

## 다공성 물질을 이용한 공기용 태양열 집열기의 설계를 위한 이론적 연구

황 용 하\* · 박 승 호\*\* · 김 종 억\*\*

\* 충주산업대학교 열공학과

\*\*홍익대학교 기계공학과

## A Theoretical Study for the Design of Solar Air Heaters Using Porous Material

Yong-Ha Hwang\* · Seung-ho Park\*\* · Jong-Eok Kim\*\*

\* Department of Thermal Engineering, National Chung ju University

\*\*Department of Mechanical Engineering, Hong-Ik University

### 요 약

본 연구에서는 다공성 물질을 이용한 공기용 태양열 집열기(Solar Air Heater)의 설계를 위한 이론적 해석을 하였다. 해석시 필요한 유리 덮개 및 다공성 매질의 파장에 따른 복사특성을 Visible Spectrometer 및 FT-IR로 측정하였다. 다공성 매질로 15 메쉬의 Stainless Steel Wire Screen을 대상으로 하였다. 열전달 현상은 1차원으로 가정하고, 열복사는 Two-Flux Model을 사용하여, 여러 경우의 유량 및 복사 물성치에 대한 집열기 내부에서의 공기온도 및 다공성 매질의 온도를 계산하여 이에 따른 집열기의 효율 등을 계산하였다. 결과로는 무광택 페인트 코팅이 된 경우가 좋은 복사특성을 보였고, 공기유량이 증가할수록, 알베도(Albedo)는 가시광선 영역에서는 작을수록, 적외선 영역에서는 클수록 집열기의 효율은 증가하였다. 다공성 매질의 두께는 0.001m가 적합함을 보였다. 본 연구에서 이는 광학적 두께(Optical Thickness)가 약 1 정도를 의미한다.

### ABSTRACT

A theoretical study is conducted for the design of solar air heaters using porous material. Radiative characteristics of glazing and porous absorbing media are found through spectral transmittances measured by the Visible spectrometer and the FT-IR. Using those

characteristics the efficiencies of collectors are calculated one-dimensionally with the use of the Two-Flux radiation model. The efficiencies increase, as the air flow rates or albedos in the visible range increase, and as albedos in the IR range decrease. The optimum thickness of the porous medium of 15-mesh stainless steel wire screens is 0.001m, which represents the opacity of one.

## Nomenclature

A : Surface area or Absorptance  
 B : Incident radiation energy flux  
 b : Backscattering fraction factor  
 $C_{pa}$  : Specific heat of air  
 d : Thickness  
 E : Emittance  
 H : Thickness of glass window  
 h : Convective heat transfer coefficient  
 i :  $\sqrt{-1}$   
 k : Thermal conductivity  
 L : Porous matrix thickness  
 m : Air flow rate  
 N : Complex refractive index  
 n : Real part of complex refractive index  
 q : Radiant heat flux  
 R : Reflectance  
 T : Temperature  
 t : Transmittance coefficient  
 U : Velocity  
 x : Coordinate in the x-direction

## Greek letters

$\lambda$  : Wavelength  
 $\tau$  : Transmittance  
 $\rho$  : Density  
 $\omega$  : Backscattering albedo  
 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann constant, absorption or scattering coefficient

## Superscripts

+, - : Inward and outward radiation

## Subscripts

a : Air or absorption  
 c : Gap between the 2nd window and the porous matrix  
 e : Exit  
 g : Gap between the 1st and 2nd windows  
 I : Infrared range  
 i : Inlet  
 ins : Insulation  
 l : Leaving  
 o : Outlet or outgoing  
 p : Porous matrix  
 s : Scattering  
 v : Visible range  
 w : Windows  
 1 : Top glass window cover  
 2 : Lower glass window cover

## I. 서 론

다공성 매질에서의 에너지 전달은 유체공학 및 열공학의 제반 분야에서 급속도로 연구가 진행 발전되고 있는 과제중의 하나이다<sup>(1)</sup>. 다공성 매질 내부의 유체가 내부 압력구배에 의하여 이동하면서 에너지를 전달하는 현상은 석유공업

및 지구열공학(geothermal engineering)에서 널리 연구되고 있다. 이와 더불어, 다공성 매질은 인간이 개발한 많은 시스템, 극초음속 비행체, 터빈 깃, 극저온의 단열장치, 스텔링 장치의 재생기, 전자장비, 폐열회수 장치, 체적형 태양열 집열기, 원자로의 노심 등 광범위한 분야에 걸쳐, 능동적인(active) 고효율의 열교환 또는 단열 매체로서 널리 이용되고, 또한 이의 적극적 응용을 위하여 많은 노력이 집중되고 있다. 이의 일환으로 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 다공성 물질을 이용한 체적형 태양열 집열기에서의 열 전달 현상을 이해하여, 고효율의 태양열 집열기의 실용화를 위한 설계기술 확립 및 기초자료 획득에 그 목표를 두고 있다.

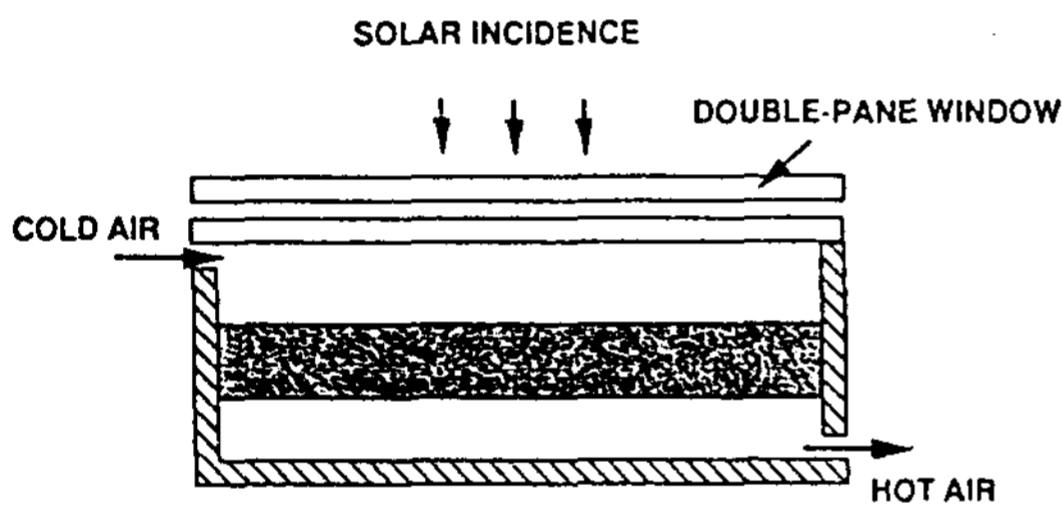


Fig. 1 Schematic diagram of the porous matrix solar collector

체적형 집열 시스템은 평판형 집열 시스템과는 달리 최근에서야 연구가 진행되어왔고 미국 및 유럽등지에서 좋은 결과<sup>(2-7)</sup>를 얻고 있어서 곧 실용화가 예상되는 장치이다. 우리나라에서는 평판에 대한 연구가 많이 진행되어져 왔으나<sup>(8-11)</sup> 체적형에 대해서는 드문 실정이다. 이 체적형은 내부 형상이 복잡하여 해석 하기에는 단순하지 않으나 고효율 및 저렴한 시스템이 될 수 있으므로 경제적이다.

체적형 집열기는 주로 공기를 열 매체로 하고 이의 개략도는 Fig. 1에 나타나 있다. 태양열을 집열표면에서 흡수하는 평판형 집열기와는 달리 체적형 집열기는 태양열을 장치 내부에서 흡수한다<sup>(2-7)</sup>. 따라서, 다공성 matrix가 이용되고 이는 기존의 평판 집열기의 흡수 능력을 훨씬 능가하도록 cavity radiator를 형성하게 된다<sup>(12)</sup>. 유리

덮개를 통과한 태양에너지가 다공성 matrix에 의해 흡수 되고 이 matrix 사이로 흐르는 유체 (여기서는 공기)가 흡수된 에너지를 회수하여 난방 및 고온수용 열원으로 이용된다. 이러한 집열기에서 일어나는 에너지 수수과정은 크게 나누면, 태양에너지가 복사열전달을 통해 집열기의 각 부품(주로 다공성 matrix)에 전달되는 과정과 이렇게 해서 가열된 부분들을 작동유체인 공기가 통과하면서 최종적으로 에너지를 전달 받는 대류열전달 과정으로 나뉠 수 있다.

본 연구에서는 유리 및 다공성 매질의 파장에 따른 투과율을 Visible Spectrometer와 FT-IR을 사용하여 측정하며, 이들의 복사특성을 상관 관계식으로부터 구하여 집열기에 대한 이론 해석에 사용하였다. 이론 해석에서는 열전달을 일차원 전달 현상으로 가정하였고 복사열전달은 Two-Flux 모델<sup>(13)</sup>을 사용하여 집열기의 특성 및 효율을 계산하였다. 또한, 태양이 없는 경우 즉, 야간에 있어서의 온도강하를 계산하여 공기 냉각기로의 적용 가능성을 고찰하였다.

## II. 복사 물성치의 측정

열복사 물성치의 측정 및 이에 대한 이론 해석은 오래전부터 고효율 태양열 집열 시스템 개발이라는 관점 및 고온 또는 저온 시스템의 열전달 관점에서 행하여져 왔다. 뿐만 아니라 신물질의 확인에서도 많이 이용되어 왔다. 본 연구에서는 집열기의 덮개로 사용되는 유리와 다공성 매질로 사용되는 Stainless Steel Wire Screen의 투과율을 측정하여 복소굴절율 또는 흡수 및 후면 산란계수 등을 계산하였다. 여기서 파장에 따른 투과율을 측정하기 위하여 가시광선 영역에서는 HP-8452 Visible Spectrometer가, 적외선 영역에서는 MIDAC-1200 FT-IR(Fourier Transformer-Infrared)이 사용 되었다.

유리의 복사 물성치인 복소굴절율을 구하기 위하여 투과율을 측정하였고 매끄러운 평판이라 가정하여 전자기론으로부터 유도된 투과율에

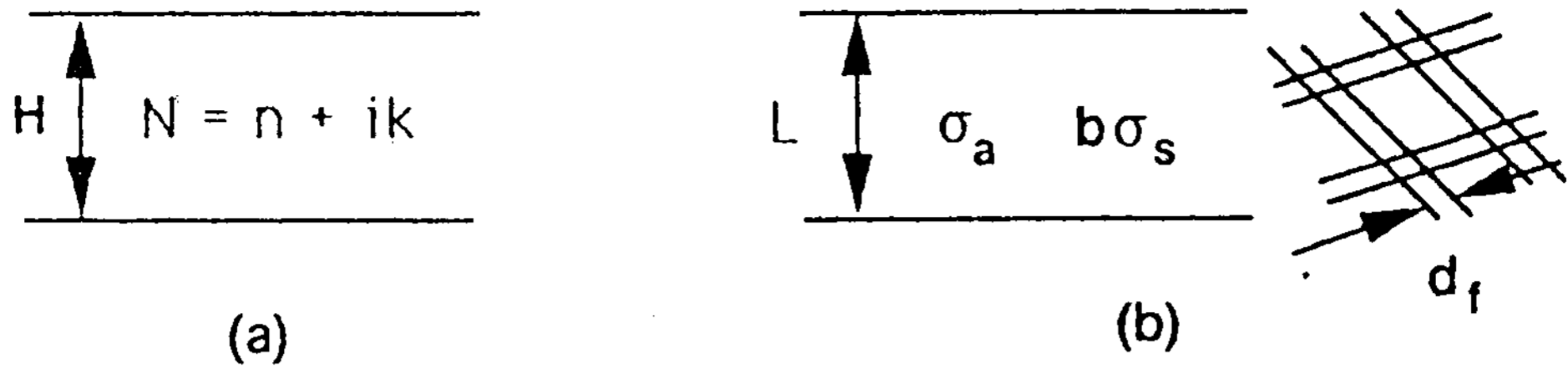


Fig. 2 (a) window glass cover (b) porous matrix made of wire screens

대한 식<sup>(14)</sup>을 적용하였다. Figure 2(a)에서 보여지고 있는 두께 H, 복소 굴절율  $N(=n+ik)$ 의 평판의 투과계수는

$$t = \frac{4N}{(N+1)^2} \frac{\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda} H)}{[\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda} NH) - r^2 \exp(i\frac{2\pi}{\lambda} NH)]} \quad (1)$$

이고, 여기서  $r = (1-N)/(1+N)$ 이다. 그러면, 투과율은

$$\tau = t t^* \quad (2)$$

이다. 여기서  $( )^*$ 는 공액 복소수를 의미한다.

집열기 내부의 다공성 매질로는 15mesh의 Stainless Steel Wire Screen이 여러겹으로 겹쳐서 사용되었으며 복사 물성치의 해석에는 측정된 투과율과 Two-Flux 모델을 응용한 이론적 투과율<sup>(15)</sup>을 비교하여 복사 흡수계수와 후면 산란계수를 구하였다. Two-Flux 모델로부터 두께, L, 복사 흡수계수,  $\sigma_a$ , 후면 산란계수,  $b\sigma_s$ 의 다공성 매질 (Fig. 2(b))의 투과율은

$$\tau = \frac{2\beta \exp(\beta L)}{A_1 \exp(2\beta L) + A_2} \quad (3)$$

이고, 여기서

$$\begin{aligned} \beta &= (4\rho_a^2 + 8\sigma_a b\sigma_s)^{1/2}, \\ A_1 &= \beta - 2\rho_a + 2b\sigma_s, \\ A_2 &= \beta - 2\sigma_a - 2b\sigma_s \end{aligned}$$

이다.

### III. 기본 방정식

다공성 태양열 집열기 내에서의 열전달 현상을 Fig. 3에 개략적으로 나타내었고, 집열기 단위면적에 대한 방정식들은 다음과 같다. 여기에서 복사에너지는 가시광선 영역(파장  $0.5\mu\text{m}$  기준)과 적외선 영역( $12.5\mu\text{m}$  기준)으로 나누어 구분하였다.

유리덮개 1 및 2에 대한 복사에너지의 관계식은 가시광선(visible) 영역에서는

$$q_{iv} = B_v R_v + q_{v2} \tau_v \quad (5)$$

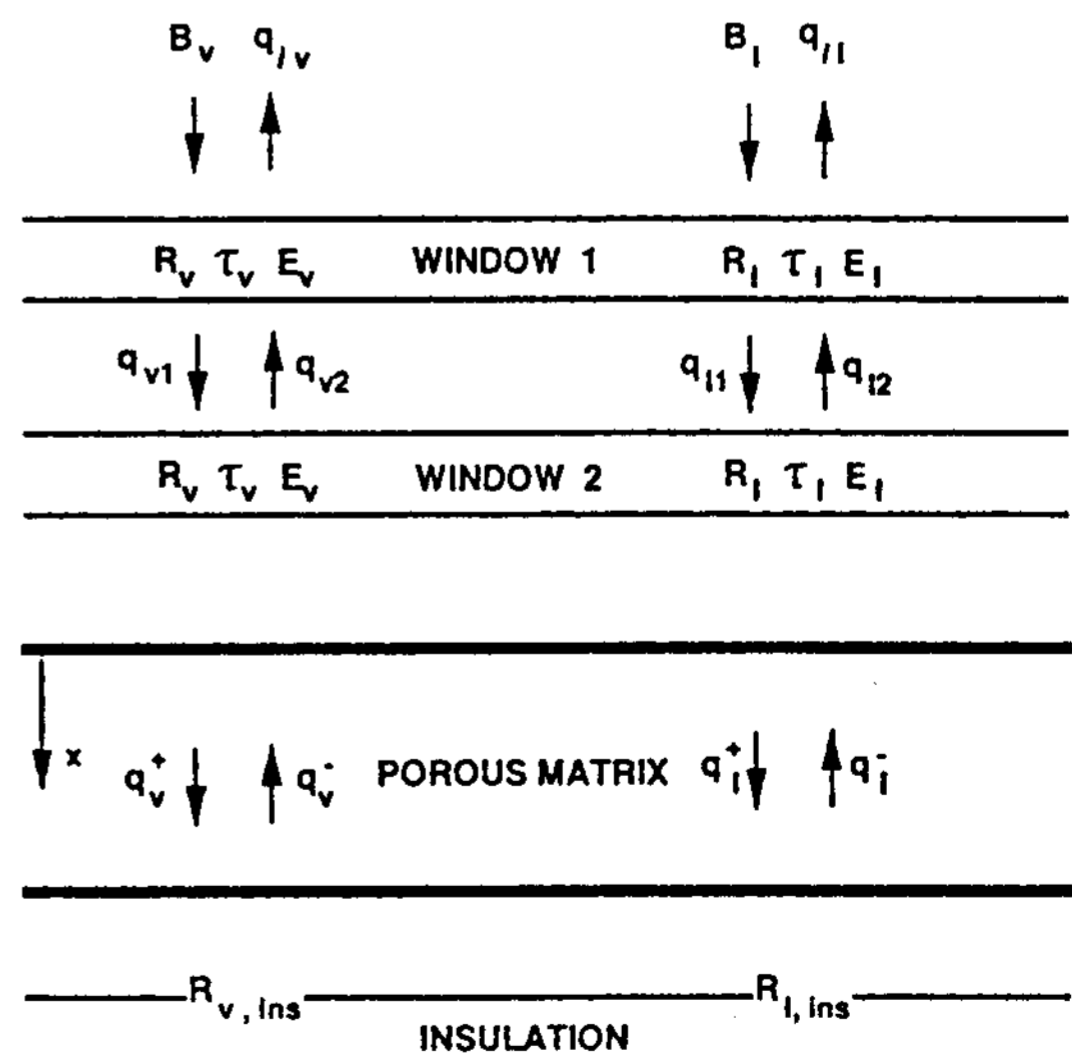


Fig. 3 Radiative heat fluxes in the porous solar collector

$$q_{v1} = \frac{q_v^-(0) \tau_v R_v + B_v \tau_v}{1 - R_v^2} \quad (6)$$

$$q_{v2} = \frac{B_v \tau_v R_v + q_v^-(0) \tau_v}{1 - R_v^2} \quad (7)$$

$$q_v^+(0) = q_v^-(0) R_v + q_{v1} \tau_v \quad (8)$$

이고, 적외선(infrared) 영역에서는

$$q_{i1} = B_i R_i + q_{i2} \tau_i + \sigma T_{w1}^4 E_i \quad (9)$$

$$q_{i1} = \frac{(q_i^-(0) \tau_i + \sigma T_{w2}^4 E_i) R_i + B_i \tau_i + \sigma T_{w1}^4 E_i}{1 - R_i^2} \quad (10)$$

$$q_{i2} = \frac{(B_i \tau_i + \sigma T_{w1}^4 E_i) R_i + q_i^-(0) \tau_i + \sigma T_{w2}^4 E_i}{1 - R_i^2} \quad (11)$$

$$q_i^+(0) = q_i^-(0) R_i + q_{i1} \tau_i + \sigma T_{w2}^4 E_i \quad (12)$$

이다. 유리덮개 1에서 에너지 보존식은

$$h_{w\infty}(T_\infty - T_{w1}) + h_{wg}(T_{w2} - T_{w1}) + B_v + B_i + q_{v2} + q_{i2} = q_{iv} + q_{i1} + q_{v1} + q_{i1} \quad (13)$$

이며, 유리덮개 2에서의 에너지보존식은

$$h_{wg}(T_{w1} - T_{w2}) + h_{wc}(T_{ai} - T_{w2}) + q_{v1} + q_{i1} + q_v^-(0) + q_i^-(0) = q_{v2} + q_{i2} + q_v^+(0) + q_i^+(0) \quad (14)$$

이다. 유리덮개 2와 다공성 matrix 사이에서 공기에 대한 에너지보존식은

$$h_{wc}(T_{w2} - T_{ai}) = \rho_a C_{pa} U_a (T_{ao} - T_{ai}) \quad (15)$$

이고, 다공성 매질내부에서 공기에 대한 에너지 보존식은

$$\rho_a C_{pa} U_a \frac{dT_a}{dx} = h_p A_p (T_p - T_a) \quad (16)$$

가 된다. 다공성 매질에 대한 에너지 보존식은

$$h_p A_p (T_a - T_p) = 4\sigma_{al} \sigma T_p^4 - 2\sigma_{al} (q_i^+ + q_i^-) - 2\sigma_{av} (q_v^+ + q_v^-) \quad (17)$$

이다. 다공성 matrix 아랫면과 단열면 사이에서의 공기에 대한 에너지 보존식은

$$h_{pi} [T_{ins} - T_a(L)] = \rho_a C_{pa} U_a [T_{ae} - T_a(L)] \quad (18)$$

이며, 단열면에서의 에너지 보존식은

$$h_{pi} [T_a(L) - T_{ins}] + q_i^+(L) + q_v^+(L) + h_{ins} (T_\infty - T_{ins}) = q_i^-(L) R_{i, ins} + \sigma T_{ins}^4 (1 - R_{i, ins}) + q_v^-(L) R_{v, ins} \quad (19)$$

이다. 다공성매질 내에서 복사에너지의 전달방정식은 TWO-Flux 모델을 사용하면

$$\frac{dq_i^+}{dx} = -2\sigma_{al} q_i^+ - 2b\sigma_{sl} q_i^+ + 2\sigma_{al} \sigma T_p^4 + 2b\sigma_{sl} q_i^- \quad (20)$$

$$-\frac{dq_i^-}{dx} = -2\sigma_{al} q_i^- - 2b\sigma_{sl} q_i^- + 2\sigma_{al} \sigma T_p^4 + 2b\sigma_{sl} q_i^+ \quad (21)$$

$$\frac{dq_v^+}{dx} = -2\sigma_{av} q_v^+ - 2b\sigma_{sv} q_v^+ + 2b\sigma_{sv} q_v^- \quad (22)$$

$$-\frac{dq_v^-}{dx} = -2\sigma_{av} q_v^- - 2b\sigma_{sv} q_v^- + 2b\sigma_{sv} q_v^+ \quad (23)$$

가 된다. 여기서 식(16)에 대한 경계조건은

$$T_a(0) = T_{ao} \quad (24)$$

이고, 식 (20)-(23)에 대한 경계조건은

$$q_i^-(0) = E_i \sigma T_{w2}^4 + q_i^-(0) \left[ R_i + \frac{\tau_i^2 R_i}{1 - R_i^2} \right] + \frac{6T_{w2}^4 E_i R_i \tau_i + B_i \tau_i^2 + \rho T_{w1}^4 E_i \tau_i}{1 - R_i^2} \quad (25)$$

$$q_v^-(L) = E_{i, ins} \sigma T_{ins}^4 + (1 - E_{i, ins}) q_i^-(L) \quad (26)$$

$$q_v^+(0) = q_v^-(0) \left[ R_v + \frac{\tau_v^2 R_v}{1 - R_v^2} \right] + \frac{B_v \tau_v^2}{1 - R_v^2}$$

$$q_v^-(L) = q_v^+(L) R_{v, ins} \quad (28)$$

이다. 그리고, 집열기의 효율은

$$\eta = \frac{B_v}{\rho_a U_a C_{pa} (T_{ae} - T_{ai})} \quad (29)$$

이며, 이때의 각종 열전달계수에 대한 상관 관계식은 부록에 설명되어 있다.

#### IV. 결과 및 고찰

Figure 4에서는 두께가 각 1.98mm(2t), 2.83mm(3t), 4.87mm(5t)인 유리판(한국 유리(주) Han-lite-Clear Glass)의 가시광선 영역과 적외선 영역의 파장에 따른 투과율을 보여준다. 정확한 값을 얻기 위하여 실험을 수십회 반복하여 대표적인 값을 나타내었다. 자외선(ultraviolet) 영역인 파장이 0.3 $\mu$ m 보다 작은 구간에서는 거의 투과하지 못하였으며 그 직후 투과율은 급상승하여 가시광선 영역에서는 약 90% 정도에 이르렀다. 이때 가시광선 영역에서의 대표되는 파장을 0.5 $\mu$ m로 선택하였다. 또한, 적외선 영역에서는 파장 2.2 $\mu$ m에서 22 $\mu$ m까지의 투과율을 보여주며, 여기서의 변화는 그림에서 나타나듯이 2.7 $\mu$ m까지는

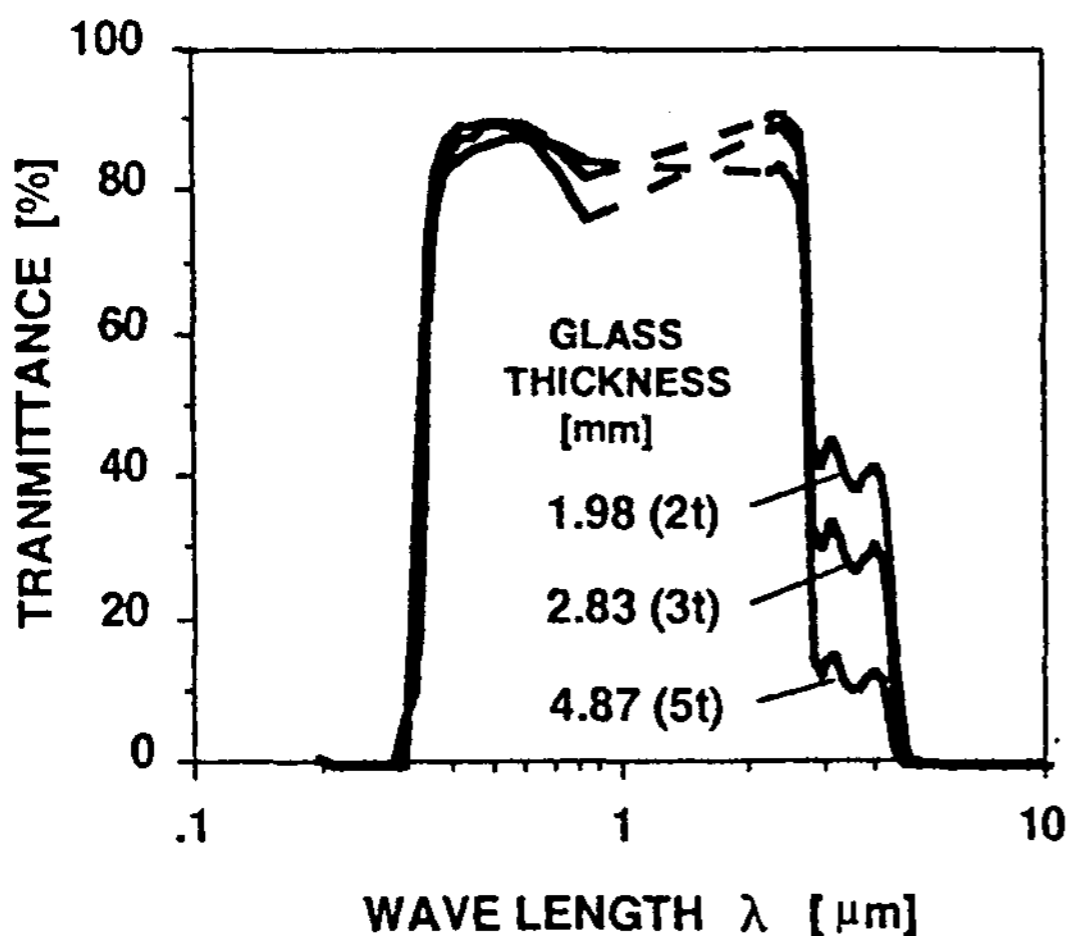


Fig. 4 Spectral transmittances of the incident radiation for various thicknesses of glass panes(solid lines : measured; dashed lines : interpolated)

완전히 변화하다가 이후 급하강 하여 4.3 $\mu$ m까지는 투과율이 50% 이하인 영역을 이루고 있어 이 영역의 대표되는 파장을 3.25 $\mu$ m로 하였다. 파장 4.3 $\mu$ m 이후부터는 투과율이 거의 0에 가까웠다. 이 그림에서 파장 0.65 $\mu$ m 이후 가시광선 영역에서 두께 4.87mm 유리의 투과율이 두께 2.83mm의 유리보다 작은 이유는 빛의 간섭효과로 투과율이 진동을 하기 때문이며 앞으로의 연구 대상이다. 점선은 본 연구에서 사용된 측정장치가 측정할 수 없는 근 적외선 영역이기에 보간되었다.

파장 0.3~2.73 $\mu$ m 구간을 0.5 $\mu$ m의 값이 대표한다면, 식 (1)을 이용하면 복소 굴절율은  $n=1.257$ ,  $k=8.258 \times 10^{-7}$ 이고 태양광선에 대한 흡수복사함수  $F=0.97$ 이다. 파장 2.73~4.26 $\mu$ m 구간은 3.25 $\mu$ m로 대표한다면,  $n=1.332$ ,  $k=1.072 \times 10^{-4}$ 이고,  $F=0.03$ 이다. 파장 4.26 $\mu$ m 이후 영역에서는  $\tau=0.01$ ,  $E=0.92$ ,  $R=0.07$ 로 가정하였다.

집열기 내의 다공성 매질로는 15-mesh의 stainless steel wire screen을 여러겹 겹쳐서 사용하였다. 집열판에 표면처리를 안한경우 wire의 직경은  $d_r=0.29$ mm이고, 무광택 Black Coating한 경우는 0.32mm, Selective Coating(Thermalox Solar Collector Coating : 250 Selective Black,  $A_v=0$ ).

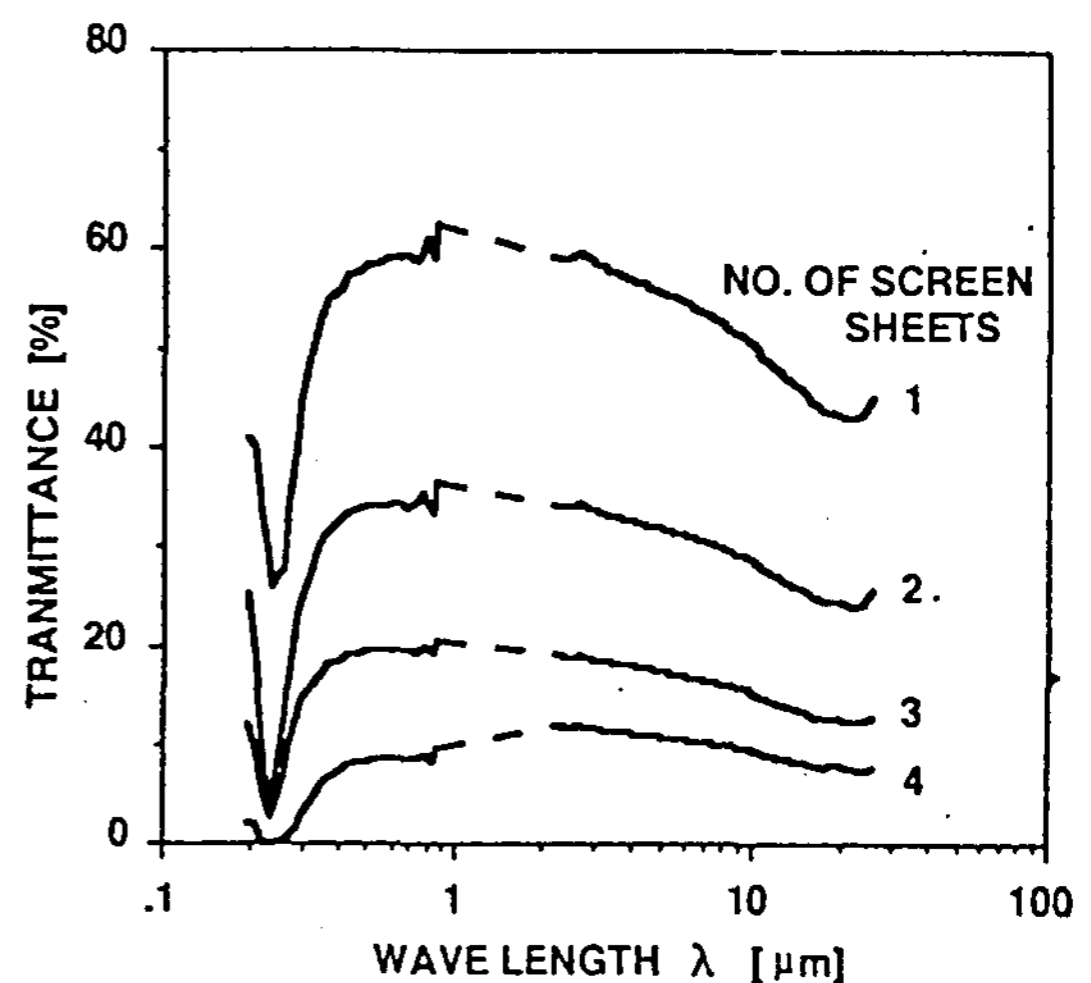


Fig. 5 Spectral transmittances of the incident radiation for various numbers of wire screen sheets(solid lines : measured; dashed lines : interpolated)

96,  $E_1=0.42$ )의 경우 0.31mm이다. Figure 5에서는 무광택 표면처리된 15mesh의 wire screen이 1-4장 겹쳐진 경우, 각 가시광선 영역과 적외선 영역의 파장에 따른 투과율을 보여준다. UV-visible 영역에서의 변화는 파장이 약 0.22 $\mu\text{m}$ 에서 투과율은 급상승하여 가시광선 영역에서 최대를 이루고 완만히 감소한다. 이때에 wire screen의 장수가 많아짐에 따라 투과율은 뚜렷이 감소함을 알 수 있다. 여기서 점선으로 나타난것은 보간되었다. 이와같은 측정된 투과율과 식(3)을 이용하여 Table 1의 결과를 얻었다. 여기서 가시광선 영역에서는 0.5 $\mu\text{m}$ , 적외선 영역에서는 12.5 $\mu\text{m}$ 으로 대표하였다. 위 세 가지의 표면처리에서는 일반적인 조건(상온 상압)하에서 Spray gun을 사용하였다.

Table 1. Absorption and backscattering coefficients of surface treated porous matrix.

표면처리		non-coating	무광택 paint coating	selective coating
$d_f$ [mm]		0.29	0.32	0.31
0.5 $\mu\text{m}$ 기준	$\sigma_{av}$	1.75	833	625
	$b\sigma_{sv}$	561	1	100
	$\omega_v$	0.996	0.001	0.137
12.5 $\mu\text{m}$ 기준	$\sigma_{al}$	749	261	853
	$b\sigma_{sl}$	1	1162	0.97
	$\omega_l$	0.001	0.816	0.001

선택 흡수표면(Selective Coating) 처리된 경우가 표면처리가 안된 경우보다 가시광선 영역에서는 albedo( $\omega_v = b\sigma_{sv}/(b\sigma_{sv} + \sigma_{av})$ )가 작으나 적외선 영역에서는 albedo가 거의 차이가 없어 본 연구 대상인 다공성 매질에서는 선택투과성을 특별히 보이지는 않았다. 그러나 무광택 paint로의 표면처리의 경우에는 뚜렷한 선택투과성을 보였다. 따라서 집열기에 대한 이론해석시에 무광택 paint 표면처리의 결과를 이용하였다.

다공성매질의 두께 및 공기 유량에 대한 효율이 Fig. 6에 나타나 있다. 유량이 증가 할수록 효율이 증가하는데, 이것은 열전달계수,  $h_p$ 가 유량에 따라 증가하고 매질의 온도가 낮아져서 적외선 영역에서의 방사에너지가 감소하기 때문이다. 다공성

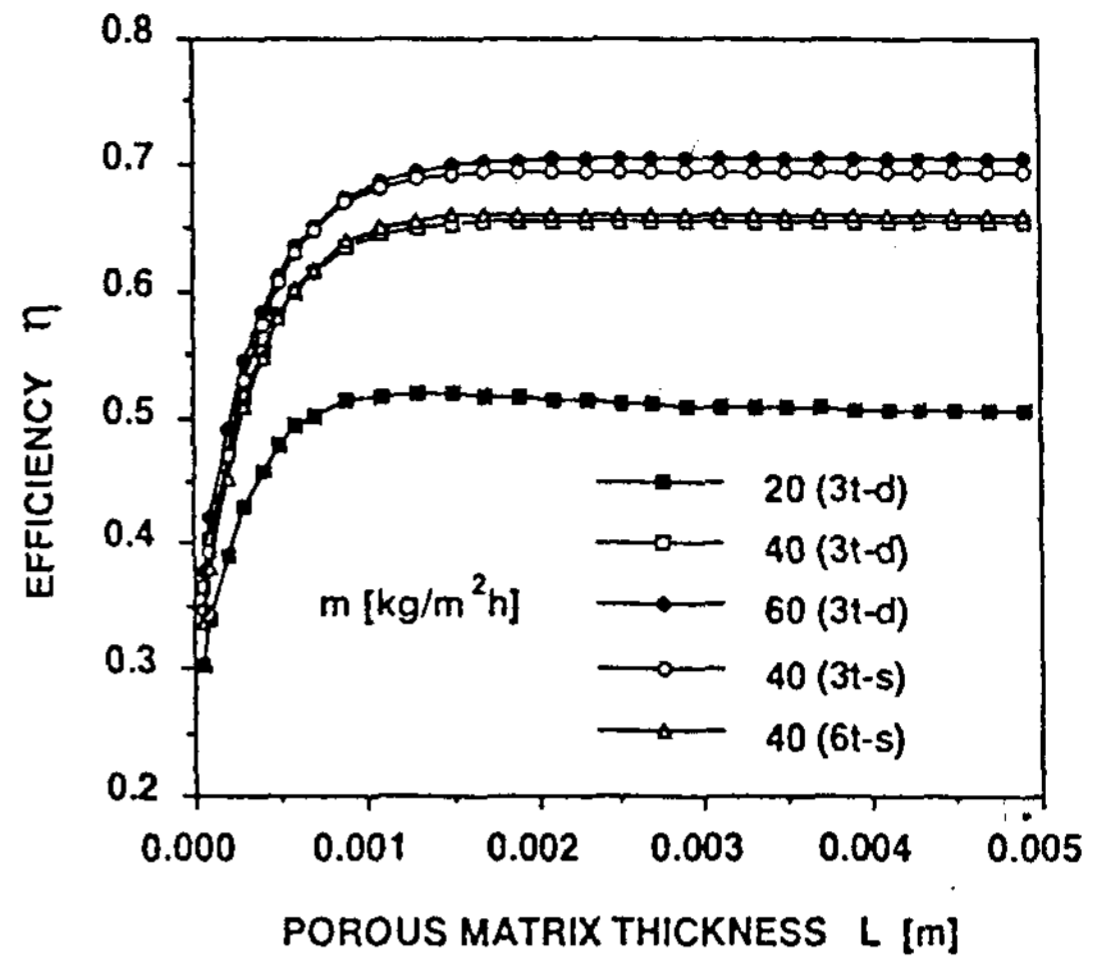


Fig. 6 Efficiencies for various air flow rates with respect to porous matrix thicknesses.(d : double pane ; s : single pane window)

매질의 두께가 0.001m(약 3-4장)까지는 두께의 증가에 따라 효율이 증가함을 알 수 있다. 따라서 다공성 매질은 0.001m 이상은 효율을 올리는데 있어서 크게 기여하지 못한다. 이는 광학적 두께(optical thickness)가 1 가량임을 의미한다. 또한 두께가 3t 또는 6t인 한장의 유리 덮개에 40kg/m<sup>2</sup>h의 유량의 경우에 있어서의 결과도 나타나 있다. 3t의 경우가 6t의 경우보다 효율이 높음을 보여 주는데 이것은 유리의 투과율이 두께가 적을수록 좋기 때문이다. 유량이 같은 40kg/m<sup>2</sup>h에서 2중 유리 덮개 보다 1장 유리 덮개의 경우가 효율이 높은것은 유리외 유리사이의 경계면 때문에 투과율이 감소하기 때문이다.

Figure 7에서는 다공성 매질의 두께 0.005m 일때 매질 내의 다공성 매질 및 공기의 온도 분포를 보여준다. 여기서 다공성 매질의 앞 부분, 즉 공기와 열교환이 일어나는 초기부분에서는 다공성 매질의 온도가 공기의 온도보다 높음을 볼 수 있고 깊이 들어갈 수록 다공성 매질과 공기의 온도는 거의 동일함을 알 수 있다. 이것은 일정 깊이 이상에서는 열전달이 거의 이루어 지지 않아 필요없는 부분으로 간주된다. 유량이 20kg/m<sup>2</sup>h로 흐를때 깊이  $x=0.002\text{m}$  부근 부터 다공성 매질의 온도보다 공기의 온도가 약간 높게 나타난 것은 공기에서 다공성 매질로 열전달이 일어나



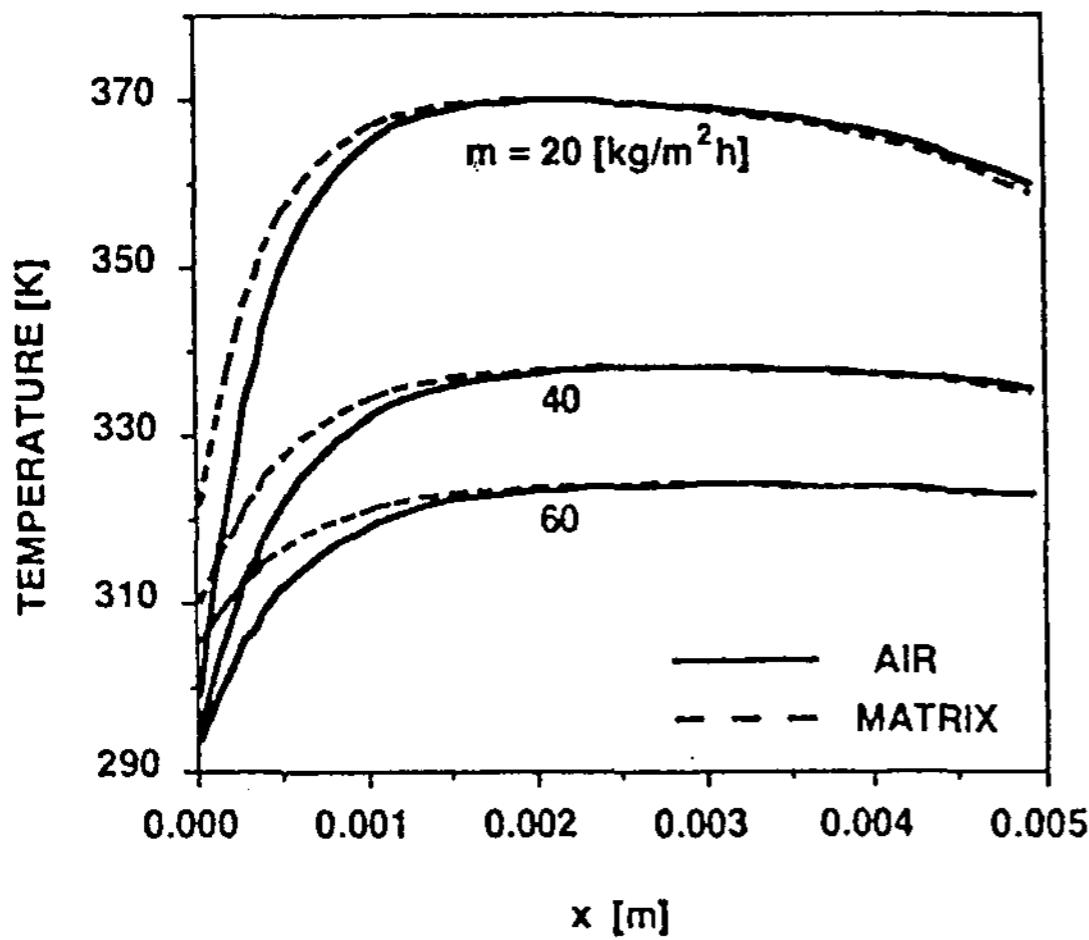


Fig. 7 Air and matrix temperature distributions inside the porous matrix of thickness  $L = 0.005m$

는데 이는 다공성 매질이 흡수하는 전파장에 걸친 복사에너지보다 더 많은 에너지(적외선 복사에너지)를 방출하기 때문이다. 또한 유량이 적을수록 공기와 다공성 매질과의 온도차가 커짐을 볼 수 있는데, 이는 효율을 감소시키는 요인임을 Fig. 6과의 비교로도 알 수 있다.

유량이 각 10, 20, 40, 60kg/m<sup>2</sup>h일때 태양의 일사량과 집열기 효율과의 관계를 Fig. 8에서 보여주고 있다. 여기서 일사량이 증가하면 효율도 증가함을 보여준다. 일사량이 100W/m<sup>2</sup>에서 250 W/m<sup>2</sup> 부근까지 효율이 급상승하는 이유는 입사

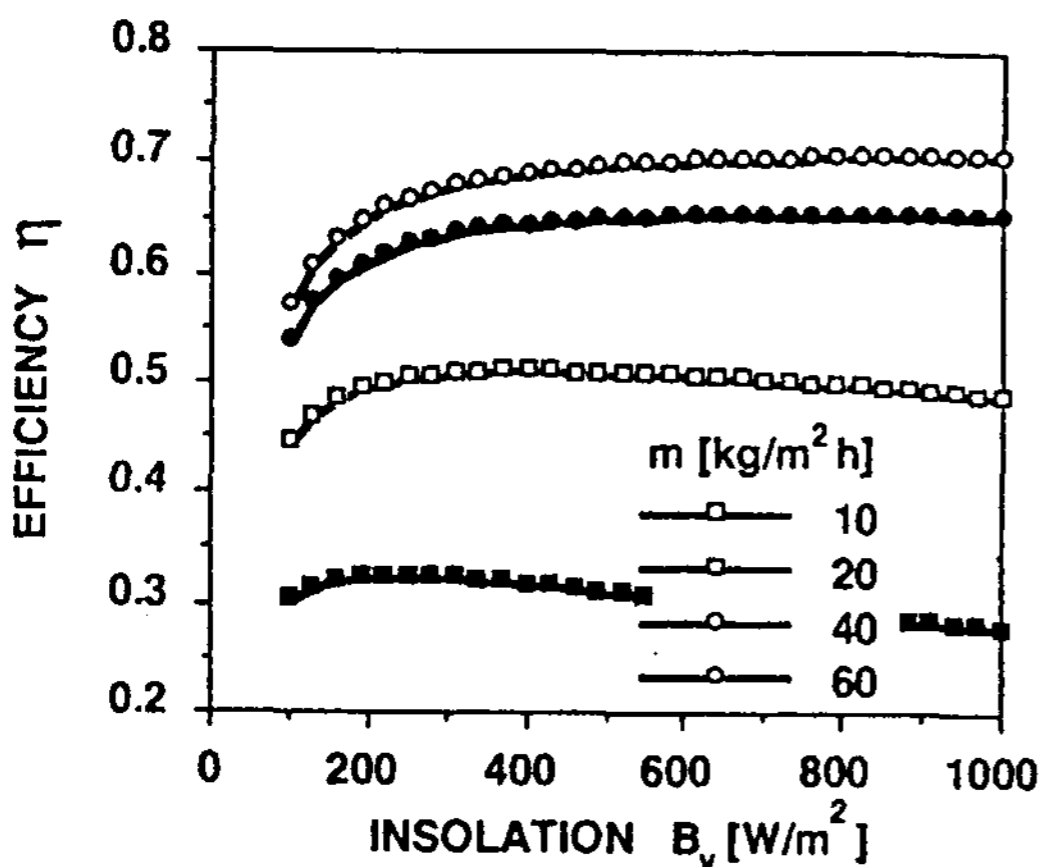


Fig. 8 Collector efficiencies for various air flow rates with respect to solar insulations.

하는 태양 에너지 양의 증가율에 비해 유리 덮개와 다공성 매질로부터의 방출에너지의 증가율이 낮기 때문이다. 그러나, 효율 60% 이상을 얻기 위해서는 약 200W/m<sup>2</sup> 이상의 일사량 하에서 40 kg/m<sup>2</sup>h 이상의 유량을 사용하여야 함을 알 수 있다. 유량이 20kg/m<sup>2</sup>h 이하의 경우에는 일사량이 많아질수록 효율이 감소하는 영향을 뚜렷이 보이는데, 이는 다공성 매질 및 유리의 온도가 높아져 방사하는 에너지가 상당히 증가하기 때문이다.

Figure 9에서는 다공성매질의 두께 및 가시광선 영역에서의 albedo,  $\omega_v$ 의 값이 0.0, 0.3, 0.6, 0.9일때 효율의 변화를 보여주고 있다. Albedo가 적을수록, 다공성매질 두께가 0.001m까지 두께의 증가에 따라 집열기의 효율이 증가함을 보인다. Albedo가 0.9의 경우는 오히려 두께에 따라서 감소함을 보이는데 이는 반사율이 두께에 따라 증가하기 때문이다.

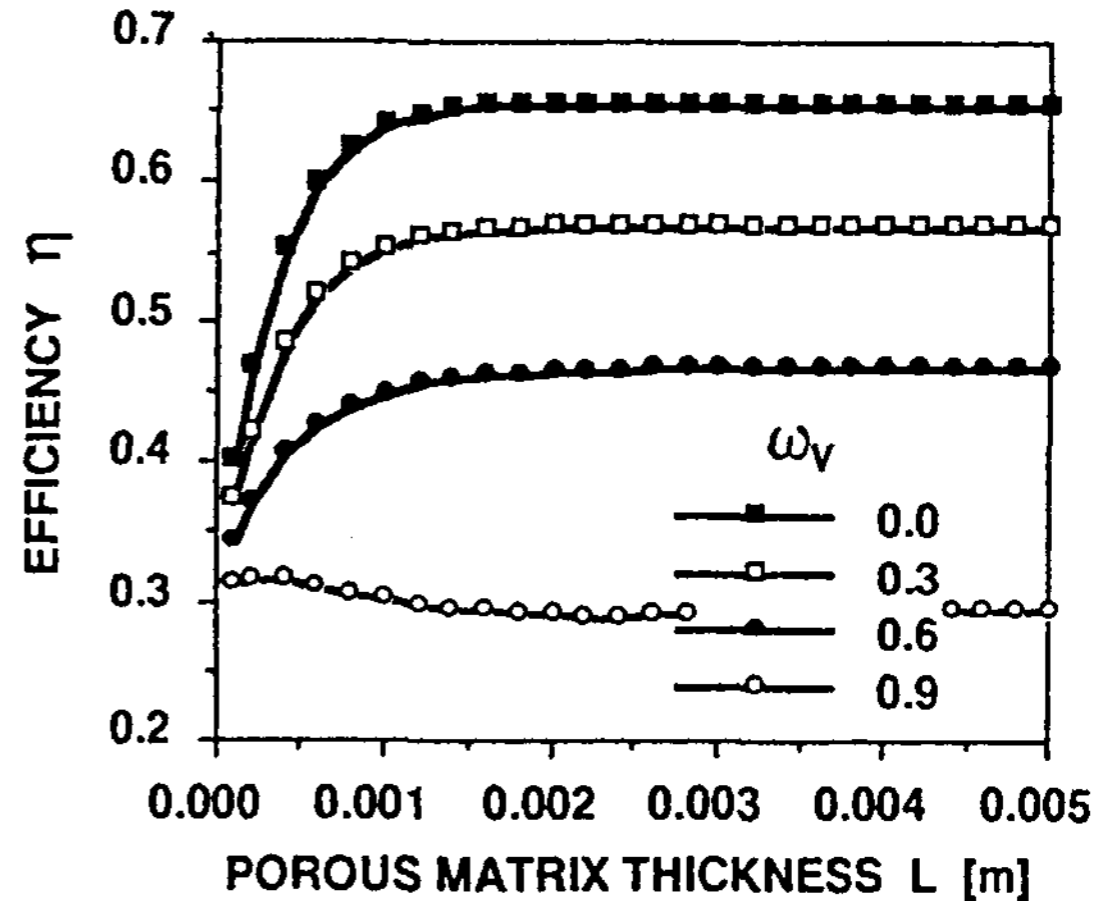


Fig. 9 Collector efficiencies for various visible range albedos with respect to matrix thicknesses.

Figure 10에서는 다공성매질의 두께 및 적외선 영역에서의 albedo,  $\omega_r$ 의 값이 0.0, 0.3, 0.6, 0.9일때 효율의 변화를 보여준다. Albedo가 클수록 집열기의 효율이 증가하나 Fig. 9의  $\omega_v$ 의 변화에 대한 것보다는 효율에 대하여 영향이 작다. 이것은 albedo가 작으면 적외선 영역에서 에너지를 많이 방출하나 유리를 거의 투과하지 못하기에, 즉



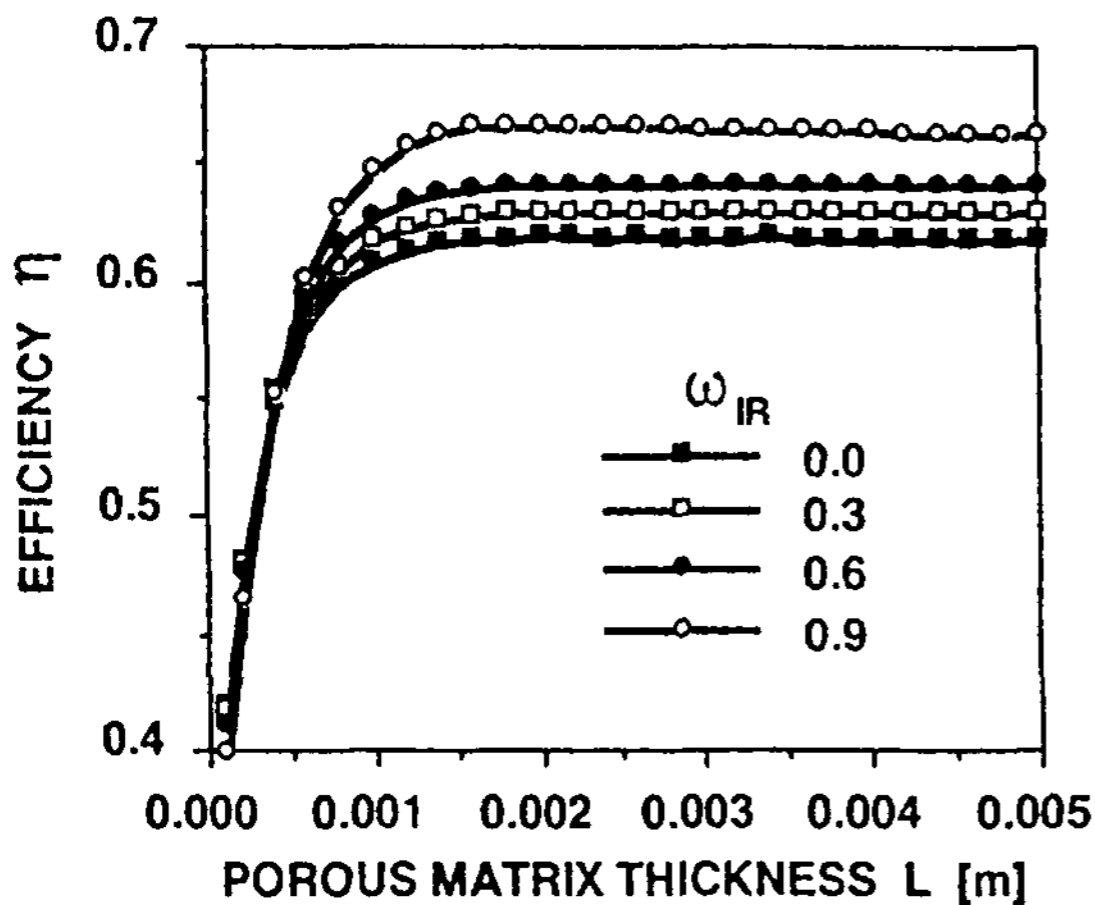


Fig. 10 Collector efficiencies for various IR range albedos with respect to matrix thicknesses

온실효과 때문에, 효율은 급격히 떨어지지 않는다. 또한 여기에서도 다공성 매질의 두께가 0.001m를 지나면서 효율의 변화는 크게 나타나지 않는다.

유량이 40kg/m<sup>2</sup>hr 일때 다공성매질의 내의 열 전달 계수 h<sub>p</sub>의 값이 0.1, 0.5, 1.0, 5.0배로 변화했을때 다공성 매질의 온도, T<sub>p</sub>와 공기의 온도, T<sub>a</sub>와의 차가 Fig. 11에 나타나 있다. 여기에서 배수 (f)가 적을수록 온도차가 높은것으로 나타났으나 다공성 매질의 깊이 0.0035m 부근 부터의 변화는

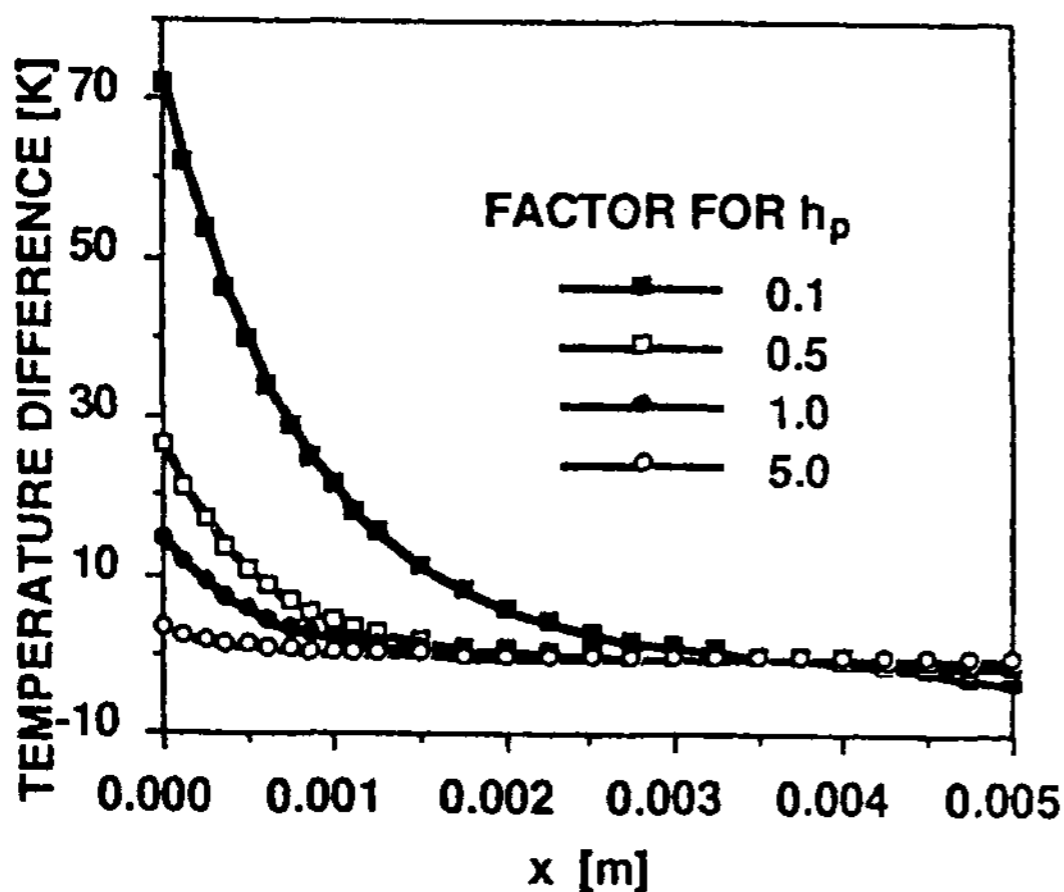


Fig. 11 Temperature differences (T<sub>p</sub>-T<sub>a</sub>) distributions for various internal convection factors inside the porous matrix of thickness L=0.005m

거의 없다. f가 5이상의 경우는 공기와 다공성 매질과의 온도차가 거의 없기에 식을 단순화 할 수 있고, 이와 같은 경우는 참고문헌 3의 해석에서 볼 수 있다.

Figure 12는 유량이 10, 20, 40, 60kg/m<sup>2</sup>h 일때 유리가 없는 경우와 유리가 1장인 경우에 다공성 매질의 두께에 따른 공기의 입구온도, T<sub>ai</sub>와 출구 온도, T<sub>ae</sub>의 차이를 나타낸다. 여기에서 유량의 증가시 온도의 강하(온도차)가 작아지는 것으로 나타났다. 또한, 유리가 없는 경우와 있는 경우의 비교에서 유리가 없는 경우가 유리가 있는 경우보다 훨씬 더 큰 온도차를 나타냈다. 이것은 유리가 없는 경우 다공성 매질과 온도가 낮은 우주와 직접 열교환을 할 수 있기 때문이다. 이와 같이 공기 냉각용으로 사용한다면 유리덮개가 없이 유량은 약 20kg/m<sup>2</sup>h 이하에서 4°C이상의 온도 강하를 가져오며 두께는 역시 0.001m가 적절함을 알 수 있다.

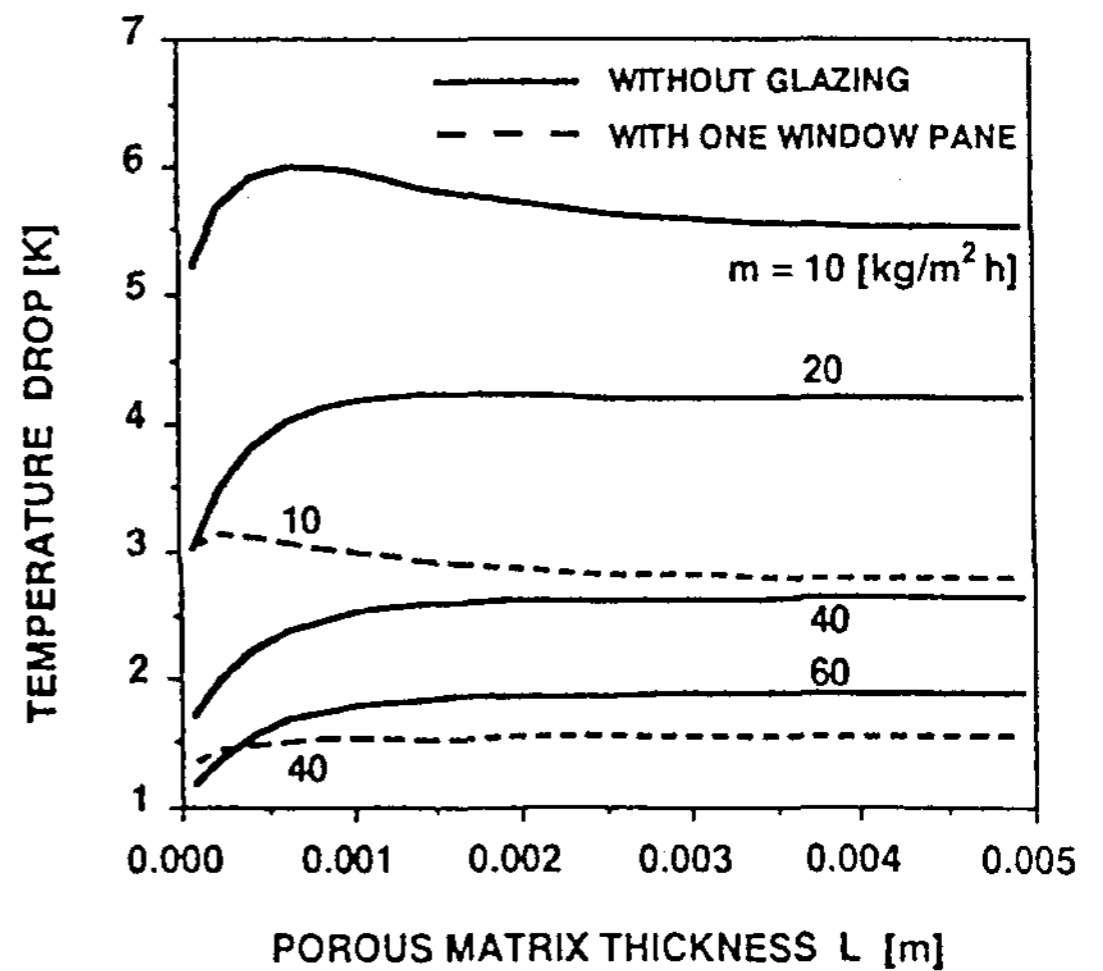


Fig. 12 Temperature drops (T<sub>ai</sub>-T<sub>ae</sub>) for various air flow rates with respect to porous matrix thicknesses.

## V. 결 론

본 연구에서는 다공성 매질을 응용한 태양열 집열기의 설계를 위한 이론해석을 수행하였다.

유리덮개와 다공성매질에 대한 파장에 따른 투과율을 Visible Spectrometer 및 FT-IR을 사용하여 측정하여, 이들의 복사 특성을 구하였다. 구해진 복사특성을 기준으로하여 여러 경우에 대하여 이론적인 해석을 하였다. 열전달은 일차원으로 하고, 열복사는 Two-Flux 모델을 사용하였다.

우리는 0.3-2.73 $\mu$ m, 2.73-4.26 $\mu$ m, 4.26 $\mu$ m 이상의 구간에 있어서 구간마다 투과율이 크게 달랐으나, 다공성 매질로 사용된 wire screen의 투과율은 완만히 변화하였다. 표면처리를 안한 경우, 무광택 paint로, 선택흡수 paint로 표면처리한 경우에 있어서, 무광택 paint의 경우가 다공성 매질에 대하여는 좋은 복사특성을 보였다.

공기 유량이 증가할수록, 가시광선 영역에서의 albedo가 작을 수록, 적외선 영역에서의 albedo가 클수록 집열기의 효율은 증가하였다. 그러나 적외선 영역에서의 albedo는 가시광선 영역에서의 albedo에 비해 영향이 상대적으로 작았다.

집열기 효율 60% 이상을 얻기 위해서는 유량 40kg/m<sup>2</sup>h 이상, 다공성 매질 두께 0.001m 이상, 가시광선 영역에서의 albedo가 0.1 이하가 되어야 함을 알았다. 그러나 다공성 매질의 효율은 두께가 0.001m 이상에서는 거의 일정하므로 두께는 0.001m(screen 3-4장)가 적절하다. 이는 광학적 두께가 약 1이다.

마지막으로 야간에 사용할 수 있는 공기 냉각기의 적용 가능성을 예측하였다. 공기 온도 강하 4 $^{\circ}$ C를 얻기 위해서는 유리덮개가 없이 유량이 20 kg/m<sup>2</sup>h 이하여야되고, 다공성 매질의 두께 역시 0.001m가 적절하다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 핵심전문연구비 지원에 의하여 연구되었음을 밝히고 이에 감사드립니다.(한국과학재단 : 931-1000-027-2)

## 참고문헌

1. Bejan, A., Convection Heat transfer, John Wiley & Sons, 1984.
2. Skocypec, R. D., Boehm, R. F. and Chavez, J.M., "Heat Transfer Modelling of the IEA/SSPS Volumetric Receiver," ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 111, pp. 138-143, 1990.
3. Hassab, M. A. and Sorour, M.M., "Heat Transfer Studies in Matrix-Type Solar Air Heaters," ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 111, pp. 82-88, 1989.
4. Bharadwaj, S. S., Singh, D. and Bansal, N. K., "Design and Thermal Performance of a Matrix Solar Air Heater," Energy Con. & Mgmt, Vol. 21, pp.253-256, 1981.
5. Kudirka, A. A., and Smock, R. H., "Ceramic Technology for Solar Thermal Receivers," ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 105, pp. 73-79, 1983.
6. Mbaye, M., "Natural Convection and Conduction in Porous Wall, Solar Collector System without Vents," ASME Journal Solar Energy Engineering, Vol. 114, pp. 40-46, 1992.
7. Kaminski, D.A. and Kar, S., "Parametric Studies of a Spectrally Selective Two Layered, Porous Volumetric Solar Collector," ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 114, pp. 150-156, 1992.
8. 이종호, 김부호, 백남춘, 정모, "설비형 태양열 시스템 개발," 동력자원 연구소 보고서, 1984.
9. 태양열에너지 학회, "태양열에너지 핸드북," 태림 문화사
10. 김부호, 이동원, "유하식 집열기를 이용한 저가 집열 시스템의 성능 해석, 태양에너지, Vol. 10, pp. 19-26, 1990.
11. 윤석범, 전문헌, "평판형 태양열 집열기를 설치한 자연순환식 급탕시스템의 성능에 관한 연구," 대한기계학회, 제9권, pp. 579-589, 1985.
12. Lansing, F. L. and Clarke, V., "A High Performance Porous Flat-Plate Solar Collector," Energy, Vol. 4, pp. 685-694, 1979.
13. Tong, T. W. and Tien, C.L., "Analytic Models

- for Thermal Radiation in Fibrous Insulations,"  
Journal of Thermal Insulation, Vol. 4, pp.27-44,  
1980.
14. Bohren, C.F. and Huffman, D.R., Absorption and  
Scattering of Light by Small Particles, John Wiley  
& Sons, 1983.
15. Park, S.H. and Tien, C.L., "Radiation Induced Ig-  
nition of Porous Solid Fuels," (Combustion Scie-  
nce & Technology, to appear)
16. Stine, W.B. and Hassigan, R.W., Solar Energy Fu-  
ndamentals and Design, John Wiley & Sons, 1985.

**부 록**

본 연구에서 사용된 각종 상관 관계식<sup>2-3)</sup>은 다음과 같다. 집열기 주위의 공기유 등에 의한 대류 열전달계수는

$$h_{wind} = 3 + 3.8V^w \quad (A-1)$$

이고, 여기서  $V^w$ 는 풍속이다. 따라서, 유리 덮개 1과 주위와의 열전달 계수는

$$h_{wc} = \left[ \frac{1}{h^{wind}} + \frac{H}{K^w} \right]^{-1} \quad (A-2)$$

이다. 유리 덮개 1과 2사이에 대한 열전달 계수는

$$H_{wg} = \left[ \frac{H}{k^w} + \frac{d^w}{k^g} \right]^{-1} \quad (A-3)$$

여기서  $d^w$ 는 유리덮개 사이의 간격이다. 유리 덮개 2와 유입하는 공기사이의 열전달에 대한 전달계수는

$$h_{wc} = \frac{k^a}{d_c} \left[ Nu^2 - \left( \frac{T_p(0) - T_{ai}}{T_{w2} - T_{ai}} \right) (Nu^1 - Pe) \right] \quad (A-4)$$

이고 여기서  $d_c$ 는 유리 덮개 2와 다공성 매질과의 간격을 나타내고,

$$Re_{dc} = m d_c / \mu^a, Pe = Pr Re_{dc} \quad (A-5)$$

$$Re_{dc} < 4 : \begin{cases} Nu_1 = 1.0 + 0.465 Re_{dc} + 1.766 \\ \quad \times 10^{-2} Re_{dc}^2 \\ Nu_2 = 1.0 + 0.111 Re_{dc} - 3.66 \\ \quad \times 10^{-3} Re_{dc}^2 \end{cases} \quad (A-6)$$

$$Re_{dc} > 4 : \begin{cases} Nu_1 = 0.79 + 0.5615 Re_{dc} + 5.75 \\ \quad \times 10^{-3} Re_{dc}^2 \\ Nu_2 = 1.0183 + 0.1027 Re_{dc} - 2.83 \\ \quad \times 10^{-3} Re_{dc}^2 \end{cases} \quad (A-7)$$

이다. 또한 단열면과 나가는 공기사이에서의 열전달 계수는

$$h_{pi} = \frac{k^a}{d_c} Nu^2 \quad (A-8)$$

이고, 단열면과 주위와의 열전달계수는

$$h_{ins} = \left[ \frac{1}{h_{wind}} + \frac{d_{ins}}{k_{ins}} \right]^{-1} \quad (A-9)$$

이고, 여기서  $d_{ins}$ 는 단열층의 두께이다. 다공성 매질의 다공도, 단위체적당 접촉면적 및 수력반경은

$$P_o = 1 - \frac{\left( \frac{\pi}{2} d_t \right)}{\left( \frac{0.0254}{\text{mesh}} \right)} \quad (A-10)$$

$$A_p = \frac{4(1 - P_o)}{d_t} \quad (A-11)$$

$$r_h = \frac{P_o}{A_p} \quad (A-12)$$

이다. 다공성 매질 내에서의 열전달계수는

$$h_p = \frac{St m C_{pa}}{P_o} \quad (A-13)$$

이고,

$$Re_p = \frac{4 r_h m}{P_o \mu_a} \quad (A-14)$$

$$Re'_p = \frac{1 - F P_o}{F P_o} Re_p \quad (A-15)$$

$$\begin{cases} F = 0.96 : Re'_p \geq 1800 \\ F = 1.155 - 0.0601 \log_{10}(Re'_p) : Re'_p < 1800 \end{cases} \quad (A-16)$$

$$St Pr^{2/3} = 0.375 Re'^{p-0.375} \quad (A-17)$$

로부터 구한다.

freezing times but little effect on the these quantities at longer times. On the amount of frozen mass, initial liquid superheating is less affected than tube wall subcooling.

## Study on the Thermal Storage Characteristics of Phase Change Materials for Greenhouse Heating

Song, Hyun-Kap\* · Ryou, Young-Sun\* · Kim, Young-Bok\*\*

\*Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Chung-Buk National University

\*\*Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Kyung-Sang National University

An overdose of fossil fuel for greenhouse heating causes not only the high cost and low quality of agricultural products, but also the environmental pollution of farm village. To solve these problems it is desirable to maximize the solar energy utilization for the heating of greenhouse in winter season.

In this study phase change materials were selected to store solar energy concentratively for heating the greenhouse and their characteristics of thermal energy storage were analyzed. The results were summarized as follows.

The organic  $C_{28}H_{58}$ , and the inorganic  $CH_3COONa \cdot 3H_2O$  and  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  were selected as low temperature latent heat storage materials. The equation of critical radius was derived to define the generating mechanism of the maximum latent heat of phase change materials. The melting point of  $C_{28}H_{58}$  was  $62^\circ C$ , and the latent heat was  $50.0 \sim 52.0 kcal/kg$ . The specific heat of liquid and solid phase was  $0.54 \sim 0.69 kcal/kg^\circ C$  and  $0.57 \sim 0.75 kcal/kg^\circ C$  respectively. The melting point of  $CH_3COONa \cdot 3H_2O$  was  $61 \sim 62^\circ C$ , the latent heat was  $64.9 \sim 65.8 kcal/kg$  and the specific heat of liquid and solid phase was respectively  $0.83 kcal/kg^\circ C$  and  $0.51 \sim 0.52 kcal/kg^\circ C$ . The melting point of  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  was  $30 \sim 30.9^\circ C$ , the latent heat was  $53.0 kcal/kg$  and the specific heat of liquid and solid phase was respectively  $0.78 \sim 0.89 kcal/kg^\circ C$  and  $0.50 \sim 0.70 kcal/kg^\circ C$ . When the urea of 21.85% was added to control the melting point of  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  and the phase change cycles were repeated from 0 to 600, the melting point was  $16.7 \sim 16.0^\circ C$  and the latent heat was  $36.0 \sim 28.0 kcal/kg^\circ C$ .

## A Theoretical Study for the Design of Solar Air Heaters Using Porous Material

Yong-Ha Hwang\* · Seung-ho Park\*\* · Jong-Eok Kim\*\*

Department of Thermal Engineering, National Chung ju University

Department of Mechanical Engineering, Hong-Ik University

A theoretical study is conducted for the design of solar air heaters using porous material. Radiative characteristics of glazing and porous absorbing media are found through spectral transmittances measured by the Visible spectrometer and the FT-IR. Using those characteristics the efficiencies of collectors are calculated one-dimensionally with the use of the Two-Flux radiation model. The efficiencies increase, as the air flow rates or albedos in the visible range increase, and as albedos in the IR range decrease. The optimum thickness of the porous medium of 15-mesh stainless steel wire screens is 0.001m, which represents the opacity of one.

## **An experimental study on heat transfer augmentation in fluidized bed heat exchanger**

**Yoo, Ji-Oh\* Seo, Jeong-Yun\*\***

Inha Univ. Graduate School  
Inha Univ.

The purpose of this study was to investigate the enhancement of heat transfer coefficient in double pipe fluidized bed heat exchangers. The inner tube used a smooth tube and a finned tube equipped with longitudinal fins. The heat transfer coefficients between the heated tube and fluidized bed of alumina beads were calculated as a function of fluidized velocity in various particle sizes ( $d_p=0.41, 0.54, 0.65, 0.77\text{mm}$ ) and static bed heights ( $H_0=50, 100, 150, 200, 250\text{mm}$ ).

The coefficient for finned tube is higher than for smooth tube. And the maximum increasing rate is 7.8 times in smooth tube and 12.9 times in finned tube.

## **자연 에너지 이용과 환경건축을 위한 신기술**

**이 경 회\***

\* 연세대학교 건축공학과교수, 부회장

This paper is to refine the concept of utilizing natural energy, and to introduce new technologies of building energy control. For the global environment protection, it is essential to turn attention to latent capacity of natural renewable energy. Especially the concept of 'Environmental Architecture' is very important from this viewpoint. This paper reviews many of new technologies for environmental architecture developed recently : TIM, high effective solar radiation control strategy of glazing, new passive cooling and heating system etc. The design application of the technology has been introduced.