

## 2자유도 상추 수확 로봇 시스템 개발<sup>†</sup>

# Development of a 2-DOF Robot System for Harvesting a Lettuce

조성인\*  
정회원  
S. I. Cho

장성주\*  
정회원  
S. J. Chang

류관희\*  
정회원  
K. H. Ryu

남기찬\*  
정회원  
K. C. Nam

### SUMMARY

In Korea, researches for year-round leaf vegetables production system are in progress and the most of them are focused on environment control. Automation technologies for harvesting, transporting and grading need to be developed.

This study was conducted to develop harvesting process automation system profitable to a competitive price.

1. Manipulator and end-effector are to be designed and fabricated, and fuzzy logic controller for controlling these are to be composed.
2. The entire system constructed is to be evaluated through a performance test.

A robot system for harvesting a lettuce was developed. It was composed of a manipulator with 2-DOF(degrees of freedom), an end-effector, a lettuce feeding conveyor, an air blower, a machine vision device, 6 photoelectric sensors and a fuzzy logic controller.

A fuzzy logic control was applied to determine appropriate grip force on lettuce. Leaf area index and height index were used as input parameters, and voltage was used as output parameter for the fuzzy logic controller. Success rate of the lettuce harvesting system was 93.06%, and average harvesting time was about 5 seconds per lettuce.

**주요용어(Key Words)** : 매니플레이터(Manipulator), 퍼지제어(Fuzzy logic control), 상추(Lettuce), 로봇(Robot), 모터(Motor), 공압실린더(Air cylinder)

## 1. 서 론

우리나라의 시설 작물 경지면적은 90년 1.9%에서 97년 4.8%로 증가하고 있으며(한국농기계공업 협동조합, 1998), 더불어 첨단 기술 적용이 가능한 유리 온실도 많이 보급되어지고 있다. 그러나 자동 파종기, 복합 환경제어 및 자동 양액 관리 시스템 등 일부분만 자동화가 진행되고 이식, 선별 및 수확 등의 작업은 아직도 대부분 인력에 의존

하고 있다(윤진하, 1996). 농촌진흥청에서 시설상추의 작업단계별 투입노동력 내역을 조사한 바에 따르면 전체 노동 투입시간에 대하여 수확작업에 47%의 노동 시간이 소모되고 있다. 따라서, 수확작업의 자동화를 통해 상당부분 노동력 부족을 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

최근 들어 농공학 분야에서 end-effector의 설계를 중심으로 한 농용 로봇 수확 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Kondo 등(1996)은 스

<sup>†</sup> 본 연구는 '99년도 농림부 첨단연구 지원사업(과제번호 : 98-3033)에 의해서 수행되었음.

\* 서울대학교 생물자원공학부 농업기계전공

테레오 기계시각 시스템과 수직 다관절 로봇을 이용하여 방울 토마토 수확 시스템을 개발하여 70% 정도의 정확도를 보였고, Reed 등(1994)은 기계시각 시스템과 직교 좌표 로봇 그리고 흡착컵을 이용한 end effector로 구성된 수확 로봇 시스템을 구축하여 67%의 성공률을 보였다. Uchida 등(1994)은 식물공장용 상추 수확 시스템을 개발하여 1,800 포기/hr의 속도로 수확이 가능함을 보였다. 하지만, 일회용 포트를 사용하여 상추 뿌리와 함께 자르는 형태로 포트를 다시 수거해야 하는 별도의 작업이 필요하며, 포트에 잔류한 양액 등에 의해 환경이 오염될 우려가 있었다. 또한 멜론(Weber 등, 1991), 제라늄(Simonton 등, 1991) 등에 농용 로봇 수확 시스템이 적용된 사례가 있다. 그러나 대부분 산업용 로봇을 이용하여 개발된 시스템으로 비용이 비싸다는 단점이 있다. 그래서 Tillet 등(1995)은 공압 장치를 이용한 2자유도 로봇을 제작하여 정확도와 비용면에서 유리한 토마토 포장 로봇 시스템을 개발하였다.

본 연구는 성능과 비용면에서 경쟁력이 있는 수확 공정 자동화 시스템 구축을 위한 것으로, 연구의 목적은 다음과 같다.

- (1) 상추 수확을 위한 매니플레이터와 end-effector를 설계·제작하고, 이를 제어할 피지제어기를 구성한다.
- (2) 구축한 전체 시스템의 성능을 실험하여 평가한다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 시스템 구성

개발된 상추 수확 로봇 시스템은 상추의 영상을 획득하는 기계시각 장치, 상추의 높이를 측정하는 광 센서 장치, 상추를 수확위치로 공급하는 공급 장치, 상추를 수확하는 매니플레이터와 그리퍼, 그리퍼가 상추에 접근할 때 처진 잎을 부상시켜 주는 잎 부상 장치 그리고 이러한 공정을 제어하는 제어기로 구성된다. 그림 1에 상추 수확 로봇 시스템의 구성도를 나타내었다.

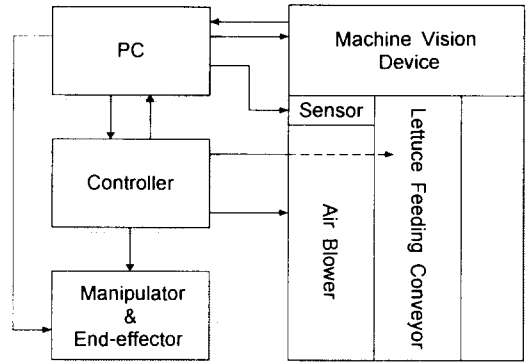


Fig. 1 Schematic diagram of a robot system for harvesting a lettuce.

### 나. 상추 수확 알고리즘

상추 수확 알고리즘은 다음과 같다.

- ① 기계 시각 장치에서 상추의 영상을 획득하고, 광 센서를 이용하여 상추의 높이를 측정한다.
- ② 상추 공급 장치에 의해 상추 압지 위치까지 상추를 하나씩 정위치 시킨다.
- ③ 매니플레이터가 상추 위치로 접근한다. 이때, 상추 잎 부상 장치에서 공압에 의해 처진 상추잎을 띄운다.
- ④ 피지제어에 의해 파지력이 제어되는 그리퍼가 상추를 압지한 후, 포트 압지 및 절단 칼날이 포트를 압지하면서 상추를 절단한다.
- ⑤ 매니플레이터가 회전하여 상추를 포장부로 이송한다.
- ⑥ 매니플레이터는 초기위치로 돌아가고 단계 ①부터 반복한다.

그림 2에 상추 수확 알고리즘을 나타내었다.

### 다. 매니플레이터

원통좌표계를 사용하는 2자유도를 갖는 매니플레이터를 제작하였다. 매니플레이터의 회전운동은 AC 서보 모터를 이용하였고, AC 서보 모터의 위치는 광 센서를 사용하여 제어하였다. 매니플레이터의 직선운동은 공압 실린더와 스톱노이드 밸브를 이용하였다. 공압 실린더를 선정할 때 다음의

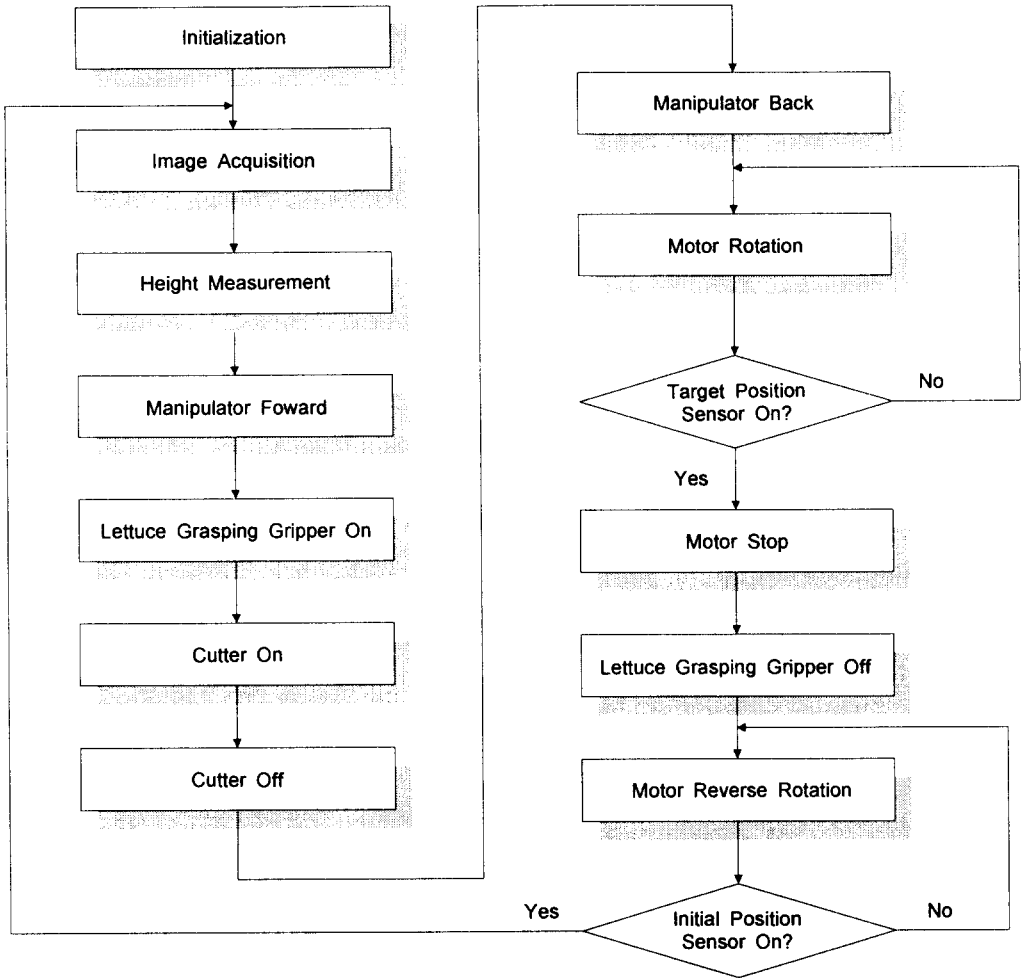


Fig. 2 Algorithm for harvesting a lettuce.

Table 1 Specifications of the AC servo motor

Model	Rated Output	Rated Speed	Moment of Inertia	Torque Constant
CSMG, Samsung	200 W	3,000 rpm	$0.196 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	3.9 kgf · cm

사항들을 고려하였다.

① 성장한 상추는 잎의 처짐 현상이 발생하게 되므로, 실린더가 상추에 접근할 때 처진 잎의 손상을 방지하기 위하여 적당한 실린더의 행정거리를 유지해야 한다.

② 실린더의 끝단에 end-effector가 장착될 때 end-effector의 하중에 의한 실린더의 처짐 현상을 고려해야 한다.

매니플레이터는 PIC 16C73를 개선한 PB-1S 원 칩 마이크로 컴퓨터를 사용하여 제어하였다. 표 1, 2에 AC 서보모터와 공압 실린더의 제원을 나타내었다.

#### 라. End-Effector

End-effector는 절단 칼날과 상추 압지 그리퍼로

Table 2 Specifications of the air cylinder

Model	Stroke	Deflection/Weight	Pressure
MGG25, SMC	200 mm	0.7 mm/32 N	0.15MPa~10MPa

구성하였다. 절단 칼날은 지점 개폐형 에어척을 사용하여 포트를 압지하면서 상추를 절단하도록 설계하였다. 솔레노이드 밸브와 릴레이를 이용하여 구동하며, PB-1S 원집 마이크로 컴퓨터로 제어된다.

상추 압지 그리퍼는 상추의 밑동을 압지하며, 상추에 손상을 주지 않는 적절한 파지력을 가지고 상추를 압지하는 동작이 이루어져야 한다. 이때 적절한 파지력을 결정하기 위해서는, 'stable grasp'를 유지하기 위해 요구되는 최소 파지력이나 상추에 손상을 일으키지 않고 가할 수 있는 최대 파지력에 대한 정보가 요구된다. 그리퍼가 상추를 파지할 때에는 그리퍼의 최대·최소 파지치수, 파지력 정도, 파지면의 강성, 상추의 중량, 크기, 기하학적 모양 등에 대한 정보가 필요하다. 상추를 압지하는 그리퍼는 개폐구간이 0°~180°인 에어척을 이용하였고, 핑거부는 MC(monomer cast) 나일론을 사용하였다. 압지하는 순간의 충격력을 줄이기 위해 MC 나일론 안쪽 부분에 스폰지를 접착하였다. 그림 3에 end-effector가 부착된 매니플레이터를 나타내었고, 그림 4에 구동 제어기를 나타내었다.

마. 기계 시각 장치

상추의 영상을 획득하여 상추의 일면적 및 기하학적 형상 정보를 추출하기 위하여 기계 시각을 이용하였다. 기계 시각 장치는 PULNiX사의 칼라 CCD 카메라와 Matrox사의 Corona-LC/8 프레임 그레버를 이용하여 구성하였으며, 전체 영상면에서 조도는 2.3~3.0klux로 유지하였다. 획득된 영상은 8방향 체인코딩(chain coding)을 실시하여 영상의 윤곽을 추출하여 일면적을 계산하였다. 추출된 일면적 정보는 상추 압지 그리퍼를 제어하는 퍼지 제어기의 입력변수로 사용되었다.

바. 광 센서 장치

상추의 기하학적 형상중 높이 정보를 추출하기 위하여 광 센서 6개를 3cm 간격으로 설치하여 상추의 높이 정보를 추출하였다. Autonic사의 직접반사형 광 센서를 사용하였고, 제어 출력은 npn open-collector 출력이다. 추출된 상추의 높이정보는 퍼지 제어기의 입력변수로 사용되었다.

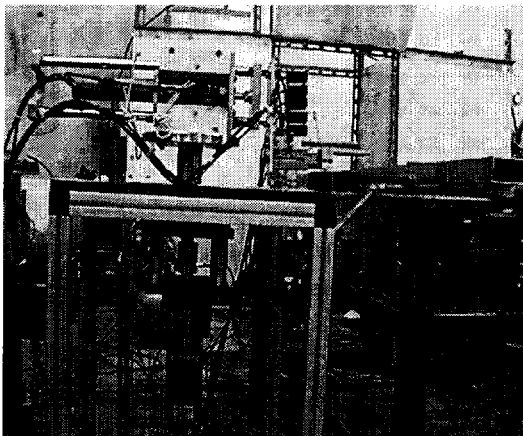


Fig. 3 Manipulator and end effector.

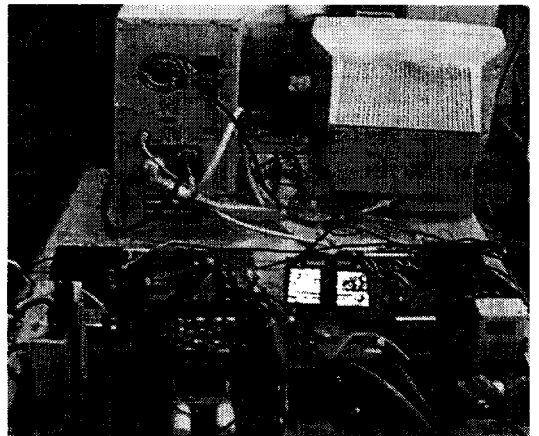


Fig. 4 Controller.

사. 잎 부상장치 및 상추 공급장치

잎 부상장치는 end-effector가 상추에 접근할 때 처진 잎을 공압으로 띄워 상추의 손상을 방지하기 위하여 제작되었다. 솔레노이드 밸브와 릴레이를 이용하여 구동되며, PB-1S 원칩 마이크로 컴퓨터에서 나오는 제어신호에 의해 제어된다.

상추 공급장치는 재배상에 일정한 간격으로 심겨져 있는 상추를 하나씩 정해진 위치로 이동시키기 위해 제작되었다. 상추 공급장치의 구동은 AC 모터를 사용하였으며 line driver인 MC34C87와 릴레이를 이용하여 구동하였다. PB-1S 원칩 마이크로 컴퓨터에서 나오는 제어신호에 의해 제어된다.

아. 퍼지 제어기 구성

상추 압지 그리퍼의 파지력을 제어하기 위하여 퍼지 제어를 사용하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 퍼지 제어기의 입력으로는 기계 시각장치에 의한 잎면적과 광 센서에 의한 높이를 사용하였고, 출력으로는 전압을 사용하였다. 전압 비례 밸브인 IP 402는 입력으로 들어오는 전압에 따라 압력을 조절하며, 조절된 압력은 솔레노이드 밸브를 통해 에어척의 구동원으로 사용되어진다. 에어척은 압력에 따라 다른 파지력을 냄으로써 상추 압

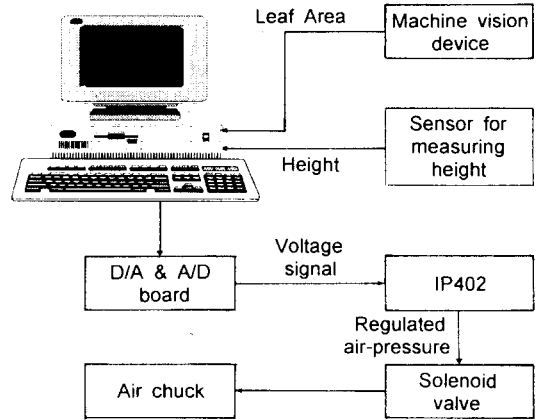


Fig. 5 Components of the fuzzy logic controller.

지 그리퍼의 파지력을 제어하게 된다.

잎면적, 높이와 전압에 대한 퍼지 변수들의 값을 표 3, 4, 5와 같이 결정하였으며, 모두 25개의 퍼지규칙을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 매니플레이터 제어기

매니플레이터의 회전 구동은 AC 시보 모터의 제어에 의해서 이루어졌다. PI 제어가 적용된 AC

Table 3 Linguistic fuzzy variables of "Leaf area index"

VN	NA	ME	WI	VW
Very Narrow	NArrow	MEdium	WIde	Very Wide

Table 4 Linguistic fuzzy variables of "Height index"

VS	SM	MD	TA	VT
Very Small	SMall	MeDium	TAll	Very Tall

Table 5 Linguistic fuzzy variables of "Voltage"

VL	LO	LM	MM	MH	HI	VH
Very Low	LOw	between Low & Medium	MediuM	between Medium & High	HIgh	Very High

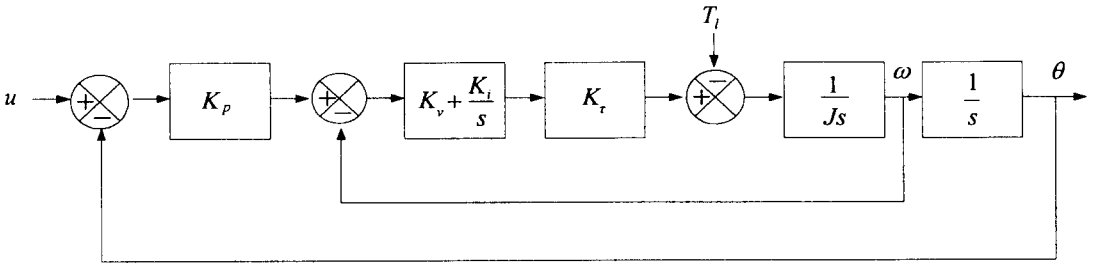


Fig. 6 Modeling of AC servo motor with the PI controller.

서보 모터의 모델링을 그림 6에 나타내었다. 그림 6을 이용하여 식 (1)과 같은 페루프 전달 함수를 구하였다.

$$\frac{\theta}{\mu} = \frac{K_p K_v K_r S + K_p K_r K_i}{J S^3 + K_v K_r S^2 + (K_i K_r + K_p K_v K_r) S + K_p K_r K_i} \quad (1)$$

- 여기서  $K_p$  : 위치비례계수
- $K_v$  : 속도비례계수
- $K_i$  : 적분계수
- $K_r$  : 토크상수
- $J$  : 모터의 관성

식(1)을 가지고 matlab을 이용하여 비례계수 및 적분계수를 구하였다. 위치 비례계수는 500, 속도 비례계수는 500, 적분계수는 5로 선정하였다.

나. 수확 성능 평가

수확 성능 평가를 위해서 국내에서 생산되는 대표적인 잎상추 중에서 온실재배에 적합한 적축면을 선정하여 재배하였다. 퍼지제어에 의한 상추 압지 그리퍼의 파지력 제어 결과를 그림 7에 나타내었다. 잎면적과 높이가 커질수록 파지력도 커져 'stable grasp'를 유지하면서도 상추에는 손상을 주지 않았다. 적축면 상추 72포기를 대상으로 수확 실험을 하였다. 그림 8에 개발된 상추 수확기의 수확 장면을 나타내었다. 실험 결과, end-effector에 의한 잎 손상이 5포기 발생하였으며, 상

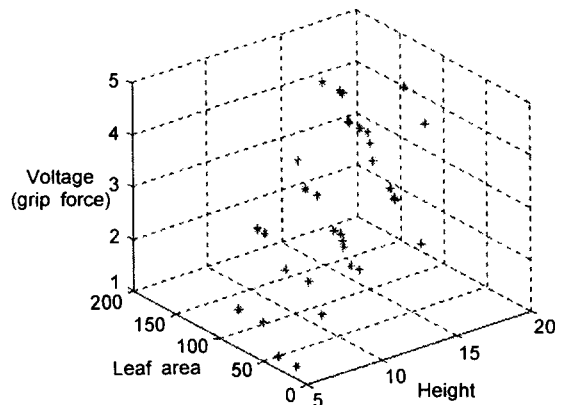
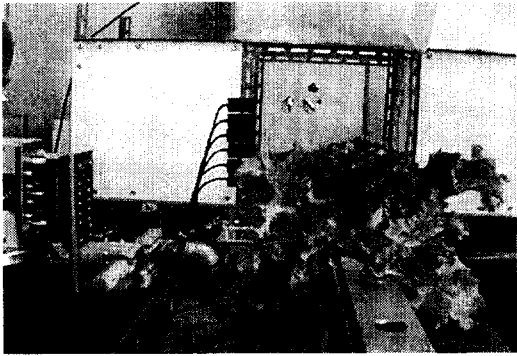


Fig. 7 Result of fuzzy logic control.

Table 6 Performance of the robotic lettuce harvester

Result analysis	No. of lettuces	Percentage (%)
Successfully harvested	67	93.06
Harvested with little damage	5	6.94
Sum	72	100.00

추 한 포기를 수확하는 데 걸린 시간은 평균 5초였다. 잎 손상을 입은 5포기의 경우는 상추의 맨 아래 잎 하나 정도가 부분적으로 찢겨지는 경우로 실제로 상품으로서의 가치는 충분하였다. 실험결과를 표 6에 정리하였다.



[a] Feeding a lettuce



[b] Blowing a lettuce



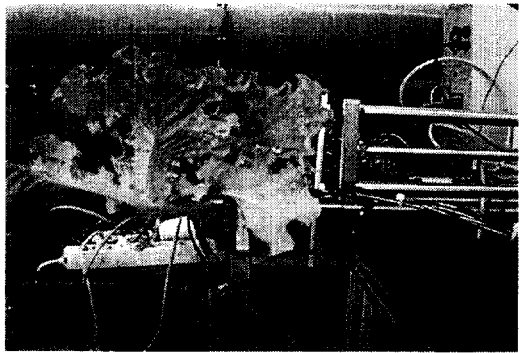
[c] Manipulator forward



[d] Gripper & cutter on



[e] Gripper on & cutter off



[f] Manipulator rotation

Fig. 8 Steps for the robotic lettuce harvesting.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 대단위 엽채류 생산 공장의 수확 자

동화를 위하여 상추 수확용 로봇을 개발한 것으로, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 2자유도 매니플레이터, end-effector, 상추 공급 장치, 처진 잎을 부상시켜 주는 잎 부상 장치,

영상 획득을 위한 기계 시각 장치, 높이 측정을 위한 광 센서 장치, 그리고 이를 제어하는 퍼지 제어기로 구성된 상추 수확 로봇 시스템을 개발하였다.

2) 그리퍼의 적정 파지력을 결정하기 위하여 25개의 규칙으로 구성된 퍼지 제어기를 사용하였다. 퍼지 제어기의 입력변수로는 잎 면적과 높이 정보를 이용하였고, 출력변수는 에어척 구동 전압을 이용하였다.

3) 72포기의 적축면 상추에 대하여 수확 실험을 한 결과 93.06%의 성공률을 보였으며, 상추 한 포기를 수확하는데 평균 5초가 소요되었다.

4) 실험결과를 보면 개발된 상추 수확 로봇 시스템은 식물공장 자동화에 충분히 적용 가능하리라 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 한국농기계공업협동조합, 한국농업기계학회. 1998. 농업기계연감.
2. 농촌진흥청. 1997. 원예농업의 기계화 기술 과제와 발전방향. '97 심포지엄 발표문.
3. 윤진하. 1996. 한국의 원예시설 자동화 현황 및 식물공장의 발전방향. 21세기 첨단식품생산 시

스템의 실용화 심포지엄.

4. Kondo, N., Y. Nishitsuji, P. P. Ling and K. C. Ting. 1996. Visual Feedback Guided Robotic Cherry Tomato Harvesting. Transactions of the ASAE 39(6):2331-2338.
5. Reed. J. N. and R. D. Tillet. 1994. Initial experiments in robotic mushroom harvesting. Mechatronics 4(3):265-279.
6. Simonton, W. 1991. Robotic End Effector for Handling Greenhouse Plant Material. Transactions of the ASAE 34(6):2615-2621.
7. Tillet, N. D., W. He and R. D. Tillet. 1995. Development of a vision guided robot manipulator for packing horticultural produce. Journal of Agricultural Engineering Research 61:145-154.
8. Uchida, T., T. Yamano and H. Miyazaki. 1994. Development on Automatic Harvesting System for Leaf Vegetables. 일본 식물공장학회지 6(3): 197-202.
9. Weber, M. C., R. L. Strohshine, K. Haghghi and Y. Edan. 1991. Melon Material Properties and Finite Element Analysis of Melon Compression with Application to Robot Gripping. Transactions of the ASAE 34(3):920-929.