

건물 면적을 이용한 시간별 냉방부하 예측에 관한 연구

유 성 연, 한 규 현[†]
충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단

A Study on Prediction of Hourly Cooling Load Using Building Area

Seong-Yeon Yoo, Kyu-Hyun Han[†]
BK21 Mechatronics Group at Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received July 1, 2010; revision received September 29, 2010)

ABSTRACT: New methodology is proposed to predict the hourly cooling load of the next day using maximum/minimum temperature and building area. The maximum and minimum temperature are obtained from forecasted weather data. The cooling load parameters related to building area are set through a database provided from reference buildings. To validate the performance of the proposed method, the predicted cooling loads in hourly bases are calculated and compared with the measured data. The predicted results show fairly good agreement with the measured data for benchmarking building.

Key words: Cooling load prediction(냉방부하 예측), Maximum temperature(최고온도), Minimum temperature(최저온도), Building area(건물면적)

기 호 설 명

- $C_{s,A}$: 고정현열부하 파라미터 [kW]
- $C_{l,A}$: 고정잠열부하 파라미터 [kW]
- h : 엔탈피 [kJ/kg]
- \dot{m}_a : 외기도입량 [m^3/h]
- \dot{m}_{inf} : 침입외기량 [m^3/h]
- $P_{s,A}$: 현열부하 파라미터 [kW]
- \dot{Q}_s : 현열부하 [kW]
- \dot{Q}_l : 잠열부하 [kW]
- \dot{Q}_{sol} : 태양복사열 [kW]
- $\dot{Q}_{s,int}$: 내부발생 현열 [kW]
- \dot{Q}_{total} : 전열부하 [kW]
- T : 온도 [$^{\circ}C$]

그리스 문자

- ϵ_s : 현열회수효율
- ϵ_l : 잠열회수효율
- η : 환기사용율

1. 서 론

오늘날 지구는 인구증가 및 인류의 사회경제활동 확대를 수반하여 중요한 자원 및 에너지를 대량으로 소비하게 되었으며, 자원·에너지의 대량소비 는 대기 중에 다량의 이산화탄소를 배출하여 지구온난화의 원인이 되고 있다. 특히 2000년 기준으로 전체 에너지 수요의 22%가 건물부문이 차지하고 있으며 2010년에는 26%, 2020년에는 27%로 확대될 것으로 예상된다.⁽¹⁾ 건물의 에너지 사용량 분포는 전체 건물 에너지 수요의 50%가 냉·난방과 관련된 공조설비에 사용되어 지고 있으며 냉방용 에너

[†] Corresponding author
Tel.: +82-42-821-8901; fax: +82-42-821-8894
E-mail address: lovelyday00@naver.com

지 수요가 지속적으로 증가되고 있다.⁽²⁾ 따라서 건물 에너지 수요의 30% 이상을 차지하고 있는 냉방 에너지를 절감하기 위해 최근에는 빙축열, 수축열, 지열, 지역냉방과 같은 환경 친화적이고, 에너지 절약적인 공조 시스템이 건물의 냉방에 적용 및 확산되고 있다. 이러한 시스템들의 공통적인 특징은 냉방 에너지 수요측인 건물의 지리적 환경이나 에너지 수요 패턴에 따라 여러 장치가 조합된 형태로 구성되어 있고 운전 전략도 다양하기 때문에 쾌적한 냉방조건과 에너지 절감을 동시에 달성하기 위해서는 효과적인 냉방 시스템의 운전 방법이 매우 중요하다. 이러한 점을 고려할 때 냉방 시스템의 효과적인 운전 전략을 실질적으로 달성하는 운전자를 위한 기술개발이 필요하다. 즉 운전자가 건물의 시간별 냉방 부하 수요 패턴을 미리 예측하여 사전에 파악하도록 안내해주고, 효율적인 시스템 운전 전략을 수립하는데 도움을 주는 프로그램이 있다면 냉방 시스템의 효율적인 운용과 에너지 사용량과 비용 절감이 가능할 것이다.

건물의 시간별 냉방 부하 패턴을 예측하는 방법은 건물 구조체의 복잡한 열적 동특성을 해석하여 냉방 부하를 예측하는 방법이 있다. 이러한 방법에는 건물 구조체의 열평형 방정식에 대한 주기경계 조건을 적용하여 계산하는 주파수 응답법,⁽³⁾ Z-변환이론을 기초로 한 방법으로 응답계수와 전도전달 함수를 포함하여 건물의 동특성을 해석하는 Z-변환법,⁽⁴⁾ 열평형법의 열전달모델을 상당외기 온도와 표면 온도 사이에서 일어나는 단일열전달로 단순화시켜서 해석하는 복사시급수법(RTS)⁽⁵⁾ 등이 있다. 이러한 방법들은 건물의 물리적 특성을 고려하고, 건물에 대한 상세한 자료를 입력하기 때문에 비교적 정확한 냉방부하 예측 결과를 얻을 수 있으나 에너지 해석 전문가가 아닌 일반 건물 관리자나 사용자가 사용하기에는 매우 어렵다. 건물의 시간별 냉방부하를 예측하는 또 한 가지 방법은 인공지능 알고리즘을 사용한 통계적인 방법으로 건물에서 발생하는 물리적인 고려가 필요 없으며 건물의 과거에 기록된 실제 냉방부하 데이터를 입력시켜 학습한 결과를 예측 냉방부하로 도출하는 방법이다.⁽⁶⁻⁸⁾ 이 방법을 통해 냉방부하를 예측할 경우 고전적인 방법에 비해 사용하기에는 편리하지만 과거 실측 데이터가 많을수록 학습의 결과로부터 얻어지는 예측 부하가 정확해 지기 때문에 신규 건물이나 과거 데이터가 충분히 축적되지 못한 건물에는 적용할

수 없다.

본 논문에서는 각각의 예측 방법들에 대한 장단점을 고려하여 건물의 열적 특성을 고려함과 동시에 사용자가 사용하기 쉽고, 적용 건물에 대한 과거 운전 데이터 없이 건물의 면적 값과 기상청의 일기 예보로부터 쉽게 얻을 수 있는 익일 최고온도와 최저온도만을 가지고 냉방부하를 예측할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 제안된 냉방부하의 신뢰성을 검토하기 위해 11개의 집단 건물에 냉방부하를 공급하는 냉방 시스템의 실측 부하 데이터와 예측 부하를 비교해 보았다.

2. 냉방부하 예측 방법

냉방부하는 유리와 벽체를 통과하는 태양복사열, 외기와 실내의 온도차에 의해 전달되는 전도열, 인체나 실내기기의 내부발생열, 침입공기와 환기에 의한 도입외기의 냉각감습열, 급기덕트의 손실을 포함한 기타부하 등이 있으며, 열은 현열과 잠열로 구분할 수 있다.

냉방부하의 전열부하는 다음과 같이 계산한다.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{air} + \dot{Q}_{int} \quad (1)$$

여기서 \dot{Q}_{sol} 은 태양복사열, \dot{Q}_{cond} 는 전도열, \dot{Q}_{air} 는 환기와 침입외기에 의한 열이며, \dot{Q}_{int} 는 내부발생열과 기타부하를 나타낸다. 본 연구에서는 복잡하고 상세한 열취득으로부터 결정되는 냉방부하의 예측을 단순화하기 위해 아래 (a), (b), (c), (d), (e)와 같은 가정을 하였다.

(a) 태양복사열, 전도열은 외기온도와 실내온도차 그리고 건물의 면적에 비례하는 파라미터 $P_{s,A}$ 의 곱으로부터 결정된다.

$$\dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{cond} = P_{s,A}(T_o - T_i) \quad (2)$$

(b) 환기와 침입외기에 의한 부하는 외기와 실내의 엔탈피차와 환기에 필요한 공기량 및 침입 공기량의 곱으로부터 결정된다.

$$\dot{Q}_{air} = (\eta_{ven}\dot{m}_a + \dot{m}_{inf})(h_o - h_i) \quad (3)$$

(c) 내부 발생열과 기타부하는 해당 건물 면적에 비

레하는 파라미터 $C_{s,A}$, $C_{l,A}$ 로 일정하다고 가정한다.

$$\dot{Q}_{int} = C_{s,A} + C_{l,A} \quad (4)$$

- (d) 건물의 실내온도와 습도는 설정 온·습도 조건을 주어 정상상태로 가정한다.
- (e) 건물의 실내 발생열은 정상상태로 가정한다.

여기서 사용하게 될 시간별 외기온도와 습도의 패턴 예측을 위해 과거 5년 간 여름철인 6월부터 9월까지의 시간대별 기상데이터를 분석하여 외기온도와 습도에 대한 표준화 예측 함수를 도출하였다. 그리고 도출된 예측함수를 이용하여 기상청에서 항상 예보하는 최고온도와 최저온도만으로 예측하는 방법을 사용하였다.⁽⁹⁾

3. 냉방부하 파라미터 설정

식(2)~식(4)를 이용하여 냉방부하를 예측하려면 각 건물 면적과 관련된 파라미터 $P_{s,A}$, $C_{s,A}$, $C_{l,A}$ 를 결정해야 한다. 본 연구에서는 공조부하 계산이 정확히 시행된 기준 건물 3개를 선정하여 용도별 냉방 존(zone)에 대하여 냉방 존 면적별 부하에 대한 분석을 통해 파라미터를 설정하도록 하였다.

3.1 면적과 $P_{s,A}$ 파라미터 관계

$P_{s,A}$ 파라미터는 건물의 외피와 내피를 통해 발생된 부하, 즉 태양 복사열에 의한 부하와 전도열에 의한 부하와 관계된 파라미터이며, 식(5)을 통해 얻을 수 있다.

$$P_{s,A} = \frac{\dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{cond}}{T_o - T_i} \quad (5)$$

여기서 \dot{Q}_{sol} 는 태양복사열, \dot{Q}_{cond} 은 전도열, T_o 는 외기 설계 온도, T_i 는 내부 설계 온도를 말한다. 기준 건물의 각 존별면적과 식(6)에 의해 계산된 $P_{s,A}$ 파라미터의 관계는 Fig.1, 상관관계 식은 식(6)과 같다.

$$P_{s,A} = 7.0 \times A - 65.84 \quad (6)$$

3.2 면적과 $C_{s,A}$ 파라미터와의 관계

고정현열부하는 기준건물 설계 목록에 나타난 극간풍에 의한 현열, 인체현열, 조명, 전열기구에 의한 부하이다. 면적과의 관계식 및 그림은 식(7), 식(8), Fig. 2에 나타내었다.

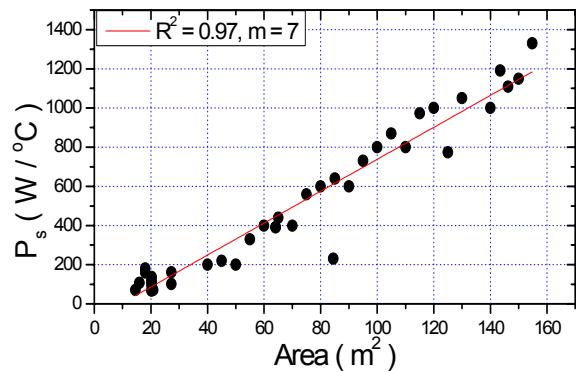
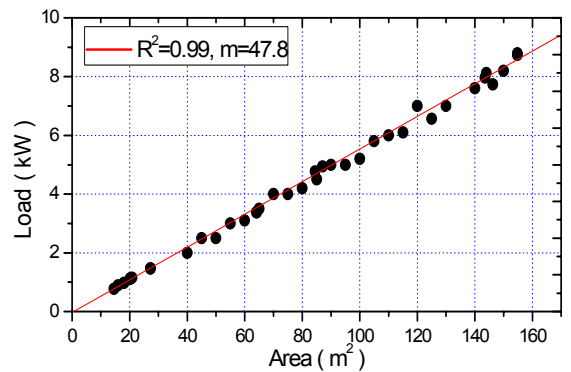
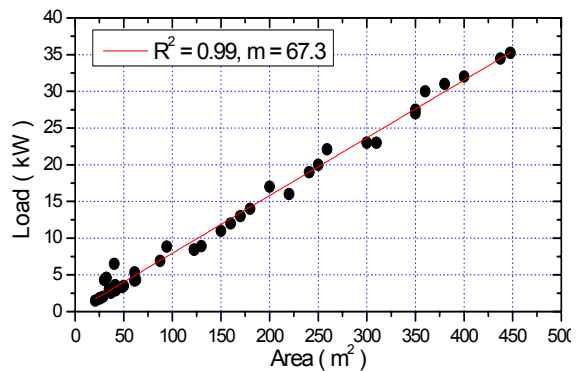


Fig. 1 Relation between zone area and $P_{s,A}$ parameter.



(a) office zone



(b) lab. zone

Fig. 2 Relation between each zone's area and $C_{s,A}$ parameter.

$$C_{s,A} = 47.8 \times A - 25.5 \quad (7)$$

$$C_{s,A} = 67.3 \times A + 160.7 \quad (8)$$

본 연구에서 고정부하는 시간변화에 따라 일정하다고 가정하였으며, 일반 사무실 존과 실험실 존에는 큰 차이가 있으므로 상관식을 구할 때 실험실 및 사무실로 나누어서 분석하였다.

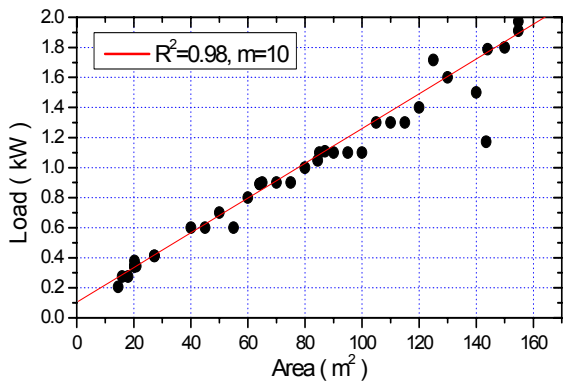
3.3 면적과 $C_{l,A}$ 파라미터와의 관계

고정잠열부하는 기준건물 설계 목록에 나타난인체 잠열에 의한 부하이다. 면적과의 관계 식 및 그림은 식(9), 식(10), Fig. 3와 같다.

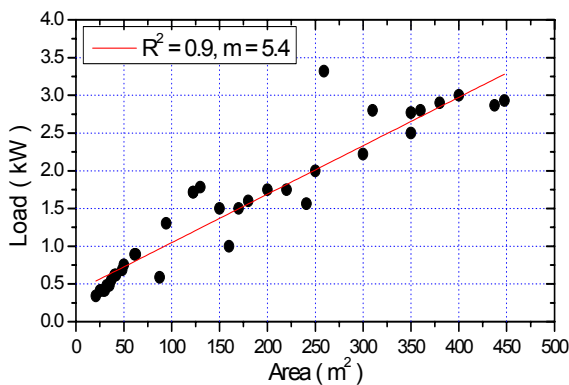
$$C_{l,A} = 9.9 \times A + 88.9 \quad (9)$$

$$C_{l,A} = 5.4 \times A + 362.9 \quad (10)$$

Fig. 1~Fig. 3에서 볼 수 있듯이 존별 면적에 대한 각 냉방부하 파라미터는 90% 이상의 강한 상관



(a) office zone



(b) lab. zone

Fig. 3 Relation between each zone's area and $C_{l,A}$ parameter.

관계를 갖고 있고, 식(7)~(13)을 이용하여 다른 건물에 대한 면적 데이터를 입력하면 신뢰성 있는 냉방부하 파라미터를 설정할 수 있다. 설정한 각 냉방부하 파라미터를 냉방부하 예측식인 식(2)~식(4)에 대입하면 시간별 냉방부하를 예측할 수 있다.

4. 냉방부하 예측 결과 및 분석

본 연구에서 제안한 집단 건물에 대한 냉방부하 예측방법의 신뢰성을 평가하기 위해 대전시 소재 P 연구소 내의 11개 집단 건물에 냉방 에너지를 공급하고 있는 냉방 시스템을 벤치마킹하여 예측된 냉방부하와 냉방 시스템에서 공급 하는 실측 냉방부하를 비교해 보았다.

11개의 집단건물에 냉방에너지를 공급하는 냉방 시스템에 설치된 냉동기의 사양은 Table 1과 같이 전기 구동식 터보 냉동기 2기, 가스 직화식흡수식 냉동기 1기로 구성되어 있으며 시스템의 흐름도는 Fig. 4와 같다. 각 냉동기에서 공급하는 실측부하는 냉수 공급 유량에 건물 부하 공급 헤더와 환수 헤더를 순환하는 냉수의 측정된 온도차를 곱하여 계

Table 1 Chiller Specification

Chiller Type	Cap. (kW)	Input Energy	C.O.P.
Turbo	1,158	electricity power	4.4
Abs.	1,930	LNG	1.2
Turbo	1,930	electricity power	4.51

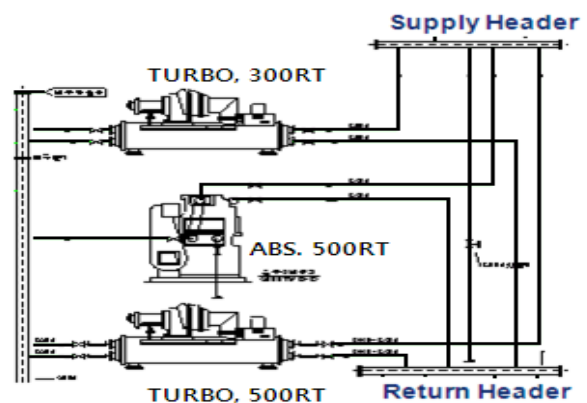


Fig. 4 Schematic diagram of the cooling system of P institute.

산하였다. 여기서 냉수의 유량은 직접 측정하지 않고 정유량 냉수 펌프의 가동시간에 대한 자료로부터 추정하였다. 따라서 3기의 냉동기가 11개의 집단 건물에 공급하는 실측 냉방부하는 Fig. 5와 같으며, 배관계에서 발생하는 열손실과 펌프등의 동력으로 인한 추가 열전달은 환수와 급수의 온도차에 의한 부하에 비해 크기가 미미하므로 부하계산에서 제외하였다. Fig. 5는 8월 1일의 시간별 공급부하 패턴을 보여주고 있다. 그림에 표시된 TURBO300은 300 RT 용량의 터보냉동기, ABS500은 500 RT 용량의 흡수식 냉동기, TURBO500은 500 RT 용량의 터보냉동기를 나타낸다. 벤치마킹 집단 건물의 특성상 24시간 냉방이 요구되는 실험실 존으로 인해 24시간 동안 부하가 나타나고 있다. 개별 냉동기의 부하 특성은 흡수식 냉동기와 500 RT 용량의 터보냉동기가 주로 냉방을 공급하는 운전과 있으며 300 RT 용량의 터보냉동기는 모자라는 부분의 냉방을 공급하는 보조열원으로 사용되고 있다. 가장 많은 부하를 공급하고 있는 장치는 500 RT이며, 흡수식 냉동기는 일정한 부하율로 주로 전력 피크 저감을 위해 주간에 운전함을 볼 수 있다. 이처럼 실측한 실제 공급부하를 시간별 예측 부하와 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이때 예측 냉방부하는 일기예보에서 예보한 익일 최고온도와 최저온도, 11개 집단 건물의 사무실별, 실험실별 면적을 입력하여 추정 하였다. 시간별 예측 냉방부하는 실측 냉방부하의 경향과 잘 일치하고 있음을 보여준다. 1일 총 냉방부하는 예측치의 경우 168.8 kJ, 실측치는 161.3 kJ로 예측치와 실측치 사이에는 4.6%의 오차가 있다. 이와 같은 방법으로 2008년 7월 16일부터 8월 15일까지 시간별, 날짜별 예측 부하를 실제 측정한 부하량과 비교한 결과를 Fig. 7에 나타

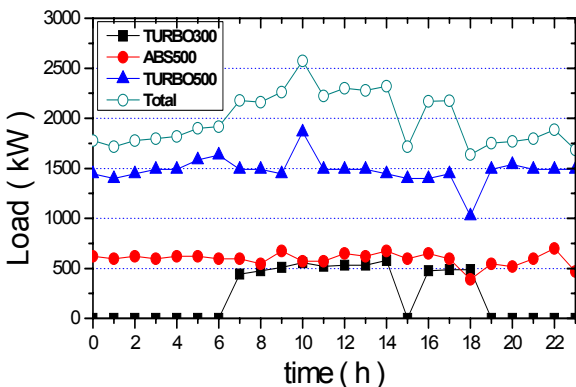


Fig. 5 Measured cooling load for a day on 1st August.

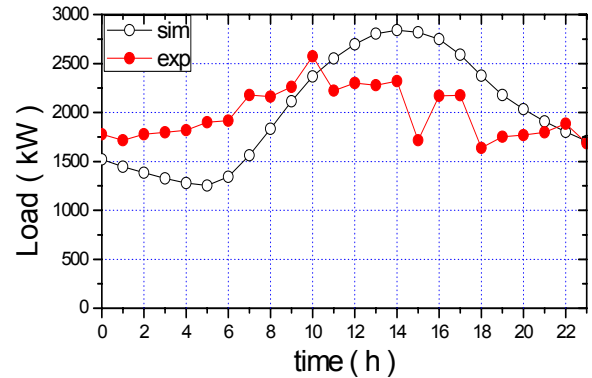


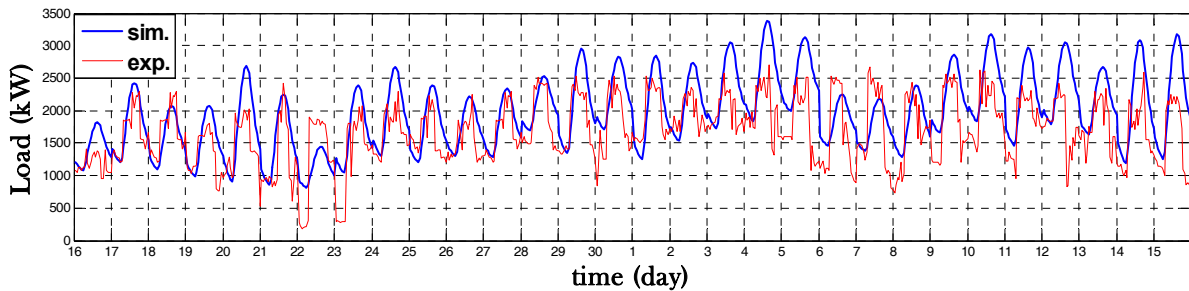
Fig. 6 Comparison of predicted cooling load with measured data on 1st August.

내었다. 실선으로 나타낸 것은 실측냉방부하이고, 파선으로 나타낸 것은 예측 냉방부하이다. 여기서 주말과 주일 및 공휴일은 분석대상 날짜에서 제외하였다. 정오에서 오후 3시 사이에 예측치와 실측치 모두 피크부하를 기록하고 있음을 보이며 전체적으로 예측부하가 실측부하보다 다소 크게 예측되었다. 이러한 차이는 건물 면적의 함수인 냉방 부하 파라미터 상관 함수를 설정하는 과정에서 크게 발생한다. 즉 각 면적 파라미터에 적용한 존별 설계 부하 데이터들은 위험률을 고려한 값이기 때문에 위험률만큼 예측냉방부하와 실측냉방부하의 차이가 나타남을 알 수 있다.

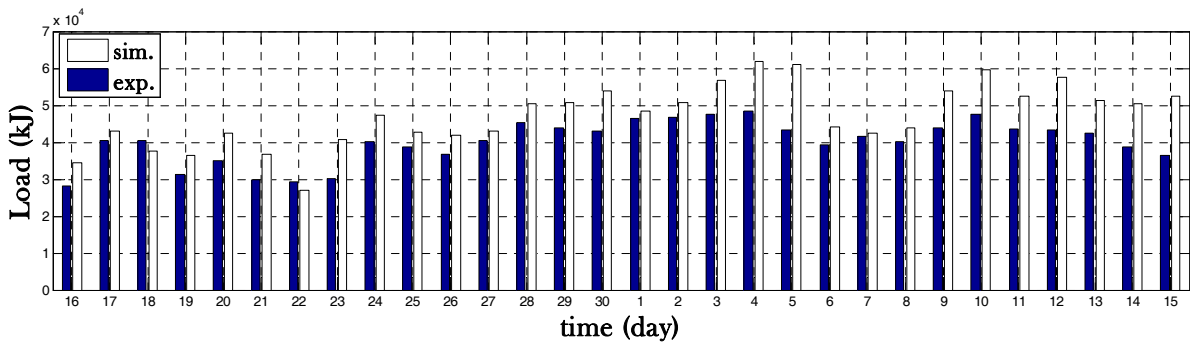
7월 15일부터 8월 15일까지 30일 간 총 예측부하량과 실측부하량에서 예측치와 실측치간의 평균오차는 17.4%이다. 또한 12시를 기준으로 오전과 오후로 구분하여 예측치와 실측치간의 오차를 비교한 결과, 오전에는 5%, 오후에는 25%의 오차를 보인다. 건물의 면적으로부터 냉방부하의 요소 값들을 추정하지 않고 건물의 공조 설계 데이터로부터 추정한다면 오차는 10% 미만으로 줄어든다.⁽¹⁰⁾ 그러나 설계 데이터가 없을 경우 이러한 방법은 매우 유용한 방법이 될 것이며 시간별 예측부하와 1일 총 예측부하량은 실제 부하의 경향과 상당히 유사함을 보여주며, 이러한 예측 부하 패턴을 이용하여 사전에 냉방 시스템에 대한 운전 전략을 수립한다면 효율적이고 경제적인 냉방 시스템 운용이 가능하게 될 것이다.

5. 결 론

냉방 시스템의 효율적이고 경제적인 운전 전략 수립을 위해 건물의 면적과 기상예보를 이용하여



(a) Hourly cooling load



(b) Daily cooling load

Fig. 7 Comparison of predicted cooling load with measured data from 16th July to 15th August.

매우 간편하게 시간별 냉방부하를 예측하는 기법을 제안하였다. 건물의 복잡한 열적 모델 방정식인 열 평형식으로부터 시작되는 고전적인 냉방부하 예측 방법을 단순화 시키기 위해서 몇 가지 가정을 하였고, 가정으로부터 도출한 냉방부하 파라미터를 설정하기 위해 기준이 되는 모델 건물의 각 존별 면적에 대응하는 태양열, 전도열, 환기, 인체, 조명 및 장치에 대한 각각의 설계 부하값을 면적 값에 대하여 분산시킨 뒤 상관관계를 분석하였다. 기준 건물의 각 존별 면적에 대응하는 각각의 설계 부하 값은 강한 선형적 상관관계를 보였으며 이를 바탕으로 건물의 면적에 대한 함수인 냉방부하 파라미터를 설정하였다. 설정된 파라미터는 태양열 및 전도열에 관련된 $P_{s,A}$, 고정현열 및 잠열부하와 관련된 $C_{s,A}$, $C_{l,A}$ 등이다. $P_{s,A}$ 와 면적과의 상관관계는 97%, $C_{s,A}$ 와 면적과의 상관관계는 사무실과 연구실은 모두 99%, $C_{l,A}$ 과 면적과의 상관관계는 사무실의 경우 98%, 연구실의 경우 90%로 나타났다. 설정된 면적 파라미터와 예측된 외기 조건을 이용하여 익일 시간별 냉방부하를 예측할 수 있다.

제안된 냉방부하 예측 기법의 신뢰성을 검증하기 위해 11개의 집단 건물에 냉방 에너지를 공급해주는 냉방 시스템에 대한 실측 부하 데이터를 이용하

여 예측치를 비교 및 분석 해 보았다. 7월과 8월에 대하여 시간별 예측 냉방부하는 실측 냉방부하의 경향과 매우 잘 일치하는 결과를 보였으며, 일별 냉방부하의 경우 예측 냉방부하가 실측 냉방부하보다 평균 17.4% 높고, 오전에는 5%, 오후에는 25% 정도 크게 예측되었다.

본 연구에서 제안한 냉방부하 예측 방법을 이용하면 공조 설계 데이터가 없는 건물에 대한 익일의 냉방부하 패턴을 비교적 쉽게 예측할 수 있으며, 이를 바탕으로 냉방시스템의 효율적이고 경제적인 운전 전략을 수립하는데 큰 도움이 될 것이다.

후 기

본 연구는 중소기업청과 (주)가교테크의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Energy Statistical Yearly Report, 2009, Korea Energy Economic Institute.
2. Statistical Analysis on the Electric Power

- Consumption of Individual Usage of Building, 2002, Korea Energy Management Corporation.
3. Davies, M. G., 1983, Transmission and storage characteristics of sinusoidally excited wall-A Review, *Applied Energy*, Vol. 15, pp. 167-231.
 4. Seem, J. E. et al., 1989, Transfer functions for efficient calculation of multidimensional transient heat transfer, *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 111.
 5. Spiliter, J. D., Fisher, D. E. and Pedersen, C. O., 1997, The radiant time series cooling load calculation procedure, *ASHRAE Transactions*, Vol. 103, No. 2, pp. 503-515.
 6. Hou, Z., Lian, Z., Yao, Y. and Yuan, X., 2006, Cooling-load prediction by the combination of rough set theory and an artificial neural-network based on data-fusion technique, *Applied Energy*, Vol. 83, pp. 1033-1046.
 7. Yang, J., Rivard, H and Zmeureanu, R., 2005, On-line building energy prediction using adaptive artificial neural network, *Energy and Building*, Vol. 37, pp. 1250-1259.
 8. Li, O., Meng, Q., Yoshino, H and Mochida, A., 2009, Predicting hourly cooling load in the building : A comparison of support vector machine and different artificial neural network, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 90-96.
 9. Yoo, S. H., Lee, J. M., Han, K. H. and Han, S. H., 2006, A study on prediction of temperature and humidity for estimation of cooling load, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 394-402.
 10. Yoo, S. H., Han, K. H., Lee, J. M. and Han, S. H., 2006, A study on estimation of cooling load for effective control of ice thermal storage system, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 394-402.