대한설비공학회 2008 동계학술발표대회 논문집 pp. 590 ~ 595

08-W-101

슬래브축열 시스템 설계인자의 감도해석

정 재 훈†

호서대학교 건축공학과

A Sensitivity Analysis of Design Factors of Air-Conditioning System with Slab Thermal Storage

Jae-Hoon Jung†

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

ABSTRACT: In this paper, the sensitivity analysis was examined about the main factors that compose an air-conditioning system with slab thermal storage by using the analytic solution. Those factors are the insulation performance of floor slab surface, the slab thickness, the heat capacity of floor slab, the air change rate, and the insulation performance of the wall. The slab thickness and heat capacity of floor slab that minimize heating loads was gained by sensitivity analysis. It is became clear that the insulation performance of slab surface, high airtightness and high heat insulation are important design factors in air conditioning system with slab thermal storage.

Key words: Slab thermal storage(슬래브축열), Design factor(설계인자), Sensitivity Analysis (감도해석)

기 호 설 명

$c\rho$: 용적비열 [J/m^3·K]
g : 단위계단함수 [-]
J : 평가함수 [-]
k : 열관류율 [W/m^2·K]
l : 슬래브 두께 [m]
n : 환기회수 [회/s]
Q : 송풍량 [m^3/s]
r : 가중함수 [-]
S : 면적 [m^2]
t : 시각
u : 공조기 처리열량 [W]
V : 용적 [m^3]

그리스 문자

α : 열전달률 [W/m^2 · K]
θ : 온도 [℃]

하첨자

a : 공기
c : 천정
f : 바닥슬래브
ip : 플레넘측
ir : 집무실측
max : 최대값
o : 외기
p : 플레넘

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

r : 집무실
$r0$: 설정 상수
s : 실온 설정값
w : 벽체

1. 서 론

최근, 슬래브축열 공조시스템이 최대부하삭감 및 심야전력이용 등에 유효하다는 사실이 알려져 있다[1~3]. 그러나 설계와 운용에 있어서 효율적이지 않으면 에너지 과소비시스템으로 전락할 위험이 있다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 슬래브축열 공조시스템의 최적설계를 목적으로 시스템을 구성하는 설계인자들의 감도해석을 실시하였다. Pontryagin의 최대원리에 기초하여 얻어진 해석해[4]를 사용하여 슬래브축열 설계인자의 변화에 따른 평가함수 내의 공조기 처리열량의 변동에 대하여 검토하였다.

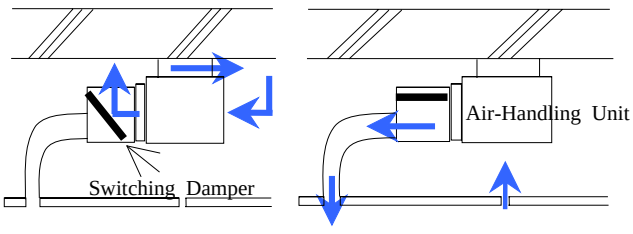
2. 계산개요

2.1 슬래브축열 공조시스템

플레넘내 공기순환식 슬래브축열 공조시스템의 개념도를 Fig. 1에 나타낸다. 주간에는 공조기로부터 취출된 공기가 실내공기와 열교환한 후 천정 플레넘 내로 돌아와 공조기로 흡입되며, 야간에는 변환댐퍼에 의해 송풍방향이 슬래브 하면으로 바뀌어 콘크리트 슬래브에 축냉 혹은 축열한다.

2.2 실 모델

슬래브축열 공조시스템의 실 모델을 Fig. 2에



a) In the nighttime b) In the daytime

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

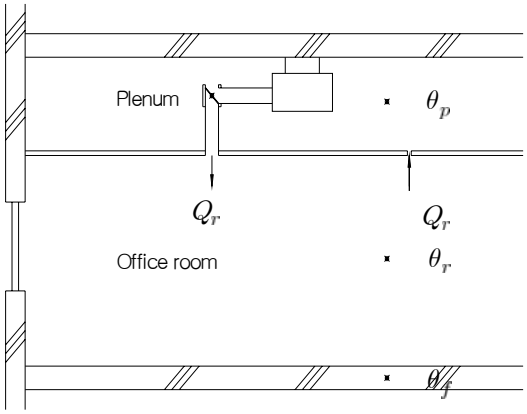


Fig. 2 The room model.

나타낸다. 본 모델에서는 집무실과 플레넘의 2개의 실을 계산대상으로 한다. 계산대상실은 건물의 중간층에 있으며, 상·하층은 계산대상실과 같은 온도 조건인 것으로 한다.

2.3 기초방정식

문제를 단순화하기 위하여 다음의 몇 가지 항목을 설정하였다. 집무실, 플레넘의 공기 및 바닥슬래브를 하나의 격자점으로 가정한다. 집무실과 플레넘 공기의 열용량은 생략하고 바닥슬래브에만 열용량을 적용한다. 외기와 집무실, 플레넘과 집무실과의 열 이동은 열관류저항에 의해 결정되는 것으로 한다. 내주부측과의 경계, 플레넘의 외벽은 완전단열로 가정한다. 공조기의 운전은 축열운전과 공조운전만으로 한다.

이상의 설정하에 집무실 공기, 플레넘 공기, 바닥슬래브에 있어서의 열수지식을 나타내면 다음과 같다.

(1) 바닥슬래브 열평형식

$$c\rho_f l_f \dot{\theta}_f = \alpha_{ip}(\theta_p - \theta_f) + \alpha_{ir}(\theta_r - \theta_f) \quad (1)$$

(2) 집무실 공기 열평형식

$$0 = (S_w k_w + c\rho_a V_r n)(\theta_o - \theta_r) + S_f \alpha_{ir}(\theta_f - \theta_r) + (S_c k_c + c\rho_a Q_r)(\theta_p - \theta_r) + g_r u \quad (2)$$

(3) 플레넘 공기 열평형식

$$0 = S_f\alpha_{ip}(\theta_f - \theta_p) + (S_c k_c + c\rho_a Q_r)(\theta_r - \theta_p) + g_p u \quad (3)$$

2.4 운전방식

취출풍량 Q_r과 공급열량의 ON-OFF를 나타내는 단위계단함수 g_r, g_p는 다음과 같다.

(1) 축열시

$$Q_r = 0,\ g_r = 0,\ g_p = 1 \quad (4)$$

(2) 공조시

$$Q_r = Q_{r0},\ g_r = 1,\ g_p = 0 \quad (5)$$

2.5 평가함수

집무실 공기온도의 설정온도로부터의 편차의 2승과 공조기 처리열량의 합의 적분을 평가함수로 한다.

$$J(u) = \int_{t_0}^{t_f} [r_1(\theta_r - \theta_s)^2 + r_2|u|]dt \quad (6)$$

즉, 식 (6)은 집무실 공기온도의 설정온도로부터의 편차와 공조기 처리열량을 운전시작시각부터 종료시각까지 합계한 것을 의미한다. 식 (6)이 최소가 되도록 공조기 처리열량 u를 결정한다.

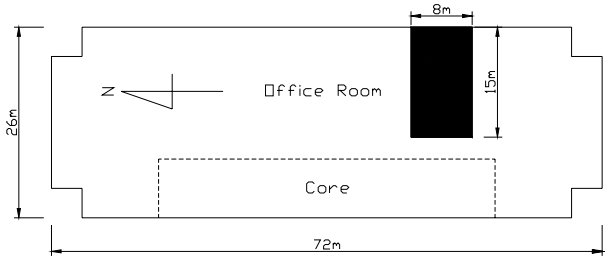


Fig. 3 Plan of typical floor in calculated building.

또한 공조기 처리열량 u는 장치용량을 고려하여 다음과 같은 조건에 의해 제약을 받는 것으로 한다.

$$0 \le u \le u_{\max} \quad (7)$$

3. 계산결과 및 고찰

3.1 계산조건

계산대상실(그림의 검정색 부분)은 Fig. 3과 같은 사무소빌딩의 기준층이며, 남북 및 동서길이는 각각 8m, 15m, 천정 높이 2.6m, 플레넘 높이 1.1m이다.

집무실, 플레넘, 바닥, 벽체의 조건은 Table 1과 같다.

평가함수의 실온항에 대한 가중함수 r_1에 대해서는 공조시에 10.0, 축열시에는 0.0으로 하여, 실온설정시(08:00~22:00)에 대한 가중을 크게 하였다. 한편, 공급열량항에 대한 가중함수 r_2에 대해

Table 1 The values used in calculation

	Symbols	Units	Values
Volumetric specific heat of the air	$c\rho_a$	J/m^3·K	1298.0
Volumetric specific heat of the slab	$c\rho_f$	J/m^3·K	1.423×10^6
Over-all heat transfer coefficient through the room air layer	α_{ir}	W/m^2·K	9.28
Over-all heat transfer coefficient through the plenum air layer	α_{ip}	W/m^2·K	15.08
Air change rate	n	1/s	1.0/3600
Wall area	S_w	m^2	20.8
Floor thickness	l_f	m	0.27
Overall heat transfer coefficient of the wall	k_w	W/m^2·K	4.57
Overall heat transfer coefficient of the ceiling	k_c	W/m^2·K	3.27

서는 하루 종일 1.0×10^{-6}으로 일정하게 한 경우와 심야전력의 사용을 고려하여 축열시의 값을 공조시의 1/3로 하였을 경우를 검토하였다. 설정실온 θ_s는 동절기를 가정하여 23℃로, 취출풍량 Q_r은 0.28 [m^3/s]로 하였다. 일사 및 내부발열은 생략하고, 외기온은 평균치로 하루 종일 0℃로 일정한 경우를 검토하였다.

3.2 계산결과

슬래브축열의 각종 설계인자값을 변화시켜 각각의 경우에 대한 최적공급열량을 최대원리에 기초하여 얻은 해석해를 통하여 결정한다. 축열시 및 공조시의 공조기 처리열량의 적산치와 이들의 합인 총 에너지소비량을 구하여 설계인자 값의 변화에 따른 총 에너지소비량의 변화를 검토한다.

슬래브축열시스템의 설계인자는 건물측의 요인 중 공조기 처리열량에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 다섯가지 요인을 선정하였다. 또한, 주간에 비해 전력요금이 1/3 저렴한 심야전력을 사용했을 경우를 함께 비교 검토하였다.

(1) 바닥슬래브 윗면의 단열성능

바닥 윗면에 단열재를 설치하면 축열시에 바닥 상부로부터 창이나 벽을 통해 외부로 유출되는 열손실을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다. 이에, 바닥 상부를 단열했을 경우를 고려하여 바닥 위쪽의 열전달률을 0.0~11.6 [W/m^2K]으로 변화시켜 최적공급열량을 결정하였다. 심야전력 사용 유무의 경우, 바닥윗면 단열성능에 따른 1일 적산 공조기처리열량을 Fig. 4에 나타낸다.

심야전력을 사용하지 않을 경우, 바닥슬래브 상부의 단열성능이 저하할수록 총 처리열량이 증가하는 결과가 나왔다. 단열성능이 떨어질수록 축열시 바닥슬래브로부터 집무실의 창과 벽을 통하여 외부로 손실되는 열량이 증가하기 때문이다. 바닥슬래브 윗면의 열전달률이 11.6 [Wm^2K]인 경우는 0.0 [W/m^2K]인 경우에 비해 총 처리열량이 약 18,000 [Wh] 증가하였다. 한편, 심야전력을 사용할 경우, 열전달률 0.0에서 11.6까지의 모든 경우에 있어 10시간의 축열시간을 전부 활용하여 축열하므로 축열에 의한 적산 공조기처리열량은 45,000 [Wh]이며 총 에너지소비량의 약

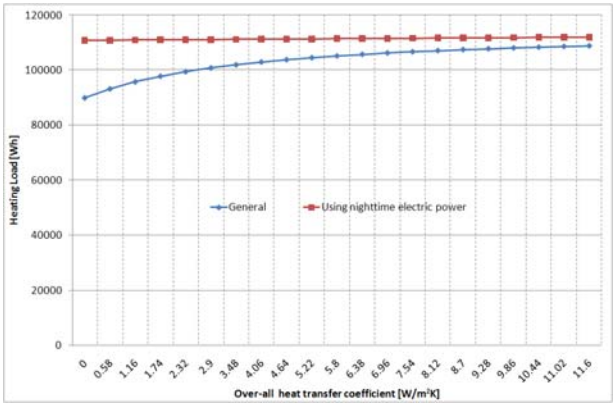


Fig. 4 Fluctuation of the heating load by over-all heat transfer coefficient.

40%에 달한다. 공조시의 처리열량은 바닥슬래브 윗면의 단열성능이 저하함에 따라 증가하나, 최대차가 약 1,000 [Wh]로 소량이다.

종합적으로 볼 때, 슬래브 상부의 단열성능이 에너지절약에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다. 즉, 바닥 윗면의 단열성능은 슬래브축열 시스템 설계에 있어 중요한 요소이나, 심야전력을 사용할 경우, 즉 야간에 충분한 양을 축열할 수 있을 경우에는 그 효과가 그다지 크지 않다는 결과이다.

(2) 바닥슬래브의 두께

바닥 콘크리트슬래브는 슬래브축열 공조시스템의 주된 축열체이며, 슬래브의 두께는 축열용량에 크게 관계할 것으로 생각된다. 바닥슬래브 두께를 7~47cm까지 변화시켜 각 경우에 대한 최적공급열량을 결정하였다. 슬래브두께에 따른 1일 적산 공조기처리열량을 심야전력 사용 유무별로 Fig. 5에 나타내었다.

심야전력을 사용하지 않을 경우, 슬래브두께가 7cm에서 19cm로 증가할 때까지는 적산 공조기처리열량이 증가하는 반면, 두께가 21cm부터는 감소한다. 또한, 심야전력을 사용할 경우, 슬래브 두께 15cm를 기점으로 두께가 얇아질수록, 또는 두꺼워질수록 적산 공조기처리열량은 증가하는 것을 알 수 있다. 심야전력을 사용하면, "(1) 바닥슬래브 윗면의 단열성능"에서와 마찬가지로 저렴한 전력을 활용하여 최대 축열시간인 10시간 축열을 실시하는 결과가 되었다. 슬래브두께가 얇을 경우, 플레넘에서 전달된 열량은 시간이 흐름에 따라 슬래브를 통과하여 위층 집무실로 방

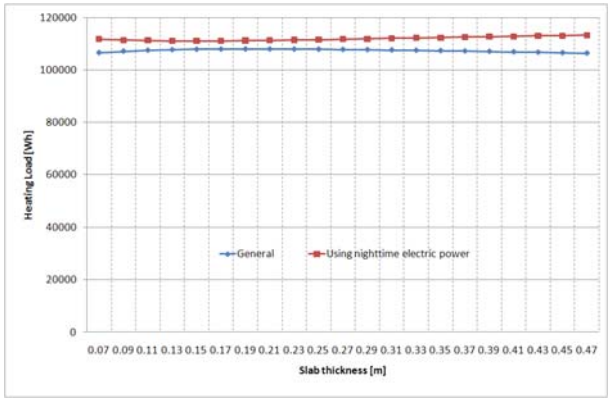


Fig. 5 Fluctuation of the heating load by slab thickness.

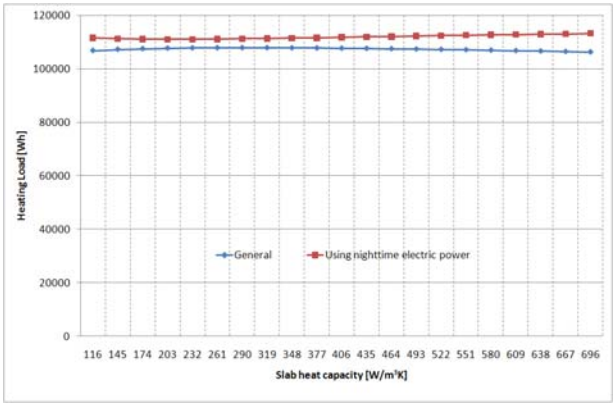


Fig. 6 Fluctuation of the heating load by heat capacity.

열되어 창을 통해 외부로 손실되므로 총 에너지 소비량이 증가한다. 반면, 슬래브두께가 두꺼울 경우, 플레넘에서 슬래브로 전달된 열량은 전체 축열시간인 10시간이 지나도 슬래브를 통과하여 윗층 집무실로 전해지기 어려워, 공조시 소량의 열량이 윗층 집무실로 전달되거나 혹은 역방향으로 진행하여 천장을 거쳐 집무실로 방열되는데 시간이 걸리므로 공조시의 공조기처리열량의 증대를 가져오는 것으로 사료된다.

(3) 바닥슬래브의 열용량

바닥 콘크리트슬래브에 상변화물질인 PCM (Phase Change Material)을 혼합하여 슬래브의 열용량을 향상시켰을 경우를 고려하여 슬래브 열용량을 116 [W/m^{3}K]에서 696 [W/m^{3}K]까지 변화시켜 최적공급열량을 산출하였다. 콘크리트 슬래브의 열용량 변화에 따른 적산 공조기처리열량의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 바닥슬래브의 두께를 변화시켰을 경우와 비슷한 결과임을 알 수 있다.

심야전력을 사용하지 않을 경우, 열용량 290 [W/m^{3}K] 부근에서 적산 공조기처리열량이 최대가 된다. 반면, 심야전력을 사용할 경우, “(2) 바닥슬래브의 두께”에서와 동일한 이유로 슬래브 열용량이 203 [W/m^{3}K]일 때 적산 공조기처리열량이 최소가 되었다.

(4) 환기횟수

환기에 의한 영향을 검토하기 위하여 환기횟수를 0~1 [회/h]로 변화시켜 계산하였다. 환기횟수의 변화에 따른 심야전력 사용 유무의 경우의 적산 공조기처리열량의 변화를 Fig. 7에 나타낸다.

환기횟수가 증가함에 따라 축열시 및 공조시의 공조기처리열량이 함께 증가하므로 심야전력 사용 유무에 관계없이 환기횟수의 증가에 따라 전체 에너지소비량이 증가한다는 것을 알 수 있다.

심야전력을 사용하지 않을 경우, 환기회수가 1 [회/h]일 때는 0 [회/h]일 때에 비해, 약 60,000 [Wh] 증가함을 알 수 있다. 반면, 심야전력을 사용할 경우, 그 차는 20,000 [Wh] 정도로 심야전력을 사용하지 않을 경우의 약 1/3이 됨을 알 수 있다. 이는 10시간 동안 슬래브에 저장된 열량이 공조시 방열됨으로 인한 결과로 사료된다.

또한, 환기횟수에 의한 공급열량에의 영향은 바닥슬래브 상부의 열전달률 및 바닥슬래브 두께, 바닥슬래브의 열용량을 변화시켰을 경우에 비해 대단히 크며, 기밀성을 높이는 것이 슬래브 축열의 설계에 있어 중요한 요소임을 알 수 있

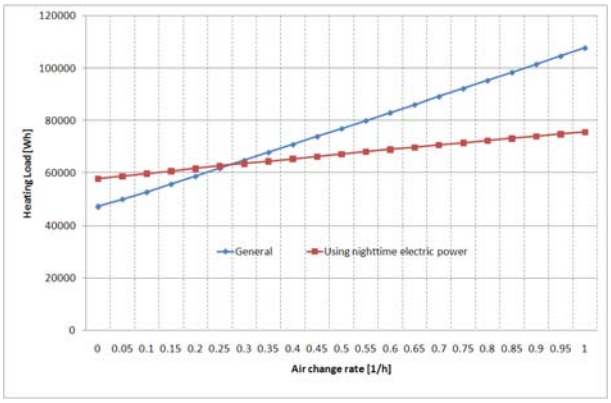


Fig. 7 Fluctuation of the heating load by Air change rate.

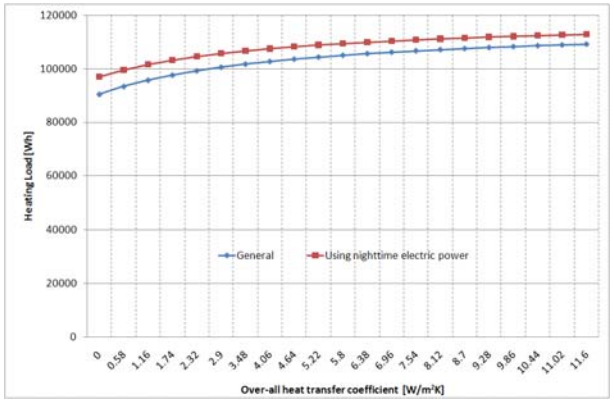


Fig. 8 Fluctuation of the heating load by wall insulation performance.

다.

(5) 외벽의 단열성능

외벽의 단열성능에 의한 영향을 검토하기 위하여, 외벽의 내측에 단열재를 부착했을 경우를 고려하여 실내측 열전달률을 0.0 [W/m^{2}K]에서 11.6 [W/m^{2}K]까지 변화시켜 검토하였다. 열전달률 변화에 따른 적산 공조기처리열량의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 심야전력 사용 유무의 경우 모두 완전단열일 경우의 적산 처리열량이 가장 적으며, 단열성능이 떨어질수록 에너지소비량이 증가함을 알 수 있다. 슬래브축열 공조시스템의 설계에 있어, 고단열이 중요한 설계요소임을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 최대원리에 의한 해석해를 사용하여 슬래브축열 공조시스템의 설계인자에 대하여 감도해석을 실시하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 바닥슬래브 윗면의 단열성능은 축열시 열손실을 억제하는데 효과적인 설계요소이다. 단, 심야전력을 활요하여 다량의 축열이 가능할 경우에 그 효과는 감소한다.

2) 바닥슬래브의 두께 및 슬래브 열용량의 경우, 심야전력을 고려하지 않았을 때 두께는 두꺼울수록 열용량은 클수록 적산 공조기처리열량이 작아지나, 심야전력을 활용한 축열이 가능한 때에는 표준조건을 기준으로 두께는 약 15cm, 열용량은 203 [W/m^{3}K]일 때 적산 처리열량이 최소가 되었다.

3) 건물의 구성요소인 슬래브를 축열체로 사용하는 축열방식인 만큼 환기횟수에 의한 영향은 지대하며, 고기밀 및 고단열이 슬래브축열 공조시스템의 설계에 있어 중요한 설계요소임을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Shinkai, K. I., et al., 2000, Performance evaluation of floor thermal storage system, ASHRAE Transactions, Vol. 106, Part. 1, pp. 311-316.
2. 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.
3. Ishino, H. Y., 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
4. Jung, J. H. and Shin, Y. G., 2006, A Study on the Optimal Control Strategy of Air-Conditioning System with Slab Thermal Storage, Results Influenced by the Choice of a Criterion Function, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18, No. 11, pp. 896-905.
5. Jung, J. H., et al., 2005, Derivation of Optimal Values of Design Factors of the Air-Conditioning System with Slab Thermal Storage by Simulation, Proceeding of Annual Conference in AIK, Vol. 25, No. 1, pp. 179-182.
6. Pontryagin, L.S., Boltyanskii, V.G., Gamkrelidze, R.V. and Mishchenko, E.F., 1986, L.S. Pontryagin selected works, Volume 4, The mathematical theory of optimal processes, Gordon and Breach Science Publishers.