

# NdFeB-PDMS 복합재가 패턴된 이온성 고분자 박막 기반 전기-자기 응답형 소프트 액추에이터

원다민\* · 김재환\*<sup>†</sup>

## Electro- and Magneto-Responsive Soft Actuators Based on NdFeB-PDMS Composite-Patterned Ionic Polymer Membranes

Damin Won\*, Jaehwan Kim\*<sup>†</sup>

**ABSTRACT:** In this study, a soft actuator that responds to both electric and magnetic stimuli was fabricated. This was achieved by laser strip-patterning an NdFeB-PDMS composite (1–3 mm pitch), embedding the patterned strips in a Nafion ionic polymer matrix, and subsequently coating both sides with PEDOT:PSS electrodes. The specimen with a 3 mm pitch exhibited an average peak-to-peak displacement of 1.60 mm under a  $\pm 1$  V, 0.1 Hz sinusoidal input, while a standalone permanent magnet located 20 mm away ( $\approx 30$  mT) induced an immediate 2 mm bend. Sequential application of electro-magnetic actuation enabled the on-demand reversal of the bending direction. When the strip orientation was set to  $45^\circ$ , a torsional component was introduced, yielding programmable two-degrees-of-freedom motion. These findings demonstrate that large, reversible deformation can be achieved under low-voltage ( $\leq 1$  V) and low-magnetic-field ( $\leq 30$  mT) conditions. Consequently, the proposed electro-magnetic hybrid design presents a promising actuation platform for next-generation bio-inspired robots, active photonic components, and wearable haptic devices.

**초 록:** NdFeB-PDMS 복합재를 레이저로 스트립(1–3 mm) 형상 패터닝한 뒤 Nafion 이온성 고분자에 매립하고, PEDOT:PSS 전극을 양면 도포하여 전기-자기 응답형 소프트 액추에이터를 제작하였다. 3 mm 피치 시편은  $\pm 1$  V, 0.1 Hz 입력에서 평균 1.60 mm의 peak-to-peak 변위를 보였으며, 20 mm 떨어진 30 mT 영구자석만으로도 약 2 mm 즉각 굽힘이 발생하였다. 전기-자기 자극을 순차 인가하면 소프트 액추에이터의 굽힘 방향을 즉시 반전할 수 있었고, 스트립 배향각을  $45^\circ$ 로 설정하면 비틀림이 더해져 2자유도 모션이 구현되었다. 1 V 이하-30 mT 이하의 저전압-저자기장 조건에서 큰 변위와 방향성 제어가 가능함을 확인하여, 제안된 구조가 생체 모사 로봇, 능동 광학, 웨어러블 촉각 장치용 전기-자기 하이브리드 구동 플랫폼으로 유용함을 제시한다.

**Key Words:** 전기활성(Electroactive), 자기활성(Magnetoactive), 소프트 액추에이터(Soft actuator), 복합재(Composites), 레이저 패터닝(Laser patterning)

## 1. 서 론

최근 전기활성 (Electroactive) 이온성 소프트 액추에이터

는 유연성, 저전력 구동, 저전압 하 대변형, 생체 적합 기능화 등의 장점으로 의료 로봇틱스, 웨어러블 기기, 휴먼-머신 인터페이스 분야에서 많은 주목을 받고 있다[1-3]. 이 액

Received 20 June 2025, accepted 30 June 2025

\*School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology

<sup>†</sup>Corresponding author (E-mail: kimjh8729@kumoh.ac.kr)

추에이터는 고분자 전해질막 내부의 이온 이동이나 이온 주입에 의해 발생하는 부피 팽창, 수축을 이용하여 굽힘 거동을 한다[4-6]. 단일 전기자극에만 의존할 경우, 최대 변위와 응답 속도의 트레이드-오프 (trade-off), 구동 전극의 낮은 장기 안정성, 고습·수중·장거리 운용 등의 극한 환경에서의 구동 성능 저하와 같은 근본적인 한계가 존재한다.

이러한 한계를 극복하는 방법으로 이중(전기·자기) 자극 기반 복합 액추에이터가 제시되고 있다[7,8]. 전기 자극은 저전력·고정밀 미세 제어를, 자기 자극은 원격·즉각적 구동과 큰 구동력을 각각 제공하므로, 두 물리 자극을 상호 보완적으로 결합하면 단일 자극 시스템 대비 더 넓은 동작 범위와 신속한 응답성을 동시에 확보할 수 있다. 특히 네오디뮴-철-붕소(NdFeB) 미세 자석 분말은 높은 잔류 자화, 뛰어난 자화 유지력 및 코팅을 통한 우수한 환경 안정성 덕분에 자성 충전재로 이상적이다[9-11]. 그 예로, 미세 분말을 탄성 고분자 매트릭스에 균질 분산시키면 고분자 및 이로 이루어진 액추에이터 내부에 영구적 자기 모멘트를 간단히 도입할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 NdFeB를 PDMS에 충전한 후, 이 복합재를 레이저 패터닝하여 스트립 단위로 기하학적 배열을 부여함으로써, 높은 분말 함량 없이도 자기 토크를 효율적으로 국소 집중시키고 전기·자기 하이브리드 구동 특성을 극대화하고자 한다. 이 구조는 스트립 간격 (Pitch) 및 배향 각도를 설계 변수로 활용해 굽힘의 크기와 방향을 프로그래밍할 수 있고, 1 V 이내의 저전압에서도 전기 구동 변위가 확보되며, 약한 외부 자계만으로도 즉각적인 원격 굽힘을 달성할 수 있다. 이를 통해 기존 방식의 한계를 보완하면서도 제작 공정의 단순성과 기계적 유연성을 저해하지 않는 새로운 설계 전략을 제시하고 있다. 이러한 특성은 차세대 생체 모사 소프트 로봇, 능동 광학 소자, 웨어러블 촉각 피드백 장치 등 광범위한 응용 분야에서 전기·자기 하이브리드 구동의 실용적 가능성을 크게 확장할 수 있을 것이다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 재료 및 기기

연구에서는 PDMS (Sylgard 184 a/b, Dow corning), NdFeB 미세 분말 (5  $\mu\text{m}$ , Henan Keer Metallurgy Material Co., Ltd), Nafion solution (D2021, DuPont™), EMIM-BF4 (>99%, IoLiTec), N,N-Dimethylacetamide anhydrous (DMAc, 99.8%, Sigma-Aldrich), Dimethyl Sulfoxide (DMSO, Sigma-Aldrich), PEDOT:PSS (Clevios PH1000, Heraeus Epurio)는 별도의 처리없이 그대로 사용하였다. 레이저 패터닝을 위한 장비로는 C30 (코리아트 정밀기계)를 활용하였으며, 자속 밀도 측정을 위하여 가우스미터(KANETEC)를 활용하였다. 전기적 액추에이터는 NI-PXI 1042Q 및 PXI-6070E 보드를 활용하여 구동 되었으며, 변위 측정을 위하여 레이저

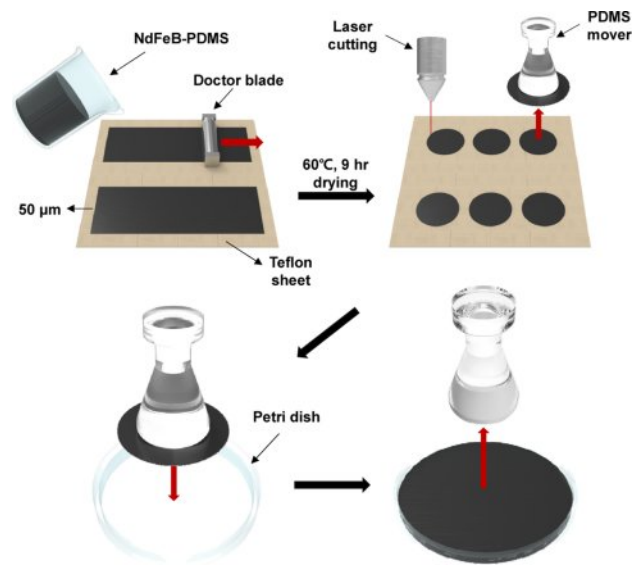


Fig. 1. Fabrication procedures of NdFeB-PDMS composite films

변위 센서인 LK-H080과 LK-G5001V (Keyence)가 활용되었다.

### 2.2 NdFeB-PDMS 복합재 필름

Fig. 1은 NdFeB 미세 분말을 포함하는 PDMS 슬러리를 이용하여 자성 필름을 제조하는 전체 공정을 네 단계로 도시하고 있다. 먼저 PDMS는 10:1 비율로 주제와 경화제를 섞어 준비시켜 놓는다. NdFeB 미세 분말을 상기 PDMS에 30 wt%로 섞고 난 후, Teflon 시트지 위에 복합 용액을 붓는다. Teflon 시트지는 NdFeB-PDMS 복합재 필름의 탈착을 용이하게 하기 위하여 사용되었다. 그 후, 닥터블레이드 기법을 활용하여 Teflon 시트지 위에 NdFeB-PDMS 복합재를 약 50  $\mu\text{m}$ 의 두께로 균일한 코팅 막을 형성한다. 단순 NdFeB-PDMS 복합 용액의 캐스팅은 반복 실험 시 균일한 두께 제어가 쉽지 않기에 본 연구에서는 균일한 두께를 갖도록 닥터블레이드 기법을 활용하였다. 두 번째 단계에서는 60°C에서 9 시간 열경화를 마친 NdFeB-PDMS 복합재 필름을 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 원형 디스크 형태로 절단한 뒤, PDMS 스탬프를 이용해 Teflon 시트지에서 들어 올린다. 그 후, 원형의 NdFeB-PDMS 복합재 필름을 Petri dish에 잘 밀착하고 정렬시킴으로써 후속 공정의 적용성을 높였다.

### 2.3 NdFeB-PDMS 복합재가 패턴된 이온성 고분자

Fig. 2는 Fig. 1에서 제조한 NdFeB-PDMS 복합재 필름을 레이저를 활용하여 스트립 형상으로 패터닝하고 Nafion 매트릭스에 매립해 복합막을 완성하는 과정을 보여 준다. 먼저 CO<sub>2</sub> 레이저가 Petri dish 내부에 밀착된 NdFeB-PDMS 복합재 필름의 표면을 패터닝하여 잘려진 부분을 트리밍함으로써 폭 2 mm, 피치 1~3 mm의 NdFeB-PDMS 스트립을 얻는다. 그 후, 이온성 고분자를 제작하기 위하여 이온성 액

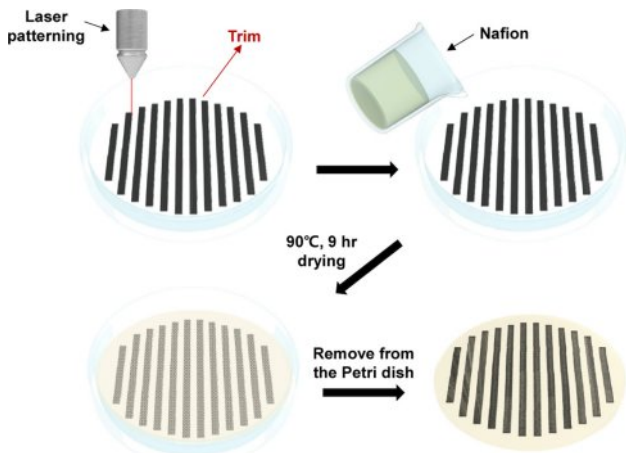


Fig. 2. NdFeB-PDMS composites-patterned ionic polymers

체가 60 wt% 함유된 Nafion 용액을 준비한다. 여기서 Nafion은 DMAc에 잘 분산하여 준비한다. 제작된 Nafion-이온성 액체 용액을 NdFeB-PDMS 스트립이 있는 Petri dish에 부어주면, Nafion-이온성 액체 용액이 모세관 현상을 통해 스트립 사이 및 스트립-Petri dish 간극을 빠르게 충전한다. 그 후, 90 °C에서 수 시간 동안 빠르게 용매를 증발시키면 투명한 Nafion-이온성 액체 고분자가 형성되면서 NdFeB-PDMS 스트립을 견고하게 고정한다. 완전 경화된 복합막은 Petri dish에서 쉽게 탈착되어 소프트 액추에이터 제작을 위한 전극 증착에 바로 사용 가능한 원형 시편이 된다.

Fig. 3은 NdFeB-PDMS 스트립이 없는 무패턴 Nafion 박막과 서로 다른 피치(1, 2, 3 mm)를 갖는 NdFeB-PDMS/Nafion 복합막의 사진을 보여주고 있다. 네 장의 원형 시편은 모두 동일한 로고 위에 놓여 로고의 가독성을 통해 광 투과율을 직관적으로 확인할 수 있도록 배치되었다. 무패턴 Nafion

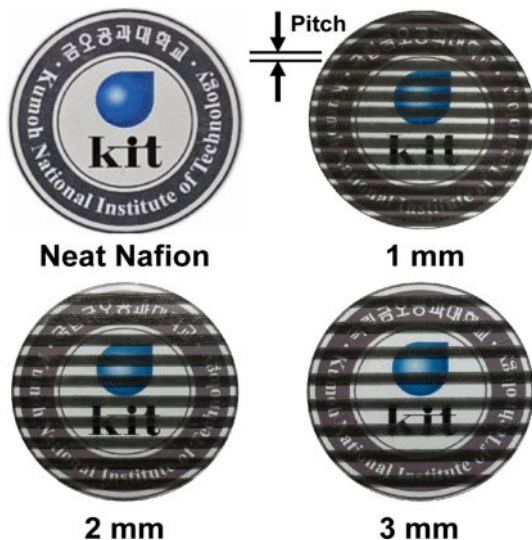


Fig. 3. Optical images of NdFeB-PDMS/Nafion films

은 거의 완전한 투명도를 보여 로고의 색상과 글자가 그대로 드러난다. 1 mm 피치 복합막에서는 NdFeB-PDMS 스트립이 촘촘히 배열되어 로고 배경이 어둡고 대비가 크게 낮아진다. 피치가 2 mm, 3 mm로 증가할수록 NdFeB-PDMS 스트립 면적 분율이 감소하여 로고가 점차 선명해지고 전반적인 투과율이 향상되었다. 또한 스트립이 일정 간격으로 균일하게 패터닝되어 있음을 한눈에 확인할 수 있어 제작 공정의 정밀성을 입증한다.

## 2.4 전기-자기 응답형 소프트 액추에이터

Fig. 4는 제작된 복합막 양면에 전도성 고분자인 PEDOT:PSS 전극을 제작하는 방법과 전기-자기 이중 응답 작동 원리를 설명한다. Fig. 4(a)에서는 피펫을 이용해 복합막 양면에 PEDOT:PSS 용액을 도포하는 과정을 그림으로 나타냈으며, 확대된 단면에는 제작된 소프트액추에이터가 총 3개의 층으로 구성되어 있음을 보여주고 있다. 양쪽 끝 단에는 전극인 PEDOT:PSS가 형성되어 있으며, 중심부에는 NdFeB-PDMS 구조가 가운데에 위치하고 있는 이온성 고분자가 있는 형태이다. 여기서 PEDOT:PSS 전극은 DMSO 도핑을 통해 수  $\Omega$ 의 낮은 표면 저항을 제공해 소프트 액추에이터의 구동 전압 손실을 최소화한다. Fig. 4(b)는 인가 자극에 따른 세 가지 상태를 묘사하고 있다: 'No field' 상태에서는 시편이 움직이지 않고, 'Electric field on' 상태에서는 양쪽 끝단의 전극에 전위차를 만들어, 이온성 고분자 내 이온들의 이동으로 인하여 소프트 액추에이터가 한쪽으로 굽힘 운동을 한다. 이어서, 'Magnetic field on' 상태에서는 외부 자석이 이온성 고분자 내 NdFeB를 끌어당김으로써 인력을 발생시켜 추가 굽힘을 유도한다. 여기서 전기 자극은  $\pm 1$  V 이하의 저전압에서 동작하게 되고, 자기 자극은 약 10 mT에서 수 백 mT 범위에서 선택적으로 적용할 수 있다. 따라서 두 자극을 독립적 혹은 조합하여 사용함으로써 더 큰 굽힘 변위나 빠른 응답 속도를 달성할 수 있을 것이다.

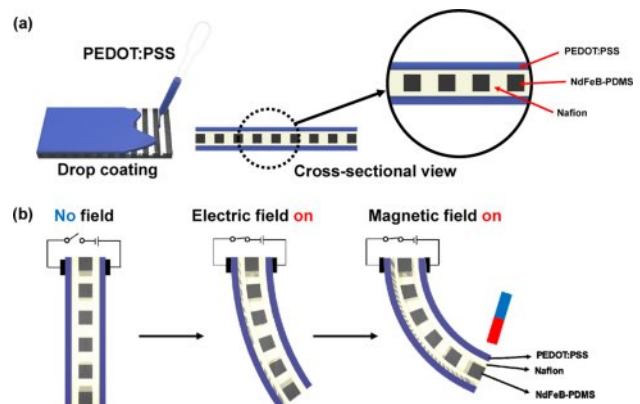


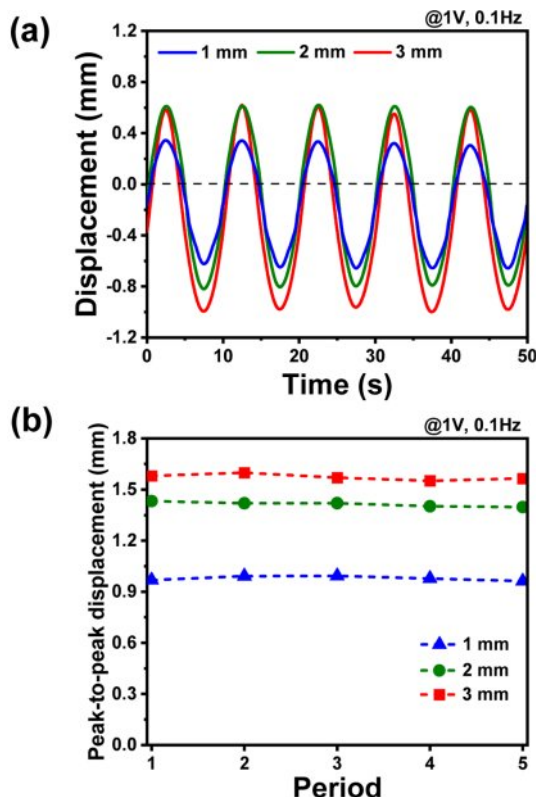
Fig. 4. (a) Fabrication of electro- and magneto-responsive soft actuators and (b) their working principle



### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 소프트 액추에이터의 전기적 구동

Fig. 5는 전기적 자극이 인가되었을 때, 서로 다른 NdFeB-PDMS 스트립 피치를 갖는 소프트 액추에이터의 구동 성능을 정량적으로 비교하고 있다. Fig. 5(a) 그래프에는  $\pm 1$  V, 0.1 Hz의 사인파를 인가했을 때 1 mm(파랑), 2 mm(초록), 3 mm(빨강) 피치를 갖는 소프트 액추에이터의 실시간 굽힘 변위가 50 초간 기록되어 있다. 제작된 모든 소프트 액추에이터는 변위의 크기 상 비대칭 거동을 하였는데, 이는 NdFeB-PDMS 스트립이 Nafion 내부에서 정중앙에 위치하지 않고 자중에 의해 제작 시 중심에서 벗어나게 위치하였기 때문임을 간접적으로 확인할 수 있다. 다만, 피치 간격에 따른 변위 크기의 경향성 및 위상 지연은 차이가 나지 않음을 확인할 수 있다. 실험 결과, 이온의 이동경로를 많이 막지 않는 3 mm 피치를 갖는 액추에이터가 가장 많이 움직였으며, 간격이 좁아질 수록 점차 그 변위의 크기가 작아졌다. 이 경향은 각 주기별 peak-to-peak 변위를 나타낸 Fig. 5(b)에서 확실히 확인할 수 있는데, 3 mm의 피치를 갖는 소프트 액추에이터는 평균 1.60 mm의 peak-to-peak 변위를 보이며, 2 mm와 1 mm 피치를 갖는 소프트 액추에이터들은 각각 1.39 mm, 0.97 mm로 약간 작은 진폭을 나타내고 있다. 전반적으로 피치가 좁을수록 소프트 액추에이터 내 NdFeB-



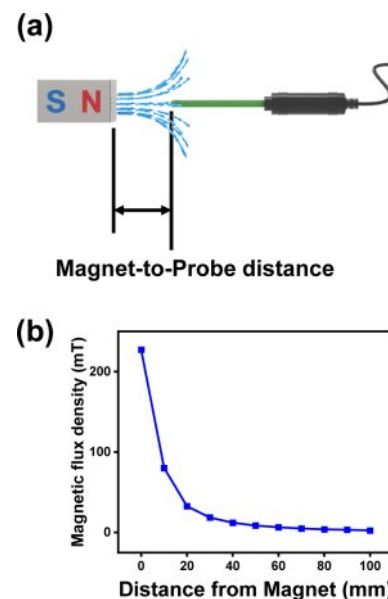
**Fig. 5.** (a) Bending and (b) peak-to-peak displacement of soft actuators under sinusoidal electrical stimulation

PDMS 스트립의 유효 면적이 커지면서 AC 전압하에서의 이온 이동을 방해하여 동일 시간 대비 굽힘 변위가 작아지는 경향을 확인할 수 있다. 강성이 높은 내부 NdFeB-PDMS 구조가 이온성 고분자 내에 존재함으로 인하여 일반적인 Nafion 기반 액추에이터보다 절대적인 변위 값이 작게 나옴을 확인하였다.

#### 3.2 소프트 액추에이터의 전자기적 복합 구동

Fig. 6은 자기장 인가를 위하여 네오디뮴 자석을 활용했을 시, 자속 밀도가 거리에 따라 어떻게 정량적으로 나타나는지를 측정하기 위한 실험 셋업과 그 결과를 제시하고 있다. 상단 도식은 N35 등급 영구자석과 Hall-probe 가우스미터를 직선상에 정렬한 레이아웃을 보여 주며, 영구자석과 프로브의 거리를 정밀하게 제어하여 외부 인가 자속 밀도를 측정하였다. 하단 그래프는 자석 표면으로부터 0-100 mm 까지 이동하며 측정한 자속 밀도를 나타낸 그래프로, 영구자석의 표면에서는 200 mT 이상의 강한 자속 밀도가 측정되지만, 10 mm의 거리에서는 약 80 mT, 50 mm 이상 떨어지면 10 mT 이하로 급격히 감소하는 지수적 감쇠 특성을 보이고 있다. 본 연구에서 실제 구동 실험에 사용된 자속 밀도 범위를 명시하고 필수적인 기준 정보를 제공하기 위하여 본 실험을 실시하였다.

Fig. 7은 전기 및 자기 자극을 순차 인가했을 때 소프트 액추에이터가 보이는 이중 응답 거동을 실험적으로 입증하고 있다. Fig. 7(a)에는 본 실험을 위하여 활용한 실험 셋업을 도시하였다. 액추에이터의 양 끝 단에는 전기적 인가를 위한 도선이 연결되어 있으며, 영구자석은 정밀하게 거리



**Fig. 6.** (a) Experimental setup used to measure magnetic flux density, (b) magnetic flux density of a used permanent Neodymium magnet

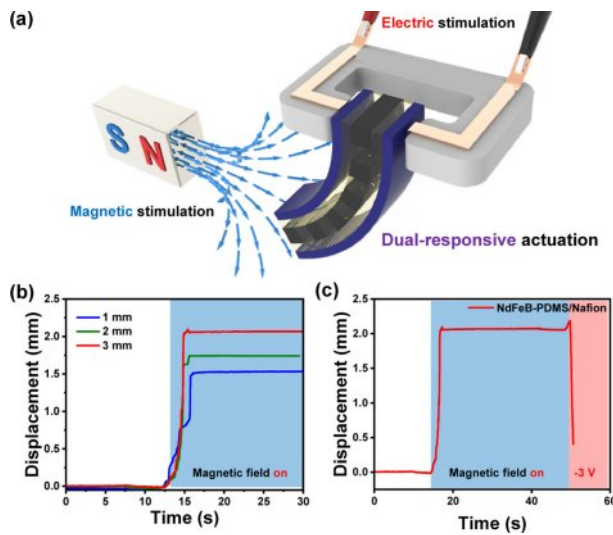


Fig. 7. Demonstration of dual-responsive actuation

를 제어하며 액추에이터에 영향을 주도록 하였다. Fig. 7(b) 그래프에는 자기장을 인가했을 시, 서로 다른 피치를 갖는 소프트 액추에이터의 시간-변위 곡선이 나타나있다. 12초에 영구자석을 각 액추에이터의 20 mm 거리에 두어 약 30 mT의 자속 밀도를 인가하자, 모든 시편이 즉각적으로 포화 변위에 도달하는 것을 볼 수 있다. 특이하게도 NdFeB 미세 분말이 상대적으로 많이 들어 있는 1 mm 피치의 액추에이터가 가장 잘 움직일 것으로 예상되었으나, 이온성 고분자의 강성 증가로 인한 변위 감소가 NdFeB 미세 분말의 양적 효과보다 더 큰 영향을 끼쳐 상대적으로 더 낮은 변위를 보이는 것을 확인하였다. 즉, 3 mm의 피치를 갖는 소프트 액추에이터가 자기장 인가 시에도 가장 높은 변위를 갖는 것을 확인하였다. Fig. 7(c)는 자기장 인가 후 전기장을 인가했을 때 3 mm의 피치를 갖는 소프트 액추에이터의 변위를 나타낸 그래프이다. 15초에 자기장을 인가하고 소프트 액추에이터가 약 2 mm의 정상 상태의 변위에 도달하게 되었을 때, 50초 시점에서 반대로 움직일 수 있도록 DC -3 V 전압을 추가로 인가하였다. 그 결과, 소프트 액추에이터가 전기장에 반응하여 반대 방향으로 움직이는 것이 확인된다. 이 결과는 NdFeB-PDMS 스트립이 제공하는 자기 토크와 Nafion-전극 시스템이 제공하는 이온 이동에 의한 구동이 독립적으로 잘 작동하여 우수한 전기-자기 굽힘 거동이 구현됨을 의미한다.

### 3.3 NdFeB-PDMS 스트립 배향 방향에 따른 구동

Fig. 8은 추가적으로 NdFeB-PDMS 스트립의 배향 각도를 조절하여 굽힘 방향을 프로그래밍하는 개념을 제시하고 구현하였다. 왼쪽의 모식도들은 0°, 30°, 45°로 NdFeB-PDMS 스트립을 배향한 복합막의 패턴을 나타내고 있으며, 오른쪽은 소프트 액추에이터가 구동할 때의 사진을 촬영하여

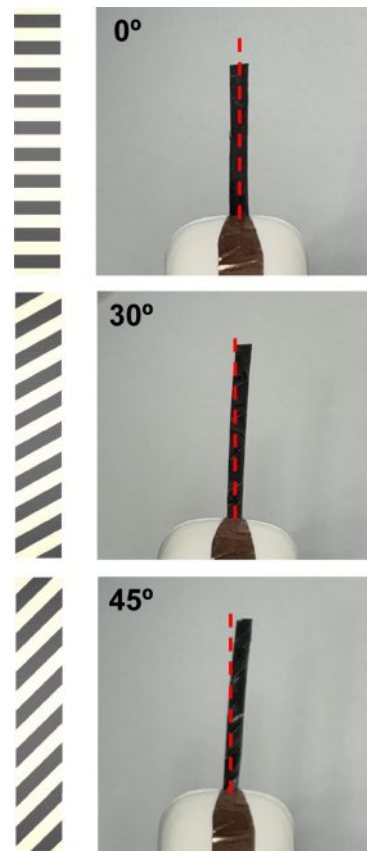


Fig. 8. Bending direction via NdFeB-PDMS strip orientation

제시하고 있다. NdFeB-PDMS 스트립이 0°로 배향되어 있는 소프트 액추에이터는 순수한 out-of-plane 굽힘을 보이나, 배향 각도가 커질수록 비틀림 거동을 하는 것을 확인할 수 있다. 특히 NdFeB-PDMS 스트립이 45°로 배향되어 있을 때는 중심선 기준으로 유의미한 측방향 편차가 나타남을 확인하였다. 즉, NdFeB-PDMS 스트립 각도를 설계 변수로 사용하면 2자유도 혹은 3자유도 복합 모션도 구현 가능하다는 가능성을 시사한다. 따라서 NdFeB-PDMS 스트립 배향은 재료 조성이나 자속 밀도 세기 변경 없이도 복합막 액추에이터의 공간 운동 경로를 손쉽게 설계할 수 있는 유효 파라미터로 작용한다.

## 4. 결 론

본 논문은 NdFeB-PDMS 복합재 스트립을 레이저 패터닝하고 Nafion-이온성 액체 고분자에 매립함으로써, 전기( $\pm 1$  V 이하)와 자기( $\sim 30$  mT) 양 자극에 모두 민감하게 응답하는 소프트 액추에이터를 제안하였다. 스트립 피치가 넓을수록 (3 mm) peak-to-peak 변위가 최대 1.60 mm로 증가하였고, 스트립 배향각 조절을 통해 굽힘-비틀림 복합 모션이 가능함을 확인하였다. 영구자석 단독 자극 시 약 2 mm의 즉각적 굽힘이 유발되었으며, 전기 자극을 연속적으로 인가하

여 변위를 신속히 반전시킴으로써 독립적·협동적 제어의 실효성을 입증하였다. 이러한 결과는 낮은 분말 함량으로도 자기 토크를 국소 집중시킬 수 있는 스트립 패터닝 전략의 우수성을 보여 주었으며, 저전압·저자기장 구동, 다자유도 설계 용이성, 제작 공정의 단순성을 동시에 확보하였다. 향후 연구에서는 NdFeB-PDMS 스트립의 3차원 자화 방향 제어 및 다중 전극 패터닝을 통하여 더 복잡한 공간 변형과 고속 응답을 달성하고자 한다. 본 연구에서 제안한 NdFeB-PDMS 복합재가 패터닝 이온성 고분자 기반 전기·자기 응답형 소프트 액추에이터는 생체 모사 로봇, 능동 광학 소자, 웨어러블 촉각 피드백 시스템 등 다양한 응용 분야에서 경량·저전력·정밀 구동 솔루션으로 활용될 것으로 기대된다.

## 후 기

이 연구는 국립금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음(2024-2026).

## REFERENCES

1. Jo, C., Pugal, D., Oh, I.K., Kim, K.J., and Asaka, K., "Recent Advances in Ionic Polymer-Metal Composite Actuators and Their Modeling and Applications," *Progress in Polymer Science*, Vol. 38, No. 7, 2013, pp. 1037-1066.
2. Jo, S.J., Kim, G.M., and Kim, J., "Recent Advances in Electric Stimulus-Responsive Soft Actuators," *Composites Research*, Vol. 37, No. 4, 2024, pp. 247-264.
3. Lu, C., Chen, W., and Zhang, X., "Highly Efficient Ionic Actuators Enabled by Sliding Ring Molecule Actuation," *Nature Communications*, Vol. 16, 2025, pp. 2480.
4. Kim, J., "High-Performance Soft Ionic Biopolymer Actuators Based on Sulfonated Chitosan-coated Electrospun Silk Membrane with Graphene Electrodes," *Advanced Composite Materials*, Vol. 33, No. 1, 2024, pp. 105-119.
5. Li, H., "Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene Based Electro-Ionic Soft Actuator with Potential for Wearable Finger Straps," *ACS Omega*, Vol. 9, No. 42, 2024, pp. 42814-42821.
6. Liu, C., and Yoshio, M., "Ionic Liquid Crystal-Polymer Composite Electromechanical Actuators: Design of Two-Dimensional Molecular Assemblies for Efficient Ion Transport and Effect of Electrodes on Actuator Performance," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 16, No. 21, 2024, pp. 27750-27760.
7. Mahato, M., Hwang, W.J., Tabassian, R., Oh, S., Nguyen, V.H., Nam, S., Kim, J.S., Yoo, H., Taseer, A.K., Lee, M.J., Zhang, H., Song, T.E., and Oh, I.K., "A Dual-Responsive Magnetoactive and Electro-Ionic Soft Actuator Derived from a Nickel-Based Metal-Organic Framework," *Advanced Materials*, Vol. 34, No. 35, 2022, pp. 2203613.
8. Shu, Q., Liao, G., Liu, S., Deng, H., Pang, H., Xu, Z., Gong, X., and Xuan, S., "An Electrothermal and Magnetic Dual-Modal Actuator toward Soft Self-Sensing Robots," *Advanced Materials Technologies*, Vol. 8, No. 14, 2023, pp. 2300019.
9. Wu, H., Luo, R., Li, Z., Tian, Y., Yuan, J., Su, B., Zhou, K., Yan, C., and Shi, Y., "Additively Manufactured Flexible Liquid Metal-Coated Self-Powered Magnetoelectric Sensors with High Design Freedom," *Advanced Materials*, Vol. 36, No. 34, 2024, pp. 2307546.
10. Dong, Z., Wang, Y., Wen, J., Li, F., Du, Q., Zhang, Y., and Zhao, X., "NdFeB/PDMS Flexible Electromagnetic Actuator with Vibration and Nonvibration Dual Modes Based on Three-Dimensional Coils," *ACS Applied Electronic Materials*, Vol. 6, No. 1, 2024, pp. 310-318.
11. Wu, T., Wang, X., Cao, X., and Wang, N., "NdFeB-based Magnetic Triboelectric Nanogenerator for Enhanced Bioenergy Harvesting and Tactile Perception," *Nano Energy*, Vol. 128, 2024, pp. 109883.