



수확용 로봇 커팅 그리퍼의 개발

전경일^{a,*}

Development of a Robotic Cutting Gripper for Harvesting

Kyoungill Jeon^{a,*}^a Department of AI IT Convergence, Soongsil University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	3	September	2025
Revised	27	October	2025
Accepted	29	October	2025

Keywords:

End-effector
Cutting gripper
Agricultural robotics
Automated harvesting
Modular mechanism

ABSTRACT

Labor shortages owing to rural depopulation and aging are accelerating automation in agriculture. Harvesting, a labor-intensive task, requires precise operations, such as grasping and cutting. This study presents a cutting gripper end-effector capable of both the aforementioned actions, designed for use with commercial multi-joint robotic arms. The modular mechanism, driven by a DC motor, ensures parallel finger movement, stable grip, and accurate cutting. Experiments conducted in a horticultural testbed demonstrated grasping and cutting success rates of 95% and 90%, respectively. The system proved reliable and durable through repeated operational tests, thus establishing its potential in automated harvesting. This end-effector is suitable for deployment in both agricultural and industrial fields, where repetitive precision handling is required.

1. 서론

산업용 로봇의 보급은 제조업의 자동화와 생산성 향상에 큰 기여를 해왔으나, 엔드 이펙터(end-effector)의 한계로 인해 다양한 작업에 범용적으로 적용하기에는 제약이 존재한다. 기존의 로봇용 그리퍼는 특정 형상의 부품이나 제한된 작업 환경에 최적화되어 있어, 작물과 같이 크기·형상·강도가 불규칙한 물체나, 비정형 조립 공정에서는 적용이 어렵다.

최근 농업 분야에서는 고령화 및 농촌 인구 감소에 따른 인력 부족 문제로 인해, 농업 분야에서 자동화 기술의 도입이 가속화되고 있다. 특히 반복적이고 노동집약적인 수확 작업은 농업 자동화의 핵심 영역 중 하나로, 이를 대체할 수 있는 수확용 로봇에 대한 수요가 증가하고 있다^[1-4]. 이러한 흐름은 농작물의 파지, 절단, 수거 등의 복합 작업을 정밀하게 수행할 수 있는 말단 장치, 즉 엔드

이펙터 기술의 발전을 요구하고 있다.

특히 파프리카·고추와 같은 농산물을 손상 없이 파지 및 절단해야 하는데, 기존 그리퍼는 강도 조절이 어렵고 작물의 손상률이 높다는 한계가 있다. 이러한 문제는 산업 현장에서도 동일하게 나타나며, 부품 손상률, 파지 실패율, 유연성 부족으로 이어진다.

기존의 수확 로봇용 그리퍼는 대부분 단순한 개폐 동작 기반의 2조형 구조를 사용하거나, 진공 흡입 방식을 활용하는 등 기능이 제한적이며, 작물의 위치나 줄기 방향, 곡률 변화에 유연하게 대응하기 어렵다. 또한 절단 동작과 파지 동작이 분리되어 있어 작업 효율성이 낮고, 절단 실패나 작물 손상률이 높다는 한계가 존재하였다^[5-13].

따라서 본 연구에서는 “수확용 로봇에 적용 가능한 커팅 그리퍼의 설계 및 구현”을 통해, 농업과 산업 현장 모두에서 활용 가능한 범용 엔드 이펙터인 수확용 로봇 커팅 그리퍼를 제시하고자 한다.

* Corresponding author. Tel.: +82-31-632-0172

E-mail address: kijeon@senestechonology.com (Kyoungill Jeon).

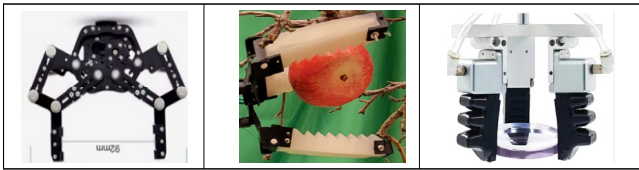


Fig. 1 Types of grippers

본 연구의 핵심 기여는 다음과 같다.

- 1) 구동 메커니즘 설계: 슬라이더-링크 구조 기반의 파지 및 절단 동작 통합
- 2) 파지력 및 절단력 제어: 작물 손상을 최소화할 수 있는 최적 파라미터 도출
- 3) 실험 검증: 실제 고추 수확 환경에서 성공률 및 손상률 평가 및 실패 원인 분석

본 논문에서는 제안된 커팅 그리퍼의 구조적 설계, 작동 원리 및 구동 해석을 소개하고, 실제 고추 수확 실험을 통해 수확 성공률, 손상률 등의 성능 평가를 수행하였다. 이를 통해 본 연구의 커팅 그리퍼가 기존 기술 대비 높은 적용성, 유연성 및 수확 효율을 보이는 것을 입증하고자 한다.

2. 수확용 로봇 커팅 그리퍼의 개발

2.1 상용 엔드 이펙터와 수확 과정

기존의 수확용 엔드 이펙터는 크게 파지형, 절단형, 복합형으로 구분된다. Fig. 1은 파지형 그리퍼의 종류를 나타낸 것이다. 파프리카, 오이 연구에서는 흡착식 및 2-지 그리퍼 기반 연구가 활발히 진행되었으나, 줄기 직경이 가는 고추에는 적용이 곤란하다. 토마토 연구에서는 칼날 절단 장치가 사용되었지만, 가지 분지부에서의 위치 오차로 인해 실패율이 높다. 최근 복합형 엔드 이펙터가 제안되었으나, 파지와 절단의 동기화 문제로 고추와 같은 작은 작물에는 성공률이 낮았다.

본 연구는 Table 1의 기존 연구와 본 연구의 비교표와 같이 이러한 기존 연구의 한계를 극복하고자, 이중 구동 모듈로 설계되었다. 첫 번째 모듈은 링크-슬라이더 메커니즘으로 이루어진 파지 장치이며, 두 번째 모듈은 링크 커터 구조를 기반으로 한 절단 장치이다. 두 기능은 동기화된 리니어 모터 제어를 통해 순차적으로 동작하며, 단일 제어 신호로 파지 및 절단이 가능한 슬라이더-링크 메커니즘 기반 커팅 그리퍼를 설계하였다.

2.2 수확용 로봇 커팅 그리퍼의 개발

본 수확용 로봇 커팅 그리퍼는 Fig. 2와 같이 크게 파지 기능을 수행하는 파지부와 줄기 또는 꼭지를 절단하는 절단부 그리고 6축 로봇 암과 연결되는 로봇 연결부로 구성된다.

Table 1 Comparison between previous studies and this study

Category	Existing Studies (Paprika / Tomato / Cucumber)	This study (Chili pepper)
Crop characteristics	Large diameter, resistant to damage	Small diameter, prone to twisting and branching
End-Effector structure	Suction type, two-finger gripper, simple blade mechanism	Slider-linkage hybrid mechanism
Limitations	Separation of cutting and gripping; difficulty handling small diameter	Enables simultaneous cutting and gripping

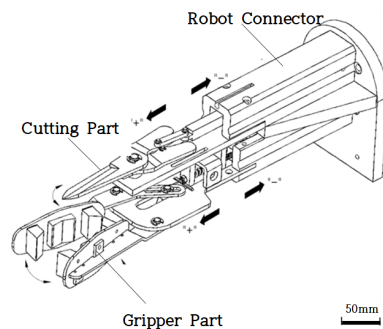


Fig. 2 Cutting gripper of a harvesting robot

Table 2 Key design specifications

Item	Specification
Size	120 mm × 80 mm × 60 mm
Weight	0.85 kg
Driven method	Linear motor (1/3.5)
Max gripping	15 N
Max cutting	24 N

2.2.1 그리퍼의 구성

수확용 로봇 커팅 그리퍼의 주요 설계 사양은 Table 2와 같다. 그리퍼는 수확 대상물을 파지하는 역할을 하며, 다음과 같은 특징이 있다. Fig. 3과 같이 제1 그리퍼와 제2 그리퍼가 대칭 구조를 이루고 있으며, 고정판, 슬라이더, 압력조절 스프링 및 너트와 파지 완충 고무로 구성된다.

슬라이더의 메커니즘은 리니어 액추에이터에 의해 이동하며, 슬라이더가 “+” 방향(수확 대상물 쪽)으로 이동하면 그리퍼가 벌어지고, “-” 방향(로봇 쪽)으로 이동하면 오므러진다. 압력조절 장치는 슬라이더와 연결된 압력조절 스프링 및 너트를 통해 파지 압력을 기계적으로 조절 가능하여 작물의 크기에 따른 파지력 변화를 감지해 적절히 조절된다. 작물의 손상 방지 기능은 슬라이더 상단의 센서가 스프링 멈춤판의 위치를 모니터링해 과도한 오므림을 방지하고, 파지 압력의 일관성을 유지하도록 슬라이더의 동작을 제어한다. 또한 교체 용이성을 위하여 파지 완충 고무는 소프트 재질로

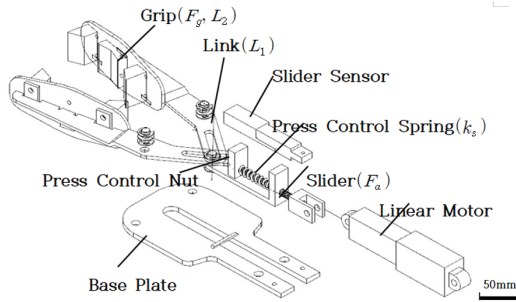


Fig. 3 Grip configuration

만들어져 있으며, 탈착식으로 설계되어 마모되거나 손상되면 쉽게 교체 가능하게 하였다.

2.2.2 모터의 선정

그리퍼에 사용되는 리니어 모터를 선정하기 위하여 부하 토크를 구했다. 그리퍼의 설계하중은 다음과 같은 식을 적용하였다.

Fig. 4는 리니어 모터의 속도선도 그래프를 나타내고 있다. 속도 선도에서 부하속도(V)는 0.05/sec 가감속 시간은 t_a 와 t_d 를 합하여 0.2sec, 등속시간 t_c 는 0.6 sec로 결정하였으며, 1사이클에 걸리는 시간은 (t_t) 0.8 sec이다. 고추를 파지하기 위하여 이동한 거리(S)는 다음 식 (1)과 같다.

$$S = \frac{1}{2} (t_c \cdot V) + (t_c \cdot V) + \frac{1}{2} (t_d \cdot V) \quad (1)$$

고추를 파지하기 위한 모터의 회전수(rpm)는 다음 식 (4)와 같다.

$$N_{screw} = \frac{S}{p} \quad (2)$$

$$N_{rot} = \frac{N_{screw}}{t_t} \quad (3)$$

$$N_{rpm} = N_{rot} \cdot R \cdot 60 \quad (4)$$

여기서 S 는 고추를 파지하기 위하여 이동한 거리이며 t_t 는 1사이클에 걸리는 시간, p 는 볼 스크류 나사의 피치, N_{screw} 는 이동 거리에 대한 볼스크류의 회전수이며, N_{rot} 는 1초당 볼스크류의 회전수이다. 또한 R 은 감속비이며 N_{rpm} 은 N_{rot} 의 분당 회전수이다.

고추를 파지하기 위한 모터의 필요한 접촉력(F_g)는 다음 식 (5)와 같다.

$$F_g = \frac{W_L}{\mu} \quad (5)$$

Table 3 Linear motor specifications

Stroke Length [m]	Length of pitching [m]	Force [N]	Reduce rate	Speed [m/s]
0.035	0.003	8	1/3.5	0.15

$$W_L = W f_s \quad (6)$$

$$W = (W_a + W_b) \quad (7)$$

W_L 은 그리퍼의 설계하중이며, W 는 그리퍼와 고추의 무게의 합, W_a 는 그리퍼의 무게, W_b 는 고추의 무게, f_s 는 안전율이며 μ 는 마찰계수이다.

그리퍼는 두 개의 핑거가 동시에 작용하는 경우를 고려해야 하므로 모터가 생성해야 하는 총 부하(F)는 접촉력(F_g)의 두 배로 계산된다.

$$F = 2 F_g \quad (8)$$

$$F = 2F_a \frac{L_2}{L_1} \Rightarrow F_a = \frac{L_1}{2L_2} F \quad (9)$$

L_1 은 Link의 길이이며, 슬라이더 연결구와 그리퍼 회전 중심까지의 길이이며, L_2 는 그리퍼 회전 중심에서 그리퍼 끝단까지의 길이이다.

모터의 부하 토크(T_L)는 다음 식과 같다. 이때 η 효율이며, p 는 슬라이더 구동 리니어모터 볼스크류 나사의 피치, R 은 감속비이다.

$$T_L = \frac{F_a p}{2\pi \eta R} \quad (10)$$

$$T_{safe} = T_L \cdot \text{안전계수} \quad (11)$$

모터의 토크(T_{safe})를 출력 전력(P)으로 변환은 다음 식 (12)와 같다.

$$P = \frac{T_{safe} 2\pi n}{60} \quad (12)$$

리니어 모터의 사양은 Table 3과 같으며, 그리퍼의 파지 상태와 파지력을 측정하기 위해 그리퍼 말단 중앙부에 힘 센서(UST-SNR-FSR No. 402, US Technology)를 부착하였다. 파지 안정성을 높이기 위해 그리퍼의 맞물리는 안쪽 면에 Silicone pad(wet) 소재의 죠(jaw)를 대칭으로 설치하여, 물체가 미끄러지지 않도록 파지의 안정성을 강화하였다. 파지 안정성은 물체를 잡는 동안 그리퍼가 밀

Table 4 Spring summary

Spring specification		
Item	Specification	
Material wire diameter [m]	0.0004	
Mean coil diameter [m]	0.006	
Inner coil diameter [mm]	0.0057	
Effective number of coils	13	
Total number of coils	15	
Coiling direction	Right	
Free height [mm]	0.038	
Load at installed	Load [N]	3.71
	Height [m]	0.028
Load at maximum	Load [N]	13.6
	Height [m]	0.006
Spring constant [N/mm]		0.53
Surface treatment	Shot peening (post-forming)	
	Corrosion protection	ZPC2



Fig. 4 Attaching the force sensor UST-SNR-FSR

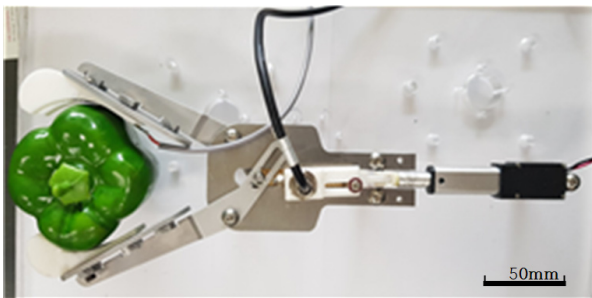


Fig. 5 Measurements were taken on model paprika

어내는 힘을 최소화하여 물체가 안정적으로 고정되도록 하는 것이 중요하다. 파지력은 그리퍼가 대상체를 온전히 잡기 위해 가하는 힘을 의미한다.

Table 4는 로봇 그리퍼에 사용된 스프링의 사양을 나타낸다. 이 스프링은 물체를 파지하는 힘을 제어하기 위해 설계되었으며, 스프링 상수는 0.53 N/mm이다. 이 스프링은 쇼트피닝 가공과 ZPC2 녹 방지 처리를 통해 내구성을 높였다.

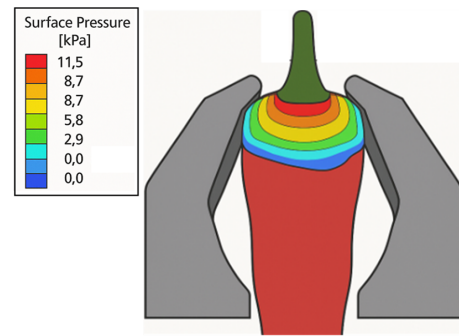


Fig. 6 Surface pressure distribution when contacting the gripping

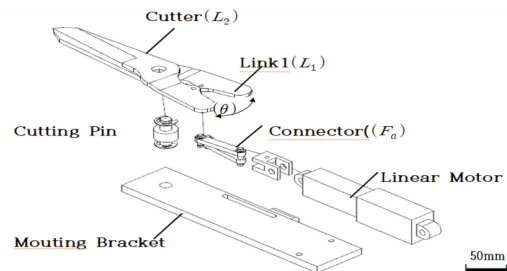


Fig. 7 Cutting section structure

2.2.3 파지시의 접촉력

파지 시 작용하는 접촉력은 Fig. 4와 같이 힘 센서를 통해 Fig. 5와 같이 모형 파프리카를 대상으로 측정되었으며, 양측 조(Jaw)에 평균 1.65 ± 0.38 N의 압력이 전달되었다. 이는 고추 조직의 압축 허용 한계(≈ 3.5 N)를 초과하지 않으면서, 미끄러짐 없이 고정 가능한 수준이다.

접촉 압력 분포 분석은 SolidWorks Simulation을 통해 시뮬레이션 되었으며, Fig. 6과 같이 접촉면의 평균 면압은 7.2 kPa, 최대 면압은 11.5 kPa로 계산되었다. 이 수치는 일반적인 홍고추의 표면 파열 임계 압력(15~17 kPa)보다 낮은 수준으로, 파지에 의한 손상 가능성이 낮음을 확인할 수 있었다. 이 수치는 파프리카뿐 아니라 홍고추 실측 데이터와도 부합하며, 스프링 상수 0.53 N/mm 기반 설계값과의 오차 $\pm 8\%$ 이내로 확인되었다. 본 해석 결과는 후속 장의 통합 테스트 기준 설계에 적용되었다.

2.2.4 절단부의 구성

절단부는 수확 대상물의 줄기 또는 꼭지를 절단하는 역할을 한다. Fig. 7과 같이 제1, 제2 가위와 링크부재, 액추에이터로 구성된다. 링크기구가 액추에이터의 직선운동에 따라 회전하여, 가위가 동시에 벌어지고 오므러지며 리니어 액추에이터로 구동되어 일정한 절단력이 제공되어 수확 대상물의 꼭지를 절단한다.

링크 구조는 제2/링크와 제3 링크가 체결편으로 연결되어, 한쪽의 힘만으로 커터가 대칭적으로 움직임을 형성한다. 또한 절단부는 절단부 고정 브라켓 위에 모듈화되어 있어 유지보수가 쉽고,

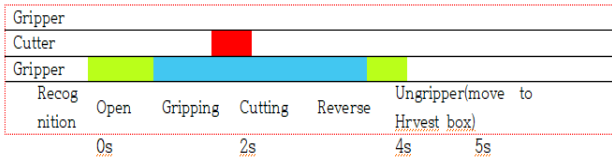


Fig. 8 Drive timing chart

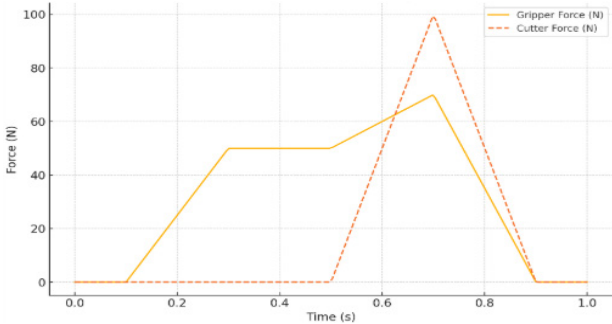


Fig. 9 Changes in gripper and cutter force over time

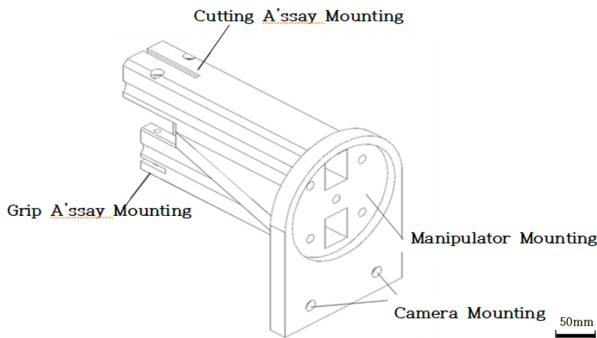


Fig. 10 Robot connector

교체나 점검이 용이하다.

고추 꼭지의 절단력이 F_{cut} 일 경우 (Table 8 참조), 가위 날에 필요한 토크 T_c 와 모터의 부하 토크(T_L), 모터의 안전 토크(T_{safe})를 출력 전력(P)으로 변환은 다음과 같은 수식을 통해 계산된다.

$$T_c = F_{cut} L_2 \quad (13)$$

$$T_c = F_a L_1 \sin\theta \quad (14)$$

$$F_a = \frac{T_c}{L_1 \sin\theta} = \frac{F_{cut} L_2}{L_1 \sin\theta} \quad (15)$$

$$T_L = \frac{F_a p}{2\pi \eta R} \quad (16)$$

$$T_{safe} = T_L \cdot \text{안전계수 (안전계수: 2)} \quad (17)$$



Fig. 11 The grip part and the cutting part are assembled by the robot connector



Fig. 12 Forms of potted and field test beds

$$P = \frac{T_{safe} 2\pi n}{60} \quad (18)$$

여기서 F_a 는 액추에이터가 링크에 가하는 힘, θ 는 링크의 각도, L_1 은 Link1의 길이이며, L_2 는 Cutter 길이, η 은 효율 이며, p 는 볼스크류 나사의 피치를 의미한다.

고추 수확용 로봇의 커팅 그리퍼는 Fig. 8의 구동 타이밍 차트와 같이 슬라이더+이동으로 그리퍼의 벌어진, 목표 과채류 파지, 파지 상태 유지, 수확 통으로 이동, 그리퍼 해제 순서로 이루어진다.

Fig. 9는 그리퍼와 커터의 시간과 힘에 따른 변화를 나타낸 경우로 슬라이더는 부드럽게 파지력을 올렸다가 유지 후 해제하고, 링크는 짧은 시간 동안 급격히 절단력을 발휘한 뒤 복귀는 것을 특징으로 한다.

2.2.5 로봇 연결구의 구성

로봇 연결부는 그립부와 절단부를 6축 로봇 암과 연결하며, Fig. 10과 같이 절단부 연결부재, 그립부 연결부재, 로봇 연결관등으로 구성되며, 각각의 액추에이터가 삽입될 수 있도록 내부에 홈을 형성하여 컴팩트한 구조를 가지고 있다. 또한 로봇 연결관에는 카메라 고정홀을 두어 크기 및 위치 인식을 위한 카메라를 부착할 수 있도록 했다. 각 모듈은 볼트 체결만으로 분해 가능하여 현장에서 신속한 점검 및 교체 가능하여 유지 보수를 용이하게 하였다.

Fig. 11은 그립부와 절단부가 로봇 연결구에 의해 조립된 상태



Fig. 13 Vision system pepper recognition

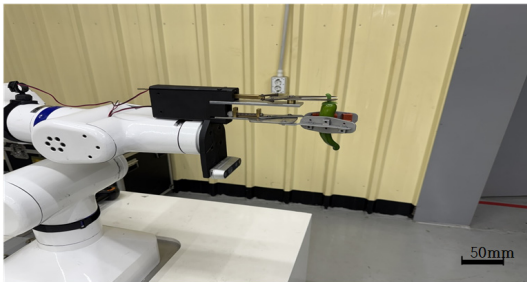


Fig. 14 Cut the stems after gripping the peppers



Fig. 15 Example of paprika gripping

를 나타낸 그림이다.

3. 수확용 로봇 커팅 그리퍼의 적용

3.1 실험의 구성 및 평가 방법

본 연구에서는 Fig. 12와 같은 테스트 베드에서 실험을 하였다. 실험은 직경 400 mm, 높이 350 mm의 화분에서 길러진 폭 400 mm, 높이 700 mm의 고추 나무와 가로 600 mm, 세로 600 mm, 높이 400 mm의 좌대 위에 개발된 엔드 이펙터가 조립된 6축 로봇(Payload 5 kg)을 설치한 테스트 베드와 경기도 소재 노지 고추밭에서 수확용 모빌리티위에 개발된 엔드 이펙터가 조립된 6축 로봇(Payload 5 kg)을 설치한 테스트 베드 에서 각각 수행하였다. 20주(株)의 홍고추를 대상으로 엔드 이펙터를 로봇 암에 장착하여 수확 성능을 평가하였다.

3.2 실험 절차

커팅 그리퍼의 실험 절차는 로봇의 비전 시스템이 고추의 위치

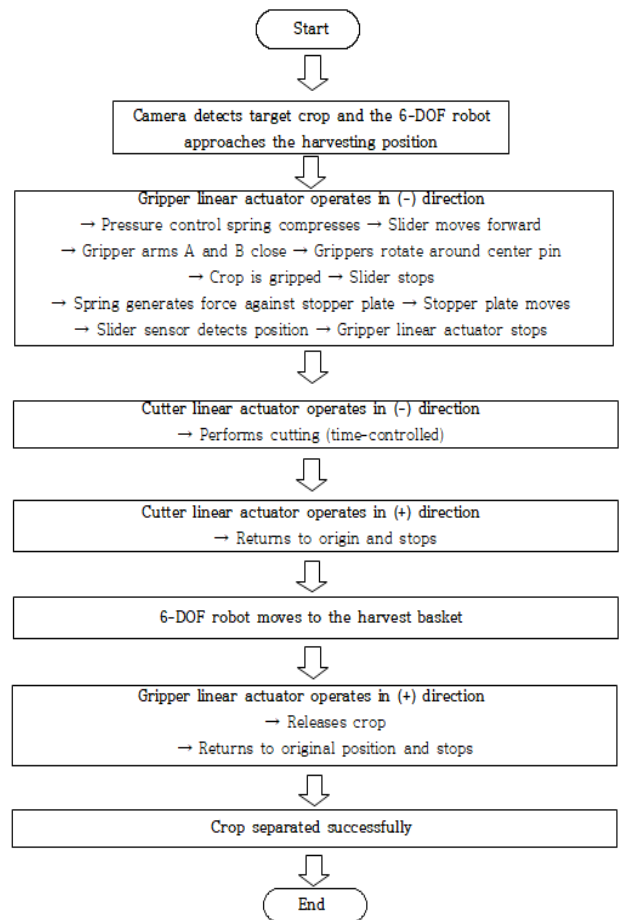


Fig. 16 Control flowchart of the gripping module and cutting module



Fig. 17 Experiments in a flowerpot test bed

와 크기를 인식한 후, 그리퍼가 벌어지며 대상물에 접근하여 그리퍼 부가 고추를 파지하며 슬라이더 스프링에 의해 속도를 낮추고 부드럽게 파지한후 절단부가 줄기를 절단한 뒤, 고추의 파지를 해제하여 회수하고 파지 및 절단의 실패시 과파와 꺾지의 손상 여부를 기록하고 크기/형태별로 데이터를 수집하였다.

Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15 등은 고추와 파프리카의 파지와 절단의 과정을 단계적으로 나타낸 것이다.

그리퍼 모듈과 커팅 모듈의 제어는 로봇 제어기의 I/O 모듈에서



Fig. 18 Experiments on an open field test bed

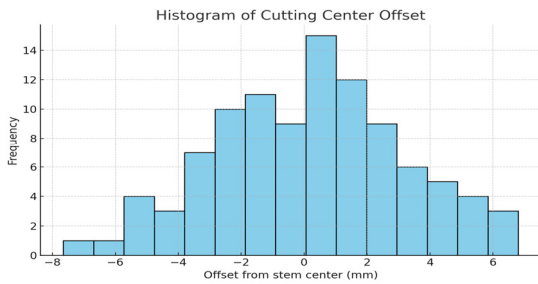


Fig. 19 Histogram of cut center error

Table 5 Experimental results

Item	Average performance	Remarks
Gripping success rate [%]	95	Failures occurred due to stem position errors
Cutting success rate [%]	90	Failures caused by severe bending of the fruit body or stem
Harvest time [sec/fruit]	4.2/fruit	65% reduction compared to manual harvesting

이루어진다. 로봇의 동작을 프로그램하기 위한 모든 작업은 쉐네스 테크놀로지의 로봇용 티칭 팬던트를 이용한 교시작업으로 구현되었으며 티칭 완료 후 플레이백 모드로 전환되어 로봇이 자동으로 전되어 조립작업이 완성되었다. Fig. 16은 위의 작업 순서를 간략화한 순서도이다.

성능 평가는 다음과 같은 지표들 기준으로 구성하였다:

- 파지 성공률 (%): 파프리카 및 고추 모형을 안정적으로 잡는 비율
- 절단 성공률 (%): 줄기 중심으로부터 5mm 이내에서의 정확한 절단 여부
- 수확시간 (sec): 6축 로봇으로부터 그리퍼에 I/O 신호를 받아 고추의 파지와 줄기의 절단, 파지 유지 후 수확 완료에 이르는 시간

3.3 파지 및 절단 성능 평가

Fig. 17, Fig. 18과 같이 화분의 테스트 베드와 노지의 테스트

Table 6 Table of damage types that occur when cutting and slicing a mathematically studied pepper

Operation	Gripping		Cutting
Number of samples	100		100
Type of damage	Pericarp peeling	Compression marks	Cut surface tearing
Occurrence	-	-	4
Damage rate [%]	0		4
Primary cause	Due to imprecise cutting, some tearing occurred, but the inner surface of the gripper with rubber pads prevented compression marks.		Caused by inaccurate cutting resulting in tearing of the pericarp.



Fig. 20 Local tearing of the stem due to inaccurate cutting

베드로 구분하여 테스트 했으며 화분 테스트 베드에서는 개발된 커팅 그리퍼의 절단 위치 반복 실험을 하였다.

커팅 그리퍼의 절단 위치 반복 실험은 총 75회 반복 실험한 결과 Fig. 19에 나타난 절단 중심 오차 히스토그램과 같이 절단 중심 오차는 평균 +1.0 mm이며, 표준 편차는 5.58 mm로 나타났으며 또한 평균 사이클 시간은 영상 인식 후 절단까지의 시간을 평균하였으며 평균 사이클 시간은 4.2(sec/과)로 측정되어 실시간 적용 가능성이 입증되었다.

노지의 테스트 베드에서는 총 20주(株)의 홍고추 나무를 대상으로 200회의 수확 실험을 하였다. 실험 결과, Table 5와 같이 파지 성공률은 95%로 나타났으며, 실패 원인은 절단 중심 인식의 위치 오차로 분석되었다.

파지의 성공률은 95%로서 실패 원인은 고추 중심 인식의 위치 오차로 분석되었다. 파지 후 손상 정도는 전체 손상 없음으로 100%를 나타냈다. 그리퍼가 고추 파지후 절단 과정에서 부정확한 절단으로 인하여 그리퍼의 당김이 발생하여 고추 줄기가 뜯기면서 고추의 과피에 힘이 가해져 경미한 눌림 자욱이 발생할 것으로 예측되어 확인했으나, 과피의 손상은 발생하지 않았다. 그 주된 이유는 그리퍼 내부의 파지 완충 고무에 의하여 그리퍼의 당기는 힘

Table 7 Comparison table between existing grippers and the cutting gripper of this study

Crop / System	Harvest success rate [%]	Cycle time [sec]	Remarks
Developed cutting gripper (pepper peduncle test)	85.5	4.2	
Sweet pepper robot (harvey) – manipulated Env.	46~58		Protected cultivation environment
Strawberry robot (isolated fruit)	96.8	7.5 / Total 10.6	High success rate under experimental conditions
Strawberry robot (open field / general env.)	53.6 (undamaged) / 59.0(all)	7.5~10.6	Actual performance in natural environment
Blackberry soft gripper (tendon-driven)	95.24 (cutting success)		Based on internal sensors and force feedback
Eggplant	62.5		Combines soft gripping and cutting functions
Soft gripper			
Directional grasping + Sequential harvest	72.1		Control strategy to reduce damage
Orchard fin ray gripper	70.8	14.7	Tested in orchard environment

Table 8 Examples of application conditions by crop

Kind	Grip [N]	Cutting [N]	Remark
Hot paper	40~50	4~5	Experimental criteria
Cucumber	50~60	8~10	Large stem diameter
Paprika	50~60	10~12	Large stem diameter

이 직접적으로 전달되지 않고 고추의 과피를 보호하는 역할을 한 것으로 추정된다.

절단 성공률은 90%로, 실패 원인은 파지의 실패 원인과 동일하게 절단 중심 인식의 위치 오차로 분석되었다. 특히 고추는 몸통뿐만 아니라 줄기 부분도 심하게 휘어져 줄기가 그리퍼의 파지에 따른 커팅 위치의 범위 밖에 존재함으로 부정확한 절단이 발생하였다.

파지 및 절단 시 발생한 손상은 Table 6에서와 같이 ‘과피 박리’, ‘눌림 자국’, ‘절단면 손상’으로 구분되었다. 손상 정도를 정량화하기 위해 100개의 수확 샘플을 육안 및 디지털 확대 분석으로 관찰한 결과, 절단 과정에서 발생한 손상은 4% 수준이었으며, 파지에 의한 손상은 관찰되지 않았다. 세부 분석 결과, 절단면 손상은 줄기 각도(±15° 이상 기울기) 및 줄기 강성 편차가 큰 개체에서 발생하

였다. 또한 절단 시 손상 유형은 절단면 손상으로 Fig. 20과 같이 절단 작업시 절단 중심 인식의 위치 오차로 인한 부정확한 절단으로 인한 줄기의 국부적 뜯김 현상이 발생하였다.

기존 고추/딸기/사과 수확 로봇 연구에서는 Table 7은 기존의 그리퍼와 본 연구의 커팅 그리퍼를 비교한 결과이다. 실험실 조건에서 90% 이상의 높은 성공률을 보인 사례도 있으나, 일반적으로 50%~70%의 성공률로 나타났다. 본 연구의 커팅 그리퍼는 노지 환경에서 파지 성공률 95% 및 절단 성공률 90%로 종합적으로 85.5%를 달성하여, 대부분의 선행 로봇 시스템을 능가하는 성능을 입증하였다.

작물별 적용 조건 예시는 Table 8의 예와 같이 정리할 수 있으며, 줄기 강성, 절단 두께, 과피 파열 압력을 기준으로 파지력에 따라 슬라이더 스프링의 압력 조절 너트를 조정하여 사용할 수 있다.

4. 결 론

농업 분야에서 자동화 기술의 도입이 가속화되고 있다. 특히 반복적이고 노동집약적인 수확 작업은 농업 자동화의 핵심 영역 중 하나로, 이를 대체할 수 있는 수확용 로봇에 대한 수요가 증가하고 있으나 농작물의 파지, 절단, 수거 등의 복합 작업을 정밀하게 수행할 수 있는 말단 장치, 즉 수확용 엔드 이펙터 기술은 결음마 수준이라고 할 수 있다. 이는 수확 작업 자동화의 기술적 난이도가 매우 높기 때문이기도 하고, 시장의 규모가 제한적이어서 상용 로봇 메이커에서 다양한 종류의 수확용 엔드 이펙터 제품을 출시하고 있지 않기 때문이기도 하다. 본 연구에서는 고추 및 과채류 수확을 위한 크기 인지 및 파지 압력 제어가 가능하며, 절단 기능을 통합한 커팅 그리퍼를 설계·구현하고, 스마트팜 환경에서의 실험을 통해 그 성능을 검증하였다. 주요 성과와 시사점은 다음과 같다.

본 연구에서는 커팅-그리퍼 기반 엔드 이펙터를 설계·구현하고, 실제 고추 수확 환경에서 파지 성공률 95% 및 절단 성공률 90%로 종합적으로 85.5%의 성능을 검증하였다. 제안한 엔드 이펙터는 파지와 절단을 통합하여 작물 손상을 최소화하면서 높은 성공률을 확보하였으며, 구조의 단순화와 모듈화로 제작비를 줄이고 유지보수를 용이하게 하였으며, 스마트팜 환경뿐 아니라 노지 등 다양한 환경에서도 적용 가능성을 확보했다. 그러나 Table 5, Table 6과 같이 일부 절단면 손상 및 절단 위치 오차가 발생하였다. 이를 개선하기 위해 향후 다음과 같은 보완을 계획하고 있다.

첫째, 작물 손상 최소화를 위한 압력 제어 알고리즘을 도입한다. 힘 센서 기반 실시간 피드백 제어를 적용하여 파지력 변화(±0.3N)를 자동 보정하고, 절단 직전의 순간 충격력을 완화하는 소프트 모션 제어를 구현할 예정이다. 둘째, 속도 향상 및 효율 개선을 위해 구동 모터의 가감속 구간을 최적화하고, 기존 평균 수확 주기

(4.2s/개)를 3.5s/개 이하로 단축하기 위한 파지-절단 병렬 동작 알고리즘을 적용한다. 셋째, 모듈 구조 개선을 통해 유지보수성과 내구성을 높이고, 절단부의 갈날 형상을 개선하여 절단 정확도를 향상시킬 계획이다.

또한 고추 및 과채류 외에도 줄기 기반 작물(예: 오이, 파프리카 등)에도 적용 가능한 범용 엔드 이펙터로 확장이 가능 가능하다. 이러한 파라미터 보정 방식은 엔드 이펙터의 범용성을 확장시키며, 향후 작물 특성 데이터베이스 기반의 AI 파라미터 자동 조정 시스템으로 발전시킬 수 있다.

이는 농업용 수확 로봇뿐 아니라 산업용 조립·물류 로봇에도 적용 가능한 범용성이 있음을 확인하였다.

그러나 반복 내구성, 다양한 작물 및 산업용 부품에 대한 적응성, 비전 기반 자동 제어와의 통합은 향후 추가 연구가 필요하다. 향후 연구에서는 비전-힘 센서 융합, AI 기반 최적 파지 전략 학습, 산업용 라인 테스트를 통해 실용화 수준을 더욱 높일 수 있을 것이다.

References

- [1] Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N., Fujimura, K., 2002, The intelligent ASIMO: System Overview and Integration, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 3 2478-2483, <https://doi.org/10.1109/IRDS.2002.1041641>.
- [2] Ogura, Y., Aikawa, H., Shimomura, K., Kondo, H., Morishima, A., Lim, H.-O., Takanishi, A., 2006, Development of a New Humanoid Robot, WABIAN-2, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 76-81, <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2006.1641164>.
- [3] Park, I. W., Kim, J.-Y., Lee, J., Oh, J.-H., 2005, Mechanical Design of Humanoid Robot Platform KHR-3 (KAIST humanoid robot-3: HUBO), Proc. IEEE- RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, 321-326, <https://doi.org/10.1109/ICHR.2005.1573587>.
- [4] Mizuuchi, I., Yoshikai, T., Sodeyama, Y., Nakanishi, Y., Miyadera, A., Yamamoto, T., Niemela, T., Hayashi, M., Urata, J., Namiki, Y., Nishino, T., Inaba, M., 2006, Development of Musculoskeletal Humanoid Kotaro, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 82-87, <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2006.1641165>.
- [5] Yamano, I., Maeno, T., 2006, Five-fingered Robot Hand using Ultrasonic Motors and Elastic Elements, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2673-2678, <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570517>.
- [6] Kim, B.-H., 2007, Neural Learning-Based Inverse Kinematics of a Robotic Finger, Journal of the Korean Institute of Intelligent Systems, 17:7 862-868, <https://doi.org/10.5391/JKIS.2007.17.7.862>.
- [7] Kim, B.-H., 2009, Task-Based Analysis on Number of Robotic Fingers for Compliant Manipulations, International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, 9:4 333-338, <https://doi.org/10.5391/IJFIS.2009.9.4.333>.
- [8] Wright, P. K., Cutkosky, M. R., 1985, Design of gripper, Handbook of Industrial Robot, 96-111.
- [9] Mason, T. M., Salisbury, J. K., 1985, Robot Hands Mechanics of Manipulation, MIT press, Cambridge, MA.
- [10] Kolluru, R., Valavanis, K. P., Stewart, A., Sonnier, M. J., 1995, A Flat Surface Robotic Gripper for Handling Limp Material, IEEE Robotics and Automation Magazine, 2:3 19-26, <https://doi.org/10.1109/100.414922>.
- [11] Setiawan, A. I., Furukawa, T. F., Preston A., 2004, A Low-Cost Gripper for an Apple Picking Robot, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 5 4448-4453, <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1302418>.
- [12] Choi, H., Koç, M., 2006, Design and Feasibility Tests of a Flexible Gripper Based on Inflatable Rubber Pockets, Int. J. Mach. Tools Manuf., 46:12-13 1350-1361, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.10.009>.
- [13] Donath, M., Leu, M., 1985, An analytical and Experimental Study of the Stiffness of Robot Manipulators with Parallel Mechanisms in Robotics and Manufacturing Automation, ASME, New York.



Kyoung Ill Jeon

Ph. D. Candidate in the Department of AI IT Convergence, Soongsil University. His research interests include Harvesting Robot Platform and Dual Arm Robot.
E-mail: kijeon@senestech.com