

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 14, No. 2, 1994

투과율의 측정 및 이를 이용한 복사물설치의 계산

황용하* · 박승호** · 이영수***

*충주산업대학교 열공학과

**홍익대학교 기계공학과

***한국에너지기술연구소

Measurements of Transmittances and Calculations of Fundamental Radiative Properties

Yong-Ha Hwang*, Seungho Park**, Young-Soo Lee***

*Department of Thermal Engineering, National Chung-Ju University

**Department of Mechanical Engineering, Hong-Ik University

***Korea Institute of Energy Research

요 약

본 연구에서는 다공성 물질을 이용한 공기용 태양열 집열기에서 사용될 수 있는 유리덮개 및 다공성 매질의 파장에 따른 투과율(transmittance)을 UV-visible spectrophotometer 및 FT-IR spectrometer을 이용하여 측정하였다. 유리의 경우에는 전자기 이론으로 유도된 투과율과 실험적 투과율을 비교하여 유리의 복소굴절율(complex refractive index)을 구하였다. 또한 분산이론(classical dispersion theory)으로부터 구한 이론적 복소굴절율과 비교하였다. 다공성 매질은 15 메쉬의 stainless steel wire screen을 여러 겹으로 겹쳐 이에 대한 투과율을 측정하였다. 그리고 two-flux 모델을 사용하여 흡수계수(absorption coefficient) 및 후면산란 계수(backscattering coefficient)를 구하였다.

Abstract

Radiative characteristics of glass windows and porous absorbing media which can

be used for a solar air heater are determined through the measurements of spectral transmittances. Those in the visible range are measured by the UV-IR spectrometer. Refractive index of glass are obtained by the comparison of the measured transmittances and the correlations derived from the electromagnetic theory and are compared to the theoretical ones calculated from the classical dispersion theory. Absorption and back-scattering coefficients of 15-mesh stainless wire screens are calculated by the comparison of the measured transmittances and the correlations derived from the two-flux model.

NOMENCLATURE

b : backscattering fraction factor
 C_0 : speed of light in a vacuum
 H : thickness of glass window
 i : $\sqrt{-1}$
 I : radiation intensity
 K : complex part of complex refractive index
 L : porous matrix thickness
 N : complex refractive index
 n : real part of complex refractive index
 R : reflectance
 x : spatial coordinate

GREEK LETTERS

α : absorption coefficient
 γ : relaxation frequency
 ϵ_r : relative permittivity(dielectric constant)
 λ : wavelength
 σ : absorption or scattering coefficient
 τ : transmittance
 ω : circular frequency

Superscripts

' : real component of complex quantity

" : complex component of complex quantity
 + : forward direction
 - : backward direction

SUBSCRIPTS

a : absorption
 m : porous matrix
 O : center value
 p : plasma
 s : scattering
 w : window

I. 서 론

열복사 물성치의 측정과 이에 대한 이론 해석은 오래 전부터 고효율 태양열 집열 시스템 개발이라는 관점 및 고온 또는 저온 시스템의 열전달 현상의 이해의 측면에서 행하여졌을 뿐만 아니라 신물질의 확인에서도 많이 이용되어 왔다. 본 연구에서는 집열기의 덮개로 사용되는 유리와 다공성 매질로 사용되는 여러겹의 stainless steel wire screen으로 이루어진 matrix의 투과율을 측정하여 이들의 복사 물성치를 구하였다. 유리의 복사 물성치인 복소 굴절율($N=n+iK$)은 유리를 매끄러운 평판이라 가정하여 전자기 이론[1]을 적용하여 계산하였

다. 이를 SiO₂에 대한 물성치를 분산이론 (dispersion theory) [2]으로부터 구하여 비교하였다. 다공성 매질의 복사 물성치(복사 흡수 계수 및 후면 산란계수)는 two-flux 모델 [3]로부터 유도된 이론적 투과율 [4]을 적용하여 계산하였다. 여기서 과장에 따른 투과율을 측정하기 위하여 가시광선 영역에서는 UV-Visible spectrophotometer (Shimadzu, UV-240)를, 적외선 영역은 MIDAC-1200 FT-IR (Fourier Transformer-Infrared) Spectrometer [5]를 사용하였다.

II. 기본 이론

본 연구에서 집열기의 덮개로 사용된 유리와 다공성 매질로 사용된 stainless wire screen의 투과율을 가시광선 영역에서는 UV-Visible spectrophotometer를 적외선 영역은 MIDAC-120 FT-IR spectrometer를 사용하여 측정하여서 여러 이론 관계식으로 해석하여 복사물성치를 계산하였다.

1. 유리의 투과율

전자기 이론을 바탕으로, Fig. 1에 나타난 것과 같이 두께 H, 복소굴절율 n+ik인 유리에 수직으로 입사한 빛의 투과율 τ [1]는

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

이고,

여기서 $0 \leq \psi \leq \pi$,

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{2k}{n^2 + k^2 - 1} \right)$$

$$\zeta = \frac{4\pi n H}{\lambda}, \quad \alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

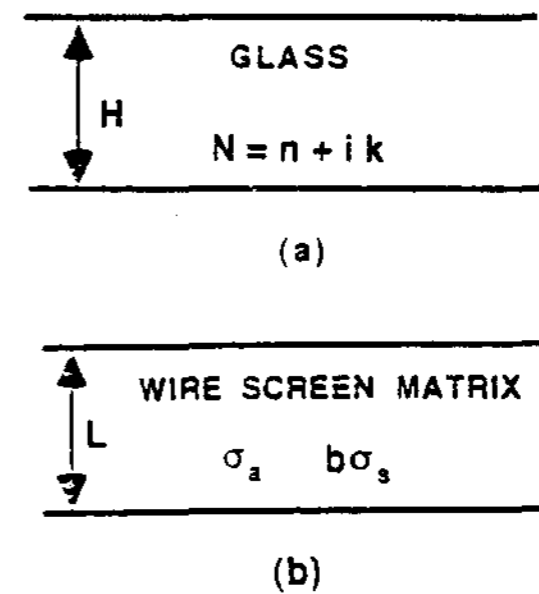


Fig. 1. (a) Window glass cover and (b) porous matrix made of wire screens.

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \dots (2)$$

이고 R은 반무한 고체에 대한 반사율이다. 식 (1)에서 입사파 및 내부 반사파의 간섭을 무시하여 단순화하면 투과율은

$$\lambda_w \approx (1-R)^2 e^{\alpha H} \dots (3)$$

가 된다. 이를 이용하여 두께 H₁, H₂인 유리의 투과율을 각각 τ_{w1} 및 τ_{w2}라 하면 복소 굴절율 성분인 n, k를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k = \frac{\lambda \ln(\tau_{w1}/\tau_{w2})}{4\pi(H_1 - H_2)} \dots (4)$$

$$n = (1 + R_{w1})$$

$$+ \frac{\sqrt{(1 + R_{w1})^2 - (1 - R_{w1})^2(1 + k^2)}}{1 + R_{w1}} \dots (5)$$

이고,

$$\text{여기서 } R_{w1} = 1 - (\tau_{w1} e^{\alpha H_1})^{\frac{1}{2}} \dots (6)$$

이다.

2. 분산이론 (dispersion theory)

선형 진동 모델 (linear oscillator model)

[1-2]을 이용하여 부도체(dielectric) 물질의 복소굴절율에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$n = \left[\frac{\epsilon_r' + \sqrt{\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2}}{2} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

$$kn = \left[\frac{-\epsilon_r' + \sqrt{\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2}}{2} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(8)$$

이고, 여기서 $\epsilon_r = \epsilon_r' + i\epsilon_r''$ 은 측정 대상 물질의 복소 유전율(complex dielectric constant) 이고

$$\epsilon_r' = n_e^2 + \frac{\omega_{p2} (\omega_{o2}^2 - \omega^2)}{(\omega_{o2}^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \dots\dots\dots(9)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{\omega_{p2} \gamma \omega}{(\omega_{o2}^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \dots\dots\dots(10)$$

이다. 여기서 ω_p 는 plasma 진동수를, ω_{o2} 는 격자진동(lattice vibration)의 중심 진동수를 γ 는 relaxation 진동수를 의미한다. 본 연구에서는 유리의 재질을 무정형(amorphous) SiO_2 로 가정하여, 이에 대한 변수들은 $n_e = 1.46$, $\gamma = 30 \text{ cm}^{-1}$, $\lambda_{o2} = 9.4 \mu\text{m}$, $\lambda_{p1} = 11.1 \mu\text{m}$ 이고

$$\omega = \frac{2\pi C_0}{\lambda} \dots\dots\dots(11)$$

의 관계가 있다.

3. 다공성 매질의 투과율

다공성 매질인 wire-screen matrix의 물성치에 대한 해석을 위하여 two-flux 모델[3] 이론으로부터 전달 방정식은

$$\frac{dI^+}{dx} = -(2\sigma_a + 2b\sigma_s)I^+ + 2b\sigma_s I^- \dots\dots\dots(12)$$

$$\frac{dI^-}{dx} = -(2\sigma_a + 2b\sigma_s)I^- + 2b\sigma_s I^+ \dots\dots\dots(13)$$

이며, 경계조건은

$$I^+(0) = I_0^+, I^-(L) = 0 \dots\dots\dots(14)$$

이며 matrix로부터의 내부방사는 무시하였다. 이때의 투과율 및 반사율 [4]은

$$\tau_m = \frac{I^+(L)}{I^+(0)} = \frac{2\beta \exp(\beta L)}{A_1 \exp(2\beta d) + A_2} \dots\dots\dots(15)$$

$$R_m = \frac{I^-(0)}{I^+(0)} = \frac{2b\sigma_s [\exp(2\beta d) - 1]}{A_1 \exp(2\beta d) + A_2} \dots\dots\dots(16)$$

이고,

$$\text{여기서 } \beta = (4\sigma_a^2 + 8\sigma_a b\sigma_s)^{1/2}$$

$$A_1 = \beta + 2\sigma_a + 2b\sigma_s$$

$$A_2 = \beta - 2\sigma_a - 2b\sigma_s \dots\dots\dots(17)$$

이다. 두께 L_1, L_2 인 wire matrix의 투과율을 측정하여 이를 각각 τ_{m1}, τ_{m2} 라 하자. 이 때 식(15)로부터 σ_a 및 $b\sigma_s$ 를 구할 수 있다.

II. 결과 및 고찰

파장 $0.19 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 범위의 자외선, 가시광선 및 근적외선 영역의 투과율은 UV-visible spectrophotometer로, $2.2 \sim 22 \mu\text{m}$ 범위의 적외선 영역의 투과율은 FT-IR spectrometer로 측정하였다. 그리고 $0.9 \sim 2.2 \mu\text{m}$ 의 영역은 측정장치의 한계로써 측정할 수가 없어서 보장하였다.

Fig. 2에서는 두께가 각 $1.98 \text{ mm}, 2.83 \text{ mm}, 4.87 \text{ mm}$ 인 유리판(한국 유리(주) Hanlite-Clear Glass)의 가시광선 영역과 적외선 영역의 파장에 따른 투과율을 보여준다. 정확한 값을 얻기 위하여 실험을 수십 회 반복하여 대표적인 값을 나타내었다. 자외선 영역에서는 파장이 $0.3 \mu\text{m}$ 보다 작은 구간에서는 거의 투과하지 못하였으며 이는 자외선 영역에서 boundelectron의 에너지 상태의 천이(energy

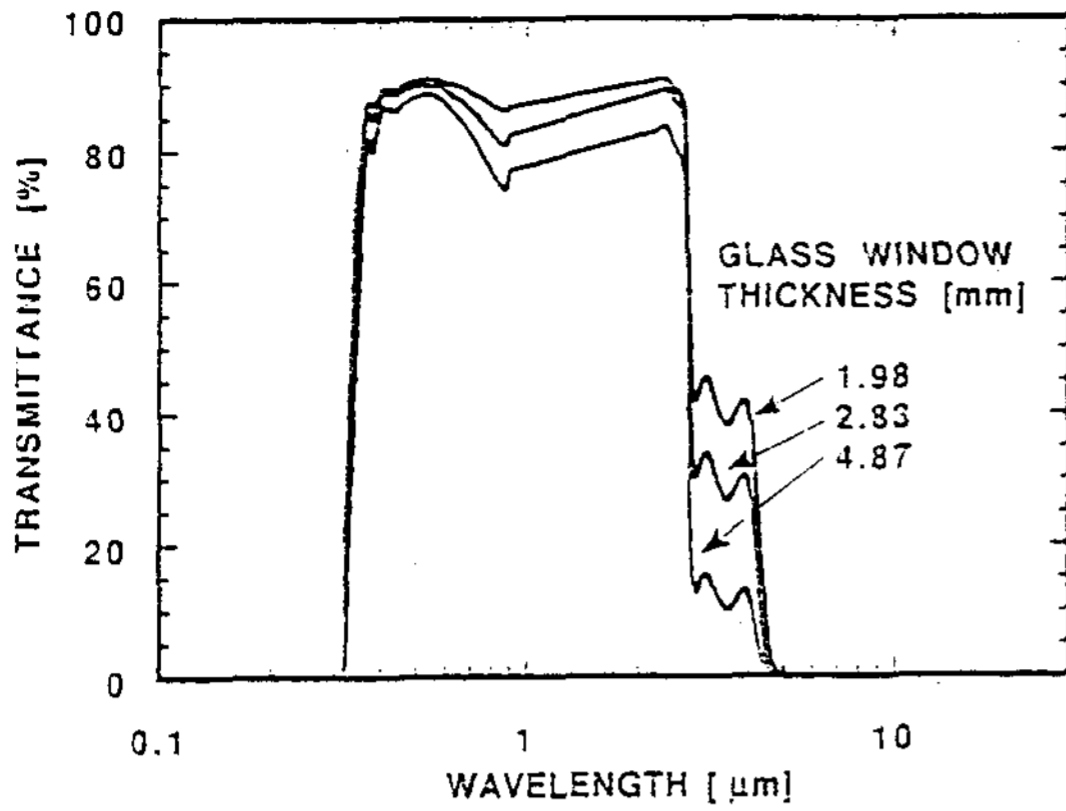


Fig. 2. Spectral transmittances of the incident radiation for various thicknesses of single glass window pane.

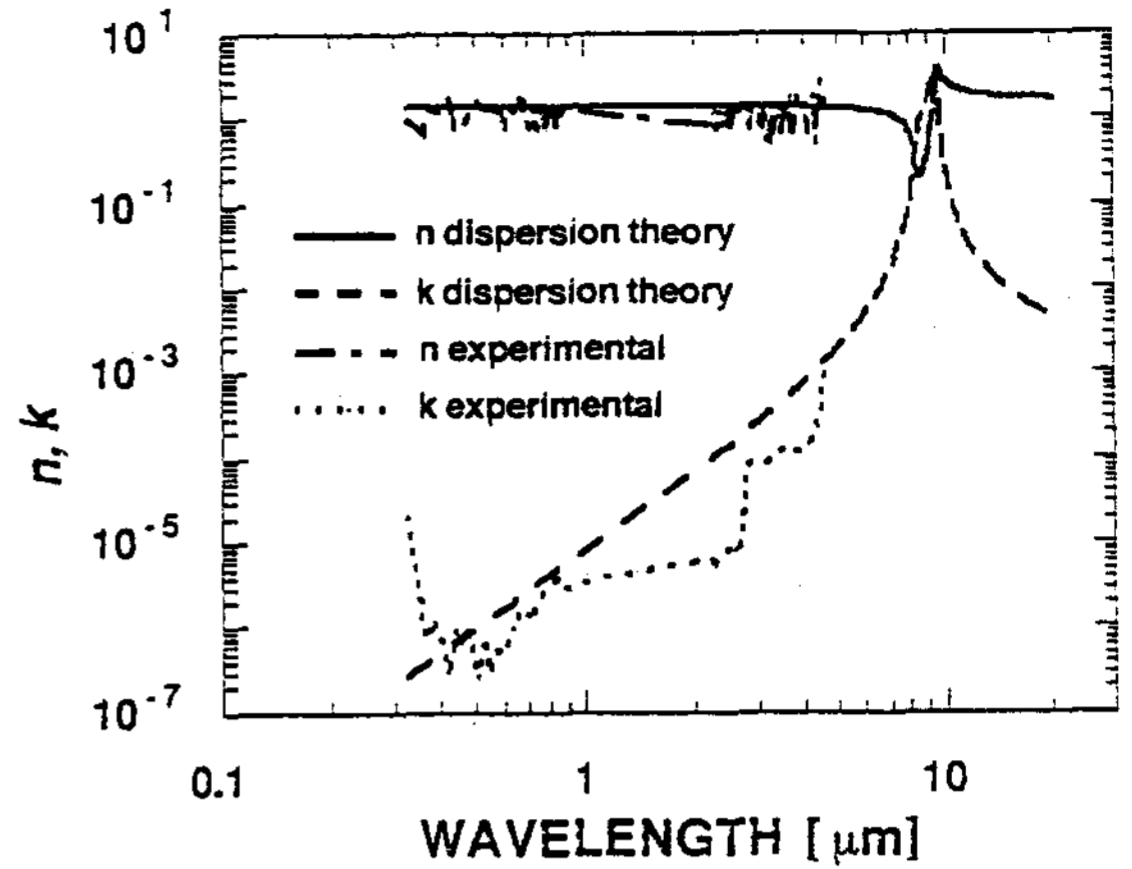


Fig. 3. Optical constants of glass at room temperature obtained from experiments and the classical dispersion theory.

state transition)에 의하여 흡수가 강화되었기 때문이다. 가시광선 영역에서는 투과율이 약 90% 정도에 이르렀다. 적외선 영역에서는 2.7 μm 까지는 완만히 변화하다가 이후 급강하하여 4.3 μm 까지는 투과율이 50% 이하인 영역을 이루고 있고, 파장 4.3 μm 이후부터는 투과율이 거의 0에 가까웠다. 이는 격자진동에 의하여 흡수가 증진되었기 때문이다. 0.9~2.2 μm 범위는 본 연구에서 사용되어진 기기로서 얻을 수 없는 근 적외선 영역이기에 보간되었다.

유리의 복소 굴절율은 식 (4)와 (5)를 이용하여 대략의 값을 구한다. 이 값들을 기본으로 복소 굴절율을 변화시켜 식 (1)에 대입하여 이론적 투과율을 계산한다. 그리고, 이를 실험으로부터 얻은 투과율과 비교하여 가장 잘 일치하는 경우에 있어 이때의 복소 굴절율을 Fig. 3에 나타내었다. 파장 4.3 μm 이후에는 투과율이 거의 0에 가깝기 때문에 식 (1)로부터는 복소굴절율을 구할 수가 없었다. 이와 같은 경우에 있어 복소굴절율을 구하려면 반사율을 측

정하여야 하나 본 연구진이 반사율 측정장치를 갖추고 있지 않아 구할 수가 없었다. 분산이론으로부터 구한 값과 실험으로부터 구한 값이 n 의 경우에는 잘 일치하나 k 의 경우에는 정성적으로는 비슷하나 차이가 있음을 볼 수 있다. 이는 분산이론에서의 진동이 선형으로 가정하였기 때문이고, 또한 측정대상 유리가 순수한 무정형 SiO_2 가 아니고 철분등이 섞인 일반 유리이기 때문이다. 그러나, 4.3 μm 이후의 복소 굴절율의 변화를 분산이론으로부터 예측할 수 있었다. λ_0 에서 비정상 분산(anomalous dispersion)을 볼 수 있다. 이와 같은 복소굴절율에 대한 두께 4.87 mm의 유리에 대한 투과율을 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. 파장 1 μm 까지는 잘 일치하나 그 이후에는 앞에서 언급한 바와 같은 이유로 차이가 있음을 보인다.

다공성 매질로는 15 mesh의 stainless steel wire screen을 여러겹 겹쳐서 사용하였다. 다공성 matrix에 표면처리를 안한 경우(bare) wire의 직경은 0.29 mm이고, 무광택 black 코팅을 했을 경우는 0.32 mm이며 선택표면

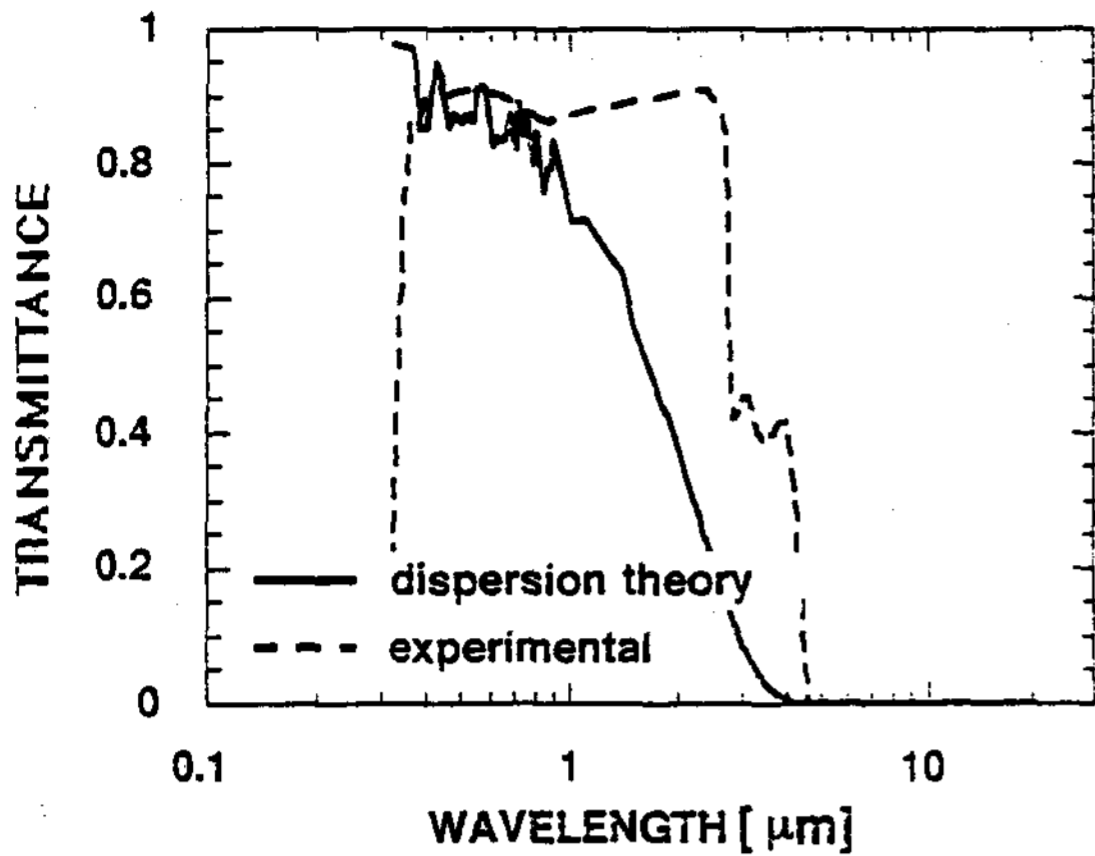


Fig. 4. Spectral normal transmittances of 4.87 mm thick glass window at room temperature.

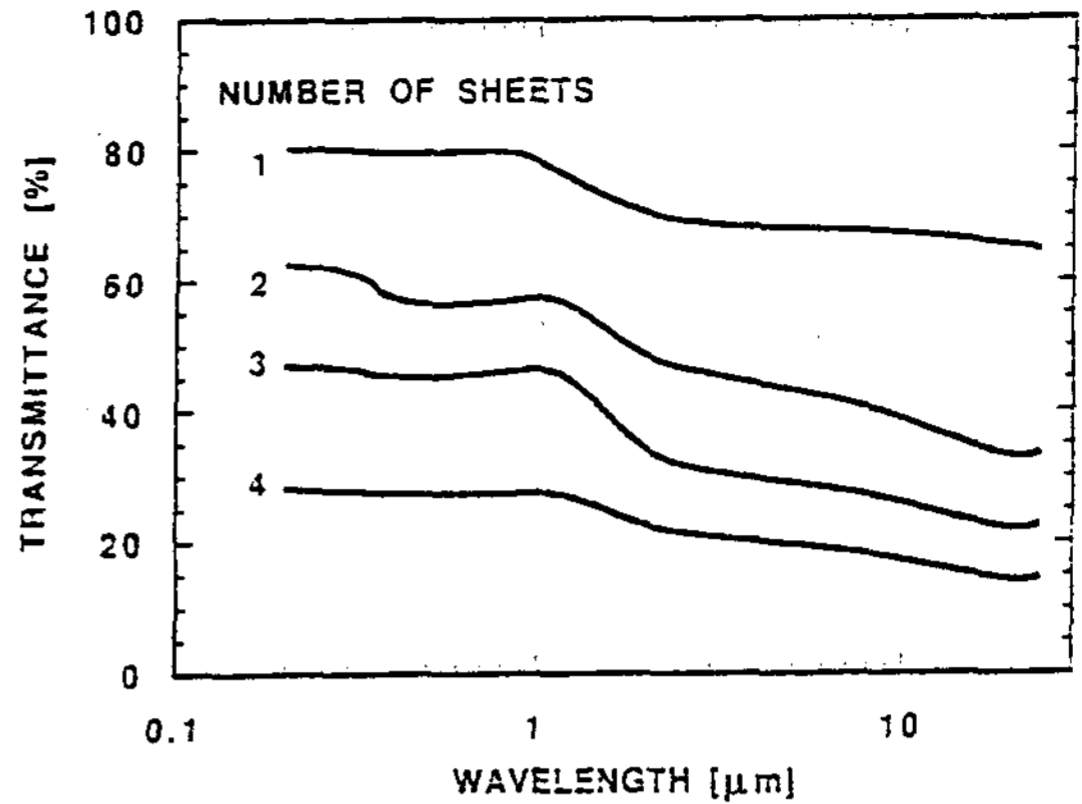


Fig. 5. Spectral transmittances of the incident radiation for various numbers of wire screen sheets (15 mesh non-coated).

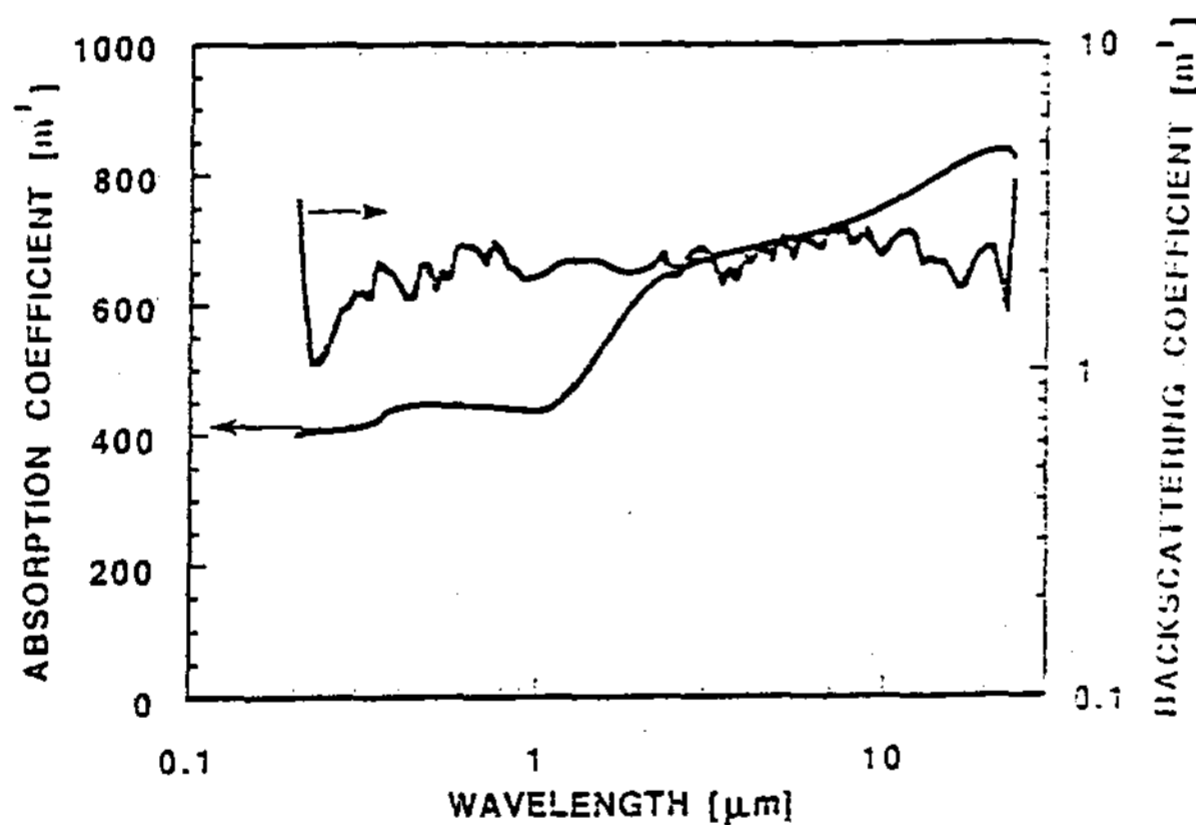


Fig. 6. Absorption and backscattering coefficients of the incident radiation for wire screen sheets (15 mesh non-coated).

(selective) 코팅 재료(Thermalox Solar Collector Coating:250 selective black)의 경우 0.31 mm이다.

Fig. 5에서는 표면처리에 안한 15 mesh의 wire screen이 1장에서 4장까지 겹쳐진 경우, 각 가시광선 영역과 적외선 영역의 파장에 따른 투과율을 보여준다. UV-visible 영역에

서의 변화는 파장이 약 0.2 μm 부터 0.9 μm 에 이르기까지는 미소하게 감소하였고, 2 μm 이후부터도 역시 서서히 감소하였다. 파장 0.9 μm ~ 2.2 μm 는 유리의 경우처럼 보간을 하였다. Wire screen의 장수가 많아질수록 투과율은 비슷한 선형을 그리면서 뚜렷이 감소함을 알 수 있다. 유리의 복사 물성치를 구하는 방법과 같

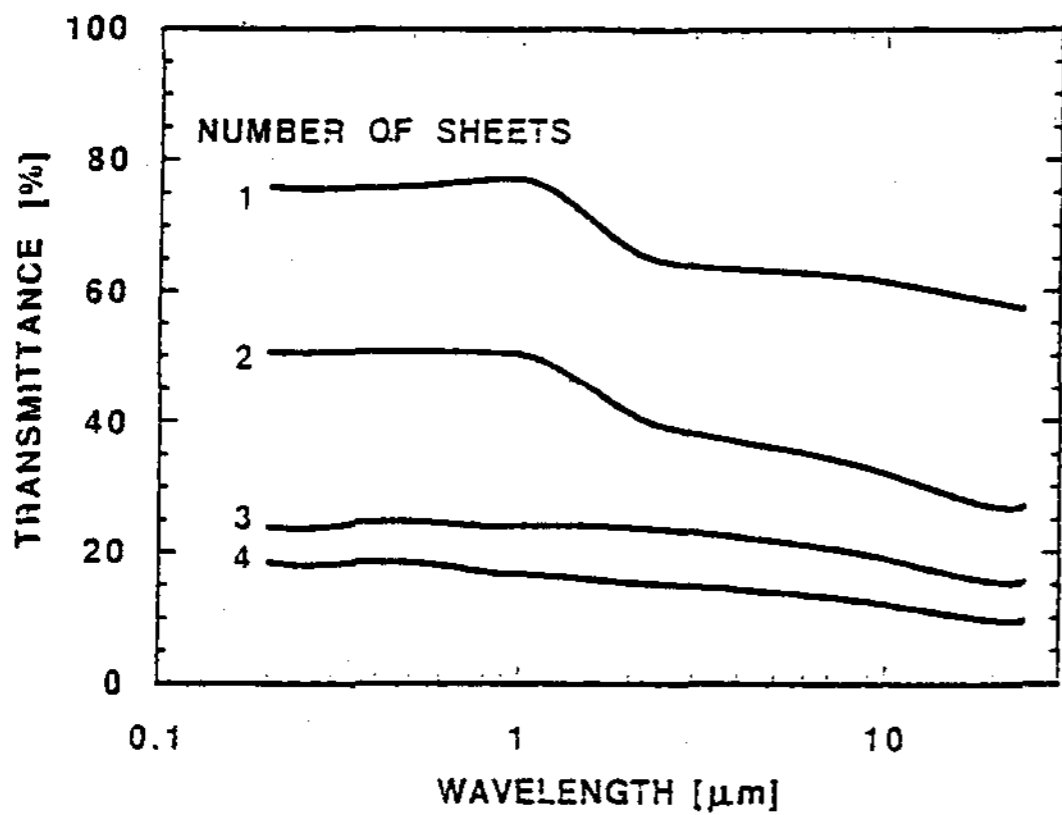


Fig. 7. Spectral transmittances of the incident radiation for various numbers of wire screen sheets(15 mesh selective paint coated).

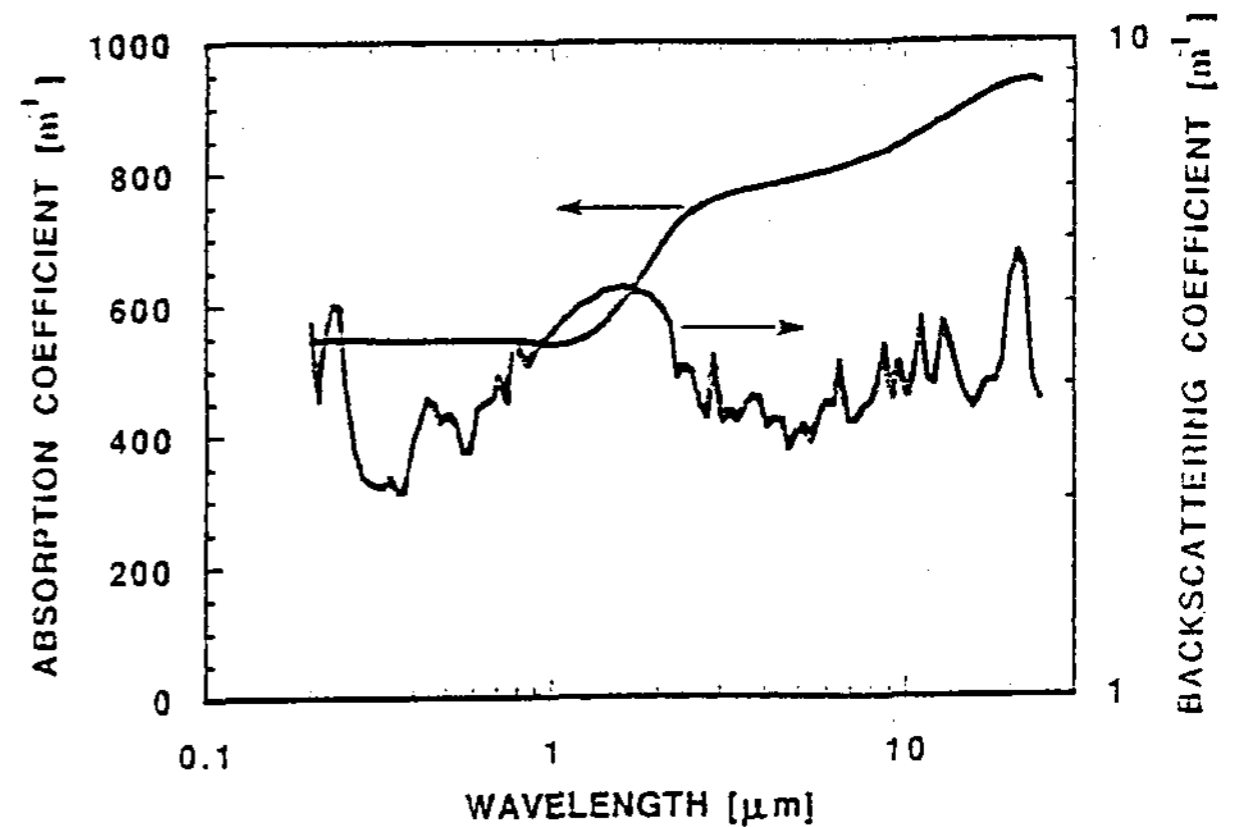


Fig. 8. Absorption and backscattering coefficients of the incident radiation for wire screen sheets(15 mesh selective paint coated).

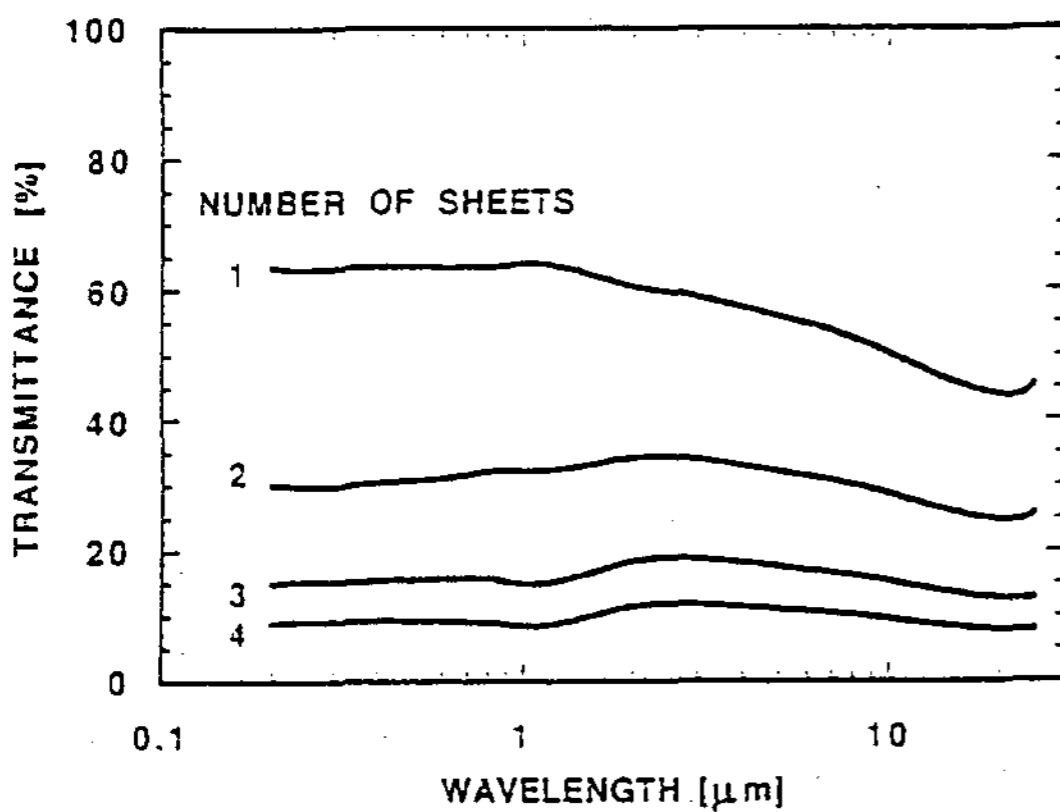


Fig. 9. Spectral transmittances of the incident radiation for various numbers of wire screen sheets(15 mesh non-glossy black paint coated).

다. 후면 산란계수 $b\sigma_s$ 는 전 영역에 걸쳐 작지 않은 요동이 있으나 $1\sim 3m^{-1}$ 를 갖게되므로 알베도 $\omega(\omega=b\sigma_s/(\sigma_a+b\sigma_s))$ 가 거의 0에 가까우므로 선택투과성이 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 7에서는 15 mesh의 wire screen에 selective코팅을 한 경우로서 각 1장에서 4장에 이르기까지 겹쳐진 경우의 각 파장에 따른 투과율을 보여준다. UV-visible 영역에서의 변화는 거의 없음을 보이나 적외선 영역에서는 감소함을 볼 수 있다. 여기에서도 투과율은 장수가 증가함에 따라 감소함을 뚜렷이 알 수 있으나, 1장과 2장의 경우와는 달리 3장 또는 4장의 경우에는 투과율의 변화가 급격함이 없이 파장 약 $0.2\mu m$ 에서 $22\mu m$ 에 이르기까지에는 완만한 감소 변화를 보여준다. 이 경우 wire screen의 흡수계수 σ_a 와 후면 산란계수 $b\sigma_s$ 를 구하여 Fig. 8에 나타내었다. 복사 흡수계수 σ_a 는 UV-visible 영역인 $0.2\mu m$ 에서 약 $1\mu m$ 부근까지는 변화를 보이지 않다가 그 시점을 지나면서 적외선 영역에서는 급상승함

이, 식 (15)를 이용하여 15 mesh의 wire screen에 코팅에 안한 경우 복사 흡수계수 σ_a 와 후면 산란계수 $b\sigma_s$ 를 구하여 각 파장에 따른 spectrum을 Fig. 6에 나타내었다. 흡수계수 σ_a 는 UV-visible 영역에서는 거의 일정하게 유지되다가 적외선 영역에서는 점차 증가하였

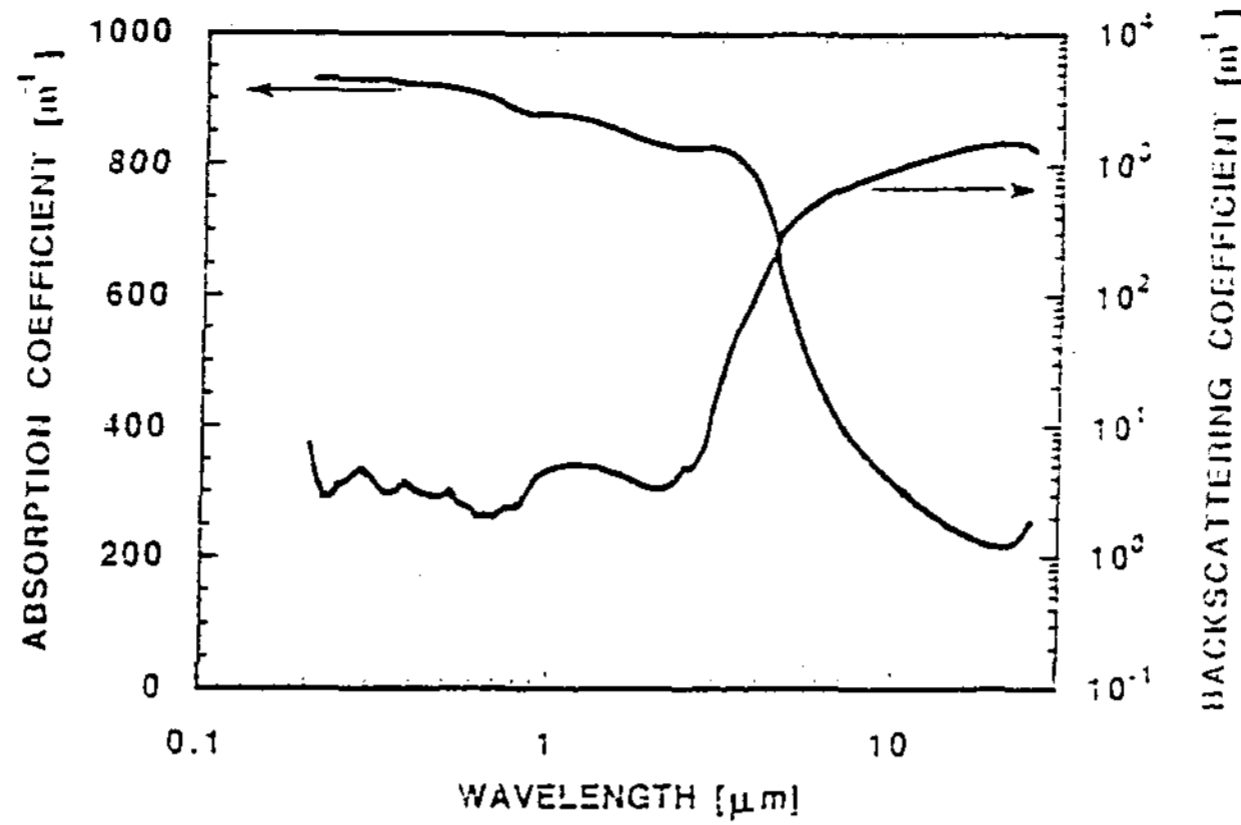


Fig. 10. Absorption and backscattering coefficients of the incident radiation for wire screen sheets(15 mesh non-glossy black paint coated).

을 보였다. 복사 흡수계수 σ_a 는 550~950 m^{-1} 사이에 있다. 후면 산란계수 $b\sigma_s$ 는 상당히 요동을 하나 2~5 m^{-1} 사이에 존재하였다. 여기에서도 알베도 ω 는 거의 0에 가까웠다.

Fig. 9는 15 mesh의 wire screen에 무광택 black코팅을 했을 경우 각 파장에 따른 투과율의 값을 파장에 따라 나타내었다. 코팅을 안한 경우와 selective코팅을 한 경우와 유사한 변화를 보였으며 다른것은 투과율의 값이 적다는 것이다. 여기에서 1장의 경우 UV-visible 영역에서는 거의 일정했으며 IR 영역에서는 서서히 감소하였고, 2장의 경우와 3장의 경우는 UV-visible영역에서는 투과율이 상승하였고 IR 영역에서는 서서히 감소함을 보여주며, 0.9 μm ~2.2 μm 사이에서는 상승한 것으로 나타내었지만 이 영역은 근 적외선 영역으로서 측정이 불가능하여 그림상에서 보간되었다. Fig. 10에서는 15 mesh wire screen을 무광택 코팅을 한 경우 각 파장에 따른 복사 흡수계수 σ_a 와 후면 산란계수 $b\sigma_s$ 를 보여준다. 여기에서 복사 흡수계수 σ_a 의 값은 UV-visible

영역인 0.2 μm ~0.9 μm 까지는 930 m^{-1} 에서 서서히 감소하여 880 m^{-1} 에 이르렀다. 이러한 현상은 IR영역 약 3.7 μm 까지 계속되다가 그 시점에서 급격히 감소하여 200 m^{-1} 까지 내려온다. 후면 산란계수 $b\sigma_s$ 는 UV-visible영역에서는 약 10 m^{-1} 이하이며, IR영역에서는 1000 m^{-1} 정도까지 크게 증가한다. 따라서 15 mesh의 wire screen으로 제작된 다공성 집열기에 대하여는, UV-visible영역에서는 흡수가 크고 반사가 작고 적외선 영역에서는 반사가 작으므로 태양에너지를 선택 흡수하는데 있어 무광택 paing코팅의 경우가 다른 경우에 비해 뛰어난 예측할 수 있다.

VI. 결 론

유리판과 다공성 매질의 파장에 따른 투과율을 UV-visible spectrophotometer 및 FT-IR spectrometer로 측정하였다.

유리의 경우에는 파장 4.3 μm 이상의 영역

에서 투과율이 거의 0이 되므로 해석이 불가능하였으나 $0.3\sim 4.3\mu\text{m}$ 까지는 실험결과와 분산이론의 결과와 잘 일치하였다. 따라서 $4.3\mu\text{m}$ 이상의 영역에서는 반사율을 측정하여 복사물성치를 구하든지 분산이론으로부터 구할 수 있다.

다공성 매질의 복사물성치는 two-flux 이론을 이용하여 계산하였다. 다공성 매질의 표면을 무처리, 선택투과재료로 처리, 무광택 도료로 처리한 경우에 있어 각각의 복사물성치를 구하였다. 무광택도료로 처리한 경우가 선택투과성이 뛰어나서 집열기의 집열매질로써 적합함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 1994년도 홍익대학교 교내연구비의 지원에 의하여 진행되었음을 밝히고 이에 감사드립니다.

V. References

1. Bohren, C.F. and Huffman, D.R., Absorption and Scattering of Light by Small Particles, John Wiley & Sons. 1983.
2. Brewster. M.Q., Thermal Radiative Transfer and properties. John Wiley & Sons, 1992.
3. Tong. T.W. and Tien, C.L., "Analytic models for Thermal Radiation in Fibrous Insulation," Journal of Thermal Insulation, Vol. 4., pp. 27-44, 1980.
4. Park, S.H. and Tien. C.L., "Radiation Induced Ignition of Porous Solid fuels," Combustion Science and Technology, Vol. 95, pp. 173-192, 1994.
5. 황 용하, 다공성 매질을 이용한 체적형 태양열 집열기에 대한 이론 및 실험적 연구, 홍익대학교, 공학박사학위논문, 1993.

areas.

In this work a new correlation has been made to predict the solar radiation for any areas over Korea by calculating the regression models taking into account latitude, percentage of possible sunshine, and cloud cover.

From the results, the single linear equation proposed by using percentage of possible sunshine method shows reliable results for estimating the global radiation with average annual deviation of -4 to $+2\%$ from measured values.

Measurements of Transmittances and Calculations of Fundamental Radiative Properties

Yong-Ha Hwang*, Seung-ho Park, Young-Soo Lee*****

**Department of Thermal Engineering, National Chung-Ju University*

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

****Korea Institute of Energy Research*

Radiative characteristics of glass windows and porous absorbing media which can be used for a solar air heater are determined through the measurements of spectral transmittances. Those in the visible range are measured by the UV-IR spectrometer. Refractive index of glass are obtained by the comparison of the measured transmittances and the correlations derived from the electromagnetic theory and are compared to the theoretical ones calculated from the classical dispersion theory. Absorption and back-scattering coefficients of 15-mesh stainless wire screens are calculated by the comparison of the measured transmittances and the correlations derived from the two-flux model.

An Experimental Study on the Heat Transfer Performance in a Fluidized Bed Double Pipe Heat Exchanger

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

** Dept. of Build, Equip., Shin Heung Junior College*

*** Dept. of Mech. Eng., Inha Univ.*