

건물의 외주부 존에 대한 동적 부하모델 이용 피크냉방부하 저감효과 분석

이경호*, James E. Braun**

*한국에너지기술연구원 태양열지열센터(khlee@kier.re.kr),
**퍼듀대학교 기계공학과(jbraun@purdue.edu)

Evaluation on Reducing Peak Cooling Load Based on Dynamic Load Model of Building Perimeter Zones

Lee, Kyoung-Ho* Braun, James E.**

*Solar Thermal and Geothermal Center, Korea Institute of Energy Research(khlee@kier.re.kr),
**School of Mechanical Engineering, Purdue University(jbraun@purdue.edu)

Abstract

In this paper, inverse building modeling was applied to building perimeter zones which have different window orientation. Two test zones of east-facing and west-facing zones in ERS(Energy Resource Station) building, which is representative of small commercial building, was used to test performance of cooling load calculation and peak cooling load reduction. The dynamic thermal load model for the east and west zone was validated using measured data for the zones and then it was used to investigate the effect of peak cooling load reduction by adjustment of indoor cooling temperature setpoints during on-peak time period. For the east zone, the peak load can be reduced to about 60% of the peak load for conventional control even without any precooling. For the west zone, PLR is nearly independent of the start of the on-peak period until a start time of 1pm. Furthermore, PLR has a small dependence on the precooling duration. Without any precooling, the peak cooling load can be reduced to about 35% of the peak load associated with conventional control.

Keywords : 동적부하모델(Dynamic load model), 냉방부하(Cooling load), 외주부 존(Perimeter zone),
피크부하저감(Peak load reduction)

기 호 설 명

e	: 전달함수계수
T	: 온도 (°C)
J	: 목적함수
NS	: Night-setup 운전제어방식
PLR	: 피크냉방부하비 (Peak Load Ratio)
PR	: Peak-reduction 운전제어
S	: 전달함수계수 벡터
u	: 모델의 입력 벡터
Q_z	: 건물의 존 열부하 (kJ/hr)

1. 서 론

여름철 전력망의 수요는 주로 냉방용 전력 수요에 의하여 크게 증가되므로 안정적인 전력공급을 위해서는 건물의 피크냉방수요 저감을 통하여 최대전력수요를 줄이는 노력이 중요하다. 건물규모면에서 중소형 건물은 대형건물에 비하여 센서 및 제어장치 설치가 부족하고 건물 관리인을 두지 않으므로, 초기 저비용의 건물 부하 및 에너지관리를 위한 자동 제어기기가 필요하다. 중소형건물을 위한 초기 저가형의 피크 냉방부하관리를 위한 장치로 써모스탯(실내온도 조절장치, Thermostat)을 활용할 수 있다. 냉방부하는 설정온도의 함수이므로, 써모스탯의 실내온도 설정값을 변경시켜 건물의 냉방부하 형태를 변화시킬 수 있으며, 더 나아가 실내 쾌적온도 범위에서 설정온도를 최적으로 조절하여 피크냉방부하를 최소화할 수 있다. 또한 피크시간대 이전에 설정온도를 쾌적범위의 하한값으로 낮춘 상태로 유지함으로써 건물 내벽을 차갑게 하여 벽체가 갖는 열저장 효과를 이용함으로써 냉방부하 저감효과를 더욱 증대시킬 수 있다.

건물의 피크냉방부하를 줄이기 위한 건물 모델기반의 실용적인 설정온도제어 기법에 대한 연구¹⁾가 최근에 발표된 바 있으며, 이는

건물전체의 냉방부하를 대상으로 한 연구이었다. 그렇지만, 실별 써모스탯의 설정온도를 개별적으로 설정할 수 있고, 실별로 설치된 냉방기의 설정온도를 조정하여 존별로 냉방이 달리 이루어질 수 있으므로, 건물의 실별 또는 존별로 피크냉방부하를 조절하는 효과분석에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 중소규모의 실증시험용 건물의 창문방향이 동쪽과 서쪽을 향하는 외주부 존(Perimeter zone)을 대상으로 하였으며, 이에 대한 동적 존 부하모델을 구하고 존별 피크냉방부하를 최소화하기 위한 설정온도제어기법을 적용한 시뮬레이션을 통하여 그 효과를 분석하였다.

2. 대상 건물

본 연구를 위한 대상건물은 ERS(Energy Resource Station)건물로서, 그림 1에 건물 외관과 평면구성을 나타내었다. 이 건물은 미국 Iowa주의 Ankeny에 위치(북위 41.71도, 서경 93.61도)한 1층 규모의 실증시험을 위한 소형 건물이다. 실내의 존은 동, 서, 남, 내부 등

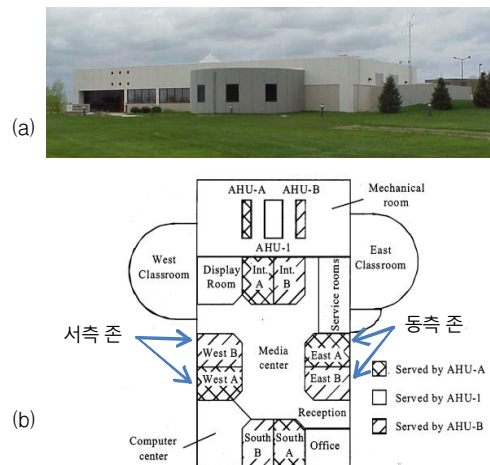


그림 1. ERS 빌딩 구성 평면도 (a)외관 모습, (b) 내부 평면구성도²⁾ (Price and Smith, 2000)

4개의 존으로서 각각 A실과 B실로 나뉘어져 있다. 본 논문에서는 East A와 East B를 합하여 동향 존으로 하고, West A와 West B를 서향 존으로 하여 적용대상 존으로 선정하였다. 동향 존과 서향 존은 각각 동쪽과 서쪽을 향하는 외벽에 창문이 있으며 창문에 차양은 설치하지 않았다. 서향 존에 대한 기하학적인 정보를 그림 2에 나타내었고, 동향 존과 동일하게 적용된다. 외벽의 창문은 0.7cm두께의 이중단열창이며, 바닥은 카페트로 되어있다. 각 존에는 내부 열취득을 위하여 조명과 1kW 히터를 사용하였다.

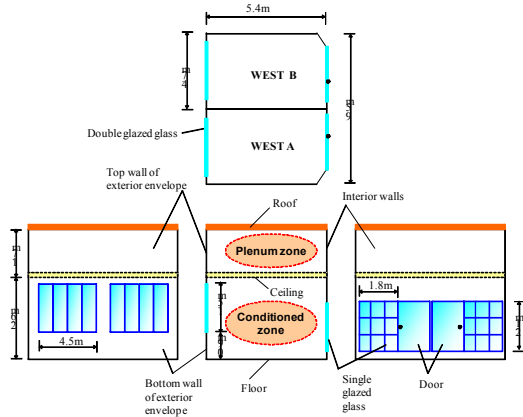


그림 2. 서향 존에 대한 기하학적 정보

본 논문에서는 동향 존과 서향 존을 연구대상으로 하였으며, 남향으로 창을 가진 존은 남향에 창을 갖는 건물에 대한 연구결과³⁾를 참고할 수 있을 것이다.

3. 건물 외주부 존에 대한 동적 부하모델

3.1 동적 부하모델

건물은 벽체가 갖는 열용량의 영향으로 주변의 조건이나 실내조건이 갑자기 변화하는 경우에 열적 관성으로 인한 과도현상이 나타나게 되는데 이를 정확하게 예측할 수 있는 동적 부하모델이 필요하다. 동적 부하모델은

화이트박스(White-box) 모델과 그레이박스(Grey-box) 모델⁴⁾ 기법으로 구분되어 지는데, 본 논문에서는 건물에 대한 단순화한 물리적인 모델을 수립하고, 모델의 파라미터는 실제 데이터를 이용하여 구하는 방식인 그레이박스 모델기법을 적용하였다.

3.2 외주부 존의 동적부하모델

ERS 건물 외주부 존에 대한 모델은 외기와 접하는 외벽과 상부의 천정벽, 지표면과 접하는 바닥면, 내부의 다른 존과 접하는 내벽으로 단순화시켰으며 그림 3에 열회로(Thermal network)로 나타내었다. 각각의 벽은 두 개의 열용량과 세 개의 열저항을 갖는 두 개의 열적 노드로 구성하여 존에 대한 열회로를 구성하였다. 각 노드에 대한 열적 평형식을 적용하여

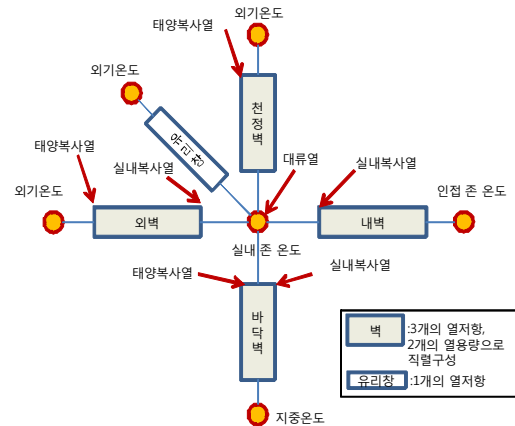


그림 3. 건물 외주부에 대한 열적 회로

연립 미분방정식을 상태공간(state-space)방정식으로 표현할 수 있으며, 존의 설정온도를 유지하기 위하여 제거하여야 할 열량인 존의 열부하는 Seem 등이 제안한 방법⁵⁻⁶⁾을 적용하여 다음 식으로부터 계산하였다.

$$Q_z = \left(\sum_{j=0}^N S_j u_{k-j} \right) - \left(\sum_{j=1}^N e_j Q_{z,k-j} \right) \quad (1)$$

대상건물인 ERS의 실내 온도에 대한 부하모델의 파라미터는 학습(Training)이라는 과정을 통하여 결정하며, 각 존에 대하여 모델을 이용하여 계산된 냉방부하와 실측 냉방부하 사이의 차이를 최소화하는 각 노드의 열저항과 열용량을 포트란의 NREG 서브루틴함수⁷⁾를 이용하여 구하였다. 각 존의 수직 외벽의 동향면과 서향면에 작용하는 태양복사는 수평면 전일사 데이터를 이용하여 TRNSYS⁸⁾의 Solar radiation processor로부터 계산하여 구하였다.

파라미터를 구하는데 필요한 데이터를 얻기 위한 냉방시험은 2회차에 걸쳐 이루어졌으며, 각 존의 냉방부하는 급기온도, 실내온도 및 급기풍량으로 구하였으며, 각각에 대한 측정 정확도를 표 1에 표시하였다.

표 1. 측정 정확도

측정 항목	정확도(Accuracy)
실내 및 급기온도	±0.14℃
급기 풍량	±1.13m ³ /min
외기온도	±0.1℃
수평 전일사량	읽음값의 ±0.5%

1차 시험에서는 냉방시간대의 실내온도를 일정하게 유지하고 비냉방시간대에는 설정온도를 상향조정하여 유지하는 기존의 운전방식(NS, Night-Setup)을 적용하였고, 2차 시험에서는 야간에 설정온도를 낮추어 둔 후 냉방시간대에 설정온도를 상향조정하여 열부하에 대한 동적 특성이 잘 나타날 수 있도록 하였다. 1차와 2차 시험데이터를 모델의 학습과 부하예측 성능평가용으로 이용한 경우에 따른 예측 오차(rmse)를 표 2에 나타내었다. 대체로 10% 이내의 오차를 나타내어 상당히 정확하게 존의 열부하를 잘 묘사하였으며, 실측 냉방부하와 예측 냉방부하를 그림 4에 비교하여 나타내었다.

표 2. 존 모델의 냉방부하 예측성능

존	학습	예측	예측오차
동향	1차 시험	2차 시험	8.94%
	2차 시험	1차 시험	8.78%
서향	1차 시험	2차 시험	9.46%
	2차 시험	1차 시험	12.4%

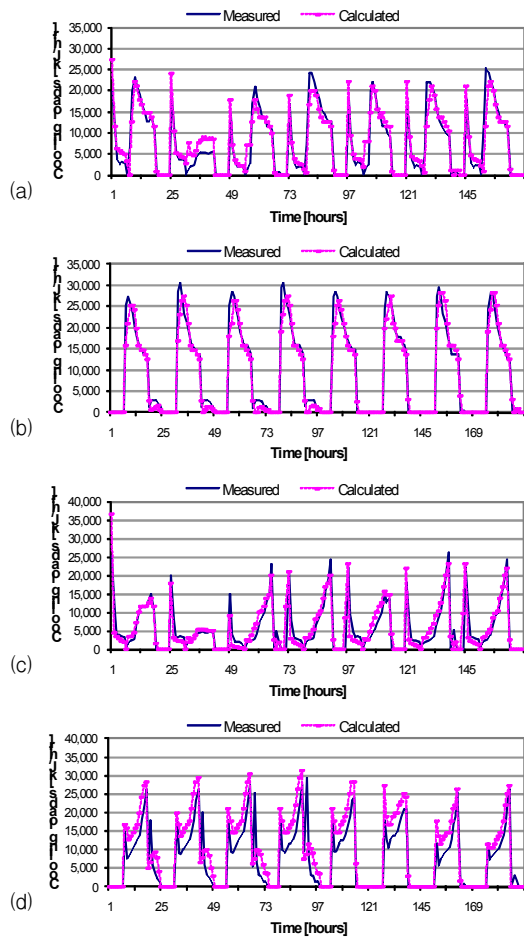


그림 4. 건물 존의 동적 부하모델의 냉방부하예측과 실측 냉방부하의 비교, (a) 동향 존 (1차 시험데이터로 학습 후 2차시험 데이터로 예측비교), (b) 동향 존 (2차 시험데이터로 학습 후 1차시험 데이터로 예측비교), (c) 서향 존 (1차 시험데이터로 학습 후 2차 시험데이터로 예측비교), (d) 서향 존 (2차 시험데이터로 학습 후 1차 시험데이터로 예측 비교)

4. 건물 외주부 존 피크냉방부하 저감 효과분석

4.1 피크냉방부하 저감기법 개요

본 논문에서 적용한 피크냉방부하 저감기법은 야간시간대에 각 존을 기존운전방식의 냉방온도보다 더 낮은 온도로 예냉하고, 오전 시간대에는 좀 더 온도를 상승시켜 유지한 후, 피크시간대에는 최대냉방부하를 최소화하기 위하여 설정온도를 변화시키는 방법이다. 피크시간대에 적용할 최적 냉방설정온도를 결정하기 위한 문제는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Minimize } J = \text{Minimize} [\max\{Q_z\}] \quad (2)$$

for peak time period

최적화를 위한 제약조건은 피크시간대에 걸쳐서 실내설정온도가 피크시간대 직전의 예냉온도와 쾌적범위 상한온도의 범위에 있어야 한다는 것과 피크시간대의 최종시각에서의 설정온도는 쾌적범위 상한온도와 같아야 한다는 것 등으로 하였다. 본 최적화문제를 보다 효율적으로 풀기 위하여 피크시간대에 걸쳐서 냉방부하가 일정한 값을 갖는 냉방설정온도를 결정하는 방식으로 Secant법¹⁾을 적용하여 구하였다.

4.2 냉방운전 시뮬레이션

ERS건물의 동향 존과 서향 존에 대한 부하모델을 이용하여 피크냉방부하를 최소화하기 위한 최적설정온도를 구하여 냉방운전을 시뮬레이션하였다. 피크냉방부하 저감효과를 위한 비교기준은 기존 운전방식(NS)으로 하였다. 기존운전(NS)의 설정온도 조건은 냉방시간대 실내설정온도를 일정하게 23.3℃로 유지하였고 비냉방시간대에는 32℃로 상향조정하여 냉방기가 꺼질 수 있도록 하였다. 한편, 피크시간대의 최대냉방부하를 저감하기 위한 운전방식(PR, Peak Reduction)에서 실

내설정온도는 비냉방시간대에는 27℃, 밤시간대 야간예냉온도로 19.4℃, 오전시간대 예냉온도로 20.6℃, 피크시간대에는 24.4℃를 상한온도로 하여 부하모델로부터 구한 최적온도변화를 적용하였다.

4.3 피크냉방부하 저감효과 분석

피크부하저감 시뮬레이션에 사용한 부하모델은 존의 열특성을 잘 묘사할 수 있도록 1차 및 2차시험 데이터를 모두 사용하여 학습한 부하모델을 이용하였다. 맑은 하늘의 기상 조건을 갖는 1일에 대하여 실측 냉방부하와 학습한 모델로부터 계산한 냉방부하를 동향 존과 서향 존에 대하여 각각 그림 5에 비교하였다. 동향 존의 경우 냉방부하는 오전에 매우 높은 부하를 나타내고 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있고, 서향 존의 경우 이와 반대로 시간이 지나 오후시간으로 갈수록 냉방부하가 급격히 증가함을 알 수 있는데, 이것은 창문을 통한 일사의 영향이 매우 크기 때문이다.

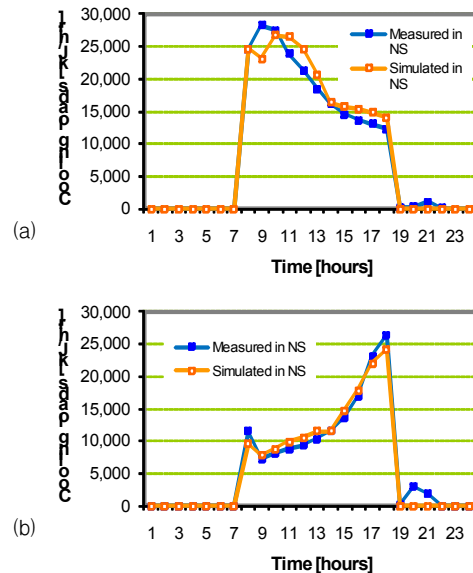


그림 5. 건물 존별 냉방부하모델의 계산부하와 실측 부하의 비교 (a)동향 존, (b)서향 존

피크냉방부하 저감성능을 평가하기 위한 지표로서 피크냉방부하율(PLR, Peak load ratio)을 다음과 같이 정의하였다.

$$PLR = \frac{\max\{Q_{z,PR}\}}{\max\{Q_{z,NS}\}} \quad (3)$$

for peak time period

동향 존과 서향 존에 대한 시뮬레이션 결과로부터 PLR을 구하여 그림 6에 나타내었다. 피크시간대의 시작시각을 오전 7시부터 1시간 간격으로 오후 3시까지 달리하였고 피크시간대 종료시각은 동일하게 오후 6시로 하였다. 야간 예냉운전 시작시간은 새벽 2시부터 2시간 간격으로 고려하여 야간예냉을 하지 않는 경우까지 포함하였다. 야간예냉을 하지 않는 경우에는 오전예냉만 하게 되며, 20.6℃로 피크시간대 직전까지 실내온도를 유지하게 하였다.

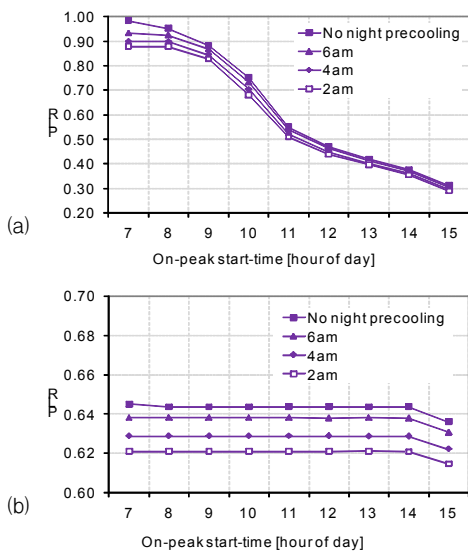


그림 6. 건물 존별 냉방부하모델을 이용한 PLR 계산 결과 (a)동향 존, (b)서향 존

동향 존의 경우, PLR값은 피크시간대 시작시각이 오후로 바뀔수록 즉, 피크시간대가

짧아질수록 급격히 낮아져 피크부하 저감효과가 매우 커지는 것으로 나타났다. 오후 1시부터 오후 6시까지 피크부하저감을 하고자 하는 경우에 야간예냉을 하지 않는 경우에도 약 60%에 가까운 피크저감효과가 예상된다. 야간예냉 시간이 피크부하저감에 미치는 영향이 매우 작게 나타났지만, 피크시간대가 오전부터 시작할수록 그 영향은 다소 커지는 것을 알 수 있다.

서향 존의 경우에는 오후 3시의 피크부하 시작시각을 제외하고는 PLR값이 피크시간대 시작시각의 변화 즉 피크부하시간대가 길어지거나 짧아지는 변화에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 야간예냉에도 그 영향이 그리 크지 않았다. 야간예냉을 하지 않는 경우에 피크부하는 약 35%까지 저감이 가능할 것으로 나타났다.

하루 중 동향 존과 서향 존의 실내 설정온도와 그에 따른 냉방부하를 기존 NS운전과 PR운전에 대하여 그림 7과 그림 8에 각각 나타내었으며, 야간 예냉운전 없이 오전 7시부터 설정온도를 20.6℃로 낮추고 오전 예냉운전을 한 후, 오후 1시부터 피크부하저감을 위하여 24.4℃까지 최적의 경로로 증가시켜 준 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 두 존의 경우 모두 PR운전제어에서 오전 7시에 냉방을 시작하면서 밤사이 존 내에 축적된 열을 제거하기 위한 냉방부하가 크게 나타났으나, 그 이후로는 기존운전(NS)에서의 부하와 유사한 패턴으로 냉방부하가 나타났고, 1시 이후부터는 동향 존의 경우에 급격히 냉방부하가 낮아진 후에 일정하게 유지되었고, 서향 존의 경우 냉방부하가 다소 증가하다가 일정하게 유지되어 기존운전에서의 피크시간대 최대냉방부하를 상당히 낮출 수 있는 것으로 나타났다.

존 별로 최적 설정온도의 시간에 따른 변화 형태를 살펴보면 서로 매우 상이한 것을 알 수 있다. 즉, 동향 존에 대한 최적설정온도는

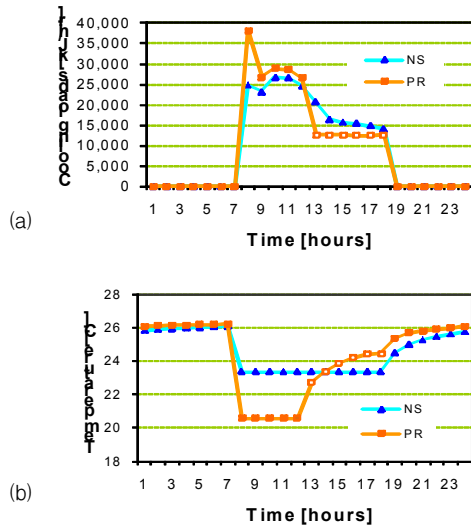


그림 7. 동향 존의 피크냉방부하 저감을 위한 최적온도 및 그에 따른 냉방부하 (오후 1시부터 오후 6시까지 PR운전) (a)냉방부하, (b)실내온도

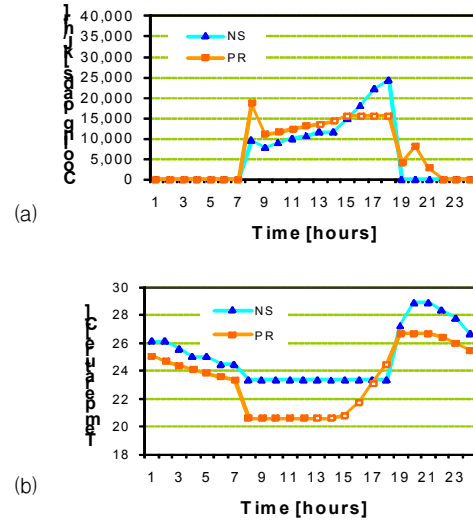


그림 8. 서향 존의 피크냉방부하 저감을 위한 최적온도 및 그에 따른 냉방부하 (오후 1시부터 오후 6시까지 PR운전) (a)냉방부하, (b)실내온도

피크시간대 초기에 급격하게 증가한 후에 지수함수적인 변화를 보였으나, 서향 존의 경우는 초기에는 예냉온도를 유지하다가 시간이 지날수록 급격하게 지수함수적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이로부터 피크냉방부하를 최소화하기 위한 실내온도는 존의 열부하 특성에 따라 매우 다르다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 사용한 설정온도값과 다른 온도조건에서는 피크부하절감율에 대한 결과값이 달라질 수 있지만, 전체적인 경향은 크게 변화하지 않을 것으로 보인다. 다만 실제 건물에 적용하는 경우에는 건물 존의 거주자의 반응을 고려하여 실내 쾌적온도범위를 결정할 필요가 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 건물 개별 존의 피크냉방부하관리를 위한 목적으로 존에 대한 그레이박스 모델링을 적용한 동적 부하모델을 구하였으며, 피크시간대의 피크냉방부하를 최소화하기 위한 최적설정온도를 구하여 존별 냉방

운전 시뮬레이션으로 그 효과를 분석하였으며, 요약과 향후 연구방향 및 활용방안의 제언을 통한 결론은 다음과 같다.

5.1 요약

존별 동적 냉방부하모델 예측성능 및 모델 기반으로 최대냉방부하를 최소화하기 위한 기법의 효과를 시뮬레이션으로 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실증시험용 ERS 건물의 외주부 존을 대상으로 동측면의 유리창을 갖는 동향 존과 서측면에 유리창을 갖는 서향 존에 대한 동적부하모델의 부하예측성능은 예측 오차 10%이내 수준으로 매우 정확함을 확인하였다.
- (2) ERS건물 외주부 존에 대한 실측 부하데이터로 학습시킨 존별 동적부하모델을 이용한 운전최적화 시뮬레이션을 통하여 피크부하저감 성능을 확인하였다. 오전 예냉온도를 21°C 정도로 하고, 오후 1시부터 오후 6시까지의 피크시간대에 실내냉방온도를 24.4°C 정도까지 건물 존의 특성

에 맞게 최적으로 조절할 경우, 냉방설정 온도 23.3℃로 유지하는 기존운전의 경우에 비하여 동향 존에서 60%, 서향 존에서는 35% 수준까지 피크냉방부하를 절감할 수 있을 것으로 계산되었다.

- (3) 피크냉방부하를 최소화하기 위한 설정온도의 시간에 따른 변화궤적의 형태는 동향 존과 서향 존에 대하여 서로 매우 다르게 나타나, 존별 열부하특성에 크게 영향을 받는다.

5.2 향후 연구 및 활용방안 제언

본 연구와 관련한 향후 연구방향과 활용방안에 대한 제언은 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서는 냉방부하를 예측하는데 있어서 외기온도와 태양복사의 실측데이터를 이용하였지만, 실제 적용을 위해서는 이에 대한 예측이 필요하다. 또한 우리나라의 경우 여름철에 우기가 길어지고 있고 습도가 높아 잠열부분이 차지하는 비중이 점차 커지고 있으므로, 잠열부하를 포함하는 부하예측모델 개발이 필요할 것이다.
- (2) 본 논문의 연구결과는 건물 내 존별로 설치된 냉방기기의 설정온도나 써모스탯에 적용하여 개별 존 단위의 피크부하를 관리하는 스마트 제어기기 개발을 위한 기초자료로 활용가능할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 본 연구에서 동향 존과 서향 존은 각각 A실과 B실로 나뉘어진 존의 그룹으로도 볼 수 있으므로, 건물 내 여러 개의 존을 묶어서 한꺼번에 그룹제어하는 경우에도 적용가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. Lee,K.-H. and Braun,J.E., Model-based Demand-Limiting Control of Building Thermal Mass, Building and Environment,

Vol.43, No.10, 2008, pp.1633~1646.

2. Price,B.A. and Smith,T.F., Description of the Iowa Energy Center Energy Resource Station: Facility Update III, Technical Report ME-TFS-00-001, The University of Iowa, 2000.

3. Lee,K.-H. and Braun,J.E., Evaluation of Methods for Determining Demand-Limiting Setpoint Trajectories in Buildings Using Short-Term Measurements, Building and Environment, Vol.43, No.10, 2008, p.1769~1783.

4. Wikipedia, mathematical model.

5. Seem,J.E., Beckman,W.A., Mitchell,W., Transfer Functions for Efficient Calculations of Multi Dimensional Heat Transfer, Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 1989, Vol.111, No.1, pp.5~12.

6. Chaturvedi,N., Braun,J.E., An Inverse Grey-Box Model for Transient Building Load Prediction, International Journal of HVAC&R Research, 2002, Vol.8, No.1, pp.73~100.

7. NREG(Nonlinear regression) analysis, Fortran library.

8. University of Wisconsin at Madison, TRNSYS 15.0 Manual.