

기술논문

마이크로 액츄에이터의 연구동향 : 마이크로 로봇의 연구개발 사례를 중심으로

김 덕 호*, 김 경 현*, 김 태 송*, 박 종 오**

* 한국과학기술연구원 마이크로시스템 연구센터 **지능형 마이크로시스템 개발사업단

1. 서론

1980년대 후반 이후 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술의 비약적인 발달로 마이크로 크기의 다양한 기계적 구조물, 센서 및 액츄에이터의 제작이 가능해졌고 VLSI, SMT(Surface Mounting Technology)와 같은 기술에 의해 많은 전자부품들이 소형화됨으로써 마이크로로봇의 개발이 활발히 진행되어 왔다. 이와 함께 마이크로 로봇에 적합한 마이크로 구동원과 마이크로센서의 연구 및 통합기술이 강력히 요구되고 있다. 기존의 전자모터는 90%가 넘는 높은 변환효율과 취급의 간편함을 장점으로 가지며 마이크로로봇의 구동원으로도 기존의 전동식 액츄에이터를 소형화하여 사용할 수 있지만, 소형화 할수록 급격히 구동력이 떨어지게 된다. 따라서 극히 미소한 운동기구를 움직이기 위해서는 새로운 구동원리를 가진 작은 크기의 구동장치가 필요하다.

최근에는 MEMS의 미세 가공기술(micromachining)을 이용하여 형상기억합금(Shape Memory Alloy:SMA), 압전 세라믹 재료(Piezoelectric Ceramic Material) 및 전기적 구동성을 갖는 기능성 고분자(Polymer) 재료를 이용한 새로운 액츄에이터가 개발되고 있으며 마이크로시스템에 적합한 구동원으로서 주목을 받고 있다. 이러한 액츄에이터들은 소형화, 경량화가 가능하며 무엇보다도 단위 중량비 출력이 기존의 전동식, 유공압식 액츄에이터에 비해 우수하여 소형화 로봇(Miniatured Robot), 마이크로 로봇(Microrobot)에 적합한 것으로 기대된다. (그림 1 참조)

소형 경량으로 큰 힘을 내는 액츄에이터는 이 밖에도 여러가지가 있는데 구성재료 및 구동원리가 다양하므로, 액츄에이터의 특성에 대한 깊은 이해를 바탕으로 마이크로화의 적합성 여부를 판단하고, 응용 대상을 신중히 고려해야 한다. 본 논문에서는 현재 개발된 다양한 마이크로액츄에이터를 소개하고 관련 연구 동향과 함께 각 액츄에이터 특성에 대한 비교자료를 제공하고 마이크로 로봇에 적용된 사례를 소개하는

것을 목적으로 한다.

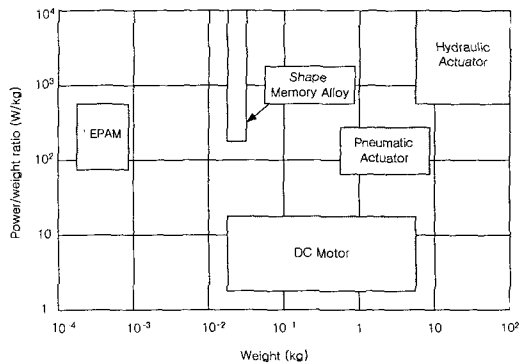


그림 1. 액츄에이터의 출력비 비교.

1) EPAM (Electrostrictive Polymer Artificial Muscle Actuators)

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 마이크로시스템의 설계에서 고려해야 할 스케일링 효과에 대한 소개와 함께 마이크로 액츄에이터로서의 적합성을 나타낼수 있는 성능지표를 기술하였다. 3장에서는 최근 주목 받고 있는 형상기억합금(Shape Memory Alloy: SMA), 무기질 압전재료(Piezoelectric Ceramic Material) 및 전기적 구동성을 갖는 기능성 고분자(Polymer) 재료 등의 구동특성을 기술하고 표로 비교하였다. 4장에서는 다양한 마이크로 구동원리를 이용한 마이크로 로봇의 개발사례를 소개한다. 마지막으로 마이크로 로봇에 적용되기 위한 액츄에이터의 문제점과 함께 향후 연구개발 방향에 대해 논하고자 한다.

2. 마이크로액츄에이터의 요구조건

2.1 스케일링 효과(Scaling Effect)

마이크로머신의 설계에 있어서 고려해야 할 중요한 사항으로 스케일링 효과(scaling effect)가 있다. 스케일링 효과는 단위길이가 작아짐에 따라 역학적 물리량이 변화함으로써 나타나는 현상을 뜻하는 것으로 이

를 유념하면 마이크로 세계에서 발생하는 다양한 물리적 현상들을 보다 잘 이해할 수 있다. 또한 스케일링 효과는 마이크로 로봇의 이동도(mobility), 마이크로 액츄에이터의 구동역학, 마이크로 구조물의 구조역

표 1. 역학적 물리량의 스케일링 효과.

Parameter	Equation	Scaling Effect
Surface Area Volume / Mass	$\propto L^2$ $\propto L^3$	L^2 L^3
Friction force	μmg	L^3
Stress	$\propto m/L^2$	L
Wind, lift, drag forcness	$\propto L^2$	L^2
Gravitational force	mg	L^3
Inertial force	$m \frac{d^2x}{dt^2}$	L^4
Viscosity force	$c \frac{A}{L} \frac{\partial x}{\partial t}$	L^2
Elastic force	$eA \frac{\Delta L}{L}$	L^2
Linear spring constant	$2UV/(\Delta L)^2$	L
Eigen Vibration Frequency	$\sqrt{K/m}$	L^{-1}
Angular momentum	amr^2	L^5
Electrostatic force	$\frac{\epsilon A V^2}{2 d^2}$	L^0
Electromagnetic force	$\frac{B}{2\mu} A_m$	L^2
Thermal expansion force	$eA \frac{\Delta L(T)}{L}$	L^2
Piezoelectric force	$eA \frac{\Delta L(E)}{L}$	L^2

학, 센서 및 에너지원 설계, 제어 및 시스템 통합에 있어서도 고려해야 할 필수 사항이다. 표 1은 다양한 역학적 물리량의 스케일링 효과를 나타내고 있다.

2.2 마이크로 액츄에이터의 성능지표

마이크로액츄에이터가 마이크로로봇에 효과적으로 적용되기 위해서 갖추어야 할 기본적인 요구조건은 다음과 같다.

- 1) 소형이며 경량 (Compactness, Light Weight)
- 2) 단위 부피/중량비 대 높은 출력 (High Power Density)
- 3) 고효율 (High Efficiency)
- 4) 우수한 제어성 (Good Controllability)

이러한 관점에서 마이크로액츄에이터의 일반적인 특성을 표 2에 요약하였다. 현재까지 개발된 구동방식에 대해서 구동효율과 응답성 및 중량비대 출력에 대한 비교결과를 나타내었다.

마이크로액츄에이터로는 정전기력과 정자기력을 이

용한 정전(electrostatic)모터와 정자기모터가 대표적이다. 이는 발생구동력이 전극의 면적에 비례하기 때문에, 이 힘이 체적에 비례하는 전자 액츄에이터에 비해 마이크로화에 유리하다. 그 때문에 미국을 중심으로 실리콘의 미세가공법을 응용하여 회전부가 머리카락의 지름보다도 작은 마이크로모터를 만드는 연구가 활발히 전개되고 있다. 그림 2은 미국 위스콘신 대학 MEMS연구그룹에서 제작한 대표적인 정자기 마이크로 모터의 예이다. 그러나 이러한 정전형의 액츄에이터는 구동력이 상대적으로 작고 마찰의 영향이 지대한 미소영역에서 고속으로 회전하는 정전모터가 마이크로시스템의 범용 액츄에이터로서 적합한가는 미지수이다.

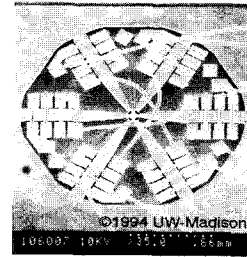


그림 2. 고속의 마이크로 자기모터.

마이크로 액츄에이터로서 이용할 수 있는 물리, 화학적인 현상이 많은데, 예를 들어 정전기력 외에도 열팽창, 압전효과, 전기적 화학반응 등을 이용하여 새로운 구동방식으로 채용하고 있다. 표 3에서 보듯이 각 구동방식은 장, 단점을 가지고 있으므로 적용하려는 마이크로시스템의 구동원으로서 적합성, 요구사양을 만족시키도록 구동방식의 선택 및 최적화된 구동메커니즘의 설계가 필요하다.

특히 이 중에서 마이크로화에 적합한 구동방식으로 주목받고 있는 형상기억합금을 이용한 액츄에이터, 압전 세라믹 재료 및 기능성 고분자(polymer)재료를 이용한 액츄에이터의 특성 및 문제점을 3장에서 살펴보기로 한다.

3. 기능성 재료를 이용한 마이크로 액츄에이터

형상기억합금, 기능성 polymer, 무기질 압전재료, 정전기력/정자기력을 이용한 액츄에이터의 특성을 표 4에 요약하였다. 이 도표는 여러가지 원리에 입각한 액츄에이터의 마이크로화로의 적합성을 좌우할 수 있는 변위, 구동력, 응답성 및 제어방식, 효율 등을 보여주고 있다.

3.1형상기억합금(Shape Memory Alloy:SMA)

형상기억합금을 이용한 액츄에이터는 중량비에 비

해 출력이 매우 높고 비교적 운동범위가 넓은 반면에 전력소모가 심하고 동작주파수가 낮아 응답속도가 느리다. SMA 액츄에이터는 열이 가해지면 물성적으로 마르텐사이트(martensite)에서 오스테나이트(austenite)로의 상전이를 통해 구동되며, 냉각시간이 가열시간에 비해 오래 걸리므로 적용 가능한 주파수 대역 (bandwidth)이 낮다. SMA 액츄에이터는 작게 개발될 수록 냉각속도가 느리고 효율이 낮은 단점이 개선될 수 있으며, 최근에는 큰 전자기장 내에서 SMA를 열 처리하는 방법으로 주파수대역을 두배정도 개선한 연구 사례들이 보고되고 있다. SMA 액츄에이터는 재료의 특성상 히스테리시스(hysteresis)가 있고, 실시간으로 변위와 힘, 응력 등을 직접 측정하여 피드백하기가 어렵기 때문에 현재는 SMA재료의 특성실험을 바탕으로 개루프제어하거나 온도, 전류, 저항 등의 측정을 통해 간접적으로 피드백(feedback) 제어하는 방식을 사용한다. 제어성의 향상을 위해서 능동적인 가열/냉각 제어법에 대한 연구와 SMA특성의 수학적 모델링 등을 이용하여 히스테리시스를 줄임으로써 액츄에이터의 응답속도를 개선하려는 연구[21] 등이 주로 진행되어 왔다. 대표적인 응용사례로는 Hirose, Esashi [1][19]등에 의해 개발된 인체용 자율주행 내시경의 구동 액츄에이터이며, 아직은 효율이 낮고 응답속도가 느리며 고전류를 사용하여 실용화되기에 어려운 점이 있다. 최근에는 반도체 박막성형기술을 이용한 SMA 액츄에이터의 제작이 가능해져서 um 단위까지 작게 제작이 가능하게 되어 의료용, 소형 정밀기계용으로 응용범위를 확대하고 있으며, 마이크로로봇의 구동원으로 장점이 많아 앞으로도 자율주행형 마이크로로봇에 많이 적용될 것으로 보인다.

3.2 압전 세라믹 재료(Piezoelectric Ceramic Material)

무기질 압전재료는 현재까지 개발된 마이크로액츄

에이터 중에서 가장 널리 활용되고 있으며, 특히 최근에는 졸/겔 제작법(예: 일본MEL 마에다 연구실), 수열 가공법(예: 일본 동경대 히구치연구실)등 마이크로화 기술이 발달하여 여러 분야에 응용되고 있다.

대표적으로 쓰이는 압전 세라믹 재료는 PZT (Pb (Zr, Ti)O3 로 구성)로서, unimorph cell들이 각각 sector에 구동전압을 조절함으로써 액츄에이터의 운동이 결정되는 구동원리를 가지고 있다.

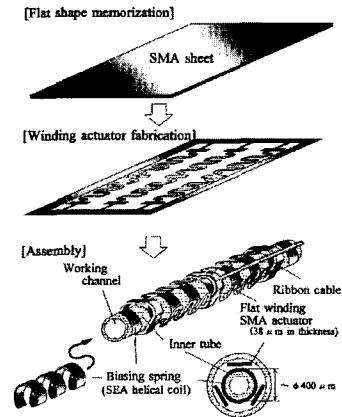


그림 3. SMA 액츄에이터를 이용한 능동 내시경[1].

압전재료는 특성상 동작주파수가 높고 제어성이 좋은 반면에 아직까지 고전압으로 구동되고 소재의 유연성이 부족하며 strain 범위가 작아 미세한 운동만을 제공하는 단점이 있다. strain범위를 개선하려는 연구로서 변위가 상대적으로 큰 적층형 압전 액츄에이터가 개발되었으나 구동변형율은 여전히 한계가 있다. 최근 압전재료를 이용하여 큰 변위와 구동 토크를 얻을 수 있도록 직경 2mm미만의 초음파모터가 제작(예: 미국 펜실베니아 대학 Uchino교수)되었는데, 건

표 2. 성능지표에 따른 구동방식 비교.

Method	Principle	Efficiency	Response Speed	Power Density
Electromagnetic	magnetism ⇒ force	◆◆	◆◆	◆◆
Electrostatic	electricity ⇒ force	◆◆◆	◆◆	◇
Thermomechanical	heat ⇒ force	◆◆◆	◆	◆
Phase Change	heat ⇒ force	◆◆◆	◆	◆◆
Piezoelectric	electricity ⇒ force	◆◆◆	◆◆	◆◆
Shape Memory	heat ⇒ force	◇	◆	◆◆◆
Magnetostrictive	magnetism ⇒ force	◆	◆◆	◆◆◆
Electrorheological	electricity ⇒ viscosity	◆	◆	◆
Electrohydrodynamic	heat ⇒ force	◆	◆	◇
Diamagnetism	magnetism ⇒ force	◆◆	◆◆	◆◆

(Performance Index-Very High ◆◆◆ / High ◆◆ / Medium ◆ / Low ◇)

전지로 구동되며 조만간 양산화 될 예정이다. 압전 세라믹재료는 액츄에이터로서 뿐만 아니라 센서로서 쓰일수 있는 장점을 가지고 있는데, 이러한 특성을 이용하면 필요한 구성요소를 줄여 마이크로시스템에 보다 효율적인 액츄에이터로 쓰여질 수 있다.

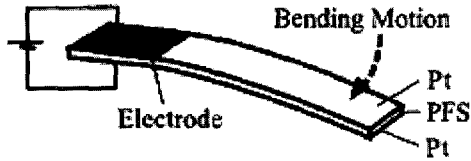


그림 4. 이온전도성 고분자 액츄에이터.

3.3 기능성 polymer 재료

기능성 polymer재료는 인간의 근육과 유사한 특성을 가지고 있으며, 중량대비 출력이 높고, 효율이 좋아 다양한 형태의 기능성 polymer들이 액츄에이터로서 연구되고 있다. 현재 주목받고 있는 기능성 폴리머 액츄에이터(Electro Active Polymer: EAP)로는 polymer 젤, 전도성 polymer, IPMC (Ion Exchange Polymer Metal Composite) 등이 있으며, 기존의 액츄에이터보다 작은 크기로 저전압에서 구동된다. 기능성 polymer는 전압을 인가했을 때 화학적 확산을 통해 polymer가 수축/팽창함으로써 구동되는 방식이다. 예를 들어, 그림 4의 ICPF(Ionic Conducting Polymer gel Film) 액츄에이터는 perfluorosulfonic acid membrane(PFS)에 화학

적으로 백금을 입힌 것으로, 양단의 백금층을 전극으로 사용하여 고전압을 인가함으로써 polymer가 두께 방향으로 줄어들고, 폭 방향으로 늘어나서 구동이 된다. 고분자를 이용한 액츄에이터 중에서 현재까지 가장 제작기술수준이 높은 액츄에이터 형태는 Electrostrictive polymer로서, 변형율이 30%이상으로 크고, 응답속도도 빠르며 높은 에너지 효율을 가진다. 이 액츄에이터는 미국 SRI 사(<http://www.sri.com/>) 등에서 제작, 판매하고 있으며 MAV(micro air vehicle)나 자율주행로봇에 적용되고 있다. Electrostrictive polymer는 소재의 특성이 인간근육의 특성과 아주 유사하고, 반응속도가 빠르고, 구동력이 큰 반면에, PZT type처럼 변형율이 제한될 뿐 아니라 고전압이 필요하다는 단점이 노출되었다. 최근 더욱더 주목받고 있는 기능성 polymer는 IPMC재료를 이용한 액츄에이터로서, 이미 미국의 NASA등에서는 탐사로봇의 액츄에이터로 시작품을 제작하여 검증을 마쳤으며, Dupont사 등에서는 구동소자로 개발, 판매하는 등 미래에 유망한 액츄에이터로 보고되고 있다

3.4 기타

소형/경량으로 큰 힘을 내는 액츄에이터로는 이외에도 수소저장 합금, 공압식 액츄에이터가 있으며 공압식 구동방식은 주로 마이크로 밸브로 적용되고 있다. 수소저장합금은 중량 대비 출력 기준으로 가장 우수한 것으로 알려져 있는데, 일례로 약 12g의 합금으로 50kg 의 무게를 1m정도 들어올릴 수 있을 정도로

표 3. 마이크로 액츄에이터의 장/단점 비교.

Actuators	Advantages	Disadvantages
SMA (Shape Memory Alloy)	-High power to weight ratio -Compact and lightweight -Self-sensing capability -Simple two-state (on-off type)action -Robust(good fatigue properties) -Muscle-like properties	-Low strain(%5) -Low bandwidth(< 1Hz) -Highlynonlinear(hysteresis behavior) -Low efficiency of the process
EAP (Electro Active Polymer)	-Lightweight and compact -Muscle-like actuation -Large stroke capability -Specific power comparable to that of electric motors -Promising for many biological and medical applications	-Need to operate at relatively high voltages -Hard for micro fabrication
Piezoelectric	-High torque at low speed and high holding torque at zero power(ultrasonic motor) -High bandwidth(khz) -Capability with both sensing and actuation	-High voltage and special waveform required -Linear types have low stain(% 0.1) -Small displacement
Electro-Magnetic	-Many different size and types available on the market -Easy to use, reliable -Easy to control	-Requires gearbox and some electronics -Limited miniaturization -Low strength to weight ratio

보고되고 있다. 수소저장합금은 차폐(shield)가 어렵고 수소를 저장하기 위한 필요장비를 갖추어야 하는 단점이 있지만, 니켈수소전지와 수소자동차의 보급으로 수요가 증가할 것으로 예상되고 있으며, 차세대 에너지 개발 및 에너지 저장방법에도 큰 위력을 발휘하고 있어 더욱더 주목받고 있는 액츄에이터이다. 화학반응을 이용하여 압력을 발생시키는 장치도 개발중인데 금속에 고주파를 투과시켜 열을 발생시키고 이에 의해 고압을 얻는 원리이다. 이외에도 요즘 주목받고 있는 Magnetostrictive 액츄에이터나 ER 혹은MR 유체 액츄에이터 등도 큰 힘을 낼 수 있어 활발히 연구되고 있다.

4. 마이크로 로봇의 적용사례

이제까지 주요한 마이크로 액츄에이터에 대해 설명하였다. 이 장에서는 이러한 마이크로 액츄에이터를 이용하여 개발된 마이크로 로봇에 대해 최근의 연구 개발 동향을 소개하고자 한다. 일반적으로 마이크로 로봇이라고 하면, 범용 마이크로 프로세서를 탑재한 크기 10 cm 이상의 마이크로 마우스를 연상하는가 하면, 영화 Fantastic Voyage (1966년)나 Inner Space (1984년)에 나오는 혈관 로봇이 개발되었다고 생각하는 일반인도 있다. 본 논문에서는 로봇의 크기에 주목하기 보다는 어떠한 마이크로 액츄에이터를 사용하여 구동원을 얻고 있느냐는 관점에서 살펴 보고자 한다.

4.1 전동모터를 이용한 마이크로 로봇

가장 흔히 볼 수 있는 마이크로 로봇은 종래의 마이크로 마우스를 더욱 소형화한 것들이다. MIT의 AI Lab에서는 그림 5와 같은 Ant Robot을 여러 대 만들어 개미 집단의 분산 지능을 모사한 바 있다. [34] 모형 장난감에 쓰이는 모터, 기어박스, 센서 만으로 이 정도의 집적화가 가능하며 연구에 활용할 수 있다는 점을 잘 보여주고 있다.

미국 등에서 군사 정찰용으로 개발중인 Micro Air Vehicle (MAV)도 마이크로 로봇의 좋은 개발 사례이다. AeroVironment사에서는 1986년부터 MAV를 개발해오고 있는데, 그림 6의 Black Widow는 6inch 크기와 2 oz 무게, 22분의 비행시간, 43 miles/hour의 최대 비행속도를 가진 최신판이다.[35] 이는 모터 구동 방식이며 2 gram의 초소형 CCD 카메라를 탑재하여 실



그림 5. MIT AI Lab에서 만든 Ant Robot[34].

표 4. 다양한 마이크로 액츄에이터의 파라미터, 사양 및 성능비교.

Actuator	Type	Strain	Force/Torque	Response time	Driving power	Efficiency
SAM	Coil type	Medium (>6%)	Large (200Mpa)	Medium	High current (300mA-2A) 5V	Low (>3%)
	Thin-film type			Medium	High current (300mA-2A) 5V	
	Structure/Actuator integrated type			Medium(20Hz)	High current (300mA-2A) 5V	
Piezo-electric	Laminated type	Small (0.1%)	Large	high(100KHz)	High Voltage (10-200V)	Medium (>35%)
	Bimorph type	Small	Small	Medium(1KHz)	High Voltage (10-200V)	
	Ultrasonic type	Large	Large	Small to medium	High Voltage (5-100V)	
Electro-static	Film type	Large (>100%)	Medium (0.04Mpa)	high(3KHz)	High Voltage (5-100V)	Medium (>20%)
	Wobble type	Large	Large	high	High Voltage (5-500V)	
	Rotary type	Large	Large	high rotation speed	High Voltage (5-500V)	
	Rectilinear motion type	Small	Small	high	High Voltage (5-500V)	
Electro-magnetic	Rotary type	Large	Small to medium	Medium to high	Low Voltage	Medium
	Rectilinear motion type	Large		Medium to high	Low Voltage	
EAP	EPAM	Large (>32%)	2Mpa	Medium	High Voltage (4-6KV)	High (80%)
	IPMC	Large (>10%)	Large	Medium	Low Voltage (1.5-7V)	High

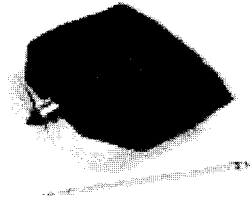


그림 6. 미국 AeroVironment 사의 Micro Air Vehicle (MAV) Black Widow[35].

시간 화상전송이 가능하게 설계되어 있다.

Black Widow에서 사용한 모터 구동 방식 이외에도 Robert Michelson이 개발한 MAV에서는 화학 물질을 이용하여 날개를 10 Hz속도로 구동하는 Reciprocating Chemical Muscle (RCM)과 같은 방법을 사용하였다. [36]

4.2 정전력을 이용한 마이크로 로봇

UC-Berkeley에서는 3자유도의 다리를 가진 6족 마이크로 로봇을 개발하였다. 이 마이크로 로봇의 보행 반경은 수 cm, 속도는 1 mm/s 정도이다.

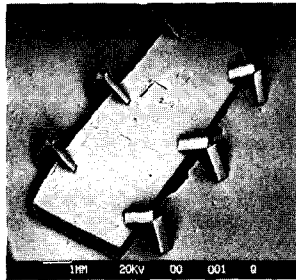


그림 7. UC-Berkeley 팀이 개발한 3자유도 6족 로봇.

Surface Micromachining 기술을 이용하여 다리와 기계 커플링, 수 uW의 정전기력 스테핑 모터를 개발하였다. 그림 7는 6개의 다리를 가진 1 cm * 0.5 cm 실리콘 다이 (die)를 보여준다. 정전기력 마이크로 스테핑 모터는 작은 소비 전력으로 수백 um의 이동거리와 수십 uN의 힘을 발생시킬 수 있다. 이 마이크로 로봇의 개발 의의는 모든 요소들, 즉 제어회로, 센서, 적외선 통신 모듈 등을 하나의 실리콘 다이 위에 올려놓았는데 있다.

4.3 압전재료를 이용한 마이크로로봇

그림 8은 미국 Vanderbilt 대학에서 개발한 압전구동방식의 마이크로 곤충로봇 GF4이다. 두개의 압전액츄에이터를 사용했고, 각 관절에 2자유도의 spatial linkage 구조를 가진 다자유도의 관절 보축을 사용하여 거칠고 불규칙한 지형을 가로질러 나갈수 있다.

* 12 cm 이며, 29 gram의 무게를 가진다. 최고속도는 100mm/s 이고, 입력 주파수를 변환하여 좌우 방향을 전환하고, 주파수 변조를 통해 hopping 이 가능하여 거칠고 불규칙한 지형을 가로질러 나갈수 있다.

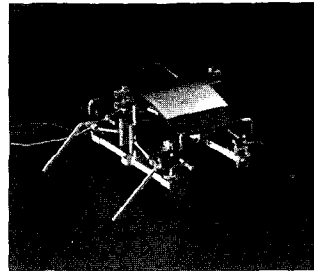


그림 8. Vanderbilt 대학의 마이크로 곤충로봇 GF4.

동경대의 T. Higuchi 교수는 압전소자의 급속 변형에 따른 관성력을 이용한 미소 이동 메커니즘을 개발하였다. 그림 9은 압전 임팩트 구동 방식의 이동 원리를 설명하고 있다. 이동체는 평면상에 놓여지고 마찰력에 의해 고정되며 압전소자와 추가 그 단면에 붙어 있다. 그림 9의 (a)에서는 압전소자가 뻗은 상태로 이동체는 마찰력으로 고정되어 있다. (b)에서 압전소자를 원상복귀시키면 이동체는 정지마찰력으로 고정된 채로 추만을 움직일 수 있다. (c)에서 원상복귀 동작을 급속히 정지시키면 관성력에 의해 이동체가 미소하게 움직인다. (d)에서 압전소자를 급속하게 뻗으면 충격관성력이 발생하여 이동체가 마찰력을 이기고 이동한다. 그림 9의 오른쪽에 압전소자에 인가하는 전압 패턴을 표시하였다. 이러한 원리를 이용하여 다자유도 마이크로 로봇을 만들 수 있는데, 그림 10의 경우 각 축 제어를 위해 10*10*20mm의 적층형 압전소자를 사용하여 150V의 인가전압으로 16 um의 변위를 발생하고 있다.

이러한 임팩트 드라이브 방식은 수 nm의 미소이동을 할 수 있고 정지 상태에서는 에너지를 필요로 하지 않고 안정성이 높다는 장점을 가지고 있다.

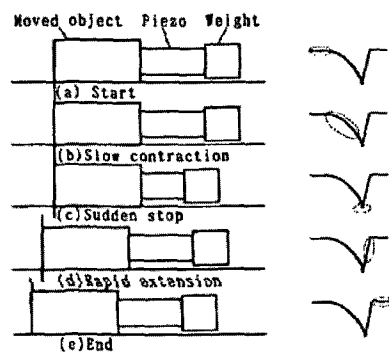


그림 9. Impact 구동 방식의 원리.

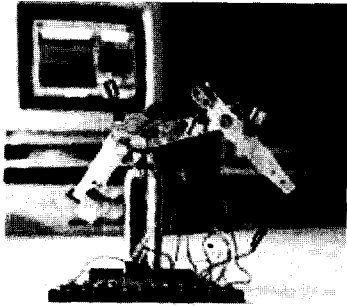


그림 10. 동경대 Higuchi 교수팀이 개발한 압전 Impact 구동방식의 마이크로 로봇 암.

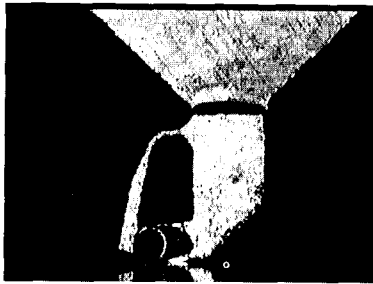


그림 11. SMA 그리퍼에 의한 렌즈 파지 작업.

4.4 형상기억합금을 이용한 마이크로 그리퍼

스위스의 EPFL에서는 형상기억합금 (SMA)만을 사용하여 마찰력 등의 불필요한 요인을 제거한 마이크로 그리퍼 (gripper) 및 Translation Stage를 제작하였다. 그림 11은 EPFL에서 개발된 Two-Way SMA micro-gripper (TWSME gripper)를 사용하여 직경 0.35 mm의 렌즈를 집는 장면이다. 이 그리퍼는 NiTiCu를 재료로 제작되었으며 열은 열전 소자나 직접 가열에 의해 공급된다. SMA의 최대 변형률은 1.5~2 %이며 160 μ m의 이동이 가능하다. EPFL에서는 그리퍼 외에도 SMA를 이용하여 Translation Stage를 개발한 바 있다.

4.5 기능성 polymer를 이용한 마이크로로봇

기능성 polymer 액츄에이터 중에서 ICPF 액츄에이터는 일반적인 고분자 겔 액츄에이터와 비교하여 빠른 응답특성 및 저전압(1.5V)에서 구동할 수 있는 장점이 있어 마이크로 로봇의 구동원으로 주목 받고 있다. 그림 12 은 일본 Nagoya 대학에서 개발한 이온전도성 고분자 액츄에이터(ICPF)를 이용한 수중용 마이크로 로봇의 구조를 나타내고 있다. 개발된 로봇은 10mm*40mm의 크기를 가지며, 물에 부양할 수 있도록 목재로 만들어진 몸체(A)와 지느러미를 가진 꼬리부(B)가 ICPF 액츄에이터에 의해 구동되고, 도선(C)에 의해 전기에너지가 공급이 된다. ICPF 액츄에이터는 큰 추진력을 얻기 위해 병렬형 구조를 가지며, 각각의 fin이 독립적으로 구동된다. ICPF 액츄에이터는

Dupont사의 Perfluorosulfonic acid polymer (Nafion 117) 필름 양면에 3 μ m 정도 두께의 백금을 화학적으로 입혀서 제작되었다. 1.5 V의 전압이 전극에 인가되면 ICPF는 굴절되며 변위는 전압에 비례한다.

스웨덴의 Linkoping 대학에서는 전도성고분자를 이용하여 670 μ m 길이의 마이크로로봇 팔을 제작하였다. 실제로 elbow, wrist, finger 등을 가졌고, 각 관절을 독립적으로 제어할 수 있으며, 100~250 μ m 크기의 물체

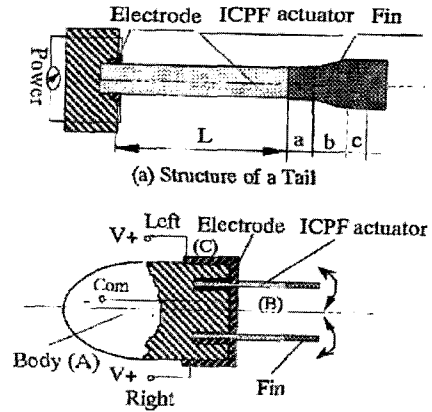


그림 12. 이온전도성 고분자 액츄에이터를 이용한 수중 마이크로 로봇[8].

를 조작할 수 있다. 50mV단위로 전압을 증가, 감소시킴으로써 병진운동과 굴절이 가능하며, 최대 20도까지 로봇팔이 회전할 수 있다.[38]

4.6 공압차를 이용한 Flexible Manipulator

일본의 K. Suzumori (1992)와 영국의 J.B.C Davies (1996) 등은 3개의 공압관을 병렬로 배치하고 공압차를 줌으로써 구동하는 Flexible Manipulator를 제안하였다. [23] 공압차를 이용한 Flexible Manipulator의 원리는 그림 13에 나타내었다. 이 방식은 종래의 관절형 매니플레이터와 대비되는 것으로서 마이크로 로봇의 End Effector로서 사용되면 임의의 형상의 물체를 파지할 수 있다. 일본 Toshiba에서도 동일한 원리를 이

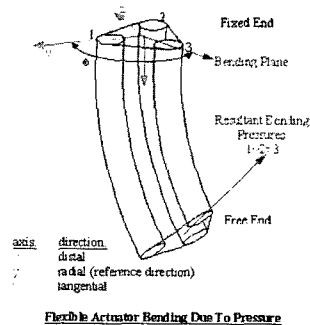


그림 13. 공압차를 이용한 Flexible Manipulator 원리.

용하여 실리콘 튜브로 만든 Flexible Manipulator와 높은 토크를 발생하는 공압 워블 모터를 개발한 바 있다. 공압 워블 모터의 경우는 링 기어의 들레에 6개의 air chamber를 배치하여 모터를 회전시킨다.

4.7 열변형을 이용한 액츄에이터

Stanford 대학의 Transducers Laboratory에서는 thermal bimorph actuator를 개발하여 위치제어를 구현하였다.[37] 액츄에이터는 열팽창 계수가 서로 다른 두개의 polyimide 층, 알루미늄 전극, Ti/W 박막 히터 등으로 구성되어 있다. 그림 14는 thermal bimorph 액츄에이터를 사용한 실험 결과를 나타낸다.



그림 14. Stanford 대학에서 개발된 열변형차를 이용한 액츄에이터[37]

5. 결론

마이크로 로봇에 응용 가능한 액츄에이터의 종류와 기술적인 특징을 살펴보았다. 물리적인 에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 기본적인 기능을 발휘하게 되는 액츄에이터는 적용부위의 종류에 따라 다양한 종류의 액츄에이터가 선택 가능함을 알 수 있다. 즉, 적용 부위의 크기, 발휘되는 변형 정도, 변형력, 작동 주파수, 응답특성, 동작 전압 c아주 미소한 부위에 사용되는 마이크로 액츄에이터는 미세 가공기술과 접목되어 연구되어진다. 가장 주목해야 될 것은 각각의 액츄에이터에 사용되는 재료의 특성이 실제 구현 액츄에이터의 성능을 좌우하게 된다는 사실이다. 즉 적용 부품의 크기에 따라 사용되는 액츄에이터 구동 재료의 박막,후막 형성 기술, 미세 가공기술 등을 포함한 복합 연구가 뒷받침 되어야 최적의 액츄에이터 구현에 이를 수 있으며, 특히 액츄에이터의 안정성 또는 주변 제어회로와의 일체화 가능성 등도 고려의 대상이 되어야 한다.

참고문헌

[1] K-T Park, K. Minami and M. Esashi, An Integrated Communication and Control System for a Multi-Link Active Catheter, *Journal of Micromech. Microeng.* Vol. 6, pp. 345~351, 1996.
 [2] D. Wolons, F. Gandhi, and B. Malovrh, An Experimental Investigation of the Pseudoelastic

Hysteresis Damping Characteristics of Nickel Titanium Shape Memory Alloy Wires, *AIAA-98-2036*, pp.2821~2833, 1998.
 [3] R. A. Russell, and R. B. Gorbet, Improving the Response of SMA Actuators, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2299~2304, 1995.
 [4] M. Bergamasco, F. Salsedo, L. Ferretti, and P.Dario, SMA-Based Integrated Miniature Motor, *Proc. of the 1993 JSME International Conference on Advanced Mechatronics*, Tokyo, Japan, pp. 493~498, Aug. 1993.
 [5] C. Pfeiffer, K. DeLaurentis and C. Mavroidis, Shape Memory Alloy Actuated Robot Prostheses: Initial Experiment, *Proc. of the IEEE International Conference of Robotics and Automation*, Detroit, Michigan, pp. 2385-2391, May, 1999.
 [6] J.L.Pons, D.Reynaerts, J.Peirs, R.Ceres, H.VanBrussel, Comparison of Different Control Approaches to Drive SMA Actuators, *International Conference on Advanced Robotics*, Monterey, CA, pp.819~824, July 7-9, 1997.
 [7] R. Kornbluh, R. Pelrine, J. Eckerle, and J. Joseph, Electrostrictive Polymer Artificial Muscle Actuators, *Proc. of the IEEE International Conference of Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, pp. 2147-2154, May, 1998.
 [8] S. Guo, T. Fukuda, N. Kato, and K. Oguro, Development of Underwater Microrobot Using ICPF Actuator, *Proc. of the IEEE International Conference of Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, pp. 1829-1834, May, 1998
 [9] S. Tadokoro, S. Fuji, M. Fushimi, R. Kanno, T. Kimura, and T. Takamori, Development of a Distributed Actuation Device Consisting of Soft Gel Actuator Elements, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, pp. 2155-2160, May, 1998.
 [10] S. Tadokoro, T. Murakami, S. Fuji, R. Kanno, M. Hattori, T. Takamori, and K. Oguro, An Elliptic Friction Drive Element Using an ICPF Actuator, *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 60-68, June, 1997
 [11] P. Dario, R. Valleggi, M.C. Crarrozza, M.C. Montesi, and M. Cocco, Microactuator for microrobots: a critical survey, *Journal of Micromech. Microeng.* Vol. 2, pp.141~157, 1992.
 [12] R.S. Muller, Microdynamics, Sensors and Actuators, A21-A23, pp.1~8, 1990.
 [13] H. Fujita, and A. Omodaka, The Fabrication of an Electrostatic Linear Actuator by Silicon Micromachining, *IEEE Transactions on Electron*

- Devices, Vol. 35, No. 6, pp.731~734, June, 1988.
- [14] S.C. Jacobsen, R.H.Price, J.E. Wood, T.H. Rytting and M. Rafaelof, A Design Overview of an Eccentric-motion Electrostatic Microactuator (the Wobble Motor), *Sensors and Actuators*, 20, pp.1~16, 1989.
- [15] P.B. Chu, P.R. Nelson, M.L. Tachiki, and K.S.J. Pister, Dynamics of Polysilicon Parallel Plate Electrostatic Actuators, *Transducer95*, pp.356~359, 1995.
- [16] C.J. Kim, A.P. Pisano, and R.S. Muller, Silicon-Processed Overhanging Microgripper, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.1, No.1, pp.31~36, March, 1992.
- [17] H.Okamoto, M.Asano, S.Mitsuishi, T.Matsuoka, and T. Matsui, Prototype Models of Piezoelectric Driving Force Actuator for Micro Moving Mechanism, *Proc. of the 1993 JSME International Conference on Advanced Mechatronics*, Tokyo, Japan, pp.86~91. Aug., 1993.
- [18] R. Relrine, R. Kornbluh, Q. Pei, J. Joseph, High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%, *Science*, Vol.287, February, 2000.
- [19] T. Mineta, T.Mitsui, Y. Watanabe, S. Kobayashi, Y. Haga, M. Esashi, Batch Fabricated Flat Winding Shape Memory Alloy Actuator for Active Catheter, *Proc. of the Micro Electro Mechanical Systems'2000*, Miyazaki, pp.375-380, January 2000.
- [20] J. M. C-H, and V. Hayward, An Approach to Reduction of Hysteresis in Smart Materials, *Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Leuven, Belgium, pp.1510~1515, May, 1998.
- [21] R.B. Gorbet, D.W.L. Wang, and K.A. Morris, Preisach Model Identification of a Two-Wire SMA Actuator, *Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Leuven, Belgium, pp.2161~2167, May, 1998.
- [22] Gregory T. A. Kovacs, *Micromachined Transducers Sourcebook*, McGraw-Hill, 1998.
- [23] Davies J.B.C., *A Flexible Three Dimensional Motion Generator*. PhD Thesis, Dept. Mech. Eng. Heriot-Watt University, Edinburgh, 1996.
- [24] Y. Yamagata, T. Higuchi, A Micropositioning Device for Precision Automatic Assembly using Impact Force of Piezoelectric Elements, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 666~671, 1995.
- [25] Suh, J. W., Storment, C. W. and Kovacs, G. T. A., "Characterization of Multi-Segment Organic Thermal Actuators," *Digest of Technical Papers from Transducers '95/Eurosensors IX*, Vol. 2, Stockholm, Sweden, June 25 - 29, 1995. pp. 333 - 336.
- [26] Y. Bellouard, R. Clavel, R.Gotthardt, T.Sidler, J.-E. Bidaux, "A new concept of Monolithic Shape Memory Alloy Micro-Devices Used in Micro-Robotics", *Actuators 1998*, Bremen, Germany, June 17-19, 1998, pp. 499-502.
- [27] R. Yeh, E. J. J. Kruglick, and K. S. J. Pister, "Surface Micromachined Components for Articulated Microrobots," *J. Microelectromechanical Systems*, Vol 5, No. 1, March 1996.
- [28] <http://www.sri.com/>
- [29] <http://www.ijinet.or.jp/MMC/>
- [30] <http://wwwmems.jpl.nasa.gov/>
- [31] <http://ndea.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/eap/EAP-w eb.htm>
- [32] <http://www-mitech.sssup.it/>
- [33] <http://www.cim.mcgill.ca/~haptic/>
- [34] <http://www.ai.mit.edu/projects/ants/index.html>
- [35] <http://www.aerovironment.com/area-aircraft/unmanned .html>
- [36] <http://avdil.gtri.gatech.edu/RCM/RCM/Entomopter/Ent omopterProject.html>
- [37] <http://transducers.stanford.edu/stl/Projects/organic.html>
- [38] <http://www.ifm.liu.se/Applphys/ConjPolym/index.html>

김 덕 호

1998년 포항공과대학교 기계공학과 (공학사). 2000년 서울대학교 기계설계학과 (공학석사). 2000년~현재 한국과학기술연구원(KIST) 마이크로시스템 연구센터 연구원. 주요 관심분야는 Man-Machine Interface, 마이크로 매니플레이션, 차량동역학 및 제어.

김 태 송

1982년 연세대학교 세라믹공학과(공학사). 1984년 한국과학기술원 재료공학과(공학석사). 1993년 한국과학기술원 재료공학과(공학박사). 1994년 한국과학기술연구원(KIST) 선임연구원, 1997년부터 1998년 University of Minnesota 전기과 Postdoc, 현재 한국과학기술연구원 책임연구원. 주요 관심분야는 강유전, 압전 등 기능성 박막, MEMS 부품 및 센서 응용, 압전후막응용 액츄에이터.

김 경 환

1992년 연세대학교 전기공학과 (공학사). 1994년 일본 동경대학 전기공학과 (공학석사) 1997년 동경대학 전기공학과 (Ph.D.). 1997년부터 1999년까지 미국 University of Wisconsin-Madison과 Texas A&M University에서 연구원. 1999년부터 한국과학기술연구원(KIST) 시스템연구부 선임연구원. 주요 관심분야는 로봇 제어, 원격조종, 마이크로 매니퓰레이션.

박 종 오

1978년 연세대학교 기계공학과(공학사). 1981년 한국과학기술원 기계공학과(공학석사). 1987년 독일 Stuttgart대학 (공학박사). 1987년~ 현재. 한국과학기술연구원 책임연구원. 2000년~ 현재. 지능형마이크로시스템개발사업단 단장. 주요 관심분야는 지능형 가공/조립시스템, 서비스 로봇, 원격조종, 지능형 마이크로 시스템.