

< 論 文 >

# 주요매개변수에 따른 복사매질 내에서의 열전달 특성에 관한 연구

이 찬\* · 백 승 욱\*\*

(1988년 4월 25일 접수)

## Parametric Study on the Heat Transfer in a Radiating Medium

Chan Lee and Seung Wook Baek

**Key Words** : Radiating Medium(복사 매질), Optical Thickness(광학 두께), Blockage Effect (봉쇄 효과), Albedo(산란알비도)

### Abstract

The heat transfer by simultaneous conduction, convection and radiation between flame and fuel surface in a thermally radiating medium is investigated theoretically. The flame and fuel surface are assumed to be diffuse, gray, infinite, isothermal, parallel surfaes separated by a finite distance. The space between the plates is supposed to be filled with a radiatively absorbing, emitting and scattering medium. The problem is formulated exactly in terms of simultaneous integro-differential equations. The numerical results reveal the effect of the system parameters on the heat transfer characteristics and the temperature distributions. The numerical results reveal that the optically thick radiating medium has a blocking effect on the total heat transfer. The temperature distributions are observed to be convex upward for an optically thick radiating medium as the albedo decreases.

### 기 호 설 명

$B$ : 표면 출사	$T$ : 온도
$C_p$ : 복사매질의 비열	$V$ : 유동의 국소적 속도
$E_b$ : 흑체 방사능력	$x$ : 공간좌표
$E_n(\tau)$ : 지수적분함수	$X$ : 무차원 표면출사량
$G$ : 입사 복사량	$\alpha$ : 흡수계수
$k$ : 복사매질의 열전도계수	$\beta$ : 감쇄계수
$L$ : 화염면과 연료표면사이의 거리	$\epsilon$ : 표면방사율
$N_1$ : 전도-복사 무차원 매개변수	$\theta$ : 무차원 온도
$N_2$ : 대류-복사 무차원 매개변수	$\sigma$ : Stefan-Boltzmann 상수
$r$ : 고체연료의 연소율	$\sigma_s$ : 산란계수
	$\tau$ : 복사매질의 광학두께
	$\psi$ : 무차원 입사복사
	$\Psi$ : 무차원 총열유속
	$\phi$ : 무차원 열유속

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

$\omega_0$  : 복사매질의 산란알비도  
 $\rho$  : 밀도

하 첨 자

$k$  : 전도  
 $c$  : 대류  
 $r$  : 복사  
 $s$  : 고체상  
 1 : 고체연료표면  
 2 : 화염면

1. 서 론

본 연구는 화염면과 연료표면 사이에 복사 매질이 있을때, 전도와 대류, 복사현상에 의한 정상상태의 열전달을 다루었다.

이러한 복사매질 내에서의 여러 열전달 방식들간의 상호작용은, 화염을 수반하는 연소현상 같은, 고온의 여러 경우에 있어서 중요한 관심사이다. 이런 현상은 휘발성 기체를 갖는 석탄의 연소, 고체입자를 갖는 유동층의 열전달, 용해반응, 플라즈마, 고체 추진제의 연소, 재 돌입시의 용발현상(abrasion), 우주공간에서의 동력장치등과 같은 실제적인 여러 문제들과 깊은 연관성을 갖는다. 특히 금속성성분(metallic ingredient)을 포함하는 고체추진제의 연소에 있어서 복사에 의한 열전달과 분출에 의한 대류열전달은 무시할 수 없을 뿐더러, 화염면과 연료표면 사이에 온도분포와 열전달계수를 구하는 것이 연소 현상을 이해함에 있어서 매우 중요한 문제이다.

Viskanta와 Grosh<sup>(1-3)</sup>가 전도와 복사현상이 있는 두 평판 사이의 문제를 다루었으며, Grief와 Clapper<sup>(4)</sup>는 무한히 긴 동축원통간의 복사를 포함하는 열전달 문제를 다루었다. Leung과 Edwards<sup>(5)</sup>는 분출이나 흡입이 있는 유동층의 복사와 전도에 의한 열전달에 관하여 연구하였다. 더 나아가 Lick<sup>(6)</sup>은 용발현상에 있어서 복사와 전도에 의한 열전달의 과도적 현상을 살펴 보았다. Sparrow와 Cess, Siegel과 Howell<sup>(7-9)</sup>는 평면경계사이의 복사와 전도에 의한 복합적인 열전달 문제를 포괄적으로 검토 하였는데, 상당부분이 단순화된 경우로 제한되어 있다. Viskanta와 Merriam<sup>(10)</sup>은 동심구사이에서 전도와 복사에 의한 복합적 열전달 문제를 다루었으나 분출의 문제는 고려하지 않고 있

다. 또한, 최근들어서 Choi와 Kruger<sup>(11)</sup>는 Starcloud 모형을 가지고 석탄연소에 있어서의 휘발성 기체의 분출과 복사·열전달에 의한 영향을 다루었다.

본 연구에서는 앞서의 여러 경우에서 단순하게 취급되었던 화염면과 연료표면의 경계조건을 무한히 길고, 평행한 확산, 회색 평판(gray, diffuse plates)으로 보고, 이 두 평판 사이에 흡수(absorbing), 방사(emitting), 산란(scattering)을 하는 회색매질(gray medium)이 차여져 있다고 생각한다. 이런 가정하에서, 여러 매개변수들을 변화시켜가며 전도, 대류, 복사열전달들의 상호작용과 온도 분포를 수치적으로 해석하였다. 특히 화염면과 연료표면간의 열교환에 있어서의 분출에 의한 효과와 복사열전달의 영향에 관심을 기울였다.

2. 이 론

2.1 기본가정

Fig. 1에서 보듯이, 연료표면이 화염과의 열교환에 의해서 열분해 되어 휘발성 기체와 고체입자들을 생성할 때, 화염과 연료표면 사이의 복사매질은 전도, 대류, 복사 등의 열전달 방식에 의해 그 온도 분포와 열전달율이 결정되어 진다. 이때 고체입자들은 연속적 이고 균질(continuous and homogeneous)하다고 생각한다. 이러한 관점에서, 휘발성 기체와 고체입자가 평형상태를 유지하고, 고체

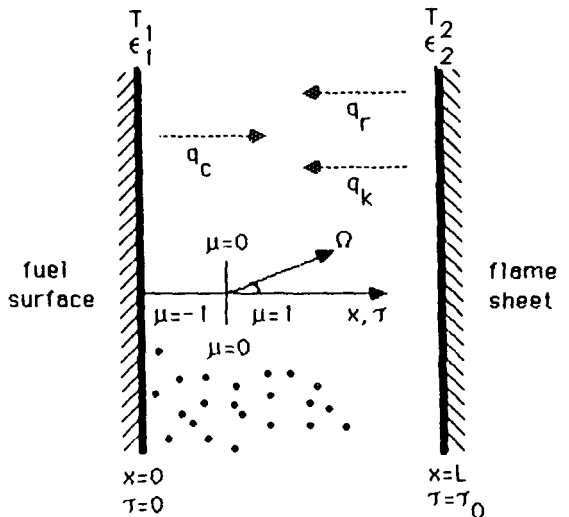


Fig. 1 Schematic diagram of physical system

입자간의 간격이 충분히 작다면, 고체입자간의 온도차와 열전달은 무시할 수 있을 만큼 작다고 볼 수 있다. 또한 연료표면과 화염면은 무한히 긴 확산, 회색 평면으로 서로 다른 온도  $T_1, T_2$ 을 유지하고 있다. 그러므로, 이런 두 표면간의 복사매질(휘발성 기체와 고체입자의 혼합물)은 국소적으로 열역학적 평형상태를 유지하며, 흡수, 방사, 산란 현상등을 통하여 복사 열전달에 참여한다고 보며, 산란현상은 등방성(isotropy)를 유지한다.

특히 고체추진체의 과도적 연소현상에 있어서 복사매체를 준정상상태(quasi-steady state)로 고려함으로써, 비정상효과를 무시할 수 있다<sup>(12,13)</sup>.

이 문제를 다룸에 있어, 필요한 가정들은 가정과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 정상상태 또는 준 정상상태
- (2) 유동과 열전달 현상은 일차원적 이다.
- (3) 기체의 물성치들은 일정하다.
- (4) 기체와 고체입자들은 국소적으로 열역학적 평형상태를 이룬다.
- (5) 복사매질의 열전도율은 일정하다.
- (6) 복사 매질은 회색매질이다.
- (7) 복사매질은 등방성 산란을 한다.

## 2.2 지배 방정식

우선 질량보존식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dx}(\rho V) = 0 \quad (1)$$

고체연료표면과 기체상태간의 질량보존관계를 이용하여

$$\rho V = \rho_s r = \text{일정} \quad (2)$$

이때  $\rho_s$ 는 고체연료의 밀도이고,  $r$ 은 연료표면의 연소율이다. 앞서의 가정들에 의해 에너지 방정식은 다음과 같이 쓰여진다.

$$\rho C_p V \frac{dT}{dx} = k \frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{dq_r}{dx} \quad (3)$$

여기서  $C_p$ 와  $k$ 는 복사매질의 비열과 열전도계수이며,  $T$ 는 복사매질의 온도이다.

다음과 같은 무차원 변수를 이용하여

$$\tau = \beta x, \tau_0 = \beta L, \theta = T/T_2, \theta_1 = T_1/T_2$$

$$N_1 = k\beta/4\sigma T_2^3,$$

$$N_2 = \rho C_p V/4\sigma T_2^3 = \rho_s C_p r/4\sigma T_2^3$$

식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$N_2 \frac{d\theta}{d\tau} = N_1 \frac{d^2\theta}{d\tau^2} - \frac{1}{4\sigma T_2^3} \frac{dq_r}{d\tau} \quad (4)$$

Sparrow와 Cess<sup>(9)</sup>에 따르면, 복사 열유속

(radiation heat flux)  $q_r$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} q_r(\tau) &= 2B_1 E_3(\tau) - 2B_2 E_3(\tau_0 - \tau) \\ &+ \frac{2\alpha}{\beta} \int_0^\tau \left[ \sigma T^4(t) + \frac{\sigma_s}{4\alpha} G(t) \right] \\ &\times E_2(\tau - t) dt \\ &- \frac{2\alpha}{\beta} \int_\tau^{\tau_0} \left[ \sigma T^4(t) + \frac{\sigma_s}{4\alpha} G(t) \right] \\ &\times E_2(t - \tau) dt \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} -\frac{dq_r}{d\tau} &= 2B_1 E_2(\tau) + 2B_2 E_2(\tau_0 - \tau) \\ &+ \frac{2\alpha}{\beta} \int_0^{\tau_0} \left[ \sigma T^4(t) + \frac{\sigma_s}{4\alpha} G(t) \right] \\ &\times E_1(|\tau - t|) dt \\ &- \frac{4\alpha}{\beta} E_b(\tau) - \frac{\sigma_s}{\beta} G(\tau) \end{aligned} \quad (6)$$

이때, 입사복사(incident radiation)  $G(\tau)$ 와 표면출사(surface radiosity)  $B_1, B_2$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G(\tau) &= 2B_1 E_2(\tau) + 2B_2 E_2(\tau_0 - \tau) \\ &+ \frac{2\alpha}{\beta} \int_0^{\tau_0} \left[ \sigma T^4(t) + \frac{\sigma_s}{4\alpha} G(t) \right] \\ &\times E_1(|\tau - t|) dt \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} B_1 &= \varepsilon_1 E_{b1} + 2(1 - \varepsilon_1) \left\{ B_2 E_3(\tau_0) \right. \\ &+ \left. \int_0^{\tau_0} \left[ (1 - \omega_0) E_b(t) + \frac{\omega_0}{4\alpha} G(t) \right] \right. \\ &\times \left. E_2(t) dt \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} B_2 &= \varepsilon_2 E_{b2} + 2(1 - \varepsilon_2) \left\{ B_1 E_3(\tau_0) \right. \\ &+ \left. \int_0^{\tau_0} \left[ (1 - \omega_0) E_b(t) + \frac{\omega_0}{4\alpha} G(t) \right] E_2 \right. \\ &\times \left. (\tau_0 - t) dt \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

또한, 지수적분함수(exponential integral function)  $E_n(\tau)$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$E_n(x) = \int_0^1 \mu^{n-2} \exp\left(-\frac{x}{\mu}\right) d\mu$$

다시  $G$ 와  $B_1, B_2$ 를 다음과 같이 무차원화 시키면,

$$\phi(\tau) = \frac{G(\tau)}{\sigma T_2^4}, \quad X = \frac{B}{\sigma T_2^4}, \quad \omega_0 = \frac{\sigma_s}{\beta}$$

식 (4), (7), (8), (9)는 다음과 같이 표시 된다.

$$\begin{aligned} N_1 \frac{d^2\theta}{d\tau^2} - N_2 \frac{d\theta}{d\tau} + (1 - \omega_0) \left[ \frac{1}{4} \phi(\tau) - \theta^4(\tau) \right] \\ = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\phi(\tau) = 2X_1 E_2(\tau) + 2X_2 E_2(\tau_0 - \tau)$$

$$+ 2 \int_0^{\tau_0} \left[ (1 - \omega_0) \theta^*(t) + \frac{\omega_0}{4} \phi(t) \right] \times E_1(|\tau - t|) dt \quad (11)$$

$$X_1 = \varepsilon_1 \theta_1^* + 2(1 - \varepsilon_1) \{ X_2 E_3(\tau_0) + \int_0^{\tau_0} \left[ (1 - \omega_0) \theta^*(t) + \frac{\omega_0}{4} \phi(t) \right] E_2(t) dt \} \quad (12)$$

$$X_2 = \varepsilon_2 + 2(1 - \varepsilon_2) \{ X_1 E_3(\tau_0) + \int_0^{\tau_0} \left[ (1 - \omega_0) \theta^*(t) + \frac{\omega_0}{4} \phi(t) \right] \times E_2(\tau_0 - t) dt \} \quad (13)$$

연료표면과 화염면에 있어서 온도로서 경계조건은

$$\theta(0) = \theta_1, \quad \theta(\tau_0) = 1.0 \quad (14)$$

감쇠계수(extinction coefficient)의 정의에 의하면,  $\beta = \alpha + \sigma_s$ , 복사매질의 산란알비도(albedo)  $\omega_0$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\omega_0 = 1 - \frac{\alpha}{\beta}$$

이때 비율  $\alpha/\beta$ 은 입사복사량이 열량적 에너지로 전환되어지는 정도를 나타내어 준다.

식(10)~(13)과 경계조건(14)는 서로 비선형적으로 연계되어 있으므로, 온도분포  $\theta(\tau)$ 를 구하기 위하여서는 수치적 반복계산을 행하여야 한다.

### 2.3 수치적 반복계산과정

연립 미-적분방정식(10)~(13)을 풀기위한 계산과정은 다음과 같다.

○ 함수  $\psi(\tau)$ ,  $\theta(\tau)$ 를 가정하여, 식(12), (13)을 통해  $X_1, X_2$ 에 대한 연립대수 방정식을 구한다.

○ 주어진  $X_1, X_2$ 를 가지고, 식(11)로 부터  $\phi(\tau)$ 를 새로이 계산한다

○  $\psi(\tau)$ 를 식(10)에 대입하여, 경계조건(14)를 만족하는  $\theta(\tau)$ 를 계산한다.

○ 주어진 수렴조건을 만족할때까지 이러한 반복계산과정을 되풀이 한다.

### 2.4 열전달 관계식

앞서의 연립 미-적분 방정식을 만족하는 온도분포를 가지고, 무차원화 된 열유속들은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_k = q_k / 4\sigma T_2^4 = \left( -k \frac{dT}{dx} \right) / 4\sigma T_2^4 = -N_1 \frac{d\theta}{d\tau} \quad (15)$$

$$\phi_c = q_c / 4\sigma T_2^4 = (\rho C_p V T) / 4\sigma T_2^4 = N_2 \theta \quad (16)$$

$$\phi_r = q_r / 4\sigma T_2^4$$

$$= \frac{1}{2} X_1 E_3(\tau) - \frac{1}{2} X_2 E_3(\tau_0 - \tau)$$

$$+ \frac{1}{2} \int_0^{\tau} \left[ (1 - \omega_0) \theta^*(t) + \frac{\omega_0}{4} \phi(t) \right]$$

$$\times E_2(\tau - t) dt$$

$$+ \frac{1}{2} \int_{\tau}^{\tau_0} \left[ (1 - \omega_0) \theta^*(t) + \frac{\omega_0}{4} \phi(t) \right]$$

$$\times E_2(t - \tau) dt \quad (17)$$

또한 무차원화된 총 열유속  $\Psi$ 는 전도 대류와 복사 열전달량의 합으로서 표시할 수 있다.

$$\Psi = \phi_k + \phi_c + \phi_r = \text{일정.}$$

### 3. 결과 및 검토

(1) 독립매개변수 : 복사매질의 전도, 복사, 대류에 의한 열전달의 상호작용과 온도분포를 구명하기 위해, 여러가지 독립매개변수( $N_1, N_2, \tau_0, \omega_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ )들이 사용 되었다. 결과를 검토하기전에, 이런 여러 매개변수들의 물리적 의미를 살펴보기로 한다.

$N_1$ 은 복사열전달에 대한 전도열전달의 상대적인 역할을 의미하며,  $N_2$ 는 복사열전달에 대한 대류열전달(또는 분출효과)의 상대적인 역할을 의미한다.  $N_1=0$ 인 경우, 전도에 의한 열량교환 없이, 복사와 대류열전달간의 상호작용만이 존재한다.  $N_2=0$ 일 때는, 유동이 없는 상태의 복사매질에 있어서의 전도와 복사에 의한 열전달 만이 존재한다.  $N_1=\infty$ 인 경우는, 전도에 의한 열전달의 영향이 복사와 대류에 의한 열전달 효과를 월등히 앞서, 순수전도(pure conduction)에 의한 열전달의 문제와 같아진다.  $N_2=\infty$ 인 경우는 매우 큰 분출의 효과로 인해, 복사와 전도에 의한 열전달이 거의 무시되어질 수 있다. 그러므로, 이런 매개변수  $N_1, N_2$ 들의 다양한 조합을 통해서, 여러가지 물리적 현상들을 생각할 수 있다.

복사매질의 광학두께(optical thickness)  $\tau_0$ 는 두 경계간의 물리적 거리  $L$ 에 대한 복사현상의 자유 행정거리(mean free path)  $1/\beta$ 의 상대적인 크기를 의미한다. 즉,  $\tau_0 = L/(1/\beta)$ 이다.

산란알비도(albedo)  $\omega_0$ 는 복사에너지중에 산란현상에 의한 운동에너지(kinetic energy)의 상대적 크기를 나타낸다. 반면에,  $1-\omega_0$ 는 복사에너지가 열량적에너지(thermal energy)로 전환 될수있는

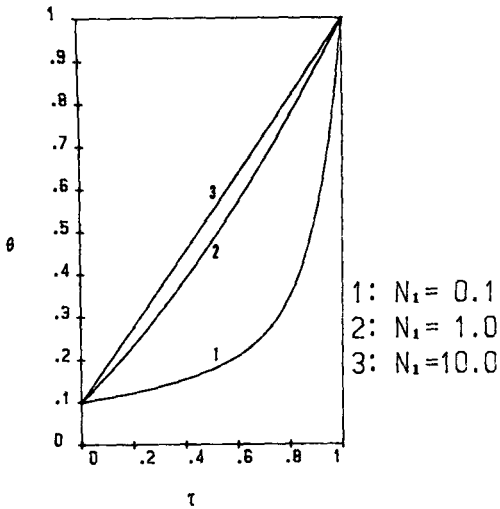


Fig. 2 The effect of conduction-radiation parameter on the temperature distribution ( $N_2=1.0$ ,  $\tau_0=1.0$ ,  $\omega_0=0.0$ ,  $\epsilon_1=\epsilon_2=1.0$ )

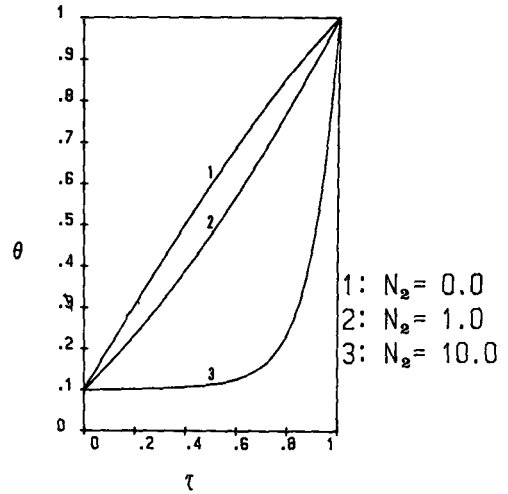


Fig. 3 The effect of convection-radiation parameter on the temperature distribution ( $N_1=1.0$ ,  $\tau_0=1.0$ ,  $\omega_0=0.0$ ,  $\epsilon_1=\epsilon_2=1.0$ )

비율을 나타낸다.  $\omega_0=0$ 인 경우, 복사매질은 방사와 흡수현상을 통해 열전달에 참여하나,  $\omega_0=1$ 일 때는 방사나 흡수는 전혀하지 않고 산란현상만을 나타낸다.

(2)  $N_1, N_2$ 의 영향 : Fig. 2에서 보여 지듯이, 일정한  $N_2$ 에 대해  $N_1$ 이 증가할수록, 온도 분포는 직선분포에 가까와 짐을 볼 수 있다. 식(4)에서  $N_1$ 이 커지면, 우변의 항들이 무시 될 수 있다. 즉  $N_1$ 이 커지면 커질수록, 전도에 의한 열전달이 복사나 대류에 의한 열전달 효과보다 훨씬 커지기 때문에, 온도분포는 순수전도에 의한 경우의 직선분포에 가까와 진다. 반대로  $N_1$ 이 줄어들어 상대적으로  $N_2$ 보다 작아지면, 온도분포는 저온의 경계근처에서는 거의 일정하다가 고온의 경계부근에 다가와서 급격히 증가하는 경향을 보여준다. 즉, 분출에 의한 대류열전달의 효과는 전도나 복사에 의해 고온에서 저온으로 전달 되려는 열전달을 막는 저항력의 구실을 하며, 이러한 저항의 영향으로 인해 고온의 경계부근에 열량이 집중되는 현상을 보인다.

바꾸어서,  $N_1$ 을 고정시키고  $N_2$ 를 변화 시켜가며 살펴보면, Fig. 3에서 볼 수 있듯이,  $N_2$ 의 증가(분출량의 증가)에 따라, 온도분포가 순수전도에 의한 직선분포에서 많이 벗어나는 경향을 보여준다. 그러나  $N_2=0.0$ 일 경우(분출이 없는 경우)일 때는 온도분포가 순수전도에 의한 경우보다 위로 볼록하게 형성되는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상

은 분출에 의한 저항력이 사라짐으로써, 전도와 복사에 의한 열전달이 활성화 되기 때문이다. 더우기 복사에 의한 에너지가 고온의 경계로부터 멀리까지 전달되어지고, 이러한 복사에너지를 복사매질이 충분히 흡수하여 열적에너지로 전환해줌으로써, 복사매질이 저온의 경계에서부터 빨리 가열되는 현상을 보여준다.  $N_2=0.0$ 인 경우의 결과는 Viskanta 와 Grosh<sup>(1)</sup>의 복사 전도에 대한 연구결과와 일치함을 볼 수 있다. 또한 Fig. 2와 Fig. 3을 비교하여 보

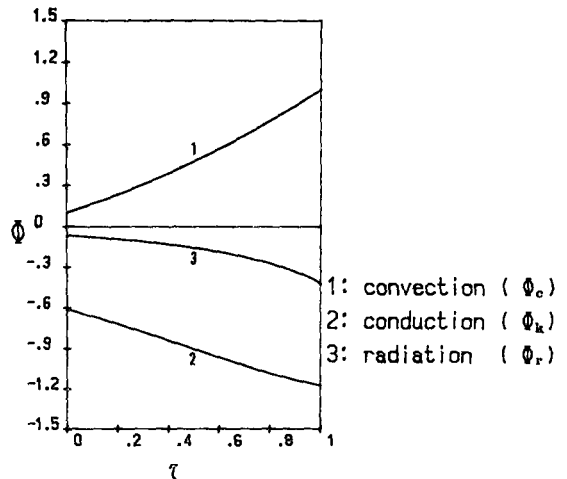


Fig. 4 Comparison of heat fluxes for three heat transfer modes ( $N_1=N_2=1.0$ ,  $\tau_0=1.0$ ,  $\theta_i=0.1$ ,  $\omega_0=0.0$ ,  $\epsilon_1=\epsilon_2=1.0$ )

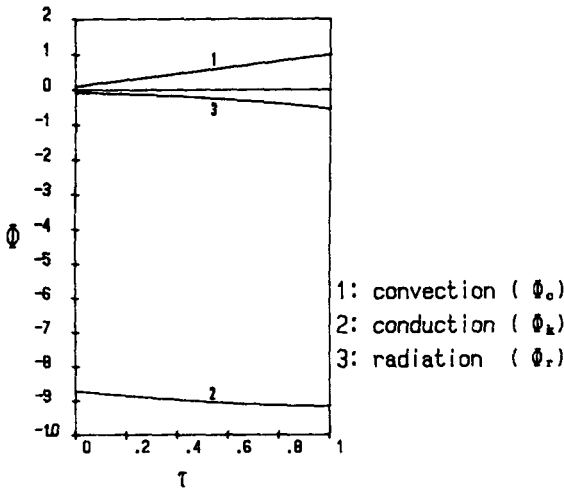


Fig. 5 Comparison of heat fluxes for three heat transfer modes ( $N_1=10.0$ ,  $N_2=1.0$ ,  $\tau_0=1.0$ ,  $\theta_1=0.1$ ,  $\omega_0=0.0$ ,  $\epsilon_1=\epsilon_2=1.0$ )

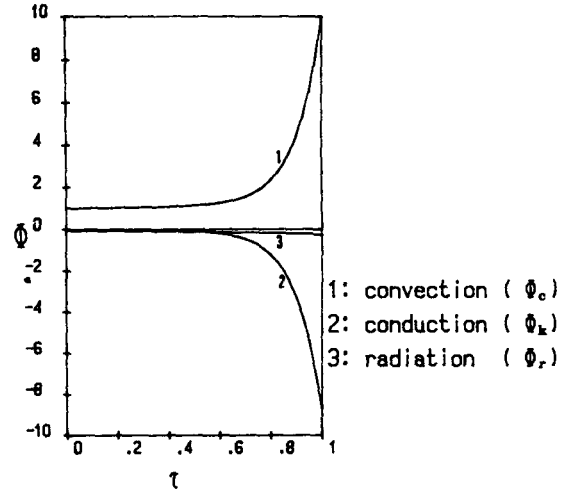


Fig. 6 Comparison of heat fluxes for three heat transfer modes ( $N_1=1.0$ ,  $N_2=10.0$ ,  $\tau_0=1.0$ ,  $\theta_1=0.1$ ,  $\omega_0=0.0$ ,  $\epsilon_1=\epsilon_2=1.0$ )

면,  $N_2$ 의 변화에 따른 온도분포간의 차이가  $N_1$ 의 변화에 따른 차이보다 큼을 볼수있다. 이런결과는, 식(3)에서 보여지듯이, 분출에 의한 열전달을 야기시키는 대류항이 온도의 1차 구배인데 반해, 전도 열전달의 경우는 그 구동력이 온도의 2 차구배 인 점에 기인한다.

Fig. 4와 Fig. 5, Fig. 6은 국소적 열유속(local

heat flux)들의 변화를 보여 주고있다. 이때 음(-)의 값은 고온에서 저온으로의 열유속을, 양(+ )의 값은 저온에서 고온으로의 열유속을 나타낸다.  $N_1=1.0$ ,  $N_2=1.0$ 인 경우는, Fig. 4에서 보여 지듯이, 저온 경계로의 열전달은 거의 전도현상에 의존하며, 복사에 의한 열전달은 별로 큰 역할을 하지 못한다. 그러나 고온경계근처에 다가 갈수록,

Table 1 Total heat flux variations for various parameters

$\tau_0$	$N_1$	$N_2$	$\omega_0$	$\epsilon_1=\epsilon_2$	$\theta_1$	$\psi$
0.1	1.0	0.1	0.0	1.0	0.1	-9.2906
0.1	1.0	1.0	0.0	1.0	0.1	-8.7403
0.1	1.0	10.0	0.0	1.0	0.1	-4.5062
1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.1	-1.1186
1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	0.1	-0.5850
1.0	1.0	10.0	0.0	1.0	0.1	0.9330
1.0	0.1	1.0	0.0	1.0	0.1	0.0873
1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	0.1	-0.5850
1.0	10.0	1.0	0.0	1.0	0.1	-8.7051
1.0	0.1	0.1	0.0	1.0	0.1	-0.2593
1.0	0.1	0.1	0.5	1.0	0.1	-0.1855
1.0	0.1	0.1	1.0	1.0	0.1	-0.0971
0.1	0.1	0.1	0.0	1.0	0.1	-1.0952
0.1	0.1	0.1	0.5	1.0	0.1	-1.0869
0.1	0.1	0.1	1.0	1.0	0.1	-1.0679

전도 뿐만이 아니라 복사에 의한 열전달량도 무시하지 못할 정도로 커진다. 이런 현상은, 총열유속을 일정하게 보내주기 위해서는 분출에 의한 저항력의 증가를 이겨내기 위해 고온 경계에서 복사, 전도에 의한 열전달이 활성화 되기 때문이다.  $N_2=1.0$ 으로 고정하고  $N_1=10.0$ 으로 증가 시켰을 경우, Fig. 5에서 보여지듯이, 거의 모든 열전달이 전도 현상에 의해 지배되어 진다. 또한 전도에 의한 열유속이 거의 일정한것으로 부터 온도분포가 직선에 가까운 것을 확인할 수 있다. 또 Table 1로부터,  $N_2=1.0$ 으로 고정 시키고  $N_1=1.0, 10.0$ 으로 변화시킨 경우 총열유속은  $-0.585 - 8.705$ 의 값을 갖는다.  $N_1=10.0$ 인 경우가  $N_1=1.0$ 인 경우보다 약 15배 정도로 총열유속이 늘어남을 볼 수 있다. Fig. 6은  $N_1=1.0, N_2=10.0$ 으로서 분출의 효과가 큰 경우 이다. 모든 범위내에서 분출에 의한 효과가 복사, 전도에 의한 열전달 효과를 앞서고 있음을 볼 수 있다. 이러한 경우에 있어서, Table 1에 의하면, 총열유속은 0.933의 양의 값을 갖는다. 분출이 있는 고체추진체의 연소현상에 있어서의 화염면과 연료표면 사이의 열전달을 생각해 보면, 총열유속이 양의 값을 가질 만큼 분출이 센 것은 화염면으로부터 연료표면으로의 열전달을 위한 복사, 전도에 의한 영향이 분출에 의한 저항을 이겨내지 못함을 의미한다. 이런경우는 화염면으로부터 연료표면으로의 열량전달이 없으므로, 지속적

인 연료표면의 열분해과정과 연소현상이 물리적으로 불가능해진다. 이러한 분출속도(또는 연소율)와 연소현상의 안정성에 관한 결과들로 부터, 고체추진체의 과도연소현상에 있어서 야기되어질 수 있는 소화현상의 예측에도 유용한 자료가 될 수 있다.

(3)  $\tau_0$ 의 영향 : Fig. 3과 Fig. 7을 비교하여 보면,  $N_1$ 을 고정시키고 일정하게  $N_2$ 를 변화시켜 주었을 때, 광학 두께가 작을수록 분출에 의한 효과가 줄어들음을 볼 수 있다.  $\tau_0=1.0$ 인 경우는 온도 분포간의 차이가 최고 25%, 70%까지 되었으나,  $\tau_0=0.1$ 로 짧아진 경우에 있어서는 2.5%, 20.7% 이내로 줄어들고 있다. 광학 두께( $\tau_0$ )가 작아진다는 것은 복사 에너지가 뚫고 나갈수 있는 자유행정거리( $1/\beta$ )가 길어짐을 의미한다. 즉 고온에서 저온으로 전달되는 복사열전달량이 멀리까지 침투될 수 있으며, 이러한 복사열전달의 활성화가 분출에 의한 저항력을 상쇄해 줌으로써, 분출 속도의 증가에도 불구하고, 복사 매질을 빨리가열 시켜주는 역할을 한다. 대류현상이 존재하지않는,  $N_2=0$ , 경우의 결과는 Viskanta<sup>(2)</sup>의 연구와 매우 잘 일치하고 있다.

Table 1은  $\tau_0=0.1$ 인 경우의 총열유속이  $\tau_0=1.0$ 인 경우에 비해 현저히 증가됨을 보여준다. 즉 광학 두께가 길어 질수록, 전체적인 열량 전달에 있어서 감소현상이 나타남을 볼수 있다. 이러한 현상을 봉쇄효과(blockage effect)라고 하며, 대류현

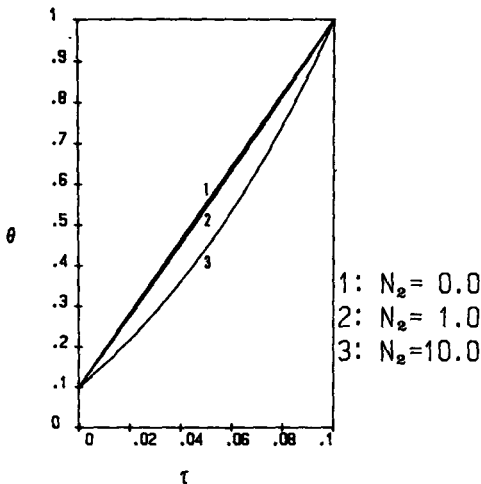


Fig. 7 The effect of convection-radiation parameter on the temperature distribution ( $N_1=1.0, \tau_0=0.1, \omega_0=0.0, \epsilon_1=\epsilon_2=1.0$ )

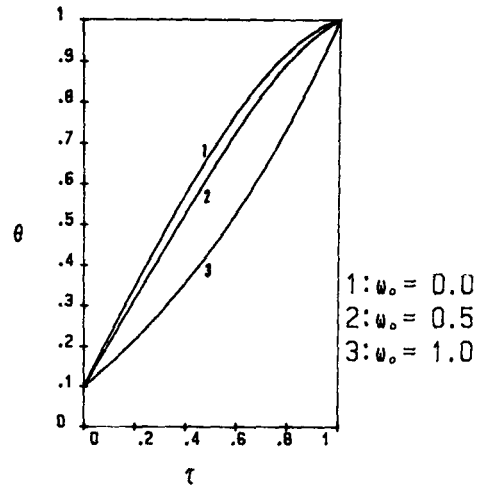


Fig.8 Effect of scattering albedo on the temperature distributions ( $N_1=0.1, N_2=0.1, \tau_0=1.0, \epsilon_1=\epsilon_2=1.0$ )

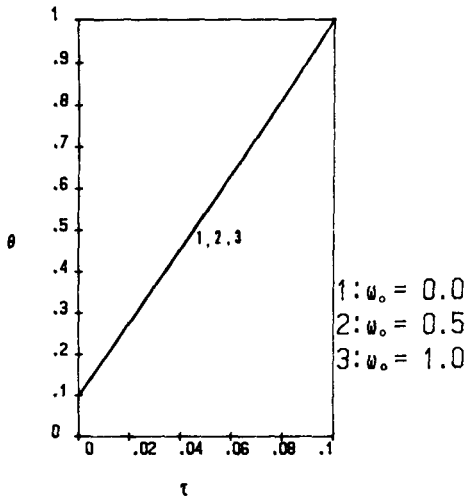


Fig. 9 Effect of scattering albedo on the temperature distributions ( $N_1=0.1, N_2=0.1, \tau_0=0.1, \epsilon_1=\epsilon_2=1.0$ )

상의 증가에 따라 봉쇄효과는 더욱 두드러 진다.

(4)  $\omega_0$ 의 영향 : Fig. 8에 나타난 바와 같이,  $\omega_0$ 가 0.0에 가까와 질수록, 온도분포가 위로 볼록해지는 경향을 보인다.  $\omega_0 \neq 0.0$ 인 경우, 모든 복사에너지가 열적에너지로 전환되므로,  $\omega_0=0.0$ 인 경우에 비해 복사매질이 일찍 가열되어 온도분포가 볼록한 형상을 보이는 것이다. 그러므로  $\omega_0 \neq 0.0, 0.5$ 인 경우는  $\omega_0=1.0$ 인 경우에 비해, 온도분포가 최고 45%, 37% 까지 증가 하였다. 그러나  $\omega_0=$

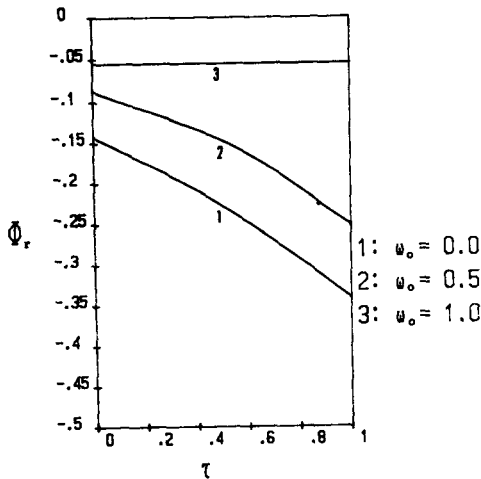


Fig. 10 Effect of scattering albedo on the radiant heat fluxes ( $N_1=0.1, N_2=0.1, \tau_0=1.0, \theta_1=0.1, \epsilon_1=\epsilon_2=1.0$ )

1.0인 경우는 복사에너지의 열적에너지로의 전환이 전혀 없으므로, 전도-대류에 의한 열전달에 의해 온도분포가 결정 되어진다. 또한, Fig. 9에서 보여 지듯이,  $\tau_0$ 가 작아지면 산란알비도의 온도분포에 관한 영향은 약 2% 이내로 거의 무시할 수 있게 된다. 또한, Fig. 10에서 볼 수 있듯이,  $\omega_0$ 가 감소 할수록 복사열유속이 증가 하는 것을 볼 수 있다. 그러나,  $\omega_0=1.0$ 일 경우는 복사열유속이 항상 일정하게 유지된다. 즉 산란현상만을 거치는 복사매질에 있어서는 전도열전달과 대류열전달간에만 상호작용이 존재함을 알수있다. 식(10)에서 볼 수 있듯이  $\omega_0$ 가 1.0인 경우는 복사열전달에 따른 세번째 항이 사라진다. 즉  $\omega_0=1.0$ 일 경우, 복사매질은 순수한 산란현상에 의해 복사현상의 방향성만 바뀔 뿐, 열적 에너지로의 변화과정을 거치지 않기 때문이다. 또한 Table 1에서 보여지듯이,  $\omega_0$ 가 증가하면 증가할수록 복사 열유속 뿐만이 아니라 총 열유속도 감소하는 경향을 보여준다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 연료표면과 화염면사이에 흡수, 방사 그리고 산란현상을 거치는 복사매개체내 에서의 매개변수에 따른 열전달특성에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 고온경계에서 저온경계로의 총열유속은 전도 현상이 주된 경우에 있어서 현격히 증가함을 보여 준다.

(2) 광학두께가 작은 복사매개체는 광학두께가 긴 경우에 비해 빨리 가열된다. 더우기 광학두께가 긴 복사매개체는 총열유속에 있어서 봉쇄효과가 나타난다.

(3) 산란알비도가 감소하면 할수록, 온도분포는 위로 볼록하게 형성 되는 경향을 보여주나, 산란알비도에 따른 총열유속의 변화는 광학두께가 줄어들 음에 따라 무시되어질수 있을 정도로 작아진다.

#### 참 고 문 헌

(1) Viskanta.R and R.J. Grosh 1962, "Heat Transfer by simultaneous Conduction and Radiation in an Absorbing Medium", J. of Heat Transfer, Vol. 84, pp. 63~72.  
 (2) Viskanta. R 1965, "Heat Transfer by Conduction



- and Radiation in Absorbing and Scattering Materials", *J. of Heat Transfer*, Vol. 87, pp. 143~150.
- (3) Viskanta. R and Grosh, R.J., 1962, "Effect of Surface Emissivity on Heat Transfer by Simultaneous Conduction and Radiation", *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 5, pp. 729~734.
- (4) Greif. R and G.P. Clapper, 1966, "Radiant Heat Transfer between Concentric Cylinders", *Appl. Sci. Res., Sec. A*, Vol. 15, pp. 469~474.
- (5) Leung.A.T and Edwards, D.K, 1966. "Simultaneous Radiation, Conduction, and Convection in a Spectrally selective Emitting, and Scattering Porous Bed", *J. of Heat Transfer*, Vol. 88, pp. 231~238.
- (6) Lick. W. 1965, "Transient Energy Transfer by Radiation and Conduction", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 8, pp. 119~127.
- (7) Siegel, R. and Howell, J.R., 1981, "Thermal Radiation Heat Transfer", Chapter 14,15, McGraw-Hill Book Company, New York.
- (8) Cess, R-D, 1963, "The interaction of Thermal Radiation with Conduction and Convection Heat Transfer". *Advances in Heat Transfer*. Academic Press.
- (9) Sparrow, E. M and Cess, R.D, 1970, "Radiation Heat Transfer", Part 3, Brooks/Coke Publishing Company, Belmont, California.
- (10) Viskanta. R and R.L.Merriam, 1968, "Heat Transfer by Combined Conduction and Radiation between Concentric Separated by Radiating Medium, *J. of Heat Transfer*, Vol. 90, pp. 248~256.
- (11) Choi.S and Kruger, C.H, 1985, "Modeling Coal Particle Behavior under Simultaneous Devolatilization and Combustion", *Combustion and Flames*, Vol. 6, pp. 131~144.
- (12) Krier, H., T'ien, J.S., Sirignano, W.A. and Summerfield, M. 1968, "Nonsteady Burning Phenomena of Solid Propellants : Theory and Experiments", *AIAA Journal*, Vol. 6, No.2, pp. 278~285.
- (13) Kuo, K.K., Gore, J.P. and Summerfield, M., 1983, "Transient Burning of Solid Propellants", *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 90, pp. 599~659.