

액적방열기의 복사열전달 특성에 관한 연구

김금무* · 김용모** · 김경근***

A Study on the Radiation Heat Transfer Characteristics
of Liquid Droplet Radiator

K. M. Kim · Y. M. Kim · K. K. Kim

Key words : 입자층(Particle layer), 복사열전달(Radiative heat transfer), 비등방성 산란(Anisotropic scattering), 몬테카를로 시뮬레이션법(Monte Carlo simulation method), 액적방열기(Liquid droplet radiator), 광학두께(Optical thickness)

Abstract

The radiative heat transfer analysis in particle layer has an inherent difficulty in treating the governing integro-differential equations, which are derived from the remote effects. Most of the existing analyses are limited to the one dimensional system, taking into account only absorption or isotropic scattering of solid particles. Fortunately, a new Monte Carlo Simulation method is recently developed to analyse multidimensional radiative heat transfer in particles with anisotropically scattering. By this method, the present study analyses the radiative heat transfer in dispersed particles through the numerous droplets in the liquid droplet radiator to develop a technique of liquid droplet radiator. Consequently, knows that the radiative heat flux in particle layer is influenced by extinction coefficient, optical thickness and surface area of particles in the system.

기호설명		DR	: 흡수분포비		
a	: 흡수계수	$[m^{-1}]$	dA	: 미소면적	$[m^2]$
C_p	: 정압비열	$[J/kg K]$	dV	: 미소체적	$[m^3]$
D	: 입자의 직경	$[m]$	dΩ	: 미소입체각	$[sr]$
			i	: 복사에너지 강도	$[W/m^2 sr]$

* 한국해양대학교 대학원
** 한국열유체산업
*** 한국해양대학교

K	: 광학두께	
N_p	: 입자수밀도	$[m^{-3}]$
Q_r	: 복사전열량	$[W]$
Q_f	: 유동에 의한 엔탈피 이송량	$[W]$
Q_a	: 정미열량	$[W]$
R	: 입자의 반경	$[m]$
RND	: 유사난수	
S	: 거리	$[m]$
T	: 온도	$[K]$
VF	: 체적충진율	
β	: 감쇠계수	$[m^{-1}]$
ϵ	: 방사율	
η	: 천정각	$[rad]$
θ	: 방위각	$[rad]$
π	: 원주율	
ρ	: 반사율	
σ	: Stefan - Boltzmann 상수	$[W/m^2 K^4]$
σ_s	: 산란계수	
Φ	: 위상함수	

첨 자

m	: 매체
p	: 입자
w	: 벽
in	: 요소에의 유입
out	: 요소로부터 유출

1. 서 론

입자층에서의 복사전열은 원방입자로부터의 에너지교환을 고려해야 하기 때문에 단순한 가스층의 복사전열과 같이 취급해서는 안되며, 따라서 해석이 매우 복잡하게 된다. 입자를 단순한 구형입자로 고려할 경우, 구입자층에서의 복사에너지의 전달특성은 구에 의한 산란과 흡수가 현상을 지배하게 된다. 입자의 구에 의해 산란 또는 흡수되는 에너지는 다른 구에 의한 영향도 받기 때문에 전체구에 의한 산란 및 흡수특성이 서로 영향을 미쳐 합해지게 된다. 따라서 3차원적인 엄밀해를 구하는 것이 곤란하여, 종래에는 2유속모델 등¹⁾ 다양한 모델에 의하여 입자층에서의 복사에너지 투과해석

을 행하였다. 그러나 이러한 방법은 구에 의한 산란효과를 무시 또는 간단화하고 있기 때문에 정확한 해를 구하는 것이 곤란하게 된다. 본연구에서는 액적방열기의^{2),3)} 기술개발을 위하여, 최근에 개발된 몬테카를로 시뮬레이션법에 의해 입자층에서의 복사에너지의 전달특성, 산란 및 흡수특성 등을 고찰하여 입자층에서의 복사전열을 해석하고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 벽면과 열방사성 매체의 복사특성

1) 벽면의 방사, 흡수 및 반사특성

미소면적의 회색면으로부터 단위시간당 방사되는 복사에너지는 다음과 같다.^{4),5)}

$$dQ_{we} = \epsilon_w \sigma T_w^4 dA \quad (1)$$

Fig.1과 같이 미소면적의 평면으로부터 (η , θ)방향의 미소입체각내에 방사되는 복사에너지는 Lambert의 여현법칙에 의해 다음과 같다.

$$d^2Q_{we} = i_{we} dA \cos \eta d\Omega \quad (2)$$

여기서, i_{we} 는 벽면으로부터 방사되는 복사에너지강도, 즉 복사에너지의 진행방향에 수직한 단위면적으로부터 단위시간당, 단위입체각내에 방사되는 에너지로서 다음과 같다.

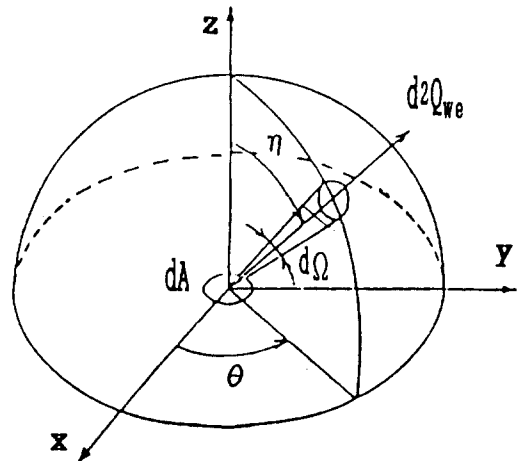


Fig.1 Radiative Energy Emitted from Wall

$$i_{we} = dQ_{we}/\pi dA \quad (3)$$

미소면적에 dQ_{wi} 의 복사에너지가 입사될 때, 그 중에서 $\epsilon_w dQ_{wi}$ 는 벽에 흡수되며, 그 나머지 $dQ_{wr} = (1 - \epsilon_{wi}) dQ_{wi}$ 는 반사된다. 총 반사에너지 dQ_{wr} 중에서 Fig.1의 (η, θ) 방향의 미소입체각내로 반사되는 에너지는 다음과 같다.

$$d^2Q_{wr} = (1/\pi) dQ_{wr} \cos \eta d\Omega \quad (4)$$

2) 열방사성 매체의 방사, 흡수 및 산란 특성

미소체적의 열방사성 매체로부터 단위시간당 방사되는 복사에너지는 Kirchhoff법칙에 의해 다음과 같다.

$$dQ_{me} = 4a \sigma T_m^4 dV \quad (5)$$

Fig.2와 같이 미소체적으로부터 방사되는 에너지의 방향분포는 등방적인 것으로서, 방사에너지 dQ_{me} 중에서 (η, θ) 방향의 미소입체각내에 방사되는 복사에너지는 다음과 같이 미소체적주위에 균등하게 방사된다.

$$d^2Q_{me} = dQ_{me} d\Omega/4\pi \quad (6)$$

복사에너지가 열방사성 매체를 통하여 미소거

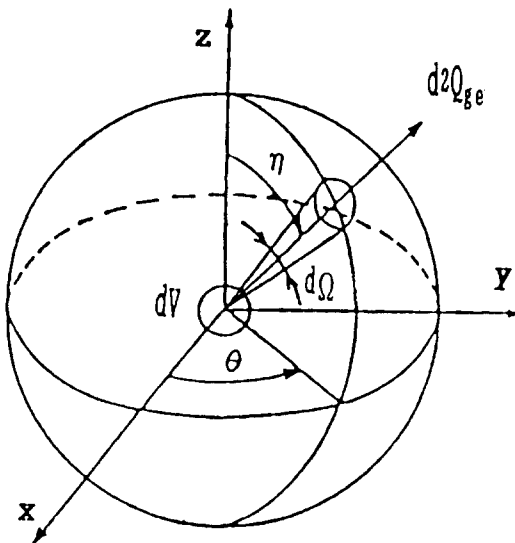


Fig.2 Radiative Energy Emitted from Media

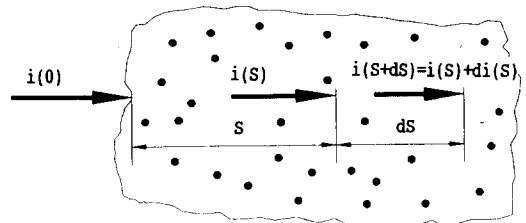


Fig.3 Attenuation of Radiative Energy Intensity

리 ds 만큼 진행할 때의 복사에너지 강도의 감쇠 di 는 Fig.3과 같으며, 매체를 구성하는 입자의 환경이 복사에너지의 파장에 비하여 매우 클 경우, 입자표면에서의 흡수와 산란에 의해 일어나는 것으로서 다음과 같다.^{6,7)}

$$di = -\beta i ds \quad (7)$$

$$\beta = a + \sigma_s \quad (8)$$

여기서,

$$\beta = \pi R^2 N_p = 1.5 VF/D_p \quad (9)$$

$$a = \epsilon_p \pi R^2 N_p \quad (10)$$

$$\sigma_s = (1 - \epsilon_p) \pi R^2 N_p \quad (11)$$

매체중에서의 감쇠계수가 일정할 경우, 사출점 0으로부터 거리 S 만큼 떨어진 위치에서의 복사에너지 강도는 식 (7)을 적분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i(S) = i(0) \exp(-\beta S) \quad (12)$$

Fig.4는 비교적 큰 입자에서 광학산란이 일어날 경우로서, 미소요소 dA 에 복사에너지가 입사되어 진행방향으로부터 단위 입체각당 η 의 방향으로 산란하는 산란에너지 및 산란에너지 강도는 각각 다음과 같다.

$$dQ_s = (2/3)(\rho i d\Omega R^2/\pi) (\sin \eta - \eta \cos \eta) \quad (13)$$

$$i'(\eta) = (2/3)(\rho i/\pi^2) (\sin \eta - \eta \cos \eta) \quad (14)$$

전방향으로의 산란에너지 강도는

$$i' = \rho i \quad (15)$$

이므로, 다음의 관계가 성립한다.

$$(2/3)(\rho i/\pi^2)(\sin \eta - \eta \cos \eta) = \rho i \Phi(\eta)/4\pi \quad (16)$$

여기서, $\Phi(\eta)$ 는 산란에너지의 방향분포를 나타내는 위상함수로서 다음과 같으며, 이것을 도식화하면 Fig.5와 같다.

$$\Phi(\eta) = (8/3\pi)(\sin \eta - \eta \cos \eta) \quad (17)$$

2.2 몬테카를로법에 의한 해석

1) 계에 대한 에너지방정식

벽면과 매체로 구성된 계의 복사전열을 몬테카를로법^{8),9)}으로 해석하는 경우, Fig.6과 같이 계의 벽면과 매체를 각각 적당한 수의 요소로 나누어 한 요소에 출입하는 열교환량을 고려함으로써 구할 수 있다.

매체 요소에 있어서의 복사평형은 에너지보존의 법칙에 의해 다음과 같다.

$$Q_{rout} + Q_{fout} = Q_{rin} + Q_{fin} \quad (18)$$

또한, 벽 요소에 있어서의 복사평형은 다음과 같다.

$$Q_{rout} + Q_a = Q_{rin} \quad (19)$$

그리고 매체 요소에 대한 Q_{rout} 는,

$$Q_{rout} = (1 - \alpha)4a\sigma T_m^4 dV \quad (20)$$

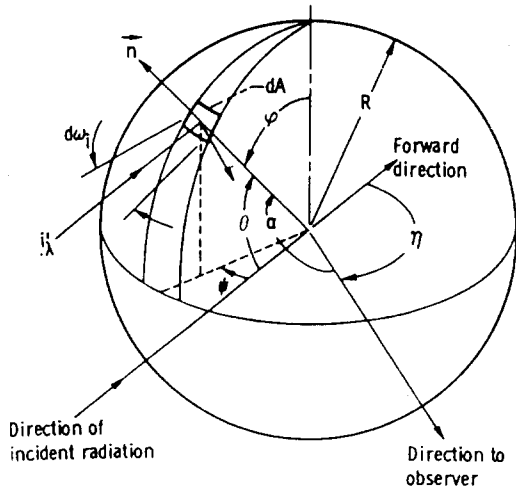


Fig.4 Scattering by Reflection from Diffuse Sphere

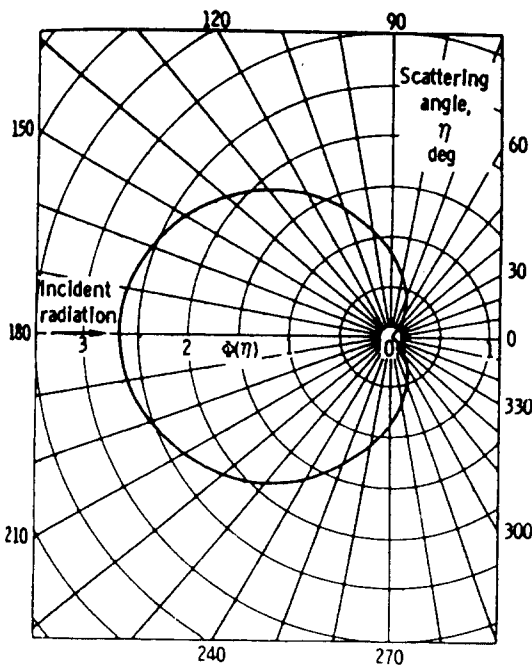


Fig.5 Scattering Phase Function for Diffuse Reflecting Sphere

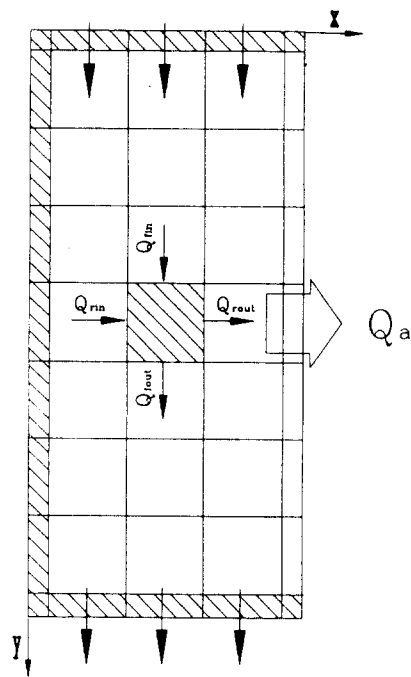


Fig.6 Radiative Energy Balance in Droplet Radiator

벽요소에 대한 Q_{rout} 는,

$$Q_{\text{rout}} = (1 - \alpha)\epsilon_w \sigma T_m^4 dA \quad (21)$$

여기서, α 는 자기흡수계수로서, 한 요소로부터 방사된 전에너지에 대한 그 요소자체에 흡수된 에너지의 비를 나타낸다. 또한, 유동에 의한 엔탈피 이송량은 각각 다음과 같다.

$$Q_{\text{fin}} = U_{\text{mup}} C_p T_{\text{up}} \quad (22)$$

$$Q_{\text{fout}} = U_m C_p T \quad (23)$$

여기서,

U_{mup} : 상류측 요소와의 계면에 수직인 질량속도 [kg/s]

U_m : 하류측 요소와의 계면에 수직인 질량속도 [kg/s]

T_{up} : 상류측 요소의 온도 [K]

T : 임의요소의 온도 [K]

임의의 요소 I로부터 방사된 에너지가 다른 요소 J에 흡수되는 에너지의 양은 다음과 같다.

$$Q_{\text{rin}}(J) = DR(I, J) \cdot Q_{\text{rout}}(I) \quad (24)$$

여기서, $DR(I, J)$ 는 임의의 요소 I로부터 방사된 복사에너지중에서 다른 요소 J에 흡수되는 에너지의 비, 즉 복사에너지의 흡수분포비이다.

따라서 한 요소에 흡수되는 복사에너지 Q_{rin} 은 다른 모든 요소로부터 그 요소에 전달된 에너지를 더함으로써 구할 수 있다. 즉,

$$Q_{\text{rin}} = \sum_{\text{wall}} DR Q_{\text{rout}} + \sum_{\text{med}} DR Q_{\text{rout}} \quad (25)$$

2) 몬테카를로법에 의한 흡수분포비의 계산
복사전열을 몬테카를로법으로 해석하는 경우, 복사에너지는 일종의 광자¹⁰⁾라는 개념으로부터, 일정한 에너지를 가지는 난수적인 입자로서 고려될 수 있으나, 한 요소에서 입자의 방사점은 일정하게 분배되어야 하므로 매체요소에 있어서 방사점의 X좌표는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X = (RND_x - 0.5)\Delta X + X_c \quad (26)$$

여기서, ΔX 는 한 요소의 길이, X_c 는 요소의 중심점을 의미하며, RND_x 는 0과 1사이에 균등하게 분

포된 유사난수이다.¹¹⁾

Fig.1과 같은 벽요소로부터의 각 에너지 입자의 방사방향(θ, η)은 2개의 난수 RND_θ, RND_η 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta = 2\pi RND_\theta \quad (27)$$

$$\eta = \cos^{-1} \sqrt{1 - RND_\eta} \quad (28)$$

Fig.2와 같은 매체요소의 경우, 에너지의 방사방향(θ, η)은 다음과 같다.

$$\theta = 2\pi RND_\theta \quad (29)$$

$$\eta = \cos^{-1}(1 - 2 RND_\eta) \quad (30)$$

에너지의 비행거리 S는 그것이 상각되기 전에 에너지가 날아가는 거리로서 Beer의 법칙으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$S = -\ln(1 - RND_s) / \beta \quad (31)$$

비행거리내에서 에너지가 벽면과 충돌하는지, 않는지는 단순히 기하학적으로 고려하여 구할 수 있으며 매체에서의 흡수, 산란 또는 벽면에서의 흡수, 반사 등은 다음과 같이 두가지의 경우로 나누어서 고려할 수 있다.

(1) 에너지가 벽과 충돌하지 않을 경우 :

에너지가 매체에서 산란되는지 또는 흡수되는지를 결정하기 위해서는 0에서부터 1까지의 값을 갖는 유사난수 RND_{sc} 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$RND_{sc} > \omega \quad (32)$$

$$RND_{sc} \leq \omega \quad (33)$$

여기서, ω 는 감쇠계수에 대한 산란계수의 비이다. 식 (32)의 경우, 에너지는 비행거리끝에 있는 매체에 의해 흡수되며, 그 에너지의 추적은 끝난다. 그리고 식 (33)의 경우, 그 에너지는 매체에 의해 산란된다. 이 때의 산란방향(θ, η)은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{3}{2} - \frac{3}{8} \sin 2\eta + \frac{\eta \cos 2\eta}{4} - \frac{3\pi}{4} RND_\eta = 0 \quad (34)$$

또한, 산란된 에너지의 새로운 비행거리는 식 (31)에 의해 정해진다.

(2) 에너지가 벽과 충돌할 경우 :

벽에 입사한 에너지중에서 벽면의 방사율만큼의 에너지는 벽에 흡수되며, 그 나머지는 반사된다. 따라서 유사난수 RND_r 을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$RND_r \leq \epsilon_w \quad (35)$$

$$RND_r > \epsilon_w \quad (36)$$

식 (36)의 경우, 식 (27), 식 (28)에 의한 방향으로 반사된다. 반사점으로부터의 새로운 투과거리는 처음의 투과거리로부터 그 에너지가 이미 비행한 거리를 뺀으로써 구할 수 있다.

각 요소의 흡수분포비는 각요소로부터 무수한 에너지입자를 사출하여 Fig.7의 프로차트에 의해 구할 수 있다. 만약, 요소 I로부터 방사된 N개의 에너지입자중에서 요소 J에 n(J)개의 에너지입자가 흡수된다면, 자기 흡수계수 α 와 흡수분포비 DR(I,J)는 각각 다음과 같다.

$$\alpha = n(I)/N, (I=J) \quad (37)$$

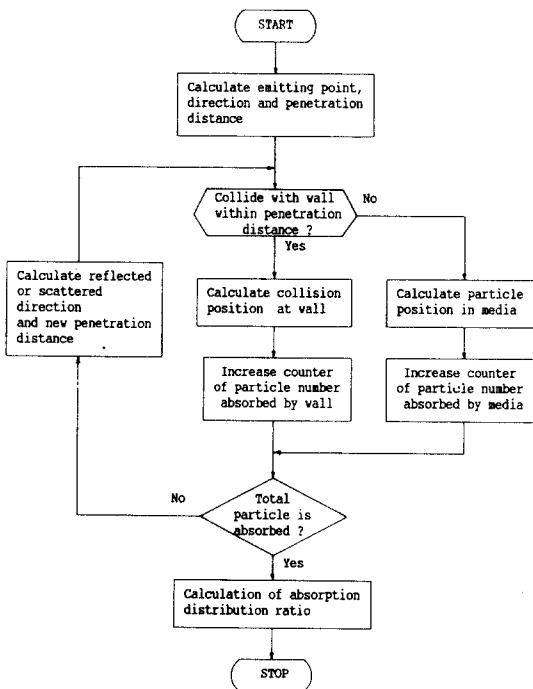


Fig.7 Flow Chart of Absorption Distribution Ratio

$$DR(I,J) = n(J)/(N - n(I)), (I \neq J) \quad (38)$$

3. 결과 및 고찰

Fig.8은 액적방열기의 수치시물레이션을¹²⁾ 위한 2차원적인 해석모델로서, 상하부벽 및 좌측벽은 단열된 경면반사체($\epsilon=0$)이며, 우측벽은 이상흑체($\epsilon=1$)인 방사면이다. 상부벽으로부터 온도 500K인 미소입자가 무수히 분출되어 계내를 진행하는 동안에 방사면을 통하여 온도 300K인 외부로 복

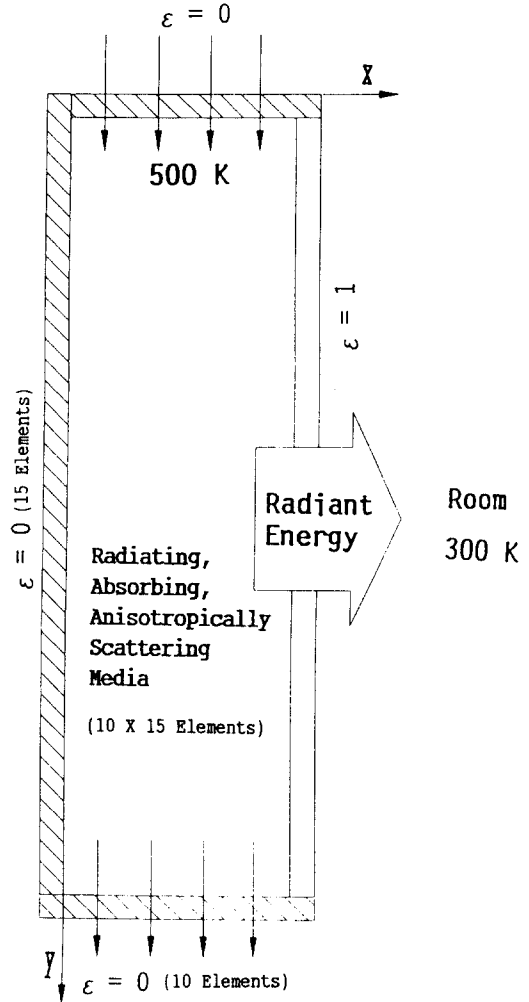


Fig.8 Two Dimensional Analysis Model for Liquid Droplet Radiator

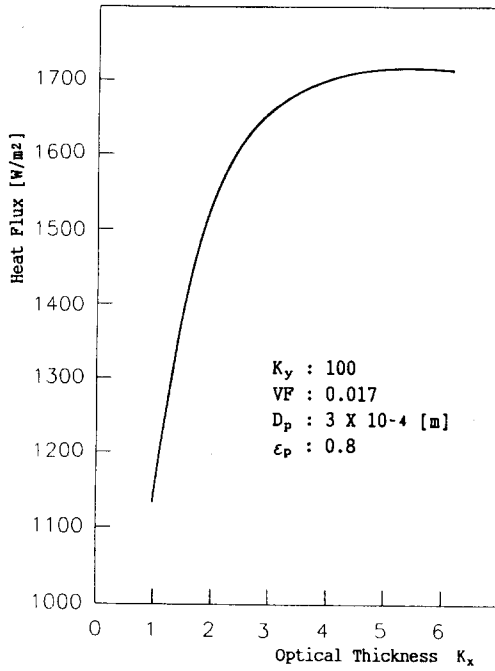


Fig. 9 x - Direction Optical Thickness on Heat Flux

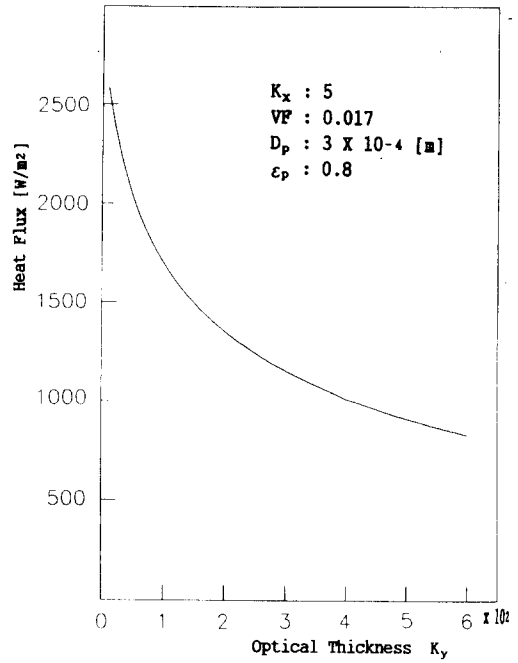


Fig. 10 y - Direction Optical Thickness on Heat Flux

사에너지를 방출하게 되는데, 계내를 진공상태로 유지함으로써 대류에 의한 전열은 무시한다.

우선, 시스템의 크기를 결정하기 위하여 입자의 직경 $300\mu\text{m}$, 입자의 체적충진율 0.017 로서 감쇠 계수가 85 이며, 입자의 방사율이 0.8 인 경우에 대하여 x (폭)방향 및 y (입자의 진행)방향의 광학두께의 변화에 대한 복사열유속의 변화를 고찰하였다.

Fig.9는 x 방향의 광학두께의 변화에 대한 복사열유속의 변화를 나타내는 그래프인데, 시스템의 폭이 증가함에 따라 복사열유속은 거의 선형적으로 증가하지만 광학두께가 4 이상에서는 열유속의 증가폭이 현저히 둔화되는 경향을 나타내었다. 즉, 광학두께를 증가시키면 전열면적이 증가하기 때문에 전반적인 열유속도 증가하지만 어느 정도 이상에서는 광학두께를 증가시켜도 내부 벽면쪽의 입자층은 외부와의 열교환이 줄어들기 때문에 전반적인 열유속의 증가는 없게 된다. 또한, Fig. 10은 x 방향의 광학두께가 5 인 경우의 y 방향의 광학두께의 변화에 대한 복사열유속의 변화를 나타내는 그래프로서, 광학두께가 증가함에 따라 복사

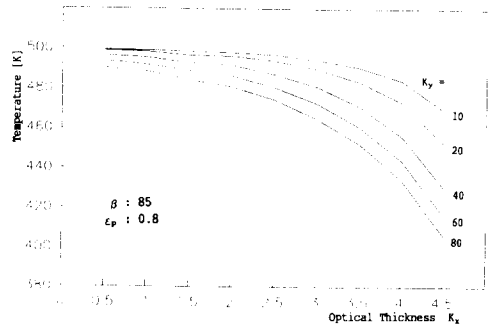


Fig. 11 x - Directional Temperature Distribution in Droplet Radiator

열유속이 지수적으로 감소함을 알 수 있었다.

Fig.11과 Fig.12는 계내 각점의 온도분포로서, Fig.11의 경우, 방열기의 입구부인 K_y 10의 위치에서는 K_x 의 변화에 대하여 온도변화의 기울기가 완만하지만 출구부로 갈수록 온도변화의 기울기가 증가함을 알 수 있었다. 또한 Fig.12로부터 광학두께가 적은, 좌측벽근처에서는 주로 입자들 사이에 복사전열이 일어나기 때문에 y 방향에 따라

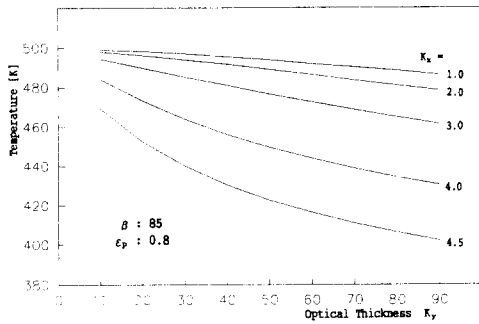


Fig. 12 y-Directional Temperature Distribution in Droplet Radiator

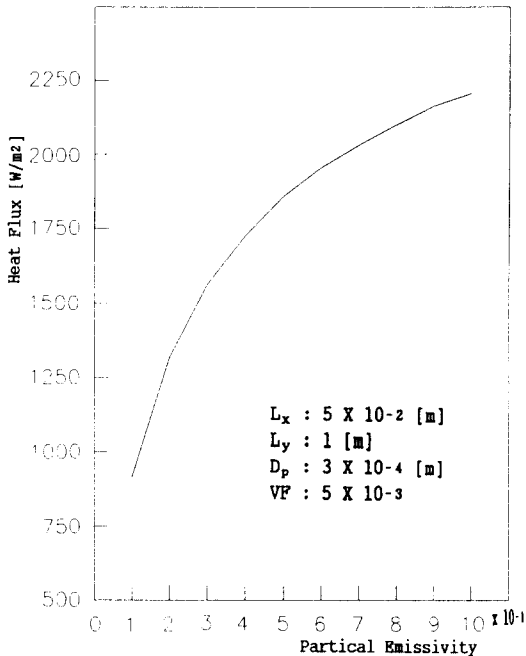


Fig. 13 Heat Flux Variation to Emissivity of Particles

온도분포가 선형적으로 완만하게 감소되나 광학 두께가 큰, 방사면근처에서는 온도기울기가 지속적으로 감소함을 알 수 있었다.

Fig.13은 계내 입자의 방사율의 변화에 대한 복사열유속의 변화로서, 방사율이 증가함에 따라 복사열유속증가의 기울기가 완만해 짐을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 액적방열기의 기술개발을 위한 기초 연구로서, 액적입자층에서의 복사전열 특성의 고찰을 위한 수치시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 입자층에서의 복사열유속은 계의 감쇠계수, 광학두께 및 입자의 표면적 등에 영향을 받는다.
- (2) 입자의 방사율이 0.8, 체적충진율이 0.017인 경우, 폭방향의 광학두께가 4 이상에서는 열유속의 증가를 얻지 못한다.
- (3) 계내 입자방사율의 변화에 대한 복사열유속의 변화는 방사율이 증가할수록 복사열유속증가의 기울기가 완만해진다.

참고문헌

- 1) Viskanta, R., 1966, "Advances in Heat Transfer, 3", Academic Press.
- 2) Alden F. Presler, Carolyn E. Coles, Priscilla S. Diem - Kirsop, and K. Alan White., 1986, "Liquid Droplet Radiator Program at the NASA Lewis Research Center" Jt. AIAA/ASME Thermophysics and Heat Transfer Conference, pp.1~9
- 3) Richard F. Brown, Dr. Robert Kosson, "Liquid Droplet Radiator Sheet Design Considerations", Grumman Aerospace Corporation, pp.330~338
- 4) 甲騰好郎, 1976, "傳熱概論", 養賢堂, pp.337~393
- 5) 西川兼康, 騰田恭伸, 1988, "傳熱學", 理工學社, pp. 289~353
- 6) 福地健, 1987, "非等方性散亂粒子含有カス中での放射傳熱解析", 修士論文, 北海道大學 大學院 工學研究科 機械工學專攻
- 7) 金鎔模, 1990, "球充填層中の放射エネルギー減殺效果に関する研究"
- 8) Robert Siegel, John R. Howell, 1981, "Thermal Radiation Heat Transfer", McGraw - Hill, pp. 751~768
- 9) A. Haji - Sheikh, 1988, "Monte Carlo Methods", John Wiley & Sons, Inc., pp.673~722
- 10) Arthur Beiser, 1987, "Concepts of Modern Physics", McGraw - Hill, pp.44~86
- 11) 津田孝夫, 1977, "モンテカルロ法とシミュレーション"

- ジョン”, 培風館, pp.7~106
- 12) K. kudo, H. Taniguchi, W. J. Yang, H. hayasaka, T. Fukuchi and I. Nakamachi, 1987, “Monte Carlo Method for Radiative Heat Transfer Anal-

ysis of General Gas - Particle Enclosures”, Numerical Methods in Thermal Problems, Volume 5, part 2, Fifth International Conference held in Montreal, Canada, pp.1264~1275