

유동입자층에서의 복사열전달 특성에 관한 연구

김금무* · 김용모** · 김경근***

A Study on the Radiative Heat Transfer Characteristics in the Fluidized Particles Layer

K. M. Kim · Y. M. Kim · K. K. Kim

Key words : 복사 열전달(Radiative heat transfer), 유동 입자층(Fluidized particles layer), 액적 방열기(Liquid droplet radiator), 몬테카를로 시뮬레이션법(Monte Carlo simulation method), 광학두께 모델(Optical depth model)

Abstract

The radiative heat transfer analysis in the fluidized particles layer has important application in many technological areas such as combustion chambers at high pressure and temperature, plasma generators for nuclear fusion, MHD generator using pulverized coal and the liquid droplet radiator used to reject wasted heat from a power plant operating in space.

To accurately model the radiation properties of the fluidized particles layer, it is necessary to know the radiation interchange factors of particles in each layer. But the solutions are usually not possible for the equations of radiative heat transfer because it has an inherent difficulty in treating the governing integro-differential equations, which are derived from the remote effects of radiative heat transfer.

In this study, the analysis uses the Monte Carlo simulation method with optical depth model to calculate the radiation interchange factors of particles in each layer with wall and with each other.

기호설명

ADR : 흡수분포비

a : 흡수계수 [m⁻¹]

a_s : 자기흡수계수

C_p : 정압비열 [J/kg · K]

* 정회원, 한국해기연수원

** 정회원, 한국열유체산업

*** 정회원, 한국해양대학교

D	: 입자의 직경	[m]
dA	: 미소면적	[m ²]
dV	: 미소체적	[m ³]
dΩ	: 미소입체각	[sr]
d ₀	: 노즐의 직경	[m]
E _a	: 흡수효율계수	
E _s	: 산란효율계수	
f _v	: 입자체적비	
I	: 복사에너지 강도	[W/m ² · sr]
i ₁ , i ₂	: 무차원 편광각도	
N _p	: 입자수밀도	[개/m ³]
P	: 입자층의 피치	[m]
Q _r	: 복사전열량	[W]
Q _f	: 유동에 의한 엔탈피 이송량	[W]
Q _a	: 정미열량	[W]
R	: 입자의 반경	[m]
S	: 경로거리	[m]
T	: 온도	[K]
U	: 질량속도	[kg/m ² · s]
β	: 감쇠계수	[m ⁻¹]
ε	: 방사율	
η	: 천정각	[rad]
θ	: 산란각	[rad]
κ	: 광학두께	
λ	: 파장	[μm]
μ	: 점성계수	
ζ	: 치수변수	[kg/m · s]
π	: 원주율	
ρ	: 밀도	[kg/m ³]
σ	: 표면장력	[mN/m]
σ _s	: 산란계수	
Φ	: 위상함수	

첨 자

i	: 입사
m	: 매체
p	: 입자
s	: 산란
w	: 벽
in	: 요소에 유입
out	: 요소로부터 유출

1. 서 론

최근 경제규모의 확대 및 국민 소득수준의 향상 등에 의하여 에너지소비가 급증하고 있는 바, 우리나라는 에너지절약 기술개발방안을 다각도로 모색하고 있다. 가정 및 상업부문의 에너지소비는 공기조화용, 조명용, 기타 등으로 구성되어 있으며, 특히 일반 업무용 건물의 경우, 건물 에너지 소비량의 약 60% 정도를 공기조화용으로 소비하고 있는 실정이다¹⁾. 현재 대부분의 공기조화장치는 그 열전달메카니즘이 대류열전달에 의해 이루어짐으로써 그 효율이 매우 낮은 실정으로, 본 연구에서는 에너지 절약대책의 일환으로서 난방용 액적방열기의 기술개발을 위하여 그 이론적 배경이 되는 유동 입자층에서의 복사전열을 고찰하였다.

유동 입자층에서의 복사전열특성을 정확히 모델하기 위해서는 각 층내 입자의 복사전열요소와 일시적인 거동을 해석하여야 한다. 그러나, 복사전열의 원격의 영향으로부터 유도되는 미, 적분방정식을 취급하는데 있어서 고유의 어려움이 있기 때문에 흡수, 방사 및 산란하는 유동입자층에서 복사전열방정식의 해를 구하는 것은 일반적으로 가능하지 않다. 본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션법을 이용하여 해석하였으며, 이러한 유동입자층에서의 복사전열해석은 액적방열기 뿐만 아니라 고온, 고압하의 연소실, 핵융합을 위한 플라즈마 발생기 및 미분탄을 사용하는 MHD발전 등과 같은 여러기술분야에 있어서 중요하게 응용된다. 특히, 액적방열기의 기술개발은 우주기기의 방열을 위하여 최근 미국 항공우주국(NASA)을 중심으로 하여 우주기지용 액적 라디에이터의 연구개발이 활발히 진행되고 있는 상태이다^{2,3)}.

2. 이론해석

2.1 단독입자의 복사특성

전자기파 또는 광자가 입자매체와 상호작용을 할 경우, 복사강도는 입자에 의한 흡수 및 산란에 의해 변하게 되는데, 산란은 Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 입자표면에서의 반사 또는 입자에서의

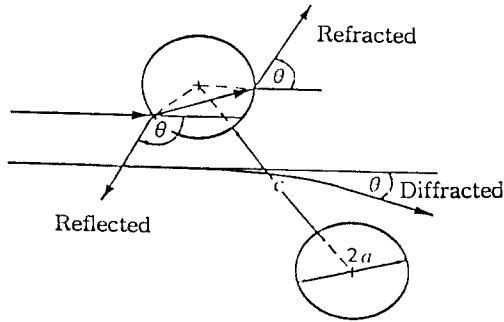


Fig. 1 Interaction between electromagnetic waves and spherical particles

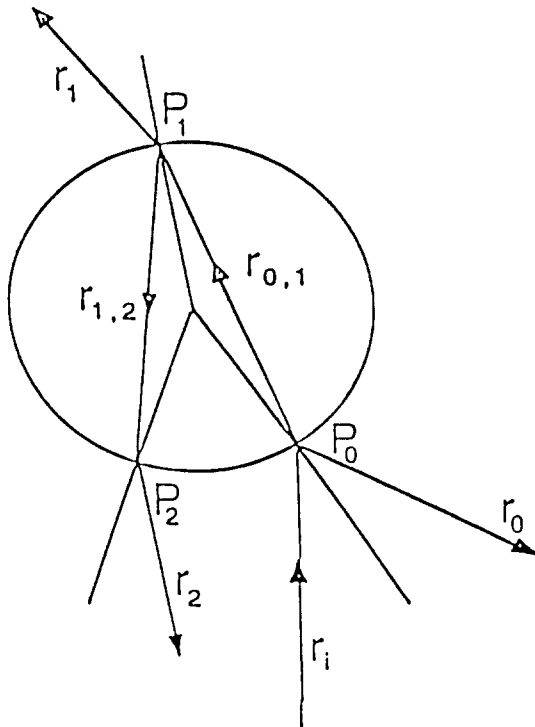


Fig. 2 The refraction in the spherical particle

굴절 그리고 입자주위에서의 회절에 의해 일어나게 된다. 이 때 입자에서의 굴절은 Fig. 2와 같이 입사복사가 입자경계와 상호작용을 할 때의 굴절 및 입자내의 다중반사에 의해서 복사의 진행방향이 바뀌게 된다.

공학적 대부분의 산란은 탄성산란으로서, 그 거동은 입자의 형상, 성질 및 크기 등에 의존하게 되는데, 본 연구에서는 해석을 간단히 하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

- (1) 입자의 형상은 구형이다.
- (2) 주위 매체의 복소굴절율은 1 이다.
- (3) 입자의 크기는 치수변수, $\xi \gg 1$ 이다.
- (4) 입자표면에서는 난반사를 한다.

1) 입자에 의한 산란

입자에 의해 산란되는 에너지의 양은 일반적으로 산란단면적 A_s 로 나타내는데, 단독 구입자에 의해 모든 방향으로 산란된 에너지의 양은 다음과 같다.

$$Q_s = \frac{A_s}{\pi R^2} = \frac{R^2}{\pi R^2} \int_{4\pi} \frac{I_s}{I_i} d\Omega = \frac{1}{\xi^2} \int_0^\pi (i_1 + i_2) \sin\theta d\theta \quad (1)$$

그리고, 난반사하는 큰 구형입자의 경우, 산란된 복사강도의 각분포를 나타내는 위상함수 Φ 는 다음과 같다.

$$\Phi(\eta) = \frac{8}{3\pi} (\sin\eta - \eta \cos\eta) \quad (2)$$

난반사하는 구의 위상함수를 도식화하면 Fig. 3

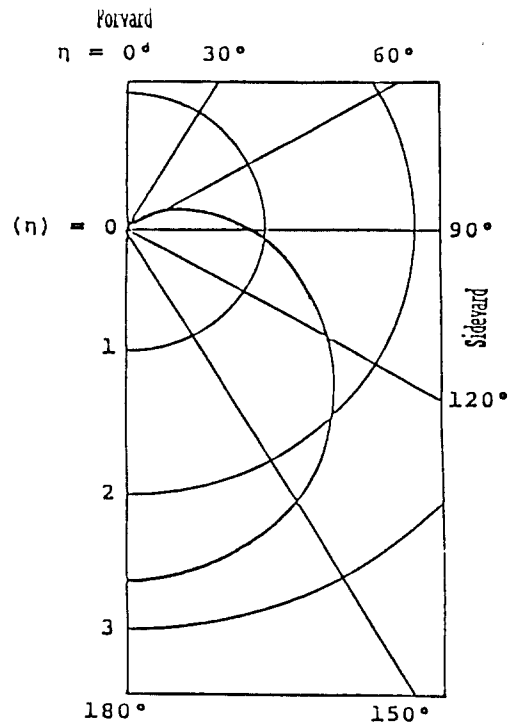


Fig. 3 Scattering phase function for diffuse reflecting sphere

과 같으며, 강한 후방성 산란을 나타내고 있음을 알 수 있다.

2.2 입자군의 복사특성

입자군의 복사특성을 해석하는데에는 이웃하는 입자들사이의 영향 및 산란된 복사장사이의 간섭에 의한 영향을 고려하여야 하는데, 이러한 영향은 독립산란의 가정에 의해 무시될 수 있다. 독립산란은 입자들 사이의 간격 C 가 입자의 직경 D 와 복사의 파장 λ 에 비하여 충분히 큰 경우에 적용된다. 즉, 독립산란의 적용을 위한 한계가 $C/\lambda > 0.4$ 와 $C/D > 0.4$ 임을 Hottel 등이 실험적으로 고찰하였다⁴⁾. 그 후 Brewster는 더 큰 입자의 경우 $C/\lambda > 0.3$ 인 한 어떠한 종속산란도 일어나지 않음을 나타내었으며, 또한 Yamada, Drolen 및 Tien 등은 독립산란의 응용가능성에 대해 $C/\lambda > 0.5$ 임을 입증하였다. 이러한 연구들에 의한 현재의 결과는 Fig. 4와 같다⁵⁾. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 독립산란의 가정을 위한 한계치는 입자 체적비 f_v 가 0.006 이하이며, 또한 $f_v > 0.006$ 의 경우, 파장에 대한 간격비, C/λ 의 임계치는 0.5이다.

1) 복사강도의 감쇠

입자의 반경이 복사에너지의 파장에 비하여 매우 클 경우, 복사에너지가 입자군을 통하여 미소거리 dS 를 진행한 후의 복사강도의 감쇠 dI 는 입자에 의한 흡수와 산란에 의해 일어나는 것으로서 Fig. 5와 같다.

경로거리 S 에서의 강도를 $I(S)$, 위치 S 로 부터 미소거리 dS 를 진행한 후의 강도를 $I(S) + dI(S)$ 라고 하면,

$$dI(S) = -\beta(S)I(S)dS \quad (3)$$

거리 S 의 유한경로에 대하여 식 (3)을 적분하면,

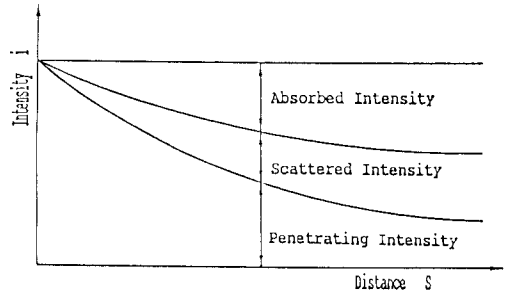


Fig. 5 The attenuation of intensity by absorption and scattering

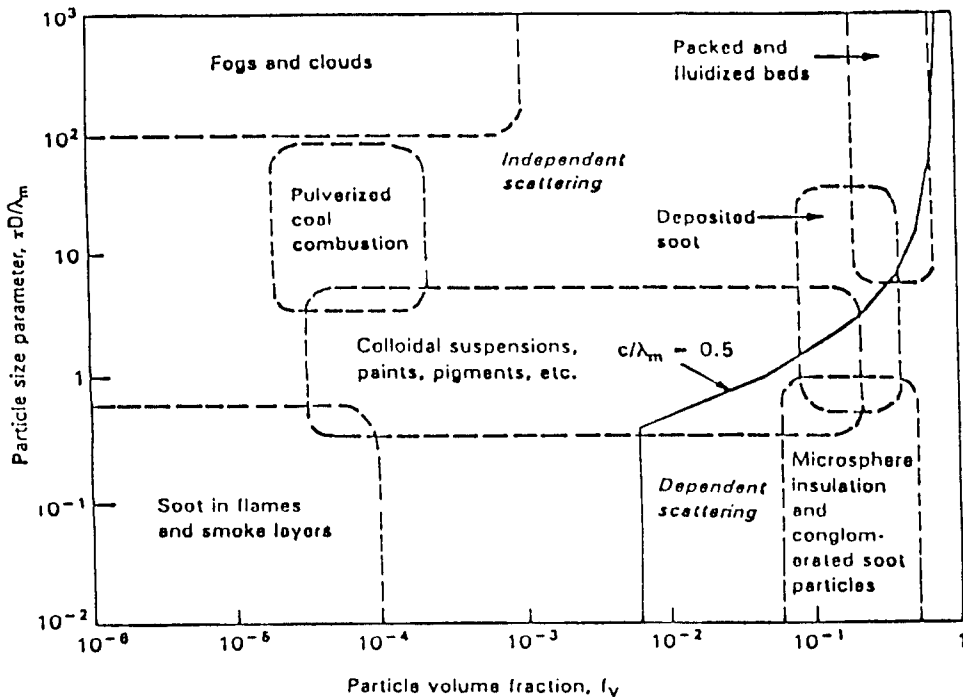


Fig. 4 Scattering regime map for independent and dependent scattering

$$I(S) = I(0)\exp[-\int_0^S \beta(S^*) dS^*] \quad (4)$$

여기서, $I(0)$ 는 경로의 원점에서의 강도이며, S^* 는 적분을 위한 가변수이다. 또한, 그 지수요소를 무차원 양으로 정의한 광학두께는 다음과 같다.

$$\kappa(S) = \int_0^S \beta(S^*) dS^* \quad (5)$$

그리고, 균일한 구성요소와 균일한 온도 및 압력인 매체의 경우, 광학 두께는 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$\kappa(S) = \beta \cdot S \quad (6)$$

Fig. 6과 같이 입사빔에 수직한 미소면적 dA 에 강도 $I(0)$ 의 복사에너지가 입사하는 경우, 미소거리 dS 에서 산란되는 강도를 $dI(S)$ 라고 하면

$$\frac{dI(s)}{I(0)} = \frac{d^2 A_s}{dA} \quad (7)$$

여기서, $d^2 A_s$ 는 입사빔과 만나는 모든 산란입자의 외견상 투영된 산란면적, 즉 유효산란면적이며, 일반적으로 입사복사의 파장에 의존한다.

독립산란의 경우, 입자군에 대한 유효산란면적은 다음과 같이 단독입자의 산란단면적에 관계된다. 즉, 입자의 반경이 R 에서 $R+dR$ 의 범위에 있는, 단위체적당 입자의 수를 $dN(R)$ 이라 하고, 반경 R 인 입자에 대한 산란단면적을 $S(R)$ 이라고 하면, 미소체적 dV 인 입자군의 유효산란단면적은 모든 입자에 대해 적분함으로써 다음과 같다.

$$d^2 A_s = dV \int_{N(R)=0}^{\infty} S(R) dN(R) \quad (8)$$

또한, 단위체적당 유효산란단면적인 산란계수 σ_s 는 다음과 같다.

$$\sigma_s = dV \int_{N(R)=0}^{\infty} S(R) dN(R) \quad (9)$$

만약, 입자들이 균일한 반경을 가진 구형로서, 입자의 수밀도가 N_p 이면

$$\sigma_s = S \cdot N_p = \pi R^2 E_s N_p \quad (10)$$

또한, 입자군에서의 흡수계수 a 도 마찬가지로 방법으로 다음과 같이 된다.

$$a = \pi R^2 E_a N_p \quad (11)$$

그리고 난반사하는 큰 구입자의 경우, 흡수 및 산란 효율계수는 각각 다음과 같다.

$$E_a = \epsilon_p \quad (12)$$

$$E_s = 1 - \epsilon_p \quad (13)$$

따라서 입자군에서의 흡수 및 산란계수는 각각 다음과 같다.

$$a = \epsilon_p \pi R^2 N_p \quad (14)$$

$$\sigma_s = (1 - \epsilon_p) \pi R^2 N_p \quad (15)$$

또한, 식(3)에서 알 수 있는 바와 같이 입자군에서의 감쇠는 흡수와 산란에 의한 것으로서 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \beta &= a + \sigma_s = \pi R^2 N_p \\ &= \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \left(\frac{6f_v}{\pi D^3}\right) = \frac{1.5f_v}{D} \end{aligned} \quad (16)$$

2.3 몬테카를로법에 의한 해석

양자론에 의하면 전자기파는 입자적 성질을 가지고 있으며, 파동에 의한 에너지의 이송은 에너지를 보유하는 광자가 광속으로 이동하기 때문에 일어난다⁶⁾. 또한 복사에 의한 에너지이송은 열방사성 입자의 분자 또는 벽면의 분자로부터 방사된 다수의 독립된 광자의 산란과 흡수거동의 집적에 의하여 이루어 진다고 할 수 있다. 따라서 몬테카를로법에^{7,8)} 의한 난수를 이용하여 광자에 상당하는

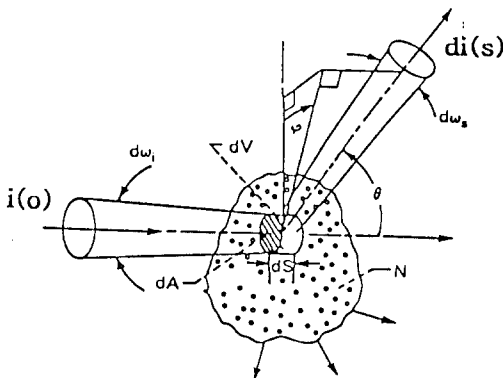


Fig. 6 Scattering of intensity from incident radiation

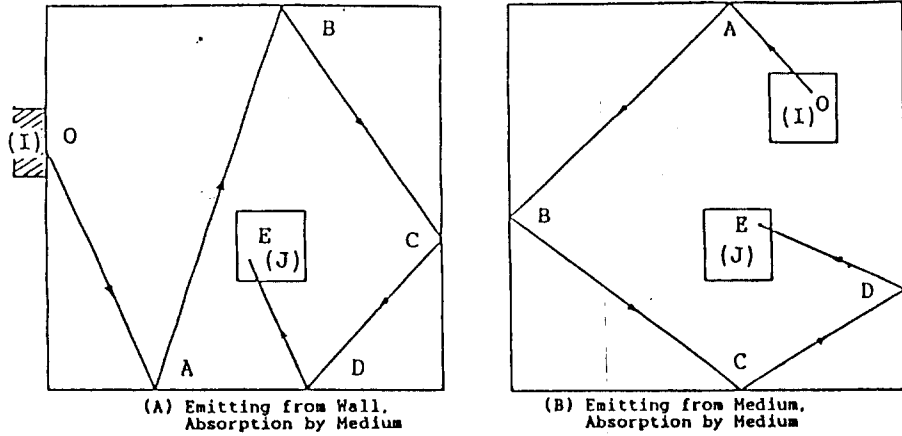


Fig. 7 The travelling path of energy particle in the system

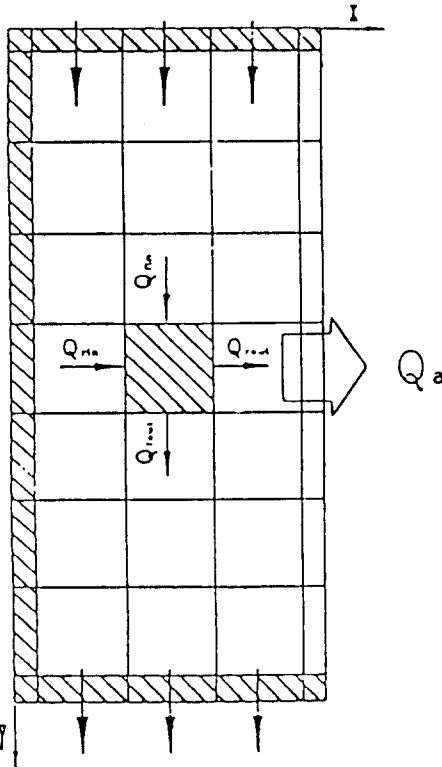


Fig. 8 Radiative energy balance in the system

다수의 독립된 에너지입자를 계내의 각 점으로부터 주위로 사출한 다음, Fig. 7과 같이 각 에너지 입자의 산란, 흡수 거동을 추적, 집계함으로써 복사에 의한 에너지이송의 물리적인 과정을 시뮬레이션^{*)} 할 수가 있다. 벽면과 열방사성 매체로 구성된

계의 복사전열 해석은 Fig. 8과 같이 벽면과 매체를 각각 적당한 수의 요소로 나누어 한 요소에 출입하는 열교환량을 고려함으로써 구할 수 있다.

입자층에서의 복사평형은 에너지보존의 법칙에 의해 다음과 같다.

$$Q_{\text{rout}} + Q_{\text{fout}} = Q_{\text{rin}} + Q_{\text{fin}} \quad (17)$$

$$Q_{\text{rout}} = (1 - a_s) 4a\sigma T_m^4 dV \quad (18)$$

그리고, 유동에 의한 엔탈피 이송은 각각 다음과 같다.

$$Q_{\text{fin}} = U_{\text{mup}} C_p T_{\text{up}} \quad (19)$$

$$Q_{\text{fout}} = U_{\text{m}} C_p T \quad (20)$$

또한, 벽 요소에 있어서의 복사평형은 다음과 같다.

$$Q_{\text{rout}} + Q_a = Q_{\text{rin}} \quad (21)$$

$$Q_{\text{rout}} = (1 - a_s) \epsilon_w \sigma T_m^4 dA \quad (22)$$

그리고 한 요소에 흡수되는 복사에너지 Q_{rin} 은 흡수분포비로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{\text{rin}} = \sum_{\text{wall}} \text{ADR} Q_{\text{rout}} + \sum_{\text{med}} \text{ADR} Q_{\text{rout}} \quad (23)$$

이러한 에너지 방정식으로부터 복사전열을 해석하기 위한 프로그래트는 Fig. 9와 같다.

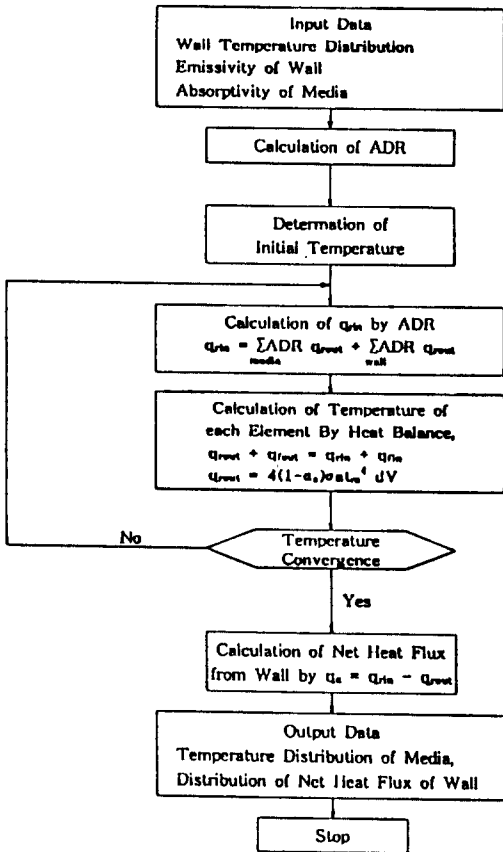


Fig. 9 Flow chart for analysis of radiative heat transfer

3. 실험 및 수치 시뮬레이션

3.1 실험장치의 구성

Fig. 10은 실험장치의 전체 배치도이며, Fig. 11은 실험장치의 사진이다. Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 실험장치는 열매체 공급펌프, 진공용 이젝터 및 실험용 액적방열기 등으로 구성되어 있다. 본 실험에서 사용하는 열매체는 점도 50cSt인 실리콘유이며, 그 물성치는 Table 1과 같다. 액적방열기는 0.1×0.1×1.0m의 직면체 형상으로서 그 상부에는 액적을 발생시키기 위하여 직경 0.3mm

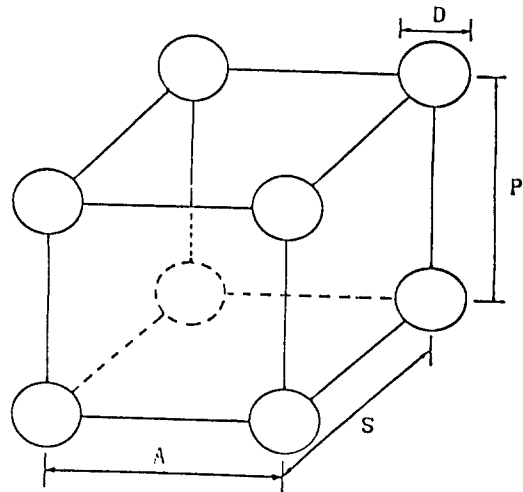


Fig. 10 Schematic diagram of experimental apparatus

(0.5, 0.7, 1.0)의 다수의 미세공이 가공된 노즐판이 설치되어 있으며, 하부에는 액적의 비산을 막기 위하여 망사로 형성된 이중바닥(False Bottom)이 설치되어 있다. 또한 액적방열기내의 진공도를 일정하게 유지하기 위한 진공브레이크 밸브와 진공도의 측정을 위한 압력공이 설치되어, 마노메타로 압력을 측정하고 있다. 액적방열기의 입구부에는 공급되는 열매체의 온도를 조절하기 위한 미세 온도조정용 히터가 설치되어 있으며, 슬라이더를 사용하여 히터의 공급전압을 조절함으로써 온도를 일정하게 조절할 수 있도록 되어 있다. 그리고 액적방열기의 열유속 및 각 부의 온도분포를 측정하기 위하여 액적방열기의 입출구부 및 계내 각부에 열전대(C-A)를 설치하여 온도를 측정하도록 되어 있다.

3.2 실험방법 및 범위

이 시스템의 사이클은 다음과 같다. 먼저 구동펌프를 운전하여 이젝터에 의해 액적방열기의 계내부를 진공으로 유지한 다음, 저장탱크에서 일정한 온도로 가열된 열매체가 열매체 공급펌프로부터

Table 1 Properties of Silicone Oil(KF96 - 50)

							[at 25℃]
동점성계수[mm ² /s]	비 중	비열[kcal/kg℃]	표면장력[mN/m]	열전도율[W/m℃]	팽창율[m ³ /m ³ ℃]	인화점[℃]	
50	0.960	0.36	20.8	0.15	0.00096	300이상	

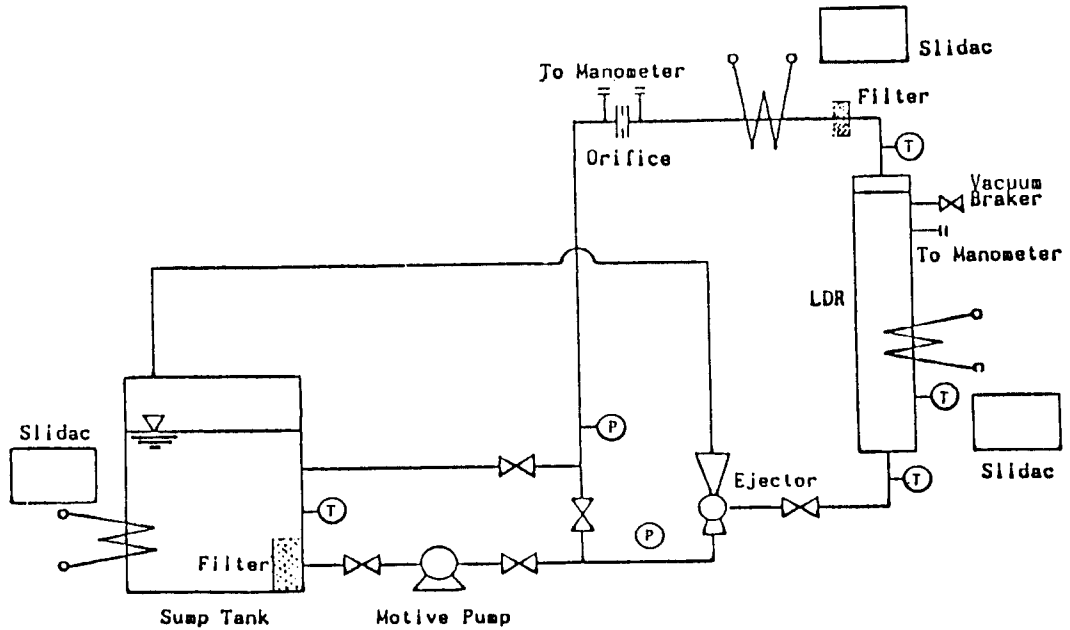


Fig. 11 Photo of experimental apparatus

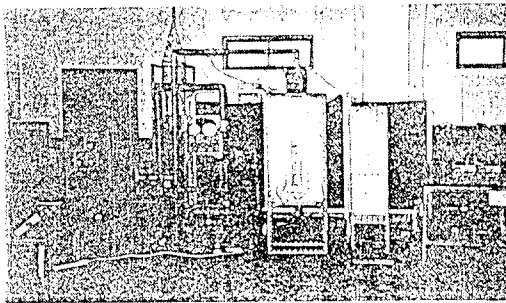


Fig. 12 Model for calculation of particle volume fraction

오리피스 유량계를 거쳐 액적방열기의 상부로 유입되며, 액적방열기의 상부에 설치된 스프레이 노즐을 통하여 계내로 미소한 액적이 분출된다. 이때 계내를 진공으로 유지함으로써 대류에 의한 열 전달은 무시되며, 액적이 계내를 진행하는 동안에 외부로 복사에너지를 방사하게 된다. 그리고 액적방열기하부의 콜렉터에 수집된 열매체유는 이젝터에 의해 저장탱크로 되돌아 가게 된다. 실험에 있어서 스프레이 노즐로부터 발생된 액적의 직경 및 입자층의 피치와 액적형성을 위한 필요유량의 산출은 다음과 같이 구할 수 있다¹⁰⁾(Fig. 12 참조).

1) 노즐로부터 발생된 액적의 직경
 일정한 직경의 노즐로부터 발생되는 액적의 직경은 다음과 같다.

$$D = 1.89 d_0 \left[1 + \frac{3\mu}{(\sigma \rho d_0 g_c)^{1/2}} \right]^{1/6} \quad (24)$$

2) 입자층의 피치

입자층의 피치, 즉 입자중심사이의 거리는 질량 보존의 법칙으로부터 액적의 크기와 노즐의 직경에 대해 다음과 같은 관계가 있다.

$$P = \frac{d_0}{1.5} \left(\frac{D}{d_0} \right)^3 \quad (25)$$

3) 액적형성을 위해 필요한 최소유량

액의 분사로부터 액적을 형성하기 위해서는 분사시의 동수두가 노즐에서의 표면장력보다 더 크야함으로 이러한 힘의 평형으로부터 다음식과 같은 최소속도 U_{min} 을 가져야만 한다

$$U_{min} = \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho d_0}} \quad (26)$$

그리고, 노즐이 N개 설치되었을 때의 노즐 전단 면적 A는

$$A = \frac{\pi}{4} d_0^2 N \quad (27)$$

따라서, 액적을 형성하기 위하여 필요한 최소유량 Q_{min} 은 다음과 같다.

$$Q_{min} = A U_{min} \quad (28)$$

위의 식에 의하여 액적의 직경, 입자체적비 및 광학 두께 등을 구할 수 있다.

3.3 수치시뮬레이션

Fig. 13은 벽면으로 둘러싸인 입자층에서의 복

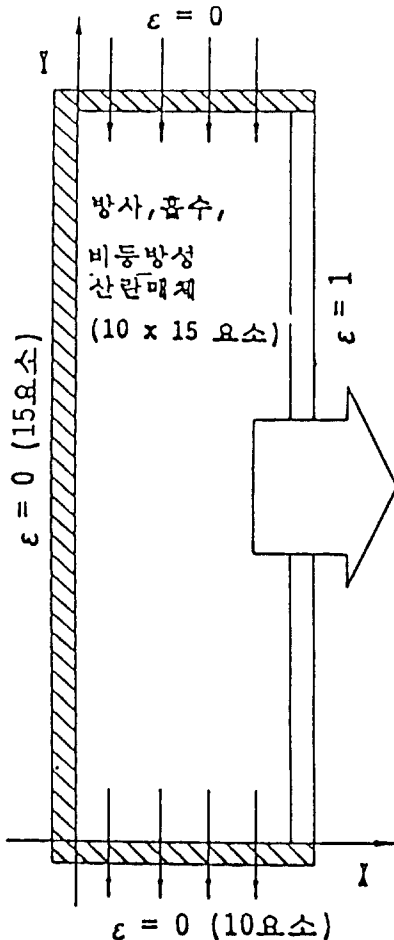


Fig. 13 Two dimensional analysis model for liquid droplet radiator

사전열해석을 위한 2차원적 해석모델로서, 상하부 벽 및 좌측벽은 단열된 재복사 표면¹³⁾이며, 우측벽은 이상흑체($\epsilon=1$)인 방사면이다. 상부벽으로부터 온도 500K 인 미소입자가 무수히 분출되어 계내를 진행하는 동안에 우측벽을 통하여 온도 300K 인 외부로 복사에너지를 방출한다. 본 연구에서는 스프레이 노즐의 직경변화에 의한 입자직경의 변화에 대한 복사열유속의 변화와 노즐갯수의 변화에 의한 입자체적비의 변화가 미치는 영향, 그리고 액적방열기의 두께변화를 통해 광학두께의 변화가 미치는 영향 등을 수치시뮬레이션하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 14는 입자의 직경 300 μ m, 입자의 체적비 0.017로서 감쇠계수가 85이며, 입자의 방사율이 0.8인 경우의 광학두께의 변화에 대한 복사열유속의 변화를 나타내는 그래프이다. Fig. 14에서 알 수 있는 바와 같이 시스템의 폭이 증가함에 따라 복사열유속이 증가하지만 광학두께가 4이상에서는 열유속의 증가폭이 현저히 둔화되는 경향을 나타내었다. 그 이유는 광학두께가 증가하면 전열면

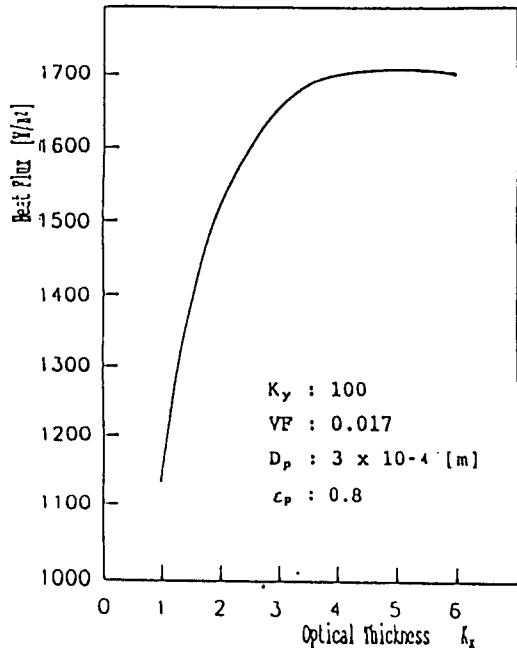


Fig. 14 Heat flux variation to optical thickness

적이 증가하기 때문에 전반적인 열유속도 증가하지만 어느 정도이상에서는 광학두께를 증가시키도 벽면쪽의 입자층은 외부와의 열교환이 줄어들게 되어 전반적인 열유속의 증가는 가져오지 않는 것으로 사료된다.

Fig. 15와 Fig. 16은 폭 0.05m, 길이 1m인 계에서의 입자체적비의 변화 및 입자직경의 변화에 대한 복사열유속의 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 15에서 입자체적비가 증가하면 복사열유속이 증가되나 그와 함께 흡수,산란에 의한 감쇠도 증가하게 된다. 따라서 어느 정도이상에서는 전열면적의 증가에 따른 복사열유속의 증가보다는 감쇠에 의한 감소가 더 크게 되어, 입자체적비가 증가함에 따라 오히려 복사열유속이 감소함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 16으로부터 입자의 직경이 증가함에 따라 감쇠계수는 지수적으로 감소하며, 따라서 어느 정도이하에서는 입자직경의 증가와 함께 복사열유속이 증가하게 되나 그 이상에서는 입자직경의 커짐에 따른 감쇠계수의 감소에 의한 영향보다는 입자표면적의 감소에 의한 영향이 더 크므로 복사열유속이 감소하게 됨을 알 수 있었다.

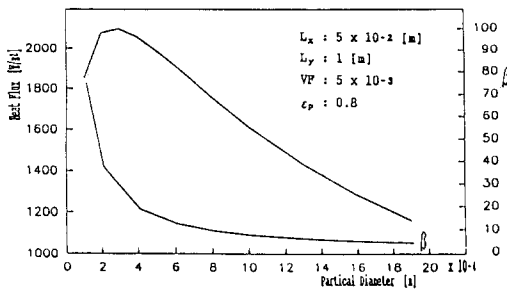


Fig. 15 Heat flux variation to particle volume fraction

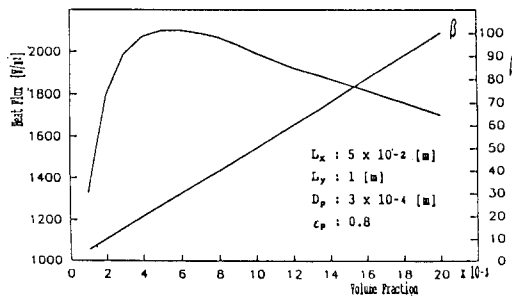


Fig. 16 Heat flux variation to the diameter of particle

본 연구는 한국과학재단의 93년도 협력연구지원 과제(과제번호 : 93 - 10 - 00 - 06 - 2)에 의하여 수행되었음을 밝히며, 이에 심심한 사의를 표합니다.

5. 참고문헌

- 1) 김영호, "공기조화설비의 에너지 절약방안", 한국냉동공조 기술협회, 1993. 4
- 2) Alden F. Presler, Carolyn E. Coles, Priscilla S. Diem - Kirsop, and K. Alan White., "Liquid Droplet Radiator Program at the NASA Lewis Research Center" Jt. AIAA/ASME Thermophysics and Heat Transfer Conference, 1986, pp. 1~9.
- 3) Richard F. Brown, Dr. Robert Kosson, "Liquid Droplet Radiator Sheet Design Considerations", Grumman Aerospace Corporation, pp. 330~338.
- 4) B. P. Singh, M. Kaviany, "Independent Theory versus Direct Simulation of Radiation Heat Transfer in Packed Beds", The University of Michigan Ann Arbor, MI40109
- 5) Robert Siegel, John R. Howell, "Thermal Radiation Heat Transfer", McGraw-Hill, 1981, pp. 567~570
- 6) Arthur Beiser, "Concepts of Modern Physics", McGraw-Hill, 1987, pp. 44~86
- 7) K. kudo, H. Taniguchi, W. J. Yang, H. hayasaka, T. Fukuchi and I. Nakamachi, "Monte Carlo Method for Radiative Heat Transfer Analysis of General Gas-Particle Enclosures", Numerical Methods in Thermal Problems, Volume 5, part 2, Fifth International Conference held in Montreal, Canada, 1987, pp. 1264~1275.
- 8) 上藤一彦, 谷口傳, 福地健, "モンテカルロ法による放射吸收散亂媒體中の放射傳熱解析", 日本機械學會論文 53卷 496號, 1987, pp. 37~41
- 9) 金鎔模, "球充填層中の放射エネルギー減殺效果に関する研究", 1990
- 10) Richard F. Brown, Dr. Robert Kosson, "Liquid Droplet Radiator Sheet Design Considerations", Grumman Aerospace Corporation, pp. 335~336.
- 11) Frank P. Incropera, David P. de Witt, 1985, "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons, Inc., PP. 775~776.