

과수 수확을 위한 주머니 방식의 로봇 그리퍼 설계 및 검증

Design and Evaluation of a Cinch Bag Typed Robotic Gripper for Fruit Harvesting

최성모¹·황면중[†]

Seongmo Choi¹, Myun Joong Hwang[†]

Abstract: In this paper, the cinch bag typed fruit harvesting gripper was proposed. This gripper is focused on preventing problems that we found from the related research and setting the breakthrough as a design condition according to the harvest failures of other related studies. The cover part is designed to overcome the surrounding obstacles of target fruits such as tomato, Korean melon, and sweet pepper. The measurement of maximum load showed that the well-grasped target object, such as a spherical object with 65 mm of diameter, is unable to slip in a range of 0 kg to 10 kg. The fact that the gripper allows from 4 cm to 6 cm of positional error was shown in the measurement of positional error tolerance. And the cover part of this gripper showed that the suggested gripper can grab a target object without being obstructed by leaves and stems. Finally, it was proved that the gripper satisfied the design conditions through the measurement of contacting force, which showed it is appropriate for grasping an actual fruit without damage.

Keywords: Gripper, Agricultural Robotics, Manipulation

1. 서 론

현재 그리퍼는 다양한 환경에서의 로봇 작업에 활용되고 있다. 그 중에서도 과수 수확용 그리퍼는 과일의 온전한 수확과 운반을 위해 최근까지도 연구가 진행되고 있다. 손가락을 지닌 강체 그리퍼^[1,2], 소프트 그리퍼^[3]와 석션 컵^[4] 등이 연구되었고, 텐던 메커니즘을 이용^[5]하거나, 생물의 요소를 적용한 그리퍼^[6]도 개발되었다. 하지만, 이들의 장단점이 명확하게 드러남에 따라, 장점을 부각시킬 수 있는 과일을 수확하는 능력과 단점에 의한 수확 실패요인이 분명하게 드러난다. 그 예시로, 손가락을 지닌 그리퍼^[7]는 미끄러짐에 의해 파지 대상을 놓치는 경우가 석션 컵보다는 상대적으로 적으나^[8], 손가락이

줄기나 이파리에 걸림으로 인해서 수확 대상의 수확에 실패하는 경우가 발생^[9]하기도 한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 설계된 석션 컵의 경우에는 과일의 움푹 패인 틈에서 발생하는 누설로 인해 진공 압력을 온전하게 발생시키지 못하여 과일을 잡지 못하는 경우가 발생하기도 한다^[4]. 바구니 형태의 디자인을 채용하여 위치오차에 강인하게 대응할 수 있는 장점을 가진 그리퍼^[8]도 등장하였으나, 대상 과일이 균집을 이루고 있을 경우에는 수확에 실패하는 문제^[8]가 보고되기도 하였다. 그리고, 접촉력에 의해 과일이 손상되어서 수확에 실패한 경우도 있으며^[6], 과일의 손상을 방지하기 위해 접촉 부위를 연성체로 제작해야 한다는 내용도 보고되었다^[9]. 또한, 줄기로부터 과일을 분리하는 데에 실패한 경우^[4,7]도 수확 실패 요인으로 보고되었다. 수확의 성공률을 높이기 위해서는 수확 실패 요인을 설계단계에서 예방할 필요가 있고, 이를 위해서는 수확 실패한 원인들을 분석하여야 한다. 다양한 과수 수확 그리퍼 설계에 관한 연구에서 수집한 수확 실패 요인들을 [Table 1]에서 보이는 바와 같이 분류별로 정리하였다.

기존의 그리퍼 중에서 2017년에 소개된 텐던 메커니즘 구동형 세 손가락 그리퍼^[7]와 2019년에 소개된 케이블 구동형 그리퍼^[8]가 있다. 케이블 구동형 그리퍼^[8]는 바구니와 유사한 의

Received : Oct. 31. 2022; Revised : Nov. 30. 2022; Accepted : Dec. 3. 2022

※ This work was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through Smart Farm Innovation Technology Development Program, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (421031-04)

1. Graduate Student, Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea (smchoi97@uos.ac.kr)

† Associate Professor, Corresponding author: Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea (mjhwang@uos.ac.kr)

[Table 1] Causes of harvest failure

No.	Cause	Category
I	The grasping posture was inaccurate.	Related to the recognition and path planning
II	The wrong object or part was detected.	
III	An error occurred during the manipulating process.	
IV	The end effector was misplaced due to a positional error between fruits and the end effector.	
V	Movement of the finger or end effector was obstructed by the surrounding object.	Related to the performance of end effector
VI	Grasping failure occurred due to the slippery.	
VII	Grasping failure occurred due to the irregular shape of fruits.	
VIII	A failure occurred during carrying.	
IX	The fruit was damaged.	
X	A failure occurred while detaching the fruit from the stem.	Related to the cutting methods

형을 가지고 있고, 이로 인해 허용 가능한 위치오차가 크다는 특징을 가지고 있다. 그래서 케이블 구동형 그리퍼는 파지대상 과일(딸기)이 그리퍼와 정렬되지 않아도 허용하는 오차범위 이내에서 수확을 수행할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그리고 이 그리퍼는 바구니형 외관을 채택함으로써 내부에 저장된 파지대상 과일이 그리퍼가 이동하는 동안 떨어지거나 슬립에 의해 그리퍼 밖으로 빠져나갈 위험을 방지하였다. 그러나, 케이블에 의해 열리고 닫혀야 하는 입구가 주변 줄기에 의해 막히면서 입구가 닫히지 않기도 하는 문제가 발생하였고, 이로 인해 균집을 이루며 자란 파지 대상에 대한 harvest success (수확의 성공률)가 단일 과수 대상 harvest success에 비해 낮았다는 보고가 있었다. 그러므로 이 케이블 구동형 그리퍼는 [Table 1]의 IV, VI, VII, VIII번 문제를 해결하였으나, V번과 IX번 문제는 해결하지 못하였음을 알 수 있다. 다음으로, 사과를 수확하기 위해 제작된 텐던 메커니즘 기반의 세 손가락 그리퍼⁷⁾는 손가락의 강성이 좋고, 다양한 형상의 물체에 대해 강인한 파지 성능을 보인다고 한다. 실제로 플러킹(plucking) 방식으로 수확한 사과에 대해 80% 이상의 수확성공률을 보이지만, 수확 실패 요인 중에서 손가락이 줄기나 스프링클러 라인 등에 걸려서 움직임에 방해받은 것과 제어 시 축적된 위치오차에 의해 그리퍼가 파지 대상과 정렬되지 않아서 수확에 실패한 내용이 보고되었다. 추가로 수확에 성공한 사과 줄기의 처리가 불만족스러운 수확물도 있었으나, 줄기가 남아있어도 사과의 보관 시 과일이 손상되지 않는다는 특수성으로 인해 해당 그리퍼를 이용한 수확에서는 주목받지 않았다. 줄기 제거에 대한 부분은 참외와 토마토를 수확할 때 중요하게 고

려해야 하는 부분이므로 줄기 제거가 완전하지 않았다는 문제도 제시된 그리퍼를 설계할 때 고려할 문제 사항으로 추가하였다. 고로, 이 텐던 메커니즘 기반 세 손가락 그리퍼는 [Table 1]의 VII 문제를 해결하였으나, IV번과 X번 문제는 해결하지 못하였다고 할 수 있다. 앞서 제시된 문제들 중에서 ‘손가락이 장애물에 의해 움직임을 방해 받음’이라는 문제를 개선하기 위해 2017년에 석선 컵을 이용한 파프리카 수확 그리퍼⁸⁾가 연구되었다. 이 석선 컵은 파프리카의 노출된 단일 표면만 있으면 파지가 가능하다는 장점과 움직임이 주변 장애물에 의해 방해받을 위험이 없다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 수확에 실패한 요인 중에서 파프리카의 불규칙적인 형상(irregular shape)이 파지실패를 야기했다는 문제와 그리퍼의 커터가 줄기를 잘 제거하지 못하였다는 문제 등이 보고되었다. 그러므로, 이 석선 컵 그리퍼의 하드웨어는 V번 문제를 잘 해결하였으나, VII번과 X번 등의 문제는 해결하지 못하였다고 볼 수 있다.

과수 수확 그리퍼의 개념설계 당시에 ‘목표 과일 10 개를 수확한다고 했을 때 수확에 실패한 과일이 없도록 하고, 그 중에서 9개 이상은 손상이 없이 온전하게 수확을 시킬 것’이라는 목표를 만족시키기 위해서 제작할 그리퍼의 detachment success (과수 분리 성공률)를 100%, harvest success를 90%로 설정하였다¹⁰⁾. 여기에서 detachment success는 과일이 줄기로부터 분리되어 수확에 성공한 비율을 의미하고, harvest success는 과일에 아무런 이상이 없이 수확에 성공한 비율을 의미한다¹¹⁾. 그리고 본 연구에서는 [Table 1]의 문제 사항들을 예방할 수 있도록 설계조건을 설정함으로써 목표 과일인 토마토, 파프리카, 참외를 수확하였을 시 100%의 detachment success와 90%의 harvest success를 목표로 하는 그리퍼의 설계를 제안하고자 한다. 이 그리퍼의 설계 목표를 설정하고 상세 설계 및 프로토타입 제작을 진행한 내용에 대해 2장에서 정리하였다. 3장에서는 제작된 프로토타입에 대하여 현장 적용 이전에 성능을 검증하기 위한 실험을 진행한 내용에 대하여 정리하였고, 이 실험들의 결과에 대해 정리하고 고찰한 내용을 4장에 기록하였다. 5장에서는 지금까지 진행된 성능 검증 실험의 결론을 정리하였다.

2. 그리퍼의 설계

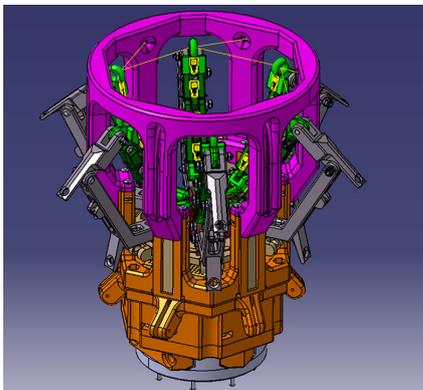
2.1 설계 목표 설정

본 연구에서는 파지 대상의 비정형성에도 강인하다는 장점을 가진 손가락 타입과 위치오차에 강인한 성능을 보이는 주머니 형태가 결합된 형상의 그리퍼를 설계하였다. 설계된 그리퍼는 [Table 1]에 있는 수확 실패 요인을 설계 단계에서 예방할 수 있어야 한다. 그 중에서 엔드 이펙터와 관련된 이슈인 V,

VI, VII, VIII, IX번 문제와 경로 계획과 관련된 이슈인 IV번 문제에 대한 예방 방법을 과수 수확 그리퍼의 설계 조건으로 제시하였다. 우선, ‘그리퍼와 과수 사이의 위치오차 발생으로 인한 파지 실패’ 문제를 하드웨어 설계 단계에서 해결하기 위해 그리퍼가 허용하는 위치 오차의 범위를 증가시켜주어야 한다. 이를 통해, 과수의 위치를 기반으로 계획된 경로가 매니플레이터의 캘리브레이션 오차 등에 의해 과일의 주변을 향하게 되더라도 과수의 파지를 수행하게 하도록 하였다. ‘손가락의 움직임이 주변 장애물에 의해 방해받음으로 인한 파지 실패’ 문제는 손가락의 움직임을 보호할 수 있는 보호 구조물의 설계를 함으로써, 덩굴 속이나 덤불 속과 같이 운동의 방해물이 많은 환경에서도 움직임을 완수할 수 있도록 하였다. ‘접촉면 슬립(slip)으로 인한 파지 실패’ 문제를 대응하기 위해 과일과 그리퍼 접촉부의 마찰력을 증가시키기로 하였다. 마찰력을 증가시키는 방법 중에서 수직 항력으로 계산될 수 있는 반력을 크게 할 경우, 과일을 파손시킬 수 있기 때문에 반력을 증가시키기 보다는 접촉 면적을 늘려서 마찰력을 높이는 방식을 채택하였다. ‘비정형 형상으로 인한 파지 실패’ 문제를 대응하기 위해 손가락이 물체의 형상에 따라 변형하는 구조를 설계함으로써 파지 대상의 다양한 형상에 대하여 유연하게 대처하도록 설계하였다. 특히, 구형 물체에 대해 접촉면에서 미끄러짐이 발생하지 않도록 설계하였다. 다음으로 ‘이송 시 과일을 떨어뜨림’이라는 문제에 대응하기 위해 바구니나 통발과 같이 물건이 안에 있는 상태에서 그리퍼가 닫힐 경우 내부의 과일이 빠져나오지 못하도록 설계하기로 하였다. 마지막으로 ‘과일이 손상됨’이라는 문제에 대응하기 위해 과일과 그리퍼의 접촉면에서 발생하는 접촉력에 의해 과일이 파손되지 않도록 설계 목표를 정하였다.

2.2 과수 수확 그리퍼의 설계

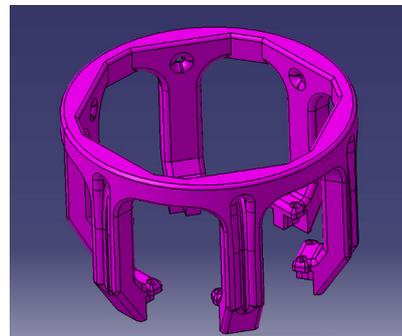
앞서 제시된 설계 조건을 고려하여 과수 수확 그리퍼의 상



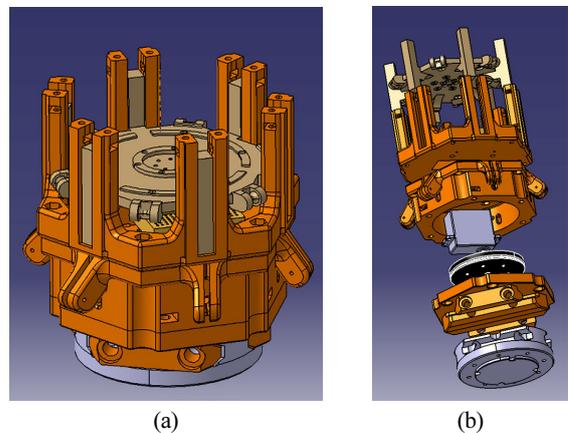
[Fig. 1] 3D modeling of the fruit harvesting gripper

세설계를 진행하였고^[12], 이는 [Fig. 1]에 보이는 바와 같이 진행되었다. 이 그리퍼는 크게 ‘보호 구조물’, ‘몸체’, ‘모션 수행 파트’로 구성되어 있다. ‘보호 구조물’과 ‘몸체’는 바구니의 형태를 하고 있으며, 이와 같은 구조는 위치 오차에 대해 강인한 성능을 보이므로 전체적인 형상이 바구니형 구조와 유사하도록 설계되었다. 그리고, 손가락과 과일의 접촉부위는 접촉력을 줄이기 위해 외력에 대한 변형률이 커야 한다. 이 그리퍼에서는 그 방안으로 연성체를 사용하는 대신 스프링과 링크 구조를 이용하여 과일과의 접촉부위가 변형되고 탄성 회복하도록 설계하였다. 그리고 과일과 손가락의 접촉 부위에 직접적으로 힘을 가하지 않고 손가락과 과일이 접촉되는 면적을 증가시키는 방안으로 당김줄 가방(cinch bag)의 메커니즘을 이용하였다.

‘보호 구조물’은 [Fig. 2]에 보이는 바와 같고, 손가락의 움직임을 이파리 및 줄기로부터 보호하기 위한 의도로 설계되었다. 이 파트는 맨 윗부분의 원통형 판을 이용해 파지 대상 주변의 장애물을 밀어냄으로써 문제 V번을 해결하기 위해 제작되었다. 그리고, 합사(braided line)를 이용해 그리퍼의 입구 면적을 조절하게 하기 위한 실이 통과할 6 개의 구멍을 입구 근처에 배치하였다.



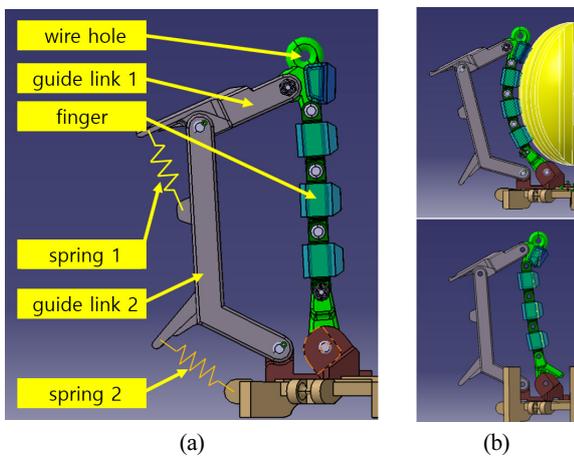
[Fig. 2] 3D modelling of the cover part



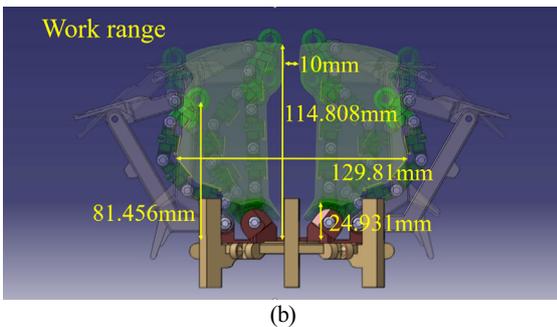
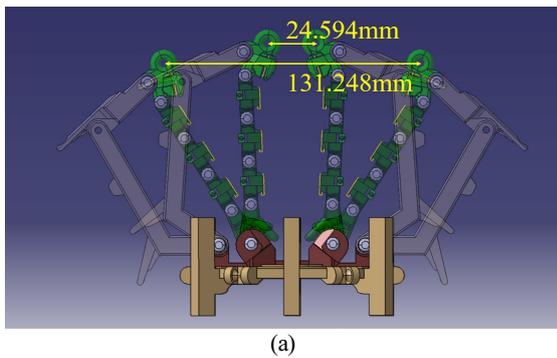
[Fig. 3] (a) 3D modelling of the cover part, (b) Compositions of the body part

‘몸체’ 부위는 [Fig. 3(a)]와 [Fig. 3(b)]에 보이는 바와 같이 내부에 서보 모터와 풀리가 배치 되어있다. 서보 모터는 CLS HV7346MG모터를^[13] 이용하였고, 전원 공급기를 이용하여 7.4 V의 외부 전원을 인가해 46 kgf·cm의 토크를 발생시킨다. 서보 모터는 Arduino Uno 보드와 포텐서미터를 이용해 제어 하고, 풀리를 이용해서 실에 모터의 토크를 전달한다.

‘모션 수행파트’는 [Fig. 4(a)]에 보이는 것과 같이 굴곡(flexion) 과 신전(extension)이 용이한 손가락과, 손가락 움직임의 큰 틀을 잡아줄 가이드 링크, 그리고 스프링으로 구성되어 있다. 여기서 스프링 1은 [Fig. 4(b)]에서 보이는 바와 같이 손가락이 형성



[Fig. 4] (a) 3D modelling of the moving part^[12], (b) Closed finger at each case^[12]

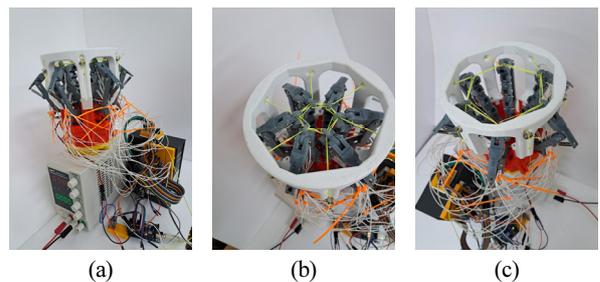


[Fig. 5] (a) Work range of the moving finger, (b) Opening range of the cinch bag typed gripper

하는 내부공간에 아무것도 없을 때 손가락이 항상 퍼진 상태를 유지시키도록 한다^[12]. 이때 그리퍼는 [Fig. 5(a)]에 보이는 바와 같이 입구가 24.594 mm에서 131.248 mm까지 확장되고 수축된다. 그리고 내부에 물체가 있으면 쉽게 변형되고 물체가 사라지면 다시 원상태로 복구되도록 스프링을 선정하였다. 외력에 의해 변하고 스프링1에 의해 복원하는 손가락의 작업 범위(work range)는 [Fig. 5(b)]에 보이는 바와 같이 손가락이 완전히 퍼져 있을 때는 지름이 10 mm보다 크고, 높이가 114.808 mm이내인 물체나 돌출물을 잡을 수 있다. 그리고, 접촉면의 반력에 의해 손가락이 변형하면서 지름이 129.81 mm 이내이고, 높이가 81.54 mm이내인 물체나 돌출물을 잡을 수 있게 된다. 스프링 2는 그리퍼의 입구가 어떤 방향을 향하고 있더라도 그리퍼가 열려 있는 동안 열린 상태를 유지시키도록 선정하였다. 손가락의 마디에는 접촉력을 알 수 있도록 QA6P 힘 센서^[14]를 부착하였고, 맨 위쪽 마디에는 실이 통과하는 구멍을 만들어서 실의 장력을 이용해 입구가 열리고 닫히도록 설계하였다.

2.3 프로토타입의 제작

PLA 필라멘트를 사용하여 3D프린팅한 프로토타입은 [Fig. 6(a)]에 보이는 바와 같이 제작되었다. 프로토타입의 전체 무게는 1.1235 kg이고, 높이는 220 mm이며, 입구의 외경은 180 mm이다. 몸체 내부의 풀리가 돌아가면서 실에 장력을 전달하고, 신발주머니가 입구 면적을 조절하는 방식을 이용하여 [Fig. 6(b)]와 [Fig. 6(c)]에 보이는 바와 같이 6개의 실로 육각형 입구의 면적을 조절한다. 육각형 입구의 높이가 최소 23 mm에서 120 mm까지 변함을 의미한다. 손가락 마디와 과일이 접촉하는 부위에는 마디마다 QA6P 힘 센서를 장착하였고, 이를 이용하여 접촉 부위에서의 접촉력을 측정할 수 있다. 총 24 개의 힘 센서 값을 읽기 위해 3 개의 CD4051BE 멀티플렉서를 이용하였고, 서보 모터에 7.4 V의 전압을 인가하기 위해 UTP3315FL-II 전원 공급기를 이용하였다.



[Fig. 6] (a) 3D printed prototype, (b) When the gripper is opened, (c) When the gripper is closed

3. 성능 검증 실험

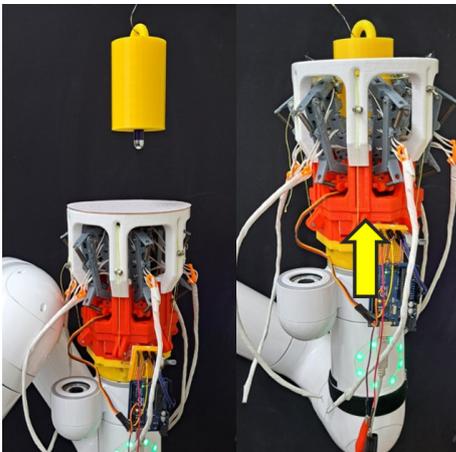
이 그리퍼는 과일 중에서도 줄기에 매달려서 아래로 처진 목표 과일(참외, 토마토, 파프리카)의 과지를 대상으로 제작되었다. 이 그리퍼로 다른 물체를 잡는다고 하였을 때, 구형 문고리와 같이 작업범위 내부에 들어가는 크기의 물체이어야 한다. 이로 인해 과지 대상을 목표 과일 이외의 다른 물체로 확장했을 때는 작업범위에 따른 크기와 형태의 제약을 받게 되지만, 목표 과일로 제시된 과지 대상은 크기가 모두 이 작업범위의 내부에 들어간다는 조건을 만족한다. 그리고, 목표 과일들은 모두 줄기에 연결되어 아래로 쳐져 있기 때문에 수확을 위해서 그리퍼는 위를 바라보게 된다. 그래서 앞으로 진행할 실험에서는 과수 수확을 하게 될 때 그리퍼가 위를 바라보고 있는 상황을 반영하여 그리퍼가 위를 바라보게 한 채로 실험을 진행하였다.

제작된 프로토타입 그리퍼를 이용하여 실제 현장에서 실험을 수행하기 이전에 그리퍼가 설계 목표설정 단계에서 제시한 설계 의도를 만족하였는지 검증하였다. 실험은 위치오차 허용범위 측정실험, 최대 하중 측정실험, 접촉력 측정실험으로 총 3 가지 실험을 수행하였고, [Table 1]의 문제 IV, VI, VII, IX 번에 대한 대응 능력을 확인하기로 하였다.

3.1 위치오차 허용범위의 측정

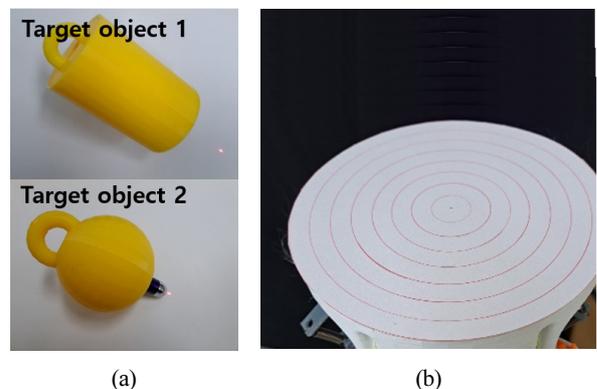
이 실험에서는 횡방향 위치오차의 허용범위를 측정함으로써 그리퍼가 허용할 수 있는 위치의 부정확성을 확인하였다. 이를 통해 ‘그리퍼와 과수 사이의 위치오차 발생으로 인한 과지 실패’ 문제에 대한 대응 가능 여부를 확인하였다.

실험 환경은 [Fig. 7]에 보이는 바와 같이 로봇 팔(Indy7,

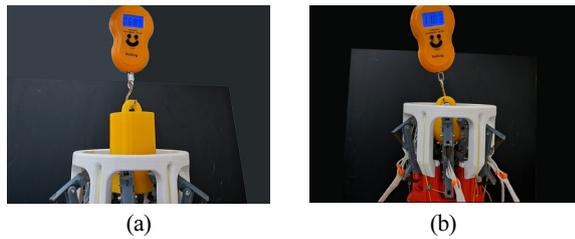


[Fig. 7] Experiment settings and experiment method of the measurement of positional error tolerance

Neuromeka)에 그리퍼를 설치하고, 1번 과지 대상과 2번 과지 대상을 실에 매달아 천장에 고정시켜서 구성하였다. 과지 대상은 [Fig. 8(a)]와 같이 65 mm의 지름, 100 mm의 높이를 가지는 원통과, 65 mm의 지름을 가지는 구형 물체로 설정하였다. 이때, target object 1에 대해서 그리퍼가 과지 대상을 완전히 감싸지 못하였을 경우의 위치오차 허용 범위를 측정하고, target object 2에 대해서 그리퍼가 과지 대상을 완전하게 감싸고 있을 때의 위치오차 허용범위를 측정하기로 한다. 각각의 과지 대상은 모두 중앙에 레이저 포인터를 장착할 구멍을 뚫어서 레이저가 수직 아래를 향하도록 하였다. 이를 통해, 과지 대상의 무게중심이 어느 위치를 향하고 있는지 확인한다. 그리퍼와 과지 대상이 어느 정도의 거리만큼 떨어져 있는지 확인할 때에는 [Fig. 8(b)]에서 보이는 바와 같이 이격 측정판을 그리퍼 위에 부착한 뒤, 판 위에서 레이저 포인터가 향하고 있는 위치를 확인한다. 이격 측정판의 형태는 지름 180 mm의 원판으로 그리퍼 입구의 외경 지름과 동일하며, 원의 중심으로부터 중심점을 공유하고 반지름이 1 cm부터 8 cm인 원이 표기되어 있다. 이격 측정판을 그리퍼의 입구에 장착함으로써 그리퍼와 대상물체가 떨어진 거리를 알 수 있게 된다. 과지 대상과 그리퍼가 0 cm만큼 떨어져 있는 상태에서 실험을 수행할 때, 로봇 팔을 수직 위로 향하게 이동시킨 뒤 입구 면적을 감소시켜서 천장에 매달려 있는 물체를 온전하게 과지하였을 경우, 이에 대해 ‘0 cm이격한 물체에 대하여 과지를 성공하였다’고 정의한다. 반대로, 그리퍼를 수직 위를 향해 이동시켰을 때 과지 대상이 그리퍼를 벗어나는 등의 요인으로 인하여 그리퍼가 과지 대상을 잡을 수 없게 되었을 때는 ‘과지 실패’로 정의한다. 과지를 성공했을 경우, 횡방향으로 1 cm씩 그리퍼를 이동시킨 뒤 그리퍼를 수직 위로 이동시켜서 과지 성공 여부를 확인한다. 각각의 과지 대상에 대해서 0 cm부터 8 cm까지의 실험 범위를 설정한 뒤 ‘과지 실패’가 발생할 때까지 위치오차 측정 실험을 진행하였다.



[Fig. 8] (a) Photograph of the target objects, (b) Photograph of the measurement tool



[Fig. 9] (a) Measuring maximum load with cylindrical object (target object 1), (b) Measuring maximum load with spherical object (target object 2)

3.2 최대 정하중의 측정

이 실험에서는 그리퍼가 위를 바라보며 멈춰 있을 때 구조적으로 버틸 수 있는 정하중의 최대치를 측정함으로써 그리퍼가 접촉면에서 발생하는 미끄러짐에 강인하게 대응할 수 있는지 여부를 확인하였다. 이를 통해 ‘접촉면 슬립으로 인한 파지 실패’ 문제의 대응 정도를 확인하였다.

실험환경은 앞서 ‘위치오차 허용범위의 측정’에서 했던 것과 같이 그리퍼를 로봇 팔에 고정하고 뒤 실험을 하였다. 그리고, [Fig. 9(a)]와 [Fig. 9(b)]에서 보이는 바와 같이 실험을 위해 설정한 각각의 파지 대상을 그리퍼 내부에 안착시키고 입구를 조여 파지를 진행한 뒤, 파지 대상에 달려있는 고리에 무게 측정기(WH-A04 portable electronic scale)를 걸고 위로 들어 올리면서 최대 정하중을 측정하는 방식으로 실험을 진행하였다. 파지 대상은 구형 물체와 원통형 물체로, 앞서 ‘위치오차 허용범위의 측정’에서 설정한 파지 대상과 동일한 물체를 설정하였다. 이때, 원통형 파지 대상에 대해서는 그리퍼가 물체를 완전히 감싸지 못하였을 때 최대 정하중의 크기를 확인하였고, 구형 파지 대상에 대해서는 그리퍼가 물체를 완전히 감싸고 있을 때 최대 정하중의 크기를 확인하였다. 여기에서 최대 정하중은 그리퍼가 위를 바라보고 있을 때 파지 대상이 위로 빠져나가기 직전까지의 무게를 의미하며, 이 과수 수확 그리퍼에 대하여 최대 정하중의 측정범위는 0 kg에서 10 kg까지로 설정하였고, 실험에 이용한 무게 측정기는 이 측정범위에서는 5 g단위의 해상도를 가진다. 파지 된 물체의 고리에 무게 측정기를 걸고 위로 당기며 무게를 측정하였을 때 물체가 미끄러져서 그리퍼를 빠져나올 때까지 정하중을 증가시키면서 실험을 진행하였다.

3.3 장애물 극복실험

이 실험에서는 그리퍼의 보호 구조물이 덩굴이나 이파리와 같은 장애물을 개척하여 그 안에 있는 파지 대상을 잡을 수 있는지 여부를 확인하였다. 이 실험으로 ‘손가락의 움직임이 주



[Fig. 10] (a) Experimental setting with using artificial tomato and ivy plant, (b) Experimental setting with using artificial Korean melon and ivy plant

변 장애물에 의해 방해를 받음으로 인한 파지 실패’ 문제를 얼마나 잘 해결하였는지 확인하였다.

실험은 그리퍼를 로봇 팔에 부착하고, 로봇 팔을 원격으로 조종하며 진행하였다. 파지 대상은 최소 지름이 63.0 mm이고, 최대 지름이 81 mm인 모형 토마토와 지름 79 mm에 105 mm의 높이를 가지는 모형 참외를 이용하였으며, 장애물은 인테리어 용 인조 덩굴을 사용하였다. 이 그리퍼를 운용할 장소인 스마트 팜의 환경과 유사한 환경을 조성하기 위해 덩굴을 벽에 고정하고 파지 대상을 매달았다. 인조 덩굴과 모형 과일을 이용한 시험 환경은 그림 [Fig. 10(a)]와 [Fig. 10(b)]에 보이는 바와 같이 구성하였으며, 모형 덩굴과 모형 식물은 철사를 이용하여 연결하였다. 각각의 실험 대상에 대해 10 회의 실험을 진행하였고, 실험을 수행할 때마다 모형 과일이 매달린 위치를 매회 변경하였다. 실험은 덩굴 속에 있는 모형 과일을 향해 그리퍼를 접근시키고 파지 대상이 그리퍼 내부에 안정적으로 안착되었을 때 입구 면적을 축소시키며 진행하였다. 입구 면적을 축소시키고 다시 그리퍼를 덩굴에서 멀리 떨어뜨렸을 때 모형 과일의 파지에 성공하였을 경우 장애물 극복 성공이라고 정의하였고, 파지에 실패했을 경우, 장애물 극복 실패라고 정의하였다.

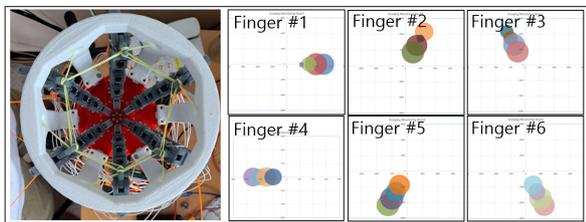
3.4 접촉력 측정 실험

이 실험에서는 실제 과일을 그리퍼로 파지할 때에 그리퍼 내부의 과일을 손상시키는지 여부를 확인하였다. 이를 통해 ‘과일이 손상됨’ 문제에 대한 대응 정도를 확인하였다.

실험은 실제 과일을 그리퍼의 내부에 안착시키고 입구를 닫은 뒤 파지를 시켰을 때, 손가락의 접촉부위에서 발생하는 접촉력을 확인하는 방식으로 실험을 진행하였다. 손가락의 마디마다 붙인 QA6P 힘 센서를 이용해서 접촉력의 최대치와 분포를 확인하였다. 파지 대상은 [Table 2]에 나온 바와 같이 토마토 3개와 파프리카 2개를 선정하였다. 토마토는 속도 별 경

[Table 2] Target objects in the contacting force measurement

Specimen	Tomato 1	Tomato 2	Tomato 3	Sweet pepper 1	Sweet pepper 2
Diameter [mm]	73.5-83	70.8-73	64-71.5	74.5-83	66-71.5
Weight [g]	222	179	155	153	72
Height [mm]	Value is similar to its diameter			72.5	81
Specifications	Maturity Lv. 4	Maturity Lv. 4	Maturity Lv. 4	Red	Yellow
Yield strength	274.3 gf- 445.6 gf			null	null
Overall strength	null	null	null	712 gf- 1369 gf	723 gf- 1236 gf
Maximum yield point	23.85±3.56 N			null	null



[Fig. 11] Contacting force monitoring board

도측정 연구결과¹⁵⁾를 기준으로 4단계의 속도를 가진 토마토를 선정하였고, 파프리카는 적색과 황색 두 가지를 선정하여 전체 경도를 작성¹⁶⁾하였다. [Table 2]에서 'null'이라고 표시된 항목은 선택한 참고 문헌에 해당 항목과 관련된 데이터가 확인되지 않았다는 것을 의미한다. 각각의 파지 대상에 대해 10회의 접촉력 측정실험을 진행하였고, 매회 접촉력을 측정하고 나서 과일의 손상 여부를 확인하였다. 실험 후에도 과일이 손상이 발생했는지 여부를 접촉력과 종합적으로 검토하여 손상 없는 파지의 성공과 실패 여부를 결정하였다. 접촉력의 최대 수치가 과일의 항복강도나 전체 경도의 최대 수치를 넘지 않은 경우에는 과일의 손상이 없다고 판단하였다. 그리고 접촉력의 측정 결과가 항복강도의 최소 수치를 넘었어도 해당 지점에서 외상이 확인되지 않을 경우에도 과일의 손상이 없다고 판단하였다. 24 개의 센서 값은 Arduino Uno 보드와 3 개의 CD4051BE 멀티플렉서를 이용하여 확인한다. 그리고 PLX-DAQ를 이용하여 시리얼 모니터에 기록된 데이터를 엑셀로 전송하였다.

다음으로는 실험을 위해 손가락의 접촉력 분포를 확인할 수 있는 모니터링 보드를 [Fig. 11]과 같이 제작하였다. 모니터링 보드는 엑셀의 거품형 차트를 이용하여 제작하였고, 센서와 손가락의 위치에 맞추어 원을 배치하였다. 센서의 값이 커질수록 원의 크기가 커지도록 만들었고, 이를 이용해 원의 크기와 위치에 따른 손가락 별 접촉력의 크기와 분포, 최대 접촉력 수치를 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

수확 대상인 참외, 파프리카, 토마토에 대해 수확을 진행하기 위해 그리퍼를 설계하였고, 성능 검증 실험에서 했던 세 가지의 실험을 통해 현장 실험에 임하기 전에 그리퍼의 성능 검증 실험을 하였다

4.1 위치오차 허용범위의 측정 결과 및 고찰

위치오차 측정 실험의 결과는 아래 [Table 3]에 보이는 바와 같이 target object 1에서는 4 cm까지의 위치오차를 허용하고, target object 2에서는 6 cm까지의 위치오차를 허용하였다. '모션 수행파트'가 이루는 육각형 입구의 최대 높이가 120 mm인 것을 보았을 때 구형 물체에 대해 입구 내부 손가락 위의 어떤 곳이든 안착되면 손가락이 이루는 경사에 의해 파지 대상이 그리퍼의 중심으로 향하게 된다는 것을 알 수 있었다. 반면, 원통형 물체에 대해서는 그리퍼로 접근하는 파지 대상의 면적이 구형 물체보다 크다는 요인으로 인해서 허용할 수 있는 위치오차의 범위가 구형 물체보다 상대적으로 작은 것이라고 사료된다. 이 그리퍼를 이용하여 수확을 진행할 토마토와 참외는 비정형 구체이므로, 토마토와 참외를 수확할 때에는 비정형 각기둥형 물체에 가까운 파프리카보다 큰 위치오차 허용범위를 보일 것으로 예상할 수 있다. 그리고 실험을 통해 파프리카를 수확할 때에는 위치 오차의 허용범위가 토마토와 참외보다 적을 것이라는 것도 함께 예측이 가능하다.

4.2 최대 정하중의 측정 결과 및 고찰

최대 정하중의 측정 결과는 [Table 4]에 보이는 바와 같이

[Table 3] Result of the positional error tolerance measurement

Distance from center	Grasping target object 1 (Success/ Failure)	Grasping target object 2 (Success/ Failure)
0 cm	Success	Success
1 cm	Success	Success
2 cm	Success	Success
3 cm	Success	Success
4 cm	Success	Success
5 cm	Failure	Success
6 cm	Failure	Success
7 cm	Failure	Failure
8 cm	Failure	Failure

[Table 4] Result of the maximum load measurement

	Target object 1	Target object 1
Slipped at	0.685 kgf	nowhere

target object 1에 대하여 0.685 kgf가 측정되었고, target object 2에 대해서는 실험범위 내에서 미끄러짐이 발생하지 않았음을 확인하였다. 원통형 물체가 적은 힘에서 미끄러짐이 발생한 원인에 대해 분석해 보았을 때, 그리퍼 손가락의 맨 위쪽 마디가 구부러져 있어서 손가락의 맨 위쪽 마디와 바닥을 제외하고 파지 대상과 손가락이 접촉하지 않은 것을 들 수 있다. 이로 인해서 구형 물체를 잡았을 때보다 파지 면적이 감소하여 미끄러짐을 버티기 위한 마찰력을 내지 못하였다고 추정이 가능하다. 그래서 실험 결과에 대해 그리퍼가 파지 대상을 완전히 감쌌을 경우 미끄러짐이 발생하지 않는다고 말할 수 있다. 이때, 대상 물체가 완전히 감싸졌다는 상태는 그리퍼가 물체를 파지했을 때 물체가 돌출물이 [Fig. 5(b)]에서 보인 작업범위 내부에 들어오면서, 수축된 그리퍼 입구의 면적이 그리퍼 내부에 있는 파지대상 물체의 단면적보다 작은 경우라고 정의하였다. 그리퍼를 이용하여 수확을 진행할 대상인 파프리카, 참외, 토마토의 경우 그리퍼의 내부에 성공적으로 감싸지며 안착할 수 있다. 그러므로, 실험 결과를 토대로 수확 대상 과일들에 대하여 그리퍼는 미끄러짐이 발생하지 않는다고 예측할 수 있다. 이 실험 결과로부터 물체는 그리퍼 내부에 감싸져 있는 상태라면 내부 접촉 면적의 변화에 관계없이 내부의 물체가 그리퍼를 빠져나가지 않는다고 할 수 있으므로, 내부에서 감싸진 토마토, 파프리카, 참외에 대해 파지를 성공했다고 할 수 있다. 특히, 수확을 진행할 과일 중 하나인 토마토의 경우 플러킹 방식을 이용하여 과일과 줄기를 분리하기 위해서 필요한 힘이 0.58 N에서 2.46 N인 것을 고려했을 때¹⁷⁾, 이 그리퍼를 이용하여 토마토를 플러킹 방식으로 수확하기에도 적합하다고 예상이 가능하다.

4.3 장애물 극복실험의 결과 및 고찰

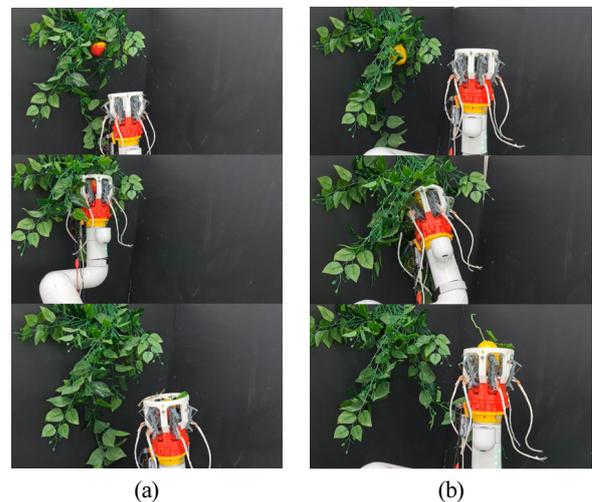
장애물 극복실험 I의 결과는 [Table 5]에 보이는 것과 같이 모형 토마토와 모형 참외에 진행한 10번의 실험에서 10번 모두 성공적으로 덩굴 속의 물체를 잡는 데에 성공 했음을 확인하였다. 각 모형 과일의 실험은 [Fig. 12(a)]와 [Fig. 12(b)]에 보이는 것과 같이 진행되었다. 보호 구조물이 장애물을 극복하는 과정은 보호 구조물이 이파리와 줄기를 파지 대상에서 밀어내고, 이파리 및 줄기보다 상대적으로 무거운 파지 대상 물체가 아래로 밀려 나오면서 그리퍼 내부에 안착하는 것으로 확인되었다. 이를 통해 보호 구조물은 성공적으로 주변의 이파리와 줄기 등의 장애물을 극복한 것이 확인되었다.

4.4 접촉력 측정 실험 결과 및 고찰

매 회 접촉력의 최대 수치 측정 결과와 파손 여부는 [Table 6]에 보이는 바와 같이 확인되었다. 그리고 각 실험에서 가장 큰

[Table 5] Result of the obstacle overcoming performance test

Trial #	Grasping an artificial tomato (Success/ Failure)	Grasping an artificial Korean melon (Success/ Failure)
1	Success	Success
2	Success	Success
3	Success	Success
4	Success	Success
5	Success	Success
6	Success	Success
7	Success	Success
8	Success	Success
9	Success	Success
10	Success	Success
Success rate	100%	100%



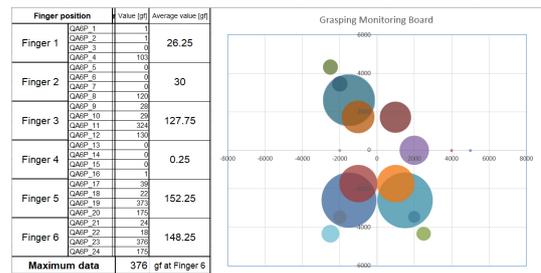
[Fig. 12] (a) Grasping an artificial tomato in the ivy plant with a gripper, (b) Grasping an artificial Korean melon in the ivy plant with a gripper

접촉력이 발생하였을 때의 모니터링 보드를 [Fig. 13]에 제시하였다. [Table 6]에서 확인되는 바와 같이 접촉력의 최대치가 모두 각 과일의 항복점이나 전체 경도를 넘어가지 않았다. 토마토의 경우 토마토 1, 토마토 2, 토마토 3 모두가 항복 강도의 최소 수치를 초과했음을 확인하였다. 하지만, 토마토마다 항복점이 다를 수 있다는 점과 단계별 항복점의 최대 수치를 넘지 않았다는 점, 그리고 매 실험 이후 육안상 손상이 확인되지 않았다는 점을 들었을 때, 해당 그리퍼는 토마토를 손상 없이 잡는 데에 성공하였음을 알 수 있다. 파프리카의 접촉력 측정 결과는 최대 접촉력의 수치가 85 gf에서 568 gf까지 보인 것을 확인하였다. 특히, sweet pepper 2에서 568 gf의 최대 접촉력 수치를 확인하였다. 발생한 모든 최대 접촉력 수치가 파프리카의 전체 경도보다 작은 수치를 보인다는 것과, 매 실험 이후 육

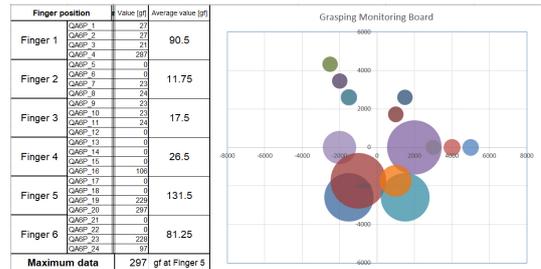
[Table 6] Result of the maximum load measurement

Trial #		Tomato 1	Tomato 2	Tomato 3	Sweet pepper 1	Sweet pepper 2
1	Maximum force	277 gf	270 gf	190 gf	206 gf	256 gf
	Damage	×	×	×	×	×
2	Maximum force	351 gf	173 gf	211 gf	256 gf	397 gf
	Damage	×	×	×	×	×
3	Maximum force	336 gf	188 gf	201 gf	400 gf	418 gf
	Damage	×	×	×	×	×
4	Maximum force	258 gf	231 gf	224 gf	172 gf	216 gf
	Damage	×	×	×	×	×
5	Maximum force	376 gf	297 gf	206 gf	193 gf	157 gf
	Damage	×	×	×	×	×
6	Maximum force	354 gf	220 gf	191 gf	85 gf	122 gf
	Damage	×	×	×	×	×
7	Maximum force	376 gf	270 gf	275 gf	186 gf	568 gf
	Damage	×	×	×	×	×
8	Maximum force	191 gf	282 gf	190 gf	213 gf	324 gf
	Damage	×	×	×	×	×
9	Maximum force	351 gf	182 gf	224 gf	265 gf	499 gf
	Damage	×	×	×	×	×
10	Maximum force	320 gf	235 gf	245 gf	282 gf	270 gf
	Damage	×	×	×	×	×

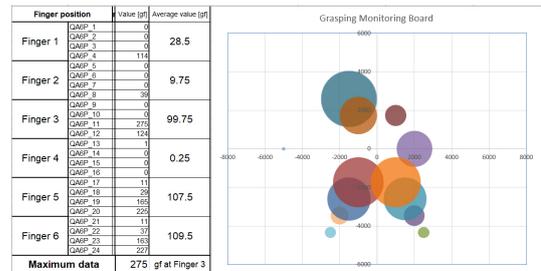
안으로 확인된 과실의 손상이 없다는 점을 들었을 때, 해당 그리퍼는 파프리카도 손 상없이 파지할 수 있음을 알 수 있다. [Fig. 13]에서 접촉 력의 수치가 나오지 않는 부분들에 대한 원인은 다음과 같다. 우선, [Fig. 14(a)]와 같이 파지 대상의 크기가 작아서 손가락과 접촉되지 않은 부위가 많은 경우가 있다. 다음으로는 [Fig. 14(b)]에서 확인된 바와 같이 형상적으로 손가락의 중간부분이 파지 대상과 접촉하기 어려운 경우를 들 수 있다. 마지막으로, [Fig. 14(c)]와 같이 손가락의 센싱 영역에 과일이 제대로 접촉하지 못하였을 때 수치가 0으로 나오는 것을 확인하였다. 이는 센싱 영역(4 mm × 4 mm)에 비해 접촉이 가능한 면적(15 mm × 9 mm)이 상대적으로 넓기 때문에 발생하는 문제이다. 이 문제에 대해서는 2차 프로토타입의 손가락에 버튼을 만들어서 손가락 마디 위의 어느 부분을 눌러도 접촉력이 확인되도록 제작한 뒤 실험을 진행할 계획이다.



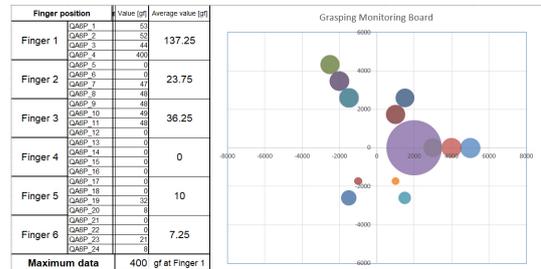
(a)



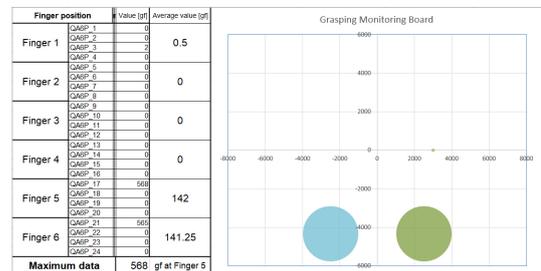
(b)



(c)

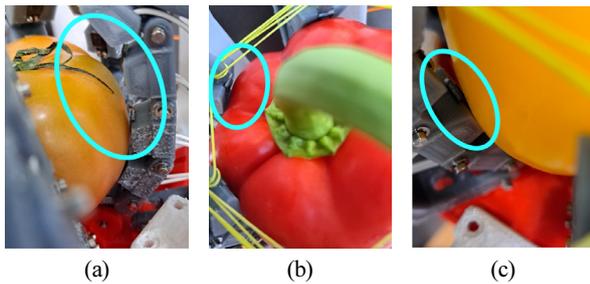


(d)



(e)

[Fig. 13] (a) Sensor data of tomato 1 shows 376 gf of maximum contacting force, (b) Sensor data of tomato 2 shows 297 gf of maximum contacting force, (c) Sensor data of tomato 3 shows 275 gf of maximum contacting force, (d) Sensor data of sweet pepper 1 shows 400 gf of maximum contacting force, (e) Sensor data of sweet pepper 2 shows a 568 gf of maximum contacting force



[Fig. 14] (a) Uncontacted area 1, (b) Uncontacted area 2, (c) Unstimulated sensing area

5. 결 론

위치오차 허용범위 측정 실험을 통해서 해당 그리퍼는 중심 축으로부터 수직인 방향으로 4 cm에서 6 cm까지의 위치오차를 허용한다는 것을 확인하였다. 이는 그리퍼가 수확 대상을 바라보면서 이동할 때 과일을 4 cm에서 6 cm만큼 벗어나도 수확이 가능하다는 의미를 가지므로, ‘그리퍼와 과수 사이의 위치오차 발생으로 인한 파지 실패’ 문제를 설계 단계에서 완화하였다고 볼 수 있다. 최대 정하중 측정실험을 통해 그리퍼 내부에 안착한 과일에 대해 ‘물건이 안에 있는 상태에서 그리퍼가 닫힐 경우 내부의 과일이 빠져나오지 못하도록 설계할 것’이라는 설계조건을 만족한 것으로 확인되었다. 이를 통해, 참외, 파프리카, 토마토를 수확할 때 발생할 수 있는 ‘접촉면 슬립으로 인한 파지 실패’ 문제를 극복하였다는 것을 알 수 있다. 단, 최대 정하중의 측정 실험에서 그리퍼의 축 방향 및 횡 방향 가속에 의한 힘은 고려되지 않았다. 실제 수확 과정에서는 그리퍼의 가속에 의한 추가 하중을 받을 가능성이 있고, 가속에 의한 하중이 추가됨에도 불구하고 슬립이 발생하지 않는지의 여부는 추후에 검증 실험을 진행할 계획이다. 장애물 극복실험의 결과를 통해 제시된 그리퍼는 이파리나 줄기와 같은, 파지 대상 과일의 주변 장애물을 밀어내고 파지대상 물체를 파지할 수 있음을 보였다. 이를 통해 이 그리퍼의 보호 구조물은 ‘손가락의 움직임이 주변 장애물에 의해 방해받을 수 있으므로 인한 파지 실패’ 문제에 대응할 수 있고, 의도된 설계 목표에 부합하는 성능을 보였음을 확인할 수 있다. 접촉력 측정 실험의 결과를 통해 ‘접촉면에서 발생하는 접촉력은 과일의 항복강도 등을 넘지 않을 것’이라는 설계조건을 만족한 것을 확인하였다. 이로써 토마토와 파프리카에 대해 ‘과일이 손상됨’으로 인한 수확 실패 문제를 극복하였음을 알 수 있다.

현재까지 그리퍼가 파프리카, 토마토를 손상 없이 파지할 수 있음을 확인하였지만, 참외의 최대 접촉력 측정 실험은 시기적인 요인으로 인하여 수행하지 못하였다. 그래서, 실제 참외의 접촉력 실험은 손가락을 개선한 2차 프로토타입을 이용

하여 추후에 진행할 계획이다. 그리고 제시된 그리퍼로 아래로 당기는 모션과 옆으로 비틀어 따는 모션 등을 이용하여 실제 토마토에 대한 detachment success를 확인함으로써 ‘줄기 및 과수분리 실패’문제에 대한 대응 능력을 확인할 계획이다. 이 실험의 결과에 기반하여 실제 과일에 대한 줄기 분리 과정을 정리할 예정이다.

References

- [1] D. S. Choi, J. E. Lee, and M. J. Hwang, “Design of Flexible Gripper for Unstructured Object Manipulation,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 184-190, Mar., 2020, DOI: 10.5302/J.ICROS.2020.19.0217.
- [2] C. W. Bac, J. Hemming, B. A. J. Van Tuijl, R. Barth, E. Wais, and E. J. van Henten, “Performance Evaluation of a Harvesting Robot for Sweet Pepper,” *Journal of Field Robotics*, vol. 34, no. 6, pp. 1123-1139, Sept., 2017, DOI: 10.1002/rob.21709.
- [3] S. Y. Moon and M. J. Hwang, “An Adaptive Soft Gripper for Fruit Harvesting,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 28, no. 7, pp. 664-670, 2022, [Online], <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?serArticleSearchBean.artiId=ART002856837>.
- [4] C. Lehnert, A. English, C. Mccool, A. W. Tow, and T. Perez, “Autonomous Sweet Pepper Harvesting for Protected Cropping Systems,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 872-879, Apr., 2017, DOI: 10.1109/LRA.2017.2655622.
- [5] A. L. Gunderman, J. A. Collins, A. L. Myers, R. T. Threlfall, and Y. Chen, “Tendon-Driven Soft Robotic Gripper for Berry Harvesting,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 2652-2659, Apr., 2022, DOI: 10.1109/LRA.2022.3143891.
- [6] Y. Hao, S. Biswas, E. Hawkes, T. Wang, M. Zhu, L. Wen, and Y. Viseli, “A Multimodal, Enveloping Soft Gripper: Shape Conformation, Bioinspired Adhesion, and Expansion-Driven Suction,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 37, no. 2, pp. 350-362, Apr., 2021, DOI: 10.1109/TRO.2020.3021427.
- [7] A. Silwal, J. R. Davidson, M. Karkee, C. Mo, Q. Zhang, and K. Lewis, “Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester,” *Journal of Field Robotics*, vol. 34, no. 6, pp. 1140-1159, Sept., 2017, DOI: 10.1002/rob.21715.
- [8] Y. Xiong, C. Peng, L. Grimstad, P. J. From, and V. Isler, “Development and field evaluation of a strawberry harvesting robot with a cable-driven gripper,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 157, pp. 392-402, Feb., 2019, DOI: 10.1016/j.compag.2019.01.009.
- [9] Y. S. Ha and T. W. Kim, “Design Factor Analysis of End-Effector for Oriental Melon Harvesting Robot in Greenhouse Cultivation,” *Journal of Bio-Environment Control*, vol. 22, no. 3, pp. 284-290, Sept., 2013, DOI: 10.12791/KSBEC.2013.22.3.284.
- [10] S. M. Choi and M. J. Hwang, “The Method to Determine Target Specification of a Fruits Harvesting Gripper based on Quality Function Deployment,” *ICROS 2022*, Geoje, Republic of Korea,

- pp. 168-169, 2022, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11103497>.
- [11] J. Seol, S. Lee, and H. I. Son, "A Review of End-effector for Fruit and Vegetable Harvesting Robot," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 15, no. 2, pp. 91-99, Jun., 2020, DOI: 10.7746/jkros.2020.15.2.091.
- [12] S. Choi and M. J. Hwang, "Design of a Fruit Harvesting Gripper Specialized in Grasping Arbitrary Spherical and Cylindrical Object," *ICCAS 2022*, Busan, Republic of Korea, 2022, [Online], <https://sigongji.iccas.org/wp/SessionPaperList.asp?code=WB4>.
- [13] Shantou JiXian Electronic Technology Co.,Ltd., *CLS-HV7346MG 46KG HV High Precision Steel Gear Full CNC Aluminum Shell Structure Digital Coreless*, [Online], <http://www.jx-servo.com/en/Product/FULL-METAL/fmcs/460.html>, Accessed: Oct. 30, 2022.
- [14] *Marveldex Sensor Manual-J200712*, Marveldex, Seongnam City, Republic of Korea, 2020, [Online], http://mdex-shop.com/board/free/read.html?no=514&board_no=7, Accessed: Oct. 30, 2022.
- [15] K. C. Kim, K. D. Kwon, and Y. G. Hong, "Study of Maturity Level Hardness Measurement of Tomato Harvest Gripper," *ICROS 2022*, Geoje, Republic of Korea, pp. 86-87, 2022, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11103457>.
- [16] S. M. Lee, J.-S. Kim, C. G. An, J.-S. Park, and S. Kim, "Assessment of Paprika Quality by Instrumental Parameters and Sensory Attributes," *Journal of the East Asian Society of Dietary Life*, vol. 26, no. 1, pp. 34-43, Feb., 2016, DOI: 10.17495/easdl.2016.2.26.1.34.
- [17] H. Xie, D. Kong, J. Shan, and F. Xu, "Study the Parametric Effect of Pulling Pattern on Cherry Tomato Harvesting Using RSM-BBD Techniques," *Agriculture*, vol. 11, no. 9, Aug., 2021, DOI: 10.3390/agriculture11090815.



최 성 모

2022 공주대학교 기계자동차공학부 기계 설계공학전공(공학사)

2022~현재 서울시립대학교 기계정보공학과 석사과정

관심분야: Gripper Design, Mechanical Design Process, Robot Hardware Design, Field Robotics



황 면 중

2001 한국과학기술원 기계공학과(학사)

2003 한국과학기술원 기계공학과(석사)

2007 한국과학기술원 기계공학과(박사)

2008~2009 Case Western Reserve University, Research Associate

2010~2013 삼성전자 생산기술연구소 책임연구원

2013~2015 한라대학교 기계자동차공학부 조교수

2015~2021 한국교통대학교 기계공학전공 조교수/부교수

2021~현재 서울시립대학교 기계정보공학과 부교수

관심분야: Robot Motion Planning, Motion Control, Manipulation, Autonomous Mobile Robot, Field Robotics