

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
 Vol. 21, No. 3, 2001

지붕 증발냉각시스템의 열성능 해석

신 우 철*

* 대전대학교 건축공학과

Analysis of Thermal Performance in Roof Evaporative Cooling System

U.C. Shin*

* *Department of Architectural Engineering, Daejeon University*

Abstract

This paper reports on an theoretical study of heat transfer from evaporative cooling system by the flow of recirculated water over the roof. In this system the water is distributed at the top of the pitched roof, collected at the bottom by a gutter and recirculated by a pump. To analysis the system, the energy balance equations are developed and solved using a finite difference method. The calculation results show a good agreement with the measured ones obtained from our experiment. Based on the results, it was seen that the roof-evaporative cooling system reduced the heat flux significantly compared with the conventional roof structure even in the hot-humid summer climate of Korea.

기 호 설 명

c_p : 비열 [kJ/kg $^{\circ}$ C]

g : 중력가속도 [m/s 2]

G_b : 입사면 직달일사 [W/m 2]

G_d : 입사면 산란일사 [W/m 2]

G_{gr} : 입사면 지면반사 일사 [W/m 2]

Gr : Grashof 수

h : 대류열전달계수 [W/m^2K]
 h_m : 복합대류열전달계수 [kg/m^2s]
 h_o : 순환수의 대류열전달계수 [W/m^2K]
 h_r : 복사열전달계수 [W/m^2K]
 i : 엔탈피 [$kJ/kg(DA)$]
 I_d : 산란일사량 [W/m^2]
 I_t : 수평면 총일사량 [W/m^2]
 k : 열전도율 [$W/m^{\circ}C$]
 L : 실험체의 길이 [m]
 m_i : 저수조의 유입 질량유속 [kg/s]
 m_o : 순환수의 공급 질량유속 [kg/s]
 M : 저수조 유량 [kg]
 M_m : 증발 유량 [kg/s]
 n : 윤량
 P_{ws} : 포화수증기압
 Pr : Prandtl 수
 Q : 순환수 유량 [m^3/s]
 Re : Reynolds 수
 S : 입사면 총 일사량 [W/m^2]
 t : 시간 [s]
 T : 온도 [K]
 T_{dp} : 노점온도 [$^{\circ}C$]
 T_i : 순환수 환수온도 [$^{\circ}C$]
 T_o : 순환수 공급온도 [$^{\circ}C$]
 T_{sky} : 천공온도 [K]
 T_{tank} : 저수조온도 [$^{\circ}C$]
 W : 실험체의 폭 [m]
 u_m : 순환수의 평균유속 [m/s]
 UA : 저수조 콘텍턴스 [$W/m^2^{\circ}C$]
 v : 풍속 [m/s]
 x : 절대습도 [$kg/kg(DA)$]
 a : 실험체 상부면의 태양흡수율
 a_{co} : 대류열전달계수 [$W/m^2^{\circ}C$]
 δ_w : 순환수의 두께 [m]
 ν : 동점성계수 [m^2/s]
 μ : 점성계수 [$kg/m \cdot s$]
 β : 실험체의 경사각 [degrees]

γ : 물의 증발잠열 [kJ/kg]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 ρ_{gr} : 지면 반사율
 τ : 자정으로부터 경과된 시간 [hour]
 ε : 방사율
 σ : Stefan-Boltzmann의 상수
 θ : 태양 입사각
 θ_z : 천장각

하 첨 자

a : 외기
 v : 수증기
 w : 물 또는 수면접촉공기

1. 서 론

증발냉각시스템은 지붕이나 벽체 등 건물의 외 표면에 물을 흘리거나 분무하여 물과 외표면의 온도차에 따른 현열냉각과 주변 외기 사이의 수증기분압차에 따른 수분증발의 잠열냉각을 이용하여 외피 구조체의 온도를 낮추는 자연냉방수법이다. 1939년 Houghten에 의해 처음 시도된 증발냉각시스템에 대한 열전달 해석은 최근까지 많은 연구결과^{1)~5)}가 보고되고 있으며 외국의 경우 각종 시스템이 실용화되어 보급되고 있다. 한편 국내의 경우 고온 다습한 하절기 기후여건에 따라 적용하기 어려운 시스템으로 인식되어 그 연구개발이 미진한 실정에 있으나 신 등⁶⁾은 실험연구를 통해 그 가능성을 검토한 바 있다. 본고는 그 후속 연구로서 철근콘크리트조 경사지붕에 적용된 순환구조를 갖는 유수(flowing water)방식의 증발냉각시스템에 대한 열전달해석 알고리즘을 개발하고 실험을 통하여 그 타당성을 검토하고자 한다.

2. 이론해석

그림 1은 순환식 지붕 증발냉각시스템의 구조를 나타낸 것이다. β° 의 경사각을 갖는 지붕 외피의 상단부(water inlet)에서 저수조로부터 공급된 일정 유량의 순환수를 흘려 보내면 두께, δ_w 를 갖는 수막이 형성되고 하단부(water outlet)에서 집수되어 저수조로 다시 보내진다. 이 과정에서, 일사에 의해 가열되는 지붕면은 순환수에 의해 현열 냉각되고 주변 외기 사이에서 수증기분압차에 의해서 발생하는 수분증발로 인해 기화열손실이 동시에 일어나게 된다. 따라서 일사 및 외기로 가열되는 지붕의 온도상승이 억제되어 실내로 작용하는 열부하가 감소하게 되고 지붕하부면의 표면복사온도감소로 인해 실내온열환경의 열적 쾌적성이 높아지는 냉각작용이 발생한다.

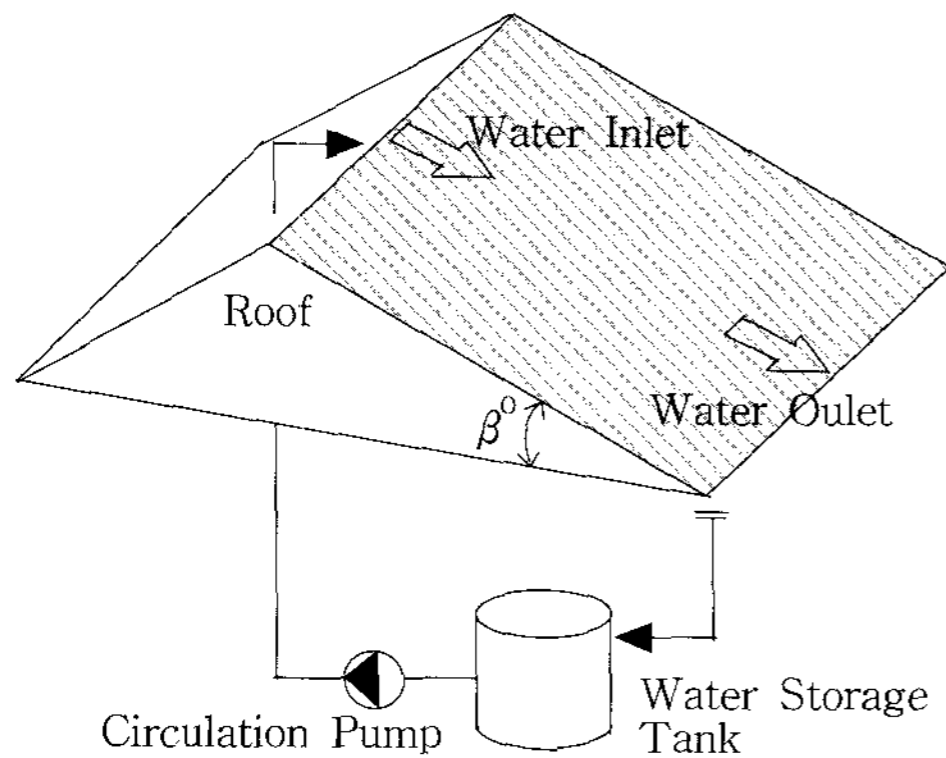


Fig. 1. Schematic of roof evaporative cooling system

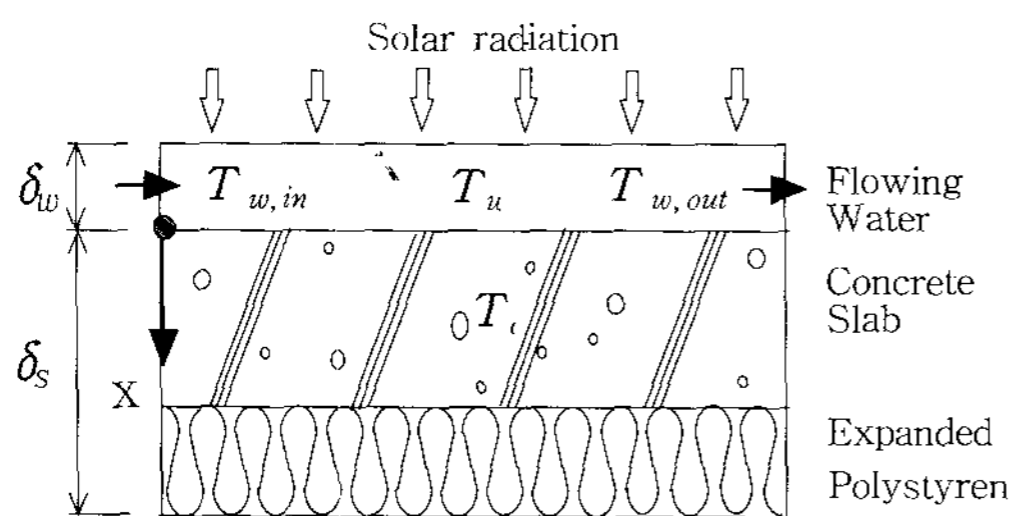


Fig. 2. Model of theoretical analysis

그림 2는 이론해석을 위한 지붕 증발냉각시스템의 열전달 모델을 간략하게 나타낸 것이다.

본 연구의 이론해석에서는 구조체의 길이방향의 온도변화는 무시하고 x축 방향의 열전달만이 존재하는 1차원 문제로 간주하였으며, 이 외에 단순화를 위하여 다음과 같은 가정을 도입하였다.

- 모든 부재의 표면은 산란반사와 방사에 대하여 회색체로 간주한다.
- 순환수의 유속 및 두께는 균일하다.
- 시스템의 측면을 통한 열손실은 발생하지 않으며, 반사단열재로 마감된 하부면의 복사열 전달은 없다.
- 저수조는 완전혼합모델로서 수온이 균일하다.

지붕의 외피 면에는 물을 투과한 일사가 입사하고 순환수의 접촉을 통하여 열전달이 이루어진다. 이때 입사되는 일사는 직달성분, 천공반사성분, 지면반사성분 등으로 구성되며 다음과 같이 계산된다.

$$G_b = (\cos \theta / \cos \theta_z) (I_t - I_d) \quad (1)$$

$$G_d = \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) I_d \quad (2)$$

$$G_{gr} = \rho_{gr} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) I_t \quad (3)$$

따라서 입사면에 입사되는 시간당 총 일사량은 다음과 같다.

$$S = (G_b + G_d + G_{gr}) \quad (4)$$

얇은 수막을 형성하며 경사면을 흐르는 순환수는 평균두께(δ_w)와 평균유속(u_m)⁷⁾은 다음 식을 통해 각각 계산할 수 있다.

$$\delta_w = \left(\frac{3\mu m_i}{\rho g W \sin \beta} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$$u_m = \frac{2}{3} \frac{\delta_w^2 g \sin \beta}{2\nu} \quad (6)$$

그림 2의 순환수에 대하여 다음과 같은 열평형 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} & WL \delta_w \rho_w c_{p,w} \frac{\partial T_w}{\partial t} \\ &= m_i c_{p,w} (T_i - T_o) + WL [\alpha_w S \\ &\quad - Q_m - Q_r + h_o (T_r - T_w)] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$T_w = \frac{T_o + T_i}{2} \quad (8)$$

식(7)의 우측에서 첫 번째 항은 순환수의 일사 흡수를 나타내며, 물의 두께가 얇을 때 대부분의 일사는 물을 투과하며 실험체 상부면에 입사한다.

두 번째 항은 수면의 접촉공기와 주변 외기 사이에서 발생하는 물질이동(증발)을 동반한 대류 열전달로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_m = h_m (i_w - i_a) \quad (9)$$

한편 이 과정에서 순환수의 증발량은 다음과 같다.

$$M_m = h_m (x_w - x_a) \quad (10)$$

Lewis의 관계식(Lewis Relation)^{8)~9)}을 도입하면 물질이동을 동반한 복합대류열전달계수, h_m 을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$h_m = \alpha_{col} / (c_{p,a} + c_{p,v} \cdot x_a) \quad (11)$$

물에 접촉한 표면공기가 물과 동일한 온도, T_w 를 갖고 있으며 포화수증기압상태로 있다고 가정할 때, 이 공기가 갖는 엔탈피⁸⁾는 다음과 같다.

$$i_w = c_{p,a} T_w + (c_{p,v} T_w + \gamma) x_w \quad (12)$$

온도, T_w 에 대한 포화수증기압을 $P_{ws}(T_w)$ 로 표시하면 절대습도, x_w 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$x_w = \frac{S}{R} \quad (13)$$

여기서,

$$S = 0.622 \times 735.55 \times P_{ws}(T_w) \quad (14)$$

$$R = 760.0 - 735.55 \times P_{ws}(T_w) \quad (15)$$

이때 포화수증기압, $P_{ws}(T_w)$ 는 다음과 같이 계산된다.⁸⁾

$$\begin{aligned} \ln(P_{ws}) = & C_1/T_w + C_2 + C_3 T_w \\ & + C_4 T_w^2 + C_5 T_w^3 + C_6 \ln(T_w) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서,

$$C_1 = -5800.2206$$

$$C_2 = 1.3914993$$

$$C_3 = -0.04860239$$

$$C_4 = 0.41764768 \times 10^{-4}$$

$$C_5 = -0.14452093 \times 10^{-7}$$

$$C_6 = 6.5459673$$

외표면의 대류열전달계수, a_{co} 는 Watm-uff 등이 제안한 다음 식¹⁰⁾을 사용하였다.

$$a_{co} = 2.8 + 3.0v \quad (17)$$

식(7)에서 우측의 세 번째 항은 천공복사에 의한 열전달을 나타낸다.

$$Q_r = h_r(T_w - T_{sky}) \quad (18)$$

이 식에서 h_r 은 복사열전달계수로서 다음과 같다.

$$h_r = \frac{\epsilon\sigma(T_w^4 - T_{sky}^4)}{(T_w - T_{sky})} \quad (19)$$

유효천공온도, T_{sky} 는 노점온도, 외기온 및 운량의 함수로서 주어진다. 청명한 날의 천공온도는 Martin과 Berdahl이 제안한 다음식¹¹⁾을 사용하였다.

$$T_{c,sky} = T_a(0.711 + 0.0056 T_{dp} + 0.000073 T_{dp}^2 + 0.013 \cos(\tau))^{1/4} \quad (20)$$

운량이 증가하면 맑은 날에 비해 천공방사율이 증가하게 되고 따라서 천공온도가 높아진다.¹²⁾

$$T_{sky} = (C_a)^{1/4} T_{c,sky} \quad (21)$$

이 식에서 구름에 의한 영향, C_a 는 운량(cloudiness), n 에 의해 다음식으로 표현된다.

$$C_a = 1 + 0.0224n - 0.0035n^2 + 0.00028n^3 \quad (22)$$

한편 실험체 상부에서 순환수의 온도가 일정하

다면 실험체 내부의 열전달은, 1차원 열전도방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (23)$$

이 때 실험체의 상·하부면에 대해 다음과 같은 경계조건을 설정할 수 있다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_o(T_w - T) + a_c S \quad (24)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta_s} = h(T_a - T) \quad (25)$$

식(24)에서 순환수와 실험체 상부면 사이의 대류열전달계수, h_o 는 다음 제안식¹³⁾을 사용하였다.

$$h_o = 3.6 \frac{k_w}{L} (0.14 (\text{Gr Pr})^{1/3} + 0.664 (\text{Pr})^{1/3} (\text{Re})^{1/2}) \quad (26)$$

마지막으로 저수조에 대한 질량 및 열평형방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{dM}{dt} = m_i - m_o \quad (27)$$

$$c_p \frac{d(MT_{tnk})}{dt} = m_i c_p (T_i - T_{tnk}) + UA(T_a - T_{tnk}) \quad (28)$$

비선형의 경계조건을 갖는 지배방정식(7)과 (23), (27), (28)을 풀기 위하여 본 연구에서는 유한차분법을 이용하여 이산화방정식을 유도하고 Crank-Nickolson법 그 해를 구하였다.

3. 실험방법

지붕 증발냉각시스템의 열전달에 대한 이론해석의 타당성과 기존 지붕과의 열성능을 비교·분석하기 위하여 동일한 구조(1.2m×1.8m)로 제작된 두 개의 실험체를 대상으로 증발냉각시스템이 적용된 지붕구조체와 기존구조체에 대한 실험을 동시에 실시하였다. 그림 3은 이 실험체의 단면을 나타낸 것으로 국내에서 가장 많이 사용되는 철근 콘크리트조의 경사지붕을 가정하여 두께 100mm의 철근 콘크리트 슬라브 하부에 80mm 단열재를 부착하였다.

그림 4는 순환구조를 갖는 지붕 증발냉각시스템의 실험장치를 개략적으로 나타낸 것이다. 순환 펌프와 급수구 사이에는 유량계 및 순환수의 이물질 제거를 위한 필터를 설치하였으며, 배관, 급수구, 환수구 및 저수조는 단열재로 피복하

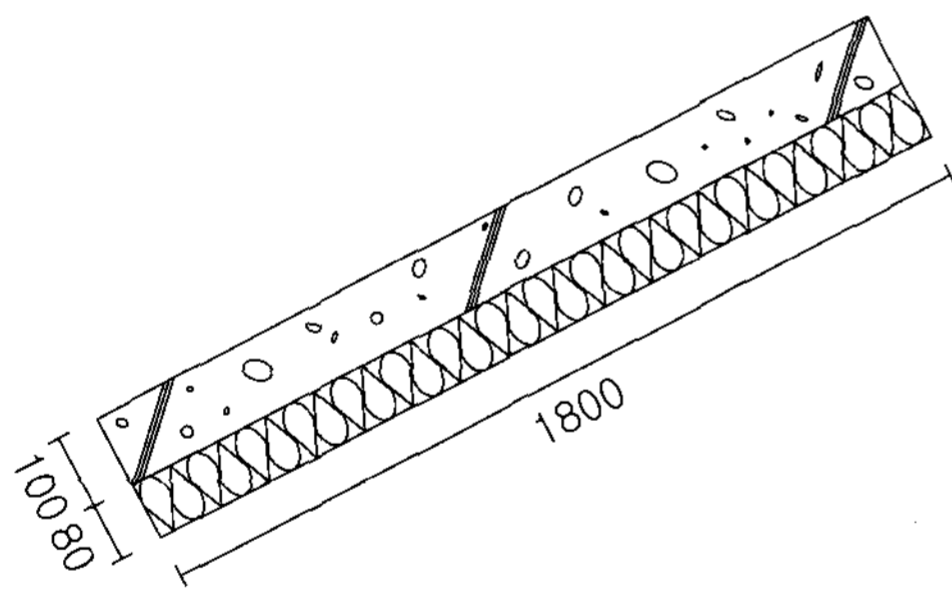


Fig. 3. Section of experimental model

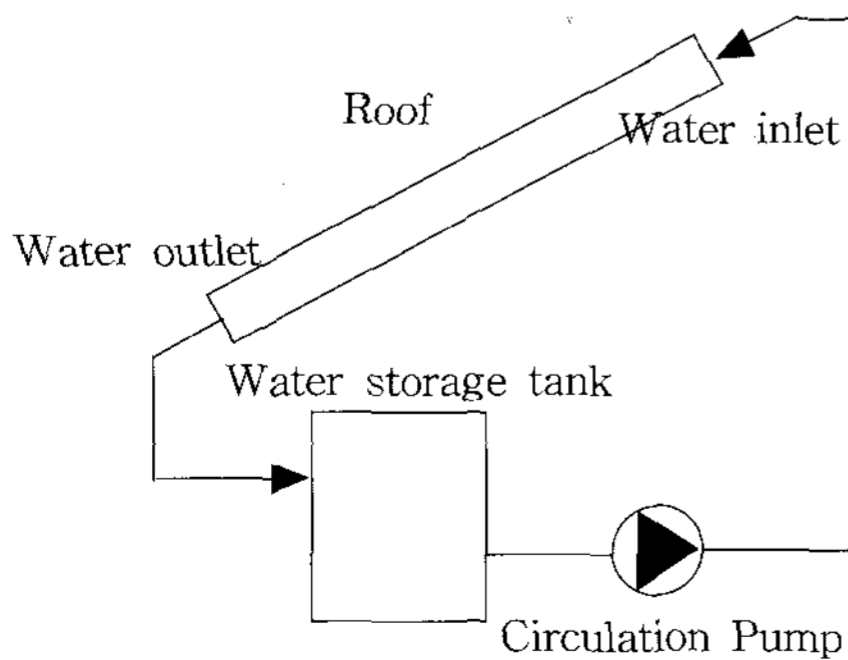


Fig. 4. Schematic of experiment apparatus

여 주변으로의 열손실을 최대한 억제하였다.

그림 5는 실험현장에 설치된 증발냉각시스템의 실험체를 보여주고 있다.

표 1은 실험에서 사용된 측정기기 및 센서의 주요 사양을 나타낸 것이다. 온도센서는 구조체의 상부표면과 내부에 좌·우 3열, 상·하 4열로 각 12개와 순환수의 온도측정을 위하여 증발시스템의 급수구와 환수구, 저수조에 각각 2개의 온도센서를 부착하였다. 실험조건은 표 2와 같이 정남향으로 설치된 실험체의 경사각은 40도로 고정하였으며 저수조의 저수유량은 250 liter로 설정하고 1.4LPM의 유량으로 순환수를 공급하였다.

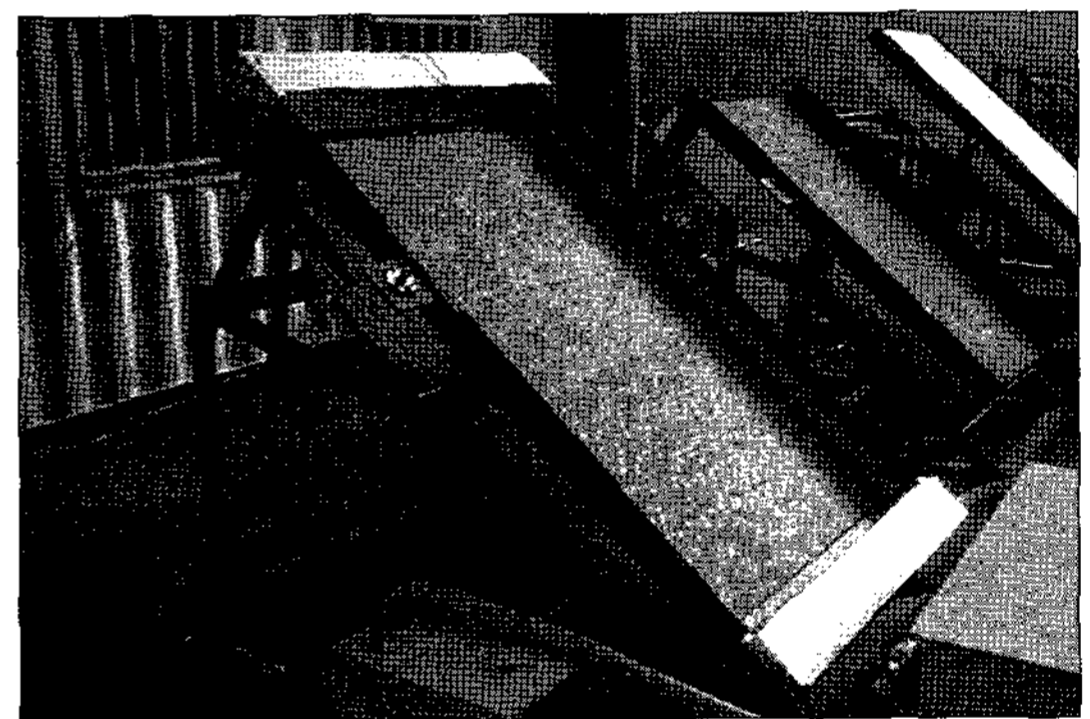


Fig. 5. View of experimental apparatus

Table 1. Measuring instrument

Item	Specification
Data Logger	HP 34970A
Thermocouple	T-type (Watlow)
Flowmeter	Omega FLSC-28
Pyrheliometer	Li-cor Pyranometer
Hygrometer	Delta HD 8507TC
Anemometer/ Anemoscope	Omega WMS-22

Table 2. Experimental condition

Item	Condition
Tilt angle	40°
Direction	south
Tank volume	250kg
Water flowrate	1.4 LPM

4. 본 론

시뮬레이션을 위한 기상자료는 현장 측정데이터를 기준으로 작성하였다. 그림 6~8은 실험기간동안(2000년 8월 10일~8월 15일) 일사조건이 양호한 2일 동안(8월 13일~8월 14일)의 수평면 총 일사량과 상대습도, 외기온을 나타낸 것이다. 일사량은 5분 간격으로 측정된 값을 시간 평균한 값으로 첫째 날과 둘째 날의 하루 총 일사량은 5669Wh와 5452Wh를 각각 나타내고 있다. 주간 상대습도는 60~80% 정도로서 증발냉각이 가능한 습도범위에 해당되나, 야간의 경우에는 90~100%까지의 매우 높은 습도분포를 보이고 있다. 이와 같은 주·야의 높은 상대습도편차는 우리나라 하절기의 전형적인 일일 습도변화 특성과 일치하는 것이다. 한편 첫째 날의 최고 및 평균기

온은 31.1°C와 26.8°C로서, 둘째 날의 32.8°C와 27.2°C에 비해 다소 낮은 분포를 보이고 있다. 표 3은 시뮬레이션에서 사용된 부재의 열적 물성치를 정리한 것이다.

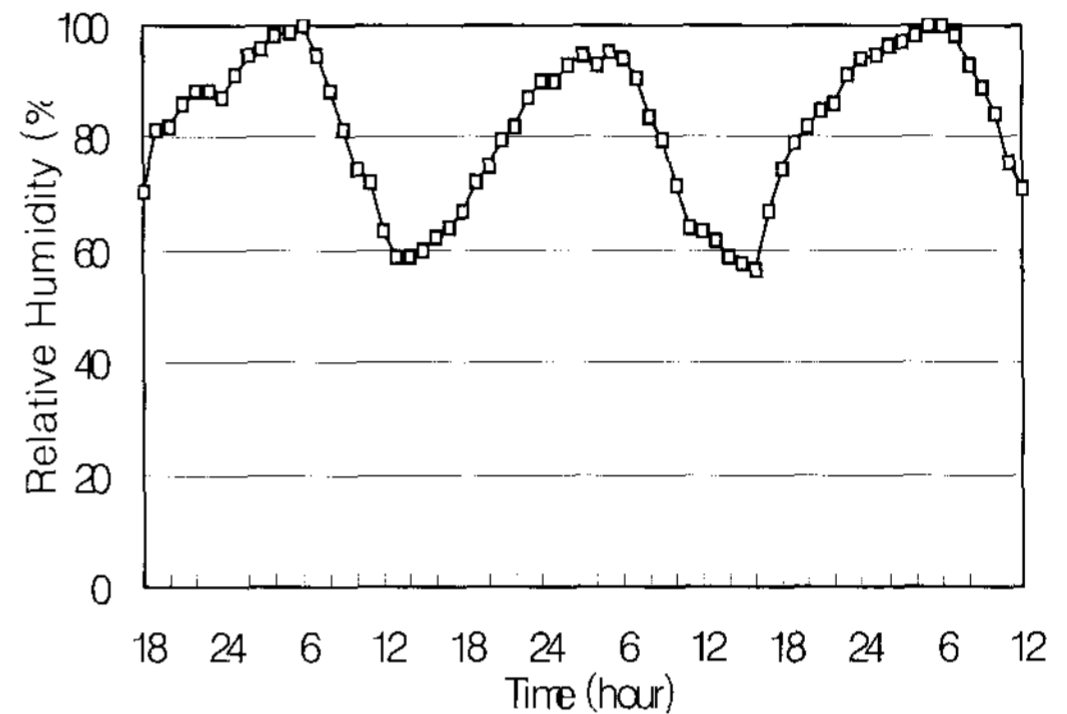


Fig. 8. Relative humidity

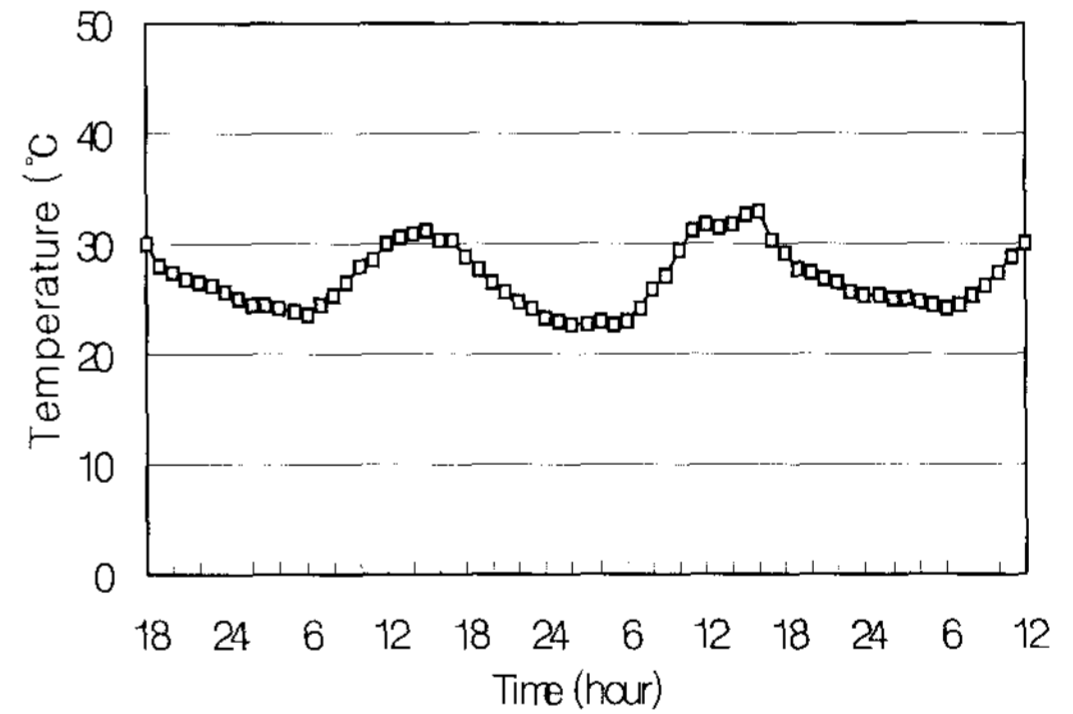


Fig. 7. Ambient air temperature

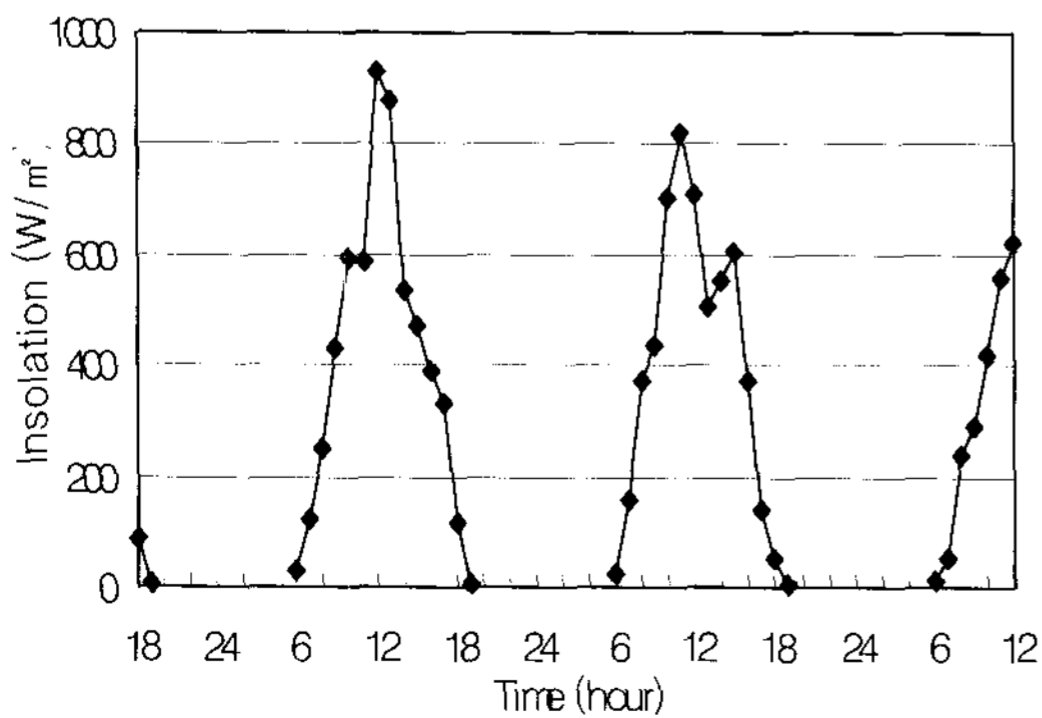


Fig. 6. Solar radiation on horizontal surface

Table 3. Thermal properties of material

Material	Conductivity (W/m°C)	Specific heat (kJ/kg°C)	Density (kg/m³)
Concrete	1.3	0.96	2243
Expanded Polystyrene	0.03	2.52	25

그림 9과 10은 증발구조체의 열전달에 대한 이론해석의 타당성을 검토하기 위해 실험결과와 비교한 것이다. 여기서 실험결과는 각 부위의 측정값을 면적가중 평균한 것이다. 이론해석의 경우 두 구조체 부재의 열적 물성치가 모두 동일한 상태에서 계산된 결과이며 초기의 실험 및 이론결과는 축열과정으로서 분석에서 제외한 것이다.

표면온도를 비교하면 이론과 실험에 따른 두 구조체의 열적 거동이 정확히 일치하고 있으나 부분적으로 최대 2~3°C의 온도차는 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 실험구조체 주변의 국부적인 기상변화와 시스템의 측면 열전달을 무시하고 1차원 열전달 문제로 가정한 이론해석의 결과 등에 일부 기인한 것으로 사료된다. 반면 이론해석에 따른 기존구조체 내부의 온도는 실험결과와 거의 동일한 안정된 분포를 보이고 있으며 증발구조체의 경우에도 주간의 일부 구간을 제외하고 실험결과와 동일한 온도분포를 나타내고 있다.

여기서 각 구조체의 열적거동을 비교하면, 급격한 온도상승을 나타내는 기존구조체에 비해 증발구조체의 표면 및 내부온도는 외기온과 거의 유사한 온도분포를 갖는 것을 알 수 있다. 이것은 기존구조체의 태양열 흡수에 따른 축열 상당량이 증발구조체에서는 순환수에 의해 제거되는 것을 의미하며 따라서 두 구조체는 상당외기온(sol-air temperature)이 가장 높은 15시경에 최대 온도차를 보이게 된다.

그림 11과 12는 증발구조체의 상부면을 흐르는 순환수의 공급 및 환수온도를 비교한 것으로 이론해석과 실험결과가 대체로 부합하는 것을 알 수 있다. 여기서 순환수의 공급온도는 배관 열손실이 거의 없는 본 실험에서 저수조의 온도와 같게 된다. 저수조로부터 공급되는 순환수가 안정된 온도분포를 보이는 반면, 환수온도는 다소 불규칙적인 분포로서 주변의 국부적인 외기변화에 직접적인 영향을 받는 것을 알 수 있다.

그림 13은 이론해석에 따른 순환수의 열적거동

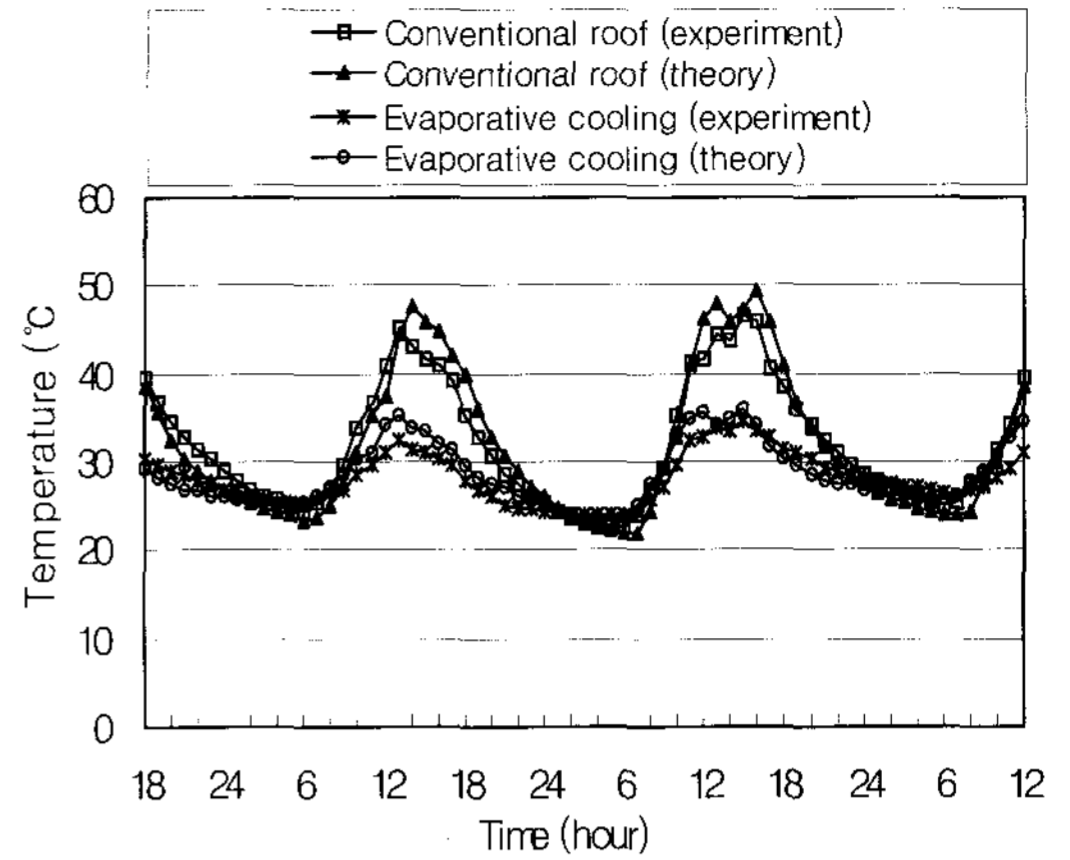


Fig. 9. Variation of surface temperature

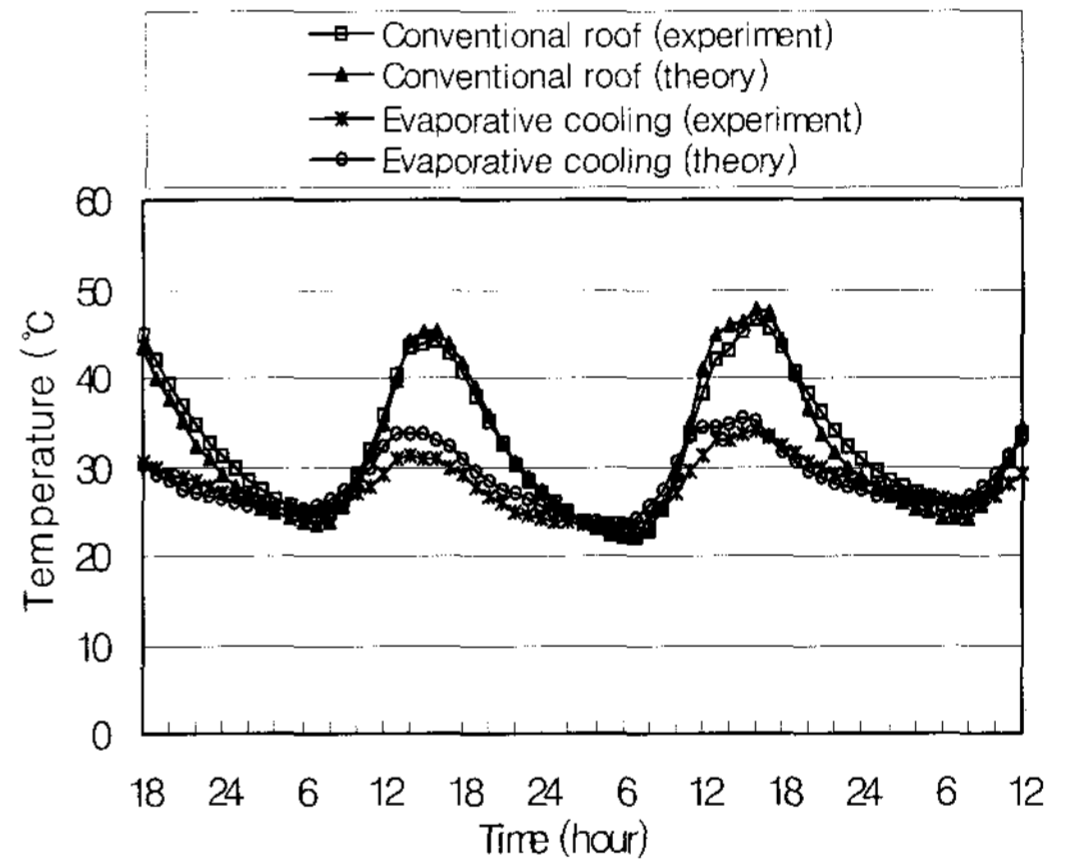


Fig. 10. Variation of internal temperature

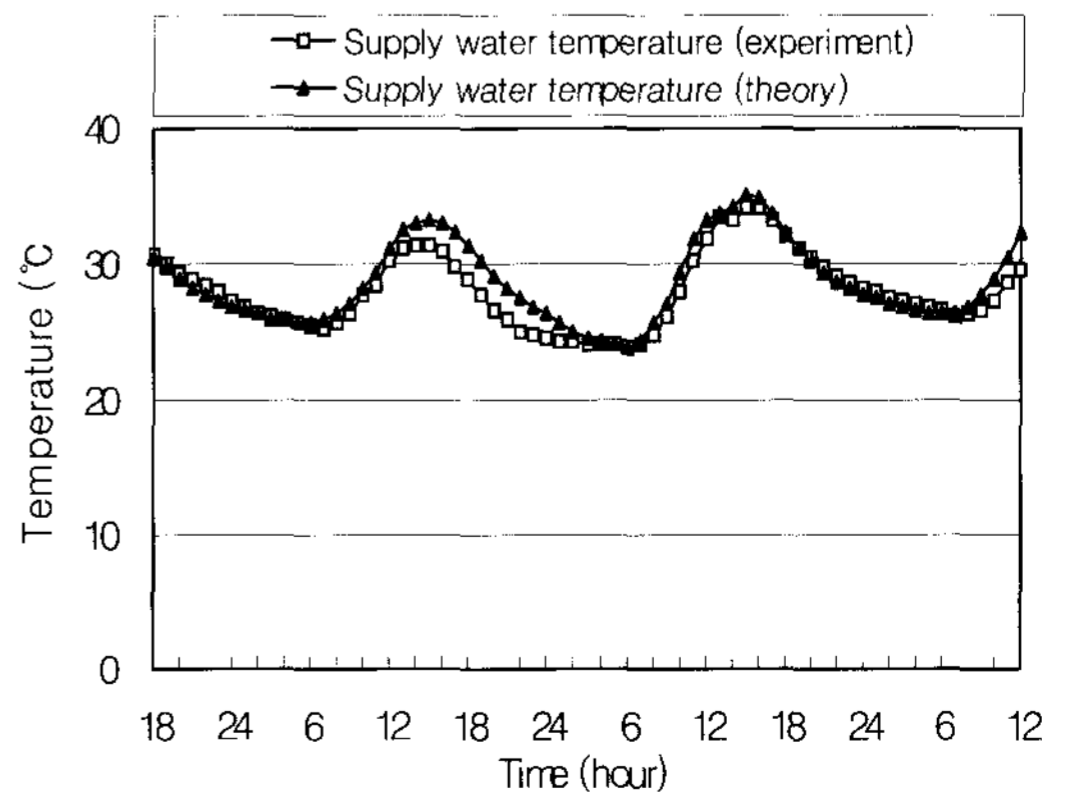


Fig. 11. Temperature of supply water

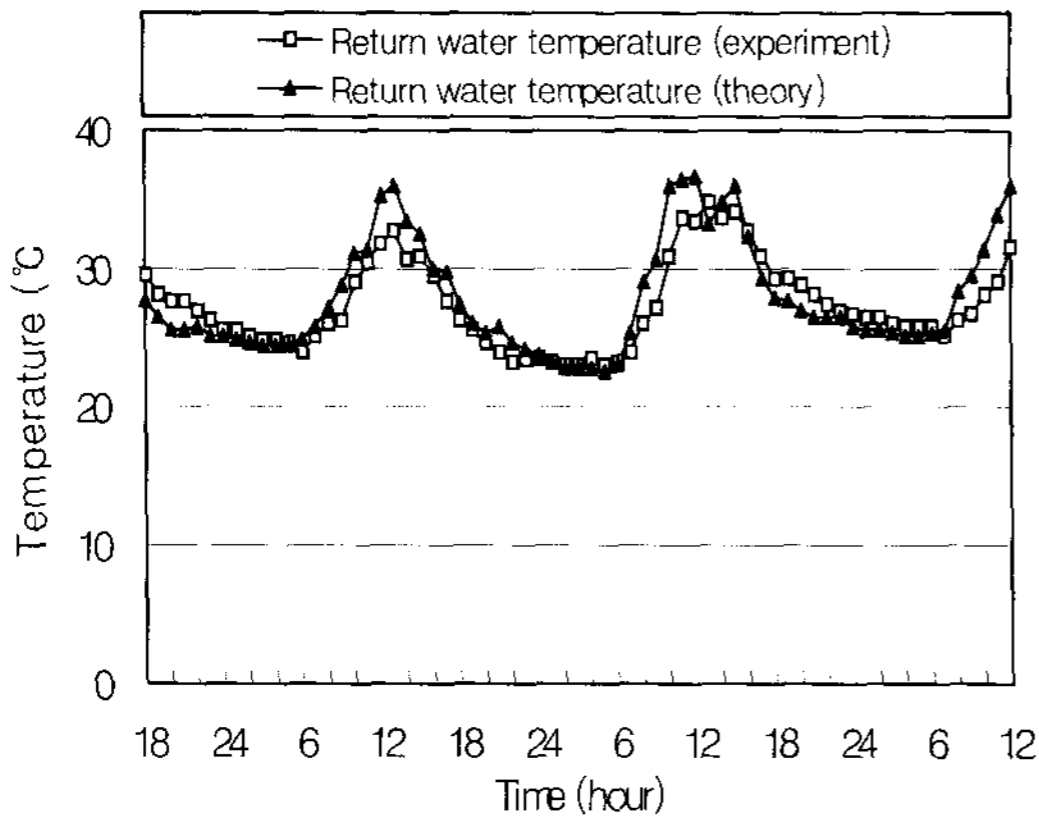


Fig. 12. Temperature of return water

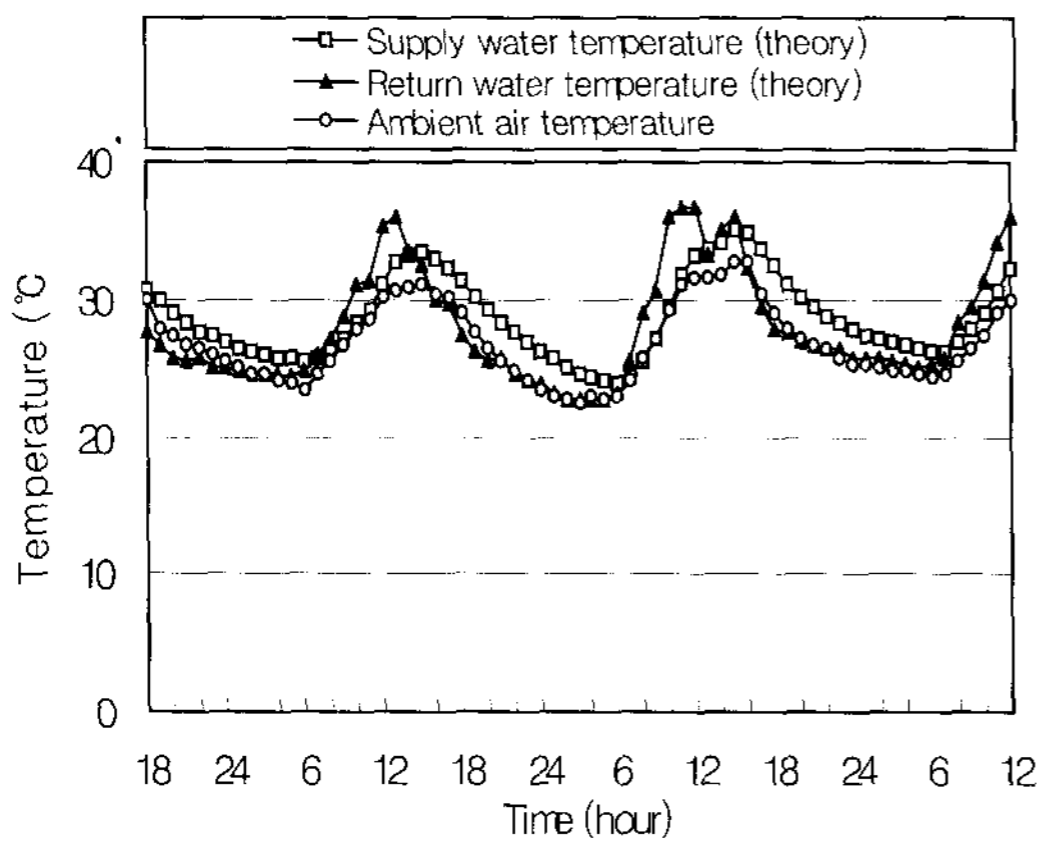


Fig. 13. Temperature of supply and return water

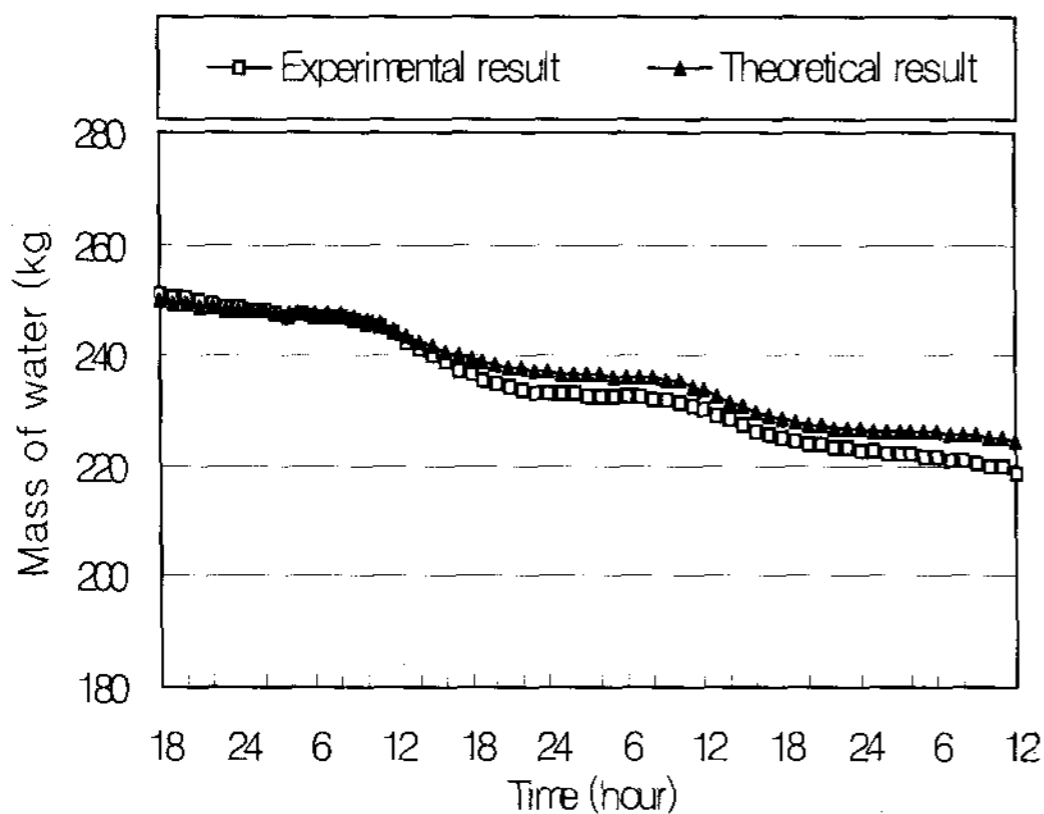


Fig. 14. Water mass of storage tank

을 고찰하기 위해 공급 및 환수온도를 나타낸 것이다. 앞서 연구결과⁶⁾에서 확인된바와 같이 외기온이 상승하는 일출이후 순환수의 환수온도가 공급온도에 비해 높아짐에 따라 저수조의 온도 또한 점차 상승하여 외기온보다 최대 5~6°C 높은 상태까지 도달하게 된다. 한편 상당외기온이 감소하는 오후 3시경부터는 환수온도가 급수온도보다 낮아지기 시작하여 일출 전까지 계속 진행되며 저수조의 수온이 최저 외기온까지 근접하게 된다.

그림 14는 순환수의 증발에 따른 저수조의 유량변화를 나타낸 것이다. 약 250kg의 초기 저수량을 기준으로 시뮬레이션 기간동안 이론 및 실험에 따른 유수면의 단위면적당 증발량은 각각 12kg과 14kg으로서 다소 차이는 있으나 동일한 형태의 유량변화를 보이고 있다. 상대습도가 80% 이하가 되는 9시~20시 사이에서 증발이 활발하게 진행되는 반면 상대습도가 80% 이상이 되는 시간대는 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 철근콘크리트조의 경사지붕모델을 대상으로 순환구조를 갖는 유수(flowing water)방식 증발냉각시스템의 열전달해석 알고리즘을 개발하고 실험을 통하여 그 타당성을 검토하였다.

실험은 동일한 구조로 제작된 두 개의 구조체를 대상으로 증발냉각시스템이 적용된 지붕모델과 기존 지붕모델에 대하여 동시에 실시하였으며, 이론해석은 증발 및 외기, 일사, 천공복사, 내부 열전달 등이 포함된 증발냉각시스템의 에너지방정식을 유도하고 수치해석을 이용하여 그 해를 구하였다. 그 결과 구조체 내·표면온도, 순환수의 급수 및 환수온도, 증발량 등의 계산결과가 실험결과와 거의 일치하는 것으로 나타나 이론해석

의 타당성이 입증되었다. 또한 증발냉각시스템은 하절기의 고온다습한 기후에서도 기존 구조체에 비해 우수한 열성능을 갖는 것으로 밝혀졌다.

후 기

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-1999-041-E00624)

참 고 문 헌

1. P. Gandhidasan, "Simplified model for the behavior of a roof-spray cooling system", *Applied Energy*, Vol. 34, pp. 69~77, 1989
2. S. Somasundaram and A. D. Carrasco, "An experimental and numerical modeling of a roof-spray cooling system", *ASHRAE Transaction*, OT-88-04-2, pp. 1091~1097, 1988.
3. J. I. Yellot, "Roof cooling with intermittent water sprays", 73rd Annual Meeting, American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineerings, 1966.
4. G. N. Tiwari, A. Kumar and M. S. Sodha, "A review-cooling by water evaporation over roof", *Energy conversation and managements*, Vol. 22, pp. 143~153, 1982.
5. A. Caraasco, R. Pittard, S. Kondepudi and S. Somasundaram, "Evaluation of a direct evaporative roof-spray cooling system", Texas A&M university 4th Annual Symposium on Improving Building Energy Efficiency in Hot and Humid Climates, Houston, Tex., 1987.
6. 신우철, 임득환, 장문석, 백남춘, "지붕 증발냉각시스템의 열성능에 관한 실험적 연구", *대한건축학회논문집*, Vol. 16, pp. 109~115, 2000.
7. D. Sultanovic, B. Bjerke, J. Rekstad and K. A. Villalonga, "A study of the heat transfer of rivulet flow on inclined plates", *Solar Energy*, Vol 60, No. 3/4, pp. 221~227, 1997.
8. ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1993.
9. 石川幸雄, "散水屋根のある多數室室溫計算の簡易化と散水の熱的効果に関する研究 第1報-計算法の概要", *日本空氣調和・衛生工學論文集*, No. 30, pp. 21~30, 1986.
10. J.A. Duffie and W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. -2nd ed., Wiley, New York, 1991.
11. Marlo Martin and Paul Berdahl, "Characteristics of Infraraed Sky Radiation in the United States", *Solar Energy*, Vol. 33, No. 3/4, pp. 321~336, 1984.
12. B. Givoni, *Passive and Low Energy Cooling of Building*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1994.
13. Sekhar N. Kondepud, "A simplified analytical method to evaluate the effects of roof spray evaporative cooling", *Energy conversation and managements*, Vol. 34, pp. 7~16, 1993.