

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 21, No. 1, 2001

공기순환구조를 갖는 축열지붕의 열전달해석

신우철*, 박석현**, 백남춘***

*대전대학교 건축공학과

**충주대학교 건축공학과

***한국에너지기술연구원

Analysis of Heat Transfer of Thermal Storage Roof with the Air Circulation System

U.C. Shin*, S.H. Park**, N.C. Baek***

**Department of Architectural Engineering, Daejeon University*

***Department of Architectural Engineering, Chungju National University*

****Korea Institute of Energy Research*

ABSTRACT

The paper discusses the modelling of the thermal storage roof with the air circulation system. In this system, the fully glazed absorber plate is put on the top of the conventional pitch roof made of massive concrete and acts as a solar air heater. Solar radiation collected into absorber is stored in the roof structure by radiation and convection so that it reduces the nighttime heating load through the roof. Another part of the energy is also transmitted to internal air drawn into the channel and is then introduced into the room. To analysis the system, the energy balance equations are developed and are solved using a finite difference method. The calculation results show a good agreement with the measured ones obtained from our experiments. From the results, it is seen that the thermal storage roof with the air circulation system reduces significantly the conductive heat loss compared with that for the conventional roof and has the instantaneous solar collection efficiency of about 30%.

기 호 설 명

A_g	: 집열면 면적
c_p	: 공기의 비열
D	: 통기층의 두께
D_h	: 수력학적 지름
h_∞	: 외표면 대류열전달계수
h_c	: 내표면 대류열전달계수
h_r	: 복사열전달계수
I_t	: 입사면 총 일사량
k	: 열전도계수
L	: 통기층의 길이
\dot{m}	: 유입공기의 질량유량
Nu	: Nusselt 수
Pr	: Prandtl 수
Ra	: Rayleigh 수
Re	: Reynold 수
T_a	: 외기온
T_c	: 콘크리트표면온도
T_{dp}	: 노점온도
T_f	: 통기층의 평균온도
T_g	: 유리온도
T_{gr}	: 지표면 온도
T_i	: 통기층 입구온도
T_p	: 집열판 온도
T_n	: 단열재 하부 표면온도
T_o	: 통기층 출구온도
T_{sky}	: 천공온도
W	: 통기층의 폭
α	: 흡수율
α'	: 열확산계수
β	: 지붕경사각
β'	: 체적 팽창계수
ε	: 방사율
η	: 시스템 효율
μ	: 점성계수
ρ	: 밀도
σ	: Stefan-Boltzmann 상수
ν	: 동점성계수

1. 서 론

주택, 체육관, 상가, 체육관 등 대부분의 저층 건축물에서 지붕면은 상대적으로 넓은 외피 면적을 갖는 부위로서 동절기에는 야간 천공복사열교환에 의해 열손실이 발생하고, 하절기에는 과도한 일사유입 등 열적으로 취약한 부분으로 작용하고 있어, 이 부위를 통한 열손실이 건물 전체의 열 부하에 큰 영향을 미치게 된다. 한편 남향의 경사 지붕면은 우리나라의 밀집된 주거환경의 특성상 주변의 건축물이나 수목 등에 의해 차폐되는 수직벽면에 비해 계절의 변화에도 상대적으로 일정하고 많은 일사량이 입사되어 풍부한 에너지를 확보할 수 있는 외피부위이다. 특히 우리나라 주택건물 외피의 대부분은 콘크리트 라멘조의 높은 축열성을 갖는 중량 구조체로서 집열성을 높인다면 형태 및 구조의 큰 변형 없이도 태양열 집열장치로 쉽게 활용할 수 있는 장점을 갖고 있다. 외국의 경우 지붕면을 활용한 각종 태양열 시스템¹⁾⁻⁵⁾의 개발이 활발하게 진행되어, 보급단계에 접어들고 있으나 국내에서는 이와 관련한 개발 및 연구가 미진한 실정에 있다. 유하식 집열기(Trickle Collector)⁶⁾를 수영장의 지붕구조체로 활용한 연구사례가 있으나 후속 연구는 진행되지 않았으며, 자연형 시스템의 개념이 도입된 지붕구조체의 사례는 보고된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 가장 많이 사용되는 기존의 콘크리트 라멘구조의 지붕을 태양열 시스템으로 활용하기 위한 “공기순환구조를 갖는 축열지붕”을 개발하고 이론해석 및 실험을 통하여 그 열전달을 분석하고자 한다.

2. 이론해석의 개요

공기순환구조를 갖는 축열지붕(이하 공기순환식 축열지붕)이란 철근콘크리트조의 경사지붕과

같은 중량구조를 갖는 기존의 지붕구조체 상부면에 무광흑색 도장한 철판(이하 집열판)과 투과유리를 설치하여 집열성을 높인 시스템으로서 상부 공기층이 밀폐된 반면 하부 공기층(이하 통기층)은 제어조건에 따라 개폐되며 송풍기에 의한 강제대류나 굴뚝효과(stock effect)의 자연대류에 의해 실내·외 공기가 유입되어 가열된 후 실내·외로 배출하게 된다. 이 시스템은 동절기 집열판에 집열된 태양열을 지붕구조체에 축열하여 지붕을 통한 야간 관류열손실을 줄이고, 동시에 실내에서 통기층으로 유입된 순환공기를 가열하여 주간 열부하를 감소시키게 된다. 반면 하절기에는 외기를 도입하여 집열된 태양열을 제거함으로써 냉방부하를 감소시키게 된다. 따라서, 공기순환식 축열지붕은 실내·외의 설치된 통기구(air vent)를 적절하게 제어함으로써 부하저감 뿐만 아니라 실내의 온열환경을 크게 개선할 수 있다.

그림 1은 이론해석을 위하여 시스템의 구성을 나타낸 것으로, 콘크리트와 단열재로 구성된 지붕구조체의 상부면에 일정한 간격을 두고 집열판과 유리판이 설치된다.

그림 2는 공기 순환식 축열지붕의 열전달 모델을 개략적으로 나타낸 것이다. 이 시스템내의 열전달은 일사, 복사, 대류 등의 복합된 경계조건을

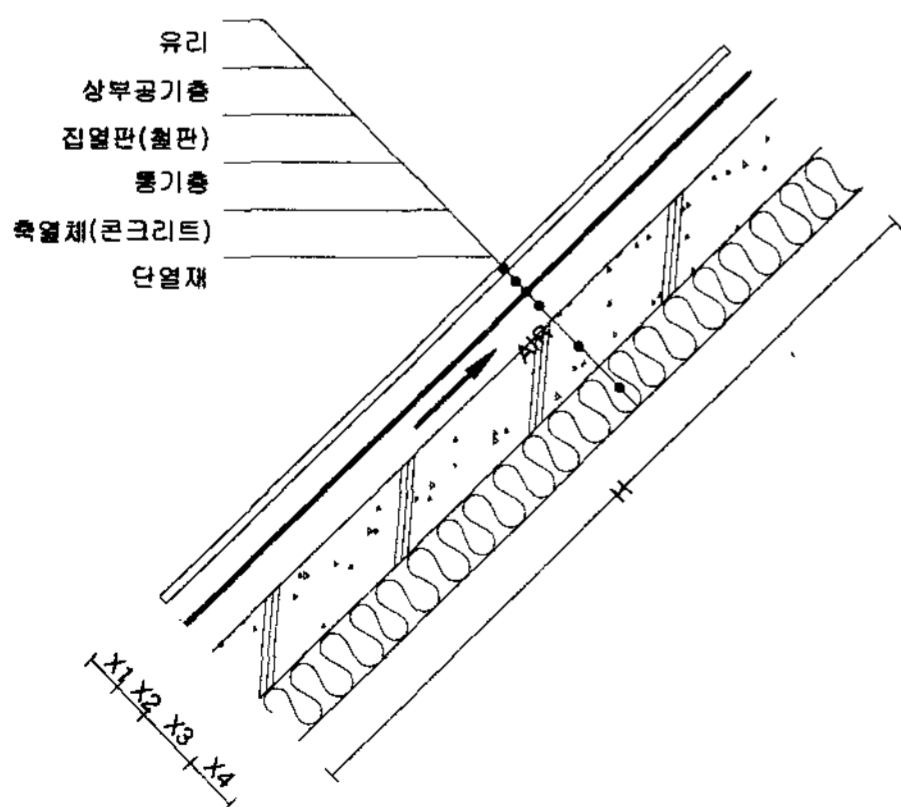


Fig. 1. 공기순환식 축열지붕의 구조

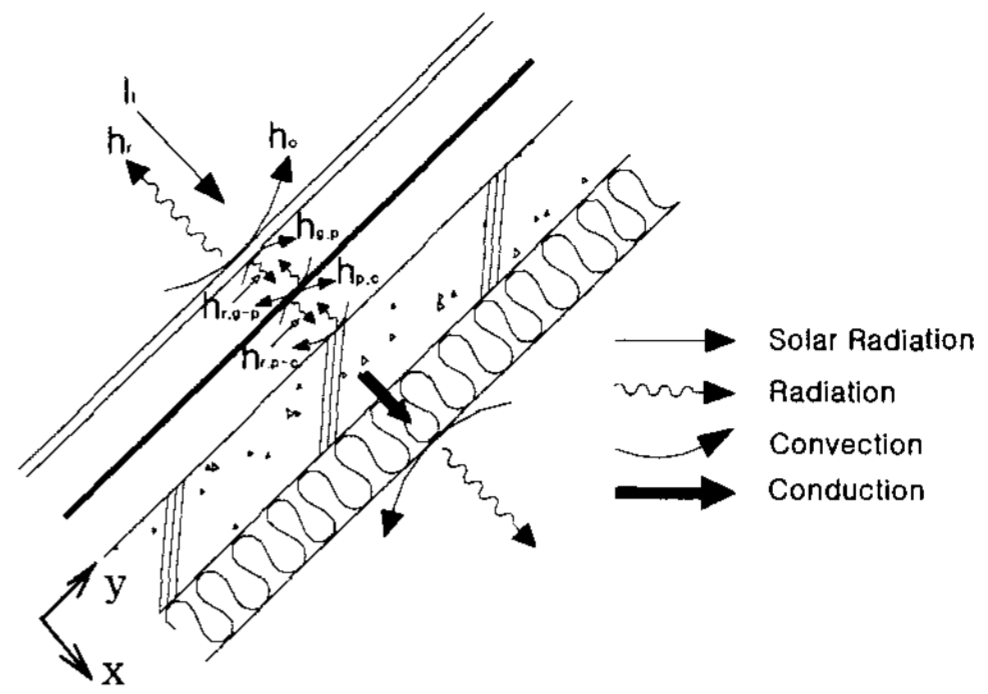


Fig. 2. 공기순환식 축열지붕의 열전달 모델

갖는 문제로서 본 연구의 이론해석에서는 구조체의 길이방향(y축)의 온도변화는 무시하고 x축 방향의 열전달만이 존재하는 1차원의 열전달 문제로 간주하였으며, 그 이외에 단순화를 위해서 다음과 같은 가정을 도입하였다.

- 시스템의 측면을 통한 열손실은 없다.
- 집열판 상·하부 공기층의 온도는 균일하다.
- 집열판의 열용량은 무시한다.
- 지표면의 온도는 외기온과 동일하다.

이와 같은 가정을 전제로 공기순환식 축열지붕에 대한 열평형방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

유리면

$$0 = \alpha I_t + h_{\infty}(T_a - T_g) + h_{r,sky-g}(T_{sky} - T_g) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + h_{r,gr-g}(T_{gr} - T_g) \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) + h_{c,g-p}(T_p - T_g) + h_{r,p-g}(T_p - T_g) \quad (1)$$

통기층 밀폐시 집열판

$$0 = \alpha I_t(\tau\alpha) + h_{c,p-g}(T_g - T_p) + h_{r,g-p}(T_g - T_p) + h_{c,p-c}(T_c - T_p) + h_{r,c-p}(T_c - T_p) \quad (2)$$

통기층 개방시 집열판

$$0 = aI_t(\tau\alpha) + h_{c,p-g}(T_g - T_p) + h_{r,g-p}(T_g - T_p) + h_{c,p-f}(T_f - T_p) + h_{r,c-p}(T_c - T_p) \quad (3)$$

통기층에 대한 열평형식은 다음과 같다.

$$\dot{m}c_p(T_o - T_i) = A_g(h_{c,p-f}(T_p - T_f) + h_{c,c-f}(T_c - T_f)) \quad (4)$$

통기층의 평균온도, T_f 는 다음과 같이 근사한다.

$$T_f = \frac{(T_o + T_i)}{2} \quad (5)$$

구조체(Concrete) 및 단열재 내부의 열전달은 다음식을 만족한다.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha' \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6)$$

통기층에 면한 구조체의 경계조건을 다음과 같이 설정할 수 있다.

① 통기층 밀폐시 구조체 상부면

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{c,c-p}(T_c - T_p) + h_{r,c-p}(T_c - T_p) \quad (7)$$

② 통기층 개방시 구조체 상부면

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{c,f-c}(T_c - T_f) + h_{r,c-p}(T_c - T_p) \quad (8)$$

③ 단열재 하부면

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=n} = h_\infty(T_n - T_a) \quad (9)$$

외표면 대류 열전달계수, h_∞ 는 Hettel과 Woertz⁷⁾이 제안한 다음식을 사용하였다.

$$h_o = 5.7 + 3.8V \quad (10)$$

집열부의 상·하부 공기층은 경사각 β 를 갖는 평행한 두 평판 사이의 밀폐공간으로서 자연대류 열전달계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁸⁾

$$Nu = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8\beta)^{1/6}}{Ra \cos \beta} \right] \times \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right]^+ \left[\left(\frac{Ra \cos \beta}{5830} \right) - 1 \right]^+ \quad (11)$$

여기서 우측항의 [+]는 해당 항의 값이 0보다 큰 경우 계산되나, [-]인 경우 해당 항은 1이 된다.

식 (11)에서 Rayleigh 수, Ra 는 다음과 같이 정의된다.

$$Ra = \frac{g\beta \Delta T D^3}{\nu\alpha} \quad (12)$$

통기층이 개방될 때, 두 평판사이의 강제대류 열전달수, h_c 는 다음과 같다.

$$h_c = Nu k_a / D_h \quad (13)$$

여기서 Nu 는 다음의 관계식을 사용하였다.

층류영역($Re < 2100$)일 때,⁹⁾

$$Nu = 4.9 + \frac{0.0606(Re Pr D_h/L)^{1.2}}{1 + 0.0909(Re Pr D_h/L)^{1.7} + Pr^{0.17}} \quad (14)$$

여기서 수력학적 지름(hydraulic diameter), D_h 와 Reynold 수, Re 는 다음과 같이 정의된다.

$$D = \frac{2DW}{(D+W)} \quad (15)$$

$$Re = \frac{vD_h}{\nu} = \frac{\dot{m}D_h}{\mu DW} \quad (16)$$

$$\eta = \frac{q_t}{I_t} \times 100 \quad (22)$$

난류영역($Re > 2100$)일 때,¹⁰⁾

$$Nu = 0.0158Re^{0.8} \quad (17)$$

두 평판사이의 복사열전달계수 $h_{r,i-j}$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$h_{r,i-j} = \frac{\sigma(T_i + T_j)(T_i^2 + T_j^2)}{1/\epsilon_i + 1/\epsilon_j - 1} \quad (18)$$

식 (1)의 유효천공온도(effective sky temperature), T_{sky} 는 노점온도, 외기온 및 운량의 함수로서 주어진다. 청명한 날의 온도는 Martin & Berdahl¹¹⁾이 제안한 다음식을 사용하였다.

$$T_{clear, sky} = T_a(0.711 + 0.0056 T_{dp} + 0.000073 T_{dp}^2 + 0.013 \cos(t))^{1/4} \quad (19)$$

운량이 증가하면 맑은 날에 비해 천공방사율(sky emissivity)이 증가하게 되고 따라서 천공온도가 높아진다.

$$T_{cloud, sky} = (C_a)^{1/4} T_{clear, sky} \quad (20)$$

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

$$C_a = 1 + 0.0224n - 0.0035n^2 + 0.00028n^3 \quad (21)$$

통기층이 개방될 때 공급공기의 취득열량을 고려한 순환식 축열지붕의 시스템 효율, η 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

여기서,

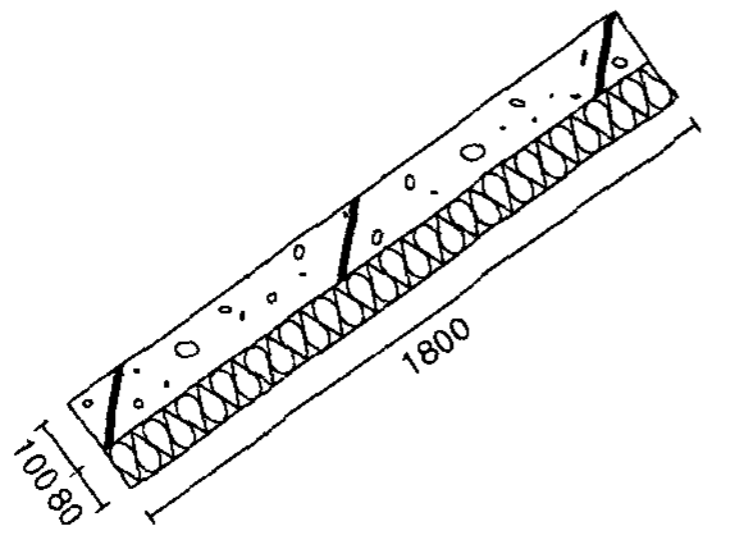
$$q_t = \dot{m} c_p(T_o - T_i) \quad (23)$$

비선형의 경계조건을 갖는 지배방정식 (1)~(6)은 현시적 방법(Explicit method)을 이용하여 이산화하였으며, Gauss-Siedel의 반복법으로 이산화방정식의 해를 각 시간 증분마다 계산하였다.

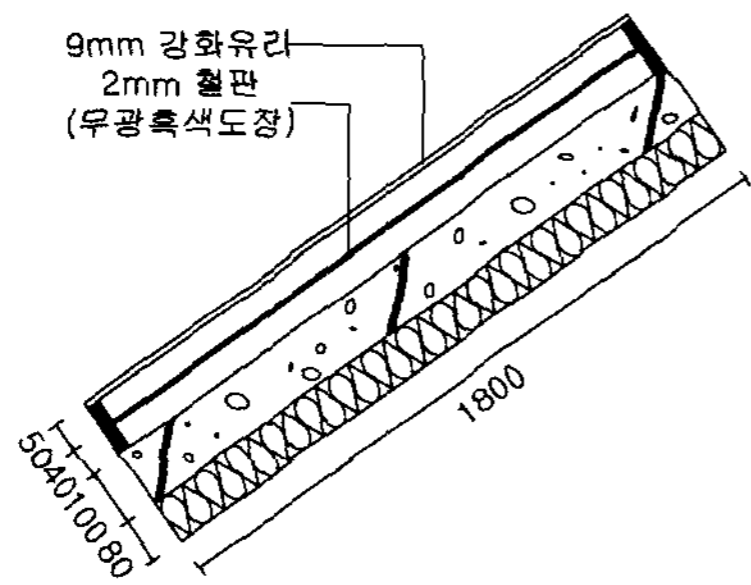
3. 실험방법

공기순환식 축열지붕의 열성능에 대한 이론해석의 타당성을 검토하기 위하여, 그림 3과 같은 기존 지붕구조체, 밀폐식 축열지붕 및 순환식 축열지붕 등 3가지 형태의 지붕 실험체를 1.2m(폭) × 1.8m(길이) 크기로 제작하였다.

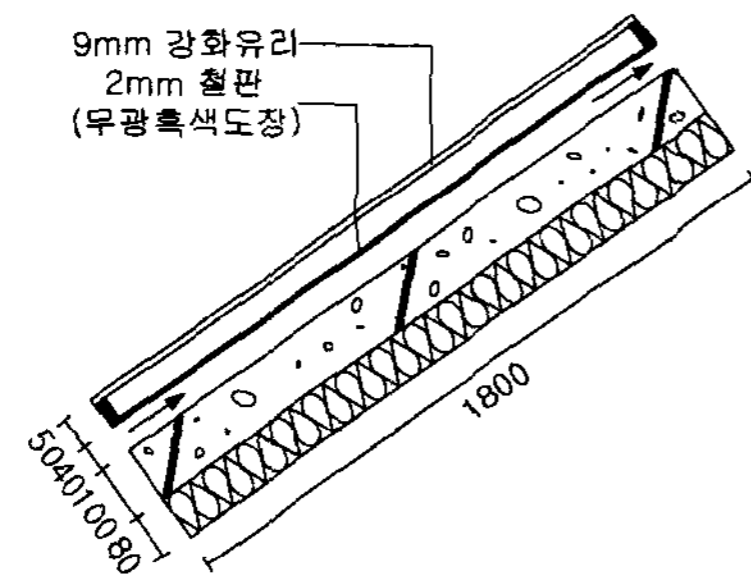
그림 3-a는 기존 지붕모델이 되는 지붕구조체의 단면을 나타낸 것으로 두께 100mm의 철근 콘크리트 슬라브 하부에 80mm 단열재를 부착하였다. 밀폐식(그림 3-b)과 순환식(그림 3-c) 축열지붕은 기존지붕의 집열성능을 높이기 위해 콘크리트 상부면에 무광흑색도장(Non-reflective black coating finish)한 철판으로 제작된 흡수판과 집열 및 단열을 위한 투명유리를 설치한 것이다. 밀폐식은 흡수판 상·하부 공기층을 완전히 밀폐하여 구조체의 축열성을 최대한 높일 수 있도록 설계된 반면, 순환식은 집열을 위한 상부 공기층만을 밀폐하고 흡수판 하부 공기층(통기층)은 제어조건에 따라 개폐할 수 있는 구조로 설계하였다. 또한 구조체의 상부 집열면을 제외한 모든 면에는 반사형 단열재로 마감하여 일사 및 주변 구조체와의 복사 열전달을 최대한 억제하였다.



(a) 기존지붕 구조체



(b) 밀폐식 축열지붕



(c) 순환식 축열지붕

Fig. 3. 지붕 실험체

표 1은 본 실험에서 사용된 주요 측정기기의 모델을 나타낸 것이다. 온도센서는 각 구조체의 집열관 표면, 콘크리트 상부표면과 내부에 좌·우 2열, 상·하 4열로 8개의 동일한 지점에 각각 설치하였으며, 집열부 상부 공기온도와 통기층의 온도는 각각 5개와 4개 지점에서 측정하였다.

Table 1. 측정기기의 사양

항 목	측정기기
Data Logger	HP 34970A
일사계	EPPLEY Radiometer
습도계	Delta HD 8507TC
온도센서	T/C T-type
유량계	DwyerSeries 640
풍향풍속계	Setra WMS-22B

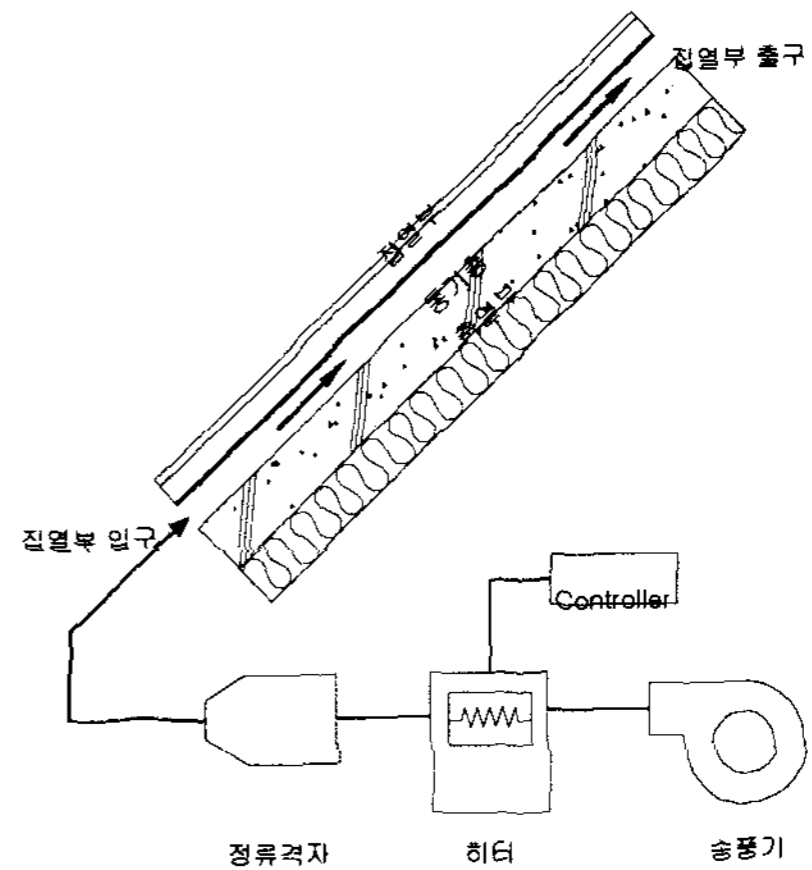


Fig. 4. 공기순환식 축열지붕의 실험장치

그림 4는 공기순환식 축열지붕의 실험장치를 나타낸 것이다. 실제로 통기층으로 공급되는 실내 공기의 온열조건을 가정하여, 통기층 입구에 설치된 송풍기와 히터는 흡입된 외기를 일정온도로 가열하여 공급하게 된다. 공기의 유량조절은 인버터에서 송풍기 모터의 회전속도 제어에 의해 이루어지고, 공급공기는 아크릴로 제작된 정류격자를 통과하여 집열부 입구에서 등속도 분포를 갖도록 하였다. 그러나 송풍기 가동 중단 시에는 열손실을 방지하기 위해 통기층 입·출구를 밀폐하게 된다.

4. 분석 및 고찰

지붕구조체에 대한 동절기 열성능 실험을 2000년 2월 24일부터 3월 4일까지 10일간 실시하였으며 이때 측정된 실험결과를 이론해석의 결과와 비교·분석하였다. 이때 실험조건으로서 3가지 지붕구조체의 경사각을 40°C로 동일하게 조절하고 순환공기의 공급온도를 20°C로 가정하였으며, 순환식 축열지붕의 송풍기 가동시의 평균유속은 3.3m/s로 설정하였다. 표 2에 정리한 바와 같이 동절기 송풍기의 On/off 제어변수는 2개로서, 집열판에 의해 가열되는 콘크리트 표면온도, T_c 를 모니터링(monitoring)하여 가정된 실온(20°C)보다 3°C이상 높아질 때 송풍기를 가동하였으며, 이때 흡입된 외기는 실내공기로 가정하여 컨트롤러에 의해 자동 제어되는 히터로 20°C까지 가열한 후 공급하였다. 한편 순환공기의 출구온도, T_o 가 공급공기의 온도보다 낮을 때 송풍기의 가동을 중지하고, 통기층을 밀폐하여 주변공기의 역사이편 작용에 의한 열손실을 방지하였다.

시뮬레이션을 위한 기상자료는 현장 측정데이터를 기준으로 작성하였다. 그림 5는 실험기간중 외기조건이 비교적 양호한 3일(2000년 2월 28일~3월1일) 동안의 시스템의 입사면 일사량과 외기온을 나타낸 것이다. 일사량은 최대 980~1080W/m²의 균일한 분포를 보이고 있으며, 3일 동안의 평균 외기온은 -1°C로서 최대 16°C의 일교차를 나타내고 있다. 표 3은 시뮬레이션에서 사용된 부재의 열적 물성치를 정리한 것이다.

Table 2. 송풍기 제어변수

구분	송풍기 제어변수	
동절기	γ_1	$T_H = T_c, \Delta T_H = 3^\circ C$ $T_L = 20^\circ C, \Delta T_L = 0^\circ C$
	γ_2	$T_H = T_o, \Delta T_H = 0^\circ C$ $T_L = 20^\circ C, \Delta T_L = 0^\circ C$

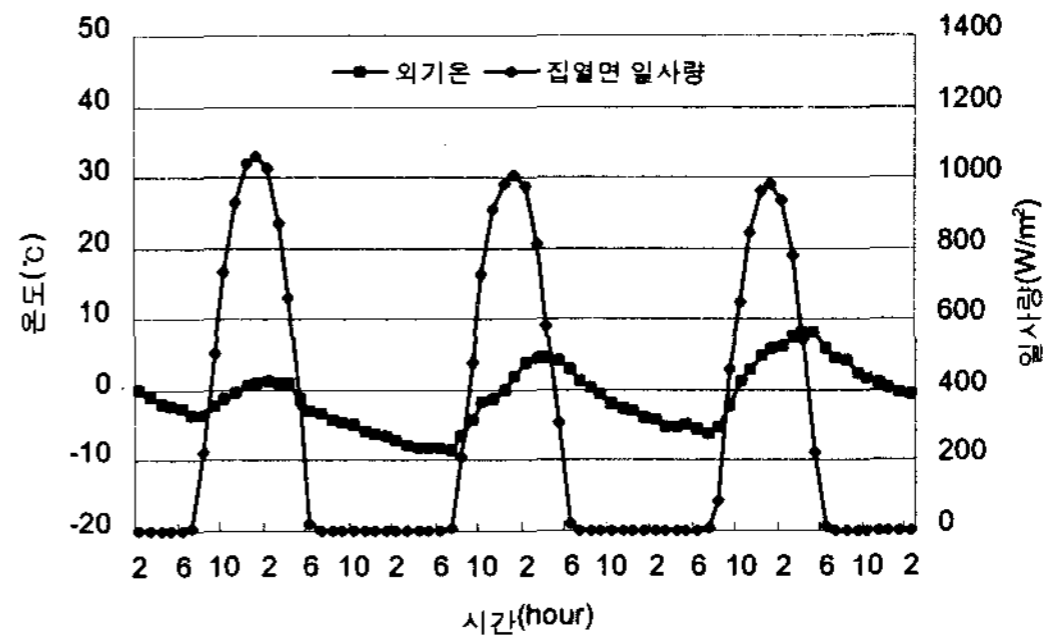


Fig. 5. 외기온 및 수평면 일사량

Table 3. 부재의 열적 물성치

부재	열전도율 (W/m°C)	비열 (kJ/kg°C)	밀도 (kg/m ³)
유리	1.05	750	2470
철판	43	473	7800
콘크리트	1.3	0.96	2243
단열재	0.03	2.52	25

그림 6~8은 순환식, 밀폐식 축열지붕 및 기존 지붕구조체의 열전달에 대한 이론해석과 실험결과를 비교하기 위하여 각 부위의 온도분포를 하루동안(2월29일) 나타낸 것이다. 여기서 실험결과는 각 부위의 측정값을 면적가중 평균한 것이다. 이론해석의 경우 세 구조체 부재의 열적 물성치가 모두 동일한 상태에서 계산된 결과이며, 초기 계산결과는 구조체 내부의 축열이 충분히 이루어지지 않은 상태로서 분석대상에서 제외하였다.

순환식 축열지붕의 경우 이론과 실험에 따른 집열판과 통기층, 구조체 표면온도 등의 열적거동이 일치하는 것을 알 수 있다. 반면 이론해석에 따른 구조체 내부의 온도는 주간동안 거의 동일한 온도분포를 갖고 있으나 야간에는 실험결과에 비해 2~3°C 높은 온도를 보이고 있다. 이것은 시스템의 측면 열손실을 무시하고 1차원 열전달 문제로 가정한 이론해석에 비해, 실제 실험구조체

는 측면을 통해 열손실이 발생하며 이로 인해 구조체 내부의 축열 열량이 감소된 결과로 사료된다. 한편 밀폐식 축열지붕의 경우에도, 각 부위에 대한 이론해석과 실험결과가 일치하고 있으나 구조체 측면의 열손실에 따른 구조체 내부의 야간 온도차는 여전히 발생하고 있다. 그러나 주간 축열 열량이 상대적으로 적은 기존 지붕구조체의 경우에는 거의 동일한 온도분포를 보이고 있다.

여기서 각 구조체의 열적거동을 비교하면, 순환식의 경우 밀폐식과 거의 유사한 온도패턴을 나타내고 있으나 통기층이 개방될 때 집열판과 구조체의 표면온도가 밀폐식에 비해 급격히 떨어지며 일정한 통기층의 온도를 갖는 것을 알 수 있다. 이것은 집열된 열량중 이에 상당하는 열량이 순환공기에 취득되어 실내로 공급되고 있음을 의미하며, 이에 따른 구조체 내부온도 또한 밀폐식에 비해 다소 낮은 분포를 갖게 된다. 한편 열손실이 많은 야간 기존 지붕구조체의 내부온도가 외기온과 거의 동일한 -10°C 까지 떨어지는데 비해, 유리와 집열판으로 마감된 순환식 축열지붕의 내부온도는 10°C 이상 높은 온도분포를 나타냄으로서 상대적으로 우수한 야간 관류열저항을 보이고 있다.

그림 9~10은 시뮬레이션 기간 중 공기순환식 축열지붕의 통기층 출구온도와 순간 집열효율을 이론해석을 통해 나타낸 것이다. 일사조건이 양호한 3일 동안, 평균유속 3.3m/s 의 20°C 상태로 유입된 공급공기의 평균 출구온도는 22°C 로서 2°C 의 입·출구 온도차를 보이고 있다. 여기서 송풍기는 오전 12:30 경부터 가동되어 오후 6시경 중지되며, 1일 1회의 On/off로서 매우 단순하고 효율적으로 제어되고 있는 것을 알 수 있다. 그림 10은 앞서 언급한 공급공기의 취득열량을 입사면 총일사량에 대한 백분율로 나타낸 것으로, 구조체의 축열 열량은 제외한 수치이다. 순간 집열효율은 평균 30%로서 기존의 태양열 집열기¹²⁾에 비해 낮은 효율을 나타내고 있으나, 구조체의 축열

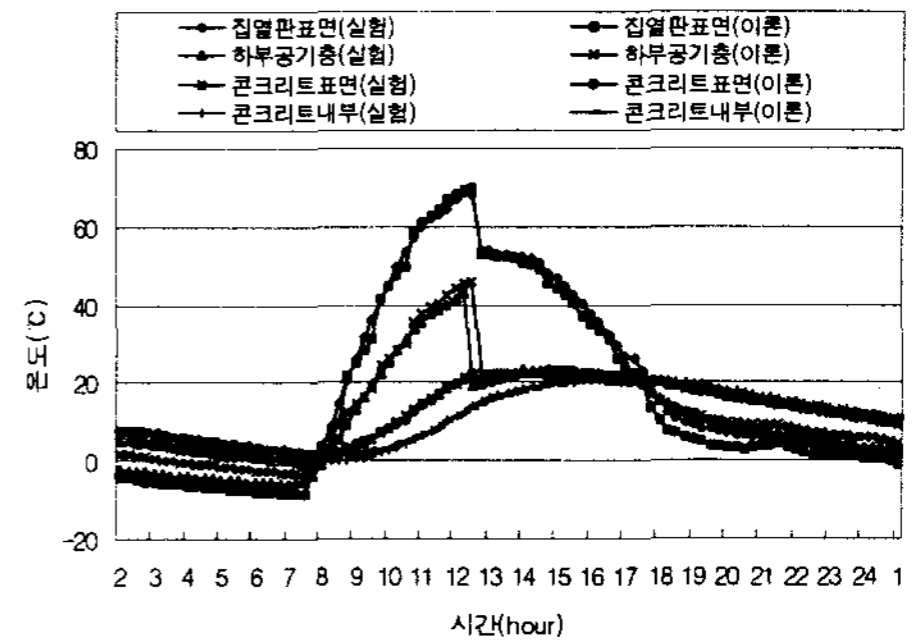


Fig. 6. 순환식 축열지붕의 온도분포

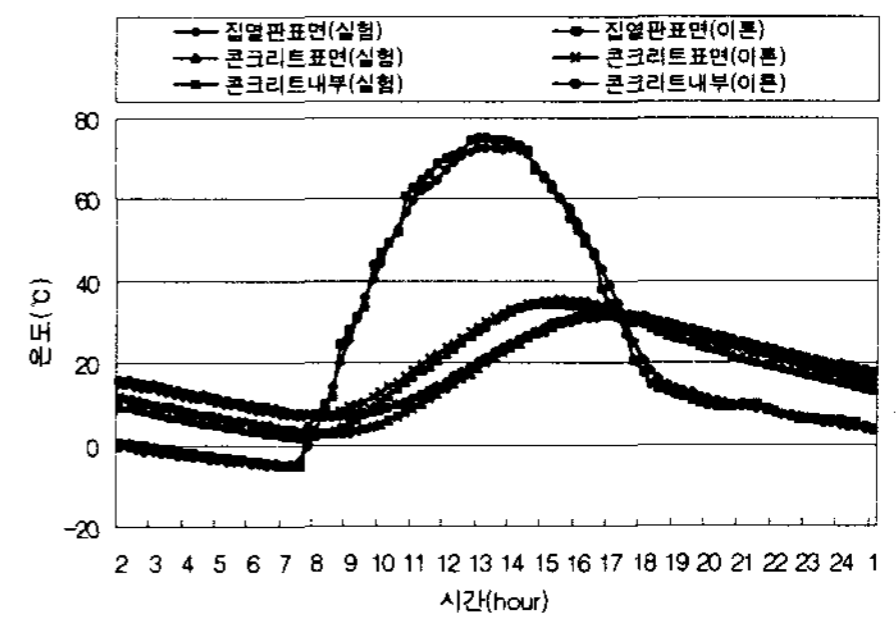


Fig. 7. 밀폐식 축열지붕의 온도분포

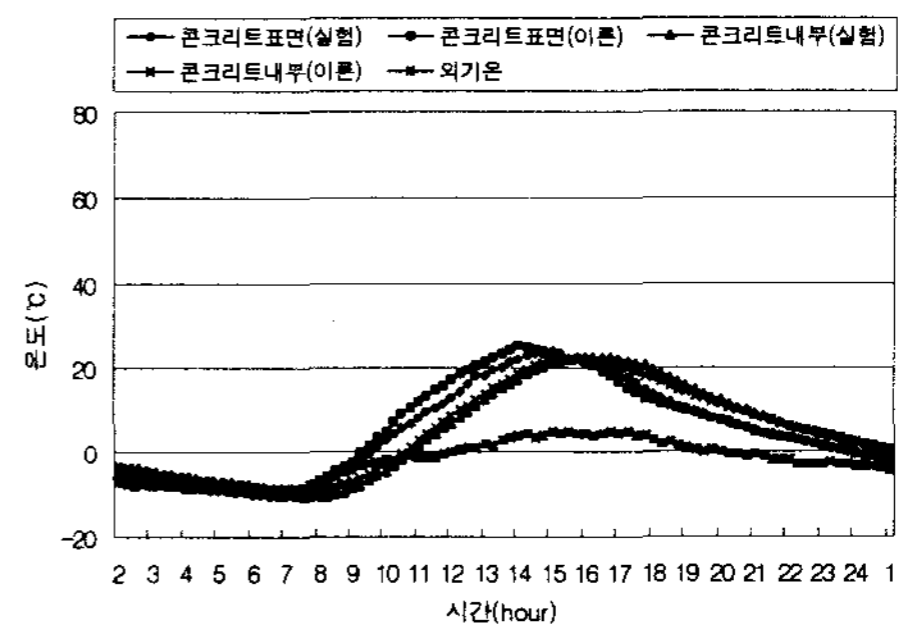


Fig. 8. 기존지붕구조체의 온도분포

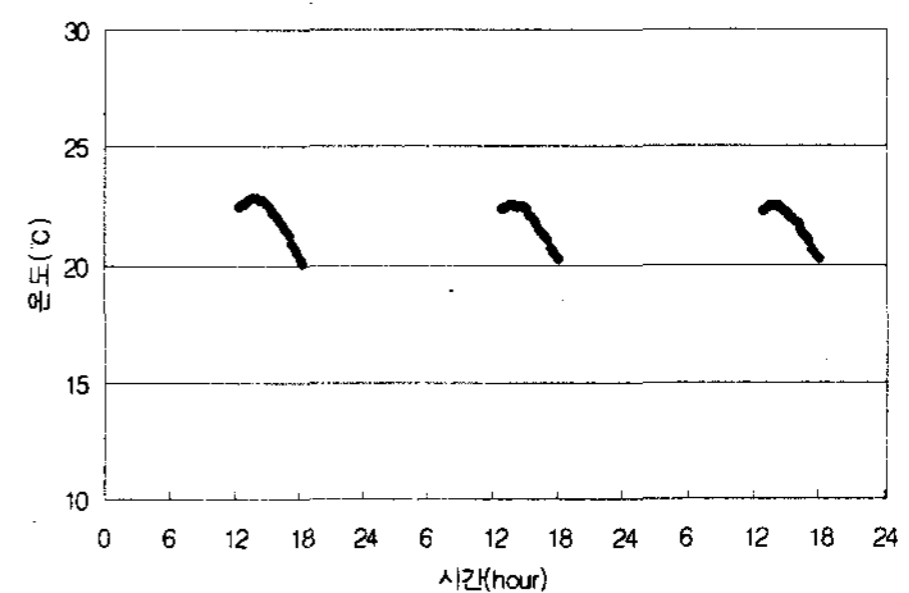


Fig. 9. 통기층 출구온도

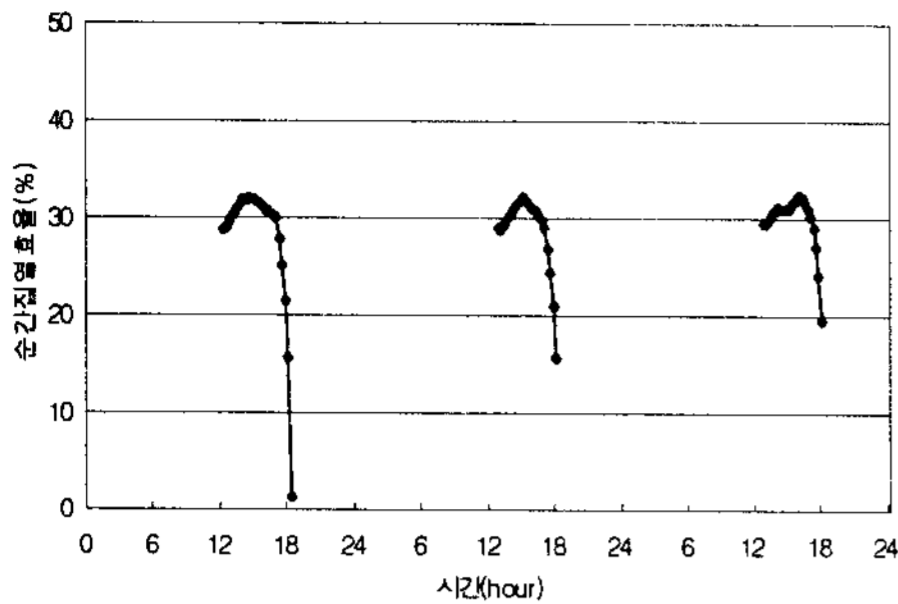


Fig. 10. 순간집열효율

에 따라 상대적으로 매우 균일한 집열효율을 보이고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 “공기순환구조를 갖는 축열지붕”을 개발하기 위한 연구의 일환으로 세 가지 지붕형태에 대한 열전달을 이론적으로 해석하고 실험을 통하여 그 타당성과 그에 따른 결과를 비교·분석하였다. 실험은 순환식 축열지붕과 밀폐식 축열지붕, 기존 지붕구조체 등 3가지 형태의 지붕실험체를 대상으로 실시하였으며, 이론해석은 외기와 일사, 천공복사, 내부열전달 등이 고려된 지붕 구조체의 에너지 평형방정식을 유도하고 유한차분법을 이용하여 그 해를 구하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 이론해석에 따른 집열면과 구조체 표면, 내부온도 등의 온도분포가 실험결과와 거의 일치하는 것으로 나타나 이론해석의 타당성이 입증되었다.

둘째, 구조체의 축열열량을 제외한 공기순환식 축열지붕 실험구조체의 태양열 순간 집열효율은 평균 30% 정도로 분석되며, 기존 지붕구조체에 비해 우수한 관류열저항을 나타낸다.

셋째, 공기순환식 축열지붕의 송풍기는 1일 1회의 On/Off 제어로 매우 단순하고 효율적으로

작동되었다.

후 기

이 연구는 1998년도 산업자원부에서 주관하는 에너지학술진흥사업의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

참 고 문 헌

1. Jang He and etc., “The passive cooling and dehumidifying in the outdoor-air heat collecting solar system”, Proceedings of the ISES 1997 Solar World Congress, Taejon Korea, 1997.
2. Tika Bunnag, A study of a roof solar collector towards the natural ventilation of new habitations, School of Energy and Material, Thailand, M.S. Thesis, 994.
3. Wasim Saman, Martin Belusco., “Roof-integrated solar space air heater”, Proceedings of the ISES 1997 Solar World Congress, Taejon Korea, 1997.
4. K.T.K. Ho and D.L. Loveday, “Covered profiled steel cladding as an air heating solar collector : laboratory testing, modeling and validation”, Energy and Buildings, 26, pp.293~301, 1997.
5. <http://nmrc.ucc.ie/groups/solar/>
6. 한국동력자원연구소, 자연형 태양열 시스템 개발(IV), 1984
7. J. P. Holman, Heat Transfer, 7th edition, 1990.
8. K. G. T. Hollands, T. E. Unny, G. D. Raithby, and L. Konic, “Free convection

- heat transfer across inclined air layers”, J. Heat Transfer, Vol. 98, pp.189~195, 1976.
9. W.E. Mercer, W.M. Pearce and J.E. Hitchcock, “Laminar forced convection in the entrance region between parallel flat plates”, J Heat Trans.-T. ASME, Vol. 89, pp.251~257, 1967
10. J. Duffie and W. Beckmann, Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons, New York, 1980.
11. Marlo Martin and Paul Berdahl, “Characteristics of Infrared Sky Radiation in the United States”, Solar Energy, Vol. 33, No. 3/4, pp.321~336, 1984.
12. 김보철외 3인, “태양열 이용 냉난방 공조시스템중 평판형집열기의 동계 상부 열손실 해석”, 태양에너지 Vol18, No.3, 1998, pp15~24.
13. 김보철외 3인, “태양열 이용 냉난방 공조시스템중 공기식집열기의 집열효율에 관한 연구”, 태양에너지 Vol20, No.4, 2000, pp.1~8.