



## 사무소 건물 적용 PCW 창호의 기후대별 에너지 성능 분석

### Energy Performance Analysis of Photochromic Window in Office Buildings According to Climate Zone

현지연\* · 박보랑\*\* · 최은지\*\*\* · 최윤경\*\*\*\* · 이춘엽\*\*\*\*\* · 문진우\*\*\*\*\*

Ji Yeon Hyun\* · Bo Rang Park\*\* · Eun Ji Choi\*\*\* · Yoon Kyung Choi\*\*\*\* · Choon Yeab Lee\*\*\*\*\* · Jin Woo Moon\*\*\*\*\*

\* Main author, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (jiyuneco@gmail.com)

\*\* Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (pbr\_1123@naver.com)

\*\*\* Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (ejchl77@gmail.com)

\*\*\*\* Coauthor, Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (ykc@cau.ac.kr)

\*\*\*\*\* Coauthor, Orion NES Co., Ltd, Gumi-si 39370, South Korea (cylee@orionnes.co.kr)

\*\*\*\*\* Corresponding author, Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (gilerbert73@gmail.com)

#### ABSTRACT

**Purpose:** This study analyzed building cooling, heating and lighting energy performance of the photochromic window (PCW) in various climate zones. **Method:** Office buildings were modeled using DesignBuilder software, which is a building energy analysis program, and four climate regions-Temperate climate, Tropical climate, Marine climate, and Cold climate were selected to test the performance of PCW. **Result:** Due to the characteristics of U-value and shading coefficient (SC) of PCW, indoor heat loss decreased in winter resulting in a decrease in heating energy consumption. On the other hand, cooling energy consumption decreased due to less transmission solar radiation in summer. As for the lighting energy consumption, the PCW's visible light transmittance (VLT) was lower than the standard clear windows (CW), thus, it was confirmed that the use of artificial lighting increased for satisfying the office indoor illumination standard. Based on the findings in this study, it can be concluded that PCW with higher VLT needs to be developed for improving energy performance as well as maintaining indoor lighting conditions.

#### KEYWORD

광변색유리  
스마트창호  
건물에너지

PCW (Photochromic Window)  
Smart Window  
Building Energy

#### ACCEPTANCE INFO

Received Dec. 7, 2020

Final revision received Dec. 12, 2020

Accepted Dec. 16, 2020

© 2020. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구배경 및 목적

전 세계적으로 건물 에너지소비량 저감을 위하여 벽체 및 창호의 단열성능, 광학적 성능 등 각종 특성에 관련된 연구를 통한 노력이 시도되고 있다. 특히 창호는 벽체나 지붕 등의 외피에 비하여 약 8배 열손실이 크므로 에너지 측면에서 취약하다[1]. 이에 따라 고단열, 고기밀성 창호 개발은 물론 외부에서 유입되는 태양광에 따라 투과율 및 색상 등을 자유롭게 조절하는 스마트창호의 일종인 변색 유리에 대한 연구가 활발해지고 있다.

변색 유리는 빛 또는 열에 자동으로 반응하는 수동형 (Non-Electrical) 타입과 전압에 의해 조절되는 능동형 (Electrical) 타입으로 구분할 수 있다. 수동형 타입의 대표적인 변색 유리는 열변색 유리 (Thermochromic window), 광변색 유리 (Photochromic window)가 있고 능동형 타입으로는 전기변색 유리 (Electrochromic window), 분극입자 소자 (Suspended particle devices), 고분자 분산형 액정 (Phase dispersed liquid crystal)이 있다. 이 중 광변색 유리 (PCW)는 상대적으로 제조비용이 저렴하고 인위적인 전기 인가 없이 태양광에 의해 투과율이 변화되는 장점이 있어 차세대 스마트 창호 기술로 관심이 증대되고 있다.

PCW는 외부 태양광 일사조건의 영향을 받아 발현되는 성능이 달라지므로 기후조건 고려가 중요하다. 그러나 PCW의 특성을 고려하여 다양한 지역 및 기후에 대한 적용성 평가는 미비한 것으로 확인되었다. 또한, PCW에 관해 소자와 필름 자재를 주제로 다룬 연구가 국내에서 수행되고 있으나 건물 외장재로서의 에너지 성능을 분석 연구는 현저히 부족하다[2]. 따라서, 본 연구에서는 차세대 스마트 창호인 PCW의 건물 외장재로서 성능을 확인하고자, 다양한 기후대별 사무소 건물에 PCW를 적용하여 건물 냉난방 및 조명 에너지 비교·분석을 실시하였다. 연구결과를 토대로 기후대별 PCW 적용 필요성 및 방안을 확인하고 향후 PCW의 실제 적용 시 사전 성능 검토를 위한 기초자료로써 활용성을 기대할 수 있다.

### 1.2. 연구방법 및 범위

기후대별 PCW의 건물 에너지성능 분석을 위해 온난기후 (Temperate climate), 열대기후 (Tropical climate), 해양성 기후 (Marine climate), 냉대기후 (Cold climate)로 구분되는 네 가지 대표적인 지역을 선정하였다. PCW는 일반적으로 적용되고 있는 Clear Window, Low-e Window와 비교하여 건물 냉난방, 조명 에너지를 분석하였다. 에너지 성능분석은 컴퓨터 시뮬레이션으로 수행하였으며 DesignBuilder (Version 6.1.4) 를 사용하였다.

## 2. 이론 고찰

### 2.1. 광변색 유리 (Photochromic Window, PCW) 개념

광변색 유리는 광변색 물질을 사용하여 외부 가시광선 및 자외선에 의해 유리 색이 자동으로 변색하여 일사열획득계수 (SHGC, Solar Heat Gain Coefficient)와 가시광선투과율 (VLT, Visible Light Transmittance)의 변화로 건물 실내로 유입되는 일사량을 조절한다.

### 2.2. 변색 유리 및 창호형 PCW 선행연구 조사 · 분석

변색 유리란 외부에서 유입되는 태양광의 투과율을 자유롭게 조절하여 에너지 손실을 줄임과 동시에 에너지 효율을 높여 사용자에게는 쾌적한 환경을 제공하여 감성과 기능성을 동시에 만족시키는 창호를 말한다[3]. 자동차, 버스, 기차 등 수송 분야뿐만 아니라 최근엔 건축 분야 등 다양하게 응용되고 있다. 기존 전기변색 유리 제품은 가격이 비싸고 전기배선을 창문까지 연결하는 시공 등의 어려움으로 활성화가 되지 못하고 있다[4]. 하지만 광변색 유리 기술은 소자 내에 광흡수층을 포함하고 있어 별도의 전원공급 장치가 필요 없고 생산 시 고가의 전도성 유리를 사용하지 않기 때문에 저가화가 가능하다는 장점이 있다.

변색 유리에 관한 연구로 Bo Rang Park et al.(2019)[5]은 전기변색 유리 (Electrochromic window)의 다양한 특성과 전기변색 유리가 적용된 오피스 건물 에너지소비량에 대한 관계를 e-Quest를 통하여 분석하였으며, Kaitlin Allen et al. (2017)[6]은 열변색 유리 (Thermochromic window)의 태양광 일사 취득량에 따른 창호 분석을 설치 경사면을 다르게 고려하여 냉난방, 조명 에너지성능에 관한 연구하였다. Bo Rang Park et al.(2020)[7]은 DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell) BIPV 창을 건물에 적용하여 건물 환경성능 및 건물 에너지성능을 분석하였고 발전 효율을 충족시키는 VLT를 제안하였다. 그 중 PCW에 관한 연구로는 Javed Roof Talukder et al.(2019)[8]은 광변색 유리 (Photochromic glass)의 변색 성능을 분석하기 위해 변색 물질에 관한 연구를 진행하였으며, Ze-Yang Kuang et al.(2019)[9]는 변색 재료로 빛을 강하게 흡수하는 아조벤젠 (Azobenzene)을 적용하여 UV 반응을 통해 반응하는 광변색 유리를 제안하였다.

선행연구 분석 결과 기타 스마트 창호를 건물에 적용한 연구는 계속되었으나 광변색 유리는 유리의 물질, 변색 재료, 성능 개선에 대한 분석이 주로 이루어지고 있다. 실제 건물에 적용하여 기후별로 성능을 평가한 연구는 매우 부족한 상태이다. 따라서 건물 자체로써 PCW 적용이 다양한 기후환경에서 건물 에너지소비량에 미치는 영향을 구체적으로 분석할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 다양한 기후대별 PCW의 적용에 따른 건물 냉난방, 조명 에너지소비량을 분석하고자 한다. 이는 향후 PCW의 건물 외피 적용 시 기후대에 따른 에너지 증·절감 확인을 통해 상황에 적합한 적용방안 도출에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

## 3. 대표 기후 선정

각 기후대를 대표하는 네 지역을 선정하여 평가를 진행하였다. Table 1.과 같이 냉난방 도일을 참고하여 온난기후는 Seoul, Republic of Korea, 그 외 세 가지 기후대는 다양한 기후대가 존재하는 미국을 기준으로 Miami, Florida (FL), San Francisco, California (CA), Ann Arbor, Michigan (MI) 으로 선정하였다.

미국 공조냉동공학회 (ASHRAE, The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)와 International Energy Conservation Code (IECC)에서는 온도, 강수량, 냉난방 도일 등을 고려하여 8개의 Zone으로 국제기후를 구분하였고 미국은 습도 기준으로 A, B, C 소구역을 구분하였다.

대표적인 열대기후 지역은 1A의 Miami, Florida로 연평균 온도 24°C로 연중 고온이며 최저온도는 19°C로 겨울이 없는 기후이다. 해양성기후 지역은 3C의 San Francisco, California로 여름철에는 비가 적고 시원하며 겨울철에는 비가 많고 따뜻하다. 냉대기후 지역은 5A의 Ann Arbor, Michigan으로 1년 중 7개월 동안 눈이 내리는 추운 날씨이며 여름철은 짧지만 온도가 높다. 미국의 기후대별 지역의 위치는 Fig. 1.에 표시하였다[12][13].

## 4. 시뮬레이션 모델링

### 4.1. 대상 건물 모델링

본 연구에서는 PCW 창호 성능 분석을 위하여 DesignBuilder (Version 6.1.6.011)을 사용하였다. DesignBuilder는 LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)와 ASHRAE 90.1의 기준조건을 포함한 통합 건물 에너지 해석 프로그램으로 EnergyPlus를 기반으로 건물에너지 사용량을 분석할 수 있다.

Table 1. Reference regions by Climate Zones

Climate Zones	Reference City	CDD	HDD
4	Seoul, Republic of Korea	3956	5007
1A	Miami, Florida (FL)	5297	118
3C	San Francisco, California (CA)	1478	1664
5A	Ann Arbor, Michigan (MI)	262	4280

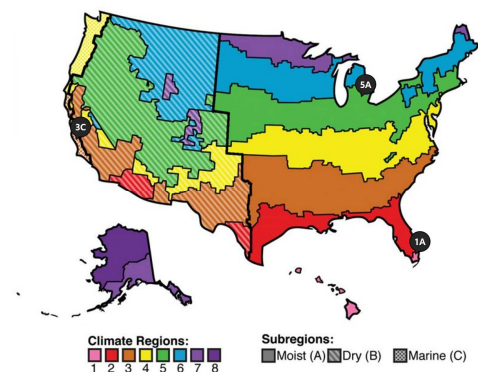
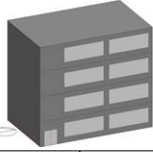


Fig. 1. Reference city by climate regions in the United States

Table 2. Parameters of simulation model

Item	Contents	
Modeling Image		
Building information	Total Floor area	640m <sup>2</sup>
	Number of Floors	4F
	Floor Heights	3.5m
Exterior window	Size	5.6m x 2m (8AE)
	WWR	40%
Occupied load	Lighting	Office-10.2 W/m <sup>2</sup> Core-2 W/m <sup>2</sup>
	People	0.161 person/m <sup>2</sup>
	Office equipment	11.8 W/m <sup>2</sup>
	Dimming Control	Office-400 Lux Core-200 Lux
<b>Detail parameters by Climate zone</b>		
Seoul, Republic of Korea		
Construction (U-Value)	External walls	0.240 W/m <sup>2</sup> K
	Roof	0.150 W/m <sup>2</sup> K
	Ground Floors	0.290 W/m <sup>2</sup> K
System	Cooling/Heating system	Fan Coil Unit (4-Pipe)
	Cooling/Heating seasonal COP	0.89/5.96
	Heating/Cooling setpoint Temperature	20°C/26°C
	Heating/Cooling setback Temperature	15.5°C/29.4°C
Schedule	Heating period	January 01–February 28, November 01–December 31
	Cooling period	March 01–October 31
Miami, Florida (FL)		
Construction (U-Value)	External walls	0.124 W/m <sup>2</sup> K
	Roof	0.063 W/m <sup>2</sup> K
	Ground Floors	0.322 W/m <sup>2</sup> K
System	Heating/Cooling system	Fan Coil Unit (4-Pipe)
	Heating/Cooling seasonal COP	-/5.96
	Heating/Cooling setpoint Temperature	-/24.0°C
	Heating/Cooling setback Temperature	-/27.4°C
Schedule	Heating period	-
	Cooling period	January 01–December 31
San Francisco, California (CA)		
Construction (U-Value)	External walls	0.084 W/m <sup>2</sup> K
	Roof	0.048 W/m <sup>2</sup> K
	Ground Floors	0.107 W/m <sup>2</sup> K
System	Heating/Cooling system	Fan Coil Unit (4-Pipe)
	Heating/Cooling seasonal COP	0.89/5.96
	Heating/Cooling setpoint Temperature	21.5°C/24.0°C
	Heating/Cooling setback Temperature	17.0°C/27.4°C
Schedule	Heating period	January 01–February 28, December 01–December 31
	Cooling period	March 01–November 30
Ann Arbor, Michigan (MI)		
Construction (U-Value)	External walls	0.550 W/m <sup>2</sup> K
	Roof	0.048 W/m <sup>2</sup> K
	Ground Floors	0.074 W/m <sup>2</sup> K
System	Heating/Cooling system	Fan Coil Unit (4-Pipe)
	Heating/Cooling seasonal COP	0.89/5.96
	Heating/Cooling setpoint Temperature	21.5°C/24.0°C
	Heating/Cooling setback Temperature	17.0°C/27.4°C
Schedule	Heating period	January 01–April 30, October 01–December 31
	Cooling period	May 01–September 30

시뮬레이션 대상 건물은 선행연구를 기반으로 연면적 640m<sup>2</sup>, 4층 높이의 표준형 오피스 건물로 구성하였다. 대상 건물은 남향이며 창면적비는 40%로 설정하였다. VLT값이 조명 에너지소비량에 미치는 영향을 분석하기 위해 Dimming Control을 실시하였다. 실내조도는 Office 400Lux, Core 200Lux로 설정하였고 오피스 작업면 높이인 0.75m에 Dimming Control 센서를 적용하였다. 내부 발열 요소는 업무시설의 표준 값을 적용하였다. 시뮬레이션의 상세 정보는 Table 2.와 같다.

대상 건물의 외피 열관류율 값과 냉난방 조건은 지역별 기준에 맞게 설정하였다. Seoul의 열관류율 값을 2018년에 개정된 건축물 에너지 절약설계기준을 반영하였으며 Miami, San Francisco, Ann Arbor는 ASHRAE 90.1의 기준으로 U-value 값을 적용하였다 [10][14].

건물 냉난방 시스템은 업무시설에서 일반적으로 사용되는 Fan Coil Unit (4-Pipe)을 적용하였다. 시스템 냉난방 온도와 기간은 지역별 기후조건을 고려하여 가정하였다. 건물 시뮬레이션에 적용된 지역별 Weather data는 National Renewable Energy Laboratory's (NREL)에서 제공하는 TMY2 dataset을 사용하였다[15].

#### 4.2. 창호유형 및 변색 스케줄 설정

본 연구에서 적용한 창호 유형별 특성 및 PCW의 변색 스케줄은 Table 3.과 같다.

PCW 성능평가를 위해 비교군으로 Clear Window (CW), Low-e Window (LW)로 설정하였고 기존에 일반적으로 사용되고 있는 Clear Window (CW)를 기준모델로 설정하였다. 창호의 특성은 IGDB (International Glazing Data Base)를 기반으로 하는 DesignBuilder의 Glass data를 이용하였다. PCW는 변색 유무에 따라 PCC (Photochromic-colored)와 PCB (Photochromic-Bleached)로 구분하며 계절별 일사유입 시간에 따라 변색 스케줄을 설정하였다. 창호의 특성은 모든 지역에 동일하게 적용한다.

### 5. 시뮬레이션 결과 분석

#### 5.1. 창호 유형별 건물에너지 성능분석

본 연구에서는 기후대별 창호 유형에 따른 건물 냉난방, 조명에

Table 3. External window properties and discoloration schedule

Type	Glazing Layer [No. Thickness]	U-Value [W/m <sup>2</sup> K]	SHGC	SC*	VLT [%]	Note
CW	Clear5+Ar12+Clear5	2.531	0.71	0.82	78.4	Base case
LW	Low-e5 + Ar12 + Clear5	1.832	0.61	0.71	76.7	
PCW	PCC(Colored 5) + Ar12 + Clear5	1.487	0.23	0.26	26.6	
	PCB(Bleached 5) + Ar12 + Clear5	1.487	0.69	0.79	62.2	
Window discoloration operation (PCC)	Month	Time				
	January–February, November–December	09:00–17:00 (8hr)				
	March–May, October	08:00–18:00 (10hr)				
	June–September	07:00–19:00 (12hr)				

\*SC: Shading Coefficient

너지소비량 분석을 실시하였다.

온대성 기후인 Seoul의 결과는 Fig. 2와 같다. 총 건물 에너지소비량은 PCW > CW > LW 순으로 높게 나타났다. PCW 전체 에너지소비량은 31,582.23 kWh로 기준모델 대비 4,575.24 kWh (16.94%) 사용하였고 조명-난방-냉방 순으로 높게 계산되었다. 기준모델인 CW는 27,006.96 kWh 사용하였으며, LW는 25,947.96 kWh를 사용하여 기준모델 대비 1,059.03 kWh (3.92%) 감소하였다.

난방 에너지소비량은 CW가 가장 높은 5,515.86 kWh를 사용하였고 PCW, LW는 기준모델 대비 각각 871.25 kWh (15.80%), 898.30 kWh (16.29%) 감소하였다. 이는 U-value가 높은 창호를 적용할 경우 겨울철 열손실에 취약하다는 것을 알 수 있다. U-value가 가장 낮은 PCW보다 LW의 난방 에너지소비량이 낮은 이유는 LW의 일사열 취득계수 (SHGC) 값이 높아 더 많은 일사량 획득이 가능하여 난방 에너지소비량이 감소한 것으로 사료된다. 냉방 에너지소비량은 PCW가 10,793.19 kWh로 가장 낮게 계산되었으며, 기준모델 대비 936.21 kWh (7.98%) 감소하였다. LW는 11,395.28 kWh로 334.11 kWh (2.85%) 감소하였고 기준모델의 냉방 에너지소비량은 11,729.40 kWh로 가장 많다. 이는 PCW가 변색시 적용되는 PCC의 차폐계수 수치가 낮아 유리를 통해 실내로 유입되는 태양열을 차단하여 실내온도를 유지하기 때문에 냉방 에너지소비량 감소에 유리한 것으로 판단된다.

조명 에너지소비량은 기준모델 대비 대폭 증가하였다. 기준모델은 9,761.73 kWh이며 LW가 9,935.11 kWh로 기준모델 대비 173.38 kWh (1.78%) 증가하였고 PCW는 16,144.44 kWh로 기준모델 대비 6,382.70 kWh (65.38%) 증가하였다. 이는 PCW 변색시 PCC의 VLT값은 26.6%로 기준모델의 VLT값인 78.4%보다 낮아 자연광 유입이 적어 실내 조도확보를 위한 인공조명 사용량이 증가함에 따른 현상으로 보인다. 조명 에너지소비량은 실내조도와 직접적인 관련이 있는 것을 알 수 있다. 그러나 조명 에너지를 제외한 냉난방에너지 합산 값은 PCW가 LW보다 575.05 kWh 낮은 것으로 확인되었다. 이는 PCW가 낮은 VLT로 인한 높은 조명발열을 발생 시킴에도 불구하고 우수한 U-value 및 낮은 SHGC 특성으로 인하여 겨울철 단열 및 여름철 일사투과를 줄여 나타나는 현상으로 사료된다.

열대기후인 Miami의 경우 연중 냉방시스템을 가동하여 냉방 에너지소비량이 높게 산출되었고 난방 에너지소비량은 없다. 전체 에너지소비량 결과는 PCW > CW > LW 순으로 Fig. 3과 같다. Miami는 1년 내내 20도가 넘는 열대기후로 기준모델인 CW의 냉방 에너지소비량은 34,520.68 kWh로 가장 높게 나왔다. PCW는 34,158.56 kWh로 기준모델 대비 362.12 kWh (1.05%) 감소 효과가 있지만 VLT가 현저히 낮아 LW보다는 냉방 에너지소비량이 많이 사용되었다. LW의 냉방 에너지소비량은 33,168.36 kWh로 기준모델보다 1,352.32 kWh (3.92%) 감소한 것으로 보아 냉방 에너지소비량은 창호 열관류율 값과 차폐계수의 영향을 받는 것을 알 수 있다. Miami는 다른 지역에 비해 일조시간에 따른 일사취득량이 많아 연간 조명 에너지소비량이 적은 것으로 보인다. CW의 조명 에너

지소비량은 6,694.90 kWh로 가장 적고 다음으로 LW는 6,771.09 kWh, PCW가 11,541.91 kWh로 기준모델 대비 4,847.01 kWh (72.40%) 증가하여 가장 높게 계산되었다. 기준모델의 전체 에너지소비량은 41,21.58 kWh이며, LW는 39,939.45 kWh로 1,276.13 kWh (3.10%) 감소하였고 PCW는 45,700.47 kWh로 기준모델 대비 4,484.89 kWh (10.88%) 증가하였다.

해양성기후인 San Francisco는 연평균온도 13도를 유지하고 겨울철 최저온도가 9°C로 따뜻하다. Fig. 4에 따르면 전체 에너지사용량은 LW가 18,780.64 kWh로 기준모델인 CW보다 238.35 kWh (1.25%) 적게 사용되었고 PCW의 전체 에너지 사용량은 23,043.34 kWh로 기준모델 대비 4,024.34 kWh (21.16%) 더 많이 사용되었다. 난방 에너지소비량은 CW > PCW > LW 순으로 나타났다. CW의 난방 에너지소비량은 4.02 kWh이며 가장 적게 사용된 LW의 난방 에너지소비량은 0.05 kWh로 3.52 kWh (87.45%) 감소하였고, PCW는 1.86 kWh로 기준 모델대비 2.17 kWh (53.86%) 감소하였다. 겨울철 따뜻한 외기온도로 인해 실내 열손실을 줄일 수 있어 다른 지역에 비해 난방 에너지사용량이 현저히 적은 것을 알 수 있다. 냉방 에너지소비량은 열관류율과 차폐계수의 영향으로 PCW의 에너지소비량이 10,351.78 kWh로 가장 적게 사용되었다. 반면 조명 에너지소비량은 PCW가 12,689.69 kWh로 기준모델 대비 4,953.35 kWh (64.03%) 많이 사용되었고 LW는 7,817.74 kWh로 81.40 kWh (1.05%) 많이 사용되어 조명 에너지소비량 측면에서는 PCW보다 LW가 더 효율적인 것으로 확인되었다.

Fig. 5는 냉대기후인 Ann Arbor의 난방, 냉방, 조명 에너지소비량을 분석한 결과이다. 냉난방 에너지소비량은 세 가지 유형의 창호 중 PCW가 가장 적게 소비되었다. PCW 적용 시 난방 에너지소비량은 8,415.39 kWh로 기준모델 대비 3,234.51 kWh (27.76%) 감소하였고 LW는 9,284.09 kWh로 2,365.80 kWh (20.31%) 감소하였다. 기준모델의 냉방 에너지소비량은 8,579.05 kWh로 계산되었다. PCW와 LW의 냉방 에너지소비량은 8,062.59 kWh, 8,109.50 kWh로 기준모델 대비 각 6.02%, 5.47% 감소하였다. PCW의 U-value와 차폐계수 (SC)의 특성으로 인하여 겨울철의 경우 실내 열손실이 줄어들어 난방 에너지소비량 감소 현상이 나타나고 여름철의 경우 일사투과를 적게 받아 냉방 에너지소비량 감소 현상이 나타났다. 난방, 냉방 에너지소비량은 기준모델보다 감소 하였지만, 조명 에너지소비량이 대폭 증가함에 따라 총 에너지소비량은 PCW가 가장 높은 것으로 나타났다. PCW의 조명 에너지소비량은 15,711.55 kWh로 기준모델 대비 6,607.31 kWh (72.57%) 증가하였고 LW는 8,998.27 kWh로 105.97 kWh (1.16%) 감소하였다. 현재 PCW의 VLT 값은 인공조명 사용 없이 자연채광만으로 오피스의 기준 실내조도를 충족하기 어려운 것으로 확인되었다. 총 에너지소비량은 LW의 경우 26,391.86 kWh로 기준모델 대비 2,941.32 kWh (10.03%) 감소하였지만 PCW는 2,856.35 kWh (9.74%) 증가한 32,189.52 kWh로 계산되었다. PCW의 과도한 조명 에너지는 실내 발열에 따라 냉난방 부하에도 영향을 주기 때문에 총 에너지소비량 절감을 위해서는 기후에 맞는 변색 스케줄과 적절한 VLT 개선이 필요하다.

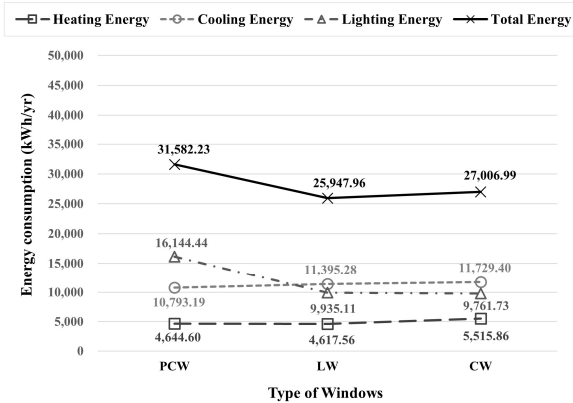


Fig. 2. Total energy consumption graph of Seoul

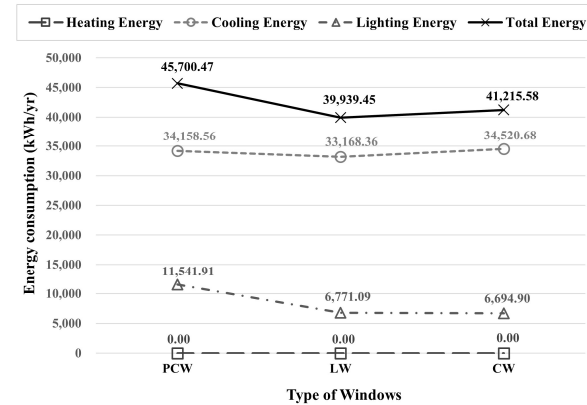


Fig. 3. Total energy consumption graph of Miami

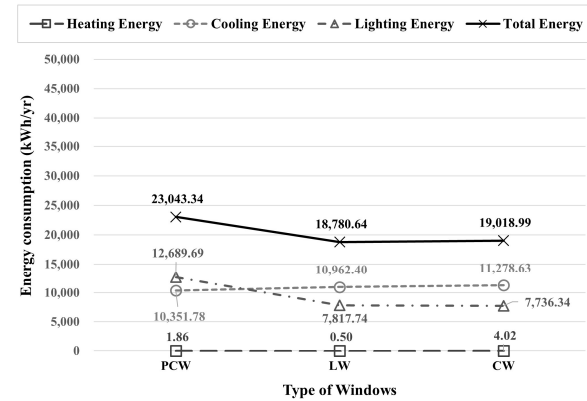


Fig. 4. Total energy consumption graph of San Francisco

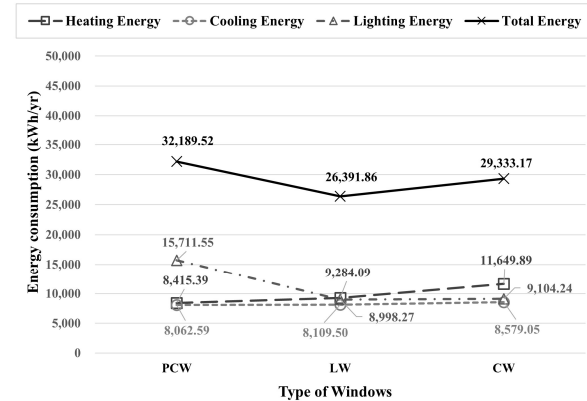


Fig. 5. Total energy consumption graph of Ann Arbor

## 6. 결론

본 연구에서는 PCW가 적용된 건물의 실내환경성능 및 에너지소비량에 대한 분석을 위해 DesignBuilder 시뮬레이션 프로그램을 사용하였다. PCW 성능평가를 위해 비교군으로 Clear Window (CW), Low-e Window (LW)로 설정하였고 Clear Window (CW)를 기준모델로 설정하였다. 다양한 기후대를 반영하기 위해 온대기후 (Seoul)와 열대기후 (Miami), 해양성기후 (San Francisco), 냉대기후 (Ann Arbor)를 대표하는 지역을 선정하여 난방, 냉방, 조명 에너지소비량 분석을 진행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) PCW의 연간 냉난방 에너지소비량은 지역별로 모두 기준모델 대비 감소하였다. 온대기후인 Seoul은 10.48%, 열대기후인 Miami는 1.05%, 해양성기후인 San Francisco는 8.23%, 냉대기후인 Ann Arbor는 18.54% 감소하였다. 냉난방 에너지소비량 저감에 가장 효과적인 기후대는 냉대기후이다. PCW의 우수한 U-value와 낮은 SHGC의 특성으로 겨울철의 경우 실내 열손실이 줄어 난방 에너지소비량 감소 현상이 나타나고 여름철의 경우 일사투과율이 적어 냉방 에너지소비량이 감소하여 연중 온도차가 큰 지역에서 더 효과적인 것을 확인하였다.

(2) 조명 에너지소비량은 네 지역 모두 PCW가 가장 많은 에너지를 사용하였다. 이는 PCW의 VLT가 기준모델보다 현저히 낮아 나타나는 현상으로 PCC의 변색시간 동안 자연채광만으로 사무소 실내 조도도 기준을 맞추지 못해 인공조명 사용량이 증가한 것으로 확인되었다. Seoul은 기준모델 대비 6,382.70 kWh (65.38%) 증가하였고, Miami, San Francisco, Ann Arbor는 기준모델 대비 각각 4,847.01 kWh (72.40%), 4,953.35 kWh (72.40%), 4,953.35 kWh (64.03%), 6,607.31 kWh (72.57%) 증가하였다. 해양성 기후에서는 연간 높은 일사취득량으로 인해 기준모델 대비 조명 에너지사용량이 가장 적었다. PCW의 조명 에너지소비량을 줄이기 위해서는 기후에 맞는 변색 스케줄을 조절하여 적절한 VLT 반영이 필요하다.

(3) 연간 전체 에너지소비량은 PCW > LW > CW 순으로 나타났으며 모든 기후대에서 동일하다. PCW의 냉난방 에너지 절감에도 불구하고 조명 에너지소비량의 증가로 인하여 기준모델보다 총 에너지소비량이 증가하는 것으로 나타났다. PCW를 효율적인 건축 외장재로 적용하기 위해서는 기후에 맞는 변색 스케줄 및 VLT 개선이 필요하다.

본 연구를 통해 건축 외장재로 PCW를 적용할 경우 기후대별 냉난방 및 조명 에너지소비량에 미치는 영향을 확인하였다. PCW의 조명 에너지소비량은 기준모델 대비 많이 사용되었으나 이는 시뮬레이션 특성상 외부 일사량에 따른 자동 변색이 가능한 변색 유리가 구현되어 있지 않아 임의로 설정한 창호 변색 시간을 적용하여 실제보다 과도하게 사용된 것으로 사료된다. 냉난방 에너지 소비 측면에서는 PCW가 효과적인 것으로 확인되어 외장재로서의 가능성을 확인하였다. 창호는 단열성능뿐만 아니라 일사열취득계수, 차폐계수 등 다양한 고려요소가 존재하므로 추후 연구에서는 실제 일사취득량에 따른 변색 시간을 고려해 VLT 성능이 개선된 PCW의 개발과 여러가지 용도의 건물을 대상으로 각종 에너지 성능에 관한 연구가 계속해서 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## Acknowledgement

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-미래선도기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. NRF-2018M3C1B9088457).

## Reference

- [1] 최민서, 장성주, 창호의 열관류율, 일사취득계수와 향의 배치가 건물의 냉난방 부하에 미치는 영향에 관한 지역별 비교연구, KIEAE Journal, 제13권 제2호, 2013.4, pp.123-130. // (M.S. Choi, S.J. Chang, Comparative Analysis on the Heating and Cooling Loads Associated with U-value, SHGC and Orientation of the Windows in Different Regions, KIEAE Journal 13(2), 2013.4, pp.123-130.)
- [2] 조혜은 외 6인, 건물 에너지 사용량 분석을 통한 광변색유리 창호 성능 평가, 대한설비공학회 2020 하계학술발표대회 논문집, 2020, pp.1-4. // (H.U. Cho et al., A Performance Evaluation of Photochromic Window by Analyzing Building Energy Consumption, The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, 2020, pp.1-4.)
- [3] 김경호, 스마트 윈도우-고기능 고감성 차세대 성장 기대, KISTI MARKET REPORT, 제5권 제1호, 2020, pp.3-6. // (K.H. Kim, Smart window, KISTI MARKET REPORT, Vol 5. Issue 1, 2020, pp.3-6.)
- [4] 황우진, 남중우, 원종서, 일반건축 냉난방에너지 최적화를 위한 외피 기술개발, DAELIM TECHNICAL REVIEW, 2015, pp.114-121. // (W.J. Hwang, J.W. Nam, J.S. Won, Development of skin technology for optimizing general building heating and cooling energy, DAELIM TECHNICAL REVIEW, 2015, pp.114-121.)
- [5] B.R. Park et al., Improvement in Energy Performance of Building Envelope Incorporating Electrochromic Windows(ECWs), Energies 12(6), 2019, article no.1181.
- [6] K. Allen et al, Smart window-dynamic control of building energy performance, Energy and Buildings 139, 2017, pp.535-546.
- [7] 박보람 외 3인, 사무소 건물 적용 DSSC BIPV 창호의 환경 및 에너지 성능 분석, KIEAE Journal, 제20권 제1호, 2020.2, pp.121-128. // (B.R. Park et al, Environmental and Energy Performance Analysis of DSSC BIPV Window in Office Buildings, KIEAE Journal 20(1), 2020.2, pp.121-128.)
- [8] J.R. Talukder, Y.H. Lee, S.T. Wu, Photo-responsive dye-doped liquid crystals for smart window, OPICS EXPRESS, 27(4), 2019, pp.4480-4487.
- [9] Z.Y. Kuang et al. Responsive Smart Windows Enabled by the Azobenzene Copolymer Brush with Photothermal Effect, ACS Publications 11, 2019, pp.37026-37034.
- [10] ASHRAE Standard 90.1, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, ASHRAE, Atlanta, 2010.
- [11] Building america best practices series, volume 7.3: Guide to determining climate regions by country, U.S. Department of Energy, 2015.
- [12] 최은지 외 3인, 동적 착의량 반영에 따른 기후대별 실내 열쾌적 분석, KIEAE Journal, 제20권 제5호, 2020.10, pp.171-177. // (E.J. Choi et al., Analysis of indoor Thermal Comfort reflecting Dynamic Clothing Insulation in diverse Climate Zone, KIEAE Journal 20(5), 2020.10, pp.171-177.)
- [13] D.F. Nicholas et al. Regional performance targets for transparent near-infrared switching electrochromic window glazings, Building and Environment 61, 2013.03, pp.160-168.
- [14] 국토교통부, 건축물의 에너지절약설계기준, 국토교통부고시 제 2017-881호. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Standards for Energy saving design of buildings, Korea MOLIT, 2017)
- [15] National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, www.nrel.gov, 2020.10.07.