

복합 조명 환경에서 에너지 절감을 실현하는 그리드조명시스템

이세현*, 오승택**, 임재현*

*공주대학교 컴퓨터공학부

**공주대학교 스마트자연공간연구센터

e-mail: bunkerbuster@smail.kongju.ac.kr, {ost73, defacto}@kongju.ac.kr

Grid Lighting System that Realizes Energy Saving in Compound Lighting Environment

Se-Hyun Lee*, Seung-Taek Oh**, Jae-Hyun Lim*

*Dept. of Computer Science & Engineering, Kongju National University,

**Smart Natural Space Research Center, Kongju National University

요약

현대인들의 생활 패턴이 변화하고 건물이 대형화 됨에 따라 실내 인공조명에 대한 의존도가 높아졌다. 또한 실내 빛 품질의 향상에 유리한 대형화 및 다수개의 조명 적용이 선호되면서 그에 따른 전력소비량도 증가하고 있다. 일반적인 조명환경은 창을 통해 유입되는 자연광과 주로 천정에 설치되는 인공광이 함께 작용하여 실내 공간의 빛 환경을 조성한다. 각 광원별 상호 영향도를 고려할 경우 조명에너지의 사용량을 줄일 수 있음에도 불구하고 관련한 연구는 부족한 실정이다. 본 논문에서는 자연광이 유입되는 복합 조명 환경(실내 환경)에서 에너지 절감을 위해 조도의 영향도를 계산하여 제어하는 그리드 조명제어시스템을 제안한다. 이를 위해 다수개의 LED 조명과 블라인드 및 조도 센서를 적용한 실험환경을 구축한 후 개별 LED 조명마다의 실내 각 지점별 영향도를 분석한다. 이후 자연광의 영향에 의해 변화되는 실내 각 구역별 조도에 연계 대응하고, 실내 모든 구역에서 권장 조도 기준(300~600lux)을 충족하는 영향도 기반 제어를 실현한다. 제안 방법의 시뮬레이션에서는 약 42%의 에너지 절감 효과가 있음을 확인하였다.

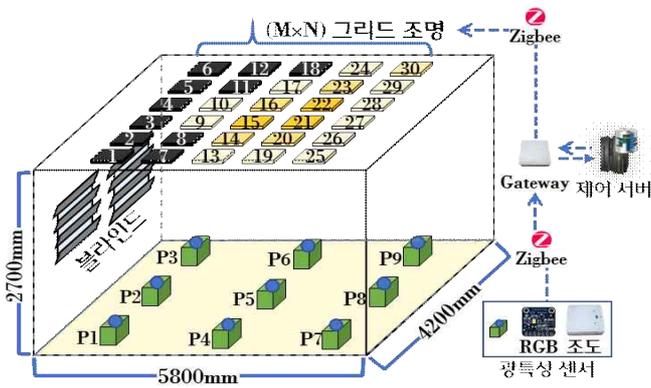
1. 서론

최근 건축물들이 대형화되고 밀집된 환경으로 변화하면서 인공 조명의 사용이 증가하고[1], 현대인들의 생활 패턴의 변화로 인해 실내 활동 시간이 늘어남에 따라 인공조명에 대한 의존도가 증가하였다. 또한 실내에 균일한 빛 환경을 조성하기 위해 다수개의 조명을 배치하거나 광천장과 같은 대형 건축화 조명 기술이 제시되었다[2]. 전반적인 인공 조명의 사용 증가 추세에 따라 전력 소비량도 함께 증가하고 있다. 일반적인 실내 조명 환경은 시간별로 계속 변화하며 창을 통해 유입되는 자연광과 천정 등에 설치되는 인공광이 함께 작용하는 복합 조명 환경이다[3]. 따라서 자연광 및 인공광이 실내 각 구역에 미치는 영향을 분석하여 광원들의 조도를 제어할 경우 조명에너지의 절감 효과를 기대할 수 있다. Soori는 복합 조명환경에서 자연광의 유입량에 따른 인공광의 조도를 제어하여 조명 에너지의 사용량을 절감하였다[4]. 그러나 최근 많이 사용되고 있는 대면적 광원이나 다수개의 조명이 적용된 복합 조명환경에서의 에너지 절감을 위한 제어방법에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 자연광과 다수개의 LED 조명으로 구성된 복합 조명환경에서 조명에너지 절감을 실현하는 그리드조명 시스템을 제안한다. 이를 위해 그리드 조명의 제어와 광특성 및 전력량 측정이 가능한 실험 환경을 구축한다. 이후 자연광의 영향을 고려한 베네시안 블라인드의 각도 제어와 각 LED 조명이 실내 각 구역에 미치는 영향도를 고려한 조명 제어를 실현한다. 이때 실내 조명 환경의 빛 품질은 기준조도 500lux, 균제도 0.3 이상, 색온도 5,400K를 유지한다. 이후 제안방법의 적용 유무에 따른 조명에너지의 차이를 시뮬레이션을 통해 비교함으로써 그리드조명의 영향도 기반 제어시스템의 성능을 확인한다.

2. 그리드조명시스템(실험환경) 구축

복합 조명환경에서 조명에너지 최적화를 위한 조명시스템의 제어를 실현하고 관련 실험을 수행하기 위해 그리드조명 시스템을 구축하였다. 위도 36°, 경도 127°에 위치해 있는 K 대학 건물내 연구실(4층)에 그림 1과 같이 실험환경을 구성하였다.

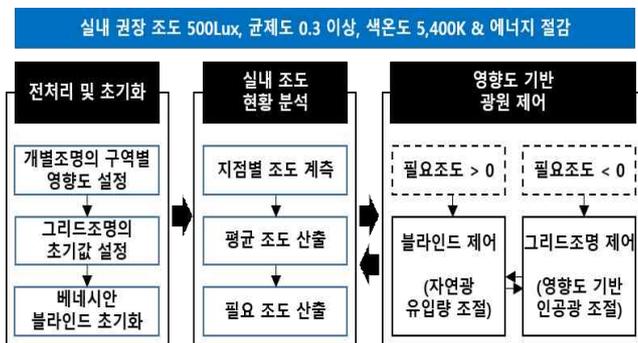


[그림 1] 그리드조명시스템(실험환경)

천장에는 대면적 및 대형화 조명을 고려하여 30대의 LED 조명을 일정한 간격(5행×6열)으로 설치하여 그리드조명을 구성하였다. 각 LED 조명은 색온도가 다른 4개의 LED 광원(7,400K, 6,400K, 4,000K, 2,700K)을 사용하였다. 약 4,800단계의 채널별 제어를 통해 0~832lux의 조도와 2,656~7,358K의 색온도를 제공할 수 있도록 구현하였고 전원부에는 전력관계를 설치하였다. 창 면에는 자연광의 유입량을 조절하기 위해 슬래트의 각도를 -70°에서 +70°까지 5°단위로 제어가 가능한 베네시안 블라인드를 설치하였다. 이후 실내 공간을 9개의 균등한 영역(P1~P9)으로 구분하고 각 영역마다 조도 계측을 위한 조도(TSL4531) 센서를 바닥면에서 85cm의 높이에 설치하였다. 또한 그리드조명시스템의 조명 제어, 블라인드 제어, 데이터수집 기능을 수행할 수 있도록 제어서버와 ZigBee 기반 게이트웨이를 구성하였다.

3. 조명에너지의 절감 제어

본 논문에서는 자연광과 인공광이 함께 영향을 미치는 복합 조명환경에서 광원의 조도 제어를 통해 실내에 균일한 조도를 제공하면서 에너지 사용량을 절감하는 그리드조명시스템의 제어 방법을 제안하였다. 그림 2는 제안 방법의 처리과정을 나타낸 것이다.



[그림 2] 조명에너지의 절감 제어

조명에너지의 절감 제어는 전처리 및 초기화, 실내 조도현황 분석, 영향도 기반 광원 제어의 처리 과정으로 구성하였다. 먼저 전처리 및 초기화 단계에서는 천장에 설치된 30개의 그리드 조명들이 각 실내 구역의 조도 형성에 얼마 만큼씩을 기여하는 지를 영향도로 산출하였다. 1~30번까지의 LED 조명을 최대 밝기(810lux)로 하나씩 개별적으로 점등해가며 각 구역에서의 조도를 계측하였다. 이후 각 조명에 대한 구역별 영향도를 비율로 계산하였다. 그림 3은 1번 조명의 영향도를 예로 나타낸 것이며 각 LED 조명에 대한 영향도는 표 1과 같다.

1	P1 58%	P2 13%	P3 3%
	P4 15%	P5 5%	P6 2%
	P7 5%	P8 2%	P9 1%

[그림 3] 조명 (LED1)의 영향도

[표 1] LED 조명의 각 구역별 영향도

조명 번호	각 구역별 영향도 (%)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
1	58	13	3	15	6	2	5	2	1
2	94	38	7	19	10	3	5	3	2
3	58	77	19	15	19	9	5	5	2
...
30	1	2	5	2	5	16	3	13	58

그림 3에서 1번 LED를 점등했을 때의 각 구역별 영향도를 확인한 결과 거리에 반비례하는 형태로 조도가 증감하는 것을 알수 있었다. 또한 표 1에서는 조명마다 실내 각 구역에 어느 정도 비율로 조도를 제공하는지와 각 구역별 조도 형성에 개별 조명들이 어느 정도 영향을 미치는 지를 확인하였다. 이를 조명 제어를 위한 기준 영향도로 설정하고, 그리드 조명과 블라인드를 초기화하였다. 그리드조명은 자연광의 영향이 없는 상태에서 실내 조명환경의 기준조도를 500lux로 제공하였고, 베네시안 블라인드의 슬래트 각도를 수평 상태인 0도로 설정하였다.

실내 조도 현황 분석 단계에서는 실내 각 구역별 기준조도를 측정하였고 이들을 평균하여 실내 공간 전체에 대한 평균 조도(I_{avg})를 산출하였다. 이후 기준조도(I_{std})와의 차이인 실내 공간 전체에 대한 필요조도(I_{need})를 산출하였다. 식 (1), (2)는 평균조도와 필요조도의 산출식이다.

$$I_{avg} = \sum_{i=1}^n I_i / n \quad (1)$$

$$I_{need} = I_{std} - I_{avg} \quad (2)$$

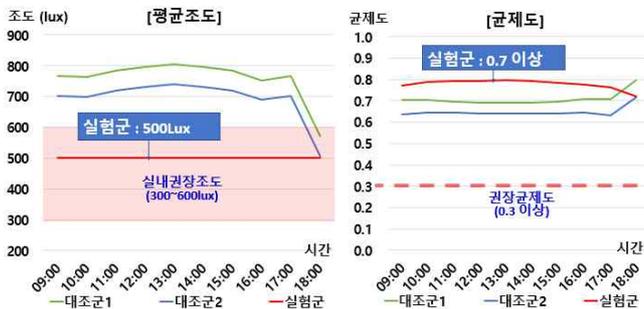
영향도 기반 제어 단계에서는 먼저 필요조도를 확인하였다. 필요조도가 음수이면 실내의 조도가 이미 권장조도를 넘어선 경우로 실내의 전반적인 조도를 낮추기 위한 그리드조명의 제어를 수행하였다. 평균 조도와 조도 차이가 가장 큰 밝은 구역을 제어 구역으로 선정하였다. 이후 제어 지점에 대한 조명의 영향도가 20% 이상인 조명을 제어 대상 조명으로 선정하고 그중 영향도가 낮은 조명부터 조도를 단계적으로 낮추었다. 이때 조명의 영향도가 20% 이하인 조명은 현 구역

에서의 영향도는 미미하지만 다른 구역의 조도 형성에 큰 영향을 제공할 수도 있으므로 효율적인 제어를 위해 제어 대상 조명의 선정에서 배제하였다. 제어 조명이 모두 OFF 상태인 경우에는 블라인드의 슬랫 각도를 조절하여 자연광의 유입을 제한하였다. 또한 필요조도가 양수인 경우 기준조도보다 어두운 상태이므로 자연광에 의한 조도를 우선적으로 확보하기 위하여 블라인드의 제어를 먼저 수행하였다. 블라인드의 슬랫 각도 상태를 확인하여 0도 이하인 경우 블라인드를 제어 장치로 선정하였다. 이후 블라인드 슬랫 각도를 조절하여 자연광의 유입량을 늘렸고 그럼에도 실내 조도가 권장조도 기준을 충족하지 못할 경우에는 개별 조명의 채널별 제어를 수행하였다. 개별 조명은 각 채널별로 인가전류를 조절하여 최소 1lux 단위로 조절하였다.

결론적으로 필요조도가 음수일 경우에는 조도를 단계적으로 낮추었고 양수인 경우에는 조도를 단계적으로 높여줄수 있도록 제어 기능을 구현하였다. 또한 복합 조명환경에서는 시간별 자연광의 유입량이 계속 달라지므로 필요조도의 변화에 따라 블라인드 또한 상시 개별 조명들과 연계하여 제어되도록 구현하였다. 상기의 과정을 반복하여 실내의 빛 품질을 일반 사무환경에서의 권고 기준(KSA 3011)인 기준조도 500lux, 색온도 5,400K에 충족하도록 제어하였다.

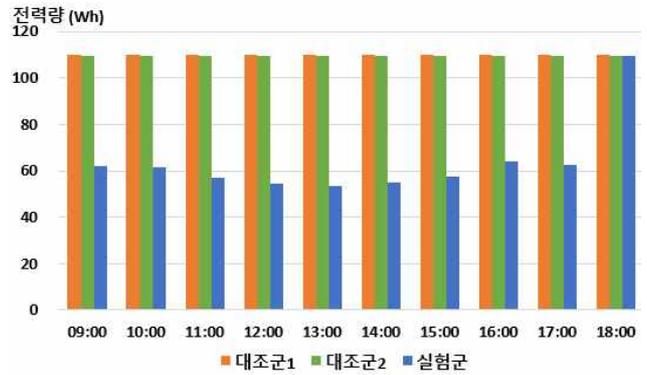
4. 실험 및 분석

제안 방법의 조명에너지 최적화 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 제안 조명시스템을 적용한 실험군과 일반 사무조명환경의 대조군1, 조도가 일률적인 값으로 고정된 그리드 조명환경의 대조군2를 비교하였다. 대조군1은 조도 500lux와 색온도 5,400K로 고정된 4대의 LED조명으로 설정하였다. 대조군2는 실내의 평균조도 500lux와 색온도 5,400K이 되도록 30대의 LED 조명을 설정하였다. 시뮬레이션을 통해 조명의 전력 소비량, 실내 평균조도 및 균제도를 비교하였고 실내권장조도(500Lux)와 권장균제도(0.3 이상)를 준수하는 지를 확인하였다. 그림 4는 시뮬레이션의 수행 결과로 하루 동안의 평균조도 및 균제도의 변화를 나타낸 것이다.



[그림 4] 평균조도 및 균제도 변화

실험군은 09:00~18:00까지 모든 시간대에서 실내권장조도(300~600lux)를 충족함은 물론 기준조도(500lux)를 일정하게 유지하였다. 그러나 대조군1과 대조군2는 18:00을 제외한 모든 시간대에서 실내권장조도보다 높은 조도 현상을 보였다. 특히 남중시각(12:42)에 가까운 13:00에서는 대조군1은 804.33lux, 대조군2는 740.29lux로 조도가 매우 높아 과도한 조명에너지의 사용이 발생함을 확인하였다. 단, 균제도는 모든 실험군에서 실내 권장 균제도인 0.3 이상을 충족했고 특히 실험군의 균제도가 0.7 이상으로 가장 높아 가장 균일한 조도를 제공함을 알수 있었다. 이후 각 실험군에서의 전력소비량을 비교하였고 그 결과는 그림 5와 같다.



[그림 5] 시간별 전력소비량

대조군1과 대조군2는 제어를 하지 않아 광특성의 변화가 없는 조명 환경으로 모든 시간에서의 전력소비량이 일정하였다. 대조군1은 109.8Wh, 대조군2는 109.6Wh의 전력을 소비하여 두 실험군 간의 전력소비량의 차이는 거의 없었다. 그러나 실험군은 자연광의 유입량에 따라 조명을 가변적으로 제어하였으므로 매 시간별 전력소비량이 다르게 예측되었다. 일몰 시간(18:34)에 가까운 18:00을 제외한 모든 시간대에서 평균 58.6Wh의 전력을 소비하여 타 실험군 대비 높은 에너지 절감 효과를 보였다. 09:00~18:00까지의 총 에너지 소비량을 계산한 결과 실험군은 637Wh, 대조군1은 1098Wh, 대조군2는 1096Wh의 수치를 보였다. 실험군은 대조군1보다 461.1Wh, 대조군2보다 459.1Wh의 전력을 적게 사용하였으며 약 42%의 에너지 절감효과를 나타냈다. 이를 통해 제안 조명시스템은 권장조도(500lux) 및 권장균제도(0.3이상)를 준수하면서도 가장 효율적으로 조명에너지를 소비했음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 자연광이 유입되는 복합조명 환경에서 조명 에너지 절감을 실현한 그리드조명시스템을 제안하였다. 이를 위해 개별 제어가 가능한 M×N개의 LED 조명과 자연광의 유

입량을 조절하는 블라인드, 각 구역별 조도 계측을 위한 조도 센서, 조명 제어 기능 등의 실현을 위한 제어서버를 적용하여 실험환경을 구성하였다. 이후 개별 LED 조명들이 각 구역별 조도에 얼마나 영향을 주는지 영향도로 산출하였다. 창을 통해 유입된 자연광에 의해 상시 변화하는 실내 구역별 조도, 평균조도, 필요조도 등을 분석한 후 조명에너지 사용량의 절감 기능을 실현하였다. 실내구역별 필요조도 값에 따라 블라인드의 제어를 통해 자연광의 유입량을 조절하였고 이와 연계하여 채널별 제어를 통해 영향도에 기반하여 기준조도를 충족하도록 개별 LED 조명을 제어하였다. 이를 통해 실내에 기준조도(500lux), 권장 규제도(0.3 이상) 및 색온도 5,400K를 충족하면서도 조명에너지를 절감하는 그리드조명시스템을 구축하였다. 제안 조명시스템(실험군)에 대한 성능 평가를 위한 맑은 날 하루에 대한 시뮬레이션에서는 일반조명환경(대조군1)과 고정된 밝기를 제공하는 그리드 조명 환경(대조군2)보다 각각 461.1Wh, 459.1Wh의 에너지를 적게 사용하여 약 42%의 에너지 절감 효과가 있었다.

향후에는 다양한 계절 및 기상 조건에서의 추가 실험을 통한 제안시스템의 성능향상을 위한 노력을 계속할 것이며 제안시스템의 상용화를 위한 연구가 필요하다.

※ 이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2019R1A6A1A03032988)

※ 이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2020R111A3073320)

참고문헌

- [1] 김용호, 이권형, 장갑석, 최용훈, & 김훈. (2011). 사용자 요구조도 보장 에너지 효율적 LED 조명 제어 기법. 한국통신학회논문지, 36(11), 1383-1388.
- [2] 이진숙, 정찬웅, and 박성주. (2017). 광천장 사무 환경에서의 행위별 적정 조도· 색온도 도출. 조명· 전기설비학회논문지, 31(7), 1-14.
- [3] 한상필. (2012). 실내조명환경의 시각적 쾌적성 확보 및 조명부하 저감을 위한 채광제어방법에 관한 연구. 한국태양에너지학회 논문집, 32(6), 100-105.
- [4] Soori, P. K., & Vishwas, M. (2013). Lighting control strategy for energy efficient office lighting system design. Energy and Buildings, 66, 329-337.