



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

건물에너지 효율적 관리를 위한  
실내온도 제어방법에 관한 연구

濟州大學校 大學院

에너지응용시스템學部 電氣工學專攻

金 正 燮

2013年 08月

# 건물에너지 효율적 관리를 위한 실내온도 제어방법에 관한 연구

指導教授 金 豪 贊

金 正 嬾

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2013年 08月

金正嬾의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_

委 員 \_\_\_\_\_

委 員 \_\_\_\_\_

委 員 \_\_\_\_\_

委 員 \_\_\_\_\_

濟州大學校 大學院

2013年 08月

A Study on the Internal Temperature Control for  
Efficient Management of Building Energy

Jeong-Hyuk Kim

(Supervised by Professor Ho-Chan Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING

MAJOR OF ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2013. 08.



## 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	vi
LIST OF SYMBOLS .....	vii
SUMMARY .....	ix
<b>I. 서 론</b> .....	1
<b>II. 단일 존 건물 모델링</b> .....	5
1. 실내 열 환경 기준 .....	5
1) 열 쾌적 지표 .....	6
2) 건축물 단열개수 .....	9
3) 직달 및 확산 일사 .....	9
2. 유리 및 벽 구조 모델링 .....	11
1) 유리 모델 .....	12
2) 벽 구조 모델 .....	14
3. EHP 시스템 모델링 .....	16
4. 단일 존 건물 모델링 .....	19
1) 집중인자 모델 .....	19
2) 온도제어 적용을 위한 상태 공간 모델 .....	21
<b>III. 요금제를 고려한 온도제어 알고리즘 제안</b> .....	23
1. 전력요금제 .....	23
1) 계시별 요금제 .....	23
2) 최대피크 요금제 .....	23
3) 실시간 요금제 .....	24
2. 제어구간 적용 온도제어 알고리즘 .....	24

1) 전력 요금제를 고려한 제어구간 적용 알고리즘 .....	24
2) 온도제어 알고리즘 .....	29
<b>IV. 현장 측정 시스템 구성 .....</b>	<b>33</b>
1. 실시간 온·습도 및 전력사용량 측정 시스템 구성 .....	33
2. 현장 데이터 측정 .....	37
1) 계절에 따른 실내 온·습도 비교 .....	37
2) EHP 가동에 따른 전력사용량 변화 특성 .....	46
3) 측정결과고찰 .....	51
<b>V. 컴퓨터 시뮬레이션 .....</b>	<b>53</b>
1. 대상건물의 모델설계 및 시뮬레이션 .....	53
1) 대상건물 모델설계 .....	53
2) 대상건물 시뮬레이션 결과 .....	57
2. 계절에 따른 실내온도 변화 시뮬레이션 .....	60
1) 여름철 실내온도 비교 .....	60
2) 겨울철 실내온도 비교 .....	62
3. 요금제 기반의 제어 알고리즘 적용 .....	63
1) 계시별 요금제를 고려한 전력사용 및 실내온도제어 .....	64
2) 최대피크 요금제를 고려한 전력사용 및 실내온도제어 .....	70
3) 최대수요를 고려한 전력사용 및 실내온도제어 .....	73
4) 요금제를 적용한 전력 사용량 비교 .....	76
4. 결과고찰 .....	78
<b>VI. 결론 .....</b>	<b>80</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>82</b>

## LIST OF FIGURES

Fig. 1 Thermal comfort zones in summer and winter .....	6
Fig. 2 Thermal sensation of PMV .....	7
Fig. 3 Comfortable range of PPD - PMV .....	8
Fig. 4 Beam, diffuse and ground-reflected radiation onto the surface of the outer wall or window .....	11
Fig. 5 Heat transfer model configuration .....	11
Fig. 6 Heat transfer in a single pane of window glass .....	12
Fig. 7 Thermal transfer in a single pane of window glass .....	13
Fig. 8 Heat transfer in external wall .....	15
Fig. 9 Thermal transfer in single wall .....	15
Fig. 10 A simple stylized diagram of a heat pump cycle .....	17
Fig. 11 EHP model .....	18
Fig. 12 Simplified thermal network of single zone building .....	20
Fig. 13 Thermal transfer model configuration .....	20
Fig. 14 TOU tariffs in summer .....	25
Fig. 15 Control horizon switching strategy .....	27
Fig. 16 Schematic diagram of LP algorithm .....	30
Fig. 17 Schematic diagram of PSO algorithm .....	32
Fig. 18 Single zone building in Jeju-do .....	33
Fig. 19 Data acquisition system configuration .....	34
Fig. 20 Temperature/humidity sensor and data server .....	35
Fig. 21 Current transformer and data server .....	36
Fig. 22 Solar radiation in summer and winter .....	37
Fig. 23 External temperature and the average temperature/humidity in summer by KMA data .....	38
Fig. 24 External temperature and the average internal temperature/humidity	

in summer weekdays .....	39
Fig. 25 External and internal temperatures in summer .....	40
Fig. 26 Internal humidity changes in summer .....	41
Fig. 27 External temperature and the average temperature/humidity in winter by KMA data .....	42
Fig. 28 External and the average internal temperature/humidity in winter weekdays .....	43
Fig. 29 External and internal temperatures in winter .....	44
Fig. 30 Internal humidity in winter .....	45
Fig. 31 Energy consumption according to the external temperature in summer .....	46
Fig. 32 Energy consumption by EHP/Lighting/Electrical outlet in summer weekdays .....	47
Fig. 33 Energy consumption by EHP/Lighting/Electrical outlet in summer ·	47
Fig. 34 External and internal temperatures by EHP energy consumption in summer weekdays .....	48
Fig. 35 Energy consumption according to the external temperature in winter .....	49
Fig. 36 Energy consumption by EHP/Lighting/Electrical outlet in winter weekdays .....	49
Fig. 37 Energy consumption by EHP/Lighting/Electrical outlet in winter ···	50
Fig. 38 External and internal temperatures by EHP energy consumption in winter weekdays .....	50
Fig. 39 Energy consumption comparison of EHP in summer and winter weekdays .....	51
Fig. 40 Heat transfer model .....	53
Fig. 41 Windows model .....	54
Fig. 42 Temperature control model .....	55
Fig. 43 State space model .....	56

Fig. 44 Matlab/Simulink simulation model for single zone building .....	57
Fig. 45 Simulation results of single zone building .....	59
Fig. 46 Temperature changes according to wall structures in summer .....	61
Fig. 47 Internal temperature comparisons for light weight wall in summer	61
Fig. 48 Temperature changes according to wall structures in winter .....	62
Fig. 49 Internal temperature comparisons for light weight wall in winter ..	63
Fig. 50 Power consumption and temperature by On-off algorithm .....	65
Fig. 51 Power consumption and temperature by LP binary algorithm .....	66
Fig. 52 Power consumption and temperature by LP variable algorithm .....	68
Fig. 53 Power consumption and temperature by PSO algorithm .....	69
Fig. 54 Power consumption and temperatures for non-peak tariff day by LP algorithm .....	71
Fig. 55 Power consumption and temperatures for peak tariff day by LP algorithm .....	72
Fig. 56 Power consumption and temperatures with MD tariff by LP binary algorithm .....	74
Fig. 57 Power consumption and temperatures with MD tariff by LP variable algorithm .....	75
Fig. 58 Comparisons of peak power .....	78

## LIST OF TABLES

Table 1 Comfort vote and thermal sensation of PMV .....	7
Table 2 Distribution of individual thermal sensation votes for different values of mean vote .....	8
Table 3 Comparisons of building thermal loss with insulation .....	9
Table 4 Time period for the general .....	26
Table 5 Internal temperature and humidity measuring instruments .....	35
Table 6 CT measurement system .....	36
Table 7 Parameters of windows .....	54
Table 8 Parameters of single zone building .....	56
Table 9 Solar radiation parameters in summer .....	58
Table 10 Comparisons of the power consumption .....	76

## LIST OF SYMBOLS

$A_w$	유리의 면적[ $m^2$ ]
$U_w$	유리의 $U$ 값[ $W/m^2K$ ]
$R$	열 저항[ $K/W$ ]
$C$	열 용량[ $J/K$ ]
$R_e$	외부기온 대류 열 저항[ $K/W$ ]
$R_i$	내부온도 대류 열 저항[ $K/W$ ]
$T_e$	외부온도[ $^{\circ}C$ ]
$T_i$	실내온도[ $^{\circ}C$ ]
$H$	건물 열손실[ $W$ ]
$Q_{c/h}$	냉/난방에 의한 열에너지[ $W$ ]
$Q_{vin}$	환기 유입에 의한 열에너지[ $W$ ]
$Q_{vout}$	환기 유출에 의한 열에너지[ $W$ ]
$Q_{ins}$	실내 열 이득[ $W$ ]
$Q_{solar}$	태양에너지에 의한 실내공기 에너지[ $W$ ]
$Q_{solar\_mass}$	태양에너지에 의한 열 질량[ $W$ ]
$m$	유동성 질량[ $kg$ ]
$c$	비열[ $J/kg \cdot K$ ]
$C_b$	계시별 요금제 기본요금[ $Won/kWh$ ]
$P_t$	15분 평균 최대전력 사용량[ $kWh$ ]
$T_o$	초기 스위칭 구간의 실내온도[ $^{\circ}C$ ]
$T_{in}(k)$	실내온도 상승열량[ $^{\circ}C$ ]
$T_{out}(k)$	실내온도 하강열량[ $^{\circ}C$ ]
$N$	온도제어 스위칭 총합
$u(k)$	냉방시스템 가동상태

$p(k)$	사용전력[kW]
$c(k)$	전력사용 요금[Won/kWh]
$P_{\max}$	최대 전력사용량[kWh]
$C_{cp}$	최대수요 제약조건[Won/kWh]



## SUMMARY

In this dissertation, a building internal temperature control algorithm in cooling systems of a large glass-covered single zone building is proposed using control horizon method. An important performance in building thermal control is to ensure thermal comfort with minimal energy consumption. A control horizon switching method is considered to use occupancy schedule for optimal temperature control and the optimization problem is solved with LP(linear programming) or PSO(particle swarm optimization) algorithms. Both TOU(time of use) and MD(maximum demand) electricity rates are included to calculate the energy costs. Simulation results show that the reductions of energy cost and peak power can be obtained using proposed algorithms.

Demand response in building energy systems is an approach to give incentives to customers to change their electric usage pattern from their regular practice, in response to the time-varying price of electricity. The use of building thermal storage has been recognized as an important mean to reduce the peak demand for decades.

Model-based control algorithms are desirable for both building designers and operators in that they can be simulated and tested even before a building is actually built. Moreover, an effective control system for one building is relatively easier to be adjusted and applied to another. Nowadays, TOU electricity rates have been implemented on most smart grids for demand response.

A typical model of a building can present some nonlinearity and include several hundreds of states. Though model reduction techniques can reduce this number, they require an initial detailed model of the building and are not effective for nonlinear models. Here the structure of the low-order model

is found directly and the values of the parameters are estimated by using experimental identification techniques.

Control horizon algorithms has several features that make it suitable for the problems encountered in intermittently heated buildings. This model-based predictive control algorithm optimizes not only the comfort but also an energy usage. As cooling systems generally consume energy to provide thermal comfort, it makes a trade-off between energy savings and thermal comfort.

This dissertation focuses on the application of control horizon algorithm to cooling systems that are charged on TOU and MD rates. A control horizon approaches with LP and PSO algorithm are selected to model and simulate the cooling systems. An model-based predictive control strategy is selected, because its periodic reoptimization characteristic provides stability during external disturbances. The periodic reoptimization also compensates for inaccurate or simplified system models.

## I. 서론

우리나라의 에너지수입 의존도는 약 95[%]이며 2011년 기준 에너지를 수입한 금액이 1,217억 달러에 이르고 있다 [1]. 또한 국제에너지기구(IEA : International Energy Agency)보고에 따르면 우리가 수입해서 사용하고 있는 에너지원에서 발생하는 이산화탄소 배출량은 5억 2,813만 톤으로, 조사대상 국가 중 8위를 차지하고 있다 [2]. 우리나라는 현재 유엔기후변화협약 당사국총회(COP : Conference Of the Parties)가 정한 온실 가스감축 비의무국이지만 중국과 미국 등 교토의정서 미가입국이 참여하여 새로운 기후변화체제로 출범하는 2020년부터는 비감축 의무국에서 감축 의무국으로 포함될 것으로 예상하고 있다.

전 세계적으로 건물의 에너지사용량은 총에너지사용량의 약 40[%]를 차지하고 있으며, 우리나라의 경우에도 총에너지사용량의 약 25[%]를 차지하고 있다 [3]. 정부에서는 공공기관의 에너지이용합리화 추진지침을 계속해서 발표하고 있으며 일반 건물인 경우도 지능형건축물 인증을 친환경건축물 인증으로 전환하여 시행하는 방안으로 건물의 에너지절약 설계기준을 계속해서 강화하고 있다 [4]. 또한 온실가스인 경우 건축물분야가 국가 온실가스 배출량의 1/4을 차지하고 있어 2020년 까지 건축물 온실가스 감축목표치를 26.9[%]로 설정하고 녹색건축 활성화를 위한 종합적이며 체계적인 추진기반을 마련하기 위해서 건축물 에너지·온실가스 정보체계 구축, 녹색건축 인증, 에너지 소비총량 설정 및 에너지 소비 증명제 도입 등을 주요 내용으로 한 녹색 건축물 조성 지원법을 제정하는 등 점차적으로 건물에너지소비에 대한 규제를 강화하고 있다 [5]. 따라서 건물에서 소비되는 에너지에 대한 규제가 정부차원에서 계속해서 강화하고 있어 건물에서의 에너지소비량 감축방안에 대한 연구 및 개발과 신·재생에너지를 활용한 기술을 함께 병행하여 진행된다면 에너지소비와 이산화탄소 배출에 대한 감축효과를 충분히 기대할 수 있다.

건물에서 소비되는 에너지사용에 대한 감축효과를 높이기 위해서는 실제 에너지 사용의 흐름을 파악하는 것이 무엇보다 중요하며 실제 에너지 사용의 흐름을 파악하는 기법으로 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 모델링이 주로 이용되고 있다. 건물 내부의 실제 에너

지 흐름은 외부의 기후변화에 따라 열의 전도, 대류, 복사 등 모든 열전달 현상이 포함된 복합적이며 상호간의 영향을 미치는 동적시스템으로 구성되어 있기 때문에 시뮬레이션을 실제상황과 동일하게 모델링하는 데는 많은 어려움과 한계가 따른다. 따라서 모든 시뮬레이션 모델링에는 수많은 가정요소와 단순한 기법이 도입되고 있으며 도입 정도에 따라 해석능력과 범위가 결정 된다 [6].

건물 내부의 실제 에너지흐름을 파악하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 이용하여 건물에서 소비되는 에너지의 분석과 평가를 미국냉동공조학회(American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers)의 연구 프로젝트에서 건물의 전체 에너지 소비에 대해 수행한 경우가 대표적인 사례이다 [7]. 이러한 분석과 평가에 사용되는 대표적인 에너지평가 시뮬레이션 프로그램으로는 DOE-2, Energy Plus, TRNSYS, ESP-r, 등이 사용되고 있다 [8].

건물에서 발생하는 에너지의 효율적 관리는 건물의 외벽과 유리창의 단열 등 건축적인 면과 실내공기의 효율적인 순환을 위한 공조시스템의 설계와 같은 하드웨어적인 부분 이외에도 전기요금체계를 고려하여 전력사용에 따른 피크전력 및 시간대별에 따른 전력 사용량을 조절하는 소프트웨어적인 부분을 연동한 상호간의 융합을 필요로 한다. 우리나라의 전기요금제는 수요관리형 요금제로 전기요금을 일정수준으로 고정하여 부과하는 고정요금제와 계약전력이 일정규모 이상의 수용가를 대상으로 피크전력을 기본요금으로 하여 계절과 시간을 구분한 전력 사용량에 요금을 부과하고 있는 변동요금제로 구분할 수 있다. 최근에는 여름철과 겨울철의 피크전력과 전력 사용량에 대한 부하를 줄이기 위해 전력회사와 수용가의 사전계약을 통해 피크시간대는 요금단가를 인상하며, 비피크일이나 경부하시간대의 요금을 인하하여 전력수요를 분산시키는 최대피크 요금제를 적용하고 있다 [9]. 따라서 최근에는 전력사용 시간대를 고려하여 에너지 소비량의 최적화를 통한 에너지의 효율적인 관리 분야가 중요한 이슈가 되고 있다.

냉난방 시스템의 온도제어는 일반적으로 고전적인 온-오프 제어와 PID 제어가 많이 사용되고 있으며 [10], 이외에도 퍼지제어 [11], 신경회로망 [12], 그리고 유전알고리즘 [13]을 사용한 방법들도 연구되고 있다. 그러나 이러한 제어방법들은 전력사용 시간대를 고려한 에너지 소비량의 최적화에는 적용하기가 어렵다. 최적제어 환경에서 다양한 제한조건을 처리하기위해 모델기반의 예측제어(model-based predictive control) 방법들이 연구되고 있다 [14, 15]. 모델기반의 예측제어는 시스템의 내부모델(internal model)과

주어진 제어구간에서 미래의 제어입력들을 계산하기 위한 미래에 가질 수 있는 예측치들을 사용하며, 제어입력은 제어구간에서 목적함수를 최소화하는 최적제어 문제를 통해 결정된다. 시간대에 따른 외부온도와 일사량에 관한 값들을 예측할 수 있다고 가정하면, 시간대별로 빌딩의 실내 온도를 예측할 수 있으므로 빌딩의 온도제어에 제어구간을 사용한 모델기반의 예측제어를 적용할 수 있다. 최근에는 빌딩의 냉난방 시스템에서 다양한 목적함수를 대상으로 모델기반의 예측제어에 관한 연구가 진행되고 있다 [16].

본 논문에서는 단일 존(single zone) 건물에 대한 열 모델설계와 Matlab/Simulink 시뮬레이션을 사용한 모델링을 수행한다. 외부기온 변화에 따른 실내 공간의 온도변화를 파악하기 위해 여름철과 겨울철로 구분하여 각 위치별로 온도와 습도센서를 설치하여 측정 비교하며, EHP(electric heat pump) 가동에 따른 전력 사용량도 측정하여 비교한다. 또한 계시별요금제(TOU : time of use)와 최대피크요금제(CPP : critical peak pricing), 최대수요(MD : maximum demand)를 고려한 전력피크 감소 및 전력 사용량을 감축하는 새로운 제어 알고리즘 제안과 평가를 수행하는데 그 목적을 두었으며, 논문의 내용을 전개하기 위한 구성은 다음과 같다.

제1장에서는 본 논문의 연구 배경과 목적, 연구의 범위 및 방법에 대하여 제시한다.

제2장에서는 단일 존 건물의 모델링을 구성하기 위한 과정으로, 열 환경에 대한 만족감을 표현하는 실내 열 환경기준과 냉방과 난방에 사용하고 있는 EHP 시스템의 원리와 모델링, 직달 및 확산 일사를 정의하였으며, 외부기온과 실내온도에 영향을 미치는 건물의 외벽과 유리의 열전달과 변환과정, 단일 존 형태의 건물에 집중인자 모델을 이용하여 건물에 대한 등가모델을 제시한다.

제3장에서는 요금제의 종류와 특징을 살펴보고, 요금제를 고려한 전력제어 및 온도 제어 방법으로서, 시간대별로 차등하여 요금을 부과하는 계시별 요금제와 비피크일과 피크일을 적용하는 최대피크 요금제, 최대수요를 고려한 제어구간(control horizon) 적용 알고리즘 방법, 그리고 건물의 실내온도를 제어하기 위한 온-오프, LP(linear programming) 및 PSO(particle swarm optimization) 알고리즘을 제안한다.

제4장에서는 현장 측정시스템 구성으로, 실제 대상건물에 8개의 온·습도 센서를 설치하여 여름철과 겨울철 중 평일의 외부기온 변화에 따른 실내 공간의 각 위치별 온도와 습도 변화, EHP 가동에 따른 전력 사용량 변화 특성을 측정하고 비교한다.

제5장에서는 대상건물의 모델설계 및 모델링 구현과 검증 및 벽 구조에 의해서 실내

온도가 변화되는 과정과 요금제 기반의 제어알고리즘을 적용하기 위해 건물의 일반현황과 각 구조별 파라미터를 구성하여 모델링을 검증한다. 외부기온 변화에 따른 실내 공간의 각 위치별 온도 변화를 동절기와 하절기로 구분하여 시뮬레이션을 수행하고 실제 측정값과 비교한다. 그리고 전력사용, 에너지비용 절감 및 실내온도를 제어하기 위한 온-오프 제어와 LP 및 PSO 알고리즘의 제어 성능을 비교하고 분석한다.

제6장에서는 본 논문의 결론과 향후 연구되어야 할 사항들을 제안하도록 한다.

## II. 단일 존 건물 모델링

건물에서 사용되는 에너지의 효율적인 관리를 위해서는 건물의 설계단계부터 에너지 소비를 줄이기 위한 여러 가지 사항을 고려하여 설계를 해야 한다. 에너지 소비를 줄이기 위해 고려해야 할 사항으로 건물을 신축하는 경우 건물의 형태와 방향, 외피, 창호 등 건축적인 요소와 고효율의 자재를 사용한 단열 및 실내의 조명, 냉·난방시스템 등 전기적인 부분의 요소를 고려한 에너지 절감방안이 중요시 된다. 건물에서 전기를 사용하여 에너지가 소비되는 분야로는 조명분야와 콘센트분야, 동력분야, 냉방과 난방분야로 나눌 수 있으며, 그 중 에너지 소비가 가장 높은 분야가 냉방과 난방분야로 이는 건물의 내부에서 생활하는 재실자가 요구하는 실내 환경의 질을 향상시키기 위한 방법으로 냉방과 난방분야에서의 에너지가 소비가 이루어지기 때문이다. 건물에서의 에너지 사용 및 실내 환경의 질 향상과 관련하여 실내의 내부구조에 따라 여러 개의 벽과 파티션으로 구성되어 있는 멀티 존(multi zone)과 벽이나 파티션이 없는 단일 존으로 구분 할 수 있다. 멀티 존은 각 실마다 열 에너지에 대한 해석과 냉방과 난방, 환기 등 실내공기의 효율적인 순환을 위한 HVAC(heating, ventilation, air conditioning)시스템을 필요로 한 모델링 구성이 요구되지만, 단일 존은 실내 환경에서 열 에너지의 교환 과정에 대한 모델링이 비교적 간단하여 단일 존을 대상으로 모델링을 구성하고자 한다.

### 1. 실내 열 환경 기준

건물내부의 열 환경은 실외의 기후변화에 따라 열의 전도, 대류, 복사 등의 모든 열 전달 현상이 복합적으로 구성되어 상호간에 영향을 미치고 재실자의 다양한 생리적 구조에 따라 인체가 느끼는 체감환경이 다르게 나타난다. 현대인들은 생활의 80[%] 이상을 건물의 내부에 거주하고 있기 때문에 실내의 쾌적성에 대한 요구는 거주자의 만족 및 생산성과 직결되는 문제이자 기업의 이득에 영향을 미치고 있어 실내의 일괄적인 설정온도 완화는 기존의 실내온도에 적용된 재실자의 감각변화 등을 고려하지 않아 결과적으로 생산성을 떨어뜨릴 가능성이 있다 [17].

건물의 실내 환경 쾌적성을 나타내는 지표와 기준들을 살펴보면 열 평형 모델과 적응 모델(adaptive model) 등이 제시하는 예상 평균 온열감(PMV : predicted mean vote), 예상 불만족율(PPD : predicted percentage of dissatisfied) 등의 온열 쾌적 지표와 국제 표준화기구, 미국냉동공조학회 등을 기준으로 한다 [18, 19].

### 1) 열 쾌적 지표

열 쾌적(thermal comfort)은 열 환경에 대한 만족감을 표현하는 조건으로 열적 불쾌감을 느끼지 않는 상태를 말하며 현재의 온열환경에서 거주자의 80[%] 이상 만족을 나타내는 주관적인 상태를 말한다[13]. Fig. 1은 여름철과 겨울철의 쾌적 영역을 나타낸 것으로 여름철인 경우 실내온도는 23~27[°C], 습도는 30~60[%], 겨울철에는 실내온도를 20~25[°C], 습도는 30~60[%]를 나타내고 있다 [20].

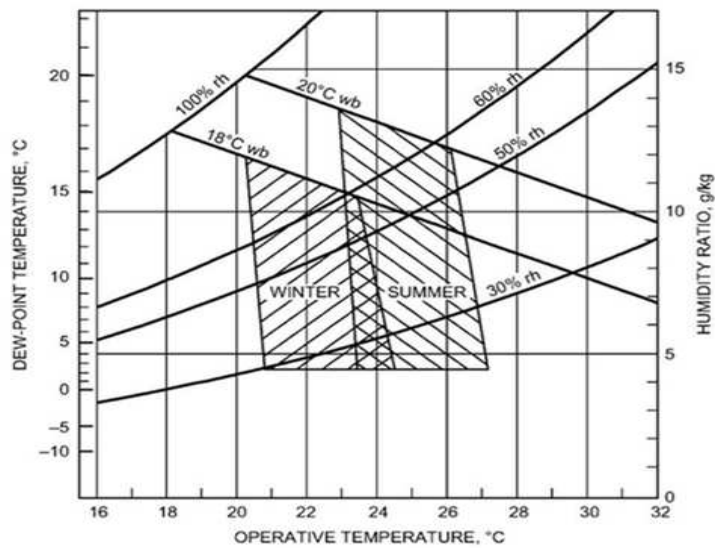


Fig. 1 Thermal comfort zones in summer and winter

열 쾌적 지표는 크게 물리적 조건에 기초한 평가지표와 생리적 항목에 기초한 평가지표, 열평형에 기초한 평가지표, 주관에 따른 평가지표가 있다 [21]. 주관에 따른 평가지표는 인간의 등온감각에 기초한 감각적 지표와 쾌적과 불쾌적 판단에 기초한 심리적 지표로 분류되며 실내의 온열환경 평가에 널리 사용되고 있는 열 쾌적 지표인 예상 평균 온열감과 예상 불만족율로 나타낸다.



(1) 예상 평균 온열감

예상 평균 온열감은 1977년 덴마크의 P.O. Fanger 교수가 주위환경에 대한 인간의 온열쾌적감에 대한 실험결과를 정량적으로 도출한 이론으로 1984년 ISO 표준 7730으로 국제 규격화 되었다. 예상 평균 온열감은 온도[℃], 복사온도[℃], 상대습도[%], 주변기류 [m/s], 착의량[Clo], 대사량[*MET*]에 따라 영향을 받는다. Fig. 2는 예상 평균 온열감의 범위를 나타낸 것으로 미국냉동공조학회의 7단계 온열쾌적감 척도는 +3에서 -3까지를 그 범위로 하고 있으며, Table 1은 예상 평균 온열감 지표에 따른 열 감각을 나타낸 것으로, 재실자의 95[%] 이상이 만족하는 범위를 쾌적하다고 정의하고 있다 [22].

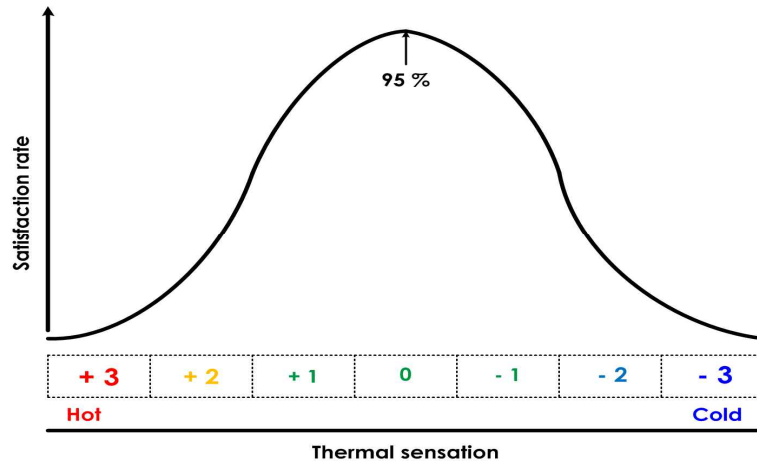


Fig. 2 Thermal sensation of PMV

Table 1 Comfort vote and thermal sensation of PMV

Vote	Thermal sensation	Comfort sensation
+3	Hot	Uncomfortable
+2	Warm	Slightly uncomfortable
+1	Slightly warm	Comfortable
0	Neutral	
-1	Slightly cool	
-2	Cool	Slightly uncomfortable
-3	Cold	Uncomfortable

(2) 예상 불만족율

예상 불만족율을 나타내는 지표는 실내 환경을 평가하기 위한 온열쾌적감 지표로, 예상 평균 온열감 이론을 기초로 하여 실내 거주자의 불만족율을 정량화한 것으로, 단위는 %를 사용한다. Fig. 3과 Table 2는 예상 평균 온열감과 예상 불만족율 간의 관계를 나타낸 것으로, 예상 불만족율은 열적으로 불쾌적인 사람들의 비율을 예측하는 의사표시의 지표로 활용하고 있다 [23].

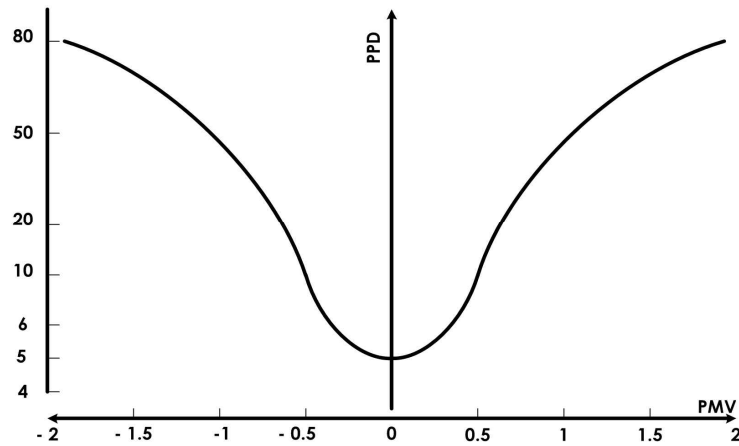


Fig. 3 Comfortable range of PPD - PMV

Table 2 Distribution of individual thermal sensation votes for different values of mean vote

PMV	PPD	Percentage persons predicted to vote [%]		
		0	-1, 0, +1	-2, -1, 0, +1, +2
+2	75	5	25	70
+1	25	30	75	95
0	5	60	95	100
-1	25	30	75	95
-2	75	5	25	70

## 2) 건축물 단열개수

건물을 신축하는 경우 열의 손실을 방지하기 위해 거실의 외벽, 최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕, 최하층에 있는 거실의 바닥, 공동주택의 측벽 및 층간 바닥, 창 및 문을 열 관류율 기준과 단열재의 두께 기준에 따라 중부, 남부, 제주지역으로 구분하여 고시하고 있으며, 고시된 기준에 따라 시공하도록 하고 있다. 열 관류율은 특정 두께를 가진 재료의 열전도 특성으로 열 관류율의 작을수록 단열성능이 좋다고 할 수 있어, 건물에서 소비되는 에너지 사용량의 효율성 향상과 실내 환경의 쾌적성을 높이기 위해 단열 성능을 높이는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

Table 3은 건물의 단열 전과 후의 지붕, 외벽, 유리, 바닥, 환기 등으로 구분하여 열 손실에 대한 비교 및 절감효과를 나타내었다. 건물의 단열 시공 전 열 손실율은 외벽의 경우 39[%]로 열에 대한 손실율이 가장 크고, 유리 24[%], 지붕 19[%] 바닥과 환기에서 각각 9[%]의 순으로 열 손실율을 나타내고 있다. 단열 시공 후의 열 손실율은 외벽이 7[%]로 단열 시공 전 39[%]에 비해 32[%]의 절감효과가 나타나고 있어, 건물의 단열에 대한 중요성을 확인할 수 있다 [24].

Table 3 Comparisons of building thermal loss with insulation

Composition Thermal Loss	Composition					
	Ceiling	Wall	Window	Floor	Vent.	Total
Without insulation [%]	19	39	24	9	9	100
With insulation [%]	6	7	16	6	9	44
Energy saving [%]	13	32	8	3	0	56

## 3) 직달 및 확산 일사

### (1) 직달 일사

직달 일사는 태양주위에 구름이 없고 일사의 대부분이 직사광을 의미하며, 시간이 변화에 따른 태양의 위치에 따라 입사하는 일사량의 값을 의미한다. 태양의 방향에 의해

직달 일사량 값이 달라지는 요인들을 몇가로 나누어 보면, 첫째, 태양시(solar time)는 지구의 하늘을 가로지르는 태양의 각운동에 기초한 시간으로, 관찰자의 자오선을 가로지르는 태양의 시간을 나타낸 것이다. 태양의 남중할 때의 시간을 12시로 하여  $15^\circ$  를 1시간 간격으로 동쪽은 - (negative), 서쪽은 + (positive) 값을 갖게 된다. 둘째, 태양 방위각(solar azimuth angle) 어떠한 시간에 대한 태양의 위치에서 수평면에 투영했을 때 정남향과의 각도를 나타낸 것으로 동쪽은  $-180^\circ$  값을, 서쪽은  $180^\circ$  값을 가지며, 셋째, 위도는 지구상에서 적도를 기준으로 북쪽 또는 남쪽으로 얼마나 떨어져 있는지를 나타낸 것으로 북위  $90^\circ$ , 남위  $90^\circ$  ( $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ )까지의 범위 안에 있다. 넷째, 적위는 적도에서 태양이 남중할 때 수평면에 대한 태양의 각(angle) 위치로 춘분과 추분은  $0^\circ$ , 동지는  $-23.45^\circ$ , 하지는  $23.45^\circ$  ( $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$ )를 나타내며, 다섯째, 표면방위각(surface azimuth angle)은 경사면을 수평면에 투영했을 때 정남향에 대한 치우친 정도를 나타내며 동쪽은  $-180^\circ$ , 서쪽은  $180^\circ$ 의 범위를 갖는다. 마지막으로, 시간각은 태양이 그 지역의 자오선에 남중했을 때를 기준으로 한 태양의 위치에 대한 각도로 오전은 -, 오후는 +로 하며, 1시간 당  $15^\circ$  ( $\omega = 15^\circ$ )의 각도를 갖는다 [25].

## (2) 확산 일사

확산 일사는 직사광이 대기 중의 분자 또는 크기가 큰 입자와 지구의 지형으로 인해 발생한 확산각과 온도의 영향에 의해 변화하는 일사량의 값을 의미 하는 것으로, 비등방성 일사에 대한 확산모델은(HDKR : Hay-Davies-Klucher-Riendl)의 이론모델을 근거로 하여 태양에 의한 확산 일사(diffuse radiation)의 구성요소가 건물의 수직면과 수평면의 표면에 도달하는 복사에너지의 방향에 따른 값을 정의하고 있다 [26]. Fig. 4는 외벽의 표면과 유리표면에 태양에 의한 확산 일사의 복사에너지가 전달되는 과정을 보여주는 것으로, 지구의 스카이 돔은 어느 방향에서나 태양에 의한 복사에너지를 받아들이지만 지구대기의 상태가 주요한 변수요인으로 작용한다. 맑은 날의 경우 확산 일사의 변수요인을 세부분으로 구분한다면, 첫 번째는 균일한 등방성, 두 번째는 점광원의 밝기, 세 번째가 지평선의 밝기이다. 지평선의 밝기는 지형에 의한 반사율로 지형의 온도와 확산각에 의해 확산 일사의 복사에너지가 달라져 외벽표면의 온도상승과 하강의 요인으로 작용 한다 [27].

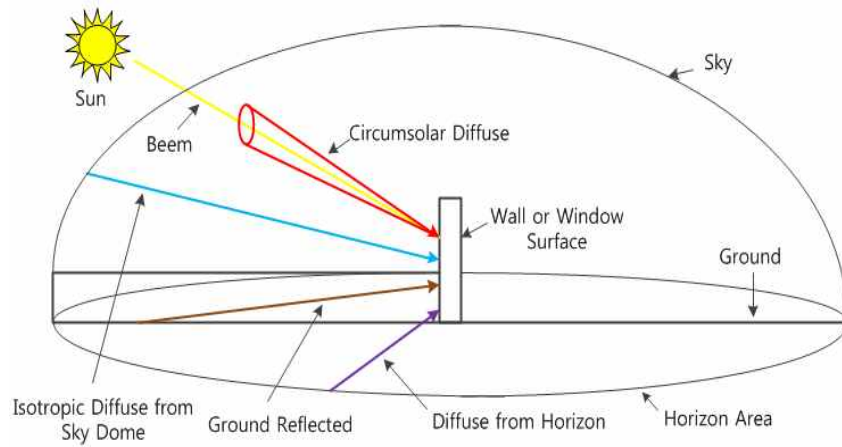


Fig. 4 Beam, diffuse and ground-reflected radiation onto the surface of the outer wall or window

## 2. 유리 및 벽 구조 모델링

대기상태의 일사량이 여러 가지 요인에 의해 변화된 외부기온이 건물의 외벽과 유리의 열 교환을 통해 건물의 내부로 열이 전도와 대류, 복사에너지가 전달되는 열 교환을 Fig. 5에서 보여주고 있다.

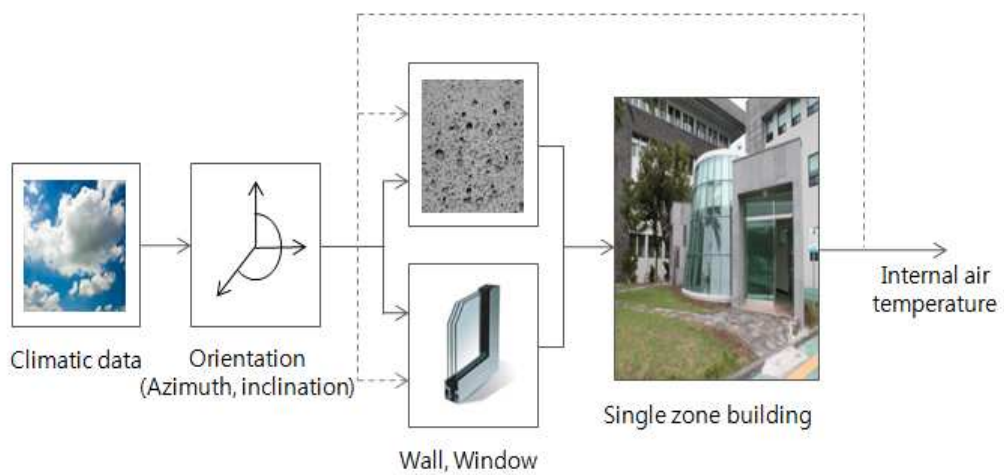


Fig. 5 Heat transfer model configuration

1) 유리 모델

Fig. 6은 유리를 통한 열 교환을 보여주는 것으로 유리는 실내의 공간으로 태양에 의한 복사에너지를 전달하는 역할을 한다. 복사에너지 중 일부는 반사되기도 하지만, 유리의 외부표면에 열 대류현상 및 주변 환경과의 열 교환으로 유리의 온도는 증가한다. 유리를 통해 투과된 복사에너지는 유리가 일부 흡수하고 나머지는 유리를 통해 전도되어 실내의 유리표면에 열 대류현상 및 주변 환경과 열에너지가 교환되는 과정을 만들어 실내의 온도를 올리거나 떨어뜨리는 요인으로 작용 한다 [28].

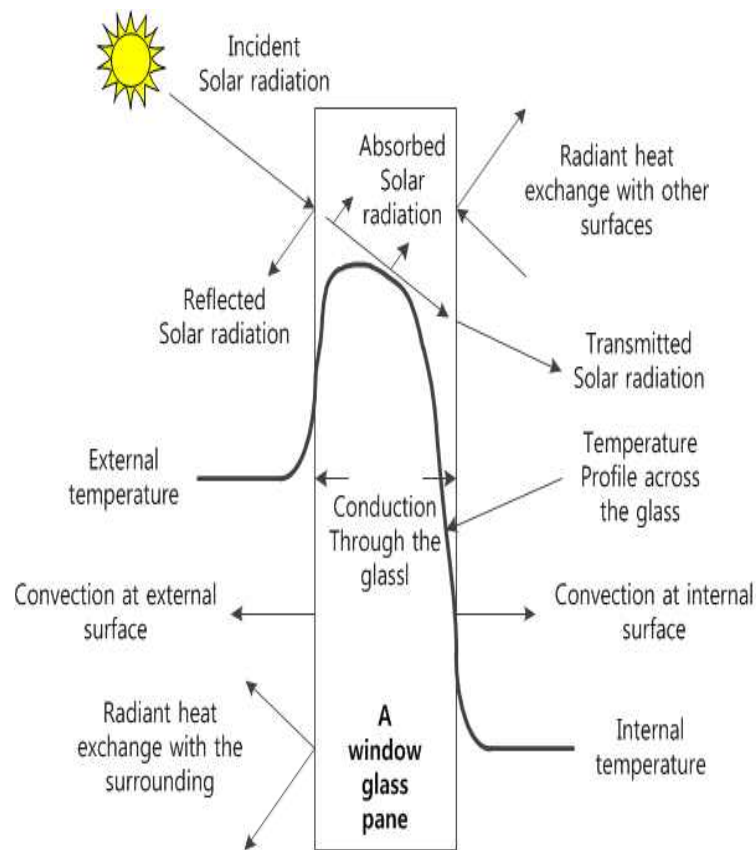


Fig. 6 Heat transfer in a single pane of window glass

Fig. 7은 대상 건물의 유리에 대한 등가회로를 간략하게 나타낸 것으로, 유리를 통한 열 투과율은 유리의 외부표면과 내부표면의 열 저항과 유리자체의 열 저항, 유리 표면의 열 전달율이 중요한 역할을 한다 [29].

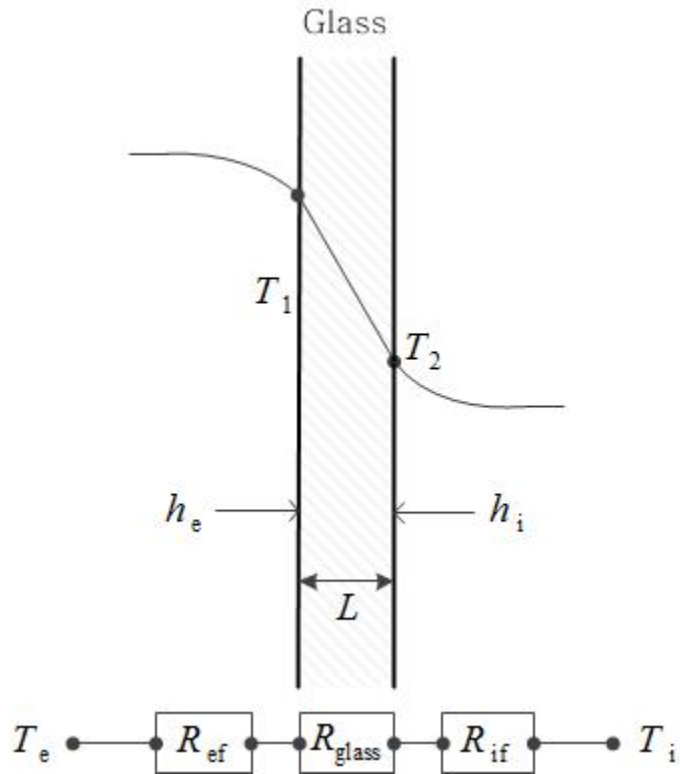


Fig. 7 Thermal transfer in a single pane of window glass

단일 유리를 통해 전달되는 열량  $Q_w [W]$ 은 외부표면의 온도  $T_1 [^{\circ}C]$ 과 내부표면의 온도  $T_2 [^{\circ}C]$ 의 온도차  $\Delta T [^{\circ}C]$ 와 외부표면에서 내부표면까지의 각각의 열 저항의 총합으로 나눈 값과 같으며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_w = \frac{\Delta T}{R_{total}} \quad (1)$$

$$R_{total} = R_{ef} + R_{glass} + R_{if} = \frac{1}{h_e A_w} + \frac{L}{\lambda A_w} + \frac{1}{h_i A_w} \quad (2)$$

여기서  $R_{ef}$ 는 유리의 외부표면 열 저항,  $R_{glass}$ 는 유리의 열 저항,  $R_{if}$ 는 실내표면의

열 저항 값이다. 그리고  $h_e$ 와  $h_i$ 는 외부표면과 내부표면의 대류현상과 열 복사에 의한 열 전달 계수이고,  $A_w[m^2]$ 는 유리의 면적,  $L[mm]$ 은 유리의 두께,  $\lambda[W/m \cdot K]$ 는 열 전도 값으로 유리의 특성에 따른 상수 값으로 주어진다.

외부에서 유리를 통해 들어오는 열에 대한 식 (1)을 열 전달을 결정하는 주요 인자인 열 관류율을 적용하여 나타내면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_w = U_w \cdot A_w \cdot (T_e - T_i) \quad (3)$$

여기서  $U_w[W/m^2K]$ 는 열 전달 계수,  $T_i[^\circ C]$ 는 내부온도,  $T_e[^\circ C]$ 는 외부온도를 나타낸다.

식 (1)을 식(3)에 대입하게 되면 유리의 열 전달 계수인  $U_w[W/m^2K]$ 는 총 열 저항의 역수로 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U_w = \frac{1}{R_{total}} \quad (4)$$

여기서  $U_w[W/m^2K]$ 와 유리의 표면 열 전달 계수  $h_e[W/m^2K]$ 와  $h_i[W/m^2K]$ 를 알 수 있는 경우 식(4)에서 유리의 저항 값을 얻을 수 있다.

## 2) 벽 구조 모델

Fig. 8은 건물의 벽체를 통해서 열이 교환되는 과정을 보여주는 것으로 벽체는 실내의 공간으로 태양에 의한 복사에너지를 전달하는 역할을 한다. 복사에너지 중 일부는 반사되기도 하지만, 일부는 외벽의 표면에 열 대류현상 및 주변 환경과의 열 교환으로 외벽 온도의 상승으로 이어지며, 벽체를 통해 투과된 복사에너지는 벽체가 흡수하며 흡수된 복사 에너지는 벽체를 통해 전도 되어 실내의 내부 벽 표면에 열 대류현상 및 주변 환경과 열 에너지가 교환되는 과정을 만들어 실내의 온도를 올리거나 떨어뜨리는 요인으로 작용한다.



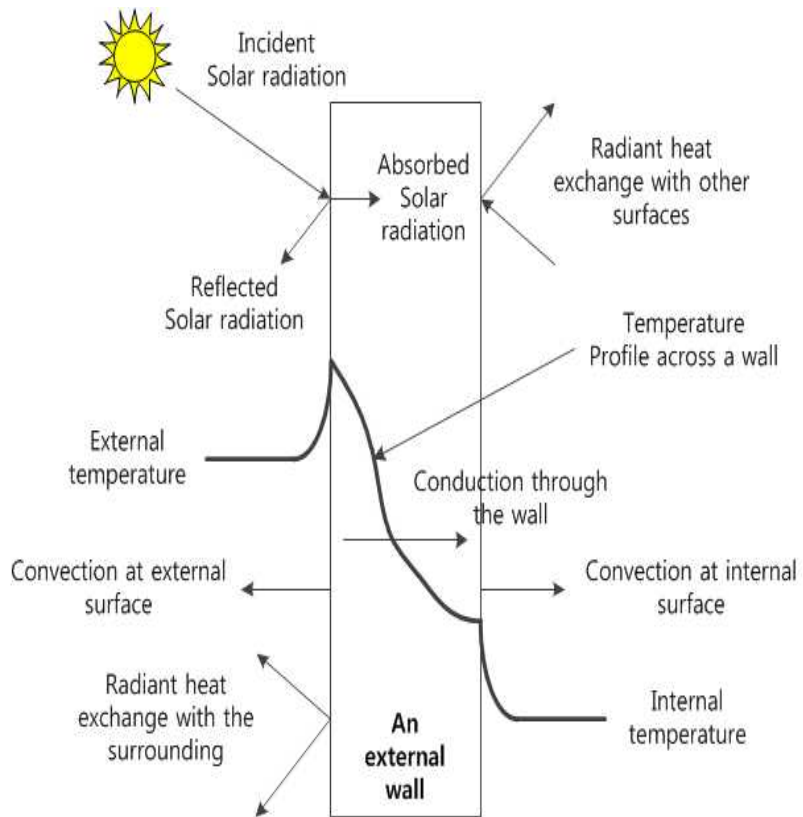


Fig. 8 Heat transfer in external wall

Fig 9는 해석 대상 건물의 단일구조 벽체에 대한 등가회로를 나타낸 것으로 태양에 의한 복사 에너지는 직달 일사와 확산 일사에 의한 복사에너지가 벽체의 온도를 증가시키지만 벽체의 열 용량, 비열, 밀도 및 벽의 두께, 벽을 구성하고 있는 내부와 외부의 마감 요소에 따라 반사와 흡수율, 투과율이 달라진다.

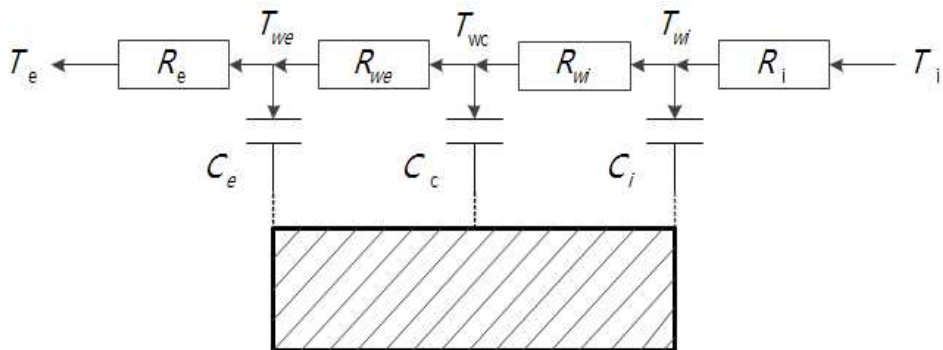


Fig. 9 Thermal transfer in single wall

각 교점에서의 온도에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i \cdot \frac{dT_{wi}}{dt} = \frac{T_i - T_{wi}}{R_i} - \frac{T_{wi} - T_{wc}}{R_{wi}} \quad (5)$$

$$C_c \cdot \frac{dT_{wc}}{dt} = \frac{T_{wi} - T_{wc}}{R_{wi}} - \frac{T_{wc} - T_{we}}{R_{we}} \quad (6)$$

$$C_e \cdot \frac{dT_{we}}{dt} = \frac{T_{wc} - T_{we}}{R_{we}} - \frac{T_{we} - T_e}{R_e} \quad (7)$$

여기서  $R_i[K/W]$ 는 내부기온의 대류에 의한 열 저항,  $R_{wi}[K/W]$ 과  $R_{we}[K/W]$ 는 각각 벽체의 구성요소와 관련된 열 저항,  $R_e[K/W]$ 는 외부기온의 대류에 의한 열 저항을 나타내며,  $C_i[J/K]$ 는 내부기온의 대류에 의한 열 용량,  $C_c[J/K]$ 는  $C_i[J/K]$ 와  $C_e[J/K]$ 와 사이의 벽체 열 용량,  $C_e[J/K]$ 는 외부기온의 대류에 의한 열 용량을 나타낸다.  $T_i[^\circ C]$ 는 내부온도,  $T_{wi}[^\circ C]$ 는 내부벽체의 온도,  $T_{we}[^\circ C]$ 는 외부벽체의 온도,  $T_{wc}[^\circ C]$ 는  $T_{wi}[^\circ C]$ 와  $T_{we}[^\circ C]$ 의 사이의 벽체온도, 그리고  $T_e[^\circ C]$ 는 외부온도를 나타낸다.

### 3. EHP 시스템 모델링

EHP는 전기를 에너지원으로 하는 히트펌프 사이클 시스템으로 학술적으로는 VRF(variable refrigerant flow)라고 쓰이며, 전기를 이용한 모터로 압축기를 구동시켜 냉매를 실내기와 실외기 사이의 냉매배관으로 흐르게 하여 액화와 기화를 반복하는 순환 사이클에 의해서 냉방과 난방을 하는 방식으로, 잠열을 이용한 상태변화에 따른 열의 이동원리를 이용한 시스템이다 [30].

EHP 시스템은 건물 내부의 개별적인 냉방과 난방 시스템의 필요성이 점점 부각되어 기존의 중앙 집중식 냉·난방 시스템과 차별화하여 냉방과 난방이 필요한 장소와 공간에 전체적 또는 부분적으로 효율적인 냉·난방이 가능하도록 만들어진 시스템이다. 기존의 시스템은 건물 설계단계부터 설비의 위치, 배관구성, 덕트 배치 및 관리를 위한 공간이

필요하여 실내공간의 활용성과 인테리어성을 떨어뜨리는데, EHP 시스템은 건물의 신축과 리모델링을 하는 등 다양한 환경에 맞게 설계가 가능하고 건물의 형태에 관계없이 최소한의 공간만을 필요로 하여 건물의 활용면적을 높일 수 있다. 또한 기존의 시스템은 공조 및 덕트시공, 제어비용 등 전체 공사비의 64[%]를 순환계통과 시스템 구축비용으로 사용되고 있어 이러한 비용을 모두 적용하여 비교해 보면 EHP 시스템은 기존의 중앙 집중식 시스템 보다 33[%]의 설치비용 절감이 가능한 경제적인 이점을 가지고 있다. 열에너지 효율 면에서도 냉매의 잠열을 이용하는 EHP 시스템은 현열을 이용하는 기존의 시스템보다 25[%]~30[%] 정도의 에너지 절감이 가능하다 [31]. 또한 덕트나 환코일 유닛 같은 설비들의 공간 활용성과 인테리어성에 대한 단점을 보완하여, EHP시스템은 다양한 실내기를 선정하여 실내공간의 활용성과 인테리어성을 향상 시킬 수 있도록 하였으며, 유지관리 측면 또한 기존 시스템 보다 EHP시스템 자체적으로 용량에 따른 시리즈화와 모듈화로 제품을 생산하기 때문에 배관자체의 문제점만 발생하지 않는다면 유지관리의 효율성이 매우 높다. 또한 EHP시스템은 경제적이고 효율적인 제어 시스템으로 구성되어 있어서 실시간 모니터링 및 최대수요 전력제어를 건물의 빌딩관리 시스템과 연동이 가능하기 때문에 냉방과 난방을 효율적으로 제어할 수 있다.

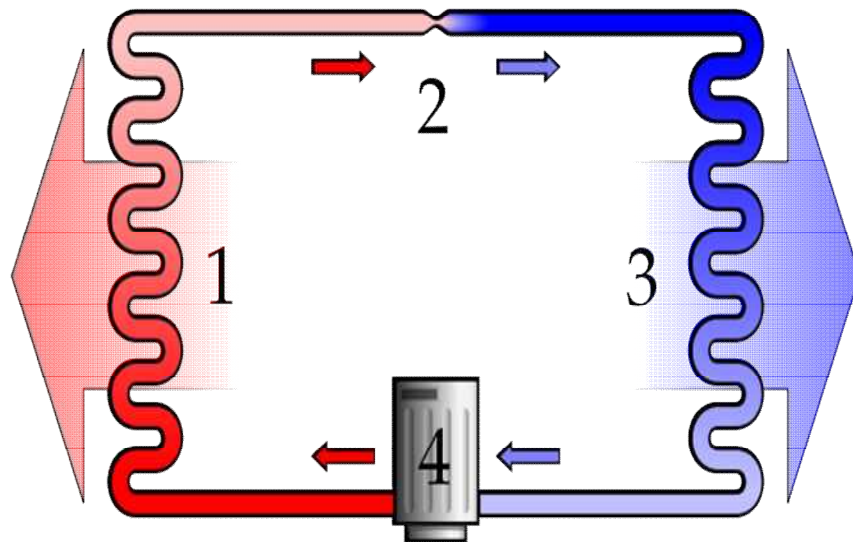


Fig. 10 A simple stylized diagram of a heat pump cycle

Fig. 11은 EHP 시스템에 대한 모델링을 나타낸 것으로, 냉방과 난방시스템에 인가하는 전력  $P[kW]$ 와 동작상태 입력  $u$ 를 사용하여 실내 온도제어를 위한 용량을 출력하게 되며, 냉방과 난방의 공기 유입비율은 상수 값을 가진다. 스위칭 상태는 설정한 실내 온도에 따라 가동과 정지를 반복적으로 수행하며, 출력 용량은 포화현상으로 인하여 용량의 일정한 값까지 증가 하여도 그 이상 증가하지 않게 된다.

EHP 시스템의 냉방과 난방의 가동은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dQ_{c/h}}{dt} = P \cdot \dot{M} \cdot c \cdot u \quad (8)$$

여기서  $\frac{dQ_{c/h}}{dt}$ 는 냉·난방기에 의한 실내의 열 흐름,  $c[J/kg \cdot K]$ 는 일정한 압력에서 공기의 열 용량,  $\dot{M}[kg/hr]$ 는 냉·난방시스템을 통해 생성되는 공기 질량을,  $P[kW]$ 는 냉방과 난방시스템 운전을 위한 전력으로 상수 값을 나타낸다. 스위칭 상태의 경우 전력 사용량을 가변할 수 있는 시스템을 사용한 경우 동작 상태 값  $u$ 는 0~1사이의 값을 갖지만, 전력조절이 가능하지 않는 경우에는 냉·난방기의 정격용량에 대한 0과 1의 값으로 스위칭 된다.

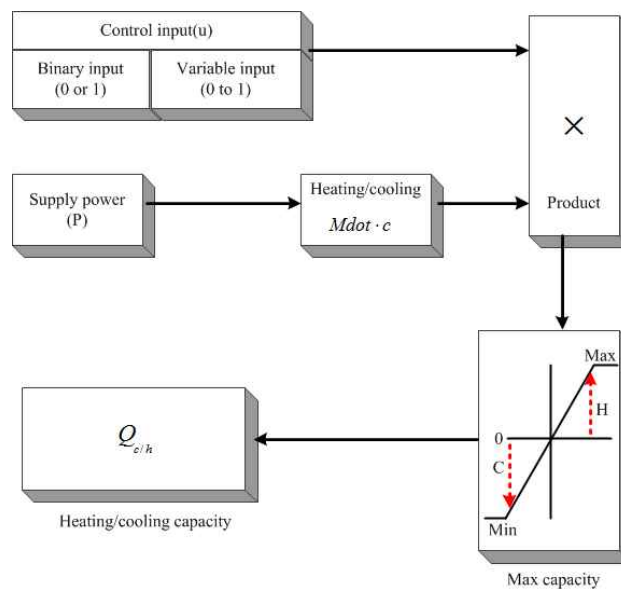


Fig. 11 EHP model

#### 4. 단일 존 건물 모델링

건물 전체에 대한 열손실  $H[W]$ 는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H = H_t + H_v + H_i \quad (9)$$

여기서  $H_t$ 는 지붕, 벽, 창, 문, 바닥 등을 통한 열 손실,  $H_v$ 는 환기(ventilation)에 의한 열 손실,  $H_i$ 는 창과 벽 등의 개구부의 빈틈 등 출입구의 문을 개폐함에 따라 외부에서 실내로 침입되는 침기(infiltration)에 의한 열 손실을 나타낸다.

건물에 대한 모델링 방법으로 집중인자(lumped parameter) 모델이 사용되며, 이 방법은 하나의 벽체를 몇 개의 열 저항과 열 용량을 등가회로로 변환하여 각 벽체의 회로 방정식을 푸는 방법이다 [32]. 1차원 벽에서 작게 나눈 계산영역의 교점에서의 순수 열 전달은 내부에너지의 증가로 나타낼 수 있으며, 이때 내부온도가 일정하게 집중용량으로 작용하게 된다. 내부에너지의 증가와 교점에서의 열 전달량은 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = C_m \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (10)$$

여기서  $\Delta E$ 와  $\Delta T$ 는 각 교점 사이의 에너지와 온도변화량이며,  $C_m [J/K]$ 은 격자의 열 용량으로 나타낸다.

##### 1) 집중인자 모델

단일 존 형태의 건물에 집중인자 모델을 사용하여 열 저항  $R[K/W]$ 과 열 용량  $C [J/K]$ 를 사용하여 건물의 열 전달을 간단하게 모델링한 등가회로를 Fig. 12에 나타내었다. 단일 존 건물의 모델은 하나의 벽체를 3개의 열 저항( $R_i, R_3, R_e$ )과 2개의 열 용량( $C_2, C_3$ ) 및 유리의 열 저항( $R_2$ ), 실내에너지의 증감에 대한 열 용량( $C_1$ ), 실내공기 대류에 의한 열 저항( $R_1$ )으로 나타낸다.



본 논문에서는 외부의 일사량에 의한 열전달과 EHP를 이용해서 냉방(또는 난방)시스템의 가동을 통한 실내온도의 변화를 집중적으로 분석하기 위한 것으로, 환기를 통해 유입/유출되는 에너지( $Q_{vin}/Q_{vout}$ )와 태양에너지에 의한 실내공기 에너지( $Q_{solar}$ )는 고려하지 않도록 한다.

5개의 열 저항과 4개의 열 용량으로 구성되는 단일 존 건물에서의 실내에너지 온도 변화에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_1 \cdot \frac{dT_1}{dt} = \frac{T_i - T_1}{R_1} + Q_{solar\ mass} \cdot d_f \quad (11)$$

$$C_2 \cdot \frac{dT_2}{dt} = \frac{T_i - T_2}{R_i} - \frac{T_2 - T_3}{R_3} \quad (12)$$

$$C_3 \cdot \frac{dT_3}{dt} = \frac{T_2 - T_3}{R_3} - \frac{T_3 - T_e}{R_e} \quad (13)$$

$$C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = Q_{c/h} + Q_{ins} + Q_{solar\ mass} \cdot (1 - d_f) + \dot{m} \cdot c \cdot T_e - \dot{m} \cdot c \cdot T_i - \frac{T_i - T_1}{R_1} - \frac{T_i - T_2}{R_i} - \frac{T_i - T_e}{R_2} \quad (14)$$

여기서  $R_1[K/W]$ 은 내부공기 대류에 의한 열 저항을 나타내며,  $R_i, R_3, R_e[K/W]$ 는 벽 구조에 대한 열 저항을,  $R_2[K/W]$ 는 유리와 관련된 열 저항을 나타낸다.  $T_1[^\circ C]$ 은 실내온도 질량이며,  $T_i[^\circ C]$ 는 실내온도,  $T_2[^\circ C]$ 는 실내표면온도,  $T_3[^\circ C]$ 는 실외 표면온도, 그리고  $T_e[^\circ C]$ 는 외부온도를 나타낸다.  $Q_{solar\ mass}[W]$ 는 일사모텔과 유리 모텔에 의해 생성되는 태양에너지와 창외 방향 등에 의해 변화되는 에너지 값으로 각각 태양에너지와 창외 면적 그리고 창외 투과계수의 곱으로 나타낼 수 있고,  $d_f$ 는 태양에너지에서 건물의 실내온도에 영향을 미치지 못하고 실내에서 소모되는 비율을 나타낸다.

## 2) 온도제어 적용을 위한 상태공간 모델

건물외벽과 내부에 대한 저차모델을 구성하기 위해서는 다음과 같이 선형화된 상태공간모델은 식(15)와 같이 나타낼 수 있다 [33].

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}} &= A_c \underline{x} + B_c \underline{u} \\ \underline{y} &= C_c \underline{x}\end{aligned}\quad (15)$$

여기서  $\underline{x}$ 와  $\underline{y}$ 는 냉방과 난방의 요구하는 영역 등의 입력과 출력을 나타내며, 벡터  $\underline{x}$ 는 분할된 벽 노드와 내부 벽 표면의 접촉된 공간을 포함하는 각각의 온도들이며,  $\underline{u}$ 는 대류에 의한 내부이득 등의 영역 온도, 그리고  $\underline{y}$ 는 냉방요구 등의 영역 온도로 입력과 출력에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_i \end{bmatrix}, \quad \underline{y} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_i \end{bmatrix}, \quad \underline{u} = \begin{bmatrix} T_e \\ Q_{c/h} \\ Q_{ins} \\ Q_{solarmass} \end{bmatrix}\quad (16)$$

$$A_c = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 \cdot C_1} & 0 & 0 & \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \\ 0 & -\frac{1}{R_i \cdot C_2} - \frac{1}{R_3 \cdot C_2} & \frac{1}{R_3 \cdot C_2} & \frac{1}{R_i \cdot C_2} \\ 0 & \frac{1}{R_3 \cdot C_3} & -\frac{1}{R_3 \cdot C_3} - \frac{1}{R_e \cdot C_3} & 0 \\ \frac{1}{R_1 \cdot C_i} & \frac{1}{R_i \cdot C_i} & 0 & -\frac{\dot{m} \cdot c}{C_i} - \frac{1}{R_i \cdot C_i} - \frac{1}{R_2 \cdot C_i} \end{bmatrix}\quad (17)$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{d_f}{C_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_e \cdot C_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\dot{m} \cdot c}{C_i} - \frac{1}{R_2 \cdot C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{(1-d_f)}{C_i} \end{bmatrix}\quad (18)$$

$$C_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\quad (19)$$



### Ⅲ. 요금제를 고려한 온도제어 알고리즘 제안

#### 1. 전력요금제

우리나라의 전력 요금체계는 수요관리형 요금제로서 전기요금을 일정수준으로 고정하여 부과하는 고정요금제와 시간대별로 차등하여 부과하는 변동요금제로 구분할 수 있다. 고정요금제는 전력 사용량이나 사용 시기에 관계없이 동일한 요율을 적용하여 연중 정해진 가격으로 부과하는 요금제로서 주택용 전력과 같은 대부분의 수용가에 해당하며, 변동 요금제는 계절과 시간에 따라 요금을 달리하는 기준을 적용하는 요금제로, 계약전력이 300[kW] 이상의 대규모 수용가에 적용하고 있으며, 요금제를 구분해보면 계시별 요금제, 최대 피크 요금제, 실시간 요금제(real time pricing)로 분류할 수 있다 [34].

##### 1) 계시별 요금제

계시별 요금제는 전력소비의 형태가 계절과 시간에 따라 차이가 클 경우에 반영하는 전기 요금제도로 이부제 또는 삼부제 형태로 수용가에 차등하여 부과하는 방식이다. 수용가의 계약전력이 300[kW]이상 대규모 수용가에 적용하고 있으며, 여름철과 봄·가을철, 겨울철 시간대를 기준으로 경부하 시간대와 중부하 시간대, 최대부하 시간대로 구분하여 요금이 부과된다.

##### 2) 최대피크 요금제

최대피크 요금제는 전력수요가 높은 시간대에 계약 수용가에게 전력회사가 피크수준의 전력가격을 사전에 공지하여 시행하는 제도로, 평상시에는 표준 시간대별 요금을 적용하고 전력이 부족한 긴급 상황이 발생하면 피크부하 시간대에 정상 수준보다 높은 피크부하 요금을 적용하는 것으로 계시별 요금제와 병행하여 적용한다.

### 3) 실시간 요금제

실시간 요금제는 도매 혹은 소매가격을 기본으로 수용가에 부과되는 요금이 시간대별로 변동하는 제도로, 계시별 요금제와 실시간 요금제는 시간대별로 요금차이가 있다는 점은 비슷하지만, 실시간 요금제는 계시별 요금제와 달리 전력계통 운영 및 수급상황에 따라 요금이 가변적이다. 고정요금제에 비해 전력요금 변동성은 높으나 수용가에서 경제적으로 사용할 경우 공급자와 수용가 양측의 편익을 증가시킬 수 있다.

## 2. 제어구간 적용 온도제어 알고리즘

변동요금제 기반의 전력요금을 기준으로 한 건물 냉·난방 시스템의 온도제어 알고리즘은 요금이 상대적으로 낮은 중 부하 시간대 가동을 우선으로 하고 최대부하 시간대 이전에 최소온도 설정 값으로 냉·난방 시스템이 가동될 수 있도록 설정한다. 전체적으로 가변적인 실내온도의 기울기를 조절할 수 있게 냉·난방 시스템을 제어하여 최대부하 시간대 구간에서는 시스템의 가동을 최대한 억제시켜 전체적으로 전력사용 시점의 이전(shifting)을 통한 에너지 비용 절감 및 최대전력 사용을 억제하는 효과를 얻을 수 있다 [35].

일반적으로 업무용으로 많이 사용되는 단일 존 건물의 에너지 사용은 주로 낮에 이루어지며, 전기요금 부과 시 기본요금이 되는 피크전력도 여름철 3개월 중 최고 피크전력을 적용하고 있고, 시간대 별 전력량 요금도 여름철을 높게 적용하고 있다. 따라서 에너지 수요가 많은 여름철을 대상으로 냉방시스템의 온도제어 알고리즘을 살펴보도록 한다.

### 1) 전력 요금제를 고려한 제어구간 적용 알고리즘

#### (1) 계시별 요금제를 고려한 제어구간 적용 알고리즘

건물 냉방시스템의 시간당 스위칭 시한에 따라 24시간 평균에 따른 전력요금 계산식  $E(t)$ 는 계절별 요금과 선택요금, 시간대별 요금제로 결정되는 식은 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(t) = C_b \cdot P_t + \left( \sum_i^{Off} C_{il} \cdot P_{il} + \sum_i^{Mid} C_{ih} \cdot P_{ih} + \sum_i^{On} C_{im} \cdot P_{im} \right) \quad (20)$$

여기서  $C_b$ 와  $P_t$ 는 각각 계시별 요금제에서 부과되는 기본요금과 1개월 동안 사용한 전력량에서 중부하와 최대부하 시간대에서 15분 평균으로 가장 많이 사용한 전력량 값을 나타낸다. 전체 에너지 비용은 이외에도 시간대별로 사용한 경부하( $Off$ ), 중부하( $Mid$ ), 그리고 최대부하( $On$ ) 시간대에서 사용한 전력 사용량에 각각의 전력요금을 곱한 값을 모두 합한 값으로 계산된다. 따라서 하루 동안에 사용된 전력요금을 고려하므로 식(20)에서 기본요금 부분은 생략하고 시간대별로 사용한 요금만을 고려하도록 한다.

여름철에 시행되고 있는 변동요금제의 시간대 구분은 경부하( $Off_1, Off_2$ ), 중부하( $Mid_1, Mid_2, Mid_3$ ), 최대부하( $On_1, On_2$ )로 Fig. 14에 나타내었다 [36].

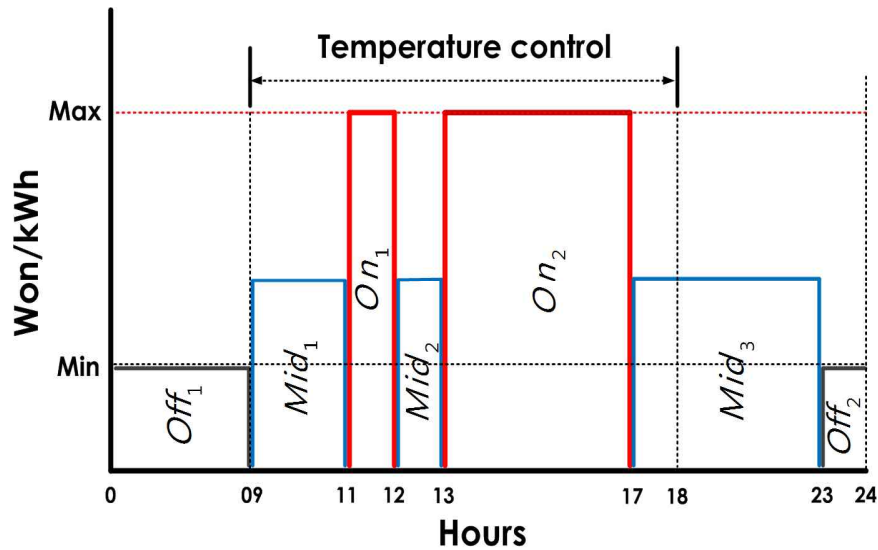


Fig. 14 TOU tariffs in summer

Table 4는 계절에 따른 경부하와 중부하 및 최대부하 시간대를 나타낸 것으로, 계절별로 여름철이 1년 중 가장 높은 전력수요를 나타내며, 하루를 기준으로 여름철에는 오후, 겨울철에는 저녁시간대에 전력수요가 높게 나타나고 있어, 1년 중 최대수요가 발생하는 여름철과 하루 중 수요가 집중되는 최대부하시간대에 상대적으로 높은 요금을 적용하기 위해 계절과 시간대를 구분하여 요금을 부과하고 있다.

Table 4 Time period for the general

Classification	Spring, Summer and Fall	Winter
Off-peak load	23:00~09:00	23:00~09:00
Mid-peak load	09:00~11:00	09:00~10:00
	12:00~13:00	12:00~17:00
	17:00~23:00	20:00~22:00
On-peak load	11:00~12:00	10:00~12:00
	13:00~17:00	17:00~20:00
		22:00~23:00

계시별 요금제에서 냉방시스템의 가동비용을 절감하는 것은 전체적으로 전력피크를 줄이며 부하사용을 이동 또는 감소시키는 방법으로, 주어진 요금 시간대에 따른 최적화된 운전시기를 결정하여 전력요금을 최소화 하는 것을 목적으로 한다 [37]. 일반적으로 24시간 동안 각각의 시간대별 냉방시스템의 사용을 고려하지만 본 논문에서는 모델로 설정한 건물의 이용시간인 오전 9시부터 오후 6시까지에 대한 냉방시스템 가동으로 국한하여 살펴보도록 한다. 따라서 에너지 비용을 최소화하는 목적함수는 식(21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min J = \min_u \sum_{k=1}^N \{u(k) \cdot p(k) \cdot c(k)\} \quad (21)$$

여기서  $N$ 은 건물온도를 제어하기 위해 사용되는 스위칭 총합으로 본 논문에서는 1분 기준으로 오전 9시부터 오후 6시까지 고려하므로 540이 되며,  $u(k)$ 는  $k$ 번째 스위칭 구간에서 냉방시스템 가동상태,  $p(k)$ 는 사용전력, 그리고  $c(k)$ 는 전력요금을 나타낸다.

냉방시스템에서 사용되는 전력은 EHP시스템에 입력되는 일정한 전력 값을 갖도록 하며, 즉  $p(k) = p$ , 제어입력은 전력요금을 제외한 냉방시스템 가동상태  $u(k)$ 와 사용 전력  $p(k)$ 의 곱으로 주어지게 된다. 냉방시스템 가동상태 값은 전력조절이 EHP시스템인 경우에는 0~1사이의 값을 갖지만 전력조절이 가능하지 않고 일정한 전력을 공급하는 냉방시스템의 경우에는 0과 1로만 주어진다.

수용가 전력사용이 냉방시스템 초기 가동시간인 오전 9시부터 냉방시스템 전력 사용량을 기반으로 중부하와 최대부하 시간대의 출력을 계산하기 위해 최적화 구간을 설정하며, 냉방시스템 제어를 위해 Fig. 15와 같이 시간에 따른 온도와 냉방시스템 동작을 설계 한다. 냉방시스템 제어구간은 1일 기준으로 설계되며, 다음날의 최초의 중부하 시간대의 입력변화가 발생하게 되면 새로운 제어구간 설정을 할 수 있는 구조로 설계 되어 진다 [38].

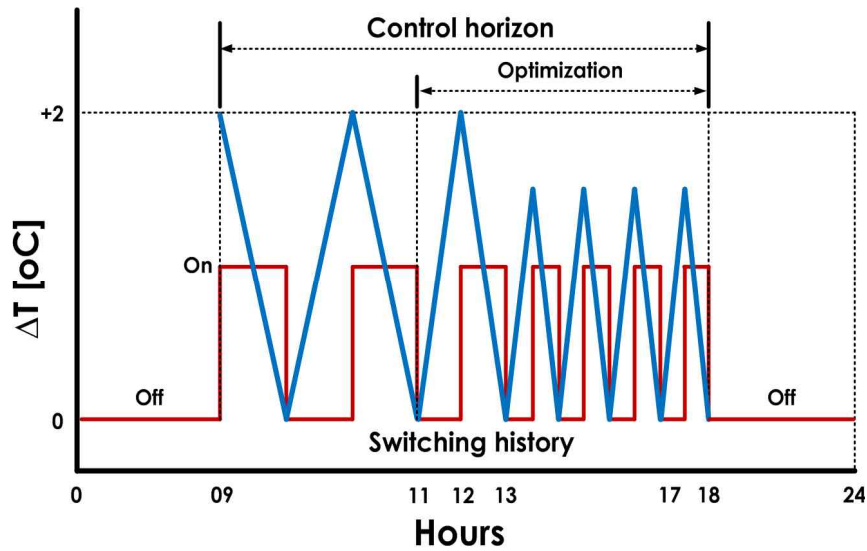


Fig. 15 Control horizon switching strategy

본 논문에서는 단일 존 건물의 냉방시스템 가동을 고려하였고 현재 실내온도를 기준으로 가동되기 때문에 시간에 대해서 새로 생성되는 현재의 실내온도를 나타내는 식(22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{n+1} = T_o + \sum_{k=1}^n (T_{in}(k) - T_{out}(k) \cdot u(k)) \quad (22)$$

여기서  $T_o$ 는 초기의 스위칭 구간에서 실내온도,  $T_n$ 는  $n(n=1, \dots, N)$ 번째 스위칭 구간에서의 실내온도,  $T_{in}(k)$ 는  $k$ 번째 스위칭 구간에서의 실내 온도의 상승열량, 그리고  $T_{out}(k)$ 는 냉방시스템 스위칭을 통한 실내온도의 하강열량을 나타낸다.

설정된 제어구간에서 냉방시스템 가동이 시작되면( $u(k) > 0$ ) 실내의 온도가 상승열량에서 하강열량의 차이만큼 실내온도가 내려가게 되고 냉방시스템 가동을 정지하게 되면( $u(k) = 0$ ) 실내온도는 다시 올라가게 된다. 따라서 실내온도제어 범위는 냉방제어 시스템이 가동 되는 시간동안 실내온도의 상한치와 하한치 범위 내에 있어야 하기 때문에 실내온도는 식(23)과 같은 경계조건을 만족하도록 제어하여야 한다.

$$T_{low} \leq T_n \leq T_{high}, \quad n = 1, \dots, N \quad (23)$$

여기서  $T_{high}$ 와  $T_{low}$ 는 시간에 따른 실내온도가 최대로 상승할 수 있는 상한치와 냉방시스템 가동으로 설정온도가 도달할 수 있는 하한치의 온도조절 범위를 나타내며, 실내온도 조절 경계조건에 도달하면 냉방시스템은 가동과 정지를 우선적으로 수행하게 된다.

계시별 요금제에서 제어구간 적용 알고리즘을 사용한 최적화는 식(24)와 같은 최소화 문제를 통해 결정할 수 있다.

$$\text{minimize: } J = \sum_{k=1}^N \{u(k) \cdot p(k) \cdot c(k)\} \quad (24)$$

$$T_{low} \leq T_n \leq T_{high}, \quad n = 1, \dots, N$$

## (2) 최대수요를 고려한 제어구간 적용 알고리즘

계시별 요금제와 병행하여 적용하고 있는 최대피크 요금제는 평상시에는 표준 시간대별 요금을 적용하고, 전력이 부족한 긴급 상황이 발생하는 피크부하 시간대에는 정상수준보다 높은 피크의 부하요금을 적용한다. 최대피크 요금제와 같이 피크를 줄이기 위한 또 다른 방법으로 외국의 여러 나라에서 사용되고 있는 최대수요 요금제를 살펴 보도록 한다.

전력피크를 고려하여 에너지 비용을 최소화하기 위한 수학적 모델은 식(25)와 같은 목적 함수를 사용하도록 한다.

$$\min J = \min_u \left( \sum_{k=1}^N \{u(k) \cdot p(k) \cdot c(k)\} + P_{\max} \cdot C_{cp} \right) \quad (25)$$

여기서  $P_{\max}$ 는 15분 기준으로 중부하와 최대부하 시간 중에 사용한 최대 전력사용량이며,  $C_{cp}$ 는 계시별 요금제와 별도로 부과되는 최대수요 요금제의 기본요금을 나타낸다.

## 2) 온도제어 알고리즘

### (1) 온-오프 제어 알고리즘

온-오프 제어는 단순한 제어 알고리즘으로 목표값의 부근에서 온-오프 스위칭을 반복하는 제어를 하며, 조작량이 0[%]와 100[%]사이를 반복하므로 조작량의 변화가 너무 크고, 실제 목표 값에 대해 지나치게 반응하게 된다. 식(24)와 식(25)에서 냉방시스템 가동상태를 나타내는  $u(k)$ 는 식(26)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(k) = \begin{cases} 0 & T_k \leq T_{low} \\ u(k-1) & T_{low} < T_k < T_{high} \\ 1 & T_k \geq T_{high} \end{cases} \quad (26)$$

여기서  $T_k$ 는 현재 실내온도,  $T_{low}$ 와  $T_{high}$ 는 실내온도를 유지할 수 있는 상한치와 하한치의 온도조절 범위를 나타낸다. 온-오프 제어 알고리즘은 온도에 대한 제어를 용이하게 수행할 수 있으나 시간에 따른 변동요금제의 특성은 반영하지 못한다.

### (2) LP 제어 알고리즘

본 논문에서는  $N$ 개의 유한한 스위칭구간에서 에너지 비용을 최소화하기 위해 목적함수 값을 최소화하도록 하는 제어상태 값을 결정하기 위해 LP 알고리즘을 사용하도록 한다. LP 알고리즘을 적용하여 온도제어를 수행하기 위해, 첫 번째로 시간에 따른 구간에서 스위칭 동작을 통한 실내온도 상한과 하한 경계값 설정, 구간에 따른 에너지 비용 계산, 최대부하 사용에 대한 제약조건을 설정하게 된다. 두 번째로 설정된 제약조건들은 실내온도의 상한과 하한에 대한 출력온도 제한조건  $A$ , 입력온도 제한조건  $b$ 를 계산한다. 마지막으로  $A \cdot x \leq b$  조건을 만족하는 상황에서 목적함수  $J$ 를 최소화할 수 있는

스위칭 동작  $u$ 를 결정하게 된다. 또한 스위칭  $u$  값을 0과 1만을 갖도록 하는 이진 제어와 0~1사이의 값을 갖는 가변 제어로 구분하여 살펴본다. 따라서 냉방시스템의 제어 입력으로 이진 제어는 0과 최대값을 갖는 온-오프 제어가 되고, 가변 제어는 0과 최대값 사이의 값을 사용하며, 전력조절이 가능한 냉방시스템에만 적용할 수 있다.

제안한 냉방시스템을 이용한 실내온도 조절 스위칭 최적화 문제를 해결하기 위해 Fig. 16과 같은 절차의 LP 알고리즘을 사용하였다.

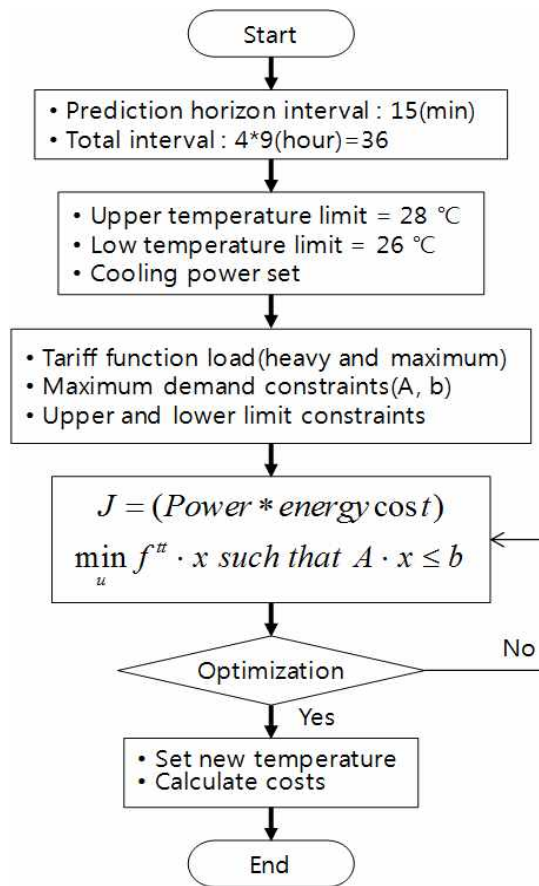


Fig. 16 Schematic diagram of LP algorithm

### (3) PSO 제어 알고리즘

PSO 알고리즘은 1995년 R. Eberhart 와 J. Kennedy가 제안한 이론으로, 일반적인 인공생명, 개체의 군집이론을 근거로 파티클(particle)의 활공이력과 다른 동반 개체들이 활공이력을 이용하여 자신의 활공을 조절하는 자연계 생물의 사회적 행동양식의 기반에



서 제안된 알고리즘으로, 진화의 개념을 통해서 구현된 GA(genetic algorithm)와 달리, 개체의 군집이론을 근거로 사회적 행동양식 기반으로 구현된다. PSO는 AI(artificial intelligence)를 기반으로 하는 경험적 최적화기법의 알고리즘으로, 수학적 알고리즘이 아닌 어떠한 경험적인 최적화를 위한 기법에 비해 이론이 간결하고, 구현의 용이하며 파라미터 제어의 견고성 및 연산의 효율성이 좋다 [39].

PSO 알고리즘은 개별의 파티클을  $n$ 차원 공간에서 하나의 해로 가정하며, 위치벡터( $X_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})$ )와 속도벡터( $V_i = (v_{i1}, \dots, v_{in})$ ), 두 벡터를 포함하는 솔루션으로 나타낸다. 시간에 따라 이동하는 개별의 속도 파티클은 지속적으로 최적의 파티클( $P_{best_i} = (x_{i1}^{P_{best}}, \dots, x_{in}^{P_{best}})$ )로 이동하도록 결정하며,  $P_{best_i}$  위치들 중에 최적의 적합도를 가지는 파티클이 전역 최적위치 파티클( $G_{best_i} = (x_{i1}^{G_{best}}, \dots, x_{in}^{G_{best}})$ )이 된다. 임의로 생성된 가중치 계수( $\alpha_i, r_1, r_2$ )와 가속상수( $m_1, m_2$ )에 의해 개별의 파티클들은 시간의 경과에 따라 전역 최적위치로 이동하게 되며, 모든 탐색 알고리즘은 전역 최적위치를 찾아내기 위해 전역적 탐색과 국지적 탐색이 조화를 이루어야 한다. 이를 위해 관성가중치  $\alpha_i$ 를 추가하고, 관성가중치의 변화에 따라 전역적 경험과 국지적 경험이 달라지게 된다. 관성가중치를 크게 주면 전역적인 탐색을, 적게 주면 국지적인 탐색을 의미하며, 관성가중치가 추가된 PSO의 두 가지 업데이트 규칙은 식(27)과 같이 나타낼 수 있다 [40].

$$V_i^{k+1} = \alpha_i V_i^k + m_1 r_1 (P_{best_i}^k - X_i^k) + m_2 r_2 (G_{best_i}^k - X_i^k) \quad (27)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1}$$

여기서  $V_i^{k+1}$ 는  $i$ 번째 파티클의  $k+1$ 번째 속도 벡터,  $X_i^{k+1}$ 는  $i$ 번째 파티클의  $k+1$ 번째 위치벡터,  $\alpha_i$ 는 관성가중치,  $m_1$ 과  $m_2$ 는 양의 실수,  $r_1$ 과  $r_2$ 는  $[0, 1]$ 사이의 랜덤 함수,  $P_{best_i}^k$ 는  $i$ 번째 최적의 파티클 위치벡터,  $G_{best_i}^k$ 는 전체 파티클 중 최적의 위치 벡터,  $k$ 는 반복지수이다.

제안한 냉방시스템을 이용한 실내온도 조절 스위칭 최적화 문제를 해결하기 위해 Fig. 17과 같은 절차의 PSO 알고리즘을 사용하였다.

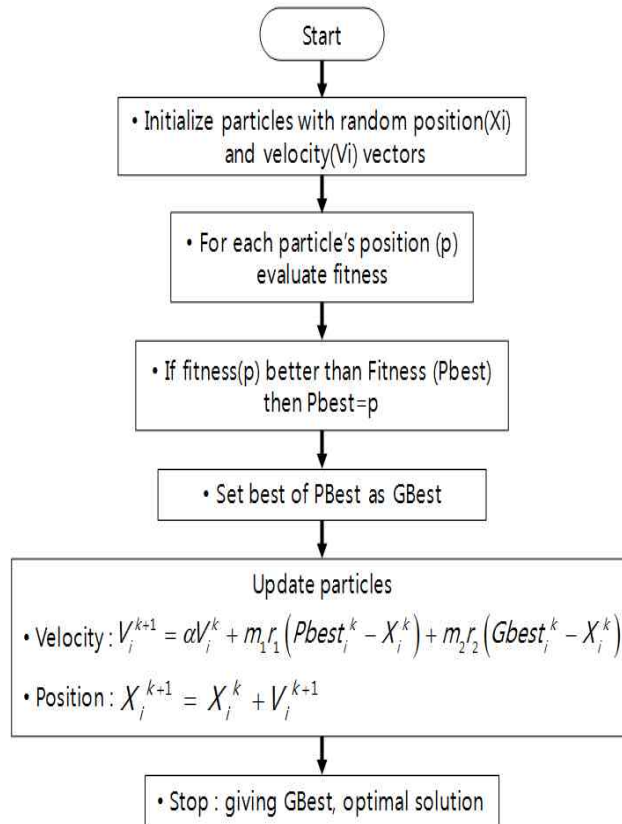


Fig. 17 Schematic diagram of PSO algorithm

## IV. 현장 측정 시스템 구성

### 1. 실시간 온·습도 및 전력사용량 측정 시스템 구성

현장 측정에 적용된 대상건물은 제주특별자치도 제주시 소재 지상 1층의 상업용 부속 건물로 2009년 9월 준공되었으며, 건물 면적은  $54.85[m^2]$ , 건물 구조는 철근 콘크리트 구조로 건물의 정면은 남쪽을 향하고 있다. 건물의 정면인 남쪽 벽면은 유리 외벽(glass curtain wall)과 제주관석으로 구성되었고 주 출입구인 동쪽 면과 서쪽 면에는 강화유리 도어가 설치되었다. 건물의 배면인 북쪽 면은 드라이비트(Dry vit)공법으로 마감되어 있다. Fig. 18은 현장 측정에 적용된 건물의 전경을 보여주고 있다.



Fig. 18 Single zone building in Jeju-do

외부기온 변화에 따른 실내의 온도와 습도 및 전력 사용량 변화를 측정하기 위해 대상건물에 설치된 모니터링 시스템과 구성도를 Fig. 19에 나타내었다. 실내의 온도와 습도를 측정하기 위해서 설치된 온·습도 센서는 네 개의 그룹으로 구성되어 각 모듈마다 온도와 습도가 측정되고, 측정된 온도와 습도 데이터는 RS232 유선통신을 이용하여 서버로 전송된다. 전력 사용량에 대한 측정은 EHP, 전등부하, 콘센트부하로 구분하여 각각의 부하에 개별의 CT(current transformer)를 설치하며, 개별의 CT에서 측정된 전력 사용량은 Zigbee 무선통신을 이용하여 서버로 전송된다. 서버로 전송된 온도와 습도 데이터 및 전력 사용량 데이터를 모니터링하고 DB화하는 세 가지 구조의 시스템으로 구성되어 있다.

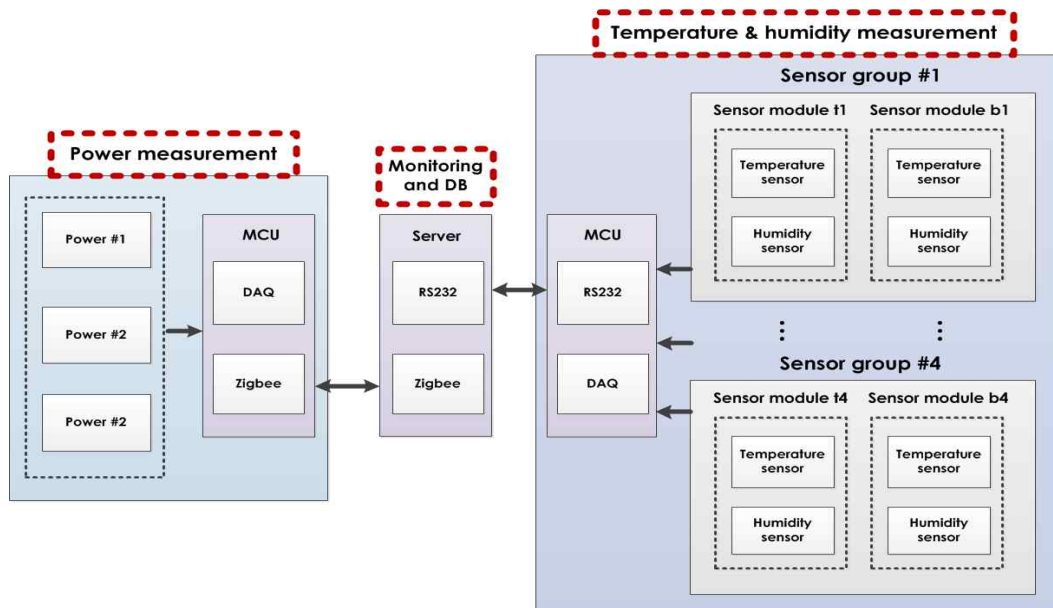


Fig. 19 Data acquisition system configuration

Fig. 20은 대상건물의 실내공간에 온도와 습도의 변화를 측정하기 위해 온·습도센서와 서버가 실제 현장에 설치된 모습을 보여주고 있다. 실내온도와 습도를 측정하기 위해 실내공간을 동쪽과 서쪽, 유리창과 안쪽 벽 측 그리고 상단과 하단으로 구분하였으며, 각각 8개의 온·습도 센서를 설치하였다. 센서의 설치위치와 간격으로는, 동쪽과 서쪽의 간격은 3.5[m], 유리창 측과 내부 벽 측까지 간격은 5.4[m], 동쪽과 서쪽 출입구에서는 각각 3.2[m], 하단에서 상단으로 0.8[m]와 2[m]지점으로 구분하여 설치하였다.



Fig. 20 Temperature/humidity sensor and data server

Table 5는 대상건물에 설치된 온·습도 센서의 제원을 나타낸 것으로, 실내 온도와 습도를 같은 시간대에 측정하고 DB화가 동시에 이루어지기 위하여 온·습도계를 사용하였으며, 온도의 측정범위는  $-40\sim 120[^\circ\text{C}]$ , 습도의 측정범위는  $0\sim 100\%[\text{RH}]$ 이다.

Table 5 Internal temperature and humidity measuring instruments


Model	Company	Measurement	Range
	Maxdetect	Indoor Temperature/ Humidity	Temperature $-40\sim 120^\circ\text{C}$ Humidity $0\sim 100\%[\text{RH}]$

Fig. 21은 대상건물의 전압과 전류, 전력 사용량을 측정하기 위해 전기 분전함에 계측용 CT가 실제 현장에 설치된 모습을 보여주고 있다. 전압과 전류, 전력 사용량을



측정하기 위해 전기 분전함 내부의 ELB(electrical leakage breaker) 2차 측에 EHP, 전등부하, 콘센트부하로 구분하여 각각의 CT를 설치하였다.

Table 6은 대상건물에 설치된 전압과 전류, 전력 사용량을 측정하기 위한 CT와 측정된 데이터의 수신부 제원을 나타낸 것으로, CT의 주파수 측정범위는 50~60[Hz], 교류 전압의 측정범위는 90~300[V]이다.

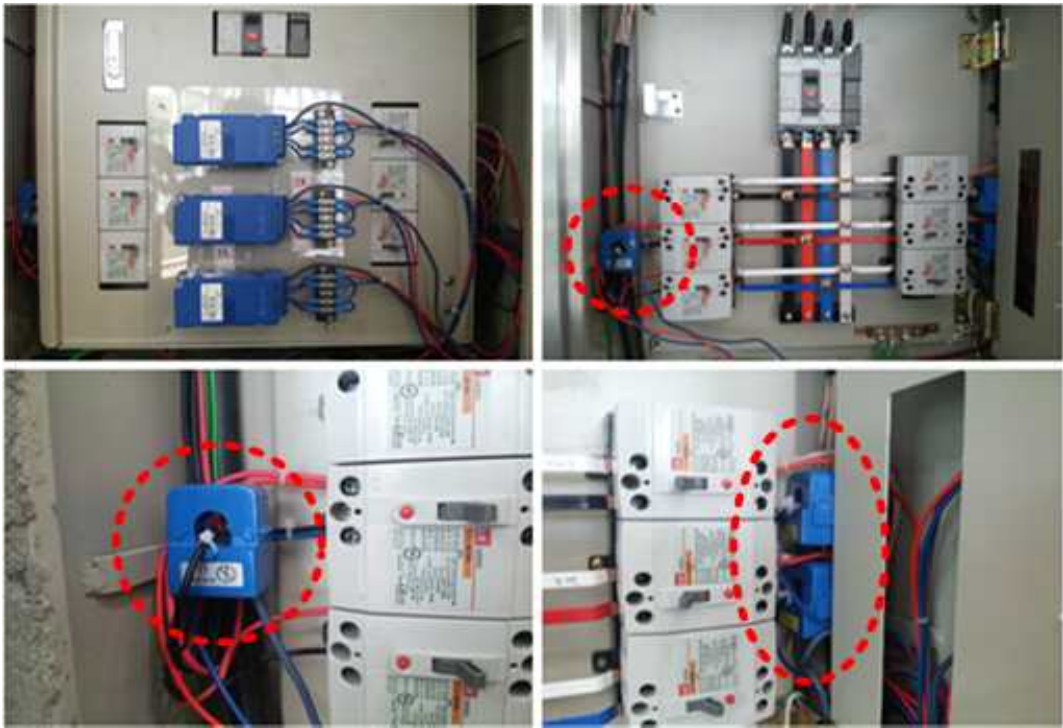



Fig. 21 Current transformer and data server

Table 6 CT measurement system

Model	Company	Measurement	Range
	LEM	Frequency/ Power/ Reactive Energy/ Apparent Energy Sum	Frequency 50~60[Hz], Measuring range 90~300[V]

## 2. 현장 데이터 측정

외부기온 변화에 따른 실내온도와 습도 및 전력 사용량 변화를 측정하기 위해 여름철과 겨울철 평일로 구분하고, 기상청에서 제공된 제주(청) 지상관측자료 중 요소별 자료 중 일사량과 외부의 최고기온 및 평균기온, 상대습도를 기준으로 하여 평일 EHP를 가동한 경우 대상건물의 실내온도와 습도 및 미국냉동공조학회가 제시하는 쾌적 영역의 포함여부와 전압과 전류, 전력 사용량 변화를 측정 비교하였다.

### 1) 계절에 따른 실내 온·습도 비교

#### (1) 일사량 현황

건물의 실내온도에 영향을 미치는 계절별 일사량을 확인하기 위해 여름철인 2012년 7월과 8월, 그리고 겨울철인 12월과 2013년 1월의 일사량을 Fig. 22에 나타내었다.

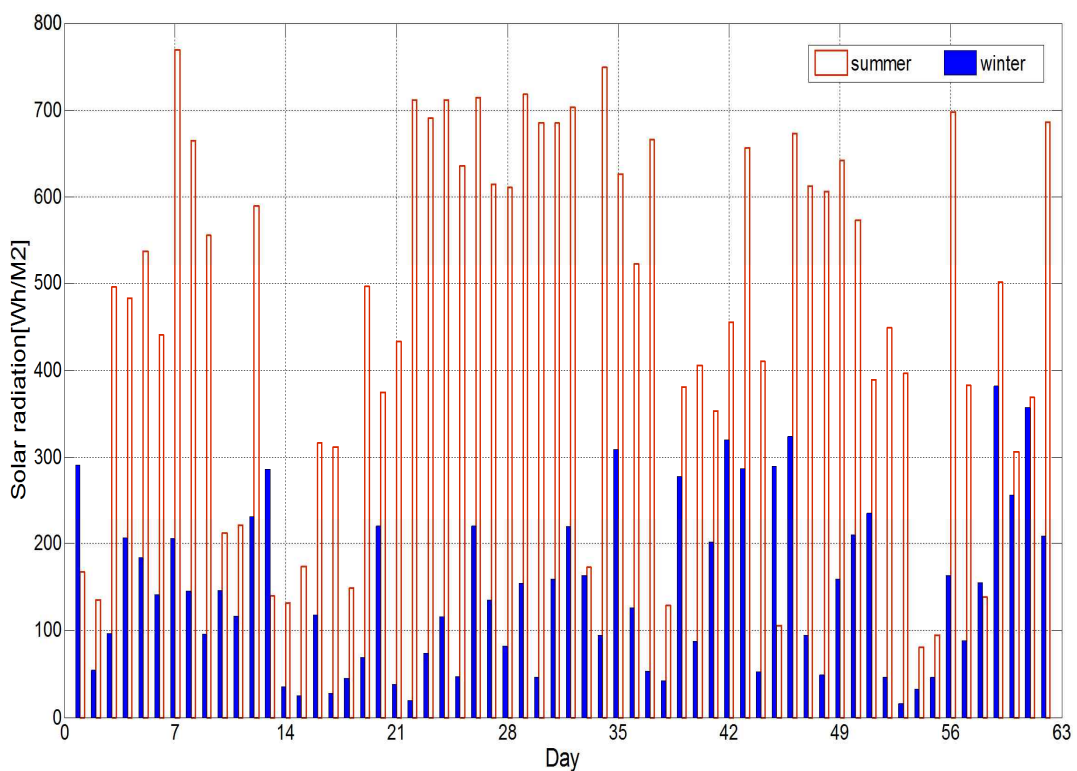


Fig. 22 Solar radiation in summer and winter

여름철 최고일사량은  $769 [Wh/m^2]$ 이고 최저일사량은  $81 [Wh/m^2]$ 를 나타내고 있으며, 7월과 8월의 평균 일사량은 각각  $470 [Wh/m^2]$ 과  $450 [Wh/m^2]$ 로 7월의 평균 일사량이 높음을 알 수 있다. 또한 겨울철 최고일사량은  $381 [Wh/m^2]$ 이고 최저일사량은  $20 [Wh/m^2]$ 를 나타내고 있으며, 12월과 1월의 평균 일사량은 각각  $124 [Wh/m^2]$ 와  $173 [Wh/m^2]$ 로 1월의 평균 일사량이 높음을 알 수 있다.

(2) 여름철 실내 온·습도 비교

2012년 6월부터 10월 초 까지 외부의 최고기온과 평균기온 및 상대습도를 Fig. 23에 나타내었다. 최고기온은  $30.2 \sim 34.9 [^{\circ}C]$ 를 나타내고 있고, 하루를 기준으로 최고기온은 7월이 가장 높으며 1개월 기준의 평균기온은 8월이 높음을 알 수 있다. 상대습도인 경우도  $71.5 \sim 98.1 [\%]$ 를 나타내고 있고, 하루기준의 상대습도는 9월이 가장 높으며 1개월 기준의 평균습도는 6월이 낮게 나타나고 있다.

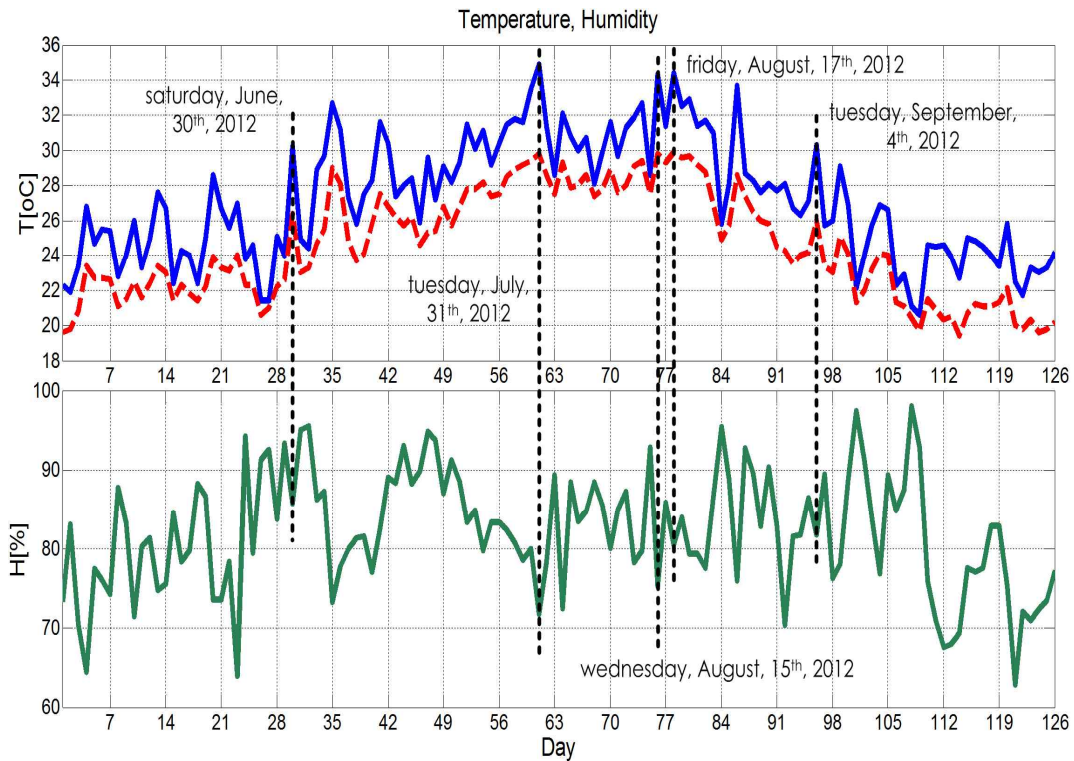


Fig. 23 External temperature and the average temperature/humidity in summer by KMA data



Fig. 24는 외부기온이 높은 여름철인 2012년 7월부터 8월까지 토요일과 일요일을 제외한 평일 하루의 시간변화에 따른 실내 평균온도와 상대습도의 변화를 기상청에서 제공한 자료와 대상건물에 설치된 온·습도 센서에서 측정된 온도와 습도를 비교하여 나타낸 것으로, EHP를 가동하지 않은 평일 외부기온이 가장 높은 시간대의 경우 외부기온보다 실내온도가 2[°C] 높게 나타나고 있으며, 실내습도는 외부기온의 영향으로 인해 외부습도와 실내습도의 변화 폭이 작게 나타나고 있다. EHP를 가동하는 경우는 환기에 대한 고려를 우선하지 않더라도 EHP를 가동하지 않는 경우는 실내공간의 적절한 환기의 필요성을 알 수 있다.

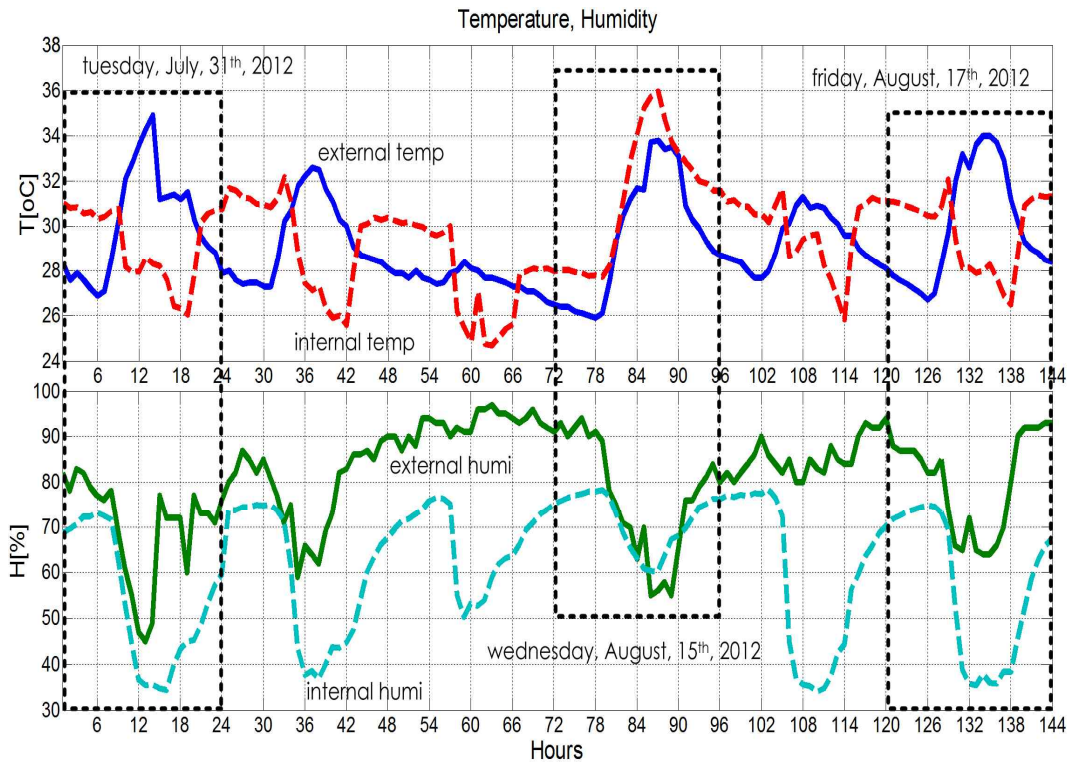


Fig. 24 External temperature and the average internal temperature/humidity in summer weekdays

가. 평일 실내온도 변화 비교

여름철인 7월 중 외부기온이 높은 평일 EHP 설정온도를 26[°C]로 하여 가동한 후 시간변화에 따른 실내 평균온도를 Fig. 25에 나타낸 것으로, 외부기온이 가장 높은 14시

의 온도차를 비교하였다. Fig. 25(a)는 외부와 실내 평균온도 변화를 나타내었는데, 외부와 실내 평균온도와의 차는  $-6.6[^\circ\text{C}]$ 이고 미국냉동공조학회가 제시하는 온도의 쾌적범위인  $23\sim 27[^\circ\text{C}]$ 에는 포함되지 못하는 것으로 나타나고 있다. Fig. 25(b)는 유리창 동쪽과 서쪽의 상단과 하단 4개 지점의 실내 평균온도를 나타낸 것으로, 동쪽과 서쪽 상단 실내 평균온도는  $30[^\circ\text{C}]$ , 하단은  $28.6[^\circ\text{C}]$ 와  $29.2[^\circ\text{C}]$ 로 나타나고 있다. Fig. 25(c)는 실내 벽의 동쪽과 서쪽의 상단과 하단 4개 지점의 실내 평균온도를 나타낸 것으로, 동쪽과 서쪽 상단 실내 평균 온도는  $28.1[^\circ\text{C}]$ 와  $27.3[^\circ\text{C}]$ , 하단은  $27[^\circ\text{C}]$ 와  $25.9[^\circ\text{C}]$ 로 나타나고 있다. Fig. 25(d)는 유리창의 동쪽 상단지점과 서쪽 벽 하단지점의 실내 평균온도를 비교한 것으로, 유리창 동쪽 상단의 실내 평균온도는  $1.7[^\circ\text{C}]$  높게, 서쪽 벽의 하단 실내 평균온도는  $2.4[^\circ\text{C}]$  낮게 나타나고 있으며, 두 지점의 온도차는  $4.1[^\circ\text{C}]$ 로 나타나고 있다.

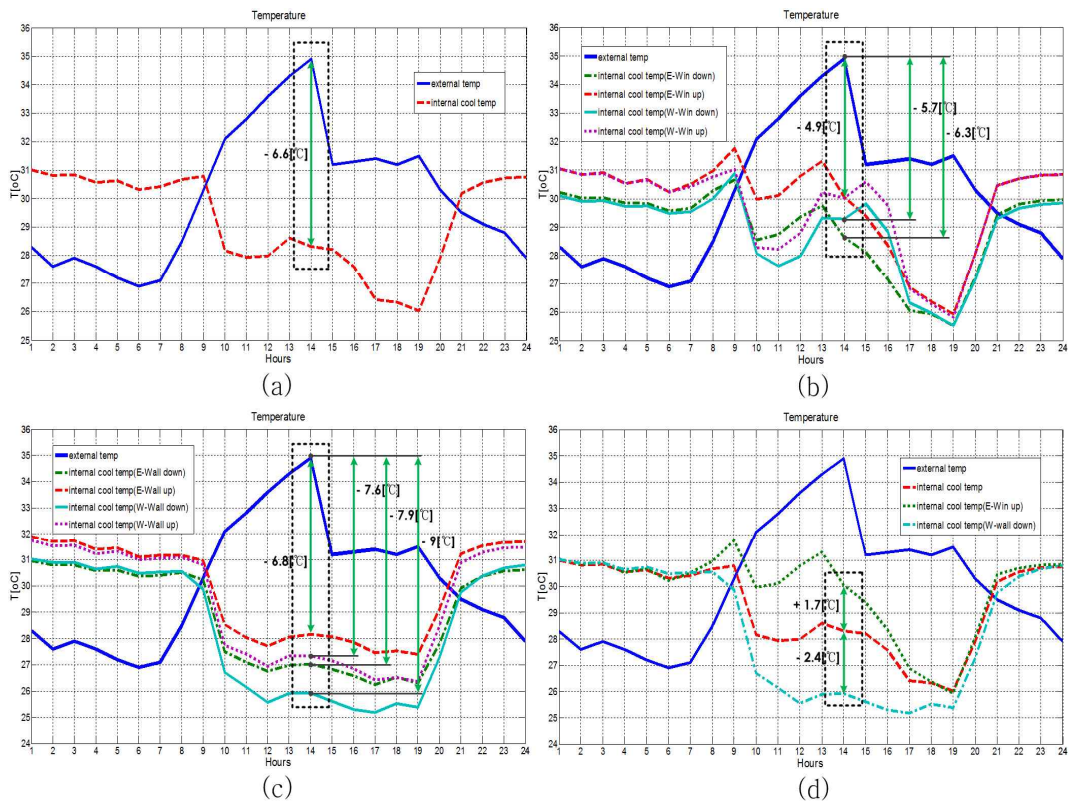


Fig. 25 External and internal temperatures in summer

(a) internal temperature (b) internal temperature at window side

(c) internal temperature at wall side (d) internal temperature at window/wall side

나. 평일 실내습도 변화 비교

시간변화에 따른 실내 평균습도를 측정 후 비교한 것을 Fig. 26에 나타내었다. Fig. 26(a)는 외부기온 및 습도와 실내 평균온·습도를 나타낸 것으로, 외부습도 및 실내 평균 온도와 습도는 외부 기온과 반대곡선을 보이고 있으며, EHP를 가동하는 시간동안은 미국냉동공조학회가 제시하는 습도의 쾌적 범위인 30~60[%]에 포함되는 것을 알 수 있다. Fig. 26(b)는 유리창의 동쪽과 서쪽의 상단과 하단 4개 지점의 실내 평균습도로, 상단과 하단의 습도분포가 비슷하게 나타나고 있다. Fig. 26(c)는 실내 벽의 동쪽과 서쪽의 상단과 하단 4개 지점의 실내 평균 습도로, 상단과 하단의 습도는 비슷하며 서쪽 벽의 하단 습도가 높게 나타나고 있다. Fig. 26(d)는 유리창의 동쪽 상단지점과 서쪽 벽 하단지점의 실내 평균습도의 차로, 유리창의 동쪽 상단 1개 지점은 실내 평균습도보다 낮게, 서쪽 벽의 하단 1개 지점은 실내 평균습도보다 높으며, 두 지점의 실내 평균습도 차는 13.3[%]로 나타나고 있다.

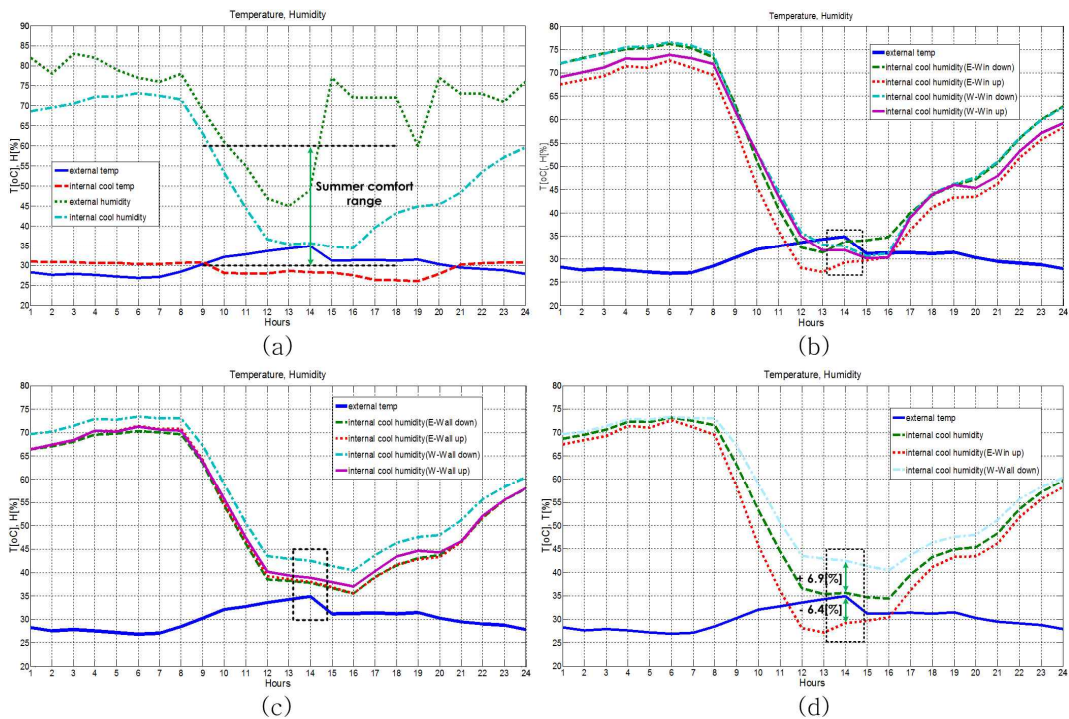


Fig. 26 Internal humidity changes in summer

(a) internal humidity (b) internal humidity at window side

(c) internal humidity at wall side (d) internal humidity at window/wall side

(3) 겨울철 실내 온·습도 비교

2012년 11월부터 2013년 3월 초 까지 외부의 최저기온과 평균기온 및 상대습도를 Fig. 27에 나타내었다. 최저기온은  $-0.1 \sim -1.8[^\circ\text{C}]$ 이고, 하루기준의 최저기온은 2월이 가장 낮았으며 1개월 평균기온은 1월이 낮은 것으로 나타나고 있다. 상대습도인 경우도  $48.6 \sim 91.6[\%]$ 를 나타내고 있고, 하루기준의 상대습도는 2월이 가장 높으며 1개월 평균 습도는 11월이 낮음을 알 수 있다.

Fig. 28은 외부기온이 낮은 2012년 12월과 2013년 1월까지 평일 하루의 시간변화에 따른 실내 평균온도와 상대습도의 변화를 기상청에서 제공된 자료와 대상건물에 설치된 온·습도 센서에서 측정된 온도와 습도를 나타낸 것으로, 겨울철이 여름철 보다 습도가 낮았으며, 외부기온이 높을 경우 상대적으로 외부습도가 낮음을 확인 할 수 있다. EHP를 가동하는 경우 실내의 습도를 낮게 유지하는 것으로 나타나고 있어 겨울철 실내공간의 환기에 대한 고려보다는 적절한 실내온도 유지의 필요성을 알 수 있었다.

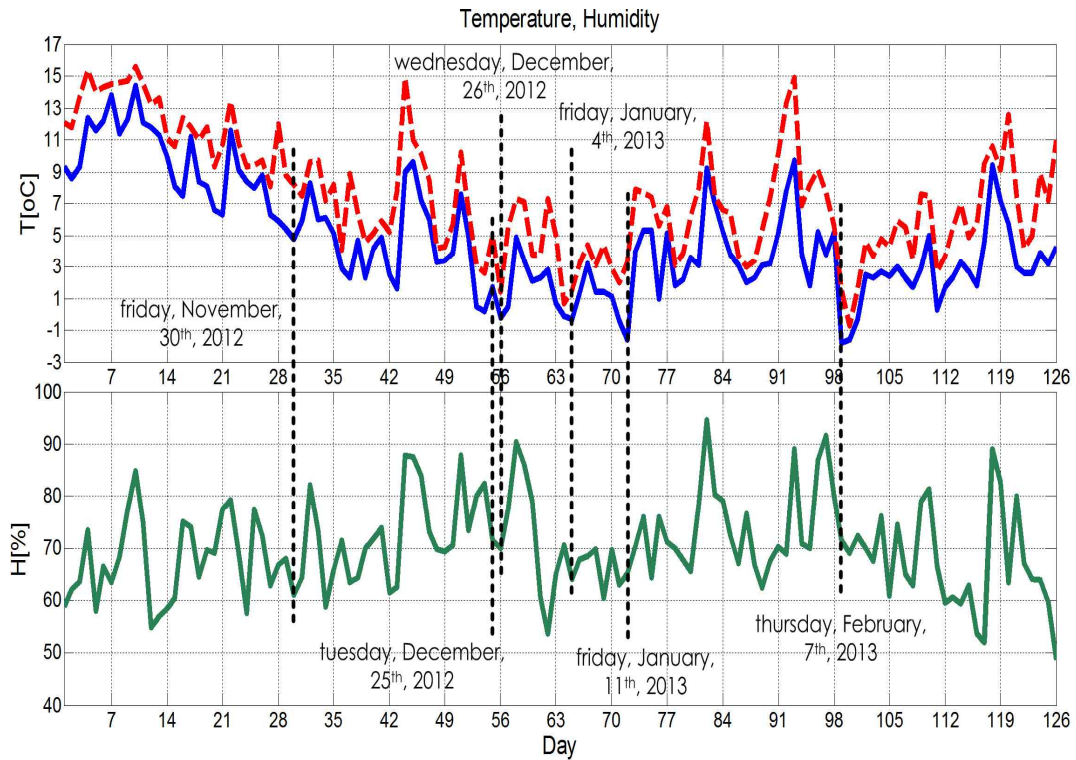


Fig. 27 External temperature and the average temperature/humidity in winter by KMA data



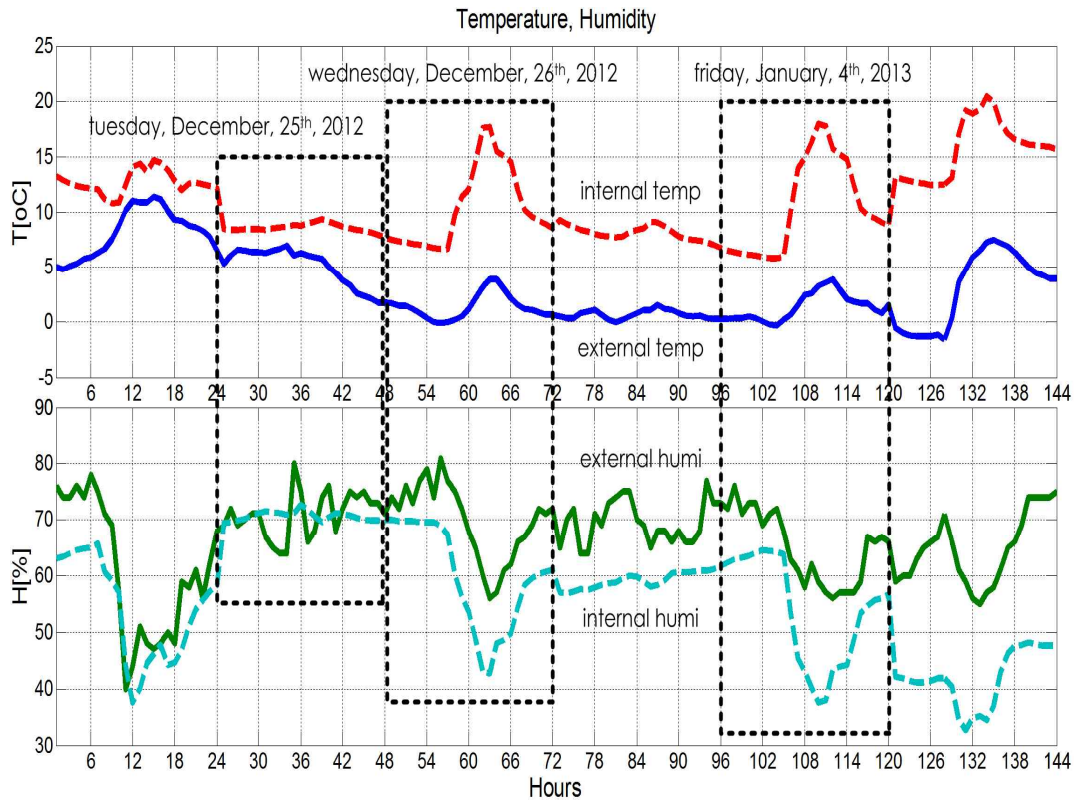


Fig. 28 External and the average internal temperature/humidity in winter weekdays

가. 평일 실내온도 변화 비교

겨울철인 1월 중 외부기온이 낮은 평일 EHP 설정온도를 18[°C]로 하여 가동한 후 시간변화에 따른 실내 평균온도를 Fig. 29에 나타낸 것으로, 실내 평균온도가 가장 높은 14시와 외부기온이 가장 낮은 24시를 기준으로 온도차를 비교하였다. Fig. 29(a)는 외부기온과 실내 평균온도 변화를 나타낸 것으로, 외부기온과 실내 평균 온도차는 14.7[°C], 외부기온이 가장 낮은 24시 실내 평균 온도차는 7.2[°C]를 보이고 있으며, 미국냉동공조 학회가 제시하는 온도의 쾌적 범위인 20~25[°C]에 포함되지 못하는 것으로 나타나고 있다. Fig. 29(b)는 유리창 동쪽과 서쪽의 상단과 하단 4개 지점의 실내 평균온도를 나타낸 것으로, 서쪽과 동쪽 상단은 24.6[°C]와 19.7[°C], 하단은 20.8[°C]와 16.6[°C]로 서쪽 상단과 동쪽하단의 온도차는 8[°C], 외부기온이 가장 낮은 24시의 실내 평균 온도차는 7.3[°C]로 나타나고 있다. Fig. 29(c)는 실내 벽의 동쪽과 서쪽의 상단과 하단 4개 지점의 실내 평균온도를 나타낸 것으로, 동쪽과 서쪽 상단은 19[°C]와 15[°C], 하단은 14.7[°C]와

13.3[°C], 외부 기온이 가장 낮은 24시 실내 평균 온도차는 8.2[°C]로 나타나고 있다. Fig. 29(d)는 유리창의 서쪽 상단지점과 서쪽 벽 하단지점의 실내 평균온도를 비교한 것으로, 유리창 서쪽 상단의 실내 평균온도는 6.6[°C]높게, 서쪽 벽의 하단 실내 평균 온도는 4.7[°C]낮게 나타나고 있으며, 외부기온이 가장 낮은 24시의 실내 평균 온도차는 7.1[°C]임을 알 수 있다.

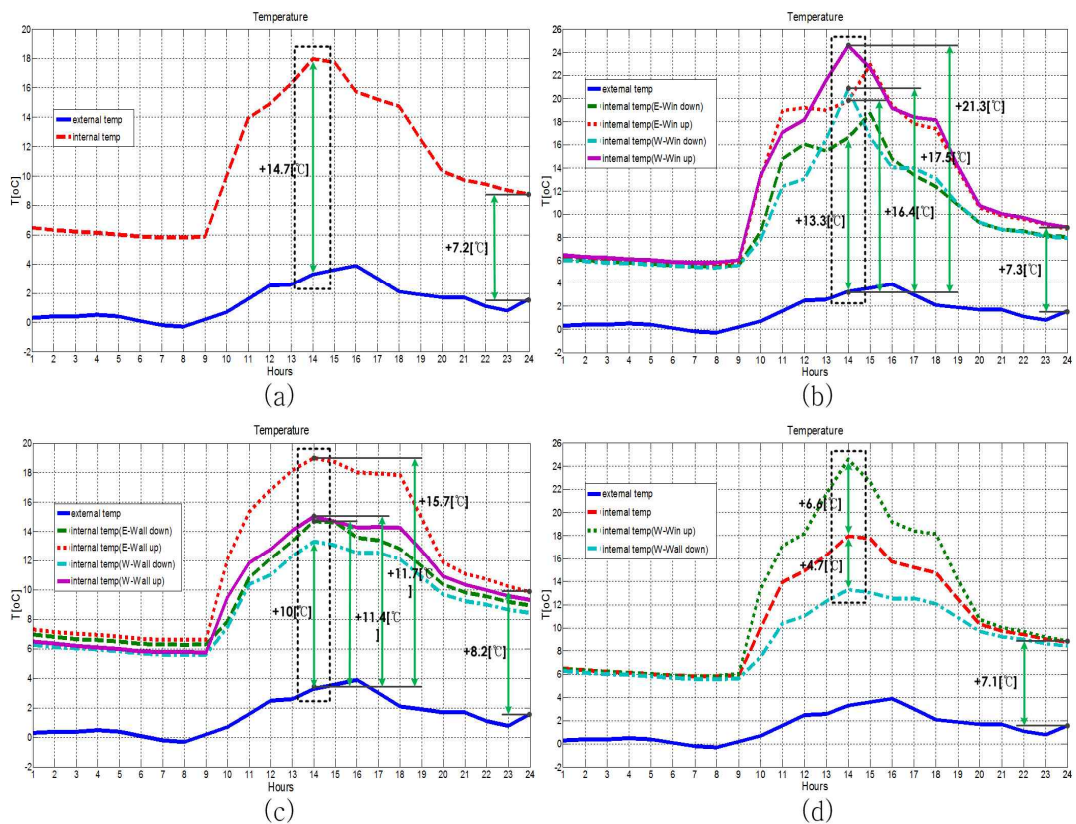


Fig. 29 External and internal temperatures in winter

(a) internal temperature (b) internal temperature at window side

(c) internal temperature at wall side (d) internal temperature at window/wall side

나. 평일 실내습도 변화 비교

시간변화에 따른 실내 평균습도를 측정 후 비교한 것을 Fig. 30에 나타내었다. Fig. 30(a)는 외부기온 및 습도와 실내 평균 온·습도를 나타낸 것으로, 외부습도 및 실내 평균 온도와 습도는 외부 기온과 반대곡선을 보이고 있으며, EHP를 가동하는 시간

동안 미국냉동공조학회가 제시하는 습도의 쾌적 범위인 30~60[%]에 포함되는 것으로 나타나고 있다. Fig. 30(b)는 유리창의 동쪽과 서쪽의 상단과 하단 4개 지점의 실내 평균 습도로, 상단과 하단의 곡선은 비슷하게 나타나고 있으며, 서쪽 유리창 상단의 습도가 낮게 나타나고 있다. Fig. 30(c)는 실내 벽의 동쪽과 서쪽의 상단과 하단 4개 지점의 평균습도로, 동쪽 벽 상단은 35.4[%]를 서쪽 벽 하단은 50.6[%]를 나타내고 있으며, 서쪽 벽 하단 습도가 높음을 알 수 있다. Fig. 30(d)는 유리창의 서쪽 상단지점과 서쪽 벽 하단지점의 실내 평균습도의 차로, 유리창의 서쪽 상단 1개 지점은 실내 평균습도 보다 11.2[%] 낮게, 서쪽 벽 하단 1개 지점은 실내 평균습도 보다 14.4[%] 높고, 두 지점의 실내 평균습도 차는 24.3[%]임을 알 수 있다.

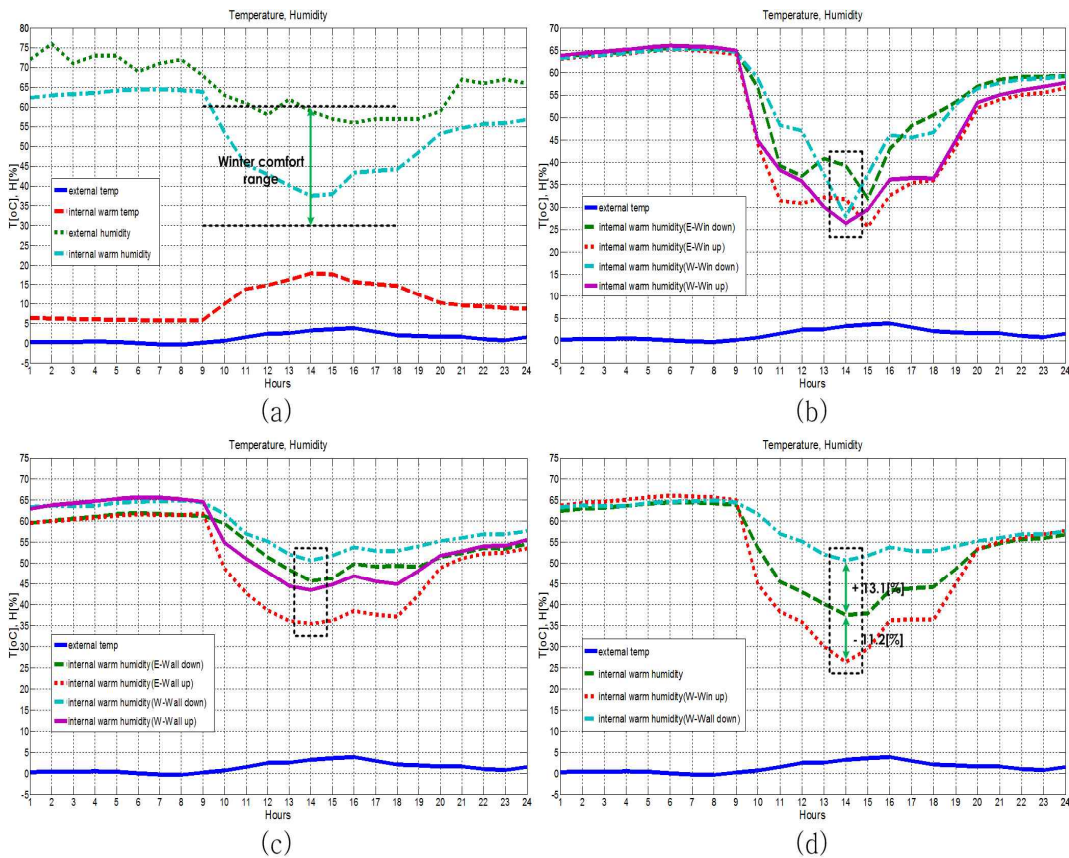


Fig. 30 Internal humidity in winter

(a) internal humidity (b) internal humidity at window side

(c) internal humidity at wall side (d) internal humidity at window/wall side



## 2) EHP 가동에 따른 전력사용량 변화 특성

### (1) 여름철 전력 사용량 변화 특성

2012년 6월부터 9월 초까지 외부기온 변화에 따른 EHP와 전등부하, 콘센트부하에 대한 전압, 전류, 전력 사용량의 변화를 Fig. 31에 나타내었다. EHP 가동에 따른 전압 변동범위는 최소 214.3[V]에서 최대 218.3[V], 평균전압은 216.3[V], 전류는 최대 7.6[A], 전력 사용량은 25.1[kWh]로 나타나고 있으며, 전등부하의 전압 변동범위는 최소 213.8[V]에서 최대 218.5[V], 평균전압은 216.1[V], 전류는 최대 1.3[A], 전력 사용량은 2.9[kWh], 콘센트 부하의 전압 변동범위는 최소 213.6[V]에서 최대 217.4[V], 평균전압은 216[V], 전력 사용량은 23.2[kWh]로 나타나고 있다. 최대 전력사용량과 전류는 EHP를 가동했을 때가 높았으며, 평균전압은 EHP보다 전등과 전열을 사용했을 때가 낮은 것으로 나타나고 있다.

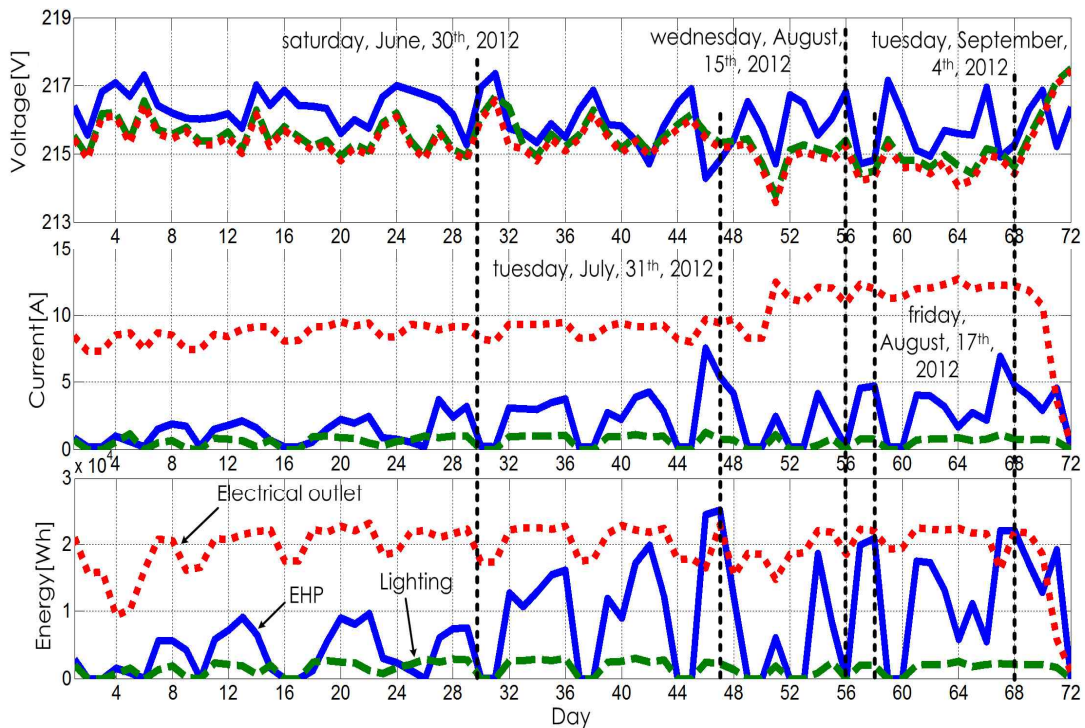


Fig. 31 Energy consumption according to the external temperature in summer

Fig. 32는 외부기온이 높은 7월과 8월 시뮬레이션 대상건물의 전력 사용량 변화를 측정된 것으로, 토요일과 일요일을 제외한 평일 시간변화에 따른 EHP, 전등부하, 콘센트



부하의 전력 사용량 변화를 나타내고 있다. EHP 가동에 따른 전력 사용량은 최소 2.5 [kWh]에서 최대 2.7[kWh], 콘센트 부하의 전력사용량은 최소 696[Wh]에서 최대 1.3 [kWh]로 나타나고 있다.

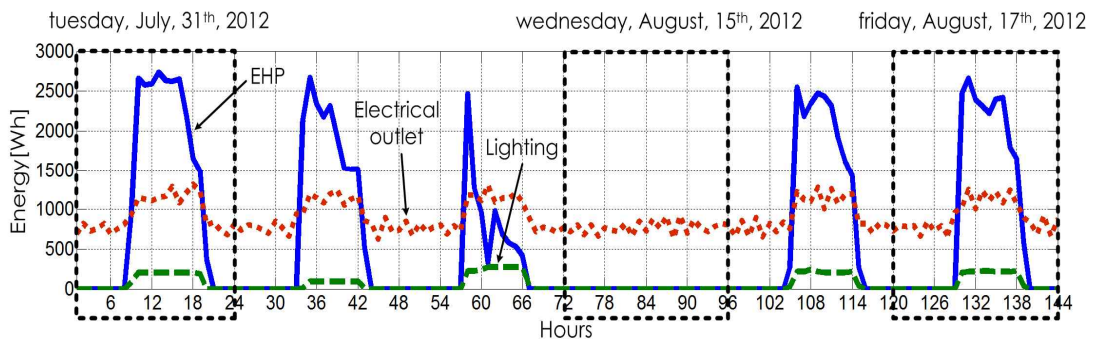


Fig. 32 Energy consumption by EHP/Lighting/Electrical outlet in summer weekdays

Fig. 33은 7월 중 평일 시간변화에 따른 EHP와 전등부하, 콘센트 부하에 대한 전력 사용량을 나타낸 것으로, EHP 가동에 따른 전력 사용량은 2.7[kWh], 전등부하에 따른 전력 사용량은 214[Wh], 콘센트 부하에 따른 전력 사용량은 1.3[kWh]로 나타나고 있다.

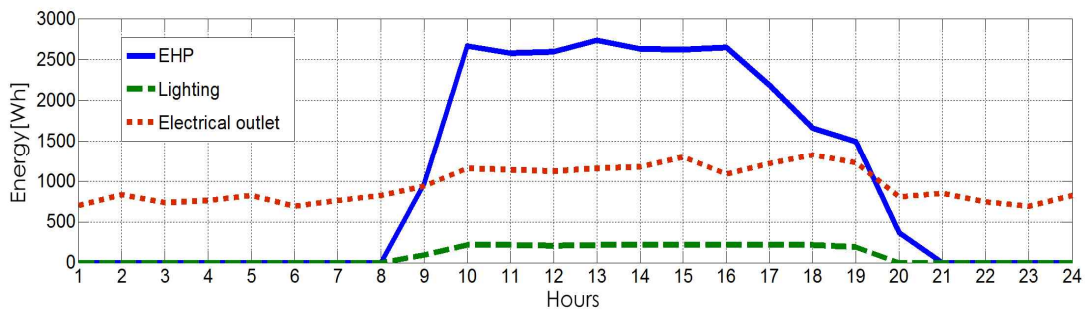


Fig. 33 Energy consumption by EHP/Lighting/Electrical outlet in summer

Fig. 34는 7월과 8월 중 외부기온이 높은 평일 EHP 가동 후 시간변화에 따른 전력 사용량을 비교한 것으로, 8월 중 평일보다 7월 중 평일의 일사량이 높아 외부기온 상승

으로 인한 실내온도 상승으로 이어져 EHP 가동시간에 의한 전력 사용량이 높게 나타나고 있다.

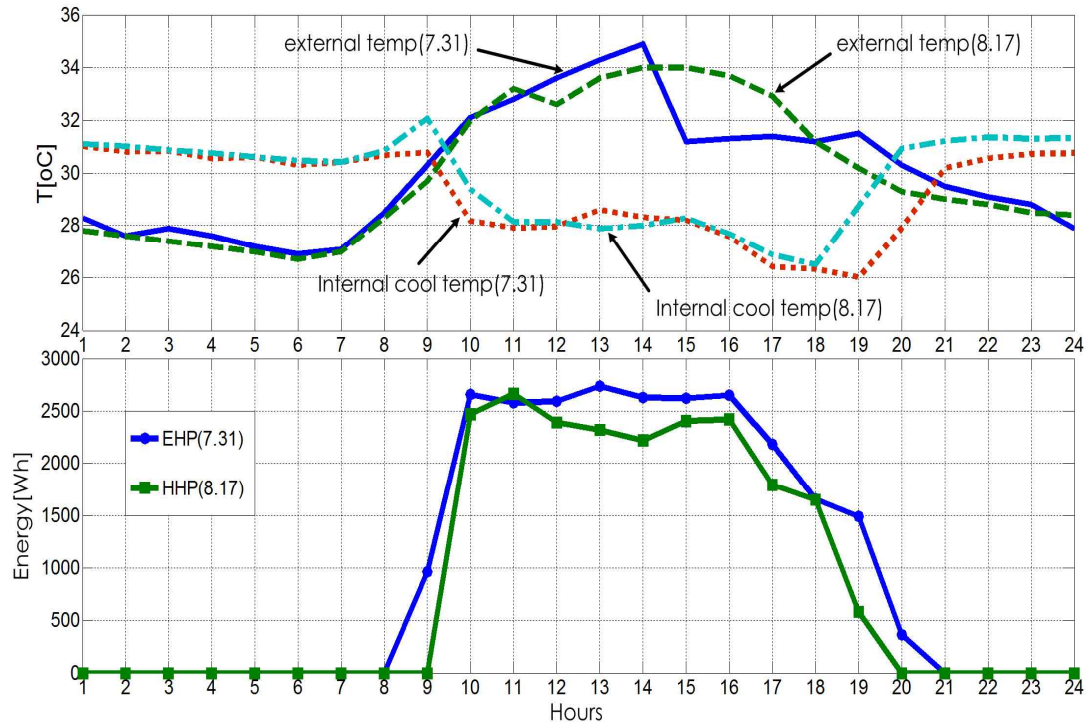


Fig. 34 External and internal temperatures by EHP energy consumption in summer weekdays

(2) 겨울철 전력 사용량 변화 특성

2012년 11월부터 2013년 3월까지 외부기온 변화에 따른 EHP와 전등부하, 콘센트부하에 대한 전압, 전류, 전력 사용량의 변화를 Fig. 35에 나타내었다. EHP 가동에 따른 전압의 변동범위는 214.7~217.9[V], 평균전압은 216.7[V], 전류는 최대 7[A], 전력 사용량은 33.3[kWh]로 나타나고 있으며, 전등부하의 전압 변동범위는 215.8~218.3[V], 평균전압은 217.3[V], 전류는 최대 2.1[A], 전력 사용량은 2.9[kWh], 콘센트 부하의 전압 변동범위는 215.3~218.2[V], 평균전압은 217.2[V], 전류는 최대 1.3[A], 전력 사용량은 15.4[kWh]로 나타나고 있다. 최대 전력사용량은 EHP를 가동했을 때가 높았으며, 전류는 콘센트 부하를 사용했을 때가 높았고, 평균전압은 EHP를 사용했을 때가 전등과 콘센트 부하에 비해 낮은 것으로 나타나고 있다.

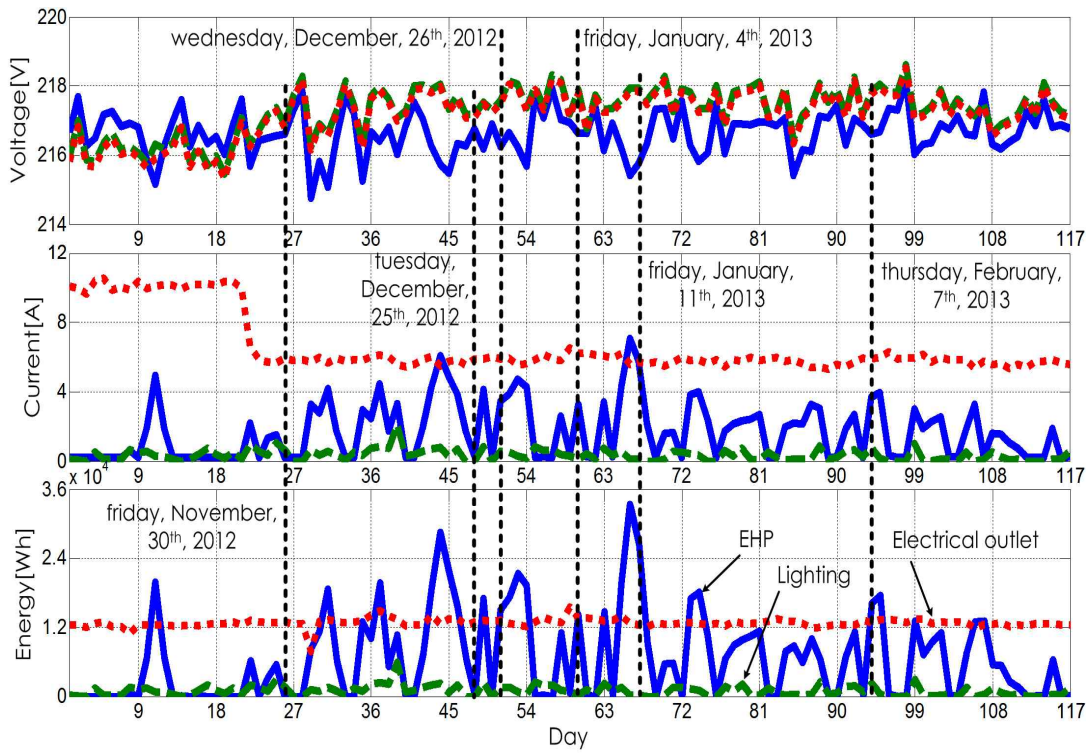


Fig. 35 Energy consumption according to the external temperature in winter

Fig. 36는 실내 평균온도가 높은 2012년 12월과 2013년 1월 시뮬레이션 대상건물의 전력 사용량 변화를 측정된 것으로, 평일 시간변화에 따른 EHP, 전등부하, 콘센트부하의 전력 사용량 변화를 나타내고 있다.

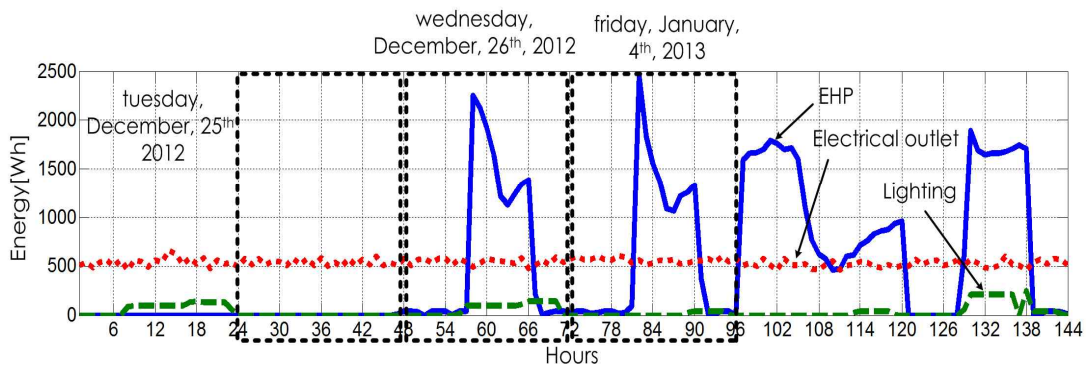


Fig. 36 Energy consumption by EHP/Lighting/Electrical outlet in winter weekdays

Fig. 37은 2013년 1월 중 실내 평균온도가 높은 평일 시간변화에 따른 EHP와 전등부하, 콘센트부하에 대한 전력 사용량을 나타낸 것으로, EHP 가동에 따른 전력 사용량은 2.5[kWh], 콘센트부하는 603[Wh]로 나타나고 있다.

Fig. 38은 2012년 12월과 2013년 1월 중 실내 평균온도가 높은 평일 EHP 가동 후 시간변화에 따른 전력 사용량을 비교한 것으로, 2012년 12월 중 평일의 일사량이 낮아 외부기온이 낮아져 EHP 가동에 의한 전력 사용량이 높게 나타나고 있다.

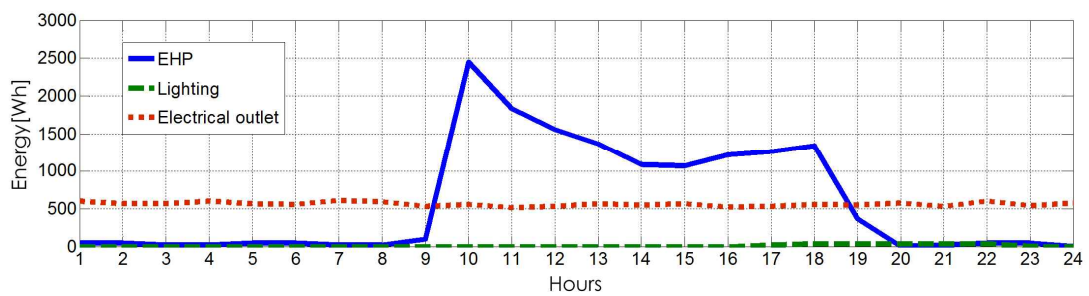


Fig. 37 Energy consumption by EHP/Lighting/Electrical outlet in winter

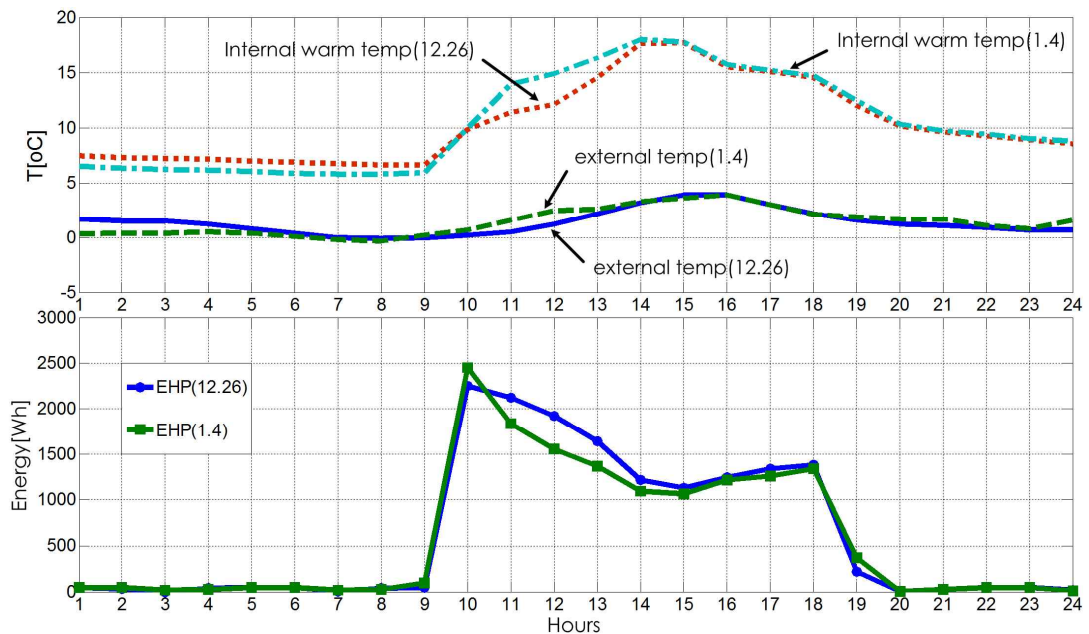


Fig. 38 External and internal temperatures by EHP energy consumption in winter weekdays



(3) 여름철 및 겨울철 EHP 전력 사용량 특성

Fig. 39는 2012년 여름철과 겨울철에서 평일 EHP 가동 후 시간변화에 따른 EHP에 대한 전압, 전류, 전력 사용량을 평균하여 나타내었다. 여름철의 전압은 214.7[V]와 214.8[V], 전류는 5.8[A]와 4.8[A], 전력 사용량은 1[kWh]와 871.2[Wh]로 외부기온이 낮은 경우가 평균 전력 사용량도 낮게 나타나고 있다. 겨울철에 전압은 216.3[V]와 216.6[V], 전류는 3.43[A]와 3.3[A], 전력 사용량은 620[Wh]와 584[Wh]로 외부기온이 높은 경우가 평균 전력 사용량이 낮게 나타나고 있다.

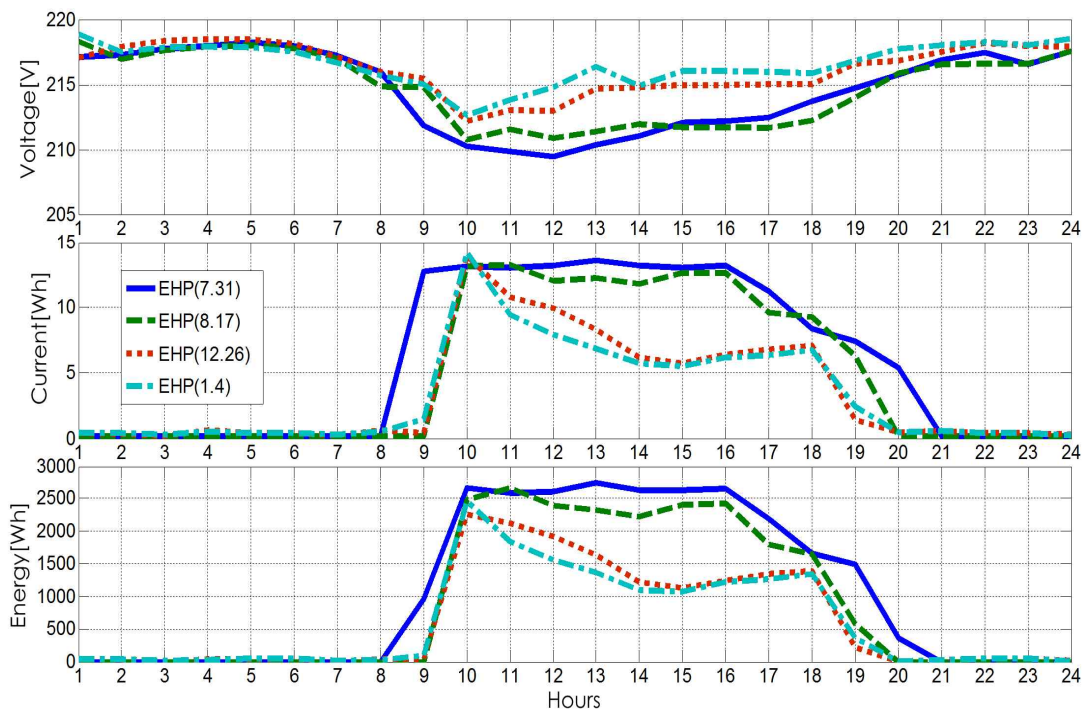


Fig. 39 Energy consumption comparison of EHP in summer/winter weekdays

3) 측정결과 고찰

건물에너지의 효율 향상을 위한 실내온도 제어방안에 대한 해석을 위해 단일 존 건물에 영향을 미치는 일사모델과 외벽모델, 유리의 열 교환 모델, 집중인자를 이용한 건물의 등가모델을 제안 하였다. 여름철과 겨울철 건물의 벽과 바닥 구조에 따른 냉방과 난방의 열손실에 대한 비교 분석 및 외부기온 변화에 따른 실내 온도와 습도, 전력 사용량이 변화하는 과정을 측정하고 이를 비교 분석하였다.

실시간 온·습도를 측정하기 위해 대상건물에 측정시스템을 구성하고 설치하였으며, 여름철과 겨울철에 EHP를 가동하는 평일을 기준으로 실내온도와 습도가 변화하는 과정을 측정 비교하였다. 이 경우 미국냉동공조학회가 제시하는 온도와 습도의 쾌적 영역의 포함여부와 실내공간의 각 지점에 따른 온도 및 습도변화의 결과를 나타내었다. 여름철 EHP를 가동한 경우 유리창의 하단과 실내 벽의 서쪽 하단 온도는 낮게 나타나고 있고, 온도의 쾌적 범위에 포함되지 못하는 것으로 나타나고 있다.

실내 평균습도는 여름철에 EHP를 가동하지 않은 경우 유리창의 평균습도는 태양에 의한 복사에너지의 영향에 의해 쾌적 범위에 포함되고 있으나, 실내 평균습도는 쾌적 범위에는 포함되지 못하는 것을 확인 할 수 있었다. EHP를 가동한 경우 유리창과 실내 벽 서쪽 하단의 습도가 높게 나타나고 있으나, 실내 평균습도는 쾌적 범위에 포함되는 것을 확인 할 수 있었다. 겨울철 난방을 위해 EHP를 가동한 경우 실내 벽의 서쪽 하단 습도가 높게 나타나고 있고, 습도의 쾌적 범위에 포함되는 것으로 나타나고 있다. 따라서 여름철과 겨울철에 EHP를 사용하는 경우에 평균습도는 항상 쾌적 범위에 속함을 확인할 수 있다.

대상건물에 여름철과 겨울철의 평일을 대상으로 EHP 전력 사용량을 측정하기 위해 측정시스템을 구성하고 설치하였으며, 비교한 결과를 나타내었다. EHP를 가동 할 경우 여름철의 전력 사용량  $2.7[kWh]$ 보다 겨울철의 전력 사용량  $2.5[kWh]$ 로 겨울철 전력 사용량이  $0.2[kWh]$ 가 낮게 나타나고 있어 난방에 의한 전력 소비량 보다 냉방에 의한 전력 소비량이 더 높게 발생 하고 있음을 확인 할 수 있었다. 여름철의 경우 일사량에 의한 외부기온이 상승이 실내 온도의 상승으로 이어져 EHP 가동시간에 의한 전력 사용량이 많게 나타나고, 겨울철인 경우 일사량 많으면 외부기온이 높아져 실내 온도의 상승으로 이어져 EHP 가동 시간에 의한 전력사용량이 적게 나타남을 확인 할 수 있다.

현장데이터 측정을 통해 EHP를 사용한 냉방과 난방시스템은 동일한 방식으로 가동하며, 평균습도는 항상 쾌적 범위에 속함을 확인할 수 있다. 따라서 EHP가동으로 인한 실내공간의 습도와 관련된 문제점 보다는 온도에 의한 쾌적성이 결정됨을 알 수 있었다. 따라서, EHP 가동에 따른 전력 소비량이 증가하는 여름철의 온도제어에 대한 냉방시스템을 대상으로 효율적인 제어알고리즘을 제안하도록 한다.

## V. 컴퓨터 시뮬레이션

### 1. 대상건물의 모델설계 및 시뮬레이션

#### 1) 대상건물 모델설계

현장 측정에 적용된 건물을 대상으로 시뮬레이션 모델 설계를 수행하였다. Fig. 40은 일사량에 의한 외부기온이 벽과 유리를 통해 들어오는 복사에너지와 실내공간의 설정 온도에 대한 냉방시스템, 그리고 상태공간의 건물영역을 포함하는 시스템 구성도를 나타내었다.

시스템을 구성하는 요소들은 입력부와 제어부, 출력부로 구분 할 수 있으며, Matlab/Simulink를 사용하여 모델링을 수행한다. 입력부는 기상청에서 제공되는 외부기온 및 일사량 값의 기후 데이터와 건물 내부의 설정온도 및 냉방과 난방용량, 에너지 단가 등 파라미터 값을 입력으로 하며, 제어부는 건물의 면적, 벽과 바닥의 두께, 유리 면적 등 파라미터 값의 입력에 의한 냉방과 난방 제어를, 출력부는 입력부와 제어부의 입력으로 수행된 시뮬레이션 결과로 실내온도, 내부와 외부의 벽 표면온도, 에너지비용을 확인 가능하도록 구성되어 있다.

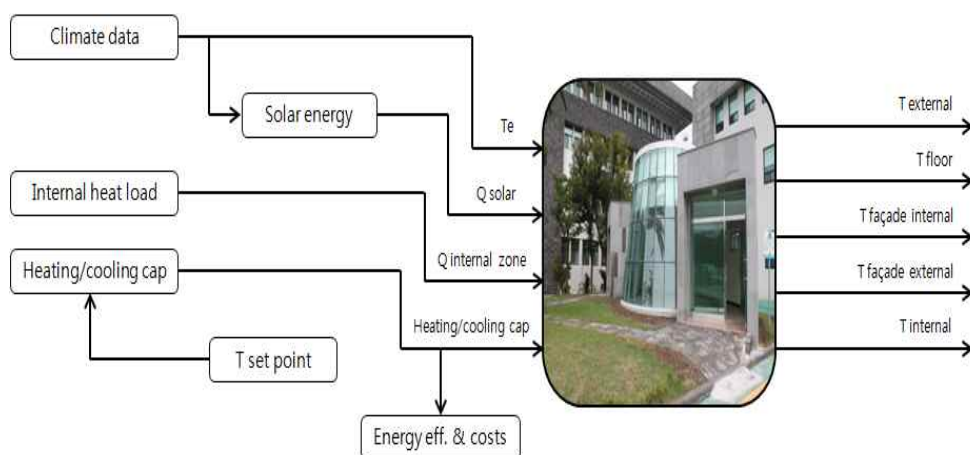


Fig. 40 Heat transfer model

(1) 유리 모델

Fig. 41은 대상건물의 유리창에 대한 모델로 4개의 창으로 구성되어 있으며, 개별의 유리창에는 시간에 따른 일사량 값과 유리창의 방향, 태양의 고도, 유리 면적, 유리 투과 계수 등 파라미터 값을 입력으로 하고 있다.

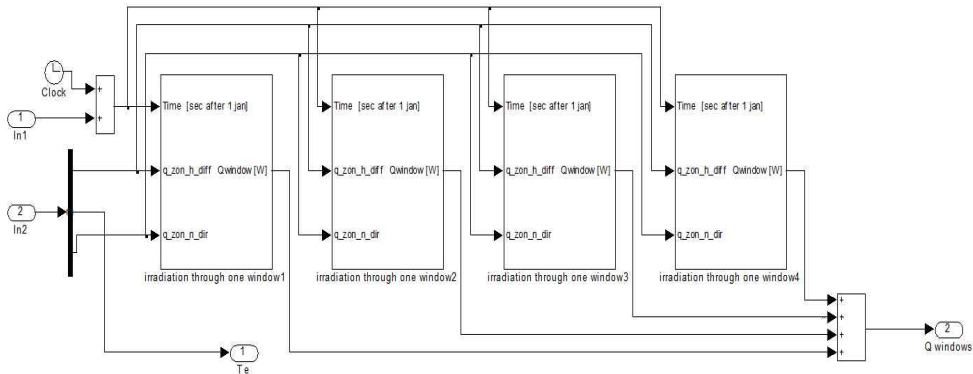


Fig. 41 Windows model

Table 7은 건물의 유리창에 대한 파라미터 값으로, 유리창은 동쪽부터 남쪽, 서쪽, 북쪽 방향으로 유리창 1, 유리창 2, 유리창 3, 유리창 4로 구분하였으며, 유리창의 방향은 태양방위각을 기준으로 동쪽을 -로 표기 하였고, 유리창의 면적인 출입구의 강화유리 도어는 유리창 1과 유리창 3으로 면적은 각각  $7.15[m^2]$ , 유리 외벽인 남쪽방향의 유리창 2의 면적은  $37[m^2]$ 이다. 태양의 기울기는 하지를 기준으로 한 남중고도  $70^\circ$ 로 하였으며, 유리의 투과계수는 각각의 유리창에 동일하게 주어졌다.

Table 7 Parameters of windows

	Window1	Window2	Window3	Window4
Azimuth[-180 - 180, 0=south]	-45	0	45	180
Inclination[0-90, 0=horizontal]	35	70	35	0
Window surface[ $m^2$ ]	7.15	37	7.15	0
Window transmission coefficient	0.7	0.7	0.7	0



(2) 온도제어 모델

Fig. 42는 대상건물에서 요구되는 실내공간의 설정온도를 제어하기 위한 모델을 나타내었다. 제어모델의 입력 값으로는 시간, 계시별 요금, 상한과 하한 온도, 단일 존의 출력으로 주어지는 실내온도, 가변 또는 이진에 대한 스위칭 입력이다. 온-오프, LP와 PSO 알고리즘을 사용한 제어구간 적용알고리즘은 S-function으로 구현되며, 계산된 출력  $u(k)$ 는 냉방시스템의 가동을 결정하게 된다. 스위칭 입력이 이진일 경우 전력은 최대 전력이 되고, 가변일 경우 0에서 1사이의 값의 곱만큼 출력이 되며, 냉방의 경우 상한에서 냉방시스템을 가동하고 하한인 경우 냉방시스템을 정지하게 된다.

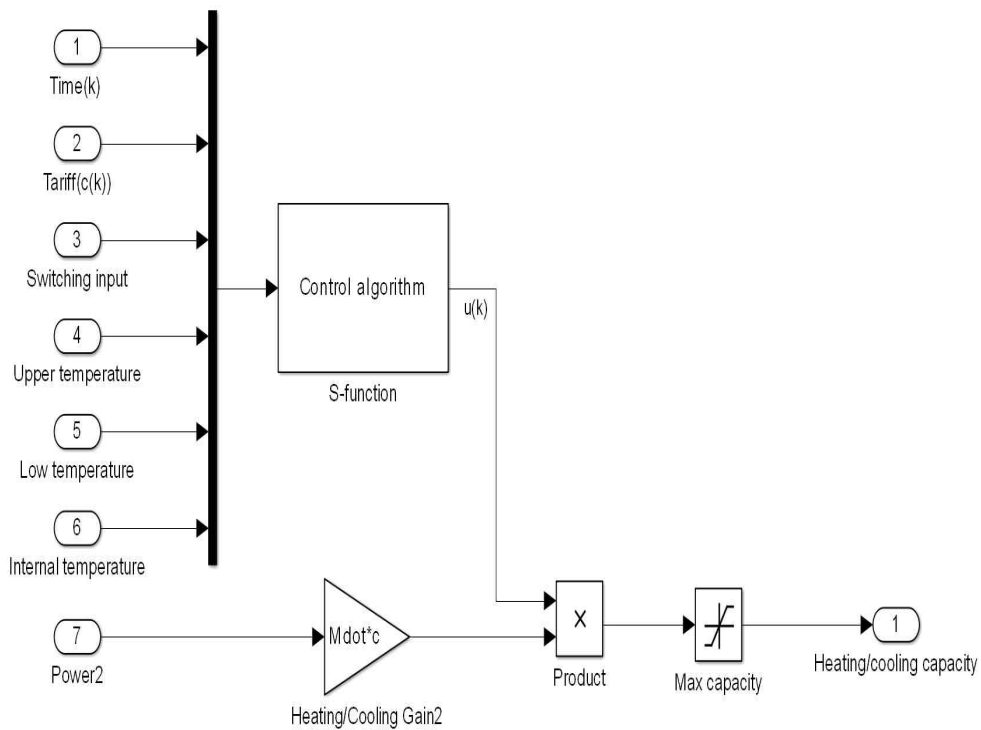


Fig. 42 Temperature control model

(3) 단일 존 빌딩 모델

Fig. 43은 대상건물의 상태 공간에 대한 모델을 나타낸 것으로, 실내의 공간면적, 환기 횟수, 정면과 바닥의 면적, 유리창의 면적, 벽과 유리창의 열 저항 등 파라미터 값을 입력으로 한다.

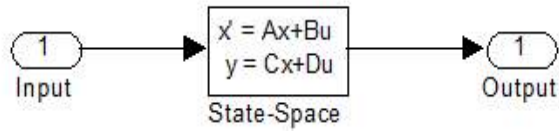


Fig. 43 State space model

Table 8은 시뮬레이션 대상건물에 대한 파라미터 값을 나타내었으며, 건물의 전체 공간은  $253m^3$ 이고 시간당 환기 수는 0으로 하였으며, 건물의 정면방향의 면적은  $57[m^2]$ , 바닥과 입구의 면적은  $60.45[m^2]$ , 유리창의 면적은  $51.4[m^2]$ , 벽면과 유리창의 열 저항은 각각 3.6과  $0.043[m^2K/W]$ 를 사용하였다.

Table 8 Parameters of single zone building

Parameters	Values
Volume zone $[m^3]$	253
Ventilation[hour]	0
Facade surface $[m^2]$	57
Facade heat resistance $[m^2K/W]$	3.6
Floor and internal walls surface $[m^2]$	60.45
Window surface $[m^2]$	37
Window heat resistance $[m^2K/W]$	0.043

(4) 건물 시뮬레이션 모델링

Fig. 44는 대상건물의 일사량에 의한 외부기온, 유리창을 통해 투과 되는 복사에너지와 설정온도에 따라 가동되는 냉방시스템, 그리고 상태 공간의 건물영역을 포함하는 모델을 나타내고 있다.

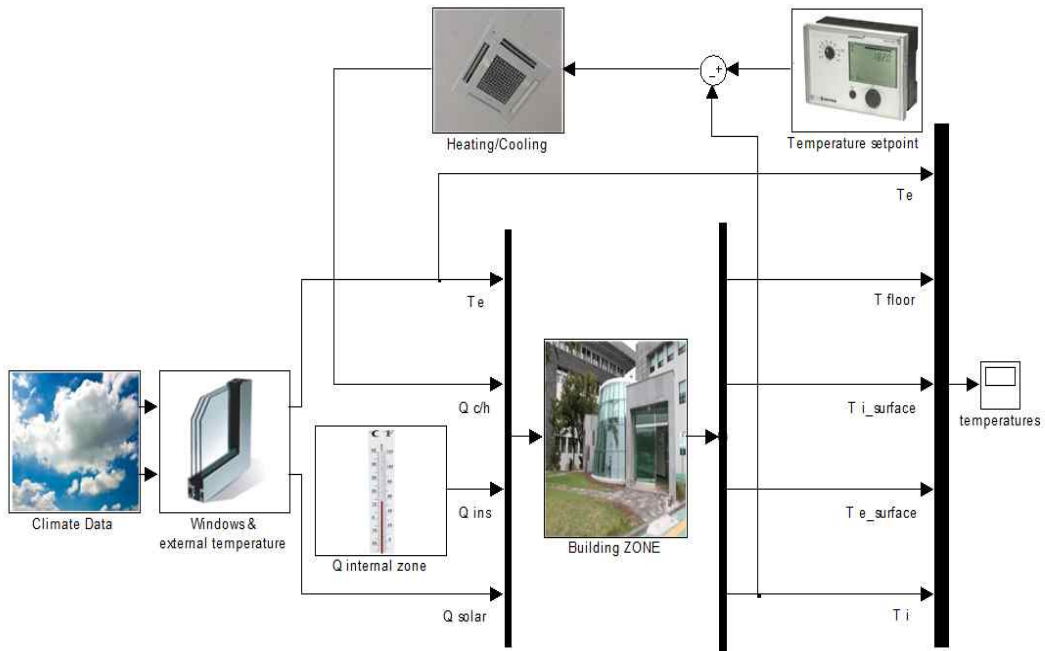


Fig. 44 Matlab/Simulink simulation model for single zone building

2) 대상건물 시뮬레이션 결과

단일 존 건물을 대상으로 시뮬레이션 모델링이 정상적으로 구현되는지 검증하기 위해서는 외부의 일사량과 기온변화에 따라 건물내부 공간의 실내온도를 나타내는 상승과 하강그래프 곡선이 서로 유사하게 나타나는 특성을 보여야 한다. 단일 존 건물의 모델링 검증을 위해 여름철 하루 동안 냉방시스템을 가동하지 않은 해석대상 건물에 기상청에서 제공된 제주(청) 지상관측자료 중 요소별 자료인 외부기온과 일사량 값과 시뮬레이션 대상건물의 동쪽과 서쪽, 상단과 하단 벽 네 곳의 온도센서에서 1분 단위로 측정된 데이터를 1시간 단위로 평균한 실내온도 값과 비교하였다. Table 9는 기상청에서 제공된 하루 중의 일사량 값과 외부온도, 대상건물에서 실제 측정된 실내온도 값을 나타내었다.

Table 9 Solar radiation parameters in summer

Hours	Solar radiation [ $Wh/m^2$ ]	External temp. [ $^{\circ}C$ ]	Internal temp. [ $^{\circ}C$ ]
1	0	26.4	28.3
2	0	26.4	28.3
3	0	26.2	28.2
4	0	26.1	28.2
5	0	26	28
6	0	25.9	28
7	4.4	26.1	27.9
8	21.4	27.1	28.3
9	43.3	29.4	29
10	60	30.5	29.7
11	73.9	31.2	30.9
12	84.5	31.7	31.8
13	85.6	31.6	32.8
14	88.4	33.7	33.3
15	76.1	33.8	33.8
16	53.9	33.4	33.3
17	41.4	33.5	33
18	30	33.1	32.8
19	9.5	30.9	32.7
20	0.3	30.3	32.5
21	0	29.9	32.2
22	0	29.3	32.2
23	0	28.9	31.9
24	0	28.7	31.9

8월 중 외부기온이 높은 공휴일 EHP를 가동하지 않고 기상청에서 제공된 제주(청) 지상관측자료 중 요소별 자료인 외부기온과 일사량 값을 입력으로 하고, 실제 대상건물에서 측정된 평균 실내온도를 Matlab/Simulink로 구현한 결과를 Fig. 45에 나타내었다. Fig. 45(a)는 일사량을 투과하지 않은 상태에서 실내 온도 시뮬레이션 결과이고, Fig. 45(b)는 하루 동안 건물의 실내 네 곳의 센서를 통해 측정된 실내온도를 평균하여 나타낸 실측값이고, Fig. 45(c)는 일사량이 투과된 상태에서 시뮬레이션 결과이며, Fig. 45(d)는 측정된 실측값과 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타내었다. 대상건물의 실내온도가 증가함에 따라 발생하는 현열(Sensible heat) 구간에서 오차가 발생하고 있으나, 전체적으로 대상건물의 실내 온도변화를 나타내는 두 개의 그래프 곡선이 유사하게 나타나고 있어 대상건물에 대한 모델링이 적절하게 수행되었음을 확인 할 수 있다.

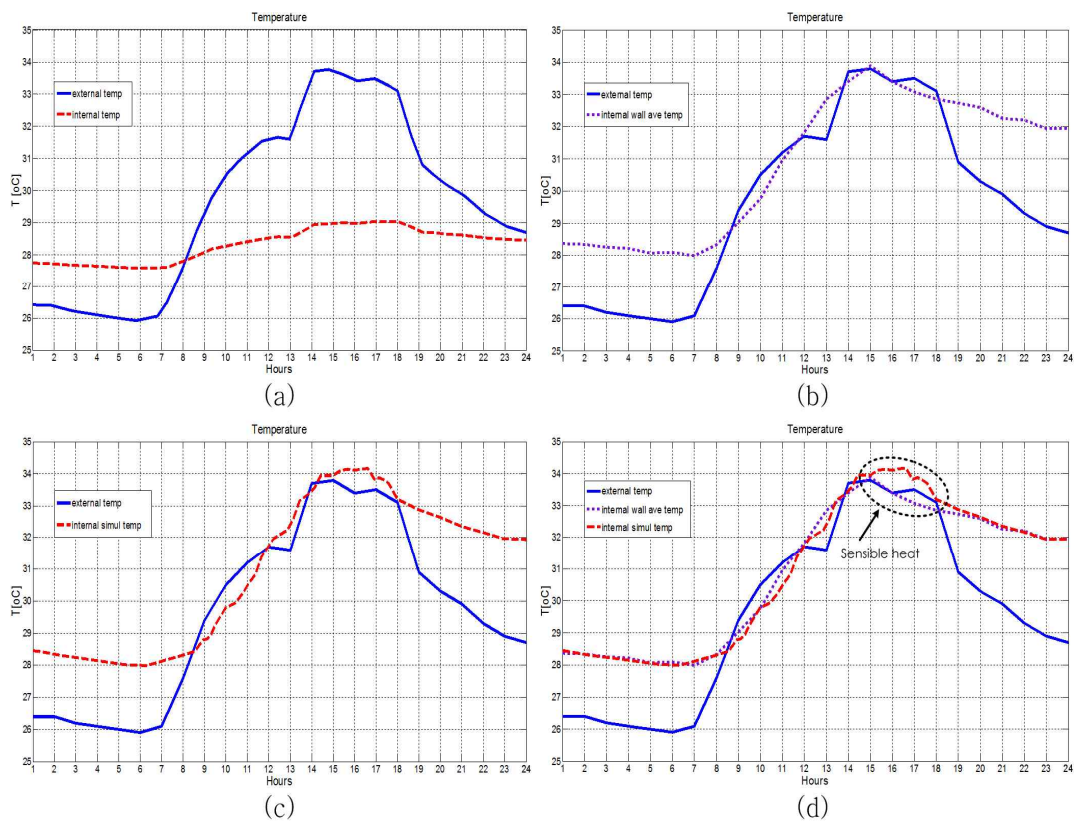


Fig. 45 Simulation results of single zone building

(a) simulated temperature without radiation (b) measured temperature at the wall (c) simulated temperature with radiation (d) temperature comparison

## 2. 계절에 따른 실내온도 변화 시뮬레이션

여름철과 겨울철의 일사량에 의한 외부기온 변화가 벽 구조에 의해 실내공간의 온도 변화로 이어지는 현상을 확인하기 위해 시뮬레이션을 통해 나타내는 것으로, 다른 계절에 비해 외부기온의 차이가 여름철과 겨울철은 높거나 낮게 발생하며, 일사량에 의해 발생한 외부기온은 건물의 내부로 열이 전달되어 실내의 온도를 올리거나 떨어뜨리는 요인으로 작용한다. 따라서 대상건물의 실내온도 변화특성과 벽 구조에 의한 변화를 비교하기 위해 벽과 바닥을 두꺼운 벽(Heavy weight) 200[mm], 중간두께 벽(Middle weight) 150[mm], 얇은 벽(Light weight) 100[mm]로 구분하여 모델링하였다.

### 1) 여름철 실내온도 비교

Fig. 46은 7월 중 평일 EHP 가동 후 실내 설정온도를 26[°C]로 하여 벽구조에 따른 실내온도 변화특성을 시뮬레이션을 통해 나타내었다. Fig. 46(a)는 두꺼운 벽 H 구조, Fig. 46(b)는 중간두께 벽 M 구조, Fig. 46(c)는 얇은 벽 L 구조일 때의 실내온도에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로, 오전 시간대는 세 가지 구조가 서로 비슷하게 실내 온도를 유지하고 있으며, EHP를 가동하는 시간대의 경우에도 전체적으로 실내온도의 변화곡선 패턴이 서로 유사함을 알 수 있다. Fig. 46(d)는 H 구조와 M 구조, L 구조 등 세 가지 구조를 비교한 것으로, H 구조가 M 구조와 L 구조보다 실내온도를 좀 더 낮게 유지하고 있었으며, 또한 외부기온 변화의 영향을 적게 받고, EHP 가동에 대한 냉방 열 손실이 적은 것을 알 수 있다.

Fig. 47은 기상청에서 제공된 요소별 자료인 외부기온과 일사량 값을 입력으로 하고, 실제 대상건물에서 측정된 실내온도를 1시간으로 평균한 값을 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 여름철 EHP를 가동한 경우 대상건물의 실내온도가 점차 감소함에 따라 현열구간에서 오차가 발생하고 있으나, 전체적으로 대상건물의 실내 온도변화를 나타내는 두 개의 그래프 곡선이 서로 유사하게 나타나고 있으며, L 구조에서 측정된 평균 실내온도의 실측값과 외부기온과 일사량이 투과된 실내온도 변화의 시뮬레이션 결과가 유사하게 나타나고 있어 대상건물에 대한 모델링이 적절함을 확인할 수 있다.

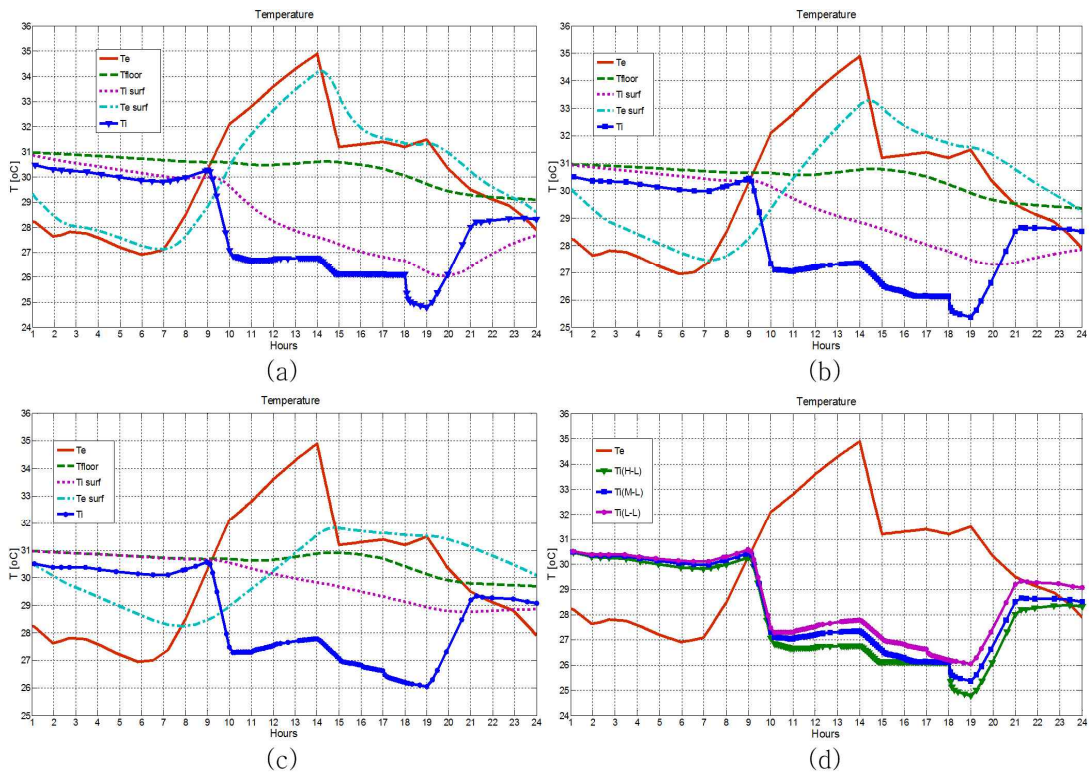


Fig. 46 Temperature changes according to wall structure in summer

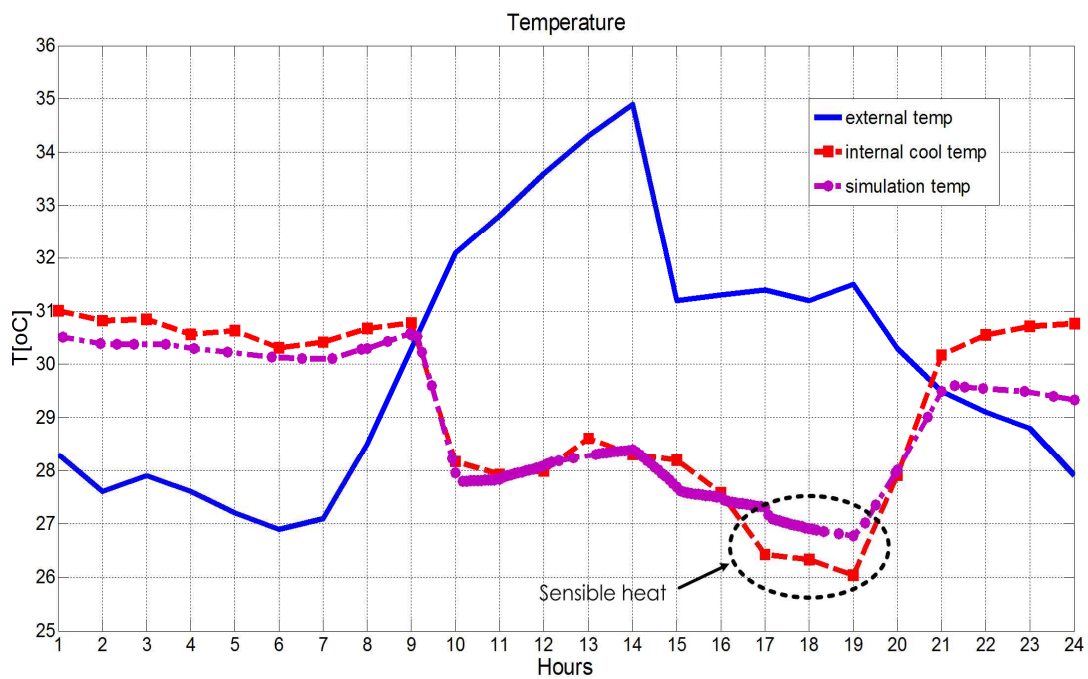


Fig. 47 Internal temperature comparisons for light weight wall in summer



## 2) 겨울철 실내온도 비교

Fig. 48은 2013년 1월 중 평일 EHP 가동 후 실내 설정온도를 18[°C]로 하여 벽 구조에 따른 실내온도 변화특성을 시뮬레이션을 통해 나타내었다. Fig. 48(a)는 H 구조, Fig. 48(b)는 M 구조, Fig. 48(c)는 L 구조일 때의 실내온도에 대한 시뮬레이션 결과로, 여름철과 마찬가지로 전체적으로 실내온도의 변화 곡선패턴이 서로 유사하게 나타나고 있다. Fig. 48(d)는 H 구조가 M 구조와 L 구조 보다 외부기온 변화의 영향을 적게 받고, 난방에 대한 열 손실이 적은 것을 알 수 있다.

Fig. 49는 여름철과 마찬가지로 기상청에서 제공된 외부기온과 일사량 값을 입력으로 하고, 실제 대상건물에서 측정된 평균 실내온도를 Matlab/Simulink로 구현한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 겨울철 EHP를 가동한 경우 대상건물의 실내온도가 감소함에 따라 발생하는 현열구간에서 오차가 발생하고 있으나, 전체적으로 대상건물의 실내 온도변화를 나타내는 두 개의 그래프 곡선이 서로 유사하게 나타나고 있으며, L 구조에서 측정된 평균 실내온도 측정값과 일사량이 투과된 실내온도 시뮬레이션 결과가 유사하게 나타남을 알 수 있다.

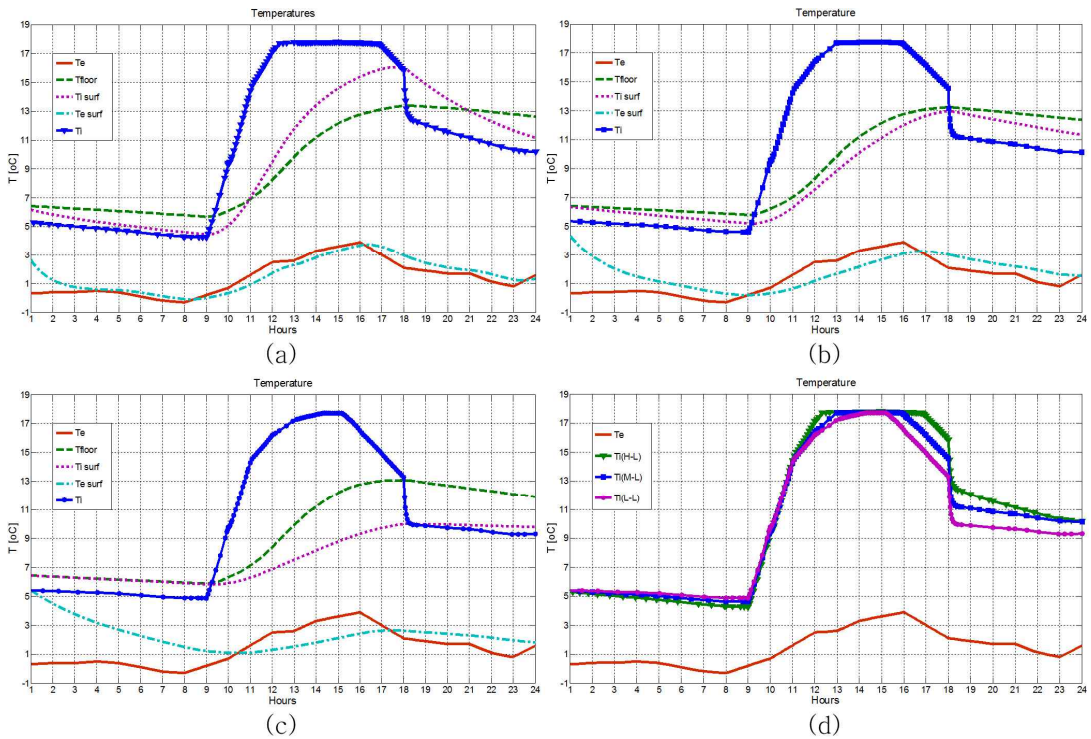


Fig. 48 Temperature changes according to wall structure in winter

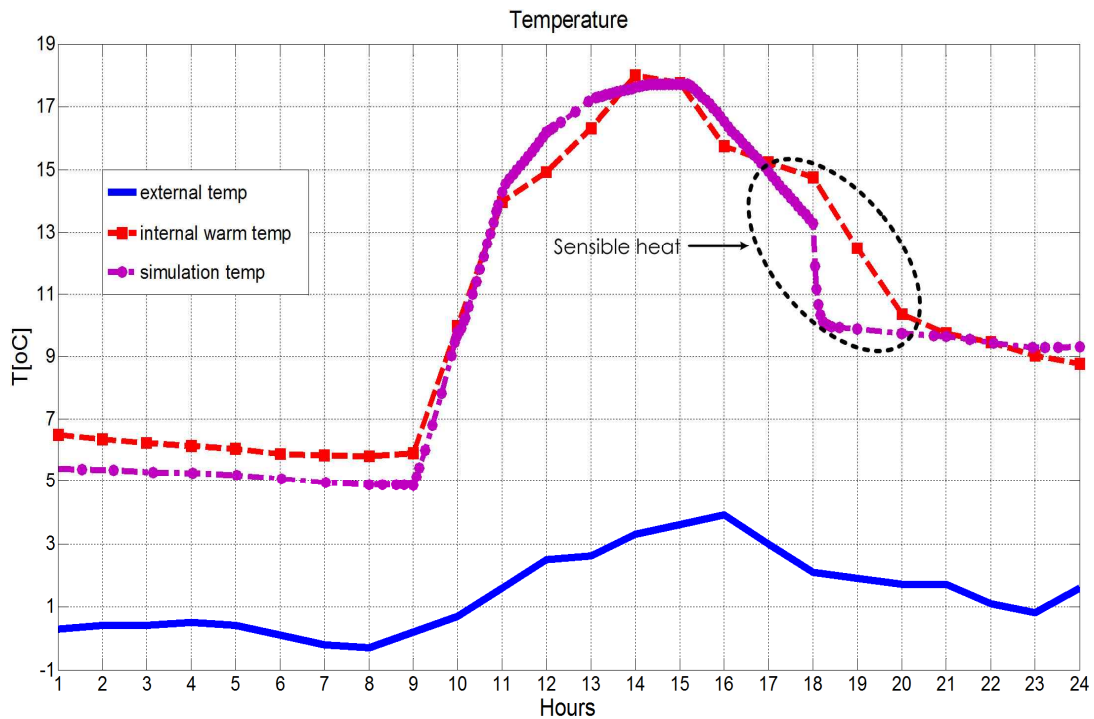


Fig. 49 Internal temperature comparisons for light weight wall in winter

### 3. 요금제 기반의 제어 알고리즘 적용

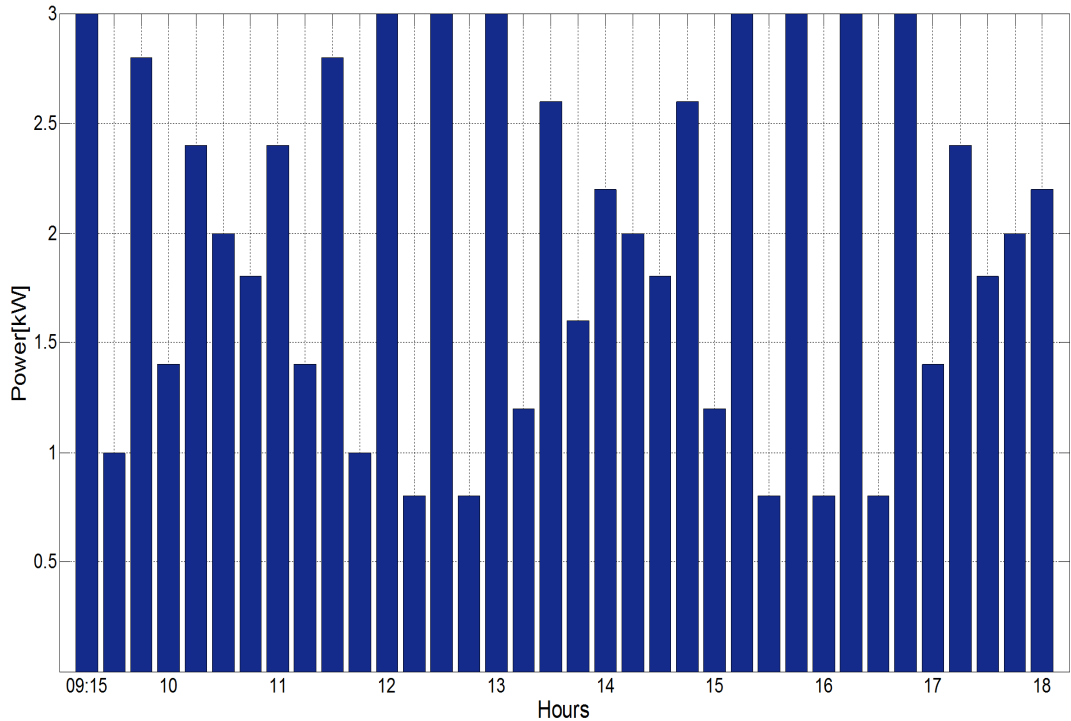
대상건물에 대한 에너지 비용 절감 및 최대부하 시간대의 전력피크를 억제하기 위한 냉방시스템 가동방식의 효과를 알아보기 위해, 계시별 요금제와 최대피크 요금제 및 최대수요를 고려한 요금제에서 온-오프 제어와 LP 및 PSO 알고리즘을 적용하여 설정된 제어구간에 입력으로 인가하는 제어 방법을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

여름철과 겨울철 기간의 EHP 가동을 기준으로, 겨울철 보다는 여름철의 전력피크와 전력 사용량이 높게 발생되고 있으며, 전기요금 부과 시 기본요금이 되는 피크전력도 여름철 3개월 중 최고 피크전력을 적용하고 있고, 시간대 별 전력량 요금도 여름철을 높게 적용하고 있어 에너지 비용 절감 및 최대부하 시간대의 피크전력을 억제하기 위한 냉방시스템 가동에 대한 제어는 여름철을 기준으로 하였다. 여름철 기준으로 온도제어를 위한 외기온도는 28[°C]로 고정하였으며, 중부하 시간대와 최대 부하 시간대의 전력사용을 고려하였기 때문에 경부하 시간대는 제외하였다.

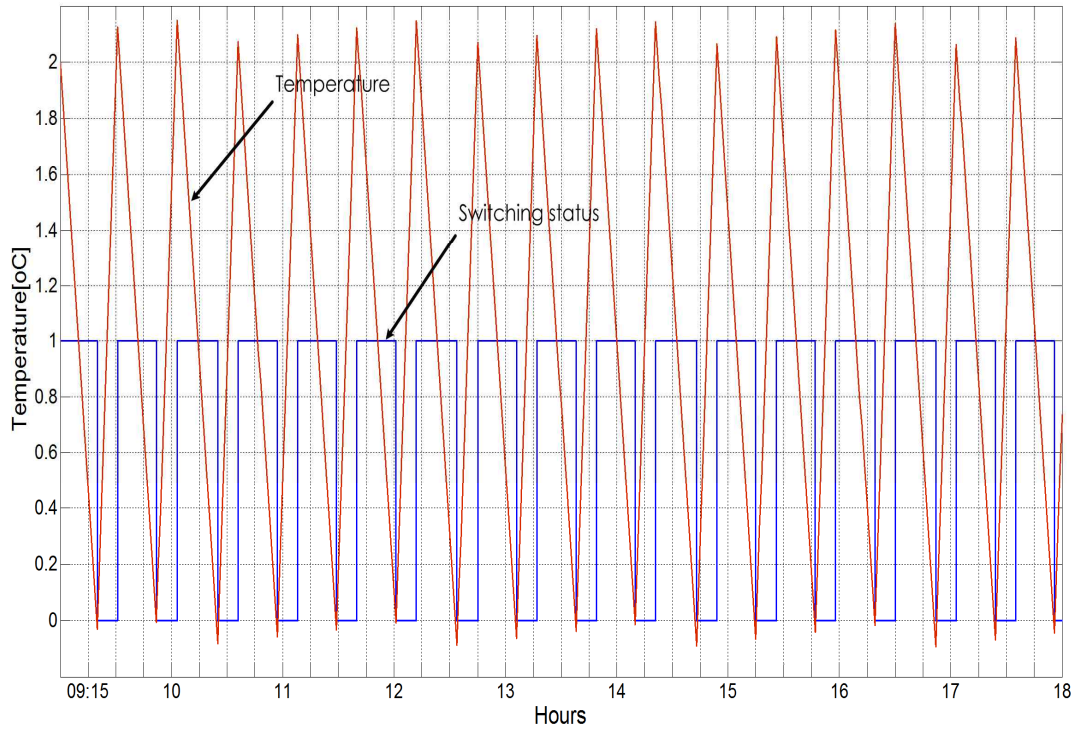
## 1) 계시별 요금제를 고려한 전력사용 및 실내온도제어

### (1) 온-오프 제어 알고리즘

Fig. 50은 기존의 실내 온도제어에서 주로 사용하고 있는 온-오프 제어를 적용하여 시뮬레이션을 수행 하였을 때 전력사용과 온도변화 결과를 나타내었다. Fig. 50(a)는 온-오프 제어에 따른 전력사용을 나타낸 것으로, 냉방시스템 운전방식에 대한 피크전력이 결정 되는 15분 단위의 전력사용은 오전 9시부터 오후 6시까지 최저 0.8[kW]에서 최대 3[kW]를 나타내고 있으며, 온-오프 제어방법은 시간을 고려하지 않고 실내온도의 상한치와 하한치의 설정 값에 따라 냉방시스템이 가동되어 경부하 시간대와 중부하 시간대, 최대부하 시간대를 고려하지 않고 많은 전력을 사용하고 있음을 알 수 있다. Fig. 50(b)는 실내온도의 상한치와 하한치의 설정 값의 범위에 따라 냉방시스템이 가동 되는 것을 나타낸 것으로, 2[°C] 온도제어 범위 내에서 연속적으로 동작하고 온-오프 제어의 스위칭도 일정한 패턴을 나타내고 있으며, 실내온도의 상한치와 하한치의 설정 온도제어 범위를 다소 초과하고 있음을 알 수 있다.



(a)



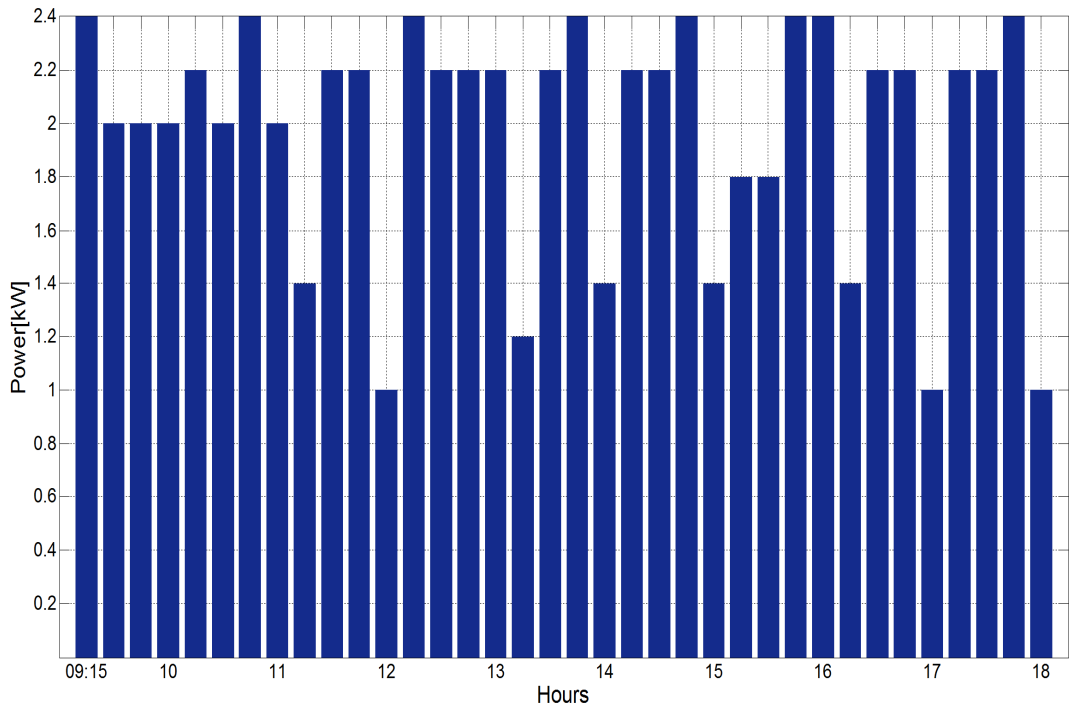
(b)

Fig. 50 Power consumption and temperature by On-off algorithm

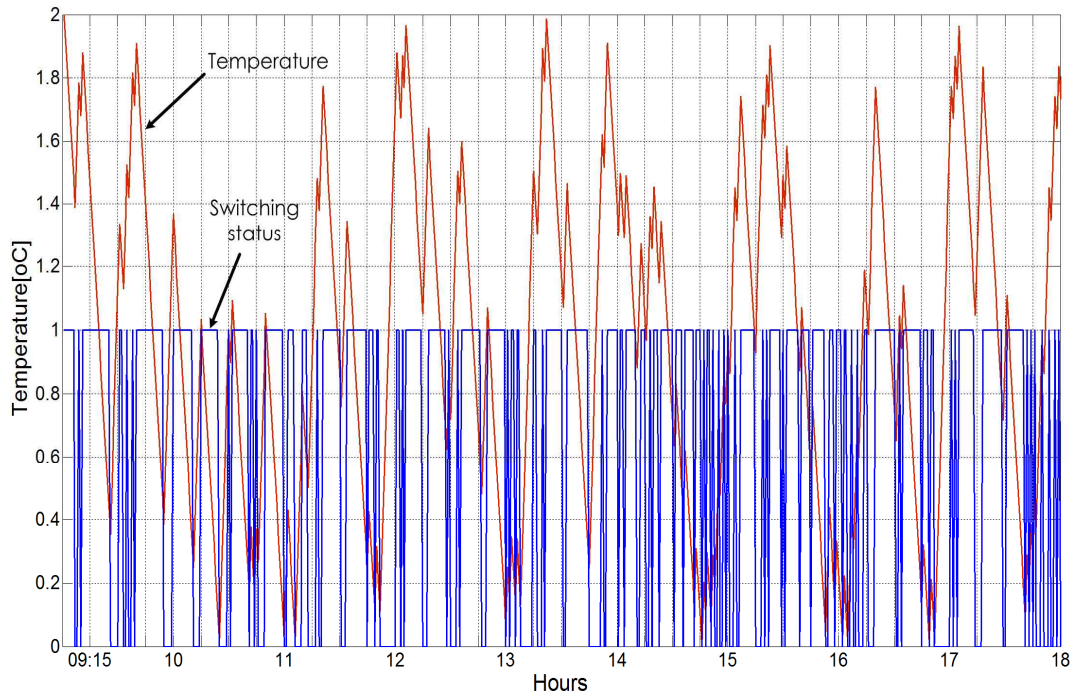
(a) power consumption (b) internal temperature

## (2) LP 제어 알고리즘

Fig. 51은 이진 제어 방식의 LP 알고리즘을 적용하여 설정된 제어구간의 입력으로 인가하는 방법으로 시뮬레이션을 수행하였을 때 전력사용과 온도변화 결과를 나타내었다. 최대부하 시간대의 냉방시스템 가동을 최소화하기 위해 최대 부하시간대가 처음 시작 되는 오전 11시에 실내온도는 하한치가 되게 설계하였다. Fig. 51(a)는 이진 제어에 따른 전력사용을 나타낸 것으로, 냉방시스템 운전 방식에 대한 피크전력이 결정되는 15분 단위의 전력사용은 중부하 시간대는 최저  $2[kW]$ 에서 최대  $2.4[kW]$ , 최대부하 시간대는 최저  $1[kW]$ 에서 최대  $2.4[kW]$ 를 나타내고 있다. 온-오프 제어보다 피크전력 값이 작게 나타남을 알 수 있으며, 최대부하 시간대에서 전력사용이 상대적으로 적음을 확인할 수 있다. Fig. 51(b)는 기준온도에서 변할 수 있는  $2[^\circ C]$  온도제어 범위 내에서 실내 온도 변화가 불규칙적으로 변화하고 있으며, 온-오프 온도 제어 패턴과 유사한 형태로 나타나고 있다.



(a)

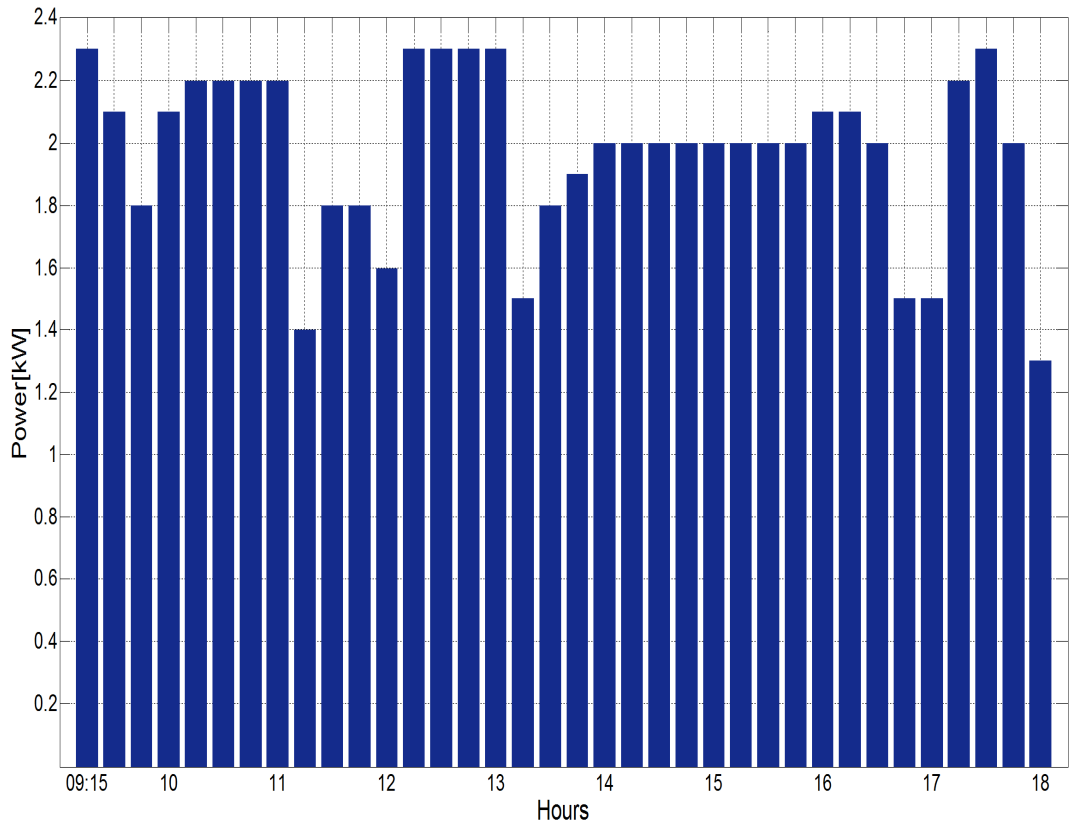


(b)

Fig. 51 Power consumption and temperature by LP binary algorithm

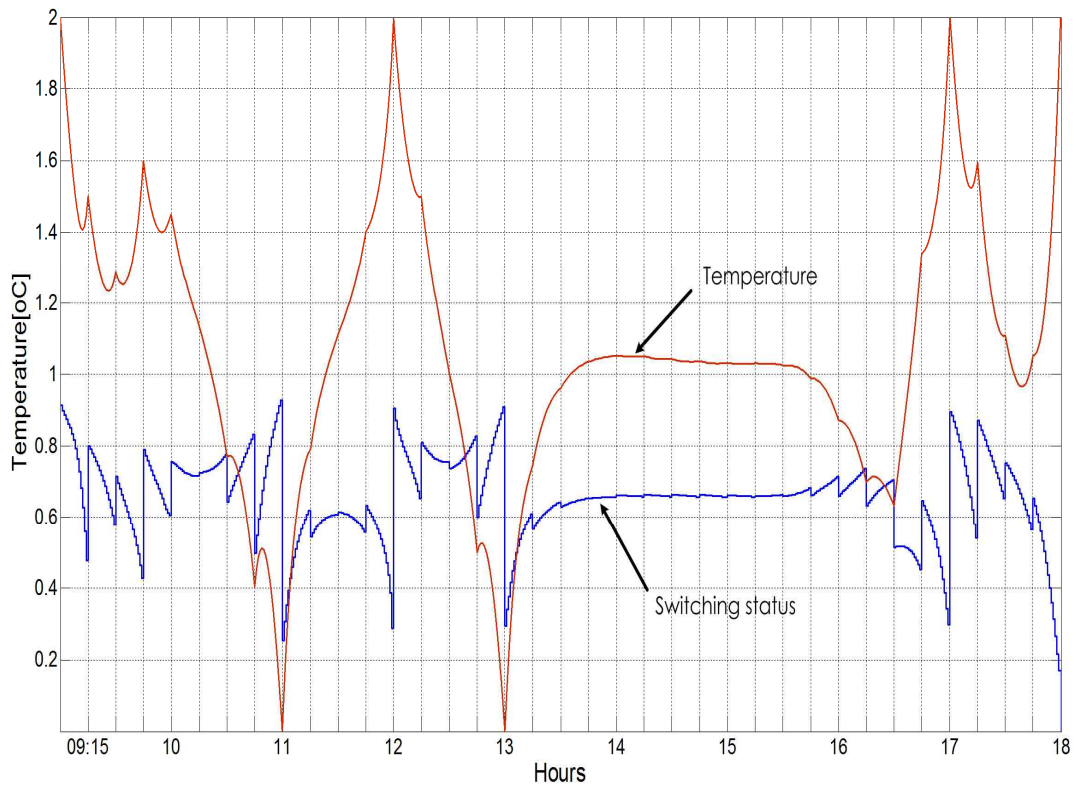
(a) power consumption (b) internal temperature

Fig. 52는 가변 제어 방식의 LP 알고리즘을 적용하여 설정된 제어구간의 입력으로 인가하는 방법으로 시뮬레이션을 수행하였을 때 전력사용과 온도변화 결과를 나타내었다. Fig. 52(a)는 가변 제어에 따른 전력사용을 나타낸 것으로, 냉방 시스템 운전방식에 대한 피크전력이 결정되는 15분 단위의 전력사용은 중부하 시간대는 최저 1.8[kW]에서 최대 2.3[kW], 최대부하 시간대는 최저 1.4[kW]에서 최대 2.1[kW]를 나타내고 있으며, 이진 방식의 LP 알고리즘에 비해 최대부하 시간대의 피크전력이 감소되었으며, 전력사용량 또한 균일하게 나타남을 알 수 있다. Fig. 52(b)는 기준온도에서 변할 수 있는 2[°C] 온도제어 범위 내에서 오후 최대부하 시간대의 실내온도 변화 폭이 일정하게 나타나고 있어 재실자의 쾌적성 면에서 좋은 결과를 나타내고 있으며, EHP 가동은 온-오프 방법을 사용하지 않고 공급되는 전력을 적절한 범위에서 일정하게 작동시켜 온도를 일정하게 유지시키고 있다.



(a)





(b)

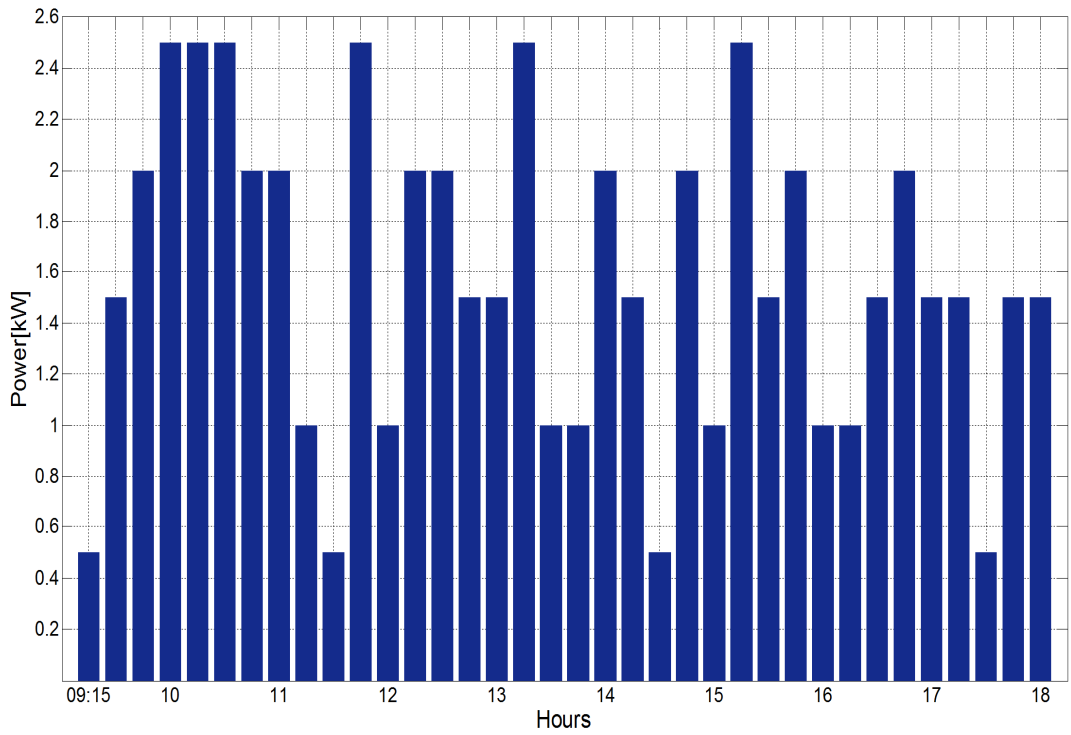
Fig. 52 Power consumption and temperature by LP variable algorithm

(a) power consumption (b) internal temperature

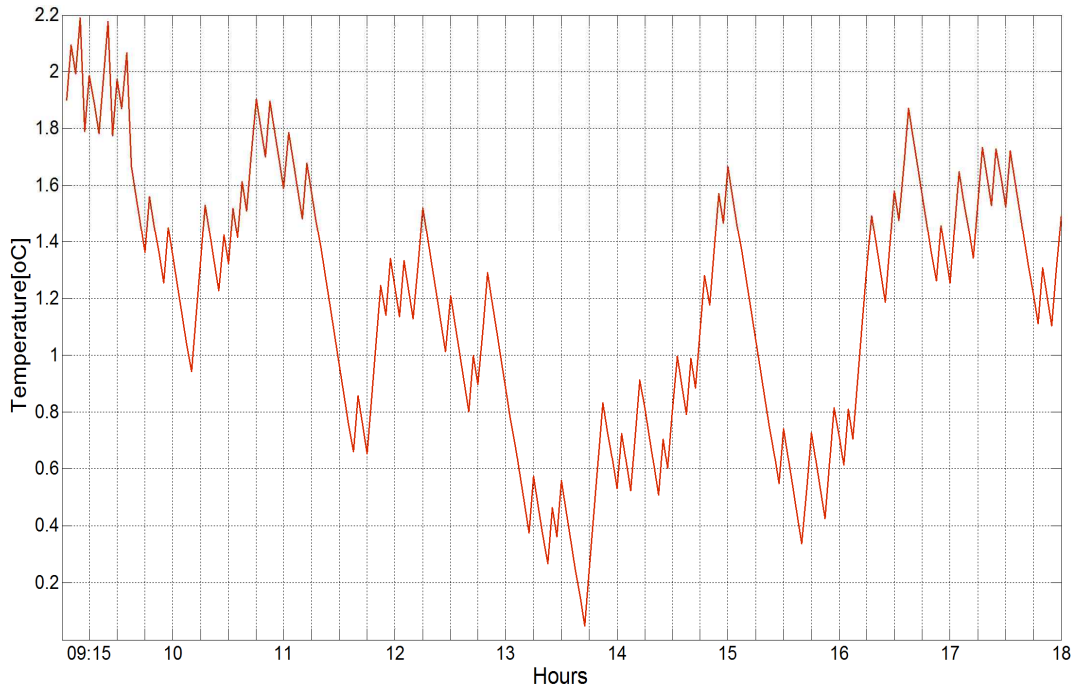
### (3) PSO 제어 알고리즘

Fig. 53은 PSO 알고리즘을 이진 제어 방식과 동일한 조건을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였을 때 전력사용과 온도변화 결과를 나타내었다. Fig. 53(a)는 PSO 제어에 따른 전력사용을 나타낸 것으로, 냉방시스템 운전방식에 대한 피크전력이 결정되는 15분 단위의 전력사용은 중부하 시간대는 최저  $0.5[kW]$ 에서 최대  $2.5[kW]$ 를 나타내고 있다. LP 제어 알고리즘에 비해 시간대에 따른 피크전력은 크게 나타나고 있으며, 시간대에 따른 전력 사용량은 변화가 적음을 확인할 수 있다. Fig. 53(b)는 기준온도에서 변할 수 있는  $2[^\circ C]$  온도제어 범위 내에서 설정 온도 변화가 불규칙적으로 변화하고 있으나, 온-오프 제어와 이진 제어를 적용한 결과보다 온도변화의 상한치와 하한치의 폭이 좁게 나타나고 있어 쾌적성 면에서도 온-오프 제어와 이진 제어 방식의 LP 알고리즘을 적용한 방식보다 좋은 결과를 나타내고 있다.





(a)



(b)

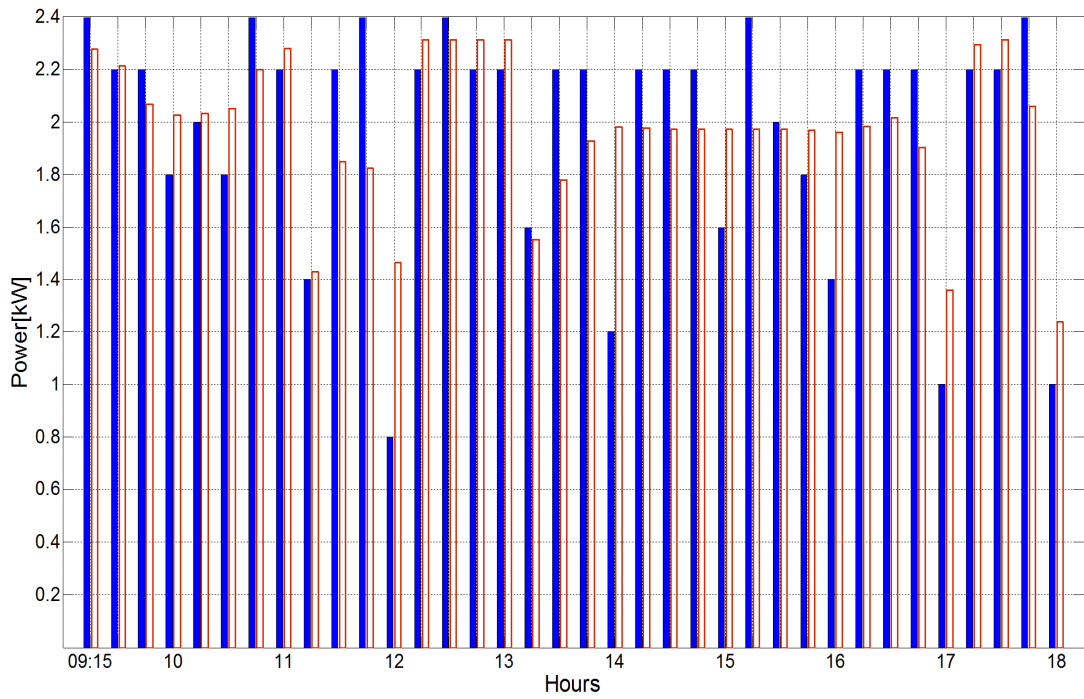
Fig. 53 Power consumption and temperature by PSO algorithm

(a) power consumption (b) internal temperature

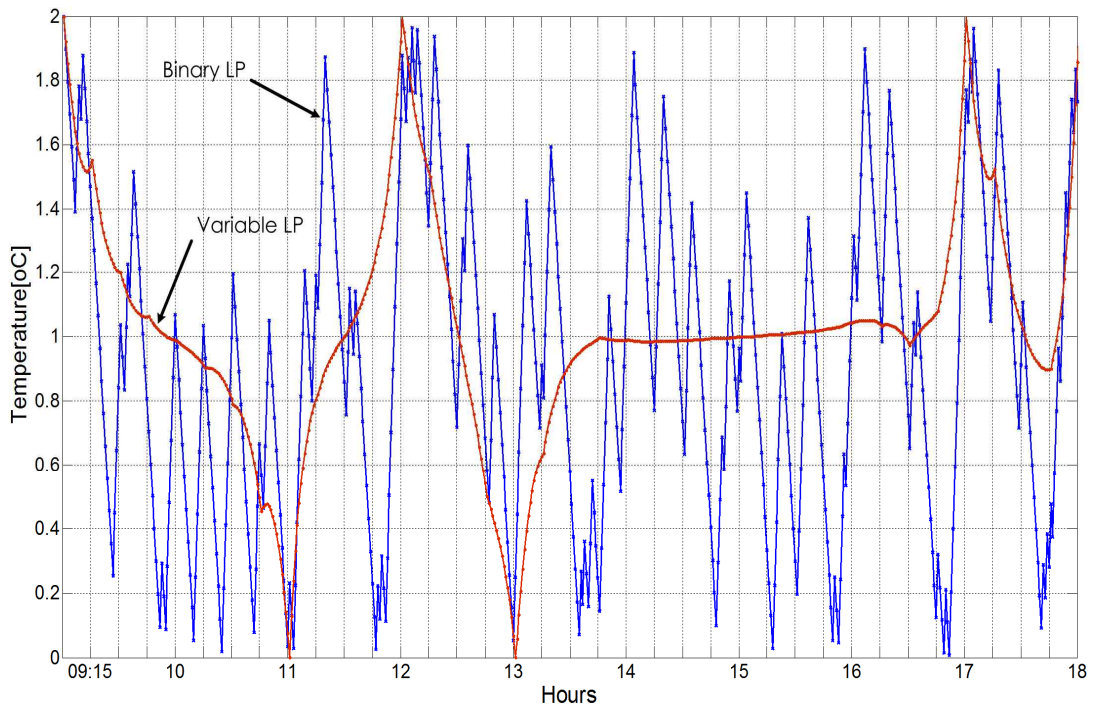
## 2) 최대피크 요금제를 고려한 전력사용 및 실내온도제어

Fig. 54는 최대피크 요금제에서 총 59일 중 수용가와 전력회사의 계약에 의해서 정하는 비피크일 49일을 이진 제어 방식과 가변 제어 방식의 LP 알고리즘을 적용하여 설정된 제어구간을 입력으로 인가하는 방법으로 시뮬레이션을 수행하였을 때 전력사용과 온도변화 결과를 나타내었다. Fig. 54(a)는 LP 제어에 따른 비피크일 49일을 적용한 전력사용을 나타낸 것으로, 이진 제어 방식의 경우 중부하 시간대는 최저  $1.8[kW]$ 에서 최대  $2.4[kW]$ , 최대부하 시간대는 최저  $0.8[kW]$ 에서 최대  $2.4[kW]$ , 가변제어 방식의 경우 중부하 시간대는 최저  $2[kW]$ 에서 최대  $2.3[kW]$ , 최대부하 시간대는 최저  $1.4[kW]$ 에서 최대  $2[kW]$ 를 나타내고 있다. 가변 제어 방식은 이진 제어 방식에 비해 중부하 시간대에서는 전력을 많이 사용하고, 최대 부하 시간대에서는 적은 전력사용을 나타내고 있으며, 최대피크 값도 적게 사용하므로 최대피크 요금제에서 훨씬 효율적으로 사용할 수 있음을 확인할 수 있다. Fig. 54(b)는 기준온도에서 변할 수 있는  $2[^\circ C]$  온도제어 범위 내에서 이진 제어 방식의 경우 실내온도 변화가 불규칙적으로 변화하고 있으나, 가변 제어 방식은 오후 최대부하 시간대의 실내온도 변화 폭이 좁게 나타나고 있어 재실자의 쾌적성 면에서 좋은 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 55는 최대피크 요금제에서 피크일 10일을 이진 제어 방식과 가변 제어 방식의 LP 알고리즘을 적용하였을 때 결과를 나타내었다. Fig. 55(a)는 이진 제어 방식과 가변 제어 방식의 LP 알고리즘을 적용한 전력사용을 나타낸 것으로, 이진 제어 방식의 최대 전력은  $2.4[kW]$ , 가변 제어 방식의 최대전력은  $2.3[kW]$ 로 가변 제어 방식을 적용한 경우가 피크전력이 감소함을 확인할 수 있다. Fig. 55(b)는 기준온도에서 변할 수 있는  $2[^\circ C]$  온도제어 범위 내에서 이진 제어 방식은 실내온도의 변화가 불규칙적으로 변화하고 있으나, 가변 제어 방식은 오후 최대부하 시간대의 실내온도 변화 폭이 좁게 나타나고 있어 재실자의 쾌적성 면에서 좋은 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 전체적으로 전력 사용면에서는 비피크일에 적용한 경우와 유사한 결과를 확인할 수 있었으며, 실내온도 제어에서 가변 제어 방식이 오후 최대부하 시간대의 실내온도 변화 폭이 비피크일을 적용한 가변 제어 방식 보다 실내온도 변동 폭이 다소 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

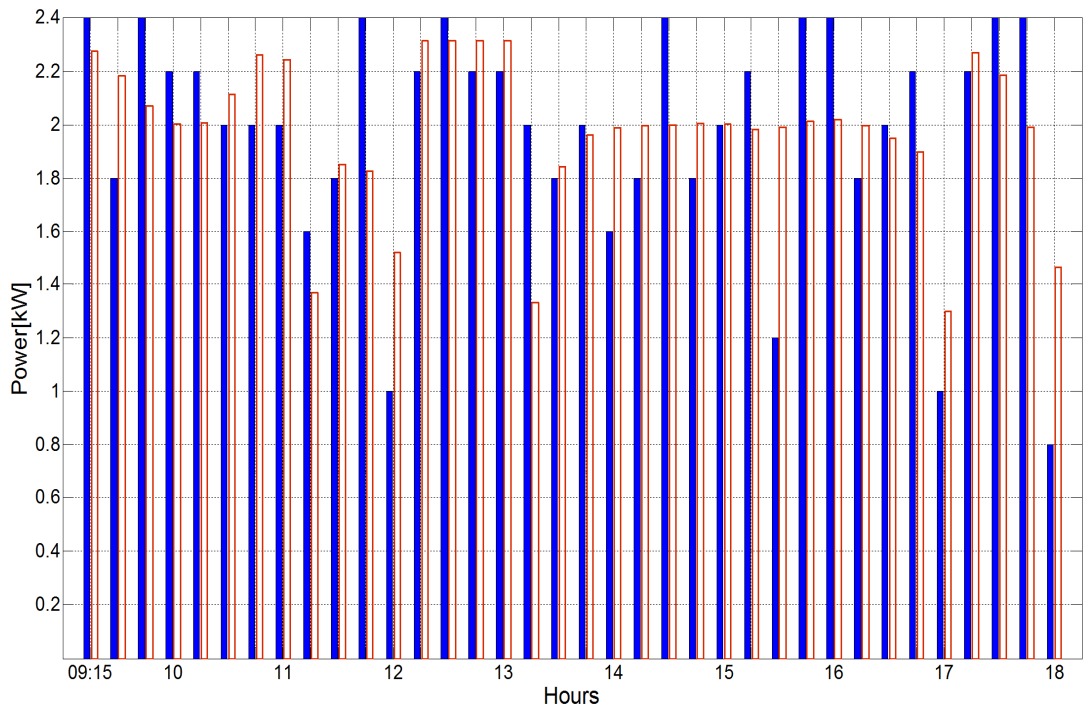


(a)

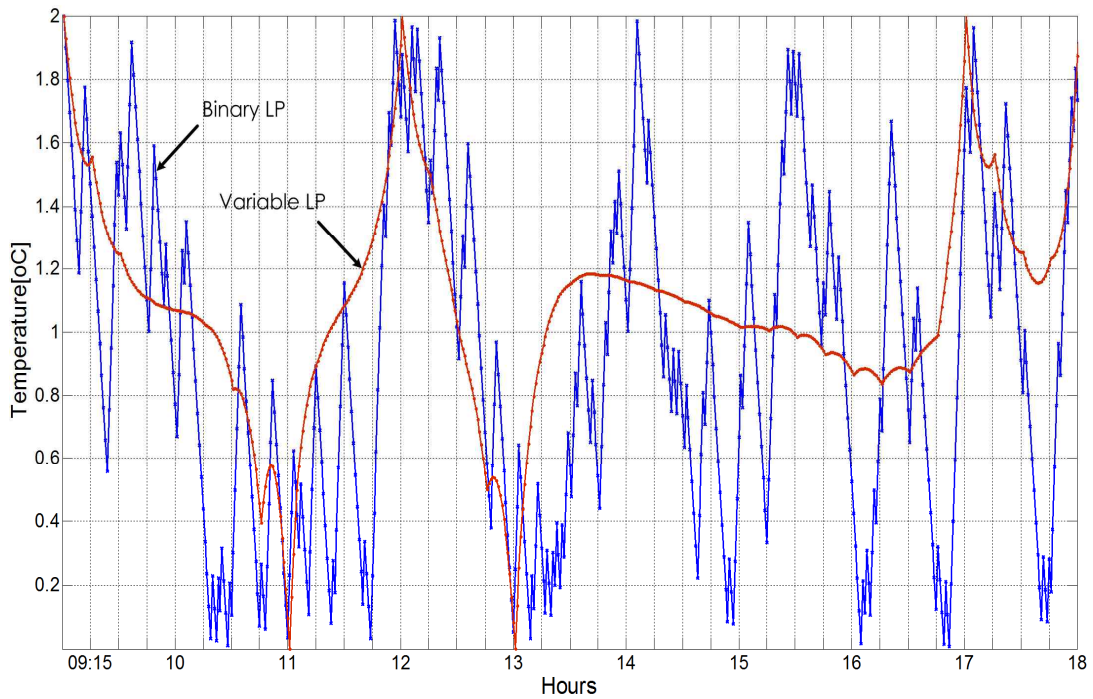


(b)

Fig. 54 Power consumption and temperatures for non-peak tariff day by LP algorithm  
 (a) power consumption (b) internal temperature



(a)

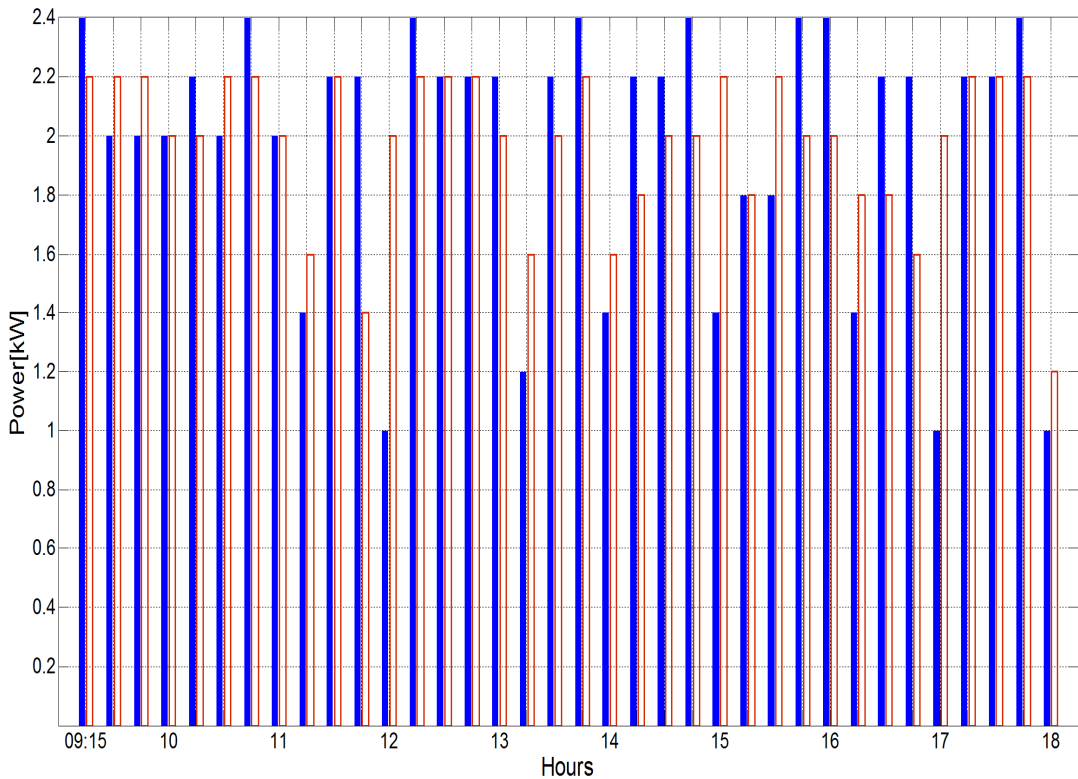


(b)

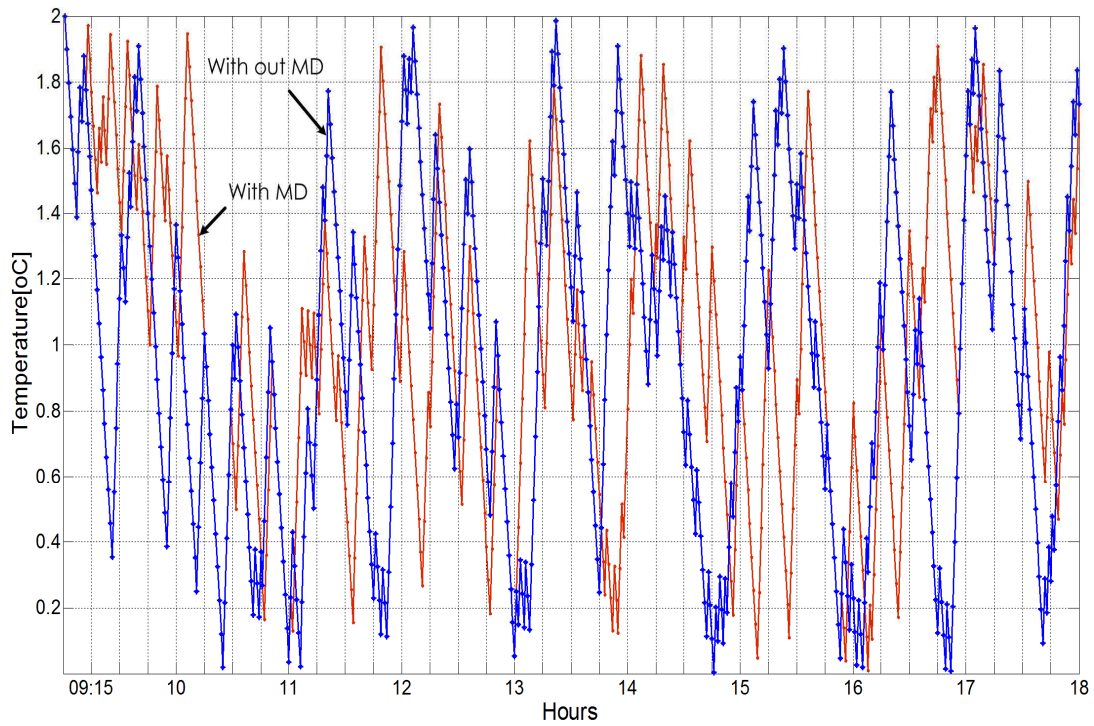
Fig. 55 Power consumption and temperatures for peak tariff day by LP algorithm  
 (a) power consumption (b) internal temperature

### 3) 최대수요를 고려한 전력사용 및 실내온도제어

Fig. 56은 최대수요 제약조건과 이진 제어 방식의 LP 알고리즘을 적용하여 설정된 제어구간의 입력으로 인가하는 방법으로 시뮬레이션을 수행하였을 때 결과를 나타내었다. Fig. 56(a)는 이진 제어 방식의 LP 알고리즘을 적용한 전력사용을 나타낸 것으로, 최대수요 제약 조건을 적용하지 않은 경우에 중부하 시간대는 최저 2[kW]에서 최대 2.4[kW], 최대부하 시간대는 최저 1[kW]에서 최대 2.4[kW], 최대수요 제약 조건을 적용한 경우에 중부하 시간대는 최저 2[kW]에서 최대 2.2[kW], 최대부하 시간대는 최저 1.4[kW]에서 최대 2.2[kW]를 나타내고 있다. 최대수요 제약 조건을 적용한 경우가 최대수요 제약 조건을 적용하지 않은 경우보다 전력사용을 2.4[kW]에서 2.2[kW]로 부하를 이동시켜 최대피크 전력사용이 0.2[kW] 감소하였음을 알 수 있다. Fig. 56(b)는 기준 온도에서 변할 수 있는 2[°C] 온도제어 범위 내에서 최대수요 제약조건을 적용하지 않은 방식이 최대수요 제약 조건을 적용한 방식보다 실내온도 변화가 불규칙적으로 변화하고 있음을 확인할 수 있다.



(a)

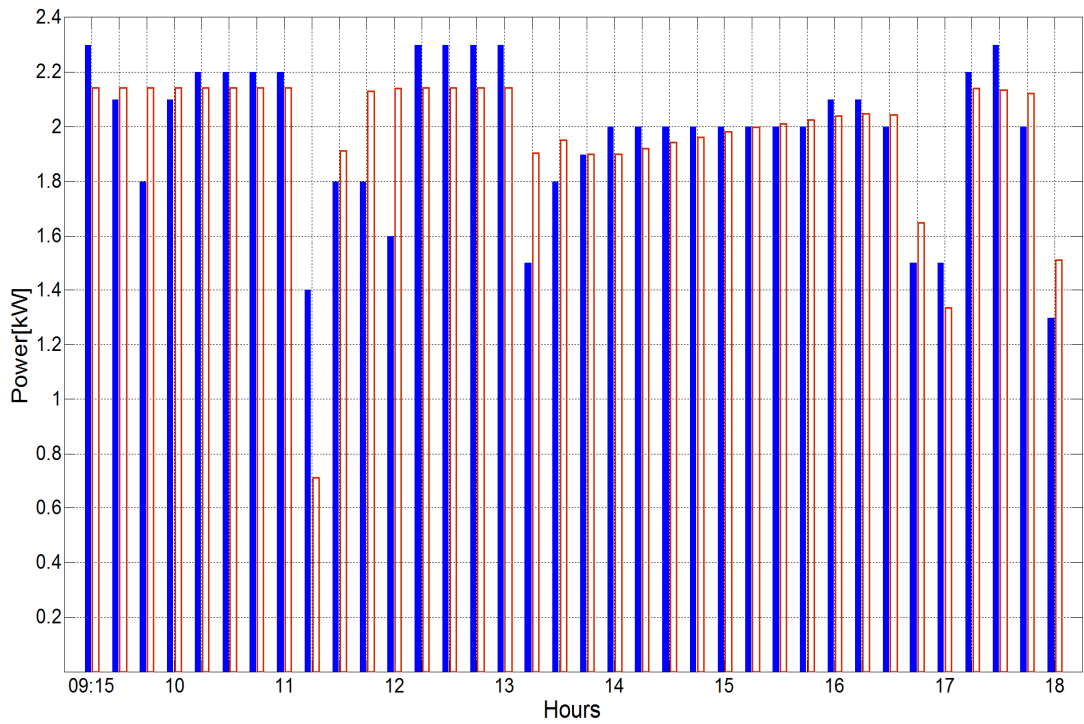


(b)

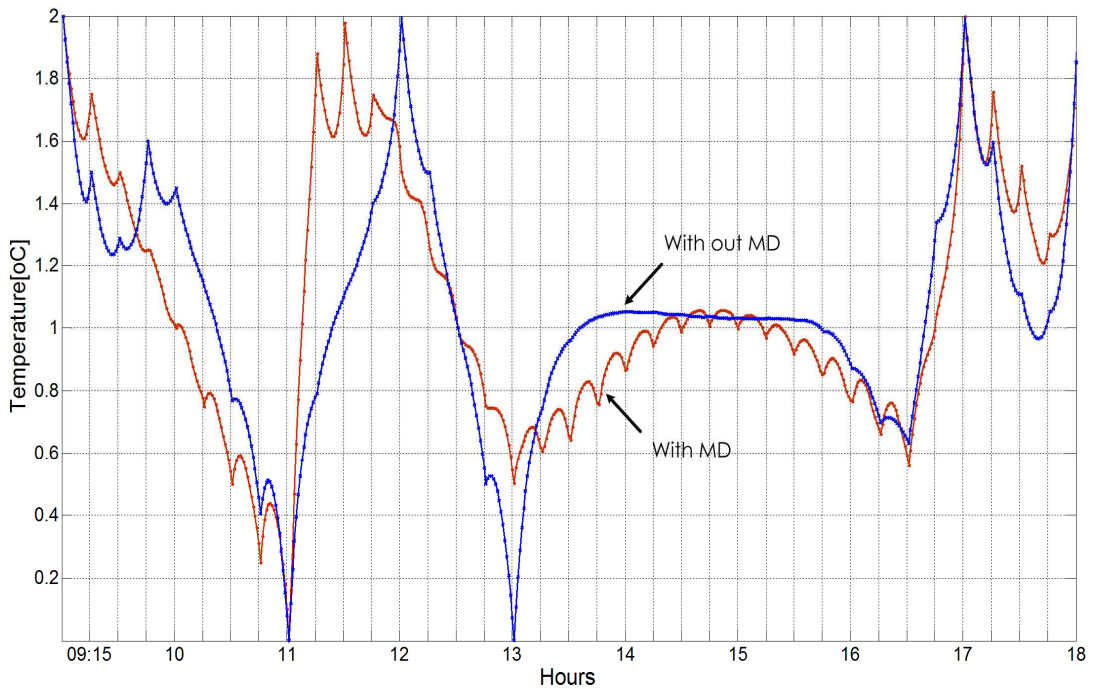
Fig. 56 Power consumption and temperatures with MD tariff by LP binary algorithm  
 (a) power consumption (b) internal temperature

Fig. 57은 최대수요 제약조건과 가변 제어 방식의 LP 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였을 때 결과를 나타내었다. Fig. 57(a)는 가변 제어 방식의 LP 알고리즘을 적용한 전력사용을 나타낸 것으로, 최대수요 제약 조건을 적용하지 않은 경우에 중부하 시간대는 최저 1.8[kW]에서 최대 2.3[kW], 최대부하 시간대는 최저 1.5[kW]에서 최대 2.1[kW], 최대수요 제약 조건을 적용한 경우에 중부하 시간대는 2.2[kW], 최대부하 시간대는 최저 0.7[kW]에서 최대 2.1[kW]를 나타내고 있다. 최대수요 제약 조건을 적용한 경우가 최대수요 제약 조건을 적용하지 않은 경우보다 전력사용을 2.3[kW]에서 2.1[kW]로 부하를 이동시켜 최대피크 전력사용이 0.2[kW] 감소하였음을 알 수 있다. Fig. 57(b)는 기준온도에서 변할 수 있는 2[°C] 온도제어 범위 내에서 최대수요 제약조건을 추가한 방식과 추가하지 않은 가변 제어 방식을 나타낸 것으로, 최대수요 제약조건을 추가하지 않은 가변 제어 방식이 실내온도 변화 폭이 좁게 나타나고 있어 재실자의 쾌적성 면에서 좋은 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.





(a)



(b)

Fig. 57 Power consumption and temperatures with MD tariff by LP variable algorithm

(a) power consumption (b) internal temperature



Table 10은 기존 온-오프 제어방법과 최대수요 제약조건을 포함하는 LP 제어방법에 대한 전력사용과 전력량을 나타낸 것으로, 하루의 전력사용량은 유사하게 나타나고 있으며, 최대부하 시간에서 전력사용은 최대수요 제약조건을 추가한 가변 제어 LP 알고리즘을 적용한 방법에서 성능이 우수하게 나타남을 확인할 수 있다.

Table 10 Comparisons of the power consumption

Hour Algorithms	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Total [kWh]
On-Off	2.05	2.15	2.05	1.9	1.9	1.9	1.9	2.05	2.1	18
Binary LP	2.1	2.15	1.7	2.25	1.8	2.05	2.1	1.7	1.95	17.8
Binary LP with MD	2.15	2.1	1.8	2.15	1.85	2	2	1.8	1.95	17.8
Variable LP	2.07	2.22	1.64	2.31	1.80	1.98	2.00	1.79	1.98	17.79
Variable LP with MD	2.14	2.14	1.72	2.15	1.91	1.96	2.02	1.77	1.98	17.79

#### 4) 요금제를 적용한 전력 사용량 비교

계시별 요금제가 적용된 온-오프 제어와 LP 알고리즘 및 PSO 알고리즘을 적용하여 1시간 단위의 에너지 비용 및 전력량을 비교한 결과로, 대상건물에 적용한 요금제는 일반용 전력(을) 고압 A 선택 I이며, 15분 단위 피크전력에 부과되는 기본요금은 6,790 원, 사용량 요금은 경부하시( $Off_1$ ,  $Off_2$ ) 55.9원, 중부하시( $Mid_1$ ,  $Mid_2$ ,  $Mid_3$ ) 107.9원, 최대부하시( $On_1$ ,  $On_2$ ) 185.2원이다. 에너지 비용은 냉방시스템의 가동 제어방식에 따른 피크전력은  $3[kW]$ 로 하였으며, 사용량 요금은 전력사용 $[kW]$ 와 시간 $[hour]$ 의 곱으로 계산하였다. EHP를 오전 9시부터 오후 6시까지 가동한 전력량은  $18[kWh]$ ,  $17.8[kWh]$ 와

17.79[kWh], 14.3[kWh]이며, 사용량 요금은 각각 2,692원, 2,636원과 2,624원, 2,101원으로 PSO 알고리즘을 적용한 제어 방식이 온-오프 제어 방식에 비해 20.5%, 이진 제어와 가변 제어 방식보다 19.7[%]와 19.6[%]가 감소함을 알 수 있었다. 또한 전력 사용량 요금과 피크전력에 부과되는 기본요금을 더하여 계산된 전력요금은, 온-오프 제어가 3[kW], 이진 제어와 가변 제어는 2.4[kW]와 2.3[kW], PSO 제어는 2.5[kW]로 각각 23,060원, 18,930원과 18,240원, 19,070원으로, 가변 제어 알고리즘을 적용한 경우가 피크 전력이 낮게 발생되어 전체 전력요금이 감소함을 알 수 있었다.

최대피크 요금제가 적용된 LP 알고리즘을 이진 제어와 가변 제어 방식으로 구분하여 계시별 요금제와 동일하게 적용하였다. 비피크일을 적용한 사용량 요금은 경부하시 42.4원, 중부하시 72.9원, 최대부하시 104.7원이며, 피크일을 적용한 사용량 요금은 경부하시 42.4원, 중부하시 170.8원, 최대부하시 503.1원이다. EHP를 오전 9시부터 오후 6시까지 가동한 전력 사용량으로 비피크일은 17.8[kWh], 17.79[kWh]이며, 피크일은 17.8[kWh], 17.79[kWh], 사용량 요금은 비피크일은 1,595원, 1,590원이며, 피크일은 5,589원, 5,532원으로, 전력 사용량은 동일하게 나타나지만 전력사용량에 대한 요금은 비피크일 보다 피크일이 최대 71.5[%] 높게 나타나고 있다. 또한 전력사용량 요금과 피크전력에 부과되는 기본요금을 더하여 계산된 전력요금으로는, 비피크일과 피크일의 피크전력은 유사하게 나타나 동일하게 적용하였으며, 비피크일을 적용한 이진 제어는 중부하와 최대부하가 2.4[kW], 가변제어는 중부하가 2.3[kW], 최대부하가 2[kW]로 각각 17,890원과 17,210원, 15,170원이고, 피크일을 적용한 이진 제어와 가변 제어의 피크전력은 비피크일과 동일하지만 전력 요금은 각각 21,883원과 21,149원, 19,112원으로 가변 제어 알고리즘을 적용한 경우가 피크전력이 낮게 발생되어 전체 전력요금이 감소함을 알 수 있었으며, 피크일 10일을 적용한 기간은 기존의 피크전력을 지속적으로 유지하거나 최대부하 시간대의 피크전력을 감소시킬 수 있는 대상건물의 특성을 고려한 전략이 필요하다.

Fig. 58은 온-오프 제어와 PSO 알고리즘, LP 알고리즘과 MD 제약조건을 추가한 LP 알고리즘을 15분 단위의 피크전력에 대한 결과를 나타내었다. 최대부하 시간대 전력사용은 온-오프 제어가 3[kW], PSO제어는 2.5[kW], 이진 제어와 가변 제어 방식을 적용한 LP제어는 2.4[kW]와 2.3[kW], MD 제약조건을 추가한 이진 제어와 가변 제어 방식을 적용한 LP제어는 2.2[kW]와 2.1[kW]로 MD 제약조건을 추가한 가변 제어 방식의 LP 알고리즘 성능이 우수하게 나타남을 확인할 수 있다.

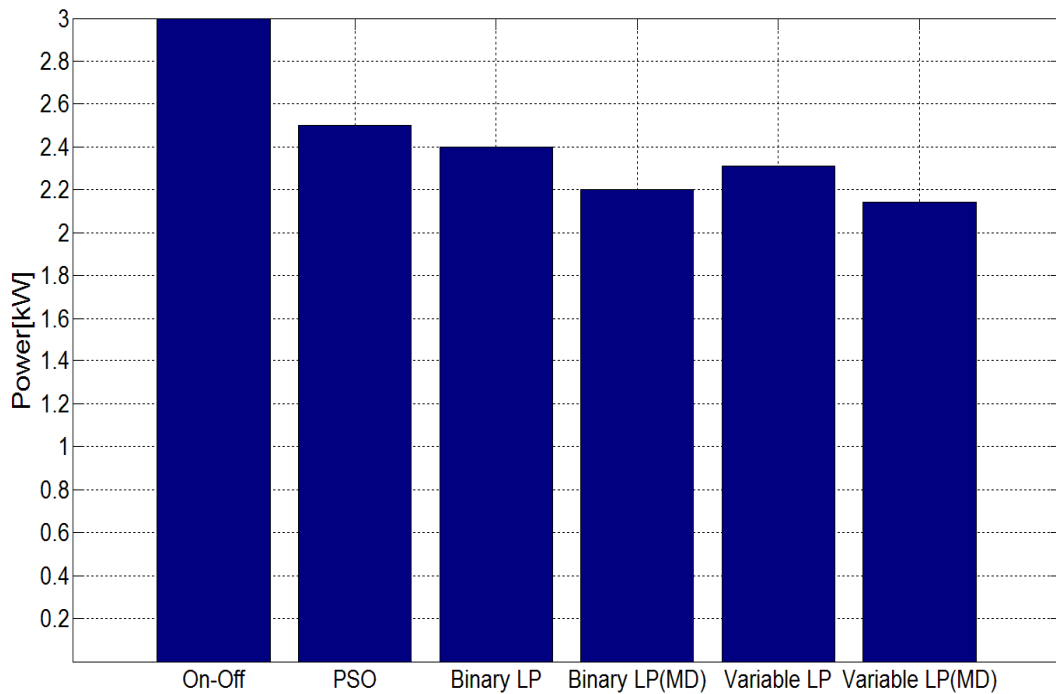


Fig. 58 Comparisons of peak power

#### 4. 결과고찰

단일 존 건물을 대상으로 집중인자를 이용한 건물의 등가모델을 제안 하였고, 제안한 건물모델링이 정상적으로 구현되는지 검증하기 위해 일사량과 기온변화에 따라 건물 실내 공간의 온도변화 특징을 Matlab/Simulink로 구현하였다. 시뮬레이션을 통해 여름철과 겨울철 건물의 벽구조에 따른 냉방과 난방의 열손실에 대한 비교 분석 및 외부기온 변화에 따른 실내온도와 습도, 전력 사용량이 변화하는 과정을 실제 측정된 현장데이터와 비교하였고, 이를 근거로 하여 전력 사용량과 피크전력의 절감을 위해 적용한 제어 알고리즘의 성능을 다양한 방법으로 분석하였다.

기상청에서 제공된 요소별 자료를 근거로 외부의 일사량과 기온변화에 따라 건물내부 공간의 온도변화 특징을 Matlab/Simulink 프로그램을 통해 결과로 나타내었다. 이를 해석대상 건물에 하루 동안 온도센서에서 1분 단위로 측정된 데이터를 1시간 단위로 평균한 실내온도 측정값과 비교한 결과, 대상건물의 실내 온도가 증가함에 따라 발생하는 현열구간에서 오차가 발생하고 있으나, 전체적으로 대상건물의 실내 온도변화를 나타내는 그래프 곡선이 유사하게 나타나고 있어 대상건물에 대한 모델링이 적절하게

수행되었음을 알 수 있었다. 또한 대상건물의 외부기온 변화에 따른 실내온도 변화 특성을 비교하기 위해 벽과 바닥을 두꺼운 벽 H 구조, 중간두께 벽 M 구조, 얇은 벽 L 구조를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였으며, 대상건물의 벽이 H구조가 외부기온 변화의 영향을 적게 받고 냉방과 난방에 대한 열손실이 적음을 알 수 있었다. 그리고 L 구조에서 일사량이 투과된 실내온도 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 평균 실측값의 온도 그래프 곡선이 유사하게 나타나고 있어 대상건물에 대한 모델링 결과를 확인 할 수 있다.

계시별 요금제 기반에서 온-오프 제어와 LP 알고리즘 및 PSO 알고리즘을 적용하여 전력피크 감소 및 쾌적성을 향상 시킬 수 있는 방법에 대해서 제안한 결과, 온-오프 제어인 경우에 냉방시스템을 가동할 때 시간을 고려하지 않으므로 피크전력은  $3[kW]$ 로 가장 많은 사용량을 나타내었다. 온-오프 방식이 아닌 가변 제어 LP 알고리즘에서 가장 낮은  $2.3[kW]$ 의 피크전력을 사용하며, PSO 알고리즘이  $14.3[kWh]$ 로 가장 낮은 전력 사용량을 나타내었다. 온-오프 제어와 LP 제어, PSO 알고리즘을 적용한 제어 방법에서  $2[^\circ C]$  온도제어 범위 내에서 동작함을 확인할 수 있는데, 온-오프와 이진 제어 LP 알고리즘을 적용하는 경우에 실내온도 변화가 불규칙적으로 변화하고 있으며, 가변 제어 LP 알고리즘과 PSO 알고리즘을 적용한 경우는 실내온도 변화 폭이 좁게 나타나고 있어 재실자의 쾌적성 면에서 좋은 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

최대피크 요금제 기반에서 전력 사용량이 많은 59일을 비피크일 49일과 피크일 10일로 구분하여 이진 제어 방식과 가변 제어 방식의 LP 알고리즘을 적용하였을 때 시뮬레이션을 수행하였다. 전체적으로 피크일과 비피크일에 적용한 경우와 유사한 결과를 확인할 수 있으며 계시별 요금제에서의 최대피크 값 보다는 적게 나타나고 있어, 최대 피크 요금제를 이용 할 경우 최대부하 시간대에 최대피크 값을 작게 유지하려는 목적에 부합되는 결과를 얻었다.

최대수요 기반의 이진 제어 LP 알고리즘을 적용한 전력사용은 계시별 요금제와 최대 피크 요금제의 전력사용  $2.4[kW]$ 보다  $0.2[kW]$  감소한  $2.2[kW]$ 로 부하가 이동하였음을 알 수 있었다. 가변 제어 방식의 경우에 전력사용은 가장 작은  $2.3[kW]$ 로 부하가 다른 시간대로 이동하였음을 알 수 있으며, 최대부하 시간대의 실내온도 변화 폭이 일정하게 나타나고 있어 재실자의 쾌적성 면에서 가장 좋은 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

## VI. 결론

본 논문에서는 건물에너지의 효율 향상을 위해서 단일존 건물에서 에너지소비가 가장 많이 이루어지는 냉방분야의 전력사용을 감소시키기 위해, 해석 대상 건물에 대한 열 모델설계와 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 사용하여 모델링을 구현하고 검증 하였다. 여름철과 겨울철 건물의 구조에 따른 온도와 습도의 차이 및 EHP, 전등부하, 콘센트부하의 전력 사용량을 측정하기 위해 시스템을 구성하고 현장에 적용하여 비교하였다. 또한 계시별 요금제 및 최대피크 요금제와 최대수요 기반의 제약조건에서 온-오프 제어와 LP 알고리즘 및 PSO 알고리즘을 적용한 제어 방식을 비교하여 전력사용을 감소시킬 수 있는 제어기법의 비교를 제안하였다. 이상의 연구를 통하여 다음의 결과를 도출하였다.

1. 단일 존 건물을 대상으로 외부의 일사량과 기온변화에 따라 건물내부 공간의 온도가 변화하는 특성을 살펴보기 위해 실제 건물을 대상으로 건물 모델링을 수행하였다.
2. 건물 모델링의 성능을 검증하기 위해 Matlab/Simulink 프로그램을 작성하였으며, 시뮬레이션을 통해 대상건물의 실내 온도변화를 나타내는 그래프 곡선이 실제 측정값과 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.
3. 대상건물의 외부기온 변화에 따른 실내온도 변화 특성을 비교하기 위해 벽을 두꺼운 벽, 중간두께 벽, 얇은 벽 구조로 구분하여 건물 모델링을 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과 두꺼운 벽 구조가 외부기온 변화의 영향을 적게 받으며 냉방과 난방에 대한 열손실이 적게 나타나며, 얇은 벽 구조에서 일사량이 투과된 실내온도 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 평균 실측값의 온도 그래프 곡선이 유사하게 나타나고 있어 대상건물에 대한 모델링이 적절하게 수행되었음을 확인할 수 있었다.
4. 계시별 요금제 기반에서 피크전력이 결정되는 15분 단위의 전력사용은 가변 제어 LP 알고리즘을 적용한 방식에서 가장 작은 값을 가지고, PSO 알고리즘을 적용한 방식이 최소의 전력 사용량이 나타남을 확인하였다. 온도제어 면에서는 가변 제어

LP 방식과 PSO 알고리즘을 적용한 제어 방식이 온-오프 제어와 이진 제어 LP 방식의 알고리즘을 적용한 제어 방식 보다 좋은 결과를 나타내었다.

5. 최대피크 요금제 기반에서 전력사용은 비피크일과 피크일로 구분하여 이진 제어와 가변 제어 LP 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 15분 평균 전력 사용과 전체 전력 사용량은 비슷하게 나타났으며, 온도 제어 면에서는 가변 제어 LP 알고리즘을 적용한 제어 방식에서 좋은 결과를 나타내었다.
6. 최대수요 기반에서 LP 알고리즘을 적용하였고, 가변 제어 방식을 적용한 LP 알고리즘이 이진 제어 방식을 적용한 LP 알고리즘 보다 15분 평균 전력사용이 감소하고 실내온도 변화 폭이 일정하게 나타나고 있어 재실자의 쾌적성 면에서 좋은 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

향후 추가 연구가 필요한 사항으로는, 단일 존 건물을 대상으로한 온도제어 모델링을 멀티 존으로 확장해 적용하는 경우와 실시간 외기온도 변화에 따른 제어 알고리즘을 구성하여 그 결과를 비교하여 분석하면 실제 현장 건물에 직접적으로 적용할 수 있으리라 기대된다.

## 참고문헌

- [1] 에너지경제연구원, 에너지통계연보, 2011.
- [2] 국제에너지기구(IEA), 세계에너지전망보고서, 2009.
- [3] 에너지기술평가원, 그린 에너지 전략 로드맵, 2011.
- [4] 국토해양부, 건축물의에너지절약설계기준 개정, 2012.
- [5] 국토해양부, 녹색건축물 조성 지원법, 2013.
- [6] 박창봉, 사무소건물의 에너지절약형 냉방시스템 적용에 관한 연구, 박사학위논문, 중앙대학교, 2011.
- [7] S. J. Rees, D. Xiao, and J. D. Spitler, "An analytical verification test suite for building fabric models in whole building energy simulation program," ASHRAE Transactions, vol. 108, no. 1, pp. 30-41, 2002.
- [8] J. Cigler and S. Prívará, "Subspace identification and model predictive control for buildings," International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, pp. 750-755, Singapore, 2010.
- [9] 산업통상자원부, 2013년 여름철 전력수급 전망 및 대책, 2013.
- [10] C. G. Nesler, "Adaptive control of thermal processes in buildings," IEEE Control Systems Magazine, pp. 9-13, 1986.
- [11] M. Ham and G. Lachiver, "A fuzzy control system based on the human sensation of thermal comfort," IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 487-492, Anchorage, USA, 1998.
- [12] J. Liang and R. Du, "Design of intelligent comfort control system with human learning and minimum power control strategies," Energy Conversion and Management, no. 48, pp. 517-528, 2008.
- [13] N. Nassif, S. Kajl, and R. Sabourin, "Optimization of HVAC control system strategy using two-objective genetic algorithm," HVAC&R Research, no. 3, pp. 459-486, 2005.
- [14] M. Morari and J. Lee, "Model predictive control: past, present and future,"



- Computers and Chemical Engineering, vol. 23, pp. 667-682, 1999.
- [15] E. F. Camacho and C. Bordons, Model Predictive Control, Springer, 2004.
- [16] P. D. Morosan, R. Bourdais, D. Dumur, and J. Buisson, "Distributed model predictive control based on Benders' decomposition applied to multisource multizone building temperature regulation," IEEE Conference on Decision and Control, pp. 3914-3919, Atlanta, USA, 2010.
- [17] S. Hasimoto, M. Terano, T. Sugiura, M. Nakamura, T. Kawase, Y. Kondo, 양정훈, "실내 환경 개선에 의한 생산성 향상에 관한 조사연구," 대한설비공학회지, 34권 4호, pp. 62-72, 2005.
- [18] ISO 7730, Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal comfort, ISO, 1984.
- [19] ASHRAE standard, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE 55-2004, 2004.
- [20] ASHRAE, Thermal Comfort Conditions, ASHRAE standard 55.66, New York, 1966.
- [21] E. Yoram and S. M. Daniel, "Thermal comfort and the heat stress indices," Industrial Health, vol. 44, pp. 388-398, 2006.
- [22] P. O. Fanger, Thermal Comfort, Danish Technical Press, 1970.
- [23] ISO, Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, ISO 7730, 1984.
- [24] 산업자원부·에너지관리공단, 에너지이용합리화사업, 2004.
- [25] 인하대학교 건축환경설비 연구실, TRNSYS를 이용한 건물에너지 해석, 도서출판건기원, pp. 50-53, 2004.
- [26] J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons., 1991.
- [27] P. Romanos, Thermal Model Predictive Control for Demand Side Management Cooling Strategies, Ph.D. Dissertation, University of Kassel, 2007.
- [28] C. P. Underwood and F. W. H. Yik, Modelling Methods for Energy in Buildings, Wiley-Blackwell, 2004.

- [29] Y. A. Cengel, Heat and Mass Transfer: A Practical Approach, 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw Hill, New York, 2007.
- [30] 박나희, 동특성 에너지 시뮬레이션을 이용한 사무용 건물에서의 EHP와 GHP의 경제성 비교, 석사학위논문, 서울과학기술대학교, 2011.
- [31] 성환봉, 대학건물에서 히트펌프 냉난방시스템의 경제성 분석, 석사학위논문, 부경대학교, 2007.
- [32] A. W. M. van. Schijndel, Integrated Heat Air and Moisture Modeling and Simulation, Ph.D. Dissertation, Eindhoven University of Technology, 2007.
- [33] A. Sempey, C. Inard, C. Ghiaus, and C. Allery, "Reduced order model for air temperature control in indoor spaces," PALENC Conference, pp. 924-928, Creac island, Greece, 2007.
- [34] 고동수, 스마트 그리드의 핵심인 실시간 요금제의 미국 사례와 시사점, 산업연구원, 2010.
- [35] I. Hazyuk, C. Ghiaus, and D. Penhouet, "Optimal temperature control of intermittently heated buildings using model predictive control: Part I - Building modeling," Building and Environment, vol. 51, pp. 379 - 387, 2012.
- [36] 한국전력공사 전기요금표, <http://cyber.kepco.co.kr/cyber/>, 2012.
- [37] Y. Yang, A. Pinto, A. Sangiovanni-Vincentelli, and Q. Zhu, "A design flow for building automation and control systems," 31st IEEE Real-Time Systems Symposium, pp. 105-116, San Diego, USA, 2010.
- [38] 부창진, 김정혁, 김호찬, "냉방시스템 제어구간설정 방법을 이용한 건물 실내온도 제어," 한국산학기술학회논문지, 13권 10호, pp. 4902-4909, 2012.
- [39] J. S. Heo, K. Y. Lee, and R. Garduno-Ramirez, "Multi objective control of power plants using particle swarm optimization techniques," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, pp. 552-561, 2006.
- [40] R. Poli, J. Kennedy, and T. Blackwell, "Particle swarm optimization: An overview," Swarm Intelligence, vol. 1, no. 1, pp. 33-57, 2007.

## 감사의 글

한편의 논문을 마무리 할 수 있기까지 오랜 시간이 걸렸습니다. 7년 전 제주대학교 대학원에 들어올 때 저의 모습이 떠오릅니다. 새로운 시작에 대한 설렘과 앞으로 헤쳐 나가야 할 연구에 대한 열정으로 가득한 저였습니다. 이러한 열정 앞에서도 지난 시간동안 많은 좌절과 어려움이 저를 힘들게 하였습니다. 이런 저를 옆에서 지켜보아 주시고 끊임없는 격려를 해주신 많은 분들께 이 글을 통해 감사의 마음을 전해드리고자 합니다.

저의 지도교수님이신 김호찬 교수님께 감사드립니다. 짧지 않은 시간동안 교수님으로부터 참된 연구자의 마음가짐과 삶에 대한 성실한 태도를 마음 깊이 새길 수 있었습니다. 학문과 삶에 대한 교수님의 진심 어린 말씀 하나하나를 새겨가며 최선을 다해 살아갔습니다.

오성보 교수님과 이개명교수님, 김세호 교수님께 감사드립니다. 연구와 강의로 바쁘신 가운데에도 저의 학위논문 심사를 흔쾌히 맡아주시고 아낌없는 조언을 해주셨습니다.

김일환 교수님과 김호민 교수님, 좌종근 교수님께도 감사드립니다. 대학원 박사과정을 옆에서 지켜보아주시고 학문적으로나 생활함에 있어 많은 조언과 도움을 주셨습니다. 그리고 멀리 제주도까지 오셔서 논문심사를 흔쾌히 응해주신 상명대학교 김정욱 교수님께 감사드립니다. 저의 박사학위 연구에 관해 많은 관심을 가져주시며 연구방향과 과정에 있어 많은 조언과 도움을 주셨습니다.

제어계측연구실 부창진 박사님께 감사드립니다. 저의 논문과정을 처음부터 끝까지 관심을 가지고 지켜보아 주셨고 내가 힘들어 할 때 마다 많은 도움을 주셨습니다. 지난 시간은 그 무엇보다 바꿀 수 없는 소중한 경험과 추억으로 내 마음 한켠에 영원히 머무를 것입니다.

저를 자기발전의 기회로 만들어준 제주특별자치도의회 의장님을 비롯한 사무처장님, 직상상사와 동료 그리고 저의 대학원생활을 함께 지켜보고 용기를 준 동문 선배와 후배님들에게도 고마움을 전합니다. 여러분들의 따뜻한 관심과 끊임없는 애정은 지치고 힘들 때마다 저에게 큰 힘이 되어 주었습니다.

어머님과 장인, 장모님에게 감사드립니다. 어머님과 장인, 장모님의 사랑과 관심이 없었다면 지금의 저는 결코 있을 수 없었을 것 입니다. 어머님과 장인, 장모님의 사랑에

항상 감사하며 최선을 다해 열심히 살아가겠습니다.

마지막으로 제 모든 힘의 원천이며 살아가는 원동력이 되어준 저의 아내 고희실과 두 자녀 지형, 동욱에게 사랑한다는 말과 함께 작지만 소중한 선물로 논문을 바치고자 합니다.

이 외에 제가 미처 언급하지 못한 고마운 분들이 너무나 많습니다. 그 분들의 이름을 하나하나 되새기지 못함을 죄송하게 생각합니다.

모두들 감사합니다.

2013年 08月