



# 자성 액추에이터 기반의 소프트 로봇

노규령, 최문기 

울산과학기술원 신소재공학과

## Soft Robots Based on Magnetic Actuator

Gyu-Lyeong Nor and Moon Kee Choi

Department of Materials Science and Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST),  
 Ulsan 44919, Korea

(Received October 4, 2021; Revised October 15, 2021; Accepted October 15, 2021)

**Abstract:** Soft robots are promising devices for applications in drug delivery, sensing, and manufacturing. Traditional hard robotics are manufactured with rigid materials and their degrees of motion are constrained by the orientation of the joints. In contrast to rigid counterpart, soft robotics, employing soft and stretchable materials that easily deforms in shape, can realize complex motions (*i.e.*, locomotion, swimming, and grappling) with a simple structure, and easily adapt to dynamic environment. Among them, the magnetic actuators exhibit unique characteristics such as rapid and accurate motion control, biocompatibility, and facile remote controllability, which make them promising candidates for the next-generation soft robots. Especially, the magnetic actuators instantly response to the stimuli, and show no-hysteresis during the recovery process, essential for continuous motion control. Here, we present the state-of-the-art fabrication process of magnetically controllable nano-/micro-composites, magnetically aligning process of the composites, and 1-dimensional/multi-dimensional multimodal motion control for the next-generation soft actuators.

**Keywords:** Soft robot, Magnetic actuator, Magnetic stimuli

### 1. 서론

지난 수십 년 동안 기술의 발전으로 로봇은 강력한 힘을 구현함과 동시에 미세한 움직임을 정밀히 조절하는 수준까지 이르렀으며, 적재적소의 다양한 산업에 활용되어 많은 재화를 효율적으로 생산하는 데 크게 기여하였다 [1]. 최근 기술의 고도화로 초소형 공장(microfactory), 랩온어칩(lab-on-a-chip) 등 기계의 소형화가 화두인 가운데 미세

공정을 이용한 집적기술을 통해 센티미터 이하 크기의 초소형의 액추에이터, 센서, 배터리의 구현을 위해 많은 노력이 이뤄지고 있다. 분명 로봇은 전도 유망한 미래의 기술이지만 단순 작업의 반복 움직임에 최적화되어 있는 경우가 많고, 외골격의 크기가 크기 때문에 외부 환경에 대한 적응력과 소형화의 이슈가 존재한다 [2]. 로봇을 구성하고 있는 기본 유닛인 조인트/링크, 골격, 모터 등은 모두 강체 물질로 이루어져 있고, 조인트/링크 부분에서만 고정 축 방향으로 유동적인 움직임을 나타낼 수 있어서 외부 장애물에 제한적 방향으로만 대응할 수 있기 때문에 낮은 환경 적응력을 보인다 [3,4]. 다양한 축 방향의 자유도를 높이기 위해서는 조인트 개수를 선형적으로 증가시켜야 하는데 이는 전체 골격의 크기를 증가시켜 로봇의 소형화에 제약을

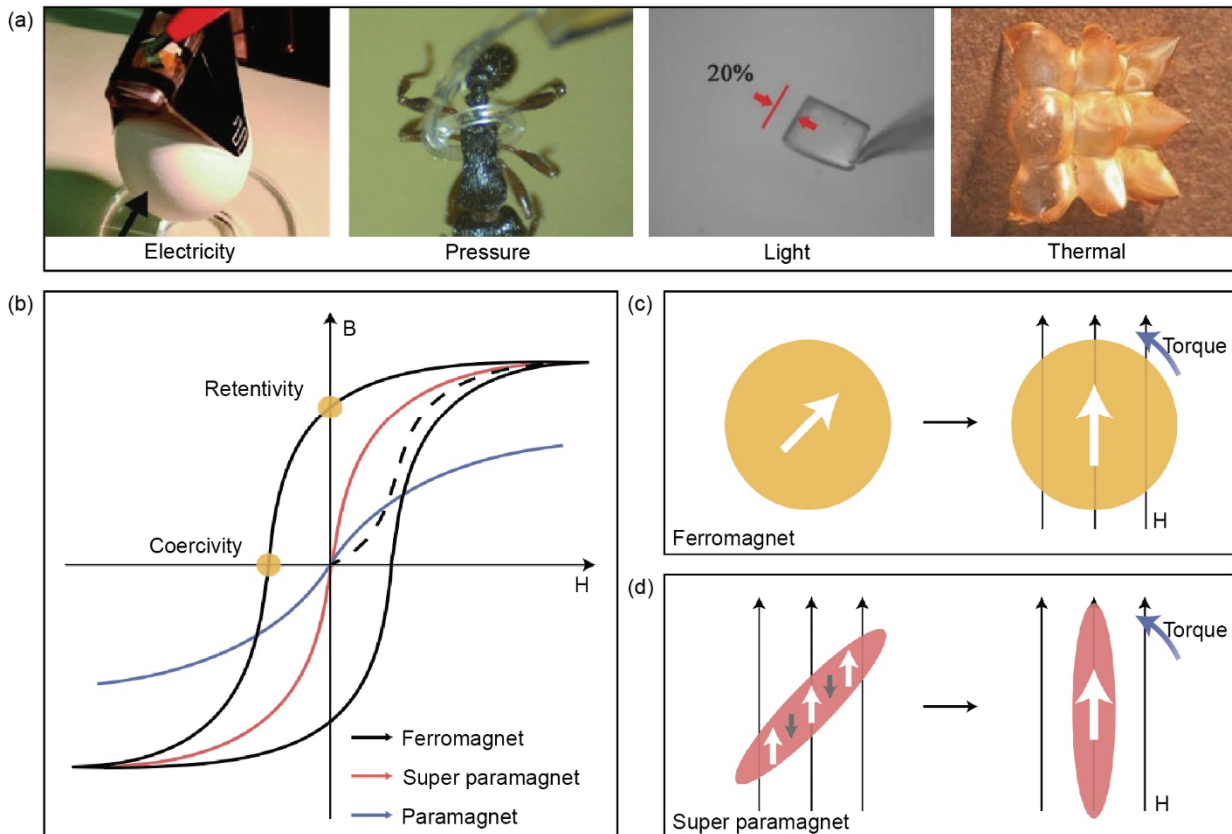
✉ Moon Kee Choi; [mkchoi@unist.ac.kr](mailto:mkchoi@unist.ac.kr)

Copyright ©2021 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

준다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 다양한 환경과 상황에 맞춰 유연하게 움직일 수 있도록 다축 구동 및 피드백 구동이 가능한 로봇에 대한 수요가 높아지고 있다. 소프트 로봇은 유연한 연성 물질로 이루어진 로봇으로 물질의 본질적 또는 구조적인 변화를 통해 외부 환경 혹은 장애물에 능동적으로 상호작용이 가능하다. 따라서 동적 변형에 대한 자유도가 증가하여 높은 환경 적응력으로 새로운 환경에서도 즉각적으로 주변 상황에 맞춰서 형태를 변화시켜 움직임을 제어할 수 있다 [5]. 또한 유연한 연성 물질을 사용하여 간단한 구조로도 높은 자유도를 구현할 수 있기 때문에 로봇의 구조가 매우 간소화되어 소형화에 유리하다. 마이크로 소프트 로봇은 환경 적응력과 다축 방향으로 모션의 자유도가 높아 헬스케어, 생명 공학, 마이크로 공장과 같이 다양한 응용분야에 활용될 수 있을 것이라 기대된다 [6,7].

소프트 액추에이터는 변형성이 높은 재료/복합체로 이루어져 있으며 설계한 움직임과 힘/토크를 만드는 동력으로 전기 [8], 압력 [9], 빛 [10], 열 [11], 자기장과 같은 다변

화된 외부 자극을 이용한다 [그림 1(a) 참조] [12]. 자극원마다 장단점이 뚜렷해 액추에이터의 장점을 부각시키고 단점을 극복하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 먼저 전기로 구동되는 액추에이터 중 흔히 기존 로봇구조인 모터로 구동되는 액추에이터 이외에 유전체, 압전 재료의 변형을 활용한 액추에이터가 있다. 유전체를 이용한 액추에이터는 전위차를 가진 두개의 유연한 전극 사이에 변형성 있는 유전체로 구성된 샌드위치 구조이며, 외부 전압 인가 시 전극 사이의 쿨롱 인력에 의해 유전체가 수축하면서 구동하게 된다. 아크릴 계열의 유연소재, 실리콘, 폴리우레탄 등을 이용한 절연 소재들은 높은 변형성을 갖고 있어 유연하면서 크기가 작은 전기 구동 액추에이터를 구현할 수 있다 [13]. 그러나 수 kV 수준의 높은 인가 전압과 높은 누설 전류는 낮은 구동 효율성의 원인이 된다 [14]. 압전 소재는 물질에 압력을 가했을 때 전기적인 변화가 생겨 전기가 흐르는 물질이다. 보통 고체 물질은 전기적으로 중성을 띠지만 압전 소재는 외부 압력에 의해 고체의 결정 구조가 변하면



**Fig. 1.** (a) Examples of micro soft robots actuated by various stimuli, (b) magnetic hysteresis loops of ferromagnet, super-paramagnet and paramagnet, (c) schematic to magnetically derived ferromagnetic torque, and (d) schematic to magnetically derived superparamagnetic torque.

서 물질 내의 전하 분포가 변해 분극을 형성하면서 순간적으로 전기가 흐르게 된다. 액추에이터에서는 이 압전 효과를 역으로 이용하여 외부 전기장을 걸어 주어 압전 소재에 기계적 변형을 일으켜 구동한다 [15]. 하지만 압전 특성을 구현하는 과정에서 전력 소비가 높아 낮은 에너지 효율로 인해 응용처가 제한되는 단점이 있다.

빛으로 구동되는 액추에이터는 빛을 흡수하는 분자구조를 이용하여 빛을 받은 부분만 선택적으로 자극하여 구조 변형을 제어할 수 있으며 빛을 비추었을 때 즉각적인 반응을 야기할 수 있다 [8]. 또한 빛은 파장대에 따라 공기, 액체, 피부 등 다양한 매질을 투과할 수 있기 때문에 액추에이터의 원격 제어가 가능하다는 장점을 가지고 있으며 파장대를 조절하여 투과 깊이, 반응 속도 등을 제어할 수 있다. 그러나 빛은 친환경적이나 에너지 밀도가 낮기 때문에 빛으로 구동되는 액추에이터의 즉각적 반응을 위해 주로 높은 에너지의 자외선 영역의 빛을 에너지원으로 활용하는 연구가 많은데, 빛의 파장이 짧아질수록 물, 고분자 등 다른 매질에 쉽게 흡수되므로 원격제어 가능 거리 혹은 투과 깊이를 제한한다는 상충관계가 있다. 열을 이용한 액추에이터는 비교적 생체 친화적인 적외선, 근적외선 광원을 이용하거나, 줄(Joule) 발열 효과를 이용해 구현할 수 있어 빛과 전기를 결합하여 다중 파워 소스를 통해 액추에이터를 작동할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 물질이 열을 흡수하고, 이를 소재의 구조 변화를 통해 동적 변형으로 만드는 데 시간이 오래 걸리기 때문에 다른 외부 자극에 비해 느린 반응 속도를 보인다. 또한 빛과 열에 의한 구동은 높은 에너지로 순간적인 변형을 만들더라도 물질이 반응 후 흡수한 에너지를 다시 방출하여 원래 형태로 돌아가기까지 오랜 시간이 걸리며 이력현상(hysteresis)을 보여 초기 상태로 완전히 돌아가지 못하는 경우가 많다. 따라서 이를 기반으로 한 액추에이터는 지속적이고 반복적인 동작을 수행하기 어렵다 [16]. 압력을 기반으로 한 액추에이터는 부피 변형이 가능한 모세 기공 내에 공기 혹은 물을 주입하는 압력을 실시간으로 변화시키며 다양한 거동을 보인다. 액추에이터 외부로 연결된 펌프를 이용하여 실시간

으로 공기와 물의 압력을 조절할 수 있기 때문에 모션 제어가 빠르고 단위 면적당 높은 힘을 구현할 수 있다. 그러나 압력을 전달하는 매질의 주입/추출하는 유체관이 외부 펌프와 항상 연결되어 있어야 하기 때문에 부피가 커지는 동시에 무선 구동이 불가능하다. 자력을 기반으로 하는 액추에이터는 다른 외부 자극으로 움직이는 액추에이터에 비해 프로그램한 모션의 빠른 실행능력과 정해진 공간에서 자기장의 크기와 세기, 방향 조절을 통해 원격으로 미세 제어가 가능하다. 또한 높은 생체 적합성과 저렴한 가격으로 생체 내 질병 진단 및 진료에 적절하다. 그러나 정해진 공간 내에서만 자기장이 정확하게 구동이 가능하기 때문에 공간 제약이 크다는 단점이 있다. 외부 자극별 액추에이터의 장단점을 표 1에 간략히 서술한다.

본 논문에서는 앞서 소개한 다양한 외부 자극원을 이용한 액추에이터 중 외부 자극에 빠른 반응과 회복 탄성력을 가지고 있는 자성 기반의 액추에이터에 관해 심도 있게 고찰할 것이다. 외부 자극에 의한 즉각적인 빠른 제어는 인공 근육으로서 가능성을 제시하여 유기체나 생물체에서 영감을 받은 다양한 모션의 로봇에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 또한 자성 기반의 액추에이터는 생체 친화적으로 매질을 통과하여 로봇을 조절할 수 있는 특성 덕분에 실시간 생체 내 원격 제어의 가능성도 보여주었다. 이와 같은 장점들과 다양한 3D 자화 프로그래밍이 결합된 연구들이 진행되면서 다기능(multifunctional) 로봇에 대한 연구가 활발히 보고되어 목표(targeted) 약물 전달, 최소 침습 수술과 같은 무선 의료기기, 헬스케어, 생명 공학분야에서 주목을 받고 있다 [17,18]. 이러한 소프트 자성 액추에이터는 로봇 자체의 자화 방향 혹은 인가되는 외부 자기장의 형태에 따라 구동 메커니즘이 달라지며 마이크로 로봇에 쓰이는 자성체의 종류에 따라서도 메커니즘이 상이하다. 이에 본 논문에서는 강자성체 기반의 액추에이터의 구동원리와 다양한 응용방법에 대해 기술한 후, 초상자성체 기반의 액추에이터의 구동원리와 응용방법에 대해서 서술하겠다.

**Table 1.** Comparison of soft actuators operated by various external stimuli.

	Biocompatibility	Response time	Wireless	Force	Scale	Operating environment
Electrical (mechanical)	△	Fast	X	High	mm~	Air
Light	X	Slow	O	Low	µm~	Air, liquid
Thermal	O	Slow	△	Low	µm~	Air
Magnetic	O	Fast	O	Medium	µm~	Air, liquid
Pressure	O	Fast	X	High	mm~	Air, liquid

## 2. 강자성체 자기 마이크로 로봇

물질은 자기적 성질에 따라 크게 상자성체(paramagnetic), 강자성체(ferromagnetic), 그리고 반자성체(diamagnetic) 세 종류로 나눌 수 있다 [19]. 그중, 자기장에 의해 구동되는 액추에이터 분야에서 많이 쓰이는 자성체는 높은 자화율(magnetic susceptibility)을 가지는 강자성체와 초상자성체가 있다. 강자성체는 잔류 자화를 가지고 있어 강력하고 정확한 모션을 초상자성체에 비해 간단한 방법으로 구동할 수 있다. 이 장에서는 강자성체의 특성에 대해 고찰하고, 강자성체 액추에이터를 단축 방향, 다축 방향으로 자화시키는 다양한 방식들을 소개하고, 이를 이용한 액추에이터의 구동 및 응용 예시를 살펴보고자 한다.

### 2.1 강자성(ferromagnetism)의 원리

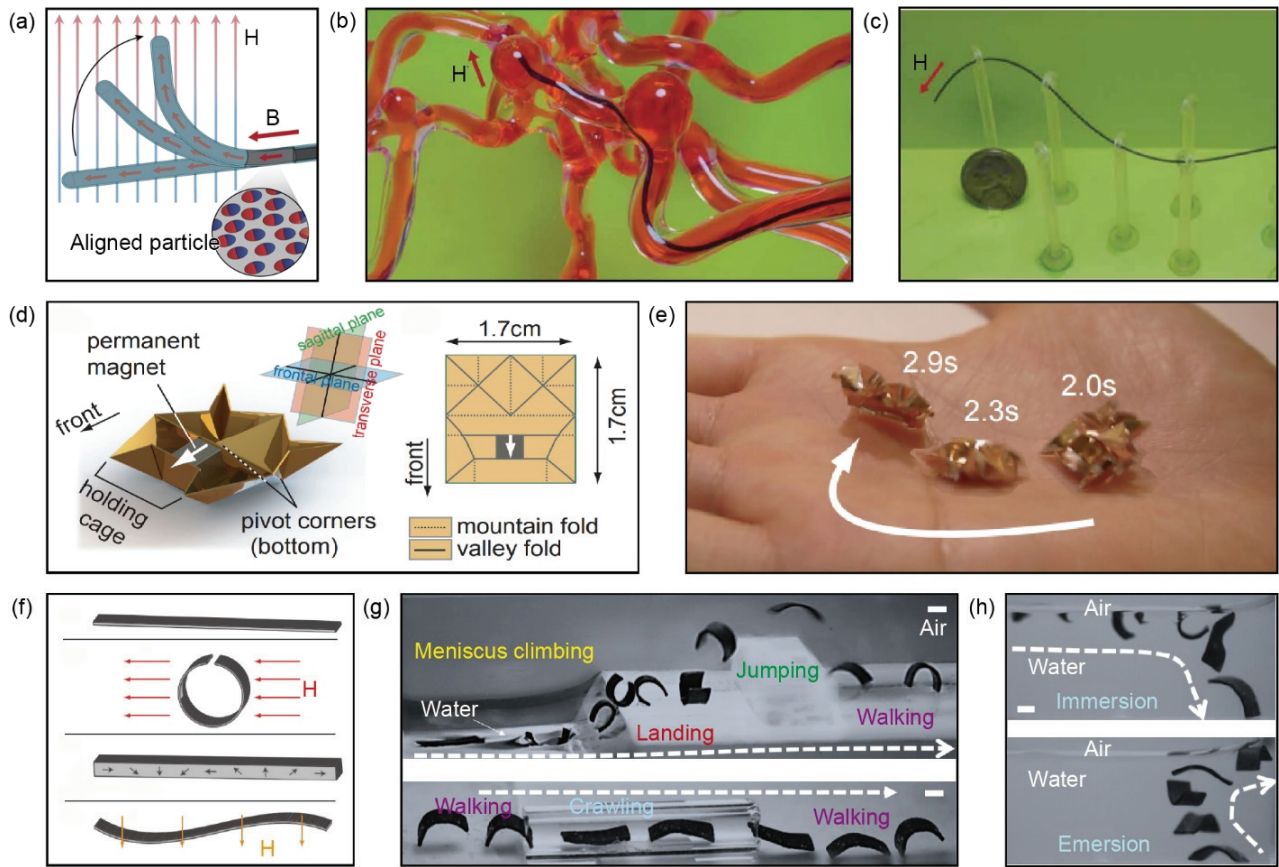
소수의 결정성 물질들은 강자성이라는 강한 자기적 성질을 보여준다. 자화되지 않은 강자성체는 약한 외부 자기장에도 평행하게 정렬하려는 성질을 가지고 있으나 외부 자기장 방향으로 정렬된 구역(domain)들의 수가 작아 약한 자력을 가진다. 외부에서 인가해 주는 자기장이 강해지면 자기 모멘트가 한쪽으로 정렬되면서 외부 자기장과 같은 방향으로 정렬되는 구역이 많아지게 된다. 자기 모멘트가 정렬된 후 강자성체는 외부 자기장이 제거된 후에도 강한 자화 상태를 유지하게 되어 자석의 성질을 계속 띠는 잔류 자화(retentivity/ remanence)를 가진다. 이는 그림 1(b)과 같이 자화곡선(magnetization curve)이라는 자기력(magnetizing force, H)에 대한 자속 밀도(magnetic flux density, B)의 곡선으로 나타낼 수 있다.

강자성체를 이용한 액추에이터의 구동은 자기 토크에서 유래된다. 강자성체 잔존 자화의 자기 모멘트 방향과 외부 자기장의 방향 불일치는 불안정한 에너지 상태를 야기한다. 강자성체의 자화 방향과 외부 자기장은 벡터의 외적 관계이기 때문에 90도가 될 때 가장 높은 에너지를 갖는다. 인가하는 자기장의 세기가 강자성체의 보자력(coercivity) 이하이면 높아진 에너지를 줄이기 위해 강자성체의 물리적인 방향을 외부 자기장의 방향에 맞추어 회전하게 되는데 이때 발생하는 힘이 강자성체의 자기 토크이다 [그림 1(c) 참조]. 반면, 보자력 이상의 자기장을 인가하게 되면 강자성체의 자기 모멘트 방향이 외부 자기장의 방향으로 정렬되어 다시 자화된다.

### 2.2 강자성체를 이용한 액추에이터

강자성체는 일반적으로 인가된 자기장 내에서 강한 유

도 자화를 발생시킨다. 외부 자기장이 제거되면 유도된 자화를 쉽게 잃는 철과 같은 연자성 재료와 달리, 네오디뮴과 같은 강자성재료는 높은 보자력으로 인해 자기적으로 포화되면 외부 자기장에 대해 높은 잔류 자화를 유지하는 특징이 있다. 네오디뮴 자석(NeFeB)은 강자성체 기반 액추에이터에 쓰이는 대표적인 물질로써 붕소와 철을 합금하여 만들어 가장 강력한 강자성 물질 중 하나이다. 또한 지구상에 존재하는 희토류 중 흔히 발견될 수 있는 물질로 값이 싸 액추에이터 분야에 널리 쓰인다. 이 외에도 크로뮴 옥사이드( $\text{CrO}_2$ ), 페라이트 등이 쓰이기도 한다. 자기 마이크로 로봇의 변형성을 높이기 위해 소프트한 하이드로젤, 실리콘 고무 등을 매개체로 강자성 재료를 단순 혼합하여 복합체를 형성하고, 강자성재료를 복합체 내부에 특정 방향으로 정렬함으로써 외부 자기장 변화에 따라 복합체의 구조를 쉽게 변형할 수 있다. 대표적인 예로 Xuanhe Zhao 그룹은 네오디뮴 미세 입자를 포함하는 탄성 중합체 합성물을 이용하여 연성 연속체 로봇을 구현하였다 [그림 2(a)~(c) 참조]. 그림 2(a)의 연성 연속체 로봇(soft continuum robot)은 네오디뮴의 미세 입자를 포함하는 탄성 중합 복합체로 제작된다. 탄성 중합 복합체는 연질 고분자인 PDMS 또는 TPU 바탕질(matrix) 골격에 네오디뮴 강자성체 미세입자( $5 \mu\text{m}$ )를 혼합하여 잉크 형태로 제작하며, 외부 자기장(2.7 T) 내에서 이를 프린팅 또는 인젝션하여 자화된 구조체를 만든다. 인쇄 또는 주입이 완료되면 성형된 잉크는 가열 과정을 통해 열경화(PDMS 기반 복합재) 또는 용매 증발(TPU 기반 복합재)을 거쳐 로봇 본체로 응고된다. 또한 경화된 로봇 본체 표면에 추가적으로 하이드로겔 박막을 씌우면 로봇의 표면 마찰이 감소하여 1시간 이상 장기간의 전단(prolonged shearing) 후에도 안정적이고 손상되지 않는 충분한 기계적 견고성을 나타낸다. 자화된 탄성 중합 복합체는 외부 자기장에 따라 자기 토크에 의한 회전운동으로 형태 변형을 보인다. 복합체의 바탕질로 활용되는 하이드로겔은 변형이 용이하고, 친수성(hydrophilic)을 띠어 액상에서 마찰을 최소화한 상태로 변형할 수 있기 때문에 강자성 소프트 연속체 로봇이 혈관계와 같은 복잡하고 제한된 환경에서 구동할 수 있게 한다. 그림 2(b)는 혈관계 모델 내에서 소프트 로봇이 원격 자기장 제어에 의해 목표 경로를 탐색하는 것을 보여준다. 나아가 외부 자기장을 정밀하게 조절하면 소프트 로봇을 이용하여 다양한 연속동작을 수행할 수 있다. Xuanhe Zhao 그룹은 거리 40~80 mm에서 50 mm의 원통형 영구자석으로 20~80 mT의 자기장을 생성하여 3차원 공간 내에서 외부 자기장 제어를 통해 연성 연속체 로봇이 여러 개의 링을 연속적으로 통과하는 복잡한 동작 수행이 가능함을 제



**Fig. 2.** Various method of actuating soft magnetic robots. (a)~(c) Ferromagnetic soft continuum robots [30]. (a) Schematic to the magnetically responsive tip of the continuum robot with programmed magnetic polarities resulting from the hard-magnetic particles embedded in the robot's body made of soft polymer matrix, (b) demonstration of navigating through a 3D cerebrovascular phantom network, and (c) experimental demonstration of the designed ferromagnetic soft continuum robot (based on PDMS + NdFeB composite) selectively navigating through a set of rings based on magnetic actuation and steering. (d) and (e) An untethered miniature origami robot [31]. (d) Schematic to outlook and crease pattern of designed mobile robot and (e) self-folded robot (controlled by a magnetic field) walking on a palm. (f)~(h) Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion. (f) Schematic fabrication process of a flat sheet robot [32], (g) the robot climbs up a water meniscus, lands on the solid platform, jumps beyond a standing obstacle, and walks away [The robot walks towards a tubular tunnel (diameter 1.62 mm) that impedes its walking gait. The robot then switches to the crawling mode to cross the tunnel, and finally walks away. Scale bars, 1 mm], and (h) the robot rotates, disengages from the water surface, sinks, and subsequently swims up from the pool bottom to emerge again at the water-air interface (Scale bars, 1 mm. The robot used in Fig. 2(g) and (h) is same one) [33].

시하였다 [그림 2(c) 참조]. 이러한 형태의 자기 액추에이터는 현재 임상에서 주목하고 있는 카테터 및 가이드 와이어와 같은 최소침습수술에서 정밀 구동 제어 파트에 활용할 수 있다. 실제 생체 내에서 구동되기 위해서는 시술 도중 의료사고의 위험을 방지하기 위해 정밀한 제어가 필수적이다. 따라서 액추에이터 구조 개발과 동시에 정밀 제어를 위한 자기장 컨트롤 시스템 개발이 동시에 진행되어야 한다. Hongsoo Choi 그룹은 구동의 정밀성을 위해 8개의 전자석을 활용한 8축 자기 시스템을 개발하여 외부 자기장의 제어를 통해 자기 액추에이터가 관상동맥을 모사한 2,

3차원의 복잡한 관을 통과하는 높은 구동 정밀성을 제시하였다 [20].

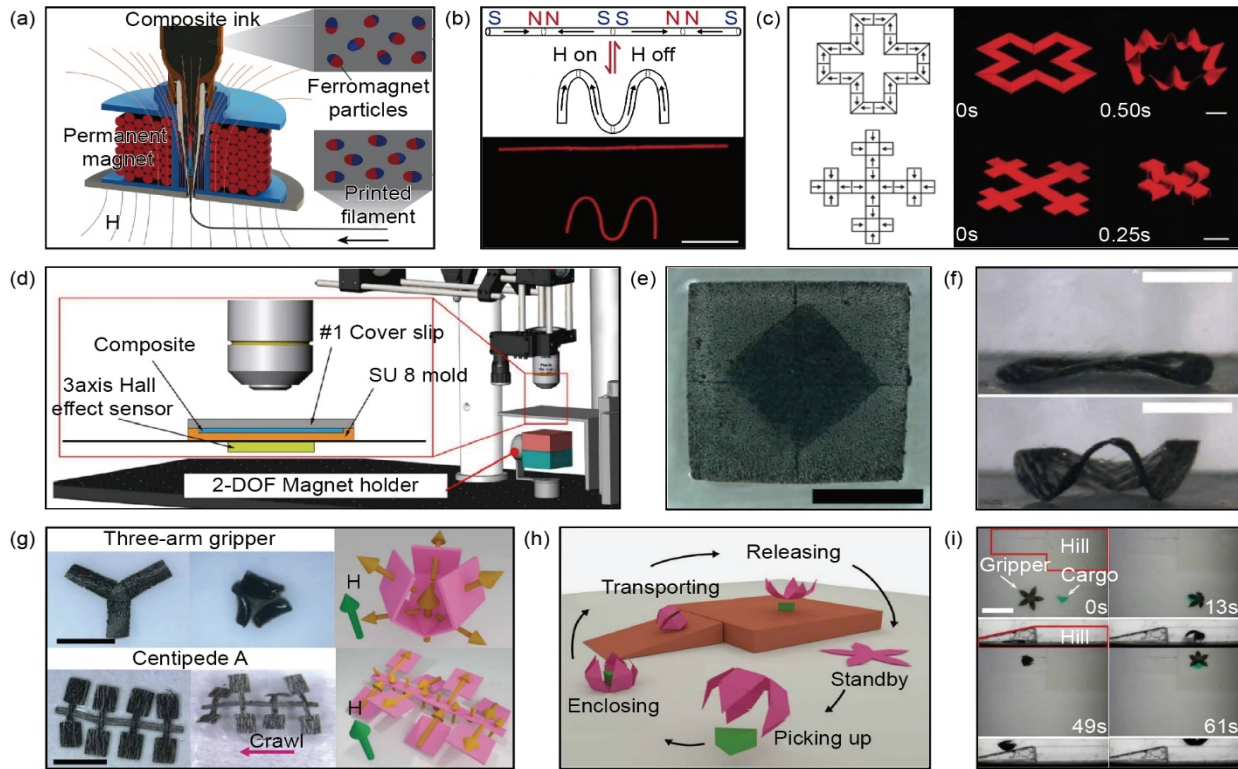
보통 소프트 로봇의 변형성을 높이는 방법으로 강자성체 입자에 모듈러스가 낮은 바탕질을 섞어 변형성이 높은 복합체를 만드는데 Daniela Rus 그룹은 자기 마이크로 로봇의 변형성을 높이는 방법으로 오리가미 기법이라는 색다른 방법을 제시했다. 오리가미(종이접기) 기법을 활용하여 높은 모듈러스를 갖는 박막 형태의 재료를 원하는 형태로 접어 힌지 부위의 변형을 통해 정확한 변형률을 유도하였다. 이러한 오리가미 구조에 외부 자기장에 반응할 수 있

는 강자성체를 도입하여 자기장에 의해 3차원 구동을 제어할 수 있다 [그림 2(d), (e) 참조]. 그림 2(d)는 열에 민감한 폴리 비닐 클로라이드(PVC)와 절단면 깊이에 따른 자가 접힘(self-folding)이 가능한 미세 로봇의 단면도와 입체 도식화이다 [그림 2(d) 참조]. 자가 접힘 미세 로봇은 단단한 이중층 사이에 열에 변형하는 PVC가 샌드위치 구조로 구성되며, 절단면은 이중층의 앞, 뒷면의 깊이와 폭을 다르게 함으로써 65 도의 열에 절단면의 깊은 쪽으로 자가 접힘이 일어나 약 1분 내외로 평면에서 복잡하고 입체적인 자가 접힘 미세로봇이 만들어진다. 만들어진 미세 로봇은 몸체 앞쪽에 위치한 사각의 네오디뮴 자석으로 움직임을 제어할 수 있다. 그림 2(e)와 같이 비대칭적인 4 방향(-27°, -63°, -90°, 90°)으로 15 Hz 빠르기외의 외부 자기장을 번갈아 인가하면 강자성체 구조 쪽으로 무게중심을 가진 액추에이터가 무게중심 방향으로 추진하게 된다. 오리가미 기법을 이용해 복잡한 구조의 미세 로봇이지만 강자성체 자석의 단순한 자화라도 입체적인 구조의 로봇 구동이 가능함 보여줌으로써 강자성체 기반 소프트 로봇의 범용성을 확인하였다.

앞서 말한 Xuanhe Zhao 그룹의 예시와 같이 강자성체 미세 자기 입자와 낮은 모듈러스의 고무로 이루어진 자성 복합체는 간단한 자화 과정에 비해 강력한 토크를 보여 주어 자력에 의해 구동되는 액추에이터 제작에 광범위하게 활용되고 있다. 그러나 단순히 한쪽 방향으로 자화된 구조체는 단축방향의 단조로운 모션 제어만 가능하다는 한계를 갖는다. 막스 플랑크 연구소의 Metin Sitti 그룹은 한 방향의 단순한 자화를 유기적인 축으로 이어 다양하고 복잡한 연속동작이 가능한 강자성체 액추에이터의 새로운 패러다임을 제시하였다 [그림 2(f)~(h) 참조]. 그림 2(f)는 탄력이 있는 실리콘 엘라스토머(ecoflex00-10)와 5  $\mu\text{m}$  크기의 네오디뮴 자기 입자 복합체로 이루어진 직사각형의 유연 미세 로봇의 자화 과정을 보여준다. 길이 3.7 mm의 직사각형 자성 복합체를 동그랗게 원형으로 말고 강력하고 일정한(uniform) 외부 자기장(1 T)을 걸어 주어 유연 미세 로봇의 몸체를 따라 유기적 자화 방향을 가지도록 설계한다. 이렇게 제작된 직사각형 자성 복합체는 단일 방향의 외부 자기장에 따라 단순한 직선운동이 아닌 뱀과 같이 구불구불한 유기적인 모션을 수행할 수 있다. 인가하는 외부 자기장의 세기(5~20 mT)와 진동수 변화에 따라 직사각형 유연 미세 로봇의 굴절 정도를 조절하여 그림 2(g), (h)와 같이 공기 중에서 걷기, 기어가기, 뛰어오르기 물속에서 수영하기, 가라앉기(침수), 떠오르기(부상)와 같은 다양한 모션을 보여주었다. 실리콘 엘라스토머는 소수성 특성을 가지고 있고 표면에너지가 낮아 다양한 매질, 물질 표면

에서 마찰이 적기 때문에 단일 매질에서의 구동(물 등 액상 혹은 공기 중)뿐만 아니라 물에서 공기, 공기에서 물로의 매질 간의 이동도 가능하여 다양한 실제 환경에서 소프트 로봇의 제어 및 조절이 가능함을 보여주었다.

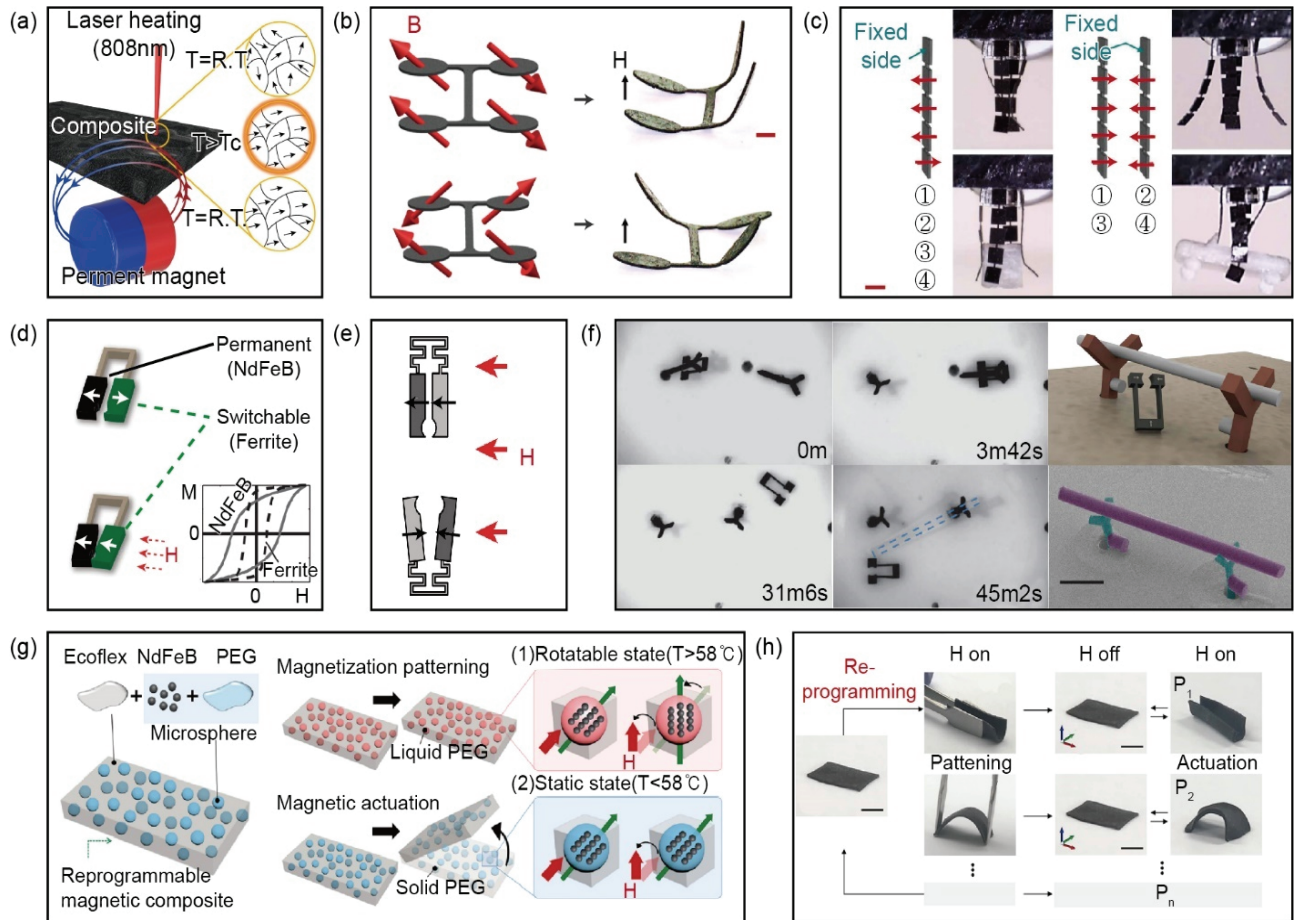
지금까지 단축 방향으로 자화된 강자성체를 이용한 다양한 액추에이터들의 예시에 대해 알아보았다. 강자성체를 이용한 액추에이터는 강력하지만 간편한 자화 과정으로 쉽고 빠르게 액추에이터를 구동할 수 있기 때문에 바이오 엔지니어링, 헬스케어 분야에서 주목받고 있지만 단순한 자화 패턴 때문에 복잡한 움직임을 실현하는 데 적합하지 않아 이를 극복할 수 있는 다축(multiaxial) 자화 방법들에 대해 많은 연구들이 진행되었다. Xuanhe Zhao 그룹은 3D 프린팅 기술을 이용하여 소프트로봇의 다양한 3차원 구조를 쉽게 형성하였다. 그림 3(a)는 무작위 방향을 가지는 강자성체 입자(NdFeB)와 실리콘 고무를 섞은 혼합물을 노즐을 통해 주사하여 형태를 인쇄한다. 동시에 410  $\mu\text{m}$  직경의 노즐 주위에 영구 자석 혹은 전자석 코일로 50 mT의 외부 자기장을 인가하여 자성 복합체를 자화시키며 프린팅하는 방법을 제시하였다. 잉크 속의 강자성체 입자는 인가된 자기장을 따라 배열되어, 외부 자기장의 방향을 전환하거나 인쇄 방향을 달리하여 압출된 잉크의 자기 방향을 조절할 수 있다. 자기 로봇 내의 특정 영역마다 독립적인 자기 방향 패턴이 가능한 이 방식은 3차원 구조를 만들기에 적합하여 복잡한 모양의 강자성체 미세 로봇 제작에 용이하다. 그림 3(b)는 200 mT의 균일한 자기장을 인가하여 직선의 필라멘트가 프로그래밍 된 자화 방향으로 변형되는 것을 보여준다. 또한 일정 영역마다 자기 방향이 다르게 인쇄된 구조체는 200 mT의 자기장에 의해 각 구역마다 입력된 자화 방향으로 독립적인 제어를 통해 복잡하고 다양한 입체적 구조를 만들었다 [그림 3(c) 참조]. 3D 프린팅을 이용하여 다축 방향 자화를 가능하게 했다는 점에서 단조로운 모션만 가능했던 자성 액추에이터의 동작 제어에 있어 큰 도약점을 시사한다. 그러나 인쇄된 자기 필라멘트의 자화 방향을 유지하기 위해서 한 방향 패턴을 인쇄하면 다른 자화 방향을 인쇄하기 전 잉크에 사용된 고분자를 충분히 경화시켜야 하기 때문에(약 1시간 소요) 다축 구동 액추에이터를 만드는 공정시간이 오래 소요된다. 실리콘 고무와 같은 유연 소재와 자성 입자를 섞어 만든 강자성체 미세 로봇은 자화가 편하다는 장점이 있지만 실리콘 고무를 경화시키는 데 수 시간이 소요되는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 Eric Diller 그룹은 경화 시간이 긴 실리콘 고무 대신 유연한 광경화 고분자를 소프트 로봇의 매질로 이용해 자외선 조사를 통한 수초~수분 내에 빠르게 로봇을 제작할 수 있는 방법에 대해 소개하였다. 그림



**Fig. 3.** Various method of multi-axial magnetization profile. (a)~(c) Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials [34]. (a) Schematics of the printing process and the material composition (The ferromagnetic particles embedded in the composite ink are reoriented by the applied magnetic field generated by a permanent magnet or an electromagnet placed around the dispensing nozzle), (b) simulation of the finite-element model and experimental results of a single fiber encoded with alternating magnetic domains designed to form an ‘m’ shape in 0.1s under an applied magnetic field of 200 mT (Scale bar, 10 mm), and (c) schematic quadrupedal and hexapedal designs and experimental results for an annulus encoded with alternating domains that are equidistant (Scale bar, 10 mm). (d)~(i) 3D magnetization profile driven by UV curable matrix [35]. (d) Schematic representation of the system for patterning discrete 3D magnetization, (e) top view image of the dual-layer structure fabricated (Scale bar, 2 mm), (f) side view images showing undulatory bending of a ring under 20 mT (Scale bars, 2 mm), (g) flexible magnetic planar structures that have distributed 3D magnetization profiles (Yellow arrows represent the direction of local magnetization, and green arrows represent the direction of the actuating magnetic field. The materials are about 80  $\mu\text{m}$  thick. The actuating magnetic field was less than 20 mT. Scale bars, 2 mm), (h) illustration of the cargo transportation task of untethered multi-arm magnetic microgripper, and (i) top view and side view images of the cargo transportation task in silicone oil (20 cSt, Sigma-Aldrich) (Silicone oil is used to lift the body weight and to slow down the shape changes of the gripper to make open-loop control easier. Scale bar, 5 mm).

3(d)는 UV 경화 재료에 자성 입자를 패턴시킬 수 있는 장비의 도식화이다. 강자성체와 자외선으로 경화 가능한 레진을 섞은 혼합체를 원하는 모양의 몰드 내에 담지하고 기판 아래의 영구 자석을 이용해 자화 방향을 제어한다. 자성 입자의 입자방향을 배열 후 패턴을 형성하고자 하는 영역에 선택적으로 자외선을 조사하면 해당 영역의 자성 입자를 자성 복합체 내에 외부 자기장의 방향으로 고정시킬 수 있다. 그림 3(d)의 장비를 이용하여 자화 방향이 다른 이중층을 만들어 단층뿐 아니라 수직적 다층으로 자화 패턴을 만들어 자기 마이크로 로봇의 정밀 제어 및 구동의 잠재력을 보여주었다 [그림 3(e) 참조]. 앞서 말한 공정대로 독립적 자화 방향을 가지는 평면 유연 복합체는 균일한 외부 자기장(20

mT) 내에서 설계된 3D 모양으로 구부러지고 외부 자기장이 제거되면 원래 모양으로 돌아간다 [그림 3(f), (g) 참조]. 그림 3(h)은 외부 자기장으로 구동되는 6 자유도 마이크로 그리퍼를 나타낸다. 마이크로 그리퍼는 5개의 다리를 있는 평평한 중앙부와 물체를 잡는 여러 개의 다리로 이루어져 있다. 자기장의 세기(0~15 mT)를 조절하여 그리퍼의 접힘 정도를 조절하여 물체를 옮길 수 있다. 그림 3(i)는 마이크로 그리퍼가 실리콘 오일 속에서 목표하는 지점까지 정확히 운반 및 운송하는 사진이다. 바탕질의 UV 경화를 통한 3D 자화 방식은 하나의 액추에이터에 다축 방향의 자성 입자 배열을 통해 단일 자기장 내에서 다중/다각도의 다리 접기와 같은 미세 로봇 구동이 가능함을 보여줌으로써 자기장을 이



**Fig. 4.** Various method to reprogram magnetic actuator. (a)–(c) Heat-assisted 3D magnetic programming of magnetic soft machines [36]. (a) Schematic heat-assisted 3D magnetic programming process of magnetic  $\text{CrO}_2$  particle embedded in PDMS by applying 808 nm laser, (b) reprogramming magnetization profile of a quadrupedal soft robot enables tunable locomotion patterns [Left images are magnetization directions of the legs are programmed to generate different deformation configurations. Red arrows indicate local magnetization directions. Upon magnetic actuation (20 mT) indicated with the black arrows, the legs deform in accordance with their magnetization directions. Scale bar, 1 mm], and (c) a four-finger adaptive soft gripper, enabled by reprogramming magnetization profile of the fingers [Shape deformation of the fingers is reprogrammed to grasp objects with different morphologies including a rod (4 mm diameter and 4 mm height) and a car representing complex morphology (10.6 mm length, 3 mm width, and 1.75 mm height). Red arrows indicate local magnetization directions. Scale bar, 2 mm. Actuation of the structures is performed by applying uniform magnetic fields of 60 mT in the directions indicated with the upward]. (d)–(f) 3D programmable assembly by untethered magnetic robotic micro-grippers [37]. (d) Force-based addressable micro-gripper (The gripping state is changed through the application of a large magnetic field pulse, which switches the ferrite magnet magnetization directions. This changes the arms from a repulsive to attractive state. The micro-gripper can be re-opened by applying a field pulse in the opposite direction. Inset is Magnetization hysteresis loops of NdFeB and ferrite magnetic materials used, as measured in an alternating force gradient magnetometer), (e) selective orientation process to achieve addressable opening and closing of individual micro-grippers among a set (Gripper tip magnetization is shown as arrows. Light sections indicate permanent NdFeB magnet materials, while dark sections indicate switchable ferrite material), and (f) demonstration of 3D micro-assembly using a mobile robotic micro-gripper (Schematic and SEM images of the assembled 3D structure. Scale bar, 1 mm). (g) and (h) Reconfigurable soft magnetic actuator [38]. (g) Composition of a reconfigurable magnetic composite [The proposed magnetic composite has a hierarchical structure comprising magnetic microspheres within an elastomeric matrix, where the microsphere is composed of magnetic microparticles (NdFeB) and encapsulating PEG oligomer. (b) Rotatable and static ferromagnetic states of magnetic microspheres. In the rotatable ferromagnetic state, above the melting temperature of the PEG, the magnetic particle chains can freely rotate. However, in the static ferromagnetic state, below the melting temperature of the PEG, the magnetic particle chains are fixed in the solidified PEG, maintaining the programmed ferromagnetic domain patterns] and (h) reconfiguring process of a reprogrammable magnetic composite [This structure transforms into various shapes under the magnetic field applied perpendicular to the plane of the structure (z-axis direction). ‘P’ represents ‘programmed magnetization profile’ and ‘n’ indicates the number of programming processes of the magnetization profile. Scale bars, 10 mm].

용한 마이크로 로봇의 다기능성 로봇 구현에 대한 기대를 높였다.

유연한 물질로 이루어진 로봇은 강체 기반 물질의 로봇보다 환경에 대한 적응력이 높은 것이 장점이다. 그러나 자화 방향이 미리 코딩되어 있는 액추에이터는 설계된 자화 방향에 따라 거동 방향이 정해져 있어 예기치 못한 장애물을 맞닥뜨리게 되면 정해진 거동이 아닌 새로운 거동을 통한 유기적 대응이 불가능하기 때문에 궁극적인 환경의 적응성 혹은 다기능을 가진다고 말할 수 없다. 이에 많은 연구자들이 액추에이터 내의 자화 방향을 필요에 따라 재프로그래밍 하는 방식에 대해 연구를 진행하였다. 강자성 입자가 퀴리 온도(Curie temperature) 이상에서는 자성을 잃는 것에 착안하여 자기 입자의 자성 자화방향을 온도 변화와 외부 자기장 방향 변화를 통해 재프로그래밍할 수 있음을 보였다 [그림 4(a) 참조]. 이러한 방법은 퀴리 온도 이상으로 자성 복합체를 가열하고 냉각할 때마다 자기 입자의 입력된 자화 방향을 바꿀 수 있어 자화의 재프로그래밍이 가능하다. 강자성체 크로뮴 옥사이드( $\text{CrO}_2$ )와 실리콘 고무인 PDMS를 섞어 만든 자성 복합체를 이용해 원하는 형태를 만든 뒤, 적외선을 이용해 국소 부위를 퀴리 온도(118도) 이상으로 가열하고 냉각하면서 자성 복합체 내에서 자화 방향을 선택적으로 코딩할 수 있다. 이를 통해 4족 보행 소프트 로봇의 자화 프로파일을 재프로그래밍하여 20 mT의 자기장에서 각기 다른 모션을 보여줄 수 있다 [그림 4(b) 참조]. 또한 4개의 손을 가진 집게구조에서 손 하나에 4개의 자화 필름의 자화방향을 선택적으로 프로그래밍을 하여 같은 방향의 자기장 속에서 다양한 각도로 움직여 하나의 로봇으로 여러 가지 다양한 일을 수행할 수 있도록 설계할 수 있음을 보여주었다 [그림 4(c) 참조]. Metin Sitti 연구진은 보자력이 다른 자석을 이용하여 간단히 자기장의 세기를 조절함으로써 다양한 구동과 역할 수행이 가능한 자기 마이크로 그리퍼를 제작하였다. 그리퍼의 양손의 쓰이는 자석의 종류를 달리하여 집게의 모션을 제어했다 [그림 4(d) 참조]. 그리퍼의 한쪽은 보자력이 높은 강자성체 네오디뮴 강자성체를 사용하고, 다른 한쪽은 상대적으로 보자력이 약한 페라이트 자석을 이용했다. 인가하는 외부 자기장의 세기에 따라 페라이트 자석의 자화 방향을 스위치처럼 전환할 수 있어 그림 4(e)와 같이 다양한 강도의 자기장에서 선택적 이동 및 구동이 가능하다. 영구자석과 페라이트의 보자력 이하의 외부 자기장을 걸어 줄 경우 액추에이터는 자기장 방향으로 이동하지만 영구자석과 페라이트의 보자력 사이의 외부 자기장이 인가되면 페라이트의 자화 방향이 외부 자기장의 방향으로 자화되면서

그리퍼가 열리는 모션을 취한다. 그림 4(f)은 자기장에 강도에 따라 선택적 제어 가능한 마이크로 그리퍼를 이용해 3D 구조를 조립하는 사진이다. Jiyun Kim 그룹은 낮은 녹는점을 갖는 바탕질을 이용하여 네오디뮴 자석의 퀴리 온도보다 훨씬 낮은 58도의 온도에서 자기 입자의 재프로그래밍을 가능함을 보여주었다. 그림 4(g)은 폴리에틸렌 글라이콜(PEG)과 5  $\mu\text{m}$  크기의 네오디뮴 자석들이 섞인 미소 구체들이 탄성 바탕질인 Ecoflex00-30 내에 고르게 분포되어 있는 도식화이다. PEG 기반의 미소 구체는 고체-액체 상전이를 통해 미소 구체 속의 자성 입자의 자화 방향을 물리적으로 재배열할 수 있다. PEG는 상온에서 고체(녹는점=58도)이기 때문에 PEG 미소 구체 내에서 자성 입자들은 특정 배열 방향으로 고정되어 있지만 PEG의 녹는점 이상의 온도를 가하면 Ecoflex 내의 PEG 미소 구체가 액상으로 변하여 유동성을 갖게 되므로 내부 자성입자의 배열이 랜덤하게 변한다. 이러한 액상 상태에서 300 mT 세기의 외부 자기장으로 자기 입자를 배열 후 냉각하면 PEG가 고체로 변하면서 강자성체의 자기 배열이 외부 자기장의 방향에 따라 PEG 미소 구체 내에 고정되기 때문에 그림 4(h)와 같이 온도의 변화를 통해 반복적인 자화 배열이 가능하다.

### 3. 초상자성체 자기 마이크로 로봇

강자성체는 강한 자력을 띠기 때문에 다른 자성체에 비해 강력하고 정확한 모션을 구동할 수는 있지만 나노 단위로 크기가 작아지면 자력이 약해져 소형화의 한계를 갖는다. 따라서 마이크로미터, 나노미터 크기의 초소형 자성 액추에이터를 구현하기 위해서는 강자성체보다 초상자성체 자성 입자들을 활용하게 된다. 초상자성체는 수십 나노미터 크기에서도 외부 자기장에 의해 높은 자력을 띠지만 외부 자기장이 없으면 잔존 자화가 없기 때문에 강자성체의 자화 프로그래밍과는 다른 원리로 구동된다. 특히 나노~수십 마이크로 미터 단위에서 구동되는 액추에이터의 경우 대개 약물 전달과 같은 분야에 주목되어 체내의 혈액과 같이 낮은 레이놀드 값을 가지는 액체에서의 구동 제어가 중요하기 때문에 외부 자기장과 액체의 점성력 사이의 당김힘(drag force)을 제어하는 것이 액추에이터의 구동 제어에 필수적이다. 본 장에서는 초상자성체의 개념과 이러한 개념을 이용하여 외부 자기장 방향에 따른 초상자성체 기반의 액추에이터의 구동을 살펴보도록 하겠다.

### 3.1 초상자성체(superparamagnetism)

초상자성체는 상자성체와 비슷한 성질을 가지고 있으나 자성체의 크기가 단일 영역(single domain)보다 작거나 비슷한 크기를 갖는다. 산화철, 카르보닐 철 나노 입자가 대표적인 초상자성체 물질이며, 자성 입자의 크기가 나노미터 스케일에서 일정 임계 크기 이하가 되면 나노 입자의 자기적 에너지보다 상온의 열 에너지가 더 크기 때문에 외부 자기장이 없으면 나노 입자의 자기적 모멘트가 불규칙하게 배열(random orientation)하게 되어 자성을 띠지 않는다. 초상자성체의 자화 세기는 인가한 외부 자기장의 세기에 비례하여 증가하고 물질의 자기 모멘트는 외부 자기장에 따라서 정렬한다. 강한 외부 자기장에서 초상자성체의 스핀은 최대로 결합되어 포화 자화에 이르게 되어 강한 자성을 나타내지만 외부 자기장이 사라지면 상자성체의 자기 모멘트 방향이 다시 흐트러져 랑주뱅 이론(Langevin theory)에 의해서 자성을 잃는다. 따라서 외부 자기장과 자화 방향의 불일치로 토크를 일으켜 구동하는 강자성체 액추에이터와 같은 방법으로는 초상자성체 액추에이터를 구동할 수 없다. 초상자성체 나노 입자는 수 나노에서 수백 나노미터의 작은 스케일을 가지고 있지만 같은 세기의 외부 자기장에서 상자성체보다 보다 강한 자력[그림 1(b) 참조]을 가지고 있기 때문에 다양한 액추에이터 분야에 각광 받고 있는 물질이다.

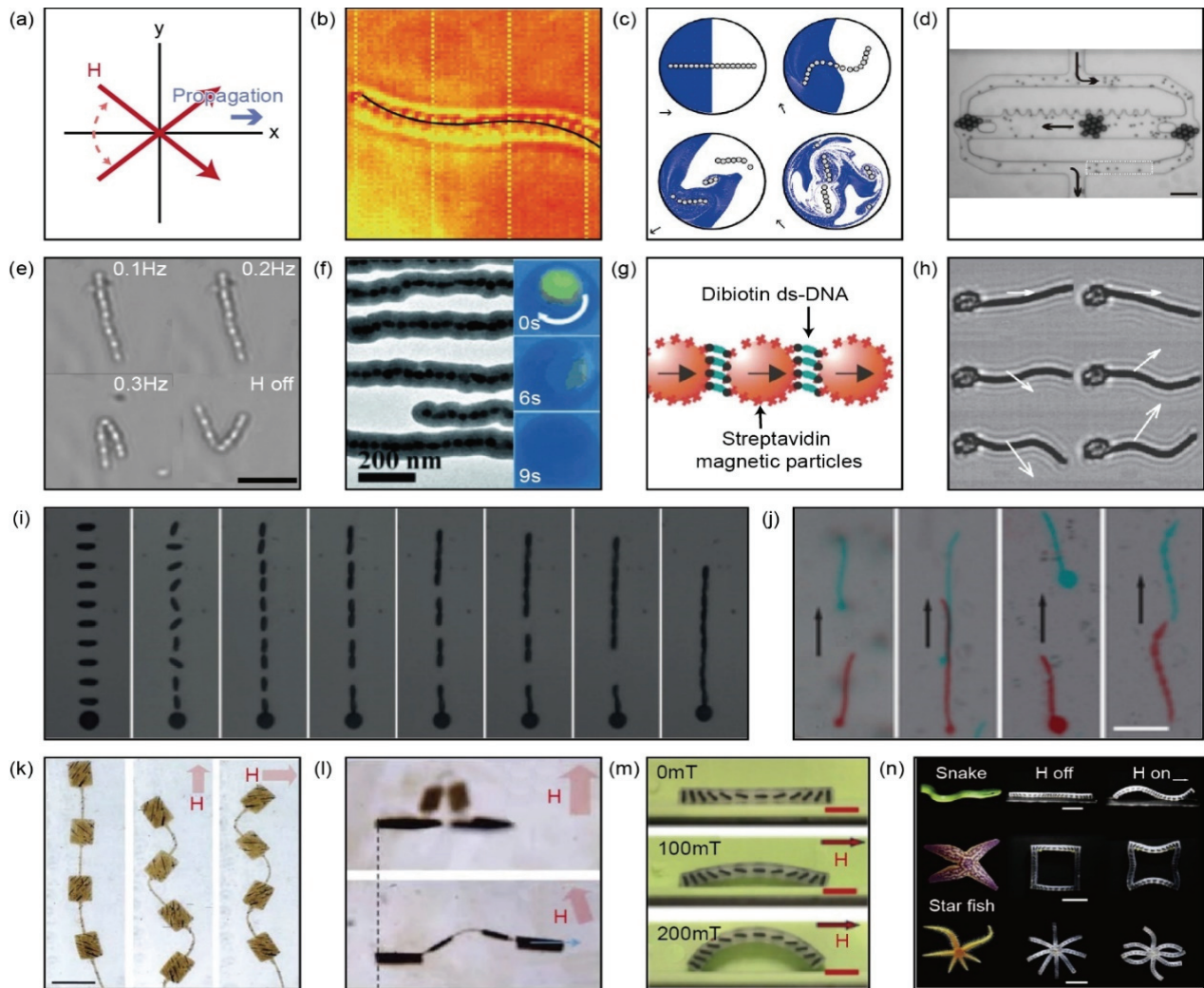
등방성 상자성체 입자의 자기 토크는 외부 자기장에 대한 자기 모멘트의 상호 작용이 위와 같은 이유로 성립될 수 없다. 그러나 자기적 이방성을 이용하면 자기 토크를 통한 액추에이터 구동을 할 수 있다. 만약 상자성체 입자가 그림 1(d)와 같이 모양 이방성(geometric anisotropy) 혹은 자기 이방성(magnetic anisotropy)을 가진다면, 외부 자기장이 인가되었을 때 입자의 에너지적인 측면에서 내부 찢찢땀(frustration)을 감소시키기 위해 토크가 발생하게 된다. 외부 자기장에 의해 생성된 상자성체의 내부 자기장은 인접한 원자들끼리 보강 및 상쇄를 통해 토크가 발생한다. 만약 인접한 원자의 배열이 외부 자기장의 방향으로 정렬되어 있다면 자기 모멘트가 내부 자기장(local magnetic fields)을 자화를 강화시킨다. 반면, 인접한 원자들의 배열이 인가된 자기장과 일치하지 않는다면 원자 각각의 자기 모멘트가 상쇄되는 반자화(demagnetization)를 생성하게 된다. 이 반자화는 입자의 에너지를 높여 불안정한 상태로 만드는 원인으로 이 찢찢땀을 감소시키는 방향으로 토크가 발생하게 된다.

### 3.2 초상자성체 액추에이터

초상자성체는 인가하는 외부 자기장의 방향에 따라 크게 세 가지 방법으로 액추에이터를 구동할 수 있다. 첫 번째는 진동(oscillating)하는 자기장에 입자 단위로 구동함으로써 유동적인 움직임을 만드는 것이다 [그림 5(a) 참조]. 두 번째는 액추에이터가 추진하는 방향과 평행한 축으로 회전하는 자기장을 이용해 나선형의 몸체가 액체 속에서 회전하며 추진하는 방식을 이용할 수 있다 [그림 6(a) 참조]. 세 번째는 액추에이터가 진행하고자 하는 방향의 수직으로 회전하는 자기장을 걸어 입자 하나하나가 걷는 듯한 모션을 만들 수도 있다 [그림 6(d) 참조]. 초상자성체 액추에이터는 인가하는 자기장의 방법에 따라 액추에이터의 디자인을 달리하여 성능을 극대화시키는 방향으로 연구들이 진행되어 왔기 때문에 자기장의 방향에 따른 초상자성체 액추에이터의 거동에 대해 기술할 것이다.

#### 3.2.1 진동하는 자기장에서 초상자성체 액추에이터

진동하는 자기장에서 초상자성체 기반의 액추에이터의 움직임은 매질의 점성력과 액추에이터가 자력에 이끌리는 힘의 상쇄 작용으로 비대칭적 S 모양으로 물결치는 모션을 가진다 [그림 5(b) 참조]. 만약 초상자성체 입자의 표면에 가교 결합과 같은 화학적 처리가 없다면 외부 자기장이 없는 환경에서 자기 입자는 자력을 잃고 뿔뿔이 흩어지게 된다. 이러한 특성을 이용해서 가변 구조형(reconfigurable) 액추에이터를 고안할 수 있다. 가변 구조형을 가진 초상자성체 액추에이터의 형태는 인가된 정현파(sinusoidal) 자기장의 진동수에 따라 변화한다 [그림 5(c) 참조] [21]. 일반적으로 용액 내에서 스트로크(stroke) 모션을 만들어 내는 액추에이터의 경우 점성력(viscous force)과 자력(magnetic force)의 균형이 굉장히 중요하다. 점성력은 인가된 진동하는 외부 자기장에 의해 반응하는 액추에이터의 모션을 지연시켜 다양한 모션을 만들어 낼 수 있다. 용액 내의 유체학적(hydrodynamic) 영향 때문에 용액의 점성력이 인가된 자력보다 큰 경우 막대 끝부분만 진동하는 모션(tip-wagging)이 관찰되고 반대의 경우에는 뾰뾰한 막대(rigid-rod) 모션이 관찰된다 [45]. 따라서 용액의 점성력과 외부 자기장 세기의 적절한 균형을 통해 막대 모양으로 결합한 초상자성체 액추에이터가 비대칭적으로 물결치는 진핵 세포(eukaryotic cells)와 같은 모션을 만들어 앞으로 추진할 수 있게 한다 [22]. 진동하는 정현파 자기장 내에서 사슬 혹은 막대 구조의 초상자성체 액추에이터는 임계진동수(critical frequency) 이상에서 구조를 유지하지 못하고 작은 조각으로 부서지게 된다 [그림 5(c) 참



**Fig. 5.** Super-paramagnetic actuator under oscillating magnetic field. (a) Schematic image of oscillating magnetic field (Red arrow represents direction of applied external magnetic field and purple one is direction of propagating actuators), (b) a chain ( $N=21$ ) at the point of rupture superimposed with simulation results (The line connects the bead centre positions from the numerical model. The field rotates clockwise at 1 Hz) [39], (c) progress of mixing visualized via a colored tracer tracking [40], (d) pumping performed by a colloidal assembly piston using  $4.5 \mu\text{m}$  particles as building blocks (Scale bar,  $20 \mu\text{m}$ ) [41], (e) video microscope images of a chain linked with PEG 3,400 rotating at various frequencies (At 0.3 Hz, the chain folds and coalesces to rotate synchronously with the external magnetic field. Once the external magnetic field is removed, elastic recoil and thermal motion will cause the chain to open. Scale bar,  $5 \mu\text{m}$ ) [42], and (f) single-line chains of  $40 \text{ nm}$   $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles can be used as the world's smallest magnetic stir bars [Inset is images showing the dispersing of dye solution (rhodamine 6 G) in a water droplet ( $30 \mu\text{L}$ ) with stirring nano stir bars. Scale bar,  $200 \text{ nm}$ ] [43]. (g) and (h) Microscopic artificial swimmers [44]. (g) Schematic representation of a flexible magnetic filament [The magnetic particles are coated with streptavidin (red cross symbols). Under an applied magnetic field  $B_x$  the particles form filaments. Double-stranded DNA with biotin at each end can bind the particles together via the specific biotin–streptavidin interaction] and (h) the time interval between each image is 5ms [The white arrows represent the magnetic field ( $B_x=8.3 \text{ mT}$ ,  $B_y=13.7 \text{ mT}$ ,  $f=10 \text{ Hz}$ ). The white arrow on the top shows the direction of motion. The filament length is  $L=24 \mu\text{m}$ ]. (i) and (j) Modular magnetic microswimmers [45]. (i) Assembly of an S swimmer under a static magnetic field [The first frames are module release at  $t=0\text{s}$  and timings thereafter (left to right) are 9.4, 9.75, 10.55, 11.20, 12.55, 14.55, 21.05s (S swimmer)] and (j) time lapses demonstrating the locomotion direction of the S, LT, BH, and Tr swimmers driven by a magnetic field alternating in the  $x$ - $y$  plane (19 Hz) (Scale bar,  $50 \mu\text{m}$ ). (k) and (l) Programming magnetic anisotropy in polymeric microactuators [46]. (k) A microactuator containing four different easy axes recoils like a snake when a magnetic field is applied (Scale bar,  $100 \mu\text{m}$ ) and (l) side view of sequential movement of a micro-looper (The micro-looper creeps on the substrate as the external magnetic field is applied). (m) and (n) Biomimetic magneto-active soft matter by 3D printing [47]. (m) Photographs of the bending deformation of the MASM strip under 0, 100, and 200 mT, and the magnetic structural elements with a length of 1.5 mm, width of 0.3 mm, and thickness of 4 mm (Scale Bar, 5 mm) and (n) simulation of various shape-programmable actuators with two-dimensional shape change under applied magnetic fields for biomimetic imitation (Scale bar, 10 mm).

조] [21,23]. D. W. M. Marr 그룹은 임계진동수보다 더 높은 정현파 진동수의 자기장을 인가하여 초상자성체 입자가 콜로이드 모양으로 뭉치게 하여 진동수에 따라 다양한 모양의 콜로이드를 제어할 수 있음을 보여주었다. 이를 이용하여 높은 주파수의 영역에서 모양을 바꾸어 복잡 모양의 미세 유체 관(micro fluidic channel)을 통과하여 [그림 5(d) 참조] 효율적인 마이크로 믹서 혹은 마이크로 칩에서 쓰일 수 있는 정류기(rectifier), 밸브, 펌프로써 기능을 할 수 있음을 증명했다. 가교 결합이 되지 않은 초상자성체의 액추에이터가 정현파 자기 진동에 의해 가변 구조를 가지는 것은 양날의 검과 같아서 높은 환경 적응력이란 장점과 동시에 복잡한 메커니즘으로 제어가 어려워 특정 형태의 모양을 유지하기 어렵다는 단점을 갖는다. 이를 보완하기 위해서 초상자성체 표면에 가교가 가능한 표면 처리를 하여 하나의 몸체(body)처럼 구동 가능한 소프트 로봇이 제시되었다 [그림 5(e) 참조]. 이러한 단일 구조의 액추에이터는 높은 환경 적응력이 필요 없는 마이크로 믹싱과 같은 분야에 먼저 활용되었다. 마그네틱 토크로 구동되는 교반 자석(magnetic stirring bar)은 실험실에서 흔히 볼 수 있는 기구로서 높은 회전 속도를 이용해 용액의 와류 현상(turbulence)을 일으켜 빠르고 효과적인 현탁액(suspension)을 만드는 데 사용된다 [24]. 마이크로 믹싱은 1  $\mu$ L 이하의 용액을 다루는 생명 공학이나 랩온어 칩과 같은 미세 구조를 다루는 분야에서 굉장히 중요한 기반 기술이지만 기존의 센티미터 스케일의 교반 자석으로는 구현하기 어렵다. 나노~마이크로 미터 부피의 스케일에서는 레이놀드 값이 급격히 감소하여 와류 현상이 아닌 규칙적이고 일정한 층류(laminar flow)가 발생하여 확산적인 양상을 띠어 현저히 느린 반응이 나타난다. 자기장 안에서 초상자성체 입자는 내부 자기장(local magnetic fields)이 생성되면서 자화가 된다. 이러한 내부 자기장은 인접한 입자들과 인력을 일으켜 외부 자기장을 따라서 입자들이 일렬로 정렬되어 막대 구조를 이루게 되고, 자기 입자 표면의 가교 결합 물질은 액추에이터의 강성(rigidity)을 결정한다. 강성은 초상자성체 액추에이터의 구동 효율에 지대한 영향을 미치는 요인이기 때문에 다양한 가교 결합 물질이 강성 조절에 활용된다. 그림 5(e)에서 액추에이터 사슬은 비오틴 리간드를 4개를 묶을 수 있는 높은 어피니티(affinity)를 가진 tetrameric 단백질인 streptavidin을 이용하여 초상자성체 입자들을 영구적으로 연결하였다 [25]. 그림 5(f)는 sol-gel processes로 초상자성체 입자를 처음에 얇은 실리카층으로 코팅한 다음 외부 자기장을 이용해 일렬로 정렬한 후, 체인 구조를 안정화시키기 위해 실리카층을 추가함으로써 기계적으로 견고한 사슬을 만든 것이다 [26].

이러한 입자 표면의 화학적인 가교 결합(cross-link)은 영구적인 연결 고리를 만듦으로써 교반 자석의 기능을 강화시킬 수도 있다. 17  $\mu$ m 크기의 액추에이터를 이용해 염료 용액을 30  $\mu$ L의 물에 희석시키는 것을 그림 5(f)의 내부 사진에서 확인할 수 있다. 그러나 가교 결합 처리가 된 액추에이터는 가교 결합되지 않은 막대 구조의 액추에이터보다 강성이 낮아 효과적인 스트로크를 만들기 어려워 교반 자석이 아닌 스트로크를 만드는 관점에서는 단점이 될 수 있다. Remi Dreyfus 그룹은 초상자성체 입자 표면을 streptavidin으로 코팅하고 DNA 이중 가닥으로 입자를 연결하여 액추에이터의 강성을 증가시켜 안정적인 스트로크 모션이 가능한 액추에이터를 보여주었다 [그림 5(g) 참조]. DNA로 연결된 사슬 끝에 적혈구를 부착하여 비대칭적 박동 패턴을 유도하였고 인가된 정현파 자기장 내에서 적혈구 반대쪽으로 추진하는 인공적인 편모(flagellum)를 모사했다 [그림 5(h) 참조]. 그러나 대부분 편모를 모사한 액추에이터는 Remi Dreyfus 그룹과 같이 머리 쪽이 아닌 꼬리 방향으로 추진하는 경향이 있는데 이는 몸체보다 머리가 무겁고, 모양의 등방성을 띠고 있어 외부 자기장에 덜 반응하기 때문이다. 결과적으로 꼬리 쪽에 밴딩 웨이브가 크게 생기면서 추진력을 얻어 꼬리 쪽으로 추진하는 기작을 보여준다. 이는 대부분의 편모 모사 액추에이터에서 쉽게 볼 수 있는 패턴이다. 편모 모사 액추에이터는 대개 하나의 몸체로 거동하는 반면 그림 5(i)는 콜로이드 상태의 초상자성체 입자들을 ethoxylated trimethylolpropane triacrylate (ETPTA)로 코팅한 여러 개의 모듈러에 추진 방향으로 정적 자기장을 걸어 주면 자체적으로 조립이 되어 정렬이 됨을 보여준다. ETPTA로 코팅된 모듈러들이 자기장에 의해 부착이 되면 콜로이드 표면의 고분자끼리 반데르발스 상호 작용(van der Waals' interaction)으로 결합되어 외부 자기장 제거시 모듈러들의 분산을 방지한다. 이는 자기 모듈러들을 쉽게 고정시킬 뿐만 아니라 영구적인 결합이 아닌 모듈러들끼리 유동적 연결이라는 점에서 액추에이터의 강성을 증가시킨다. 또한 꼬리 쪽으로 진행하는 일반적인 편모와 다르게 모양 이방성을 이용해 머리 쪽으로 추진하는 완벽한 자연의 편모를 모사하고 [그림 5(j) 참조], 군체를 이룬 다수의 액추에이터를 구동하였다.

그림 5(k)은 빛에 의해 경화되는 바탕질에 초상자성체 입자를 섞어 외부 자기장으로 입자를 정렬한 다음 빛으로 레진을 경화시킴으로써 입자 정렬을 고정시켰다. 이렇게 고정된 자기 배열이 앞장에서 말했던 자기 이방성으로 외부 자기장과 방향이 다를 경우 토크를 발생시켜 강자성체와 동일한 기작으로 원하는 움직임 만들어 낸다. 레진 내의 자기 입자의 정렬 방향을 조절하여 특정 방향의 자기장

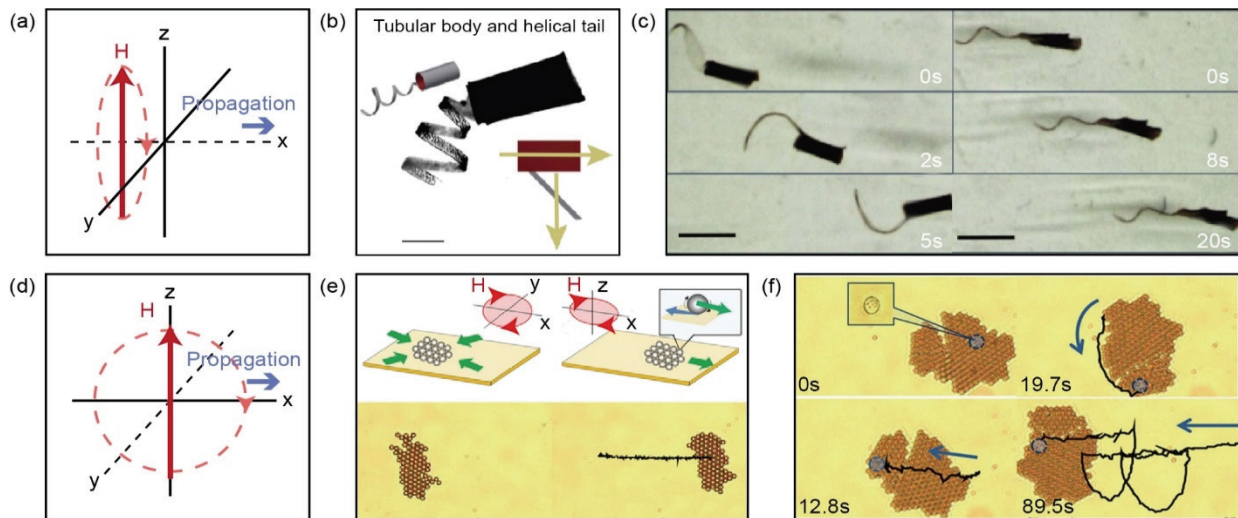
에 서로 다른 방향으로 반응하도록 소프트 로봇을 설계하여 좌우로 꿈틀거리는 지렁이와 같은 움직임을 모사하였다. 그림 5(l)는 표면에 수직으로 자기 입자를 정렬하고 인가하는 자기장의 축을 표면에 수직으로 걸어 주면 애벌레와 같은 입체적인 구동을 할 수 있음을 보인다. 이렇게 자기 이방성으로 초상자성체를 구동하는 방식은 생물 모사 분야에서 많은 주목을 받았다. 그림 5(m)은 3D 프린팅 기술로 초상자성체 자기 입자를 필러 형태로 인쇄하고 PLA를 도포하여 전체적인 몸체를 만든 것이며 그림 5(n)는 PLA의 유연한 특성을 이용해 생물의 인공 근육을 모사하여 뱀, 불가사리와 같은 생물의 움직임을 보여주었다.

### 3.2.2 회전하는 자기장에서 초상자성체 액추에이터

회전하는 자기장에서의 액추에이터는 외부 자기장의 회전축과 액추에이터의 추진방향의 관계에 따라 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 외부 자기장의 회전축과 액추에이터의 추진방향이 일치[그림 6(a) 참조]하여 타래 송곳(corkscrew)과 같은 구동을 보이는 액추에이터이며, 두 번째는 회전하는 자기장과 액추에이터의 추진방향이 수직[그림 6(d) 참조]을 이루어 구동하는 액추에이터이다.

첫 번째로 추진방향과 회전축이 동일한 액추에이터는 인가하는 외부 자기장에 대해 직관적으로 반응하여 비교적

쉬운 제어가 가능한 장점이 있다. 하지만 대개 나선형의 모양을 가지고 있어야만 구동이 가능하여 형태의 제약을 갖는다. 또한 나선형의 액추에이터를 마이크로 혹은 나노 단위로 정교하고 쉽게 제작하는 것 자체가 어려워 많은 연구진들이 보다 쉬운 제작방식 개발을 위해 노력해 왔다. Bradley J. Nelson 그룹은 초상자성체 자기 입자 배열에 따라 나선형의 모양을 쉽게 제어하는 기술을 선보였다 [그림 6(b) 참조]. 그림 6(b)는 다양한 생체를 모사한 유연 미세 로봇의 도식화와 실물이다. 이 공정을 통해서 구조 내 자성 나노 입자의 자기 배열을 노란 화살표 방향으로 빠르게 광 패턴화하는 방법을 소개하였다. 이 마이크로 로봇의 구조는 이중층 구조로 팽윤 열 반응성 N-이소프로필아크릴아미드(NIPAAm)층과 자기 패턴화된 비팽윤 폴리(에틸렌 글리콜) 디아크릴레이트(PEGDA) 지지층으로 구성되어 있다. 특정 방향으로 패턴화된 나노 자기 입자의 배열은 배열한 축을 따라 이중층의 수축 팽창 지수 차이에 의해 말림의 정도가 각기 다르게 표현된다. 이 그룹은 몸통과 꼬리의 자기 배열을 달리할 뿐만 아니라 꼬리에 쓰이는 이중층과 자기 배열의 각도에 따라 말림 현상을 자세히 규명하였다. 그림 6(c)는 말리는 정도가 다른 나선형 액추에이터의 실제 구동 비교 사진이다. 그림 6(c)에서 알 수 있듯이 나선형 꼬리의 각도 설계가 회전하는 자기장에서 액추에이터



**Fig. 6.** Super-paramagnetic actuator under rotating magnetic field. (a) Schematic image of rotating magnetic field parallel to the direction of propagating actuator (Red arrow represents direction of applied external magnetic field and purple one is direction of propagating actuator). (b) and (c) Reconfigurable body plans for soft micromachines inspired from microorganisms [48]. (b) Optical images of flagellated soft micromachines with complex body plans (Yellow arrows denote the magnetic axis in the head and the tail, respectively. Scale bars, 500  $\mu\text{m}$ ) and (c) time lapse optical images of two different types of compound micromachines driven by rotating uniform magnetic fields (Scale bars, 2 mm). (d) Schematic image of rotating magnetic field perpendicular to the direction of propagating actuator. (e) and (f) Magnetic propulsion of self-assembled colloidal carpets [49]. (e) Schematics showing and corresponding demonstration of the procedure to assemble (left) and propel (right) a colloidal carpet and (f) sequence of images showing the transport of one yeast cell by combining translation and rotation of the carpet (The position of the tracked cell is superimposed as a black line).

의 기동성을 결정하는 데 중요한 요인이기 때문에 B. J. Nelson 연구진들은 꼬리 각도를 미세 조절할 수 있는 합성법의 중요성을 증명하였다.

자기 입자를 벌크로 고정시켜 미세하게 조절하는 것은 액추에이터 분야에서 매우 중요한 요소이지만 미세 자성 입자 하나하나를 제어하는 기술도 동시에 많은 집중을 받고 있다. 회전하는 자기장의 축과 액추에이터의 추진방향이 수직인 경우 콜로이드 형태로 뭉친 자기 입자 하나하나가 표면을 따라 걷는 것과 같은 모션을 만들 수 있다. Pietro Tierono 연구원들은 이러한 자기장을 이용하여 균일하고 기동성이 있는 2차원의 카펫 형태 액추에이터를 개발하였다. Pietro Tierono 그룹은 표면 처리되지 않은 자성 입자에 표면의 수직 방향으로 회전하는 자기장을 인가하여 흩어져 있는 입자를 콜로이드 형태로 모은 다음, 구동 표면과 평행(혹은 추진방향의 수직)한 축을 가지는 회전하는 자기장을 걸어 주게 되면 콜로이드의 자기 입자들 하나씩 굴러, 유기적으로 하나의 움직임을 만드는 콜로이드 형태의 액추에이터를 구현할 수 있음을 보여주었다 [그림 6(e) 참조]. 연구진은 이러한 콜로이드 형태를 카펫이라고 칭하고 이 카펫은 자기장에 따라 마음대로 조립 및 분해가 가능하며 초상자성체 입자 하나하나를 굴러 카펫 내에서 운송하고자 하는 입자를 회전, 운반 등 컨베이어 벨트와 같은 메커니즘으로 제어할 수 있음을 증명했다 [그림 6(f) 참조]. 또한, 복잡한 미세 유체 관에서 외부 자기장으로 카펫을 제어하여 가변적인 구조도 보여주었다. 이러한 콜로이드 미세로봇은 회전하는 자기장에 의해 구성되며 유체역학 컨베이어 벨트 효과를 통해 생물학적 화물을 포획, 운반 및 방출하는 데 쉽게 사용될 수 있어 마이크로 스케일에서의 다기능 스마트 기기 개발에 대한 큰 잠재력을 보여준다 [27].

#### 4. 결론

로봇이란 용어는 강제적인 노동을 뜻하는 체코어 robota에서 유래되어 1920년에 나온 체코의 희곡 RUR (rossum's universal robors)에 처음 쓰였다 [28]. RUR에서 로봇은 사람을 대신하여 노동을 하기 위한 존재로 표현되었고 산업용 로봇이란 자동 제어에 의한 조작 또는 이동 기능을 갖고, 각종 작업을 프로그램에 의하여 실행할 수 있고, 산업에 사용되는 기계를 칭한다 [29]. 변형성이 없는 강체의 재료들로 만들어진 전통적인 로봇은 정확한 모션과 힘을 제어할 수 있어 소품종 대량생산에 적합하지만 개인의 개성 및 다양성이 추구되는 21세기에 유저 맞춤형 다품종 소량생산이라는 다양한 환경에 적용할 수 있는 새로

운 형태의 로봇의 필요성이 강조되면서 다양한 동작 제어 및 수행이 가능한 소프트 로봇의 연구가 지난 10여 년간 활발히 진행되었다. 본 논문에서는 자성 입자와 유연 고분자 복합체로 이루어져 간단한 구조로 다양한 모션 제어가 가능한 자성 액추에이터 기반의 소프트 로봇에 대해 서술했다. 자기장 제어를 통해 다양한 환경에서 빠르고, 쉽게 모션 제어가 가능한 자성 입자 기반의 미세 로봇에 대한 다양한 재료와 함께 제작 방법부터 구동 방식과 다양한 응용 방법까지 다양한 연구를 소개하였다. 특히 자기장으로 구동하는 액추에이터는 자성 입자 및 유연 복합체를 이루는 PDMS, Ecoflex 등의 실리콘 고무가 생체 적합성을 가지기 때문에 생명공학 및 헬스케어 분야에서 다양하게 활용될 수 있으며, 체외에서 원격 정밀 구동 제어가 가능하므로 최소 침습, 표적 치료의 가능성을 제시한다. 앞으로 자력 기반의 소프트 로봇이 다양한 물리, 화학적 센서 및 발광소자, 전기 소자들과 결합되면 기존에 모션 구동 및 제어에 어려움을 겪던 체내 삽입형 전자소자 분야에서 획기적으로 활용될 수 있을 것이라 생각된다.

#### ORCID

Moon Kee Choi

<https://orcid.org/0000-0003-4536-3393>

#### REFERENCES

- [1] D. Rus and M. T. Tolley, *Nature*, **521**, 467 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nature14543>]
- [2] C. Majidi, *Soft Rob.*, **1**, 5 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1089/soro.2013.0001>]
- [3] H. Zeng, P. Wasylczyk, D. S. Wiersma, and A. Priimagi, *Adv. Mater.*, **30**, 1703554 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201703554>]
- [4] S. Petsch, R. Rix, B. Khatri, S. Schuhladen, P. Müller, R. Zentel, and H. Zappe, *Sens. Actuators, A*, **231**, 44 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.10.014>]
- [5] C. Laschi, B. Mazzolai, and M. Cianchetti, *Sci. Rob.*, **1**, eaah3690 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aah3690>]
- [6] H. Ceylan, J. Giltinan, K. Kozielski, and M. Sitti, *Lab Chip*, **17**, 1705 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C7LC00064B>]
- [7] D. Cappelleri, D. Efthymiou, A. Goswami, N. Vitoroulis, and M. Zavlanos, *Int. J. Adv. Rob. Syst.*, **11**, 150 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.5772/58985>]
- [8] J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano, and H. Shea, *Adv. Mater.*, **28**, 231 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201504264>]
- [9] J. Paek, I. Cho, and J. Kim, *Sci. Rep.*, **5**, 10768 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1038/srep10768>]
- [10] H. Zeng, P. Wasylczyk, C. Parmeggiani, D. Martella, M. Burreli,

- and D. S. Wiersma, *Adv. Mater.*, **27**, 3883 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201501446>]
- [11] T. H. Ware, M. E. Mcconney, J. J. Wie, V. P. Tondiglia, and T. J. White, *Science*, **347**, 982 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1261019>]
- [12] L. Hines, K. Petersen, G. Z. Lum, and M. Sitti, *Adv. Mater.*, **29**, 1603483 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201603483>]
- [13] G. H. Kwon, J. Y. Park, J. Y. Kim, M. L. Frisk, D. J. Beebe, and S. H. Lee, *Small*, **4**, 2148 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1002/sml.200800315>]
- [14] K. Jung, J. C. Koo, J. D. Nam, Y. K. Lee, and H. R. Choi, *Bioinspiration Biomimetics*, **2**, S42 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-3182/2/2/S05>]
- [15] J. W. Sohn and S. B. Choi, *Int. J. Mech. Syst. Eng.*, **3**, 122 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.15344/2455-7412/2017/122>]
- [16] M. Wang, B. P. Lin, and H. Yang, *Nat. Commun.*, **7**, 13981 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms13981>]
- [17] X. Yan, Q. Zhou, M. Vincent, Y. Deng, J. Yu, J. Xu, T. Xu, T. Tang, L. Bian, Y.X.J. Wang, K. Kostarelos, and L. Zhang, *Sci. Rob.*, **2**, eaaq1155 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aaq1155>]
- [18] C. Peters, M. Hoop, S. Pané, B. J. Nelson, and C. Hierold, *Adv. Mater.*, **28**, 533 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201503112>]
- [19] H. D. Young, R. A. Freedman, T. R. Sandin, and A. L. Ford, *University Physics* (Addison-Wesley Reading, MA, 1996), p. 731.
- [20] S. Jeon, A. K. Hoshiar, K. Kim, S. Lee, E. Kim, S. Lee, J. Y. Kim, B. J. Nelson, H. J. Cha, B. J. Yi, and H. Choi, *Soft Rob.*, **6**, 54 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1089/soro.2018.0019>]
- [21] T. G. Kang, M. A. Hulsen, P. D. Anderson, J.M.J. den Toonder, and H.E.H. Meijer, *Phys. Rev. E*, **76**, 066303 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.066303>]
- [22] M. Roper, R. Dreyfus, J. Baudry, M. Fermigier, J. Bibette, and H. A. Stone, *Proc. R. Soc. A*, **464**, 877 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2007.0285>]
- [23] I. Peousis, E. Homburg, R. Derks, and A. Dietzel, *Lab Chip*, **7**, 1746 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1039/B713735B>]
- [24] R. M. Erb, J. J. Martin, R. Soheilian, C. Pan, and J. R. Barber, *Adv. Funct. Mater.*, **26**, 3859 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201504699>]
- [25] S. L. Biswal and A. P. Gast, *Phys. Rev.*, **68**, 021402 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.68.021402>]
- [26] Y. Hu, L. He, and Y. Yin, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **50**, 3747 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201100290>]
- [27] F. Martinez-Pedrero and P. Tierno, *Phys. Rev. Appl.*, **3**, 051003 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.3.051003>]
- [28] K. Čapek, *RUR (Rossum's Universal Robots)* (Penguin, New York, 2004) p. 3.
- [29] Y. H. Cho, *Industrial Robot* (Korea Institute of Science and Technology Information, 2002) p. 15.
- [30] Y. Kim, G. A. Parada, S. Liu, and X. Zhao, *Sci. Rob.*, **4**, eaax7329 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aax7329>]
- [31] S. Miyashita, S. Guitron, M. Ludersdorfer, C. R. Sung, and D. Rus, *Proc. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (IEEE, Seattle, USA, 2015)* p. 1490. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139386>]
- [32] E. Diller, J. Zhuang, G. Z. Lum, M. R. Edwards, and M. Sitti, *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 174101 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4874306>]
- [33] W. Hu, G. Z. Lum, M. Mastrangeli, and M. Sitti, *Nature*, **554**, 81 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nature25443>]
- [34] Y. Kim, H. Yuk, R. Zhao, S. A. Chester, and X. Zhao, *Nature*, **558**, 274 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0185-0>]
- [35] T. Xu, J. Zhang, M. Salehizadeh, O. Onaizah, and E. Diller, *Sci. Rob.*, **4**, eav4494 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aav4494>]
- [36] Y. Alapan, A. C. Karacakol, S. N. Guzelhan, I. Isik, and M. Sitti, *Sci. Rob.*, **6**, eabc6414 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc6414>]
- [37] E. Diller and M. Sitti, *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 4397 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201400275>]
- [38] H. Song, H. Lee, J. Lee, J. K. Choe, S. Lee, J. Y. Yi, S. Park, J. W. Yoo, M. S. Kwon, and J. Kim, *Nano Lett.*, **20**, 5185 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c01418>]
- [39] I. Petousis, E. Homburg, R. Derks, and A. Dietzel, *Lab Chip*, **7**, 1746 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1039/B713735B>]
- [40] T. G. Kang, M. A. Hulsen, P. D. Anderson, J.M.J. den Toonder, and H.E.H. Meijer, *Phys. Rev. E*, **76**, 066303 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.066303>]
- [41] T. Sawetzki, S. Rahmouni, C. Bechinger, and D.W.M. Marr, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **105**, 20141 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0808808105>]
- [42] S. L. Biswal and A. P. Gast, *Phys. Rev. E*, **69**, 041406 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.041406>]
- [43] W. H. Chong, L. K. Chin, R.L.S. Tan, H. Wang, A. Q. Liu, and H. Chen, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **52**, 8570 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201303249>]
- [44] R. Dreyfus, J. Baudry, M. L. Roper, M. Fermigier, H. A. Stone, and J. Bibette, *Nature*, **437**, 862 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nature04090>]
- [45] C. Pauer, O. du Roure, J. Heuvingh, T. Liedl, and J. Tavaicoli, *Adv. Mater.*, **33**, 2006237 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202006237>]
- [46] J. Kim, S. E. Chung, S. E. Choi, H. Lee, J. Kim, and S. Kwon, *Nat. Mater.*, **10**, 747 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat3090>]
- [47] S. Qi, H. Guo, J. Fu, Y. Xie, M. Zhu, and M. Yu, *Compos. Sci. Technol.*, **188**, 107973 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107973>]
- [48] H. W. Huang, M. S. Sakar, A. J. Petruska, S. Pané, and B. J. Nelson, *Nat. Commun.*, **7**, 12263 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms12263>]
- [49] F. Martinez-Pedrero and P. Tierno, *Phys. Rev. Appl.*, **3**, 051003 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.3.051003>]