

사무소건물의 슬래브축냉을 위한 내부발열부하의 확률적 정상 모델화

정 재 훈[†]
호서대학교 건축공학과

Modeling of Stochastic Properties of Internal Heat Generation of an Office Building for Slab Cooling Storage

Jae-Hoon Jung[†]
Department of Architectural Engineering, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea
(Received June 30, 2011; revision received November 4, 2011)

ABSTRACT: It has been shown that the air-conditioning system with slab cooling storage is effective in cutting peak load and utilizing nighttime electric power. The stochastic properties of internal heat generation which has great influence on the cooling load are examined in this paper. Based on the measured cooling load and electric power consumption in an office building with slab cooling storage, stochastic time series models to simulate these random processes are investigated. Furthermore, a calculated result by an optimal control method of thermal analysis taking into account the internal heat is compared with the measured cooling load.

Key words: Internal heat generation(내부발열), Stochastic properties(확률적 정상), Modeling(모델화), Slab cooling storage(슬래브 축냉)

———— 기 호 설 명 ————

E : 기대치 [-]
 y : 부하 [W]
 e : 백색잡음 [W]
 J : 평가함수 [-]
 t : 시간
 r : 비중
 u : 제거열량 [W]

그리스 문자

γ : 자기공분산 [-]

θ : 온도 [°C]
 ψ : 자기상관함수 [-]

하첨자

t : 시각
 0 : 초기
 f : 최종
 r : 실내
 s : 설정

1. 서 론

최근, 열용량이 큰 바닥 콘크리트 슬래브를 축열체로 하는 슬래브 축열(또는 축냉)이 최대부하의 삭감 및 야간전력 이용에 유효하다는 사실이 실측과

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-41-540-5775; fax: +82-41-540-5778
 E-mail address: jungjh@hoseo.edu

시뮬레이션을 통하여 확인되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 또한, 집무시의(설정온도에 대한) 실내온도 편차와 전체 에너지소비량을 목적함수로 하는 슬래브축열의 최적제어운전에 대한 검토가 이루어지고 있다.^(4,5) 단, 슬래브축열 시스템은 야간의 무계획적인 축열이 아니라, 다음 날의 부하를 예측하여 계획적으로 운용할 때 효율성을 극대화할 수 있다. 부하예측에는 기상자료 및 내부발열의 입력이 요구되며, 이들은 불확실하게 변동되는 요소이므로 확률적 특성이 고려되어야 한다. 나아가 기상요소 및 내부발열의 불확실성이 고려된 슬래브축열 시스템의 확률적 최적제어방책의 도출이 필요하다. 이를 위해서는 기 연구된 기상자료의 확률과정 모델화⁽⁶⁾뿐 아니라 시스템의 외란 중 큰 비중을 차지하는 실내발열의 확률적 성장에 대한 검토와 모델화가 필요하다.

실내발열에 관한 기존연구로서는 커튼월 사무용건물을 대상으로 외피의 종류, 실내발열 스케줄, 실내발열 크기 등의 입력조건에 따른 냉난방부하에의 영향을 시뮬레이션을 통해 검토한 사례,⁽⁷⁾ 동경의 오피스빌딩을 대상으로 조명과 콘센트의 사용전력량 측정 및 재실률, 컴퓨터 사용률, 조명 사용률 등 집무실 사용실태 조사를 통한 내부발열 실태조사,⁽⁸⁾ 설문조사, 통계자료, 문헌자료 등을 활용하여 공동주택 주거건물의 재실스케줄, 조명스케줄, 실내기기 사용스케줄 등 내부발열의 패턴을 분석한 사례⁽⁹⁾ 등이 있으나, 확률적 해석을 위한 모델화 사례는 찾아보기 어렵다.

이 같은 관점에서 본 논문에서는 슬래브축열 공조시스템의 확률적 최적제어해석을 목적으로, 우선 사무소 건물의 하절기 냉방부하와 전력사용량 데이터를 사용하여 내부발열의 확률적 성장에 대하여 검토하고, 이들 데이터의 성장을 표현하는 확률과정 모델을 작성하였다.

2. 확률시계열 모델 이론^(10, 11)

불규칙한 변동을 수반하는 현상을 어느 시간간격으로 샘플링하여 시간 순서로 나열한 시계열(time series)은 모델화, 즉 시계열 데이터의 배후에 있는 확률과정의 수학적 모델을 결정하고 모델에 포함된 미지 파라미터를 추정함으로써 예측문제나 불규칙 입력에 대한 시스템의 응답·제어문제 등의 해석에 이용할 수 있다.

정규성 정상확률과정 시계열은 정규성 백색잡음을 입력으로 하는 선형 시스템의 출력으로 모델화할

수 있으며, 이에 는 자기회귀(AR; auto regressive) 모델, 이동평균(MA; moving average)모델, 자기회귀이동평균(ARMA; autoregressive-moving average)모델 등의 3종류가 있다. 예를 들어, l 차 자기회귀모델, 즉 AR(l) 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$y_t + \sum_{i=1}^l a_i y_{t-i} = e_t \quad (1)$$

여기서, e_t 는 평균치 0, 분산 σ^2 인 정규형 백색잡음과정이다.

식(1)은 현 시각의 데이터 값 y_t 는 이전 시각의 값 $y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-l}$ 및 현 시각의 백색잡음 e_t 에 의해 결정됨을 의미한다.

AR(l) 모델의 계수 $a_i (i=1, \dots, l)$ 는 정상확률과정 y_t 의 자기공분산(autocovariance) $\gamma_s = E\{y_t y_{t-s}\}$ 에 의한 자기상관함수(autocorrelation function) $\psi_y(k) = \gamma_k / \gamma_0$ 를 사용하여 다음의 Yule-Walker 방정식을 풀어 구할 수 있다.

$$\psi_y(k) + \sum_{i=1}^l a_i \psi_y(k-i) = 0, \quad (k=1, 2, \dots, l) \quad (2)$$

3. 사무소 건물의 하절기 냉방부하와 전력부하

3.1 실측치

검토대상 건물은 Fig. 1에 나타낸 일본 오사카시에 위치한 사무소 빌딩이다. 이 건물은 지상 15층, 연면적 48,000 m²로 지역냉난방을 열원으로 하고 있으며, 반송동력을 절감할 수 있는 냉매 자연순환 시스템에 찬장취출식 슬래브축열 공조 시스템을 도



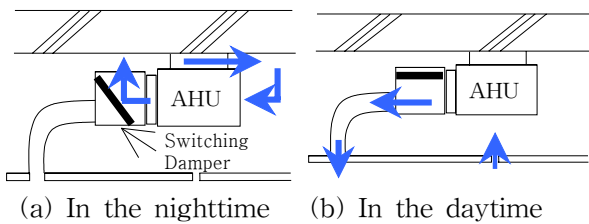
Fig. 1 The object building.

입하고 있다. 천장취출식 슬래브축열 공조 시스템의 개념도를 Fig. 2에 나타낸다. 주간에는 공조기로부터 취출된 공기가 실내공기와 열교환한 후 천장 플레넘 내로 돌아와 공조기로 흡입되며, 야간에는 변환댐퍼에 의해 송풍방향이 바뀌어 슬래브 하면에 냉·온풍을 취출하여 축냉·축열한다. Fig. 3에 대상건물의 중간층 평면도를 나타내었다. 그림 속의 검정 칠 부분은 실측 및 검토 대상부분을 나타낸다.

검토 대상면적 120 m²에 대한 1997년 7월, 8월의 시각별 냉방부하와 전력소비량을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 단, 7월 28~31일 값은 결측으로 되어 있다. 냉방부하는 냉매자연순환 시스템을 도입하고 있는 대상건물 응축기의 냉수출입구온도 및 냉수유량을 측정하여 산출하였다. 전력은 단상 100 V/200 V 부하로 조명, 콘센트, 소형 팬을 포함하고 있다.

냉방부하는 공조시스템의 운전방식과 기상, 내부 발열 등의 변화에 따라 심하게 변동하고 있으나, 전력소비량의 변동 폭은 비교적 작은 편이다. 평일의 경우, 냉방부하는 전력소비량의 약 4배 정도이며, 토요일, 일요일에는 약 3배인 것으로 나타났다.

냉방부하의 경우, 7월 1, 2주차와 8월 1, 2주차에는 밤 8시부터 10시까지 대상실에서 냉방을 하지 않아 냉방부하가 작았던 것으로 추정된다. 밤 10시부터는 심야전력을 이용하여 축열운전을 실시하였다. 7월 3주차와 8월 3, 4주차에는 밤 8시부터 아침 7시까지 약 2,600 W의 값으로 축열하고 있다. 7월 4주차에는 축열하지 않았으므로 주간에 7,900 W의



(a) In the nighttime (b) In the daytime

Fig. 2 The schematic of air-conditioning systems with slab thermal storage.

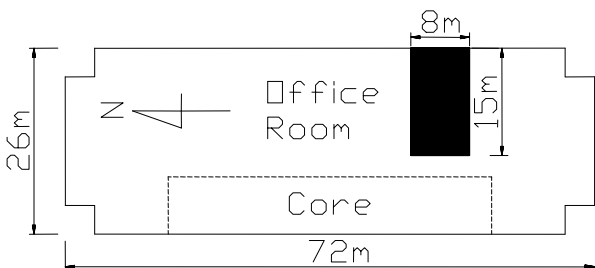


Fig. 3 Plan of typical floor in the building.

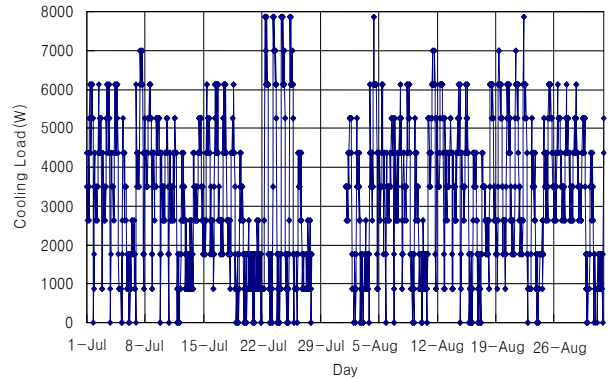


Fig. 4 Cooling load of the object area.

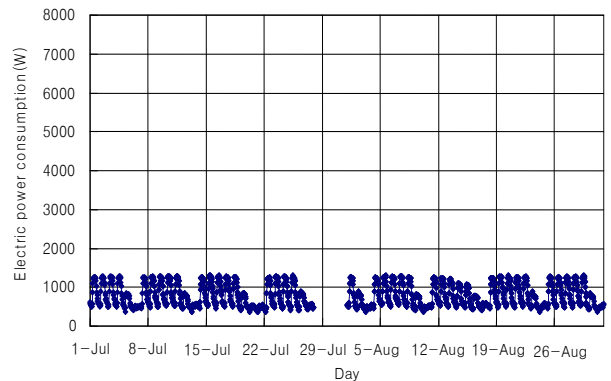


Fig. 5 Electric power consumption of the object area.

최대값이 출현하고 있다.

한편, 전력부하는 평일에 약 500~1,200 W, 토요일에 약 500~750 W, 일요일에 약 500 W이며, 변동 폭이 작다.

3.2 시각별 평균치

냉방부하와 전력부하의 주간 주기 및 일 주기 특징을 알아보기 위해, 요일별(평일, 토요일, 일요일) 데이터로부터 각각의 시각별 평균치를 검토하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 검토 대상면적의 냉방부하와 전력소비량의 시각별 평균치이다.

냉방부하는 평일의 경우 업무가 시작되는 오전 8시경부터 급상승하여 11시에 5,700 W에 가까운 최대치가 된다. 집무시(8:00~18:00)에는 5,500 W 정도의 부하가 계속되고, 오후 6시부터 감소하기 시작하여, 7시부터 22시까지 급감한다. 밤 22시부터는 축열운전이 개시되어 상승하기 시작하며, 축열부하는 평균적으로 주간 공조부하의 절반 정도이다.

토요일의 경우는 평일과 마찬가지로 오전 8시경

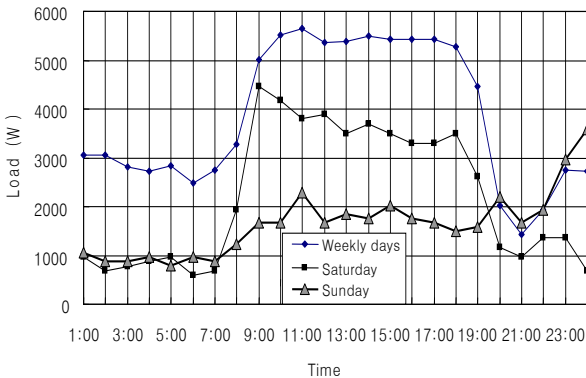


Fig. 6 Average value of cooling load on time.

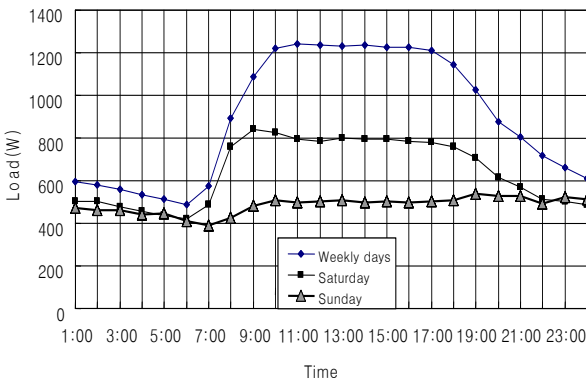


Fig. 7 Average value of electric power load on time.

부터 급격하게 상승하여 아침 9시에 최대치가 되나, 그 후 6시까지 계속적으로 감소한다. 6시부터 급격하게 내려가지만, 밤 8시부터는 대략 1,000 W 정도의 값을 유지한다. 토요일 밤에는 축열을 하지 않기 때문인 것으로 생각된다.

일요일은 아침 8시 경부터 천천히 증가하기는 하나, 주간의 냉방부하는 토요일의 절반에 가까운 1,700 W 정도이다. 밤 10시부터는 축열운전을 개시하며, 10시부터 12시까지의 축열에 의한 부하는 평일의 값을 상회한다. 금요일과 토요일의 무축열, 토요일, 일요일의 적은 공조운전으로 인해 슬래브의 축열량이 적어져 부하가 증가한 것으로 판단된다.

전력소비량에 대해서는 평일의 경우, 냉방부하와 마찬가지로 11시에 피크가 나타난다. 단, 피크값은 크지 않으며 변동 패턴이 냉방부하와 달리 완만하다. 토요일도 냉방부하와 마찬가지로 아침 9시에 피크가 나타나고 있다. 일요일은 종일 평균적으로 500 W 정도의 부하를 유지하고 있다. 전력소비량의 경우, 일요일 심야부터 축열운전을 시작하는 냉방부하와 달리 심야가 되어도 부하가 상승하지 않는다.

3.3 랜덤성분의 시계열분석 및 모델화

냉방부하와 전력소비량의 실측데이터로부터 시각별 평균치를 뺀 값의 시계열을 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 시계열의 표준편차는 냉방부하가 984.3 W, 전력소비량이 42.5 W이며, 평균에 대한 표준편차의 비율은 냉방부하가 30.7%, 전력소비량이 5.4%이다.

Fig. 10과 Fig. 11은 냉방부하와 전력부하의 랜덤 성분 시계열의 시각별 표준편차를 나타낸 것이다. 냉방부하의 경우, 평일과 일요일의 심야 10시 이후 표준편차가 커진다. 이는 축열실험시 주 단위로 축열 시간의 변동이 있었기 때문에 축열이 시작되는 시간대의 변동 폭이 크게 나타난 것으로 생각된다. 전력부하는 평일 야간에 표준편차가 다소 큰 것으로 나타났다.

Fig. 12와 Fig. 13에 냉방부하와 전력부하의 랜덤 성분 시계열 데이터의 자기상관함수를 나타내었다. 또한, 이들 시계열의 확률적 성상을 표현하는 확률

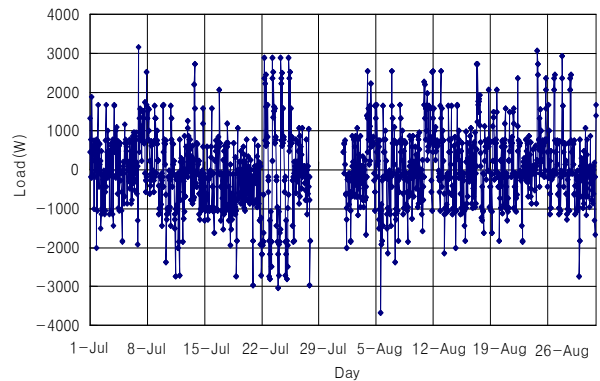


Fig. 8 Time series of random components of cooling load.

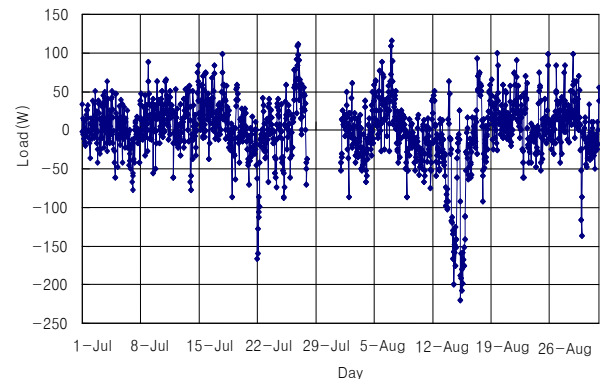


Fig. 9 Time series of random components of electric power load.

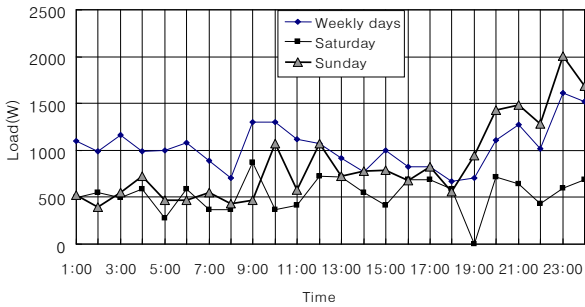


Fig. 10 Standard deviation of random components of cooling load on time.

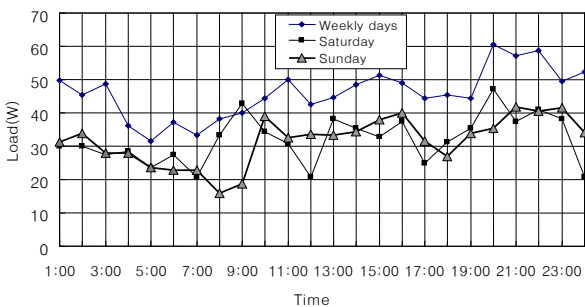


Fig. 11 Standard deviation of random components of electric power load on time.

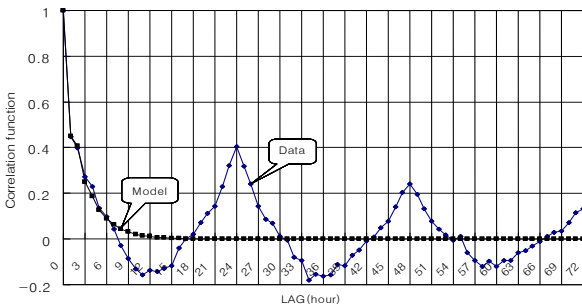


Fig. 12 Correlation function of the time series of random components of cooling load.

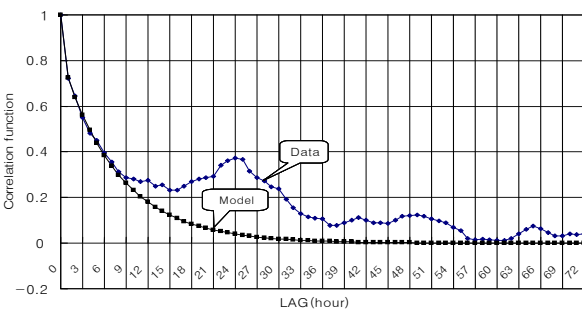


Fig. 13 Correlation function of the time series of random components of electric power load.

시계열모델로 2차 자기회귀(AR)모델과(1, 1)차 자기회귀이동평균(ARMA)모델을 작성하여 데이터 값의 자기상관함수와 비교하였다. 이들 모델은 각각 다음과 같다.

• 냉방부하 : $y_t = 0.33y_{t-1} + 0.26y_{t-2} + e_t$ (3)

• 전력부하 : $y_t = 0.88y_{t-1} + e_t - 0.35e_{t-1}$ (4)

Fig. 12와 Fig. 13을 보면, 냉방부하의 경우 7시간까지, 전력부하의 경우 9시간까지 실 데이터와 모델의 자기상관 함수가 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 슬래브축열 최적제어에 의한 냉방부하 재현

본 장에서는 제 3.2절의 전력소비량의 시각별 평균치를 사용하여 선행연구⁴⁾에서 제작한 슬래브축열 최적제어 프로그램으로 최적제거열량을 산출하여 실측 냉방부하와 비교해 보았다.

계산에 사용한 내부발열을 Fig. 14에 나타내었다. 내부발열은 조명, 콘센트, 소형 팬 등을 포함한 평일 전력소비량 평균치에 인체의 발열을 더한 값으로 구성하였다. 재실인원은 집무시 0.2 인/m², 인체 발열량은 1인당 115 W 값을 사용하였다. 기타 조건은 선행연구⁴⁾에서와 같은 값을 사용하였다.

Fig. 15에 최적 슬래브축열 운전을 하였을 경우의 제거열량과 실측 냉방부하를 나타내었다. 최적을 평가하는 평가함수는 다음 식과 같다.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [r_1(\theta_r - \theta_s)^2 + r_2 u^2] dt \quad (5)$$

식(5)의 우변 적분 내 제1항은 실온과 설정온도와 의 편차, 제2항은 제거열량을 나타낸다. r_1 과 r_2 는

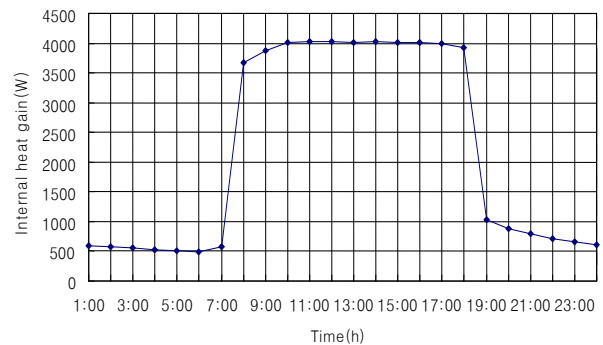


Fig. 14 Internal heat generation used in calculation.

각 항의 비중을 나타내는 가중함수이다. 즉, 평가함수 J 는 운전 시작시각 t_0 에서 종료시각 t_f 까지의 실온편차와 제거열량의 총합을 나타내며, J 가 최소가 되도록 우변 적분 내 제2항의 제거열량 u 를 결정한 것이 Fig. 15의 최적냉방부하이다.

Fig. 15의 측정치는 평일 냉방부하의 시각별 평균치이다. 또한, 최적제어운전에 의한 제거열량은 평가함수 식(5)의 제거열량에 대한 가중 r_2 를 축열시에 1.4배하여 구한 결과이다. 즉, 야간의 전력이 주간의 전력요금보다 1.4배 비싼 경우의 결과를 나타낸다. 이 결과를 보면 주간의 제거열량은 실측치 쪽이 최적치를 다소 상회하고 있으나, 대체적으로 비슷한 수준임을 알 수 있다. 주간의 제거열량의 차는 야간의 축열운전법의 차 및 최적제어와 실측치와의 주간의 외기조건의 차에서 나온 것으로 생각된다.

또한, 실측치의 냉방부하와 야간의 전력비율을 주간의 1/3로 한 경우의 최적 제거열량과 비교한 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 야간의 전력요금을 주간

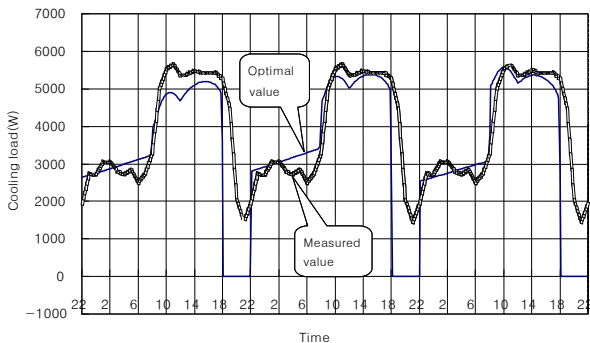


Fig. 15 Comparison of cooling load(In case that nighttime electric power rate is 1.4 on evaluation function).

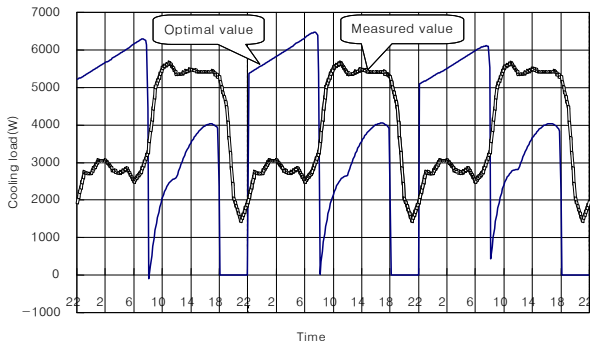


Fig. 16 Comparison of cooling load(In case that nighttime electric power rate is 1/3 on evaluation function).

Table 1 Costs(Unit : Won)

	No nighttime- electric power	Nighttime- electric power	Rate
Nighttime	3,296.1	2,102.8	-36%
Daytime	5,545.3	2,971.4	-46%
Total	8,841.4	5,074.2	-43%

Table 2 Energy consumptions(Unit : kWh)

	No nighttime- electric power	Nighttime- electric power	Rate
Nighttime	30.9	59.1	+91%
Daytime	51.9	27.8	-46%
Total	82.8	86.9	+5%

의 1/3로 가정했을 경우, 야간의 축열은 5,200 W에서 서서히 상승하여, 축열운전이 종료되는 오전 8시에는 약 6,200 W에 달한다. 이와 같은 축열운전에 의해 오후 4시에 생기는 주간부하가 약 25% 감소하고 있다.

심야전력의 적용 여부에 따른 비용을 Table 1에, 에너지소비량을 Table 2에 나타내었다. 비용은 기준이 되는 주간전력 요금을 106.8 원/kWh로 하고,⁽¹²⁾ 심야전력이 적용되는 경우는 주간전력 요금의 1/3로 하였다. Table 1, Table 2의 값은 계산한 3일 중 이틀째의 1일 값을 나타낸 것이다. Table 1에서 보면, 심야전력 요금을 적용할 경우 야간비용을 36%, 주간비용을 46% 절감하며 전체적으로 43%의 절감효과가 있음을 알 수 있다. 반면, 에너지소비량으로 볼 때는, 주간 전력소비량이 46% 감소한 반면, 야간 전력소비량은 91% 증가하여 총 에너지소비량이 5% 증가하였음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 슬래브축열의 확률적 최적제어에 대한 검토를 목적으로 우선 시스템 외란의 하나인 내부발열의 확률적 변화 성상을 모델화하였다. 구체적으로는 슬래브축열 시스템을 도입한 사무소 건물의 냉방부하 및 전력소비량을 대상으로 이들 데이터의 확률적 성상을 표현하는 확률시계열 모델을 작성하였다. 이들 중 전력소비량에 인체발열을 더한 내부발열을 입력으로 하여 슬래브축열의 최적운전 계산을 하고 실측 냉방부하와 비교·검토하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 평일의 경우, 냉방부하는 전력소비량의 약 4배이며, 변동 폭은 약 20배이다. 냉방부하의 변동이 큰 것은 공조기의 운전조건과 외기 및 인체발열 등의 시간 변화가 크기 때문으로 생각된다.

(2) 냉방부하와 전력소비량으로부터 주간주기와 일주기 성분을 제거한 랜덤성분의 시계열모델은 7~9시간 앞까지의 자기상관함수가 실측 데이터와 잘 일치하였다.

(3) 전력소비량의 시각별 평균치를 활용한 내부발열을 입력한 슬래브축열의 최적제거열량은, 야간 전력을 주간보다 1.4배 비싸게 했을 때의 해가 냉방부하 실측치와 잘 일치하였다. 또한, 심야전력요금이 주간의 1/3일 경우의 최적해에 따르면, 주간 피크부하를 약 25% 저감시킴으로써 비용적으로는 총 43%의 절감효과를 가져오지만, 에너지소비량은 약 5% 증가함을 알 수 있었다.

본 논문에서는 실내발열의 확률적 성분 모델화에 전력소비량을 활용하였다. 전력소비량은 조명과 콘센트 부하를 포함하고 있으며, 인체발열에 대해서도 양적으로는 미미하지만 어느 정도 경향은 반영하고 있을 것으로 생각된다. 그러나 양적인 측면에서 인체발열의 확률적 성상에 대한 검토가 차후 필요하다. 또한, 이들 내부발열 요소들을 종합적으로 반영한 슬래브축열의 확률적 최적제어에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2009년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0582).

참고문헌

- Shinkai, K. I., Kasuya, A., and Kato, M. H., 2000, Performance Evaluation of Floor Thermal Storage System, ASHRAE Transactions, Vol. 106, No. 1, pp. 311-316.
- Jung, J. H. and Shin, Y. G., 2005, An Experimental Study on Thermal Storage Performance of an Air-Conditioning System with Slab Thermal Storage, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 427-435.
- Ishino, H., 2003, A Simulation Study on the Response of Charged and Discharged Thermal Energy in Building Thermal Mass Storage Systems, Proceedings of Eighth International IBPSA Conference, pp. 547-555.
- Jung, J. H., Hokoi, S. and Urabe, W., 1999, Fundamental study into optimized control for air-conditioning system with floor thermal storage based on optimal control theory, Journal of Architecture, planning and environmental engineering(Transactions of AIJ), Vol. 520, pp. 33-39.
- Jung, J. H., 2008, An Analysis of the Optimal Thermal Storage Time of Air-Conditioning System with Slab Thermal Storage : An Analysis by the Gradient Method Algorithm, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 10, pp. 702-709.
- Yoshida, H. and Terai, T., 1992, Modeling of weather data by time series analysis for air-conditioning load calculations, ASHRAE Trans., 98 Pt.1 pp. 328-345
- Kim, J. Y., Yook, I. S., Nam, H. J., Lee, J. S., Kim, J. M. and Cho, S., 2008, The Impact of Internal Heat Gain on Heating and Cooling Load in Curtain Wall Office Buildings, Proceedings of the SAREK 2008 Summer Annual Conference, pp. 925-930.
- Hirata, T. Y., Kawase, T. H., Nagai, T. O. and Nagata A. H., 2010, Field Survey on Internal Heat Generation in Office Buildings, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, pp. 1157-1158.
- Yoo, S. Y. and Kim, J. Y., Analysis of Internal Heat Gain and System Operation Patterns in Residential Buildings, Proceedings of the SAREK 2011 Summer Annual Conference, pp. 683-686.
- Box, G. E. P. and Jenkins, G. M., 1976, Time Series Analysis-Forecasting and Control, Holden-Day.
- Peter, J. B. and Richard, A. D., 1996, Introduction To Time Series and Forecasting, Springer-Verlag New York, Inc.
- Korea Electric Power Corporations; www.kepco.co.kr.