

동적 착의량 기반 열환경 제어에 따른 주거환경 열쾌적 분석

Comparative Analysis of Indoor Thermal Comfort in a Residential Building by Applying Dynamic Clothing Insulation

저자 (Authors)	최은지, 조혜운, 현지연, 박진철, 문진우 Choi, Eun Ji, Cho, Hye Un, Hyun, Ji Yeon, Park, Jin Chul, Moon, Jin Woo
출처 (Source)	대한건축학회논문집 37(4) , 2021.4, 205-212 (8 pages) Journal of the Architectural Institute of Korea 37(4) , 2021.4, 205-212 (8 pages)
발행처 (Publisher)	대한건축학회 ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10548526
APA Style	최은지, 조혜운, 현지연, 박진철, 문진우 (2021). 동적 착의량 기반 열환경 제어에 따른 주거환경 열쾌적 분석. 대한건축학회논문집, 37(4), 205-212.
이용정보 (Accessed)	중앙대학교 165.194.26.*** 2021/05/31 18:20 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독 계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

동적 착의량 기반 열환경 제어에 따른 주거환경 열쾌적 분석

Comparative Analysis of Indoor Thermal Comfort in a Residential Building by Applying Dynamic Clothing Insulation

최 은 지* 조 혜 운** 현 지 연** 박 진 철*** 문 진 우****
Choi, Eun Ji Cho, Hye Un Hyun, Ji Yeon Park, Jin Chul Moon, Jin Woo

Abstract

The purpose of this study is to confirm the necessity and significance of applying a dynamic clothing insulation for controlling the thermal environment. For this purpose, the comparative analysis of indoor thermal comfort in the residential building was conducted with three different control methods: 1) DBT (dry-bulb temperature)-based control, 2) PMV (predicted mean vote)-based controls reflecting the fixed clothing insulation, 3) PMV-based control reflecting the dynamic clothing insulation. DesignBuilder was employed for a residential building modeling and the thermal comfort analysis which was accessed with PMV and PPD (predicted percentage dissatisfied) indicators. As a result, the PMV-based control applying the dynamic clothing insulation satisfied the comfort ranges of the PMV and PPD at all times regardless of the season. On the other hand, in the case of the DBT-based control, the average PMV value was out of the comfort range in both seasons, and the PPD value was more than twice that of the PMV-based control reflecting the dynamic clothing insulation. In addition, PMV-based control reflecting fixed clothing insulation resulted in a slightly cold condition in the morning and at night in both seasons as presenting PMV values below -0.5 and PPD values over 10%. In conclusion, from this study, the possibility was confirmed that the PMV-based control reflecting dynamic clothing insulation can provide a comfortable thermal environment for the occupants. Therefore, it is necessary to apply the accurate value of the clothing insulation in order to comfortably control the thermal environment, and a follow-up research should be conducted to develop a prediction model of the real-time clothing insulation.

키워드 : 실내 환경, 열쾌적, 예상평균온열감, 예상불만족률, 착의량

Keywords : Indoor Environment, Thermal Comfort, Predicted Mean Vote, Predicted Percentage Dissatisfied, Clothing Insulation

1. 서 론

현대인들의 실내 거주 시간이 증가함에 따라 쾌적한 실내환경 제공에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있으며, 건물 설비 제어는 이러한 사람의 쾌적, 건강 및 삶의 질을 능률적으로 유지하는 것을 목적으로 한다. (Altomonte et al., 2019; 환경부, 2015; ASHRAE Guideline 10, 2011; Choi, 2020; Spengler, 2012). 실내환경의 질을 구성하는 요소 중 열환경은 재실자의 열쾌적을 결정짓는다. 재실자의 열쾌적을 나타내는 지표 중 Fanger(1970)에 의해 제안된 예상평균온열감(Predicted mean vote, PMV)은 6가지의 열환경 결정요소를 고려한다. 열환경 결정요소는 실

내 온도, 습도, 기류속도, 평균복사온도(mean radiant temperature, MRT)와 같은 환경적 요소 및 재실자의 개인적 요소인 착의량(clothing insulation)과 활동량(metabolic rate)으로 구성된다.

PMV는 -3.0에서 +3.0 범위에서 사람의 열쾌적을 수치적으로 나타내며 -3.0에 가까울수록 추운 정도를 +3.0에 가까울수록 더운 정도를 의미한다. 또 다른 열쾌적 평가 지표로 PMV 조건에서 불쾌적하게 느끼는 사람의 비율을 정량적으로 나타내는 예상불만족률(Predicted percentage dissatisfied, PPD)이 사용된다. 두 열쾌적 지표에서 사람들이 일반적으로 열적으로 쾌적하게 느끼는 범위는 $-0.5 < PMV < 0.5$, $PPD < 10\%$ 이다(ASHRAE 55, 2017).

실내 열환경을 제어하기 위해 기존에 일반적으로 사용하던 건구온도(dry-bulb temperature, DBT) 제어는 온도만 고려하는 독립 제어로서 온도 측면의 단일 요소 만족은 가능하나 습도, 기류속도, MRT 등 통합적인 실내 열환경 측면에서 불만족이 발생할 수 있다. 이에 따라 6가지 열환경 요소를 통합적으로 고려할 수 있는 PMV 기반 열환경 제어의 필요성이 대두되었으나 재실자의 개인적 요소인 착의량, 활동량의 실제값 산출이 어려운 실정이다.

* 중앙대 건축학부 박사과정

** 중앙대 건축학부 석사과정

*** 중앙대 건축공학과 교수, 공학박사

**** 중앙대 건축학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : School of Architecture and Building Science, Chung-Ang University, gilerbert73@cau.ac.kr)

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A2C1084145).

기존의 경우, PMV 기반 열환경 제어 시 개인적 요소는 설문조사 등을 통한 재실자의 주관적인 값 적용 혹은 임의의 고정값으로 가정 후에 적용하는 방법을 사용하였다. 이때 착의량의 경우 ASHRAE Fundamentals(2017)에서 제시된 고정값인 겨울철 1.0 clo, 여름철 0.5 clo를 주로 적용하는 추세이다(Gao, Wang & Wargocki, 2015; Hawila et al., 2018; Kosonen & Tan, 2004; Moon, 2012). 하지만 고정된 착의량 값은 재실자의 실제 상황을 반영한 값이 아니므로 PMV 기반 제어 시 재실자의 실제 PMV와 차이가 발생한다는 한계를 가진다. 이러한 차이로 인해 실내 재실자의 쾌적 만족도가 낮아질 수 있으며 이는 업무 생산성, 건강 및 삶의 질 저하 문제를 야기할 수 있다.

착의량은 사람의 활동 및 거주 환경에 따라 실시간으로 변할 수 있는 동적 변수이기 때문에 PMV를 사용하여 열환경을 제어하기 위해서는 객관적으로 측정된 실제 착의량 값이 적용되어야 한다. 이때, 실제 실내환경에서 동적 착의량이 PMV 기반의 열환경 제어에 미치는 영향을 확인하기 위해 착의량 및 실내 열환경 제어 방법에 따른 재실자의 열쾌적성을 분석할 필요가 있다.

따라서 본 연구의 목적은 PMV 기반 열환경 제어 시 동적 착의량 반영이 미치는 영향을 확인하고 향상된 열쾌적 조성을 위한 실제 착의량 값 적용의 필요성을 확인하고자 한다. 이를 위해 기존 열환경 제어 방법과 비교하여 재실자의 시간대별 착의량을 반영한 열환경 제어가 주거환경의 동절기 및 하절기 실내 열쾌적에 미치는 영향을 분석한다. 또한, 연구 결과를 토대로 추후 정확한 열쾌적 예측 및 열환경 제어를 위해서 재실자의 실제 착의량을 예측하는 방법의 필요성을 강조하고자 한다.

2. 이론고찰

착의량은 환경적, 심리적 요인과 같은 변수로 인해 다양한 값을 가질 수 있으므로 단일 값으로 일반화할 수 없다. 이로 인해 사람의 실제 착의량을 측정하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 대표적으로 현장 연구를 통해 재실자의 착의량을 직접 조사한 연구가 Table 1과 같이 진행되었다. 현장 연구는 대부분 특정 나라 및 기후대에서 진행되었다는 한계를 보이며 조사 대상이 해당 기후대에 적응된 사람에 한정된다. 이러한 한계점을 보완하기 위해 Licina et al.(2018)는 세계적으로 다양한 기후대에서 수행된 설문조사 결과를 20년 동안 수집하였고 착의량에 영향을 미치는 주요 요소 분석 및 착의량 예측 모델 개발 등에 적용이 가능한 빅데이터를 제공하였다.

현장 연구를 통한 열쾌적 분석은 재실자의 지속적인 참여를 요구하며 시간이 소요되기 때문에 실제 열환경 제어에 실시간으로 적용하기에는 어려움이 따른다. 따라서 재실자의 직접적 참여를 요구하지 않고도 변하는 착의량을 예측하고자 다양한 예측 모델 개발을 위한 연구가 진행되고 있다.

De Carli et al.(2007)는 외부 매개 변수 중 오전 6시의 외기온도가 재실자의 의복 선택에 가장 큰 영향을 미치

는 것을 확인하였다. 이러한 연구 결과를 토대로 오전 6시의 외기온도와 추가적인 환경 변수를 고려하여 착의량을 산출하는 다양한 선형 및 지수 방정식 모델이 개발되었다(Liu et al., 2018; Schiavon & Lee, 2012). De Carvalho, Da Silva & Ramos(2013)는 당일의 최대외기온도 및 이전 날의 평균외기온도를 주요 변수로 적용하였고 Liu et al.(2018)는 과거 외기온도의 지수 가중치 실행 평균값을 착의량 예측 변수로 사용하였다. Schiavon & Lee(2012)는 오전 6시의 외기온도, 작용온도를 변수로 고려하는 3가지 착의량 예측 모델을 개발하였다. 하지만 개발된 모델의 정확도 분석을 통해 착의량 예측 성능을 확보하기 위해서는 기후적인 변수 외에도 착의량에 영향을 미치는 심리적, 문화적 변수가 추가적으로 고려되어야 한다는 것을 확인하였다.

최근에는 선형 및 지수 방정식 모델이 아닌 인공지능 기법을 사용한 예측 모델 개발도 진행되었다. Ngarambe, Yun & Kim(2019)는 오전 6시의 외기온도, 이슬점, 성별, 계절, 운송수단을 입력데이터로 사용하여 딥러닝 착의량 예측 모델을 개발하였다. 하지만 예측 모델의 입력데이터 중 운송수단 역시 설문조사를 통해 수집되어야 하므로 실시간으로 데이터를 입력받는데 어려움이 따른다.

Table 1. Field studies for identifying clothing insulation

Num	Authors	Contents
1	Wang et al. (2020)	20 subjects were surveyed for 9 clothing situations in Beijing.
2	Liu et al. (2018)	13 months of thermal comfort survey conducted in two office buildings in Changsha, China.
3	Salata et al. (2018)	Analysis of the relationship between wind speed, temperature and humidity in the Mediterranean climate zone and clothing insulation values through survey.
4	Wu, Cao & Zhu(2018)	A field study conducted at an office building in Guangzhou, China. At room temperature of 26.8°C, occupants feel it as neutral temperature, and 90% of people feel comfortable below 29°C.
5	Haldi & Robinson (2011)	A field study conducted in Switzerland confirmed that clothing selection was affected by the daily average outdoor temperature and no adaptation to the clothing occurred within one day.
6	Humphreys (1974)	Collecting student clothing information and room temperature data in the UK classroom in summer to present the optimal room temperature according to the clothing.
7	Vecchi, Lamberts & Candido (2017)	Data collected in Brazil reveals the correlation between the clothing insulation and operating temperature in a warm and humid climate zone.
8	Licina et al. (2018)	From 1995 to 2016, data on the clothing insulation for each region, climate, season, and building use were collected and "Comfort Database" was established.

이처럼 착의량 예측 모델을 개발하기 위한 다양한 연구가 진행되었으나 주로 일별 착의량을 예측하는 방법으로 개발되었다. 다시 말해, 선행된 연구 방법은 하루의 착의량을 단일 값으로 예측하는 방법이며 시간대별 착의량을 예측하는데 적용이 어렵다는 한계를 가진다.

3. 주거 건물 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 모델

본 연구에서는 DesignBuilder(Version 6.1.4)를 사용하여 주거 건물을 Figure 1과 같이 모델링하였고 대한민국 서울의 기후데이터를 사용하였다. 대상 건물은 공동주택으로 연면적 560 m²의 4층짜리 남향 건물로 구축하였으며 창면적비는 18.4%로 설정하였다. 건물 외피 및 창호 입력 데이터는 2020년 개정된 에너지절약형 친환경주택 건설기준(2020)에 맞춰 Table 2와 같이 산정하였다. 한 세대는

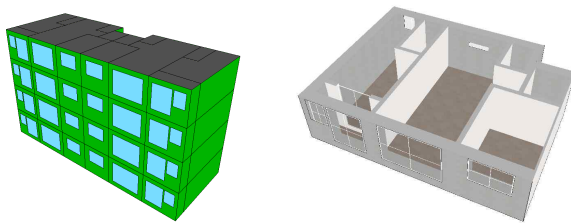


Figure 1. Residential modeling images

Table 2. Modeling information of the residential building

Modeling input data		Information
Building Information	Location/Weather	Seoul, Korea (EPW weather file)
	Orientation	South
	Total floor area	560 m ²
	Floors	4F
	Floor Height	2.4 m
	Window to Wall Ration	18.4 %
Construction	External Wall (U-Value)	0.17 W/m ² K
	Roof (U-Value)	0.15 W/m ² K
	Floors (U-Value)	Ground-0.17 W/m ² K Internal-0.17 W/m ² K
	Windows U-value	0.90 W/m ² K
	Windows SHGC	0.817
	Infiltration	0.7 ac/h
Internal Load	Occupancy	0.02 people/m ²
	Metabolic rate	144 W/person
	Lighting	2.10 W/m ²
	Equipment	5.74 W/m ²
HVAC	Heating/Cooling system	Packaged Terminal Air Condition (PTAC)

Table 3. System setpoint by control methods

HVAC setpoint		PMV	DBT
Heating	setpoint	0.0	22℃
	setback	-1.1	15℃
Cooling	setpoint	0.0	26℃
	setback	1.0	30℃

두 개의 방과 거실, 화장실, 발코니로 구성하였으며 냉난방 시스템은 사람의 생활공간인 거실 및 방에 적용하였다. 내부 발열 요소는 DesignBuilder 라이브러리에서 제공하는 주거환경 기준값을 적용하였으며 재실자의 활동량은 고정값인 144 W/person으로 설정하였다. 실내조명은 2.1 W/m²의 LED를 적용하였고 실내 전력 사용량은 ISO 18523-2(2018)의 가정용 전기기기 전력 기준을 토대로 존별로 발생 가능한 전력량을 합산하여 5.74 W/m²으로 적용하였다. 이러한 전자기기 및 조명은 재실자의 스케줄에 맞춰 작동율을 설정하였다.

실내 냉난방 시스템은 PMV 기반 열환경 제어가 가능한 Packaged Terminal Air Condition (PTAC)을 적용하였다. 각 시스템을 통한 냉난방 스케줄은 국내 기후 조건을 고려하여 난방의 경우 1-2월과 11-12월, 냉방은 5-9월로 설정하였다. 실내 열환경 제어 시 DBT 및 PMV 기준을 설정하기 위해 기준별 setpoint 및 setback 값을 Table 3과 같이 설정하였다. DBT 제어의 경우 ASHRAE Fundamentals(2017)의 권장 온도 기준에 따라 난방/냉방 설정 온도는 setpoint 22℃/26℃, setback 15℃/30℃로 설정하였고 PMV 제어의 경우 setpoint PMV는 열적으로 중립 상태인 0.0으로 설정하였다. 이때, 비재실 기간에는 PMV setback 권장 기준이 없으므로 DBT 제어의 setpoint 및 setback의 온도차가 PMV 변화에 미치는 크기만큼 PMV 제어의 setback 값으로 설정하였다.

3.2 착의량 스케줄

열쾌적에 착의량이 미치는 영향을 분석하기 위해 본 장에서는 시간대별 재실자의 착의량을 설정하였다. 기존의 착의량 예측 모델은 일별 착의량을 예측하는 방식으로 시간대별 착의량 예측이 어렵다는 한계를 가진다. 따라서 본 연구에서 적용할 시간대별 동적 착의량의 경우 주거환경 거주 시간이 긴 44세 주부의 활동 스케줄을 기반으로 시간대별 착의량을 반영하였다. 44세 주부의 활동은 ISO 18523-2(2018)의 Figure A.1 -Time use for weekday에 제시된 스케줄과 통계청의 ‘생활시간조사’(2019) 자료를 토대로 기상 및 취침시간, 식사시간, 여가시간 등을 반영하여 Figure 2의 시간대별 Activity를 선정하였다. 이때 비재실 시간대는 11:00-13:00와 15:00-17:00이고 각 시간대에 정해진 활동을 함에 있어 재실자의 적정 의복을 ASHRAE 55(2017)의 의복 조합 표(Table B2)를 참고하여 산정하였다. 또한, 고정 착의량은 ASHRAE Fundamentals(2017)에서 제안된 여름 0.5 clo, 겨울 1.0 clo

Table 4. Clothing insulation by the clothing ensemble

clothing ensemble		clo
summer	short-sleeve short robe	0.34
	short-sleeve pajamas (thin)	0.42
	trousers, short-sleeve shirt	0.57
winter	long-sleeve short wrap robe	0.48
	long-sleeve pajamas (thick)	0.57
	trousers, long-sleeve shirt	0.61

hour	Activity	Dynamic clothing insulation (clo)		Fixed clothing insulation (clo)	
		Summer	Winter	Summer	Winter
0	sleep	0.34	0.48	0.5	1.00
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7	washing	0.42	0.57		
	breakfast				
8	TV				
9	cleaning				
10	TV	-	-		
11	waking				
12					
13	lunch	0.57	0.61		
14	TV				
15	shopping	-	-		
16					
17	TV	0.57	0.61		
18	cooking				
19	dinner				
20	hobby				
21	TV	0.42	0.57		
22	washing				
23	sleep	0.34	0.48		

Figure 2. Hourly schedule of the clothing insulation

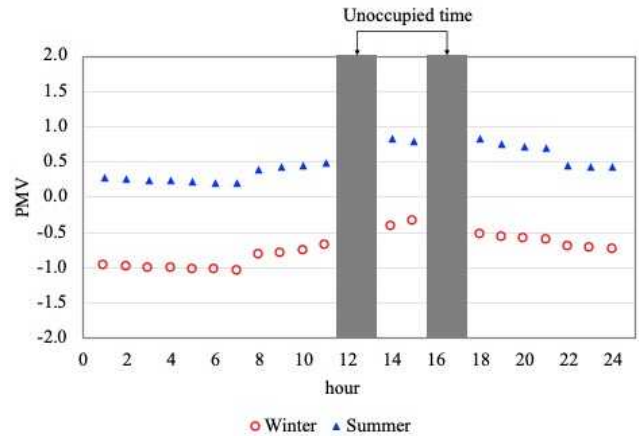
를 적용하였다. 이처럼 산정된 여름 및 겨울의 대표 착의량은 Table 4와 같으며 시뮬레이션에 적용된 고정 및 동적 착의량의 시간대별 스케줄은 Figure 2와 같이 제시하였다.

4. 착의량에 따른 실내 열쾌적 분석

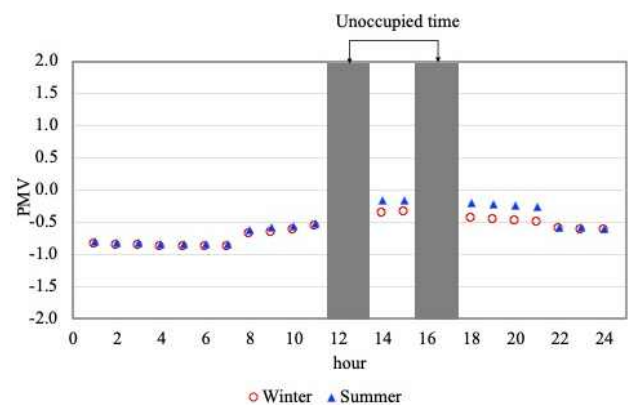
동적 착의량 반영의 필요성을 확인하기 위해 주거 건물에서 재실자의 실제 열쾌적을 비교·분석하고자 다음 세 가지 열환경 제어 방법을 적용하였다. 1) DBT 제어, 2) 고정 착의량을 적용한 PMV 제어, 3) 동적 착의량을 적용한 PMV 제어. 각 방법에 따라 제어된 실내환경 조건에서 재실자의 실제 열쾌적을 확인하기 위해 ISO 7730(2005)의 PMV 및 PPD 산출 식에 동적 착의량 값을 대입하여 값을 치환 및 분석하였다. Figure 3, 5, 6은 겨울 및 여름철의 시간대별 평균값을 분석하였으며 11:00-13:00와 15:00-17:00의 비재실 시간대는 분석에서 제외하였다. 또한, Figure 4는 평균값 이외에 최대/최소 PMV가 발생할 수 있는 특정일에 대한 추가 분석을 위해 계절별 최저/최고 외기온이 측정된 날에 대하여 PMV를 분석하였다.

4.1 DBT 제어 결과

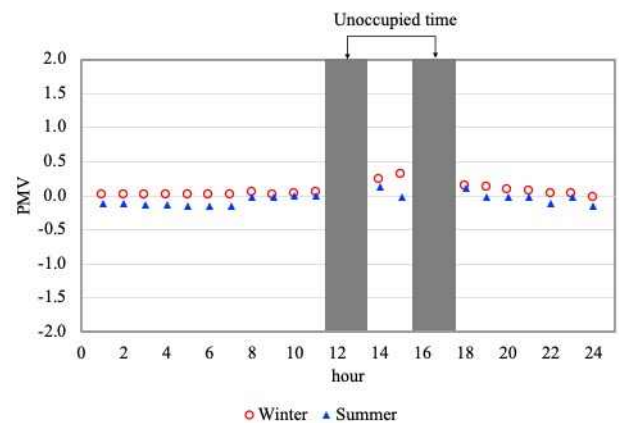
적용된 HVAC 시스템은 DBT 제어 시 겨울철 22℃, 여름철 26℃의 setpoint 온도를 유지하며 실내환경을 제어하였다. 이렇듯 DBT 제어는 단일 요소인 온도 측면에서는 온도의 쾌적 범위를 만족하는 결과를 보이지만 제어된 실내환경에서 재실자 PMV 측면의 통합적 열쾌적을 분석할 필요가 있다. 이를 위해 DBT 제어 결과 측정된 실내 온도 및 다른 환경 요소와 동적 착의 상태의 실제 재실자의 착의량이 고려된 PMV를 재산출하여 열쾌적을 분석하



a) DBT-based control



b) PMV-based control with fixed clothing insulation



c) PMV-based control with dynamic clothing insulation

Figure 3. Hourly results of PMV

였다. Figure 3 a)는 겨울 및 여름철 각각 전체기간의 시간대별 평균 PMV를 나타낸다.

겨울철의 평균 PMV는 -0.78이며 재실시간 중 외기온이 가장 높은 14:00~16:00 2시간을 제외하고 모든 시간대에서 -0.5 이하의 값을 보이며 PMV 쾌적범위를 벗어남을 확인하였다. 또한, 하루 중 가장 낮은 착의량 값을 가지는 오전 7시 이전 시간대에서 평균 PMV는 -1.0의 값을 가진다. 즉, 겨울철 DBT 제어 시 동적인 의복 상황에서 실제 재실자는 쉽게 느낄 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

여름철의 경우 일평균 PMV는 0.51로 겨울철에 비해 쾌적범위를 크게 벗어나지 않지만 하루 중 가장 높은 착의량 값을 가지는 13:00-21:00 시간대에 모든 PMV 값이 +0.5 이상이며 최대 PMV 1.21까지 쾌적범위를 벗어나는 결과를 보였다.

4.2 고정 착의량 기반 PMV 제어 결과

겨울철 1.0 clo, 여름철 0.5 clo의 고정 착의량을 적용한 PMV 기반 열환경 제어를 수행한 결과, 시뮬레이션 상에서는 PMV의 setpoint 0.0을 만족하도록 제어되었다. 하지만 이렇게 조성된 실내환경은 실제 재실자의 착의 상태를 고려한 결과로 실제 PMV와 차이가 발생한다. 따라서 동적 착의 상태를 가지는 재실자의 실제 PMV를 재산출 하였으며 그 결과는 Figure 3 b)와 같다.

DBT 제어와 비교하여 여름 및 겨울의 PMV 차이는 크지 않으나 일평균 PMV는 겨울철 -0.66, 여름철 -0.56으로 두 계절 모두 쾌적범위를 벗어나는 결과를 보였다. 시간대별로 PMV 결과를 보면 두 계절 모두 13:00-21:00를 제외한 나머지 시간대에서 겨울철 평균 PMV는 -0.75, 여름철은 -0.71 이하의 값을 보이며 재실자가 다소 춥게 느낄 수 있음을 알 수 있다. 즉, 실제 착의량이 아닌 고정값을 사용할 경우 PMV 제어를 하더라도 재실자의 쾌적이 확보되지 못하는 시간이 발생할 수 있다.

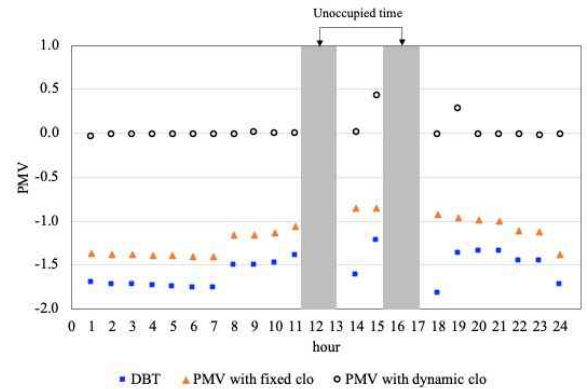
4.3 동적 착의량 기반 PMV 제어 결과

동적 착의량을 적용한 PMV 제어 결과는 Figure 3 c)와 같다. 두 계절의 PMV는 모든 재실 시간대에서 $-0.5 < PMV < 0.5$ 의 쾌적 범위 내에서 제어되었으며 일평균 PMV는 겨울철 0.06, 여름철 -0.05로 열적으로 쾌적한 상태인 PMV 0.0에 매우 가까운 결과를 보였다.

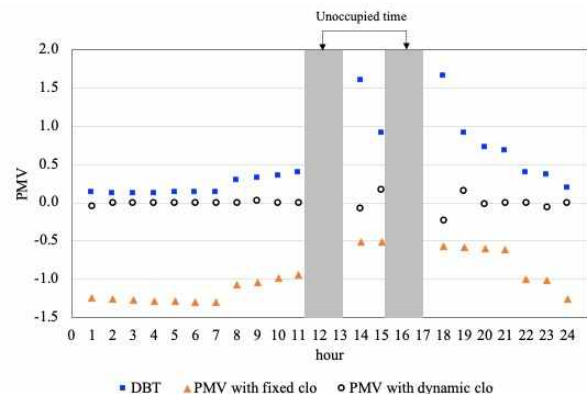
또한, 동적 착의량을 적용한 결과는 기존 DBT 제어와 비교하여 겨울 및 여름 각각 평균 PMV 0.84, 0.46의 차이를 보였고 고정 착의량과 비교하여 평균 PMV 0.72, 0.51의 차이를 보이며 더 쾌적한 열환경을 제공하는 것을 알 수 있다. 다시 말해 시간대별로 변하는 동적 착의량을 고려한다면 재실자의 실제 PMV를 더 정확히 예상할 수 있고 이를 기반으로 쾌적한 통합 열환경 제어가 가능함을 알 수 있다.

계절별 평균값이 아닌 연간 최저/최고 외기온이 측정된 특정일(겨울: 12월 16일, 여름: 7월 23일)에 대한 PMV 분석을 추가로 수행한 결과는 Figure 4와 같다. Figure 4 a)와 같이 겨울철의 경우 동적 착의량 기반의 PMV 제어를 제외한 두 제어법은 모든 시간대 PMV 쾌적범위를 벗어났다. DBT 제어의 일평균 PMV는 -1.56으로 겨울철 전체 평균 PMV에 비해 두 배 이상 더 낮은 값을 보였으며, 마찬가지로 고정 착의량 기반 PMV 제어도 최저기온이 측정된 날의 일평균 PMV는 -1.16으로 겨울철 평균값보다 더 춥게 느낀다는 사실을 확인하였다.

Figure 4 b)와 같이 여름철 최고기온이 측정된 날의 경우 고정 착의량을 적용한 PMV 제어는 일평균 -0.98의 값을 나타내며 모든 시간대에서 -0.5 보다 낮은 값을 가지



a) The day of the lowest temperatures in winter (12/16)



b) The day of the highest temperatures in summer (7/23)

Figure 4. PMV of a specific day according to control methods

는 과냉방된 상황으로 이해할 수 있다. 또한, DBT 제어의 경우 여름철 평균 PMV와 비슷한 분포를 보였으나 오후 시간대는 최대 PMV가 1.6 이상으로 여름철 평균값보다 약 두 배 정도 높은 수치를 보였다. 즉, 동적 착의량을 반영하지 않는 기존 두 제어 방법은 최저/최고 외기온과 같은 극한 상황에서 PMV 쾌적 범위를 더 크게 벗어나는 것을 알 수 있다.

4.4 제어 방법별 PPD 비교·분석

제어 방법에 따른 실내 열쾌적의 비교·분석을 위해서 PPD 지표를 사용하여 추가 분석을 실시하였으며, 이때 ASHRAE 55(2017)에서 제시하는 PPD의 쾌적 범위는 10% 이내이다. 각 제어 방법을 통해 제어된 환경에서 재실자의 시간대별 PPD를 산출한 결과는 Figure 5-6과 같으며 계절별(Winter season, Summer season), 최저/최고 외기온이 측정된 특정일(Winter (12/16), Summer (07/23))에 대한 평균 및 최대 PPD는 Table 5와 같다.

겨울철 동적 착의량 기반의 PMV 제어는 Figure 5, Table 5에서 나타내듯이 겨울철 전체 평균 PPD는 5.2%로 쾌적 지수가 가장 높았으며 PPD가 10%를 초과하는 불쾌한 시간대가 존재하지 않았다. 반면 DBT 제어 방법은 겨울철 전체 평균 PPD는 18.2%, 최대 PPD는 27.5%로 전 재실 시간대에서 가장 높게 나타났으며 그 뒤를 이은 고정 착의량 기반의 PMV 제어는 겨울철 전체 평균 PPD

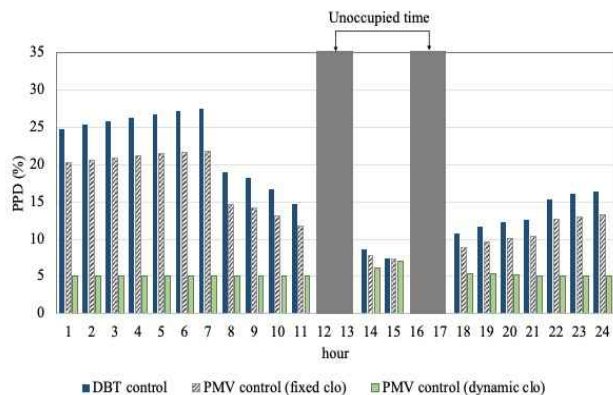


Figure 5. Hourly PPD results in winter season

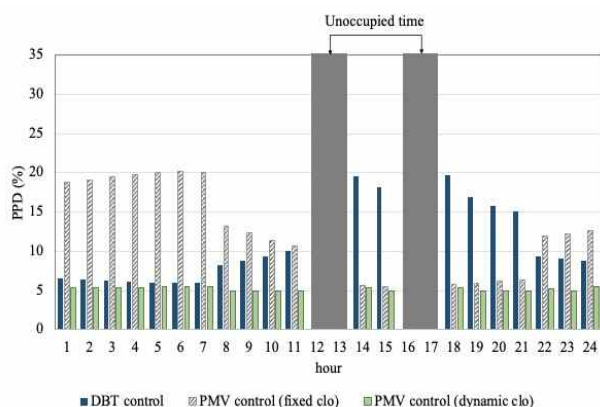


Figure 6. Hourly PPD results in summer season

Table 5. PPD comparative analysis by each control methods

PPD (%)	DBT control		PMV control (fixed clo)		PMV control (dynamic clo)	
	Average	Max	Average	Max	Average	Max
Entire Winter	18.2	27.5	14.7	21.8	5.2	7.1
Winter (12/16)	54.1	67.5	34.0	45.5	5.3	9.0
Entire Summer	10.6	19.7	12.9	20.2	5.2	5.5
Summer (07/23)	14.1	59.6	27.1	40.8	5.2	6.2

14.7%, 최대 PPD 21.8%를 보였다. 동적 착의량 기반의 PMV 제어와 비교하여 DBT 제어 방법은 평균 PPD가 3.5 배 높고 고정 착의량 기반의 PMV 제어는 2.8배 높은 결과를 보였으며 두 제어 방법 모두 평균 PPD가 10%를 초과해 열적으로 불쾌한 수치를 보였다. 또한, 하루 중 PPD 10%를 초과하는 평균 시간대는 DBT 제어가 18시간, 고정 착의량 기반 PMV 제어가 16시간으로 이는 각각 겨울철에 재실시간의 90%, 80%를 불쾌하게 느낀다는 것을 의미한다. 구체적으로 최저 외기온이 발생한 12월 16일의 경우 DBT 제어는 일평균 PPD 54.1%, 최대 PPD 67.5%로 불쾌 정도가 가장 높게 나타났으며, 고정 착의량 기반의 PMV 제어도 겨울철 전 기간의 평균 및 최대 PPD와 비교해 두 배 이상 높은 수치를 보였다. 반면, 동적 착의량

기반의 PMV 제어의 경우 외기온이 낮아지더라도 PPD 10% 이하의 값을 보이며 쾌적한 환경 조성이 가능한 것으로 판단할 수 있다.

여름철은 겨울철과 마찬가지로 동적 착의량 기반의 PMV 제어가 전 재실 시간대에서 가장 낮은 PPD 값을 가지는 것을 확인할 수 있다(Figure 6). 이때 여름철 전 기간의 평균 PPD는 5.2%이고 최대 PPD도 5.5%로 균일하게 낮은 값을 보인다. 반면 DBT 제어는 여름철 전체 평균 PPD 10.6%로 기준치인 10%를 많이 벗어나지는 않지만, 시간별로 보면 재실시간 중 평균 7시간 동안 불쾌적 비율이 10%를 초과하며 이때 최대 PPD는 19.7%를 보였다. 또한, 고정 착의량 기반 PMV 제어는 여름철 전체 평균 PPD 12.9%로 세 가지 제어 방법 중 가장 높았고 평균적으로 재실 시간의 70%를 차지하는 14시간 동안 쾌적 기준을 초과하였다. 최고 외기온이 발생하는 7월 23일에도 동적 착의량 기반 PMV 제어는 평균 및 최대 PPD 모두 10%를 초과하지 않았다. 하지만 DBT 제어 및 고정 착의량 기반 PMV 제어는 각각 최대 PPD 59.6%, 40.8%까지 발생 가능성을 확인하였다.

두 계절 모두 동적 착의량을 적용한 경우 전 재실 시간대에서 재실자의 열쾌적성을 확보할 수 있음을 확인하였다. 반면 동적 착의량을 반영하지 않는 제어법을 사용할 경우 착의량 변경에 따른 재실자의 열쾌적 변화를 반영하지 못하므로 PPD가 최소 2배 이상 높은 결과를 보였으며 외기온 변화에 따라라도 재실자의 쾌적성이 큰 폭으로 변화할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구는 실내 열환경 쾌적 제어를 위해 동적 착의량 적용 필요성을 확인하고자 세 가지 제어 방법에 대한 실내 열쾌적성을 비교 분석하였다. 열쾌적 분석에는 PMV 및 PPD 지표를 사용하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) DBT 제어 결과 평균 PMV는 겨울철 -0.78 , 여름철 0.51 이며 PPD로 산출 시 18.2%, 10.6%이다. 이는 제어된 실내환경에서 실제로는 재실자가 겨울철에 약간 춥게, 여름철에 약간 덥게 느낄 수 있음을 의미하며 하루 중 불쾌한 시간이 18시간으로 재실 시간의 90%를 차지한다. 특히, 여름철은 PPD가 최대 19.7%까지 높게 나타나며 동적 착의량 기반의 PMV 제어 방법보다 평균 PPD가 두 배 높다.
- 2) PMV 제어 시 고정 착의량을 사용할 경우 실제 PMV는 겨울 및 여름 각각 평균 -0.66 , -0.56 으로 쾌적 범위를 벗어나며 두 계절 모두 재실자에게 서늘한 환경을 조성할 수 있다. 또한, PPD 분석 결과 평균 쾌적 범위 불만족 시간은 겨울철 16시간, 여름철 14시간으로 재실시간의 반 이상을 차지했다. 이는 동적 착의량 기반의 PMV 제어보다 평균 PPD가 겨울철 14.7%로 2.8배, 여름철 12.9%로 2.5배 높은 값으로 쾌적한 열환경 조성에 불리한 것을 확인하였다.

3) 동적 착의량 기반의 PMV 제어 결과 모든 재실 시간대에서 PMV 쾌적 범위를 유지함을 확인하였다. 또한, PPD 역시 두 계절 모두 평균 5.2%로 세 가지 제어 방법 중 가장 낮은 값을 보였다. 추가적으로 겨울 및 여름철 최저/최고 외기온이 측정되는 특정일에 대한 PMV, PPD 분석을 수행한 결과, 동적 착의량을 고려하지 않는 두 제어법의 경우 PMV, PPD 쾌적 범위를 평균보다 크게 벗어났으며, 동적 착의량 기반의 PMV 제어는 외기온 변동에 큰 영향을 받지 않고 실제 재실자에게 쾌적한 열환경을 제공할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 동적 착의량이 고려된 PMV 제어가 기존 제어 방법보다 재실자의 열쾌적성을 확보하는데 있어 유리함을 확인하였고 이를 토대로 쾌적한 열환경 조성에 있어 착의량이 중요한 변수임을 확인하였다. 다만, 본 연구와 같은 임의의 착의량 값이 아닌 실제 착의량 예측이 가능하다면 정확한 열환경 제어 및 쾌적 환경 조성이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 추후에는 재실자의 실시간 착의량을 추정할 수 있는 모델 개발이 진행되어야 하며 이를 활용하여 재실자의 실제 PMV 기반의 열환경 제어 및 열쾌적 분석이 이루어져야 한다.

또한, 본 연구에서 적용된 난방 시스템과 달리 바닥난방과 같은 다른 시스템을 적용할 경우 실내 MRT 변수 등 환경 요소가 변경되어 PMV 값이 달라질 수 있다는 한계점을 가진다. 따라서 추후에는 주거환경에 적용 가능한 다양한 냉난방 시스템 및 기후대를 반영하여 실내 열쾌적의 비교분석을 수행하고 착의량 이외의 개인적 요소인 활동량의 변화도 함께 고려하여 재실자의 열쾌적에 미치는 영향을 통합적으로 분석할 필요가 있다. 더 나아가 동적 착의량의 반영이 재실자의 열쾌적 향상뿐만 아니라 건물 냉난방 에너지소비량에 미치는 영향을 함께 분석할 예정이며 이를 통해 재실자의 쾌적을 유지함과 동시에 에너지를 절감할 수 있는 방향을 제시할 필요가 있다.

REFERENCES

- Altomonte, S., Schiavon, S., Kent, M., & Brager, G. (2019). Indoor environmental quality and occupant satisfaction in green-certified buildings. *Building Research and Information*, 47, 255-274.
- ASHRAE 55, (2017). Thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE: Atlanta, USA.
- ASHRAE Guideline 10. (2011). Interactions Affecting the Achievement of Acceptable Indoor Environments. ASHRAE: Atlanta, USA.
- ASHRAE Handbook Fundamentals. (2017). In Thermal Comfort, ASHRAE, Atlanta.
- Choi, E.J., Yoo, Y., Park, B.R., Choi, Y.J., & Moon, J.W. (2020). Development of Occupant Pose Classification Model Using Deep Neural Network for

- Personalized Thermal Conditioning, *Energies* 13(1).
- de Carvalho, P.M., da Silva, M.G., & Ramos, J.E. (2013). Influence of weather and indoor climate on clothing of occupants in naturally ventilated school buildings. *Building and environment*, 59, 38-46.
- Fanger, P.O. (1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Gao, J., Wang, Y., & Wargocki, P. (2015). Comparative analysis of modified PMV models and SET models to predict human thermal sensation in naturally ventilated buildings. *Building and Environment*, 92, 200-208.
- Haldi, F., & Robinson, D. (2011). Modelling occupants' personal characteristics for thermal comfort prediction. *International journal of biometeorology*, 55(5), 681-694.
- Hawila, A., Merabtine, A., Chemkhi, M., Bennacer, R., & Troussier, N. (2018). An analysis of the impact of PMV-based thermal comfort control during heating period: A case study of highly glazed room. *Journal of Building Engineering*, 20, 353-366.
- Humphreys, M.A. (1974). Classroom Temperature, Clothing and Thermal Comfort--A Study of Secondary School Children in Summertime. Building Research Establishment Current Paper 22/74. Reprinted from The Building Services Engineer (JHVE), 41, 191-202.
- ISO 18523-2. (2018). Energy performance of buildings – Schedule and condition of building, zone and space usage for energy calculation - Part 2: Residential buildings, ISO.
- ISO 7730. (2005). Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, ISO.
- Kosonen, R., & Tan, F. (2004). Assessment of productivity loss in air-conditioned buildings using PMV index. *Energy and Buildings*, 36, 987-993.
- Ličina, V.F., Cheung, T., Zhang, H., De Dear, R., Parkinson, T., Arens, E., ... & Li, P. (2018). Development of the ASHRAE global thermal comfort database II. *Building and Environment*, 142, 502-512.
- Liu, W., Yang, D., Shen, X., & Yang, P. (2018). Indoor clothing insulation and thermal history: a clothing model based on logistic function and running mean outdoor temperature. *Building and Environment*, 135, 142-152.
- Ministry of Environment. (2015). Plan for Indoor Air Quality Management(2015~2019).
- Moon, J.W. (2012). Performance of ANN-based predictive and adaptive thermal-control methods for disturbances in and around residential buildings, *Building and Environment* 48, 15-26.

19. Ngarambe, J., Yun, G. Y., & Kim, G. (2019). Prediction of indoor clothing insulation levels: A deep learning approach. *Energy and Buildings*, 202, 109402.
20. Salata, F., Golasi, I., Ciancio, V., & Rosso, F. (2018). Dressed for the season: Clothing and outdoor thermal comfort in the Mediterranean population. *Building And Environment*, 146, 50-63.
21. Schiavon, S., & Lee, K.H. (2012 December). Predictive clothing insulation model based on outdoor air and indoor operative temperatures. *In Proceedings of 7th Windsor Conference: The changing context of comfort in an unpredictable world* (Vol. 1, No. 1, pp. 1-14).
22. Spengler, J.D. (2012). Climate change, indoor environments, and health. *Indoor Air*, 22, 89-95.
23. Statistics Korea Time Use Survey. (2019). Time Use Survey Results in 2019, Statistics Korea, South Korea.
24. Vecchi, R. D., Lamberts, R., & Candido, C.M. (2017). The role of clothing in thermal comfort: how people dress in a temperate and humid climate in Brazil. *Ambiente Construido*, 17(1), 69-81.
25. Wang, Z., Cao, B., Ji, W., & Zhu, Y. (2020). Study on clothing insulation distribution between half-bodies and its effects on thermal comfort in cold environments. *Energy and Buildings*, 211, 109796.
26. Wu, T., Cao, B., & Zhu, Y. (2018). A field study on thermal comfort and air-conditioning energy use in an office building in Guangzhou. *Energy and Buildings*, 168, 428-437.
27. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2020). Construction standards for energy-saving eco-friendly housing. Korea MOLIT, 2020
28. De Carli, M., Olesen, B., Zarrella, A. & Zecchin, R. (2007). People's clothing behaviour according to external weather and indoor environment. *Building and Environment*. 42. 3965-3973.

(Received Jan. 10 2021 Revised Feb. 9 2021 Accepted Mar. 24 2021)