

시설재배 토양의 수분 조절을 위한 자동 수분제어시스템 개발

이동훈 이규승 장영창

Development of an Automatic Water Control System for Greenhouse Soil Water Content Management

D. H. Lee K. S. Lee Y. C. Chang

Abstract

This study was conducted to develop an automatic soil water content control system for greenhouse, which consisted of drip irrigation nozzles, soil water content sensors, an on/off valve, a servo-motor assembly and a control program. The control logic adopted in the system was Ziegler-Nichols algorithm and rising time, time constant and over/undershoot ratio as control variables in the system was selected and determined by various control experiments to maintain small delay time and low overshoot. Based on the experimental results, it was concluded that the control system developed in the study could replace the unreliable conventional greenhouse soil water management.

Keywords : Automatic water control system, Greenhouse soil moisture, Drip irrigation nozzle, Ziegler-Nichols algorithm

1. 서론

국제 농산물 무역환경(FTA, DDA)의 변화와 더불어 생물 생산 환경에 대한 국내외(리우선언, 친환경 인증)의 규제가 강화됨에 따라 고품질 농산물의 경쟁력 강화를 위한 다양한 노력이 이루어지고 있다. 아울러 소비자로부터 각광을 받고 있는 웰빙 농산물에 대한 까다로운 요구에 부합하기 위한 생산자의 노력이 다각적으로 이루어지고 있다. 이러한 추세에 부합하여 전통적 재배 방식으로부터 벗어나 시설 재배지를 구축하고 자연 환경에 의존적인 재배기법의 한계를 극복하며 적극적으로 재배환경을 관리함으로써 생산량을 증대시키고 품질의 향상을 도모하는 경제적인 생물생산 기법의 도입이 급증하고 있다.

시설 재배지에서 관리되는 재배 환경 중 가장 중요한 수분, 양분의 관리는 현재 재배자의 경험적인 지식에 의존성이 높은 관리기법이 보편적으로 적용되고 있다. 이로 인하여 작목

의 변화, 품종의 변화, 재배지 토성의 변화에 적절히 대응할 수 있는 지식 베이스의 구축이 전무한 상태이며 결과적으로 시설 재배지로의 변화를 피하는 관행 농가의 진입에 어려움이 있는 상황이다.

관수, 관비를 체계적으로 하는 시설 재배농가의 수확량은 일반 야외에서 생산하는 생산품과의 차이는 명확하게 구분된다. 관수, 관비 시설의 토마토의 생산량은 일반 하우스 토마토에 비해 59.5%의 생산량 향상이 있으며 야외에서 재배된 토마토에 비해 116.2%의 생산량의 향상되었다(Gulshan and Singh, 2006). 또한 관수 시설재배에서는 전통적인 농장의 생산보다 50% 정도의 물 절약을 할 수 있다. 생산 비용의 주원인은 비료의 사용량에 따라 크게 영향을 받으므로 관비까지 확실한 시설재배 시스템을 구축하는 일이 중요할 것이다 (Maisiri 등, 2005).

특히 점적관수(drip irrigation) 시스템은 관수 시설재배에서 가장 널리 쓰이는 방식이며 이는 신뢰성이 높고 수분의 양을

일정하게 유지 해주는데 큰 장점이 있다(Jerzy, 1998; Lee 등, 1992). 토양 함수율을 정확하게 실시간으로 측정하는 것이 중요하다. 토양 함수율을 정확히 알 수 있으며 정확한 제어시스템의 구축이 요구된다.

이러한 정밀 시스템의 구축과정에서 필수적인 토양 수분의 계측과 관련한 연구에 대하여 살펴보면, Time-domain Reflectometry (TDR) 방식의 시간변위에 따른 유전율의 반사 측정법을 이용한 수분측정기가 널리 연구되고 사용되고 있다. TDR 방식은 상대유전율을 이용하여 비교적 넓은 범위의 수분을 신속하고 정확하게 측정할 수 있으며, 가격 또한 다른 수분측정기에 비해 경쟁력이 있어 큰 장점으로 부각되고 있다. 그러나 토양의 밀도, 온도 등에 큰 영향을 받고 이로 인해 보정을 해야 하는 단점이 있으므로(Kim 등, 2003) 현장에서 실시간으로 대응하기 위한 시스템의 구축에 있어 사용상 많은 경험이 요구되는 실정이다. 또한 측정에 사용되는 주파수와 신호처리 회로는 거의 공개되지 않았고 국산화가 되어있지 않아 외국에서 전량을 수입하는 실정이다.

국내에서는 고주파 impedance 및 TDR 방식을 이용하는 연구를 활발하게 진행 중에 있으며 해외에서는 기본적인 연구를 마무리하고 실질적으로 토양에 적용하여 2가지 이상의 토성을 측정하는 복합 센서의 개발이 진행되고 있다. 토양과 물의 유전율을 이용하고 주파수 방식을 사용하여 수분과 염도를 측정하는 실험이 있었고(Zhang, 2004; Thompson 등, 2007) 실시간으로 impedance 반응 신호를 이용하여 수분을 측정하고 로드셀 신호를 이용하여 저항 지수를 계측하는 연구 등이 활발하게 진행되고 있는 실정이다.

또한 재배지 생산 환경의 친환경적인 보존성과 건전성을 유지해야 하는 요구 기준에 부합하기 위해서는 농업용수와 양분의 과소비를 억제함은 물론 양분 공급의 불균형을 해소하기 위한 적절한 관리가 병행이 되어야한다. 따라서 토양 검정, 작목 특성에 대한 분석 및 처방을 통하여 판단 가능한 특정한 관수, 관비 재배 기법의 제한성을 극복할 수 있는 보편적이고 최적화된 관리 기법이 마련된다면 전국적으로 증가하고 있는 신생 재배 농가에 대하여 토성, 작목 등에 대한 구체적이고 전문적인 관리기법의 부재로 인한 경영 오류를 해결할 수 있으리라 생각된다.

본 연구는 급격히 증가하고 있는 관비 재배 농가 등의 시설 재배 농가에서 가장 간략한 절차를 통하여 효율적으로 관수, 관비 시스템을 도입할 수 있도록 자동제어 시스템을 개발하고자 하였다. 구체적인 목표는 작목 주변부 다 지점의 토양 함수율을 계측할 수 있는 계측 시스템을 구성하고, 토양수분 계측 값을 분석하여 수분의 과부족을 판단하는 제어 로직을 설정하며, 궁극적으로 수분의 과부족 현상을 억제하기 위한 정밀 제어시스템 개발하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 연구 재료

본 연구에서는 토양에 물을 공급하는 점적노즐로서 국내 관수, 관비시설에 가장 대표적으로 사용되고 있는 악어적 관입방식의 점적밸브를 사용하였다. 수분 공급량의 제어는 물탱크로부터 점적관에 물을 공급하는 밸브의 전동식 on/off 제어와 수동 개폐가 가능한 경유회로를 구성하여 점적관 제어 방식으로 수행하였다. 그림 1과 2는 본 연구에 사용된 점적노즐과 점적관 개폐밸브 및 서보모터의 구성을 보여준다.

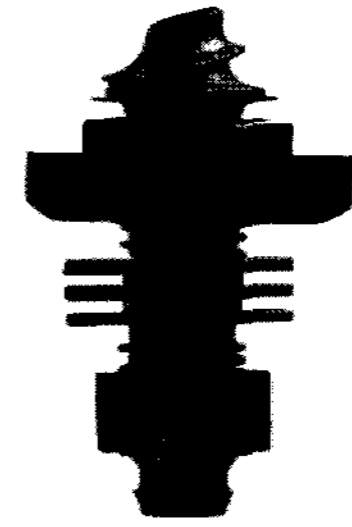


Fig. 1 Drip irrigation nozzle.



Fig. 2 On/off valve and servo-motor.

토양 수분함량의 측정에 사용한 센서의 모델명은 WT1000 (Mirae Sensor, Seoul, Korea)로서 probe 부분만을 취하였으며 데이터 로거는 본 연구를 위해 별도로 제작한 정밀 컨트롤러 내부에 제작하여 재구성하였다. 그림 3과 표 1은 수분센서와 그 센서의 사양을 보여주고 있다.

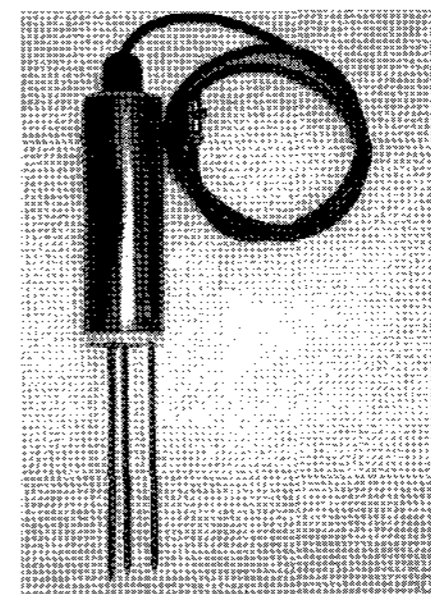


Fig. 3 A water content measuring sensor.

Table 1 Specification of the soil water content sensor

Properties	Specification
Acquisition Range	Soil MC (0~100%) Soil Temp (-10~60°C)
Accuracy	Soil WC (± 3%)
Dimension (φ)	38 mm
Dimension (L)	250 mm
Depth	100 mm ~ 120 mm

본 연구에서는 정밀 수분제어를 수행하기 위하여 제어시스템을 설계, 제작하였다. 제어시스템은 ATmega128(Atmel Co., San Jose, CA, U.S.A.) 마이크로컨트롤러를 사용하였으며 입출력 포트의 수를 확장하기 위하여 범용 프로그래머 칩인 82C55A 모듈을 6식으로 사용하였다. 그림 4는 제작된 마이크로 컨트롤러시스템을 보여주고 있으며 그림 5는 컨트롤러의 마이크로 버스 회로도를 나타낸다.

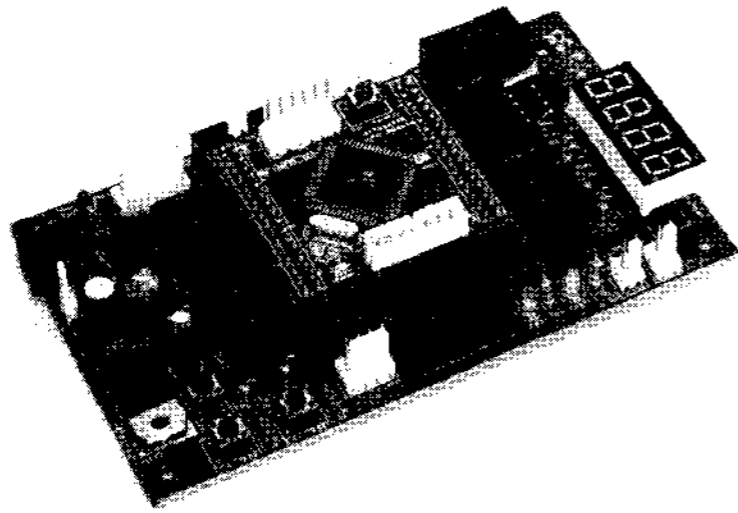


Fig. 4 A micro-controller system used in the study.

Functional Diagram

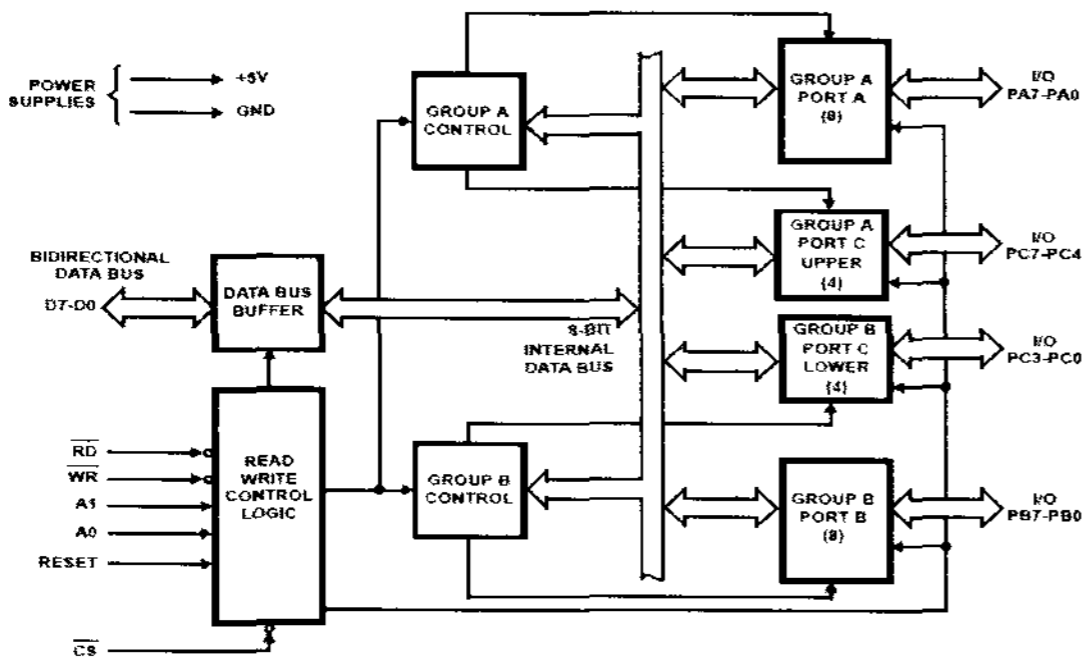


Fig. 5 Circuit diagram of DATABus of the micro-controller.

본 연구에서는 시설재배 토양특성의 변이를 최소화하기 위하여 실내에서 소형의 시설재배 토양을 조성하였다. 조성된 시설재배 공시 토양은 사양토로서 토양 구성비는 표 2에 나타냈으며 그림 6은 공시 시설배재 포장의 조성상태를 보여주고 있다. 토양의 초기 함수율은 자연건조를 통하여 10%가 되도록 조절한 후 실험을 수행하였다. 나아가 구성된 시설재배 공시토양에서 점적 노즐과 수분센서 사이의 거리를 조절하여 제어시스템의 특성을 고찰하고 제어시스템의 최적 설계를 하고자 하였다.

Table 2 Specification of soil used in this study

Composition			Texture
Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	
43.7	37.3	19.0	Sandy Loam



Fig. 6 A photo of soil preparation.

자동 수분제어시스템을 효율적으로 운용하기 위하여, 토양 수분 측정값을 입력하고 점적관수 밸브의 on/off 제어 신호를 출력하는 마이크로 컨트롤러의 제어 규칙을 실시간으로 설정하기 위한 PC용 S/W를 제작하였다. 실시간 계측 및 제어 규칙의 변경 등을 용이하게 하기 위하여 PC용 S/W와 마이크로 컨트롤러간의 정보는 RS-232C 규격을 통하여 상호 통신하도록 하였다. 제어용 S/W는 MS Visual C++6.0을 바탕으로 윈도우즈 프로그램으로 개발되었으며 그림 7과 8은 제어시스템

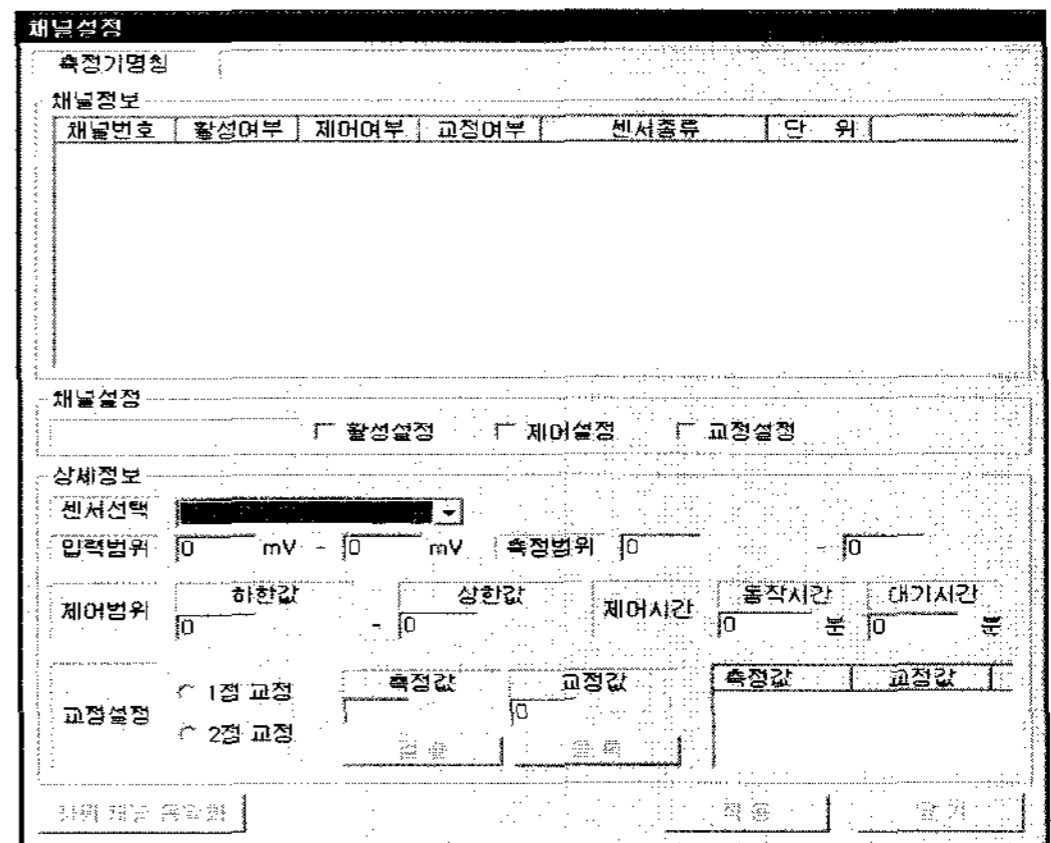


Fig. 7 Host windows for sensor selection S/W.

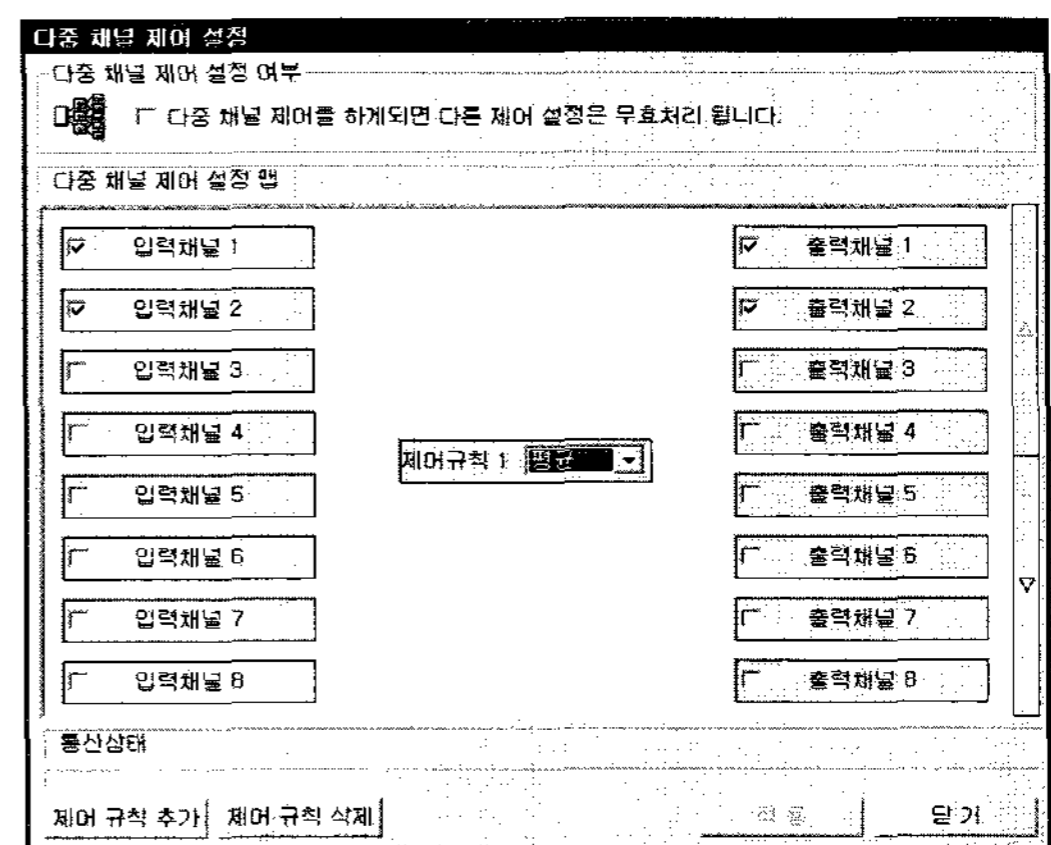


Fig. 8 Host windows for sensor selection S/W.

의 센서와 다중채널 제어옵션을 선택하는 호스트 윈도우를 보여주고 있다.

상기 제어시스템의 개별 요소들을 통합하여 시설재배 토양의 수분 조절을 위한 자동 수분제어시스템의 전체 구성도를 살펴보면 그림 9와 같다. 본 연구에서 개발된 제어시스템의 가장 큰 특징은 토양 수분센서를 통한 입력 신호에 대한 실시간 조희 및 이를 입력 변수로 취하는 제어 로직을 실시간으로 재구성할 수 있다는 점이다. 이러한 기능을 이용하여 시스템 검증 실험에서 데이터 취득 및 정밀 제어를 수행할 수 있었다.

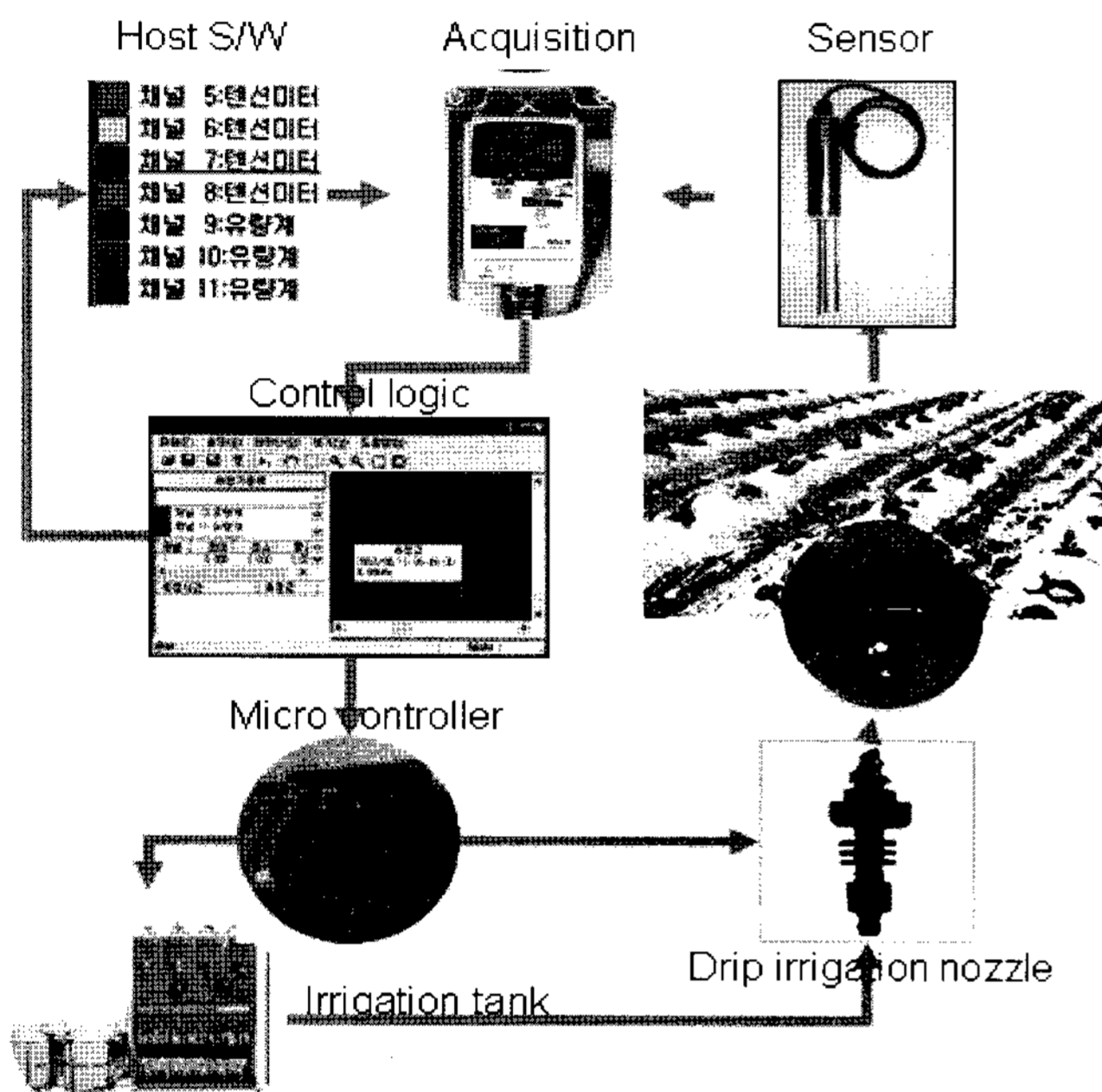


Fig. 9 Configuration of an automatic water control system for greenhouse soil content management suggested in this study.

나. 연구 방법

1) 제어 이론

시설 재배에 관행적으로 관리되는 관수/관비 공급 방식을 대체함과 동시에 효율적인 농업용수/양분을 관리하기 위한 제어기의 설계를 위해서는 토양 수분계측을 통한 관수 공급 시스템의 제어 시스템 변수 및 특성을 최적으로 결정하여야 한다. 본 연구에서 구성된 제어시스템의 변수 및 특성을 표 3에 나타내었다.

이러한 시스템적 특성을 고려하여 채택한 제어 방식은 제어변수를 시스템의 입력변수의 상황에 따라 실시간으로 조정 가능한 PID 자동동조(Auto-tuning) 제어기법을 사용하였다. 동기법을 위해 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols) 동조법(Rajani 등, 2008)을 알고리즘으로 채택하였으며 그 기본 전달함수 $G(s)$

의 형태는 다음과 같다.

Table 3 Specification of the control system designed in this study

Specification	Irrigation system
Reference Input	Soil Moisture Contents
Disturbance	Soil property : Texture, Cavity Environmental property : Humidity, Temperature, etc
Control type	Open-loop control
Time dependent type	Time-varying system
Linearity	Nonlinear system
Major control objective	Command following
Minor control objective	Stability
Output signal	Electrical edge signal
Output device	Mechanical actuator

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1)$$

여기서,

K_p : 비례계수,

T_i : 적분시간(integral time),

T_d : 미분시간(derivative time)

이 동조법을 이용하여 제어변수의 조정을 수행하면 입력 측의 계단입력에 대한 과도응답의 최고치가 대체로 25%에서 안정적으로 나타나는 특성을 지니고 있다. 이러한 특성을 역으로 이용하여 목표 함수율에서 근소하게 제어 목표를 설정하여 토양 조성의 불균일성, 대기습도 등, 외란(disturbance)에 대한 정확한 모델의 구명 과정을 거치지 않는 토양 함수율 정밀 제어가 설계가 가능하다.

본 연구에서는 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols) 동조법의 계수 조정법 중에서 토양수분 제어와 가장 유사한 로직은 일종의 개회로 시스템이라는 판단에 의하여 현행 공조기(Air-Conditioner)에 채용되는 계단응답에 의한 계수 조정법을 채택하였다.

그림 10에 나타낸 바와 같이, 계단응답에 의한 계수 조정법은 계단입력에 대한 S자형 곡선으로부터 지연시간 L, 시정수 T, 직류이득 K를 취하여 계수를 조정하는 방식으로 이를 지글러-니콜스 전달함수에 적용하게 된다. 지글러-니콜스 전달함수는 선형시불변 시스템에 적용 가능하다. 그러나 본 연구에서 설계된 제어시스템은 비선형-시변형 특성을 보이는데 토양의 수분 함수율을 제한된 범위 내에서 제어한다는 목표를 통하여 설계된 시스템은 선형 시불변으로 가정하였다. 따라서 식 (1)은 지연시간 L, 시정수 T, 직류이득 K을 이용하여 식 (2)로 변형된다.

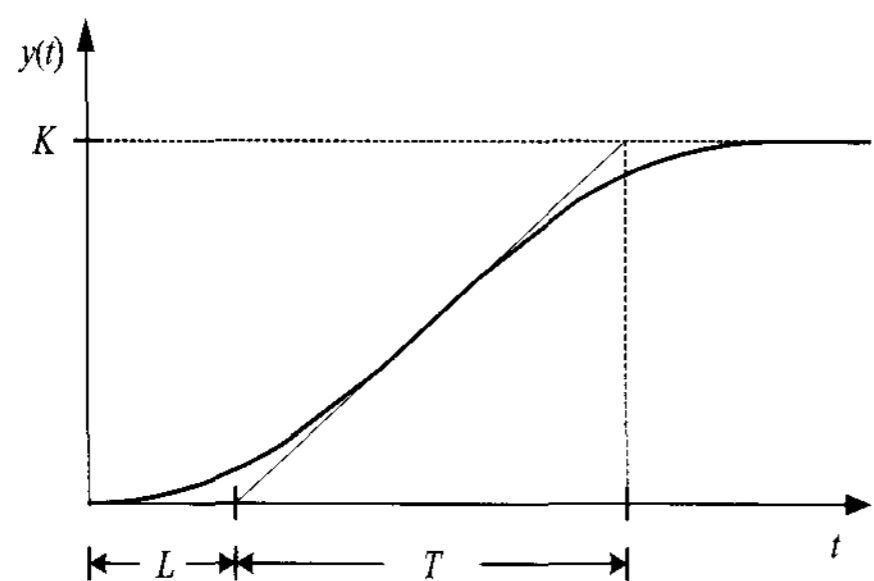


Fig. 10 S-shaped response curve.

$$\begin{aligned}
 G(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2) \\
 &= \frac{1.2T}{KL} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \\
 &= \frac{0.6T}{K} \frac{(s+1/L)^2}{s}
 \end{aligned}$$

2) 시설재배 토양의 요인 실험

본 연구에서 구축한 실내 시설재배 토양의 요인 실험은 적정조건의 제어변수를 설정하기 위하여 몇 개의 연관된 실험으로 수행되었다. 각 실험은 이전 단계의 실험 결과를 토대로 단계적으로 설계, 수행되었으며 최종 요인실험 통하여 도출된 제어 로직을 바탕으로 시설재배 토양의 수분 조절을 위한 자동 토양 함수율 제어시스템의 제어 변수를 결정하였다.

첫 번째 요인실험은 점적노즐로부터 공급된 수분의 토양내 거동의 상태를 파악하고자 수행되었다. 본 실험에서는 하나의 점적노즐로부터 각기 다른 거리(0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm)에 매설된 토양 함수율센서에서 수분변화를 계측하고 지속적인 수분 공급에 의한 토양의 반응상태를 살펴보았다. 실험 과정의 노이즈를 줄이고자 동일 실험 3회 반복을 통하여 평균치를 구하는 방식으로 10분 단위로 24시간의 계측 정보를 구하였다.

두 번째 요인실험은 토양의 수분 거동에 따른 수분 공급의 과부족 상황을 제어하기 위하여 수행되었다. 본 실험에서는 수분 함량 목표치 15%와 20%를 달성하기 위하여 점적 노즐의 on/off 제어를 수행하였다. 토양 수분센서의 계측 값을 통하여 목표치 달성여부를 판단하고 제어신호를 변경하는 단순 피드백제어를 수행하였고 시설재배 토양의 수분 거동 상태는 1분 단위로 정밀 측정하였다.

세 번째 요인실험은 토양의 수분 거동에 따른 수분 함량의 과부족 상황을 조기 판단하기 위한 로직을 개발하기 위해 수행되었다. 본 실험에서는 두 번째 요인실험에서 관찰된 오버슈트 현상을 억제하기 위하여 제어신호의 발생시점을 조절하여 점적관을 개폐하였으며 수분 함량의 변화는 두 번째 방법과 동일한 방식으로 측정하였다.

마지막 네 번째 요인실험은 시설재배 토양의 수분 거동에

따르는 실시간 자동 수분제어시스템의 정밀 제어로직을 구명하기 위해서 수행되었다. 본 실험에서는 세 번째 요인실험을 통하여 수행된 예측에 의한 제어로직의 성능을 제고함과 동시에 수분의 과공급 상황을 최소화하기 위하여 점적관 제어 밸브의 개폐를 일정한 시간 간격(10분, 20분, 30분, 40분, 50분, 60분)으로 교차하여 수행하는 비연속식 수분공급 로직을 바탕으로 수행하였다. 실험의 계측 값으로서 해당 실험조건에 따른 목표함수율 도달시간, 과도응답시간이었으며 시계열의 구간은 0분에서 1440분, 즉 최대 1일로 제한하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 토양 수분 거동

그림 11은 하나의 점적노즐로부터 수분이 공급될 때 노즐로부터 각기 다른 거리에 설치된 토양 수분센서에서 계측된 24시간의 토양 함수율 변화를 보여주고 있다. 토양 내 수분의 확산속도는 수분공급량, 토양의 공극률 등 여러 가지 요인에 의해 변한다. 본 연구에서 수분의 확산 속도는 실험조건에 따라 다소 차이가 있으나 평균적으로 대략 2 cm/min으로 분석되었다.

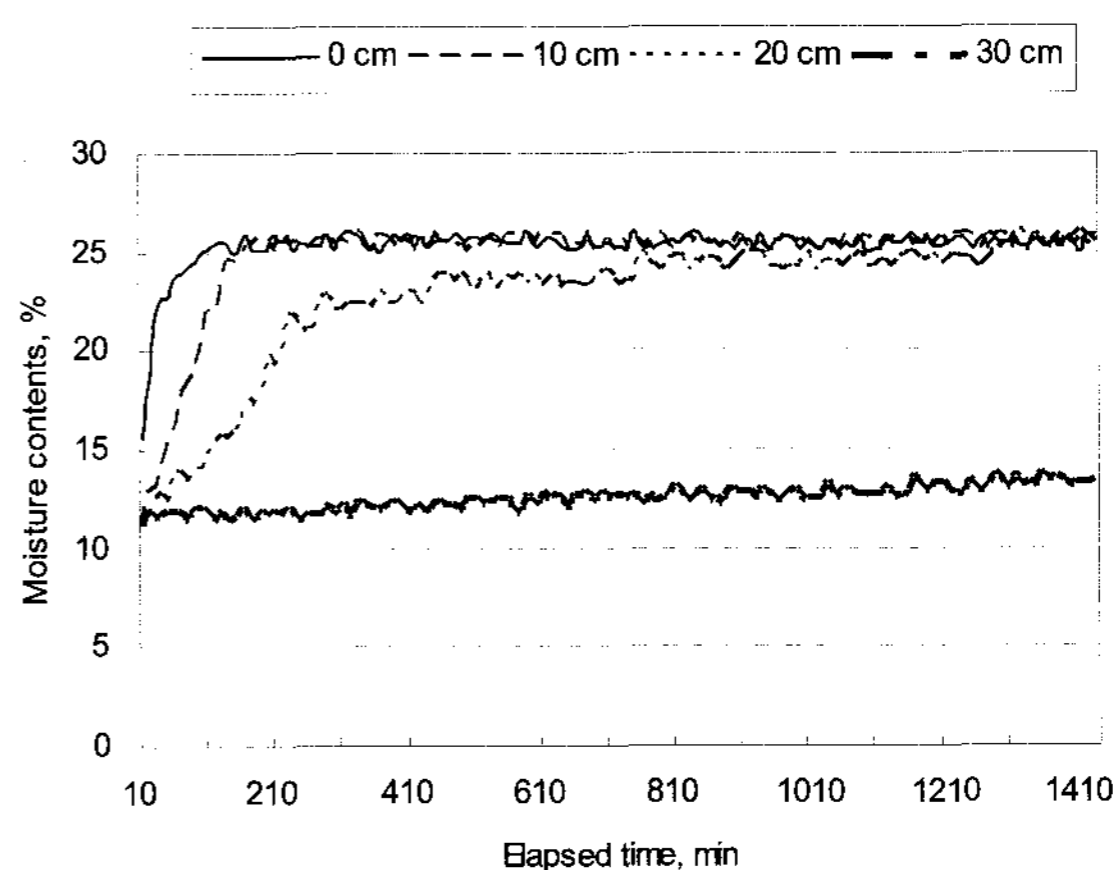


Fig. 11 Variations of soil moisture content with time at various distances from a drip irrigation nozzle.

노즐로부터 대략 10 cm까지는 2시간 내에 25%의 수분함량에 도달함을 알 수 있다. 아울러 20 cm에 설치된 노즐에서 계측된 결과에 의하면 약간 낮은 함수율을 보이기는 하지만 궁극적으로 25%의 함수율에 도달하고 있다. 그러나 30 cm에 설치된 노즐의 경우는 24시간의 수분공급에도 불구하고 함수율의 증가는 매우 느리고 목표치에 도달하는 것이 거의 불가능함을 보여주고 있다. 따라서 다소 긴 시간이 소요되긴 하나 점적노즐 매설 지점으로부터 20 cm에 위치한 센서에서도 충분히 토양 함수율의 변화를 감지할 수 있었다.

나. 토양 수분공급의 과부족 제어

그림 12와 13은 토양의 수분 함량 목표치를 달성하기 위하여 점적 노즐의 on/off 제어를 수행한 후 노즐로부터 각기 다른 거리에서 계측된 24시간의 토양 함수율 변화를 보여주고 있다. 점적노즐로부터 30 cm 지점에서는 점적 노즐의 on/off 제어와 관계없이 함수율 변화는 측정되지 않음을 보여주고 있다. 목표 함수율을 15%와 20%로 했을 경우, 모두 그림 11의 결과와 유사한 경향을 가지고 있으나 모두 목표치에 대해 오버슈트를 보이고 있다. 특히 토양 함수율을 20%로 제어하고자 한 실험에서는 제어 목표치보다 5% 이상(목표치 대비 25%)의 극심한 오버슈트 현상을 보이고 있다. 제어가 시작된 후 대략 3시간 내외에서 목표치에 도달하고 있으며 목표 함수율이 낮을 경우 도달시간도 더 빠르고 오버슈트도 작았다.

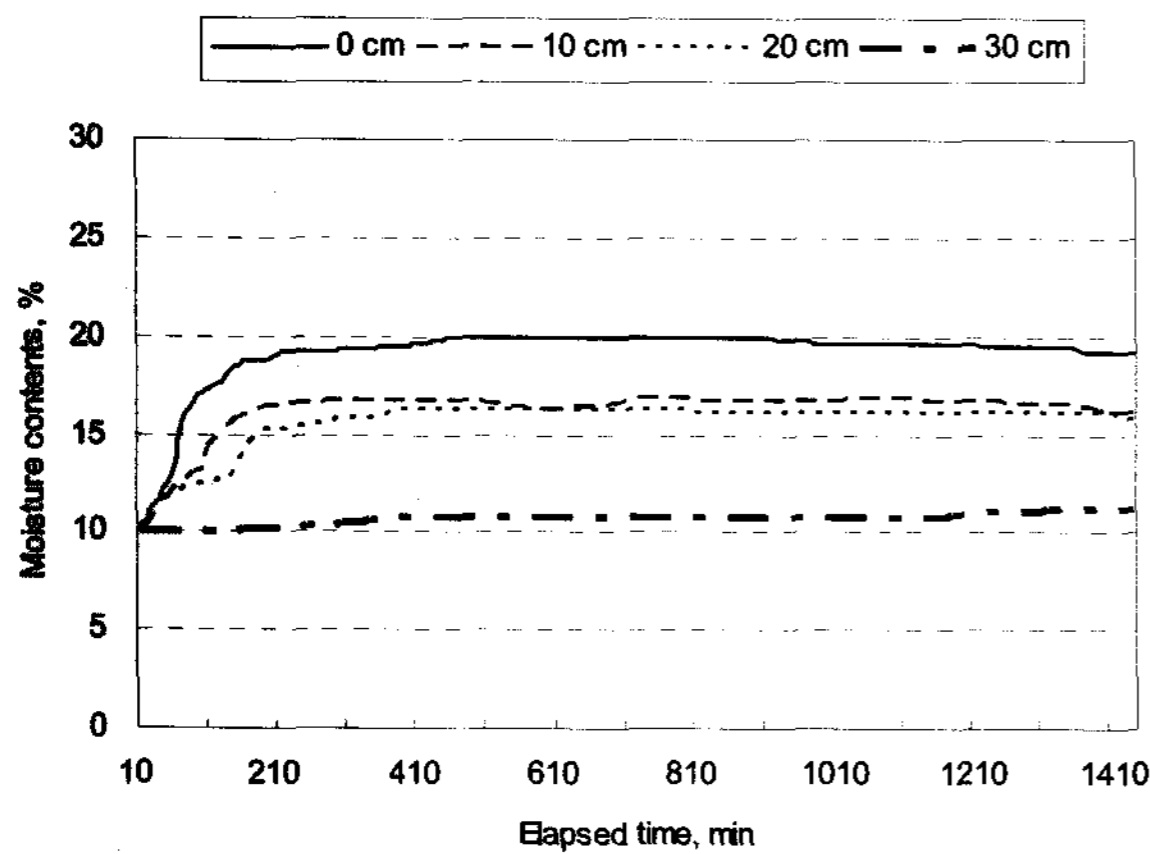


Fig. 12 Variations of soil moisture content with time at various distances from a drip irrigation nozzle under on/off control for the target MC of 15%.

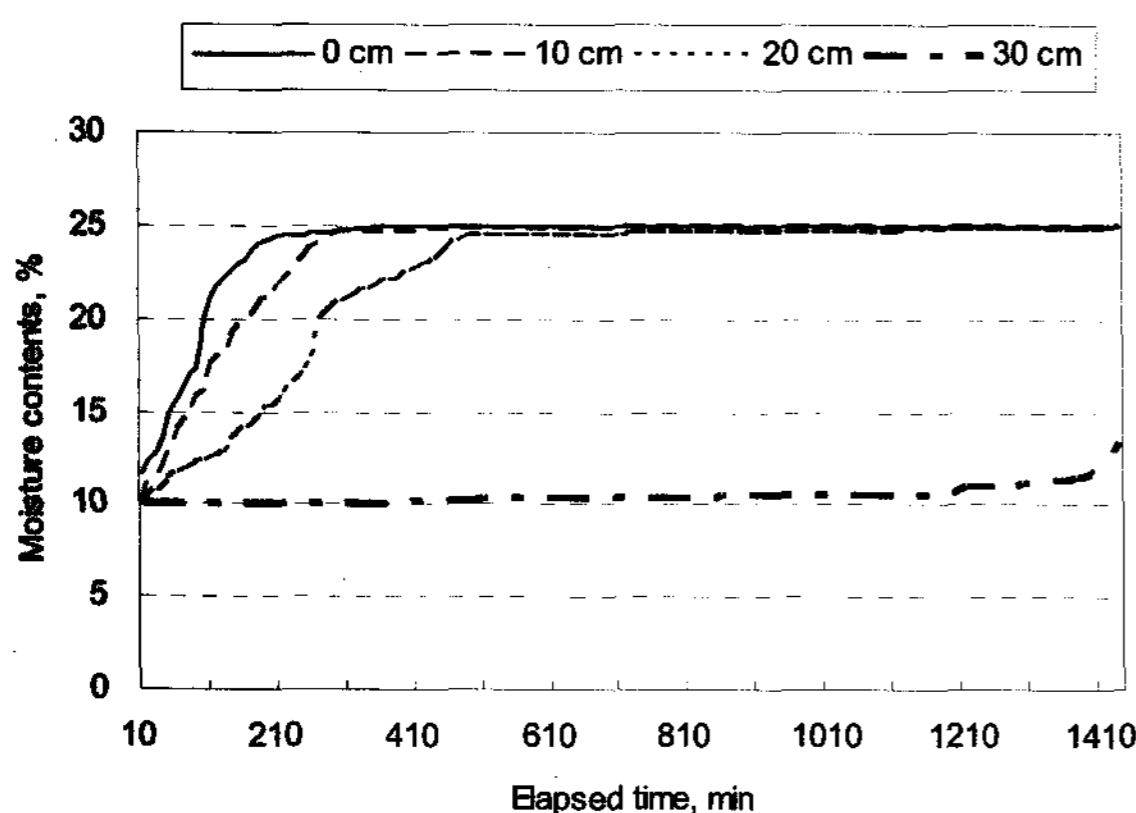


Fig. 13 Variations of soil moisture content with time at various distances from a drip irrigation nozzle under on/off control for the target MC of 20%.

목표 함수율에 이르기까지 수분 공급시간과 토양 함수율 변화에 대한 직선성을 분석한 결과 목표함수율 15%와 20%

에서 각각 R^2 가 0.82 이상과 0.96 이상으로 수분공급시간과 함수율의 거동이 매우 유의적이라고 생각되었다.

다. 토양 수분함량 과부족의 적정 판단

상기의 토양 수분공급의 과부족 제어 실험으로부터 도출된 결과를 분석하여 수분 공급지점의 함수율이 목표치에 대하여 3% 정도 작은 함수율에 도달하면 수분 공급을 중지하였다. 본 연구에서는 공시토양의 함수율의 범위를 10-25%로 가정하였고 실제적으로 목표치 대비 25% 오버슈트(목표치 25%에서 약 6% 초과)를 고려하면 최대 유효계측 범위는 10-22%까지 12% 구간이 실제 계측범위로 설정된다. 따라서 수분을 과잉 공급하는 오버슈트를 줄이기 위해서 최대 목표치의 아래 3% 함수율을 기준으로 제어 중단시점을 정한 것이다.

그림 14와 15는 수분공급을 중단하는 제어 로직 하에서 목표 함수율이 15%와 20%일 때 점적노즐로부터 각기 다른 거

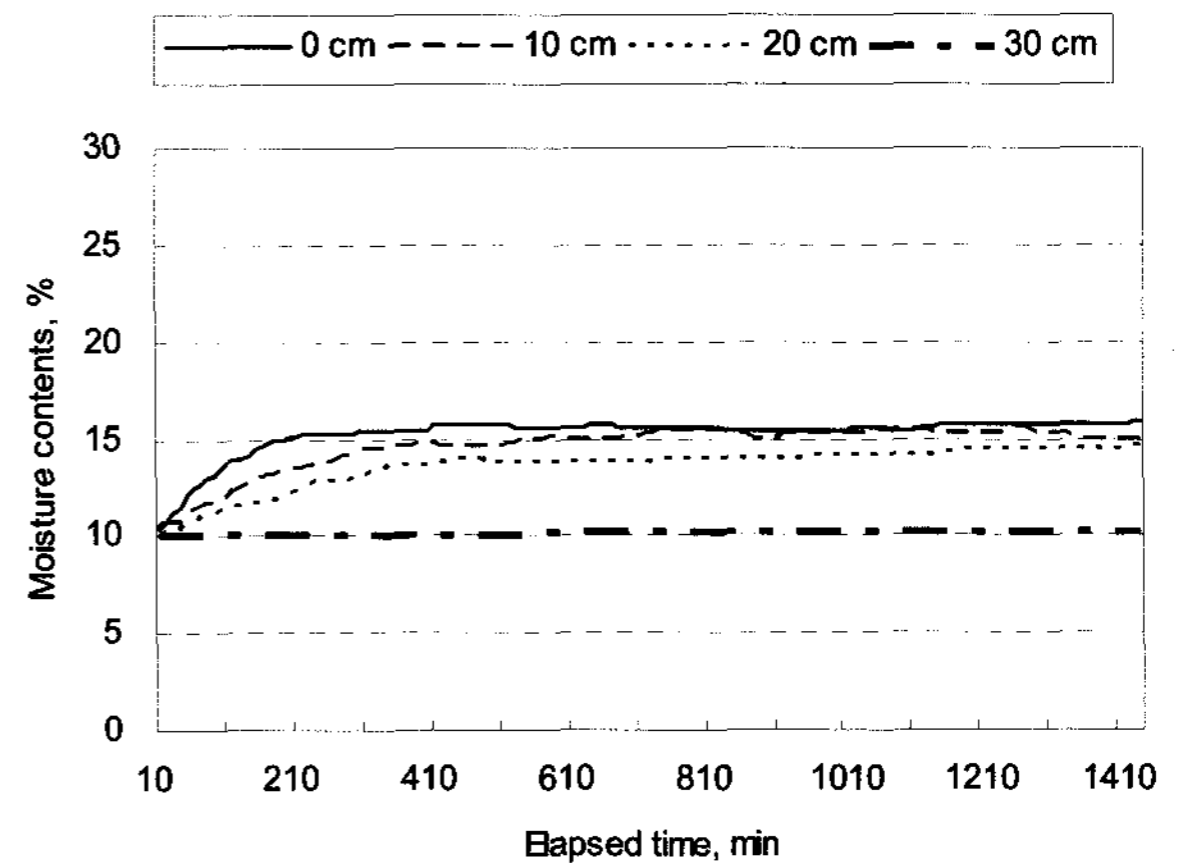


Fig. 14 Variations of soil moisture content with time at various distances from a drip irrigation nozzle under the condition that the nozzle was shut at the MC of 3% less than the target MC of 15%.

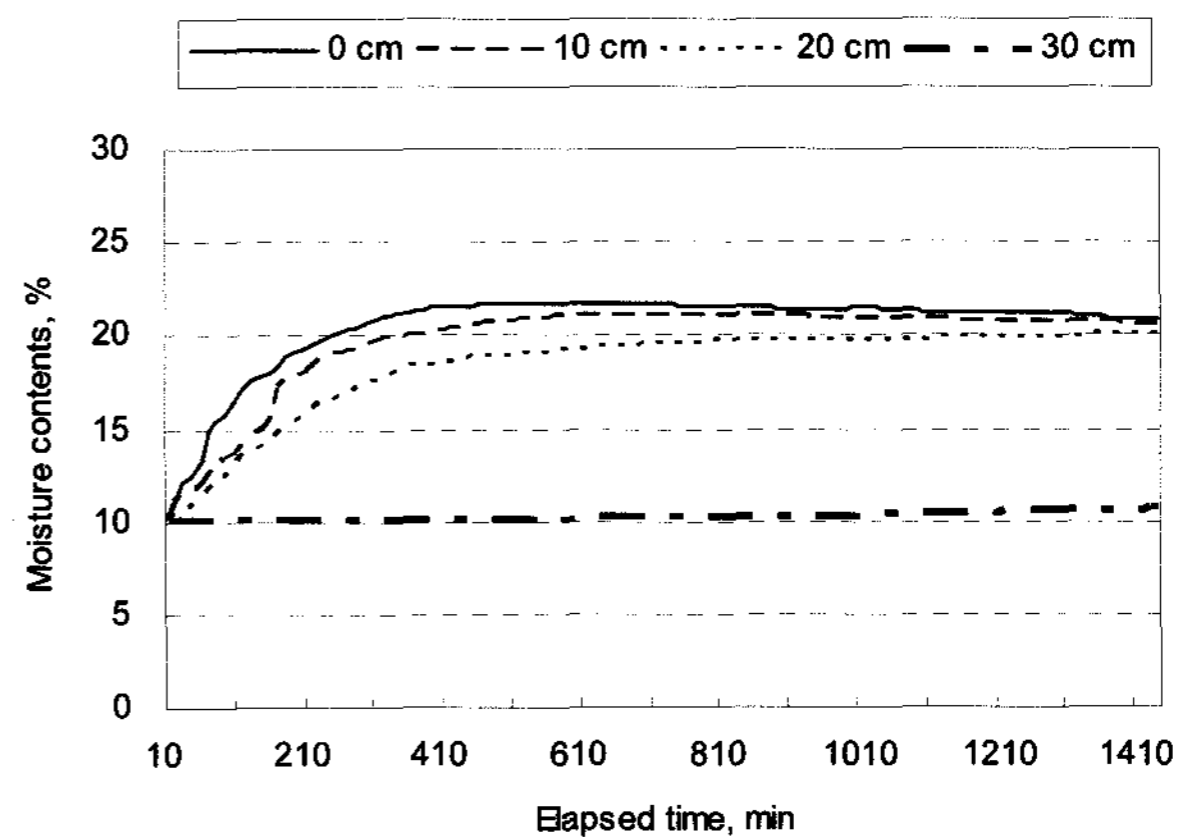


Fig. 15 Variations of soil moisture content with time at various distances from a drip irrigation nozzle under the condition that the nozzle was shut at the MC of 3% less than the target MC of 20%.

리에서 예측된 24시간의 토양 함수율 변화를 보여주고 있다. 그림을 보면 목표 함수율에 도달하기 위해 소요된 시간이 그림 12 및 13과 비교하여 다소 증가하였으나 오버슈트 비율을 비교하여 보면 상당히 완화되었다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 일반적인 선형폐회로 시스템의 제어 특성과 아주 유사한 양상을 보인다고 파악될 수 있다. 그러나 제어 목표치에 도달하지 못하는 경우나 본 연구에서 취급하는 토양의 함수율과 같이 상태변수를 강제적으로 감소시킬 수 없는 한계를 가지고 있는 시스템의 반응특성은 포화 상태에 도달하기전의 실험결과를 다각적으로 고찰함으로써 분석이 가능하다.

그림 16과 17은 점적노즐을 on/off로 제어할 경우와 수분공급을 중단하는 제어로직에서 각각의 시정수와 오버슈트 비율을 상대 비교한 것이다. 시정수의 경우는 점들이 대각선 중앙 윗부분에 집중되어있는데 이는 수분공급을 중단하는 제어로직이 목표함수율에 도달하는데 on/off 제어보다 많은 시간을 필요하다는 것을 보여준다. 그러나 오버슈트 비율의 경우는 점들이 중앙 대각선 아래에 많이 치우쳐져있다. 이로부터 수분공급을 중단하는 제어로직이 수분의 과잉공급을 많이 억제하는 것을 알 수 있는데 실험결과에 의하면 오버슈트 비율이 대략 10%이하인 것으로 분석되었다.

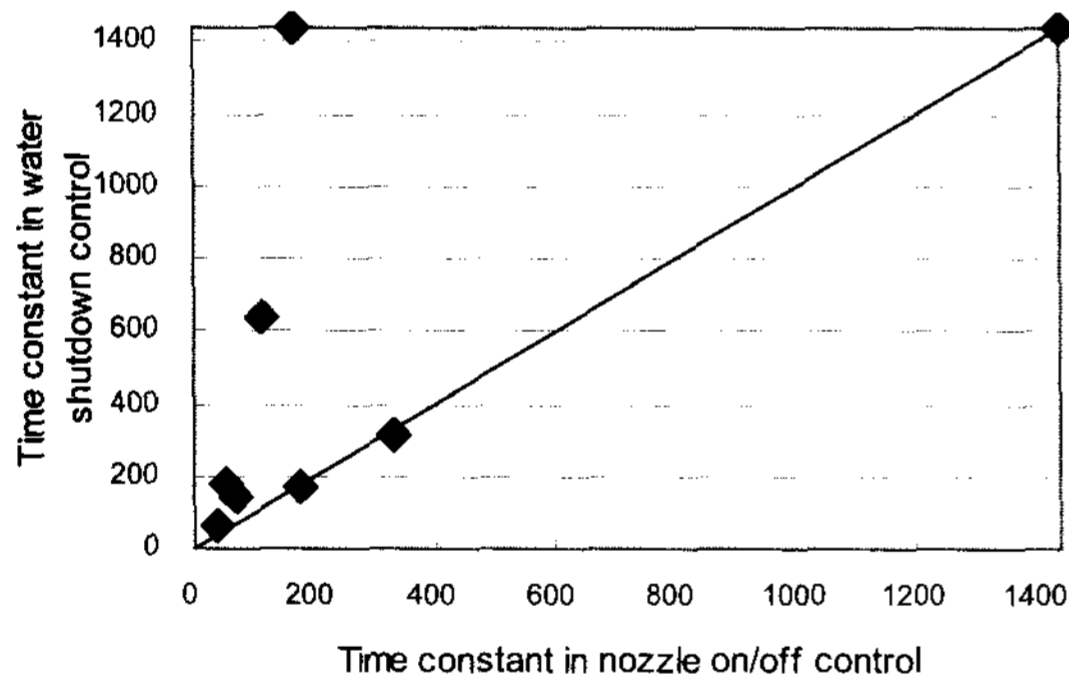


Fig. 16 Comparison of time constants between on/off control of a drip nozzle and water shutdown control at the MC of 3% less than the target MC.

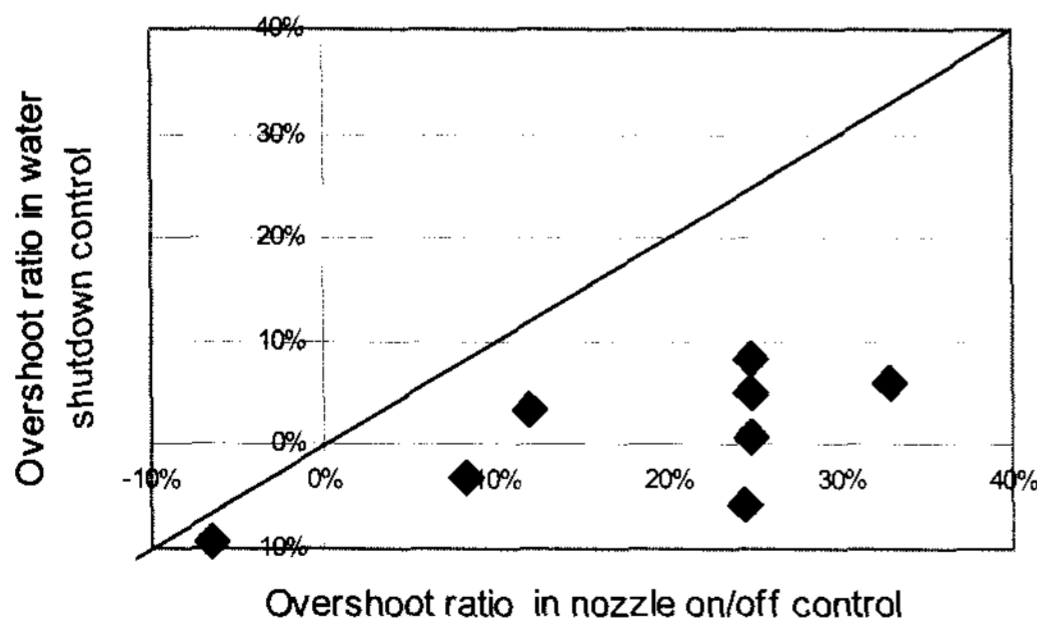


Fig. 17 Comparison of overshoot ratios between on/off control of a drip nozzle and water shutdown control at the MC of 3% less than the target MC.

라. 자동 수분제어시스템의 정밀 제어로직 구명

점적노즐을 on/off로 제어할 경우와 수분공급을 중단하는 제어로직에서의 제어변수의 분석을 바탕으로 점적관 제어밸브의 개폐를 일정한 시간 간격(10분, 20분, 30분, 40분, 50분, 60분)으로 교차하여 수행하는 비연속식 수분공급 제어로직을 바탕으로 시스템 제어성능을 분석하였다.

그림 18과 그림 19는 목표 함수율이 각각 15% 및 20%일 때 비연속식 수분공급제어를 앞선 두 가지의 제어방식과 비교하여 도달시간에 대한 오버슈트 비율을 비교 도시한 것이다. 두 그림에서 “Method 2”는 on/off 제어방식, “Method 3”는 수분공급을 중단하는 제어방식, 그리고 “Method 4”는 비연속식 수분공급 제어방식을 나타낸다. 또한 그림의 수직축의 단위는 %/min로 표시하였는데 이것은 각 제어방법에 의해 도달시간이 다를 수 있으므로 비교를 위하여 표준화한 것을 의미한다. 따라서 이 값이 1보다 작을 경우 비연속식 수분공급 로직을 바탕으로 한 시스템 제어성능이 우수한 것을 나타낸다. 두 그림에 있어 뚜렷한 특징은 단절식 제어방식인 비연속식 수분공급 제어를 통한 목표 함수율 도달시간이 단순 피드백에 의한 제어방식과 근사한 차이를 보임에도 불구하고 오버슈트 비율이 현저히 낮아진 점을 들 수 있다.

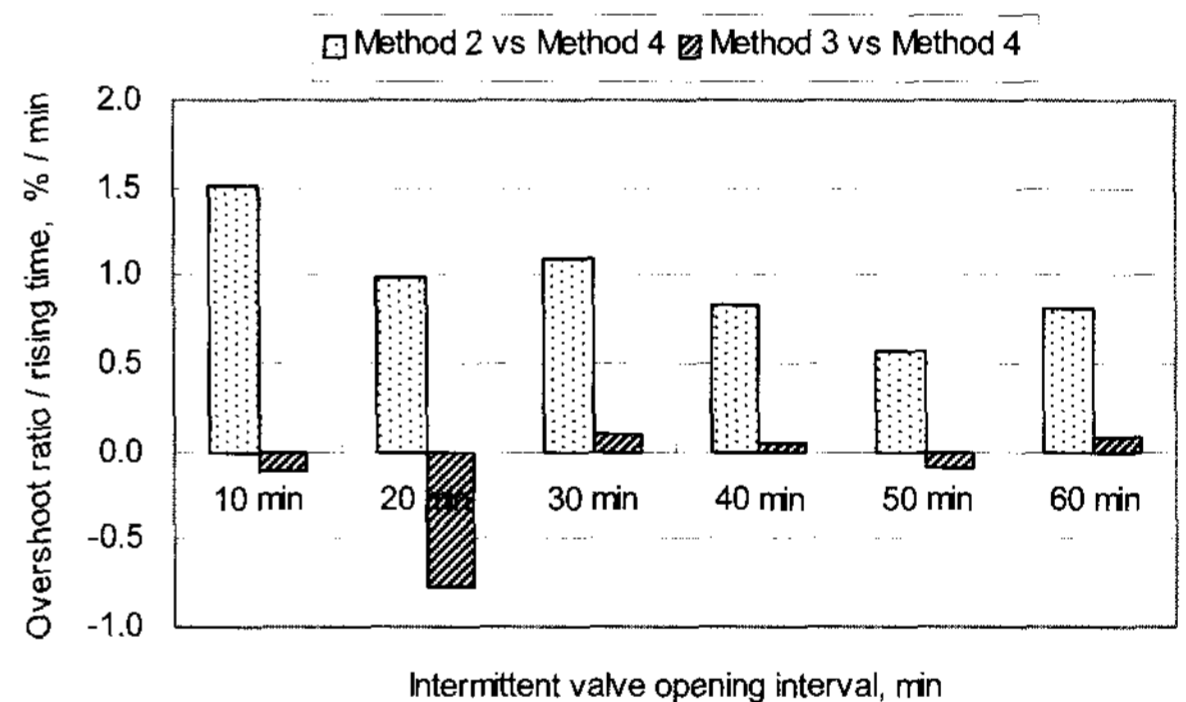


Fig. 18 Comparison of overshoot ratio/rising time for various control methods for the target MC of 15%.

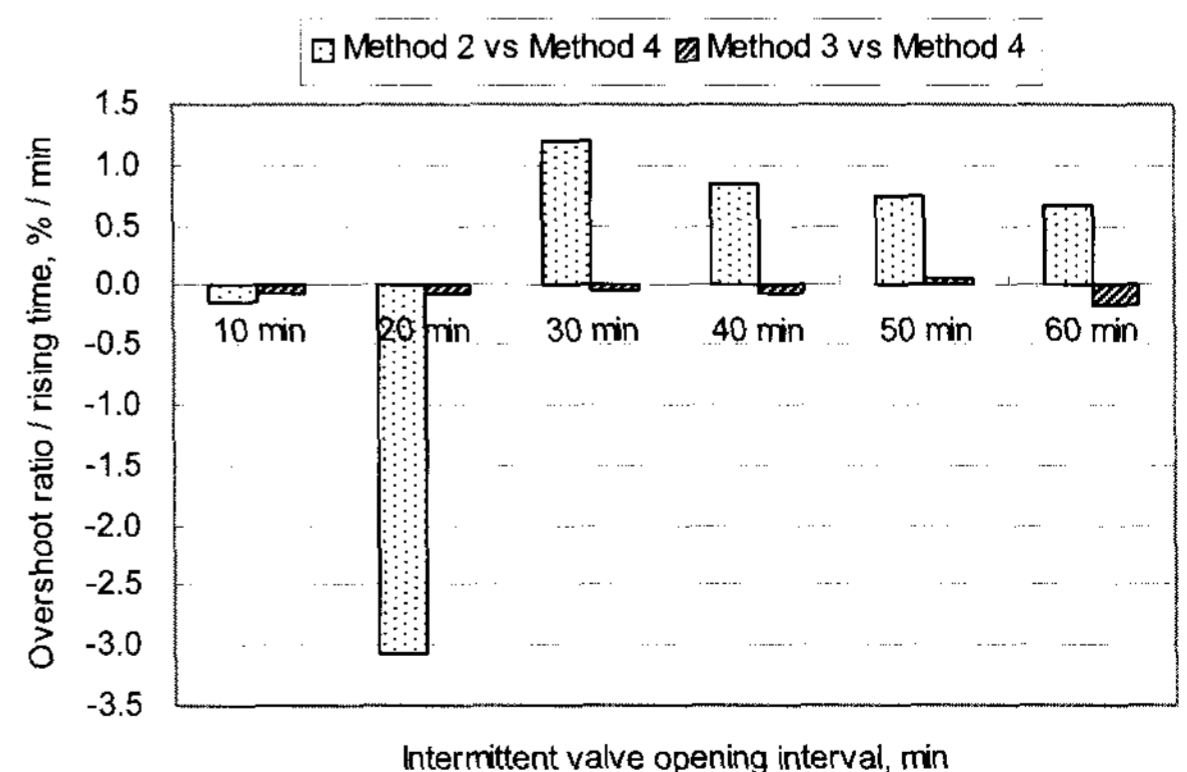


Fig. 19 Comparison of overshoot ratio/rising time for various control methods for the target MC of 20%.

Table 4 Analysis of control variables for various control logics in the study

Control logic	Control objective MC (%)	Control interval (min)	Acquisition distance (cm)	Delay time[L] (min)	Rising time[T] (min)	Over/under shoot (WC, %)
Drip nozzle on/off control	15	Continuity	0	25.8	326.7	19.93
			10	23.5	193.3	16.80
			20	28.2	328.8	16.23
	20	Continuity	0	40.0	164.7	24.98
			10	30.8	242.6	24.98
			20	48.8	424.6	24.98
Water shutdown control	15	Continuity	0	22.8	384.9	15.88
			10	22.8	717.0	15.50
			20	33.0	1145.0	14.55
	20	Continuity	0	27.5	307.2	21.68
			10	27.5	417.7	21.00
			20	46.9	748.3	20.13
Intermittent valve opening interval control	15	10	0	35.7	420.2	15.23
		20	0	41.1	410.2	15.09
		30	0	22.8	380.7	15.48
		40	0	22.1	378.0	15.77
		50	0	27.5	361.5	16.55
		60	0	24.5	359.3	15.45
	20	10	0	34.6	579.2	19.11
		20	0	42.7	545.3	19.18
		30	0	24.5	480.7	20.55
		40	0	26.7	421.6	21.07
		50	0	22.8	436.0	21.29
		60	0	24.3	456.8	22.48

본 실험의 결과를 통해 단순 제어방식의 극심한 오버슈트를 줄이기 위한 제어기법을 도입할 때 일정시간 간격을 두어 교차로 수분을 공급하는 방식을 병행할 경우 응답시간과 오버슈트 비율이 비교적 안정적인 제어할 수 있다고 생각되었다. 나아가 이러한 특성은 현실적으로 수분 공급량의 절약으로 직결되는 부분이며 단시간 내의 함수율의 빠른 조절을 필요로 하지 않는 경우에는 충분히 효율적인 제어방식이 될 수 있다고 판단하였다.

이와 같이 수행한 각기 다른 3가지 방식의 제어특성을 파악하고자 비선형열린회로의 응답특성 분석에 이용되는 상태변수를 표 4에 나타내었다. 일반적인 선형폐회로의 분석에서는 over/undershoot는 비정상적이지만 예측 가능한 제어오류에 해당하고 이를 줄이기 위한 방향으로 제어기가 설계되며 이를 위해서 제어이득 K(제어 목표)를 지정해야 한다. 그러나 본 연구에서는 대상으로 하는 시스템은 토양의 수분을 강제로 저하시킬 수 없는 특성이 있어 토양 함수율의 시계열 변화가 안정되는 시점의 값을 응답특성 분석에 참고하였다.

일반적으로 짧은 지연시간과 도달시간 동안에 작은 오버슈트를 보일 때 제어성능이 우수하다고 판단할 수 있다. 이런 관점을 기준으로 본 연구에서 수행한 제어 방식별 응답성능을 시각적으로 비교하기 위하여 표 4에 지연시간이 30분 미만인 결과에는 굵은 글씨체를 사용하였으며 over/undershoot 비율이 10% 이하인 결과에는 이탤릭체를 사용하여 구분하였다. 점적노즐 on/off 제어의 경우 빠른 반응시간을 보인 것이 특징이며, 수분공급을 중단하는 제어의 경우 작은 오버슈트 비율을 보이는 것이 눈에 띄는 차이점이라 분석되었다. 비연속식 수분공급 제어의 경우 이전 2가지 방식의 제어성능 특성이 혼합되어 나타나고 있는 것으로 판단되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 시설 재배지나 관비 재배지에서 이루어지는 관수/관비 시스템의 운영에 있어 농업용수의 낭비, 과도한 양분공급에 의한 토양 오염의 누적 등의 경제적, 환경적 역효과

적인 현상을 억제하기 위해 수행되었다. 구체적으로는 마이크로 컨트롤러를 기초로 하여 작목 주변부 여러 지점의 토양 수분을 계측할 수 있는 계측 시스템 구성하고, 토양 수분 계측값을 분석하여 수분의 과부족을 판단하는 제어 로직을 설정하며, 궁극적으로 수분의 과부족 현상을 억제하기 위한 정밀 제어 시스템 개발하고자 하였다. 이러한 목적에 의거하여 시설재배 환경 하에서 일반적인 제어시스템의 응답성능을 제고하고 동시에 공급량의 낭비를 줄이는 것이 가능하다.

본 연구에서 개발하고자했던 시설재배 토양의 수분의 과부족 현상을 억제하기 위한 정밀제어시스템의 전반적인 제어 특성은 다음과 같이 요약할 수 있었다.

- (1) 점적 노즐로부터 20 cm에 이르는 거리에서도 토양 함수율의 변화를 감지할 수 있었다.
- (2) 함수율 조절을 위한 제어에서 단순 피드백에 의한 제어는 과도한 응답을 초래하여 수분의 과다 공급을 발생시킨다. 특히 이러한 현상은 함수율을 높게 제어하려는 상황에서 정도가 심한 것으로 나타났다.
- (3) 과도응답을 방지하기 위한 제어에서는 응답시간을 연장시키는 역효과가 있으며 그럼에도 불구하고 과도응답이 발생하는 상황을 억제하기 어려운 것으로 판단되었다.
- (4) 제어범위 내에서 일정 간격을 두어 수분공급을 수행하는 비연속식 제어 방식에서 제어간격이 짧은 경우 응답시간이 크게 연장되는 단점이 발견되나, 응답시간의 증가폭이 적어짐과 동시에 과도응답 비율이 감소하였다.
- (5) 시설재배 토양에 있어서는 과도응답이 발생한 시점 이후의 상태는 함수율 제어가 불가능하다는 점과 계의 입력상태가 외란에 민감하다는 측면으로 인하여 선형 폐회로시스템에 적용되는 제어계수 분석에 의한 성능파악은 토양 함수율의 포화 상태가 이르기 전 단구간의 시계열 내에서만 한계적으로 도입해야할 필요성이 있었다.

- (6) 본 연구는 시설재배지에서 하루에 1회 1시간 관수 밸브를 열어 두는 관행적인 관리방법을 대체하는 과학적 관리 방법론을 제공할 수 있는 필수적인 제어 기술로 발전할 수 있을 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. Gulshan, M. and K. G. Singh. 2006. Response of greenhouse tomato to irrigation and fertigation. *Agricultural Water Management* 84:202-206.
2. Jerzy, J. 1998. Reliability of drip irrigation systems under different operation conditions in Poland. *Agricultural Water Management* 35:261-267.
3. Maisiri, N., A. Senzanje, J. Rockstrom and S. J. Twomlow. 2005. On farm evaluation of the effect of low cost drip irrigation on water and crop productivity compared to conventional surface irrigation system. *Physics and Chemistry of the Earth* 30:783-791.
4. Rajani, K. M., C. Dey and T. Lee. 2008. An improved auto-tuning scheme for PI controllers. *ISA Transactions* 47:45-52.
5. Thompson, R. B., M. Gallardo, M. D. Fernandez, L. C. Valdez and C. Martinez-Gaitan. 2007. Salinity effects on soil moisture measurement made with a capacitance sensor. *Soil Science Society of America Journal* 71(6):1647-1657.
6. Zhang, N., G. Fan, K. H. Lee, G. J. Kluitenberg and T. M. Loughin. 2004. Simultaneous measurement of soil water content and salinity using a frequency method. *Soil Science Society of America Journal* 68:1515-1525.
7. 김기복, 김상천, 주대성, 윤동진. 2003. 고주파의 2개 주파수 임피던스 변화를 이용한 토양내 수분함량 정밀측정. *한국농업기계학회지* 28(4):369-376.
8. 이원주, 최영철, 송성범, 성문현. 1992. 뽕밭 지하점적관수 및 관비에 의한 생산성 향상에 관한 연구. *Korean Society of Sericultural Science* 34(2):6-12.