

<論 文>

열복사에 의한 수직연료면의 점화현상 해석

한조영* · 백승욱**

(1995년 3월 2일 접수)

Ignition of a Vertically Positioned Fuel Plate by Thermal Radiation

Cho-Young Han and Seung-Wook Baek

Key Words : Thermal Radiation(열복사), Autoignition(자연발화), Absorption(흡수), Discrete Ordinates Method(구분종좌법), Ignition Criteria(점화판단기준)

Abstract

The ignition phenomena of a solid fuel plate of polymethyl-methacrylate(PMMA), which is vertically positioned and exposed to a thermal radiation source, is numerically studied here. A two-dimensional transient model includes such various aspects as thermal decomposition of PMMA, gas phase radiation absorption, gas phase chemical reaction and air entrainment by natural convection. Whereas the previous studies considers the problem approximately in a one-dimensional form by neglecting the natural convection, the present model takes account of the two-dimensional effect of radiation and air entrainment. The inert heating of the solid fuel is also taken into consideration. Radiative heat transfer is incorporated by the Discrete Ordinates Method(DOM) with the absorption coefficient evaluated using gas species concentration. The thermal history of the solid fuel plate shows a good agreement compared with experimental results. Despite of induced natural convective flow that induces heat loss from the fuel surface, the locally absorbed radiant energy, which is converted to the internal energy, is found to play an important role in the onset of gas phase ignition. The ignition is considered to occur when the rate of variation of gas phase reaction rate reaches its maximum value. Once the ignition takes place, the flame propagates downward.

기 호 설 명

a_g : 흡수기체의 흡수계수
 A_p : 열분해 선행계수
 A_r : 기상화학반응 선행계수
 C : 기체비열[J/gK]
 D : 분자확산계수[cm²/s]
 E_p : 열분해 활성화에너지[J/mol]
 E_r : 기상화학반응 활성화에너지[J/mol]
 I : 복사강도[W/cm²]

k : 열전도계수[W/cmK]
 L_v : 열분해 잠열[J/g]
 m''_i : 화학종 i 의 생성률[g/cm³s]
 n : 양론(量論)계수
 q'' : 열유속[W/cm²]
 Q_H : 연소열[J/g]
 R : 일반 기체상수[J/K-mol]
 S''_g : 에너지생성률[W/cm³]
 t : 시간[s]
 T : 온도[K]
 u : x -방향속도

*한국과학기술원 대학원 항공우주공학과

**정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

- v : y -방향속도
 v_p : 열분해속도
 x : 표면을 따르는 좌표축[cm]
 y : 표면에 수직한 좌표축[cm]
 Y_i : 화학종 i 의 질량분율

그리스문자

- α : 열확산계수[cm^2/s]
 θ_p : 무차원 열분해 활성화에너지[E_p/RT_∞]
 θ_r : 무차원 기상화합반응 활성화에너지[E_r/RT_∞]
 μ : 공기의 점성계수[$\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}$]
 ρ : 밀도[g/cm^3]
 σ : Stefan-Boltzmann 상수[$\text{W}/\text{cm}^2\text{K}^4$]
 Ω : 입체각[sr]

하첨자

- b : 흑체
 f : 연료
 g : 기체장
 o : 외부 복사열원
 ox : 산화제
 pr : 연소생성물
 s : 고체장
 ∞ : 주위조건

상첨자

- R : 복사

1. 서 론

플라스틱의 발달에 의하여 건물 내장재 등으로 이의 활용범위가 현격히 늘어남에 따라 플라스틱재의 열분해 및 점화특성에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 특히 PMMA(polymethylmethacrylate)와 PP(polypropylene) 등은 열분해하면서 탄화수소계의 기체를 발생하므로 화염발생에 민감하고, 물리적 및 열분해 특성이 대체적으로 잘 알려져 있어 많은 연구자들이 대상모델로 채택하고 있다. 이와 같은 PMMA의 주된 열분해 물질은 MMA($\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_3$: methyl-methacrylate)로 화학식에 나타난 바와 같이 연소에 매우 민감하다. 이같은 고체연료의 열복사에 의한 자연발화현상 해석은 열 및 물질전달과 화학반응간의 매우 복잡한 상호작용을 전체적으로 고려해야만 하나 기존의 연구들

은 이러한 복잡한 상호작용을 상당히 단순화시켜 간단한 모델을 이용하여 정성적인 관점에 치중해 해석해왔다.

온도차만에 의한 부력의 영향으로 인한 비정상 자연대류 경계층에 관한 연구는 이미 Sammakia 등⁽¹⁾에 의해 많은 연구가 수행되어졌다. Park과 Tien⁽²⁾은 열복사에 의한 PMMA의 열분해율과 복사물성치 등에 관한 실험적 연구를 수행하였고 Amos와 Fernandez-Pello⁽³⁾는 기체장의 복사를 고려한 1차원적 수치해석을 통해 점화점에서의 점화에 관한 연구를 수행하였으나, 부력을 무시하였으며 고체의 열분해에 관한 자세한 모델을 생략하였다. Kashiwagi^(4,5)는 기체장의 화학반응을 점화의 주요 인자로 고려하여 고체연료의 점화가능성을 수치적으로 해석하였으며, 이때 고체의 복사흡수(indepth absorption)가 점화지연에 영향을 미침을 보여주었다. 또한 연료와 주위조건간의 열적, 화학적 특성에 의해 결정되는 점화가능성(ignitability)영역을 도시했다. 여기에 수행된 매개변수 해석을 통해 고체연료의 복사에 의한 점화와 점화 가능영역을 구하기 위해서는 기체장의 화학반응이 반드시 포함되어야 함을 입증했다. 그러나 1차원 해석을 하였으므로 자연대류의 영향을 고려하지 못했다.

이들 일련의 연구로부터 복사열전달의 중요성이 인지되었으며, Kashiwagi^(6,7)는 수평 및 수직 고체연료 자연발화 실험을 통해 점화과정중 기체장내 열분해 생성물에 의한 심각한 외부 입사복사량의 감소(attenuation)가 존재함을 관찰하였고 따라서 PMMA의 자연발화는 기체장내 열분해 생성물에 의한 입사된 복사에너지의 흡수로 인해 발생된다고 결론지었다. Park과 Tien⁽⁸⁾은 고체내부와 기체장의 복사열전달을 모두 고려하여 수직연료면의 열분해와 이에 따른 점화현상을 수치적으로 해석하였고 이때 얇은 경계층 가정에 의한 유효 열전도계수 및 물질전달계수를 도입하여 부력이 점화지연에 미치는 영향에 대하여 고찰하였으나 Kashiwagi^(6,7)의 수평 및 수직 고체연료 자연발화실험에서의 정량적 연구결과와 비교시 Park과 Tien⁽⁸⁾의 결과는 1차원 모델의 근본적 약점으로 인해 부력에 의한 비정상 자연대류 경계층의 영향이 과소평가 되었음을 볼 수 있다.

언급한 기존의 연구들과는 달리 본 연구에서 사용하고자 하는 물리적 모델은 2차원 수직연료벽면으로서 고체로부터 열분해된 가연성 기체가 집적되

어 있지 않고 피할 수 없는 중력의 영향으로 인해 수직 연료면을 따라 자연대류 경계층을 형성하며 상승하므로 외부로부터의 지속적인 냉각공기 유입에 따른 열손실 및 복사에 관여하는 가연 기체장내 연료와 생성물의 지속적인 하류로의 방출과 같은 점화지연인자와 기체장의 복사에너지 흡수와 같은 점화촉진인자가 서로 상호작용하며 동시에 존재한다. 따라서 기존 연구들의 유동특성과 점화 특성을 연계하여 고온의 복사열원에 노출된 수직 연료면의 복사열전달에 기인한 고체 연료의 열분해와 자연대류 하에서의 점화과정 중 기체장의 입사 외부 복사 흡수의 역할규명 및 궁극적인 점화현상과 이에 따른 초기화염발달을 수치적으로 해석하고, 외부복사 열원의 강도(external radiant intensity)를 변수로 하여 점화지연시간 및 점화위치를 포착하며 점화구조의 물리적 특성을 고찰한다.

2. 이론 모델의 해석

이론식을 체계화한 모델은 Fig. 1과 같은 수직 연료벽면으로서 벽면은 가열되면 가연성 기체를 열분해하여 발산할 수 있는 고체로 형성되어 있고 경계면을 제외한 고체면들은 단열되어 있다. 고체의 표면은 외부 복사열원에 의해 가열된다. 외부 정적 기체장은 산화제인 공기로, 가연성의 기체를 발산할 수 있는 고체 연료벽은 PMMA로 가정한다. 벽면과 기체장 사이에 매우 큰 온도차가 존재하므로 Boussinesq 근사는 적용될 수 없으며 공기의 점성계수, 열전도계수 및 확산계수의 온도에 따른 변화를 고려해야 한다. 반면 매우 큰 온도차에도 불구하고 벽면의 높이를 작은 값으로 취한다면 유동장의 층류해석이 가능하다.

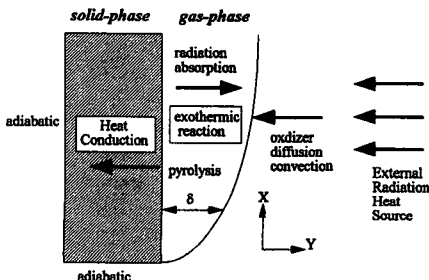


Fig. 1 Schematic of two-dimensional model

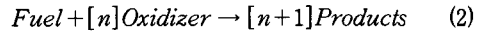
2.1 가정

다음의 가정을 사용하여 수학적 모델을 간단화했다.

- (1) 2차원, 비정상, 층류 경계층유동을 가정한다.
- (2) 외부 압력은 일정하고, 기체 혼합물(gas-mixture)은 이상기체로 거동한다.
- (3) 고체장의 물성치는 일정하고, 기체장의 비열 및 $\rho k, \rho \mu, \rho^2 D$ 는 온도의 변화에 대해 일정하다. 이것은 기체장의 Pr, Sc, Le 가 항상 일정함을 의미한다.
- (4) 화학종간의 열확산 및 압력효과(soret and dufour effect)를 무시하고 확산계수가 같다고 하여 Fick's law를 도입하며, 기체 혼합물의 Lewis수는 1로 가정한다. Lewis수가 1이면 밀도와 확산계수의 곱은 다음과 같이 표현된다.

$$\rho D = \left(\frac{\rho C D}{k} \right) \frac{k}{C} = Le \frac{k}{C} = \frac{k}{C} \quad (1)$$

- (5) 고체연료의 열분해는 표면에서만 일어나고, Arrhenius의 0차 반응식을 따른다.
- (6) 기체장의 화학반응은 다음 형태의 단단계 비가역 반응(one-step irreversible reaction)과 Arrhenius의 2차 유한율 반응식으로 나타낸다.



- (7) 모든 화학종의 분자량은 일정하며 같다.
- (8) 기체 혼합물의 복사흡수계수는 열분해 기체의 질량분율 및 연소 생성물의 질량분율의 합에 비례한다.

$$\kappa_g = a_g P (Y_f + Y_{pr}) \quad (3)$$

여기서, a_g 는 1atm 분압에서 흡수기체의 Planck 평균 흡수계수

- (9) 열분해 입자에 의한 복사 산란(scattering)은 무시한다.

가정 (1)~(7)은 기존의 연구들^(4,8)에서 일반적으로 사용된 것이며 가정 (8)은 Park⁽⁶⁾의 연구에서 흡수기체의 복사 특성을 수치적으로 산정하기 위해 사용한 모델이다.

2.2 지배방정식

이상의 가정을 사용하여 수학적으로 모델링한 질량, 운동량, 에너지 및 화학종 보존의 지배방정식은 다음과 같다.

- Gas phase continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (4)$$

- Gas phase momentum equation

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ & = g(\rho_\infty - \rho) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

- Gas phase energy equation

$$\begin{aligned} & \rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ & = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_g''' - \nabla \cdot q^R \end{aligned} \quad (6)$$

- Gas phase species conservation equation

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial Y_i}{\partial t} + u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + v \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) \\ & = \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) + m_i''' \end{aligned} \quad (7)$$

where subscript i represents fuel(f), oxidizer(ox) and product(pr), respectively.

- Solid phase energy equation

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_p \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

- Equation of state

$$\rho T = \rho_\infty T_\infty \quad (9)$$

에너지 생성항 및 반응 생성항은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} m_f''' &= -\rho_g^2 Y_f Y_{ox} A_r \exp(-E_r/RT) \\ m_f''' &= \frac{m_{ox}'''}{n} = -\frac{m_{pr}'''}{n+1} = -\frac{S_g'''}{Q_H} \end{aligned} \quad (10)$$

2.2 초기조건 및 경계조건

초기유동장은 정지상태에 있으며, PMMA를 포함한 전체장의 온도는 상온상태이다.

- at $t \leq 0$ then

- gas-phase initial condition

$$\begin{aligned} u &= v = 0, \quad T = T_\infty \\ Y_f &= Y_{pr} = 0, \quad Y_{ox} = Y_{ox,\infty} \end{aligned} \quad (11)$$

- solid-phase initial condition

$$T = T_\infty \quad (12)$$

- for $t > 0$

- at interface ($y=0$)

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_g + q_y^R = -k_s \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s + \rho_s v_p L_v \quad (13)$$

$$-\rho D \frac{\partial Y_f}{\partial y} + \rho v Y_f = \rho_s v_p \quad (14)$$

$$-\rho D \frac{\partial Y_{ox}}{\partial y} + \rho v Y_{ox} = 0 \quad (15)$$

$$-\rho D \frac{\partial Y_{pr}}{\partial y} + \rho v Y_{pr} = 0 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \rho_s v_p &= \rho_g v_g, \quad T_s = T_g \\ v_p &= A_p \exp(-E_p/RT) \end{aligned} \quad (17)$$

- at solid-phase

$$x=0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$x \rightarrow \infty, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$y \rightarrow -\infty, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (18)$$

- at gas-phase

$$\begin{aligned} x=0, \quad T &= T_\infty, \quad u=0 \\ Y_f &= Y_{pr}=0, \quad Y_{ox} = Y_{ox,\infty} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} y \rightarrow 0, \quad T &= T_\infty, \quad u=0 \\ Y_f &= Y_{pr}=0, \quad Y_{ox} = Y_{ox,\infty} \end{aligned} \quad (20)$$

2.3 복사경계조건 및 구분종좌법

복사열전달의 효과는 에너지보존식에서 다음과 같이 표현되는 복사열유속의 발산(divergence)형태로 나타난다.

$$-\nabla \cdot q^R = \kappa(r) \left[\int_{4\pi} I(r, \Omega) d\Omega - 4\pi I_b \right] \quad (21)$$

여기서, $I(r, \Omega)$ 를 구하기 위해 다음의 복사전달 방정식(radiation transfer eqn.)을 회색기체(gray gas)에 대해 푼다.

$$\begin{aligned} & (\Omega \cdot \nabla) I(r, \Omega) \\ & = -[\kappa(r) + \sigma(r)] \cdot I(r, \Omega) + \kappa(r) I_b(r) \\ & \quad + \frac{\sigma(r)}{4\pi} \int_{4\pi} I(r, \Omega') \Phi(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega' \end{aligned} \quad (22)$$

복사전달방정식의 복사강도를 풀기 위해 구분종좌법(discrete ordinates method)을 사용한다. 일종의 다유속법인 구분종좌법은 입체각 4π 를 적절한 구간으로 나누고 각 구간에서 복사강도가 일정한 가중치를 갖도록 가정하여 복사전달방정식을 일련의 상미분방정식으로 근사하는 방법이다. 이를 이용한 근간의 연구로는 Fiveland⁽¹⁰⁾의 사각밀폐공간에서의 복사를 구분종좌법으로 해석한 것과 Kim과 Baek⁽¹¹⁾의 사각밀폐공간에서의 복사와 전도열전달의 효과를 함께 고려한 것 등이 있다.

구분종좌법에 의한 복사전달방정식(RTE : 식(22))의 복사강도에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$x=0, I(y, \Omega) = I_b(y) \quad (23)$$

$$x \rightarrow \infty, I(y, \Omega) = I_b(y) \quad (24)$$

$$y=0, I(x, \Omega) = \epsilon_w I_b(x) + \frac{\rho_w}{\pi} \int_{\vec{n} \cdot \Omega < 0} \vec{n} \cdot \Omega | I(x, \Omega) d\Omega', \vec{n} \cdot \Omega > 0 \quad (25)$$

$$y \rightarrow \infty, I(x, 0) = I_{b,o} \quad (26)$$

식(23)과 (24)는 유출입 산화물에 대한 흑체방사 조건이며, 표면의 방사율(wall-emissivity : ϵ_w)은 전형적인 PMMA의 물성치인 0.92를 택했다. 또한 식(26)은 고온의 복사열원이 흑체거동을 하며, 균일한 복사강도(radiant intensity)를 가지고 있음을 나타낸다.

2.4 수치해석

2.4.1 유동장의 수치해석

지배방정식 (4) ~ (8)은 다음과 같은 일반적 형태로 나타낼 수 있다.

$$\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (27)$$

이 식에서 ϕ 는 대표 종속변수이며, Γ 는 각 종속 변수에 대한 확산계수이고, S_ϕ 는 생성항이다. 식(27)과 같은 비정상(unsteady)문제를 수치해석하기 위해 시간간격에 관계없이 항상 안정적으로 수렴성을 지닌 완전내재적(fully implicit)방법으로 차분하고 시간적으로는 전방차분법을, 공간적으로 대류항은 외부로부터의 공기유입을 고려하기 위해 기존의 경계층 해석에 많이 사용되었던 풍향차분법(upwind differencing method)을 사용하며 확산항은 2차의 중심차분법(2nd order central difference)을 사용한다. 계산의 효율을 위해 종속변수의 구배가 급격한 경계면쪽으로 격자계를 밀집시킨 비균일 격자계를 사용했다.

2.4.2 복사장의 수치해석

본 연구에 있어 가장 중요한 것은 투명매질(transparent medium)을 통과한 복사열유속에 의한 고체 연료의 초기 비반응예열의 정확한 산정이다. 만약 이러한 고체 연료의 초기 비반응예열에 관여하는 복사열유속이 제대로 산정되지 않을 경우 차후에 부차적으로 발생하는 고체 연료의 열분해 및 기체 장의 화학반응 등의 점화구조를 정확히 예측할 수 없다. 그러므로 투명매질을 통한 외부 복사열원에

의한 고체연료 표면으로의 입사량 산정은 복사에 의한 점화현상을 해석하기 위해 그 수치적 정확도가 입증되어야 한다.

그러한 복사량 산정의 방법으로 다차원 복사계산에 많이 쓰이는 구분중좌법은 연속된 입체각을 각각의 가중치를 갖는 유한한 개수의 입체각으로 근사함에 따라 파생되는 피할 수 없는 오차(i. e. ray effect and false scattering⁽¹³⁾)가 발생한다. 한편 Kashiwagi⁽⁷⁾의 실험방법은 Gaussian laser beam을 확산(expand)시켜 고체연료표면으로 거의 균일 열유속분포를 주었기에, 외부 복사열원은 Fig. 2와 같이 연료면에 수직인 평행광(collimated radiation)으로 모사해야하나 유한한 개수의 중좌를 사용하는 구분중좌법에서 그같은 조건을 구현하기란 매우 어렵다. 이러한 난점들을 해결하고 계산시간의 효율증대 및 물리적으로 타당한 경계조건을 주기 위해 벽면에 수직인 방향주위에 존재하는 동일한 가중치를 갖는 4개의 입체각에 가중치로 산술평균한 복사강도를 주어 가중적분시 그 합이 외부 복사열원의 강도가 되도록 모사했다.

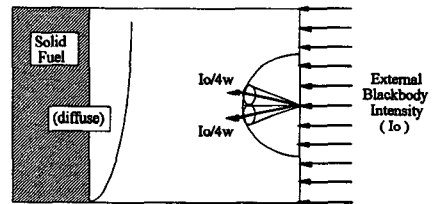


Fig. 2 Physical and computational radiation field

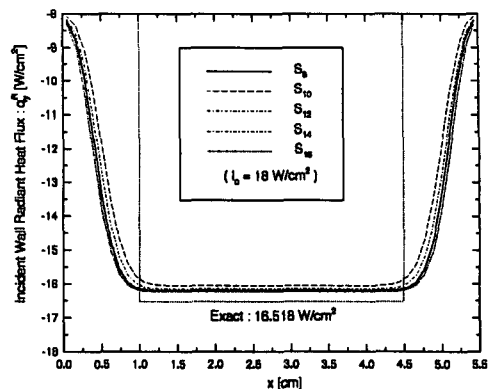


Fig. 3 Wall incident radiation heat flux through transparent medium by S_N method ($a_g = 0 \text{ atm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

초기의 상태, 즉 고체 연료면의 온도가 300 K이고 외부 복사열원의 강도가 18 W/cm²일 경우 연료면으로 입사되는 복사열유속을 종좌의 수를 매개변수로 하여 구분종좌법으로 계산한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 종좌의 수에 따라 큰 차이는 없으나, 앞서 언급한 종좌 선택상의 문제로 인해 완전한 평행광으로는 모사될 수 없다. 그러나 양 끝단을 제외하면 계산된 결과는 실제의 Kashiwagi의 실험⁽⁷⁾에서 사용되었던 3.5 cm 직경의 균일 열유속 열원을 1 cm~4.5 cm 구간에서 매우 잘 모사한다. 따라서 계산시간 및 그 외의 변수들을 고려하여 본 연구에서는 이후 특별한 언급이 없는 한 S₀을 사용한다.

3. 결과 및 검토

수직연료 고체면으로의 조사영역(3.5 cm)을 포함한 수직연료면의 높이는 Kashiwagi의 실험치⁽⁷⁾와 비교, 검증하기 위해 5.5 cm로 했다. 급격한

Table 1 Physical and chemical properties used in study

A _p [cm/s]	5.5 × 10 ⁸
A _r [cm ³ /gs]	10 ⁹
C _{g,∞} [J/gK]	1.005
C _s [J/gK]	1.42
k _{g,∞} [W/cmK]	2.61 × 10 ⁻⁴
k _s [W/cmK]	1.9 × 10 ⁻³
L _v [J/g]	-1250
n	8
P _∞ [atm]	1
Q _H [J/g]	26120
α _{g,∞} [cm ² /s]	0.2216
α _s [cm ² /s]	1.12 × 10 ⁻³
ρ _s [g/cm ³]	1.195
ρ _{g,∞} [g/cm ³]	1.1766 × 10 ⁻³
μ _{g,∞} [g/cms]	18.53 × 10 ⁻⁵
θ _p	66.7
θ _r	30

점화과정중 기체장의 세부적인 물성치는 적용이 불가능하기에 기체장의 물성치는 300 K 공기의 물성치를 기준했다. 그러나 기체장의 흡수계수는 공기의 물성치를 사용하지 않고 Park⁽⁸⁾의 연구에서 사용된 모델을 채택했다. 전형적인 플라스틱 기체(MMA vapor)의 Planck 평균 흡수계수는 800 K 이하의 기체 온도에서 1 atm⁻¹cm⁻¹ 정도⁽²⁾이다. 또한 Kashiwagi의 실험⁽⁷⁾에서는 10.6 μm 파장의 CO₂ laser를 외부 복사열원으로 사용했기에 그 파장에서의 MMA 기체의 추정 흡수계수로서 a_g = 1.9 atm⁻¹cm⁻¹⁽²⁾을 특별한 언급이 없는 한 기본값으로 사용하며 그외 다른 물성치는 Table 1의 물성치를 사용했다.

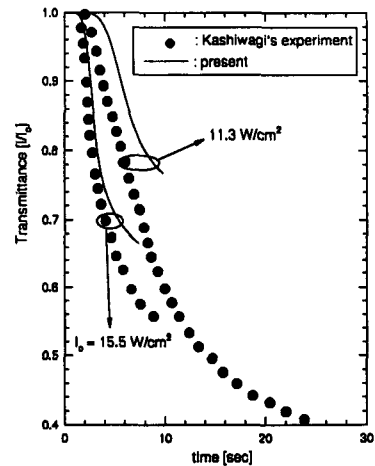


Fig. 4 Time history of transmittance at the center of irradiation area(a_g=1.9 atm⁻¹cm⁻¹, Y_{ox,∞}=0.23)

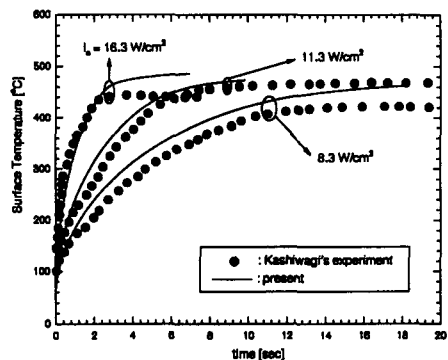


Fig. 5 Time history of surface temperature at the center of irradiation area(a_g=1.9 atm⁻¹cm⁻¹, Y_{ox,∞}=0.23)

Fig. 3에서 보듯 초기단계 벽면으로의 입사 복사에너지를 구함에 있어 피할 수 없는 가산란부위(일종의 ray-effect라고도 생각되는)가 벽면 상하단 부위에 나타난다. 따라서 본 연구에서는 그와 같은 외부조사(external irradiation) 분포하에서 점화현상 해석이 이루어졌다. 본 연구의 모델과 Kashiwagi의 실험⁽⁷⁾결과와의 비교를 Fig. 4와 Fig. 5에 도시했다. 연료면의 외부 복사 조사영역 중앙에서의 투과도(transmittance)와 표면온도의 시간변화를 본 모델과 비교시, 본 모델은 그와 같은 현상을 수치적으로 상당히 만족스럽게 모사함을 볼 수 있다.

점화현상 해석의 현재 발달과정에서 점화지연시간의 실험적 측정은 광탐지(light emission detection)에 기초한 반면, 이론적 점화의 정확한 상태는 거의 잘 정의되지 않았다. 비록 많은 점화판단기준

이 있다 하더라도, 점화지연시간은 어떠한 특정한 점화판단기준에 잘 부합되지 않는다. 기존의 기체장의 복사흡수를 고려하지 않은 점화문제 해석에서 많이 사용되었던 것과 같이 벽면에서의 온도구배가 역전될 때 $(\partial T / \partial t) |_{y=0}=0$ 를 점화로 취하는 경우 본 연구에서와 같이 기체장이 복사흡수에 관여하는 경우는 기체장의 화학반응없이도 기체장에 흡수된 복사에너지는 위의 열적인 조건에 부합되도록 기체장의 온도를 올릴 수 있고, 조사영역을 벗어난 벽면 상단에서는 자연대류 유동에 의한 열이동(thermal transport)으로 인해 가상의 벽면 온도구배 역전이 일어날 수 있으므로 사용이 불가하다.

기존의 복사에 의한 자연발화의 점화판단기준^(4,9)에서 2차원 모델에 사용가능한 것들과 최근의 연구(Kim⁽¹²⁾)에서 사용된 점화판단기준을 시험한 결과

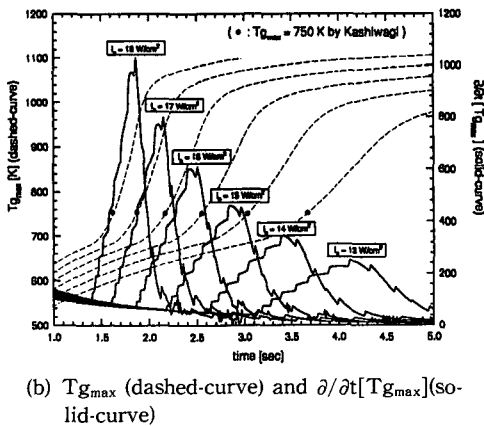
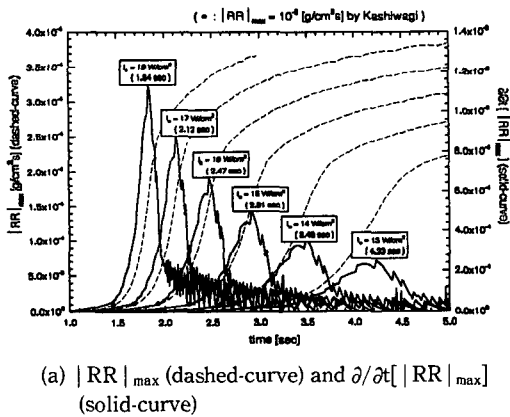


Fig. 6 Comparison of ignition criteria under various external radiation intensity($a_g=1.9 \text{ atm}^{-1}\text{cm}^{-1}$, $Y_{Ox,\infty}=0.23$)

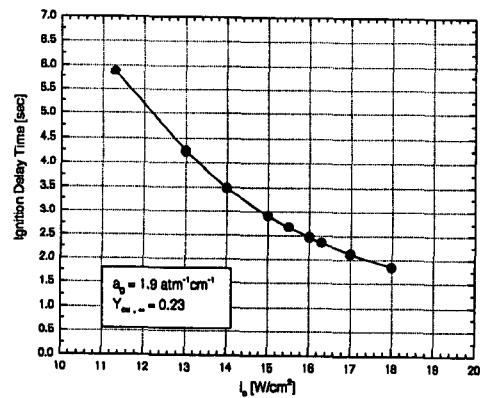


Fig. 7 Variation of ignition delay time with external radiation intensity

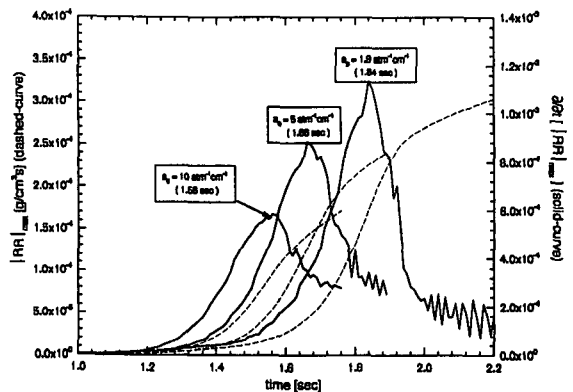


Fig. 8 Effect of absorption coefficient on ignition delay time: $|RR|_{max}$ (dashed-curve) and $\partial/\partial t[|RR|_{max}]$ (solid-curve)($I_0=18 \text{ W/cm}^2$, $Y_{Ox,\infty}=0.23$)

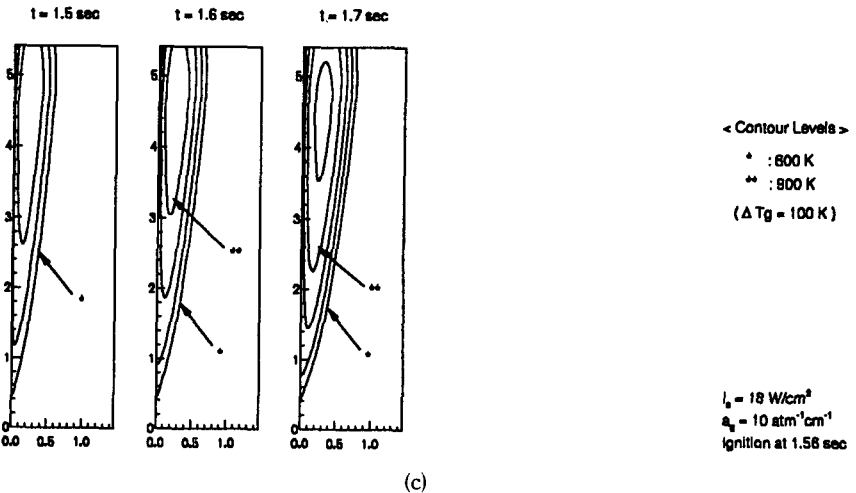
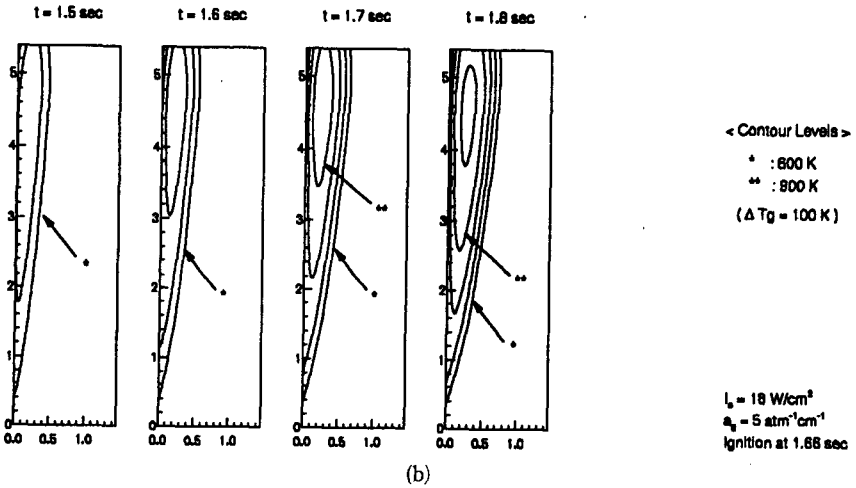
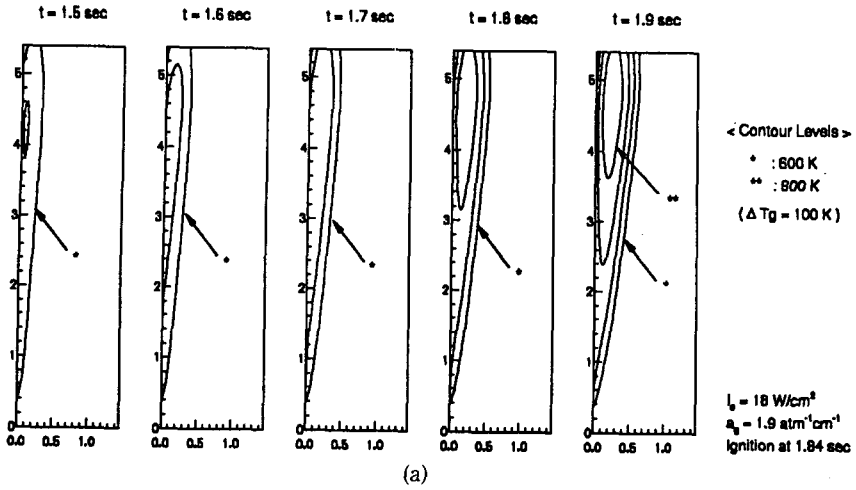


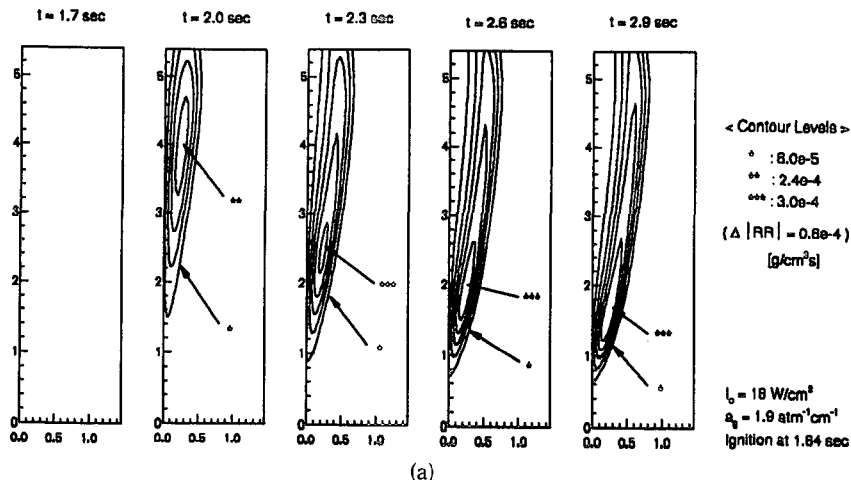
Fig. 9 Effect of absorption coefficient on the isothermal contours [a_g =(a) 1.9, (b) 5, (c) 10 $\text{atm}^{-1}\text{cm}^{-1}$]

본 연구에서는 점화현상을 수치적으로 판단 가능하며, 물리적으로도 명확한 의미를 지니는 조건인 '매 시간(time step)마다 기체장에서의 최고 반응률을 취해 그 반응률의 시간 변화율이 최대가 될 때', 그때를 점화로 판정하는 점화판단기준(ignition criteria)을 채택했다. 다른 가능한 점화판단기준과의 비교 역시 Fig. 6(a)와 (b)에 도시했다. 기존의 1차원 모델에서 사용되었던 점화판단기준($RR_{max} \geq 10^{-5} [g/cm^3s]$, $T_{gmax} \geq 750 K$ by Kashiwagi⁽⁴⁾)은 본 연구의 점화판단기준보다 점화를 과소예측하며, 비교가능한 점화판단기준(RR_{max} , T_{gmax} , $\partial/\partial t [T_{gmax}]$)들은 본 연구에 사용된 점화판단기준의 타당성을 보완 설명해주고 있다.

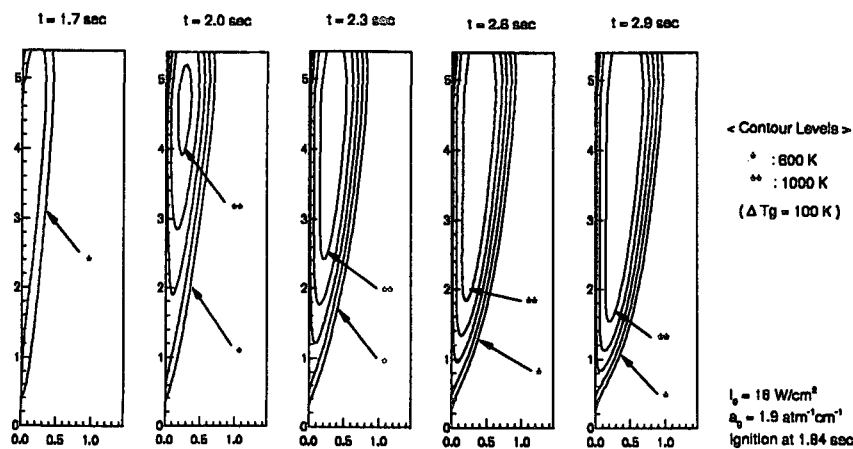
Fig. 7에는 위에 언급한 점화판단기준을 기초한

외부 복사열원의 강도에 대한 점화지연시간을 $a_g = 1.9 atm^{-1}cm^{-1}$, $Y_{Ox,\infty} = 0.23$ 의 경우 도시했다. 일반적으로 예견된 바와 같이 외부 복사열원의 강도가 증가함에 따라 점화지연시간은 감소한다.

Fig. 8의 점화판단기준에서는 기체장이 복사흡수에 관여하는 정도에 따른 점화지연시간을 나타낸다. 기체장이 복사흡수에 관여하지 않는 경우, 즉 표면복사만이 존재하는 경우 본 연구에서 사용된 최대 외부 복사강도($18 W/cm^2$)에서조차 점화는 일어나지 않았다. 그러나, 기체장이 복사흡수에 관여하는 경우($a_g = 1.9 atm^{-1}cm^{-1}$), $I_o = 18 W/cm^2$ 일 때 1.84초에서 점화는 일어나며 흡수계수가 증가할수록 점화지연시간은 점차 감소한다. 이는 기체장 내에서 보다 더 많은 양의 복사에너지가 열에너지



(a)



(b)

Fig. 10 Continued

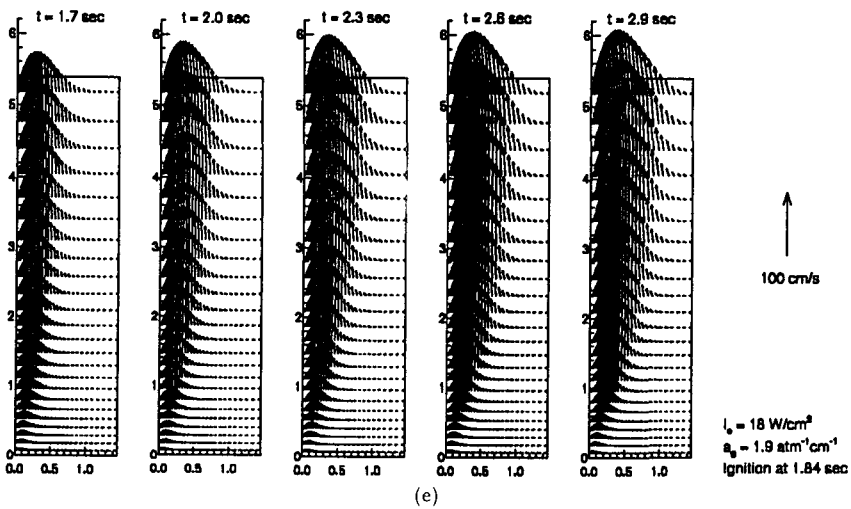
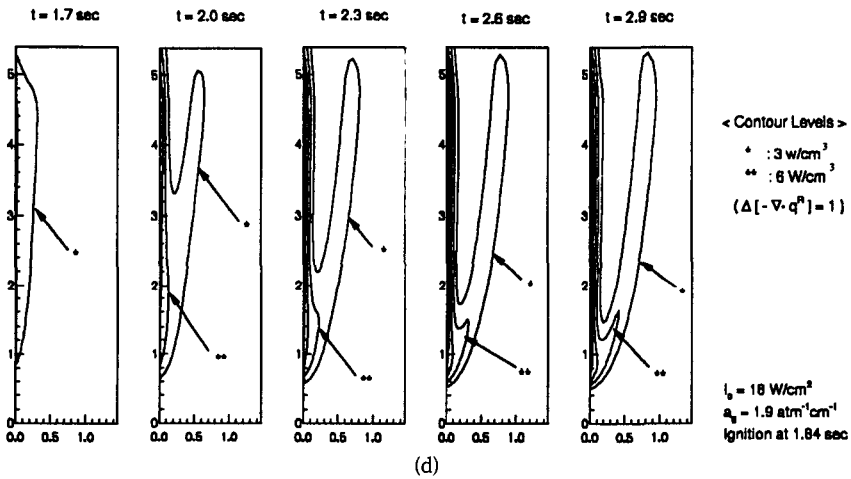
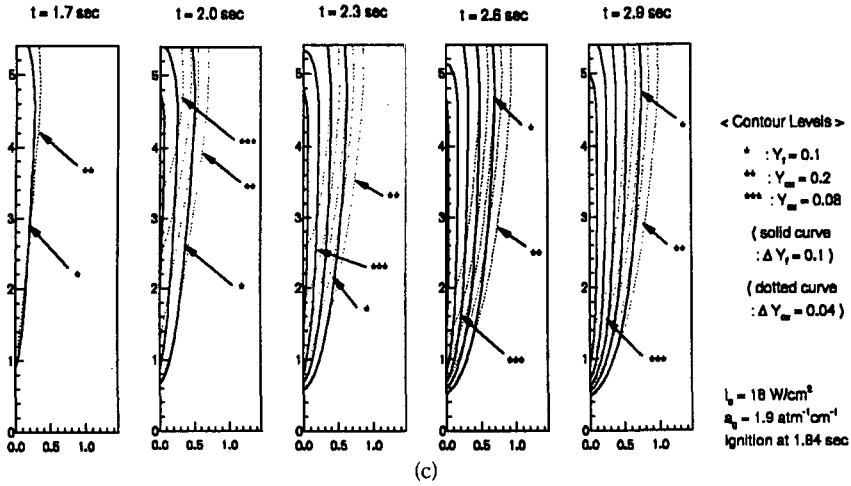


Fig. 10 Temporal variations of : (a) reaction rate, (b) gas phase temperature, (c) fuel(solid) and oxidizer(dotted) mass fraction, (d) absorbed radiant energy ($-\nabla \cdot q^R$) and (e) velocity profile

로 변환되어졌음을 의미한다. 그러므로 Fig. 9의 등온선도에 보여진 바와 같이 기체장의 온도는 흡수계수의 증가에 따라 더 급속히 증가한다.

외부 복사열원의 강도가 18 W/cm^2 이고, 흡수계수가 $1.9 \text{ atm}^{-1}\text{cm}^{-1}$, 외부 산화제의 질량분율이 0.23의 경우 시간에 따른 유동장과 점화후 초기 화염발달을 Fig. 10에 도시했다. 반응물의 시간 변화는 Fig. 10(a)에 도시되었다. 점화는 연료면의 선단으로부터 후류 4 cm 지점에 발생하며 그 후 화염은 자연대류 유동을 거슬러 벽면 하단쪽으로 진행한다. Fig. 10(c)의 연료 및 산화제 질량분율 선도에서 보면 매우 적은 양의 연료와 산화제만이 선단 부근에서 서로 침투하고 있으며 따라서 연료와 산화제 존재영역의 뚜렷한 구분이 있음을 알 수 있다. 이는 전형적인 확산화염(diffusion flame) 거동을 의미하며 결국 화염은 전형적인 EDF(envelope diffusion flame)의 형태를 지니며 발달한다. Fig. 10(d)에는 시간에 따라 기체장에 흡수된 복사에너지를 도시하였다. 대부분의 복사에너지는 복사흡수에 관여하는 연료의 농도가 높은 수직연료 벽면 부근에서 흡수된다. Fig. 10(e)에 도시된 속도장은 점화후 열적팽창(thermal expansion)에 의한 속도 증가를 나타내며 또한 부력에 의해 속도 경계층 내부로 외부 공기유입이 존재함을 볼 수 있다.

4. 결 론

강한 외부 복사열원에 노출된 수직연료 벽면의 복사에 의한 이론적 점화모델을 수치적으로 계산했다. 2차원 비정상 모델에서 기체장의 화학반응 효과, 수직 고체연료 자연발화에 중요한 인자인 기체장의 복사흡수, 열분해 생성물에 의한 입사 복사량의 감소(attenuation), 수직고체 연료 위를 흐르는 자연대류 유동에 의한 혼합기체의 하류로의 방출(flushing) 및 냉각공기 유입효과를 고려했다. 2차원 복사열전달의 해석은 구분중좌법(DOM)을 사용했다.

계산된 고체연료면의 외부 복사 조사영역 중앙에서의 투과도(transmittance)와 표면온도의 시간 변화는 기존의 실험결과와 잘 부합된다. 흡수 기체를 희석하고, 열손실을 증가시키는 자연대류 유동에도 불구하고, 기체장의 내부 에너지로 전환된 흡수 복사에너지는 기체장의 열적인 급격한 변화, 즉 점화현상의 발생에 매우 중요한 역할을 한다. 유동의

하류에서 점화발생후 화염은 수직고체 연료면 하단 쪽으로 진행한다. 동시에 점화후 열적팽창에 의해 속도는 증가한다. 점화지연시간은 외부 복사강도가 감소할수록 증가하나 흡수계수의 증가에 따라서는 감소한다.

참고문헌

- (1) Sammakia, B. and Gebhart, B., 1978, "Transient and Steady-state Numerical Solutions in Natural Convection," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 1, pp. 529~542.
- (2) 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.
- (3) Amos, B. and Fernandez-Pello, A. C., 1988, "Model of the Ignition and Flame Development on a Vaporizing Combustible Surface in a Stagnation Point Flow: Ignition by Vapor Fuel Radiation Absorption," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 62, pp. 331~343.
- (4) Kashiwagi, T., 1974, "A Radiative Ignition Model of a Solid Fuel," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 8, pp. 225~236.
- (5) Kashiwagi, T., 1979, "Effects of Attenuation of Radiation on Surface Temperature for Radiative Ignition," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 20, pp. 225~234.
- (6) Kashiwagi, T., 1979, "Experimental Observation of Radiative Ignition Mechanisms," *Combustion and Flame*, Vol. 34, pp. 231~244.
- (7) Kashiwagi, T., 1982, "Effects of Sample Orientation on Radiative Ignition," *Combustion and Flame*, Vol. 44, pp. 223~245.
- (8) Park, S. H. and Tien, C. L., 1990, "Radiation Induced Ignition of Solid Fuels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 1511~1520.
- (9) Gandhi, P. D. and Kanury, A. M., 1988, "Thresholds for Spontaneous Ignition of Organic Solids Exposed to Radiant Heating," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 57, pp. 113~128.
- (10) Fiveland, W. A., 1984, "Discrete Ordinates Solutions of Transport Equation for Rectangular

- Enclosures," *J. Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 699~706.
- (11) Kim, T. Y. and Baek, S. W., 1991, "Analysis of Combined Conductive and Radiative Heat Transfer in a Two-Dimensional Rectangular Enclosure using the Discrete Ordinates Method," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 2265~2273.
- (12) 김택영, 1993, "복사와 대류에 의한 사각밀폐 공간내 고체 연료의 점화에 관한 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원, 대전.
- (13) Chai, J. C., Lee, H. S. and Patankar, S. V., 1993, "Ray Effect and False Scattering in the Discrete Ordinates Method," *Numerical Heat Transfer (Part B)*, Vol. 24, pp. 373~389.