

정책보고서 부문  
(대학(원)생)

대상 : 부총리 겸 기획재정부장관상

## 지구 온난화에 따른 미래 건물에너지 변화 예측 및 건축물 설계 정책 제언

- 빅데이터 분석을 기반으로 한 머신러닝을 통하여 -

경희대학교 기계공학과 석사과정 **용 석 길**

경희대학교 기계공학과 학사과정 **송 하 진**



## [요약]

대표적인 온실가스(Greenhouse gases; GHGs)인 이산화탄소 농도 증가로 인한 기후변화는 21세기 전 지구적으로 관심을 갖고 있는 문제 중 하나이다. 이산화탄소는 대부분 화석연료의 연소를 통한 에너지 생산 과정에서 발생하는데, 미국 에너지 정보청에 따르면 미국의 총 에너지 사용량 중 건물에서 사용하는 에너지 비율이 전체의 42%를 차지하는 것으로 나타났다. 기후변화가 진행될수록 건물에서 배출하는 이산화탄소의 양은 지속적으로 증가할 것이고, 따라서 건물에서 소비하는 에너지양상을 예측하고 이를 절감할 대책을 마련해야 한다.

본 연구는 온실기체 농도에 따른 미래 지구전망 정보인 RCP시나리오를 활용하여 각 시나리오별 미래 건물의 냉난방 부하를 예측하고, 건물 설계 인자의 영향을 파악하여 미래 건물에너지 부하가 최소가 될 수 있는 정책 제언 및 가이드라인을 제시하고자 하였다. 조사 지역은 중부와 남부지역을 대표하는 인천, 울산으로 선정하였으며 연구 진행 과정은 다음의 두 단계로 나뉜다.

첫째, IPCC(기후변화에 대한 정부 간 협의체)가 제시한 RCP시나리오를 기반으로 미래 기후 데이터를 제작한 뒤 이를 본 연구 그룹이 제작한 통합 건물 에너지 부하 예측 모델인 ICRM(Integrated Climate Regression Model)에 적용하여 시나리오별 2100년의 건물 에너지 부하를 도출하였다.

둘째, 미래 기후에서의 건물 에너지 부하 예측 값을 바탕으로 부하에 대한 건물 설계 인자의 영향을 정량적으로 분석하였다. 이후 유전 알고리즘(Nsga2; Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)을 이용하여 냉난방 에너지 부하가 최소가 되는 건물 설계 인자의 최적화 과정을 진행하였다.

본 연구 결과를 바탕으로 기후변화 문제에 선제적으로 대응할 수 있는 실질적 방안을 제시하기 위하여 현재 대한민국에서 실시하고 있는 건축 법규를 조사하였다. 법규 조사 대상은 건물의 냉난방 부하에 대한 영향이 큰 세 가지 설계 인자 SHGC(일사열 취득계수), WWR(창 면적비), WDI(창문 단열)로 구성하였다. 본 연구와 현행 건축 법규를 비교하는 과정을 통하여 미래 건축 법규에 대한 가이드라인을 두 가지로 제시하였다. 첫째, SHGC는 현행 기준인 0.4보다 감소한 0.2수준이 되어야 한다. 둘째, WWR은 현행 기준인 40%보다 감소한 25%가 되어야 한다.

본 연구를 참고하여 미래 에너지 문제를 해결할 방안을 강구한다면 국내 에너지 소비량을 효과적으로 절감하여 미래 에너지산업에 큰 도움이 될 것이다

## I 서론

### 1. 기후변화에 대한 배경

기후변화 문제는 21세기에 들어서며 전 지구적으로 가장 중요시되고 있는 사안이다.<sup>1)</sup> 기후변화의 가장 큰 원인은 대표적인 온실가스(Greenhouse gases; GHGs)인 이산화탄소 농도의 증가인데, 이 이산화탄소는 대부분 화석연료의 연소를 통한 에너지 생산 과정에서 발생한다.<sup>2)</sup> 미국 에너지 정보청(U.S Energy Information Administration; EIA)의 2015년 통계량에 따르면 미국의 총 에너지 사용량 중 건물에서 사용하는 에너지의 비율이 주거용 건물에서 23%, 상업용 건물에서 19%로 총 사용량의 42%를 차지하였으며, 미국의 총 이산화탄소 배출량 기준으로도 건물에서 발생하는 이산화탄소 배출량이 전체의 39%로 나타났다.<sup>3)</sup> 기후변화가 진행될수록 건물에서 배출하는 이산화탄소의 양은 지속적으로 증가할 것이며 이는 결국 기후변화를 가속화시키는 원인이 될 것이다. 따라서 기후변화로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 미래 건물에서 소비하는 에너지의 양상을 예측하고 이를 절감할 수 있는 대책을 마련해야 한다.

기후변화가 초래한 지구생태계의 이상 징후에 대한 연구는 활발히 진행 중이나, 대부분 미래 기후를 예측하는 것에 초점이 맞추어져있다. 그 예로 미래 특정 지역의 월 단위 외기온도, 일사량 등의 데이터를 얻을 수 있는 RCA4모델이 있으며 최근에는 이 모델을 개선하여 시간 단위의 날씨 데이터를 예측하는 연구도 진행되었다.<sup>4)</sup> 이러한 예측 기후 데이터를 활용하면 미래 건물에서 소비하는 에너지의 양상을 파악할 수 있다. Dodoo와 Gustavsson는 스웨덴 지역의 3가지 건물에 RCP4.5, 8.5의 두 가지 시나리오를 적용해 미래의 냉난방 형태에 대한 연구를 진행하였다.<sup>5)</sup> Amato 외 3인은

- 
- 1) 에너지경제연구원, 에너지부문의 기후변화대응과 연계한 녹색성장 전략연구, 기본연구보고서 10-27, 2010년
  - 2) 에너지경제연구원, 에너지부문의 기후변화대응과 연계한 녹색성장 전략연구, 기본연구보고서 11-23, 2011년
  - 3) U.S Energy Information Administration, Monthly Energy Review, 2016년
  - 4) Belcher SE, Hacker JN, Powell DS. Constructing design weather data for future climates. Build Serv Eng Res Technol 2005;26(1):4961.
  - 5) Dodoo, A., Gustavsson, L., 2016. Energy use and overheating risk of Swedish multi-storey residential buildings under different climate scenarios. Energy 97, 534-548.

기후데이터의 변화와 그에 따른 전기, 보일러 사용의 변화로 인한 건물에너지 소비량 간의 상관관계를 파악하는 연구를 진행하였다.<sup>6)</sup>

그러나 두 연구 모두 논문에서 제시된 건물에 한정지어 냉난방 부하를 계산하였기 때문에 다른 형태, 혹은 다른 기후대 지역의 건물에서 사용되는 부하를 계산하려면 추가적인 시뮬레이션을 실행하여야 한다. 또한 이를 활용해 냉난방 부하에 영향을 끼치는 주요 건물 설계 인자를 분석하고, 최적화 알고리즘을 통하여 실질적으로 건물에 에너지를 절감할 수 있는 해결책을 제시하는 내용은 포함되지 않았다.

## 2. 연구 목표

본 연구는 RCP시나리오에 따른 2100년의 기후 데이터를 이용해 각 시나리오별 미래 건물의 냉난방 부하를 예측하고, 나아가 냉난방 부하에 영향을 미치는 건물 설계 인자를 파악하여 건물에너지 사용량을 줄일 수 있는 최적의 건물 설계안을 제시한다. 이때 각 처리조건에서의 건물 냉난방 부하 계산은 본 연구 그룹이 선행연구로 제작한 ICRM(Integrated Climate Regression Model)을 이용하였다.

ICRM은 실험계획법의 다량 케이스를 바탕으로 한 미국의 8대 기후 대표 도시의 결과를 빅데이터 분석법인 머신러닝 기법을 이용하여 모델에 학습시켜 원하는 건물 설계 조건과 그 지역의 기후 데이터를 입력하면 해당지역에서 자신이 설정한 설계 조건을 가진 건물의 냉난방 부하를 산출할 수 있는 회귀모델이다. ICRM은 8대 기후대의 기후 데이터를 모두 포함하고 있어 별도의 건물에너지 시뮬레이션을 수행하지 않고도 지구 전 지역에서의 냉난방 부하를 상대적으로 신속하게 산출할 수 있다는 장점이 있다.

이후 연구에서 도출한 최적 설계안을 활용하여 기후변화 문제에 선제적으로 대응할 수 있는 방안을 서술한다. 첫째, 현재 시행중인 건축 설계에 관한 법규를 살펴보고 현 정책이 미래까지 지속될 경우 미래 건물에너지 사용에 어떠한 문제가 발생하는지 분석한다. 둘째, 분석한 내용을 토대로 현재의 법규가 향후 어떠한 방식으로 수정되어야 하는지 고찰하여, 최종적으로 본 연구가 미래의 기후변화에 대응하여 건물에너지 감소 정책을 수립하는 가이드라인이 되고자 한다.

6) Amato AD, Ruth M, Kirshen P, Horwitz J. Regional energy demand responses to climate change: methodology and application to the commonwealth of Massachusetts. Clim Change 2005; 71:175-201.

### 3. 연구의 구성

본 연구의 진행 순서는 다음과 같다.

Ⅱ. 이론적 배경에서는 본 연구의 미래 기후 데이터를 제작하는데 활용한 RCP시나리오와 건물에너지 냉난방 부하를 계산하는데 사용한 ICRM을 정의한다.

Ⅲ. 미래 건물에너지 냉난방 부하 분석에서는 미래 기후 데이터를 냉난방 부하 예측 모델에 적용하여 미래 건물의 냉난방 부하를 계산하고, 해당 부하에 영향을 주는 건물 설계 인자를 분석한다. 분석 결과를 토대로 최적화 과정을 통해 냉난방 부하 에너지가 최소가 되는 건물 설계 인자의 처리조건을 결정한다.

Ⅳ. 미래 건축 설계 법규에 대한 가이드라인에서는 Ⅲ의 분석 결과를 토대로 향후 건물에너지 감소 정책을 수립하기 위한 가이드라인을 제시한다. 이를 위해 냉난방 부하에 영향을 주는 설계 인자에 관하여 현재 시행중인 건축 설계 법규를 조사한 후 본 연구의 결과와 비교하여 미래의 정책 수정 방향을 제시한다.

## Ⅱ 이론적 배경

### 1. RCP시나리오 정의

RCP시나리오(Representative Concentration Pathways Scenario)는 IPCC(기후변화에 대한 정부간 협의체)가 2013년 5차 평가보고서에서 발표한 온실기체 농도에 따른 미래 지구기후 전망 정보이다. RCP시나리오에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 결정하는데, 온실가스 농도값을 설정한 후 기후변화 시나리오를 산출하여 그 결과의 대책으로 온실가스 배출 저감 정책을 결정한다.<sup>7)</sup>

RCP시나리오는 8.5, 6.0, 4.5, 2.6의 4종류로 구성되며 이를 <표 1>에 정리하였다. 이때 시나리오의 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스로 인해 추가적으로 지구에 흡수되는 에너지의 양을 의미하며 단위는  $W/m^2$ 이다. 예시로 RCP8.5의 경우  $8.5 W/m^2$ 가 추가적으로 흡수된다는 뜻이다. 지상에 도달하는 태양복사가 약  $238 W/m^2$ 이므로 각 시나리오별 복사강제력은 입사 복사량의 약 3.6%, 2.5%, 1.9%, 1.1%이다. [그림

7) 국가기후변화적응센터, 기후변화 신시나리오(RCP) 소개, 2013년

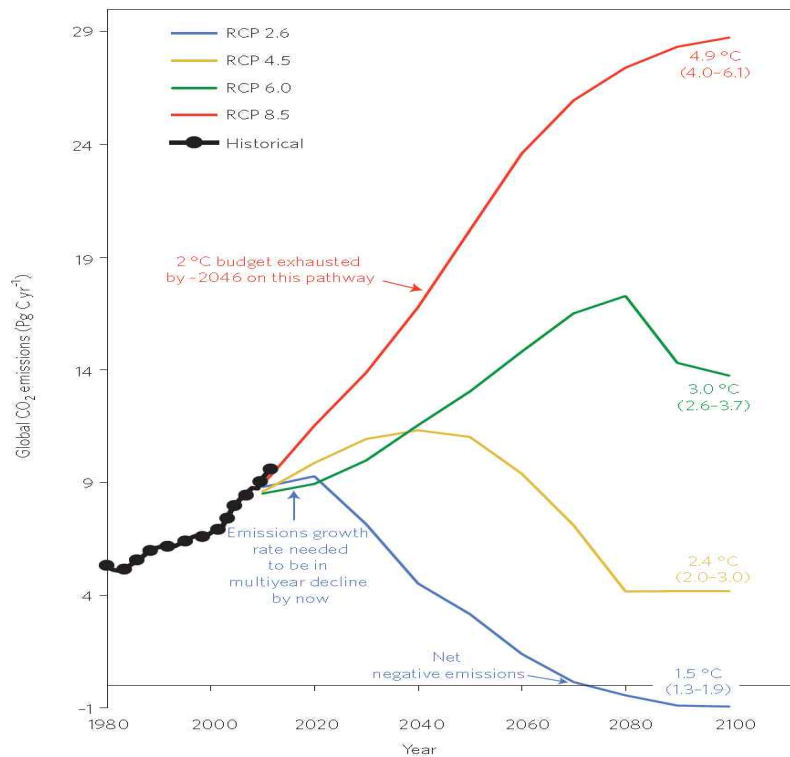
1]은 RCP시나리오별 시간에 따른 온실가스 농도 변화를 나타낸 그래프이다.

<표 1> RCP 시나리오의 정의

구분	특징	특징
RCP 2.6	인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우 (실현 불가능)	420ppm
RCP 4.5	온실가스 저감 정책이 상당히 실행되는 경우	540ppm
RCP 6.0	온실가스 저감 정책이 어느정도 실행되는 경우	670ppm
RCP 8.5	현재 추세(저감 없이)로 온실가스가 배출되는 경우 (BAU 시나리오)	940ppm

자료: 국가기후변화적응센터 (주소 : [http://ccas.kei.re.kr/climate\\_change/menu3\\_5\\_04.do](http://ccas.kei.re.kr/climate_change/menu3_5_04.do))

[그림 1] 과거, RCP 시나리오별 이산화탄소 발생 추세 예측<sup>8)</sup>



자료: Sanford T, 2014, “The climate policy narrative for a dangerously warming world”

8) Sanford T, Frumhoff PC, Luers A, Gullette J. The climate policy narrative for a dangerously warming world. Nat Clim Change 2014; 4:164-6.

2. ICRM: 건물 에너지 냉난방 부하 예측 모델

가. ICRM의 정의와 설계과정

ICRM(Integrated Climate Regression Model)은 본 연구 그룹이 제작한, 원하는 지역의 기후 데이터와 건물 설계 조건을 입력하면 해당 조건에서의 건물의 냉난방 부하를 산출하는 회귀 모델(Regression model)이다. 따라서 이 모델을 이용하면 별도의 건물 에너지 시뮬레이션을 수행하지 않고도 신속하게 건물의 냉난방 부하를 계산할 수 있다.

본 연구 그룹은 ICRM이 한 기후대에 국한되지 않고, 인간이 생활하고 있는 전 기후대에서 건물냉난방 부하를 예측하게 하고자 하였다. 이를 위해 표준 8대 기후대를 가진 미국 대표 도시를 선정하였고 각 지역의 날씨 특성은 다음 <표 2>와 같다.

<표 2> ICRM에 학습된 미국의 8대 기후 대표도시 정보 및 날씨 특성

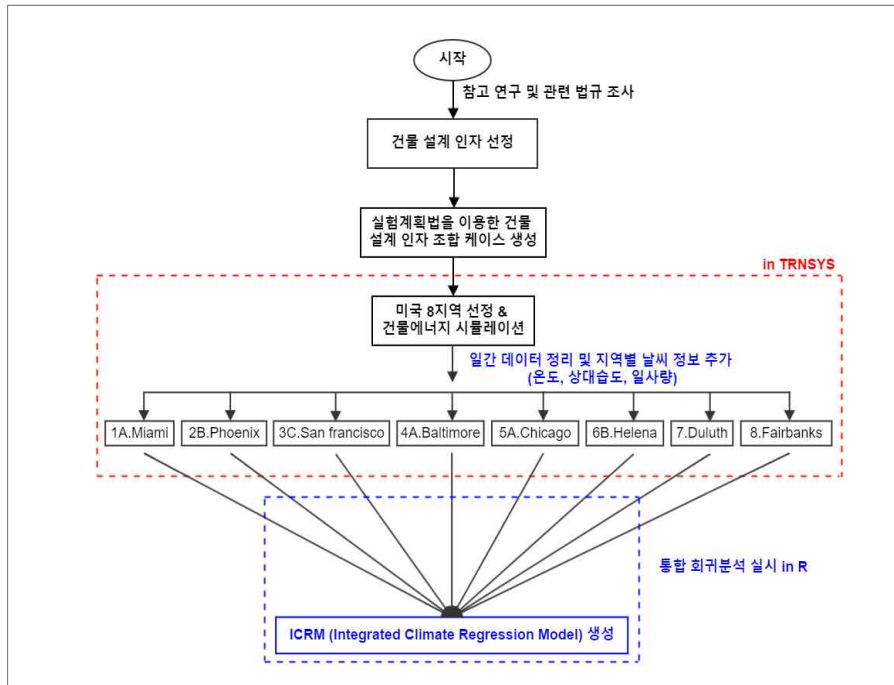
Climate Zone	City	Climate feature
1A	Miami	Hot, humid
2B	Phoenix	Hot, dry
3C	San Francisco	Marine
4A	Baltimore	Mild, humid
5A	Chicago	Cold, humid
6B	Helena	Cold, dry
7	Duluth	Very cold, dry
8	Fairbanks	Extremely cold, dry

자료: ASHRAE, Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings,2011

대상 8지역에서 건물 설계 인자에 따른 연간 냉난방 부하를 동적 건물 에너지 시뮬레이션 TRNSYS를 이용하여 계산하였다. 이후 이를 일간 데이터로 세분화 한 뒤 8개 지역의 데이터를 모두 총합하여 최종적인 통합 회귀 모델 ICRM을 도출하였다. ICRM의 전반적인 설계 과정을 [그림 2]에 나타냈다.



[그림 2] ICRM(Integrated Climate Regression Model) 제작 연구 흐름도



건물의 냉난방 부하에 영향을 줄 건물 설계인자는 장단변비(AR, unit:—), 바닥면적(FA, unit: $m^2$ ), 천정고 높이(CH, unit: $m$ ), 플래넘 높이(PH, unit: $m$ ), 창문 단열(WDI, unit: $W/m^2K$ ), 일사열 취득계수(SHGC, unit:—), 창 면적비(WWR, unit:%), 벽 단열(WI, unit: $W/m^2K$ ), 침입공기(ACR, unit:—), 방향(OR, unit:—)로 총 10가지를 선정하였다. <표 3>은 인자별 수준을 나타낸 표이며, 본 연구에서는 이 수준을 기반으로 해상도 V (Resolution V)인  $\frac{1}{8}$ 부분실험을 적용해 총 128개의 건물 처리 조건을 구성하였다. 그리고 8개의 대표도시마다 각 처리조건에 따른 냉난방 부하를 동적 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS를 이용하여 계산하였다.

&lt;표 3&gt; 건물 설계 인자 종류 및 수준

	AR	FA	CH	PH	WDI	SHGC	WWR	WI	ACR	OR
Level (-)	1	1000	2.4	0.8	0.75	0.2	25	0.15	0.1	South
Level (+)	2	2000	2.9	1.2	2.84	0.7	52	0.365	0.3	West

이후 해당 도시의 기후데이터 중 일간 온도, 상대습도, 일사량 3가지를 추가 설계 인자로 고려하기 위하여, 앞서 설계한 10개 인자의 수준 조합인 하나의 처리 조건을 365번 반복 나열한 뒤 각 행에 3개의 일간 기후 데이터를 인자로 추가하였다. 이때 하나의 처리조건으로 계산된 냉난방 부하의 경우 1년, 즉 365일간의 냉난방 부하의 총 합이므로 이를 다시 하루(1일) 단위로 세분화하여 각 365개의 처리 조건 별 결과에 대입하였다.

결과적으로 건물의 냉난방 부하에 영향을 주는 인자는 총 13개(10개의 건물 설계 인자와 3개의 기후 관련 인자)이며, 한 도시 당  $128 \times 365 = 46,720$ 번의 처리 조건이 만들어지고 8개 지역의 데이터를 모두 총합하면 ICRM을 제작하는데 사용된 처리 조건은 총  $46,720 \times 8 = 373,760$ 개가 된다. 본 연구 그룹은 건물 에너지 부하의 전체 데이터를 빅데이터 분석 기법 중 하나인 머신러닝을 통하여 학습시킨 모델을 ICRM이라 정의하였다.

#### 나. ICRM의 구성

ICRM은 건물의 공조 특성에 따라 3개 부분으로 나뉘어 각각 월요일, 화요일~금요일, 토요일의 냉난방 부하를 예측한다. 월요일의 부하는 일요일의 공조가 없기 때문에 날씨에 따라 건물의 축열, 발열 영향으로 다른 요일과의 경향성이 다르고, 토요일의 부하는 평일 스케줄과 다르고, 화요일~금요일은 일반적인 평일 조건을 따르므로 전체 요일을 3개로 구분하여 분석하였다.

회귀식인 ICRM의 정확도를 판별하는 기준으로는 R-squared 수치와 Regression plot을 이용했다. R-squared는 총 변동(SST)중 회귀식을 통해 설명된 부분(SSR)이 차지하는 양을 수치적으로 나타낸 값으로 식 (1)과 같이 나타난다. R-squared가 1에 가까울수록 해당 모델이 종속 변수를 정확하게 예측함을 의미한다.

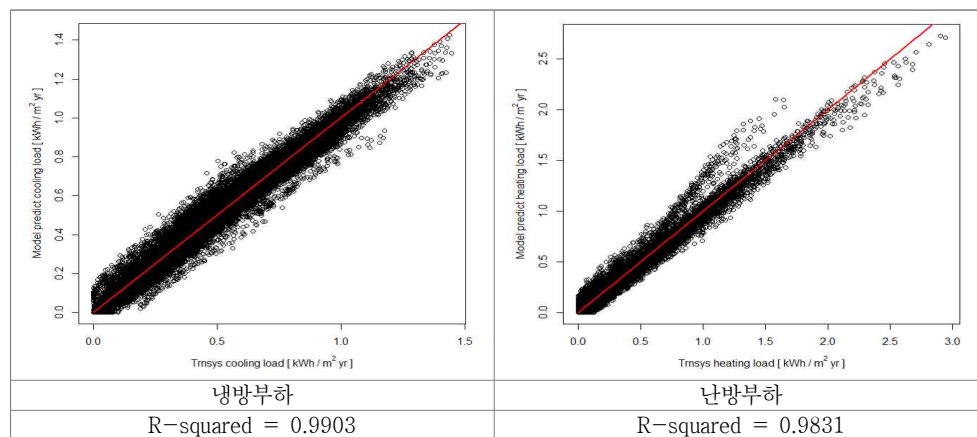
$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \dots\dots\dots \text{식 (1)}$$

Regression plot은 실제 TRNSYS 시뮬레이션 값을 x축에, 회귀식을 통한 예측값을 y축에 나타낸 그래프로 종속변수와 해당 모델 간의 선형 관계를 시각적으로 판별할 수 있게 한다.

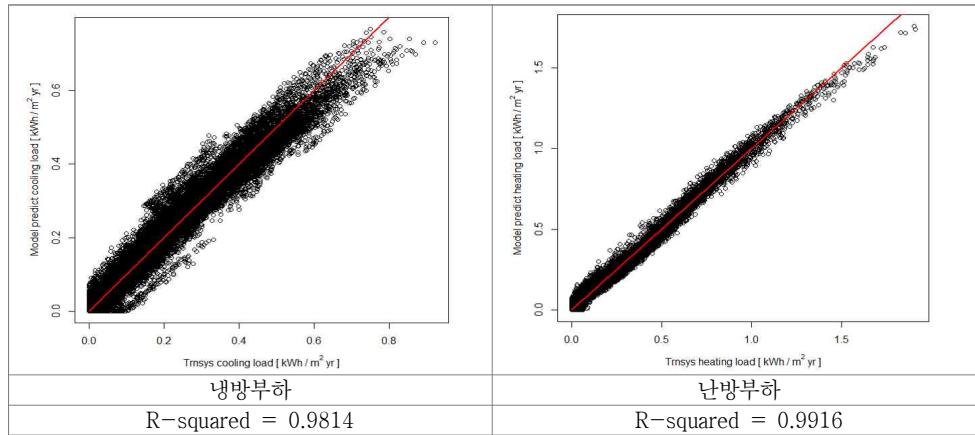
[그림 3], [그림 4], [그림 5]는 각각 월요일, 토요일, 화~금요일의 냉방 난방부하에 대한 Regression plot와 R-squared를 표기한 결과이다. 각 회귀모델에 대한 R-squared 판별 결과, 대부분 적합도가 98% 수준으로 해당 모델을 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 3개의 회귀식에 대한 Regression plot역시 대부분 선형에 가까워 해당 모델에 대한 예측 정확도를 시각적으로 판단할 수 있다. 월요일의 부하는 일요일에 공조가 없기 때문에 일요일에 침입, 방출된 열량에 따라 부하량이 결정되므로 부분적인 이상치가 발견되었지만 크게 영향을 미치지 않았다.

결론적으로 ICRM에 대한 신뢰성을 통계적 방법으로 확인하였고, 본 연구에서는 해당 ICRM을 이용하여 미래 기후의 건물 냉난방 부하를 예측하고자 한다.

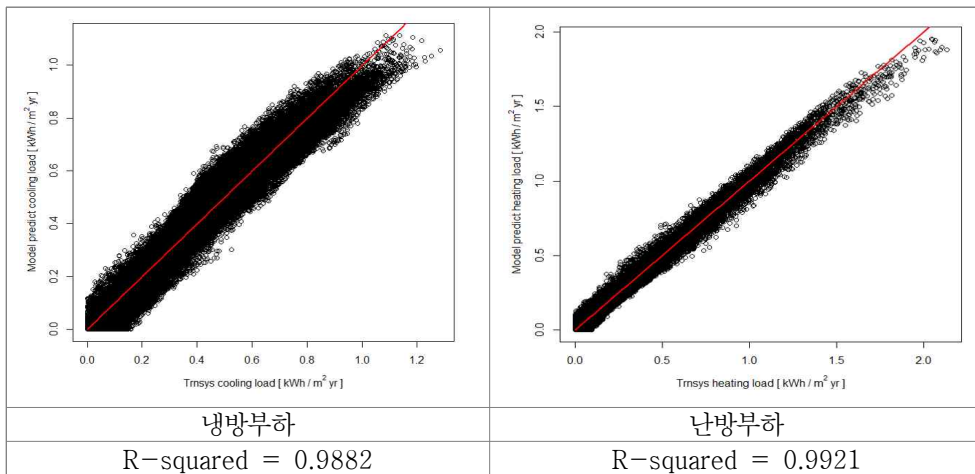
[그림 3] ICRM 구성 일간 데이터의 Regression plot(월요일)



[그림 4] ICRM 구성 일간 데이터의 Regression plot(토요일)



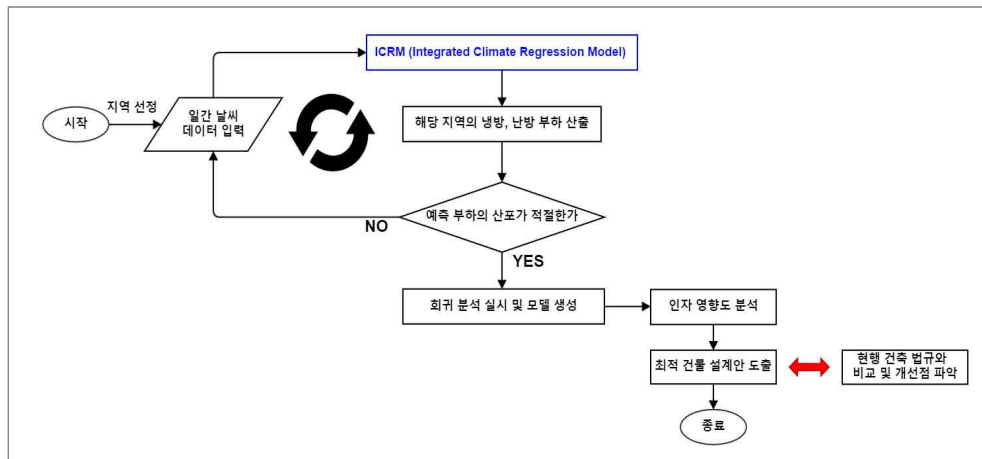
[그림 5] ICRM 구성 일간 데이터의 Regression plot(화~금요일)



### III 미래 건물에너지 냉난방 부하 분석

#### 1. 미래의 건물에너지 냉난방 부하 예측 과정

[그림 6] ICRM을 통한 미래 건물에너지 예측 연구 흐름도



본 연구에서는 RCP시나리오를 기반으로 하여 현재 기후 데이터를 시나리오에 따른 미래 기후 데이터로 재생산한 뒤, 이를 활용해 100년 후의 건물 에너지 부하량을 파악하고자 한다. 도출한 결과를 활용해 100년 후의 미래 건물에 대한 최적 설계 인자 처리조건을 찾고, 이를 현행 건축 법규와 비교하여 최종적으로 미래의 건물에너지 부하를 최소화하는 건축 가이드라인을 제공하고자 한다.

본 연구의 흐름도를 [그림 6]에 나타내었다. 첫째, 건물의 냉난방 부하를 알고자 하는 지역 및 시나리오를 정하고 해당 일간 날씨 데이터(온도, 상대습도, 일사량)를 ICRM(Integrated Climate Regression Model)에 입력한다.

둘째, ICRM에서 산출되는 해당 조건의 냉난방 부하의 산포가 적절한지 연구자가 결정한 후, 예상과 멀어진다고 파악하면 입력하는 날씨 데이터를 재확인하여 모델에 적용한다. 셋째, ICRM에 의해 예측된 산포가 적절하다면 이에 대한 회귀분석을 실시하여 인자의 영향도 분석 및 최적 건물 설계안을 도출한다. 마지막으로 산출된 최적화 결과를 현행 건축 법규와 비교하고 개선점을 파악한다.

## 2. RCP시나리오별 기후 데이터 제작 과정

ICRM을 활용하면 대한민국 전 지역에 대한 냉난방 부하 예측이 가능하나 본 연구에서는 중부지역을 대표하는 인천, 남부지역을 대표하는 울산 지역을 선정하여 연구를 진행하였다.

두 지역의 Energy Plus Weather File(\*.EPW) 기후 데이터를 기반으로 RCP시나리오별 2100년의 일간 기후 데이터를 제작하였다. ICRM에서 고려하는 기후 관련 인자는 일간 온도, 상대습도, 일사량인데 이중 건물의 냉난방 부하에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 일간온도이다. 따라서 본 연구에서는 2100년 대표 지역의 기후는 상대습도, 일사량은 현재와 동일하며 가장 영향력 있는 일간 온도만 시나리오에 따라 상승한다고 가정하였다.

IPCC는 RCP시나리오의 내용에 따라 각 시나리오별 21세기 후반(2081-2100년) 지구 표면의 온도 변화를 제시하였다. <표 4>는 각 시나리오별 지구 표면 온도 변화를 정리한 표이다. 본 연구는 기후변화로 인한 미래 상황 예측 중 최악의 경우를 대비하고자 각 시나리오별 온도 증가량을 신뢰구간의 최댓값으로 적용하였다. 따라서 2100년의 일간 온도는 시나리오별 RCP2.6은 1.7℃, RCP4.5는 2.6℃, RCP6.0은 3.1℃, RCP8.5는 4.8℃가 상승하였다고 가정한다.

<표 4> RCP 시나리오별 지구 표면 온도 변화

구분	표면 온도 변화
RCP2.6	0.3oC ~ 1.7oC
RCP4.5	1.1oC ~ 2.6oC
RCP6.0	1.4oC ~ 3.1oC
RCP8.5	2.6oC ~ 4.8oC

2100년 외기온도가 상승하면 외기온도에 따라 결정되는 HDD(Heating Degree Day)와 CDD(Cooling Degree Day)값도 변화하기 때문에 냉난방 기간이 현재와 다른 양상을 보이게 될 것이다. 따라서 시나리오별 HDD, CDD를 계산하여 적절한 냉난방 기간을 설정해 주어야 한다. <표 5>는 두 지역에서 현재와 각 시나리오에 따른 미래의 여름철 냉방기간을 정리한 표이다. 인천, 울산 지역 모두 전 시나리오에서 현재보다 냉방기간이 길어짐을 알 수 있다.

<표 5> RCP 시나리오에 따른 여름철 냉방기간 (인천, 울산 지역)

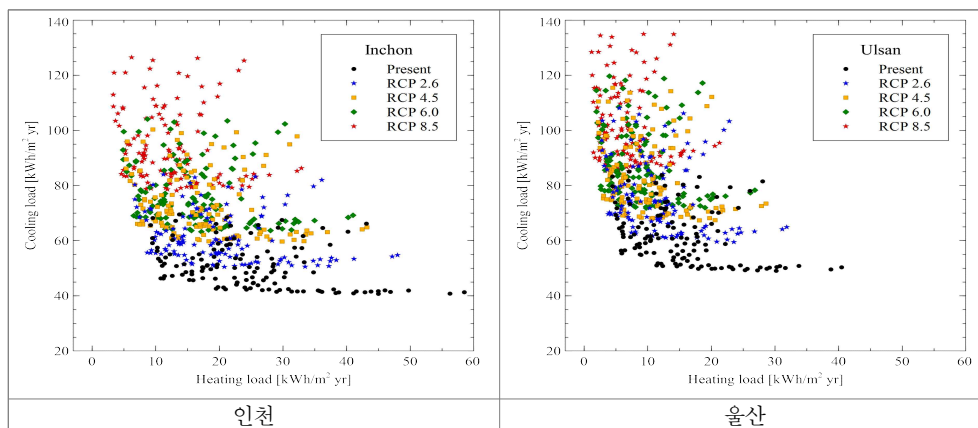
	인천	울산
기준(현재)	5 ~ 9월	5 ~ 10월
RCP2.6	5 ~ 10월	4 ~ 10월
RCP4.5	5 ~ 10월	4 ~ 10월
RCP6.0	5 ~ 10월	4 ~ 10월
RCP8.5	4 ~ 10월	4 ~ 10월

### 3. 미래 냉난방 부하 예측 결과

[그림 7]은 인천, 울산 지역에서 계산한 기준(현재) 건물과 각 시나리오별 온도 증가에 따른 미래 건물의 128개의 처리 조건의 냉난방 부하 데이터 산포를 나타낸 그래프이다. 시나리오의 외기 온도가 상승할수록 (RCP2.6=1.7℃ ↑, RCP4.5=2.6℃ ↑, RCP6.0=3.1℃ ↑, RCP8.5=4.8℃ ↑) 미래 건물은 냉방부하는 증가하고, 난방부하는 감소하는 형태를 확인하였다.

따라서 본 연구에서 사용하는 ICRM이 온도 변화량에 따른 냉난방 부하 변화를 적절하게 예측하고 있다고 판단하고 연구를 진행하였다.

[그림 7] 인천, 울산지역의 냉난방 부하에 대한 예측 데이터 산포



### 4. 시나리오 회귀분석

128개의 데이터를 이용하여 RCP시나리오별 연간 냉난방 부하를 예측하는 회귀 모

텔을 만들었다. <표 6>은 인천 지역의 RCP시나리오별 냉, 난방 부하의 회귀 모델의 정확도를 정리한 표이고 <표 7>은 같은 방법으로 울산 지역의 회귀 모델의 정확도를 정리한 표이다. 16개 회귀식(각 지역에서, 각 시나리오별 냉, 난방 부하에 대한 회귀식) 모두 정확도가 99% 이상임을 알 수 있다.

<표 6> 인천 지역 RCP 회귀 모델 R-squared

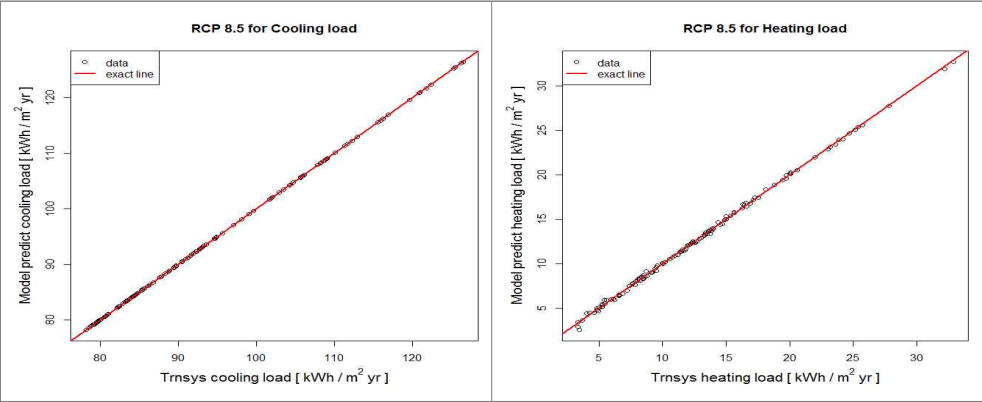
	Cooling load	Heating load
RCP2.6	1	0.9992
RCP4.5	1	0.9995
RCP6.0	1	0.9993
RCP8.5	1	0.9991

<표 7> 울산 지역 RCP 회귀 모델 R-squared

	Cooling load	Heating load
RCP2.6	1	0.9990
RCP4.5	1	0.9984
RCP6.0	1	0.9980
RCP8.5	1	0.9957

[그림 8]은 Regression plot의 예로써 인천지역의 RCP8.5시나리오에서의 냉난방 부하를 계산한 데이터와 회귀모델을 적용한 예측값을 그래프 상에 비교한 것이다. 데이터의 분포가 거의 선형에 가까워 회귀 모델이 데이터를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

[그림 8] 인천지역 RCP8.5 시나리오에 따른 냉난방 부하 회귀분석 그래프





각 시나리오별 미래의 건물에너지 냉난방 부하에 대한 회귀식을 토대로 부하에 영향을 주는 건물 설계 인자의 영향을 평가했다.

#### 가. 건물 설계 인자 분석 평가 기준

[그림 9], [그림 10]은 인천 지역을 대상으로 한 인자의 수준이 증가함에 따른 냉방, 난방부하의 증감 형태 표현한 Barplot이고 [그림 11], [그림 12]는 같은 방법으로 울산 지역을 분석한 그래프이다. Barplot에 표현한 Impact 점수는 식 (2)을 이용하였으며, 이를 활용하여 해당 건물 설계 인자가 부하에 미치는 절대적인 영향을 판단할 수 있다.

$$Impact_{(parameter\ j)} = \Delta load_{(parameter\ j)} \dots\dots\dots \text{식 (2)}$$

$$\Delta load_{(parameter\ j)} = (Cooling\ Heatingload)_{parameter\ jload = +1} - (Cooling\ Heatingload)_{parameter\ jload = -1}$$

#### 나. 건물 설계 인자 분석(인천, 울산 지역)

##### 1) 냉방부하

본 연구에서는 ICRM을 이용해 RCP시나리오에 따른 미래 건물의 냉난방 부하를 산출하였고, 식 (2)을 이용해 건물 설계 인자들의 영향을 정량적으로 파악할 수 있는 Barplot을 제작하였다.

[그림 9], [그림 11]의 냉방부하 분석 결과 인천 지역과 울산 지역 모두 시나리오가 증가함에 따라 냉방부하의 절대적인 크기가 증가하는 형태를 보였다. 인자 분석 결과 Impact 점수가 가장 높은 SHGC(일사열 취득계수)가 가장 영향력 높은 인자로 판단되었고, WWR(창 면적비)가 두 번째로 중요한 인자로 평가되었다. 또한 SHGC와 WWR 인자 모두 수준이 증가할수록 냉방부하가 증가하였다.

일사량을 결정짓는 SHGC의 경우 시나리오에 따라 외기 온도 조건만 변화시켰기 때문에 인자 영향력의 변화가 없어야 하지만, Barplot은 절대적인 냉방 부하량을 표현하고 있기 때문에 시나리오별 냉방 부하량의 절댓값의 증가로 그 영향력이 상승하는 것으로 판단된다.

창문의 열전도도를 나타내는 WDI(창문 단열)의 경우, 본 시뮬레이션 대상 모델이 전자기기와 재실자 등에 의해 내부 발열이 큰 사무용 오피스 건물에 속하므로 해당

인자가 증가할수록 외기와 열 교환이 활발히 일어나 냉방부하가 감소한다. 이때 시나리오가 상승할수록 외기 온도가 증가하여 외부와의 열교환이 활발히 일어나지 못해 WDI를 통한 냉방부하 절감량이 감소함을 Barplot을 통해 확인할 수 있다.

ACR(침입공기)의 경우 기준 건물의 경우 외기의 온도가 상대적으로 시원하여 침입공기가 많을수록 냉방부하가 감소하는 모습을 보이지만, 인천과 울산 지역 모두 RCP8.5(온도 증가량 4.8℃)인 경우에는 외기 온도가 높아 오히려 ACR 수준이 증가함에 따라 냉방부하가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

나머지 초기 건물 설계 인자들도 시나리오에 따른 온도 증가량에 비례하여 영향도가 변하는 것을 확인하였다.

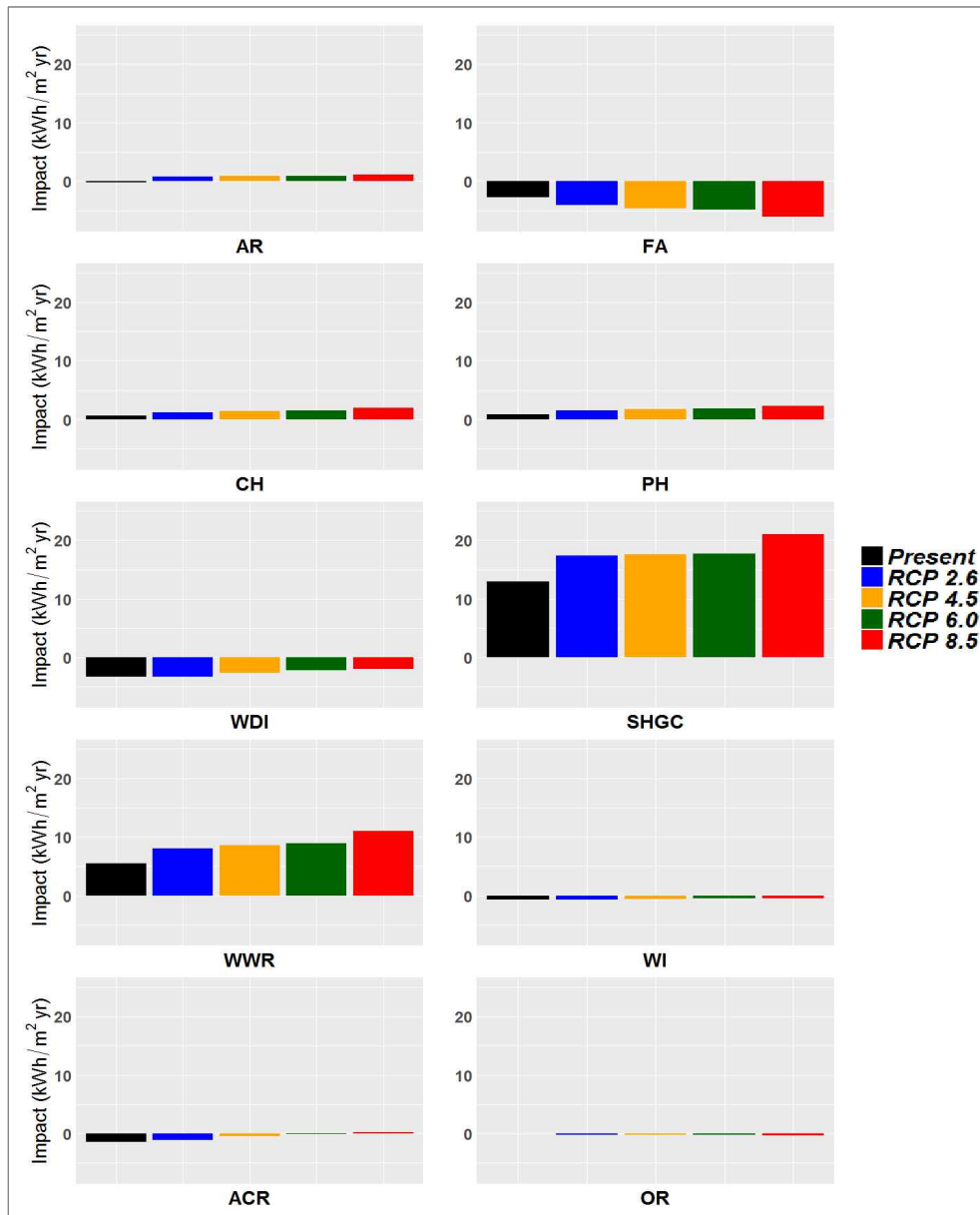
## 2) 난방부하

[그림 10], [그림 12]의 난방 부하에 대한 인자 분석 결과 WDI(창문 단열)가 난방부하에 가장 큰 영향을 미치며, 그 뒤로 ACR(침입공기) 및 SHGC(일사열 취득계수)가 영향을 주는 것으로 평가되었다.

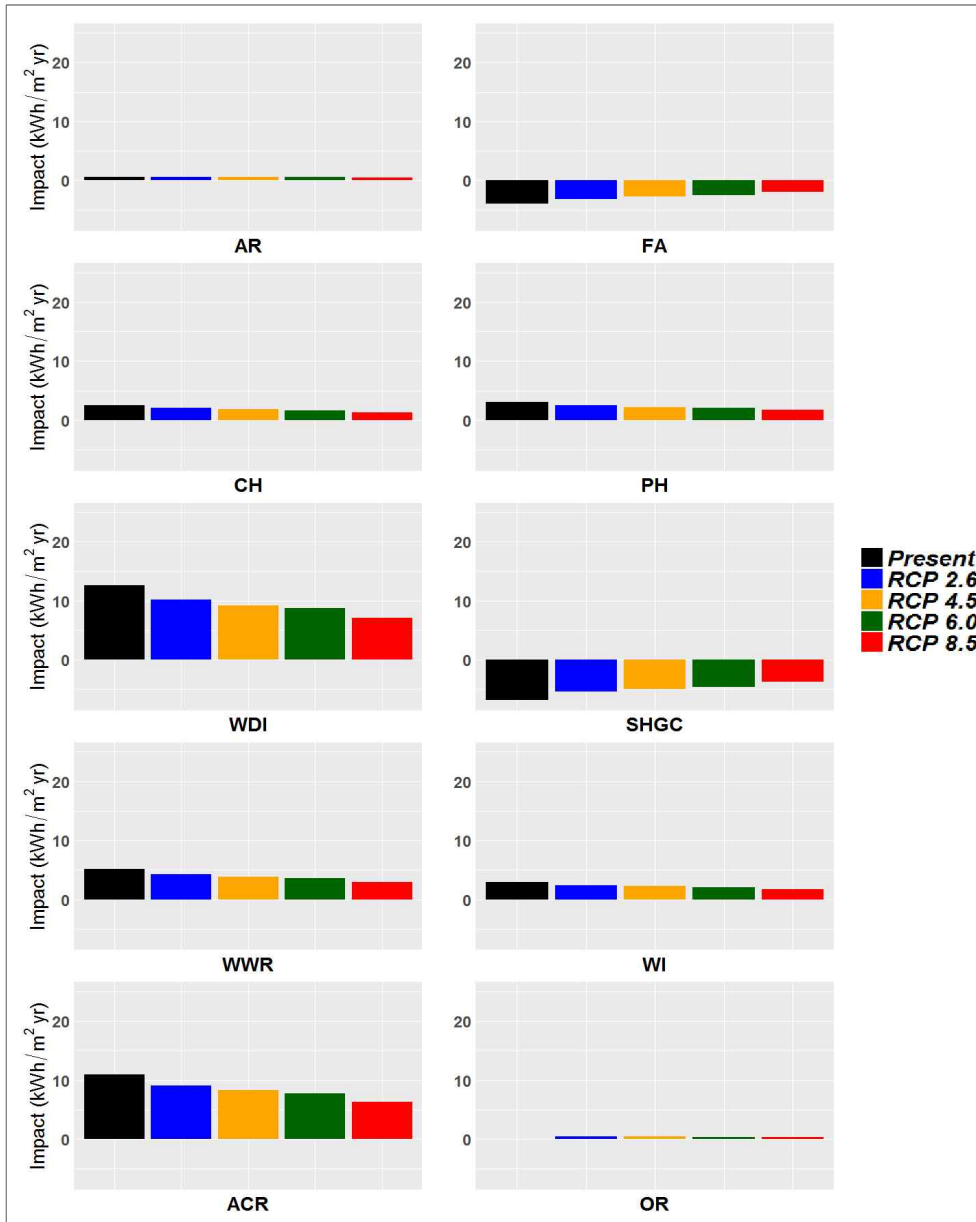
WDI 인자는 난방 부하 분석과 같은 방법론을 적용하여 RCP시나리오에 따른 외기 온도가 상승함에 따라 인자 중요도가 낮아짐을 알 수 있다. ACR(침입공기) 또한 WDI 인자와 같은 방법으로 분석할 수 있다.

SHGC의 경우 냉방부하와 같은 방법으로 분석하였을 때 시나리오가 증가함에 따라 난방 부하의 절대량이 감소하므로 그 영향력이 감소한다고 할 수 있다.

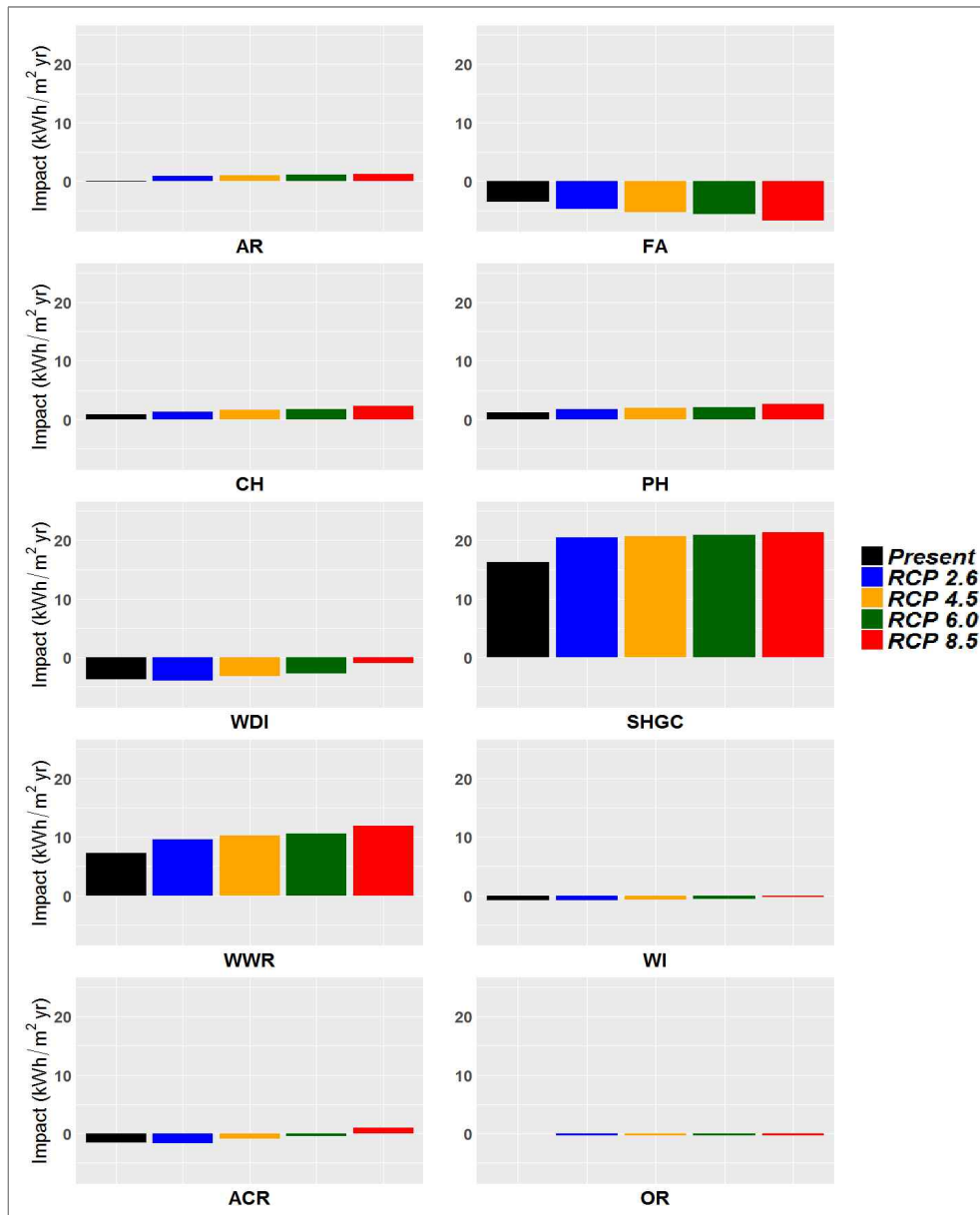
[그림 9] 인천 지역의 BarPlot 인자 영향도 분석 (냉방부하)



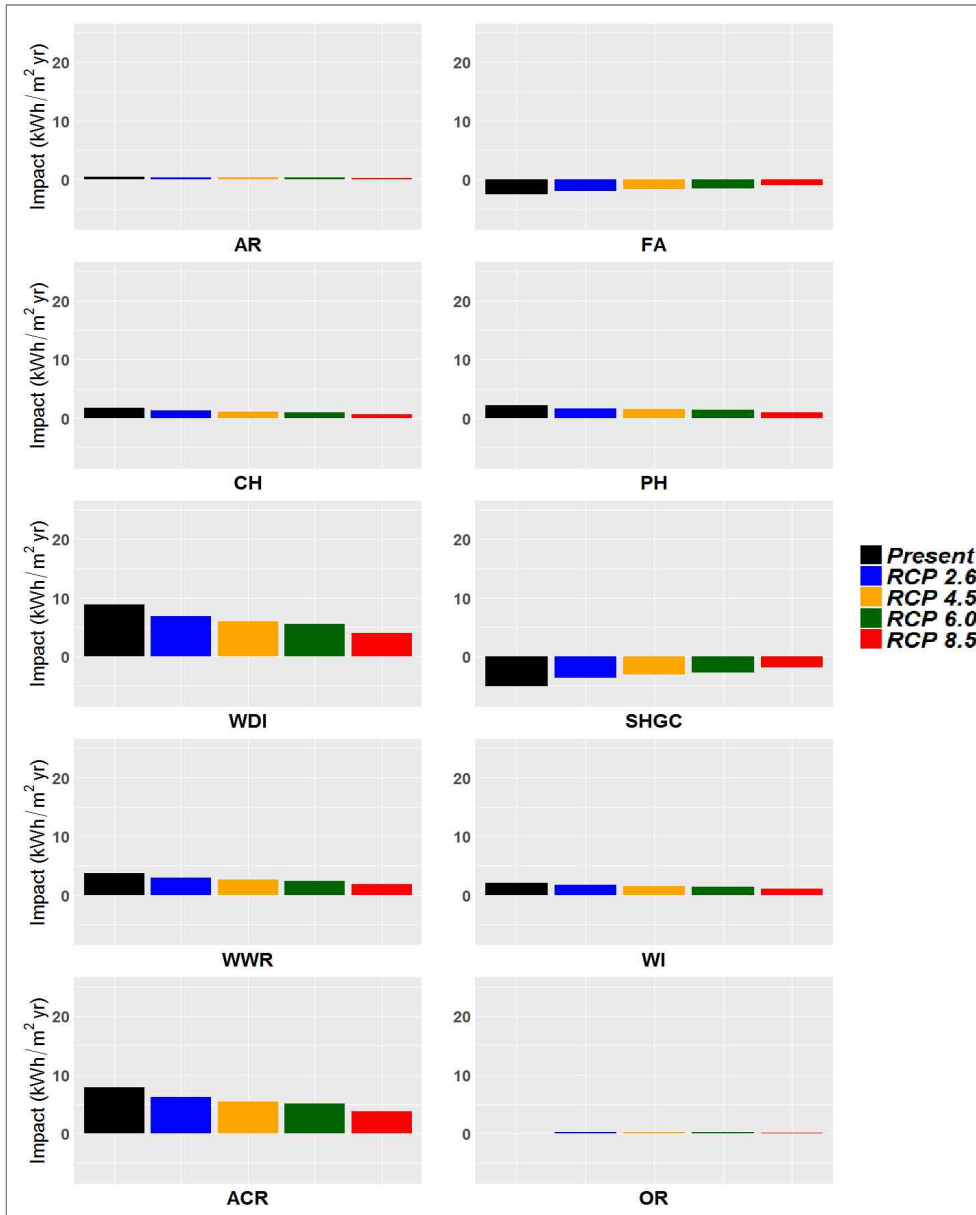
[그림 10] 인천 지역의 BarPlot 인자 영향도 분석 (난방부하)



[그림 11] 울산 지역의 BarPlot 인자 영향도 분석 (냉방부하)



[그림 12] 울산 지역의 BarPlot 인자 영향도 분석 (난방부하)



## 5. RCP시나리오별 최적 건물 설계

본 연구에서 완성한 시나리오별 개별 회귀식을 이용하여 RCP시나리오에 따라 냉난방 부하가 최소가 되는 미래 건물의 Pareto front를 얻었고 이를 기준(현재) 건물의 최적화 결과와 비교하였다. [그림 13]와 [그림 14]는 각각 인천, 울산 지역에서의 시나리오별 Pareto front이다. 그래프 하단의 표는 해당 건물 설계 인자의 처리조건을 정리한 것이다. 최적화 설계는 유전알고리즘 Nsga2 package를 사용하였다.

본 연구에서 사용한 Nsga2(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)는 R에서 제공하는 유전알고리즘 최적화 기법이다. Nsga2 package내에 있는 ParetoFront, ParetoSet을 이용하여 건물에너지 냉난방 부하가 최소가 되는 부하 값과 이를 도출할 수 있는 설계 인자 조합을 도출할 수 있었다.

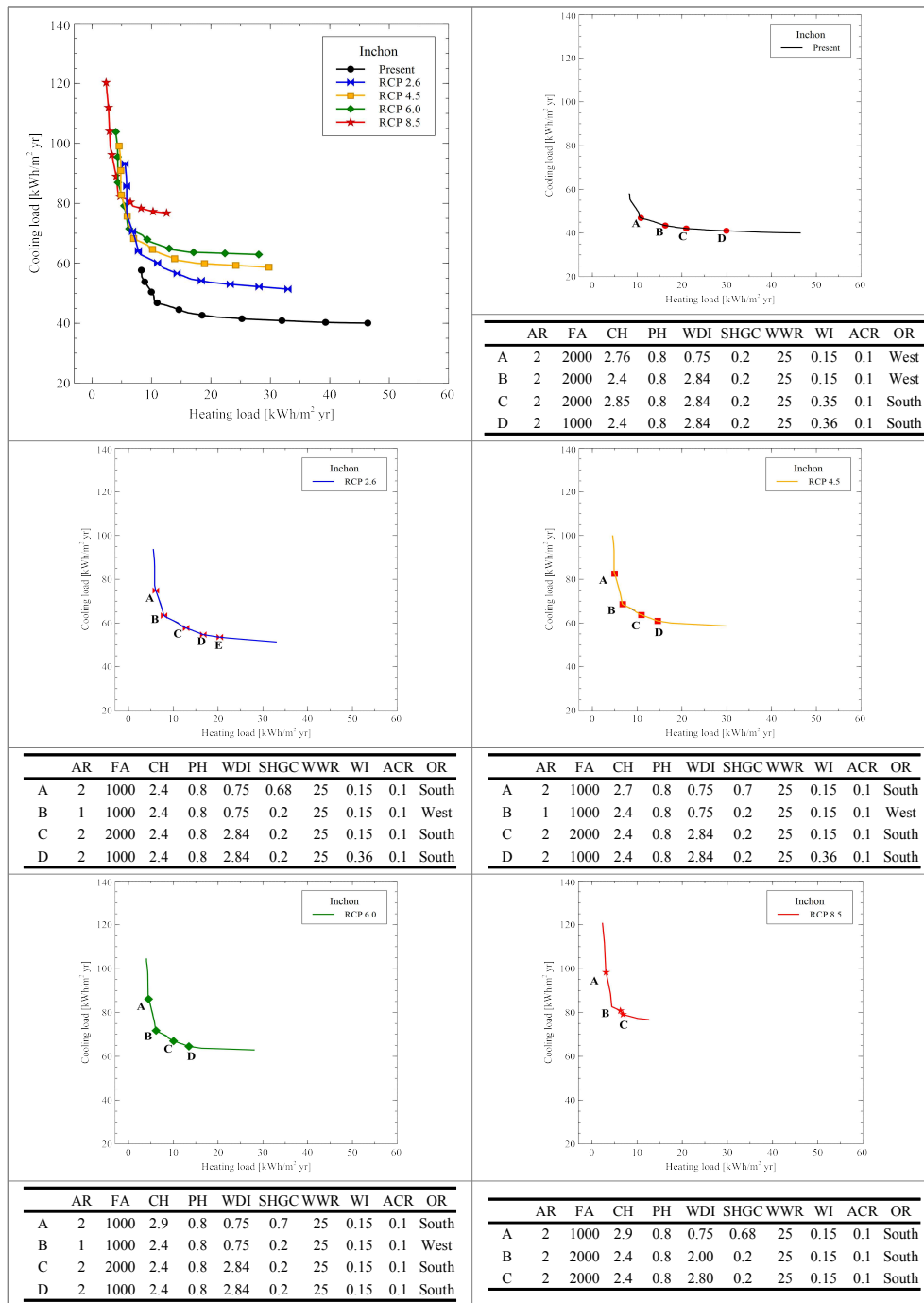
건물 설계 인자 분석법은 크게 3개의 그룹으로 구분할 수 있다. 1그룹은 SHGC(일사열 취득계수)로 태양 일사량에 관련된 인자가 주요한 영향을 나타내었고, 2그룹은 외부와 건물 내부의 온도 차에 영향을 받는 WDI(창문 단열), WI(벽 단열), ACR(침입 공기) 인자로 구성되어 있다. 3그룹은 건물 외피에 대하여 태양 일사와 벽 또는 창을 통한 열의 이동량을 결정짓는 WWR(창 면적비), AR(장단면비), FA(바닥면적), CH(천정고 높이), PH(플래넘 높이)가 있다. 마지막 4그룹은 OR(Orientation)이 있다.

[그림 13]와 [그림 14]에 시나리오별 최적 건물 설계 인자 조합을 제시하였다. PH(플래넘 높이), ACR(침입 공기), WWR(창 면적비) 인자의 경우 모든 지역을 대상으로 0.8, 0.1, 25% 인자 수준의 동일한 결과를 얻었다. 설계 점에 따라 인자 수준이 변화하는 이유는 건물 설계 인자의 주 효과와 교호작용 효과가 복합적으로 작용하여 해당 점의 냉난방 부하를 산출하기 위하여 변하게 된다. AR, FA, CH 인자의 경우에 설계 점에 따라 변화하는 이유는 독립적인 영향도 보다 SHGC, WDI 등의 영향력이 큰 인자와의 교호작용이 발생하여 수준이 변화되었다.

SHGC(일사열 취득계수) 인자의 경우 RCP 시나리오가 증가함에 따라서 온도 상승량이 증가하므로 최적 인자 수준이 부분적으로 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 SHGC의 인자 수준이 증가하는 부분은 상대적으로 냉방부하가 큰 설계 조건이므로 제외하고 인자 수준이 낮은 조건(SHGC : 0.2)만 고려하도록 한다. 이 결과는 상대적으로 냉방부하가 크고 난방부하가 작은 울산지역은 해당되지 않았다.

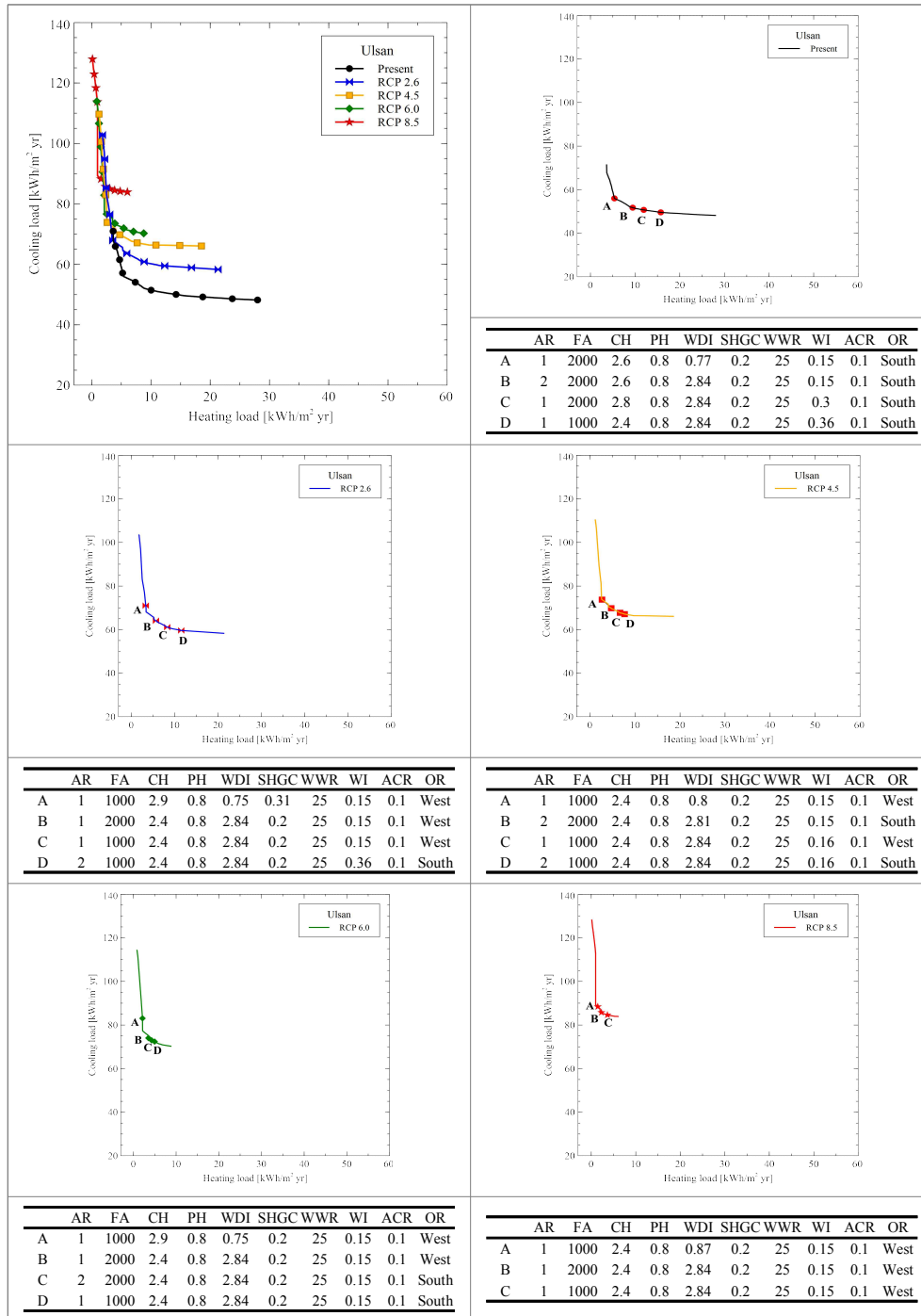
WDI 인자의 경우 인자 수준이 커질수록 외부와의 열 교환이 활발하게 일어나므로 여름철의 냉방부하는 감소하고 겨울철의 난방부하는 증가함을 확인하였고 이 결과는 RCP 시나리오에 따라 동일한 패턴을 보임을 확인하였다. OR 인자의 경우 [그림 9]~[그림 12]의 인자 분석 결과를 바탕으로 영향이 크지 않은 것으로 판단하였다.

[그림 13] 인천 지역 시나리오별 최적화 및 설계 인자 조합 제시



[그림 14] 울산 지역 시나리오별 최적화 및 설계 인자 조합 제시





## IV 미래 건축 설계 법규에 대한 가이드라인

III. 미래 냉난방 부하 분석에서 RCP시나리오에 따라 냉난방 부하를 최소로 하는 미래 건물 설계 인자 조합을 제시하였다. 이제 본 연구의 결과로 나온 건물 설계 인자의 수준을 살펴 해당 수준이 현재 시행중인 건축 설계 법규에 부합한지를 파악하고, 그렇지 않을 경우 향후에는 설계 법규가 어떠한 방향으로 수정되어야 하는지에 대한 가이드라인을 제시하고자 한다. 이때 설계 규정의 범위가 광범위하기 때문에, 본 연구에서는 냉난방 부하 소비에 가장 크게 영향을 미치는 SHGC(일사열 취득계수), WWR(창 면적비), WDI(창문 단열)에 관한 법규를 중점적으로 다루었다.

### 1. 건축물의 에너지 절약 설계 기준

건축물에 대한 전반적인 설계 기준은 2015년 국토교통부에서 제시한 건축물의 에너지절약 설계기준<sup>9)</sup>을 참고하였다. 해당 전문은 건축물의 효율적인 에너지 관리를 위해 다양한 건축 설계 기준을 제시하고 있다.

제 6조 1항에서 건물에 사용되는 창 및 문의 경우 본 해설서에서 제시한 열관류율 기준을 만족하는 경우 적합하다고 언급하고 있으며, SHGC(일사열 취득계수)에 대한 언급은 별도로 이루어지지 않았다.<sup>9)</sup> 또한 전반적인 규정이 냉방보다는 난방부하를 절약하는데 초점이 맞추어져 있다. 그러나 본 연구의 회귀분석 결과를 살펴보면, 미래에는 난방부하보다 냉방 부하의 증가량이 더 클 것이며 냉방 부하는 WDI(창문 단열)보다 SHGC(일사열 취득계수)에 의한 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 미래의 건물 설계 평가 중 창의 평가기준은 WDI 대신 SHGC가 되거나, 혹은 WDI와 SHGC의 두 기준을 모두 제시하는 방향으로 개정하는 것이 좋다.

제 7조 건축부문의 권장사항에서는 건축물의 배치, 단열 계획 시 고려해야 할 사항을 제시하고 있다. 현 규정의 경우 단열벽의 두께를 두껍게 하고 창 면적을 최소화하라는 등의 해설은 있으나 이에 대한 정확한 수치를 제시하고 있지 않다.<sup>9)</sup> 본 연구의 결과 냉난방 부하량이 가장 적은 미래 건물의 경우 WWR(창 면적비)이 모두 25%이었

9) 국토교통부, 한국에너지공단, 건축물의 에너지절약 설계기준 해설서, 국토교통부 고시 제2015-1108호, 2015년

으며, WI(벽단열) 역시 벽의 열전도도가 대부분  $0.15 W/m^2K$  로 두 인자 모두 낮은 수준을 보였다. 이를 활용하여 향후에는 단열벽, 창 면적에 대한 값을 규정할 때 본 연구 결과와 근접한 수치를 제시하여 주는 것이 좋다.

## 2. 창호 설계 기준

본 연구에서 도출한 미래 건물의 냉난방부하 회귀식을 살펴보았을 때 창호에 대한 설계 인자가 가장 큰 영향을 미침을 확인할 수 있다. 따라서 미래 건물의 설계 기준을 제시할 때 다른 인자보다 창호 설계 기준을 더욱 강화하는 것이 좋다.

현재 시행중인 창호 설계 규정사항은 2012년 국토해양부에서 출간한 건축물 에너지 절약을 위한 창호 설계 가이드라인을 참고하였다.<sup>10)</sup> 해당 전문은 창호 설계 인자에 대한 규정을 소개한 뒤 각 설계요소들이 에너지 성능에 미치는 영향을 파악하여 설계 가이드라인을 제시하고 있다. 해당 전문에 활용된 에너지성능지표(EPI)는 창호와 관련된 항목으로 단열성능, 기밀성능, 창 면적비, 차양설치를 평가하였다.

본 해설의 1.4절에서 지방자치단체별 설계 가이드라인을 제시하고 있다. 중부지방인 서울, 인천의 경우를 살펴보면,<sup>10)</sup> 서울시에서는 WWR(창 면적비)을 주거와 비주거 건물 모두 60%미만으로 제한하였다. 그러나 본 연구 결과를 통해 미래에는 시나리오별로 외기 온도가 상승하여 WWR이 현재와 같은 60% 수준으로 유지될 경우 냉난방 부하가 급증함을 알 수 있다. 미래 건물 최적 설계 결과 냉난방 부하가 최소가 되게 하는 WWR 설계 인자는 25%이므로 향후에는 건물의 WWR을 현재의 60%보다 낮은 비율인 25%정도로 규정하여야 한다.

이후 해당 문서에서는 지역별 창호 설계 조건을 달리하였을 때 건물의 에너지 소요량이 어떻게 변화하는지 분석한 뒤 설계 가이드라인을 제시하였다. 대상지역은 중부지역(서울), 남부지역(대전), 제주지역이며 각 지역별로 열관류율, SHGC(일사열 취득계수)에 따른 4가지 타입의 창호를 사용해 건물의 에너지소요량을 계산하였다. 이에 대한 결과로 해당 문서에서 제시한 BASE건물(별도의 조명, 차양을 제어하지 않고 단순히 창 면적비와 창호의 타입 만을 변화시킨 건물)의 창호 설계 인자 기준과 본 연구의 최적화 결과로 제시한 2100년 건물의 창호 설계 인자를 비교하였다. 이때 본 연구에서는 냉난방 부하만을 고려한 반면, 해당 문서에서는 냉난방 부하 뿐 아니라

10) 국토해양부, 건축물 에너지절약을 위한 창호 설계 가이드라인, 2012년

조명, 환기(송풍동력)까지도 건물에너지로 고려하였다는 차이가 있으나, 실제 건물에너지 소비의 대다수가 냉, 난방 과정에서 발생하기 때문에 해당 오차는 제외하였다. 해당 문서에서 제시한 설계 인자 수준을 표 8에 정리하였다.

<표 8> 현행 건물의 건물 설계 인자 제안

지역	창 면적비(WWR)	열관류율	SHGC
중부 지역	0.4 정도가 적당함	1.8	0.44
남부 지역	0.4 정도가 적당함	2.1	0.4

자료: 국토해양부, 건축물 에너지절약을 위한 창호 설계 가이드라인, 2012년, 20~41쪽

본 연구에서 제시한 2100년 미래 건물에서 설계 인자의 최적 수준을 표 8의 현행 기준과 비교하였을 때, 현행 법규가 미래에는 부합하지 않는다는 것을 알 수 있다. 우선 열관류율과 같은 뜻을 함포하고 있는 WDI(창문 단열)의 경우는 현행법규가 지속되어도 문제가 없다고 판단된다. 그러나 WWR(창 면적비)의 경우 미래에는 현재 기준인 40%보다 감소한 25%정도가 되어야 한다. SHGC(일사열 취득계수)는 냉방부하의 경우 감소할수록 좋고 난방부하의 경우 증가할수록 좋으나 냉방부하에 더 큰 영향을 주며, 또한 미래에는 난방부하보다 냉방 부하의 증가량이 더 크므로 감소하는 방향으로 가는 것이 바람직하다. 따라서 최적 설계 인자의 수준을 참고해 미래에는 SHGC의 수준을 현재 기준인 0.4보다 감소한 0.2 정도 감소시키는 것이 바람직하다.

## V 결론

본 연구는 RCP시나리오에 따른 2100년의 기후 데이터를 이용해 인천, 울산 지역의 각 시나리오별 미래 건물 냉난방 부하 회귀식을 도출하고, 나아가 냉난방 부하에 영향을 미치는 건물 설계 인자 파악을 통하여 건물에너지 사용량을 줄일 수 있는 최적의 건물 설계안을 제시하였다. 이를 활용하여 현재 건물 설계 법규가 향후 어떠한 방식으로 수정되어야 하는지 고찰하였다.

건물의 냉난방 부하에 영향을 미치는 인자 분석 결과 인천, 울산 지역이 시나리오별로 동일한 경향을 보였다. 두 지역 모두 RCP시나리오가 증가할수록 냉방부하가 증

가하고, 난방부하가 감소하는 경향을 보여 향후 냉방부하에 의한 에너지 소비가 더욱 증가할 것임을 예측할 수 있었다.

냉방부하에 큰 영향을 주는 인자는 SHGC(일사열 취득계수), WWR(창 면적비)로 나타났으며 SHGC와 WWR모두 낮은 수준일수록 냉방부하가 감소했다. 난방부하에 큰 영향을 주는 인자는 WDI(창문 단열), ACR(침입공기), SHGC(일사열 취득계수)로 나타났으며 WDI와 ACR은 낮은 수준일수록, SHGC는 높은 수준일수록 난방부하가 감소했다. 이후 시나리오별 개별 회귀식을 사용해 냉난방 부하가 최소가 되는 건물의 최적 설계안을 제시하였으며 각 인자별 수준을 정리하였다. 분석한 최적 설계안을 토대로 현재 시행중인 건축 설계 법규에 대한 향후 수정 가이드라인을 제시하였다. 최종 분석 결과는 아래와 같다.

첫째, 미래 기후는 현재보다 외기온도가 상승하기 때문에 WWR(창 면적비)를 현재 수준인 40%보다 작은 25%로 규정하여야 한다.

둘째, 미래에는 외기온도의 상승으로 인해 냉난방 부하의 절대량이 증가하므로 SHGC(일사열 취득계수)는 현재 수준인 0.4보다 감소한 0.2 수준으로 규정하여야 한다.

본 연구는 전 기후대에서 건물의 미래 냉난방 부하를 예측하고, 이에 영향을 끼치는 설계 인자 분석을 통하여 최적의 건물 설계안을 제시함으로써 건물에너지를 절감할 수 있는 실질적인 해결책을 제시한다는 데 의의가 있다. 본 연구를 참고하여 기후 변화와 에너지 문제를 해결할 방안을 강구한다면 국내 에너지 소비량을 효과적으로 절감하여 미래 에너지산업에 큰 도움이 될 것으로 기대한다.

## 참 고 문 헌

### <국내 자료>

- 국가기후변화적응센터, 기후변화 신시나리오(RCP) 소개, 2013.  
주소 : [http://ccas.kei.re.kr/climate\\_change/menu3\\_5\\_04.do](http://ccas.kei.re.kr/climate_change/menu3_5_04.do)
- 국토교통부, 한국에너지공단, 건축물의 에너지절약 설계기준 해설서, 국토교통부 고시 제 2015-1108호, 2015.
- 국토해양부, 건축물 에너지절약을 위한 창호 설계 가이드라인, 2012.
- 에너지경제연구원, 에너지부문의 기후변화대응과 연계한 녹색성장 전략연구, 기본 연구보고서 10-27, 2010.
- 에너지경제연구원, 에너지부문의 기후변화대응과 연계한 녹색성장 전략연구, 기본 연구보고서 11-23, 2011.

### <해외 자료>

- Amato AD, Ruth M, Kirshen P, Horwitz J. Regional energy demand responses to climate change: methodology and application to the commonwealth of Massachusetts. Clim Change 2005; 71:175-201.
- Belcher SE, Hacker JN, Powell DS. Constructing design weather data for future climates. Build Serv Eng Res Technol 2005;26(1):4961.
- Dodoo, A., Gustavsson, L., 2016. Energy use and overheating risk of Swedish multi-storey residential buildings under different climate scenarios. Energy 97, 534-548.
- Sanford T, Frumhoff PC, Luers A, Gullede J. The climate policy narrative for a dangerously warming world. Nat Clim Change 2014; 4:164-6.
- U.S Energy Information Administration, Monthly Energy Review, 2016.