

17CTAP-
C114863-
02

보안과제(), 일반과제(○)/ 공개(○),비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

R&D / 17CTAP-C114863-02

바닥복사난방시스템의 에너지절약
환경센서기반 재실인식 기술개발
제어를 위한
최종보고서

2019

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

바닥복사난방 시스템의 에너지 절약 제어를 위한 환경 센서 기반 재실 인식 기술 개발 최종 보고서

2019.02.28.

주관연구기관 / 부경대학교

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

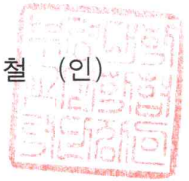
제 출 문

국토교통부 장관 귀하

‘바닥복사난방 시스템의 에너지 절약 제어를 위한 환경 센서기반 재실 인식 기술 개발’(연구
개발 기간 : 2016.10.24. ~ 2018.12.23) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2019. 02 . 28 .

주관연구기관명 : 부경대학교 산학협력단 (대표자) 서 용 철 (인)



주관연구기관책임자: 이 규 남

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C114 863-02	해당 단계 연구 기간	2017.06.24.~ 2018.12.23	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	바닥복사난방 시스템의 에너지 절약 제어를 위한 환경 센서기반 재실 인식 기술 개발			
연구책임자	이규남	해당단계 참여연구원 수	총: 3 명 내부: 3 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:5,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:5,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 3 명 내부: 3 명 외부: 명	총 연구비	정부:7,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:7,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	부경대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제				

9대 성과 등록 · 기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록 · 기 탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설 · 장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약 - CO ₂ 농도와 재실센서(PIR sensor)를 병용한 재실 추정 알고리즘 도출 - 실제 주거건물 적용 시 예측정확도 78%~98% 확보 - 재실 스케줄에 따른 난방 정지 · 기동, 셋백제어, 온도조절 전략 도출 - 기존제어방식(거주자에 의한 수동 on/off방식) 대비 최대 20.3%의 난방 에너지 절감 및 ISO 7730 쾌적 조건 (PMV -0.5~+0.5)만족 - 알고리즘 관련 특허출원 1건, 국내 논문 1건 출판 - 주거건물 실내환경 분석 관련 국외 논문 1건 출판 - 에너지 성능평가 관련 국내 논문 2건, 국외 논문 2건 출판	보고서 면수 58
---	--------------

요약문

연구의 목적 및 내용	- 주거건물에서 거주자 재실여부와 환경변수간 상관성을 도출하고, 이를 근거로 추정된 재실 시간을 기반으로 바닥복사난방시스템의 운전 및 정지 시점을 제어하는 기술을 개발하기 위한 기초연구 - 주거 건물에 실용적으로 적용 가능한 환경 센서를 이용한 재실 인식 알고리즘 개발 - 재실 인식 알고리즘을 활용하여 난방 운전 및 정지 시점을 제어할 경우, 재실기간 중 거주자 쾌적 수준을 만족하면서 난방 에너지를 20% 절감할 수 있음을 시뮬레이션으로 검증				
연구개발성과	1. 주거건물의 재실 추정 알고리즘 개발 - CO₂ 농도 변화율-재실간 상관성 분석 (측정 및 계산식) - CO₂ 농도 변화율의 보완방안으로써 재실센서(Passive Infrared sensor)를 병용한 재실 추정 알고리즘 도출 - 실제 주거건물 적용 시 예측정확도 83%~99% 확보 - 알고리즘 관련 특허출원 1건, 국내 논문 1건 2. 거주자 재실 기반 난방제어 방법 및 성능평가 - 복사난방시스템 적용 주거건물의 난방에너지 해석 시뮬레이션 모델 구성 - 재실 스케줄에 따른 난방 정지·기동제어, 셋백제어, 온수온도 조절 전략 도출 - 기존 제어방식(거주자에 의한 수동 on/off방식) 대비 최대 20.3%의 난방 에너지 절감 및 ISO 7730 쾌적 조건 (PMV -0.5~+0.5)만족 - 에너지 성능평가 관련 국내 논문 2건, 국외 논문 2건				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	1. 주거건물 난방 제어 알고리즘 고도화에 활용 - 재실자 맞춤형 난방 제어 알고리즘의 기초 데이터 제공 - 복사난방시스템형 Smart Thermostat 구현을 위한 요소기술로 활용 - 건물 에너지 시뮬레이션의 정확도 향상을 위한 거주자 occupancy 모델 제공 2. 복사난방시스템의 운전 메커니즘 심화 연구에 활용 - 시스템 운전조건(외기온, 구조체 축열, 재실, 온수온도 및 유량)과 최적 정지/기동 시점 간의 관계 규명 - 실제 거주 주택에 재실 기반 난방 제어 알고리즘을 적용하여 실온 제어 성능 및 에너지 성능 평가, 문제점 및 개선방안 도출 연구 - 기계학습과 연계한 재실 패턴 추출 및 예측 제어 연구에 활용				
국문핵심어 (5개 이내)	복사난방시스템	재실인식	난방에너지	열쾌적	제어
영문핵심어 (5개 이내)	Radiant heating system	Occupancy detection	Heating energy	Thermal comfort	Control

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	5
2. 연구수행내용 및 성과	8
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	51
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	55
붙임. 참고 문헌	57

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목적

(1) 최종목표

기존의 재실 추적방법은 주로 PIR 등 재실센서를 이용하는 것이나, 본 연구에서는 주거 건물에서 실용적으로 활용될 수 있는 실내환경 센서를 이용하여 재실인식 기초 기술을 개발하고, 이를 복사난방시스템의 제어에 적용하는 것이 최종 목표이며, 아래와 같은 세부 목표로 구성됨

(2) 세부목표

(가) 재실인식 정확도 70%

복사난방시스템의 정지/기동 시점 결정에 필요한 재실 시간 추정의 정확도는 실제 재실 스케줄과 비교하여 70%의 정확도를 확보하도록 함

(나) 난방에너지 20% 절감

거주자에 의한 수동 on/off에 비교하여, 기동정지제어 및 셋백제어의 조합을 통해 20%의 에너지 절감량을 확보

(다) 재실기간 쾌적도 90% 확보

비재실시간의 불필요한 난방을 방지하고, 재실시간대 쾌적도를 ISO 7730 기준의 Category B 수준 ($PMV=-0.5\sim+0.5$)으로 유지

나. 연구개발 필요성

(1) 연구개발 개요

(가) 주거건물의 난방 에너지절약을 위한 제어 기술 개발로서, 현재 난방에너지 절약은 대부분 거주자의 개별적인 조절 행위(밸브 잠금, 외출 설정 등)에 의해서 이루어지고 있는데, 이는 거주자의 불편을 초래하거나, 설정 오류로 인한 불쾌적 또는 에너지 낭비로 이어질 수 있음에 착안

(나) 이러한 관점에서 거주자 재실을 인식하고, 건물 및 복사난방시스템의 열적 특성을 고려하여 자동으로 난방을 제어할 수 있는 시스템이 필요

(다) 이를 위해 본 연구에서는 주거건물에서 거주자의 재실에 따른 환경변수(온습도, CO₂ 농도 등) 변화추이를 일정 기간 센싱하여 재실여부와 환경변수 간 상관성을 도출하고, 이를 근거로 복사난방시스템의 운전 및 정지 시점, 셋백 (set-back) 온도를 제어하는 기초 기술을 개발하고자 함

(라) 비재실시간동안 불필요한 난방을 방지하고 초기 기동시 과도 열량공급을 방지하여 난방에너지를 20% 절감하고, 재실자 맞춤형의 쾌적 수준을 제공

(2) 연구개발 국내외 현황

(가) 국내현황

- ① 국내 주거건물에는 대부분 복사난방시스템이 적용되고 있어, 적정 방열량 확보를 위한 온수온도 및 유량제어 기술 등 에너지절약을 위한 다양한 제어기술이 개발·제안되어 있음
- ② 보다 선진적인 제어기술로서 복사난방시스템의 예측제어에 대한 연구도 수행되었으며, 인공지능경망을 활용하여 난방초기시 과열(overshooting) 저감 기술 개발
- ③ 최근 건물에너지와 거주자 재실간의 관계에 주목하여, 거주자 재실을 판단하기 위한 기술이 연구된 바 있으나, 대부분 재실센서, Wifi 신호(Bae et al., 2015) 등 실내환경과 관련성이 적은 물리센서를 활용
- ④ 재실센서(PIR)의 인체감지 성능은 매우 정확하나, 장시간 정적인 상태의 재실자 인식(예: 취침), 재실자 수의 판단은 어려우며, 이는 난방제어에 있어서 불리한 측면임
- ⑤ 실내 환경 센서를 이용한 재실인식에 대한 연구는 미흡하며, 복사난방시스템의 열적 지연으로 인한 방열시간과 재실시간 간의 불일치를 해소하기 위한 기술 개발이 필요

(나) 국외현황

- ① 재실인식 기술에 대한 연구개발이 폭넓게 진행되어 왔으며, 이를 분류하면 실시간 측정(real-time monitoring), 확률적 모델(stochastic modeling), 두 방법의 혼합으로 구분할 수 있음
- ② 확률적 모델의 일환으로, 재실자의 써모스탯 설정 패턴을 학습하여 재실·비재실시의 냉난방 온도를 제어하는 기술 활용 (예: 美 Google 사의 NEST)
- ③ 실시간 모니터링 방법의 일환으로, 재실센서(Peng et al. 2018), CO₂ 센서(Cali et al. 2015), 압력센서(Labeodan et al. 2015), 영상(Erickson et al. 2014) 또는 음성 이용(Amayri et al. 2016) 추적 기법, 컴퓨터 사용여부, 에너지 미터링을 통한 재실패턴 추적 연구가 진행되어 있음
- ④ 재실 인식 기술을 활용하여, 재실 기간 중 쾌적성을 만족하면서 불필요한 냉난방을 방지하기 위한 공조시스템의 기동 및 정지 제어 및 set-back 제어 기술 적용
- ⑤ 재실기반 제어기술은 대부분 사무소 건물을 대상으로 하거나, 주거의 경우라도 공기의 대류를 이용한 냉난방 시스템에 적용되어, 이를 주거건물의 복사난방시스템에 적용하는 것은 한계가 있음

다. 연구개발 범위

(1) 주거건물 실내환경 분석을 통한 재실 인식 방법 도출

(가) 기초 자료 및 기존 연구 조사

- ① 재실 추적 방법, 거주자 재실에 의한 실내오염물질/환경 변수 변화 관련 연구

(나) 실거주 주택의 실내환경 측정 분석

- ① 표준적인 주거 건물 유형 선정 및 현장 확보
- ② 주거 건물의 규모에 따른 재실-실내환경 변수 상관성 분석
- ③ 주거 건물의 실내환경 측정을 통한 온습도, CO₂ 변화 추이 분석

(다) 재실 인식 방법 도출

- ① 실내환경 변수와 거주자 재실 간의 상관성 분석을 통해 재실 인식에 적합한 실내 환경 변수 선정
- ② 실내환경 변수 변화를 응용한 재실 추정 방법 도출
- ③ 실내환경 변수간의 상관성 분석을 통해 재실 인식 방법 보완
- ④ 거주자 설문을 이용하여 측정 당시 실제 재실 스케줄을 파악하고, 이를 추정된 재실 스케줄과 비교하여 정확도 검증

(라) 연구 결과 정리 및 활용

- ① 재실 인식 및 제어 활용 가능성 확인
- ② 제어 알고리즘 탑재 방안 검토

(2) 시뮬레이션을 통한 쾌적성 및 에너지 소비량 분석

(가) 기초 자료 및 기존 연구 조사

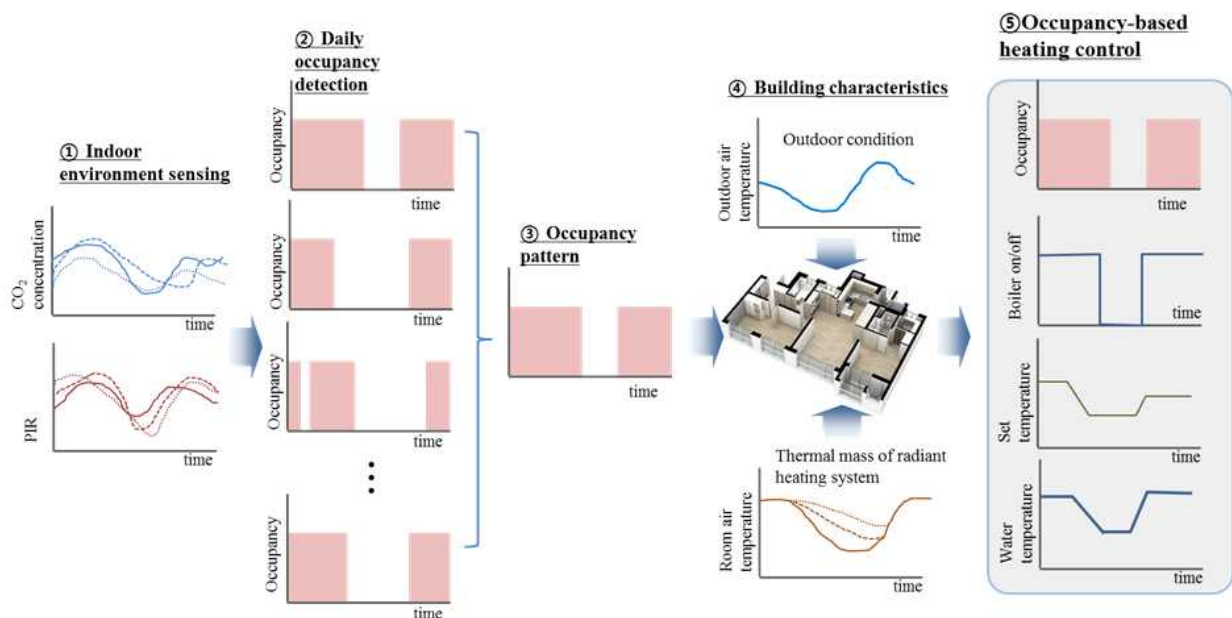
- ① 복사난방시스템 제어기술, 시스템 및 제어알고리즘 모델링 연구 등

(나) 재실인식 복사난방시스템 제어 전략 도출

- ① 인식된 재실패턴에 대응 가능한 난방 기동·정지 시점 및 온수온도 제어 전략 도출
- ② 기동정지 시점 결정을 위한 복사난방시스템의 설정온도 도달 시간 영향인자 분석
- ③ 복사난방시스템의 열적지연 효과, 외기온 등을 고려한 온수온도/유량 제어 전략 수립

(다) 제어 전략 평가 및 보완

- ① 해석대상 표준 주거 모델 및 에너지 소비량 평가를 위한 복사난방시스템 모델 구성
- ② 건물 에너지 시뮬레이션(에너지플러스)을 통해 에너지 절감 및 쾌적성 검토
- ③ 시뮬레이션 결과에 기반한 제어 전략 보완 방안 수립



[그림 1] 연구 개발 개념

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구개발 방법

(1) 연구개발 추진전략 및 방법

(가) 추진전략: 개념 정립 및 시뮬레이션을 통한 초기 검증 단계의 연구로, 주관기관의 자체 연구로 수행

- ① 현장측정: 실거주 주택을 대상으로 CO₂ 농도/PIR 센싱/온습도 측정
- ② 재실인식 알고리즘 보완: CO₂ 농도/PIR 센싱/온습도 (필요시) 기반 재실예측 방법 보완
- ③ 복사난방시스템 제어 로직 도출: 재실 인식 알고리즘을 활용한 최적 정지/기동 제어 방안 도출
- ④ 에너지 시뮬레이션: 에너지 절감성능 평가

(나) 주요 추진 방법

- ① 현장 측정
 - 실제 주거 건물에서 온습도, CO₂ 농도, PIR 모니터링을 통해 실내환경 변수 및 재실 상관성 분석
 - 일정기간 모니터링(예:1주일)과 함께 거주자 재실 여부 설문 조사 실시
 - 모니터링 데이터를 통해 재실 스케줄을 추정하고, 이를 설문조사 결과와 비교
- ② 재실 인식 알고리즘 보완
 - CO₂ 데이터 불확도 최소화를 위한 칼만필터 파라미터 최적화
 - CO₂ 농도 범위, CO₂ 농도 변화율, CO₂ 농도의 시간평균값, PIR 센싱 데이터를 활용하여 재실 상황별 조건 분류
 - 재실 판단 기준 변수의 셋팅값 적정성 검토 (예: CO₂ 농도변화율, 시간평균값 등의 적정기준)
- ③ 복사난방시스템의 제어변수별 실온제어 영향도 분석
 - 온수온도, 온수유량, 난방정지/기동 시간 조정에 따른 실온 상승/하강 시간 분석
 - 에너지 시뮬레이션 (Designbuilder) 활용 분석
- ④ 난방 제어알고리즘 도출 및 에너지/쾌적 성능 평가
 - 재실추정 결과에 기반하여 정지/기동 시점 및 설정온도 결정
 - 실온(작용온도)제어 성능, 에너지 소비량 시뮬레이션 분석

(2) 연구개발 추진체계

연구개발과제			
과제명	바닥복사난방 시스템의 에너지 절약 제어를 위한 환경 센서기반 재실 인식 기술 개발		
기 관 별 참 여 현 황			
구 분	기관수	인원수	총인원 수
산 업 계	1	3	3
대 학			
국공립(연)			
출 연 (연)			
기 타			
주 관 연 구 기 관		공 동 연 구 기 관	위 탁 연 구 기 관
부경대학교 산학협력단			
참 여 연 구 원		참 여 연 구 원	참 여 연 구 원
주관연구책임자		공동연구책임자	위탁연구책임자
이규남 외 2명		(000)외 0명	(000)외 0명
담당연구개발내용		담당연구개발내용	담당연구개발내용
- 실거주 주택의 CO ₂ /PIR/온습도 측정 - 환경변수 기반 재실인식 알고리즘 보완 - 바닥복사난방시스템의 제어변수별 실온제어 영향도 분석 - 난방제어 전략 도출 및 에너지/쾌적 성능평가 시뮬레이션 수행		-	-

(3) 연구개발 추진 일정

구분	연구과제명 (연구 수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도					
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표				1/4	2/4	3/4	4/4	1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6
총괄																	
주관	바닥복사난방 시스템의 에너지 절약 제어를 위한 환경 센서기반 재실 인식 기술 개발 (부경대학교 산학협력단)	재실 인식 기술	재실 인식 관련자료 축적	기존 연구 리뷰	자료 조사	자료집											
			주거건물 실내환경 분석	실거주 건물의 측정데이터	현장 측정	데이터셋	10										
			환경변수 및 재실 상관성 분석	데이터 대표성 및 유의성	측정 결과 분석	데이터셋	2.5										
			재실여부 확률적분포 분석	데이터 대표성 및 유의성	측정 결과 분석	논문 1건	2.5										
			재실인식 방법 도출	환경변수 및 재실 여부 일치도	방법론 및 알고리즘 초안 정립	논문 1건	5										
		재실 인식 복사난방 시스템 제어 알고리즘	에너지절약 제어자료 축적	기존 연구 리뷰	자료 조사	자료집											
			기동정지 알고리즘	제어알고리즘 적용성	알고리즘 작성	알고리즘, 논문 1건	20										
			셋백제어 알고리즘	제어알고리즘 적용성	알고리즘 작성	알고리즘 특허 출원 1건	10										
			알고리즘 성능평가	평가방법/결과의 기준 부합성	시뮬레이션 수행 및 결과 분석	논문 1건	20										

나. 연구개발 성과

(1) 1차년도 수행 내용 및 성과

(가) 재실 인식 관련 자료 축적(기존 연구 리뷰)

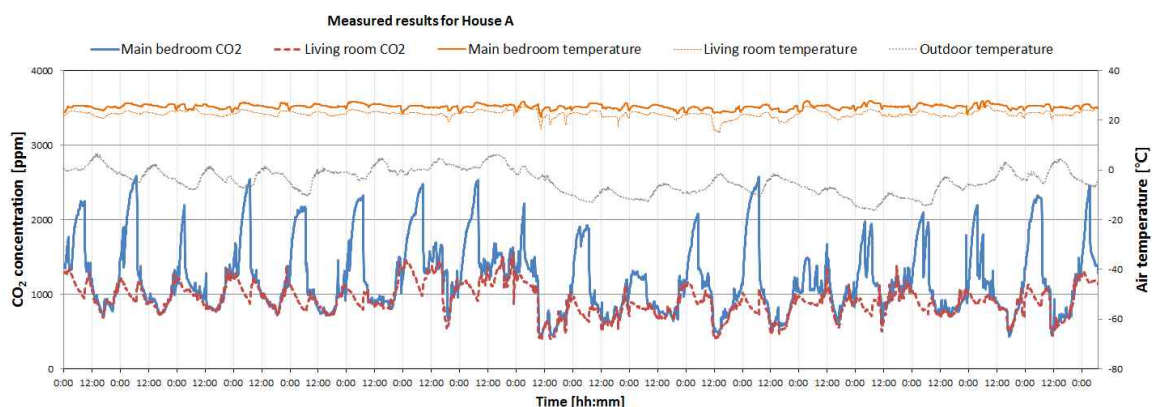
- ① 단일 센서 또는 복합 센서 (sensor fusion)를 이용한 재실 인식 관련 연구 리뷰
- ② 비침투성(Intrusive) 센싱방법을 중심으로 기존 연구 리뷰
- ③ 기존 연구 리뷰를 통해 CO₂ 농도와 PIR 센서가 프라이버시 침해, 거주자 불편을 초래하지 않으면서 저가의 실용적인 재실 추정을 구현할 수 있는 것으로 분석

〈표 1〉 재실인식 관련 기존 연구

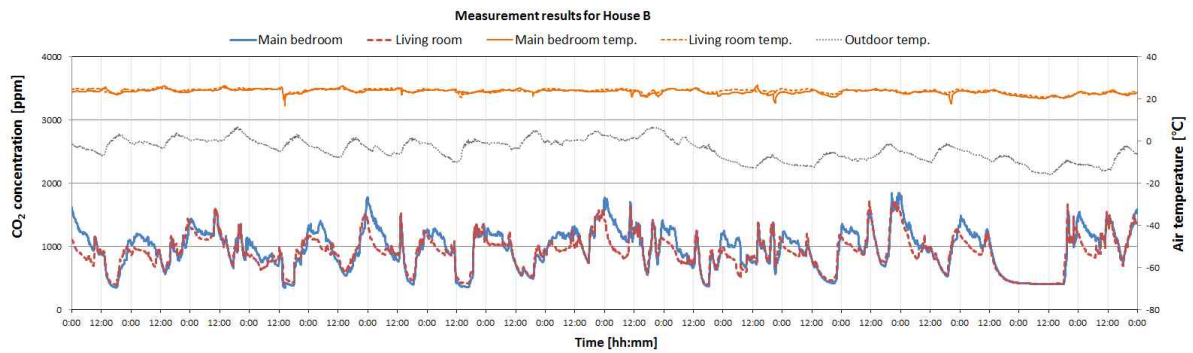
Reference	센서종류	재실 정보	실제재실확인	검증 실험	
				추정대상	추정기간
Erickson et al (2014)	카메라	재실자수	video 재생	building	5일
Erickson et al (2013)	카메라, PIR	재실자수	video 재생	building	4주
Lee et al (2013)	Wifi	재실위치	거주자앱정보	home	1달
Agarwal et al (2011)	PIR+reed S/W	재실유무	실 조사	building	1일
Lu et al (2010)	PIR+reed S/W	재실유무	인터뷰	home	4주
Taneia et al (2013)	CO ₂ 센서, 캘린더	재실유무	-	room	3주
Jin et al (2017)	CO ₂ 센서	재실자수	수동기록	room	-
Scott et al (2011)	RFID, PIR	재실유무	수동기록	home	2달
Kuutti et al (2014)	광센서, 적외선 카메라	재실자수	-	building	1주
Peng et al (2018)	PIR	재실유무	-	room	9주
Jung et al (2013)	PIR, CO ₂ 센서	재실자수	수동기록	building	1일
Padmanabh et al (2019)	PIR, 마이크	재실유무	-	room	2달
Valle et al (2016)	마이크	재실자수	video 재생	room	1주
Trivedi et al (2017)	Wifi	재실자수	수동기록	building	일~월

(나) 주거건물 실내환경 분석

- ① 실제 거주 주택 대상 동절기 실내 온습도, CO₂ 농도 측정
- ② 재실 여부와 CO₂ 농도, 절대습도 증감 간의 상관성 및 CO₂ 농도와 절대습도 간 상관성 확인
- 거주자 재실에 따른 CO₂ 농도 증가(build-up) 경향 확인 (〔그림 2〕 참조)



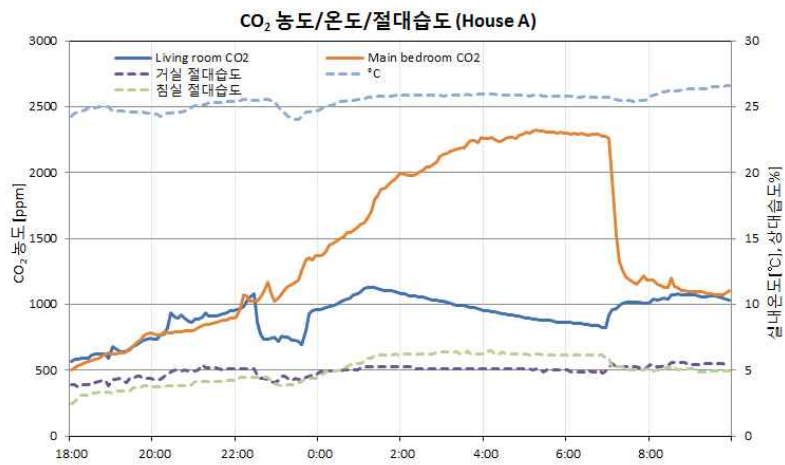
(a) A 공동주택



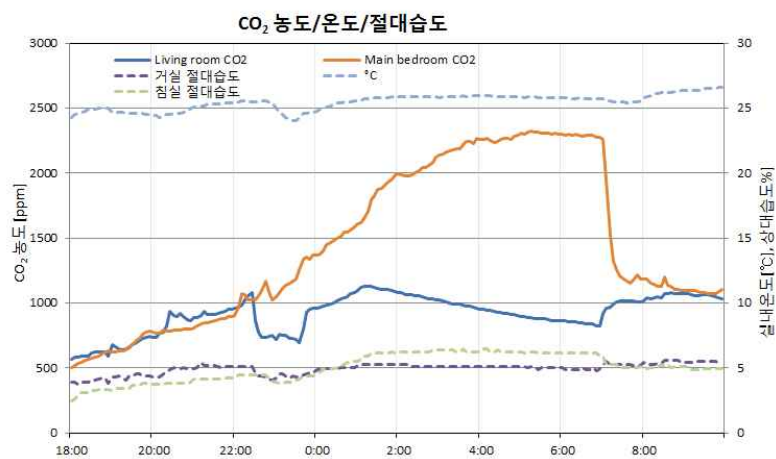
(b) B 공동주택

[그림 2] 공동주택의 CO₂ 농도 및 온도 측정 결과

- 특히 야간시간대 취침으로 인한 CO₂ 농도 및 절대습도 증가 경향 확인 ([그림 3] 참조)



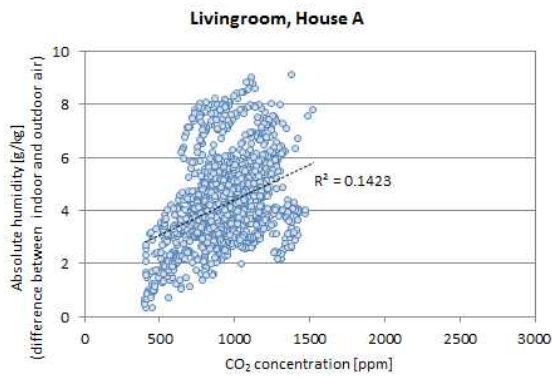
(a) A 공동주택



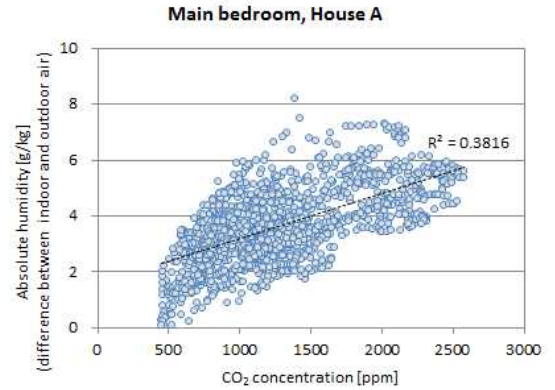
(b) B 공동주택

[그림 3] 대표일의 CO₂ 농도, 온습도 (절대습도) 측정 결과

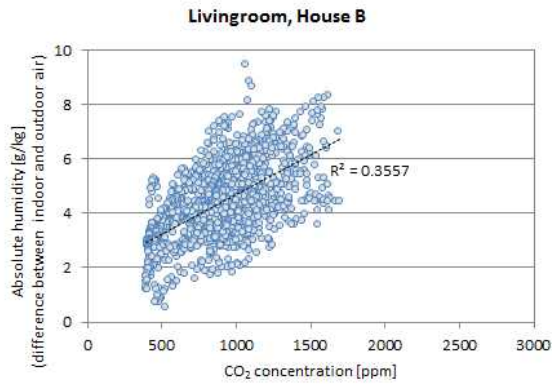
- CO₂ 농도-절대습도간 상관성 분석을 통해 재실과 환경변수 간의 상관성 확인 ([그림 4] 참조)



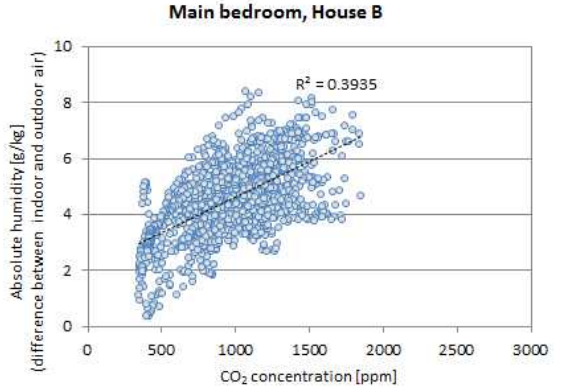
(a) A 공동주택 거실



(b) A 공동주택 침실



(c) B 공동주택 거실



(d) B 공동주택 침실

[그림 4] CO₂ 농도-절대습도 상관관계

(다) 이론식을 통한 환경변수-재실상관성 도출

① 재실-CO₂ 농도 상관관계 평가

- 아래 Seidel 식으로 실내 CO₂ 농도의 build-up과 decay 사전 검토

$$C(t) = C_{out} + (C_i - C_{out})e^{-(Q/V)t} + \frac{G}{Q}(1 - e^{-(Q/V)t})$$

$C(t)$: t 시점의 CO₂ 농도 [ppm]

C_{out} : 외기 CO₂ 농도 [ppm]

C_i : 초기 CO₂ 농도 [ppm]

Q : 환기량 [m³/s]

G : CO₂ 발생량 [m³/s]

V : 실체적 [m³]

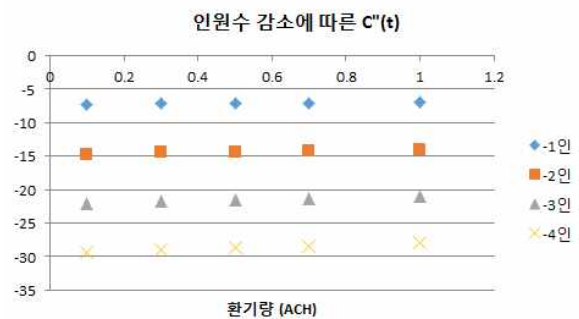
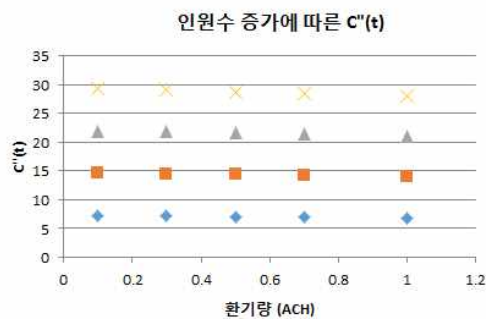
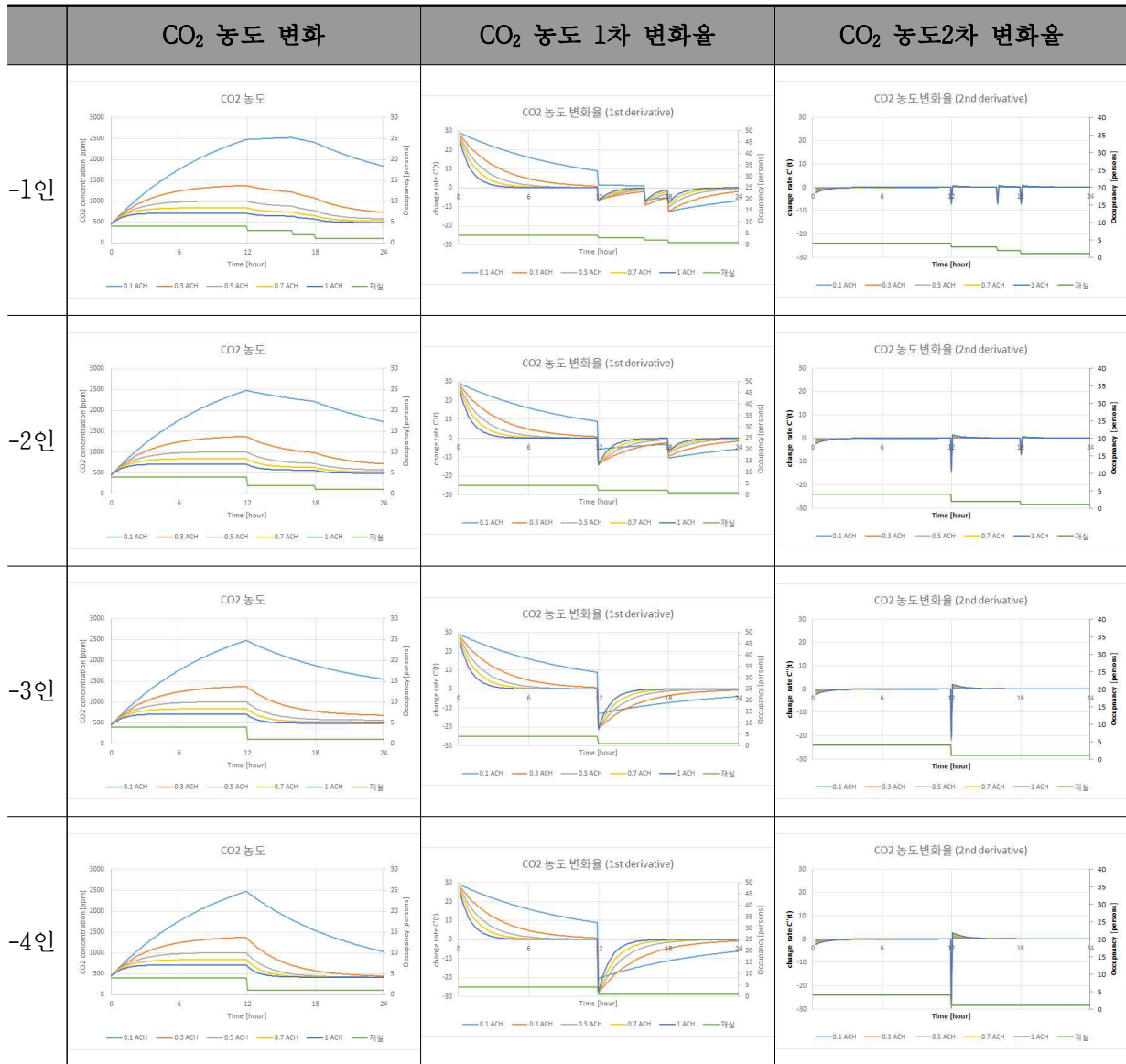
- 재실자 수 변화에 따른 CO₂ 농도, CO₂ 농도의 1차/2차 변화율을 이론식으로 검토
(엑셀시트로 작성: <표 2>, <표 3> 참조)

- CO₂ 농도의 범위 외에 CO₂ 농도 변화율로 재실여부를 판정하는 것이 효율적인 것으로 판단
- 이론식 분석에 의하면, 증가 혹은 감소되는 재실자 인원 수에 따라 CO₂ 농도의 2차 변화율이 일정하게 나타나는 것으로 분석됨 ([그림 5]참조)
- 그러나 제 주거건물에서는 침기량의 변동, 문/창문 개폐, 사람 이외의 CO₂ 발생 등 요인으로 인해 이상적인 완전혼합(Well-mixed)상태의 농도를 가정하기 어려우므로 여러 오차요인이 있을 것으로 예상

〈표 2〉 재실자 수 증가에 따른 CO₂ 농도 및 1차/2차 변화율 추이

	CO ₂ 농도 변화	CO ₂ 농도 1차 변화율	CO ₂ 농도 2차 변화율
+1인			
+2인			
+3인			
+4인			

〈표 3〉 재실자 수 감소에 따른 CO₂ 농도 및 1차/2차 변화율 추이

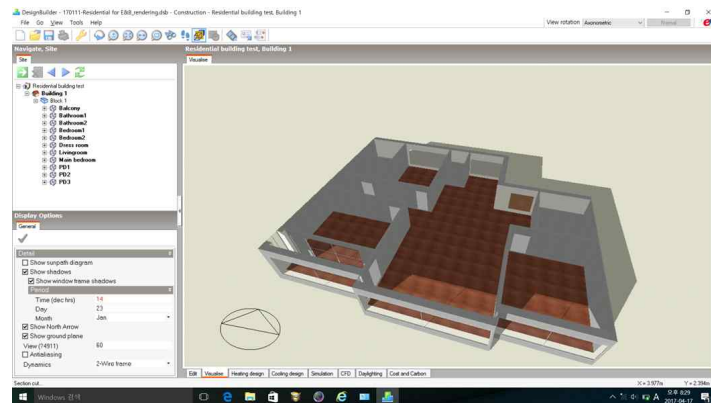


(a)증가되는 인원수에 따른 CO₂ 농도 2차변화율 (b)감소되는 인원수에 따른 CO₂ 농도 2차변화율

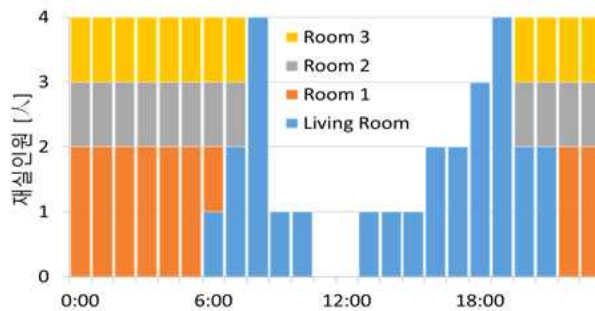
[그림 5] 재실자 수 변동에 따른 CO₂ 농도 2차 변화율

② 시뮬레이션 모델 작성

- 전용면적 85㎡의 일반적인 공동주택 단위세대 모델링 (Designbuilder v.5 활용)
- 유사규모의 공동주택에서 측정된 CO₂ 농도 데이터와 시뮬레이션 결과값 비교
- 시뮬레이션에 의한 CO₂ 농도의 변화 패턴은 실제 데이터와 유사한 경향을 보이나, 침기량, 외기 CO₂ 농도, 실제거주자의 유동적인 재실 스케줄 등에 의해 불확도가 있으므로 완전히 일치하지 않음

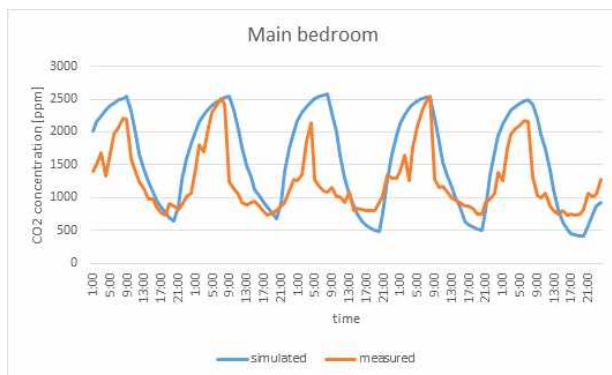


(a) 일반적인 공동주택 단위세대 모델링 (Designbuilder)



(b) 재실 스케줄 입력

[그림 6] 주거건물 시뮬레이션 모델



(a) 실제 주거건물(안방)의 CO₂ 농도 측정결과와의 비교



(b) 실제 주거건물(거실)의 CO₂ 농도 측정결과와의 비교

[그림 7] 시뮬레이션 및 실제 주거건물의 CO₂ 농도 비교

(라) 재실여부 확률적 분포 분석

① CO₂ 농도 이용 재실 추정

- 실제 거주 주택에서 측정된 CO₂ 농도와 거주자 재실기록을 근거로 재실 추정
- CO₂ 농도 및 CO₂ 농도 1차 변화율을 이용하여 재실여부 판정
- 비재실일 지속될 경우 실내 CO₂ 농도가 외기온에 가깝게 감소하고, CO₂ 농도 1차 변화율이 음의 값을 보이는 것([그림 8] 참조)을 감안하여, 아래 조건을 만족할 경우 비재실, 그 외의 경우 재실로 판정

$$C(t) < 500 \text{ ppm}$$

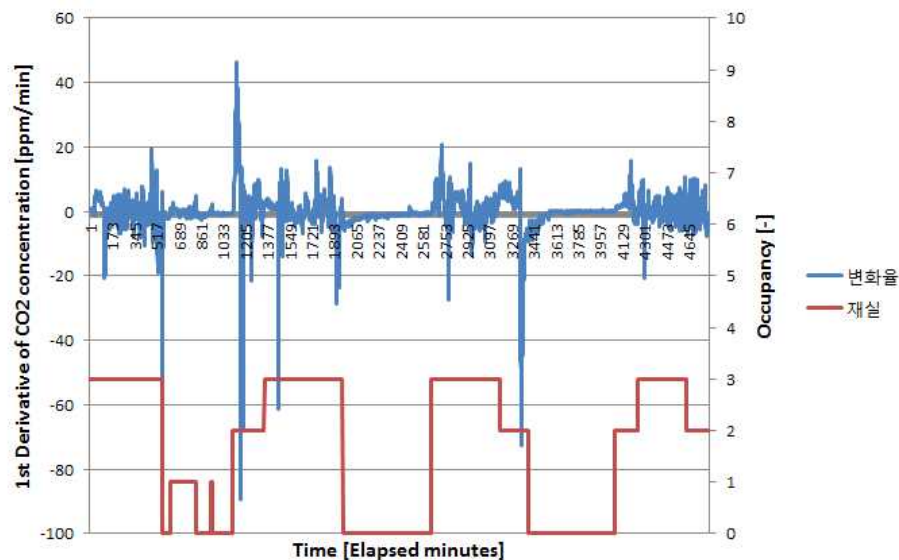
$$[C(t)-C(t-1)] / \Delta t < 0.1$$

$C(t)$: t 시점의 CO₂ 농도

Δt : 타임스텝

② 재실 추정 정확도 평가

- 재실 추정 정확도 평가: 전체 평가시간 중, 각 타임스텝의 재실 판정 결과와 실제 재실여부가 일치하는 시간의 비율로 평가
- 안방의 CO₂ 농도를 기준으로 재실 예측할 경우, 67%의 정확도로 재실 판정
- 연구 계획에서 목표로 설정한 정확도인 70%를 만족하지 못하므로 예측 정확도를 개선할 필요가 제기되었음



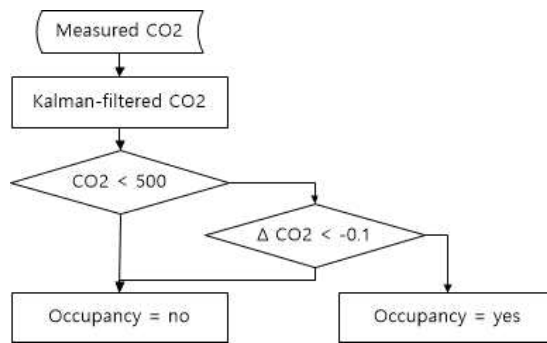
[그림 8] 실제 재실여부와 CO₂ 농도 1차변화율간의 관계

(마) 재실인식 방법 도출

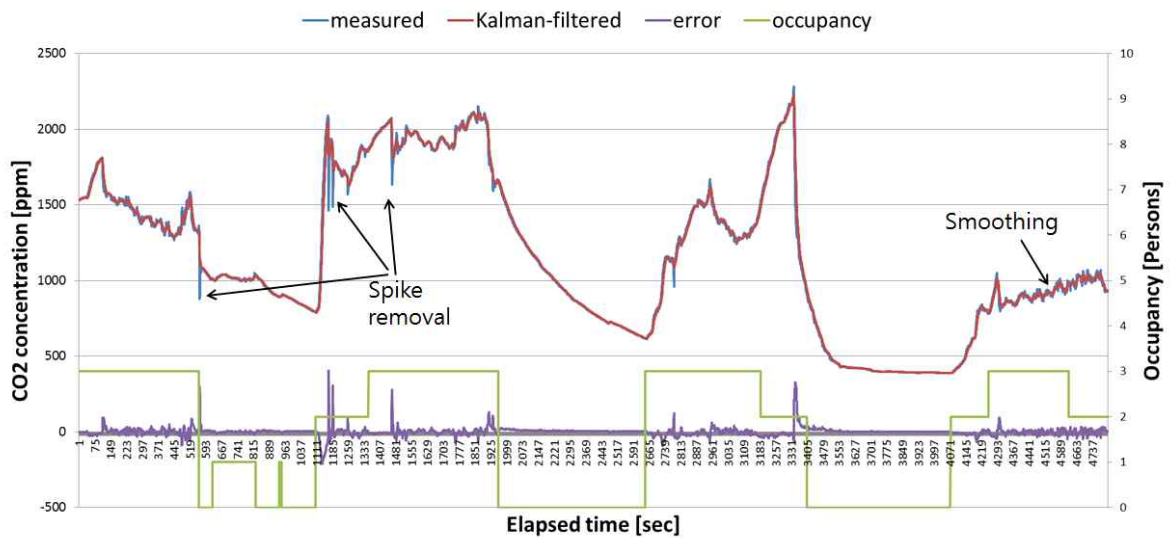
① 재실 인식 알고리즘 작성

- CO₂ 농도의 변화율을 이용하여 재실여부를 추정할 경우, CO₂ 농도 센서의 일시적 외란 또는 에러로 인해 변화율 계산에 오류가 발생하였음
- 재귀적 필터기법 중 하나인 칼만필터(Kalman Filter)(Kim 2010, Duarte et al 2018)를 이용하여 CO₂ 농도의 급작스런 변화를 필터링함으로써 변화율 계산의 오류 최소화

$C_K(t) = K \cdot C_m + (1 - K) C_K(t - 1)$	$C_K(t)$ = Kalman filtered CO ₂ at t
$P = P_n + varP$	C_m = Measured CO ₂
$P_n = (1 - K)P$	P = Process noise initial value
$K = P / (P + varM)$	varP = Process noise Variance
	varM = Measurement noise variance
	K = Kalman gain initial value

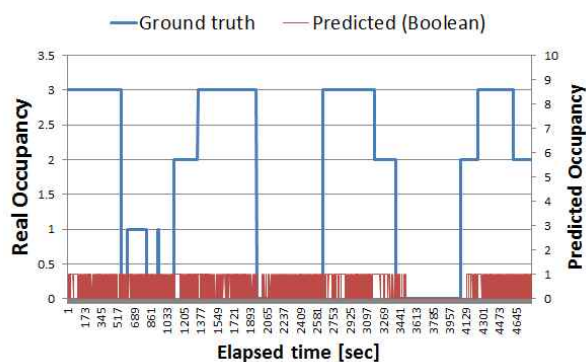


[그림 9] 칼만필터 구현 및 CO₂ 농도 이용 재실인식 알고리즘



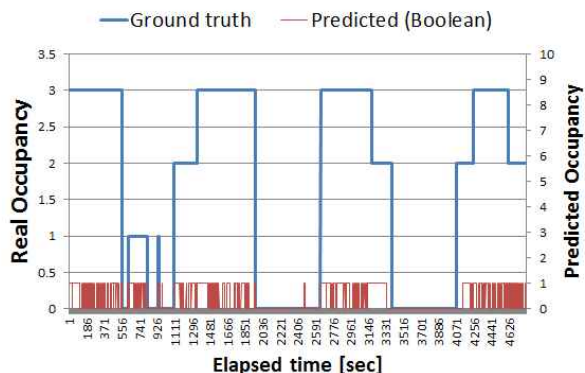
[그림 10] 칼만필터 적용시 CO₂ 농도 변화

- CO₂ 측정 데이터에 칼만필터를 적용한 결과, 순간적인 CO₂ 농도 변화가 완화되어, CO₂ 농도 변화율 산출시 오차 요인이 감소함으로써 재실 예측 정확도가 67%→72%로 향상되었음 ([그림 10], [그림 11] 참조)
- 그러나 재실 예측의 정확도를 향상시키고 그 적용범위를 확장하기 위해서는 CO₂ 농도 이외에 재실 예측의 정확도를 높일 수 있는 다른 변수의 적용도 검토해야 함 (2차년도에 보완)



재실예측 정확도 = 67%

(a) 칼만필터 미적용시 재실예측



재실예측 정확도 = 72%

(b) 칼만필터 적용시 재실예측

[그림 11] 칼만필터 적용시 CO₂ 농도 이용 재실 예측 정확도 향상

<1차년도 연구 수행 성과>

- ① 실거주 주택 실내환경 측정 데이터를 기반으로 국외 논문 1편 출판
 - Shin et al. (2018) Performance evaluation of CO₂-based ventilation control to reduce CO₂ concentration and condensation risk in residential buildings. Building and Environment 142, 451-463.
- ② 공동주택 시뮬레이션 모델을 기반으로 국외 논문 1편, 국내 논문 2편 출판
 - Determination of Equivalent Thermal Conductivity of Window Spacers in Consideration of Condensation Prevention and Energy Saving Performance, Energies 2017, 10(5), 717; doi:10.3390/en10050717
 - 외단열 벽체에서 창호 설치 위치에 따른 단열성능 및 냉난방 에너지 소비량, 대한건축학회논문집 구조계 2017, 33(12), 91-98
 - 바닥 복사 난방 시스템이 적용된 공동주택의 선형 열관류율 분석, 한국건축친환경설비학회 논문집 2018, 12(4), 313-325

(2) 2차년도 수행 내용 및 성과

(가) 에너지절약 제어 관련 자료 축적(기존 연구 리뷰)

- ① 재실기반제어(Occupancy-based control)의 에너지 절약 효과 관련 연구 고찰
- ② 재실 스케줄을 고려한 HVAC 시스템 가동 및 설정온도 조절로써 냉난방 에너지를 절약하는 연구 위주로 리뷰
- ③ 대부분 재실패턴이 일정한 오피스를 대상으로 시뮬레이션 분석이 수행됨
- ④ 재실 스케줄 기반 정지/기동 제어, 셋백온도 제어 등을 통해 최대 45%의 에너지 절감이 가능한 것으로 보고됨
- ⑤ 이를 참고하여 주거건물에서 재실기반의 복사난방시스템 제어 전략으로서 정지/기동 시각 제어, 셋백제어 및 온수온도 조절을 검토해 보고자 하였음

〈표 4〉 재실기반 제어에 의한 에너지 절약 관련 기존 연구

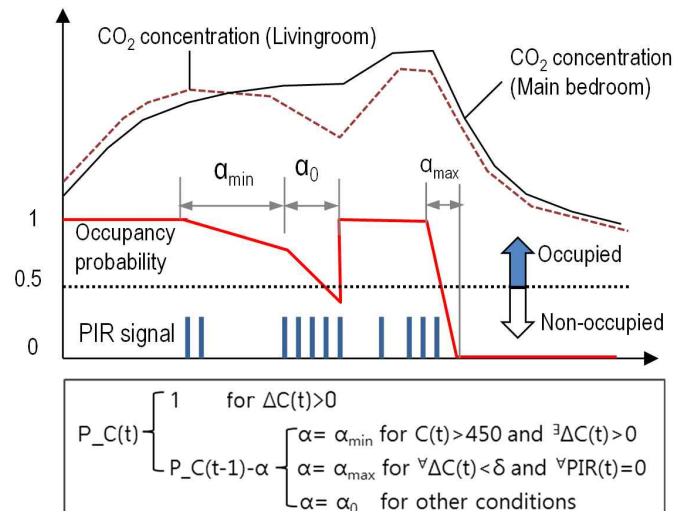
Reference	제어전략	대상 건물	검증방법	에너지절감효과
Bionda and Domingo-Irigoyen (2017)	셋백제어	공동주택	시뮬레이션	3-3%
Zeiler et al (2012)	셋백제어+개별난방	오피스	시뮬레이션	30-45%
Rosiek and Batlles (2013)	재실기반 축열조제어	오피스	실증 실험	42%
Gruber et al (2014)	재실기반 급기온도제어	오피스	시뮬레이션	30-39%
Yang et al (2013)	비재실중 운전정지	오피스	시뮬레이션	18-20%
Zhao et al (2016)	재실기반 예측제어	오피스	시뮬레이션	44%
Jazizadeh et al (2014)	재실기반 급기풍량제어	오피스	실증실험	39%
Dong and Lam (2014)	재실/기상 예측 제어	실험주택	실증실험	17.8-30.1%
Dobbs and Hincey (2014)	기동정지 시각 예측제어	오피스	시뮬레이션	19%
Peng et al (2017)	셋백제어	오피스	실증실험	20.3%
Gunay et al (2015)	셋백제어	오피스	시뮬레이션	10-15%

(나) 재실인식 방법 보완

- ① 재실인식 방법 보완 방향
 - CO₂ 농도만으로 재실 예측이 되지 않는 경우가 있으므로 (거주자가 재실 중이나 환기나 문개방에 의해 CO₂ 농도가 감소하는 경우) 이러한 경우를 보완하기 위해 모션센서 (PIR센서) 데이터를 병용
 - PIR 센서는 재실자의 움직임을 감지하는 가장 직접적인 방법이나, 거주자가 휴식과 수면 중인 정적 상태에 있는 경우에는 재실 판단을 할 수 없으므로(Kim et al., 2017) 이 경우는 CO₂ 농도 및 변화율을 재실 판정에 활용
 - 즉 CO₂ 농도와 PIR 신호 단독으로 재실 감지가 되지 않는 경우를 보완하기 위해, CO₂ 농도 기반 재실여부 판정결과와 PIR 신호 기반 재실여부 판정결과의 논리합(OR)으로 재실여부를 추정

② CO₂ 농도 기반 재실 판정 방법 도입

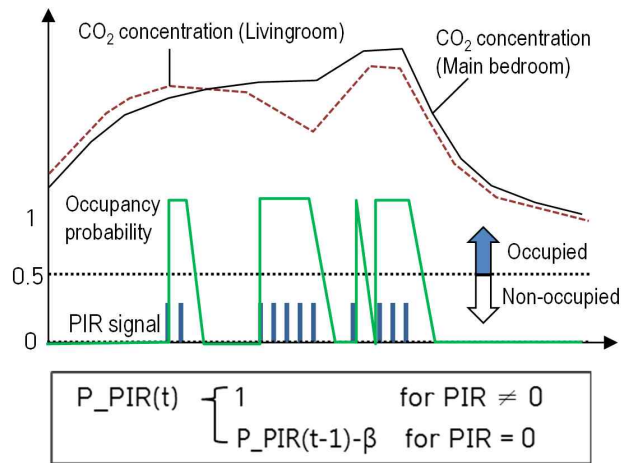
- 대표실(거실)의 CO₂ 농도 변화량($\Delta C(t)$)을 계산하여, $\Delta C(t) > 0$ 인 경우 재실에 의해 CO₂ 농도가 증가하였다고 판단할 수 있으므로 해당 타임스텝의 재실확률을 1로 설정
- $\Delta C(t) \leq 0$ 인 경우 재실여부가 확실하지 않으므로, 이전 타임스텝의 재실확률에서 소정의 감쇠율(α)을 차감
- 이 때 적용하는 감쇠율은 비재실 조건에 가까운 경우 최대감쇠율을, 재실 조건에 가까운 경우 최소값을 적용
- 즉, 모든 실의 $\Delta C(t)$ 가 특정값 이하이고, 모든 실의 PIR신호가 0인 경우 최대 감쇠율($\alpha_{\max}$)을 적용하며, 대표실 CO₂ 농도가 외기농도보다 높고, 하나의 실이라도 $\Delta C(t) > 0$ 인 경우에는 최소 감쇠율($\alpha_{\min}$)을 적용하고 그 외의 경우에는 기본 감쇠율(α_0)을 적용
- 이러한 감쇠율을 적용하여 재실확률을 매타임스텝마다 갱신하였을 때 재실확률이 0.5 이상인 경우 재실로, 그 외의 경우는 비재실로 판정(Pedersen et al. 2017).



[그림 12] CO₂ 농도 이용 재실 판정개념

③ PIR 센서 기반 재실 판정 개념 도입

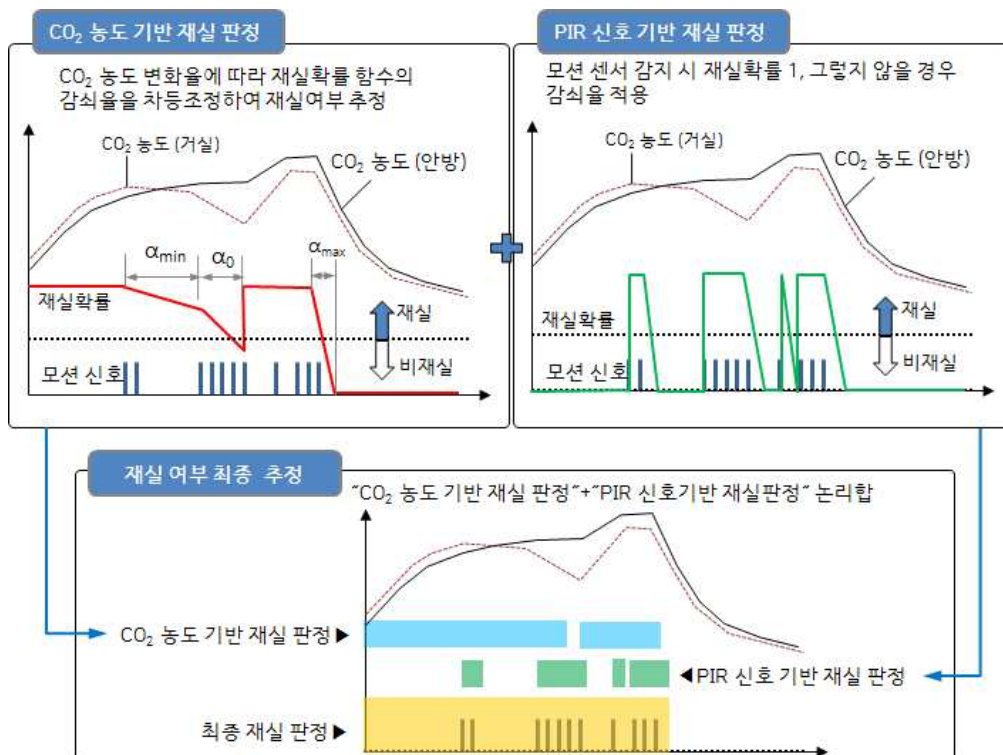
- PIR $\neq$ 0인 경우 재실자 움직임을 감지한 것이므로 재실확률을 1로 설정
- PIR=0인 경우에는 이전 타임스텝의 재실확률에서 소정의 감쇠율(β)을 차감하는데, 이는 센서의 감지범위, 민감도에 따라 PIR 신호가 감지되지 않는다고 하더라도 바로 비재실로 판정하기 어렵기 때문임
- 이러한 감쇠율을 적용하여 재실확률을 매타임스텝마다 갱신하고 그 결과가 0.5 이상인 경우 재실로, 그 외의 경우는 비재실로 판정



[그림 13] PIR 센서 이용 재실 판정개념

④ 최종 재실 판정 방법 도출

- 최종적인 재실판정은 CO₂ 농도로 재실감지가 안 되는 경우와, PIR 신호로 재실감지가 안 되는 경우를 보완하기 위해, 각각의 재실 판정 결과의 논리합으로 재실여부를 최종 판정하고 그 결과는 Boolean 변수(1: 재실, 0: 비재실)로 출력
- 재실 추정에 이와 같은 확률함수를 적용한 이유는, CO₂ 농도 변화량이 감소하거나 PIR 신호가 없다고 하더라도 비재실이라고 확정할 수 없는 경우가 많으므로, 이전의 확률함수를 감쇠시켜가며 재실확률이 0.5이하로 떨어질 경우에만 비재실로 판단



[그림 14] 수정 보완된 재실 추정 개념

(다) 재실 추정 알고리즘 도출

① CO₂-PIR병용 재실 추정 알고리즘 도출

< 알고리즘 도출 내용 >

- CO₂ 농도기반 재실 추정 결과와 PIR 신호기반 재실 추정 결과를 논리합으로 하는 재실 추정 알고리즘 도출
- 재실 추정 알고리즘에서는 데이터의 변화율이 중요한 변수이므로, 데이터 noise를 저감하면서도 데이터 delay 방지에 효과적이며, 실시간 데이터 보정이 가능하도록 Kalman filter(Kim, 2010; Duarte et al. 2018)를 적용한 데이터 처리 과정을 포함
- 칼만필터는 이전 타임스텝의 보정치, 현재 타임스텝의 측정치를 통해 재귀적으로 현재 타임스텝의 보정치를 산출하는 방식으로, 연산의 정확도와 효율성 측면에서 재실 추정에 효과적으로 적용될 수 있음

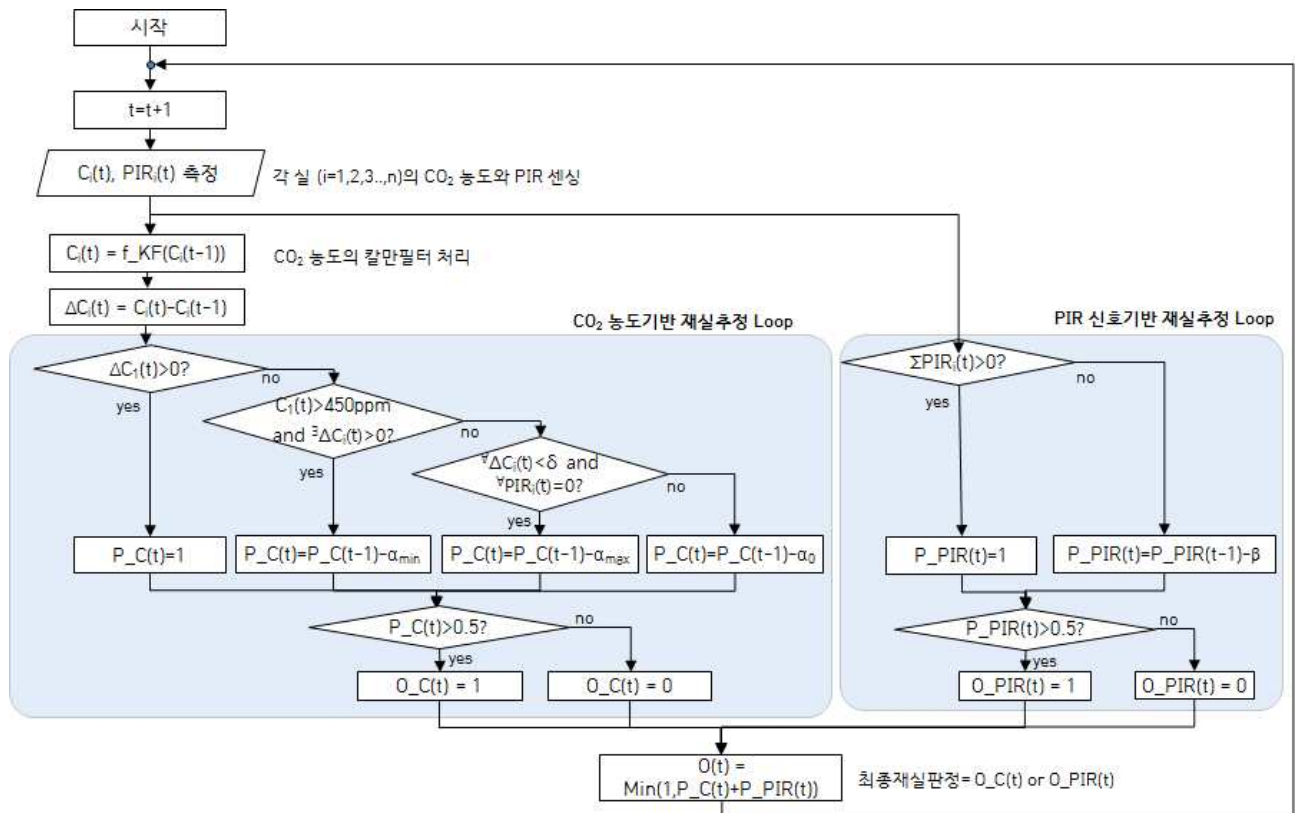
$$f_{KF}(C(t)) = K \cdot C(t) + (1 - K) \cdot f_{KF}(C(t-1))$$

여기서,

$C(t)$: 시점 t 에서의 CO₂ 농도 [ppm]

$f_{KF}(C(t))$: 시점 t 에서 칼만필터처리된 CO₂ 농도 [ppm]

K : 칼만 계인 [-]



[그림 15] 재실 추정 알고리즘

<기호설명>

α_0	: CO ₂ 기반 재실확률함수의 감쇠율 기본값 (예: 0.05 min ⁻¹)
$\alpha_{\max}$	: CO ₂ 기반 재실확률함수의 감쇠율 최대값 (예: 0.5 min ⁻¹)
$\alpha_{\min}$	: CO ₂ 기반 재실확률함수의 감쇠율 최소값 (예: 0.005 min ⁻¹)
β	: PIR 기반 재실확률함수의 감쇠율 (예: -0.1 min ⁻¹)
$C_i(t)$	: t시점에서 i번째 실의 CO ₂ 농도
$\Delta C_i(t)$	: i 번째 실의 CO ₂ 농도 변화율
δ	: 비재실 판정에 필요한 CO ₂ 농도감소율 기준 값 (예: -2.5ppm/min)
$f_{KF}(C_i(t))$	: t시점 i번째 실의 CO ₂ 농도의 칼만필터 처리값
i	: Room 번호
$O(t)$	: t시점에서 재실여부 Boolean 값 (1:재실, 0:비재실)
$O_C(t)$	: CO ₂ 농도 기준으로 판정한 재실여부 Boolean 값
$O_PIR(t)$	: PIR 신호 기준으로 판정한 재실여부 Boolean 값
$PIR_i(t)$	: t시점에서 i번째 실의 PIR 신호
$P_C(t)$	: CO ₂ 농도기반 재실확률함수
$P_PIR(t)$	: PIR 신호기반 재실확률함수
$\Sigma PIR_i(t)$	: 모든 실의 PIR 센서값 합산
t	: 측정/연산 타임스텝

< 알고리즘 적용 실험 >

- 실제 거주 주택에서 측정한 CO₂ 농도와 PIR 데이터를 재실 예측 알고리즘에 적용하여 재실여부를 판정하고, 거주자가 표기한 외출/귀가 기록과 비교하여 정확도 평가
- 대상 주택은 4인 가족이 거주하는 65m²의 공동주택(부산 해운대구 소재)으로, 세 개의 침실과 거실/주방으로 구성
- CO₂ 센서는 재실자 호흡, 창문이나 출입문의 영향을 직접 받지 않는 위치를 선정하여, 일반적인 호흡역으로 간주되는 바닥 위 1.2m 높이에 설치
- PIR 센서는 각 실의 출입문 상부(거실의 경우 현관 출입문 상부)에 설치하여 각 실에서의 움직임이 모두 감지될 수 있도록 하되, 재실자의 움직임이 즉각적으로 감지될 수 있도록 지연시간은 최소(0.3초)로 설정하고, 감지범위를 최대(110°)로 설정
- CO₂ 농도는 2분 간격으로 측정하여 자체 메모리에 기록하고, PIR 신호는 1초 간격으로 출력하여 NI cDAQ-9178을 통해 PC에 기록 후 재실 추정 알고리즘에 입력
- 측정은 2017.3.7~3.20 (2주간)에 진행되었으며, 재실추정 알고리즘의 정확도는 재실 추정결과와 실제 재실여부(거주자가 기록한 외출/귀가 시간에 근거)를 비교하여 산출
- 2주간의 측정 기간 중, 2일의 데이터가 누락되어 재실 추정이 불가능한 관계로, 12일간의 재실 추정 정확도를 평가



(a) 측정 대상 주택



(b) 측정 대상 주택 평면 및 센서 위치

[그림 16] 재실 추정 예측 알고리즘 적용 주거 건물

<표 5> 현장 측정에 사용된 CO₂ 농도 센서와 PIR 센서 사양

	CO ₂ concentration	PIR sensor
Name	TR-76Ui	HC-SR501
Type	NDIR(Non-dispersive infrared)	Pyroelectric Infrared
Range	0~9,999ppm	less than 110°, 7m
Accuracy	±(50ppm+5% of reading)	-
Resolution	1ppm	TTL 0V(Low)-3.3V(High)
Response	1min	0.3sec ~ 5min
Shape		



(a) PIR 센서 설치 (안방)



(b) PIR 센서 설치 (침실)

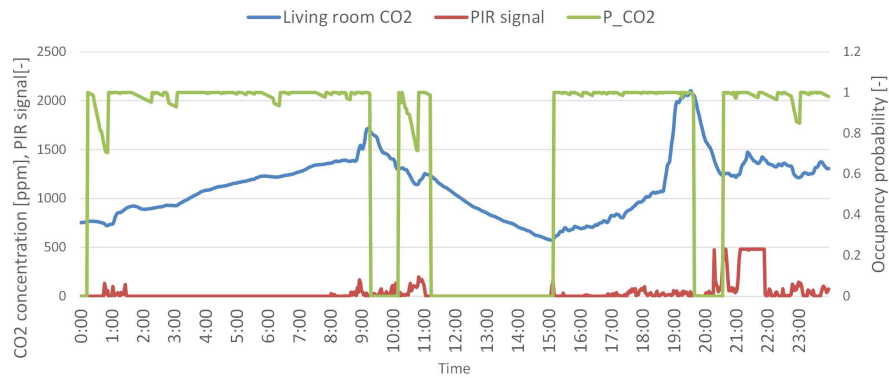


(c) 데이터 수집장비

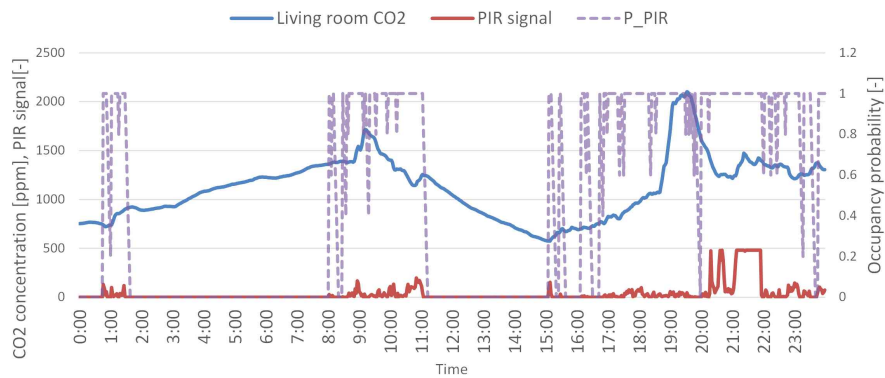
[그림 17] PIR 센서 및 데이터 수집 장비

< 알고리즘 정확도 평가 결과 >

- [그림 18] (a)는 CO₂ 농도로 산출한 재실확률로, CO₂ 농도가 지속적으로 상승하는 구간에서는 그 확률이 1에 가깝게 유지되는 반면, CO₂ 농도가 하강하는 구간에서는 재실확률이 감소
- 09:00~10:00, 19:30~20:30 구간에서는 PIR 신호가 감지됨에도 불구하고 CO₂ 농도가 감소하는 것으로 보아 재실자의 문개방 또는 환기 행위가 있었던 것으로 보임
- 이러한 경우 CO₂ 농도만으로 재실 추정할 경우 오류가 발생하므로, [그림 13](b)와 같이 PIR 신호를 활용하여 재실확률을 산출하면 CO₂ 농도만으로 재실을 추정하기 어려운 조건에서 재실 추정의 정확도를 보완할 수 있음

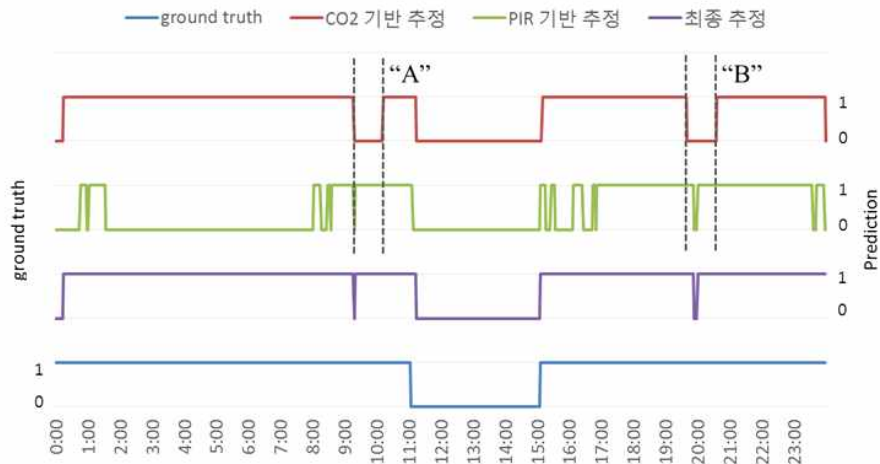


(a) CO₂ 농도 기반 재실 확률



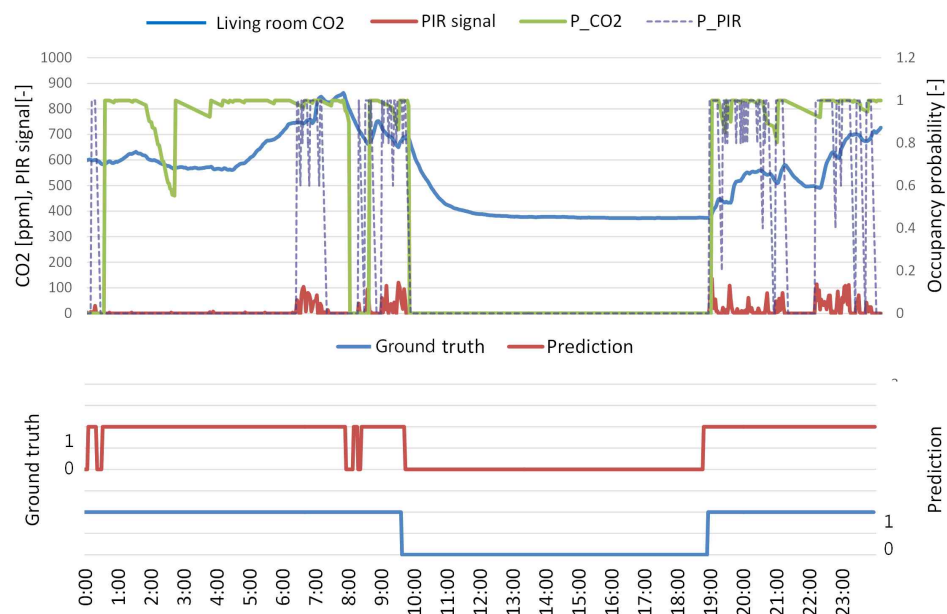
(b) PIR 신호 기반 재실 확률

[그림 18] CO₂ 농도와 PIR 신호 기반 재실확률

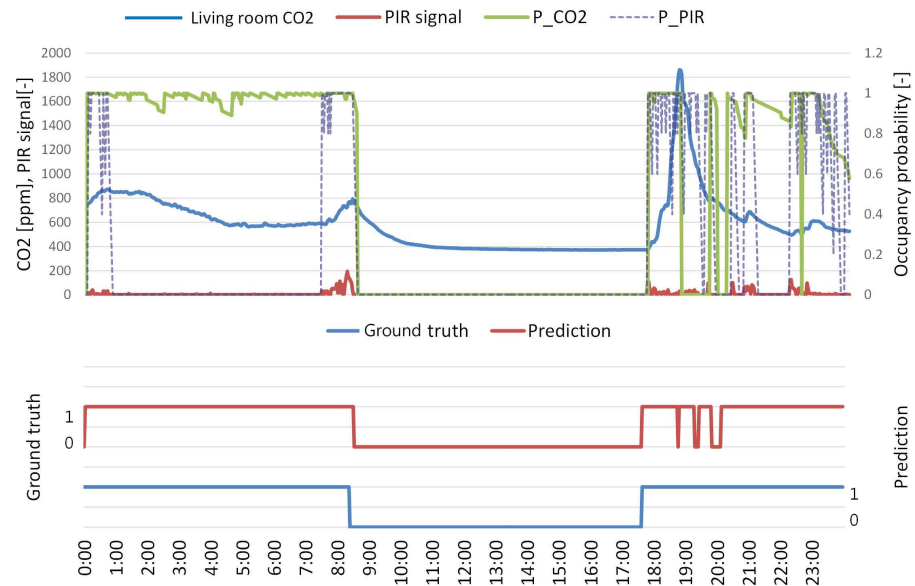


[그림 19] CO₂ 농도와 PIR 신호 기반 재실 추정 결과

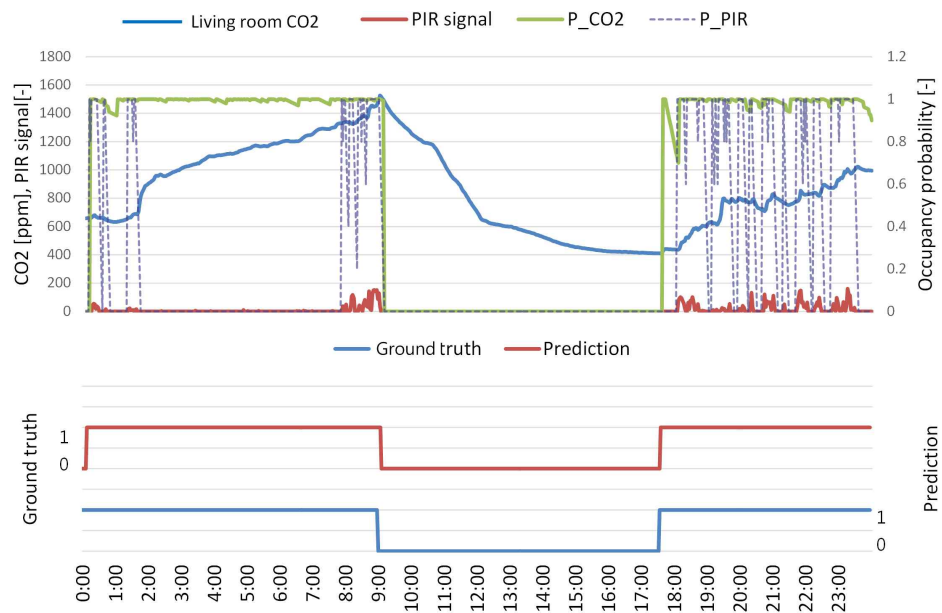
- [그림 19]는 각각의 재실확률을 근거로 재실 추정 결과를 Boolean으로 나타낸 것으로, “A” 구간과 “B” 구간에서 PIR 신호가 CO₂ 농도로 감지하지 못하는 재실 조건을 감지하는 것을 확연히 보여주는 사례임
- 그러나 이러한 경우에도, 재실 중 PIR 신호가 감지되지 않는 짧은 시간 동안 (재실자가 센서의 감지 범위 밖에 있는 짧은 시간 동안)은 재실 추정이 어려운 한계가 있으므로 이를 감안해야 함
- [그림 20]은 2주간 재실 추정결과 중의 일부 사례를 나타낸 것으로, CO₂ 농도 기반 재실 확률함수와 PIR 신호 기반 재실 확률함수의 합으로 재실 추정이 이루어지는 것을 나타냄



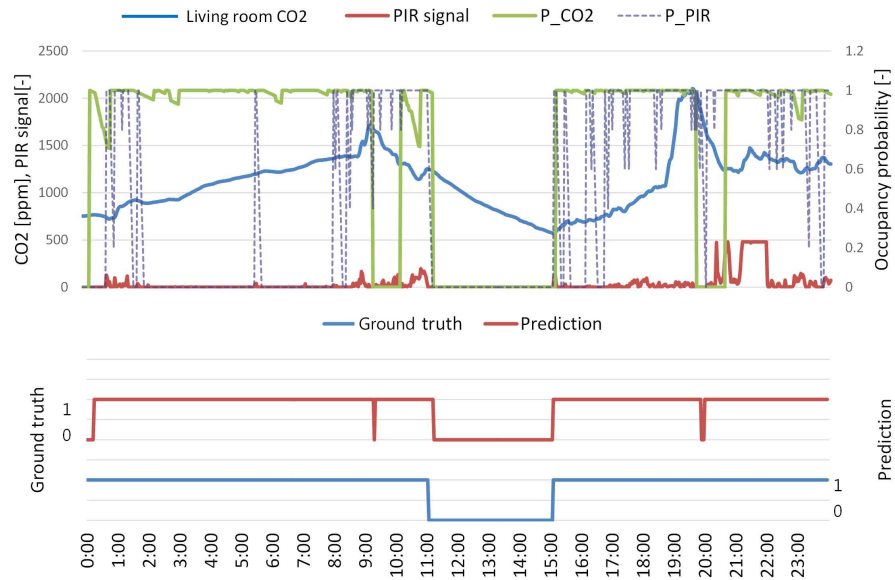
(a) 재실추정 결과 (2017.3.7.)



(b) 재실추정 결과 (2017.3.8.)



(c) 재실추정 결과 (2017.3.13.)



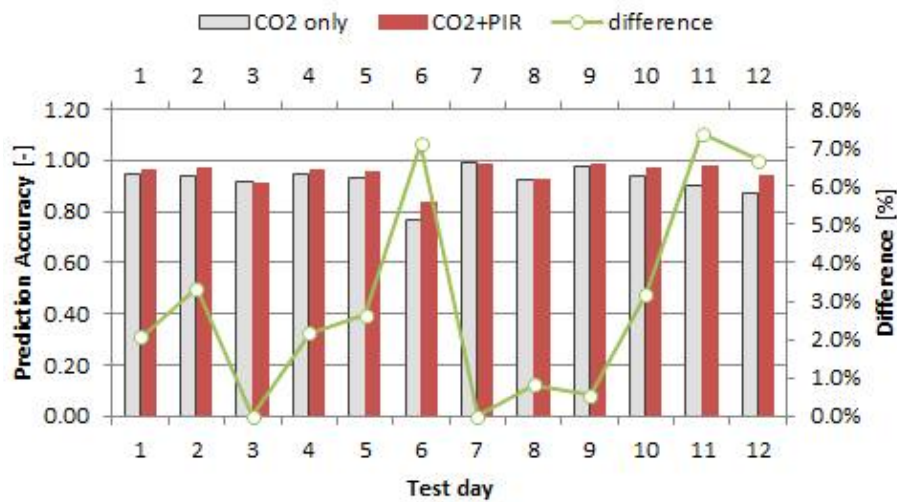
(d) 재실추정 결과 (2017.3.19.)

[그림 20] 재실 추정 결과

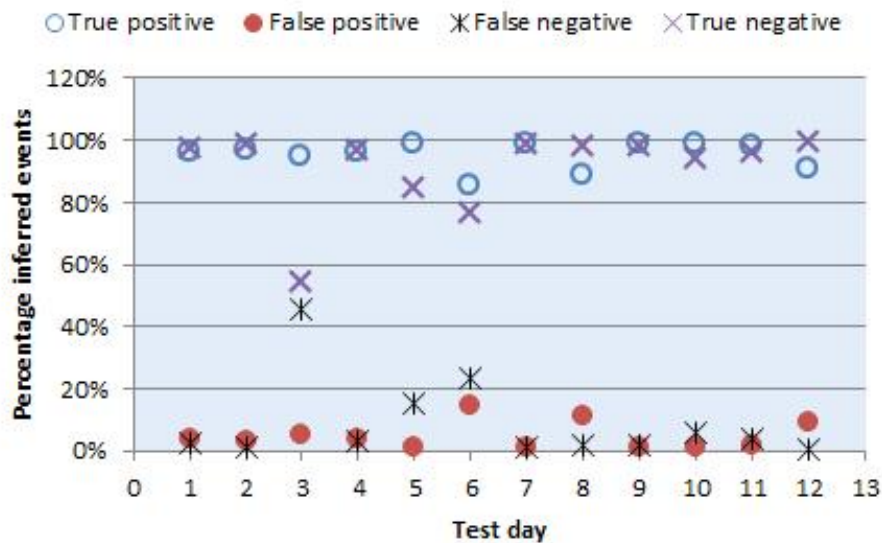
- 재실 추정의 정확도는 매 타임스텝의 재실 추정결과를, 재실을 재실로 판정하는 경우(TP: True Positive), 비재실을 재실로 판정하는 경우(FP: False Positive), 재실을 비재실로 판정하는 경우(FN: False Negative), 비재실을 비재실로 판정하는 경우(TN: True Negative)로 분류하고, TP와 TN의 합을 모든 추정결과의 개수로 나누어 산출 (Candanedo and Feldheim, 2016).
- 표 4 및 그림 16은 재실 추정 결과의 정확도를 나타낸 것으로, 재실추정 결과의 정확도는 83~99% (평균 95%)로 나타남
- 데이터의 학습 과정 없이, 비교적 간단한 재실추정 알고리즘으로 주거건물의 재실 추정이 가능한 것으로 판단
- 또한 CO₂ 농도만으로 재실추정 시 평균 정확도 92% 달성, CO₂ 농도+PIR 병용하여 재실추정시 평균 정확도 95% 달성 ([그림 21](a) 참조)

<표 6> 재실 추정 정확도

Test day	True positive	False positive	False negative	True negative	Accuracy
1	0.959	0.041	0.025	0.975	0.965
2	0.966	0.034	0.014	0.986	0.974
3	0.946	0.054	0.455	0.545	0.915
4	0.960	0.040	0.030	0.970	0.965
5	0.988	0.012	0.151	0.849	0.957
6	0.855	0.145	0.234	0.766	0.835
7	0.989	0.011	0.012	0.988	0.989
8	0.890	0.110	0.019	0.981	0.929
9	0.988	0.012	0.021	0.979	0.985
10	0.985	0.015	0.062	0.938	0.969
11	0.982	0.018	0.041	0.959	0.978
12	0.907	0.093	0.007	0.993	0.942



(a) 재실추정 방법에 따른 예측 정확도

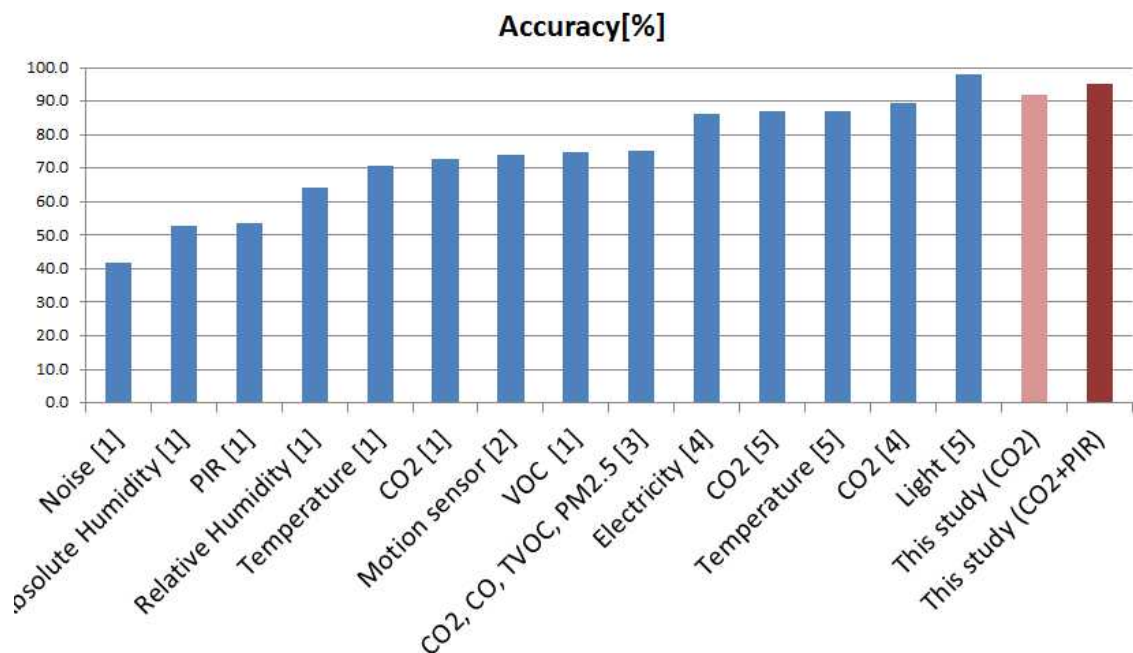


(b) CO₂ 농도 + PIR 병용 시 예측 정확도

[그림 21] 재실 추정 정확도 분석 결과

- CO₂ 농도+PIR 병용시 재실 추정 정확도 향상 정도는 0%~7.4% (평균 3%) 수준으로 예상보다는 크지 않았으나, 재실 중 거주자의 창문 개방에 의해 환기가 이루어진 날의 경우 (Test day 6, 11, 12) 효과가 상대적으로 크게 나타남. 즉 이러한 조건에서는 CO₂ 농도의 변화율로 재실추정이 되지 않는 상황 (환기로 인한 CO₂ 농도 감소)에서 재실자의 움직임을 감지하여 재실로 판정하므로, CO₂ 농도만으로 재실 추정하는 경우보다 정확도 향상 폭이 큰 것으로 나타남.
- 일부 측정 데이터, 특히 Test day 3의 경우 다른 날에 비해 False Negative가 매우 높고 True Negative가 매우 낮게 되어 전체적인 추정 정확도가 저하되는 결과를 보였는데, 이는 당일 실내 CO₂ 농도가 전반적으로 낮고(과도한 자연환기의 영향으로 판단됨), 외출 이후 CO₂ 농도의 감소율이 다른 날에 비해 현저히 낮아 CO₂ 농

- 도로 재실 판정이 제대로 이루어지지 않았기 때문으로 판단됨. 또한 재실 중에도 환기에 의해 CO₂ 농도가 낮아지는 구간이 있는데, 이 때 PIR 신호로 거주자 움직임이 감지되지 않아 재실인데 비재실로 판정되어 재실 추정 정확도가 낮아지게 됨
- 외출 및 귀가가 빈번하게 이루어지는 경우, 평일과 재실패턴이 상이한 휴일 등 다양한 재실 조건에서의 데이터 수집을 통해 재실 추정 알고리즘의 정확도 향상 방안에 대한 추가 연구 필요
 - SVM(Support Vector Machine), ANN(Artificial Neural Network), DT(Decision Tree) 등 기계학습 알고리즘을 활용한 기존 재실 추정 방법과 정확도를 비교할 경우에도, 본 연구의 재실 추정 알고리즘은 이와 동등한 수준의 정확도를 확보할 수 있는 것으로 판단되나, 보다 풍부한 데이터셋을 활용하여 재실 추정 알고리즘의 신뢰성을 추가적으로 검토할 필요가 있음



- [1] T.H. Pedersen, K.U. Nielsen, S. Petersen, Method for room occupancy detection based on trajectory of indoor climate sensor data, Build. Environ. 115 (2017) 147-156,
- [2] M. Amayri, A. Arora, S. Ploix, S. Bandhyopadhyay, Q.-D. Ngo, V.R. Badarla, Estimating occupancy in heterogeneous sensor environment, Energ. Buildings 129 (2016) 46-58
- [3] B. Dong et al, An information technology enabled sustainability test-bed (ITEST) for occupancy detection through an environmental sensing network, Energy Build. 42 (2010) 1038-1046.
- [4] S.H. Ryu, H.J. Moon, Development of an occupancy prediction model using indoor environmental data based on machine learning techniques, Build. Environ. 107 (2016) 1-9
- [5] L.M. Candanedo, V. Feldheim, Accurate occupancy detection of an office room from light, temperature, humidity and CO₂ measurements using statistical learning models, Energ. Buildings 112 (2016) 28-39

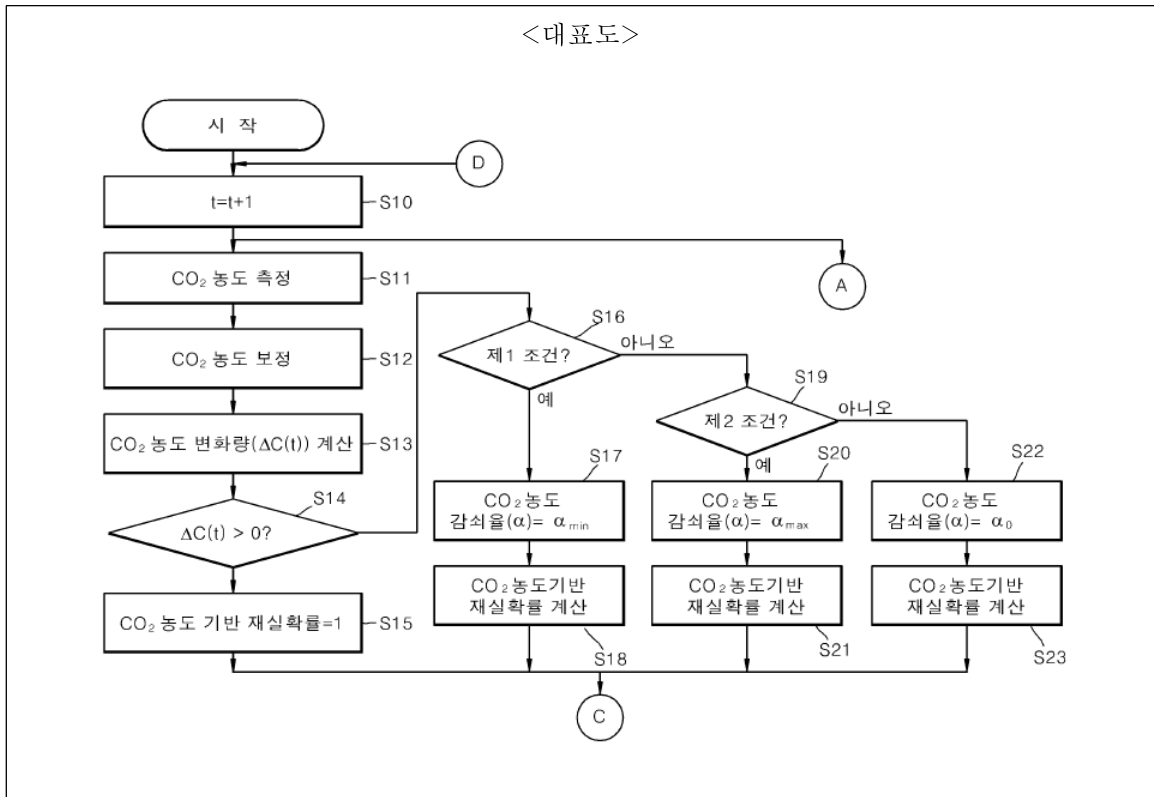
② 재실예측 알고리즘 특허 출원

- CO₂ 농도 및 PIR 신호를 활용한 재실추정 알고리즘 특허 출원

<요약문>

본 발명에 따른 CO₂농도와 PIR신호를 활용한 거주자 재실 추정방법은, CO₂ 농도가 감소하는 경우에 비재실이라고 판단하지 않고, 이전 시점의 재실 확률에서 미리 설정된 CO₂농도 감쇠율을 차감한 값을 현 시점의 CO₂농도 기반 재실확률로 계산함으로써, 환기 등의 이유로 CO₂농도가 변화하는 경우 재실 여부를 오판할 수 있는 것이 방지될 수 있다. 또한, CO₂농도 감쇠율을 미리 설정된 조건에 따라 다르게 설정함으로써, 보다 정확한 재실 판정이 이루어질 수 있다. 또한, PIR신호가 0인 경우에도 바로 비재실이라고 판단하지 않고, 미리 설정된 PIR신호 기반 감쇠율을 적용하여 PIR 신호 기반 재실확률을 계산함으로써, 센서의 민감도, 감지범위 및 거주자의 움직임 정도에 따라 재실인 상황에서 비재실로 오판되는 것을 방지할 수 있다.

<대표도>



[그림 22] 출원 특허 대표도

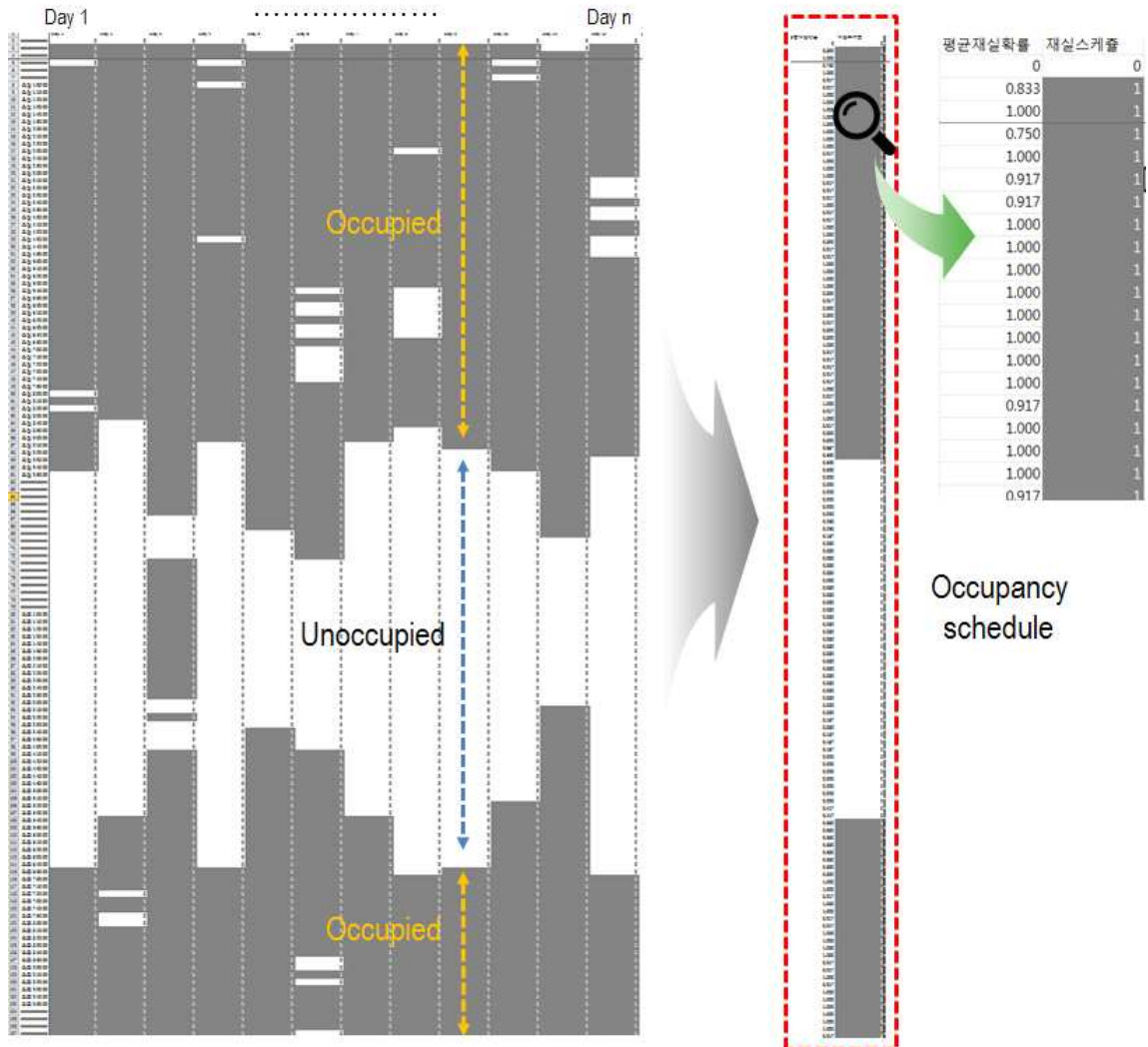
(라) 재실인식 복사난방시스템 제어 알고리즘

① 기동정지 제어 알고리즘

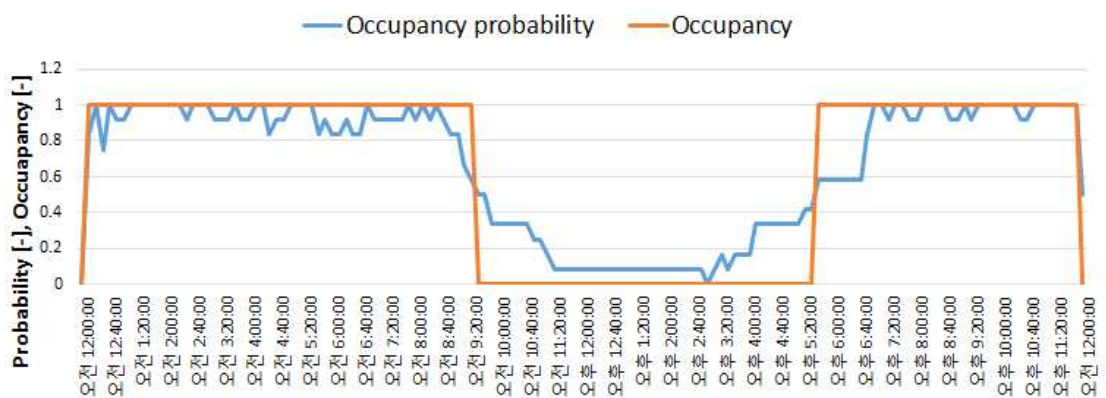
< 재실 패턴 추출 >

- (다)에서 도출된 재실 추정 알고리즘을 활용하여 10분 단위로 재실/비재실 여부를 구분하고, 2주간 데이터를 평균하여 해당 시간대 재실 확률을 산출
- 각 시간대의 재실을 1, 비재실을 0으로 하고 이를 2주간 평균하여 산출한 수치가

- 곧 해당시간대의 재실확률이라고 볼 수 있음
- 해당 시간대 재실확률이 특정값 (예: 0.5) 이상인 경우 재실로 판별



[그림 23] 재실 스케줄 추출 개념



[그림 24] 재실 스케줄 추출 결과

- 재실 스케줄을 외출/귀가시각으로 정량화하기 위해서는, 특정일의 외출/귀가 시각을 이전 일의 외출/귀가 시각과 평균한 값을 저장하고, 이 평균값을 다시 다음 날의 외출/귀가 시각과 평균한 값을 산출하는데 넘겨주는 방식을 취할 수 있음
- 즉 아래 식과 같이 표현할 수 있으며, 이렇게 도출된 외출/귀가 시각을 그래프로 나타내면 [그림 25]와 같음
- 적용 대상 주택의 재실스케줄이 비교적 일정한 편이어서 외출/귀가 시각이 빠른 속도로 수렴하는 것으로 나타났으나, 재실 스케줄이 다소 불규칙적인 경우에는 일반화된 외출/귀가 시각을 도출하기까지에는 더 많은 시간이 소요될 것으로 예상됨

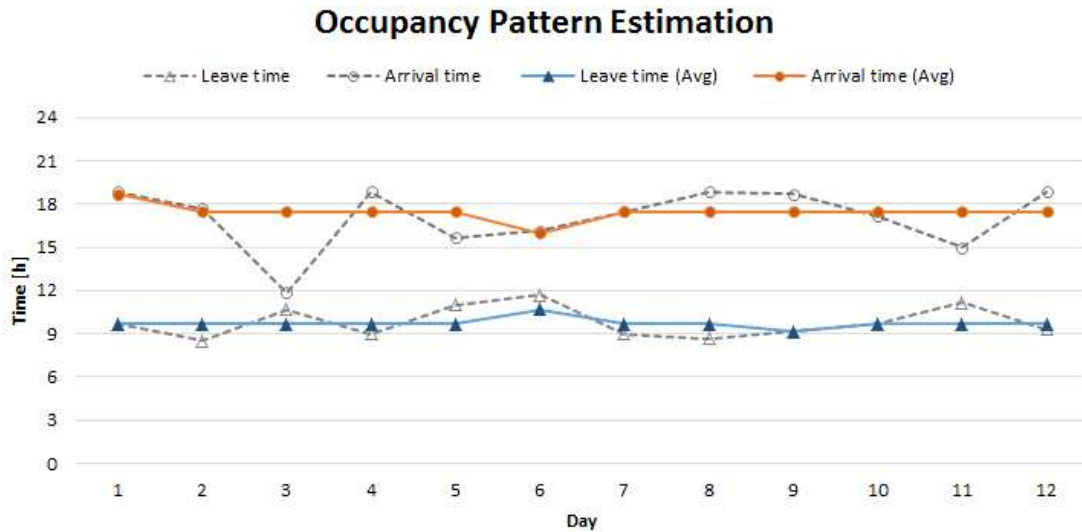
$$T_{leave,n} = \frac{\sum_{k=1}^n (T_{leave,k})}{n}$$

$$T_{arrive,n} = \frac{\sum_{k=1}^n (T_{arrive,k})}{n}$$

여기서,

$T_{leave,n}$: n 번째 일까지의 평균 외출시각 [h]

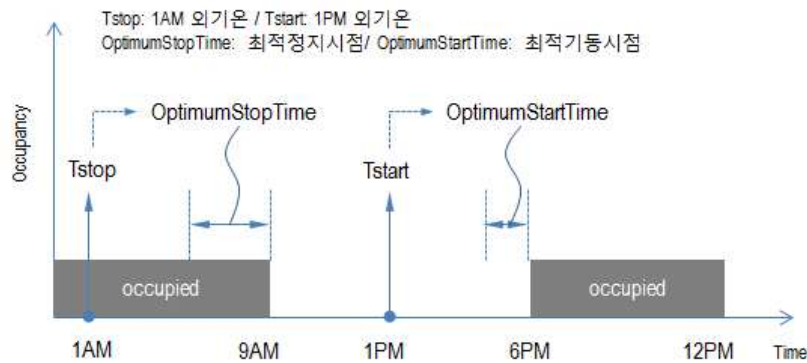
$T_{arrive,n}$: n 번째 일까지의 평균 귀가시각 [h]



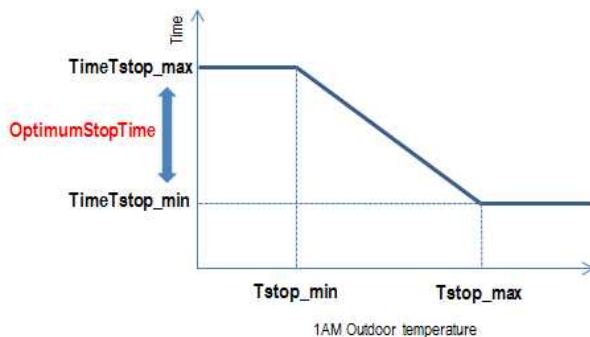
[그림 25] 외출/귀가 시각 추출 결과

< 난방 정지/기동 제어 알고리즘 >

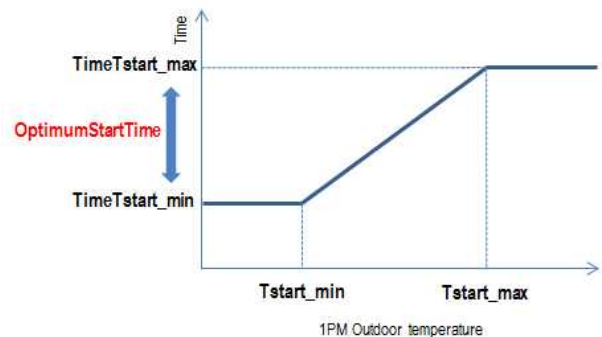
- 향후 상용 제어기에도 탑재할 수 있도록 간단한 사칙연산으로 구현할 수 있는 정지/기동 알고리즘 작성
- 정지 시점은 재실 중 특정 시점(예: 오전 1시)의 외기온에 따라 결정하되, 외기온이 낮은 경우 정지 시점을 늦추고 외기온이 높은 경우 정지 시점을 앞당김
- 기동 시점은 비재실 중 특정 시점(예: 오후 1시)의 외기온에 따라 결정하되, 외기온이 낮은 경우 기동 시점을 앞당기고 외기온이 높은 경우 기동 시점을 늦춤
- Energyplus의 EMS 기능으로 정지/기동 알고리즘을 구현하고, 열쾌적 및 에너지 성능 분석 실시



(a) 재실 스케줄과 연계한 정지/기동 제어 개념



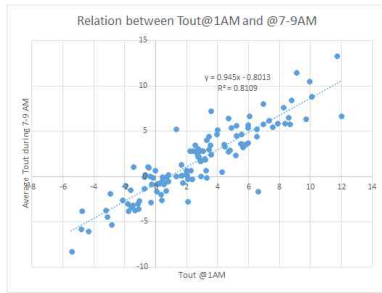
(b) 정지 시점 결정 알고리즘 개념



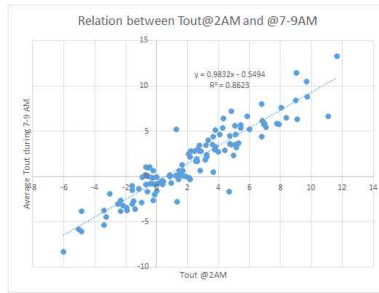
(c) 기동 시점 결정 알고리즘 개념

[그림 26] 정지/기동 제어 알고리즘 개념

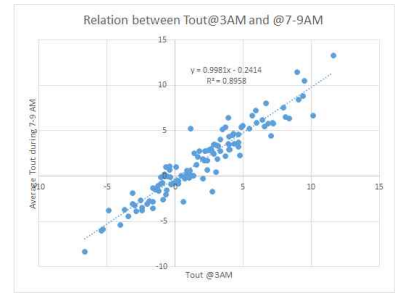
- 정지/기동 시점을 결정하는 데 참조된 외기온이 각각 오전 1시와 오후 1시인 것은 해당시간 대의 외기온이 정지 시점(주로 오전 6~9시 사이)과 기동 시점(주로 오후 5~6시 사이)의 외기온을 대변할 수 있다는 가정에서 근거함
- 그러나 다음 [그림 27], [그림 28]에서와 같이, 특정 시점의 외기온과 정지/기동 시점 외기온과의 상관성은 정지/기동 시점에 가까울수록 높게 나타나므로, 정지/기동시점 이전이면서 정지/기동시점의 외기온을 효과적으로 대변할 수 있는 기준 시점에 대한 추가 연구가 필요



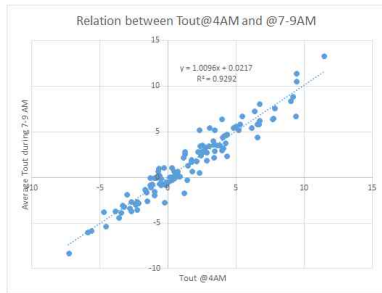
(a) 오전 1시



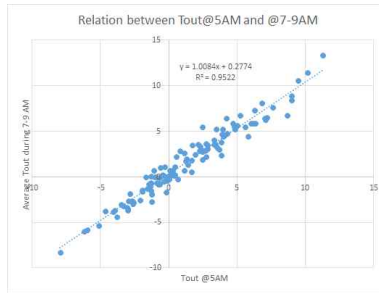
(b) 오전 2시



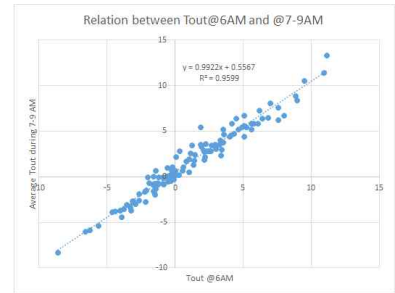
(c) 오전 3시



(d) 오전 4시

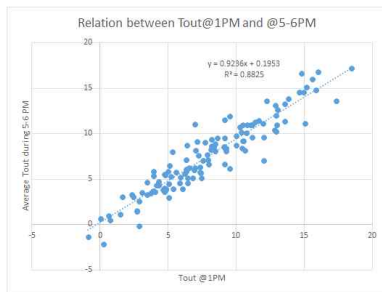


(e) 오전 5시

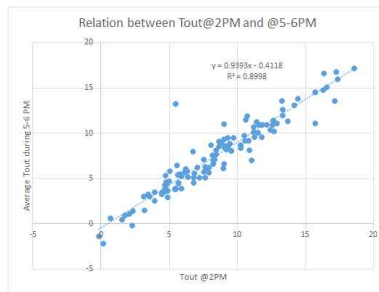


(f) 오전 6시

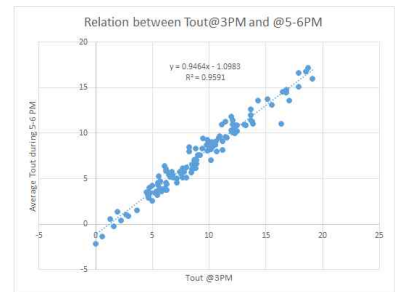
[그림 27] 특정시각의 외기온과 정지시점(오전 7-9시)의 외기온간 상관관계



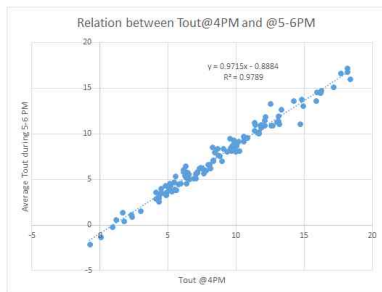
(a) 오후 1시



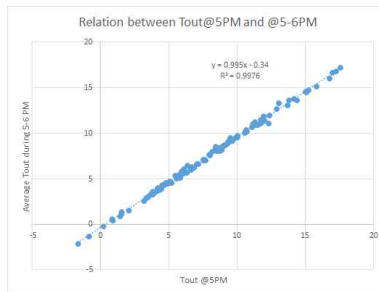
(b) 오후 2시



(c) 오후 3시



(d) 오후 4시



(e) 오후 5시

[그림 28] 특정시각의 외기온과 이동시점(오후 5-6시)의 외기온간 상관관계

② 셋백 제어 알고리즘

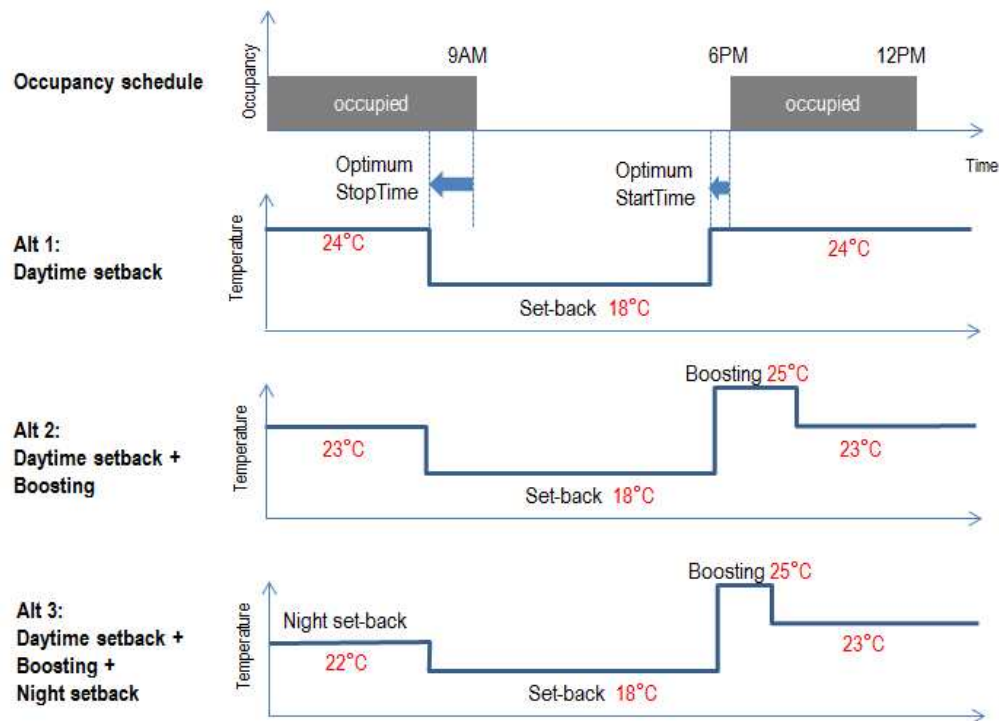
- 향후 상용 제어기에도 탑재할 수 있도록 시간별 설정온도 차등화 알고리즘 대안 검토

[Alt 1] 정지시점과 기동시점 사이 구간은 기본적으로 Deep set-back, 그 외의 경우 일반 설정온도

[Alt 2] Alt 1 + 기동 직후 공급열량을 증대시켜 실온 회복이 빠르게 되도록 함

[Alt 3] Alt 2 + 취침 시 쾌적 온도가 낮아짐에 착안하여, 야간 set-back 적용

- 야간 Set-back 제어 시 온수온도에 대한 Set-back 제어를 병용하여 열원 효율을 증대하도록 함
- 정지/기동 제어와 셋백제어 알고리즘을 EnergyPlus Runtime Language(ERL)로 작성하여 제안 알고리즘의 실온제어성능과 에너지 절감성능을 평가



[그림 29] Set-back 제어 알고리즘 개념

<정지/기동 및 Set-back 제어 알고리즘 ERL 구현>

```
EnergyManagementSystem:GlobalVariable, CurrentOptimumStartTime;
EnergyManagementSystem:GlobalVariable, CurrentOptimumStopTime;
EnergyManagementSystem:ProgramCallingManager,
    OptimumStop&Start,
    BeginTimestepBeforePredictor,
    OptimumSS;
EnergyManagementSystem:ProgramCallingManager,
    InitConstants,
    BeginNewEnvironment,
    Init;
```

```

EnergyManagementSystem:Program,
  Init,
  SET CurrentOptimumStartTime = 15,
  SET CurrentOptimumStopTime = 7;

EnergyManagementSystem:Sensor,
  SiteOutdoorAirDrybulbTemperature,
  Environment,
  Site Outdoor Air Drybulb Temperature;

<ForAllOccupiedHeatedZones>
EnergyManagementSystem:Actuator,
  Schedule_Value_<LoopZoneVariableName>,
  <LoopZoneVariableName> HEATING SETPOINT SCHEDULE,
  Schedule:Compact,
  Schedule Value;
<LoopNextZone>

! set optimum stop time
EnergyManagementSystem:Program,
  OptimumSS,
  ! set the optimum stop time at 1am
  IF (CurrentTime == 1),
    SET Tstop = SiteOutdoorAirDrybulbTemperature,
    ! outside temp for latest stop time
    SET TstopMin = -5,
    ! earliest start time
    SET TimeTstopMin = 6,
    ! outside temp for earliest stop time
    SET TstopMax = 5,
    ! latest stop time
    SET TimeTstopMax = 4,
    IF (Tstop <= TstopMin),
      SET Timestop = TimeTstopMin,
    ELSEIF (Tstop >= TstopMax),
      SET Timestop = TimeTstopMax,
    ELSE,
      SET m1 = (TimeTstopMax - TimeTstopMin) / (TstopMax - TstopMin),
      SET C1 = (TimeTstopMin + TimeTstopMax - m1 * (TstopMin + TstopMax)) / 2,
      SET Timestop = m1 * Tstop + C1,
    ENDIF,
    SET CurrentOptimumStopTime = Timestop,
  ENDIF,

  ! set the optimum start time at 1pm
  IF (CurrentTime == 13),
    SET Tstart = SiteOutdoorAirDrybulbTemperature,
    ! outside temp for earliest start time
    SET TstartMin = 0,
    ! earliest start time
    SET TimeTstartMin = 17,
    ! outside temp for latest start time
    SET TstartMax = 10,
    ! latest start time
    SET TimeTstartMax = 18,
    IF (Tstart <= TstartMin),
      SET Timestart = TimeTstartMin,
    ELSEIF (Tstart >= TstartMax),
      SET Timestart = TimeTstartMax,
    ELSE,
      SET m2 = (TimeTstartMax - TimeTstartMin) / (TstartMax - TstartMin),
      SET C2 = (TimeTstartMin + TimeTstartMax - m2 * (TstartMin + TstartMax)) / 2,
      SET Timestart = m2 * Tstart + C2,
    ENDIF,
    SET CurrentOptimumStartTime = Timestart,
  ENDIF,

! override heating setpoint schedule:

```

```

<ForAllOccupiedHeatedZones>
  If (CurrentTime < CurrentOptimumStopTime),
    SET Schedule_Value_<LoopZoneVariableName> = <LoopZoneAttribute HeatingDesignSetPointTemperature>,
  ELSEIF (CurrentTime < CurrentOptimumStartTime),
    SET Schedule_Value_<LoopZoneVariableName> = <LoopZoneAttribute HeatingSetBackSetPointTemperature>,
  ELSE,
    SET Schedule_Value_<LoopZoneVariableName> = <LoopZoneAttribute HeatingDesignSetPointTemperature>,
  ENDIF,
<LoopNextZone>
;
! Water temperature reduction during pre-stop period
If (CurrentTime >= (CurrentOptimumStopTime-2)) && (CurrentTime < CurrentOptimumStopTime),
  SET Schedule_Value_BOILERCONTROL = 45,
ELSE,
  SET Schedule_Value_BOILERCONTROL = 60,
ENDIF,
;

EnergyManagementSystem:OutputVariable,
  Optimum Start Time,
  CurrentOptimumStartTime,
  Averaged,
  ZoneTimeStep ;

EnergyManagementSystem:OutputVariable,
  Optimum Stop Time,
  CurrentOptimumStopTime,
  Averaged,
  ZoneTimeStep ;

<If BuildingAttribute TimesteplyOutput = 1 Then>
Output:Variable,
  *,
  Optimum Start Time,
  timestep;
<Endif>

<If BuildingAttribute TimesteplyOutput = 1 Then>
Output:Variable,
  *,
  Optimum Stop Time,
  timestep;
<Endif>

```

③ 알고리즘 성능평가

< 성능평가 방법 >

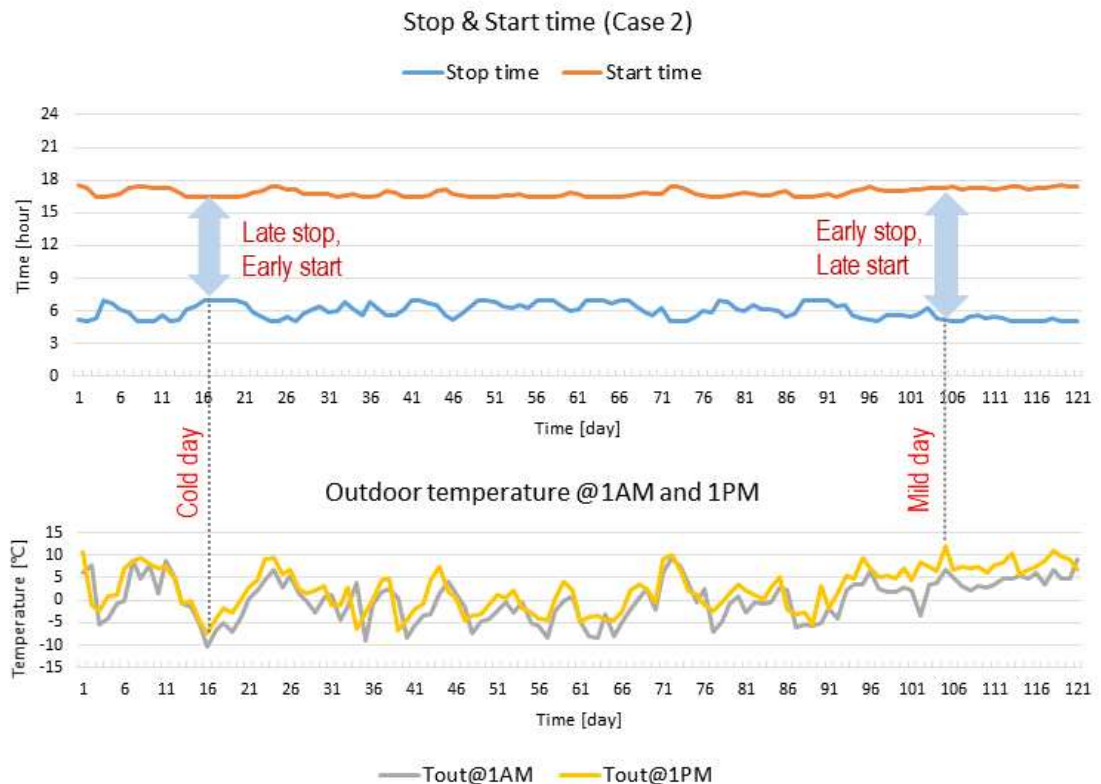
- 열쾌적 평가: ISO 7730의 PMV 및 작용온도(Operative Temperature) 적용
- 에너지성능 평가: ISO 13790 방법론에 근거하여, 난방을 위한 단위면적당 에너지 소요량을 지표로 평가
- Baseline(재실자에 의한 수동 on/off 제어)를 기준으로, 알고리즘의 파라미터 변경시 쾌적 및 에너지 성능 분석
- 설정온도는 국내주택의 동절기 실내온도 조사결과(Kim et al 2014)를 근거로 24℃로 설정 (비재실시 set-back 온도는 18℃로 설정)

〈표 6〉 알고리즘 성능평가 Case

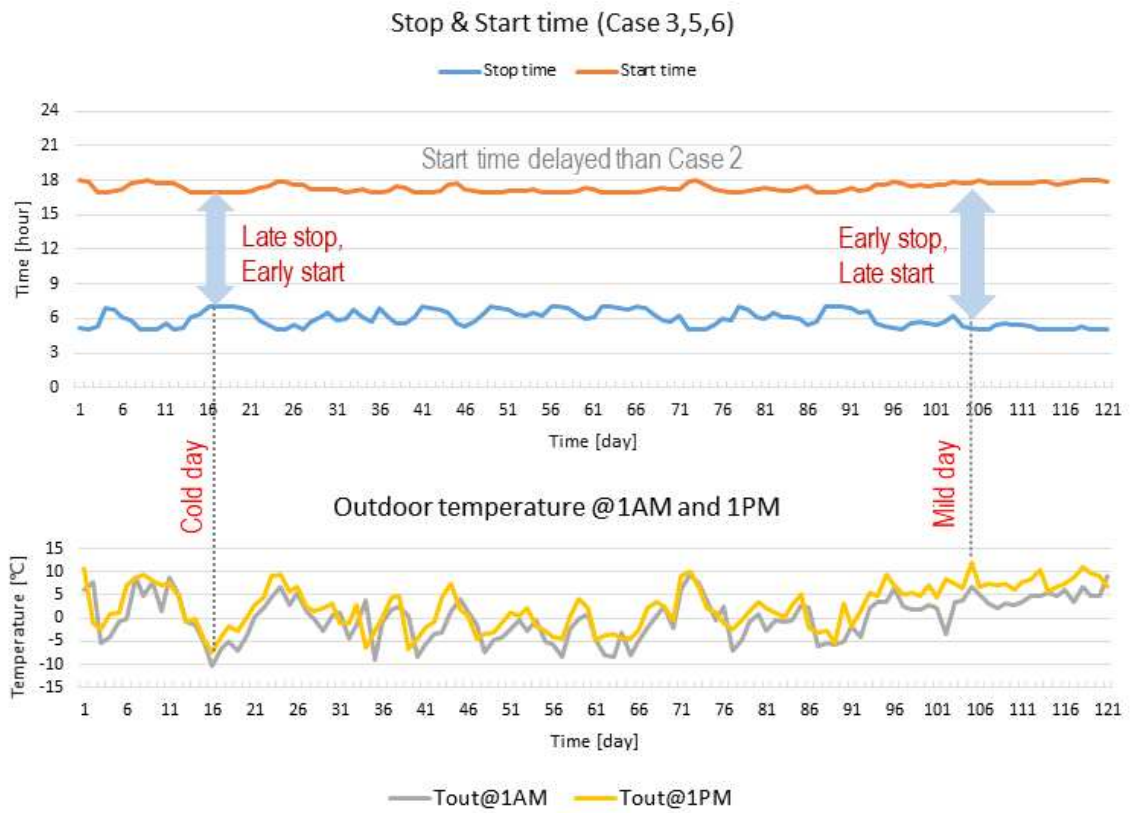
	정지기동제어 Parameter								온수온도	실온 제어 기준	설정실온 sequence	
	Tstop _min	TimeTstop _max	Tstop _max	TimeTstop _min	Tstart _min	TimeTstart _min	Tstart _max	TimeTstart _max				
Case 0	-5℃	09h	5℃	9h	0℃	18h	10℃	18h	80℃ 고정	건구온도	24℃ -18℃ -24℃	기본 set-back
Case 1	-5℃	09h	5℃	9h	0℃	18h	10℃	18h	60℃ 고정	건구온도	24℃ -18℃ -24℃	기본 set-back
Case 2	-5℃	07h	5℃	5h	0℃	16.5h	10℃	17.5h	60℃ 고정	건구온도	24℃ -18℃ -24℃	기본 set-back
Case 3	-5℃	07h	5℃	5h	0℃	17h	10℃	18h	60℃ 고정	건구온도	24℃ -18℃ -24℃	기본 set-back
Case 4	-5℃	06h	5℃	4h	0℃	17h	10℃	18h	60℃ 고정	건구온도	24℃ -18℃ -24℃	기본 set-back
Case 5	-5℃	07h	5℃	5h	0℃	17h	10℃	18h	Set-back 적용	건구온도	24℃ -18℃ -24℃	기본 set-back
Case 6	-5℃	07h	5℃	5h	0℃	17h	10℃	18h	Set-back 적용	작용온도	24℃ -18℃ -24℃	기본 set-back
Case 7	-5℃	06h	5℃	4h	0℃	17h	10℃	18h	Set-back 적용	작용온도	24℃ -18℃ -24℃	기본 set-back
Case 8	-5℃	06h	5℃	4h	0℃	17h	10℃	18h	Set-back 적용	작용온도	23℃ -18℃ -24℃	야간 set-back 추가
Case 9	-5℃	06h	5℃	4h	0℃	17h	10℃	18h	Set-back 적용	작용온도	23℃ -18℃ -25℃ -23℃	야간 set-back + boosting
Case 10	-5℃	06h	5℃	4h	0℃	17h	10℃	18h	Set-back 적용	작용온도	21℃ -18℃ -25℃ -22℃	야간 deep set-back + boosting

< 정지/기동시각 분석 결과 >

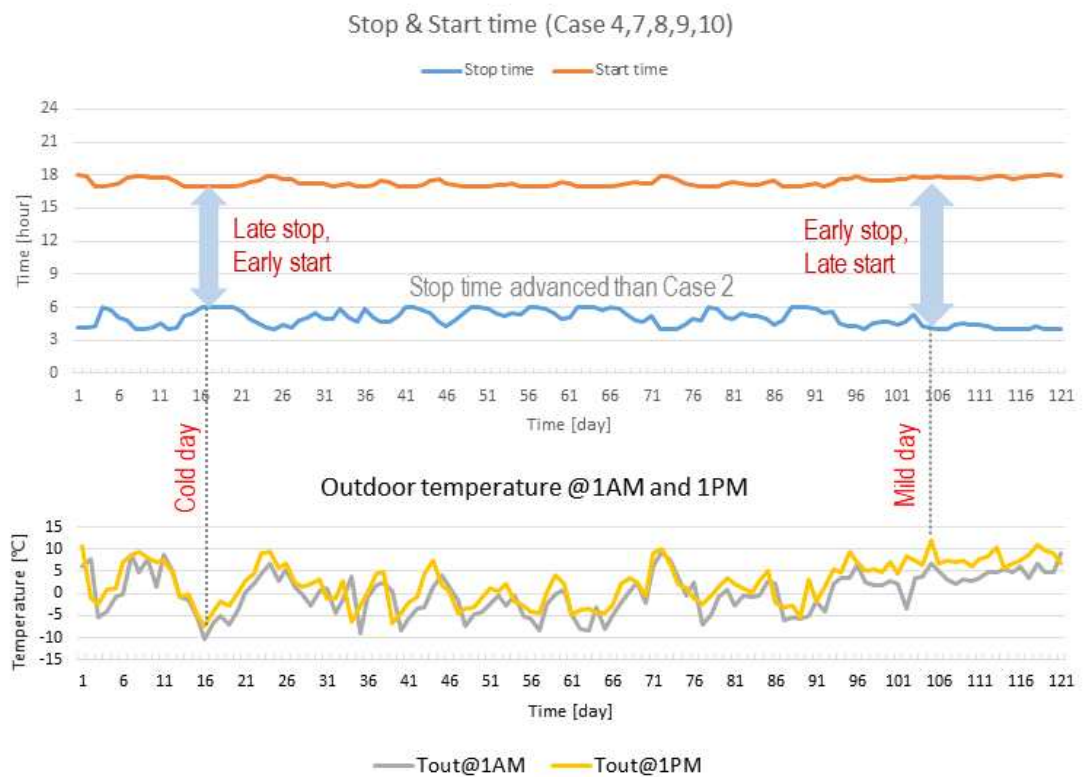
- 거주자 재실스케줄은 0시~9시 재실, 9시~18시 비재실, 18시~24시 재실로 가정
- 정지/기동시각 결정 파라미터(T_{stop_min} , T_{stop_max} , T_{start_min} , T_{start_max})를 조절하여 산출된 정지/기동시각은 다음 그림과 같음
- 외기온이 다소 낮은 날의 경우 열량이 충분히 공급되어야 하므로 정지시각은 늦고 기동시각은 빠른 반면, 외기온이 비교적 높은 날의 경우에는 필요열량이 상대적으로 작아도 되므로 정지시각은 이르고 기동시각은 늦춰지게 됨
- Baseline (Case 0)의 경우 거주자의 외출/귀가에 맞춰 수동으로 정지/기동하는 것이므로 정지시각은 오전 9시, 기동시각은 오후 6시인 것으로 가정
- 에너지 절감을 위해서는 정지시각을 가능한 앞당기고, 기동시각은 가능한 늦추는 것이 필요하나, 재실기간 중 쾌적 조건을 만족시키는 범위에서 조절해야 함



[그림 30] 정지/기동시각 (Case 2)



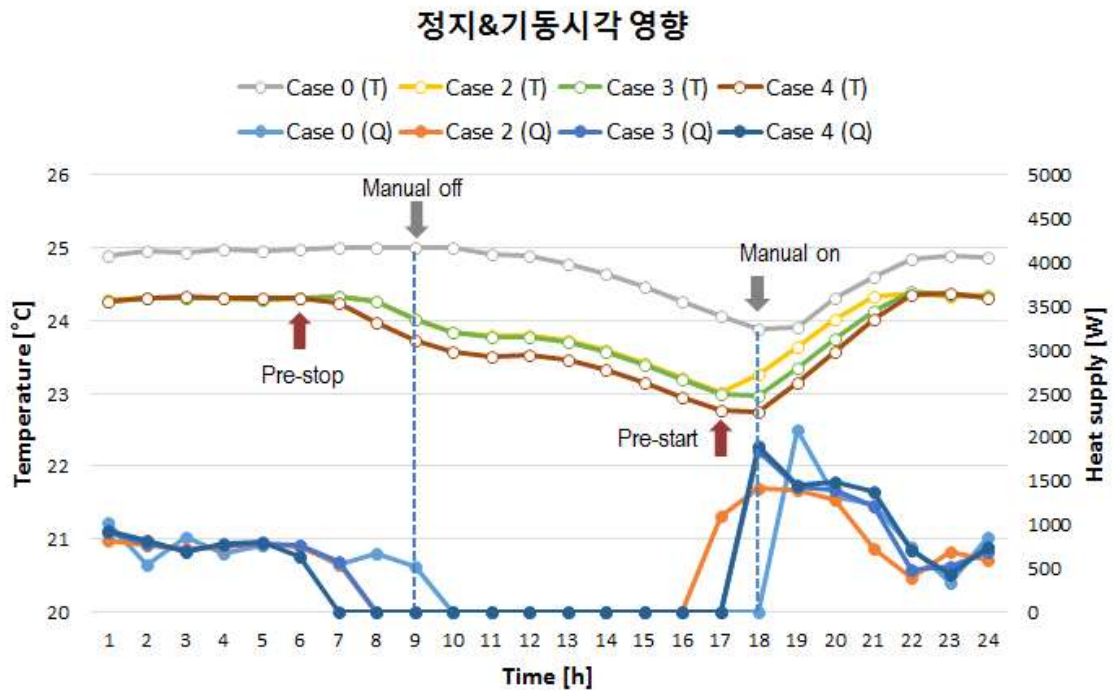
[그림 31] 정지/기동시각 (Case 3,5,6)



[그림 32] 정지/기동시각 (Case 4,7,8,9,10)

< 정지/기동시각 조절효과 (Case 2~4) >

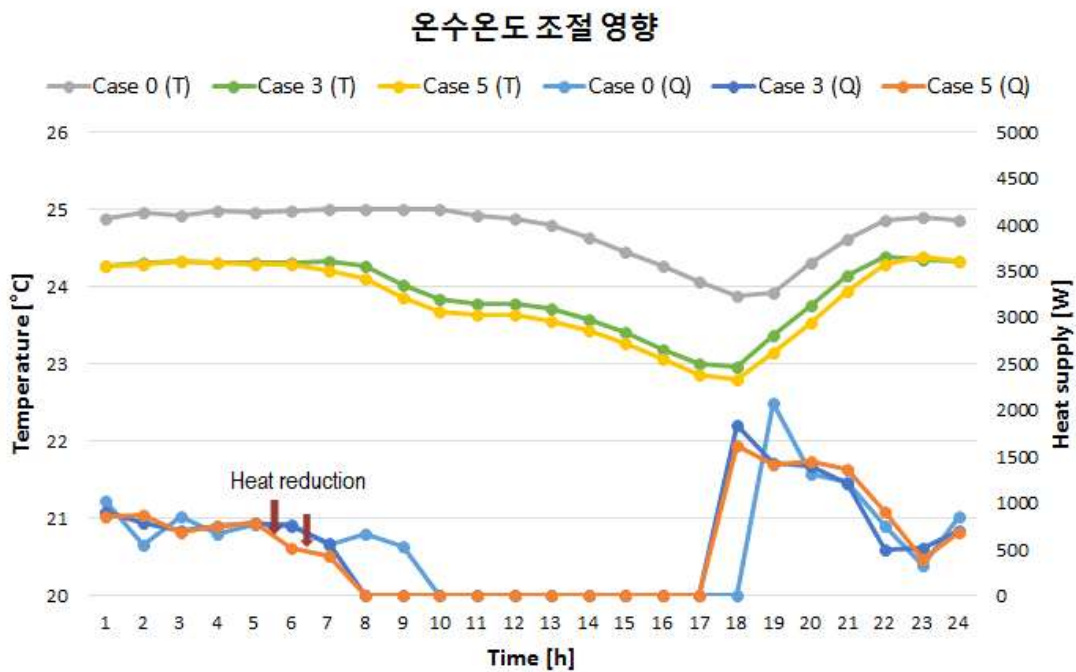
- Baseline (Case 0)의 경우 외출 시점에 거주자가 난방을 중단하여, 복사난방시스템의 축열 영향으로 비재실 기간중에도 실온이 24℃ 아래로 떨어지지 않으므로 에너지 낭비의 요인이 됨.
- 그러나 Case 2~4와 같이 외출시점 2~3시간 이전에 난방을 정지하고, 귀가시점 이전 1시간 이전에 난방을 기동할 경우, 쾌적성을 해치지 않는 수준에서 난방 에너지를 절감할 수 있음
- Pre-stop으로 인해 불필요한 열량공급을 방지하고, Pre-start로 인해 귀가 후 실온을 설정온도까지 회복시키는데 도움을 줄 수 있음
- 정지/기동시각 조절로 Baseline 대비 2.5~3.4%의 난방에너지 절감 가능 (Baseline: 73.5kWh/m², Case 2: 72.3kWh/m², Case 3: 71.7kWh/m², Case 4: 71.0 kWh/m²)
- 평균 PMV는 Baseline: 0.275, Case 2: 0.204, Case 3: 0.190, Case 4: 0.172



[그림 33] 정지/기동시각 조절 효과 (T:실온, Q:공급열량)

< 온수온도 조절효과 (Case 5) >

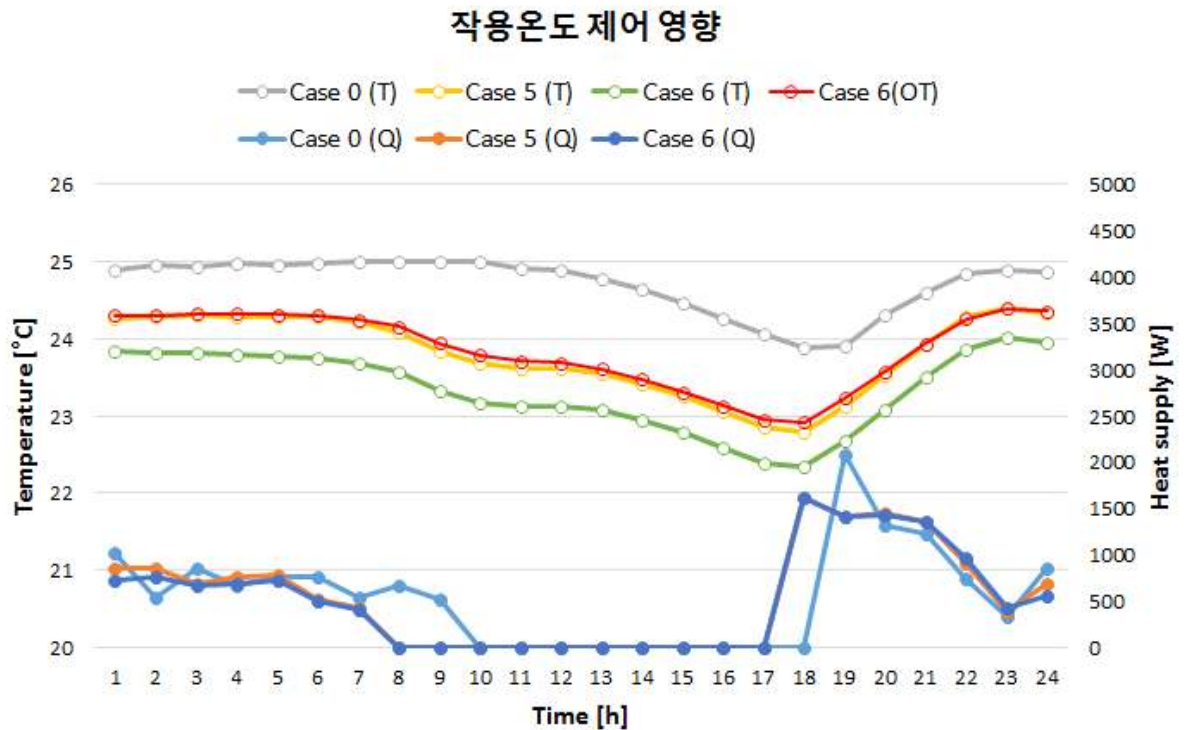
- 정지시점 이전의 소정 시간(2시간)동안 공급 열량을 점차적으로 감소시키는 의미로 온수온도를 15℃ 낮추어 공급
- 공급열량이 줄어들어 에너지 절약에 도움이 되며, 이 경우 실온의 하강 정도는 매우 작은 편으로 쾌적에 악영향을 미치지 않음
- 온수온도가 낮은 경우 온수 ΔT 도 낮아질 수 있으며, 이 경우 보일러의 입구온도 (Energy Water Temperature)가 낮아지게 되므로 보일러 효율 증가로 추가적인 에너지 절감 가능성이 있음
- Pre-stop 제어와 함께, 일정시간 동안 온수온도의 set-back 제어를 통해 에너지 절감이 가능할 것으로 판단됨
- 다만 Pre-start 제어 시점에서는 설정실온에 신속하게 도달하기 위해서 온수온도를 높이는 Boosting 제어가 필요하다고 사료됨
- 정지/기동시각 조절+온수온도 조절을 병행할 시 Baseline 대비 5%의 난방에너지 절감 가능 (Baseline: 73.5kWh/m², Case 2: 72.3 Case 2: 71.7 Case 3
- 평균 PMV는 Baseline: 0.275, Case 5: 0.166



[그림 34] 온수온도 조절 효과 (T:실온, Q:공급열량)

< 작용온도 제어 효과 (Case 6,7) >

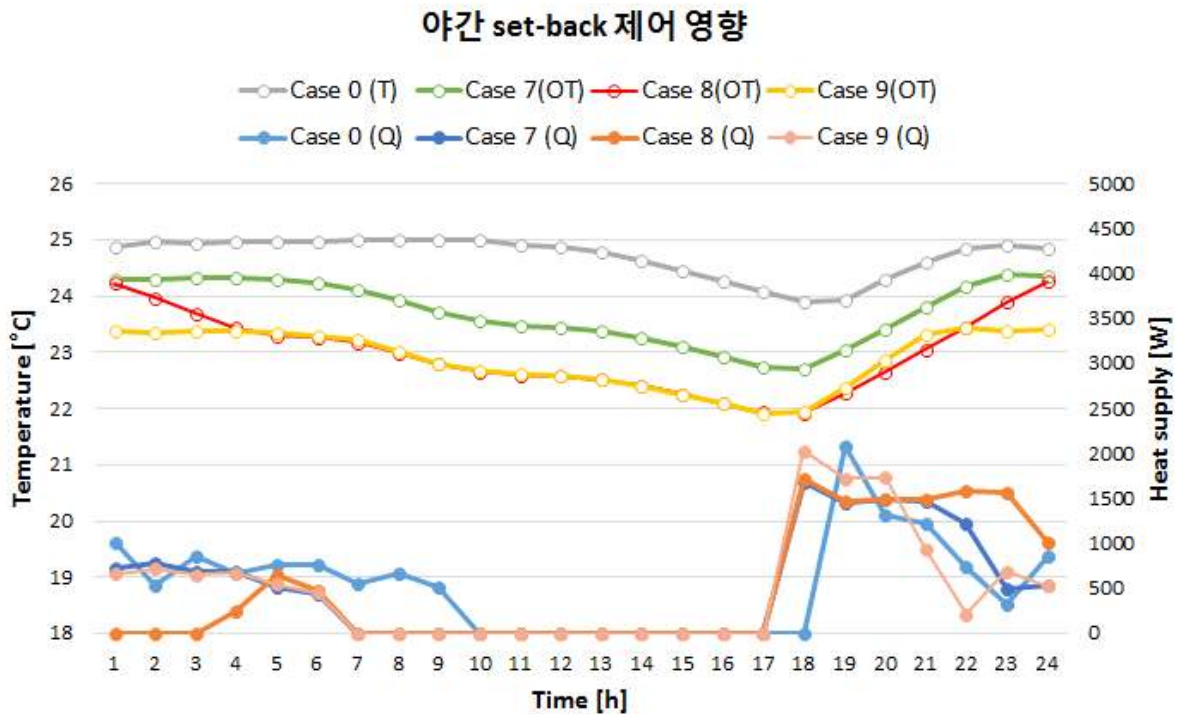
- 바닥복사난방 시스템이 적용된 공간에서는 인체와 실내 표면간의 복사 열교환이 이루어지므로, 열쾌적 평가 시 건구온도(Dry-bulb temperature)가 아닌 작용온도(OT: Operative temperature)를 이용하는 것이 보다 합리적임(Olesen 2002)
- 작용온도는 건구온도와 MRT의 평균치로 근사할 수 있으며, ASHRAE Standard 55에서는 동절기 쾌적범위를 작용온도 21~25°C(clo=1.0, met 1.1~1.3, 상대습도 40% 가정)로 권고하고 있음
- 복사난방이 적용된 경우, 높은 바닥표면온도로 인해 일반적으로 작용온도가 건구온도보다 높게 형성되므로, 실온이 다소 낮더라도 열쾌적을 유지할 수 있음
- 시뮬레이션 모델의 난방시스템을 작용온도 기준으로 제어할 경우, 아래 그림과 같이 실온(건구온도)보다 작용온도가 0.5°C 이상 높게 형성되어 쾌적 조건을 유지하면서 에너지 절감 효과를 달성할 수 있음
- 정지/기동시각 조절+온수온도 조절과 함께 작용온도 기준 제어를 병행할 시 Baseline 대비 7.4~7.9%의 난방에너지 절감 가능 (Baseline: 73.5kWh/m², Case 6: 68.1kWh/m², Case 7: 67.7kWh/m²)
- 평균 PMV는 Baseline: 0.275, Case 6: 0.059, Case 7: 0.027



[그림 35] 작용온도 제어 효과 (T:실온(건구온도), OT: 작용온도, Q:공급열량)

< 야간 set-back 제어 효과 (Case 8,9) >

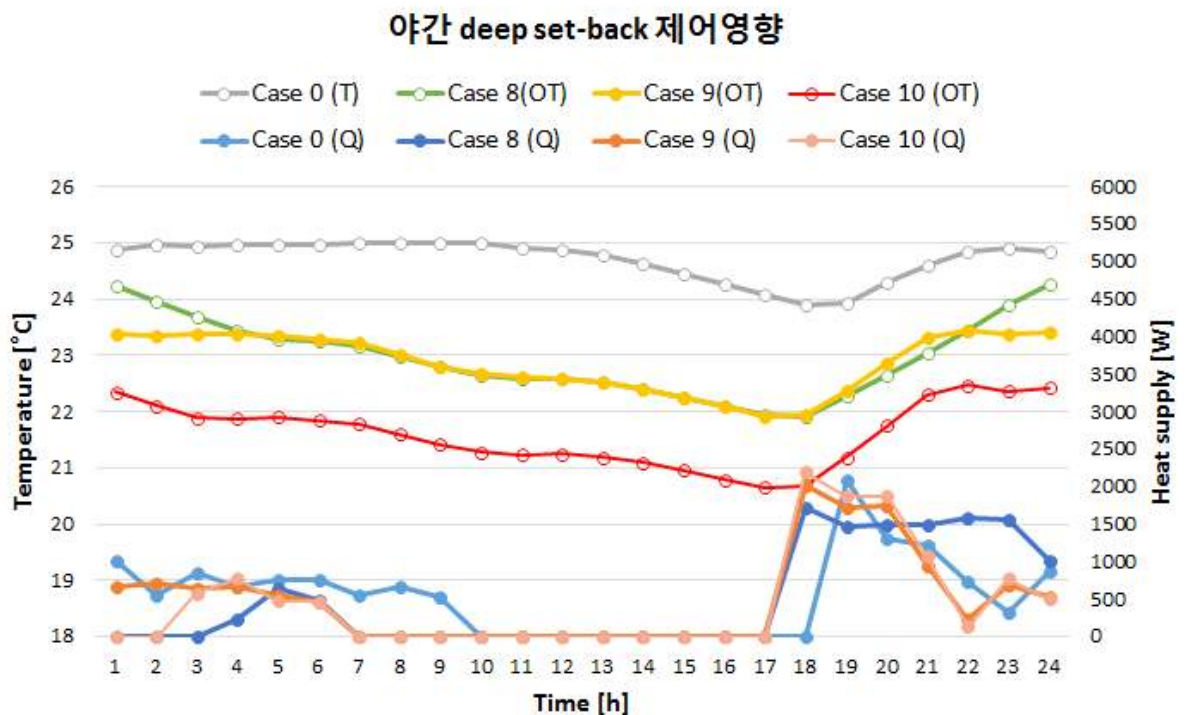
- Case 8은 0시~정지시각 구간에서 설정온도를 1℃ 낮춘(set-back) 조건이며, Case 9는 기동시각 이후 1시간 동안 설정온도를 2℃ 높였다가(boosting) 그 이후 다시 set-back 제어를 적용한 조건
- 야간 set-back 제어는 전반적으로 실온을 강하시키는 경향이 있어 열쾌적성을 저하시킬 수 있으므로, Case 8은 취침시간 동안만 set-back을 적용한 것이고, Case 9는 set-back 구간을 확대하되 기동시각에서 공급열량을 증가시켜 실온 저하를 방지하고자 한 것임
- 야간 set-back을 할 경우 설정온도($24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) 이하로 떨어지는 구간이 발생하나, 대부분 비제실 구간이며 작용온도 기준으로 했을 때는 쾌적 조건인 21°C 이상이므로 열쾌적 문제는 없을 것으로 판단됨
- 정지/기동시각 조절+온수온도 조절+작용온도 기준 제어와 함께 야간 set-back 제어를 병행할 시 Baseline 대비 10.7~13.3%의 난방에너지 절감 가능 (Baseline: 73.5kWh/m^2 , Case 8: 65.6kWh/m^2 , Case 9: 63.7kWh/m^2)
- 평균 PMV는 Baseline: 0.275, Case 8: -0.038, Case 9: -0.113



[그림 36] 야간 set-back 제어 효과 (T:실온(건구온도), OT: 작용온도, Q:공급열량)

< 야간 deep set-back 제어 효과 (Case 10) >

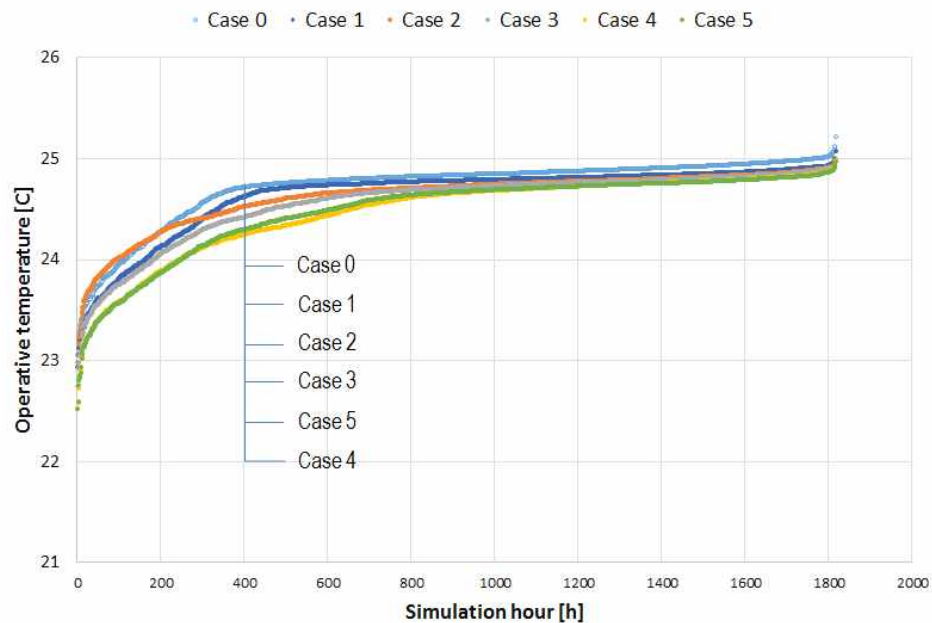
- Case 10은 Case 9의 조건에, 0시~정지시각 구간의 설정온도를 2℃ 더 낮춘 (deep set-back) 조건
- 야간 deep set-back 제어를 설정한 근거는, 바닥복사난방 공간에서 취침시 발한량이 상대적으로 높기 때문에 실내온도를 낮추어야 한다는 기존연구(Maerefat et al 2012) 및 수면 시 쾌적온도는 작용온도 기준으로 15℃까지 낮출 수 있다는 기존연구 (Leung and Ge 2013)를 참조한 것
- 또한 동절기 야간 취침시 이불은 추가적인 착의량으로 작용하므로, 상대적으로 낮은 실내온도에서도 쾌적 기준을 만족할 수 있을 것으로 예상됨
- Deep set-back 적용시 작용온도가 21℃ 미만으로 떨어지는 구간이 발생하나, 재실 시간의 대부분은 21℃ 이상으로 유지되어 쾌적 기준을 만족하는 것으로 분석됨
- 정지/기동시각 조절+온수온도 조절+작용온도 기준 제어와 함께 야간 deep set-back 제어를 병행할 시 Baseline 대비 20.3%의 난방에너지 절감 가능 (Baseline: 73.5kWh/m², Case 10: 58.6kWh/m²)
- 평균 PMV는 Baseline: 0.275, Case 10: -0.440*
※ 취침시 clo=1.5, met=0.9로 할 경우 평균 PMV=-0.190



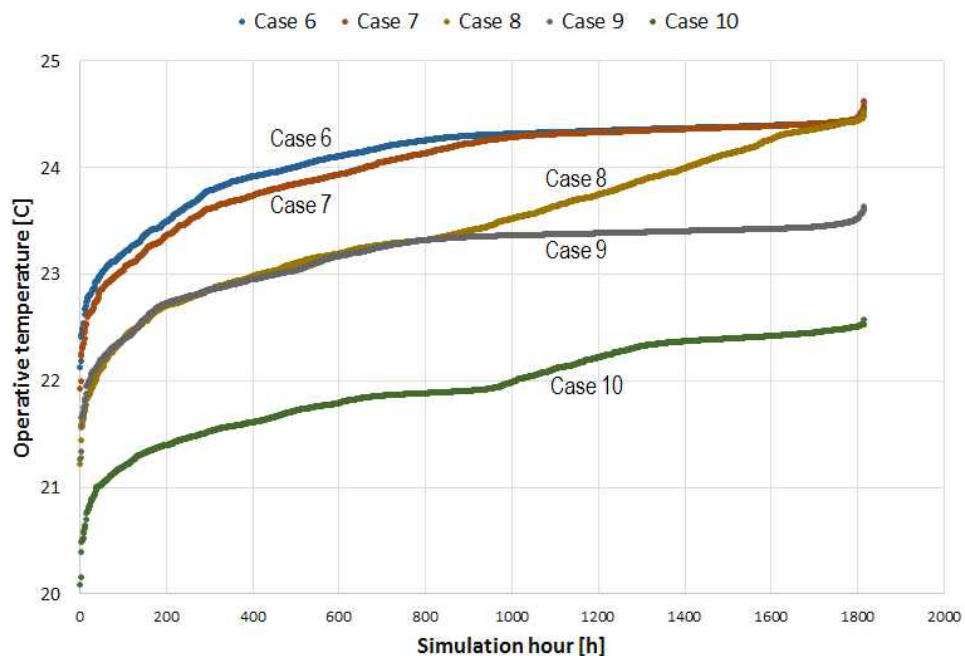
[그림 37] 야간 deep set-back 제어 효과 (T:실온(건구온도), OT: 작용온도, Q:공급열량)

< 제어 알고리즘 적용시 작용온도 종합 비교 >

- 정지/기동시각 조절, 보일러 온수온도 조절을 적용한 Case 1~5까지는 Baseline (Case 0)에 비해 작용온도가 크게 저하되지 않고, ASHRAE Standard 55의 작용온도 기준인 21℃~25℃ 범위에 분포
- 작용온도 기준으로 제어하고 야간 set-back제어를 적용한 Case 6~10은 Case 0~5와 비교했을 때 작용온도가 다소 저하되는 경우를 보이나, 21℃ 이상은 대부분 만족함
- 다만 야간 deep set-back을 적용한 Case 10의 경우에는 작용온도가 21℃ 미만으로 떨어지는 경우도 있어, 이 경우에는 PMV 관점에서 분석할 필요가 있음



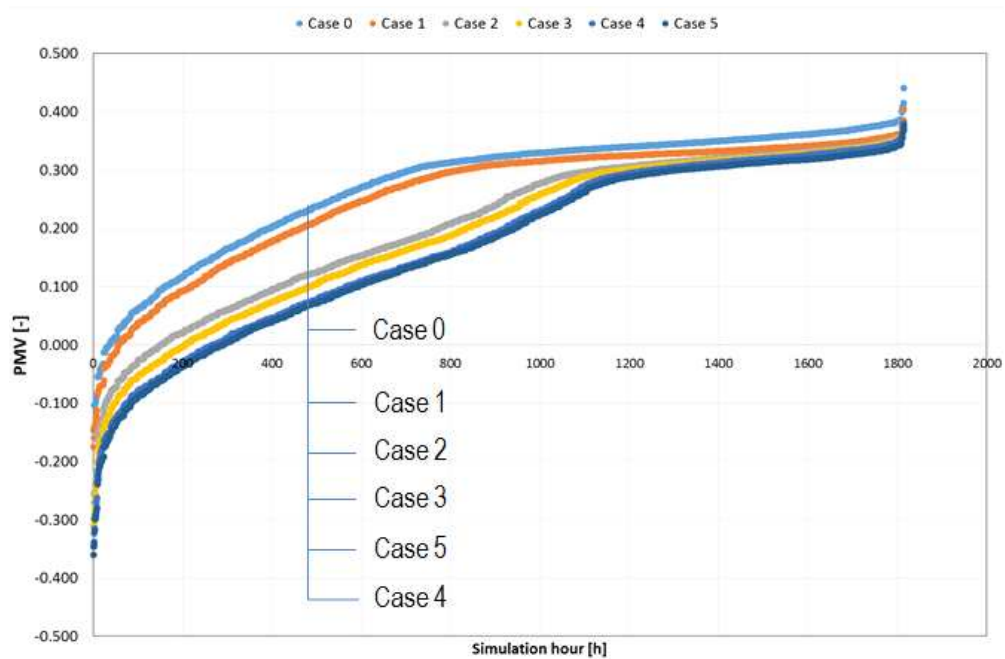
[그림 38] 재실기간 중 작용온도 분포 (Case 0~4)



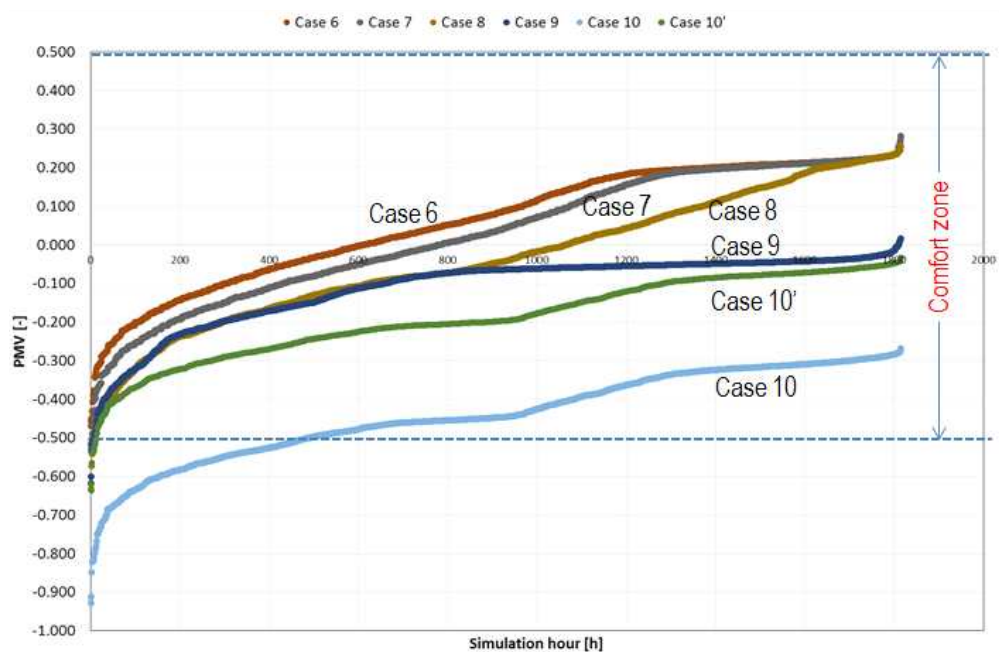
[그림 39] 재실기간 중 작용온도 분포 (Case 6~10)

< 제어 알고리즘 적용시 PMV 종합 비교 >

- Case 1~5까지는 재실기간중 PMV가 모두 $-0.5 \sim +0.5$ 사이에 분포하여 ISO 7730 Category B 수준을 만족
- 야간 Deep set-back을 적용한 Case 10의 경우 $PMV < -0.5$ 인 경우가 발생하나, 취침시 착의량($clo=1.5$) 및 활동량($met=0.9$)을 반영할 경우(Case 10') ISO 7730 Category B 만족



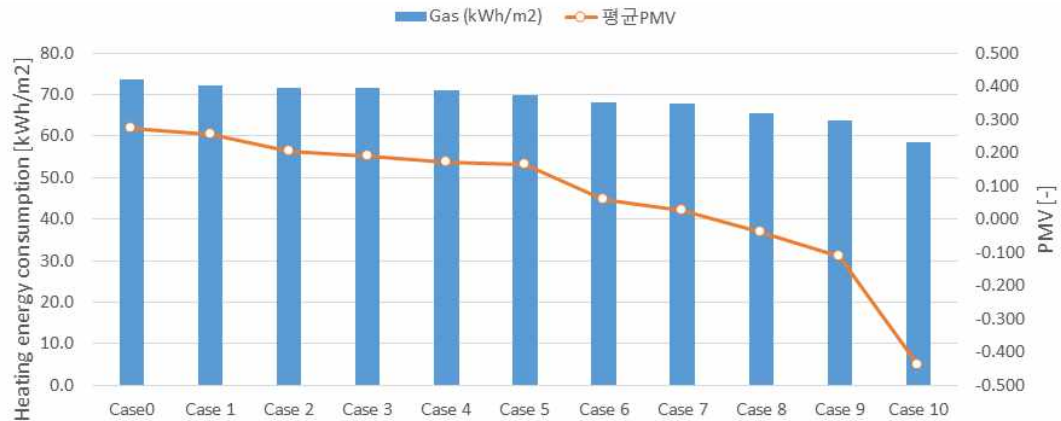
[그림 40] 재실기간 중 PMV 분포 (Case 0~5)



[그림 41] 재실기간 중 PMV 분포 (Case 6~10)

< 제어 알고리즘 적용시 난방에너지 및 열쾌적 종합 비교 >

- 정지/기동시점 조절, 온수온도 조절, 작용온도기준 제어, 셋백제어의 조합으로 Baseline 대비 20.3%의 난방에너지 절감 가능
- 이 때 평균 PMV는 ISO 7730의 Category B 수준인 $-0.5 < \text{PMV} < +0.5$ 를 만족
- 재실기반 난방제어 알고리즘 적용 시, 쾌적기준을 만족하면서 목표했던 에너지 절감성능을 확보할 수 있음



[그림 42] 난방에너지 및 열쾌적 분석 결과

<표 7> 난방 에너지와 열쾌적 비교

Case	가스소비량		에너지 절감률	평균 실온 (℃)	평균 OT (℃)	평균 PMV
	(Wh)	(kWh/m²)				
Case 0	8,235,803	73.5	0	24.3	24.7	0.275
Case 1	8,098,253	72.3	1.7%	24.2	24.7	0.254
Case 2	8,025,846	71.7	2.5%	24.2	24.6	0.204
Case 3	8,007,622	71.5	2.8%	24.1	24.6	0.190
Case 4	7,953,015	71.0	3.4%	24.1	24.5	0.172
Case 5	7,824,661	69.9	5.0%	24.1	24.5	0.166
Case 6	7,626,547	68.1	7.4%	23.7	24.1	0.059
Case 7	7,584,930	67.7	7.9%	23.6	24.0	0.027
Case 8	7,351,305	65.6	10.7%	23.1	23.4	-0.038
Case 9	7,136,670	63.7	13.3%	22.8	23.2	-0.113
Case 10	6,560,361	58.6	20.3%	21.6	21.9	-0.440

<2차년도 연구 수행 성과>

- ① 재실추정 알고리즘을 내용으로 국내 논문 1편 출판
 - 실내 CO₂ 농도와 PIR 신호를 활용한 주거건물의 재실 추정 알고리즘에 관한 연구, 대한건축학회연합 논문집, 20(6), 113~119
- ② 재실추정 알고리즘을 내용으로 특허 출원 1건
 - CO₂ 농도와 PIR신호를 활용한 거주자 재실 추정방법, 대한민국, 출원번호 10-2018-0138778

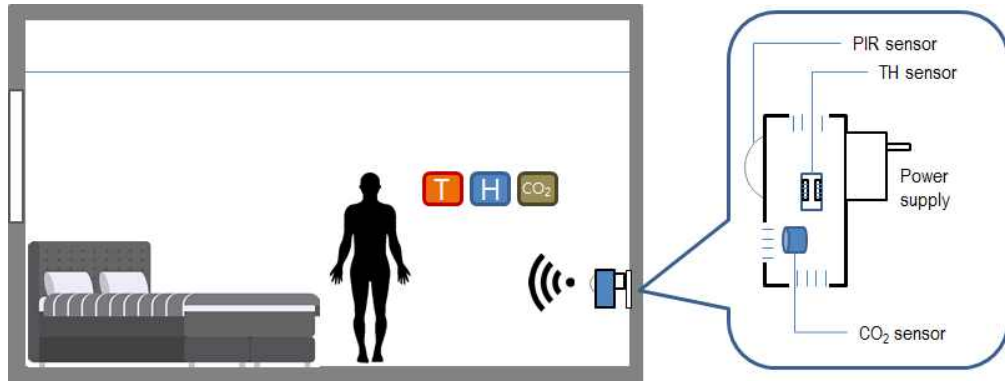
(라) 재실 인식 통합 센서 및 기술 도출

① 재실 인식 통합 센서 제안

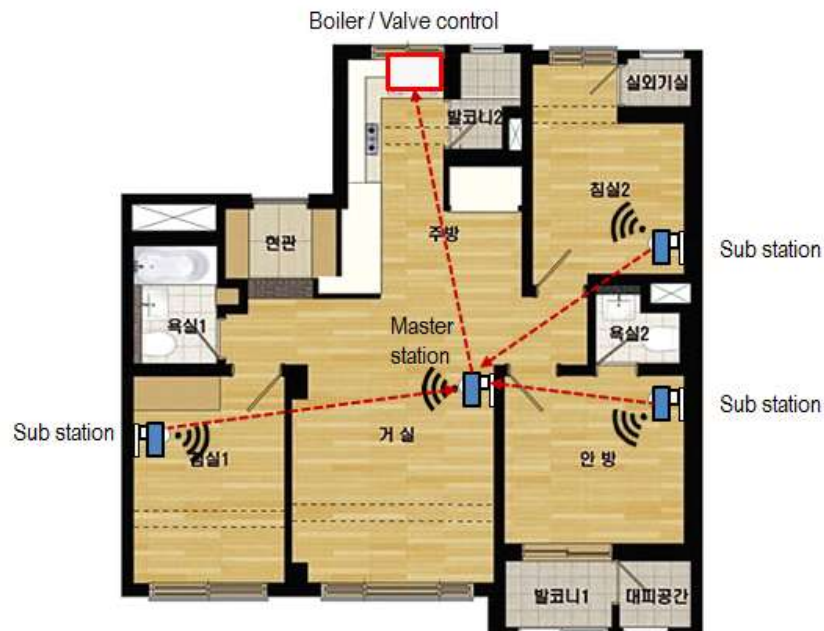
- 본 연구에서는 CO₂ 농도와 PIR 센서 데이터로써 재실 인식이 가능함을 검증하였으나, 실험/측정용의 CO₂ 농도 센서와 PIR 센서를 이용하여 검증된 것임
- 실제 적용을 위해서는 해당 센서를 패키지화한 복합 센서 모듈(sensor fusion module)이 요구될 것임
- 전원 공급부, 센서부, 케이싱으로 구성된 통합 센서를 제안 ([그림 43]참조)
- 센서의 크기, 설치 위치, sampling rate 등 센서 운용을 위한 후속 연구 필요

② 재실 기반 난방 제어 기술 제안

- ①에서 도출한 통합 센서로 재실 여부를 판정하고, 이를 난방제어에 활용하기 위해서는 난방시스템의 제어기 (밸브 컨트롤러)와의 연동이 가능해야 함
- 거실에 설치되는 주통합센서(Master-station)는 각 실의 통합센서(Sub-station)로부터 재실여부를 전달받고, 난방 필요 여부를 판정하여 밸브 컨트롤러에 각 실 밸브와 열원을 제어하는 신호를 전달 ([그림 44] 참조)



[그림 43] PIR 센서+실내환경 통합 센서 개념



[그림 44] PIR+실내환경 통합센서 이용 난방 제어 개념

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

(1) 최종 목표 및 세부 목표

구분	내용
최종 목표	기존의 재실 추적방법은 주로 PIR 등 재실센서를 이용하는 것이나, 본 연구에서는 주거건물에서 실용적으로 활용될 수 있는 실내환경 센서를 이용하여 재실 인식 기초 기술을 개발하고, 이를 복사난방시스템의 제어에 적용하는 것이 최종목표이며, 아래와 같은 세부목표로 구성됨
세부 목표	1. 재실인식 정확도 70% 복사난방시스템의 정지/기동 시점 결정에 필요한 재실 시간 추정의 정확도는 실제 재실 스케줄과 비교하여 70%의 정확도를 확보하도록 함 2. 난방에너지 20% 절감 거주자에 의한 수동 on/off에 비교하여, 기동정지제어 및 셋백제어의 조합을 통해 20%의 에너지 절감량을 확보 3. 재실기간 쾌적도 90% 확보 비재실 시간의 불필요한 난방을 방지하고, 재실 시간대 쾌적도를 ISO 7730의 Category B 수준 ($PMV=-0.5\sim+0.5$)으로 유지

(2) 연차별 연구개발 목표 및 평가방법

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	평가착안점
1차 연도	환경변수와 거주자 재실 간 상관성 규명	이론식을 통한 환경변수-재실상관성 분석	이상적 조건에서 거주자 재실에 따른 CO ₂ 농도변화 예측 시뮬레이션 모델 작성	재실자수 증감에 따른 CO ₂ 농도 및 변화를 예측 데이터 평가 공동주택 단위세대 에너지/CO ₂ 해석 모델링 평가
		실거주 공간에서 환경변수-재실 상관성 도출	실제 거주 주택에서 CO ₂ 농도 측정 후 재실여부를 예측하고, 실제 재실시간과의 정합도 비교	실제거주세대 대상 재실시간 예측 정확도 평가
	환경변수 기반의 재실인식 방법 보완	환경센서-재실센서 (PIR) 변화패턴 분석	실거주 주택에서 CO ₂ 농도와 거주자 모션을 동시 측정하여 재실패턴 추정	실제거주세대의 CO ₂ 농도-PIR 데이터 확보 및 재실상관성 데이터 평가
		환경센서-PIR 병용 재실인식 개념 도출	CO ₂ 농도와 PIR 측정데이터를 활용한 재실 인식 로직 작성	CO ₂ 농도-PIR 데이터 기반 재실 추정 알고리즘 도출 여부 평가
2차 연도	재실인식 복사난방 시스템 제어전략 도출/평가	재실기반 기동정지 및 셋백제어 알고리즘 도출	재실추정 알고리즘을 통한 재실패턴 추출 재실패턴을 반영한 정지/기동 시각 및 셋백온도 설정이 가능한 알고리즘 구현	제어 알고리즘의 에너지 시뮬레이션 코드 구현 및 구동여부 평가
		알고리즘 성능평가	에너지 시뮬레이션을 통한 난방 에너지 소비량 및 쾌적도 평가	난방에너지 20% 절감, 쾌적성 확보 ($PMV -0.5\sim+0.5$) 여부 평가

나. 목표 달성여부

(1) 성과 달성 현황

핵심성과 (CTE)	단위성과	성과점검기준						양적성과 목표치 (달성치)
		질적 성과지표	목표치	달성치	평가방법	비 중 (%)	달 성 도 (%)	
재실 인식 기술	재실 인식 관련자료 축적	기존 연구 리뷰	자료집 1건	1건	자료집 제작여부 확인 ^(*)	5	100	국내 논문 1(1) 국외 논문 1(1) 학술 발표 -(3) 특허 출원 1(1)
	주거건물 실내환경 분석	실거주 건물의 측정데이터	데이터셋 1건	1건	실제주택의 CO ₂ 농도 및 온습도 측정치 데이터 확인	10	100	
	환경변수 및 재실 상관성 분석	데이터 대표성 및 유의성	데이터셋 1건	1건	재실자 변동에 따른 CO ₂ 농도변화 분석 시트 확인	10	100	
	재실여부 확률적분포 분석	데이터 대표성 및 유의성	데이터셋 1건	1건	시간대별 재실여부 확률분포 분석 시트 확인	5	100	
	재실인식 방법 도출	환경변수 및 재실 여부 일치도	70%	83~99%	재실예측 데이터- 거주자기록 비교	20	100	
재실인식 복사난방 시스템 제어 알고리즘	에너지절약 제어자료 축적	기존 연구 리뷰	자료집 1건	1건	자료집 제작여부 확인 ^(*)	5	100	국내 논문 2(2) 국외 논문 1(1) 학술 발표 -(3)
	기동정지 알고리즘	제어알고리즘 적용성	알고리즘 1건	1건	알고리즘 도출 및 시뮬레이션 적용 여부 확인 ^(**)	15	100	
	셋백제어 알고리즘	제어알고리즘 적용성	알고리즘 1건	1건	알고리즘 도출 및 시뮬레이션 적용 여부 확인 ^(**)	15	100	
	알고리즘 성능평가	평가방법/ 결과의 기준 부합성	PMV -0.5~+0.5 난방에너지 20% 절감	PMV -0.44~0.275 난방에너지 20.3% 절감	알고리즘 적용시 PMV, 난방에너지 분석	15	100	
계						100	100	특허출원 1(1) 국외논문 2(2) 국내논문 3(3) 학술발표 -(6)

(*) 자료집은 재실인식 관련 연구와 에너지 절약제어 관련 연구를 취합하여 제작

(**) 기동정지와 셋백제어는 하나의 프로그램코드에 취합하여 시뮬레이션에 적용

(2) 양적 성과 달성 리스트

성과지표	성과 목표	최소 성과 목표	성과달성	비고
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	2건	1건	2건	1건은 중복사사
일반학술지게재(1점)	3건	2건	3건	1건은 중복사사
학술발표	-	-	6건	추가달성(1건은 중복사사)
특허출원(1점)	1건	1건	1건	
소계(점수)	8점	5점	12점	

다. 관련 분야 기여도

(1) 기술분야 기여도

(가) 재실 기반 HVAC 시스템 제어 관련 연구 데이터 제공

- ① 재실자 맞춤형 난방 제어의 성능 기초 데이터 (에너지, 쾌적) 제공
- ② 복사난방시스템형 NEST (Smart thermostat) 구현을 위한 재실 추정 알고리즘 제공
- ③ 건물 에너지 시뮬레이션의 정확도 향상을 위한 거주자 occupancy 데이터 제공

(나) 복사난방시스템의 운전 메커니즘 데이터 제공

- ① 시스템 운전조건(외기온, 재실여부, 온수온도)과 실온하강 및 상승 시간 상관성
- ② 표준적 주거건물에서 외기온-정지/기동 시점 간 상관성
- ③ 재실 스케줄, 쾌적 및 에너지 성능을 고려한 셋백 온도 설정 데이터

(다) 거주자 재실-실내환경 지표 간의 상관성 데이터 제공

- ① 재실과 실내 CO₂ 농도, 절대습도 상관성 데이터
- ② 실내 CO₂ 농도와 절대습도 상관성 데이터
- ③ 재실여부 판정에 적합한 대표실 선정 방법

(라) HVAC 시스템 성능 평가 및 제어를 위한 데이터 처리 방법 제공

- ① Kalman filter를 활용한 실내환경 데이터 노이즈 제거 방법
- ② LabVIEW cDAQ을 이용한 PIR 데이터 측정 및 기록 방법

(2) 경제·산업분야 기여도

(가) 친환경·저에너지 주택 시장에 기여

- ① 저에너지 주택의 난방시스템 운영 기술로 활용함으로써, 제로에너지 주택 또는 패시브 하우스 달성에 기여
- ② 복사난방시스템의 에너지 절약 기술 관련 제품 및 시장 확장에 기여
- ③ 난방 이외에 환기 또는 냉방 제어에 활용함으로써 친환경 주택의 종합 환경제어 시스템 구현에 필요한 요소기술 제공

(나) 스마트홈, 홈 IoT 관련 신산업 창출

- ① PIR센서 + CO₂ 센서가 통합된 실내환경 모니터링+재실인식 센서 개발에 활용
- ② 스마트폰의 애플리케이션과 연동한 pre-heating 기능 구현에 활용 (외출 전 난방을 중지해도 무방한 시점을 알람으로 알려주거나, 귀가 전 난방을 시작해야하는 시점을 알람으로 알려주는 기능)
- ③ IoT 기술의 건설 산업 적용 확장

(3) 사회분야 기여도

(가) 난방에너지·관리비 저감

- ① 주거 관리비 중 가장 많은 비중을 차지하는 난방비의 절감에 기여
- ② 불필요한 난방운전 차단을 통해 에너지 수요 관리에 기여

(나) 재실자 맞춤형 환경 제공

- ① 거주자 구성원 고유의 생활 패턴, 온열감각 선호도에 적합한 실내 환경 제공

- ② 거주 시간대별 설정온도 조절(set-back 제어)를 통해 Activity에 적합한 쾌적성 제공
- (다) 사용자 편의제고를 통한 주거성능 향상
 - ① 사용자의 개입을 최소화하여 주택 설비의 관리 포인트를 줄임
 - ② 수동조절에 따른 오동작을 감소시켜 거주자의 편의성 증대

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 추가연구 필요성

본 연구는 주거 건물의 CO₂ 농도와 PIR 신호를 활용하여 거주자 재실 패턴을 추정하는 알고리즘을 도출하고, 그 타당성을 실제 거주 공간에 적용하여 검증하였으나, 다음과 같은 한계를 지니고 있으므로 이를 극복하기 위한 추가 연구 또한 요구됨

(1) 연구의 한계

(가) 한정된 조건에서의 측정 데이터에 기반한 재실 추정 알고리즘

- ① 공동주택 1세대에서의 측정 데이터만을 활용한 것으로, 규모 및 가족 구성원이 다른 주거건물에서의 검증 필요
- ② 비교적 재실 패턴이 규칙적인 주거건물을 대상으로 분석됨
- ③ 주중/주말 재실 패턴을 별도로 구분하지 않음

(나) 재실 기반 난방제어 알고리즘의 효과는 시뮬레이션으로만 분석됨

- ① 재실 추정 알고리즘의 적용성은 실제 주택을 대상으로 검증하였으나, 난방 제어 알고리즘의 실온 제어성능과 에너지 소비량은 시뮬레이션으로 분석
- ② 난방제어 알고리즘의 성능은 실제 주택에서 측정되기 매우 어려우므로 우선적으로 실험실 단위에서 재현하여 추가 분석할 필요가 있음

(2) 추가 연구 필요성

(가) 다양한 조건에서의 재실 추정 알고리즘 검증

- ① 아파트 외의 주거 형태(원룸, 기숙사, 호텔 등)에서의 알고리즘 적용
- ② 거주자 재실패턴이 보다 불규칙적인 주거 건물에서의 알고리즘 적용

(나) 재실추정 알고리즘의 최적화

- ① 재실 확률 계산시 적용되는 감쇠율 최적값 선정
- ② 데이터 노이즈 제거에 필요한 칼만필터의 파라미터 최적값 선정
- ③ CO₂ 센서, PIR 센서 sampling rate, 계산 간격 등 최적값 선정
- ④ CO₂ 센서 위치, PIR 센서 감지범위/지연시간 등 감응범위에 따른 재실추정 분석

(다) 재실 기반 난방 제어시스템의 실제 구현

- ① CO₂ 센서, PIR 센서의 주택 내 위치 (수평/수직적) 선정 기준 개발 필요
- ② CO₂ 센서, PIR 센서, 온도센서(작용온도)가 통합된 통합 Thermostat 개발
- ③ 대표실 제어와 실별 제어 각각에 적합한 재실 추정 및 난방 제어 시스템 개발
- ④ CO₂ 농도, PIR 데이터 외 전력소비량 등의 보조 데이터 활용 방안 검토

(라) 기계학습과 연계한 재실 기반 난방 제어 시스템

- ① 재실 인식 알고리즘을 간략화할 수 있는 데이터 학습 및 재실 예측 알고리즘
- ② 거주자의 온도 조절 행위 (Thermostat을 조작하는 시간, 설정온도 변경 정도)를 기계학습으로 인식하여, 재실기간 중의 적정 설정온도를 결정하는 알고리즘

나. 타 연구에의 응용 방안

본 연구는 주거건물의 거주자 재실을 자동으로 인식하여 재실 패턴을 추출하고, 이러한 패턴에 근거한 복사난방 시스템의 제어 전략을 제시한 것으로, 본 연구에서 적용한 방법론과 도출된 결과를 응용하여 난방 시스템 효율화, 실내환경 제어시스템 개발 관련 연구에 응용할 수 있을 것으로 판단됨

(1) 난방 시스템 효율화 관련 연구

(가) 주거건물 난방 제어 알고리즘 고도화에 활용

- ① 재실자 맞춤형 난방 제어 알고리즘의 기초 데이터 제공
- ② 복사난방시스템형 Smart Thermostat 구현을 위한 요소기술로 활용
- ③ 건물 에너지 시뮬레이션의 정확도 향상을 위한 거주자 occupancy 모델 제공

(나) 복사난방시스템의 운전 메커니즘 심화 연구에 활용

- ① 시스템 운전조건(외기온, 구조체 축열, 재실, 온수온도 및 유량)과 최적 정지/기동 시점 간의 관계 규명
- ② 실제 거주 주택에 재실 기반 난방 제어알고리즘을 적용하여 실온제어 성능 및 에너지 성능 평가, 문제점 및 개선방안 도출 연구
- ③ 기계학습과 연계한 재실 패턴 추출 및 예측 제어 연구에 활용

(2) 실내환경 제어 시스템 개발 관련 연구

(가) 작용온도 기반 제어 시스템 개발

- ① 복사환경의 열쾌적 평가에 적합한 작용온도 기반 Thermostat 개발을 위한 기초 데이터 제공
- ② 작용온도 기준 제어의 에너지 절감성능 및 쾌적성 데이터 활용

(나) 환기 시스템과의 연동 제어 기술

- ① 재실 추정 데이터를 활용한 수요기반 환기 제어 알고리즘 개발
- ② 난방에너지 증가를 최소화하는 환기 제어 전략 개발

붙임. 참고문헌

- (1) Amayri, M., Arora, A., Ploix, S., Bandhyopadhyay, S., Ngo, Q. D., Badarla, V. R. (2016). Estimating occupancy in heterogeneous sensor environment. *Energy and Buildings*, 129, 46~58.
- (2) Bae, W., Ko, J., Mun, S., Huh, J. (2015). Occupants' Location-Driven Control of Radiant Floor Heating Using Fingerprinting Method in Residential Buildings, *Journal of Architectural Institute of Korea (Design and Planning)*. 31(11), 211 ~ 219.
- (3) Bionda, D., & Domingo-Irigoyen, S. (2017). Energy saving potential of occupancy-based heating control in residential buildings. *Energy Procedia*, 122, 27-31.
- (4) Cali, D., Matthes, P., Huchtemann, K., Streblow, R., Müller, D. (2015). CO₂ based occupancy detection algorithm: Experimental analysis and validation for office and residential buildings. *Building and Environment*, 86, 39~49.
- (5) Dobbs, J. R., & Hancey, B. M. (2014). Model predictive HVAC control with online occupancy model. *Energy and Buildings*, 82, 675-684.
- (6) Dong, B., & Lam, K. P. (2014, February). A real-time model predictive control for building heating and cooling systems based on the occupancy behavior pattern detection and local weather forecasting. In *Building Simulation (Vol. 7, No. 1, pp. 89-106)*. Springer Berlin Heidelberg.
- (7) Duarte, R., Gomes, M. G., Rodrigues, A. M. (2018). Estimating ventilation rates in a window-aired room using Kalman filtering and considering uncertain measurements of occupancy and CO₂ concentration. *Building and Environment*, 143, 691~700.
- (8) Erickson, V. L., Carreira-Perpiñán, M. Á., Cerpa, A. E. (2014). Occupancy modeling and prediction for building energy management. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 10(3), 42.
- (9) Gruber, M., Trüschel, A., & Dalenbäck, J. O. (2014). Alternative strategies for supply air temperature control in office buildings. *Energy and Buildings*, 82, 406-415.
- (10) Gunay, H. B., O'Brien, W., & Beausoleil-Morrison, I. (2015). Development of an occupancy learning algorithm for terminal heating and cooling units. *Building and Environment*, 93, 71-85.
- (11) Kim, G.-T., Kim, J.-Y., Hwang, H.-J., & Kim, K.-S. (2014). The Design Criteria of the Indoor Temperature and Humidity for the Prevent Condensation of Small Apartment Buildings. *LHI Journal of Land, Housing, and Urban Affairs*, 5(4), 291-296. <https://doi.org/10.5804/lhij.2014.5.4.291>
- (12) Kim, S. (2010). Understanding Kalman Filter using MATLAB (in Korean). A-Jin, Seoul.
- (13) Labeodan, T., Zeiler, W., Boxem, G., Zhao, Y. (2015). Occupancy measurement in commercial

- office buildings for demand-driven control applications—A survey and detection system evaluation. *Energy and Buildings*, 93, 303~314.
- (14) Leung, C., & Ge, H. (2013). Sleep thermal comfort and the energy saving potential due to reduced indoor operative temperature during sleep. *Building and Environment*, 59, 91-98.
- (15) Maerefat, M., Zolfaghari, A., & Omidvar, A. (2012). On the conformity of floor heating systems with sleeping in the eastern-style beds; physiological responses and thermal comfort assessment. *Building and Environment*, 47, 322-329.
- (16) Olesen, B. W. (2002). Radiant floor heating in theory and practice. *ASHRAE journal*, 44(7), 19-26.
- (17) Peng, Y., Rysanek, A., Nagy, Z., Schlüter, A. (2018). Using machine learning techniques for occupancy-prediction-based cooling control in office buildings. *Applied Energy*, 211, 1343~1358.
- (18) Rosiek, S., & Batlles, F. J. (2013). Reducing a solar-assisted air-conditioning system' s energy consumption by applying real-time occupancy sensors and chilled water storage tanks throughout the summer: A case study. *Energy conversion and management*, 76, 1029-1042.
- (19) Shin, M., Rhee, K., Lee, E., Jung, G. (2018). Performance evaluation of CO₂-based ventilation control to reduce CO₂ concentration and condensation risk in residential buildings. *Building and Environment*.
- (21) Yang Z, Li N, Becerik-Gerber B, Orosz M. (2013). A systematic approach to occupancy modeling in ambient sensor-rich buildings. *Simulation* 90:960-77.
- (22) Zeiler, W., Boxem, G., & Maaijen, R. (2012). Wireless Sensor Technology to Optimize the Occupant's Dynamic Demand Pattern Within the Building.
- (23) Zhao, J., Lam, K. P., Ydstie, B. E., & Loftness, V. (2016). Occupant-oriented mixed-mode EnergyPlus predictive control simulation. *Energy and Buildings*, 117, 362-371.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

210mm×297mm[백상지(80g/㎡) 또는 중질지(80g/㎡)]