

식물 공장용 자동 상추 수확 시스템 개발

Development of Automatic Lettuce Harvesting System for Plant Factory

조성인*	류관희*	신동준*	장성주*
정회원	정회원	정회원	정회원
S. I. Cho	K. H. Ryu	D. J. Shin	S. J. Chang

ABSTRACT

Factory-style plant production system aims to produce the standardized horticultural products with high quality and cleanness. In Korea, researches for year-round leaf vegetables production system are in progress and the most of them are focused on environment control. Automating technologies for harvesting, transporting and grading need to be developed.

A lettuce harvesting system applicable to the plant factory was studied. It was composed of an articulated robot with a cutter and a gripper, lettuce feeding conveyor and air blower. Success rate of the developed system was 94.7%. The system carried out harvesting a lettuce smoothly and the harvesting time was about 6 seconds per lettuce. The results showed a feasibility of robotic lettuce harvesting.

주요용어(Key Words): 자동 수확 시스템(Automatic Harvesting System), 상추(Lettuce), 다관절 로봇(Articulated Robot), 식물공장(Plant Factory).

1. 서 론

우리 나라 농업은 농업노동 기피에 따른 농촌 노동력 부족과 세계무역기구(WTO)체제 출범에 따른 농산물 수입 개방의 어려움을 겪고 있으며, 소비자의 농산물 소비 고급화와 다양화에 따라 고품질 농산물의 수요가 증대되고 있다. 이러한 변화에 대처하기 위해서는 품질 좋은 농산물을 값싸게 생산할 수 있는 기술 집약적 농업으로 발전되어야 한다.

선진국의 경우 엽채류의 시설재배는 파종에서 수확까지 대부분의 생산공정을 기계화·자동화한 식

물공장을 개발하여 고부가가치 청정채소를 연중 생산하고 있으나, 우리 나라의 경우 자동 파종기, 복합 환경제어 시스템 및 자동 양액 관리 시스템 등 일부 분만 자동화가 진행되었고 이식, 수확 및 선별 등의 작업은 아직도 인력에 의존하고 있다(윤진하, 1996). 농촌진흥청에서 시설상추의 작업단계별 투입노동력 내역을 조사한 바에 따르면 전체 노동 투입시간에 대하여 수확 작업에 47%의 시간이 소모되고 있다. 따라서, 수확 작업의 자동화를 통해 상당부분 노동력 부족을 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

최근 들어 농공학 분야에서는 로봇을 이용한 자동

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계전공

수확 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 로봇의 농업 응용에 관한 연구 사례를 살펴보면 다음과 같다. 과수의 수확을 위한 연구로 멜론(Weber 등, 1991), 방울토마토(Kondo 등, 1996), 포도(Kondo 등, 1996), 토마토(Sakaue 등, 1997) 등에 적용한 사례가 있으며, 시설 재배 채소를 대상으로 한 연구로 제라늄(Simonton, 1991) 등에 적용한 연구가 진행되었다. 특히, Uchida 등(1994)은 식물 공장용 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.

본 연구는 대단위 엽채류 생산 공장에서 수확 작업 공정의 자동화를 위한 것으로, 구체적인 연구 목적은 다음과 같다.

- (1) 현재의 상추 수확 작업 공정을 분석하고, 이를 자동화하는 시스템을 구축하고 적정 공정을 개발한다.
- (2) 상추 수확을 위한 적정 end-effector를 설계·제작한다.
- (3) 구축한 전체 시스템의 성능을 실험하여 평가한다.

2. 재료 및 방법

가. 상추 수확 공정

본 연구는 유리 온실에서 폭 6cm, 길이 5~6m 되는 재배상에서 약 20cm 간격으로 포트에 심겨져 재배되는 상추를 대상으로 하였다. 재배되는 동안 생육 단계에 따라 재배상 이송 장치에 의해 조건을 조절하게 되며, 수확시기가 되면 수확장치 앞으로 재배상을 하나씩 끌어들이도록 되어 있다. 수확할 재배상의 상추는 수확 위치까지 하나씩 공급되고 수확 과정을 거쳐 포기별로 포장되어야 하며, 포트는 분리되어 재활용될 수 있도록 수거되어야 한다. 하나의 재배상이 모두 수확되면 재배상은 재활용을 위해 수집된다.

개발된 상추 수확 시스템은 수확할 재배상의 상추를 하나씩 포트 압지 위치로 공급해주는 공급 컨베

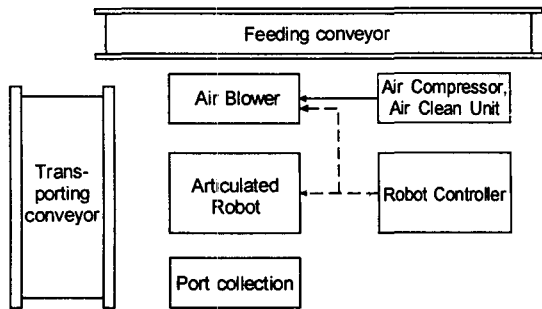


Fig. 1 Schematic diagram of harvesting system for a lettuce.

이어와 수확용 다관절 로봇, 그리퍼가 포트 압지를 위하여 접근할 때 처진 상추 잎을 부상시켜 주는 공압장치, 수확된 상추를 포장부로 이송하는 컨베이어, 포트 재활용을 위한 수거부, 이러한 공정을 총괄 제어하는 로봇 제어반으로 구성된다. 그림 1에 상추 수확 장치의 구성도를 나타내었다.

수확 작업 공정은 다음과 같다.

- ① 공급 컨베이어에 의해 포트 압지 위치까지 상추를 하나씩 정위치 시킨다.
- ② 로봇이 포트를 압지하기 위해 접근한다. 이때, 상추 잎 부상장치에서 공압에 의해 포트를 가리고 있는 상추 잎을 띄운다.
- ③ 로봇 그리퍼가 포트를 압지하고 들어올려 재배상으로 부터 상추를 포트채 이탈시킨다.
- ④ 로봇이 상추를 이송 컨베이어 위로 이동한 후 그리퍼 위에 위치한 절단 칼날로 상추의 밑동을 자른다. 상추는 이송 컨베이어에 떨어져 포장부로 이송된다.
- ⑤ 로봇은 포트를 수거함에 떨어뜨린다.
- ⑥ 로봇은 초기 위치로 돌아가고, 단계 ①부터 반복한다.

나. 수확용 다관절 로봇

채소 수확작업을 기계화할 때는 적용 작물의 특성과 함께 재배 환경을 고려하여야 한다(농촌진흥청, 1997). 성장한 상추의 특성과 재배 환경을 고려하여 수확용 로봇을 선정하였다. 성장한 상추는 품종에 따라 300~400mm의 직경이 되며, 100~400g 내외의

중량이 되며, 하엽이 처져 작업부의 접근이 쉽지 않다. 따라서, 비교적 좁은 공간에서도 상추 잎의 상해 없이 수확 작업이 가능한 로봇을 선정하는 것이 작업 성능과 공간 활용도를 높이는 것으로 판단된다. 다관절 로봇은 크기에 비해 작업 범위가 넓어 공간 활용도가 높으며, 동작 유연성이 좋은 장점이 있어 수확용 로봇으로 다관절 로봇을 이용하였다. 비교적 가벼운 열채류의 수확은 소형 로봇이 적합하며, 로봇 제어반은 주변 장치와의 연계 작업을 위해서 10 단자 이상의 외부 I/O 단자를 갖고 있어야 한다. 이러한 요구사항을 고려하여 Yaskawa 社の SV035 모델을 수확용 로봇으로 선정하였다. 선정된 로봇은 5 자유도를 갖는 수직 다관절 로봇 형태로 가반 하중이 3kg, 작업 범위가 650mm 이다.

다. 작업 선단부

작업 선단부는 작물과 직접 접촉되는 부위로 대상물의 물리적, 생물적 특성 등을 고려하여 작물의 피해를 최소화 할 수 있도록 하여야 한다.

로봇의 선단부에 상추 밀동 절단용 칼날과 포트 압지용 그리퍼를 상하로 설치하여 먼저 포트를 압지하고 절단용 칼날로 상추의 밀동을 자르도록 하였다.

포트 압지용 그리퍼는 평형 개폐형 에어척에 포트를 압지할 수 있도록 핑거를 제작하여 부착하고, 공압장치와 솔레노이드 밸브를 이용하여 구동장치를 구성하였으며, 로봇 제어기의 외부신호에 의해 제어가 가능하도록 하였다. 그리퍼의 개폐구간은 ±7mm 이며, 포트를 압지할 때 충격을 흡수할 수 있도록 핑거는 우레탄 소재를 사용하였다.

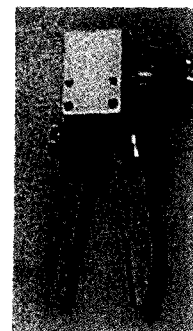
절단용 칼날은 지점 개폐형 에어척의 말단에 칼날을 부착하여 사용하도록 설계하였다. 공압장치와 솔레노이드 밸브를 이용하여 구동장치를 구성하였다. 칼날은 스테인레스 스틸을 이용하여 두 가지 형태로 제작하였고 수확 실험을 통하여 성능을 평가하였다. 표 1에 두 가지 형태의 칼날의 제원을 나타내었으며 그림 2에 두 형태의 절단 칼날 모습을 나타내었다.

그림 3에 로봇에 부착된 절단칼날과 그리퍼를

나타내었으며, 그림 4, 5에 상추의 밀동을 절단하는 장면과 수확된 상추의 모습을 나타내었다.

Table 1 Comparison of two cutter

Blades	Type 1	Type 2
Operating angle	180~0°	20~-5°
Cutting range	60 mm	40 mm
Operating condition	5~6 bar	7~8 bar



[a] Type 1

[b] Type 2

Fig. 2 Photograph of the cutters.

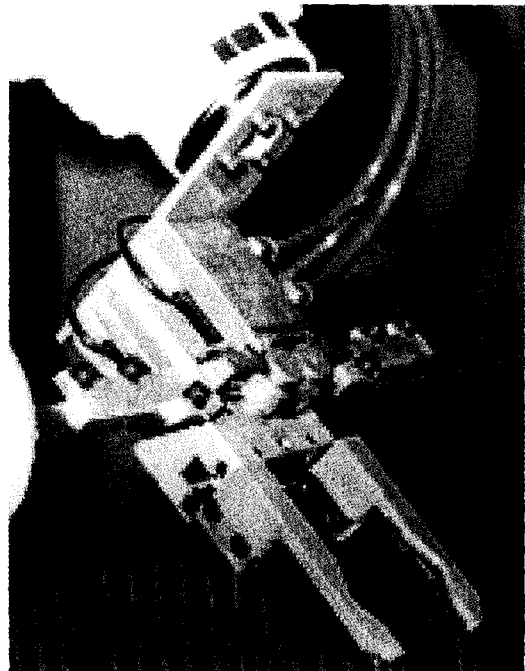


Fig. 3 Developed gripper and cutter.

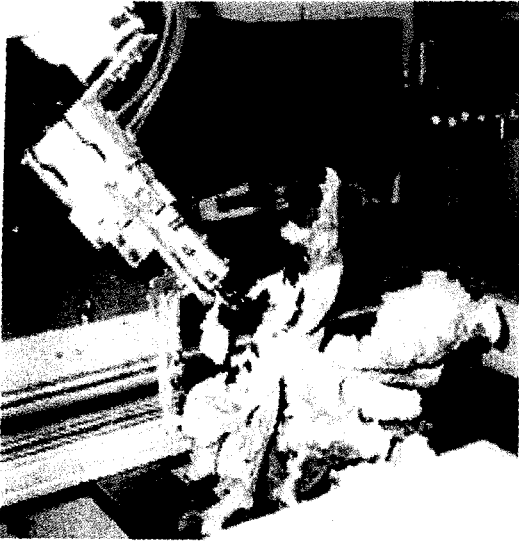


Fig. 4 Figure of cutting a lettuce.

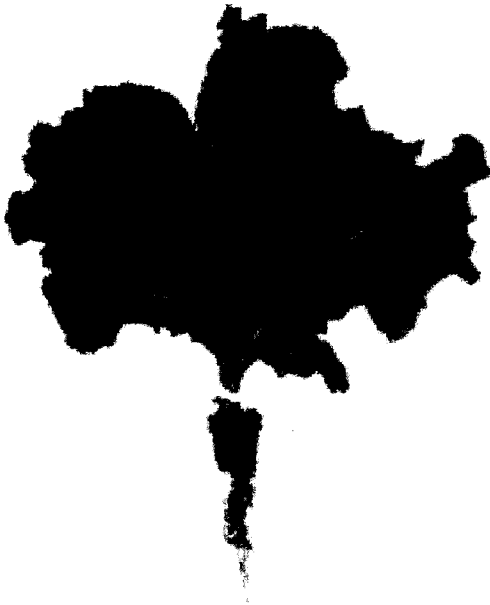


Fig. 5 Figure of the harvested lettuce.

라. 상추 공급 컨베이어

상추 공급 컨베이어는 재배상에 일정한 간격으로 심겨져 있는 상추를 하나씩 정해진 포트 압지 위치로 이동시키기 위해 제작하였다. 컨베이어 벨트는

재배상이 미끄러지는 것을 방지하기 위해 고무 소재를 이용하였고, 처짐을 방지하기 위해 25cm 간격으로 무부하 롤러를 배치하고, 장력 조절 롤러를 두었다. 벨트의 구동은 제동과 속도 조절이 가능한 AC 모터를 사용하였으며, 로봇 제어반의 타이머 기능을 이용하여 상추가 포트 압지 위치에 정위치 할 수 있도록 하였다.

마. 공압 시스템

그리퍼와 절단칼날, 잎 부상장치를 구동하기 위해 공기 압축기(air compressor)와 공기 저장탱크, 공기 정화장치 및 공기 레귤레이터로 구성된 공압 공급원에 솔레노이드 밸브를 이용하여 ON/OFF 제어가 가능한 공압 시스템을 구성하였다. 각각의 솔레노이드 밸브는 로봇 제어반 외부 신호에 의해 제어 하였다.

3. 결과 및 고찰

성능평가를 위해서 국내에서 생산되는 대표적인 잎상추 중에서 온실재배에 적합한 적축면을 선정하여 재배하였다. 35mm 직경의 포트에 우레탄 스펀지를 이용하여 정식 하였으며 정식한 후 상추 잎이 8~10장 내외일 때 수확을 하였다.

수확 공정은 로봇의 동작을 교시하여 프로그램 하였으며, 하나의 재식판이 모두 수확될 때까지 반복 수행하도록 하였다. 그림 1의 장치 배치를 토대로 작업 경로를 설정하였다. 로봇이 잎 부상장치 앞에서 그리퍼로 상추를 압지하여 들어올린 후, 로봇 1축이 반시계 방향으로 90° 회전하여 상추의 밀동을 절단하고, 다시 90° 회전하여 포트를 수거하도록 경로를 설정하고, 작업 시간을 측정하였다.

가. 장치 성능평가

그림 6에 개발된 상추 수확기의 수확 장면을 나타내었다. 개발된 수확기의 성능을 평가하기 위해 수확 작업 중 각 동작의 정확도를 평가하고, 수확시간을 측정하였다.

컨베이어 공급기는 최대 발생 오차가 ±4mm를 넘지 않았으며, 이는 그리퍼가 ±7mm의 오차 극

Table 2 Performance of the robotic harvester for a lettuce

Result analysis		No. of lettuces	Percentage
Successfully harvested		90	94.7
Wrong harvested	Lettuces with a damaged leaf by gripper	3	3.2
	Lettuces with a damaged leaf by cutter	2	2.1
Sum		95	100.0

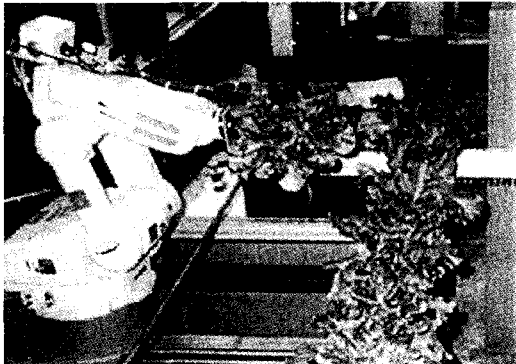


Fig. 6 Figure of the robotic harvester for a lettuce.

복이 가능하였으므로 포트가 압지되지 않은 경우는 발생하지 않았다. 상추는 정위치에 수확되었으며 포트도 100% 수거되었다. 상추 한 포기 수확 시 걸리는 시간은 최대 약 6초가 소요되었다.

나. 수확 성능평가

형태 1의 절단 칼날을 부착하고 88포기의 적측면에 대하여 1차 수확 실험을 하였다. 실험결과 그리퍼가 포트를 압지할 때 잎이 상해를 입은 경우가 4포기, 절단 칼날에 의해 상해를 입은 경우가 5포기 발생하였다. 이는 형태 1의 칼날은 에어척의 개폐 행정시 180°로 벌어졌던 칼날이 0°로 모임으로 절단은 잘 되지만 처진 상추 잎이 상해를 입는 것으로 판단되었다. 그리퍼에 의한 잎 손상은 그리퍼가 포트를 압지하려고 접근할 때 정면과 측면의 처

진 잎이 포트와 함께 잡혀 손상된 경우가 발생하였다.

1차 실험 후 그리퍼 폭보다 넓게 잎을 붙어 올릴 수 있도록 잎 부상장치에 노즐을 추가하고, 작동각이 20~5°인 형태 2의 절단 칼날을 부착하여 95포기의 적측면에 대하여 2차 수확 실험을 하였다. 실험 결과, 그리퍼에 의한 잎 손상이 3포기, 절단 칼날에 의한 잎 손상이 2포기 발생하여 1차 실험에 비해 성공률이 높았다. 실험을 통하여 형태 2의 칼날을 절단 칼날로 선정하였다. 실험결과를 표 2에 정리하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 대단위 엽채류 생산 공장의 수확 자동화를 위하여 개발한 것으로, 그 결과는 다음과 같다.

1) 다관절 로봇과 상추 공급 컨베이어, 처진 잎 부상시켜 주는 공압장치, 포트 재활용을 위한 수거부, 공정을 총괄 제어하는 로봇 제어반으로 구성된 상추 수확 메커니즘을 개발하였다. 이의 성능을 평가한 결과 전 공정이 원활히 수행되었고, 상추 한 포기를 수확하는 데 걸린 시간은 최대 약 6초였다.

2) 두 가지 형태의 절단 칼날을 제작하여 실제 상추에 대하여 수확 실험을 통하여 작동각이 20~5°인 형태 2의 칼날을 절단 칼날로 선정하였다. 95포기의 적측면에 대하여 수확 실험을 한 결과 성공률은 94.7%를 보였다.

참 고 문 헌

1. 농촌진흥청. 1996. 농업용 로봇 연구개발 동향과 전망. '96 심포지엄발표문.
2. 농촌진흥청. 1997. 원예농업의 기계화기술 과제와 발전방향. '97 심포지엄발표문.
3. 류관희, 조성인, 황현, 최종섭 공역. 1996. 생물생산을 위한 지능로봇공학. 문운당.
4. 윤진하. 1996. 한국의 원예시설 자동화 현황 및 식물공장의 발전방향. 21세기 첨단식물생산시스템의 실용화 심포지엄.
5. Fu, K. S., R. C. Gonzalez, and C. S. G. Lee. 1987. Robotics : Control, Sensing, Vision, and Intelligence. McGraw-Hill Inc.
6. Kondo, N., Y. Nishitsuji, P. P. Ling, and K. C. Ting. 1996. Visual Feedback Guided Robotic Cherry Tomato Harvesting. Transactions of the ASAE vol. 39(6):2331-2338.
7. Kondo, N., M. Monta, and Y. Shibano. 1996. Multi-operation Robot for Fruit Production. ICAME '96 Proceedings : 621-631.
8. Sakaue, O. and S. Hayashi. 1997. Activities at the Laboratory of Form Mechanization, National Research Institute of Vegetables, Ornamental Plants and Tea (NIVOT). Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America vol. 28(1): 63-67.
9. Simonton, W. 1991. Robotic End Effector for Handling Greenhouse Plant Material. Transactions of the ASAE vol. 34(6):2615-2621.
10. Uchida, T., T. Yamano, and H. Miyazaki. 1994. Development on Automatic Harvesting System for Leaf Vegetables. 일본 식물공장학회지 vol. 6(3): 197-202.
11. 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 vol. 34(3):920-929.