

식물공장을 위한 회전형 조명시스템 시제품의 광합성유효광양자속 분석

이원섭¹, 김성관^{2*}

¹공주대학교 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

Analysis of Photosynthetic Photon Flux by Prototype of Rotational Lighting System for Plant Factory

Won-Sub Lee¹ and Sung-Gaun Kim^{2*}

¹Division of Mechanical Engineering, Kongju National University

²Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

요 약 식물공장을 위한 회전형 조명 시스템은 기존의 식물공장 조명시스템에 무수히 많이 설치되는 LED를 대신하여 비교적 적은 양의 LED가 설치된 조명장치를 회전시켜 작물들에게 필요한 광을 공급하는 시스템이며, 기존 식물공장 조명시스템에서 발생하는 고가의 초기 설치비용을 해결하기 위한 시스템이다. 본 논문에서는 식물이 성장하는데 필요한 광합성유효광양자속(PPF)에 대하여 조사하고, 회전형 조명시스템 시제품과 광양자센서를 이용하여 조명시스템의 LED출력과 회전속도 변화에 따른 PPF의 차이를 비교, 분석하였다. 블레이드의 회전속도가 20rpm이고 LED의 출력이 IN 73%, CENTER 37%, OUT 50%일 때 모든 영역에서 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 일정한 PPF값이 공급된다는 결과를 확인하였으며, 기존의 식물공장의 조명 시스템에 비해 적은양의 LED를 회전시킴으로써 식물의 성장에 필요한 광을 제공하는데 어려움이 없다는 결과를 확인하였다.

Abstract Rotational lighting system for plant factory is the way to decrease high installation cost of the existing lighting system. A few of LEDs are used at the rotational lighting system in comparison with the existing lighting system to supply artificial lights to crops. At rotational lighting system, the manufacturing cost becomes very low by comparing with the existing lighting system. In this paper, the photosynthetic photon flux (PPF) is investigated in order that plants may grow. And PPF is analyzed with the rotational speed of blade and LED output by using the rotational lighting system prototype and quantum sensor. It is confirmed that constant PPF value of $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ is supplied with the blade rotation speed of 20rpm and LED output of IN 73%, CENTER 37% and OUT 50%. By comparing with the lighting system of existing plant factory, there is no difficulty to supply the light needed to grow plants by rotating a few of LEDs.

Key Words : Lighting Equipment, Photosynthetic Photon Flux, Plant Cultivation System, Plant Factory, Rotational Lighting System

1. 서론

최근 농약 사용이 없이 무공해 재배 환경에서, 인체에 무해하고 영양이 충분히 함유된 채소나 곡물을 수확하여

판매하고, 외부의 지구 자연 환경에서도 전혀 무해하도록 폐기물을 정화해서 배출하는 식물공장들과 식물재배기들이 확산되고 있다. 특히, 식품안전성 HACCP 인증이 중요한 그린 푸드(Green Food)에 대한 관심이 높아지는 상

*Corresponding Author : Sung-Gaun Kim (Kongju National University)

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

Received November 16, 2012

Revised (1st January 15, 2013, 2nd January 23, 2013)

Accepted February 6, 2013

황에서 식물공장들은 새로운 기술 개발과 서비스와 품질의 개선과 혁신을 도모하고 있다. 일본 후쿠시마 원전 폭발의 영향으로 방사선 낙진에 의한 야산의 전담에서 재배되는 채소류와 곡물류가 치명적으로 상품가치를 상실하게 됨에 따라, 식물공장의 산출물에 대한 소비자들의 기대와 인정이 동시에 시장에서 나타나고 있고, 인류에게 다가오고 있는 21세기 대재앙, 재난재해, 사건/사고에 의하여 생존에 필요한 “영양자원”을 보호하고 식량을 장기적으로 확보하는 차원에서도 범국제적으로 “식물공장”과 융합하는 IT기술의 수요가 급증하고 있다[1].

식물공장은 도시 대기 중에 급증하고 있는 이산화탄소를 포집하여 식물공장에 공급할 경우 도시의 온실가스를 절감할 수 있다. 또한, 식물공장은 온실가스 절감의 대표적인 기술인 LED를 광원으로 활용하므로 에너지를 절감할 수 있다[2]. 하지만, 연중 일정한 환경을 유지하기 위해 필요한 형광등, LED(Light Emitting Diode)램프와 같은 광원과 일정온도를 유지하기 위한 공조시설 등의 추가적인 설비로 인해 설치비와 에너지 소비량이 증가하는 단점이 있다[3]. 또한, 기존 식물공장의 조명 시스템은 무수히 많은 LED 또는 형광등과 같은 조명장치를 설치함에 따라 고가의 초기 투자비용의 문제점이 발생한다.

본 논문에서는 조명시스템의 LED출력과 회전속도 변화에 따라 광양자센서에서 측정되는 광합성유효광양자속(Photosynthetic Photon Flux, PPF)의 차이를 비교, 분석하는 실험을 통하여 기존 식물공장의 단점 중 무수히 많은 광원 설치로부터 발생하는 고가의 초기 설치비용의 문제점을 해결하기 위하여 개발된 식물공장을 위한 회전형 조명시스템을 검증하였다.

2. 시스템 구성 및 실험 방법

Fig. 1에 표현한 회전 조명 시스템을 포함하는 식물공장 시스템의 시제품은 기존의 식물공장에서 사용되는 무수히 많은 LED에 대한 고가의 초기 투자비용을 줄이기 위하여 적은 양의 LED를 설치하여 회전시키는 조명시스템의 시제품으로써 기존 식물공장 대비 LED에 대한 투자비용을 감소시킬 수 있는 조명시스템의 대안이다. 회전형 조명시스템의 특징은 LED가 설치된 블레이드의 회전 속도와 높이, LED의 광량 등이 제어가 가능하다.

또한, Fig. 2와 같이 회전형 조명시스템은 총 3개의 블레이드로 이루어져있으며, 각 블레이드 간의 각도는 120°로 구성하였다. 블레이드에 설치한 LED는 S업체의 P42180(적색)과 D42180(청색)을 이용하여 3:1의 비율로 총 8개의 LED가 설치된 8.4W의 소비전력 발생하는 LED

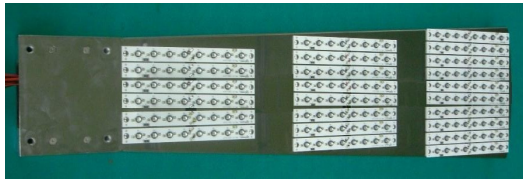
바를 이용하였다. 조명부 블레이드의 LED바 설치 개수를 설정하기 위하여 Relux 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 이때 LED의 개수는 안쪽, 중간, 바깥쪽 모두 같은 개수로 설정하고 진행하였다. 시뮬레이션을 통하여 블레이드의 회전부 중심(IN영역)에서 바깥쪽(OUT영역)으로 갈수록 측정되는 광량 값의 차이가 100%, 76%, 46%로 나타나는 결과[4]를 얻었다. 시뮬레이션의 결과와 IN영역에서 OUT영역으로 갈수록 빛을 공급받는 면적이 증가하는 이유를 토대로 Fig. 3과 같이 LED바의 개수를 블레이드 1개당 IN영역 6개, CENTER영역 8개, OUT영역 10개로 구성하였다. 또한, 빛을 공급받는 동일한 면적에 대하여 회전 조명 시스템에 사용된 LED(0.01m²당 0.58개)가 기존 식물공장시스템에서 사용되는 LED(0.01m²당 1.11개)보다 약 47.75% 적은 장점이 있다.



[Fig. 1] Prototype of a plant factory system containing rotational lighting system



[Fig. 2] Lit appearance of the rotational lighting system prototype



[Fig. 3] Prototype of the blade, single LED bar power consumption of 8.4W, LED bars were installed on the inside 6, middle 8, outer 10

LED의 출력 제어 방법으로는 PWM 제어 방식을 이용하여 LED에 인가되는 전류를 제어하는 방법을 사용하였으며, LED의 출력이 100%일 때 전류는 730mA가 출력된다. 블레이드의 회전부는 1kW의 Servo Motor와 Harmonic Drive, Timing Belt를 이용하여 10rpm ~ 60rpm으로 회전할 수 있게 구성하였다.

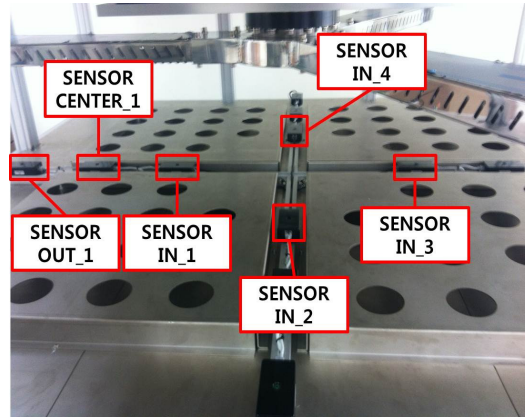
조명시스템의 LED출력에 대한 PPF를 측정하기 위하여 LabVIEW 프로그램을 기반으로 휴대형 자료수집 장치(cDAQ-9172, National Instruments, USA), 아날로그 입력 모듈(NI 9205, National Instruments, USA), 광양자센서(SQ-120, Apogee Instruments, USA)를 사용하였다.

식물체의 광합성에 관련된 광량은 일반적으로 사용하고 있는 조명의 조도 단위인 룩스 또는 루멘 등은 사용하지 않으며 광합성유효광양자속, 광합성유효방사 등의 단위로 표시한다. PPF란 식물이 빛에 포함된 광양자 하나를 받아들여 하나의 광합성을 하기 때문에 이때의 빛의 강도를 나타내는 방법이며, 단위로서는 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 가 사용된다. 광양자 1 mol은 아보가드로수에 상당하는 6.022×10^{23} 개의 광양자를 의미한다[5].

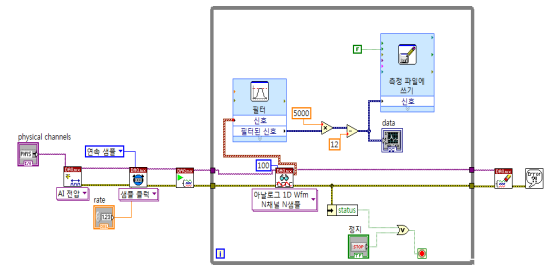
실험 진행에서 사용된 광양자센서는 측정파장범위 400 ~ 700nm인 사양의 센서를 사용하였으며, 블레이드와 센서 사이의 거리를 250mm로 설정하였다. 사용한 광양자센서의 특징은 Full Sunlight($2,000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)일 때 output이 400mV로 출력되며, 이때 출력되는 sensor output voltage값에 conversion factor $5.00\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}/\text{mV}$ 를 곱하면 PPF값으로 환산할 수 있다. 예를 들어 Full Sunlight일 때 센서에서 출력되는 400mV의 값을 PPF값으로 환산한다면 $400\text{mV} \times 5.00\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}/\text{mV} = 2,000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 환산할 수 있다.

또한, 조명장치의 회전에 따라 IN, CENTER, OUT의 영역에서 측정되는 PPF 차이와 각각 다른 방향의 IN영역에서 측정되는 PPF를 알아보기 위하여 Fig. 4와 같이 위치시켰다. 여기에서 IN, CENTER, OUT영역은 빛이 조사되는 면적을 뜻하며, 상단에 설치된 조명부 블레이드의 회전축에 가까울수록 IN영역, 회전축에서 바깥쪽으로 갈수록 OUT영역을 나타낸다. IN영역은 중앙으로부터 반경

430mm, CNETER영역은 반경 670mm, OUT영역은 반경 920mm이다.



[Fig. 4] Quantum sensor location for PPF measurement by LED rotational



[Fig. 5] PPF measurement program based on LabVIEW by portable data collection device

PPF를 측정하기 위하여 LabVIEW를 기반으로 Fig. 5와 같이 측정 프로그램을 설계하였으며, 광양자센서로 측정할 때에 발생하는 외부 노이즈를 상쇄시키기 위하여 프로그램 내에 저역 통과 필터링 타입과 컷오프 주파수 5Hz, 버터워스 3차인 스펙의 필터를 적용하였다.

첫 번째 실험에서는 양상추의 광포화점과 광보상점으로 알려진 PPF값 $302\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 와 $18\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 중에서 임의의 사이 값인 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 를 공급량의 목표로 설정하고 블레이드의 회전이 정지(LED만 점등) 상태일 때 IN, CENTER, OUT영역에 설치된 광양자센서에서 측정되는 PPF가 모두 목표 값인 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 측정될 때의 LED 출력을 확인하였다.

광 포화점이란 광합성 속도가 더 이상 증가하지 않을 때의 빛의 세기를 말하며, 광합성 속도는 빛의 세기에 비례하지만 광 포화점에 이르면 속도가 증가하지 않는다. 광 보상점이란 식물에 의한 이산화탄소의 흡수량과 방출

량이 같아져서 식물체가 외부 공기 중에서 실질적으로 흡수하는 이산화탄소의 양이 0이 되는 광의 강도이다. 따라서 식물에게 조사되는 광량은 광 보상점보다 같거나 높아야하며, 광 포화점보다 같거나 낮아야한다. 그 예로 형광램프를 기준으로 했을 때 작물들의 광 포화점과 광 보상점을 살펴보면 토마토와 수박은 $874\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 와 $36\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 양상추와 피망은 $302\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 와 $18\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 오이는 $665\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 와 $24\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 인삼은 $145\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 와 $6\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이다[6,7].

두 번째 실험에서는 첫 번째 실험에서 얻은 LED 출력의 결과 값을 기반으로 하여 블레이드의 회전속도를 변수로 설정하고 임의의 회전속도 5rpm, 10rpm, 15rpm, 20rpm으로 변경하며 PPF를 측정하는 실험을 같은 시간 동안 일정한 LED출력에 대하여 진행하였다.

3. 실험 결과

첫 번째 실험에서는 Table 1과 같이 조명 블레이드가 정지하고 있을 때 블레이드의 IN, CENTER, OUT에서 출력되는 LED의 광량 변화에 따른 여러 가지의 실험 샘플을 통하여 광양자센서에서 측정된 PPF값이 양상추를 재배하기 위해 가정한 목표 PPF값 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에 가장 근사한 값이 측정될 때의 LED 출력에 대하여 알아보았다. 또한, 세 영역의 LED의 출력이 100%일 때의 측정된 PPF값을 이용하여 측정값이 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이 되기 위한 비율로 LED의 출력을 조절하며 실험을 진행하였으며, 그 결과 LED의 출력이 IN 73%, CENTER 37%, OUT 50%일 때 목표 PPF값 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에 대한 오차범위 5% 이내의 가장 근사한 값이라는 것을 확인하였다.

[Table 1] PPF measurements by LED output

LED output (%)			PPF ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		
IN	CENTER	OUT	IN	CENTER	OUT
100	100	100	378.9	500.5	502.9
50	50	50	190.9	251.9	253.0
50	40	40	180.1	210.1	205.2
64	37	45	191.5	190.4	189.8
73	37	50	202.7	200.2	201.5

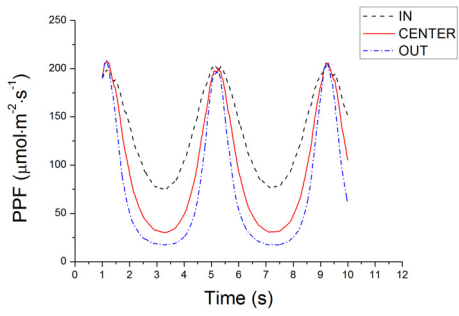
Table 2는 팔이 세 개인 블레이드의 회전속도에 따라 재식판의 한 포인트에서 블레이드의 하나의 팔이 지나가고 다음 팔이 도달하는데 까지 걸리는 시간별 공급되는 PPF를 나타낸 표이다. 블레이드의 회전 속도가 5rpm일 경우 재식판의 한 포인트에서 블레이드의 다음 팔이 오는데 걸리는 시간은 약 5초이다. 따라서 회전속도 5rpm일 때, LED에서 재식판에 공급되는 PPF를 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 고정한다고 할 경우 재식판의 한 포인트에서 평균적으로 공급받는 PPF는 $40\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 계산된다. 따라서 블레이드의 회전속도 20rpm과 IN 73%, CENTER 37%, OUT 50%의 LED출력으로 블레이드 아래쪽에 위치한 면적에 일정한 PPF $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 를 공급할 수 있다는 결과를 얻었다.

[Table 2] Supplied PPF by the rotational speed

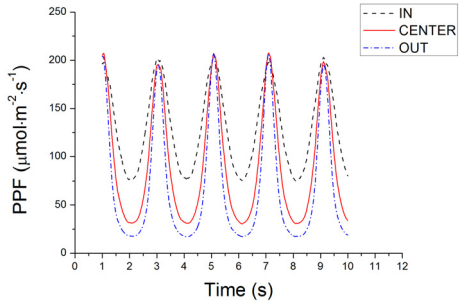
Rotational speed (rpm)	Supplied PPF ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
5	40
10	100
15	150.38
20	200

Fig. 6은 첫 번째 실험의 결과 값을 기반으로 진행한 두 번째 실험으로 블레이드의 임의의 회전속도(5rpm, 10rpm, 15rpm, 20rpm)를 변수로 설정하고 실험을 진행하였을 때, 블레이드 회전속도에 따른 각각의 영역(IN, CENTER, OUT)에서 측정되는 PPF 값을 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 7은 각각 다른 방향의 IN영역에서 조명부 블레이드의 회전속도가 증가(5rpm, 10rpm, 15rpm, 20rpm)할 때 측정되는 PPF 값을 그래프로 나타낸 것이다.

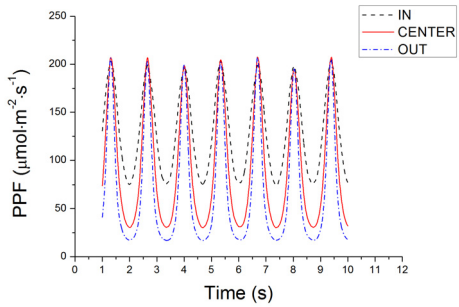
데이터를 분석한 결과 블레이드의 rpm이 증가할수록 광양자센서에서 측정된 PPF의 값이 양상추를 재배하기 위해 가정한 목표 PPF값 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에 위치하는 피크점의 주기가 짧아지는 것을 확인하였다. 또한, 이 데이터를 통하여 기존의 식물공장 조명시스템에 비하여 넓은 면적에 적은 양의 LED를 사용하여 조명부 블레이드를 회전시킴으로써 블레이드 아래쪽 면적에 위치한 식물에게 일정한 PPF를 공급할 수 있다는 결과를 확인하였으며, Table 2와 접목시켰을 때 기존 식물공장의 조명시스템에 비하여 적은 LED를 회전시킴으로써 식물을 재배하는데 필요한 광을 공급하는 것이 어려움이 없다는 결과를 확인하였다.



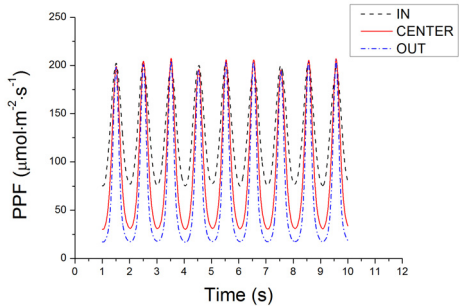
(a)



(b)

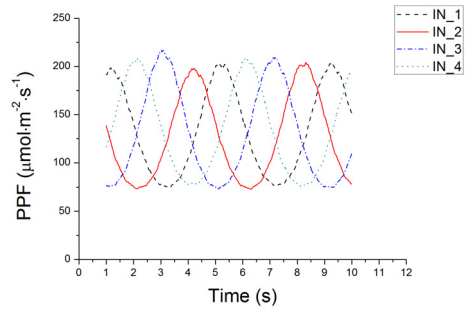


(c)

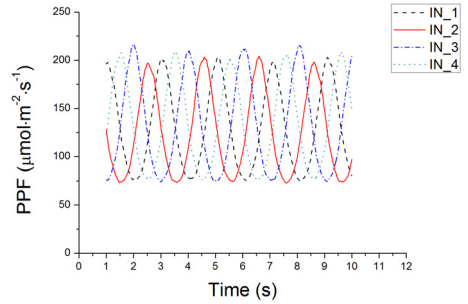


(d)

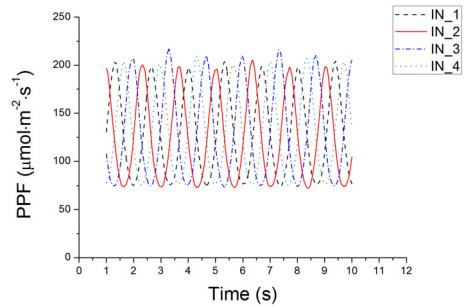
[Fig. 6] Values measured by quantum sensors at the three areas in accordance with the rotational speed (a) 5rpm (b) 10rpm (c) 15rpm (d) 20rpm



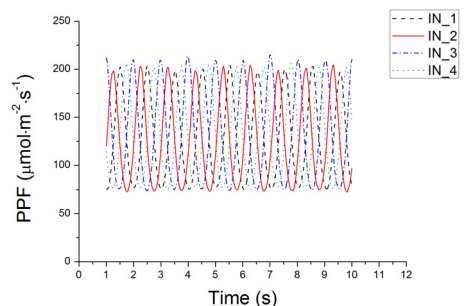
(a)



(b)



(c)



(d)

[Fig. 7] Values measured by quantum sensors at IN section in accordance with the rotational speed (a) 5rpm (b) 10rpm (c) 15rpm (d) 20rpm

4. 결론

본 논문에서는 기존의 식물공장에서 발생하는 고가의 초기 설치비용을 해결하기 위해 제작된 식물공장을 위한 회전형 조명시스템 시제품을 이용하여 조명부 블레이드의 LED출력과 회전속도 변화에 따른 광합성유효광양자속 측정 실험을 진행하였으며, 실험을 통하여 LED출력과 회전속도 변화에 따라 발생하는 광량의 차이를 확인하였다. 또한, LED출력과 회전속도 제어를 통하여 광이 공급되는 면적에 일정한 PPF가 공급되는 결과를 확인하였다.

기존의 식물공장 조명시스템 대비 적은 양의 LED를 사용하여 조명부 블레이드를 회전시킴으로써 빛이 공급되는 면적에서 양상추를 재배하기 위해 가정한 PPF $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 를 공급할 수 있으므로 기존 식물공장의 조명시스템에 비해서 회전형 조명시스템을 이용하여 적은 양의 LED로 식물을 재배할 수 있다는 결과를 확인하였다.

향후에는 식물공장을 위한 회전형 조명시스템 시제품을 이용하여 작물의 생육환경에 따라 성장하는데 필요한 광량, 온·습도 등이 자동으로 제어 가능한 시스템을 연구하려 한다.

References

- [1] S. C. Park, "Green Agriculture and IT Fusion Cases of Korea Plant Factory", *Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 79-80, 2011.
- [2] Y. C. Kim, M. T. Cho, H. J. Joo, "A Study on the Development of Plant Growth Monitoring System Using Plant Measurement Algorithms", *Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 6, pp. 2702-2706, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.6.2702>
- [3] C. K. Lee, W. T. Kim, "A Study on the Heating and Cooling Energy Load Analysis of the KNU Plant Factory", *Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 4, pp. 1419-1426, 2012.
- [4] W. S. Lee, S. G. Kim, "Development of the Rotational Smart Lighting Control System Using Artificial Light for Plant Factory", *Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 4, pp. 1474-1479, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.4.1474>
- [5] Y. H. Kim, "Plants Associated with the Production of

Light in Physics Terms and Concepts", *Journal of the Korean Society of Agricultural Machinery*, Vol. 22, No. 4, pp. 503-512, 1997.

- [6] 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.
- [7] PARUS Co., Ltd., What's LED Growlight?, <http://www.growlight.co.kr/en/about/what.asp>. (accessed Oct., 9 2012)

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 기계공학과 교수

<관심분야>

지능형제어시스템, 메카트로닉스, 로봇틱스, 분자동역학