

건물냉방부하에 대한 동적 인버스 모델링기법의 EnergyPlus건물모델 적용을 통한 성능평가

이 경 호[†], James E. Braun^{*}

한국전력공사 전력연구원, ^{*}Purdue 대학교

Performance Evaluation of a Dynamic Inverse Model with EnergyPlus Model Simulation for Building Cooling Loads

Kyoung-ho Lee[†], James E. Braun^{*}

Korea Electric Power Research Institute, KEPCO, Daejeon 305-380 Korea

^{}School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47906 USA*

(Received September 20, 2007; revision received November 23, 2007)

ABSTRACT: This paper describes the application of an inverse building model to a calibrated forward building model using EnergyPlus program. Typically, inverse models are trained using measured data. However, in this study, an inverse building model was trained using data generated by an EnergyPlus model for an actual office building. The EnergyPlus model was calibrated using field data for the building. A training data set for a month of July was generated from the EnergyPlus model to train the inverse model. Cooling load prediction of the trained inverse model was tested using another data set from the EnergyPlus model for a month of August. Predicted cooling loads showed good agreement with cooling loads from the EnergyPlus model with root-mean square errors of 4.11%. In addition, different control strategies with dynamic cooling setpoint variation were simulated using the inverse model. Peak cooling loads and daily cooling loads were compared for the dynamic simulation.

Key words: Dynamic building model(동적 건물모델), Inverse model(인버스 모델), Cooling load(냉방부하), EnergyPlus program(EnergyPlus 프로그램)

기 호 설 명

A_b : 시스템 방정식의 계수 행렬
 B_b : 시스템 방정식의 계수 행렬
 C : 열용량
 C_b : 시스템 방정식의 계수 행렬
 D_b : 시스템 방정식의 계수 행렬

E_{rms} : 제곱평균 제곱근 오차(RMSE, root-mean-square error)
 e : 시스템 방정식에 사용되는 과거 데이터 추이에 대한 스칼라 전달함수 계수
 R : 열적 저항
 S : 과거 데이터 추이에 대한 시스템방정식에 사용되는 전달함수의 계수
 Q : 열전달율
 u : 입력변수 벡터
 x : 상태변수 벡터
 Y : 출력변수 벡터

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-865-7665; fax: +82-42-865-5904

E-mail address: leekh@kepri.re.kr

하첨자

<i>a</i>	: 건물주위 대기
<i>b</i>	: 건물
<i>E+</i>	: EnergyPlus 모델
<i>e</i>	: 외벽
<i>eff</i>	: 유효
<i>f</i>	: 바닥
<i>g</i>	: 지면 또는 열취득
<i>rad</i>	: 복사
<i>conv</i>	: 대류
<i>sol</i>	: 태양
<i>i</i>	: 내부
<i>r</i>	: 천정
<i>w</i>	: 창문
<i>z</i>	: 건물 실내 존

1. 서 론

건물의 열적 성능을 모델링하고 시뮬레이션을 통하여 건물의 냉방에너지 사용량을 분석할 수 있으며, 주로 상용화된 상세한 건물 시뮬레이션 프로그램을 사용한 연간 시뮬레이션 등이 이용되고 있다. 이러한 건물 상세 시뮬레이션용 프로그램을 이용하여 한 건물에 대하여 모델링을 하기 위해서는 대상 건물에 대한 자세한 정보가 요구되며, 이에 따른 많은 작업을 필요로 한다. 최근에는 서로 다른 건물별로 열적 모델을 보다 용이하게 구하기 위하여 실측 데이터를 기반으로 한 인버스 모델링(inverse modeling) 기법을 적용한 연구결과가 발표된 바가 있다.⁽¹⁻³⁾ 인버스 모델링은 Grey box 모델링으로도 알려져 있으며, Black box 모델링과 White box 모델링의 두 장점을 활용한 기법으로 볼 수 있다. 즉, Black box 기법에서의 실측 데이터를 활용하는 방식과 White box 기법에서의 물리적 모델을 기반으로 하는 접근방식을 이용하는 것이다. 또한 Black box 기법에서의 단점인 다량의 데이터를 필요로 하는 점과, White box 기법에서 나타나는 모델링의 어려움과 과도한 계산비용 등의 단점을 보완한 것이다. Black box 기법의 예로는 신경망을 이용한 기법을 들 수 있으며, White box 기법은 TRNSYS, ESP-r, EnergyPlus 등의 프로그램을 이용하여 건물의 상세한 구조와 열적 현상을 모델링하는 것을 예로 들 수 있을 것이다.

인버스 모델링 기법은 각개 건물별로 적용이 용이하며, 각종 건물의 냉방부하 해석 및 냉방부하 제어기법 개발에 비교적 손쉽게 이용가능한 장점이 있다. 인버스 모델링 기법을 이용하여 건물의 부하모델을 구하기 위해서는 건물로부터의 2주 이상의 데이터가 효과적이다.⁽¹⁾ 이들 인버스 모델의 연구^(1,3)는 주로 실험용 건물 또는 실건물에서의 실측 데이터를 이용한 건물의 모델링 성능에 대한 것이다. 하지만, 건물로부터의 실측 데이터는 정확도 측면에서 오차를 가지고 있으므로, 인버스 모델링 기법의 성능을 평가하기에는 한계를 가지고 있다. 그러므로 실 건물을 모델링한 어떠한 상세모델을 대상으로 인버스 모델링 기법을 적용함으로써 인버스 모델링 기법의 부하예측 성능을 평가해 볼 필요가 있을 것이다.

본 논문에서는 냉방부하 예측을 위한 모델을 구하고자 하는 건물에 대하여 건물에 대한 모델링 툴로서 EnergyPlus⁽⁴⁾ 프로그램을 이용하여 모델을 구하고 이 모델을 보정(calibration)한 후, 이 모델로부터 시뮬레이션에 의한 데이터를 생성시켜, 인버스 모델링에 이용함으로써 모델링 기법^(1,3)의 성능을 평가하고자 한다. Fig. 1에 본 논문에서의 방법론적인 개념을 간략히 나타내었다. EnergyPlus 모델로부터 생성시킨 데이터를 이용하여 모델 파라미터를 구함으로써 건물에 대한 모델링을 완성하게 된다.

EnergyPlus를 이용한 건물모델을 통하여 데이터를 생성시키고, 이 건물모델을 대상으로 인버스 모델링 기법을 적용함으로써 데이터 오차에 대한 영향을 배제하고 모델의 냉방부하 예측성능을 평가할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 대상건물 개요

본 논문에서 대상으로 하는 건물은 미국 캘리

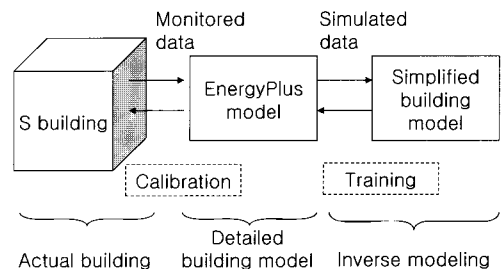


Fig. 1 Schematic of evaluation method.

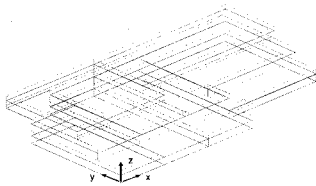


Fig. 2 Three-dimensional diagram of S building.⁽⁵⁾

포니아 주에 위치해 있는 S건물로서, 건물 바닥면적이 3,720 m²인 3층 규모의 사무용 건물이며, 그 3차원적인 구조에 대하여 개략적으로 Fig. 2에 나타내었다. 건물의 벽체는 두께 10 cm 정도의 콘크리트로 주로 이루어져 있으며, 벽면의 창문면적비는 0.67, 건물 내 인원수는 100명 정도이며, 건물 내부의 조명과 전기기기 등에 의한 열취득은 5.4 W/m² 정도이다.

3. 건물의 EnergyPlus모델

EnergyPlus⁽⁴⁾는 건물에 대한 동적 에너지 시뮬레이션을 수행할 수 있는 프로그램으로서 미국 DOE의 지원으로 개발되었다. S건물에 대한 EnergyPlus모델은 Xu et al.⁽⁵⁾에 의하여 모델의 기본틀이 만들어 졌다. 건물 내부는 6개의 열적 존으로 나누었으며, 실내 공기는 완전혼합모드로 설정되었다. 실내 상주인원, 실내 조명과 전기기기 등은 건물로부터 조사한 정보를 토대로 입력되었다. 열원기기 루프는 냉수, 냉각수, 온수 루프로 이루어져 있으며, 공기이송계통은 이중덕트의 변풍량시스템으로 구성하였다. 냉동기는 부분부하 용량제어가 가능한 한 대의 큰 기기로 이루어진 것으로 하였다. 그러나 이 모델은 보정이 제대로 이루어지지 않아, 건물모델의 주요 파라미터 조정을 통한 보정이 필요하였다.

S건물에 대한 EnergyPlus 모델을 보정하기 위하여 2004년 S건물에서 취득한 며칠간의 건물 열성능 데이터를 이용하였다. 냉동기 소비전력, 외기온도, 실내온도 등이 이용가능한 측정 데이터이다. 건물의 모델에서 보정된 주요 항목은 다음과 같다.

- 창문이 벽면 내부에 위치해 있어 차양효과가 발생하므로, 외부차양 추가
- 상주인원수를 기준으로 환기량 조정
- 건물 실내 가구 등의 질량효과 조정

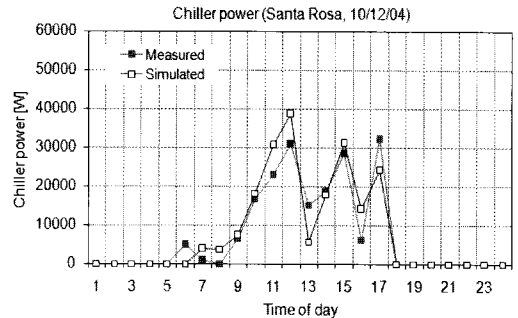


Fig. 3 Comparison of actual and simulated chiller power with EnergyPlus model for S building in CA.

Fig. 3은 냉동기부하의 하루 예로서, 모델을 보정한 후의 냉동기 전력부하 계산치와 실측데이터를 비교한 것이다. EnergyPlus모델로부터 계산한 냉동기의 전력소비 패턴이 실제 데이터를 대체로 잘 묘사하고 있다.

4. 건물냉방부하의 동적 인버스 모델링

4.1 단순화한 건물 모델

인버스(inverse) 모델링 기법⁽¹⁻³⁾을 이용한 건물 냉방부하 모델링은 단순화시킨 건물의 물리적 모델로부터 건물의 냉방부하 성능데이터와 기후 데이터 등을 입력 및 출력으로 하여 모델의 파라미터를 추정(estimation)하는 방법이다. 건물의 물리적 모델을 위하여 열적 회로를 구성하고, 지배방정식을 수립한 후, 냉방부하를 계산할 수 있다. Fig. 4는 건물을 하나의 존(zone)으로 단순화한 건물 모델을 열적 회로로 나타낸 것이다. 건물의 벽체는 천정벽, 외벽, 내벽, 바닥으로 나누었으며, 각각 2개의 열적 노드, 3개의 열적 저항, 2개의 열용량으로 구성되어진다. 외벽 및 천정에 작용하는 태양복사, 실내에 작용하는 대류 및 복사형 열취득 등 열적 입력요소가 적절한 노드에 작용하도록 구성된다. 수직 외벽면과 수평 천정면에 작용하는 태양복사는 TRNSYS⁽⁶⁾의 Type 16 solar radiation processor 모듈을 이용하여 구하였다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 실제 건물을 단순화시킨 열적 회로로 표현한 건물 모델에 대하여 에너지평형을 고려한 지배방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.⁽³⁾

$$\frac{dx_b}{dt} = A_b x_b + B_b u_b \quad (1)$$

$$Y_b = Q_b = C_b x_b + D_b u_b \quad (2)$$

여기에서 모델 시스템의 상태를 나타내는 x_b 로는 각 열적 노드의 온도가 되며, 시스템 입력을 나타내는 u_b 는 외기온도, 태양복사, 실내 복사 열취득, 실내 대류 열취득 등이다. 전등 등 전기기기에 의하여 주로 발생하는 실내 복사 및 대류 열취득은 건물 정보에서 구할 수 있는 값으로부터 각각 적정한 비율을 적용하여 일정한 값을 갖는 것으로 가정하였다. 외기온도, 태양복사 등 입력요소에 대해서는 별도의 예측모델이 필요하다.

실내공기 노드 T_z 에 대한 별도의 에너지평형으로부터 다음 식을 구할 수 있다.⁽³⁾

$$C_{z,eff} \frac{dT_{z,k}}{dt} = Q_{b,k} - Q_{c,k} \quad (3)$$

건물 내부로의 열전달율(heat transfer rate) $Q_{b,k}$ 는 Seem et al.⁽⁷⁾에 의해 제안된 계산방법을 이용하여 계산할 수 있다.⁽³⁾

$$Q_{b,k} = \left(\sum_{j=0}^N s_{b,j} u_{b,j} \right) - \left(\sum_{j=1}^N e_{b,j} Q_{b,k-j} \right) \quad (4)$$

결국 건물의 냉방부하는 식(3)의 $Q_{c,k}$ 로서 결정이 된다.

4.2 실데이터 기반의 인버스 모델링 기법

인버스 모델링 기법의 가장 핵심적인 작업은 Fig. 4와 같은 단순화시킨 건물모델의 파라미터를 결정하는 것이다. 파라미터가 결정이 되면 대상 건물에 대한 냉방부하 계산이 가능하다. 이러한 작업을 본 논문에서는 이전 연구^(1,3)와 일관된 용어를 사용하기 위하여 학습(training)이라는 용어를 사용하기로 한다. 인버스 모델링 기법을 적용하기 위한 단순화한 건물모델에서 결정하여야 할 파라미터는 열적 저항, 열용량, 실내 열취득 보정계수(대류항, 복사항), 태양복사의 창문통과 보정계수 등이다. 이들 파라미터는 비선형 회귀(non-linear regression)기법을 이용하여 결정하였다.⁽³⁾ 모델 파라미터를 추정함에 있어서 정확도를 더

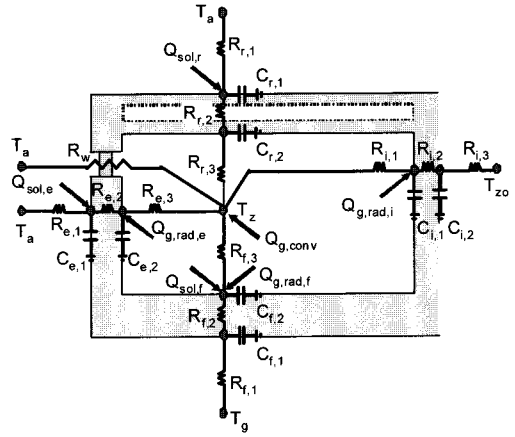


Fig. 4 Thermal network for inverse building model⁽³⁾.

높이기 위하여 건물정보로부터 얻을 수 있는 대략적인 정보를 이용할 수 있다. 예로서 파라미터 중 건물 외벽에 대한 열용량 $C_{e,1}$ 이나 $C_{e,2}$ 의 경우, 건물 벽의 두께, 비열, 밀도, 면적에 대한 대략적인 값의 범위로부터 열용량 $C_{e,1}$ 와 $C_{e,2}$ 의 가능한 상한 및 하한값을 구할 수 있다. 또한 $R_{e,1}$, $R_{e,2}$ 의 열적 저항과 같은 다른 파라미터에 대해서도 건물 벽체에 대한 두께, 면적, 열전도도 등의 물리적인 기초정보를 이용하여 가능한 상한 및 하한값을 간단히 구할 수 있다. 모델 파라미터들의 각 상한 및 하한값은 포트란 서브루틴 모듈인 DGUESS⁽⁸⁾에 이용된다. DGUESS 모듈은 모델 파라미터들에 대한 상한 및 하한값의 범위를 가지고, 파라미터 조합의 개수를 사용자가 원하는 만큼 생성시켜 이들 각각의 파라미터 조합에 대하여 계산한 냉방기간 중 냉방부하, 비냉방기간 중 실내온도 그리고 실제 냉방부하 및 실내온도의 차이를 오차로 한 제곱평균 제곱근 오차(RMSE, root-mean-square error)가 최소가 되는 파라미터 조합을 찾아낸다. 그리고 이것은 비선형 회귀법 초기 추정치로 이용된다. 즉, 모델로부터 계산한 냉방부하와 실제 냉방부하 및 실내온도를 비교하여 그 차이를 최소화시키는 최적의 파라미터 값을 비선형 회귀법을 이용하여 결정함으로써 인버스 모델링은 완료가 된다. 회귀기법으로는 포트란⁽⁸⁾ 언어에서 제공하는 서브루틴인 NREG77을 사용하였다. 모델링이 완료가 되면, 기후 데이터를 모델에 대한 입력으로 이용하여

건물 냉방부하를 계산 또는 예측할 수 있다.

이상에서 설명한 건물 모델의 파라미터를 구하기 위한 방법으로 보다 향상된 최적화 기법을 사용하여 모델의 파라미터에 대한 최적 전역해(global optimal solution)를 구하기 위한 성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

5. 시뮬레이션 결과

5.1 냉방부하 인버스 모델링

S건물에 대한 인버스 모델의 파라미터를 추정하기 위한 데이터는 S건물에 대한 EnergyPlus모델을 사용하여 생성시켰다. 기후 데이터로는 EnergyPlus 시뮬레이션을 위하여 제공되는 캘리포니아 zone2에 해당하는 epw형태의 파일(TMY)⁽⁴⁾을 사용하였으며, 7월의 한 달에 대하여 건물 냉방부하 데이터를 생성시켰다. 생성된 냉방부하 및 건물 실내온도 데이터와 인버스 건물 모델로부터 계산한 냉방부하와 실내온도의 오차가 최소가 되도록 하는 파라미터를 결정하였으며, 그 때의 오차에 대한 정의는 냉방부하의 오차만을 정의한 기존 방법^(1,3)에서와는 다소 달리 냉방시간대와

비냉방시간대에 대하여 다음의 식(5), 식(6)과 같으며, 각 오차의 합을 하나로 통합할 때 두 식에서 계산된 오차 크기의 정도(magnitude order)를 고려하여 보정계수를 별도로 도입시켰다. 냉방시간대에는 예측된 냉방부하 $Q_{c,k}$ 와 EnergyPlus 건물모델로부터의 냉방부하 $Q_{E+,k}$ 사이의 오차를 최소화하고, 비냉방시간대에는 냉방부하가 없지므로, 계산된 실내온도 $T_{z,k}$ 와 EnergyPlus 건물모델로부터의 실내온도 $T_{E+,k}$ 의 오차를 최소화하도록 모델의 최적 파라미터를 찾도록 설정하였다.

$$E_{rms} = \sqrt{\sum_k (Q_{E+,k} - Q_{c,k})} : \text{냉방시간대} \quad (5)$$

$$E_{rms} = \sqrt{\sum_k (T_{E+,k} - T_{z,k})} : \text{비냉방시간대} \quad (6)$$

7월 한달간의 데이터를 이용해 인버스 모델링이 완료된 후, 7월에 대하여 인버스 모델에서 계산한 냉방부하와 EnergyPlus모델로부터의 냉방부하를 Fig. 5(a)에 비교하였다. 두 냉방부하간의 E_{rms} 는 2.11%이다. 파라미터 추정이 완료된 인버스 건물모델을 이용하여, 이번에는 냉방부하를

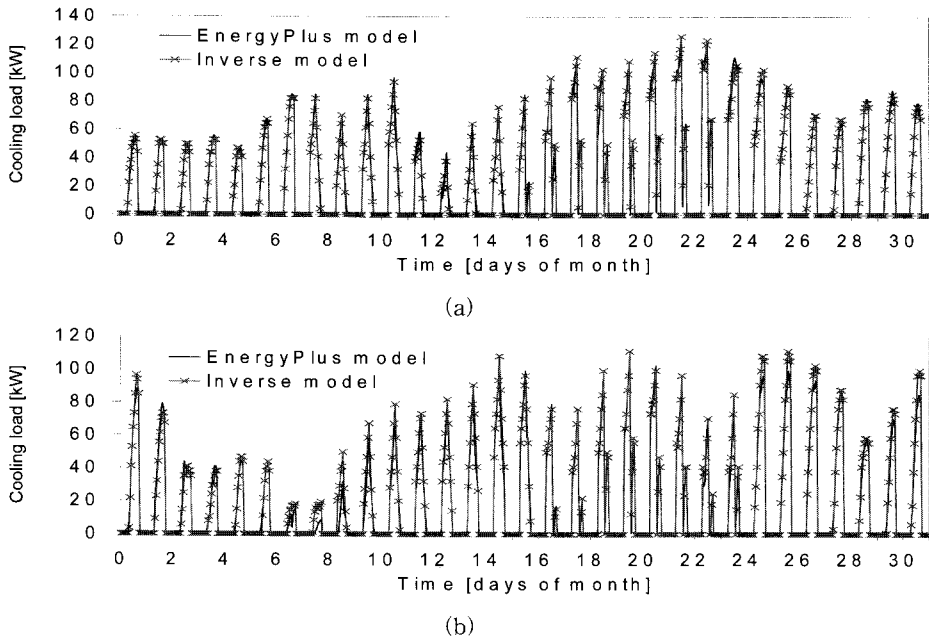


Fig. 5 Comparison of cooling loads from EnergyPlus model and trained inverse model : (a) training performance and (b) testing performance.

8월에 대하여 계산하였다. 파라미터 예측에 사용하지 않은 새로운 데이터인 8월 한달간의 기후데이터를 적용하여 냉방부하를 계산한 결과를 Fig. 5(b)에 EnergyPlus모델로부터의 냉방부하와 비교하여 나타내었다. 두 냉방부하의 오차는 4.11%로서 상당히 잘 일치하였다.

또한, EnergyPlus모델에서의 실내 온도와 인버스 모델에서 계산한 실내 온도를 Fig. 6에 비교하여 나타내었다. Fig. 6(a)는 파라미터 추정에서 사용한 7월에 대한 실내 온도를 비교하였으며, Fig. 6(b)는 8월에 대한 실내 온도를 비교한 것이다. 밤 시간대인 비냉방시간대의 실내온도 또한 잘 일치함을 알 수 있다.

이상과 같은 결과를 토대로 인버스 건물 모델을 이용하여 상당히 정확하게 EnergyPlus모델 건물의 열적특성 즉, 냉방부하, 비냉방시 실내온도 등을 잘 나타낼 수 있다고 할 수 있다. 실제 건물에서의 실측 데이터를 이용한 연구⁽¹⁾에서의 냉방부하 예측성능에 대한 오차는 약 10% 이었으며, 실험용 건물에 대한 연구⁽³⁾에서의 인버스 모델링기법의 냉방부하예측 성능은 약 8%의 오차를 보여주었다. 본 논문에서의 검토방법인 실 건물에 대한 EnergyPlus모델에 대한 인버스 모델링 기법의 냉방부하 예측 오차는 더 낮게 나타

났다. 이로부터 실측 데이터의 오차에 의한 냉방부하예측 성능 감소는 약 4내지 6% 정도 오차의 증가로 나타나는 것으로 볼 수 있을 것이다.

5.2 동적 냉방 시뮬레이션

인버스 모델링 기법의 냉방부하 모델에 대한 동적시뮬레이션을 위하여 실내의 냉방설정온도를 동적으로 변화시켜 냉방운전을 시뮬레이션 하였다. 세 가지 경우에 대한 운전 스케줄을 고려하였으며, 첫 번째는 기존 건물의 냉방운전에 이용이 되는 방식으로 냉방시간대에는 일정한 온도 23℃로 설정하여 두고, 비냉방시간대에는 냉방설정온도를 올려두는 방식(Fig. 7의 conventional)이다.

다음으로는 냉방시간대의 오전인 8시부터 오후 1시까지의 기존 냉방온도보다 낮추어 21℃로 과냉을 하고, 오후 1시부터 오후 6시까지는 기존 냉방온도보다 높여 25.5℃로 재설정하여주는 방식(Fig. 7의 Test A)이며, 비냉방시간대에는 기존 방식과 동일하다. 세 번째로 고려된 스케줄은(Fig. 7의 Test B) 냉방시간대의 오후 1시부터 오후 6시까지만 Test A 방식과 달리한 방식으로 선형으로 온도를 증가시켜 주는 방식이다. 이와 같은 세 가지 방식의 냉방온도설정 스케줄로써 인버스

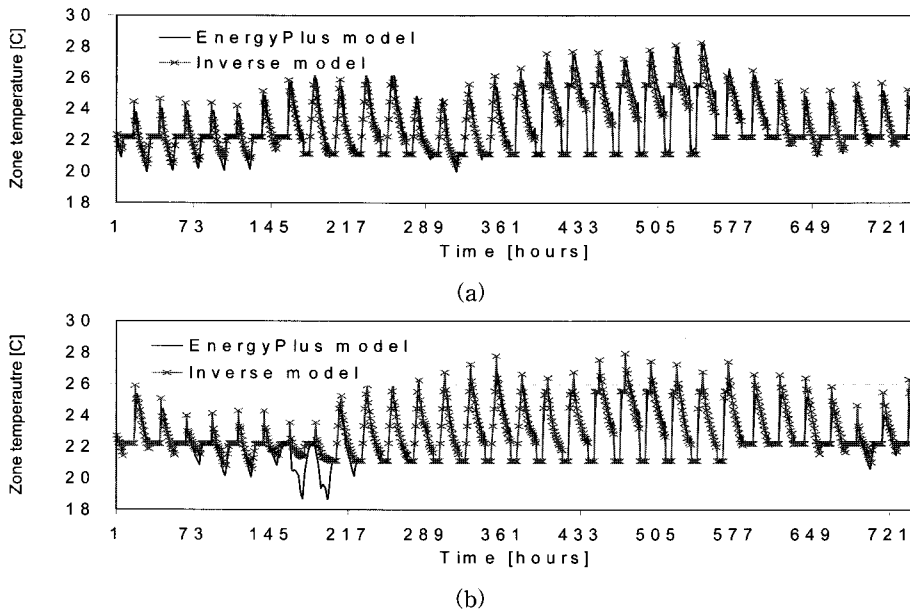


Fig. 6 Comparison of zone temperatures from EnergyPlus model and trained inverse building model : (a) training and (b) testing.

모델을 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 가장 더운 여름철의 하루에 대한 실내온도 변화를 Fig. 7에 외기온도와 함께 나타내었다. 이에 따른 동적 냉방부하의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 기존 방식 냉방온도 스케줄에 따른 경우, 냉방시간대에는 실내온도가 주어진 설정온도를 유지하고 있으며, 비냉방시간대에는 높아진 설정온도까지 오르지 않는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 냉방부하가 생기지는 않는다. Test A와 Test B의 경우에는 냉방시간대 오전의 경우에는 설정온도를 낮춰주었으며, 이에 따라서 냉방부하가 기존 방식에 비하여 상당히 증가하였다. 이어서 오후시간대의 실내온도의 변화에 따라서 냉방부하는 크게 감소하는 것으로 나타났다. Test A의 경우, 오후의 설정온도를 25℃로 갑자기 상승시켜 주었으나, 실내온도는 1시간 이내에 25℃까지 상승되어 냉방부하가 완전히 사라지지는 않았으며, 낮은 냉방부하가 나타나고, 이후에는 점진적으로 증가하

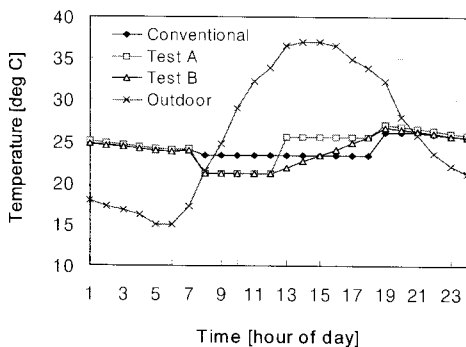


Fig. 7 Comparison of simulated indoor temperature for different control strategies.

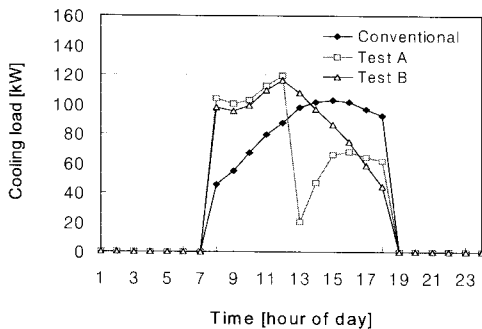


Fig. 8 Comparison of simulated cooling loads for different control strategies.

Table 1 Simulated peak and daily cooling loads for three different strategies of conventional, Test A and Test B

	Cooling Load	Savings
	Peak, kW Daily, kWh	kW(%) kWh(%)
Conventional	102.7 926.1	- -
Test A	68.0 865.4	34.7(33.8) 60.8(6.6)
Test B	107.8 984.9	-5.1(-4.9) -58.8(-6.3)

는 경향을 보여주었다. Test B의 경우에는 오후의 설정온도를 선형적으로 증가시킴에 따라 냉방부하는 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

오후 시간대에 대한 피크 냉방부하와 피크 절감치 그리고 전체 냉방시간대의 냉방부하 및 절감량을 Table 1에 나타내었다. 기존운전방식을 비교기준으로 하여 Test A가 피크 냉방부하와 냉방부하량 절감의 측면에서 기존의 운전방식에 비하여 33.7%와 6.8%의 효과를 각각 나타내었다. Test B의 경우, 피크부하가 오히려 약 4.9% 증대되었고, 냉방부하량도 약 6.3% 증대되었다.

이상의 시뮬레이션 결과로부터 냉방설정온도를 어떻게 가변하는가가 피크냉방부하와 에너지절감에 크게 영향을 미칠 것으로 판단할 수 있다. 이와 같은 효과는 건물별로 상이하게 나타날 것이므로, 건물별로 적용이 용이한 인버스 모델링 기법을 통하여 다양한 건물에 대한 효과분석을 기대할 수 있을 것이다.

5.3 향후 연구

인버스 모델링 기법을 적용한 냉방부하 예측에 있어서 기후데이터인 외기온도와 태양복사는 정확히 예측된 것으로 가정한 것이었다. 실제의 경우, 외기온도와 태양복사는 별도의 예측모델을 통하여 먼저 예측되어야 한다. 외기 온도의 경우, 유사한 패턴을 보이기 때문에 비교적 용이하고 정확하게 예측이 가능하지만, 태양복사의 예측은 구름양 변화의 불확실성으로 인하여 예측이 더욱 어렵다. 하지만, 기후예측기관으로부터 구름양의 변화에 대한 예보자료가 이용가능하다면, 이를 예측에 활용할 수 있을 것이며, 이들 기후모델의 예

측오차가 인버스 모델의 냉방부하 예측성능에 미치는 영향 등을 분석할 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 논문에서는 건물의 측정데이터를 이용하고, 단순화시킨 건물에 대한 물리적 모델의 파라미터를 구하는 모델링기법인 인버스 모델링 기법의 적용에 대한 것으로서, EnergyPlus 건물 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 실제 건물에 대한 모델링을 수행한 후, 실 건물로부터의 실측데이터를 이용하여 보정하고, 이 EnergyPlus 건물모델로부터 인버스 모델링을 위한 데이터를 시뮬레이션으로 생성시켜 모델링기법에 적용함으로써 기법의 성능을 평가하였다. EnergyPlus 건물모델의 시뮬레이션으로 생성한 7월간의 건물데이터를 이용하여 인버스 모델의 파라미터를 추정하고, 건물모델의 학습에 사용되지 않은 다른 기간에 대한 냉방부하를 시뮬레이션으로 예측한 결과, 8월 한달간의 냉방부하 예측 오차는 4.11%로 나타났다. 실건물과 모형건물에 인버스 모델링 기법을 적용함으로써 냉방부하를 예측한 경우^(1, 3)에 비하여 각각 6%와 4% 정도로 예측오차가 낮게 나타났다. 또한, 동적 시뮬레이션을 위하여 실내 설정온도를 시간에 따라 가변 시켜줌으로써, 피크냉방부하와 하루 중 냉방부하에 미치는 영향을 기존의 일정한 냉방온도방식과 비교하였다.

인버스모델링 기법을 실건물에 적용한 경우의 냉방부하 예측성능은 데이터의 오차가 제외된 EnergyPlus모델에 적용한 경우에 비하여 그 성능이 다소 저하되기는 하였으나, 예측오차가 4 내지 8%정도 증가하는 정도로 크게 성능감소는 나타나지 않는 것으로 볼 수 있으며, 실제 건물에도 높은 냉방부하예측 정확도로 이용가능할 것으로 기대된다.

인버스 모델링 기법에 의한 냉방부하예측에서 외기온도와 태양복사가 정확히 예측된 경우를 가정한 경우로 연구가 이루어졌다. 그러나 이들의 예측정확도가 어떻게 냉방부하 예측에 영향을 미치는지에 대한 연구가 필요하다. 또한 건물의 냉방부하 중 잠열부분에 대한 부분이 포함되어 있지 않으므로, 이를 포함한 냉방부하예측 기법으로 보완되어야 하며, 이로부터 건물 냉방에 따른 전기 또는 가스 등의 에너지소비량이 보다 정확하게 예측가능할 것이다.

인버스 모델링에 의한 건물 냉방부하 예측기법은 건물에 대한 에너지절감 및 피크냉방부하 절감을 위한 운전기법 개발에 활용할 수 있으며, 특히, 축열식 시스템의 운전제어기법 개발에 활용할 수 있다. 또한 이 기법은 냉방부하예측에 적용하였으나, 난방부하예측에도 활용가능할 것이며, 향후에는 건물의 총체적인 에너지관리를 위한 시스템에 필요한 건물 에너지모델의 한 구성요소로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

EnergyPlus 시뮬레이션에 대한 기술적인 도움과 측정 데이터 제공에 대하여 LBNL(Lawrence Berkeley National Lab.)의 Dr. Peng Xu에 감사를 표한다.

참고문헌

1. Chaturvedi, N. and Braun, J. E., 2002, An inverse grey-box model for transient building load prediction, HVAC&R Research, Vol. 8, No. 1, pp. 73-100.
2. Gouda, M. M., Danaher, S. and Underwood, C. P., 2002, Building thermal model reduction using nonlinear constrained optimization, Building and Environment, Vol. 37, pp. 1255-1265.
3. Lee, K. H. and Braun, J. E., 2004, Development and application of an inverse building model for demand response in small commercial buildings, Proceeding of the IBPSA-USA SimBuild 2004.
4. EnergyPlus, Energy Simulation Software, DOE, USA, <http://www.eere.energy.gov>.
5. Xu, P., Haves, P., Zagreus, L., and Piette, M., 2006, Peak shifting with thermal mass in large commercial buildings (Field tests, simulation and results), LBNL.
6. TRNSYS, Transient system simulation program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
7. Seem, J. E., Klein, S. A., Beckman, W. A. and Mitchell, J. W., 1989, Transfer functions for efficient calculations of multi dimensional heat transfer, Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, Vol. 111, No. 1, pp. 5-12.
8. Compaq Visual Fortran Math Library, Compaq.