

슬래브축열 공조시스템의 축열성능에 관한 실험적 연구

정재훈[†], 신영기^{*}

세종대학교 세종-록히드마틴 우주항공연구소, ^{*}세종대학교 기계공학과

An Experimental Study on Thermal Storage Performance of an Air Conditioning System with Slab Thermal Storage

Jae-Hoon Jung[†], Young-Gy Shin^{*}

Sejong-Lockheed Martin Aerospace Research Center, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

^{*}Department of Mechanical Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

(Received January 10, 2005; revision received March 10, 2005)

ABSTRACT: This paper investigates the thermal storage performance of the office building which has adopted an air conditioning system with its slab structure as a regenerator. Four cases of the thermal storage performance experiment were conducted. Room air temperatures, floor slab temperatures, temperatures around the air conditioning unit were logged and analyzed. The load handling capacity of the air conditioning unit and the amount of heat stored in the slab were decided from those experiments. Several efficiencies were investigated to evaluate the performance of the thermal storage. The results concluded that the slab as a regenerator is very effective in cutting down peak loads of the office building.

Key words: Thermal storage performance(축열성능), Slab thermal storage(슬래브축열), Cutting peak load(피크부하삭감), Nighttime electric power(심야전력)

기 호 설 명

그 리 스 문 자

$c\rho_a$: 공기의 용적비열 [$J/m^3 \cdot K$]

$c\rho_f$: 콘크리트의 용적비열 [$J/m^3 \cdot K$]

Q : 공조기 처리열량 [W]

Q_s : 축·방열량 [W]

V : 송풍량 [m^3/s]

V_f : 바닥슬래브의 체적 [m^3]

θ_{ra} : 공조기 흡입공기온도 [$^{\circ}C$]

θ_{sa} : 공조기 취출공기온도 [$^{\circ}C$]

$\Delta\theta_f$: 바닥슬래브의 단위시간당 온도변화율 [$^{\circ}C/s$]

1. 서 론

냉난방 피크부하를 줄이기 위해 예전부터 사용되어 온 축열조 대신 콘크리트의 열용량에 착안하여 바닥슬래브와 벽체 등 건물구조물의 축열체 이용 가능성에 대한 연구가 진행되어 왔다.^(1,2) 최근에는 건물의 구조물 중 특히 바닥슬래브를 주요 축열체로 하여 천정의 플레넘(plenum)에 실내기를 설치하고 덕트 내 덤퍼의 개폐에 의해 야간

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-3408-3897; fax: +82-2-3408-3895

E-mail address: jhjung@sejong.ac.kr

에는 슬래브에 축열하고 주간에는 실내에 냉·온풍을 취출하는 플레넘 내 공기순환식 슬래브축열 공조시스템에 대한 연구가 이루어지고 있다.^(3,4) Roh and Udagawa⁽³⁾는 공조기부하 시뮬레이션을 통해 슬래브축열의 운전방법, 실내발열 및 건물의 열적사양 등이 슬래브축열 공조시스템의 성능에 미치는 영향을 검토하였다. Lim et al.⁽⁴⁾은 슬래브축열의 축열시간에 따른 실내수직온도분포와 온열환경특성, 에너지소비량 등을 검토하였다.

그러나 슬래브축열 시스템의 설계 및 운용에 있어서 가장 중요한 요건이라고 할 수 있는 축열체 슬래브의 축·방열량 및 축열성능에 대한 검토는 아직 미흡하다고 할 수 있다. 이러한 관점에서, 본 논문은 슬래브축열 시스템을 도입한 사무용 건물을 대상으로 축열운전에 따른 슬래브축열체의 시간적 온도변화, 축·방열량 및 축열성능을 검토하여 시스템설계 및 최적운전방책수립을 위한 기초자료로 삼고자 하는 것이다.⁽⁵⁾

2. 실험개요

2.1 측정대상 건물 및 슬래브축열 공조시스템

측정대상 건물은 동경에 위치한 지하 1층, 지상 8층의 사무소 건물이다. 연면적은 약 4,000m²이며 열원으로는 빙축열식 공랭 열펌프 시스템을 도입하고 있다.

측정은 5층 사무실에서 이루어졌으며, 사무실 공간은 측정 당시 미사용 상태에 있었다. 5층 평면도를 Fig.1에 나타낸다. 측정대상 구역은 사선이 쳐져 있는 4.8m×7.1m 부분이다.

천장취출식 슬래브축열 공조시스템의 개념도를 Fig.2에 나타낸다. 주간에는 공조기로부터 취출된 공기가 실내공기와 열교환한 후 천장 플레넘 내로 돌아와 공조기로 흡입되며, 야간에는 변환댐퍼에 의해 송풍방향이 바뀌어져 슬래브 하면에

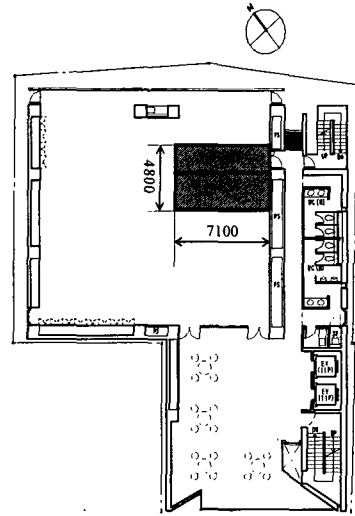
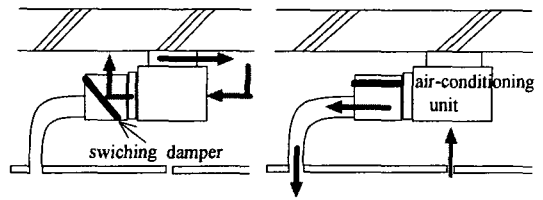


Fig. 1 The 5th floor plan.



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

Fig. 2 The schematic of air-conditioning systems with slab structure as a regenerator.

냉·온풍을 취출하여 축냉·축열한다.

2.2 운전스케줄

측정은 2002년 7월 8일(월)부터 8월 10일(토)까지 5주간 실시되었다.

축열운전은 운전종료시각을 아침 8시(심야전력 종료시각)로 하여 8시까지의 축열시간을 주마다

Table 1 Operation schedule

	Date	Thermal storage time	Time period
First week	July 8~July 12	5 hours	03 : 00~08 : 00
Second week	July 15~July 19	10 hours	22 : 00~08 : 00
Third week	July 22~July 26	2 hours	06 : 00~08 : 00
Fourth week	July 29~Aug. 2	-	-
Fifth week	Aug. 5~Aug. 9	5 hours	03 : 00~08 : 00

변경하였다. 축열운전중 실내기는 정풍량이었으며, 취출구온도는 장치용량과 특성에 따라 정해진다. 설정축열시간은 0시간(무축열), 2시간, 5시간, 10시간의 네 가지 패턴이었다. 또한 첫째 주의 5시간 축열의 경우, 바닥슬래브의 초기상태와 내부발열 등의 조건이 다른 케이스와 달랐기 때문에 5주째에 5시간 축열실험을 한번 더 실시하였다. Table 1에 축열운전 스케줄을 나타낸다.

공조운전은 근무시간인 아침 9시 30분부터 저녁 18시 30분까지로 하였다. 공조기의 흡입구온도는 실온계측 지점이 대략 26℃가 되도록 24℃로 설정했다. 또한, 공조시 내부발열을 재현하기 위해 760 W 히터 12대로 약 30 W/m²의 열을 발생시켰다. 실내조명은 모두 점등하였다.

2.3 온도측정 지점

측정항목은 바닥슬래브 온도, 공조기 주변온도 및 실내온도이다. 바닥슬래브 온도는 내주부의 보로 둘러싸인 존을 대상으로 하였다. 바닥슬래브 온도의 측정 지점을 Fig.3에 나타낸다.

측정대상 존 슬래브 내에는 가로 630 mm, 세

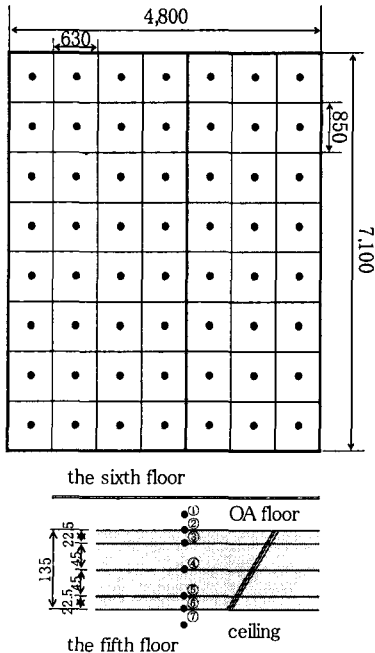


Fig. 3 The measurement points of floor slab temperature.

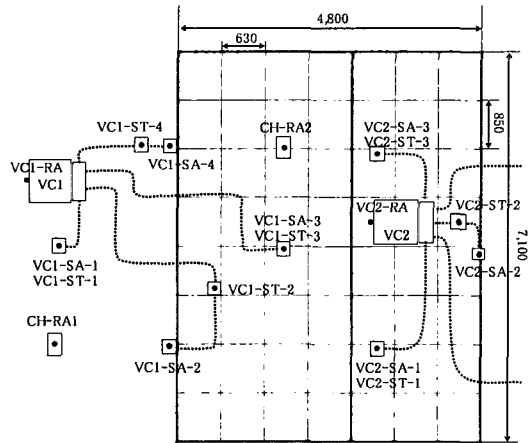


Fig. 4 The measurement points of air temperature around the air conditioning units.

로 850 mm, 상하 45 mm 간격으로 상중하 3점(③~⑤)에 열전대가 매설되어 있어, 5분 간격으로 측정데이터가 전송된다. 슬래브 내 온도 외에 슬래브 상하 표면온도(②, ⑥), 슬래브 상하 주변 공기온도(①, ⑦)도 측정했다.

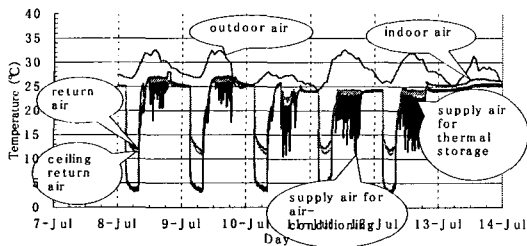
공조기 주변온도의 계측 지점을 Fig.4에 나타낸다. 측정대상 공조기는 2대이며 공조기의 덕트 9개 중 7개가 측정대상이다. 그림의 VC1, VC2는 실내기를, CH-RA, VC-RA, VC-ST, VC-SA는 각각 천장리턴온도, 공조기흡입온도, 축열용 취출온도, 공조용 취출온도를 나타낸다.

실내공기온도로는 실 중앙의 상하 2점의 온도를 측정했다. 측정 지점의 높이는 각각 100 mm, 1,100 mm였다.

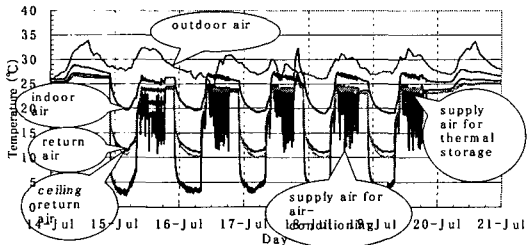
3. 실험결과 및 고찰

3.1 실온 및 공조기 주변온도

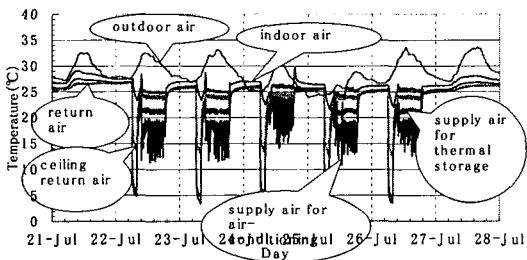
측정기간 중의 외기온, 실온(높이 1,100 mm) 및 공조기 주변온도를 Fig.5에 나타냈다. 측정기간은 전형적인 성하(盛夏)였으며, 외기온은 대체로 25~35℃의 범위 이내였다. 각 실험 케이스에 있어 외기온에 다소의 차이는 있으나, 주 단위로는 그리 큰 차가 없다. 또한, 측정대상 실내는 개구부가 크지 않으므로 일사를 포함한 외기 기상조건의 차이는 그다지 크지 않았을 것으로 사료된다. 실내온도는 축열시에 취출구 온도의 저하에 따라



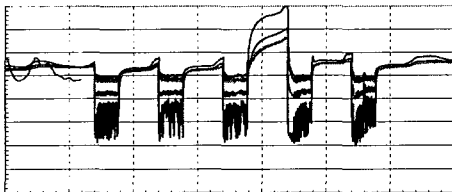
(a) First week - 5 hours thermal storage



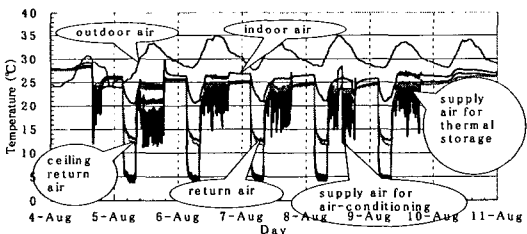
(b) Second week - 10 hours thermal storage



(c) Third week - 2 hours thermal storage



(d) Fourth week - no thermal storage



(e) Fifth week - 5 hours thermal storage

Fig. 5 Room air temperature and air temperature around the air-conditioning unit.

서서히 내려가, 2시간 축열로 약 23℃, 5시간 축열로 약 21℃, 10시간 축열로 약 19℃까지 내려간다. 공조시에는 대략 25~26℃의 범위 내로 유지되고 있다. 단, 7월 17일, 24일, 31일의 오후 무운전시에 있어서는 실의 사용상황이 다른 날과 달랐기 때문에 다른 형태의 실온이 얻어졌다.

공조기 주변온도의 경우, 축열시에 공조기의 흡입구 온도가 내려가고 그에 따라 취출구 온도가 내려간다. 축열시의 취출구 온도는 축열개시 2시간만에 5℃ 정도까지 내려가고 10시간 축열의 경우 최저 3℃까지 내려간다. 또한 3℃의 공기를 취출하고 있을 때의 공조기 흡입온도는 11℃ 정도로 공조기 냉방능력인 흡입구와 취출구의 온도차는 약 8℃ 정도임을 알 수 있다. 공조시의 공조기 취출온도는 저부하로 인해 제어상 크게 변동하는 결과가 되었다.

3.2 공조기 처리열량

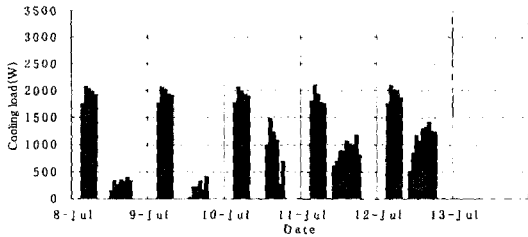
축열시와 공조시에 공조기가 처리한 열량을 다 음식과 같이 공조기 흡입공기온도와 취출공기온도의 차로 평가한다.

$$Q = c p_a V (\theta_{ra} - \theta_{sa}) \quad (1)$$

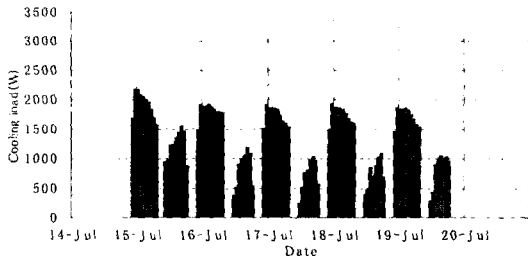
대상면적당 공조기 처리열량을 Fig. 6에 나타낸다. 공조기의 송풍량은 측정대상실과 공조기의 대수로부터 산정하여 0.19 m³/s로 했다. 축열일의 경우, 공조기 처리열량의 피크는 모두 야간에 발생하고 있으며 그 값은 대략 1,900~2,100 W 정도이다. 또한, 주간의 공조기 처리열량은 야간의 축열 정도를 반영하여 축열시간이 길수록 작아지는 경향을 보인다. 다만, 7월 8, 9일의 경우에는 내부발열을 상정하지 않았기 때문에 주간의 부하가 작고 다른 날에 비해 공조기의 처리열량이 적다. 또한, 8월 1일은 다른 날과 달리 전날 밤의 사무실 이용상황이 달랐기 때문에 주간의 부하가 컸다.

3.3 바닥슬래브 온도

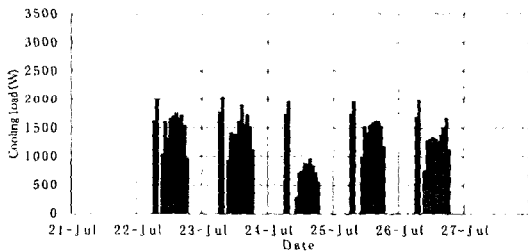
바닥슬래브 및 슬래브 주변온도의 시간변화를 Fig. 7에 나타냈다. 여기서 바닥슬래브(슬래브 밑 표면, 슬래브 위 표면, 슬래브 내 상·중·하)의



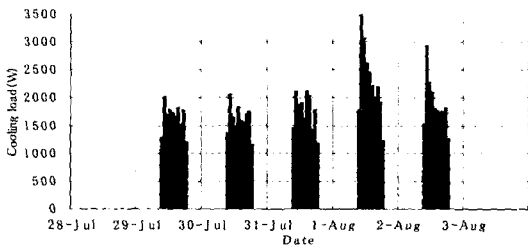
(a) First week - 5 hours thermal storage



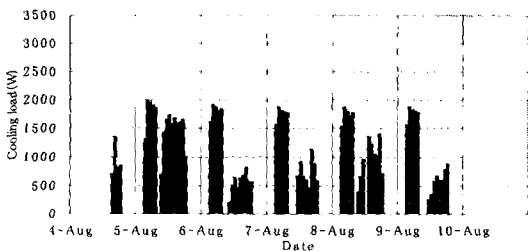
(b) Second week - 10 hours thermal storage



(c) Third week - 2 hours thermal storage

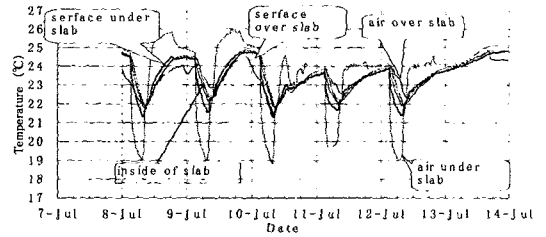


(d) Fourth week - no thermal storage

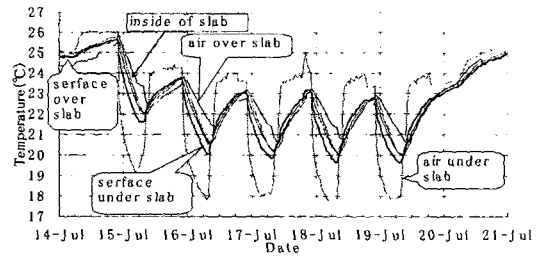


(e) Fifth week - 5 hours thermal storage

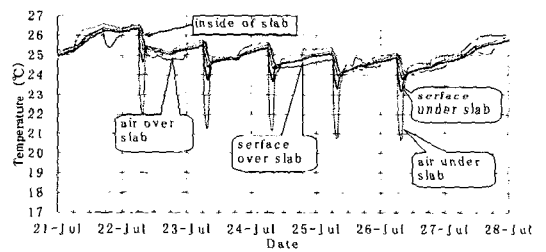
Fig. 6 The load handling capacity of the air-conditioning unit.



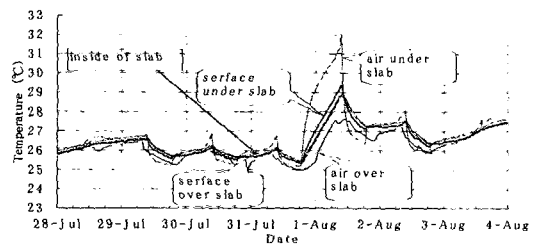
(a) First week - 5 hours thermal storage



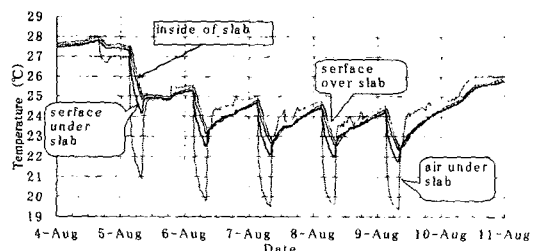
(b) Second week - 10 hours thermal storage



(c) Third week - 2 hours thermal storage



(d) Fourth week - no thermal storage



(e) Fifth week - 5 hours thermal storage

Fig. 7 The time variation of floor slab temperature.

온도는 측정점 56점의 평균 온도이다.

축열시에는 슬래브 아래측 공기온도가 가장 먼저 낮아지고 그에 따라 슬래브 온도도 하강한다. 슬래브 내 온도는 평균적으로 2시간 축열에 약 1℃, 5시간 축열에 약 2℃, 10시간 축열에 약 3℃ 정도 저하한다. 또한, 슬래브 내의 상·중·하 3점의 온도차는 1℃ 미만으로 크지 않다.

슬래브 밑 주변온도는, 예를 들어 10시간 축열의 경우 최저가 18℃ 정도이며 공조기 흡입온도와 차가 크다(7월 16일 08:00시의 공조기 흡입온도는 11.2℃, 슬래브 밑 주변공기온도는 18.2℃이며, 그 차는 7℃나 된다). 이것은 취출된 공기가 슬래브 하면에 직접 부딪치지 않으며, 플레넘 내의 높이에 따른 온도분포가 큰 것을 의미한다. 취출공기가 슬래브 하면에 직접 닿지 않는 이유는 실내기로부터 송풍된 공기가 4, 5개의 취출구로 분산되었기 때문에 풍량과 풍속이 저하된 것을 들 수 있다.

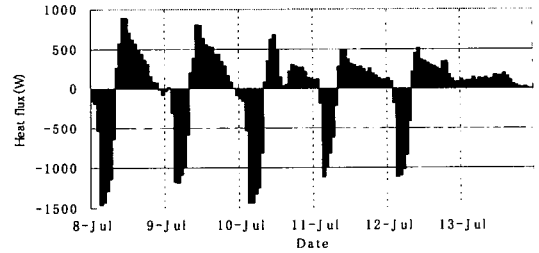
3.4 축·방열량

다음 식과 같이 바닥슬래브 온도의 시간변화로 부터 슬래브의 축·방열량을 산출한다. 온도가 하강한 경우(축열)를 마이너스(-), 상승한 경우(방열)를 플러스(+)로 표현한다.

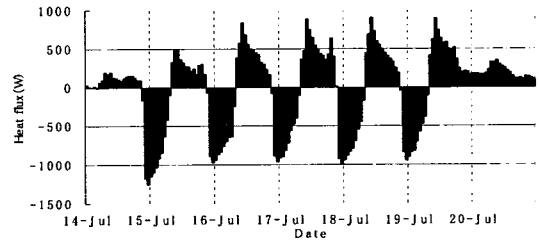
$$Q_s = c\rho_f V_f \Delta\theta_f \quad (2)$$

각 실험케이스의 바닥슬래브 축·방열량을 Fig. 8에 나타낸다. 축열 개시 직후의 최대축열량은 1.0~1.5kW이며, 그 뒤 축열량은 서서히 감소된다. 5시간과 10시간 축열의 경우, 축열운전 종료와 더불어 방열이 시작되어 2~3시간 후인 오전 10~12시 사이에 방열량은 피크에 달한다. 한편, 2시간 축열의 경우, 공조시의 방열량이 적으며 월요일에는 공조시에도 슬래브온도가 플레넘 내의 공기에 의해 낮아지는 것을 알 수 있다. 이것은 토요일과 일요일의 무운전으로 인해 상승한 슬래브온도를 2시간 축열로는 충분한 정도로 낮출 수 없었기 때문이다.

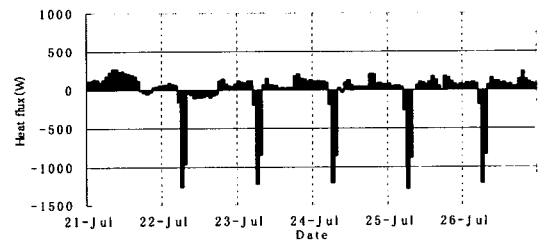
한편, 무축열의 경우에는 주간 공조시 슬래브가 차가워지고, 공조 종료시부터 따뜻해지는 축열시와는 반대현상이 일어나고 있다. 이 경우, 주간의 축열은 이른바 간헐공조시의 축열부하에 해당한다.



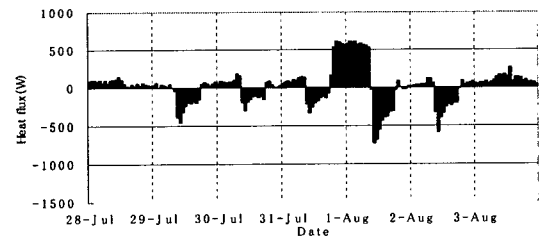
(a) First week - 5 hours thermal storage



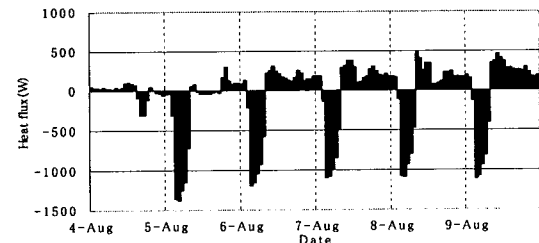
(b) Second week - 10 hours thermal storage



(c) Third week - 2 hours thermal storage



(d) Fourth week - no thermal storage



(e) Fifth week - 5 hours thermal storage

Fig. 8 The amount of thermal storage of the floor slab.

Table 2 Ratio of the heat stored in the floor to heat input

		MON	TUE	WED	THU	FRI	Average (%)
5 hours (first week)	Input heat (kJ)	35252	35075	34919	33908	35160	52.8
	Storage (kJ)	21502	18163	22632	13633	16174	
	Ratio (%)	61.0	51.8	64.8	40.2	46.0	
10 hours	Input heat (kJ)	69558	65835	62888	63505	62463	40.8
	Storage (kJ)	31183	27090	24362	26104	23781	
	Ratio (%)	44.8	41.1	38.7	41.1	38.1	
2 hours	Input heat (kJ)	13065	13823	13399	13417	13216	56.7
	Storage (kJ)	7971	7397	7416	7770	7366	
	Ratio (%)	61.0	53.5	55.3	57.9	55.7	
5 hours (fifth week)	Input heat (kJ)	32788	32758	31877	31527	32025	53.7
	Storage (kJ)	21172	17681	16276	15785	15662	
	Ratio (%)	64.6	54.0	51.1	50.1	48.9	
Average (%)		57.9	50.1	52.5	47.3	47.2	

다음으로 축열시의 공조기 처리열량 중 어느 정도가 바닥슬래브에 축열되었는가를 검토한다. 축열시의 공조기 처리열량과 슬래브의 축열량 및 그 비율(이하, 축열투입열량비율이라 부름)을 Table 2에 나타냈다. 축열시간별 평균으로 보면, 2시간 축열의 경우 약 57%, 5시간 축열의 경우 약 53%, 10시간 축열의 경우 약 41%이며, 축열시간이 길어질수록 축열투입열량비율은 작아짐을 알 수 있다.

또한, 요일별 축열투입 열량비율은 주초(週初)가 가장 크고 점차 작아지는 경향이 보인다. 특히 월요일의 경우, 10시간 축열을 제외하면 모두 60%를 넘는다. 평균으로 보아도 월요일에는 약 58%, 금요일에는 약 47%로, 월요일이 금요일에 비해 10% 정도 큼을 알 수 있다. 토요일과 일요일의 무운전으로 인해 슬래브온도가 높아지고 그 결과 플레넘 공기와의 온도차가 커져 열전달이 활발해지기 때문이다.

전반적으로 보면, 축열투입 열량비율은 대략 50% 정도로, 야간에 공조기가 처리한 열량의 반 정도가 바닥슬래브에 축열된 셈이 된다.

3.5 슬래브축열의 각종 효율

실험대상 빌딩에 있어서의 슬래브축열 공조시스템의 성능을 평가하기 위해 각종 지표를 다음과 같이 정의하였다.

(1) 피크삭감률 α : 주간 공조기 처리열량의 피

크치(1시간 적산치의 최대치)가 무축열일에 비해 어느 정도 삭감되었는가를 평가한다.

$$\alpha = \left(1 - \frac{\text{축열일의 주간피크 처리열량}}{\text{비축열일의 주간피크 처리열량}} \right) \times 100 \quad (3)$$

(2) 야간이행률 β : 무축열일에 비해 주간 공조기 적산부하가 어느 정도 삭감되었는가를 평가한다.

$$\beta = \left(1 - \frac{\text{축열일의 주간적산 처리열량}}{\text{비축열일의 일적산 처리열량}} \right) \times 100 \quad (4)$$

(3) 슬래브축열효율 γ : 야간에 축열함으로써 주간의 공조기 처리열량이 무축열일에 비해 어느 정도 삭감되었는지 야간의 공조기 처리열량으로 평가한다.

$$\gamma = \frac{\left(\frac{\text{비축열일의 일적산 처리열량}}{\text{축열일의 야간적산 처리열량}} \right) - \left(\frac{\text{축열일의 주간적산 처리열량}}{\text{축열일의 일적산 처리열량}} \right)}{\text{축열일의 야간적산 처리열량}} \times 100 \quad (5)$$

(4) 야간부하율 δ : 슬래브축열일의 1일 공조기 처리열량에 대한 야간 공조기 처리열량의 비율을 말한다.

$$\delta = \frac{\text{축열일의 야간적산 처리열량}}{\text{축열일의 일적산 처리열량}} \times 100 \quad (6)$$

Table 3 Efficiencies of slab thermal storage

	2 hours	5 hours	10 hours
Efficiency of peak load cut	23.4	35.7	42.6
Efficiency of shifting daytime load	23.6	42.5	54.9
Efficiency of slab thermal storage	103.2	77.3	50.1
Daily proportion of nighttime load	24.1	45.4	71.4
Ratio of increment of air-conditioning load	-0.7	1.7	55.7

(5) 1일 공조기부하 증가율 ϵ : 축열일의 1일 공조기 처리열량이 무축열일의 공조기 처리열량에 비해 얼마나 증가했는지를 평가한다.

$$\epsilon = \left(\frac{\text{축열일의 일적산 처리열량}}{\text{비축열일의 일적산 처리열량}} - 1 \right) \times 100 \quad (7)$$

이상의 계산식에 근거하여 각 축열시간별 슬래브축열의 각종 효율을 Table 3에 나타낸다. 단, 비축열일의 1일 적산처리열량 및 주간 피크처리열량으로는 7월 30일(화)의 데이터를 사용하였다. 또한, 5시간 축열에 관해서는 실험조건이 일부 달랐던 첫번째 주 대신 다섯번째 주의 데이터를 사용했다.

피크삭감률, 야간이행률의 경우, 축열시간이 길어질수록 커짐을 알 수 있다. 슬래브축열에 의한 주간 피크부하의 삭감과 야간이행효과를 알 수 있다.

슬래브축열효율은 축열시간이 길어질수록 떨어지고, 야간부하율은 축열시간이 길어질수록 커지는 경향이 보인다. 단, 2시간 축열의 경우, 슬래브축열효율이 100%를 넘는 결과가 나왔는데, 이는 평가기준인 무축열일(7월 30일)의 외기에 의한 부하가 2시간 축열 주에 비해 약간 컸던 것과 무축열일의 공조시 실내온도가 2시간 축열일에 비해 약간 낮게 제어되었기 때문으로 사료된다.

1일 공조기부하 증가율은 2시간과 5시간 축열의 경우, 무축열과 비슷한 정도이지만, 10시간 축열의 경우 무축열에 비해 대략 50% 정도 증가하는 결과가 되었다. 본 실험에 있어서 실내가구 등에 의한 열용량의 재현이 없었으므로 야간축열시 실내로 샌 냉기가 실내의 가구 등에 축적되지 않고 실외로 누출되었기 때문으로 생각된다. 또한, 2시간 축열의 경우 1일 공조기부하 증가율이 낮이 음수가 되었는데, 이는 2시간 축열의 슬래브축열효율이 100%를 초과한 이유와 같은 맥락으로 생각할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 슬래브축열 공조시스템을 도입한 사무용 빌딩을 대상으로 슬래브축열의 하계실험 및 그 결과에 대하여 기술하였다. 실험기간은 전형적인 성하였으며, 축열운전패턴은 각각 무축열, 2시간 축열, 5시간 축열, 10시간 축열이었다. 실험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 종래의 간헐공조운전에 비해 슬래브축열 2시간으로 약 23%, 5시간으로 약 36%, 10시간으로 약 43%의 피크부하삭감이 가능하다.

(2) 야간에 공조기가 처리한 열량 중 바닥슬래브에 축열된 양은 2시간 축열로 약 57%, 5시간 축열로 약 53%, 10시간 축열로 약 41%였다.

(3) 1일 공조기부하 적산량의 경우, 2시간과 5시간 축열은 무축열과 비교해 큰 차이가 없으나, 10시간 축열은 50% 정도 증가했다.

(4) 슬래브축열 공조시스템은 피크부하의 야간이행효과를 살려 심야전력을 이용한 코스트 다운을 달성할 수 있으나, 에너지 다소비 시스템으로 전략할 우려도 있으므로 축열시의 열손실을 고려한 적절한 운전(최적제어)이 필요하다.

후 기

슬래브축열 공조시스템에 대한 조언과 데이터를 제공해 준 (株)竹中工務店の 中村 愼 박사에게 감사의 뜻을 표합니다. 이 논문의 일부는 2004년도 한국학술진흥재단의 지원으로 이루어졌습니다 (KRF-2004-005-D00247).

참고문헌

1. Ruud, M. D., Mitchell, J. W. and Klein, S. A., 1990, Use of building thermal mass to offset cooling loads, ASHRAE Transactions,

- Vol. 96, No. 2, pp. 820-829.
2. Snyder, M. E. and Newell, T. A., 1990, Cooling cost minimization using building mass for thermal storage, ASHRAE Transactions, Vol. 96, No. 2, pp. 830-838.
 3. Roh, H. W. and Udagawa, M. H., 2001, Simulation study on the performance of a fabric heat storage system, Transactions of AIJ, No. 544, pp. 31-38.
 4. Lim, J. H., Lee, S. H., Kim, S. H., Chung, K. S. and Yee, J. J., 2002, A study on the potentiality for the thermal storage of effect with air-conditioning system, Proceedings of the SAREK 2002 Winter Annual Conference, pp. 569-574.
 5. Jung, J. H., 2004, Fundamental study into optimized control for air-conditioning system with floor thermal storage, Ph.D. thesis, University of Kyoto, Kyoto, Japan.