

신재생에너지를 활용한 IT-융합 식물공장 시스템 설계

임 계 재*

A Design of IT-Convergence Plant Factory System Using the Renewable Energy

Gye-jae Lim*

요 약

본 논문에서는, 친환경 Green IT 기술과 융합된 식물공장 시스템의 이상적인 표준 설계 및 구축안을 요소기술 별로 제시하였으며, 이의 실현 가능성과 문제점 분석을 위해 요소기술별 관련 하드웨어 및 소프트웨어를 종합한 컨테이너형 식물공장 테스트베드를 구축하여 운영하고, 운영상의 문제점을 파악하여 미래의 대형 식물공장 구축과 운영의 기반이 되는 시험연구를 수행하였다.

Key Words : Plant Factory, IT-Convergence, Monitoring of Plant Growth, Sensor Module, Solar Energy

ABSTRACT

In this paper, the ideal standard design and construction of plant factory systems with the Green IT technologies is proposed. For feasibility and problem analysis, a container-type plant factory which was integrated with hardware and software of elemental technologies was operated as a test bed. This operation testing and research will be the foundation of the future construction and operation of large plant factories.

I. 서 론

최근 기온, 강수량, 일사량 변화와 집중호우, 초대형 태풍, 가뭄 등의 기상 이변으로 농작물 재배에 많은 어려움을 주고 있으며 그에 따라 식품 가격의 변동폭이 급변하여 생산자는 물론이고 소비자 또한 어려움을 겪고 있다. 따라서 식량의 안정적 확보 및 물가 안정을 위해 1년 내내 안정적으로 작물을 재배할 수 있는 식물공장이 주목을 받고 있다.^[1]

이러한 식물공장은 친환경, 에너지 효율화, 식물생장 모니터링 및 환경 제어, 자동화 시설 등과 같은 종합적인 기술의 집적화를 통해 고부가가치 농산물의

과종에서 숙성에 이르는 원스톱 관리 시스템 체계를 마련하여야 하고, 환경요소를 복합적으로 분석 관리하여 재배작물이 일류품질의 고소득 제품으로 업그레이드될 수 있도록 지원할 수 있는 시스템 개발이 요구되기 때문에 지속가능한 기술로써 친환경 Green IT 기술과의 융합과 활용이 필수적이다.^[2]

친환경 Green IT 기술과 융합된 식물공장 관련기술 중 가장 핵심이라고 할 수 있는 생장환경 모니터링 시스템 연구^[3-5], 인공광원 시스템 도입^[6-8], 환경 센싱용 센서모듈의 개발^[9], 식물공장 자동화 설계^[10], 멀티미디어의 활용^[11-12], 고품질 작물의 안전성 확보를 위한 이력관리 방법^[13-15]에 대한 연구가 활발하게 이루어

* First Author : Cathoric Kwandong University, Department of Energy Resources, gilim@cku.ac.kr

논문번호 : KICS2015-02-032, Received February 13, 2015; Revised April 8, 2015; Accepted April 8, 2015

어지고 있다.

그리고 최근 이슈가 되고 있는 온실가스 저감을 위한 신재생에너지 활용 시스템과 같은 생장 적정온도 유지, 유틸리티 대체효과가 가능한 저전력 기반 첨단시설 활용 등의 요소기술 개발을 통해, 탈석유 및 에너지 자립을 강화하고, 온실가스의 배출량을 최소화하는 방안에 대해서도 기술개발이 이루어지고 있다.

이러한 연구와 기술을 바탕으로 저탄소 친환경 사회 구현에 기여할 수 있으며, 고부가가치의 농산물 생산에 따른 농업 경쟁력 향상이 가능할 것이다.

현재 식물공장과 관련한 국내 기술수준은 세계 최고수준(100%)에 비하여 약 50% 정도의 기술적 완성도 수준에 불과한 실정이며, 구체적으로 식물공장 구성별 기술수준을 보면, 공장설비 51.2 ~ 58.0%, 환경 및 생체 제어시스템 51.9 ~ 61.9%, 인공조명 50% 내외, 배지 및 수경재배시스템 62.3 ~ 64.3%, 파종 및 육묘 시스템 66.5%, 이송장치 및 기계 설비 72.0% 등에 머물러 있는 실정이다.^[16]

현재까지 다양한 작물들을 대상으로 식물공장 시스템의 개발과 연구가 진행되고 있지만, 주로 엽채류 또는 화훼에 국한되어 왔으나 보다 고부가가치의 과채류나 약용식물 등의 재배에도 관심을 기울일 필요가 있다. 이를 위해서는 다양한 종류의 작물재배가 가능한 식물공장 시스템의 구현이 요구된다.

따라서 본 논문에서는, 친환경 Green IT 기술과 융합된 식물공장 시스템의 이상적인 표준 설계 및 구축안을 요소기술별로 제시하였으며, 이의 실현 가능성과 문제점 분석을 위해 요소기술별 관련 하드웨어 및 소프트웨어를 종합한 컨테이너형 식물공장 테스트베드를 구축하여 운용하고, 운용상의 문제점을 파악하여 미래의 대형 식물공장 구축과 운용을 위한 시험연구를 수행하였다.

각 요소기술별 핵심 내용에 대해서는 2장에서 식물생장 모니터링 및 제어의 설계 과정, 환경 센서와 이의 모듈화 과정, LED 조명의 설계, 신재생에너지로서 태양광 발전의 적용 방안을 설명하였고, 3장에서는 2장에서의 요소기술들을 집적화한 시험시설로써 구축된 컨테이너형 식물공장의 테스트 베드를 운용한 결과를 설명하였다.

II. 요소기술별 핵심 내용

식물공장 작물의 재배환경 최적화를 통해 고품질의 식물생산과 유품상승 및 인건비 상승, 농가의 경영비 상승 원인을 절감하여 수출 경쟁력을 증대하기 위해

서는 생장환경 모니터링을 비롯하여 융합센서 모듈 개발, 최적생장용 LED 적용 및 신재생 에너지 활용 등과 같은 요소기술 별 통합 시스템 구축(그림 1)이 요구된다.

특히, LED 광원을 기반으로 작물을 재배하는 식물공장에서의 환경 및 생장 모니터링 및 제어를 위한 통합 SW 를 개발하기 위해서, 다양한 식물공장에 대한 종합적인 문제점 등을 분석하여 가장 실현가능하고 현실적인 시스템 설계에 주력하였다.



그림 1. 요소기술들의 시스템 통합화 구성도
Fig. 1. Integrated System Layout of elementary technologies.

2.1 식물생장 모니터링 및 제어

통합 센서 모듈과 CCTV 영상자료에서 취득한 정보를 DB 화하고 이를 분석하여 전원 및 LED 조명 부분, 공조 및 양액공급 시설 부분을 제어하는 하드웨어와 소프트웨어를 구축할 필요가 있으며, 이를 위한 세부 기능과 사양들을 아래에 설명하였다.

2.1.1 생장상태 모니터링 및 분석

작물의 생장환경 모니터링에서는 기상상태, 생육상태, 병충해 감지, 토양 및 수분 등에 대한 환경을 수집하여 스크린에서 모니터링할 수 있는 기능을 수행한다.

통합센서 모듈 등을 이용하여 작물의 재배지에 대한 생장환경과 작물의 생장상태 모니터링과 분석을 통해서 실시간 생장환경과 단계별 병충해 발생시기 정보를 도출하여 능동적 농약방제시스템을 활용한 최소량 농약 살포로 고품질의 안전한 작물 생산이 가능하도록 하고, 생장환경과 생장의 연관관계를 도출하여 생장지표를 정량화함으로써 최소의 양액 공급으로 최고 품질의 작물을 재배하기 위한 생장환경에 대한 기반을 마련한다.

또한 CCTV 또는 이미지 캡처시스템 등을 이용하여 재배지의 작물재배 현황에 대한 모니터링과 근접 촬영 등의 기능으로 작물의 생육상태에 대한 실시간

시각적 모니터링이 가능하도록 시스템을 구축하여 작물의 생육상태에 따른 병충해 방제가 가능하도록 지원하여 오·남용되는 병충해 방제로 작물의 품질을 저하시키는 사례를 방지한다.

이렇게 모니터링된 정보를 농가의 관리자에게 통보하여 재배시설을 제어할 수 있는 모바일 웹 기반서비스를 제공한다.

(1) 센서 데이터(재배환경 데이터) 수집 기술

시설 내에서 수경재배, 배지재배 등과 같이 서로 다른 재배방식 구역에 따라 대기환경의 센서 데이터와 재배지 토양양액 성분정보 데이터를 센싱하여(그림 2 참조) Gateway / Sink Mote로 통해 수집된 데이터는 Control System을 통해 DB에 저장한다. DB에 저장된 데이터를 Web Application이 Polling 하는 방식으로 데이터를 취득하여 클라이언트에 제공한다.



그림 2. 주요 센서의 분류.
Fig. 2. the classification of sensors for monitoring system.

(2) CCTV 영상정보(작물 생육정보) 수집 기술

네트워크, API, 다 중접속 지원 가능한 CCTV를 사용하여 Web Application과 Control System의 영상정보를 취득하고 스크린에 표시한다. 이때 CCTV 는 시설내에서 재배되는 작물별로 설치할 필요가 있으며, 실시간 동영상 정보보다는 주기별 캡처 화면의 정보 취득이 더 효율적이다.

(3) 관찰 내용의 수기작성

상기 센서 및 CCTV 로 기록 취득하기 어려운 작물 크기, 특징, 기타 특이 사항 및 성장별 주요 이슈들을 작성하기 위해 수기기록이 필요한 경우가 있으므로 이 기능을 보유하고 있어야 한다.

(4) 데이터전송 노드의 상태 모니터링 기술

DB에 저장된 배터리, 네트워크 상태 정보를 Web

Application의 개별 페이지로 구성하여 모니터링하고 관리한다.

(5) 생장상태 분석 기술

특정 작물의 생장률을 분석하는 방법으로는 일별 건물중 증가량과 생체중 증가량을 주어진 환경과 양액공급 상태조건과 비교하는 정량화 분석방법과 그림 3의 예와 같이 서로 다른 환경조건에 따라 동일한 2개 이상의 작물 생장률을 직접 비교 분석하는 case-study 분석방법이 있다. 그림 4에는 case-study 방법에 의한 생장률의 분석결과 예를 보였다.

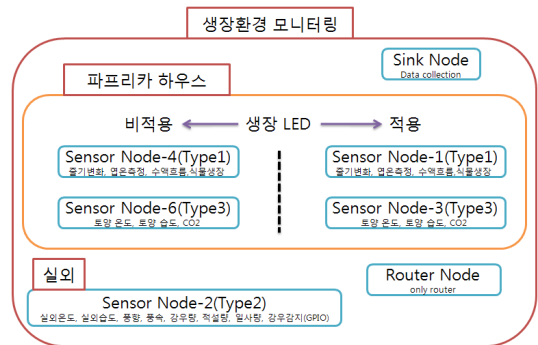


그림 3. case-study 분석방법.
Fig. 3. Analysis method of case-study.

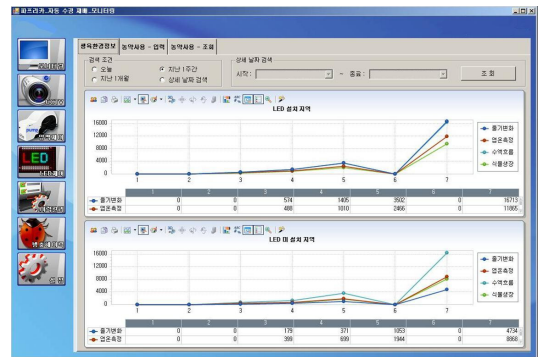


그림 4. case-study 방법에 의한 생장률 분석결과 예.
Fig. 4. An example of the result of case-study analysis.

2.1.2 재배시설 자동 제어

아래의 다양한 재배시설의 제어는 센서 데이터의 분석에 따른 자동제어가 주 모드가 되지만, 운용자의 경험에 따른 수동제어 모드도 경우에 따라 필요하기 때문에 제어시스템의 수동/자동 설정의 선택이 가능하여야 한다.

(1) LED 조명 제어

조도 및 광합성 센서와 연계한 LED 광원의 PWM 제어기술을 통해 조명시간 제어(일자 및 생장주기별 조명시간의 설정 SW), LED 높이(수기 입력), 파장제어 등의 기능이 포함되어 있어야 한다.

(2) 온실 재배 환경 및 설치물 제어

차양막, 환기구, 관수, 양액, 보일러, 농약/비료 살포 시설 등의 제어가 요구되며, 이 장치들의 운영 상태와 제어는 제어시스템에서 담당한다. 특히, 양액의 공급에 대한 제어는 시간대별 공급시간(수기입력), 공급량(1회 공급시간, 1회 공급 ml 량 기록), EC 및 Ph 데이터의 분석을 통해 제어되어야 한다.

(3) 전원관리

전원관리는 전력생산 및 공급 부분의 관리와 전력 소비 부분의 관리로 나눌 수 있다. 전력생산 및 공급 부분은 신재생에너지의 효율적인 전력 생산과 상용계통전원의 연계를 효율적으로 관리하여야 한다. 전력소비 부분은 시설 내에서 전력공급을 필요로 하는 장치들으로써 LED 조명, 제어용 모터, 센서 및 인터페이스 전송 회로부, 냉난방 기기 등과 같이 다양한 종류가 있으며, 이들의 에너지 효율화뿐만 아니라 작물의 고품질화를 위한 최적 전원관리가 요구된다.

2.1.3 생육환경 DB 및 이력관리

단위 식물공장에서 서로 다른 작물의 재배가 이루어지는 경우, 각 구획별로 모니터링하는 센서와 수집 데이터의 차이가 있기 때문에 이에 대한 프로파일 DB를 설정하여 프로젝트화하여 기록하는 것이 우선적으로 필요하다.

작물재배 농가의 직관적이고 경험적인 재배 기술을 기반으로 작물의 생장환경 관리로 병충해 예방을 위한 필요 이상의 과도한 농약·비료 살포로 작물의 수확 후 잔류농약성분 검사에서 기준치 이상으로 성분이 검출되어 결국 상품으로 부적격 판정을 받아 품질 및 상품성에도 영향을 받을 수 있으므로 농약 및 비료의 살포 이력 정보를 관리하고 병충해에 대한 이력정보도 함께 관리하도록 한다. 이력관리의 기능의 분류와 각각의 세부 내용을 그림 5에 보였다.

이러한 생육환경 이력관리를 위해 CCTV 또는 이미지 캡처 시스템 등을 이용하여 이력관리 시스템에 저장하고 추후 출하 시 활용 또는 작물 재배 시 기반 데이터로 활용할 수 있도록 한다.

작물의 품질관리 및 인증을 위해 통합센서 모듈을

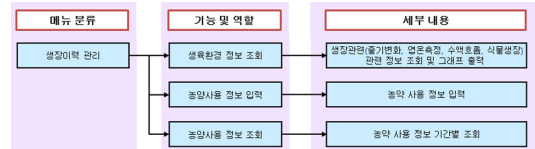


그림 5. 이력관리의 기능의 분류와 각각의 세부 내용.
Fig. 5. the classification of Tracability Management functions.

적용하여 작물 생장환경 이력관리시스템을 구축하고 생장환경 및 생장관리에 대한 이력을 효율적으로 관리할 수 있도록 한다. 이를 위해 통합센서 모듈을 활용한 작물 생장환경 및 생장이력에 대한 관리가 가능해지면, 수집되는 다양한 정보를 이력관리 시스템에 저장하여 작물의 재배에서 발생한 정보를 제공할 수 있어 품질 관리 및 보증과 소비자의 알권리를 충족시켜 줄 수 있는 기반이 마련되어 안심하고 소비할 수 있을 것이다.

또한 작물의 생장 단계별 관리를 위해서는 각종 환경 데이터뿐만 아니라 조건에 생장률을 계산할 수 있는 정지화상의 데이터도 요구된다. 따라서 기본 저장 시간(초당 1-2 프레임)뿐만 아니라 필요시에 스틸컷의 저장도 요구되며, 이를 이용하여 영상 관찰일지의 작성도 가능하다.

2.1.4 원격관리

Web 기반형 소프트웨어를 개발을 통해 스마트폰을 이용한 모니터링과 관리가 가능하며, 비상시에 SMS 전송에 의한 경보기능도 가능하다.

여기서 비상 상황이라 함은 각 센서 별로 기준 임계치를 작성하여 기준 미달이나 기준 초과 시에 담당자에게 경고를 보내는 알람 메시지 기능을 의미한다. 예를 들면, 온도 및 습도, EC, Ph 등의 센싱 데이터가 Control System에 설정된 임계값보다 초과 혹은 미만이 데이터가 수신된 경우 Web Application을 이용한 모바일 관리할 수 있는 기능을 가져야 한다.

2.2 환경 센서

본 절에서는 생장환경 모니터링용 각종 센서들을 (표 1) 집약하여 단일 모듈화하는 융합센서 모듈 기술과 이들 이기종 융합센서 모듈과 서버 간의 데이터 연계를 위한 표준 인터페이스 회로 기술, USN Gateway 부분에 대해 설명한다.

생장 환경의 주요 요인인 다양한 환경 센서들이 결합된 융합센서 모듈의 개발에는 다음과 같은 하드웨어, 소프트웨어, 망제어 등의 세부 기술들의 개발이

표 1. 각종 센서의 세부 사양
Table 1. the specifications of various sensors.

No.	Items	Specifications
1	Temperature	<ul style="list-style-type: none"> 온도 분해능력: 0.1℃ 온도 측정범위: -40℃ ~ +65℃ 온도 정밀도: 0.5℃
2	Humidity	<ul style="list-style-type: none"> 습도측정범위: 0 ~ 100%RH 습도 분해능력: 1% 습도 정밀도: 3% RH 빠른 반응 속도: < 8sec
3	CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> 측정 범위: 0 ~ 3000 ppm 정밀도: ± 2% ppm (0 ~ 3000 ppm) @10 ~ 50℃ 작동 조건: 0 ~ 50℃, 0 ~ 95% RH Non Condensing 보관 온도: - 40 ~ 70℃
4	Illuminance	<ul style="list-style-type: none"> 측정범위: 0~2000μm/m²·sec 분해능: 1μm/m²·sec 정밀도: ± 4% FS
5	EC sensor	<ul style="list-style-type: none"> 측정범위 : 0 ~ 9.99dS/m 측정오차 : ± 0.1 dS/m sensor type : FDR2
6	Photosynthesis	<ul style="list-style-type: none"> Propeller Diameter감도: 30uV Spectrum범위: 400 ~ 660nm 측정 범위: 0 - 5000 사용 온도: 0 - 50도 정밀도: 5%
7	Plantation temperature	<ul style="list-style-type: none"> 분해능: 0.1℃ 측정범위: -10℃ ~ +65℃ 정밀도: 0.5℃
8	Plantation humidity	<ul style="list-style-type: none"> 습도측정범위: 0 ~ 100%RH 분해능: 1% 정밀도: 3% RH
9	Video Information	<ul style="list-style-type: none"> VGA급 지원 유무선 통신 지원 모션캡처 기능
10	RS-232c to I2C Transformati on module	<ul style="list-style-type: none"> TI MSP430F1611 processor SDRAM: 48KB I/F: UART, I2C

* 주) 4,5,6 항 : 식물생장에 있어 조도량 보다는 EC측정량이 중요하며, 6번 항목의 광합성 센서부분과 중복의 성격을 가짐.

요구된다.

- 임베디드 시스템 기반의 센서 보드 개발
- 온도, 습도, CO₂, 조도, 배지온도, 배지습도, 광합성, 영상 센서 융합 기술 개발
- 센싱된 정보의 유, 무선망을 통한 데이터 전송을 위한 프로토콜 개발
- 수집된 데이터를 관제 센터에 전송하기 위한 기술 개발

- 관제 센터 위치를 변경할 수 있는 망제어 기술 개발
- 융합모듈 센서의 설치와 운영이 간편한 센서 구조 기술 개발

2.2.1 이기종 융합센서 연계를 위한 표준 인터페이스 개발

식물생장 모니터링에 필요한 각종 이기종 센서들을 통합하여 데이터 수집할 수 있는 센서 인터페이스 회로(그림 6)의 개발에는 다음과 같은 세부 기술이 요구되며, 이때 인터페이스에 접속되는 각종 센서들의 동적 사양이 정의되어 있어야 한다.

- 센서 인터페이스 회로 설계
- 센서 데이터 포맷 정의
- 센터 인터페이스 통신 프로토콜 개발
- 센서 캘리브레이션 알고리즘 개발
- 인터페이스 드라이버 개발

(1) 센서의 OUTPUT 사양 정리

- Analog 출력 type : 전압/전류 출력(ADC연결), Pulse 출력
- Digital 출력 type :
 - serial 통신(UART, RS-232/RS485 or TTL Level)
 - Pulse 출력(PNP/NPN등의 접촉식signal)
 - I2C 통신
 - PWM방식의 Pulse 출력

(2) 인터페이스 보드 구성

- 전원부
 - 12V 입출력 - 대부분 센서의 전원으로 사용
 - 5V 출력 - G/W 및 5V를 전원으로 사용하는 디바이스에 적용 가능
 - 3.3V 출력 - MOTE 공급전원 및 온습도 센서의 전원으로 사용

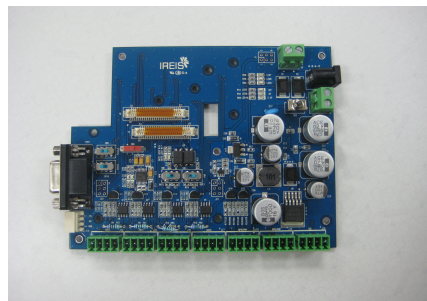


그림 6. 센서 인터페이스
Fig. 6. sensor interface.

- 전원제어 기능
솔라셀 등의 제한적인 전원 사용시 효율적인 전원 관리를 위하여 센서들의 전원공급 ON/OFF 제어가능
- 인터페이스 가능 PORT
ADC analog signal (전압출력 0~12V → 정밀저항의 전압분배를 통하여 0~2V 신호로 처리)
ADC analog signal (전류출력 0~20mA/4~20mA → 부하 저항의 저항 값 변경으로 처리)
NPN/PNP signal (접촉식 → 포토 커플러를 이용한 count / 스위치 변경으로 NPN 및 PNP로 변경가능)
I2C 통신 (I2C → MOTE의 I/O 핀을 이용하여 처리)
serial 통신 (RS-232 level, TTL level → D-Sub 커넥터 Type 및 센서의 pin connection에 따라서 pin의 용도를 Female/Male, Direct/Cross로 설정 변경 가능)

Items	Specifications	Remarks
TFT-LCD I/F	Max. 1024*768	(option)
Touch I/F	Interface 4 line type	(option)
Jtag	ON-board JTAG convetor	Debugging port
Power	DC 5V/2A	Min. 500mA

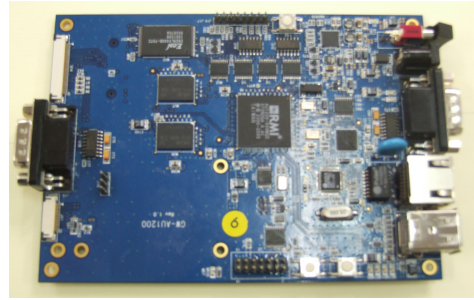


그림 7. USN Gateway의 실물.
Fig. 7. USN Gateway.

2.2.2 USN Gateway

융합센서 모듈에 수집된 이기종 센서의 데이터를 관리 및 모니터링 데이터를 서버에 전송하기 위한 Gateway 시스템을 Embedded Processor Platform 으로 제작하였으며, 여기에는 Linux 기반 Embedded 시스템이 탑재되어 있어 IP 망과 연동을 위한 Ethernet, CDMA I/F 구현이 가능하다. 설계된 USN Gateway 하드웨어의 사양을 표 2에 보였으며, 실물을 그림 7에 보였고, USN Gateway 소프트웨어 개발 사양은 표 3에 보였다.

표 2. USN Gateway 하드웨어의 사양.
Table 2. the specification of USN Gateway H/W.

Items	Specifications	Remarks
MCU	RMI AU-1200 500MHz MIPS core	
RAM	DDR2 128Mbyte SDRAM(533MHz)	
ROM	64Mbyte NAND-Flash	Max. 1GBbyte
LED	Debugging 4 bit	
UART	Console 1 port, rs232 1 port	
Ethernet	10/100Mbps	AX88769B
USB	USB host 2 ports	USB rev2.0
SD/MMC	SD/MMC card socket	

표 3. USN Gateway 소프트웨어의 개발환경 및 사양.
Table 3. the environment and specification of USN Gateway S/W.

Items	Versions	Explanation
Cross compiler Tool	Mipsel-toolchain-3.4.4.tar.gz	Cross Compile toolset Binuils, gcc, Glibc
Boot loader	EZboot (ezboot.ez-au1250)	F/W, linux porting
OS	linux kernel 2.6.21	
RAM disk	Ramdisk-1.10-16M-mipsel.gz	Linux file system utility
Development SW	Flash Rom Write	JTag program. (boot loader down loader)
	QT(qt-x11-opensource)	embedded linux GUI tool
Application SW	PPPD	Network protocol
	Socket Program for the serial to ethernet	sensor Data ↔ communication program for IP network Interface

2.2.3 식물생장 센서시스템 전체 구성도

식물생장 센서 시스템 구성도는 그림 8과 같으며, 최적 성장환경 모니터링용 주요 융합센서 모듈과의 출력 연계를 위한 RS-232c to I2C 통신 변환모듈에서 세부개발 내용은 다음과 같다.

- 주요 성장센서의 출력을 고려한 I/O 연계 및 I/F변환을 위한 변환모듈개발
- Digital출력지원 센서모듈의 다중연계를 위한 I/F 변환모듈 개발
- RS-232c to I2C 변환을 위한 통신프로토콜 개발
- RS-232c to I2C 변환을 위한 데이터 변환 표준 설계

(1) RS-232c to I2C 변환모듈(그림 9) 구성

- 전원부
 - 구동전압 : DC 3.3V
 - 입력전압 : DC 5V, 12V (센서전압공급 및 RS-232c TTL level 변환용)
- 제어부
 - 제어 SW : RS-232c to I2C 통신을 위한 변환 프로토콜
- I/O
 - UART : RS-232c(TTL level 지원)
 - I2C : 일반 I/O포트를 이용한 I2C프로토콜 구현
- I/F 변환모듈

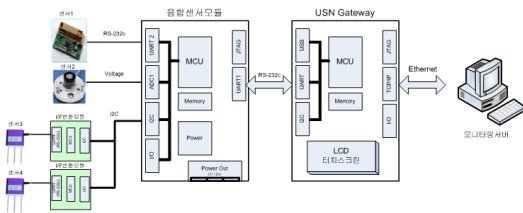


그림 8. 식물생장 센서시스템 구성도
Fig. 8. the sensor system layout for the plant factory.

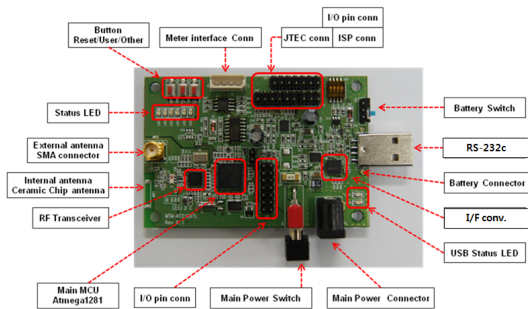


그림 9. 변환모듈의 구성도
Fig. 9. the layout of converter module.

(2) 식물생장 융합센서 시스템의 구현

- 외부 터치스크린 화면 : 수집 데이터 표시
- 이기종 융합센서 보드 : 식물생장 센서 제어 및 데이터 수집
- I/F 변환모듈 : RS-232c to I2C 통신 변환

2.3 LED 조명의 활용

폐쇄형 식물공장에서는 LED 와 같은 인공광원의 이용이 필수적이며, 특히 LED 광원은 초기 설치비용이 높으나 에너지 이용효율이 높아 앞으로의 전망이 밝다.

자연광 이용 작물재배 시설의 경우에도, 작물 재배기간 동안의 태양 광도의 고저는 생산성을 감소시키므로 인공광원에 의한 일사량의 보존은 생산성 및 품질을 향상시킬 수 있어 태양광이 낮을 시 적정 일사량의 보존을 위해 인공광원을 설치하고, 이를 최적 제어할 수 있는 기술이 필요하다.

식물공장에서 인공광원 활용 시 과도한 발열로 인해 방열판 및 수냉식 칠판을 사용하기도 하지만, LED 광원 자체의 발열을 이용해 공조기 가동시간을 감소시킬 수 있으며, 공조용 경유 사용에 비해 40%의 생산성 증가와 에너지 절약이 가능하여 생산자의 경영비를 20% 절감시킬 수 있다는 이점이 있다.

식물공장에서 재배하는 작물의 최적 성장용 LED 인공광원 개발을 위해서는 식물공장 넓이에 따른 LED 배열 크기와 소요 전력의 분석이 선행되어야 하며, 표 4와 같이 최적 파장의 배열방법과 LED 제어 기술의 개발이 요구된다.

표 4. 최적 성장용 LED 인공광원 개발을 위한 요소기술.
Table 4. the elemental technologies of LED light for plant factory.

Element Technology	Details
a. Analysis of the LED power specification	<ul style="list-style-type: none"> - 식물공장 넓이에 따른 LED 배열 판넬의 개수 결정 - 소요전력 산출 - 신재생에너지 전력 공급형 인버터 설계기술
b. Selection of the LED for optimal growth	<ul style="list-style-type: none"> - 최적 파장 사양 분석 - 성장용 LED 설계 - Red, Blue LED 적용 기술
c. LED Control technology for optimal growth	<ul style="list-style-type: none"> - Controller 설계 - 광량, 광질, 주파수 제어 기술 - 원격 제어 Interface 기술

2.3.1 LED 전력 사양 분석

1000 (L) X 200(W) X 39(H)mm 크기의 LED 판넬 1개가 갖는 전기적 기본 사양은 아래와 같다.

- ✓ 소비전력 : 100W (Power LED 3W 사용)
- ✓ 입력전압 : DC 12V/36V
- ✓ 제품규격 : 1000 (L) X 200(W) X 39(H)mm

2.3.2 최적 생장용 LED 의 선정

식물에 유효한 파장은 생리효과 파장(300~800nm) 과 광합성효과 파장(400~700nm)이며, 청색 계열과 적색 계열의 빛은 식물이 흡수하고 녹색계열은 반사시키는 특성이 있다.

- 식물 생장용 최적 파장 사양 분석 (LED 조명 30cm 아래 기준)
 - RED ; 660nm±10nm
엽록소 작용 최대 ; 655nm
발아작용과 잎 배포 화아형성 ; 660nm
 - BLUE ; 430nm±10nm
(광합성작용의 최대 ; 430nm)
 - WHITE ; 450nm±10nm
(엽록소 작용의 최대 ; 440nm)
- 식물 생장용 LED 규격
 - ✓ RED : 최대발광파장 660nm±20nm
 - ✓ BLUE : 최대발광파장 450nm±20nm
 - ✓ White : 최대발광파장 465nm±20nm
- 식물에 적합한 조명의 밝기 ; 광합성 광양자 속 밀도 (Photosynthetic Photon Flux Density, PPF)
 - ✓ 광포화점 lx(PPFD) 55,000lx(665) ~ 70,000lx(847)
 - ✓ 광보상점 lx(PPFD) 2,000lx(24) ~ 3,000lx(36)
- 고품질 과채류 생산을 위한 LED 파장 및 광량 분석 및 LED 조명 개발
 - ✓ 광합성 광양자 밀도(PPFD)에 의해 소비전력을 결정
- 소비전력 ; 100W (PPFD ; 150(약12,000lx) ~ 350(약27,000lx))
 - ✓ RED 166 PPF, BLUE 150 PPF, WHITE 283 PPF, RED+BLUE 216 PPF, RED+BLUE+WHITE 335 PPF
 - ✓ 완전 밀폐형 식물공장일 경우 310 PPF 가 최 적임.

2.3.3 생장용 LED 광원 제어 기술 개발

최적 생장용 LED 광원 제어부의 기본 구성은 그림 10과 같으며, 기본 사양은 아래와 같다.

- Control Chanel : 7 Ch/14 Ch (Red, Blue, White 각 1ch 및 혼합 4ch)
- 제어방식 : PWM Dimming Constant Current Control
- PC Interface : RS-485, RS-232
- 제어범위 : 광량, 광질, 주파수
- 광량 : RED, BLUE, White 각각 0 ~ 100%, 1% 단위 제어
- 광질 : RED : BLUE : White = 0 : 100 ~ 100:0, 1% 단위 제어
- 주파수 : 0.1 ~ 10kHz, 0.1kHz 단위 제어 제어 프로그램의 기능은 아래와 같다.
- ✓ 다채널 제어 가능
- 동일 공간에서 다양한 광환경 조건 제공
- LED 모듈 8개를 Slave controller 1개가 제어하도록 설계되어 재배 단계별, 공간별로 상이한 광환경 제공기능 (광량, 광질, 파장)
- Controller별로 각각의 자동 ID 부여로 독립적 제어 가능
- 광주기 설정 : 명기 / 암기 광주기 제어 가능
- ✓ 사용자 편의성을 고려한 윈도우 기반 GUI 프로그램 제공
- 제어 구간별 광주기 설정, 광량설정, 파장 설정, 주파수 설정
- ✓ 현장에서 광환경 제어요소 긴급 변경을 위한 Stand alone방식 적용
- PC 프로그램 상에서 제어뿐만 아니라 현장에 설치된 Master controller를 통한 Stand alone 방식의 제어방식 제공
- ✓ 정전류 구동방식을 통한 일정 광량 제공

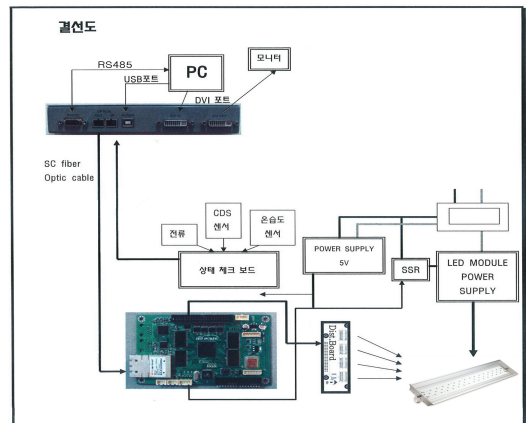


그림 10. LED 광원 제어 시스템 구성도
Fig. 10. the layout of LED control system.

2.4 신재생에너지 활용

식물공장 LED 전원 공급을 위한 태양광 전력공급 장치 개발하기 위해서는 다음과 같은 사양을 만족하여야 한다.

- ✓ LED 전원을 100% 태양광을 통해 공급
- ✓ 태양광 공급이 없어도 3일 동안 전원을 공급 할 수 있도록 충전 장치 구성
- ✓ 상용계통 연계형으로 개발

2.4.1 LED 전력 사양 분석

- 태양광 에너지 공급 장치 개발 (독립형) : 그림 11 참조

- ✓ 모듈 1개당 100W
- ✓ 태양광 모듈 3개 X 100W = 300W
- ✓ 축전지 3개 X 100AH = 300AH 사용으로 1일 10시간 사용 (부조일수 3일)
- ✓ 전력조절장치 : 과충전, 과방전 방지 기능



그림 11. 독립형 태양광발전 시스템.
Fig. 11. the solar energy system of stand-alone type.

III. 테스트 베드의 구축과 운용

3.1 에너지 절감형 테스트 베드 구축

모니터링용 SW 기술과 LED 제어 기술, 태양광 전원장치 기술, LED 방열용 공조장치 기술, 센서융합 기술들을 일괄적으로 통합하여 컨테이너형 소형 테스트베드를 구축하고, 시험 운용을 수행하였다. 여기서 얻어진 결과와 문제점을 통해 차세대 식물공장의 최적의 표준화 가능성을 타진하였다.

컨테이너형 식물공장(그림 12)에 본 개발기술을 적용하고 그 안정성 및 제품의 신뢰성 검증을 위해 LED 품질 신뢰성 시험은 한국광기술원에서 평가하였으며, 성장환경 측정 센서노드의 신뢰성 파라미터 분석, 신재생에너지 전력공급 신뢰성 분석을 수행하였다.

- 각종 식물성장 데이터 측정용 센서 적용
 - 식물성장 관리 센서 : EC, 광합성센서, 배지온도 센서, 배지습도센서



그림 12. 식물공장 컨테이너 테스트베드.
Fig. 12. the test-bed in the container for plant factory.



- 식물성장 환경 센서 : 온도센서, 습도센서, CO2 센서, 이미지센서
- 식물성장 양액 센서 : EC, Ph, 온도센서
- 각종 센서시스템 구조물 구축
 - 식물성장용 수조 구조물 : 배지재배 Type, 수경재배 Type
 - 양액 공급용 배관 시스템 구축
 - LED Light 높이조절 장치
 - LED Light 일체형 식물성장 보조 브라켓 등

3.2 테스트베드의 운용

식물성장 테스트베드의 운영과 평가를 위해 파프리카와 상추의 재배를 수행하였으며, 테스트베드 운영을 통한 성장환경 Data 수집하고 분석하였으며 그 일례로써 분석 결과의 관찰일지를 표 5에 보였다.

표 5. 테스트베드 운영을 통한 성장환경 Data 수집 및 분석 관찰일지 예.
Table 5. an example of the data log for plant factory operation.

○ Plant Growth Test-bed Operation and Plant Growth Data collection		
▪ operation period :		
Items of plant	Issues	
Lettuce	8월 1일(정식-모종심기)	
	8월 2일~15일(생장기)	1차 수확 후 녹조발생, 갯빛곰팡이병 발생
	8월 2일~9월 8일(수확기)	평균 12일 간격으로 수확
Paprika	8월 1일(정식-모종심기)	모종 정식시 암면에 많은 뿌리로 인한 영김 발생
	8월 2일~9월 8일(생장기)	뿌리 발육저하로 흰가루병 발생

▪ Issues (Lettuce)	
16 th August (Lettuce - 1 st Harvest)	
Issues	1. 모종을 정식한지 15일 만에 1차 수확 2. LED광원에 직접 노출된 양액부위 녹조발생
27 th August (Lettuce - 2 nd Harvest)	
Issues	1차 수확 후 약 11일 경과 후 2차 수확

IV. 결 론

식물공장은 현재까지는 초기투자비용이 높다는 문제점이 있지만 친환경적이고 안전성이 보장되는 미래의 먹거리 창출을 위한 대안으로 인식되고 있기 때문에 기술 선점을 위한 개발 경쟁이 높아지고 있다.

따라서 친환경 Green IT 기술과 융합된 식물공장 관련 기술 중 가장 핵심이라고 할 수 있는 생장환경 모니터링 시스템, 센서들의 통합모듈화, 인공광원 시스템, 그리고 최근 이슈화되고 있는 온실가스 저감을 위한 신재생에너지 활용 등과 같은 요소기술의 개발과 표준 설계방안을 마련할 필요가 있다.

본 연구에서는 이 요소기술들의 설계 개념을 정립하고 통합시스템으로 구현하는 과정을 정립하고 연구하였다. 지금은 컨테이너를 이용한 테스트베드 수준의 실험을 수행하였지만 여기서 얻어진 하드웨어 및 소프트웨어의 설계기술과 운영 경험을 바탕으로 중대형 식물공장 운영과 관리의 표준 설계 과정으로 적용가능할 수 있을 것으로 판단된다.

더불어 이 시스템의 상용화를 위해서는 생산효율 향상 및 노동비용 절감을 위한 자동화 개념과 탈석유 및 에너지 자립도 향상, 저탄소 온실가스 저감을 위한 친환경농업 개념의 도입을 통해 시장 경쟁과 제품 생산에 있어서 기술 경쟁력과 고부가가치의 농산물 생산에 따른 농업 경쟁력의 향상이 가능할 것이다.

References

[1] K. Kim, et al., "Optimization of growth environment in the enclosed plant production

system using photosynthesis efficiency model," *J. Bio-Environ. Control*, vol. 13, no. 4, pp. 209-216, 2004.

[2] S. S. Kang, et al., "USN based agricultural IT convergence technology trends," *ETRI ICT Trend Anal.*, vol. 26, no. 6, pp. 97-107, Dec. 2011.

[3] S. Y. Joo, et al., "A middleware with efficient memory management technique and advanced structure for M2M network," *J. KIIT*, vol. 12, no. 6, pp. 101-108, Jun. 2014.

[4] Q. Zhang, et al., "A wireless solution for greenhouse monitoring and control system based on ZigBee technology," *J. 1584 Zhejiang Univ. Sci. A*, vol. 8, no. 10, pp. 1584-1587, 2007.

[5] D. H. Ryu, "A development of urban Farm management system based on USN" *J. KIECS*, vol. 8, no. 12, pp. 1917-1922, 2013.

[6] M. Wada, K. Shimazaki, and M. Iino, *Light Sensing in Plants*, Springer, 2005.

[7] J. W. Heo, et al., "Influence of LED on the growth of annual plants," *J. Plant Biology*, vol. 49, no. 4, pp. 286-290, Aug. 2006.

[8] G. D. Massa, et al., "Innovations in led lighting for reduced-esm crop production in space," *NLSI Lunar Sci. Conf.*, 2008.

[9] E. J. Lee, et al., "Development of agriculture environment monitoring system using integrated sensor module," *IJOC*, vol. 10, no. 2, pp. 63-71, 2010.

[10] K. K. Seo, et al., "Design of adaptive neuro-fuzzy inference system based automatic control system for integrated environment management of ubiquitous plant factory," *J. Bio-Environ. Control*, vol. 20, no. 3, pp. 169-175, 2011.

[11] K. J. Jeong, et al., "A design and implementation of mobile application SREMS," *J. KICS*, vol. 7, no. 5, pp. 1173- 1180, 2012.

[12] K. J. Jeong and W.-J. Kim, "The implementation of smart raising environment management system based on sensor network and 3G telecommuni- cation," *J. The Korea Inst. Electronic Commun. Sci.*, vol. 6, no. 4,

pp. 595-601, 2011.

- [13] J. Y. Lee, et al., "A study on the necessity and construction plan of the internet of things platform for smart agriculture," *J. Korea Multimedia Soc.*, vol. 17, no. 11, pp. 1313-1324, Nov. 2014.
- [14] M. H. Kim, et al., "Agricultural products traceability management system based on RFID/USN," *J. KIISE : Computing Practices and Lett.*, vol. 15, no. 5, pp. 331-342, 2009.
- [15] N. H. Yoo, et al., "Design and implementation of the management system of cultivation and tracking for agricultural products using USN," *J. KIISE : Computing Practices and Lett.*, vol. 15, no. 9, pp. 661-674, 2009.
- [16] KRIBB (한국생명공학연구원), "Domestic commercialization prospects of Plant Factory (식물공장의 국내 사업화 전망)," Agri-Food R & D technology planning system establishment, Issue Analysis Report vol. 3 (농식품 R&D 기술기획 시스템 구축, 이슈분석보고서 3호), 2011.

임 계 재 (Gye-jae Lim)



1983년 2월: 동국대학교 전자공학과 졸업
 1988년 8월: 동국대학교 전자공학과 석사
 1993년 2월: 동국대학교 전자공학과 박사
 1994년 2월~현재: 가톨릭관동대학교 에너지자원공학과 교수

<관심분야> 정보통신, 전자파공학