

〈論 文〉

다공성 물질을 이용한 공기용 태양열 집열기의 설계를 위한 이론 및 실험적 연구

황용하* · 박승호** · 김종억**

(1995년 5월 4일 접수)

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

Y. H. Hwang, S. H. Park and J. E. Kim

Key Words : Porous(다공성), Solar Air Heater(태양열 공기가열기), Radiation Properties(복사 물성치), High Efficiency(고효율)

Abstract

A theoretical and experimental study was conducted in order to design highly efficient solar air heaters using porous material. Radiative characteristics of glass windows and porous absorbing media were correlated through spectral transmittances measured by the UV-Visible and the FT-IR spectrometers. Using those characteristics the efficiencies of collectors were numerically calculated with the use of the two-flux radiation model. Based on the theoretical results, an experimental solar collector was designed and constructed. Experimental results under various conditions show that the daily efficiencies are over 60% in general and agree well with the theoretically calculated ones.

기 호 설 명

b : 후면산란분율
 B : 입사복사열유속
 C_{pa} : 공기의 정적비열
 d : 두께 또는 간격
 E : 방사율
 H : 유리판의 두께
 h : 대류 열 전달계수
 i : $\sqrt{-1}$
 k : 열전도계수
 L : 다공층의 두께
 \dot{m} : 공기의 질량 유량
 N : 복소 굴절률

n : 복소 굴절률의 실수부
 q : 복사열유속
 R : 반사율
 T : 온도
 U : 단위면적당 체적유량
 x : x 방향 좌표계

그리스문자

α : 크기변수
 ϵ_r : 유전율
 x : 복소 굴절률의 허수부
 η : 집열효율
 λ : 파장
 ρ : 밀도
 σ : Stefan-Boltzmann 상수, 흡수 또는 산란계수

*충주산업대학교 열공학과

**회원, 홍익대학교 기계공학과

- τ : 투과율
- ω : 후면산란 알베도

상첨자

- +, - : 내부 및 외부방향의 복사 또는 x 좌표의 양방향과 음방향

하첨자

- a : 공기 또는 흡수
- b : 흑체
- c : 두번째 유리판과 다공성 매질 사이의 간격
- d : 누적 에너지
- e : 출구상태
- g : 첫번째와 두번째 유리판 사이의 간격
- ir : 적외선 영역
- ins : 단열면
- i : 입구상태
- l : 떠나는 (leaving)
- o : 출구의 또는 방출되는
- p : 다공성매질
- s : 산란
- v : 가시광선 영역
- w : 유리판
- 1 : 첫번째 유리판
- 2 : 두번째 유리판

1. 서 론

다공성물질을 이용한 체적형 집열기는 태양열을 집열표면에서 흡수하는 평판형 집열기와는 달리 태양열을 장치 내부에서 흡수하고, 주로 공기를 열매체로 사용한다.⁽¹⁻³⁾ 따라서, 이는 cavity radiator를 형성하여 집열기의 표면특성에 덜 의존하게 되고 기존의 평판형 집열기의 흡수 능력을 증가하게 된다.

Fig. 1에 나타난 것과 같이 유리덮개(glass window) 및 다공성매질(porous medium)로 구성된 집열기에 입사된 태양에너지는 유리덮개를 통과한 후 다공성 matrix에 의해 흡수되고, matrix 사이로 흐르는 공기가 matrix에 흡수된 에너지를 회수하여 난방 및 온수용 열원으로 이용된다.

Lansing과 Clarke⁽¹⁾는 다공성매질로 이루어진 체적형 집열기가 평판형 집열기보다 훨씬 높은 효율을 보인다는 것을 이론해석을 통하여 증명하였

다. Skocypec 등⁽²⁾은 800 K 이상의 고온의 공기를 80%의 고효율로 획득하고자 하는 목표하에 유리덮개 없이 고온에서 산화처리된 wire screen으로 체적형 집열기를 제작·실험하여, 약 60% 이상의 고효율을 획득하여 solar farm용 공기집열기의 이용가능성을 확인하였다. Hassab과 Sorour⁽³⁾는 이중유리로 덮개를 구성하고 이집트의 값싸고 흔한 식물인 *Luffa cylindria*를 집열매질로 선정하고, 고효율의 집열기를 제작하여 이론연구와 비교하였다. 이와 같은 기존의 연구들은 집열구성매질 및 유리덮개의 물성치를 적당히 가정하였고, 또한 체적형 집열기의 고효율성을 입증하는 것이 목적이었기에 일반적인 설계자료를 제시하기에는 불충분하였다. 따라서, 본 연구에서는 체적형 집열기 구성매질의 복사 물성치를 측정하고, 이를 이용하여 보다 실제적인 이론해석을 수행함으로써, 고효율의 집열기를 설계하기 위한 구체적인 설계자료를 제시하는 것을 목표로 하고 있다.

본 연구에서는 다공성 매질을 이용하여 태양열 집열기의 설계자료 도출을 위한 이론 해석을 수행하였고, 실험을 통하여 그 이론을 확인하였다. UV-Visible spectrometer와 FTIR spectrometer를 사용하여 측정된 투과율로부터 이론적 연구에 필요한 유리덮개 및 다공성 매질의 파장에 따른 복사 물성치(spectral complex radiative properties)를 계산하였다. 복사열전달의 이론해석은 흡수와 산란이 있는 경우에 적용될 수 있는 단순하면서 비교적 정확한 two-flux 모델⁽⁴⁻⁶⁾을 사용하여 집열기의 특성 및 효율을 계산하였다. 또한, 태양이 없는 경우 즉 여름철 야간에 있어서의 온도강하를 계산하여 공기 냉각기로서의 적용 가능성을 고찰하였다.

본 실험에 앞서서 기초 실험을 수행하였고, 이때 얻은 경험과 이론적 해석으로 얻은 결과를 기초로 하여 집열기를 제작하였다. 집열기는 유리덮개, 다공성 매질 및 단열재로 구성되어 있다. 유리덮개

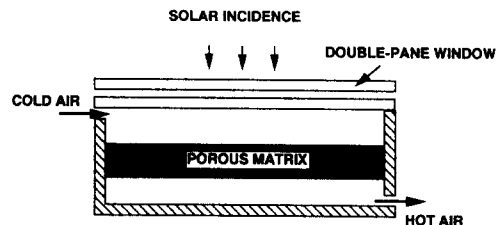


Fig. 1 Schematic diagram of the porous matrix solar collector

는 두께 5 mm의 일반유리(한국유리(주) Hanlite-Clear Glass)가 사용되었고, 다공성 매질로는 무광택 흑색도료로 코팅된 15 mesh의 stainless steel wire screen이 사용되었다. 제작된 집열기를 이용한 실험 결과는 이론적 효율과 잘 일치하였고, 공기유량이 48~53 kg/m²hr일 때 60% 이상의 일간 집열효율을 얻었다.

2. 복사 물성치의 측정

본 연구에서는 집열기의 덮개로 사용되는 유리와 다공성 매질로 사용되는 여러 겹의 stainless steel wire screen으로 이루어진 matrix의 투과율을 측정하여 이들의 복사 물성치를 구하였다. 유리의 복사 물성치인 복소 굴절률은 유리를 매끄러운 평판이라 가정하여 전자기 이론을 적용하여 계산하였으며, 다공성 매질의 복사 물성치(복사 흡수계수 및 후면 산란계수)는 two-flux 모델로부터 유도된 이론적 투과율을 적용하여 계산하였다. 여기서, 파장에 따른 투과율을 측정하기 위하여 가시광선 영역과 근적외선 영역(0.3~0.9 μm)에서는 UV-Visible spectrometer(Shimadzu, UV-240)를, 적외선 영역(2.2~22 μm)은 MIDAC-1200 FTIR spectrometer를 사용하였고, 중간영역(0.9~2.2 μm)은 두 실험장치로 측정할 수 없었다.

2.1 유리의 투과율

두께 H , 복소 굴절률 $N = n + ik$ 인 유리판에 수직으로 입사한 파장 λ 의 빛의 투과율 $\tau_w^{(7)}$ 는

$$\tau_w = \frac{(1-R)^2 + 4R\sin^2\psi}{R^2 e^{-\alpha H} + e^{\alpha H} - 2R\cos(\zeta + 2\psi)} \quad (1)$$

이다. 여기서

$$\begin{aligned} 0 \leq \psi \leq \pi, \quad \psi &= \tan^{-1}\left(\frac{2\kappa}{n^2 + \kappa^2 - 1}\right) \\ \zeta &= \frac{4\pi nH}{\lambda}, \quad \alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda} \\ R &= \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2} \end{aligned} \quad (2)$$

이고 R 은 반무한고체에 대한 반사율이다. 두께 H_1, H_2 인 유리의 측정된 투과율을 각각 τ_{w1} 및 τ_{w2} 라 하면 식 (1)을 이용하여 복소 굴절률 성분인 n, κ 를 구할 수 있다. 또한 다음과 같은 분산이론(classical dispersion theory)으로부터 유리의 복소 굴절률을 이론적으로 예측할 수 있다. 선형 진동

모델(linear oscillator model)을 이용하여 부도체(dielectric) 물질의 복소 굴절률에 대한 관계식^(8,9)은 다음과 같다.

$$n = \left[\frac{\epsilon'_r + \sqrt{\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2}}{2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$\kappa = \left[\frac{-\epsilon'_r + \sqrt{\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2}}{2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

이고, 여기서 ϵ_r 은 측정 대상 물질의 복소 유전율(complex dielectric constant)로

$$\epsilon_r = \epsilon'_r + i\epsilon_r'' \quad (5)$$

$$\epsilon'_r = n_e^2 + \frac{\omega_{p2}^2(\omega_{o2}^2 - \omega^2)}{(\omega_{o2}^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2} \quad (6)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{\omega_{p2}^2\gamma\omega}{(\omega_{o2}^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2} \quad (7)$$

이다. 여기서, ω_p 는 plasma 진동수를, ω_{o2} 는 격자 진동(lattice vibration)의 중심 진동수를, γ 는 relaxation 진동수를 의미한다. 본 연구에서는 유리의 재질을 무정형(amorphous) SiO₂로 가정하였고, 이에 대한 변수들은 $n_e = 1.46$, $\gamma = 30 \text{ cm}^{-1}$, $\lambda_{o2} = 9.4 \mu\text{m}$, $\lambda_{p2} = 11.1 \mu\text{m}$ 이고

$$\omega = \frac{2\pi c_0}{\lambda} \quad (8)$$

의 관계가 있다. 이와 같이 구한 실험적 물성치와 이론적 물성치를 Fig. 2에서 비교하였다. 파장 4.5 μm 이상에서는 투과율이 거의 0이기에 복소 굴절률을 투과율 측정 자료로는 구할 수 없었기에 나타내지 않았고 다만 이론적으로 구한 값만 표시하였다.

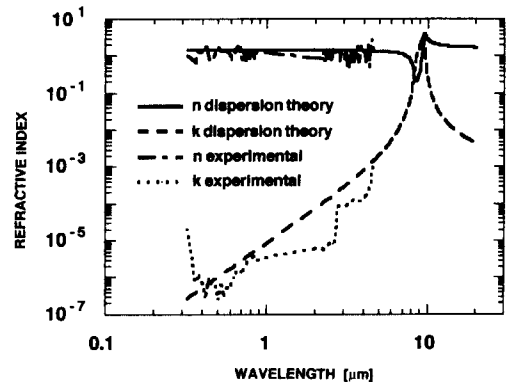


Fig. 2 Optical constants of glass at room temperatures

2.2 다공성 매질의 투과율

다공성 매질인 wire screen matrix의 물성치에 대한 해석을 위하여 two-flux 모델 이론으로부터 투과율^(9,10)은

$$\tau_m = \frac{2\beta \exp(\beta L)}{A_1 \exp(2\beta L) + A_2} \quad (9)$$

이고, 여기서

$$\begin{aligned} \beta &= (4\sigma_a^2 + 8\sigma_a b\sigma_s)^{\frac{1}{2}} \\ A_1 &= \beta + 2\sigma_a + 2b\sigma_s \\ A_2 &= \beta - 2\sigma_a - 2b\sigma_s \end{aligned} \quad (10)$$

이다. 두께 L_1 , L_2 인 wire matrix의 투과율을 측정하여 이를 각각 τ_{m1} , τ_{m2} 라 하자. 이 때 식 (8)로부터 흡수계수 σ_a 및 후면산란계수 $b\sigma_s$ 를 구할 수 있다. 본 실험에서 사용된 무광택 흑색도료로 표면처리된 15 mesh의 stainless steel wire에 대한 복사계수들을 Fig. 3에 나타내었다. 이때에 wire screen을 여러 겹 겹쳐서 사용하였기 때문에 screen과 screen의 배치에 따라 같은 장수라도 투과율이 상당히 변하였지만 screen 사이의 간격을 띄우면 배치와는 무관하게 투과율은 거의 일정하였다. 이는 빛의 회절 현상 때문이다.

3. 이론적 모델링

다공성 태양열 집열기내에서의 복사에너지 전달 현상을 Fig. 4에 개략적으로 나타내었다. 날장 두께 H 의 이중 유리덮개, 두께 L 의 다공성 매질 및 단열재로 구성된 집열 시스템에서 태양으로부터 B_v 의 가시광선 영역의 복사 에너지와 우주로부터 B_{ir} 의 적외선 복사 에너지가 입사하는 경우로 가정

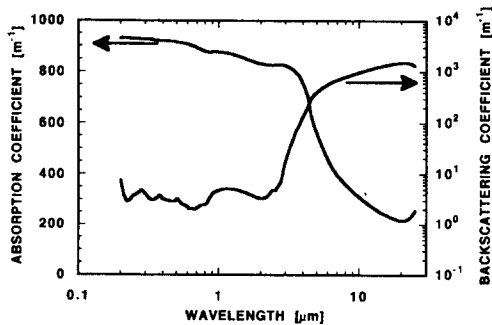


Fig. 3 Absorption and backscattering coefficients for 15 mesh wire screen sheet(non-glossy black paint coated)

하였다. 여기에서 복사 에너지는 가시광선 영역(파장 $0.5 \mu\text{m}$ 기준)과 적외선 영역($12.5 \mu\text{m}$ 기준)으로 나누어 하첨자 v 와 ir 로 각각 구분하였다.

3.1 지배방정식

Fig. 1에 나타난 기호⁽⁶⁾를 사용하여 유리덮개 1과 2에 대한 복사 에너지 균형에 대한 관계식을 정리하면 가시광선(visible) 영역에서는

$$q_{v1} = B_v R_v + q_{v2} \tau_v \quad (11)$$

$$q_{v1} = \frac{q_v^-(0) \tau_v R_v + B_v \tau_v}{1 - R_v^2} \quad (12)$$

$$q_{v2} = \frac{B_v \tau_v R_v + q_v^-(0) \tau_v}{1 - R_v^2} \quad (13)$$

$$q_v^+(0) = q_v^-(0) R_v + q_{v1} \tau_v \quad (14)$$

이 되고, 여기서 하첨자 l 은 유리덮개 1에서 외부로의 방출을 의미한다. 그리고, 적외선(infrared)영역에서는

$$q_{ir1} = B_{ir} R_{ir} + q_{ir2} \tau_{ir} + \sigma T_{w1}^4 E_{ir} \quad (15)$$

$$q_{ir1} = \frac{(q_{ir}^-(0) \tau_{ir} + \sigma T_{w2}^4 E_{ir}) R_{ir} + B_{ir} \tau_{ir} + \sigma T_{w1}^4 E_{ir}}{1 - R_{ir}^2} \quad (16)$$

$$q_{ir2} = \frac{(B_{ir} \tau_{ir} + \sigma T_{w1}^4 E_{ir}) R_{ir} + q_{ir}^-(0) \tau_{ir} + \sigma T_{w2}^4 E_{ir}}{1 - R_{ir}^2} \quad (17)$$

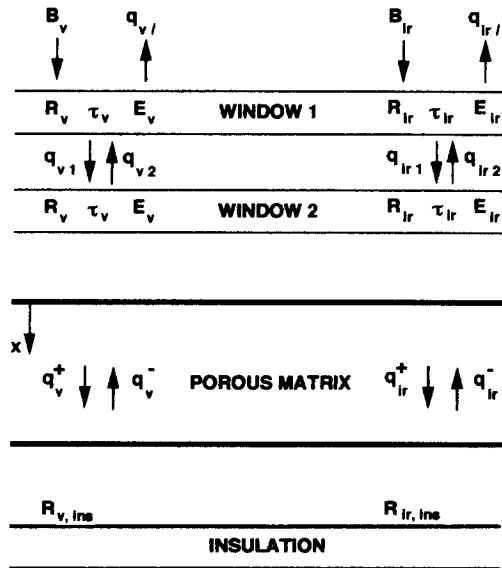


Fig. 4 Radiative heat fluxes in the porous solar collector

$$q_{ir}^+(0) = q_{ir}^-(0)R_{ir} + q_{ir1}\tau_{ir} + \sigma T_{w2}^4 E_{ir} \quad (18)$$

이 된다. 여기서, R , τ , E 는 유리의 반사율(reflectance), 투과율(transmittance), 방사율(emittance)을 각각 나타낸다. 이 때 q^+ , q^- 는 다공성 매질내에서의 x 축에 대하여 양의 방향과 음의 방향으로의 복사열전달을 의미한다. 유리덮개 1에 대한 에너지 보존식은

$$\begin{aligned} & h_{w\infty}(T_{\infty} - T_{w1}) + h_{wg}(T_{w2} - T_{w1}) + B_v + B_{ir} \\ & + q_{v2} + q_{ir2} \\ = & q_{v1} + q_{ir1} + q_{v1} + q_{ir1} \end{aligned} \quad (19)$$

이며, 유리덮개 2에서의 에너지 보존식은

$$\begin{aligned} & h_{wg}(T_{w1} - T_{w2}) + h_{wc}(T_{a1} - T_{w2}) + q_{v1} + q_{ir1} \\ & + q_v^-(0) + q_{ir}^-(0) \\ = & q_{v2} + q_{ir2} + q_v^+(0) + q_{ir}^+(0) \end{aligned} \quad (20)$$

이고, 여기서, T_{a1} 는 공기의 집열기 입구온도이다. 그리고, h 는 열전달계수를 나타내고 부록에서 설명되어 있다. 유리덮개 2와 다공성 matrix 사이에서 공기에 대한 에너지 보존식은

$$h_{wc}(T_{w2} - T_{a1}) = \rho_a C_{pa} U_a (T_{a0} - T_{a1}) \quad (21)$$

이고, 여기서 T_{a0} 는 다공성 매질로 들어갈 때의 공기의 온도를 나타낸다. 다공성 매질내에서 공기에 대한 에너지 보존식은

$$\rho_a C_{pa} U_a \frac{dT_a}{dx} = h_p A_p (T_p - T_a) \quad (22)$$

가 된다. 여기서 U_a 및 A_p 는 집열기 단위 면적당 공기의 체적 유량 및 단위 체적당 기체-고체 접촉 면적을 나타낸다. 다공성 매질에 대한 에너지 보존식은

$$\begin{aligned} & h_p A_p (T_a - T_p) = 4\sigma_{a,ir}\sigma T_p^4 - 2\sigma_{a,ir}(q_{ir}^+ + q_{ir}^-) \\ & - 2\sigma_{a,v}(q_v^+ + q_v^-) \end{aligned} \quad (23)$$

이다. 다공성 matrix 아랫면과 단열면 사이에서의 공기에 대한 에너지 보존식은

$$h_{pi}(T_{ins} - T_a(L)) = \rho_a C_{pa} U_a (T_{ae} - T_a(L)) \quad (24)$$

이며, 여기서 T_{ins} 는 단열면의 온도이고, T_{ae} 는 공기의 집열기 출구온도이다. 단열면에서의 에너지 보존식은

$$\begin{aligned} & h_{pi}(T_a(L) - T_{ins}) + q_{ir}^+(L) + q_v^+(L) + h_{ins}(T_{\infty} \\ & - T_{ins}) \\ = & q_{ir}^+(L)R_{ir,ins} + \sigma T_{ins}^4(1 - R_{ir,ins}) \\ & + q_v^+(L)R_{v,ins} \end{aligned} \quad (25)$$

이다. 다공성 매질내에서 복사 에너지의 전달방정식은 two-flux 모델⁽⁴⁻⁶⁾을 사용하면

$$\begin{aligned} \frac{dq_{ir}^+}{dx} = & -2\sigma_{a,ir}q_{ir}^+ - 2b\sigma_{s,ir}q_{ir}^+ + 2\sigma_{a,ir}\sigma T_p^4 \\ & + 2b\sigma_{s,ir}q_{ir}^- \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} -\frac{dq_{ir}^-}{dx} = & -2\sigma_{a,ir}q_{ir}^- - 2b\sigma_{s,ir}q_{ir}^- + 2\sigma_{a,ir}\sigma T_p^4 \\ & + 2b\sigma_{s,ir}q_{ir}^+ \end{aligned} \quad (27)$$

$$\frac{dq_v^+}{dx} = -2\sigma_{a,v}q_v^+ - 2b\sigma_{s,v}q_v^+ + 2b\sigma_{s,v}q_v^- \quad (28)$$

$$-\frac{dq_v^-}{dx} = -2\sigma_{a,v}q_v^- - 2b\sigma_{s,v}q_v^- + 2b\sigma_{s,v}q_v^+ \quad (29)$$

가 된다. 여기서 식 (22)에 대한 경계조건은

$$T_a(0) = T_{a0} \quad (30)$$

이고, 식 (26)~(29)에 대한 경계조건은

$$\begin{aligned} q_{ir}^+(0) = & E_{ir}\sigma T_{w2}^4 + q_{ir}^-(0) \left[R_{ir} + \frac{\tau_{ir}^2 R_{ir}}{1 - R_{ir}^2} \right] \\ & + \frac{\sigma T_{w2}^4 E_{ir} R_{ir} \tau_{ir} + B_{ir} \tau_{ir}^2 + \sigma T_{w1}^4 E_{ir} \tau_{ir}}{1 - R_{ir}^2} \end{aligned} \quad (31)$$

$$q_{ir}^-(L) = E_{ir,ins}\sigma T_{ins}^4 + (1 - E_{ir,ins})q_{ir}^+(L) \quad (32)$$

$$q_v^+(0) = q_v^-(0) \left[R_v + \frac{\tau_v^2 R_v}{1 - R_v^2} \right] + \frac{B_v \tau_v^2}{1 - R_v^2} \quad (33)$$

$$q_v^-(L) = q_v^+(L)R_{v,ins} \quad (34)$$

이 된다. 그리고, 집열기의 효율은

$$\eta = \frac{\rho_a U_a C_{pa} (T_{ae} - T_{a1})}{B_v} \quad (35)$$

로 정의할 수 있고, 시간에 대한 누적효율은

$$\eta_a = \frac{\int_{t_i}^{t_f} \rho_a U_a C_{pa} (T_{ae} - T_{a1}) dt}{\int_{t_i}^{t_f} B_v dt} \quad (36)$$

이 되고 이는 시간 t_i 에서 t_f 까지의 평균효율을 의미한다. 이와 같이 전개된 이론식을 복사 방사향의 비선형성 때문에 반복법을 이용하여 수치해석하였다. 다공성매질의 온도분포를 가정한 후 복사전달 방정식 (26)~(29)로부터 복사열유속을 구하여 이를 에너지 보존식에 대입하여 온도분포를 구하고 이 온도가 수렴할 때까지 계속 반복하였다.

3.2 이론적 고찰

유리의 복사 물성치인 복소 굴절률을 가시광선 영역 및 근적외선 영역($0.3 \sim 2.7 \mu\text{m}$)에서는 파장 $0.5 \mu\text{m}$ 의 값을 대표로, 적외선 영역($2.7 \sim 4.3$

μm)에서는 파장 $3.25 \mu\text{m}$ 의 값을 대표로 하였고, 그밖의 적외선 영역(파장 $\lambda > 4.3 \mu\text{m}$)에서는 방사율 $E_{ir}=0.92$, 투과율 $\tau_{ir}=0.01$ 로 하였다. 집열기 내의 다공성 매질로는 무광택 paint로 표면 처리된 15 mesh의 stainless steel wire screen을 여러 겹 겹쳐서 사용하였는데 Fig. 3에 나타난 것처럼 선택 투과성이 뛰어나다. 이에 대한 복사 물성치는 파장 $0.5 \mu\text{m}$ 일 때의 값으로 가시광선 영역에 대한 물성치를, 파장 $12.5 \mu\text{m}$ 일 때의 값으로 적외선 영역에 대한 값으로 대표하였다. 단열면은 방사율 $E=0.9$ 인 회체로 가정하였고, 우주로부터의 복사 에너지 B_{ir} 을 계산하기 위해 하늘은 적외선 방사율 $E_{ir}=0.81$, 온도는 대기온도 T_{∞} 라 가정하였다.⁽¹¹⁾ 그리고, B_v 는 600 W/m^2 로 대표하여 계산하였다.

공기유량이 $40 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ 인 경우 대기의 온도에 따른 집열기의 효율을 다공성 매질의 두께 L 에 대하여 계산하여서 Fig. 5에 나타내었다. 주변 대기의 온도가 낮을수록 효율이 높는데 이는 복사열전달 현상이 비선형적이기 때문이다. 또한 유리덮개가 한 장일 경우가 두 장일 경우보다 높은 효율을 보였다. 이는 유리의 장수가 증가함에 따라 투과되는 태양에너지가 상당히 감소하지만, 상대적으로 보온효과는 그리 커지지 않기 때문이다. 다공성 매질의 두께가 0.001 m 이상에서는 효율이 거의 변하지 않으므로 적절한 두께는 0.001 m 가량으로 생각할 수 있고, 이 경우에는 광학적 두께(optical thickness)가 1이다. 이는 일반적으로 광학적 두께가 1 이상인 경우에는 광학적으로 두껍다는 개념과 잘 일치한다.

공기유량이 각 20, 30, 40, 60 $\text{kg/m}^2\text{hr}$ 인 경우에 대한 효율이 Fig. 6에 나타나 있다. 유량이 증가할수록 효율이 증가하는데, 이것은 공기와 고체 matrix 사이의 열전달 계수가 유량에 따라 증가하고, 매질의 온도가 낮아져서 적외선 영역에서의 복사 에너지가 감소하기 때문이다. 역시 다공성 매질의 두께가 0.001 m (약 3~4장)까지는 두께의 증가에 따라 효율이 증가함을 알 수 있다. 따라서 다공성 매질은 0.001 m 이상은 효율을 올리는데 있어서 크게 기여하지 못한다.

Fig. 7에서는 다공성 매질의 두께에 대한 가시광선 영역에서의 Albedo, ω_v 의 값이 0.0, 0.3, 0.6, 0.9일 때 효율의 변화를 보여주고 있다. Albedo가 적을수록, 다공성 매질 두께가 0.001 m 까지 두께의 증가에 따라 집열기의 효율이 증가함을 보인다.

Albedo가 0.9의 경우는 오히려 두께에 따라서 감소함을 보이는데 이는 반사율이 두께에 따라 증가하기 때문이다. 그러나, 이 때 유리덮개가 두 장일

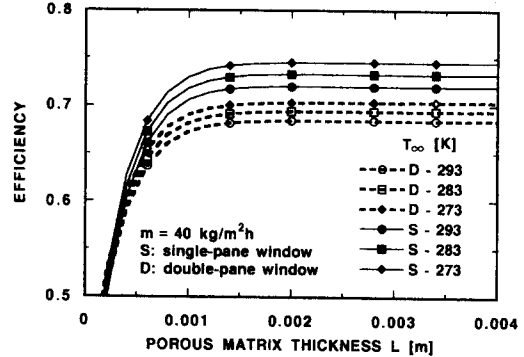


Fig. 5 Efficiencies for various ambient temperatures with respect to porous matrix thickness

Fig. 5 Efficiencies for various ambient temperatures with respect to porous matrix thickness

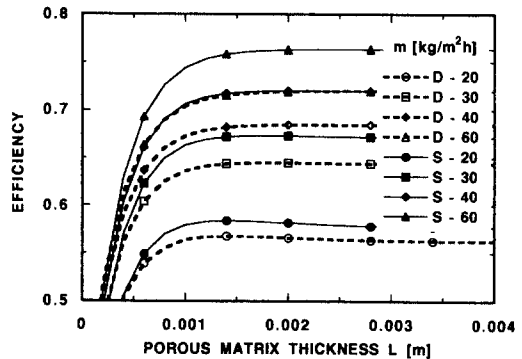


Fig. 6 Efficiencies for various air flow rates with respect to porous matrix thickness

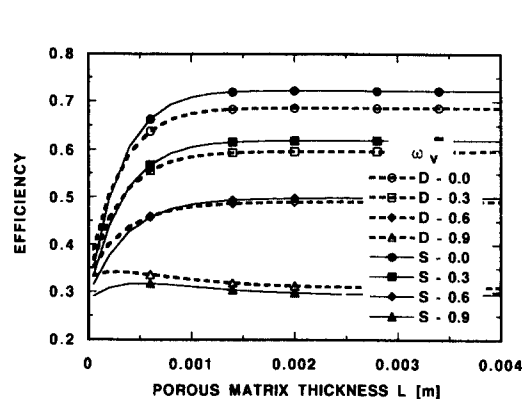


Fig. 7 Efficiencies for various visible-range albedos with respect to porous matrix thickness

때의 효율이 한 장일 때보다 높은데 이는 Albedo가 크기 때문에 다공성 매질에서 반사된 많은 에너지가 다시 다공성 매질을 향하여 재반사되는 양이 많기 때문이다.

적외선 영역에서의 Albedo, ω_{ir} 의 값이 0.0, 0.3, 0.6, 0.9일 때 효율의 변화를 Fig. 8에서 보여준다. Albedo가 클수록 집열기의 효율이 증가하나 Fig. 7의 ω_v 의 변화에 대한 것보다는 효율에 대한 영향이 작다. 이것은 Albedo가 작은 경우 다공성 매질이 적외선 영역의 에너지를 많이 방출하나 유리를 거의 투과하지 못하기에, 즉 온실효과 때문에, 효율이 급격히 떨어지지 않는다. 또한 여기에서도 다공성 매질의 두께가 0.001 m를 지나면서 효율의 변화는 크게 나타나지 않는다.

야간에 사용할 수 있는 복사식 공기냉각기의 응용 가능성을 해석하였다. 유량이 10, 20, 40 kg/m²hr일 때 유리가 없는 경우와 유리가 한 장인 경우에 다공성 매질의 두께에 따른 공기의 입구온도와

출구온도의 차이를 Fig. 9에 나타내었다. 유리가 없는 경우와 있는 경우의 비교에서 유리가 없는 경우가 있는 경우보다 훨씬 더 큰 온도차를 나타냈다. 이것은 유리가 없는 경우는 다공성 매질과, 온도가 낮은 우주와 직접 열교환을 할 수 있기 때문이다. 이와 같이 공기 냉각용으로 사용한다면 유리 덮개가 없이 유량은 약 20 kg/m²hr 이하에서 4°C 이상의 온도 강하를 가져오며 두께는 역시 0.001 m가 적절함을 알 수 있다.

4. 실험적 연구

체적형 태양열 집열기의 실험을 위하여 제작된 실험장치는 Fig. 10에 나타난 것과 같이 집열기와 보조기기 및 측정장치로 나누어진다. 집열기는 알루미늄사시 및 강판을 이용하여 제작하였으며 유리 덮개, 다공성 매질 및 단열재로 구성되어 있고, 외부 크기는 가로 2.601 m, 세로 1.246 m로 제작되어 세 칸으로 나뉘어졌고, 각 칸들은 필요에 따라 각기 따로 사용할 수 있도록 되어 있다. 유리덮개는 5 mm 두께의 일반 보통 유리(Hanlite-Clear Glass) 한 장을 사용하였다. 각 칸마다 내부의 다공성 매질은 15 mesh의 stainless steel wire screen을 가로 0.795 m 세로 1.14 m의 크기로 여러 겹 겹쳐서 구성하였다. 이론적 연구에서 밝힌 바와 같이 적절한 두께는 약 0.001 m이므로 이는 screen의 세 장을 겹친 것에 해당하므로 주로 이 경우에 대하여 실험을 하였다. 보온을 위하여 덮개 부위를 제외한 모든 부분은 50 mm 두께의 단열재를 사용하였다. 입사 태양에너지는 10분 간격으로 KIPP & ZONEN CM 11 pyranometer로 측정되었고, 계속 누적되어 일사량이 계산되었다.

실험은 주로 충북 충주에서 1993년 가을부터

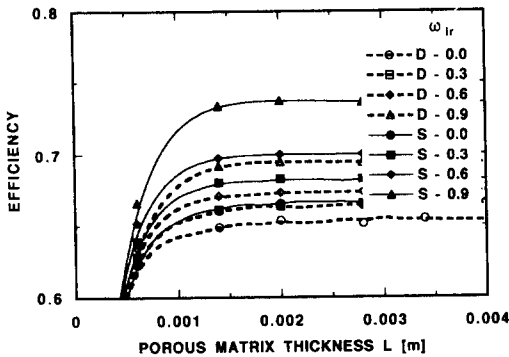


Fig. 8 Efficiencies for various IR-range albedoes with respect to porous matrix thickness

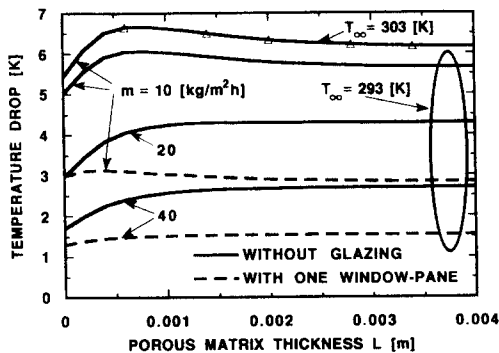


Fig. 9 Temperature drops under various conditions with respect to porous matrix thickness

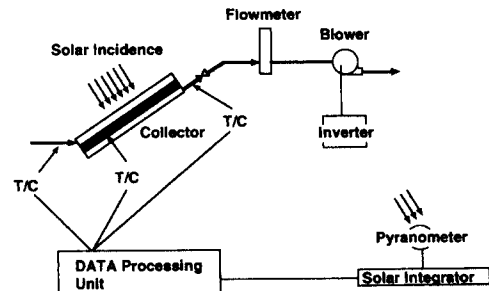


Fig. 10 Schematic diagram of experimental system

1994년 봄까지 수행되었다. 측정은 오전 9시부터 오후 6시까지 진행되었다. Fig. 11은 시간에 따른 태양의 입사량과 집열기의 입구와 출구에서의 공기 온도를 나타낸다. 여기에서 입구 및 출구의 온도차는 정오경이 가장 크고 그 시간을 전후하여 증가 및 감소하였다. 이 때에 실험적인 온도가 이론적인 온도보다 오전에 낮게 나타난 것은 실험장치가 야간에 냉각된 상태에서부터 작동하기 때문이며, 오후 2시 이후에는 오히려 실험적인 온도가 이론적인 온도보다 높게 나타난 것은 집열기에 축적된 에너지의 방출에 의한 것이다. 즉, 집열기의 열적 관성 때문이다. 측정초기의 열적 관성효과를 줄이기 위하여 오전 8시부터 송풍기를 가동하였으나, 입사량이 계속 변화하므로 열적관성효과를 완전히 제거할 수는 없었다.

Fig. 12는 Fig. 11의 경우에 대한 집열기의 순간 효율 및 누적 효율을 이론적 결과와 비교한다. 이와 같이 이론에 의한 두 경우는 효율이 거의 일치함을 보여주지만 실험적인 두 경우는 효율이 다를 것을 보여주는 것은 측정초기에 집열기의 낮은 효율 때문이다. 순간적인 효율은 오후 2시경까지 서서히 증가함을 보이다가 그 이후 시간부터 급격한 상승을 보인다. 이것은 오전의 경우와는 반대로 집열기에 축적된 에너지의 방출에 의한 것이다.

Fig. 13과 14는 안개 및 구름 때문에 일사량이 급격히 변화할 경우에 대한 집열기의 입구온도와 출구온도 및 효율의 변화를 보여준다. 오전 10시경 효율의 급격한 변화를 볼 수 있는데 이것은 안개를 벗어나면서 급격히 일사량이 증가하기 때문이며, 그 이후의 급격한 효율의 변화는 구름의 영향 때문이다. 오후 2시경부터 실험적인 효율이 증가함을 볼 수 있는데 이것 역시 집열기에 축적된 에너지가

방출되기 때문이다.

그밖에, 공기를 집열기의 위로 들어가서 아래로 나오도록하여 실험한 결과, 집열 효율은 약간 감소하였으나 그 차는 아주 작았으므로 본 실험과 같은 경우 자연대류의 영향이 상대적으로 미미함을 예측할 수 있었다.

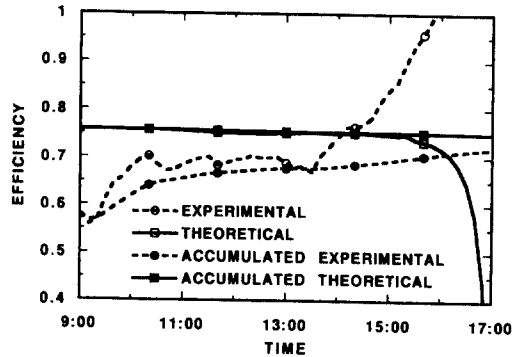


Fig. 12 Theoretical and experimental efficiencies for Fig. 11

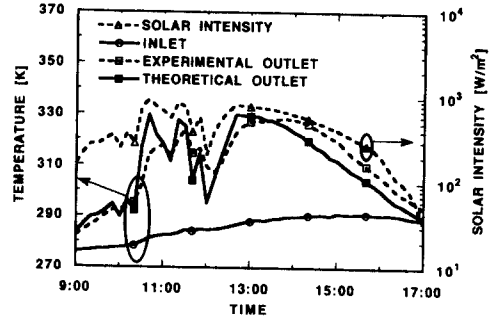


Fig. 13 Variation of temperatures and solar intensities for a cloudy day

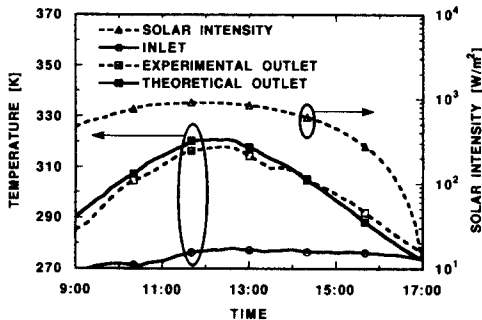


Fig. 11 Variation of temperatures and solar intensities for a clear day

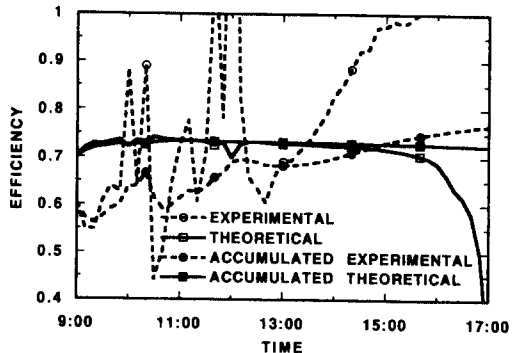


Fig. 14 Theoretical and experimental efficiencies for Fig. 13

5. 결 론

본 연구에서는 다공성 매질을 응용한 체적형 태양열 집열기에 대한 이론해석 및 실험적 연구를 수행하였다. 이론적 연구에서는 집열기의 유리덮개와 다공성 매질에 대한 파장에 따른 투과율을 UV-Visible spectrometer 및 FT-IR을 사용하여 측정하여, 이에 대한 복사 특성을 구하였다. 복사 특성을 기준으로 하여 여러 경우에 대하여 열전달은 일차원으로 하고, 열복사는 two-flux 모델을 사용하여 이론적인 해석을 하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 유리는 두께에 따라 파장 $0.3 \sim 2.73 \mu\text{m}$, $2.73 \sim 4.26 \mu\text{m}$, $4.26 \mu\text{m}$ 이상의 구간에 있어서 각 구간마다 투과율은 크게 달랐으나 두께가 얇을수록, 다공성 매질인 wire screen은 무광택 흑색 도료로 표면처리한 경우가 좋은 복사 특성을 보였다.

(2) 유리덮개가 한 장인 경우가 두 장인 경우보다 높은 집열효율을 나타내었다. 공기유량이 증가할수록, 가시광선 영역에서의 Albedo가 작을수록, 적외선 영역에서의 Albedo가 클수록 집열기의 효율은 증가하였다. 그러나 적외선 영역에서의 Albedo는 가시광선 영역에서의 Albedo에 비해 영향이 상대적으로 작았다.

(3) 집열기 효율 60% 이상을 얻기 위해서는 유량 $30 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ 이상, 다공성 매질 두께 0.001 m 이상(여기에서 다공성 매질의 두께는 순수 매질의 두께만을 의미한다), 가시광선 영역에서 Albedo는 0.1 이하가 되어야 함을 알았다. 그러나 다공성 매질의 효율은 두께가 0.001 m 이상에서는 거의 일정하므로 두께는 0.001 m (15 mesh screen 3~4장)가 적절하다. 이는 광학적 두께가 약 1이다.

(4) 야간에 사용할 수 있는 공기 냉각기의 적용 가능성을 예측하였다. 공기 온도강하 4°C 를 얻기 위해서는 유리덮개가 없이 유량이 $20 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ 이하여야 되고, 다공성 매질의 두께 역시 0.001 m 가 적절함을 알았다.

실험적 연구에서 집열기의 매질로는 15 mesh의 wire screen에 무광택 흑색 paint로 코팅을 하였으며 두께는 0.00096 m (직경 $0.00032 \text{ mm} \times 3$)로 하여 실험에서 얻은 결과는 다음과 같다.

(5) 공기 유량 $48 \sim 53 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ 의 경우에 있어서

오전 10시부터 오후 3시까지 집열기의 순간 효율은 약 60% 이상, 하루에 대한 집열 효율은 약 70% 가량임을 실험결과로 얻을 수 있었다.

(6) 공기의 유동을 달리한 경우에 있어서는 공기를 집열기 아래에서 위로 흐를 경우가 효율이 비교적 좋았으나, 큰 차이는 보이지 않았다.

(7) 이론적 결과와 실험적 결과와의 차이는 주로 집열기의 열적 관성의 영향에 기인하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Lansing, F. L. and Clarke, V., 1979, "A High Performance Porous Flat-Plate Solar Collector," *Energy*, Vol. 4, pp. 685~694.
- (2) Skocypec, R. D., Boehm, R. F. and Chavez, J. M., 1989, "Heat Transfer Modelling of the IEA/SSPS Volumetric Receiver," *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 111, pp. 138~143.
- (3) Hassab, M. A. and Sorour, M. M., 1989, "Heat Transfer Studies in Matrix-Type Solar Air Heaters," *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 111, pp. 82~88.
- (4) Tong, T. W. and Tien, C. L., 1980, "Analytic Models for Thermal Radiation in Fibrous Insulations," *Journal of Thermal Insulation*, Vol. 4, pp. 27~44.
- (5) Tong, T. W. and Tien, C. L., 1983, "Radiative Heat Transfer in Fibrous Insulations-Part I: Analytical Study," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 70~75.
- (6) Siegel, R. and Howell, J. R., 1992, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Third Ed., Hemisphere.
- (7) Bohren, C. F. and Huffman, D. R., 1983, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, John Wiley & Sons.
- (8) Brewster, M. Q., 1992, *Thermal Radiative Transfer and Properties*, John Wiley & Sons.
- (9) 황용하, 박승호, 이영수, 1994, "투과율의 측

정 및 이를 이용한 복사물성치의 계산," 태양에너지학회논문집, Vol. 14, No. 2, pp. 29~37.

- (10) Park, S. H. and Tien, C. L., 1994, "Radiation Induced Ignition of Porous Solid Fuels," *Combustion Science and Technology*, Vol. 95, pp. 173~192.

- (11) Mills, A. F., 1992, *Heat Transfer*, Irwin.

부 록

본 연구에서 사용된 각종 상관 관계식^(2,3)은 다음과 같다. 집열기 주위의 공기유동에 의한 대류 열전달계수는

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

이고, 여기서 V_w 는 풍속이다. 따라서, 유리덮개 1과 주위와의 열전달계수는

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

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

이다. 또한 단열면과 나가는 공기 사이에서의 열전달계수는

$$h_{pi} = \frac{k_a}{d_c} Nu_2 \quad (A-8)$$

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

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

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

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

이다. 유리 덮개 1과 2 사이에 대한 열전달계수는

$$h_{wg} = \left[\frac{H}{k_w} + \frac{d_w}{k_a} \right]^{-1} \quad (A-3)$$

이고, 여기서, d_w 는 유리덮개 사이의 간격이다. 유리덮개 2와 유입하는 공기 사이의 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 유리덮개 2와 다공성 매질과의 간격을 나타내고,

$$Re_{dc} = md_c / \mu_a, \quad Pe = Pr_a Re_{dc} \quad (A-5)$$

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

이다. 다공성 매질내에서의 열전달계수는

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

이고,

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

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

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

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

로부터 구한다.