

## AP추진제의 연소면 형성 및 전파 모델링 연구

정태용\* · 김기홍\* · 유지창\*\* · 도영대\*\* · 김형원\*\* · 여재익\*

### Modeling of burning surface growth and propagation in AP-based composite propellant combustion

Tae-yong Jung\* · Ki-hong Kim\* · Ji-chang Yoo\*\* ·  
Young-dae Do\*\* · Hyung-won Kim\*\* · Jai-ick Yoh\*

#### ABSTRACT

In the solid rocket propellant combustion, dynamic phase change from solid to liquid to vapor occurs across the melt layer. During the burning surface, micro scale bubbles form as liquid and gas phases are mixed in the intermediate zone between the propellant and the flame. The experimentally measured thickness of this layer called the foam layer is approximately 1 micron at 1 atmosphere. In this paper, we present a new melting layer model derived from the classical phase change theory. The model results show that the surface of burning grows and propagate uniformly at a velocity of  $r = ap^n$ .

#### 초 록

고체추진제가 연소될 때, 고체상에서 기체상으로의 상변화가 일어난다. 액체상과 기체상의 혼합으로 인하여 거품이 형성되는데 이를 거품층(Foam Layer) 혹은 용융층(Melting Layer)이라고 한다. 일반적으로 고체추진제가 연소될 때 생성되는 거품층의 두께는 1기압에서 약 1마이크론 정도이다. 거품층의 윗부분, 즉 액체상과 기체상 사이에는 연소면(Burning Surface)이 존재하는데, 본 연구에서는 연소면의 형성과 전파를 모사하였다. 연소면의 전파 속도는 연소율과 같다.

Key Words: AP, Burning Surface(연소면), Foam Layer(거품층), Phase Equation(상방정식), Burning Rate(연소율)

#### 1. 서 론

복합추진제의 산화제로는 AP(Ammonium

Perchlorate)가 널리 사용되는데, 그 이유는 연소 안정성이 높고 연소 속도 제어가 용이하기 때문이다. 산화제 AP의 연소 메커니즘에 관한 선행 연구로는, 점화 후 고체상 추진제의 용융 및 열분해과정(Decomposition)과 화염 구조를 모사한 연구들이 있는데, Hermance에 의해 추진제의 표면이 불균질할 때의 통계적 연소모델이 처음 시

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 국방과학연구소

연락처, E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

도되었고, Hermance모델의 단점을 보완하기 위하여 연소시의 발생 화염을 예혼합화염, 초기화산화염, 최종화산화염의 3가지 화염으로 설명한 BDP모델이 제안되었다[1,2]. BDP모델은 상이한 연소성질 외에도 연소속도-압력의 관계를 설명하는데 경계면 반응의 중요성을 제시하였다. 이 중 예혼합화염은 응축상태가 존재했을 때 생성되는 화염이기 때문에 다중화염 연소 메커니즘을 모사하기 위해서는 응축상태의 존재를 밝히는 것이 중요하고, 이 응축상태를 형성하는 구간을 용융층이라고 명명한다.

실험적 근거에 의하면 AP는 용융층의 두께가 매우 얇기 때문에 육안으로 관측하기는 어렵다 [3]. 수치적으로 용융층의 두께를 계산했을 때 로켓추진제의 산화제로 사용되는 니트라민 계열의 RDX나 HMX의 경우 1atm에서 약 100 $\mu$ m 정도이지만, AP의 경우는 1atm에서 약 1 $\mu$ m 정도이다[4,5]. 용융층의 두께는 연소 불안정성과 관련이 있고, 용융층이 두꺼울 때는 연소 불안정성이 좀 더 증가한다고 알려져 있다.[6]

본 논문에서는 용융층의 윗부분의 연소면의 형성과 전파를 모사하여, 기존에 알려진 보존식과 상방정식을 결합하였을 때의 얻어지는 결과의 타당성을 검증하였다.

## 2. 지배 방정식

### 2.1 연소면의 구조

연소면의 구조를 모사하기 위해서 정상상태에서의 질량, 운동량, 에너지 보존식과 상 방정식을 풀다.

$$\rho u = m \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u e + p u)}{\partial x} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho T \left( \beta_m \frac{Q_m}{T_m} + \beta_v \frac{Q_v}{T_v} \right) \dot{\phi} + Q_k \beta_k \quad (3)$$

$$B_\phi \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = -\rho \left( \frac{1}{2} \Psi \frac{\partial F}{\partial \phi} + \beta_m(\phi) \frac{T - T_m}{T_m} Q_m + \beta_v(\phi) \frac{T - T_v}{T_v} Q_v \right) \quad (4)$$

$\frac{\partial T}{\partial x} = H$  로 정의하면, Eq. 3을 2개의 1차 미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = H \quad (5)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{1}{\kappa} \left\{ \frac{\partial(\kappa c_p T + mRT)}{\partial x} - \rho T \left( \beta_m \frac{Q_m}{T_m} + \beta_v \frac{Q_v}{T_v} \right) \dot{\phi} - Q_k \beta_k \right\} \quad (6)$$

Equation 3을 Eq. 5와 Eq. 6으로 나누는 이유는 지배방정식을  $y' = Ay + g$ 의 선형 시스템으로 표현하기 위함이다.  $\phi$ 는 상의 상태를 표현하는 변수로서,  $\phi = 0$ 에서는 고체,  $\phi = 1$ 에서는 액체,  $\phi = 2$ 에서는 기체를 나타낸다. 일반적인 추진제의 연소를 풀 때 화학반응을 나타내는  $Q_k \beta_k$  항을 포함하여 식을 간략화 하였다.  $\beta_k$ 를 Eq. 7과 같이 정의하여 화학반응의 경우와 유사하게 온도를 증가시키도록 모사하였다.

$$\beta_k(\phi) = (\phi - 1)^2 (5 - 2\phi) \quad (7)$$

Equation 4에서  $F$ 는 고체, 액체, 기체일 때 안정 값(Stable root)을 갖게 하는 함수이고,  $\beta_m$ 는 추진제의 온도가 용융점 보다 높을 때 상 변수가 고체에서 액체로 바뀔 수 있도록 제한하는 함수이고,  $\beta_v$ 는 추진제의 온도가 끓는점 보다 높을 때 액체에서 기체로 바뀔 수 있도록 제한하는 함수이다.

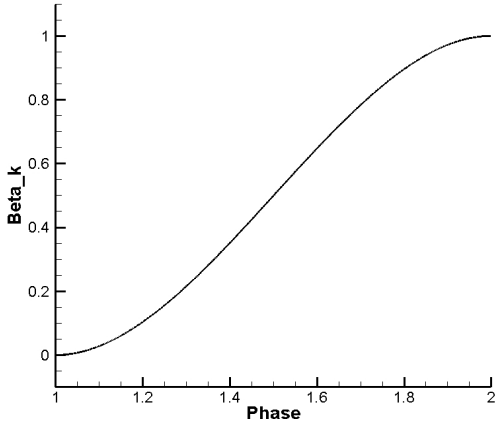


Fig. 1 A Transfer Function of Enthalpy of Phase Transformation

$$F = (\varphi(\varphi-1)(\varphi-2))^2 \quad (8)$$

$$\beta_m(\varphi) = 6\varphi(1-\varphi) \quad (9)$$

$$\beta_v(\varphi) = 6(\varphi-1)(2-\varphi) \quad (10)$$

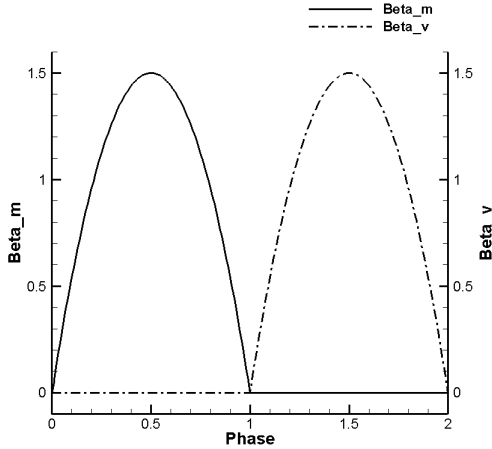


Fig. 2 The Plot of Transition Function

## 2.2 연소면의 형성 및 전파

연소면의 형성 및 전파를 모사하기 위해서 풀어야 할 질량, 운동량, 에너지 보존식, 상 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u e + p u)}{\partial x} \\ & = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho T \left( \beta_m \frac{Q_m}{T_m} + \beta_v \frac{Q_v}{T_v} \right) \dot{\varphi} + Q_k \beta_k \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & B_\varphi \left( \frac{d\varphi}{dt} + u \frac{d\varphi}{dx} \right) = \\ & -\rho \left( \frac{1}{2} \Psi \frac{\partial F}{\partial \varphi} + \beta_m(\varphi) \frac{T-T_m}{T_m} Q_m + \beta_v(\varphi) \frac{T-T_v}{T_v} Q_v \right) \end{aligned} \quad (14)$$

상태방정식의 기체상수 R은 상변수에 관한 함수이고 다음과 같이 정의한다.

$$R(\varphi) = 2(R_{liquid} - R_{gas})(\varphi-1)^3 - 3(R_{liquid} - R_{gas})(\varphi-1)^2 + R_{liquid} \quad (15)$$

$$R_{liquid}(\varphi) = 2R_l(\varphi-1)^3 - 3R_l(\varphi-1)^2 + R_l \quad (16)$$

$$R_{gas}(\varphi) = -2R_g(\varphi-1)^3 + 3R_g(\varphi-1)^2 \quad (17)$$

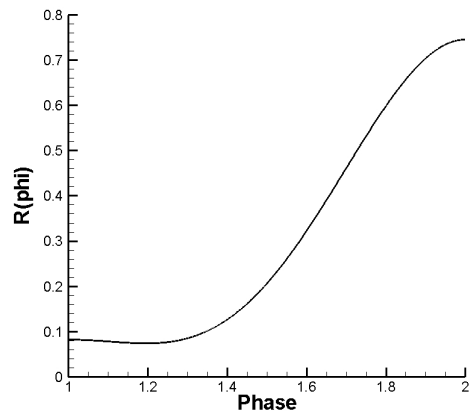


Fig. 3 The Plot of Gas Constant R

### 3. 결 과

#### 3.1 연소면의 구조

용융층의 두께가 약  $0.1\mu\text{m}$ 이기 때문에 연소면의 두께는 더 얇을 거라는 추측이 가능하다. 상방정식을 이용한 모델링에서는 약  $10\text{nm}$  정도의 연소면이 형성되었다.

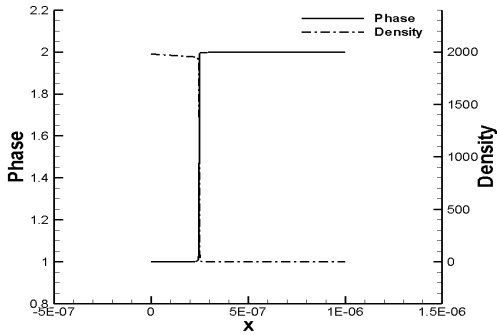


Fig. 4 The Structure of Phase Change Zone

#### 3.2 상면의 형성 및 전파

Figures 5-7는 액체에서 기체로의 상변화를 수반한 보존식을 이용하여 모사한 결과이다. 초기 액체 상태 ( $\varphi=1$ )의 AP기반 복합추진제를 가열하였을 때 연소면이 생성되기 시작한다(fig. 5). 계속해서 화학반응에 의해 가열되면 기체로의 상변화가 일어나 기체상과 액체상 사이에 분명한 연소면 형성되는 것을 확인할 수 있다(fig. 6).

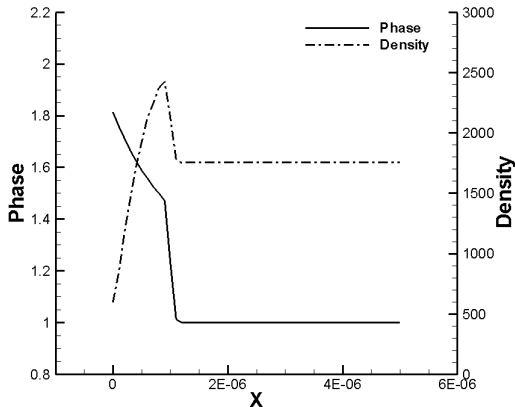


Fig. 5 The Initiation of Burning Surface

Figure 7에서는 연소가 진행됨에 따라 형성된 연소면이 안정되어 전파되는 것을 확인할 수 있다. 화염이 왼쪽에 있고, 오른쪽으로 화염이 전파되는 것을 모사하였다.

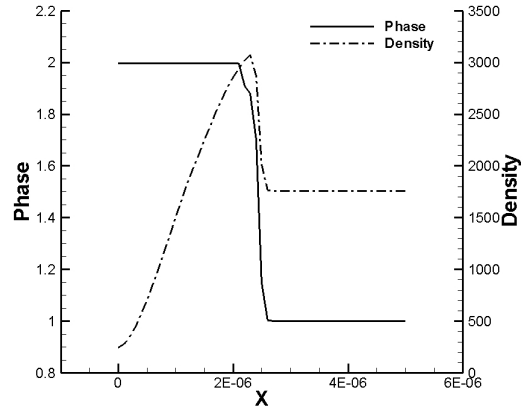


Fig. 6 The Growth of Burning Surface

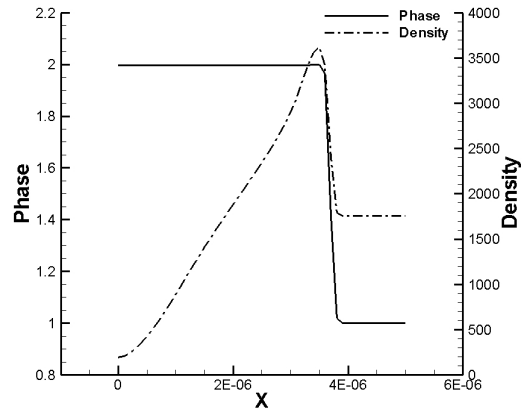


Fig. 7 The Propagation of Burning Surface

점화 후 액체 상태일 때의 AP추진제가 기체 상태로 변하여 연소면이 생성될 때의 두께가 연소면이 전파될 때 보다 좀 더 두꺼운 것을 확인할 수 있는데 이는 용융층의 두께가 압력에 따라 영향을 받기 때문이다. 연소가 계속 진행됨에 따라 화염부분의 온도가 상승하고 이는 압력을 증가시킨다. 주위의 압력이 높을 때 용융층은 얇

게 형성되고 압력이 낮을 때 용융층은 두껍게 형성되는데, 위의 결과를 통하여 용융층의 두께가 압력에 영향을 받는다(Dominant)는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에 사용된 값들은 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Parameters for Burning Surface Growth and Propagation

$\rho_1$	1800 kg/m <sup>3</sup>	$Q_m$	-300 kJ/kg
$u_1$	0 m/s	$Q_v$	-1800 kJ/kg
$T_1$	865 K	$c_v$	1 kJ/kg-K
$\phi_1$	$1 \cdot 10^{-14}$	$\kappa$	0.4 W/m-K
$T_m$	580.1 K	$\Psi$	550
$T_v$	865.6 K	$B_\phi$	1.5
$R_i$	0.0824	$Q_k$	$3 \cdot 10^{15}$ kJ/kg
$R_g$	0.745		

#### 4. 결 론

본 연구에서는 복합추진제가 연소될 때의 상변화를 고려하여 연소면의 형성 및 전파를 모사하였다. 연소면의 두께가 실험적으로 알려져 있지 않지만 용융면의 두께를 통해 추측 가능한 범위에서 연소면이 형성되었다. 본 연구에서는 용융층의 윗부분인 연소면 만을 모사하였는데, 추후에서는 고체상에서 기체상으로의 상변화를 모사하여 실험적 연소율의 속도와 비교하고자 한다. 용융층은 일정한 두께를 가지고 정상상태로 전파되며, 전파속도는 실험적 연소율의 속도인  $r = ap^n$ 와 같기 때문이다. 용융층의 형성을 모사하는 이유는 고체추진제의 연소특성을 명확히 해석할 수 있는 전산기법을 마련하기 위함이다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소 핵심기술 위탁연구의 지원을 받아 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Hermance, C. E., "A Model of Composite Propellant Combustion Including Surface Heterogeneity and Heat Generation," AIAA Journal, Vol. 4, 1966, pp.1629-1637
2. Beckstead, M., Derr, R. and Price, C., "A model of composite solid-propellant combustion based on multiple flames," AIAA Journal, Vol. 8, No. 12, 1970, pp.2200-2207
3. Summerfield, M., Sutherland, G. S., Webb, M. J., Taback, H. J. and Hall, K. P., Solid Propellant Rocket Research, Academic Press, 1960
4. Tanaka, M. and Beckstead, M., "A three-phase combustion model of ammonium perchlorate," AIAA Paper 96-2888, 1996, pp.1-10
5. Liao, Y-C and Yang, V., "Analysis of RDX monopropellant combustion with two-phase subsurface reactions," Journal of Propulsion and Power, Vol. 11, No. 4, 1995, pp.729 - 739
6. 이형인, "고체추진제 연소의 압력파에 대한 반응 : 용융층영향하의 비정상상태 해석," 대한기계학회논문집, 제16권 11호, 1992, pp.2169-2180