

# 케이블 다발 파지 및 이송을 위한 롤러 기반 형상적응형 가변강성 소프트 그리퍼

## Roller-Based Shape-Adaptive Variable-Stiffness Soft Gripper for Grasping and Transferring Cable Bundles

김민준<sup>1,2</sup> · 이재영<sup>1</sup> · 장재혁<sup>1</sup> · 김휘수<sup>1</sup> · 김문유<sup>1</sup> · 박동일<sup>1</sup> · 조성진<sup>3</sup> · 송성혁<sup>†</sup>  
Min-Jun Kim<sup>1,2</sup>, Jae-Young Lee<sup>1</sup>, Jae Hyuck Jang<sup>1</sup>, Hwi-Su Kim<sup>1</sup>, Munyu Kim<sup>1</sup>,  
Dong Il Park<sup>1</sup>, Seong Jin Cho<sup>3</sup>, Sung-Hyuk Song<sup>†</sup>

**Abstract:** Flexible cable bundles pose a significant challenge in automated handling due to their irregular geometry and deformable nature. To address this, we propose a novel soft gripper that incorporates a roller-based structure with variable stiffness and shape adaptability. The gripper uses a vacuum-controlled particle-jamming mechanism, allowing it to conform gently to various cable shapes during initial contact and subsequently increase stiffness for secure grasping. In addition, its integrated rolling function enables smooth and controlled transfer of gripped cables without damage. Experimental validation demonstrates reliable grasping performance across cable bundles of different sizes and shapes, confirming that the proposed system can operate effectively without relying on complex visual sensing.

**Keywords:** Flexible Cable, Soft Gripper, Variable-Stiffness, Shape-Adaptation, Automated Handling

### 1. 서론

와이어링 하네스는 전기 및 전자 시스템에서 전력과 데이터를 각 부품에 전달하는 필수 요소로<sup>[1]</sup>, 자동차<sup>[2]</sup>, 항공기<sup>[3]</sup>, 철도<sup>[4]</sup>, 산업기계 등 다양한 분야에서 그 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 최근 전기차<sup>[5]</sup>, 자율주행 시스템<sup>[6]</sup>, 스마트 기기 등 고도화된 기술이 발전함에 따라 와이어링 하네스의 복잡도<sup>[7]</sup> 역시 크게 증가하고 있다. 구성 요소의 수, 길이, 굵기 등이 다양해지면서 제조 및 조립 공정 역시 더욱 복잡하고 정밀한 작업이 요구된다.

그러나 현재 대부분의 하네스 조립 공정은 여전히 수작업에 의존하고 있으며<sup>[8]</sup>, 이에 따라 많은 인적 자원이 필요하고 생산성, 품질, 비용 측면에서 한계를 드러내고 있다. 이를 해결하기 위해 케이블의 파지, 이송, 정렬 등의 기능을 포함하는 자동화 시스템 개발이 필수적이며, 이를 가능하게 하는 핵심 기술 중 하나는 유연하고 비정형적인 케이블을 안정적으로 조작할 수 있는 로봇 그리퍼 기술이다.

와이어링 하네스는 복잡한 구조, 다양한 커넥터 형상, 높은 유연성으로 인해 일반적인 병렬 그리퍼나 고정형 구조로는 정밀한 조작이 어렵고<sup>[9]</sup>, 다수의 센서나 고도화된 제어 기술이 요구된다<sup>[10]</sup>. 이에 따라 최근 케이블 조작을 위한 특수 목적의 그리퍼가 제안됐다<sup>[11]</sup>.

케이블의 파지 상태 정보를 이용하는 방식으로는, 케이블의 접촉 상태 및 위치 정보를 실시간으로 인식하고 조작할 수 있는 그리퍼가 제안된 바 있다<sup>[12]</sup>. 이 시스템은 삼입이나 정렬과 같은 정밀 작업에 유리하지만, 고해상도 센서 기반 제어의 복잡성과 높은 비용은 실제 산업 적용에 있어 주요한 제한 요소로 작용한다.

또한, 케이블 구동 연속 매니플레이터의 운동학 및 동역학 분석을 이용하여 연속 체형 소프트 그리퍼를 설계함으로써, 복

Received : May. 30. 2025; Accepted : Jun. 25. 2025

※ This work was supported by the Industrial Strategic Technology Development Program (RS-2024-00416852) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

1. Researcher, Advanced Robotics Research Center, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM), Daejeon, Korea (kmj990727, leeji, jjh1266, hskim81, mykim, parkstar@kimm.re.kr)

2. MS Student, Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea (kmj990727@kimm.re.kr)

3. Professor, Co-Corresponding author: Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea (scho@cnu.ac.kr)

† Associate Professor, Corresponding author: Department of Mechanical, Robotics, and Energy Engineering, Dongguk University, Seoul, Korea (shsong@dgu.ac.kr)

잡한 공간 내에서도 유연하게 케이블을 조작했다<sup>[13]</sup>. 연속체 구조는 유연성과 적응성 측면에서 강점을 가지지만, 구조의 비선형성과 제어의 복잡성으로 인해 고정밀 반복 작업에는 한계가 존재한다.

실질적인 조립 환경을 고려한 연구로는, 케이블이 회전, 슬라이딩, 정렬하는 등의 다양한 방식으로 조작할 수 있는 인핸드(In-hand)조작 기능 통합형 그리퍼가 제안된 바 있다<sup>[14]</sup>. 이 시스템은 다기능성을 통해 복잡한 조립 작업에 대응할 가능성을 보여주었으나, 작업 대상의 형상 변화나 외란에 대한 실시간 대응 능력이 부족하며, 파지 대상의 위치 오차나 케이블의 비정형성에 대한 유연한 대응 측면에서 한계를 보였다. 이에 따라 다양한 상황에서의 적응성과 복원력을 고려한 설계가 요구된다.

최근에는 조작 대상이나 상황에 따라 파지 강성을 능동적으로 변화시킬 수 있는 가변강성 그리퍼 기술에 대한 관심이 높아지고 있다<sup>[15-17]</sup>. 예를 들어, 공압 기반으로 강성을 조절할 수 있는 소프트 그리퍼가 개발된 바 있으며<sup>[18]</sup>, 입자 재밍(Particle Jamming)<sup>[19]</sup>, 자기유변유체(MRF)<sup>[20]</sup>, 형상기억합금(SMA)<sup>[21]</sup> 등 다양한 가변강성 기술의 설계 및 구현가능성이 제시 됐다<sup>[22]</sup>. 이들 기술은 높은 적응성을 제공한다는 점에서 유리하지만, 응답 속도의 지연이나 제어 정밀도의 한계가 존재한다.

이처럼 기존의 그리퍼 기술은 유연성, 정밀성, 적응성 중 일부 요소를 충족하더라도, 실제 산업 환경에서 이들을 통합적으로 구현한 안정적인 자동화 시스템은 아직 충분히 제안되지 않았다. 특히 다양한 굵기와 형상을 가진 케이블을 안정적으로 파지하고, 삽입·정렬·이송 작업을 정밀하게 수행하며, 위치 오차와 외란에 대응 할 수 있는 통합형 그리퍼 기술이 요구된다.

이에 본 연구에서는 케이블 다발을 안정적으로 파지하고, 다양한 조작 작업을 수행할 수 있는 새로운 형태의 그리퍼를 제안한다. 본 그리퍼는 반복성과 유연성을 고려하여 설계되었으며, 이를 통해 케이블 자동 조립 공정의 정밀도와 작업 효율 향상을 목표로 한다.

제안하는 그리퍼는 파지, 이송, 배치 등의 복합 작업을 수행할 수 있도록 설계되었으며, 내부에는 입자 기반의 가변강성 구조를 적용하여 케이블 형상에 적응할 수 있는 유연한 파지 기능을 갖추었다. 진공을 통해 입자간 마찰을 조절함으로써 구조의 강성을 실시간으로 변화시킬 수 있으며, 이를 통해 다양한 형태의 와이어링 하네스를 안정적으로 파지하고 조작할 수 있다.

또한, 브레이크 메커니즘을 통해 그리퍼의 회전 상태를 제어할 수 있도록 했으며, 필요 시 회전을 허용하거나 고정하여 드리블링 동작이 가능하도록 했다. 이를 통해 케이블의 위치를 정밀하게 조정하며 이송 및 배치 과정을 효과적으로 수행할 수 있다. 제안된 그리퍼는 와이어링 하네스 조립 자동화 공정에 있어 핵심 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

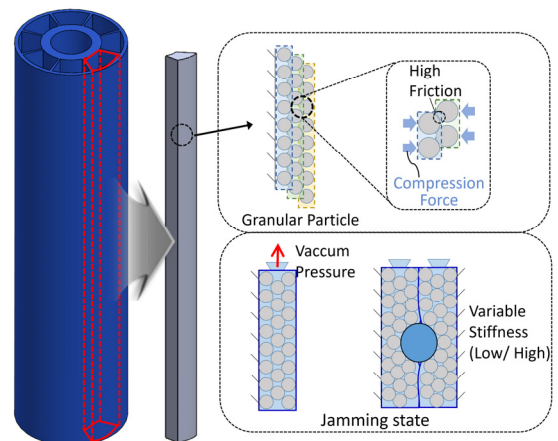
## 2. 본 론

### 2.1 가변강성 메커니즘

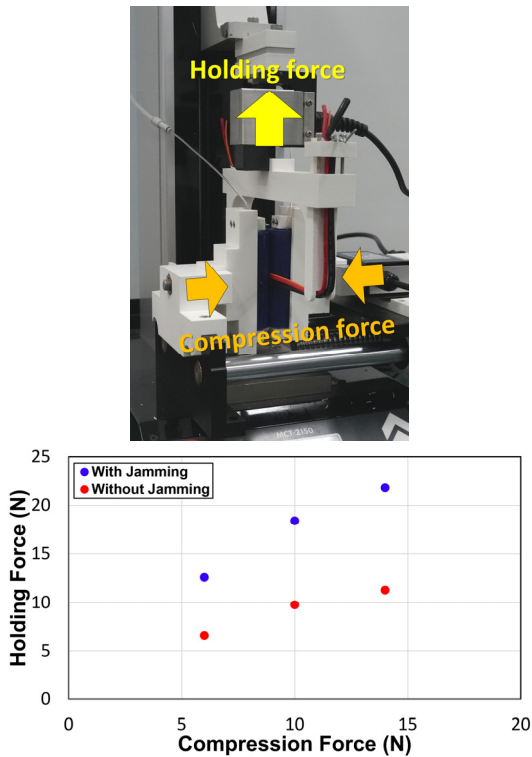
본 연구에서는 입자 재밍(Particle Jamming)기반의 가변강성 메커니즘을 제안한다. [Fig. 1]과 같이, 원통형 구조 내부에 채워진 다수의 입자들은 재밍이 가해지지 않은 상태에서는 느슨하게 분포되어 구조 전체가 유연하게 저강성을 유지한다. 이 상태에서 물체를 파지하면, 입자들은 물체의 표면 형상에 따라 쉽게 변형되어 밀착할 수 있다. 이후 진공을 통해 재밍이 유도되면, 구조 내부에 압축력이 형성되고 입자간 마찰이 증가함에 따라 고강성 상태로 전환되면서 파지한 물체를 단단하게 고정하거나 안정적으로 지지할 수 있다.

와이어링 하네스 또는 케이블 다발을 현장에서 조작 할 때, 그리퍼가 항상 이상적인 자세나 정중앙에서 파지되는 것이 어렵다. 실제 작업자는 양손을 사용하여 케이블을 끼워 넣거나 잡아 당기는 등 다양한 동작을 수행하게 되며, 이러한 복잡한 조작 상황을 고려한 설계가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 현실적인 작업 조건을 반영하기 위해 두 가지 실험 조건을 설정했다. [Fig. 2]는 가변강성 그리퍼의 재밍 상태 및 비재밍 상태에서의 파지력(Holding Force)을 측정하여 케이블의 양쪽이 고정된 상태에서 이루어지는 작업 상황을 가정한 실험이다. 이 조건 하에서, 실험은 인장시험기를 이용하여 케이블 다발을 수직방향으로 당기며, 그리퍼가 케이블을 어느 정도의 힘으로 고정할 수 있는지를 평가했다.

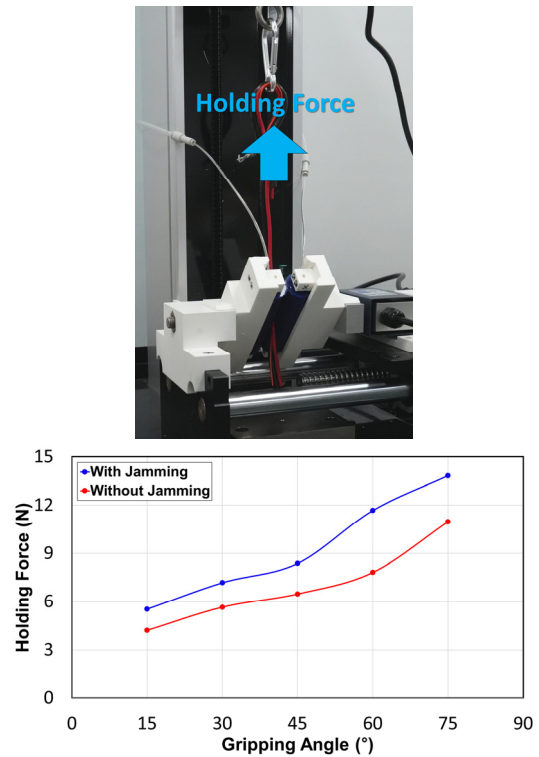
압축력(Compression Force)이 동일한 조건에서, 재밍 상태의 그리퍼는 비재밍 상태 대비 약 1.8배에서 1.9배 높은 파지력을 나타냈다. 이는 재밍 작용에 따라 내부 입자들이 밀집되며 마찰이 증가하여, 외부 하중에도 흔들림 없이 물체를 안정적으로 고정할 수 있음을 보여준다. 이러한 결과는 실제 배선 작업



[Fig. 1] Compression force depending on the presence of jamming



[Fig. 2] Compression force measurement of the variable stiffness gripper in jamming and non-jamming states under a fixed cable-end condition using a tensile testing machine



[Fig. 3] Holding force measurement of the gripper at various contact angles (15°, 30°, 45°, 60°, 75°), simulating oblique cable orientations during manipulation

환경에서 케이블이 미끄러지거나 불안정하게 움직이는 문제를 효과적으로 제어할 수 있음을 확인했다.

[Fig. 3]은 작업중 케이블이 기울어지거나, 그리퍼가 비정상적인 자세로 사선 방향에서 접촉하는 상황을 가정했다. 이를 위해 한쪽을 인장시험기에 고정하고 다른 한쪽을 조작하는 조건에서, 다양한 접촉각도(15°, 30°, 45°, 60°, 75°)에서 그리퍼가 케이블을 파지한 상태로 파지력(Holding Force)을 측정했다.

본 실험에서는 다양한 굵기의 케이블 다발을 사용했으며, 저강성 상태에서 물체 표면에 밀착한 뒤 재밍을 적용하여 재밍 및 비재밍 상태 간의 파지력을 비교했다. 재밍 상태에서의 파지력이 평균적으로 1.3배에서 1.4배 더 높게 나타났는데, 이는 재밍 기술이 다양한 접촉 각도 및 비정형 파지 자세에서도 높은 적응성과 파지력을 제공할 수 있음을 보여준다.

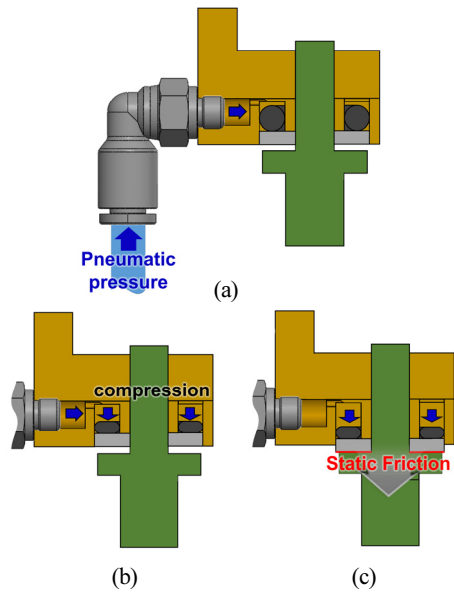
## 2.2 브레이크 메커니즘

본 연구에서는 단순한 브레이크 ON/OFF 제어 시스템뿐만 아니라, 작업 상황에 맞추어 실시간으로 제어 강도를 조절할 수 있는 브레이크 메커니즘을 적용하였다. 이를 통해 그리퍼의 회전을 능동적으로 억제하거나 허용함으로써, 보다 정밀하고 안정적인 케이블 조작이 가능하도록 하였다.

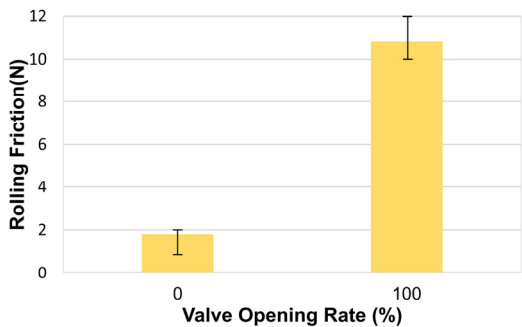
제한된 브레이크 메커니즘은 공압 기반의 능동 브레이크 방식으로 [Fig. 4]와 같은 순서를 통해 작동된다. 외부 공기 공급 장치와 연결된 공압 튜브를 통해 공기가 그리퍼 본체 내부로 주입되며, 그리퍼 내부에는 수직 방향으로 배치된 O-링이 존재한다. 공기가 주입되어 내부 압력이 증가했을 때 압력에 의해 O-링이 아래쪽으로 압축되면, O-링 하부에 위치한 브레이크 패드가 회전축에 밀착되면서 마찰력을 형성하고, 그리퍼의 회전이 제어될 수 있도록 하였다.

브레이크 패드 메커니즘은 회전축과의 마찰을 통해 수동 브레이크 역할을 수행하며, 별도의 복잡한 기구 없이 공기압만으로 작동할 수 있어 구조가 단순하고 안정적이다. 본 구조는 단순성과 신뢰성을 동시에 확보할 수 있어, 다양한 작업 환경에서 그리퍼의 자세 안정성과 정밀한 회전 제어 성능이 향상된다.

공압 기반 브레이크 메커니즘의 성능을 정량적으로 평가하기 위해, 밸브 개폐율에 따른 최대 구름 마찰(Rolling Friction)을 측정하는 실험을 수행했다. 실험에서는 밸브의 개폐율을 두 가지 조건으로 설정했다. 밸브는 개폐율이 0%인 완전차단 모드와 개폐율이 100%인 완전개방 모드로 설정하여, 두 가지 조건에 대한 성능 비교를 진행했다. 밸브의 개폐율은 공기 유입량을 조절하는 밸브의 개방 정도를 의미하며, 그에 따라 그리퍼 내부 압력이 변화하고 O-링과 브레이크 패드가 회전축에 작용하는 마찰력도 달라지게 된다.



[Fig. 4] Pneumatic-based passive brake mechanism. (a) Compressed air is supplied from an external source into the brake mechanism. (b) The incoming pneumatic pressure compresses the O-ring, which in turn presses the brake pad. (c) The brake pad contacts the rotating part, generating static friction to halt motion



[Fig. 5] Brake performance testing apparatus and maximum load evaluation

브레이크 성능 측정 실험은 다음과 같이 구성되었다. 그리퍼 파지부 사이에 와이어 다발을 배치하고, 와이어 다발의 말단에는 하중을 부가했다. 이후 점진적으로 하중을 증가시켜, 그리퍼가 더 이상 마찰력을 유지하지 못하고 회전이 발생하는 시점의 최대 하중을 측정했다. 이 최대 하중은 브레이크 메커니즘이 생성할 수 있는 구름 마찰의 정량적 지표로 활용되었다.

[Fig. 5]의 결과에서 확인할 수 있듯이, 밸브 개폐율이 완전차단 모드일 경우 약 1.8N의 기본 마찰력이 측정되었다. 반면, 완전 개방 모드에서는 내부 압력이 증가함에 따라 브레이크 패드와 회전축 간의 마찰력이 상승하여 최대 10.8N의 구름 마찰이 발생했다.

이를 통해 공압 제어만으로 구름 마찰을 약 6배 증가시킬 수 있음을 확인했다. 본 메커니즘은 실제 케이블 작업 환경에서 그리퍼의 불필요한 회전을 억제하고, 작업 안정성과 조작 정밀도를 크게 향상시킬 수 있는 가능성을 보여준다.

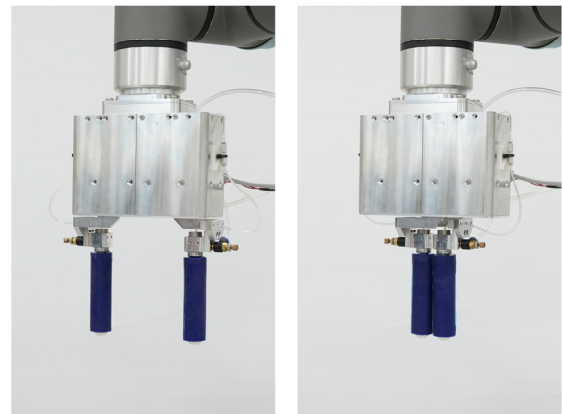
### 2.3 메커니즘의 결합

본 연구에서는 와이어링 하네스와 같은 유연한 물체를 안정적이고 정밀하게 조작하기 위해, 가변강성 메커니즘과 공압 기반 브레이크 메커니즘을 결합한 소프트 그리퍼를 제안한다. 이 통합 설계는 복잡한 환경에서 비정형적인 와이어링 하네스 조작에 대해 높은 적응성과 제어 정밀도를 동시에 확보할 수 있도록 설계되었다[Fig. 6].

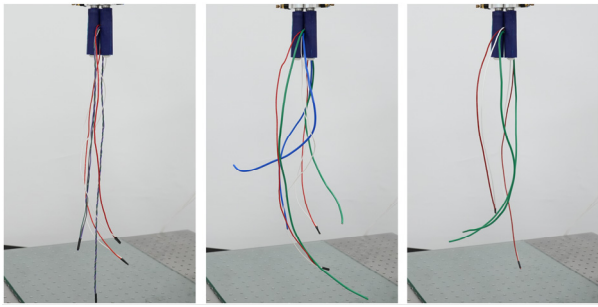
그리퍼 파지부에는 입자 재밍 기반의 가변강성 구조가 적용되어 있다. 초기 상태에서는 저강성을 유지하며, 파지 대상의 표면 형상에 유연하게 적응할 수 있도록 한다. 이후 진공 압력에 의해 재밍이 활성화 되면 내부 입자 간의 마찰이 급격히 증가하여 구조물이 고강성으로 전환된다. 이를 통해 대상 물체를 안정적으로 고정할 수 있으며, 작업 중에도 흔들림 없이 지지하는 것이 가능하다.

한편, 실제 작업 환경에서는 그리퍼가 단순히 물체를 잡는 것만으로는 충분하지 않으며, 대상의 초기 위치가 일정하지 않기 때문에 그리퍼 자체의 회전 동작 제어도 중요한 요소로 작용한다. 이를 고려하여, 그리퍼의 회전부에 공압식 브레이크 메커니즘을 적용했다. 이 메커니즘은 그리퍼 본체 내부에 배치된 O-링과 브레이크 패드를 기반으로 작동하며, 외부에서 공기가 유입되면 압력 상승에 따라 O-링이 하강하면서 브레이크 패드가 회전축에 밀착하게 된다. 이로써 회전축과 브레이크 패드 간의 마찰력이 증가하고, 그리퍼의 회전이 고정된다.

두 메커니즘은 상호 보완적으로 작동하여, 그리퍼가 대상 물체에 적응적으로 밀착한 후 재밍을 통해 고정하고, 동시에 필요 시 회전방향을 제어함으로써 정밀한 배치, 정렬, 삽입 작업이 가능해진다. 특히 케이블이 기울어져 있거나, 그리퍼가 비정상적인 자세에서 접근하는 상황에서도 안정적인 파지와 회전 제어가 가능하며, 실제 조립 환경에 적합한 실용적 기능을 갖춘다.



[Fig. 6] Soft gripper combining variable stiffness mechanism and pneumatic brake mechanism



[Fig. 7] Gripper holding wire bundles of various diameters during grasping performance test



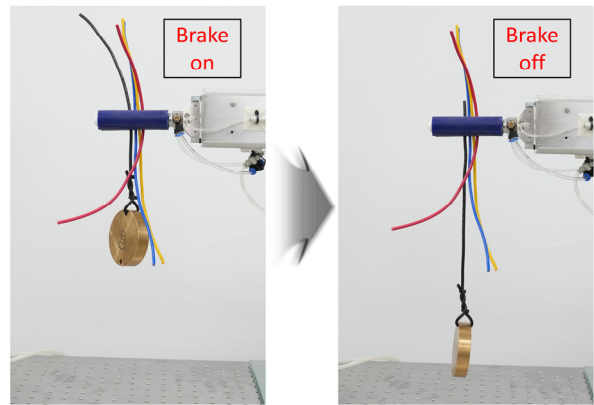
[Fig. 8] Shape adaptation and retention of the variable stiffness mechanism demonstrated by maintaining wire bundle form after removal

제안한 그리퍼의 실제 산업 적용 가능성을 평가하기 위해 다양한 종류와 굵기로 구성된 와이어 다발을 조합하여 파지 성능을 검증했다. 실험에 사용된 와이어는 서로 다른 직경(1 mm, 2 mm, 4 mm, 6 mm)을 포함하여 실제 현장에서 사용되는 구성에 유사하게 조합했다.

본 실험에서는 그리퍼가 서로 다른 종류의 와이어 다발을 파지한 후, 재밍 메커니즘을 작동시켜 고강성 상태로 전환하고, 설정된 시간(20초) 동안 파지 상태를 유지할 수 있는 경우를 파지 성공으로 정의했다.

실험 결과 [Fig. 7] 모든 와이어 조합에서 안정적인 파지가 가능했으며, 특히 다양한 두께의 와이어가 혼합된 조건에서도 그리퍼는 표면 형상에 적응하여 밀착한 후 고정력을 유지하는 우수한 성능을 보였다. 이는 가변강성 구조가 비정형 물체의 복합 형상에 효과적으로 대응할 수 있었다.

또한, 가변 강성 메커니즘의 형상 적응 및 유지 능력은 [Fig. 8]을 통해 시각적으로 확인할 수 있다. 이는 그리퍼가 와이어 다발을 파지한 후 재밍 메커니즘을 활성화한 상태에서 와이어를 제거한 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이,



[Fig. 9] Experimental setup for grasping and goad application on wire bundles using gripper with jamming and brake mechanisms

내부 입자들이 재밍 작용에 의해 고정되면서, 파지했던 와이어 다발의 외형을 그대로 유지하고 있다. 이는 그리퍼가 유연한 파지 대상을 밀착하여 형상에 적응한 이후에도 안정적인 고정 상태를 지속적으로 유지할 수 있었다.

본 연구에서 제안한 가변강성 메커니즘과 브레이크 메커니즘이 실제 케이블 조작 환경에서 상호 보완적으로 작동하며 안정적인 조작 성능을 발휘하는지를 검증하기 위한 통합 실험을 설계했다.

실험은 와이어 다발을 대상으로 했으며, [Fig. 9]와 같이 그리퍼 사이에 와이어 다발을 배치한 후 하나의 와이어 끝단에만 추를 부착하여 중력방향으로 하중을 인가하는 방식으로 진행되었다. 이후 그리퍼가 와이어 다발 전체를 파지한 상태에서 공압을 인가하여 재밍과 브레이크를 작동시켰다.

그 결과, 그리퍼는 모든 와이어를 안정적으로 밀착 파지하며 외부 하중이 가해진 상황에서도 파지 상태를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 내부 입자간 마찰 증대를 통한 강성 증가와, 브레이크 패드가 회전부에 작용하여 생성된 마찰 저항이 결합되어, 추의 하중에도 불구하고 추가 달린 와이어를 포함한 전체 와이어 다발이 안정적으로 고정되었다.

이후 브레이크 메커니즘을 해제하자, 추의 하중에 의해 회전하면서 이송되는 현상을 볼 수 있다. 이는 회전 마찰력을 실시간 가변하여, 필요에 따라 케이블 다발을 롤러 그리퍼의 롤링을 통해 이송할 수 있음과 동시에, 안정적 파지가 필요한 상황에서는 롤러의 회전을 멈춰 파지 위치를 고정할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

결론적으로, 본 실험을 통해 두 메커니즘이 상호보완적으로 작동하여 유연 물체에 대한 안정적인 파지 및 선택적 해제가 가능함을 검증했다. 이는 복잡한 조립 작업이나 비정형 객체를 다루는 실제 산업 환경에서 보다 정밀하고 안정적인 조작을 실현할 수 있는 기반 기술로 작용할 수 있음을 보여준다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 와이어링 하네스와 같은 유연한 물체를 안정적으로 조작하기 위한 소프트 그리퍼를 제안하였다. 제안된 그리퍼는 그래놀라 재밍 기반의 가변강성 메커니즘과 공압식 브레이크 메커니즘을 통합하여, 파지 대상의 형상에 유연하게 적응하면서도 와이어 하네스의 조작 중에도 안정적인 자세 유지를 가능하도록 하였다. 가변강성 메커니즘은 입자 내부 마찰력과 전단응력을 활용하여 저항성 상태에서 고강성 상태로 실시간 전환이 가능하도록 하였으며, 브레이크 메커니즘에서 내부 압력을 조절하여 필요에 따라 롤러의 구름 마찰력을 변화할 수 있도록 하였다.

실험을 통해 각각의 메커니즘이 파지력 및 자세 안정성 향상에 기여함을 확인했으며, 두 메커니즘을 통합 적용한 실험에서는 복잡한 와이어 구성 조건에서도 안정적인 파지가 가능함을 검증하였다. 본 연구는 실제 조립 작업 환경을 고려한 유연한 파지 전략을 제시함으로써, 향후 케이블 조작 자동화 및 고난도 공정 자동화 분야로 확장이 가능할 것으로 기대된다.

### References

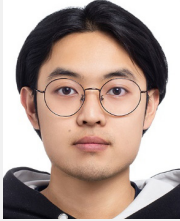
- [1] J. Trommnau, J. Kühnle, J. Siegert, R. Inderka, and T. Bauemhansl, "Overview of the state of the art in the production process of automotive wire harnesses, current research and future trends," *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 387-392, 2019, DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.067.
- [2] X. Jiang, K.-M. Koo, K. Kikuchi, A. Konno, and M. Uchiyama, "Robotized assembly of a wire harness in a car production line," *Advanced Robotics*, vol. 25, no. 3-4, pp. 473-489, Apr., 2011, DOI: 10.1163/016918610X551782.
- [3] R. K. Yedavalli and R. K. Belapurkar, "Application of wireless sensor networks to aircraft control and health management systems," *Journal of Control Theory and Applications*, vol. 9, no. 1, pp. 28-33, Mar., 2011, DOI: 10.1007/s11768-011-0242-9.
- [4] B. Hu and R. W. K. Chan, "Railway overhead wiring structures in Australia: review and structural assessment," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 3, Feb., 2022, DOI: 10.3390/app12031492.
- [5] O. Salunkhe, W. Quadrini, H. Wang, J. Stahre, D. Romero, L. Fumagalli, and D. Lämkuullm, "Review of current status and future directions for collaborative and semi-automated automotive wire harnesses assembly," *Procedia CIRP*, vol. 120, pp. 696-701, 2023, DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.061.
- [6] S. Olbrich and J. Lackinger, "Manufacturing Processes of automotive high-voltage wire harnesses: State of the art, current challenges and fields of action to reach a higher level of automation," *Procedia CIRP*, vol. 107, pp. 653-660, 2022, DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.041.
- [7] N. Lorenz and R. Mayer, "Approaches for automated wiring harness manufacturing: function integration with additive manufacturing," *Automotive and Engine Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 227-237, Aug., 2023, DOI: 10.1007/s41104-023-00137-9.
- [8] I. Stefan (Iorga), A. C. Popescu, C. L. Popa, T. G. Dobrescu, and C. E. Cotet, "Research regarding assembly flow optimization of wiring harness in automotive industry," *MATEC Web of Conferences*, vol. 343, 2021, DOI: 10.1051/mateconf/202134302003.
- [9] J. Lin, C. Y. Wu, and J. Chang, "Design and implementation of a multi-degrees-of-freedom cable-driven parallel robot with gripper," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Sept-Oct., 2018, DOI: 10.1177/1729881418803845.
- [10] X. Jiang, Y. Nagaoka, K. Ishii, S. Abiko, T. Tsujita, and M. Uchiyama, "Robotized recognition of a wire harness utilizing tracing operation," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 34, pp. 52-61, Aug., 2015, DOI: 10.1016/j.rcim.2014.12.002.
- [11] K. Koo, X. Jiang, A. Konno, and M. Uchiyama, "Development of awire harness assembly motion planner for redundant multiple manipulators," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 23, no. 6, pp. 907-918, Dec., 2011, DOI: 10.20965/jrm.2011.p0907.
- [12] Y. She, S. Wang, S. Dong, N. Sunil, A. Rodriguez, and E. Adelson, "Cable manipulation with a tactile-reactive gripper," *International Journal of Robotics Research*, vol. 40, no. 12-14, pp. 1385-1401, 2021, DOI: 10.1177/02783649211027233.
- [13] Q. Wu, Z. Yi, H. Wang, and H. Yuan, "Design and experiment of a soft gripper based on cable-driven continuum structures," *2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Sanya, China, pp. 637-642, 2021, DOI: 10.1109/ROBIO54168.2021.9739279.
- [14] Y. Zhou, X. Jiang, D. Chen, Y. Guo, and Y. Liu, "Design of a gripper for cable assembly with integrated in-hand cable manipulation functions," *2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Sanya, China, pp. 1929-1934, 2021, DOI: 10.1109/ROBIO54168.2021.9739398.
- [15] K. B. Ham, J. Han, and Y.-J. Park, "Soft gripper using variable stiffness mechanism and its application," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 19, no. 4, pp. 487-494, Apr., 2018, DOI: 10.1007/s12541-018-0059-2.
- [16] Y. Yang, Y. Chen, Y. Wei, and Y. Li, "Novel design and three-dimensional printing of variable stiffness robotic grippers," *ASME J. Mechanisms Robotics*, vol. 8, no. 6, Dec., 2016, DOI: 10.1115/1.4033728.
- [17] M. Liu, L. Hao, W. Zhang, and Z. Zhao, "A novel design of shape-memory alloy-based soft robotic gripper with variable stiffness," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 1, Jan.-Feb., 2020, DOI: 10.1177/1729881420907813.
- [18] Z. Tang, J. Lu, Z. Wang, and G. Ma, "The development of a new variable stiffness soft gripper," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 16, no. 5, Sept-Oct., 2019, DOI: 10.1177/1729881419879824.
- [19] L. Weirui, Z. Jingrun, Y. Hui, G. Xingjun, L. Jiaqi, and L. Wenbo, "A novel variable stiffness soft gripper based on air-quicksand: design, analysis, and validation," *Smart Materials and Structures*, vol. 33, no. 5, Apr., 2024, DOI: 10.1088/1361-665X/ad38a2.

[20] M. Xu, Y. Liu, J. Li, F. Xu, X. Huang, and X. Yue, "Review of flexible robotic grippers, with a focus on grippers based on magnetorheological materials," *Materials*, vol. 17, no. 19, Oct., 2024, DOI: 10.3390/ma17194858.

[21] W. Wang and S.-H. Ahn, "Shape memory alloy-based soft gripper with variable stiffness for compliant and effective

grasping," *Soft Robotics*, vol. 4, no. 4, pp. 379-389, Dec., 2017, DOI: 10.1089/soro.2016.0081.

[22] Y. Shan, Y. Zhao, H. Wang, L. Dong, C. Pei, Z. Jin, Y. Sun, and T. Liu, "Variable stiffness soft robotic gripper: design, development, and prospects," *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 19, no. 1, Nov., 2023, DOI: 10.1088/1748-3190/ad0b8c.



**김민준**

2022 충남대학교 기계공학부(석사과정)  
2022~현재 한국기계연구원 학생연구원

관심분야: Universal gripper, Soft robotics, Robot



**김문유**

2017 고려대학교 제어계측공학과(학사)  
2025 고려대학교 제어계측공학과(공학박사)  
2025~현재 한국기계연구원 AI로봇연구소  
첨단로봇연구센터 선임연구원

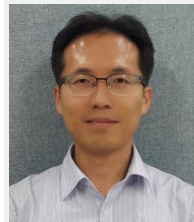
관심분야: Motion planning and control, Robot kinematic and dynamic modeling, Mobile robot and manipulators



**이재영**

2019 성균관대학교 기계공학과(박사과정)  
2017~현재 한국기계연구원 학생연구원

관심분야: Universal gripper, Soft robotics, Morphing wheel



**박동일**

2000 KAIST 기계공학과(공학사)  
2002 KAIST 기계공학과(공학석사)  
2006 KAIST 기계공학과(공학박사)  
2006~현재 한국기계연구원 선임/책임 연구원

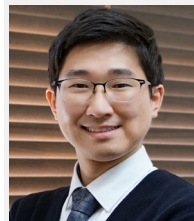
관심분야: Robot Design and Control, Robot Manipulation, Mobile Robots



**장재혁**

2019 한밭대학교 전자제어공학과(학사)  
2021 성균관대학교 기계공학과(석사)  
2025 성균관대학교 기계공학과(박사)  
2025~현재 한국기계연구원 박사 후 연구원

관심분야: Soft Robotics, Wearable Robots, Gripper, Actuators, Soft Sensors



**조성진**

2003 포항공과대학교 기계공학과(학사)  
2008 포항공과대학교 기계공학과(석사)  
2010 포항공과대학교 기계공학과(박사)  
2014 포항공과대학교 고분자연구소  
박사 후 연구원  
2015~현재 충남대학교 기계공학부 교수

관심분야: Advanced Sensors, MEMS, Micro-Scale Mechanism Design, Wearable Devices, Artificial Intelligence Signal Processing



**김희수**

2007 고려대학교 기계공학과(학사)  
2014 고려대학교 기계공학과(박사)  
2015~현재 한국기계연구원 책임연구원

관심분야: Robot and automation design, Robot-based process automation, Human-robot collaboration and safety, Humanoid



**송성혁**

2011 고려대학교 물리학과(학사)  
2016 서울대학교 기계항공공학부(박사)  
2025 한국기계연구원 책임연구원  
2025~현재 동국대학교 조교수

관심분야: Universal gripper, Soft robotics, Morphing wheel