

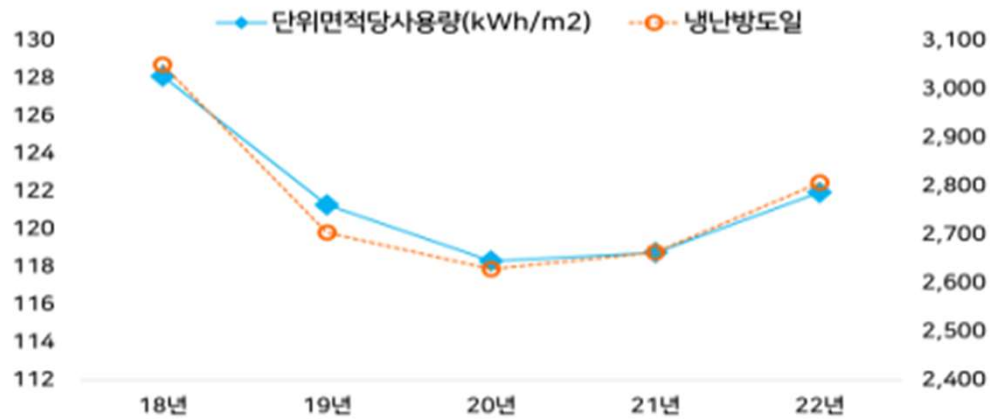
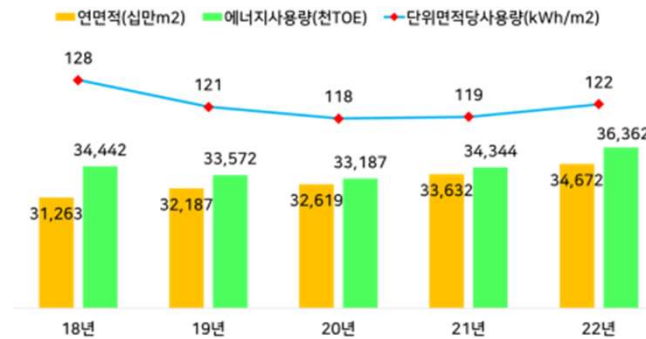
건물 부문 온실가스 저감을 위한 새로운 도전들

서울대 건축학과 박철수 교수

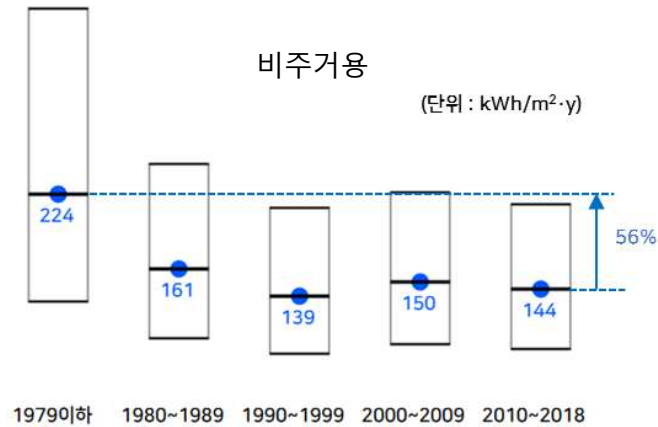
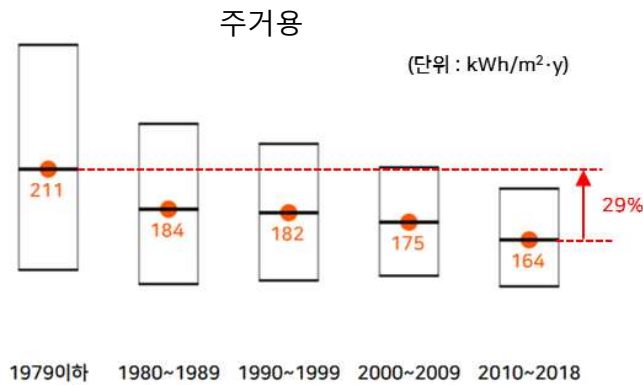
국토교통부 보도자료 (2023.6.1)

2022년 건물에너지사용량통계 현황

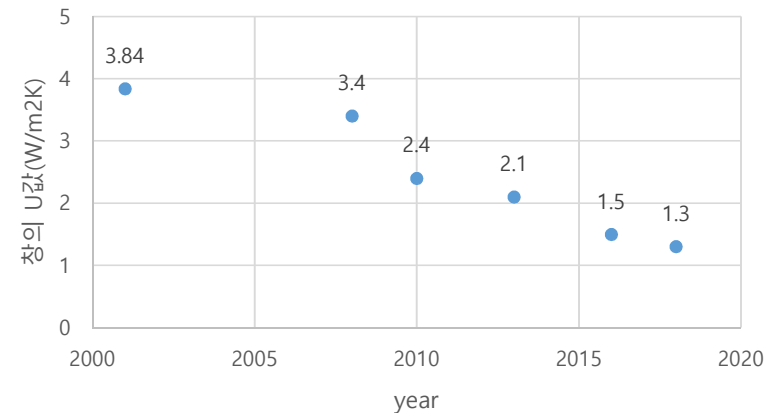
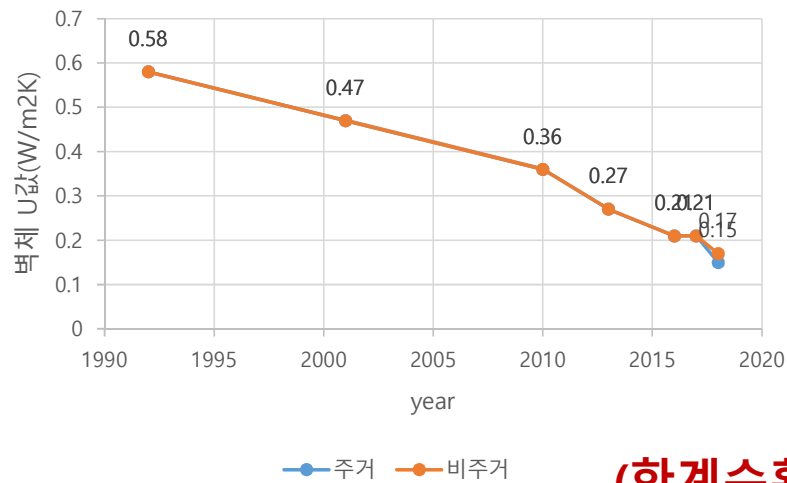
전년 대비 에너지 총사용량	전년 대비 5.9% ↑
전년 대비 단위면적당 에너지사용량	전년 대비 2.7% ↑
기준년 대비 단위면적당 에너지사용량	기준년 대비 4.8% ↓



국토교통부 보도자료 (2021.6.1)

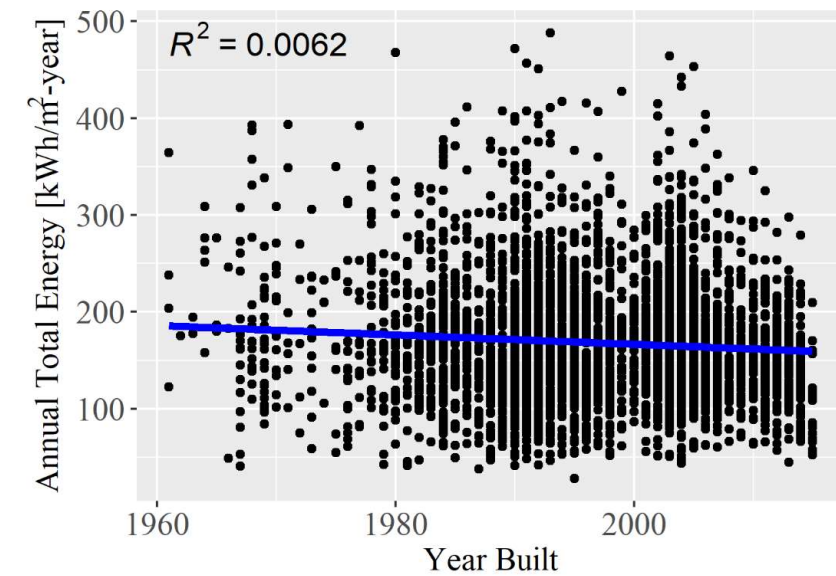
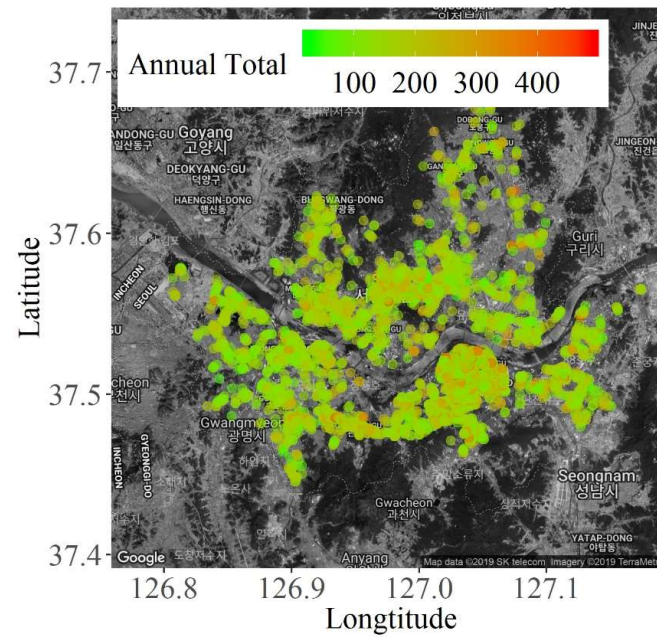
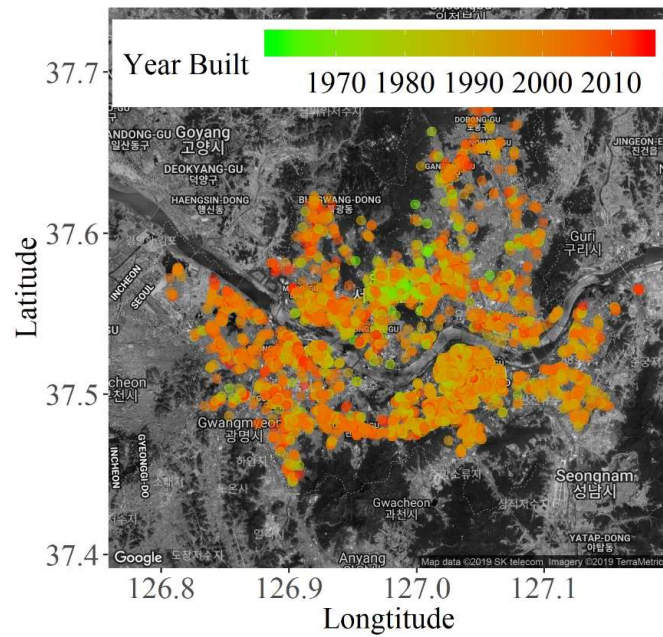


건물의 사용승인연도 그룹별 2020년 단위면적당 에너지사용량



(한계수확체감 법칙) Law of diminishing returns ??

공공 데이터 분석



Building Envelopes	Year	W/m²·K
U-values of exterior walls	1992	0.58
	2001	0.47
	2010	0.36
	2013	0.27
U-values of exterior windows	2001	3.84
	2008	3.40
	2010	2.40
	2013	2.10

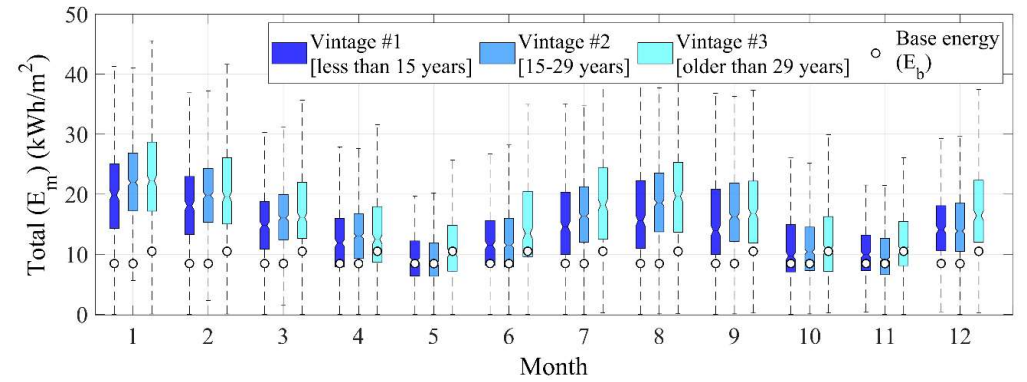
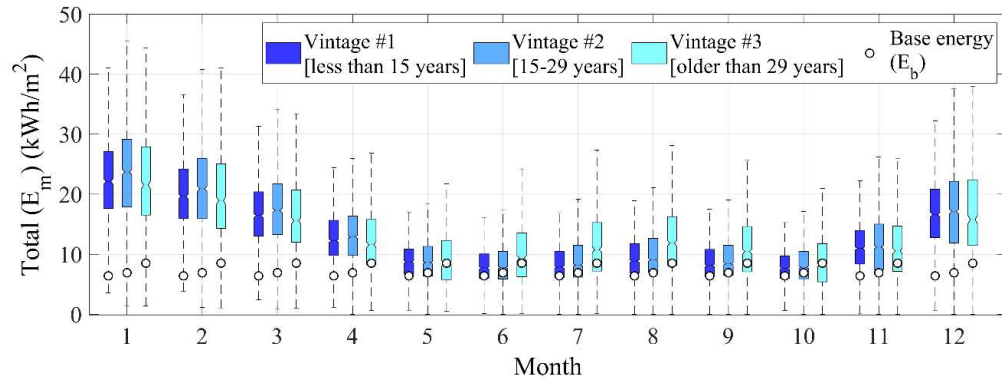
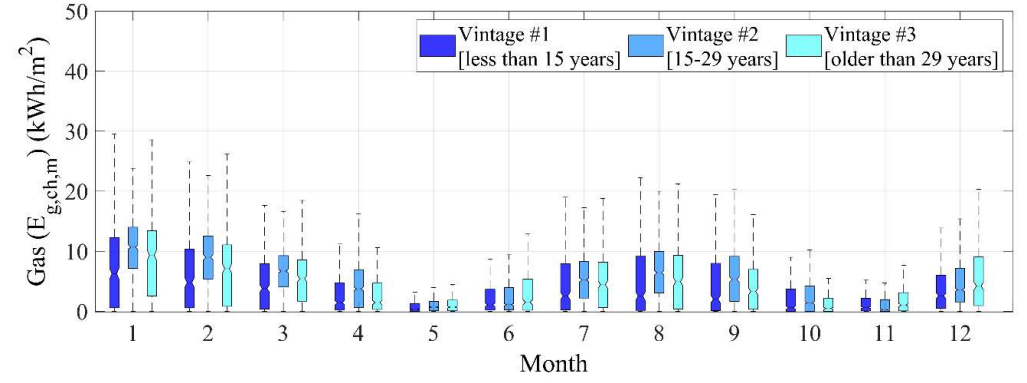
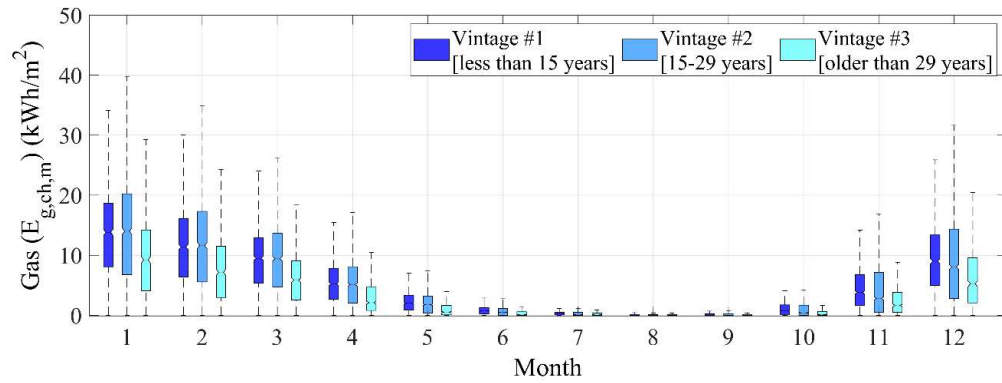
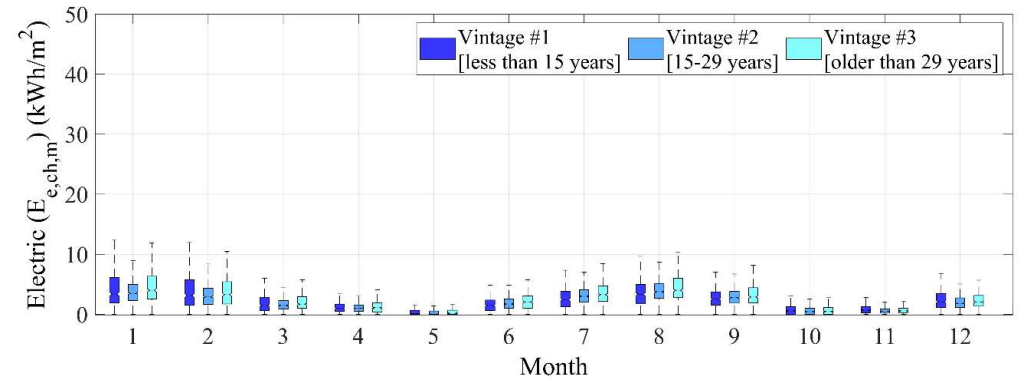
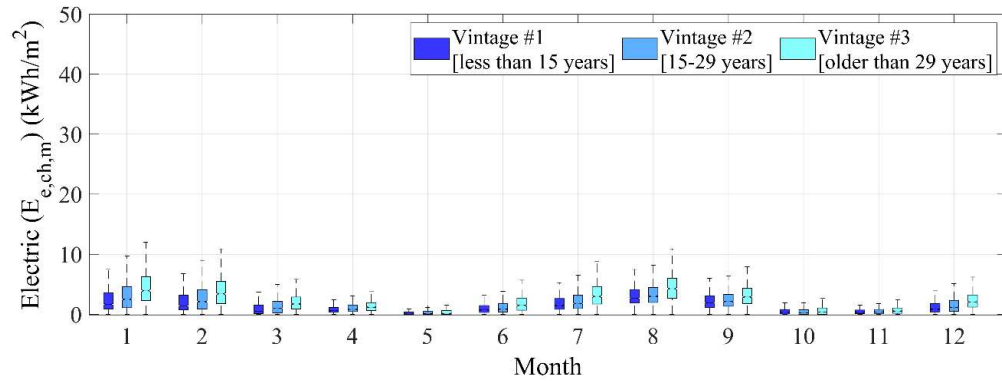
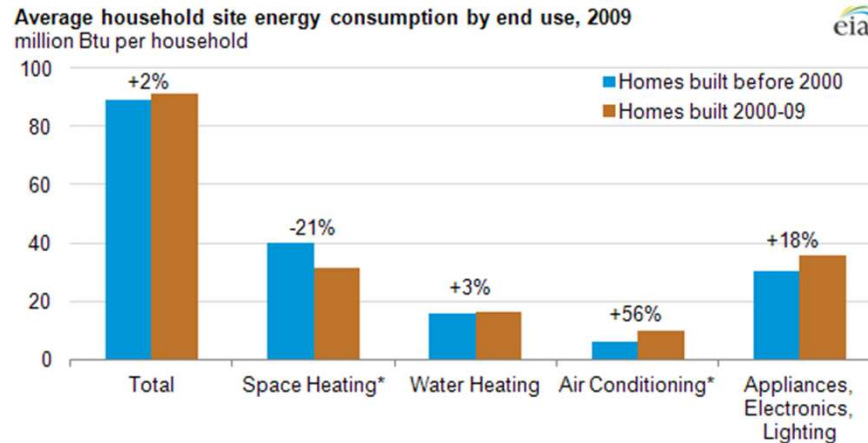


Image source: Ahn, K.U., Shin, H.S. and **Park, C.S.** (2019), Energy Analysis of 4625 Office Buildings in South Korea, *Energies*, Vol.12, No.6

미국 정부 기관 분석 사례 (US EIA, EnergyStar)



- US Energy Information Administration (에너지 정보 수집, 통계 및 분석), part of US DOE
- 더 넓은 집, 북부에서 남부로 인구이동(난방 감소 및 냉방 증가), 단열 강화, 에어컨 및 보일러 효율 상승, 식기세척기, 빨래건조기, 냉장고 2-3대, 컴퓨터, TV 및 주변장치 (DVR, 게임기 등)
- There is **not a straightforward relationship** between building age and **energy use**. (US Energy Star)

sources: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=9951>

<https://energystar.my.site.com/PortfolioManager/s/article/Does-the-ENERGY-STAR-score-account-for-building-age-1600088546156>

새로운 도전들

- #1: Occupant Behavior(OB)를 이용한 건물 에너지 절감

Responsive occupants

- **Motivation: 기계환기 시스템 vs. OB**
- 실험 #1: CO₂ 정보 없음
- 실험 #2: 계측된 CO₂ 정보를 실시간 제공
- 실험 #3: CO₂ 정보 및 지식 제공
- 실험 #4: 가짜 CO₂ 정보 제공 (계측된 CO₂ 농도에 500ppm를 더한 값)

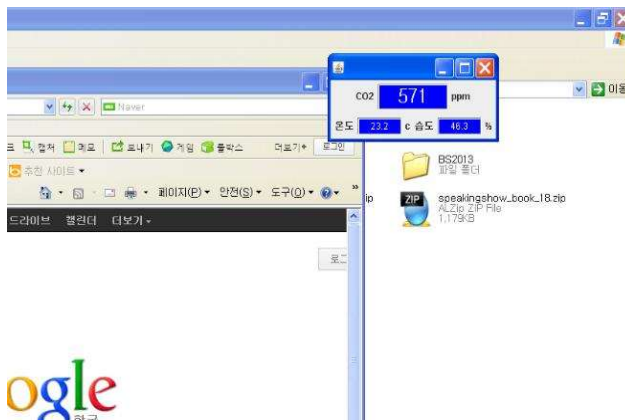


표 2. 재실자에게 배포한 자료

CO ₂ (ppm)농도	설명	
350~450	일반적인 대기중 농도, 외부공기	
1,000	환기기준, 공기질 관리기준	
1,500	가벼운 정도의 대사장애, 학습능력저하, 집중력 저하, 가벼운 두통, 졸음	
4,000	가슴 답답함, 호흡 곤란, 두통	산소부족 및 혈액내 산소 밸런스 이상 발생
7,000 이상	정상적 활동 어려움	



	실험 #1 (정보제공 없음)	실험 #2 (정보만 제공)	실험 #3 (정보+지식 제공)	실험 #4 (왜곡된 정보제공)
평균 재실자 수	3.99	4.19	4.05	4.02
최소 CO ₂ (ppm)	700	508	440	455
평균 CO ₂ (ppm)	1,131	844	688	716
최대 CO ₂ (ppm)	1,646	1,458	1,080	1,363
표준편차 (ppm)	208	275	217	317
최빈값 (ppm)	1,000-1,099	600-699	900-999	500-599
1,000 ppm 초과확률	76.4%	27.3%	4.2%	25.0%

- 단순한 (정보+교육) 으로 충분 → responsive occupant, smart energy agent
- H/W (패시브, 액티브) 업그레이드 vs. occupant's cognitive behavior



Student Travel Awards at the 13th IBPSA-World Conference, 2013, France (1등, 2등, 4등 수상)

OB

- 창문 개폐, 조명 점등/디밍/소등, 전열기기 on/off, 냉난방기기 on/off, 설정온도, 가전기기 사용, 급탕 등
- Depending on the building type, climate, and degree of automation in operation and controls, **occupants** could **increase or decrease** energy use **by a factor of up to three for residential buildings** [Andersen 2012], and **increase by up to 80% or reduce by up to 50% for single-occupancy offices** [Hong & Lin, 2012].
- **Behavioral efficiency** has been identified as **an efficient and economical method** compared with **retrofitting technologies**. (Chen et al. 2021)

Chen et al. (2021), The impacts of occupant behavior on building energy consumption: A review, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol.45, June

Andersen, R. K. (2012). The influence of occupants' behaviour on energy consumption investigated in 290 identical dwellings and in 35 apartments. 10th International Conference on Healthy Buildings, Brisbane, Australia.

Hong T. and Lin H.W. (2012). Occupant behavior: impact on energy use of private offices, ASim: IBPSA Asia Conference, Shanghai, China.

OB를 이용한 건물 에너지 절감

- 정보와 지식 전달: 내용, 방법
- 재실자 행동 모델
- 에너지 절감 예측
- 인센티브 부여
- 균형점 (H/W vs. OB)

1. Average value model (80s-2000s)

Table G-G—Hotel/Motel Occupancy

Hour of Day (Times)	Schedule for Occupancy			Schedule for Lighting Receptacle			Schedule for HVAC Systems			Schedule for Service Hot Water			Schedule for Elevator			
	Percent of Maximum Load			Percent of Maximum Load			Percent of Maximum Load			Percent of Maximum Load			Percent of Maximum Load			
	Wk	Sat	Sun	Wk	Sat	Sun	Wk	Sat	Sun	Wk	Sat	Sun	Wk	Sat	Sun	
1 (12-1 am)	90	90	70	20	20	30	On	On	On	20	20	25	40	44	55	
2 (1-2 am)	90	90	70	15	20	30	On	On	On	15	15	20	33	35	55	
3 (2-3 am)	90	90	70	10	10	20	On	On	On	15	15	20	33	35	43	
4 (3-4 am)	90	90	70	10	10	20	On	On	On	15	15	20	33	35	43	
5 (4-5 am)	90	90	70	10	10	20	On	On	On	20	20	20	33	35	43	
6 (5-6 am)	90	90	70	20	10	20	On	On	On	25	25	30	33	35	43	
7 (6-7 am)	70	70	70	40	30	30	On	On	On	50	40	50	42	40	52	
8 (7-8 am)	40	50	70	50	30	40	On	On	On	60	50	50	42	32	52	
9 (8-9 am)	40	50	50	40	40	40	On	On	On	55	50	50	52	45	65	
10 (9-10 am)	20	30	50	40	40	30	On	On	On	45	50	55	52	45	65	
11 (10-11 am)	20	30	50	25	30	30	On	On	On	40	45	50	40	42	53	
12 (11-12 pm)	20	30	30	25	25	30	On	On	On	45	50	50	51	60	60	
13 (12-1 pm)	20	30	30	25	25	30	On	On	On	40	50	40	51	65	53	
14 (1-2 pm)	20	30	20	25	25	20	On	On	On	35	45	40	51	65	51	
15 (2-3 pm)	20	30	20	25	25	20	On	On	On	30	40	30	51	65	50	
16 (3-4 pm)	30	30	20	25	25	20	On	On	On	30	40	30	51	65	44	
17 (4-5 pm)	50	30	30	25	25	20	On	On	On	30	35	30	63	65	64	
18 (5-6 pm)	50	50	40	25	25	20	On	On	On	40	40	40	60	75	62	
19 (6-7 pm)	50	60	40	60	60	50	On	On	On	55	55	50	66	90	65	
20 (7-8 pm)	70	60	60	90	70	70	On	On	On	60	55	50	70	80	63	
21 (8-9 pm)	70	60	60	90	70	80	On	On	On	50	50	40	70	75	63	
22 (9-10 pm)	90	70	80	90	70	60	On	On	On	55	55	50	70	75	63	
23 (10-11 pm)	90	70	80	60	60	50	On	On	On	45	40	40	45	55	40	
24 (11-12 am)	90	70	80	30	30	30	On	On	On	25	30	20	45	55	40	
Total/Day																
Total/Week																
Total/Year																
Wk = Weekday																

2. Markov chain model (2011~)

$$X(t) = i \xrightarrow{p_{ij}} X(t+1) = j$$

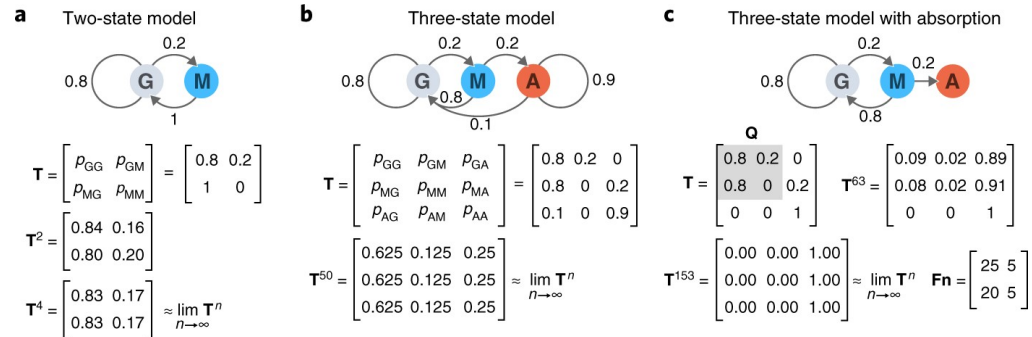
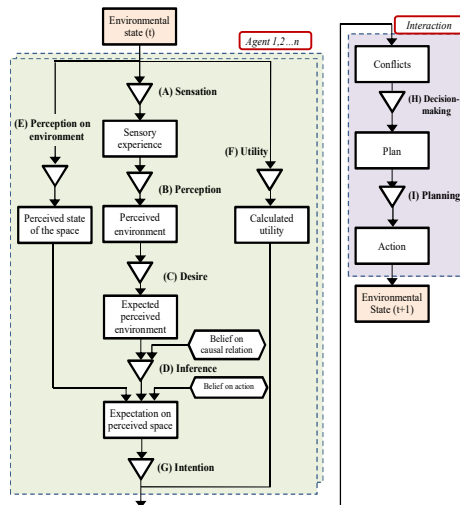
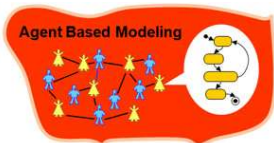
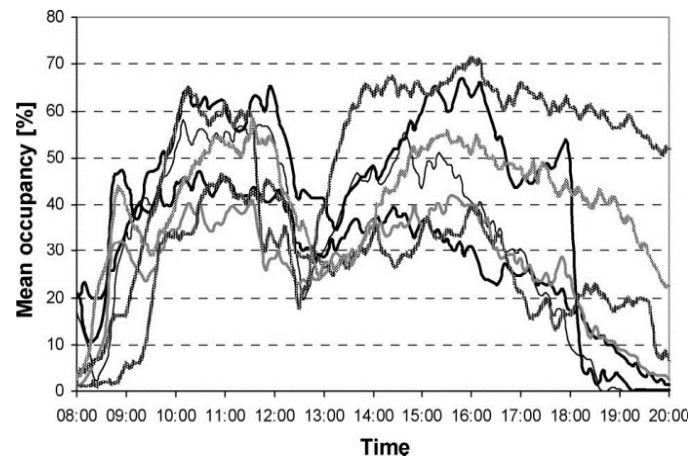


Image source: <https://www.nature.com/articles/s41592-019-0476-x/figures/1>

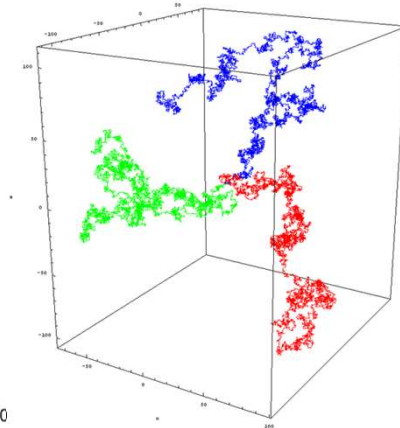
2. Agent model



3. Random walk model (2015~)



안기연 IBPSA STA 1등 논문 (인도, 2015)



KT 연구소



Robinson
Univ. Nottingham



A. Mahdavi
TU Gratz



KICT



Seoul Natl' Univ

새로운 도전들

- #1: Occupant Behavior (OB)를 이용한 건물 에너지 절감
- #2: AI를 이용한 건물 에너지 절감

건물 에너지 절감

- I: 건축적 방법 (passive): 향, 벽체 단열, 고성능 창호, 차양
- II: 설비적 방법 (active): 고효율 칠러, 보일러, 히트펌프
- III: 운영 방법
 - Cost-effective (pick the low-hanging fruit first!)

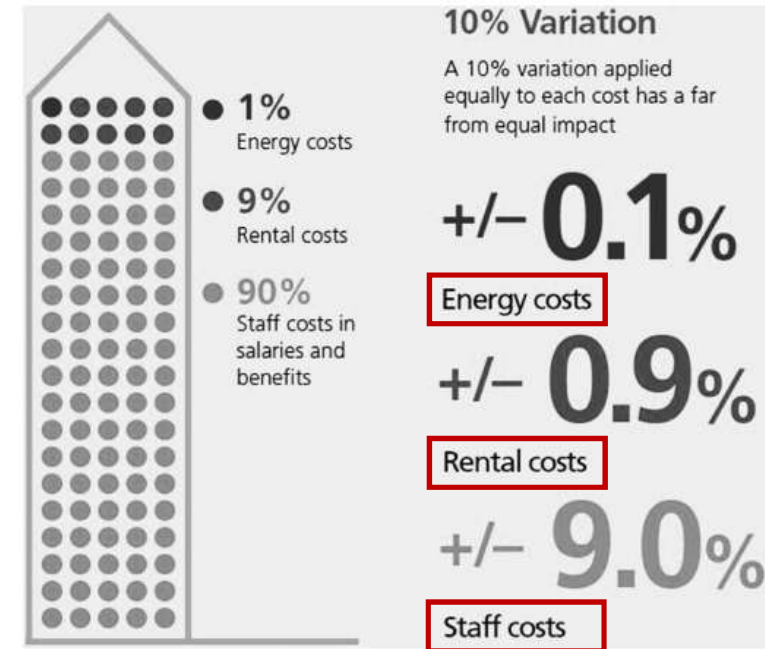
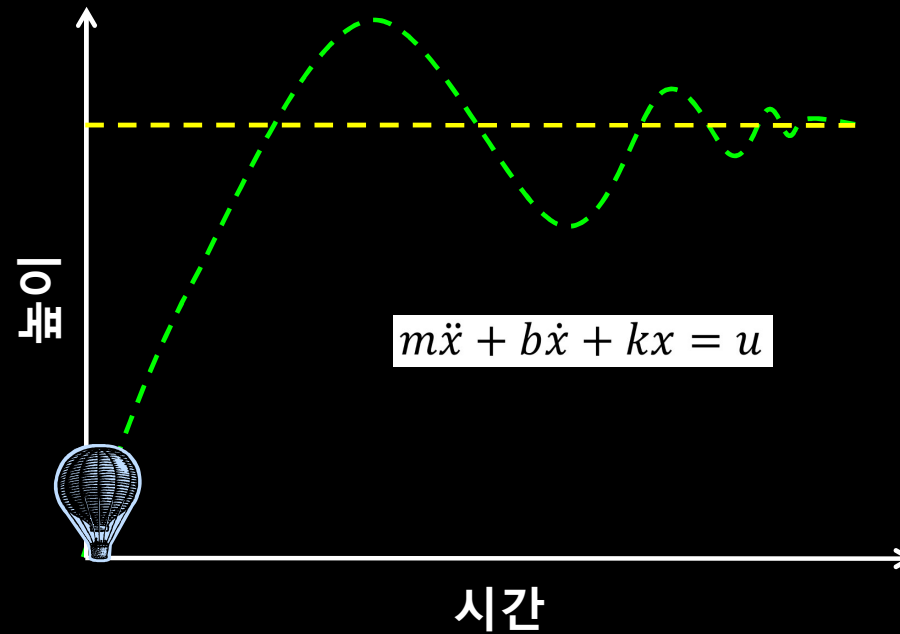


Figure 1.1 Typical business operating costs and the effect of a 10% variation applied to each cost

Source: WGBC 2014

Image source: Hensen & Lamberts (edited), 2019. *Building Performance Simulation for Design and Operation*. 2nd Ed. Routledge. Ch.1

충분히 정확한 시뮬레이션 모델이 중요 (예측 모델)

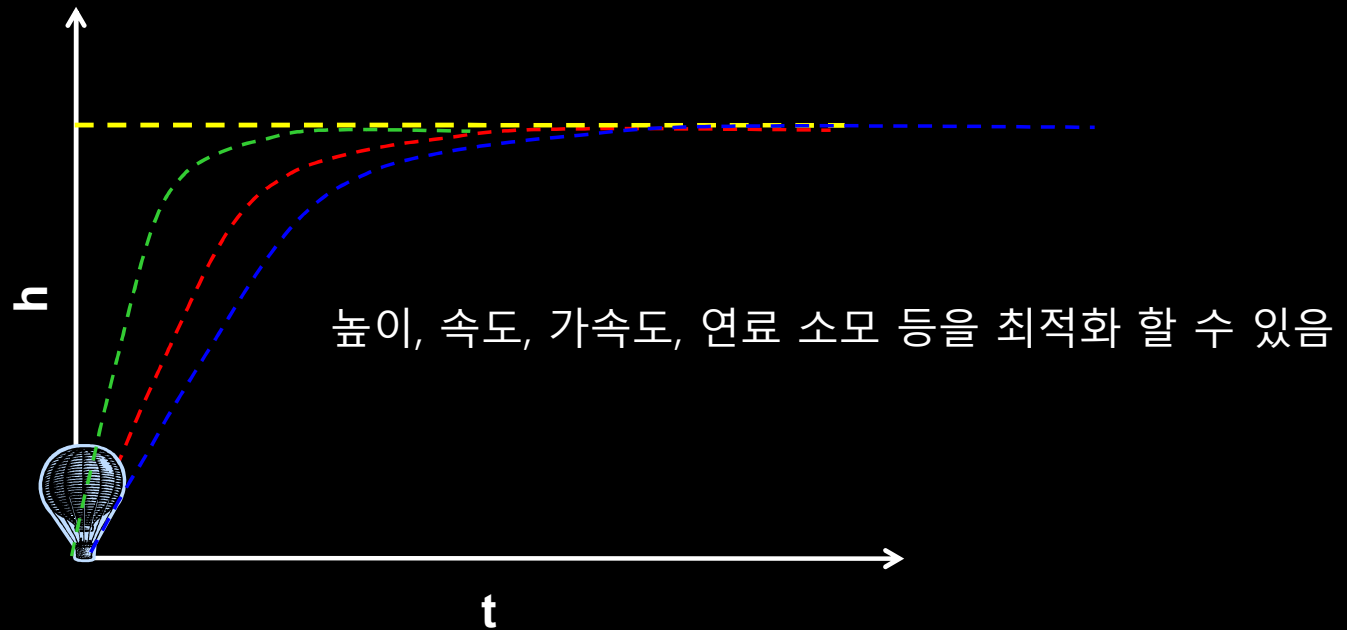


$x(t)$: 열기구 높이
 $x'(t)$: 속도 (v)
 $x''(t)$: 가속도 (a)
 $U(t)$: 버너 연료사용

Rule-based control:

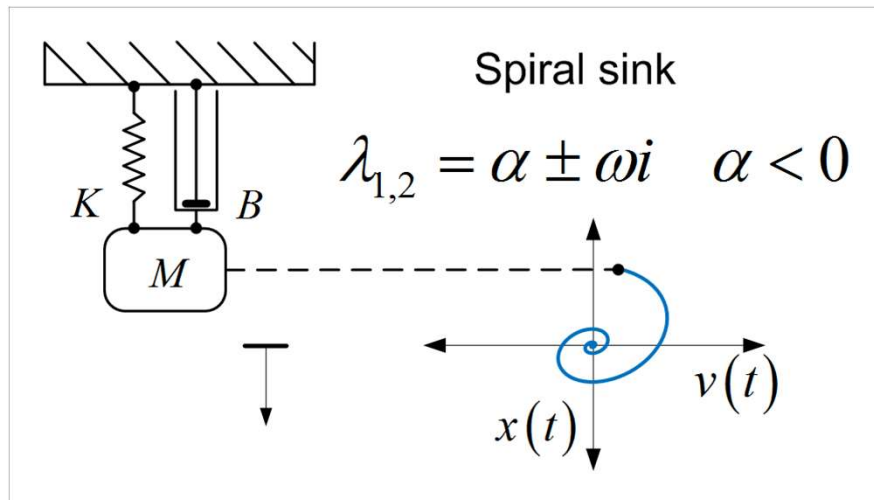
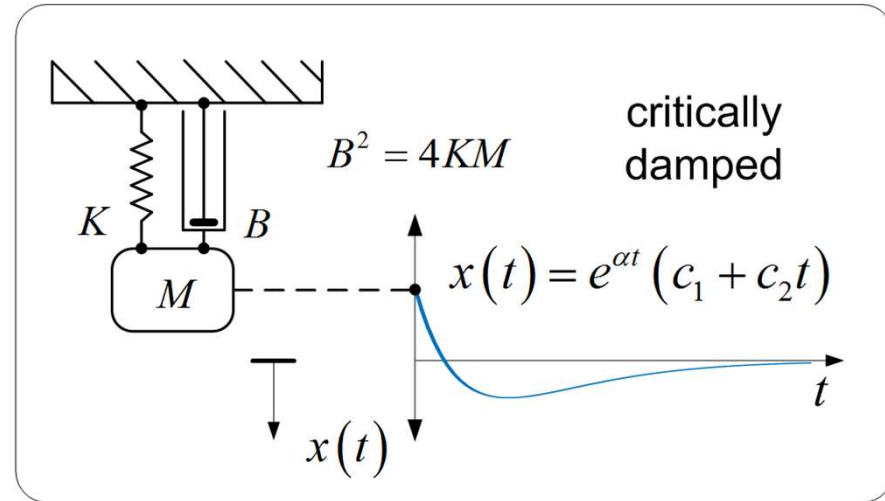
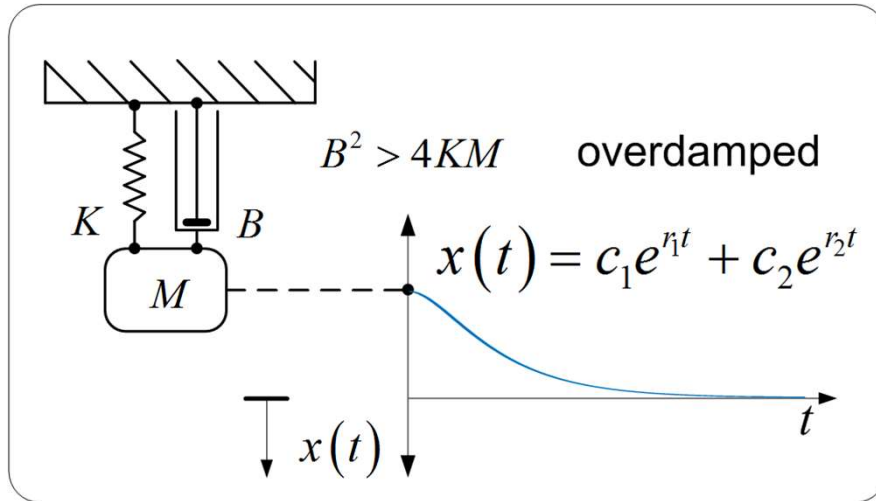
시뮬레이션 모델 없이 경험/직관에 기반한 (단순) 규칙 사용

Why? $m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = u$



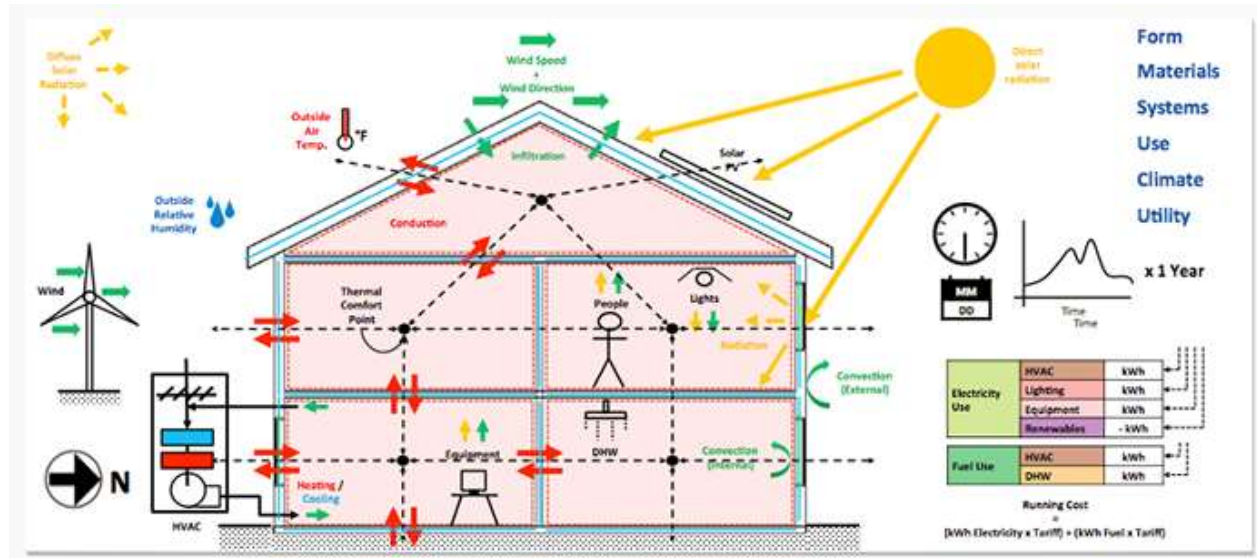
‘열기구 거동을 정확히 예측’ → 합리적인 에너지 관리 가능
prediction window는 0.5-1.0시간이면 충분

Classic mass-damper-spring model: ordinary diff. eq.



$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = u$$

물리식 기반의 건물 에너지 시뮬레이션 모델 (1970s~2010s)



고도의 전문지식

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zone}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys}$$

미지(unknown) 변수 추정 → parameter estimation
 확률적 거동 → Monte Carlo simulation

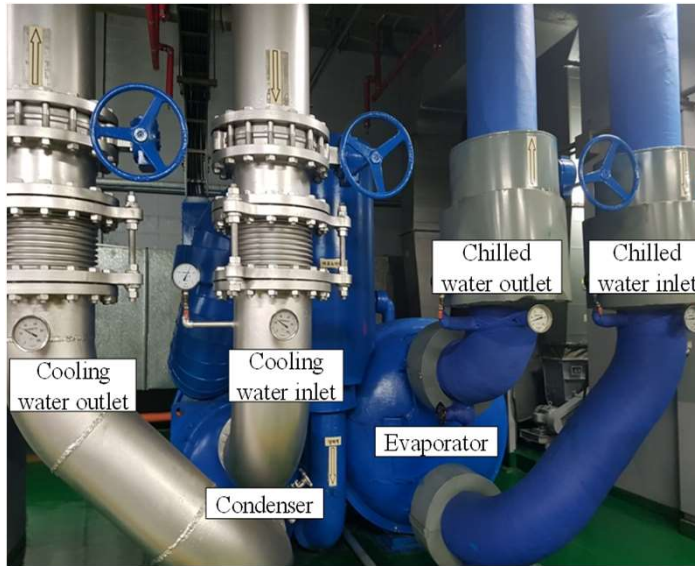
AI in building energy management

- 물리식 기반 접근과 비교
 - 장점: 빠르고 단순하게 모델 작성 / 물리 지식, 변수보정 크게 불필요 / 설비 교체 없이 절감 가능
 - 단점: data availability, extrapolation → transfer learning으로 극복 가능
- 에너지 사용 최적화: 칠러, 보일러, 히트펌프, 조명, 팬, 냉각탑
- OB 패턴 추적 (온도 설정, 창문) → Explainable AI (XAI)
- 오작동/제어 에러 탐지
- 최적 기동/정지
- 맥킨지 보고서에 따르면 건물 부문에서 20%까지 절감
- 구글, 아마존 등 많은 적용 사례

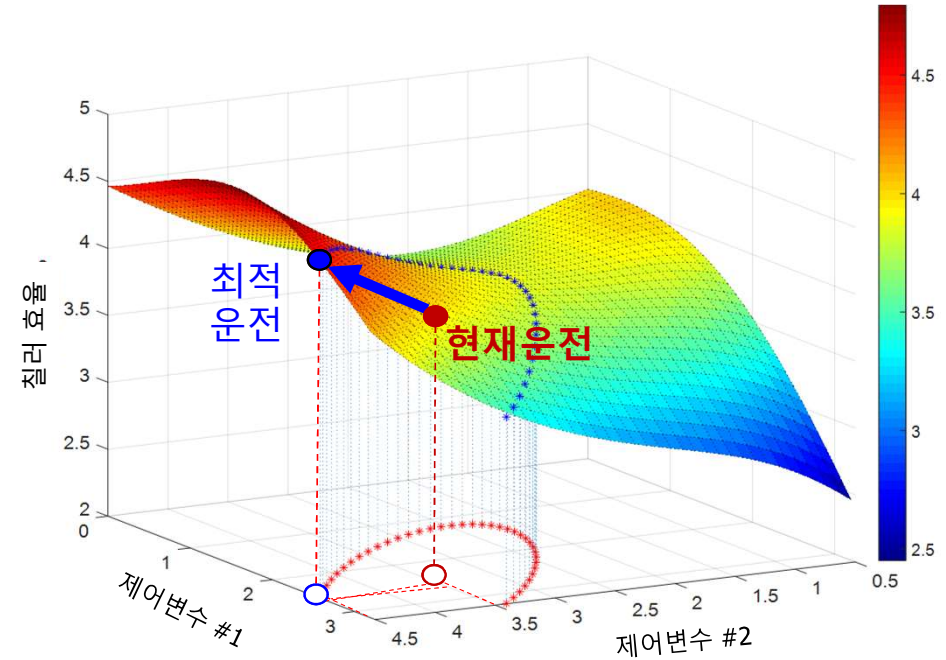
AI 냉방 에너지 절감 사례



대상건물



520 USRT



4개의 입력변수
칠러 냉수 유량 (x_3)
칠러 냉수 공급 온도 (x_4)
칠러 냉수 환수 온도 (x_5)
냉각수 온도 (x_7)

Output	칠러 전력	COP
NMBE(%)	-3.99	3.83

설비 교체 없이 에너지 절감 가능!

(2015-2018) 기계학습 방법을 이용한 건물 에너지 시뮬레이터 개발 및 이를 이용한 건물 시스템의 자율 제어, 자율 진단을 통해 25% 에너지 절감 기술 개발, 한국에너지기술평가원
(2017) 기계학습을 이용한 시뮬레이션 모델 개발 및 최적 제어 연구, SK 텔레콤주식회사

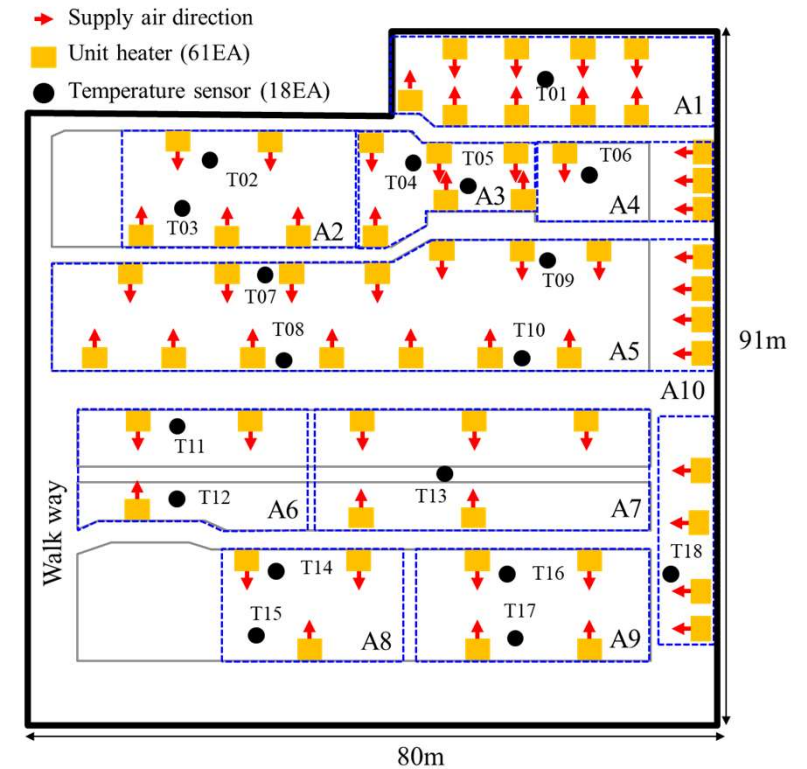
공장 건물 난방 AI 실증



유닛 히터 (61개), 58.1kW



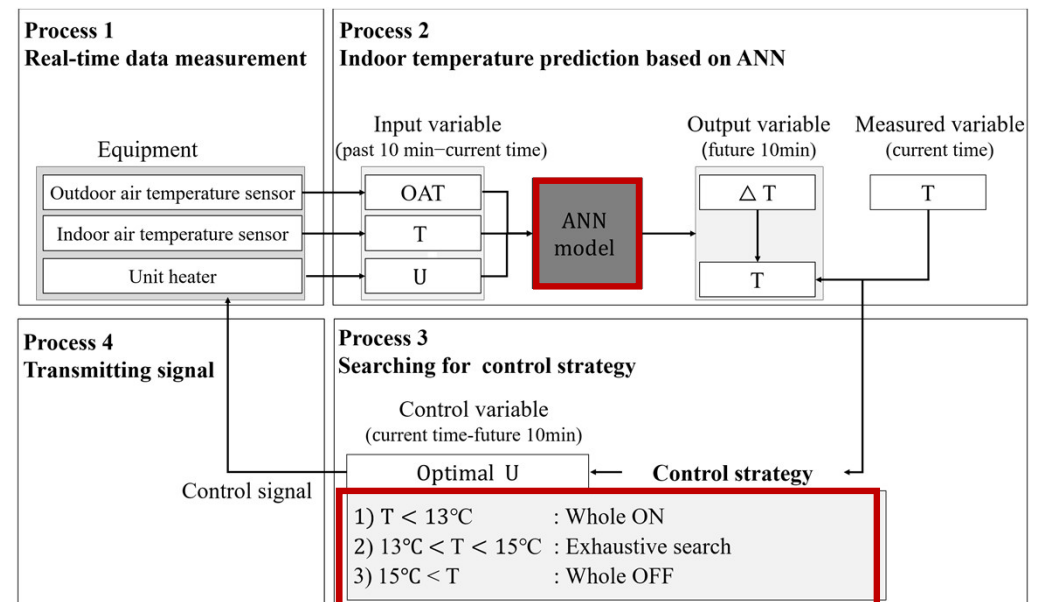
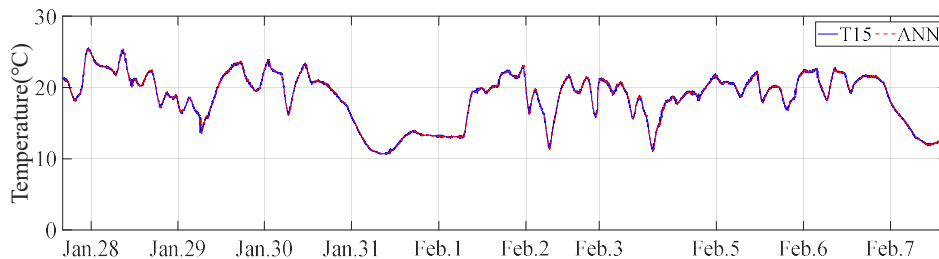
온도 센서 (18개)



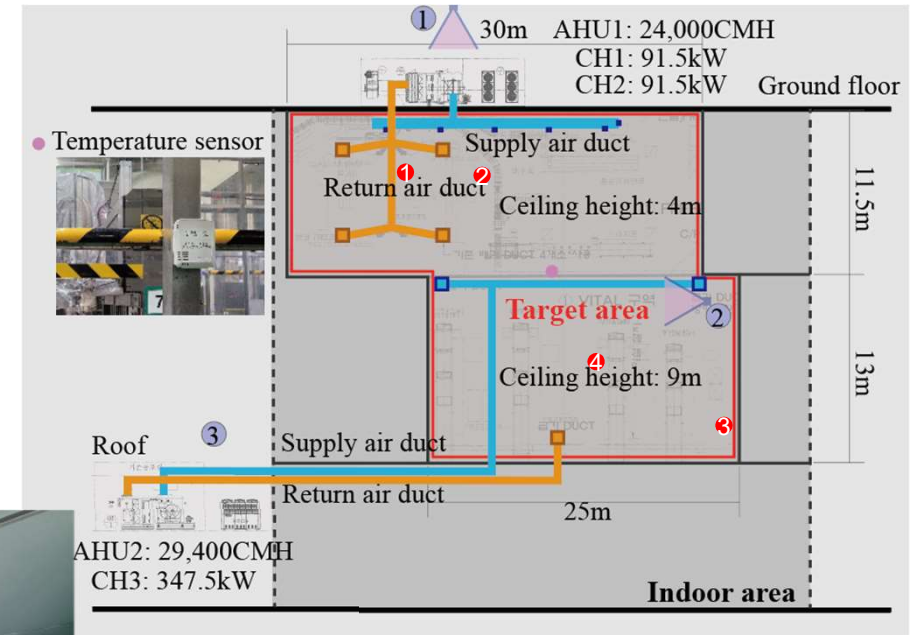
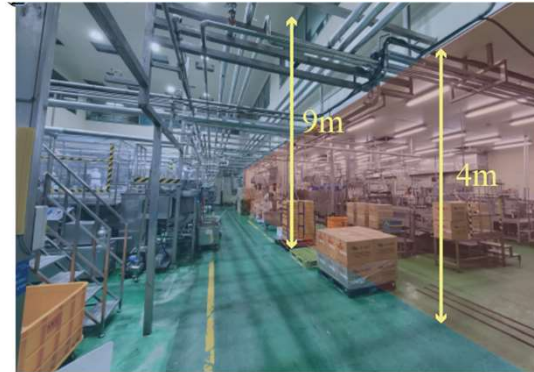
온라인 실시간 적용

- 2월 22일 - 3월 11일까지 (3주 동안 오전 7시부터 오후 6시까지 주중 적용)
- 비교일 선정: 기존 제어 적용된 날짜의 외기온과 유사한 날짜 선정
- 에너지 절감: 56.3%** (유닛 히터 사용 시간: 1,846 시간 → 806 시간, 에너지 사용 107.3MWh → 46.9MWh)

설비 교체 없이, 난방 에너지 절감



충남 식품 공장의 냉방 에너지 절감



31% 냉방에너지 절감

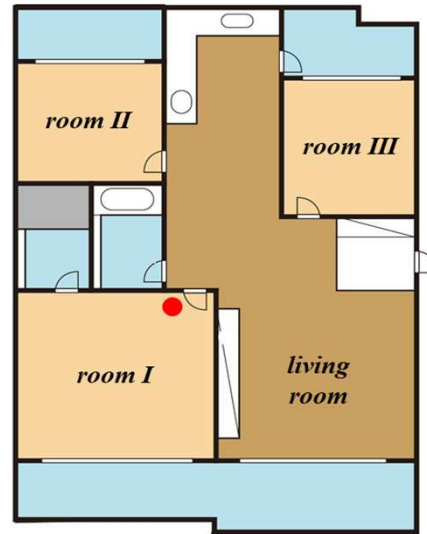
주거건물 난방 및 냉방 에너지 절감



거실 모습

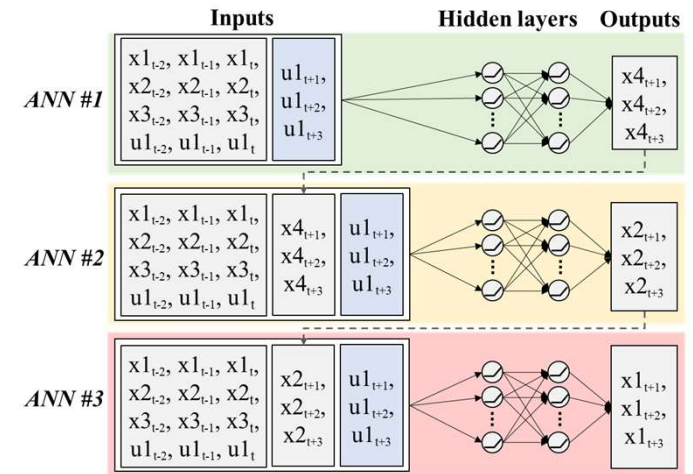
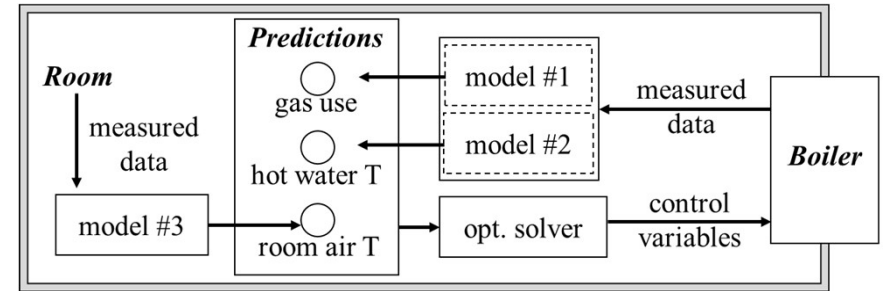


써모스탯



● Boiler Control Machine (BCM)

난방: 13 - 46 % (겨울철 43일 간)
 냉방: 평균 20.2% 절감
 Prediction window: 0.5시간
 보일러 교체 / 에어컨 교체 없이 절감



새로운 도전들

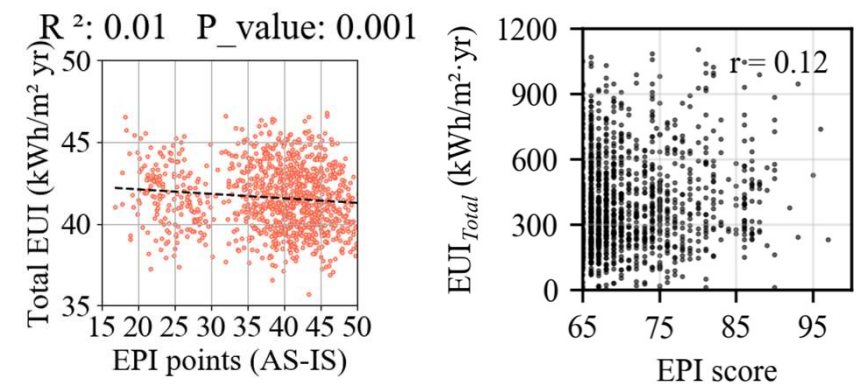
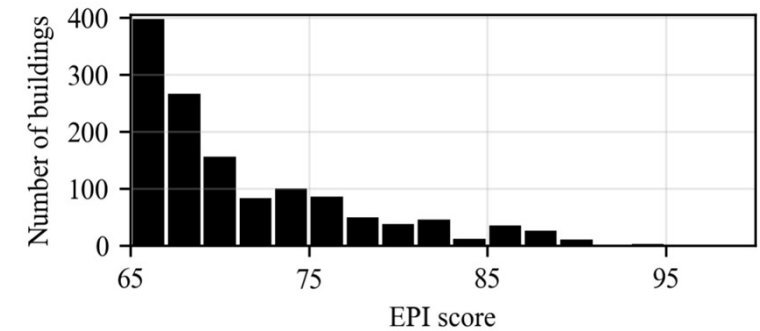
- #1: Occupant Behavior (OB)를 이용한 건물 에너지 절감
- #2: AI를 이용한 건물 에너지 절감
- #3: 도구
 - “You can't manage what you can't measure” by Peter Drucker
 - “You can't improve what you can't simulate/calculate”
 - EPI, ECO2

EPI 건물의 에너지 사용량 분석

- 공공데이터 포털 Open API (<https://www.data.go.kr/data/15044713/openapi.do>) 이용, 2013년 9월 이후 건축허가 받은 1,360개 건물의 EPI

(12쪽 중 제3쪽)

2. 에너지성능지표 ^{주1)}													
항 목		기본배점 (a)				배점 (b)					평점 (a*b)	근거	
		비주거		주거		1점	0.9점	0.8점	0.7점	0.6점			
		대형 (3,000㎡ 이상)	소형 (500~ 3,000㎡ 미만)	주택 1	주택 2								
1. 외벽의 평균 열관류율 U_e (W/㎡K) 주2) 주3) (창 및 문을 포함)	21	34	31	28	충북1	0.380미만	0.380-0.430미만	0.430-0.480미만	0.480-0.530미만	0.530-0.580미만			
					충북2	0.490미만	0.490-0.580미만	0.580-0.620미만	0.620-0.680미만	0.680-0.740미만			
					남부	0.620미만	0.620-0.690미만	0.690-0.780미만	0.780-0.840미만	0.840-0.910미만			
					제주	0.770미만	0.770-0.880미만	0.880-0.950미만	0.950-1.040미만	1.040-1.130미만			
	충북1	0.300미만			0.300-0.340미만	0.340-0.380미만	0.380-0.410미만	0.410-0.450미만					
	충북2	0.340미만			0.340-0.380미만	0.380-0.420미만	0.420-0.480미만	0.480-0.500미만					
	남부	0.420미만			0.420-0.470미만	0.470-0.510미만	0.510-0.580미만	0.580-0.610미만					
	제주	0.550미만			0.550-0.620미만	0.620-0.680미만	0.680-0.750미만	0.750-0.810미만					
	2. 지붕의 평균 열관류율 U_r (W/㎡K) 주2) 주3) (천창 등 투명 외파부분을 제외한 부위의 평균 열관류율)	7	8	8	8	충북1	0.090미만	0.090-0.100미만	0.100-0.110미만	0.110-0.130미만	0.130-0.150미만		
						충북2	0.090미만	0.090-0.100미만	0.100-0.110미만	0.110-0.130미만	0.130-0.150미만		
						남부	0.110미만	0.110-0.120미만	0.120-0.140미만	0.140-0.150미만	0.150-0.180미만		
						제주	0.150미만	0.150-0.170미만	0.170-0.190미만	0.190-0.210미만	0.210-0.250미만		
3. 최하층 거실바닥의 평균 열관류율 U_f (W/㎡K) ^{주2) 주3)}	5	6	6	6	충북1	0.100미만	0.100-0.110미만	0.110-0.130미만	0.130-0.150미만	0.150-0.180미만			
					충북2	0.120미만	0.120-0.130미만	0.130-0.150미만	0.150-0.170미만	0.170-0.210미만			
					남부	0.150미만	0.150-0.170미만	0.170-0.190미만	0.190-0.210미만	0.210-0.280미만			
					제주	0.200미만	0.200-0.220미만	0.220-0.250미만	0.250-0.280미만	0.280-0.340미만			



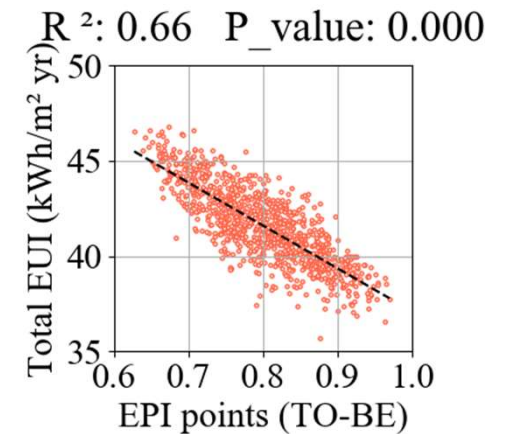
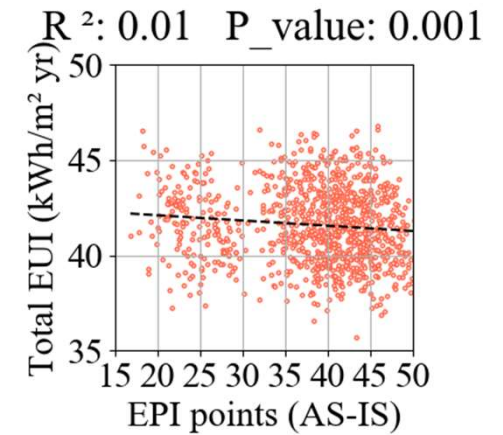
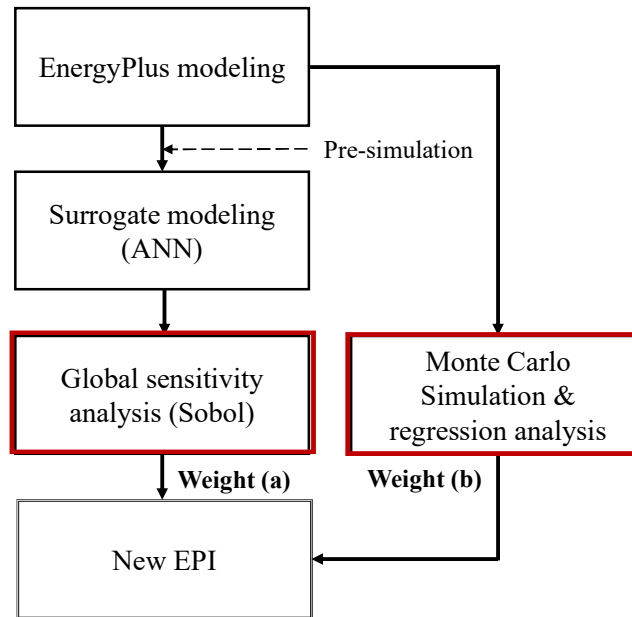
EPI 개선 사례 연구

항 목	기본배점 (a)				배점 (b)					평점 (a*b)	단거
	대형 (3,000㎡ 이상)	소형 (500~3,000㎡ 미만)	주택 1	주택 2	1점	0.9점	0.8점	0.7점	0.6점		
8. 냉방부하저감을 위한 제5조제10호더목에 따른 차양장치 설치 (남향 및 서향 거실의 투광부 면적에 대한 차양장치 설치 비율)	5	3	3	3	80%이상	60%~80%미만	40%~60%미만	20%~40%미만	10%~20%미만		
9. 냉방부하저감을 위한 제5조제10호더목에 따른 거실 외피면적당 평균 태양열 취득 ^{제5)}	2	2			14W/㎡ 미만	14~19W/㎡ 미만	19~24W/㎡ 미만	24~29W/㎡ 미만	29~34W/㎡ 미만		
원심식(성적계수, COP)					5.18이상	4.51~5.18미만	3.96~4.51미만	3.52~3.96미만	3.52미만		
흡수식(성적계수, COP)					0.75이상	0.73~0.75미만	0.7~0.73미만	0.65~0.7미만	0.65미만		
2. 냉방설비	6	2	-	2	1.2이상	1.1~1.2미만	1.0~1.1미만	0.9~1.0미만	0.9미만		
기타 냉방설비					고효율 인증제품, (신재생 인증제품)	에너지 소비효율 1등급제품	-	-	그 외 또는 미설치		

#1: Insufficient variables

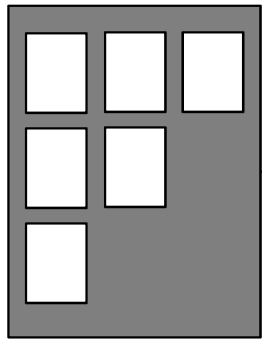
#2: Objective quantification of weight (a) required.

#3: Weight (b) is not continuous but discrete

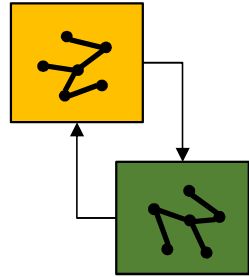


For 1,000 buildings sampled from Latin Hypercube Sampling
→ EPI calculated vs. EP simulated

ISO vs. dynamic simulation



건물



에너지 모델

ISO (normative, 규범적 접근)

- NEN2916 → ISO13790, ISO52016, DIN V 18599
- 대수식 (algebraic equation) 계산
- 적절한 수준(?) → defines the minimum that society deems acceptable (Grondzik and Kwok, 2019)
- 동특성을 반영하기 위한 계수들 존재
- 평가의 편의성 (evil approach 배제)

Dynamic simulation (high-fidelity tool, EnergyPlus)

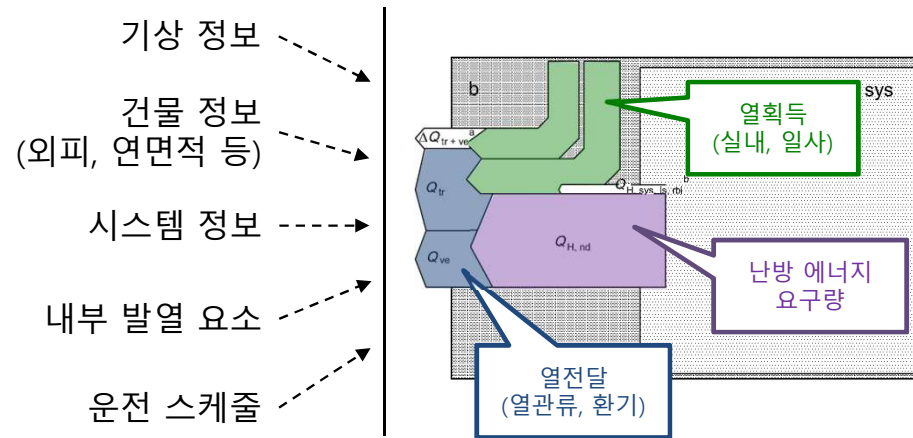
- 상세 열적 거동 모사
- 전문지식 요구됨

ISO 장점과 단점

- 계산 단순 / 빠름
- 모델 작성 쉬움: ECO2
- 전문 지식이 없어도, 약간의 교육 이수 후 사용 가능

- 간략화된 수식으로 건물 에너지 동적 거동
- Advanced/innovative 시스템&제어 반영 쉽지 않음 (구조적인 한계)
- 재연성 (simplifications, engineering assumptions)
- **국제 학술단체 (IBPSA 2013): 최신 기술 반영 어려움 → 시장 도입 느려짐 → 기업기술개발, S/W 산업 발전에 긍정적이지 않음을 주장 (vs. acausal, equation-based)**

ISO 13790 알고리즘 (monthly 방법)



난방 에너지요구량

$$Q_{H,nd} = (Q_{tr} + Q_{ve}) - \eta_H \times Q_{gn}$$

(η_H = 난방 열취득 이용률)

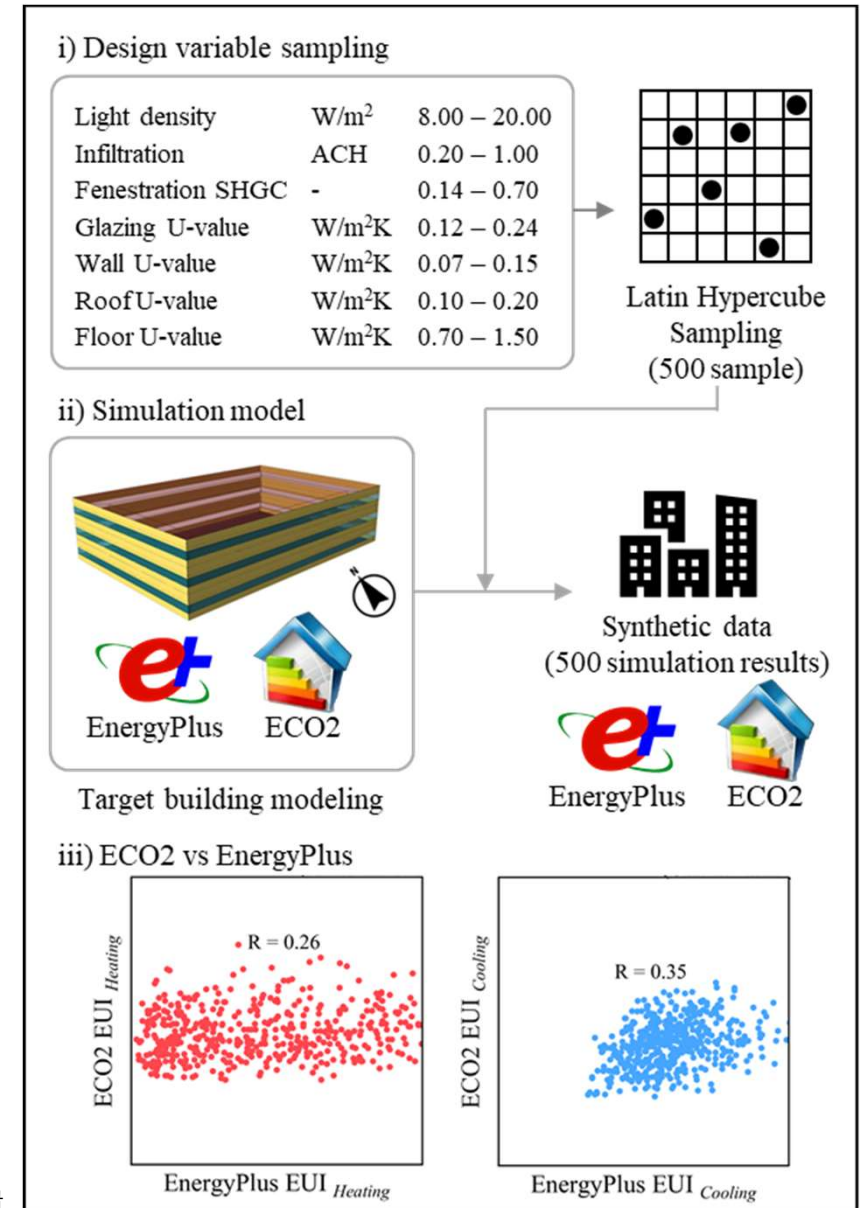
냉방 에너지요구량

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_C \times (Q_{tr} + Q_{ve})$$

(η_C = 냉방 열손실 이용률)

ECO2 vs. high-fidelity

- Latin Hypercube sampling 통해 500개 건물 생성
- 건축가/엔지니어 최적 설계 도구로 미흡할 수도



향후 방향성

- 접근 I: ECO2 업그레이드 방향성

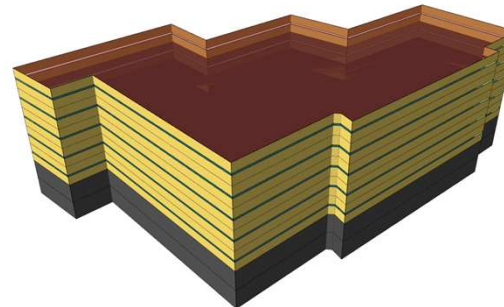
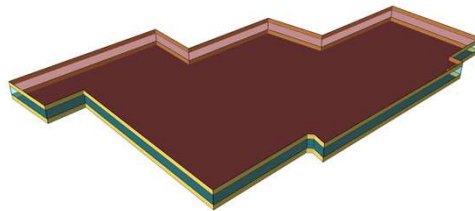
- High-fidelity 모델과 근접하도록 (η_H , η_C , normative 계수들) (IBPSA Italy)
- open source → 많은 연구자들/엔지니어들의 자발적 참여 → 객관성/투명성/합리성
- The 3rd party software 개념으로 전환 (사례: US DOE EnergyPlus와 DesignBuilder)
- 혁신적인 신기술/신제품 수용가능한 열린 구조

접근 II: a completely new design

- Unfortunately, it is often regarded as a safe route to expand existing tools, but it has been shown that this approach **requires more effort** and produces **less desirable results** than **a completely new design** (Curlett and Felder 1995; Malkawi & Augenbroe, 2004)
 - better OS, better program language, efficient engineering solver (MATLAB), open source
 - IT/computing 기술 진보: Rhino (ClimateStudio→ EnergyPlus)
 - 에너지 모델 작성도 자동화 가능
- 입력은 normative, 엔진은 EnergyPlus (미국 캘리포니아 주)

```
n_floors_g = int(props.GRND_FLR) # 지상층수
n_floors_u = int(props.UGRND_FLR) # 지하층수

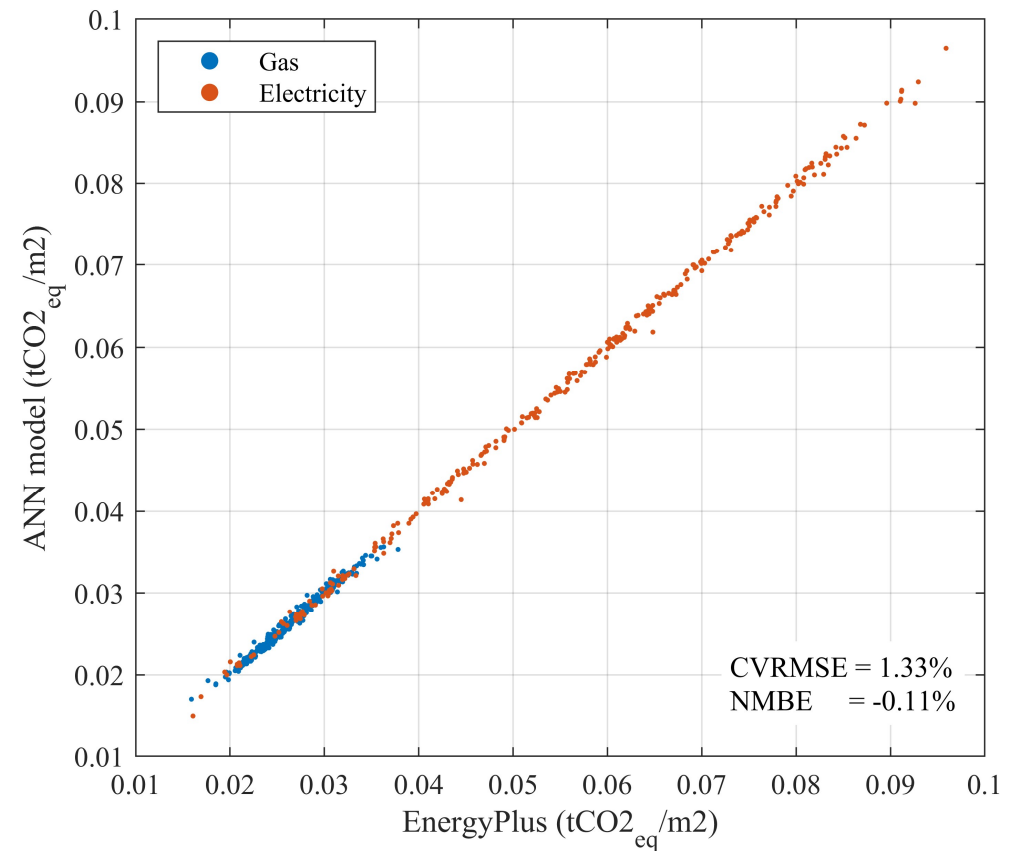
idf.add_block(
    name = 'Building',
    coordinates = [tuple(c) for c in coords],
    zoning = 'by_storey',
    height = FLOORHEIGHT * n_floors_g,
    num_stories = n_floors_g + n_floors_u,
    below_ground_stories = n_floors_u,
    below_ground_storey_height = FLOORHEIGHT
)
idf.match()
```



```
idf.set_wwr(
    wwr = kwargs.get('wwr', 0.5),
    force = True,
    construction = 'Construction_Window'
)
```

접근 III: AI 기술

- High-fidelity model (Monte Carlo sampling을 통해, 40,000-50,000(??) 개 건물 자동 생성)
- Surrogate model (AI 학습)
- Validation
 - Surrogate vs. HF model



결론

- OB
 - 비용효율적
 - 주거용 건물에서 효과 기대
- AI
 - 간단한 센서 및 S/W 추가 → 설비교체 불필요
 - 비주거용 (대형, 중형) 건물에서 효과 예상
 - 그린 리모델링 비용 vs. AI
 - AI 도입 장려하는 정책
- Tool
 - 성능을 과학적으로 평가하는 도구
 - 정부/서울시/지방자치단체/공공기관 역할
 - Myth of “one-fits-all”

감사합니다