

원형공간내 열분해 연료의 공간배치가 연소현상에 미치는 영향

한 조 영* · 김 정 수*

Influence of Pyrolyzing Fuel Disposition on Combustion Phenomena in a Cylindrical Enclosure

Cho Young Han and Jeong Soo Kim

Key Words : Ignition(점화), Flame Propagation(화염전파), Thermal Radiation(열복사), Vertical Eccentricity(수직편심율), Overheat Ratio(과열비)

Abstract

Investigation on ignition and flame propagation of pyrolyzing fuel in a cylindrical enclosure is accomplished. The pyrolyzing fuel of cylindrical shape is located in an outer cylinder sustained at high-temperature. Due to gravity, the buoyancy motion is inevitably incurred in the enclosure and this affects the flame initiation and propagation behavior. The radiative heat transfer plays an important role since a high temperature difference is involved in the problem. Numerical studies have been performed over overheat ratio, and vertical fuel eccentricity. The location of flame onset is affected by the vertical eccentricity of inner pyrolyzing fuel as well as thermal conditions applied.

	기호설명
a_g	Planck 평균흡수계수
b	열분해과정의 선지수함수인자
B	기상 연소반응의 빈도인자
E	활성화 에너지
e_v	수직편심율
I	복사강도 [$W/(m^2 \cdot Sr)$]
L_v	잠열
\dot{m}	연료질량연소율
N_o	이론 산화제/연료 질량비
Q_H	연료단위질량당 연소열
Y_i	화학종 i 의 질량분율

	그리스 문자
δ	과열비
ε	방사율
κ_a	흡수계수 [$1/m$]
σ	Stefan-Boltzmann 상수 [$5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$]
$\dot{\omega}$	반응율 [$kg/(m^3 \cdot s)$]

	상첨자
*	무차원량
'	임사방향

	하첨자
F	연료
g	기상
O	산화제
s	고상
w	벽면

1. 서론

연소란 연료의 산화반응에 의해 다량의 발열을 수반하는 발열화학반응으로 정의할 수 있다. 일반 중력하에서 연소반응이 일어나는 경우 고도의 발열로 인한 밀도차가 존재하게 되며, 이에 따라 피할 수 없는 부력에 의한 자연대류 현상이 발생하게 된다. 최근 십수년간의 연구성과(Grayson et al.⁽¹⁾, Ferkul and T'ien⁽²⁾, Han and Baek⁽³⁾)를 보더라도 자연대류를 무시할 수 있는 고속유동과는 달리 부력에 의한 저속유동이 나타나는 경우의 화염거동은 고

* 정회원, 한국항공우주연구소 위성사업부
위성본체연구그룹 추진계

속유동에 의한 화염거동과는 질적으로 다르다. 또한 보다 근본적인 학문적 관점에서 보더라도, 자연대류에 의한 화염의 거동은 우주선이나 항공기의 선실 및 대형빌딩 내부와 같은 밀폐공간에서의 화재방재(fire safety)를 위해서도 매우 중요하다. 이 경우 내부를 구성하고 있는 열분해 연료(pyrolyzing fuel)의 점화 및 화염전파에 따른 화염 거동이 주 관심사가 됨은 자명하다.

고체연료를 사용하는 다양한 공학적 연소장치의 대표적인 경우로 회전로(rotary kiln)를 거론할 수 있다. 열분해 연료로 모사할 수 있는 회전로의 연료는 매우 느리게 회전하는 원통형 연소로 내부에서 안정적으로 연소되도록 연소로 내의 하단에 자리잡게 되며, 이 때 연소로 내벽으로부터 고온에 의한 복사열전달을 받게 된다. 이 경우 연소로 내벽은 고온의 복사 전열면으로 생각할 수 있으며 내부 열분해 연료는 연소로의 어느 위치에 편심되어 있는 것으로 가정할 수 있다.

본 연구에서는 고온의 외부 원관 내부에 존재하는 원통형 열분해 연료의 위치변화에 따른 점화 및 화염전파 현상을 2차원 비정상 해석모델을 사용하여 수치해석한다. 이를 위해 비직교 좌표계를 도입하고 고체연료의 열분해와 자연대류 하에서의 점화 및 화염전파 과정 중 복사효과를 고려하며 추후 도입할 여러 매개변수들의 영향 및 물리적 특성을 고찰함으로써 열분해 연료의 점화 및 화염전파 현상에 대한 새로운 해석모델을 제시하고자 한다.

2. 이론 모델의 해석

본 연구에 사용할 모델은 Fig. 1과 같은 원형공간으로서 내부에 위치되어 있는 원통형 연료는 가열되면 가연성 기체를 열분해하여 발산할 수 있는 고체로 형성되어 있다. 고체의 표면은 고온의 외부 원관에 의해 가열된다. 원형공간 내부의 정적 기체장은 산화제인 공기로, 가연성의 기체를 발산할 수 있는 내부 열분해 연료는 PMMA(polymethyl methacrylate)로 가정한다.

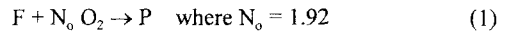
2.1 가정

고려할 기하학적 형상이 Fig. 1에 도시되어 있다. 지름이 D_o 이고 T_H 의 고열로 균일하게 유지되는 외부 원관내에 지름이 D_i 이고 초기온도 상온의 원통형 열분해 연료가 수직편심율(vertical eccentricity)이 e_v 인 위치에 존재한다. 해석의 간편성을 위해 수직편심율만을 고려했으며, 따라서 계산은 실제 물리적 영역의 반쪽 영역만을 취해 수

행했다.

해석 모델의 용이성을 위해 다음의 가정들을 도입한다.

- 2차원, 비정상, 층류 유동을 가정한다.
- 원통형 연료의 단면은 원형을 유지한다.
- 기체혼합물의 이동변수(transport property)들은 온도에 관한 함수로서 공기의 물성치를 차용한다.
- 기체 혼합물의 Lewis 수는 1로 가정한다.
- 고체연료의 열분해는 표면에서만 일어나고 Arrhenius의 0차 반응식을 따른다.
- 기체장의 화학반응은 다음 형태의 단단계 비가역 반응과 Arrhenius의 2차 유한율 반응식으로 나타낸다:



- 기체 혼합물의 복사 흡수계수는 열분해 기체의 질량분율 Y_F 에 비례한다(Han and Baek⁽⁹⁾):

$$\kappa_a = a_g P Y_F \quad (2)$$

2.2 무차원 지배방정식

모든 물리적 변수들의 무차원화는 적절한 무차원 변수 및 무차원수를 도입하여 수행된다. 무차원화된 지배방정식들 중 대표적인 것들은 다음과 같다.

y-momentum

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) = \\ -\frac{\partial p_m}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \\ - \frac{1}{\text{Fr}^2}(\rho - 1) + S_v \end{aligned} \quad (3)$$

where

$$S_v = \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right]$$

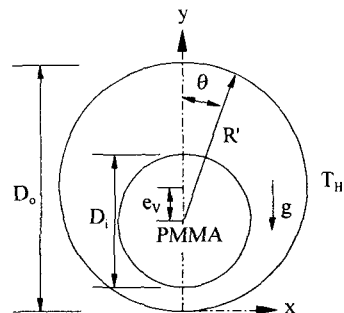


Fig. 1 Schematic of 2-D model.

energy

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v T) = \\ & \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] \\ & + \frac{1}{C_p} \frac{u_o^2}{C_{p_o} T_o} \left[\frac{\partial p_m}{\partial t} + u \frac{\partial p_m}{\partial x} + v \left(\frac{\partial p_m}{\partial y} - \frac{1}{\delta} \right) \right] \\ & + \frac{1}{C_p} \frac{1}{\text{Re}} \frac{1}{C_{p_o} T_o} \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \\ & - \frac{1}{C_p} Q_H \dot{\omega}_F - \frac{1}{C_p} \frac{\tau_o}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \text{Pl}} (1 - \omega_o) \kappa_a \left(T^4 - \frac{1}{4} G \right) \end{aligned} \quad (4)$$

fuel species equation

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_F) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_F) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Y_F) = \\ & \frac{\text{Le}}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D \frac{\partial Y_F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D \frac{\partial Y_F}{\partial y} \right) \right] + \dot{\omega}_F \end{aligned} \quad (5)$$

oxidizer species equation

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_o) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_o) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Y_o) = \\ & \frac{\text{Le}}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D \frac{\partial Y_o}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D \frac{\partial Y_o}{\partial y} \right) \right] + N_o \dot{\omega}_F \end{aligned} \quad (6)$$

radiative transfer equation

$$\frac{dI}{ds} = \kappa_{a_o} L \kappa_a I_b - \bar{\beta}_o L \beta_o I + \sigma_{s_o} L \frac{\sigma_s}{4\pi} \int I \Phi d\Omega \quad (7)$$

2.3 무차원 초기조건 및 경계조건

초기 유동장은 정적인 상태에 있으며 시간 경과 후의 경계조건은 다음과 같다.

at $t > 0$ then

- $R' = \frac{1}{D_o/D_i - 1}$ (interface condition)

$$v_t = 0, \quad v_n = \frac{\dot{m}}{\rho_g}, \quad T_s = T_g \quad (8)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_g + \frac{\epsilon_s}{4\text{Pl}} (T_{s,w}^4 - H) + \dot{m} L_s \quad (9)$$

$$-\frac{\text{Le}}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \rho D \frac{\partial Y_F}{\partial n} \Big|_g + \dot{m} Y_F = \dot{m} \quad (10)$$

$$-\frac{\text{Le}}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \rho D \frac{\partial Y_o}{\partial n} \Big|_g + \dot{m} Y_o = 0 \quad (11)$$

- on the outer cylinder

$$u = v = \frac{\partial Y_F}{\partial n} = \frac{\partial Y_o}{\partial n} = 0, \quad T = \delta + 1 \quad (12)$$

- radiation boundary condition

$$I(\bar{r}_w, \hat{s}) = \frac{\epsilon_w T_w^4}{\pi} + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} H(\bar{r}_w) \quad (13)$$

where $H(\bar{r}_w) = \int_{\hat{s}' \cdot \hat{n}_w < 0} I(\bar{r}_w, \hat{s}') |\hat{s}' \cdot \hat{n}_w| d\Omega'$

$$I(\bar{r}_{sym}, \hat{s}) = I(\bar{r}_{sym}, \hat{s}') \quad \text{for} \quad |\hat{s} \cdot \hat{n}_{sym}| = |\hat{s}' \cdot \hat{n}_{sym}| \quad (14)$$

2.4 수치해석

본 연구에서 도입한 기하학적 형상인 두 등온 원관 사이의 환상유로에서, 내부 등온원관의 위치 변화에 따른 복사효과 및 유동현상에 대해 Han and Baik⁽⁴⁾이 연구를 수행했다. 그들은 Kuehn and Goldstein⁽⁵⁾의 실험 및 Dua and Cheng⁽⁶⁾의 기준해 (benchmark solution)와 비교해 유동장과 복사장 해석기법의 타당성을 입증하고, 복사효과 및 내부 등온원관의 위치변화에 따른 매개변수들을 도입하여 부력에 의한 유동과 복사열전달간의 상호작용을 해석했다. 본 연구에서는 이상에서 검증된 수치기법을 사용하여 열분해 연료의 점화 및 화염전파 현상에 대한 해석결과를 제시하기로 한다. 보다 상세한 수치해석기법의 유도 및 설명은 한⁽⁷⁾의 학위논문을 참고하기 바란다.

전체 계산영역은 여러 단계의 검증을 거쳐 기상(gas-phase)에는 공간적으로 $(N_x \times N_y) = (41 \times 63)$ 개의 비균일 격자계를 채택했고, 전체 입체각 4π 는 $(N_\theta \times N_\phi) = (2 \times 24)$ 개의 균일 격자계를 채택했다. 고상(solid-phase)에는 공간적으로 $(N_x \times N_y) = (21 \times 63)$ 개의 비균일 격자계를 채택해 종속변수의 구배가 급격한 기상-고상 경계면(gas-solid interface)과 특이점인 열분해 연료 중심에 격자계를 밀집시켰다. 한편 유동장 및 복사전달방정식의 수렴조건은 다음의 L_2 -norm 을 사용해 결정했다.

$$\| \text{velocity} \|_2 < 10^{-5}, \quad \| T \|_2 < 5 \times 10^{-5} \quad (15)$$

$$\| Y_F \|_2 = \| Y_o \|_2 < 10^{-5}, \quad \text{Max} \left| \frac{I_p^m - I_p^{m,old}}{I_p^m} \right| < 10^{-6} \quad (16)$$

Table 1 Simulation conditions and visible flame existence.

CA SE	Gr	δ	e_v/L	$\dot{\omega}_{F, \text{visible}}^*$	t_{ig}^*	visible flame
1	10 ⁶	2	0	0.0029	659.4	Y
2			0.6		657.9	
3			-0.6		648.3	
4		3	0	0.0022	86.5	
5			0.6		84.4	
6			-0.6		85.6	

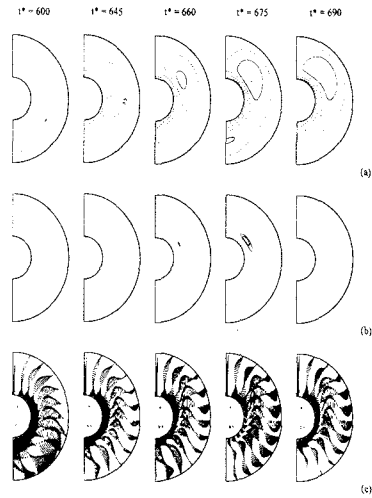


Fig. 2 Weak visible flame for case 1: (a) temperature ($\Delta T^* = 0.5$), solid line is $T^* = 4$; (b) fuel reaction rate over $\dot{\omega}_{F, \text{visible}}^* = 0.0029$ ($\Delta \dot{\omega}_F^* = 0.5 \times 10^{-3}$); (c) velocity vector.

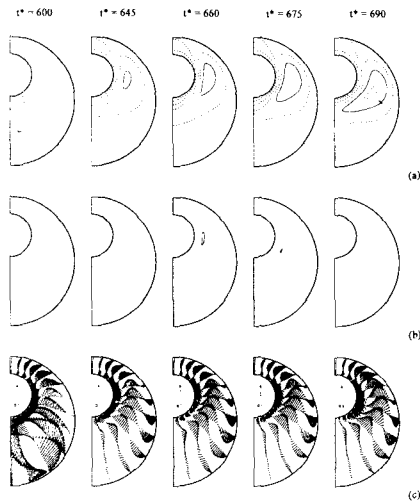


Fig. 3 Weak visible flame for case 2: (a) temperature ($\Delta T^* = 0.5$), solid line is $T^* = 4$; (b) fuel reaction rate over $\dot{\omega}_{F, \text{visible}}^* = 0.0029$ ($\Delta \dot{\omega}_F^* = 0.5 \times 10^{-3}$); (c) velocity vector.

3. 결과 및 검토

본 연구에 사용된 모든 물성치는 Yang and T'ien⁽⁸⁾의 값을 차용했다. 다만 전형적인 플라스틱 기체(MMA vapor)의 Planck 평균흡수계수는 800 K 이하의 기체온도에서 $100 \text{ atm}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 정도⁽⁹⁾이므로

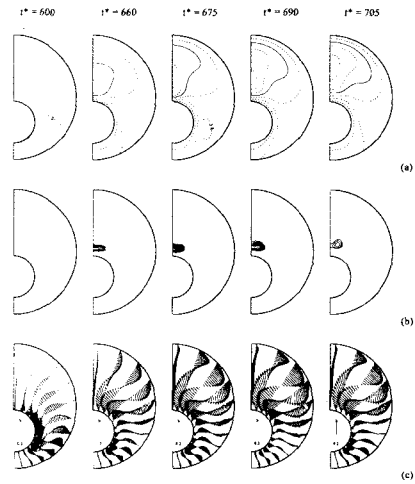


Fig. 4 Weak visible flame for case 3: (a) temperature ($\Delta T^* = 0.5$), solid line is $T^* = 4$; (b) fuel reaction rate over $\dot{\omega}_{F, \text{visible}}^* = 0.0029$ ($\Delta \dot{\omega}_F^* = 0.5 \times 10^{-3}$); (c) velocity vector.

기체장의 흡수계수를 고려시 그 값을 기본값(a_{go})으로 설정했다. 그러나, 본 연구에서는 해석의 용이성을 위해 내부 기체장이 투명매질($a_g^* = 0$)인 경우의 결과만을 제시하였다. 가시화염 생성의 판단 기준은 Yang and T'ien⁽⁸⁾이 Grayson et al.⁽¹⁾의 실험과 비교해 PMMA 연소시 가시청염(visible blue flame)의 영역 하한으로 채택한 $\dot{\omega}_F = 0.1 \text{ kg}/(\text{m}^3 \text{ s})$ 의 연료반응을 값을 이용했다. 따라서 본 연구에서 제시된 연료반응을 선도는 실제 실험에서도 가시청염으로 보이는 형상을 의미한다.

본 연구에서 수행한 계산조건은 Table 1에 정리되어 있다. 주요 계산인자로 과열비($\delta = T_H / T_o - 1$, overheat ratio)를 도입하고, 열분해 연료의 위치변화에 따른 점화 및 화염전파 영향을 고찰하기 위해 연료의 수직편심율이 0인 동심의 경우와 정(正, $e_v / L = 0.6$) 및 부(負, $e_v / L = -0.6$) 등 3가지 기하학적 배치를 고려했다. 이 경우 과열비 δ 를 제외한 그의 다른 변수들은 $Gr = 10^6$, $a_g^* = 0$, $D_o / D_i = 3$ 으로 일정하다.

먼저 과열비 2인 경우 열분해 연료의 위치변화에 따른 점화 및 화염전파 영향을 고찰했다. case 1, 2, 3의 기체장의 최대 연료반응율 및 온도의 시간이력(time history)을 고찰해보면 가시청염의 하한값 $\dot{\omega}_{F, \text{visible}}^* = 0.0029$ 을 상회하는 화염(weak visible flame)이 모두 발생하고 있지만, 그 최대 연료반응율의 절대크기를 비교하면 연료가 동심 또는 정의 편심율을 가질 경우 별 차이가 없으나 부의 편심율을

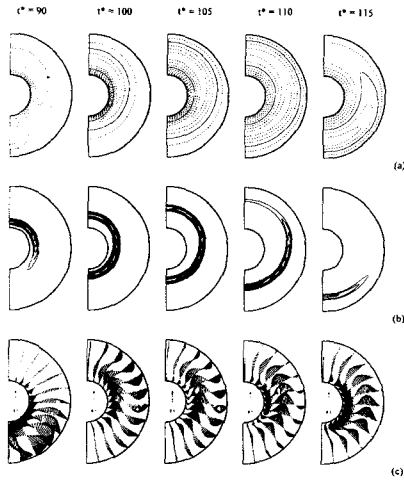


Fig. 5 Strong visible flame and flame propagation for case 4: (a) temperature ($\Delta T^* = 0.5$), solid line is $T^* = 5$; (b) fuel reaction rate over $\dot{\omega}_{F, \text{visible}}^* = 0.0022$ ($\Delta \dot{\omega}_F^* = 1 \times 10^{-3}$); (c) velocity vector.

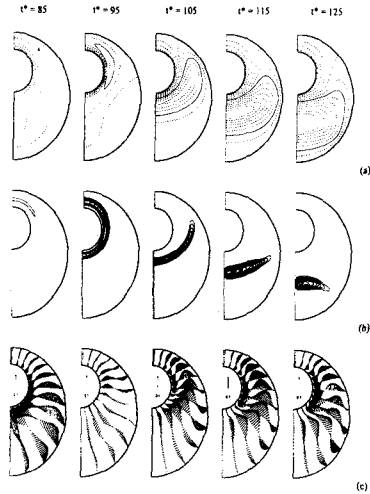


Fig. 6 Strong visible flame and flame propagation for case 5: (a) temperature ($\Delta T^* = 0.5$), solid line is $T^* = 5$; (b) fuel reaction rate over $\dot{\omega}_{F, \text{visible}}^* = 0.0022$ ($\Delta \dot{\omega}_F^* = 1 \times 10^{-3}$); (c) velocity vector.

가지는 경우 비약적으로 증가하며 이에 더불어 최고온도 또한 가장 높음을 알 수 있었다. 점화시간 역시 Table 2에 나타나 있듯 연료가 고온원관의 하부에 위치할 때 가장 빠르다. 화염발생 위치를 비교하면 연료가 고온원관의 중앙에 위치(case 1, Fig. 2)할 경우 연료면 상부 1/4 지점에서 발생하고,

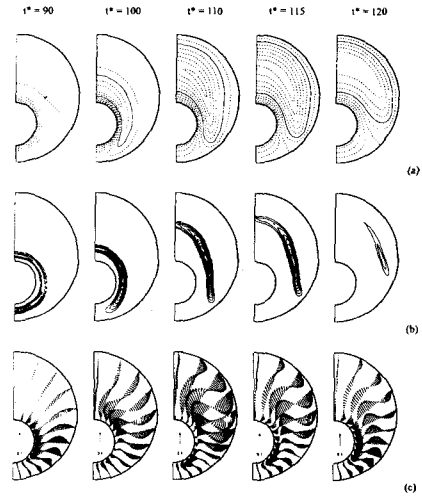


Fig. 7 Strong visible flame and flame propagation for case 6: (a) temperature ($\Delta T^* = 0.5$), solid line is $T^* = 5$; (b) fuel reaction rate over $\dot{\omega}_{F, \text{visible}}^* = 0.0022$ ($\Delta \dot{\omega}_F^* = 1 \times 10^{-3}$); (c) velocity vector.

연료가 고온원관의 상부에 위치(case 2, Fig. 3)할 경우는 연료면 측면에서 발생한다. 연료가 고온원관의 하부에 위치(case 3, Fig. 4)하면 화염은 연료면 상단에서 발생한다. 연료와 고온원관이 가장 근접해서 열적인 전도현상이 증대해지는 부위에서 점화현상이 발생하는 것이 아니라는 점을 고려하면, 고온원관의 온도가 비교적 낮은 과열비 2의 경우 화염발생은 내부에 형성되는 유동장에 의해 지배됨을 의미한다.

과열비를 3으로 증가시킬 경우(case 4, 5, 6) 이 3 경우 모두에 대해 강한 가시화염(strong visible flame)이 형성되며 스스로 전파해 나간다(self-propagation). 화염발생 위치를 비교하면 연료가 고온원관의 중앙에 위치(case 4, Fig. 5)할 경우 연료면 상부에서 발생하고, 연료가 고온원관의 상부에 위치(case 5, Fig. 6)할 경우는 역시 연료면 상단에서 발생한다. 그리고 연료가 고온원관의 하부에 위치(case 6, Fig. 7)하면 화염은 연료면 하단에서 발생한다. 이는 고온의 외부원관과 연료의 기하학적 배치에 관련이 있는 것으로서 연료가 고온원관과 더 근접한 위치에서 화염이 발생하고 있다. 즉 이 경우 발생된 화염은 열적인 전도현상이 큰 영향을 미치고 있음을 의미한다. 화염전파 경로는 중심 및 정의 편심율의 경우 연료면 하단으로 전파하고 부의 편심율의 경우는 연료면 상부로 전파한다.

4. 결 론

고온의 외부 원관 내부에 동심 및 편심된 원통형 열분해 연료의 점화 및 화염전파 현상을 해석하기 위해 2차원 비정상 해석모델을 도입했다. 이 해석모델에서 비정상, 층류 자연대류 유동을 고려하고 관련 매개변수들을 도입해 수치적 계산을 수행했다.

연료의 배치에 따른 영향을 고찰해보면 고온원관의 온도가 비교적 낮은 과열비 2의 경우 화염 발생은 내부 유동장의 발달에 영향을 받는다. 과열비를 3으로 증가시킬 경우 모두에 대해 강한 가시화염(strong visible flame)이 형성되며 스스로 전파해 나간다(self-propagation). 또한 화염발생 위치를 비교해보면 이 경우 열적인 전도현상이 큰 영향을 미치고 있다.

본 연구에서는 비직교 좌표계를 도입하고 고체 연료의 열분해와 자연대류 하에서의 점화 및 화염전파 과정 중 복사효과를 고려하며 여러 매개변수들의 영향 및 물리적 특성을 고찰함으로써 열분해 연료의 점화 및 화염전파 현상에 대한 새로운 해석모델을 제시했다.

참고문헌

- (1) Grayson, G., Sacksteder, K., Ferkul, P. V., and T'ien, J. S., 1994, "Flame Spreading Over a Thin Fuel in Low Speed Concurrent Flow: Droptower Experimental Results and Comparison with Theory," *Microgravity Sci. Tech.*, pp. 187~196
- (2) Ferkul, P. V., and T'ien, J. S., 1994, "A Model of Low-Speed Concurrent Flow Flame Spread Over a Thin Solid," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 99, pp. 345~370
- (3) Han, C. Y., and Baek, S. W., 1995, "Radiative Ignition of Volatile Gases on a Vertical Fuel Plate," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 109, pp. 309~325
- (4) Han, C. Y., and Baek, S. W., 1999, "Natural Convection Phenomena Affected by Radiation in Concentric and Eccentric Horizontal Cylindrical Annuli," *Numer. Heat Transfer, Part A*, Vol. 36, pp. 473~488
- (5) Kuehn, T. H., and Goldstein, R. J., 1978, "An Experimental Study of Natural Convection Heat Transfer in Concentric and Eccentric Horizontal Cylindrical Annuli," *J. Heat Transfer*, Vol. 100, pp. 635~640
- (6) Dua, S. S., and Cheng, P., 1975, "Multi-Dimensional Radiative Transfer in Non-isothermal Cylindrical Media with Non-isothermal Bounding Walls," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 245~259
- (7) 한조영, 2000, "원형공간내 열분해 연료의 점화

및 화염전파," KAIST 박사학위논문

- (8) Yang, C. T., and T'ien, J. S., 1998, "Numerical Simulation of Combustion and Extinction of a Solid Cylinder in a Low-Speed Cross Flow," *J. Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 1055~1063
- (9) Park, S. H., Stretton, A. J., and Tien, C. L., 1988, "Infrared Radiation Properties of Methyl Methacrylate Vapor," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 62, pp. 257~271