

인공배지용 양액 조제 및 공급 자동화 시스템 개발

류관희 · 홍순호 · 오길근
(서울대학교 농업생명과학대학 농공학과)

Development of Automatic Nutrient-Solution System for Soilless Culture

Ryu, Kwan-Hee · Hong, Soon-Ho · Oh, Kil-Keun

Dept. of Agric. Engineering, Coll. of Agric. & Life Sciences, Seoul National Univ., Suwon, 441-744, Korea.

Abstract

Trickle application of nutrient solution to plants is widely used for hydroponics. The adequate mixing and uniform application of nutrient solution are important concepts affecting the design and operation of these systems.

The objective of this study was to develop an automatic control system which is able to mix the ingredients of nutrients at a desired level and to supply the solution uniformly to the plants by trickle application.

A prototype automatic nutrient-solution supply system was constructed and its performance was investigated through the experiments. The nutrient solution could be controlled with a small deviation from the objective values. The errors were 0.5°C for the temperature, 0.1 for pH, and 0.1mS/cm for the electric conductivity(EC), respectively. The uniformity of application from the emitters was also good with the coefficient of variation of 0.16, which was defined as the standard deviation divided by the arithmetic mean.

I. 서론

적절한 양액의 조제와 공급은 작물의 성장 속도 조절을 통한 적기출하와 수익 증대를 위해 매우 중요하다. 그러나, 작물의 성장특성은 작목마다 다르며, 성장단계에 따라서 작물이 필요로 하는 양분의 구성비가 다르다. 또한 같은 작물, 같은 성장 단계라 하더라도 일사량, 온실내 온도, 습도 등의 지상부 환경을 포함한 주위 환경, 그리고 사용된 배지의 물리 화학적인 성질과 양액의 액온, 산도, 이온농도, 용존산소량 등에 따라 근권부에서의 양분 흡수 특성이 달라진다. 양액 조제시 고려되는 양액 상태 변수는 그 처리 효과가 정량적으로 확인된 액온, 산도(pH), 이온농도(전기전도도, EC), 용

존산소량(DO) 등이다.

양액 공급방식으로는 담액식, 분무식, 박막 수경식, 저면 급액식, 점적 급액식 등이 이용되고 있으나, 인공 배지경에는 점적 급액식이나 저면 급액식이 적합하다. 점적 급액식은 저면 급액식에 비하여 작물 한 그루씩 급액할 수 있기 때문에 병원균의 만연이 적어 병해를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 장치가 간단하고 펌프나 밸브를 조정할 필요가 없으며 설치, 관리 수리가 간단한 장점이 있다. 그러나 점적 급액식은 점적 파이프를 따라서 점적 파이프 내의 압력 손실 등으로 인하여 공급량의 차이가 생기기 때문에 모든 작물에 균일한 양을 공급하기가 어려운 단점을 가지고 있다.

본 연구의 목적은 양액 상태 변수를 설정값의 적정 범위에서 제어하기 위하여 컴퓨터를 이용한 양액 자동조제장치

와 양액을 점적식으로 균일하게 공급하기 위한 양액자동공급장치를 개발하는데 있다.

II. 재료 및 방법

1. 양액 자동 조제 및 공급 장치

양액의 자동 조제 및 점적식 공급 장치의 전체 구성도는 Fig. 1과 같으며, 각각의 장치의 구성은 다음과 같다.

가. 양액 자동 조제 장치의 구성

1) 계측 시스템

가) 산도 (pH)

본 연구에서는 유리 전극용 내부 전극과 기준 전극에 모

두 전해법으로 제조한 은-염화은 전극을 사용하여 동일한 지지관에 봉입시킨 복합 전극(combination electrode)을 선정하였다. 본 연구에서 제작한 pH 센서의 신호처리 회로는 dual FET인 U421과 저 드리프트 연산증폭기 OP-27을 이용한 임피던스 변환용 차동 증폭회로와 U421의 안정된 동작을 위한 FET 정전류원, 그리고 접지점에 대한 기준 전극 및 차폐선의 전위를 가변시키기 위한 조정회로를 결합하여 구성한 것이다.

전압/pH 변환회로는 초단 증폭회로에서 처리된 pH 센서 전극간의 기전력 신호를 이에 해당하는 pH로 변환시키는 역할을 수행하며, 자동적인 온도보상을 위하여 온도 감응 저항을 이용한 보상회로를 부착하였다. pH는 5.5에서 7.5까지의 범위에서 측정이 가능하도록 가변저항기에 의해 전극 쌍의 등전위 pH를 조절할 수 있도록 제작하였다.

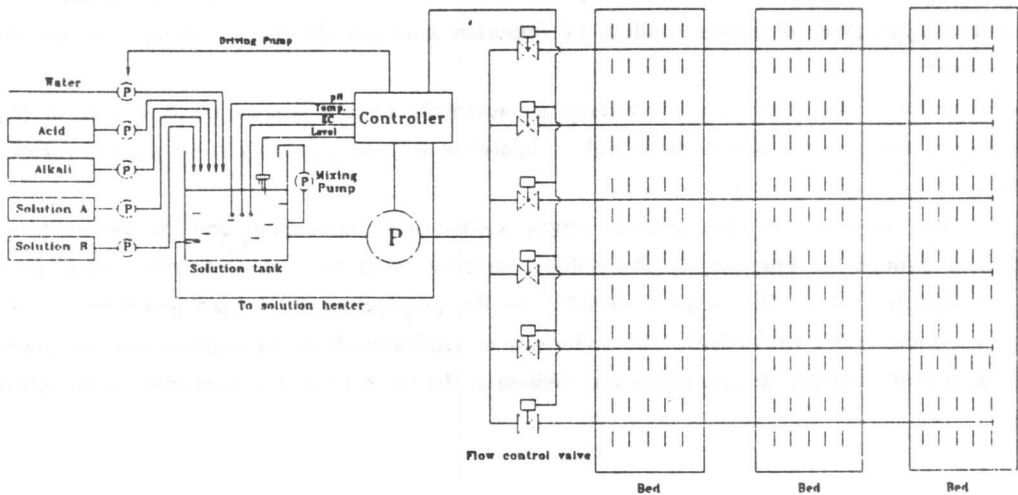


Fig. 1. 자동 양액 조제 및 공급 자동화 시스템의 구성도

나) 전기전도도(EC)

작물에 필요한 각종 무기물을 조합시켜 제조된 양액에는 여러 종류의 전해질이 용해되어 이온 형태로 존재하기 때문에 두 전극의 양단에 전위차가 있을 경우, 전하입자의 이동에 의해 전류가 흐르게 된다. 이때 전극 사이를 통하여 흐르는 전류는 양액중에 포함된 무기양분의 농도와 비례하기 때문에 양액의 조성변화에 따라 두 전극 사이의 전기전도도(EC)가 변화하게 된다.

전극판의 직경을 0.32 cm, 전극간의 거리를 1.0 cm로 설계하여 셀 상수가 1.0cm²가 되도록 하였다. 이때 전극 인입선을 지지하는 케이싱은 외부 리드선과의 기밀유지를 위

해 연결유리로 제작했고, 전극 재질은 내반응성이 매우 우수한 백금(Pt)을 사용하였다.

검출셀을 통과한 전류는 수십~수백 μA 범위의 교류신호이므로, 먼저 적절한 이득을 가진 증폭기에 의해 전압으로 변환된 후, 정밀 정류회로에 의해 직류로 변환되어야 한다.

다) 용존산소량(DO)

본 연구에서 사용한 용존산소량 검출장치는 대전극으로 사용한 납이 알칼리 전해액 중에서 산화되고, 양액중의 산소가 반응전극에서 환원되면서 산소농도에 비례하는 전류를 발생시키는 갈바니 셀(galvanic cell)의 원리를 이용하였다.

센서가 침적되는 양액의 온도에 따라 산소분자가 센서의 격막을 투과하는 속도가 변화하여 동일한 용존산소량에 비례하여 반응전류가 증가하는 경향을 나타내므로, 온도에 반비례하는 이득특성을 갖도록 보상회로를 부착하여야 한다. 따라서 개발한 DO 신호처리 회로의 종단에는 pH측정에서와 마찬가지로 측온 저항체를 이용한 온도보상 장치를 부가하였다.

라) 온도

온도검출 소자로는 측온 저항체를 선택하였다. 이 방식은 온도에 따라 금속의 전기저항이 변화하는 현상을 이용한 것으로, 별도의 보상장치를 부착하지 않아도 절대적인 온도의 측정이 가능하기 때문에 상온범위에서의 정밀측정에 유리하다. 본 연구에는 정확도와 재현성이 우수하며, 내구성이 매우 높은 백금 저항체를 이용하였으며, 0℃에서의 100Ω의 저항치를 갖는 Pt-100을 선정하였다.

마) 수위 센서

양액 탱크는 1회 공급량을 보유하고 있어야 하고, 탱크내의 양액 양을 80%수준으로 유지하기 위하여 수위센서를 설치하였다. 수위 센서는 누설전류를 이용하는 전극봉 방식을 사용하였다.

2) 양액 탱크

양액 탱크의 크기의 선정에 있어서 고려해야 될 요소는 재배 작물의 실제 요구수량, 재배 면적, 재식 밀도, 급액 설계 등이다. 작물의 주당 요구수량은 주위의 여러 생육환경 요인에 따라 계속적으로 변화하므로 1개월 정도의 평균수분 요구량으로 계산할 수 있다. 재배 면적과 재식 밀도로 부터 재식 주수를 구하며 작물 한 주당 1회에 요구되는 양액량을 곱하여 1회 급액에 필요한 급액량을 구한다. 여기에서, 재배 면적을 몇개의 구역으로 분할 하여 급액 주기를 달리하면 1회 공급에 필요한 급액량을 조절할 수 있으며, 양액 탱크의 용량을 1회 급액량보다 약 1.25배 큰 용량을 선택한다면 작물 재배에 필요한 양액탱크의 용량의 계산은 식(1)로 표시할 수 있다.

$$\text{양액 탱크의 용량} = \frac{\text{재식밀도} \times \text{재배면적} \times \text{주당요구수량}}{\text{급액설계상 분할한 면적의 갯수}} \times 1.25 \quad (1)$$

본 연구에서는 보급형 온실을 기준으로 하여 설계하였다. 작목을 토마토로 하였을 때, Table 1과 같은 급액설계가 가능하며, 이에 따른 양액 탱크의 용량은 다음과 같이 계산

된다.

Table 1. 급액설계

재 배 면 적	600 평 (1983.42m ²)
재 식 밀 도	13.2 주/평 (4주/m ²)
주 당 요 구 수 량	76cc/주, 1회
1회 공급면적	전체 면적의 1/3

$$\text{양액 탱크의 용량} = \frac{13.2 \times 600 \times 0.076}{3} \times 1.25 = 250.8 [l]$$

3) 농축 배양액 탱크

농축 배양액 탱크의 용량은 위에서 계산된 1회 급액량을 조절하는데 필요한 농축 배양액량을 결정한 후, 작물 생육 주기 전체 동안의 급액횟수를 곱하여 계산하였다. 양액 조제시 요구되는 농축 배양액은 비료염을 약간의 물에 희석하여도 무방하나, 농축 배양액 공급용 정량펌프의 성능을 고려하여 농도를 대략적으로 맞추어야, 양액 조제 시스템의 안정성과 정확성을 유지시킬 수 있다. 적정 배합을 위하여 본 연구에서는 농촌진흥청 원예시험장 추천액 양액 조성비를 이용하였다.

4) 물 공급 펌프

물 공급 펌프의 용량은 급액 설계와 1회 급액량에 의하여 결정되며, 각 급액 간의 시간에서 양액 조제에 필요한 시간을 뺀 시간동안에 양액 탱크내에 1회 급액량에 필요한 물을 공급할 수 있는 용량보다 크게 하였다.

5) 정량 펌프

본 연구에서는 농축배양액 A, B, 산도 조절용 산, 알칼리를 공급하기 위하여 4개의 정량펌프를 사용하였다. 실험에 사용된 정량펌프는 전자기적 회로에 의하여 구동되는 용적형 펌프이다. 정량펌프의 자세한 명세는 다음 Table 2에 나타내었다.

Table 2. 정량펌프의 명세

제 조 원	ITALY, BlackStone Pumps
작동원리	다이어프램을 이용한 용적형펌프
사용전압	110 V
정격 사용 압력	2 bar
도출량	4.8 l/min (조절 가능)

6) 순환 펌프

순환 펌프는 양액 탱크내의 양액을 흡입하여 다시 양액 탱크로 떨어뜨림으로써, 양액 내의 용존산소량을 증가시키고 균일한 조제가 이루어지도록 하기 위해 양액을 혼합시키는 역할을 한다. 작물은 뿌리로 부터 산소를 흡수하여 근권에서 호흡을 하며 그 결과 양수분을 흡수에 필요한 에너지를 얻는다. 그러나, 양액 내의 산소이온농도는 온도가 상승함에 따라 감소하기 때문에 적정 수준으로 유지시키기 위한 대책을 세워야 한다. 배지경의 경우 대개 용존산소량을 고려하지 않고 있으나, 본 연구에서는 별도의 산소 공급장치를 부착하지 않고, 양액 교반용 순환펌프를 이용하여 양액을 공기중에 노출시킴으로써 산소이온농도의 증가를 피하였다.

7) 가열기

양액 온도를 적정범위내에서 제어하기 위하여 열선식 가열기를 사용하였으며, 열평형관계를 이용하여 가열기의 용량을 결정하였다. 외부로의 열손실은 양액 조제장치가 온실내에 설치되는 것을 감안하여 어느 정도 일정한 값을 갖는다고 가정할 수 있으며, 실제로 양액의 가온시 온도 변화는 가열기가 공급한 열량에 거의 직선적으로 증가하였다. 따라서, 가열기의 용량은 1회 급액량을 가온하여 적정온도로 유지하는데 필요한 열량을 낼 수 있도록 하였다.

나. 양액 자동 공급 장치의 구성

1) 계측 시스템의 구성

가) 급액관내의 압력

급액관 내의 압력을 측정하기 위하여 압력센서를 부착하였다. 압력센서는 신속한 계측을 위하여 Bourdon관을 이용한 계측범위가 0~3 bar의 압력계이지를 사용하였다.

나) 배출량

각 배출기로부터의 배출량을 측정하기 위하여 각 배출기의 말단부에 양액을 받을 수 있는 계량 용기를 설치하였다. 계량용기는 ml 단위의 정확도로 측정할 수 있도록 하였다.

2) 급액펌프

양액을 공급하기 위한 급액펌프의 용량은 급액설계에 따른 1회 급액량을 적정 압력수준으로 작물에 보낼 수 있도록 설계되어야 한다.

3) 유로의 설계

점적 급액 방식에서 유로의 적정 설계는 재배 면적의 형상, 재배계획에 의한 공간적인 배치에 의해 다르게 수행된다. 본 연구에서는 보급형 온실 규모의 양액 공급장치를 설계 제작하였으며, 특성 실험을 위한 유로를 구성하였다.

2. 양액 자동 조제 및 공급 장치의 성능 시험

가. 양액 자동 조제 장치의 성능 시험

1) 제어용 소프트웨어

개발된 제어용 프로그램은 기계어 코드로 컴파일되어 'NUTRIENT. EXE'라는 실행파일로 저장하였다. 이 파일을 실행시키면 양액조제의 작동을 간편하게 하기 위하여 설계된 풀다운(Pull-down)메뉴 환경이 화면상에 표시된다. 이 화면에서 주메뉴를 자료화일 저장 및 작동정지부, 자동조제부, 수동작동부, 설정값 입력 및 변경부로 나누었다.

자동 조제 모드에서는 양액의 상태변수인 액온, 산도(pH), 전기전도도(EC)를 제어하기 위하여 설정값과 측정값의 차이인 오차에 비례하는 각 구동기의 작동시간을 계산하여 각 구동기의 작동시간을 조절하는 PWM(pulse width modulation)방식을 이용하였다. 제어용 소프트웨어의 흐름도를 Fig. 2에 나타내었다.

2) 양액 자동 조제 시험

개발된 양액 자동 조제 장치의 성능을 검증하기 위하여 1회 급액량인 200 l의 양액을 조제하였다. 양액 조제에 사용된 원수는 수도물을 이용하였으며, 원수의 산도(pH)는 6.8이었으며, 전기전도도(EC)는 0.18 mS/cm로서 일본 양액재배 수질 기준에 적합한 것으로 나타났다.

실험에 사용된 농축배양액은 농촌진흥청 원예시험장 추천 양액 조성에 따라서 조제하였으며, 구체적인 내용은 Table 3에 나타내었으며, A, B액 각각 10 l를 조제하여 사용하였다.

배지경에 사용되는 배지들이 알칼리성 또는 산성을 가지고 있기 때문에 배지의 종류를 고려하여 양액의 pH를 조정하여야 한다. 본 실험에서는 암면을 기준으로 하여 수행하였으며, 실험 설정값은 각각 온도 20℃, 산도(pH) 5.5, 전기전도도(EC) 1.5mS/cm이었다.

나. 양액 공급 장치의 성능 시험

설계 제작된 양액 공급장치의 성능을 검증하기 위하여 배

출기의 특성 실험을 수행하였다. 특성 실험을 위한 실험 장치는 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 각 배출기간의 간격은 1m이고 각각의 급액관의 길이는 100m이다. 공급량의 균일도를 계산하기 위하여 각 배출기에 계량 용기를 설치하고, 일정 시간동안 배출되는 양을 측정하였다. 또한 각 배출기로부터 배출되는 양의 평균 값이 주당 일회 공급량이 될 때의 시간을 측정하였다.

Table 3. 농축배양액의 성분

구 분	첨가된 비료	농 도
A 액	질산 칼슘, Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	94.4g/10 ℓ
	칼산 칼슘, KNO ₃	50.5g/10 ℓ
	질산 암모늄, NH ₄ NO ₃	8.0g/10 ℓ
B 액	황산마그네슘, MgSO ₄ ·7H ₂ O	49.2g/10 ℓ
	계 1인산칼륨, KH ₂ PO ₄	11.533g/10 ℓ
	킬레이트 철, Fe EDTA	2.0g/10 ℓ
	붕산, H ₃ BO ₃	0.25g/10 ℓ
	황산망간, MnSO ₄ ·4H ₂ O	0.25g/10 ℓ
	황산아연, ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.022g/10 ℓ
	황산동, CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.005g/10 ℓ
	몰리브덴산 나트륨, Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.002g/10 ℓ

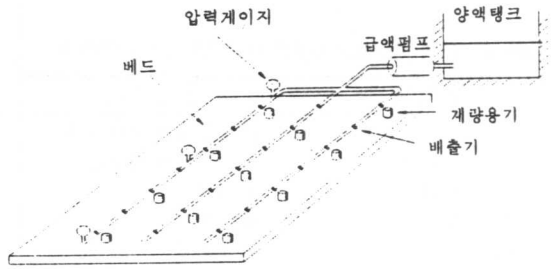


Fig. 3. 배양액 공급시스템의 유로 설계

3. 양액 공급 시뮬레이션

양액 공급장치는 적정량의 양액을 손실없이 작물의 근권부에 공급 가능하여야 하며 각 작물에 균일한 양을 공급하여야 한다. 점적 급액식에서의 각 작물로의 급액 유량은 점적관내의 압력분포와 배출기 특성으로 결정되며 이들 간의 관계는 식 (2)로 표현된다.

$$Q = KH^x \dots\dots\dots (2)$$

여기에서, Q : 각 배출기에서의 압력 [ℓ /min]

K : 배출기들 간의 편차에 의한 교정 상수

H : 배출기가 위치한 점에서의 압력 [m]

x : 배출기의 형상에 따른 압력에 대한 반응 상수

여기에서 급액관내의 압력 분포는 유로를 구성하는 각 구성요소에서의 수두손실을 계산하여 구할 수 있다. 급액관내의 수두손실은 식 (3)으로부터 구할 수 있다.

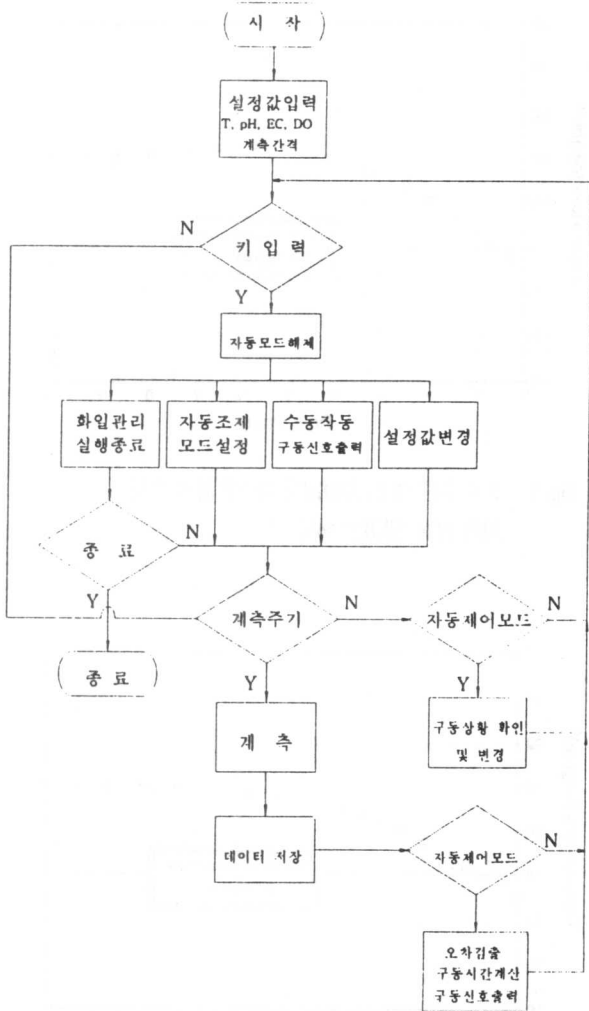


Fig. 2. 양액 조제용 소프트웨어의 흐름도

$$Hr = f\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{V^2}{2g}\right) \dots\dots\dots (3)$$

여기에서, Hr = 수두손실, m
 f = 마찰 계수
 V = 유속, m/s
 L = 점적용 배관의 길이, m
 D = 점적용 배관의 직경, m
 g = 중력 가속도, m/s²

위의 식을 이용하여 설계된 급액관의 각 배출기에서의 배출량을 구할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 작성하였으며, 시뮬레이션 프로그램에서의 입력 데이터와 출력 데이터를 Table 4에 나타내었다. 위의 두 식을 기초로 하여 각 유로 구성에 대한 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며, 그 흐름도는 Fig. 4에 나타내었다.

Table 4. 양액 공급시뮬레이션 프로그램의 입출력변수

입력 변수	출력 변수
공급 압력	급액관 내의 수두 손실
급액관의 평균 기울기	배출기 평균 배출량
급액관의 내경	총 배출량
배출기의 간격	최고 압력
배출기 상수, k	최저 압력
배출기의 지수 성분, x	배출량의 균일도

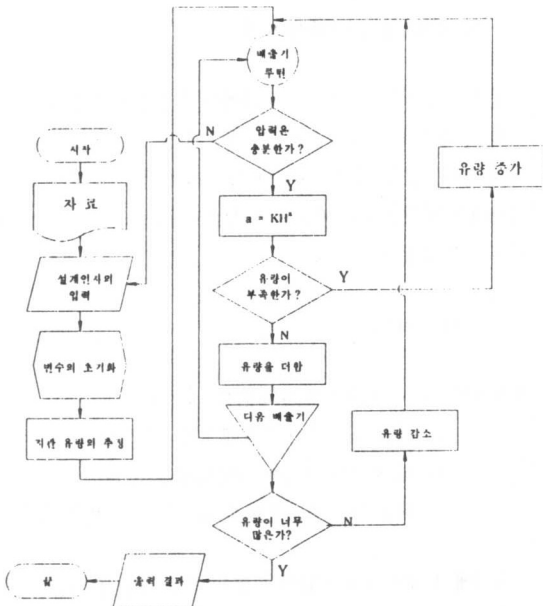


Fig. 4. 양액 공급 시뮬레이션 프로그램의 흐름도

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 배양액 자동조제 장치의 성능

가. 양액 온도

Fig. 5, 6은 외기온이 18℃일 때와 12℃일 때, 양액의 온도를 20℃로 설정한 경우 온도제어 결과를 나타낸 것으로 정정시간은 각각 4분과, 6분으로 나타났다.

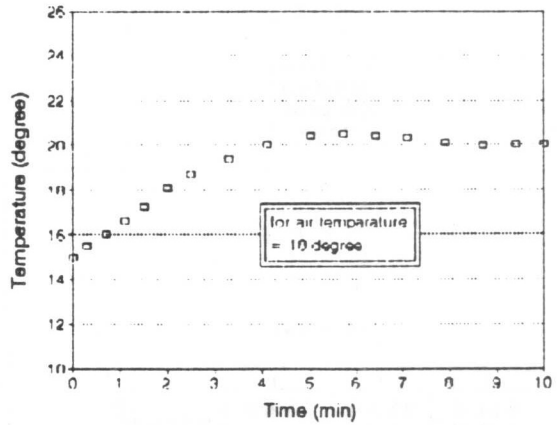


Fig. 5. 초기 수온 18℃, 설정온도 20℃일때의 온도 제어 성능 (외기온 18℃)

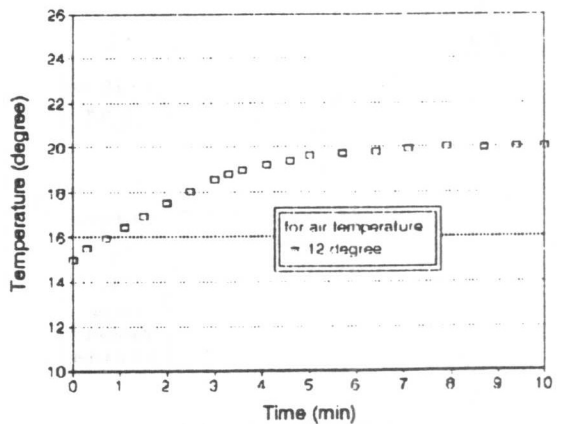


Fig. 6. 초기 기온 12℃, 설정온도 20℃ 일때의 온도 제어 성능 (외기온 12℃)

나. 산도 (pH)

Fig. 7은 배양액 조제 중의 산도의 제어성능을 나타낸 것으로, 정정시간은 약 19분정도임을 알 수 있다.

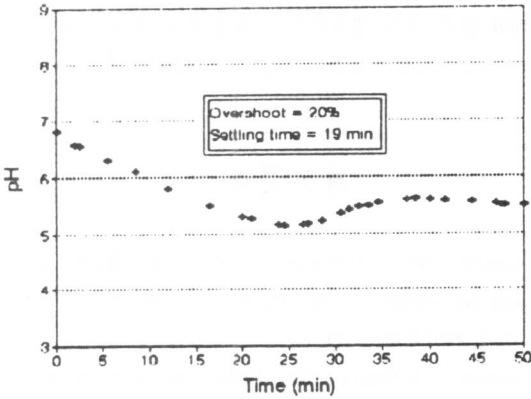


Fig. 7. 초기 pH 6.8, 설정 pH 5.5일 때의 pH 제어성능

다. 전기전도도 (EC)

Fig. 8은 배양액 조제 중의 전기전도도의 제어성능을 나타낸 것으로, 정정시간은 약 41분임을 알 수 있다.

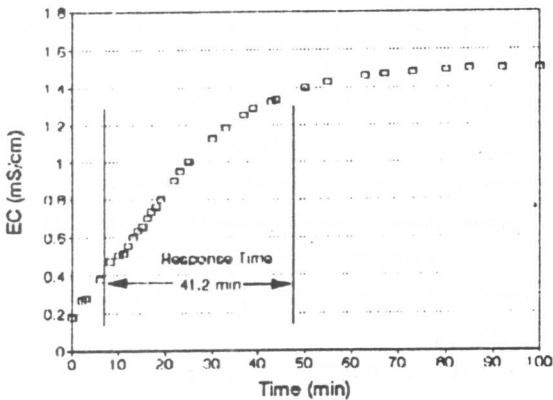


Fig. 8. 초기 EC 0.18, 설정 EC 1.5일 때의 EC의 제어성능

라. 용존산소량

Fig. 9는 액온이 20℃ 일때 배양액 조제 중의 용존산소량의 제어성능을 나타낸 것으로, 포화상태에 도달하는 데 소요되는 시간은 약 15분이 소요되었다. 배양액 조제 중에 혼합펌프는 계속적으로 가동되었다.

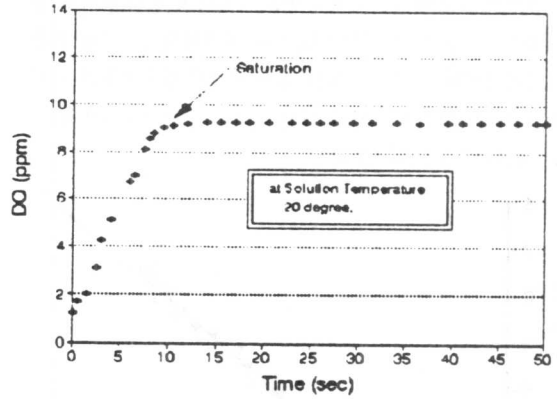


Fig. 9. 액온 20℃일 때, 혼합펌프 작동시 용존 산소량의 변화

2. 양액 공급 성능

설계 제작된 양액 공급장치의 각 배출기에서의 배출량을 각 공급시간별로 측정하였으며 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 공급실험 결과 배출기의 형상에 따른 식(2)의 지수성분 x 의 값은 0.101, 각 배출기 간의 편차에 의한 교정상수 K 의 값은 1.90으로 나타났다. 배출량의 불균일 정도를 정량화하기 위하여 통계적인 방법을 사용하였으며, 배출량의 표준편차를 평균값으로 나누어 변이 계수로 계산하였다. Table 1에서 설계된 토마토용 양액설계에 따른 양액량은 1株당 1 회에 76ml가 요구되는데, 그림으로부터 평균 배출량이 요구 양액량 76ml가 되도록 하기 위해서는 1 회 공급시간이 약 14.5분으로 설정되어야 함을 볼 수 있다. 1회 공급시간이 14.5분일 때의 배출량의 변이 계수는 0.16으로 외국에서의 경우와 비슷한 결과를 나타내었다.

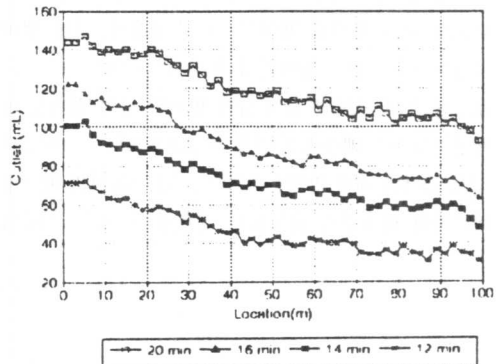


Fig. 10. 배관 길이에 따른 배출기의 배출량 변화

개발된 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 설계 제작된 급액관의 각 배출기에서의 배출량을 예측하였으며, Fig. 11은 시뮬레이션에 의한 예측치와 실제 측정한 실측치와의 관계를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과는 상관계수 0.99의 높은 상관관계를 나타내었다.

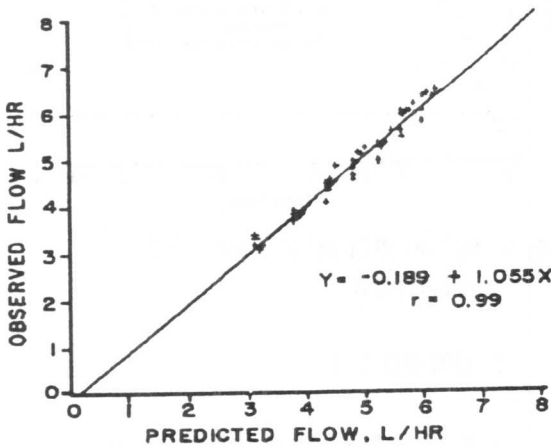


Fig. 11. 예측치와 실험치와의 관계

IV. 결 론

1. 양액 자동조제 장치를 개발하였으며, 양액 조제시 고려된 양액 상태변수는 액온, 산도(pH), 전기전도도(EC), 용존산소량이며, 설정값의 설정에서 배지의 종류를 고려하였다.
2. 양액 자동 조제를 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며, 프로그램은 각 양액 상태변수를 적정 범위로 유지되도록 제어하기 위하여 PWM제어 방식을 이용하였다.
3. 개발된 양액 자동조제 장치의 성능 시험을 실시하였으며, 액온을 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 산도를 $\text{pH} \pm 0.1$, 전기전도도를 $\pm 0.1\text{mS/cm}$ 의 오차 범위로 제어가 가능하였으며, 작물 생육에 적절한 범위내에서 양액의 조제가 가능하였다.
4. 보급형 온실 규모의 점적 급액 방식의 급액 장치를 설계 제작하였으며, 배출량의 편차 계수는 0.16으로 나타났다.
5. 점적 급액관 내의 압력손실과 각 배출기에서의 배출량을 예측하여 배출량의 균일도를 예측할 수 있는 시뮬레이

션 프로그램을 개발하였다.

6. 개발된 시뮬레이션 프로그램은 설계 제작된 공급라인에서의 배출량을 상관계수 0.99의 높은 정확도로 예측 가능하였으며, 점적 급액 방식을 위한 적정 배관설계에 적용 가능한 것으로 판단된다.
7. 위의 결과로부터 개발된 양액 자동 조제 및 공급장치는 농가보급형으로 상품화가 가능한 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Donald J. Pitts, A. James, et al. 1986. Trickle Irrigation Lateral Line Design by Computer Analysis, Transaction of the ASAE, 29(5):1320~1324
2. Numan M., E. Gordon, 1989. Emitter Discharge Evaluation of Subsurface Trickle Irrigation Systems. Transactions of the ASAE 32(4):1223~1228
3. Hisao Anyoji, I-Pai Wu. 1987. Statistical Approach for Drip Lateral Design. Transactions of ASAE 30(1):187~192
4. I. P. Wu, J. M. Irudayaraj. 1989. Sample Size Determination for Evaluating Drip Irrigation System. Transactions of the ASAE 32(6):1961~1965
5. I. P. Wu, H. M. Gitlin. 1981. Preliminary Concept of a Drip Irrigation Network Design. Transactions of the ASAE Paper No. PR 80-014 pp. 1080~1085
6. A. J. Clemmens. 1987. A Statistical Analysis of Trickle Irrigation Uniformity. Transactions of the ASAE 30(1):169~175
7. Kenneth H. Solomon. 1985. Global Uniformity of Trickle Irrigation Systems. Transactions of the ASAE 28(4):1151~1158
8. 박상근, 김광용, 1991. 수경재배, 오성출판사
9. 박권우, 김영식, 1991. 수경재배의 이론과 실제, 고려대학교 출판부
10. 橋本 康, 1997. 植物環境制御 入門, オ-ム社
11. 養液栽培の新技術 -その現況と展望-農業および園藝 第61巻 別策 東京 株式会社. 養賢堂 發行