

내부발열의 확률적 성상을 고려한 슬래브축냉의 최적제어

A Study on Optimal Control of Slab Cooling Storage Considering Stochastic Properties of Internal Heat Generation

정재훈(Jae-Hoon Jung)[†]

호서대학교 건축공학전공

Department of Architectural Engineering, Hoseo University, Chungnam, 336-795, Korea

(Received March 23, 2015; revision received May 7, 2015; Accepted: May 8, 2015)

Abstract In this paper, a method to obtain the probability distribution of room temperature and cooling load is presented, when the internal heat generation is applied to the system as a disturbance in the air conditioning system with slab cooling storage. The probability distribution of room temperature and the cooling load due to the disturbance were examined in one room of an office building. When considering only the electric power consumption as a probability component, it was found that the effect on room temperature and cooling load is small, because the probability component of the measured electric power consumption in the building is small. On the other hand, when considering the stochastic fluctuations of electric power consumption together with the heat generated by human bodies, the mean value of the cooling load was about 2,300 W and the ratio of the standard deviations was 19% (10 o'clock in second day). It was revealed that the stochastic effects of internal heat generation acting on the air conditioning system with slab cooling storage are not small.

Key words Slab cooling storage(슬래브축냉), Optimal control(최적제어), Internal heat generation(내부발열), Probability distribution(확률분포)

[†] Corresponding author, E-mail: jungjh@hoseo.edu

기호설명

a : 온도전도율 [m^2/s]
 b : 부분 식 치환기호
 cp : 용적비열 [$J/m^3 \cdot K$]
 D' : 정규백색잡음의 세기 [W^2]
 d : 계수 [1/s]
 E : 기대치 연산기호
 g : 열공급을 나타내는 단위계단함수 [-]
 h : 인체축 열전달률 [$W/m^2 \cdot K$]
 k : 종합열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]
 n : 환기횟수 [1/s]
 P : 부분 식 치환기호
 Q : 취출풍량 [m^3/s]
 q : 열량 [W]
 R : 상관함수 [-]
 r : 가중함수 [-]
 S : 면적 [m^2]
 t : 시간 [s]
 V : 용적 [m^3]
 v : 정규백색잡음 [W]

u : 제거열량 [W]
 x : 길이 [m]
 Y : 전력소비량의 연속시간 확률과정 [W]
 y : 전력소비량의 이산시간 확률과정 [W]
 α : 열전달률 [$W/m^2 \cdot K$]
 δ : Kronecker의 δ 함수
 Δx : 차분 분할폭 [m]
 θ : 온도 [$^{\circ}C$]
 λ : 열전도도 [$W/m \cdot K$]

상첨자

o : 최적
 T : 전치행렬

하첨자

a : 공기
 c : 천정
 cv : 대류
 ea : 전력소비량
 f : 바닥슬래브

- fs* : 사무실 내 바닥슬래브 표면
- g* : 유리창
- hg* : 인체발열
- in* : 내부
- ip* : 플레넘 내측
- ir* : 사무실 내측
- mrt* : 평균 복사온도
- o* : 외기
- ot* : 작용온도
- p* : 플레넘
- p0* : 플레넘 측 상수 값
- ps* : 플레넘 내 바닥슬래브 표면
- r* : 사무실
- r0* : 사무실 측 상수 값
- rd* : 복사
- s* : 설정
- sa* : 취출공기
- sat* : 상당외기온도
- sol* : 일사
- t* : 시간
- w* : 벽체
- ws* : 벽체 표면

1. 서론

열용량이 큰 바닥 콘크리트 슬래브를 축열체로 하는 슬래브축냉(또는 축열)이 최대부하의 삭감 및 심야 전력 이용에 유효하다는 사실이 실측과 시뮬레이션을 통하여 확인되었다.^(1, 2) 단, 슬래브축냉 시스템은 심야의 무계획적인 축냉이 아니라, 다음 날의 부하를 예측하여 계획적으로 운전할 때 효율성을 극대화시킬 수 있다. 부하예측에는 기상데이터 및 내부발열의 입력이 요구되며, 이들은 불확실하게 변동하는 요소이므로 확률적 성상이 고려되어야 한다.⁽³⁾ 동시에 설정된 제한조건하에 목적함수를 최소(또는 최대)로 하는 슬래브축냉의 최적운전제어에 대한 검토가 필요하다.

이러한 배경 가운데, 선행연구에서는 사무소건물의 1실을 대상으로 집무시의 실내온도 편차와 전 에너지 소비량을 목적함수로 하는 슬래브축냉의 최적제어에 대하여 검토하였다.⁽⁴⁾ 또한, 슬래브축냉 시스템의 외란 중 큰 비중을 차지하는 실내발열의 확률적 성상에 대하여 검토하고 이를 모델화하였다.⁽⁵⁾

본 논문에서는 내부발열이 외란으로 작용했을 때의 슬래브축냉 시스템의 최적제어에 대하여 검토한다. 확률적으로 변동하는 입력치로는 조명과 사무기기 등의 소비전력과 인체발열을 대상으로 한다.

우선 내부발열, 벽체온도, 바닥슬래브온도, 실온, 플레넘온도를 상태량으로 표현하고, 이들 상태량에 관한

상태방정식(1계선형 상미분 방정식)을 작성한다. 또한, 이들 상태방정식을 평균화하고, 평균치, 분산·공분산에 관한 1계연립 상미분방정식을 작성한다.^(6, 7) 마지막으로 이들 관계식을 풀어 실온과 제거열량의 확률적 변동에 대하여 검토한다.

2. 문제의 정식화

2.1 슬래브축냉 공조시스템

천장취출식 슬래브축냉 공조시스템의 개념도를 Fig. 1에 나타낸다. 주간에는 공조기로부터 취출된 공기가 실내공기와 열교환한 후 천장 플레넘 내로 돌아와 공조기로 흡입되며, 야간에는 변환댐퍼에 의해 송풍방향이 바뀌어 슬래브 면에 냉·온풍을 취출하여 축냉·축열한다.

2.2 전력소비량의 연속시간 필터

선행연구⁽⁵⁾에서는 전력소비량의 확률과정을 이산표현에 의한 ARMA 모델로 나타내었다. 본 논문에서는 전력소비량 데이터(이산시간)를 시뮬레이트하는 연속시간 필터를 작성한다. 이는 상태방정식 표현에 필요하기 때문이다.

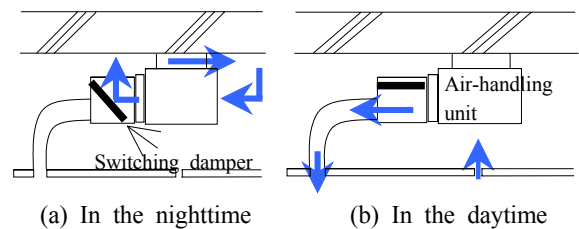


Fig. 1 The schematic of air-conditioning systems with slab thermal storage.

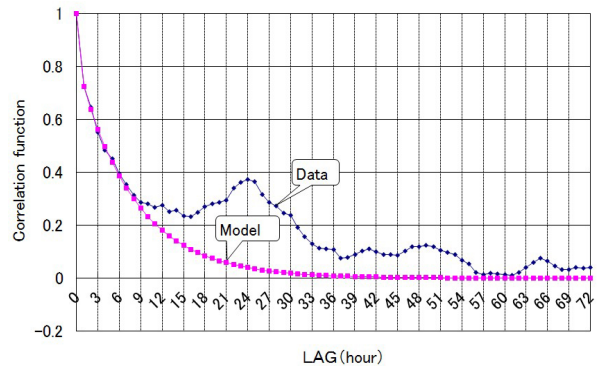


Fig. 2 Correlation function of the time series of random components of electric power load.

2.2.1 전력소비량 데이터 y_t

전력 소비량으로부터 1주주기, 1일주기 성분을 제거한 값을 y_t 라 하고, 이를 확률성분으로 간주한다. 전력 소비량의 확률성분 y_t 의 자기상관함수는 Fig. 2와 같다.

2.2.2 연속시간 필터 작성

전력소비량의 확률성분 y_t 를 연속적인 시계열에서 1시간마다 추출된 데이터로 간주한다. y_t 를 근사적으로 표현하는 연속시간 확률과정 $Y_t[W]$ 는 다음 식에 의해 정해지는 것으로 한다.

$$\frac{dY(t)}{dt} + d \cdot Y(t) = v(t) \quad (1)$$

여기서, $v(t)$ 는 정규백색잡음이며, 식(1)의 계수 d 와 정규백색잡음 $v(t)$ 의 세기 D' 를 결정해야 한다. 시간 t 가 충분히 경과한 시점($t \rightarrow \infty$)에서 생각하면, 식(1)의 해 $Y(t)$ 의 상관함수 $R(\tau)$ 는 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$R(\tau) = \frac{D'}{2d} e^{-d\tau} \quad (2)$$

계측된 전력소비량의 상관함수와 근사하게 일치하도록 $R(\tau)$ 를 결정한 결과, $d = 9.2 \times 10^{-5} [1/s]$, $D' = 1190 [W^2]$ 이 얻어졌다.

2.3 슬래브축냉 시스템의 각부온도 및 제거열량의 확률분포

제 2.2절과 같이 확률적으로 변동하는 전력소비량이 슬래브축냉 시스템에 작용할 때, 실온 및 제거열량이 어떻게 변동하는지 검토하기 위하여 분산·공분산을 구하는 방법에 대하여 기술한다.

2.3.1 대상 시스템

(1) 입력 내부발열 $q_{in}(t)$

내부발열 $q_{in}(t)$ 는 다음 식으로 주어지는 것으로 한다.

$$q_{in}(t) = q_{hg}(t) + q_{ea}(t) + Y(t) \quad (3)$$

여기서, $q_{hg}(t)$ 는 인체에 의한 발열, $q_{ea}(t)$ 는 전력소비량의 시각별 평균치이다.

(2) 실, 벽체 및 바닥슬래브

벽체와 바닥슬래브에 대해서는 각각의 열전도방정

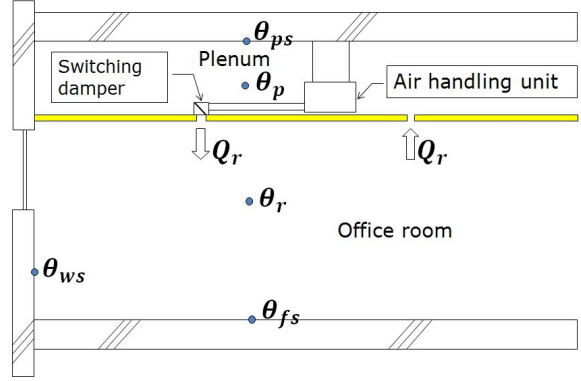


Fig. 3 Room model.

식을 차분에 의해 이산화하고, 사무실과 플레넘의 공기에 대해서는 각각의 열평형식을 사용한다. 단, 문제를 단순화하기 위해 계산대상실과 내주부 사이의 경계 및 플레넘의 외벽은 완전단열 상태인 것으로 가정한다. 슬래브축열 공조시스템의 실 모델을 Fig. 3에 나타내었다.

가. 벽체와 바닥슬래브의 열전도방정식

$$c\rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial x^2} \quad (4)$$

여기서, $i = w, f$ 이며, w 와 f 는 각각 벽체와 바닥슬래브를 가리킨다.

나. 사무실 공기의 열평형식

$$c\rho_a V_r \frac{d\theta_r}{dt} = S_w \alpha_{ir} (\theta_{ws} - \theta_r) + (S_g k_g + c\rho_a V_r n) (\theta_o - \theta_r) + S_f \alpha_{ir} (\theta_{fs} - \theta_r) + S_c k_c (\theta_p - \theta_r) + q_{sol} + q_{in} + c\rho_a Q_r (\theta_p - \theta_r) + g_r u \quad (5)$$

식(5)의 좌변은 시간간격별 실온(θ_r) 변화에 따른 사무실공기의 보유열량을 나타내며, 우변은 벽체 표면, 유리창 및 환기, 바닥슬래브, 천장보드, 일사, 내부발열, 플레넘과 사무실과의 환기, 제거열량 등에 의한 사무실 공기의 열수지를 나타낸다.

다. 플레넘 공기의 열평형식

$$c\rho_a V_p \frac{d\theta_p}{dt} = S_f \alpha_{ip} (\theta_{ps} - \theta_p) + S_c k_c (\theta_r - \theta_p) + c\rho_a Q_r (\theta_r - \theta_p) + g_p u \quad (6)$$

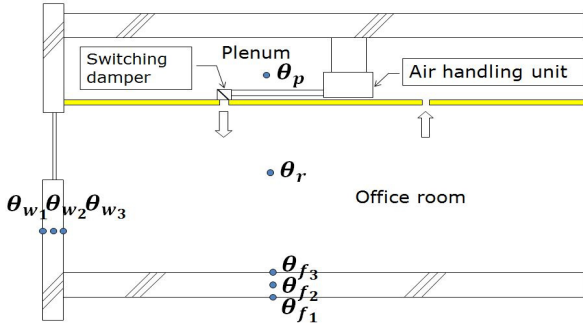


Fig. 4 Discretization of wall and floor.

식(6)의 좌변은 시간간격별 플레넘 공기온도(θ_p) 변화에 따른 플레넘 공기의 보유열량을, 우변은 바닥슬래브, 천장보드, 사무실과 플레넘과의 환기, 제거열량 등에 의한 플레넘 공기의 열수지를 나타낸다.

식(5), 식(6)의 제거열량 u 를 제어변수로 한다. 사무실과 플레넘으로의 송풍량 Q_r , Q_p 를 상수로 가정하면, 최적제어문제의 해로서 얻어지는 최적제거열량으로부터 플레넘 공기와 취출공기의 온도차를 구할 수 있다. 각 운전모드에 따른 제거열량 u , 사무실로의 송풍량 Q_r , 플레넘으로의 송풍량 Q_p , 열공급의 ON-OFF를 나타내는 단위계단함수 g_r , g_p 는 각각 다음과 같다.

- 축냉시 : $u = c\rho_a Q_p(\theta_{sa} - \theta_p)$,
 $Q_r = 0$, $Q_p = Q_{p0}$, $g_r = 0$, $g_p = 1$
- 공조시 : $u = c\rho_a Q_r(\theta_{sa} - \theta_p)$,
 $Q_r = Q_{r0}$, $Q_p = 0$, $g_r = 1$, $g_p = 0$
- 무운전시 : $u = 0$, $Q_r = 0$, $Q_p = 0$, $g_r = 0$, $g_p = 0$

2.3.2 상태방정식 표현

벽체와 바닥슬래브의 온도에 대해서는 식(4)의 열전도방정식을 차분화하여 상태량으로 표현한다. 구체적으로 Fig. 4와 같이 벽체와 바닥슬래브를 각각 3개의 격자점으로 이산화한 경우에 대하여 나타내면 다음과 같다.

벽체의 차분식

$$\frac{d\theta_{w1}}{dt} = 2b_w \left[\theta_{w2} - \theta_{w1} + \frac{\alpha_o \Delta x}{\lambda_w} (\theta_{sat} - \theta_{w1}) \right] \quad (7)$$

$$\frac{d\theta_{w2}}{dt} = b_w (\theta_{w3} - 2\theta_{w2} + \theta_{w1}) \quad (8)$$

$$\frac{d\theta_{w3}}{dt} = 2b_w \left[\theta_{w2} - \theta_{w3} - \frac{\alpha_{ir} \Delta x}{\lambda_w} (\theta_{w3} - \theta_r) \right] \quad (9)$$

바닥슬래브의 차분식

$$\frac{d\theta_{f1}}{dt} = 2b_f \left[\theta_{f2} - \theta_{f1} + \frac{\alpha_{ip} \Delta x}{\lambda_f} (\theta_p - \theta_{f1}) \right] \quad (10)$$

$$\frac{d\theta_{f2}}{dt} = b_f (\theta_{f3} - 2\theta_{f2} + \theta_{f1}) \quad (11)$$

$$\frac{d\theta_{f3}}{dt} = 2b_f \left[\theta_{f2} - \theta_{f3} - \frac{\alpha_{ir} \Delta x}{\lambda_f} (\theta_{f3} - \theta_r) \right] \quad (12)$$

여기서, $b_w = a_w / \Delta x^2$, $b_f = a_f / \Delta x^2$ 이다.

사무실과 플레넘의 공기 온도에 대해서는 식(5)와 식(6)의 열평형식을 사용한다.

벡터 $\mathbf{x}(t)$ 를 도입하여

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9]^T \\ &= [Y, \theta_{w1}, \theta_{w2}, \theta_{w3}, \theta_{f1}, \theta_{f2}, \theta_{f3}, \theta_r, \theta_p]^T \end{aligned} \quad (13)$$

라 하고, 식(1), 식(5)~식(12)의 일부를 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -dx_1 \\ -2b_w(1 + P_o x_2) + 2b_w x_3 + 2b_w P_o \theta_{sat} \\ b_w x_2 - 2b_w x_3 + b_w x_4 \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서, $P_o = \alpha_o \Delta x / \lambda_w$ 이다.

따라서 식 (14)는 다음의 Ito 방정식의 형태가 된다.⁽⁶⁾

$$d\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), t]dt + \mathbf{G}[\mathbf{x}(t), t]d\mathbf{B}(t) \quad (15)$$

2.3.3 평가함수

평가함수 $J(u)$ 는 작용온도의 설정온도 편차와 제거열량으로 이루어진 다음 식으로 하였다.

$$J(u) = E \left\{ \int_{t_0}^{t_f} [r_1(t)(\theta_{ot} - \theta_s)^2 + r_2(t)u(t)^2] dt \right\} \quad (16)$$

여기서, θ_{ot} 는 작용온도이며, 다음 식과 같다.

$$\theta_{ot} = \frac{\theta_r h_{cw} + \theta_{mr} h_{rd}}{h_{cw} + h_{rd}} \quad (17)$$

평가함수 $J(u)$ 를 최소화하는 제거열량 $u^o(t)$ 는 (선형의 결정론적) 최적화문제의 해이며, 다음 식으로 주어진다.⁽⁴⁾

$$u^o(t) = -\mathbf{F}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{d}(t) \quad (18)$$

2.3.4 모멘트방정식 도출⁽⁷⁾

내부발열이 확률적으로 변동할 때의 실온 등 상태량의 평균치와 분산을 구하기 위해서는, 제 2.3.1절의 대상 시스템을 제 2.3.2절과 같이 상태방정식으로 표현하여 평균치와 분산·공분산에 관한 모멘트 방정식을 도출해야 한다. 도출된 1계연립 상미분 방정식의 모멘트방정식을 풀면, 본 연구에서 목적으로 하는 실온과 제거열량의 평균치, 분산(또는 표준편차)을 얻을 수 있다.

(1) 평균치

식(14)의 상태방정식을 평균화한 결과의 일부를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \frac{dE[x_1]}{dt} = -dE[x_1] \\ \frac{dE[x_2]}{dt} = -2b_w(1 + P_o E[x_2]) + 2b_w E[x_3] + 2b_w P_o \theta_{sat} \\ \frac{dE[x_3]}{dt} = b_w E[x_2] - 2b_w E[x_3] + b_w E[x_4] \\ \vdots \end{cases} \quad (19)$$

여기서, 내부발열의 확률과정인 상태량 x_1 에 관한 식에서 백색잡음 $v(t)$ 의 평균치는 0이다.

(2) 분산·공분산함수

식(15)를 만족하는 $x(t)$ 에 대하여 임의의 함수 $h[x(t), t]$ 는 다음 식을 만족한다.⁽⁶⁾

$$\frac{dE[h]}{dt} = \sum_{j=1}^n E[f_j \frac{\partial h}{\partial x_j}] + \sum_{i,j=1}^n E[(GDG^T)_{ij} \frac{\partial^2 h}{\partial x_i \partial x_j}] + E[\frac{\partial h}{\partial t}] \quad (20)$$

여기서, f_j 는 식(15) Ito 방정식의 f 의 제 j 성분, D 는 $d\mathbf{B}(t)$ 의 분산행렬이다. 여기서, $h = x_k x_l$ 이라 하면,

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial x_j} = \delta_{kj} \cdot x_l + \delta_{lj} \cdot x_k \\ \frac{\partial^2 h}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\delta_{kj} x_l + \delta_{lj} x_k) = \delta_{kj} \delta_{li} + \delta_{lj} \delta_{ki} \\ \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

여기서, δ_{ij} 는 Kronecker의 δ 함수로, $i = j$ 일 때 $\delta_{ij} = 1$, $i \neq j$ 일 때 $\delta_{ij} = 0$ 이다. 또한,

$$(GDG^T)_{ij} = \begin{bmatrix} D & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

이므로, 식(21), 식(22)를 식(20)에 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned} \frac{dE[x_k x_l]}{dt} &= \sum_{j=1}^n E[f_j (\delta_{kj} x_l + \delta_{lj} x_k)] \\ &+ \sum_{i,j=1}^n E \left\{ \begin{bmatrix} D & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \delta_{kj} \delta_{li} + \delta_{lj} \delta_{ki} \right\} \\ &= \sum_{j=1}^n \delta_{kj} E[f_j x_l] + \sum_{j=1}^n \delta_{lj} E[f_j x_k] + DE[\delta_{kl} \delta_{11} + \delta_{11} \delta_{kl}] \\ &= E[f_k x_l] + E[f_l x_k] + 2D\delta_{kl} \delta_{11} \end{aligned} \quad (23)$$

가 된다. 식(23)을 식(14)에 대하여 풀어 일부를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \frac{dE[x_1 x_1]}{dt} = -2dE[x_1 x_1] + 2D \\ \frac{dE[x_1 x_2]}{dt} = -\{d + 2b_w(1 + P_o)\}E[x_1 x_2] + 2b_w E[x_1 x_3] + 2b_w P_o E[x_1] \\ \frac{dE[x_1 x_3]}{dt} = b_w E[x_1 x_2] - (d_1 + 2b_w)E[x_1 x_3] + b_w E[x_1 x_4] \\ \vdots \end{cases} \quad (24)$$

따라서 평균치에 관한 모멘트 방정식인 식(19)와 분산·공분산에 관한 모멘트 방정식인 식(24)를 초기조건을 사용하여 풀면, 슬래브축냉 시스템에 내부발열이 확률적으로 작용했을 때의 실온과 제거열량의 평균과 분산을 구할 수 있다.

3. 계산 예

3.1 검토대상실

제 2장의 정식화를 검토대상실에 적용한 결과에 대하여 기술한다. 검토대상실은 선행연구^(4,5)에서와 마찬가지로 슬래브축냉 시스템을 도입한 사무소빌딩의 기준층의 일부이다. Fig. 5는 대상건물의 중간층 평면도이며, 그림 속의 검정색 부분이 검토대상실이다.

3.2 계산조건

벽체, 바닥슬래브, 사무실, 플레넘의 조건을 Table 1에 나타내었다.

운전스케줄은 심야전력이 적용되는 22:00~08:00까지를 축냉운전, 08:00~18:00까지를 공조운전, 18:00~22:00까지를 무운전으로 하였다.

평가함수 $J(u)$ 에서 작용온도에 대한 가중함수 $r_1(t)$ 에 대해서는, 온도설정시(08:00~18:00)의 가중치를

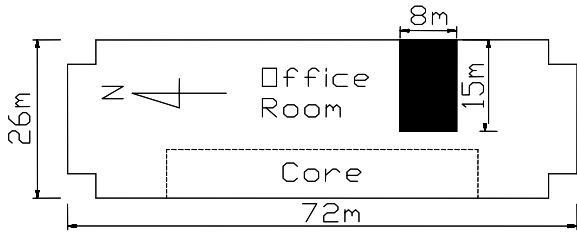


Fig. 5 Plan of typical floor in the building.

크게 하였다. 제거열량에 대한 가중합수 $r_2(t)$ 에 대해서는 축냉시(22:00~08:00)에는 심야전력 요금을 고려하여 주간의 1/3로 하였다. 설정온도는 26°C로 하였으며, 축냉시의 풍량은 0.56[m³/s], 공조시에는 0.28[m³/s]로 하였다.

외관으로는 내부발열의 일부를 차지하는 전력소비량만을 대상으로 했을 경우, 그리고 인체발열이 전력소비량에 비례하여 작용하였을 경우를 상정하였다. 외기온과 일사에 대해서는 선행연구⁽⁴⁾에서와 동일한 값을 확정적으로 부여하였다.

3.3 계산결과 및 고찰

3.3.1 전력소비량만이 확률적으로 변동하는 경우

확률성분으로 전력소비량만을 입력했을 경우의 3일간 슬래브축냉을 운전한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 위 그림은 실온의, 아래 그림은 제거열량의 표준편차를 나타낸 것이다. 전력소비량 확률성분의 표준편차가

작은 관계로 실온과 제거열량의 표준편차도 작은 값으로 나타나 있다. 둘째 날 오전 10시를 기준으로 실온의 표준편차는 0.007°C, 제거열량의 표준편차는 25 W 정도이다. 온도설정시인 08:00~18:00의 실온의 표준편차는 실내 작용온도 제어로 인해 비공조시 표준편차의 1/4수준의 작은 값을 나타내고 있다.

한편, 제거열량의 표준편차는 축냉운전을 개시하며 서서히 상승하여 공조운전으로 전환하기 직전 피크 값이 되며, 공조운전 중에는 대략 25 W 전후에서 변화하고 있다. 제거열량의 경우, 실온과 달리 공조시의 표준편차가 비공조시에 비해 큰 값을 나타내고 있으며, 공조시 인체발열 등의 확률성분의 영향이 나타난 것으로 사료된다.

3.3.2 소비전력과 인체발열이 확률적으로 변동하는 경우

재실자에 의한 내부발열에 대해서는 전력소비량에 어느 정도 반영되어 있는 것으로 판단된다. 이런 관점에서 전력소비량에 비례하여 인체발열이 발생하는 것으로 근사시킨 해석을 실시하였다.

해석에서는 동일한 대상 사무실에서 하절기 5일간 시간대별로 재실인원의 변동을 조사한 자료⁽⁹⁾를 기초로 설계 재실자수 24인, 평균 재실인원 12인, 표준편차 6인으로 근사시킨 값을 사용하였다. 인체에 의한 발열은 업무시인 08:00~18:00에 1인당 115 W 발생하는 것으로 하였다. 이상의 조건하에 실시한 계산결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Table 1 The values used in calculation

	Units	Values
Volumetric specific heat of the air	J/m ³ · K	1298.0
Volumetric specific heat of the wall	J/m ³ · K	1.934×10 ⁶
Volumetric specific heat of the slab	J/m ³ · K	1.423×10 ⁶
Room volume	m ³	2.6×8×15
Plenum volume	m ³	1.1×8×15
Thermal conductivity of the wall	W/m · K	1.51
Thermal conductivity of the slab	W/m · K	1.51
Mesh increment	m	0.09
Over-all heat transfer coefficient through the outer air layer	W/m ² · K	23.2
Over-all Heat transfer coefficient through the room air layer	W/m ² · K	9.3
Over-all heat transfer coefficient through the plenum air layer	W/m ² · K	15.1
Air change rate	1/s	1.0/3,600
Wall area	m ²	10.6
Window area	m ²	10.2
Ceiling area	m ²	120
Floor area	m ²	120
Overall heat transfer coefficient of the window	W/m ² · K	6.1
Overall heat transfer coefficient of the ceiling	W/m ² · K	3.3

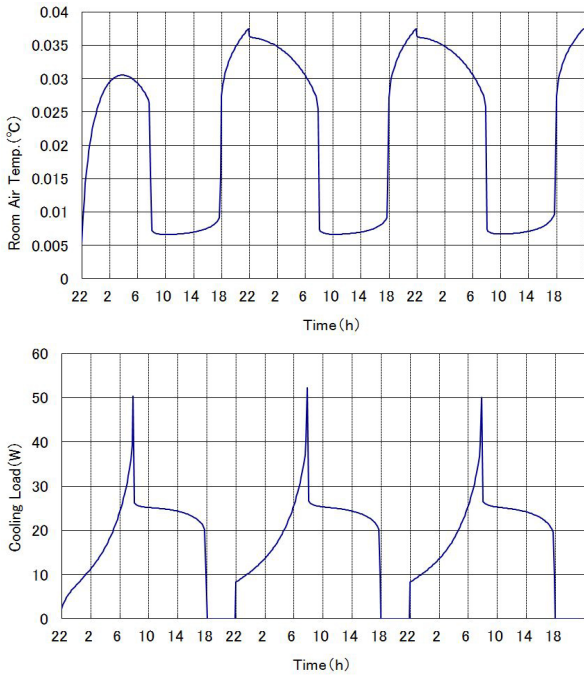


Fig. 6 Standard deviation of room air temperature and cooling load when electric power consumption was input only.

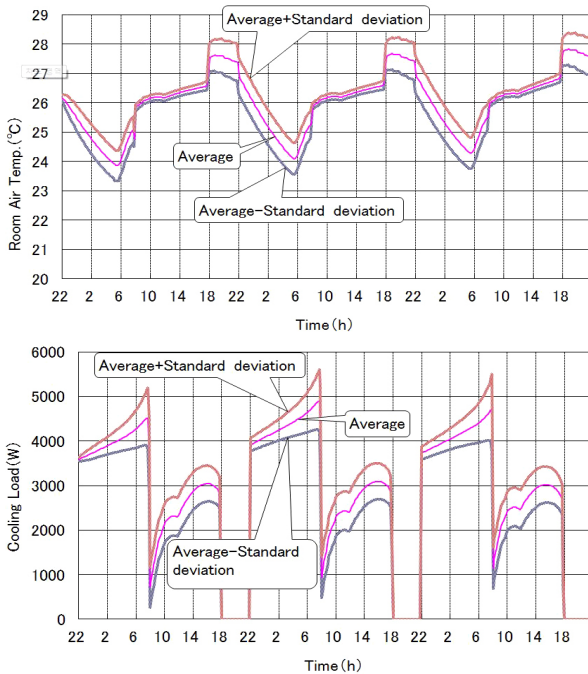


Fig. 7 Average and Standard deviation of room air temperature and cooling load when electric power consumption and human body heat generation were input simultaneously.

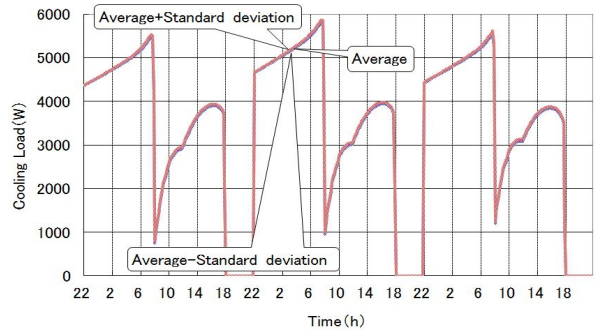


Fig. 8 Average and Standard deviation of cooling load when electric power consumption was input only.

인체발열의 확률변동을 함께 고려했을 때, 전력소비량만을 고려했을 경우(Fig. 6, Fig. 8)에 비해 제거열량의 평균치는 작아지고, 표준편차는 커진 것을 알 수 있다. Fig. 7의 둘째 날의 경우, 공조시 제거열량의 평균치 총량은 약 92,000 kJ, 표준편차 총량은 약 15,000 kJ로 평균치 대비 표준편차 비율은 약 16.3%였다. 또한, 축냉시 제거열량의 평균치 총량은 약 157,000 kJ, 표준편차 총량은 약 11,400 kJ로, 축냉시의 평균치 대비 표준편차 비는 약 7.3%에 달했다.

즉, 슬래브축냉 시스템에 작용하는 외란으로서의 내부발열은 공조시 뿐 아니라 축냉시에까지 영향을 미치며, 특히 업무시간대에 재실 인원의 변동이 심한 사무실(즉, 인체발열에 의한 내부발열의 확률 성분이 큰 사무실)일수록 주간 내부발열의 확률적 성상을 고려하여 심야시간대 축냉을 실시해야 함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 슬래브축냉 공조시스템을 대상으로 내부발열이 외란으로 시스템에 작용했을 때, 실온 및 제거열량의 확률분포를 구하는 방법에 대하여 제시하고, 사무소건물의 1실에 적용한 결과를 나타내었다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 확률성분으로 전력소비량만을 고려한 경우, 해당건물에서 실측된 전력소비량의 확률성분이 작아 실온과 제거열량에 미치는 영향이 미미한 것으로 확인되었다.
- (2) 전력소비량에 비례하여 인체발열이 발생하는 것으로 가정하여 인체발열의 확률변동을 함께 고려한 결과, 전력소비량만을 고려한 경우에 비해 제거열량의 평균치는 감소하고, 표준편차는 증가하였다. 평균치 대비 표준편차의 비는, 둘째 날의 경우, 공조시 약 16.3%, 축냉시 약 7.3%로 비교적 큰 수치를 나타내었다.

- (3) 슬래브냉 시스템에 작용하는 외란으로서의 내부 발열은 공조시 뿐 아니라 냉냉시에까지 영향을 미치며, 특히 업무시간대에 재실 인원의 변동이 심한 사무실의 경우, 내부발열의 확률적 성상을 고려하여 냉냉을 실시해야 함을 확인할 수 있었다.

References

1. 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.
2. 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.
3. Yoshida, H. and Terai, T., 1992, Modeling of weather data by time series analysis for air-conditioning load calculations, ASHRAE Trans., Vol. 98, No. 1 pp. 328-345.
4. Jung, J. H. and Shin, Y. G., 2006, A Study on the Optimal Control Strategy of Air-Conditioning System with Slab Thermal Storage : The Difference by the Presence of Radiant Heat as a Criterion Factor, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 287-296.
5. Jung, J. H., 2011, Modeling of Stochastic Properties of Internal Heat Generation of an Office Building for Slab Cooling Storage, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 12, pp. 836-842.
6. Soong, T. T., 1973, Random differential Equations in Science and Engineering, Academic Press.
7. Hokoi, S. I. and Matsumoto, M., 1988, An Analysis of Stochastic Properties of the Heating Load in an Intermittently Air-conditioned Building, Energy and Building, Vol. 106, No. 1, pp. 259-266.
8. Kato, K. I., 1987, Introduction to Optimal Control, Tokyo University Press.
9. Urabe, W., Hokoi, S. I., Shinmura, K. I., Shinkai, K. I., and Kasuya, A., 1997, Thermal Behavior in Air Conditioning System Utilizing Building Thermal Storage : Suggestion of Analysis Model and Comparing Actual Measurement with the Model, Proc. of Kinki Branch, Architect. Inst. of Japan, Vol. 37, pp. 209-212.