

열화상 기술 적용 연구사례

열화상 적용 실내 온열환경의 평가 방법 개발 소개

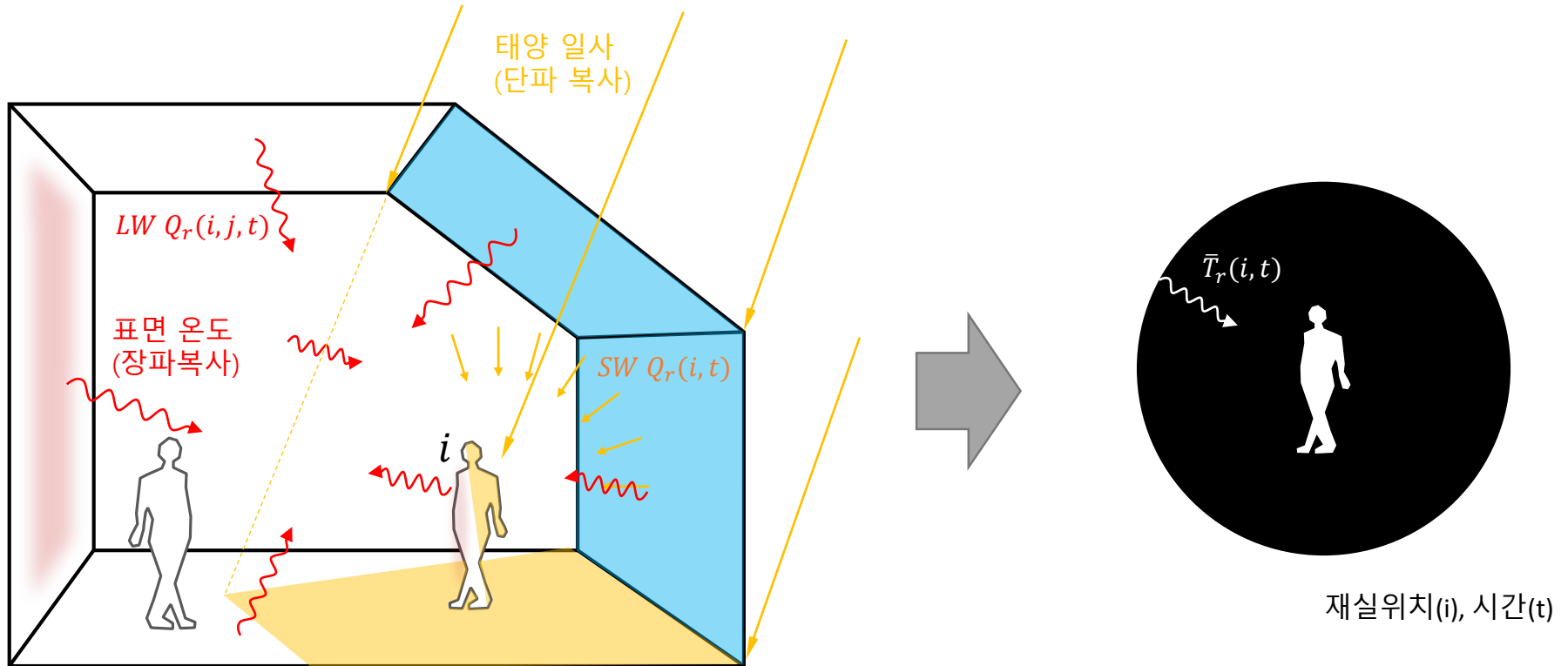
2023. 10. 20.

계명대학교
이동석

평균복사온도 (MRT, Mean Radiant Temperature)

■ 평균복사온도란?

- 인체와 인체 주변의 복잡한 장파장(표면온도) 및 단파장(태양일사) 복사에 따른 다양한 복사열 교환의 영향을 단순한 흑체 내부의 균일한 복사온도 값으로 변수(parameter)화 한 것 [단위: °C]


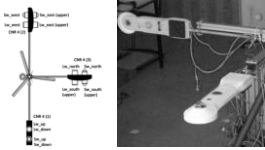
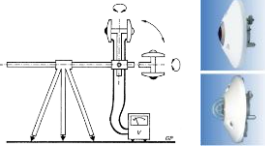
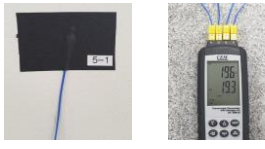



실제 환경 : 복잡한 복사열 교환

재실위치(i), 표면(j), 시간(t)

평균복사온도(MRT, \bar{T}_r)

평균복사온도 측정방법

Measuring methods	Measuring devices	Estimating locations	Longwave radiation	Shortwave radiation	Note	
$T_r = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{h_{cg}}{\epsilon_g \sigma} (T_g - T_a)}$		Globe thermometer	Single (installed)	O	O	Most used due to: - standard diameter - easy to calculate - Portable
$S_{Str} = \alpha_k \sum_{i=1}^6 K_i F_i + \epsilon_p \sum_{i=1}^6 L_i F_i$ $t_{mrt} = [S_{Str} / (\epsilon_p \cdot \sigma)]^{0.25} - 273.2$		Three-dimensional short- and long-wave radiation sensors	Single (installed)	O	O	Direct measure of longwave and shortwave radiation
$S_{Str} = \sum_{i=1}^6 W_i \cdot (a_k \cdot K_i + a_l \cdot L_i)$ $t_{mrt} = [S_{Str} / (\epsilon_p \cdot \sigma)]^{0.25} - 273.2$		Pyrgeometer and pyranometer	Single (installed)	O	O	Similar with (b)
$T_r^4 = T_1^4 \cdot F_{p-1} + T_2^4 \cdot F_{p-2} + \dots + T_N^4 \cdot F_{p-N}$		Contact thermometer	Multiple (angle factors)	O	X	Need modeling Less accurate due to low measuring range
$T_{li} = \frac{1}{\Phi_{obj}} \left[\frac{1}{\epsilon \tau} \Phi_{tot} - \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} \Phi_{ref}(T_{ref,t}) - \frac{(1-\tau)}{\epsilon \tau} \Phi_{atm}(T_{atm,t}) \right]$ $T_r^4 = T_1^4 \cdot F_{p-1} + T_2^4 \cdot F_{p-2} + \dots + T_N^4 \cdot F_{p-N}$		Infrared thermal imaging camera	Multiple (angle factors)	O	X	Need modeling Better accuracy than (d) method Correction required Difficult to apply

건물 센싱 데이터

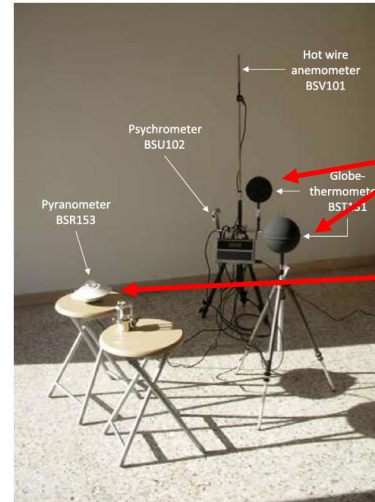
- 냉난방 설비의 제어 변수 → **공기온도만을 주로 사용**

온도센서 적용 예



- 비교적 균일 온도 분포
- 작은 공간에 1대 설치
- 벽면 실내 온도조절기와 함께 사용
- 비용 저렴, 측정 간단

MRT 측정 (예) : 사례 X



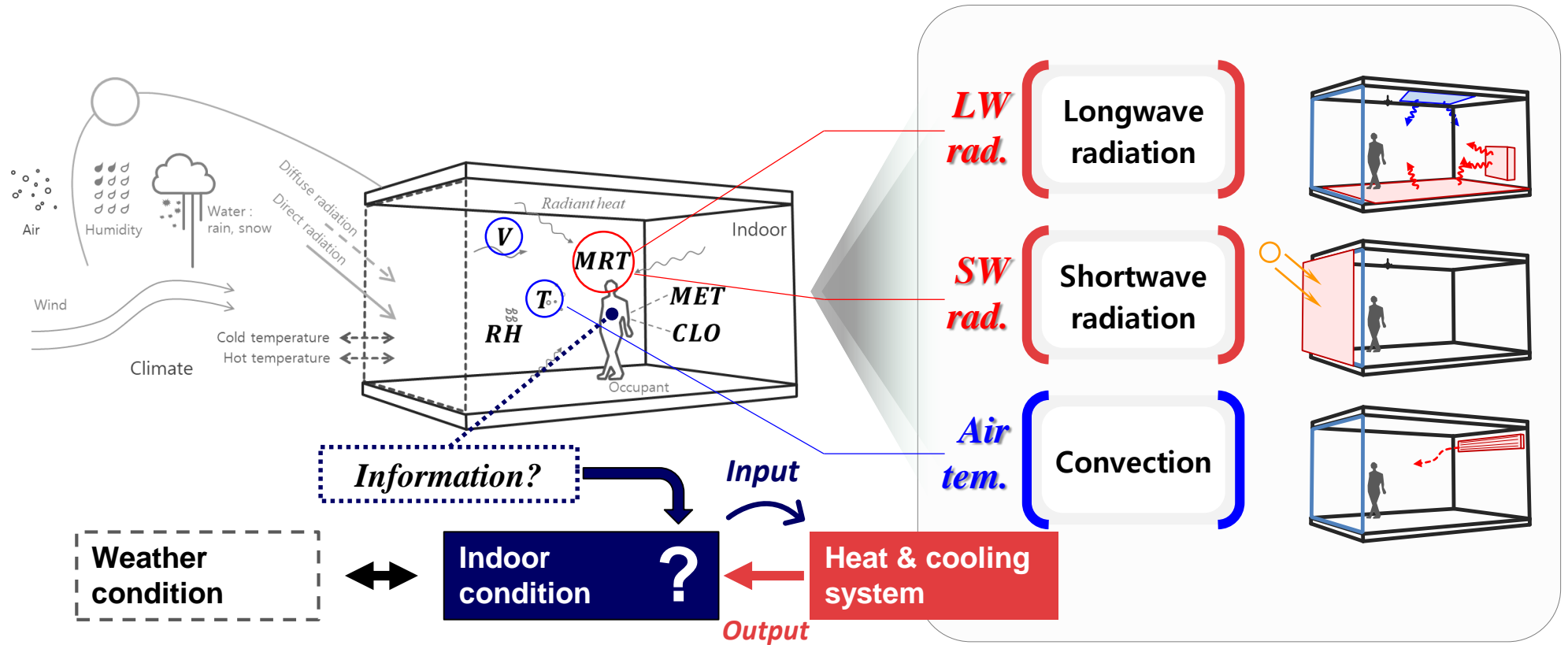
흑구온도계

일사량계

C. Marino et al.
Journal of Building Engineering
9 (2017) 42–51

- 위치별 온도분포 상이 (최대 30°C)
- 재실 위치별 측정 필요 (여러대 설치)
- 설치 위치가 중요
- 고비용, 측정 어려움
- 적용 사례 없음

Key issue about indoor sensing



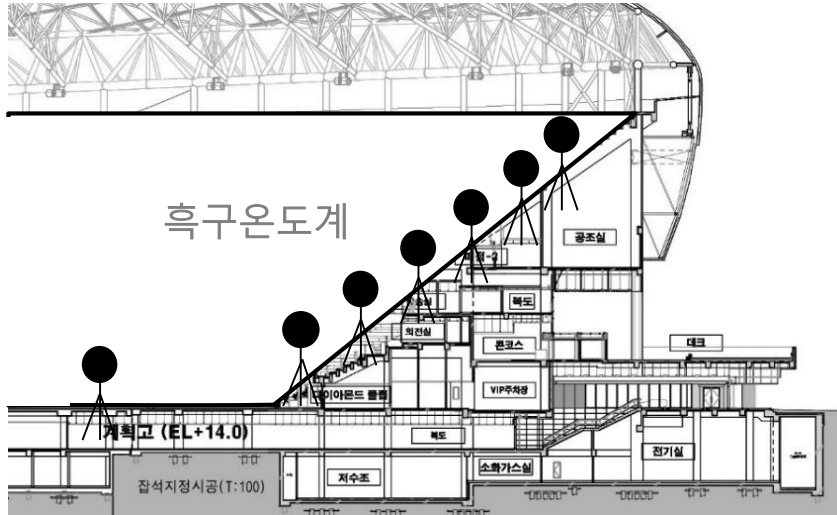
Thermal condition = T_a ?

$$T_a + MRT \rightarrow OT, PMV, \dots$$

MRT monitoring system 개발 배경 : IR 스캐닝의 적용

As-Is vs. To-Be

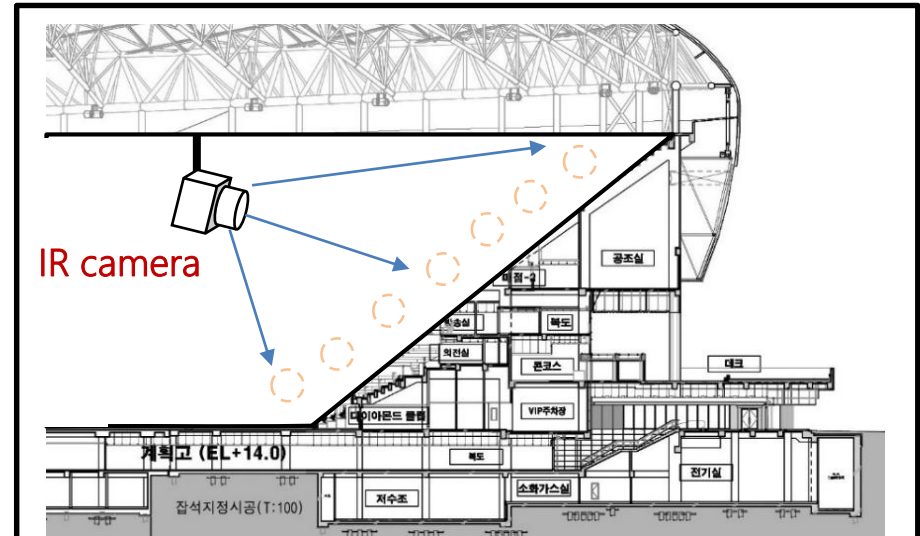
직접 측정 방법



(기존 현황)

- 재실자위치 또는 존(zone)마다 흑구온도계 설치 ○
→ 설치대수 증가 및 비용 증가
→ 재실자 동선 방해
- 측정 반응시간 ○
→ 실시간 측정 어려움

원격 측정 및 모델기반 예측



(열화상 적용 기술)

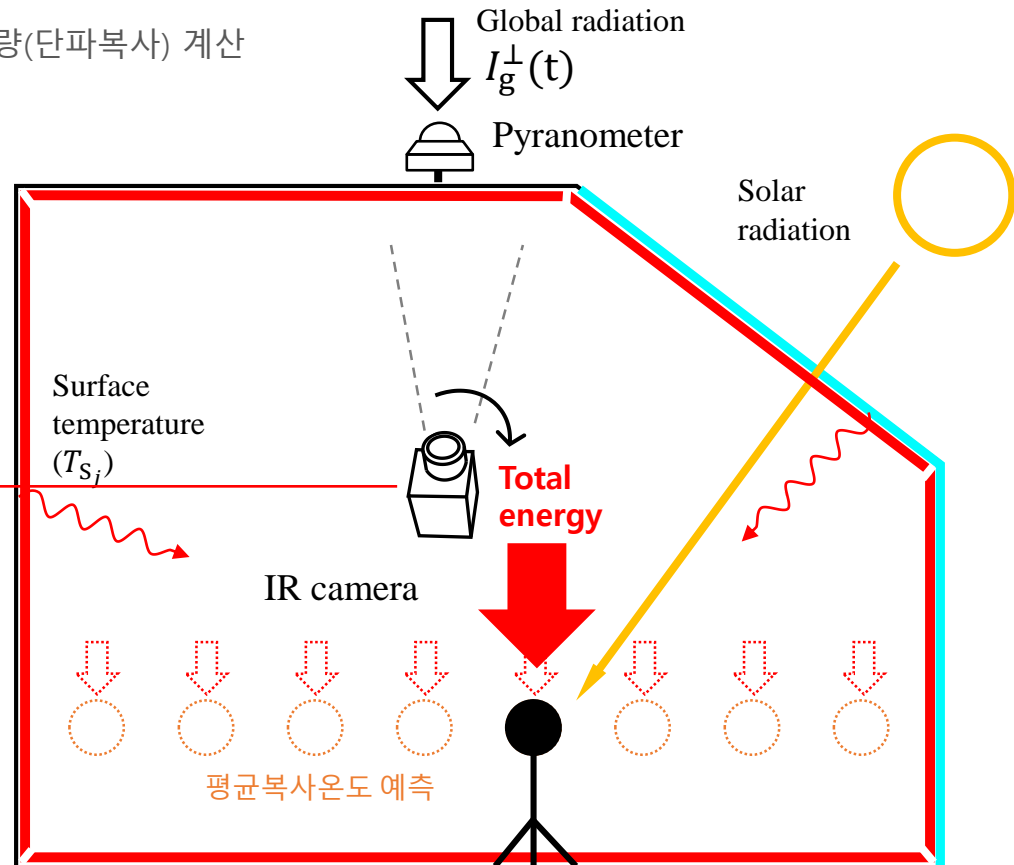
- 재실자위치 또는 존(zone)마다 기기 설치 X
→ 1개소 설치 및 비용 감소
→ 재실자 동선 방해 없음
- 측정 반응시간 X
→ 실시간 측정 용이

개발 배경 : IR 스캐닝의 적용

- 장파 및 단파 복사온도 센싱
 - 장파장 복사 : 열화상 카메라 (IR camera)
 - 실내 표면온도 스캐닝 및 angle factor를 이용한 장파복사 계산
 - 단파장 복사 : 일사량계 (Pyranometer)
 - 직산분리 모델 및 빌딩 모델 기반 입사 일사량(단파복사) 계산

$$MRT(i, t) = \left(\sum_{j=1}^n F_{i-j}(i, j) \bar{T}_S(j, t)^4 \right)^{0.25} - 273.15$$

각 실내 표면과 재실 위치 사이
형태계수 (건물 모델 정보)

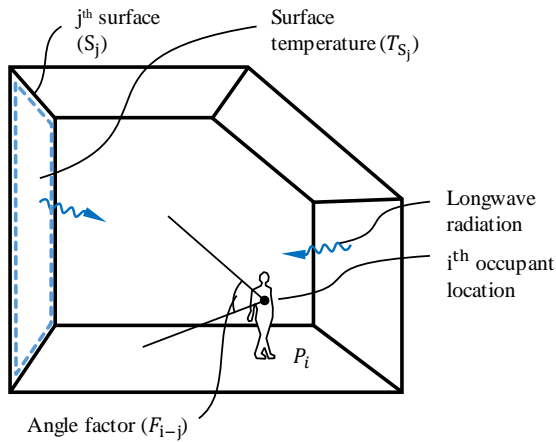


Shortwave and longwave MRT sensing

- 건물 모델 기반 장파장·단파장 복사온도 예측



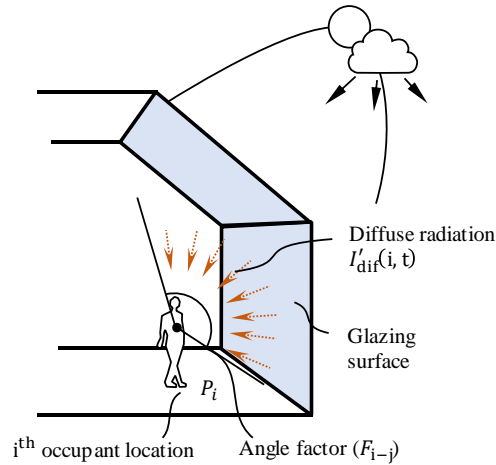
Longwave radiation



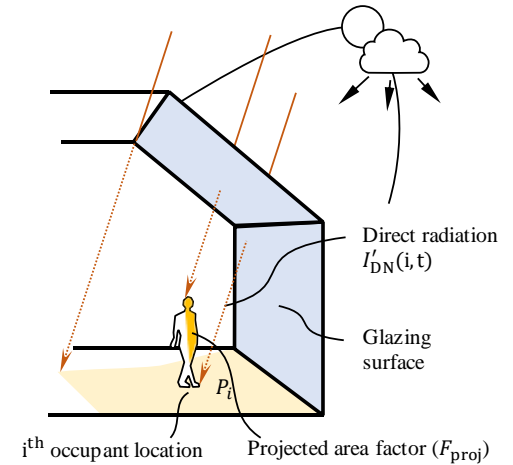
Surface temperature (T_{S_j})



Shortwave radiation



Diffuse irradiance $I'_{dif}(i, t)$

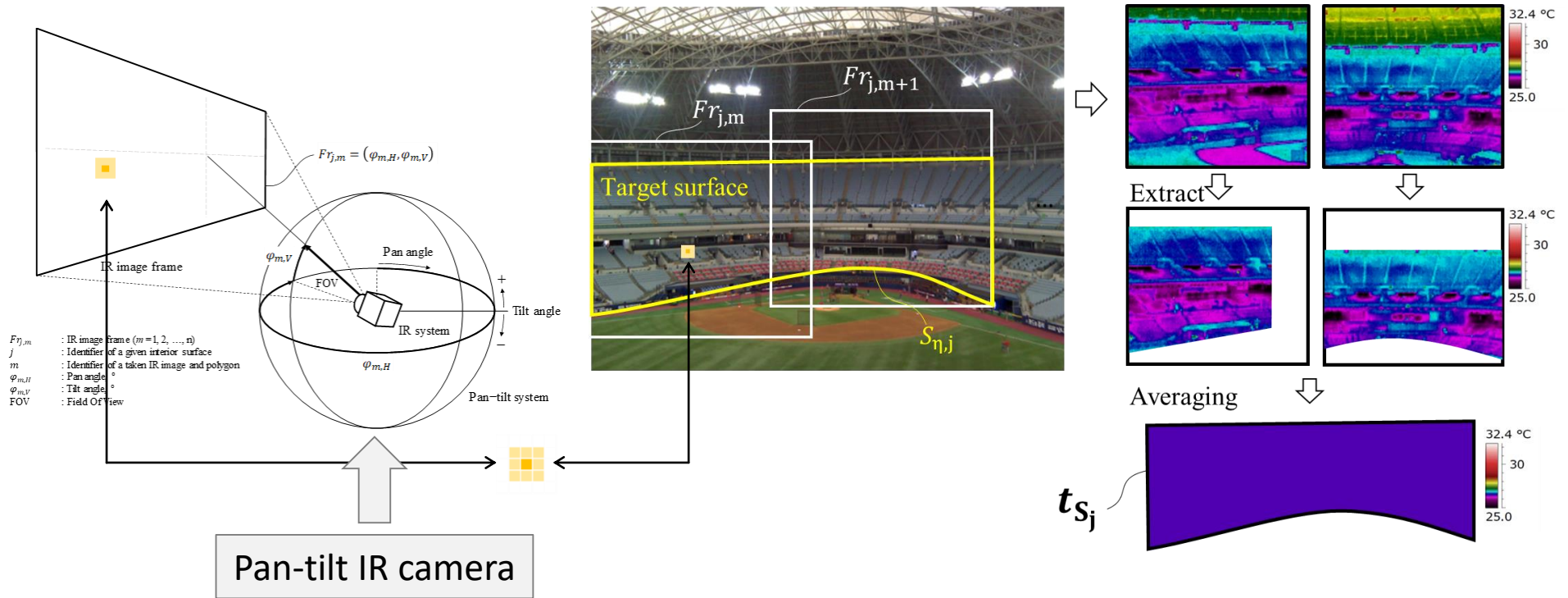
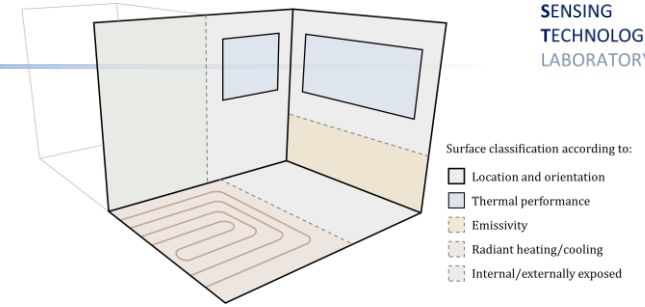


Direct irradiance $I'_{DN}(i, t)$

$$\bar{T}_r^{l,k}(i, t) = \left(\sum_j T_{S_j}^4(j, t) F_{i-j}(i, j) + \frac{\alpha^k}{\sigma \epsilon_P} \sum_{j'} I'_{dif}(j', t) F_{i-j'}(i, j') + \frac{\alpha^k}{\sigma \epsilon_P} f_{proj} I'_{DN}(i, t) \right)^{0.25}$$

KEY IDEA 1 : 표면의 평균온도 반복 측정

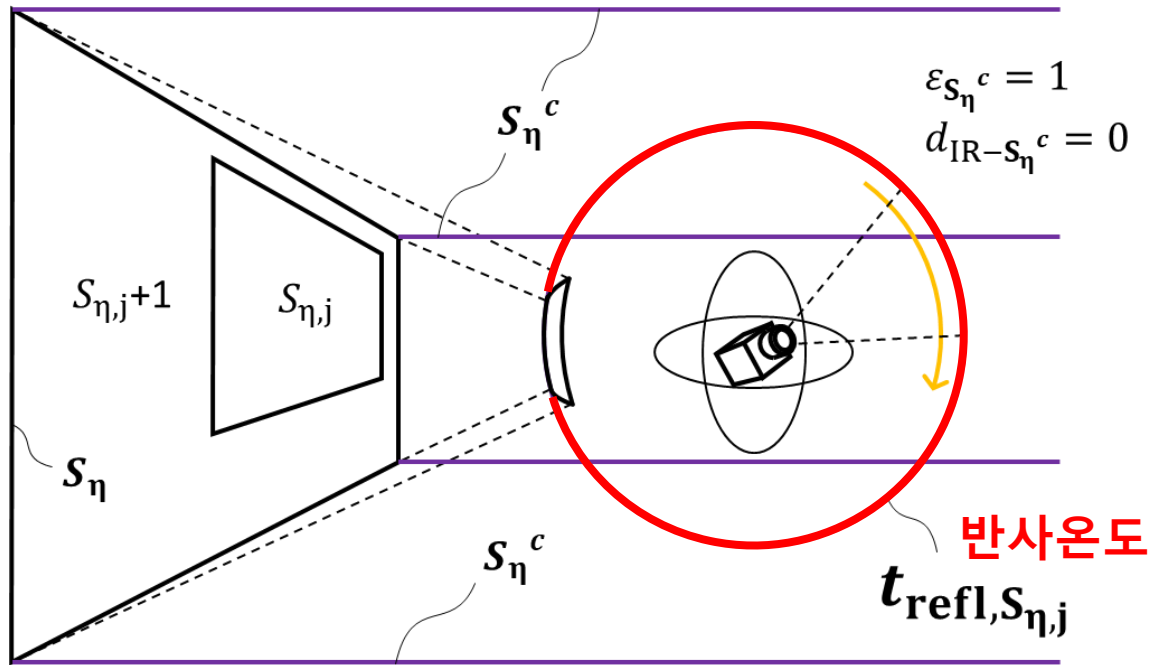
- 실내 모든 표면(벽, 천정, 창 등)의 지정
- 실내표면별 카메라 방향벡터 및 ROI (target surface) 지정



Average surface temperature $W_{S_{\eta,j}} = \overline{(W_{tot,S_{\eta,j}})} = \frac{1}{\sum_{m < j} N(C_{\eta,j,m,\xi}^{px})} \sum_{\xi \in \epsilon m} \sum_{m < j} W_{tot,C_{\eta,j,m,\xi}^{px}}$

KEY IDEA 2 : 표면의 반사온도 반복 측정

- 전체 실내 표면온도 측정
- 측정 후 반사온도 재 계산



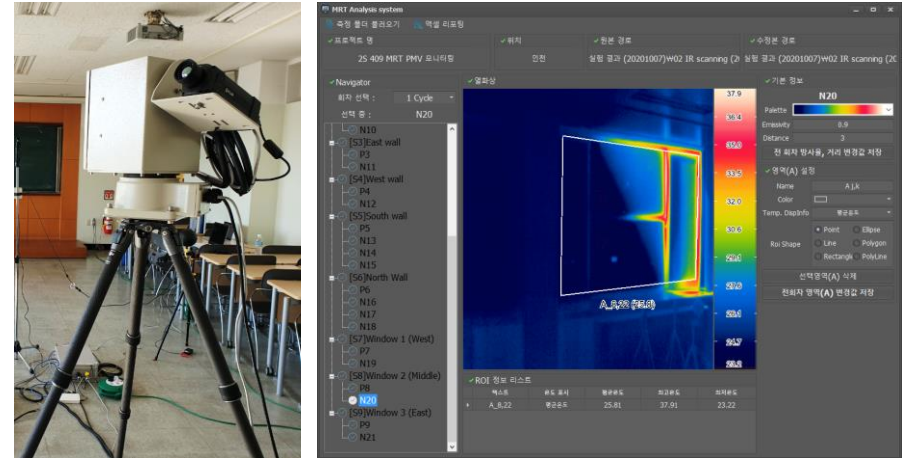
$$t_{refl,S_{\eta}} = t_{refl,S_{\eta,j}} = t_{refl,S_{\eta,j+1}}$$

Average reflected temperature $W_{refl,S_{\eta,j}} = \overline{(W_{tot,S_{\eta}^c})} = \frac{1}{\sum_{m \subset j, m \notin \eta} N_{(c_{\eta,j,m}^{px})}} \sum_{\xi \in m} \sum_{m \notin \eta} W_{tot,c_{\eta,j,m,\xi}^{px}}$

"MRT MONITORING SYSTEM" 개발

■ MRT 모니터링 시스템 제작

- 단일 열화상 카메라를 이용하여 실내 다중 위치에서의 평균복사온도(MRT) 및 예상평균온열감(PMV)을 예측하는 장치
 - 온도, 습도, 풍속을 고려하여 종합 온열환경 지표인 예상평균온열감(PMV, Predicted Mean Vote) 예측 가능
 - 자유로운 센서 설치 위치, 설치 최소화(단일센서), 다중 위치 예측 가능



시작품 하드웨어 및 소프트웨어

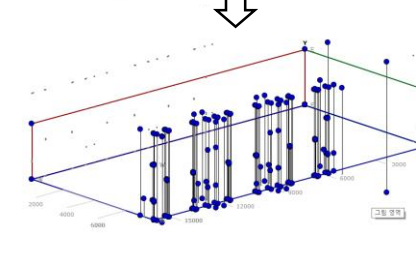
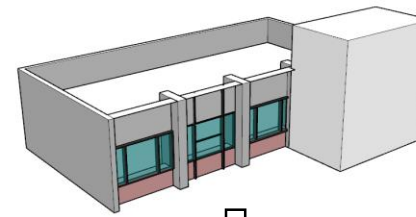
Pan-tilt IR scanning system

→ 장파복사 MRT

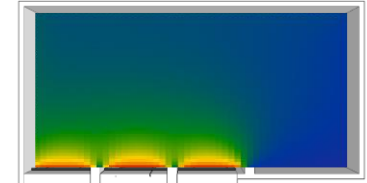


Pan-tilt IR scanning system + Plus

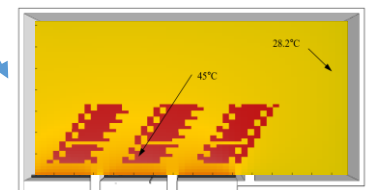
→ 장파/단파복사 MRT



대상건물 모델링



장파복사 MRT



장파/단파복사 MRT

열화상 모듈 및 성능 (시작품)



● IR camera

- 측정범위 : $-20^{\circ}\text{C} \sim +350^{\circ}\text{C}$
- NETD (Noise Equivalent Temperature Difference)
: $< 0.05^{\circ}\text{C}$ at $+30^{\circ}\text{C}$
- FOV : $45^{\circ} \times 33.8^{\circ}$
- 화소 : 320×240 Pixel
- 정확도 : $\pm 2\%$ 또는 ± 2 이내
- 보정 : 방사율, 피사체 거리, 공기온도, 상대습도, 반사온도

● Pan-Tilt BLDC 모터

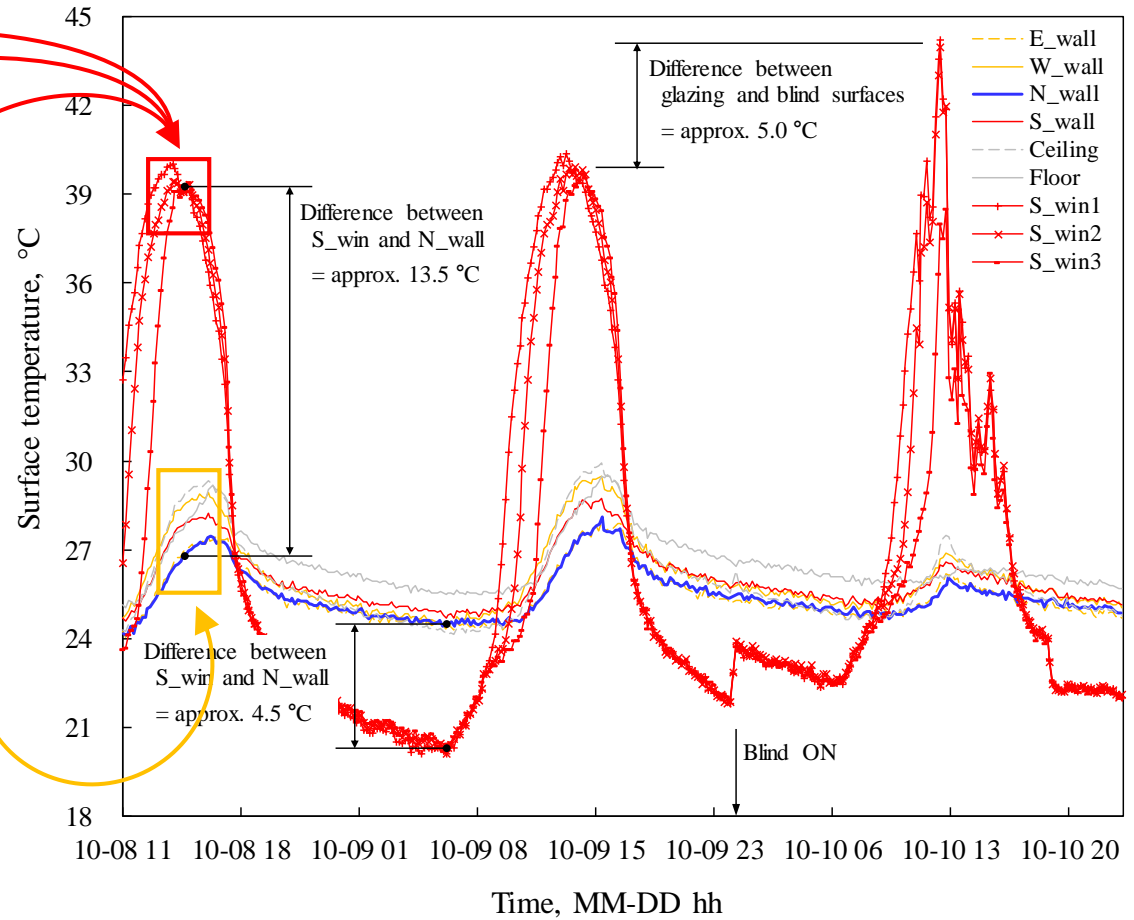
- 작동범위 : Pan: $0 \sim 355$, Tilt: $-85 \sim +85$
- 작동간격 : Pan $0.1^{\circ} \sim 25^{\circ}/\text{sec}$, Tilt $0.1^{\circ} \sim 12^{\circ}/\text{sec}$
- Pan 회전 속도 : 분당 3~4 프레임
- 정확도 : $\pm 1^{\circ}$
- 적재중량 : 15kg

● 온습도 센서

- 측정범위 : T: $-19.9 \sim +60$, RH: $0 \sim 99.9\%$
- 정확도 : T: ± 1 (상온구간), RH: $\pm 2\%$

Application

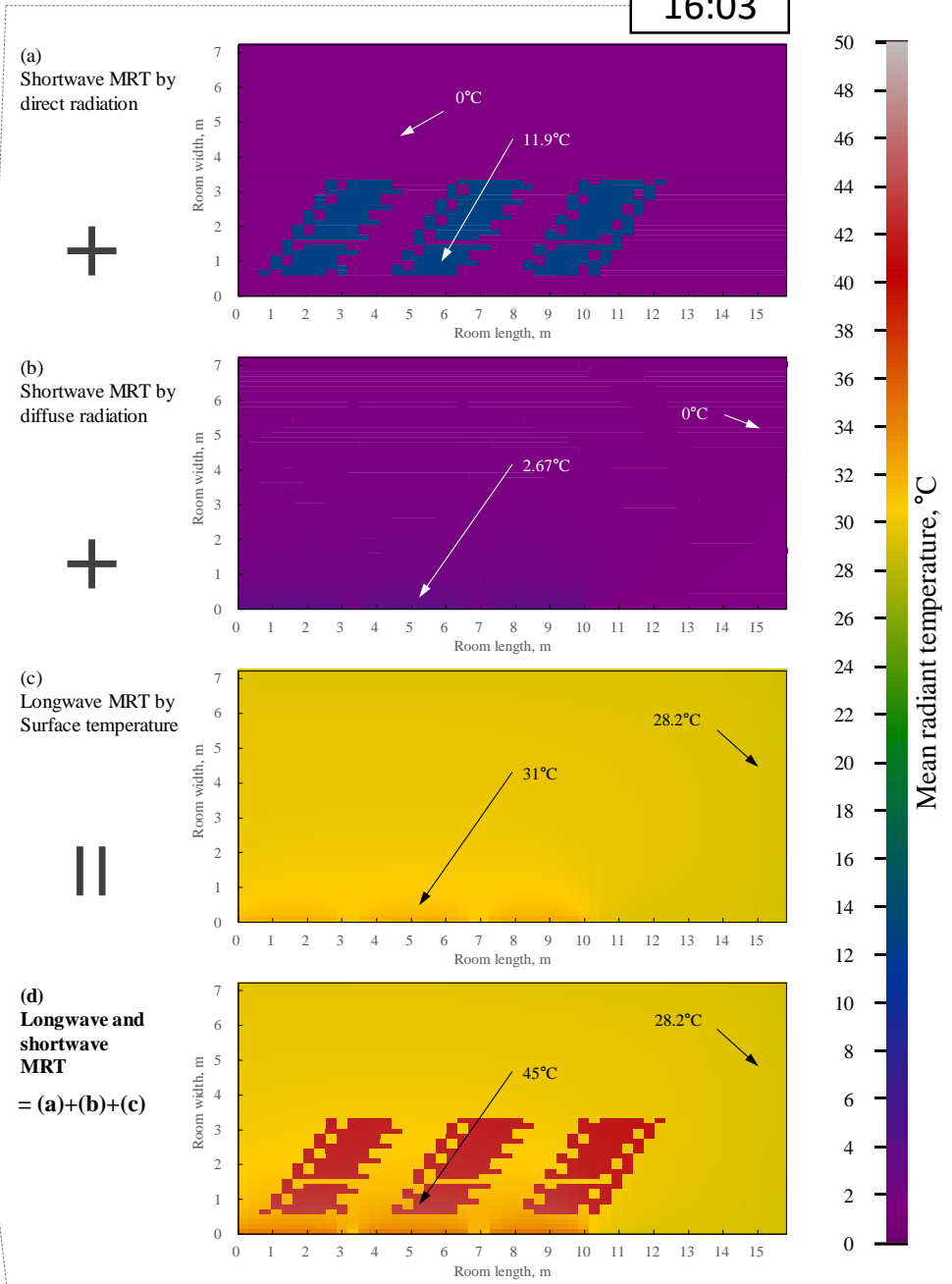
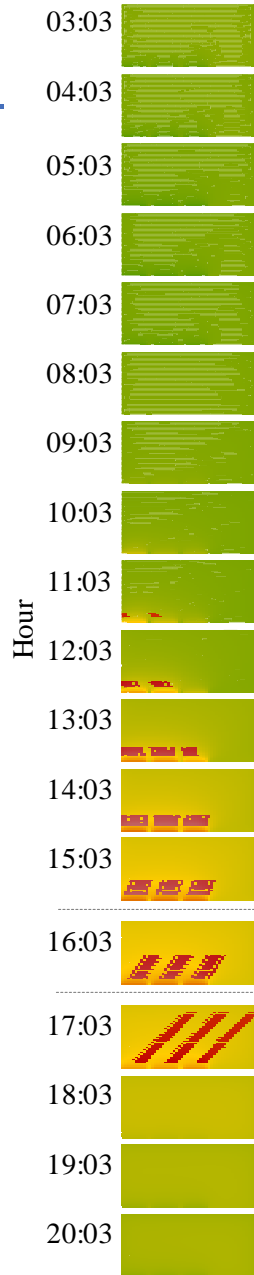
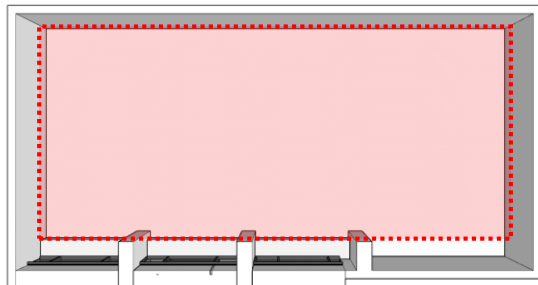
- 실내 표면온도의 모니터링 DATA



Application

- 실내 평균복사온도 분포

Monitoring area



건물분야 적용 분야

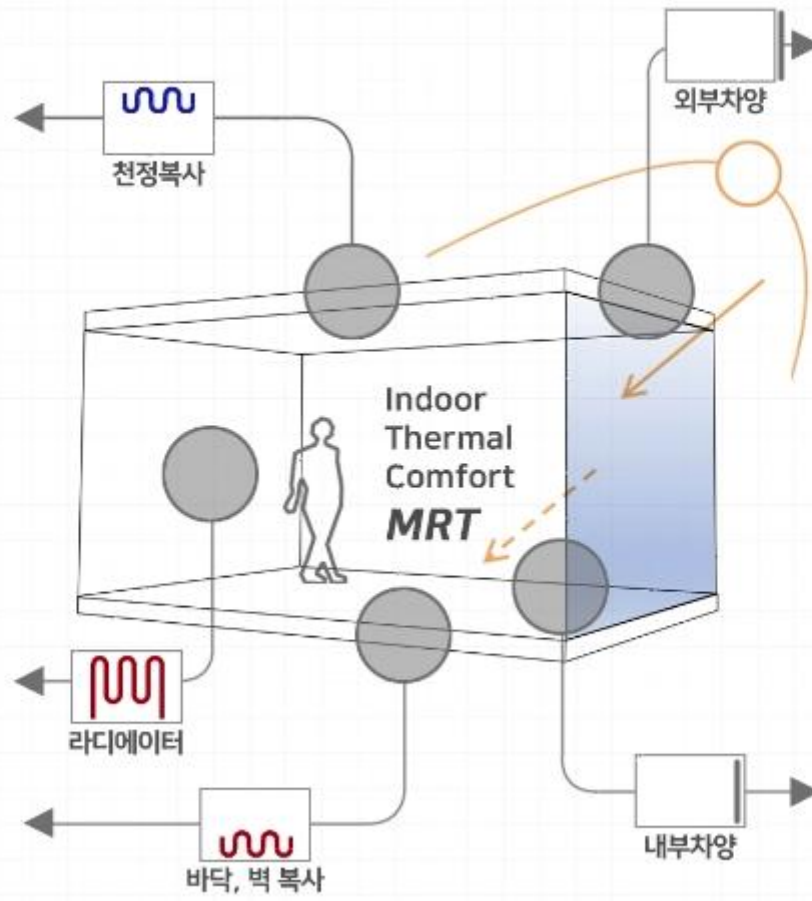
- 실시간 온열환경 맵핑 → 건물 냉난방 제어에 활용

장파복사

천정냉각



바닥, 벽 난방



단파복사

외부차양



내부차양



감사합니다.