

전기조명 제어 전략에 따른 조명에너지 소비량 평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Lighting Energy Consumption by Control Strategy of the Electric Lighting

윤 경* 김 강 수**
 Yun, Gyeong Kim, Kang-Soo

Abstract

The objective of this study is to evaluate the electric lighting energy consumption carried out by Daysim program. A comparison between the measurement and simulated exterior global horizontal illuminance shows differences about 10% and it is very similar to the measurement. The interior illuminance simulated by Daysim are 18.9% lower than the measurement and simulated lighting energy consumption is 10% lower than the measurement. Corrected annual lighting energy simulation results show that the best case is the combination of occupancy switch-off and dimming system with automatic controlled blinds (E-3). In case of no blinds, it occasionally derives the minimum lighting energy consumption but it causes the glare, so we need to be careful for choosing the control strategy. For the overcast sky, the lighting energy consumption is not changed significantly by control strategy while the lighting energy in the clear sky is changed noticeably. So we must know the right strategy for each case to control the electric lights and blinds.

키워드 : 전기조명, 제어 전략, 조명에너지, 디밍 제어, Daysim

Keywords : Electric lighting, Control logic, Lighting energy, Dimming control, Daysim

1. 서론

1.1 연구배경

사무용 건물의 경우 조명에너지는 전체 전기 소비량의 30% 이상을 차지하기 때문에 에너지 절감을 위해 적절한 조명 제어가 필수적이다[1][2]. 건물의 디자인 단계에서는 시스템 성능을 예측하기 위해 시뮬레이션을 활용한다. 자연채광 및 전기조명으로 인한 실내 빛 환경 분석에 사용되는 프로그램으로는 대표적으로 Radiance, Daysim[3], ECOTECT[4], EnergyPlus[5], SPOT[6] 등이 있으며 프로그램 각각의 알고리즘이 다르므로 적절한 프로그램을 선택해야 한다. 일반적으로 조명에너지는 재실자 스케줄 및 행동패턴, 차양 장치의 유무 및 제어 패턴, 조명 제어 방법 등에 의해 달라지며 Daysim 프로그램에서는 위의 요소들에 따른 조명에너지 소비량 결과를 조명스케줄로 제공하며 다른 프로그램과 연계가 가능한 장점이 있다.

1.2 연구목적 및 범위

본 연구는 조명 제어 전략에 따른 조명에너지 소비량을

평가하고 연간 조명에너지 소비량을 예측 평가하는 것을 목적으로 하며 빛 환경 시뮬레이션 프로그램인 Daysim 프로그램에서 조명 제어 전략에 따른 연간 조명에너지 소비량을 산출하고 측정 결과와의 비교를 통하여 분석하는 것을 내용의 범위로 한다.

2. 연구 방법

2.1 연구의 방법

본 연구에서는 Daysim 프로그램의 조명 제어 전략에 따라 연간 조명에너지 소비량을 평가하기 위하여

- 1) Daysim 시뮬레이션을 위한 case를 설정하고
- 2) Daysim 조명에너지 소비량을 산출하여 분석한 후
- 3) 측정 데이터와 Daysim 시뮬레이션 비교를 통해 제어 전략에 따른 연간 조명에너지 소비량을 예측 평가한다.

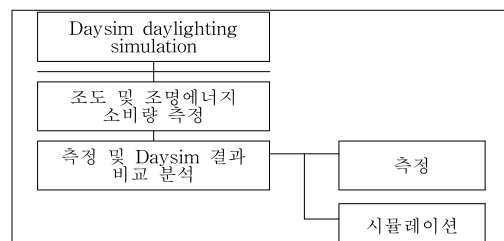


그림 1. 연구흐름도

* 주저자, 고려대학교 건축학과 석박사통합과정 (poprin@korea.ac.kr)

** 교신저자, 고려대학교 건축학과 교수 (kskim@korea.ac.kr)

2.2 Daysim 프로그램

Daysim 프로그램은 NRCC(National Research Council Canada)에 의해 개발된 동적 시뮬레이션 프로그램으로 시간에 따라 변하는 천공 조건에 대하여 1년 중 주광의 양을 산출할 수 있다. 기본적으로 3차원 모델과 건물 대지의 기상 데이터를 입력하며 기상 데이터로는 직달 및 확산 일사량 데이터가 포함된 EPW 파일을 직접 활용할 수 있다 [3].

2.3 Daysim 조도 계산 알고리즘

일반적으로 외부 수평면 조도는 외부 수평면 일사량에 발광효율을 곱하여 계산하며 이 때 발광효율은 Perez et al.[7]의 방식을 따른다. Perez et al.의 발광효율 모델은 sky clearness index (ϵ), solar zenith angle (Z), sky brightness index (Δ)와 atmospheric water content (W) 네 가지 변수를 이용하여 계산되며 각각의 식은 선행연구에 명시되어 있다[8, 9, 10].

Daysim은 Radiance 기반의 프로그램으로 실내 주광조도 계산에 광선역추적법(ray-tracing method)을 사용하며 계산 시간이 긴 반면 복잡한 형상을 가진 공간의 조도를 비교적 정확하게 계산할 수 있는 장점이 있다.

2.4 Daysim Daylighting Analysis

Daysim 프로그램에서 자연채광 및 조명 시뮬레이션 분석시 입력되어야 하는 항목에는 크게 재실자 프로파일, 사용자 요구 및 행동 패턴, 조명 및 차양 제어 시스템 세 가지가 있으며 본 연구에서는 조명 및 차양 제어 방식에 따른 조명에너지 소비량을 평가하였다.

1) Occupancy profile

재실자는 오전 9시부터 오후 6시까지 존재하며 점심시간 및 쉬는 시간에 따른 재실자 프로파일은 Lightswitch model [11]을 따른다.

2) User requirements and behavior

Daysim은 사용자가 입력한 최소 조도 레벨에 대하여 조명 및 차양 제어에 따른 조명에너지 소비량을 결과로 제공한다. 본 연구에서는 최소 조도 레벨을 500 lux[12]로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 재실자 행동 패턴은 크게 active와 passive로 나뉘는데 Lightswitch model에 따르면 active 타입의 사용자는 전기조명보다는 자연광을 선호하여 glare를 차단하는 수준에서의 자연광을 사용하며 passive 타입의 사용자는 연중 블라인드를 내리고 전기 조명을 사용한다.

3) Lighting and shading control system

Daysim은 조명제어방식 6가지[13]를 제공하며 내용은 다음과 같다.

- Manual on/off switch (case A): 문 근처의 on/off 스위치와 결합된 전기조명이 표준 매뉴얼[14]대로 일반적인 방법인 수동으로 제어되는 방식. 재실자가 도착했을 때 작업면 최소 조도에 대한 점등 가능성과 재실자가 나갈 때 자리를 비우는 시간에 대한 소등 가능성에 따라 조명에너지 소비량을 계산.

- Switch-off occupancy sensor (case B): 수동으로 켜지며 재실자 센서가 설치되어 매뉴얼이나 자동으로 꺼지는 시스템으로 조명이 켜져 있는 동안 3W의 대기전력을 소모함. Manual on (case A)과 occupancy sensor off (case C) 시스템이 결합된 방식으로 켜질 때는 주광의 양에 따라 재실자가 판단하여 점등하나 꺼질 때는 재실자 센서에 의해 자동 소등됨.

- Switch on/off occupancy sensor (case C): 재실자 센서에 의해 재실자 유무에 따라 전기 조명이 자동적으로 on/off 제어되며 24시간 대기전력 3W가 소모됨. Manual on/off (case A)나 switch-off occupancy sensor (case B)와는 달리 주광의 양을 전혀 고려하지 못하고 재실자가 감지되면 100% 켜지며 재실자가 없는 경우 소등됨.

- Photosensor controlled dimming system (case D): 문 근처의 스위치에 의해 매뉴얼대로 on/off 되며 점등되어있는 동안 작업면 기준조도를 만족시키기 위해 photocell이 조명을 디밍하며 디밍율이 최소 1%일 때의 시스템소비전력은 최대 소비전력의 15%이고 photocell의 대기전력은 2W.

- Combination switch-off occupancy & dimming system (case E): switch-off (case B)와 디밍시스템 (case D)이 결합된 방식으로 재실자센서의 대기전력 3W와 디밍을 위한 photocell 대기전력 2W의 합인 총 5w의 대기전력이 조명이 켜진 시간동안 소모됨.

- Combination switch on/off occupancy&dimming system (case F): switch on/off (case C)와 디밍시스템 (case D)이 결합된 방식으로 24시간 대기전력 5W가 소모됨.

본 논문에서는 조명 제어방식에 대하여 위의 case A부터 F까지 6가지 제어 방식에 따른 조명에너지 소비량을 비교분석하였다.

차양 시스템의 경우 Daysim에서는 컨트롤 방식에 따라 no blind, manual, automatic 세 가지로 나누어 분석하게 되며 내용은 다음과 같다.

- No movable shading: 광선반과 같은 고정 장치를 통해 glare가 방지되어 블라인드가 적용되지 않는 경우.

- Manual: 표준 실내 베네시안 블라인드가 설치되며 사용자 행동 패턴과 함께 active 또는 passive로 조절됨.

- Automatic: 이상적인 자동 블라인드 시스템으로 작업면에 닿는 직달일사량이 50 W/m² 이상이 되면 glare 방지를 위해 완전히 아래까지 블라인드가 내려오며 glare가 사라지면 블라인드가 올라감.

3. 측정 및 Daysim 시뮬레이션 비교 분석

3.1 측정 및 시뮬레이션 개요

Daysim 프로그램의 조도 및 조명에너지 결과의 활용도를 평가하기 위해 측정 데이터와의 비교 분석을 실시하였다. 측정이 이루어진 K대학교 실험실(서울)은 이중외피 구조로 정면은 30° 동향이며 자세한 개요는 그림 2와 표 1에 나타내었다.

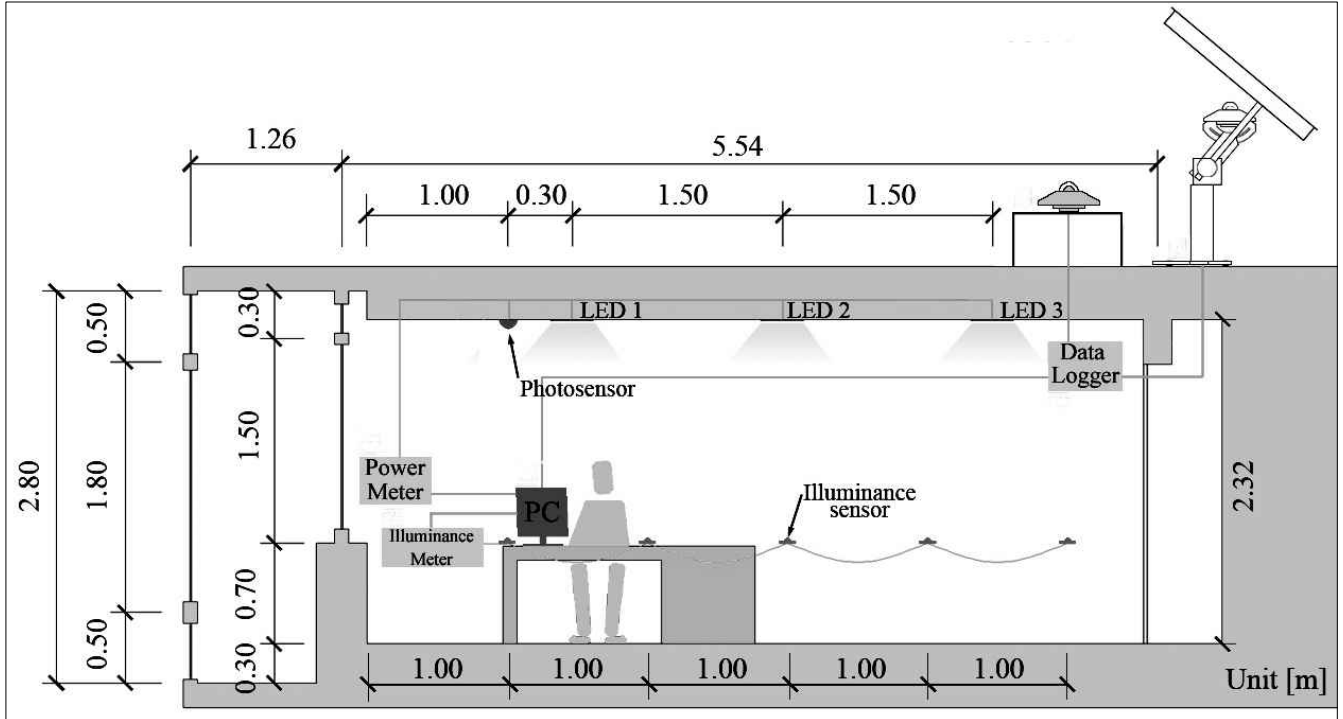


그림 2. 주광 디밍 제어 시스템의 측정을 위한 실험실 개요

표 1. 실내 표면 반사율 및 유리 투과율

구분	반사율	구분	투과율
바닥	16 %	이중외피 바깥쪽 창문	71 %
벽	50 %	이중외피 안쪽 창문	78 %
천장	70 %		

이중외피 공간의 바깥 창문은 바깥유리가 로이유리인 double Low-E window이며 안쪽 창문(double clear window)보다 가시광선 투과율이 약 7% 낮다. 그림 1과 같이 외부 일사량 및 조도를 측정하기 위해 LP-PYRA와 LP-PHOT를 설치하고 Data logger에 연결하여 데이터 저장 및 모니터링을 실시하였다. Minolta T-A21 조도계로 실내 조도를 측정하고 모든 데이터는 초(second) 단위로 PC에서 취합되었으며 측정된 데이터 항목은 exterior global horizontal irradiance (외부수평면전일사량, W/m²), exterior diffuse horizontal irradiance (외부수평면확산일사량, W/m²), exterior global horizontal illuminance (외부수평면전조도, lux), exterior diffuse horizontal illuminance (외부수평면확산조도, lux), interior workplane illuminance (실내작업면조도, lux), electric lighting energy (전기조명에너지, Wh)이다.

측정은 서울 지역(위도 37.6 N, 경도 126.7 E)에 대하여 2011/06/04~2011/10/20까지 총 98일간 실시하였으며 Daysim 시뮬레이션에 사용된 기상데이터는 기상청으로부터 제공 받은 외기온 (°C), 운량, 이슬점 온도 (°C)와 실험실 옥상에서 측정된 외부일사량 (W/m²) 및 외부조도 (lux), 계산된 값인 대기권 밖 일사량 (Extraterrestrial horizontal radiation, W/m²)을 입력하여 서울 지역의 새로운 웨더파일을 작성해 사용하였다.

3.2 측정 및 Daysim 시뮬레이션 결과 비교 분석

1) 결과 분석 방법

Daysim 프로그램에서 산출된 실내조도 및 그에 따른 조명에너지 소비량을 검증하기 위해 측정 데이터와 비교하여 분석하였으며 결과 분석에는 M&V guideline [15]의 MBE (%) 및 Cv(RMSE) (%)를 사용하였고 각각의 식은 다음과 같다.

$$MBE (\%) = \frac{\sum (S - M)_{Interval}}{\sum M_{Interval}} \times 100$$

M: 시간간격동안의 측정데이터

S: 시간간격동안의 시뮬레이션 데이터

$$RMSE_{Period} = \sqrt{\frac{\sum (S - M)_{Interval}^2}{N_{Interval}}}$$

N_{Interval}: 측정 기간 동안의 시간 간격 개수

$$A_{Period} = \frac{\sum M_{Interval}}{N_{Interval}}$$

$$Cv(RMSE_{Period}) (\%) = \frac{RMSE_{Period}}{A_{Period}} \times 100$$

2) 외부수평면전조도 비교 분석

측정기간(6/4~10/20, 98일간)동안의 외부조도 계산을 위해 사용된 발광효율을 표 2에 나타내었다.

표 2. 측정기간동안 sky clearness 구간별 발광효율

	sky clearness 구간	평균 sky clearness	확산 발광효율 [lum/W]	직달 발광효율 [lum/W]
1	1~1.065	1.008	119	33
2	1.065~1.230	1.158	120	85
3	1.230~1.500	1.332	126	82
4	1.500~1.950	1.689	130	82
5	1.950~2.800	2.368	135	87
6	2.800~4.500	3.561	140	93
7	4.500~6.200	5.325	142	97
8	6.200~	8.330	142	102

외부조도는 외부 일사량에 발광효율을 곱하여 계산하며 이 때 사용되는 발광효율은 Perez et al.의 계산 방식을 따른다. Perez는 sky clearness를 8개의 category로 나누고 각각에 맞는 발광효율을 계산하였다. 표 2와 같이 sky clearness의 category가 1에 가까울수록 담천공에, 8에 가까울수록 청천공에 가깝다. 측정기간(6/4~10/20)동안 시간별로 sky clearness를 계산하고 구간별 평균 sky clearness와 확산 발광효율, 직달 발광효율을 구한 결과 청천공에 가까울수록 확산 및 직달 발광효율이 크고 담천공에 가까울수록 확산 및 직달 발광효율이 작다. 확산 발광효율은 119~142 lum/W, 직달 발광효율은 33~102 lum/W까지 분포하며 직달 성분의 발광효율보다 확산성분의 발광효율이 더 큰 것으로 분석된다.

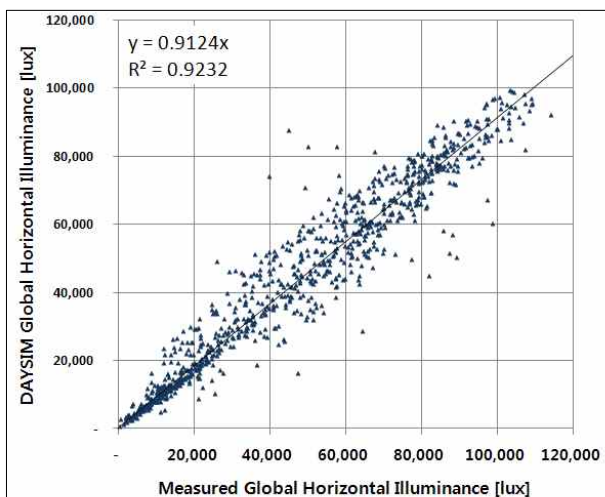


그림 3. 측정 및 Daysim 외부 수평면 조도 (lux)

측정기간(6/4~10/20)동안 외부 수평면 조도에 대하여

MBE (%) 분석을 실시한 결과 측정된 외부수평면조도는 최소 0 lux~최대 114,500 lux까지 분포하며 (R^2 은 0.9232) Daysim 시뮬레이션 값은 최소 0 lux~최대 99,000 lux까지 분포하여 MBE가 -7.6%, Cv(RMSE)는 18.2%로 산출되어 MBE가 10% 미만으로 비교적 유사한 것으로 분석된다(그림 3).

3) 실내작업면조도 비교 분석

Daysim 프로그램은 .pts 파일에 저장된 센서 포인트에 대하여 주광 조도를 계산하며, 결과로 도출된 작업면 조도는 다음과 같다.

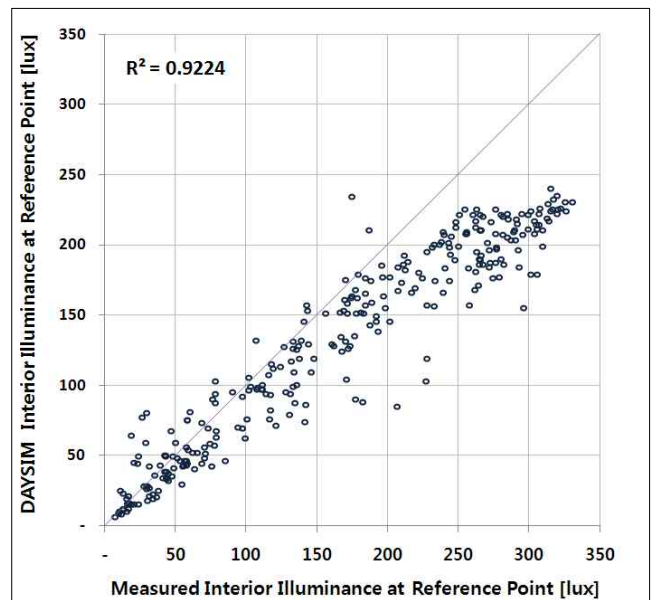


그림 4. 측정 및 Daysim 실내 작업면 조도 (lux)

그림 4와 같이 실 중앙점(창면으로부터 3m)에 대하여 Daysim 시뮬레이션 실내 작업면 조도 결과를 측정 결과와 비교하여 나타내었다. MBE는 -18.9%, Cv(RMSE)는 36%로 실 중앙점에 대하여 R^2 은 0.9224이며 Daysim 시뮬레이션 결과가 측정 결과보다 낮게 산출되는 것을 알 수 있다.

4) 조명에너지 소비량 비교 분석

Daysim 시뮬레이션에서 시간별 조명에너지 소비량을 산출하기 위해서는 결과 파일 중 active.intgain.CSV 파일을 확인해야 한다. 이 결과 파일에는 1월 1일 0시 ~ 12월 31일 23시까지 1년 총 8760시간에 대한 조명 스케줄이 0과 1 사이의 fraction으로 명시되어 있고 이 값에 전체 조명부하를 곱하여 조명에너지 값을 얻을 수 있다. 또한 이 스케줄은 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램인 EnergyPlus 프로그램에 조명스케줄로 입력하여 전체 에너지 계산에도 활용할 수 있다.

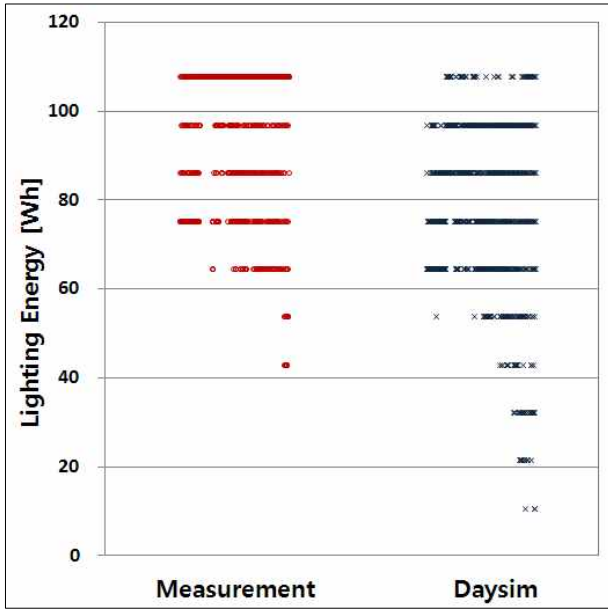


그림 5. 측정 및 Daysim 조명에너지 소비량 (Wh)

측정은 09:00~18:00까지 9시간동안 dimming 되며 제실자는 100% 존재하는 것으로 진행되었다. 측정 기간(6/4~10/20, 시간 평균)동안 최소, 최대, 평균 조명에너지 소비량은 각각 43.1Wh, 107.8Wh, 92.3Wh이며 Daysim 시뮬레이션에 의한 조명에너지 소비량은 최소 10.8Wh, 최대 107.8Wh, 평균 78.3Wh로 MBE는 -10%, Cv(RMSE)는 17%이다. 따라서 Daysim 시뮬레이션으로 조명에너지 소비량을 산출할 경우 실제보다 약 10% 작은 값을 얻는 것으로 분석되었다(그림 5).

5) 제어 전략에 따른 조명에너지 사용량 비교 분석

표 3. 조명에너지 분석을 위한 Case

Case	Lighting control	User behavior	Blind control
A-1	Manual on/off switch near the door	Default	no blind
A-2			manual
A-3			automatic
B-1	Switch off occupancy sensor		no blind
B-2			manual
B-3			automatic
C-1	Switch on/off occupancy sensor		no blind
C-2			manual
C-3			automatic
D-1	Photosensor controlled dimming system	no blind	
D-2		manual	
D-3		automatic	
E-1	Combination switch-off occupancy&dimming system	no blind	
E-2		manual	
E-3		automatic	
F-1	Combination on/off occupancy & dimming system	no blind	
F-2		manual	
F-3		automatic	

표 3과 같이 6가지 조명 제어 특성 및 3가지 블라인드 제어 패턴에 따라 18개의 case를 설정하고 각 조건에 따라 조명에너지 소비량을 산출하여 비교 분석하였다.

Daysim 시뮬레이션과의 비교를 위해 측정이 이루어진 실험실에는 LED 평판조명과 함께 photosensor dimming system이 적용되어 있으며 이러한 시스템은 Daysim 시뮬레이션에서 표 2의 case 중 D-1에 해당한다.

측정 기간의 오차율을 보정하여 Daysim 시뮬레이션 결과를 바탕으로 1년간의 전기조명 에너지 소비량을 예측하고 천공별 에너지 소비량을 분석하였다.

그림 6에서와 같이 제어 전략에 따른 조명에너지 소비량은 C-F-A-D-B-E로 갈수록 줄어들며 switch off occupancy&dimming system(case E)의 경우에 에너지 소비량이 가장 작다. 블라인드 제어 방식에 있어 블라인드가 없는 것보다 설치 후 자동으로 제어하는 것이 조명에너지 절감에 효과가 더 좋으며 블라인드가 없는 경우(A~F-1)가 블라인드를 매뉴얼로 제어(A~F-2)하는 것보다 소비량이 더 적은 것으로 나타났으나 블라인드가 없는 경우 경우에 따라 직사광의 유입으로 glare가 발생할 수 있다. 측정 조건인 D-1과 같이 photosensor controlled dimming system을 적용한 경우 전기조명에너지 연간 소비량은 7.4 kWh/m²·yr로 예측된다. 또한 이 시스템에 제실자 센서를 부착하여 사람이 없을 때 꺼지는 switch-off system을 결합할 경우(case E)에 블라인드 유무 및 제어 방식과 상관없이 에너지를 가장 많이 절약할 수 있으며 블라인드가 없는 E-1, E-3의 경우에 연간 조명에너지가 가장 작은 4.7 kWh/m²·yr가 발생할 것으로 예측된다. 일반적으로 소규모 사무실에서 많이 사용되는 case A나 C는 조명에너지 소비량이 다른 경우에 비해 크므로 사용하지 않는 것이 바람직하다. D나 E를 적용하기 어려울 경우 제실자 센서를 설치하고(B-1) 블라인드를 적용하여 자동제어 하면(B-3) 가장 좋은 경우(E-3)보다 약 26% 큰 조명에너지가 발생할 것이나 C의 절반 정도의 수준으로 조명에너지가 줄어들 것으로 예측된다.

6) 천공별 조명에너지 소비량 분석

1년 중 09:00~18:00 시간별 천공을 분류하여 조명에너지 소비량을 분석해 그림 7에 나타내었다. 천공 분류에는 Perez et al.의 모델을 기본으로 하여 Fakra가 제안한 sky clearness(ϵ) 구간을 사용하였으며 18개의 case에 대하여 분석하였다. 천공은 sky clearness에 따라 담천공($\epsilon < 1.23$), 중간천공($1.23 \leq \epsilon < 4.5$), 청천공($\epsilon \geq 4.5$)으로 나누었으며 1년 중 담천공은 48%, 중간천공은 42%, 청천공은 11%이다.

조명에너지 소비량은 C와 F case 일부를 제외한 거의 모든 경우에 sky clearness가 커질수록(청천공으로 갈수록) 감소하여 절감율이 크며 모든 천공에서 C-F-A-D-B-E 순서로 조명에너지 소비량이 작아진다. 단위면적당 조명에너지 소비량은 담천공시 최소 1.26 W/m²(E-3)에서 최대 2.97 W/m²(case C)까지, 중간천공의 경우 최소 0.55 W/m²(E-3)에서 최대 3.32 W/m²(case C)까지, 청천공의 경우 최소 0.51 W/m²(E-3)에서 최대 3.32

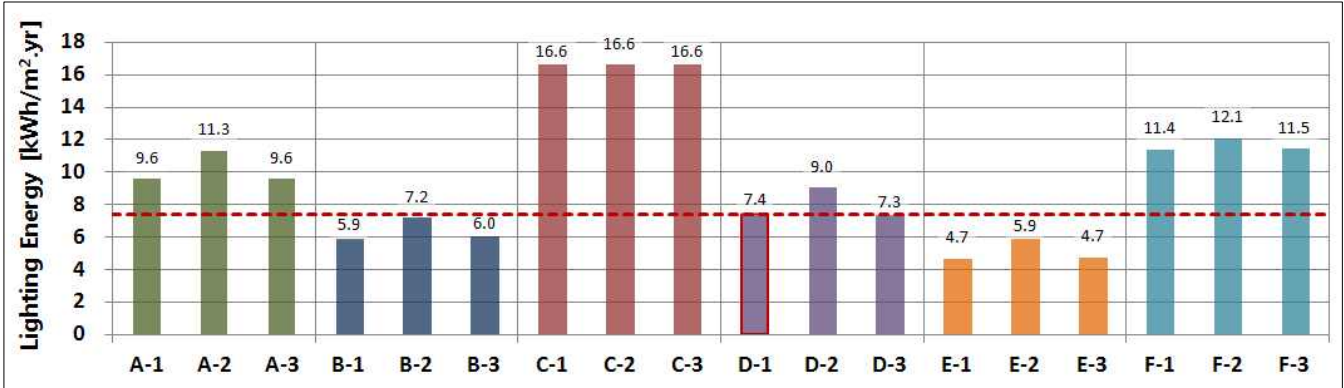


그림 6. 조명에너지 소비량의 시뮬레이션 결과 (D-1 제외한 17개 case) 및 측정결과 (D-1) 비교 분석

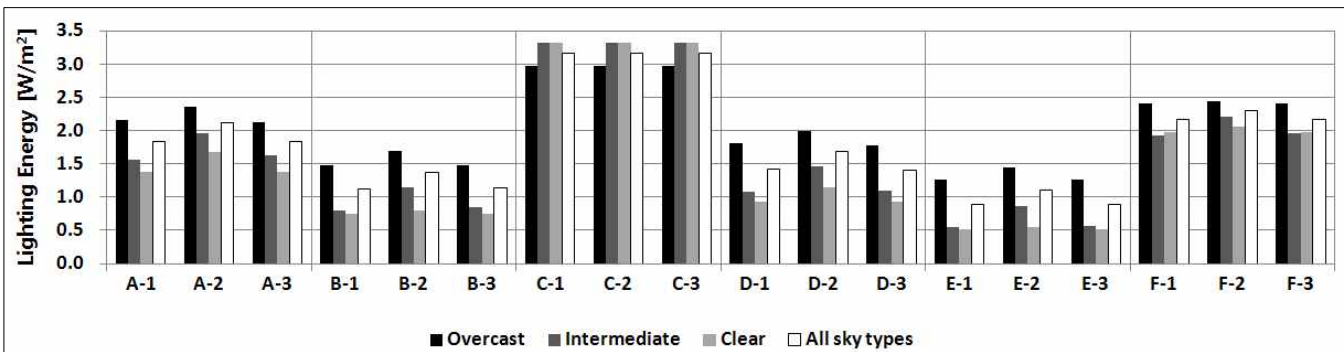


그림 7. 제어 전략에 따른 천공별 조명에너지 소비량

W/m²(case C)까지 분포하며 답천공의 조명에너지 소비량은 청천공에 비하여 case C를 제외한 모든 경우에 최소 140%~최대 267%까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 답천공의 경우에는 제어 전략에 따른 조명에너지 소비량 변화가 크지 않으나 중간천공과 청천공의 경우 제어 전략에 따라 소비량 변화가 크며 1년 중 약 90%가 중간천공 및 청천공에 속하므로 적절한 제어 전략을 선택하는 것이 중요하다.

4. 결론

본 연구결과를 종합하여 다음의 결론을 내릴 수 있다.

(1) 측정기간(6/4~10/20)동안 외부 수평면 조도를 비교한 결과 측정 및 Daysim 시뮬레이션 결과는 MBE -7.6%, Cv(RMSE) 18.2%로 비교적 유사하다.

(2) 실내 중앙의 작업면 조도 비교 결과 MBE는 -18.9%로 Daysim 시뮬레이션 결과가 측정값보다 다소 낮게 산출된다.

(3) 조명에너지 소비량 비교 결과 측정값과 Daysim 결과는 MBE -10%, Cv(RMSE) 17%로 시뮬레이션 결과가 측정값보다 약 10% 작은 조명에너지 소비량을 갖는 것으로 분석되었다.

(4) 측정값과의 비교 결과를 보정한 후 조명 제어 방법과 블라인드 제어 방법에 따라 18개의 case에 대하여 Daysim 조명에너지 시뮬레이션을 수행한 결과 C-F-A-D-B-E 순서로 조명에너지 소비량이 감소하여 에너지 절감율이 높아진다. switch on/off occupancy

sensor(case C) 시스템을 적용한 경우의 조명에너지 소비량이 16.6 kWh/m²·yr로 가장 크며 combination switch-off occupancy & dimming system(case E)에 블라인드 자동제어를 적용한 case E-3의 단위면적당 연간 조명에너지 소비량이 4.7 kWh/m²·yr로 가장 작아 에너지 절감율이 가장 크며 case C의 28%의 전력으로 같은 성능을 낼 수 있을 것으로 분석되었다.

(5) 블라인드가 없는 일부의 경우(A~F-1)에 조명에너지 소비량이 작아 절감율이 크게 산출되는 경향이 있으나 경우에 따라 직사광의 유입으로 glare가 발생할 가능성이 있어 주의가 요구되며 소규모 사무실에서 많이 사용되는 manual on/off switch near the door(case A)나 switch on/off occupancy sensor(case C)의 경우 조명에너지 소비량이 다른 경우에 비해 200%에서 350%까지 커질 것으로 예측되어 사용하지 않는 것이 바람직하다.

(6) 연간 천공별 조명에너지 소비량을 분석한 결과 sky clearness가 커질수록 청천공에 가까워 조명에너지 절감율이 크고, 답천공의 경우 제어 전략에 따른 조명에너지 소비량의 변화가 크지 않으나 중간천공과 청천공의 경우 제어 전략에 따른 소비량 변화가 크므로 적절한 제어 전략을 선택해야 한다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (20110004078)

참고문헌

1. 윤 경, 윤갑천, 김강수, 주광을 활용한 LED조명시스템의 컨트롤에 관한 실험적 연구, 한국생태환경건축학회 논문집, 2010.
2. Yun G, Kim KS, A study on visual environment evaluation of an office building using the useful daylight illuminance (UDI) and daylight autonomy(DA). 3rd Lighting Symposium of China, Japan and Korea Proceedings, 2010.
3. Reinhart CF, Tutorial on the use of Daysim simulations for sustainable design, Harvard University, 2010.
4. Ahmed A, Otreba M, Korres NE, Elhadi H, Menzel K. Assessing the performance of naturally day-lit buildings using data mining, Advanced Engineering Informatics, 2011.
5. ENERGYPLUS, Getting started with EnergyPlus, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.
6. Architectural Energy Corporation, SPOT v4.2 user manual, Architectural Energy Corporation, 2010.
7. Perez R, Ineichen P, Seals R, Michalsky J, Stewart R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, Solar Energy, 1990.
8. Kasten A, A new table and approximation formula for the relative optical air mass, Arch. Meteorol, Geophys, Bioklimatol, 1965.
9. Reitan CH, Surface dew point and water vapor aloft, Journal of applied meteorology, 1963.
10. Wright J, Perez R, Michalsky J, Luminous efficacy of direct irradiance: Variations with insolation and moisture conditions, Solar Energy, 1989.
11. Reinhart CF, Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds, NRCC, 2004.
12. Azza Nabil, John Mardaljevic, Useful Daylight Illuminances : A Replacement for Daylight Factors, Energy and Buildings, 2006
13. Reinhart CF, Morrison M, The Lightswitch wizard-reliable daylight simulation for initial design investigation, 8th IBPSA Conference, 2003.
14. Reinhart CF, Daylight availability and manual lighting control in office building simulation studies and analysis of measurement, Ph. D. thesis. Technical University of Karlsruhe Germany, 2001.
15. FEMP, M&V guidelines: Measurement and verification for federal energy projects Version 3.0, Energy Efficiency and Renewable Energy, 2008.
16. Fakra AH, Boyer H, Miranville F, Bigot D, A simple evaluation of global and diffuse luminous efficacy for all sky conditions in tropical and humid climate, Renewable Energy, 2011.

투고(접수)일자: 2011년 12월 13일
 수정일자: 2012년 2월 6일
 게재 확정일자: 2012년 2월 9일