

실시간 가중 회기최소자승법을 사용한 익일 부하예측

한도영*, 이재무*

국민대학교 기계·자동차공학부, *국민대학교 기계공학과 대학원

Real-Time Building Load Prediction by the On-Line Weighted Recursive Least Square Method

Doyoung Han[†], Jaemoo Lee^{*}

School of Mechanical & Automotive engineering, Kookmin University, Seoul 861-1, Korea

^{*}Graduate School of Mechanical engineering, Kookmin University, Seoul 861-1, Korea

(Received December 30, 1999; revision received April 25, 2000)

ABSTRACT: The energy conservation is one of the most important issues in recent years. Especially, the energy conservation through improved control strategies is one of the most highly possible area to be implemented in the near future. The energy conservation of the ice storage system can be accomplished through the improved control strategies. A real time building load prediction algorithm was developed. The expected highest and the lowest outdoor temperature of the next day were used to estimate the next day outdoor temperature profile. The measured dry bulb temperature and the measured building load were used to estimate system parameters by using the on-line weighted recursive least square method. The estimated hourly outdoor temperatures and the estimated hourly system parameters were used to predict the next day hourly building loads. In order to see the effectiveness of the building load prediction algorithm, two different types of building models were selected and analysed. The simulation results show less than 1% in error for the prediction of the next day building loads. Therefore, this algorithm may successfully be used for the development of improved control algorithms of the ice storage system.

Key words : On-line weighted recursive least square method(실시간 가중 회기최소자승법), Building load prediction(건물부하 예측), Real-time parameter estimation(실시간 파라미터 추정), Outdoor temperature prediction(외기온도 예측), Ice storage system(빙축열 시스템), Energy conservation(에너지 절약)

기 호 설 명

$T_{F,high}$: 익일 예보 최고 외기온도 [°C]

$T_{F,low}$: 익일 예보 최저 외기온도 [°C]

T_M : 측정 외기온도 [°C]

T_P : 예측 외기온도 [°C]

Q_M : 측정 건물부하 [kWh]

Q_P : 예측 건물부하 [kWh]

θ_n : 시스템파라미터

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4675; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: dyhan@kmu.kookmin.ac.kr

하첨자

F : 예보(Forecasted)

M : 측정(Measured)

P : 예측(Predicted)

1. 서론

최근 하절기 냉방부하 증가로 인한 전력 에너지 공급상의 문제는 사회적인 이슈가 되고 있다. 이 문제를 해결하기 위해 국가적인 차원에서 빙축열 냉방 시스템을 권장하고 있으며 이 빙축열 시스템을 좀 더 효율적으로 사용하기 위해서는 익일의 건물부하를 예측할 수 있는 기술이 필요하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 실시간 가중 회기최소자승법(On-line weighted recursive least square method)을 사용한 부하예측을 통해 빙축열 시스템 성능향상과 에너지 절약에 기여하고자 한다.^(1,2,3)

2. 건물부하 예측시스템

Fig. 1에서 건물부하 예측시스템은 외기온도 예측과 실시간 시스템파라미터 추정, 그리고 건물부하 예측으로 구성되어 있다. 선택된 외기온도 $T_M(I)$ 와 건물부하 $Q_M(I)$ 는 매시간 측정되며 다음날의 외기 최고예상온도 $T_{F,high}$ 와 외기 최저예상온도 $T_{F,low}$ 는 외부로부터 예보되어 입력된다고 가정하였다.

2.1 외기온도 예측

익일 시간대별 예측 외기온도 $T_P(I)$ 는 예보된 익일 외기 최고예상온도 $T_{F,high}$ 와 최저예상온도 $T_{F,low}$ 를 사용하여 다음식⁽⁴⁾으로 예측되며

$$T_P(I) = T_{F,high} - \alpha_t(I) (T_{F,high} - T_{F,low}) \quad (1)$$

여기서 $\alpha_t(I)$ 는 각 시간대별 온도수정계수^(5,6)로 각 지역에서 수집된 수년간의 측정데이터를 사용하여 통계적인 방법⁽⁷⁾으로 얻어진다.

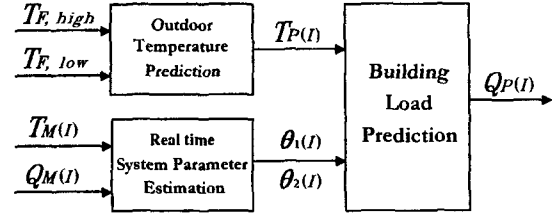


Fig. 1 Building load prediction system.

2.2 실시간 시스템파라미터 추정

매시간 측정되는 외기온도 $T_M(I)$ 와 건물부하 $Q_M(I)$ 는 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있으며

$$Q_M(I) = \theta_1(I)T_{M1}(I) + \theta_2(I)T_{M2}(I) + \dots + \theta_n \quad (2)$$

여기서 $Q_M(I)$ 를 Y 로, $[T_{M1}(I), \dots, T_{Mn-1}(I), 1]$ 를 X 로, 파라미터 $[\theta_1(I), \dots, \theta_{n-1}(I), \theta_n(I)]^T$ 를 θ 로 표시하면 다음과 같은 행렬식으로 표시된다.

$$Y = X\theta \quad (3)$$

n 일 제의 시간대별 시스템파라미터 θ_n 는 실시간 가중 회기최소자승법⁽⁸⁾을 사용한 다음식으로 추정할 수 있으며

$$\theta_n = P_n X_n^T W Y_n \quad (4)$$

여기서 W 는 가중행렬(weighting matrix)을 의미하며 P_n 은 $(X_n^T W X_n)^{-1}$ 로 표현된다.

$n+1$ 일 제의 시간대별 시스템파라미터 θ_{n+1} 는 다음식으로 추정할 수 있으며

$$\theta_{n+1} = \theta_n + K_n [Y_{n+1} - X_{n+1} \theta_n] \quad (5)$$

여기서 K_n 과 P_n 은 아래와 같은 식들을 사용하여 계산할 수 있다.

$$K_n = P_n X_{n+1}^T [X_{n+1} P_n X_{n+1}^T + W_{n+1}^{-1}]^{-1} \quad (6)$$

$$P_n = [P_{n-1}^{-1} + X_n^T W_n X_n]^{-1} \quad (7)$$

여기서 망각계수(Forgetting Factor) β ($0 \leq \beta \leq 1$)를 적용하고 M_n 을 P_n/β 로 정의하면 식(6)는 식(8)과 같이 변형된다.

$$K_n = M_n X_{n+1}^T [X_{n+1} M_n X_{n+1}^T + W_{n+1}^{-1}]^{-1} \quad (8)$$

2.3 건물부하 예측

매시간 추정된 시스템파라미터 $\theta(I)$ 와 예측된 다음날 시간대별 예측온도 $T_p(I)$ 를 입력으로 시간대별 예측 건물부하 $Q_p(I)$ 와 전체 예측 건물부하 $Q_{p,total}$ 는 다음식으로 계산된다.

$$Q_p(I) = \theta_1(I)T_{p1}(I) + \theta_2(I)T_{p2}(I) + \dots + \theta_n(I)T_{pn}(I)$$

$$Q_{p,total} = \sum (Q_p(I)) \quad (9)$$

3. 결과 및 분석

익일 부하예측의 성능을 확인하기 위해 두 개의 다른 건물을 선택한 후 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 여기서 공조 냉·난방부하 계산프로그램⁽⁹⁾을 사용하여 계산된 건물부하를 측정 건물부하로, 실시간 가중 회귀최소자승법을 사용하여 예측된 부하를 예측 건물부하로 가정하였다.

3.1 건물 모델

건물부하 예측시스템의 효율성을 확인하기 위해 Fig. 2와 같은 두 개의 건물을 선택하였고 A 모델은 서울에 위치한 사무실 용도의 단층 건물로 재실총인원 최대 200명으로 가정하고 B 모델은 안산에 위치한 연구소 용도의 3층 건물로 재실총인원 최대 150명으로 가정하였다.⁽¹⁰⁾

Fig. 3은 선택된 건물모델 A와 B의 요일에 따른 시간대별 건물 재실인원에 대한 가정을 보여주며 휴일 재실패턴과 일요일 재실패턴은 같다고 가정하였다.

3.2 건물 A의 부하 예측

건물 A의 부하 예측을 위하여 최근 10년간 5월1일부터 8월31일까지의 서울 표준기상데이터⁽¹¹⁾를 사용하였으며 망각계수 β 로 1.00, 0.98, 0.96을 적용하였다. 여기서 시간대별 건물부하 Q_M 과 외기 건구온도 $T_{M, dry}$ 만을 사용하여 건물부하를 예측한 결과와 외기 습구온도 $T_{M, wet}$ 까지 포

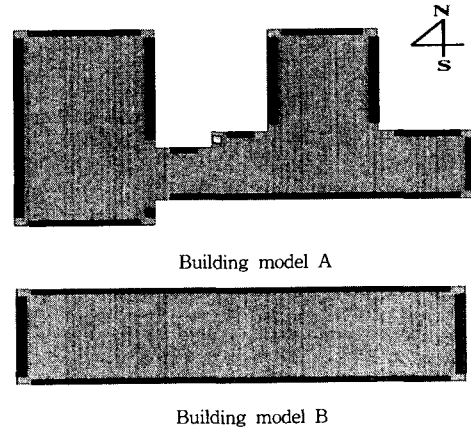


Fig. 2 Building model A and B for load prediction simulation.

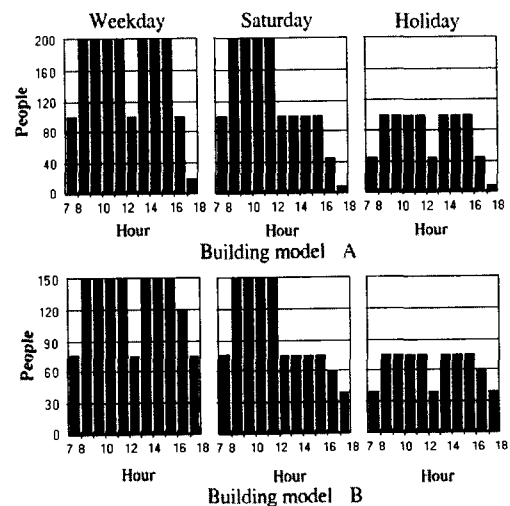


Fig. 3 People occupancies for building model A and B.

함하여 예측한 결과를 비교하였다.

3.2.1 시스템파라미터 추정

Fig. 4는 5월1일부터 8월31일까지의 측정된 시간대별 건물부하 $Q_M(I)$ 와 시간대별 외기 건구온도 $T_{M, dry}(I)$ 만을 사용하여 평일의 시스템파라미터 $\theta_1(I)$, $\theta_2(I)$ 를 추정한 결과를 나타낸 것으로 망각계수 β 로 1.00, 0.98, 0.96을 적용하였다. 여기서 시스템파라미터 $\theta_1(I)$, $\theta_2(I)$ 는 7시

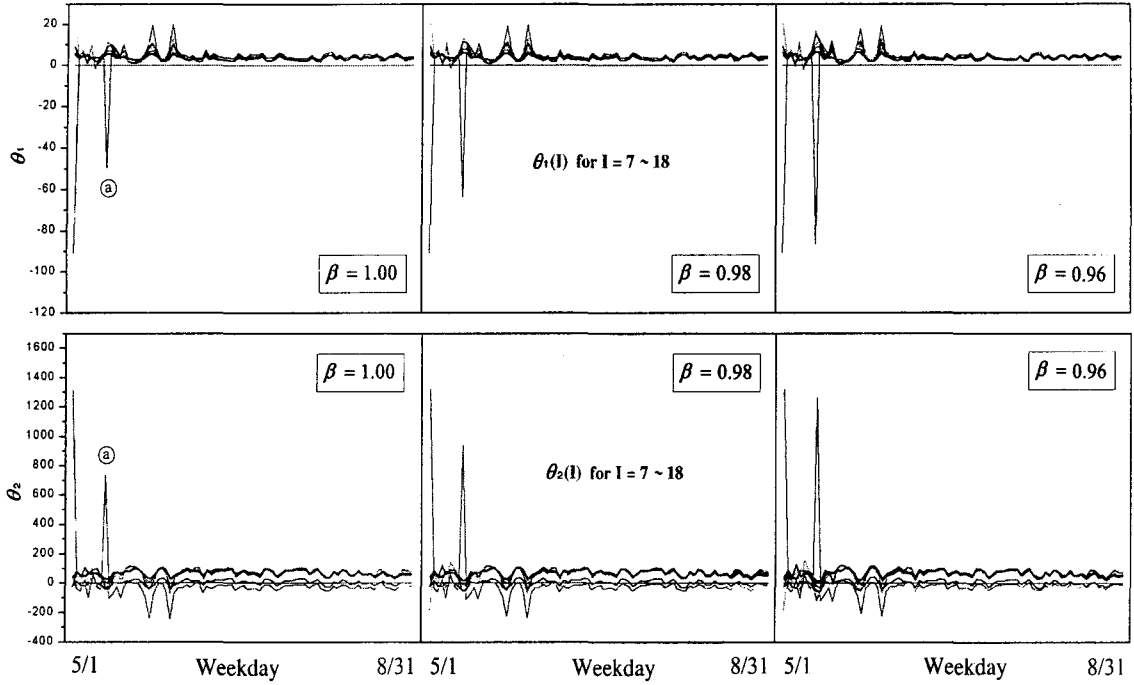


Fig. 4 $\theta_1(I)$ and $\theta_2(I)$ for weekday.

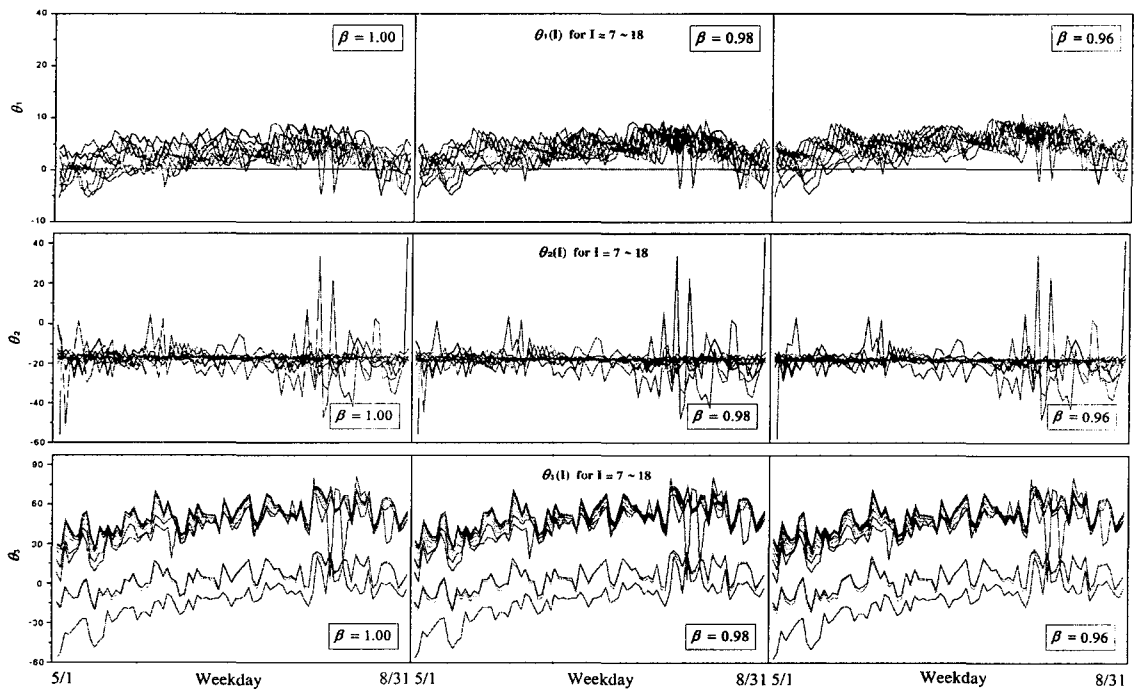


Fig. 5 $\theta_1(I)$, $\theta_2(I)$ and $\theta_3(I)$ for weekday.

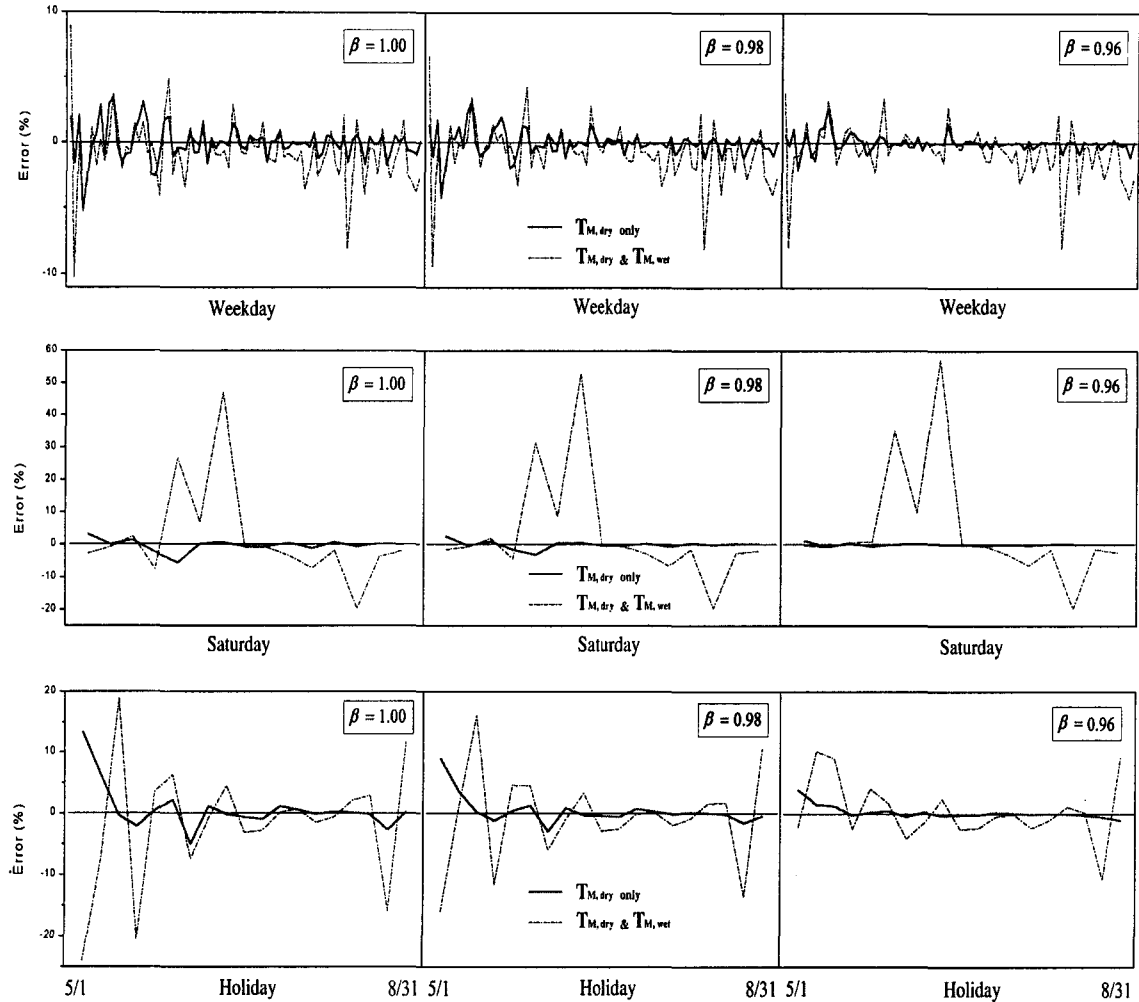


Fig. 6 Hourly load prediction error for building model A.

부터 18시까지의 각 시간대별 시스템 파라미터를 나타내며 날짜가 증가할수록 점차 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다. β 가 작아질수록 실시간 입력 데이터 값에 민감하게 반응하여 시스템파라미터의 변화에 신속하게 반응하지만 외란에도 민감하게 반응하므로 그림 ③위치에서 보듯이 외란에 의한 $\theta_1(I), \theta_2(I)$ 값의 변화가 β 가 감소할수록 민감하게 영향을 받음을 알 수 있다.⁽¹²⁾

Fig. 5는 5월1일부터 8월31일까지의 측정된 시간대별 $Q_M(I)$ 와 $T_{M,dry}(I)$ 및 시간대별 외기습구온도 $T_{M,wet}(I)$ 를 포함하여 평일의 시스템파라

미터 $\theta_1(I), \theta_2(I), \theta_3(I)$ 를 추정한 결과를 나타낸 것으로 망각계수 β 로 1.00, 0.98, 0.96을 적용하였다. 여기서 시스템파라미터 $\theta_1(I), \theta_2(I), \theta_3(I)$ 는 날짜가 증가함에 따라 수렴하지 못함을 알 수 있다.

3.2.2 건물부하 예측

Fig. 6은 추정된 시스템파라미터를 사용하여 예측한 예측 건물부하를 측정 건물부하와 비교한 후 그 오차를 평일, 토요일, 휴일로 구분하여 나타낸 그림으로써, 그림에서 실선으로 보여주듯이

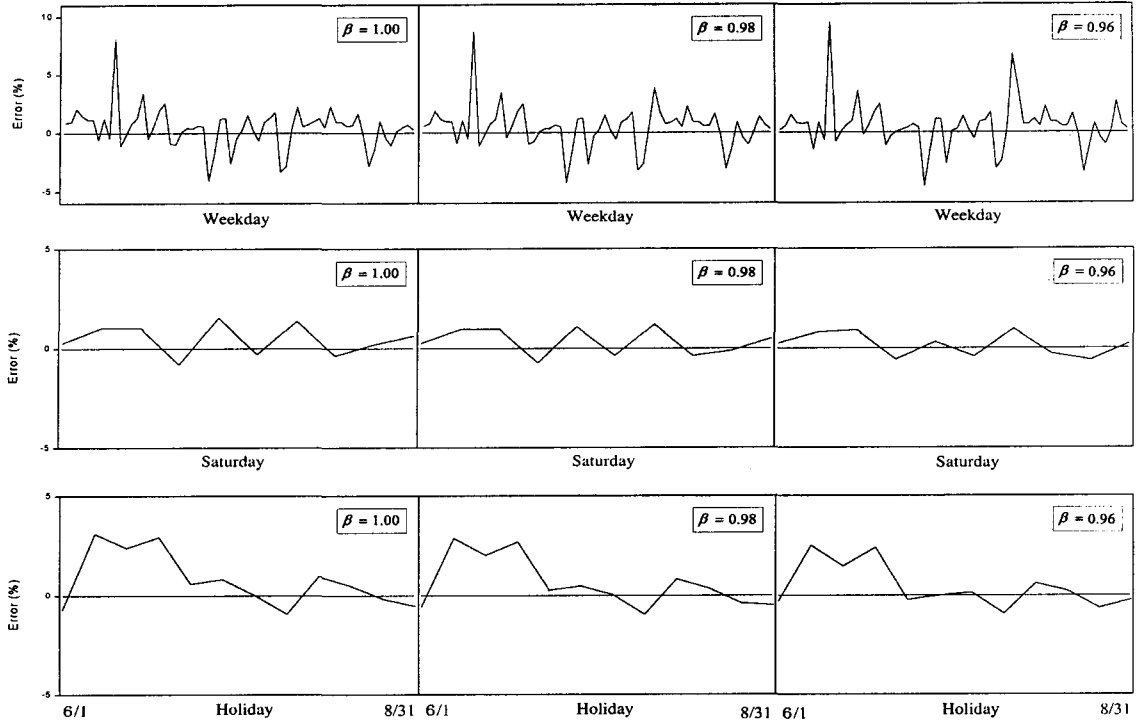


Fig. 7 Hourly load prediction error for building model B.

외기 건구온도 $T_{M,dry}$ 만을 사용하였을 경우 β 가 0.96일 때 평일 예측 건물부하는 $\pm 1.5\%$ 이내, 토요일 예측 건물부하는 $\pm 0.4\%$ 이내, 휴일 예측 건물부하는 $\pm 1.1\%$ 이내로 잘 예측되었다. 그러나, 외기 습구온도 $T_{M,wet}$ 항을 첨가하였을 경우 그림에서 점선으로 보여주듯이 예측 건물부하가 측정 건물부하에 비해 상대적으로 많은 오차가 있음을 확인할 수 있다.

3.3 건물 B의 부하 예측

건물 B의 부하 예측을 위하여 1999년 6월1일부터 8월31일까지의 안산의 실측 기상데이터⁽¹³⁾를 사용하였으며 망각계수 β 로 1.00, 0.98, 0.96을 적용하였다. 또한 건물부하 예측을 위해 시간대별 측정 건물부하 Q_M 과 외기 건구온도 $T_{M,dry}$ 만을 사용하였다.

Fig. 7은 건물 B의 평일과 토요일, 휴일의 예측 건물부하와 측정 건물부하의 오차를 보여준 그림으로써 여기서 평일 건물부하 예측의 경우

날짜가 증가할수록 $\pm 1\%$ 이내로 수렴되었고, 토요일 건물부하 예측의 경우 $\pm 1.2\%$ 이내로, 휴일 건물부하 예측의 경우 $\pm 1\%$ 이내로 수렴되었다.

4. 결론

익일 건물부하 예측을 위해 실시간 가중 회기최소자승법을 사용하여 건물 A와 B의 부하 예측에 대해서 시뮬레이션 한 결과 측정 건물부하와 외기 건구온도만을 사용하여 건물부하를 예측한 경우 외기 습구온도항을 포함하여 건물부하를 예측한 경우보다 오차율이 상대적으로 더 작게 수렴하므로 외기 건구온도만을 사용하여 건물부하를 예측하는 것이 더 타당하다는 결론에 도달하였다.

망각계수 β 의 경우 시스템파라미터의 변화정도와 외란의 크기를 고려하여 선정하여야 하며 주어진 10년간의 데이터를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 0.96에서 0.98 사이가 적절함을 확인하였다.

참고문헌

1. Han, D., 1997, Development of ice storage control system, Report #1, Ministry of Commerce, Industry & Energy.
2. Han, D., 1998, Development of ice storage control system, Report #2, Ministry of Commerce, Industry & Energy.
3. MacArthur, J. W., Mathur, A. and Zhao, J., 1989, On-line recursive estimation for load profile prediction, ASHRAE Transactions, Vol. 95, Pt. 2, pp. 621-628.
4. Kawashima, M., Charles, E. D. and Hohn, W. M., 1996, Optimizing system control with load prediction by neural networks for an ice-storage system, ASHRAE Transactions, Vol. 102, Pt. 3, pp. 1169-1178.
5. 1993, Handbook of Fundamentals, ASHRAE, pp. 26.5-26.6.
6. Han, D. and Lee, J. M., 1999, Building load prediction for the ice storage system, Proceedings of the SAREK, pp. 997-1001.
7. Seo, J. S. and Kim, D. C., 1997, Development of the weather data for load calculations of major cities in Korea, Proceedings of the SAREK, pp. 874-880.
8. Brogan, W. L., 1991, Modern Control Theory, Prentice-Hall, pp. 223-225.
9. 1998, BLAST Simulation Program ; Reference Manual, Univ. of Illinois.
10. Han, D., 1999, Development of ice storage control system, Final Report, Ministry of Commerce, Industry & Energy.
11. 1997, Weather Data of Korea, KMA.
12. Han, D. and Lee, J. M., 1999, On-line building load prediction algorithm, Proceedings of the SAREK, pp. 405-410.
13. 1999, Weather Data of Korea, KMA.