

작물의 생장정보 계측 및 생육제어에 관한 연구

I. 炭酸가스 制御 알고리즘 開發

陳濟鏞 · 柳寬熙 · 洪淳昊*

서울대학교 農業生命科學大學 農工學科, *麻浦産業電子株式會社

On-line Measurement and Control of Plant Growth

I. Development of CO₂ Control Algorithm

Jin, Je-Yong · Ryu, Kwan-Hee and Hong, Soon-Ho.*

Dept. of Agr. Eng., Coll. of Agr. & Life Sciences, Seoul Nat'l Univ., Suwon 441-744

*Mapo Technomax Ltd. 17-1, Chuan-dong, Nam-Gu, Incheon 402-200

ABSTRACT

Carbon dioxide enrichment for greenhouse crops has generally been a standard commercial practice for many years. Vegetable crops such as tomato, cucumber, and lettuce respond positively to the CO₂ enrichment. But improper CO₂ enrichment leads to physiological damage and economical loss.

This study was carried out to develop a CO₂ concentration control algorithm considering growth stage and efficiency. The measurand was CO₂ consumption rate and top fresh weight that represents growth stage. The weight of top fresh lettuce as a whole in the tray was measured through a non-destructive method. The demand in CO₂ concentration according to growth stage was investigated. The results are summarized as follows.

1. The CO₂ consumption rate could be measured within the error of $\pm 15.4\text{mgCO}_2/\text{hr}$ in the range of CO₂ concentration of 500~1500ppm.
2. The weight of top fresh lettuce could be measured within the error $\pm 4.3\text{g}$ in the range of 0~1400g.
3. The CO₂ control model developed could determine an economical CO₂ supply rate considering CO₂ consumption rate and leakage rate.
4. The CO₂ control algorithm based on the control model was composed of feedforward control for maintaining a stable CO₂ concentration level, and feedback control with CO₂ consumption rate and top fresh weight for adapting to the change in CO₂ demand by growth stage.
5. For the performance test with the developed control algorithm on lettuce the decrease in CO₂ supply rate was obtained without a significant decrease in top fresh weight.

키 워 드 : 탄산가스 농도제어, 탄산가스 소비율, 탄산가스 공급률, 생체중

Key words : CO₂ concentration control, CO₂ consumption rate, CO₂ supply rate, top fresh weight.

緒 論

材料 및 方法

당면한 농업의 문제점을 극복하는 한 방안으로 시설재배가 주목되고 있다. 시설재배에서는 단시간내에 고품질의 농산물을 안정적으로 대량 생산하기 위하여, 노지재배에서와는 다른 생육환경을 조성하고 있으며, 이러한 맥락에서 고농도의 탄산가스 施用도 이루어지고 있다.

고농도의 탄산가스 시용은 발아 촉진, 수량 증대, 이식시 뿌리의 빠른 활착, 꽃이나 과실의 크기 및 보존성 증대, 수확물의 균일한 품질유지 등의 효과가 있는 것으로 보고 되고 있다.^{1,4,6,7,9,10)} 특히 밀폐된 시설내에서 작물을 재배할 경우, 해가 뜬 뒤 30분 정도 지나면 탄산가스 결핍현상이 발생하여 정상적인 생장이 불가능하므로 인위적인 탄산가스 공급이 필요하다. 그리고 온도나 기타 환경을 최적조건으로 유지하는 노력에 비하여 탄산가스 시용은 그 비용이 저렴하고 수량증대 효과가 크다¹⁾. 따라서 현재 많은 시설재배 농가에서 탄산가스 施肥를 도입하고 있다.

그러나, 기존의 탄산가스 공급 방법은 시설의 밀폐정도, 작물의 생육상태 등을 고려하지 못하여 작물에 악영향을 주거나 탄산가스의 낭비를 초래하였다. 즉 지나치게 고농도의 탄산가스 환경을 유지하여 체내의 호르몬 機作, 氣孔開閉 機作 등에 악영향을 주어 오히려 생육장애를 유발하는 경우도 발생하였고^{4,6,10)}, 탄산가스의 장기시용에 따른 잎의 노화촉진 등 부작용으로 인하여 작물의 수량 및 품질을 저하시키는 경우도 초래하여 왔다¹⁾. 선진국에서 실용화 된 탄산가스 제어방법도 대부분 ON/OFF제어로 작물의 생육상태를 고려하지 못하고 있으며, 최근에 와서야 최적제어 이론을 도입하려는 시도가 이루어지고 있다.¹¹⁾ 국내에서는 탄산가스 시용의 초기 단계로 지금까지 구체적인 제어방법이나, 탄산가스 시용의 시작시기, 적정농도 등에 대한 연구가 매우 미흡한 실정이다. 따라서 환경변화에 민감하게 반응하는 작물의 성장지표를 제어의 피드백 신호로 활용함으로써 CO₂ 시용을 보다 효과적으로 수행하는 방법론적 연구가 요청되고 있다.

본 연구는 생육시기, 생체중, 탄산가스 농도 등에 따른 탄산가스 소비율의 변화를 연속적으로 측정 한 후, 이를 고려한 적정 제어 알고리즘을 개발함으로써 보다 경제적인 탄산가스 공급의 방법론을 제시하려는 목적으로 수행되었다.

가. 작물 생육 시스템의 구성

1) 육묘장치 제작

탄산가스의 농도, 생육시기 및 生體重에 따른 CO₂ 소비율을 정량화하기 위해서는 반복실험이 수행되어야 한다. 이때 육묘기의 생육환경에 의하여 처리효과가 왜곡될 수 있기 때문에 육묘기의 환경조건을 동일하게 유지할 수 있도록 육묘장치를 제작하여 사용하였다.

이 장치는 파종시기를 달리하여 재배할 수 있도록 3단으로 구성하였고, 480×450mm 크기의 재식판에 60mm간격으로 56개의 작물을 재배하였다. 또한 육묘장치에서 온습도 제어를 위하여 가열기와 냉각기를 개별적인 콘트롤러에 의하여 제어하였고, 광원은 10W 형광등 14개를 사용하였으며, 광주기 제어를 위한 주기설정용 타이머를 부착하였다. 챔버 내부재질은 조도 향상과 습기로 인한 부식의 방지를 위하여 스테인레스 스틸을 사용하였으며, 내외부 강판 사이에는 효율적인 온도제어를 위하여 발포형 단열재를 삽입하였다.

2) 완전제어형 인공생육장치

작물의 생육에 영향을 미치는 다른 환경요인을 일정하게 유지한 상태에서 탄산가스 농도만을 변화시킴으로써 생육시기에 따른 탄산가스 소비율을 정량화하기 위하여 완전제어형 인공생육장치를 이용하였다. 이 장치는 작물의 생육에 영향을 미치는 중요한 환경요인인 지상부 환경(빛, 온도, 습도, 탄산가스)과 지하부 환경(액온, EC, pH)을 제어 대상으로 설정하여 계측 및 제어를 수행할 수 있도록 개발한 것으로, 본 연구목적에 부합하도록 탄산가스 환경의 계측 및 제어분야에 중점을 두어 제작하였으며, 전체 구성도는 Fig. 1과 같다.

각 환경요인의 계측을 위하여 계측기에서 출력된 아날로그 신호는 신호처리용 증폭기와 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력시켰다. 중앙처리장치인 개인용 컴퓨터(IBM-AT)에서는 각 환경간의 상호관계를 고려한 복합제어 알고리즘을 이용하여 측정치와 설정치간의 차이에 따라 계산된 제어신호를 종말 작동장치로 보내어 원하는 환경을 유지할 수 있도록 하였다.

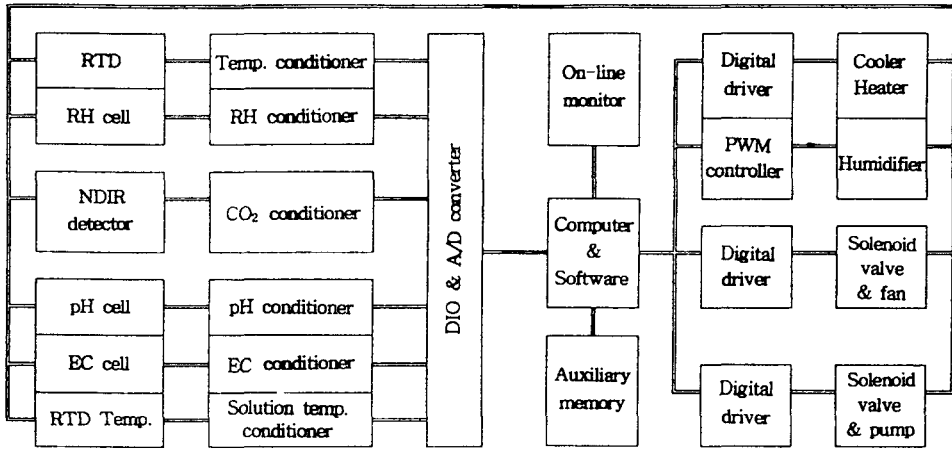


Fig. 1. Block diagram of fully-controlled plant growth system.

나. 탄산가스 제어 시스템의 구성

1) 탄산가스 농도의 계측

탄산가스 농도의 계측을 위해서, 본 연구에서는 연속측정이 가능하고 신호처리가 용이한 비분산적 외선법 방식의 탄산가스 분석기(Horiba GH-250E)를 이용하였는데, 이 장치의 주요 명세는 Table 1과 같다.

Table 1. Specifications of CO₂ analyzer.

Item	Specification
Measurement range	0 ~ 3000ppm
Repeatability	± 0.5% of FS
Response speed	Within 15 seconds
Output signals	4 ~ 20 mA
Air sampling ability	-200mAq ~ Atmosphere
Power supply	110V/220V 50/60Hz
Power used	20W
Operating temperature	5 ~ 40°C
Dimensions	W 222×D 85×H 262mm

이 분석기는 탄산가스가 4.3μm 파장의 빛을 잘 흡수하는 성질을 이용한 것으로³⁾, 수증기로 인한 측정치의 오차를 감소시키기 위하여 샘플 채취 유로상에 펠티어(Peltier) 효과를 이용한 냉각소자를 부착하여 수증기를 제거하였다. 또한 검출 셀의 오염을 막기 위하여 시료공기 채취부에 여과장치를 부착하였다. 시료공기의 채취는 작물이 광합성을

하는 부위인 잎부위에서 수행하였다.

계측기는 0~3000ppm의 탄산가스 농도에 대하여 4~20mA의 전류신호를 출력하므로, 이를 전압신호로 변환하는 신호처리용 증폭장치를 제작하여 사용하였다. 계측기의 교정을 위하여 豫備 動作 時間을 1시간으로 하여 N₂ 가스(0ppm CO₂)로 영점을 조정하였고, 스펠(span)은 2500ppm의 표준 CO₂ 가스를 이용하여 조정하였다. 한편 A/D 변환기의 값을 탄산가스의 농도로 환산하기 위하여 0ppm에서부터 1500ppm까지 100ppm씩 증가시키며 회귀식을 구하였는데, Fig. 2에 결과를 나타내었다.

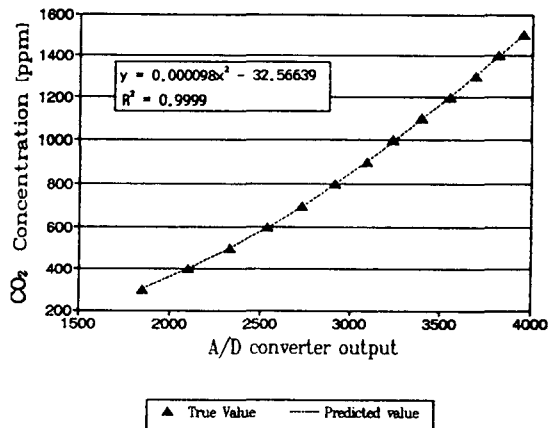


Fig. 2. Calibration curve of A/D converter output vs. CO₂ concentration.

2) 탄산가스 농도 제어 시스템 구성

본 연구에서는 고농도의 탄산가스 환경을 구현할 수 있고, 정밀한 농도 제어가 가능하며, 유해가스의 피해가 없는 액화탄산가스를 이용하였고, 농도제어를 위하여 설정농도와 측정된 농도와의 차이가 발생했을 경우, 펄스형태로 일정한 시간 동안 솔레노이드 밸브를 개방하여 부족한 양을 공급하는 방식을 채택하였다^{4,6)}. 이때 설정농도와 측정농도간의 차이에 무관하게 개방시간은 일정하게 유지하였고, 빠른 응답특성을 갖도록 개폐간의 간격을 농도차에 비례하여 가감시켰다. 또한 탄산가스 재공급 여부는 측정기의 측정 지연시간과 공급된 탄산가스의 확산시간을 감안하여 한번 탄산가스를 공급하고 1분 후의 농도를 기준으로 결정하였다.

제어를 위한 종말 작동장치는 탄산가스 용기, 레귤레이터, 유량조절 밸브와 솔레노이드 밸브로 구성하였다. 압력 유지용 레귤레이터는 솔레노이드를 개폐할 때 액화탄산가스가 기화하면서 과냉각에 의한 폐쇄현상을 방지하기 위하여 가열형을 사용하였다. 공급되는 탄산가스의 양은 솔레노이드의 개방시간, 레귤레이터의 압력 및 유량조절 밸브의 위치를 조절하여, 한번 개방할 때 증가되는 탄산가스의 농도가 약 30ppm이 되도록 설정하였고, 공급된 탄산가스가 빠르게 확산될 수 있도록 순환 팬 바로 위에 공급하였다. Fig. 3에 탄산가스 측정 및 제어시스템의 구성도를 나타내었다.

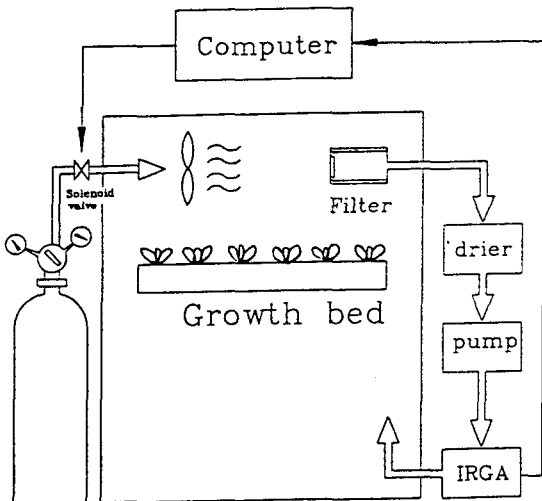


Fig. 3. Schematic diagram of CO₂ control system.

다. 생장정보 계측 시스템 구성

1) 탄산가스 소비율 계측

본 연구에서는 생육상태를 대표하는 물리량으로 탄산가스 소비율을 선정하였다. 탄산가스 소비율은 작물에 의하여 흡수된 탄산가스의 양으로, 이론적으로 단위시간당 작물의 전체 광합성량인 總光合成速度에서 호흡속도를 뺀 純光合成速度와 같다. 탄산가스 소비율을 측정하기 위하여, 본 연구에서는 작물이 생육하는 생육장치를 하나의 同化箱으로 간주하여 시스템내에서 탄산가스의 收支를 구하는 同化箱法(enclosure methods)을 적용하였다^{4,5,6,8)}. 본 연구에서 사용한 작물생육 시스템 내부의 탄산가스 수지를 식으로 나타내면 식(1)과 같다⁶⁾.

$$\frac{V}{22.4} \cdot \frac{dc}{dt} = \frac{v}{22.4}(C_1 - C_2) + B - P \quad (1)$$

여기에서,

V : 동화상의 체적 [l]

v : 통기량 [l/sec]

$\frac{dc}{dt}$: 시스템내의 탄산가스 농도의 시간당 변화율 [ppm/sec]

C_1, C_2 : 동화상 입구 및 출구의 탄산가스 농도 [ppm]

B : 동화상에 인위적으로 공급되는 탄산가스 유입 속도 [$\mu\text{mol/sec}$]

P : 순광합성 속도 [$\mu\text{mol/sec}$]

본 연구에서 채택한 반폐쇄식 측정법은 시스템 내부의 탄산가스 농도를 일정하게 유지하고, 유입되거나 유출되는 공기가 없도록 시스템을 밀폐시켰으므로

$$v = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dc}{dt} = 0 \quad (3)$$

이 되며, 이와 같은 경우에 탄산가스 소비율을 나타낸 식(1)은 식(4)와 같이 정리될 수 있다. 즉, 일정한 농도를 유지하기 위하여 추가로 공급된 탄산가스 양이 식물이 흡수한 탄산가스의 양과 같게 된다.

$$P = B \quad (4)$$

반폐쇄식 동화상법을 작물 생육장치에 적용하기 위해서 본 연구에서는 열전도도식 누출 탐지기 (Leakseeker 96)를 이용하여 생육장치의 누출부위를 찾아 실리콘으로 밀폐하였으며, 문틈을 통한 누출을 막기 위하여 밀봉재로 바세린을 사용하였다. 조치가 불가능한 미세한 누출량은 소프트웨어적으로 처리하였다.

2) 지상부 생체중 계측

탄산가스 소비율과 함께 작물생육의 대표적인 지표로 지상부의 생체중을 선정하여 계측하였다. 이때 생체중을 비파괴적인 방법으로 연속 계측하기 위하여 Fig. 4와 같이 작물이 자라는 栽植板을 하중변환기가 지지하도록 구성하여 하중에 비례하는 전압을 측정하였다.

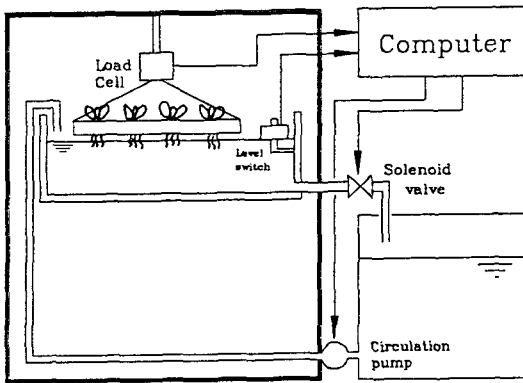


Fig. 4. Apparatus for monitoring top fresh weight

이 장치에서는 하중변환기로 20kg까지 측정할 수 있는 로드셀(봉신로드셀, DBBP-20)을 사용하였고, 재식판은 계측상의 오차를 방지하기 위하여 하중이 작고 힘이 적은 고밀도 스티로폼을 사용하였다. 작물 개체단위의 생체중 변화는 매우 미소하기 때문에 증폭 및 평균효과를 위해 공시작물 20개의 생체중을 동시에 측정하였다. 재식판은 온도나 하중에 따라 길이의 변화가 없고 충분한 강도를 갖는 강선을 사용하여 로드셀에 매다는 방식을 채택하였으며, 수평 유지를 위하여 강선의 길이를 조절할 수 있도록 제작하였다.

연구에 사용된 로드셀은 4개의 스트레인 게이지를 풀브리지(full bridge)로 구성한 것으로, 컴퓨터 인터페이스를 위하여 Fig. 5와 같은 스트레인 증폭회로를 설계 제작하였다. 생체중 계측 시스템의 較定을 위하여 무게를 알고 있는 분동을 재식판에

가감하여 올려 놓고 이때의 A/D 변환값을 측정하여 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다.

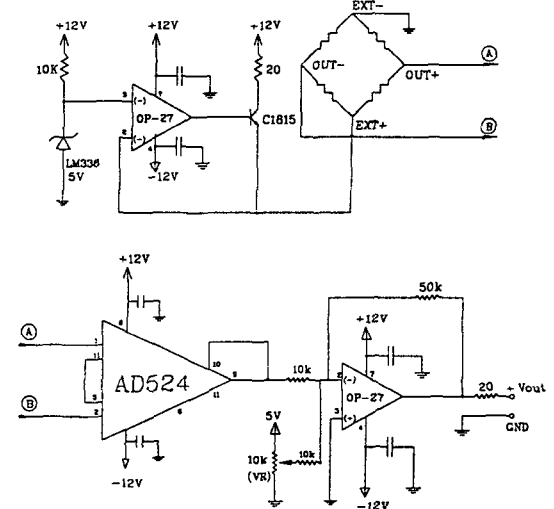


Fig. 5. Circuit diagram of strain amplifier.

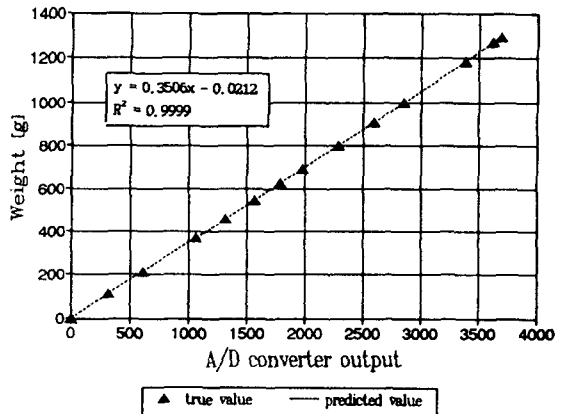


Fig. 6. Calibration curve of A/D converter output vs. fresh weight.

또한 부력의 영향을 배제하기 위하여 리드(reed) 스위치와 자석으로 구성된 레벨 스위치를 부착하여, 양액 배출구에 있는 솔레노이드 밸브를 개폐시킴으로써 일정한 수위가 유지되도록 제어하였다.

라. 생육 실험

청치마 상추(Lactuca sativa L., 농우종묘)를 공시작물로 선정하였으며, 파종시의 배지는 훈탄을 사용하였다. 파종 직후에는 물만을 공급하였고, 6~7일이 경과한 뒤부터 배양액을 공급하였으며, 본엽이

2~3개 나오면 재식간격을 넓게 하기 위하여 이식을 실시하였다. 이식 후 약 20일이 경과한 후에는 생육실험을 위하여 인공생육장치에 각 작물간의 간격을 120mm로 하여 정식하였다. 육묘과정은 모두 육묘장치 내에서 수행하였고, 이때의 온도는 20℃로 유지하였다. 실험에 사용한 배양액은 엽채 및 화훼류용으로 상품화된 물푸레 1호(대유화학)를 희석하여 사용하였는데, 이때 배양액의 EC는 1.3 mS/cm, pH는 6.8 정도로 하였다.

생육장치에서는 실제 재배환경을 감안하여 적절한 광주기를 주었는데, 주간은 16시간, 야간은 8시간으로 설정하였다. 주간 환경요인의 설정치는 조도 18,000~20,000 lux, 온도 22℃, 상대습도 80%, 양액 온도 18℃, 전기전도도 1.8 mS/cm, pH 6.8로 하였다. 이때 온도는 탄산가스의 처리효과를 보다 크게 하기 위해서 일반적인 재배적온보다 2℃ 높게 설정한 것이다. 한편, 야간이 시작되는 30분 동안에는 22℃에서 천천히 18℃로 낮추었고, 다시 주간으로 바뀌기 전 30분 동안에 18℃에서 22℃로 천천히 온도를 올려 급격한 온도 변화를 초래하지 않도록 하였다. 과도기를 제외한 야간에는 호흡에 의한 손실을 줄이기 위하여 18℃로 유지하였고 나머지 환경요인은 주간과 동일하게 유지하였다.

배양액은 한국원시액을 사용하였다. 작물을 한번 생육시키고 난 후에는 아염소산나트륨(sodium hypochlorite) 1% 용액을 이용하여 양액 순환계통 및 재배판, 생육베드 등을 소독하였다.

탄산가스의 처리는 정식 후 탄산가스 농도를 3개 수준(500, 1000, 1500ppm)으로 설정하여 각 수준 별로 수확할 때까지 일정하게 농도를 유지하며 매일 일정한 시간 동안 처리하였고, 그때의 탄산가스 소비율은 컴퓨터에 의하여 측정하고 저장하였다. 솔레노이드 밸브를 1회 개방할 때 공급되는 탄산가스의 양은 30 ± 3 ppm으로 설정하였으므로 공급된 탄산가스의 양은 솔레노이드 밸브를 개폐한 횟수를 측정하여 구하였다.

結果 및 考察

가. 생장정보 계측 시스템의 성능

탄산가스 농도 계측장치의 정확도 검증을 위하여 표준 시험조건에서 탄산가스 농도를 100ppm씩 증가시키는 것을 5회 반복하여 측정한 결과, 500ppm~

1500ppm 범위에서 $\pm 1.3\%$ FS 이하의 정도를 나타내었다.

탄산가스 농도에 대한 제어성능은 각 수준(500 ppm, 1000ppm, 1500ppm)에서 ± 20 ppm으로 나타났다. 또한 500ppm에서 1000ppm으로 농도를 상승시키기 위해서는 약 20분이 소요되었고, 1000ppm에서 1500ppm으로 상승시키는 데는 약 30분 정도의 시간이 소요되었다. 이러한 현상은 고농도에서 생육장치 외부로의 확산속도가 빠르기 때문에 발생한 것으로 해석된다. 이상의 계측성능과 제어성능을 조합하여 탄산가스 소비율 계측 시스템의 정도를 구하였는데, 500ppm~1500ppm에서 ± 15.4 mgCO₂/hr로 나타났다. 생체중 계측 시스템의 성능을 검증하기 위하여 무게를 정확하게 알고있는 분동을 재식판 위에 차례로 올리는 것을 5회 반복하여 출력값을 관찰하였다. 그 결과, 측정오차는 전체 측정범위의 약 0.3%인 ± 4.3 g 이하로 나타났다.

나. 탄산가스 농도에 따른 작물의 반응

탄산가스 농도를 3개 수준으로 설정한 각각의 처리에서 탄산가스 소비율의 변화는 Fig. 7과 같이 나타났다. 모든 처리에서 정식후 약 5일까지는 탄산가스 소비율의 증가량과 각 농도간 차이가 크지 않았는데, 뿌리 활착이 이루어지는 시점과 일치하는 것으로 보아 이식에 의한 스트레스를 극복하는데 걸리는 시간으로 생각된다. 따라서 초기에는 탄산가스를 고농도로 사용하더라도 광합성속도의 증대 효과가 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다. 정식후 약 5일이 지나면 모든 처리에서 급격하게 탄산가스 소비율이 증가하는데 500ppm의 경우 약 11일이 지나면 그 증가추세가 감소하고, 1000ppm은 약 10일, 1500ppm은 약 9일이 경과하면 동일한 현상이 나타났다. 이는 상추의 엽면적이 급격히 증가하여 이 시점에 이르면 고정된 정식간격에 의하여 개체간에 빛을 가리는 잎이 많이 발생하게 되므로 광합성에 참여하는 잎이 제한되어 탄산가스 소비율의 증가가 나타나지 않는 것으로 생각된다.

농도에 따른 생체중의 변화는 탄산가스 소비율의 변화와 유사하게 나타났는데, 정식후 약 5일까지는 미약하게 증가하다가 그 후 급격한 증가추세를 보였다. Fig. 8에서도 알 수 있듯이 본 실험에서와 같은 정식간격을 유지할 경우, 상추의 지상부 생체중이 개체당 약 25g정도 되면 상대적인 생장속도의 증가량이 둔화되며 이 시점이 탄산가스 소

비율이 둔화되는 시점과 유사함을 알 수 있다. 이때 상대적 성장속도는 하루동안에 증가한 생체중에 현재의 생체중에 대한 백분율로 나타낸 것이다.

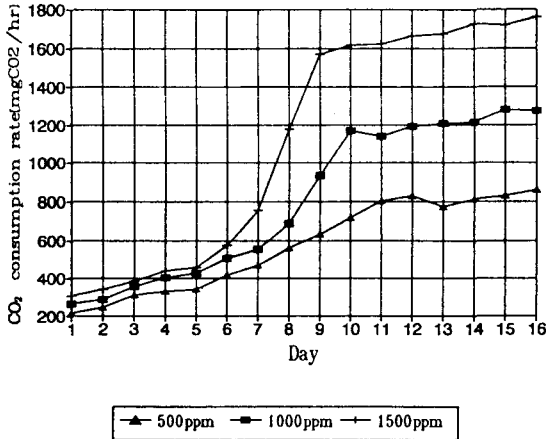


Fig. 7. Changes in CO₂ consumption rate.

성장속도의 상대적 변화는 탄산가스 소비율의 변화보다 약 하루정도 늦게 생육환경의 변화를 표현하므로, 생육환경이나 생육상태의 변화에 따른 적절한 탄산가스 공급량의 조절을 위해서는 탄산가스 소비율의 변화를 주된 피드백 신호로 활용하는 것이 타당함을 알 수 있었다. 그러나 생육단계에 따른 탄산가스 소비율의 변화 양상이 성장속도 및 생체중의 변화에 밀접한 관계가 있으므로 소비율의 변화양상을 예측할 때 고려하여야 할 지표라 판단되었다.

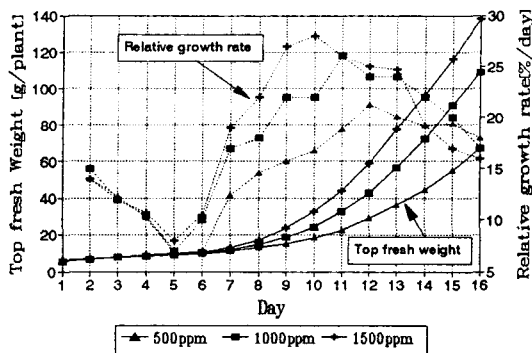


Fig. 8. Changes in top weight and relative growth rate.

다. 제어모델 개발

생육실험을 통하여 얻은 자료로 부터 탄산가스 소비율의 변화를 정량화한 회귀식을 구하기 위하여 통계용 프로그램인 SAS(Statistical Analysis System)를 이용하였으며, 탄산가스 소비율을 예측하는 회귀모델의 독립변수로는 탄산가스 농도, 생육시기, 생체중, 상대적 성장속도 등으로 설정하였고, 각 독립변수간의 상호작용을 고려하였다. 실험에 사용된 인공생육장치에서 상추를 생육시킨 경우의 회귀모델은 식(5)와 같고, 계수 $a_0 \sim a_9$ 는 Table 2에 나타내었다. 이때 탄산가스 소비율은 생육장치 내에 심은 40개의 상추가 실제로 흡수한 총 탄산가스 양을 대상으로 하였으므로 시스템의 누출률에는 영향을 받지 않는 값이다.

$$C = a_0 + a_1X_1 + a_2\ln(X_1) + a_3X_2 + a_3X_2^2 + a_5X_3 + a_6X_3^2 + a_7X_4 + a_8X_4^2 + a_9X_3X_4 \quad (5)$$

여기에서

C : 탄산가스 소비율 [mgCO₂/40plant·hr]

X₁ : 탄산가스 농도 [ppm]

X₂ : 생육시기 [day]

X₃ : 지상부 생체중 [g/plant]

X₄ : 상대적 성장속도 [%/day]

$a_0 \sim a_9$: 계수

Table 2. Coefficients of the regression equation for CO₂ consumption rate.

a_0^{**}	a_1^{**}	a_2^{**}	a_3^{**}	a_4^{**}	a_5^{**}
2698.6776	0.6613	-497.3997	53.0189	-0.4486	49.2049
a_6^*	a_7^{**}	a_8^{**}	a_9^{**}	R ²	C(p)
-0.0982	-36.3797	2.5038	-0.0497	0.9837	8.8606

* Significant at P = 0.05, ** Significant at P = 0.01

효과적인 탄산가스 제어 알고리즘의 개발을 위해서 탄산가스 소비율과 동시에 공급률 및 탄산가스 농도에 따른 누출률을 측정하여 식(6), 식(7)과 같은 회귀식을 얻었다. 이때 각 계수는 Table 3에 나타내었다. 누출률에 대한 회귀식은 시스템과 대기간의 농도차에 비례하여 증가한다는 Fick의 법칙에 잘 부합되었으며, 공급률을 나타내는 회귀식은 공급된 탄산가스가 작물에 흡수되지 못하고 생육

장치 밖으로 새어 나가는 누출률과 작물에 의해 소비되는 소비율의 합으로 표시됨을 나타내었다.

$$L = b_0 X_1 + b_1 \quad (6)$$

$$S = c_0 C + c_1 L + b_2 \quad (7)$$

여기서 L : 탄산가스 누출율 [mgCO₂/hr]
 X₁ : 탄산가스 농도 [ppm]
 S : 탄산가스 공급율 [mgCO₂/hr]
 C : 탄산가스 소비율 [mgCO₂/hr]
 b₀~b₁, c₀~c₂ : 상수

Table 3. Coefficients of the regression equation for leak & supply rate.

계수 종속변수	b ₀ (c ₀)	b ₁ (c ₁)	b ₂ (c ₂)	R ²
누출율**	0.6359**	-253.5751**		0.9951
공급율**	0.9832**	1.0151**	-3.7614*	0.9962

* Significant at P = 0.05, ** Significant at P = 0.01

라. 제어 알고리즘 개발

이상에서 얻어진 탄산가스 소비율과 공급률의 모델을 이용하여 경제성이 인정되는 수준에서 적정 생육속도를 얻기 위한 탄산가스 제어 알고리즘을 개발하였다. 탄산가스의 농도를 증가시키면 소비율도 증가되나 그 증가분은 점차로 감소하여 어느 이상 공급되면 소비율의 증가가 발생하지 않는 이른바 수확체감의 법칙을 따른다. 그러나 공급률과 소비율의 관계는 단조증가 함수이므로 탄산가스의 공급량을 줄여 생산 비용을 감소시키면서, 탄산가스 소비율을 최대로 하여 생산량을 증대시키는 것은 상반된 제어행위를 요구한다. 따라서 이러한 목적을 달성하기 위해서 최적제어의 개념을 도입하여 식(8)과 같이 우선순위에 따른 가중치를 설정하였다.²⁾

$$S = kC \quad (8)$$

여기에서 k : 가중치

S : 탄산가스 공급율

C : 탄산가스 소비율

이때 가중치 k를 결정하는 주요요인으로 재배 작물에 따른 탄산가스 소비율, 탄산가스 소비율의 증가가 최종수확물의 수량증가에 기여하는 정도, 재배작물의 가격, 탄산가스 공급형태, 탄산가스 공급량, 탄산가스 공급 비용, 최초 시설투자비, 시설의 환기정도 등이 있다. 가중치 k값은 이러한 상황을

종합적으로 고려하여 재배자가 결정해야 하며, 가중치가 결정되면 식(8)을 탄산가스 농도에 관하여 정리한 후 수치해석적 방법으로 해를 구할 수 있다. 본 연구에서 사용되었던 작물과 생육제어 시스템의 k값은 약 2.0 정도로 하였고, Newton-Raphson법을 이용하여 매일의 설정치를 결정하였다.

제어의 목적치인 탄산가스 농도가 결정되면, 예측되는 탄산가스 소비율과 누출율, 시설의 용적 등을 고려하여 공급되어야 할 탄산가스의 양을 미리 계산하여 제어하는 피드퍼워드(feedforward)제어용 소프트웨어를 작성하였다. 이러한 제어방법을 도입함으로써 탄산가스의 과잉공급을 막아 고농도에 의한 장애를 방지할 수 있고, 탄산가스의 낭비를 줄일 수 있으며, 원하는 농도를 안정적으로 유지할 수 있게 되었다. 아울러 생육상태를 대표하는 탄산가스 소비율, 지상부 생체중을 연속적으로 측정하여 제어의 피드백 신호로 활용함으로써 생육상태의 변화에 따른 탄산가스 요구량의 변화를 감안한 종합 제어 시스템을 완성하였다. 본 연구에서 개발된 탄산가스 소비율을 고려한 제어 시스템의 흐름도는 Fig. 9에 나타내었다.

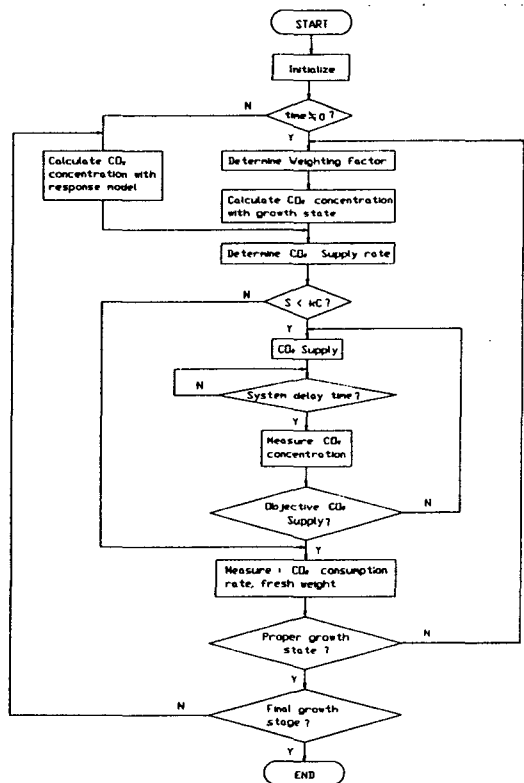


Fig. 9. Flow chart of CO₂ control software.

개발된 제어 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 검증실험을 수행 하였는데, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 이때 각 수치는 가장 높은 탄산가스 소비율과 탄산가스 공급율을 보인 설정치 1500ppm을 100으로 보았을 때, 설정치를 각각 500ppm, 1000ppm으로 일정하게 유지한 경우와 개발된 제어 알고리즘을 적용한 경우의 탄산가스 공급량, 소비량, 최종수확물의 생체중을 상대적으로 비교한 것이다.

개발된 알고리즘을 사용하였을 때 탄산가스의 공급량은 1000ppm을 계속 유지한 경우에 비하여 9.4% 감소한 반면, 소비량과 생체중은 각각 2.0%, 1.7% 정도로 그 감소가 매우 미약한 것으로 나타났다. 또한 설정치 1500ppm에 비하면 공급량은 47.6%, 소비량은 29.5%, 생체중은 22.8% 감소한 것으로 나타나 탄산가스 공급량은 대폭적으로 감소하고, 탄산가스 소비량과 생체중의 감소량은 비교적 적음을 확인하였고, 전 생육기간동안 고농도에 인한 생육장애는 나타나지 않았다.

Table 4. Performance of developed CO₂ control algorithm.

CO ₂ concentration	CO ₂ Supply	CO ₂ consumption	Fresh weight
500ppm	57.4	72.3	61.7
1000ppm	100	100	100
1500ppm	161.8	137.9	126.7
CO ₂ control algorithm	84.8	92.7	97.8

要約 및 結論

본 연구는 생육시기, 생체중 및 탄산가스 농도에 따른 탄산가스 소비율의 변화를 정량화시킨 후, 이 모델을 이용한 탄산가스의 적정 제어 알고리즘을 개발하려는 목적에서 수행되었다. 이를 위하여群落을 대상으로 탄산가스 消費率 및 생체중을 비파괴적으로 연속 계측할 수 있는 시스템을 구성하여生育時期에 따른 작물의 탄산가스 要求量을 구명하였고, 이를 토대로 탄산가스 공급량을 제어하는 알고리즘을 개발하였는 바, 그 결과를 요약하면

다음과 같다.

- 가. 반폐쇄식 동화상법을 적용하여 탄산가스 소비율을 측정된 결과, 측정오차는 500ppm~1500ppm에서 $\pm 15.4\text{mCO}_2/\text{hr}$ 이하로 나타났다.
- 나. 생체중 측정 시스템은 로드셀을 이용하였고 부력의 영향을 제거하기 위하여 리드스위치를 이용하여 양액 수위를 제어하였는데, 이 장치의 오차는 0~1400g에서 $\pm 4.3\text{g}$ 이하로 나타났다.
- 다. 자동제어에 활용할 수 있도록 탄산가스 소비율, 누출률을 작물의 생육시기, 생체중, 성장속도, 탄산가스 농도에 대하여 정량화시킨 공학적 모델을 개발하였다.
- 라. 제어의 안정성을 유지하기 위하여 피드퍼워드 제어를 채택하였고, 생육상태의 변화에 대응하기 위하여 탄산가스 소비율과 생체중을 피드백 신호로 활용하는 제어 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 생육실험을 수행한 결과, 탄산가스 공급률을 대폭 감소시킨 상태에서도 생체중의 감소는 비교적 적음을 확인하였다.

引用 文 獻

1. 李龍範. 1991. CO₂長期施用이 토마토의 生育, 無機養分 吸收, RuBP Carboxylase의 活性 및 光合成에 미치는 影響. 서울대학교 박사학위 논문.
2. 趙鏞珍, 高學均, 朴在福. 1991. 고추의 건조과정 최적화에 관한 연구. 한국농업기계학회지. 16(4) : 272-283.
3. 洪淳昊. 1990. 作物 生産 自動化를 위한 複合環境計測 시스템 開發. 서울대학교 석사학위 논문.
4. 橋本 康. 1987. 植物環境制御入門. オーム社. 東京.
5. 橋本 康. 1990. 바이오시스템における計測・情報科學. 養賢堂. 東京.
6. 矢吹萬壽 외 8인. 1985. 農業環境調節工學. 朝倉書店, 東京.
7. Kimball, B. A. 1983. Carbon dioxide and agricultural yield : An assemblage and analysis of 430 prior observations. Agron. J. 75 : 779-788.

8. Long, S. P. and J. E. Hallgren, 1985. Measurement of CO₂ assimilation by plants in the field and the laboratory. In : J. Coombs et.al(editor) Techniques in bioproductivity and photosynthesis. 2nd edition. Pergamon press. Oxford.
9. Michael A. Porter and Bernard Grodzinski. 1985. CO₂ enrichment of protected crops. Horticultural Reviews. Vol 7. 345-398.
10. Nelson, Paul V. 1991. Greenhouse operation and management. Prentice Hall. Englewood Cliffs.
11. Van Henten, E. J. and J. Bontsema, 1991. Optimal control of greenhouse climate. IFAC Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture. Japan. pp. 27-32.

학 회 광 고

한국생물생산시설환경학회에서는 본 학회지인 “生物生産施設環境”에 게재할 원고를 아래와 같이 모집하고 있사오니 많은 투고를 바랍니다.

- 아 래 -

1. 원고의 종류 : 논문, 논설, 자료, 강좌, 국제회의보고, 신간소개, 기타
2. 작 성 요 령 : “아래한글”을 사용하여 디스켓에 수록할 것.
기타사항은 논문투고요령 참조할 것. 단, 표작성의 경우는 전산조판의 효율화를 위하여 가로줄만 칠것(Box를 만들지 말것).
3. 접 수 내 용 : 최초의 제출부수는 사본 3부(2부 : 심사용, 1부 : 반송용)
최종수정후(게재확정시)에는 원본 1부, 사본 1부 및 디스켓 1매만 제출
4. 접 수 시 기 : 제2권 제2호(12월 발행예정)에 게재할 원고는 10월 31일까지 이후 게재예정원고는 수시접수
5. 접 수 처 : 본 학회 사무국

* 회원동정에 관한 사항도 접수하고 있사오니 연락바랍니다.