

형상기억 복합재료



이 상 관
(KIMM 공정연구부)

- '86 경북대학교 금속공학과 (학사)
- '88 경북대학교 금속공학과 (석사)
- '02 한국과학기술원 재료공학과(박사)
- '88 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

업 문 광
(KIMM 공정연구부)



- '88 서울대학교 기계공학과 (학사)
- '90 서울대학교 기계공학과 (석사)
- '95 서울대학교 기계공학과 (박사)
- '98 미국 Northwestern Univ. (Post Doc.)
- '95 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



백 영 민
(KIMM 공정연구부)

- '93 연세대학교 기계공학과 (학사)
- '96 포항공과대학교 기계공학과 (석사)
- '02 포항공과대학교 기계공학과 (박사)
- '02 - 현재 한국기계연구원 위촉연구원

1. 서 론

지능(intelligence)의 개념은 그림 1에 나타낸 바와 같이 감지(sensing), 작동(actuating) 그리고 제어(controlling) 혹은 정보 처리 능력을 의미한다. 자극에 따라, 미리 결정된 방법으로 적절한 시간동안 반응할 수 있으며, 자극이 제거되자마자 원래 상태로 되돌아가게 된다. 일반적으로, 센서 혹은 작동기(actuator)가 심어진 복합 구조물은 지능형 재료라기보다는 적응 구조물(adaptive structure)이라고 불리어 진다. 최근 들어 형상 기억합금(shape memory alloy, SMA)과 압전 재료 (piezoelectric materials)와 같은 적응성 특징을 가진 몇몇의 소재들이 개발됨에 따라 이 들을 이용하여 복합화하면 감지, 제어, 응답을 위한 고유의 기능들을 가진 신 개념의 복합재료를 만들 수 있다. 압전 재료는 센서와 작동기로서의 특성이 우수하나 대변형이 어려운 단점이 있다. 형상기억합금은 열이나 응력 자극을 감지할 수가 있고, 작동이나 어떤 미리 결정된 반응들을 나타낼 수 있다. 따라서 형상, 변형, 강성, 고유 진동수, 감쇠(damping) 등과 같은 기술적 인자들을 제어하는 것이 가능하므로 센서와 작동기로서 사용이 가능하다. 또한 이러한 형상기억합금은 높은 주파수 영역에서의 작동은 어렵지만, 낮은 주파수 영역에서는 작동되므로 대변형 작동기로도 적합하다. 진동의 능동 제어를 위한 일반적인 기술들은 감쇠의 수단으로서 유공압(hydraulics)을 종종 이용한다. 그

러나 몇몇의 응용 분야에서 유공압은 너무 무거운 단점이 있을 뿐만 아니라 우주 같은 특별한 환경 하에서는 적합하지 못하다. 반면에, 형상기억합금을 이용하여 만든 복합재료는 경량, 고비강도, 고비강성 등의 구조적 특성과 재료가 가지는 고유의 특성으로 인하여 우주환경 등 특별한 환경하의 능동 제어 뿐만 아니라 다양한 분야에서도 활용이 가능한 첨단 소재이다.^[1]

따라서 본 소고에서는 적응성 소재로서 적합한 특성을 나타내는 형상기억합금의 형상기억 효과에 대하여 간단히 살펴보고, 형상기억합금을 복합재료에 적용하기 위한 기본 원칙과 지금까지 개발된 형상기억 복합재료의 종류에 대하여 살펴보고자 한다.

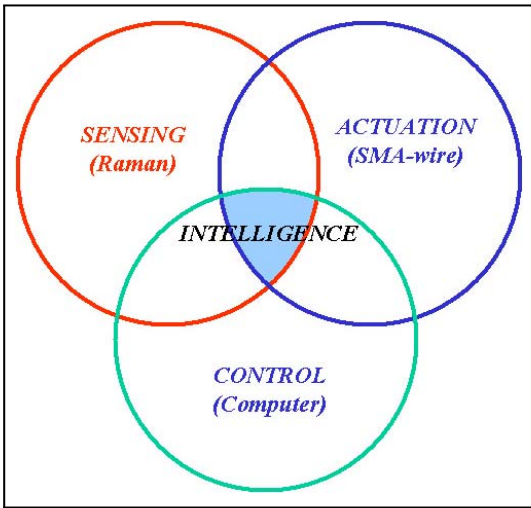


그림 1. 지능의 개념

2. 형상기억 효과

형상기억합금이란 적절한 온도로 가열하였을 때 변형 전의 형태로 되돌아 갈 수 있는 금속 재료를 말하고 이러한 특성을 형상기억 효과(shape memory effect, SME)라고 한다. 형상기억 효과는 주로 마르텐사이트 변태(martensitic transformation)로 인해 발생하게 되는데 이는 일반적인 탄소강에서의 마르텐사이트 변태와 유사하다.

고온의 오스테나이트(austenite) 상태의 형상기억합금을 마르텐사이트 변태 종료 온도, M_f , 이하로 냉각시키면 저온의 마르텐사이트로 변태를 하게 된다. 이때 자기적응특성(self-accommodating property)에 의해 최대 24 방향의 쌍정구조(twinned martensite)를 갖게 된다. 이로 인해 마르텐사이트 변태에 의해 발생된 미시적인 형상 변화는 서로 상쇄되어 거시적인 형상 변화는 거의 없게 된다. 그러나 이러한 쌍정구조의 마르텐사이트 상태의 형상기억합금에 힘을 가하게 되면 서로 다른 방향의 쌍정들이 일정한 방향을 갖게 되고(detwined martensite), 이로 인해 힘이 가해진 방향으로 거시적인 형태가 변하게 된다. 형태가 변화된 형상기억합금을 오스테나이트 변태 종료 온도, A_f , 이상으로 가열하면 형상기억합금은 고온의 오스테나이트로 되돌아가게 되고 거시적인 형태도 변형 전의 초기 형태로 되돌아간다^[2,3]. 이러한 전체적인 거동의 과정을 그림 2에 나타내었다. 그림 3에 Ni-Ti 합금의 쌍정 마르텐사이트와 detwinned 마르텐사이트의 미세 조직 사진의 예를 나타내었다^[4]. 이러한 형상기억 효과의 경우 고온의 모상의 형태만을 기억하게 된다. 그러나 이방향성 형상기억효과(two way shape memory effect, TWSME)를 이용할 경우 고온의 모상의 형태뿐만이 아니라 저온에서의 변형된 형태 모두를 기억시킬 수 있다. 과도한 변형이나 반복적인 변형이 형상기억합금에 가해지게 되면 형상기억합금 내에 전위밀도가 높아져서 잔류응력장이 형성되게 된다. 이로 인해 마르텐사이트에서의 구조가 안정화되고 마르텐사이트에서의 형태가 기억되게 된다. 이방향성 형상기억 효과를 갖게 하는 방법에는 여러 가지가 있는데 가장 간단한 방법으로 마르텐사이트 상태의 형상기억합금을 과도한 변형을 시켜서 이방향성 형상기억효과를 갖게 하는 것이다. 또한 반복적인 형상기억 과정(shape memory cycling)이나 의탄성 탄성 과정(pseudo-elastic cycling), 구속가열 과정(constrained temperature cycling)에 의해서도

이방향성 형상기억효과가 얻어 질 수 있다^[5]. 그 외에 구속시효(constrained aging)에 의한 방법도 알려져 있다^[6].

형상기억합금은 형상기억효과 이외에 의탄성이라고 하는 독특한 성질을 갖는다. A_f 온도 이상에서 형상기억합금에 힘을 가하면 마르텐사이트 변태가 일어나게 된다. 이때 힘을 제거하면 다시 역방향의 변태가 일어나게 되고 형상기억 효과에 의하여 본래의 형태로 되돌아가게 되는데 이러한 거동을 의탄성(pseudo-elasticity) 또는 초탄성(super-

elasticity)이라고 한다. 의탄성 과정이나 이방향성 형상기억 효과를 나타내는 과정은 이력(hysteresis) 현상을 동반하게 되는데 이러한 이력 현상은 그림 4에 나타낸 바와 같이 형상기억합금의 가열과 냉각 과정에서 상변태 온도가 서로 같지 않다는 점에서도 알 수 있다. 이 상변태 온도는 DSC(Differential Scanning Calorimeter) 등을 이용하거나 비저항 변화 또는 부피 변화를 측정하여 알 수 있다. 표 1은 지금까지 개발된 형상기억합금의 종류와 변태 온도 영역을 나타낸 것이다^[7].

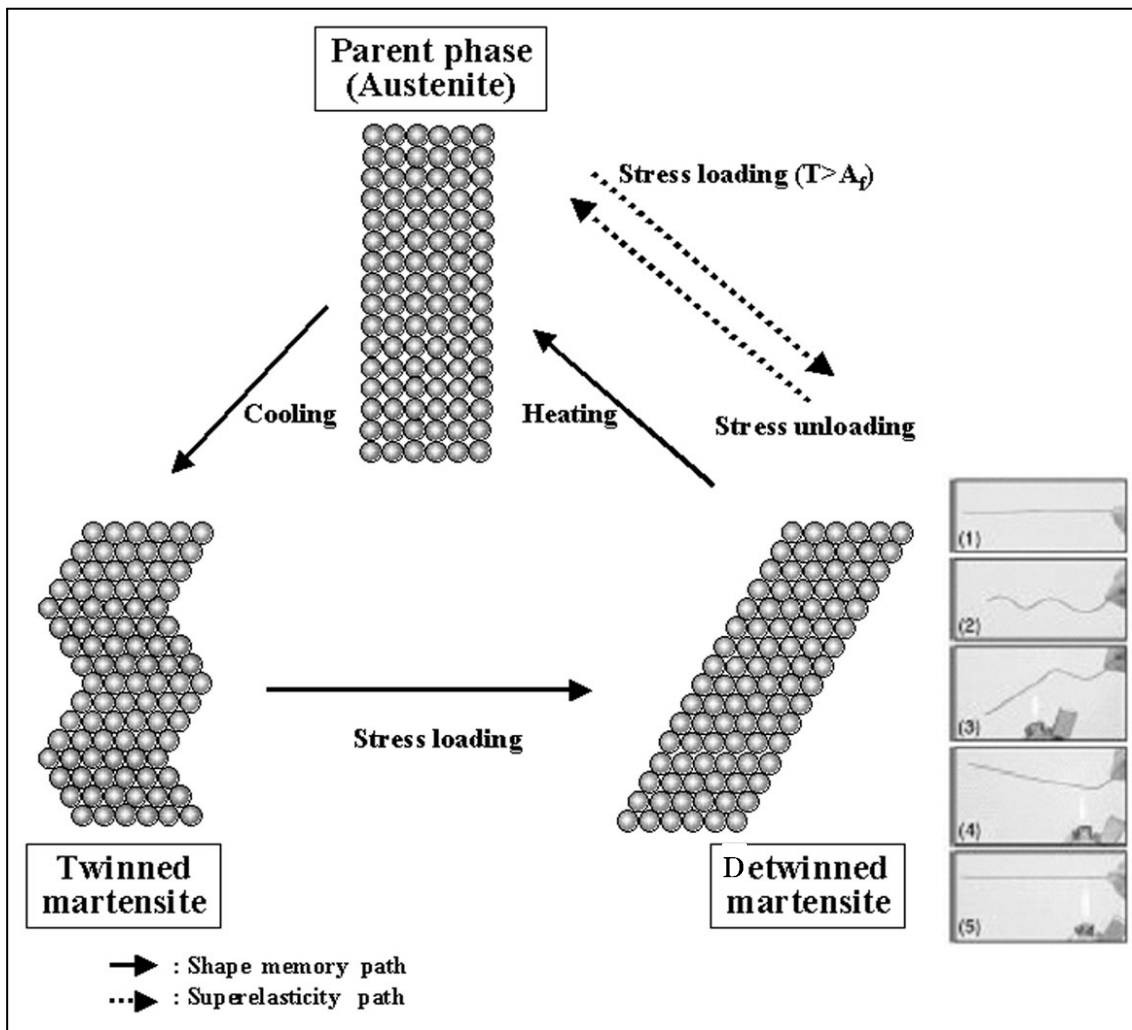


그림 2. 형상 기억효과와 의탄성 효과 기구의 개요도

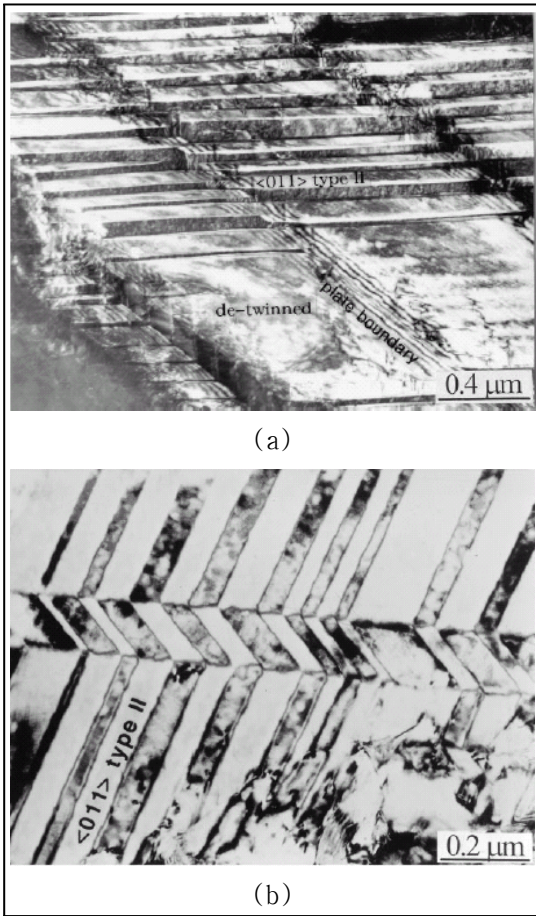


그림 3. Ni-Ti 합금의 마르텐사이트 상의 미세조직
 (a) twinned 마르텐사이트 상
 (b) detwinned 마르텐사이트 상

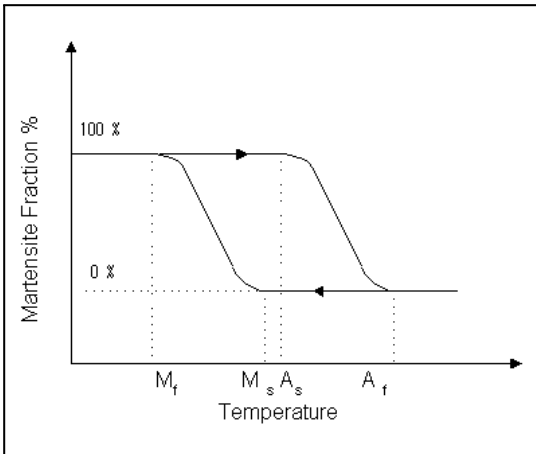


그림 4. 형상 기억합금의 가열과 냉각 과정에서의 상변태 온도

3. 형상 기억 복합재료의 원칙

형상기억 복합재료(adaptive shape memory alloy reinforced composites)는 그림 5의 개념도에 나타난 바와 같이 고분자나 금속의 기지 재료 내에 입자, 섬유 등의 강화재와 함께 여러 가지 기하학적인 형태의 형상기억합금으로 구성되며, 형상기억 복합재료를 제조하는 공학적 목표는 다음과 같이 정리할 수 있다^[8].

3.1 형상기억소재들의 성능 향상

기지재료 내에 형상기억합금을 심으면, 형상기억합금의 기계적 특성도 향상된다. 복합화에 따른 형상기억 합금의 항복응력의 증가는 보다 큰 작동 응력을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 작동기와 감쇠기(damper)로서 형상기억 성능을 나타내는 응력 구간의 제어를 할 수 있다. 예를 들면, 지진이 발생하는 동안 형상기억합금 감쇠기는 보다 높은 정적 하중을 견딜 수 있으므로 건물과 다리를 보호할 수 있게 된다. 그리고 높은 열전도도와 열용량을 가진 기지재료 내에 형상기억합금을 심으면, 열전달을 가속화할 수 있으며 형상기억합금들의 반응 시간을 감소시킬 수 있게 된다.

3.2 구조용 소재의 기계적 거동 향상

기계적 특성은 변태에 따른 형상 변화의 결과로서 생기는 내부 응력에 의하여 향상시킬 수 있다. 오스테나이트 상태에서는 형상기억합금 입자나 섬유들은 수축하여 주변 기지 내에 압축응력을 발생시킨다. 압축응력 상태는 균열이나 기공의 생성과 성장을 지연시켜서 강도, 피로, 크립 저항을 증가시킨다. 형상기억합금의 형상과 최적화된 배열에 따른 내부 응력의 적절한 분산은 구조 재료의 기계적 특성을 향상시키기 위하여 필요하다. 예를 들면, 형상기억합금을 강화하여 세라믹의 인성을 증가시키는 방법은 매우 잘 알려져 있다. 이

표 1. 지금까지 개발된 형상기억합금의 종류

Alloys	Composition	Transformation Temperature(A _s) Range (°C)	Temperature Hysteresis(°C)
Ag-Cd	44 ~ 49 at% Cd	-190 ~ -50	~15
Ag-Cd	46.5 ~ 50 at% Cd	30 ~ 100	~15
Cu-Al-Ni	14 ~ 14.5 wt% Al 3 ~ 4.5 Wt% Ni	-140 ~ 100	~35
Cu-Sn	~ 15 at% Sn	-120 ~ 30	
Cu-Zn	38.5/41.5 wt% Zn	-180 ~ -10	~10
Cu-Zn-X (X=Si, Sn, Al)	a few wt% X	-180 ~ 200	~10
In-Ti	18 ~ 23 at% Ti	60 ~100	~4
Ni-Al	36 ~ 38 at% Al	-180 ~ 200	~10
Ti-Ni	46.2 ~ 51 at% Ti	-50 ~ 110	~30
Ti-Ni-X (X=Pt, Pd)	50 at% Ni+ X 5 ~ 50 at% X	-200 ~ 700	~100
Ti-Ni-Cu	~ 15 at% Cu	-150 ~ 100	~50
Ti-Ni-Nb	~ 15 at% Nb	-200 ~ 50	~125
Ti-Ni-Au	50 at% Ni+ Au	20 ~ 610	
Ti-Pd-X (X=Cr, Fe)	50 at% Pd+ X ~ 15 at% X	0 ~ 600	~50
Mn-Cu	5 ~ 35 at% Cu	-250 ~ 180	~25
Fe-Mn-Si	32 wt% Mn 6 wt% Si	-200 ~ 150	~100
Fe-Pt	~ 25 at% Pt	~ -130	~4
Fe-Pd	~ 30 at% Pd	~ 30	
Fe-Ni-X (X=C, Co, Cr)	a few wt% X		

러한 형상기억합금은 균열 선단(crack tip) 부근에서 변태에너지의 분산에 의하여 균열의 성장을 멈추게 하는 역할을 하게 된다. 따라서 구조용 재료나 시스템에 심어진 형상기억합금은 재료의 파괴나 파단의 시작을 탐지하기 위한 센서로서 사용될 수 있다.

3.3 새로운 기능적 특성을 가진 적응성 소재

형상기억합금의 마르텐사이트 변태는 형상기억합금 자체의 물리적 기계적 특성을 크게 변화시키므로 복합재료의 특성도 변화시키게 된다. 오스테나이트에서 마르텐사이트로 변태가 일어나면

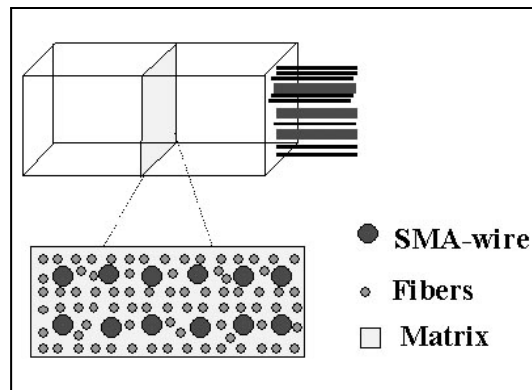


그림 5. 형상기억복합재료의 기본적인 구성

형상기억합금의 감쇠능이 크게 증가하고, 탄성계수는 감소하게 된다. 형상기억합금과 기지재료의

탄성계수의 차이가 많이 나면 형상기억합금의 부피 분율이 낮은 경우에도 복합재료의 평균 탄성계수가 크게 변화한다. 마르텐사이트 상태에서의 감쇠능의 큰 증가는 복합재료 내에 온도에 민감한 감쇠 인자로서의 사용을 가능하게 한다. 형상기억합금 층과 변태를 하지 않는 소재의 층으로 이루어진 박막 이중층은 굽힘을 제어하기 위한 간단한 예이다. 구속된 변태는 내부 응력의 발생에 기인한 부가적인 효과를 만든다. 이러한 응력들은 소재들의 국부적인 특성들에 영향을 미칠 수 있다. 즉, 외적인 구속하의 평균 변형은 평균 응력으로 변환되므로 복합재료의 특성에 영향을 미치게 된다. 응력을 받은 복합재료의 진동 주파수의 변화는 온도와 응력의 변화를 통한 소음과 진동의 능동 제어용으로 사용된다. 형상기억합금의 적응특성은 센서와 작동 특성을 결합한 지능 복합재료의 설계에 사용된다.

형상기억합금은 섬유, 와이어, 리본, 입자, 필름 등과 같은 다양한 형태로 제조될 수 있으며, 이들을 활용하면 매우 다양한 형상기억 복합재료의 제조가 가능하다. 섬유, 필름, 판상의 형상기억 합금이 연속적으로 심어진 복합재료와 입자, 플레이크(flake)로 불연속적으로 심어진 복합재료의 개발을 위한 연구가 널리 수행되고 있으며, 이들 중의 일부는 이미 상업화되었다. 형상기억합금 복합재료의 제조는 통상적인 복합재료 제조 방법으로는 가능하지만 약간의 문제를 가지고 있다. 가장 중요한 문제가 복합재료 보강재, 기지 재료와 형상기억합금과의 결합이다. 기지와 형상기억합금의 강한 결합(hard bonding)은 형상기억효과를 감소시키게 된다. 한편 약한 결합(weak bonding)은 형상 기억 복합재료의 신뢰성을 감소시킨다. 따라서 구성 재료들의 적절한 조합을 통한 효과적인 기능을 얻기 위한 타협점을 찾는 것이 형상기억 복합재료의 신뢰성 향상을 위하여 풀어야 할 중요한 과제이다. 형상기억합금 복합재료의 성공적인 응용을 위하여 풀어야 할 또 다른 문제는 광범위한 영역에서 복합재료의 기계적 거동을 나타내기 위한 구성 방정식

의 공식화이다. 최근 십여년동안에 복합재료의 이론적 연구와 모델링은 이러한 문제가 가까운 미래 내에 해결될 수 있는 희망을 가지게 한다.

4. 형상 기억 복합재료의 종류

그림 6은 다양한 형상의 형상기억합금이 복합재료 내에 삽입되는 개요도를 나타낸 것이다^[9]. 형상기억 복합재료는 형상기억합금의 형태와 사용되는 기지 재료의 종류에 따라 분류할 수 있다. 본 절에서는 현재까지 개발된 형상기억 복합재료의 종류에 대하여 살펴보고자 한다^[8, 10, 11].

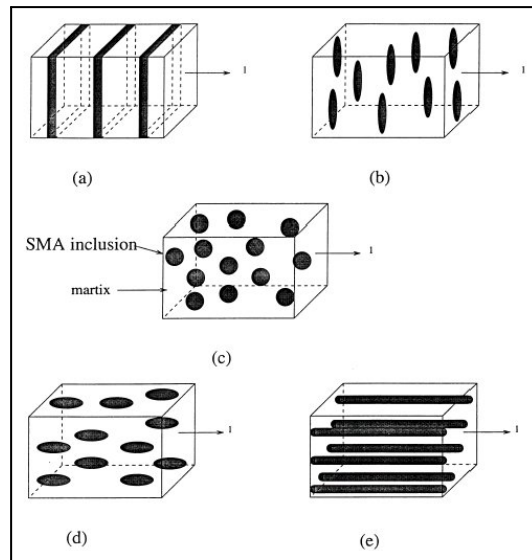


그림 6. 형상기억 복합재료에 삽입되는 형상기억합금의 다양한 형상
(a) thin disc; (b) oblate; (c) sphere;
(d) prolate; (e) long fiber

4.1 섬유 강화 형상 기억 복합재료 (SMA Fiber Reinforced Composites)

4.1.1 형상기억합금 섬유 강화 금속기지 복합재료 (SMA Fiber/Metal Matrix Composites)

형상기억합금 섬유강화 금속기지 복합재료는 기지 금속 내에 형상기억합금 섬유를 심어서 만

드는 것으로 형상기억합금 섬유강화의 목적은 기지 금속 내에 압축응력을 발생시키기 위한 것이다. 기지 금속 내의 압축응력은 항복응력과 파괴인성같은 복합재료의 기계적 특성에 유리하다는 것이 잘 입증되어 있다. 즉, 형상기억합금 섬유강화 금속복합재료는 항복응력 등의 기계적 특성의 향상 뿐만 아니라 피로저항의 향상과 균열성장을 지연시키는 특성을 가지게 된다. 그림 7은 Ti-Ni 섬유강화 Al 기지 복합재료의 설계 개념을 나타낸 것이다. 우선, 형상기억합금 섬유강화 Al 기지 복합재료를 일반적인 방법으로 제조한 후에 고온으로 가열한다. 이 온도에서 그림 7(a)와 같은 특정한 형상을 기억하도록 열처리를 수행하고, 그림 7(b)와 같이 복합재료는 마르텐사이트 변태 개시 온도, M_s , 이하로 냉각시킨다. 이 때 복합재료 내의 형상기억합금 섬유는 마르텐사이트로 변태한다. 그 다음에 마르텐사이트 상태에 있는 섬유를 가진 복합재료에 그림 7(c)에 나타난 바와 같이 인장 변형(ϵ)을 가한다. 인장변형된 복합재료는 오스테나이트 변태 종료 온도, A_f , 이상의 온도로 가열하면 마르텐사이트에서 오스테나이트로 역변태가 일어나게 된다. 최종적으로 형상기억합금 섬유는 그들의 형상을 회복하면서 수축하려는 경향을 나타내어 섬유 축 방향을 따라 기지 금속 내에 압축응력이 도입되고, 반면에 섬유는 인장 상태에 존재하게 된다.

Al 기지 내에 Ni-Ti 섬유를 심기 위한 방법은 여러 가지가 있다. 그 방법들 중의 하나는 금형 내에 고정 치구로 Ti-Ni 섬유를 배열시키고, 용융 알루미늄을 부은 다음 60 MPa로 가압하여 제조하는 것이다. 알루미늄의 용해 온도가 높지 않기 때문에 대부분의 Ti-Ni 섬유는 제조과정 동안 영향을 받지 않는다. 제조된 복합재료에 형상기억 효과를 주기 위하여 열처리를 수행한 후에 특정한 인장변형을 가하고, A_f 이상의 온도로 복합재료를 가열한다. 또 다른 제조 방법은 알루미늄 분말과 Ti-Ni 섬유를 몰드 내에 위치시키고 상온에서 200 MPa 압력으로 가압하여 예비 성형체를

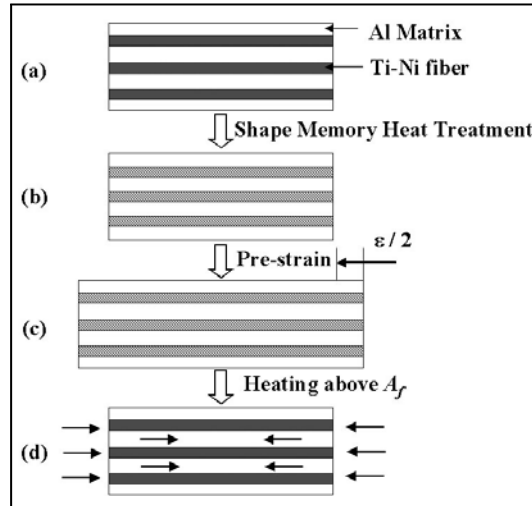


그림 7. 형상기억합금 섬유 강화 금속복합재료의 설계 개념

만든다. 이와 같이 준비된 예비 성형체를 10^{-4} torr 하의 진공로에서 843K의 온도로 소결하며, 형상기억 효과 처리는 소결공정 동안 이루어진다. Ti-Ni 섬유에 5%의 인장변형을 가하면, 알루미늄 기지는 12%까지 연신된다. 순 알루미늄 (Al-1100)은 유동응력이 너무 낮아서 기지 금속으로 사용할 수가 없기 때문에 보다 높은 항복응력을 가진 6061-T6와 6082-T6 시효 알루미늄 합금들이 형상기억합금 강화 복합재료의 기지 금속으로 종종 사용된다.

형상기억합금 섬유강화 복합재료의 강화에 미치는 중요한 인자는 형상기억합금의 섬유 체적율과 인장 변형량이다. 즉, 섬유 체적율과 인장 변형량이 증가할수록 형상기억합금 섬유에 의한 강화효과는 증가하게 된다. 예를 들면, Ti-Pd-Ni-W 형상기억합금 섬유강화 Ti 기지 복합재료의 형상기억합금 섬유 체적율과 변형량이 항복응력에 미치는 영향을 온도에 따라 조사한 결과, Ti 합금과 비교해서 복합재료의 항복응력이 증가한다고 보고하고 있다^[12]. 또한, Furuya와 Taya는 Ni-Ti 합금 섬유강화 Al 기지 복합재료의 균열전파속도를 응력확대계수 (stress intensity factor)의 함수로 측정된 결과에 의하면, 형상기억합금

섬유강화 금속기지 복합재료는 균열전파를 지연시킬 수 있다고 보고하고 있다^[13].

4.1.2 형상기억합금 섬유강화 고분자 기지 복합재료

다양한 형태의 형상기억합금 섬유를 가지는 고분자 복합재료가 정적/동적 특성을 제어하기 위하여 제조될 수 있다. 형상기억합금 섬유가 심어진 작동기는 active properties tuning(APT)와 active strain energy tuning (ASET)가 있다. 기본적인 개요는 형상기억합금의 두 가지 특성을 이용하는 것이다. 즉, 마르텐사이트 변태동안 유효 탄성계수의 변화와 형상기억 효과를 이용하는 것이다. APT의 경우, 형상기억합금 섬유는 탄소 섬유 강화 에폭시 복합재료 같은 탄성이 높은 소재에 심으며, 이 섬유에 전류를 흘려서 작동시킨다. 전류에 의하여 상승한 온도가 오스테나이트 변태 종료 온도, A_f , 이상이 되면, 복합재료의 유효 탄성계수 및 항복응력이 증가하게 된다. ASET의 경우, 형상기억합금 섬유는 고분자 기지에 심기 전에 연신하여 소성변형시킨다. 전류를 흘려 가열시키면, 회복응력이 발생하여 섬유는 수축하여 원래의 길이로 되돌아가려고 한다.

복합재료의 구조적 응답을 위한 중요한 제어는 APT나 ASET를 이용하면 가능하며, 이들의 개념적인 차이는 다음과 같다. APT는 구조의 강성도만 변화시킴으로서 구조적 응답을 바꾸는 것이며, 반면 ASET는 구조적 응답을 바꾸기 위하여 미리 연신된 형상기억합금 섬유의 회복력에 주로 의존한다. 이 회복력은 섬유의 길이를 따라 구조에 가해진 분산력이라 할 수 있다. 현재는 APT보다 ASET가 많이 사용되고 있다. 이는 APT보다 훨씬 다양한 제어가 가능하며, 광범위한 굴곡 제어(deflection control)가 가능하기 때문이다.

형상기억합금 섬유강화 고분자 복합재료를 제조하는 방법은 여러 가지가 있다. 그 중에 하나가 미리 연신된 형상기억합금 섬유들을 복합재

료 내에 심는 방법이다. 이들은 경화과정 동안 원래의 길이로 수축하게 되어 복합재료는 구속을 받게 된다. 변형된 섬유는 형상기억 복합재료 구조의 한 부분이 되며, 형상기억합금 섬유는 전기적 가열에 의해 회복력이 발생하게 된다. 또한 형상기억합금 섬유강화 고분자 기지 복합재료는 일반적인 고분자 복합재료 제조 방법으로도 제조가 가능하다. 즉, 복합재료 프리프레그 층 사이에 형상기억합금 섬유를 적층한 후 열간 프레스나 오토클레이브(autoclave)를 이용하여 제조하는 것이다. 대부분 일방향성 형상기억 효과를 이용하며, 특히 회복응력을 요구하는 응용 분야에 사용된다. 이 방법이 가지는 문제 중의 하나는 경화 사이클 동안 인장변형된 형상기억합금 섬유나 선의 형상 회복을 방해한다는 것이다. 이 문제는 이방향성 형상기억 효과를 이용하면 간단하게 해결될 수 있다. 형상기억합금 선은 기지 내에 심기 전에 이방향성 형상기억 효과를 나타내게 할 수 있다.

형상기억합금 섬유강화 고분자 복합재료의 제조와 관련된 다른 중요한 문제는 계면 결합(interfacial bonding)이다. 형상기억합금 복합재료에서 형상기억합금 섬유와 고분자 기지 사이에 계면 접착이 최대로 되는 것이 바람직하다 왜냐하면, 대부분의 응용 분야에서 형상기억합금 선과 고분자 기지 사이에 하중 전달(load transfer)을 요구하기 때문이다. 계면 결합을 증가시키기 위하여 여러 가지 표면 처리 방법들이 제안되었다. 결과를 요약하면, 계면 강도의 증가와 그에 따른 계면 전단강도의 증가가 형상기억합금 선의 변위를 감소시켜 기지의 구속효과를 증가시킨다는 것이다^[14]. 그림 8은 장섬유의 TiNi 형상 기억합금 선이 CFRP(carbon fiber reinforced plastics) 내에 삽입된 복합재료의 미세조직의 예를 나타낸 것이다^[15]. 그림 9는 NASA Langley 센터에서 상용화한 리본 형태의 SMA를 보강한 형상기억 복합재료의 예를 나타낸 것이다^[16].

4.2 형상기억합금 입자강화 금속 복합재료

형상기억합금 입자강화 금속복합재료는 취성 재료 내의 균열 전파를 억제하거나 금속 내의 균열을 수리하기 위하여 사용될 수 있다. 금속복합재료를 강화하기 위한 설계 개념은 섬유강화 복합재료의 개념과 유사하다. 형상기억합금 입자들을 금속기지 내에 분산시킨 후에 마르텐사이트 상태에서 변형시킨다. 이 상태에서 A_f 이상으로 가열하면 마르텐사이트에서 오스테나이트로 역변태가 일어나서 미리 변형된 형상기억합금 입자들은 원래 형상으로 회복하여 기지 금속 내에 응력을 발생시켜서 복합재료의 인장강도를 향상시킨다. 기지 금속으로는 알루미늄 합금이 주로 사용되고 있으며, 스테인레스강을 사용한 사례도 있다. 이는 강은 취성 모드에서 균열전파를 연구하는 데에 매우 유용한 소재로 알려져 있기 때문이다.

형상기억합금 입자들은 atomization 방법, spray 등과 같은 급냉응고 공정에 의해 제조되며, Ti-Ni, Ti-Ni-Cu계 합금들이 사용된다. 이 중에서 Ti-Ni-Cu 합금은 낮은 이력, 큰 변태소성, 높은 충격흡수능 등의 특성을 가지고 있으므로 형상기억합금 입자로서는 아주 적합한 소재이다. Cu-Zn-Al 합금을 형상기억합금 입자용으로 사용하기 위한 시도는 복잡한 기계적 합금 반응들과 공정 동안에 생기는 오염으로 인하여 대부분 실패하였다.

4.3 세라믹 입자강화 형상기억합금 기지 복합재료

형상기억합금 내에 세라믹 입자의 존재는 감소된 밀도와 증가된 강도, 강성, 경도 그리고 마멸 저항을 가진 새로운 복합재료를 가능하게 한다. 이러한 복합재료는 통상의 세라믹 강화 금속기지 복합재료와 비교해서 몇 가지 이점이 있다. 즉, 이 복합재료는 응력유기 마르텐사이트 변태로 인하여 보다 높은 소성능력을 가지게 되고, 이로 인

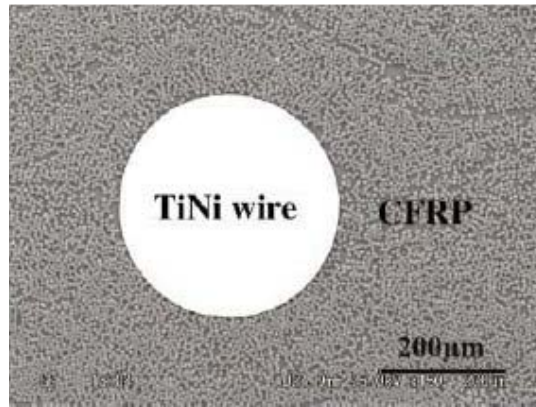


그림 8. TiNi/CFRP 형상기억 복합재료

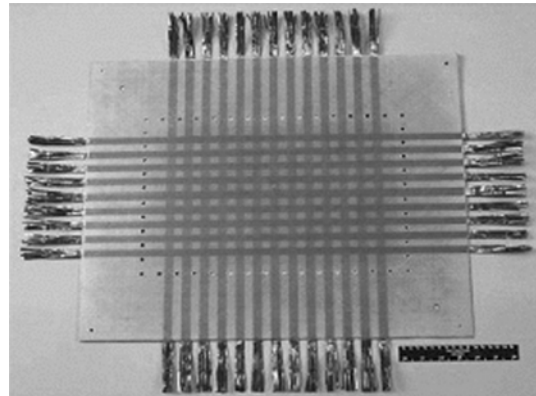


그림 9. 형상기억합금 복합재료의 예

해 균열의 발생을 억제하게 된다.

세라믹 입자강화 형상기억합금 기지 복합재료는 일반적인 방법으로 제조가 가능하다. Al_2O_3 입자 강화 Cu-Zn-Al 기지 복합재료는 일반적인 주조 방법에 의하여 제조가 가능하다. 분말 혼합체의 충격 제조방법을 이용하면, TiC 입자 강화 NiTi 복합재료의 제조가 가능하다. 이 복합재료의 경도와 압축 강도는 TiC 함량이 증가할수록 증가하지만 연성과 인성은 감소하는 경향을 나타낸다.

5. 결 론

능동구성요소로서 형상기억합금을 가진 복합재료는 형상기억합금의 성능 뿐만 아니라 새로운 기능특성을 가진 적응소재들을 만들기 위하

여 전망이 매우 밝다. 형상기억 복합재료는 진동 모드 개선과 높은 감쇠능 같은 몇 가지 독특한 특성도 가지게 된다. 그러나, 이러한 복합재료에 대한 개발과 연구는 아직까지 초보 단계에 있다. 주요 개발목표 중의 하나가 형상기억 효과를 희생하지 않는 계면을 만드는 것이다. 그리고 복합재료의 특성과 성능을 최적화하기 위하여 복합재료의 거동을 적절하게 설명할 수 있는 구성방정식을 체계화할 필요가 있다. 최근 십년 동안 이론적 연구와 수학적 모델링에 대한 연구도 이러한 문제를 보다 현실화하기 위하여 수행되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Z.G Wei, C.Y. Tang, J. of Mat. Pro. Tech., Vol.69, p.68 (1997)
- [2] K. Jonnalagadda, G.E. Kline and N. R. Scotts, Experimental Mechanics, Vol.37, No.1, p.78(1997)
- [3] K. Otsuka, T. Kakeshita, MRS Bulletin, p.91, (2002)
- [4] Y. Liu, Z. Xie et al, Scripta Materialia, Vol.41, No.12, p.1273(1999)
- [5] A.K. Sinha, "Ferrous Physical Metallurgy", Butterworths(1989)
- [6] 이근철, 김용수 공역, "실용형상기억합금", 기전연구소(1989)
- [7] 이창호, "Ni-Ti 형상기억합금 선의 센서로서의 응용을 위한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문(1997)
- [8] A.L Royburd, J. Slutsker, et al, " Smart Composites with Shape Memory", in Vol.5, Test Methods, Nondestructive Evaluation and Smart Materials, in Comprehensive Materials, Amsterdam(2000)
- [9] Z.K. Lu, G.J Weng, Int. of J. of Plasticity, Vol.16, p.1289 (2000)
- [10] Y. Xu, K.Otsuka, et al, Intermetallics, Vol.10 p.361 (2002)
- [11] D. Yang, Mat. and Design, Vol. 21, p.503 (2000)
- [12] K. Mizuuchi, K. Yamauchi, et al, J. Jpn Inst. Metals, Vol.61, p.727(1997)
- [13] M. Taya, Y. Furuya, et al, "Smart Structures and Materials 1993: Smart Materials", ed. V. V. Varadan, SPIE Bellingham, WA, vol.1916, p.373(1993)
- [14] K. Jonnalagadda et al, Exp. Mech., Vol.37, p78(1997)
- [15] Ya Xu, AIST Today, Vol.2 p.12(2002)
- [16] NASA Langley Research Center Brochure, Langley Edge (2002)