

염료감응형 태양전지(DSC)와 자연채광의 상관관계 분석-교육공간을 중심으로

이웅작*

세명대학교 건축공학과, 교수

A Correlation Analysis between DSC (Dye Sensitized Cell) and Daylighting-Focusing on Educational Space

Lee Eung-Jik[†]

Department of Architectural Engineering, Semyung University, Professor

[†]Corresponding author: drlee@semyung.ac.kr

Abstract

Due to the large window area, the lighting environment of the educational space between the window and deep part of the room is not uniformly illuminated, and the phenomenon of glare is severe. For this reason, the daylight performance of DSC-BIPV windows was analyzed in order to improve the natural lighting in the educational sector. The method derives the correlation with natural lighting by measurement and simulation. Dynamic simulation confirmed that the average illuminance of the target space was higher at later than the early afternoon. The performance of natural lighting at 40% and 30% transmission of DSC has the effect of significantly reducing the amount of excess light in existing windows. Nevertheless, the actual average illuminance in all seasons corresponds to the standard illuminance of the educational facility, 300 Lux. In addition, the uniformity is also seen through the skylight illuminance ratio.

Keywords: 염료감응형 태양전지(DSC_Dye Sensitized Cell), 자연채광(Natural lighting), 조도(Illuminance), 투과율(Transmittiont), 주광조도비(Skylight illuminance ratio)

1. 서론

BIPV의 세계적인 확산 추세는 범지구적 CO₂ 감축 당위성과 태양전지의 기술개발이라는 상승작용에 기인하여 지금까지 중심적인 활용의 결정계 태양전지 이외에도 다양한 비결정계 태양전지에 대한 개발과 상용화에 큰 진전이 있어왔다. 그중에서도 염료감응형 태양전지(이하 DSC)의 경우 다양한 색상 및 투광성과 유연한 기판에 따른 건축적용의 확장성 등에 의한 고기능 BIPV로의 가능성이 주목 받고 있다. 특히 채광에 직접적인 영향을 미치는 DSC 창호의 경우 실내공간의 빛 환경 쾌적성 확보가 담보되어야만 한다.

 OPEN ACCESS


Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.40, No.1, pp.35-47, February 2020
<https://doi.org/10.7836/kses.2020.40.1.035>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 07 January 2020

Revised: 29 January 2020

Accepted: 19 February 2020

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이에 일부 연구에서 DSC에 의한 실내의 채광성능 연구가 이루어진 상황이나, DSC BIPV창호의 학교시설에 대한 빛 관련 실내 환경에 대한 논의는 전무한 실정이다. 특히 주간활동 중심의 교육공간에서의 빛 환경은 학습자의 공간지각 능력향상 그리고 시각적 쾌적감과 건강성뿐만 아니라 학습능률 및 건물에너지소비 등 다각적인 상호관계의 중심에 있다¹⁾. 그러나 교육 공간 창호는 대부분 넓은 면적으로 계획되어 있어 자연채광 측면에서는 공간의 조도가 고르지 못하거나 과도한 현휘 발생 및 일사유입에 따른 문제를 해결하기 위하여 실내블라인드 또는 커튼 등으로 자연채광을 차단하는 실정²⁾이므로, 본 연구에서는 교육공간의 DSC 창호 적용으로 실의 자연채광에 미치는 상관관계 규명과 그에 따른 실내 빛 환경 개선 가능성을 분석하여 DSC BIPV 확장성 제고에 일조하고자 한다.

2. 이론적 고찰

측창에 의한 공간의 일반적인 주광율의 특성은 창문주변은 과도한 조도를 나타내나 창문에서 멀어질수록 급격히 어두워지는 경향³⁾을 보이므로 균일한 자연채광은 언제나 건축계획의 주요 요소 중 하나다. 따라서 본 연구의 주제인 DSC를 통한 주광이용에 있어서의 상관관계를 교육시설을 중심으로 분석하기 위해 실제 교육공간의 자연채광 관련 이론고찰과 기존연구의 동향을 파악하고 실내 빛 환경을 실측 및 점검하는 과정을 거친다.

2.1 교육시설의 자연채광

교육공간에서의 교육효과 증진에 작용하는 요소가 실내공기 질, 음향, 온도, 디자인 그리고 동기부여와 아울러 자연채광이 그 중심에 있기 때문⁴⁾에 건축의 자연채광계획은 중요하다. 이는 실의 원활한 자연채광이 육체 및 정신 건강에 상당한 영향을 미치는 것으로서, 단순히 눈으로 볼 수 있는 상황연출에 그치지 않는다는 것을 암시한다. 충분한 자연채광을 위해서는 큰 면적의 창호가 바람직하지만 그에 따른 과다유입 직사광선에 의한 현휘로 일조 및 일사조절 장치 계획이 필요하며, 요즈음의 화이트보드나 빔 프로젝터 사용이 빈번한 상황에서는 필수적인 요소이다⁵⁾. 이와 관련된 연구로는 강의실의 일반적 빛 환경과 자연채광의 적극적 이용⁶⁾ 및 각종 디지털기기의 효율적 활용에 대한 기초 조사⁷⁾등이 이루어진 상태이다. 일반적인 교육시설의 채광기준은 담천공 아래에서 주광율 최소 2%부터 5%이상 그리고 균제도는 주광아래에서 1/10 이상이며, 실내 책상 면 조도의 경우 300 Lux 이상이 되어야 한다고 「학교보건법 시행규칙」 별표 2(시행일자 2017-02-04)에 규정되어 있다. 국제조명위원회에서도 실 용도에 따른 조도기준을 제시하고 있고 교육시설인 강의실의 경우 300 ~ 600 Lux 정도로 나타난다.

2.2 연구동향

건축에서의 주광이용은 건축역사와 함께 시작된 것으로서, 주로 건물외피 개구부의 크기와 위치에 의존하였고 자연채광이 충분하지 못한 경우의 현대건축에서는 인공조명을 부가적으로 활용한다. 그러나 인공조명은 실

내의 복사열 발생을 증가시켜 냉방부하를 키우고, 현대건축에서의 창호의 크기는 과거에 비해 커져서 오히려 과도한 채광에 의한 실내에서의 휘도발생이나 창호를 통한 과도한 에너지 소비는 실내 환경을 악화 시키는 경우도 흔하다⁸⁾.

본 연구와 연관된 주제어는 DSC와 자연채광으로서, 특히 이의 상관관계를 교육시설 공간에서 분석하는 것으로 그 범위를 설정하고 이 두 분야의 기존연구를 통해 동향을 파악하였다. 국내 교육시설공간의 자연채광 연구는 다양한 관점에서 이루어지고 있는 상황으로, 박경은(2002)은 채광성능측정을 통한 교실의 빛 환경 특성분석을 실시하여 공간의 평균주광률은 기준을 상회하나 실내의 조도 불균형 및 커다란 현휘 발생과 실내설치의 커튼 또는 블라인드 등의 차양 장치 문제점을 지적하였다. 또한 임복녀(2008)는 과도하게 넓은 창호로 인한 강의실 빛 환경의 불균형 해소를 위해 블라인드 각도조절 방법을 제시한 바 있다. 하나(2011)의 관련 연구는 교실의 창문을 통해 외부를 주시할 경우 발생하는 블래글레어에 대하여 실제 실험자를 대상으로 측정·분석하였다. 정지석(2013)은 주간 채광유입 시뮬레이션을 통해 창호의 크기 조절로서 대학 강의실의 전면 현휘 감소 가능성에 대해 연구하였고, 최우람(2013)은 학교건축에서의 조도 불균형과 심각한 현휘 발생방지를 위한 창호계획 방법을 제시하였다.

한편 DSC에 의한 채광관련 선행연구는 오명환(2010)이 DSC적용 창호입면에 있어서의 부위별 채광 특성을 시뮬레이션을 통해 분석하였고 심세라(2011)는 DSC창호의 광학성능 파악으로 창호특성을 규명한 바 있다. 또한 김효중(2012)은 DSC에 의한 실내 채광성능 검토 및 재실자의 색상 호감상황에 대해 연구하였다. 또 정우람(2012)은 커튼월 사무용 건물 DSC적용성 평가를 실내 빛 환경 및 에너지 성능을 통합적으로 감안한 DSC투과율에 대한 연구를 수행하였다. 이기원(2014)은 실내에서의 DSC 선호색상과 적용위치에 따른 창호 디자인 컨셉을 제시하였다. 국외에서는 Ng et al. (2013)에 의해 싱가포르 빌딩에서 반투명 전지에 의한 BIPV 적정 투명도에 대한 분석이 이루어졌다. 이러한 두 가지 주제에 관한 연구를 바탕으로 교육공간 DSC의 자연채광 상관관계를 분석한다.

2.3 DSC 창호의 자연채광 성능

현대건축을 위한 창호기능은 다기능화로 채광, 환기, 일조, 조망 등의 투과성의 목적을 바탕으로 그에 따른 단열, 차음, 방충 그리고 시각적 프라이버시 등의 방어적 차단성이 더해져 오랜 기간 지속적인 유지가 가능하여야 하나 일부조건들은 상호 모순적 특성으로 그 해법이 난해한 경우도 존재 한다⁹⁾. 따라서 창호와 태양전지의 통합은 창호 기존 기능은 유지 또는 개선시키며 자체적 청정전기 생산이 가능하다면 가장 이상적일 것인데, 결정형 태양전지가 제품의 특성상 만족할 수준의 투광성 확보에 한계를 보이는 반면 DSC를 비롯한 박막형 태양전지의 경우는 일정부분의 투광성 및 투명성을 확보하는 장점을 지니고^{10,11)} 이러한 장점은 곧 창호 및 커튼월 BIPV의 새로운 가능성으로 꼽힌다. 특히 DSC의 특성은 이러한 투광성과 아울러 발전에 작용하는 광선범위가 결정계보다 넓고 복사선의 입사각에 덜 민감하기 때문에 직사광뿐만 아니라 산란광에도 전기 생산이 이루어지므로¹²⁾ 수

직외벽의 창호 적용에 결정계 태양전지 BIPV 대비 유리하게 작용할 수 있다. 여기서 DSC의 발전 특성과 투광성의 관계는 반비례적 요소로서 DSC창호의 발전성능이 높아질수록 투광성은 낮아지므로¹³⁾ DSC창호의 BIPV에는 이 두 조건의 접점을 찾아야 한다. 즉, 실내조도 증가는 일반적으로 그 실의 생산성 증가에 긍정적인 영향을 미치므로¹⁴⁾ 높은 발전 성능만을 고려할 경우 낮은 가시광선 투과율로 기준 조도 확보에 어려움과 아울러 창호를 통한 시야차단 상황이 발생한다. 이와 관련된 투광형 BIPV연구로¹⁵⁾ 동경지역 빌딩 정면의 창면적비(Window to Wall Ratio) 50%의 경우 냉·난방, 채광 그리고 전기 생산량 등 종합적인 건물에너지 절감예측 시뮬레이션을 통해 건물의 최소 전력소비는 투과율 40%에서 이루어졌다는 결과를 제시하고 있으며, 유색 박막전지 창호유리를 통한 시각 쾌적성은 착색율이 0 ~ 25%일 경우 바람직하다고 판단하였다¹⁶⁾. 국내연구로는 사무용 건물 대상의 DSC 투과율 특성으로 나타나는 채광성능 등에 의한 적정창면적비 연구에서는 조명부하를 상승시키지 않은 적정 투과율로 붉은색 33.2%와 푸른색 35.2%를 도출하였고¹⁷⁾ 빛 환경 및 에너지 절감 차원의 적정 투과율은 창면적비 90%인 사무용 건물을 대상으로 10% DSC 창호로 제시하였다¹⁸⁾. 한편 DSC의 색상은 일반적으로 적색 계열, 청색 계열, 초록 계열이며 이러한 색상을 통한 실내 시 환경 선호도에는 차이가 있으나 오명환(2009), 김효중(2012), 이기원(2014) 등의 연구에 따르면 가장 많이 선택된 색상은 청색 계열로 나타나고 있다. 이러한 결과를 근거로 본 연구의 시뮬레이션 적용은 청색 계열 DSC를 투과율 기본조건 30%를 기준으로 40%와 20% 그리고 일반창호의 85% 투과율로 결정하였다.

3. 실측 및 시뮬레이션

교육공간 밝기의 평가는 바닥 위 85 cm인 책상면의 수평면 조도로 이루어지며, 옥외 전천공 조도에 대한 실내조도 비율인 주광을 계산에는 비교적 변화가 없는 담천공 조도¹⁹⁾를 기준으로 활용한다. 본 연구에서는 대상 공간에 과도한 광선 유입으로 가장 조도 변화가 크고 공간의 빛 환경이 만족스럽지 못한 경우의 문제를 살펴보기 위하여 추분 오후의 청공광 상황의 실측을 통하여 실의 평균조도를 산출한 후 시뮬레이션 값과 비교하였다.

3.1 대상 공간 개요

연구를 위한 대상공간이 위치한 건물은 S대 이공학관으로 Fig. 1과 같이 전체 형태는 L형을 나타내며 총 5층 규모이다. 평면의 구성은 중복도에 의한 양측이 교육공간으로 사용되는 상황에서 실측 공간은 서향을 향하는 2층에 자리 잡고 있다. 공간은 길이 18 m에 폭 8 m 그리고 높이 2.8 m 규모로서 18 m 길이는 4개의 4.5 m 기둥스팬으로 이루어져 있다. 각 스펬에 장착된 창호는 크기가 3.4 × 1.8 (m)로 바닥에서 0.9 m 높이의 창턱 위에 형태적으로 상부는 고정된 유리로 그리고 아래 부분은 미닫이로 개폐가 가능한 일반유리 5 mm 겹창으로 구성되어 있다. 창호의 전면 외부는 낮은 표면단차로 형성된 주차장이며 건물과의 사이에 일부 전나무가 식재되어 있으나 2층의 대상 공간 채광에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

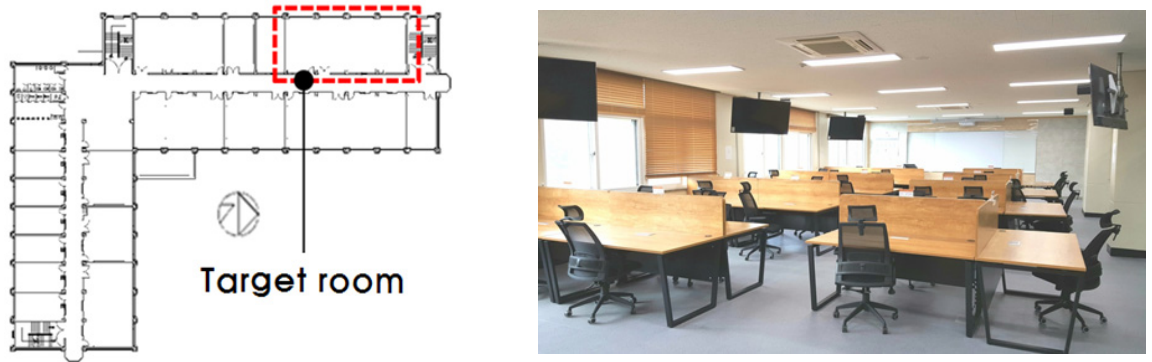


Fig. 1 Floor plan of the target space (left) and space view (right)

실 내부 마감은 천장이 석고텍스이며 콘크리트 벽체는 미색 페인트 그리고 바닥은 회색 데코타일과 실 전면에는 대형 화이트보드로 되어 있다. 외부와 접한 서향 외벽의 창호면적 비율이 약 49%에 달하는 상당히 큰 면적으로 오후시간에는 과도한 채광에 의한 실내 빛 환경 악화되는 상황이다. 한편 창호에 적용된 DSC의 발전기능에 있어서는 외부벽면에 입사되는 강렬한 일사는 긍정적인 영향을 줄 것이므로 DSC 창호가 과도한 채광을 상쇄시키면서 청정전기를 얻을 수 있다는 매우 흥미로운 가능성에 주목하고자 한다. 대상공간의 실제적 상황을 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1 Information of the building and room

Location of building	Science and Engineering building, 205, S Univ. (Latitude 37° 10', Longitude 128 11')
Room	West
Room	8.0m x 18.0m x 2.8m
Window	3.4m x 1.8m = 6.12 m ²
Window	Double window (aluminum + plastic window frame)
Indoor reflectance	ceiling: 85%, floor: 30%, wall: 50

3.2 대상공간의 조도측정

일반적으로 적절한 채광을 확보하기 위한 창호의 크기는 벽면의 3분의 1 정도이나²⁰⁾이 대상공간의 창호면적은 벽면적의 거의 절반 정도로 상당히 넓으면서 서향인 관계로 오후에는 과다한 빛의 유입에 따른 불균일 조도의 발생을 피할 수 없는 상태이다. 그러므로 청천공 아래에서 대상공간의 실 깊이 별 조도분포를 구체적으로 파악하기 위하여 Fig. 2와 같이 5.0 × 1.7 (m) 크기의 격자형으로 총 15개의 측정지점을 선정하였는데, 여기에 창 주변에서부터 공간 깊은 곳까지의 측정지점은 5단계로 나누어 A ~ E로 명명하고 1 ~ 5번, 6 ~ 10번 그리고 11 ~ 15번열에 대한 각각의 작업면(바닥 위 80 cm) 조도를 측정·분석하였다. 실측에는 디지털 조도계 TES 1332가 사용되었으며 이 기기는 200에서 200,000 Lux까지를 측정범위로 규정하고 있다.

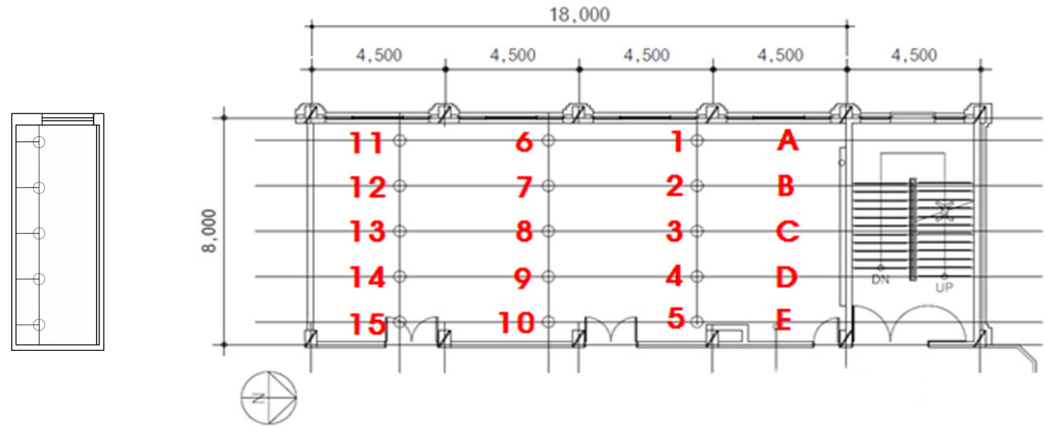


Fig. 2 Section and floor plan of the target space and measured points

실측 시기는 추분(9/24) 오후 1시30분부터 30분 간격으로 4시30분까지 7차례 외부 전청공 조도와 함께 실측한 결과 창 주변(A: 1, 6, 11지점) 조도는 평균 13,572 Lux로 아주 높고, 공간 깊은 벽 주변(E: 5, 10, 15지점)은 평균 406 Lux로 그 편차가 33배 이상에 달한다. 이에 대한 상세분석으로 창호에 수직인 1번열을 비롯해 6번열과 11번열에 대한 작업면 조도변화가 Figs. 3, 4, 5에서 확인된다. 즉 시간대별로 차이를 감안하더라도 창문주변의 경우 2,750 Lux부터 41,900 Lux까지 아주 밝은 조도분포를 나타내는 반면 내부 벽 주변은 156 Lux부터 660 Lux까지로 조도가 급격히 떨어짐을 확인할 수 있다. Fig. 6은 대상공간의 창문과 수직인 1 ~ 5, 6 ~ 10 그리고 11 ~ 15 측정지점에(Fig. 3 참고) 대한 오후 시간대인 전체 측정시간 외부조도에 대한 내부조도인 주광 조도비를 나타내는 것으로 창문주변 A열의 경우 약 33 ~ 56% 정도인데 비해 실내 벽 주변은 1% 정도로서 그 편차가 상당함을 알 수 있고 이는 다시 조도분포의 균일도를 나타내는 균제도와도 관계가 있게 된다. 주광조도의 균제도 기준은 최소/최대 값이 1/10 이상으로 규정되어 있는데 Fig. 7에서와 같이 13시30분과 14시30분의 두 경우는 0.04 정도로 매우 낮아 실 전체 조도 균일성에 불리한 상황이다. 결과적으로 이의 원인은 큰 창호면적과 서향이라는 특성으로 오후에 유입되는 과도한 광량에 있다고 판단되어 그에 대한 해법을 DSC 적용에 의해 분석하고자한다.

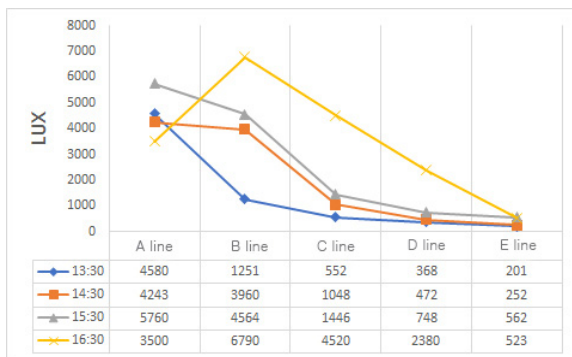


Fig. 3 Illuminance change of measuring point 1 ~ 5 by measurement time

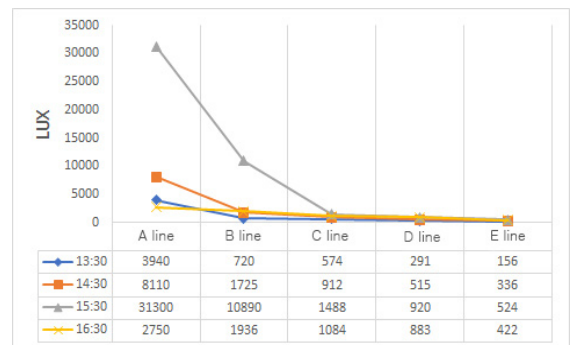


Fig. 4 Illuminance change of measuring point 6 ~ 10 by measurement time

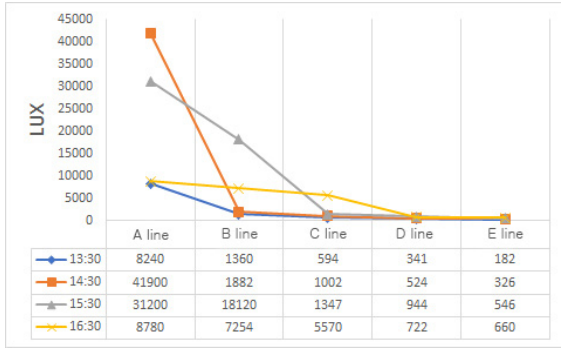


Fig. 5 Illuminance change of measuring point 11 ~15 by measurement time

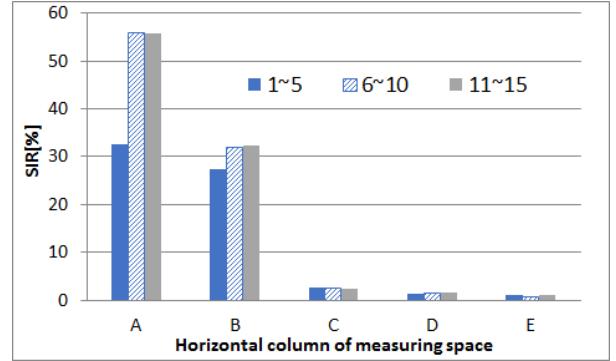


Fig. 6 Skylight illuminance Ratio of the window vertical axis (1, 6, 11 points) at 15:30

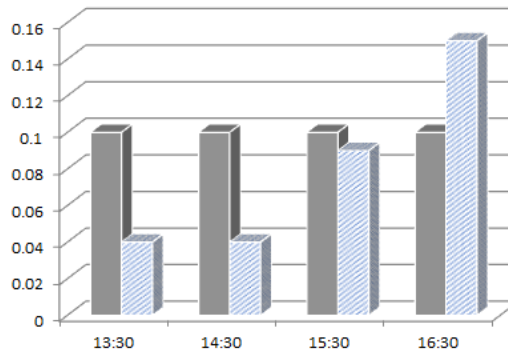


Fig. 7 Uniformity ratio by measurement time

3.3 대상 공간에 대한 시뮬레이션

3.2에서 측정된 데이터와 시뮬레이션으로 확인되는 계절 별 데이터의 상호 비교를 통해 교육공간의 실내 빛 환경 문제점을 DSC 창호에 의한 개선 가능성을 추론함에, 1차적으로 실측의 신뢰성 점검을 위하여 RELUX 프로그램에 의한 시뮬레이션으로 그 결과를 비교하였다. RELUX 프로그램은 해당지역의 위치 정보를 입력하여 자연채광 및 인공조명에 대한 실내조도 및 휘도계산에 널리 활용되는 상용 도구이다. 대상공간에(Table 2참고) 9월 24일 오후 과대광량이 발생하는 시간대인 15시30분의 수평면 평균조도를 Fig. 8과 같이 KS 5점법 측정기준으로 계산하고, 동일 시간대의 값을 시뮬레이션으로 산출한 결과 Table 2와 같이 청천공 조건인 평균조도비가 두 경우 모두 약 20%로 거의 비슷한 수준으로 나타나 실측의 객관성이 확인된다.

Table 2 Comparison of measured values and simulation values for Sep. 24 at 15:30[Lux]

Division	Em1	Em2	Eg	Em3	Em4	Average illuminance	Average illuminance ratio	External illuminance
Measured value	31,300	1,488	1,795	31,200	1,347	11,487.5	20.55%	55,900
Simulation value	28,670	1,826	2,616	28,852	1,447	11,004.4	19.69%	

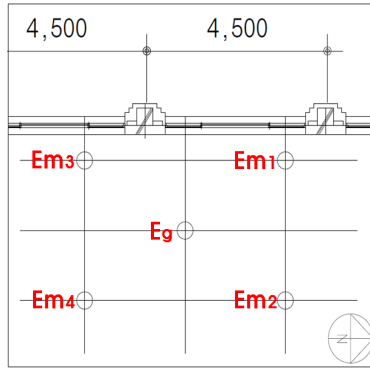


Fig. 8 Illuminance measurement 5 points by KS Method

2차적으로 대상공간의 전반적인 조도분포 확인을 위한 동적 시뮬레이션은 태양과 자연채광, 열 및 음 환경 그리고 특히 자연채광에 의한 실내조도 분석에 유용한 ECOTECT Analysis 2011 프로그램을 활용하여 춘분, 하지, 추분, 동지 4계절의 오후 상황에 대하여 투과율 85%의 일반창호를 기준으로 투과율(T_transmittance) 각 40, 30, 20%의 DSC 창호를 시뮬레이션 조건으로 설정하고 그에 따른 자연채광 성능을 분석하여 계절별 결과를 Fig. 9 및 10에 표현하였다. 이를 통해 투과율 85%의 기준창호에서의 모든 계절 오후 시간대 실 평균조도가 아주 높다는 것이 확인된다.

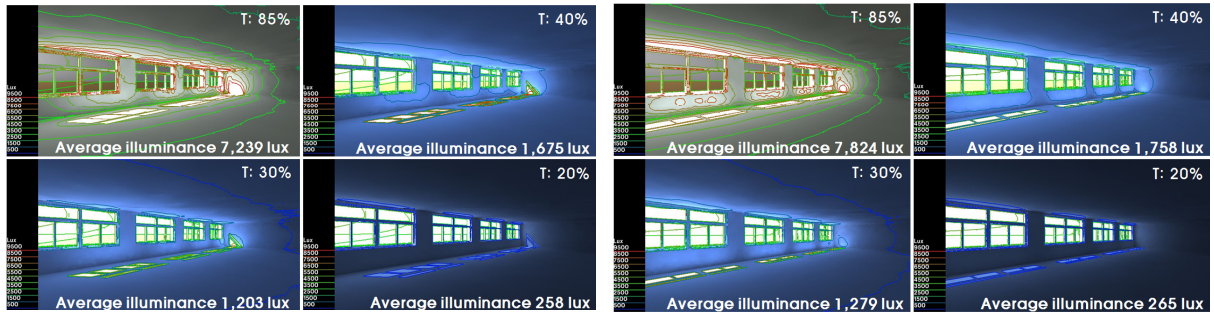


Fig. 9 At 15:30 average illuminance simulation for 85%, 40%, 30% and 20% transmittance (Left: Vernal equinox, Right: Summer solstice)

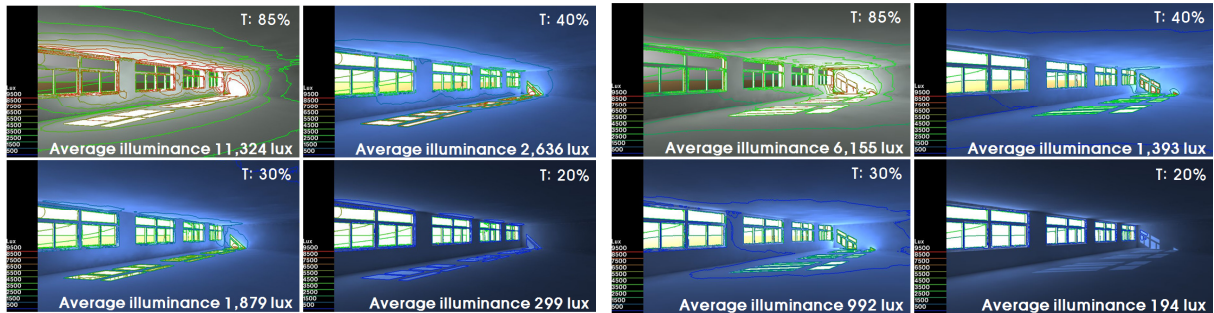


Fig. 10 At 15:30 average illuminance simulation for 85%, 40%, 30% and 20% transmittance (Left: Autumnal equinox, Right: Winter solstice)

4. 자연채광과의 상관관계

창문 면적비 약 50%에 달하는 대상 교육 공간이 서향을 향하는 관계로 오후 시간대에 과도한 광량 유입을 피할 수 없어 공간의 조도분포 균일정도가 상당히 나쁘게 나타남을 실측결과로 확인하였으므로, 그에 대한 대응으로 창호의 투과율을 낮추어 자연스럽게 유입광량을 조절하는 방법을 3절에서와 같이 3종류의 투과율이 다른 DSC를 통해 분석하여 DSC와 자연채광의 상관관계를 살펴본다.

4.1 DSC 투과율에 따른 평균조도 분석

Fig. 11은 태양고도가 달라지는 4계절의 중심인 춘분, 하지, 추분, 동지의 오후 시간대 실내 평균조도 시뮬레이션 결과이다. 각 그림의 T는 창호 투과율(T_transmittance)을 의미하는 것으로 일반창호 T 85%와 더불어 T 40%, 30% 그리고 20%인 DSC 적용 창호의 경우를 나타내고 있다. 모든 계절의 시간 및 투과율별 평균조도는 실측에서 확인된 일반적인 패턴과 같이 오후의 늦은 시간일수록 높아지는 경향을 보이는데 이는 태양광선의 깊은 유입각도와 관계가 있을 것으로 판단된다. 일반창호의 경우 4계절 모두 교실 및 강의실 기준조도 범위인 300 ~ 600 Lux를 훨씬 초과하는 상황이다. 한편 투과율이 서로 다른 DSC의 조건에서는 20%의 경우를 제외한 30 및 40% 투과율에 의한 실내평균조도는 역시 4계절 모두 300 Lux를 넘은 수준을 보여주고 있다. 이를 통해 DSC에 의한 자연채광 가능성과 일사차단 효과를 충분히 추론 가능하다고 판단하여 투과율 30 및 40% 상황을 집중 분석한다.

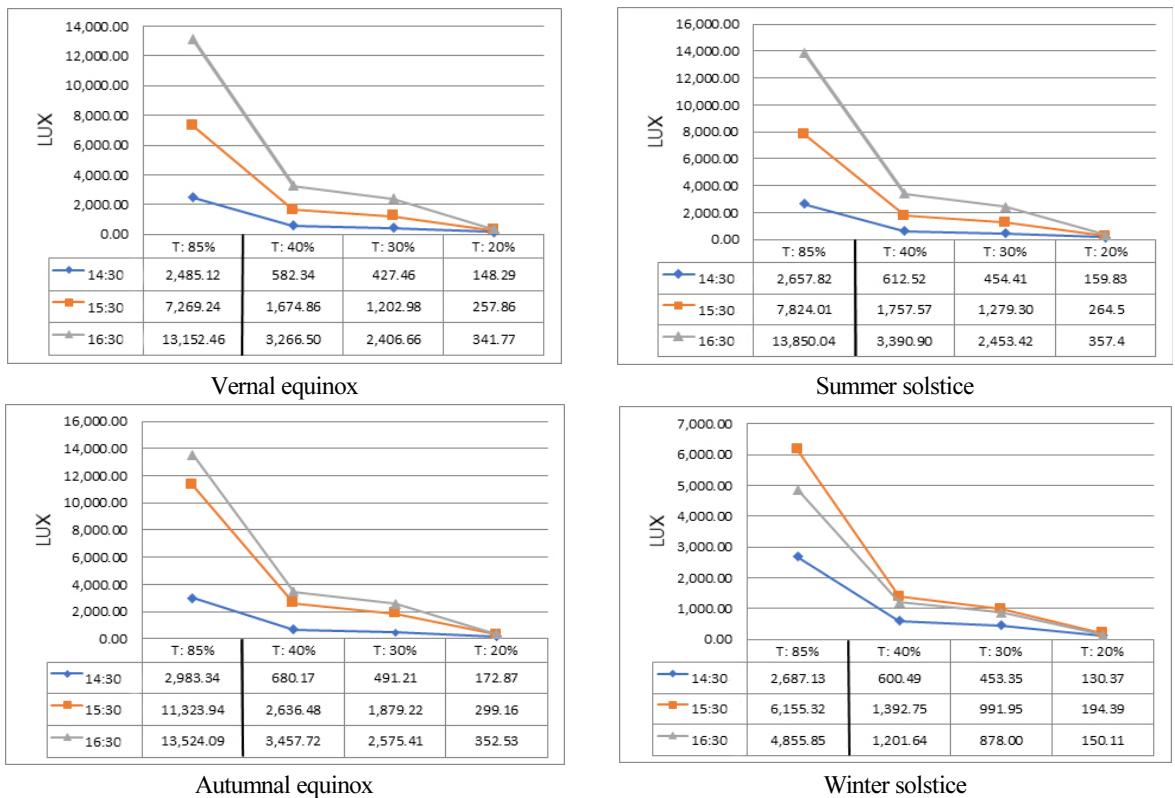


Fig. 11 Simulation average illuminance value at 14:30, 15:30 and 16:30 by each transmittance

4.2 DSC 투과율 40% 및 30% 분석

투과율 40% 및 30%의 DSC를 활용한 채광상태 파악을 위해 ECOTECT 프로그램에 의해 추출된 시뮬레이션 값을 분석한다. Table 3과 같이 춘분, 하지, 추분, 동지 오후 각 3번의 평균조도 시뮬레이션 결과 기존 창호의 경우 평균조도의 분포는 약 2,500 ~ 13,900 Lux로 나타난다. DSC 40% 투과율 창호에 있어서의 계절별 평균조도는 춘분에 최소 582 Lux 그리고 추분에 최대 3,460 Lux로서 교육 공간 기준조도 300 Lux를 넘어가는 수준을 보인다. Fig. 10의 좌측은 이러한 기존창호 결과에 의한 대상공간의 3D 시뮬레이션을 실측이 이루어졌던 추분 15:30시로 한정하여 실현한 상황으로 실 평균조도는 11,324 Lux에 달하고 특히 창 가까운 부분이 과도한 채광이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 반면 DSC투과율 40% 창호에서는 평균조도가 2,636 Lux이므로 약 77%p 정도 낮아지는 상황이지만 기준조도를 넘는 수준이다.

Table 3 Comparison of average Illuminance of Conventional Glass (T 85%) and DSC (T 40 & 30%)

Classification	Transmittance	Conventional glass		DSC		
		85%	40%	Reduction from 85%	30%	Reduction from 85%
Vernal equinox (22. March)	14:30	2,485.12 Lux	582.34 Lux	76.57 %	427.46 Lux	82.80 %
	15:30	7,629.24 Lux	1,674.86 Lux	76.96 %	1,202.98 Lux	83.45 %
	16:30	13,152.46 Lux	3,266.05 Lux	75.16 %	2,406.66 Lux	81.70 %
Summer solstice (22. June)	14:30	2,657.82 Lux	615.52 Lux	76.95 %	454.41 Lux	82.90 %
	15:30	7,824.01 Lux	1,757.57 Lux	77.54 %	1,297.30 Lux	83.65 %
	16:30	13,850.04 Lux	3,390.90 Lux	75.52 %	2,453.42 Lux	82.29 %
Autumnal equinox (24. Sep.)	14:30	2,983.34 Lux	680.17 Lux	77.20 %	491.21 Lux	83.53 %
	15:30	11,323.94 Lux	2,636.48 Lux	76.72 %	1,879.22 Lux	83.40 %
	16:30	13,524.09 Lux	3,457.72 Lux	74.43 %	2,575.41 Lux	80.96 %
Winter solstice (22. Dec.)	14:30	2,687.13 Lux	600.49 Lux	77.65 %	435.35 Lux	83.80 %
	15:30	6,155.32 Lux	1,392.75 Lux	77.37 %	991.95 Lux	83.88 %
	16:30	4,855.85 Lux	1,201.64 Lux	75.25 %	878.00 Lux	81.92 %

또한 투과율 30% DSC 창호에 대한 결과로서 기존창호의 상황은 위의 경우와 동일하고 투과율이 10%p 낮은 DSC 30%일 경우 실 평균조도는 춘분의 427 Lux가 최소, 추분의 2,575 Lux가 최솟값으로 나타났고 이의 최솟값 역시 기준을 상회하고, 15:30시의 실 평균조도 1,879 Lux는 기존창호 대비 17% 수준에 머문다. 이에 대한 3D 시뮬레이션 상황이 역시 Fig. 10에서 나타난다. 한편 투과율 20%를 상정한 채광상황으로 전체적으로 어두워져 기준조도에도 이르지 못하고 있으므로 자연채광에 합당하지 않음을 Fig. 11에서 볼 수 있다. 이러한 내용으로 보아 오후의 과도한 광량에 의한 공간의 부적절한 빛 환경은 투과율 40%와 30%의 DSC 창호에 의한 차단 효과로 개선가능성이 충분하다고 판단된다.

4.3 DSC 투과율에 따른 채광성능

4.2절의 결과가 자연채광에 의한 공간의 빛 환경에 어떤 긍정적 요소인지 구체적으로 확인하기 위하여 채광 성능평가를 분석함에 그 지표를 외부조도에 대한 내부조도의 비율인 주광조도비를 적용한다. 주광조도비 (SIR_Skylight Illuminance Ratio)는 측정된 추분 오후시간의 외부수평면조도에 대한 시뮬레이션에서 추출된 실내수평면 조도를 통해 구해지고 Table 4로 정리된다. 특징적인 것은 모든 투과율 상황에서 시간이 지날수록 조도가 높아지며 그에 따라 주광조도비도 커지는 것으로 이는 서향 공간이라는 물리적 상황과 시간의 흐름으로 태양고도가 낮아짐에 따라 공간 깊은 곳의 채광효과가 커지기 때문이라 사료된다. 각 투과율별 측정시간에 대한 주광조도비의 표준편차(standard deviation)는 기존 창호에서 15.4이며 투과율 40 및 30% DSC 창호는 각 4%와 1%로 낮아지므로 조도분포가 상대적으로 고르고 여기에서 실 최소기준 조도가 확보된다면 실의 빛 환경에 유리하게 작용함을 의미한다.

Table 4 SIR for each time zone according to transmittance and standard deviation

Transmittance / Category / Time		14:30	15:30	16:30	Standard deviation
Exterior horizontal illuminance		77,200 Lux	55,900 Lux	32,600 Lux	
85%	Average illuminance	2,983.34 Lux	11,323.94 Lux	13,524.09 Lux	15.4
	Skylight Illuminance ratio	3.9 %	20.3 %	41.5 %	
40%	Average illuminance	680.17 Lux	2,636.48 Lux	3,457.72 Lux	4.0
	Skylight Illuminance ratio	0.9 %	4.7 %	10.6 %	
30%	Average illuminance	491.21 Lux	1,879.22 Lux	2,575.41 Lux	1.0
	Skylight Illuminance ratio	0.6 %	3.4 %	7.9 %	
20%	Average illuminance	172.87 Lux	299.16 Lux	352.53 Lux	0.2
	Skylight Illuminance ratio	0.2 %	0.5 %	1.1 %	

5. 결론

큰 창면적비에 따른 교육공간의 빛 환경은 창문주변의 과도한 유입일광으로 실 전체의 조도 불균일성 및 눈부심 현상이 심하게 나타나고 이의 해소를 위해 블라인드 또는 커튼 등으로 일광을 차단하는 실정이며, 이를 통해 실 깊은 구역은 기준조도 확보가 어려워 인공조명을 사용하는 불합리한 상황이 연출된다.

본 연구에서는 이러한 교육공간에서의 불합리적인 자연채광 이용과 그에 따른 사회적 경제적 문제 해결에 대한 대안으로 일반창호를 대신한 DSC BIPV창호의 채광성능을 분석함에 자연채광과의 상관관계를 실측과 시뮬레이션을 통해 도출하여 다음과 같이 결과를 요약한다.

첫째, 창면적비 49%인 서향 공간에 있어서의 추분시기에 대한 기준창호에 대한 자연채광측정 결과 오후시간대는 작업면 수평조도 및 주광조도비가 창 주변과 실 내부 벽 주변의 편차가 대단히 크게 나타나 실 조도균일성이 많이 부족하다.

둘째, 동적 시뮬레이션 결과 대상공간의 평균조도는 오후의 이른 시간보다 늦은 시간일수록 높게 나타나는데, 이는 오후의 변화하는 태양고도에 따라 실 깊숙이 유입되는 광선 입사각도의 영향으로 판단된다. 단, 연간 일몰시간이 가장 이른 겨울 동지의 경우 그 피크는 15:30시경 일어난다.

셋째, DSC의 자연채광성능은 40%와 30% 투과율에서 기준창호에서 나타나는 과도한 광량을 상당히 낮추는 효과를 나타낸다. 그 효과는 85% 투과율 대비 각각 23%, 17% 수준임에도 모든 계절에서 실 평균조도는 교육시설의 기준조도인 300 Lux를 충분히 충족시킨다.

넷째, DSC 20% 투과율의 경우 모든 계절 동안 기준조도에 이르지 못해 채광용 BIPV 창호로는 바람직하지 않음을 의미한다. 그러나 이는 투과율이 낮으면 전기 발전기능에는 유리하다는 기존 이론 측면에서 창호 이외의 건축 외장재료의 역할을 기대할 수 있다.

다섯째, 일반적인 자연채광성능 평가지표인 주광조도비(SIR)에 있어서도 일몰까지 늦은 시간대에서 그 비율이 커지며, 결과적으로 대상공간의 조도분포를 투과율 별 표준편차를 통해 살펴보면 40%와 30% 투과율의 경우가 각각 4.0과 1.0으로 상대적으로 고른 분포를 나타내며 실 평균조도는 기준을 유지함을 알 수 있다.

이러한 결과를 종합하면, DSC 적용에 의해 과도한 조도와 눈부심 등의 조절이 가능하고 교육공간의 빛 환경 개선에 일조할 수 있으므로 DSC와 자연채광의 상관관계에 유의미함과 DSC의 BIPV 확장성을 확인할 수 있다. 후속 연구로써 태양전지의 기본 기능인 발전성능을 통합적으로 고려하여 DSC BIPV 창호의 빛, 열, 재실자 심리효과 등 다차원적인 분석이 필요하다.

후기

본 연구는 2017년 세명대학교의 연구년에 대한 연구비지원으로 수행되었음.

REFERENCES

1. Park, K. E. and Kim, J. T., A Study on the Experiment of Luminous Environment in Classroom of an Elementary School, Journal of Korean Institute of Educational Facilities, Vol. 9, No. 5, pp. 13-21, 2002.
2. Im, B. N. and Kim H. Y., A Study on a Improving Effect of Light Environment according to Blind Angel Control using a Daylighting in a Lecture Room, AIK-RA, Proceeding of Academic Conference, pp. 629-633, 2008.
3. <https://www.baunetzwissen.de/licht/fachwissen/tageslicht/tageslichtanalyse-eines-buerorraumes-840914>
4. Barrett, Clever Classrooms: Summary Report of HEAD Project, Univ. of Salford, Manchester, 2015.
5. VELUX commercial Blog, Warum ist Tageslicht so wichtig fuer die Gestaltung von Schulen?, 2018.
6. Han, J. H., Cho, K. H., and Yoon, J. O., The field Measurement and survey of light improvement in Lecture rooms, AIK-Excellent Graduation Proceeding, Vol. 6, No. 1, pp. 97-100, 2010.
7. Im, B. N. and Kim H. Y., Ibid. pp. 629-633
8. Final report of ClimaBau, Federal Office of Energy, Switzerland, 2017.
9. Kim, J. T., Jeong, I. Y., and Jeong, Y. G., A Study on Integration of Pre-manufactured Window Systems with

- Conventional Building Design Elements, Journal of Korean Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol. 6, No. 1, p. 16, 2006.
10. Lee, K. W. and Lee, E. J., A Study on the Design Concept of DSC Window by Color and Installation Position, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 34, No. 4, p. 92, 2014.
 11. Oh, M. H., Sim, S. R., Lee, C. S., Chin, K. I., and Yoon, J. H., A Study on the Optimal Window Floor Ratio According to Transmittance of Dye Solar Cell (DSSC) by Analysis of Daylighting performance and Glare Index of Transmittance, Proceeding of the Korean Solar Energy Society 2009 Autumn Annual Conference, pp. 92-97, 2009.
 12. Robert F. Service, Solar cells that work in low light could charge devices indoors, <https://www.sciencemag.org/news>, Chemistry, Technology, 2018.
 13. Jeong, W. R., Sim, S. R., and Yoon, J. H., A Study on the Optimal Transmittance of DSSC BIPV Window System in Office Building Considering Daylighting and Energy Performance, Journal of the KIAEBS, Vol. 6, No. 3, pp. 145-150, 2012.
 14. Boyce, P., Howlett, C., The Benefits of Daylight through Windows, Rensselaer Research Center, Troy, NY, p. 88, 2003.
 15. Miyazaki, T., Akisawa, A., Kashiwagi, T., Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows, Renewable Energy, Vol. 30, No. 3, pp. 281-304, 2005.
 16. Vossen, F. M., Aarts, M. J., and Debije, M. G., Visual performance of red luminescent solar concentrating windows in an office environment, Energy and Buildings, Vol. 113, pp. 123-132, 2016.
 17. Lee, K. W., Lee, E. J., Ibid. p. 92.
 18. Robert F. Service, Ibid.
 19. Kim, J. S., Architectural Environmental Engineering, Book Publishing Seo-woo, p. 273, 2005.
 20. Reference No. 3 Ibid.
 21. Ng, p. K., Mithraratne, N., Kua, H. W. K., Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings, Energy and Buildings, Vol. 66, pp. 274-281, 2013.