〈논 문〉

단일액적연소현상에서 비회색체복사에 관한 연구

최창은* · 박재현* · 백승욱**

(1997년 2월 1일 접수)

Investigation of a Droplet Combustion with Nongray Gas Radiation Effects

Chang Eun Choi, Jae Hyun Park and Seung Wook Baek

Key Words: Single Droplet Combustion (단일액적연소), Radiative Heat Transfer (복사열전달), 구분종좌법 (DOM), 회색체가중합모델 (WSGGM)

Abstract

Single liquid droplet combustion processes including heating, evaporation, droplet burning and flame radiation were theoretically investigated by adopting nongray gas radiation model for the radiative transfer equation (RTE). n-Heptane was chosen as a fuel and the numerical results were compared with the experimental data available in the literature. The discrete ordinate method (DOM) was employed to solve the radiative transfer equation and the weighted sum of gray gases model (WSGGM) was applied to account for nongray effect by CO_2 and H_2O. Therefore, detailed effects by nongray gas and its comparison with the gray gas model could be figured out in the results. It is found that the radiative heat flux is higher when the nongray model is used, thereby reducing the maximum gas temperature and the flame thickness, but the total burning time increases due to the deceased conductive heat flux in nongray model. Consequently, a better agreement with experimental data could be obtained by using nongray model.

기호설명

A_s, A_n : 제어 체적의 북면과 남면의 면적
C_p : 비열
D : 확산 계수
Le : Lewis 수$=\lambda/\rho C_p D$
MW : 분자량
Nu : Nusselt 수$=hL/\lambda$
$R(t)$: 액적의 반지름
r' : 무차원화된 좌표계$=r/R(t)$
R_U : 기체 상수
t : 시간
T_b : 끓는점
v : 속도
V : 제어 체적의 부피

그리스문자

β : 소멸계수(extinction coefficient)$=\sigma_a+\sigma_s$
μ : 방향 여현
σ : Stefan-Boltzmann 상수
σ_a : 흡수 계수
σ_s : 산란 계수
ω_s : 산란율(scattering albedo)$=\sigma_s/(\sigma_a+\sigma_s)$

*한국과학기술원 항공우주공학과 대학원
**회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

상첨자

m : m번째 각도구역

하첨자

0 : 초기 단계
g : 기체상
l : 액체상
s : 표면
∞ : 대기 조건
p, s, n : 제어 체적의 중앙점, 남쪽점, 북쪽점
$m-\frac{1}{2}$: m-1번째 각도구역에 인접한 셀 표면
$m+\frac{1}{2}$: m+1번째 각도구역에 인접한 셀 표면

1. 서 론

노(furnace), 디젤 엔진, 가스 터빈 연소기 등에 실제적으로 널리 응용되고 있는 분무 연소(Spray Combustion)는 연소 모델의 측면에서 아직도 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만, 분무 연소는 그 자체가 많은 복잡한 물리적인 현상들을 포함하고 있기 때문에, 해석의 관점에 따라 단순화된 모델을 해석하는 경우가 대부분이다. 이런 분무 연소의 이해를 위해서는 분무를 구성하고 있는 비정상 단일 액적연소(Single Droplet Combustion)에 대한 이해가 반드시 선행되어야 한다. 따라서 예로부터 단일액적연소에 대한 많은 이론적인, 그리고 실험적이 연구들이 진행되어 왔다.[1~5] 단일액적연소의 해석 과정에 많은 현상들이 포함되었지만, 아직까지 화염과 연소 생성물에 의한 복사 효과는 명백하게 토의되어 있지 않다. 특히 단일액적연소에서의 비회색체 복사 모델은 아직까지 보고된 바가 없다.

복사전달방정식(Radiative Transfer Equation, RTE)은 매질의 흡수, 방사, 산란하는 성질에 의존하는 복잡한 형태의 미적분 방정식으로 되어 있다. 이런 복사전달방정식을 풀기 위해 zone 방법,[6,7] Monte Carlo 방법,[6,7] PN 방법,[6,7] 구분종좌법(Discrete Ordinates Method, DOM),[6,7] 모멘트 방법[5,7] 등의 여러 이론적인 시도들이 있었다. 이중 구분종좌법은 원래 Carson과 Lathrop이 중성자 수송 이론에 적용하기 위해 발전시킨 것으로, 그의 많은 장점 때문에 많은 공학적인 문제에 응용이 있었다. 그 중 특히 한성헌 등[9]은 구분종좌법을 사용하여 구형 좌표계에서의 복사 현상을 관찰하였다.

복사전달방정식의 해법에 대한 연구와 동시에 매질의 비회색체 거동을 해석하기 위한 wide band model,[7,10] narrow band model,[7,11,12] 회색체가중합모델(Weighted Sum of Gray Gases Model, WSGGM),[13,14] WSGGM의 변형인 spectral group model[15] 등의 많은 이론적인 시도들이 있었다. 이 중 WSGGM은 공간적으로 독립적인 흡수계수와 가중치를 선택함으로써, 일반적인 복사전달방정식에 적용시킬 수 있음이 알려져 있다.[6]

이번 연구에서는 기존 연구와는 달리 단일액적연소에 대한 비회색체 복사의 영향을 기체장에서 준정상 상태 가정을 도입하지 않은 좀 더 정제된 모델을 사용하여 살펴보았다. 지배 방정식은 수치적으로 풀어졌으며, 기존의 실험치들과 비교되었다.

2. 지배방정식

2.1 연속방정식, 에너지보존방정식, 화학종종보존방정식

단일액적이 뜨거운 기체장에 투입되면, 액적은 가스의 대류열에 의해서 가열되어, 액적의 끓는 점에 도달하면, 증발이 시작된다. 액체가 증발함에 따라, 연료 기체가 반경 방향으로 확산하여, 산화제와 섞이게 되며, 어느 정도 가열되면, 점화가 일어난다. 점화가 일어난 후에는 액적 주위에 구형의 화염이 형성되고, 액적의 크기가 연속적으로 줄어든다. H_2O와 CO_2는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 모두 반응 지역에서 반경 방향으로 이동(migrate)하

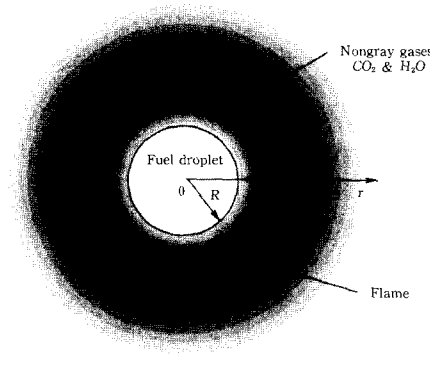

Fig. 1 Schematic model for fuel droplet with non-gray radiation effect

며, 이들 비회색체 기체들이 복사에너지를 흡수, 방사, 산란한다.

비회색체 기체의 영향을 설명하기 위해서, 1.계는 일차원이고, 구형 대칭이며, 비정상이다. 2.중력 효과는 무시한다. 3.압력은 기체장에서 일정하다. 등의 가정들이 사용되었다. 그리고, 기체장이 화학반응은 $F+\nu O \rightarrow (1+\nu)P$과 같은 단단계화학반응을 사용하였다. 이때 F, O, P는 각각 연료, 산소, 생성물을 가리킨다.

단일액적연소를 묘사하는 지배방정식들은 다음과 같이 쓸 수 있다.

액적내부, $0 \le r \le R$;

$$C_{pl}\rho_l \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda_l r^2 \frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{1}$$

기체장, $R \le r \le \infty$;

연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(r^2 \rho_g v) = 0 \tag{2}$$

화학종보존방정식 :

$$\rho_g \frac{\partial Y_i}{\partial r} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(D\rho_g r^2 \frac{\partial Y_i}{\partial r}\right) - \rho_g v \frac{\partial Y_i}{\partial r} - \nu_i (MW)_i \dot{\omega} \tag{3}$$

이때 i는 각 화학종들(연료, O_2, H_2O, CO_2)을 나타내며, ν는 각 화학종의 당량계수(stoichiometric coefficient)를 의미한다.

에너지보존방정식 :

$$\rho_g C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda_g r^2 \frac{\partial T}{\partial r}\right) - \rho_g C_p v \frac{\partial T}{\partial r} - \nabla \cdot q_r + (MW)_F Q \dot{\omega} \tag{4}$$

위 식에서 $\nabla \cdot q_r$는 복사열유속의 발산항을 나타내며, 이 값은 비회색체 기체에 대한 복사전달방정식을 풀어서 얻을 수 있다.

Westbrook과 Dryer[16]에 따르면 식 (3)의 화학반응률은 다음과 같은 Arrhenius 형태로 쓸 수 있다.

$$\dot{\omega} = A\left\{\frac{\rho_g Y_F}{(MW)_F}\right\}^{\alpha' f}\left\{\frac{\rho_g Y_O}{(MW)_O}\right\}^{\alpha' O} \exp\left(\frac{-E_a}{R_U T}\right) \tag{5}$$

본 식의 Arrhenius 상수 A, 활성화에너지, Ea는 Bergeron과 Hallett[1]가 실험적으로 구한 값들을 사용하였다.

기체장의 밀도는 다음과 같은 기체의 상태방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\rho_g = p_\infty \frac{(MW)}{R_U T} \tag{6}$$

그리고, 기체의 평균분자량은

$$(MW)_g = \left[\frac{Y_F}{(MW)_F} + \frac{Y_O}{(MW)_O} + \frac{Y_{N_2}}{(MW)_{N_2}} + \frac{Y_{CO_2}}{(MW)_{CO_2}} + \frac{Y_{H_2O}}{(MW)_{H_2O}}\right]^{-1} \tag{7}$$

이 되며, 전화학종들의 질량분율의 합은 1이 되어야 하므로,

$$Y_F + Y_O + Y_{N_2} + Y_{CO_2} + Y_{H_2O} = 1 \tag{8}$$

가 성립한다.

이번 연구에 사용된 액체 연료는 n-헵텐(n-C_7H_{16})이며, 그것의 물성치를 Table 1에 나타내었다.[17] 그리고, n-헵텐의 연소 반응은 다음과 같은 비가역반응으로 가정하였다.

$$C_7H_{16} + 11O_2 \rightarrow 7CO_2 + 8H_2O \tag{9}$$

Table 1 Properties of n-Heptane

Property of n-Heptane	Symbol	Value
Density	ρ_l	684kg/m^3
Specific heat	C_p	2.219 KJ/kgK
Conductivity	λ_l	0.140W/mK
Boiling point	T_b	371.4K
Latent heat of vaporization	L	316.5KJ/kg
Heat of combustion	Q	44600KJ/kg
Reaction order	α'_F, α'_O	$\alpha'_F=1.25$, $\alpha'_O=0.5$
Activation energy	E_a	60KJ/mol
Pre-exponential factor	A	0.82×10^4

2.2 초기 조건과 경계 조건들

초기 조건 :

$$t=0: \; T(r) = T_e \qquad 0 \le r \le R_o$$
$$T = T_o(r), \quad Y_i = Y_{i\infty}(r) \qquad r > R_o \tag{10}$$

경계 조건 :

$$r=0 : \frac{\partial T}{\partial r}=0,$$

$$r=\infty : \frac{\partial Y_i}{\partial r}=0 \text{ and } \frac{\partial T}{\partial r}=0 \tag{11}$$

액적 표면에서의 복합된 조건들 :

$$r=R(t) : T_{s-0}=T_{s+0}$$

$$\rho_g v_s=\frac{dr_s}{dt}(\rho-\rho_l),$$

$$\lambda_l\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{s-0}=\rho_l L\frac{dr_s}{dt}+q_c+q_r,$$

이때 q_c와 q_r는 각각 전도열유속과 복사열유속을 나타낸다.

$$\rho_g D_o\left(\frac{\partial Y_o}{\partial r}\right)_s=\rho_g v_s Y_o, \quad : \text{산소에 대한 식}$$

$$-\rho_g D_i\left(\frac{\partial Y_i}{\partial r}\right)_s=\rho_g v_s(1-Y_i), \quad : \text{다른 } i\text{번째 화학종에 대한 식} \tag{12}$$

기체장으로부터의 대류열유속, q_c는

$$q_c=h(T_{gas}-T_s) \tag{13}$$

로 주어지며, 복사열유속, q_r은 다음 절에 소개될 복사전달방정식을 풀어서 구할 수 있다.

2.3 복사전달방정식

복사 효과는 에너지보존방정식에서 복사열유속의 발산항으로 표현된다. 회색체 매질에 대해서, 이 값은

$$-\nabla\cdot q_r=a(\gamma)\left[2\pi\int_{-1}^{1}I(r,\ \mu)\,d\mu-4\pi I_b\right] \tag{14}$$

로 주어지면, $a(r)$은 흡수 계수, $I(r,\ \mu)$는 복사강도, μ는 복사의 방향여현, I_b는 흑체복사 강도를 의미한다. 복사 강도에 대한 복사전달방정식(Radiation Transfer Equation, RTE)은 회색체 매질의 구형좌표계에서 다음과 같다.

$$\frac{\mu}{r^2}\frac{\partial[r^2 I(r,\ \mu)]}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial[(1-\mu^2)I(r,\ \mu)]}{\partial\mu}+\beta I(r,\ \mu)$$

$$=\sigma_a I_b(r)+\frac{\sigma_s}{2}\int_{-1}^{1}I(r,\ \mu,\ \mu')\,d\mu' \tag{15}$$

구분종좌법은 전체 입체각 4π를 유한 개의 종좌들로 나타내는 것으로, 복사전달방정식은 각각의 종좌방향을 따라 차분되어 풀어진다. 직접차분법을 이용한 결과적인 차분식은 다음과 같다.

$$\omega_m\frac{\mu_m}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}[r^2 I_m(\bar{r})]+\frac{1}{r}\left[\frac{\partial[(1-\mu^2)I(r,\ \mu)]}{\partial\mu}\right]_m+\beta\omega_m I_m(r)$$

$$=\beta\omega_m\left[(1-\omega_o)I_b(r)+\frac{\omega_o}{2}\int_{-1}^{1}I(r,\ \mu')\,d\mu'\right] \tag{16}$$

이때 ω_m은 m번째 종좌방향의 가중치를 나타내며, 이 값들은 단위구면 전체에 대하여 합이 1이어야 한다는 조건을 만족한다.

$$\sum_{m=1}^{M}\omega_m=4\pi \tag{17}$$

식 (16)의 두번째 항은 각 종좌방향, m에 따른 복사 강도의 방향도함수를 적분함으로써 얻을 수 있으며, 이 항은 원하는 각도 구간에 복사 강도가 흘러 들어가고, 나가는 것을 표현하고 있다.

$$\left[\frac{\partial[(1-\mu^2)I(r,\ \mu)]}{\partial\mu}\right]^m=\alpha_{m+\frac{1}{2}}I_{m+\frac{1}{2}}-\alpha_{m-\frac{1}{2}}I_{m-\frac{1}{2}} \tag{18}$$

여기서 $I_{m-\frac{1}{2}}$은 $(m-1)$번째 각도구역과 인접한 면에서의 복사 강도를 의미한다.

각 검사 체적에 대하여 식 (16)을 적분하면,

$$\mu_m[A_m I_{n,m}-A_s I_{s,m}]+(A_n-A_s)\left[\frac{\alpha_{m+\frac{1}{2}}I_{m+\frac{1}{2}}-\alpha_{m-\frac{1}{2}}I_{m-\frac{1}{2}}}{2\omega_m}\right]+\beta I_{p,m}V$$

$$=\beta\left[(1-\omega_o)i_b(r)+\frac{\omega_o}{2}\int_{-1}^{1}I(r,\ \mu')\,d\mu'\right]V \tag{19}$$

n=2, 3, 4, …에 대하여 총 n(n+2)개의 각 노드에서 유사한 방정식들을 푼다. 이런 종류의 해는 종종 S2, S4, S6 등으로 불려지며, 이때 하첨자는 근사하는 정도를 나타낸다. 하지만, 지나치게 큰 n값으로 근사하는 것은 계산에 소모되는 시간에 비하여, 정확도가 그다지 향상되지 않으므로, 본 연구에서는 S4 근사를 사용하였다. 종좌방향과 가중치 값들은 한상헌 등[9]에 의해 주어진 값들을 사용하였다. 식 (19)에 나타난 α항들은 곡선좌표계(curved coordinate)에서 복사 강도의 보존성을 유지하기 위해 나타나는 항들로써 다음과 같은 점화식에 의해서 구해진다.

Table 2 Coefficients for Emissivity (Mixture=CO2 and H2O) - Smith 등[12]
P_T=1atm, $0.001 \leq PS \leq 10.0$atm · m, $600K \leq T \leq 2400$K

	Mixture, $p_w/p_c=1$			Mixture, $p_w/p_c=2$		
k	1	2	3	1	2	3
a_k	0.4303	7.055	178.1	0.4201	6.516	131.9
$b_{\varepsilon,k,1}\times 10$	5.150	0.7749	1.907	6.508	-0.2504	2.718
$b_{\varepsilon,k,2}\times 10^4$	-2.303	3.399	-1.824	-5.551	6.112	-3.118
$b_{\varepsilon,k,3}\times 10^7$	0.9779	-2.297	0.5608	3.029	-3.882	1.221
$b_{\varepsilon,k,4}\times 10^{11}$	-1.494	3.770	-0.5122	-5.353	6.528	-1.621

$$\alpha_{m+\frac{1}{2}}-\alpha_{m-\frac{1}{2}}=-2\mu_m\omega_m \tag{20}$$

$\mu=-1$을 $m=1$ 방향으로 잡으면, 식 (18)의 좌변항으로부터 첫번째 각도구역에서 방향도함수는 0이 된다. 때문에 첫번째 각도구역에서는 이웃한 두 각도구역들과 상호작용은 전혀없다고 가정할 수 있다. $\alpha_{\frac{3}{2}}$, $\alpha_{\frac{5}{2}}$, 그리고 ω_1은 모두 1이 된다. 그리고, 검사 체적의 각 면에서의 복사 강도는 다음과 같은 보조관계식에 의해 셀 중앙에서의 복사 강도와 관계되어 있다.

$$\mu_m>0 : I_p^m=fI_n^m+(1-f)I_s^m=fI_{m+\frac{1}{2}} + (1-f)I_{m-\frac{1}{2}} \tag{21}$$

$$\mu_m<0 : I_p^m=fI_n^m+(1-f)I_s^m=fI_{m+\frac{1}{2}} + (1-f)I_{m-\frac{1}{2}} \tag{22}$$

여기서 f는 0.5보다 크고 1 보다 작은 실수이다. 식 (21), (22)를 식 (19)에 대입하면 최종적으로 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$I_p^m=\frac{4/\mu_m\left[fA_s+(1-f)A_n\right]+2(A_n-A_s)\left[f\alpha_{m-\frac{1}{2}}+(1-f)\alpha_{m+\frac{1}{2}}\right]I_{m-\frac{1}{2}}/\omega_m+4f\beta sV}{2\left[\mu_n\left[(A_s+A_n)+(A_n-A_s)(\alpha_{m+\frac{1}{2}}+\alpha_{m-\frac{1}{2}})/\omega_m+4f\beta V\right.\right.}$$

$$s=(1-\omega o)I_b+\frac{\omega_o}{4\pi}\sum_{i=1}^{M}\omega_m I_p^m \tag{23}$$

2.4 회색체가중합모델

회색체가중합모델(Weighted Sum of Grey Gases Model, WSGGM)은 CO_2나 H_2O 같은 비회색체 기체의 영향을 고려한다. WSGGM은 가스의 방사계수를 가중된 회색 기체의 합으로 나타내어 구하는 방법으로 아래의 식 (24)와 같다.

$$\varepsilon=\sum_{k=0}^{K}\omega_{\varepsilon,k}(T)\left[1-e^{-a_kPS}\right] \tag{24}$$

여기서 가중치, $\omega_{\varepsilon,k}$는 흡수 계수가 a_k이고, 압력-경로길이 곱이 PS인 k번째의 회색체 기체에 대한 방사 계수의 온도에 의존하는 가중치를 의미한다.

가중치의 온도에 대한 의존성은 다음과 같이 온도에 대한 $j-1$차의 다항식으로 나타내면 편리하다.

$$\omega_{\varepsilon,k}=\sum_{j=1}^{J}b_{\varepsilon,k,j}T^{j-1} \tag{25}$$

여기서 $b_{\varepsilon,kj}$를 방사기체온도 다항식계수(emissivity gas temperature polynomial coefficient)라고 부른다. 흡수 계수와 방사기체온도 다항식계수는 표준값(reference data)과 계산을 통하여 구한 값의 오차를 최소화하는 과정을 통하여 얻어지며, 온도와 연소 가스의 몰분율(mole fraction)의 함수이다. 보통 Smith 등[13]에 의해 구해진 값들이 널리 쓰이는데, Table 2에 나타내었다.

Modest[18]는 임의의 근사해법에 WSGGM이 훌륭하게 적용될 수 있음을 수학적으로 증명하였고, 그 결과식들은 다음과 같다.

$$I=\sum_k I_k \tag{26}$$

식 (26)은 비회색체 거동을 각각의 가중된 회색체에서 구한 복사 강도의 합으로 표현함을 의미한다. 따라서, 일반화된 식 (14)~(16)은 각각의 가중된 회색체에서 구한 I_k가 되며 가중된 회색체의 개수만큼 풀어 합을 취하면 된다. 마찬가지로 복사열유속의 발산항은 다음과 같다.

$$-\nabla\cdot q_r=-\sum_k\nabla\cdot q_{r,k}=\sum_k a_k\left[2\pi\int_{-1}^{1}I_k(r,\ \mu)\,d\mu-4\pi(\omega_kI_b)\right] \tag{27}$$

3. 결과 및 고찰

비회색체 기체 모델에 대한 복사물성치는 WSGGM을 사용하여 구하였고, 회색체 모델의 흡수 계수는 Saitoh 등[20]에 의해 사용된 0.35를 사용하였다. 그리고, Kobayasi[21]의 실험과 비교하기 위하여 특별한 언급이 없는 한 액적의 직경은 1.4 mm, 초기 액적의 온도는 298K, 초기 주위 고온 공기의 온도는 1053K, 액적의 방사 계수는 0.8, 그리고, 무한히 떨어진 곳의 경계에 대해서는 방사 계수를 1.0으로 주었다. 본 연구에서 미연탄소(soot)의 효과는 무시하였다.[19,20]

액적직경의 제곱의 시간에 따른 변화 과정이 Fig. 2에 나타나 있다. 비회색체인 경우와 회색체인 경우의 수치 해석 결과가 Kobayasi[21]의 실험 결과와 비교되었다. 수치 해석 결과들은 모두 초기 액적 가열 단계 이후의 d^2의 값이 과소 평가되는 경향을 보여준다. 하지만, 그 중 비회색체 모델을 사용한 경우가 좀 더 실험치에 근접해 있다. 이것은 Fig. 3에서 보여지는 것과 같이 액적표면으로의 총열유속의 값이 비회색체인 경우에 더 작기 때문이다.

Fig. 3은 화염이 생성된 이후, 초기 기체장의 온도에 따른 액적 표면에서의 복사열유속과, 전도열유속을 함께 보여주고 있다. 비회색체인 경우에 액적 표면으로의 복사열유속은 더 크지만, 전도 열유속이 더 작기 때문에 총열유속이 더 작다. 이는 생성물에 의한 열차단 효과(heat blockage effect)로 인하여 액적 표면으로의 총열유속이 더 작기 때문이다. 따라서, 복사를 고려하지 않은 경우의 액적 직경의 감소가 연소 중 복사의 효과를 고려한 경우보다 더 빠르게 나타난다. 하지만, 화염이 생성되기 전 초기 증발상태에서는 상대적으로 복사를 고려한 경우가 복사를 고려하지 않은 경우보다 액적 표면으로의 열유속이 더 크기 때문에 증발이 더 빨리 일어남을 Fig. 2를 통해 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 초기 기체장 온도 1053 K인 경우에 시간에 따른 기체장의 온도 변화와 복사열유속의 시간에 따른 변화를 나타낸 것으로 초기 고온 기체장으로부터 액적으로의 순복사열유속도 함께 보여주고 있다. 일단, 연료 기체와 공기가 혼합되어 점화하기 시작하면, 기체장의 온도가 화염대(flame zone)에서 1053 K를 넘는다. 따라서, 복사열유속은 화염대로부터 액적으로 향하는 것과 대기로 향하는 두 가지 양을 가지게 된다. 이때 액적으로 향하는 복사는 액적의 증발에 긍정적인 기여를 하지만, 액적과 반대쪽으로 향하는 복사는 외부에 에너지를 잃어버리는 순수한 열손실이 된다.

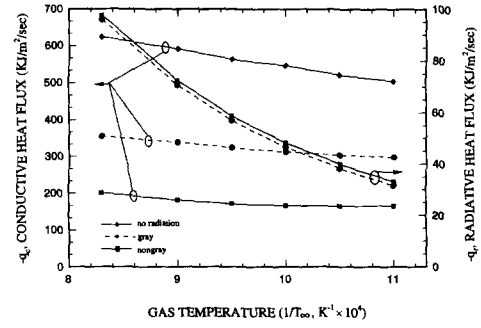

Fig. 3 Comparison of the nongray with gray radiation for the radiative heat flux at the droplet surface

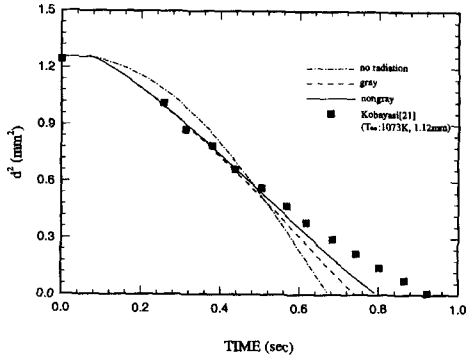

Fig. 2 Comparison of the theoretical results with measured d^2-law

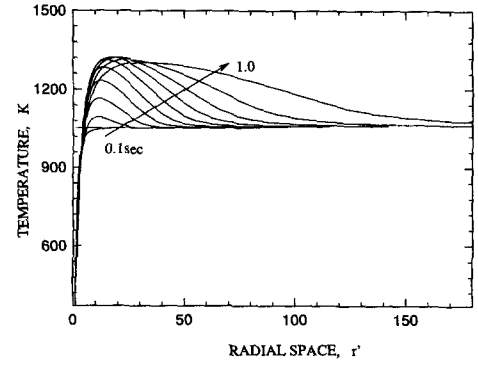

Fig. 4 Transient variation of flame structure (Δt= 0.1sec)

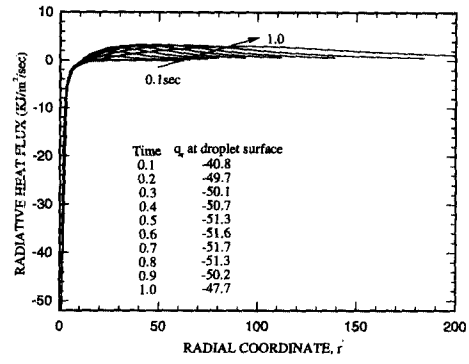

Fig. 5 Transient variation of the radiative heat flux (t=0.1sec)

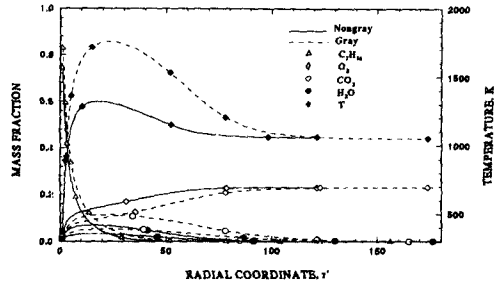

Fig. 6 Comparison of the nongray with gray radiation for temperature each species during combustion

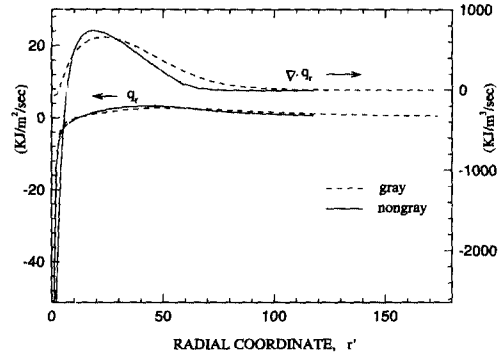

Fig. 7 Comparison of the nongray with gray radiation at gas fields

Fig. 6은 비회색체와 회색체 모델에 대하여, 기체장에서 연소 과정 중 화학종들의 분포를 대표적으로 보여주고 있다. 앞에서 지적한 바와 같이 비회색체 모델을 사용한 경우 외부로 잃어버리는 열의 양이 증가하기 때문에 화염의 온도가 낮아진다. 따라서, CO_2나 H_2O 같은 생성물이 덜 생기게 된다.

복사열전달의 관점에서 회색체 모델과 비회색체 모델의 근본적인 차이점을 알아보기 위해, 복사열유속과 복사열유속의 발산항을 Fig. 7에서 비교하였다. 복사열유속의 경우 두 모델 사이에 큰 차이는 없지만, 복사열유속의 확산항에는 차이가 있는 것을 보인다. 이것으로부터 비회색체 모델인 경우에 화염대가 좀더 얇아지는 것을 알 수 있다.

참고로, 586 PC를 사용한 본 연구에서의 전형적인 계산시간은 비회색체의 경우 약 40분, 회색체인 경우 약 30분 정도 소요되었다.

4. 결 론

가열, 증발, 연소, 액적직경 감소, 화염 복사가 포함된 단일액적의 연소 현상을 복사해법으로는 DOM과 WSGGM을 사용하여 해석하였다. n-헵텐에 대한 수치 모사가 수행되었으며, 기존의 실험치와 비교하였다. 본 연구에서 검토된 비회색체 모델을 사용한 경우와 회색체 모델을 사용한 경우의 차이점들은 다음과 같다.

(1) 비회색체 모델에서는 기체장으로부터 액적으로의 복사열유속이 크게 예측되므로, 화염이 얇아지며, 연소 과정 중의 생성물이 회색체 모델의 경우보다 감소한다.

(2) 연소 과정 중 생성되는 연소 생성물은 비록 양은 작지만, 화염대 근처에 존재하여, 현저한 비회색체 효과를 야기한다.

(3) 비회색체 모델에서는 액적이 완전히 증발되어 소멸되는 시간이 회색체 모델의 경우보다 더 큰데, 이는 비록 복사열유속의 양은 크지만, 낮은 기체장의 온도로 인해 전도열유속의 양이 감소하기 때문이다.

후 기

이 논문은 1995년도 학술진흥재단 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Bergeron, C. A. and Hallett, W. L., 1989, "Ignition Characteristics of Liquid Hydrocarbon Fuels as Single Droplets," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 67, pp. 142~149.

(2) Law, C. K., 1982, "Recent Advances in Droplet Vaporization and Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 8, pp. 169~199.

(3) Lage, P. L. C. and Rangel, R. H., 1993, "Total Thermal Radiation Absorption by a Single Spherical Droplet," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 7, No. 1, pp. 101~109.

(4) Law, C. K., 1976, "Unsteady Droplet Combustion with Droplet Heating," *Combustion and Flame,* Vol. 26, pp. 17~22.

(5) Saitoh, T. and Nagano, O., 1980, "Transient Combustion of a Fuel Droplet with Finite Rate of Chemical Reaction," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 22, pp. 227~234.

(6) Modest, M. F., 1993, *Radiative Heat Transfer, McGraw-Hill. Inc.*, New York.

(7) Siegel, R. and Howell, J. R., 1993, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 3rd Ed, McGraw-Hill, Inc., New York.

(8) Carlson, B. G. and Lathrop, K. D., 1968, "Transport Theory - The Method of Discrete Ordinates," *Computing Methods in Reactor Physics*, H. Greenspan, Kelber, C. N. and Okrent, D. eds., Gordon and Breach, New York, pp. 162~266.

(9) 한상헌, 백승욱, 안국영, 1993, "구형 복사 매질에서의 비정상 열전달 특성에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제 17권, 제 10호, pp. 2582~2589.

(10) Edward, D. K., 1976, "Molecular Gas Band Radiation," Adv. Heat Transfer, Vol. 12, pp. 115~193.

(11) Ludwig, C. B., Malkmus, W., Reardon, J. E. and Thompson, J. A., 1973, *Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gases*, NASA SP-3080, Scientific and Technical Information Office, Washington, D. C..

(12) Grosshandler, W. L., 1980, "Radiative Heat Transfer in Nonhomogeneous Gases : A Simplified Approach," *Int J. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 1447~1459.

(13) Smith, T. F., Shen, Z. F. and Friedman, J. N., 1982, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 602~608.

(14) Taylor, P. B. and Foster, P. J., 1974, "The Total Emissivities of Luminous and Non-luminous Flames," *Int J. Heat Mass Transfer*, Vol. 17, pp. 1591~1605.

(15) Song, T.H., 1993, "Comparison of Engineer ing Models of Nongrey Behavior of Combustion Products," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 16, pp. 3975~3982.

(16) Westbrook, C. K. and Dryer, F. L., 1981, "Simplified Reaction Mechanism for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 27, pp. 31~43.

(17) Raznjevic, K., 1976, *Handbook of Thermodynamic Tables and Charts*, Hemisphere publishing corporation, Washington.

(18) Modest, M. F., 1991, "The Weighted Sum of Gray Gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 650~656.

(19) Chiu, H. H. and Chang, S. S., 1993, "Radiation Effects on Droplet Vaporization and Combustion," *AIAA* 93-2194, June 28-30.

(20) Saitoh, T., Yamazaki, K. and Viskanta, R., 1993, "Effect of Thermal Radiation on Transient Combustion of a Fuel Droplet," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 7, No. 1, pp. 94~100.

(21) Kobayasi, K., 1995, "An Experimental Study on the Combustion of a Fuel Droplet," *Proceedings of the Fifth International Symposium on Combustion*, pp. 717~725, The Combustion Institute, Pittsburgh.