

소규모 사무공간에서 디밍제어를 이용한 조명에너지 절약에 관한 연구

(A Study on Lighting Energy Conservation in a Small Office Space
with Daylight Dimming Control System)

김한성* · 김강수

(Han - Seong Kim · Kang - Soo Kim)

요 약

본 연구에서는 소규모 사무공간을 대상으로 주광과 인공조명의 성능 평가를 위한 디밍제어 시스템의 실험을 실시함으로써, 사무소 건물의 조명에너지 절약을 도모할 수 있는 성능 평가 자료를 제시하고자 한다. 본 연구에서는 성능 평가를 위해 Mock-Up Room(3.6×7.2×2.6[m])을 사용하여 측정하였으며, 연구 결과는 다음과 같다; 1) 주광 작업면조도와 센서조도간의 상관관계는 디밍 시스템의 성능에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 2) 디밍 시스템을 적용한 본 실험에서는 주광과 인공조명을 포함한 총 작업면조도는 월평균 579[lux], 월간 에너지 절감율은 약 53[%]로 나타났다.

Abstract

This paper presents field measurements on daylighting and electric lighting with dimming controlled systems for a small office in Seoul, Korea. And the main purpose of this study is to provide the evaluation data of lighting energy performance when a dimming system is installed.

For the performance evaluation, the mock-up room(3.6×7.2×2.6[m]) was used for the actual test. The results of this study were as follows; 1) The correlation between daylight illuminance at a workplane(E_d) and the photosensor signal(S_d) was an important factor affecting the performance of daylight responsive dimming system, 2) The mock-up office space gained a sufficient workplace illuminance of 579[lux] with the dimming control system 3) About 53[%] of monthly lighting energy could be saved using the dimming control system.

Key Words : Workplane Illuminance, Dimming Control System, Lighting Energy

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

대부분의 사무소 건물에서는 작업에 필요한 적정 조도를 확보하기 위해 주간에도 주광 뿐 아니라 인

* 주저자 : 고려대 건축공학과 박사과정
Tel : 02-3290-3744, Fax : 02-921-7947
E-mail : khs86@lycos.co.kr
접수일자 : 2003년 7월 18일
1차심사 : 2003년 7월 25일
심사완료 : 2003년 8월 19일

소규모 사무공간에서 디밍제어를 이용한 조명에너지 절약에 관한 연구

공조명에 의존하는 경우가 많다. 일반적으로 대규모 상업용 건물에서 조명에너지 부하는 전체 전기에너지 소비의 약 20~30[%]정도를 차지한다고 알려져 있다.

실내 공간에서, 이상적인 조명 시스템은 작업면에서 설계 조도를 유지하기 위해 주광을 최대한 이용하고, 부족한 부분은 인공조명으로 보충하는 것으로, 이러한 조명제어시스템은 대상 건물에서 불규칙한 조명레벨을 연속적으로 제어하기 위해 광센서를 이용해야 한다.

따라서, 본 연구에서는 소규모 사무공간을 대상으로 주광과 인공조명의 성능 평가를 위한 디밍제어 시스템의 실험을 실시함으로써, 사무소 건물의 조명 에너지 절약을 도모할 수 있는 성능평가 자료를 제시하고자 한다.

1.2 연구 범위 및 방법

본 연구에서는 소규모 사무공간의 조명환경을 분석하기 위하여, 1차적으로 K 대학교의 연구실을 대상공간으로 선정된 후 실제 성능평가자료를 취득하기 위해 대상공간 천장에 주광 센서를 부착하고, 인공조명 등기구에는 디밍용 안정기와 이를 제어할 수 있는 조명제어시스템을 설치하여 실험을 실시하였다. 본 연구에서는 주광 분석을 위해 외부조도에 따라 세 가지 천공 type(청천공, 부분담천공, 담천공)으로 구분하였으며, 외부조도에 따른 주광 및 인공조명에 의한 작업면조도와 광센서의 조도를 측정하였다. 또한 시스템의 성능과 주광에 따른 디밍 시스템의 에너지 절감을 평가하기 위하여 조명 에너지 소비량을 측정하였다.

2. 실내 주광환경 성능 평가

본 장에서는 주광에 의한 실내 조명환경을 평가하기 위하여 대상공간에서 외부조도에 따른 작업면 조도분포와 센서조도를 측정하였다.

2.1 실험실 개요

본 연구에서 측정한 실험실의 크기는 3.6×7.2×2.6[m]이고, 창의 투과율은 30[%]이다. 주광 센서는

창으로부터 3.6[m](실깊이의 1/2) 지점의 천장에 설치하였으며, 작업면조도 측정점은 실 중앙부 5점으로 설정하였고, 작업면 높이는 바닥으로부터 0.8[m], 설계조도는 500[lux]로 설정하였다. 표 1은 실내 표면 반사율을, 그림 1은 대상공간의 크기 및 측정점을 나타낸 것이다.

본 연구에서 조도계는 7개를 설치하였으며(외부 조도 1, 작업면 조도 5, 센서조도 1), 작업면조도는 실 중앙부 5개 지점의 평균값을 기준으로 분석하였다. 센서는 천장에 설치하였으며, 개방형(unshielded type)으로 실험하였다. 측정실험은 약 40일간(3/18~4/30) 실시하였으며, 일반 작업시간대인 오전 8시~오후 6시까지 매 5분 단위로 측정하였다.

표 1. 실내 표면 반사율
Table 1. Surface Reflectance

구	분	반사율
물성치	바닥	30 [%]
	벽	50 [%]
	천장	80 [%]

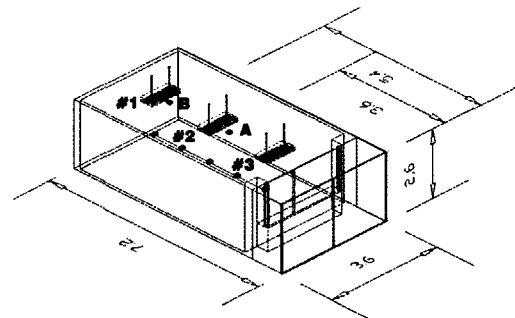


그림 1. 대상실의 크기 및 측정점
Fig. 1. Mock up room dimension and test point

2.2 천공별 주광특성에 따른 조명성능평가

본 절에서는 대표적인 3가지 천공(담천공, 부분담천공, 청천공)에서 주광의 증가에 따른 인공조명과 전체조도의 변화를 평가하고자 하였다.

2.2.1 외부 기상자료 분석

태양의 직사 일광성분은 센서에 직접적으로 영향을 미치기 때문에, 각각의 측정 자료를 청천공, 부분

담천공, 담천공으로 구분하였으며, 참조 기준1)은 다음과 같다.

$$\text{흐린날 (not sunny)} : \frac{E_g - E_d}{\sin \theta} < 20,000 \text{ lux}$$

$$\text{맑은날 조건(sunny)} : \frac{E_g - E_d}{\sin \theta} > 20,000 \text{ lux}$$

여기서, E_g 는 외부 수평면 조도이고, E_d 는 측정시간의 확산성분이며, θ 는 태양의 고도이다.

상기 기준을 참조하여 흐린날 조건에 해당하는 최대 외부 수평면조도가 약 20,000[lux] 이하인 경우를 담천공으로 분류하였다. 일반적으로 부분담천공으로 분류되는 운량비 40~70[%]를 측정된 최대 조도에 대한 비율로 개략화하여 최대조도가 20,000~60,000[lux]인 경우를 부분담천공으로, 60,000[lux] 이상인 경우를 청천공으로 본 논문에서는 분류하였다.

2.2.2 담천공시 조명성능 평가

그림 2는 담천공시(4/25)의 측정 사례이다. 작업시간(8시~18시)동안 측정일의 최대 외부조도는 오후 1시에 16,290[lux]를 나타내었으며, 주광에 의한 평균 작업면 조도는 101[lux]를 나타내었다. 본 담천공의 경우 전반적으로 주광에 의한 작업면 조도가 낮기 때문에, 작업시간동안 주로 인공조명에 의존하였으며, 인공조명을 포함하는 평균 작업면조도는 595[lux]로 균질한 조도레벨을 유지하였다. 본 담천공의 경우 평균 점등율은 81[%]이고, 에너지 절감율은 약 12.5[%]를 나타내었다. 그림에서 빗금으로 표현된 부분이 설계 조도를 유지하기 위한 인공조명 필요 부분이다.

2.2.3 부분담천공시 조명성능 평가

그림 3은 부분담천공시(3/23)의 측정 사례이다. 작업시간(8시~18시)동안 측정일의 최대 외부조도는 오후 12시에 34,700[lux]를 나타내었으며, 주광에 의한 평균 작업면 조도는 160[lux]를 나타내었다. 본 부분담천공에서도 인공조명을 포함하는 평균 작업면조도는 643[lux]로서, 담천공보다는 편차가 크나, 비교적 균질한 조도레벨을 유지하였다. 또한, 평균 점등율은 56[%], 에너지 절감율은 약 21.8[%]를 나타내었다.

타내었다.

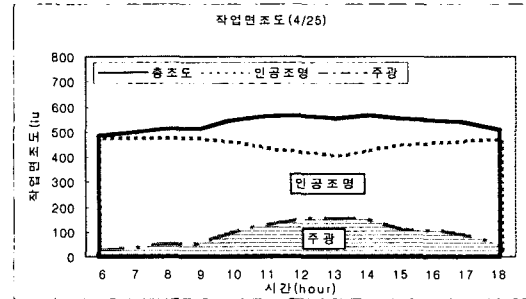


그림 2. 주광과 인공조명에 의한 작업면조도(담천공)
Fig. 2. Total illuminance on workplane(Overcast sky)

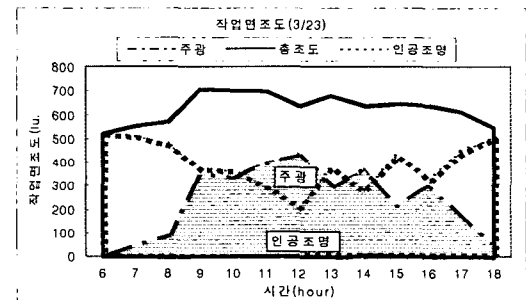


그림 3. 주광과 인공조명에 의한 작업면조도(부분담천공)
Fig. 3. Total illuminance on workplane(P-Cloudy sky)

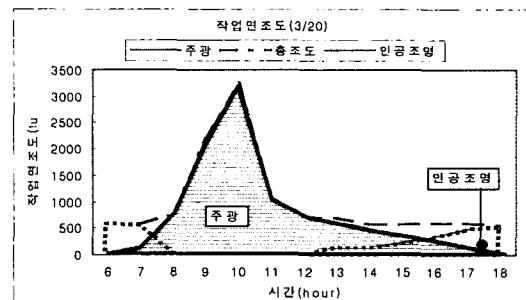


그림 4. 주광과 인공조명에 의한 작업면조도(청천공)
Fig. 4. Total illuminance on workplane(Clear sky)

2.2.4 청천공시 조명성능 평가

그림 4는 청천공시(3/20)의 측정 사례이다. 작업시간(8시~18시)동안 측정일에 최대 외부조도는 오후 12시에 78,300[lux]를 나타내었으며, 주광에 의한

평균 작업면 조도는 517[lux]를 나타내었다. 그러나, 측정일의 경우 태양고도가 낮은 오전 시간대에 집중적으로 직사 일광이 사입되어 오전의 평균 작업면 조도는 사무실의 일반적인 설계 조도 500[lux]를 훨씬 상회하고 있으나, 실질적으로는 12시 이후부터 인공 조명을 점등하여 500[lux]를 유지하였다. 이는 청천공일 때 전형적인 주광과 인공조명의 사용 행태를 나타낸 것이다. 본 청천공의 경우 평균점등율은 24[%] 이고, 에너지 절감율은 약 67.7[%] 이었다.

2.3 작업면 조도와 센서조도

작업면 조도(E_d)와 주광 성능에 따라 디밍 시스템에 영향을 주는 센서조도 (S_d)는 상관관계가 있으며, 모든 조명제어 알고리즘은 주광 조건에 따라 일정하게 유지되는 E_d/S_d 비를 필요로 한다. 본 절에서는 디밍 시스템의 성능과 주광에 따른 에너지 절감을 평가하기 위한 자료로 E_d/S_d 비를 측정하였다. E_d/S_d 비를 산정하기 위해 작업면 조도(E_d)는 주광 센서의 직하부에 위치한 #2 작업면의 조도를 기준으로 하였으며, 직사일광의 사입을 배제하기 위해 측정 조도값이 작업 기준조도보다 현저하게 큰 경우 (1,400[lux] 이상)는 계산에서 제외하였다.

표 2. 주광시 작업면조도와 센서조도와의 상관관계
Table 2. Correlation between workplane illuminance and photosensor signal

천공조건	E _d /S _d 비	R ²
부분담천공	2.49	0.9848
청천공	2.16	0.9041

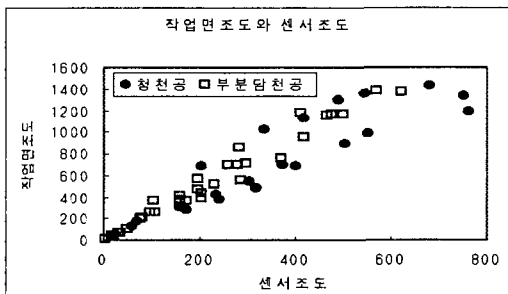


그림 5. 작업면조도와 센서조도의 상관성
Fig. 5. Correlation between daylight illuminance at the workplane and photosensor signal

그림 5는 천공 조건에 따른 작업면 조도와 센서 조도간의 관계를 나타낸 것이다(3/18~23). 측정 결과, 주광시 각각의 천공 조건에 따른 작업면 조도와 센서 조도간의 비(E_d/S_d)는 전체 작업시간(8시~18시) 동안 2.0~2.7의 분포로 나타났다. 본 실험결과 외부조도가 높을수록 E_d/S_d 비율이 다소 낮게 나타나고 있었으며, 표 2는 작업면조도와 센서조도간의 상관관계(R²)를 나타낸 것이다.

3. 조명제어시스템을 이용한 인공조명 성능 평가

본 장에서는 인공조명에 의한 실내 조명환경을 평가하기 위하여 대상공간에서 인공조명에 따른 작업면 조도분포와 센서조도를 측정하였다.

3.1 실험 조건

본 실험에서 2장에서와 동일한 대상공간(그림 1)에서 직접조명방식으로 실 깊이에 따라 창으로부터 멀수록 등기구의 점등율을 높게 유지하도록 등기구별로 점등율을 변화시켜 실내조도분포를 측정하였다. 본 실험에서 사용한 등기구는 40[W](T12) 2등으로, 실험실 내에 3개의 등기구를 설치하였으며, 등기구 배치는 창으로부터 가장 먼 곳에 위치한 것을 #1으로, 창으로부터 가장 가까운 곳에 #3로 명명하였다. 본 연구에서는 등기구의 점등율 제어를 위해 디밍용 전자식안정기를 설치하여 실험하였고, 디밍 범위는 100~40[%]의 조명 출력으로 구분하였다.

3.2 등기구 제어방식(점등율 결정)

조명제어를 위한 계산은 천장에 설치된 광센서의 측정조도(Present Value ; PV)와 디밍 개시조도(Set Point ; SP)와의 차이를 기준으로 하여, PV가 SP보다 클 경우 매 10[lux]당 5[%]씩 점등율이 감소하도록 PV와 SP 차이에 따른 연차적 비례제어방식을 채택하였으며, 각 등기구별로 점등과 소등되는 기준 조도를 별도로 설정하여 광센서의 측정조도에 따라 자동적으로 점등/소등되도록 설치하였다. 표 3은 작업면 조도 400 ~500[lux]를 확보하기 위한 각 등기구별 점등/소등 및 디밍레벨 설정값을 나타낸 것이다.

표 3. 등기구 설정값
Table 3. Set point of Electric light

(단위 : lux)

구 분	등기구 On	등기구 Off	점등 설정값(SP)
#1 등기구	130	550	140
#2 등기구	130	350	40
#3 등기구	130	250	10

3.3 인공조명의 에너지 사용량

본 연구에서 사용한 인공조명의 점등율에 따른 에너지사용량을 측정된 결과는 다음 표 4와 같고, 본 실험 연구에서는 야간에 인공조명의 평균 점등레벨이 88[%]로 측정되었다.

표 4에 나타난 에너지 사용량을 바탕으로 하여, 등기구의 평균 점등율과 에너지 사용량과의 상관관계를 구한 결과, $R^2=0.9969$ 로 상당히 높은 값을 나타내고 있었다(그림 6).

표 4. 등기구 점등율에 따른 에너지사용량(W)
Table 4. Energy consumption with dimming level

점등율	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%
사용량	261	261	240	222	200	166	142

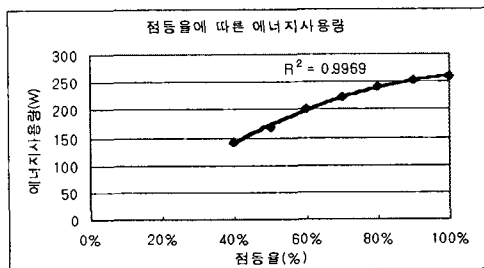


그림 6. 등기구 평균점등율에 따른 에너지 사용량
Fig. 6. Correlation between dimming level and energy consumption

3.4 주광조도와 에너지 사용량

3.4.1 주간 성능평가

그림 7은 4/24~4/30까지 1주(7일)간 주광 작업면 조도, 그리고 인공조명을 포함한 총 작업면 조도의 측정 분포이고, 그림 8은 주광에 의한 작업면조도와 에너지 사용량을 나타낸 것이다. 7일간의 기상 조건은 담천공 2일, 부분담천공 1일, 청천공 4일로 일반

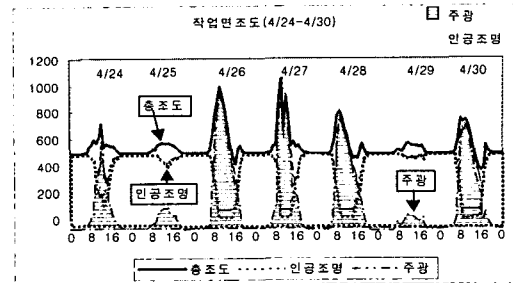


그림 7. 주광과 인공조명에 의한 작업면조도
Fig. 7. Total workplane illuminance(Daylight + Elec. light)

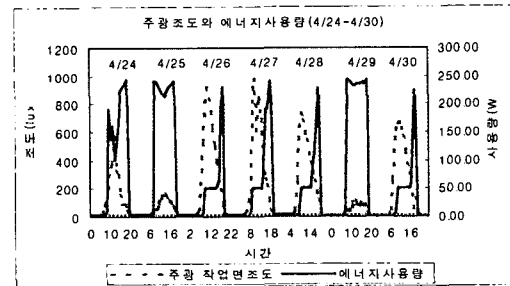


그림 8. 주광에 의한 작업면조도와 에너지사용량
Fig. 8. Workplane illuminance and energy consumption

적인 분포가 측정되었다. 1주(7일)간 주광과 인공조명을 포함한 평균

작업면 조도는 595[lux], 평균 점등율 49.7[%]이었고, 에너지 절감율은 약 43.7[%]로 나타났다.

3.4.2 다주간의 성능평가

다주간(4/1~4/30 중 유효 측정일 21일) 일반적인 작업시간대(오전 8시~오후 6시)의 외부조도와 작업면 조도, 에너지 사용량이 측정되었다. 측정 기간동안 평균 작업면 조도는 579[lux]이었고, 등기구의 평균 점등율은 40.8[%]를 나타내었다. 또한, 총 에너지 사용량은 25.6[KWh] 이었고, 평균 에너지 절감율은 약 53.1[%]로 나타났다. 상기 결과는 평균 작업면 설계 조도를 500[lux]로 설정하여, 실험실 내의 3개 등기구를 모두 점등했을 경우를 기준으로 산출된 것이다.

그러나, 작업 공간내에 직사 일광성분이 사입되는 외주부존(Perimeter Zone)을 고려한다면, 창으로부

터 가장 가까운 곳에 위치한 등기구는 전시간 소등이 될 수 있다. 실제로, 측정기간 동안 담천공을 제외한 나머지 천공의 경우 창으로부터 가장 가까운 곳에 위치한 등기구가 작업시간동안 약 60~80[%] 정도 소등되고 있었다. 따라서, 작업 시간동안 창으로부터 가장 가까운 곳에 위치한 등기구가 전시간 소등되어 있는 것으로 가정하여 산출한 4월 월간 에너지 절감율은 약 44.2[%]로 나타났다.

3.5 외부조도와 에너지 절감율

외부 기상상태에 따라 주광 이용률이 높을수록 더 많은 에너지 절감을 꾀할 수 있다. 본 절에서는 디밍제어를 적용하여 주광 이용에 따른 조명에너지 절감에 대해 분석하였다.

그림 9는 실험기간 21일 동안(4/1~4/30) 측정된 외부조도와 이에 따른 조명에너지 절감율간의 상관관계를 나타낸 것이다. 여기서, 외부조도 레벨이 20,000[lux]보다 낮을 때는 에너지 절감율이 25[%] 이하로 낮게 나타나고 있으며, 외부조도가 20,000~60,000[lux]사이에서는 조도가 증가함에 따라 에너지 절감율도 이에 비례하여 약 25~80[%]까지 증가하고 있었다. 또한, 외부 조도가 60,000[lux] 이상일 때는 에너지 절감이 변화하지 않고 약 80[%] 정도로 일정하게 유지되고 있었다.

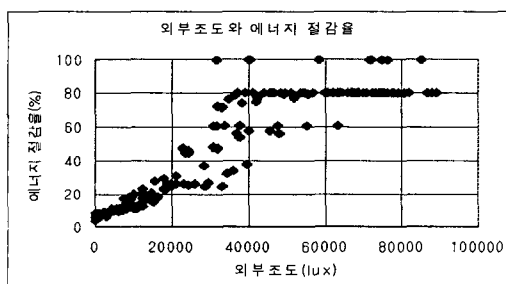


그림 9. 외부조도와 에너지 절감율
Fig. 9. Correlation between outdoor illuminance and energy saving ratio

외부조도가 20,000[lux] 이하인 경우에는 담천공의 조건으로, 주로 인공조명에 의해 실내 작업면 조도를 유지하기 때문에 에너지 절감율이 낮게 나타나고, 외부조도가 20,000~60,000[lux]인 경우에는 직

사 일광성분이 실내로 사입되는 정도에 따라 다양한 등기구 점등률을 나타내고, 이에 따라 에너지 절감율도 변화되는 것이다. 외부조도가 60,000[lux] 이상인 경우 에너지 절감율이 약 80[%] 정도를 일정하게 유지하고 있는 것은, 창으로부터 가장 멀리 떨어져 있는 등기구가 항상 점등되어 있기 때문이며, 이 때 점등된 등기구 직하부의 작업면 조도는 400~500[lux]를 유지하고 있었다.

그림 9에서 에너지 절감율이 100[%]로 표시된 경우는, 측정 기간 중 태양 고도가 낮은 오전시간대에 직사 일광성분이 강하게 실내로 사입된 일부 시간대 측정자료들이다.

4. 결 론

이상과 같이 주광과 인공조명의 성능 평가를 위한 디밍제어 실험 결과는 다음과 같다.

1) 작업면 조도(E_d)와 센서조도(S_d) 간에는 상관성이 있었으며, 두 변수간의 비(E_d/S_d)는 2.0~2.7의 분포로 나타났고, 외부조도가 높을수록 다소 낮은 비율을 나타내었다.

2) 1개월간 측정된 작업 시간대의 월간 에너지 절감율은 약 53.1[%]로 나타났으며, 외부부존(Perimeter Zone)을 고려하여 창가 쪽의 등기구를 완전히 소등한 경우는 절감율이 약 44.2[%] 정도로 나타났다.

3) 외부조도와 에너지 절감율 간에는, 외부조도가 20,000[lux]보다 낮을 경우 에너지 절감율이 낮게 나타나고 있으며, 외부조도가 20,000~60,000[lux]사이에서는 조도가 증가함에 따라 에너지 절감율도 따라서 증가하며, 외부 조도가 60,000[lux] 이상일 때는 에너지 절감이 변화하지 않고 일정하게 유지됨을 알 수 있었다.

이상과 같이 본 연구에서 실험 측정된 결과, 외부 기상조건에 따라 실내로 주광이 사입될 경우, 디밍제어를 통해 실 깊이에 따른 등기구의 점등율이 변화되어 실내 공간의 전반조명에 필요한 균등한 조도를 확보할 수 있고, 조명에너지 절감도 꾀할 수 있는 것으로 나타났다. 향후 계속되는 측정 실험을 통하

여 연간 데이터베이스를 확보하고자 한다.

- 감사의 글 -

이 연구는 2002년도 건설교통부 산학연 공동연구 개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) R.R. Verdver, F.M.Rubinstein, G.Ward, Photoelectric Control of Daylight-Following Lighting System, IBL 24872, 1989.
- (2) Francis Rubinstein, Photoelectric Control of Equi-illumination Lighting Systems, Energy and Buildings, 6(1984).
- (3) R.G.Mistrick, J.Thongtipaya, Analysis of Daylight Photocell Placement and View in a Small Office, Journal of the Illuminating Engineering Society, Summer 1997.
- (4) Danny H.W.Li, Joseph C. Lam, Evaluation of lighting performance in office buildings with daylighting controls, Energy and Building 33, 2001, pp. 793-803.
- (5) IES Lighting Handbook.

◇ 저자소개 ◇

김한성 (金翰成)

1966년 8월 18일생. 1990년 연세대학교 건축공학과 졸업(학사). 1994년 동 대학원 졸업(석사). 현재 고려대학교 건축공학과 박사과정.

김강수 (金岡秀)

1954년 11월 17일생. 1981년 고려대학교 건축공학과 졸업(학사). 1983년 미국 Ball State University, Indiana 졸업(석사). 1987년 미국 Texas A&M University 졸업(박사). 현재 고려대학교 건축공학과 교수.