

형상기억합금의 특성 및 응용



이 인 / KAIST, 기계공학과 항공우주공학전공, 교수
e-mail : inlee@kaist.ac.kr

양승만 / KAIST, 기계공학과 항공우주공학전공, 박사과정

이 글에서는 형상기억합금만의 독특한 열-기계적인 특성에 대하여 간단히 설명하고, 다양한 분야에 적용되는 사례들과 그 작동 원리에 대하여 소개하고자 한다.

형상기억합금(SMA : Shape Memory Alloy)은 일반적인 금속이나 합금에서는 찾아볼 수 없는 형상기억효과(shape memory effect)와 초탄성(superelasticity) 거동을 보이고 있다. 이러한 특성은 1951년에 금-카드뮴(Au-Cd) 합금에서 처음으로 발견되었으며, 1963년에 미국 해군병기연구소(Naval Ordnance Laboratory)에서 니켈-티타늄(Ni-Ti) 합금에서 형상기억효과를 발견한 후로 널리 상용화되었다. 니티놀(nitinol)이라고 불리는 니켈-티타늄 계열의 형상기억합금은 단위 부피당 많은 에너지를 낼 수 있고, 내 부식성(corrosion resistance)과 생화학적 적합성(bio-compatibility)이 뛰어나다. 또한 100,000사이클 이상의 긴 사용 수명을 갖기 때문에 작동기(actuator)로서 우수한 특징을 갖는다.

형상기억합금은 소성변형이 없이도 상변태(phase transformation)에 의해서 10%에 이르는 큰 변형률을 나타낼 수 있으며, 온도나 하중의 변화에 의해 초탄성거동이나, 형상기억효과를 나타낸다. 온도와 응력에 의하여 형상기억합금의 상변태가 일어나게 되며, 대표적인 두 상(phase)인 마르텐사이트(martensite)와 오스테나이트(austenite)를 갖게 된다. 초탄성 거동은 부하-제하(unloading) 시에 이력곡선(hysteresis)을 그리면서 초기의 탄성 상태로 돌아오는 것을 말하며, 형상기억효과란 잔류 변형률이 존재할 때 온도 변화에 의해 원래 상태로 돌아가는 것을 말

한다. 형상기억효과를 갖는 합금으로 흔히 사용되는 것으로 구리 합금 계와 니켈-티타늄 합금 등이 있다.

이러한 독특한 열-기계적인 특성을 이용하여 기계적 결합 장치, 작동기, 의학용 장치, 생활 용품 등의 다양한 분야에 적용이 되고 있으며, 점점 더 그 적용 범위가 넓어지고 있는 실정이다. 이 글에서는 형상기억합금이 갖는 열-기계적인 특성에 대해서 간단히 살펴보고, 현재 여러 방면으로 적용되는 사례들을 살펴보고자 하겠다.

형상기억합금의 열-기계적 특성

형상기억합금이란 온도의 변화에 의하여 변형된 형상이 원래의 형태로 돌아갈 수 있는 금속 재료를 말하고, 이러한 특성은 형상기억효과라고 한다. 형상기억효과는 초기에 변형된 형상기억합금이 온도가 상승하면서 원래의 형상으로 복귀하려는 특성을 말하며, 이러한 특성은 매우 큰 복원 응력(recovery stress)을 발생시키기도 한다. 초탄성 거동은 상대적으로 높은 온도에서 일어나는 현상으로, 부하-제하 과정에서 비선형 특성을 유발한다. 이러한 변형에 대한 복원은 주위의 환경과 경계 조건에 의한 형상기억합금 재료의 마르텐사이트 상변태(martensite phase transformation)의 결과이다. 응력이 없는 상태에서 높은 온도의 조건에서 형상기억합금은 모상(parent phase)인 오스

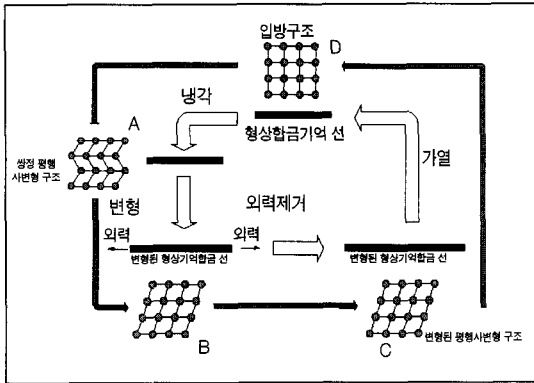


그림 1 형상기억합금의 형상기억효과에 따른 상변태 및 분자 결정 구조

테나이트 상의 형태로 존재하며, 온도가 낮아지면 결정 구조가 마르텐사이트 상으로 변하게 된다. 응력이 없는 경우 형상기억합금은 네 개의 천이 온도(transition temperatures)가 존재하며, 다음과 같이 정의된다.

M_s : 마르텐사이트 상변태 시작 온도

M_f : 마르텐사이트 상변태 종료 온도

A_s : 오스테나이트 상변태 시작 온도

A_f : 오스테나이트 상변태 종료 온도

일반적으로 네 개의 천이 온도는 $M_f < M_s < A_s < A_f$ 의 관계를 갖고, 이 경우 $M_s < T < A_s$ 의 영역에서는 상의 변화가 없으며, $M_f < T < A_f$ 의 영역에서는 마르텐사이트와 오스테나이트 두 개의 상이 함께 존재할 수 있다.

형상기억효과는 형상기억합금의 결정 구조(crystal structure)의 변화에 의해서 이루어지며, 높은 온도에서 격자 형상(cubic form)의 결정 구조를 갖는 오스테나이트 상에서 낮은 온도에서의 평행사변형 형상(parallelogram)의 결정 구조를 갖는 마르텐사이트 상으로 변하는 과정에서 발생한다. 그림 1은 형상기억합금 작동기의 상변태를 도식화한 것이다. 초기에 형상기억합금 선이 낮은 온도에서 마르텐사이트 상이며, 변형이 없는 상태

라고 가정을 하면(A), 외부에서 가해지는 인장에 의하여 쉽게 길이가 늘어날 수 있게 된다(B). 이 과정에서 쌍정 구조의 마르텐사이트(twinned martensite) 상태에서 일정한 방향을 갖게 되고(detwinned martensite), 이로 인해 힘이 가해진 방향으로 거시적인 형태의 변화가 나타나게 된다(C). 형태가 변화된 형상기억합금을 오스테나이트 변태 종료 온도, A_f 이상으로 가열하면 형상기억합금은 고온의 오스테나이트 상으로 돌아가게 되며, 거시적인 형태도 변형 전의 초기 형태로 되돌아가게 된다(D).

일반적으로 이러한 형상기억효과의 경우 고온의 모상의 형태만을 기억하게 된다. 그러나 이방향성 형상기억효과(two way shape memory effect)를 이용할 경우 고온의 모상뿐만 아니라 저온에서의 변형된 형태까지 기억시킬 수 있다. 과도한 변형이나 반복적인 변형이 형상기억합금에 가해지게 되면 형상기억합금 내에 전위밀도가 높아져서 잔류 응력장이 형성 된다. 이로 인해 마르텐사이트 상에서의 구조가 안정화되고 마르텐사이트 상에서의 형태가 기억되게 된다. 이방향성 형상기억 효과를 갖게 하는 방법은 여러가지가 있으며, 가장 간단한 방법은 마르텐사이트 상의 형상기억합금을 과도한 변형을 시켜 이방향성 형상기억효과를 갖게 하는 것이다. 또한 반복적인 형상기억 과정이나 초탄성 과정, 구속가열 과정에 의해서도 이방향성 형상기억효과가 얻어질 수 있다.

초탄성효과란 오스테나이트 상태에서 합금에 힘을 가하여 변형시킨 후 힘을 제거하면 원래의 모양으로 돌아가는 현상을 의미한다. 이러한 탄성 변형거동은 보통의 금속재료에서도 나타나는데 그 경우 탄성 변형률이 0.5% 이하임에 반하여 형상기억합금에서는 최대 7%까지 가능하다. A_f 보다 높은 온도에서 오스테나이트 상태(D)에서 외부에

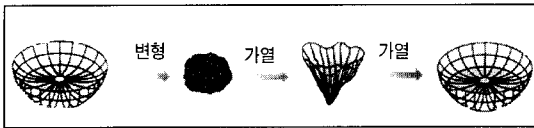


그림 2 아폴로 달착륙선에 사용된 안테나의 전개 개념도

형상기억합금이란 형상기억효과를 갖는 합금을 통칭하는 것으로, 1970년대 미국 해군연구소에서 Ni-Ti 합금을 통하여 최초로 발견된 이래 현재까지 200여 종 이상의 합금이 개발되어 왔다.

서 힘이 가해지면 쌍정 구조의 마르텐사이트 상태(C)로 변형이 되고 이러한 외력이 제거되면 다시 오스테나이트 상태로 변화하면서 원래의 형상으로 회복되는 것이다.

우주선 안테나

1969년 NASA의 아폴로 11호 달착륙선에 사용된 파라볼라(접시형) 안테나는 형상기억합금의 최초의 실용화라고 말할 수 있다. 먼저 찻잔 모양의 형상기억합금의 파라볼라 안테나를 150°C에서 조립하고, 실온에서 로켓에 싣기 쉬운 형태로 변형시킨 후, 달 표면까지 운반된다. 달 표면에 설치된 파라볼라 안테나는 태양열에 의해 200°C가 넘는 온도 때문에 순간적으로 원상태로 되돌아 갈 수 있으며, 정상적인 기능 수행을 할 수 있었다. 즉, 형상기억효과를 이용한 최초의 실용화라 할 수 있으며, 이를 계기로 형상기억합금에 대한 관심이 증대되고 많은 제품들의 개발이 이루어졌다

의료용 스텐트

'스텐트(stent)'의 어원은 1800년대 후반의 치를 위한 치아의 본(impression material)을 제작했

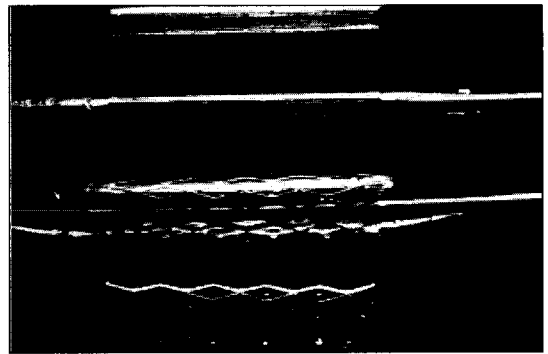


그림 3 풍선확장식 Palmaz 스텐트

던 스텐트 박사의 피부이식의 치유에 이용되면서 사용되었으며, 그 후로 장기 또는 생체의 치유를 돕기 위해 사용되는 모든 재료를 일컫는 말로 사용되고 있다. 특히 혈관, 위장관, 담도 등 혈액이나 체액의 흐름이 순조로워야 되는 부위에 악성 혹은 양성질환이 발생하여 그 흐름에 장애가 발생하였을 때, 외과적 수술을 통하지 않고 x-선 투시하에서 좁아지거나 막힌 부위에 삽입하여 흐름을 정상화시키는 데 사용되는 원통형의 의료용 재료인 스텐트에 대표적으로 형상기억합금이 사용되고 있다. 혈관에 삽입하여 사용하는 혈관 스텐트 삽입술에 사용되고 있는 금속 스텐트는 보통 지름 2mm~1cm, 길이가 9mm~60mm의 가느다란 망상(網狀)으로 되어 있다. 그림 3은 대표적인 혈관스텐트인 Palmaz 스텐트의 팽창 과정을 나타낸다.

이러한 스텐트는 인체의 외부에서 이미 존재하거나 수술로 만든 구멍을 통하여 삽입하여야 하므로 좁은 단면적으로 압축할 수 있어야 환자의 고통을 줄일 수 있고, 시술자에게 편리하다. 병변 부위에 삽입된 후에는 협착을 해소할 수 있도록 확장되어야 하는데, 외부의 힘에 의하지 않고 금속 재료의 팽창력을 이용하는 자가확장형(self-expandable) 스텐트와 외부의 힘 즉 풍선을 이용하는 풍선확장형(balloon expandable) 스텐트로

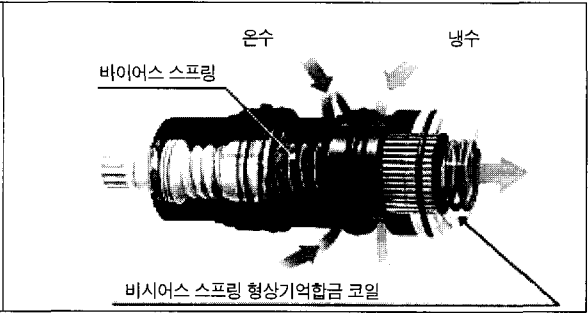
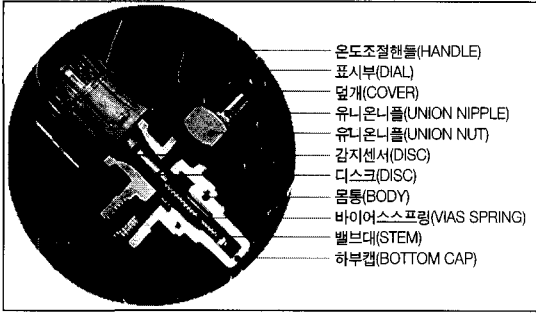


그림 4 난방용 메모 밸브(memo valve)와 자동온도조절장치(thermostat)의 구조

나누어진다.

스텐트의 혁신을 가져온 재료는 형상기억합금이다. 이는 처음에 원하는 모양을 만들어 놓으면 아무리 꾸그르뜨려도 온도만 맞으면 그 형태대로 복원되는 금속이다. 스텐트는 대장, 식도, 요도용 등 신체 부위에 따라 직경과 모양을 달리 써야 하는 특성 때문에 이 금속이 제격이다. 원하는 스텐트 모양을 만든 뒤 아주 가늘게 오므라뜨려 인체에 집어넣으면 본래 모습으로 돌아오기 때문이다. 그래야 수술 후유증이 줄어든다. 금속을 혈관 등을 통해 밀어 넣다보면 상처가 나 염증이 생기는 등 부작용이 있다. 형상기억합금으로 만든 담도용 스텐트를 가로로 오므라뜨리면 직경이 3~4mm가 된다. 이를 내시경을 이용해 담도에 집어넣은 뒤 놔두면 저절로 1~1.5cm로 부풀어 오른다. 형상기억합금이 아닌 스테인리스를 사용했을 경우엔 그 물망을 몸 속 관에 오므라뜨려 집어넣은 뒤 가운데에서 풍선을 불어 부풀어 오르게 한다.

기계 요소

형상기억합금을 이용한 기계 요소들의 사례를 살펴보면, 우선적으로 떠오르는 것이 온도 센서이다. 온도에 따라 형상의 변화를 이용하여 밸브

(valve)의 역할을 수행할 수 있다. 그림 4에 나타난 메모 밸브(memo valve)는 보일러에서 공급되어 방안을 지나 되돌아오는 환수부의 온도를 감지하여 온수 온도가 상승함에 따라 형상기억합금 스프링(감지센서)의 팽창에 의하여 밸브를 통과하는 유량을 비례제어 한다. 따라서 배관 속의 온수의 온도가 높아짐에 따라 감지센서가 팽창하여 물의 흐름을 차단시켜 주어 방 아래의 정지된 온수가 방바닥에 열을 공급해주고, 온도가 하강하면 감지센서는 수축하여 다시 순환시켜 준다. 그리고 자동온도조절장치(thermostat)는 형상기억합금 스프링과 바이어스 스프링과 작용하여 온도에 따라 온수와 냉수의 양을 조절하는 장치이다.

낮은 온도에서 유연해지고 높은 온도에서는 단단하고 강해진다는 일방향성을 나타내는 가역적인 성질이 있기 때문에 액체 공기(극저온) 속에서 확대시킨 고리 모양의 합금이 상온에서는 작게 오



그림 5 파이프 연결 장치

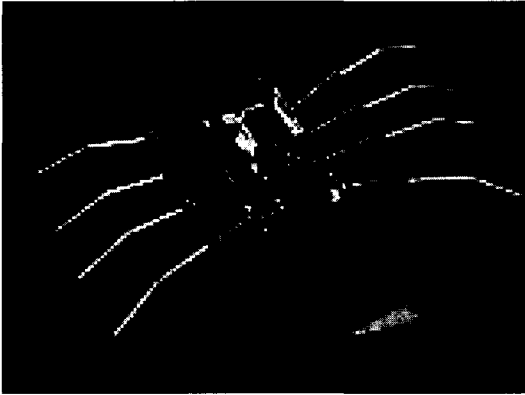
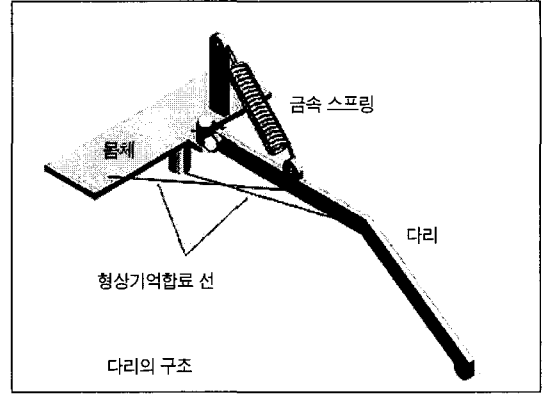


그림 6 8개다리 미소 로봇과 다리의 구조



그라진다는 성질을 이용해서 파이프의 이음매의 접속이나 클램프 등의 고정 용구로서 이용되고 있다. 그러나 이것을 다시 저온으로 해도 이전의 변형된 모양이 되지 않는 것도 특징의 하나이다. 또 형상의 변화량이 많고 입체적이며 특정한 온도에서 급격하게 작동한다는 가역적인 온도 작동 소자의 특징도 있다.

소 로봇이나 의료 장비 등의 넓은 영역에서 적용되고 있는 실정이다.

그림 6은 다리가 여덟 개인 거미 형상의 로봇의 예를 보여 주고 있다. 기존의 작동기를 사용하려면 코일이 감긴 전기 모터를 이용하여 다리를 움직이겠지만, 로봇의 크기가 매우 작으므로 그 부

작동기

형상기억합금은 상변태에 의해서 큰 복원력과 변형을 일으킬 수 있다. 따라서 전기를 가하여 내부 저항에 의해 온도를 증가시키므로 형상기억합금을 작동기로 사용할 수 있다. 형상기억합금을 작동기로 이용하는 경우, 기존의 작동기로 사용하는 모터 등에 비하여 매우 작은 부피를 가지고 있으므로 부피가 중요한 요인이 되는 미

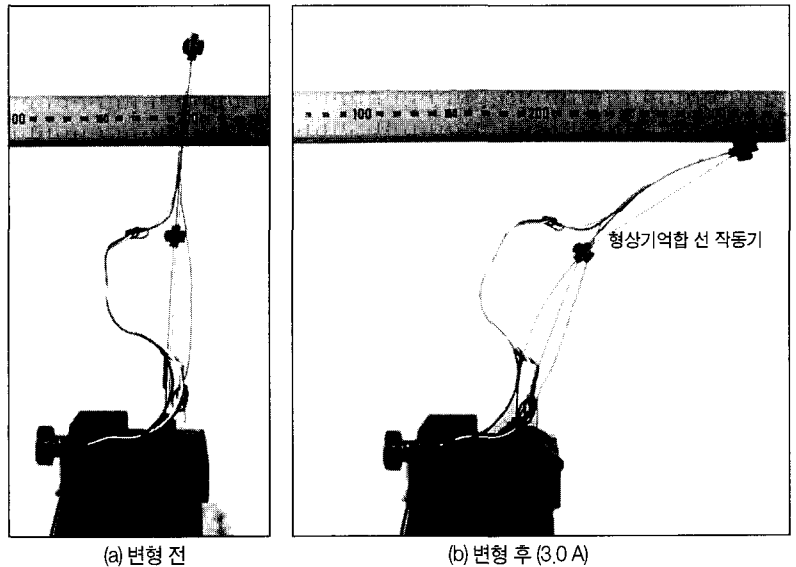


그림 7 형상기억합금 선을 이용한 복합재 구조의 가변 형상 실험 결과

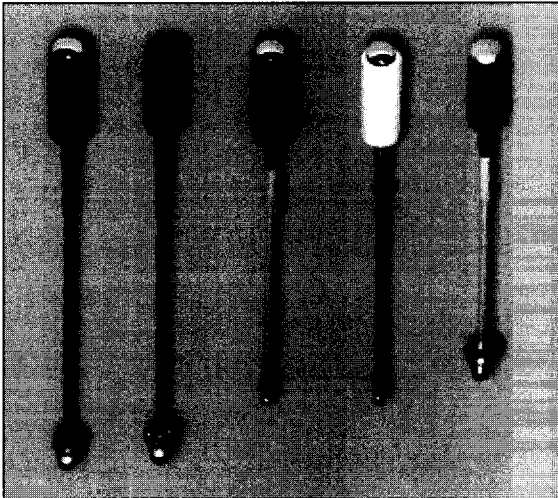
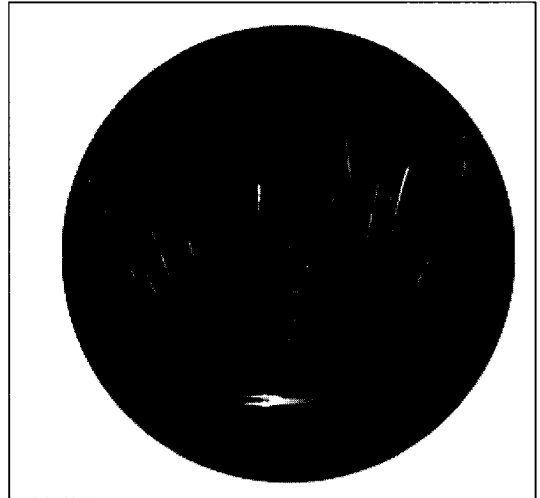


그림 8 휴대폰의 안테나와 안경테 부품



피를 줄이는 데 형상기억합금 작동기는 매우 중요하게 적용될 수 있다. 하지만, 2방향 형상기억효과를 이용하는 경우는 그 변형과 복원력이 작아지므로, 보통 1방향 형상기억효과를 이용하여 일반적인 스프링과 더불어 사용하게 된다. 즉, 전기를 가하여 형상기억합금이 줄어들 때는 스프링이 늘어나 작동하고, 전기가 가해지지 않는 경우 스프링이 형상기억합금을 당겨 다시 평형 상태로 돌아가도록 할 수 있다.

그림 7은 복합재 외팔보 시편의 표면에 형상기억합금 선을 부착한 후, 전기를 가할 때 구조의 변형을 보여주고 있다. 전체 시편의 길이는 200mm 이고, 약 3A의 전류를 흘렸을 경우 시편의 끝이 100mm 이상의 변형을 보이고 있다. 이는 형상기억합금 작동기의 장점인 큰 변형과 복원력을 보여주는 한 예로서, 형상기억합금 선을 이용하는 경우, 구조물의 표면에 부착하거나, 구조 내부에 삽입하여 이용하는 연구들이 진행되고 있다.

그 외 생활용품

앞에서 살펴본 경우 외에도 우리 생활에 사용되는 많은 것들이 형상기억합금을 이용하고 있다. 대표적으로는 휴대폰의 안테나와 안경테를 들 수 있다. 휴대폰의 안테나와 안경테의 경우는 실온에서 초탄성효과를 이용하는 경우로, 실온이 A_s 보다 높아야 한다. A_s 보다 큰 온도에서 외력이 작용하면 마르텐사이트 상으로 변하며, 외력이 제거되면 다시 오스테나이트 상으로 변하며 원래의 형상으로 돌아가게 된다. 이때 외력에 의해 큰 변형이 생겼더라도 상변태에 의해서 원래의 모양으로 돌아갈 수 있는 장점이 있다.