

식물공장용 체인 컨베이어식 작물 조간 조절장치 개발

장유섭* · 송현갑¹ · 김동억
농업공학연구소, ¹21대체에너지연구소

Development of a Chain Conveyor Type Row-Spacing System for Plant Factory

Chang, Yu Seob*, Song, Hyun Gap, and Kim, Dong Eok
National Institute of Agricultural Engineering Institute of Rural Development
Administration Suwon 441-100, Republic of Korea
¹21 Substitute Energy Institute, CheongJu 360-220, Republic of Korea

Abstract. This study was conducted to develop a chain conveyor-type, row-spacing system for a plant factory. The developed system was evaluated for its practical use in growing plants. Results are intended to provide technical suggestions on the row spacing for hydroponically grown vegetables in a plant factory. The designed row-spacing system for a plant factory could be adjusted by four stages with a conveying speed range of 5.3~15.8 cm · s⁻¹ and with a row-space range of 10~25 cm. The torque of driving shaft was measured with a torque range of 11.7~33.3 N · m according as a trough weight changes with a range of 17~935 N. A measured value was 5.9~9.8 N · m lower than a theoretical value. Travel reduction rate was shown up 1.6~1.9%. The conveying time of trough was shown up 2.24 seconds in case that the designed value was 2.26 seconds. The system was evaluated to be functioning effectively according to the initial design factors in the test.

Key words : row-spacing, hydroponics, plant factory, greenhouse

*Corresponding author

서 언

식물공장은 1957년에 덴마크의 크리스텐센 농장에서 처음 시작되었다. 이 농장에서 채소의 일종인 크레스를 파종에서 수확까지 일괄 자동 생산한 것이 시초이다. 그 후, 유럽을 중심으로 식물공장에 관한 연구(Benoit와 Ceustermans, 1994, Benoit 1997; Van Henten과 Van Straten, 1994)가 진행되었고, 1970년대에 들어 미국에서 인공광을 이용하는 완전제어형 식물공장이 개발되었다. 1980년대에 들어서면서 미국에서 태양광을 이용하는 자동화된 대규모 식물공장이 실용화되었으며, 일본에서는 1997년에 히다치의 중앙연구소를 시작으로 1998년에 20여 개소가 설치 가동 중에 있다(Tadashi, 1996; Takatsuji, 1987, 1997).

식물공장은 파종, 이식, 수확 등 농작업기계 및 광원, 냉난방, 이산화탄소 등 작물의 지상부와 배양액, 액운 등 지하부의 환경제어 뿐 아니라 작물의 조간조절장치

가 매우 중요하며 간단하고 제작이 용이한 시스템의 연구 개발이 필요하다(Takatsuji, 1987). 특히 식물공장에서는 온실의 환경조절기술과 함께 면적을 최대한 활용할 수 있는 작물조간조절 기술개발이 더욱 중요하다.

작물의 조간조절장치는 작물을 이동하면서 조간조절을 할 수 있기 때문에 밀식재배가 가능하여 토지이용률을 높일 수 있다. 또한 파종, 이식과 수확 등의 농작업이 정위치에서 가능하게 되어 작업장소를 집중화할 수 있고 농작업 조건이 단순화되어 노동력 투입이 크게 절감 될 수 있다. 국내에서는 최근에 식물공장과 관련된 광원과 배양액 등에 관한 연구(Park과 Lee, 1999)가 수행된 바 있으나 작물의 조간조절장치와 같은 작업장치에 관한 연구는 미진한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 외국에서 연구된 조간조절장치와 달리 구조가 간단하고 쉽게 제작이 가능한 체인 컨베이어식 작물조간조절시스템을 개발하였으며, 조간조절장치를 설계제작한 후 그 성능을 평가하였다.

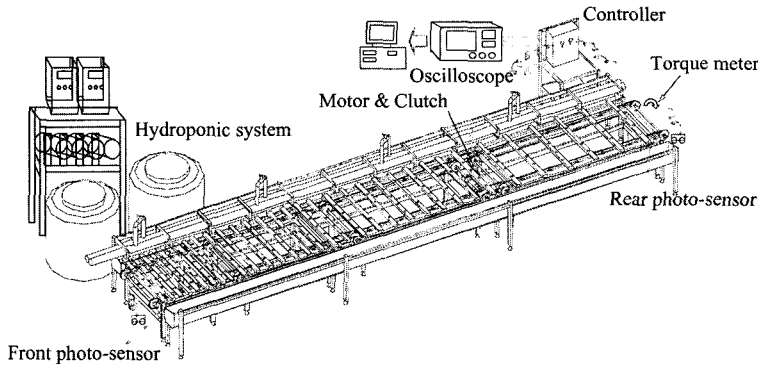


Fig. 1. Experimental apparatus of the row-spacing control system.

재료 및 방법

1. 조간조절장치의 설계 및 제작

조간조절장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 단상 유도전동기와 전자클러치로 구성된 구동부, 체인과 스프로킷으로 구성된 이송부, 체인과 스프로킷 조합으로 속

도비에 의해 조간조절을 하는 조간 조절부, 두 쌍의 광센서의 감지신호에 의해 조간조절장치가 제어되는 제어부로 구성되어 있다. 구동부는 전동기와 전자클러치로 구성되어 체인에 전달되는 동력을 단속할 수 있도록 설계 제작하였다. 구동부의 모식도는 Fig. 2와 같다. 조간조절장치는 재배홍통이 이송부와 조간 조절부에 들어오고 나가는 것을 광센서로 감지하여 조간조절장치가 제어되는 시퀀스제어방식으로 설계 제작되었다. 조간조절장치의 작동은 전원이 연결되면 전동기가 구동된 상태에서 재배홍통투입감지 광센서(BMS200-DDTN)에 의해 재배홍통이 감지되면 전자클러치(KEB, combibox. 10,370,90)의 릴레이(SZR-MY2-1)에 신호를 보내 전자클러치의 브레이크가 풀리면서 조간조절장치가 가동되어 재배홍통이 이송된다. 이송되는 동안 재배홍통은 조간 조절부를 통과하면서 조간이 조절된다. 조간조절장치 제어부의 제원은 표 1에서 보는 바와 같다.

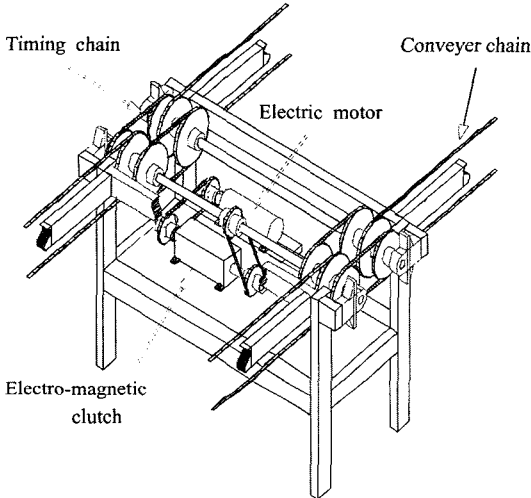


Fig. 2. Assembly of electric motor, electromagnetic clutch and timing sprockets.

조간조절장치는 광센서, 릴레이, 전자클러치의 조합에 의해 시퀀스제어 되도록 회로를 구성하였으며, 그 구성은 광센서와 릴레이를 출발점과 종착점에 각각 1개씩 설치하고, 전자클러치와 전자클러치에 전원을 공급하는 전원공급장치(LN75-24)로 구성 제작되었다. 조간조절장치의 제어 흐름도는 Fig. 3에서 보는 바와 같

Table 1. Specifications of the control unit of the row-spacing control system.

| Item | Model | Specifications |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| Photo sensor | Autonics, BMS200-DDTN | Detect distance: 200 mm |
| Relay | Honeywell, SZR-MY2-1 | Current rating: 5 A |
| Electronic clutch | KEB, combibox.10,370,90 | Torque: 15 N?m |
| Power supply | Suntronix, LN75-24 | Output: 3.5 A, 75 W |

여기서, μ_c 는 체인의 마찰저항, W_c 는 체인의 무게(kg), W_p 는 트라프와 작물의 무게(kg), $J_{inertia}$ 는 스프라켓 관성력(kg) 그리고 R_c 는 스프라켓의 반경(m)이다.

시험은 조건조절장치에 재배홈통이 투입되고 반출되는 동안 재배홈통의 간격이 조절되는 것을 단계마다 재배홈통 중심 간의 간격을 10회 반복 측정하고 평균하여 조건 조절성을 검토하였다.

결과 및 고찰

1. 성장단계 설정과 재배상의 길이

작물성장단계별 조건조절량을 설정하기 위하여 농가에서 조사한 엽상추의 성장속도와 성장단계는 Fig. 6에 나타내었다. 농가에서 조사한 작물점유폭 상관 관계식은 식(2)와 같다.

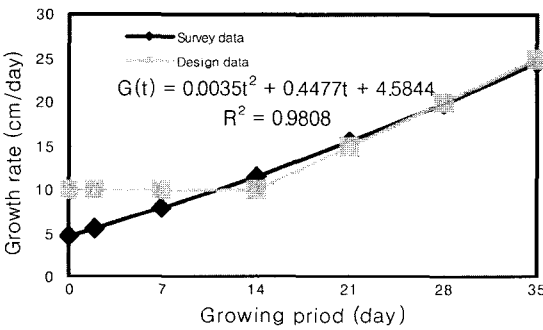


Fig. 6. Growth rates and the growth stages of the leafy lettuce.

$$G(t) = 0.0035t^2 + 0.4477t + 4.5844 \quad (2)$$

G(t): 작물의 성장속도($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$), t: 재배일수(d)

이 식에 재배기간을 대입하면 엽상추의 하루 성장량이 구해진다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 정식 일부터 수확까지의 작물성장 정도를 나타내고 있으며, 성장단계는 정식과 수확계획에 의해 결정되므로 매주 수확하는 것으로 계획하여 정식 후 14일, 21일, 28일, 35일마다 주간을 조절할 수 있도록 4단계로 설정하였다.

작물조건 조절량은 Table 2에서 보는 바와 같이 엽상추의 평균 작물점유폭이 고려되어 단계별로 각각 101.6 mm, 152.4 mm, 203.2 mm, 250.0 mm로 설정하였다. 작물조건조절장치의 각 단계별 재배홈통은 60 mm 폭의 재배홈통을 10개로 하고, 조건조절장치에 사용된 체인은 40번으로 피치가 12.7 mm인 점을 고려하여 조건을 조정하였다. 조건조절부 축간 거리는 19 cm로 하였다. 각 단계별 재배상의 길이와 사용된 작물의 평균 작물 폭, 재배상길이, 이때에 소요되는 체인의 수, 길이 등을 Table 3에 나타내었다.

2. 조건조절부의 속도비와 부하시 속도변화

조건조절장치의 속도는 감속형 전동기의 회전속도를 28.8 rpm, 구동전동기가 설치된 3단계축의 회전속도를 14.4 rpm로 하여 조건조절부의 속도비와 이송부의 속도를 분석하고 그 결과를 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 보는 바와 같이 조건조절부의 속도비는

Table 2. Row-spacing distance according to the growth period.

| Item | Row-spacing distance | | | |
|-----------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| Growing period (d) | 14 | 21 | 28 | 35 |
| Survey spacing (mm) | 115.4 | 155.4 | 198.6 | 245.4 |
| Adjusted spacing (mm) | 100.0 | 150.0 | 200.0 | 250.0 |
| Length of chain (mm) | 101.6 (8 ea) | 152.4 (12 ea) | 203.2 (16 ea) | 254.0 (20 ea) |

*Pitch of #40 chain: 12.7 mm

Table 3. Design data for the row-spacing control system.

| Item | 1st stage | 2nd stage | 3rd stage | 4th stage | Total |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| Increase in leaf length per day ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$) | 10 | 15 | 20 | 25 | - |
| Space between plants (cm) | 106.0 | 152.4 | 203.3 | 254.0 | 715.7 |
| Length of growing bed (cm) | 99.0 | 152.0 | 204.0 | 257.0 | 712.0 |
| Number of chain (ea) | 198 | 304 | 408 | 514 | 1424 |
| Length of chain (cm) | 251.5 | 386.1 | 518.2 | 652.8 | 1808.5 |

Table 4. Speed of conveyer and speed ratio at the growth stages.

| Item | 1st stage | 2nd stage | 3rd stage | 4th stage |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| No. of driving sprocket teeth | 30 | 28 | 21 | 21 |
| No. of driven sprocket teeth | 20 | 22 | 27 | 27 |
| Speed ratio of shaft | 0.667 | 0.786 | 1.286 | 1.286 |
| Speed of conveyer (cm · s ⁻¹) | 6.4 | 9.6 | 12.3 | 15.8 |

*Revolution per seconds of motor: 28.8 rpm.
 Revolution per seconds of 3rd stage (Driving shaft): 14.4 rpm
 Pitch circle of conveyer sprocket: 161.9 mm

Table 5. Comparison of the velocities of conveyer according to the growth rates.

| | 1st stage | 2nd stage | 3rd stage | 4th stage |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Conveyer design velocity (cm · s ⁻¹) | 6.4 | 9.6 | 12.3 | 15.8 |
| Conveyer velocity without load (cm · s ⁻¹) | 6.3 | 9.5 | 12.2 | 15.6 |
| Conveyer velocity with load (cm · s ⁻¹) | 6.2 | 9.3 | 12.0 | 15.3 |
| Slippage (%) | 1.6 | 2.1 | 1.6 | 1.9 |

*Weight of leafy lettuce and troughs: 131.4 kg

스프로킷의 피치, 잇수의 비에 따라 1-2단은 0.64, 2-3단은 0.79, 3-4단은 1.29로 분석되었으며, 각 단계별 이송속도는 각각 6.4, 9.6, 12.3, 15.8 cm · s⁻¹이다.

작물조간조절장치의 이송속도를 측정된 결과를 Table 5에 나타내었다. 조간조절장치의 무부하시 속도변화는 1단계에서 4단계까지 각각 6.3 cm · s⁻¹, 9.5 cm · s⁻¹, 12.3 cm · s⁻¹, 15.6 cm · s⁻¹로 설계속도와 비슷하였으며, 부하시속도 변화는 1단계는 6.2 cm · s⁻¹, 2단계는 9.3 cm · s⁻¹, 3단계는 12.0 cm · s⁻¹, 4단계는 15.3 cm · s⁻¹로 다소 속도가 떨어지는 것으로 나타났으며, 체인의 롤러와 체인가드레일의 마찰에 의해 진행 저하율이 1.6~2.1%가 발생하였다.

3. 조간조절장치 소요토크 변화

작물이 심어진 재배홈통을 이송할 때 체인롤러와 가이드라인 마찰력, 작물과 재배홈통의 하중에 의해 조간 조절장치의 구동축에 가해지는 축토크가 분석되었고, 이론 분석 값과 실측값을 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 축에 가해지는 토크는 조간조절장치에 17 N~935 N의 범위에서 작물이 심어진 재배홈통을 적재하여 가면서 토크미터로 실측한 결과, 작물조간조절장치에 소요되는 축토크는 무부하시 10.8 N · m이었으며, 부가하중이 17 N에서 935 N까지 증가함에 따라 11.7 N · m에서 33.3 N · m까지 직선적으로 증가하는 경향을 나타내어 조간 조절 설계시에 조간조절장치의 구동축

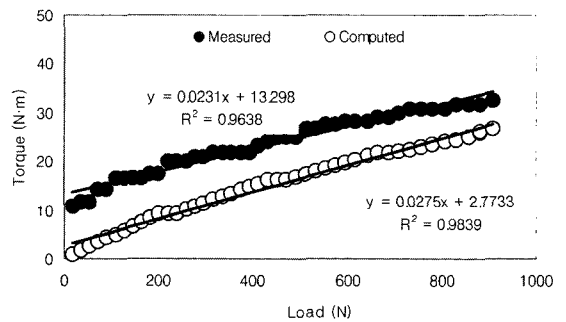


Fig. 7. Torque versus load for the row-spacing control.

토크를 10% 정도 부가하여야 할 것으로 판단되었다.

4. 제어 특성

오실로스코프에 의해 측정된 센서의 전압과 전자클러치의 자동전압 변동을 측정된 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 전자클러치는 마그네틱 브레이크를 작동하는 동안 전압이 24 V로 유지되고, 투입측 센서는 5 V가 유지되며, 반출측 센서는 전압이 0 V에서 투입측 센서 작동한 후 1.2초 후에 5 V로 유지된다. 투입측 센서가 재배홈통을 감지하면 전자클러치의 마그네틱 브레이크가 풀리면서 조간조절장치가 구동된다. 이때에 투입측 센서는 2.24초 동안 0 V로 강하했다 상승한다. 반출측 센서가 반출되는 재배홈통을 감지하면 마그네틱 브레이크가 작동하여 조간조절장치는 멈추게 되며 동시에

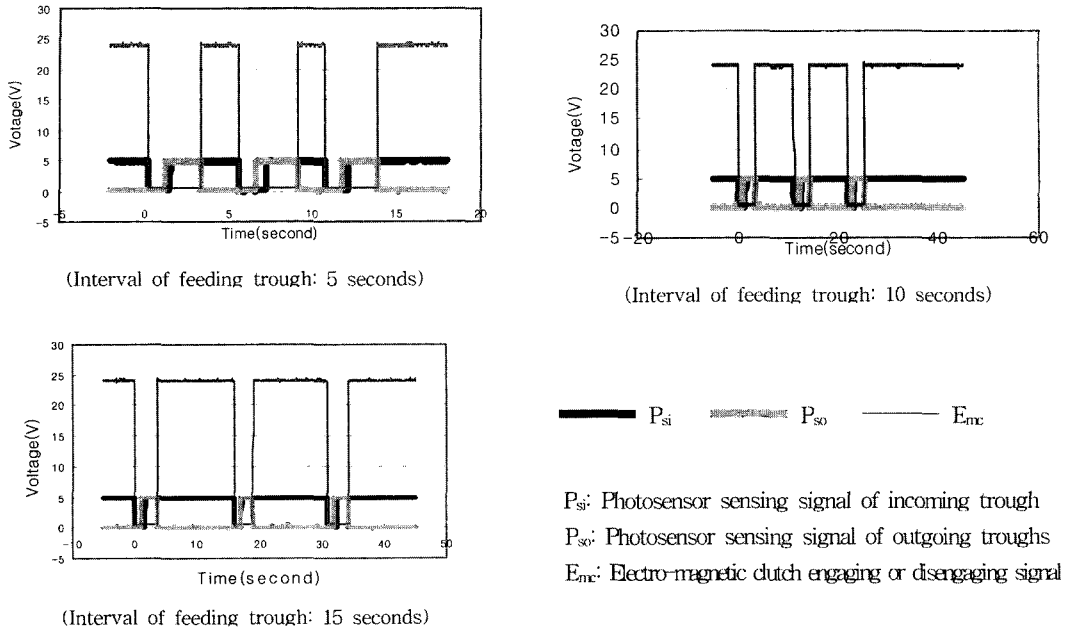


Fig. 8. Responses characteristics of photosensors and electro-magnetic clutch.

투입측 센서에 5 V의 전압이 인가된다. 재배홈통이 센서를 통과하는 시간은 설계 값이 2.26초이며, 실측값이 2.24초로 거의 일치하는 결과를 얻어 제어가 잘 되는 것으로 평가되었다.

5. 조건 조절성

작물조건조절장치는 1-2단, 2-3단, 3-4단에서 조건조

절컨베이어에 의해 재배홈통의 조건이 조절된다. 조건 조절은 1단 101.6 mm에서 2단의 152.4 mm, 2단에서 3단으로 203.2 mm로 넓혀지며, 3단에서 4단으로 254.0 mm가 조절되어 작물간격이 넓혀지게 된다. Fig. 9는 본 시스템의 조건을 조절하여 조건이 넓혀지는 과정을 보여주고 있으며, Fig. 10은 각 단계별로 조건이 넓혀진 상태를 나타낸 것으로 조건이 잘 조절되고 있

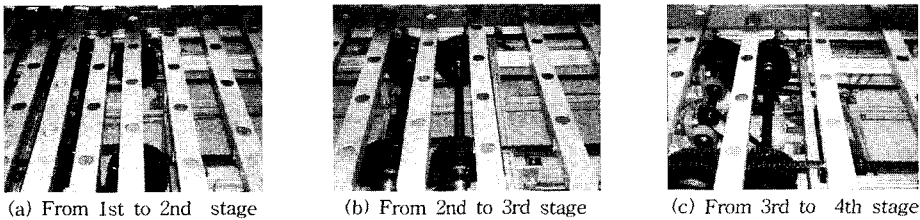


Fig. 9. Overview of the variation in row-spacing between stages.

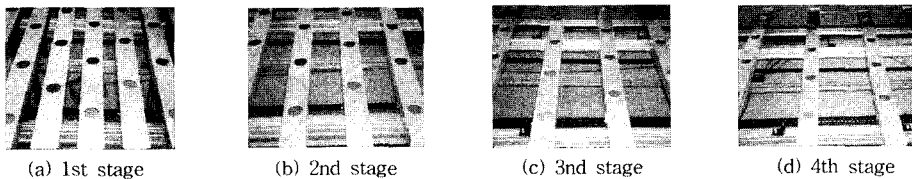


Fig. 10. Overview of row-spacing at stages.

식물공장용 체인 컨베이어식 작물 조간 조절장치 개발

Table 6. Variation in row-spacing for stages (unit: mm)

| Stage. | 1st stage conveyor | timing conveyor | 2nd stage conveyor | timing conveyor | 3rd stage conveyor | timing conveyor | 4th stage conveyor |
|---|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| designed space | 101.6 | 100 | 152.4 | 152.4 | 203.2 | 203.2 | 254.0 |
| Actual space between neighboring trough | 1 | 0 | 97 | 150 | 153 | 205 | 207 |
| | 2 | 106 | 93 | 150 | 158 | 203 | 248 |
| | 3 | 104 | | 152 | | 203 | 260 |
| | 4 | 100 | | 153 | | 204 | 249 |
| | 5 | 109 | | 156 | | 204 | 254 |
| | 6 | 100 | | 149 | | 204 | 265 |
| | 7 | 97 | | 153 | | 203 | 254 |
| | 8 | 102 | | 150 | | 203 | 254 |
| | 9 | 102 | | 155 | | 206 | 248 |
| | 10 | 101 | | 149 | | 200 | 251 |
| | 11 | | | | | | 255 |
| Average | 102.3 | 95.0 | 151.7 | 155.5 | 203.5 | 207 | 253.2 |
| Standard Deviation | 3.5 | - | 2.5 | - | 1.6 | - | 5.4 |

는 것을 볼 수 있다.

각 단계별로 조간조절장치에 의해 재배함통의 조간 조절량을 측정된 결과를 Table 6에 나타내었다. 각 단계별로 조간조절량을 보면 1단계는 평균 102.3 mm, 2단계는 151.7 mm, 3단계는 203.5 mm, 4단계는 253.2 mm로 나타났다. 또한, 각 단계별로 재배함통과 재배함통사이의 간격을 보면 ±5 mm 정도의 편차를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이것은 이송체인컨베이어에 부착된 리그의 부착위치의 차이에 의해 나타나는 현상으로 어떤 단계에서 나타난 편차가 다음단계에서는 편차를 계속 유지하지는 않았으며, 재배함통의 조간조절이 잘 되는 것으로 판단되었다.

적 요

본 연구는 식물공장용 체인컨베이어식 조간조절장치를 개발하기 위해 수행하였다. 개발 시스템을 재배작물에 실제로 적용하기 위해 평가시험하였다. 실험결과, 식물공장에서 수경재배되는 채소의 주간을 조절하는 기술을 제공하였다. 작물조간조절단계는 매주 수확하는 것으로 하여 4단계로 설정하였고, 단계별 이송속도는 각각 6.4, 9.6, 12.3, 15.8 cm·s⁻¹이었고, 조간조절량은 각각 101.6, 152.4, 203.2, 254.0 mm로 나타났다. 1단계에서 4단계로 작물이 이송되는 동안 작물과 재배함통의 무게가 17 N에서 935 N으로 증가함에 따라 구

동축토크도 11.7~33.3 N·m범위에서 증가하여 이룬 토크 값보다 5.9~9.8 N·m 더 소요되었으며, 이때의 진행 저하율은 1.6~2.1%이었다. 재배함통의 이동소요 시간의 설계 값이 2.26초이고 실측값이 2.24초로 잘 일치한 것으로 나타났다. 조간조절장치는 조간조절량이 설계된 값의 5%이내 범주에서 잘 조절되고, 시스템으로도 안정적으로 나타나 식물공장용 조간조절장치로 체인컨베이어식 조간조절장치가 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

주제어 : 조간조절, 양액재배, 식물공장, 온실

사 사

이 시스템은 2000년 농림기술센터의 연구비 지원에 의해 개발된 것임.

인 용 문 헌

1. Benoit, F. and N. Ceustermans. 1994. First findings with the continuous NFT-HEAD lettuce production system in small plastic pots. In: The International Seminar Proceedings Part II; Hydroponics Society of Japan. p. 14-24.
2. Benoit, F. 1997. The Mobil Gully System (MGS) for leafy vegetables and herbs. In: Technical communications. Belgium: European Vegetable R&D Centre,

- February 1997. p.4.
3. Park, M. H. and Y. B. Lee. 1999. Effects of Light Intensity and Nutrient Level on Growth and Quality of Leaf Lettuce in a Plant Factory. *J. Bio-Environment Control* 8(2):108-114.
 4. Tadashi Takaura. 1996. State-of-the-art factory-style plant production systems. In: *Practical plant factories toward the 21st century*. Korea: Korean Society for Bio-Environment Control. p.3-10.
 5. Takatsuji Masamoto. 1987. *System of Plant Factory*. 1st ed., Japan: CMC Co. p.290 (in Japanese).
 6. Takatsuji Masamoto. 1997. *Handbook of plant factory*. 1st ed., Japan: Tokai University Press. p. 3-9 (in Japanese).
 7. Van Henten, E. J. and G. Van Straten. 1994. Sensitivity analysis of dynamic growth model of lettuce. *J. Agric. Engng. Res.* 59:19-31.