



건물 외주부 재실자 온열환경 개선을 위한 실내환경 제어방안 연구 - 겨울철 태양 복사열 획득에 의한 국부적 온열환경 변화를 중심으로 -

*Indoor Environmental Controls for Improving Occupant Thermal Comfort in Perimeter Spaces
- Focusing on the Thermal Environment due to Solar Radiation during the Heating Season -*

김철*
Chul Kim*

* Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pukyong National Univ., South Korea (chulkim@pknu.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: Solar radiation during the winter daytime can cause horizontal stratification of indoor temperatures in perimeter spaces. Window-side spaces in perimeter spaces often experience high temperatures of 30 degrees or more in winter, and the horizontal radiant temperature imbalance from solar radiation forms simultaneous cooling and heating loads in the perimeter spaces. As a result, the thermal comfort difference between window-side and hallway-side occupants increases within the same space. **Method:** Short-term monitoring of indoor temperature on clear days was conducted in a university classroom in Busan during winter. Considering the operating conditions of the HVAC system in winter, local temperature differences and unmet load hours in the indoor space were investigated under 1) no heating and ventilation, 2) heating only, and 3) heating and ventilation operating conditions, and the thermal comfort and dissatisfaction of the occupants were evaluated. **Result:** The results of the study showed that the window-side space would experience high cooling loads in winter, and the duration may vary depending on the orientation and the window designs. Therefore, it should consider HVAC system design and operation to respond to the simultaneous heating and cooling demands in the same perimeter spaces in winter.

© 2024. KIEAE all rights reserved.

KEYWORD

국부적 온열환경
외주부
난방기
냉방부하
실내환경제어

Local Thermal Environment
Perimeter Space
Heating Season
Cooling Load
Indoor Environmental Control

ACCEPTANCE INFO

Received Dec. 30, 2023
Final revision received Jan. 8, 2024
Accepted Jan. 12, 2024

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

건물에서 온열환경은 재실자 열쾌적과 건강한 생활환경 유지에 중요한 역할을 한다. 특히, 계절적이 존재하는 우리나라는 계절적 변화에 따라 기후환경에 뚜렷한 변화가 있으며, 이는 실내 온열환경의 직접적인 영향을 준다. 따라서 냉난방기 건물 외주부의 균질한 열환경의 제어는 재실자의 열쾌적 유지에 중요하다.

하지만 현실적으로 외주부 온열환경 제어는 많은 어려움이 따른다. 이러한 원인 중 하나로 태양복사로 인해 외주부에서 직접 외피에 면한 공간과 내측 공간은 열적 불균형이 나타나며, 여름철과 겨울철에 더 크게 증가한다. 특히, 건물의 유리면적이 넓은 경우, 겨울철에도 외표면 실내측 온도가 높아져 국부적으로 열이 불균형하게 되며, 외피에 인접한 공간은 겨울철에 30도가 넘는 과열시간대 발생할 수도 있다[1]. 이것은 겨울철 외주부에서 동일 공간 혹은 thermal zone에서 재실자 냉난방에 대한 동시 수요가 존재함을 의미하며 이를 건축환경적으로 제어하지 못 할 경우 국부적으로 불쾌적이 발생할 수 있음을 나타낸다.

따라서 본 연구는 부산에 00 대학교 강의공간을 대상으로 겨울철 난방기 공조시스템 가동조건에 따른 단기적인 실내 온열환경 모니

터링을 수행하였다. 이를 바탕으로 겨울철 외주부 위치별 온도분포와 열적쾌적을 분석하고 실내 온열환경 개선을 위한 시사점을 도출하였다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 겨울철 외주부에서 태양복사열 획득과 공조시스템 운영에 따른 국부적인 온열환경에 미치는 영향을 분석하고 있으며, 이를 통해 재실자의 열쾌적증진을 목적으로 한다. 이를 위한 본 연구의 수행 목표는 다음과 같다.

- 난방기 실내 위치별 온열환경 분석
- 난방기 실내 위치별 열적쾌적도 분석
- 난방기 공조시스템 가동 조건에 따른 온열환경 영향
- 외주부 온열환경 대응을 위한 실내환경 제어방안 도출

본 연구의 결과는 겨울철 외주부에서 발생 가능한 열적 불균형과 냉방부하 요인을 진단하고 나아가 외주부 온열환경 개선과 공조설비 구축방안 개선을 위해 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 문헌조사

건축물 외주부에서 온열환경의 불균형은 다양한 요인에 의해 발생

한다. 외주부 태양복사열 획득이나 HVAC 시스템의 불균등한 열분배, 여러 유형의 HVAC 시스템 운영, 공간의 열특성이 적절히 고려되지 않은 thermal zoning 등 다양한 건축적, 설비적, 제어적 요인이 작용한다. 특히, 태양복사에 의한 불균등한 열분포는 HVAC시스템 공급급 재실자의 수요의 불일치로 열쾌적성을 악화시키고 건물 내 재실자의 업무 생산성 저하, 불필요한 에너지의 사용을 야기할 수 있다.

따라서, 선행 연구는 태양복사에 의한 불균등한 온열환경이 재실자의 열쾌적성에 영향을 준다고 지적해 왔다. Marino et al. (2017)은 사례분석을 통해 태양복사가 실내 복사열 분포에 영향을 미치며, 복사의 비대칭성으로 인해 국부적으로 재실자의 불쾌적을 야기할 수 있음을 밝혔다[2]. Wang et al. (2019)는 20명의 챔버실험을 통해 불균등한 온열환경에서 실내온도와 복사온도가 재실자의 열쾌적에 영향을 미친다고 연구한 바 있다. 이 연구는 불만족도 수준별에 따른 thermal comfort zone을 제시하였다[3]. 또한, Yang et al. (2020)은 태양복사 조건에 따른 PMV연구를 통해 태양복사가 여름철과 겨울철 열쾌적에 유의미한 영향을 미친다고 밝혔다. 겨울철 중국 텐진시의 도서관, 오피스, 기차역을 대상으로 수행한 실험에서 응답자는 태양복사는 부정과 긍정 응답 모두를 보였으며, 이를 통해 연구자들은 겨울철 적절한 태양복사는 열환경 개선에 기여할 수 있지만 지나치게 높은 경우는 불쾌적을 유발할 수 있다고 분석하였다[1].

이러한 태양복사에 의한 온열환경의 불균형은 외주부에서 재실자의 열쾌적 보장과 HVAC시스템 운영에 어려움을 가중할 수 있다. 일례로 A et al. (2022)는 소형 챔버실험에서 외주부 공간의 태양복사 노출 기간과 비노출기간을 비교하여 챔버 외피 인접면과 내측면의 온열환경을 모니터링하였다. 연구결과, 태양복사가 수직적 온도 성층화와 불만족도의 요인이 될 수 있으며 기존 시스템과 비교할 때, floor radiant cooling 시스템이 직사에 의한 복사열과 복사온도 개선에 효과적으로 작동할 수 있다고 확인하였다[4]. Li et al. (2023)은 미국 테네시 ORNL의 8개 오피스를 포함한 12개 thermal zone 실험에서 건물 내 온열환경 센서 위치가 건물 에너지 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다고 분석하였다. 구체적으로 냉방 및 난방시 모두 센서 위치에 따라 과냉각과 과열 발생이 입증되었다. Unmet load hour 분석결과, 센서를 적게 사용하면 난방 또는 냉방 공급이 부족해져 열 쾌적도가 떨어지기 때문에 냉난방 부하가 불만족된 시간을 줄이기 위해 실내 센서 수 또한 중요함을 확인하였다[5]. 마지막으로 Luo et al. (2018)은 18°C와 29°C 주변온도 환경의 온열실험에서 이러한 국부적인 온열환경 개선을 위해 개인별 쾌적시스템(Personal Comfort System, PCS: heating/ cooling chair and wristpad, desk fan, heating insole)의 사용이 재실자의 전체적인 열쾌적 만족도를 크게 증가시킬 수 있다고 연구하였다[6].

선행연구에 따르면, 태양복사는 재실자들의 열쾌적에 큰 영향을 미치며 계절적 요인에 따라 불쾌감을 유발할 수 있다고 확인되었다. 또한, 이러한 온열환경의 불균형은 HVAC시스템의 설계방법이나 제어방식 개선, 혹은 개인별 쾌적시스템(PCS) 등의 활용을 통해 완화되었음을 확인하였다. 하지만 현재 대부분의 복사에 의한 온열환경에 관한 연구는 여름철 태양복사에 초점을 두고 있으며, 겨울철 실내공간에서 열적 불균형으로 인한 냉방부하 발생 연구는 드문 것으로 나타났다.

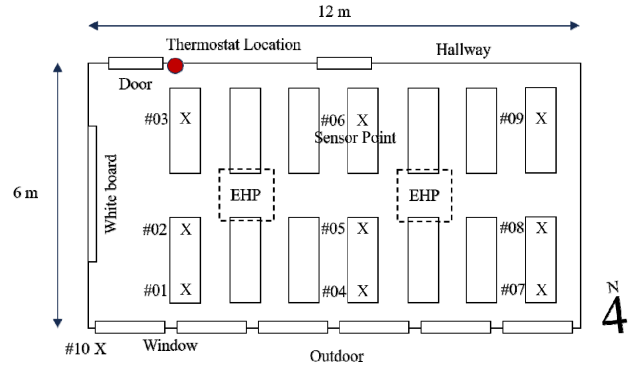



Fig. 1. Experiments setting for a target classroom

Table 1. Experiments setting for a target classroom

	Description	Note
Space Settings		T&D TR-74Ui (Temp 0~55°C±0.3°C, RH 10~90%±5%, UV 0~30mW/cm²±5%, 260~400 nm) Testo 417 (0~20m/s±1.5%)
Space Area	72m ² (12m X 6m X 2.6m)	apx. 50 occupants
Window	1.5m X 1.7m X 6ea (clear glass 6mm x 2 layers)	WWR 49%
HVAC System	EHP 2ea, ERV 2ea (Operation: 9:00-18:00)	set-point temperature 22°C

3. 연구방법

3.1. 겨울철 온열환경 실험구성

본 연구의 대상건물은 부산광역시 남구에 위치한 00대학교 강의실로 남동향에 면해 있으며 규모는 72m²로 약 50명의 학생이 동시에 수업이 가능한 공간이다(Table 1.). 창면적은 15.3m², 천정형 EHP가 2대, 열회수 환기장치(ERV)가 2대 설치되어 있다. EHP의 난방과 ERV 환기는 낮시간(09:00~18:00)동안 가동하였다(조명 off). 겨울철 복사열에 의한 국부적 온열환경을 모니터링하기 위해 일기예보를 기반으로 2023년 02월 22일~24일 맑은 날을 측정하였다. 실험은 강의실 외부 외기 모니터링 센서 1대와 강의실 실내 위치별 온열환경 모니터링을 위한 센서 9대가 작업면을 기준으로 설치되었으며(Fig. 1.), T&D사의 TR-74Ui, Testo 417을 사용하여 실내 외 온습도와 실내온도를 측정하였다. 모니터링 간격은 1분 단위로 측정되었으며 난방기 온열환경 조건을 고려하여 HVAC시스템 운전조건을 다음과 같이 구성되었다.

- Case 1: 자연조건, 난방 및 환기시스템 off (23/2/24)
- Case 2: 난방조건(1), 난방 on 및 환기시스템 off (23/2/22)
- Case 3: 난방조건(2), 난방 on 및 환기시스템 on (23/2/23)

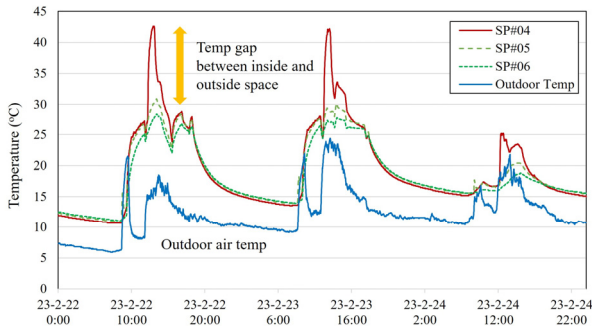


Fig. 2. Outdoor and indoor air temperatures(2/22-24)

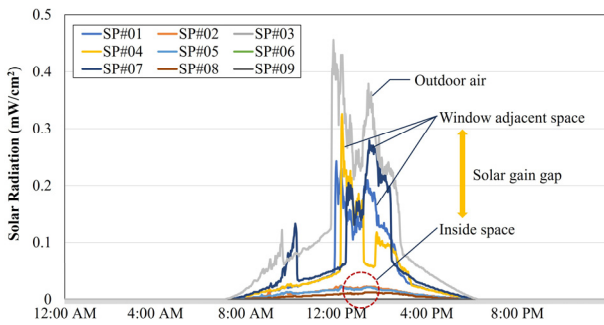


Fig. 3. UV solar under natural condition (2/24)

Table 2. 24-hour indoor temperature under natural conditions (°C)

	SP# 01	SP# 02	SP# 03	SP# 04	SP# 05	SP# 06	SP# 07	SP# 08	SP# 09	SP# 10
n	1,440									
Max	27.7	19.5	18.4	28.5	20.4	18.8	33.2	20.4	19.0	22.0
75%	16.5	16.5	15.9	16.7	16.7	16.2	17.7	16.8	16.7	13.1
Avg	16.0	15.4	15.0	16.0	15.6	15.3	17.3	15.8	15.8	11.6
25%	13.7	14.1	14	13.9	14.2	14.2	14.4	14.5	14.8	9.4
Min	12.0	12.4	12.5	12.2	12.6	12.7	12.6	12.8	13.3	7.2
S.D.	2.9	1.1	0.8	2.6	1.3	0.9	4.3	1.2	0.8	2.6

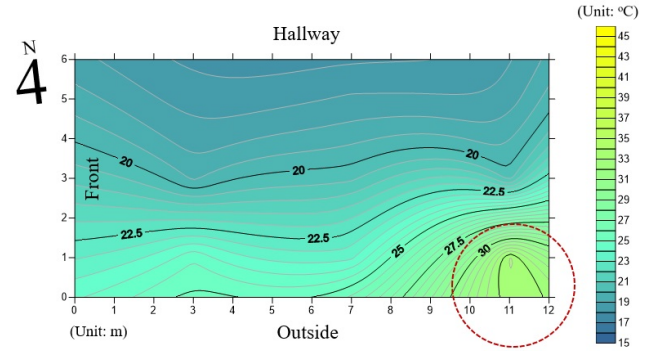


Fig. 4. Peak hour indoor temperature distribution under natural condition (2/24, 2:33pm)

3.2. 겨울철 실내 온열환경 분석

실측결과(Fig. 2.~Fig. 3.)를 바탕으로 겨울철 난방기 외주부 강외의 실내 온열환경 분석을 모니터링 기간과 실내 피크타임에 대해 온도 및 재실자 PMV, unmet load hour를 분석 및 맵핑하였다. 온열환경 분석은 Surfer 13[7]을 이용하여 Kriging 알고리즘에 기반한 추세를 분석하였다. PMV-PPD값은 미국 U.C. Berkeley에서 개발한 CBE Thermal Comfort Tool[8]을 이용하여 산출하였다.

Table 3. 24-hour indoor temperature with heating only (Unit:°C)

	SP# 01	SP# 02	SP# 03	SP# 04	SP# 05	SP# 06	SP# 07	SP# 08	SP# 09	SP# 10
n	1,440									
Max	38.9	29.9	29	42.6	30.9	28.3	43.4	30.2	28.3	21.5
75%	25.8	25.4	24.6	26.5	25.8	24.4	27.5	25.6	24.8	12.3
Avg	19.3	18.7	18.2	19.5	18.9	18.2	20.6	18.8	18.7	10.3
25%	11.3	11.7	11.7	11.4	11.8	11.9	11.7	11.9	12.5	6.8
Min	10.5	10.8	10.9	10.7	11	11.1	11	11.2	11.7	5.9
S.D.	8.4	6.6	6.2	8.4	6.8	6.0	9.4	6.6	5.9	3.7

4. 분석결과

4.1. 외주부 난방기 실내온도 및 태양복사

1) Case 1: 자연조건, 난방 및 환기시스템 off

Case 1은 난방 및 환기시스템이 가동되지 않는 겨울철 맑은 날(2월24일) 24시간 온도분포를 모니터링한 것이다(Table 2.). 실내에 난방 및 환기시스템이 가동되지 않는 조건에서 하루 중 센서 포인트(Sensor point, SP)의 온도 최고값은 33.2°C(SP#07), 평균값은 15.4°C, 최저값은 12.0°C로 나타났으며, 센서 포인트별 평균값 차이는 2.3°C, 최저값 차이는 1.3°C로 나타났다. 낮동안 실내온도 피크시간(Fig. 4., 2:33pm)은 센서 포인트 기준 SP#07에서 2시 33분에 발생하였고, 이때 작업면 최고 온도는 33.2°C(SP#07)로 동시간 최저온도가 SP#03 18.3°C임을 고려할 때 외주부 공간 위치별 최대 온도차는 14.9°C가 발생하여 실내 열적 불균형이 큰 것으로 확인되었다. 특히, 국부적 온도차가 컸던 고온영역은 외피면에서 1m 이내 공간에서 주로 발견되었는데 이는 태양복사 획득과 관련하여 작업면 UV값을 분석할 때, 창가측 최대치는 0.33mW/cm²(SP#04)인데

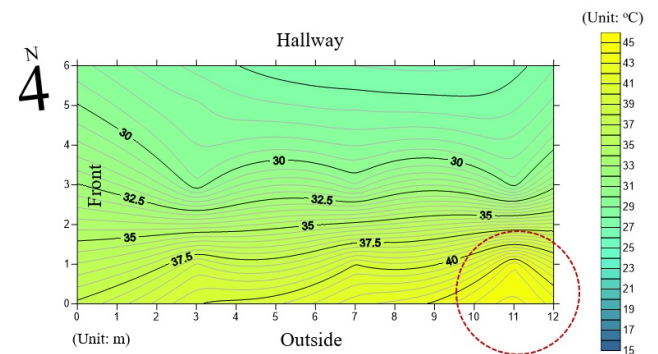


Fig. 5. Peak hour indoor temperature distribution with heating only at a peak hour (2/22, 1:22pm)

반해 실내측으로 갈수록 급격히 감소하는 것(SP#05 0.02 → SP#06 0.0)으로 확인되어 태양복사열 획득이 실내온도분포에 영향을 주고 있는 것으로 판단되었다.

2) Case 2: 난방조건(1), 난방 on 및 환기시스템 off

Case 2은 맑은 날(2월22일) 실내 난방 설정온도 22°C를 유지하고 있을 때, 24시간 강의실 작업면 표면온도를 분석한 것이다(Table 3.). 통상적인 겨울철 난방조건에서 태양복사열 획득시 국부적 온도 분포에 미치는 영향을 확인하였다. 측정결과 하루 중 센서 포인트 온도 최고값은 43.4°C(SP#07), 평균값은 19.0°C, 최저값은 10.5°C로 센서 포인트별 평균값 차이는 2.4°C, 최저값 차이는 1.2°C로 평균값, 최저값에서의 차이는 작게 나타났다.

하루 중 피크시간은 1:22pm로 확인되었으며 난방 가동시 실내 표면온도가 43.4°C(SP#07)까지 상승하는 것으로 확인되었다(Fig. 5.). 이때 센서 포인트별 온도차이는 최대 15.5°C로 난방가동시, 창측에 위치한 약 3m 이내 공간은 대부분 30°C 이상의 고온이 나타나 과도한 실내온도를 형성하는 것으로 분석되었다 또한, 작업면 UV값의 경우 창가측 센서(SP#01, 04, 07)에서 최대 복사열은 0.33~0.46 mW/cm²로 중간위치 센서(SP#02, 05, 08) 0.01~0.03mW/cm² 및 안측위치 센서(SP#03, 06, 09)의 0.0mW/cm²과 비교할 때 외주부 공간에서 외피면 위치의 복사 노출값의 차이가 큰 것으로 확인되었다.

3) Case 3: 난방조건(2), 난방 on 및 환기시스템 on

Case 3은 맑은 날(2월23일) 실내 난방(22°C) 및 열회수환기시스템(ERV)를 가동하고 있을 때 24시간 작업면 온도를 분석한 것이다(Table 4.). Case 3은 겨울철 밀폐공간에서 실내공기질 저하를 방지를 위해 환기장치 가동을 가정한 것으로 환기장치의 환기량은 급기 353 CMH, 배기 266 CMH이었다.

하루 중 피크온도값은 42.6도(SP#07), 평균값은 20.8°C, 최저값은 13.5°C였으며, 센서 포인트별 평균값 차이는 2.1°C, 최저값 차이는 1.0°C로 나타났다. 피크시간은 2:02pm로 난방 가동시 42.6°C(SP#07)까지 상승하는 것으로 확인되었다(Fig. 6.). 피크시간 센서 포인트별 온도차는 최대 14.9°C로 실내 최저온도가 27.9°C를 기록하였다. 태양복사열 관련 작업면 UV값의 경우 낮시간 최대 0.32~0.46mW/cm²가 창가측 센서(SP#01, 04, 07)나타났고 실내측의 경우 UV값이 거의 발견되지 않았다. 유사하게 창측에 위치한 약 3m 이내 공간은 대부분 30°C 이상의 고온이 나타나 난방 및 환기 가동시에 과도한 실내온도를 형성하는 것으로 분석되었다.

Table 4. 24-hour indoor temperature with heating and ERV (Unit:°C)

	SP# 01	SP# 02	SP# 03	SP# 04	SP# 05	SP# 06	SP# 07	SP# 08	SP# 09	SP# 10
n	1,440									
Max	38.2	29.6	28.5	42.2	30.2	27.7	42.6	29.9	28.4	24.4
75%	27.4	26.9	26.1	26.6	26.7	25.8	27.8	26.7	26.4	14.9
Avg	21.3	20.6	20.0	21.1	20.5	20.0	22.1	20.6	20.6	13.4
25%	14.5	14.8	14.7	14.5	14.9	14.9	14.9	15.1	15.5	10.0
Min	13.5	13.8	13.8	13.5	13.9	13.9	13.9	14.1	14.5	9.1
S.D.	7.6	5.7	5.3	7.3	5.6	5.0	8.3	5.5	5.0	4.2

4.2. 외주부 난방기 실내 열쾌적 분포

실측값을 기반으로 겨울철 낮시간 난방기 실내온전환경에 따른 실내 열쾌적의 변화를 예측하였다. 가장 국부적 냉방부하 발생이 컸던 피크시간대를 기준으로 분석하였으며, CBE Thermal Comfort Tool을 이용하여 난방기 강의실 센서 위치별 PMV-PPD를 예측하였다. 열쾌적 산출시 재실자의 착의량(clo)은 1.0, 활동량은 MET 1을 가정하였으며, 실내기류속도는 0.01m/s로 설정하였다. 실험 Case별 실내위치에 따른 열쾌적 예상 결과는 다음과 같다.

1) Case 1: 자연조건, 난방 및 환기시스템 off

피크시간(2/24, 2:33pm)의 온열환경 분석결과, 센서 포인트별 PMV값은 평균 -0.4, 범위는 -1.2~1.3이었으며, PPD는 평균 22.2%, 범위는 5.2~42.1%이었다. ASHRAE Standard 55-2020 [9]에서 “PPD < 10”. “-0.5 < PMV < 0.5”를 기준으로 열쾌적을 위한 조건으로 범위를 제시하고 있음을 볼 때, 겨울철 밀폐된 공간에서 일사를 받는 낮동안 동일한 실내공간에서 PMV격차가 최대 2.5로 재실자의 온열환경에 대한 쾌적도 차이가 클 것으로 판단된다. 동일한 공간에서도 복도측은 slightly cool을 창가측은 neutral~slightly warm을 느끼는 구간이 동시에 발생하며, 국부적으로 창가측은 불만족도가 크게 발생하여 국부적인 냉난방 수요가 동시에 발생할 것으로 예측된다(Table 5.).

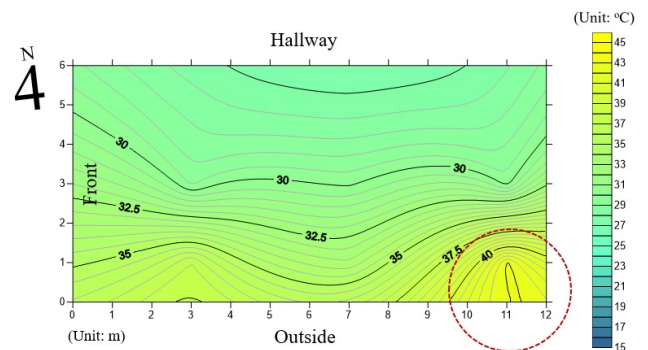


Fig. 6. Peak hour indoor temperature distribution with heating and ERV at a peak hour (2/23, 2:02pm)

Table 5. Predicted thermal comfort under natural conditions

Sensor	Tdb (°C)	RH (%)	MRT(°C)	PMV	PPD
SP#01	24.4	20.0	25.2	0.2	6.0
SP#02	19.4	28.0	21.8	-0.9	21.2
SP#03	18.3	30.0	20.2	-1.2	36.2
SP#04	23.4	22.0	25.3	0.1	5.2
SP#05	20.4	26.0	21.8	-0.7	16.3
SP#06	18.6	30.0	20.2	-1.2	33.8
SP#07	33.1	12.0	26.5	1.3	42.1
SP#08	20.3	25.0	23.1	-0.6	12.7
SP#09	18.8	28.0	21.5	-1.0	26.4
Max	33.1	30.0	26.5	1.3	42.1
Avg.	21.9	24.6	22.8	-0.4	22.2
Min	18.3	12.0	20.2	-1.2	5.2
S.D.	4.5	5.5	2.2	0.8	12.6

2) Case 2: 난방조건(1), 난방 on 및 환기시스템 off

겨울철 22도 난방시스템 가동시 피크시간(2/22, 1:22pm)의 온열 환경은 센서 포인트별 PMV값 평균 2.2, 분포범위는 1.5~3.0였으며, PMV격차가 최대 1.5로 PPD는 평균 77.8%, 범위는 52.2~100.0% 이었다(Table 6.).

난방기 가동시 오전에 실내온도가 낮을 때 난방기가 가동하면서 공급된 열이 설정온도를 유지하다가 오후가 되며 직접적인 태양 복사열이 유입되면서 실내온도가 급격히 상승하는 것으로 보이며 이것이 PMV와 PPD값에 영향을 준 것으로 판단된다. 복도측은 slightly warm을 창가측은 hot을 느끼는 구간이 발생하며, 실내 전반적으로 냉방에 대한 수요가 발생할 수 있다.

3) Case 3: 난방조건(2), 난방 on 및 환기시스템 on

난방시스템 및 ERV 환기장치 가동시 피크시간(2/23, 2:02pm) 분석결과, 실내 센서 포인트별 PMV값은 평균 2.0, 범위는 1.3~3.0, PMV격차는 최대 1.7로 PPD는 평균 71.0%, 분포범위는 39.1~100.0%로 확인되었다. 복도측은 slightly warm을 창가측은 hot을 느끼는 영역이 생기며, 실내 전반에서 냉방 수요가 발생한다. 난방 및 ERV 사용자 환기로 인해 일부 열손실이 발생하였으나 환기량이

Table 6. Predicted thermal comfort with heating only

Sensor	Tdb (°C)	RH (%)	MRT(°C)	PMV	PPD
SP#01	38.3	13.0	37.0	3.0	99.9
SP#02	29.9	20.0	32.8	2.0	75.3
SP#03	28.9	22.0	30.9	1.6	56.0
SP#04	35.8	15.0	37.2	3.0	99.7
SP#05	30.8	19.0	33.0	2.1	81.2
SP#06	28.2	22.0	31.1	1.5	52.2
SP#07	43.2	10.0	37.6	3.0	100.0
SP#08	30.0	20.0	33.5	2.1	80.0
SP#09	28.2	22.0	31.5	1.6	55.6
Max	43.2	22.0	37.6	3.0	100.0
Avg.	32.6	18.1	33.8	2.2	77.8
Min	28.2	10.0	30.9	1.5	52.2
S.D.	5.0	4.1	2.6	0.6	18.6

Table 7. Predicted thermal comfort with heating and ERV

Sensor	Tdb (°C)	RH (%)	MRT(°C)	PMV	PPD
SP#01	37.0	10.0	36.0	3.0	99.5
SP#02	29.4	14.0	32.4	1.8	66.1
SP#03	28.3	15.0	30.6	1.4	45.4
SP#04	33.6	11.0	35.7	2.7	96.9
SP#05	29.9	13.0	32.0	1.8	66.2
SP#06	27.7	16.0	30.2	1.3	39.1
SP#07	42.6	7.0	36.9	3.0	100.0
SP#08	29.8	13.0	33.2	1.9	73.8
SP#09	28.4	14.0	31.4	1.5	51.6
Max	42.6	16.0	36.9	3.0	100.0
Avg.	31.9	12.6	33.1	2.0	71.0
Min	27.7	7.0	30.2	1.3	39.1
S.D.	4.7	2.6	2.3	0.6	22.2

작고 ERV의 전열회수로 인해 실내온도의 저하는 크게 나타나지 않은 것으로 보이며, 일부 온도 저하에 따른 PMV, PPD의 개선이 부분적으로 확인되었다(Table 7.).

4.3. 외주부 난방기 국부적 Unmet Load Hour

ASHRAE Standard 90.1-2022[10]의 성능기반 총족방법인 Energy Cost Budget method와 Appendix G method의 평가방법에서는 건물을 디자인할 때, 건물에서 발생하는 unmet load hour를 연간 300시간 이하를 유지하도록 요구하고 있다. ASHRAE는 unmet load hour는 하나 이상의 존이 온도조절을 위한 throttling range(통상 1~2°C)의 ±1/2(예: throttling range가 1°C인 경우 0.5°C)을 초과하는 시간을 의미하며, 건물에서 하나 이상의 존에서 냉방 혹은 난방이 적정온도 범위를 충족하지 못할 경우 unmet load hour에 해당한다. 따라서 난방기 강의실 내 국부적 온열환경이 설정온도를 충족하는지 평가하기 위해 센서 포인트를 기준으로 별도의 쓰루를 범위없이 겨울철 난방온도인 22°C 및 여름철 에너지절감 냉방온도인 28°C, 그 외 30°C로 산출하였다. 이를 통해 강의실에서 겨울철 하루동안 국부적으로 발생 가능한 unmet load hour를 비교해보았다(Table 8.).

분석결과 겨울철 실내 난방온도인 22°C를 기준으로 Case 1:자연 조건(no heating and ventilation)에서 창가측 위치(SP#01, 04, 07)에서는 하루 약 3시간 내외의 unmet load hour가 발생하였다. 특히 방위에 의해 직사광을 가장 많이 받은 SP#07의 경우 작업면에서 하루 1시간 30분동안 30°C 이상을 기록하였다. Case 2: heating only에서는 모든 센서 포인트에서 낮시간 대부분에 해당하는 8시간 이상이 22°C를 초과하였으며, 대상공간의 중심부근에 해당하는 SP#02, 05, 08에서도 1.7시간 이상 28°C 이상을 초과하여 unmet load hour가 크게 증가함을 확인하였다. 마지막으로 Case 3: heating and ERV 조건에서는 창가측 자리를 중심으로 중심부까지 unmet load hour가 더 증가하였는데 이것은 Case 2보다 높아진 외기온 등이 영향을 미친 것으로 보인다.

겨울철 외주부 강의실을 대상으로 맑은 날 난방조건에 따른 국부적 온도와 이에 따른 unmet load hour를 분석한 결과 12m x 6m의 크지 않은 강의실 공간임에도 불구하고 복사열과 난방 가동조건에

Table 8. Unmet hours during monitored heating season (unit: hour)

	SP# 01	SP# 02	SP# 03	SP# 04	SP# 05	SP# 06	SP# 07	SP# 08	SP# 09
Case 1: Natural Condition									
≥22°C	3.0	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0
≥28°C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0
≥30°C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0
Case 2: Heating Only Condition									
≥22°C	9.0	9.2	8.5	9.4	9.4	8.8	9.7	9.3	9.1
≥28°C	2.9	1.7	0.7	3.6	2.2	0.5	4.9	1.7	0.4
≥30°C	2.6	0.0	0.0	2.2	0.8	0.0	2.7	0.2	0.0
Case 3: Heating and ERV Operations									
≥22°C	9.5	9.7	9.4	9.6	9.7	9.3	9.8	9.7	9.9
≥28°C	5.1	2.8	0.3	3.6	2.8	0.0	5.6	2.7	0.3
≥30°C	3.1	0.0	0.0	3.1	0.1	0.0	3.3	0.0	0.0

따른 국부적 온도 차는 매우 크게 나타났으며, 난방가동시 실내에서 unmet load hour의 큰 폭의 증가와 더불어 위치에 따라 냉난방 수요가 동시에 발생할 수 있음을 확인하였다. 특히, 겨울철 날씨가 온화하거나 향후 기후변화로 인해 따뜻한 날이 증가할 경우 이러한 겨울철 실내부하의 불균형한 분포는 심화될 수 있을 것으로 예상되었다.

5. 외주부 국부적 온열환경 개선방안

그동안 통상적으로 냉방부하는 여름철에 대해 계획되어 왔으며, 겨울철 태양복사열 획득에 의해 외주부에서 발생하는 국부적 냉방부하와 온열환경의 불균형, 재실자의 불쾌적, unmet load hour 발생 등은 많이 다루어지지 않은 면이 있다. 본 연구에서 겨울철 외주부 복사열에 대한 국부적 온도변화를 관찰하였으며, 이를 통해 발견한 온열환경의 특징 및 난방기 시스템 운영에 대한 고려사항(Table 9.~Table 10.)은 아래와 같이 정리될 수 있다.

- 남동측면에 위치한 강의공간은 오전 중에는 상대적으로 설정한 set point temperature(22°C)와 인접한 25°C 내외로 유지되었으나 직달 일사가 도달하는 오후 시간에는 복사열에 직접적인 영향으로 창측과 실내측의 온도가 차별화되는 양상을 보였다. 예를 들면, 외피면 인근은 최대 30°C 이상의 고온이 발견되었으며 난방 운전환경에 따라 최대 90~198분까지 발생하였다. 동시간 안측 공간과 비교할 때 10°C 이상의 온도차가 발생하는 것으로 나타났다.
- 겨울철 낮시간 불균등한 온열환경은 공간의 방위에 따라 외피면을 중심으로 냉방부하를 유발할 수 있으며, 이는 동일 공간 내 냉방, 난방부하를 동시에 요구할 수 있다. 따라서 단일 공조기기를 통한 난방기 냉난방 제어시 공간의 부하수요 및 종류에 따라 모드를 전환(swing)할 수 있는 유연한 공조시스템 운영이 필요하다. 일례로 최근 사용되는 all-in-one 방식의 EHP는 남향과 동향 공간을 연결하여 사용할 경우 겨울철 낮에 국부적 냉방부하 발생할 때 실외기가 동시에 냉난방 모드를 대응할 수 없어 남향 혹은 동향의 공간에서 unmet load hour가 발생할 수 있다.
- 낮시간에 이용되는 공간의 경우 창가 인접공간(특히 1~3m 내외)에서의 직접적인 복사열 획득으로 인한 냉방부하가 발생할 수 있으며, 이는 겨울철 난방을 가동할 때 더 증가할 우려가 있다. 따라서 겨울철 낮동안 사용되는 건물에서 방위에 따른 창가측 국부적 열환경 제어 방안(외부 차양, 반사 블라인드, 국부냉방 등)에 대해 계획될 필요가 있다.
- 겨울철 외주부 공간의 국부적인 불쾌적을 해소하기 위해 패시브 및 액티브 방법, 공조시스템 제어개선 등이 검토될 수 있다. 패시브 방법은 시간대별 복사열 유입이나 반사 제어가 가능한 외부차양이나 집광채광루버 등이 고려될 수 있으며, 액티브 방법은 창측 복사 냉난방 시스템이나 개별 냉난방 장치(Table 9.) 등이 검토될 수 있다. 현재 다수의 냉난방시스템이 실내온도 센서를 안측의 온도제어장치(thermostat)에 설치하여 창가측 온도가 적절히 반영되지 않는 측면이 있으므로 센서 위치를 적정 실내온도의 대푯값을 도출하기 위해 최적화할 필요가 있다.

Table 9. Required performance for personal comfort systems

Type		Requirement	Ref.
Heating	Footwarmer	Capable of adding 6 W to the body	[11]
	Heated chair	Capable of adding 14 W to the body	
Cooling	Desk fan for head/face/upper body	Capable of providing air movement at the occupant's head / face / upper body within range from 0.36 to 0.8 m/s (70.9 to 157.5 fpm)	
	Cooled chair	Capable of extracting 20 W from the target body	

Table 10. Local thermal control systems for perimeter zones

Type		Control measures			Ex ref.
		Central or local	Sensible heat	Heat reflection	
Passive	Operable external shading (w/ solar PV)	Local	X	O	[12]
	Concentrating light louver	Local	X	O	[13]
Active	Radiant heating/cooling	Central/Local	O	X	[14]
	Personal heating/cooling devices	Local	O	X	[6]
Control	HVAC system sensor point optimization	Central/Local	O	X	[15]

6. 결론

건물에서 통상적으로 겨울철에는 난방부하가 건물의 주요 부하 요인으로 다루어지지만 난방기 외주부에서 발생하는 국부적인 온열환경 불균형과 냉방부하는 간과할 수 없는 요소이다. 따라서 본 연구는 겨울철 건물의 외주부에서 발생하는 열적 불균형과 재실자의 불쾌적을 해소하기 위해 겨울철 부산에 위치한 대학교 강의실을 대상으로 단기적인 온열환경에 대한 분석을 수행하였다.

연구결과 겨울철 난방기 동일공간 내에서 직사광이 비치는 시간대에 외주부에서 외기 인접면과 안측 공간과의 온도차는 유의미하게 크게 발생할 수 있는 것으로 확인되었으며, 난방시스템 가동시 실 전체 평균온도를 상승시켜 재실자의 열쾌적을 악화시킬 수 있는 것으로 확인되었다. 따라서 외주부 환경에서 태양복사열이 직접적으로 영향을 미치는 영향에 대한 국부적인 온열환경제어는 재실자의 열쾌적을 위해 중요하다고 판단되며, 이는 창면적률(Window-to-Wall Ratio, WWR)이 높은 커튼월 건축물에서 더욱 크게 작용할 수 있다.

본 연구의 결과는 낮동안 주로 사용되는 건축물의 외주부 공간에서 발생 가능한 온열환경 변화에 대해 보다 이해를 높이고 능동적으로 계획할 수 있도록 기여할 수 있으며, 향후 건물 외주부에서 국부적 재실자 온열환경과 난방기 냉방부하 발생에 대해 패시브, 액티브, 제어적 요소를 중심으로 개선방안 개발시 기초자료로써 검토될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

이 논문은 2022학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (202212390001).

References

- [1] R. Yang et al., Study on the thermal comfort index of solar radiation conditions in winter, *Building and Environment*, 167, 2020.01, 106456.
- [2] C. Marino, A. Nucara, M. Pietrafesa, Thermal comfort in indoor environment: Effect of the solar radiation on the radiant temperature asymmetry, *Solar Energy*, 144, 2017.03, pp.295-309.
- [3] D. Wang et al., Experimental study on coupling effect of indoor air temperature and radiant temperature on human thermal comfort in non-uniform thermal environment, *Building and Environment*, 65, 2019.11, 106387.
- [4] Y. A et al., Occupant-centered evaluation on indoor environments and energy savings of radiant cooling systems with high-intensity solar radiation, *Solar Energy*, 242, 2022.08, pp.30-44.
- [5] Y. Li et al., Evaluation of thermostat location for multizone commercial building performance, *Journal of Building Engineering*, 70, 2023.07, 106212.
- [6] M. Luo et al., Thermal comfort evaluated for combinations of energy-efficient personal heating and cooling devices, *Building and Environment*, 143, 2018.10, pp.206-216.
- [7] Golden Software, Surfer, <https://www.goldensoftware.com>, 2023.12.01.
- [8] Center for the Built Environment, U.C. Berkeley, CBE thermal comfort tool, <https://comfort.cbe.berkeley.edu>, 2023.12.01.
- [9] ASHRAE, ANSI, ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal environmental conditions for human occupancy, 2020.
- [10] ASHRAE, ANSI, ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2022: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings, 2022.
- [11] ASHRAE, ANSI, ANSI/ASHRAE Standard 55-2023: Thermal environmental conditions for human occupancy, 2023.
- [12] A. Kontadakis et al., An active sunlight redirection system for daylight enhancement beyond the perimeter zone, *Building and Environment*, 113, 2017.02, pp.267-279.
- [13] S. Liang et al., Design and performance validation on a solar louver with concentrating-photovoltaic-thermal modules, *Renewable Energy*, 191, 2022.05, pp.71-83.
- [14] Q. Dong, S. Li, C. Han, Numerical and experimental study of the effect of solar radiation on thermal comfort in a radiant heating system, *Journal of Building Engineering*, 32, 2020.11, 101497.
- [15] T. Wei et al., An optimization platform based on coupled indoor environment and HVAC simulation and its application in optimal thermostat placement, *Energy and Buildings*, 199, 2019.09, pp.342-351.