

공압 파우치 액추에이터 구동 오리가미 그리퍼

Pneumatic Pouch Actuator-Driven Origami Gripper

안수종¹, 정현환[†]Sujong An¹, Hyunhwan Jeong[†]

Abstract: This paper presents a novel gripper system that combines pneumatic pouch actuators with an origami-inspired structure for achieving flexible grasping in confined environments. The proposed gripper is designed to transform from a flat configuration into a three-dimensional grasping structure by deploying an origami mechanism, enabling the manipulation of objects with diverse shapes. To realize such complex folding geometry, a double-fold origami structure was adopted for the finger joint design. The proposed mechanism enables flexible grasping motions, including passing through narrow gaps and manipulating various objects. The origami gripper was designed and analyzed through kinematic modeling and simulation, and a prototype hardware system was developed. In order to verify the validity and feasibility of the proposed design, various grasping experiments were conducted using the prototype hardware.

Keywords: Origami Gripper, Pneumatic Pouch Actuator, Slot-Through Grasping.

1. 서 론

최근 로봇공학 분야에서는 인간과 유사한 유연한 동작을 구현하기 위해 소프트 로보틱스(Soft Robotics)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^[1,2]. 소프트 로봇은 전통적인 강체 링크 기반 로봇과 달리, 구조적 순응성을 이용하여 예기치 못한 접촉이나 외력에 안전하게 대응할 수 있으며, 복잡한 환경에서도 안정적으로 물체를 조작할 수 있는 장점을 가진다^[3]. 특히 소프트 그리퍼는 복잡한 물체 형상을 별도의 경로 계획 없이 파지할 수 있어, 자동화 및 비정형 환경 조작에 널리 활용되고 있다^[4,5]. 이러한 소프트 그리퍼는 의료, 농업, 식품, 전자 부품 조립 등 섬세한 작업이 필요한 다양한 분야에서 인간의 손을 대체할 잠재력을 지닌 기술로 평가받고 있다^[6,7].

이 가운데 오리가미(Origami) 구조는 단순한 평면 접힘을 통해 복잡한 3차원 변형을 만들 수 있다는 점에서 소프트 로보틱스 분야에서 주목받는 설계 패러다임이다^[8,9]. 오리가미 구조는 구조적으로 가볍고 구동이 단순하다는 장점을 갖는다^[10]. 이러한 특성 덕분에 오리가미 기반 그리퍼는 낮은 비용과 높은 적응성을 동시에 확보할 수 있어 연구 초기부터 다양한 형태의 파지 시스템으로 응용되어 왔다^[11].

그러나 기존의 오리가미 기반 그리퍼는 대부분 단일 구동 또는 단일 공압 채널을 이용한 구조로 설계되었다^[12,13]. 이는 설계가 단순하고 제어가 용이하다는 장점이 있으나, 구동원이 하나이기 때문에 모든 관절이 동시에 움직이게 된다^[14]. 따라서 그리퍼 전체의 변형은 제한적이며, 특정 관절만 선택적으로 제어하거나 비대칭적 파지를 구현하는 것은 불가능하다^[15]. 그 결과 기존 오리가미 그리퍼는 순응적인 파지에는 적합하지만 정밀 조작과 같은 고도화된 동작에는 제약이 존재한다.

또한 이러한 단일 구동 방식은 좁은 공간에서의 조작 작업에도 한계를 보인다^[16]. 예를 들어, 실제 산업 현장에서는 협소한 슬롯(Slot) 내부나 복잡한 구조물 사이에서 특정 부품을 잡거나 방향을 맞추는 작업이 요구되지만, 기존의 오리가미 그리퍼는 모든 관절이 동시에 접히고 퍼지기 때문에 협소 공간에서의 진입 및 파지 동작인 슬롯-스루(slot-through) 동작이나 부분적 관절 구동이 어렵다^[17,18]. 이는 오리가미 구조의 순응성과 변형 가

Received : Oct. 27. 2025; Revised : Nov. 21. 2025; Accepted : Nov. 25. 2025

※ This work was supported by the Basic Science Research Program [NRF-2022R111A3066094] and Industrial Strategic Technology Development Program (RS-2024-00443339) funded by the Ministry of Education (MOE) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

1. Principal Researcher, Department of Electro-Mechanical System Engineering, Korea University, Sejong, Korea (dao1367@naver.com)

† Associate Professor, Corresponding author: Department of Control and Instrumentation Engineering, Korea University, Sejong, Korea (hyunhwanjeong@korea.ac.kr)

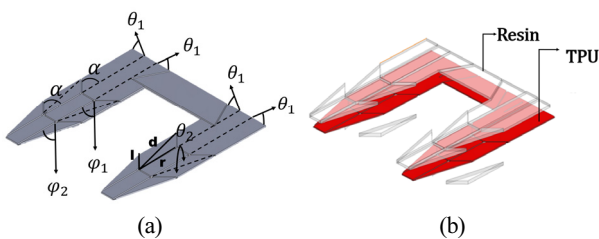
능성에 초점을 둔 선행연구들^[19,20]이 사람의 손과 유사한 정밀 조작 및 관절 독립 제어에는 도달하지 못했다는 한계를 보완하고자 하는 시도이다.

이러한 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 공압 파우치를 이용하여 관절 독립 제어할 수 있는 파우치 액추에이터 구동 오리가미 그리퍼를 제안한다. 공압 파우치는 얇은 필름 내부에 공기를 주입하여 부피 팽창을 유도함으로써 힘을 발생시키는 초경량 연성 액추에이터로, 구조가 단순하고 제작이 용이하며 반복적인 변형에도 높은 내구성과 유연성을 지닌다. 특히, 공압 파우치의 얇고 유연한 특성으로 인해 제안된 그리퍼는 접힌 상태로 좁은 틈새나 복잡한 구조 내부를 통과한 뒤 내부에서 전개되어 물체를 파지하는 슬롯-스루 작업을 수행할 수 있다. 이러한 구조적 특성은 기존의 그리퍼로는 구현하기 어려운 협소 공간 내 조작에 매우 유리한 장점을 제공한다.

2. 하드웨어 설계 및 기구학적 해석

2.1 오리가미 구조의 설계 개요

기존의 오리가미 기반 그리퍼는 구조적 제약으로 인해 관절의 자유도가 제한되어 정밀한 조작이 어려웠다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 [Fig. 1(a)], [Fig. 1(b)]에 나타난 바와 같이 두 번째 관절에 이중 접힘 구조(Double-Folding Structure)를 적용하였다. [Fig. 1(b)]에 나타난 붉은 부분의 그리퍼 프레임은 각 관절이 원활하게 접히도록 TPU 재질로 제작된다. 관절부는 굽힘 운동을 유도하기 위해 0.3 mm로 얇게 설계하였고, 나머지 부분은 구조 강성을 유지하기 위해 1.5 mm 두께로 설계하였다. 그림에서 투명한 부분은 레진(Resin)으로 제작되어 전체 구조를 지지하는 역할을 한다. 레진의 두께로 인한 간섭을 방지하기 위해 날개 부분의 레진 프레임은 TPU 프레임의 상하 방향으로 교차하여 부착하였다. 이러한 구조적 배치는 오리가미 메커니즘이 균일한 접힘 운동과 균형 잡힌 기계적 특성을 구현할 수 있도록 한다.



[Fig. 1] Origami Pattern (a) origami gripper structure, (b) origami structure assembly

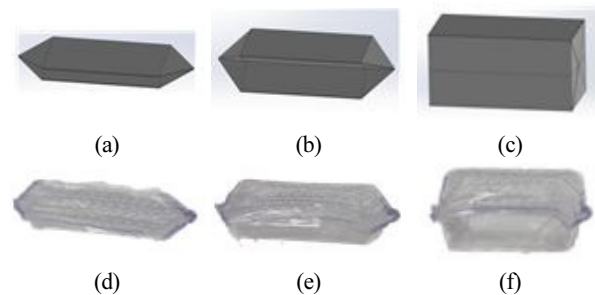
2.2 공압 파우치 액추에이터의 구조 및 결합

파우치 액추에이터는 유연한 재질의 소재를, 열융착을 통해 제작하였으며, [Fig. 2]는 공압에 의하여 구동하는 파우치 액추에이터의 초기 상태, 중간 팽창 상태, 완전 팽창 상태를 보여준다. [Fig. 1(a)]에서 실제 하드웨어의 l, r, d 흰지 파라미터를 각각 21.21 mm, 45 mm, 61.84 mm로 설정하였다. 이 기구학적 파라미터와 인접 관절, 프레임과의 간섭 조건을 고려하여, 오리가미 구조에 간섭 없이 장착할 수 있도록 파우치 액추에이터의 최대 외형 치수는 약 15*15*30 mm로 설정하였다. 파우치 액추에이터는 대칭 구조로 설계되어 외력이 없는 상황에서는 균일한 형태의 변형을 제공하도록 하였다.

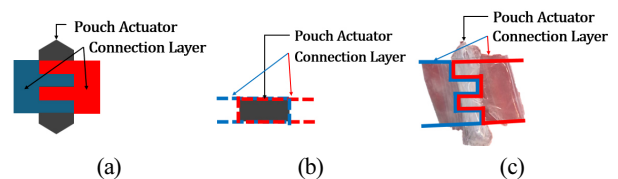
[Fig. 3]은 파우치 액추에이터가 오리가미 그리퍼의 각 관절부에 결합한 형상을 보여준다. 파우치 액추에이터는 양쪽에서 감싸는 두 개의 연결부에 의해 결합되어 있으며 공기가 주입되면 내부 압력에 의해 파우치 액추에이터가 팽창하고, 이 팽창을 통해 양쪽에 지지점에 대칭적으로 힘이 전달되어, 양쪽 날개가 서로 당겨지며 각 관절에 굽힘 운동이 발생하도록 구성되었다.

2.3 기구학적 해석

제안한 오리가미 구조의 제어기 구성을 위하여 관절의 거동을 기구학적으로 해석하였다. 본 연구에서 제안한 이중 접힘형 오리가미 구조는 각 관절이 양 날개의 접힘을 통해 관절의 굽힘



[Fig. 2] Pneumatic Pouch Actuator, (a-c) Designed CAD models (d-f) Fabricated prototype actuator



[Fig. 3] Pouch Actuator integration with the origami gripper (a) Top view showing the motor wrapped by the layers.(b)Side view showing the motor wrapped by both layers. (c) Actual integrated gripper.

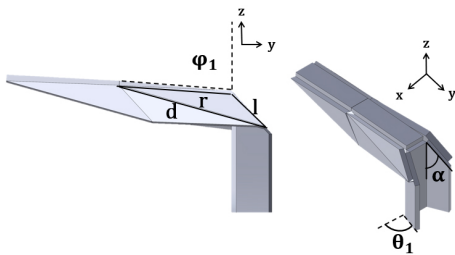
을 구현하도록 구성하였다. 첫 번째 관절의 경우 단일 접힘 구조로 동작하며, [Fig. 4]와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서와 같이 양 날개면의 경사각 α 와 힌지의 회전각 ϕ_1 , 그리고 면과 힌지의 길이 파라미터를 각각 l, r, d 로 정의하였다. 이때 r 과 l 은 각각 힌지의 x 축 방향의 길이, 날개면의 아래쪽 빗변 d 는 날개면의 바깥쪽 빗변의 길이를 의미한다. 이를 통해 첫 번째 관절의 힌지 회전각 ϕ_1 과 양 날개 접힘각 θ_1 사이의 관계를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_1 = \arccos\left(\frac{d^2 - l^2 - r^2}{2lr\sqrt{\cos^2\alpha + (\sin\alpha\sin\theta_1)^2}}\right) + \arctan\left(\frac{\sin\alpha\sin\theta_1}{\cos\alpha}\right) \quad (1)$$

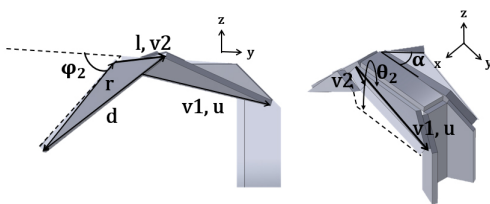
[Fig. 5]에서와 같이 두 번째 관절의 경우 첫 번째 관절이 접히고, 접힌 상태에서 한 번 더 접히는 구조인 이중 접힘 구조로 설계되었다. 두 번째 관절의 해석에서는 쿼터니언을 이용하여 회전의 누적과 복합적인 변화를 간결하게 나타낼 수 있다. 첫 번째 관절의 회전은 θ_1 만큼 y 축을 기준으로 발생하며, 이때의 회전 쿼터니언 식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$q_{\theta_1} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \\ 0 \\ \sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \\ 0 \end{bmatrix}, q_{\theta_1}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \\ 0 \\ -\sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

이로부터 다음 관절 회전을 위한 회전축 벡터(v_1)를 도출할 수 있다.



[Fig. 4] Single-Folding Mechanism



[Fig. 5] Double-Folding Mechanism

$$[0, v_1] = q_{\theta_1} \otimes [0, v_0] \otimes q_{\theta_1}^{-1} \quad (3)$$

이후, 식 (4)와 같이 회전된 벡터를 정규화하여 다음 회전의 축(u)으로 사용한다.

$$u = \frac{v_1}{\|v_1\|} \quad (4)$$

두 번째 회전은 앞서 구한 회전축 u 를 기준으로 θ_2 만큼 회전하는 과정이며, 이때 쿼터니언은 식 (5)와 같이 정의된다. 최종적으로 v_2 는 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

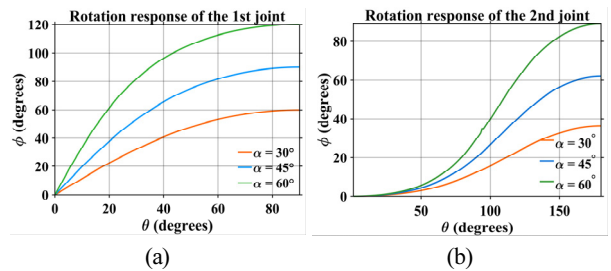
$$q_{\theta_2} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right)u_x \\ \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right)u_y \\ \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right)u_z \end{bmatrix}, q_{\theta_2}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \\ -\sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right)u_x \\ -\sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right)u_y \\ -\sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right)u_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[0, v_2] = q_{\theta_2} \otimes (q_{\theta_1} \otimes [0, w_0] \otimes q_{\theta_1}^{-1}) \otimes q_{\theta_2}^{-1} \quad (6)$$

이 과정을 통해 회전 후의 벡터 좌표(x, y, z)를 계산할 수 있으며, 이를 이용하여 식 (7)과 같이 날개 회전과 관절 회전에 대한 관계식을 도출할 수 있다.

$$\phi_2 = \arccos\left(\frac{d^2 - (x^2 + y^2 + z^2 + r^2)}{2r\sqrt{y^2 + z^2}}\right) + \arctan2\left(\frac{z}{y}\right) \quad (7)$$

[Fig. 6(a)], [Fig. 6(b)]는 제안된 오리가미 구조의 이론적 회전 결과를 보여준다. [Fig. 6(a)]는 첫 번째 관절인 단일 접힘 구조의 이론적 결과로, 날개의 접힘 각 θ_1 에 대한 출력 회전인 각 ϕ_1 의 변화를 계산한 결과이다. $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 모두 θ 가 증가함에 따라 ϕ_1 는 비선형적으로 증가하며, α 가 클수록 더 큰 회전 응답을 보인다. (b)는 두 번째 관절인 이중 접힘 구조의 이론적 결과이며, 첫 관절이 90° 회전한 상태에서 누적하여 회전한 벡터 좌표인 (x, y, z)를 이용하여 ϕ_2 를 계산한 결과이다. 두 번

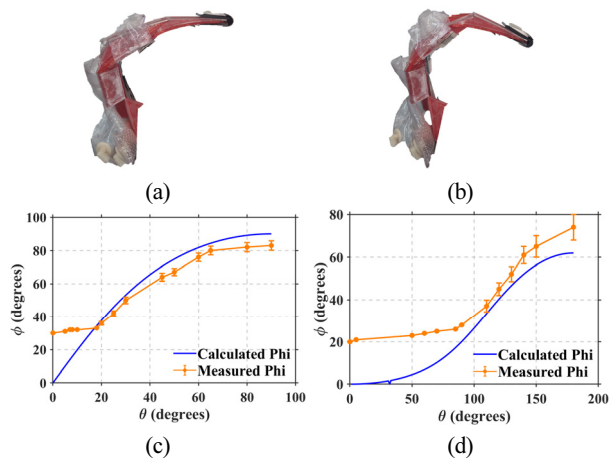


[Fig. 6] Theoretical rotation result of the 1st and 2nd joints

째 관절은 초기 회전이 작고 중간 영역에서 급격히 증가하는 S 자형 응답을 나타낸다. 본 논문에서는 물건을 파지하는데 적합하다고 판단한 $\alpha = 45^\circ$ 인 설계를 선정하였다.

2.4 기구학 해석 검증

[Fig. 7]은 제안된 파우치 액추에이터 구동 오리가미 그리퍼의 1번 관절(단일 접힘 구조) 및 2번 관절(이중 접힘 구조)에 대한 이론적 기구학 모델과 실제 하드웨어 측정 결과를 비교하여 모델의 예측 정확도를 검증한 결과이다. 이 그림의 상단에 제시된 [Fig. 7(a)], [Fig. 7(b)]는 1번 관절과 2번 관절이 각각 최대 각도로 굽혀졌을 때의 실제 하드웨어 최종 굽힘 자세를 보여준다. 각 관절이 공압 구동을 통해 원하는 최대 변형 범위에 도달했음을 알 수 있다. 각 관절의 회전 응답 그래프 [Fig. 7(c)], [Fig. 7(d)]에서 파란색 선은 코사인 법칙 및 쿼터니언을 통해 계산된 이론적 각도 변화(Calculated Phi)를, 주황색 선은 실제 공압 구동 시 측정된 각도 변화(Measured Phi)를 나타낸다. 결과에서 보이는 것과 같이 두 관절의 실험 결과는 해석 결과와 평균 약 10% 이내의 차이를 나타낸다. 이는 그리퍼를 이루는 소재의 유연성으로 인한 변형 및 구동기와의 마찰력 등으로 발생하는 비선형적 특성에 의해 발생하는 오차이다. 하지만 관절의 거동에 대한 특성은 해석의 결과와 유사한 양상을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 변형 그래프에서 측정값은 0° 근처에서 시작되지 않고 일정 각도(약 20°)에서 시작하는 비선형적 양상을 보인다. 이는 관절이 모두 펼쳐진 자세에 대한 특이(singular)영역을 회피하고 구동 안정성을 확보하기 위해, 관절이 20도 정도 굽어진 형태로 초기 자세를 구현했기 때문이다.



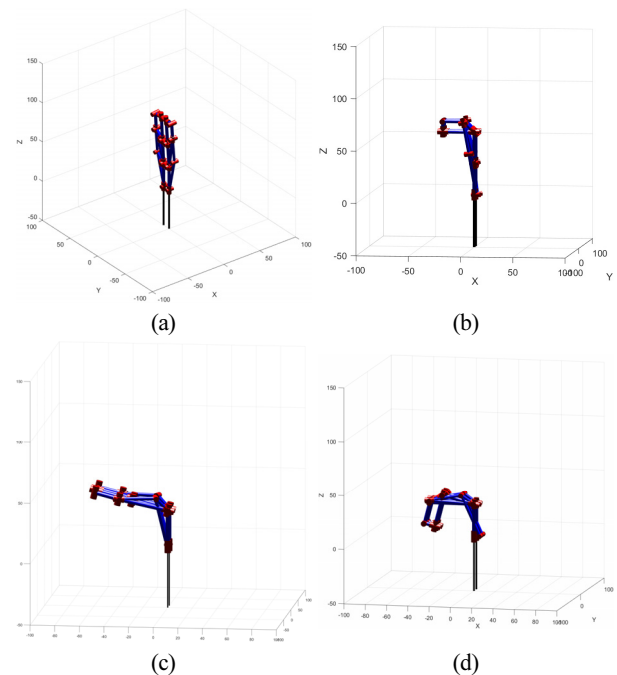
[Fig. 7] Comparison between theoretical and measured rotation responses for the 1st and 2nd joints. (a) Final bent posture of the 1st joint. (b) Final bent posture of the 2nd joint. (c) Comparison data for the 1st joint. (d) Comparison data for the 2nd joint.

[Fig. 8]은 제안한 오리가미 구조 메커니즘의 기구학적 해석의 결과를 검증하기 위하여 MATLAB 시뮬레이션으로 구현한 결과이다. 중앙 연결부 파라미터는 $15 \times 45 \text{ mm}$ 로 설정하였으며, $\alpha = 45^\circ$ 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 이 과정에서 앞서 구한 기구학적 관계식 식(1)과 (7)을 적용하여 관 관절의 변화를 적용하였다. [Fig. 8(a)]는 모든 관절이 중립 상태인 초기 자세, [Fig. 8(b)]는 첫 번째 관절만 구동된 상태, [Fig. 8(c)]는 두 번째 관절만 구동된 상태, [Fig. 8(d)]는 두 관절을 순차적으로 구동하여 이중 접힘 구조를 나타낸다.

3. 실험 및 결과

3.1 하드웨어 구성

[Fig. 9]는 본 논문에서 제안한 파우치 액추에이터 구동 오리가미 그리퍼의 프로토타입 하드웨어를 보여준다. 표시한 FS1~FS4는 각 관절부의 굽힘 각을 측정하기 위해 부착된 굽힘 센서(Flex Sensor)를 의미한다. 각 센서는 1번 관절부터 4번 관절까지 순서대로 대응하며, 공압 주입량에 따른 실제 관절 굽힘 각을 실시간으로 계측한다. 2 자유도를 갖는 손가락 2개와 1 자유도의 손바닥을 통해 총 5 자유도를 갖도록 그리퍼가 구성되었다. 그리퍼 자체 무게는 50 g 으로 경량성을 확보하였다. 본 그리퍼는 단일 손가락만으로 물체를 손가락 끝으로 들어 올려 최

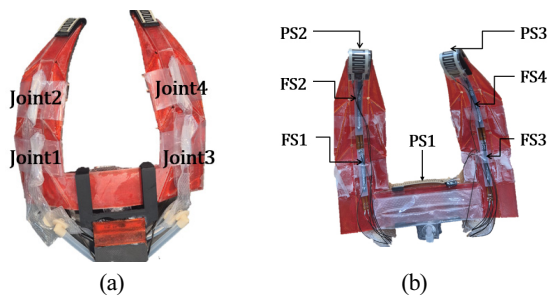


[Fig. 8] Simulation result of the proposed mechanism (a) Initial position, (b) First joint bending, (c) Second joint bending, (d) Full joint bending.

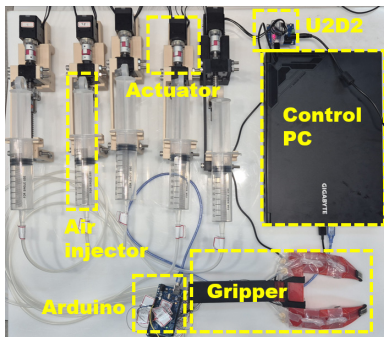
대 지지 하중(payload)을 측정하였다. 완전히 굽혀진 상태에서 오리가미 구조의 기계적 잠금 효과가 발휘되어 최대 200 g까지 안정적으로 지지할 수 있다.

[Fig. 10]은 그리퍼 하드웨어 시스템을 전체 구성도로, Dynamixel 액추에이터 5개를 통해 5개의 관절에 연결된 5개의 공기 주입기의 공기 주입량을 제어한다. 공기 주입기의 경우 피스톤 1 mm 변위당 공기 1 ml 주입되도록 구성되었으며, 최대 80 ml의 공기를 주입할 수 있도록 구성되어 있다.

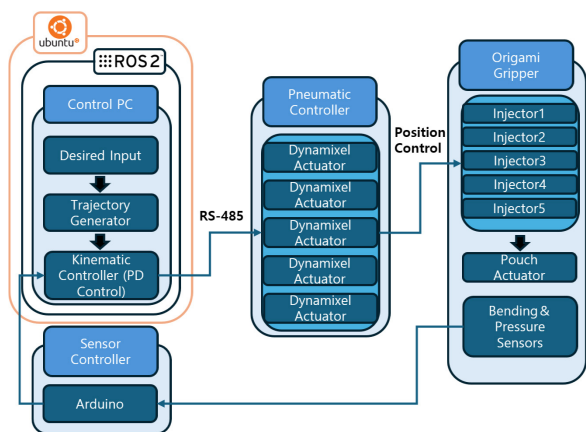
[Fig. 11]은 시스템 제어 프로그램 구성도이다. ROS 2 환경에서 공압 생성을 위한 피스톤의 경로 생성 및 위치 제어를 수행하도록 구성되었다. 이러한 방식으로 또한, 제어를 위하여



[Fig. 9] Prototype gripper hardware



[Fig. 10] Experimental setup



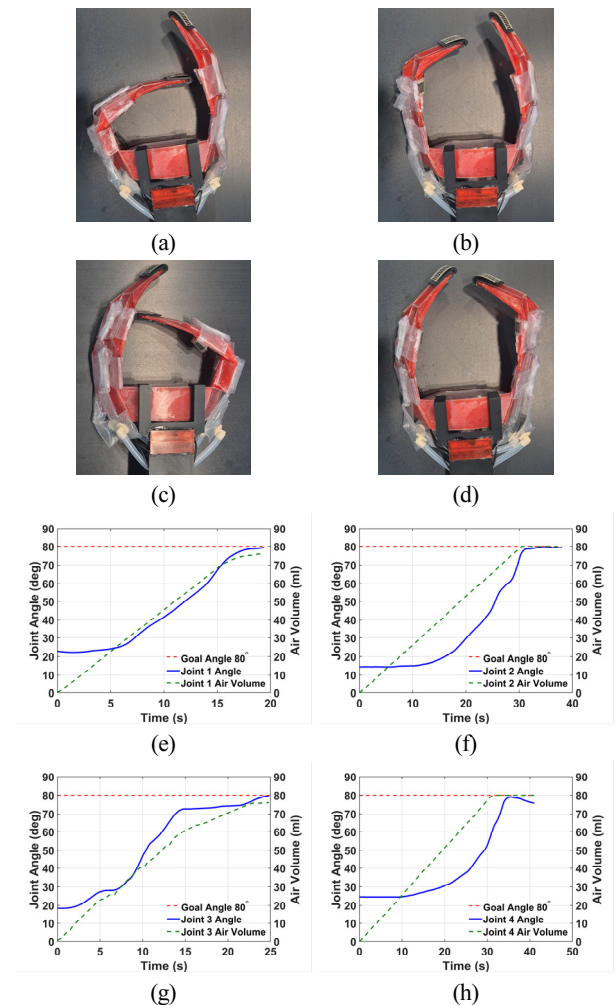
[Fig. 11] Overall control architecture of the proposed system.

각 관절부에 부착된 굽힘 센서와 압력 센서로부터 200 Hz 주기로 관절각 및 파지 압력 데이터를 수집하도록 구성되었다. 이를 통해 관절의 실제 굽힘 상태와 파지압력을 모니터링하며 PD 제어를 통해 각 관절을 원하는 각도로 제어할 수 있다.

3.2 파지 실험 및 동작 결과

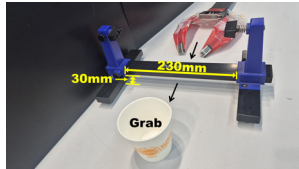
본 연구에서는 다양한 파지 실험을 통해 제안한 파우치 액추에이터 구동 오리가미 그리퍼의 성능을 검증한다. 이를 위하여 그리퍼 구동 실험, 물체 파지 실험 및 제안한 파우치 액추에이터 구동 오리가미 그리퍼의 장점 중 하나인 슬롯-스루 동작을 통한 파지 실험을 수행하였다.

[Fig. 12]는 제안된 파우치 액추에이터 구동 오리가미 그리퍼의 관절 독립 구동 특성에 대한 실험이다. [Fig. 12(a)], [Fig. 12(b)], [Fig. 12(c)], [Fig. 12(d)]는 각 관절(Joint 1부터 4)에 개



[Fig. 12] Individual joint bending motions and measured rotation responses. (a)~(d) Top view (e)~(h) Experimental data for joint 1~4.

별적으로 공압을 인가했을 때의 동작 모습과 이에 상응하는 관절의 회전에 대한 측정 결과를 보여준다. 결과에서처럼 개별 파우치 액추에이터의 공압 주입에 따라 제안한 그리퍼 하드웨어의 관절이 독립적으로 회전을 확인할 수 있다. [Fig. 12(e)], [Fig. 12(f)], [Fig. 12(g)], [Fig. 12(h)]는 각 관절에 주입된 공기량(Air Volume, mL) 변화에 따른 관절의 실제 굽힘 각도(Joint

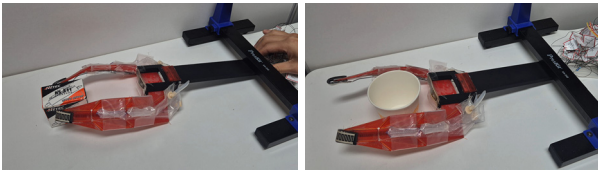


(a)



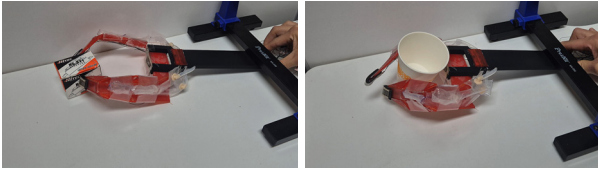
(b)

(c)



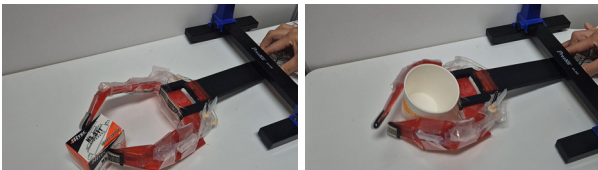
(d)

(e)



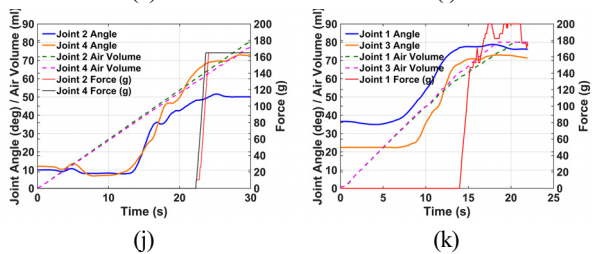
(f)

(g)



(h)

(i)



(j)

(k)

[Fig. 13]. Experimental validation of slot-through grasping versatility. (a) Overall setup for the slot-through grasping demonstration, (b), (c) Passing through a narrow slot (d), (e) Central section actuation and grasp preparation. (f), (g) Grasp done. (h), (i) Lifting&moving an object (j) Experimental data for pinch grasp (k) Experimental data for power grasp

Angle)를 측정할 정량적 응답 곡선이다. 이는 관절 독립 제어 능력을 정량적으로 입증한다. 실험 결과, 각 관절의 굽힘은 하드웨어 물리적 한계인 80°까지 80 ml의 공기 주입을 통해 안정적으로 구동할 수 있음을 보여주고 있다. 다만, 관절의 굽힘 동작 중 구동 하중에 의하여 비선형적인 공기 주입량이 나타남을 확인할 수 있다. 이는 관절에 연결된 굽힘센서를 통해 관절의 회전각을 측정하고 이를 이용한 피드백 제어를 통해 정확한 회전 각도 제어를 구현할 수 있다.

[Fig. 13(a)]은 제안된 그리퍼가 협소 공간 통과 능력(슬롯-스루)을 유지하면서, 다른 물체에 대한 파지 유연성 확보를 검증하기 위한 실험 환경을 보여준다. 이 실험에서는 제안한 파우치 액추에이터 구동 오리가미 그리퍼가 높이 30 mm의 협소 공간(슬롯, slot)을 통과한 뒤, 핀치 파지(pinch grasp)와 파워 파지(power grasp)를 이용하여 서로 다른 두 물체를 파지하게 된다. [Fig. 13]에서 그림의 좌측 열린 핀치 파지를 통한 직육면체 상자의 파지 결과, 우측 열린 파워 파지를 통한 종이컵의 파지 결과를 보여준다. [Fig. 13(b)], [Fig. 13(c)]는 그리퍼가 평평하게 퍼진 상태를 유지하며 슬롯을 통과하는 장면을 보여준다. [Fig. 13(d)], [Fig. 13(e)]은 슬롯 통과 후, 손바닥에 부착된 파우치 액추에이터의 동작을 통해 그리퍼의 형태를 만들고, 파지 준비 자세를 형성한다. 이후, [Fig. 13]의 (f)와 (g)는 각각 핀치 파지와 파워 파지를 통해 상자와 종이컵 안정적으로 파지하였음을 보여준다. [Fig. 13]의 (h)와 (i)는 각각 파지한 상자와 종이컵을 들어올려 다른 지점으로 옮기는 장면을 나타낸다. [Fig. 13]의 (j)와 (k)를 통해 슬롯-스루 실험에서 제안한 그리퍼 시스템에 부착된 센서를 통해 파지 동작시 각 파우치 액추에이터에 주입된 공기량과 이에 따른 관절의 회전량, 그리고 물체를 파지하는 동안에 그리퍼에 부착된 압력센서에서 측정된 파지력을 확인할 수 있다. 본 실험 결과에서 확인할 수 있듯이, 제안한 파우치 액추에이터 구동 오리가미 그리퍼는 다양한 물체를 파지할 수 있을 뿐만 아니라 공압 파우치 액추에이터와 결합한 오리가미 그리퍼의 구조적 특징으로 인해 좁은 틈을 통과하여 파지 작업을 할 수 있음을 확인하였다.

[Table 1] Comparison of origami grippers

	Firouzeh&Paik ^[8]	Orlofsky et al. ^[19]	Proposed gripper
Payload	70g/finger	150g/finger	200g/finger
Joint control	all active	with passive	All active
Actuation Method	Tendon-driven	Tendon-driven	Pneumatic
Grasp direction	Gravity direction only	All-direction	All-direction
Slot-through	Impossible	Impossible	Possible

4. 결론

본 논문에서는 공압 파우치 액추에이터를 이용하여 각 관절을 독립적으로 제어할 수 있는 파우치 액추에이터 구동 오리가미 그리퍼 제안하였다. 제안된 그리퍼는 기존 단일 구동 오리가미 구조의 제약을 극복하고, 각 관절의 독립 구동을 통해 다양한 형태의 파지 동작을 수행할 수 있음을 확인하였다.

기구학적 해석을 통해 단일 접힘 및 이중 접힘 구조의 기구학적 해석을 수행하였으며, 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안된 해석 모델이 실제 기구적 거동과 일치함을 검증하였다. 또한 제안된 파우치 액추에이터 구동 오리가미 그리퍼 프로토타입 하드웨어를 이용하여 기본 동작 실험 및 슬롯-스루 파지 실험을 통해 그 성능을 검증하였다. [Table 1]에는 대표적인 오리가미 그리퍼와 제안한 그리퍼의 주요 특징을 비교하고 있다. 표에서 보이는 것과 같이 제안한 그리퍼는 다른 와이어 구동 오리가미 그리퍼와 비교하여도 파지력이 큰 것을 알 수 있다. 또한 그리퍼의 전체의 크기가 작고 전방향 파지가 가능하기 때문에 슬롯-스루 작업에 적합하다.

향후 연구에서는 각 관절에 부착된 압력 센서의 실시간 데이터를 피드백 기반으로 파지력을 제어할 수 있는 알고리즘을 개발하고 이를 통해 물체의 파지력에 따라 안정적인 파지를 구현할 수 있도록 할 것이다. 더 나아가, 다관절 동기 제어 알고리즘의 설계 및 공압 시스템의 응답속도 개선을 통해 실제 환경에서 다양한 로봇 파지를 구현할 수 있도록 할 예정이다.

References

[1] Y. A. AboZaid, M. T. Aboelrayat, I. S. Fahim, and A. G. Radwan, "Soft robotic grippers: A review on technologies, materials, and applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 372, no. 2022, pp. 115380, 2024, DOI: 10.1016/j.sna.2024.115380

[2] D. Rus and M. T. Tolley, "Design, fabrication and control of soft robots," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 467-475, 2015, DOI: 10.1038/nature14543.

[3] S. Kim, C. Laschi, and B. Trimmer, "Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics," *Trends in Biotechnology*, vol. 31, no. 5, pp. 287-294, 2013, DOI: 10.1016/j.tibtech.2013.03.002

[4] J. Shintake, V. Cacucciolo, D. Floreano, and H. Shea, "Soft Robotic Grippers," *Advanced Materials*, vol. 30, no. 29, pp. 1707035, 2018, DOI: 10.1002/adma.201707035.

[5] A. Dzedzickis, J. J. Petronienė, S. Petkevičius, and V. Bučinskas, "Soft Grippers in Robotics: Progress of Last 10 Years," *Machines*, vol. 12, no. 12, pp. 887, 2024, DOI: 10.3390/machines12120887.

[6] Y. Liu, J. Hou, C. Li, and X. Wang, "Intelligent Soft Robotic Grippers for Agricultural and Food Product Handling: A Brief Review with a Focus on Design and Control," *Advanced*

Intelligent Systems, vol. 5, no. 12, pp. 2300233, 2023, DOI: 10.1002/aisy.202300233.

[7] C. Della Santina, C. Duriez, and D. Rus, "Model-Based Control of Soft Robots: A Survey of the State of the Art and Open Challenges," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 43, no. 3, pp. 30-65, 2023, DOI: 10.1109/MCS.2023.3253419.

[8] A. Firouzeh and J. Paik, "Grasp Mode and Compliance Control of an Underactuated Origami Gripper Using Adjustable Stiffness Joints," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 5, pp. 2165-2173, 2017, DOI: 10.1109/TMECH.2017.2732827.

[9] H. Choi, T. Park, G. Hwang, Y. Ko, D. Lee, T. Lee, J.-O. Park, and D. Bang, "Fabrication of Origami Soft Gripper Using On-Fabric 3D Printing," *Robotics*, vol. 12, no. 6, pp. 150, 2023, DOI: 10.3390/robotics12060150.

[10] S. Li et al., "A Vacuum-driven Origami "Magic-ball" Soft Gripper," *2019 Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, Canada, pp. 7401-7408, 2019, DOI: 10.1109/ICRA.2019.8794068.

[11] N. Ando, K. Takahashi and S. Mikami, "Disposable Soft Robotic Gripper Fabricated from Ribbon Paper with a Few Steps of Origami Folding," *2022 25th Int. Conf. on Mechatronics Technology (ICMT)*, Kaohsiung, Taiwan, pp. 1-4, 2022, DOI: 10.1109/ICMT56556.2022.9997672.

[12] J. Zhu, Z. Chai, H. Yong, Y. Xu, C. Guo, H. Ding, and Z. Wu, "Bioinspired Multimodal Multipose Hybrid Fingers for Wide-Range Force, Compliant, and Stable Grasping," *Soft Robotics*, vol. 10, no. 1, pp. 30-39, 2023, DOI: 10.1089/soro.2021.0126.

[13] S. Liu, H. Wu, Y. Yang and M. Y. Wang, "Parallel-motion Thick Origami Structure for Robotic Design," *2020 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Paris, France, pp. 934-939, 2020, DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9197339.

[14] J. Hughes, U. Culha, F. Giardina, F. Guenther, A. Rosendo, and F. Iida, "Soft Manipulators and Grippers: A Review," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 3, pp. 69, 2016, DOI: 10.3389/frobt.2016.00069.

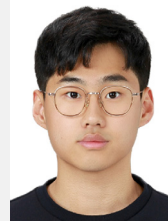
[15] Y. Shan, Y. Zhao, H. Wang, L. Dong, C. Pei, Z. Jin, Y. Sun, and T. Liu, "Variable stiffness soft robotic gripper: design, development, and prospects," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 19, no. 1, pp. 011001, 2023, DOI 10.1088/1748-3190/ad0b8c.

[16] C. Liu, S. J. Wohlever, M. B. Ou, T. Padir, and S. M. Felton, "Shake and Take: Fast Transformation of an Origami Gripper," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 38, no. 1, pp. 491-506, 2021, DOI: 10.1109/TRO.2021.3076563.

[17] T. Nishimura and T. Watanabe, "Single-Motor Robotic Gripper with Three Functional Modes for Grasping in Confined Spaces," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 8, no. 11, pp. 7408-7415, 2023, DOI: 10.1109/LRA.2023.3315559.

[18] Z. Kan, Y. Zhang, Y. Yang, Y. A. Tse, and M. Y. Wang, "An Origami-Inspired Monolithic Soft Gripper Based on Geometric Design Method," *2019 2nd IEEE Int. Conf. on Soft Robotics (RoboSoft)*, Seoul, Korea (South), pp. 470-476, 2019, DOI: 10.1109/ROBOSOFT.2019.8722746.

- [19] A. Orlofsky, C. Liu, S. Kamrava, A. Vaziri, and S. M. Felton, "Mechanically Programmed Miniature Origami Grippers," *2020 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Paris, France, pp. 2872-2878, 2020, DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9196545.
- [20] T. Yan, S.-F. Xu, and K.-C. Chuang, "A Dual-Morphing Pneumatic Origami Gripper," *Actuators*, vol. 14, no. 4, pp. 166, 2025, DOI: 10.3390/act14040166.



안 수 종

2020~현재 고려대학교 전자·기계융합
공학과(공학사)

관심분야: Robotic gripper, Robotic hand



정 현 환

2007 고려대학교 제어계측공학과(공학사)
2014 고려대학교 제어계측공학과(공학박사)
2015~현재 고려대학교 제어계측공학과
부교수

관심분야: Grasping, Robotic hand/gripper, Robotic Manipulation,
Robot mechanism,