



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

인공 지능을 이용한 식물 공장 LED 조명  
제어 시스템 구현에 관한 연구

A Study on the Implementation of Plant Factory LED Lighting  
Control System using Artificial Intelligence



2013年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電子通信工學科

柳昌完

本 論 文 을 柳 昌 完 의  
工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 양 규 식 (인)



委 員 심 준 환 (인)

委 員 이 상 배 (인)

2013년 2월

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

# 목 차

List of Tables .....	iv
List of Figures .....	v
Abstract .....	vii

## 제 1 장. 서 론

1.1 개요 .....	1
--------------	---

## 제 2 장. 식물 재배와 인공조명

2.1 광합성과 파장의 관계 .....	3
2.2 광원이 광합성에 영향을 미치는 요인 .....	4
2.3 생물에 영향을 미치는 파장대역 .....	6
2.4 인공 광원 .....	7
2.5 LED RGB와 식물 재배의 관계 .....	8

## 제 3 장. 퍼지 제어 시스템

3.1 퍼지이론의 개요 .....	10
3.2 보통집합과 퍼지집합 및 연산 .....	10
3.3 퍼지추론 .....	14
3.4 퍼지제어기의 구성 .....	16

## 제 4 장. Plant Factory Lighting System

4.1 Plant Factory System .....	20
4.2 Plant Factory Lighting System 구성 .....	21
4.3 퍼지 알고리즘 구성 .....	22
4.4 MATLAB Simulation .....	30

## 제 5 장. 인공지능형 Plant Factory Lighting System 구현

5.1 하드웨어 구성 .....	33
5.2 조명 통합 제어보드 .....	34
5.2.1 전원부 .....	34
5.2.2 AVR 제어부 .....	35
5.2.3 통신부 .....	38
5.3 센서 보드 .....	40
5.4 테스트 실험 .....	42
5.5 조명 통합 제어보드 제작 .....	43
<b>제 6 장. 실험 및 결과</b>	
6.1 실험 방법 .....	45
6.2 실험 결과 .....	46
<b>제 7 장. 결 론</b> .....	50
참고문헌 .....	51
감사의 글 .....	53



## List of Tables

<b>Table 1</b> Wavelength bands affecting the biological .....	6
<b>Table 2</b> RGB ratio of wavelength band .....	26
<b>Table 3</b> Fuzzy Rule .....	28
<b>Table 4</b> Output of fuzzy arithmetic .....	49



## List of Figures

Fig. 1 Solar Wavelength Bands .....	3
Fig. 2 Wavelength band of photosynthesis .....	4
Fig. 3 Light absorption of chlorophyll .....	5
Fig. 4 The light intensity and the rate of photosynthesis .....	5
Fig. 5 The photosynthesis of temperature and light intensity .....	6
Fig. 6 Type of artificial light source .....	7
Fig. 7 Red, Green, Blue wavelengths and plant cultivation .....	9
Fig. 8 Crisp set & fuzzy set .....	11
Fig. 9 $\widetilde{A}_1 \cap \widetilde{A}_2$ of Fuzzy set .....	13
Fig. 10 $\widetilde{A}_1 \cup \widetilde{A}_2$ of Fuzzy set .....	13
Fig. 11 $\widetilde{A}_1^c$ of Fuzzy set .....	13
Fig. 12 Inference of Mamdani .....	15
Fig. 13 Structure of Fuzzy controller .....	16
Fig. 14 Fuzzy inference process .....	17
Fig. 15 Block diagram of variable structure of the fuzzy system .....	19
Fig. 16 Inside the Plant factory .....	20
Fig. 17 Block diagram of Plant Factory Lighting System .....	21
Fig. 18 Block diagram of fuzzy system .....	22
Fig. 19 Function of temperature membership .....	23
Fig. 20 Function of humidity membership .....	23
Fig. 21 Function of $CO_2$ membership .....	24
Fig. 22 Function of illuminance membership .....	25
Fig. 23 Light intensity & Channel on/off .....	25
Fig. 24 Spectra Program .....	26
Fig. 25 Ratio of RGB .....	26
Fig. 26 Block diagram of MATLAB of fuzzy .....	30
Fig. 27 Three-dimensional function of C - I .....	31

Fig. 28	Three-dimensional function of C - H1 .....	31
Fig. 29	Three-dimensional function of H1 - H2 .....	31
Fig. 30	Three-dimensional function of H1 - I .....	32
Fig. 31	Three-dimensional function of C - H2 .....	32
Fig. 32	Three-dimensional function of I - H2 .....	32
Fig. 33	Block diagram of Plant Factory Lighting System .....	33
Fig. 34	Test board of 200W SMPS .....	34
Fig. 35	Test operation of 200W SMPS .....	35
Fig. 36	Circuit of ATmega128 .....	35
Fig. 37	Timing diagram of CTC mode .....	36
Fig. 38	Drive circuit of RGB LED .....	37
Fig. 39	Circuit of 7805 .....	38
Fig. 40	DC-cooler connector .....	38
Fig. 41	Circuit of communication .....	39
Fig. 42	Test of $I^2C$ communication .....	39
Fig. 43	Circuit of illuminance sensor .....	40
Fig. 44	Interface of SHT71 .....	41
Fig. 45	Circuit of SHT71 sensor .....	41
Fig. 46	Circuit of $CO_2$ sensor .....	42
Fig. 47	Completed sensor board .....	42
Fig. 48	Test of lighting controller & sensor board .....	43
Fig. 49	Lighting control system board .....	44
Fig. 50	LED RGB 4-channel Module .....	45
Fig. 51	Plant Factory Lighting System .....	46
Fig. 52	Output according to the temperature .....	47
Fig. 53	Output according to the Humidity .....	47
Fig. 54	Output according to the $CO_2$ .....	47
Fig. 55	Output according to the Illuminance .....	48
Fig. 56	Result of simulation .....	48

# A Study on the Implementation of Plant Factory LED Lighting Control System using Artificial Intelligence

Ryu, Chang-Wan

Department of Electronics & communications Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University



## Abstract

Currently, LED plant factory have been using colors by fixed red and blue colors spectrums. This has the disadvantage that can not be applied to organic, depending on the situation around.

In other words, if the type of plants according to the growth stage or the appropriate light environment can not be controlled, but rather hinder or promote the growth of plants, can cause unnecessary energy consumption.

Growth progresses, the environmental conditions suitable for the growth period of the plant will vary, but always maintain the same environmental conditions, plant growth promotion and growth of plants can be inhibited in order to save energy when appropriate according to the step-by-step growth of plants formulation of the light source is needed. Because it has been using for secondary source energy is not the main source of energy in photosynthesis, also used in LED plant factory directly, depending on the external environment affect the growth of plants, do not give. In addition, LED unit price formation and also expensive because typically tend to be reluctant to use. In this paper, we present a system that is controlled by the organic as well as the use of LED lighting as the main energy source rather than a secondary energy source, according to the surrounding environment (temperature, illumination, humidity, soil conditions, etc.) Plant Factory Lighting System has been implemented. Existing fixed wavelength of LED, without using Variable LED wavelengths, and changes the system in the environment to be controlled organically by introducing the fuzzy inference system has constructed.

**KEY WORDS:** Fuzzy theory, Plant Factory, Artificial intelligence, lighting, wavelength

# 제 1 장 서 론

## 1.1 개요

최근, 전 세계적으로 식량 부족 문제가 심각한 수위를 넘어 위기 상황으로 가고 있다. 실제로 지구의 이상 고온 현상으로 인해 폭염, 가뭄 등으로 세계 곡물 생산량이 점차 낮아지고 있으며, 이미 일부 국가에서는 식량 부족으로 인해 기아와 아사현상이 발생하고 있다. 유엔의 세계식량계획(World Food Programme: WFP)에 따르면 전 세계에서 기아로 고통 받는 인구는 9억 2천 5백만 명이며 이 수치는 전 세계 인구 7명 중 한 명은 충분한 식량을 얻지 못해 건강하고, 활동적인 삶을 영위하지 못한다는 것을 의미한다.

이러한 식량 부족 문제는 기후환경, 농업 기반시설의 부족, 환경의 과잉개발 등을 원인으로 꼽고 있다. 특히 기후 환경은 지역별 식량 공급 불균형 현상에 큰 영향을 미치는 이유 중의 하나이며, 기후 환경이 열악한 지역은 만성적으로 식량 부족에 시달릴 수밖에 없는 실정이다[1].

이러한 가운데 식량 공급 불균형 현상으로 인한 식량 부족을 해결할 방책으로 주목을 받고 있는 식물공장은 자연 기후에 상관없이 또한 농지확보의 어려움 없이 작물을 생산한다는 큰 장점을 지니고 있다[2].

식물공장은 식료품 자급률의 향상, 지구온난화로 인한 이상기후 현상, 식품의 안전성 향상 등을 배경으로 하여 인공적인 환경에서 작물의 재배를 제어하는 첨단 농업 산업의 집약체이다. 특히 LED 광원을 이용하는 식물공장의 경우, 세계적으로 관심을 가지고 연구를 진행 중이며, 국내에서도 차츰 선을 보이고 있는 중이다[3].

LED의 파장을 광합성에 가장 효율적인 파장대로 맞추어 식물에 비추므로써 작물의 성장 효과를 최고로 끌어내는 데, 현재 식물공장에서 광원으로 사용되고 있는 LED는 그 파장대역이 고정되어 사용되고 있으며, 각각의 LED 모듈의 가격 또한 높다.

식물의 종류 또는 생육 단계에 따른 적절한 광 환경 제어가 불가능하다면 오히려 식물의 생육 촉진을 저해하거나 또는 불필요한 에너지 소비를 초래할 수

있다. 식물은 생육이 진행되면서 생육 시기에 적합한 환경조건이 달라질 수 있는데 항상 동일 환경조건을 유지하게 되면 식물의 생육이 저해될 수 있으므로 식물의 생육 증진 및 에너지 절감을 위해서는 식물의 생육단계별 특성에 따른 적절한 광원의 배합이 필요하다[4].

본 논문에서는 식물공장의 광원으로 사용되는 LED 파장을 환경에 맞게 변화시켜 작물의 성장 흐름에 따라 광원이 자연스럽게 따라가도록 하여 최적의 성장환경을 제공하는 조명시스템을 구성하였다. 이를 위해 퍼지 추론 시스템을 도입하였으며, 식물재배에 사용되는 고정 LED모듈 대신에 색상 컨트롤이 가능한 일반 조명용 RGB LED 모듈을 사용하여 효과적으로 제어가 가능하도록 하였다[5].

본 연구의 전체적인 구성은 크게 6개 부분으로 나누어진다.

1장에는 연구에 대한 전체적인 서론 내용을 정리하였고, 2장에서는 식물공장의 메인이 되는 LED광원의 파장별 특징을 나타내고, 그 파장이 식물의 성장에 미치는 영향을 서술하였다. 3장에서는 이 조명시스템을 실제로 제어하는 데 사용된 퍼지 제어 시스템을 서술하였으며, 4장에서는 식물공장 조명 시스템에 대한 전반적인 내용을 서술하였다. 또한 각 외부 환경(온도, 습도, 토양상태 등)에 따른 퍼지 알고리즘을 제시하고, 그 알고리즘에 의한 조명 제어 동작을 제시하였다. 5장에서는 실제로 인공지능형 식물 공장 조명 시스템을 구현하였고, 6장에서는 구현된 식물 공장 조명 시스템의 실험과 시뮬레이션을 통해 결과를 도출하였다.

## 제 2 장 식물 재배와 인공조명

### 2.1 광합성과 파장의 관계

식물은 태양광을 받아 광합성 작용을 통해 성장에 필요한 에너지를 만들어 낸다. 광합성이란 식물의 잎에서 일어나는 일종의 화학적 반응이라고 볼 수 있는데 이는 식물이 잎을 통해 받아들인 빛 에너지를 화학적 에너지로 변화 시켜 식물의 성장을 돕는 일련의 과정을 의미한다.

태양으로부터 나오는 파장대역은 Fig. 1과 같이 자외선(Ultra Violet, UV), 가시광선(Visible Light), 적외선(Infra Red, IR)등이며, 이 중에서 가시광선 영역(Visible Light)인 400nm~700nm 대역이 식물 성장에 필요한 파장대역이다.

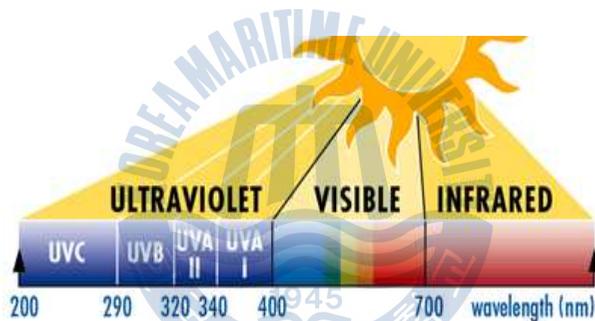
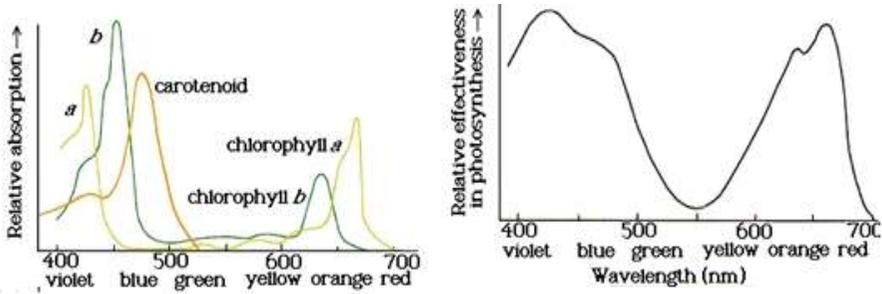


Fig. 1 Solar Wavelength Bands

광합성을 위해서는 엽록소라는 것이 필요한데 이는 식물이 광합성을 하는 데 필요한 빛을 흡수하는 색소이다. 여러 종류가 있지만, 가장 보편적으로 볼 수 있는 것은 엽록소 a와 b이다. 엽록소 a는 광합성을 하는 모든 식물과 조류에 공통 존재하는 중심색소이며, 엽록소 b는 녹조류 이상에서 존재하는 색소이다. 엽록소 이외의 광합성 색소로 적황색을 띠는 카로틴과 황색을 띠는 크산토펜을 지칭하며 빛에너지를 흡수하여 반응 중심 색소로 에너지를 전달하는 카로티노이드라 불리는 색소가 있다. 아래의 Fig. 2는 파장대역에 따른 광합성을 나타내는 것으로 (a)의 경우 파장에 따른 광합성 색소의 상대적인 흡수량을 보여주며, (b)는 광합성의 상대적 효과를 나타내는 그래프이다.



(a) Relative absorption (b) Relative effectiveness in photosynthesis

Fig. 2 Wavelength band of photosynthesis

엽록소a는 420nm 근처에서 광흡수가 가장 높고, 다음으로 670nm에서 높고 일부는 600nm 전후의 파장에서도 미약하나 광합성 반응을 보인다고 할 수 있다. 또한 일부 자외선과 적외선에서도 광합성 반응을 일으킨다.

엽록소b는 465nm 근처에서 가장 광흡수가 강하고, 다음으로 650nm에서, 그리고 490~620nm 전후에서도 광합성 반응이 일으킨다. 그런 이유로 이 엽록소 a, b를 동시에 충족하기 위해서는 가시광선 영역의 450nm, 660nm 대역의 파장이 식물에 좋은 파장이라고 할 수 있다[6].

## 2.2 광원이 광합성에 영향을 미치는 요인

광합성에 영향을 미치는 요인은 여러 가지들이 있으나 그 중에서 광원에 의해 크게 영향을 미치는 요인은 빛의 파장, 빛의 세기, 온도로 구분할 수 있다.

광원의 역할 중 가장 중요한 부분을 차지하는 것이 빛의 파장이다. 파장에 따라 식물의 반응이 각기 다르다. 하지만 가시광선의 모든 파장의 빛이 광합성에 이용되지는 않는다. 엽록소에 흡수된 빛만 광합성에 이용되며, 투과하거나 반사된 빛은 혼합되어 녹색으로 보인다. Fig. 3은 파장에 따른 광합성의 빛 흡수를 보여준다.

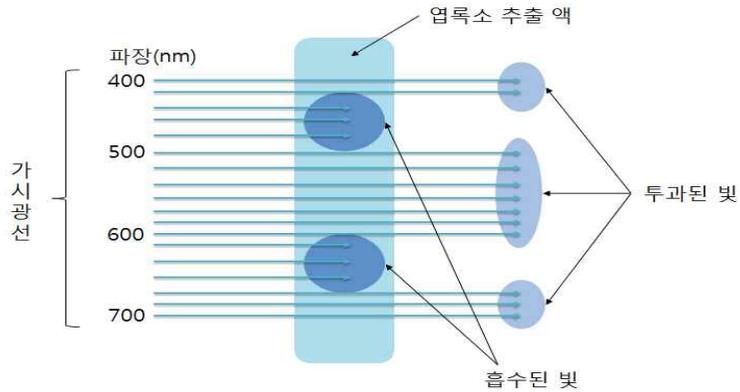


Fig. 3 Light absorption of chlorophyll

빛의 파장뿐만 아니라 빛의 세기 또한 광합성에 영향을 미치는 요인 중 하나이다. Fig. 4는 양지 식물과 음지 식물의 빛의 세기에 따른 광합성 속도를 나타낸다. 온도와  $CO_2$ 의 농도가 일정할 때 빛의 세기가 증가함에 따라 어느 한계까지는 광합성의 양도 증가한다. 식물마다 각각 광포화점과 광보상점이 다르기 때문에 이에 맞춰 빛의 세기를 조절해줘야 한다[6].

광보상점이란 식물에 의한 이산화탄소의 흡수량과 방출량이 같아져서 식물체가 외부 공기 중에서 실질적으로 흡수하는 이산화탄소의 양이 0이 되는 광의 강도를 말하며, 광포화점은 식물의 호흡작용에서 더 강하게 빛을 비추어도 광합성량이 증가하지 않을 때의 빛의 세기를 말한다.

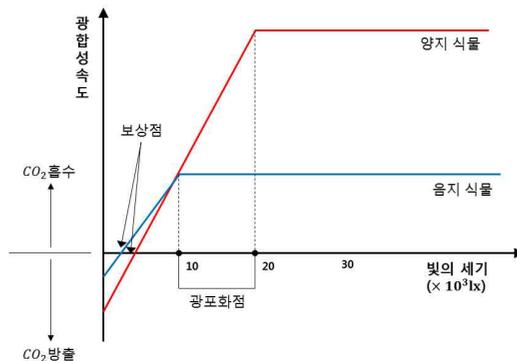
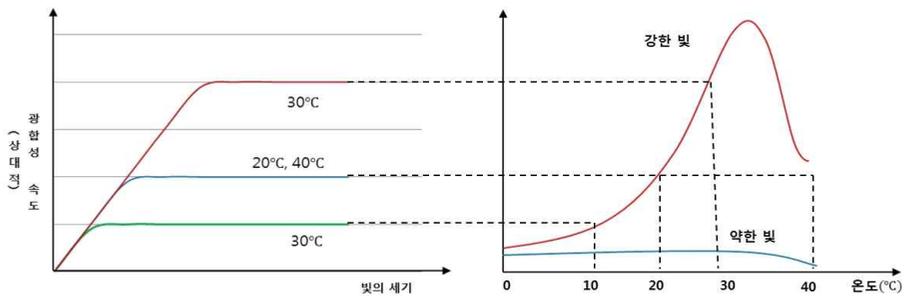


Fig. 4 The light intensity and the rate of photosynthesis

약한 빛일 때, 광합성은 온도영향을 거의 받지 않는다. Fig. 5를 보면 강한 빛 일 때는 10℃ 씩 상승함에 따라 광합성의 속도가 2배씩 증가하다가 30~35℃ 에 서 최대를 보인다. 하지만 그 이상에서는 광합성의 속도가 급격히 감소하는 증 상을 보인다[6].



(a) light intensity & photosynthesis (b) Temperature & photosynthesis

Fig. 5 The photosynthesis of temperature and light intensity

### 2.3 생물에 영향을 미치는 파장대역

Table 1 Wavelength bands affecting the biological

파장대역(단위:nm)	효과
1400~1000(IR)	식물에 대해 특별한 작용은 없음. 열의 영향을 미침
780(IR)	식물의 특별한 신장효과를 촉진
700	발아저지(730), 광합성 작용의 최대(670)
660	엽록소작용최대(655), 발아작용과 잎 배포/ 화아 형성(660)
610	광합성에 유익하지 않음. 해충방제효과(580~650)
510	노란 색소에 의한 일부 흡수, 어류 집어(485)
430~440	광합성 작용의 최대(430), 엽록소작용의 최대(440), 해충유인
400~315(UV)	식물의 잎을 두껍게 하는 작용, 색소의 발색촉진작용, 해충유인
280(UV)	많은 합성과정에 중요한 작용(면역체형성), 강하면 해가 됨.
100(UV)	식물을 급속하게 시들게 하는 작용

과장에 따라 생물에 미치는 영향은 모두 다르다. 적외선 및 자외선, 그리고 가시광선에 따른 각 효과를 위의 Table 1에서 나타내었다[6].

실제로 광합성에 쓰이는 대역은 가시광 대역의 400nm~700nm이다. 이 대역은 광합성작용뿐만 아니라 식물의 발아작용이나 식물의 잎을 두껍게 하는 등의 효과도 있다. 또한 식물뿐만 아니라 어류 집어 및 해충을 유인하는 데 유익한 과장대역도 있다. 실제로 오징어 집어등에 이러한 과장의 효과를 이용한 새로운 형태의 LED집어등이 시판 중이다. 시중에 판매되고 있는 식물생장용 LED광원의 대부분은 청색광과 적색광을 혼합한 형태이며, 이는 적색광(660nm)과 청색광(440nm)으로 표에 있는 바와 같이, 광합성 작용 최대 효과를 가지는 대역을 기준으로 판매되고 있다.

## 2.4 인공 광원

식물공장에 사용되는 인공광원은 그 종류가 다양하며, 이를 Fig. 6에 나타냈다.



Fig. 6 Type of artificial light source

나트륨과 수은 등을 사용하여 발광하는 고압나트륨 램프는 수년 전까지 가시광 변환율이 30%로 높고 경제성이 있어 보광용이나 초기 식물공장에서 인공광원으로 사용되었다. 효율이 높아 전력비가 적고 수명이 길지만 식물에 필요한 적색과 청색파장의 비율이 적고 발열이 심하기 때문에 식물과 거리를 충분히 두어야 하므로 식물공장에서의 다단식 재배가 불가능하며 가격 또한 높다.

수은 증기압을 높여 가시광을 발산하는 고압수은 램프는 엽록소 광합성에 크게 영향을 미치는 청색에 강한 파장대를 방사하는 특징을 가지고 있으나 단독으로 사용할 경우 효율이 낮아 광질 개선을 위한 보광용으로 사용된다.

수은램프의 효율과 다양한 파장대역 생성을 위해 인듐, 탈륨, 나트륨램프의 금속할로겐화 첨가물을 사용한 메탈 할라이드 램프는 효율이 높고 가시광선영역 전반을 커버하여 작물재배 및 연구용으로 적합하나 고압나트륨 램프에 비해 발광효율과 수명이 떨어지는 단점을 가지고 있다.

다단식 재배를 하는 식물공장에서 가장 많이 활용하고 있는 형광등(Fluorescent light)은 램프내부에 형광체가 도포되어 있기 때문에 수은의 방전으로 방사된 자외선으로 인해 연속 스펙트럼을 만들어 다양한 색상을 연출하는 특징을 가지고 있다. 가시광선 영역이 많고 저가이며, 발광체에서의 열방사가 적기 때문에 식물에 근접조명이 가능하나 백열등에 비해 광 효율성이 낮고 식물 광합성에 효율적인 적색 파장대가 적으며 램프 가운데와 양단의 광 강도가 달라 균일한 조사가 곤란하다는 단점이 있다. 이 외에도 LD(Laser diode), HEFL(Highly Energized fluorescent light)등이 있다.

이러한 인공광원에 비해 LED는 특정 파장대의 광원 생산이 가능하고, 방사 가능한 특정파장대가 식물생육에 적합하며 이 외에도 많은 장점을 가진 인공광원으로써 식물공장에 많이 쓰이고 있으며, 점차 그 비중을 넓혀 가고 있다[6].

## 2.5 LED RGB와 식물 재배의 관계

LED는 광 스펙트럼이 좁은 파장 대역의 빛을 발생하기 용이하므로 식물에 유효한 파장을 집중적으로 조사 할 수 있어 식물재배에 적합한 광원이다. 적색의 파장 영역은 주로 식물의 광합성에 기여하고 청색광은 주로 형태형성에 기여함

으로써 식물의 생육단계에 따라 필요한 파장을 적절하게 조사하여 재배의 효율성을 극대화할 수 있다. 또한, 혼합 파장의 조절을 통해 식물의 품질과 기능성분의 함량을 증진시킬 수 있고 생육 및 색소함량의 조절 또한 가능하다[7].

LED는 빛의 3원색인 Red, Green, Blue(이하 RGB)으로 색상을 표현한다. 각각의 색은 0~255로 구분되어 최대  $255^3$ 개, 약 1600만 가지의 색을 표현할 수 있다. 표현되는 색마다 파장은 모두 다르기 때문에, 식물 생장에 미치는 영향이 전부 다를 수밖에 없다. RGB 각각의 파장에 따라 식물에 영향을 미치는 효과는 다음과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 7은 3가지 파장에 따른 식물의 영향을 보여준다.

RED 파장의 경우는 식물의 광합성을 이용하여 성장을 촉진시키는데 큰 영향을 주며, 소량의 Blue 파장을 조합하면 높이에 비해 잎을 넓고 크게 만들 수 있다. 이로 인해, 시판되고 있는 식물재배용 LED의 경우 이와 같은 효과를 얻기 위해 Red LED와 Blue LED를 섞어 제작되는 것이 대부분이다[6].

Green 파장은 녹색의 엽록소에서 광흡수가 적기 때문에, 광합성이 억제되고 이로 인해 성장 또한 영향을 받아 억제 된다. 그 결과로 식물의 잎이 전체적으로 가늘고 길게 형성된다.

Green 파장은 잎 성장이 억제 되는데 반해, Blue 파장은 줄기의 성장이 억제 된다. 이로 인해 잎이 넓고 크게 되는 현상을 보인다. 앞서 Red 파장에 Blue 파장을 조합하는 이유가 바로 이런 목적이다.



(a) Red



(b) Green



(c) Blue

Fig. 7 Red, Green, Blue wavelengths and plant cultivation

## 제 3 장 퍼지제어 시스템

### 3.1 퍼지이론의 개요

퍼지 이론은 1965년, 미국 버클리대학의 Lofti Zedeh 교수가 ‘퍼지집합(FUZZY SET)’이란 논문을 발표하면서부터 시작되었다. 퍼지이론은 퍼지 논리를 기초로 하는 이론이며 고전적인 집합론인 부울 논리를 확장한 개념이다[8]. 부울 논리를 기본으로 하는 집합이론에서는 특정한 객체가 주어진 집합  $A$ 의 원소로서 속하거나 속하지 않거나 둘 중의 하나이다. 그러나 퍼지 논리를 기반으로 하는 퍼지 집합이론에서는 이 객체가 구성 원소로서 특정 집합  $A$ 에 어느 정도로 속하는가 하는 것을 0과 1사이의 수치로써 나타내며 이를 소속의 정도라고 한다. 이것으로 인해 퍼지 논리가 인간의 불확실한 개념을 다룰 수 있도록 해주며, 물리적인 수치와 양에 대한 인간의 불확실한 논리적 개념을 정연한 수학적 표현 형태로 나타낼 수 있다는 특징이 있다[9].

### 3.2 보통집합과 퍼지집합 및 연산

고전적 집합론에서 집합이란 확정된 원소들의 모임을 나타내며, 이와 같이 경계가 명확한 보통집합(crisp set)  $A$ 와 전체집합  $X$ 의 원소를 집합  $\{0, 1\}$ 로 대응시키는 특성함수는 식 (1)로 표현된다.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

여기서 특성함수  $\mu_A$ 는 대집합 내의 원소  $x$ 에 대한  $A$ 의 “소속”을 표현하며, 보통집합에서는 전체집합 내의 원소에 대한 주어진 집합에서의 소속과 비 소속 사이의 변화는 이산적으로 잘 정의되어 있다.

퍼지집합  $A$ 를  $\tilde{A}$ 로 표현하고, 만일 대집합의 한 원소  $x$ 가 퍼지집합  $\tilde{A}$ 에 소속되면 이에 대한 사상(mapping)은 다음과 같이 식 (2),(3)으로 주어진다.

$$\text{소속정도} \rightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1] \quad (2)$$

$$\tilde{A} = (x, \mu_{\tilde{A}}(x) | x \in X) \quad (3)$$

다음 Fig. 8은 보통집합과 퍼지집합의 관계를 나타낸 것으로 두 집합사이의 소속정도를 알 수 있다.

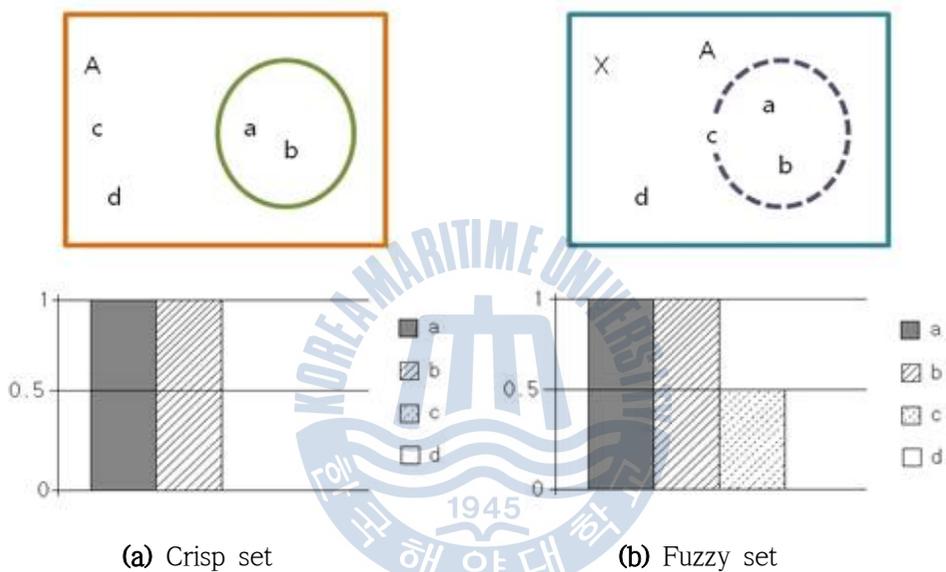


Fig. 8 Crisp set & fuzzy set

여기서 전체집합이  $X$ 일 때 퍼지집합  $\tilde{A}$ 를 이산적이고 유한한 형태로 표현하면 다음 식 (4)와 같다.

$$\tilde{A} = \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_2)}{x_2} + \dots = \sum_i \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_i)}{x_i} \quad (4)$$

그리고 연속적이고 무한한 형태로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$\tilde{A} = \int \frac{\mu_{\tilde{A}}(x)}{x} \quad (5)$$

퍼지집합의 연산에는 합집합, 교집합, 여집합 3개의 기본적인 연산이 있으며 [10], 만약 전체 집합  $X$ 내에 퍼지 집합  $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \tilde{A}_3$ 가 존재한다고 하면, 퍼지집합의 합집합, 교집합, 여집합은 다음과 같이, 식 (6),(7),(8)로 나타낼 수 있다.

- 합집합 :  $\mu_{\tilde{A}_1 \cup \tilde{A}_2}(x) = \mu_{\tilde{A}_1}(x) \vee \mu_{\tilde{A}_2}(x)$  (6)

- 교집합 :  $\mu_{\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2}(x) = \mu_{\tilde{A}_1}(x) \wedge \mu_{\tilde{A}_2}(x)$  (7)

- 여집합 :  $\overline{\mu_{\tilde{A}_3}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}_3}(x)$  (8)

퍼지이론에서 교집합에 사용되는 t-norms에는 다음과 같은 연산자가 있으며, 이를 각각 식 (9),(10),(11),(12)로 나타내었다.

- 논리곱(logical product) :  $a \wedge b = \min(a, b)$  (9)

- 대수곱(algebraic product) :  $a \cdot b$  (10)

- 한계곱(bounded product) :  $a \otimes b = \max(a+b-1, 0)$  (11)

- 격렬곱(drastic product) :  $a \wedge b = \begin{cases} a, & b = 1 \text{ 일 때} \\ b, & a = 1 \text{ 일 때} \\ 0, & \text{기타} \end{cases}$  (12)

퍼지이론에서 합집합에 사용되는 t-conorms에는 다음과 같은 연산자가 있으며, 이를 각각 식 (13),(14),(15),(16)으로 나타내었다.

- 논리합(logical sum) :  $a \vee b = \max(a, b)$  (13)

- 대수합(algebraic sum) :  $a + b = a + b - ab$  (14)

- 한계합(bounded sum) :  $a \oplus b = \min(a + b, 1)$  (15)

• 격렬합(drastic sum) :  $a \vee b = \begin{cases} a, & b = 0 \text{ 일 때} \\ b, & a = 0 \text{ 일 때} \\ 0, & \text{기타} \end{cases}$  (16)

다음의 Fig. 9에서 Fig. 11은 퍼지집합의 연산인 퍼지 합집합, 퍼지 교집합, 퍼지 여집합을 나타낸 것이다.

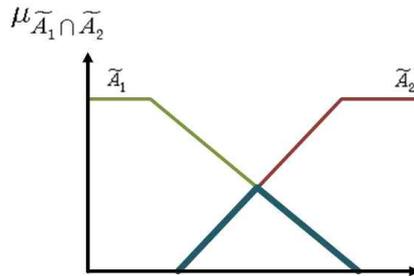


Fig. 9  $\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2$  of Fuzzy set

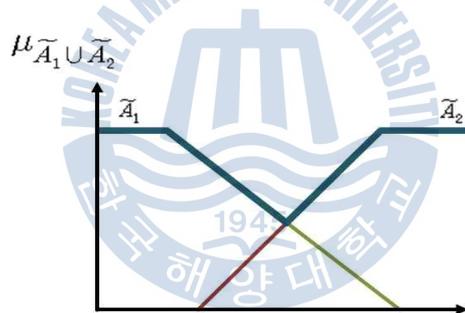


Fig. 10  $\tilde{A}_1 \cup \tilde{A}_2$  of Fuzzy set

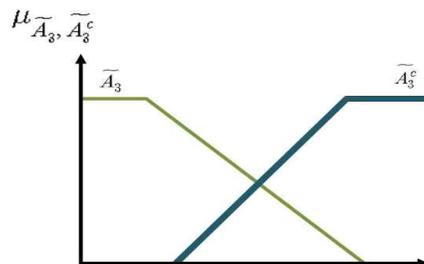


Fig. 11  $\tilde{A}_3^c$  of Fuzzy set

### 3.3 퍼지추론

“P이면 Q이다”와 같은 조건명제를 이용하여 이루어지는 추론에는, 연역추론(modus ponens)와 대우추론(modus tollens)이 있다[11]. 이와 같은 비퍼지 명제에 대한 연역추론 및 대우추론을 퍼지명제로 확장시킨 것이 일반화된 연역추론(generalized modus ponens : GMP) 및 일반화된 대우추론(generalized modus tollens : GMT)이다[12].

여기서는 본 논문에서 사용한 일반화된 연역 추론법에 근거한 퍼지 추론 혹은 근사 추론에 대하여만 설명하기로 한다. 일반화된 연역추론은 다음과 같이

$$(전제1)\tilde{P} \rightarrow \tilde{Q} : \text{"if } x \text{ is } \tilde{A} \text{ then } y \text{ is } \tilde{B}\text{"}$$

$$(전제2)\tilde{P}^* : \text{"}x \text{ is } \tilde{A}^*\text{"}$$

---


$$\text{결론 } \tilde{Q}^* : \text{"}y \text{ is } \tilde{B}^*\text{"}$$

에 있어서  $\tilde{Q}^*$ 를 구하는 방법이다. 여기에도  $\tilde{P} \rightarrow \tilde{Q}$  및  $\tilde{P}^*$ 를 이용한 퍼지관계의 합성연산으로부터 직접 구하는 직접법(direct method)과, 퍼지명제의 언어적 진리값을 이용하여,  $\tilde{P}$ 의  $\tilde{P}^*$ 에 대한 상대적 진리값  $L(\tilde{P})$ 을 구하고,  $L(\tilde{P} \rightarrow \tilde{Q})$  및  $L(\tilde{P})$ 를 이용하여  $\tilde{Q}$ 의 진리값  $L(\tilde{Q})$ 을 구한후,  $L(\tilde{Q})$ 를 이용하여  $\tilde{Q}$ 로부터  $\tilde{Q}^*$ 를 구하는 간접법(indirect method)이 있다. 이하에서는 본 논문에서 사용하는 'Mamdani's minimum fuzzy implication rule'인 직접법에 대하여 설명한다.

직접법은 퍼지집합  $\tilde{P} \rightarrow \tilde{Q}$  및  $\tilde{P}^*$ 의  $\tilde{Q}^*$ 는 합성연산에 의해 이루어지며, 결론  $\tilde{Q}^*$ 는 다음과 같이 식 (17)로 나타낸다.

$$\tilde{Q}^* = \tilde{P}^* \circ (\tilde{P} \rightarrow \tilde{Q}) \tag{17}$$

여기서, 조건명제  $\tilde{P} \rightarrow \tilde{Q}$ 에 대한 구체적인 예로 Mamdani가 제안한 식 (18)의

$$\tilde{P} \rightarrow \tilde{Q} = \tilde{R}_{\tilde{P} \times \tilde{Q}} \quad (18)$$

를 사용하면,  $\tilde{Q}^*$ 의 소속 함수는 식 (19)인

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{R}_{\tilde{Q}}}^-(y) &= \max_x (\mu_{\tilde{A}^*}^-(x) \wedge \mu_{\tilde{A}}^-(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}^-(y)) \\ &= \max_x \{ \mu_{\tilde{A}^*}^-(x) \wedge \mu_{\tilde{A}}^-(x) \} \wedge \mu_{\tilde{B}}^-(y) \\ &= \omega \wedge \mu_{\tilde{B}}^-(y) \end{aligned} \quad (19)$$

로 나타낸다. 단,  $\omega = \max_x \mu_{\tilde{A}^*}^-(x) \wedge \mu_{\tilde{A}}^-(x)$  로 된다. 여기서,  $\omega$ 는  $\tilde{P}^*$ 의  $\tilde{P}$ 에 대한 적합도를 나타내므로, 결론  $\tilde{Q}^*$ 는  $\tilde{Q}$ 의  $\omega$ 보다 큰 부분을 잘라낸 형태와 같다는 것을 알 수 있으며, Fig. 12은 이를 나타내고 있다.

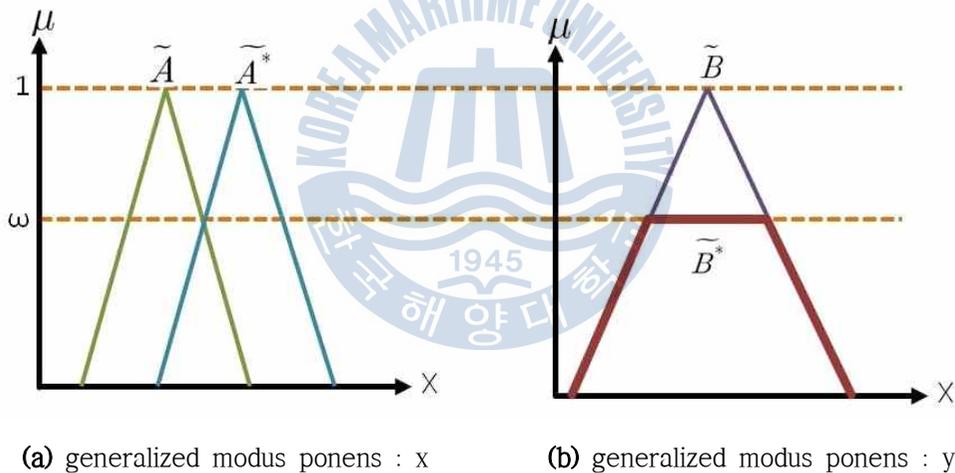


Fig. 12 Inference of Mamdani

### 3.4 퍼지 제어기의 구성

퍼지이론은 적절한 언어의 값을 정의함으로써 불확실한 느낌을 그대로 나타낼 수 있다[13].

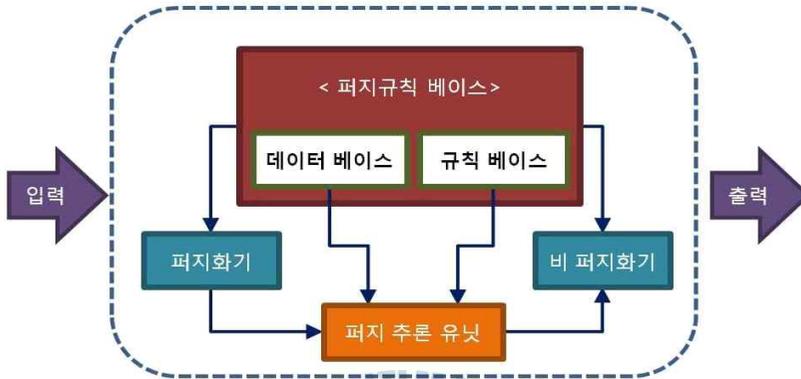


Fig. 13 Structure of fuzzy controller

위의 Fig. 13는 기본적인 퍼지 제어기의 구조를 나타내고 있으며, 퍼지추론을 하기 위해서는 IF-THEN 형식의 추론 규칙이 필요하며, 이를 “퍼지 IF-THEN규칙” 이라고 한다.

식 (20),(21)과 같은 2개의 규칙으로 된 2입력 1출력의 경우를 고려해보자.

$$R^1 : IF x \text{ is } A_1 \text{ AND } y \text{ is } B_1, \text{ THEN } z \text{ is } C_1 \quad (20)$$

$$R^2 : IF x \text{ is } A_2 \text{ AND } y \text{ is } B_2, \text{ THEN } z \text{ is } C_2 \quad (21)$$

여기에서  $A_1, B_1, A_2, B_2, C_1, C_2$ 는 퍼지 집합이다. 또한  $A_1, A_2 \subset X, B_1, B_2 \subset Y, C_1, C_2 \subset Z$ 이다.

식 (20)과 식 (21) 같은 퍼지 규칙(fuzzy rule)에 있어서 첫 번째 규칙의 연결강도를  $\alpha_1$ , 두 번째 규칙의 연결강도를  $\alpha_2$ 로 정의하면 다음의 식 (22)과 같이 표현된다.

$$\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0), \quad \alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0) \quad (22)$$

Mamdani 추론법에서  $i$ -번째 퍼지 규칙은 다음의 식 (23)과 같이 정의된다.

$$\mu_{C_i}(W) = \alpha_i \wedge \mu_{C_i}(W) \quad (23)$$

최종적인 결론으로서의  $\mu_C(W)$ 는 다음의 식 (24)와 같다.

$$\mu_C(W) = \mu_{C_1} \vee \mu_{C_2} = [\alpha_1 \wedge \mu_{C_1}(W)] \vee [\alpha_2 \wedge \mu_{C_2}(W)] \quad (24)$$

여기서  $\mu_C(W)$ 를 실제 제어 값으로 사용하기 위해서는 실수의 값으로 비퍼지화(defuzzification)하여야 한다. 본 논문에서는 식 (25) 같은 무게 중심법(center of gravity method)을 사용하였다.

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_C(z_j) z_j}{\sum_{j=1}^n \mu_C(z_j)} \quad (25)$$

이러한 퍼지추론 과정을 도식적으로 나타내면 Fig. 14과 같다.

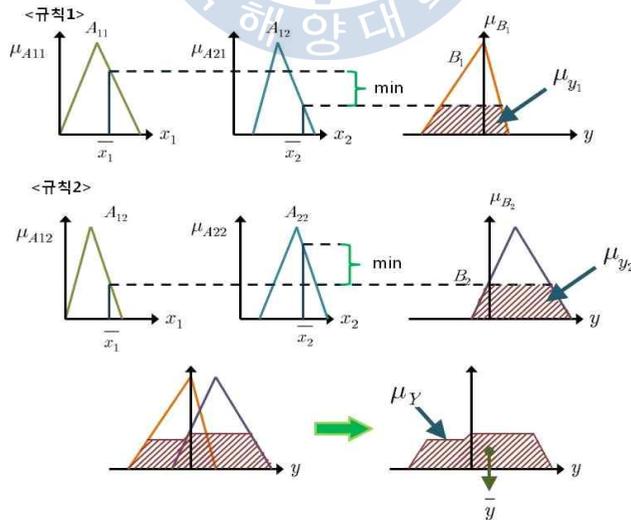


Fig. 14 Fuzzy inference process

지금까지의 앞장에서 설명한 이론을 바탕으로 퍼지 제어를 설계할 때 결정해야 할 주요사항을 정리하면 다음과 같다.

① 퍼지제어의 입·출력변수들과 그들의 퍼지값 결정

제어대상이 주어지면 입·출력변수를 먼저 결정한 후, 입·출력 변수들의 언어값과 그 언어값에 대한 소속함수를 결정한다[14].

② 지식기반(knowledge base)의 설계

제어에 필요한 지식은 규칙기반으로 표현할 수 있으며, 여기에서는 if-then 형식의 규칙으로 if절은 전반부 또는 전건부 등으로 불리고 then절은 후반부 또는 후건부 등으로 불리는 퍼지함의(fuzzy implication)로 제어규칙을 기술하는 경우를 생각한다[15].

③ 수치적인 입력변수값의 퍼지화방법 결정

입력변수의 값은 수치적인 값이므로 추론과정에 직접 이용될 수 없으므로 입력변수의 값을 퍼지화기(fuzzifier)를 통하여 퍼지값으로 변환하여 사용하여야 한다[16].

④ 퍼지추론 방법의 결정

추론법에는 무한치 논리를 기반으로 하는 추론법과 퍼지논리를 기반으로 하는 추론법이 있다. 무한치 논리를 기반으로 하는 추론법은 합성에 의한 방법, Tsukamoto의 방법, Takagi와 Sugeno의 방법으로 분류할 수 있다. 합성에 의한 추론법에는 Zadeh의 방법, Mamdani의 방법, Larsen의 방법 등이 있다[17].

⑤ 출력 퍼지값의 비퍼지화 방법의 결정

프로세스의 입력인 제어량은 수치적인 값이어야 하므로 퍼지값인 추론결과를 수치적인 실수값으로 변환하는 과정이 필요하며, 이 기능을 수행하는 것을 비퍼지화기라고 부르며, 무게 중심법, 합중심법(center of sums method), 최대 면적 중심법(first of maxima method), 최대치 평균 방법(middle of maxima method or mean of maxima method), 등이 있다[18].

아래의 Fig. 15는 앞에서 설명한 다변수 퍼지 시스템의 내부 구조 및 연산 과정을 나타낸 것이다.

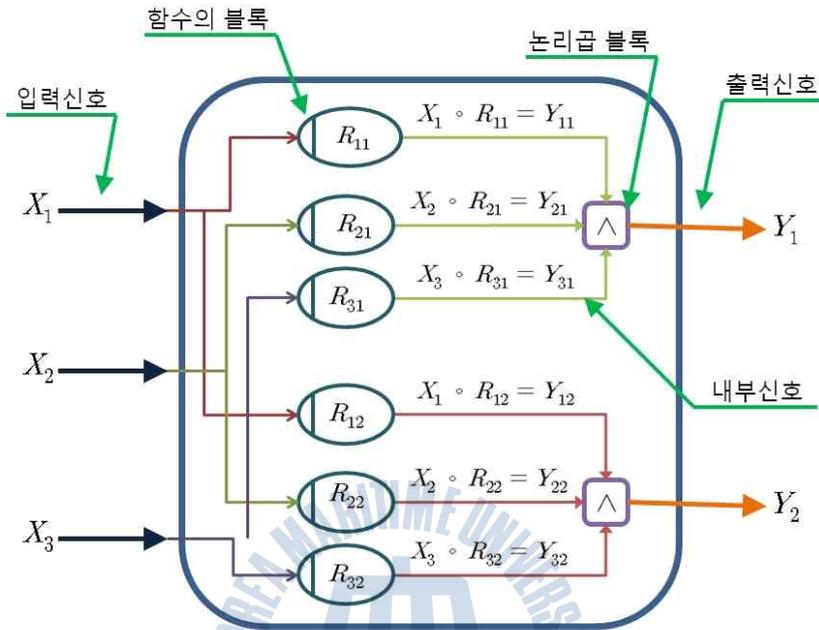


Fig. 15 Block diagram of variable structure of the fuzzy system

## 제 4 장 Plant Factory Lighting System

### 4.1 Plant Factory System

식물 공장시스템(Plant Factory System)이란, 채소나 묘를 중심으로 하는 작물을 시설 내에서 광, 온·습도, CO<sub>2</sub>농도 및 배양액 등의 환경조절을 인위적으로 제어하며 계절이나 장소에 관계없이 자동화를 통한 공장생산과 동일한 작물을 계획 생산할 수 있는 시스템이다[19].

이로 인해서 생산의 계획성, 시기나 장소에 영향을 받지 않고 생육의 제어가 가능해졌으며, 단기간의 대량생산이 가능해졌고, 수확물의 균일성과 재현성 및 수량 및 품질 향상의 효과를 가져 오게 되었다. 또한 체계적인 시스템으로 인한 환경관리의 자동화, 재배관리과정(파종, 이식, 재배, 수확, 포장)의 자동화 및 생력화가 가능해졌고, 재배 불가능한 작물의 생산 공급, 무 농약 및 청정재배로 인한 영양가 향상, 기능성 향상이 이루어져 고기능성 바이오 식품을 생산할 수 있게 되었다.

식물공장은 1957년 덴마크 크리스텐센 농장에서 새싹채소를 컨베이어시스템으로 재배한 것이 식물공장의 효시이며, 초기 비닐온실에서 1990년대 초 유리온실을 거쳐 2000년대 식물공장의 모습을 갖추게 되었다. 아래의 Fig. 16은 식물공장 내부 형태를 보여 준다[6].



Fig. 16 Inside the Plant factory

우리나라의 경우 1990년 초에 농림수산식품부에서 첨단기술 농업 적용으로 유리온실 지원 사업을 실시한 것을 시작으로 현재 식물공장 핵심요소기술 개발이 진행 중이다.

## 4.2 Plant Factory Lighting System의 구성

Plant Factory Lighting System의 목적은 외부 환경의 미세한 변화에 따라 식물에 가장 적합한 빛을 비춰 성장을 돕는 것이다. 이를 위해서 퍼지 연산이 이루어지고 마이크로프로세서를 통해 결과, 즉 조명모듈을 통해 색상을 도출하게 된다. 시스템은 크게 입력부, 제어부, 출력부의 3단계로 나누어 볼 수 있다.

입력부는 퍼지 제어를 위한 변수값을 받는 부분으로, 각 센서별로 외부 환경으로부터의 변화를 감지하도록 하였다. 외부 환경의 변수 요인은 조도, 온도, 습도, 이산화탄소 농도로 하였다.

퍼지를 적용한 Plant Factory Lighting System의 동작은 다음 Fig. 17과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

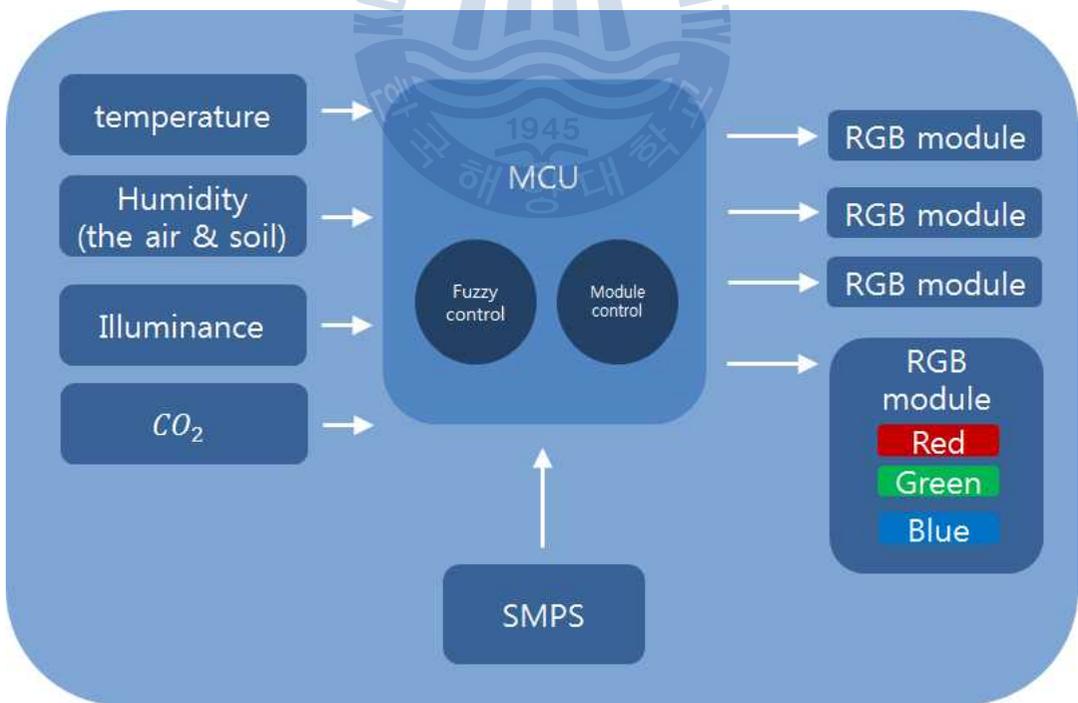


Fig. 17 Block diagram of Plant Factory Lighting System

습도 요인은 다시 대기 습도와 토양 습도로 나누어 값을 받는다. 값을 나누어 받는 이유는 시스템의 목적이 식물의 생장에 맞는 최적의 광원을 얻는 것이고, 습도는 식물에 영향을 많이 주는 요인 중 하나기 때문에 대기과 토양으로 나누어서 값을 받았다. 그리고 대기보다는 토양 습도가 미치는 영향이 더 크기 때문에 가중치 또한 토양 습도 변수를 크게 줬다. 온도의 경우도 대기과 토양의 온도의 변수의 값을 따로 받으면 좋지만 영향이 습도에 비해 높지 않으므로 논문에서는 대기 온도만 받았다. 조도는 출력되는 광량을 제어하기 위해 입력값으로 설정하였다. 각 변수의 값은 마이크로프로세서를 통해 퍼지 연산을 거친 후에 그 결과가 실질적인 광원인 RGB 모듈을 통해 나타난다.

### 4.3 퍼지 알고리즘 구성

퍼지 알고리즘은 수량화되어 있는 입력들을 언어적인 변수로 변환해 주는 부분이다. 제어 시스템에서 측정된 데이터는 실제적인 값이고, 퍼지제어기에서는 퍼지 집합론을 기반으로 하므로 수량화된 값들을 퍼지화 할 필요가 있다. 퍼지화의 방법으로는 수치적인 값  $x$ 를 퍼지 싱글턴으로 변환하는 방법과 퍼지수로 변환하는 두 가지 방법이 있는데, 여기서는 퍼지 싱글턴으로 변환하여 사용하였다[11]. 본 논문에서 마이크로프로세서로 입력되는 값은 온도, 습도(대기과 토양), 조도, 이산화탄소 농도의 4가지 변수이다. 그리고 이 변수로 인해 출력되는 값은 빛의 세기와 빛의 파장이 조절된 RGB LED의 발광이다.

아래 Fig. 18은 본 시스템의 퍼지 알고리즘의 대략적인 블록도를 나타낸다.

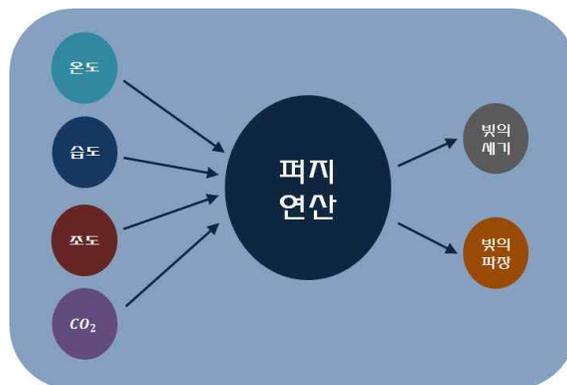


Fig. 18 Block diagram of fuzzy system

각 입출력 변수들의 등급을 5개의 클래스로 나누고 그에 따라 변수별로 멤버십 함수를 할당하였다. 다음 Fig. 19는 설정된 온도 멤버십 함수이다.

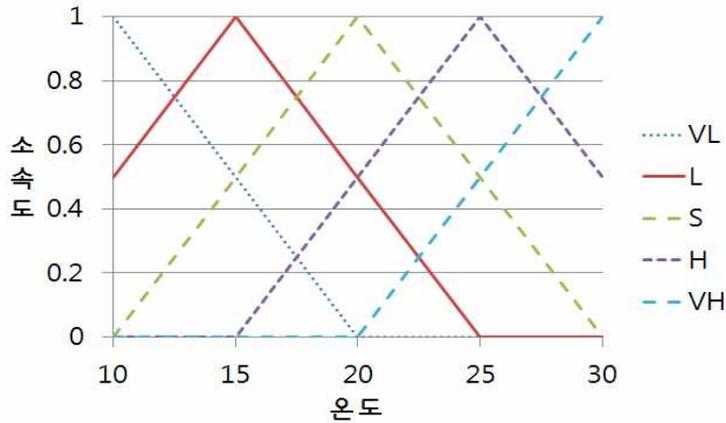


Fig. 19 Function of temperature membership

온도의 등급은 매우 낮음(VL), 낮음(L), 알맞음(S), 높음(H), 매우 높음(VH)의 5개의 클래스로 나누었다. 각 등급별 온도를 기준으로  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  까지 소속도를 가지도록 설정하였다. 알맞음(S) 클래스의 경우 표준 상온인  $20^{\circ}\text{C}$  를 기준으로 삼았다[20]. 이 때문에 온도가  $20^{\circ}\text{C}$  일 때, 소속도를 1로 두었으며,  $5^{\circ}\text{C}$  의 차이까지 0~1 사이의 소속도를 설정하였다.

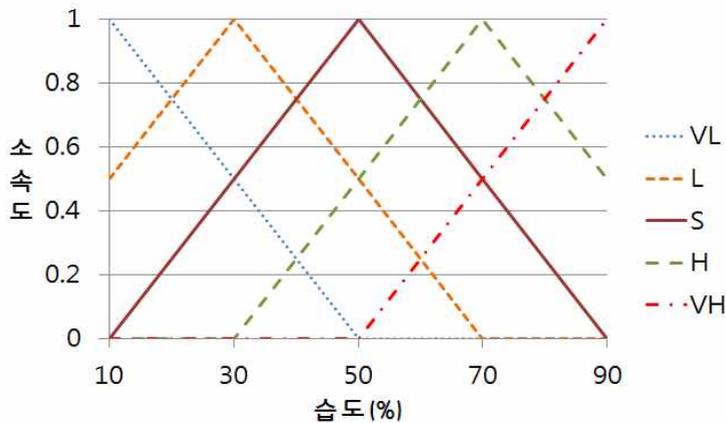


Fig. 20 Function of humidity membership

위의 Fig. 20은 습도 멤버십 함수를 나타낸다. 습도의 경우도 역시 5개의 클래스로 나누었으며, 각 클래스는 매우 낮음(VL), 낮음(L), 적당(S), 높음(H), 매우 높음(VH)으로 나타냈다. 식물의 성장환경에서 적정습도는 50~60%로, 본 논문에서는 습도 50%를 기준으로 하였다[21]. 50%를 적당 클래스로 설정하여 소속도를 1로 두었고, 각 클래스간의 간격을  $\pm 20\%$ 로 설정하였다. 습도는 대기와 토양의 2가지 변수로 설정했으나 멤버십함수는 각각 차이가 없이 동일하게 적용하여 나타내었다.

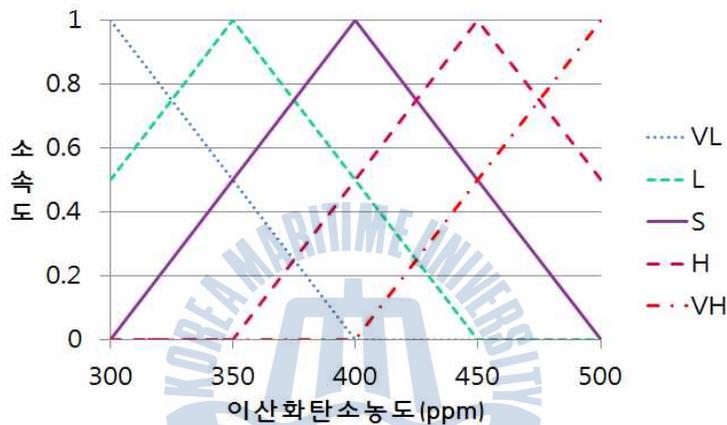


Fig. 21 Function of  $CO_2$  membership

이산화탄소 농도의 클래스는 매우 낮음(VL), 낮음(L), 적당(S), 높음(H), 매우 높음(VH)으로 설정하여 할당하였다. 적당(S)의 기준 농도를 400ppm으로 설정하였는데 사실 400ppm의 경우는 과학자들이 위험하게 여기는 농도의 기준이다. 하지만 현재 지구 전체의 이산화탄소 농도를 보면 평균 395ppm으로 400ppm에 근접하는 수치이기 때문에 현재 지구 대기에 맞게 400ppm으로 적당(S) 클래스를 설정하였다[22]. 클래스간의 간격은  $\pm 50\text{ppm}$ 으로 하였다. 이를 Fig. 21에 나타내었다.

조도는 매우 낮음(VL), 낮음(L), 적당함(S), 높음(H), 매우 높음(VH)의 5개의 클래스로 나누었다. 적당함(S)의 기준은 1만 룩스로 설정하고 각 클래스 당 5천

룩스의 범위를 가지도록 하였다. 적당함(S)의 기준을 1만 룩스로 잡은 이유는 광포화점과 관계가 있다. 양지식물의 경우 2만 룩스에서, 음지식물의 경우 1만 룩스에서 광포화점이기 때문에 이의 최소 교점 부분인 1만 룩스를 기준으로 잡았다[6]. 다음 Fig. 22는 조도에 따른 멤버십 함수를 나타낸다.

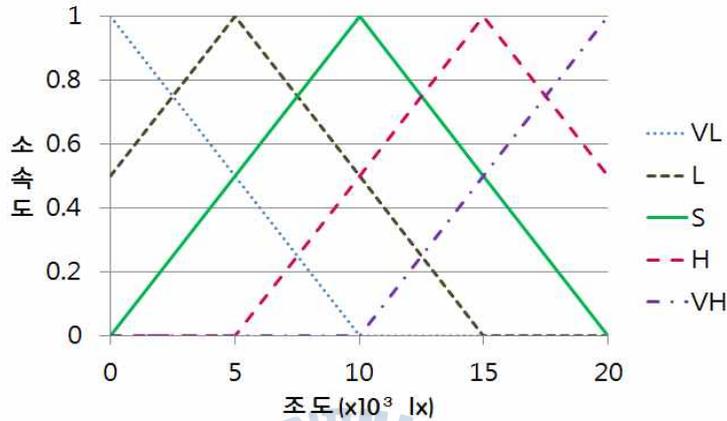


Fig. 22 Function of illuminance membership

이러한 입력변수로 인해 빛의 세기와 빛의 과장이 결정된다. 빛의 세기는 LED모듈의 on된 개수로 표현이 되며, 빛의 과장의 경우는 색상의 변환에 의해 표현되게 된다. 빛의 세기는 총 4개의 채널의 on~off의 %로써 나타낸다. 이는 다음 Fig. 23과 같이 나타낼 수 있다.

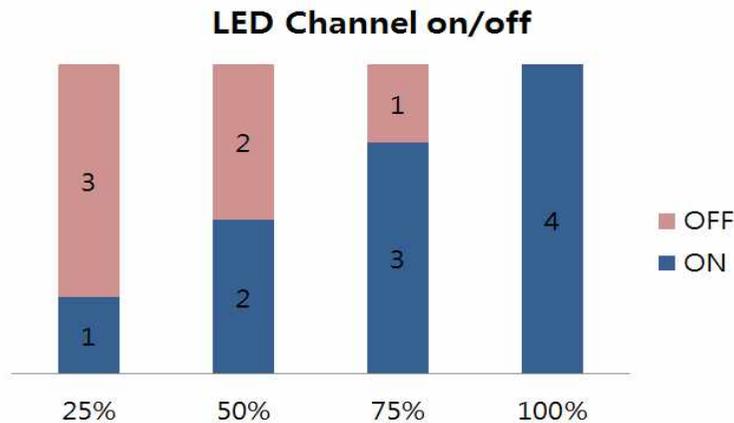


Fig. 23 Light intensity & Channel on/off

빛의 파장을 LED RGB모듈로 나타내기 위해서는 파장에 따른 RGB의 색상비를 먼저 알아야 한다. Table 1의 내용을 참조하여, 파장에 따른 RGB의 색상비를 계산하여 나타내었다. 계산은 Fig. 24와 같이 efg's computer lab의 오픈소스 프로그램인 spectra를 통해 이루어졌으며[23], 그 결과는 Table 2에 다음과 같이 나타내었고, 그에 따른 RGB 비율은 Fig. 25에 나타내었다.

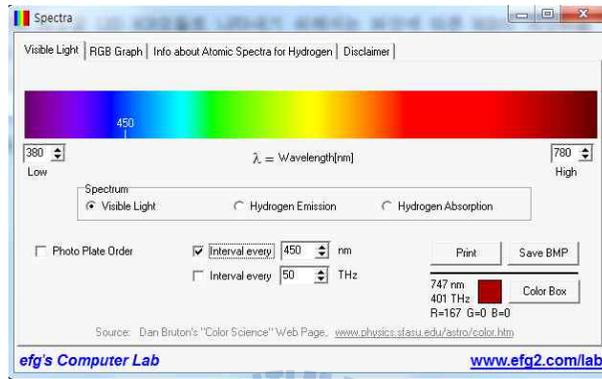


Fig. 24 Spectra Program

Table 2 RGB ratio of wavelength band

파장대역(nm)	R	G	B
730	200	0	0
660	255	0	0
600	255	190	0
440	0	0	255
400	131	0	181

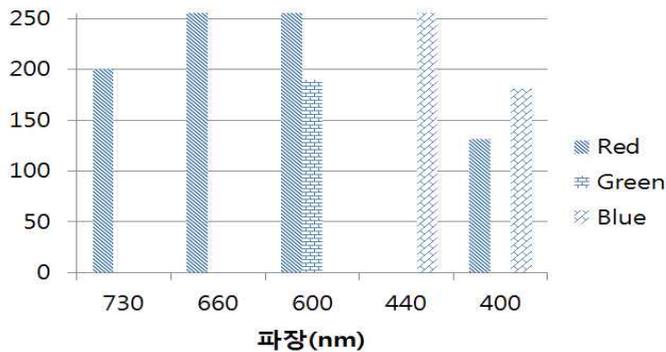


Fig. 25 Ratio of RGB

퍼지 알고리즘에서 중요한 것은 규칙을 설정하는 것인데, 이러한 규칙은 입력 변수에 의해 결과를 도출하는데 가장 중요한 사항이다.

규칙은 전문가의 자문을 받아서 작성되거나 일반적으로 사실로 인정되는 사항에 의해 작성된다. 다시 말해서 퍼지논리 제어 시스템은 전문가의 판단행위를 흉내 내는 것으로 이해할 수 있으므로, 퍼지 논리 제어 시스템은 전문가 시스템의 실제적인 시스템 제어의 응용이며, 퍼지논리 제어 시스템을 구현하기 위해서는 먼저 전문가의 경험적 지식을 기술하여야 한다[11].

충분한 학습으로 시스템 제어에 필요한 지식을 보유하고 있는 전문가는 수학적이고 정량적이라기보다는 정성적이고 언어적인 방법으로 자기의 제어규칙을 기술할 수 있다. 특히 IF-Then 형식은 경험적 지식을 표현하는데 편리하여 가장 많이 사용하므로 본 논문에서도 이 형식을 사용하였다.

조명 시스템의 입력변수가 5개이고, 각 입력별 클래스 또한 5개이며, 출력 변수는 2개에 클래스가 5개로 나누어져있다. 그렇기 때문에 규칙의 수 또한 매우 많이 만들 수 있다.

퍼지로직은 규칙이 많으면 많을수록 세밀하고 정확한 연산을 할 수 있게 되므로, 모든 규칙을 다 넣게 되면 가장 이상적인 시스템이 되나, 처리 시간이 오래 걸리고 계산이 복잡해지기 때문에 본 논문에서는 규칙의 수를 제한하여 나타내었다.

입력변수들은 편의를 위해 다음과 같이 온도는 T, 대기습도는 H1, 토양습도는 H2, 조도는 I, 이산화탄소농도는 C로 나타내었다. 또한 출력값인 파장대역 또한 730nm은 OA, 660nm는 OB, 600nm는 OC, 440nm는 OD, 400nm는 OE로 각각 나타내었다. 이로 인해 작성된 규칙은 다음 장에서 Table. 3으로 나타내었다.

Table. 3 Fuzzy Rule

	T	H1	H2	C	I	OUT1	OUT2
Rule. 1	VL	VL	VL	VL	VL	100%	OA
Rule. 2	VL	L	L	L	L	100%	OA
Rule. 3	S	S	S	S	S	75%	OB
Rule. 4	S	H	H	H	H	75%	OE
Rule. 5	H	S	S	S	VH	50%	OD
Rule. 6	H	H	H	S	VH	50%	OB
Rule. 7	VL	S	S	H	VH	75%	OB
Rule. 8	S	VH	VH	L	L	50%	OC
Rule. 9	VH	VL	VL	H	VH	25%	OE
Rule. 10	VL	VH	VH	H	L	100%	OA
Rule. 11	VL	S	S	S	VL	100%	OA
Rule. 12	VL	H	H	L	L	100%	OC
Rule. 13	VL	VH	VH	S	VH	25%	OE
Rule. 14	L	VL	VL	L	VL	100%	OE
Rule. 15	L	L	L	S	L	50%	OE
Rule. 16	L	S	S	S	H	75%	OB
Rule. 17	L	H	H	H	VH	75%	OC
Rule. 18	L	VL	VL	S	L	25%	OA
Rule. 19	S	VH	VH	S	S	50%	OE
Rule. 20	S	H	H	S	VH	25%	OE
Rule. 21	S	S	S	H	H	50%	OB
Rule. 22	H	VL	VL	L	VL	100%	OA
Rule. 23	H	L	L	S	L	75%	OC
Rule. 24	H	S	S	S	S	50%	OB
Rule. 25	H	H	H	H	H	25%	OC
Rule. 26	H	VH	VH	S	S	25%	OD
Rule. 27	VH	L	L	S	VL	100%	OA
Rule. 28	VH	S	S	H	L	100%	OB
Rule. 29	VH	VL	VL	L	S	75%	OC
Rule. 30	VH	H	H	S	H	75%	OD

위 규칙을 토대로 만드는 관계 함수는 각각 다음과 같이 식 (26)~(35)로 나타낼 수 있다.

$$R_{11} = \bigvee_{i=1}^{30} \{ T_{(i)} \wedge OUT1_{(i)} \}, R_{12} = \bigvee_{i=1}^{30} \{ T_{(i)} \wedge OUT2_{(i)} \} \quad (26),(27)$$

$$R_{21} = \bigvee_{i=1}^{30} \{ H1_{(i)} \wedge OUT1_{(i)} \}, \quad R_{22} = \bigvee_{i=1}^{30} \{ H1_{(i)} \wedge OUT2_{(i)} \} \quad (28),(29)$$

$$R_{31} = \bigvee_{i=1}^{30} \{ H2_{(i)} \wedge OUT1_{(i)} \}, \quad R_{32} = \bigvee_{i=1}^{30} \{ H2_{(i)} \wedge OUT2_{(i)} \} \quad (30),(31)$$

$$R_{41} = \bigvee_{i=1}^{30} \{ C_{(i)} \wedge OUT1_{(i)} \}, \quad R_{42} = \bigvee_{i=1}^{30} \{ C_{(i)} \wedge OUT2_{(i)} \} \quad (32),(33)$$

$$R_{51} = \bigvee_{i=1}^{30} \{ I_{(i)} \wedge OUT1_{(i)} \}, \quad R_{52} = \bigvee_{i=1}^{30} \{ I_{(i)} \wedge OUT2_{(i)} \} \quad (34),(35)$$

이로 인한 퍼지 관계 R은 다음과 같이 식 (36)~(45)로 나타낼 수 있다[24].

$$R_{11} = \begin{bmatrix} 0.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 \end{bmatrix}, \quad R_{12} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 1.0 & 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 1.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \\ 0.5 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (36),(37)$$

$$R_{21} = \begin{bmatrix} 0.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0 \end{bmatrix}, \quad R_{22} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 \\ 1.0 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 1.0 \\ 0.5 & 1.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (38),(39)$$

$$R_{31} = \begin{bmatrix} 0.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0 \end{bmatrix}, \quad R_{32} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 \\ 1.0 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 1.0 \\ 0.5 & 1.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (40),(41)$$

$$R_{41} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.5 & 0.5 & 1.0 \\ 0.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad R_{42} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.0 & 0.5 & 0.0 & 1.0 \\ 1.0 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 1.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 1.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.5 & 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (42),(43)$$

$$R_{51} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1.0 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 \end{bmatrix}, \quad R_{52} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.5 & 0.5 & 1.0 \\ 1.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 \end{bmatrix} \quad (44),(45)$$

예를 들어, Rule. 30의 경우 온도가 매우 덥고, 대기온도와 토양온도가 습하며, 이산화탄소 농도가 적당하며, 조도가 밝으면 빛의 세기를 75%로 하고 빛의 파장을 440nm로 하여 광합성작용을 최대로 하게끔 조절한다는 것이다.

물론, 규칙의 전제를 모두 만족하게 된다면, 소속도가 1이 되어 결과값이 그대로 출력되겠지만, 전제의 변화에 따라 소속도에 영향을 미치므로 그 결과값 또한 차이가 나게 되어 파장이 조금씩 바뀔 것이다. 여기서 소속도란 퍼지시스템에서 0과 1사이의 소속의 정도를 나타내는 것을 말한다. 하지만 이렇게 퍼지연산을 한 결과값은 퍼지값으로 출력됨으로 실제 조명 제어를 하지는 못한다. 퍼지값을 실제 제어할 수 있는 값으로 변환하는 과정이 필요한데, 이 과정을 비퍼지화 방법이라고 한다. 비퍼지화 방법에는 여러 가지가 있으나, 실제로는 무게 중심법을 주로 사용하기 때문에 여기서도 무게 중심법을 사용하여 계산하였다[11].

#### 4.4 MATLAB Simulation

무게 중심법을 이용한 비퍼지화 계산 및 결과는 MATLAB을 통하여 Simulation 하였으며 그 결과는 다음과 같이 나타냈다. 아래의 Fig. 26은 매트랩 퍼지 연산의 블록도를 나타낸다.

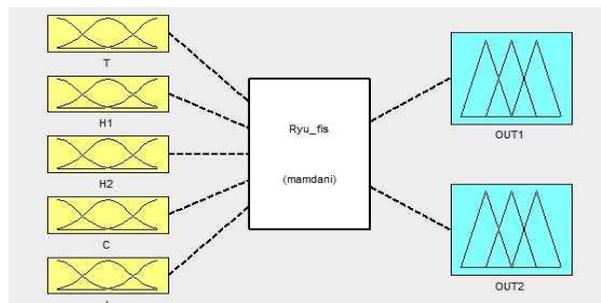


Fig. 26 Block diagram of MATLAB fuzzy

입력 변수 5개(온도, 습도, 조도, 이산화탄소)와 출력 변수(빛의 세기, 빛의 파장)2개를 4장에서 설정한 규칙들에 의해 퍼지 연산을 진행하였으며, 그 결과는 다음과 같이 Fig. 27~ Fig. 32의 입력 변수 2개와 출력 변수 1개의 3차원 함수로 나타내었다[25].

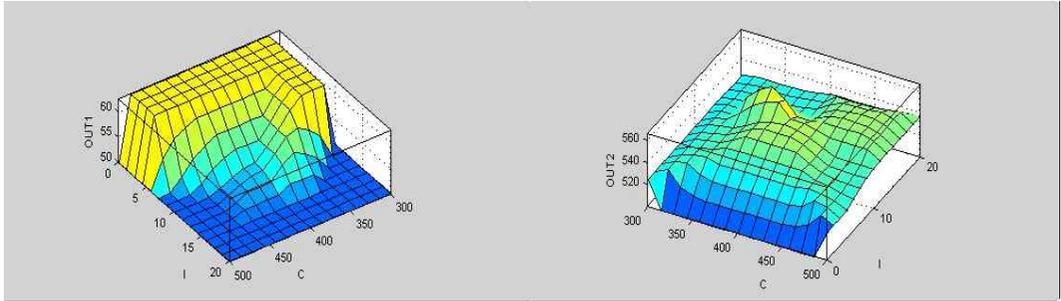


Fig. 27 Three-dimensional function of C - I

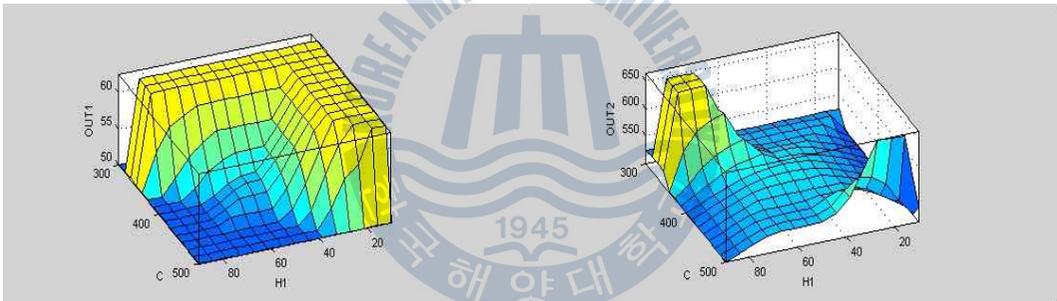


Fig. 28 Three-dimensional function of C - H1

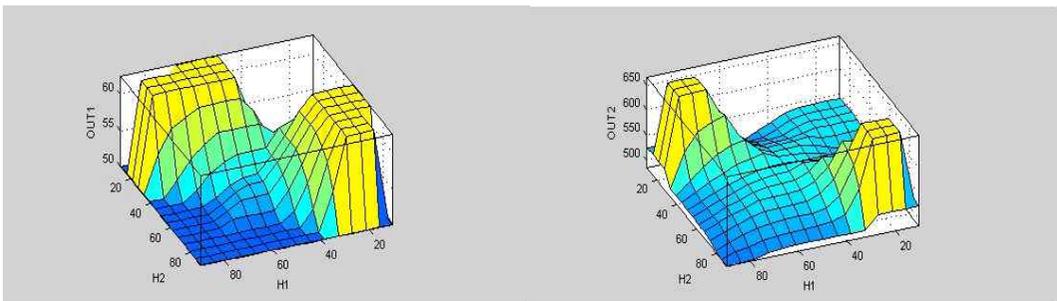


Fig. 29 Three-dimensional function of H1 - H2

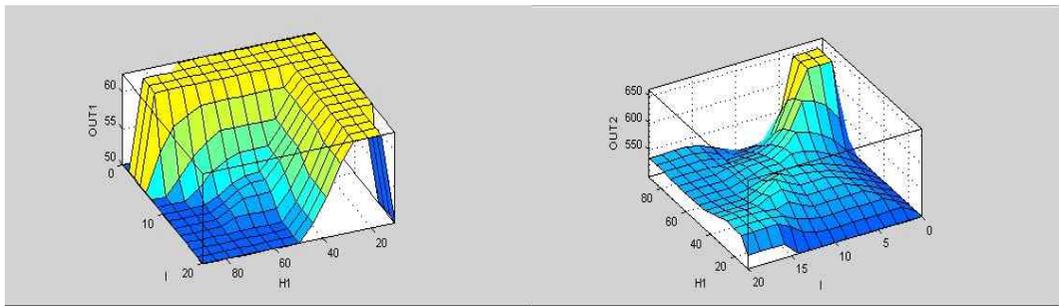


Fig. 30 Three-dimensional function of H1 - I

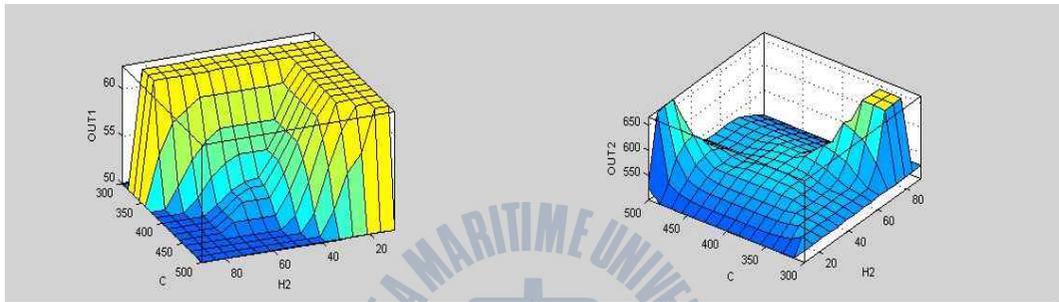


Fig. 31 Three-dimensional function of C - H2

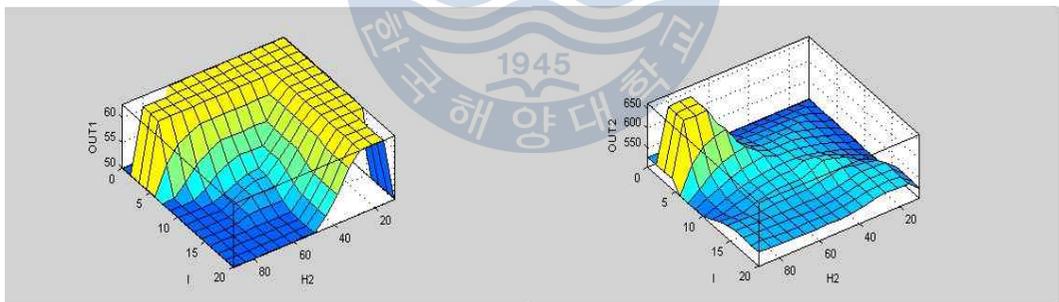


Fig. 32 Three-dimensional function of I - H2

## 제 5 장 인공지능형 Plant Factory Lighting System 구현

### 5.1 하드웨어 구성

하드웨어는 크게 센서 보드, 조명 통합 제어보드로 나누어 구성을 하였다. 센서 보드는 각 입력변수인 온도, 습도, 조도, 이산화탄소 농도를 입력받는 센서와 이를 처리하여 퍼지 연산을 행하는 AVR제어부 그리고 조명 통합 제어보드로 정보를 전송하는 통신부로 구성되었다. 조명 통합 제어보드는 조명을 제어하기 위한 연산을 행하는 AVR제어부와 실제로 결과값을 조명으로 발현하기 위한 RGB LED Module을 담당하는 LED제어부, 그리고 어디서든 사용할 수 있게 220V전원을 조명 시스템에 맞게 DC 12V로 낮추어 제어보드와 RGB LED Module에 전원을 공급해 주는 SMPS인 전원부로 구성되었다.

하드웨어의 전체적인 구성은 다음 Fig. 33과 같이 Block Diagram으로 나타낼 수 있다.

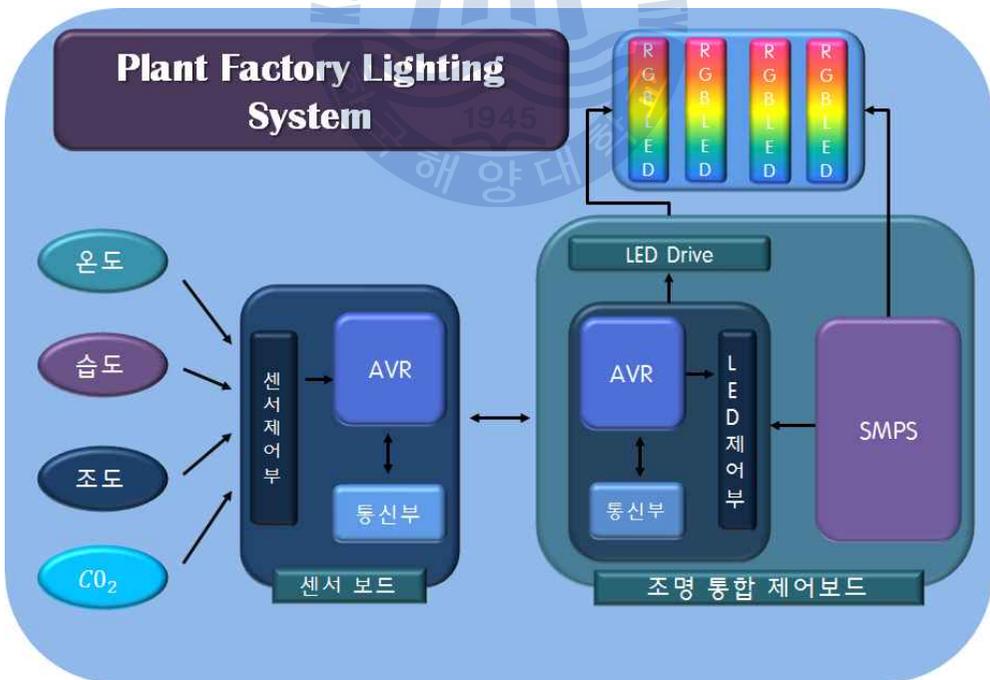


Fig. 33 Block diagram of Plant Factory Lighting System

## 5.2 조명 통합 제어보드

### 5.2.1 전원부

조명 통합 제어보드와 RGB LED Module에 실질적인 전원을 공급하기 위해 SMPS를 설계하여 구성하였다.

SMPS는 Switching mode power supply의 약자로 전원공급기 중의 하나이며, 전력용 트랜지스터 등의 반도체 소자를 이용하여 직류 전압을 구형형태의 전압으로 변환한 후 필터를 이용하여 직류전압을 얻는 장치이다. 이때 직류 출력 전압은 스위치의 ON, OFF기간을 제어함으로써 이루어진다. SMPS의 동작은 직류에서 직류로의 변환을 기본으로 하기 때문에 SMPS를 DC/DC컨버터라고 부른다. 기존의 선형제어기는 트랜지스터를 능동영역에서 동작시키기 때문에 손실이 심하여 회로 효율이 저하되는 단점이 있으나 SMPS는 트랜지스터를 스위치로 사용함으로써 효율 및 사이즈를 줄일 수 있는 장점이 있다. 용량이 크면 클수록 최대 LED module의 개수 즉, 빛의 세기를 더 밝게 조절할 수 있으나, 와트(W)의 수가 높을수록 설계가 어렵기 때문에 본 논문에서는 200W급의 SMPS를 선정하여 직접 설계하고 장착하였다. 참고로 200W 용량의 경우, RGB LED Module 3구 모델을 기준으로 200개를 동작시킬 수 있기에 본 시스템에서 쓰기에 충분한 용량이다. SMPS의 Test Board를 Fig. 34과 같이 제작하였고, 실제 용량 확인 테스트를 Fig. 35과 같이 나타내었다.

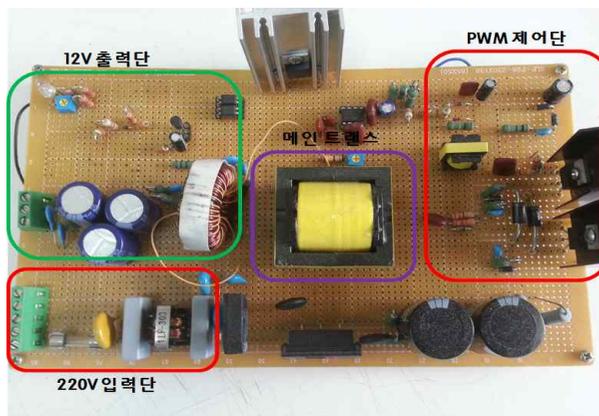


Fig. 34 Test board of 200W SMPS

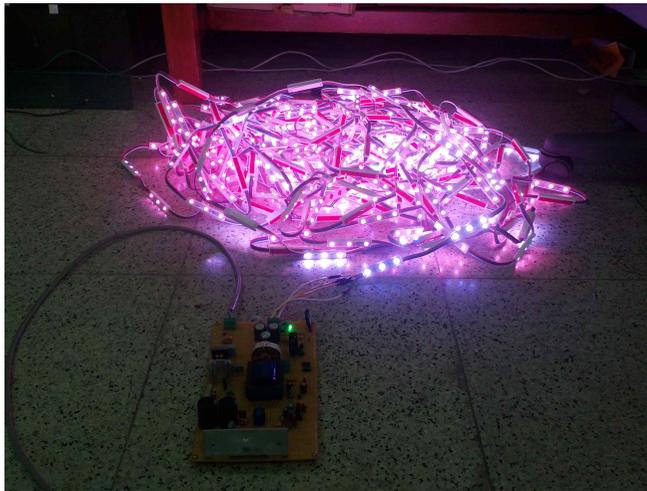


Fig. 35 Test operation of 200W SMPS

## 5.2.2 AVR제어부

본 시스템의 MCU는 아트멜(ATmel)사의 8비트 RISC 프로세서인 AVR 중에서 ATmega128 모델을 사용하였으며, 회로는 다음의 Fig. 36과 같다.

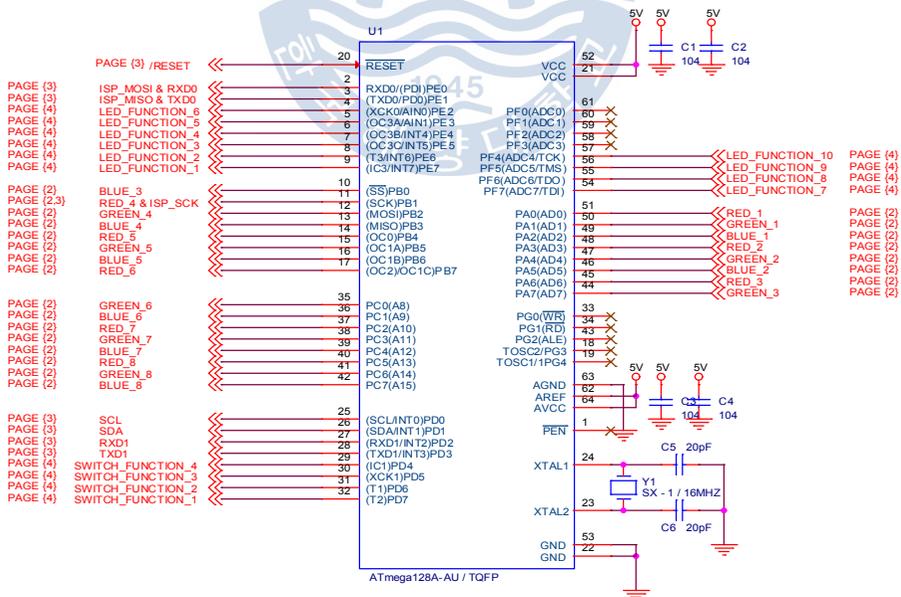


Fig. 36 Circuit of ATmega128

AVR제어부에서는 센서보드의 AVR제어부로부터 결과값을 받아서 실제로 각 RGB LED Module의 색상을 제어하는 역할을 한다.

RGB LED Module의 색상제어는 기본적으로 타이머/카운터 기능을 통해 이루어지며, 이 기능을 사용하여 PWM 출력을 만들어내어 모듈의 각 색상들 즉, Red, Green, Blue의 비율을 조절한다. 타이머/카운터에서도 16비트 카운터인 타이머/카운터1을 쓰고, 여러 모드가 있는데 그중에서도 CTC모드를 사용하였다. CTC모드(Clear Timer on Compare Match)는 카운터를 하면서 OCR값(Output Compare Register)과 계속 비교하여 그 값이 같아지면 매치신호를 발생시키고 이로 인해 파형 발생기로 펄스파형을 출력하게 된다. 파형 발생기로 인해 출력되는 파형의 주파수는 다음과 같이 식 (46)으로 정의된다.

$$f_{OC_nA} = \frac{f_{clk}}{2 \cdot N \cdot (1 + OCR_nA)} \quad (46)$$

CTC모드의 타이밍도는 다음의 Fig. 37과 같다.

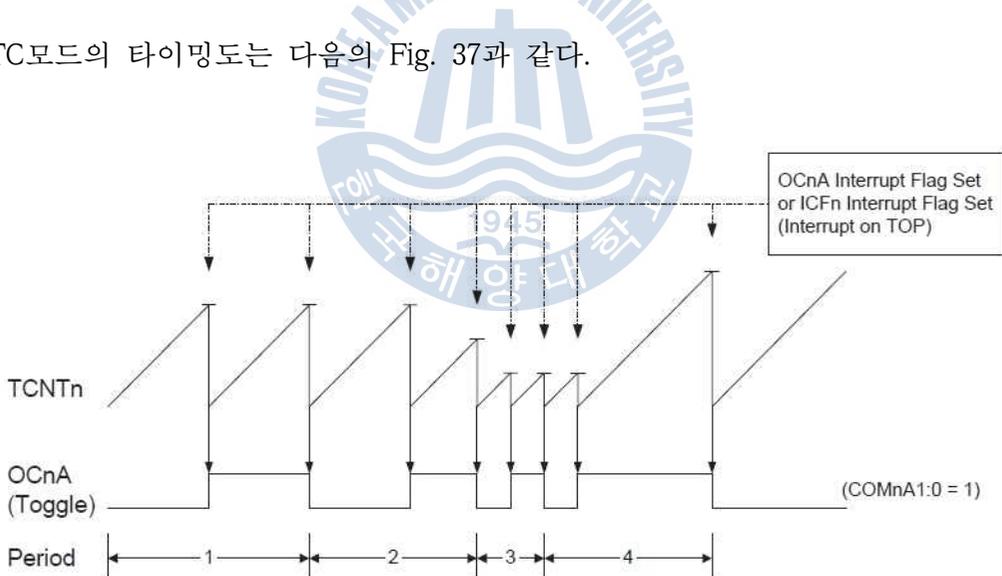


Fig. 37 Timing diagram of CTC mode

결과값을 실제적인 색상으로 내주는 LED module은 RGB LED 3구와 4구 모듈을 사용하였다. MCU에서 나오는 값은 실제적으로 module을 구동시키지는 못한

다. module의 구동전압은 12V로 전원부인 SMPS부에서 공급을 한다. MCU에서 나오는 값은 파워MOSFET의 게이트단으로 연결되어 실질적으로 module을 on-off시키는 기능을 한다. 즉, FET는 스위치의 기능을 하는 것으로 게이트단의 신호에 따라 module에 전원을 인가하여 색상을 나타내게 된다.

LED module에는 R, G, B, Com의 총 4개의 선이 있으며, Com을 제외한 나머지 3개의 선에 각각 파워MOSFET가 연결되어 색상을 제어하게 된다. 일반 TR을 써도 무방하나 각 채널별로 연결되는 Module의 개수가 많기 때문에 용량이 큰 파워MOSFET인 IRFZ44N 모델을 사용하였다. 이 모델의 경우, 흘릴 수 있는 최대전류가 49A로 모듈이 개당 0.06A의 소비전류를 가지기 때문에 전원의 공급이 충분히 이루어진다면 이론상 채널당 module을 800개까지 연결할 수 있다. 회로는 Fig. 38과 같이 구성하였다.

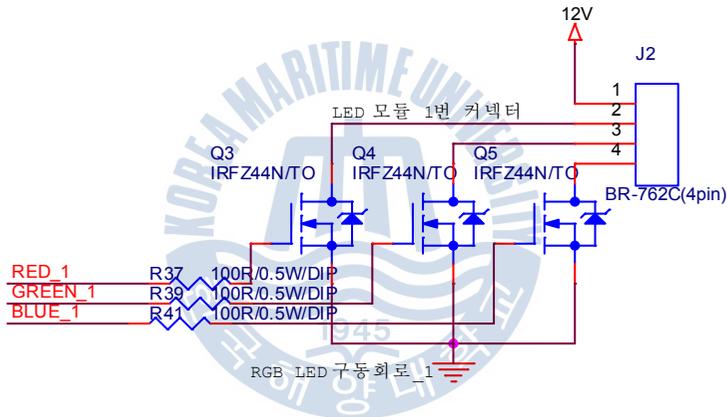
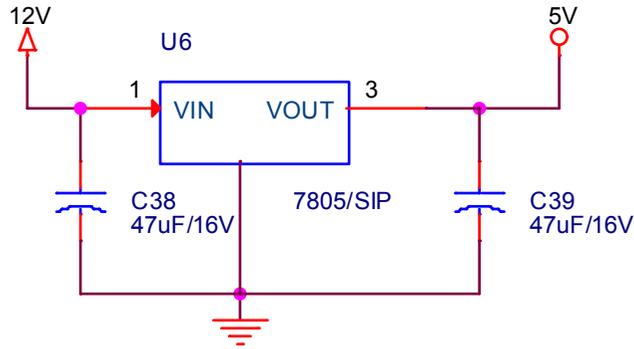


Fig. 38 Drive circuit of RGB LED

전원부인 SMPS가 따로 장착되어 있지만 이는 출력이 12V이기 때문에 구동전압이 5V인 MCU를 동작시킬 수 없다. 그렇기 때문에 12V를 5V로 낮춰주기 위한 변압회로를 구성해야 한다.

12V를 5V로 낮춰주기 위해서 많이 쓰이는 선형레귤레이터인 7805모델을 써서 전압회로를 구성했다. 7805는 전압을 낮춰주면서 나머지 에너지를 열로써 발산하기 때문에 방열판을 추가로 달아주어야 한다.

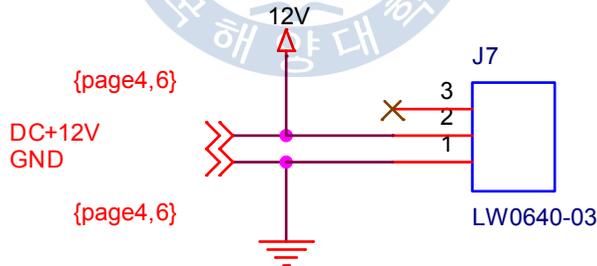
다음 Fig. 39는 7805의 회로 구성을 보여준다.



5V 스위칭 레귤레이터 전원회로

Fig. 39 Circuit of 7805

조명 통합제어보드는 전원부와 AVR제어부가 하나의 보드에 통합되어 구성하였다. 전원부의 SMPS의 경우, 스위칭하는 파워FET과 메인트랜스 등 발열이 많은 소자들이 다수 장착되어 있기 때문에 소자보호가 필수이며, 또한 통합보드이기 때문에 AVR제어부와 붙어 있어 자칫 MCU에 영향을 미칠 수 있다. 그렇기 때문에 발열소자 각각에 방열판을 장착했으며, 추가적으로 쿨러를 달 수 있게 커넥터를 추가하였으며, 그 회로는 Fig. 40과 같다.



컨트롤러 입력부 및 DC쿨러팬

Fig. 40 DC-cooler connector

### 5.2.3 통신부

조명 통합 제어보드와 센서 보드의 통신은 동기식 직렬 통신인  $I^2C$  통신을 사

용하였다.  $I^2C$ (Inter Integrated Circuit)는 필립스에서 개발한 규격으로 양방향 오픈 드레인 선인 SCL과 SDA의 두가닥으로 이루어져 있으며, 마스터-슬레이브 형태로 동작한다. 속도면에서는 다른 방식에 비하여 현저히 느리지만 하드웨어적으로 간단한 구성과 대화형 프로토콜을 만들 수 있고 하나의 버스에 많은 수의 노드를 연결 할 수 있다는 큰 장점이 있다. 1개의 조명 통합 제어보드에서는 채널이 4개이기 때문에 차후에 좀 더 채널을 늘리게 될 경우 이 통신을 이용하면 쉽게 연결할 수 있기 때문에 선택하였다. 하지만 기본적으로 통신 거리가 타 통신에 비해 많이 짧기 때문에 통신 거리를 확장하기 위한 extender chip인 82B715를 장착하였다.

조명 통합 제어보드의 MCU가 마스터, 센서 보드는 슬레이브로 지정하였으며, 이 회로는 다음과 같이 Fig. 41과 같이 나타내었으며, 통신 확인을 Fig. 42와 같이 Module 3개를 이용하여 왼쪽의 1개를 Mater로 오른쪽의 2개를 Slave로 설정하여 테스트하였다.

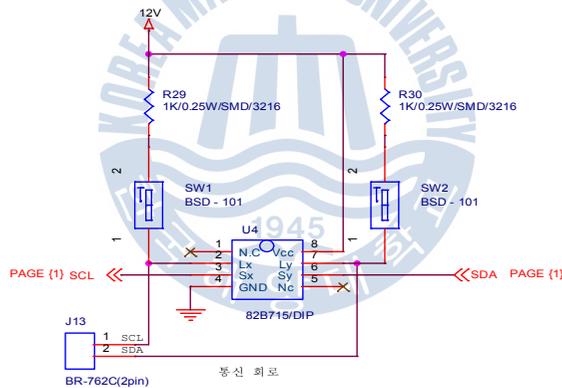


Fig. 41 Circuit of communication

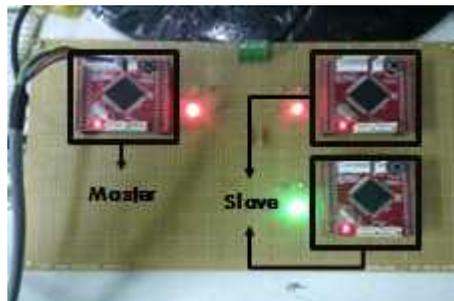


Fig. 42 Test of  $I^2C$  communication

### 5.3 센서 보드

센서 보드는 각 센서 즉, 온도, 습도, 조도, 이산화탄소 센서의 값을 받아서 보드 내의 MCU에서 각 값들을 퍼지 연산을 통해 각각 계산한 뒤 이를 취합하여 조명 통합 제어보드로 정보를 송신한다.

조도센서는 빛의 세기에 따라 저항 값이 달라지는 소자로 아날로그 값으로 출력한다. MCU에서는 이런 아날로그 값은 인식을 하지 못하기 때문에 이를 디지털화해 주기 위하여 A/D컨버터를 거쳐야 한다. 여기서는 ATmega128 모듈 내에 내장되어 있는 A/D 컨버터를 이용하였으며, 회로는 다음 Fig. 43과 같다.

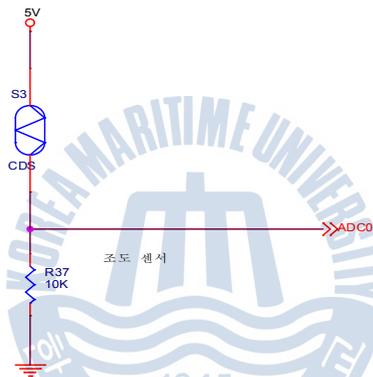


Fig. 43 Circuit of illuminance sensor

온도센서와 습도센서는 하나의 칩에서 온도&습도 기능을 가지고 있는 SHT71 모델을 사용하였다. SHT71은 칩 내부적으로 A/D 컨버터를 내장하고 있기 때문에 따로 디지털 변환이 필요 없이 바로 MCU로 디지털화된 값을 전송한다. SHT71 온도&습도센서모듈은 I<sup>2</sup>C 통신프로토콜 방식으로 동작되며 마이크로프로세서를 통해 제어가 가능하다. 4핀 중 SCK 라인은 단방향통신을 하며 마이크로프로세서에서 SCK을 온·습도 센서모듈로 보내게 되면 센서 내부에 저장되어 있는 프로토콜에 따라 SHT71 모듈에서 그에 맞는 동작을 하도록 되어있다. 인터페이스는 다음과 같이 Fig. 44로 나타낼 수 있으며, 회로는 Fig. 45처럼 구성하였다.

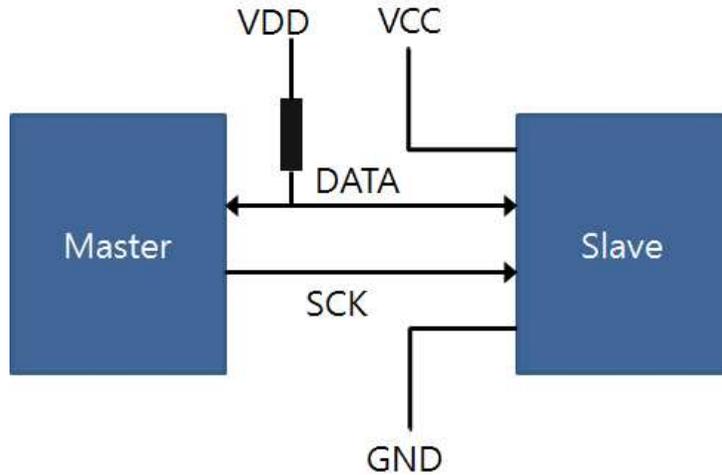


Fig. 44 Interface of SHT71

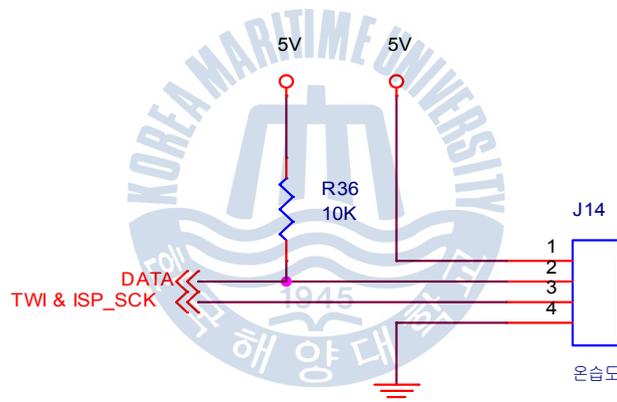


Fig. 45 Circuit of SHT71 sensor

이산화탄소센서는 NAP-55A 모델을 사용했다. 이 센서는 이산화탄소의 농도를 감지하여 그 결과를 조도센서와 마찬가지로 아날로그 값으로 출력을 한다. 역시 마찬가지로 A/D 컨버터는 MCU의 내장되어 있는 기능을 사용했다. 이산화탄소 농도를 최대 2000ppm까지 측정이 가능하기 때문에 실제로 적용시키기에 충분하다. 단, CO2 센서의 입력전압이 2.5V여서 따로 정전압 회로를 구성하였다. LM317 레귤레이터를 사용하여 12V를 2.5V로 낮추었다. 다음 Fig. 46에 CO2 센서 회로를 나타내었다. 그리고 통합된 센서 보드를 Fig. 47에 나타내었다.

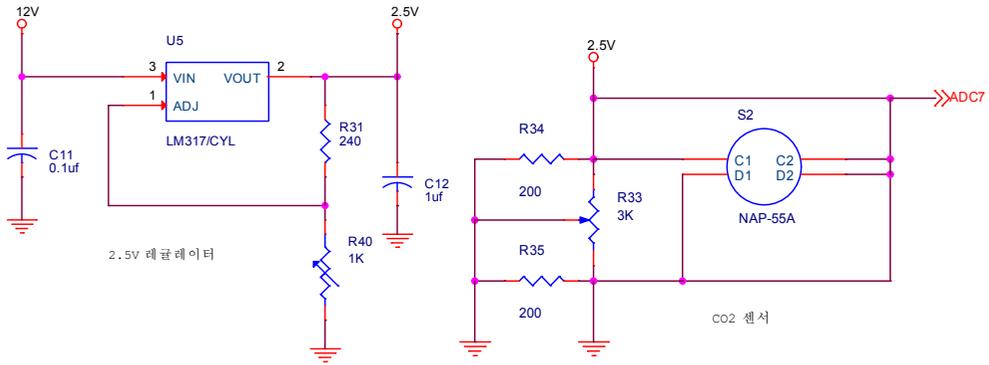


Fig. 46 Circuit of  $CO_2$  sensor

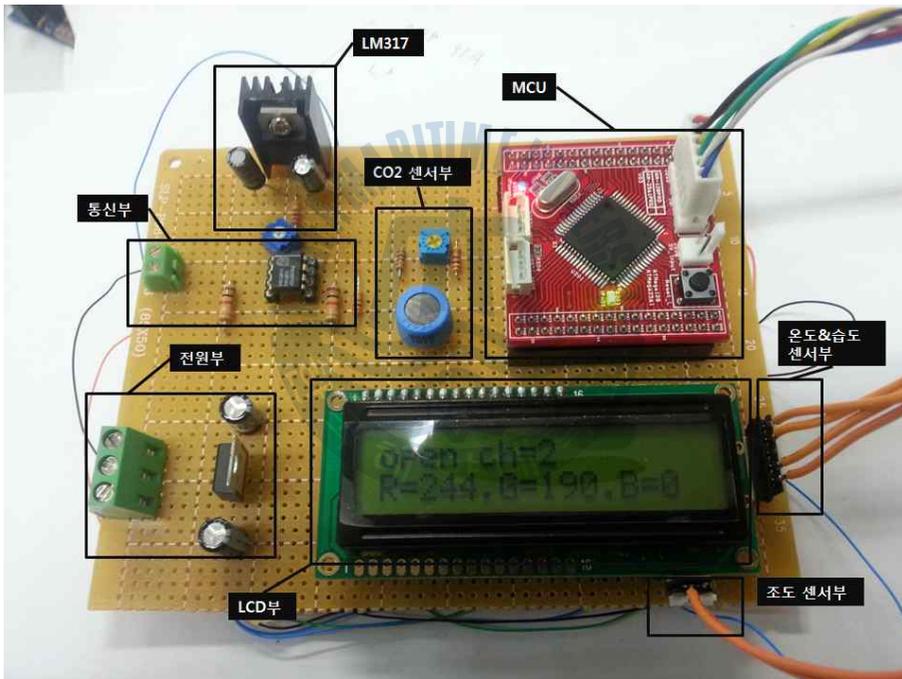


Fig. 47 Completed sensor board

## 5.4 테스트 시험

구성된 조명제어기 및 센서보드의 테스트 가동 시험을 진행하였다.

테스트의 목적은 센서보드에서 각 센서의 센싱 능력을 시험해 보고, 통신을

통해 조명 통합 제어와의 신호 송수신, 이에 따른 조명 통합 제어보드의 MCU 인 ATmega128의 실제적인 동작을 확인하기 위함이다. 또한 전원부로 설계한 200W급의 SMPS의 성능을 알아보아 실제로 식물재배에 쓰일 수 있는 보드인지 테스트를 하였다. 특히 SMPS의 경우 직접 220V에 연결하여 사용하기 때문에 실제 적용시 안전상의 문제가 생길 수 있고, 전원의 특성상 발열이 심하므로 특히 이 부분에 신경을 써서 테스트를 진행하였으며 Fig. 48과 같이 테스트를 진행하였다.



Fig. 48 Test of lighting controller & sensor board

테스트에 사용된 RGB LED 모듈은 RGB 3구 모듈 및 플렉시블 LED bar 타입의 모듈을 사용하였다. 두 개의 아크릴판을 나누어 각각 부착하였으며, 보드당 3구 모듈 기준 232개, 104개의 총합 336개의 모듈을 장착하였다. 총 전력 기준 235.2W가 소비되었으나, 실제로 설계한 SMPS는 200W로 35.2W의 초과 전력이 발생하여, 제작한 SMPS가 예상보다 좀 더 나은 효율을 보였다.

조명 통합제어보드의 MCU 또한 SMPS의 발열에 의해 영향을 받을 것이라 예상했으나 별 문제없이 잘 동작하는 것을 확인하였다.

## 5.5 조명 통합 제어보드의 제작

위의 내용을 바탕으로 하여 조명 통합 제어보드를 PCB 제작하였으며, 다음

Fig. 49와 같다. 조명 통합 제어보드 하나로 실제적 전원공급과 효과적인 식물 재배를 위한 조명 시스템을 가능하도록 하였다.

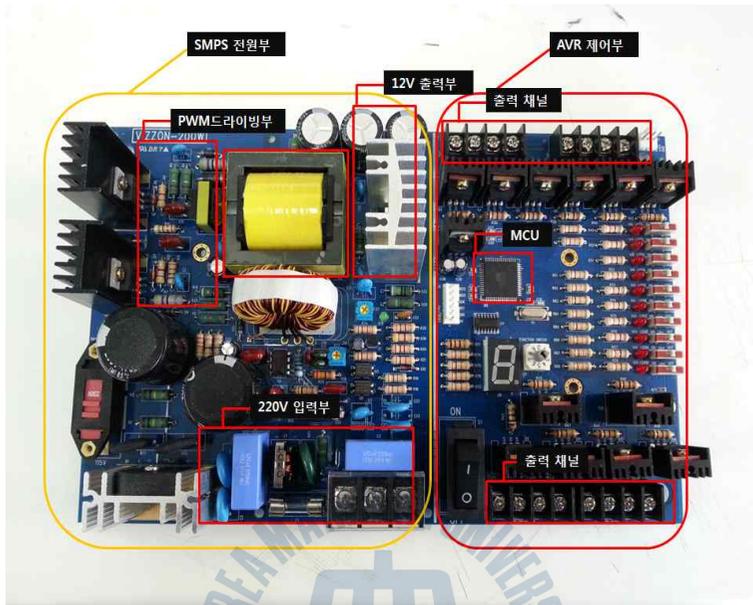


Fig. 49 Lighting control system board

PCB 하나의 보드상에 전원부와 AVR제어부를 동시에 장착했다. 전원부에서는 상용전원 220V을 받는 부분에 라인필터 및 x-cap, y-cap을 달아서 노이즈를 걸러내도록 하였으며, 안전 및 회로 보호를 위해 전원스위치를 따로 달았고, 퓨즈도 장착하였다. 비교적 발열 상태가 심한 파워트랜지스터와 쇼트키다이오드는 방열판을 큰 것을 장착해서 소자가 열에 의해 무리가 가지 않도록 최대한 신경을 썼다. RGB LED 모듈의 채널을 총 4개로 구성하였고, MCU의 퍼지 멤버십에 따라 각 LED 모듈의 FET의 온오프동작을 하도록 설정하여, 이를 통해 PWM출력을 내게 하였다. 그 외에 퍼지 시스템을 사용하지 않더라도 한 가지 파장의 색상을 고정시킬 수 있게끔 하기 위해서 스위치를 달아서 선택하게 하였고, 파장에 의한 색상 변경 속도를 설정해주기 위해서 로터리스위치와 이를 확인하기 위한 FND소자를 장착하였다. 200W 용량의 전원에 의해 채널당 LED RGB Module 3구 기준 50개씩 연결이 가능하다.

## 제 6 장 실험 및 결과

### 6.1 실험 방법

조명 시스템으로 직접 식물을 키우는 것이 가장 좋은 실험 방법이나, 식물 재배를 위한 조명 이외의 환경 구성의 어려움이 있어서 외부 환경 요인(센서보드)에 따른 과장의 변화를 관찰하여 이를 MATLAB Simulation 결과와 비교하는 것으로 결정하였다.

실험은 한국해양대학교 공대 내의 퍼지 뉴로 제어 연구실에서 진행되었으며, 태양에 의한 영향을 최대한 적게 받아 좀 더 정확한 실험을 위해 야간에 진행되었다.

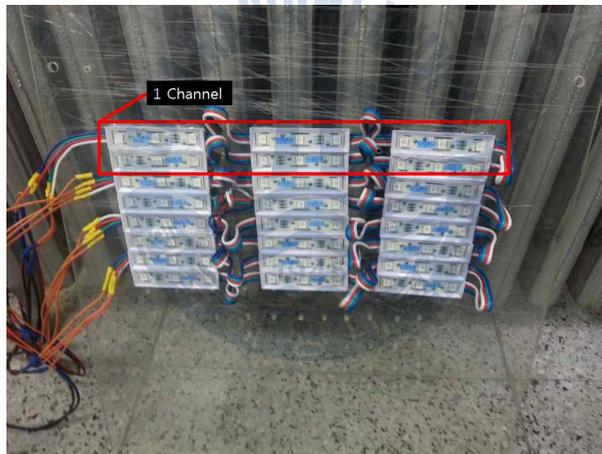


Fig. 50 LED RGB 4-channel Module

아크릴판에 Fig. 50과 같이 LED RGB Module을 달았다. 맨 위쪽부터 2개의 라인이 하나의 채널을 이뤄 총 4개의 채널을 구성하였다. 또한 빛을 모으기 위해 촘촘히 붙였다.

조명 통합 제어보드의 경우, 케이스가 없는 관계로 SMPS 방수케이스에 넣어서 실험을 진행하였고, 센서 보드의 경우는 아크릴판 뒤쪽에 올려서 조명 통합 제어보드와  $I^2C$ 통신을 연결하였다.

특히 센서 보드에 장착되어 있는 LCD Module에서는 센서 보드 MCU에서 퍼지 연산이 끝나고 나오는 결과 값들을 실제로 출력하여 동작과 매치 여부를 확인할 수 있게 하였다.

각 변수들을 통제시키고 파장의 변화와 채널의 on-off 여부를 측정하였으며, 특히 입력 변수 중에 대기과 토양의 습도를 따로 나누어야 하나 실험에서는 하나로 통합하여 진행하였다. 테스트 모습을 다음의 Fig. 51에 나타내었다.

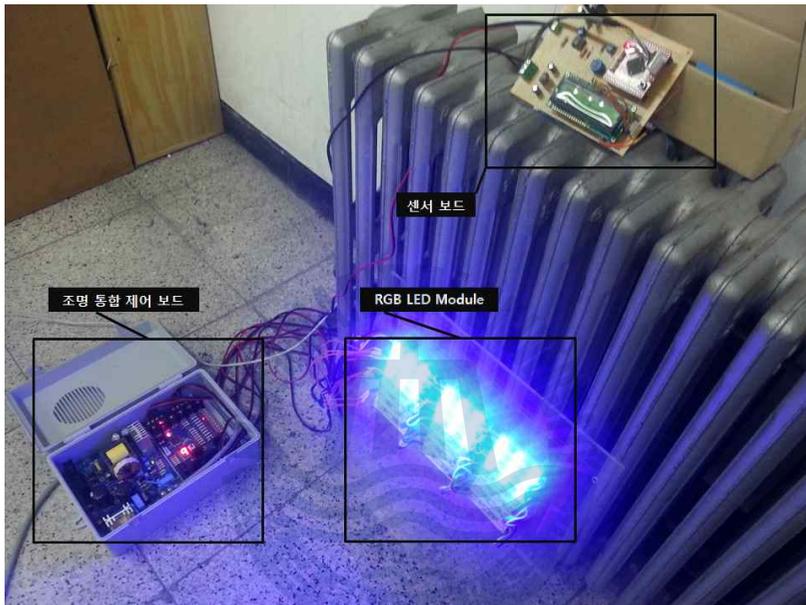


Fig. 51 Plant Factory Lighting System

## 6.2 실험 결과

총 4개의 채널 중에서 2개의 채널만 on되었고, 파장은 440nm 정도의 파장만 출력되었다. 외부 변수 요인이 어느 정도 크게 변하지 않는 이상, 퍼지 연산에서 미치는 가중치는 미미할뿐더러, 프로그램 내에서 파장의 구간을 정해 고정된 상수값을 출력하도록 설정해 놓았기 때문인 것으로 추측된다. 출력을 몇 가지 형태의 상수로 고정시킨 이유는 생물에 유익한 영향을 미치는 파장대역은 몇 가지로 제한되기 때문에 그 파장에 맞는 파장을 바로 출력하기 위함이다. 예를 들어 광합성에 도움이 되는 파장은 660nm대이나 퍼지연산 후 출력은 정

확히 660nm이 나올 수 없다. 그렇기 때문에 이를 기준으로 아래위의 기준선을 잡아 기준에 부합하면 모두 660nm가 나오게끔 설정해 놓았다. 이 외에도 rule의 경우, 전문적인 사실이 아닌 구현을 위해 임의적으로 작성되어진 것도 이유가 될 수 있다. 실제로 위 실험은 간단한 파장의 변화와 빛의 세기만을 보여줄 수 있기 때문에 퍼지 연산 결과를 충분히 보여줄 수는 없다.

그렇기 때문에 이를 보완하기 위해 Simulation을 통해서 결과값을 따로 도출해 내었다. 각 입력변수와 출력변수를 퍼지멤버십과 rule에 맞추어 설정하고 Simulation하였다.

각 입력 변수들을 통제 시키고 하나씩 변화시킨 후의 결과는 다음과 같이 Fig. 52~ Fig. 55에 나타내었다.

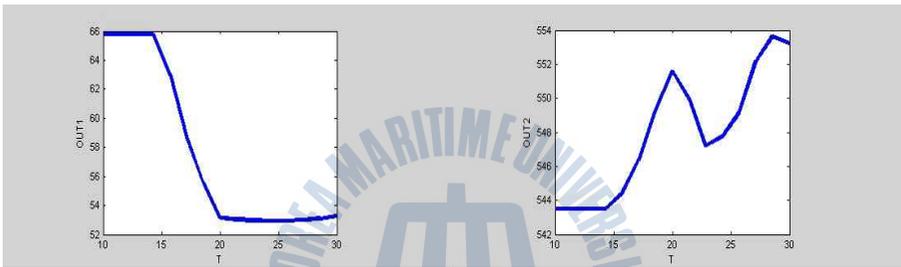


Fig. 52 Output according to the temperature

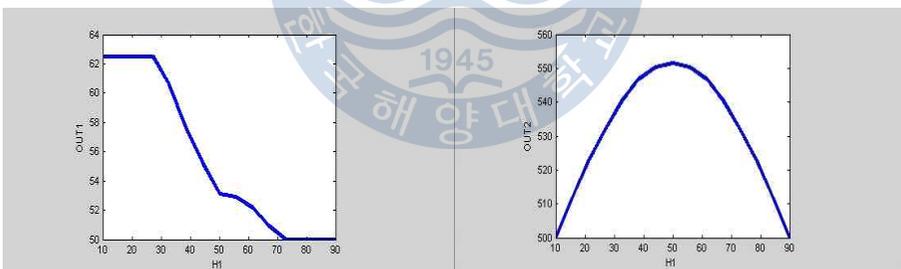


Fig. 53 Output according to the Humidity

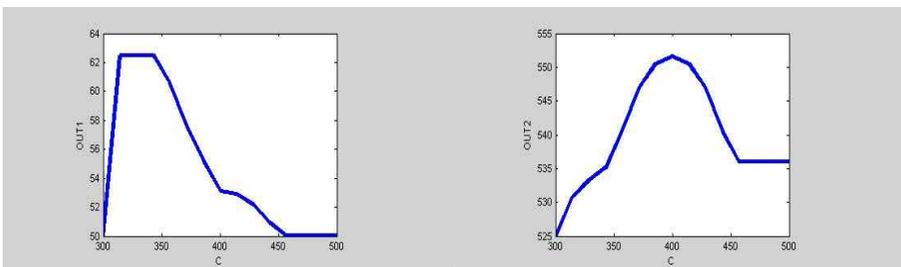


Fig. 54 Output according to the CO2

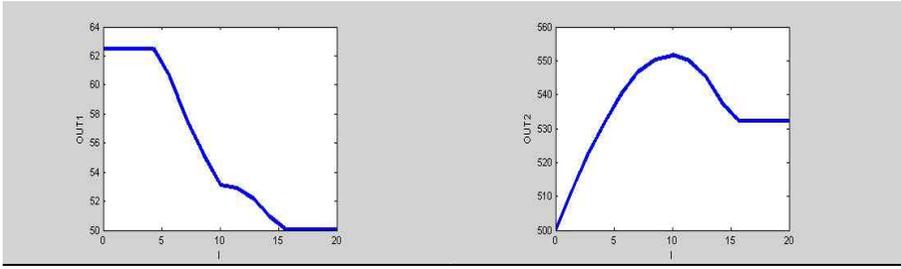


Fig. 55 Output according to the Illuminance

다음의 Fig. 56은 입력 변수 5개에 의해 퍼지 연산 Simulation을 수행한 결과를 나타낸다.

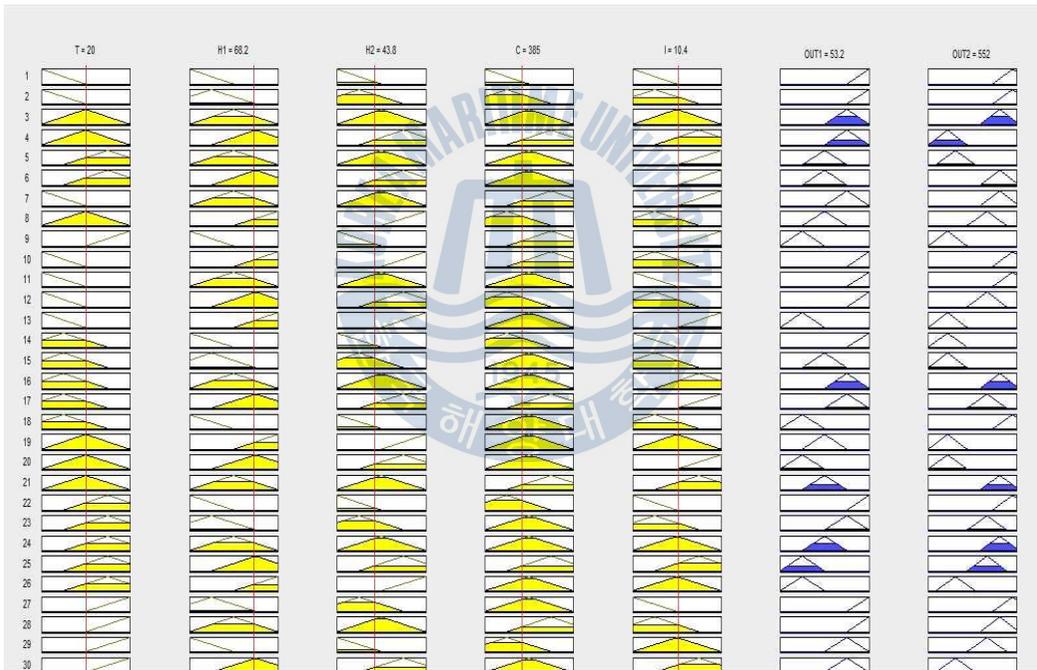


Fig. 56 Result of simulation

Simulation의 최대 장점은 실험을 하지 않더라도 실제 출력의 결과를 미리 볼 수 있는 것이다. 5개의 입력 변수들을 임의로 10번 가변시켜 출력값을 확인해 보았으며, 이를 다음 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Output of fuzzy arithmetic

	온도(T)	대기습도 (H1)	토양습도 (H2)	CO2 (C)	조도(I)	빛의 세기 (OUT1)	빛의 파장 (OUT2)
No.1	14.6	76	72.5	344	4.4	2.64	571
No.2	26	36.6	30.4	428	14.7	2.05	568
No.3	29.5	50.9	54.1	435	2.76	2.81	631
No.4	15	79.6	65.4	351	12.8	2.03	557
No.5	26.8	31.8	28.7	472	20	1.42	557
No.6	24.4	39.6	39.9	392	2.46	2.71	612
No.7	11.3	10	15.6	446	5.6	1.55	569
No.8	27.7	30	66.6	380	0	3.32	641
No.9	27.7	30	66.6	432	0.672	3.19	647
No.10	21.9	40.7	41.7	371	4.55	2.34	586

퍼지에서의 출력은 입력변수와 퍼지 규칙에 의해서 정해지기 때문에 똑같은 입력변수라 하더라도 규칙작성자의 성향에 따라 결과값은 달라질 수 있다.

이것은 퍼지 연산이 인공 지능의 특성을 가졌기 때문에 가능하다. 이러한 특성으로 인해 퍼지 제어 시스템을 통한 LED 조명이 일반 파장 고정식 LED형태의 식물 공장 조명보다 좀 더 유기적이며 지능적인 시스템이 될 수 있는 이유가 된다.

## 제 7 장 결 론

본 논문에서는 식물 공장에서 쓰이는 일반 고정 파장형인 인공조명 대신에 외부 환경 및 각 상황에 따라서 가변적으로 식물 생장에 도움이 되는 파장으로 바뀌는 새로운 형태의 조명 시스템을 제시하였다.

현재 식물 공장은 고정 파장형인 인공조명을 사용하는 곳이 대부분이나 식물의 성장에 맞추어 빛을 공급하는 업체들도 점차 등장하고 있다.

파루스사의 식물 공장 제어 시스템의 경우, LED조명을 이용하여 작물의 종류에 맞춘 파장 제어 시스템을 제시하였으며, 다른 곳에서도 작물이나 기타 다른 영향을 주는 파장대역에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있는 중이다[6].

친환경 조명으로 이미 각광을 받기 시작한 LED 산업과 차세대 농업을 이끌어갈 식물 공장의 조합은 큰 시너지 효과를 낼 것이며, 이로 인해 다른 산업에 비해 열악했던 농업 경쟁력 향상에 큰 도움이 될 것은 자명하다.

건강과 웰빙을 선호하는 현대인들의 입맛에 맞춰줄 수 있는 작물을 효과적으로 생산이 가능한 인공 광원을 이용하는 식물 공장, 특히 LED를 이용한 식물 공장은 향후 급성장할 것으로 보이며, 이에 따라 식물의 성장 방식 및 이에 관한 제어 연구에도 큰 발전이 있을 것이다.

이러한 식물 공장의 인공 광원에 인공 지능을 이용한 제어를 하게 된다면, 자동화 물결을 타고 있는 현재 농업 시스템 상에서 큰 힘이 될 것이다.

인공지능 제어기법인 퍼지추론을 이용하여 알고리즘을 구성하고 본 논문에서 제작된 제어기에 적용한 결과, 충분히 적용하여 사용할 수 있다는 결과를 얻었다. 하지만, 이에 관련되어서는 아직까지 많은 연구와 투자가 필요한 단계 이므로, 국가적인 차원에서 그리고 기업들의 공격적인 연구 투자가 이루어진다면, 정말 획기적인 조명 시스템으로 태어날 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] UN world food programme, 2012. <http://ko.wfp.org> [Online] Available at: <http://ko.wfp.org/%EA%B8%B0%EC%95%84%EB%9E%80/%EA%B8%B0%EC%95%84%EB%9E%80> [Accessed 15 October 2012].
- [2] 김재훈, 2010. 식물공장 시스템의 동향과 발전 방향. *J Plant Biotechnol*, 37, pp.442-455.
- [3] 이상우, 2010. 식물공장과 LED 인공광 이용한 식물 재배. *Optical science and technology*, 14(3), pp.12-18.
- [4] 손정익, 이훈, 오명민, 2009. 광 독립영양 기내 미세증식시스템에서 광 강도 및 CO<sub>2</sub> 농도에 따른 감자 소식물체 생육 분석 및 모델링에 의한 생육단계별 적정 환경조건 설정. *Journal of Bio-Environment Control*, 18(1), pp.15-22.
- [5] 정연홍, 박병철, 김현선, 최안섭, 2009. R,G,B LEDs의 Natural Color 조명색 채 구현 방안에 대한 기초연구, 2009년도 한국조명전기설비학회 추계 학술대회 논문집, pp.3-6.
- [6] 한국미래기술교육연구원, 2011. IT-LED 기반 미래형 식물공장 융합기술 및 사업전망, 서울: 한국미래기술교육연구원, pp.5-299.
- [7] 조태제, 2006. 고부가가치 식물 재배용 광원으로서의 LED의 가능성. 첨단기술정보분석.
- [8] Chuen Chien Lee, 1990. Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part I·II, *IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics*, 20(2), pp.404-435.
- [9] Jacek M. Zurada, 1992. *Introduction to Artificial Neural System*. West Publishing Company.
- [10] Chin-Teng Lin & C.S George Lee, 1996. *Neural fuzzy systems, Prentice Hall*.
- [11] 이상배, 1999. 퍼지-뉴로 제어 시스템. 교학사. pp.7-108.
- [12] 이광형, 오길록, 1991. 퍼지이론 및 응용 I/II. 홍릉과학출판사.
- [13] L. A. Zadeh, 1965. *Fuzzy Sets, Information and Control* 8, pp.338-353.

- [14] M. Mizumoto, 1989. *Pictorial representation of fuzzy connectives, Part I : cases of t-norms, t-conorms and averaging operators*, Fuzzy sets and Systems, 31, pp.217-242.
- [15] L. A. Zadeh, 1978. *Fuzzy sets as a basic for a theory of possibility*, Fuzzy sets and Systems, 1, pp.3-28.
- [16] Jyh-Shing & Roger Jang, 1993. ANFIS: Adaptive Network Based Fuzzy Inference system, *IEEE Transaction on system, Man, And Cybernetics*, 23(3), pp. 665-685.
- [17] J. S. R. Jang & C.-T. Sun, 1995. Neuro-Fuzzy Modeling and Control, *Proc. IEEE*.
- [18] M. Sugeno & M. Nishida, 1985. *Fuzzy control of model car*, Fuzzy Sets Systems, 16, pp.103-113.
- [19] 홍정환, 이동운, 2011. 식물공장의 종합적 환경 제어에 관한 연구, *대한학술추계학술 발표대회 논문집*, 31(2), pp.69-70.
- [20] 화학용어사전편찬회, 2011. *화학용어사전*. 일진사.
- [21] 진용호, 이용범, 김재영, 2000. *식물공장에서 상대습도와 배양액 농도가 반결구 상추의 생육에 미치는 영향*. KOR. J. HORT. SCI. & TECHNOL.
- [22] 기상청, 2011. *지구대기감시보고서*, 충남: 기상청 기후과학국 기후변화감시센터, pp.22-25.
- [23] efg' s Computer Lab, 2011. [www.efg2.com/lab](http://www.efg2.com/lab) [Online] Available at: <http://www.efg2.com/Lab/> [Accessed 20 November 2012].
- [24] Madam M. Gupta, 1993. *Multivariable Structure of Fuzzy Control System*, pp.2-18.
- [25] 이현엽, 문경일, 1999. *MATLAB을 이용한 퍼지-뉴로*. 아진, pp.445-454.

## 감사의 글

먼저, 제 인생의 방향을 찾으려 해주시고 물심양면으로 지원을 아끼지 않으셨던 지도교수님이신 이상배 교수님께 진심으로 깊이 고개 숙여 감사의 말씀을 올립니다. 교수님과 함께 한 2년 동안, 연구실에서 정말 많은 것을 배우면서 느낀 감사의 마음을 단 몇 줄의 감사의 말로 나타낸다는 것이 죄송스러울 만큼 큰 은혜를 입었습니다. 다시 한 번 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 부족한 제 논문을 다듬어 주신 양규식 교수님과 심준환 교수님께도 고개 숙여 감사의 말씀을 드립니다. 석사 생활동안 많은 편의를 봐주신 임재홍 교수님께도 감사드립니다.

바닷바람을 맞으면서 아치 섬에 첫 발을 내딛은 지가 엿그제 같은데 이제 떠나야한다는 사실이 믿기질 않습니다. 여러모로 부족한 제가 이렇게 무사히 결과를 내기까지에는 정말 많은 분들의 관심과 도움이 있었기에 가능했습니다.

특히, 연구실 생활동안 정말 많은 도움을 주신, 저에겐 그 무엇보다 바꿀 수 없는 크나큰 정신적 지주이신 박주원 선배님께 정말 큰 감사의 말씀을 드립니다. 주원선배는 저에게는 단지 연구실 선배가 아닌 친형과 같은 존재입니다. 형님께서 전수해주신 경험들과 스킬들을 바탕으로 더 크게 성장해가는 모습을 보여드리겠습니다.

바쁘신 와중에도 연구실에 오셔서 좋은 말씀 해주신 연구실 선배이신 이창규 선배님과 김영탁 선배님께도 감사합니다.

우리 학과의 안방마님이신 주현진 조교누나에게도 감사의 말씀을 드립니다. 누나덕분에 2년 동안 편안하게 지낼 수 있었어요.

처음 1년 동안 같이 지내면서 도움을 많이 주고 미지의 신세계를 알게 해 준 학과동기이자 연구실 1년 선배인 진강이, 그리고 물질적으로 많은 도움을 주신 상용이형님, 이제 연구실을 맡아 이끌어갈 에이스 정수, 그리고 저와 연구실 동기이신 조봉근 학우님께도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

그리고 외로운 연구실 생활동안 나의 말벗이 되어준, 좋은 학과후배이자 같은 석사의 길을 가는 원경이와 현이, 너희들이 있어서 외롭지 않은 석사 생활이

될 수 있었어. 연구실에 와서 좋은 인연을 맺게 된 영철이형, 동근이형, 관준이형님께도 감사의 말씀을 드립니다.

좋은 후배이자 동생들인 민재, 성욱이, 지훈, 재용이, 민수, 줄기, 주화 이 외에도 미처 적지 못한 학우님들께도 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

나의 가장 친한 친구들이며, 나의 버팀목이 되어준 죽마고우 창민이, 태수, 상현아! 이제는 내가 너희들을 먹여 살려야겠구나.

그리고 마지막으로 제 뒷바라지 하시느라 너무 고생하신 부모님과 석사의 길을 가고 있는 나의 하나뿐인 동생 재현이에게도 고마움을 전합니다.

석사 생활을 하지 않았더라면 함께 하지 못했을 소중한 인연들입니다. 2년 동안 정말 많은 도움을 받고, 좋은 추억들을 많이 만들었습니다.

제가 받은 사랑을 평생 마음속에 새겨놓아 잊지 않고 열심히 살겠습니다.

다시 한 번 모두에게 진심으로 감사의 말씀 올립니다. 감사합니다!!

