

## 형상기억합금 특성 및 응용기술

### Basic Characteristic of Shape Memory Alloy and Its Application

박중호 · 윤소남

J. H. Park and S. N. Yun

#### 1. 서론

최근, 기계시스템 및 부품모듈의 고효율화, 소형경량화, 고성능화, 다기능화를 구현하기 위하여 스마트 재료 및 구조물(SMS: Smart Materials and Structures)에 대한 관심이 고조되고 있다. 스마트 재료는 크게 구조물 혹은 시스템과 연계되어 액추에이터 및 센서로 사용된다. 액추에이터의 역할은 전기장, 자기장, 온도 등에 반응하여 구조물의 형상, 특성을 변화시켜 외부 환경의 변화로부터 구조물과 시스템이 적응할 수 있는 능력을 제공하는 것이다. 또한, 센서로서의 역할은 구조물의 외부 혹은 내부에 부착 혹은 삽입되어 구조물의 여러 가지 상태변수를 피드백함으로써 일련의 지능제어 과정들에 필요한 정확한 정보를 제공하게 된다. 상용화된 스마트 재료로는 형상기억합금, 압전세라믹, 자기변형재료 등이 있는데, 이 중에서 형상기억합금은 외부의 열이나 응력에 반응하여 형상을 변화시키는 합금으로 우수한 복원력을 가지고 있으며, 변형률 및 체적대비 발생력이 타재료에 비해 크고, 수십만번의 반복적인 동작에도 형상회복 특성을 보이는 우수한 소재로 알려져 있다<sup>1)</sup>.

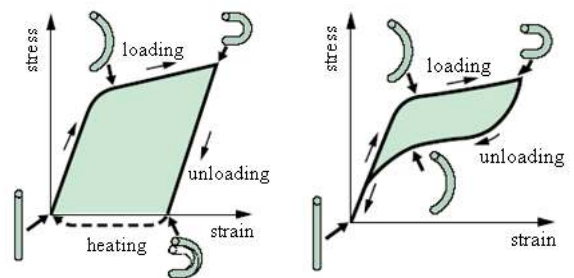
형상기억합금은 일정한 온도에서 형상을 기억시키면 형상기억온도보다 낮은 온도에서 변형을 시켜도 형상회복온도까지 가열을 하면 다시 원래의 형태로 돌아가는 합금을 가르키며 1964년에 미국 해군 무기연구소에서 Ni-Ti합금이 발견되고, 그림 1에 나타난 바와 같이 1969년에 해저케이בל용 파이프 커플링과 달착륙 탐사선용 안테나 등에 응용된 이래 현재는 산업용, 가정용, 의료용 기구에 이르기까지 폭넓게 이용되고 있다. 그림 2에 나타난 바와 같이 일반적인 금속재료는 외부 힘에 의하여 탄성영역 밖의 변형을 일으키면 영구변형이 남아서 원래의 형상으로 돌아가는 것은 불가능하나 형상기억합금은 변형 후에 일정온도(형상회복온도) 이상으로 가열하면 원래의 형상으로 복귀하려는 특성이 있으며, 이 때에 상변태(마르텐사이트에서 오스테나이트 상)에 의한 큰 응력

이 발생한다. 형상기억합금은 응답성이 떨어지고, 외부온도에 의존성이 강하다는 단점이 있으나, 마이크로 액추에이터 중에서 단위중량당 출력비가 가장 우수하다는 점과 생체적합성이 우수하며 통전 가열에 의한 단순 구동이 가능하기 때문에 소형 액추에이터에 적합한 특성을 가지고 있다. 또한, 최근에는 응답성을 대폭 개선시킨 강자성 형상기억합금에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

본고에서는 형상기억합금의 대표적 특성과 원리 및 대표적인 연구개발 사례에 대해서 언급한다.

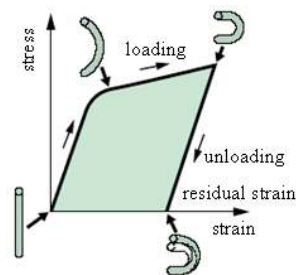


그림 1 형상기억합금의 최초 응용 사례



(a) 형상기억효과

(b) 초탄성효과



(c) 일반 금속재료

그림 2 일반 금속 대비 형상기억합금 특성

## 2. 형상기억합금의 특성

### 2.1 일반 형상기억합금의 개요

형상기억합금은 일반적으로 형상기억효과와 초탄성효과로 구별할 수 있는데 실생활에서 볼 수 있는 대표적 응용 예로서는 그림 2 (a)에 나타난 형상기억효과를 이용한 여성용 브래지어와 그림 2 (b)의 초탄성효과를 이용한 휴대폰 안테나나 안경 프레임을 들 수 있다. 여기서 초탄성효과란, 형상회복온도보다 높은 온도에서 크게 변형을 가해도 힘을 빼면 원래의 형태로 돌아오는 특성을 나타낸다.

형상기억합금은 고온의 오스테나이트 상에서 형상을 기억시킨 후에 저온의 마르텐사이트 상에서 변형을 시키고 온도를 올려 주면 원래의 오스테나이트 상으로 바뀌면서 큰 응력을 발생시킴과 동시에 원래의 기억된 형상으로 복원하는 특성을 나타내며, 형상을 기억시킨 특성에 따라서 일방향성(고온에서만 기억)과 이방향성(고온과 저온에서 기억)을 나타낸다. 따라서, 일방향성 형상기억합금을 액추에이터로 응용할 경우에는 복원성을 향상시키기 위해서 일반적으로 스프링을 같이 사용한다. NiTi 기반 형상기억합금(Ni-Ti, Ni-Ti-Co, Ni-Ti-Cu 등)의 경우에는 형상회복온도  $A_f$  (그림 3 참조)는 Ni 함유량에 따라서  $-30^{\circ}\text{C}$ 에서  $100^{\circ}\text{C}$ 까지 응용분야에 대응하여 조절할 수 있다. 형상기억합금의 변형율은 압전소자의 0.05-0.2%에 비해서 3-5%로 매우 우수하며, 그림 4에 나타난 바와 같이 발생력 및 에너지밀도도 다른 액추에이터에 비해서 가장 우수한 특징을 가지고 있는 것을 알 수 있다<sup>2)</sup>. 그림 4 (a)와 (b)는 소형화 가능한 액추에이터(형상기억합금, 압전소자, 정전액추에이터, 전자액추에이터 등)를 액추에이터 대표 길이에 대해서 얻어진 이론적인 응력과 에너지밀도를 나타내고 있다.

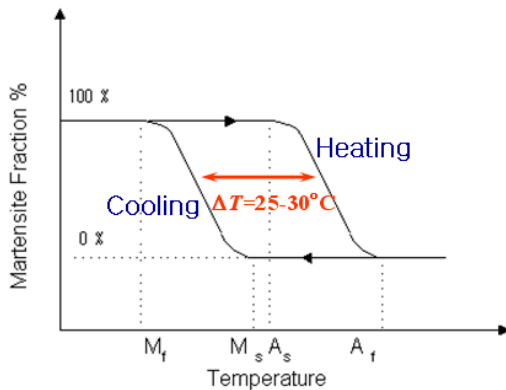
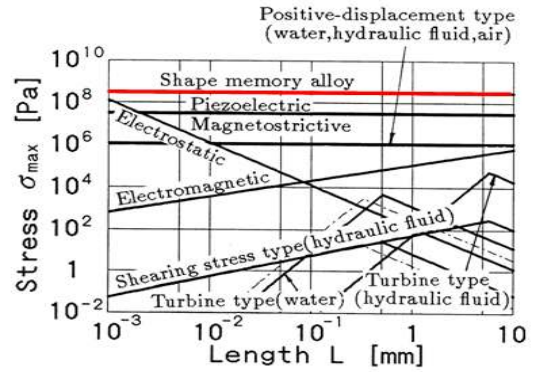
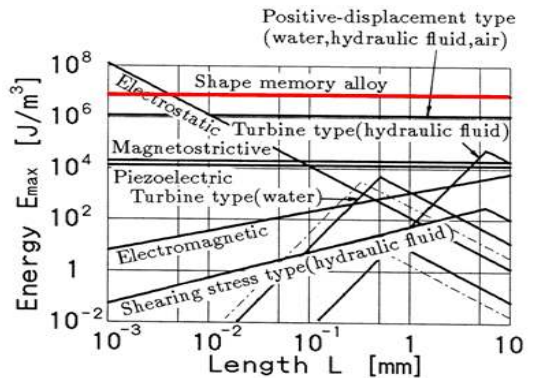


그림 3 상변화에 따른 형상회복온도 관계



(a) 응력 특성



(b) 에너지밀도 특성

그림 4 각종 액추에이터의 소형화 특성

### 2.2 강자성 형상기억합금의 개요

기존의 형상기억합금은 주로 열에 대하여 반응을 하기 때문에 응답속도가 느리고, 변위의 이력이 크다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점으로 인하여 형상기억합금은 우수한 제반특성에도 불구하고 정밀기계부품용으로서의 사용에 상당한 제약을 받아 왔다. 최근에는 이러한 단점을 보완할 수 있는 새로운 형상기억합금이 개발되고 있다.

강자성 형상기억합금 (FSMA: Ferromagnetic Shape Memory Alloy)은 기존의 형상기억합금이 가지는 응력, 열에 반응하는 특성 이외에 외부 자기장

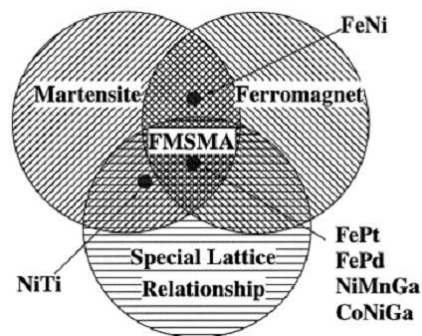


그림 5 강자성 형상기억합금계

에 변화하는 특성을 가진 합금으로 응답속도를 현저히 개선할 수 있는 소재로 알려지며, 미국, 유럽, 일본 등의 선진국에서는 소재 개발에 박차를 가하고 있는 동시에 액추에이터로서의 응용 연구도 활발히 진행되고 있다<sup>1)</sup>.

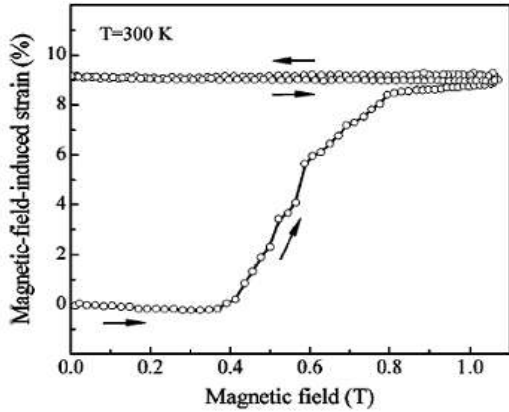


그림 6 NiMnGa계 강자성 형상기억합금 특성

무확산 변태(마르텐사이트 변태)를 하는 합금계 중에서 특수한 결정구조의 방위 관계를 갖는 합금계(NiTi, CuAlZn 등)들은 형상기억효과를 나타낸다. 그림 5는 강자성 형상기억효과를 나타낼 수 있는 합금계를 도식적으로 나타낸 것으로, 이에는 NiMnGa, CoNiGa, FePd, FePt 합금계 등이 있다. 그림 6은 NiMnGa계 강자성 형상기억합금의 MFIS(Magnetic field induced strain) 특성을 나타낸 것으로 1T이하에서 약 10%의 변형을 얻을 수 있으나, 자기장을 제거하여도 변형이 회복이 되지 않는 것을 볼 수 있다. 실용적인 면에서 가역적인 변형이 얻어지는 것이 중요한데, 스프링으로 bias stress를 가하여 자기장을 인가하면 약 6%의 가역적인 변형을 얻을 수 있다는 것이 확인되었다.

강자성 형상기억합금은 응력, 열, 자기장의 변화에 따라 특성이 변화는 성질을 가지고 있기 때문에, 이 세 가지의 변화를 적절히 조합하여 액추에이터 설계에 적용할 수 있다. 액추에이터로 사용될 때의 기본적인 작동 기구는 크게 자장유기 상변태, 마르텐사이트 변형의 재배열, 불균일 자장에서 응력유기 상변태(Hybrid Mechanism)에 응용이 가능하다.

자장유기 상변태 기구는 자기장을 인가하여 모상(Austenite)을 마르텐사이트로 변태시키거나, 반대로 자기장을 제거하여 역변태를 시키는 기구이다. 지금까지 알려진 NiMnGa 합금이나 FePd 합금의 경우, 이 기구로 변태/역변태를 유도하기 위해서는 상당히

큰 자기장이 필요하기 때문에 액추에이터로 구성하기에는 실용성이 없는 것으로 보고되고 있다.

마르텐사이트 변형의 재배열 기구는 완전한 마르텐사이트상에서 균일한 자기장을 인가하여 마르텐사이트의 변형을 재배열시켜 MFIS를 얻는 것으로, 1T 정도의 자기장에서 6% 정도의 MFIS를 얻을 수 있다. AdaptMat Co.에서는 이 기구를 이용하여 선형모터나 밸브 등의 제품을 개발하고 있다. 강자성 형상기억합금의 액추에이터는 기계적 일을 하며 변형된 재료는 가역적으로 회복되지 않기 때문에 일반적으로 스프링을 부착하여 가역적인 동작을 하게한다.

불균일 자장에서 응력유기 상변태 기구는 연쇄반응에 기초를 두고 있다. 시편에 기울기가 있는 자기장을 인가하면 자성체는 힘/모멘트를 느끼게 된다. 즉, 기울기가 있는 자기장에 대하여 강자성 형상기억합금은 자기력/자기모멘트를 받게 되고, 이로 인해서 유발된 응력으로 FSMA에 응력유기 마르텐사이트변태가 일어난다. 응력유기 마르텐사이트 변태가 일어나면 FSMA는 더욱더 부드러워지며 더 많은 변형을 일으킬 수 있다. 이 기구는 변형 재배열 현상에 응력유기 변태가 결합된 기구로 복합기구(Hybrid Mechanism)라고도 한다.

### 3. 형상기억합금의 응용기술

#### 3.1 의료용 응용기술

최근의 외과 수술은 환자의 정신적/육체적 부담을 경감하기 위하여 무통(painfree) 내지는 최소침습(minimally invasive) 수술 위주로 되고 있으며, 이를 위한 대표적인 의료기기의 하나가 카테터(catheter)로써, 동맥 등의 혈관을 경유해서 심장이나 뇌혈관에 혈관조영제의 주입과 혈전 제거 등을 위해서 사용되고 있다. 형상기억합금은 체내 일정 온도가 유지되며 빠른 응답성을 필요로 하지 않는 카테터용 액추에이터에 매우 적합하다고 할 수 있다<sup>3)</sup>.



그림 7 능동 굴곡 카테터 선단부



형상기억합금을 이용한 능동 카테터의 대표적인 예로써 그림 7과 그림 8에 나타난 바와 같이 카테터의 선단부가 혈관벽에 접촉하면 자동적으로 반대방향으로 굴곡하여 복잡하고 비좁은 공간에서의 진입을 용이하게 하는 일본 올림퍼스광학공업(주)에서 수행되었던 외경 1.5mm의 능동 카테터가 있다. 이 카테터는 내부 채널에 0.5mm 직경의 혈관 관찰용 내시경을 주입시킴으로써 혈관 내부의 관찰도 가능하다. 3개의 형상기억합금(SMA) 와이어를 얇은 튜브에 피복시킴으로써 3방향 독립적으로 굴곡 가능하고,

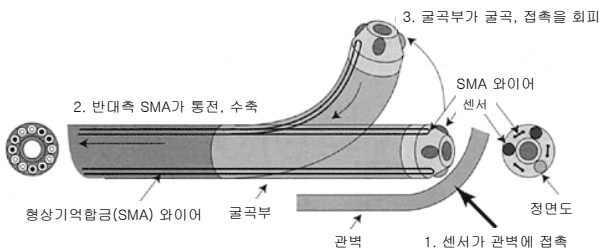


그림 8 능동 굴곡 카테터의 구조 및 동작원리

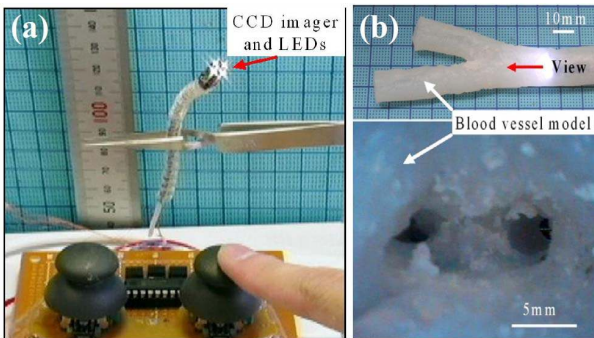


그림 9 능동 굴곡 전자내시경



(a) 압력 밥솔

(b) 온수조절기



(c) 커피메이커

(d) 에어컨 풍량조절기

그림 10 형상기억합금 가정용 응용 사례

2개의 SMA 액추에이터의 구동을 조합시킴으로써 모든 방향의 굴곡이 가능하며, 카테터의 진행방향에 맞춰서 배열된 SMA 와이어는 통전하여 가열함으로써 수축변위를 일으켜 굴곡동작하게 된다. 그림 9는 동북대에서 연구개발 중인 형상기억합금을 이용하고 조이스틱으로 조작 가능한 외경 5mm의 능동굴곡 전자내시경을 나타낸다.

### 3.2 가정용 응용기술

형상기억합금은 감온감지의 센서기능과 전기/열에너지를 기계적 에너지로 변환하는 액추에이터로서의 기능을 겸비하고 있어 스위치 소자나 온도제어용 장치로 이용될 수 있다. 이러한 특성을 가정용 일반제품에 활용한 대표적 응용 사례를 그림 10에 나타낸다. 이 외에도 영국의 Delta Memory Metal사는 일찍부터 창문개폐기 등에 쓰이는 작동소자 개발을 시작하여  $\beta$ -Alloy (Cu-Zn-Al계 합금)를 이용한 온도 제어장치를 개발한 실적이 있다.

### 3.3 산업용 응용기술

에너지절약 및 환경보호에 대한 사회적 관심이 높아지고 있는 가운데 항공사들의 치열한 가격경쟁, 원유가격의 가파른 상승 등의 이유로, 항공기의 경량화, 공기저항 감소에 의한 연비절감 요구가 급증하고 있으며, 초소형 기능성 액추에이터 등에 의한 진동과 공력소음 경감 대책이 미래의 항공기를 포함한 수송기계 전반에 걸쳐서 요구되고 있다. 기존의 액추에이션 기구는 전자모터, 유압시스템과 같이 대출력, 짐중형이 요구되었으나, 미래의 항공기에서는 압전소자, 형상기억합금, 고분자 액추에이터 등 재료자체의 변형응답기능을 활용한 소출력, 분산형이 요구된다.

형상기억합금은 압전재료나 자왜재료에 비교해서 파워밀도 및 변형률이 우수한 반면에 응답속도가 현저히 떨어지는 특성때문에, 항공기에 적용을 고려할 경우에는 준정적 액추에이션 기구인 모핑(가변형상쉐브론, Mini-TEDs, 볼텍스 제네레이터 등)에 적용될 수 있다. 그림 11은 Boeing사를 중심으로 GE사, Goodrich사 등이 추진 중인 QTD(Quiet Technology Demonstrator) 프로그램에서 2005년에 실시된 QTD2 실증시험에서 형상기억합금을 사용하여 이륙시에 쉐브론 노즐의 각도를 변경시켜서 정숙성을 향상시킨 777-300ER 항공기를 나타내고 있다<sup>4)</sup>. 그림 12와 13은 헬리콥터 로터 블레이드의 양력을 조절하기 위해서 미국 메릴랜드 대학에서 수행한 결과이며,

대칭익 에어포일 NACA 0012에 형상기억합금 와이어를 장착시켜서 탭 각도를 제어한 결과이며, 20°의 각도를 변화시킬 수 있는 것이 확인되었다<sup>5)</sup>.



그림 11 QTD2 실증시험에 사용된 항공기

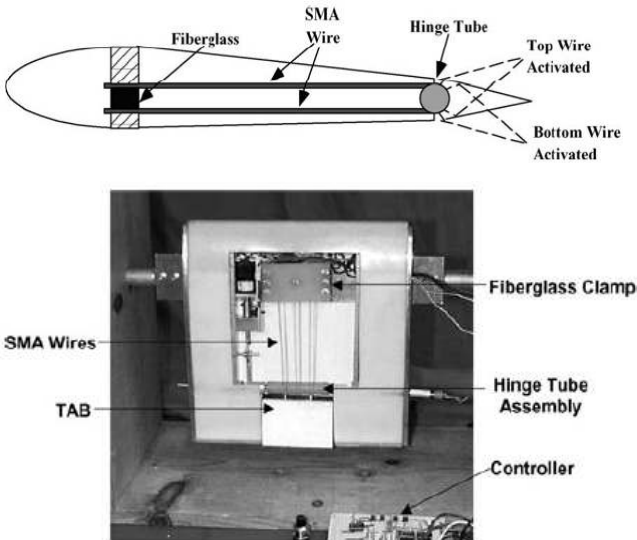


그림 12 NACA 0012 윙에 장착된 탭 액추에이터

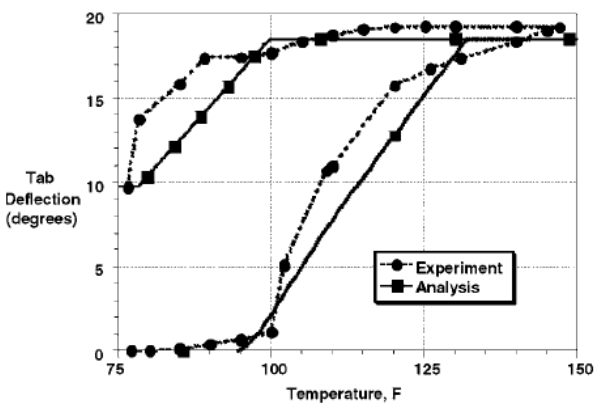


그림 13 SMA 구동 탭 각도 제어 결과

그림 14는 아버나 콜릿과 같은 클램핑 디바이스를 사용하는 기존 공작기계의 소형화를 위해서, 한국기

계연구원에서 수행한 형상기억합금을 이용한 클램핑 장치의 개념도를 나타내고 있으며, 그림 15는 프로토타입의 실험결과로써 마이크로 엔드밀링, 드릴링에 적용 가능한 약 300N·mm의 클램핑 토크가 얻어진 것을 알 수 있다<sup>6)</sup>.

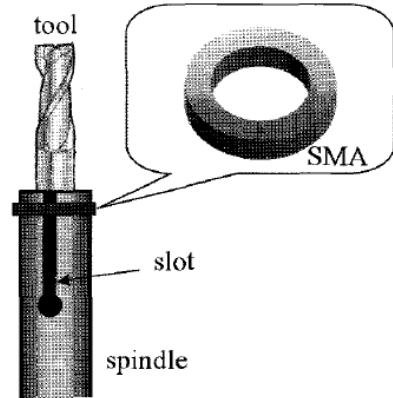


그림 14 형상기억합금을 이용한 클램핑 장치

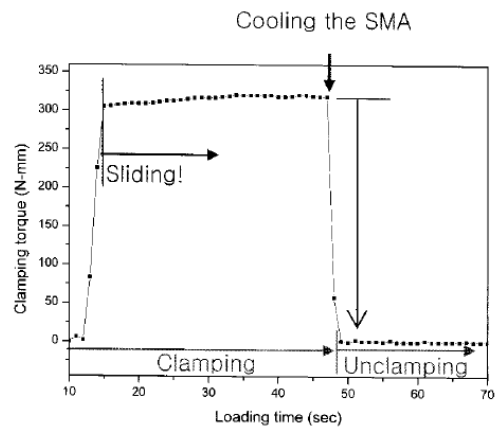


그림 15 SMA에 의한 클램핑 토크 측정 결과

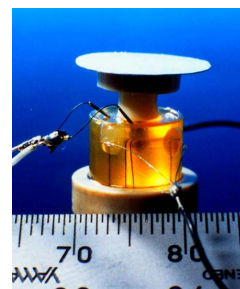
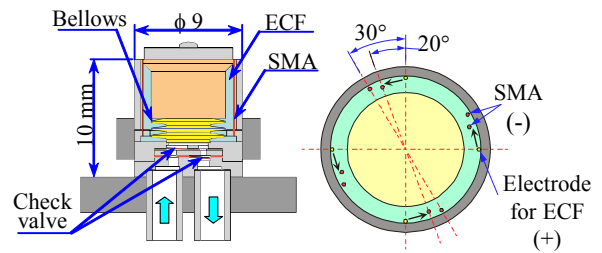


그림 16 SMA와 ECF를 이용한 마이크로펌프

그림 16은 형상기억합금 와이어를 마이크로펌프에 응용한 연구 예로써, 내부의 벨로우즈를 형상기억합금을 가열, 냉각시킴으로써 용적변화를 일으키는 구조이고, 실험을 통해서 11mm<sup>3</sup>/s, 0.18MPa의 성능을 얻고 있다. 형상기억합금의 응답성 향상을 위해서 냉각시에 ECF(Electro Conjugate Fluid)를 이용하고 있다.

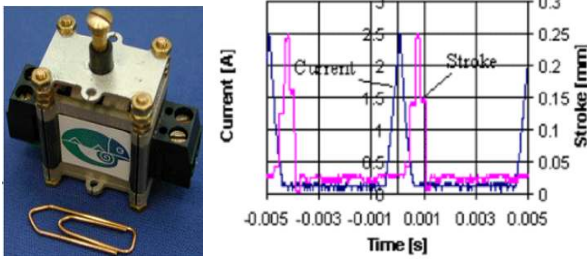


그림 17 강자성 형상기억합금 액추에이터 특성

그림 17은 AdaptMat에서 개발한 NiMnGa계 강자성형상기억합금을 이용한 작동길이 15mm액추에이터의 특성을 나타내고 있으며 응답시간이 1ms이하인 것을 알 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 linear motor나 proportional valve등에도 응용할 수 있다<sup>7)</sup>.

#### 4. 결 론

본고에서는 일반적 형상기억합금 및 응답성 향상을 목적으로 최근 개발중인 강자성 형상기억합금의 특성 및 대표적 응용 사례에 대해서 살펴보았다. 물론, 여기서 언급하지 않은 의료용 치열교정장치, 그립퍼, 유체제어요소 및 초정밀모션분야 등 다양한 응용 예가 있지만 지면사정상 생략한다. 형상기억합금은 향후 스텐트/카테터를 이용한 저침습치료 등 선진 의료분야뿐만 아니라 항공산업을 필두로 가정용/산업용 전 분야에 걸쳐서 응용범위가 확대될 것으로 예상되며, 향후 형상기억합금의 성능향상과 더불어서 신규 기술시장이 열릴 것으로 전망된다.

#### 참고 문헌

1) 윤소남, 이정무, 강자성 형상기억합금 기술”, 기계저널, 제46권 제8호, pp. 20~23, 2006.

2) K. Yoshida and S. Yokota, "Study on High-power Micro-actuator Using Fluid Power", Proc. FLOMEKO'93, Vol. 1, pp. 122~130, 1993.  
 3) 박중호, 윤동원, 최상규, 의료용 Active Catheter 기술 개발 동향”, 기계와 재료, 제17권1호, pp. 33~41. 2005.  
 4) 박중호, 항공기용 진동-공력소음 제어기술”, 기계저널, 제48권 제4호, pp. 19~22, 2008.  
 5) J.J. Epps and I. Chopra, Smart Materials and Structures, Vo. 10, pp. 104~111, 2001.  
 6) 정준모 외 3인, 형상기억합금을 이용한 회전공구 클램핑 장치 구현”, 한국공작기계학회논문집, Vol. 17, No. 1, pp. 16~20. 2008.  
 7) 한국기계연구원, 차세대 스마트 액추에이터 기술 기획조사 보고서”, 2006.

#### [저자 소개]



박중호

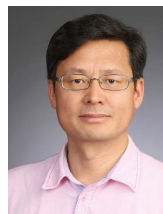
E-mail : jhpark@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7607

1968년 6월 19일생

1999년 Tokyo Institute of Technology 정밀기계시스템 전공 박사과정 졸업, 1999년 Tokyo Institute of Technology 정밀공학연구소 Assistant Prof., 2004년 한국기계연구원 입사, 2009년~현재 한국기계연구원 선임연구원, 마이크로 유체제어 시스템, 스마트 액추에이터 및 센서 응용 연구에 종사, 대한기계학회, 한국정밀공학회, 유공압시스템학회 회원, 공학박사

#### [저자 소개]



윤소남

E-mail : ysn688@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7155

1963년 7월 29일생

1990년 부경대학교 기계공학부 석사, 1994년 동 대학원 박사과정 졸업, 2005년 어번대 마이크로나노시스템/재료연구실 객원연구원, 1994년~현재 한국기계연구원 책임연구원, 스마트 액추에이터, 유공압밸브 및 에너지 수확기 개발 연구에 종사, 유공압시스템학회, 대한기계학회, 동력기계공학회, 한국정밀공학회, 일본유공압시스템학회 등 회원, 공학박사