KIEAE Journal, Vol. 20, No. 5, Oct. 2020, pp.171-177.

KIEAE Journal

Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

105

동적 착의량 반영에 따른 기후대별 실내 열쾌적 분석

Analysis of Indoor Thermal Comfort reflecting Dynamic Clothing Insulation in diverse Climate Zone

최은지* · 조혜운** · 조지현*** · 문진우****

Eun Ji Choi* · Hye Un Cho** · Ji Hyeon Cho*** · Jin Woo Moon****

** Main author, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (ejjchl77@gmail.com)*

*** Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (choaustin63@gmail.com)*

**** Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (selmainger326@gmail.com)*

***** Corresponding author, Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (gilerbert73@cau.ac.kr)*

ABSTRACT

Purpose: The aim of this study is to highlight the effect of the dynamic clothing insulation on indoor thermal comfort in diverse climate zones and the necessity of dynamic clothing insulation to provide comfortable indoor environment. **Method:** An office building was modeled through DesignBuilder, and representative climate zones were selected as tropical, marine, and cold. The dynamic clothing insulation for each climate zone was computed using the outside temperature at a specific time. For the building simulation, PMV based control applied fixed and dynamic clothing insulation was conducted. Indoor temperature and actual PMV of occupants were evaluated for the analysis of the thermal comfort. **Result:** In tropical and marine climates, the indoor temperature difference according to the clothing insulation values was not large (average 0.12℃ and 0.8℃, respectively) and the actual PMV was within the PMV comfort range. In cold climates, however, the difference in indoor temperature between fixed and dynamic clothing insulation was high as 0.98℃ during the heating period. In addition, when the fixed clothing insulation was applied, the actual PMV was analyzed that the discomfort periods were more frequently occurred for 58 days in heating season. Whereas, in the case of the dynamic clothing insulation, the actual PMV was within the comfortable range during the heating period. In conclusion, the influence of the dynamic clothing insulation on the indoor thermal environment in cold climate zone was emphasized. As a further studies, an estimation model accurately estimating the actual clothing insulation should be developed for providing comfort environment.

ⓒ 2020. KIEAE all rights reserved.

KEYWORD

온열환경
동적 착의량
예상평균온열감

Thermal Environment
Dynamic Clothing Insulation
Predicted Mean Vote

ACCEPTANCE INFO

Received Oct. 8, 2020
Final revision received Oct. 15, 2020
Accepted Oct. 20, 2020

1. 서론

건물의 실내 열환경은 재실자의 쾌적, 건강 및 삶의 질에 영향을 미치는 주요 요인 중 하나이며[1], 특히 업무시설의 경우 재실자의 업무효율 및 생산성과 열환경은 밀접한 관련이 있기 때문에 재실 특성을 고려한 쾌적 열환경을 제공하는 것은 매우 중요한 제어 목적으로 볼 수 있다[2]. 이러한 쾌적 열환경 조성을 위해 이중외피 시스템의 개구부 최적제어를 실시하거나 재실자의 활동량 산출 모델 개발을 통해 정확한 PMV 기반 제어의 가능성을 확인하는 등 다양한 제어 방법 및 기술 개발 연구가 수행되고 있다[3,4].

재실자의 열쾌적은 실내환경 변수인 온도, 습도, 기류속도, 평균복사온도(mean radiant temperature, MRT) 및 재실자의 개인적 변수인 활동량(metabolic rate), 착의량(clothing insulation) 등을 고려하여 결정된다. 재실자의 열적 상태를 나타내는 열쾌적 지표인 예상평균온열감(predicted mean vote, PMV)은 이러한 6가지 변수를 통해 −3.0~+3.0의 범위로 산출되며 사람이 일반적으로 쾌적하게 느끼는 범위는 −0.5≤PMV≤0.5이다[5].

PMV를 사용하여 실내 열환경을 제어할 경우 실내환경 변수와 함께 개인적 요소를 고려하기 때문에 단순 건구온도 값만 사용하는 건구온도(dry-bulb temperature, DBT) 제어와 달리 개인 맞춤형 쾌적 열환경 조성이 가능하다. 이러한 PMV 기반 실내환경 제어를 위해서는 개인적 변수인 착의량과 활동량의 정확한 값이 요구되지만, 객관적이고 정확한 측정이 어렵기 때문에 기존에는 열쾌적 분석 시 보편적으로 고정 상수값을 적용하였다[6-8].

특히, 개인적 변수 중 착의량의 경우 PMV 에 활용 시 일반적으로 ASHRAE Fundamentals에서 제시하는 겨울철 −1.0clo, 여름철 +0.5clo를 고정 상수로 사용하였다[9]. 하지만 착의량은 직물 종류, 의복 조합 및 거주 지역의 기후 등 다양한 변수로 결정되는 동적인 값이며 실제 재실자의 PMV를 정확히 산출하기 위해서는 단순 고정값이 아닌 동적 착의량을 반영할 필요성이 있다. 다시 말해, 동적 착의량은 고정값이 아니라 다양한 변수에 의해 매일 변하는 착의량을 의미한다.

실제 착의량과 실내 열쾌적의 상관관계를 분석하기 위한 다양한 현장 연구가 수행되었다. Jiao(2017)는 70대 이상의 노년층을 대상으로 착의량을 포함하여 나이, 실내온도, 외기온도 등 착의량에 영향을 미치는 변수를 파악하기 위해 설문조사를 수행하였다[10].

pISSN 2288-968X, eISSN 2288-9698
http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2020.20.5.171

Vecchi (2017)는 브라질에서 수집한 현장 데이터로 착의량과 작용온도의 상관관계를 밝혔으며[11], Hamphreys(1974, 1977)는 영국에서 현장 데이터를 수집하여 외기온도가 착의량에 가장 큰 영향을 미치는 요소임을 확인하였다[12,13].

하지만 현장 데이터는 주로 특정 지역의 기후대에서 일부 대상에 대해 수집된 데이터로서 보편적인 적용에 한계가 있다. 이러한 한계점을 보완하기 위해 현장 연구가 요구되지 않는 동적인 착의량 예측 모델 개발 연구가 진행되었다. 동적 착의량 예측을 위해 개발된 모델은 회귀 함수를 주로 사용하였으며 다양한 환경변수와 착의량의 상관관계를 분석하였다. 대표적으로 Carvalho(2013)는 전날의 평균 실외온도를 고려한 선형함수로 착의량 예측모델을 개발하였고[14], Schiavon(2013)는 Comfort Dataset의 일부 데이터를 활용하여 선형 및 지수 함수 기반의 착의량 예측모델을 개발하였으며 오전 6시의 외기온도가 착의량에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다[15].

또한, 다양한 동적 착의량 측정 방법을 사용하여 건물의 열쾌적을 분석한 선행연구도 진행되었다. Kim(2019)은 실내 환기 시스템의 작동에 따른 실내 열쾌적 분석을 위해 설문조사를 통해 재실자의 착의량을 적용하였고 거주자의 86.7%가 열환경에 만족하는 결과를 보였다[16]. Lee(2014)는 착의량 예측 방정식 모델을 제시하고 오피스 건물 열쾌적 분석을 통해 고정값 대비 동적 착의량을 고려할 때 정확한 쾌적 환경 제공이 가능하다고 밝혔다[17].

선행연구 분석 결과 동적 착의량을 반영할 경우 기존의 고정 상수값을 활용한 방법보다 쾌적한 열환경 조성이 가능함을 확인하였다. 이러한 가능성을 토대로 동적 착의량의 적용이 다양한 기후환경에서 실내 열환경에 미치는 영향 및 필요성을 구체적으로 분석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 기후대에서 착의량에 따른 실내 열환경 및 재실자의 열쾌적성을 분석함으로써 동적 착의량의 반영 필요성을 확인하고자 한다. 실내 열쾌적을 위한 동적 착의량 반영 필요성 확인을 토대로 추후 연구로써 정확한 실제 착의량 산출모델 개발 및 적용을 통해 재실자 열쾌적 향상을 기대할 수 있다.

2. 지역별 동적 착의량 적용

2.1. 대표 기후 선정

기후별로 착의량에 따른 실내 열쾌적 분석을 위해 지리적 특성상 다양한 기후대가 존재하는 미국을 기준으로 대표 기후를 선정하였다. International Energy Conservation Code (IECC)와 미국냉난방공조학회(ASHRAE)는 미국의 기후를 온도, 강수량, 냉난방도일을 기준으로 8개의 Zone과 습도를 기준으로 A,B,C 구역으로 구분하였다[18, 19]. IECC에서 제공하는 미국의 지역별 기후대는 Fig. 1.과 같다.

본 연구에서는 세 지역의 대표 기후(열대기후(hot-humid), 해양성기후(marine), 냉대기후(cold))를 선정하여 평가를 진행하였다(Table 1.). 열대기후를 대표하는 지역은 1A의 Miami, Florida로 연중 고온이며 겨울이 존재하지 않는 기후이다. 해양성기후의 대표 지역은 3C의 San Francisco, California로 연중 온난한 기후이며 겨울은 약간 춥고 우기이다. 냉대기후의 대표 지역은 5A의 Ann Arbor, Michigan으로 선정하였다. Michigan은 겨울에 강풍을 동반하는 추운 날씨를 보이고 여름은 짧지만 기온이 높다. 각 지역의 위치는 Fig. 1.에 표시하였고 지역별 냉난방 도일은 Table 1.과 같다. Miami는 냉방도일이 난방도일에 비해 현저히 높은 지역적 특징을 가지며, San Francisco와 Ann Arbor는 난방도일이 더 높은 특징을 가진다.

Table 1. Reference Regions by Climate Zones

Climate zone	Reference city	CDD	HDD
1A	Miami, Florida (FL)	2293	111
3C	San Francisco, California (CA)	361	2687
5A	Ann arbor, Michigan (MI)	262	4280

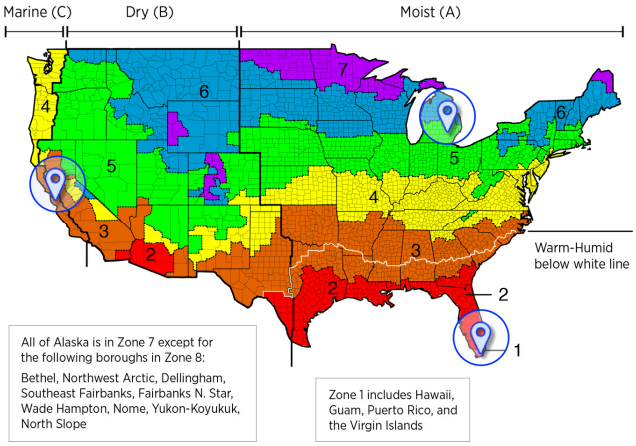


Fig. 1. Reference City from IECC Climate Regions

2.2. 지역별 동적 착의량 산출

동적 착의량에 영향을 미치는 주요 변수를 파악하기 위해 1장에서 언급한 바와 같이 환경변수와 착의량의 상관관계를 분석한 다양한 연구가 진행되었다. Michele(2006)은 외부 매개변수 중 오전 6시의 외기온도가 재실자의 의복 선정에 가장 큰 영향을 미친다고 주장했다[20]. 또한, Schiavon(2013)은 다양한 기후 및 국가를 대상으로 착의량과 환경변수를 수집한 ASHRAE RP-884, 921[21,22] 데이터를 활용하여 오전 6시의 외기온도를 변수로 착의량 산출 모델을 개발하였다[15].

본 연구에서는 각 기후대의 동적 착의량을 반영하기 위해 Schiavon(2013)에 의해 개발된 방정식 모델을 사용하여 계산하였다[15]. 이 모델은 오전 6시의 외기온도를 변수로 사용하는 선형회귀 방정식으로 Eq. 1과 같이 계산된다. 이때, $day06_{ta}$는 오전 6시의 외기온도를 의미한다.

$$\log_{10} clo = -0.1635 - 0.0066 \times day06_{ta} \quad \cdots\cdots \text{(Eq. 1)}$$

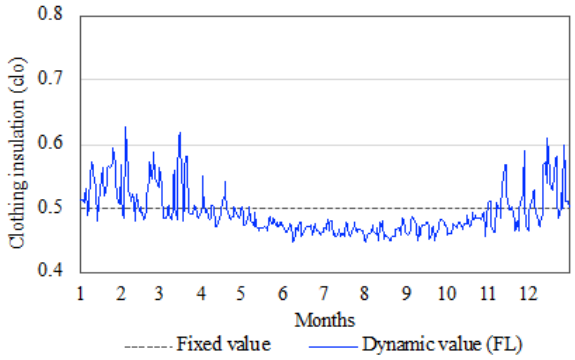
연중 동적 착의량은 각 지역의 외기온도 데이터를 기반으로 산출하였고 Fig. 2.는 지역별 연중 동적 착의량 및 고정 착의량을 보여주고 있다. 이때, 고정 착의량은 각 지역의 냉난방 기간에 맞춰 겨울철 1.0clo, 여름철 0.5clo[9]로 그래프에 함께 표현하였다. 지역별 냉난방 기간의 설정은 3장에서 자세히 설명하였다.

열대기후인 Miami에서의 동적 착의량은 Fig. 2(a).와 같이 연중

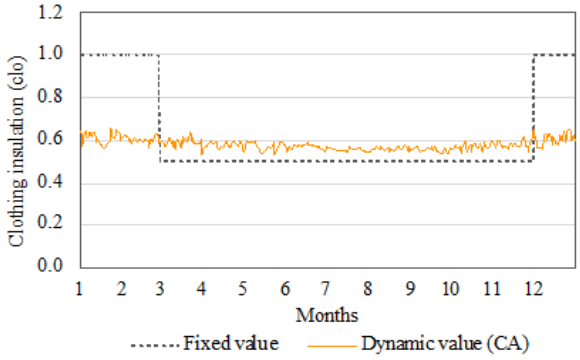
0.44clo~0.63clo 사이의 값을 보이며 5월~10월은 고정값인 0.5clo 보다 낮은 착의량을 보인다. 연중 온난한 해양성기후를 보이는 Fig. 2(b).의 San Francisco는 착의량의 큰 변화가 발생하지 않고 약 0.6clo에서 약간의 변동만 발생한다. 마지막으로 Fig. 2(c).의 냉대기후인 Ann Arbor는 세 기후 중 연중 착의량 차이가 가장 크게 나타났다. 여름철에는 고정 착의량 0.5clo 보다 착의량 값이 높게 나타나는 반면 겨울철 동적 착의량은 이틀을 제외하고 고정 착의량 값인 1.0clo 보다 낮은 값을 나타낸다.

3. 건물 모델링

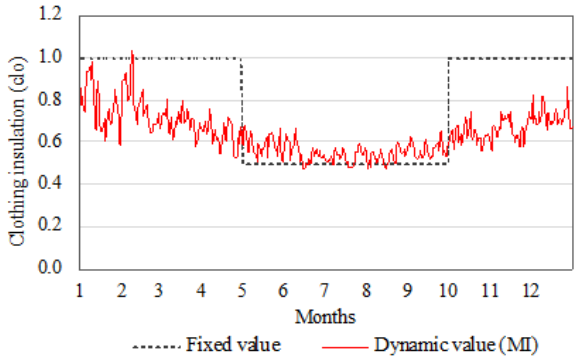
본 연구에서는 재실자의 실제 착의량을 반영한 실내 열쾌적 및 에너지 분석을 위해 DesignBuilder(Version 6.1.4)을 사용하였다. DesignBuilder는 LEED와 ASHRAE 90.1[19]의 기준조건을 포함한 시뮬레이션 프로그램으로 EnergyPlus 기반의 통합 건물 에너지해석이 가능하다.



(a) Miami, FL



(b) San Francisco, CA



(c) Ann Arbor, MI

Fig. 2. Clothing Insulation of Dynamic and Fixed Values by Regions

시뮬레이션 대상 건물은 연면적 640m^{2}의 4층짜리 표준 업무시설로 구성하였으며, 모델의 주요 구성 정보는 Table 2.에 정리되어 있다. 건물은 남향으로 배치하였고 창면적비는 40%로 설정하였다. 2018년에 개정된 에너지절약 설계기준[23]에 맞춰 건물 외피 열관류율 값을 적용하였으며 내부 발열 요소로 일반적 수치의 인체발열, 조명, 기기 발열량을 설정하였다. 건물 HVAC 시스템은 일반 업무시설에서 사용되는 Fan Coil Unit (FCU)를 이용하였다. 착의량에 따른 실내 열환경을 분석하고자 또 다른 개인적 변수인 활동량(metabolic rate)은 light office work/standing/walking에 해당하는 110.7W/person으로 고정값을 사용하였다.

시스템 냉난방 기간은 지역별로 각 기후 조건을 고려하여 가정하였으며 Table 3.과 같다. 냉난방 기간은 각 지역의 외기온도 이외에도 업무시설 특성에 따른 조명, 컴퓨터 기기 등 높은 내부발열량을 고려하여 기간을 설정하였다. 건물 시뮬레이션에 적용된 지역별

Table 2. Modeling Information

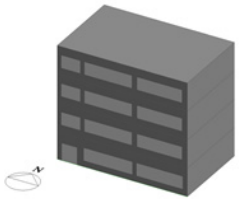
Image		
Simulation Parameter		**Data**
Building information	Orientation	South
	Total floor area	640m^2
	Number of floors	4F
	Floor Height (Flr-To-Flr)	3.5m
	Window to Wall Ratio	40%
Construction	External walls (U-value)	0.24W/m^{2}K
	Roof (U-value)	0.15W/m^{2}K
	Floors (U-value)	Ground-0.20W/m^{2}K
		Internal-2.93W/m^{2}K
	Windows	1.29W/m^{2}K
	Infiltration	0.7ac/h
Internal load	Occupancy	0.111people/m^2
	Metabolic rate	110.7W/person
	Lighting	400lux
	Equipment	11.77W/m^2
HVAC system	Cooling/Heating system	Fan Coil Unit (4-Pipe)
	Cooling/Heating seasonal COP	1.80/0.85
	Ventilation	1.14L/s-m^3

Table 3. Heating and Cooling Periods for HVAC

Season / Location	Heating	Cooling
Miami, FL	-	January 01 -December 31
San Francisco, CA	January 01-February 28, December 01-December 31	March 01 -November 30
Ann Arbor, MI	January 01-April 30, October 01-December 31	May 01 -September 30

ⓒ 2020. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

Table 4. System setpoint and setback of PMV based control

Season	PMV	
	Setpoint/Setback	value
Cooling	setpoint	0.0
	setback	+1.0
Heating	setpoint	0.0
	setback	-1.1

weather data는 National Renewable Energy Laboratory's (NREL)에서 제공하는 TMY2 dataset[24]을 사용하였다.

본 연구에서는 실내 열쾌적 분석을 위해 고정 및 동적 착의량을 반영한 PMV 기반 제어 방법을 사용하였다. 재실 시간은 업무시설의 재실 특성을 고려하여 평일 07:00부터 19:00까지이며 주말은 24시간 비재실로 가정하였다. 재실/비재실 시간의 제어를 위한 setpoint /setback PMV 값은 Table 4.와 같다. Setpoint의 경우 냉난방 기간 모두 쾌적 상태로 제어하기 위해 PMV 값을 0.0으로 정하였다. 하지만 PMV 기반 제어는 재실자의 개인적 요소를 고려하는 제어 방법으로 비재실 기간에 대한 setback 권장 기준은 따로 존재하지 않는다. 따라서 ASHRAE[9]에 의해 권장되는 DBT 기반 제어의 setpoint/setback 온도 차이로 인한 ⊿PMV 값을 산출하여 PMV setback으로 적용하였다. 예를 들어, ASHRAE 권장 setpoint/setback 온도 중 냉방은 25℃/30℃, 난방은 23℃/15℃로 가정할 경우, 각 기간의 설정온도 차인 ⊿5℃와 ⊿8℃에 해당하는 ⊿PMV는 ⊿1.0와 ⊿1.1이다. 따라서 PMV 기반 제어의 setback 값은 Table 4.와 같이 냉방기간에 +1.0, 난방기간에 −1.1로 적용되었다.

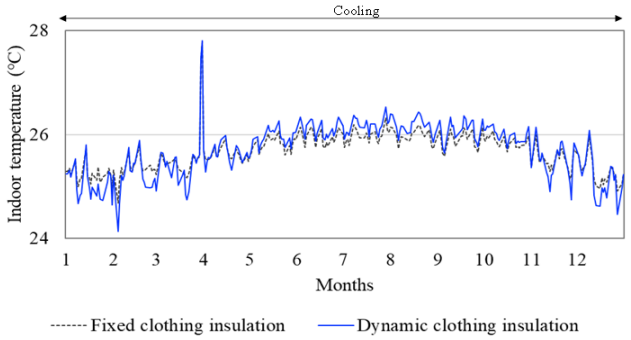
4. 착의량에 따른 지역별 실내 열쾌적 분석 결과

본 장에서는 Fig. 2.의 지역별 고정 및 동적 착의량 값을 반영한 PMV 기반 실내환경 제어 결과를 토대로 실내 열쾌적 분석을 실시하였다. 이를 위해 실내온도와 재실자의 실제 PMV를 평가하였다. 이때 재실자의 실제 PMV는 제어된 실내환경에서 동적 착의 상태인 재실자의 PMV로 치환된 값을 의미한다. 따라서 실제 PMV의 산출은 제어된 환경 변수인 실내 온·습도, 기류속도 및 MRT와 실제 변화하는 착의량으로 가정된 각 지역의 동적 착의량을 사용하여 계산하였다. 활동량은 3장에서 가정한 바와 같이 고정값(110.7W/person)을 사용한다.

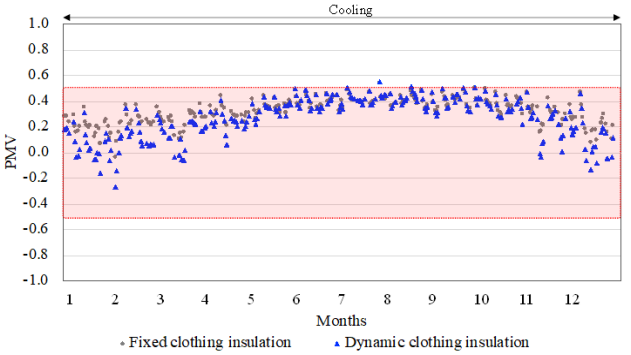
분석 기간설정의 경우 본 연구의 주요 목적은 재실자의 열쾌적을 분석하는 것이므로 24시간 비재실인 주말을 제외하고 평일에 대한 열쾌적만을 분석하였다. 명확한 PMV 쾌적 분석을 위해 PMV 쾌적 범위(−0.5〈PMV〈0.5)를 그래프 상에 붉은색 영역으로 표시하였다.

4.1. 열대기후(Miami, FL)

열대기후인 Miami의 경우, Table 3.과 같이 연중 냉방시스템만 작동된다. 두 가지 착의량을 각각 반영한 PMV 기반 제어 결과는 Fig. 3.와 같다. Fig. 3(a).는 각 착의량 값을 반영한 PMV 기반 제어의 실내온도 변화를 나타내며 전 기간에서 두 방법의 실내온도 차이는



(a) Indoor Air Temperature



(b) Actual PMV of Occuapnts

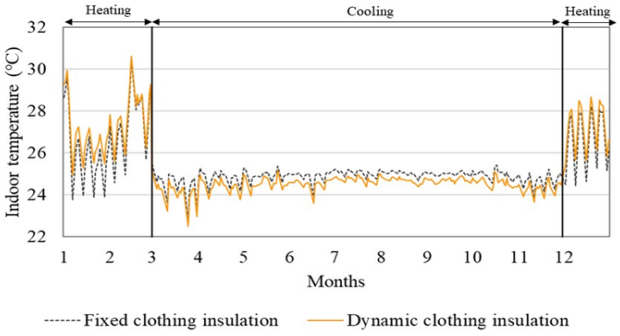
Fig. 3. Analysis of Indoor Thermal Comfort in Miami, FL

크지 않았다. 이는 Fig. 2(a).의 그래프와 같이 연중 동적 착의량과 고정 착의량 변화폭이 작아 PMV 차이도 크지 않기 때문으로 판단된다. 하지만 같은 냉방기간이라도 1월~3월, 11월~12월은 동적 착의량이 고정값인 0.5clo 보다 높은 편으로 동적 착의량을 적용했을 때 실내온도는 평균 0.11℃ 정도의 차이를 보이며 더 낮게 제어되었다. 반면, 5월~9월은 Fig. 2(a).의 동적 착의량이 0.5clo 이하의 값을 나타내므로 더 얇은 착의 상태를 반영하여 고정 착의량 적용 방법보다 평균 0.13℃ 정도의 약간 더 높은 실내온도로 제어되었다. Fig. 3(b).는 제어된 실내환경에서 재실자의 실제 PMV를 보여준다. Miami의 경우 두 착의량 적용 방법 모두 재실자의 실제 PMV가 쾌적 범위 내에서 크게 벗어나지 않게 제어되는 것을 확인할 수 있다.

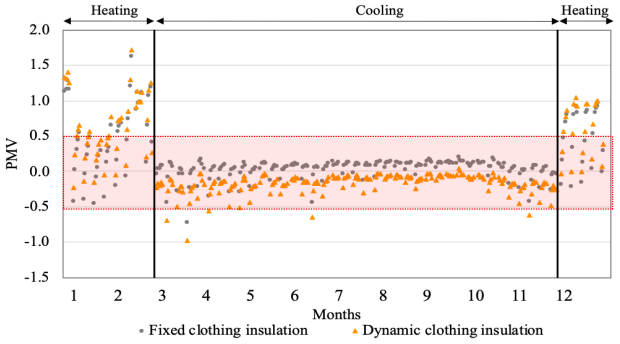
4.2. 해양성기후(San Francisco, CA)

해양성기후인 San Francisco에서 고정 및 동적 착의량을 적용한 PMV 기반 제어 결과는 Fig. 4.와 같다. San Francisco는 연중 온화한 기후지만 업무시설의 특성상 내부발열량이 높아 3월~11월 냉방시스템이 가동된다. Fig. 4(a).는 냉방 및 난방기간의 각 착의량을 반영한 PMV 기반 제어의 연중 실내온도를 보여준다. Fig. 2(b).와 같이 동적 착의량이 더 높은 냉방기간에는 평균 0.36℃ 정도 더 낮은 실내온도로 제어되고, 반대로 동적 착의량이 더 낮은 난방기간의 경우 실내온도는 평균 0.62℃ 더 높게 제어된다.

제어된 실내환경에서 동적 착의 상태의 재실자가 느끼는 실제 PMV는 Fig. 4(b).와 같다. 고정 및 동적 착의량을 적용한 두 PMV 기반 제어의 결과, 냉방기간에 재실자의 실제 PMV는 모두 +0.5이하의



(a) Indoor Air Temperature



(b) Actual PMV of Occuapnts

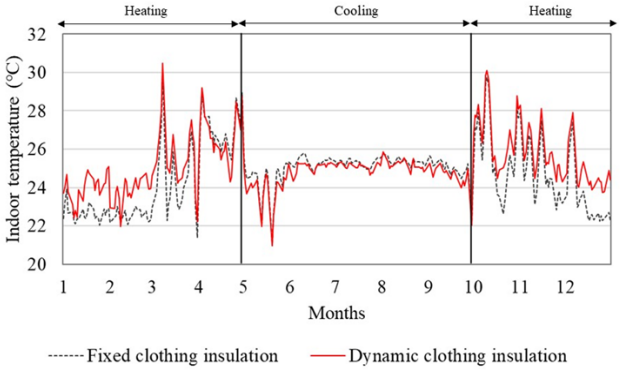
Fig. 4. Analysis of Indoor Thermal Comfort in San Francisco, CA

쾌적범위로 제어되었고 난방기간에는 −0.5 이상의 쾌적범위로 제어되었다. 다만 냉방 및 난방 시스템은 병용되어 작동하지 않기 때문에 냉방기간 중 PMV −0.5 이하, 난방기간 중 PMV +0.5 이상인 일부 날에는 시스템이 별도의 제어를 하지 않는다. 이로 인해 이상치 값들이 나타나지만, 이는 추후 냉난방 시스템을 함께 사용하는 일부 기간을 설정하는 등의 방법을 접목하여 쾌적 범위 내로 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

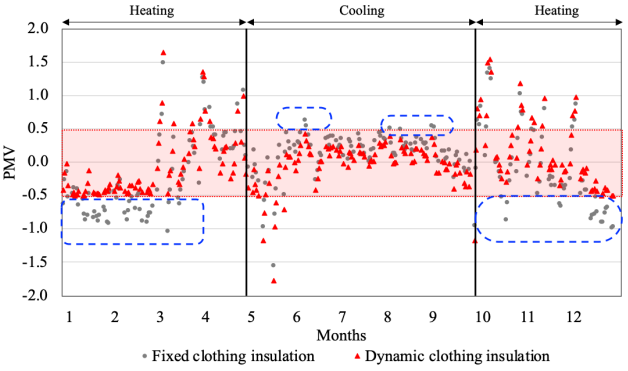
4.3. 냉대기후(Ann Arbor, MI)

냉대기후인 Ann Arbor 지역의 착의량에 따른 PMV 기반 제어 결과는 Fig. 5.과 같으며 Fig. 5(a).는 제어된 실내온도를 보여준다. Ann Arbor의 경우 Fig. 2(c).와 같이 냉방기간 보다 난방기간의 동적 및 고정 착의량 값의 차이가 더 크므로 실내온도 차이도 난방기간에 더 크게 나타났다. 난방기간의 실내온도는 더 낮은 착의량 값을 가지는 동적 착의량을 고려할 경우 실내온도가 평균 0.98℃ 더 높게 제어되었으며 세 기후대 중 온도차가 가장 크게 나타났다. 이에 비해 냉방기간은 두 방법의 실내온도 차이가 크지 않았으며 냉방기간에 더 높은 착의량 값을 가지는 동적 착의량을 고려할 경우 평균 0.27℃ 더 낮은 실내온도를 보였다.

이와 같이 제어된 실내온도에서 재실자가 실제로 느끼는 PMV는 Fig. 5(b).와 같다. 4.2장과 마찬가지로 냉난방 시스템의 적용 기간을 분리하였기 때문에 냉방기간 동안 PMV −0.5 이하, 난방기간 동안 +0.5 이상인 날은 제어되지 않는다. 이러한 일부 날들을 제외하고 동적 착의량을 반영할 경우 재실자의 실제 PMV는 모두 쾌적범위 내에서 제어되었다.



(a) Indoor air temperature



(b) Actual PMV of occuapnts

Fig. 5. Analysis of Indoor Thermal Comfort in Ann Arbor, MI

Table 5. Number of Days by Actual PMV Range

Season	Clothing insulation	PMV range							
		-2.0 ~-1.5	-1.5 ~-1.0	-1.0 ~-0.5	-0.5 ~0.0	0.0 ~0.5	0.5 ~1.0	1.0 ~1.5	1.5 ~2.0
Heating	Fixed	0	1	52	44	29	18	8	0
	Dynamic	0	0	3	90	29	22	6	2
Cooling	Fixed	1	0	4	16	83	5	0	0
	Dynamic	1	2	4	36	66	0	0	0

하지만 다른 기후대의 열쾌적 분석 결과와 달리 고정 착의량을 반영할 경우 난방 및 냉방기간 모두 재실자의 실제 PMV가 쾌적 범위를 벗어나는 날이 발생하였다. 냉난방 기간 중 PMV 쾌적 범위 내에서 제어되지 못한 날을 Fig. 5(b).에 파란색 점선 영역으로 표시하였다. 냉방기간에 비해 고정 및 동적 착의량 값의 차이가 큰 난방기간에 쾌적범위를 벗어나는 날이 더 많이 발생했다.

PMV 쾌적범위 불만족 정도를 정량적으로 분석하기 위해 고정 및 동적 착의량을 고려하여 제어된 실내환경에서재실자의 실제 PMV가 속하는 각 구간의 총 일수를 산출하였다. PMV 구간은 −2.0~2.0의 범위에서 0.5의 간격으로 설정하였으며 각 구간에 해당되는 총 일수를 Table 5.와 같이 산출하였다. 냉난방 기간의 불쾌적 구간에 해당하는 구간을 각각 굵은 선으로 표시하였다. 이 때, 난방의 경우 0.5〈PMV〈2.0은 난방제어를 하지 않아도 따뜻하게 유지되는 구간이며, 냉방은 −2.0〈PMV〈−0.5 구간에서 냉방제어를 하지 않아도 시원하게 유지되는 구간이다. 난방기간의 불쾌적한 PMV 구간(−2.0≤PMV〈−0.5) 중 고정 착의량을 고려한 제어는 −1.5≤PMV〈−1.0 구간에서 1일, −1.0≤PMV〈−0.5에서 52일의 불쾌적

ⓒ 2020. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

일수가 산출되었다. 반면, 동적 착의량을 적용한 경우 불쾌적한 날은 −1.0≤PMV〈−0.5 구간에서만 3일 정도 발생하였다. 냉방기간의 불쾌적 PMV 구간(+0.5≤PMV〈+2.0) 중 동적 착의량을 고려할 경우 불쾌적한 날이 나타나지 않지만, 고정 착의량을 고려할 경우 0.5≤PMV〈1.0 구간에서 5일 동안 불쾌적한 환경을 제공한다.

Ann Arbor, MI의 분석을 토대로 냉난방 기간의 온도 차가 크고 추운 기후에서 동적 착의량을 고려한 PMV 제어는 고정 착의량을 고려할 때와 달리 사람들에게 열적으로 더 쾌적한 환경을 제공할 수 있음을 확인하였다. 또한, 단순히 고정 착의량을 고려하여 제어할 경우 재실자의 실제 PMV와 차이가 발생할 수 있으며 재실자의 불쾌적을 야기할 수 있다.

5. 결론

본 연구의 목적은 다양한 기후대에서 동적 착의량의 반영이 실내 열환경 및 재실자의 쾌적성에 미치는 영향을 확인하고 동적 착의량 적용의 필요성을 확립하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 다양한 기후대의 동적 착의량을 반영한 실내 PMV 제어를 통해 실내 열쾌적 분석을 수행하였다. 다양한 기후를 반영하기 위해 특징이 서로 다른 열대기후(Miami, Florida), 해양성기후(San Francisco, California), 냉대기후(Ann Arbor, Michigan)를 선정하였다. 기후대별로 특정 시간의 외기온도를 변수로 동적 착의량을 산출하였고 고정 및 동적 착의량을 반영하여 PMV 기반으로 실내환경을 제어하였다. 동적 착의량의 실내환경 제어에 대한 영향성 분석을 위해 기존에 보편적으로 사용되는 고정 착의량 적용 방법과 비교하여 실내온도 및 재실자의 실제 PMV를 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 열대기후의 경우 PMV 제어 결과 두 착의량 값에 따른 실내온도 차는 전기간 평균 0.12℃로 미미한 차이를 보였으며 재실자의 실제 PMV도 하루를 제외하고 모두 쾌적 범위 내에서 제어되었다. 해양성기후는 두 착의량 값에 의한 실내온도 차가 난방기간 평균 0.62℃, 냉방기간 평균 0.36℃이며 재실자의 실제 PMV가 모두 쾌적 범위 내에서 제어되었다.
2) 냉대기후의 경우 두 착의량 값에 의해 제어된 실내온도 차이는 난방기간 평균 0.98℃, 냉방기간 평균 0.27℃로 난방기간에 제어된 실내온도 차가 크게 나타났다. 난방기간의 동적 착의량은 대체로 고정 착의량(1.0clo) 보다 낮은 값으로 산출되었기 때문에 고정 착의량을 적용했을 때보다 실내온도가 높게 제어되었다.
3) 냉대기후에서 동적 착의량을 적용하면 냉난방 기간에 재실자의 실제 PMV는 쾌적범위 내에서 제어된 반면 고정 착의량을 적용할 경우 재실자의 실제 PMV는 냉방 및 난방 모두 불쾌적 영역에 속하는 날이 발생하였다. 이때, 고정 착의량 적용 시 PMV 쾌적 범위를 불만족하는 날은 58일로 동적 착의량(3일) 보다 더 자주 나타났다. 특히 고정 착의량을 반영했을 때 불쾌적한 날 중 90%는 난방기간에 발생했다.

본 연구를 통해 동적 착의량을 반영할 경우 기후대별 실내 열환경 및 재실자의 쾌적성에 미치는 영향을 확인하였다. 동적 착의량으로 인해 실내 열쾌적에 가장 큰 영향을 미친 기후대는 냉대기후였으며, 특히 난방기간에 고정 착의량과 달리 실제 재실자의 쾌적을 만족하는 실내환경을 제공할 수 있음을 확인하였다. 결과적으로 재실자의 동적 착의량은 연중 온도차가 큰 기후대에서 더 효과적으로 재실자의 열쾌적에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 동적 착의량 산출 시 특정 시간의 외기온도를 변수로 계산하였지만 실제로 사람의 착의량은 단일 변수로 결정되지 않으며 다양한 고려 요소가 존재한다. 따라서 재실자의 실제 착의 상태를 파악하고 착의량을 산출하는 방법이 필요하며 이를 위한 후속연구를 진행할 예정이다. 또한, 재실자의 실제 착의량을 정확하고 객관적으로 산출할 수 있는 모델을 개발하여 실시간 동적 착의량을 적용한 실내 열쾌적 분석 등 추후 연구를 수행할 예정이다.

Acknowledgement

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

Reference

[1] J.D. Spengler, Climate change, indoor environments, and health, Indoor Air 22, 2012, pp.89-95.
[2] L. Lan et al., The effects of air temperature on office workers' well-being, workload and productivity-evaluated with subjective ratings, Applied Ergonomics 42, 2010, pp.29-36.
[3] 백용규, 문진우, 이중외피 건물 난방시스템의 발정제어 및 가변제어를 위한 최적로직의 개발 및 성능평가, KIEAE Journal 14(3), 2014, pp.71-77. // (Y.K. Baik, J.W. Moon, Development and Performance Evaluation of Optimal Control logics for the Two-Positionand Variable-Heating Systems in Double Skin Facade Buildings, KIEAE Journal, 14(3), 2014, pp.71-77.)
[4] 최은지 외 3인, 재실자 활동량 산출을 위한 Pose 분류 모델 개발, KIEAE Journal, 18(5), 2018, pp.93-98. // (E.J. Choi et al., Development of a Human Pose Classifying Model to Estimate the Metabolic Rate of Occupant, KIEAE Journal, 18(5), 2018, pp.93-98.)
[5] P.O. Fanger, Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.; Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
[6] J. Gao et al., Comparative analysis of modified PMV models and SET models to predict human thermal sensation in naturally ventilated buildings, Building and Environment, 92, 2015, pp.200-208.
[7] 문소원 외 3인, 오피스 빌딩의 실내 환경측정과 재실자의 주관적 평가에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 - 계획계, 25(5), 2009, pp.279-286. // (S.W. Moon et al., A Study on Occupants' Subjective Evaluation and an Measurement of Indoor Environments of an Office Building -Focused on the Seasonal Change of Indoor Temperature-, Architectural Institute of Korea, 25(5), 2009, pp.279-286.)
[8] 이철성, 윤종호, 착의량과 실내설정온도 관계에 따른 난방에너지 및 온실가스저감량 평가 연구, 한국태양에너지학회 논문집, 30(4), 2010, pp.49-54. // (C.S. Lee, J.H. Yoon, A Study on the Estimation of Heating Energy and CO2 Reduction depending on a Indoor Set Temperature and Clo value, Journal of theKorean Solar Energy Society, 30(4), 2010, pp.49-54.)
[9] ASHRAE, ASHRAE Handbook Fundamentals, In Thermal Comfort, ASHRAE, Atlanta, 2013.
[10] Y. Jiao et al., The relationship between thermal environments and clothing insulation for elderly individuals in Shanghai, China. Journal of Thermal Biology, 70, 2017, pp.28-36.
[11] R.D. Vecchi, R. Lamberts, C.M. Candido, The role of clothing in thermal comfort: how people dress in a temperate and humid climate in Brazil, In Proceedings of Ambiente Construido, Porto Alegre; 2017,

pp.69-81.
[12] M.A. Humphreys, Classroom temperature, clothing and thermal comfort –a study of secondary school children in summertime, Building research establishment current paper 22/74. Build. Serv. Eng., 41, 1974, pp.191-202.
[13] M.A. Humphreys, Clothing and the outdoor microclimate in summer, Build, Environ., 12(3), 1977, pp.137-142.
[14] P.M. de Carvalho, M.G. da Silva, J.E. Ramos, Influence of weather and indoor climate on clothing of occupants in naturally ventilated school buildings, Build. Environ., 59, 2013, pp.38-46.
[15] S. Schiavon, K.H. Lee, Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures, Build. Environ., 59, 2013, pp.250-260.
[16] J. Kim et al., Thermal comfort in a mixed-mode building: Are occupants more adaptive? Energy and Buildings 203, 2019, 109436.
[17] K. Lee, S. Schiavon, Influence of Three Dynamic Predictive Clothing Insulation Models on Building Energy Use, HVAC Sizing and Thermal Comfort. Energies 7, 2014, pp.1917-1934.
[18] Building america best practices series, volume 7.3: Guide to determining climate regions by country, U.S. Department of Energy, 2015.
[19] ASHRAE Standard 90.1, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, ASHRAE, Atlanta, 2010.
[20] M. De Carli et al., People's clothing behaviour according to external weather and indoor environment, Building and Environment 42, 2007, pp.3965-3973.
[21] R. de Dear, G. Brager, D. Cooper, Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, Final Report ASHRAE RP-884, Macquarie University, University of California, 1997.
[22] K. Cena, R. de Dear, Field Study of Occupant Comport and Office Thermal Environments in a Hot Arid Climate, Final Report ASHRAE, RP-921, Institute for Environmental Science, Murdoch University, Perth, 1998.
[23] 국토교통부, 건축물의 에너지절약설계기준, 국토교통부고시 제 2017-881호. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Stnadards for Energy saving design of buildings, Koream MOLIT, 2017)
[24] National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, www.nrel.gov, 2020.10.07

ⓒ 2020. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.