 상 변형특성 때문이다. 형상기억합금에 단일 방향으로 하중을 가해줄 때, 임계(critical) 응력 값 이상에서 트윈드(twinned) 마르텐사이트 상이 디트윈(detwinning) 과정을 거치게 되고, 하중의 부하/loading) 그리고 제하(unloading) 과정을 통하여 하중이 작용하는 방향으로 디트윈드(detwinned) 마르텐사이트 상 변형이 생기게 된다. 하중이 작용할 때, 디트윈드(detwinned) 마르텐사이트로의 상 변형에서 잔류 변형이 생기게 되고, 외부에서 열을 가해주게 되면 다시 원래의 상태로 돌아가게 되는데, 이런 현상을 형상기억효과(SME)라고 부른다.

하지만, 재료가 오스테나이트 상을 결정하는 온도( $A_f$  :

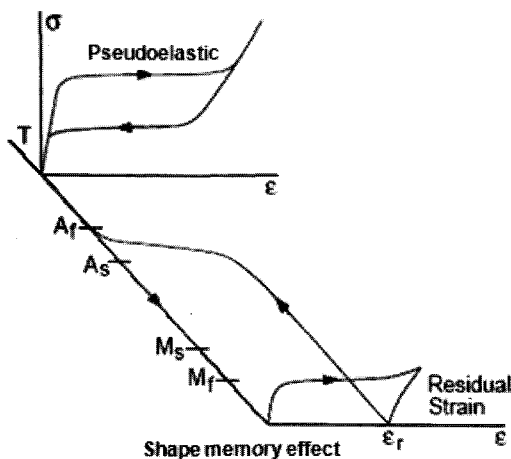
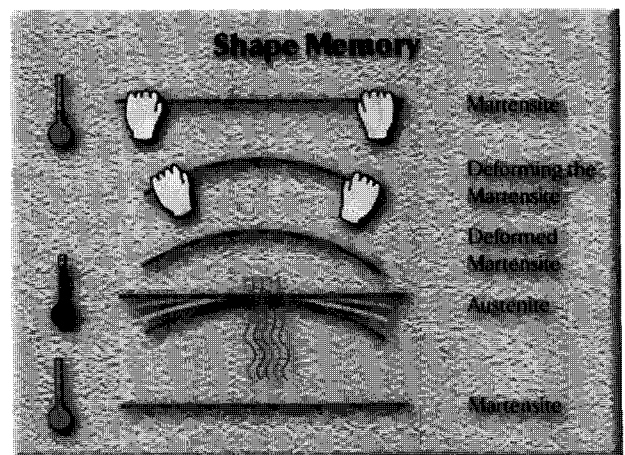


그림 3 온도 범위에 따른 형상기억합금의 거동 특성

austenite finish) 보다 높은 환경에 있다면, 응력이 없는 상태에서 마르텐사이트 상은 불안정해지기 때문에 제하시 원래의 형상으로 다시 되돌아온다. 이런 부하 그리고 제하의 전체적인 거동을 의탄성(pseudoelasticity) 효과라고 부른다. 만약 재료의 온도가  $A_f$ (austenite start) 보다 낮은 상태라면 제하시 잔류 변형은 존재하게 되고 열을 가해주면, 초기의 변형 전 상태로 되돌아오게 되는 형상기억효과 현상을 보여준다.

그림 3은 온도 범위  $A_f$ (austenite finish) >  $A_s$ (austenite start) >  $M_s$ (martensite start) >  $M_f$ (martensite finish)에 따른 형상기억합금의 열-기계적 거동 현상을 보여준다. 비교적 낮은 온도( $M_f$ 이하)에서는 큰 변형뒤에 잔류 변형이 발생하게 된다. 이때 온도를  $A_f$  이상으로 올려주게 되면 변형전의 원래의 형상으로 뒤돌아 감을 알 수 있다(형상기억효과). 또한,  $A_f$  이상의 높은 온도에서는 큰 변형 뒤에도 소성변형 없이 원래의 형상으로 뒤돌아 오는 의탄성 현상을 관찰할 수 있다.

위에서 언급된 형상기억합금의 매우 독특한 열-기계적 현상(형상기억효과와 의탄성거동)을 이용하여 구조물의 형상 변형 및 진동제어를 위한 재료로 항공우주 및 기계 그리고 생체의공학(bio-medical engineering) 분야에 널리 응용되어 지고 있다<sup>2)</sup>. 우선, 항공우주 및 기계분야의 적용 사례를 살펴보면, 미국 및 유럽에서는 수행되고 있는 형상적응날개(shape adaptive wing) 기술개발에서 대표적으로 적용된 사례를 찾아 볼 수 있다. 형상적응날개 기술은 비행조건에 따라 날개 및 항공기 구조물의 형상을 외부 유동 흐름에 능동적으로 적응(adaptation)하도록 만들어, 항공역학적(aerodynamic) 성능을 향상시키는 기술로, 일반 항공기뿐만 아니라 무인기의 성능을 향상시키는 기술이다. 그림 4는 Texas A&M, Lagoudas 교수 연구팀이 수행한 형상기억합금 작동기를 이용한 active



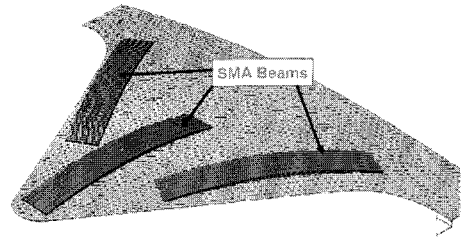


그림 4 형상기억합금 작동기를 이용한 active chevrons

chevrons을 보여주고 있다<sup>3)</sup>. 이 연구에서는 이륙 및 착륙시의 유동흐름 조건에 따라 엔진의 배기구 단면적을 능동적으로 변화시켜, 유동흐름으로 유발되는 소음을 줄여주는 것이다. 연구결과 상당부분의 소음을 줄여줄 수 있었으며, Boeing 787에 장착을 시켜 비행시험을 수행하였다. 엔진에서 배출되는 열원을 사용하여 형상기억합금 작동기를 구동시켰으며, 형상기억합금의 매우 큰 변형에너지를 이용하여 엔진 출구의 단면적을 효과적으로 변형시킬 수 있었다.

형상기억효과를 이용한 작동기의 응용 외에 형상기억합금 자체의 감쇠(damping) 특성을 이용하여 구조물에 유발

되는 진동을 줄여주는 응용연구를 찾아 볼 수 있다. 그림 5의 왼쪽은 형상기억합금의 응력-변형률 선도를 보여주고 있다. 형상기억합금은 부하시 8%이상의 매우 큰 변형률이 일어난 뒤에도 하중을 없애주면, 다시 원래의 상태로 되돌아오는 의탄성(pseudoelasticity) 거동 특성을 가지고 있다. 이런 의탄성 거동 특성은 그림 5의 오른쪽에서 보듯이 안정태에 응용될 수 있으며, 큰 굽힘이나 외부충격으로부터 안정태가 부러지는 것을 방지해 준다. 다른 금속재료에 비해 형상기억합금의 매우 큰 응력-변형률 이력(hysteresis) 선도는 외부 에너지를 충분히 흡수할 수 있음을 보여주며, 이

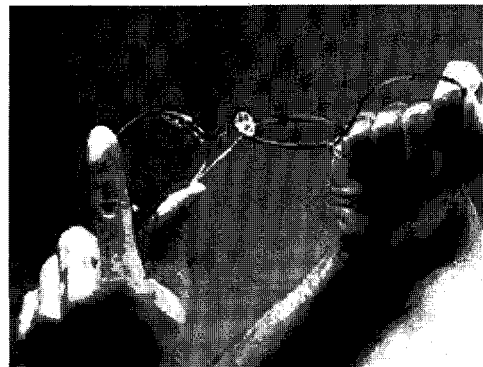
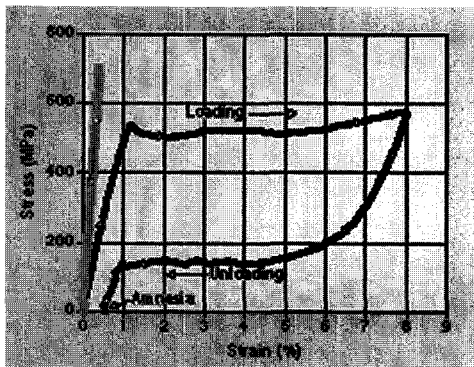


그림 5 형상기억합금의 의탄성거동 특성

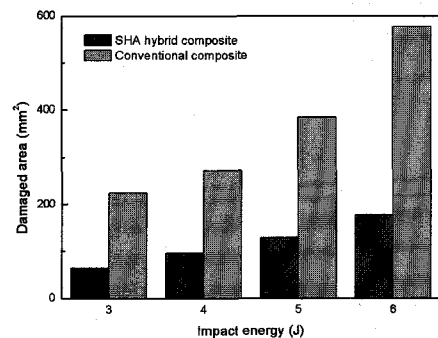
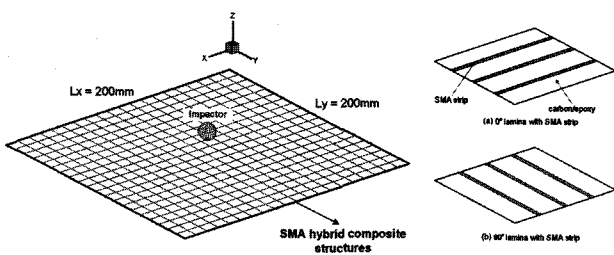


그림 6 SMAHC 구조물의 충격저항 특성

런 특성을 이용하여 외부의 충격에 의해 발생할 수 있는 구조물의 진동 및 충격손상을 효과적으로 줄여줄 수 있다. 적용된 연구들은 대부분 충격에 상대적으로 취약한 복합재료(composite materials) 구조물에 응용이 되어지고 있다. 일반적으로 지름이 매우 작은 형상기억합금 선(wire)을 복합재료 구조물에 삽입시키는, SMAHC(Shape Memory Alloy Hybrid Composite) 구조물을 제작하여 충격에 대한 저항성을 향상 시켜줄 수 있다. 그림 6은 각각의 복합재료 층(lamina)에 형상기억합금을 삽입시킨 SMAHC 평판의 저속 충격의 저항 특성을 보여주고 있다. 형상기억합금의 뛰어난 충격흡수 능력으로 일반 복합재료에 비해 상대적으로 충격에 의한 손상을 줄여줌을 보여주고 있다<sup>4)</sup>.

최근 의료계에서 가장 주목 받고 있는 생체 재료는 형상기억합금으로 그 사용이 증대되고 용도도 다양해지고 있다. 형상기억합금은 1950년대 말에 생체의료용으로 적용되기 시작하면서 오늘날까지 정형외과 및 치과용 보철물, 악안면(dentofacial) 보철물, 심장혈관 계통 의료기기 핵심 소재로서 꾸준히 사용되고 있다. 형상기억합금 임플란트(implant)는 취급 및 휴대가 간편하고, 어떤 부위나 형태의 골절상이라도 치료가 가능하여 그림 7과 같이 골절된 뼈를 접합하기 위한 클립(clip) 등으로 다양하게 사용되고 있다. 또한, 혈관 수술시에도 형상기억합금을 이용한 스텐트(stent) 기술이 사용되고 있다<sup>5)</sup>. 스텐트는 혈관, 위장관, 담도 등 혈액이나 체액의 흐름이 악성 혹은 양성질환의 발생으로 순조롭지 못할 때 외과적 수술을 시행하지 않고 X-선

투시하에서 좁아지거나 막힌 부위에 삽입하여 그 흐름을 정상화 시키는데 사용되는 원통형의 의료용 재료이다. 스텐트가 압축되어 최소의 부피를 가진 상태에서 병변에 도달한 후 원하는 크기로 스스로 팽창하여 협착부위를 넓혀주는 역할을 수행한다(그림 8). 스텐트를 이용한 중재적 시술의 장점은 수술을 통한 방법보다 간편하며, 전신마취에 의한 부담을 줄일 수 있고, 성공률도 높아 세계적으로 널리 이용되고 있다<sup>6)</sup>. 또한 형상기억합금으로 만든 유클립(U-Clip)은 혈관과 조직 봉합뿐만 아니라 분할술과 같은 정교한 수술에서 요구되는 빠르고 정확한 안정적인 봉합을 위해 개발된 신의료기술 제품이다. 높은 탄성과 형상기억 특성을 지닌 형상기억합금으로 만들어진 이 제품은 U자형 자가 폐쇄클립(self-closing clip)과 끝에 봉합침(needle)이 달린 시스템으로 구성되어 있다. 형상기억합금 클립은 봉합침이 달

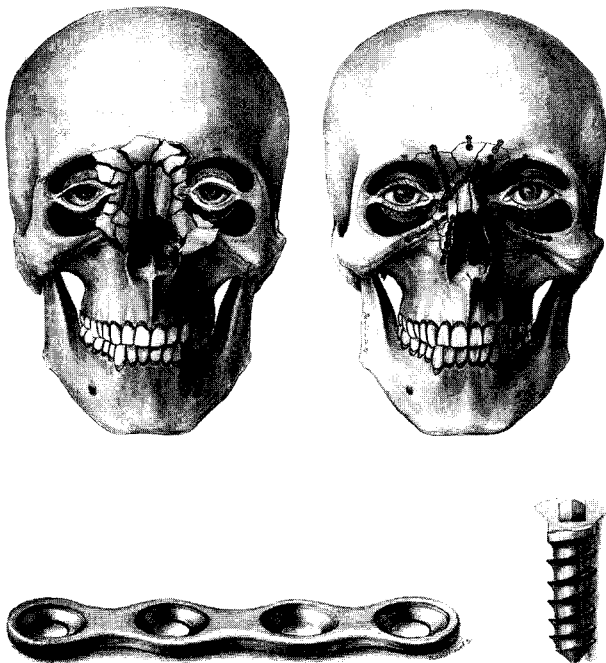


그림 7 형상기억합금 임플란트 구조물

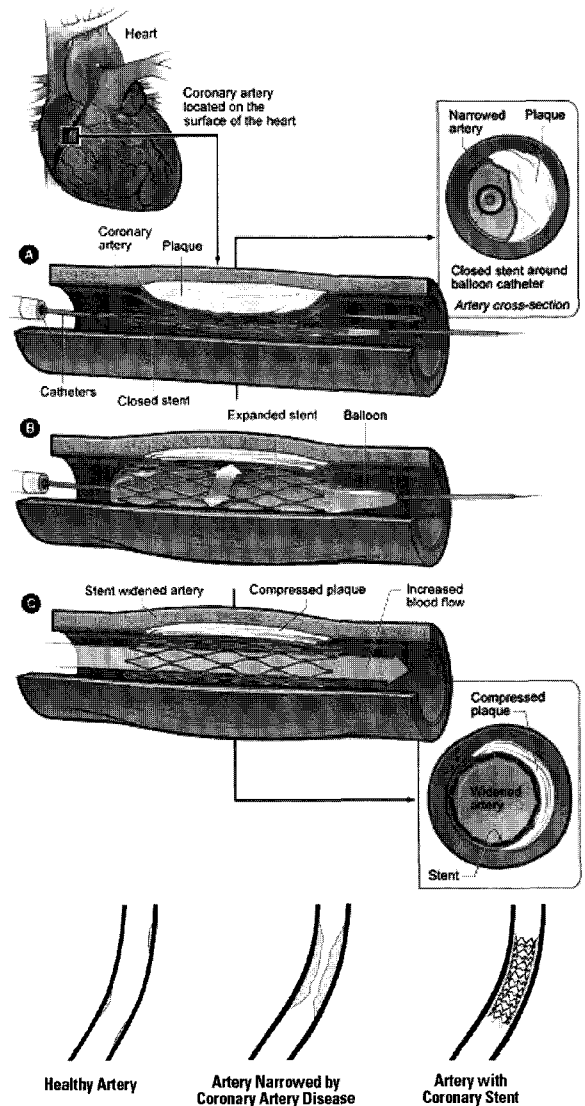


그림 8 형상기억합금 스텐트의 병변 치료원리

린 시스템을 통해 혈관과 조직을 통과한 후 바로 클립의 원래 형상인 U자형으로 복원돼 스스로 봉합부위를 만들게 된다. 나머지 폴림시스템은 봉합침홀더로 살짝 집어주면 클립과 자동으로 분리된다. 특히 빠르고 정확한 혈관 봉합이 매우 중요한 수술과 로봇수술(robotic surgery)을 이용한 수술에서의 시간 단축에 크게 기여할 것이다.

형상기억합금만의 독특한 특성(형상기억효과와 의탄성 거동)을 이용하여, 항공우주 및 기계 그리고 부가가치가 큰 생체의공학 분야까지 광범위하게 응용 연구되어 지고 있다. 다른 스마트 재료와 비교하여 형상기억합금은 매우 큰 구동에너지를 가지고 있다. 하지만, 충분한 구동력을 얻기 위한 반응시간이 느리고 형상기억합금이 가지고 있는 이력(hysteresis) 특성으로 인한 비선형성이 크다는 단점으로 인하여 아직까지 극복해야 할 여러 문제점들이 있다. 최근에는 빠른 반응시간을 얻기 위하여 자기장(magnetic field)에 의해 구동력을 얻을 수 있는 MSMAs(Magnetic SMAs) 및 얇은 박막(thin film) 형태의 형상기억합금의 연구개발을 통하여, 정적인 형상제어 뿐만 아니라 폭넓은 구조물의 진동제어에 적용될 수 있는 새로운 작동기로의 개발도 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. D. C. Lagoudas, "Shape Memory Alloys : Modeling and Engineering Applications," Springer, 2007
2. T. Yoneyama and S. Miyazaki, "Shape Memory Alloys for Biomedical Applications," CRC Press, 2009
3. J. H. Mabe, F. Calkins, G. Butler, "Boeing's Variable Geometry Chevron, Morphing Aerostructure for Jet Noise Reduction," 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Rhode Island, pp.1-19, 2006
4. J. H. Roh, E. H. Kim, and I. Lee, "Low Velocity Impact Behaviors of Composite Structures with Embedded Shape Memory Alloy Films," 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, IL, pp.1-10, 2008
5. C. Li, C. Zou, Z. Peng, and H. Ma, "Clinical Application of Custom Aortic Stent-graft," Materials Sciences Forum, 394-395, pp.29-32, 2002
6. N. B. Morgan, "Medical Shape Memory Alloy Applications-the Market and Its Products," Materials Science and Engineering A, 378, pp.16-23, 2004

[담당 : 배재성, 편집위원]