

# 기후변화에 따른 태양광병용형 식물공장의 온·습도 및 조도 분포 해석

권숙연\*, 임재현\*

\*공주대학교 컴퓨터공학부

e-mail:{sookyoun, defacto}@kongju.ac.kr

## The Distribution Interpretation of Temperature, Humidity and PPFD in Hybrid Plant Factory According to Climate Change

Sook-Youn Kwon\*, Jae-Hyun Lim\*

\*Dept of Computer Engineering, Kongju National University

### 요 약

본 논문은 ZigBee 기반의 통합센서 네트워크 구축 및 모니터링 시스템 구현을 통해 계절과 시각, 그리고 천기상태에 따라 변화하는 태양광의 광합성유효광량자속밀도를 태양광병용형 식물공장 내부의 각 영역별로 측정 및 분석하고자 한다. 통합센서를 통해 수집된 정보는 식물의 생육에 필요한 적정 태양광 에너지가 유입되는 시간대와 보광을 필요로 하는 시간대 및 그 양을 파악하는데 활용되며, 이를 통해 조명 및 냉난방 기기를 지능적으로 제어함으로써 전체 에너지 소비를 절감하고자 한다.

### 1. 서론

최근 기후변화로 인한 기상이변은 노지재배의 농업 생산성을 약화시켜 급격한 농산물 가격 변동 등의 리스크를 발생시키고 있다. 2010년 위험기상으로 인한 국내 농업의 피해 양상으로는 일조량 부족 및 이상저온이 대표적이며, 이로 인한 작물의 생육부진 발생으로 전체 시설면적 51천 ha 중 약 28%에 달하는 14천 ha에서 상당한 피해를 입은 바 있다[3]. 이러한 기상재해의 빈도와 강도는 점차 확대되며 일상화되고 있고 특히 국내 기후변화는 전국 강수량 및 일조시간 추이를 살펴볼 때, 1970년대 일조시간(1,548.9h) 대비 2000년대(1,388.1h)으로 약 10.4% 감소하였으며, 강수량은 1,004.3mm에서 1,124.2mm로 79.9mm로 약 11.9% 증가 및 그 진행속도가 매우 빠른 것으로 분석되고 있다. 따라서, 이상고온 및 일

조부족에 대응하기 위해서는 지열 등을 이용한 냉난방 에너지 절감 기술, 인공조명장치를 이용한 보광 재배기술 등 농작물 피해를 최소화하기 위한 다양한 방안이 모색되어야 할 것이다[1][3]. 식물공장은 이러한 기상이변에 따른 농업환경의 악화를 극복하기 위한 일환으로 현재 선진국을 중심으로 활발하게 진행 중이며, 그 형태별 특징을 살펴볼 때 완전제어형 식물공장의 경우에는 설비비용 및 전력비용이 높아 채산성을 맞추기 어려운 문제점을 가진 반면 외부환경의 영향으로 환경제어 및 생육관리는 다소 어렵거나 식물의 광합성에 필요한 광원을 저렴하게 얻을 수 있는 장점을 가진 태양광병용형 식물공장이 경제적이다[2].

현재까지 자동화된 일반 온실의 작물 성장 환경에 USN 등의 u-IT 기술을 적용하여 기후변화로 인한 농업피해를 사전에 예방하고 쾌적한 성장 환경을 지속적으로 제공함으로써 작물의 생산 효율을 증대시키기 위한 시도가 계속되고 있으나, 태양광병용형 식물공장 시스템에 적용한 사례는 거의 전무한 실정이다. 태양광병용형 식물공장은 자동화된 일반 온실과 비교해 볼 때 재배 방식 및 제어 요소 등이 다르며, 연중 고품질의 신선채소를 계획적이고 과학적으로

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT/SW 창의연구과정의 연구결과로 수행되었음” (NIPA-2011-(C1820-1101-0010))

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임(2011-0022977)

로 생산할 수 있다는 점에서 차별성을 가진다. 그러나, 1년 내내 균일한 품질의 작물을 생산하기 위해서는 환경 요소와 연관된 시설 내 공조 및 조명 장치 등을 외부 기후 변화에 따라 지능적으로 제어하여 식물의 생육에 필요한 빛과 온도 등을 상황에 적합하게 공급함으로써 식물 생육을 최대화함과 동시에 불필요한 에너지 손실을 최소화해야 한다.

이에 본 논문에서는 계절과 시각, 그리고 천기 상태에 따라 변화하는 식물공장 내부의 온도, 습도, 조도 및 광합성유효광량자속밀도(PPFD)를 측정하기 위해 전력 사용량이 비교적 낮은 ZigBee 통신 기반의 통합센서를 설계 및 구현한 후 여러 지점에 설치된 통합센서들을 통해 일정 기간 동안 데이터를 수집하고 각 데이터 간 상관관계를 기후변화에 따라 시간대별, 일별 비교 분석하고자 한다. 분석된 정보는 작물의 종류에 따라 필요로 하는 태양광 에너지 유입 시간대 및 보광이 필요한 시간대와 그 양을 파악하는 데에 유용하게 활용되며, 향후 에너지 소비 효율을 극대화하기 위한 지능형 인공광 제어시스템의 중요한 입력 요소로 사용될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 관련 연구로서 작물의 광 특성 및 광 요구도에 대해 설명하고, 3장은 태양광병용형 식물공장 내부에 설치된 통합센서 환경에 대해 기술한다. 4장은 수집된 환경 데이터를 기후변화에 따라 시간대별, 일별로 비교 분석한 결과를 나타내며, 5장은 향후 연구 방향 및 기대 효과에 대해 설명하고자 한다.

## 2. 관련연구

### 2.1 식물의 광합성에 유효한 광 특성

태양광은 계절별, 일별, 시간대별로 기후변화에 따라 끊임없이 변하며 자외선, 가시광선, 적외선 등의 다양한 파장 대역을 포함하고 있다. 이러한 태양광의 파장 대역 중 인간이 가장 밝게 느끼는 파장 대역은 녹색 영역으로 낮에는 555nm, 밤에는 500nm 영역인 반면 식물의 광합성에 유효한 파장 대역은 청색광 영역인 450nm와 적색광 영역인 660nm로 알려져 있다(高辻正基 등, 2009). 일반적으로 인간이 시각적으로 느끼는 빛의 밝기는 조도( $lx$ ) 또는 방사에너지( $W \cdot m^{-2}$ ) 등의 단위를 사용하지만, 식물이 광합성을 하는데 필요한 빛의 강도는 광합성광량자속밀도(Photosynthetic photon flux density)라 하고  $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  로 나타낸다[2]. 즉, 식물은 빛에 포함된

광양자 하나를 받아서 하나의 광합성을 하며 마이크로 퍼 스퀘어미터 퍼 세컨드란 1제곱미터 면적에 1초동안 내리찍는 광양자의 양을 의미한다[2]. 여러 식물공장 관련 기관에서 발행한 보고 자료를 살펴보면 일반적으로 작물에 필요한 광요구도는 조도 개념으로 조사되어 있으며 아래의 표 1과 같이 단위 간 변환이 가능하지만 대략적인 수치로 볼 수 있다.

[표 1] 광원에 대한  $lx$ 와  $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 의 환산계수

광원	$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} / W \cdot m^{-2}$	$lx / \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	$mW \cdot m^{-2} / lx$
	400~700nm	400~700nm	400~700nm
태양 등 일광	4.57	54	4.05
청색 공간	4.24	52	4.53
고압나트륨	4.98	82	2.45
메탈할라이드	4.59	71	3.06
백색형광	4.59	74	2.94
백열전구	4.00	50	4.00
적색LED	5.52	10	-
청색LED	-	12	-

출처 : Thimijan and Heins, 1983

### 2.2 식물의 종류별 광 요구도

식물은 그 종류에 따라 광합성에 필요한 광 요구도가 각기 다르며, 상추 등의 엽채류의 경우에는 광포화점이 약 25,000lx, 광포화점이 1,500lx로 비교적 많은 광량을 필요로 하지 않으며, 토마토나 수박과 같은 과채류의 경우에는 광포화점이 약 70,000lx, 광보상점이 3,000lx로 가장 많은 광량을 필요로 하는 것으로 알려져 있다. 장미 등의 화훼류는 광포화점과 광보상점이 각각 50,000lx, 3,000lx이며 난 종류의 경우에는 각각 10,000lx, 300lx로 조사되었다[4].

[표 2] 식물별 광포화점과 광보상점(형광램프 기준)

재배 작물	광포화점		광보상점	
	조도	광량자속밀도	조도	광량자속밀도
토마토	70,000	847	3,000	36
수박	70,000	847	3,000	36
상추	25,000	302	1,500	18
파프리카	40,000	484	1,500	18
오이	55,000	665	2,000	24
장미	50,000	600	3,000	36
난 종류	10,000	121	300	3.6

기후변화로 인한 강수량의 꾸준한 증가로 일조시간부족 문제를 해결하기 위해 다양한 인공조명장치를 이용한 보광재배기술 적용 시 표 2의 식물의 종류에 따른 광포화점과 광보상점은 최대 광량 임계치 및 최소 광량 임계치로 태양광의 유입량과 함께 시스템에 적용될 수 있다.

### 3. 실험 환경 구축

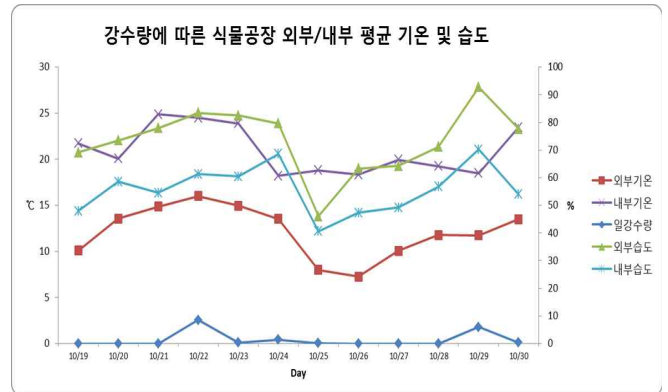
최근 가까운 거리에서 통신회선을 설치할 필요 없이 각종 정보기기의 이동성을 보장하고 있는 무선 통신 기술들 중 ZigBee는 저가격과 사용의 용이성, 저전력 구현이 가능하여 많은 센서들을 하나의 네트워크로 구성할 수 있는 센서 네트워크로서 농업 분야에 적용하기에 적합한 통신 기술이다[5]. 이에 본 실험에서는 테스트 베드 구축을 위해 250Kbps를 지원하는 ZigBee 모듈을 기반으로 식물공장의 환경요소를 측정하기에 적합한 온도, 습도, 조도, PPFD 및 일사량 센서를 통합 설계 및 제작하였다. PPFD 및 일사량센서는 각각 4개와 2개를 기 제작된 온·습도 및 조도 센서가 통합된 센서에 추가적으로 장착하여 충남 예산군 응봉면에 위치한 국내 온실 제작 분야의 1위 기업인 (주)그린플러스에 위치한 태양광병용형 온실 내부의 14개 지점에 그림 1과 같이 각각 설치하였다. 식물공장 내부의 각 14개 지점에 설치된 센서들은 일정시간마다 USN Gateway의 요청에 의해 온도, 습도, 조도, PPFD 및 일사량 값을 측정하여 전송하고, 전송된 데이터는 서버의 모니터링 시스템을 통해 적합한 데이터 포맷으로 변환하여 화면 출력 및 데이터베이스에 저장된다.

### 4. 환경정보 분석 결과

무선 센서 네트워크 구축 및 모니터링 시스템을 구현한 후 12일 동안의(2011년 10월 19일~2011년 10월 30일) 강수량에 따라 변화하는 식물공장 외부 및 내부 기온과 습도를 그림 2과 같이 분석하였다.

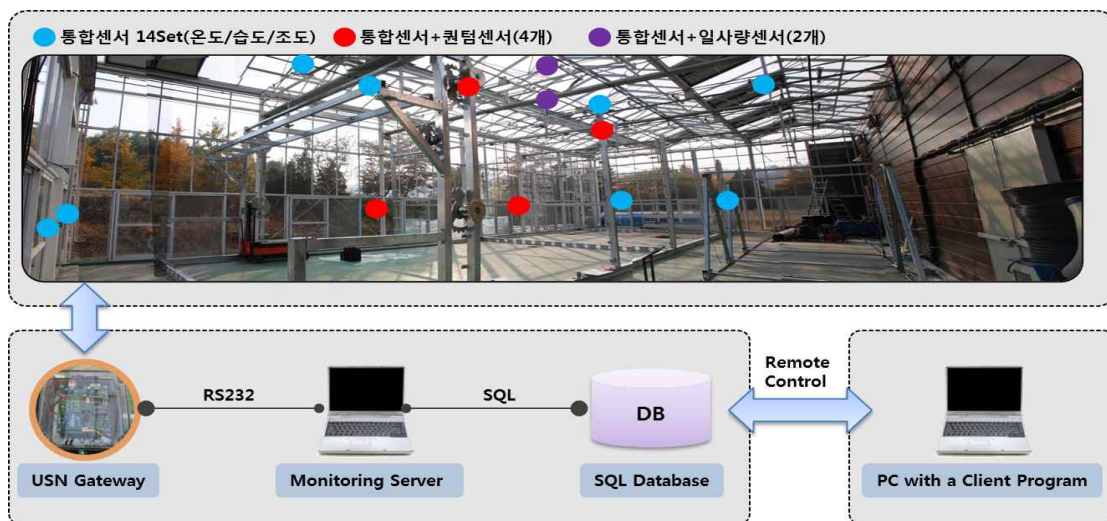
강수량이 많은 10월 22일과 10월 29일의 경우, 식물공장 외부 및 내부의 일평균 기온과 습도 또한 강수량이 낮은 날보다 높은 분포를 보이고 있다.

그림 3은 12일 동안 수집된 데이터 중 강수량의 영향으로 가장 적은 일조 시간을 보였던 10월 29일과 일조시간대가 비교적 넓은 10월 19일의 PPFD 분포를 각각 비교 및 분석한 결과이다. 상추와 같은 엽채류의 경우 표 2에서 언급한 것처럼 광포화점이 25,000lx(250  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 광보상점이 1,500lx(18  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )이므로, 엽채류의 생육에 적합한 광량 공급을 위해서는 비오는 날의 경우, 11시를 제외한 전체 태양광 유입 시간대에 인공광을 이용하여 보광채배를 해야 하는 반면, 일조 시간이 많은 맑은 날의 경우에는 오전 8시경부터 오후 3시 이전까지 광포화 이상의 태양광이 유입되므로 태양광 차단 및 온도 상승을 감소시키기 위한 공조 제어 기술 등이 필요할 것이다. 본 실험을 통해 태양광병용형 식물공장의 각 영역별 온도, 습도, 조도, PPFD 및 일사량 분



[그림 2] 강수량에 따른 식물공장 외부/내부 평균 기온 및 습도

ol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)이므로, 엽채류의 생육에 적합한 광량 공급을 위해서는 비오는 날의 경우, 11시를 제외한 전체 태양광 유입 시간대에 인공광을 이용하여 보광채배를 해야 하는 반면, 일조 시간이 많은 맑은 날의 경우에는 오전 8시경부터 오후 3시 이전까지 광포화 이상의 태양광이 유입되므로 태양광 차단 및 온도 상승을 감소시키기 위한 공조 제어 기술 등이 필요할 것이다. 본 실험을 통해 태양광병용형 식물공장의 각 영역별 온도, 습도, 조도, PPFD 및 일사량 분



[그림 1] 태양광병용형 식물공장 내부의 시스템 구성도

포를 연중 시각별, 일별, 계절별로 외부 기상 에 따라 수집 및 분석할 수 있으며, 분석된 정보는 대상 작물의 종류에 따른 최적 환경 공급을 위해 연관된 각 구성 장치를 지능적으로 제어하기 위한 입력 요소로 사용될 수 있다. 이러한 지능형 식물공장 통합 제어 시스템은 균일한 품질의 식물을 계획적으로 생산함과 동시에 불필요한 에너지 손실을 최소화함으로써 식물공장의 사업화 방안으로써 긍정적 효과를 보일 것으로 사료된다.

## 5. 향후 연구 방향

본 연구는 ZigBee 기반의 통합센서 네트워크 구축 및 모니터링 시스템 구현을 통해 강수량 변화에 따른 태양광병용형 식물공장 내부의 온도, 습도, 조도, PPFD 분포를 비교 및 분석해 보았다. 분석된 정보를 통해 강수량과 온도, 습도, 조도는 밀접하게 연관되어 있으며, 각 환경요소와 연관된 각 구성 장치의 지능적인 제어는 식물공장의 전체 생산 효율을 증대시키고 에너지 소비를 절감할 수 있다는 가능성을 확인하였다. 향후에는 누적된 각 환경 정보 간의 상관관계를 시간대별, 일별, 계절별로 분석하여 보광을 위해 필요한 인공조명장치 및 공조장치를 지능적으로 제어하기 위한 각 요소기술에 대해 연구해야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] 유병규 외 4인, “세계 경제 패러다임 변화와 한국 경제”, 현대경제연구소, pp. 1-19, 5월, 2010.
- [2] 김재훈, “식물공장 시스템의 동향과 발전방향”, J. Plant Biotechnol, 제37호, pp. 442-455, 1월, 2010.
- [3] 이덕배, 심교문, “기후변화가 농업에 미치는 영향과 대책”, 한국농촌경제연구원, pp. 320-344, 2011.
- [4] 권숙연, 임재현 “식물의 생육단계별 적정 광량 제어를 통한 식물공장의 에너지 효율 향상”, 한국인터넷정보학회 하계학술발표대회, 제12권, 제1호, pp. 85-86, 6월, 2011.
- [5] Zhou Yiming 외 4인, “A Design of Greenhouse Monitoring & Control System Based on ZigBee Wireless Sensor Network”, International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom 2007), pp. 2563-2567, 9월, 2007.