

식물공장을 위한 인공광 회전형 스마트 조명 제어시스템 개발

이원섭¹, 김성관^{2*}

¹공주대학교 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

Development of the Rotational Smart Lighting Control System Using Artificial Light for Plant Factory

Won-Sub Lee¹ and Sung-Gaun Kim^{2*}

¹Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

²Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

요 약 회전형 스마트 조명 제어시스템은 작물 재식판에 위치한 작물들에게 필요한 광을 회전하며 공급하는 시스템이다. 기존 식물공장은 무수히 많이 설치되는 LED와 형광등과 같은 조명장치에 따라 고가의 초기 조명 시스템 설치 비용이 발생 된다. 이에 본 논문은 비교적 적은 양으로 설치된 조명장치를 회전시키는 시스템을 개발하였으며, 식물이 성장하는데 필요한 광량과 광속, 광양자속 밀도(PPFD)를 계산하였다. 조명 시뮬레이션 프로그램 Relux와 시제품을 이용한 실험을 통하여 조명 모듈의 각도 변화와 블레이드의 회전속도 변화에 따른 측정 영역에서의 광량의 차이를 비교하고 분석하였다.

Abstract Rotational smart lighting control system provides artificial light to plants on planting board by rotational lighting system. As the lighting system of existing plant factory has high cost problem due to the installation for many lighting equipments, the lighting system was developed to rotate less number of lighting equipments to reduce cost. In this paper, the illuminance, luminous flux and photosynthetic photon flux density(PPFD) that plants need to grow were calculated. And the light intensity at each measured location considering the rotational speed of blade were analyzed by the simulation and the experiment.

Key Words : Plant Factory, Lighting Control System, Rotational Lighting System, Lighting Equipment

1. 서론

식물공장이란 ‘농작물에 대하여 통제된 일정한 시설 내에서 빛, 온·습도, 이산화탄소 농도 및 배양액 등의 환경 조건을 인공적으로 제어하여 계절이나 장소에 관계없이 자동적으로 연속 생산하는 시스템’을 말한다. 한마디로 온도와 습도를 제어하고 인공광원으로 농작물을 재배하는 시설농업으로써, 날씨나 계절에 관계없이 농작물을 연중 안정적으로 계획 생산할 수 있다[1]. 또한 노지에서 재배가 어려운 기능성 농작물을 재배함으로써 고부가가

치 농업을 실현할 수 있고, 무농약, 무공해에 따른 청정작물의 생산이 가능하며, 식량작물의 연중 재배를 통해 생산성을 비약적으로 높임으로써 식량기지로 활용할 수 있다는 점에서 식물공장 시스템은 미래 농업의 대안이 될 수 있다[2].

회전형 스마트 조명 제어시스템은 식물공장의 건물 중심축을 기준으로 조명부 블레이드가 작물의 성장에 따라 높이 조절이 가능하고, 조도센서에 의해 측정된 조도 값에 따라 회전하며, 작물 재식판에 위치한 작물들에게 필요한 광을 조사하는 시스템을 말한다. 이 시스템의 개념

본 논문은 2011년 교육과학기술부의 지역거점연구단 육성사업(에너지자립형 그린빌리지 핵심기술 사업단) 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Sung-Gaun Kim

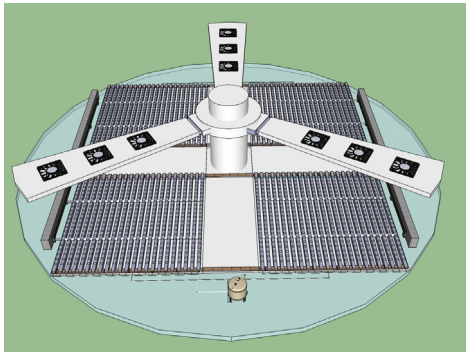
Tel: +82-41-521-9253 email: kimsg@kongju.ac.kr

접수일 12년 02월 06일

수정일 (1차 12년 04월 05일, 2차 12년 04월 11일)

게재확정일 12년 04월 12일

도로써 그림 1에 표현하였다. 기존 식물공장의 조명 시스템은 작물재식판 위에 무수히 많은 LED 또는 형광등을 설치함에 따라 발생하는 초기 설치비용의 문제점이 있다. 본 논문에서는 이와 같은 설치비용의 문제점을 해결하기 위해 개발된 회전형 스마트 조명 제어시스템을 시물레이션과 실험을 통하여 조명 모듈의 각도 변화와 블레이드의 회전속도 변화에 따른 측정 영역에서의 광량의 차이를 비교, 분석하였다.



[그림 1] 회전형 스마트 조명 제어시스템 개념도
[Fig. 1] Concept drawing of rotational smart lighting control system

제작된 시제품을 이용하여 일정한 높이에 따른 LED 출력에 대하여 블레이드의 rpm을 변수로 설정하여 실험을 진행 하였으며, 조명 시물레이션 프로그램 Relux를 사용하여 프로그램 상에서 블레이드라고 가정한 조명 모듈 사이의 각도를 변수로 설정하여 시물레이션을 진행하였다. 또한, 시물레이션에서 조명 모듈 사이의 각도를 90°에서 30°, 15°, 10°로 줄여가며 진행한 것은 중앙을 기준으로 조명을 회전시키는 동적인 시물레이션이 불가능하기 때문에 회전을 모사하기 위하여 조명 모듈을 5°씩 이동시키는 방법을 택하였다.

2. 모델 설계 및 시물레이션 과정

2.1 모델 설계

표 1은 형광램프를 기준으로 각종 식물의 광 포화점과 광 보상점을 나열한 표로써 재배작물에 따른 광 포화점과 광 보상점의 조도 값과 광양자속 밀도(PPFD) 값을 보여준다.

광 포화점이란 광합성 속도가 더 이상 증가하지 않을 때의 빛의 세기를 말하며, 광합성 속도는 빛의 세기에 비례하지만 광포화점에 이르면 속도가 증가하지 않는다[3].

광 보상점이란 식물에 의한 이산화탄소의 흡수량과 방출량이 같아져서 식물체가 외부 공기 중에서 실질적으로 흡수하는 이산화탄소의 양이 0이 되는 광의 강도이다. 따라서 식물에게 조사되는 광량은 광 보상점보다 같거나 높아야 하며, 광 포화점보다 같거나 낮아야한다. 광양자속 밀도(Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD)란 단위시간과 단위면적당 입사된 광양자수를 의미하며, 식물은 빛에 포함된 광양자 하나를 받아들여 하나의 광합성을 하기 때문에 이때의 빛의 강도를 나타내는 방법이다 [4]. 표 1을 참고하여 예를 들면 양상추를 재배 할 경우 필요한 광량은 조도 값으로 나타내었을 때 최대 25,000lx, 최소 1,500lx가 필요하며, 광양자속 밀도(PPFD)로 나타내었을 때 최대 302 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, 최소 18 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 가 필요하다는 것을 알 수 있다.

[표 1] 각종 식물의 광 포화점과 광 보상점 (형광 램프 기준)

[Table 1] Light saturation and compensation points of different plants (based on fluorescent lamps)

재배작물	광 포화점 lx (PPFD)	광 보상점 lx (PPFD)
토마토, 수박	70,000 (847)	3,000 (36)
오이	55,000 (665)	2,000 (24)
완두콩	40,000 (484)	2,000 (24)
양상추, 피망	25,000 (302)	1,500 (18)
포도	40,000 (484)	400 (5)
세인트폴리어	5,000 (60)	500 (6)
인삼	12,000 (145)	500 (6)

$$1lx = 1lm/m^2 \quad (1)$$

[표 2] 광원에 따른 $1 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 당 lx와의 관계

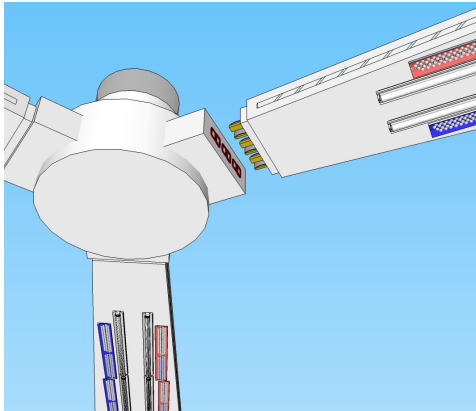
[Table 2] Relations between $1 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ and lx according to light source

광원	조도 (lx)
태양광	54
백열등	50
형광등	74
적색 LED (660nm)	9.94
청색 LED (450nm)	11.9
백색 LED (Warm white)	68.2

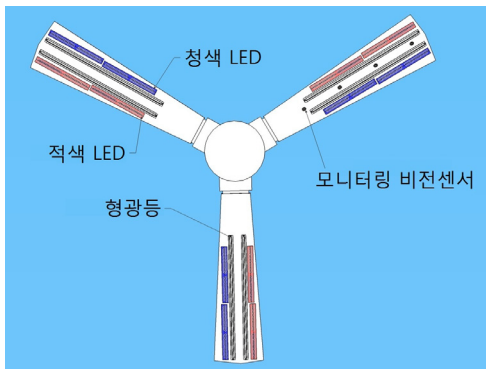
식 (1)은 조도 단위(lx)와 광속 단위(lm)의 관계를 나타내는 식으로써, 1제곱미터(m^2)의 면적당 1루멘(lm)의 세기를 내는 광원이 있다면 그것을 1럭스(lx)라고 한다.

표 2는 광원에 따른 $1\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 당 lx와의 관계를 나타낸다. 표 2를 참고하면 광원이 형광등일 때의 경우에 광양자속 밀도 $1\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 당 조도 값이 74lx로 환산되는 것을 알 수 있다. 예를 들어 양상추를 재배할 때 공급할 광양자속 밀도(PPFD)의 값을 $200\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 로 설정한다면 그때 환산되는 조도의 값은 14800lx로 계산된다. 이때 광원이 작물의 0.2m 위에서 조사된다고 가정 한다면 그때의 면적은 0.04m^2 이 되므로 이때 필요한 광속은 식 (1)을 이용하여 592lm의 값을 얻을 수 있다.[5]

LED의 경우 S업체의 P42180(적색) LED 모델을 예로 선정하였으며, 이 제품의 경우 광속이 48lm일 때 광양자속 밀도(PPFD)의 값이 $5\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 가 측정된다. 따라서 작물에게 0.2m의 높이에서 $200\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 로 광을 조사한다고 하였을 때, 40개의 LED가 필요하다는 것을 유추할 수 있다.



[그림 2] 회전형 스마트 조명 제어시스템의 개념도
[Fig. 2] Concept drawing of rotational smart lighting control system

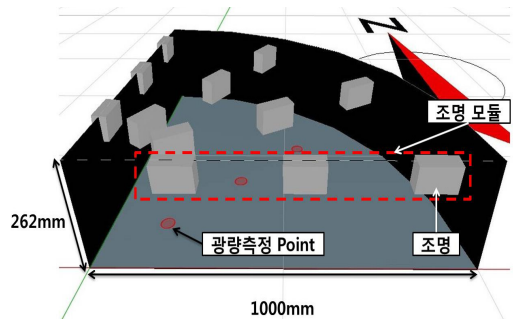


[그림 3] 회전형 스마트 조명 제어시스템의 구성
[Fig. 3] Configuration of rotational smart lighting control system

본 연구에서는 중앙의 회전축을 중심으로 LED와 형광등이 설치된 커넥트 형식의 조명장치 블레이드로 구성 되어있으며, 조명장치 블레이드에는 식물의 광합성에 효율적인 적색 LED와 청색 LED, 형광등의 혼합으로 구성되어 있는 조명 시스템을 개념 설계하였으며 이것을 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

2.2 시뮬레이션 과정

조명 시뮬레이션 프로그램인 Relux를 이용하여 블레이드라고 가정한 조명 모듈에 일정한 개수의 LED를 가진 조명을 사용하였을 때와 각기 다른 개수의 LED를 가진 조명을 사용하였을 때, 조명 모듈 간의 각도(90° , 30° , 15° , 10°)가 작아짐에 따라 블레이드의 회전 속도가 빠르다는 것으로 가정한 후 시뮬레이션을 실행하였다.



[그림 4] 시뮬레이션 영역 설정
[Fig. 4] Setting of simulation area

[표 3] 조명 파라미터 설정
[Table 3] Setting of light parameter

구분	치수 (mm)
Length	100
Width	40
Height	62

Relux 프로그램 상에서 시뮬레이션 영역과 조명의 파라미터를 그림 4와 표 3과 같이 설정하였다. 시뮬레이션 영역의 상단으로부터 높이가 62mm인 조명이 위치하고 있으며, 광량측정 Point와 조명사이의 거리가 200mm가 되도록 설정하였다. 조명 모듈은 3개의 조명을 하나의 블레이드로 가정하였으며, 3개의 광량 측정 포인트는 IN, CENTER, OUT의 순서로 Point 1, 2, 3으로 지름이 4mm 이고 좌표가(159, 159), (354, 354), (548, 548)인 위치로 설정하였다. 조명모듈 간의 각도가 10° 와 15° , 30° 일 때 조명 당 Lamp Power가 2W이고, 광속이 100lm인 LED

5개의 구성으로 설정하여 각도변화에 따른 시뮬레이션을 실행하고, 조명모듈 간의 각도가 90°이면서 조명의 LED 개수를 각각 다르게 설정(IN, CENTER, OUT의 순서로 2개, 4개, 6개)하여 영역별로 조명의 광도가 다를 때의 시뮬레이션을 실행하였다.

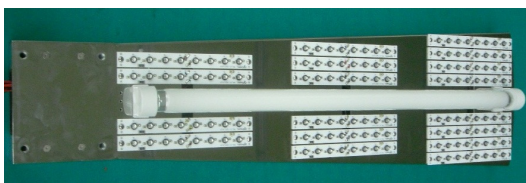
2.3 실험 과정

시제품으로 제작한 회전형 스마트 조명 제어시스템을 이용하여 실험을 진행하였으며, 시뮬레이션에서 얻은 결과와 실험에서 얻은 결과를 비교, 분석하기 위하여 시뮬레이션 상에서 조명들의 각도가 감소하는 것을 시제품을 이용한 실험에서는 rpm이 증가하는 것으로 가정하고 실험을 진행하였다.

회전형 스마트 조명 제어시스템은 블레이드의 회전속도와 높이, LED의 광량 등이 제어 가능하다. 또한, 조명시스템은 총 3개의 블레이드로 이루어져있으며, 블레이드의 광원은 형광등과 LED를 혼합하여 제작하였고, 각 블레이드 간의 각도는 120°로 구성하고, LED는 식물 생장에 적합한 적색과 청색을 3:1의 비율로 설치하였다. 이것을 그림 5와 그림 6에 나타내었다.



[그림 5] 회전형 스마트 조명 제어시스템 시제품
[Fig. 5] Prototype of the rotational smart light control system



[그림 6] 블레이드 시제품 (형광등, LED 병용형)
[Fig. 6] Prototype of the blade (combination of fluorescent with LED)

실험 진행에서 사용된 조도센서는 분해능이 1lx이고, 측정조도범위 1 ~ 65535lx, 측정파장범위 400 ~ 700nm인 사양의 센서를 사용하였으며, 센서의 광량 카운트 타임을 20초로 설정하였고, 블레이드와 센서 사이의 거리는 200mm, 설치된 광원 LED 광량의 출력은 100%로 고정하여 블레이드의 rpm이 증가할수록 측정되는 광량도 증가한다고 가정하고, 블레이드의 회전속도를 변수로 설정하여 1rpm, 5rpm, 10rpm, 30rpm으로 변경하면서 실험을 진행하였다.

3. 결과

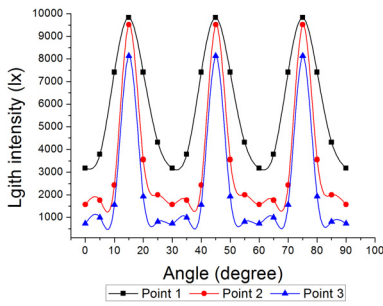
3.1 시뮬레이션 결과

그림 7, 그림 8, 그림 9는 조명 모듈 간의 각도가 각각 30°, 15°, 10°를 가지며 회전한다고 가정하고, 조명을 5°씩 이동시키며 시뮬레이션을 실행하였을 때 각각의 광량 측정 포인트(Point 1, 2, 3)에서 측정된 조도(lx) 값의 테이터를 그래프로 표현한 것이다. 측정된 조도 값의 테이터들을 이용하여 각도가 30°에서 10°로 감소할수록 동일한 각 측정 포인트에서 측정되는 조도 값은 증가하고, 각 측정 포인트에 일정한 조도를 공급하는 것을 알 수 있으며, 그때의 영역에 따른 광량 차이는 Point 1, 2, 3의 순서로 약 100%, 76%, 46%인 결과와 Point 1에서 Point 3으로 갈수록 측정되는 광량은 적어지는 결과를 얻었다.

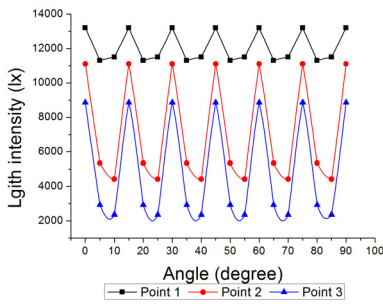
[표 4] 시뮬레이션의 측정 포인트에서 측정된 총 광량
[Table 4] Total light intensity measured at the measurement point of the simulation

측정 포인트	lx
Point 1	15839
Point 2	15615.4
Point 3	15135.8

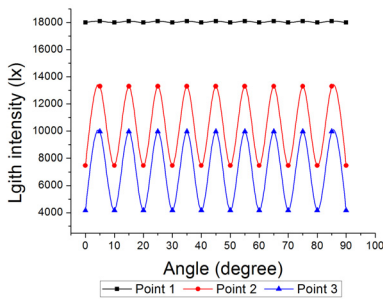
서로 다른 LED 개수의 조명을 사용한 한 개의 조명 모듈을 0°에서 90°까지 5°씩 이동시키는 동안 각 측정 포인트에서 측정된 총 광량을 표 4에 나타냈으며, IN영역보다 OUT영역에 많은 LED의 개수를 사용하여 시뮬레이션 하였을 때 영역별로 비슷한 광량이 측정되는 결과를 얻었다.



[그림 7] 각 측정 포인트의 결과 값 (각도 30°)
 [Fig. 7] The simulation results from each measurement point (30degrees)



[그림 8] 각 측정 포인트의 결과 값 (각도 15°)
 [Fig. 8] The simulation results from each measurement point (15degrees)



[그림 9] 각 측정 포인트의 결과 값 (각도 10°)
 [Fig. 9] The simulation results from each measurement point (10degrees)

3.2 실험 결과

표 5는 시제품을 이용한 실험에서 블레이드의 회전속도를 10rpm으로 설정하고 설치된 광원 LED 광량의 출력은 100%로 실험하였을 때의 영역별 조도센서에서 측정된 총 광량 값과 평균 광량 값을 나타내는 표로서, Point 1에서 Point 3으로 갈수록 조도센서에서 측정된 총 광량과 평균 광량이 적다는 결과를 나타낸다.

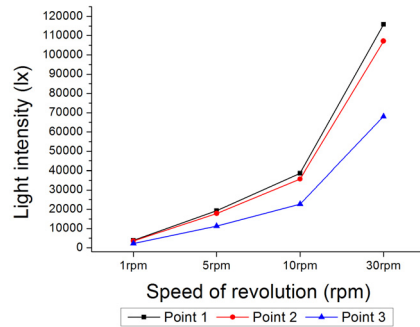
표 6은 각각의 rpm에 대해 설정된 센서의 광량 카운트 타임 20초 동안 블레이드가 120° 회전하는데 걸리는 소비시간과 회전횟수를 나타내었다. rpm이 증가할수록 블레이드가 20초 동안 120°로 한번 회전하는데 걸리는 소비시간은 감소하며, 20초 동안 블레이드의 120° 회전횟수는 증가하는 결과를 나타낸다.

[표 5] 조도센서에서 측정된 총 광량과 평균 광량 (10rpm)
 [Table 5] Total light intensity and average light intensity measured at the illuminance sensor (10rpm)

영역	총 광량 (lx)	평균 광량 (lx)
Point 1	168244	3505.08
Point 2	159951	3332.31
Point 3	118871	2476.48

[표 6] 블레이드의 회전속도에 따른 소비시간과 회전횟수
 [Table 6] Consumed time and revolution according to the speed of rotation of blade

회전속도 (rpm)	소비시간 (sec)	회전횟수 (number)
1	20	1
5	4	5
10	2	10
30	0.667	30



[그림 10] 회전속도에 따른 영역별 측정 광도
 [Fig. 10] Light intensity vs. rotational speed at different location

그림 10은 블레이드의 회전 속도를 1rpm, 5rpm, 10rpm, 30rpm으로 설정하고 실험을 진행하였을 때, 블레이드 회전속도에 따라서 각각의 영역에서 측정되는 광도의 데이터를 나타낸다. 이 데이터를 분석한 결과 블레이드의 rpm이 증가할수록 일정면적에서 측정되는 조도 값이 증가하는 결과를 얻었으며, 각 rpm에서 Point 3보다 Point 1에서 측정되는 조도 값이 많다는 결과를 얻었다.

4. 결론

본 논문에서는 기존 식물공장의 문제를 해결하고자 조명부가 회전하며 빛을 공급하는 회전형 스마트 조명 제어시스템을 개념설계하고 시제품을 제작하였으며, 시물레이션에서의 조명모듈 각도 변화와 실험에서의 블레이드 회전속도 변화에 따라 발생하는 각 측정 영역에서의 광량의 차이를 비교하고 분석하였다. 시물레이션과 실험의 결과에서 조명장치의 회전속도가 증가할수록 측정되는 광량이 증가하고 영역별 일정한 광량을 공급하는 것을 확인하였으며, 조명장치의 안쪽에서 바깥쪽으로 갈수록 측정되는 광량은 감소하는 결과가 도출되는 것을 확인하였다.

향후에는 시제품을 이용하여 모든 영역에서 일정한 광량이 공급되는 LED세기에 대하여 연구하며, 광양자속 밀도, 온·습도 센서 등을 추가로 설치하여 작물의 생육환경에 따라 성장하는데 필요한 광량, 온·습도 등이 자동으로 제어 가능한 시스템을 연구하려 한다.

References

[1] J. H. Kim, "Trends and prospects of plant factory", KREI a research paper, Vol. 61, October, 2009.

[2] J. E. Son, "Plant Factory - A prospective Urban Agriculture", The Korean Society for Bio-Environment Control, Vol. 2, No. 1, pp. 69-76, 1993.

[3] S. W. Lee, "Plant Factory and plant cultivation using the LED artificial light", Optical science and technology, Vol. 14, No. 3, pp. 12-19, July, 2010.

[4] Y. H. Kim, "Plants associated with the production of light in physics terms and concepts", Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery, Vol. 22, No. 4, pp. 503-512, 1997.

[5] W. S. Lee, "Development of the Smart Lighting Control System for Plant Factory", Proceedings of the KAIS Fall conference, Vol. 12, No. 2, pp. 425-428, 2011.

이 원 섭(Won-Sub Lee)

[준회원]



- 2011년 2월 : 공주대학교 천안 공과대학 기계공학 (공학사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 기계공학 (석사 재학 중)

<관심분야>

지능형제어시스템, 메카트로닉스

김 성 관(Sung-Gaun Kim)

[정회원]



- 1992년 8월 : KAIST 기계공학과 (공학사)
- 1995년 8월 : KAIST 자동차 및 설계공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : GIST 기전공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 부교수

<관심분야>

지능형제어시스템, 메카트로닉스, 로봇틱스, 분자동역학