

형상기억고분자의 응용

The Applications of Shape Memory Polymer

이상석 (S.S. Lee)	유연인터페이스연구실 책임연구원
임상철 (S.C. Lim)	유연인터페이스연구실 선임연구원
박찬우 (C.W. Park)	유연인터페이스연구실 책임연구원
정순원 (S.W. Jung)	유연인터페이스연구실 선임연구원
나복순 (B.S. Na)	유연인터페이스연구실 선임기술원
오지영 (J.Y. Oh)	OLED 연구실 선임연구원
구재본 (J.B. Koo)	유연인터페이스연구실 실장
추혜용 (H.Y. Chu)	차세대디스플레이연구단 단장

형상기억 물질은 임의의 형상을 유지하다 외부의 자극에 의하여 원래의 형상으로 회복되는 물질이다. 이와 같은 형상기억 물질은 형상기억합금과 형상기억고분자로 대별되며, 형상기억효과를 응용하려는 용도 및 특성에 따라 선택되어 사용되고 있다. 본고에서는 형상기억합금과 형상기억고분자의 특성 및 원리에 대해 정리하였으며, 형상기억합금에 비해 가볍고 저렴하며 외부 자극의 종류도 다양하게 선택할 수 있는 형상기억고분자의 용도를 정리하였다. 향후 형상기억고분자는 wearable 디스플레이, 태양광 패널 및 비침습성 의학소자 등 그 용도가 다양할 것으로 전망된다.

2013
Electronics and
Telecommunications
Trends

미래 부품소재기술 특집

- I. 서론
- II. 형상기억고분자의 개요
- III. 형상기억고분자의 분류
- IV. 형상기억고분자의 응용
- V. 결론

I. 서론

형상기억효과(SME: Shape Memory Effect)란 일정한 온도에서 기억시킨 형상을 기억하고 있다가, 힘을 가해 전혀 다른 형상으로 변형시킨 후 가열하면 즉시 본래의 형상으로 돌아가버리는 현상이다. 이와 같은 형상기억효과를 나타내는 물질은 재질에 따라 형상기억합금(SMA: Shape Memory Alloy)과 형상기억고분자(SMP: Shape Memory Polymer)로 대별된다.

형상기억재료는 영구적인 형상을 기억하는 능력과 특정한 온도와 응력 하에서 일시적 또는 휴지상태의 형상으로 고정되고 열, 전기 또는 환경 변화에 의해 원래 상태로 회복되는 재료이다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 형상기억재료는 형상기억합금으로 생체 적합성과 양방향 형상기억 능력 등의 장점이 있으나, 한정된 변형 회복능력, 강성, 고비용, 비교적 유연하지 않은 전이온도, 가공조건 등의 단점이 있다.

이에 비해 형상기억고분자는 여러 물리적 방법으로 일시적으로 고정하거나 회복할 수 있다. 중합된 형상기억고분자는 고탄성 변형, 저비용, 저밀도 및 잠재적인 생체적합성과 생물 분해성의 장점을 가진다. 형상기억효과를 나타내는 mechanism은 합금과 고분자 등의 재질에 따라 다르다[1].

형상기억고분자의 형상기억효과를 나타내기 위해서 외부 자극의 종류로는 열[2], 자기장[3~4], 전기장[5~6], 빛[7] 및 산성도의 변화와 같은 화학적인 자극[8][9] 등이 있다.

형상기억효과를 나타내는 형상기억 물질 중 형상기억고분자의 장점으로는 우수한 형상복원력(회복응력 400% 이상)과 공정 및 특성 조절의 편의성 및 저가격화 등으로 형상기억합금과 형상기억세라믹 보다 기술적인 장점이 있다.

본고에서는 이와 같은 장점을 가진 형상기억고분자의 응용에 대하여 정리하였다.

II. 형상기억고분자의 개요

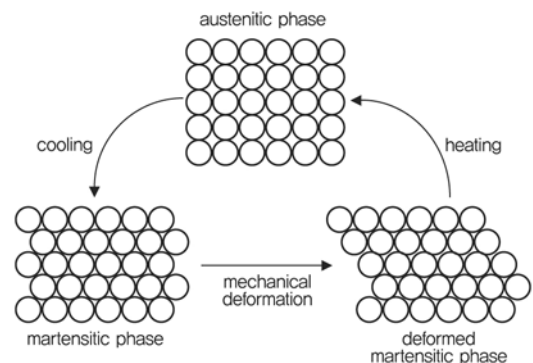
1. 형상기억합금과 형상기억고분자

형상기억합금은 다음의 세 가지로 분류된다. 합금의 종류에 따라 니켈-티탄 합금(니티놀)과 동-아연 합금, 금-카드뮴 합금, 인듐-탈륨 합금 등이 그것이다. 형상기억합금에서 형상기억 효과가 나타나는 원리는 (그림 1)과 같이 특정한 온도에서의 상의 변환에 기인된다. 즉 형상기억합금은 외부에서 가해지는 온도에 따라 고온상(austenitic phase)과 저온상(martensitic phase)으로 결정의 배열이 현저하게 변하게 된다. 저온 상에서는 형태에 변형을 가해도 일정한 온도(변위온도) 이상으로 가열하면 본래의 형태로 회복된다.

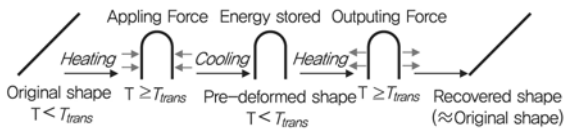
형상기억합금은 단방향 또는 양방향 형상기억효과를 나타내며, 단방향 형상기억효과는 고온에서 기억된 형상을 상온에서 변형시킨 후 가열하면 원래의 형상으로 회복되나 냉각에 의해서는 형상회복이 일어나지 않는 효과이다.

양방향 형상기억효과는 고온 상에서 냉각하였을 때 외부의 변형이 없이 자동적으로 변형이 이루어진다. 즉 냉각은 상을 변위시키고 고온의 원래의 상 가열과 냉각을 주기적으로 주면 자동적으로 변화시킬 수 있는 효과이다.

형상기억고분자에서 형상기억효과를 나타내기 위해



(그림 1) 형상기억합금의 형상기억 원리



(그림 2)형상기억고분자에서 형상기억효과의 개념도

서는 dual segment로 구성되어 있어야 한다. 즉 하나는 아주 높은 탄성이어야 하며, 다른 하나는 특별한 자극시 경직도가 감소될 수 있어야 한다[10].

(그림 2)는 전형적인 형상기억고분자에서 형상기억 효과를 설명하기 위한 개념도이다.

먼저 형상기억고분자의 원래의 형상을 만든 후 형상 기억고분자를 변형온도(또는 유리전이온도나 melting 온도) 이상으로 가열하고 외부의 힘으로 형상기억고분자를 변형한 후 변형온도 이하로 냉각하여 임의의 형상으로 변형, 외부의 힘을 제거하고 필요 시 변형온도 이상으로 가열하면 원래의 형상으로 회복된다.

형상기억고분자는 고온에서 기억된 형상을 상온에서 변형한 후 가열시에만 형상회복이 되고 냉각시에는 형상회복이 이루어지지 않는다.

형상기억합금에 비해 형상기억고분자는 저가격, 저밀도, 쉬운 공정과 인장력이 크다는 장점이 있다.

형상기억합금(10%), 형상기억세라믹(1%), 유리(0.1%)의 인장강도에 비해 형상기억고분자의 인장강도는 200%의 인장강도를 보인다.

〈표 1〉은 형상기억합금의 대표적인 니티놀과 형상기억고분자인 폴리스틸렌의 주된 특성을 비교하여 정리한

것이다.

〈표 1〉에서와 같이 폴리스틸렌 형상기억고분자는 외부 자극의 세기가 작아도 형상기억합금 보다 더 큰 회복 응력을 나타내고 있다.

2. 형상기억고분자의 구조

형상기억고분자는 전형적으로 원래의 형상과 변형된 형상으로 구성된 이중형상을 갖는다. 고분자의 화학적인 구조는 외부의 자극에 의하여 민감한 분자 스위치 구조를 가져야 한다.

형상기억고분자는 고정상으로 역할을 하는 딱딱한 부분과 가역적으로 동작하는 부드러운 부분으로 구성되어 있다. 고정상은 stress를 받는 고분자 체인의 주변에 둘러싸아 자유로운 흐름을 방지하고 가역상은 형상기억 과정에서 변형을 받는 탄성을 담당한다.

분자스위치 역할을 하는 상은 전이온도 이하에서 변형되어 동결되고 반면에 전이온도 이상에서는 원래의 형상으로 회복된다.

3. 형상기억고분자의 자극 방법

형상기억고분자의 자극 방법은 일반적으로 열, 전장, 빛, 자장 및 습기 등으로 분류할 수 있다.

열반응 형상기억고분자의 형상기억효과는 뜨거운 gas나 뜨거운 물에 의한 joule 열에 의하여 직접적으로 반응한다. (그림 3)은 형상기억고분자가 열 자극으로 원

〈표 1〉 형상기억합금과 형상기억고분자의 주요 특성 비교

	NiTi SMA	Polystyrene SMP
$T_s, \text{ } ^\circ\text{C}$	Approx. 40–100	62
Transformation strain, %	Max 8	50–100
Actuation stress, MPa	Approx. 100	2–10
Young's Modulus above T_s , GPa	Approx. 83	1.24
Young's Modulus below T_s , MPA	Approx. 28–41	2–10
Poisson's Ratio	0.33	0.30
Density, gms/cc	6.45	0.92



(a)



(b)

(그림 3) 순수한 형상기억고분자(a), 유리섬유로 강화된 형상기억고분자(b)

래의 형상으로 회복되는 과정을 예를 보여준다.

(그림 3)에서 (a)는 순수한 형상기억고분자이며 (b)는 유리섬유로 강화된 형상기억고분자로 뜨거운 gas로 활성화 시킨 경우이다. (그림 3)에서 알 수 있듯이 순수한 형상기억고분자는 유리섬유로 강화된 형상기억고분자에 비해 두께가 두꺼움을 알 수 있다.

실제로 형상기억고분자의 대부분의 응용에서 뜨거운 물이나 gas로 자극하는 경우는 거의 없기 때문에 주목받지는 못했다.

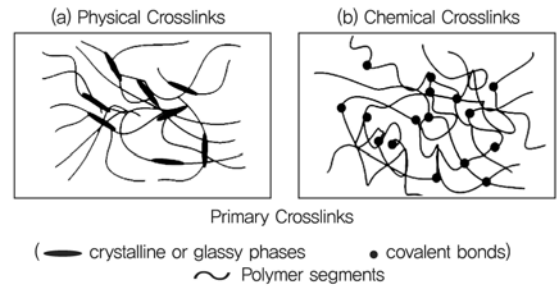
형상기억고분자의 응용을 고려했을 때 외부자극의 종류에 따라 효과도 달라져야 한다.

따라서 특별한 기능을 갖는 충진제를 사용하여 형상 기억효과를 전장, 빛, 자장 이나 습도 등과 같은 복합적으로 동작시킬 수 있다.

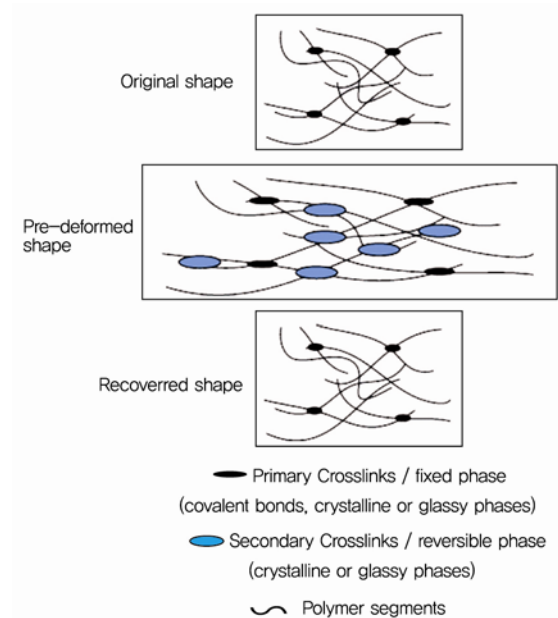
물이나 용매에 의한 형상기억고분자는 용매분자가 고분자에 확산되고 물에 담가질 때 가소제로 역할 하여 전이온도를 감소시키고 결과적으로 형상복원을 하게 된다.

III. 형상기억고분자의 분류

형상기억고분자는 가교의 형태에 따라 물리적인 가교와 화학적인 가교로 대별할 수 있다.



(그림 4) 형상기억고분자의 구조도 (a)물리적인 가교 (b) 화학적인 가교[12]



(그림 5) 형상기억고분자의 형상기억회복 구조도[13]

화학적으로 가교된 형상기억고분자는 적당한 가교화 학으로 형성되며, 열경화성 수지가 된다.

물리적으로 가교된 고분자는 적어도 두 개의 분리된 도메인을 요구하며, 열가소성 수지가 된다.

기본적으로 형상기억고분자는 (그림 4)와 같이 netpoint와 분자 스위치로 구성된다. Netpoints는 공유결합이나 상호분자 작용으로 형성된다. 또한 네트워크 체인은 비정질 또는 결정이며, 전이온도, 유리전이온도, 용융온도를 결정한다[11].

만약 열변위가 유리전이이라면 네트워크 체인의 미세

브라운운동은 유리전이온도 이하에서는 동결되고 유리 전이온도 이상으로 재가열되면 스위칭된다.

열변위가 용융점이라면 용융온도 이하에서는 스위칭 세그먼트가 결정화되고 용융점 이상으로 온도가 올라가면 원래의 형상으로 회복된다.

1. 형상기억고분자의 화학적 구조 조건

형상기억고분자는 3차원 분자 네트워크 구조를 가진다. 네트워크 구조는 고분자 segment들이 이웃한 netpoint에 연결되어 있는 가교 netpoint를 통하여 구성된다.

이들 강한 가교 구조들은 고분자가 안정된 형상으로 유지될 수 있도록 한다. 가교 netpoint의 도메인 들은 물리적 또는 화학적으로 가교된 구조이다. 물리적 가교 고분자(열가소성)들은 (그림 4(a))와 같이 어떤 용액에 용해되거나 녹일 수 있다.

물리적으로 가교된 네트워크에서 개개의 고분자 체인의 상호작용은 결정화 또는 유리상을 형성한다.

(그림 4(b))와 같이 화학적으로 가교된 고분자 (열경화성)에서는 개개의 고분자 체인이 공유결합으로 되어 있어 물리적으로 가교된 고분자 보다 더욱 안정적이다. 형상기억고분자로 요구되는 다른 기본적인 요구조건으로 고분자 segment 사이의 2차적인 가교가 되어 임시적인 변형 형상을 형성되어야 한다는 것이다.

(그림 5)에서와 같이 형상기억고분자가 전이온도 이상으로 가열될 때 두 netpoint 사이의 고분자 체인이 형상기억고분자의 변형 없이 불규칙하게 꼬인다.

외부에서 인장 스트레스가 인가되면 고분자 segment는 늘어나게 되며, 결과적으로 대부분의 고분자 체인과 netpoint (물리적이거나 화학적 가교 netpoint)는 무질서하게 배향된다. 이때 냉각하여 변형 형상을 유지하면 2차 가교는 새로운 배향 고분자 세그먼트들이 형성된다.

이 현상이 형상기억효과의 주된 원리가 된다.

재가열 시 형상기억효과는 2차 가교의 분리에 의해서 인장 에너지는 풀어지고 형상기억고분자는 형상이 회복

된다.

형상기억고분자 세그먼트는 두 형태의 구조로 나뉘는데 hard 세그먼트와 soft 세그먼트가 그것이다.

Hard 세그먼트는 soft 세그먼트와 연결된 netpoint로 형성되어 고정상으로 역할하며, soft 세그먼트는 가역분자 스위치(가역상)로 역할하고 전이온도에서 열적인 전이를 나타낸다. 그들은 전이온도 이하에서 임의의 형상으로 고정되고 반면에 전이온도 이상에서는 원래의 형상으로 되돌아간다.

2. 형상기억고분자의 구조적인 분류

열 반응을 하는 형상기억고분자는 열 전이에 따라 (1) 전이온도=유리전이온도인 물리적 가교된 열가소성 고분자 (2) 전이온도=용해 온도인 물리적 가교된 열가소성 고분자 (3) 전이온도=유리전이온도인 화학적 가교된 비정질 고분자 (4) 전이온도=용해온도인 화학적 가교된 semi-crystalline 고분자 등의 4가지로 분류할 수 있다.

가. 열가소성 형상기억고분자

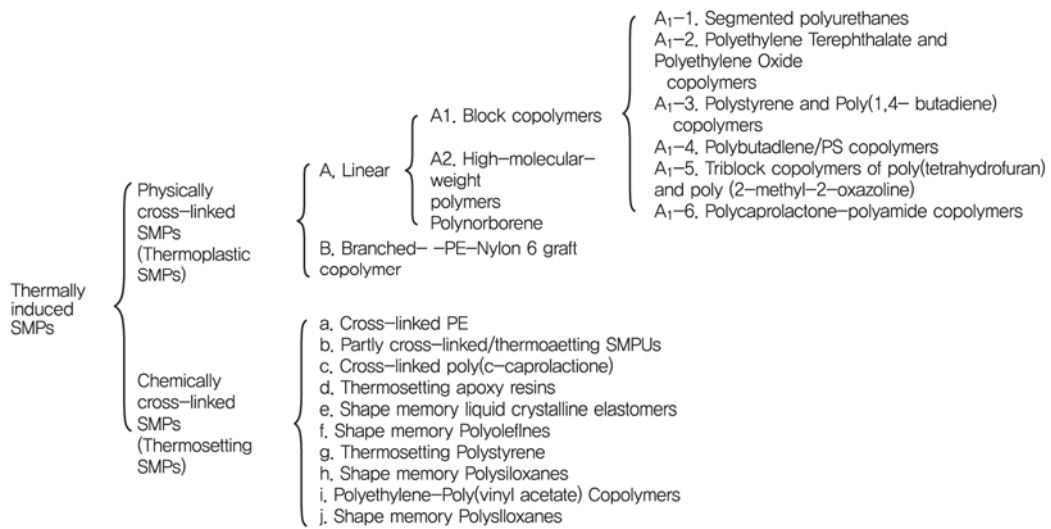
물리적으로 가교된 형상기억고분자에서 상의 분리는 열반응 형상기억효과의 기본적인 메커니즘이다.

하나의 상은 물리적 가교를, 반면에 다른 상은 분자 스위치로 동작한다.

열가소성 형상기억고분자 중에 폴리우레탄 형상기억 고분자는 높은 형상회복력(400% 이상의 최대 회복 Strain), 넓은 형상회복 온도 범위(30도 ~ 70도), 양호한 생체 적합성, 양호한 가공성 등 다른 고분자에 비해 많은 장점이 있어 많이 사용되고 있다.

나. 열경화성 형상기억고분자

화학적으로 가교된 형상기억고분자는 공유가교 네트워크를 합성하는 방법은 두 가지다[14].



(그림 6) 형상기억고분자의 분류

첫 번째는 중합반응 시 다중기능 가교제를 첨가하여 합성할 수 있다. 이때 network의 화학적, 열적, 기계적인 특성은 monomer의 선택과 기능성 첨가제 및 가교제의 양으로 조절할 수 있다. 두 번째 방법은 linear 또는 branched 고분자 가교를 통하여 얻을 수 있다.

형상기억고분자의 화학적, 열적, 기계적인 특성은 반응조건, 경화시간 및 network chain의 형태와 길이 및 가교 밀도에 의해 결정된다.

열가소성 폴리우레탄 형상기억고분자의 형상 회복비는 일반적으로 90~95%이다.

형상기억고분자의 탄성 modulus는 상온에서 0.5에서 2.5GPa 사이이다.

또한, 에폭시 형상기억고분자는 형상기억회복비가 98~100%이고 탄성 modulus도 2~4.5GPa이며, 습기와 우주방사에도 더 안정적이다.

열가소성 형상기억고분자는 (예를 들면 폴리우레탄 형상기억고분자) 생체 적합 물질과 식물과 같은 작은 크기의 기능성 물질로 연구되고 있다. 반면에 열경화성 형상기억고분자는(예를 들면 스티렌 기반과 에폭시 형상기억고분자)는 일반적으로 우주선에 사용되어 펼칠 수 있는 구조물과 자동차 actuator와 같은 구조물에 사용

되고 있다.

이상의 결과를 토대로 형상기억고분자의 종류를 정리하면 (그림 6)과 같다.

IV. 형상기억고분자의 응용

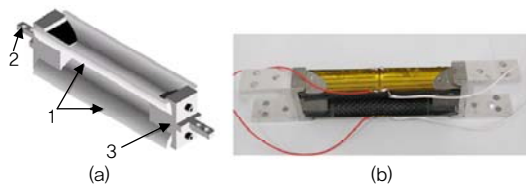
형상기억고분자의 응용은 힌지, trusses, booms, 안테나, optical reflector와 morphing skins 등에 응용되고 있으며, 최근에는 생체 의학, 스마트 섬유, 및 자동차 actuator로 응용되고 있다.

1. 펼치는 구조에 응용

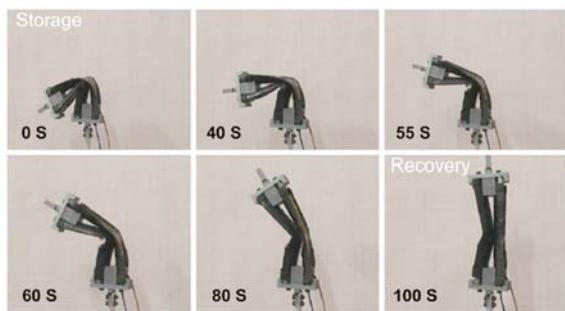
우주선에서 펼쳐지는 소자는 모터로 구동되는 기계적인 힌지나 에너지를 저장하는 소자를 사용하였으나, 복잡한 조립과정과 육중한 메커니즘 및 체적이 크다는 단점이 있어 이를 대체하기 위하여 형상기억고분자를 응용하고 있다[15].

가. 힌지에 응용

(그림 7)은 탄소섬유로 강화한 형상기억고분자 복합



(그림 7) 형상기억고분자 복합체 힌지(a) 힌지 적용 예 (1: 형상기억고분자-복합 셀; 2,3: 힌지의 고정부)(b) 실제 크기의 힌지

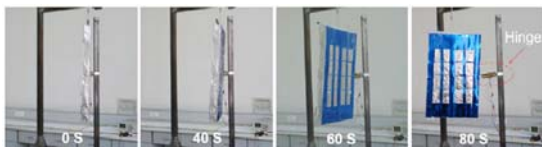


(그림 8) 형상기억고분자 복합체 힌지의 형상회복 과정[17]

체의 펼치는 구조에 응용한 예로[16] 이 구조에서는 형상기억고분자 복합체를 사용하였으며, 힌지는 두 개의 구부러진 회전 셀이 서로 반대방향으로 향하도록 구성되어 있다.

(그림 8)은 형상기억고분자 복합체 힌지의 형상기억 회복 과정을 보여주는 그림으로 전압이 적층 구조로 제작된 회전부에 내장된 저항 발열부에 인가되면 힌지의 온도는 올라가며 이때 형상기억고분자 복합체는 펴지게 된다. (그림 8)과 같이 20V의 전압을 인가하고 약 100초가 되면 다 펴지게 된다.

우주선이 발진할 때 우주선 안의 내부 공간은 제한적이기 때문에 사용되는 radiator, solar array 등의 소자



(그림 9) 형상기억고분자의 복합체 힌지를 solar array에 응용한 예[17]

들의 경량화가 요구되며 또한 신뢰성과 저가격화가 동시에 요구된다. 힌지 응용 예로 (그림 9)와 같이 solar array에 적용하였다. (그림 9)에서 형상기억고분자 복합체 힌지가 작동되어 시간이 지남에 따라 점점 형상이 회복되어 solar array가 회전한다.

나. 펴지는 거울에 응용

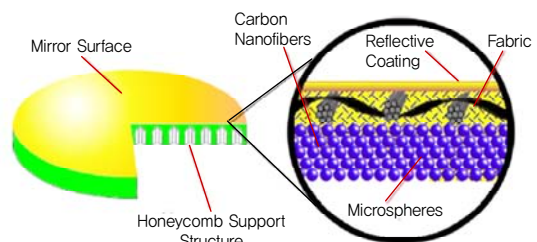
형상기억고분자는 얇고 가볍기 때문에 펴지는 거울에 적용하기에 적당하다. (그림 10)과 같이 펴지는 거울은 형상기억고분자 복합체를 이용한 기판과 반사막이 코팅된 반사경으로 구성된다.

반사표면은 주로 고감도의 반사를 위하여 니켈 도금하였다. 동작은 기판에 외부에서 인가된 전원으로 joule 열이 발생하고 이 열을 이용하여 형상기억을 회복하여 펴지게 된다.

또 다른 형태로는 (그림 11)과 같이 거울의 support로 형상기억고분자로 honeycomb 구조로 제작하였다. 반사경의 구성은 거울 표면, 카본 나노 화이버, 반사면 코팅, 직물 등이다.



(그림 10) 펴지는 거울[18].



(그림 11) 형상기억고분자로 제작된 반사경의 예

다. 반사경에 응용

대구경 안테나는 우주 발사용 로켓에 장착되며 안테나의 반사경은 위성통신의 통신향상을 위해서는 중요한 부품이다. 우주선에 대구경 안테나를 실장하고 우주공간에서 펼치게 하기 위해서 (그림 12)와 같이 형상기억 고분자를 안테나의 표면에 응용하여 우주공간에 도착하면 펴지게 하는 유연 반사경 구조이다.

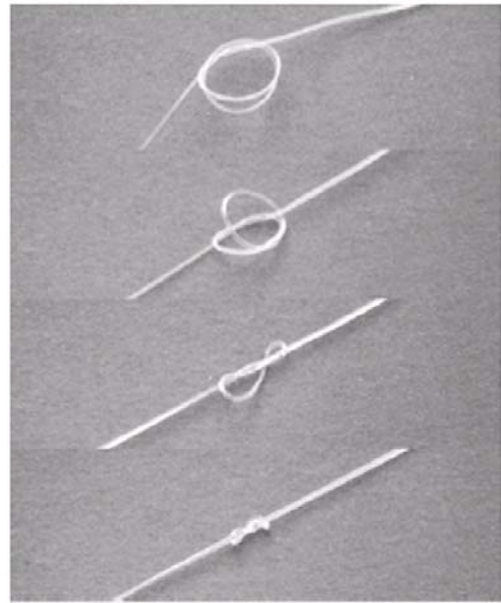
대구경 팽창형 안테나는 반사경 개발의 중요한 요소이다. 그러나 팽창형 안테나의 중심부의 변형은 대부분 아주 크기 때문에 문제가 된다. (그림 13)과 같이 parabolic 접시 안테나 반사경에 응용한 예로 형상기억 고분자 복합체 물질을 안테나의 중심부 변형에 응용하였다. 접시와 support 구조물을 형상기억고분자 복합체로 제작하여 대구경 안테나의 운반 및 장착용이성을 얻을 수 있다. 향후 이와 같은 응용을 위한 형상기억고분자 고분자의 개발에 대한 기대가 크다.



(그림 12) 형상기억고분자 복합체 반사경(a) 변형된 형태(b) 회복된 형태[19]



(그림 13) 형상기억고분자 반사경(직경 0.5m)[20]



(그림 14) 약 200% 인장된 열가소성 형상기억고분자 봉합용 실(매듭은 40°C에서 20초)[22]

2. 생체의학으로의 응용

형상기억고분자는 생체의학용 재료로의 응용도 검토되고 있다. 특히 폴리우레탄 형상기억고분자는 우수한 생물학적 적합성을 나타내기 때문에 임플란트 임상소자나 스텐트의 응용이 검토되고 있다.

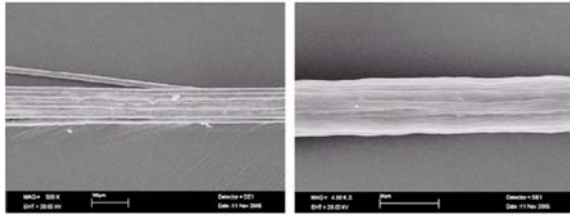
자극 형상기억고분자는 자극에 따라 하나의 형상에서 다른 형상으로 변하는 이중 형상 물질이며 3중 형상기억물질이 보고되기도 하였다[21].

이와 같은 다중 형상기억효과를 이용하여 (그림 14)와 같이 열가소성 형상기억고분자를 외과수술용 봉합용 실로 응용한 예를 보이기도 한다. 이 봉합용 실은 온도가 유리전이온도 이상으로 되면 수축되어 매듭이 지어진다.

3. 형상기억고분자 섬유로의 응용

형상기억고분자를 이용한 형상기억 실은 열 자극에 반응하는 스마트 섬유로 개발이 진행되고 있다.

(그림 15)는 형상기억고분자를 이용한 형상기억 실의



(그림 15) 형상기억실의 SEM 사진 (a)multi-filament (x 500) (b)single-filament(x 4000)[23]

전자주사현미경 단면 사진으로 single filament의 표면에서 사출 성형 시 생성된 흠을 볼 수 있다.

Single filament의 직경은 약 16 μ m이다. 향후 형상기억 직물은 형상기억 필름이나 유화제로 코팅하여 응용이 가능하다.

이와 같은 섬유는 뜨거운 물에서 세탁하거나 건조할 때 유리전이온도 이상으로 올라가면 주름이 없어지고 원래의 편평한 형상으로 회복된다.

4. 유연기판으로의 응용

변형할 수 있는 전자소자는 wearable 디스플레이, 태양광 패널, 비침습성 의학소자 등과 같은 많은 새로운 응용에서 요구되고 있다.

(그림 16)은 형상기억고분자인 아크릴레이트와 실버 나노 와이어 복합체를 변형 전자소자용 기판으로 응용한 예로 온도가 120 $^{\circ}$ C에 도달하면 우측의 사진과 같이 형상이 회복된다.

V. 결론

형상기억효과를 나타내는 물질의 종류 및 원리, 형상



(그림 16) AgNW/고분자 형상기억 특성(우측 사진 120 $^{\circ}$ C에서 회복된 형상)[24]

기억고분자의 응용에 대하여 정리하였다. 형상기억고분자는 합금에 비하여 가볍고, 저렴하며, 효과를 나타내는 자극의 종류가 다양하고, 전이온도 또한 조절이 용이하고 제조공정이 단순하다는 장점이 있다. 이와 같은 장점으로 향후 wearable 디스플레이, 태양광 패널 및 비침습성 의학소자 등의 분야로 응용범위를 확대할 것으로 전망된다. 특히 유연한 디스플레이용 기판으로의 응용이 기대되고 있으며, 이를 위한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

향후 형상기억고분자의 응용을 더욱 확대하기 위해서는 형상기억고분자가 가진 단점 즉 상대적으로 긴 반응 시간, 재료의 불안정성 등을 극복하기 위한 형상기억고분자 복합체 소재의 개발이 필요하다. 또한 응용적인 측면에서 커다란 걸림돌인 단방향 형상기억효과를 나타낸다는 점을 극복하기 위한 자동 resetting 시스템의 개발이 필요하다.

약어 정리

SME	Shape Memory Effect
SMA	Shape Memory Alloy
SMP	Shape Memory Polymer

참고문헌

- [1] A. Lendlein, R. Langer, "Biodegradable, elastic shape-memory polymers for potential biomedical applications," *Sci.*, vol. 296, May. 2002, pp. 1673-6.
- [2] J. FengLong et al., "Smart polymer fibers with shape memory effect," *Smart Mater Struct*, vol. 15, no. 6, 2006, pp. 1547-1554
- [3] R. Mohr et al., "Initiation of shape-memory effect by inductive heating of magnetic nanoparticles in thermoplastic polymers," *PNAS*, vol. 103, no. 10, 2006, pp. 3540-3545.
- [4] A. M. Schmidt, "Electromagnetic activation of shape memory polymer networks containing magnetic nanoparticles," *Macromolecular Rapid Commun.*, 2006, 27,

- 1168-72.
- [5] Cho JW, Kim JW, Jung YC, Goo NS. Electroactive shape-memory polyurethane composites incorporating carbon nanotubes. *Macromol Rapid Commun* 2005, 26, 412-6.
- [6] Sahoo NG, Jung YC, Cho JW. Electroactive shape memory effect of polyurethane composites filled with carbon nanotubes and conducting polymer. *Mater Manuf Process* 2007, 22, 419-23.
- [7] Lendlein A, Jiang HY, Junger O, Langer R. Light-induced shape-memory polymers. *Nature (London)* 2005, 434, 879-82.
- [8] Yang B, Huang WM, Li C, Li L. Effects of moisture on the thermomechanical properties of a polyurethane shape memory polymer. *Polymer* 2006, 47, 1348-56.
- [9] Hu JL. Shape memory polymers and textiles. Introduction, CRC Press LLC, 2007. p. 1-12.
- [10] Behl M, Lendlein A. Actively moving polymers. *Soft Matter* 2007, 3, 58-67.
- [11] Miaudet P, Derre A, Maugey M, Zakri C, Piccione PM, Inoubli R, et al. Shape and temperature memory of nanocomposites with broadened glass transition. *Science* 2007, 318, 1294-6.
- [12] Leng JS, Du SY. Shape memory polymer and multifunctional composite. In: Jiang HY, Schmidt A. The structural variety of shape memory polymers. CRC Press LLC, 2010, 21-64.
- [13] Jinsong Leng, Xin Lan, Yanju Liu, Shanyi Dua Shape-memory polymers and their composites: Stimulus methods and applications, Elsevier, *Progress in Materials Science* 2011, 56, 1077-1135
- [14] Leng JS, Du SY. Shape memory polymer and multifunctional composite. In: Jiang HY, Schmidt A. The structural variety of shape memory polymers. CRC Press LLC, 2010, 21-64.
- [15] Kleinhans G, Heidenhain F. Actively moving polymers. *Kunststoffe* 1986, 76, 1069-73.
- [16] Lan X, Wang XH, Lu HB, Liu YJ, Leng JS. Shape recovery performances of a deployable hinge fabricated by fiber-reinforced shape-memory polymer. In: 16th SPIE international conference on smart structures/NDE, San Diego, USA 2009, 7289, 1-8, 8-12 March, 2009.
- [17] Lan X, Wang XH, Liu YJ, Leng JS. Fiber reinforced shape-memory polymer composite, its application in a deployable hinge. *Smart Mater Struct* 2009, 18, 024002.
- [18] Arzberger SC, Munshia NA, Lakea MS, Wintergerst J, Varlese S, Ulmer MP. Elastic memory composite technology for thin, lightweight space and ground-based deployable mirrors. In: *Optical Materials and Structural Technologies Proceedings of SPIE*, 2003, 5179, 143-53.
- [19] Keller PN, Lake MS, Codell D, Barrett R, Taylor R, Schultz MR. Development of elastic memory composite stiffeners for a flexible precision reflector. In: 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS /ASC Structures, structural dynamics, and materials conferee, Newport, Rhode Island, AIAA 2006-2179, 1-11, 1-4 May 2006.
- [20] Lin JKH, Knoll CF, Willey CE. Shape memory rigidizable inflatable (RI) structures for large space systems applications. In: 47th AIAA/ASME/ASCE /AHS/ASC structures, structural dynamics, and materials conferee, Newport, Rhode Island, AIAA 2006-1896:1-10, 1-4 May 2006.
- [21] Karp JM, Langer R. Development and therapeutic applications of advanced biomaterials. *Curr Opin Biotechnol* 2007, 18, 454-9.
- [22] Lendlein A, Langer R. Biodegradable, elastic shape-memory polymers for potential biomedical applications. *Science* 2002, 296, 1673-6.
- [23] Ji F, Zhu Y, Hu J, Liu Y, Yeung L, Ye G. Smart polymer fibers with shape memory effect. *Smart Mater Struct* 2006, 15, 1547-54.
- [24] Zhibin Yu , Qingwu Zhang , Lu Li , Qi Chen , Xiaofan Niu , Jun Liu , and Qibing Pei, Highly Flexible Silver Nanowire Electrodes for Shape-Memory Polymer Light-Emitting Diodes, *Adv. Mater*, 2011, 23, 664~668