

실내 온열환경 쾌적 제어를 위한 단순 PMV 회귀모델의 적용에 관한 시뮬레이션 연구

김상훈·윤성준*·정광섭**†

서울과학기술대학교 에너지환경대학원, *파슨스브링커호프코리아 건축팀, **서울과학기술대학교 건축학부
(2015년 2월 2일 접수, 2015년 3월 11일 수정, 2015년 3월 13일 채택)

A Study on the Application of Simulation-based Simplified PMV Regression Model for Indoor Thermal Comfort Control

Sang-Hun Kim, Sung-Jun Yun*, Kwang-Seop Chung**†

Graduate School of Energy Environment, Seoul National University of Science and Technology,

*Architecture Team, Parsons Brinckerhoff Korea,

**School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology

(Received 2 February 2015, Revised 11 March 2015, Accepted 13 March 2015)

요 약

본 연구에서는 보정된 모델링 건물을 대상으로 PMV 변수에 대한 데이터베이스를 구축하였고, 다중회귀분석을 통하여 PMV 회귀모델을 도출하였다. PMV 회귀모델은 민감도 및 데이터 분석을 통하여 단순화하여 단순 PMV 회귀모델을 제시하였다. 단순 PMV 회귀모델과 Fanger PMV 모델에 대한 MAE 및 RMSE 검증을 통하여 단순 PMV 회귀모델이 Fanger PMV 모델을 대체할 수 있는 것으로 분석되었다. EnergyPlus의 EMS(Energy Management System)를 이용하여 보정된 모델링 건물에 PMV 회귀모델 제어를 적용하였다. 단순 PMV 회귀모델과 Fanger PMV 모델 제어의 온열 쾌적도를 비교한 결과, 두 제어 모두 공조기간 동안 약 90% 이상이 온열쾌적 범위를 만족하였고, 온열 쾌적 제어의 특징인 설정 PMV를 만족하는 설정온도에 의하여 제어되는 것으로 나타났다.

주요어 : 예상 평균 온열감, 다중회귀분석, 단순화, 에너지플러스

Abstract - The PMV regression analysis was conducted for this model based on a database of the PMV variables. PMV regression model simplification was completed through sensitivity and data analysis. The simplified PMV regression model's and Fanger PMV model was confirmed through MAE and RMSE. And the EMS in EnergyPlus was used to establish a simplified PMV regression analysis-based thermal comfort control. Also, the thermal comfort controls based on simplified PMV model and the Fanger PMV model were applied to the building model, it was confirmed that both controls met the thermal comfort range in more than 90% of cases during the air conditioning period.

Key words : Predicted mean vote, Multiple regression analysis, Simplification, EnergyPlus

기호설명

†To whom corresponding should be addressed.
School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology
Tel : +82-2-970-6561 E-mail : kschung@seoultech.ac.kr

$PMV_{S,per}$: 외주부 단순 PMV 회귀모델
 $PMV_{S,int}$: 내주부 단순 PMV 회귀모델
 PMV_{Set} : 설정 PMV

$T_{Set,Per}$: 외주부 설정온도 [$^{\circ}C$]
$T_{Set,Int}$: 내주부 설정온도 [$^{\circ}C$]
T_z	: 실내공기온도 [$^{\circ}C$]
T_r	: 평균복사온도 [$^{\circ}C$]
RH	: 상대습도 [%]

1. 서론

1-1. 연구의 배경 및 목적

최근 국내에서는 건물에서 소비되는 에너지를 절감하기 위한 방안으로 실내온도를 규제하거나, 적정 실내 온도 준수를 권장하고 있다. 그러나 실내온도에 대한 규제 및 권장은 냉·난방 에너지사용량을 절감할 수는 있지만, 재실자가 열적으로 쾌적하지 못한 상태에 노출되면 업무 생산성이 저하되는 문제가 발생한다. 이와 같은 이유로, 재실자가 쾌적함을 느끼는 실내온도 조건을 도출하기 위한 연구와 온열환경 쾌적지표인 PMV(Predicted Mean Vote)를 활용한 Fanger PMV 모델 기반의 온열 쾌적 제어 연구가 이루어 졌으나, 대부분의 온열환경 쾌적 제어연구들은 다수의 변수를 고려해야 하므로, 실제 건축물에 적용하기에는 많은 계측 센서를 필요로 하고, 처리시간이 길어지는 문제로 제약이 있다.

따라서, 본 연구에서는 Fanger PMV 모델 기반의 온열 쾌적 제어의 문제점을 해결하기 위해 Fanger PMV 모델을 단순화시킨 모델을 작성하였다. 그리고 이를 시뮬레이션을 통해 적용하여, 기존의 Fanger PMV 모델과의 제어효과를 비교 검토하는데 목적이 있다.

1-2. 연구의 방법

Fanger PMV 기반의 온열 쾌적 제어에서 고려되는 물리적 변수를 단순화하기 위하여 Fig. 1과 같이 연구를 수행하였다. PMV 변수에 대한 데이터베이스는 실제 업무용 건물을 모델링한 후, M&V Guideline에 의하

여 보정된 모델링 건물에서 추출하여 구축하였다. 구축된 데이터베이스는 다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)을 통해 PMV 회귀모델을 도출하였고, 도출된 PMV 회귀모델에 대한 F-검정과 k-묶음 교차검정(k-fold Cross Validation)으로 유의성을 검증하였다.

PMV 회귀모델의 단순화는 종속변수인 PMV에 영향력이 낮은 변수를 고정하는 방법과 데이터베이스 분석을 통해 유사한 패턴을 나타내는 변수를 단일값으로 고정하는 방법을 적용하였고, 기존의 Fanger PMV 모델과의 MAE 및 RMSE를 비교하여 도출된 단순 PMV 회귀모델을 검증하였다. 검증이 완료된 PMV 회귀모델은 EnergyPlus 내 EMS 기능 언어인 Erl을 활용하여 단순 PMV 회귀모델 기반 온열 쾌적 제어를 구현하였다.

2. PMV 회귀모델

2-1. 데이터베이스 구축

PMV 회귀모델 도출을 위한 건물은 Table 1과 같이 지하 2층, 지상 19층 규모이며, 외피는 드라이월(Dry-wall)과 이중유리로 구성되어 있다. 건물 외피 모델링은 EnergyPlus의 Third party 프로그램인 Google Sketchup의 Open Studio를 이용하였고, 외피를 제외한 요소는 EnergyPlus 7.0을 이용하여 모델링하였다.

모델링된 건물은 FEMP의 M&V Guideline에서 제시하는 모델에 대한 오차 평가지표인 MBE(Mean Bias Error)와 Cv(RMSE)(Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error)를 기준으로 보정 및 검증하였으며, MBE와 Cv(RMSE)는 식 1.1, 식 1.2 및 식 1.3에 의하여 산출하였다.

$$MBE[\%] = \frac{\sum_{period} (S - M)_{interval}}{\sum_{period} M_{interval}} \times 100 \quad \text{식 1.1}$$

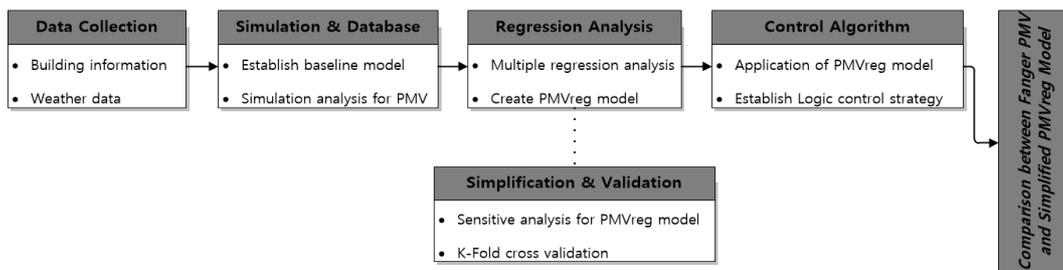


Fig. 1. Schematic diagram of simplified PMV regression model development process

Table 1. Brief descriptions of target building

Classification	Contents	
Location	Seoul	
Floor Area	32,488 m ²	
Construction	Windows	U-value = 3.7 W/m ² K
	Exterior Wall	U-value = 0.45 W/m ² K
	Floor	U-value = 0.32 W/m ² K
Internal Gains	People	2500 Person
	Lighting	11 W/m ²
	Equipment	15 W/m ²
HVAC System	Type	CAV
	Set-point Temp.	25°C (Summer) 22°C (Winter)
Operating Time	Mon. to Fri.	08:00 ~ 17:00

Table 2. Verification result of energy simulation model

Classification	Elec	Gas	Chiller	Error Tolerance
MBE	-0.6%	1.6%	4.4%	±5%
Cv(RMSE)	5.5%	9.0%	11.4%	15%

Table 3. Verification result of energy simulation model

Classification	Contents
Metabolic Rate (met)	1.2 (70W/m ²)
Clothing (clo)	Summer Season: 0.5
	Winter Season: 1.0
Air Velocity (m/s)	0.1

$$RMSE_{period} = \sqrt{\frac{\sum (S-M)_{interval}^2}{N_{interval}}} \quad \text{식 1.2}$$

$$Cv(RMSE_{period}) = \frac{RMSE_{period}}{A_{period}} \times 100 \quad \text{식 1.3}$$

보정된 모델링 건물은 Table 2와 같이 허용 오차범위 이내에 있는 것을 확인하였고, 보정된 모델링 건물을 대상으로 종속변수를 PMV, 독립변수를 물리적 변수인 실내공기온도, 평균복사온도, 상대습도로 설정하여 데이터베이스를 구축하였다. 단, 기류속도의 경우는 시뮬레이션 수행 시 입력값으로 설정되므로 Table 3과 같이 정적기류속도 최대치가 단일값으로 입력하

였다.

PMV 변수에 대한 데이터베이스는 기준층(10층)의 내주부와 외주부의 방위별로 구축하였으며, 데이터 개수는 하절기 1480개, 동절기 2160개 이다.

2-2. PMV 회귀모델 작성 및 검증

PMV 회귀모델 작성을 위한 다중회귀분석은 통계 소프트웨어 Minitab-16을 활용하여 수행하였다. 하절기, 동절기의 데이터베이스를 통해 다중회귀분석을 실시한 결과는 각각 Table 4 및 Table 5와 같으며, 도출된 회귀모델의 F-검정 결과는 모든 회귀모델이 신뢰구간 95%의 F값보다 큰 것으로 나타나므로 도출된 PMV 회귀모델이 유의한 것으로 판단되고, 결정계수가 90%이상 이므로 PMV 회귀모델이 신뢰구간 95%에서 100개 중 90개 이상의 데이터를 설명 할 수 있

어 높은 상관성을 보였다.

PMV 회귀모델 도출 과정에서 시뮬레이션 데이터가 균등하게 PMV 회귀모델 수립에 사용되었는지를 검토하기 위해 10-묶음 교차 검증을 수행하였으며, 검증 결과 평균절대치편차(MAE)와 평균제곱근편차(RMSE)의 평균과 분산이 0.01 이하로 나타나므로 본 연구에서 도출된 PMV 회귀모델이 특정값에 의해 결과가 변할 가능성이 매우 낮다고 판단된다. 그리고 외주부의 경우 방위별 회귀계수를 비교한 결과, 차이가 크게 나타나지 않으므로 남측의 PMV 회귀모델을 대표 방위로

설정하였다.

2-3. PMV 회귀모델 단순화

PMV 회귀모델 단순화는 PMV의 물리적 변수에서 단일값으로 입력된 기류속도를 제외한 실내공기온도, 평균복사온도, 상대습도에 대하여 민감도 분석을 통해 영향력이 미비하다고 판단되는 변수를 단일값으로 고정하였고, 데이터분석의 경우는 유사한 데이터를 나타내는 변수들에 대해서 단일변수로 통일하였다. 민감도 분석의 물리적 변수 유의범위는 Table 6과 같고, 내·

Table 4. PMV regression coefficient and F-value (summer)

Classification		Regression Coefficient				R-Squared	F-Value	F ≥ F(3, 1476, 0.05)
		c ₀	c ₁	c ₂	c ₃			
Perimeter	North	-8.69	0.162	0.160	0.0132	99.8	473,628	O
	South	-8.65	0.161	0.162	0.0131	99.7	452,631	O
	East	-8.68	0.162	0.160	0.0130	99.7	455,384	O
	West	-8.66	0.160	0.163	0.0132	99.3	213,214	O
Interior		-8.54	0.159	0.161	0.0116	99.4	360,527	O

Table 5. PMV regression coefficient and F-value (winter)

Classification		Regression Coefficient				R-Squared	F-Value	F ≥ F(3, 2156, 0.05)
		c ₀	c ₁	c ₂	c ₃			
Perimeter	North	-4.74	0.129	0.084	0.0027	99.7	1,050,721	O
	South	-4.82	0.113	0.101	0.0043	99.2	779,956	O
	East	-4.84	0.110	0.105	0.0041	99.9	1,544,801	O
	West	-4.81	0.121	0.094	0.0036	99.8	1,348,723	O
Interior		-4.83	0.119	0.097	0.0041	99.8	1,325,347	O

Table 6. Sensitivity analysis coverage of physical parameter

Classification		Coverage	
Physical Parameter	Air Temperature [°C]	Summer	18°C ~ 35°C
		Winter	10°C ~ 28°C
	Mean Radiant Temperature [°C]	Summer	20°C ~ 36°C
		Winter	11°C ~ 29°C
Relative Humidity [%]		20% ~ 100%	

Table 7. Sensitivity analysis coverage of physical parameter

Classification		MAE	RMSE	r ²
Summer	Perimeter Zone	0.01	0.0014	0.989
	Interior Zone	0.084	0.0027	0.97
Winter	Perimeter Zone	0.021	0.0017	0.982
	Interior Zone	0.128	0.0031	0.988

외주부 모두 평균복사온도 ≈ 실내공기온도 > 상대습도 순으로 민감도가 높게 나타났다. 상대습도에 따른 PMV 변화 범위는 하절기 ±0.5이고, 동절기 ±0.2로 변화량이 각각 1.0, 0.4로 나타났다. 따라서, 상대적으로 PMV에 영향력이 미미한 외주부의 상대습도가 유의범위의 평균값인 65%로 고정하였다.

데이터베이스를 분석하여 각 변수들의 데이터를 분석한 결과, 내주부의 경우는 실내로 유입되는 일사량이 외주부로 유입되는 일사량의 1/20 수준으로 매우 낮게 나타났는데, 이는 창을 통해 투과한 태양 일사에 직접적인 영향을 받는 외주부에 비해 실내로 유입되는 일사량이 적기 때문으로 판단된다. 따라서, 내주부의 실내공기온도와 평균복사온도에 대해서 단순회귀분석을 통해 평균복사온도를 실내공기온도로 대체하여 단순화 하였다.

단순 PMV 회귀모델과 Fanger PMV 모델을 비교한 결과는 Table 7과 같으며, 단순 PMV 회귀모델이 Fanger PMV 모델을 대체할 수 있는 것으로 분석되었다. 단순화된 내·외주부 단순 PMV 회귀모델은 식 1.4 ~ 식 1.7과 같다.

$$PMV_{S,Per} = 0.161 T_z + 0.162 T_r - 7.79 \quad (Summer) \quad \text{식 1.4}$$

$$PMV_{S,Int} = 0.271 T_z + 0.0116RH - 6.17 \quad (Summer) \quad \text{식 1.5}$$

$$PMV_{S,Per} = 0.113 T_z + 0.101 T_r - 4.54 \quad (Winter) \quad \text{식 1.6}$$

$$PMV_{S,Int} = 0.199 T_z + 0.0041RH - 4.35 \quad (Winter) \quad \text{식 1.7}$$

3. 단순 PMV 회귀모델 제어 적용

3-1. 단순 PMV 회귀모델 제어알고리즘

단순 PMV 회귀모델제어를 활용하기 위해서 도출된 단순 PMV 회귀모델을 제어가 가능한 실내공기온도를 종속변수로 설정하고, 설정 PMV를 만족하는 설정온도를 도출하기 위한 식으로 변환하였다. 위 과정을 통하여 도출된 재실자의 온열 쾌적을 반영한 설정 온도 계산식은 식 1.8~식 1.11과 같다.

$$T_{Set,Per} = (PMV_{Set} + 7.79 - 0.162 T_r) / 0.161 \quad (Summer) \quad \text{식 1.8}$$

$$T_{Set,Int} = (PMV_{Set} + 6.17 - 0.0116RH) / 0.271 \quad (Summer) \quad \text{식 1.9}$$

$$T_{Set,Per} = (PMV_{Set} + 4.54 - 0.101 T_r) / 0.113 \quad (Winter) \quad \text{식 1.10}$$

$$T_{Set,Int} = (PMV_{Set} + 4.35 - 0.0041RH) / 0.199 \quad (Winter) \quad \text{식 1.11}$$

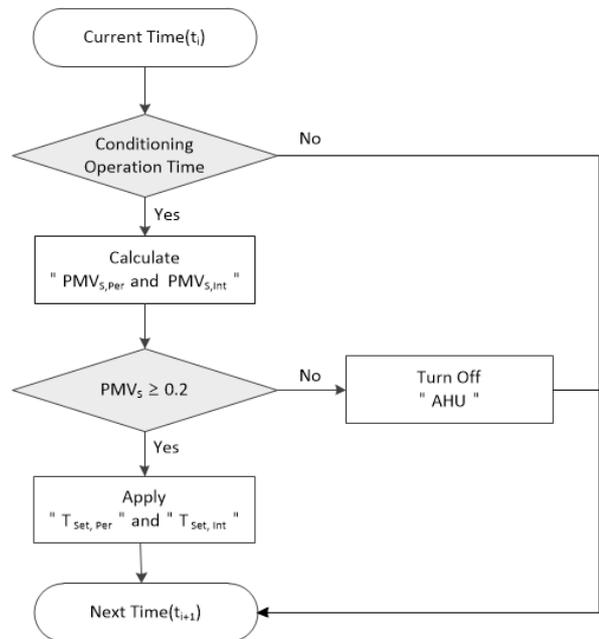


Fig. 2. Simplified PMV regression model control algorithm (summer)

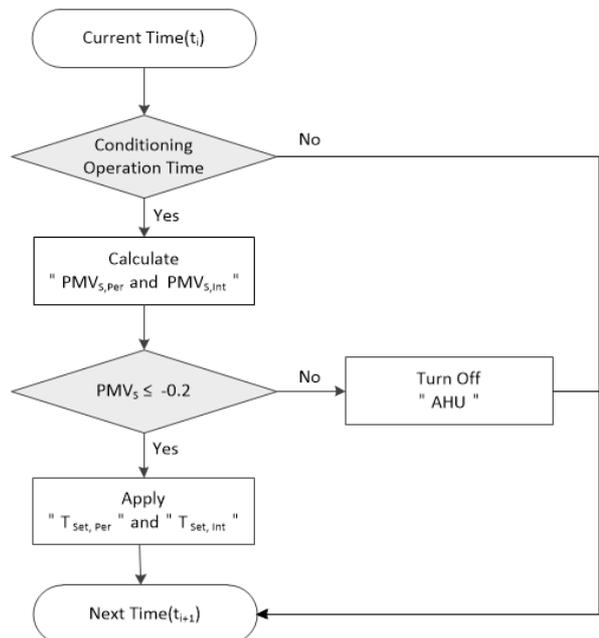


Fig. 3. Simplified PMV regression model control algorithm (winter)

PMV 제어조건은 단순 PMV 회귀모델과 Fanger PMV 모델의 편차를 고려하여 내·외주부 PMV 제어 조건을 하절기 0.2, 동절기 -0.2로 설정하였으며, 운영 시간은 실제건물의 운영시간인 오전8시~오후5시로 설정하였다. 작성된 단순 PMV 회귀모델 온열 쾌적 제어

알고리즘은 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다.

3-2. 단순 PMV 회귀모델 제어 비교분석

제어방식에 따른 온열 쾌적도 비교분석은 단순 PMV 회귀모델 제어알고리즘을 적용한 제어방식과 Fanger

Table 8. Occurrence ratio of thermal comfort range (summer)

Range	Simplified PMV Control [h]		Fanger PMV Control [h]	
	Interior	Perimeter	Interior	Perimeter
~22.0	15	19	12	15
22.0~23.0	78	77	78	77
23.0~24.0	75	74	94	96
24.0~25.0	72	79	89	90
25.0~26.0	61	59	66	67
26.0~27.0	44	41	55	46
27.0~	31	33	4	1
Set-point Temp.[°C] (Average)	24.0	24.2	24.2	24.3

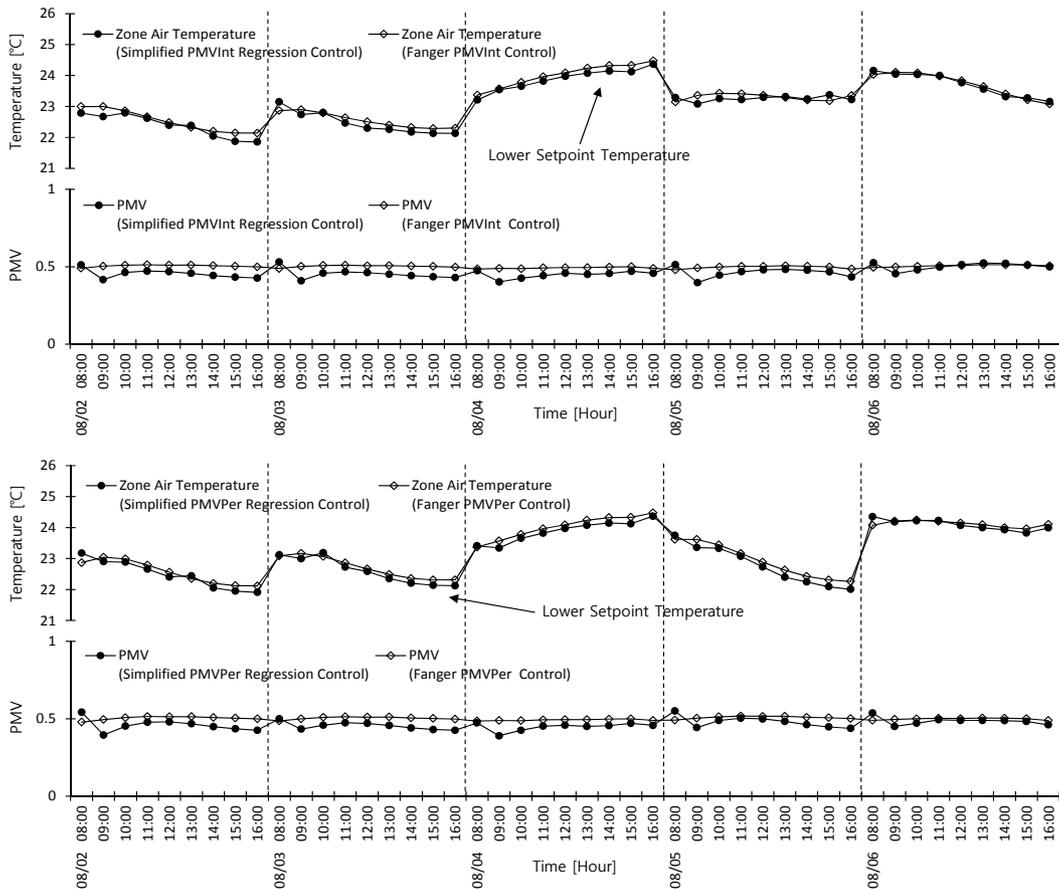


Fig. 4. Comparison of thermal comfort controls in the summer (interior zone(upper), perimeter zone(bottom))

Table 9. Occurrence ratio of thermal comfort range (winter)

Range	Simplified PMV Control [h]		Fanger PMV Control [h]	
	Interior	Perimeter	Interior	Perimeter
~18.0	3	11	17	4
18.0~19.0	18	38	36	87
19.0~20.0	177	213	145	178
20.0~21.0	273	316	356	378
21.0~22.0	139	115	115	67
22.0~23.0	86	41	55	46
23.0~24.0	34	19	8	1
24.0~	38	15	36	8
Set-point Temp.[°C] (Average)	20.3	20.6	20.0	20.2

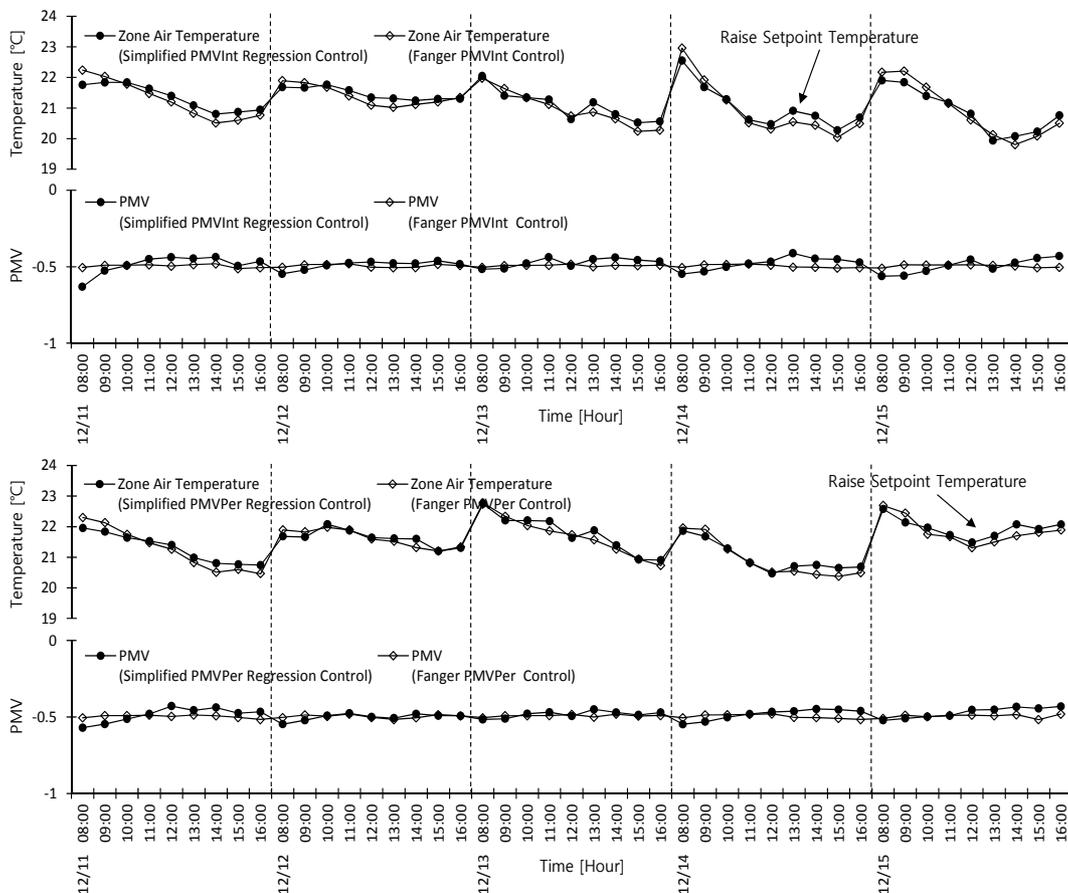


Fig. 5. Comparison of thermal comfort controls in the winter (interior zone(upper), perimeter zone(bottom))

PMV 모델 제어방식을 적용한 경우의 내·외주부 온열 쾌적 분포를 비교하였다. 단순 PMV 회귀모델제어와 Fanger PMV 모델 제어를 비교한 결과 Fig. 4, Fig. 5

와 같이 내·외주부 PMV와 하절기, 동절기 모두 최대 0.1 이내의 차이를 보이고, 단순 PMV 회귀모델 제어는 Fanger PMV 제어와 동일하게 설정 PMV 값을

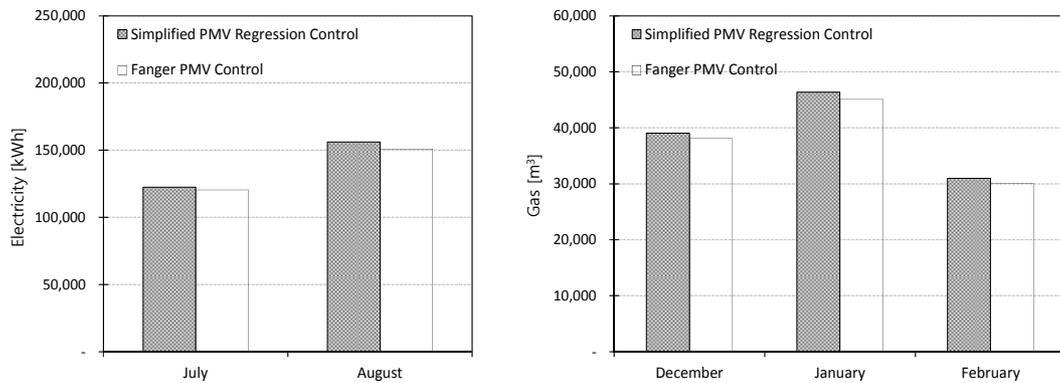


Fig. 6. Comparison of energy consumption

만족하는 실내 설정온도를 통해 제어하는 것으로 나타났다. 또한, 두 회귀모델의 온열 쾌적을 반영한 설정온도는 하절기 24℃, 동절기 20℃ 안팎이며, 하절기(7/1~8/31)와 동절기(12/1~2/28)의 공조기간 동안 온열 쾌적 제어를 적용한 경우의 설정온도 분포는 각각 Table 8 및 Table 9와 같다.

단순 PMV 회귀모델 제어와 Fanger PMV 모델 제어의 냉·난방에너지 사용량을 비교한 결과는 Fig. 6에 나타났다. 단순 PMV 회귀모델 제어는 Fanger PMV 모델 제어 대비 하절기 2.4%(6,849kWh), 동절기 2.7%(3,221m³)의 에너지가 더 사용하는 것으로 나타났다. 이것은 Fig. 4 및 Fig. 5와 같이 Fanger PMV 모델 제어가 단순 PMV 회귀모델 제어에 비해 하절기는 다소 높은 설정온도로 제어하고, 동절기는 낮은 설정온도로 제어하여 발생하는 것으로 판단된다.

4. 결론

PMV 온열 쾌적 제어에서 고려되는 물리적 변수를 줄인 단순 PMV 회귀모델 기반의 냉·난방제어를 EnergyPlus를 활용하여 모델링한 실제 사무소 건물을 대상으로 적용하여 온열 쾌적 및 에너지사용량을 도출하고, 이를 Fanger PMV 모델 제어 적용한 경우와 온열 쾌적 및 에너지 사용량 비교 분석하여 제어 효과를 확인하였다.

(1) 외주부 PMV 회귀모델의 민감도 분석 결과를 기반으로 상대습도를 유의범위의 평균값인 65%로 고정하고, 내주부는 데이터 분석을 통해 평균복사온도를 실내공기온도로 대체하여 단순화한 결과, 단순 PMV 회귀모델이 Fanger PMV 모델을 대체할 수 있을 것으

로 분석되었다.

(2) 단순 PMV 회귀모델 제어와 Fanger PMV 모델 제어를 적용한 경우의 냉·난방 에너지 사용량을 비교한 결과, 단순 PMV 회귀모델 제어가 Fanger PMV 모델 제어 대비 2.4%의 냉방에너지와 2.7%의 난방에너지를 더 사용하는 것으로 나타났으며, 이것은 단순 PMV 회귀모델과 Fanger PMV 모델과의 예측편차로 인해 발생한 것으로 판단된다.

(3) 단순 PMV 회귀모델 제어와 Fanger PMV 모델 제어를 적용한 경우의 설정온도 및 PMV를 비교한 결과, 단순 PMV 회귀모델 제어와 Fanger PMV 모델 제어가 유사한 설정온도와 온열 쾌적 범위에서 제어되는 것으로 분석되었다.

향후 본 연구결과를 토대로 단순 PMV 회귀모델 제어를 실제 건축물에 적용한다면, 기존의 Fanger PMV 모델을 활용한 경우보다 센서의 수가 현저히 줄어들므로 간단하게 온열쾌적 제어를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 연구비 지원으로 수행 되었습니다.

Reference

1. 윤동원, 강효석, 안병욱. 실내 온열환경 제어를 위한 PMV센서의 개발 및 적용성 평가연구, 대한설

- 비공학회 논문집, 2003, 15권 10호, 870-878
2. 문용준, 노광철, 오명도. 다중회귀분석을 통한 PMV 모델의 단순화, 대한설비공학회 논문집, 2007, 19권 11호, 761-769
 3. 김광호, 김병선. 소규모 유리외피 사무소 빌딩 사례를 통한 온열환경과 냉방부하 저감방안에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 2005, 21권 8호, 187-196
 4. 윤성준, 공동석, 박정민, 김두환, 허정호. 사무소 건물에서의 단순 PMV 회귀모델 기반 온열쾌적제어 적용방안 연구, 2013, 대한설비공학회 하계학술대회, 255-258
 5. Atthajariyakul, S. and Leephakpreedaz, T., 2005, Neural computing thermal comfort index for HVAC systems, Energy Conversion and Management, Vol. 46, Issues 15-16, pp. 2553-2565
 6. Buratti, C., Ricciardi, P. and Vergoni, M., 2013, HVAC systems testing and check: A simplified model to predict thermal comfort conditions in moderate environments, Applied Energy, Vol. 104, pp. 117-127
 7. Kosonen, R. and Tan, F., 2004, Assessment of productivity loss in air-condition buildings using PMV index, Energy and Buildings, Vol. 36, Issue 10, pp. 987-993
 8. Fanger, P. O., 1982, Thermal Comfort Analysis and Application in Environmental Engineering, McGraw-Hill Book Company
 9. ISO, 1994, ISO 7730:1994 Moderate thermal environmental-Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the conditions for Thermal Comfort, International Organization for Standardization
 10. U. S. Department of Energy Federal Energy Management Program, 2008, M&V Guide lines: Measurement and verification for federal Energy Projects Version 3.0