

복사 열속 교란에 대한 고체 추진제의 연소 반응 특성

Characterics of Combustion Response of Solid Propellants to Radiant Heat Flux Fluctuation

남삼식*·이창진**·김성인***

요 약

수정된 연소 반응 함수[9]를 이용하여 복사 열속 교란에 대한 연소 반응 특성을 살펴 보았다. DB N5추진제에 대한 Son 등[6]의 실험 결과와 비교할 때 본 연구에서 사용한 연소 반응 함수가 낮은 활성화 에너지에서 비슷한 피크를 예측할 수 있었다. 이것은 Son 등[6]에 의해 과소 평가된 복사 열속의 영향이 고려되었기 때문인 것으로 판단 된다. 민감 변수들을 구하기 위하여 Iribicu 등[2]이 제시한 정상 연소 관계식을 이용하였는데, 표면 온도에 대한 정상 연소율 변화를 비교한 결과 Zanotti[8]의 AP2 추진제의 실험 결과와 정성적으로 비슷한 결과를 나타내었다. Zebrowski 등[4]의 연소 반응 함수와도 비교하였는데 활성화 에너지가 Zanotti[8]가 제시한 범위의 값을 가질 때는 피크에 있어 상당한 차이를 보이지만, 그 보다 더 큰 활성화 에너지에서는 f, \bar{J} 의 영향이 거의 사라져 비슷한 결과를 보여주고 있다. 이는 활성화 에너지가 클수록 본 연구에서 사용한 연소 반응 함수가 [6]과 같아지지만, [8]에서 제시된 활성화 에너지 범위에서는 본 연구에서 사용한 연소 반응 함수로 예측함이 타당함을 의미한다.

I. 서론

고체 추진제의 비정상 연소(unsteady combustion)는 연소 불안정과 관련이 있는 매우 복잡한 연소 현상 중의 하나이다. 고체 추진제의 정상/비정상 연소 현상을 해석하기 위해 여러 연구자들에 의하여 많은 모델들이 제시되었다. 그 중에서 가장 일반적인 것으로 구 소련의 ZN(Zeldovich-Novozhilov)방법과 서구 과학자들에 의해 주로 연구된 FM(Flame Modelling)방법이 있다. 두가지 방법 모두 기체 영역(gas phase)으로부터 연료 표면으로의 과도 에너지 되먹임(transient energy feedback)을 구하기 위한 것이다. FM방법은 기체 영역을 해석하여 이를 구하는 것이고, ZN방법은 고체 연료 표면에서의 선형 교란을 가정하여 기체 영역을 해석하지 않고 이를 고려하는 차이가 있다. 그러나 두 방법 모두 QSHOD(Quasi-Steady Homogeneous One Dimensional Flame) 가정을 사용하고 있다. 또한 해석 방법의 차이에도 불구하고 동일한 결과를

* 건국 대학교 항공우주공학과 인턴 연구원

** 건국 대학교 항공우주공학과

*** 건국 대학교 항공우주공학과 대학원

나타내는 것으로 Novozhilov에 의해 밝혀 졌다.

고체 추진제의 연소 불안정 현상은 몇가지 원인에 의하여 발생된다고 알려져 있는데, 연료면에 평행한 유동의 속도 변화(velocity fluctuation)에 의하여 발생되는 경우에는 속도 간섭(velocity coupling)이 지배적인 메카니즘이며, 압력 교란에 의하여 발생되면 압력 간섭(pressure coupling)이 주된 메카니즘이 된다. 그러나 이들 외에도 기체 영역(gas phase)에서 고체 연료 표면으로 전달되는 복사 열속(radiant heat flux) 교란이 연소 불안정을 일으키기도 한다[5]. 최근에는 레이저와 같은 비정상 복사 에너지를 이용한 고체 추진제의 연소 현상 연구 방법이 제시되고 있다. 이 방법은 비정상 압력장(pressure field)에서 실험하는 것보다 복사 열속을 조절하는 것이 훨씬 용이할 뿐만 아니라 동시에 순간적인 연소율(burning rate)을 측정하는 것이 더 쉬운 장점이 있다. 몇몇 연구자들이 이러한 실험 방법으로 복사 열속 교란에 대한 연소 반응 함수 R_q 를 측정하였다. 실험 결과를 잘 이해하고 예측하기 위해서 이론적인 연소 반응 함수를 구하려는 노력들이 진행되었는데, Son 등[6]은 표면 반응 영역을 통과하여 무반응 응축 영역(chemically inert condensed phase)으로 흡수되는 복사 열속을 고려하여 압력 교란과 복사 열속 교란에 대한 연소 반응 특성을 조사하였다. 연소 반응 함수에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있는 민감 변수(sensitivity parameter)들을 결정함에 있어 이들은 실험 결과로부터 예측된 정상 연소율(steady burning rate), 가정된 표면 온도(burning surface temperature), 그리고 등가 원리(equivalence principle)를 적용하였다. Zebrowski 등[4]은 준 정상(quasi steady) 기체 영역과 표면 반응(surface reaction) 영역 가정을 통한 ZN 해석/수치 해석을 수행하였다. 또한 응축 영역에서의 분포 화학반응 모델(distributed reaction model)을 사용하여 표면 반응 영역 가정을 사용한 결과와 비교하였다. 이들의 해석 결과는 정성적으로 잘 일치하고 있으나 연소 반응 함수를 구하는 과정에서 복사 열속이 과소 평가되었음이 이창진 등[9]에 의해 밝혀졌다.

본 연구에서는 이창진 등[9]에 의해 보완된 연소 반응 함수를 이용하여 기체 영역에서 고체 추진제 표면으로 전달되는 복사 열속 교란이 연소 반응에 미치는 영향을 검토하였으며, 다른 연구자들[6,8]의 실험 그리고 해석 결과와 비교하였다.

II. 지배 방정식 및 연소 반응 함수

고체 추진제의 연소 현상은 고체 표면 위의 매우 얇은 영역으로 고체와 액체 상태가 동시에 존재하는 표면 반응 영역(surface reaction zone), 화학 반응은 발생하지 않으나 확산이 지배적인 무반응 응축 영역(chemically inert condensed phase zone), 그리고 기화된 연료와 화염이 존재하는 기체 영역(gas phase zone)의 세가지 영역으로 나눌 수 있다. 각 영역의 상대적 크기는 각 영역에서의 특성 시간(characteristic time)의 크기에 의하여 나타낼 수 있으며[1], 이들 영역의 특성 시간은 각각 $\tau_c \approx a_c / \bar{r}_b^2$, $\tau_s \approx (RT_s/E_s)\tau_c$, $\tau_g \approx a_g / \bar{u}^2$ 이다. 응축 영역과 비교할 때 표면 반응 영역과 기체 영역은 외부 교란에 대해 준 정상(quas steady)적으로 반응한다. Fig. 1은 고체 추진제의 세가지 연소 영역을 보여 준다.

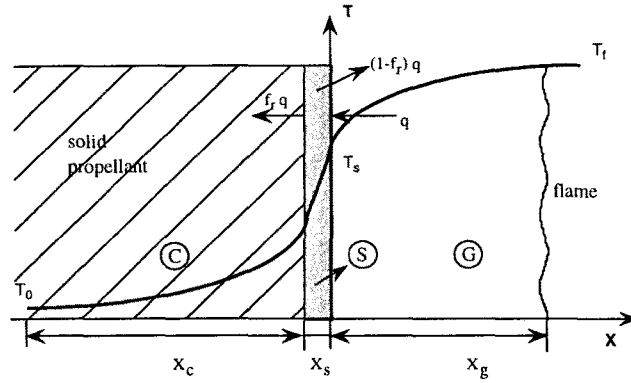


Fig. 1 Schematic description of combustion of solid propellants

표면 반응 영역은 고체 추진제 표면의 매우 얇은 영역에 국한되어 있으므로 표면 영역을 제외한 응축 영역에서의 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + r_b \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_c \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + f_r \nabla \cdot \vec{q}_r \quad (1)$$

경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x \rightarrow -\infty : T &= T_0, \\ x=0 : T &= T_s \quad \text{or} \quad k_c \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{0-} = k_g \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{0+} + \rho r_b Q_c + q_r \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 f_r 은 표면 반응 영역으로 입사되는 복사 열속과 이 영역을 통과한 후 응축 영역으로 흡수되는 복사 열속의 비로서 $f_r = \exp[-2K_a \alpha_c R \bar{T}_s / \bar{r}_b E_c]$ 이며[4], 복사 열속은 Beer의 법칙을 사용하였다.

ZN방법을 사용하여 이창진 등[9]에 의해 새로이 구해진 연소 반응 함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{R}_1 &= R_p \hat{P}_1 + R_q \hat{\psi}_1 \\ R_p &\equiv \frac{\Delta r_b / \bar{r}_b}{\Delta p / \bar{p}} = \frac{k\mu + \delta\xi}{r\xi - k\eta}, \quad R_q \equiv \frac{\Delta r_b / \bar{r}_b}{\Delta q / \bar{q}} = \frac{k\xi + \delta_q \xi}{r\xi - k\eta} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned}
\xi &= 1 - r - r\alpha(f_r \bar{J} - 1) \\
\eta &= r + r(f_r \bar{J} - 1)[A(\alpha - 1) + B(\alpha - \epsilon)] \\
\xi &= \mu_a - r f_r \bar{J} - r(f_r \bar{J} - 1)(\alpha - \epsilon)C \\
\delta &= \nu r - \mu k \\
\delta_a &= \nu_a r - \mu_a k
\end{aligned}$$

이다.

무차원 복사 열속에 대한 기호로 \bar{J} 와 \bar{J} 가 사용되고 있는데, 이는 같은 변수이지만 Son 등 [6]과 Zebrowski 등[4]의 연소 반응 함수에서는 $f_r \bar{J}$ 항이 나타나지 않기 때문에 비교를 위해 편의상 구분한 것이다. 위의 연소 반응 함수에서 나타나는 민감 변수들은 다음과 같이 정의되고 식 (5)로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
k &= (\bar{T}_s - T_0) \left(\frac{\partial \ln \bar{r}_b}{\partial T_0} \right)_{p,q} & \nu &= \left(\frac{\partial \ln \bar{r}_b}{\partial \ln \bar{p}} \right)_{T_0,q} \\
\nu_a &= \left(\frac{\partial \ln \bar{r}_b}{\partial \ln \bar{q}} \right)_{T_0,p} & r &= \left(\frac{\partial \bar{T}_s}{\partial T_0} \right)_{p,q} \\
\mu &= \frac{1}{(\bar{T}_s - T_0)} \left(\frac{\partial \bar{T}_s}{\partial \ln \bar{p}} \right)_{T_0,q} \\
\mu_a &= \frac{1}{(\bar{T}_s - T_0)} \left(\frac{\partial \bar{T}_s}{\partial \ln \bar{q}} \right)_{T_0,p}
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\bar{m}^2 = \frac{AR \bar{T}^2 \rho_c^2 C_s \alpha_c \exp[(-E_c)/R\bar{T}_s]}{E_c [C_s (\bar{T}_s - T_0) - Q_c/2 - f_r q_r / m]}, \quad \bar{T}_s = T_0 + \bar{q}_r / (\bar{m} C_s) + Q_c / C_s \tag{5}$$

식 (5)는 Ibiricu 등[2]에 의해 제시된 정상 연소 관계식(steady burning relations or laws)이다. 여기서 $\bar{m} = \rho_c \bar{r}_b$ 이다. 이 식에서는 연소율과 표면 온도의 압력 의존도가 나타나지 않으므로 결국 초기 온도와 평균 복사열에 의하여 연소율과 표면 온도가 결정된다. 하지만 이 관계식은 단열 기체(adiabatic gas) 가정을 사용하고 있기 때문에 기체 영역으로부터의 열전달이 무시되는 한계성을 지니고 있다.

III. 결과 및 해석

Fig. 2와 3은 Son 등[6]이 구한 연소 반응 함수, 실험 결과, 그리고 본 연구에서 얻은 연소 반응 함수를 비교하였으며 [6]과 동일한 DB N5 추진제의 물성치를 이용하여 연소 반응 함수를 구

하였다. 즉, $\rho_c = 1.55 \text{ g/cm}^3$, $C_s = 0.35 \text{ cal/g-K}$, $\alpha_c = 1.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, $T_0 = 295 \text{ K}$, $R_u = 1.987 \text{ cal/mole-K}$, 그리고 $\nu_a \equiv R_q(0) = 0.43$ 는 $\bar{q}_r = 41 \text{ W/cm}^2$ 에서 측정된 정상 값(steady measurement)으로부터 근사된 것을 사용하였다. 정상 연소율(steady burning rate) 또한 측정된 값으로부터 근사된 값을 사용하였다. 표면 온도를 500K로 가정하였으므로 무차원 평균 복사 열속 $\bar{J} \equiv \bar{q}_r / \rho_c \bar{r}_b C_s (\bar{T}_s - T_0)$ 은 0.38이 된다. 등가 원리를 적용하면 $\nu_a = k^* \bar{J}$ 이고, 이로부터 $k^* = 1.13$ 이다. $k^* = \sigma_p^* (\bar{T}_s - T_0)$ 의 관계로부터 온도 민감도(temperature sensitivity)는 $\sigma_p^* = 0.0055 \text{ K}^{-1}$ 가 된다. r^* 은 $r^* = \sigma_p^* (R_u \bar{T}_s^2 / E_s)$ 에 의하여 구하였다. 일반적으로 응축 영역의 흡수 계수(absorption coefficient) K_a 는 $100 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ 의 값을 가지는 것으로 알려져 있는데 [6], 여기서는 500 cm^{-1} 과 1000 cm^{-1} 인 경우에 대하여 계산하였다.

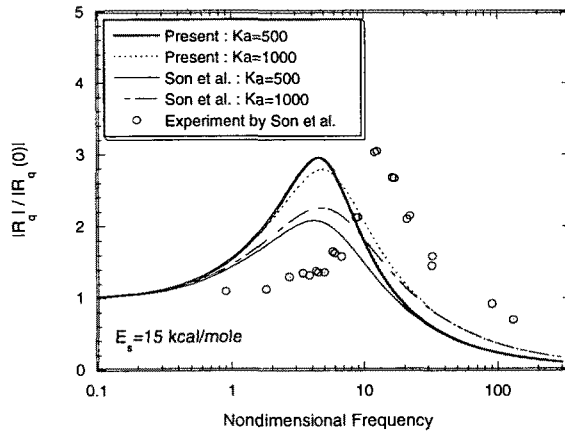


Fig. 2 Comparison of magnitudes of radiation-driven response function with those of Son's

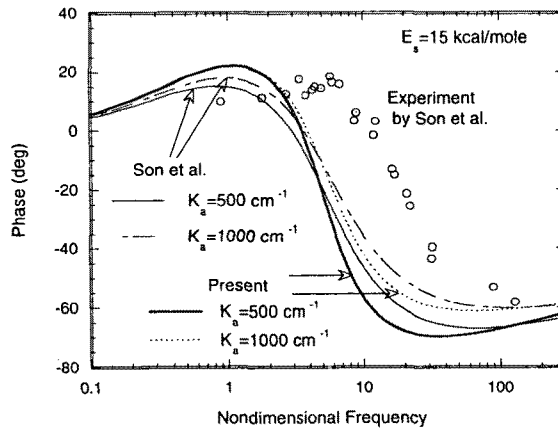


Fig. 3 Comparison of phase of radiation-driven response function with those of Son's

Son 등[6]의 결과에 의하면 활성화 에너지가 $E_s = 40 \text{ kcal/mole}$ 인 경우에 실험 결과와 비슷한

경향을 가지는 것으로 나타났다. 하지만 Zanotti 등[8]에 의하면 비슷한 catalyzed DB 추진제의 경우 활성화 에너지가 $E_s = 5.5 \sim 26.8 \text{ kcal/mole}$ 의 값을 가지는 것으로 알려져 있고, Zenin은 모든 DB 와 NC(nitrocellulose) 추진제들의 적절한 활성화 에너지가 10 kcal/mole 라고 제안하였다 [6]. 따라서 Son 등[6]이 사용한 활성화 에너지가 비 현실적인 값을 가지므로 실험값과 비교하는 것은 부적절하다고 판단된다. Fig. 2에 의하면 $E_s = 15 \text{ kcal/mole}$ 인 경우에 실험 값과 비슷한 피크를 나타내고 있다. 하지만 공진 주파수(resonance frequency)는 정확히 예측하지 못하였다. 이 결과가 Son 등[6]보다 낮은 활성화 에너지에서 실험 값과 비슷한 연소 반응 함수를 예측할 수 있었던 것은 Son 등[6]에 의해 파소 평가된 $f_r \bar{J}$ 를 보완한 반응 함수 R_o 를 사용하였기 때문인 것으로 판단된다.

Son 등[6]은 민감 변수들을 결정하는데 있어서 표면 온도를 가정하고 표면 온도에 의하여 영향을 받는 연소율을 실험 값으로부터 근사하여 사용하였으므로 부적절한 면이 있다. 정상 연소율과 표면 온도는 정상 연소 관계식(식 3)에 의하여 평균 복사 열속과 초기 온도의 함수이므로 본 연구에서는 [4]과 같은 방법을 적용하여 민감 변수들을 결정하였다.

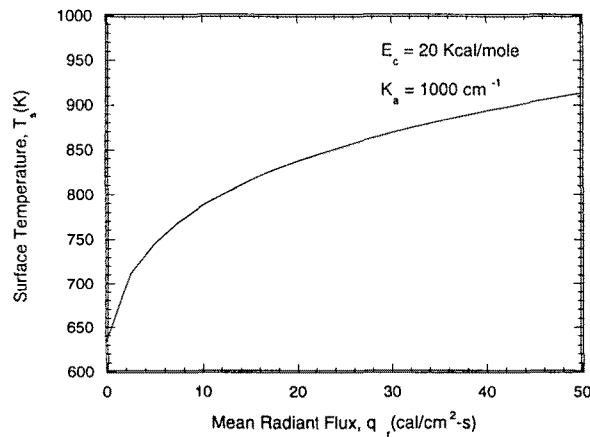


Fig. 4 Burnung surface temperature with regard to mean radiant flux

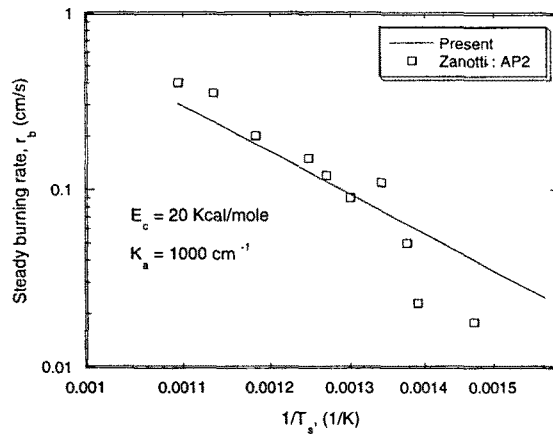
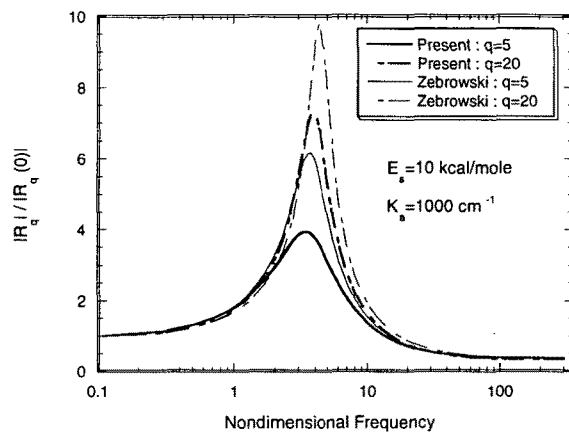


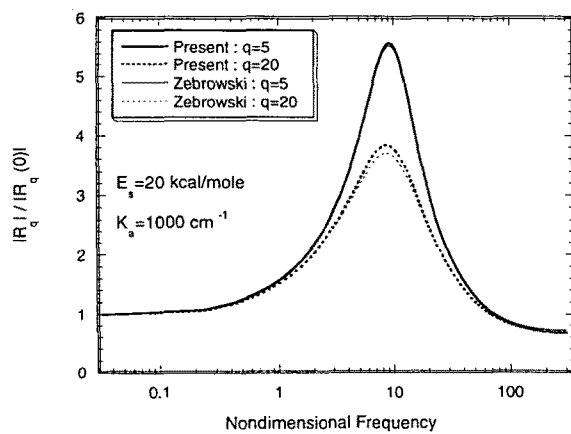
Fig. 5 The relationship between steady burning rate and surface temperature according to steady burning laws

Fig. 4와 5는 각각 평균 복사 열속에 따른 표면 온도의 변화와 표면 온도의 변화에 따른 정상 연소율의 변화를 보여주고 있다. 기체 영역에서 고체 연료 표면으로 전달되는 복사 열속의 크기가 고체 표면 온도와 연소율의 변화를 일으키므로 민감 변수들도 이에 반응하게 된다. Fig. 5는 Zanotti[8]의 AP2 추진제 실험 결과와 식 (5)를 이용하여 표면 온도 변화에 대한 정상 상태 연소율 변화를 비교하였는데 정성적으로 비슷한 경향을 나타내고 있다. 실험 값과 다소 차이가 나는 것은 추진제의 물성치가 다르기 때문이다.

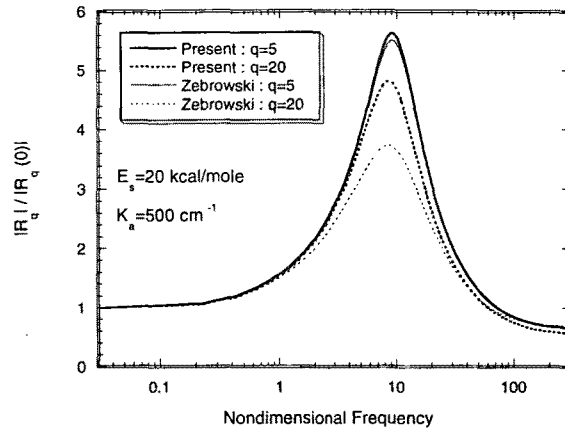
Fig. 6은 Zebrowski 등[4]과 같은 추진제의 물성치를 사용하여 본 연구의 결과와 [4]의 연소 반응 특성을 비교한 것이다. 기본 물성치는 다음과 같다. $\rho_c = 1.95 \text{ g/cm}^3$, $C_s = 0.3 \text{ cal/g-K}$, $\alpha_c = 1.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, $R_u = 1.987 \text{ cal/mole-K}$, $A = 2.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $Q_c = 100 \text{ cal/g}$, $T_0 = 300 \text{ K}$. AP계통의 추진제의 활성화 에너지는 대략 $E_s = 16.5 \text{ kcal/mole}$ 에서 21 kcal/mole 정도의 값을 가지는 것으로 알려져 있다[8]. 본 연구에서는 활성화 에너지를 $E_s = 10 \text{ kcal/mole}$ 과 20 kcal/mole , 그리고 30 kcal/mole 로 변화시켰다. 응축 영역의 흡수 계수는 $K_a = 500 \text{ cm}^{-1}$ 과 1000 cm^{-1} 인 경우에 대하여 계산하였으며, 평균 복사 열속은 $q_r = 5 \text{ cal/cm}^2\text{-s}$ 와 $20 \text{ cal/cm}^2\text{-s}$ 인 두 경우를 고려하였다.



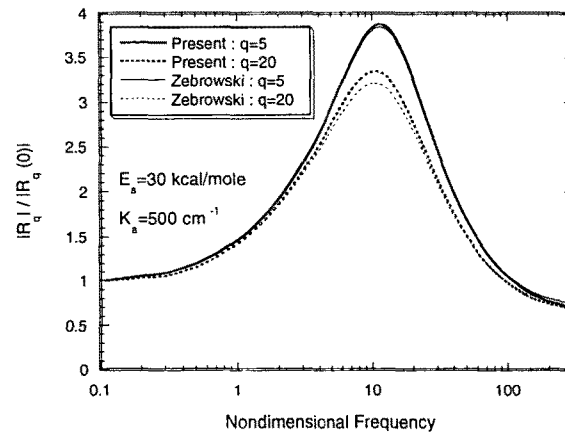
(Fig. 6a) $E_s = 10 \text{ kcal/mole}$, $K_a = 1000 \text{ cm}^{-1}$



(Fig. 6b) $E_s = 20 \text{ kcal/mole}$, $K_a = 1000 \text{ cm}^{-1}$



(Fig. 6c) $E_s = 20 \text{ kcal/mole}$, $K_a = 500 \text{ cm}^{-1}$



(Fig. 6d) $E_s = 30 \text{ kcal/mole}$, $K_a = 500 \text{ cm}^{-1}$

Fig. 6 Radiation driven combustion response for the variations of activation energy, absorption coefficient, and mean radiant heat flux

응축 영역의 흡수 계수가 $K_a = 1000 \text{ cm}^{-1}$ 이고 활성화 에너지가 $E_s = 10 \text{ kcal/mole}$ 인 경우에는 Zebrowski 등[4]의 결과와 많은 차이를 나타내고 있다(Fig. 6a). 즉, Zebrowski 등[4]의 연소 반응 피크가 더 크게 나타나고 있다. 이것은 평균 복사 열속만을 변화시켜 가면서 비교한 결과와는 상충된다[9]. 본 연구에서 사용한 연소 반응 함수와 Zebrowski 등[4]의 것 모두에서 평균 복사 열속이 $q_r = 5 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ 에서 $20 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ 으로 증가하면 피크가 커지는 경향을 보여주고 있다. 다음으로 흡수 계수는 같고 활성화 에너지가 20 kcal/mole 로 증가하면, [4]의 결과와 거의 같은 값을 가지나 본 연구에서 사용한 연소 반응 함수가 약간 더 큰 피크를 가지는 것으로 나타난다. 하지만 평균 복사 열속이 $q_r = 5 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ 에서 $20 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ 으로 증가하면 $E_s = 10 \text{ kcal/mole}$ 인

경우와는 반대의 특성을 보여주고 있다(Fig. 6b). 이는 활성화 에너지에 따라 연소 반응이 매우 다른 특성을 나타낼 수 있다는 것을 의미한다. Fig. 6b와 Fig. 6c의 비교는 흡수 계수의 영향을 보여준다. 평균 복사 열속이 상대적으로 큰 경우, 흡수 계수가 감소하면 본 연구에서 사용한 연소 반응 함수에서는 [4]보다 더 큰 피크를 가진다. 이 경우 흡수 계수가 작을 때 Zebrowski 등[4]이 과소 평가한 $f_r \bar{J}$ 값이 흡수 계수가 큰 경우보다 상대적으로 커지게 되어 연소 반응 함수에서 그림과 같은 차이를 보이는 것으로 보인다. Fig. 6c과 Fig. 6d는 흡수 계수를 $K_a = 500 \text{ cm}^{-1}$ 으로 감소시켰을 때 활성화 에너지에 따른 연소 반응 함수의 변화를 나타낸다. 활성화 에너지가 20 kcal/mole 이고 $q_r = 20 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ 인 경우, 연소 반응 함수의 피크 값에서 Zebrowski 등[4]의 결과와 상당한 차이를 나타낸다. 반면 활성화 에너지가 30 kcal/mole 인 경우에는 연소 반응 함수의 크기가 거의 같은 값을 가지는 것으로 나타나고 있다. 그러나 이 경우 활성화 에너지가 너무 큰 값을 가지므로 [8]이 제시한 활성화 에너지 범위에서는 $f_r \bar{J}$ 를 보완한 [9]의 연소 반응 함수를 사용하여 해석함이 타당하다고 판단된다.

IV. 결론

이창진 등[9]에 의해 보완된 연소 반응 함수를 사용하여 다른 연구자들[4,6]이 사용한 연소 응답 함수와 비교하였다. Son 등[8]의 실험치와 비교한 결과 $f_r \bar{J}$ 가 보완된 연소 응답 함수를 사용하였을 때 좀더 현실적인 활성화 에너지에서 피크를 예측할 수 있었다. 활성화 에너지가 10 kcal/mole 인 경우에는 Zebrowski 등[4]의 연소 반응 함수와 많은 차이를 보이고 있으나 활성화 에너지가 커지면 $f_r \bar{J}$ 의 영향이 적어져서 거의 같은 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 하지만 Zanotti[8]가 제시한 활성화 에너지 범위에서는 $f_r \bar{J}$ 의 영향을 무시할 수 없으므로 본 연구에서 사용한 연소 반응 함수로써 해석함이 타당하다고 판단된다. 새로이 보완된 연소 반응 함수가 복사 열속과 응축 영역의 흡수 계수의 변화에 따라서 반드시 [4,6]보다 큰 피크를 가지는 것은 아니라는 사실을 알 수 있었다. 그러나 민감 변수들을 결정할 때 사용되어진 정상 연소 관계식이 기체 영역으로부터의 열속을 무시한 한계성을 가지고 있으므로 개선된 관계식을 찾을 필요성이 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국 과학 재단 특정기초연구 지원(KOSEF 97-0200-02-01-3)에 의한 연구비 지원을 받았으며, 또한 한국 과학 재단에서 지원하는 인턴 연구원 지원 사업에 의한 연구비 지원을 받았음을 밝히며 이에 감사드립니다.

기호 설명

- $\tau_{()}$: characteristic time of () phase
 α_c : thermal diffusivity ($k_c/\rho_c c_c$)
 r_b : burning rate, cm/s
 f_r : fraction of q_r absorbed below surface reaction zone
 T_s : burning surface temperature
 R : dimensionless burning rate
 k_c : thermal conductivity
 Q_c : chemical heat release by condensed phase reaction
 q_r : absorbed radiant heat flux
 K_a : radiation absorption coefficient of condensed phase
 T : temperature, K
 t : time, sec
 x : coordinate normal to surface, cm
 T_e : equivalent temperature
 ω : dimensionless perturbation frequency
 E_c : effective activation of condensed phase decomposition reaction
 E_s : $E_c/2$
 R_u : universal gas constant
 R_q : radiation-driven linear response function
 R_p : pressure-driven linear response function
 A : pre-exponential factor in zeroth order, condensed phase global r
 α : $1/2 + 1/2\sqrt{1+4i\omega}$
 r : $(\partial \overline{T}_s / \partial \overline{T}_0)_{p,q}$
 k : $(\overline{T}_s - T_0)(\partial \overline{r}_b / \partial \overline{T}_0)_{p,q}$
 \dots : $(\partial \ln \overline{r}_b / \partial \ln P)_{p,q}$
 \dots : $(\partial \ln \overline{r}_b / \partial \ln \rho)_{p,q}$
 \dots : $(\partial \ln \overline{r}_b / \partial \ln T_c)_{p,q}$
 \dots : $(\partial \ln \overline{r}_b / \partial \ln T_0)_{p,q}$
 \dots : \dots
 \dots : \dots
- | <i>subscripts</i> | <i>superscripts</i> |
|-------------------------------|----------------------------|
| c : unreacted condensed phase | - : steady condition |
| s : surface reaction zone | \wedge : perturbed value |
| g : gas phase | |
| r : radiation | |

참고 문헌

1. Novozhilov, B. V., Theory of Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants by the Zeldovich-Novozhilov Method, Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants edited by L. D. Luca, E. W., Price, and M. Summerfield, vol. 143, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, New York, Chap. 15, 1992
2. Ibricic, M. M., and Williams, F. A., Influence of Externally Applied Thermal Radiation on the Burning Rates of Homogeneous Solid Propellants, *Combustion and Flame*, vol. 24, pp 185-198, 1975.
3. Clavin, P., and Lazimi, D., Theoretical Analysis of Oscillatory Burning of Homogeneous Solid Propellant Including Non-Steady Gas Phase Effects, *Combustion Science and Technology*, vol. 83, pp 1-32, 1992
4. Zebrowski, M. A., and Brewster, M. Q., Theory of Unsteady Combustion of Solids: Investigation of Quasisteady Assumption, *Journal of Propulsion and Power*, vol. 12, No.3, pp 564-573, 1996.
5. Son, S. F., and Brewster, M. Q., Radiation-Augmented Combustion of Homogeneous Solids, *Combustion Science and Technology*, vol. 107, pp 127-154, 1995.
6. Son, S. F., and Brewster, M. Q., Unsteady Combustion of Homogeneous Energetic Solids Using the Laser-Recoil Method, *Combustion and Flame*, vol. 100, pp 283-291, 1995.
7. Son, S. F., and Brewster, M. Q., Linear Burning Rate Dynamics of Solids Subjected to Pressure or External Radiant Heat Flux Oscillations, *Journal of Propulsion and Power*, vol. 9, No. 2, pp 222-232, 1993
8. Zanotti, C., Volpi, A., Bianchessi, M., and De Luca, L., *Progr. Astronaut. Aeronaut.* vol. 143, pp 145-193, 1992.
9. 이창진, 김성인, 변영환, 고체추진제의 비정상 연소의 선형 안정성 해석, 한국추진공학회지, 2권, 1호, 1998
10. C. J. Lee and S. I. Kim, Re-Examination of the Response Function of Solid Propellant with Radiant Heat Flux, accepted to 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, paper# 99-0590, 1999.