

파지와 흡착이 가능한 가변 스트로크 공압 소프트 그리퍼

Pneumatic Grasp-and-Suction Soft Gripper with Variable Stroke

류준혁¹·박성제²·전효종²·송재복[†]

Jun-Hyuck Ryoo¹, Sung-Jae Park², Hyo-Jong Jeon², Jae-Bok Song[†]

Abstract: With the recent emergence of collaborative robots, demand for grippers to be used in service sites is increasing. Soft grippers have advantages in terms of compliance, cost, weight, and stability, but it is difficult to handle objects of various shapes, sizes, and weights with a single gripper. In this study, based on a fluidic elastomer actuator (FEA), we propose a pneumatic soft gripper that can grip a variety of objects, consisting of fingers capable of both grasping and vacuum suction and a base with variable stroke between the fingers using a pneumatic cylinder. A check valve is installed inside the finger, so that when positive pressure is supplied, the finger expands to perform adaptive grasping, and when negative pressure is supplied, vacuum suction can be performed. Grasping experiments were conducted on various objects to evaluate the performance of the proposed gripper, and 94% of 54 gripping objects were successfully grasped.

Keywords: Robotic Gripper, Soft Actuator, Grasping, Vacuum Suction Gripper

1. 서론

대부분의 산업용 로봇은 자동화 공정에서 반복 리프팅 작업이나 조립작업에 특화된 전통적인 강체 그리퍼(rigid gripper)를 널리 사용하고 있다. 최근 협동로봇의 등장과 함께 다양한 분야에서 로봇의 활용이 증가함에 따라 다양한 형상의 물체를 파지할 수 있고, 다양한 작업을 수행할 수 있는 다목적 그리퍼의 수요도 증가하고 있다. 이를 위해 다자유도의 로봇 핸드가 개발되었으나^[1,2], 복잡한 제어 시스템, 높은 단가 및 내구성 문제로 인하여 실제 현장에 적용하기는 어렵다. 반면에, 소프트 그리퍼(soft gripper)는 강체 그리퍼에 비해 비숙련자도 쉽게 사용할 수 있으며, 로봇 시스템 무게 및 비용 절감, 인간-로봇 상호작용 측면 등 여러 면에서 장점이 많다. 또한, 깨지기 쉽거나(fragile) 변

형되기 쉬운 물체를 다루기에 용이하여 보다 다양한 물체를 안정적으로 파지할 수 있다.

소프트 그리퍼는 파지 원리에 따라 구동에 의한 파지, 강성 제어에 의한 파지, 접착력 제어에 의한 파지 등의 3가지 그룹으로 분류할 수 있다^[3]. 첫째 그룹에 해당하는 많은 그리퍼는 fluidic elastomer actuator (FEA)를 사용한다^[4,5]. 이들은 비정형 형상이나 변형에 취약한 물체를 파지하기에는 유리하지만, 얇은 판재 형태의 물체를 파지하기는 어렵다. 둘째 그룹의 그리퍼는 주로 탄성막(elastic membrane) 안에 작은 파티클들을 넣고 막을 수축시켜 강성을 증가시켜 물체를 파지하는 방식을 사용한다^[6,7]. 이들은 물체의 형상에는 잘 적응하지만, 표면이 오목하거나 그리퍼보다 큰 물체를 파지하기는 어렵다. 셋째 그룹의 그리퍼들은 정전기 흡착력(electro-adhesion)을 이용하거나^[8], 게코 접착력(gecko adhesion)을 이용한다^[9,10]. 이들은 파지 전략을 다양화하여 보다 많은 물체를 파지할 수 있지만, 정전기 흡착력을 이용한 그리퍼는 가변하중이 작고, 게코 접착을 이용한 그리퍼는 접착면의 위치에 따라 파지할 수 있는 물체의 형상이 제한된다.

본 연구에서는 앞서 언급한 그리퍼의 문제점을 해결하며, 최대한 다양한 형상, 크기 및 무게의 물체를 파지할 수 있는 소프트 그리퍼를 제안한다. 제안된 그리퍼는 공압으로 구동되는 다

Received : Apr. 18. 2024; Revised : Jul. 14. 2024; Accepted : Jul. 17. 2024

※ This research was supported by the MOTIE under the Industrial Foundation Technology Development Program supervised by the KEIT (No. 20015198).

1. Graduate Student, Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, Korea (jjhh1122@korea.ac.kr)

2. Ph.D Candidate, Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, Korea (shurimia, blackcubes@korea.ac.kr)

† Professor, Corresponding author: Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, Korea (jbsong@korea.ac.kr)

수의 FEA 기반 손가락을 사용하는데, 각 손가락이 진공 흡입이 가능하게 하여 비정형 물체뿐만 아니라, 기존의 FEA를 사용한 소프트 그리퍼가 파지할 수 없는 판재나 박스 형상의 물체도 파지할 수 있다. 또한 FEA의 팽창만으로 파지할 수 없는 크기의 물체까지 파지할 수 있도록 스트로크(stroke)가 변하여 보다 다양한 크기의 물체를 파지할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 그리퍼 손가락과 베이스의 세부 구조 및 작동 원리를 설명한다. 3절에서는 여러 형상의 그리퍼 손가락 형상에 대한 팽창 및 수축 유한요소 해석에 대해 서술한다. 4절에서는 그리퍼의 제작과 파지 실험을 통해 그리퍼의 성능과 범용성을 검증하고, 5절에서 결론을 도출한다.

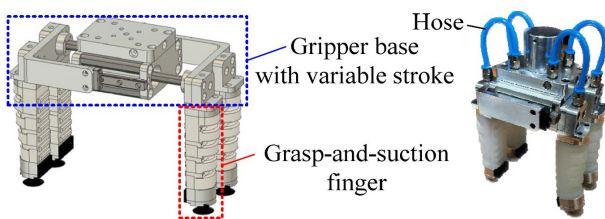
2. 그리퍼 설계

제안된 소프트 그리퍼는 [Fig. 1]과 같이 그리퍼 손가락과 베이스로 구성되어 있다. 그리퍼 손가락은 형상 적응형 및 진공 흡착형 파지가 가능하게 하며, 베이스에는 공압 실린더가 있어 손가락 사이 간격을 변화시킬 수 있다.

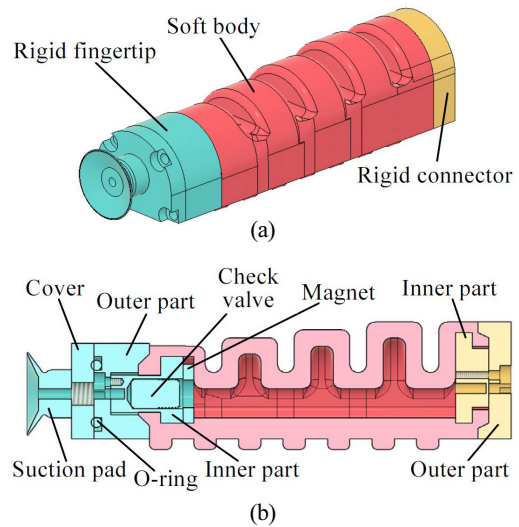
2.1 그리퍼 손가락 설계

대부분의 FEA는 실리콘과 같은 탄성체로 제작되며, 압축공기 공급 시 내부 챔버의 팽창을 통하여 굽힘이 발생하는 방식으로 작동한다. 공압 소프트 그리퍼는 이러한 FEA를 여러 개 장착하여 손가락처럼 사용하여 물체를 파지한다^[11-14]. 본 연구에서는 기존의 공압 소프트 그리퍼의 특징을 유지하며 진공 흡착형 파지도 가능하도록 소프트 손가락을 설계하였다. 제안된 그리퍼 손가락은 [Fig. 2(a)]에서 보듯이 흡착패드 및 체크밸브가 장착되는 rigid fingertip, 다수의 공기 챔버로 구성된 soft body, 그리고 그리퍼 베이스와의 조립을 위한 rigid connector 등의 세 부분으로 구성된다.

제안된 그리퍼의 손가락은 soft body가 가운데 위치하고, 그 양단에 rigid fingertip과 rigid connector가 조립되는 구조이다. 따라서 강체 파트와 소프트 파트가 결합되는 연결부에서 공기 유실이 발생되지 않는 것이 중요하다. 강체 파트의 세부 구성요



[Fig. 1] Pneumatic Grasp-and-suction soft gripper with variable stroke

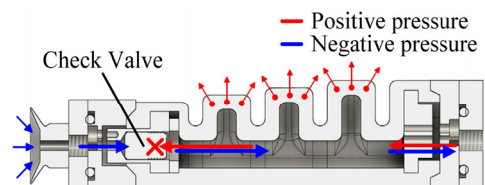


[Fig. 2] Structure of gripper finger: (a) isometric view, and (b) cross-section

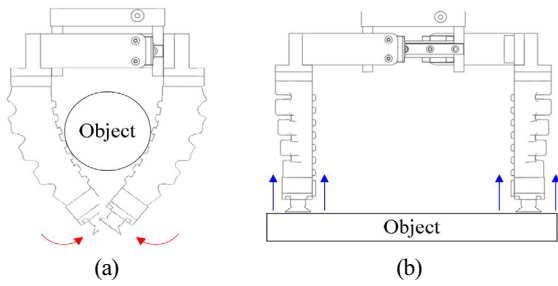
소는 [Fig. 2(b)]에서 볼 수 있다. Rigid fingertip의 cover에는 흡착패드가 연결되고, inner part 내부에는 체크밸브가 설치된다. 손가락을 조립할 때 inner part를 soft body 안에 삽입한 후, outer part와 inner part를 볼트로 체결하는데, 이때 주변 soft body가 압축되며 공기 유실을 방지한다. Rigid Connector 또한 inner part와 outer part로 구성되어 두 파트를 볼트로 체결할 때 주변 soft body가 압축되며 공기 유실을 방지한다.

2.2 그리퍼 손가락의 작동 원리

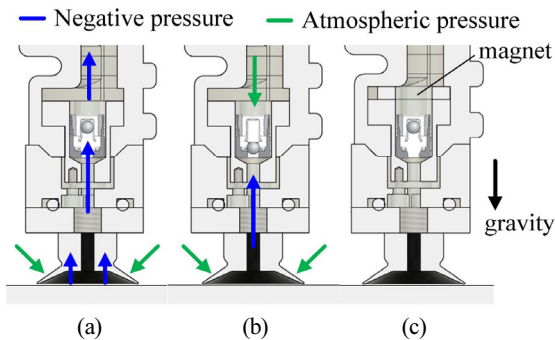
제안된 그리퍼 손가락은 [Fig. 3]과 같이 체크밸브를 이용하여 두 가지 파지 방법을 구사한다. 체크밸브는 그림과 같이 유로에 설치되어 유체의 흐름을 한 방향으로만 제한하는 역할을 한다. [Fig. 4(a)]와 같이, 공압펌프 등에 의해 손가락 내부로 대기압보다 큰 압력인 양압(positive pressure)이 공급되면 체크밸브가 닫혀 손가락 팁에 있는 유로가 차단된다. 그러면 soft body의 챔버가 팽창하고, 손가락이 안쪽으로 말리며 물체의 형상에 적응하여 파지할 수 있다. 반대로, [Fig. 4(b)]와 같이 대기압보다 작은 압력인 음압(negative pressure)을 공급하면 체크밸브가 열려 공기를 흡입할 수 있고, 흡착패드를 통해 물체를 흡착 파지할 수 있다. 이와 같이 하나의 유로만으로 2가지 기능을 수



[Fig. 3] Airflow inside the gripper finger



[Fig. 4] Example of gripper actuation: (a) grasping, and (b) vacuum suction



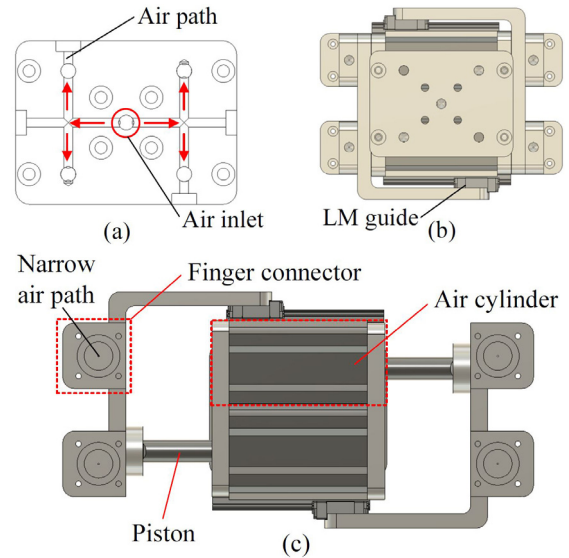
[Fig. 5] Principle of quick release after vacuum suction: (a) during vacuum suction, (b) immediately after stopping vacuum suction, and (c) magnet and check valve

행할 수 있다.

제안된 그리퍼 손가락 내부에는 볼 체크밸브가 장착되어 있으며, 볼의 위치에 따라 유로가 개방되거나 폐쇄된다. [Fig. 5(a)]와 같이 진공 흡착 파지 시에 음압에 의해 체크밸브 내부 볼이 위로 올라가 유로가 개방된다. [Fig. 5(b)]에서 물체 이탈을 위해 음압을 제거하면 볼은 중력에 의해 아래로 떨어져 물체 표면과 폐쇄된 체크밸브 사이의 작은 공간에 음압이 유지되고, 물체 이탈이 지연된다. [Fig. 5(c)]와 같이 rigid fingertip의 내부 말단에 자석을 부착하여 볼이 중력의 영향을 자력으로 상쇄시키고, 오직 공압에 의해서만 작동하도록 하였다. 이러한 설계를 통하여 제안된 그리퍼가 물체를 이탈시키려고 할 때 응답 시간을 최소화하였다.

2.3 그리퍼 베이스 설계

제안된 그리퍼는 하나의 유로에 양압과 음압을 선택적으로 공급하여 2가지 기능을 수행하는 것이 특징이다. 따라서 그리퍼 베이스 또한 하나의 유로로 연결되어 양압과 음압에 따라 손가락 사이 간격이 변경되도록 복동형 공압 실린더(double-acting pneumatic cylinder)를 활용하였다. 복동형 공압 실린더는 두 개의 포트를 가지고 있는데, 두 포트에 각각 양압을 공급하여 실린더 내 피스톤을 이동시키는 장치이다. 본 연구에서는 복동형



[Fig. 6] Design of gripper base: (a) air path in plate part, (b) top view with retracted cylinder, and (c) bottom view with expanded cylinder

공압 실린더의 포트 중 하나에 양압 또는 음압을 공급하여 작동 시키도록 하였다. 실린더 내 피스톤은 공급되는 압력에 따라 최소 길이와 최대 길이 지점을 왕복한다. 양압에서는 손가락 팽창과 함께 물체를 파지할 수 있도록 피스톤이 인입(retraction)되어 스트로크가 감소하고, 음압에서는 흡착 파지 시 큰 물체를 파지할 수 있도록 피스톤이 확장(expansion)되도록 동작 방향을 설계하였다. 피스톤이 원활하게 직선 운동할 수 있도록 LM 가이드로 보조하였다.

[Fig. 6(a)]에서 보듯이 그리퍼 베이스 상단의 평판에는 외부 펌프와 연결되는 공기 주입구(air inlet)가 있고, 내부에 유로(air path)가 뚫려 있어 공압 실린더 포트와 손가락과 연결된다. 손가락과 그리퍼 베이스 사이의 거리는 유동적이므로 [Fig. 1]과 같이 호스(hose)를 이용하여 연결하였다. 이로써 하나의 입력과 하나의 유로만으로 그리퍼 손가락과 베이스를 모두 작동시킬 수 있도록 설계하였다.

그리퍼 손가락 내부와 베이스의 공압 실린더 내부는 하나의 유로를 공유하므로 항상 동일한 압력이 형성된다. 공기 주입구를 통해 그리퍼에 압축 공기가 공급되면, 2.2절에서 설명하였듯이 그리퍼 손가락 내부 체크밸브가 닫혀 손가락과 실린더 내부 모두 밀폐되므로 양압이 형성되어 손가락이 팽창하고 실린더도 작동한다. 반대로, 공기를 흡입하게 되면 체크밸브가 열려 밀폐되지 않고, 손가락이나 실린더에 음압이 형성되지 못한다. 따라서 [Fig. 6(c)]와 같이 각 손가락으로 통하는 유로를 좁게 하였는데, 이 경우에 실린더에 비해 손가락에서 흐르는 유량이 매우 작으므로 완전히 밀폐되지 않은 상태라도 실린더에 음압이 형성되고, 실린더 단독으로 작동할 수 있다.

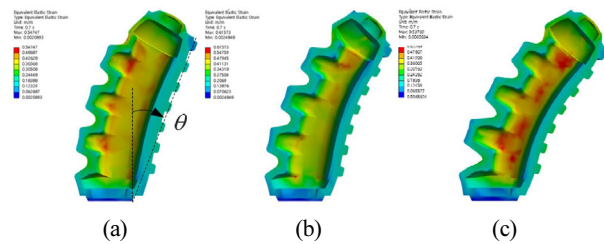
3. 유한 요소 해석

3.1 그리퍼 손가락 팽창 해석

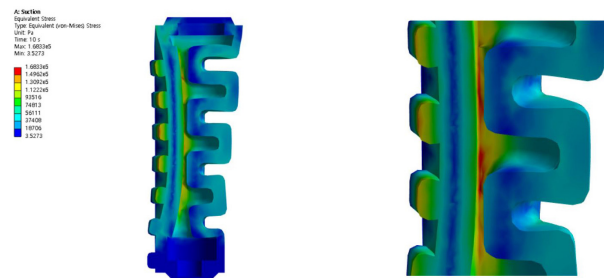
그리퍼를 제작하기 앞서 soft body 형상에 대해서 유한요소 시뮬레이션(finite element simulation)을 진행하였다. [Fig. 7(a)]는 동일한 챔버가 반복되는 형상, [Fig. 7(b)]는 챔버의 위치가 계단처럼 핑거팁으로 갈수록 낮아지는 형상, 그리고 [Fig. 7(c)]는 위치가 달라지면서 챔버의 크기도 달라지는 형상을 나타낸다. 양압을 공급받아 손가락이 팽창하는 상황을 가정하여, soft body 양쪽 말단이 막힌 모델로 시뮬레이션을 진행하였다. Soft body의 재질은 Dragon skin 30(Smooth-on Inc., PA)을 사용하였고, 모두 동일하게 60 kPa을 가했을 때 soft body가 팽창하여 챔버가 굽어지는 각도를 비교하였다. 각각 20.7°, 23.2°, 29.6°로 핑거팁 방향으로 갈수록 챔버의 위치가 낮아지고 크기가 작아지는 형상에서 가장 굽힘이 발생하는 것을 확인하였다. 동일한 작동 압력에서 굽힘 각도가 클수록 그리퍼의 파지 안정성이 증가하므로, 이 형상으로 설계를 확정하였다.

3.2 그리퍼 손가락의 수축 해석

[Fig. 7(c)]의 형상인 soft body에 대해서 음압에 대한 시뮬레이션도 수행하였다. -30 kPa을 가했을 때 [Fig. 8]과 같이 soft body 내부가 협착되지 않고 유로가 안정적으로 확보되는 것을 확인하였다. 이를 통해 진공 흡입 시 체크밸브가 원활하게 개방



[Fig. 7] Simulation results of soft body: (a) same shape and position, (b) same shape but different position, and (c) different shape and position



[Fig. 8] Simulation results for soft body contraction

되고, soft body가 유로 역할을 하여 흡착 패드를 통해 물체를 파지할 수 있음을 확인하였다.

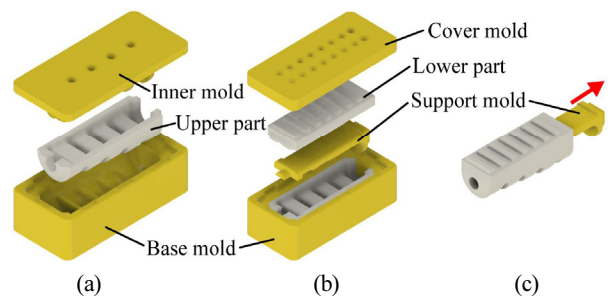
4. 제작 및 실험

4.1 그리퍼 손가락 제작

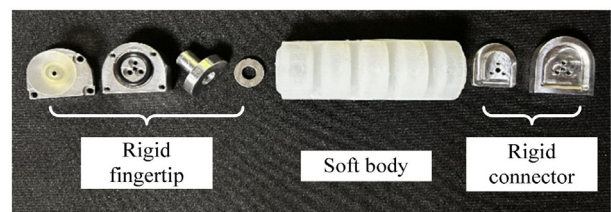
그리퍼 손가락의 soft body를 제작하기 위해 3D 프린터로 제작한 몰드와 Dragon skin 30을 활용하였다. [Fig. 9]에서 보듯이, soft body의 제작 과정은 상단부(upper part)와 하단부(lower part)로 나누어 2단계로 구조된다. 별도의 접착이 필요하지 않도록 먼저 구조된 상단부를 몰드에 함께 넣고 하단부를 구조한 후 내부에 남은 지지 금형(support mold)을 제거하는 방식으로 제작하였다. [Fig. 10]은 실제 제작한 soft body와 알루미늄 합금으로 제작한 강체 부품들을 보여준다.

4.2 그리퍼 공압 제어 시스템

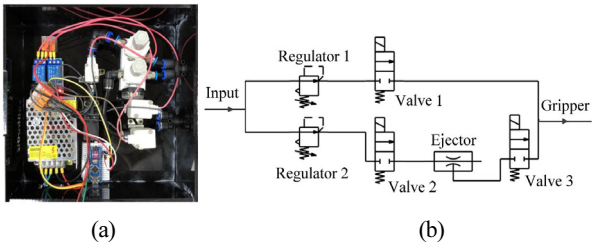
제안된 그리퍼는 하나의 유로로 양압과 음압을 공급받아 2가지 파지 방법을 수행할 수 있다. 그리퍼를 작동시킬 때 모터의 회전 방향 전환만으로 양압과 음압 모두 생성 가능한 회전식 베인 펌프(rotary vane pump)와 같은 펌프를 사용하는 것이 적절하다. 그러나 대부분의 현장은 압축공기만을 생성하는 펌프를 사용한다. 따라서 [Fig. 11(a)]와 같이 압축공기를 공급받아 양압과 음압을 생성하는 시스템을 구성하였다. 시스템 내 공압 회로는 [Fig. 11(b)]에서 보듯이 2개의 레귤레이터, 3개의 솔레



[Fig. 9] Soft body molding process: (a) Upper part molding, (b) lower part molding, and (c) support mold removing



[Fig. 10] Gripper finger fabrication



[Fig. 11] Gripper operation system: (a) example of gripper operation system, (b) pneumatic circuit of the system

[Table 1] Valve combination and gripper status for gripper mode

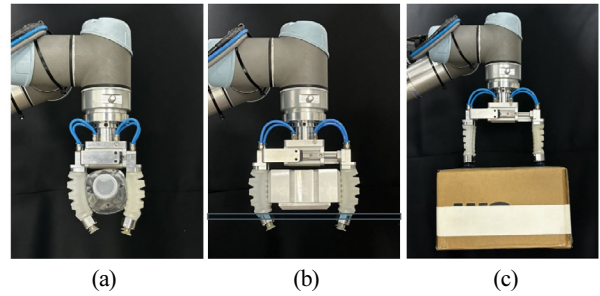
Mode	Idle (OFF)	Grasp (Positive pressure)	Vacuum (Negative pressure)
Valve 1	Closed	Open	Closed
Valve 2	Closed	Closed	Open
Valve 3	Open	Closed	Open
Finger	Idle	Inflate	Deflate
Base (Cylinder)	Idle	Retract (to min. Stroke)	Expand (to max. stroke)

노이드 밸브, 그리고 이젝터로 구성되며, 솔레노이드 밸브는 아두이노를 통해 제어된다.

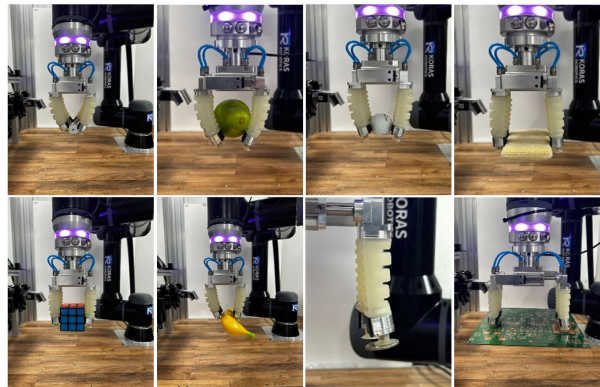
[Table 1]과 같이 밸브의 개폐 상태에 따라 세 가지 상태로 그리퍼를 제어할 수 있다. 물체를 파지하기 전 그리퍼를 최대 스트로크 상태로 설정하고, 파지 대상 물체에 따라 그리퍼 제어를 달리한다. 물체의 크기가 그리퍼의 최대 스트로크보다 작고, 얇은 판 형태가 아니라면 Grasp mode로 파지한다. 손가락이 팽창하는 동시에 베이스의 피스톤이 인입되어 손가락이 물체에 접촉할 때까지 스트로크가 축소되는데, 스트로크가 물체의 크기에 적응하므로 복잡한 제어 없이 안정적으로 파지할 수 있다. 물체의 크기가 그리퍼의 최대 스트로크보다 크거나 얇은 판 형태라면 Vacuum mode로 최대 스트로크 상태에서 흡착패드를 활용하여 파지한다.

4.3 그리퍼 파지 실험

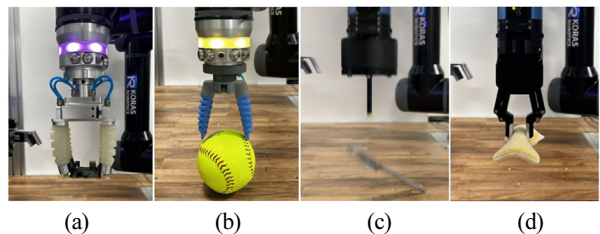
제작된 그리퍼를 평가하기 위하여, 다양한 물체에 대한 파지 실험을 진행하였다. 우선, 두 가지 파지 방법에 대하여 가반하중을 측정하였다. 최대 80 kPa의 양압을 공급하여 그리퍼를 작동시켰을 때, [Fig. 12]와 같이 500 ml 물병과 1 kg의 금속 블록을 안정적으로 파지하였다. 4개의 손가락에 Ø30 흡착패드를 장착하고 -70 kPa의 음압으로 작동시켰을 때, 약 3 kg의 물체까지 파지가 가능하였다. 그리퍼 최대 작동 양압은 손가락이 과도하게 팽창하지 않으면서 1만회 이상 반복 동작할 수 있는 최대 압력인 80 kPa로 실험적으로 선정하였다. 음압은 일반적인 공



[Fig. 12] Experiments on gripper payload: (a) water bottle (520 g), (b) metal block (1010 g), and (c) paper box (3005 g)



[Fig. 13] Experiments on gripper grasping. (dice, plastic pear, golf ball, sponge, cube, plastic banana, coin, PCB)



[Fig. 14] Grippers and grasping status: (a) Suggested gripper (graspable), (b) soft gripper (inaccessible), (c) vacuum gripper (unstable), and (d) 2-finger gripper (deformed)

압 펌프와 이젝터로 생성할 수 있는 최대 진공 압력인 -70 kPa로 선정하였다.

제작된 그리퍼가 다양한 물체에 대해 대응이 가능한지 평가하기 위하여, [Fig. 13]에서와 같이 다른 그리퍼와 비교 실험을 진행하였다. 가장 대중적으로 널리 활용되는 2지 그리퍼, 진공 그리퍼, 그리고 FEA를 활용한 공압 소프트 그리퍼와 비교하였다. 54개의 파지 대상 물체를 선정하였으며, 이 중 42개는 로봇의 조작성을 평가하는 표준화된 기준인 YCB 데이터세트 중 일부이다^[15]. 서론에 언급하였듯이, 최대한 다양한 형상, 크기, 재질을 가진 물체들을 선정하였다. 모든 파지 대상 물체는 작업대 표면에 지정된 위치에 배치되었고, 로봇이 지정된 위치에서 물체를 파지 시도하였다. 물체를 파지한 상태로 말단 속도 0.7

[Table 2] Results of gripping tests according to various grippers

	2-finger gripper	Soft gripper	Vacuum gripper	Proposed gripper
Graspable	36 66.7%	27 50.0%	36 66.7%	50 94.4%
Inaccessible	10	19	0	0
Unstable	2	8	17	3
Deformed	6	0	0	0

Total item: 54

YCB objects(42): Cheez-it Cracker box, Domino Sugar box, Jell-O Chocolate Pudding box, Jell-O Strawberry Gelatin box, Spam Potted Meat can, Coffee can, Starkist Tuna Fish can, French's Mustard bottle, Tomato Soup can, Plastic banana, Plastic strawberry, Plastic apple, Plastic lemon, Plastic pear, Plastic orange, Plastic plum, Windex Spray bottle, Scotch Brite Dobie sponge, Plate, Bowl, Spatula, Mug, Skillet, Skillet lid, Flat Screwdriver, Adjustable Wrench, Credit Card blank, Soft Ball, Baseball, Tennis Ball, Racquetball, Golf Ball, Cups, Foam Brick, Dice, Rubik's Cube, Clear Box, Box Lid, Colored Wood Blocks, 9-Peg-Hole Test, LEGO Duplo, Timer

Others(12): Mouse, Xbox controller, Cellophane tape, Egg, Bread(Croissant), PCB, Coin, Arduino, USB, Toilet paper, Fake cellphone, Bolt bush



[Fig. 15] Experiments on grasping fragile and deformable objects. (a) with 2-finger gripper (broken, deformed), (b) with proposed gripper (not deformed)

m/s로 수직 상승, 수평 이동, 말단 방위 회전 등의 동작 후에도 물체가 이탈하지 않으면 파지 성공으로 간주하였다. 파지 실패는 [Fig. 14]와 같이 상황에 따라 접근불가(inaccessible), 불안정(unstable), 변형(deformed)으로 분류하였다. 파지 실험 결과 및 파지 대상 물체 목록은 [Table 2]에 요약되어 있다.

전반적으로 제안된 그리퍼는 다양한 물체에 대응하는데 매우 효과적이었으며, 94% 이상의 물체를 성공적으로 파지하였다. 진공 그리퍼와 2지 그리퍼는 모두 66.7%의 물체를 파지하였으며, 소프트 그리퍼는 50% 물체만 파지할 수 있었다. 2지 그리퍼와 소프트 그리퍼의 경우 파지 대상 물체의 크기가 스트로크(손가락 사이 거리)보다 크거나 두께가 얇은 판재 형태의 물체를 파지할 수 없어 접근 불가(unaccessible)로 분류된 물체가 많다. 진공 그리퍼의 경우 파지 대상 물체의 표면이 거칠거나 구멍이 있어 흡착패드가 진공을 형성할 수 없어 불안정(unstable)으로 분류된 물체가 많다. 그러나 제안된 그리퍼는 손가락 사이의 거리가 변형 가능하고, 손가락을 이용한 파지와 흡착패드를

이용한 파지가 모두 가능하므로 거의 모든 물체의 파지에 성공하였다. 또한, 깨지기 쉽거나(fragile) 부드러운 물체를 2지 그리퍼로 파지하였을 때는 변형(deformed)되었는데, [Fig. 15]와 같이 제안된 그리퍼로 파지하였을 때는 변형 없이 파지할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 양압 공급 시에는 팽창하고, 음압 공급 시에는 흡입하는 손가락을 가진 소프트 그리퍼를 제안하였다. 제안된 그리퍼는 하나의 유로를 통해 공급되는 공압에 따라 손가락 사이 간격이 변화하며, 적응형 파지와 흡착형 파지가 가능하도록 설계되었다. 다양한 물체들을 파지하는 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

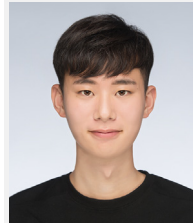
- 1) 제안된 그리퍼는 실리콘 재질의 그리퍼 손가락을 활용한 적응형 파지로 부드러운 물체도 변형없이 파지할 수 있었으며, 1 kg 이상의 물체도 파지할 수 있었다.
- 2) 손가락 하나만으로 진공 흡착 파지가 가능하며 동전과 같은 작은 물체도 파지할 수 있었으며, 3 kg 이상의 물체도 파지할 수 있었다.
- 3) 2가지 파지 방법과 가변 스트로크를 활용하여 54개의 다양한 물체 중 94.4%의 물체를 성공적으로 파지하였다.

References

- [1] I. Yamano and T. Maeno, "Five-fingered Robot Hand using Ultrasonic Motors and Elastic Elements," *2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, pp. 2673-2678, 2005, DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570517.
- [2] F. Ficuciello, G. Palli, C. Melchiorri, and B. Siciliano, "Experimental evaluation of postural synergies during reach to grasp with the UB hand IV," *2011 IEEE/RISJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, USA, pp. 1775-1780, 2011, DOI: 10.1109/IROS.2011.6094671.
- [3] J. Shintake, V. Cacucciolo, D. Floreano, and H. Shea, "Soft robotic grippers," *Advanced materials*, vol. 30, no. 29, 2018, DOI: 10.1002/adma.201707035.
- [4] F. Ilievski, A. D. Mazzeo, R. F. Shepherd, X. Chen, and G. M. Whitesides, "Soft robotics for chemists," *Angewandte Chemie*, vol. 123, no. 8, pp. 1930-1935, 2011, DOI: 10.1002/anie.201006464.
- [5] S. Terryn, S. Terryn, J. Brancart, D. Lefeber, G. Van Assche, and B. Vanderborght, "Self-healing soft pneumatic robots," *Science Robotics*, vol. 2, no. 9, Aug., 2017, DOI: 10.1126/scirobotics.aan4268.
- [6] J. Amend, N. Cheng, S. Fakhouri, and B. Cully, "Soft robotics commercialization: Jamming grippers from research to product," *Soft robotics*, vol. 3, no. 4, pp. 213-222, 2016, DOI: 10.1089/soro.2016.0021.
- [7] J.-Y. Lee, Y.-S. Seo, C. Park, J.-S. Koh, U. Kim, J. Park, H.

Rodrigue, B. Kim, and S.-H. Song, "Shape-Adaptive Universal Soft Parallel Gripper for Delicate Grasping Using a Stiffness-Variable Composite Structure," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 12, pp. 12441-12451, Dec., 2021, DOI: 10.1109/TIE.2020.3044811.

- [8] J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano, and H. Shea, "Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators," *Advanced materials*, vol. 28, no. 2, pp. 231-238, 2016, DOI: 10.1002/adma.201504264.
- [9] E. W. Hawkes, D. L. Christensen, A. Kyungwon Han, H. Jiang, and M. R. Cutkosky, "Grasping without squeezing: Shear adhesion gripper with fibrillar thin film," *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, WA, USA, pp. 2305-2312, 2015, DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139505.
- [10] V. Alizadehyazdi, M. Bonthron, and M. Spenko, "An Electrostatic/Gecko-Inspired Adhesives Soft Robotic Gripper," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 4679-4686, Jul., 2020, DOI: 10.1109/LRA.2020.3003773.
- [11] Z. Wang, Y. Torigoe, and S. Hirai, "A prestressed soft gripper: design, modeling, fabrication, and tests for food handling," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 4, pp. 1909-1916, Oct., 2017, DOI: 10.1109/LRA.2017.2714141.
- [12] Y. Hao, Z. Gong, Z. Xie, S. Guan, X. Yang, Z. Ren, T. Wang, and L. Wen, "Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length," *2016 35th Chinese Control Conference (CCC)*, Chengdu, China, pp. 6109-6114, 2016, DOI: 10.1109/ChiCC.2016.7554316.
- [13] Soft Robotics Inc., Soft Robotics, [Online], <https://www.softroboticsinc.com>, Accessed: Nov. 02, 2021.
- [14] Wegard GmbH, Wegard Soft-Gripping, [Online], <https://soft-gripping.com>, Accessed: Nov. 02, 2021.
- [15] B. Calli, A. Walsman, A. Singh, S. Srinivasa, P. Abbeel, and A. M. Dollar, "Benchmarking in manipulation research: Using the yale-cmu-berkeley object and model set," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 22, no. 3, pp. 36-52, Sept., 2015, DOI: 10.1109/MRA.2015.2448951.



류준혁

2022 고려대학교 기계공학부(공학사)
2024 고려대학교 기계공학과(공학석사)

관심분야: Collaborative robots, Robotic grippers



박성제

2019 고려대학교 기계공학부(공학사)
2019~현재 고려대학교 기계공학과 석박
통합과정

관심분야: Robotic grippers, Tool changers



전효종

2019 성균관대학교 기계공학과(공학사)
2021~현재 고려대학교 기계공학과 석박
통합과정

관심분야: Robotic grippers, Tool changers



송재복

1983 서울대학교 기계공학과(공학사)
1985 서울대학교 기계공학과(공학석사)
1992 MIT 기계공학과(공학박사)
1993~현재 고려대학교 기계공학부 정교수

관심분야: Collaborative robots, Design and control of robotic system, AI-based robot applications