

퍼지 전문가 제어 기법을 이용한 시설재배 자동화 소프트웨어의 구현

김승우[†]

요 약

본 논문에서는 시설내 작물재배 시스템의 완전자동화를 구현함과 동시에 자동 제어 방식 설계상에 존재하는 많은 문제들 때문에 실현하지 못했던 작물의 직접제어자동화를 구현하였다. 시설내 작물재배 자동제어 시스템은 제어대상에 따라서 세 가지로 구분될 수 있다. 시설외부로부터 기상 환경 등을 계측하여서 시설내 재배 제어에 응용하는 외부 환경 제어, 시설 내부 환경을 직접 계측하고 제어하는 내부 환경 제어, 작물의 성장에 직접 공급되는 배양액의 적절한 조성에 관련된 배양액 제어로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 이 세 가지의 자동 제어시스템을 완전 실현하며, 배양액의 급액량을 제어함으로써 작물의 우량 성장을 자동적으로 조절할 수 있는 고난도 제어시스템을 설계하였다.

Implementation of an Automation System Using Fuzzy Expertized Control Algorithm for the Cultivation in a Greenhouse

Seung-Woo Kim[†]

ABSTRACT

In this paper, a new approach to the automation of the cultivation in a green house is suggested and a practical automatic control cultivation system is implemented. To automatically control and optimize the very nonlinear and time-varying growth of farm products, a hybrid strategy(FECA, Fuzzy Expertized Control Algorithm) is proposed which serially combines a fuzzy expert system with the fuzzy logic control. The fuzzy expert system(FMES, Fuzzy Model-based Expert System) is intended to overcome the non-linearity of the growth of farm products. The part of fuzzy controller(FLC, Fuzzy Logic Controller) is incorporated to solve the time-variance of the growth of farm products. Finally, the efficiency and the effectiveness of the implemented agricultural automation system is presented through the cultivation results.

Keywords :Agricultural labor, Hydroponics, Fuzzy Expertized Control Algorithm

1. 서 론

세계적으로 상공업의 발전과 그에 따른 도시와 농촌의 소득 격차는 노동력의 도시 집중화를 가속시켜 농촌 노동력의 급속한 감소를 초래했으며

공업화에 따른 관개수와 토양 및 환경의 오염은 보다 높은 품질의 농산품을 요구하기에 이르렀다. 이와 같은 농촌 노동력의 감소와 고품질 상품의 요구는 생력적이면서 작물의 품질 제어가 가능한 양액재배(수경재배 : Hydroponics)에 많은 관심을 갖게 만들었다. 양액재배는 유리온실과 같은 시설에서 재배하는 것이 일반적이다. 시

[†] 정 회 원: 순천향대학교 정보기술공학부 교수
논문접수: 2004년 1월 15일, 심사완료: 2004년 1월 16일
* 본 연구는 2001년도 순천향대학교 대학자체 연구비로 지원되었음.

설 내부에서는 각종 작물을 고밀도로 배치하고 생육에 영향을 미치는 각종 환경 요인을 자동적으로 제어하는 것이 가능하기 때문에 시설재배의 장점을 극대화하기 위한 작물 생산 시스템의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 더 나아가 미래의 농업 형태로 주목받고 있는 완전제어형 작물 생산 시설 즉 식물공장의 생육환경에 대한 자동제어 시스템과 이에 소요되는 계측 및 제어장치 분야에 관한 연구가 체계적으로 이루어지고 있다.

본 논문에서는 시설내 작물재배 시스템의 완전자동화를 구현함과 동시에 자동 제어 방식 설계상에 존재하는 많은 문제들 때문에 실현하지 못했던 작물의 직접제어자동화를 구현하였다. 시설내 작물재배 자동제어 시스템은 제어대상에 따라서 세 가지로 구분될 수 있다. 시설외부로부터 기상 환경 등을 계측하여서 시설내 재배 제어에 응용하는 외부 환경 제어, 시설 내부 환경을 직접 계측하고 제어하는 내부 환경 제어, 작물의 성장에 직접 공급되는 배양액의 적절한 조성에 관련된 배양액 제어로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 이 세 가지의 자동 제어시스템을 완전 실현하며, 배양액의 급액량을 제어함으로써 작물의 우량 성장을 자동적으로 조절할 수 있는 고난도 제어시스템을 설계하였다.

작물생산 시스템을 통한 동적 자동 제어를 위해서는 각종 환경요인들을 계측하고, 이를 환경 제어의 피드백(feedback) 신호로 활용할 수 있어야 한다. 이를 위하여 계측대상이 되는 재배 및 환경 요인들을 선정하고, 온실 계측 시스템 및 모니터 소프트웨어를 개발하였다. 또한 작물을 재배하는데 직접 공급되는 배양액의 조성비 제어는 배양액을 구성하는 비료들과 pH 그리고 온도 등을 작물의 성장 시기와 성장 상태 그리고 성장 환경에 따라 적절한 구성비로 섞어주는 제어 시스템이다. 그 동안 이것은 입출력이 많고, 제어의 마지막 대상인 작물의 성장 모델링(modeling)이 어려운 관계로 수동 제어 또는 단순 시간 제어를 세계적으로 사용하고 있는 실정에 있다. 그러므로 본 논문에서는 모델링이 비선형성이 강한 제어대상 시스템에 적절한 퍼지 제어 방법으로 그동안의 문제를 완전히 극복한 적절한 배양액 조

성 제어 시스템을 구현하였다.

특히 양액 재배에서 작물의 최상의 성장 즉 과실류인 경우 그 열매의 수와 당도 그리고 크기 등을 최적화하는 제어는 그 동안 자동제어가 불가능한 것으로 인정되어 왔다. 이 최적제어는 이것은 시설재배의 자동화가 추구하는 많은 장점들 중에서 최고의 목표이기도 하다. 그동안 시설재배에서 내부 또는 외부의 환경제어는 간단한 피드백(feedback) 제어에 의하여 자동화를 실현시켜 왔으나, 배양액의 조성비 제어와 작물성장의 최적제어는 아직도 제어 방법상의 어려운 문제에 부딪혀 제자리 걸음에 머물러 있다. 그 이유는 모든 종류의 작물이 재배 환경에 대한 그 특성 변화가 매우 큰 비선형성(non-linearity)을 갖고 있어서 모델링이 불가능하며, 성장시기에 따라서 동종의 작물이라도 그 특성변화가 매우 크게 나타나는 강력한 시변시스템(time-varying system)이기 때문이다. 시변 및 비선형성이 강한 작물 성장의 최적 제어로 적응제어(adaptive control) 및 강인제어(robust control) 등을 적용하는 연구가 시도된 적도 있으나 만족한 결과를 얻지 못하였다. 그 이유는 시변성 및 비선형성이 너무 커서 적응제어나 강인제어가 극복할 수 있는 한계를 넘고 있기 때문이다. 그러므로 본 논문에서는 시변성 및 비선형성이 매우 큰 작물의 성장 최적 제어에 퍼지 전문가 시스템과 퍼지논리제어 방식을 직렬로 혼합한 새로운 제어 방식을 적용하여 시변성은 퍼지 전문가 시스템으로 비선형은 퍼지논리 제어방식으로 극복함으로써 작물의 최적 성장을 실현하였다. 이 때 사용한 입력은 배양액의 급액량이고 배양액의 배지내 양을 제어하기 위한 피드백 센서로는 배지내 수분량을 정밀하게 측정할 수 있는 중량센서(weighing system)을 설계 제작하였고, 24개의 중량센서로부터 데이터를 받아들이는 직렬 멀티포트를 제작하여 사용하였다.

본 논문의 구성은 1장에서는 논문의 배경 및 연구 목적, 방법을 설명하고, 2장에서는 시설재배에 대한 전반적인 내용을 설명하고, 시설재배의 자동화에 유연하게 사용될 수 있도록 설계 구현한 시설재배 자동화 시스템의 전체적인 구성과 모니터 프로그램을 설명하고, 3장에서는 새로운 제어방식을 개발하여 적용한 배양액 제어와 작물

의 최적성장을 위한 배양액의 급액량 제어방식을 기술하고, 배양액 조성비 제어방식과 스케줄링 제어방식에 대하여 기술하였고, 4장에서는 3장의 내용을 바탕으로 실제 구현에 관하여 설명하고, 5장에서는 실험 및 결과로서 및 본 논문에서 구현한 시설재배의 환경자동제어와 배양액 제어 그리고 작물의 최적 성장을 위한 배양액의 급액량 제어기를 작물재배에서 매우 어려운 재배종인 멜론에 대하여 적용하여 좋은 결과를 얻는 것을 보여주고 6장에서는 본 논문에서 구현한 시설재배의 완전 자동화 및 시변성 및 비선형성이 매우 강한 작물의 최적 성장제어에 적용하기 위한 퍼지 전문가 제어 알고리즘(fuzzy expertized control algorithm)의 성능을 확인한다.

2. 시설재배 자동화시스템의 구조

2.1 전체 구성도

그림 2.1은 시설재배 자동화시스템의 구성도이다.

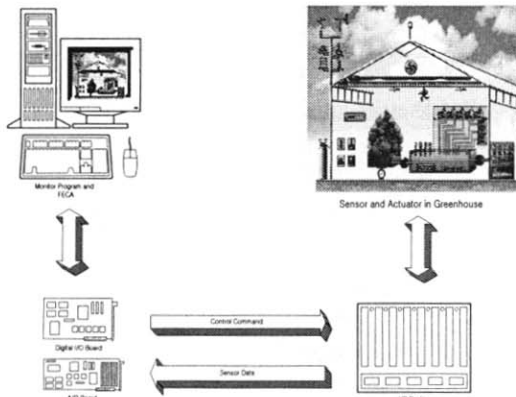


그림 2.1 시설재배 자동화 시스템 구조

2.2 시설재배 자동화 시스템 제어

시설재배 자동화는 유리온실 내에서 자라는 식물에 대해 크게 환경제어와 재배제어 부분으로 나누어진다. 유리 온실내부의 환경변수를 사용하여 제어를 하는 경우가 내부 환경제어이고 유리 온실 주위의 환경변수를 사용하게 되면 외부 환경제어이다. 이러한 환경변수를 받아 유리온실의 환경을 조절하게 된다.

2.2.1 환경제어

환경제어는 시설 내부 환경제어와 시설 외부 환경제어로 나누어진다. 시설 내부환경제어에서 사용되어지는 환경변수는 습도, 광도, 온도를 사용한다.

시설 외부의 환경제어는 유리온실 외부의 환경변수를 측정해 식물의 성장 환경을 최적화하는 것이다. 시설 외부 환경변수로는 기온, 습도, 광도, 강우, 풍향, 풍속을 사용한다. 식물의 성장은 외부의 환경변수에 영향을 많이 받는 것도 있고, 혹은 큰 영향을 받지 않는 것도 있다. 본 논문은 재배되어진 식물은 모든 환경에 민감하게 반응하는 멜론의 재배에 관한 것이다.

2.2.2 배양액 제어

그림 2.2는 본 논문에서 구현한 시설재배 자동화 시스템의 배양액 제어 시스템을 나타낸 것이다.

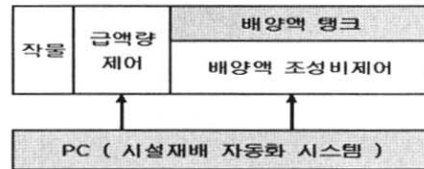


그림 2.3 배양액 제어시스템

배양액 제어시스템은 작물의 성장에 직접적으로 관여를 한다. 그림 2.3에서 배양액 탱크에서는 배양액 조성비 제어가 이루어지고, 배양액 탱크에서 작물로의 급액량이 제어된다. 시설재배 자동화 시스템의 프로그램은 배양액 제어에서 배양액 조성비제어와 급액량 제어를 동시에 하게 되어있다. 배양액 제어는 식물의 성장과 열매의 당도와 크기에 밀접한 관련이 있는 제어이다. 탱크 내에서 사용자가 설정한 배양액의 pH와 비료 농도 등을 조절하는 것이 배양액 조성비 제어이다. 배양액 조성비 제어에 필요한 센서로는 산도를 측정하는 센서, 비료의 농도를 측정하는 센서, 수온을 측정하는 센서 그리고 탱크의 수위를 측정하는 센서가 있다. 본 논문에서 중점적으로 사용한 센서는 pH 센서와 전해(EC)센서이다. 이 두

요소가 식물 성장에 가장 큰 영향을 미치기 때문이다. 본 논문에서는 배양액 조성비 제어로 PI 제어기를 사용하였다. 시설재배 자동화 시스템의 프로그램은 사용자가 설정한 값을 기준으로 계속해서 탱크내의 배양액의 농도를 조절을 한다. 급액량 제어는 탱크 내에 배양을 얼마만큼 공급해 줄 것인가를 결정을 하고 배지로의 급액량을 조절한다. 특히 멜론재배에 있어 급액량은 작물의 무게 및 크기와 밀접한 관련이 있다. 본 논문에서는 이 부분을 퍼지전문가 제어 알고리즘를 사용해 제어를 하였다.

3. 배양액 제어 알고리즘

3.1 배양액 조성비 제어 알고리즘

배양액 탱크의 센서에서 현재의 pH와 EC를 읽어들이게 되어있다. 이렇게 읽어들이는 센서값과 사용자가 설정한 값을 비교해 그 오차만큼 PI 제어기가 동작을 하여 사용자의 설정값을 유지하게 된다.

다음 그림 3.1은 PI 제어기를 블록선도로 나타내었다.

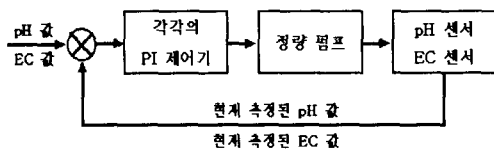


그림 3.1 배양액 조성비 제어에 사용되는 PI 제어기

PI제어기의 지령치는 사용자가 설정한 pH수치와 EC수치이다. PI제어기는 pH와 EC의 제어를 위해 탱크 당 2개씩 동작하게 된다. 본 논문에서 사용한 PI 제어기의 기본 식이다.

$$Error = r - y \quad (식 3.1)$$

$$Pump_I = G_p \cdot Error + G_i \cdot \int Error \quad (식 3.2)$$

본 논문에 사용된 시스템의 펌프는 분당 출력이 75ml 인 펌프를 사용하였다. 예를 들어 1초 동안에 산 펌프를 가동시키면 배양액 내의 산도 (pH수치)는 0.03이 올라간다. 즉 초당 1.25ml이고 pH수치를 0.01증가시키는데 필요한 양은 0.42ml가 된다. PI제어기에서 두 계인의 값을 다음과 같이 정의하였다.

$$G_p = 42, \quad G_i = 0.03 \quad (식 3.3)$$

그러므로 현재 발생한 Error는 PI제어기의 입력으로 사용을 한다.

PI제어기를 통해 나오는 출력을 0.42ml/sec으로 나누어 동작시간을 결정한다. PI제어기의 출력 $Pump_I$ 는 정량펌프를 가동하는 시간으로 된다.

$$T_{PUMP} = Pump_I \div 0.42 \text{ ml/sec} \quad (식 3.4)$$

3.2 급액량 제어 알고리즘

3.2.1 FECA (Fuzzy Expertized Control Algorithm)

본 논문에서 퍼지 전문가 시스템에 기초를 둔 새로운 제어 알고리즘 (FECA, Fuzzy Expertized Control Algorithm)구조를 제안하고 이를 통해 작물 성장을 제어하도록 한다. 작물 성장 시스템은 비선형 시변 시스템으로 수학적으로 표현이 어렵고 매우 많은 불확실성이 관여하는 시스템이다. 농업 작물 성장 시스템은 농업 전문가의 경험에 의한 생산방식이 가장 훌륭한 성장 방식으로 받아들여지는 분야로 전문가의 의견을 그대로 제어 방식으로 표현할 수 있는 퍼지 제어 알고리즘이 가장 적당한 방법이라고 생각할 수 있다. 본 논문에서는 퍼지 전문가 기반 제어 알고리즘 (FECA, Fuzzy Expertized Control Algorithm) 구조를 통해 식물 성장 제어 시스템을 구현하도록 한다.

FECA의 구조는 그림 3.2에서 보는 바와 같이

크게 퍼지 모델 기반 전문가 시스템(FMES)과 퍼지 논리 제어기(FLC)의 직렬혼합구성으로 되어 있다.

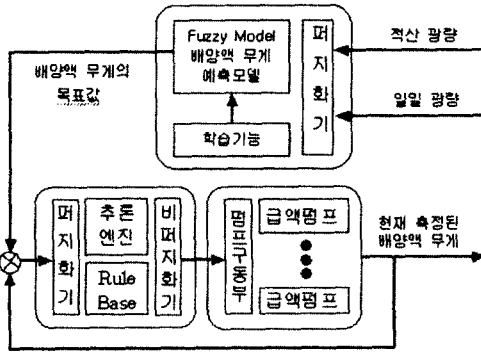


그림 3.2 FECA 제어기 구조

그림 3.2에서 배양액의 무게가 결정이 되면 퍼지 제어기의 입력으로 사용된다. 퍼지 제어기는 현재 측정된 무게를 입력 무게와 비교해 무게에 대한 오차를 계산하고 제어기를 동작하게 된다. FMES는 작물 성장 시스템의 시변성을 반영하여 이를 상쇄하도록 설계되는 부분으로 원하는(desired) 배지안의 배양액의 양을 발생(generation)시키는 역할을 한다. 이음에서 알 수 있듯이 전문가의 의견을 반영한 데이터를 추출하여 퍼지 모델을 형성하고 이를 기반으로 한 제어 시스템이다. 퍼지 모델로는 최근 각광을 받고 있는 클러스터링기법을 이용한 퍼지 모델을 이용한다. 사용한 퍼지 모델링 알고리즘은 대략 조정과 미세 조정의 두 단계로 구성된다. 대략 조정에서는 후건부와 전건부 파라미터가 클러스터링 알고리즘에 의해서 근사적으로 조정되며 미세 조정시에는 후건부 및 전건부 파라미터가 더욱 정확하게 조정되어 퍼지 모델링을 달성하게 된다. 본 논문에서 사용되는 알고리즘은 대략 조정시 이중 클러스터링 방법을 사용하여 이중 클러스터링시 샘플 데이터는 공간 분할되며 각 영역에 대해서 가장 적합한 어떤 모델의 파라미터에 대한 추정치를 제공해 준다. 퍼지 전문가 기반 제어 알고리즘(FMES)에서 나온 추론 결과를 원하는 배지의 무게로 하고 실제 배지의 무게가 FMES의 추론

결과를 따를 수 있도록 제어시스템을 구축한다.

본 식물 재배 제어 시스템은 비선형적이고 불확실한 시스템이며 또 식물의 성장이 외부 외란으로 작용하는 대단히 복잡한 시스템으로서, 수학적 모델링을 통한 접근 방식은 대단히 어렵다고 할 수 있다. 따라서 이 시스템의 제어 전략으로는 농업 전문가의 재배 방식을 표현할 수 있으면서 불확실성에 대처할 수 있는 방법이어야 하는데, 이에 가장 적합한 방법이 퍼지 제어이다.

본 논문에서 사용하는 전문가 시스템은 최적의 입력 데이터와 출력 데이터를 실험을 통해 추출하여 이를 비선형 모델링을 통해 구현하는 모델 기반 전문가 시스템을 사용한다. 본 논문에 사용하게 될 비선형 시스템을 묘사하는 모델은 다음과 같은 2개의 요소를 입력으로 사용하고 원하는 배지내의 배양액의 무게를 출력으로 갖는 시스템으로 한다.

표 3. 1 비선형 시스템 묘사모델

입 력	출 력
당 일 광량	원하는 배지내
파종이후 현재까지의 적산 광량	배양액의 무게

비선형 시스템을 구현할 모델 최근 뛰어난 성능을 인정 받고 있는 퍼지 모델을 사용하도록 한다. 지금까지 소개된 대표적인 퍼지 모델링 방법으로는 Tong, Pedrycz, Wang, Xu, Lin and Cunningham III등 많은 학자들이 여러 가지 형태의 퍼지 모델을 제안하였다. 이 가운데 가장 뛰어난 성능을 보이는 것이 Sugeno가 제안한 방법이다. 이 모델은 통상 TSK (Takagi-Sugeno-Kang) 퍼지 모델 혹은 간단히 Sugeno 형 퍼지 모델로 언급되며 주요한 특성은 바로 퍼지 모델의 후건부가 어핀(affine) 혹은 초평면(hyperplane-shaped)의 식으로 표현되는 것으로 기본적인 구조는 다음과 같다.

$$R^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, x_m \text{ is } A_m^i \quad (\text{식 3.4})$$

$$\text{then } y^i = a_0^i + a_1^i x_1 + \dots + a_m^i x_m \quad (\text{식 3.5})$$

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^c w^i y^i}{\sum_{i=1}^c w^i} \quad \text{where } w^i = \text{MIN}_{j=1}^m A_j^i(x_j)$$

(식 3.6)

여기서 $R^i(i=1,2,\dots,c)$ 는 i 번째 퍼지 규칙이고 $x_j(j=1,2,\dots,m)$ 은 입력을 y^i 는 퍼지 규칙 R^i 의 출력이다. 본 모델의 설정방법은 최근 발표된 클러스터링-기반 설정 알고리즘을 이용한다. 본 설정 알고리즘은 다른 알고리즘에 비해 쉽게 구현되는 장점이 있다.

본 알고리즘은 대략 조정과 미세 조정의 두 단계로 구성된다. 대략 조정에서는 후건부와 전건부 파라미터가 클러스터링 알고리즘에 의해서 근사적으로 조정되며 미세 조정시에는 후건부 및 전건부 파라미터가 더욱 정확하게 조정되어 퍼지 모델링을 달성하게 된다. 본 논문에서 사용되는 알고리즘은 대략 조정시 이중 클러스터링 방법을 사용하여 이중 클러스터링시 샘플 데이터는 공간 분할되며 각 영역에 대해서 가장 적합한 어떤 모델의 파라미터에 대한 추정치를 제공해 준다.

실험으로부터 n 개의 샘플 데이터 $(X_k, y_k), 1 \leq k \leq n$ 가 주어지고 c 개의 퍼지 규칙을 갖는 퍼지모델이 적용되어 진다고 가정하자. 이 때 이중 클러스터링에 사용되는 설계 파라미터는 다음과 같다.

c : 두 번째 클러스터링에서 사용되는 클러스터의 수 (즉 퍼지 규칙의 수)

$$\rho = \frac{\text{일차 클러스터링에 생성되는 부클러스터의 수}}{\text{이차 클러스터링에 생성되는 클러스터의 수}} \quad (\text{식 3.7})$$

c 는 퍼지규칙의 수로서 그림2와 같이 조정되고 ρ 는 일차 클러스터링에서 생성되는 부클러스터의 수에 대한 이차 클러스터링에서 생성되는 클러스터 수의 비(ratio)로서 정의된다. 이 값은 설계자가 결정해야 하는 변수이며 일반적으로 실험에 의하면 5에서 20사이의 값을 선택하는 것이

가장 적절한 것으로 여겨진다.

STEP 1 : 일차 클러스터링(first clustering)

각 샘플 데이터 $(X_1, y_1), (X_2, y_2), (X_3, y_3), \dots, (X_n, y_n)$ 에 FCM을 적용하여 $\rho \times c$ 개만큼의 부클러스터 $S^1, S^2, \dots, S^{\rho \times c}$ 를 생성한다. 여기서 n 은 샘플 데이터의 수이며 일반적으로 n 은 $\rho \times c$ 값에 비해 상당히 큰 값을 가져야 한다. ($n \gg \rho \times c$). 다시 설명하면, 참고 문헌 [20]의 FCM을 샘플 데이터 (X_k, y_k) 에 적용하여 l 번째 부클러스터 S^l 에 소속되는 멤버십값 $\mu_k^l(k=1,\dots,n, l=1,\dots, \rho \times c)$ 을 결정하는 과정이다. 이 때 모든 k 에 대해서 다음의 관계가 성립한다.

$$0 \leq \mu_k^l \leq 1, \quad \sum_{l=1}^{\rho \times c} \mu_k^l = 1, \quad \text{for all } k \quad (\text{식 3.8})$$

Step 2 : 파라미터 공간으로 변환 (transformation into the parameter space)

각 클러스터에 대해서 최적합 초평면(hyperplane-shaped best-fit)를 구해내기 위해서 WRLS(weighted recursive least square)방법을 적용한다. 예를 들면, 1 번째 클러스터에 대한 최적합 초평면은 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$y^l = a_0^l + a_1^l x_1 + \dots + a_m^l x_m \quad \text{or } y^l = \mathbf{X}^T \mathbf{A}^l \quad (\text{식 3.9})$$

$$\mathbf{X} = [1 \ x_1 \ \dots \ x_m]^T, \quad \mathbf{A}^l = [a_0^l \ a_1^l \ \dots \ a_m^l]^T \quad (\text{식3.10})$$

여기서 입력벡터 \mathbf{X} 는 m 차인 것으로 가정하며 (X_k, y_k) 가 S^l 에 속하는 정도가 $\mu_k^l(k=1,\dots,m)$ 라고 하면 최적의 파라미터 $\mathbf{A}^l = [a_0^l \ a_1^l \ \dots \ a_m^l]^T$ 은 다음과 같은 순환식으로 구해진다.

$$A_{k+1}^i = A_k^i + K_k [y_{k+1} - X_{k+1}^T A_k^i] \quad (\text{식 3.11})$$

$$K_k = \frac{S_k X_{k+1}}{1/\mu_k^i + X_{k+1}^T S_k X_{k+1}} \quad (\text{식 3.12})$$

$$S_{k+1} = [1 - K_k X_{k+1}^T] S_k \quad (\text{식 3.13})$$

이와 같은 방식으로 다른 모든 클러스터의 파라미터 A^l ($l=1, \dots, \rho \times c$)의 값을 얻을 수 있다.

Step 3 : 이차 클러스터링(second clustering)

FCM을 A^l ($l=1, \dots, \rho \times c$)에 적용하여 파라미터 공간 (a_0, a_1, \dots, a_m) 상에서 R^1, R^2, \dots, R^c 로 주어지는 c 개의 클러스터를 형성한다. 각 클러스터의 중심은 Sugeno형 퍼지 모델에서 각 퍼지 규칙의 후건부로서 사용된다. 지금부터 i 번째 클러스터 R^i 의 중심은 P^i ($i=1, \dots, c$)로 표현한다.

4. 배양액 제어 시스템

4.1 배양액 조성비 제어

그림 4.1은 배양액 조성비 제어의 블록선도를 나타낸 것이다.

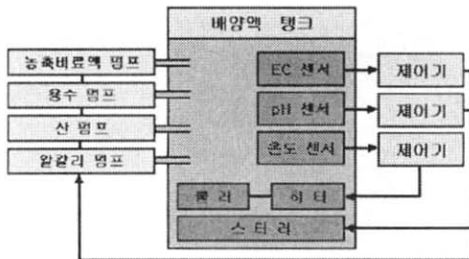


그림 4.1 배양액 조성비 제어의 블록선도

배양액 조성비 제어는 작물에게 급액할 배양

액의 pH수치와 EC수치를 자동으로 조절해 주는 제어이다. 배양액 탱크 안에는 pH, EC, 온도 센서가 배양액 탱크 내부에서 현재 센서 수치를 제어기로 보내게 된다. 각 제어기는 사용자가 설정한 수치를 유지하기 위해 액추에이터를 동작하게 된다. 본 논문에서 구현한 시설재배 자동화 시스템의 프로그램은 시설재배 자동화 프로그램에서 조성비제어는 사용자가 자동제어모드로 사용을 하거나 아니면 시간 계획 제어 모드로 사용을 하더라도 항상 동작을 한다. 사용자가 조성비 제어가 필요한 센서를 설정하면 조성비 제어는 시작된다.

4.2 배양액 급액량 제어

본 논문에서의 급액량 제어는 배양액 무게 예측 모델로 얻어진 데이터를 가지고 제어기(FLC)를 사용하였다. 멜론 작물은 작물의 베지에 공급되는 배양액의 양과 작물의 성장 곡선에 매우 중대한 관계를 가지고 있다. 그림 4.3은 시설재배 자동화 제어시스템에서 사용한 중량제어 시스템의 블록선도이다.

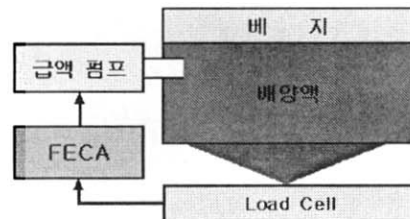


그림 4.2 중량제어 시스템의 블록선도

본 논문에서 제작한 중량센서를 사용해 베지의 무게를 측정하여 제어기의 예어로 사용한다. 베지 내의 배양액은 급액 펌프를 통해 배양액 탱크에서 들어 오게된다. 그림 5.2에서 보면 로드셀의 무게의 FECA의 입력으로 되어있다. 무게 데이터는 FECA내부의 FLC의 입력으로 들어가게 된다. 본 논문에서 사용한 무게센서는 로드셀을 사용한다. 로드셀의 출력은 낮은 전류형태로 CAS저울로 들어오게 된다. 대부분 제어 대상과 제어용 컴퓨터와는 원거리를 원칙으로 하기

때문에 정확한 데이터를 보내기 위해서는 전압보다는 전류형태로 보내지게 되고 CAS저울은 무게를 측정해 정해진 RS-232포맷으로 전송을 하게 된다. 배양액 조성비 제어에 사용되는 센서도 전류출력이기 때문에 선트(Sunt)저항을 사용해 A/D 변환기의 입력으로 사용을 한다.

4.2.1 퍼지 제어기의 입력 변수

본 논문의 퍼지 제어기의 입력변수로는 배양액 무게의 목표 값에 대한 오차와 오차의 적분값으로 선택을 하였다. 여기서 배지내로 들어가는 배양액이 오버슈트가 생기지 않도록 하기 위해 1 % 미만의 언더슈트가 발생 되도록 설정이 되었다. 그러기 때문에 오차의 적분 값은 여기서 발생되어지는 정상상태의 오차를 보정하기 위해 설정하였다. 그림 4.3은 퍼지 제어기의 블록선도이고, 퍼드백되는 오차는 식4.1과 같다.

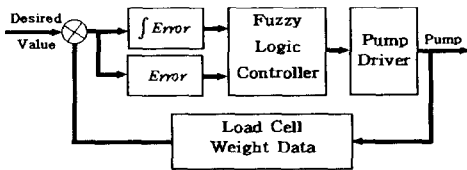


그림 4.3 퍼지 제어기의 블록선도

$$Error = Desired Value - Measurement Value \quad (식 4.1)$$

측정되는 값은 로드 셀에서 발생한 무게 데이터이다. 이 무게 데이터를 가지고 오차를 구하게 된다. 그림 4.4은 퍼지 제어기의 입력 변수의 Membership 함수를 나타내었다.

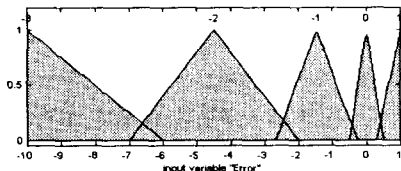


그림 4.4 입력변수(Error)

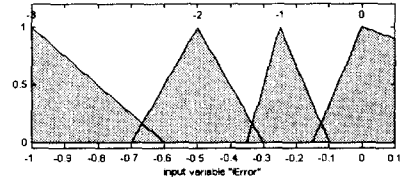


그림 4.5 입력변수(iError)

입력변수 Error에서 언어변수 -3이 가장 오차가 많이 생겼을 때이고 0은 오차가 없다고 간주한다. 0인 부분의 폭(Sharpness)이 너무 작으면 제어기가 동작을 해 오버슈트가 생기기 때문에 작은 오차는 허용을 하였다. 그러나 이 오차는 iError의 입력변수에서 처리를 하게 된다. 오른쪽의 1의 오차는 오버슈트가 되기 때문에 제어기에서 모든 펌프를 출력하지 않게 명령을 내린다. 그림 4.5는 iError의 입력 변수의 Membership 함수이다.

그림 5.5에서도 -3이 가장 큰 오차이고 입력변수 Error보다 1개가 더 적다. 이 변수에서 정상상태의 오차를 제어를 한다.

4.2.2 퍼지 제어기의 출력 변수와 Rule Base

퍼지 제어기에서 출력은 금액펌프의 가동 시간을 계산하여 출력을 해준다. 프로그램에서 제어기 출력에 일정한 Gain이 곱해지게 되어 있다. 따라서 본 논문에서는 출력 변수를 하나로 하였다. 그림 4.6은 퍼지 제어기의 출력변수를 나타낸 그림이다.

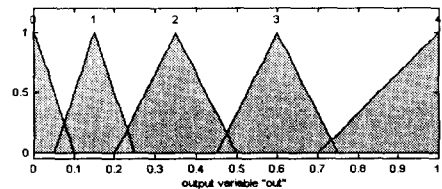


그림 4.6 퍼지 제어기의 출력변수

표 4.1 출력변수 룰베이스

Rule Base		iErr			
		-3	-2	-1	0
iErr	-3	4	4	3	3
	-2	3	3	2	2
	-1	2	2	1	1
	0	1	1	0	0
	1	1	0	0	0

퍼지 제어기의 출력변수를 보면 왼쪽이 언어 변수 0 이고 1, 2, 3, 4 순으로 되어있다. 언어 변수 0 은 실제로 펌프가 동작을 하지 않게 되는 부분이다.

4.3 시간 계획(Time Scheduling) 제어

시설재배 자동화시스템을 사용하면서 사용자의 경험 혹은 새로운 작물에 대한 이해를 위해 때로는 사용자 임의로 급액을 하여야 할 때가 있다. 이러한 경우는 퍼지 제어기를 사용 할 수 없게 된다. 그러한 경우를 위해 본 논문에 사용된 시설재배 자동화시스템에는 시간 스케줄링 제어가 있다. 사용자는 일주일간 사용자 임의대로 급액을 할 수 있도록 시간을 설정할 수 있다. 프로그램에서는 사용자의 출력시간을 데이터화하고 프로그램을 실행시키면 사용자의 설정에 따라 펌프가 동작하게 된다. 시설재배를 하는 사용자에게는 꼭 필요한 수동식 제어이므로 본 논문의 프로그램은 이러한 기능을 가지고 있다.

5. 실험 및 결과

그림 5.1은 본 논문에서 사용한 무게 예측 모델의 데이터를 그래프로 표현 한 것이다.

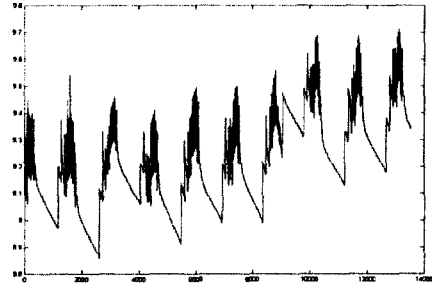


그림 5.1 무게 예측 모델의 그래프

그림 5.1의 그래프는 멜론이 잘 자라는데 필요한 배양액의 무게이다. 이 배지내의 배양액 무게 데이터를 가지고 퍼지 제어기의 입력으로 들어가게 된다. 이런 데이터는 전문가의 지식을 바탕으로 만들어진 것이며, 여러 가지 데이터를 효과적으로 실험을 할 수 있도록 프로그램은 파일화 하여 데이터를 정해진 시간별로 읽어들인다. 본 논문에서는 이러한 데이터를 기반으로 프로그램을 실행한다. 그림 5.2는 FMES에서 만들어진 무게예측 데이터를 FECA의 입력으로 사용하고, FECA의 출력으로 나타낸 그래프이다.

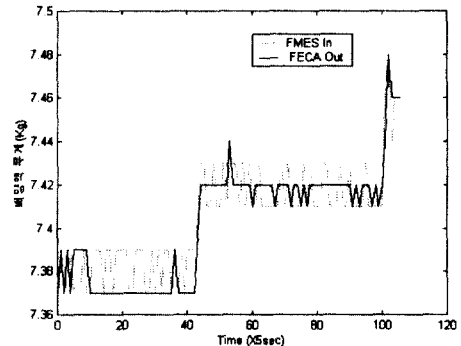


그림 5.2 급액량 제어 그래프

그림 5.2는 배지로 공급되는 배양액의 무게를 나타낸 것이다. 그림의 Y축에 해당하는 것이 배지내의 배양액 무게이다. X축에 +해당하는 것은 시간을 나타낸다. 그래프를 보면 회색으로 나타낸 것이 FECA의 입력(즉 FMES의 무게 예측 데이터)이고, 검은색은 무게 예측 데이터를 가지고 FECA에서 만들어 낸 무게 출력이다. 무게 예측

값과 실제 무게를 보면 약 X축에서 56 Sec 정도에서만 오버슈트가 있었고 나머지는 모두 언더슈트를 나타내고 있다. 본 논문에서 설계한 퍼지 제어기는 오버슈트를 발생시키지 않도록 설계가 되었다.

본 논문에서 구현한 시설재배 자동화 시스템은 급액 펌프를 가지고 있다. 이 급액 펌프는 배양액 조성비 제어를 사용해 배양액의 각 수치들을 유지한 배양액을 베지로 보내는 마지막 펌프이다. 베지에는 급액 펌프로부터 오는 펌프 이외는 없다. 따라서 베지 내로 들어온 배양액은 작물이 흡수를 해야 줄게 되어있다. 멜론의 경우는 배양액의 급액량에 따라 멜론 성장에 많은 영향을 끼치게 된다. 본 논문에서는 멜론 성장에 필요한 배양액의 급액 무게를 최대한 오버슈트 없이 FMES의 출력을 따라가야 하는 문제가 생긴다. 본 논문에서 제안한 FECA는 오버슈트 없이 배양액 무게에 접근하고, 또 이 무게의 상한과 하한값(식물에서는 필요한 배양액의 바운드값 있음)의 범위 안에 있으면 참값이라 인정하고 제어를 하지 않게 되어있다. 너무 작은 바운드를 설정하면 제어기내의 입력변수의 Sharpness를 작게 가져 가게되고, 출력은 작은 에러에도 민감하게 반응하여 출력이 진동하게 된다. 보통의 경우, 작물은 이러한 작은 값에는 반응을 하지 않기 때문에 입력변수의 Sharpness를 작게 가져갈 필요가 없다. 그리고 반응 속도도 느려서 오히려 더 나쁜 결과를 얻기 때문에 본 논문에서 설계된 FECA는 그림 5.2처럼 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

본 논문에서는 시설재배 자동화 시스템의 프로그램으로 길러진 식물의 결과는 그림 5.3의 그래프에서 볼 수 있다.

그래프의 왼쪽이 멜론의 무게를 나타낸 것이고 아래쪽은 멜론이 열매가 크기 시작할 때부터의 초 단위의 시간이다. 멜론의 경우는 위 그래프처럼 아주 복잡하게 배양액이 공급되어야 좋은 효과를 얻을 수 있기 때문에 재배가 까다로운 식물로 알려져 있다. 거기다 비선형적으로 변하는 데이터의 변화는 퍼지 제어를 사용하여 좋은 효과를 얻었다.

멜론이 사람이 키웠을 때와 시설재배 자동화

시스템의 도움으로 자랐을 때를 그래프로 나타내었다.

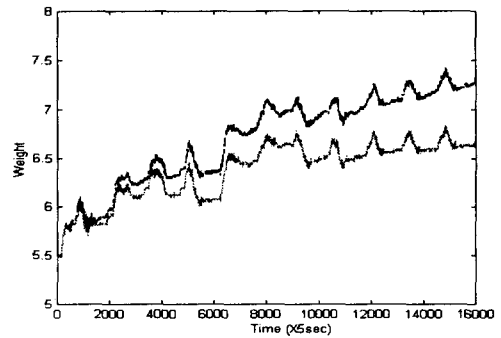


그림 5.3 멜론의 성장곡선 비교 그래프

그림 5.3에서 보듯이 연속적인 멜론의 무게 곡선이 서로 비슷한 패턴으로 퍼지 제어 이론을 적용해서 키워진 멜론이 무겁게 나타난다. 그림 5.2에서 보듯이 멜론이 성장에 필요한 배양액의 무게값을 FMES에서 발생시켜주며, 발생시켜준 무게값을 퍼지 제어가 정확하게 레귤레이션(regulation) 제어를 해줌으로서 멜론이 자연스럽게 성장 할 때보다 훨씬 좋은 성장을 하도록 만들어 주었다.

6. 결 론

본 논문에서 시설재배의 자동화 시스템에 유연하게 사용될 수 있도록 설계 구현한 시설재배 자동화 시스템의 전체적인 구성과 모니터 프로그램을 설계하였고, 새로운 제어방식을 개발하여 적용한 배양액 제어와 작물의 최적성장을 위한 배양액의 급액량 제어방식을 제안하였다. 본 논문에서는 새로운 제어방식(FECA)을 시설재배 자동화 시스템에 구현을 하고 이러한 알고리즘을 적용하는데 필요한 베지내 배양액 무게를 측정하기 위한 무게 센서를 설계 제작하였다. 로드셀(load cell)을 이용한 중량센서 시스템은 정밀한 계측을 하기위해 개발하였고 그 성능은 기대에 만족할 만큼 좋았다. 본 논문에서 여러 개의 무게 센서에서 데이터를 수집 개인용 컴퓨터로 전송하는 시스템을 개발하여 작물재배에 필요한 데

이더 수집을 광범위하게 넓히게 되었다.

본 논문에서 제안한 제어 알고리즘의 구현 과정과 구현한 시설재배의 환경자동제어와 배양액 제어 그리고 작물의 최적 성장을 위한 배양액의 급액량 제어를 적용한 결과 작물재배에서 매우 어려운 재배종인 멜론에 대하여 좋은 결과를 얻는 것을 보여줌으로서 본 논문에서 구현한 시설재배의 완전 자동화 및 시변성 및 비선형성이 매우 강한 작물의 최적 성장제어에 적용하기 위한 퍼지 전문가 제어 알고리즘(fuzzy expertized control algorithm)의 성능을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] S. W. Kim, Y. W. Cho, M. Park, A Multirule-Base Controller Using the Robust Property of a Fuzzy Controller and Its Design Method, IEEE TRANSACTION ON FUZZY SYSTEMS, 4(3) p315-327, 1996
- [2] S. W. Kim, E. T. Kim, M. Park, A New Adaptive Fuzzy Controller Using the Parallel Structure of Fuzzy Controller and Its Application, Fuzzy Sets And Systems 81, p205-226, 1996
- [3] 김승우, 김은태, 박민용, 퍼지 제어기의 강인성을 이용한 새로운 퍼지 적응 제어기의 설계, 대한전자공학회, 30(B9) p106-121, 1993
- [4] S. E. Kim, Y. S. Kim, S. W. Kim, Development of the Measuring System for Automation of Hydroponics, Journal of Biological Production Facilities and Environment Control 5(2) pp 210-214, 1996
- [5] K. S. Kim, K. M. Lee, I. J. Jang, Development of Automatic Water Manager System in Horticulture, Journal of Biological Production Facilities and Environment Control 1(1) pp 61-71, 1992
- [6] S. H. Hong, Automatic Control of Growth Environment for plant factory, Ph. D.

- thesis, Seoul National University, 1995
- [7] K. H. Ryu, Fully-Controlled Plant Factory System, KOSEF, 1991
- [8] J. I. Son, D. K. Lee, M. K. Kim, Multipurpose Growing Estimation Model of Plant Factory. Journal of Biological Production Facilities and Environment Control 2(2) pp 126-135, 1993
- [9] Li-Xin, Wang, Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis, Prentice-Hall International, 1993
- [10] Pedrycz W., An Identification Algorithm in Fuzzy Relational Systems, Fuzzy Sets and Systems. vol. 13, 1984
- [11] K. Tanaka and M. Sugeno, Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems, Fuzzy Sets And Systems 45 pp 135-156, 1992
- [12] M. Sugeno and G. T. Kang, Structure Identification of Fuzzy Model, Fuzzy Sets And Systems 28 pp 15-33, 1988
- [13] J. J. E. Slotine, W. Lei, Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall International, 1991

김 승 우



1987 연세대 전자공학과
졸업(공학학사)
1989 동 대학원 전자공학졸업
(공학석사)

1989-1990 삼성종합 기술원 근무
1994 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업
(공학 박사)
1994- 순천향대학교 정보기술공학부 부교수
1998~1999 미국 Case Western University 방문
교수
관심분야: 로봇 시스템, 퍼지제어 시스템, 자동화
기술, RP머신개발 및 응용
E-mail: seungwoo@sch.ac.kr