

연속체 로봇을 위한 영전자석 기반 고속 응답 가변 강성 볼-소켓 조인트

Electropermanent Magnet-Based Fast-Response and Variable Stiffness Ball-Socket Joint for Continuum Robots

이 태 림^{1,2} · 박 신 석³ · 황 동 현[†]

Taerim Lee^{1,2}, Sinsuk Park³, Donghyun Hwang[†]

Abstract: Variable stiffness mechanisms have been extensively studied to address the limitations of continuum robots that have poor stability and positioning accuracy due to their compliant structures. However, existing approaches still suffer from fundamental drawbacks, such as slow response times and the need for continuous power to maintain stiffness, which restrict stiffness performance of the robots. In this study, we propose an electropermanent magnet (EPM)-based ball-socket joint designed for fast and energy-efficient stiffness modulation in continuum robots. The designed joint is equipped with an EPM actuator that adjusts the magnetic attraction between internal components, thereby controlling the contact friction within the joint. In the experiments, the actuator's response time was measured to be less than 2 ms. Moreover, the maximum stiffness variation ratio was evaluated to be approximately 94.6. These results demonstrate that the proposed joint has great potential for enhancing the operational capabilities of continuum robots in various applications.

Keywords: Variable-Stiffness Ball-Socket Joint, Electropermanent Magnet, Continuum Robots

1. 서 론

연속체 로봇은 다중 관절 혹은 세그먼트가 연속적으로 이어진 구조를 가지며, 기존 강체 링크 기반의 로봇이 수행하기 어려운 협소 공간 내 작업에서 뛰어난 유연성과 기동성, 조작성을 갖는다. 이러한 구조적 특성을 바탕으로 연속체 로봇은 최소 침습 수술^[1]과 장비 유지보수 및 점검^[2,3] 등 좁은 경로 내 진입과 복잡한 공간 내 작업을 요구하는 다양한 분야에서 활용되어 왔다. 그러나, 실제 적용 과정에서 로봇의 유연한 구조는 외란에 취약하고 정밀한 자세 유지를 어렵게 만들었다. 이에 로봇의 작

업 정밀도를 높이고자 로봇의 강성을 능동적으로 조절할 수 있는 가변 강성 연속체 로봇이 제안되고 있다^[4]. 현재까지 제안된 연속체 로봇에 적용된 가변 강성 메커니즘은 와이어 및 공압을 이용하는 방식과 재밍(jamming), 상변화 물질을 활용하는 방식으로 나뉜다. 와이어 및 공압 기반 메커니즘은 와이어를 인장하거나 공기주머니를 팽창하여 로봇의 세그먼트 간 접촉을 유도하고, 이를 통해 형성된 락킹(locking) 혹은 마찰은 세그먼트의 움직임을 억제하여 로봇의 강성을 변화시킨다^[5]. 재밍 기반 메커니즘은 와이어와 공압으로 로봇 내부에 구성된 입자, 섬유, 층 사이의 마찰을 생성하여 강성을 제어한다^[6]. 와이어 및 공압 기반과 재밍 기반 메커니즘을 적용한 로봇은 연성 재료로 제작되어 높은 환경 적응성을 제공하지만, 공압을 사용하기 때문에 응답 속도가 느리고 실링(sealing) 품질이 성능에 영향을 미치는 단점이 있다. 특히, 재밍 기반 메커니즘은 재료 특성에 따라 성능 편차가 크고, 비선형 거동으로 인해 일반적으로 제어 정밀도가 낮다. 상변화 물질 기반 메커니즘은 열에 반응하여 고체-액체 상태 사이로 상전이 할 수 있는 형상기억고분자^[7], 저융점 합금^[8]을 활용해 로봇의 강성을 조절한다. 이 방식은 구조적 단

Received : Oct. 17. 2025; Accepted : Nov. 20. 2025

* This work was supported in part by grants from the Samsung Science and Technology Foundation (SRFC-IT2202-01) and in part by the KIST Institutional Program.

1. Graduate Student, Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, Korea (taerim@korea.ac.kr)

2. Student Researcher, KIST, Seoul, Korea (taerim@kist.re.kr)

3. Professor, Co-Corresponding author: Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, Korea (drsspark@korea.ac.kr)

† Principal Research Scientist, Corresponding author: KIST, Seoul, Korea (donghyun@kist.re.kr)



[Fig. 1] Functional prototype of the variable-stiffness ball-socket joint using electropermanent magnet actuator embedded

순성과 넓은 강성 변화 범위를 제공하지만, 열에 반응하기 때문에 응답 시간이 수 초에서 수십 초로 느리다는 한계가 있다. 이와 달리, 자기장에 반응하는 자기유변물질^[9]을 활용할 경우, 빠른 응답 속도를 제공하지만, 강성을 유지하기 위해서는 전자석에 지속적인 전력을 공급할 필요가 있어 발열 문제가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 기존 가변 강성 메커니즘의 한계를 극복하고, 향후 연속체 로봇에 적용할 수 있는 영전자석(electropermanent magnet, EPM) 기반 메커니즘을 제안한다. 영전자석은 높은 보자력을 갖는 NdFeB 자석과 낮은 보자력을 갖는 AlNiCo 자석, 코일의 조합으로 구성된다. 코일에 전류가 인가되면 AlNiCo 자석의 자화 방향은 코일이 생성한 자기장에 의해 바뀌며, 이 변화는 전류 인가가 종료된 이후에도 영구히 유지된다. 이로 인해 영전자석은 전자석보다 높은 에너지 효율을 갖는다^[10,11]. 이 원리는 자석의 크기에 상관없이 작동하므로 소형화가 가능하다. 이러한 특성을 바탕으로, 본 연구에서는 영전자석 기반의 가변 강성 볼-소켓 조인트를 제안하고, 이를 연속체 로봇 단위 세그먼트로 구현하였다. [Fig. 1]은 제안된 조인트의 기능 시작품을 보여준다. 본 시작품은 반도체 공정 장비 등 협소한 내부 공간을 갖는 다양한 산업 장비의 유지보수 자동화를 위한 가변 강성 연속체 로봇 구현을 목표로 설계되었다. 본 기능 시작품을 활용하여 제안된 메커니즘의 성능을 실험적으로 평가하였다.

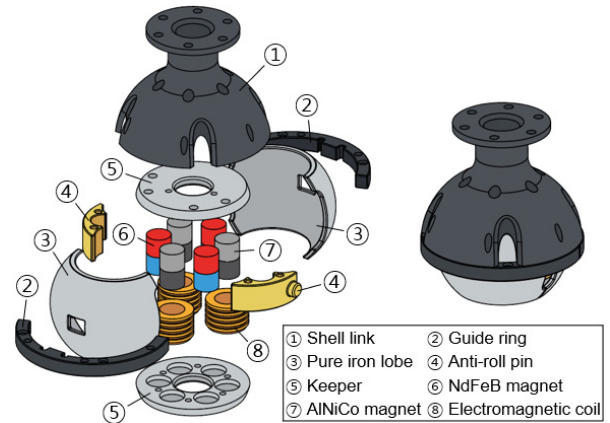
본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 영전자석 기반의 볼-소켓 조인트의 구조와 가변 강성 메커니즘의 작동 원리를 기술하고, 3절에서는 기능 시작품을 활용한 영전자석 액추에이터의 스위칭 특성과 가변 강성 조인트의 성능에 대한 실험 결과를 설명한다. 마지막으로, 4절에서는 본 연구의 결론을 서술한다.

2. 개념 및 설계

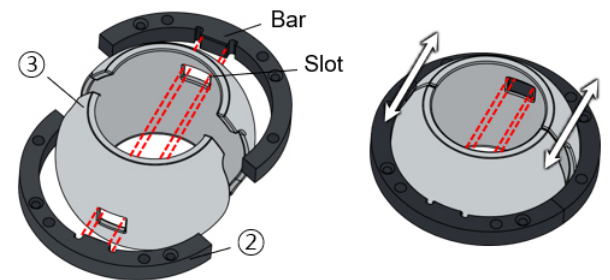
2.1 영전자석 기반 볼-소켓 조인트의 구조

[Fig. 2(a)]는 본 연구에서 제안한 영전자석 기반 가변 강성

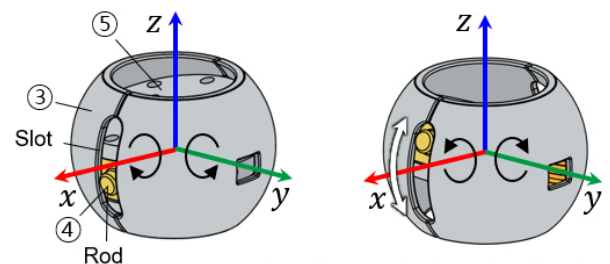
볼-소켓 조인트의 구조를 보여준다. 조인트는 세 개의 요소로 구성된다. 첫째, 조인트의 회전 운동을 출력하는 영전자석 액추에이터, 둘째, 액추에이터를 감싸고 있는 로브(lobe), 셋째, 로브를 감싸며 회전 운동을 전달하는 셸 링크(shell link)이다. 영전자석 액추에이터는 NdFeB와 AlNiCo 자석을 60도 간격의 6상 방사형 배열 구조로 교차 배치하여 구성된다. 두 자석은 축 방향으로 자화되어 있으며, 각 자석의 양단에는 순철 키퍼(keeper)가 위치해 영전자석이 생성한 자기장에 의해 형성된 자속선의 경로를 유도한다. 로브는 액추에이터 양쪽에 대칭으로 마주보게 배치되며, [Fig. 2(b)]와 같이 로브 중앙의 슬롯(slot)에 가이드 링(guide ring)으로부터 돌출된 바(bar)가 삽입되어 바의 방향으로 슬라이딩을 할 수 있도록 설계되었다. 바는 조인트의 회전 중심점을 지나 수평 방향으로 향하고 있으므로, 로브는 자기 인력에 의해 바를 따라 이동하여 볼과 접촉하고, 로브와 키퍼 간



(a) Exploded and assembled views of the joint



(b) Exploded and assembled views of the sliding mechanism



(c) Sliding mechanism-based rotational motion of the joint

[Fig. 2] Schematic diagram of the joint's structural configuration

에 형성된 마찰력으로 조인트의 회전을 구속한다. 로브는 두 개가 결합되었을 때 또 다른 슬롯을 형성한다. [Fig. 2(c)]에 나타난 바와 같이, 액추에이터에 결합된 안티-롤 핀(anti-roll pin)은 로브의 슬롯을 따라 조인트의 롤(roll) 방향 운동을 구속한다. 쉘 링크는 로브의 탈락이나 기생 운동을 방지하는 동시에 볼의 회전 운동을 다음 조인트로 전달하는 역할을 수행한다.

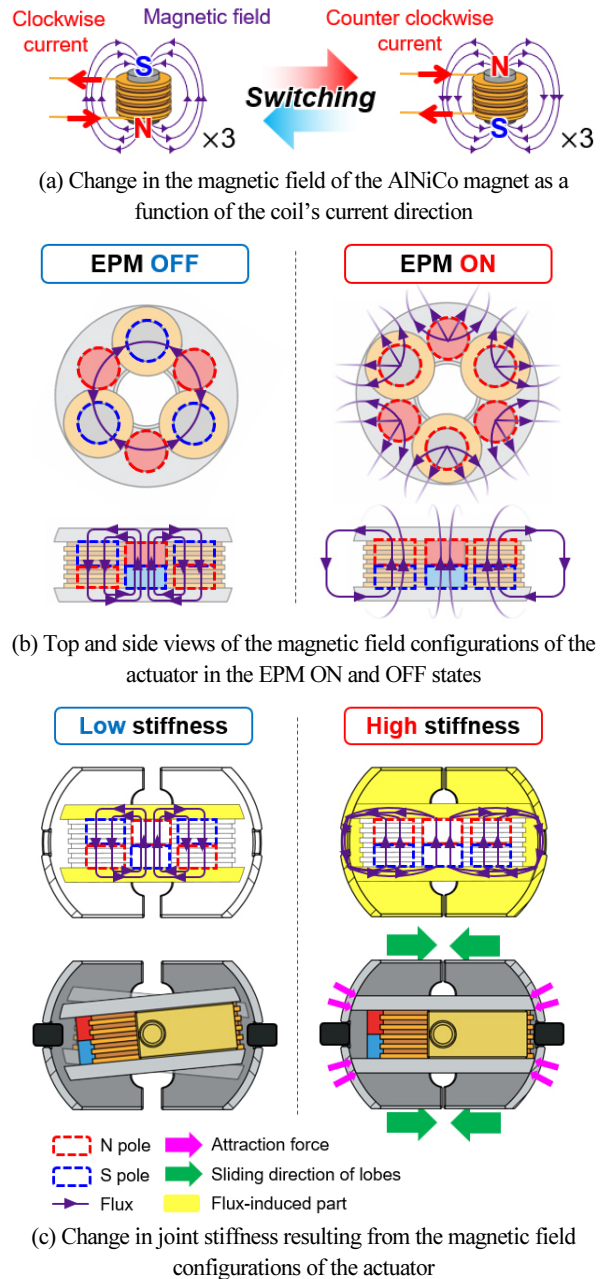
2.2 가변 강성 메커니즘의 작동 원리

제한된 조인트는 영전자석 액추에이터가 생성한 자기장을 이용해 강성을 조절할 수 있도록 설계되었다. 조인트의 강성은 영전자석 액추에이터의 두 가지 동작 상태인, ‘EPM ON’과 ‘EPM OFF’에 따라 달라진다. 먼저, 액추에이터의 상태를 전환하기 위해서는 전자석 코일에 흐르는 전류의 방향을 반대로 전환하여 AlNiCo 자석의 자화 방향을 변경하면 된다. [Fig. 3(a)]의 왼쪽 그림처럼 코일에 시계 방향 펄스(pulse)형 전류를 인가하면 AlNiCo 자석은 NdFeB 자석과 반대 방향으로 자화된다. 그러면, [Fig. 3(b)]의 왼쪽 그림과 같이 자기 선속이 내부 키퍼에서만 순환하게 되므로 액추에이터는 OFF 상태가 된다. 이때, 외부로 유출되는 자기장이 매우 작기 때문에 [Fig. 3(c)]의 왼쪽 그림처럼 로브와의 자기 인력이 거의 발생하지 않아 조인트는 자유롭게 회전할 수 있다. 반대로, [Fig. 3(a)]의 오른쪽 그림처럼 코일의 전류 방향을 반대로 인가하면 AlNiCo 자석의 자화 방향이 NdFeB 자석과 일치하게 된다. 이에 따라 [Fig. 3(b)]의 오른쪽 그림과 같이 자기 선속이 키퍼와 로브를 거쳐 페루프를 형성하는 ON 상태가 된다. 이 경우, [Fig. 3(c)]의 오른쪽 그림과 같이 강한 자기 인력이 로브에 작용하고, 로브는 중심 방향으로 슬라이딩 하여 볼과의 접촉면에서 마찰력을 생성하면서 조인트의 회전을 저지하게 된다. 자기 인력의 크기에 따라 마찰력의 크기가 달라지므로, 액추에이터가 생성한 자기장의 세기를 조절해 원하는 강성을 구현하고 영구히 유지할 수 있다.

3. 실험적 평가

3.1 액추에이터의 스위칭 특성 평가

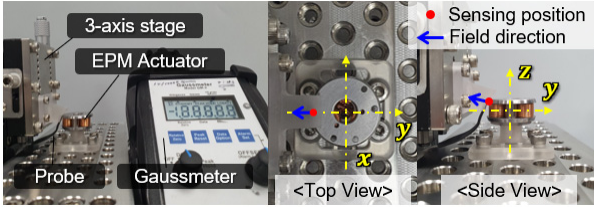
영전자석 액추에이터는 가변 강성 메커니즘의 핵심 요소로 조인트의 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서, 액추에이터의 스위칭 특성을 실험을 통해 정량적으로 평가하였다. 먼저, 액추에이터가 생성하는 자속 밀도를 다양한 전압 인가 조건에서 측정하였다. 액추에이터 [Fig. 4(a)]에 홀 프로브(Hall probe)는 키퍼 높이의 중간 지점에 해당하는 곡면 위 붉은 점으로 표시된 위치에 배치하였으며, 이 지점에서 파란 화살표와 같이 곡면의 법선 방향을 따라 자속 밀도를 측정하였다. 측정 절차는 다음과



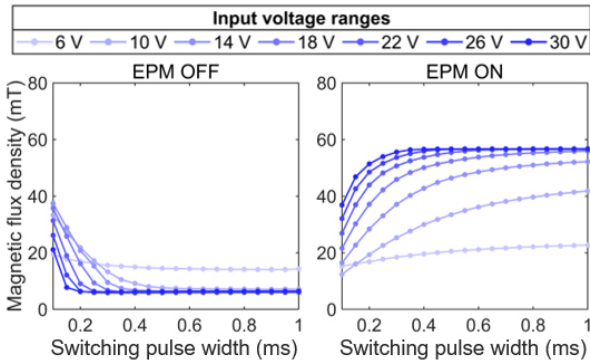
[Fig. 3] Schematic diagram of the working principle

같으며, AlNiCo 자석의 자화 방향을 전환하기 위해 필요한 전력은 전압 인가 방식을 택하였다. 초기에 액추에이터를 ON 상태로 둔 뒤, DC 전원 공급기를 이용해 전압을 일정 시간동안 인가하여 OFF 상태로 전환하고, 생성되는 자속 밀도가 안정화될 때까지 대기 후 측정하였다. 이후, 스위칭 회로를 통해 코일 내 전류의 방향을 반전시켜 OFF 상태에서 ON 상태로 전환해 동일한 방식으로 자속 밀도를 측정하였다. [Fig. 4(b)]는 다양한 입력 전압 및 스위칭 펄스 폭 조건에서 자속 밀도의 수렴 값 변화를 보여준다. 결과적으로, 두 상태에서 인가 전압이 높거나 펄스 폭이 큰 경우, 자속 밀도가 최소 혹은 최대 포화값에 도달

하였다. 반면, 인가 전압이 낮거나 펄스 폭이 작은 경우, 자속 밀도는 그보다 높거나 낮은 수준에 수렴하며 포화 값에 도달하지 못하였다. 이는 입력 조건에 따라 자기 인력의 크기를 제어할 수 있음을 시사한다.

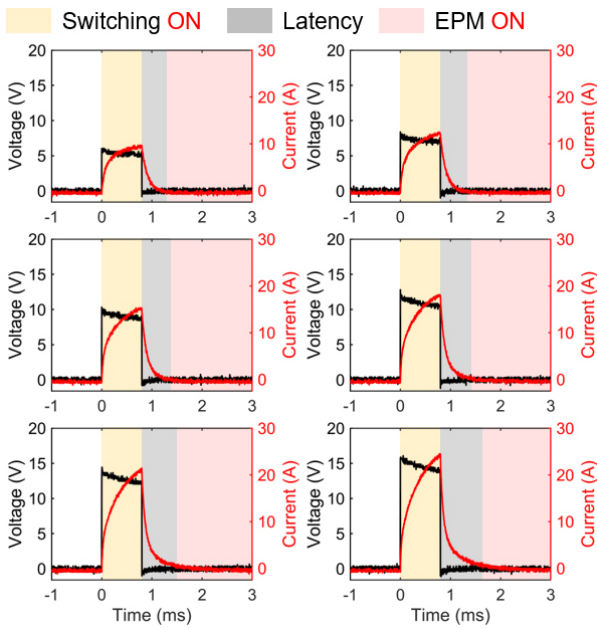


(a) Experimental setup (left), measurement position and direction of hall probe (right)



(b) Magnetic flux density change with varying switching pulses and input voltage magnitudes

[Fig. 4] Experimental characterization of the actuator

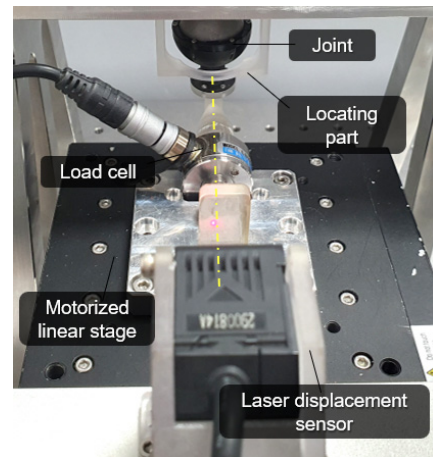


[Fig. 5] Voltage and current measurement through the coil during switchable operation, showing latency before reaching the EPM ON state

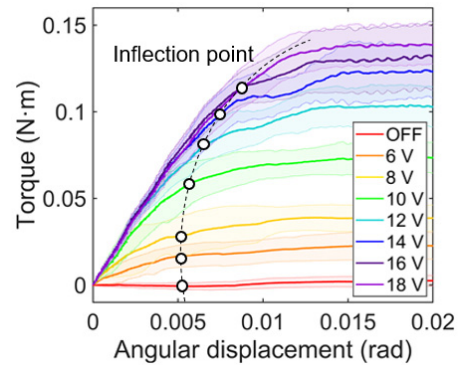
다음으로, 액추에이터가 활성화되었을 때의 상태 전환 응답 속도를 평가하였다. [Fig. 5]는 OFF 상태에서 ON 상태로 전환이 되는 과정을 전압과 전류 응답으로 보여준다. 다양한 크기의 스위칭 펄스가 0.8 ms 동안 인가되는 조건에서 전류는 피크 (peak)를 형성한 후, 인가 시간이 끝나면 지속적으로 감소한다. 이는 R-L 회로의 응답 특성을 보이며, 동시에 액추에이터가 동작 상태 전환을 끝내기까지 시간 지연이 발생함을 알 수 있다. 그래프를 보면, 6 V를 인가했을 때 전류는 약 9.4 A까지 상승 후 0.31 ms 내에 0A로 수렴하였으며, 인가 전압 18 V 조건에서는 약 24.5 A까지 도달한 후 0.99 ms 동안 지연되었다. 이처럼 높은 전압의 크기에서 코일에 더 큰 전류가 흐르며, 더 긴 지연 시간을 보인다. 그럼에도 불구하고 전체 응답 시간은 수 밀리초 이내로 고속 반응성을 입증하고 있다.

3.2 조인트의 강성 조절 성능 평가

가변 강성 조인트의 설계 개념을 검증하기 위해 기능 시작품을 제작하고, 입력 전압 크기를 달리하여 강성 측정 실험을 수행하였다. [Fig. 6(a)]는 실험 셋업을 보여준다. 조인트의 출력



(a) Experimental setup



(b) Stiffness measurement results with varying input voltages

[Fig. 6] Experimental evaluation of the joint's variable stiffness

링크가 회전할 때, 액추에이터에 의해 생성된 자기 인력의 세기에 따라 로브-키퍼 간 접촉에서 발생하는 마찰력이 회전에 저항하는 토크를 형성하게 된다. 이를 바탕으로, 선형 모터 스테이지에 연결된 로드셀이 출력 링크 말단을 밀어 일정 각도까지 회전시키는 동안 토크를 측정하였다. 이와 동시에, 레이저 변위 센서를 이용하여 조인트의 각 변위를 측정하였다. 초기에 조인트는 수직으로 정렬되었으며, 모터 스테이지는 수평 방향으로 1 mm/s의 속도로 구동되었다. [Fig. 6(b)]는 EPM OFF 상태와 6 V에서 18 V까지 범위의 입력 전압 조건에서 EPM ON 상태에서 측정된 토크-각 변위 관계를 나타낸다. 입력 조건은 앞서 수행한 스위칭 특성 분석 실험의 결과([Fig. 4(b)] 참조)를 기반으로 설정되었으며, 스위칭 펄스 폭은 0.8 ms로 고정하였다. 결과 그래프에서 볼 수 있듯이, 토크는 변곡점(inflexion point)을 기점으로 두 가지 패턴을 보이고 있다. 변곡점 이전에 토크는 각 변위에 비례하여 증가하였지만, 변곡점 이후로 기울기가 감소하며 일정한 값을 유지하는 것으로 관찰되었다. 이는 조인트 내 마찰 접촉이 정지 마찰 상태에서 슬라이딩 마찰로 전환되면서 토크가 일정 수준으로 유지되기 때문이다. 이와 같은 특징을 바탕으로, 변곡점 이전의 기울기를 강성으로 정의하여 정량화하였다. 그 결과는 [Table 1]에 정리하였다. 강성은 인가 전압의 크기가 커질수록 증가하는 경향을 보였으나, 그 증가율은 점차 감소하였다. 16 V에서 측정된 강성은 약 0.23 N·m/rad이었으며, 18 V에서 강성은 약 0.20 N·m/rad로 인가 전압 14 V 조건 대비 증가율은 13% 감소하였다. 이는 [Fig. 4(b)]에서 확인된 바 같이, 16 V 이상의 전압 조건에서는 액추에이터의 자속 밀도가 최대 수렴 값에 근접했기 때문이다. 결과적으로, EPM OFF 상태 대비 ON 상태에서 최대 94.6 배 강성 증가를 보여주었다. 이는 제안된 조인트가 전기적 제어만으로 강성이 제어될 수 있음을 보여준다. 향후 제안된 조인트를 가변 강성 연속체 로봇에 적용하여, 본 연구에서 도출된 실험 결과가 실제 연속체 로봇이 외란에 대한 자세 유지 강건성 측면에서 어떠한 영향을 미치는지를 정량적으로 평가할 계획이다.

[Table 1] Experimental results of the joint's variable stiffness under varying input voltages

Mode	Input voltage (V)	Stiffness (N·m/rad)
ON	6	0.0523
	8	0.0901
	10	0.1793
	12	0.1994
	14	0.2191
	16	0.2270
OFF	18	0.2044
	18	0.0024

4. 결론

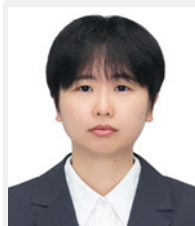
본 논문에서는 영전자석을 기반으로 한 가변 강성 볼-소켓 조인트를 설계하고, 이를 실제 시작품으로 제작하여 그 성능을 실험적으로 평가하였다. 제안된 조인트는 펄스형 전압 입력을 통해 액추에이터의 자기장을 제어함으로써, 로브와 키퍼 간 마찰력의 크기를 조절할 수 있으며, 이를 통해 조인트 출력단의 강성을 능동적으로 조절할 수 있다. 영전자석 스위칭 특성에 대한 실험에서 인가 전압의 크기와 펄스 폭에 따라 자속 밀도 제어가 가능하고 EPM OFF에서 EPM ON으로 전환하는 데에 필요한 시간은 2 ms 이내로 빠른 응답 속도를 보여주었다. 조인트의 강성 변화 평가 실험에서는 출력단의 회전 각도에 따라 발생하는 토크를 측정하고 이를 바탕으로 인가 전압 크기에 따른 강성 변화를 정량화 하였다. 실험 결과, 입력 전압이 증가함에 따라 강성이 비례적으로 증가하였으며, OFF 상태 대비 최대 94.6 배의 강성 변화율을 달성하였다. 이는 제안된 조인트의 적용을 통해 기존 가변 강성 연속체 로봇 관련 선행 연구 대비 큰 강성 변화 범위를 갖는 연속체 로봇이 구현될 수 있음을 보여준다.

제안된 조인트는 소형 볼-소켓 구주로 빠른 응답성과 큰 강성 변화 범위를 동시에 달성할 수 있음을 보여주었다. 향후 연구에서는 구현된 조인트를 활용하여 가변 강성 연속체 로봇을 개발하고, 강성 제어가 포함된 연속체 로봇 자세 통합 제어 시스템을 구현할 예정이며, 나아가 가변 강성 특성 기반 협소 공간 내 작업 성능 향상을 위한 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] R. E. Goldman, A. Bajo, L. S. MacLachlan, R. Pickens, S. D. Herrell, and N. Simaan, "Design and performance evaluation of a minimally invasive telerobotic platform for transurethral surveillance and intervention," *IEEE transactions on biomedical engineering*, vol. 60, no. 4, pp. 918-925, 2012, DOI: 10.1109/TBME.2012.2226031.
- [2] X. Dong, D. Palmer, D. Axinte, and J. Kell, "In-situ repair/maintenance with a continuum robotic machine tool in confined space," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 38, pp. 313-318, 2019, DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.01.024.
- [3] X. Dong, M. Wang, A. Mohammad, W. Ba, M. Russo, A. Norton, J. Kell, and D. Axinte, "Continuum robots collaborate for safe manipulation of high-temperature flame to enable repairs in challenging environments," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 27, no. 5, pp. 4217-4220, 2022, DOI: 10.1109/TMECH.2021.3138222.
- [4] Y. Fan, B. Yi, and D. Liu, "An overview of stiffening approaches for continuum robots," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 90, p. 102811, 2024, DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102811.

- [5] D. Shen, Q. Zhang, Y. Han, C. Tu, and X. Wang, "Design and development of a continuum robot with switching-stiffness," *Soft Robotics*, vol. 10, no. 5, pp. 1015-1027, 2023, DOI: 10.1089/soro.2022.0179.
- [6] Y. Fan, D. Liu, and L. Ye, "A novel continuum robot with stiffness variation capability using layer jamming: Design, modeling, and validation," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 130253-130263, 2022, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3228775.
- [7] S. Frieler, S. Misra, and V. K. Venkiteswaran, "Selectively tunable joints with variable stiffness for a magnetically-steerable 6-DOF manipulator," *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, vol. 6, no. 4, pp. 1713-1725, 2024, DOI: 10.1109/TMRB.2024.3464668.
- [8] L. Mao, P. Wang, C. Tian, X. Shen, F. Wang, H. Zhang, X. Meng, and H. Xie, "Magnetic steering continuum robot for transluminal procedures with programmable shape and functionalities," *Nature communications*, vol. 15, no. 1, p. 3759, 2024, DOI: 10.1038/s41467-024-48058-x.
- [9] S. Kitano, T. Komatsuzaki, I. Suzuki, M. Nogawa, H. Naito, and S. Tanaka, "Development of a rigidity tunable flexible joint using magneto-rheological compounds—Toward a multijoint manipulator for laparoscopic surgery," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 7, p. 59, 2020, DOI: 10.3389/frobt.2020.00059.
- [10] P. Kriengkamol, K. Kamiyama, M. Kojima, M. Horade, Y. Mae, and T. Arai, "A new close-loop control method for an inspection robot equipped with electropermanent-magnets," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 28, no. 2, pp. 185-193, 2016, DOI: 10.20965/jrm.2016.p0185.
- [11] A. M. Moran, V. T. Vo, K. J. McDonald, P. Sultania, E. Langenbrunner, J.H.V. Chong, A. Naik, L. Kinnicutt, J. Li, and T. Ranzani, "An electropermanent magnet valve for the onboard control of multi-degree of freedom pneumatic soft robots," *Communications Engineering*, vol. 3, no. 1, p. 117, 2024, DOI: 10.1038/s44172-024-00251-y.



이 태 림

2020 숙명여자대학교 기계시스템학부(학사)
2024~현재 고려대학교 기계공학과(석사)

관심분야: Continuum robot, Mechanism design



박 신 석

1999 MIT 기계공학과(박사)
2000 Nissan 자동차 방문연구원
2002 Harvard 대학교 Postdoc
2004 Keio 대학교 방문 교수
2011 Harvard 의대 방문 교수
2004~현재 고려대학교 기계공학부 교수

관심분야: Robot Manipulator, Haptics/Force Feedback, Augmented Reality, Human-Machine Interface, Human-Human Interface, EMG - FES System



황 동 현

2008 아주대학교 기계공학과(학사)
2010 아주대학교 기계공학과(석사)
2014 도쿄대학 정밀공학과(박사)
2014~2015 KIST Postdoc
2015~2021 KIST 연구원 · 선임연구원
2021~현재 KIST 책임연구원

관심분야: Smart Actuator, Tactile/Kinesthetic Sensor, Precision System, Multi-fingered Robotic Hand, Haptic Interface, Autonomous Manipulation