

열 하중에 의한 AP/HTPB 복합추진제의 발화특성 모델링 연구

정태용* · 김형원** · 도영대** · 유지창** · 여재익*

Time to ignition analysis of AP/HTPB composite propellant

Taeyong Jung* · Hyungwon Kim** · Youngdae Do** · Jichang Yoo** · Jai-ick Yoh*

ABSTRACT

The AP/HTPB composite propellant is a common choice for solid rocket propulsion. The externally heated rocket via fires, for instance, can cause the energetic substance to ignite, and this may lead to a thermal runaway event marked by a severe explosion. In order to develop preventive measures to reduce the possibility of such accidents in propulsion systems, we investigate the ignition and initiation properties of AP/HTPB propellant.

초 록

고체 로켓 추진제로 널리 사용되는 물질은 AP/HTPB 복합추진제이다. 고체 로켓 주위에 열 하중이 가해진다면(화재 등) 추진제가 발화할 수 있고, 사고의 원인이 된다. 본 연구에서는 AP/HTPB 복합추진제의 주위에 열 하중을 가함으로써 AP/HTPB의 발화특성을 확인해 보았다.

Key Words: Ammonium Perchlorate(AP), Hydroxyl-terminated Polybutadiene(HTPB), ODTX, Composite Propellant(복합 추진제)

1. 서 론

AP 복합물 연소현상을 해석하는 모델 중 많은 이들이 Beckstead, Derr, Price의 BDP 모델[1]을 사용한다. BDP모델은 연소가 일어날 때 발생하는 화염을 크게 3가지로 나누어 설명한다(Fig.

1). 3가지 화염은 예혼합화염(Premixed Flame), 초기확산화염(Primary Diffusion Flame), 최종확산화염(Final Diffusion Flame)이다. BDP 모델에서는 각각의 화염이 전체 화학반응식의 각 단계를 구성한다고 간주한다. 많은 이들이 BDP모델을 가지고 고에너지 물질(주로 로켓추진제)의 연소현상을 해석하였고, Hegab et al.[2] 역시 그러하다. 그러나 [2]에서는 BDP모델의 3가지 화염을 모두 고려하지 않고, 초기 확산 화염의 영향은 미미하다고 고려하여 나머지 2가지의 화염만

* 서울대학교 기계항공공학부

** 국방과학연구소

연락처, E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

으로 화염구조를 해석하였다.

그러나 Massa et al.[3]는 [2]의 결과를 조금 더 발전시키기 위해서는 BDP의 3가지 화염을 모두 해석해야 한다고 판단하여 3가지 화염을 모두 고려하여 화염구조를 해석하였다.

본 연구에서는 [2]의 연구와 [3]의 연구를 바탕으로 2가지 화염을 고려했을 때와 3가지 화염을 고려했을 때 초기온도에 따른 발화시간(One-Dimensional Time-to Explosion : ODTX)를 구해 보았다.

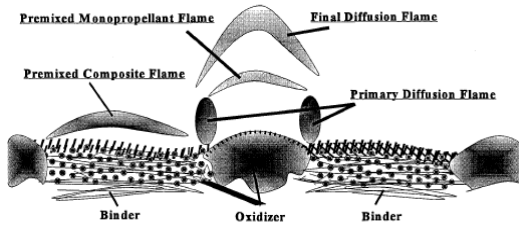
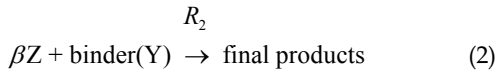
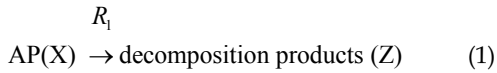


Fig. 1 Conceptual Picture of Flame Structure, adapted from the BDP Model [4]

2. 본 론

2.1 Two-step 모델링

Hegab et al.[2] 모델의 화염 구조 해석을 위한 화학반응식은



이고, 화학 반응률은

$$R_1 = B_1 P_o^{1.744} X \exp\{-E_1 / R_u T\} \quad (3)$$

$$R_2 = B_2 P_o^{1.75} Z Y \exp\{-E_2 / R_u T\} \quad (4)$$

이다. 여기에서 반응률 R_1 , R_2 는 Zhou et al.의 모델[5]을 사용하였다. 화학반응식의 첫 번째 단계가 AP 분해화염(Decomposition Flame)이고, 두 번째 단계가 최종확산화염이다.

온도 T와 화학종 X, Y, Z에 관한 식은

$$\rho \frac{DT}{Dt} = \bar{v} \left(\frac{\lambda_g}{c_p} \bar{\nabla} T \right) + Q_{g1} R_1 / c_p + Q_{g2} R_2 / c_p + (dP_o / dt) / c_p \quad (5)$$

$$\rho \frac{DX}{Dt} = -R_1 \quad (6)$$

$$\rho \frac{DY}{Dt} = -R_2 \quad (7)$$

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = R_1 - \beta R_2 \quad (8)$$

이며, β 는 질량 기반의 AP/HTPB 화학량적 비율이다. 열전달 계수 λ_g 는 $\lambda_g = 0.389 \text{ W/m-K}$ 으로 정하고, 압력 상태 방정식은

$$P_o(t) = \frac{\rho R_u T}{MW} \quad (9)$$

이다.

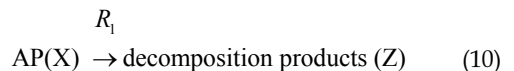
Table 1. Parameter Values for 2 Step

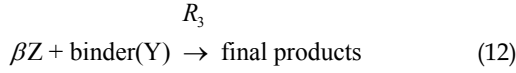
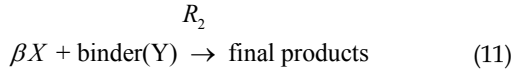
C_p	0.3 kcal/kg-K	Heat Capacity
E_1	29.79 kcal/mol	Activation Energy
E_2	35.75 kcal/mol	Activation Energy
Q_{g1}	-430 kcal/kg	Heat of Reaction
Q_{g2}	2296 kcal/kg	Heat of Reaction
B_1	1186.6	Reaction Rate Constant
B_2	12904	Reaction Rate Constant
R_u	1.9859 cal/mol-K	Gas constant
β	7.51	Mass Fraction
λ	0.389 W/m-K	Heat Conduction Coefficient
ρ	1826.4 kg/m ³	Density
MW	26	Molecular Weight

(E, B is modeled)

2.2 Three-step 모델링

초기확산화염까지 고려하여 화염구조를 해석한 Massa et al.[3] 모델의 화학반응식은





이고, 여기서 화학반응률은

$$R_1 = D_1 P_o^{2.06} X \exp\{-E_1 / R_u T\} \quad (13)$$

$$R_2 = D_2 P_o^{2.06} X^{3.3} Y^{0.4} \exp\{-E_2 / R_u T\} \quad (14)$$

$$R_3 = D_3 P_o^{1.6} YZ \exp\{-E_3 / R_u T\} \quad (15)$$

이다.

위의 두 번째 단계는 [2]에서 고려하지 않은 초기산화열을 모사하기 위한 화학반응식이다.

온도 T와 Species X, Y, Z에 관한 식은.

$$\rho \frac{DT}{Dt} = \bar{v} \cdot \left(\frac{\lambda_g}{c_p} \bar{\nabla} T \right) + (Q_{g1} R_1 + Q_{g2} R_2 + Q_{g3} R_3 + dP_o/dt) / c_p \quad (16)$$

$$\rho \frac{DX}{Dt} = -R_1 - \beta R_2 \quad (17)$$

$$\rho \frac{DY}{Dt} = -R_2 - R_3 \quad (18)$$

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = R_1 - \beta R_3 \quad (19)$$

이며, β 는 질량 기반의 AP/HTPB 화학량적 비율이다. 열전달 계수 λ_g 는 $\lambda_g = 0.389 \text{ W/m-K}$ 으로 정하고, 압력 상태 방정식은 Eq. 9과 같다.

Table 2.. Parameter Values for 3 Step

C_p	0.3 kcal/kg-K	Heat Capacity
E_1	45.676 kcal/mol	Activation Energy
E_2	59.577 kcal/mol	Activation Energy
E_3	59.577 kcal/mol	Activation Energy
Q_{g1}	-410 kcal/kg	Heat of Reaction
Q_{g2}	7403 kcal/kg	Heat of Reaction
Q_{g3}	4396 kcal/kg	Heat of Reaction
D_1	41.1	Reaction Rate Constant

D_2	23500	Reaction Rate Constant
D_3	95	Reaction Rate Constant
R_u	1.9859 cal/mol-K	Gas constant
β	7.33	Mass Fraction
λ	0.389 W/m-K	Heat Conduction Coefficient
ρ	1826.4 kg/m ³	Density
MW	26	Molecular Weight

(E, B is modeled)

3. 결 과

초기온도에 따른 발화시간을 구한 결과를 구하여 보았다. ODTX를 분석하여 보면 Arrhenius 형태인 $r = A \exp(-E/RT)$ 에 따라 선형으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. (Slope : E/R) 2 Step, 3 Step 모두 같은 온도 범위 안에서 비슷한 발화시간의 결과를 나타내지만, 3 Step의 경우 (그래프의 개형을 보았을 때) 반응이 일어나지 않는 온도가 2 Step보다 뒤에 나타나기 때문에 실험결과와는 오차가 존재한다. 결과를 확인하였을 때 참고문헌 [2]의 2 Step 화학반응식이 좀 더 실험값과 가까운 것을 확인할 수 있다.

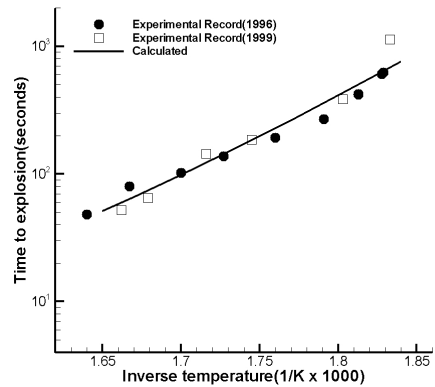


Fig. 2 ODTX Fitting Result for 2 Step Kinetics

후 기

본 연구는 국방과학연구소 핵심기술(응용연구) 위탁연구의 지원을 받아 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 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
2. Hegab A., Jackson T. L., Buckmaster J. and Stewart D. S., "Nonsteady Burning of Periodic Sandwich Propellants with Complete Coupling between the Solid and Gas Phases" Combustion and Flame 125: 1055-1070, 2001
3. Massa L., Jackson T. L. and Buckmaster J., "New Kinetics for A Model of Heterogeneous Propellant Combustion" Journal of Propulsion and Power Vol. 21, No.5, 2005
4. Jeppson M., Beckstead M. and Jing Q., "A kinetic Model for the Premixed Combustion of A Fine AP/HTPB Composite Propellant" AIAA, Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 36 th, Reno, NV, 1998
5. Zhou X., Jackson T. L. and Buckmaster J., "Oscillations in Propellant Flames with Edges" Combustion and Flame 133, 2003
6. Liao Y-C., Yang V., "Analysis of RDX Monopropellant Combustion with Two Phase Subsurface Reactions" Journal of Propulsion and Power 11(4):729 - 39, 1995

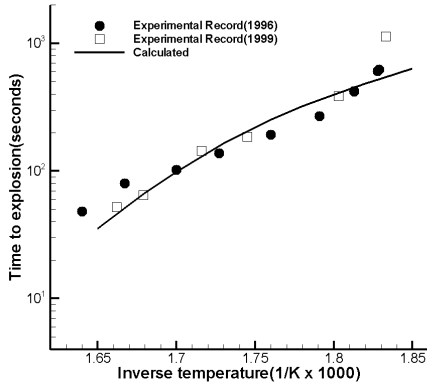


Fig. 3 ODTX Fitting Result for 3 Step Kinetics

4. 결 론

AP/HTPB의 초기온도에 따른 발화 시간을 구하였다. 이를 토대로 로켓 밖에서 열하중이 가해졌을 때(화재의 경우 등), AP/HTPB 추진제가 언제 발화되는지 확인할 수 있다. 또한 기존의 BDP모델에서 2 Step 화학반응식와 3 Step 화학반응식을 발전시켜 발화시간 예측에 적합한 값을 제시하므로써 추후 추진제 비정상 연소특성을 연구하는데 매우 중요한 기반을 마련하였다. 추후 연구는 연료의 상변화가 일어나는 Foam (fig. 4)의 특성이 고려된다.

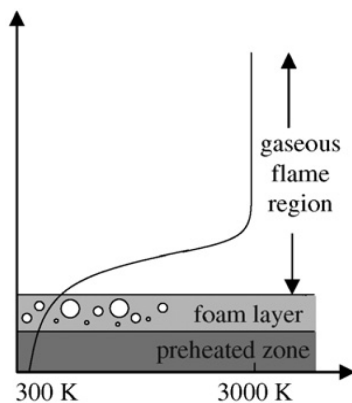


Fig. 4 Geometry of Three Phases near the Interface [6]