

에너지 절감을 위한 조명 영향도 기반 그리드 조명 시스템 구현

이세현*, 오승택**, 임재현*

*공주대학교 컴퓨터공학부

**공주대학교 스마트자연공간연구센터

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

Implementation of Grid Lighting System based on the Influence of Lighting for Energy Saving

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

인공조명에 대한 의존도가 높아짐에 따라 실내 빛 환경의 질적 향상에 관심이 높아지고 있다. 다수의 광원을 사용하여 실내 빛 품질을 향상하는 그리드 조명 기술이 제시되고 있으나 에너지 소비 증가는 불가피하다. 이전 연구에서는 조명 영향도를 기반으로 에너지 사용을 최소화하는 조명의 선택 방법을 제안하였다. 본 논문에서는 실시간으로 빛이 변화하는 환경에서 조명의 영향도에 기반하여 에너지를 절감하는 시스템을 구현한다. 조명 시스템의 구현을 통해 09:00~18:00 까지 평균조도 500Lux, 균제도 0.3 이상을 유지하면서 일반 조명환경 대비 45% 에너지 소비가 절감됨을 확인하였다.

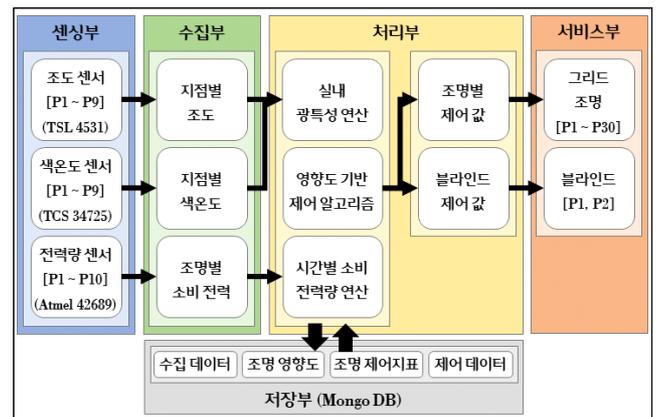
1. 서론

현대에는 건축물들이 대형화되고 밀집된 환경으로 변화하면서 인공조명에 대한 의존도가 증가하고 있다[1]. 이에 따라 재실자의 시쾌적성과 작업 능력에 영향을 미치는 인공조명의 질적 향상에 관심이 높아지고 있다[2]. 실내에 균일한 빛 환경을 제공하기 위해 다수의 광원을 사용하는 조명 기술이 제시되고 있다[3]. 그러나 광원의 개수가 늘어남에 따라 증가하는 에너지를 절감하기 위해 조명의 에너지 효율이 높은 제어 방법이 필요하다. 이전 연구에서는 다수의 광원을 사용하는 환경에서 에너지 소비를 최소화하기 위해 조명의 지점별 영향도를 적용한 제어 대상 조명의 선택 방법을 제안하였다[4]. 영향도는 조명 조도와 지점별 제공 조도의 비율을 나타내는 것으로 조명의 제어에 따른 실내 각 지점에 제공되는 실제 조도를 계산할 수 있다. 그러나 자연광의 유입 등 외부요인에 의해 실시간으로 광특성이 변화하는 실제 환경에 적용하여 결과를 확인하는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서는 조명 영향도 기반 그리드 조명 시스템을 구현하여 조명 에너지 절감 효과를 확인한다. 자연광의 변화에 따라 실내 각 지점에 필요한 조도를 연산한다. 이후 조명의 영향도 기반 제어를 통해 균일한 빛 환경과 조명의 소비 에너지 절감을 실현한다.

2. 에너지 절감 그리드 조명 시스템

본 논문에서는 영향도 기반 제어 방법을 구현하여 조명의 에너지 소비를 절감하는 그리드 조명 시스템을 구현하였다. 그림 1은 그리드 조명 시스템의 구성도이다.



[그림 1] 그리드 조명 시스템의 구성도

그리드 조명 시스템은 센싱부, 수집부, 처리부, 저장부, 서비스부로 구성하였다. 제안 시스템은 Windows 10 운영체제에서 Javascript 언어 기반의 Node.js 프레임워크를 사용하여 구현하였으며 데이터베이스는 MongoDB를 사용하였다.

센싱부는 조도(TSL 4531), 색온도(TCS 34725), 전력량

(Atmel 42689) 센서를 사용하였다. 조도 및 색온도 센서는 국가기술표준원에서 규정한 KS C 7612 조도 측정 방법에 따라 바닥면에서 850mm 높이에 측정 영역을 동등한 크기의 면적으로 분할하여 9개(P1~P9) 지점에 배치하였다. 또한, 천장면에 배치된 조명의 전력을 측정하기 위한 전력량 센서를 설치하였다.

수집부는 조도 및 전력량 데이터가 저장되는 게이트웨이와 통신하는 UDP 개별 수집부와, 색온도 센서와 통신하는 HTTP 개별 수집부로 구성하였다. 개별 수집부의 데이터는 통합 수집부에서 TCP 통신을 통해 수집되고 MQTT 통신을 통해 처리부로 전송한다. 그림 2는 조도 및 조명별 소비 전력량 수집과정을 나타내는 의사코드이다.

```

(a) Individual Collection Unit
1: Request Sensing Data to INTSAIN Gateway by UDP
2: Receive Illuminance and Power Data by UDP
3: Collect Received Data
4: if All Data is Collected
5:   Send Collected Data to Integrated Collection Unit by TCP
   (data: {(name: cnt_illum_1, value: illuminance_value), ... ,
           (name: cnt_power_1, value: power_value), ... ,
6: endif

(b) Integrated Collection Unit
1. Receive INTSAIN and CCT Collection Unit Data by TCP
2. Collect Received Data
3. if All Data is Collected
4.   Send Collected Data to Processing Unit by MQTT
   (data: {(name: cnt_illum_1, value: illuminance_value), ... ,
           (name: cnt_power_1, value: power_value), ... ,
           (name: cnt_cct_1, value: cct_value), ... ,
5. endif
    
```

[그림 2] 조도 및 전력량 수집과정 의사코드

처리부는 실내 광특성 연산, 기반 제어 알고리즘, 시간별 소비 전력량 연산을 수행하였다. 그림 3은 처리부에서 실내 광특성 연산에 대한 의사코드이다.

```

1: set standard_illuminance to 500lux
2: set standard_uniformity to 0.3
3: Receive Integrated Collection Unit Data by MQTT
4: Calculate Indoor Light Characteristics
5: Calculate needed_illuminance
6: Store RealTime Sensing and Calculated Data
6: if -5lux < needed_illuminance < +5lux and uniformity > 0.3
7:   Return to Step 1
8: else
9:   Call Control Fuction based on Influence of Lighting
10: endif
    
```

[그림 3] 처리부의 실내 광특성 연산 의사코드

실내 광특성 연산의 초기화 단계로 제어기준 조도를 500Lux로 설정하고 기준 균제도를 0.3으로 설정하였다. 다음으로 MQTT 통신을 통해 통합 수집부에서 전송하는 모든 센

싱 데이터를 수신한다. 광특성 연산단계에서 평균 및 최소 조도, 균제도(최소조도/평균조도) 연산을 수행하였다. 또한, 기준조도에 평균조도를 감산하여 필요조도를 연산하였다. 이후 필요 조도가 $\pm 5\text{Lux}$ (기준조도의 1%) 내로 부합하는 경우 그림 3의 Step 1로 복귀하였으며 부합하지 않는 경우 조명의 영향도 기반 제어 기능을 수행하였다. 그림 4는 영향도 기반 제어 기능 중 필요조도가 -5Lux 이하일 때 조도를 감소하는 영향도 기반 제어 의사코드이다.

```

1: Read LED of max point
2: Read influence
3: Read control_indicator
4: Read current_index
5: for i = 0 to LED.length
6:   for j = current_index[LED[i]]-1 to 0
7:     Set provide_illuminance[P1~P9] to control_indicator[j]*influence[LED[i]][P1~P9]
8:     if -5Lux < (needed_illuminance - Average(provide_illuminance[P1~P9])) < 5Lux
9:       Send list of control_LED and control_value to Service Unit
10:      Return to Step 1 of Calculate Indoor Light Characteristics
11:     endif
12:   endfor
13: endfor
14: if i == 0
15:   Send blind angle 5 degrees to Service Unit
16:   Return to Step 1 of Calculate Indoor Light Characteristics
17: endif
18: endif
19: endfor
    
```

[그림 4] 조도를 감소하는 영향도 기반 제어 의사코드

저장부는 수집 데이터, 조명 영향도, 조명 제어지표, 제어데이터가 저장되어 있다. 수집 데이터는 실시간 센싱부 데이터(조도, 색온도, 전력량), 실내 광특성 연산을 통해 산출된 데이터(평균조도, 균제도, 필요조도), 1시간 단위로 합산된 소비 전력량 데이터이다. 조명 영향도는 개별 조명의 실내 각 지점에 미치는 영향도 및 영향도 기반 지점별 조명 리스트이다. 조명 제어지표는 조명의 4채널 제어에 따른 실현 조도 및 색온도 데이터이다. 제어데이터는 처리부에서 도출된 장치별 실시간 제어데이터이다.

서비스부는 수집부와는 반대로 통합서비스부에서 MQTT 통신을 통해 제어 장치 및 값 목록을 수신하고 분류하고 TCP 통신을 통해 개별 서비스부로 전송하였다. 개별 서비스부에서 조명은 UDP 통신을 통해 제어 게이트웨이로 전송하였고 블라인드는 Zigbee 모듈을 통해 제어 명령을 블라인드로 전송하여 제어하였다.

3. 실험 및 평가

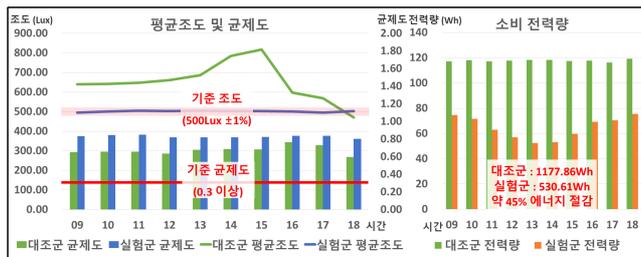
영향도 기반 알고리즘을 구현하여 적용한 조명 시스템의 성능 평가를 위해 실험환경을 구축하였다. 위도 36°, 경도 127°에 있는 K 대학 건물 내 연구실(4층)에 그림 5와 같이 실험환경을 구성하였다.



[그림 5] 성능 평가 실험환경

바닥면에는 실내 공간을 9개의 균등한 영역(P1~P9)으로 구분하고 실내 광특성 계측을 위한 조도 및 색온도 센서를 85cm 높이에 설치하였다. 천장에는 일정한 간격으로 30대(5행×6열)의 LED 광원을 배치하여 그리드 조명을 구성하였다. 조명의 소비 전력량을 계측하기 위해 전원부에는 전력량 센서를 설치하였다. 창문에는 자연광의 유입량을 조절하기 위해 베네시안 블라인드를 설치하였다.

실험은 영향도 기반 조명 제어시스템을 적용한 실험군과 일반조명환경의 대조군으로 구성하였으며 2022년 5월 12일에 09:00~18:00까지 진행하였다. 대조군은 조도 500Lux 및 색온도 5,400K로 고정된 4대의 LED 광원으로 설정하였다. 평균조도 및 균제도 변화와 조명의 소비 전력량을 비교하였고 기준 조도(500Lux ±1%)와 균제도(0.3 이상)의 만족 여부를 확인하였다. 그림 6은 평균조도 및 균제도, 조명의 소비 전력량 변화를 나타낸 것이다.



[그림 6] 평균조도 및 균제도, 소비 전력량 변화

실험군은 09:00~18:00까지 모든 시간대에서 기준조도(500Lux)의 ±1% 이내를 유지하였다. 그러나 대조군은 17:00 이후 일부 시간에 기준조도를 충족하였으나 이를 제외한 모든 시간대에서 기준조도보다 높은 조도를 제공하였다. 균제도는 대조군과 실험군 모든 실내 권장 균제도 0.3 이상을 충족하였으나 대조군은 평균 0.67, 실험군은 0.83으로 실험군이 상대적으로 높은 균제도를 유지하였다. 조명의 소비 전력량에서 대조군은 시간당 약 118Wh의 고정된 전력을 소비하였으나 실험군은 자연광의 유입량에 따라 조명을 가변적으로 제어하여 시간당 전력소비량이 다르게 계측되었다. 09:00~18:00까지 조명의 소비 전력량 총합은 대조군은 1177.86Wh, 실험군은 530.61Wh로 하루 동안 약 45%의 에너지 절감효과

를 나타내었다. 이를 통해 구현한 조명 시스템은 기준 조도(500Lux ±1%) 및 균제도(0.3 이상)를 충족하면서도 조명의 에너지를 절감할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 다수의 광원이 사용되는 그리드 조명에서 개별 광원의 영향도 기반 제어를 통해 조명 에너지를 절감하는 시스템을 구현하였다. 그리드 조명 시스템의 성능 평가를 위해 09:00~18:00까지 고정된 조도를 제공하는 일반 조명환경과 평균조도 및 균제도, 소비 전력량 비교실험을 수행하였다. 실험군은 모든 시간대에서 기준 조도(500Lux ±1%)와 균제도(0.3 이상)를 유지하였다. 그러나 대조군은 기준 균제도는 유지하였으나 자연광의 유입이 적은 17:00 이후 일부 시간대를 제외하고 과도한 조도 환경을 조성하였다. 또한, 실험군은 대조군보다 530.61Wh의 에너지를 적게 사용하여 약 45%의 에너지 절감 효과를 확인하였다.

향후 사계절 및 다양한 기상 조건에서의 추가 실험을 통해 그리드 조명 시스템의 성능을 향상하고 상용화를 위한 연구를 진행할 예정이다.

※ 이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2019R1A6A1A03032988)
 ※ 이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 수행된 미래 지하시 연구사업임.

참고문헌

- [1] 김용호, 이권형, 장갑석, 최용훈, 김훈, “사용자 요구조건 보장 에너지 효율적 LED 조명 제어 기법”, 한국통신학회 논문지, 제 36권 11호, pp. 1383-1388, 11월, 2011년.
- [2] Chanjuan Sun, Zhiwei Lian, and Li Lan, “Work performance in relation to lighting environment in office buildings”, Indoor and Built Environment, 제 28권 8호, pp. 1064-1082, 12월, 2018년.
- [3] Ono K, Miki M, Yoshimi M, Nishimoto T, Om T, Adachi H, ..., Kasahara, Y. “Development of an intelligent lighting system using LED ceiling lights into an actual office”, Electronics and Communications in Japan, pp. 제 95권 10호, pp. 54 - 63, 9월, 2012년
- [4] 신일섭, 가덕현, 오승택, 임재현, “에너지 절감을 위한 조명의 영향도 기반 제어 방법”, 한국정보과학회 학술발표 논문집, pp. 172-174, 6월, 2021년.