

광화이버 및 Fresnel lens 적용 집광식 자연채광 시스템의 이용을 통한 조명에너지의 절감 : 시뮬레이션 및 실측 비교

정해준* · 김원식* · 김영민* · 한현주** · 천원기*[†]

*제주대학교 에너지공학과, **제주대학교 건축공학과

(2017년 2월 24일 접수, 2017년 3월 10일 수정, 2017년 3월 13일 채택)

Electric lighting energy saving through the use of a Fresnel lens based fiber-optic solar lighting system : Simulation and measurements

Jeong Haejun* · Kim Wonsik* · Kim Yeongmin* · Han Hyun Joo** · Chun Wongee*,[†]

*Department of Energy Engineering, Jeju National University,

*Department of Architectural Engineering, Jeju National University

(Received 24 February 2017, Revised 10 March 2017, Accepted 13 March 2017)

요 약

본 연구에서는 2축의 태양추적장치에 프레넬 렌즈를 장착한 fiber-optic 설비형 자연채광시스템의 효율성에 대하여 이론적 분석을 수행하였다. ECOTECH와 RADIANCE를 기반으로 시뮬레이션 모델을 개발하여 다양한 조건하에서 자연채광 시스템뿐만 아니라 형광등을 이용한 인공조명에 대한 실내 조도분석과 함께 실측 데이터와의 비교 연구를 수행하였다. 형광등을 이용한 실내조명의 경우, 평균조도는 사무실 실내 조도 기준(KS A 3011 일반 사무실 [G]등급[300-400-600lux]) 충분히 만족하는 결과를 보여주었다. 한편, 디퓨저를 사용한 자연채광시스템의 경우도 사무실 실내 조도 기준을 넘는 것으로 나타났다.

주요어 : 자연채광, 프레넬 렌즈, ECOTECH, RADIANCE, 시뮬레이션

Abstract - This paper deals with the effectiveness of a fiber optic solar lighting system that uses a Fresnel lens mounted on a two-axis solar tracker. A series of comparative analyses were made concerning its performance as compared to fluorescent lighting by using a simulation model based on ECOTECH and RADIANCE as well as referring to actual data. ECOTECH was used to model the test room (space) while RADIANCE was used for its indoor lighting conditions (environment). It was found that the average indoor light levels of fluorescent lighting fully satisfy the KS standard (KS A 3011, general office, class [G]: 300-400-600lux) whereas those of the solar lighting with light diffusers depends on the occlusion factor of roller shades installed on the south window.

Key words : Daylighting, Fresnel lens, ECOTECH, RADIANCE, simulation

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-064-754-3646 E-mail : wgchunn@jejunu.ac.kr

1. 서론

20세기의 대량생산과 소비는 지구의 자원을 고갈하고 엄청난 양의 폐기물을 쏟아내면서 공기, 물, 토양을 오염시키고 지구환경을 위협하고 있다. 이 중에서 지구 온난화 현상은 상당한 환경적 재앙을 초래하고 있어 세계적인 관심사가 되고 있다. 산업혁명 이후 화석에너지 소비는 급증하여, 이를 연소시키며 대기에 배출되는 이산화탄소는 지구온난화의 주요 원인이라고 할 수 있다. 전 세계적으로 급격히 증가하는 에너지 소비와 이에 따른 지구로부터의 영향은 즉각적인 화석에너지 삭감이 요구되고 있다. 그러나 이산화탄소 배출 증가를 억제하기는커녕 점점 멀어지고 있다. 우리나라에서의 이산화탄소 배출을 보면 건물부문에서 에너지소비가 차지하는 비중이 30%가 넘는다. 건물에서 소비되는 에너지의 주요 형태는 실내공조 및 실내조명이 대부분을 차지하고 있다. 현대의 건물들은 미적인 외관을 위하여 많은 부분을 유리로 덮는 등의 획일적인 건축설계를 하고 있다. 이로 인해 건물에서의 실내 공조, 실내조명으로 인한 에너지소비는 점점 늘어나는 추세이다. 최적의 설계를 통해 실내로 들어오는 빛의 양을 조절해주는 것만으로도 실내 냉난방 공조에 필요한 에너지를 절감할 수 있으며, 일광절약 시간제를 통해 조명으로 인한 에너지소비도 줄일 수 있다. 시뮬레이션을 이용하여 그 지방의 기후와 일조량 등을 감안한 건축물에 대한 체계적인 성능 분석 및 평가는 최적의 건축 설계와 건물 에너지의 절감에 상당한 영향을 미칠 수 있을 것이다.

본 연구에서는 2축 제어 방식 태양추적기에 Fresnel lens를 장착하여 태양광을 100suns 이상 모은 후 이를 광화이버 케이블로 전송하여 실내조명을 피하는 광화이버 적용 집광식 자연채광 시스템의 설치를 통한 건물에서의 조명에너지 절감에 관하여 Radiance를 이용한 시뮬레이션 및 실측 연구를 수행하였다. 두 개의 같은 크기의 사무실 공간을 대상으로 하여 자연채광 시스템을 설치한 경우와 기존의 형광등에 의한 인공조명을 한 경우에 대하여 실내조도 분포를 다각적으로 분석하였다. 시뮬레이션은 ECOTECT와 RADIANCE 프로그램을 연동시켜 진행하였다. ECOTECT 프로그램을 이용하여 test room의 수치해석적 모델을 수립하였는데, 건물의 실제 창호와 roller shade의 사용 패턴 등을 분석하여 실제 상황에 가깝게 시뮬레이션 조건을 설정하였다. RADIANCE 프로그램은 ECOTECT

의 test room 모델과 연동하여 자연채광 시스템 등에 대한 실내조명 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 연구 개요 및 방법

2-1. 시뮬레이션 모델

본 연구에서는 자체 개발한 광화이버 적용 집광식 자연채광 기술의 실측 성능 분석을 위하여 ECOTECT와 RADIANCE를 이용한 평가 모델의 개발과 이의 실증을 위한 현장 실측을 수행하였는데, 이를 위하여 실존하는 건물의 사무실 공간을 제주대학교 공과대학 4호관의 test room을 기준으로 설정하였다(Fig. 1 (a), (b)). 그리고 실제 적용 기술 분석을 위한 자연채광 장치는 당 연구팀에서 제작된 Fresnel lens가 장착된 태양추적형 자연채광장치를 이용하였다(Fig. 1 (c)). 본 자연채광 장치는 태양광을 고도나 위치에 상관없이 항상 고밀도로 집광하여 햇빛의 유입이 어려운 환경 또는 건축물의 실내로 유입시킬 수 있도록 고정밀도로 태양을 추적하며 일정한 양의 태양광을 집광시키며, 집광된 빛을 광섬유를 이용해 자연광이 필요한 실내로 보내 자연채광에 활용하는 장치이다. test room은 창문을 기준으로 정남향이며 층과 층 사이에 수평길이 1,000mm인 직사광의 유입을 막아주는 오버행이 있다. 실내의 크기는 9,000 x 3,000 x 2,700mm이고, 실험과 시뮬레이션된 결과값 모두의 조도는 작업면 기준인 바닥에서 750mm를 기준으로 측정하였다. 시뮬레이션의 조건으로 실내 천장으로부터 들어오는 광섬유의 위치는 실제 형광등의 위치와 같은 위치로 y축 상으로 test room의 중앙에 위치하였으며, x축 상으로는 창문으로부터 각각의 거리가 750mm, 1,800mm, 1,800mm, 1,500mm에 위치하도록 모델링되었다(Fig. 1 (d)).

시뮬레이션을 위하여 ECOTECT 프로그램으로 실내의 물리적 및 광학적 특성에 대한 모델링을 완성하였으며, Table 1은 본 모델링에 적용한 내부 재질 및 창문과 차광장치의 재질 및 특성을 보여주고 있다. 반사율은 실제 재질의 색을 기준으로 설정하였으며, 투과율은 창문은 ECOTECT 내의 double window의 기본 투과율로 설정하였고 blind는 실제 조도계를 이용해 투과율을 측정한 후 값을 입력하였다. 창문의 반사율은 시뮬레이션 프로그램인 RADIANCE에서는 적용되지 않고 투과율만 적용되었다.

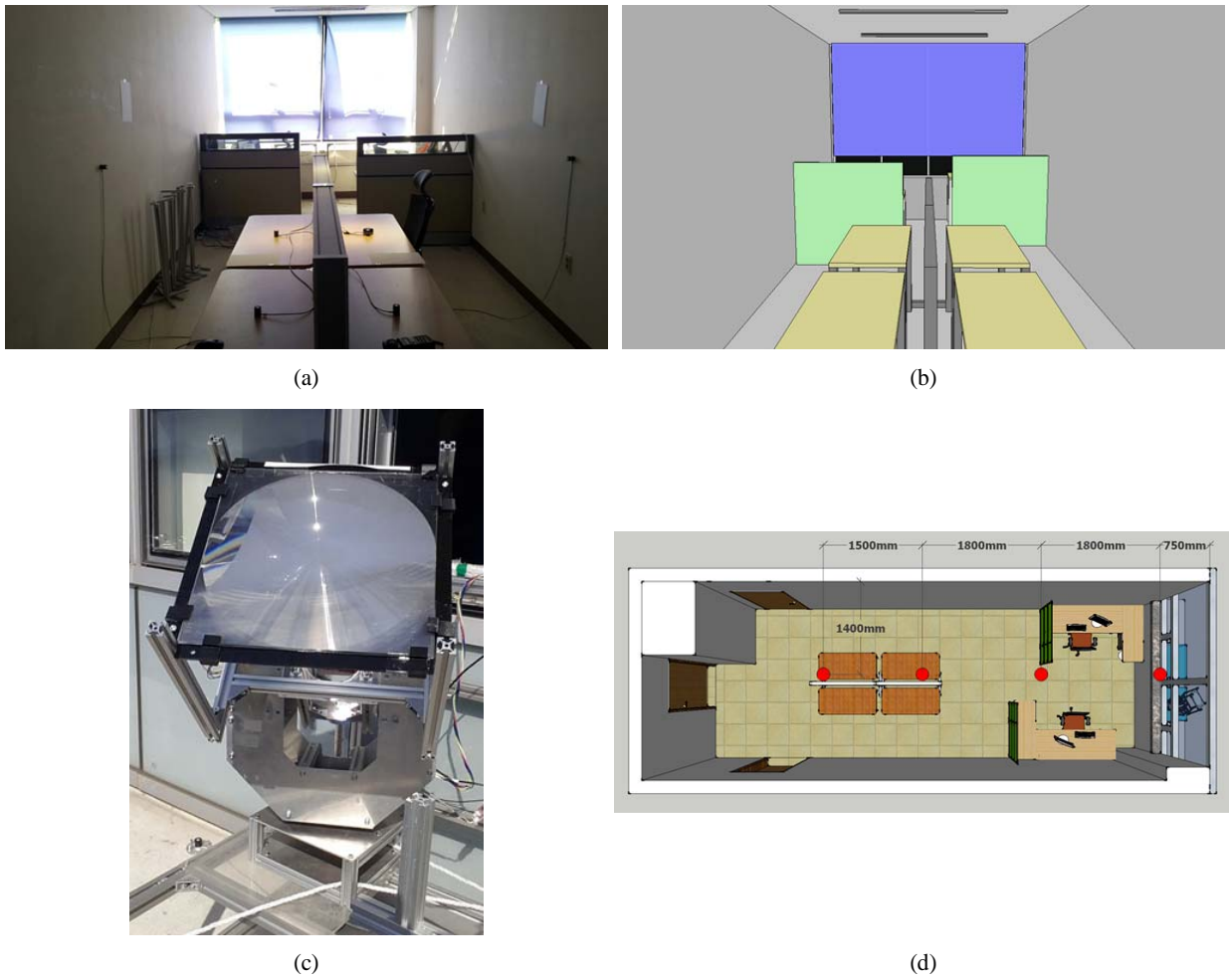


Fig. 1. Modeling conditions; (a) actual test room (b) modeling test room (c) solar tracking system (d) lighting position

Table 1. Properties of materials used

	Wall	Floor	Ceiling	Window	Shading device(blind)
Material	Concrete	Concrete	Plaster	Double window	Fabric
Reflectance (0~1)	0.9	0.75	0.9	0.92	0.54
Transparency (0~1)	n/a	n/a	n/a	0.92	0.0256

2-2. Roller shade의 사용 현황과 차광 지수 (occlusion factor)

1) 사용현황 분석

시뮬레이션을 하기에 앞서 먼저 실제 사무실들의 남측 창호에 설치되어 있는 roller shade의 사용 현황을 분석하였다. 즉, 남측 창으로부터 실내로 유입되는

자연광을 일차적으로 조절하는 역할을 하는 roller shade의 차광 효과를 구하여 이를 시뮬레이션에 차광 지수(occlusion factor)로 반영하기 위함이다. 현황 분석은 test room이 위치한 제주대학교 공과대학 4호관 (Fig. 2)을 대상으로 하였으며, Fig. 1의 test room과 같은 형태의 사무실이 위치하고 있는 건물의 남측 전

면에 대하여 총 10일 간에 걸쳐 1시간 간격으로 사진을 찍어 재실자들의 roller shade 사용 현황을 조사하였다.

2) 남측 창호와 차광지수(occlusion factor)

Fig. 3은 Fig. 2의 사진에서 보이는 제주대학교 공과대학 4호관 사무실들의 roller shade 차광지수

(occlusion factor)를 조사하여 0%, 25%, 50%, 75%, 100%로 나누어 그래프로 나타낸 것이다. 총 10일 간에 걸쳐 roller shade 사용실태를 조사한 결과를 분석해보면 roller shade를 100% 모두 가린 경우는 전체의 약 40%를 차지했으며, 75%를 가린 경우는 전체의 약 50%를 나타냈다. 즉, 이 두 가지의 경우가 대부분을 차지하고 있었으며, 75%를 가린 경우가 가장 많았다.



Fig. 2. Sky condition and window shading by roller shades

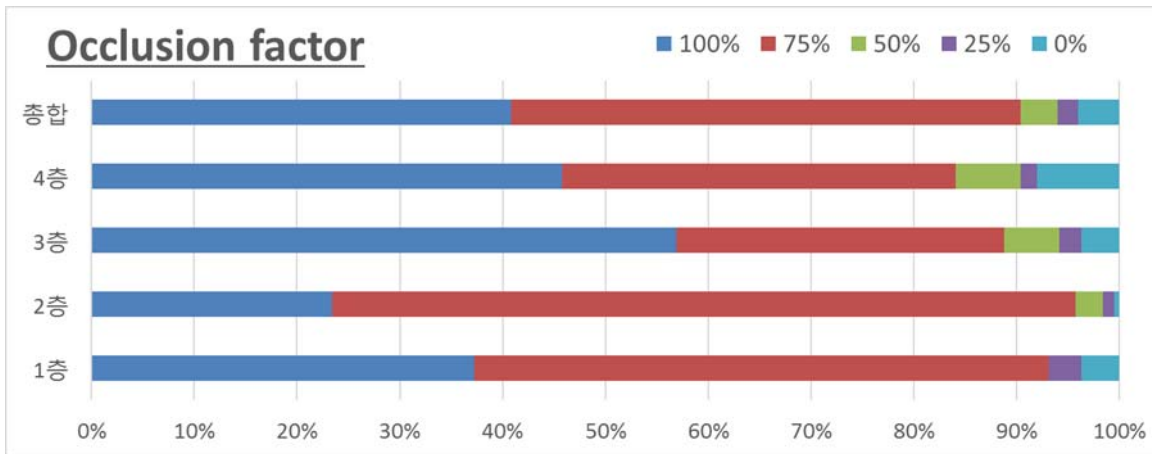


Fig. 3. The actual use of roller shades

또한, 조사결과 대부분의 재실자들이 roller shade의 길이를 조절하지 않고 실내에서 형광등을 켜 채 생활하고 있는 것으로 조사되었다.

3. 시뮬레이션 및 실측

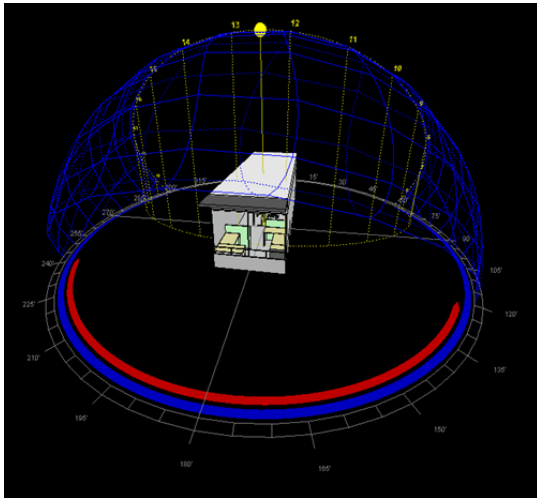
3-1. Roller shade 차광지수에 따른 시뮬레이션

1) 시뮬레이션 조건 설정

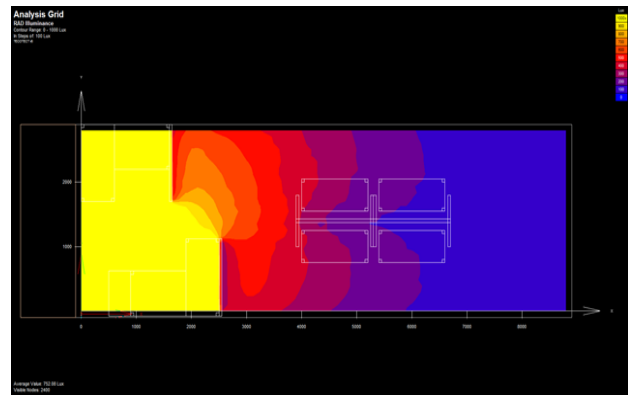
시뮬레이션은 ECOTECT을 이용하여 기본적인 모

델링과 재질 설정을 한 후 RADIANCE와 연동하여 수행하였다. 먼저 차광장치인 roller shade의 차광지수에 따라 실내로 유입되는 태양광의 양을 알아보기 위해 roller shade의 차광지수(창문 높이의 0%(차광장치 없음), 50%, 75%, 100%)에 따라 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 태양광이 가장 강한 여름인 6월 21일(하지)을 기준으로 실내조도의 평균값을 산출하였다.

Fig. 4 (a)는 시뮬레이션 조건인 6월 21일 (하지)의 태양고도 및 test room의 상태를 보여준다. Fig. 4 (b)



(a)



(b)

Fig. 4. Solar altitude and indoor illuminance (simulated) (a) summer solstice (b) result: at 12:30 blind 50%

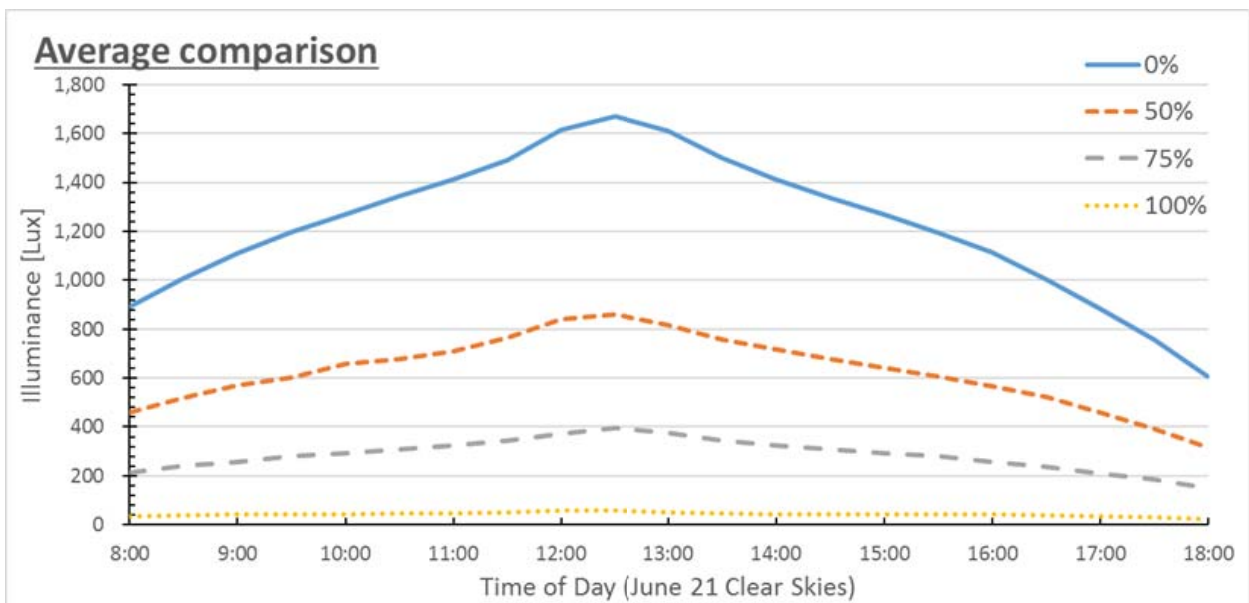


Fig. 5. Variation of average indoor illuminance of the test room with roller shade length

는 roller shade의 길이별, 시간별 시뮬레이션을 수행한 결과 값 중 하나이며 roller shade 길이가 50%일 경우 오후 12:30에서 0 ~ 1,000 lux까지 100 lux단위로 실내 조도분포를 나타내고 있다. 천공상태는 clear sky로 설정하였다.

2) 차광지수와 평균 조도

Fig. 5는 roller shade 차광지수에 따른 평균 실내조도 변화량을 시뮬레이션한 결과이며, test room의 실내 면적 27m²(9,000x3,000mm)를 가로 80등분, 세로 30등분하여 총 2400개 좌표의 평균값을 산출하여 나타내었다. 실내를 모두 가린 100%의 경우 평균조도는 50 lux도 나오지 않았으며, 75%의 경우는 평균 200 ~ 400 lux의 결과를 보였다. 50%의 경우는 400 ~ 900 lux까지의 분포를 보였고, 0%는 평균 900 ~ 1600 lux까지 나왔다. 하지만 0%의 경우 사무실 실내 조도 기준을(KS A 3011 일반 사무실 [G]등급[300-400-600 lux]) 훨씬 상회하는 결과를 보였다. 또한 100%와 75%는 조도기준에 못 미치는 결과가 나왔고 0%와 50% 경우 모두 창가가 아닌 쪽에 비해 매우 밝아 눈부심 현상이 심한 것으로 나타나 인공조명 없이는 태양이 있는 낮에도 원활한 작업이 불가능하다는 것을 알 수 있었다.

3-2. 시뮬레이션과 실측치의 비교

1) 비교 조건

본 연구에서는 시뮬레이션 프로그램의 정확도 및 재질의 물성치와 특성을 확인하기 위해 시뮬레이션 결과 값과 실제 roller shade의 차광지수별(75%,

100%) 조도측정을 한 결과 값을 비교하였다. 실험과 시뮬레이션은 모두 조명이 없는 상태와 자연광의 영향만 받는 상태에서 이루어졌다. Fig. 6은 실제 측정시의 조도계의 위치와 이름을 나타낸다. 조도계는 작업면 높이 기준과 책상 높이인 바닥으로부터 750 mm에 맞추어졌으며, 101번이 동쪽 창가 책상위에 위치하였으며, 102번은 서쪽 창가에 위치하였다. 103, 104, 105, 106번은 중앙 책상에서 각각 동쪽 창가에서부터 순차적으로 설치하였다.

2) 차광지수 75%

Fig. 7은 2015년 10월 31일에 roller shade가 창문의 75%를 차지하고 있는 경우의 실제 측정된 조도 값과 시뮬레이션 값을 비교한 그래프이다. 실제 조도 값은 Delta OHM 사의 PHOT 01 조도 측정 장치와 Agilent 사의 34970A 데이터로거를 이용하여 Fig. 6의 그림에서 보이는 포인트에서 데이터를 측정하였다. 시뮬레이션 결과 값은 실선으로 그리고 실제 측정 값(실측치)은 표식을 이용하여 점의 형태로 나타내었으며, 오전 11시 30분 이후부터 기록되었다. 시뮬레이션은 실측의 조건과 가장 유사한 청천공상태(clear sky)를 선택하여 진행하였는데, 오후 3시 이후에 몰려온 구름의 영향을 받기 전까지는 약간의 구름의 영향은 있었지만 거의 유사한 조건을 유지할 수 있었다. 외부 조도의 실측치는 동일 시간대에 시뮬레이션 값과 큰 차이가 없으며(3 ~ 11%), 그 외의 각각의 조도센서의 값도 거의 일치하거나 약간 낮은 것으로 나타나 시뮬레이션의 정확성을 뒷받침하였다.

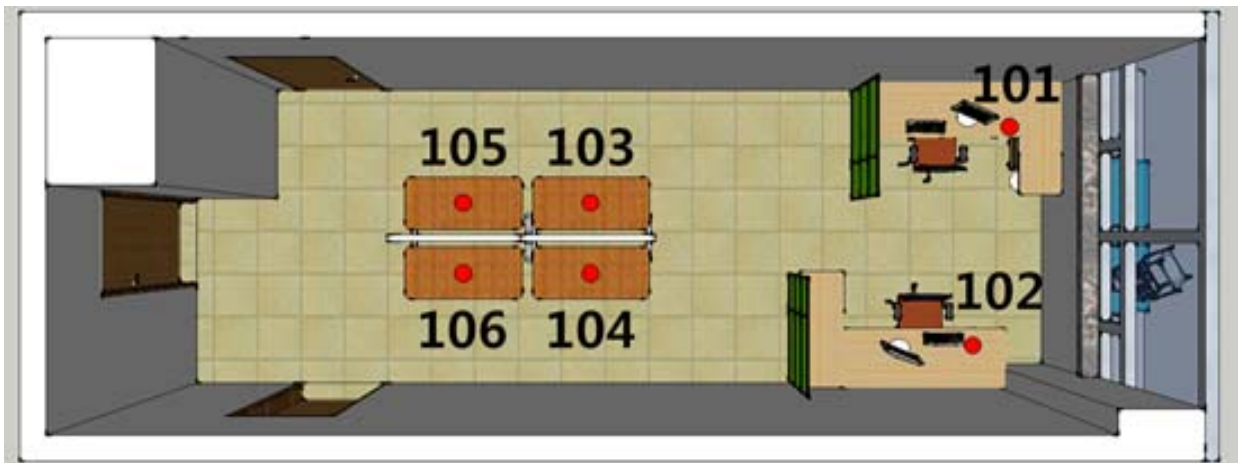


Fig. 6. Location of photo sensors

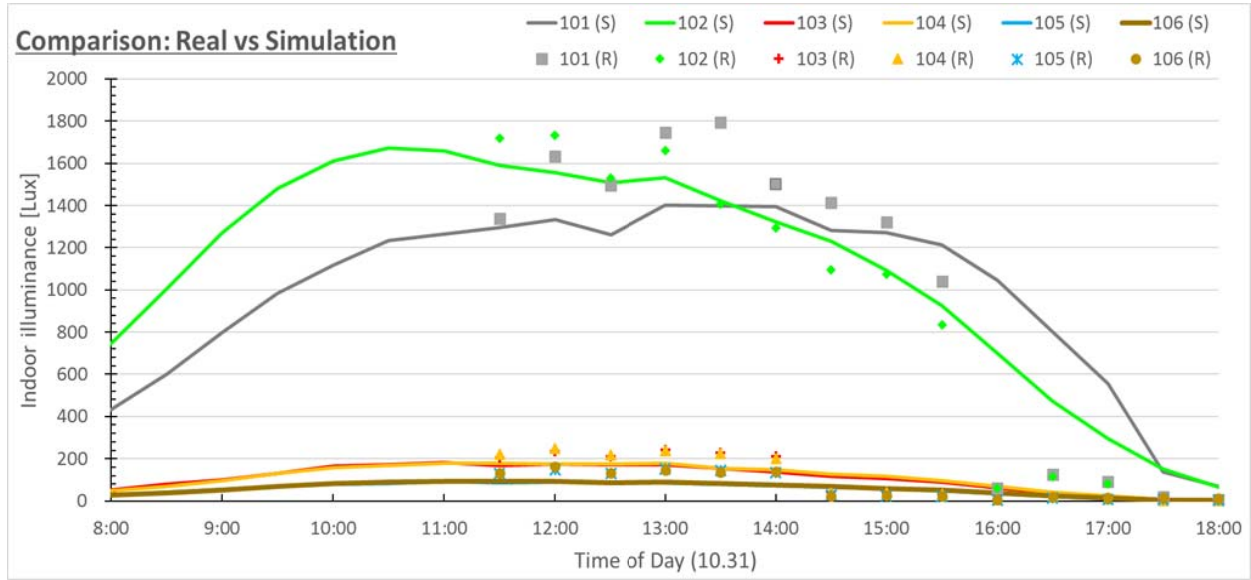


Fig. 7. Comparison between measured values and simulation results on October 31 (75%)

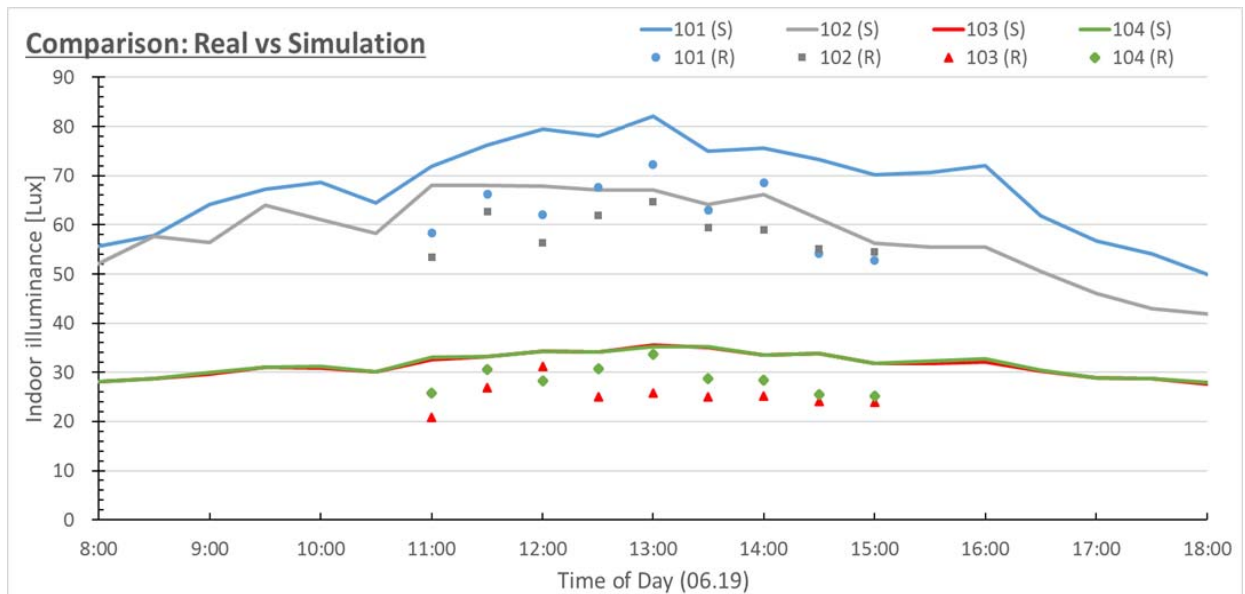


Fig. 8. Comparison between measured values and simulation results on June 19 (100%)

3) 차광지수 100%

Fig. 8은 2015년 6월 19일 roller shade를 모두 내렸을 경우의 실제 측정값과 시뮬레이션 결과 값을 비교한 그래프이다. 시뮬레이션의 조건은 앞서와 마찬가지로 청천공(clear sky) 상태를 가정하였는데, 실제 측정된 날의 날씨는 구름이 열게 낀 맑은 날이었다. Fig. 7의 경우와 같은 형태로 그래프에서 시뮬레이션 값과 측정치를 표시하도록 설정하였는데, 앞서의 경우와 마

찬가지로 비슷하거나 약간 낮은 것으로 나타나 동일 시간대에 실제 측정치와 시뮬레이션 값은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

3-3. 인공조명(형광등)과 자연채광의 실내 조도 비교 분석

1) 비교 조건

앞서 조사한 재실자의 실제 roller shade 사용현황

을 고려하여 차광한 상태로 재실자들이 선호하는 roller shade 75%를 조건으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 인공조명의 경우 test room의 실제 조건과 비슷한 사양을 사용하였는데, Philips사의 MASTER TL-D 32W/865 형광등 2개가 1세트인 매입형 등기구를 조건으로 설정하였다. 자연채광은 앞서도 언급했듯이 태양추적장치에 Fresnel lens가 장착되어 항상 동일 시간대에 가장 많은 양의 태양광을 획득할 수 있도록 설계된 설비형 자연채광 장치를 가정하였다. 자연채광 시뮬레이션은 6월 21일(하지)을 기준으로 아래의 식 (1)을 이용해 가장 밝은 시간대에 측정된 조도값을 (89,000 lux) 이용하였는데, 자연채광 장치의 집광부 면적(0.071 m²)에 진입하는 광선속(6,288 lm)을 계산하여 진행하였다. 실제 광전송시 발생할 수 있는 손실 등은 고려하지 않았으며, 형광등과 같은 위치에 광섬유를 설치하여 실내 천장으로 자연광이 조사되도록 하였다.

$$I_{\max} \times A_{LC}(\pi r^2) = lumen_{st} [lm] \quad (1)$$

I_{\max} =일단 가장 밝은 시간대의 조도
 A_{LC} =집광부(Light Collector)의 면적

태양광은 광화이버 전송장치의 특성상 대부분이 직사광 형태로 광섬유에 집광되어 들어오고 또한 대부분의 빛이 직사광 형태로 실내로 조사되므로, 이를 보완하기 위하여 광화이버 말단부에 광학렌즈를 디퓨저로 장착한 경우에 대하여도 아울러 그 실내 조도 분포를 분석하였다. 디퓨저는 convex/concave lens 형태로 제작된 산광용 유리 렌즈를 가정하였다. Fig. 9 (a), (b)는 디퓨저 적용 전과 후의 배광곡선을 나타내며 Fig. 9 (c), (d)는 디퓨저 적용 전과 후의 조도 분포 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

2) 실내 조도 비교 분석

본 연구에서는 형광등과 태양추적장치를 이용한 자연채광 조명 비교 시뮬레이션을 실제 모델인 제주대학교 공과대학 4호관의 test room을 기준으로 ECOTECT로 모델링한 후 RADIANCE를 이용해 시뮬레이션을 수행하여 roller shade가 75% 내려간 조건의 형광등을 적용했을 때와 자연채광 조명장치를 적용한 경우, 자연채광 조명장치에 디퓨저를 장착한 경우를 시간에 따른 조도 분포와 평균조도 값의 변화로 분석해보았다.

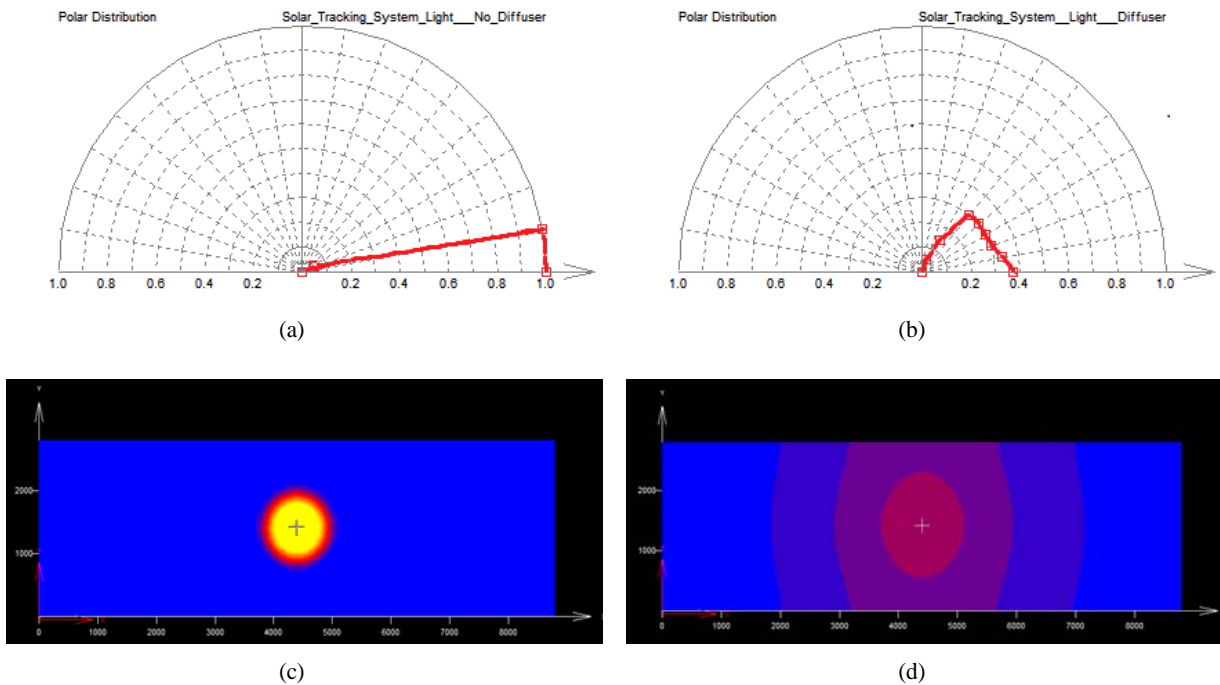


Fig. 9. Diffuser setting; (a) No diffuser (b) Diffuser (c) Before applying the diffuser (d) After applying the diffuser

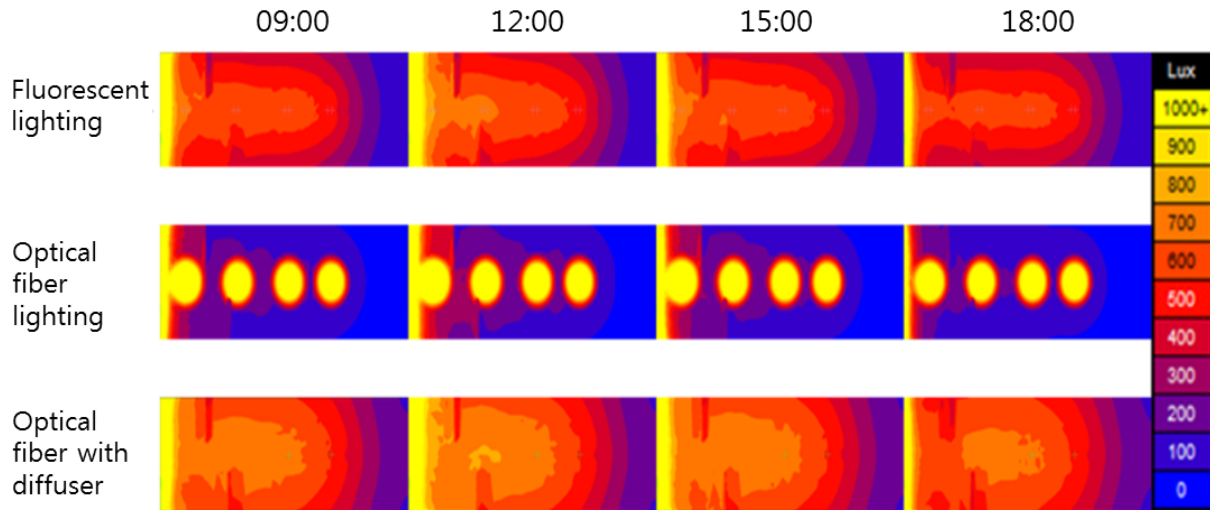


Fig. 10. Change of indoor illuminance with time

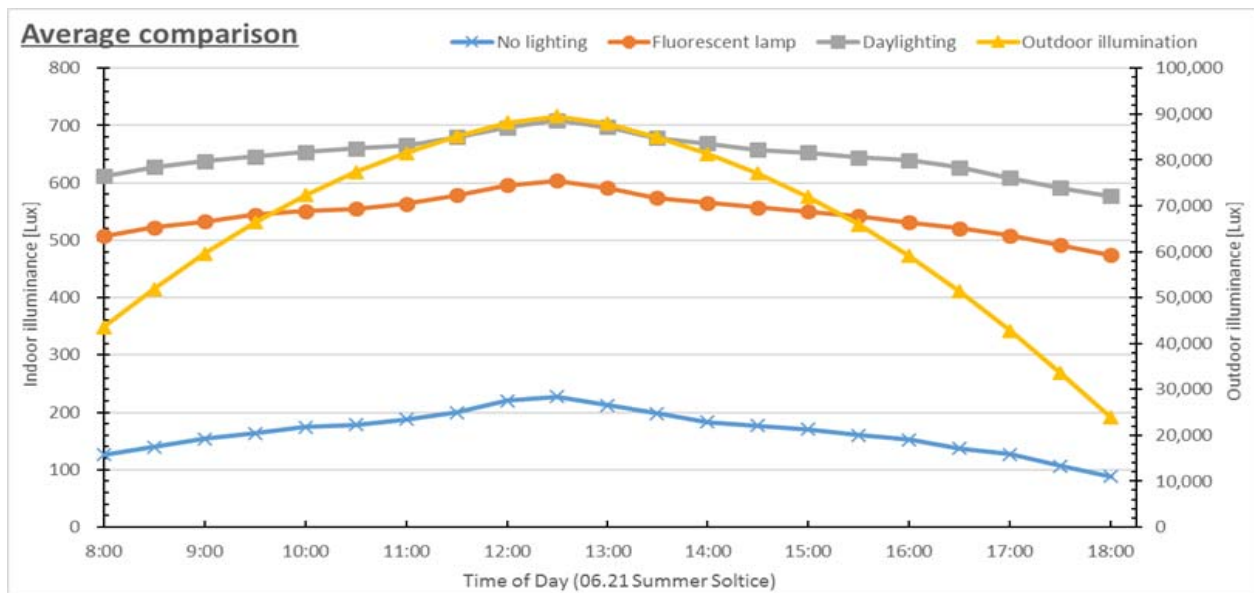


Fig. 11. Change of average indoor illuminance with time

Fig. 10은 시뮬레이션 결과를 보여주고 있는데, 1) 인공조명(형광등), 2) 디퓨저 미장착 자연채광, 그리고 3) 디퓨저 장착 자연채광 등 3가지 경우의 실내 조도 분포의 변화를 나타내고 있다. 이 그래프는 오전 9시를 기준으로 3시간마다의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있으며, 가장 어두운 부분인 0 lux부터 가장 밝은 부분인 1,000 lux까지 100 lux단위로 나타내었다. 그림에서 형광등을 이용한 인공조명은 중앙부분이 일정하게 600 lux이상 나오는 것을 알 수 있으며, 자연채

광의 경우는 디퓨저를 장착하지 않으면 광섬유의 위치를 중심으로 태양광이 몰려있는 것을 알 수 있다. 한편, 디퓨저를 장착한 경우는 그 중앙부분이 700 lux 까지 나오는 것을 알 수 있으며 형광등과 비슷한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 1)과 3)의 경우를 비교해보면 형광등 결과와 태양추적장치와 디퓨저를 사용한 결과를 비교해보면 후자의 경우가 더 높은 것을 알 수 있는데, 이는 자연채광에서 광 전송효율을 100%로 가정해 나온 것으로 실제로는 더 낮게 날 것으로 예측된다.

Fig. 11은 시뮬레이션 1)과 3)의 경우에 있어서 외부조도와 test room의 평균조도 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 10의 경우와 마찬가지로 roller shade의 차광지수는 75%로 하였으며 그림의 No lighting은 실내조명 없이 시뮬레이션 한 결과이며, Fluorescent lamp는 1)의 경우를 그리고, Daylighting은 3)의 경우를 각각 나타낸다. 외부조도는 그래프의 오른쪽 보조 축을 기준으로 표시되었으며, 천공상태는 청천공(clear sky)으로 오전 8시부터 오후 6시까지 23,000 ~ 90,000 lux의 분포를 보였다. 그림에서 실내조명이 없는 경우에는 평균 100 ~ 200 lux의 조도분포를 보였는데 반해, 형광등을 이용한 인공조명의 경우에는 평균적으로 500 ~ 600 lux의 조도분포를 보였다. 한편, 디퓨져 장착 자연채광의 경우에도 평균적으로 600 ~ 700 lux의 조도분포를 보여 인공조명과 유사한 조도분포를 나타내는 것으로 분석되었다. 세 경우 모두 평균조도가 외부조도의 변화에 따라 완만하게 변하는 것을 알 수 있다. 형광등을 이용한 자연채광의 경우에는 KS의 사무실 실내 조도 기준(KS A 3011 일반 사무실 [G]등급 [300-400-600lux])을 충분히 만족하는 결과를 보였으며, 디퓨져 장착 자연채광 조명도 이와 유사한 결과를 나타내는 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 연구는 Fresnel lens와 광화이버 기술을 적용한 집광식 자연채광 시스템의 효율성에 대하여 실제 사무실 공간을 대상으로 다양한 조건하에서 시뮬레이션과 실측 연구를 진행하였다. 특히, 형광등을 이용한 인공조명과 동일 조건하에서 작업면에서의 조도 비교 분석을 통하여 시스템의 상시 조명으로써의 활용성에 대한 실질적인 평가를 수행하였다. 시뮬레이션은 ECOTECT을 이용한 대상 사무실 공간의 모델링과 RADIANCE를 통한 조도 분석을 근간으로 진행되었으며, 실측은 작업면에 설치된 조도 센서를 이용하여 실시간으로 이루어졌다. 형광등을 이용한 실내조명의 경우에 평균조도는 사무실 실내 조도 기준을(KS A 3011 일반 사무실 [G]등급[300-400-600lux]) 충분히 만족하는 결과를 보여주었으며, 자연채광시스템도 디퓨져를 사용한 경우는 사무실 실내 조도 기준을 넘는 결과를 보였다. KS 조도기준과 재실자의 선호도가 점차 높아지는 것을 고려해볼 때 자연조명의 적극적인 활용은 전기에너지의 절감뿐만 아니라, 향후 공조시스

템의 냉·난방부하의 조절과 관련하여 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 “저열원의 하베스팅을 위한 TM(Thermal to Mechanical energy) 발전변환시스템 개발”, “전통 민가 건축물의 에너지 환경 기술 분석과 이의 적용을 통한 주거용 건축물의 효율성 제고 및 쾌적성 증진 방안 연구” 연구비 지원으로 수행되었음

(과제번호 : 2014R1A2A01006421,

2016R1D1A1B04934265)

References

1. Lee, C. S., Kim, J. M., Park, Y. M., Sung, T. K., Joung, C. B., Kang, S. H., Kim B. C., 2013, “Development of Tracking daylighting System Using Multi-Parabolic Reflector”, Journal of the Korean Solar energy Society, Vol. 33, No. 2, pp. 56-63.
2. Lee, J. Y., Song, K. D., 2003, “Developing Computer Models for the performance Evaluation of Daylighting system and Lighting Control”, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 19, No. 3, pp. 211-218.
3. Kim, Y. M., 2011, “Study on the performance enhancement of low-temperature solar application : Daylighting and adsorption desalination system”, Master Thesis.
4. Kjeld Johnsen, Richard Watkins, 2010, “Daylight in buildings”, Energy Conservation in Buildings & Community Systems & Solar Heating and Cooling Programmes, Project Summary Report.
5. Vu, N. H., Shin, S. Y., 2016, “Cost-effective optical fiber daylighting system using modified compound parabolic concentrators”, Solar Energy , Vol. 136, pp. 145-152.
6. Oh, S. J., Lee, Y. J., Kim, N. J., Hyun, J. H., 2011, “Development of an AVR MCU-based Solar Tracker”, Journal of Energy Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 353-357.
7. Park, Y. C., 2000, “Sun Tracking System for

- Active Daylighting System”, The Society Of Air-Conditioning And refrigerating Engineers Of Korea, Vol. 11, pp. 47-58.
8. Ko, D. H., 2010, “Assessment and Analysis of Green Building Performances using Autodesk ECOTECT Analysis 2010”, Architectural Institute of Korea, Vol. 54, No. 7, pp. 56-60.
 9. 1998, “KS A 3011 조도기준”, 한국표준협회.
 10. Choi, W. R., Han, S. J., Yun, Y. I., 2013, “A Study on the Window Planning of School Building Using ECOTECT Simulation -By Dynamic Daylight Simulation Using Weather Data-”, Ecological Architecture and Environment, Vol. 13, No. 6, pp. 77-82.
 11. Cho, K. H., Yoon, J. O., 2010, “A Study on the Comparison of Energy Performance in Passive House by Energy Simulation (e-QUEST, ECOTECT Analysis)”, Architectural Institute of Korea, Vol. 30, No. 1, pp. 435-436.
 12. Jeong, H. J., Kim, Y. M., Kim, W. S., Chun, W. G., 2016, “A comparative study on the economic feasibility of fluorescent lighting and fiber-optic daylighting via LCC analysis”, Energy & Climate Change, Vol. 11, No. 2, pp. 160-169.