



• Topical Issue • 가공된 기능성 재료 기술(Engineered Functional Materials)

향상된 파지특성을 위한 소프트 그리퍼 개발 동향: 다양한 구동 및 파지 메커니즘

Advancements in Soft Grippers for Versatile Grasping: Exploring Diverse Actuation and Grasping Mechanisms

송현석^{1,*}, 강동관^{1,*}, 박성진¹, 이희진¹, 정훈의^{1,#}

Hyeonseok Song^{1,*}, Dong Kwan Kang^{1,*}, Seongjin Park¹, Hee Jin Lee¹, and Hoon Eui Jeong^{1,#}

¹ UNIST 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology)

Corresponding Author / E-mail: hoonejeong@unist.ac.kr; TEL: +82-52-217-2339

ORCID: 0000-0002-1413-3774

*These authors contributed equally to this work.

KEYWORDS: Soft gripper (소프트 그리퍼), Actuation mechanism (구동 메커니즘), Grasping mechanism (파지 메커니즘)

In recent years, significant progress has been made in functional soft materials, alongside advances in nano/micro-manufacturing techniques, driving the evolution of soft grippers to the forefront of robotics innovation. Compared to their traditional rigid counterparts, soft grippers offer unparalleled adaptability, effortlessly conforming to objects of varying sizes and shapes. This comprehensive review explores the latest trends shaping the landscape of soft robotic grippers, providing insights into their diverse functionalities and applications. The exploration begins with an examination of the various actuation mechanisms utilized by soft grippers, including cable or tendon-driven, pneumatic, electroactive, and thermoactive systems. Additionally, the review delves into the intricacies of grasping and manipulating mechanisms, spanning from multi-finger configurations to innovative approaches, such as jamming, suction, and adhesion grasping. Notably, hybrid grippers, which integrate multiple actuation and grasping mechanisms, are of particular interest, thereby enhancing the range of functionalities offered by these grippers. Finally, the review briefly addresses current limitations and future directions in the field.

Manuscript received: April 4, 2024 / Revised: May 23, 2024 / Accepted: May 27, 2024

NOMENCLATURE

Ω	=	Motor Angle
L_0	=	Length of the Finger
L_i	=	Target Finger Length
R_m	=	Radius of the Cable is Wound or Unwound
R_c	=	Curvature Radius of the Finger
P	=	Pneumatic Pressure
A_c	=	Cross Section Area of Inside the Chamber
e	=	Eccentricity

E_f	=	Elastic Modulus of the Finger
I	=	Area Moment of Inertia
$\sigma_{Maxwell}$	=	Maxwell Pressure
ϵ_0	=	Absolute Permittivity
ϵ_r	=	Relative Permittivity
V	=	Applied Voltage
d_m	=	Membrane Thickness
F_h	=	Holding Force
R	=	Radius of the Gripped Object
d	=	Width of the Contact Area

μ_s	=	Static Coefficient of Friction
σ	=	Stress Applied by the End Effector
θ	=	Contact Angle between the End Effector and the Object
F_c	=	Suction Force of the Suction Cup
P_a	=	Atmospheric Pressure
P_{in}	=	Pressure Inside the Suction Cup
A_s	=	Contact Area of the Suction Cup
P_{normal}	=	Normal Adhesion Force
P_{shear}	=	Shear Adhesion Force
A	=	Contact Area
W_{12}	=	Work of Adhesion between the Contacting Surfaces
E	=	Elastic Modulus of the Microstructure Material
a	=	Radius of Microstructures with Protruding Tip
ν	=	Poisson's Ratio
μ	=	Friction Coefficient

1. 서론

최근 제한된 종류의 물체만 파지가 가능한 강체 기반의 로봇 그리퍼(Gripper)에서 벗어나, 다양한 크기와 형상의 물체를 파지할 수 있는 소프트 그리퍼에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-4]. 소프트 그리퍼는 실리콘(Silicone)과 같은 유연 소재를 기반으로 제작이 되어 대상물의 다양한 형상에 맞춰 높은 변형성과 적응성을 발휘할 수 있으며, 이에 따라 복잡한 알고리즘의 사용 없이도 우수한 파지 성능을 발휘할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 소프트 그리퍼는 Figs. 1(a-i) 및 1(a-ii)와 같이 케이블/공압 등의 기계시스템으로부터 직접적으로 동력을 얻어서 구동하는 방식과, Figs. 1(a-iii) 및 1(a-iv)와 같이 전기/열 감응형 소재의 특성으로부터 동력을 얻는 방식으로 구분될 수 있다(Fig. 1(a))[5-8]. 한편 물체를 파지하는 방식은 Fig. 1b-1과 같이 사람의 손처럼 여러 개의 손가락을 가지는 다중 손가락형 그리퍼[9,10]와, Figs. 1(b-ii), 1(b-iii) 및 1(b-iv)와 같이 손가락 말단부의 재밍(Jamming), 접착(Adhesion) 또는 흡착(Suction) 구조를 가지는 그리퍼 등으로도 구분이 가능하다. 하지만 많은 연구에도 불구하고 소프트 그리퍼는 기존 강체 기반 그리퍼에 비해 한계점 역시 지니고 있는데, 예를 들어 낮은 동력 전달 효율, 정밀 제어의 어려움, 느린 구동 속도 등을 들 수 있다. 따라서 실제 산업현장에 적용되기에는 추가적인 연구개발이 필요한 실정이다[11].

최근에는 이러한 한계점들을 극복하기 위하여 다양한 파지방식을 결합한 하이브리드 소프트 그리퍼가 개발되고 있다[12-14]. 하이브리드 소프트 그리퍼는 높은 동력 전달 효율과 동작 제어의 정밀성을 위해 부드러운 소재와 강성이 높은 소재가 혼합된 복합 구조를 가지거나, 여러 개의 파지 메커니즘을 결합하여 파지성능을 향상시키는 방식으로 개발되고 있다. 본 논문에서는

이처럼 최근 많은 관심을 끌고 있는 소프트 그리퍼 기술에 대해서 소개하고자 한다. 이를 위해 먼저 소프트 그리퍼의 다양한 구동 방식들을 소개하고(Chapter 2), 다음으로는 소프트 그리퍼의 다양한 파지 방식들을 소개하고자 한다(Chapter 3). 다음으로는 하이브리드 그리퍼에 대해 소개하고(Chapter 4), 마지막으로 소프트 그리퍼 기술 개발의 미래 방향과 전망에 대하여 간단히 기술하고자 한다(Chapter 5).

2. 소프트 그리퍼 구동 메커니즘

2.1 케이블 구동 메커니즘

케이블 구동 기반의 소프트 그리퍼는 모터(Motor), 케이블(Cable or Tendon), 풀리(Pulley) 등으로 이루어져 있다. 유연한 소재의 손가락 내부에 풀리가 배치되어 있으며, 각 풀리는 모터에 의해 제어되는 케이블로 연결되어 있다. 모터가 케이블을 당기거나, 풀어주는 움직임에 따라 케이블이 장력을 받게 되고, 부드러운 손가락에 이와 같은 장력이 전달되어 손가락에서 굽힘이 발생하게 된다(Fig. 2(a))[15,16]. 장력에 의한 손가락 굽힘은 케이블이 연결된 모터의 회전 각도에 영향을 받으며, 식(1)과 같이 표기된다[17].

$$\Omega = \frac{(L_0 - L_t)}{R} \quad (1)$$

해당 수식에서 Ω 은 모터의 회전 각도, R_m 은 감기거나 풀린 케이블 반지름, L_0 는 손가락의 초기 길이, L_t 는 손가락의 목표 길이, $L_0 - L_t$ 는 손가락의 굽힘 길이를 의미한다. 따라서 모터의 회전 각도가 커질수록 손가락의 굽힘 길이는 늘어난다. 케이블 구동 기반의 소프트 그리퍼는 사용하는 모터의 성능에 따라 그리퍼의 성능이 결정되며, 빠른 응답속도와 우수한 모션 정확도를 가지는 장점이 있다.

Changyong Cao 교수 연구진은 케이블 구동 액추에이터와 접촉 압력 및 굽힘 감지를 위한 마찰전기 나노발전기(Triboelectric Nanogenerator, TENG)센서를 결합한 소프트 그리퍼를 개발하였다[18]. DC 모터로 구동되는 액추에이터는 연속적인 삼각형 절단 패턴(Triangular Cut Pattern) 구조를 가지고 있으며, 이러한 절단 구조에 케이블이 내장되어 있다. 이러한 삼각형 절단 패턴 덕분에 액추에이터에서 굽힘 강성에 대한 차이가 발생하게 되고, 결과적으로 케이블의 장력을 이용하여 손쉽게 굽힘을 발생시킬 수 있다. 추가로, 해당 연구진은 TENG 센서를 이용하여 물체의 접촉력, 그리퍼의 굽힘 각도, 물체의 무게와 윤곽까지 모니터링할 수 있음을 실험을 통해 보여주었고 해당 그리퍼를 이용하여 최대 500 g의 물체를 파지할 수 있음을 확인하였다.

Cecilia Laschi 교수 연구진은 문어 다리의 움직임을 모사하여 최소 침습 수술을 위한 케이블 구동 소프트 그리퍼를 개발하였다[19]. 문어는 다리의 세로 방향 근육을 선택적으로 수축시킴으로써 비대칭적인 압축력을 통해 굽힘을 발생시킨다. 이러한

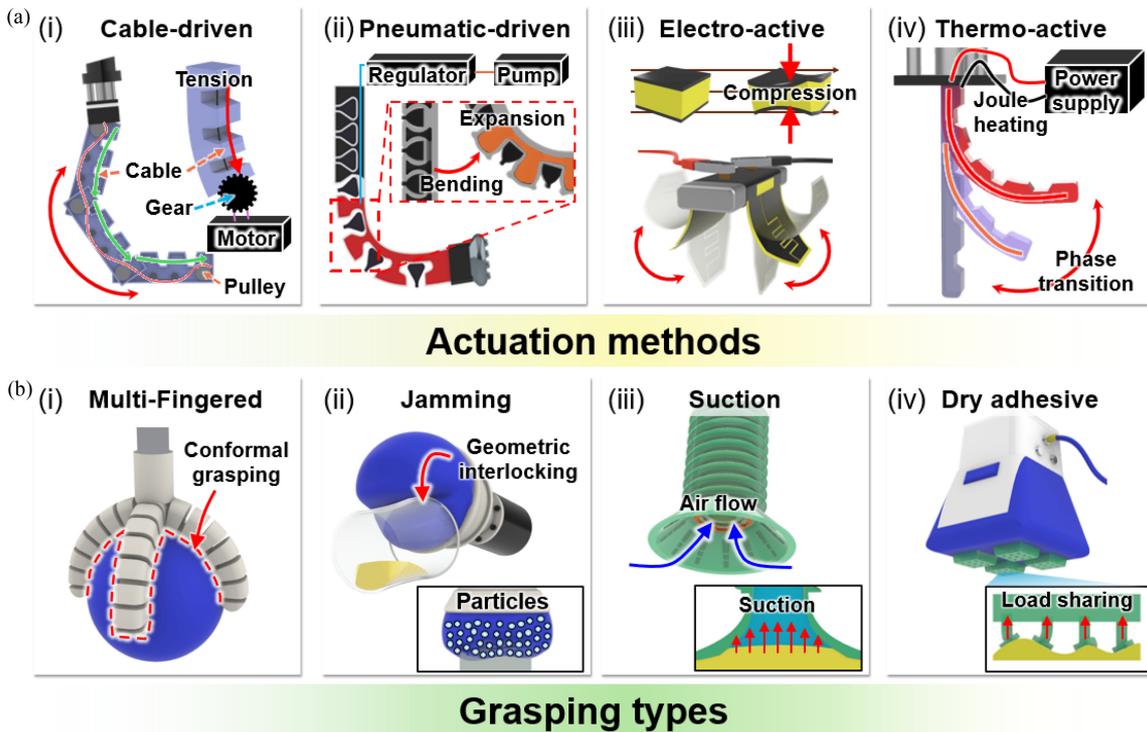


Fig. 1 Various types of actuation and grasping mechanisms in soft robotic grippers. (a) Actuation mechanisms: (i) cable-driven, (ii) pneumatic, (iii) electroactive polymer-based, and (iv) thermoactive polymer-based gripper and (b) Grasping mechanisms: (i) multi-fingered, (ii) jamming, (iii) suction, and (iv) dry adhesion

원리를 이용하여 해당 연구진은 연속적인 삼각형 절단 패턴을 가지는 손가락 내부에 케이블을 내장시킨 소프트 그리퍼를 제작하였다. 제작된 그리퍼는 문어의 다리 굽힘 원리와 같이 케이블을 당기는 방향으로 수축이 발생하여 손가락에 굽힘이 발생하고, 이러한 굽힘 동작을 이용하여 물체를 파지할 수 있다. 힘 측정 센서를 파지하고, 들어 올리는 실험을 수행한 결과 평균 파지력은 최대 1.02 N으로 측정되었다.

2.2. 공압 구동 메커니즘

대표적인 공압 구동 시스템은 DAQ (Data Acquisition System) 와 레귤레이터(Regulator), 진공펌프(Vacuum Pump), 호스(Hose) 등으로 이루어져 있다. 진공펌프와 이어진 레귤레이터가 DAQ로부터 신호를 받아들이고, 이러한 신호에 따라 공기의 세기와 방향을 정밀하게 제어할 수 있다. 호스는 공압 제어 시스템을 전체적으로 연결하며 공기가 지나가는 통로 역할을 한다. 제어된 공압은 소프트 그리퍼 내부의 챔버(Chamber)에 전달되어 팽창 또는 수축을 일으킨다. 공압 구동 방식의 그리퍼는 팽창/수축만으로 효율적인 손가락의 굽힘을 만들기 위해 케이블 구동 방식의 삼각형 절단 패턴과 유사한 비대칭적 구조를 가진다. 구체적으로, 공압 구동 기반의 소프트 그리퍼는 팽창층(Extensible Layer)과 비팽창층(Inextensible Layer)로 나뉘며, 공압이 가해졌을 때 팽창에 따른 길이 변화가 발생하며 굽힘이 발생하게 된다. 공압에 의해 그리퍼가 굽혀질 때 압력과 굽힘 반경(Radius of Curvature)의 관계는 다음과 같은 식(2)으로 표기 가능하다[20].

$$\frac{1}{R_c} = \frac{PA_c e}{EJ} \tag{2}$$

여기서 R_c 은 손가락의 굽힘 반경, P 는 공기의 압력, A_c 는 내부 챔버의 단면적, E 는 그리퍼 소재의 탄성 계수, J 는 관성 모멘트, e 는 이격 거리이다. 이에 따라 공압이 강하게 적용될수록 단면적의 크기가 증가하며, 손가락의 곡률이 증가하게 된다.

Kyujin Cho 교수 연구진은 다양한 형상의 물체에 대한 안정적인 파지 자세를 구현하기 위해 비팽창층의 강성을 조절할 수 있는 공압 구동 방식의 소프트 그리퍼를 개발하였다(Fig. 2(b))[21]. 일반적으로 공압 구동 그리퍼 손가락의 굽힘 각도는 손가락이 물체와 접촉할 때 발생하는 접촉 모멘트의 차이만큼 감소하게 된다. 이로 인하여 손가락이 물체의 형상을 잘 따라가지 못하고, 결과적으로 파지력이 감소하게 된다. 반면 강성이 높은 비팽창층을 사용할 경우, 강성이 높은 소재는 접촉 모멘트에 의한 영향을 적게 받기 때문에 손가락의 굽힘 각도를 최소화할 수 있다. 비팽창층의 강성이 높아질수록 파지력이 증가하여 더욱 무거운 물체의 파지가 가능하지만, 강성이 높아질수록 굽힘에 필요한 공압이 커지기 때문에 공압과 비팽창층의 강성은 트레이드오프(Trade-off) 관계에 있다. 해당 연구진은 비팽창층의 강성을 조절하기 위하여 다양한 소재와 특수한 패턴을 활용한 강성 변화 패턴층을 개발하였다. 추가로, 강성 변화 패턴층을 가지는 소프트 그리퍼의 파지 성능을 확인하기 위한 실험을 진행하였으며, 구형 물체와 별 모양 물체에 대한 그리퍼의 당기는 힘과 접촉력을 측정된 결과 구형 물체의

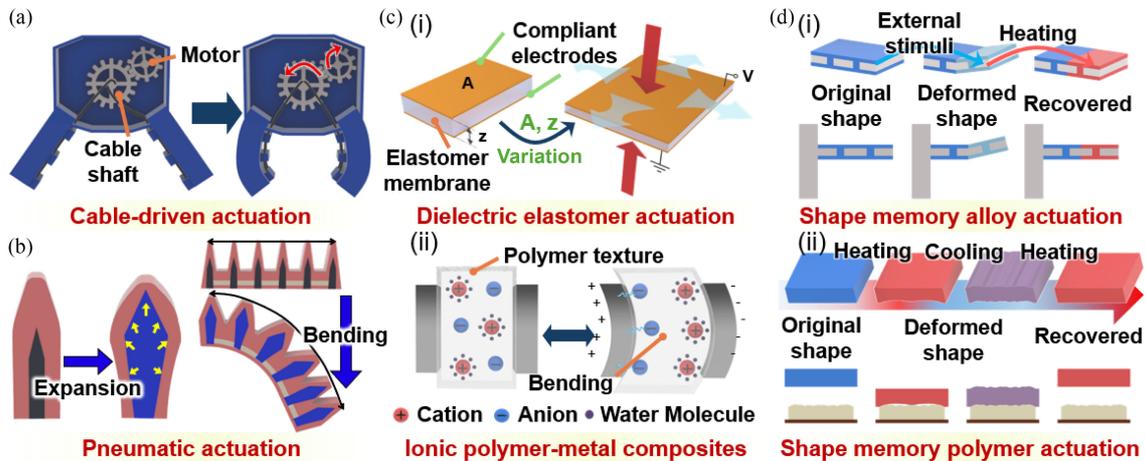


Fig. 2 Different actuation mechanisms in soft grippers: (a) Cable-driven actuation, (b) Pneumatic-driven actuation, (c) Electro-active actuation featuring dielectric elastomer actuators (DEA) and ionic polymer-metal composites (IPMC), and (d) Thermo-active actuation using shape memory alloys (SMA) and shape memory polymers (SMP)

경우 최대 당기는 힘이 3배, 별 모양 물체의 경우 1.3배 높아짐을 확인하여 성능을 입증하였다.

2.3. 전기활성 구동 메커니즘

전기활성 구동 방식은 전기 자극에 의해 가역적으로 부피가 변하는 탄성체(Elastomer)를 이용하는 방식으로, DEA (Dielectric Elastomer Actuators)와 IPMC (Ionic Polymer-metal Composites)를 활용하는 방식이 있다. DEA 방식은 2개의 전극 사이에 유전 탄성체(Dielectric Elastomer)가 결합된 구조로 이루어지며, 전극에 인가되는 전압이 없을 때는 전극과 유전 탄성체 소재 간의 탄성 차이에 의해 내부 응력과 굽힘 모멘트가 발생하여 구부러진 형상을 가진다. 유전 탄성체를 샌드위치처럼 덮고 있는 전극에 수 kV의 전압을 인가하면 전극 사이에 발생한 정전기 인력으로 인해 전극이 유전 탄성체에 압력을 가하여 내부 응력이 제거되면서 박막이 펼쳐진다. 이때 발생하는 정전기 인력은 맥스웰 압력이라 불리며 식(3)과 같이 표기된다[22].

$$\sigma_{Maxwell} = \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{V}{d_m}\right)^2 \tag{3}$$

해당 식에서 ϵ_0 는 절대 유전율, ϵ_r 는 상대 유전율, V 는 전압, d_m 는 박막의 두께이다. 해당 식으로 인해 인가하는 전압이 높을수록, 박막의 두께가 얇을수록 맥스웰 압력이 커져 더 강한 파지력을 구현할 수 있다. IPMC 방식은 2개의 얇은 금속층 사이에 고분자 전해질이 결합된 박막으로 구성되어 있다. 전극에 전압이 인가되면 음극 성질을 띠는 전극으로 전해질의 양이온과 물분자가 이동하게 되면서 부피의 팽창으로 인해 굽힘이 발생한다. DEA 방식은 고전압이 필요하지만 강한 파지력을 구현할 수 있으며 IPMC 방식은 저전압으로 구동 가능하지만 파지력이 약하고 건조한 환경에서 적용하기 어려운 단점이 있어 대체적으로 DEA 방식을 사용한다. DEA 방식은 짧은 응답 시간과 에너지 효율이 높다는 장점이 있다.

Zhongbin Xu 교수 연구진은 3D 프린터로 제작된 유연 프레임에 DEA를 결합한 소프트 그리퍼를 제작하였다(Fig. 2(c)) [23]. 그리퍼 손가락의 DEA를 사전 스트레칭(Pre-stretched) 시킨 후 전극을 코팅하고, 3D 프린터로 제작된 유연 프레임과 결합하여 사전 스트레칭에 의한 수축 에너지를 통해 손가락의 굽힘을 발생시켰다. 제작된 DEA 구동 방식 그리퍼는 전압이 인가되지 않은 상태에서 사전 스트레칭 된 유전 탄성 박막과 3D 프린터 프레임 소재 간의 탄성 차이로 인해 수축하는 에너지 일부가 프레임에 굽힘 에너지로 전환되어 손가락은 굽힌 상태를 유지하며, 전압이 인가되면 맥스웰 압력에 의해 굽힌 손가락이 펼쳐지게 된다. 이러한 특성을 이용하여 손가락이 물체에 접촉할 때 전압을 인가하여 손가락을 펼치고 물체에 접촉할 때 전압 인가를 중지하여 발생한 손가락의 굽힘으로 물체를 파지하고 다시 전압을 인가하여 파지된 물체를 내려놓을 수 있다. 그리퍼 최적화를 위해 그리퍼 손가락 길이에 따른 굽힘 각도와 차단력(Blocked Force)을 측정하였고 길이가 90 mm일 때 128°의 굽힘 각도와 25 mN의 차단력이 측정되었으며 이를 이용해 2 g의 폴리폼 큐브(Polyfoam Cube)를 파지하고 내려놓을 수 있음을 확인하였다.

2.4. 열 구동 메커니즘

열에 의해 구동되는 그리퍼는 대표적으로 열에 반응하는 형상 기억 물질(Shape Memory Materials) 소재가 있다. 형상 기억 물질은 크게 형상 기억 합금(Shape Memory Alloy, SMA)과 형상 기억 폴리머(Shape Memory Polymer, SMP)로 나누어진다. 형상 기억 합금의 결정 구조는 열에 의해 마텐자이트(Martensite)나 오스테나이트(Austenite) 구조로 변화하게 되며, 구조의 변화에 따라 합금의 강성이 변하며 길이가 수축/인장 된다. 구체적으로, 형상 기억 합금은 온도가 낮을 때 마텐자이트라는 덜 정렬된 결정 구조를 가지며, 이 상태에서는 합금이 비교적 쉽게 변형될 수 있다. 합금에 열을 가하게 되면 마텐자이트 구조가 오스테나이트

구조로 바뀌면서 결정이 정렬되고, 변형된 상태에서 초기의 형태로 형상이 회복된다. 형상 기억 합금을 기반으로 한 그리퍼는 이러한 원리를 이용하여 합금의 수축/팽창을 통해 굽힘을 발생시켜 물체를 파지하고 전이 온도 이상으로 가열하여 초기 형상으로 회복한다. 형상 기억 고분자를 이용하는 방식은 전이 온도에 따른 고분자 네트워크의 강성 변화를 이용하여 파지하는 방식이다. 형상 기억 고분자는 유리 전이온도보다 높은 온도에서 강성이 낮아지고, 유리 전이온도보다 낮은 온도에서는 강성이 높아지는 성질을 가진다. 따라서 형상 기억 고분자를 활용하는 그리퍼는 이러한 소재의 특징을 활용하여 대상 물체의 표면에 따라 형태가 변화하며 물체를 파지할 수 있다.

Yeong-Jin Kim 교수 연구진은 SMA 스프링 액추에이터와 케이블을 활용한 소프트 그리퍼를 개발하였다(Fig. 2(d-i))[24]. 상온 상태에서는 SMA 스프링의 낮은 강성으로 인해 손가락이 축 늘어져 있지만, 열을 가하면 늘어난 스프링이 원래의 상태로 돌아가려는 성질 때문에 케이블에 장력이 발생하여 파지 동작을 제어할 수 있다. 손가락 내부의 스프링의 강성이 변화되면서 케이블에 장력이 발생함에 따라 그리퍼의 손가락을 제어한다. 추가로, SMA 스프링의 동작 속도를 개선하기 위하여 스프링 주변에 냉각 튜브를 결합하여 빠른 온도 전환 속도를 가능하게 하였고, 온도 센서의 피드백 제어가 가능한 시스템을 개발했다. 개발된 그리퍼는 최대 500 gf의 축력을 가지고 있으며 알과 같은 표면이 매끄러운 물체도 안정적으로 파지할 수 있음을 확인하였다.

Jizhou Song 교수 연구진은 다양한 크기, 형상, 질감의 물체를 파지하기 위하여 열에 의해 강성 변화가 일어나는 SMP 블록을 이용한 그리퍼를 개발했다(Fig. 2(d-ii))[25]. 상온에서 대상 물체에 SMP 블록을 밀착시킨 후, 열을 가하게 되면 SMP 블록은 전이 온도보다 높은 온도에서 강성이 낮아지게 된다. 이때 SMP에 추가적인 압력을 가하면 그리퍼가 물체의 표면을 밀접하게 따라갈 수 있다. 이후에 SMP 블록을 냉각시키면 물체의 표면을 밀접하게 따라간 상태에서 딱딱하게 변하며 물체를 들어 올릴 수 있다. SMP를 재가열하면 강성이 낮아지게 되면서, 원래의 형상을 회복하려는 성질 때문에 물체의 표면을 따라 변형된 SMP의 형상이 회복되면서 물체를 내려놓을 수 있다. 해당 연구진은 SMP 블록 그리퍼를 이용하여 다양한 크기와 형상을 가진 물체를 파지했으며, 미세 패터닝된 SMP 블록을 이용하여 마이크로 LED 칩을 특정 형상으로 배치할 수 있음을 실험을 통해 증명함으로써 그리퍼 뿐만 아니라 전사 인쇄(Transfer Printing) 애플리케이션으로 이용 가능성을 보여주었다.

3. 소프트 그리퍼의 파지 메커니즘

3.1. 다중 손가락 기반 파지 메커니즘

소프트 그리퍼가 사람의 손과 같은 정밀한 동작 제어와 안정적인 파지를 수행하기 위해서는 다중 손가락이 필요하다. 다중 손가락 소프트 그리퍼는 비연속 굽힘형(Non-continuum Type)과

연속 굽힘형(Continuum Type)으로 나누어지며, 굽힘 및 비틀림 동작을 이용하여 핀치 파지(Pinch Grasping)와 인벨로핑 파지(Enveloping Grasping) 동작을 수행할 수 있다[26].

비연속 굽힘형 손가락은 인대와 힘줄로 구성된 사람의 손의 굽힘 동작을 모사한 방식으로, 단단한 프레임과 부드러운 조인트로 구성되어 있다. 부드러운 조인트의 순응도(Compliance)를 활용하여 복잡한 형상을 가진 물체에 대한 높은 적응성을 가지고 있으며, 단단한 프레임을 활용하여 동력 전달 성능 또한 우수하다. 인간의 손가락과 가장 유사한 비연속 굽힘형 손가락의 경우, 손 끝으로 물체를 집어서 들어 올리는 핀치 파지와 손가락 전체로 물체를 감싸서 들어 올리는 인벨로핑 파지가 모두 가능하다. 비연속 굽힘형 파지는 연속 굽힘형 파지와 연속 비틀림형 파지에 비해 동작 안정성과 정확도가 높지만, 단단한 프레임으로 인해 상대적으로 유연성과 순응도가 낮은 특징을 가진다.

연속 굽힘형 손가락은 끈끈이귀개속(Drosera)과 같은 식물을 모사한 형태로, 부드러운 몸체를 활용한 연속적인 굽힘 동작을 구현할 수 있다. 이와 같은 형태를 가지는 손가락은 높은 자유도의 손가락 굽힘을 활용한 핀치 파지와 인벨로핑 파지가 모두 가능하다. 하지만 단단한 구조의 부재로 인해 동력 전달 효율이 떨어지고, 물체의 하중을 지탱하기 어렵다는 특징이 있다. 따라서 연속 굽힘형 손가락을 사용하여 물체를 안정적으로 파지하기 위해서는 높은 자유도를 바탕으로 한 인벨로핑 파지가 유리하다. 최근에는 높은 적응력을 가지는 부드러운 소재와 동력 전달이 가능한 단단한 소재를 모두 활용하여 물체의 하중을 지탱할 수 있는 연속 굽힘형 손가락에 대한 연구가 이루어지고 있다.

연속 비틀림형 손가락은 꼬끼리의 코나, 덩굴손 식물과 같이 비대칭 수축으로 인한 굽힘 및 비틀림 동작을 수행할 수 있다. 연속 비틀림형 손가락은 비연속 굽힘형 손가락과 연속 굽힘형 손가락에 비해 유연성과 순응성이 높고, 복잡한 형상을 가진 물체에 대한 적응성이 뛰어나 안정적인 파지가 가능하다. 하지만 비틀림 동작을 구현하기 위해서 복잡한 구조나 제어 알고리즘이 필요하다. 또한 물체의 형상을 전체적으로 휘어 감는 손가락의 움직임 특성상 핀치 파지가 불가능하며, 인벨로핑 파지만 가능하다. 하지만 비틀림에 의한 인벨로핑 가능한 물체에 대하여 매우 높은 안정성을 지니기 때문에, 최근에는 비대칭 구조를 통해 비틀림 동작을 구현하면서도 물체의 하중을 지탱할 수 있는 스마트 소재에 대한 연구가 진행되고 있다.

3.2. 재밍 기술을 활용한 파지방식

재밍 기술을 활용하는 소프트 그리퍼는 Fig. 3(a-i)과 같이 말단부에 장착된 작은 입자로 채워진 유연한 재밍백(Jamming Bag)을 사용하여 물체를 파지한다. 평상시에는 재밍백 내부의 작은 입자들이 자유롭게 움직일 수 있어서 유연하고, 대상 물체의 형태를 잘 따라갈 수 있다. 이러한 특성으로 물체를 감싼 뒤, 음압으로 내부의 공기를 빨아들이면 내부의 입자들이 서로 밀접하게 압축되며 재료의 강성이 높아진다. 결과적으로 말단 장치와 물체가 인터로킹(Interlocking) 되면서 물체를 단단하게

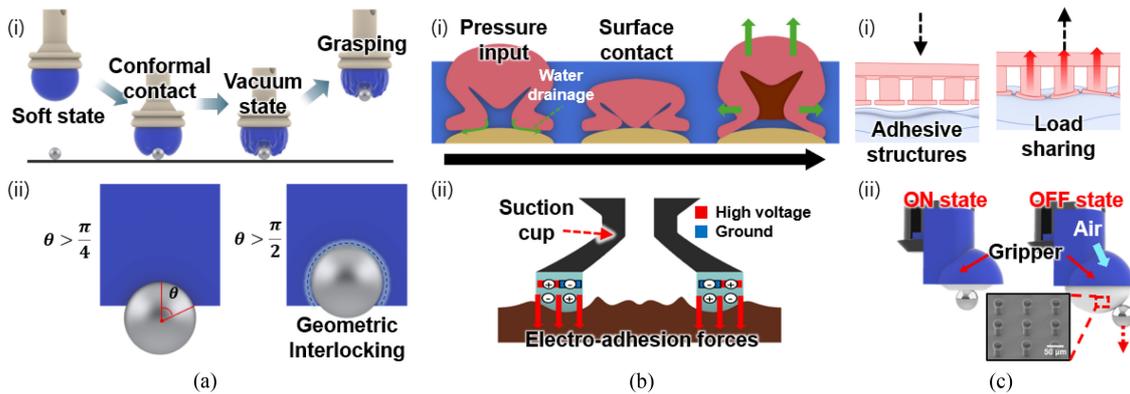


Fig. 3 Different grasping mechanisms in soft grippers: (a) Jamming type: (i) Schematic illustration of the jamming-type grasping mechanism, (ii) Influence of contact angle on geometric interlocking, (b) Suction type: (i) Schematic illustration of the suction-type grasping mechanism, (ii) Suction type gripper integrated with an electro-adhesion layer, and (c) Dry adhesive type: (i) Schematic illustration of the dry adhesive-type grasping process, (ii) Dry adhesive type gripper integrated with microscale adhesive structures

잡을 수 있다. 물체를 놓을 때에는 재밍백 내부로 다시 공기를 주입하여 입자들 사이의 압력을 줄여야 한다. 이로 인해 입자들이 다시 이동 가능한 상태로 돌아가면서 재밍백이 유연해지고, 물체를 내려놓을 수 있다. 이와 같은 과정을 ‘재밍 전이’라고 부르며, 재밍 기술을 활용한 파지방식은 재밍백 보다 작은 물체들을 빠르고, 단단하게 잡는 데에 유리하다.

Heinrich M. Jaeger 교수 연구진은 이러한 재밍 기술을 활용한 말단 장치를 개발하여 물체의 크기와 표면 상태에 따른 파지 성능 변화를 관찰하고, 물체를 효과적으로 파지할 수 있는 원리를 분석하였다(Fig. 3(a-ii))[27]. 물체 사이의 마찰에 의해 발생하는 파지력 F_h 는 다음 식(4)으로 표현될 수 있다.

$$F_h = 2\pi R d \sigma (\mu_s \sin \theta - \cos \theta) \sin^2 \theta \quad (4)$$

여기서, R 은 파지 대상 물체의 반경, d 는 재밍백과 대상 물체가 실제로 접촉한 너비, μ_s 는 재밍백과 대상 물체의 마찰계수, σ 는 재밍백 가해지는 응력, θ 는 재밍백과 대상 물체 사이의 접촉 각도를 나타낸다. 접촉 각도 θ 가 $\text{Arctan}(1/\mu)$ 보다 작을 경우 $F_h = 0$ 이 되며, 이는 재밍백이 물체를 잡지 못하고 미끄러지게 됨을 의미한다. 추가로, 마찰계수가 고무와 같이 $\mu \approx 1$ 일 때에는 접촉 각도가 최소 $\pi/4$ 보다 커야 하며, 마찰 각도가 $\pi/2$ 를 초과하는 경우에 재밍백과 대상 물체 사이에 기하학적 맞물림 (Geometrical Interlocking)이 발생하여 파지력을 더욱 강화할 수 있다(Fig. 3(a-ii)).

물체가 엔드이펙터에 완전히 밀착될 경우에는 진공상태에 의한 흡입력이 발생하며, 이는 물체와 엔드이펙터 사이의 마찰력 뿐만 아니라 추가적인 파지력을 제공한다. 마찰력과 흡입력이 모두 작용하는 엔드이펙터의 파지력은 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_h = \pi R^2 \alpha (\mu \sin \theta - \cos \theta) \sin^3 \theta \left(1 + \frac{R}{2d \sin \theta} \right) \quad (5)$$

이러한 마찰력과 흡입력, 기하학적 맞물림의 조합은 재밍백이

물체를 파지하고, 이동시키는 등의 동작을 수행할 수 있게 해준다.

3.3. 흡착 기술을 활용한 파지 메커니즘

흡착 컵(Suction Cup)을 이용하는 그리퍼는 문어의 빨판과 같은 돔(Dome) 구조의 흡착 컵을 사용하여 물체를 파지한다. 돔 구조의 흡착 컵을 물체에 밀착시키고, 컵 내부의 공기를 빨아들여 내부압력을 외부 압력보다 낮추어 발생하는 압력차를 이용하여 물체를 단단하게 흡착하는 방식이다. 이때 발생하는 압력차는 흡착 컵이 물체와 밀접하게 접촉하고 있는 면적에 비례하며, 흡입력 F_c 는 식(6)과 같다.

$$F_c = (P_a - P_{in}) A_s \quad (6)$$

여기서 P_a 는 대기압, P_{in} 은 흡착 컵 내부의 압력, A_s 는 흡착 컵이 대상 물체와 접촉하는 면적이다[28]. 물체를 놓을 때에는 진공 상태를 해제하고 공기를 흡입 컵 내부로 다시 주입하여 내부의 압력을 외부의 압력과 동일하게 조절해야 한다.

Shingo Maeda 교수 연구진은 Fig. 3(b-i)과 같이 흡착 컵과 유연 전극을 결합하여 공압과 정전기력을 모두 사용하는 흡착 컵을 제시하였다[28]. 기존의 흡착 컵은 거친 표면을 가지는 물체를 파지할 때 흡착 컵이 물체의 표면을 밀접하게 따라가지 못하여 외부의 공기가 유입되고, 이에 따라 흡착 컵 내부와 외부의 압력차가 유지되지 않아서 파지에 실패하게 된다. 연구진은 이러한 문제를 해결하기 위하여 흡착 컵에 유연 전극을 결합하고, 전압을 가하여 물체 표면에 유전체 분극을 발생시킴으로써 전극과 거친 표면 사이에 정전기적 인력을 발생시켜 거친 표면에도 잘 밀착할 수 있는 말단 장치를 개발하였다. 실험 결과, 유연 전극을 결합한 흡착 컵은 기존의 흡착 컵 대비 매끄러운 표면에서 12%, 거친 표면에서 25% 향상된 성능을 보였다.

Barbara Mazzolai 교수 연구진은 문어의 빨판 구조를 모사하여 건조 및 수중 환경에서도 효과적으로 물체를 파지할 수 있는 흡착 컵을 제시하였다[29]. 이러한 흡착 컵에 Fig. 3(b-i)와 같이

압력을 가하면 내부에 있던 공기들이 빠져나오며, 주변의 물을 밀어낸다. 흡착 컵의 내부를 압축시킨 뒤에 들어올리면 물체의 하중에 의해 흡착 컵의 부피가 증가하게 되고, 이때 발생하는 부피의 변화에 따라 흡착 컵 내부가 진공 상태가 되며 물체를 파지할 수 있다(Fig. 3(b-ii))[30]. 특히, Mazzolai 교수 연구진은 PDMS로 제작한 흡착 컵에 홍합 접착 단백질인 Mussel Foot Proteins-1 (MFP-1)을 코팅하여 수중 환경에서의 높은 접착력 및 생체 친화성을 달성하였다. 추가적으로, 실험을 통하여 알루미늄 블록 및 실리콘 웨이퍼를 흡착 컵으로 들 수 있었으며, 수중에서의 흡착력은 건조한 환경 대비 절반의 성능을 가지는 것을 보여주었다.

흡착 원리를 사용하는 소프트 그리퍼는 압력의 크기에 따라 크고, 무거운 물체를 들어올릴 수 있다는 장점이 있지만, 강한 흡착력으로 인해 물체에 손상이 가해질 수 있고, 큰 굴곡이 있거나 다공성 물체 등 밀접한 접촉을 통한 압력 차이가 발생하기 어려운 형상의 물체는 흡입하기 어렵다는 한계가 존재한다.

3.4 건식 접착 기술을 활용한 파지 메커니즘

건식 접착 원리를 이용하는 그리퍼는 게코도마뱀의 접착 구조를 모사한 미세 섬모구조를 가지는 것이 특징이다. 마이크로 스케일의 미세한 접착구조는 필러(Pillar)와 팁(Tip)으로 이루어진 계층 구조를 가지며, 대상 물체와의 접촉 면적을 최대로 확보함으로써 반데르발스 힘에 의한 인력을 극대화하여 높은 접착력을 가진다(Fig. 3(c-i))[31-33]. 건식 접착 기술을 활용하는 파지방식은 높은 접착력을 가질 뿐만 아니라, 접착 과정에서 잔여물 없이 반복적으로 사용할 수 있으며, 복잡한 작동 과정 없이 말단 장치를 수직 방향으로 누르는 것만으로 물체를 파지할 수 있다는 장점을 가진다. 계층 구조로 이루어진 미세 접착구조의 수직 방향과 전단 방향에 대한 접착력은 식(7) 및 식(8)과 같다[34].

$$P_{normal} = A \sqrt{\frac{\pi w_{12} E}{2a(1-\nu^2)}} \quad (7)$$

$$P_{shear} = \mu A \sqrt{\frac{\pi w_{12} E}{2a(1-\nu^2)}} \quad (8)$$

여기서, P_{normal} 은 수직 접착력, P_{shear} 는 전단 접착력, A 는 접촉 면적, w_{12} 는 접촉 표면 간의 접착성(Work of Adhesion), E 는 미세 구조 소재의 탄성 계수, a 는 미세 접착구조 팁의 반경 ν 는 소재의 포아송비(Poisson's Ratio), μ 는 마찰계수이다. 해당 식을 통하여 미세 접착 구조를 이용한 건식 접착은 대상 물체와 접촉 면적이 높을수록 접착력이 강해지며, 전단 접착력의 경우 물체의 표면 거칠기에 따른 마찰 계수의 영향을 추가적으로 받는 것을 확인할 수 있다.

Metin Sitti 교수 연구진은 Fig. 3(c)와 같이 게코 도마뱀을 모사한 마이크로 스케일의 접착 구조물을 활용하여 공압 구동 방식의 말단 장치를 개발하였다(Fig. 3(c-ii))[35]. 이러한 말단 장치는 물체를 파지할 때 단순한 가압만으로 접착 구조물의

반데르발스 힘을 통하여 물체를 들어 올릴 수 있다. 기존의 건식 접착 기술을 활용하는 파지방식은 강한 접착력을 기반으로 안정적인 파지가 가능하지만, 물체를 떼어낼 때 추가적인 외력을 가해줘야 한다는 한계가 있었다. 반면 Metin Sitti 교수 연구진이 개발한 소프트 그리퍼는 말단 장치에 공기압을 가하면 건식 접착 필름이 팽창하게 되고, 이 과정에서 마이크로 구조물이 물체의 가장자리에서부터 박리가 일어나게 되며 그리퍼와 물체 사이의 접촉 면적을 점차 감소시키며 자연스럽게 물체를 떼어낼 수 있다. 실험 결과, 해당 연구진이 개발한 말단 장치는 유리 표면에서 최대 0.41 N의 접착력을 발휘할 수 있으며, 공기압을 가하여 물체를 떼어낼 때 필요한 힘은 2 mN으로, 손쉬운 탈착이 가능함을 보여주었다.

4. 하이브리드 그리퍼

4.1 다중 손가락과 재밍 원리를 활용한 하이브리드 그리퍼

다중 손가락에 재밍 방식의 말단 장치를 통합하면 재밍 백의 우수한 강성 변화 특성을 활용하여 다중 손가락의 구동범위에 따라 인터로킹 가능한 물체의 범위를 확대하고, 높은 동력 전달 효율을 통하여 더욱 안정적인 자세로 물체의 파지가 가능하다[36].

Michael Yu Wang 교수 연구진은 실리콘 고무(Silicone Rubber)와 파티클이 혼합된 하이브리드 재밍층(Hybrid Jamming Substrate)을 기반으로 다중 손가락과 재밍 원리를 융합하여, 손가락 마디와 관절을 모방한 소프트 그리퍼를 제작하였다(Fig. 4(a))[13]. 하이브리드 재밍 그리퍼는 공압이 가해지지 않은 상태에서는 곡선 형태를 유지하나, 손가락 내부의 챔버에 공압이 가해지면, 챔버의 부피가 증가함에 따라 손가락에서 굽힘이 발생한다. 추가로, 손가락의 하단에 있는 재밍층에 진공을 가하게 되면, 재밍층의 강성이 증가하게 되며 동력 전달 효율이 증가하여 정밀한 동작제어가 가능해진다. 따라서 다중 손가락과 재밍 챔버에 개별적으로 공압을 제어함으로써 인간의 손가락과 같이 다양한 움직임을 기반으로 안정적인 물체의 파지가 가능하다. 해당 그리퍼의 성능을 확인하기 위해 진공을 통해 강성을 강화한 경우와 강화하지 않은 경우에 물체 파지 실험을 진행하였으며, 그 결과, 강성을 증가시키지 않았을 때는 최대 334 g의 물체를 파지할 수 있었으나, 강성을 증가시킨 경우에는 최대 540 g의 물체를 파지할 수 있음을 확인하였다.

4.2 다중 손가락과 흡착 원리를 활용한 하이브리드 그리퍼

다중 손가락에 흡착 원리를 활용하는 말단장치를 장착하면 인벨로핑, 클램핑(Clamping), 후킹(Hooking), 흡착과 같은 다중 파지 모드가 가능하여 다양한 크기나 형태, 무게를 가진 물체를 파지할 수 있다. 뿐만 아니라, 손가락의 구동을 통하여 흡착 컵의 파지 정밀도를 높이고, 물체 표면의 곡률/거칠기에 의한 공기의 유입을 방지할 수 있다[12,37].

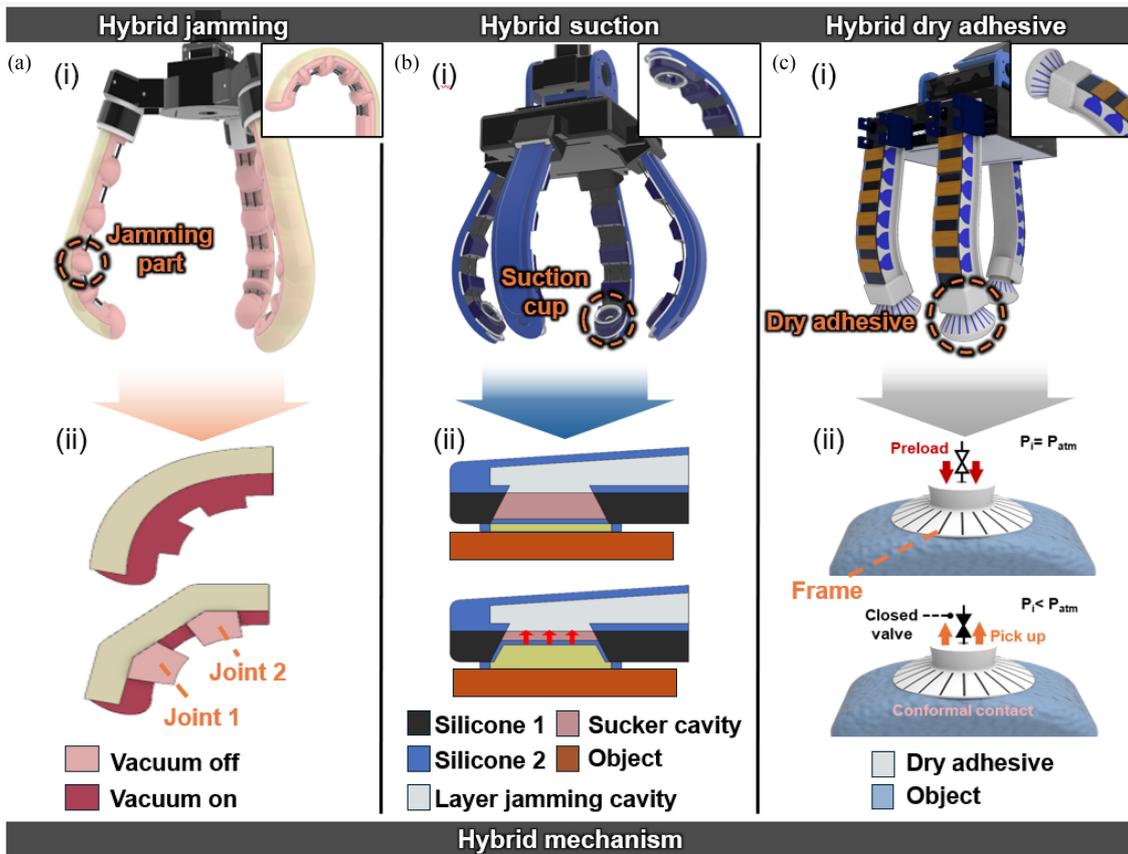


Fig. 4 Hybrid grippers combining various actuation methods and grasping types: Schematic illustrations of (a) a hybrid jamming gripper, (b) a hybrid suction gripper, and (c) a hybrid dry adhesive gripper

Li Wen 교수 연구진은 케이블 구동 방식으로 작동하는 다중 손가락에 물체의 파지를 도와줄 수 있는 재밍 구조와 흡착 컵을 결합함으로써 다양한 파지 모드를 구현할 수 있는 하이브리드 소프트 그리퍼를 제작하였다 (Fig. 4(b))[12]. 이러한 그리퍼는 재밍 방식의 강성변화와 케이블 구동을 통한 굽힘 제어를 동시에 수행할 수 있으며, 손 끝의 흡착 컵을 이용하여 물체를 더욱 안정적으로 파지할 수 있다. 케이블 구동과 재밍 강성변화를 통한 손가락 제어는 2.1 N의 힘에도 굽힘 없이 안정적인 자세의 제어가 가능하였고, 흡착 컵을 이용하여 물체를 들어 올리는 실험에서는 40 N의 파지력 성능을 보였다.

4.3 다중 손가락과 건식 접착 원리를 활용한 하이브리드 그리퍼

다중 손가락에 건식 접착 방식의 말단장치를 장착하면 손가락과 접착구조를 통하여 다양한 파지 모드가 가능하다. 특히, 건식 접착 방식의 말단장치는 수직 방향으로 정확하게 압력을 가하고, 들어올려야 접촉 면적이 넓게 형성되고, 하중이 균일하게 분산되어 안정적인 파지가 가능하다. 이에 따라 다중 손가락을 정밀한 제어를 통하여 건식 접착 원리를 활용한 말단 장치의 성능을 극대화할 수 있다[38,39].

Hoon Eui Jeong 교수 연구진은 공압 구동 방식의 다중 조인트

손가락과, 생체 모방 접착구조를 가지는 말단장치를 통합하여 하이브리드 건식 접착 소프트 그리퍼를 개발하였다(Fig. 4(c))[39]. 구체적으로, 공압 구동 방식의 다중 손가락은 근위부(Proximal)와 원위부(Distal)로 나뉘며, 각 부위는 공압을 통하여 개별적으로 굽힘 조절이 가능하다. 챔버의 측면에는 단단한 PLA (Polyactic Acid) 소재의 프레임이 내장되어 있으며, 손가락의 관절과 같은 역할을 하여 빠른 굽힘 속도와 높은 파지력을 가질 수 있게 한다. 다중 손가락의 끝에 장착된 건식 접착 말단장치는 물체와 접촉할 때 물체의 형상에 맞게 형태가 변형되며 더욱 높은 접착력으로 물체를 파지할 수 있다. 이때, 건식 접착 말단 장치에 내장되어 있는 PLA 소재의 프레임이 대상 표면의 접촉면으로 효율적으로 압력을 전달한다. 물체를 들어 올릴 때는 고르게 분산된 프레임이 하중을 균일하게 분산시킴으로써 안정적으로 물체를 파지하고, 옮기는 동작을 수행할 수 있다. 해당 그리퍼는 자유로운 손가락의 움직임과 건식 접착 말단장치를 활용하여 다양한 크기, 형상, 무게를 가진 물체에 대한 파지 실험을 진행하였으며, 특히 한 손가락으로 600 g의 물체를 들어 올리며 총 1.8 kg의 물체를 파지하며 높은 접착 성능을 보여주었다. 마지막으로, 사람과 협력하여 라면을 끓이는 실험을 보여주며 사람과 소프트 로봇이 상호작용하는 결과를 보여주었다.

5. 결론

소프트 그리퍼는 기존의 강성 소재 기반 그리퍼에 비해 유연한 소재의 특성을 활용하여 변화하는 환경 속에서도 능동적으로 적응할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 소프트 로봇의 특성을 효율적으로 활용하기 위하여 케이블 구동, 공압, 전기활성, 열 구동 등의 다양한 구동 방식이 연구되어 왔으며, 파지 방식 역시 다중손가락형, 재밍, 접착, 흡착 방식 등 앞서 소개한 바와 같이 각각의 뚜렷한 장단점이 존재한다. 이에 따라 응용처에 따른 성능 요구사항과 환경 조건 등을 고려하여 적절한 방식의 선택이 필요하다.

하지만 여전히 소프트 그리퍼는 강체 기반의 그리퍼에 비해 낮은 효율의 동력 전달, 정밀 제어의 어려움, 느린 구동 속도 등의 한계가 존재한다. 이를 극복하기 위하여 최근에는 다양한 구동 메커니즘과 파지 메커니즘을 결합한 하이브리드 그리퍼에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이를 통해 더욱 향상된 그리퍼 개발이 이루어지고 있다.

한편, 최근 전 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있는 인공지능 알고리즘과의 결합은 로봇 그리퍼를 더욱더 진일보시키고 있다. 소프트 그리퍼에 대한 다양한 구동 메커니즘, 파지 메커니즘, 센싱 및 피드백 알고리즘, 인공지능 알고리즘의 결합은 가까운 시일 내에 사람만이 할 수 있다고 여겨졌던 정교한 작업을 로봇이 하거나, 심지어는 사람의 조작 능력을 뛰어넘는 로봇 그리퍼의 발전으로 이어질 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Technology Innovation Program (No. 001444157, Development of Heterogeneous Multi-Sensor Micro-System Platform) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MITIE, Korea) and National Research Foundation of Korea (No. NRF-2021R1A2C3006297).

REFERENCES

- Lee, J.-H., Chung, Y. S., Rodrigue, H., (2019), Long Shape memory alloy tendon-based soft robotic actuators and implementation as a soft gripper, *Scientific Reports*, 9(1), 11251.
- Li, L., Xie, F., Wang, T., Wang, G., Tian, Y., Jin, T., Zhang, Q., (2022), Stiffness-Tunable soft gripper with soft-rigid hybrid actuation for versatile manipulations, *Soft Robotics*, 9(6), 1108-1119.
- Roh, Y., Kim, M., Won, S. M., Lim, D., Hong, I., Lee, S., Kim, T., Kim, C., Lee, D., Im, S., Lee, G., Kim, D., Shin, D., Gong, D., Kim, B., Kim, S., Kim, S., Kim, H. K., Koo, B.-K., Seo, S., Koh, J.-S., Kang, D., Han, S., (2021), Vital signal sensing and manipulation of a microscale organ with a multifunctional soft gripper, *Science Robotics*, 6(59), DOI: 10.1126/scirobotics.abi6774.
- Yang, Y., Vella, K., Holmes, D. P., (2021), Grasping with kirigami shells, *Science Robotics*, 6(54), DOI: 10.1126/scirobotics.abd6426.
- Li, H., Xie, D., Xie, Y., (2022), A soft pneumatic gripper with endoskeletons resisting out-of-plane bending, *Actuators*, 11(9), 246.
- Sun, T., Chen, Y., Han, T., Jiao, C., Lian, B., Song, Y., (2020), A soft gripper with variable stiffness inspired by pangolin scales, toothed pneumatic actuator and autonomous controller, *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 61, 101848.
- Wu, Q., Yi, Z., Wang, H., Yuan, H., (2021), Design and experiment of a soft gripper based on cable-driven continuum structures, *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 637-642.
- Shintake, J., Cacucciolo, V., Floreano, D., Shea, H., (2018), Soft robotic grippers, *Advanced Materials*, 30(29), 1707035.
- Hao, Y., Gong, Z., Xie, Z., Guan, S., Yang, X., Ren, Z., Wang, T., Wen, L., (2016), Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length, *Proceedings of the 2016 35th Chinese Control Conference*, 6109-6114.
- Mizushima, K., Oku, T., Suzuki, Y., Tsuji, T., Watanabe, T., (2018), Multi-fingered robotic hand based on hybrid mechanism of tendon-driven and jamming transition, *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (Robosoft)*, 376-381.
- Hughes, J., Culha, U., Giardina, F., Guenther, F., Rosendo, A., Iida, F., (2016), Soft manipulators and grippers: a review, *Frontiers in Robotics and AI*, 3, 69.
- Fang, B., Sun, F., Wu, L., Liu, F., Wang, X., Huang, H., Huang, W., Liu, H., Wen, L., (2022), Multimode grasping soft gripper achieved by layer jamming structure and tendon-driven mechanism, *Soft Robotics*, 9(2), 233-249.
- Yang, Y., Zhang, Y., Kan, Z., Zeng, J., Wang, M. Y., (2020), Hybrid jamming for bioinspired soft robotic fingers, *Soft Robotics*, 7(3), 292-308.
- Zhang, Y., Zhang, W., Gao, P., Zhong, X., Pu, W., (2022), Finger-palm synergistic soft gripper for dynamic capture via energy harvesting and dissipation, *Nature Communications*, 13(1), 7700.
- Li, C., Gu, X., Ren, H., (2017), A cable-driven flexible robotic grasper with lego-like modular and reconfigurable joints, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(6), 2757-2767.
- Zaidi, S. S. Z., Maselli, M., Laschi, C., Cianchetti, M., (2021), Actuation technologies for soft robot grippers and manipulators: a review, *Current Robotics Reports*, 2(3), 355-369.
- Nagua, L., Relañó, C., Monje, C. A., Balaguer, C., (2021), A new approach of soft joint based on a cable-driven parallel mechanism for robotic applications, *Mathematics*, 9(13), 1468.
- Chen, S., Pang, Y., Yuan, H., Tan, X., Cao, C., (2020), Smart soft actuators and grippers enabled by self-powered tribo-skins, *Advanced Materials Technologies*, 5(4), 1901075.

19. Hussain, I., Al-Ketan, O., Renda, F., Malvezzi, M., Prattichizzo, D., Seneviratne, L., Abu Al-Rub, R. K., Gan, D., (2020), Design and prototyping soft-rigid tendon-driven modular grippers using interpenetrating phase composites materials, *The International Journal of Robotics Research*, 39(14), 1635-1646.
20. Hu, W., Mutlu, R., Li, W., Alici, G., (2018), A structural optimisation method for a soft pneumatic actuator, *Robotics*, 7(2), 24.
21. Lee, J.-Y., Eom, J., Yu, S. Y., Cho, K., (2020), Customization methodology for conformable grasping posture of soft grippers by stiffness patterning, *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 114.
22. Zhou, F., Zhang, M., Cao, X., Zhang, Z., Chen, X., Xiao, Y., Liang, Y., Wong, T.-W., Li, T., Xu, Z., (2019), Fabrication and modeling of dielectric elastomer soft actuator with 3D printed thermoplastic frame, *Sensors and Actuators A: Physical*, 292, 112-120.
23. Bar-Cohen, Y., Anderson, I. A., (2019), Electroactive polymer (EAP) actuators-background review, *Mechanics of Soft Materials*, 1(1), 5.
24. Do, P. T., Le, Q. N., Luong, Q. V., Kim, H.-H., Park, H.-M., Kim, Y.-J., (2023), Tendon-Driven gripper with variable stiffness joint and water-cooled SMA springs, *Actuators*, 12(4), 160.
25. Linghu, C., Zhang, S., Wang, C., Yu, K., Li, C., Zeng, Y., Zhu, H., Jin, X., You, Z., Song, J., (2020), Universal SMP gripper with massive and selective capabilities for multiscaled, arbitrarily shaped objects, *Science Advances*, 6(7), DOI: 10.1126/sciadv.aay5120.
26. Zhou, L., Ren, L., Chen, Y., Niu, S., Han, Z., Ren, L., (2021), Bio-inspired soft grippers based on impactive gripping, *Advanced Science*, 8(9), 2002017.
27. Brown, E., Rodenberg, N., Amend, J., Mozeika, A., Steltz, E., Zakin, M. R., Lipson, H., Jaeger, H. M., (2010), Universal robotic gripper based on the jamming of granular material, *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 107(44), 18809-18814.
28. Okuno, Y., Shigemune, H., Kuwajima, Y., Maeda, S., (2019), Stretchable suction cup with electroadhesion, *Advanced Materials Technologies*, 4(1), 1800304.
29. Meloni, G., Tricinci, O., Degl'Innocenti, A., Mazzolai, B., (2020), A protein-coated micro-sucker patch inspired by octopus for adhesion in wet conditions, *Scientific Reports*, 10(1), 15480.
30. Wang, Y., Sun, G., He, Y., Zhou, K., Zhu, L., (2022), Octopus-inspired sucker to absorb soft tissues: Stiffness gradient and acetabular protuberance improve the adsorption effect, *Bioinspiration & Biomimetics*, 17(3), 036005.
31. Jeong, H. E., Lee, J.-K., Kim, H. N., Moon, S. H., Suh, K. Y., (2009), A nontransferring dry adhesive with hierarchical polymer nanohairs, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(14), 5639-5644.
32. Mengüç, Y., Yang, S. Y., Kim, S., Rogers, J. A., Sitti, M., (2012), Gecko-inspired controllable adhesive structures applied to micromanipulation, *Advanced Functional Materials*, 22(6), 1246-1254.
33. Boesel, L. F., Greiner, C., Arzt, E., Del Campo, A., (2010), Gecko-inspired surfaces: a path to strong and reversible dry adhesives, *Advanced Materials*, 22(19), 2125-2137.
34. Yi, H., Lee, S. H., Seong, M., Kwak, M. K., Jeong, H. E., (2018), Bioinspired reversible hydrogel adhesives for wet and underwater surfaces, *Journal of Materials Chemistry B*, 6(48), 8064-8070.
35. Song, S., Sitti, M., (2014), Soft Grippers using micro-fibrillar adhesives for transfer printing, *Advanced Materials*, 26(28), 4901-4906.
36. Amano, K., Iwasaki, Y., Nakabayashi, K., Iwata, H., (2019), Development of a three-fingered jamming gripper for corresponding to the position error and shape difference, *Proceedings of the IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, 137-142.
37. Chin, L., Barscevicus, F., Lipton, J., Rus, D., (2020), Multiplexed manipulation: versatile multimodal grasping via a hybrid soft gripper, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 8949-8955.
38. Ruotolo, W., Brouwer, D., Cutkosky, M. R., (2021), From grasping to manipulation with gecko-inspired adhesives on a multifinger gripper, *Science Robotics*, 6(61), DOI: 10.1126/scirobotics.abi9773.
39. Park, W., Park, S., An, H., Seong, M., Bae, J., Jeong, H. E., (2024), A sensorized soft robotic hand with adhesive fingertips for multimode grasping and manipulation, *Soft Robotics*, <https://doi.org/10.1089/soro.2023.0099>.



Hyeonseok Song

is a Ph.D. student in the School of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) under the guidance of Prof. Hoon Eui Jeong. His research interests include soft electronics and bioinspired adhesives.

E-mail: hsong@unist.ac.kr



Dong Kwan Kang

is a Ph.D. student in the School of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) under the guidance of Prof. Hoon Eui Jeong. His research interests include nanoelectronics and soft robotics.

E-mail: austc101@unist.ac.kr

**Seongjin Park**

is a Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) under the guidance of Prof. Hoon Eui Jeong. His research interests include soft robotics and bioinspired adhesives.

E-mail: qkrtjdwls918@unist.ac.kr

**Hee Jin Lee**

is a Ph.D. student in the School of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) under the guidance of Prof. Hoon Eui Jeong. His research interests include smart materials and bioinspired adhesive based energy harvesting.

E-mail: l.heejin@unist.ac.kr

**Hoon Eui Jeong**

earned his Ph.D. from the School of Mechanical and Aerospace Engineering at Seoul National University in 2009. Following this, he undertook postdoctoral research at the University of California, Berkeley, under the guidance of Prof. Peidong Yang. He embarked on his independent academic career in 2012 as an assistant professor in the Department of Mechanical Engineering at Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST). His research currently focuses on bioinspired soft materials, wearables, and soft robotics..

E-mail: hoonejeong@unist.ac.kr