

A Study on Envelope Design Variables for Energy Conservation of General Hospital Ward Area by Sensitivity Analysis

민감도 분석을 통한 종합병원 병동부의 에너지 절감 외피 설계요소 도출

Oh, Jihyun* 오지현 | Kwon, Soonjung** 권순정 | Kim, Sunsook*** 김선숙

Abstract

Purpose: Since the large hospitals are one of the most intensive energy users among building types in Korea, it is important to investigate and apply appropriate energy conservation measures. There are many researches on energy conservation measures for HVAC system in hospitals, but only few useful guidelines for envelope design variables were existed. The building envelope is one of the important factors to building energy consumption and patients' comfort. The purpose of this study is to suggest the most influential envelope design variables for each end-use energy demand.

Methods: 100 samples were generated by LHS(Latin Hypercube Sampling) method. After energy performance simulation, global sensitivity analysis was performed by the regression method. DesignBuilder, Simlab 2.2 and JEPlus were used in this process.

Results: The most influencing variables are SHGC, SHGC and VT for heating, cooling, and lighting, respectively. However, the most influencing variable for total energy demand is WWR(Window to Wall Ratio). The analysis was conducted based on the coefficient of variance results. **Implications:** The six envelop design variables were ranked according to the end-use energy demand.

Keywords Envelope design variables, Energy demand, Sensitive analysis

주 제 어 점외피 설계요소, 에너지요구량, 민감도 분석

1. Introduction

국제적인 기후변화 협약에 대응하기 위하여 국내에서는 2030년까지 온실가스 배출전망치(851백만톤) 대비 37% 감축 목표를 설정하고, 각 부문별 에너지 사용량 조사 결과를 바탕으로 에너지 수요관리 및 온실가스 감축 정책 개선을 위한 기초자료를 제공하고 있다(MOTIE, 2015a). 건물 부문에서는 특히 에너지이용 합리화법에 따라 연간 2000toe 이상 다소비 건축물을 에너지사용량 신고업체로 지정하였으며, 이를 대형건물로 구분하여 관리하고 있다. 대형건물 부문 중 병원의 연간 단위면적당 에너지사용량($364.0 \times 10^3 \text{kcal/m}^2$)은 통신시설($921.8 \times 10^3 \text{kcal/m}^2$)에 이어 두 번째로 많으며, 연간 단위건물

당 에너지사용량 또한 호텔 다음으로 높은 것으로 조사된바 있다(MOTIE, 2015a: 650-731). 특히 대형병원의 경우, 주 사용자인 환자들에게 치유에 적합한 공간을 24시간 제공함으로써 의료 서비스의 질을 높이는 것이 중요하기 때문에(Choi, 2012: 29), 환자의 진단·치료를 위한 다수의 의료기기 사용 외에도 쾌적한 환경 조성을 위한 공조 기기의 가동 등으로 인해 타 용도 건물에 비해 에너지사용이 많을 수밖에 없다.

국외의 경우 이러한 현실을 고려하여 Advanced Energy Design Guide for Large Hospital(ASHRAE, 2016)과 같은 에너지 절감을 위한 건축계획 가이드라인을 제공하고, BREEAM, LEED, CASBEE 등 친환경 건축물 인증제도에서도 병원을 별도 용도로 구분하여 인증하고 있다(Yoon, 2016). 반면 국내에서는 특정 용도가 아닌 포괄적 의미의 건물에너지 절감 가이드라인들만이 제시되어 있고 녹색건축 인증제도에서도 '그 밖의 시설'로 분류되어 평가되는 등(Oh, 2016; Yoon, 2016) 병원 건물의 특성에 대한 고려가 부족한 실정이다. 따라서 국내에

* Graduate Student, Department of Architecture, Ajou University (Primary author: tem1541@ajou.ac.kr)

** Vice President, Professor Ph.D, Department of architecture, Ajou University

*** Associate Professor, Ph.D, Department of architecture, Ajou University (Corresponding author: kss@ajou.ac.kr)

서도 대형 병원을 위한 건물에너지 절감 방안이 고찰되어야 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

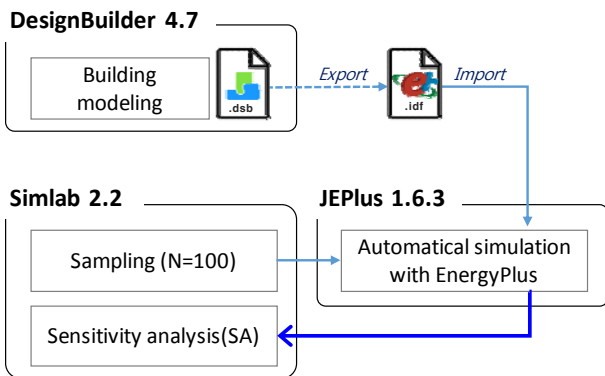
기존 연구에서는 설비시스템에 따른 에너지소비 특성 또는 효율화 방안에 대한 연구(Cho, 2015; Sohn, 2016; Moon, 2015)들이 주요하게 진행되었으며, 건축계획 단계에서 설계에 따른 에너지 절감에 관한 연구로 병실 단위의 차양 계획 평가(Choi, 2012)와 병동부 형태에 따른 냉난방부하 비교분석(Sim, 2015) 등이 있었다. 그러나 건물의 에너지소비 및 재실자의 쾌적에 복합적인 영향을 미칠 수 있는 다수의 외피 설계 요소들에 대한 정량적 효과분석 연구는 미비한 측면이 있다. 이에 본 연구에서는 에너지 절감을 고려한 병원 건축계획에 활용될 수 있도록, 각 사용용도별 에너지요구량에 영향을 미치는 주요 외피 설계요소들을 도출하고자 한다. 이를 위해 종합병원 설계에 있어 상대적으로 다양한 외피 설계안이 시도되며, 간호단위 구성에 따라 평면형태의 표준화가 가능한 병동부를 중심으로, 외피 설계요소가 에너지요구량에 미치는 민감도를 분석하였다.

2. Methodology

외피 설계요소의 민감도 분석을 위해서는 다음의 과정이 선행되어야 한다.

- ① 평가하고자 하는 요소의 분포를 결정하고, 확률적 이론에 따라 입력변수 조합 N개를 샘플링
- ② 에너지 해석을 위한 건물 형상 및 입력조건 모델링
- ③ 건물 에너지 해석 N회 반복
- ④ 민감도 분석 수행

이에 본 연구에서는 EnergyPlus를 활용한 동적 해석을 위해 DesignBuilder 4.7로 모델링하였으며, 표본 추출 및 민감도 분석은 Simlab 2.2로, 자동으로 변수가 변경되는 시뮬레이션 지원에는 JEPlus 1.6.3를 사용하였다. 평가 방법은 [Figure 1]과 같다.

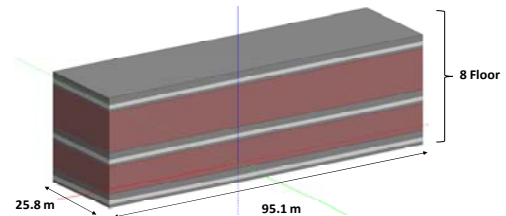


[Figure 1] Schematic workflow diagram for analysis

DesignBuilder 4.7로 모델링한 후, JEPlus 1.6.3에서의 자동 반복 시뮬레이션을 위해 .idf 형식의 파일로 변환하였다. 변환된 .idf 파일은 Simlab 2.2에서 생성된 입력변수 조합(N=100)으로 평가되었으며, 최종적으로 Simlab 2.2을 통해 각 변수들이 에너지성능에 미치는 민감도를 분석하였다.

2.1 Description of modeling in DesignBuilder

기존 연구(Sim, 2015)의 국내 상급종합병원 40개 건물 병동부 형태 조사 결과를 참고하여, 국내 병원 설계에서 실제 적용되고 있는 대표적인 병동부의 형상을 분석 대상으로 설정하였다. Sim(2015: 243)에 따르면 병동부의 매스 형태는 [—]형이 55%, 다음으로 [⊥]형이 20%로 조사되었으며, 이 중에서도 [—]형이 가장 보편적인 형태라 판단되므로 [Figure 2]와 같이 [—]형을 대상으로 모델링하였다. 병동부의 형태는 공공병원 병동부의 표준모형(최광석 외, 2014: 25)을 참조하여 이중복도형의 장방형 평면으로 하였다. 병실은 기본적으로 4인실로 구성되며 병실의 크기는 6.3m×6.3m, 병동의 크기는 25.8m×95.1m, 층고는 3.8m를 기준으로 하였다. 간호단위당 병실구성은 1인실 2실, 2인실 2실, 4인실 11실로 총 50병상이며 한 개 층에 두 개의 간호단위를 배치하여 층당 100병상으로 구성된다. 병동부의 층수는 총 8개 층으로 총 병상수는 800병상, 병동부 연면적은 19,628.6m²이다.



[Figure 2] Feature of ward area for evaluation

100회의 시뮬레이션을 빠르고 간편하게 수행하고자 건물 최하층, 기준층 및 최상층만을 모델링 후, 기준층에 Zone multiplier 기능을 적용하는 방안으로 8개 층을 모사하였다. 기준층의 구성은 크게 병실과 코어 및 복도 등의 공용공간으로 Zone을 구분하여 스케줄 설정을 다르게 하였다. 최상층과 기준층 사이 및 기준층과 최하층 사이는 열전달이 없는 단열(Adiabatic) 조건으로 설정하였다.

시뮬레이션에 사용된 ASHRAE IWEK 기상데이터의 월별 외기온 자료는 [Table 1]과 같으며, [Table 2]와 [Figure 3]의 모델링 입력 조건과 스케줄 설정은 NREL(2013: 12-63,104-112)의 Low-energy model을 참조하였다. 외피 설계에 따라 달라지는 채광량과 이에 따른 조명 및 냉·난방 에너지 성능의 변화를 보다 상세히 평가하고자 추가적으로 복도를 제외한 병실 공간에 조명제어를 설정하였다. 국내의 경우 일반적으로 외피

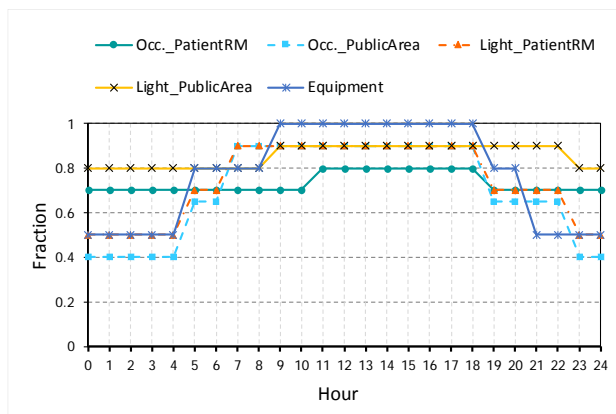
에 가까운 외주부측과 내주부측의 조명을 구분하여 on/off할 수 있도록 설계하므로, 이를 반영하고자 단계제어(Stepped control) 방식을 선택하였다.

[Table 1] Monthly min. and max. temperature data

Temp. (°C)	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Avg.	-2.2	-0.3	4.8	10.8	15.8	20.5	23.6	25	20.8	14.5	7.6	1.2
Min.	-9.9	-9.4	-5	3.1	9.4	13.6	17.9	19.7	10.7	1.5	-4.2	-11.7
Max.	8.7	10.2	13.3	22.5	24.7	31.3	32.6	32.2	28.9	23.5	16.5	11.6

[Table 2] Description of simulation condition

Parameter	Value
Location	Incheon (37.5°N, 126°E)
Lighting density	9.36 W/m ²
Lighting control	Stepped control
Equipment level	7.21 W/m ²
Occupancy	0.054 people/m ²
HVAC system	Ideal load system
Set-point temperature	Heating: 21°C, Cooling: 25°C
Infiltration rate	0.05 cfm/ft ²
Min. Outdoor Air	2ACH



[Figure 3] Occupancy, lighting and equipment schedules

2.2 Input variations

[Table 3] Range and distribution of the 6 variables

No.	Variable	Range	Unit	Distribution
X1	Orientation	-45 to 45 ¹⁾	angle	Uniform
X2	WWR	30 to 70	%	
X3	SHGC	0.35 to 0.65	-	
X4	VT	0.42 to 0.78	-	
X5	U _{win}	0.8 to 1.5	W/m ² K	
X6	U _{wall}	0.15 to 0.26	W/m ² K	

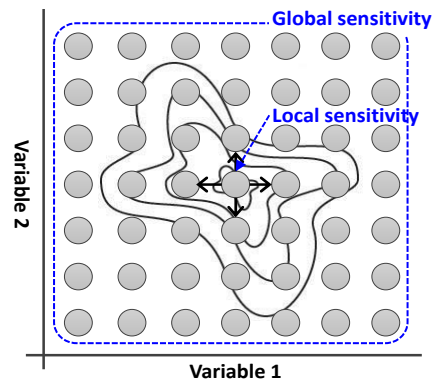
1) -45°는 남동향, 0°는 정남향 그리고 45°가 남서향을 의미한다.

건물에너지에 영향을 미치는 외피의 성능은 주변 환경, 외피 설계요소 및 재료의 물성치에 의해 결정된다(Raji, 2016: 211). 이에 본 연구에서는 주변 환경 요소인 향(X1), 설계요소인 WWR²⁾(X2) 그리고 재료의 물성치에 해당하는 창호 SHGC, VT, 열관류율(X3~X5), 외벽의 열관류율(X6)을 민감도 분석을 위한 변수로 선정하였다(Table 3). WWR은 주 입면인 장변에 위치한 창면적만을 대상으로 하였으며, 단변의 창면적은 WWR 30%를 기준으로 하였다.

선택된 설계요소들 중 X1은 Sim(2015: 244)의 연구와 장단 변비가 3.69으로 큰 [—]형임을 고려하여 동남부터 서남 방향을 범위로 설정하였으며, 성능과 관련된 X2~X6의 하한값 및 상한값은 건축물의 에너지절약 설계기준(MOLIT, 2015b) 중 부지역 단열기준에 근거하였다. X2의 경우 ASHRAE(2016: 115)에서 40% 이하로 할 것을 권장하고 있으나, 다양한 외피 설계 현황 및 Choi(2012)의 연구를 고려하여 30~70%로 설정하였다. 변수로 설정되지 않은 지붕 및 최하층 바닥의 열관류율은 동일한 법규의 중부지역 단열성능 기준을 따라 지붕 0.15 W/m²K, 바닥 0.18 W/m²K로 모델링하였다.

2.3 Sensitivity Analysis(SA)

건물의 에너지성능은 건축계획단계에서 결정되는 다양한 설계요소들의 영향을 받게 되며, 이는 건물의 운영비용과도 직접적으로 관련된다. 이에 따라 다수의 국내외 기존 연구에서는 민감도 분석 방법을 이용하여 어떠한 설계요소의 변경이 에너지성능에 더 영향을 미치는가를 평가하고, 요소간의 비교결과를 제시하고 있다(Kim, 2015; Chen, 2015; Tian, 2013). 민감도 분석은 입력변수가 결과에 미치는 영향을 수치적으로 나타내는 것으로, 수학 및 경제학에 사용될 뿐만 아니라 제어 알고리즘의 분석 등에서도 널리 사용되고 있는 방법론이다(Kim, 2015: 54). 분석 방법은 하나의 변수만을 변경하며 평가하는 Local sensitivity 분석과 모든 변수를 동시에 변경하는 Global sensitivity 분석으로 크게 분류된다.



[Figure 4] Difference between local and global sensitivity

2) WWR : Window to Wall Ratio

[Figure 4]와 같이 Local sensitivity 분석은 원안 대비 변화 하는 민감도를 평가하며, Global sensitivity 분석은 전체 변수 공간(variable space) 내에서의 민감도 평가가 가능하므로 더 신뢰성 있는 방법으로 알려져 있다(Tian, 2013: 412). Global sensitivity 분석은 구체적인 평가 방법에 따라 Regression, Screening-based, Variance-based, Meta-model based 방법으로 구분할 수 있다. Tian(2013: 415)에 따르면, Regression 방법론이 계산시간이 짧고, 지표를 직관적으로 이해하기 용이한 장점이 있어 건물에너지 분야에서의 민감도 분석 방법론으로 다수 활용되고 있다. 입력변수의 종류가 많은 경우에는 Screening-based 방법 중 하나인 Morris 방법이 영향력 있는 변수를 선별하기에 적합하다 알려져 있다.

본 연구에서 대상으로 하는 변수의 수는 6개로 많은 변수를 대상으로 하고 있지 않다. 이에 Global sensitivity analysis 방법 중 가장 일반적으로 사용하는 Regression method를 선택하였으며, Monte Carlo 방법의 하나인 LHS(Latin Hypercube Sampling)³⁾ 방법으로 [Table 3] 설계요소에 대해 100개의 케이스를 생성하였다. 생성된 케이스(Input)와 에너지 시뮬레이션을 통해 도출되는 난방, 냉방 및 조명에너지 결과(Output)의 입력변수-결과 매트릭스는 [Equation 1]과 같이 다항회귀식으로 표현 될 수 있다. 이에 따라 Simlab 2.2에서 각각의 다항회귀식의 변수별 표준화회귀계수(Standardized Regression Coefficient)로부터 SRRC(Standardized Rank Regression Coefficient)를 계산한 후, SRRC의 값으로 입력변수의 상대적 영향도를 평가하였다. SRRC의 절대 값은 영향을 미치는 정도를 의미하며, (±) 부호는 변수가 증가할 때 결과 값이 증가 또는 감소하는 경향을 나타낸다. 즉, 본 연구에서 SRRC의 부호가 (+)인 경우는 에너지요구량 증가에 기여함을 의미한다. 에너지 절감을 위해서는 해당 외피 설계요소의 값을 감소시켜야 한다.

$$\vec{Y} = \begin{cases} y_1 = a_{11}x_{11} + a_{12}x_{12} + \dots + a_{1k}x_{1k} \\ y_2 = a_{21}x_{21} + a_{22}x_{22} + \dots + a_{2k}x_{2k} \\ \vdots \\ y_N = a_{N1}x_{N1} + a_{N2}x_{N2} + \dots + a_{Nk}x_{Nk} \end{cases} \quad \dots \text{ [Equation 1]}$$

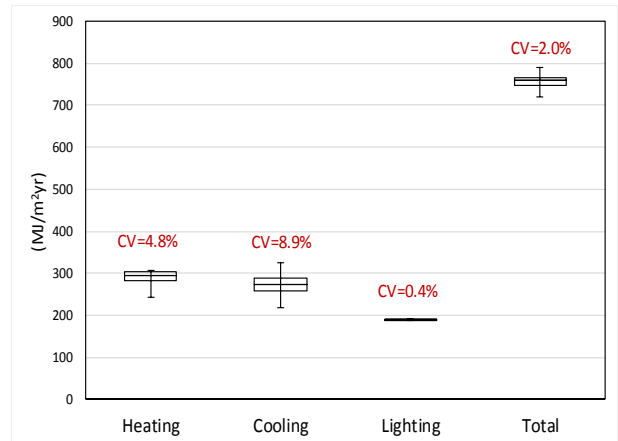
where,
 N : Sample size
 k : Number of input variables
 a : Standardized regression coefficients
 x : Input variables
 y : Output variables

3) "0~1 사이의 범위 내에서 입력변수의 입력범위를 동일하게 N개의 구간으로 구분한 뒤, 각 구간에 난수를 추출한다. 이 방법은 Simple random sampling 보다 난수를 적게 추출해도 충분히 유의한 결과를 얻을 수 있으며, 복잡한 비선형 모델에도 적합하다"(Kim, 2012: 228).

3. Result and Discussion

3.1 Evaluation results

JEPlus v.1.6.3을 통해 도출된 EnergyPlus 해석 결과는 사용 용도에 따라 난방, 냉방, 조명과 총 에너지요구량으로 구분하여 분석하였으며, 100건의 결과를 한 눈에 비교하기 위해 최소/최대 및 4분위수 산출 결과를 바탕으로 분포를 분석하였다(Figure 5).



[Figure 5] Energy demand and coefficient variation(CV) results by end-use

난방, 냉방 및 조명 에너지 순서대로 294.5MJ/m²·yr, 273.5MJ/m²·yr, 188.7MJ/m²·yr 중위 값을 갖고 있었으며, 총 에너지 대비 38.8%, 36.1%, 24.9%의 비율을 보였다. 병동부는 내원환자들을 위한 공간이므로 24시간 운영된다. 쾌적을 위한 실내 설정 온도 및 환기 조건으로 인하여 난방과 냉방 에너지요구량이 높게 산출된 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 평가한 병동부의 형태가 이중복도형이므로, 자연채광이 닿지 않는 내주부 공간 비중이 크기 때문에 조명 에너지요구량 크게 평가되었다. 평균 및 분산이 다른 네 개 에너지 항목의 산포도를 비교하기 위해 변동계수(Coefficient Variation, CV)를 산출한 결과, 난방(4.8%), 냉방(8.9%), 조명(0.4%), 총 에너지(2.0%)로 나타났다. 이는 [Table 2]에서 설정했던 외피 설계요소들이 조명에너지에는 거의 영향을 미치지 않으며, 냉방에너지에 비교적 큰 영향을 미치고 있음을 의미한다. 즉, 종합병원 병동부의 에너지 절감을 위해서는 난방 및 냉방 에너지를 절감하기 위한 요소가 도출되어야 하나 현재 평가된 설계요소의 범위는 냉방에너지 절감에 보다 효과적이므로, 두 가지를 고려한 설계요소 도출이 필요하다.

앞서 2.3장에서 언급하였듯이, 본 연구에서는 SSRRC 값의 절대 값을 기준으로 민감도를 평가하였으며, 1에 가까울수록 민감도가 큰 것으로 분석하였다. 각 사용 용도 및 총 에너지요구량에 대한 민감도 분석 결과는 [Table 4]와 같다.

[Table 4] Ranking of 6 variables for each end-use energy demand

Heating			Cooling			Lighting			Total		
Rank	Variable	SRRC	Rank	Variable	SRRC	Rank	Variable	SRRC	Rank	Variable	SRRC
1	SHGC	-0.705	1	SHGC	0.760	1	VT	-0.764	1	WWR	0.709
2	U_{win}	0.502	2	WWR	0.543	2	WWR	-0.573	2	SHGC	0.527
3	WWR	-0.156	3	U_{win}	-0.107	3	SHGC	-0.055	3	U_{win}	0.321
4	U_{wall}	0.135	4	VT	-0.047	4	U_{win}	0.025	4	U_{wall}	0.121
5	VT	-0.014	5	U_{wall}	-0.034	5	U_{wall}	0.022	5	VT	-0.112
6	Orientation	0.003	6	Orientation	-0.032	6	Orientation	0.010	6	Orientation	-0.004

난방 에너지에 대한 주요 설계요소는 창호의 일사획득계수 (SHGC), 창호의 열관류율(U_{win}), 창면적비(WWR) 순서로 나타났다. SHGC는 자연채광에 따른 일사획득과 관련되므로 (-) 상관관계를 갖으면서도 가장 영향도 높은 요소인 것으로 판단되며, WWR은 2순위 U_{win} 과 약 3.2배 차이가, 4순위인 외벽의 열관류율(U_{wall})과는 약 1.2배 차이를 보이고 있다. U_{wall} 은 법적 기준에 따라 높은 수준의 단열성능을 갖는다는 점과 평가 모델의 24시간 내부 발열량이 크다는 조건으로 인해 상대적으로 민감도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. WWR 또한 유사한 이유에서 앞선 설계요소 대비 난방 에너지에 큰 영향을 미치지 못하고 있다. 가시광선투과율(VT)은 창호를 통한 자연광 유입에 대한 비율로 열 획득과 무관하므로 민감도가 0에 가깝게 도출되었다.

그러나 냉방 에너지의 경우 SHGC, WWR, U_{win} 순서로 주요 영향을 미치고 있고, 이 외 설계요소인 VT, U_{wall} 및 향 (Orientation)은 민감도가 0.05 이하로 거의 영향도가 없었다. SHGC가 증가할수록 열 획득이 증대됨에 따라 냉방 에너지가 증가하므로 (+) 상관관계를 갖으며, SHGC의 민감도는 0.760으로 WWR의 약 1.4배 크게 나타났다. 이 때, 열 획득과 무관한 VT의 민감도가 -0.047로 U_{wall} 보다 높게 나타난 것은 VT 증가에 따라 조명 에너지요구량이 감소되고, 내부 발열량이 일부 경감되는 효과가 반영된 것으로 분석된다.

자연채광의 유입량과 관련 깊은 조명 에너지는 냉·난방 에너지와 달리 VT의 민감도가 -0.764으로 1순위였으며, 뒤이어 WWR이 -0.573로 2순위로 나타났다. 평가 건물의 공용공간 Zone은 단변에 위치한 일부 창을 통해서만 자연채광이 가능하므로 대부분의 조명 에너지요구량이 발생하게 된다. 이에 따라 조명 에너지를 절감하기 위해선 공용공간을 주요 대상으로 고려할 필요가 있다. 그러나 모든 향의 창호를 대상으로 하는 VT와 달리 WWR은 병실이 위치한 장변의 창면적이 변경되며 평가되었으므로 창면적비 보다 VT의 영향이 더 크게 나타난 것으로 판단된다. 반면에 열 획득과 관련되는 SHGC, U_{win} 및 U_{wall} 은 조명 에너지요구량의 증감과는 무관하므로 민감도가 매우 낮게 도출되었다.

총 에너지 관점에서 살펴본 결과, 사용 용도별 에너지요구량의 주요 영향 요소였던 WWR과 SHGC, U_{win} 이 주요 요소로

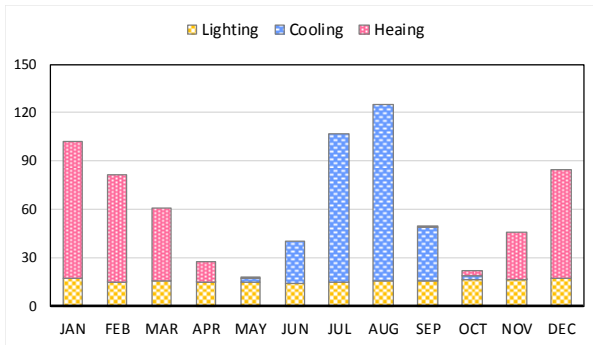
도출되었다. 조명 에너지의 경우 총 에너지 대비 24.9%의 비율을 차지하고 있으나, 외피 설계요소의 영향을 거의 받지 않고 있으므로(CV=0.4%) 주요 영향 요소인 VT는 총 에너지에 대해 5순위로 영향을 미치고 있다. 다만 총 에너지의 많은 비율을 차지하고 있는 냉·난방 에너지에 대해 모두 1순위 영향 요소인 SHGC가 총 에너지에 대해 가장 영향 있는 요소로 도출될 것이라 예측하였으나, SHGC는 커질수록 난방 에너지는 감소, 냉방 에너지는 증가하는 서로 상충되는 영향을 미침에 따라 2순위로 나타났다. 1순위인 WWR은 외피 설계요소의 영향을 크게 받고 있는 냉방 에너지요구량(CV=8.9%)에 대해 0.543의 높은 민감도를 갖고 있으므로 이와 같은 순위가 도출된 것으로 판단된다.

또한 각 용도별 에너지에 대한 향(Orientation)의 민감도는 최소 0.003, 최대 0.032로 매우 작게 나타나 하위권에 위치하고 있다. 본래 건물의 향은 에너지 성능에 영향을 미치는 주요 요소로 알려져 있으나, 앞서 언급하였듯 본 연구의 평가 대상이 내주부 면적이 넓은 이중복도형 병동부라는 점과 내부발열이 큰 특성을 가지므로 향에 따른 영향이 미미하게 나타난 것으로 사료된다. 중부지역, [-]형에 장단변비(Aspect ratio)가 3.69인 경우에 한정된 결과이므로, 다른 병동부 형태 및 지역에 대해서 정동~정서까지의 향을 포함하여 분석했을 때는 민감도 결과가 달라질 수 있다

3.2 Detailed analysis by cases

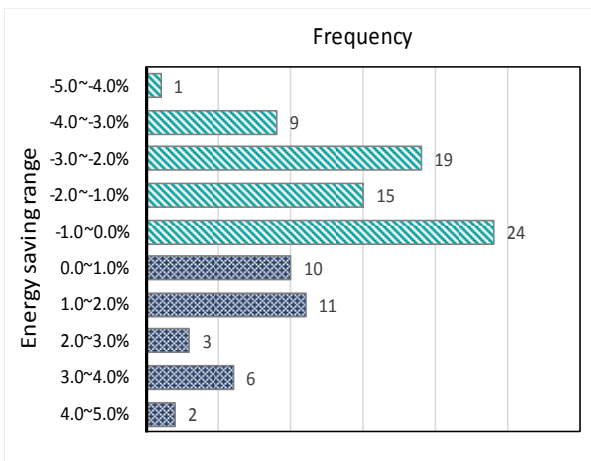
[Table 5] Base model condition

No.	Variable	Value	Unit	Reference
X1	Orientation	0	angle	Median Value
X2	WWR	50	%	
X3	SHGC	0.5	-	
X4	VT	0.6	-	
X5	U_{win}	1.5	W/m ² K	Max. Value
X6	U_{wall}	0.26	W/m ² K	



[Figure 6] Heating, cooling and lighting monthly results for base model

평가 결과에 대하여 케이스별 에너지 절감 효과를 상세분석하기 위해, [Table 5]과 같이 기준모델을 설정하였다. X1~X4의 경우 국내 기후를 고려한 최소기준이 제시되어 있지 않으므로 100개 LHS 샘플링 결과의 중앙값을 활용하였으며, X5 및 X6은 중부지역의 법적기준 상한선(MOLITE, 2015b)을 적용하였다. 기준모델의 월별 사용 용도에 따른 에너지요구량은 [Figure 6]과 같다



[Figure 7] Frequency of total energy saving percentage as compared with base model

설정된 기준모델을 바탕으로 100개 케이스의 총 에너지 절감율을 산출한 결과, 최소 0.0%부터 최대 -4.1%까지 68개 케이스가 절감 효과가 있었으며, 32개 케이스는 기준모델 대비 에너지요구량이 더 크게 나타났다(Figure 7)⁴⁾. 에너지 감소 효과가 있었던 상위 10개 케이스와 반대로 에너지요구량이 증가한 하위 10개 케이스의 변수조건 및 결과는 [Table 6] 및 [Table 7]과 같다. 앞서 수행한 민감도 분석 결과, 난방 에너지와 냉방 에너지에 미치는 외피 설계요소의 영향은 반대인 것

4) [Figure 5]의 절감율은 기준모델 대비 에너지 변화를 비율(%)로 나타낸 것으로, (-) 부호가 절감 효과가 있는 경우이며 (+) 부호는 기준모델 대비 에너지요구량이 큰 경우이다.

으로 도출되었다. 난방 에너지의 2순위 요소인 U_{win} 의 경우 냉방 에너지에는 영향을 미치지 못하고 있으나, 두 개 용도 에너지에 모두 주요한 요소인 SHGC는 증가할수록 난방 에너지는 감소, 냉방 에너지는 증가하는 상충되는 관계를 갖고 있다. 결과적으로 총 에너지요구량에 가장 주요하게 영향을 미치는 외피 설계요소를 WWR로 나타났다.

이러한 분석결과를 바탕으로 [Table 6] 및 [Table 7]의 케이스별 결과를 살펴보면, 상·하위 10개의 케이스는 WWR에 있어 명확한 차이를 보이고 있다. 상위의 케이스는 50% 미만, 하위의 케이스는 55% 이상 조건이었다. 또한 SHGC는 대체로 하위 케이스가 큰 값을 갖고 있었으며, VT는 상위 케이스가 평균 0.64으로 하위의 0.56보다 큰 것을 확인할 수 있었다. 총 에너지에 대해 3순위로 0.321의 민감도를 갖는 U_{win} 은 기준모델 대비 모두 낮은 편이었으나, 상위 케이스들의 단열성능이 평균 1.03 W/m^2K 로 더 우수한 것으로 나타났다. 이에 따른 상위 케이스들의 용도별 에너지 절감율은 각각 평균 -4.32%, -5.16%, 0.30%이며, 하위 케이스들의 경우 난방 -9.16%, 냉방 20.43%, 조명 -0.10%로 나타났다. 결과적으로, 총 에너지 증가 가장 큰 비중을 차지하는 냉방 에너지 절감을 우선하여 SHGC와 WWR을 감소시키면서 외피 단열성능을 강화하고, VT를 증가시킬 경우 총 에너지 절감에 효과적이었으며, 난방 에너지 절감을 위해 SHGC 및 WWR을 증가시키는 경우, 난방 에너지 측면에서 불리한 것으로 분석되었다. 다만, 상위 10개 케이스에서 확인할 수 있듯이, WWR이 작을수록 총 에너지 절감율이 높은 것은 아니었으며, 적절한 WWR을 유지하면서 그 밖의 설계요소를 조정함으로써 병동부의 에너지 절감을 고려한 계획수립이 가능한 것으로 판단된다.

적정 WWR에 대해 ASHRAE(2016: 115)에서는 40.0%를 언급하고 있으나, 병동부로 한정된 T-3와 T-10 케이스 결과를 비교해보았을 때 WWR이 40.0% 이상이라 하여도 창호의 단열성능 개선을 통해 유사한 에너지 성능을 갖는 것으로 도출되었다. 또한 하위 10개 케이스 중 최소 WWR을 갖는 B-7과 최대 WWR인 B-9 케이스의 경우 역시 외피의 단열성능 및 SHGC의 영향으로 WWR이 69.3%인 B-9 케이스의 에너지요구량이 작았다. 이는 WWR이 유사한 기준모델(50.0%), T-3(48.3%) 및 B-7(55.0%) 케이스 비교를 통해서도 알 수 있다. 그 밖에 T-7 케이스는 WWR를 30.7%로 설정함으로써, 난방에너지 절감을 위해 조정된 SHGC로 인해 냉방 에너지가 증가할 수 있는 영향을 상쇄하고 있다.

외피 설계요소의 변화에 따라 증감을 보이는 냉·난방 에너지와 달리, 조명 에너지의 경우 주요 영향 요소인 VT, WWR의 변화에도 $\pm 1.0\%$ 이내로 증감하고 있다. 본 연구의 평가 대상인 이중복도형의 [-]형 병동부가 아닌, 중정(Courtyard)형과 같이 공용공간의 자연채광을 유도할 수 있는 다른 병동부 형

[Table 6] Top 10 cases for total energy saving

Ranking	Orient.	WWR	SHGC	VT	U _{win}	U _{wall}	Energy demand (MJ/m ² yr)							
							Heating		Cooling		Lighting		Total	
Base model	0	50	0.50	0.60	1.50	0.26	308.99	0.0%	266.27	0.0%	188.67	0.0%	763.93	0.0%
T-1	29.8	35.1	0.40	0.50	0.83	0.18	295.00	-4.5%	247.22	-7.2%	190.24	0.8%	732.46	-4.1%
T-2	-4.4	41.5	0.41	0.72	1.00	0.20	299.44	-3.1%	248.41	-6.7%	188.48	-0.1%	736.33	-3.6%
T-3	-1.0	48.3	0.43	0.75	0.87	0.19	290.76	-5.9%	258.34	-3.0%	188.06	-0.3%	737.15	-3.5%
T-4	18.5	37.5	0.44	0.47	0.80	0.25	295.19	-4.5%	251.77	-5.4%	190.22	0.8%	737.18	-3.5%
T-5	17.5	30.9	0.57	0.77	1.03	0.17	287.15	-7.1%	261.53	-1.8%	188.67	0.0%	737.35	-3.5%
T-6	-14.0	30.2	0.40	0.74	1.39	0.21	314.19	1.7%	234.26	-12.0%	188.98	0.2%	737.43	-3.5%
T-7	-5.2	30.7	0.59	0.49	0.90	0.18	280.59	-9.2%	266.71	0.2%	190.48	1.0%	737.78	-3.4%
T-8	-20.0	32.9	0.36	0.66	1.46	0.16	314.02	1.6%	235.32	-11.6%	189.31	0.3%	738.65	-3.3%
T-9	-10.1	35.3	0.56	0.55	0.93	0.17	282.07	-8.7%	267.80	0.6%	189.61	0.5%	739.47	-3.2%
T-10	-13.1	40.5	0.46	0.73	1.07	0.20	298.17	-3.5%	253.71	-4.7%	188.37	-0.2%	740.25	-3.1%
Avg.	-0.20	36.29	0.46	0.64	1.03	0.19	295.66	-4.32	252.51	-5.16	189.24	0.30	737.41	-3.47

[Table 7] Bottom 10 cases for total energy saving

Ranking	Orient.	WWR	SHGC	VT	U _{win}	U _{wall}	Energy demand (MJ/m ² yr)							
							Heating		Cooling		Lighting		Total	
Base model	0	50	0.5	0.6	1.5	0.26	308.99	0.0%	266.27	0.0%	188.67	0.0%	763.93	0.0%
B-1	-27.3	68.1	0.65	0.68	1.20	0.26	274.88	-11.0%	339.26	27.4%	187.73	-0.5%	801.88	5.0%
B-2	24.1	68.6	0.63	0.65	1.16	0.23	273.14	-11.6%	334.18	25.5%	187.84	-0.4%	795.16	4.1%
B-3	32.2	63.6	0.63	0.50	0.97	0.22	266.15	-13.9%	336.89	26.5%	188.80	0.1%	791.84	3.7%
B-4	-31.5	57.8	0.64	0.43	1.13	0.25	276.08	-10.7%	325.73	22.3%	189.58	0.5%	791.39	3.6%
B-5	40.9	60.8	0.63	0.67	0.85	0.25	266.20	-13.8%	335.75	26.1%	187.99	-0.4%	789.94	3.4%
B-6	-42.9	67.6	0.54	0.65	1.10	0.23	289.13	-6.4%	311.53	17.0%	187.90	-0.4%	788.56	3.2%
B-7	43.9	55.0	0.61	0.46	1.13	0.22	281.18	-9.0%	317.87	19.4%	189.40	0.4%	788.44	3.2%
B-8	0.6	64.4	0.62	0.54	1.36	0.24	282.42	-8.6%	315.96	18.7%	188.53	-0.1%	786.91	3.0%
B-9	-37.8	69.3	0.47	0.48	1.21	0.26	304.59	-1.4%	289.42	8.7%	188.75	0.0%	782.76	2.5%
B-10	-25.3	64.6	0.55	0.57	1.27	0.24	292.90	-5.2%	300.04	12.7%	188.33	-0.2%	781.27	2.3%
Avg.	-2.31	63.98	0.60	0.56	1.14	0.24	280.67	-9.16	320.66	20.43	188.49	-0.10	789.82	3.40

태를 적용할 경우, 보다 민감한 변화율을 보일 수 있을 것으로 판단된다.

4. Conclusion

종합병원은 쾌적한 실내 환경 유지를 위한 설비기기의 가동 및 높은 기기 사용량, 부서에 따라 24시간 운영되는 스케줄로 인하여 타 용도에 비해 에너지 사용량이 높으므로, 건축 계획 단계에서부터 에너지 절감 방안이 적용될 필요가 있다. 이에 따라 다양한 외피 설계가 시도되는 병동부를 중심으로, 민감도 분석을 통해 사용 용도별 에너지 절감을 위한 주요 외피 설계요소를 도출하였다. 또한 기준모델 대비 에너지 절감 효과를 분석함으로써 상·하위 각각 10개 케이스에 적용된 설계요소에 대한 상세 분석을 수행하였다. 평가는 중부지역, 장단변비 3.69의 [—]형 800병상 규모 병동부에 대해 향, WWR,

SHGC, VT, U_{win}, U_{wall} 등의 설계요소를 대상으로 하였으며, 이에 대한 주요 결과는 다음과 같다.

1) 에너지 해석 결과 난방, 냉방 및 조명 에너지 순서로 총 에너지 대비 38.8%, 36.1%, 24.9% 비율로, 냉·난방 에너지의 비율이 유사하게 나타났다. 또한 사용 용도별 에너지에 대하여 각각 산출한 변동계수는 난방 4.8%, 냉방 8.9%, 조명 0.4%였다. 이를 통해 본 연구에서 설정한 외피 설계요소가 조명 에너지에 미치는 영향은 미비하며, 총 에너지 대비 비율을 고려하였을 때, 냉방 에너지에 큰 영향을 미치는 것으로 분석하였다.

2) 민감도 분석을 통해 도출된 사용 용도별 에너지에 미치는 주요 외피 설계요소와 민감도는 다음과 같다.

- 난방 에너지 : SHGC(-0.705), U_{win}(0.502)
- 냉방 에너지 : SHGC(0.760), WWR(0.543)
- 조명 에너지 : VT(-0.764), WWR(-0.573)
- 총 에너지 : WWR(0.709), SHGC(0.524), U_{win}(0.321)

외벽의 열관류율과 건물의 향은 상대적으로 영향이 미미한 것으로 나타났으며, 창호 유리의 열 및 빛 투과 특성과 관련된 설계요소들이 주요하게 영향을 미치는 것으로 도출되었다. 특히, WWR은 냉방 및 조명 에너지에 대해 민감도가 높을 뿐만 아니라, 외피 설계요소의 영향을 크게 받는 냉방 에너지의 2 순위 영향 요소이므로 총 에너지에 1순위로 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3) 외피 설계요소 중 SHGC의 경우, 난방 및 냉방 에너지에 대한 민감도가 모두 높으나 서로 상충되는 효과를 보이고 있다. 이에 따라 에너지 절감을 위해서는, 적절한 SHGC를 적용할 필요가 있으며, 설계안에 따라 WWR과 U_{win} 이 함께 고려되어야 한다.

4) 또한 본 연구에서 설정한 외피 설계요소들이 조명 에너지요구에 미치는 영향이 다른 용도 에너지에 비해 적고 ($CV=0.4\%$), 향의 민감도 계수가 작게 도출되었으나, 이는 내주부 면적이 큰 이중복도의 [-]형 병동부를 대상으로 한 것이 원인으로 분석되었다. ASHRAE(2016)에서는 자연채광을 유도하도록 병동부를 Finger 형태나 [U] 또는 [O]형태로 계획하거나, 아트리움을 활용할 것을 권장하고 있으며, 국내에서도 이를 적용함으로써 내주부 공용공간의 조명 에너지를 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 결과는 특정 기후 지역 및 건물의 장단변비 조건 하에서 한정적인 설계요소에 대하여 실시한 분석 결과이며, 실제 국내 병동부의 재실밀도, 기기밀도 등 내부발열 조건 및 스케줄이 시뮬레이션에 반영되지 못한 한계를 갖고 있다. 이는 건물에너지 해석 결과에 영향을 미치는 주요 인자들이므로, 국내 종합병원 병동부의 실제 조건을 적용함으로써 정확도를 높이고, 다양한 기후 및 건물 형태를 바탕으로 연구의 폭을 넓힐 필요성이 있다.

Acknowledgements: This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant founded by Korea government (MSIP) (No. 2014R1A2A2A01007405)

References

ASHRAE. (2016). Advanced Energy Design Guide for Large Hospitals - 50% Energy Savings, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.

Chen, X.; Yang, H.; Zhang, W. (2015). A comprehensive sensitivity study of major passive design parameters for the public rental housing development in Hong Kong, *Energy*, 93, pp.1804-1818.

Cho, J.K.; Moon, J.H.; Rhee, K.N.; Kang, H.S. (2015). Energy Consumption Characteristics of Patient Room HVAC Systems for Large Hospital Buildings in Worldwide Climate Zones, *Journal of The Architectural Institute of Korea*, 31(3), pp.171-180.

Choi, C.D.; Kwon, S.J.; Kim, S.S. (2012). Energy Consumptions and

Daylight Illumination levels of a Multi-bedded Patient Room according to the Window Shapes and Shading, *Korea Institute of Healthcare Architecture Journal*, 18(3), pp.29-39.

Choi, Kwangseok; Chai, Choul Gyun; Kwon, SoonJung (2014). A Study on the Architectural Planning Guidelines of the Wards in Central Public Hospitals of the Communities, *Korea Institute of Healthcare Architecture Journal*, 201(1), pp.15-26

Kim, K.A.; Park, J.S.; Yu, K.H.; Moon, H.J. (2015). Sensitivity Analysis of Building Envelope of Non-Dwelling Buildings, *Journal of The Korean Solar Energy Society*, 35(1), pp.53-60.

Kim, Y.J.; Park, C.S.; Kim, I.H. (2012). Sampling Methods and Stochastic Inference in Monte Carlo Building Simulation, *The Architectural Institute of Korea*, 28(6), pp.227-236.

MOLIT. (2015a). 2014 Energy Consumption Survey, Sejong: Ministry of Trade, Industry and Energy.

MOLIT. (2015b). The Building Energy Conservation Code, Sejong: Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Moon, J.H.; Cho, J.K.; Kang, H.S. (2015). Development of an HVAC Design and Energy Evaluation Tool for Healthcare Facilities, *Proceedings of the SAREK 2015 Summer Annual Conference*, pp.306-309.

NREL. (2013). Technical Support Document: Development of the Advanced Energy Design Guide for Large Hospitals-50% Energy Savings, Denver: National Renewable Energy Laboratory. pp.12-63, pp.104-112.

Oh, J.H., Kim, S.S. (2016). A Study on Building Efficiency Policies Improvement Considering Window Design for Occupants Comfort, *Journal of The Architectural Institute of Korea*, 32(11), pp.65-72.

Raji, B.; Tenpierik, M.J.; Dobbela, A.V.D. (2016). An assessment of energy saving solutions for the envelope design of high-rise buildings in temperate climates: A case study in the Netherlands, *Energy and Buildings*, 124, pp.210-221.

Sim, J.H.; Park, C.B.; Yoon, S.H. (2015). An Analysis of Yearly Heating and Cooling Load According to the Plan Type and Orientation in Large Hospital Ward Area, *Journal of The Architectural Institute of Korea*, 17(1), pp.241-248.

Sohn, B.H.; Lee, D.Y.; Min, K.C. (2016). Cooling Performance of Cooling Tower-Assisted Ground-Coupled Heat Pump (GCHP) System Applied in Hospital Building, *Transaction of Korea Society of Geothermal Energy Engineering*, 12(1), pp.7-16.

Tian, W. (2013). A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, pp.411-419.

Yoon, E.J.; Lim, Y.H. (2016). A Study on Green Building Certification Criteria for Healthcare Facilities-Focused on System and Contents for Healthcare in BREEAM, LEED, CASBEE, *Korea Institute of Healthcare Architecture Journal*, 22(3), pp.17-26.

접수 : 2017년 01월 16일
1차 심사완료 : 2017년 02월 08일
게재확정일자 : 2017년 02월 08일
3인 익명 심사 필