

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 21, No. 4, 2001

장파장 천공 복사에 의한 냉각 효과에 관한 연구

김진호*, 유지용**, 서승직***

* 인하대학교 건축공학과 대학원

** 한국에너지기술연구원

*** 인하대학교 건축공학과

A Study of the Cooling Effect by the Long-wave Sky Radiation

J.H. Kim^{*}, J.Y. Yu^{**}, S.J. Suh^{***}

* *Department of Architectural Engineering, Graduate School, Inha University*

** *Korea Institute of Energy Research*

*** *Department of Architectural Engineering, Inha University*

Abstract

The authors carried out a study on the cooling effect of radiant cooling system using the metallic lightweight radiator for cooling energy saving in building. The radiant cooling performance was examined, analyzed, and presented through the case study. In this study, the cooling effect of various factors was analyzed, especially in a thin plate above the roof. These numerical results can be used as the basic design data for application of radiant cooling system. As a result of these researches, the system was verified to be an available cooling energy sources for improvement of indoor environment in summer.

Finally, to complete the system can be suitable for Korean climate conditions, experimental study should be performed on the basis of these results.

Nomenclature

- A_g : 벽체 면적(m^2)
- C_b : 흑체의 복사정수($10^8 \cdot \sigma_b$)
- C_p : 비열(kcal/kg $^\circ C$)
- CC : 운량
- d : 두께(m)
- D_h : 수력 지름(m)
- F : 형태계수
- g : 중력 가속도(m/s^2)
- h : 높이(m)
- hw : 대류 열 전달 률(kcal/ $m^2h^\circ C$)
- hr : 복사 열 전달 계수(kcal/ $m^2h^\circ C$)
- I : 일사량(kcal/ m^2h)
- k : 열전도율(kcal/ $mh^\circ C$)
- l : 길이(m)
- L : 두께(m)
- M : 질량 유량(kg/s)
- T : 온도(K)
- t : 시간 (s)
- V : 체적(m^3)
- v : 유속(m/s)
- w : 유체 입구 둘레(m)
- x : 거리(m)

Greek Letters

- α, τ : 방사체의 흡수율
- β : 체적 팽창 계수($1/^\circ C$)
- δ : 구조체의 두께(m)
- Δ : 간격
- ϵ : 표면의 복사율
- ρ : 밀도(kg/ m^3)
- μ : 점성 계수(kg/ $m \cdot s$)
- ν : 동점성 계수(m^2/s)

Dimensionless Number

- Re : Reynolds number
- Gr : Grashof number
- Pt : Prandtl number

Subscript

- a : 외기
- air : 내부 공기
- al : 알루미늄
- c : 콘크리트
- cloud : 구름 낀 하늘
- dp : 이슬점
- ins : 단열재
- j=1,2,3.. : 구조체 내부 각 절점
- i=1,2,3.. : 유체 내부 각 절점
- room : 실내
- roof : 지붕
- s : 방사체 표면
- sky : 천공

1. 서 론

1.1 연구의 목적

건물에서 연간 많은 양의 에너지가 냉난방을 위한 에너지로 소비되고 있으며, 이러한 에너지를 건축적인 방법(Passive Control System)을 이용하여 보다 효과적으로 줄이려는 노력이 건축가들에 의해 끊임없이 이루어지고 있다. 특히 여름철 일사에 의해 뜨거워지는 실내 환경을 거주와 작업에 적합한 환경으로 만들기 위해 막대한 에너지를 냉방부하를 감당하는데 소비하고 있다. 따라서 자연 에너지를 이용하여 실내의 냉방부하를 줄일 수 있는 응용방법에 관한 연구는 궁극적으로 환경 건축을 실현하는 길이기도 하다. 연구에

서는 기존의 콘크리트 방사체의 실험 모델과 수치 해석된 결과를 통하여 야간 방사체의 냉각 효과에 대한 가능성을 고찰하였다. 특히 복사 냉각 시스템의 건물 응용을 위하여 경량의 금속 방사체 시스템의 응용 모델을 제안하고 이 모델을 통하여 우리나라 기후 조건에서의 복사냉각 효과와 복사냉각 시스템의 건물 응용을 위한 기본적인 연구를 수행하였다.

2 복사 냉각 효과³⁾

2.1 방사체의 복사 냉각 효과 분석

본 논문에서는 기존 연구의 결과를 통하여 방사체의 냉각 효과를 고찰하고 복사냉각 시스템의 응용에 따른 적용 가능성을 분석하고자 한다. 그림 1은 실험 모델로써 흑체로 가정된 천공에 노출된 콘크리트 구조체를 방사체로 하여 방사체에서의 냉각 효과를 실험과 수치해석을 통하여 분석한 것으로 제시된 모델은 선행 연구에서 채택된 것이다.

2.2 수학적 모델과 열수지식

그림 2는 방사체의 수학적 모델을 나타낸 것으로 각 층의 온도변화는 그 층에 출입하는 정미열량과 같다고 보면 각 층의 열수지식은 다음과 같다.

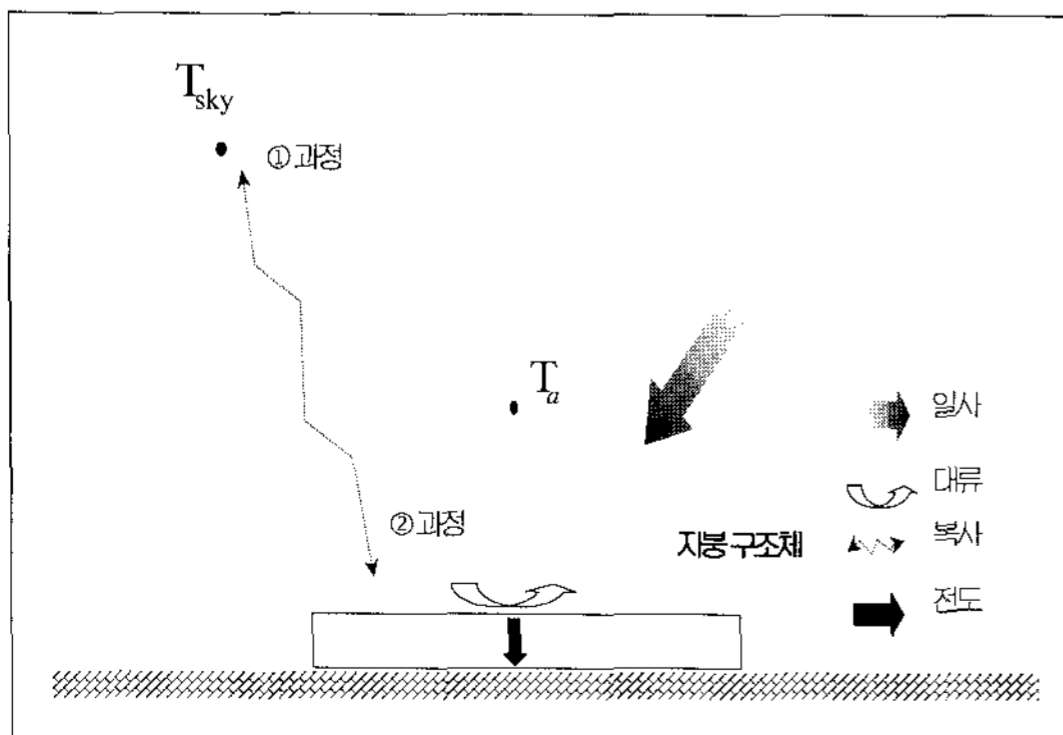


Fig. 1. 방사체의 복사 냉각 실험 모델

콘크리트 방사체 표면

$$0.5d_1\rho_1Cp_1\frac{dT_{sl}}{dt} = [(F_{s-sl}\epsilon_s\epsilon_{sl}C_b((\frac{T_{sky}}{100})^4 - (\frac{T_{sl}}{100})^4)) + hv_o(T_o - T_{sl}) + \alpha I + \frac{k_1}{d_1}(T_1 - T_{sl})] \quad (1)$$

방사체 내부

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{\frac{k_{j+1}}{d_{j+1}}(T_{j+1} - T_j) - \frac{k_j}{d_j}(T_j - T_{j-1})}{0.5(d_j\rho_jCp_j + d_{j+1}\rho_{j+1}Cp_{j+1})} \quad (2)$$

단열재 표면

$$\frac{dT_{s2}}{dt} = \frac{hv_o(T_o - T_{s2}) - \frac{k_4}{d_4}(T_{s2} - T_4)}{0.5d_4\rho_4Cp_4} \quad (3)$$

천공 온도(Clark & Allen)

$$T_{sky} = [0.787 + 0.764 \ln((T_{dp} + 273)/273)]^{(1/4)} T_a \quad (4)$$

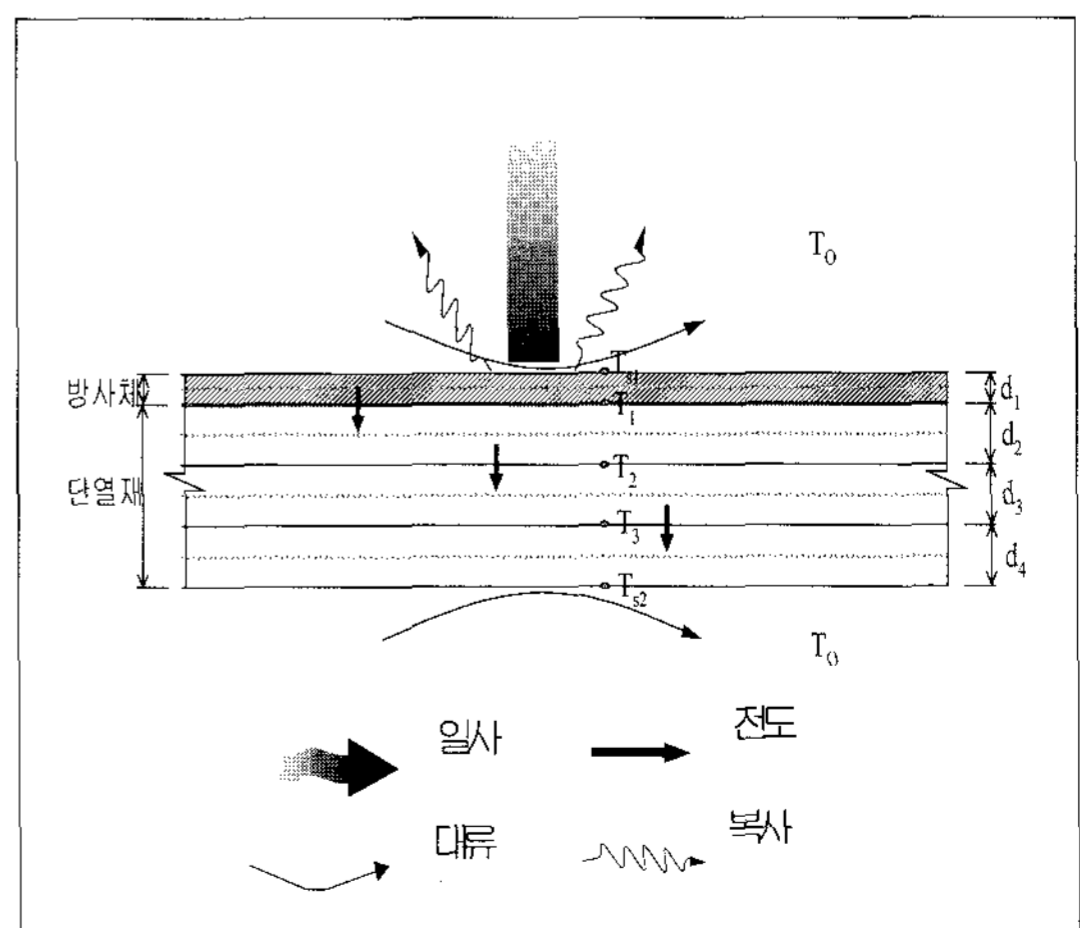


Fig. 2. 수치해석 모델

$$T_{sky\ cloudy} = (Ca)^{(1/4)} T_{sky} \quad (5)$$

$$Ca = 1 + 0.0224CC - 0.0035CC^2 + 0.00028CC^3 \quad (6)$$

유효 복사량

$$\Delta Q = F_{s-s1} \epsilon_s \epsilon_{s1} C_b \left(\frac{T_{s1}}{100}\right)^4 - [(1 + 0.0224CC - 0.0035CC^2 + 0.00028CC^3)(0.787 + 0.764 \ln((T_{dp} + 273)/273))] \left(\frac{T_a}{100}\right)^4 \quad (7)$$

2.3 실험과 수치해석 결과 및 고찰

그림 3은 1999년 8월 9일부터 13일까지 인천 지방의 유효 천공 복사량을 나타낸다.

방사체의 냉각에 실제로 영향을 미치는 유효 복사량은 장파장 천공 복사량과 방사체의 장파장 복사량의 차이로 흑색 방사체 표면의 유효 복사량은 그림 3과 같다. 일사의 영향으로 방사체의 표면온도가 급격히 상승하는 반면 천공의 온도는 크게 상승하지 않는 주간에 더 많이 발생함을 보였다. 흑체 표면에 대한 유효 복사량은 주간에는 평균 112kcal/m²h, 야간에는 평균 47.6 kcal/m²h

를 보였다.

그림 4는 같은 기간 천공온도와 대기온도 그리고 흑색 방사체 표면 온도를 비교한 것이다.

천공온도는 대기온도에 비해 4°C~15°C 낮게 나타났고 두 온도의 주야간 온도차가 심하게 나타나지 않았다. 반면 방사체의 흑색표면과 천공 온도와의 온도차는 주간 평균 15°C, 야간 평균 7°C로 나타났고 일사가 많은 11~16시 사이에는 온도차가 20~30°C로 크게 나타났다. 방사체의 냉각에 영향을 미치는 유효 복사량은 주간과 야간 모두 일어나지만 주간에는 유효 복사량에 비해 일사량이 월등히 많아 방사체의 냉각을 가져오지 못한다. 그러나 야간의 경우 유효 복사량만 발생하므로 표면의 냉각효과를 가져온다. 따라서 이러한 결과를 통해서 볼 때 야간의 천공복사 효과는 건물의 냉각 에너지원으로 충분한 효과가 있음을 확인 할 수 있다. 특히 우리 나라 기후 조건에서의 복사냉각 시스템의 건물 응용에는 방사체의 열용량과 복사냉각 효과 등을 고려할 때 경량의 금속성 방사체가 더 유리한 에너지 공급 효과를 가져 올 수 있을 것으로 예측된다. 또한 복사냉각 효과 분석에 이용된 수치해석 프로그램의 결과와 실험결과는 잘 일치하는 것을 확인한 바 이후 냉각 시스템 응용에 활용될 수 있을 것이다.

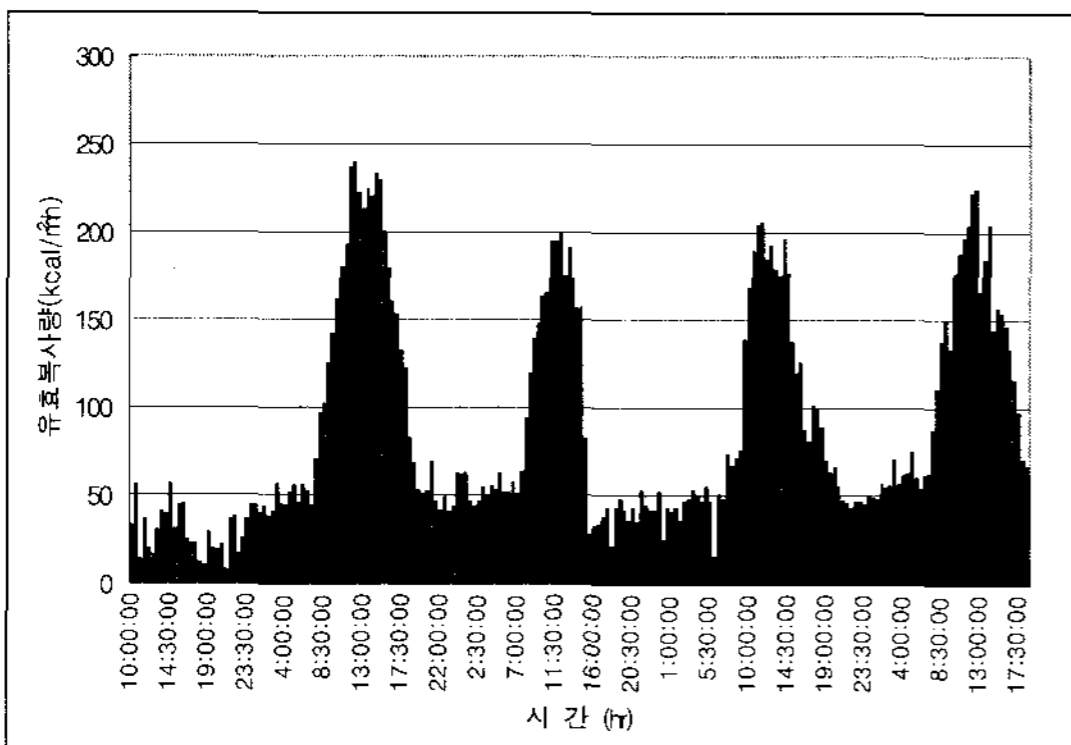


Fig. 3. 유효 천공 복사량

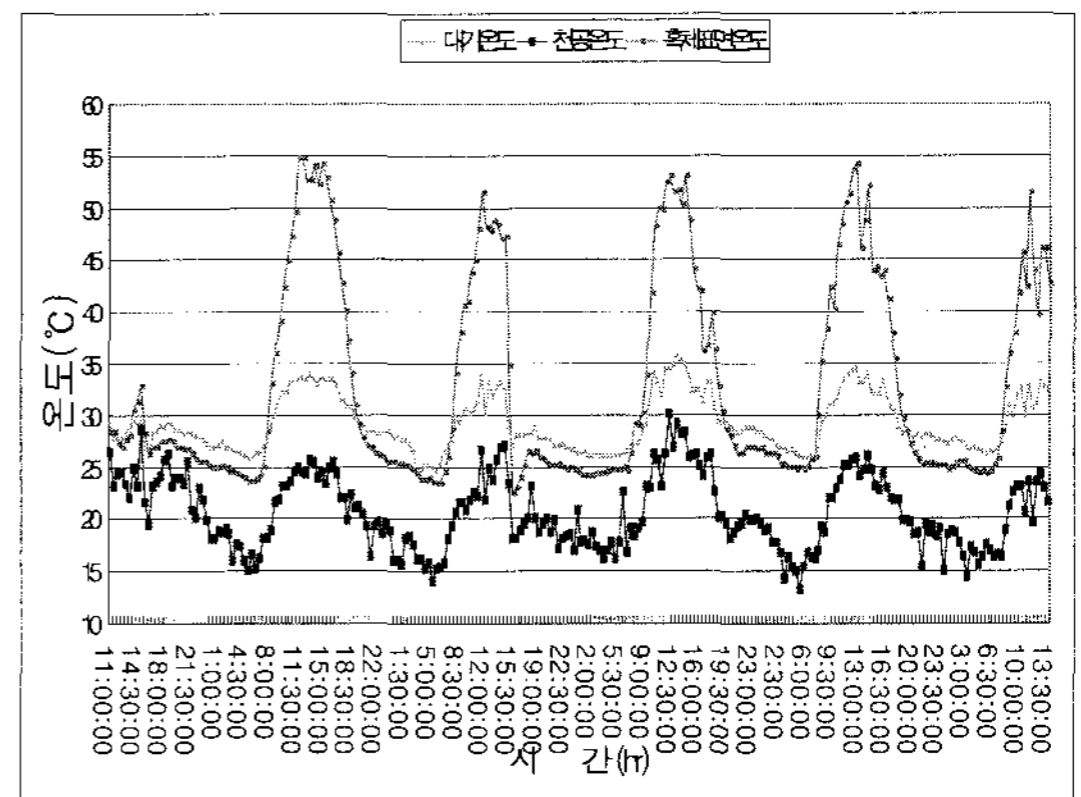


Fig. 4. 대기-천공-흑체 표면온도

3. 복사 냉각 시스템의 건물 응용⁵⁾¹³⁾

복사냉각 시스템의 응용 방법에는 유효 복사량에 의해 냉각된 냉각에너지를 전도에 의해 유입시키는 직접적인 방법과 대류를 이용해 건물로 유입시키는 간접적인 방법이 있다.

그림 5는 직접적인 방법을 나타낸 것으로 야간에 유효 복사량에 의해 냉각된 에너지가 방사체를 통해 건물로 유입된다.

그림 6은 대류를 이용한 간접적인 방법이다. 야간에 복사 냉각으로 인해 차가워진 방사체 밑으로 공기를 유동시켜 차가워진 공기를 실내로 유입시키는 방법이다. 본 연구에서는 복사냉각을 이용하는 두 가지 방법 중에서 유효 복사량에 의한 냉각이 한국 기후에 좀더 실용가능성이 있는 것을 이미 선행 연구에서 확인한 바 간접적인 방

법을 택하고 순수한 유효 복사량에 의한 냉각 효과만을 분석하였다.

4. Case Study

4.1 경량 금속 방사체를 이용한 시스템 모델

그림 7은 경량 금속방사체를 이용한 복사냉각 시스템의 개략도이다. 실의 크기는 가로 세로 6m 높이 3m 이고 지붕과 금속 방사체와의 거리는 0.2m이다.

지붕에 경량 금속 방사체를 설치하고 유체 유동의 출구 부분에 팬을 설치하여 야간에 공기를 실내로 강제 유입하여 환기할 수 있도록 시스템

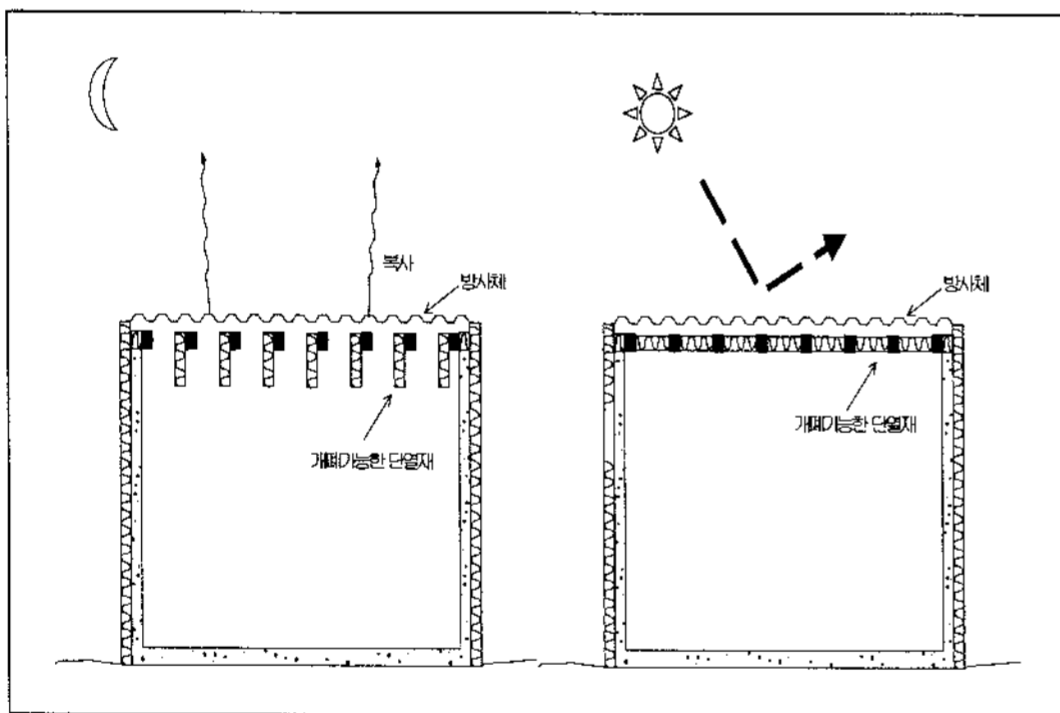


Fig. 5. 복사냉각을 이용한 직접적인 방법

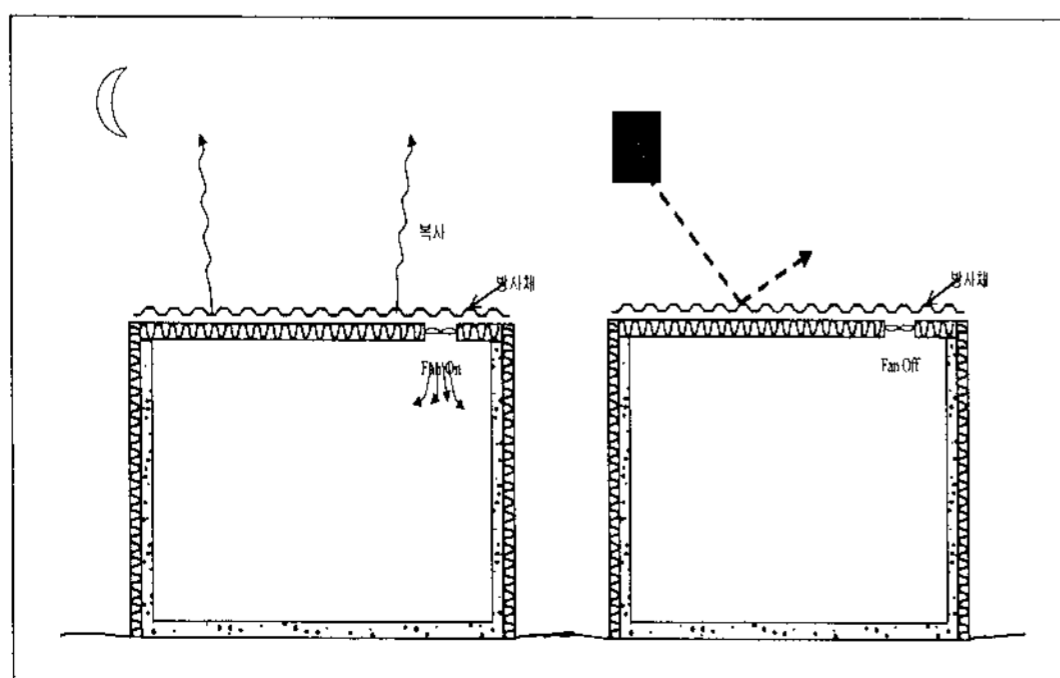


Fig. 6. 복사냉각을 이용한 간접적인 방법

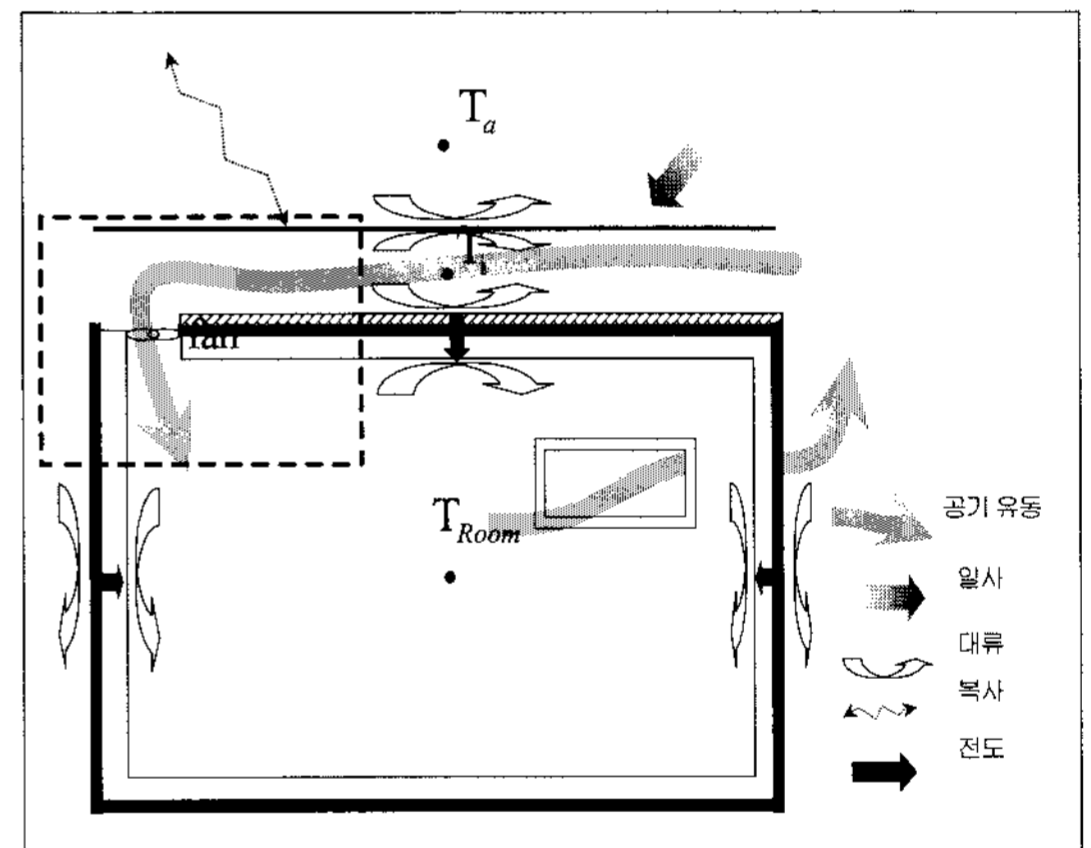


Fig. 7. 복사 냉각 시스템 모델

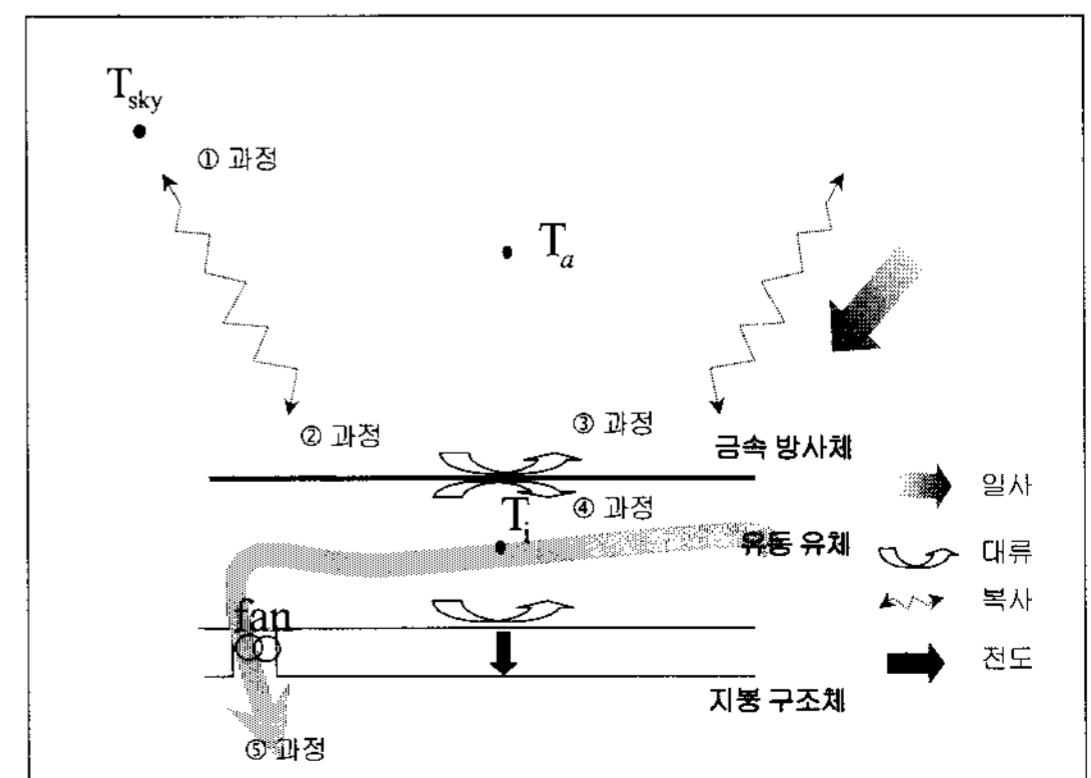


Fig. 8. 복사 냉각 과정

을 제안하였다. 그림 8은 본 논문에서 응용한 경량의 금속 방사판을 설치하였을 때 ①~⑤까지의 열 전달 과정을 나타낸 것이다.

본 시스템에서의 냉각 에너지 취득과정을 살펴보면 다음의 여섯 가지 열 전달 과정을 통하여 일어나는 것을 예측할 수 있다.⁵⁾

- ①과정 : 방사체에서 방사된 장파장복사
- ②과정 : 방사체의 장파장 천공복사 흡수
- ③과정 : 주변공기와 방사체와의 열교환
- ④과정 : 방사체 아래 강제로 공기를 유동시켜 방사체와 방사 매개체인 공기사이에서 열교환
- ⑤과정 : 열 교환된 공기를 실내로 유입하여 환기
- ⑥과정 : 야간에 구조체 내부에 주변 공기 온도보다 낮아진 온도로 축냉

①과 ②의 열전달 과정에서 야간에 ①과정에 의한 장파장 복사량이 ②과정에 의한 장파장 복사량 보다 많아 지게 되고 여기서 발생하는 장파장 복사량의 차이가 곧 유효 복사량 손실이 되며 이를 통해 일사가 없는 야간에 방사체가 대기온도 이하로 냉각하게 된다.

경량 금속 방사체를 이용한 복사냉각 시스템에 대한 수학적 모델 계산을 단순화하기 위한 가정은 다음과 같다.

- ① 실내온도를 구하기 위한 각 벽체의 열 흐름은 벽체에 수직이며 1차원이다.
- ② 금속 방사체내 유체의 흐름은 벽체 방향으로 1차원이다.
- ③ 금속 방사체 및 각 재료의 물리적 특성은 일정하다.
- ④ 천공은 흑체로 간주한다.
- ⑤ 방사체 아래의 지붕구조체와는 복사열교환을 하지 않는다.

- ⑥ 구조물의 바닥은 단열경계조건을 갖는다.
- ⑦ 주간엔 일사의 직접유입은 없고, 환기를 통한 부하만을 계산에 포함한다.

방사체 표면과 방사체내 유체 유동공간, 지붕 및 각 방위별 벽체 그리고 실내온도에 대한 열평형 방정식은 식 (8)~(11)과 같다.

$$C_{pal}\rho_{al}L_{al}\frac{dT_s}{dt} = h_{v1}(T_a - T_s) + h_{v2}(T_i - T_s) + h_r(T_{sky} - T_s) + \tau I \quad (8)$$

$$C_{\pi}\rho_i h l \frac{dT_i}{dt} = C_{\pi}\rho_i v h (T_{i-1} - T_i) + h_{v2}k(T_s - T_i) - T_i + h_{v2}k(T_j - T_i) \quad (9)$$

$$C_{tp}\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (10)$$

$$C_{pa}\rho_a V_{room} \frac{dT_{room}}{dt} = \sum_{j=1}^5 H_{v3} A g_j (T_j - T_{room}) \quad (11)$$

식 (10)에 대해 지붕과 각 방위별 벽체의 경계조건은 식 (12)와 식(13)과 같다

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{v2}(T_i - T_1) \quad (12)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = h_r(T_{sky} - T_j) + \tau_c I \quad (13)$$

각 방정식의 열 전달 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

외부 열 전달 계수(h_{v1})

$$h_{v1} = 5.3 + 3.6 v \quad (v \leq 5m/s) \quad (14)$$

$$h_{v1} = 6.47 v^{0.78} \quad (v \geq 5 \text{ m/s}) \quad (15)$$

유동공간 열 전달 계수(h_{v2})

1) 질량유량(M)=0 일 때

$$h_{v2} = \frac{k_{air}}{h} 0.01711 (Gr \cdot Pr)^{0.29} \quad (16)$$

2) $M \neq 0, Re > 2000$

$$h_{v2} = \frac{k_{air}}{h} (0.0158 Re^{0.8}) \quad (17)$$

3) $M \neq 0, Re \leq 2000$

$$h_{v2} = \frac{k_{air}}{h} \left(\frac{4.9 + 0.0606 X^{-1.2}}{1 + 0.0856 X^{-0.7}} \right) \quad (18)$$

유동공간의 열전달 계수를 구하기 위한 무차원 수는 식 (19)~(22)로 표현되며 수력지름은 식 (23)으로 표현된다. 여기서 Prandtl number는 절대온도 300K을 기준으로 하였다.

$$Re = \frac{v D_h}{\mu} \quad (19)$$

$$Gr = \frac{g \beta h^3 (T_s - T_a)}{\nu^2} \quad (20)$$

$$Pr = 0.706 \quad (21)$$

$$X = \frac{h}{Re Pr D_h} \quad (22)$$

$$D_h = \frac{2A}{1+w} \quad (23)$$

지붕면과 방위별 벽체의 복사계수는 식(24)와

식(25)로 나타낼 수 있다

$$h_{r_{roof}} = \epsilon_a \sigma_b (T_s^2 + T_{sky}^2) (T_s + T_{sky}) \quad (24)$$

$$h_{r_{wall}} = F \epsilon_c \sigma_b (T_j^2 + T_{sky}^2) (T_j + T_{sky}) \quad (25)$$

천공 온도는 Clark & Allen이 제안한 식(4)~(6)을 이용하였다.

4.2 수치해석

그림 9와 10은 그림 7의 점선 부분을 확대한 수학적 모델로서 주간과 야간의 시스템 작동을 그림 9와 10에 상세하게 나타낸다.

그림 9는 일사의 영향이 작용하는 주간으로 뜨거워진 방사체와 방사체 아래의 유체가 실내로 유입하지 못하도록 구조체에 설치된 팬을 막고 자연대류에 의해 외부로 공기를 배출시켜 구조체 내부에 일사에 의한 열에너지의 유입을 최소화하도록 한다.

그림 10은 일사의 영향이 없는 야간으로 흑체로 가정된 천공과 방사체 사이에 복사 열교환을 통하여 얻어진 순 복사열 손실로 방사체가 냉각되고 냉각된 방사체는 방사체 위의 대기와 방사체 아래 유체 사이에서 대류 열 교환을 일으켜

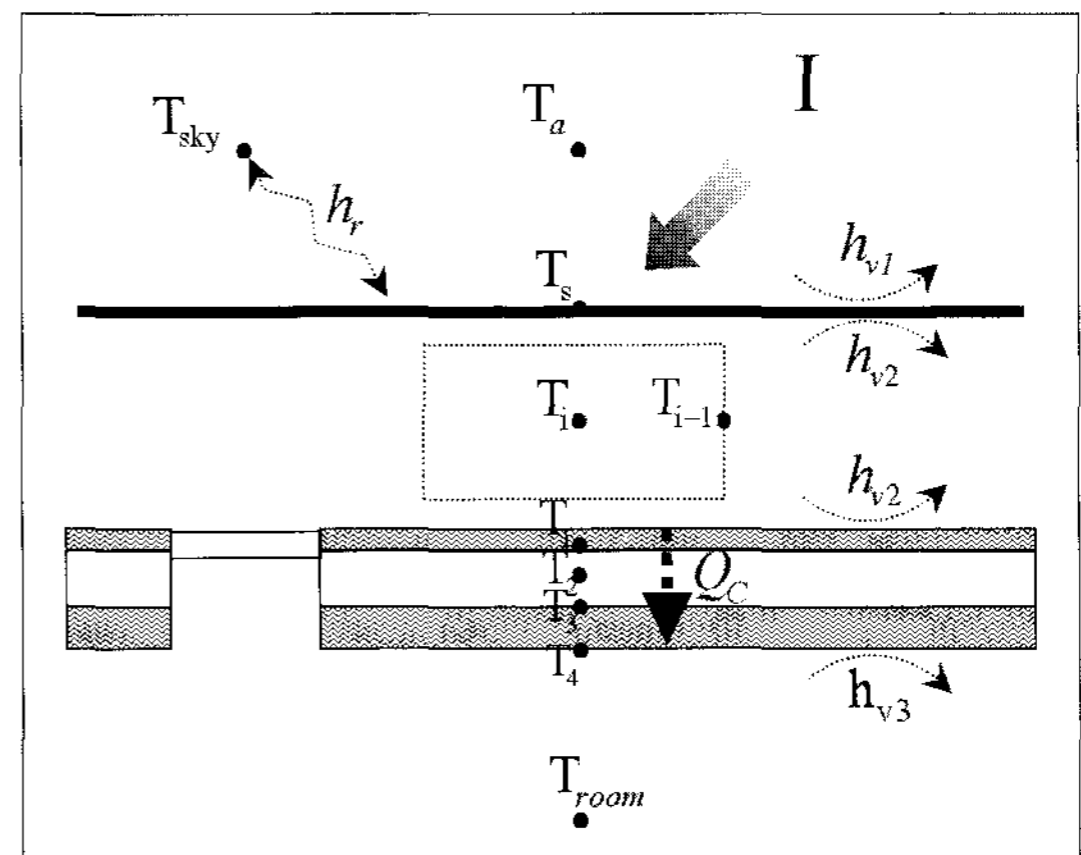


Fig. 9. 복사 냉각 시스템의 주간 mode

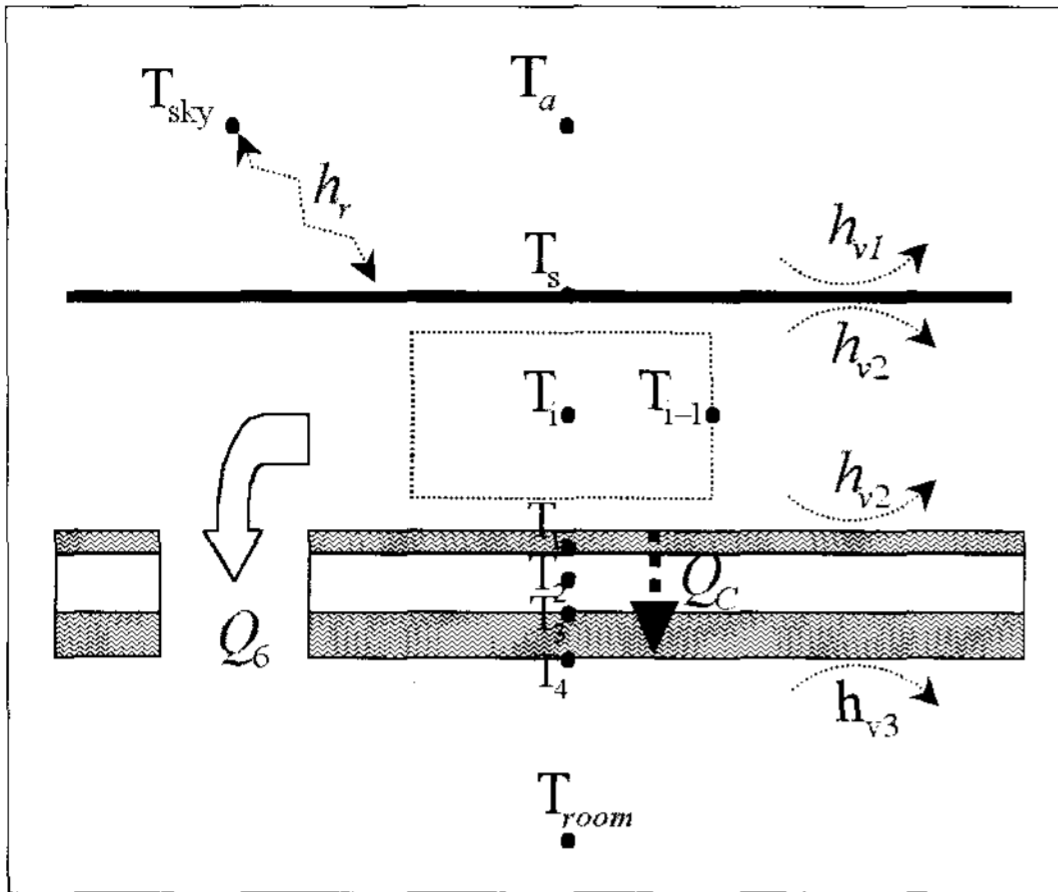


Fig. 10. 복사 냉각 시스템의 야간 mode

방사체 아래 공기가 냉각된다. 방사체 아래 유체가 대기온도 이하로 떨어졌을 때 구조체에 설치된 팬을 통하여 방사체 아래 유체를 강제 환기시켜 실내로 유입하도록 한다. 이때 실내 온도에 영향을 미치는 인자는 강제 유동에 의한 환기 열량과 냉각된 방사체 아래로부터 대류와 전도의 열 전달을 통하여 유입되는 구조체 열량이다. 방사체 및 유동공간 그리고 구조체의 각 부분은 explicit method를 통해 해석하였고 벽체에 수직인 열전도에 대해 유체유동을 벽체 방향 1차원으로 해석하기 위하여 방사체와 구조체의 표면온도를 일정시간 정지시키고 유동을 해석하는 정지계산법을 이용하였다. 방사체내의 유체는 야간에 외기온도 이하로 떨어졌을 때 강제대류에 의해 실내로 유입되므로 일정 유속을 갖도록 하였고 방사체와 구조체 표면 온도를 30초간 정지시키고 정지된 시간동안 일정한 단위 체적을 갖는 유체가 유동하는 시간 간격을 해의 안정조건 Courant 수 $(\Delta t \times V) / \Delta x$ 가 0.5가 이하가 되도록 하여 30초 동안 유체의 단위 체적이 방사체 내에서 유동할 수 있는 최대 횟수를 결정하고 결정된 횟수 동안 반복 계산함으로써 유동하는 유체의 열 흐름을 해석하였다. 각 부분의 이산화 방정식과 경계 조건은 다음과 같다.

방사체 표면온도와 유체 유동 공간

$$T_s^{n+1} = \frac{\Delta t_1}{c_{pa} \rho_a L_{al}} \left((-h_{v2} - h_{v1} - h_r) T_s^n + h_{v1} T_a^n + h_{v2} T_i^n + h_r T_{sky}^n + \tau I \right) + T_s^n \quad (26)$$

$$T_i^{n+1} = \frac{\Delta t_2}{C_{pl} \rho_1 h} \left((-h_{v2} - C_{pa} \rho_a \frac{vh}{\Delta x}) T_i^n + C_{pa} \rho_a \frac{vh}{\Delta x} T_{i-1}^n + h_{v2} T_s^n \right) + T_i^n \quad (27)$$

앞에서 언급하였듯이 정지계산법을 사용하기 위해 식 (26)의 Δt_1 은 30초이고 식 (27)의 Δt_2 는 유속에 따라 해의 안정조건에 맞도록 결정된 시간이다. 지붕은 방사체 아래 구조체가 단열재로 각층 벽체는 콘크리트의 재료를 사용하여 모델을 설정하였는데 방사체 아래 지붕 구조체가 단열이 되어 있지 않을 경우 구조체가 가지는 열용량에 의해 time-lag현상이 발생하며, 방사체 아래 유동 유체의 온도가 야간에 외기온도 이하로 잘 떨어지지 않는 단점을 나타냈다.

단위 모델 건물의 지붕과 방위별 벽체를 구성하는 재료의 물성치는 표 1과 같고, 결과에서 제시된 경량 금속 방사체를 이용한 모델과 일반 건물과 실내 온도 비교에 있어서 일반 건물은 방사

Table 1. 모델건물 벽체의 재료 및 물성치

구분	열전도율 (kcal/mh°C)	용적비열 (kcal/m³°C)	두께 (mm)	방사율	
지붕	방사체		837.5	5	0.92
	단열재	0.03	20.00	25	
	콘크리트	1.30	456.0	200	0.85
	단열재	0.03	20.00	25	
방위별 벽체	콘크리트	1.30	456.0	200	0.85
	단열재	0.03	20.00	25	

체와 유체 유동공간을 제외한 같은 모델을 사용하였다.

4.3 결과 및 고찰

그림 11은 일반 건물에서 환기에 따른 실온의 변화를 나타낸 것으로, 야간에 환기를 시킴으로써 평균 1°C 정도 낮은 실온을 얻을 수 있다.

그림 12는 8월 22일부터 26일까지 야간에 밤 10시부터 다음날 오전 7시까지 9시간 동안 환기 횟수를 시간당 10회로 하고 주간에는 시간당 2.5회로 하였을 때 경량 금속 방사체 시스템을 적용한 건물의 실온 변화를 보여준다.

방사체 아래 유동 유체의 온도가 외기 온도 이하로 떨어졌을 때 실내로 공기를 공급하도록 하였고 방사체의 온도가 오전 7시 이전에 외기 온도보다 상승하였을 때에는 외기 온도로 환기하도록 하였다.

야간에 금속 방사체 아래의 유체를 냉각하는 천공복사의 경우 평균 45 kcal/m²h의 열량을 방사체로부터 가져감으로써 유동공기가 구조체와 열평형을 이룬 이후에도 외기 온도보다 0.5°C에서 1°C 낮은 온도를 형성하였다. 그리고 유효 복사량은 그림 4에서와 같이 주간에는 평균 120 kcal/m²h, 야간에는 평균 45 kcal/m²h 정도 발생하였다. 그림 5에서 콘크리트 방사체일 경우 야간에 유효 복사량에 의해 표면 온도가 2~2.5°C 대기 온도보다 낮아지는데 반해 경량의 금속 방사체인 경우 표면 온도가 평균 1°C 정도 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 금속 방사체 아래 유체로 냉각 에너지가 전달되었기 때문이다.

그림 13은 복사 냉각 시스템을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우 벽체 구성, 환기 횟수, 환기 시간을 같게 하였을 때 실내 온도의 변화를 보여준다.

천공 복사량이 많은 23일부터 24일에서 야간에 복사 냉각 시스템을 적용한 경우의 온도가 일반 건물에 비해 최고 1.5°C 낮은 실온을 형성하게 된다. 이는 앞서 언급하였듯이 방사체로부터 유체에 전달된 냉각 열량을 실내로 유입하였기 때문에 외기 온도로 같은 양을 환기한 일반 건물 보다 낮은 실내 온도를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 주간에는 환기량을 같이 하였을 때 거의 같은 실온을 형성하다가 주간 최고 온도에 있어

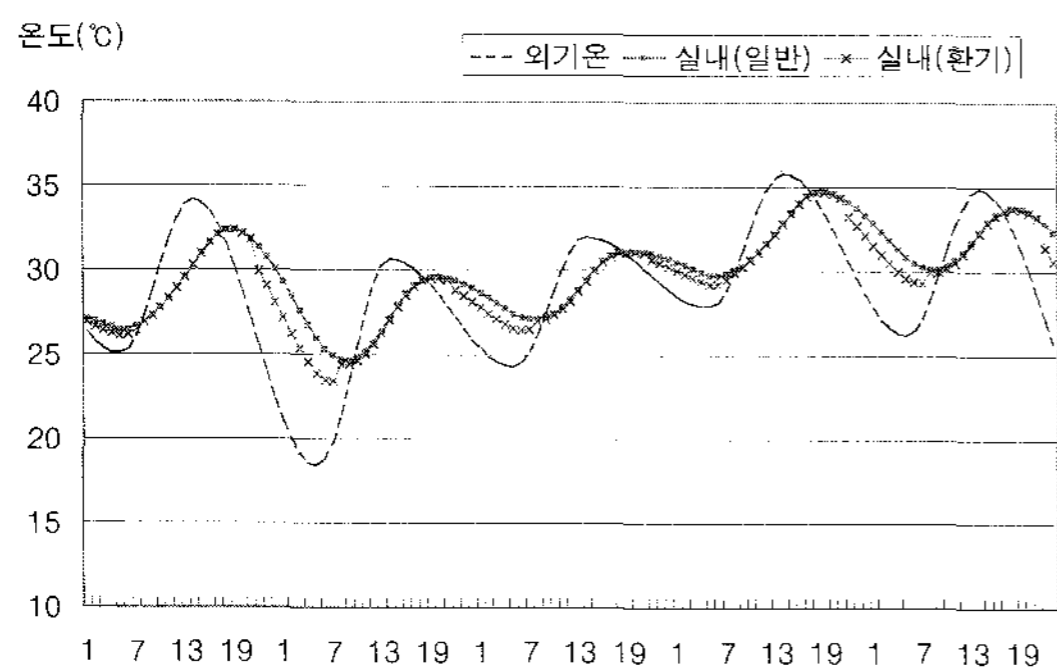


Fig. 11. 건물의 환기에 따른 실온 변동

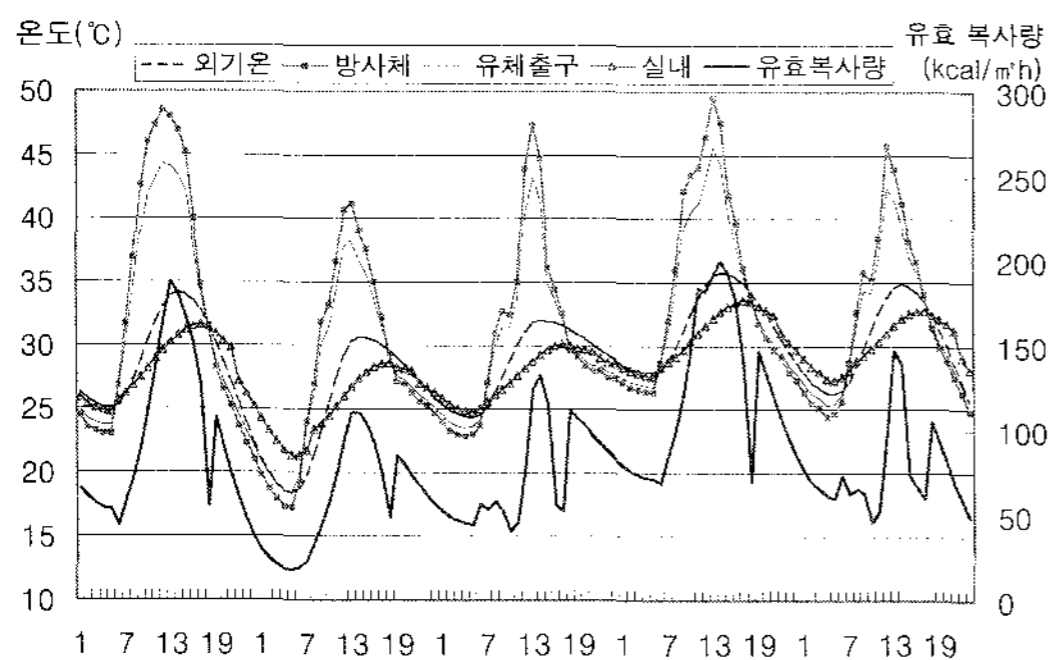


Fig. 12. 복사 냉각 시스템의 실온 변화

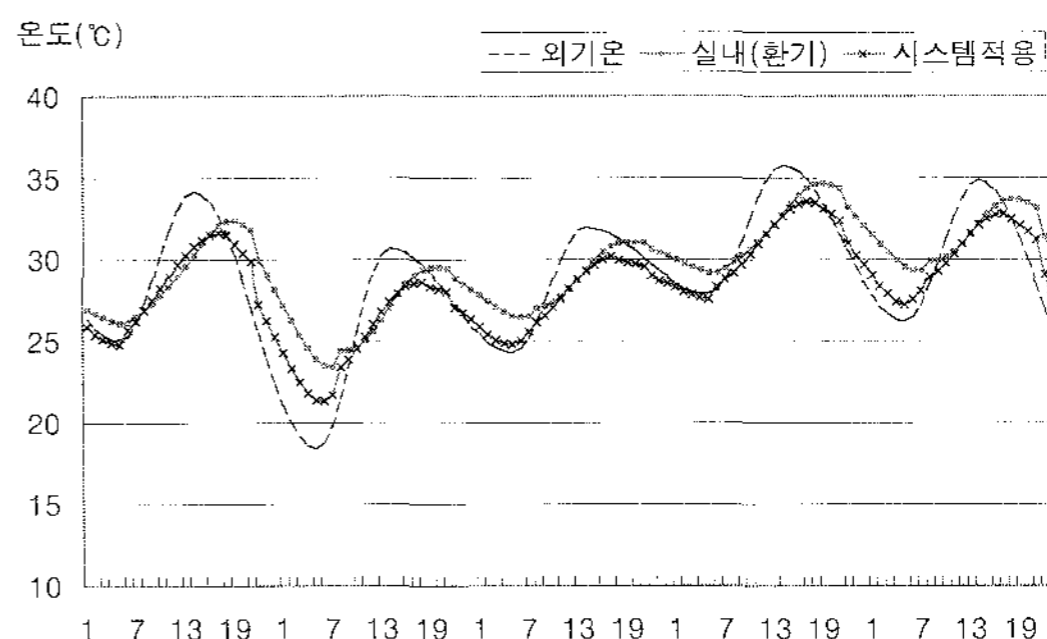


Fig. 13. 복사 냉각 시스템과 일반 건물의 실내 온도 변화

서 1°C정도 낮은 온도를 형성하는데 이것은 주간
간에 방사체의 일사 투과 흡수율이 콘크리트에
비해 40%낮은 것과 주간에도 천공복사가 최고
190kcal/m²h에서 평균 120kcal/m²h가 되므로 이
들 인자의 복합적인 영향으로 평가된다.

여름철 실내 설정 온도를 28°C로 가정하고 실
내 냉방을 오전 9시부터 저녁 9시까지 12시간 한
다고 가정하였을 때 실내 설정 온도를 유지하기
위해 사용하는 에너지의 양에 있어서 환기를 하
는 일반 건물보다 복사 냉각 시스템을 적용한 경
우가 Fan에 의한 동력을 제외하고 평균 15%의
부하 절감효과가 있는 것으로 분석되었다. 이러한
효율은 유효 복사량이 증가할수록 더욱 증가하여
최고 20%정도의 효율을 보이지만 구름, 수증기
또는 먼지등의 유효 천공 복사의 양을 줄이는 요
소들이 복합적으로 작용할 때 10%정도까지 그
효율이 떨어졌다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서 여름철 냉각 에너지를 얻기 위해
복사 냉각 시스템에 대한 적용성을 분석하였다.
즉, 방사체 표면과 천공과 복사열 손실을 이용하
여 방사체 아래 유동 유체를 냉각하고 냉각된 유
체를 실내로 유입하여 실내 축열체에 축냉 시키
는 시스템의 성능을 분석하였다. 먼저 선행 연구
에서 검증된 프로그램을 통하여 냉각 효과를 통
해 복사 냉각의 가능성을 검토하였다. 그리고 일
반 건물과 복사 냉각 시스템과의 실온 비교를 통
해 복사 냉각 시스템을 응용하여 여름철 복사냉
각 에너지를 얻을 수 있는 가능성을 확인하였으
며, 복사 냉각 시스템의 효율등을 분석하였다. 이
상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 천공의 유효 복사량에 의해 방사체를 냉각하
는 복사 냉각 방식은 야간 평균 유효복사량이

45kcal/m²h로 방사체의 표면을 2~2.5°C 낮춤
으로써 복사냉각시스템의 응용 가능성을 보여
주었다.

- ② 경량의 금속 방사체를 이용한 복사 냉각 시스
템에서 시스템을 적용하지 않은 건물과의 실
내온도 비교에 있어서 야간에 시간당 10회 주
간에 2.5회를 환기하였을 때 시스템이 설치되
지 않은 건물보다 실내온도에 있어서 야간에
는 1.5°C 낮은 온도를 주간에는 약 1°C 낮은
분포를 나타내었다.
- ③ 복사 냉각 시스템을 적용치 않은 건물과 같은
환기량으로 환기하더라도 열용량이 있는 건물
내에 야간에 구조체에 축열된 냉각 에너지로
인해 일반 건물과 같은 온도에 이르기까지 약
3시간정도의 시간이 걸리고 일사량이 많은 때
에도 주간에 경량의 금속체의 방사효과와 일
사 차단 효과에 의해 실내 온도에서 약 1°C
낮은 온도 분포를 갖는 것으로 나타났다.
- ④ 복사 냉각 시스템을 적용할 경우 일반 건물보
다 15%정도의 냉방 부하를 절약할 수 있는
것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 유효 천
공 복사량 즉 대기의 상태에 따라 많은 영향
을 받는 것으로 나타났다.

이상은 천공 복사의 냉각 효과와 경량 금속 방
사체를 이용한 복사 냉각 시스템의 응용에 대한
기본적인 연구의 결과이다. 그러나 앞으로 복사
냉각 시스템의 응용을 위해서는 기후조건, 방사체
의 냉각 효과, 유효 복사량을 비롯한 제반 요소
의 심층적 분석은 물론 시스템의 건물 적용에 따
른 design pattern등과 같은 연구가 계속적으로
이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 서승직, 건축환경공학, 일진사, 1991.

2. Seung Jik Suh, A Study of the Evaporation of Water on a Wet Mobile Plane Surface in a Hot Draft, An International Journal of Computers & Chemical Engineering, Vol. 25 No. 2~3, PP. 421~433, 2001.
3. 유지용, 최창호, 서승직, 건물 방사체의 복사 냉각효과에 관한연구, 17권 2호, 대한건축학회 논문집, 2001. 2.
4. 윤성훈, 서승직, 비 공조실의 온도 예측을 위한 실험 및 수치적 연구, 17권 7호, 대한건축학회 논문집, 2001. 7.
5. Baruch Givoni, Passive and Low Energy Cooling of Building, Van Nostrand Reinhold, 1994.
6. R. McMullan, Environmental Science in Building, The Macmillan Press Ltd.(3th edition), 1992.
7. Frank P. Incropera, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons (4th edition), 1981.
8. H.B.Awbi, Ventilation of Building, E & FN SPON, 1991.
9. Frank M. White, Fluid Mechanics, Mcgraw-Hill, 1999.
10. Jeffrey Cook, Passive Cooling, The MIT Press, 1989.
11. John A. Duffie and William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd, John Wiley & Sons. Inc., 1991.
12. ASHRAE HANDBOOK Fundamental, 1993.
13. Norbert Lechner, Heating Cooling Lighting, ohn Wiley & Sons. Inc., 1990.
14. S. C. Chapra, Numerial Methods for Engineers, McGraw-Hill, 1999.