



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](#)

碩士學位論文

수경재배 식물공장을 위한 PLC
기반 양액제어 시스템 개발

濟州大學校 産業大學院

電氣工學科

高 珍 韓

2019 年 8 月

수경재배 식물공장을 위한 PLC 기반 양액제어 시스템 개발

指導教授 金 豪 贊

高 珍 韓

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2019 年 8 月

高珍韓의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長

이 개영



委 員

김 호민



委 員

김 호찬



濟州大學校 産業大學院

2019 年 8 月



Development of PLC-Based Nutrient Solution
Control System for
Hydroponic Plant Factory

Jin-Han Ko
(Supervised by Professor Ho-Chan Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE

Department of Electrical Engineering
Graduate School of industry
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2019. 8.

- i -

목 차

그림 목 차	iv
표 목 차	vi
SUMMARY	vii
I. 서 론	1
II. 수경재배 식물공장의 개요	3
2.1 식물공장의 종류	3
2.2 LED 제어 시스템	8
2.3 식물공장 양액제어 시스템의 종류	11
2.4 식물공장의 온·습도	15
III. 식물공장 PLC 제어장치와 모니터링 시스템	17
3.1 PLC 제어장치	20
3.2 HMI 구성	24
3.3 아두이노 통합개발환경(IDE)	26
3.4 IOT 기반의 모니터링 시스템 구성	28
3.5 식물공장 환경제어 시스템	29
IV. 식물공장 LED 제어와 양액제어 시스템 설계	31
4.1 식물공장 종합 구성도와 제작과정	31
4.2 식물공장 LED 제어 시스템	34

4.3 식물공장 양액제어 시스템	36
V. 실험 및 결과분석	42
5.1 식물공장 생육기 재배조건별 상추의 성장 비교	42
5.2 식물공장 성장기 재배조건별 상추의 성장 비교	44
VI. 결 론	46
참 고 문 헌	47

그림 목 차

그림 1 세계 각 국의 수직형 식물공장	5
그림 2 식물공장 컨테이너의 종류	6
그림 3 40ft 컨테이너형 식물공장 설계도	7
그림 4 엽록소 a와 엽록소 b의 광 흡수 스펙트럼	9
그림 5 Deep Water Culture	11
그림 6 Nutrient Film Technique System	12
그림 7 Aeroponics System	13
그림 8 PLC 구성도	21
그림 9 PLC 하드웨어 구조	22
그림 10 GMWIN 화면구성	23
그림 11 GMWIN 도구 바 세부설명	23
그림 12 HMI 시스템 구성	24
그림 13 XP-Builder 화면구성	25
그림 14 아두이노 우노 ATmega328 MCU 보드	26
그림 15 아두이노 통합개발환경 화면구성	27
그림 16 JSN270IF WIFI-Shield 하드웨어 구성	28
그림 17 모니터링 시스템 구성	29
그림 18 식물공장 환경제어 시스템 구성	30
그림 19 식물공장 종합 구성도	32
그림 20 식물공장 제작과정	33
그림 21 식물공장 LED 설치 예	35
그림 22 식물공장 LED 제어 알고리즘	35
그림 23 LED PLC Logic Program	36
그림 24 분무식 양액제어 구성도	37
그림 25 분무식 노즐의 구조	37
그림 26 담액식 양액제어 구성도	38

그림 27 담액식 양액제어 순환구조	39
그림 28 분무식 양액제어 분사	40
그림 29 Pump PLC Logic Program	40
그림 30 양액농도, 산도농도 제어 프로그램	41
그림 31 재배 조건별 생장 길이 변화 그래프(생육기)	42
그림 32 식물공장 생육기 성장 사진	43
그림 33 생육기 분무식과 담액식의 뿌리 비교	43
그림 34 재배 조건별 생장 길이 변화 그래프(성장기)	44
그림 35 식물공장 성장기 사진	45

표 목 차

표 1 광 파장이 식물생장에 미치는 영향	9
표 2 식물의 광포화점과 광보상점	10
표 3 식물 생산 필수 원소 16개	13
표 4 국내개발 양액재배용 배양액의 종류 및 조성농도	14
표 5 잎채소 뿌리채소류의 온도지표	15
표 6 습도에 의한 작물의 상태	16
표 7 수경재배 식물공장 주요시스템	17
표 8 수경재배 식물공장의 하드웨어 구성	18
표 9 PLC 프로그램의 기능	21
표 10 PLC내부 어드레스 사용 예	22
표 11 XP-Builder 화면구성	25
표 12 아두이노의 구성요소	27
표 13 재배단별 LED 설치 구성도	34
표 14 재배 조건별 생장 길이 변화(생육기)	42
표 15 재배 조건별 생장 길이 변화(성장기)	44

SUMMARY

Damages due to abnormal weather are frequent throughout the world, and long - term drought can ruin farming, and heavy rainfall can cause damage to crops and subsequent damage to pests and diseases. In order to solve this food shortage problem, various plant factories utilizing information technology (IT) are growing steadily in USA, Japan and Europe. Domestic plant factories have not yet reached commercialization stage, but they are continuously researching and developing. The government is taking steps to secure the basic technology of plant factories that combine agriculture with IT technology in order to supply food and solve farmers' difficulties.

In this thesis, lettuce grown at a relatively early growth stage was classified as A, B, C, D. In this case, A and B stages are composed of a spray system, C and D stages are composed of a fresh water system, and the growth rates of plants according to a nutrient solution injection method are compared. By applying the effect of light wavelength of LED(Lighting Emitting Diode) on plants, optimal growth environment of light wavelength is derived. For this purpose, PLC (Programmable Logic Controller) automatic control system using IOT(Internet of Things) sensors has been constructed by combining Arduino, PLC, touch screen and smartphone system and designed the system suitable for container plant by comparing growth rate of plants.

I. 서 론

최근 우리나라는 고농도 미세먼지의 영향에 몸살을 앓고 있다. 각 정부 부처에서도 미세먼지의 심각성을 고려하여 방지대책을 내놓고 있다. 이러한 미세먼지가 호흡기를 통하여 우리에게 해로움을 줄 뿐 아니라 생태계에도 피해를 줄 수 있다. 대기 중 이산화황(SO₂)이나 이산화질소(NO₂)가 많이 묻어있는 미세먼지는 토양을 황폐화시키며 공기 중에서 카드뮴 등 중금속이 포함된 미세먼지가 식물의 잎에 부착되면 잎의 기공을 막고 광합성작용 등을 저해함으로써 작물의 생육을 지연시킨다[1].

이렇게 성장한 식물에는 다량의 납(Pb)과 카드뮴(Cd)이 포함되어 있어 식물을 섭취 할 때 인체에 영향을 줄 것으로 우려된다. 이러한 엽채류(잎을 이용 목적으로 사용되는 채소) 식물을 미세먼지로부터 보호하기 위해 밀폐된 공간에서 물과 배양액을 이용하여 적절하게 조정하고 빛이 없는 공간에서 LED(Lighting Emitting Diode)의 파장을 씨앗부터 뿌리가 단단해지는 시기(생육시기)에는 80%의 청색 LED와 20%의 백색 LED를 식물에 조사할 수 있도록 자동제어 하였으며 잎의 광합성작용을 최대로 받는 시기(성장시기)에는 80%의 적색 LED와 20%의 백색 LED를 식물이 빛을 조사 받을 수 있도록 자동제어 하여 작물의 수확시기를 단축시키고 재배면적의 효율성을 극대화시키기 위하여 연구하였다.

또한, 초기의 시설재배는 간단한 농업용수의 공급정도였으나 기술의 발달과 고도화로 인하여 작물 재배과정 전반에 걸쳐 자동화가 이루어지고 있다. 최근 정부의 주도하에 ICT(Information & Communication Technology)기반 스마트 농업 기술 도입이 활발하게 진행되고 있으며 IoT(Internet of Things) 결합 스마트 농업 기술도 선보이고 있다. 이러한 변화로 기존 제철 작물의 단순 생산위주의 농업에서 엄격하게 관리되는 스마트 농업 기술의 도입으로 인하여 계절에 상관없이 지속적으로 생산이 가능하여 농가 소득의 증대 및 경쟁력 강화, 효율성, 고품질 등의 이유로 스마트 농업 기술을 도입하는 농가가 지속적으로 증가하고 있다 [2]. 본 논문에서는 IOT 기반의 다양한 센서를 활용하여 식물이 적합한 환경에서 최적의 조건으로 성장할 수 있도록 식물공장내의 온도, 습도, 산소농도, 양액

의 농도 등을 터치스크린(Touch Screen) 및 스마트폰(Smart Phone)으로 실시간 모니터링하고 냉각팬(Cooling Fan), LED, 펌프(Pump) 등을 제어 할 수 있도록 설계하였다.

수경재배의 방식에는 식물을 양분과 산소가 충분한 용액에 담가 재배하는 담수식 수경재배, 재배상자에 특정한 경사를 만들어 뿌리에 양액을 흘려주는 박막식 수경재배, 양액을 작은 입자 상태로 뿌리에 살포하는 분무식 수경재배 시스템이 있다. 본 논문에서는 비교적 생육시기가 빠른 상추를 재배 하였으며 작물의 재배 위치를 A, B, C, D 4개의 단으로 분류하고 A, B단은 분무식 시스템 C, D단은 담수식 시스템으로 구성하여 분무식과 담액식의 양액주입 방식에 따른 식물의 성장속도를 비교하고 LED의 빛의 파장이 식물에 미치는 영향을 적용하여 빛의 파장대별 최적의 생육환경을 도출하는 것을 목적으로 한다. 이러한 시스템의 자동제어는 Arduino와 PLC(Programmable Logic Controller), 터치스크린, 스마트폰을 융합하여 시스템을 구축 하였고, 식물의 성장속도를 비교하여 컨테이너형 식물공장에 적합한 시스템을 개발하였다.

Ⅱ. 수경재배 식물공장의 개요

2.1 식물공장의 종류

국내외에서 이상기후로 인한 피해가 빈발하고 있으며 장기 가뭄으로 농사를 망치는가 하면 집중호우로 농작물이 피해를 입고, 이어지는 병충해로 피해가 커지기도 한다. 세계경제포럼(WEF)은 지구 온난화, 가뭄과 홍수, 도시화에 따라 이상기후가 발생하여 농작물에 큰 피해를 주면서 식량 부족이 심화될 것이라 경고 하였고 기후변화에 관한 정부간협의체(IPCC)의 보고서에 의하면 지구 온난화로 인해 10년마다 전 세계 식량이 2%(약 440,000ton)이상 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 식량부족 문제를 해결하기 위하여 정보기술(IT)을 활용한 다양한 식물공장 들이 미국, 일본, 유럽을 중심으로 꾸준히 성장해 나가고 있으며 2015년 기준 5조 3000억 달러로 자동차산업 1조 6000억 달러의 3배에 달하는 성장을 보여주고 있다. 국내의 식물공장은 아직 상업화 단계에 도달하지 못했으나 1990년 이후로 지속적으로 연구 개발을 진행하고 있으며 2010년 이후부터 정부는 원활한 식량공급과 농민들의 애로사항 해결차원에서 농업을 IT기술과 접목한 식물공장 원천기술 확보를 위해 나서고 있다[3].

식물공장의 형태는 크게 태양광 이용형 식물공장과 완전 제어형 식물공장으로 나눌 수 있다. 태양광 이용형 식물공장은 온실을 근간으로 태양광을 기본광으로 이용하여 광 조건을 개선하는 시스템이며, 완전 제어형 식물공장은 완전히 밀폐된 공간에서 인공 광을 이용하여 식물을 재배하는 것으로 수직형 식물공장(Vertical Farm), 컨테이너형 식물공장(Container Farm)등으로 분류된다. 본 논문에서는 컨테이너 식물공장에 분무식 수경재배를 접목하여 적용할 목적으로 기준을 두었으며 환경이나 장소에 구애받지 않고 누구나 쉽게 농업에 접근하여 신선한 농작물을 얻을 수 있도록 소형으로 제작하였다.

2.1.1 수직형 식물공장

1999년 콜롬비아 대학의 Dickson Despommir 교수는 건물 전체가 식물공장이 되는 빌딩형 식물공장을 설계하였으며, 48층 높이의 식물공장에서 식물을 재배하면 5만 명의 먹을거리가 생산이 가능하고 미래 식량 문제를 해결할 수 있는 획기적인 방안을 제시하였다. 수직농장은 외부 경작지와 비교해 토양과 물의 사용이 적고 공간을 효율적으로 활용할 수 있으며 재배 공간이 실내이기 때문에 해충이나 질병이 발생할 확률이 적고 농약을 사용하지 않기 때문에 농업용수의 오염이 없다[4].

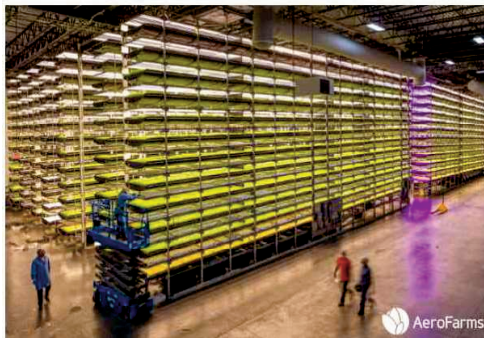
캐나다 밴쿠버에 있는 Valcent Products사는 태양광을 이용해 수직형 수경재배 식물공장을 아랍에미리트 아부다비 마스달 시티에 공장을 설립해 태양광과 풍력 등으로 모든 에너지가 유지되고 이산화탄소 배출이 제로인 시스템으로 운영하고 있다. Verti Crop이라는 재배 시스템에서는 기존 노지 재배보다 생산량이 20배 많고 물의 사용량도 기존에 비해 5%만 사용된다. 일본 또한, 현재 150개가 넘는 빌딩형 식물공장을 건설하면서 식물공장 산업에 본격적으로 뛰어 들고 있다. IT와 신기술을 선도하는 미국은 대형 태양광 발전을 활용한 수직형 식물공장을 실용화한 상태이며, 2015년 미국 뉴저지주 뉴왁시에 Aero Farm사가 건립한 3층 건물로 구성된 세계 최대 규모의 수직농장은 약 2,000여 평 규모에서 매년 1000톤이 넘는 채소를 생산하고 있다. 국내의 경우 농촌진흥청에서 지하 1층에서 지상 3층에 이르는 규모의 연구용 식물공장을 2011년에 개관하여 운영되고 있다. 빌딩형은 태풍, 홍수, 가뭄 등 기상재해로부터 안전하고 효과적인 재배가 가능하며 대도시에서도 작물재배가 가능해 운송료가 절감된다. 반면 초기 건설비가 많이 들기 때문에 선택적 시설투자가 필요하며, 신축보다는 건물의 유휴공간이나 비어있는 공공건물 등을 활용하는 방안이 효과적이다. 그림 1은 세계 각국의 대표적인 수직형 식물공장이다.



가) 캐나다의 버티크롭



나) 일본의 파소나 사옥



다) 미국의 에어로 팜



라) 한국의 국립농업과학원

그림 1 세계 각 국의 수직형 식물공장

2.1.2 컨테이너형 식물공장

컨테이너형 식물공장은 대규모 식물공장에 비해서 수익률은 적지만 대규모 시설 설치가 필요하지 않고, 이동이 가능하며, 설치환경에 대한 제약이 적게 식물을 재배할 수 있는 장점이 있다. 식물공장용에 사용되는 컨테이너는 일반 화물용 컨테이너와 냉동용 컨테이너로 분류된다. 일반 화물용 컨테이너는 열전달이 빠른 철재로 되어 있어 냉난방을 위한 단열처리 등의 개조가 필요하고 온도나 습도에 민감한 식물공장용으로는 효율이 좋지 않다. 반면 냉동용 컨테이너는 외관을 알루미늄으로 사용하여 가볍고 녹슬지 않으며 냉동, 냉장제품의 운송을 위해 철판 사이에 70~120mm 두께의 폴리우레탄 폼을 주입한 단열재가 사방으로 둘러싸고 있어 보온성과 단열성이 우수하다.



철제 컨테이너



냉동 컨테이너

그림 2 식물공장 컨테이너의 종류

컨테이너의 규격은 20ft (폭 2,438mm × 높이 2,591mm × 길이 6,058mm)와 40ft (폭 2,438mm × 높이 2,591mm × 길이 12,192mm)의 두 종류가 있다. 20ft 컨테이너는 1,300mm × 600mm 기준의 재배선반을 좌우로 6열을 설치할 수 있고, 40ft 컨테이너는 12열을 설치할 수 있으므로 경제적인 이익 창출과 효율성을 얻기 위해서는 40ft 컨테이너를 선정하는 것이 바람직하다.

재배선반은 3~4단으로 선정하고 선반위에 태양빛을 대신할 LED와 양액을 공

급하기 위한 양약호스와 펌프가 설치된다. 또한, 냉난방과 공조를 위한 흡기팬, 배기팬, 냉난방장치, 제어함 및 각종 센서들도 설치된다. 그림 3은 국내 친환경 농업기술 업체의 40ft 컨테이너형 식물공장 설계도이다[5].

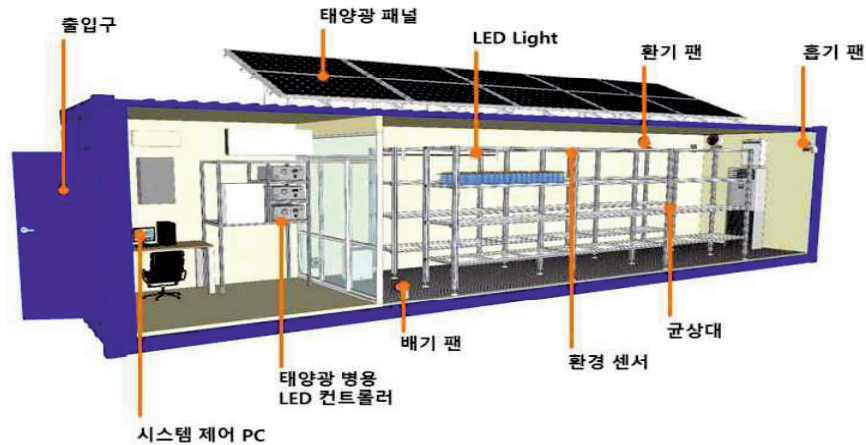


그림 3 40ft 컨테이너형 식물공장 설계도

컨테이너 식물공장은 계절에 좌우되지 않고 연중 계획생산이 가능하고 농약 등을 사용하지 않는 깨끗한 환경에서 재배되므로 무공해 식품으로 자동화와 대중화가 가능하다. 또한 초기 투자위험이 적고 컨테이너의 증설 규모 확대가 용이하고 별도의 설치공사가 많이 사용되지 않으며 전기와 물만 공급되면 언제든지 가동 할 수 있기 때문에 누구나 손쉽게 접근 할 수 있으며 소형 조립식창고나, 식당, 학교나 유치원 등에서 소규모로 재배하여 무공해로 신선한 야채를 손님이 나 학생들에게 연중 공급할 수 있다. 국내식물공장의 발전과 대중화를 위한 정부의 지원이 필요하고 다양한 방법의 연구와 개발이 진행되고 있다.

2.2 LED 제어 시스템

지구상에 녹색식물에 작용하는 광합성은 엽록체 내에서 엽록소와 광 방사에너지에 의하여 물과 이산화탄소로부터 화학 에너지의 축적물인 탄수화물을 합성하고 산소와 물을 방출하는 것으로 성장한다[6]. 식물이 있을 통하여 받아들인 광(빛) 에너지를 이산화탄소, 물 그리고 다수의 영양소로 화학적 반응을 일으켜 식물의 성장을 돕는 일련의 과정을 광합성 작용이라 하며 이 중 식물의 광합성작용과 가장 밀접한 관련이 있는 빛은 식물의 성장에 가장 큰 도움을 준다. 식물공장 LED 제어 시스템은 식물이 성장하는데 필요한 흡수율이 높은 파장을 조합하여 성장 시기별 흡수 파장을 식물에 자동으로 조사하여 식물의 생육을 돕고 성장 시기를 단축시킬 목적으로 설계되었다.

2.2.1 LED 파장이 식물에 미치는 영향

식물의 광합성에 필요한 빛(가시광선)의 파장대역은 400~800nm이며 식물의 질적 변화에 의한 파장대역이 LED에 의해 제공된다. 즉, 종자의 발아, 분화, 개화, 엽록소, 마디성장, 광합성작용, 대사물질의 변화 등에 파장대역이 식물성장에 영향을 미친다. 본 논문에서는 RGB LED를 사용하여 빛의 흡수가 이루어지는 적색(Red) 660nm, 청색(Blue) 430nm를 식물의 질적 변화시기에 맞추어 조사되도록 자동제어 하였고 적색과 청색을 4:1비율로 혼합하여 식물에 조사하여 식물의 성장속도를 비교하였다. 표 1은 광 파장이 식물 성장에 미치는 영향이다.

표 1 광 파장이 식물생장에 미치는 영향

파장(nm)		작용효과
적외선	780	식물에 특별한 신장효과를 촉진 시키는 파장
가시광선	700	광합성 작용의 최대(670)~발아저지(730)
	660	엽록소 작용 최대(655), 발아작용과 잎 배포(660)
	610	광합성에 유익하지 않음, 해충방지(580~650)
	440	광합성 작용의 최대(430), 엽록소 작용의 최대(440)
자외선	350	색소의 발색 촉진 및 해충유인

2.2.2 식물의 광 흡수 스펙트럼

광합성에 유효한 빛을 흡수하는 색소는 광합성 색소라 부르며, 가장 중요한 색소는 엽록소 a와 엽록소 b이다. 엽록소 a는 주색소로 작용하며 보조색소인 엽록소 b는 흡수한 빛을 엽록소 a에 전달하는 역할을 한다. 식물의 광흡수 스펙트럼은 그림 4와 같이 440nm, 470nm, 650nm, 680nm에서 침두 값 파장의 흡수율에 의해 일반적인 식물 재배용 인공광원들은 이 침두 값 파장을 조합하여 사용되고 있다. 그러나 실제로는 가시광선 전 영역에 걸쳐 광흡수가 일어나고 있으므로 침두 값 파장 조합만으로는 식물의 성장 저해 현상이나 결핍 영양소 문제를 야기할 수 있으므로 본 논문에서는 백색 LED를 추가로 사용하여 가시영역에 고루 분포된 광흡수 스펙트럼에 일치시키도록 하였다[7].

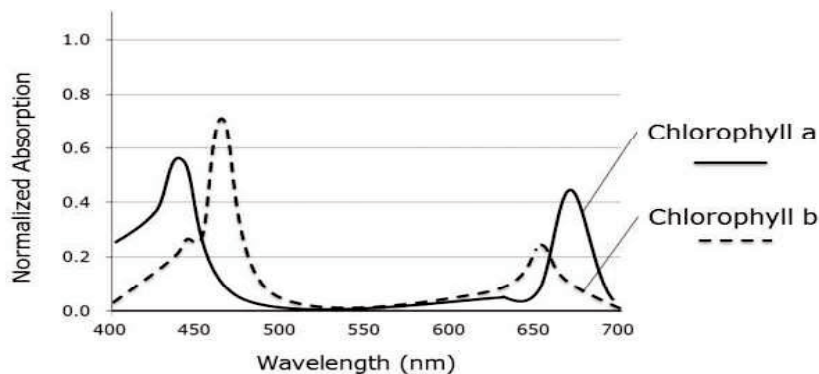


그림 4 엽록소 a와 엽록소 b의 광 흡수 스펙트럼

2.2.3 재배 작물의 최적의 조도

광포화점이란 식물의 잎에 빛을 쬐이면 빛의 세기에 비례하여 증가하는 광합성의 속도가 더 이상 증가하지 않을 때의 빛의 세기를 말한다. 그 이상의 광량에서는 상추의 추가적인 성장효과가 없으며, 보다 높은 빛의 조사는 고사될 위험성이 있다. 식물의 성장에 최소한의 광량을 나타내는 광보상점의 경우 식물에 의한 이산화탄소 흡수량과 방출량이 같아져서 식물체가 외부 공기 중에서 실질적으로 흡수하는 이산화탄소의 양이 0이 되는 광도를 말하며, 광보상점 이하의 광량은 광합성을 일으키지 못해 식물의 성장 저해를 받는다. 식물의 광포화점과 광보상점에 해당하는 조도는 표 2와 같다[8].

표 2 식물의 광포화점과 광보상점

작물명	광포화점[Lux]	광보상점[Lux]
토마토	70,000	3,000
오이	55,000	2,000
굴	40,000	200
양상추	25,000	1,500
인삼	12,000	500
상추	25,000	1,500
무청	1,241	583

2.3 식물공장 양액제어 시스템 종류

양액제어 시스템은 뿌리에 양액을 직접 담그는 순수수경(Water Culture)과 뿌리가 지지체에 자리 잡는 고행배지경(Medium Culture)방식이 있다. 순수 수경재배는 양액 공급방식에 따라 담수식(Deep Water Culture, DWC), 박막식(Nutrient Film Technique, NFT), 분무식(Aeroponics) 방식으로 분류된다[9].

2.3.1 담수식 수경재배

담수식 수경재배는 식물을 양분과 산소가 충분한 용액에 담가 재배하는 방법으로 말하며 뿌리를 양분 용액 속에 잠기게 둔 후, 지지체를 이용하여 쓰러지지 않게 식물을 고정한다. 식물 뿌리가 계속 물에 잠겨 있기 때문에, 공기펌프를 24시간 계속 작동하는 것이 중요하며 공기 펌프로 인하여 뿌리 주변으로 높은 농도의 산소 포화도가 유지되면 식물의 생육도 촉진되고 뿌리의 수분과 양분의 흡수가 빨라지게 되어 식물 세포의 성장과 활성이 전반적으로 향상된다. 노즐이나 타이머, 컨트롤러가 불필요하므로 유지관리가 용이하고 에어버블을 만들어 내는 에어스톤이 멈추게 되면 식물에 악영향을 주기 때문에 항상 비상용 공기펌프를 상비해야 한다.

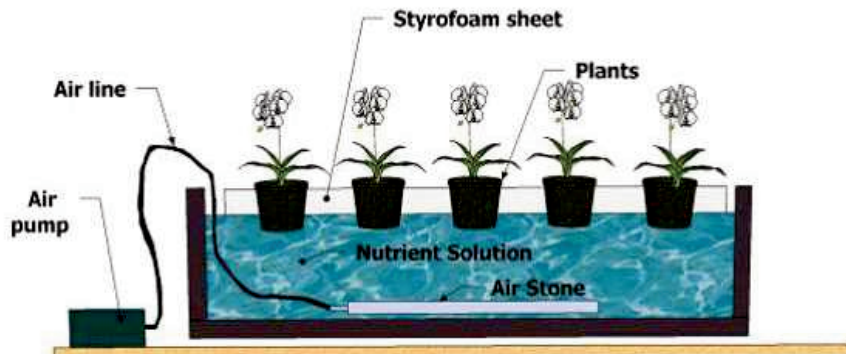


그림 5 Deep Water Culture [10]

2.3.2 박막식 수경재배

박막식 수경재배는 상추나 바질처럼 생육기간이 짧은 채소를 재배할 때 폭 넓게 사용되며 식물양액을 좁은 파이프라인이나 재배상자를 이용하여 뿌리가 위치한 곳으로 끊임없이 흘려주는 시스템이다. 식물은 컵 망에서 키우며 파이프나 재배상자의 경사를 만들어 자연적으로 양액을 순환하여 재배하는 방식이기 때문에 양액이 흐르는 속도와 재배상자의 기울기가 시스템 효율성을 결정한다.

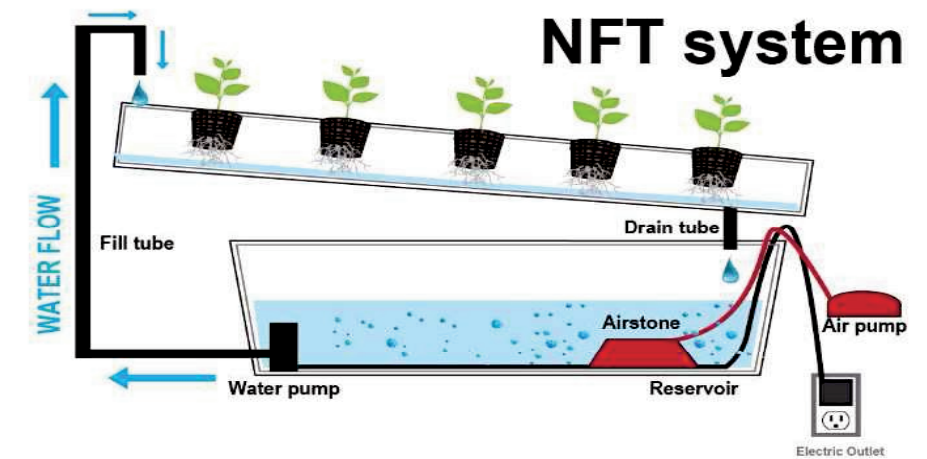


그림 6 Nutrient Film Technique System [11]

2.3.3 분무식 수경재배

분무식 수경재배는 고압의 펌프를 이용하여 양액을 아주 작은 입자 상태로 뿌리에 살포하는 방식이다. 이 과정을 통하여 식물에 수분뿐만 아니라 대량의 산소도 공급할 수 있다. 공급한 산소는 곰팡이와 균류가 번식하는 것을 억제하는 효과가 있을 뿐만 아니라 담액시 수경재배, 박막식 수경재배에 비해 양액의 사용비율이 적지만 양분 흡수율이 높고 뿌리 활착이 더 뛰어나다.

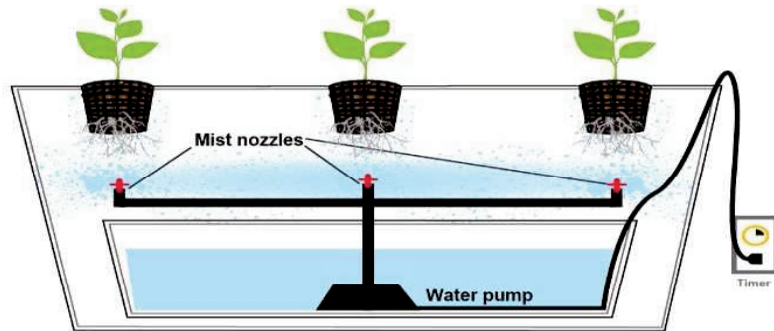


그림 7 Aeroponics System [12]

2.3.4 식물공장 양액의 조성과 활용

원예작물이 건전한 생육을 하기 위해서는 16종류의 필수 원소가 필요하다. 이러한 필수 원소의 공급조건은 물과 공기이며 공기 중의 탄산가스(CO₂)와 물(H₂O)로 공급한다. 표 3는 식물생산 16개 필수 원소를 나타낸다.

표 3 식물 생산 필수 원소 16개

원소 이름	원소기호	원소 이름	원소 기호
탄소	C	수소	H
산소	O	질소	N
인	P	황	S
칼륨	K	칼슘	Ca
마그네슘	Mg	철	Fe
망간	Mn	구리	Cu
아연	Zn	몰리브덴	Mo
붕소	B	염소	Cl

양액(배양액)은 작물의 생육에 꼭 필요한 무기양분을 각 각의 흡수량의 비율에 맞추어 물에 용해시켜 공급하고 시스템의 사양에 따라 100배~200배액으로 구분

한다. 양액은 7~10일내 사용량을 조성하여야 하며 양액의 기준 농도를 참고하여 원수와 희석하여 사용하여야 한다[13]. 표 4는 국내개발 양액재배용 배양액의 종류 및 조성농도를 나타낸다.

표 4 국내개발 양액재배용 배양액의 종류 및 조성농도

구분	적용작물	다량의 원소					pH	EC
		N	P	K	Ca	Mg		
미나리액 (서울대)	미나리 전용	7	2	4	3	1	6.2	1.2
물푸레 (대유화학)	엽채류 화훼류	8.8	2.4	5	3	1.5	6.3	1.6
비로커 (서울비료)	엽채류 과채류	9.9	3.8	4.1	5.4	1.3	6.2	1.84

이러한 다량의 원소가 부족하거나 양액의 농도 비율이 맞지 않으면 식물은 과잉증상을 일으키거나 영양결핍을 일으키므로 양액의 농도의 비율을 적정하게 유지해주어야 한다. 양액의 농도를 측정하는 단위를 EC(Electrical Conductivity) 전기전도도라 하며, 전기전도도가 높은 것은 배양액에 들어있는 높은 이온수치를 나타내며 양액의 농도가 진한 것을 의미한다. 일반적으로 재배를 하는 양액의 적정한 농도는 1.5~3.0범위이다. 양액의 농도 값이 너무 높아지면 끝부분이 타들어 가고 너무 낮아지면 성장속도가 느려진다.

식물이 적정한 농도로 영양을 원활하게 공급받기 위한 결정적인 인자는 산도(pH)이다. 토양은 모재나 기후에 따라 산성, 중성, 알칼리성을 띄게 된다. 이는 토양의 생산성과 밀접한 관계가 있으며, 산도가 식물에 잘 맞지 않으면 작물의 생육은 지체 된다. 수경재배에서는 공급하는 양분도 중요하지만 산도를 적절한 범위 내에서 유지해야 식물이 양분을 잘 흡수한다. 대부분의 식물에서 잘 자라는 산도는 5~7이다. 이 범위를 벗어나면 양분을 흡수할 수 없는 형태로 변화하므로 산도가 높아지면 인산과 질소를 주입하여 산도를 낮추어야 한다.

2.4 식물공장의 온·습도

식물공장에서 온·습도를 포함한 적절한 환경관리는 필수적인 요소이며 작물의 종류 및 생육단계별로 적절한 온도를 유지시킨다. 또한, 습도의 높고 낮음에 따라 식물의 성장뿐만 아니라, 병해 발생에도 영향을 주기 때문에 적절한 습도제어가 필요하다.

냉난방제어는 센서로부터 입력된 현재 기온과 목표 온도와의 차이를 기준으로 온도조절기, PLC 등과 같은 제어계에서 가동 여부와 제어량을 판단하여 작동기로 해당 출력을 내보내며 온도관리를 한다. 온도관리는 생육적온을 유지하는 것을 목적으로 하지만 출하시기, 주위 환경여건, 경영적 측면 등을 고려하여 적합한 온도 설정 및 관리가 필요하다. 표 5는 잎채소, 뿌리채소류의 온도지표를 나타낸다.

표 5 잎채소, 뿌리채소류의 온도지표

작물	기온(°C)		
	최고한계	최적온도	최저한계
시금치	25	20~15	8
무 우	25	20~15	8
배 추	23	18~13	5
샐러리	23	18~13	5
썩 갓	25	20~15	8
상 추	25	20~15	8

상추가 자라는데 적합한 온도는 월평균기온이 15~20°C이며, 지나치게 온도가 낮으면(8°C이하) 싹트기(발아)가 늦어지고, 30°C 이상에서는 발아가 되지 않는다. 생육기간 중 온도가 높아지면 꽃대피고, 쓴맛의 증가, 생리적 장애 및 여러 가지 병에 걸리기 쉽다. 본 논문에서는 15~20°C로 온도를 설정하여 재배환경을 구축하였다. 또한 식물생장에 적절한 상대습도는 식물마다 다르지만 상대습도 범위는 50~80%이다. 상대습도가 낮아지면 수분증발이 촉진되어 잎내 수분함유량이 저

하되기 때문에 가습을 더해줘야 하며 습도가 높은 경우에는 냉방기를 가동하여 상대습도를 낮추어 주어야 한다. 적극적인 제습을 위해서는 전용 제습기 도입을 검토할 필요가 있으며, 가습은 미스트 분무를 이용하면 습도를 높일 수 있다 [14].

표 6 습도에 의한 작물의 상태

습도	작물의 상태
20% 이하	잎의 증산량이 지나치게 증가하여 심할 경우 말라죽는다.
40% 이하	광합성 억제 시작.
80% 이상	병균의 번식이 쉬워지며 세포 및 형태의 품질저하를 초래.

Ⅲ. 식물공장 PLC 제어장치와 모니터링 시스템

본 논문에서 사용된 식물공장의 PLC 시스템의 구성은 식물의 성장 시기에 맞추어 빛의 파장을 시간대별로 제어 할 수 있으며 타 전자제품에 비하여 노이즈에 강한 PLC를 사용하였고 이러한 프로그램을 사용자가 수동 및 자동으로 조작할 수 있으며 스크린 내에서 식물공장내의 시스템 환경을 모니터링 할 수 있도록 터치스크린을 사용하였다. 온도 및 습도제어 양액의 농도제어 및 산도제어는 각종 센서의 아날로그 값을 비교하여 출력을 내보내기 위하여 아두이노를 사용하였으며 웹서버 및 스마트폰으로 통신하기 위하여 JSN270IF-WIFI-Shield를 사용하였다.

수경재배 식물공장의 주요 시스템은 식물공장 LED제어, 식물공장 환경제어, 식물공장 양액제어, 식물공장 원격관리로 구성되고, 식물이 성장하는데 필요한 온도, 습도, 산소농도, 양액의 농도 등을 각종 센서가 데이터를 수집하고 수집된 데이터를 기반으로 빛을 제어하고 온도와 습도 및 양액농도를 적정하게 제어하여 시스템을 자동화한다. 수경재배 식물공장의 주요기능의 상세 내용은 표 7과 같으며 표 8는 하드웨어 구성요소를 나타내고 있다.

표 7 수경재배 식물공장의 주요 시스템

LED제어	폐쇄형 식물공장의 광원을 대신하여 식물의 성장영역에 맞는 파장을 제어한다.
환경제어	온도, 습도, 산소농도, 양액농도 센서를 사용하여 식물이 쾌적한 환경에서 성장 할 수 있도록 히터, FAN, 쿨러 등을 제어한다.
양액제어	박막식 시스템과 분무식 시스템을 사용하여 양액의 펌프제어, 솔레노이드밸브 등을 제어한다.
원격관리	LED제어, 환경제어, 양액제어 시스템을 Touch Screen 및 Smart Phone으로 실시간 모니터링 및 원격제어 한다.

표 8 수경재배 식물공장의 하드웨어 구성

하드웨어	규격	제품명/회사
	디지털 입력 단자 : 18 디지털 출력 단자 : 12 입력 : DC24V 출력 : DC24V~AC220V 통신 : RS232	G7M-DR40A/ LS산전
PLC		
 <p>TFT 컬러 65,536 색 VGA(640×480)</p>	Power : DC24V 화면크기 : 21cm*26cm 해상도 : 640 * 480 색상 : 65, 536 컬러	XP50-TTA/ LS산전
Touch Screen		
	프로세서 : ATmege328P 동작범위 : 5V 입력전압 : 7~12V 디지털 I/O : 14핀 PWM I/O : 6 아날로그 핀 : 6	Arduino Uno R3/ Arduino
아두이노		
	입력전원 : DC12V 효율 : 100W 최대압력 : 1.1MPa 토출량 : 8L/분	XTL-3210/ 다이어프램
펌프		

	<p>LED칩 : SMD5050 3칩 소비전력 : 5M(70W) 입력전압 : DC12V 컬러 : RGB</p>	<p>SMD5050 3CHIP/ 마니LED</p>
<p>RGB LED</p>		
	<p>LED칩 : SMD5050 3칩 소비전력 : 5M(70W) 입력전압 : DC12V 컬러 : 4:1혼합비율 (적4/청1)</p>	<p>SMD5050 3CHIP 4:1혼합/ 마니LED</p>
<p>혼합 LED</p>		
	<p>소비전력 : 19.2W 입력전압 : DC12V 회전수 : 4100RPM</p>	<p>AFB1212SHE-CF00/DELTA</p>
<p>Cooling Fan</p>		
	<p>동작전압 : 3.5~5.5V 습도측정범위 : 20~90% 온도측정범위 : 0~60℃ 오차범위 : 습도±5, 온도±2</p>	<p>DTH11/Arduino</p>
<p>온습도 센서</p>		
	<p>pH측정범위:0pH~14pH pH오차범위:±0.1pH</p>	<p>Analog pH Meter Pro/ DFROBOT</p>
<p>PH 센서</p>		

	<p>EC측정범위:1~20mS/cm EC오차범위: ±10%</p>	<p>Analog Electrical Conductivity Meter/ DFROBOT</p>
<p>EC 센서</p>		
	<p>동작전압 :5V Connection via : 802.11 b/g/n 네트워크(내장형) 암호화유형 : WEP, WPA, WPA2</p>	<p>Arduino Wireless Proto Shield/ JSN270</p>
<p>WI-FI Shield</p>		

3.1 PLC 제어장치

PLC는 자동제어반 내의 릴레이(Relay), 타이머(Timer), 카운터(Counter) 등의 기능을 트랜지스터 등의 반도체 소자로 대체하여, 기존의 시퀀스제어 기능에 수치연산 기능을 추가하여 프로그램을 자유롭게 제어할 수 있도록 구성된 제어장치이다. 미국전기공업회규격(NEMA)의 PLC의 정의는 디지털 또는 아날로그 입출력 모듈을 통해 Logic, Sequencing, Timing, Counting, Operating 등의 특수기능을 수행할 수 있는 프로그램이 가능한 메모리를 사용하여 많은 종류의 기계나 프로세서를 제어할 수 있도록 구성된 디지털 동작의 전자장치로 설명하고 있다. PLC시스템의 구성도는 그림 8과 같으며, 프로그램의 기능은 표 9와 같다.

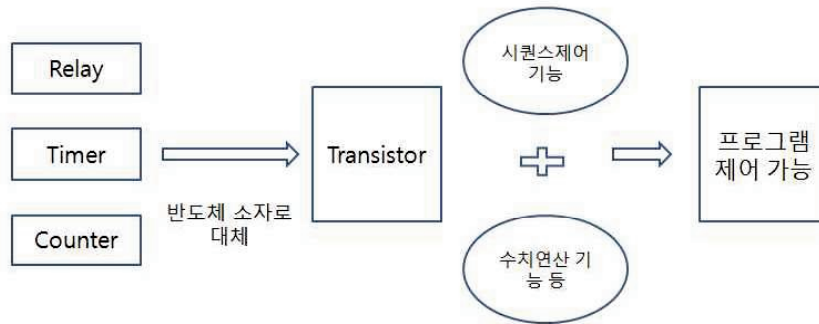


그림 8 PLC 구성도

표 9 PLC 프로그램의 기능

구분	기능	비고(기타 설명)
Sequencing	디지털 입출력 제어	각종 스위치, 센서의 ON/OFF정보 등
Logic연산	AND, OR, NOT, XOR등	Bit 및 Word 단위의 연산
산술연산	ADD, SUB, MUL, DIV, PID 연산 등	실수의 가감승제, 삼각함수 연산
Timer	TON, TOF, TMR, TRTG, TP등의 시간 지정 펄스	시간지연, 시간적산, 펄스신호
Counter	CTU, CTD, CTUD, CTR 입력 펄스의 수 카운팅	저속의 점점 개폐
Analog입력	전류, 전압, 온도, 습도 등	아날로그 신호를 받아 디지털 수치화
Analog출력	전류, 전압, 온도, 습도 등	디지털 수치를 아날로그 화
고속펄스입력	고속으로 입력되는 펄스의 수 카운팅	HSC모듈, Encoder와 Pluse Generator 등의 고속펄스 입력
펄스 입출력	Stepping, Servo 모터 제어	Stepping/Servo Motor Driver 구동 펄스
통신	통신을 이용한 데이터의 이동 및 제어 등	Ethernet 등을 이용하여 원거리 기기제어

PLC 하드웨어는 중앙처리장치(CPU), 입력부와 출력부, 전원부, 주변장치로 크게 4부분으로 구성된다. CPU는 PLC 제어에 필요한 모든 연산을 수행하는 부분으로 마이크로프로세서와 메모리로 구성되고, 입력부는 입력기기(각종 스위치, 센서 등)에서 검출한 신호를 CPU의 연산부로 보내는 역할을 수행하며, 출력부는 CPU에서 연산된 결과를 출력기기(전동기, 솔레노이드 밸브, 전자 접촉기, 램프

등)로 연결하는 기능을 수행하는 장치이다. 주변장치는 PLC내의 메모리에 사용자가 작성한 프로그램을 기록하고 저장하는 역할을 담당한다. 본 논문에서는 LS산전에 GLOFA-GM740A제품의 일체형 PLC를 사용하였다.

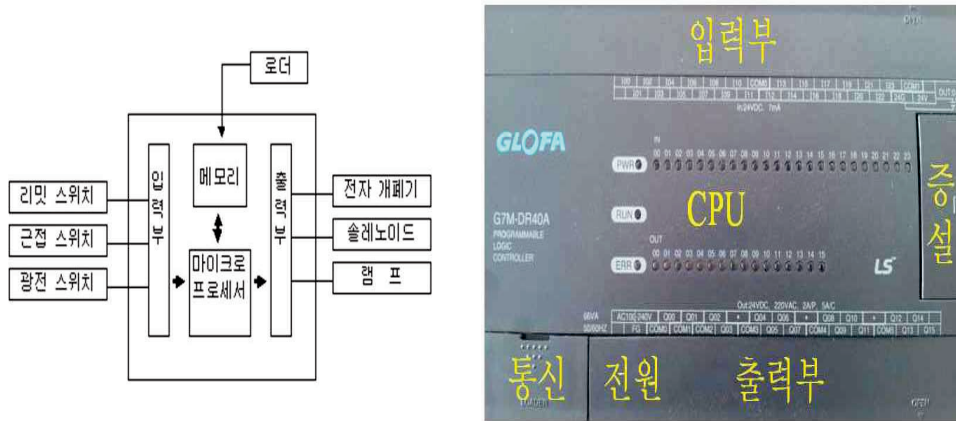


그림 9 PLC 하드웨어의 구조

PLC 소프트웨어는 그림 10과 그림 11의 형태와 같은 LS산전의 GMWIN을 사용하였으며 PLC의 CPU가 연산을 처리할 수 있도록 식물공장내의 제어를 프로그래밍하기 위한 도구이다. 소프트웨어에 사용되는 언어는 표 10과 같은 도형식 언어를 사용하며 정해진 테이블에 입력 및 출력 데이터를 메모리에 어드레스(Address)를 할당하여 저장하고 CPU가 연산을 처리할 수 있도록 한다.

표 10 PLC 내부 어드레스 사용 예

종 류	사 용 예	비 고(기타 설명)
입 력	%IX0.0.0 , %IW0.0.1	- 위치 접두어 : %I(입력), %Q(출력), %M(Touch Screen) - 크기 접두어 : X(BIT), B(BYTE), W(WORD), D(DOUBLE WORD), L(LONG WORD)
출 력	%QX0.0.0 , %QW0.0.1	
내부 메모리	%MX100 , %MW100	

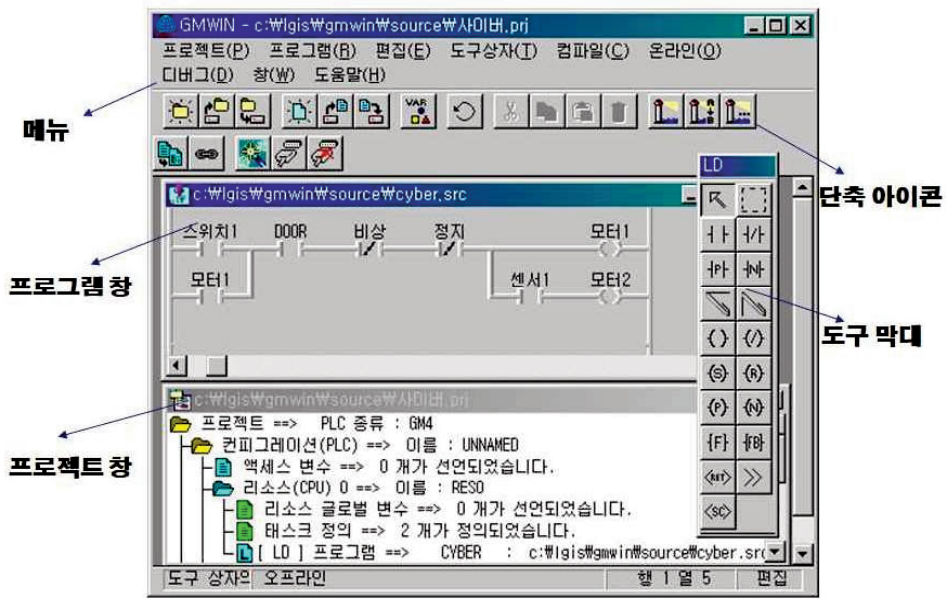
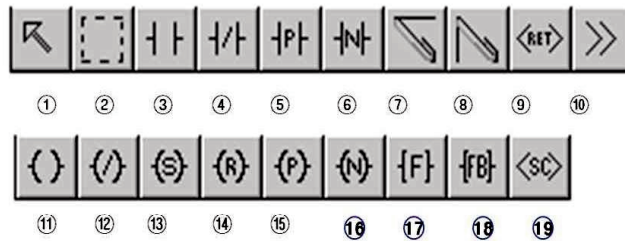


그림 10 GMWIN 화면구성



번호	명칭	번호	명칭	번호	명칭
1	화살표 모드	8	수직선	15	양 변환 검출 코일
2	영역 선택	9	Return	16	음 변환 검출 코일
3	A 점점	10	Jump	17	평선
4	B 점점	11	출력 코일	18	평선 블록
5	양 변환 검출 코일	12	역코일		
6	음 변환 검출 코일	13	Set 코일	19	Sub-routine Call
7	수평선	14	Reset 코일		

그림 11 GMWIN 도구 바 세부설명

3.2 HMI 구성

HMI(Human Machine Interface)는 PLC 또는 아두이노와 같은 자동화로 구성된 제어 장치들을 운영자가 효과적으로 제어 및 감시하기 위한 사용자용 인터페이스 장치이다. 사용 목적과 기능에 따라 입출력 장치, 연산 장치, 저장 장치를 가지는 임베디드 시스템(Embedded System)으로 구성된다. 또한 사용되는 다양한 하드웨어 환경에 맞는 프로그래밍언어를 사용하여 프로그램을 개발 및 구성함으로써 장치를 구동시킨다[15]. 그림 12에서 사용자는 PC기반의 제작 프로그램을 사용하여 인터페이스를 구성하고 구성된 데이터를 HMI 장치로 저장 및 전송하여 HMI장치와 PLC 장치 사이의 통신을 통하여 모든 시스템을 감시 및 제어한다[13]. 본 논문에서 사용된 HMI기기는 LS산전의 XGT Panel을 사용하였으며 데이터를 전송하기 위한 편집 툴은 XP-Builder를 사용하였다.

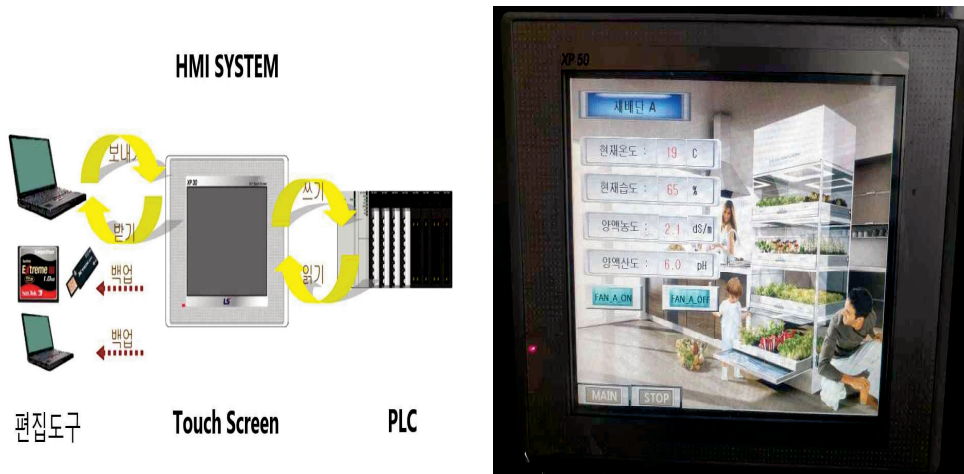


그림 12 HMI System 구성

그림 13에서 XP-Builder는 HMI 시스템과 PLC 장치간의 인터페이스를 위한 편집도구이며 다양한 오브젝트 및 스위치, 램프, 숫자/문자, 입출력기기 등의 도형들을 배치한 후 각 각의 주소 및 동작을 PLC의 어드레스와 일치하도록 설정하고 이더넷 및 시리얼 통신을 통하여 터치스크린에 전송하는 사용자 편집 툴이다. XP-Builder의 화면구성은 표 11과 같다.

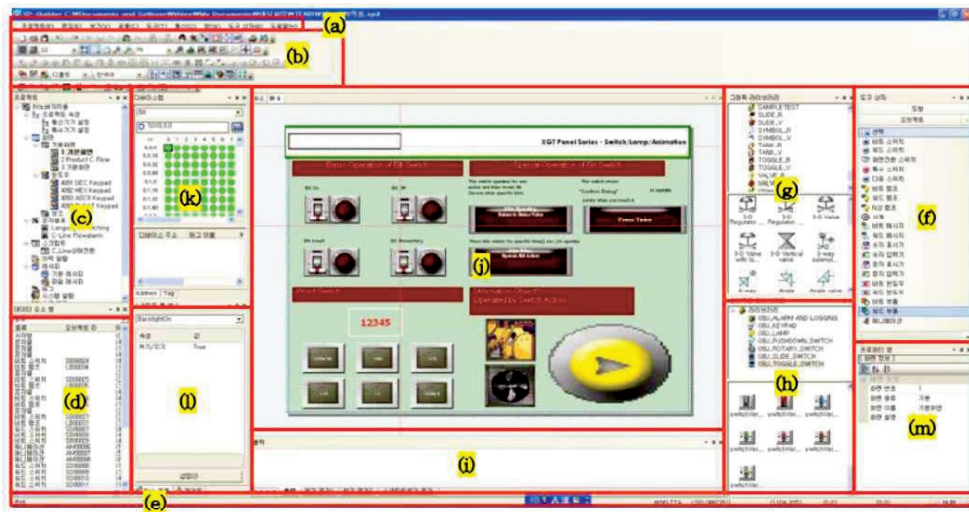


그림 13 XP-Builder 화면구성

표 11 XP-Builder 화면구성

항 목	설 명
a. 메뉴	프로젝트 경로명 정보
b. 도구 모음	메뉴를 간편하게 실행할 수 있는 도구
c. 프로젝트 창	현재 열려있는 프로젝트의 구성요소 표시
d. 데이터요소 창	오브젝트 및 도형의 위치정보 표시
e. 상태 바	XP-Builder의 상태, Touch품명, 접속된 PLC 정보 및 전송 될 오브젝트의 크기 정보 표시
f. 도구 창	여러 종류의 오브젝트를 선택하여 편집할 수 있는 툴
g. 그래픽 라이브러리	시스템 라이브러리 이미지 등을 도형이나 오브젝트의 배경이미지로 사용
h. 오브젝트 라이브러리	자주 사용되는 오브젝트 및 그들의 조합을 시스템 라이브러리로 제공
i. 메시지 창	오류 및 사용자 인터페이스 메시지를 나타내는 출력 창
j. 편집 화면	오브젝트 및 도형 편집하며 화면속성 부여할 수 있는 창
k. 디바이스 맵 창	프로젝트에 사용되는 디바이스 목록
l. 스크립트 툴 박스	스크립트 제어문 또는 함수 목록 제공
m. 프로퍼티 창	화면 및 화면 내 도형의 속성을 변경

3.3 아두이노 통합개발환경(IDE)

아두이노는 2003년 이탈리아의 IDII(Interaction Design Institute Ivrea) 학생들의 수업을 위해 개발이 시작된 오픈소스를 기반으로 한 단일 보드 MCU(Micro Control Unit)이다. 아두이노는 다수의 스위치나 센서로부터 값을 받아들여, LED나 모터와 같은 외부 전자 장치들을 통제함으로써 환경과 상호작용이 가능한 물건을 만들어낼 수 있다. MCU는 가격이 저렴하고 오픈소스인 아두이노 우노(Arduino Uno)를 사용하였다. 그림 14의 아두이노 우노는 ATmega328 기반의 마이크로 컨트롤 보드이며, 14개의 디지털 입출력 핀(6개는 PWM출력), 6개의 아날로그 입력으로 구성되어있다.

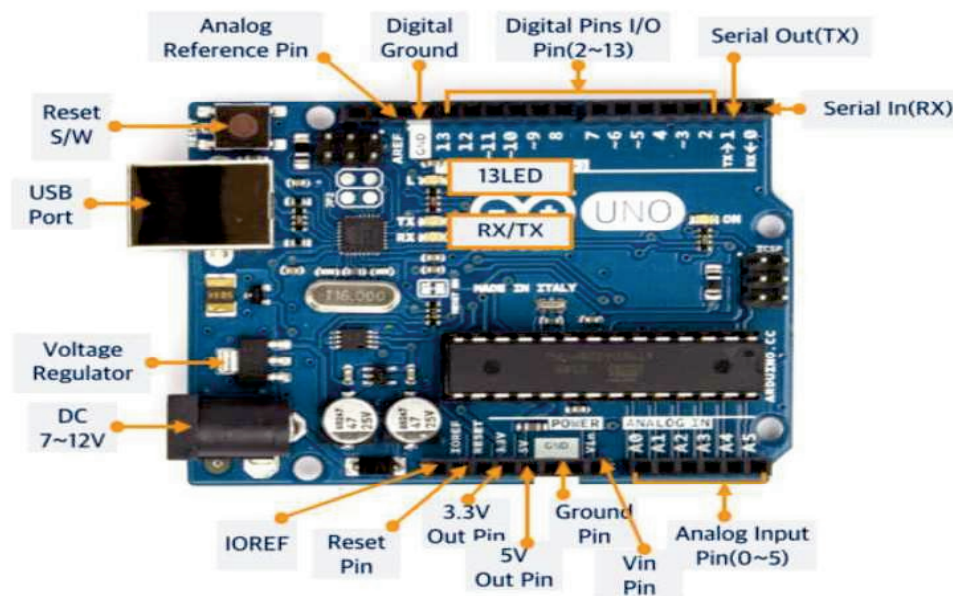


그림 14 아두이노 우노 ATmega328 MCU보드

아두이노는 표 12와 같이 SW 라이브러리, 개발 툴(IDE), 하드웨어 보드의 구성요소로 이루어져 있다. 이 중 핵심은 SW 라이브러리를 의미하며 전 세계적으로 오픈되어 있는 방대한 소스를 사용자가 자유롭게 활용 가능한 것이 가장 큰 장점이다.

표 12 아두이노의 구성요소

구성 요소	설 명
SW 라이브러리	<ul style="list-style-type: none"> - Arduino.h 라는 이름으로 사용되는 SW라이브러리로서, 복잡한 AVR 명령어 기능들을 쉬운 C언어 기반의 함수로 정의해 놓은 것이다. - 실제 아두이노 프로젝트의 가장 핵심적인 결과물이며, 아두이노 그 자체라고도 부를 수 있다.
개발 툴 (IDE)	<ul style="list-style-type: none"> - 흔히 스케치 코드라고 부르는 아두이노 코드를 작성하는 개발 툴이다. - 이 툴은 아두이노 프로젝트 팀에서 개발한 것이 아니라 MIT에서 C언어 교육용으로 개발하여 배포하고 있는 프로세싱이라는 교육용 SW 개발 툴을 사용한 것이다.
하드웨어 보드	<ul style="list-style-type: none"> - 아두이노 우노 보드와 같은 아두이노 라이브러리를 지원하는 하드웨어 보드를 의미한다.

아두이노 통합개발환경(Integrated Development Environment, IDE)은 아두이노를 개발하기 위한 모든 기능이 내장된 컴파일러이다. 다른 의미로는 IDE 혹은 스케치라고 표현하고 통합개발환경 화면구성은 그림 15과 같다.

C와 C++ 기반의 프로그래밍 언어를 사용하여 아두이노 프로그램을 작성하고, 컴파일 과정을 통해 아두이노에 업로드 할 수 있다. 스케치는 아두이노 홈페이지 (<https://www.arduino.cc/>)에서 무료로 다운로드 받을 수 있다.

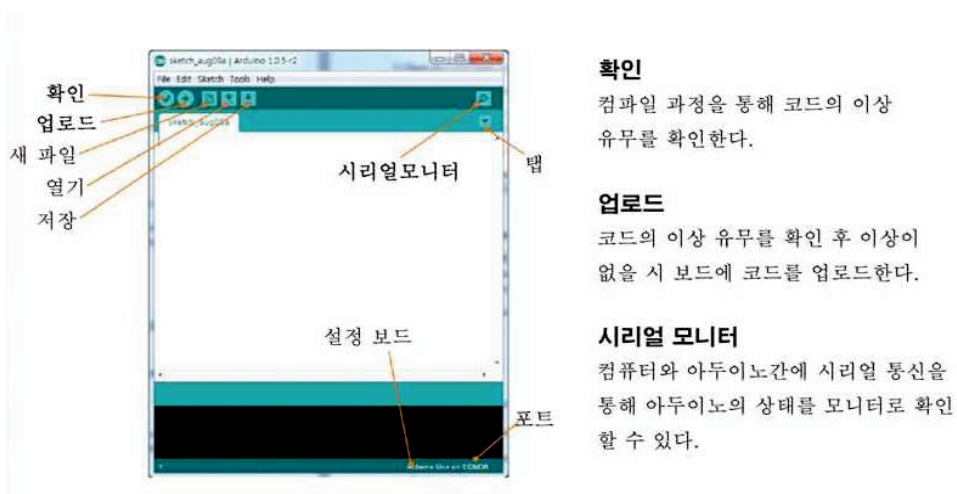


그림 15 아두이노 통합개발환경 화면구성

3.4 IOT 기반의 모니터링 시스템 구성

환경측정 데이터는 IOT 기반의 온도센서, 습도센서, 양액농도센서, pH농도센서를 통해 데이터를 계측하고, 계측된 정보를 MCU를 통해 수집하고 처리한다. 아두이노에서 습득된 센서 데이터를 스마트기기와 터치스크린으로 전송해 주기 위한 통신기기는 그림 16의 JSN270IF 와이파이 쉴드를 사용한다. JSN270IF는 UART(Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) 신호 및 1:N 동기식 통신을 위한 SPI(Serial Peripheral Interface) 신호를 IEEE802.11b/g/n 무선랜 프로토콜로 변환시키는 게이트웨이 모듈이다. 시리얼 인터페이스를 가진 기존장비를 무선랜 망에 연결하여 원격측정, 관리 및 제어를 할 수 있도록 연결해주며 Serial to WI-FI 게이트웨이 모듈로 시리얼 인터페이스를 갖는 모든 디바이스를 손쉽게 WI-FI로 구현할 수 있도록 한다. 아두이노에서 프로그램을 통하여 JSN270IF이 무선망에 접속되어 IP주소를 얻게 되면 스마트기기에서 IP주소에 접속하여 현재 식물공장내의 온도, 습도 값을 모니터링하고 냉각팬이나 솔레노이드 밸브를 동작 할 수 있도록 하여 식물공장내의 환경을 효율적으로 관리 할 수 있다. 식물공장 모니터링 시스템의 구성은 그림 17과 같다.

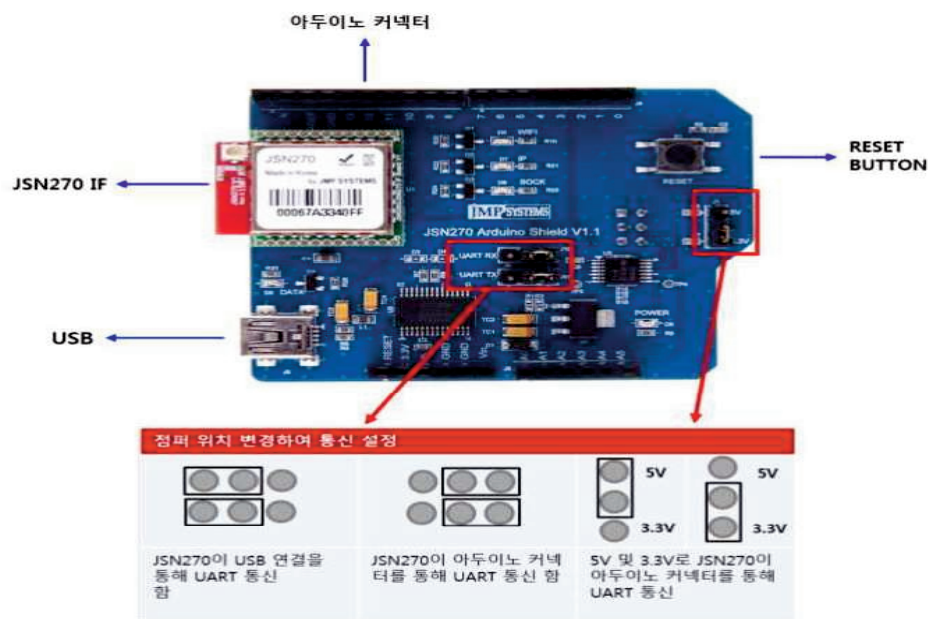


그림 16 JSN270IF WIFI-Shield 하드웨어 구성

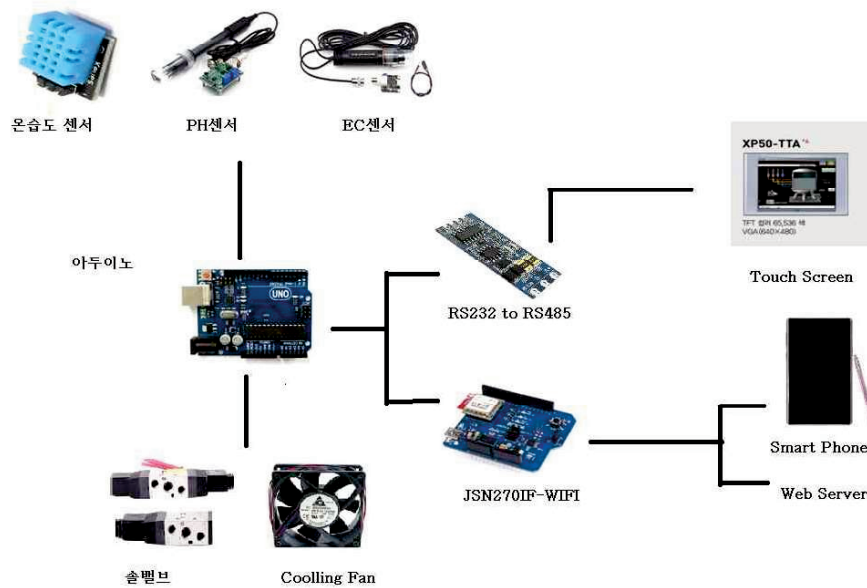


그림 17 모니터링 시스템 구성

3.5 식물공장 환경제어 시스템

식물공장 환경제어 시스템은 재배환경의 최적화를 의미한다. 따라서 환경요소와 식물상태를 정밀하게 계측 및 진단하기 위한 센서가 필요하고 각 제어요소인 온도, 습도, 이산화탄소, 빛, 공기순환, 배양액 등을 효과적으로 제어하기 위한 소프트웨어 및 하드웨어 기술의 뒷받침이 필요하다. 환경제어 시스템은 이러한 환경요소를 인위적으로 제어해 식물의 성장촉진, 생산성 증대, 품질 향상 및 성장 균일화 등을 가능하게 한다. 본 논문에서는 소형 마이크로프로세서인 아두이노를 사용하여 온도센서, 습도센서, EC센서, PH센서 등에서 온도와 습도 값을 센싱하고, 터치스크린을 통해 각 재배 단의 데이터 값을 종합적으로 모니터링 할 수 있도록 구성한다. 그리고 PLC 제어기는 냉각팬을 동작시켜 각 재배단의 실내온도 값을 적정하게 유지 할 수 있도록 설계하였다. 그림 18은 식물공장 환경제어 시스템 구성을 나타낸다.

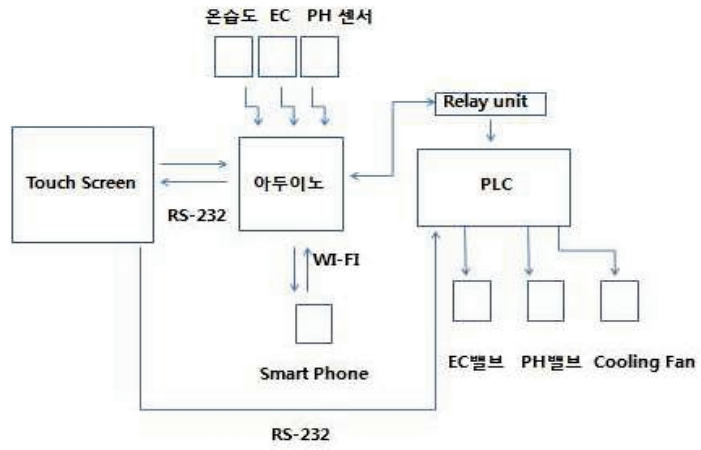


그림 18 식물공장 환경제어 시스템 구성

IV. 식물공장 LED 제어와 양액제어 시스템 설계

본 논문에서는 LED 광질의 변화에 의한 식물의 생육의 관찰이며 식물의 광포화점과 광보상점에 의한 식물성장에 있어서 최적의 조도 값을 찾기 위한 LED 제어와 식물과의 이격거리를 선정한다. 또한, 양액의 공급방식에 따른 식물의 뿌리에 관한 성장형태와 성장속도를 관찰하고, 식물공장의 온도나 습도 양액의 농도, 산도 농도 등의 환경적인 부분을 개선하여 컨테이너형 식물공장에 적용할 수 있도록 시스템을 제작하고 실험을 수행한다.

4.1 식물공장 종합 구성도와 제작 과정

식물공장의 종합 구성도는 그림 19와 같고 전체적인 제작과정은 그림 20에 나타내었다.

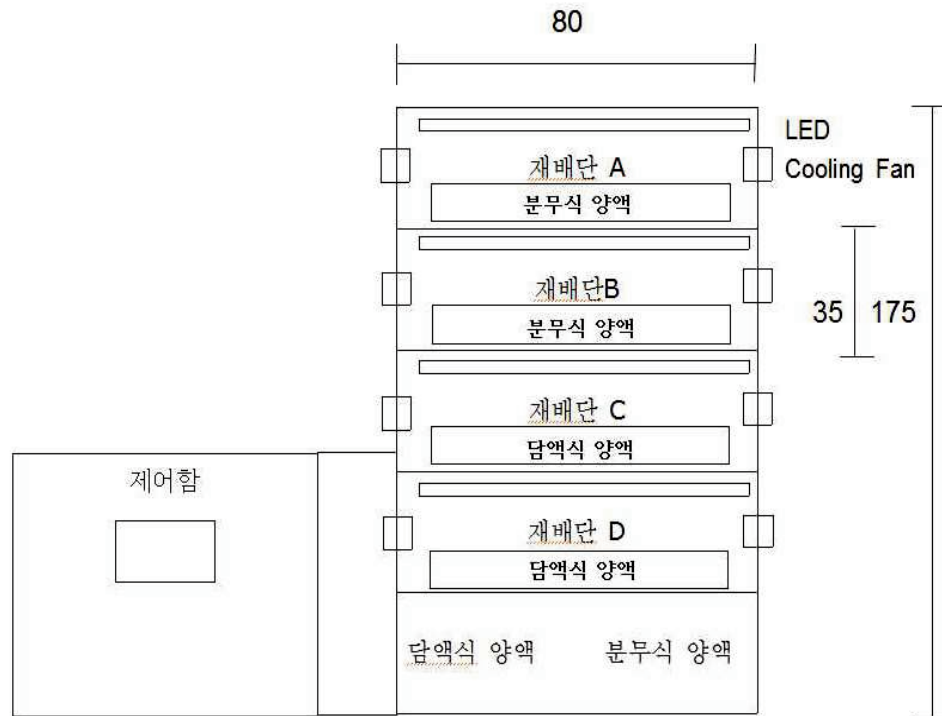


그림 19 식물공장 종합 구성도



그림 20 식물공장 제작과정

4.2 식물공장 LED 제어 시스템

표 13은 식물공장 LED 제어의 각 재배단별 LED 설치 구성도이며, A, C 재배단은 발아기와 생육시기에 맞추어 뿌리와 줄기를 튼튼하게 하기 위해 청색 LED와 백색 LED를 사용하였다. 성장기에는 식물의 광합성 작용을 최대로 하기 위하여 적색 LED와 백색 LED를 사용하였고 B, D 재배단은 4:1비율의 적색 LED와 청색 LED를 혼합하여 각 재배단별 식물의 성장 변화를 비교 하였다.

표 13 재배단별 LED 설치 구성도

A재배단 RGB 생육기 청색, 백색 혼합 A재배단 RGB 성장기 적색, 백색 혼합 (백색 혼합비율 20%)	
B재배단 4:1(적:청)혼합 LED	
C재배단 RGB 생육기 청색, 백색 혼합 C재배단 RGB 성장기 적색, 백색 혼합 (백색 혼합비율 20%)	
B재배단 4:1(적:청)혼합 LED	
담액식 양액	분무식 양액

그림 21에서 A, C단의 LED바의 설치 길이는 70cm 이고 RGB LED 50개 3줄씩 150개를 A단과 C단에 각 각 설치하였다. B, C단에서 LED는 4:1(적색:청색) 혼합 LED 50개를 3줄씩 150개를 B단과 D단에 각각 설치하였다. 재배단에 설치된 총 LED의 개수는 600개 이며 1개당 0.24W가 소비되므로 144W를 LED의 소비전력으로 본다. 하루에 LED를 15시간정도 사용하는 것으로 제어를 설계하였으므로 식물공장의 한 달 전력량은 약 60kWh로 계산한다.

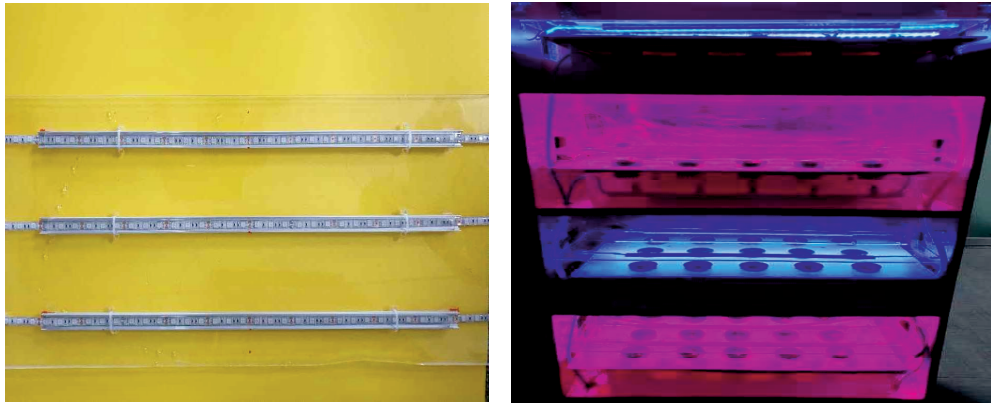


그림 21 식물공장 LED 설치 예

생육시기별 LED 파장의 타이밍은 PLC로 제어하여 빛이 없는 어두운 상태에서 발아 시키고, 3일 후 싹이 올라오면 청색, 백색 LED를 점등하고 10일 후 뿌리가 자리 잡도록 한다. 성장기에 돌입하면 적색, 백색 LED를 점등하며 24시간 기준 16시간 광합성작용, 8시간 휴면하도록 LED를 제어하였다. 그림 22는 식물공장 LED 제어 알고리즘을 나타내며, 그림 23은 LED PLC Logic Program이다.

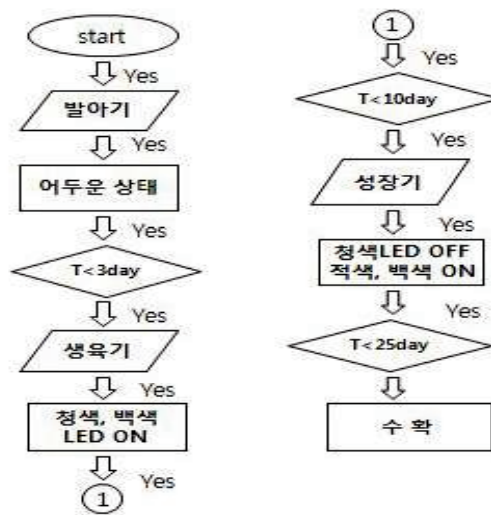


그림 22 식물공장 LED 제어 알고리즘

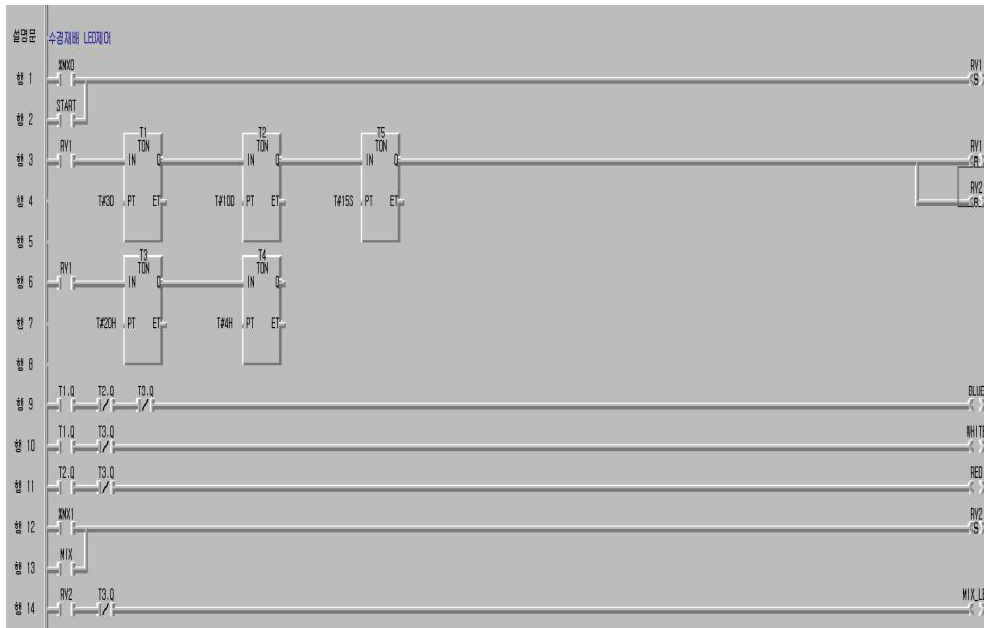


그림 23 LED PLC Logic Program

4.3 식물공장 양액제어 시스템

본 실험에서는 분무형 수경재배 방식과 담액식 수경재배 방식을 선택하였고, 재배 A, B단은 고압의 펌프를 동작시켜 미세 노즐에 의해 분무형태로 뿌리에 살포하여 식물에 필요한 수분과 영양을 공급할 수 있도록 설치하였다. 재배 C, D단은 담액식과 박막식을 혼합하여 재배상자에 뿌리가 항상 물에 잠겨있지만 펌프의 압력으로 순환되도록 설치하였다.

4.3.1 재배 A, B단 분무식 수경재배 시스템

그림 24의 재배 A, B단 분무식 시스템은 하단의 분무식 양액통에서 100W 순환펌프를 거쳐 상단의 재배 A, B단에 병렬로 입수된다. 입수된 양액은 분무식 노즐을 이동하여 식물에 분사한 후 나머지 양액은 출수를 통과하여 분무식 양액통으로 순환되는 시스템이다. 분무 노즐은 식물의 뿌리 하단에서 분사되고 A, B단 합하여 20개의 수량을 설치하였다. 그림 25는 분무식 노즐 연결의 상태이다.



그림 24 분무식 양액제어 구성도



그림 25 분무식 노즐의 구조

4.3.2 재배 C, D단 담액식 수경재배 시스템

그림 26에서 재배 C, D단 분무식 시스템은 하단의 분무식 양액통에서 100W 순환펌프를 거쳐 상단의 재배 C로 입수된다. 입수된 양액은 재배 C의 재배상자를 가득 채우며 직렬로 D 재배상자의 식물의 뿌리까지 채우고 출수를 통과하여 담액식 양액통으로 순환되는 시스템이다. 담액식 양액제어의 특징은 뿌리가 재배 상자에 항상 잠겨 있기 때문에 공기펌프가 필요한 시스템이지만 순환펌프를 이용하여 일정시간 마다 잠겨있는 양액이 순환되므로 공기펌프를 사용하지 않았다. 그림 27은 담액식 양액제어의 순환구조를 나타낸 것이다.

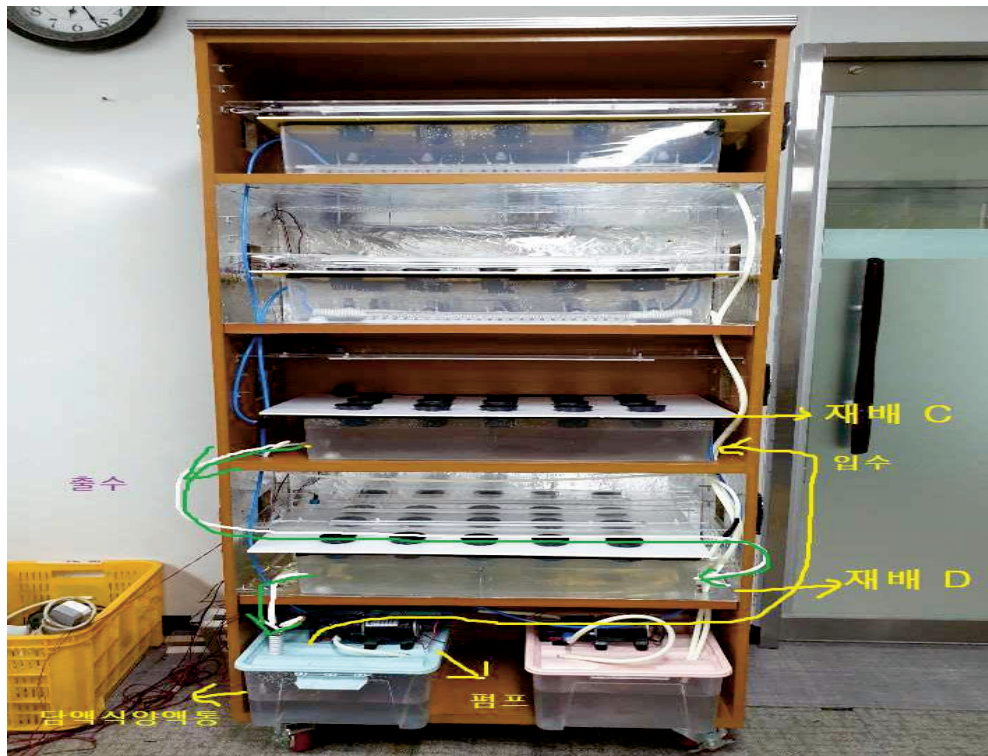


그림 26 담액식 양액제어 구성도

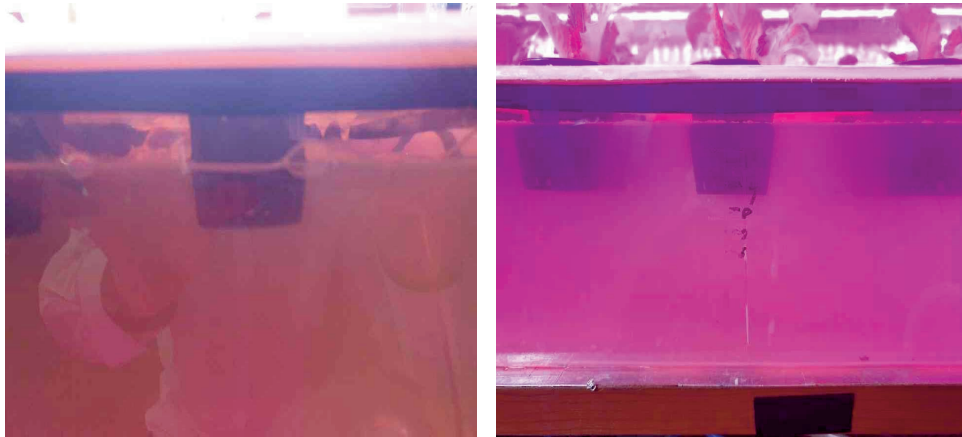


그림 27 담액식 양액제어 순환구조

4.3.3 식물공장 양액의 자동제어

식물공장 양액의 자동제어는 크게 펌프 제어와 EC, pH센서에 의한 솔레노이드 밸브를 자동으로 제어하는 부분으로 구분되어 있다. 재배 A, B단은 분무형 양액제어로서 발아와 새싹이 돌아나는 시기에는 씨앗을 감싸고 있는 스폰지에 물을 많이 적셔 주어야하기 때문에 노즐에서 분사되는 주기를 짧게 하고 분사되는 양을 많게 하여 스폰지가 마르지 않도록 PLC로 제어하였다. 싹이 돋고 뿌리가 생성되어 성장기에 돌입되면 뿌리를 튼튼하게 만들기 위하여 뿌리에 양분을 공급하고 일정시간동안은 뿌리를 말려주는 시간주기를 주어 뿌리가 단단해지고 양분을 충분히 공급할 수 있도록 제어를 수행하였다. 뿌리가 단단해지고 잎이 광합성작용이 최대로 일어나고 있는 시기에는 뿌리가 양분을 더 많이 흡수하기 때문에 양분공급 시간을 더 많이 주어 성장이 촉진 될 수 있도록 제어하였다. 그림 28은 뿌리에 분무식 노즐이 영양분을 공급하는 사진이다.



그림 28 분무식 양액제어 분사

재배 C, D의 담액식 펌프제어는 뿌리가 상시 양액에 잠겨 있기 때문에 양액이 오염되지 않도록 입수펌프의 양을 조절 하여 어린새싹 시기에는 순환시기를 작게 성장시기에는 순환시기를 크게 하여 회전될 수 있도록 프로그래밍하였다. 그림 29는 분무식과 담액식의 펌프제어 PLC Logic Program이다.

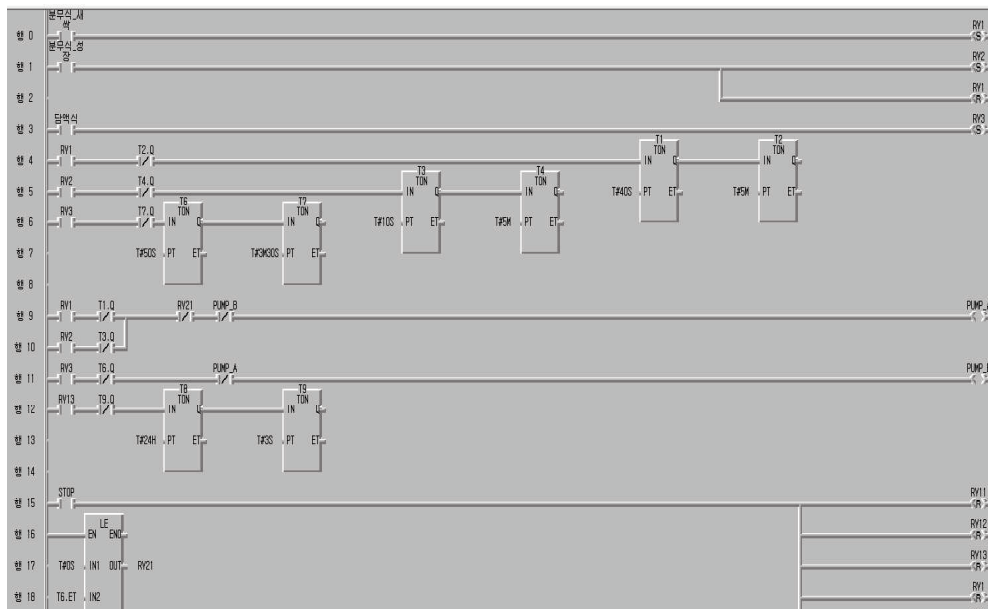


그림 29 Pump PLC Logic Program

식물공장 양액제어는 대유화학 물푸레 양액 농도 기준 1.6과 산도농도 기준 6.3을 사용하였다. 양액농도가 기준치 1.5~2.0, 산도농도가 기준치 5.0~7.0을 벗어나지 않도록 EC센서와 pH센서의 현재 농도와 산도를 센싱하였다. 양액농도가 부족할 때는 물푸레 B를 솔레노이드 밸브로 공급하고, 산도농도가 많을 때는 물푸레 A를 솔레노이드 밸브로 공급하도록 아두이노로 프로세서를 통해 제어하였다. 그림 30은 양액농도, 산도농도 제어 프로그램을 나타낸다.

```

65     float static voltageToPH(float _mvpH)
66     {
67         //DEBUG_PRINTLN("PH voltage:");
68         //DEBUG_PRINTLN(_mvpH);
69
70         float sensitivity;
71         // Two ranges calibration
72         if (_mvpH > calibration_point_7) {
73             // The sensitivity is calculated using the other two calibration values
74             // Assume that the pH sensor is lineal in the range.
75             // sensitivity = pHVariation / volts
76             // Divide by 3 = (pH) 7 - (pH) 4
77             sensitivity = (calibration_point_4 - calibration_point_7) / 3;
78
79             // The value at pH 7.0 is taken as reference
80             // => Units balance => 7 (pH) + (volts) / ((pH) / (volts))
81             return 7.0 + (calibration_point_7 - _mvpH) / sensitivity;
82             // | |
83             // (pH 7 voltage - Measured volts) = Variation from the reference
84         }

```

그림 30 양액농도, 산도농도 제어 프로그램

V. 실험 및 결과 분석

5.1 식물공장 생육기 재배 조건별 상추의 성장 비교

생육기 실험에서는 씨앗, 발아, 어린새싹까지의 성장은 씨앗자체에서 영양분이 공급되는 시기이기 때문에 80%이상의 수분을 유지하면서 LED는 점등시키지 않고 암실에서 3일을 A, B, C, D단 동일한 조건으로 성장시킨 후, A, C단은 청색 80% 백색 20%를 조사하였고, B, D단은 4:1(적색:청색)혼합 LED를 16시간 광합성작용, 8시간 휴면 주기를 두어 빛을 조사하였다. 이때 A와 B의 양액공급 조건은 분무식 수경재배, C와 D의 양액 공급조건은 담액식 수경재배를 채택하였다. 이때 A, B단의 양액공급 조건은 같은 상황에서 LED 파장을 다르게 하였을 때 식물의 성장을 비교하였고 C, D단의 양액공급 조건은 같은 상황에서 LED 파장을 다르게 하여 식물의 성장을 비교하였다.

표 14 재배 조건별 성장 길이 변화(생육기)

재배단	양액공급 방식	LED 파장	재배단 작물길이[mm]									
			1일	2일	3일	4일	5일	6일	7일	8일	9일	10일
A	분무식	청색, 백색	20	22	25	28	32	36	41	51	62	75
B		LED 4:1혼합	20	22	24	25	27	30	35	43	51	60
C	담액식	청색, 백색	20	20	22	24	26	29	32	36	40	45
D		LED 4:1혼합	20	20	21	21	22	24	26	29	32	35

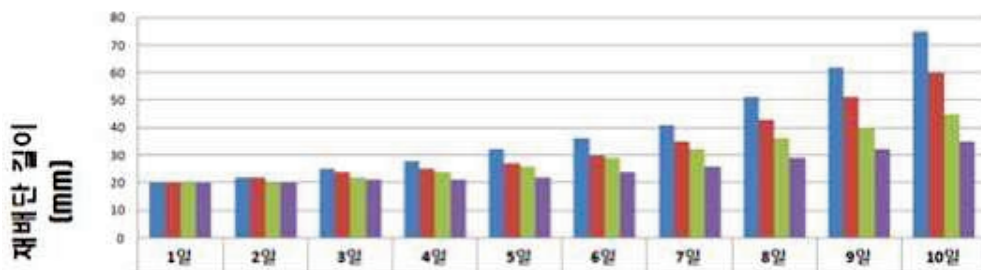


그림 31 재배 조건별 성장 길이 변화 그래프(생육기)

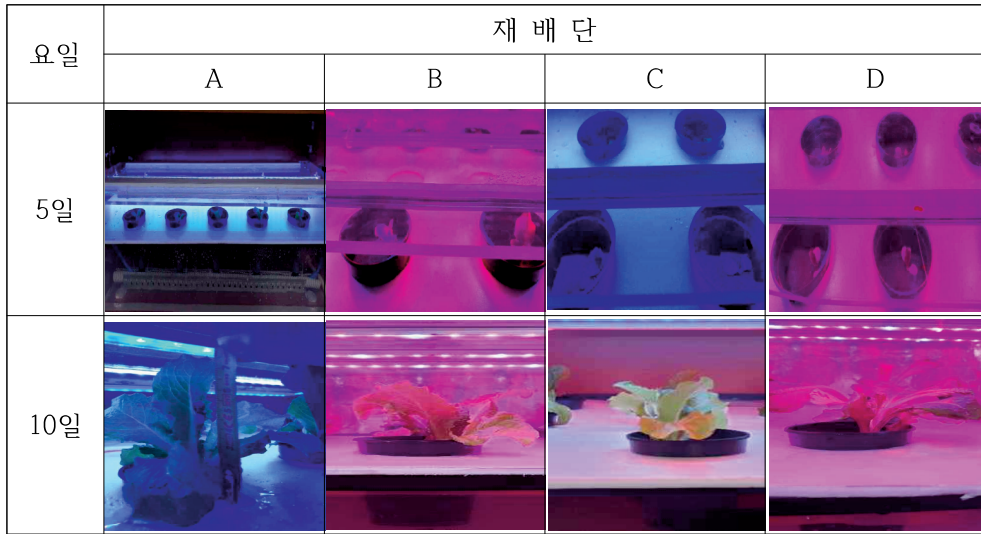


그림 32 식물공장 생육기 성장 사진

생육기 초기 5일에는 A, B, C, D단의 성장률이 크게 변화하지 않았지만 7일 이후부터는 분무식 재배단의 뿌리가 담액식 재배단의 뿌리보다 커지고 단단해지면서 차이를 보이기 시작했으며 A단과 B단을 LED 파장 차이별로 비교 하였을 때 청색과 백색의 LED가 4:1혼합 비율보다 미세하지만 15mm정도 더 성장하였다. 그림 33는 생육시기 때의 분무식과 담액식의 뿌리 비교이다.

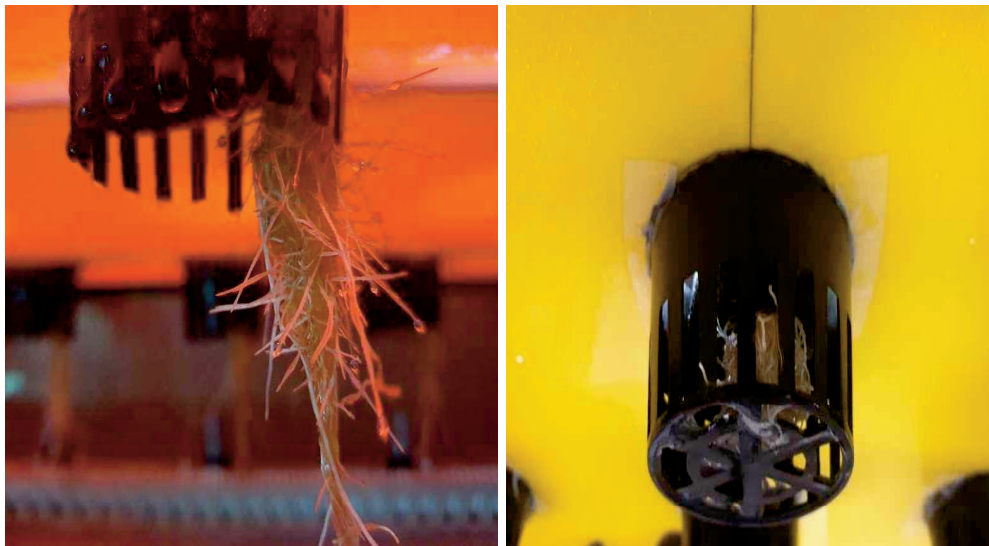


그림 33 생육기 분무식과 담액식의 뿌리 비교

5.2 식물공장 성장기 재배 조건별 상추의 성장 비교

생육기가 끝나고 성장기에 들어섰을 때는 A, C단의 LED의 파장을 적색 80% 백색 20%로 변화하였다. B, D단은 생육시기 때와 같이 4:1 혼합비율로 비교를 하였다. 양액공급 방식은 생육시기와 같다.

표 15 재배 조건별 성장 길이 변화(성장기)

재배단	양액공급 방식	LED 파장	재배단 작물길이[mm]									
			11일	12일	13일	14일	15일	16일	17일	18일	19일	20일
A	분무식	적색, 백색	79	89	99	110	121	131	143	153	162	171
B		LED 4:1 혼합	55	63	73	84	95	107	115	123	131	138
C	담액식	적색, 백색	40	46	53	61	70	81	91	102	113	128
D		LED 4:1 혼합	34	38	42	48	53	59	65	71	76	82

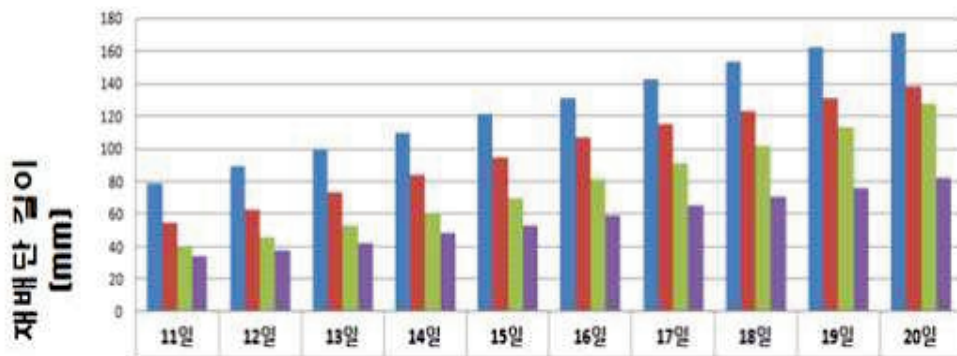


그림 34 재배 조건별 성장 길이 변화 그래프(성장기)

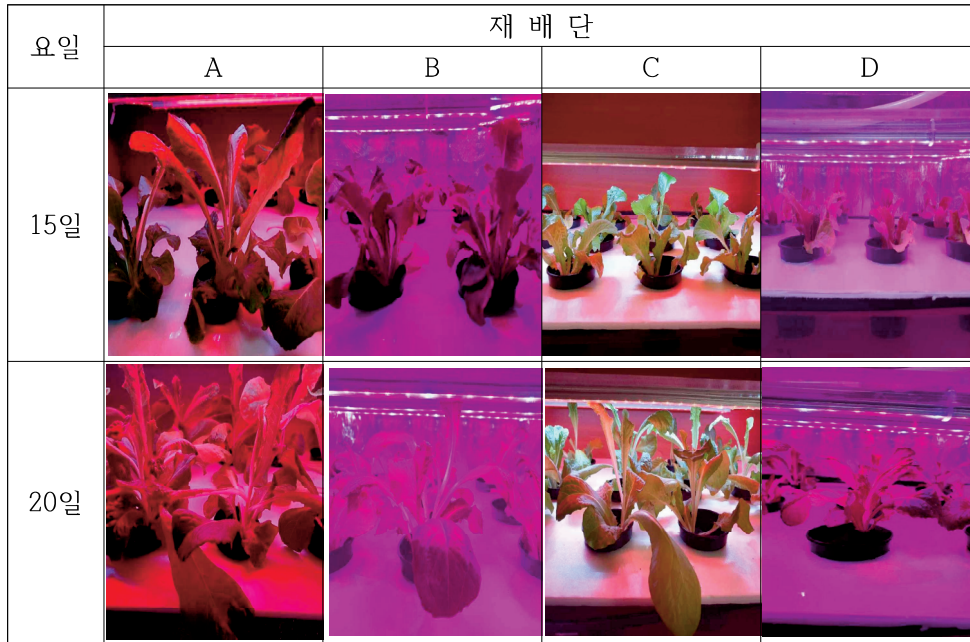


그림 35 식물공장 성장기 사진

성장기에는 그림 34에서 보듯이 뿌리가 더욱 탄탄해지면서 A, B재배단은 하루 평균 8~11 mm 꾸준히 성장하는 것을 그림 35의 그래프에서 볼 수 있다. 반면 C, D단은 성장기 초기에는 하루 평균 4~6 mm정도 성장이 분무식 보다 느리다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 C재배단도 15일 이후부터는 성장속도가 빨라지면서 15일 이후에는 10~11 mm 의 성장을 유지하였고 D단은 유난히 성장속도가 느린 것을 확인 할 수 있었다. 이는 C와 D단은 담액식으로 뿌리가 물에 잠겨 있기 때문에 뿌리가 물에 적응하는 시간이 분무식보다 늦었고 기존에 사용되어 온 담액식 수경재배 방식은 에어 펌프를 이용하여 뿌리에 산소를 상시 공급하여야 하므로 산소공급이 풍부한 분무식 수경재배 방식에 비하여 성장속도가 느린 것을 확인할 수 있었다. LED 파장에 의한 생장속도는 A와 B단 또는 C와 D단의 비교에서처럼 적색과 백색의 파장이 혼합 파장보다 식물성장에 도움을 준다는 것을 얻을 수 있었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 갈수록 심각해지는 고농도 초미세먼지에 대응하여 우리의 먹을 거리를 보장 받고자 식물공장과 PLC 기반의 양액제어 시스템을 구축하였다. 이를 통해 LED 파장에 의한 식물의 성장속도를 비교하여 수확시기를 단축시킬 파장대역을 도출하였고, 이를 식물의 성장 영역에 맞도록 빛의 파장을 자동으로 제어하여 기존에 사용하던 혼합된 LED보다 생육기간을 단축시켰다. 청색과 백색 LED, 적색과 백색 LED의 변화되는 주기를 시간적인 타이머로 주었지만 거리센서를 응용하여 식물이 성장하는 시기에 파장대역을 바꾸어 주는 실험을 주기적으로 시도하여 생육시기에서 성장시기로 넘어가는 정확한 데이터 값을 도출한다면 식물의 수확시기를 더 단축 할 수 있을 것이라 생각한다.

또한, 양액의 주입방식을 담액식 수경재배와 분무식 수경재배를 비교하였을 때, 분무식 수경배방식이 뿌리에 충분한 영양공급과 분무에 의한 산소공급으로 뿌리가 더 단단해지고 성장하는 환경에 적응능력도 빠르다는 것을 확인하였다. 재배단 한 곳에서 살포하는 방식으로 실험을 하였지만, 재배단을 더 촘촘히 쌓아 올려 뿌리를 좀 더 집중시킨 후 살포하는 힘과 각도를 증폭시키는 방법을 고안한다면 재배면적을 더 넓히는 효율을 얻을 수 있을 것이라 생각한다.

실시간으로 데이터를 저장하고 모니터링 하여 재배 환경을 개선해 나간다면 신선한 과일이나 야채를 컨테이너나 상가건물, 레스토랑의 주방 등의 폐쇄된 공간에서도 365일 환경에 피해를 받지 않고 재배할 수 있고, 각 시도별 특산품목에도 적용하여 대규모 생산시스템을 구축하면 연중 싱싱하고 깨끗한 먹을거리를 제공할 수 있고 특산품목의 대량생산으로 경제적인 효과 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 더 나아가 중동지역이나 사막지역과 같이 식물이 성장하기 어려운 조건의 환경에 적용한다면 국가적으로도 고부가 가치를 창출 할 수 있을 것이라 생각한다.

참 고 문 헌

- [1] 환경부, “바로 알면 보인다. 미세먼지 도대체 뭘까,” 행정간행물, 2016.
- [2] 감동환, *새싹작물 재배용 소형 스마트 팜 시스템 연구*, 성균관대학교, 2018.
- [3] 전황수, “식물공장의 국내외 추진동향,” 정보통신기술진흥센터 주간기술동향, 2016.
- [4] 한화케미칼, *친환경 미래농장, 태양광 식물공장과 폴리실리콘*, 화학/테크리포트, 2015.
- [5] 농림축산식품부, *수출용 컨테이너형 버섯공장 사용화 시스템 개발*, 첨단생산기술개발사업 R&D 리포트, 2018.
- [6] 오성보, *Lighting Entrance for Smart Lighting*, 문운당, 2016.
- [7] Sung-Won Lee, *Household Plant Factory Suppling a Constant PPF*, Master Thesise, Kyungpook National University, 2013.
- [8] Cheol-Gu Yoon, *A Study on the LED Illumination Lamp Development and Application for Plant Factory*, Ph.D. Thesis, Hongik University, 2011.
- [9] 농촌진흥청, *수경재배*, 표준영농교본 71, 2004.
- [10] <http://hydroponicsgrower.org/wp-content/uploads/2014/01/deep-water-culture.jpg>

- [11] [http://hydroponicsgrower.org/wp-content/uploads/2014/01/3-Nutrient-Film Technique-system.jpg](http://hydroponicsgrower.org/wp-content/uploads/2014/01/3-Nutrient-Film-Technique-system.jpg)
- [12] <http://hydroponicsgrower.org/wp-content/uploads/2014/01/4-Aeroponics-system.jpg>
- [13] 제주특별자치도 농업기술원, *스마트팜 시설농업 관리기술*, 2015.
- [14] 농촌진흥원, *식물공장*, 농업기술길라잡이 191, 2017.
- [15] 선복근, 한광록, 임기욱, “PLC 모니터링을 위한 임베디드 HMI 시스템의 개발에 관한 연구,” 전자공학회논문지, 제42권, 제7호, 2015.

감 사 의 글

석사과정을 마무리하며 많은 격려와 도움을 주신 분들에게 이 글을 통하여 감사의 마음을 전합니다. 먼저 부족한 저와 제자들을 위하여 격려해주시고 바쁘신 와중에도 2년 동안 불철주야 지도해주신 김호찬 지도교수님께 깊은 감사의 마음을 드립니다. 그리고, 야간에 석사수업을 받는 동안 꾸준히 격려해주시고 조언해주신 김일환교수님, 김세호교수님, 오성보교수님, 진영규교수님께 감사드리며, 이번 논문심사를 맡아주신 이개명교수님과 김호민교수님께 무한한 감사를 드립니다.

학사를 졸업하고 석사과정을 고심 끝에 입학할 결심하게 되면서 직장과 가정, 학업 모두를 “잘 해낼 수 있을까”라는 두려움과 잘해보겠다는 다짐으로 교정에 들어선지 2년 6개월이라는 긴 시간이 흘렀습니다. 제주도에 내려와 가족과 떨어져 지내며 일을 끝마치고 야간에 학업에 정진해야하는 시간이 때론 힘들기도 하였지만 이렇게 석사를 마무리 할 수 있도록 도움을 주신 교수님들과 동기들 그리고 사랑하는 가족이 있었기에 끝을 맺을 수 있었던 것 같습니다.

특히 학업에 전념할 수 있도록 전폭적인 지원을 아끼지 않으신 한국폴리텍 대학교 제주캠퍼스 안영관교수님, 고성필교수님, 송석환학과장님, 이윤규교수님과 항상 저에 편이 되어주시며 가족과도 같이 따뜻하게 격려해주신 김경모교학처장님, 김정호학과장님, 김종민교수님, 김은영학과장님, 한재희학과장님, 변철규교수님, 강훈철교수님 및 제주캠퍼스 교직원 모든 분들에게 감사한 마음을 전합니다.

또한, 석사과정을 마무리하는 동안 많은 도움을 주었던 제주대학교 민혁이와 박사과정 상현씨, 진홍씨, 야간에 일을 마치고 학업을 하는 부분이 힘들었지만 함께 웃으며 즐겁게 수업을 받았던 이승환팀장님, 김용균부장님, 고지은대표님 및 대학원동기들에게도 감사의 말씀을 전하며 항상 제가하는 일은 어떠한 일이든 믿어주시고 항상 용기와 희망을 주신 아버지와 부족한 사위를 항상 따뜻하게 아껴주시고, 우리 은서와 은울이를 보살펴주시는 장인어른, 장모님께 모든 영광을

돌리며 항상 저에게 용기를 북돋아 주신 큰처남과, 작은처남 및 하나 뿐인 오빠
라고 항상 걱정해주는 동생현진이, 매제에게도 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 제주 내려와 있는 5년 동안 떨어져 지내면서 은서와 은율이 혼자서
키우느라 고생이 많았던 사랑하는 아내 최명숙씨에게 항상 배려해주고 힘이 되
어 주어서 감사하다는 말과 함께 이 모든 공을 돌리며 이 영광을 함께 하고자
합니다.