

# 수경재배 토마토 수확 로봇 그리퍼 설계를 위한 경도 분석

김 경 철\*, 조 병 효\*, 권 경 도\*, 홍 영 기\*

## Hardness Analysis for Design of Harvesting Robot Gripper in Hydroponic Greenhouse

Kyoung-Chul Kim\*, Byeong-Hyo Cho\*, Kyung-Do Kwon\*, Youngki Hong\*

### 요 약

최근 다양한 사회적인 변화로 농업 생산 인력이 감소하고 있으며, 농업 생산을 위한 방법들이 변화하고 있다. 이러한 사회적 변화에 대응하기 위해 스마트 온실 재배가 증가하고 있다. 토마토의 경우에는 매주 수확을 하기에 많은 노동력이 필요하다. 이러한 이유로 본 논문에서는 스마트 온실에서 수확 작업을 로봇화하기 위한 요소기술 연구를 수행하였다. 국내 토마토의 경우 대부분 생식 목적으로 재배하기 때문에 수확 작업 시 상품성 유지가 매우 중요한 요인이다. 수확 로봇의 다양한 기술 중 과실을 다루기 위한 그리퍼의 설계 요인 분석을 하였다. 토마토의 속도에 따라 6단계로 분류하고 분류된 토마토에 대한 경도를 측정하였다. 이는 토마토 수확 로봇 그리퍼의 파지력, 모션 제어 그리고 파지를 위한 쿠션을 적용하기 위해 선행되어야 하는 실험이다. 본 연구를 통하여 속도별 토마토의 허용 압축력 요인을 분석하였다. 이를 통하여 토마토 수확을 위한 그리퍼를 개발하는데 기초 자료로 활용할 계획이다.

**키워드** : 수확로봇, 그리퍼, 속도, 경도

**Key Words** : Harvest robot, Gripper, Maturity, firmness

### ABSTRACT

Recently, Various social changing has led to a decrease worker in the agricultural. In addition, there are changing that methods for agricultural production. In response to these social changes, the area of smart greenhouse is increasing. In this paper, we conducted a study of element technology for harvest robot in smart greenhouse. In the case of domestic tomatoes, most fo them are grown for the purpose of eating without cooking, their commodity during harvesting operations is very important. We analyzed the design factors of the gripper. Tomatoes was divided into 6 stage maturity and the firmness was measured. We analyzed the allowable compressive force by tomato maturity. It is used as a data for gripping, motion of the harvesting robot gripper. This will allow us to develop a gripper-shaped gripper for tomato harvesting.

※ 본 연구는 농림축산식품부 재원으로 농림식품기술기획평가원의 첨단농기계산업화기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(321059-2)

• First and Corresponding Author : Division of Smart farm Development, National Institute of Agricultural Sciences, kkcmmole@korea.kr, 정회원

\* Division of Smart farm Development, National Institute of Agricultural Sciences, kwonkd89@korea.kr; sanm70@korea.kr  
논문번호 : 202207-140-0-SE, Received June 15, 2022; Revised September 13, 2022; Accepted September 22, 2022

## I. 서 론

농업은 인류의 식량을 생산하는 산업으로 인류의 생존을 위해서는 꼭 필요한 산업이다. 그러나 다양한 사회적 변화인 노동 인력 감소(고령화, 팬데믹 등) 및 기후변화에 대비해 다양한 연구들이 진행되고 있다<sup>[1]</sup>.

기후변화에 대비하기 위해 원격 또는 자동으로 작물의 생육환경을 적정하게 유지 및 관리할 수 있는 스마트 온실<sup>[2]</sup>에서의 재배 기술이 급증하고 있으며, 2019년 기준 국내에 보급된 스마트 온실의 면적은 5,017ha로 보급률 또한 매년 증가하고 있다<sup>[3]</sup>. 스마트 온실 재배 기술이 발전함에 따라 농작업에 대한 자동화, 무인화 요구가 증대되고 있다<sup>[4]</sup>. 이러한 이유로 스마트 온실에서 사용되는 로봇의 국내 연구의 경우 방제로봇<sup>[5]</sup>, 모니터링로봇<sup>[6]</sup>, 운반로봇 등이 진행되었다.

토마토의 경우 2020년 기준 전 세계적으로 1억 8,680만 톤이 생산되고<sup>[7]</sup> 있으며, 국내의 경우 2020년 통계청 기준 시설 온실 수경재배 과채류 중 생산량이 가장 많으며, 생산량은 약 34.4만 톤으로, 전체 과채류 생산량의 약 19%를 차지하는 경제적으로 중요한 작물 중 한 가지이다<sup>[8]</sup>.

일반 시설재배에서 스마트 온실로 전환할 경우 생산량 증가, 생산비 감소 및 상품화율 증가 등의 장점으로 인하여 스마트 온실로 전환하는 토마토 농가가 증가하고 있다<sup>[9]</sup>. 재배량이 증가하고 있는 토마토의 경우 다양한 작업 중 수확 작업이 가장 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 이유로 최근 수확 로봇에 대한 연구 개발 요구가 증대되고 있다.

시설재배 수확 로봇은 주로 토마토, 딸기 등 과채류 적용 연구가 진행되고 있으며, 노지의 경우 사과, 포도 등 과수 적용 연구가 진행되고 있다. 대부분 핑거 타입의 그리퍼를 사용하여 과실은 파지 후 회전시켜 꼭지부를 분리하는 형태(Jang<sup>[8]</sup> 1997, Min<sup>[9]</sup> 2004) 그리고 핑거타입의 그리퍼로 파지 후 커터로 꼭지부를 절단하는 형태(Son<sup>[10]</sup> 2000, Kim<sup>[11]</sup> 2007) 등이 있다. 대부분 2~3개의 핑거타입의 그리퍼를 사용하여 과실을 움켜쥐는 형태이거나, 압축 공기를 사용하여 흡착하는 형태이다.

이러한 이유로 본 연구에서는 수확 작업 시 작물을 취급하기 위한 엔드이펙터에 대한 기초 연구로 수확 로봇 작업 시 과실의 상품성을 최대한 유지할 수 있는 그리퍼를 개발하기 위한 설계 요인을 분석하였다. 경도는 토마토의 중요한 품질인자이며 소비자의 구매 여부를 결정하는 최종지표로 작용한다<sup>[12]</sup>. 이를 위해 토마토의 속도 분류를 하고, 분류된 토마토의 단계별 경

도(압축) 측정 실험을 하였다. 이를 통하여 핑거 타입의 그리퍼를 개발하기 위한 주요 요인을 도출하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

로봇을 활용하여 토마토를 수확하기 위해서는 과실의 수확 기능 여부를 판단한 후 해당 위치로 이동 후 해당 과실을 잡고 돌리거나 줄기를 자른다. 이를 위해 토마토의 분류 기준에 따른 압축 시험을 통하여 엔드이펙터의 설계에 필요한 기초 요인을 분석하였다.

### 2.1 재료 및 분류 방법

본 연구에서 사용된 토마토는 국립농업과학원 첨단 디지털 온실(전라북도 완주군 소재)에서 재배된 “데프니스” 품종을 사용하였으며, 그림 1과 같은 온실 환경에서 수경재배 형태로 재배되었다.



그림 1. 토마토 수경 재배 온실  
Fig. 1. The hydroponic greenhouse for tomato

토마토 분류는 USDA(미국 농무성)에서 사용하고 있는 6단계(Green, Breaker, Turning, Pink, Light Red, Red) 구분법<sup>[13]</sup>을 사용하였으며, 이 방법은 RDA(농진청)에서도 사용하고 있다. 토마토 과피의 색깔에 따른 6단계 분류를 위해 휴대용 색도 색차계(CR-20, KONICA MINOLTA, Japan)<sup>[14]</sup>를 사용하여 광조사 부위를 과실에 밀착시켜 Lab 색공간 값을 측정하여 a\*값으로 표 1과 같이 구분하였다. 이때 Lab의 a 값은 초록색(-127)과 빨강색(127)을 의미한다. 특히 후숙 과일인 토마토의 경우 유통과정에서 적산 온도(일 평균온도×일수)에 따라 숙도(익은정도)가 변경될 수 있기 때문에 수출용은 3단계(Breaker), 내수용은 4단계(Pink) 시기에 수확한다. 이를 고려하여 각

표 1. 토마토의 숙도 단계  
Table 1. Maturity stages of tomato

Maturity	Description	La*b Value
	Green: Entirely green	-4.87 ± 2.73
	Breaker: First appearance of external pink or red color not more than 10%	-0.33 ± 2.50
	Turning: Over 10% but not more than 30% red or pink	4.98 ± 2.70
	Pink: Over 30% but not more than 60% pinkish or red	10.70 ± 2.53
	Light red: Over 60% but not more than 90% red	16.57 ± 2.32
	Red: Over 90% red	19.31 ± 1.60

단계별 시료를 선정하여 측정하였다.

### 2.2 토마토 경도(압축) 측정

토마토의 경도 시험은 수확 그리퍼의 설계에 적용하기 위한 것으로 물성 측정기(AG-10kNX Plus, Shimadzu)를 사용하여 그림 2와 같이 직경 5mm의 프로브를 사용하여 압축 시험을 하였다. 수확로봇의 그리퍼가 이상적으로 위치하는 토마토의 중간 부위의 4개 지

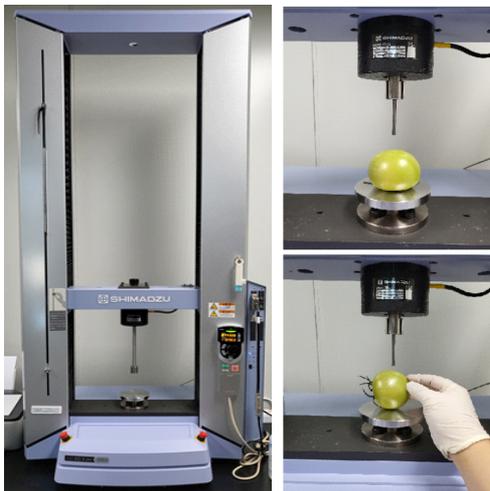


그림 2. 토마토 경도(압축) 시험  
Fig. 2. Firmness(compression) test of the tomato

표 2. 측정 설정값  
Table 2. Measurement set point

Pre-test speed	2 mm/sec
Loading speed	5 mm/sec
Skin Depth	10 mm

점을 90° 간격으로 표 2의 설정값으로 측정하였다.

### III. 결과 및 분석

그림 3은 숙도 단계별 평균 경도값에 대해 항복지점과 최대 허용지점의 경도값에 대한 상대적인 비교를 보여주고 있다. 상대적으로 1단계 녹색을 제외한 나머지 단계는 유사한 경도값이 도출되었다.

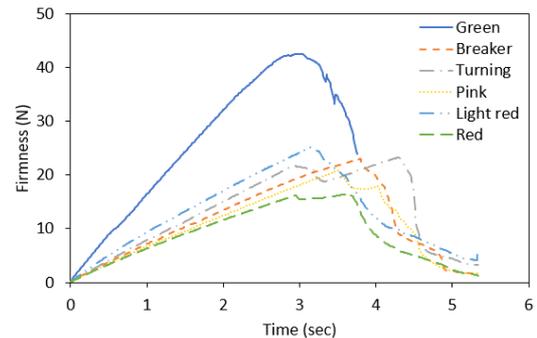
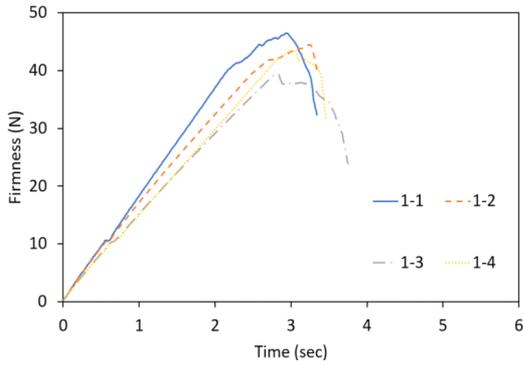


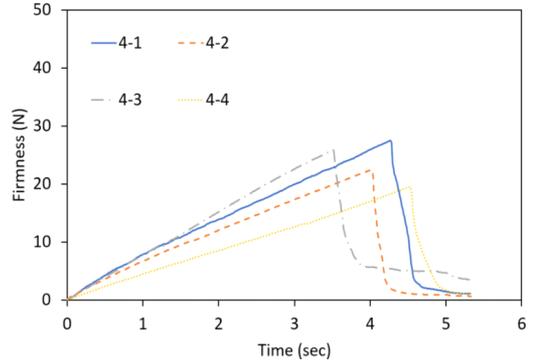
그림 3. 숙도 단계별 경도 그래프  
Fig. 3. Firmness graph of Maturity stages

그림 4는 6단계 숙도에 대하여 과실의 4방향 경도값을 측정하고 그 값을 그래프로 표현하였다. 시간에 따른 경도 측정 결과 항복지점과 최대 허용지점의 경도값을 도출할 수 있었다. 위치별 항복지점의 경도값의 편차는 크지 않았으나, 최대 허용지점의 경도값은 상대적으로 편차가 큰 것을 알 수 있었다. 1단계의 경우 위치별 최대 허용 경도값이 40.5~46.4 N, 2단계 21.4~26.9 N, 3단계 26.3~31.3 N, 4단계 20.3~27.4 N, 5단계 22.2~30.0 N, 6단계는 16.8~20.5 N으로 측정되었다.

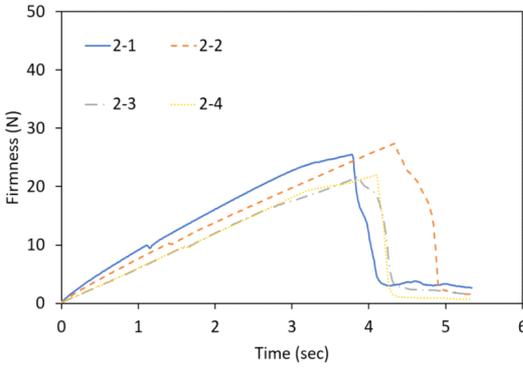
그림 5는 6단계 숙도별 과실의 4방향의 항복지점과 최대 항복점이 발생할 때 깊이 결과를 측정하고 그 값을 그래프로 표현하였다. 경도값에 따른 변형 깊이 결과를 도출할 수 있었다. 항복지점까지의 깊이 변화는 약 0.99mm로 유사하게 측정되었으며, 최대 허용지점에서의 깊이 변화는 1단계의 경우 5.7~6.5 mm, 2단계



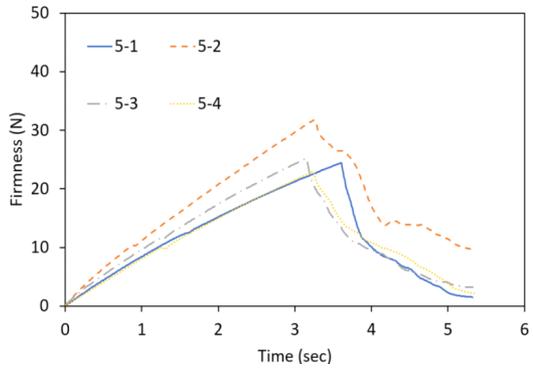
(a) Firmness graph of green tomato



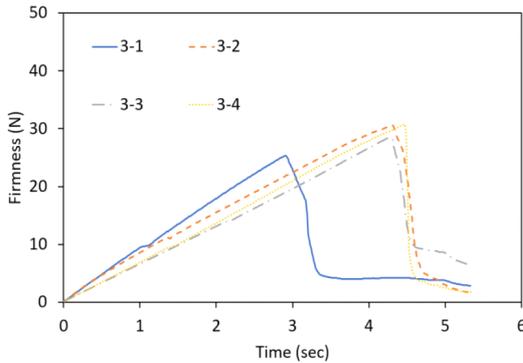
(d) Firmness graph of pink tomato



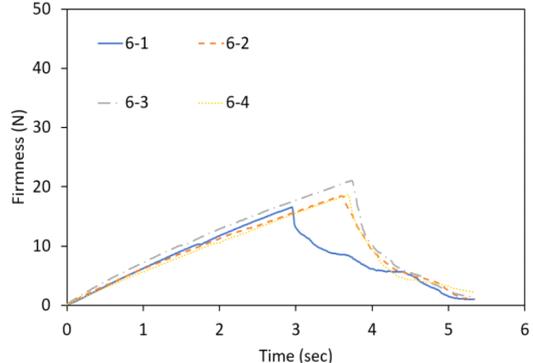
(b) Firmness graph of breaker tomato



(e) Firmness graph of light red tomato



(c) Firmness graph of Turning tomato



(f) Firmness graph of red tomato

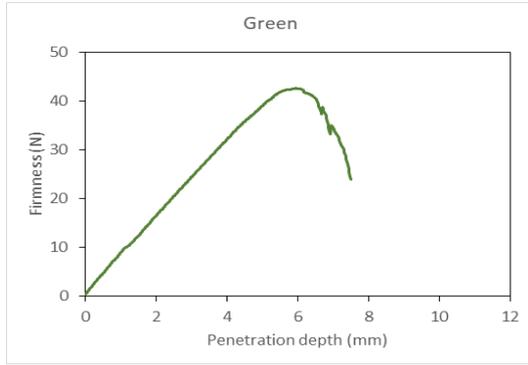
그림 4. 측정 위치에 따른 경도 그래프  
Fig. 4. Firmness graph of Measurement position

7.2~7.6 mm, 3단계 7.3~8.5 mm, 4단계 5.6~7.1 mm, 5 단계 5.1~6.6 mm, 6단계 4.9~6.5 mm 로 측정되었다.

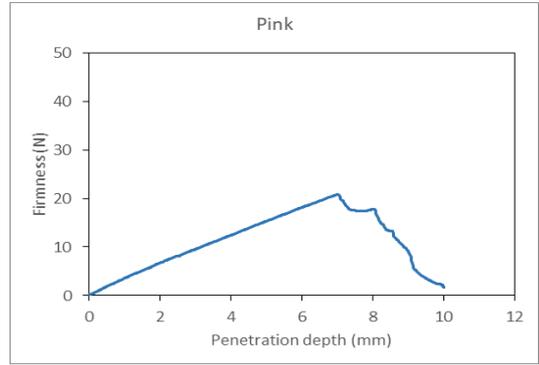
최종적으로 표 3과 같이 경도 특성은 속도에 따라 상 항복 압축력과 최대 압축력 그리고 그때의 깊이가 표 3과 같이 도출되었다.

1단계의 허용 강도가 가장 높았으며, 5단계, 3단계

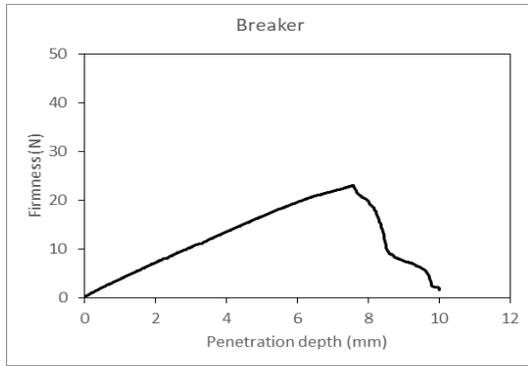
2단계, 4단계, 6단계 순으로 허용 강도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 아울러 토마토의 변형이 발생하지 않는 항복지점은 모든 분류에서 약 1mm로 유사한 결과가 도출되었으며, 파손은 없으나 일부 변형이 발생할 수 있는 최대 항복점에서 침투 가능 깊이는 1단계에서 3단계까지는 증가하다 4단계부터 감소하는 결



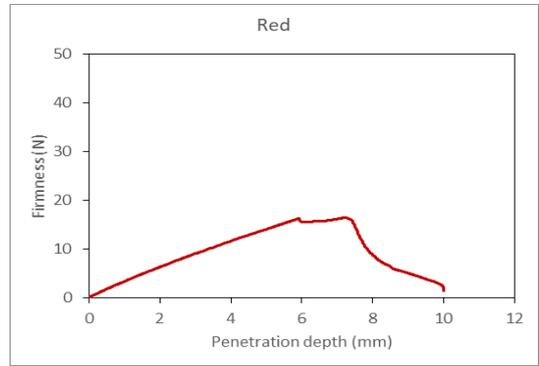
(a) Penetration depth graph of green tomato



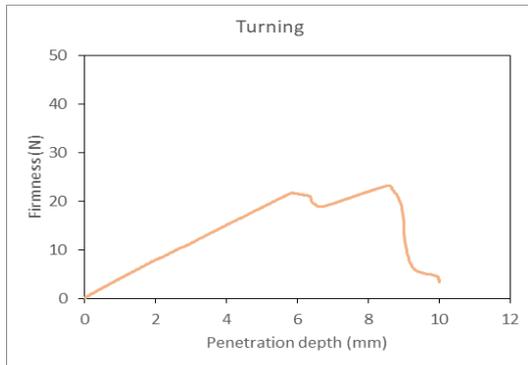
(d) Penetration depth of pink tomato



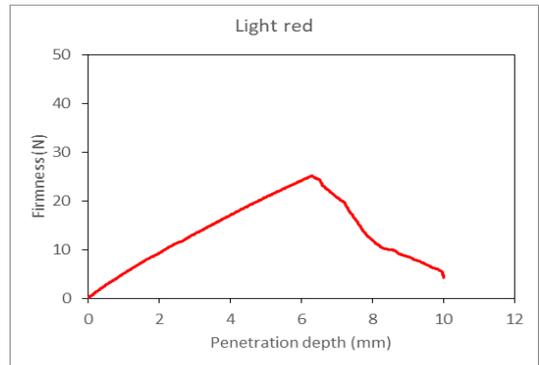
(b) Penetration depth of breaker tomato



(f) Penetration depth of red tomato



(c) Penetration depth of Turning tomato



(e) Penetration depth of light red tomato

그림 5. 침투 깊이에 따른 경도 그래프  
Fig. 5. Graph of Penetration depth

과가 도출되었다. 이는 1단계에서 3단계로 진행되면서 토마토의 표피가 질겨지는 것으로 사료된다. 토마토의 수확 특성상 손상을 줄이기 위해 핑거타입의 그리퍼가 최소의 파괴력으로 움켜쥐어 수확하는 것이 바람직하다. 이는 토마토가 파손이나 영구변형이 일어나기 전 단계 힘으로 과실을 다루어야 상품성이 유지

되기 때문이다. 토마토의 주요 수확 단계인 3, 4단계에 수확 시 과실의 상품성을 높이기 위해서는 항복지점 이하의 파괴력으로 과실을 취급하여야 하나, 수확 작업 시 과실이 떨어지거나, 절단 불량으로 수확이 실패할 것을 고려하여 최대 항복점을 기준으로 과실을 취급하여야 할 것이다. 또한, 접촉면적을 크게 하여

표 3. 토마토의 특성  
Table 3. Firmness properties of the tomato

Maturity	1st yield point	Max yield point
1단계 Green	8.76 ± 0.77 N	43.46 ± 2.98 N
	0.97 ± 0.3 mm	6.1 ± 0.4 mm
2단계 Breaker	3.74 ± 1.00 N	24.15 ± 2.77 N
	0.98 ± 0.2 mm	7.43 ± 0.2 mm
3단계 Turning	4.03 ± 0.78 N	28.78 ± 2.51 N
	0.98 ± 0.3 mm	7.91 ± 0.6 mm
4단계 Pimk	3.53 ± 0.84N	23.85 ± 3.56 N
	0.97 ± 0.2 mm	6.37 ± 0.7 mm
5단계 Light red	4.98 ± 1.06 N	26.10 ± 3.92 N
	0.97 ± 0.4 mm	5.89 ± 0.7 mm
6단계 Red	3.35 ± 0.46 N	18.66 ± 1.85 N
	0.99 ± 0.2 mm	5.67 ± 0.8 mm

힘의 분포를 분산시키는 방법과 쿠션 기능이 있는 재질을 그리퍼에 부착하여 작물에 가해지는 압축력을 경감시키는 방법도 고려해야 한다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 국내 스마트 온실에서 수경재배 작물 중 생산량이 높은 토마토의 수확 작업 로봇화를 위해 꼭 필요한 그리퍼 개발을 위한 주요 인자를 도출하기 위한 연구를 수행하였다.

토마토의 속도(익은정도)를 6단계로 구분하여 각 속도(익은정도)별 수확 로봇 적용시 과실 취급을 위한 엔드이펙터의 주요 인자 중 하나인 경도를 측정하였다. 측정 결과 국내 토마토의 주요 수확 시기인 3단계와 4단계의 허용 정도와 최대 경도를 확인할 수 있었다. 이를 통하여 그리퍼의 허용 그림력을 도출할 수 있으며, 토마토의 상품성 향상을 고려한 취급을 위해서 핑거타입의 그리퍼의 과실 크기 대비 제어 인자를 유출할 수 있을것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 엔드이펙터 설계시 작물의 크기 및 속도에 따른 파지력, 동작 제어 인자 및 충격 흡수 재질 선정 등에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### References

[1] K. C. Kim, B. S. Ryuh, S. Lee, G. Kim, M. Lee, Y. K. Hong, H. Kim, and B. K. Yu, "The study on evaluation method of pest control robot requirements for smart

greenhouse," *J. KAIS*, vol. 20, no. 10, pp. 318-325, 2019.

(<https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.10.318>)

[2] Y. G. Park, S. Baek, J. S. Im, M. J. Kim, and J. H. Kim, "Present status of smart greenhouses growing fruit vegetables in Korea: Focusing management of environmental conditions and pests in greenhouses," *Korean J. Appl. Entomology*, vol. 59, no. 1 pp. 55-64, Feb. 2020.

(<https://doi.org/10.5656/KSAE.2020.02.1.061>)

[3] *SmartFarm Distribution status of smart farm*, Available From: <https://www.smartfarmkorea.net/main.do> (accessed Nov. 20, 2021)

[4] D. Seo, B. H. Cho, and K. C. Kim, "Development of monitoring robot system for tomato fruits in hydroponic greenhouses," *Agronomy*, vol. 11, no. 11, 2021.

(<https://doi.org/10.3390/agronomy11112211>)

[5] *FAOSTAT*, Available: <http://www.fao.org/faostat/en/#home> (accessed on 14 February 2022).

[6] Korean Statistical Information Service (KOSIS), *2021 Crop production survey*, Available From: [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT\\_1ET0027&conn\\_path=I2](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ET0027&conn_path=I2) (accessed Sep. 18, 2021)

[7] Y. J. Kim, J. Y. Park, and Y. G. Park, "An analysis of the current status and success factors of smart farms," Research Report, Korea Rural Economic Institute(KREI), Korea, pp. 1-74, 2016.

[8] I. J. Jang, T. H. Kim, and K. Y. Kwon, "Development of apple harvesting robot (1) - Development of robot hand for apple harvesting," *J. Biosyst. Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 411-420, 1997.

[9] B. R. Min and D. W. Lee, "The end-effector of a cucumber robot," *J. Biosyst. Eng.*, vol. 29, no. 3, pp. 281-286, 2004.

[10] J. R. Son, C. H. Kang, K. S. Han, S. L. Chung, and G. Y. Kwon, "Development of tomato harvesting robot - 3-D detection technique for identifying tomatoes," *J. Biosyst. Eng.*, vol. 25, no. 5, pp. 415-420, 2000.

- [11] S. C. Kim, H. Hwang, Y. B. Lee, S. C. Kim, D. H. Im, and H. G. Choi, "Development of strawberry harvesting robot under bench type cultivation (prototype 2)," *J. Biosyst. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 111-117, 2007.
- [12] J. H. Choi, M. C. Jeong, and D. Kim, "Changes in quality parameters of tomatoes harvested at different mature stages during storage," *Korean J. Food Preserv.*, vol. 20, no. 2, pp. 151-157, 2013.
- [13] A. Batu, "Determination of acceptable firmness and colour values of tomatoes," *J. Food Eng.*, vol. 61, pp. 471-475, 2004.
- [14] G. E. Hobson, P. Adams, and T. J. Dixon, "Assessing the colour of tomato fruit during ripening," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 34, pp. 286-292, 1983.

**김 경 철 (Kyoung-Chul Kim)**



2015년 8월: 전북대학교 정밀 기계공학과 박사  
2016년 7월~2019년 1월: 농업 기술실용화재단 연구원  
2019년 2월~현재: 국립농업과학원 스마트팜개발과 연구사  
<관심분야> 농업로봇, 농업 인공지능

[ORCID:0000-0001-6699-881x]

**조 병 호 (Byeong-Hyo Cho)**



2017년 8월: 충북대학교 바이오시스템공학과 석사  
2021년 3월: 호카이도대학 농학원 공생기반학전공 박사  
2021년 7월~현재: 국립농업과학원 스마트팜개발과 박사후 연구원

<관심분야> 영상처리, 농업 인공지능, 비파괴 분석  
[ORCID:0000-0001-7276-5617]

**권 경 도 (Kyung-Do Kwon)**



2017년 2월: 충남대학교 농업 기계공학과 (공학석사)  
2020년 9월~현재: 국립농업과학원 농업연구사  
<관심분야> 영상처리, 인공지능  
[ORCID:0000-0003-1794-3438]

**홍 영 기 (Youngki Hong)**



2004년 3월: 일본 동경농업대 생물환경조절학전공 박사  
2007년 3월~2021년2월 : 국립농업과학원 농업연구사  
2021년 3월~현재: 국립농업과학원 스마트팜개발과 연구관

<관심분야> 영상처리, 기계학습, 인공지능  
[ORCID:0000-0002-9772-9820]