

대규모 개방형 사무실의 분할공간에 대한 조광제어 시스템의 적용

변주향¹ · 문진우² · 김수영¹

¹연세대학교 실내건축학과, ²중앙대학교 건축학부

Applications of Daylight Dimming Control Systems for Zoned Space in a Large Open-plan Office

Joohyang Byun¹, Jin Woo Moon² and Sooyoung Kim¹

¹Department of Interior Architecture & Built Environment, Yonsei University, Seoul, Korea

²School of Architecture & Building Science, Chung-Ang University, Seoul, Korea

Abstract : This study investigates system performances of a daylight dimming control installed in a large open-plan office space with a curtain wall structure. Under a variety of daylight conditions, computer simulations were performed for two zones of the office space which are facing east and west. Results indicate that the changes of photosensor illuminances were strongly influenced by the direct component of daylight under clear and intermediate sky. Overcast sky was a weak contributor to the changes due to diffused components of daylight. For the majority of time periods under all sky conditions, the dimming control system overshot a target illuminance of 750 lx due to insufficient dimmed levels. Reasonable lighting energy savings were achieved under clear and intermediate sky conditions. Overcast sky was not a favorable condition for lighting energy savings due to insufficient daylight. Strong linear correlations existed between desktop and photosensor illuminances by daylight under all sky conditions. Statistical test results imply that reasonable reductions of error variance can be achieved for the correlations.

Key words : System performance, Daylight dimming control, Open-plan office, Sky conditions, Target illuminance, Lighting energy

1. 서 론

건물의 입면 디자인은 유리로 구성된 창호의 위치 및 크기에 따라 변화된다. 입면상에서 창호가 차지하는 면적비율에 의하여 실내 환경을 유지하는 물리적인 요인은 변화된다. 창호를 구성하는 재료인 유리의 물리적인 특성에 따라 공간의 내부와 실외조건을 형성하는 외부로 교환되는 에너지는 변화된다. 창호에 의한 영향은 태양일사로 발생하는 열취득과 온도차이에 의한 열손실등으로 구분된다. 태양은 일사량의 공급이외에 실내공간에 주광(daylight)의 형태로 빛에너지를 공급하는 기능을 한다.

입면에서 창호의 면적비율이 높은 경우 실내로 유입되는 주광의 양은 증가하며, 주광은 전기조명 제어와 연계되어 효율적으로 조명에너지 절감에 기여하는 것으로 알려져 있다 (Baik & Kim 2014; Kim & Lee 2011; Lee, DiBartolomeo, & Selkowitz 1999) 입사되는 주광이 활용되어 전기조명과 연계된 조광제어 시스템은 다양한 계절 및 건물 조건에 적용되어 조명 에너지 절약 및 필요한 조도 유지에 효과적으로 활용되는 것으로 알려져 있다 (Mistrick & Thongtipaya 1997; Kim & Yum 2005; Yoon, Lee & Kim 2015; Perez, Seals & Michalsky 1993; Vine, Lee, Clear, DiBartolomeo & Selkowitz 1998; Mistrick, Chen, Bierman & Felt 2000).

또한, 실내로 유입되는 주광은 조명제어에 연계되어 공간사용자의 심리적 만족도향상에 긍정적인 영향인자로 작용한다 (Kim, 2010).

교신저자: 김수영 (우 03722) 서울특별시 서대문구 연세로 50, 연세대학교 실내건축학과
전화번호 : +82-2-2123-3142
E-mail : sooyoung@yonsei.ac.kr

입면에서 유리가 차지하는 면적이 가장 높은 디자인은 유리벽식구조이다. 유리벽식 구조가 적용되는 경우 입면의 전체면적을 통하여 입사되는 주광의 양이 과도하게 발생될 확률이 높으므로, 유입되는 주광은 조명 제어 시스템과 효율적으로 연계되어 적용되어야 한다. 특히, 실내로 유입되는 주광의 입사각이 낮은 경우, 주광의 영향은 더욱 강하게 나타나므로, 이에 대한 효과적인 분석이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 유리벽식 구조로 구성된 공간에서 발생하는 주광의 영향을 조명 제어 시스템에 효과적으로 적용하기 위하여, 다양한 천공(sky)조건에서 컴퓨터 시뮬레이션(simulation)이 진행되어 조광제어(daylight dimming control) 시스템에 의한 조명 제어 효과가 분석되었다.

2. 컴퓨터 시뮬레이션

2.1. 시뮬레이션 프로그램 및 대상공간

입면을 통하여 입사되는 주광의 변화 분석을 위하여 레이디언스(Radiance) 프로그램이 사용되어 다양한 천공조건에 대한 시뮬레이션이 실시되었다. 레이디언스 프로그램에는 광선추적기법(Ray-tracing)에 근거한 조명 해석 이론이 적용되어 있으며, 다양한 조건에서 조도 예측값이 효과적으로 제공된다 (Kim & Song 2007). 또한, 레이디언스는 시뮬레이션 조건에 적용되

는 경계조건 변화를 효율적으로 반영하여 현장에서 측정된 결과와 유사한 예측 결과를 제공하는 것으로 알려져 있다. (Reinhart & Walkenhorst 2001; Yoon, Lee, & Kim 2015).

본 연구에서 레이디언스를 활용한 시뮬레이션을 위하여 유리벽식 구조가 적용된 사무소 공간이 대상공간으로 설정되었다. 공간의 세부적인 구성은 Figure 1에 나타나 있다.

사무실의 크기는 폭 30 m, 깊이 30 m, 높이 3 m로 구성되었으며, 유리벽식 구조의 모든 벽면에 low-E (Low Emissivity) 복층유리가 적용되었다. 유리의 투과율은 35 %로 가정되었으며, 유리의 실내부분에 블라인드가 설치되었다. 블라인드 슬랫(slat)의 폭과 각 슬랫 사이의 이격거리는 각각 2.54 cm로 가정되어 적용되었다. 슬랫의 표면 반사율, 천장 및 바닥표면의 반사율은 각각 65 %, 80 % 및 20 %로 설정되었다.

2.2. 전기 조명환경 조건

대상공간에 필요한 조도를 공급하기 위하여 사무실 공간에 일반적으로 적용되는 기준이 사용되었다 (Rea 2000). 기준에 따르면, 사무업무를 위한 적정조도는 최소 500 lx, 최대 1000 lx 이므로, 설정된 범위의 중간 조도인 750 lx 가 본 연구의 목표조도로 설정되었다.

시뮬레이션에 적용된 조도를 공급하기 위하여 형광 조명기가 적용되어 공간내부에 전반적으로 균일한 조도를 유지하는 것으로 설계되었다. 조명기는 가로 60 cm, 세로 60 cm로 구성된 천장매립형 방식이다. 천장에 매립된 부분의 높이는 8.5 cm로 구성되어 있다. 조명기의 구성은 Figure 2에 명시되어 있다.

조명기에 T8 형광램프 4개가 적용되었으며, 각 램프 당 18W의 전기에너지를 소비하는 것으로 설정되었다. 램프가 설치된 부분의 하단에 가로 0.15 m, 세로 0.1 m 크기의 루버(louver)가 적용되어 각 조명기에 24개의 루버셀(louver cell)이 설치되었다. 루버를 통과하여 실내로 공급되는 광속(luminous flux)는 2335.85 lm 이며,

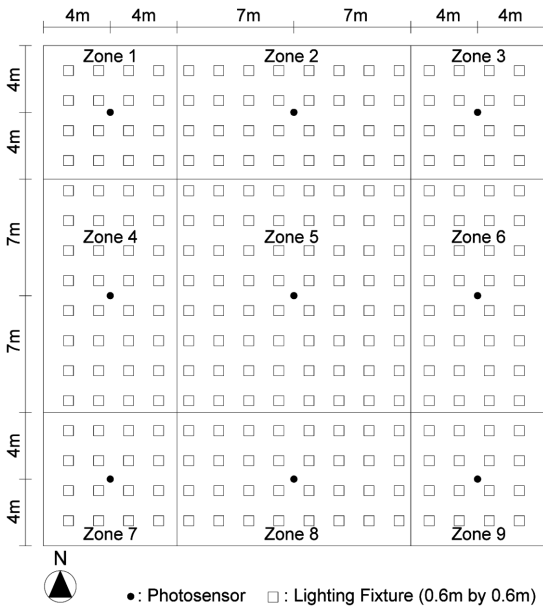


Figure 1. Space layout (Byun, Im, & Kim 2017).

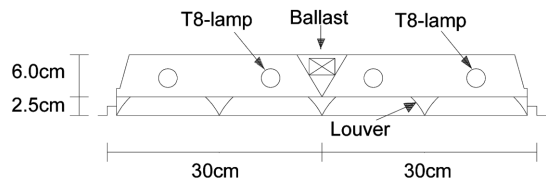


Figure 2. Section of lighting fixture (Byun, Im, & Kim 2017).

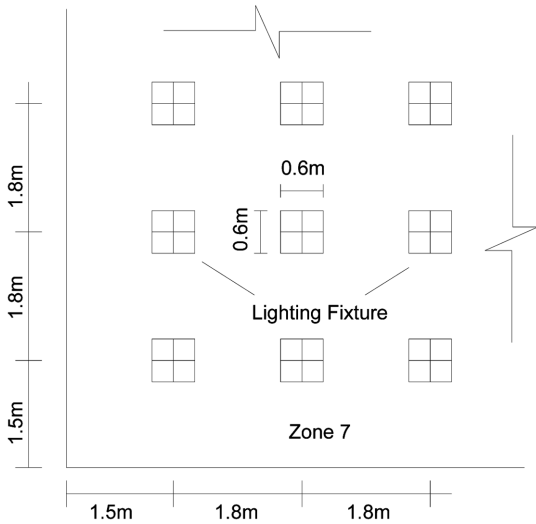


Figure 3. Detailed layout of lighting fixture (Byun, Im, & Kim 2017).

이에 따른 조명기기의 빛에 대한 효율은 61.78%이다. 설정된 목표조도 750 lx를 공급하기 위하여 조명기기는 Figure 1 및 Figure 3에 명시된 바와 같이 배치되었다. 유리면에서 조명기기의 중심점사이의 이격거리는 1.5 m이며, 각 조명기기 사이의 이격거리는 1.8 m로 설정되었다. 조명기기의 배치 조건은 공간에 균등히 적용되어, 공간의 각 지점에 균등한 조도가 유지되도록 설정되었다.

본 연구에서 설정된 사무소 공간에 조명기기는 9개 영역(zone)으로 분리되어 제어되는 것으로 가정되었다. 각 영역은 Figure 1에 명시되어 있으며, 영역 4(zone 4)와 영역 6(zone 6)이 본 연구의 분석에 적용된 대상공간으로 설정되었다.

2.3. 조명제어 및 주광조건

주광이 전기 조명에 활용되어 조명기기가 제어되는 조광제어 시스템이 9개의 영역에 적용되는 것으로 가정되었다. 조광제어 시스템은 포토센서, 제어기 및 안정기로 구성되며, 포토센서(photosensor)에서 감지되는 빛과 제어기(controller)의 세팅(setting)조건이 조명기기의 디밍(dimming)량을 최종적으로 제어하는 것으로 설정되었다. 디밍 안정기(dimming ballast)에 의하여 램프의 최대 디밍량은 90%로 가정되어 적용되었다. 이에 따른 조명기기의 최저 출력량은 10%이다. 제어 시스템의 세부적인 구성은 Figure 4에 명시되어 있다.

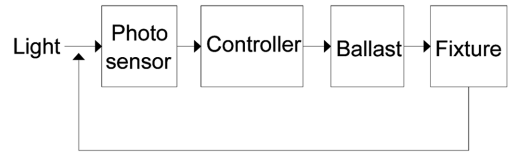


Figure 4. Daylight dimming control procedure.

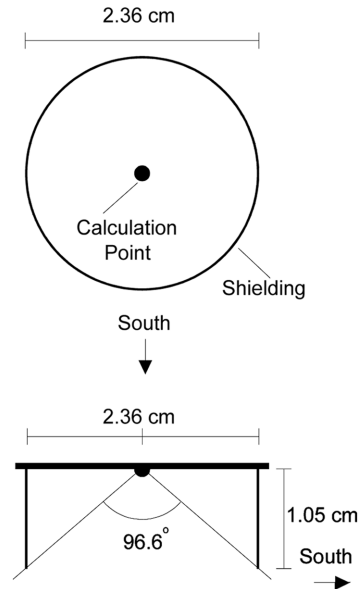


Figure 5. Configurations of photosensor (Top: Plan, Bottom: Section).

포토센서에는 완전차단 조건(full shielding)이 설정되어 센서에서 감지되는 빛의 방향성이 제한적으로 적용되었다. 포토센서에 적용된 차단조건 세부적인 사항은 Figure 5에 명시되어 있다. 설정된 9개의 영역에 동일한 조건의 차단조건이 포토센서에 적용되는 것으로 가정되었으며, 포토센서가 설치된 지점은 Figure 1에 나타나 있다.

포토센서에서 빛이 감지되는 중앙점을 기준으로 평면상으로 모든 방향으로 빛이 입사되는 방향이 차단되었다. 수직방향의 단면상으로 센서는 96.6° 개방되어, 창으로부터 유입되는 직사 주광은 포토센서에 감지되지 않았다. 실내에 유입된 주광이 실내 표면에서 일차적으로 반사된 후 포토센서에 의하여 감지되었다.

완전차단 조건과 같이 센서민감도가 약화된 조건은 포토센서로 입사되는 빛의 양이 많은 조건에 효율적으로 적용되어 운용될 수 있는 것으로 알려져 있다

Table 1. Simulation Conditions

Day	Sky	Time	Blind	Photosensor shielding
3/21	Clear	08:00 - 17:00 (Hourly base)	Horizontal	Full
6/21	Intermediate			
12/21	Overcast			

(Ranasinghe & Mistrick 2003; Kim & Baik 2008; Mistrick, Chen, & Bierman 2000). 적용된 완전차단 조건의 포토센서에서 감지된 빛의 양은 조명기기의 최종 디밍량의 산정에 필요한 기초자료로 입력되어 디밍 제어 효과 예측에 활용되었다.

센서에서 송신된 신호의 변화량에 따라 조명기기의 디밍량을 제어하는 제어기(controller)에 의한 디밍은 선형적으로 이루어 지는 것으로 가정되었다. 포토센서에서 감지되어 제어기로 입력된 신호의 범위가 15 lx 미만인 경우 디밍은 실시되지 않으며, 입력된 신호가 355 lx 이상인 경우 최소 설정된 최대 디밍량 90%가 이루어지는 것으로 가정되었다. 또한, 입력신호가 15 lx와 355 lx 사이에서 변화되는 경우, 감지된 신호 값(X)에 대하여 조명기기의 출력량은 $0.2711*(X)+105.11$ 의 선형 회귀식에 따라 설정되어 최종 디밍량은 산정되었다.

다양한 천공조건에서 조광제어 시스템의 제어효율의 분석을 위하여 레이디언스 프로그램에서 적용되는 대표적인 천공조건 3개가 적용되었다. 일년중의 대표적인 태양고도의 적용을 위하여, 연중 태양의 위치를 대표하는 일자 3개가 선정되어 시뮬레이션에 적용되었다. 시뮬레이션은 오전 8시부터 오후 5시까지 한 시간 간격으로 실시되어 각 시간대 별 발생하는 태양 및 천공의 영향이 조명제어 분석에 고려되었다. 본 연구의 시뮬레이션에 적용된 천공조건 및 주광조건은 Table 1에 요약되어 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 포토센서의 조도변화

조광제어 시스템이 적용되는 경우, 조명기기 제어의 기초 입력신호로 작용하는 변수는 포토센서에서 감지되는 주광의 변화이다. 본 연구에서 예측된 포토센서에서 감지되는 주광의 변화분포는 Figure 6 - Figure 8에 나타나 있다. 분석에 고려된 공간이 동쪽과 서쪽 방향을 향하고 있으므로 포토센서에서 감지된 주광의 분포는 시간에 따라 변화하는 태양의 위치에 강한 영향

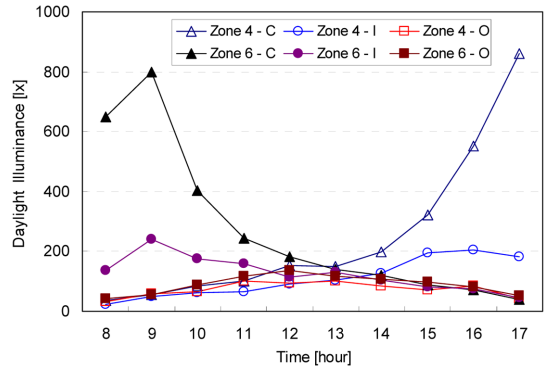


Figure 6. Daylight illuminance on photosensor (Mar/21).

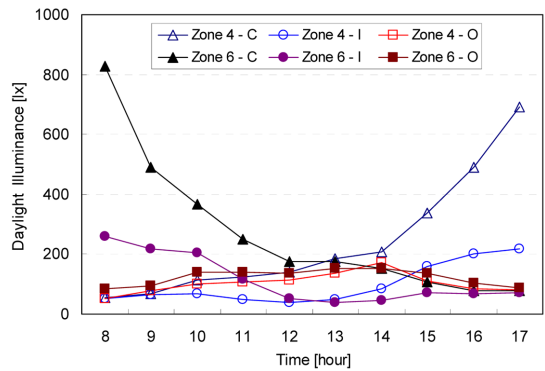


Figure 7. Daylight illuminance on photosensor (June/21).

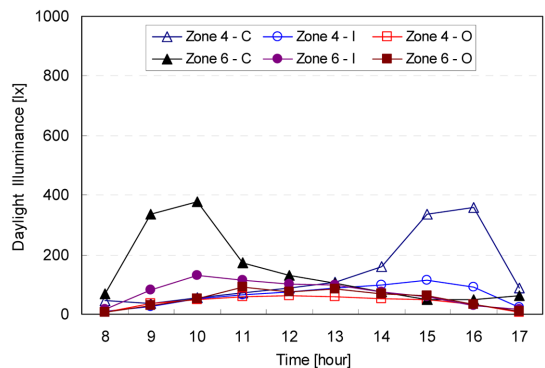


Figure 8. Daylight illuminance on photosensor (Dec/21).

을 받은 것으로 보인다.

Figure 6에 명시된 바와 같이 3월의 청천공(clear sky)조건의 경우, 포토센서의 감지되는 조도는 동쪽을 향하고 있는 영역 6 (zone 6) 에서 오전 9시에 최고값을 기록한 후, 시간이 지남에 따라 감소하여 태양이 서쪽으로 이동된 오후시간에 낮은 값을 보이고 있다. 최고 및 최저값은 각각 797.4 lx 및 40.4 lx 로 나타났다. 반면, 서쪽을 향하고 있는 영역 4 (zone 4)에서 포토센서의 주광 변화분포는 영역 6에서 발생된 분포와 대칭적인 변화분포를 보이고 있으며, 오후 5시에 최고값 861.5 lx인 것으로 분석되었다.

부분 담천공(intermediate sky) 조건에서 분석된 전반적인 포토센서의 변화분포는 청천공 조건에서 발생된 변화와 유사하지만, 최고값은 현저히 감소되었다. 영역 4 및 영역 6 에서 최고값은 204.4 lx 와 240.5 lx 로 감지되어 청천공 조건에서 감지된 포토센서 조도의 29.99 % 및 30.16 %에 해당하는 것으로 나타났다.

담천공(overcast sky)조건에서 감지된 포토센서의 조도변화는 청천공 및 부분 담천공에서 감지된 조도의 변화분포와 다른 양상을 보이고 있다. 영역 4와 영역 6 이 서쪽과 동쪽을 향하고 있으나, 센서에서 감지되는 조도는 두 공간의 방향에 상관없이 오전부터 증가하기 시작하여 12시에 최고값을 보이고 있다. 영역 4와 영역 6에서 감지된 최고값은 각각 101.8 lx 및 137.8 lx 로 나타났다.

천공조건별 각기 다르게 발생된 포토센서의 조도차이는 태양의 고도 및 방위각에 따라 변화되는 태양의 직접적인 영향으로 인하여 발생된 것으로 판단된다. 태양의 영향이 직접적으로 발생하는 청천공 및 부분 담천공 조건에서 태양이 위치한 방향을 향하고 있는 공간에서는 직달 주광(direct component of daylight)의 영향이 우세하여 포토센서의 조도는 높게 값이 감지되었다.

그러나, 담천공 조건의 경우 태양은 구름에 의하여 완벽히 차단되는 것으로 가정된다. 따라서, 태양에서 발생된 주광은 구름표면에 흡수된 후 산란된 형태(diffused component of daylight)로 지표면을 향하여 공급되므로, 천공상에서 태양위치는 포토센서에서 감지되는 주광의 변화에 중요한 요인으로 작용하지 않은 것으로 판단된다.

Figure 7에 명시된 바와 같이, 6월의 경우에도 3월에 발생된 현상과 유사한 분포를 보이고 있다. 각 시간대별 감지된 포토센서 조도의 차이는 발생되고 있으나, 전반적인 변화형태는 매우 유사한 것으로 분석된다.

영역 4와 영역 6에서 감지된 최고 조도값은 692.5 lx 및 828.4 lx로 나타났다. 이는 영역 4와 영역 6에서 3월에 감지된 최고 조도의 124.41 % 와 96.25 %에 해당하는 값이다.

부분 담천공 조건의 경우, 영역 4와 영역 6에서 최고값은 각각 218.3 lx 및 260.7 lx로 나타나, 청천공에서 감지된 최고값의 93.63 % 및 92.25 % 해당되었다. 담천공 조건의 경우, 영역 4 및 6에서 감지된 포토센서의 조도 변화범위는 53.0 lx ~ 172.6 lx 및 85.9 lx ~ 153.9 lx 로 분석되었다.

Figure 8에 명시된 바와 같이, 12월의 경우 포토센서의 조도 변화는 3월 및 6월에 감지된 변화분포와 유사한 분포를 보이고 있다. 그러나, 청천공 조건의 경우 3월과 6월에 비교하여 늦어진 일출시간과 당겨진 일몰 시간으로 인하여, 영역 4와 영역 6에서 최고값은 오후 4시 및 오전 10시에 발생되었다. 영역 4 및 영역 6에서 발생된 포토센서의 조도변화 범위는 34.9 lx ~ 357.4 lx 및 50.1lx ~ 376.3 lx로 나타났다.

부분 담천공 조건의 경우, 시간의 변화에 따라 영역 4 및 영역 6에서 변화된 포토센서의 조도변화 범위는 10.9 lx ~ 113.9 lx 및 17.3 lx ~ 131.6 lx로 나타났다. 담천공 조건의 경우 시간의 변화에 따라 영역 4와 영역 6에서 발생하는 포토센서 조도의 변화범위는 7.5 lx ~ 62.7 lx, 및 6.1 lx ~ 89.9 lx의 좁은 범위에서 변화되는 것으로 분석되었다.

3.2. 디밍 효과 및 조명에너지 절감

본 연구에서 설정된 천공조건 및 일자에 대하여 영역 4와 영역 6에서 발생하는 디밍 제어 효과를 예측하기 위하여 실행된 시뮬레이션의 결과는 Figure 9-Figure 10에 명시되어 있다.

그래프상에 명시된 각 데이터 포인트(data point)는 천공조건에서 발생된 조명기기의 출력량을 의미한다. 예측된 출력량은 실내조도를 유지하는데 적용되며, 조명기기의 디밍량은 조명기기의 최대 출력량과 계산된 출력량의 차이에 의하여 산정된다 (디밍량(%)=조명기기의 최대 출력량 (100%) - 계산된 출력량(%)).

그래프에 나타난 실선은 설정된 목표조도 750 lx를 유지하기 위하여 필요한 조명기기의 최적 출력량을 나타낸다. 실선에 가까이 존재하는 데이터 포인트는 설정된 목표조도를 효과적으로 유지하는 것을 의미한다. 실선의 상부방향으로 실선에서 이격되는 정도가 넓어질수록 목표조도를 초과하여 과도한 조명출력량이 유지되고 있음을 나타낸다. 반면, 실선의 하부 부분방향

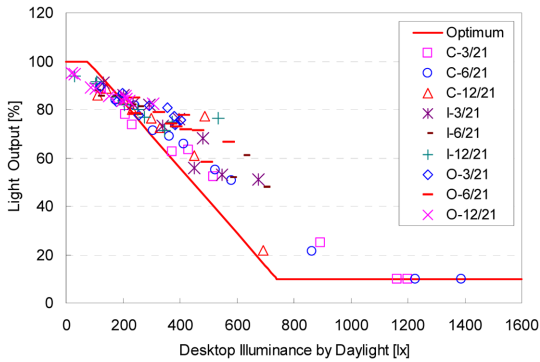


Figure 9. System performance (Zone 4).

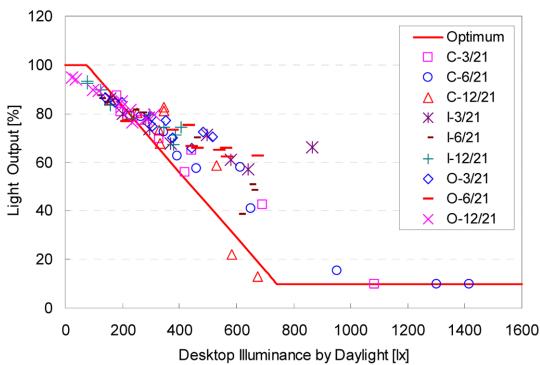


Figure 10. System performance (Zone 6).

으로 이격되는 정도가 넓은 조건은 목표조도를 유지하기에 부족한 조명 출력량이 발생되고 있음을 의미한다.

전반적으로, 영역 4와 영역 6에서 유지된 디밍제어는 실패되지 않은 것으로 판단된다. 설정된 목표조도 750 lx를 초과하여 조도가 유지되는 것으로 보인다. Figure 9- Figure 10에 명시된 바와 같이, 영역 4 및 영역 6의 경우, 청천공 조건에서 가장 효율적인 제어효과가 발생된 것으로 나타났다. 입사되는 주광의 영향으로 인하여 책상면의 주광조도는 목표조도에 근접된 범위로 유지되었으며, 조명에너지 절감량도 효과적으로 유지된 것으로 판단된다. 몇몇 시간대의 경우, 목표조도를 유지하는데 필요한 디밍량보다 부족한 디밍이 이루어져 설정된 목표조도를 초과한 것으로 나타났다.

부분 담천공 조건의 경우, 청천공 조건에서 발생한 결과와 유사한 분포를 보이고 있다. 설정된 목표조도를 초과하여 조명기기가 제어되고 있으므로, 조명 에너지절감은 최적화된 조건에 비교하여 상대적으로 미흡한 것으로 나타났다. 조명에너지 절감량은 청천공

조건에 비교하여 상대적으로 낮은 것으로 판단된다.

청천공 및 부분 담천공에서 발생한 부족한 디밍량은 책상면에 유입되는 주광이 증가하여도 포토센서에 적용된 차단조건으로 인하여 포토센서로 입사되는 주광의 양이 제한되어 발생된다. 이로 인하여 포토센서에서 제어기로 보내지는 신호가 부족하여 필요한 조명기기의 디밍량을 유지하기에 부족한 제어결과가 발생한 것으로 판단된다.

담천공 조건에서 발생한 디밍효과는 청천공 및 부분 담천공 조건에 비교하여 상대적으로 약한 것으로 나타났다. 대다수의 데이터 포인트는 조명출력량 73% 이상의 부분에 집중되어 있으므로, 조명에너지 절감적인 측면에서 효율적이지 않은 것으로 판단된다. 그러나, 조명제어로 인하여 유지되는 책상면 조도는 설정된 목표조도를 초과하여 달성하였다. 이러한 결과는 담천공 조건에서 실내로 입사되는 주광의 영향이 약하여, 책상면 조도유지에 주광보다 전기조명이 많이 사용된 것을 의미한다.

조광제어 시스템이 적용된 경우, 일별 유지된 실내 조도변화의 예는 Figure 11 - Figure 14에 나타나 있다. 영역 4와 영역 6의 경우, 청천공 조건에서 태양의 위치에 따라 책상면 주광조도는 현격히 변화되었다. 책상면 주광조도가 현격히 증가함에 따라 조명기기로 인한 책상면 조도는 현격히 감소하는 분포를 보이고 있다. 담천공의 경우, 주광으로 인한 책상면 조도는 238.9 lx 부터 672.8 lx 까지 안정적으로 변화되어 조명기기로 인한 책상면 조도는 안정적으로 변화되었다.

조광제어 시스템으로 인하여 발생한 조명 에너지의 절감량은 Table 2에 요약되어 있다. 일일 평균 조명에너지 절감량은 청천공 조건에서 33.5 % ~ 51.6 %로

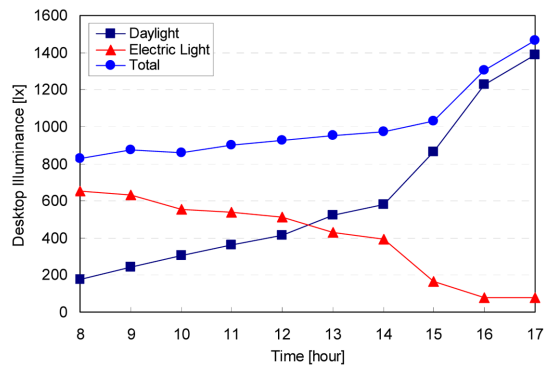


Figure 11. Example of system performance (Clear sky, Zone 4, June/21, Horizontal blind).

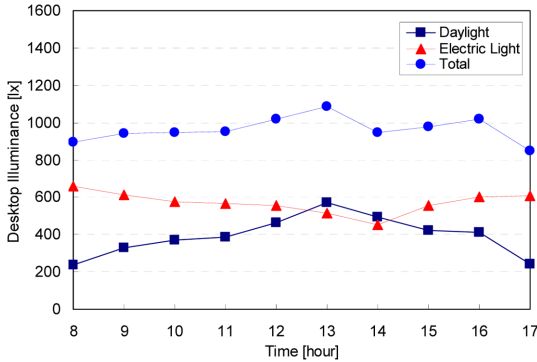


Figure 12. Example of system performance (Overcast sky, Zone 4, June/21, Horizontal blind).

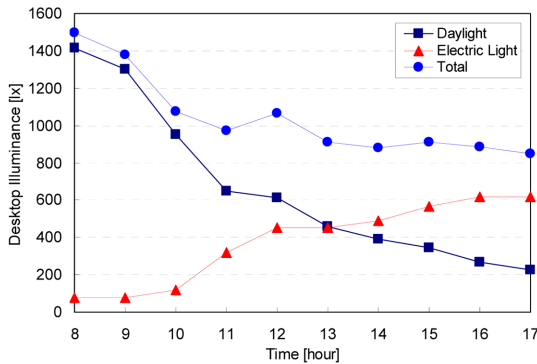


Figure 13. Example of system performance (Clear sky, Zone 6, June/21, Horizontal blind).

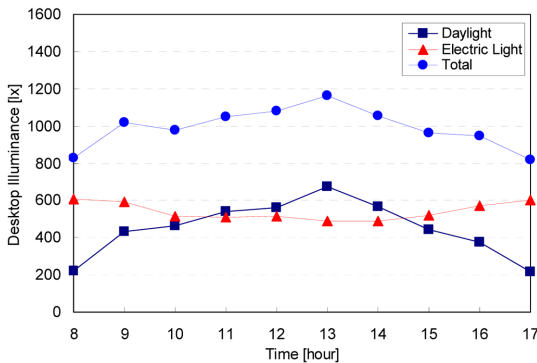


Figure 14. Example of system performance (Overcast sky, Zone 6, June/21, Horizontal blind).

나타났다. 부분 담천공 및 담천공 조건의 경우 조명에너지 절감량은 17.7 % ~ 31.6 % 및 12.8 % ~ 31.0 %로 나타났다.

모든 조건에서 책상면에 설정된 목표조도는 유지되

Table 2. Lighting Energy Savings

Day	Time	Zone 4			Zone 6			
		C	I	O	C	I	O	
3/21	8	11.3	8.9	10.5	90.0	34.1	13.3	
	9	15.6	14.1	16.8	90.0	56.9	15.6	
	10	22.2	17.6	18.3	90.0	42.8	22.8	
	11	26.2	18.2	26.1	57.4	39.1	29.8	
	12	37.5	23.9	24.2	44.2	28.7	34.2	
	13	36.8	26.8	26.2	34.9	32.4	29.5	
	14	47.7	32.0	22.7	30.2	26.4	27.7	
	15	75.2	46.9	19.2	23.1	21.5	25.4	
	16	90.0	48.9	22.3	19.2	20.0	21.3	
	17	90.0	44.1	13.1	12.6	13.7	15.4	
	6/21	8	16.1	14.8	15.4	90.0	61.4	22.7
		9	18.5	17.9	21.2	90.0	51.8	24.7
		10	28.6	18.6	25.9	84.7	49.2	34.3
		11	31.0	14.6	27.2	59.2	29.9	34.9
		12	34.3	12.0	28.8	42.3	15.4	34.1
		13	44.9	14.5	33.5	42.5	12.6	37.4
		14	49.4	22.1	41.9	37.4	13.8	37.8
15		78.7	38.9	28.4	27.5	19.6	33.6	
16		90.0	48.2	22.3	21.1	18.5	26.9	
17		90.0	52.0	21.8	20.9	19.2	23.2	
12/21		8	13.9	6.1	4.8	18.8	7.5	5.0
		9	11.4	9.3	11.4	78.1	21.9	10.5
		10	15.8	15.0	14.3	87.0	32.8	15.2
		11	19.9	18.0	16.5	41.6	28.8	23.6
		12	23.4	20.1	17.5	32.2	25.8	20.4
		13	27.5	23.1	16.5	26.7	25.5	22.1
		14	39.0	25.0	15.5	19.9	20.4	18.6
	15	78.2	28.9	14.6	14.3	16.8	17.3	
	16	82.8	23.6	11.0	14.8	10.4	10.7	
	17	22.8	8.4	5.3	17.5	6.9	5.8	

where,
 - C : Clear sky, - I : Intermediate sky
 - O : Overcast sky

었으므로, 조명에너지 절감량은 유효한 것으로 판단된다. 그러나, 설정된 목표조도에 비교하여 과도한 책상면 조도가 유지되므로 추가적인 최적 디밍 제어방안이 적용되는 경우, 조명에너지 절감량은 향상될 것으로 판단된다.

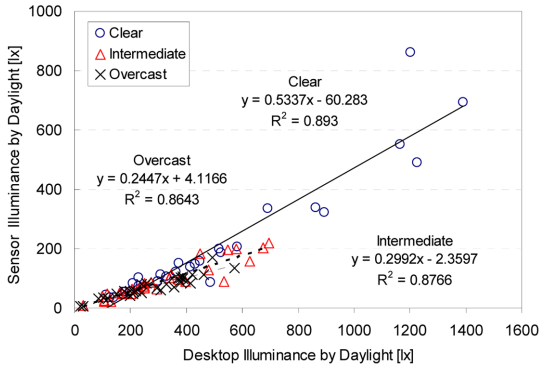


Figure 15. Correlation between desktop and photosensor illuminance by daylight (Zone 4).

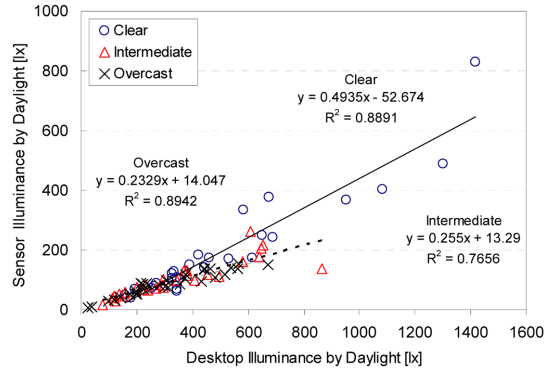


Figure 16. Correlation between desktop and photosensor illuminance by daylight (Zone 6).

3.3. 상관성 분석

천공표면과 태양으로 부터 유리를 통하여 실내로 입사되는 주광은 조광제어 시스템이 적용된 공간의 책상면 조도 및 포토센서에서 감지되는 조도의 변화에 영향을 준다. 포토센서에서 감지되는 주광조도의 변화와 책상면 주광조도의 변화의 상관성은 공간에 설정된 조도를 유지하는데 유용한 지표로 활용된다.

본 연구에서는 선형회귀(linear regression)분석방법이 적용되어 천공 조건별 예측된 주광에 의한 책상면 조도와 포토센서에서 감지된 주광조도의 상관성이 분석되었다. 조건별 예측된 책상면의 주광조도는 독립변수로 설정되었으며, 포토센서에서 감지되는 주광조도는 종속변수로 설정되어 두 변수사이의 상관성 예측 모델식에 적용되었다.

상관성 분석결과는 Figure 15 - Figure 16에 나타나 있으며, 예측 모델식을 검증하기 위하여 적용된 변수 분석 (ANalysis Of Variable: ANOVA)의 결과는 Table 3 - Table 4에 요약되어 있다.

전반적으로, 예측된 모델식은 신뢰도 수준 0.01 이하에서 효과적인 것으로 나타나 책상면의 주광조도 변화를 이용하여 포토센서에서 감지되는 주광조도의 변화를 예측하는 결과는 효과적인 것으로 분석되었다.

두 변수 사이의 상관성을 의미하는 결정계수(coefficient of determination: r^2)는 영역 4 및 영역 6에서 0.8643 ~ 0.8930 및 0.7656 ~ 0.8942 의 범위로 나타났다. 이는 책상면 주광 조도를 이용하여 포토센서 주광 조도를 예측하는 경우, 예측식의 오차(Error Variance)는 76.56 % ~ 89.3% 감소되는 것을 의미한다. 결정계

Table 3. ANOVA for Linear Correlation between Desktop and Photosensor Illuminance by Daylight (Zone 4)

Sky	Variable	U.C		t	Sig.	ANOVA
		B	S.E			
Clear	C	-60.28	21.76	-2.77	0.01	F(1, 27) = 225.29 Sig. = 0.00 $r^2 = 0.8930$
	Desk	0.53	0.04	15.01	0.00	
Intermediate	C	-2.35	7.66	-0.31	0.76	F(1, 28) = 198.88 Sig. = 0.00 $r^2 = 0.8766$
	Desk	0.30	0.02	14.10	0.00	
Overcast	C	4.11	5.72	0.72	0.48	F(1, 28) = 178.25 Sig. = 0.00 $r^2 = 0.8643$
	Desk	0.25	0.02	13.35	0.00	

where,

- U.C : Unstandardized Coefficient

- C : Constant - S.E : Std. Error

- Desk : Desktop Illuminance by daylight

Table 4. ANOVA for Linear Correlation between Desktop and Photosensor Illuminance by Daylight (Zone 6)

Blind	Variable	U.C		t	Sig.	ANOVA
		B	S.E			
Clear	C	-52.67	20.36	-2.59	0.01	F(1, 26) = 208.46 Sig. = 0.00 r ² = 0.8891
	Desk	0.49	0.03	14.44	0.00	
Intermediate	C	13.30	10.73	1.24	0.22	F(1, 27) = 88.22 Sig. = 0.00 r ² = 0.7656
	Desk	0.26	0.03	9.39	0.00	
Overcast	C	14.05	5.41	2.60	0.01	F(1, 28) = 236.89 Sig. = 0.00 r ² = 0.8942
	Desk	0.23	0.02	15.39	0.00	

where,

- U.C : Unstandardized Coefficient

- C : Constant - S.E : Std. Error

- Desk : Desktop Illuminance by daylight

수의 최대값과 최소값의 차이는 영역 4 및 6의 경우 0.0287 및 0.1286으로 나타났다.

본 연구에서 분석된 결정계수는 기존의 연구에서 남쪽을 향한 공간에서 분석된 결정계수에 비교하여 상대적으로 낮은 값을 보이고 있는 것으로 나타났다 (Byun, Im, & Kim 2017). 기존의 연구에 적용된 태양의 고도 및 방위각에 따라 실내로 입사되는 주광의 입사각은 본 연구에서 분석된 입사각에 비교하여 상대적으로 높다. 주광의 입사각이 낮은 경우, 주광의 직달성분의 영향으로 인하여 책상면의 주광조도는 매우 높게 발생된다. 그러나, 차단조건이 적용된 포토센서에서 감지되는 주광조도는 책상면에서 변화되는 주광의 변화분포와 완전히 유사한 형태로 변화하지 않는다. 이러한 차이로 인하여 상대적으로 낮은 결정계수 분포가 발생된 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 개방형(Open-plan) 사무실 공간에 적용된 조광제어 시스템에 대하여 다양한 천공조건에서 시스템의 제어효과가 분석되었다. 연구의 결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 태양의 영향이 직접적으로 발생하는 청천공 및 부분 담천공 조건에서 태양이 위치한 방향을 향하고 있는 공간에서는 직달 주광(direct component of daylight)의 영향이 우세하여 완전차단 조건이 적용된 포토센서에서 감지된 조도의 차이는 높게 발생된 것으로 판단된다. 그러나, 태양은 구름에 의하여 완벽히 차단되는

것으로 가정되는 담천공 조건의 경우, 태양에서 발생되는 주광은 구름에 의하여 산란되므로 천공상에서 태양의 위치는 포토센서에서 감지되는 주광의 변화에 중요한 요인으로 작용하지 않은 것으로 판단된다.

2. 청천공 및 부분 담천공 조건에서 목표조도를 유지하는데 필요한 디밍량 보다 부족한 디밍이 이루어져 설정된 목표조도 750 lx 를 초과한 것으로 나타났다. 부족한 디밍량은 책상면에 유입되는 주광이 증가하여도 포토센서에 적용된 차단조건으로 인하여 포토센서로 입사되는 주광의 양이 제한되어 발생된 것으로 판단된다. 담천공 조건에서 대다수의 조명출력량은 73% 이상의 부분에 집중되어 있는 것으로 나타나 조명에너지 절감적인 측면에서 디밍 제어효과는 효율적이지 않은 것으로 판단된다.

3. 조광제어 시스템이 적용되는 경우, 일일 평균 조명에너지 절감량은 청천공 조건에서 33.5 % ~ 51.6 %로 나타났다. 부분 담천공 및 담천공 조건의 경우 조명에너지 절감량은 17.7 % ~ 31.6 % 및 12.8 % ~ 31.0 %로 분석되었다. 모든 조건에서 설정된 목표조도에 비교하여 과도한 책상면 조도가 유지되므로 조명 에너지 절감량의 향상을 위하여 추가적인 디밍 제어방안이 적용되어야 할 것으로 판단된다.

4. 책상면 주광조도와 포토센서에서 감지되는 주광조도의 상관성을 나타내는 예측된 모델식은 신뢰도 수준 0.01 이하에서 효과적인 것으로 나타났다. 두 변수 사이의 상관성을 의미하는 결정계수는 최저 0.7656 및 최고 0.8930 으로 나타났다. 이는 책상면 주광 조도를 이용하여 포토센서 주광조도를 예측하는 경우, 오차

(Error Variance)는 최저 76.56 %, 최고 89.30 % 감소될 수 있다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 개방형 사무실 공간을 대상으로 제한된 조건에서 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 조광제어 시스템의 제어효과가 분석되었다. 본 연구에서 사용된 예측 프로그램의 계산알고리즘에 특징이론이 적용되므로, 본 연구에서 분석된 내용은 다른 이론이 적용된 프로그램에 의한 예측 결과와 일치하지 않을 수 있다. 또한, 현장 실험에 근거한 분석이 실시되지 않아서 실질적인 천공조건에서 발생하는 주광의 변화분포가 반영되지 않았다. 향후 연구에서 보다 다양한 주광조건에 대한 추가적인 분석 및 현장실험의 결과와 비교되어 제어 시스템의 효율이 분석되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원을 받아 수행된 것임 (NRF-2017R1A2A2A05069441)

REFERENCES

Baik, Y. & Kim, S. (2014). Analysis of photoelectric dimming control performance for lighting energy savings in a small office. *Journal of Korean Society of Living Environment System*, 21, 987-997.

Byun, J., Im, J., & Kim, S. (2017). Prediction of optimum control for a photoelectric dimming system in office space with curtain wall structure. *Journal of Korean Society of Living Environment System*, 24, 760-768.

Kim (2010). The influence of illuminance variation by a daylight dimming control system on visual comfort under clear sky conditions. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 22, 553-561.

Kim, S. & Baik, Y. (2008). Determining optimum sensitivity of daylight dimming control for a direct/indirect lighting system in a small office. *Journal of Korean Society of Living Environment System*, 15, 503-512.

Kim, S. & Lee, J. (2011). The influence of photosensor configuraton on control performance of daylight dim-

ming system in a small private office. *Journal of Korean Society of Living Environment System*, 23, 232-243.

Kim, S. & Yum, S. (2005). Optimum control of a photoelectric dimming system in a small office with a double skin envelope. *Architectural Research*, 47-54.

Lee, E., DiBartolomeo D., & Selkowitz S. (1999). The effect of venetian blinds on daylight photoelectric control performance. *The Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, 3-23.

Mistrick R., Chen C., & Bierman A. (2000). A comparison of photosensor-controlled electronic dimming system performance in a small office. *Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, 29, 66-80.

Mistrick R. & Thongtipaya, J. (1997). Analysis of daylight photocell placemnet and view in a small office. *The Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, 150-160.

Perez, R., Seals, R., & Michalsky, J. (1993). All-weather model for sky luminance distribution-preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 50(3), 235-245.

Ranasinghe, S. & Mistrick, R. (2003). A study of photosensor configuration and performance in a daylighted classroom spce. *The Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, 3-20.

Rea, M. (2000). IESNA lighting handbook 9th edition. *The Illuminating Engineering Society of North America*

Reinhart, C. & Walkenhorst, O. (2001). Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings*, 33, 683-697.

Vine, E., Lee, E., & Selkozitz, S. (1998). Office worker response to an automated Venetian blind and electric lighting system: a pilot study. *Energy and Buildings*, 28, 205-218.

Yoon, Y., Lee, J., & Kim, S. (2015). Development of computational algorithm for prediction of photosensor signals in daylight conditions. *Building and Environment*, 89, 229-243.

투 고 일: 2018. 2. 7

게재승인일: 2018. 2. 23