

사용자 요구 조도 보장 에너지 효율적 실내 조명 시스템 조명 방향 및 광속 제어 기법

(A Lighting direction and Luminous Flux Control for Energy-efficiency
under Illuminance Requirements in Indoor Lighting Systems)

김 훈*

(Hoon Kim)

Abstract

The management of energy resources for efficient utilization of the energy resources while reducing the system costs is a critical technical issue. Among many kinds of the energy resource management, the energy reduction for indoor lighting systems is getting much concern as a large portion of energy consumption has been made for indoor lightings. In this paper, an energy-efficient lighting control scheme for indoor lighting systems in order to reduce the energy consumption by controlling the luminous flux and the lighting direction under the illuminance constraints is proposed. With the use of the user location information for the luminaire which is closely located to the user, the proposed scheme firstly sets the light direction of the luminaire to be aligned to the user location. Then, an optimization problem to find the luminous flux of each luminaire is formulated in order to minimize the luminous flux sum of the luminaires with the constraints for the dynamic range of the luminous flux, and the light flux for each luminaire is determined by the solution of the problem. Simulation results show that the proposed scheme outperforms the luminaire control scheme with only the luminous flux control in the evaluation of satisfaction of the required illuminance level.

Key Words : Indoor Lighting Systems, Optimization, Luminaire Control, Lighting Direction, Luminous Flux

1. 서 론

1.1 연구의 배경

미래 에너지 고갈과 환경 변화 등에 대한 세계적인 관심이 증가하고 있으며, 이에 대한 대책으로 에너지 절감에 관한 규제와 연구개발이 큰 관심을 받고 있다[1]. 특히 전체 에너지 소비 중 건물 분야 에너지 소

* Main author : Associate Professor, Department of
Electronics Engineering, Incheon National
University
Tel : 032-835-4784, Fax : 032-835-4777
E-mail : hoon@inu.ac.kr
Received : 2015. 3. 5
Accepted : 2015. 4. 30

비가 전체의 24% 수준으로 빌딩에너지의 효율적 관리가 에너지 절감에 큰 비중을 차지한다고 알려져 있다 [2]. 또한 건물내 에너지 소비 중 인류의 일상 생활, 업무 등에 밀접한 관련이 있는 조명에 대한 에너지 비율이 30% 수준으로 조명 분야 효율적인 에너지 절감을 위한 연구가 어느 때 보다 중요하게 인식되고 있다[3].

실내 조명시스템에서의 에너지 절감 기술은 이와 같은 측면에서 기술적 수요와 매우 크다 하겠으며, 최근 사용자에게 필요한 적절한 요구 조도를 유지하면서 에너지 효율을 개선하기 위한 조명시스템 운영 방안 연구가 진행된 바 있다[5-9]. 사용자의 위치에 따라 실내 각 영역에서 요구조도를 달리하여 에너지 소모를 최소화하는 문제를 고려하고 선형계획법(Linear Programming)에 기반을 두어 조명의 광속을 제어하는 기법이 제안되었다[5]. 그리고 사용자 만족과 에너지 소비에 관한 효용함수(utility function)를 정하고 이를 최대화하는 광도 제어 기법이 제안되었다[6]. 또한 자연광과 블라인드의 실내 조도에 미치는 영향이 반영된 광도 제어 기법이 제안되었다[7]. 또한 다수 광원을 사용하는 light-emitting diode(LED) 사용 환경을 고려하여 사용자의 요구조도를 만족하면서 LED 조명 시스템 에너지 효율 극대화를 위한 LED 조명 개별 광원의 광도 및 방사각 제어 방안이 제안되었다[8]. 또한 스마트폰을 활용한 조명제어시스템 구현에 대한 연구가 수행된 바 있다[9].

이상의 연구에서 조명기구의 광원과 조명각 등에 대한 효과적인 제어를 통한 에너지 소비 절감 방안에 대한 제안이 있어 왔으나, 보다 유연한 조명기기 제어를 통해 조명시스템 에너지 효율의 상당 수준 향상을 추가로 기대할 수 있다. 최근 조명기구의 제어 요소에 광속, 방사각 외에 조명 방향에 대한 조절과 제어와 관한 연구개발이 진행되고 있다[12-14]. 즉 조명 방향의 조절의 효용성과 이의 효과적인 제어 기술에 관한 연구와 개발이 진행되고 있는 상황으로, 조명 방향의 제어를 포함한 보다 효과적인 조명 기구 제어 방안에 대한 고찰이 요구된다. 본 논문에서는 조명기구의 기존 제어 기법과 더불어 조명 방향의 조절을 통해 보다 효과적인 요구 조도 보장과 에너지 효율 향상을 위한 방안이 가능할 수 있음을 고려하여 이에 기반한 조명 기

구 제어 기법에 관한 연구를 수행한다.

1.2 연구의 목적 및 방법

본 논문에서는 실내 조명 시스템에서 조명 기구의 전력과 조명 방향을 효과적으로 조절함으로써 사용자의 요구 조도를 보장하고 전체 소모되는 에너지량을 최소화하는 방안을 제시한다. 사용자 위치 정보, 요구 조도 정보 등을 바탕으로 실내 조명 시스템 제어에 조명 방향과 광속 제어를 효과적으로 병행하는 방안을 고려한다. 즉 사용자의 위치를 고려하여 조명 방향을 제어하고 사용자 요구 조건을 만족하면서 전체 조명 기구의 에너지를 최소화하는 광속 제어에 관한 최적화 문제를 구성한다. 최적화 문제는 선형계획법 형태로 정리하여 Matlab 함수 등으로 해의 도출이 용이하도록 한다. 아울러 요구 조도와 실내 환경의 변화에 따른 요구 조도 만족도 및 에너지 저감 성능을 컴퓨터 모의 실험을 통해 분석한다. 광속 제어와 조명 방향 제어의 유무에 따른 요구 조도 만족도와 에너지 소비 수치를 분석하고 제안 방식을 통해 요구 조도 만족도와 에너지 소모 성능이 개선됨을 보인다.

2. 시스템 모델

본 논문은 그림 1과 같이 조명기구를 통해 피조면에 위치한 사용자 요구 조도를 만족시키는 조명 시스템을 고려한다. 피조면은 정사각형 모양을 가지며, 조명 기구가 하나씩 배치됨을 가정한다.

또한 사용자는 피조면 내에서 임의의 자리에 위치하며, 사용자의 위치 정보가 센서 등을 통해 오류 및 전송 지연 없이 가능함을 가정한다. 본 논문에서 그림에서와 같이 조명 방향(lighting direction)으로부터 일정 각도 이내로 광원이 방출됨을 가정하고 이를 조명의 평면각이라 한다. 즉 조명 기구의 배광은 조명 기구에 따라 상이할 수 있으며, 본 논문에서는 평면각 내부의 광도가 균일하고 평면각 외는 0으로 가정한다. 조명 기구 i 의 평면각을 ϕ_i 로 나타낸다. 아울러 θ_{ij} 는 조명 기구 i 의 조명 방향과 사용자 j 간의 각을 나타내며, 그림 1은 조명 방향이 피조면과 수직으로 설정된 경우가

다. 조명 방향이 임의로 설정될 수 있음을 감안하여 조명 방향 벡터를 D_i , 조명의 위치로부터 사용자 지점의 방향 벡터를 D_j 로 각각 나타내면, θ_{ij} 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

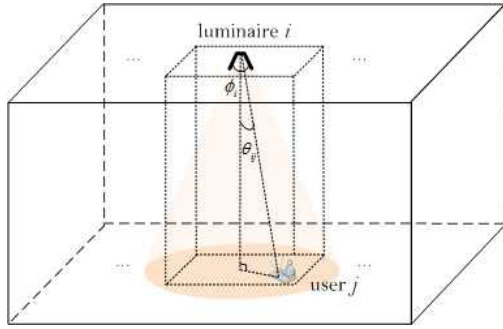


그림 1. 실내 조명 시스템 구성도
Fig. 1. System model for Indoor Lighting Systems

$$\theta_{ij} = \arccos\left(\frac{D_j \cdot D_i}{|D_j||D_i|}\right) \quad (1)$$

조명기구와 피조면간에 line-of-sight(LOS) 링크가 형성되어 있음을 가정하면, 조명기구 i 로부터의 사용자 j 위치로의 수신되는 조도(illuminance) e_{ij} 는 (1)과 같이 정리될 수 있다. 이 때 반사 등에 의한 조도는 무시할 수 있는 수준으로 가정한다.

$$e_{ij} = \begin{cases} \frac{f_i \cos\theta_{ij}}{2\pi \left(1 - \cos\frac{\phi_i}{2}\right) d_{ij}^2}, & \text{if } -\frac{\phi_i}{2} \leq \theta_{ij} \leq \frac{\phi_i}{2} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2)$$

f_i 는 조명기구 i 의 광속을 의미하며, d_{ij} 는 사용자 j 와 조명기구 i 간의 거리이다. 그림 1과 같은 평면 피조면에서의 수신 조도는 조명에서의 광속을 투영입체각(projected solid angle)과 조명 기구-사용자 위치간 거리 제곱의 곱으로 나눈 값에, 다시 조명 기구와 사용자간 각의 코사인(cosine)값을 곱한 것으로 산출되며, $2\pi \left(1 - \cos\frac{\phi_i}{2}\right)$ 로 계산되는 투영 입체각을 대입하여 (2)와 같이 표현된다[10-11]. 또한 총 L 개의 조명기구가 배치된 상황에서, 다수의 조명기구가 사용자 j 의 조도에 영향을 줄 수 있음을 감안하면 사용자 j 에서의

조도는 다음과 같이 정리된다.

$$E_j = \sum_i^L e_{ij} \quad (3)$$

조명기구의 광속은 최대치 범위 내에서 조절이 가능하고 조명 방향은 조명기구의 회전이나 중심축 제어를 통해 가능성을 고려한다.

3. 에너지 저감을 위한 조명 방향 미 광속 제어 기법

본 장에서는 평면각이 일정하게 유지되는 조건에서 사용자 위치에 따라 사용자 요구 조도를 만족하면서 전체 조명 시스템의 소요 에너지를 최소화하는 조명 방향 및 광속을 순차적으로 제어 방안을 제시한다.

3.1 조명 방향 결정

피조면 사용자 위치 지점에서의 조명기구-사용자간 각에 따른 조도 감쇄 효과를 최소화하기 위해 조명 방향을 사용자 위치 방향에 정렬한다. 이는 조명 방향에 대한 벡터를 사용자의 위치 좌표 벡터($J(j_x, j_y, j_z)$)에서 조명의 위치 좌표 벡터($I(i_x, i_y, i_z)$)에 대한 차로 하여 결정된다. 이에 따라 조명 방향 단위 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$D_i = \frac{(j_x, j_y, j_z) - (i_x, i_y, i_z)}{|(j_x, j_y, j_z) - (i_x, i_y, i_z)|} \quad (4)$$

3.2 광속 결정

조명 방향이 결정된 상태에서 사용자 요구 조건을 만족하면서 에너지 소모를 최소화하기 위한 광속 결정 문제를 구성하고 이의 해를 도출하여 조명 기구의 광속 제어에 적용한다. 시스템 전체의 에너지 소모를 고려하기 위해 조명기구 i 의 전력 소모가 광속 f_i 에 비례함을 가정하고 이의 합을 최소화하는 문제 P₀를 고려한다. (1), (2)로부터 각 조명 기구로부터의 피조면까지의 조도가 계산되며, 각 사용자 위치에서 요구 조

도 이상의 조도가 유지되는 제약조건을 고려한다. 또한 조명기구에서의 광속 및 회적각의 최대, 최소값이 존재함을 고려하면, P_0 는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$(P_0) \min \sum_{i=1}^L f_i \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^L \frac{f_i \cos \theta_{ij}}{\pi \sin^2 \left(\frac{\phi_i}{2} \right) d_{ij}^2} 1_A \geq E_{ij}^r \quad (6)$$

$$f_{\min} \leq f_i \leq f_{\max}$$

$$1_A = \begin{cases} 1, & \text{if } |\theta_{ij}| \leq \frac{\phi_i}{2} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases}$$

본 논문에서는 MATLAB의 linprog() 함수를 활용하여 광속에 관한 최적해를 구한다. 주어진 광속의 범위에서 어느 한 사용자의 요구 조도가 만족되지 않을 경우 Outage가 발생한 것으로 간주한다. 이를 알고리즘 Flowchart로 정리하면 다음 그림 2와 같다. 우선적으로 조명 방향을 조명으로부터의 사용자 위치 방향에 일치시킨다.

각 사용자 j 에 대해 가장 가까이 위치한 조명기구를 선택하여 조명의 중심 방향이 사용자 위치를 향하도록 조명 방향을 결정한다. J 는 사용자 수이다. 또한 이어 최적 광속 결정을 위한 P_0 를 구성하고 MATLAB 함수를 이용한 해를 도출한다. 즉 (4)는 조명기구-사용자 간 각에 따른 조도 감쇄량이 최소가 되도록 조명 방향을 사용자 위치 지점에 정렬하는 방안이며, (5), (6)은 조명 방향과 요구 조도 수준, 최대 광속 등이 주어진 조건에서 요구 조도 수준을 만족하면서 소모되는 광속의 합을 최저로 하는 최적화 문제를 수식화하여 구성한 것이다. (5), (6)의 문제 P_0 의 해가 주어진 상황과 요구 조건을 만족하는 조명 기구별 광속이 되며, 이를 Matlab의 linprog() 함수를 활용하여 구하는 것이 된다. Matlab의 linprog() 함수는 P_0 와 같은 선형 계획법 최적화 문제의 해를 구하는 함수이며, P_0 의 관계식과 알려진 변수값을 입력으로 하였을 때 해에 해당하는 조명 기구별 광속 값을 도출한다. 따라서 (4), 그리고 (5), (6) 문제의 해를 통해 모든 조명기구에 대

해 원하는 값을 찾게 된다. 이 때 도출된 해가 광속의 가변 범위를 벗어날 경우 Outage 발생 횟수가 추가된다. 제안 방식의 성능 분석을 위해 사용자 위치를 변화하면서 Outage 확률을 분석할 수 있다.

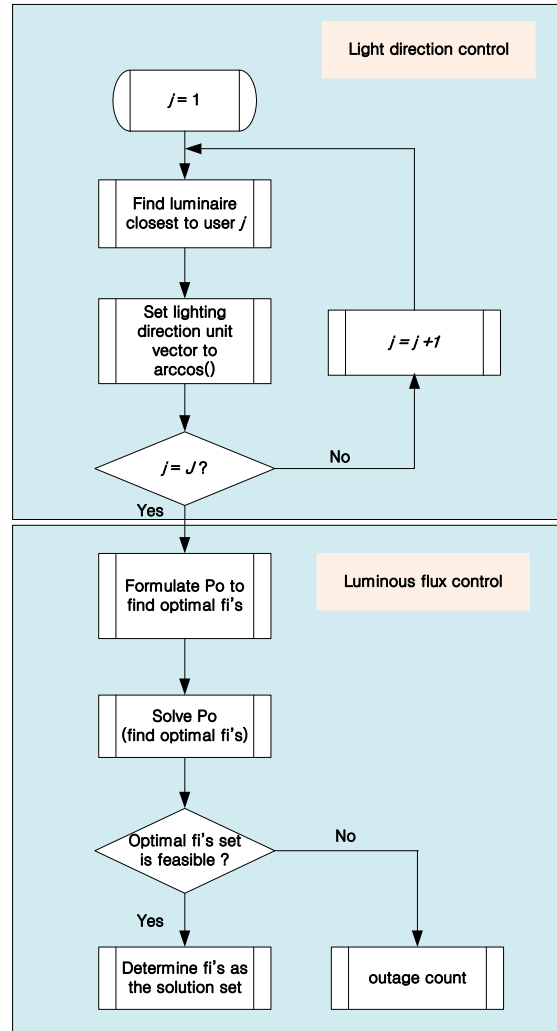


그림 2. 조명기구 조명 방향 및 광속 제어 알고리즘
Fig. 2. Proposed Lighting direction and luminous flux control algorithm

4. 모의실험 결과

4.1 모의실험 환경

제안된 방식의 성능 분석을 위한 모의실험을 수행한

다. 실내 피조면은 정사각형 모양의 격자가 정방향으로 된 모양을 가정하고, 단위 피조면 한 변의 길이를 1.2m, 피조면 밑면으로부터 조명기구가 설치된 면까지의 높이를 2m의 경우를 고려한다. 또한 피조면에 조명기구가 1개씩 설치되어 있고, 단위 피조면의 수가 각각 1, 4, 9인 경우를 가정하며, 조명기구의 평면각은 50°, 55°, 60° 등 3가지 경우를 고려한다. 이와 같은 실내 구조 및 평면각 환경은 각 조명 기구가 해당 피조면 전체를 조명 가능 범위로 포함하면서 조명 방향 제어에 따른 사용자 위치에서의 심각한 눈부심을 피할 수 있는 상황으로 간주될 수 있다. 사용자가 요구하는 조도는 학교, 주택, 사무실 등 실내 용도에 따라 200lx 이상으로 설정되어 권고되고 있다[15]. 본 모의 실험에서 요구 조도에 대한 성능을 200lx 이상으로 설정하고 10,00회의 모의실험 수행을 하여 Outage 확률 0.5 이내 범위의 성능을 고찰한다. 이와 같은 모의실험 파라미터를 표 1과 같이 정리한다.

표 1. 모의실험 파라미터
Table 1. Simulation parameters

파라미터	수치
실내 구조	직육면체 (정방향 피조면)
단위 피조면 길이	1.2m, 1.3m
실내 높이	2m
피조면 수	1, 4, 9
피조면당 조명기구 수	1
고정 중심각	50°, 55°, 60°
모의실험 반복회수	10,000
요구 조도/Outage 성능구간	200lx 이상/0.5이하
최대 광속	1000lm

4.2 모의실험 결과

그림 3~5에서 주어진 실내조명시스템 환경에 대해 가용 광속 범위 내에서 사용자의 요구조도를 만족하지 못하는 Outage 발생 빈도를 비교한다. 제어 기법으로는 조명 방향을 피조면과 수직으로 두면서 광속에 대한 P_0 의 최적해를 구하여 적용한 방법(Normal)과

그림 2와 같이 조명 방향과 광속을 함께 제어하는 방법(Directional)을 비교한다. 또한 평면각을 각각 50°, 55°, 60°로 변화하면서 결과를 비교한다.

그림 3은 피조면 수가 1인 환경에 대한 모의실험 결과이다. 즉 조명 기구, 사용자 수가 1인 경우이다. 가로축은 요구 조도 수치로 주어지는 값이며, 세로축은 해당 요구 조도 수준을 만족하지 못하는 빈도를 나타낸다. 즉 세로축은 가로축으로 주어지는 요구 조도 수준을 만족하지 못하는 사건의 발생 횟수를 총 모의실험 횟수로 나눈 수치이다. 그림에서 보듯 평면각이 좁을수록 Outage 확률이 감소됨을 알 수 있다. 이는 평면각이 해당 조명 기구의 피조면을 모두 비출 수 있도록 설정될 경우 보다 작은 평면각을 사용함으로써 단위 면적에서의 조도는 그만큼 상승하는 것에 기인한다. 또한 Normal 방식의 요구 조도 달성 성능보다 Directional 방식이 보다 나은 성능을 거둬들일 수 있다. 즉 Directional 방식으로 평면각 50°, 55°, 60°에 대해 240lx, 290lx, 340lx의 요구 조도 수준을 Outage 없이 만족하였으며, Normal 방식 대비 Outage가 발생하지 않은 요구 조도 수치에서 20~30lx의 가량의 성능 개선을 보임을 알 수 있다.

그림 4는 피조면 수를 4로 증가하여 얻은 결과이다. 이 때 조명 기구 및 사용자 수 역시 4가 된다. 그림 3의 결과와 비교하면 Outage 확률이 0을 달성하는 요구 조도 수준에서 차이를 볼 수 없는 반면, 동일 조건에서 요구 조도를 상승하는, 즉 Outage가 증가하는 상황에서는 전체적으로 보다 열화된 성능을 보임을 알 수 있다. 이는 사용자 수가 증가하면서 모든 사용자의 요구 조도 수준을 만족하여야 하여 동일 조건에서 Outage 확률이 보다 상승하기 때문이다.

그림 5는 피조면 수를 9로 증가하여 얻은 결과이다. 그림 3, 4 등의 결과와 비교하면 역시 Outage 확률이 0을 달성하는 요구 조도 수준에서 차이를 볼 수 없는 반면, 동일 조건에서 요구 조도를 상승할 경우 전체적으로 보다 열화된 성능을 보임을 알 수 있다. 앞의 분석에서와 같이 사용자 수가 증가함에 따른 것으로 이해할 수 있다.

그림 6은 Directional 방식에서의 조명 방향 제어 각의 분포를 나타낸다. 즉 가로축이 조명 방향에 대한

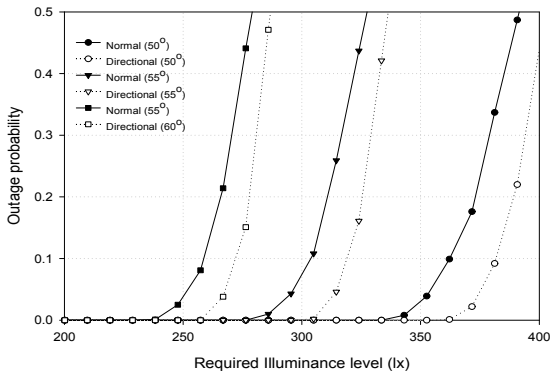


그림 3. 요구 조도 수준 vs. Outage 확률(피조면 수 : 1)
Fig. 3. Required illuminance level vs. Outage probability(number of floor grids : 1)

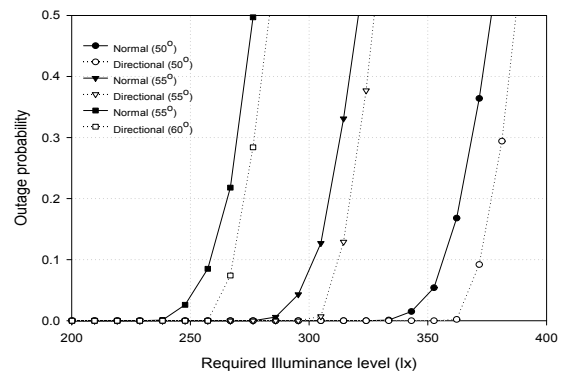


그림 5. 요구 조도 수준 vs. Outage 확률(피조면 수 : 9)
Fig. 5. Required illuminance level vs. Outage probability(number of floor grids : 9)

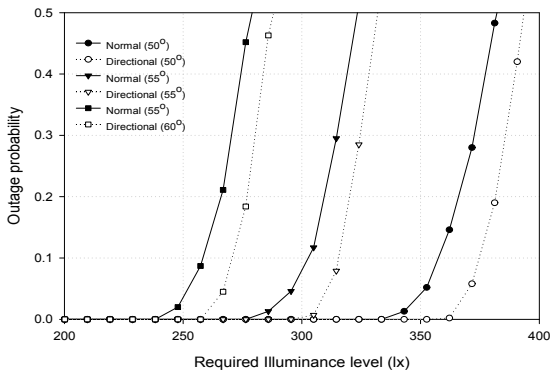


그림 4. 요구 조도 수준 vs. Outage 확률(피조면 수 : 4)
Fig. 4. Required illuminance level vs. Outage probability(number of floor grids : 4)

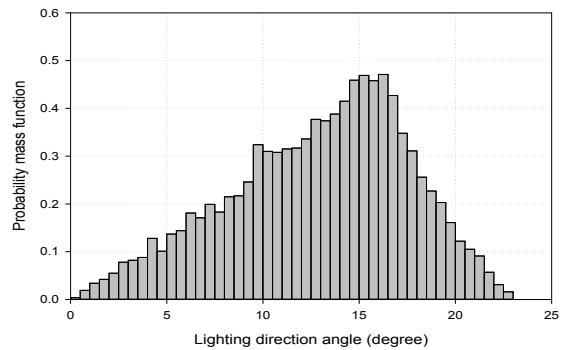


그림 6. 조명 방향 조정 각 분포
Fig. 6. Probability mass function for lighting direction angle

각을 의미하며, 세로축은 해당 각의 분포를 의미한다. 그림에서 보듯 피조면 길이 1.2m, 실내 높이 2m 환경에서 사용자의 위치 변화에 따라 일정 범위내의 분포를 가짐을 알 수 있다.

그림 7은 조명기구 및 피조면, 사용자 등의 수가 4인 경우 요구 조도 수준에 대한 광속의 분산을 나타낸다. Outage가 발생하지 않은, 즉 요구 조도를 만족하는 모의 실험의 경우에 대한 결과이다. 그림에서 요구 조도 수치가 높을수록 광속의 분산이 높게 나타남을 알 수 있으며, 이는 요구 조도 수치가 상승할수록 이를 만족하기 위해 더 높은 광속을 필요로 하고 그에 따라 광속의 분산 또한 높아짐에 따른 것이다. 또한 동일 요구 조도 수준에서 Normal 방식의 광속 분산이

Directional 방식에 비해 높게 나타났다. 이는 Normal 방식에서 인접 피조면이라 하더라도 상대적으로 사용자들이 가까이 위치한 조명 기구의 이용 효율이 높음으로 인해 해당 조명 기구의 광속이 높게 설정됨을 의미한다. 반면 Directional 방식에서는 각 피조면에 대응되는 조명 기구가 해당 피조면의 사용자의 위치에 맞춰지도록 방향을 설정하므로 인접 사용자의 조명 서비스에 미치는 영향이 상대적으로 크지 않음으로 인해 단일 조명 기구에 광속이 소수에 집중되기 보다는 여러 조명 기구에 보다 균일하게 정도가 낮게 설정된다. 그림에서 Directional 방식의 광속이 Normal 대비 1/2 이하 수준의 분산을 가짐을 보이며, 그만큼 광속의 균일도가 상승되도록 설정됨을 의미한다.

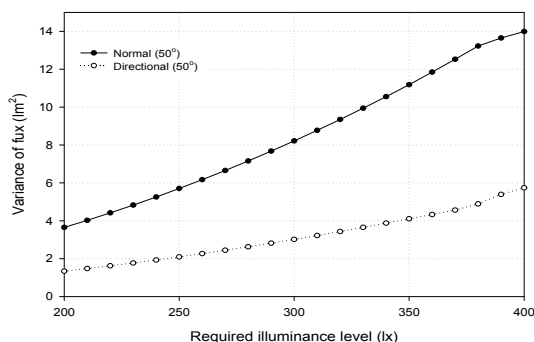


그림 7. 요구 조도 수준 vs. 광속 분산(피조면 수 : 4)
 Fig. 7. Required illuminance level vs. Variance of flux probability(number of floor grids : 4)

5. 결 론

본 논문에서는 실내 환경에서의 조명 방향 및 광속 제어를 통해 요구 조도를 만족하면서 효과적인 에너지 사용을 위한 방안을 제시하였다. 조명 방향이 사용자 위치를 향하도록 설정하고 주어진 광속 제한 범위에서 요구 조도를 효율적으로 만족하는 기법을 제안하고 성능을 분석하였다. 아울러 조명 방향과 광속을 동시에 제어함으로써 광속만을 제어하는 방식에 비해 Outage가 발생하지 않은 요구 조도 수준에서 개선된 성능을 보임을 확인하였다. 향후 간접 조명, 그림자에 의한 조도 손실 등 보다 다양한 실내 조명 환경을 고려하고 추가적인 조명 서비스 요구 조건, 이용 정보의 정확도 개선 및 오차에 따른 성능 분석, 조명 방향의 최적 설정 등을 통한 성능 개선 등의 후속 연구 수행이 요구된다.

감사의 글

본 논문은 인천대학교 2012년도 자체연구비 지원을 받아 수행된 것임.

References

[1] Jeong-mo Gang, "LED related policies and trends in USA", Green Technology Information. Portal, Oct. 2010.
 [2] Energy saving statistics, Korea Energy Management Corporation(KEMCO), 2008.

[3] F. Domingo-Perez et al., "Lighting Control System based on DALI and Wireless Sensor Networks", Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES, pp 1-6, Jan., 2012.
 [4] T. Islam, I. Koo "Autonomous Indoor Lighting Device Control System Based on Wireless Sensor Network", J. of the Internet Television and Telecom., Vol. 11, No. 4, pp. 31-38, 2011.
 [5] Y. Wen et al. "Wireless networked lighting systems for optimizing energy savings and user satisfaction," Wireless Hive Networks Conference 2008 IEEE, pp.1-7, Aug. 2008.
 [6] V. Singhvi et al. "Intelligent light control using sensor networks," in Proceedings of the 3rd itn'l conference on Embedded networked sensor systems. San Diego, California, pp.1-7, Nov., 2005.
 [7] K. Park et al., "Workplane Illuminance Prediction Method for Daylighting Control Systems," Journal Solar Energy, Vol.75(4), pp.277-284. Oct., 2003.
 [8] Y. Kim, Kwon-hyung Lee, Kap-seok Chang, Yong-hoon Choi, Hoon Kim, "An Energy-efficient LED Lighting Control Scheme with Provision of User Illumination Requirement", Journal of the Korean Institute of Communications and Information Sciences(KICS), Vol. 36, No. 11, pp. 1383-1388, 2011.
 [9] Daesik Shin, Hoon Kim, "A Smart Lighting Management System with Satisfaction of User's Lighting Requirements), Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 27, No. 6, pp. 1-9, 2013.
 [10] A. V. Arecchi, T. Messadi, and R. J. Kosheh, "Field Guide to Illumination", SPIE Press, Bellingham, WA, 2007.
 [11] Joseph B. Murdoch, "Illuminating Engineering from Edison's Lamp to the Laser", Visions Communications, Washington D.C., USA, 2nd edition, 1994.
 [12] <http://www.thelightingsuperstore.co.uk/interior-lighting/spot-lights/240v-mains-voltage-spot-lights/recessed-spot-lights>.
 [13] <http://www.martinenergetics.com/lighting.html>.
 [14] <http://www.luminitco.com/node/178>.
 [15] KSA 3011, "Recommended levels of illumination," Korean Industrial Standards, 2008.

저자소개



김 훈(金 薰)

1971년 12월 27일생. 1998년 KAIST 전자공학과 졸업. 1999년 동 대학원 공학부 졸업(석사). 2004년 동대학원 공학부 졸업(박사). 현재 인천대학교 전자공학과 부교수.