



Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2017.21.6.039>

파이로테크닉 착화기 화약 연소 모델링

차승원^a · 우정민^a · 김용찬^a · 오석환^a · 조진연^a ·
김정호^a · 장승교^b · 양희원^c · 노태성^{a,*}

Combustion Modeling of Explosive for Pyrotechnic Initiator

Seung-Won Cha^a · Jeongmin Woo^a · Yong-chan Kim^a · Seok-Hwan Oh^a · Jin Yeon Cho^a ·
Jeong Ho Kim^a · Seung-gyo Jang^b · Hee Won Yang^c · Tae-Seong Roh^{a,*}

^aDepartment of Aerospace Engineering, Inha University, Korea

^bThe 4th R&D Institute - 1st Directorate, Agency for Defense Development, Korea

^cEnergetic Materials & Pyrotechnics Department, Hanwha Corporation Defence R&D Center, Korea

*Corresponding author. E-mail: tsroh@inha.ac.kr

ABSTRACT

In this study, combustion modeling of ZPP and BKNO₃ mainly used in the PMD industries has been performed. Saint Robert's law, energy conservation equation, and the Noble-Abel equation of the state have been used for governing equations. The results of pressure obtained from established combustion models and actual CBT have been compared. In the case of ZPP, the model has predicted a pressure curve similar to that of the experimental results, but BKNO₃ has showed that the maximum pressure of the model is greater than the experiment at small chamber volume. For these gaps, the probability of BKNO₃ unburning has been considered.

초 록

PMD 산업에서 주로 사용되는 ZPP와 BKNO₃에 대한 연소 모델링을 수행하였다. 구성방정식으로는 Saint Robert's law와 에너지보존식, 그리고 Noble-Abel 상태방정식을 사용하였다. 구축된 연소 모델과 실제 CBT에서 얻은 압력 결과데이터를 비교하였다. ZPP의 경우, 모델이 실험 결과와 유사한 압력곡선을 예측하였지만, BKNO₃는 챔버의 부피가 작을 때 모델이 실험보다 큰 최대압력을 도출하였다. 이에 대해 BKNO₃의 미연소성을 고려하였다.

Key Words: ZPP(지르코늄/과염소산칼륨), BKNO₃(붕소/질산칼륨), CBT(밀폐 폭발 시험)

Nomenclature

a : Burning Coefficient (m/s)

b : Co-Volume (m³/kg)

c_v : Specific Heat at constant volume (J/kg/K)

e : Specific Internal Energy (J/kg)

Received 27 February 2017 / Revised 6 July 2017 / Accepted 12 July 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

η_{cp} : Condensate Ratio of combustion products
 HV : Heating Value (cal/g)
 m : Mass (kg)
 N : Number of solid propellant particles
 n : Pressure Exponent
 P : Pressure in chamber (Pa)
 R : Specific Gas Constant (J/kg/K)
 r : Radius of solid propellant (m)
 ρ : Density (kg/m³)
 T : Temperature in chamber (K)
 T_0 : Initial Temperature in chamber (K)
 V : Volume (m³)
 v : Specific Volume in chamber (m³/kg)

Subscripts

cp : Condensate Phase of combustion products
 gas : Gas Phase of combustion products
 i : Types of propellant (ZPP, BKNO₃)
 j : Phase of propellant before & after
 combustion (p, gas, cp)
 p : Propellant

1. 서 론

PMD (Pyrotechnic Mechanical Device)는 화약의 폭발로 인해 발생하는 압력에너지를 통해 작동하는 기계적인 장치를 말한다. PMD의 구성품 중 착화기는 화약을 충전해놓고 신호를 받은 순간, 높은 압력을 발생시키는 역할을 맡는다. PMD의 작동시물레이션을 위해서는 착화기에 의해 얼마만큼의 압력이 발생하는지 알아야 하는데, 이는 화약의 연소과정을 모델링함으로써 계산할 수 있다.

국내외적으로 많은 연구들이 진행되어 왔으며, 국내에서는 주로 ZPP (Zirconium Potassium Perchlorate)의 연소 모델링에 대한 연구가 많다. 대표적으로 ZPP 화약의 알갱이를 완전 구형으로 가정된 뒤 연소율에 의한 가스발생량을 계산하

여 챔버 내부의 압력을 구하는 연소 모델이 있다[1,2]. 이중화약을 사용하는 착화기는 단일 화약종의 연소 모델을 각각의 화약종에 적용하고 이상적으로 혼합된다는 가정 하에 크기 성질 (Extensive Property)들을 더해주는 연소 모델이 있다[3]. 해외에서는 1990년대 미국에서 NASA Standard Initiator Driven Pin Puller에 대한 연구가 활발했으며 그 접근 방법은 현재 국내에서 연구되는 방식과 매우 유사하다[4].

국내와 국외에서 사용되는 연소 모델 모두 화약의 연소율 개념과 질량보존 및 에너지보존 법칙에 의거하는 기본적인 지배방정식을 사용한다. 국내에서 이러한 구성방정식을 적용하여 PMD 작동해석을 수행하였을 때, 실험 결과와 큰 오차를 보이지 않았다[1,3]. 하지만 앞서 언급한 연구들에서는 해석대상에 특화되어 있는 보정계수를 사용함으로써 범용성이 떨어진다.

본 연구에서는 연소 모델의 해석대상을 기존보다 넓히고, 사용되는 물성치들에 논점을 맞추어 범용적으로 사용할 수 있는 화약의 연소 모델을 목표하였다. 해석대상은 챔버 내에 존재하는 모든 물질로 연소 전인 고체상태의 화약과 기체, 액체, 고체상태의 연소결과물, 그리고 기존에 존재하던 공기까지 고려하였다. 연소결과물의 물성치들은 NASA의 CEA (Chemical Equilibrium with Application)[5]을 통해 압력에 따른 함수로 만들어 사용하였으며, 화약의 열량값(Heating Value)와 입자크기는 직접 시험을 통해 측정된 수치를 적용하였다. 위 과정을 통해 구축된 연소 모델을 CBT (Closed Bomb Test)를 통해 얻은 시간-압력데이터와 비교하였다.

2. 파이로테크닉 착화기

파이로테크닉 착화기의 목적은 시동, 방출, 주입, 밸빙, 스위칭 등으로 짧은 시간에 충분한 힘이 구조물로 전달되어 미션이 성공하도록 해야 한다. 그리고 어떠한 환경조건이라도 낮은 전력 신호에 발화가 가능해야 하며 역으로 외부에서 오는 충격에 대해서는 둔감하게 반응해야 한다.

또한 항공우주산업에 사용되기 위해서는 높은 효율성 가져야하기 때문에 적은 양의 화약으로도 충분히 빠르고 높은 압력을 발생시켜야 한다.

2.1 착화기

착화기의 기본적인 형상은 Fig. 1과 같다. 접촉핀(Contact Pin)을 통해 외부로부터 전원이 공급되면 전열선(Heating Wire)의 온도가 올라가 화약의 연소가 시작되고, 압력이 올라감에 따라 입구를 막고 있는 보호마개(Protective Closure)가 파열되면서 유동이 분출된다. 통상적으로 발생시키는 압력에 따라 착화기의 이름을 명명하는데, 부피가 10 CC인 챔버에서 300 psi의 압력을 발생시키면 PC-300, 800 psi의 압력을 발생시키면 PC-800이라 부른다. 본 연구에서는 ZPP 65 mg을 충전한 PC-300과 보조화약으로 ZPP 65 mg과 주화약인 $BKNO_3$ (Boron Potassium Nitrate) 100 mg이 충전되어 있는 PC-800에 대한 모델링을 수행하였다.

2.2 Zirconium-Potassium Perchlorate ($Zr/KClO_4$)

ZPP는 연료로 쓰이는 지르코늄 파우더와 산화제로 쓰이는 과염소산칼륨 파우더를 Viton으로 섞어 제조하며 약간의 흑연을 첨가한다. ZPP는 착화기용 화약 중에서도 높은 열에너지와 빠른 연소율을 보이고 전기 스파크에 매우 민감하여 낮은 전력 신호에도 충분히 발화한다. 하지만 정전기에 대한 민감성 때문에 제조과정에서 번거로움이 존재한다[6].

Table 1은 ZPP의 구성 요소의 질량분율 및 규격에 대한 정보를 보여준다. Table 1의 질량분율을 토대로 CEA를 통해 ZPP 화약의 연소결과물을 도출할 수 있다. Table 2는 100기압에서 ZPP가 연소할 때, 생성되는 물질과 질량 비율을 보여준다. 연소결과물로는 가스뿐 아니라 액체상태의 응축물이 적지 않게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이 응축물의 생성량은 챔버 내의 압력을 모델링할 때 중요한 변수로 사용된다.

2.3 Boron Potassium Nitrate (B/KNO_3)

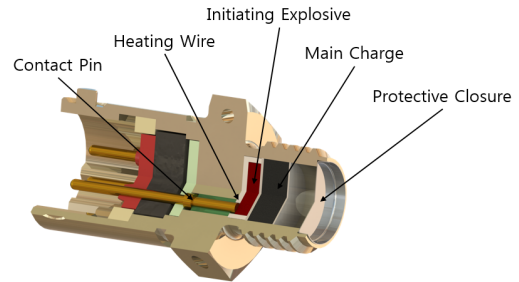


Fig. 1 Schematic model of pyrotechnic initiator.

Table 1. ZPP propellant specifics[7].

Ingredient	% by weight	Specification
Zirconium	52.0	Mil-Z-399D, Type II, Class II Hafnium content: 3.0% max
Potassium Perchlorate	42.0	Mil-P-217, Grade A, Class 4
Viton	5.0	DuPont Sales
Graphite	1.0	Mil-G-155, Grade III. Particle size less than 1 micron

Table 2. ZPP combustion products at 100 atm.

Combustion Product	Mass Fraction
$ZrO_2(l)$	0.48164
$ZrO(g)$	0.12484
$KCl(g)$	0.10558
$KF(g)$	0.07005
$ZrO_2(g)$	0.06903
$Cl(g)$	0.05450
$CO(g)$	0.05308
$K(g)$	0.01549
$F(g)$	0.00947
$Zr(g)$	0.00612
$HF(g)$	0.00443
$HCl(g)$	0.00233
$O(g)$	0.00152
etc	0.00420

$BKNO_3$ 는 연료로 쓰이는 보론과 산화제로 쓰이는 질산칼륨을 결합제인 Laminac 4116을 사용

하여 제조한다. 일반적으로 보론 금속을 사용하는 경우 높은 발열량을 가지게 되며 산화반응이 더디게 일어난다[8]. Table 3과 4는 각각 BKNO_3 의 질량분율 및 규격과 100 기압에서의 연소결과물들을 보여준다.

3. 화약 연소 모델링

3.1 구성방정식

화약의 연소 반응으로 생성되는 연소가스와 액체, 고체상태의 연소응축물의 질량 생성률을 Saint Robert's law에 따라 Eq. 1-5와 같이 나타낼 수 있다. Eq. 1은 Saint Robert's law에 따른 화약입자 반지름의 감소율을, Eq. 2는 화약질량 감소율을, Eq. 3-4는 연소결과물 질량 생성률을, 마지막으로 Eq. 5를 통해 화약입자 개수를 정한다. Eq. 1-5는 한 종류의 화약에 대해서 적용되며, 이종 화약인 경우에는 화약종마다 각각 따로 적용한다. 이때 화약의 입자는 완전 구형으로 가정하며, 초기에 결정된 입자개수가 연소를 진행하는 동안 유지된다.

$$\frac{dr_i}{dt} = -a_i P^{n_i} \quad (1)$$

$$\frac{dm_{i,p}}{dt} = 4\pi r_i^2 \rho_{i,p} N_{i,p} \frac{dr_i}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dm_{i,gas}}{dt} = (1 - \eta_{i,cp}) \left(-\frac{dm_{i,p}}{dt} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dm_{i,cp}}{dt} = (\eta_{i,cp}) \left(-\frac{dm_{i,p}}{dt} \right) \quad (4)$$

$$N_{i,p} = \frac{(m_{i,p})_{initial}}{\rho_{i,p} \left(\frac{4}{3} \pi r_i^3 \right)_{initial}} = constant \quad (5)$$

위 식으로 구해진 연소 가스와 응축물의 생성 질량을 기반으로 챔버 내의 에너지 보존 법칙을 이끌어내면 온도에 대한 미분방정식을 얻을 수

Table 3. BKNO_3 propellant specifics[8].

Ingredient	% by weight	Specification
Boron	23.7	Mil-B-51092
Potassium Nitrate	70.7	Mil-P-156A
Laminac 4116	5.6	Mil-R-7575

Table 4. BKNO_3 combustion products at 100 atm.

Combustion Product	Mass Fraction
$\text{KBO}_2(\text{g})$	0.51423
$\text{BN}(\text{cr})$	0.13474
$\text{B}_2\text{O}_2(\text{g})$	0.11341
$\text{CO}(\text{g})$	0.08391
$\text{B}(\text{l})$	0.04455
$\text{HBO}(\text{g})$	0.03492
$\text{K}(\text{g})$	0.02508
$\text{N}_2(\text{g})$	0.02094
$\text{B}_2\text{O}_3(\text{g})$	0.01467
$\text{KCN}(\text{g})$	0.00408
$\text{BO}(\text{g})$	0.00390
$\text{HBO}_2(\text{g})$	0.00247
$\text{H}_2(\text{g})$	0.00167
etc	0.00140

있다. 챔버 내부에 존재하는 기체, 액체, 고체상의 모든 물질들이 상호간에 큰 열전달이 이루어진다고 가정하면 챔버 내부는 열적 평형상태가 되며 본 연구에서 다루는 해석대상 모두 같은 온도를 가진다($T=T_p=T_{cp}=T_{gas}=T_{air}$)[9]. 여기서, air는 초기 챔버를 차지하고 있던 공기를 뜻하며 챔버의 부피가 변하지 않는다면 에너지 보존 법칙을 통하여 Eq. 6과 같은 온도 미분방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{dT}{dt} = \sum_i (-dm_{i,p}/dt) \times \left[\frac{e_{i,p}(T) - e_{i,gas+cp}(T) + HV_i - e_{i,p}(T_0) + e_{i,gas+cp}(T_0)}{\left[\sum_i \sum_j (mC_v)_{i,j} + (mC_v)_{air} \right]} \right] \quad (6)$$

Eq. 6에서 구한 온도 미분방정식을 통해 챔버 내부의 온도를 결정하고 상태방정식을 통해 압력을 구한다. PMD 내부는 화약 폭발로 인해 고온 고압의 상태가 되며, 이러한 경우에는 이상기체 상태방정식이 아닌 Noble-Abel 상태방정식을 사용하여 오차를 줄일 수 있다[10].

Noble-Abel 상태방정식을 이용하기 위해서는 챔버를 차지하는 기체의 Co-Volume 값이 필요하다. 정확한 Co-Volume 값을 얻기 위해서는 기체를 구성하는 모든 원자의 van der Waals radius를 알아야 하지만 이는 비효율적이며 불가능한 작업이다. 또한 다른 참고문헌에 제시되어 있는 화약들의 Co-Volume 값들을 살펴보면 큰 편차가 없어, 본 연구에서는 참고문헌에 나와 있는 수치들의 평균값인 $0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$ 을 사용하였다[11,12]. Noble-Abel 상태방정식을 기반으로 한 압력 미분방정식은 Eq. 7-10의 과정을 걸쳐 Eq. 11과 같이 도출된다. Eq. 7은 연소가스 및 공기의 밀도를, Eq. 8은 실제로 기체성분이 차지하는 부피를, Eq. 9-10은 각각 밀도와 비체적의 변화율을 뜻하며, 이를 통해 Eq. 11과 같은 압력 미분방정식을 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{\sum_i m_{i,gas} + m_{air}}{V} \quad (7)$$

$$V = V_{chamber} - V_p - V_{cp} \quad (8)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{V} \sum_i \frac{dm_{i,gas}}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} \quad (10)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{R}{v-b} \frac{dT}{dt} - \frac{RT}{(v-b)^2} \frac{dv}{dt} \quad (11)$$

3.2 연소 물성치

물질의 물성치들은 주로 온도와 압력에 따라 바뀌게 되는데, 연소반응으로 생성되는 결과물의 경우 온도보다는 압력변화에 따라 수치가 민감

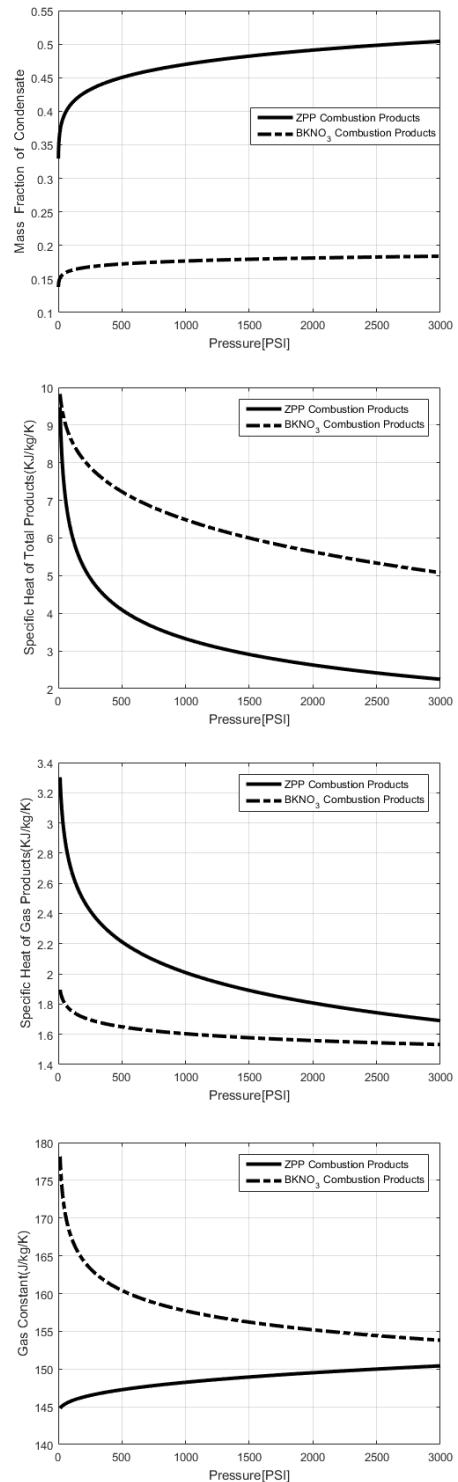


Fig. 2 Properties of combustion products with respect to pressure.

Table 5. Characteristics of ZPP / BKNO₃ propellant.

	Density (kg/m ³)	Burning coefficient (mm/s)	Pressure exponent (psi ⁿ)
ZPP	2440	18.82	0.182
BKNO ₃	1390	5.82	0.306

하게 바뀐다. 따라서 본 연구에서는 압력에 따른 연소반응을 CEA로 해석하여 모델링에 쓰이는 물성치 값들을 압력에 대한 함수로 만들어 적용하였다.

Fig. 2는 챔버의 내부압력이 1~3000 psi일 때, ZPP와 BKNO₃의 연소반응으로 생성된 결과물들의 물성치 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 전반적으로 1~200 psi에서 급격한 변화를 보이며 압력이 커질수록 기울기가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

CEA로 얻을 수 없는 물성치들은 시험을 통한 측정 또는 다른 참고문헌에 나와 있는 수치를 사용하였다. 화약이 연소되면서 발생하는 열량값은 열량측정시험[13]으로 도출된 값을 사용하였다(ZPP: 1350 cal/g, BKNO₃: 1550 cal/g). 연소하기 전, 고체상태 화약의 비열값은 ZPP의 경우 참고문헌[14]에 나와 있는 수치 (500 J/kg/K)를, BKNO₃의 경우 보론과 질산칼륨의 비열을 질량 평균한 값 (960 J/kg/K)을 적용하였다.

Table 5는 고체화약의 밀도 및 연소율을 결정하는 물성치들을 보여준다[15]. 연소율 및 압력 지수는 Eq. 1의 Saint Robert's law에 사용되며, 고체화약의 밀도는 화약의 질량 감소율을 구하는 Eq. 2에 사용된다.

화약 입자의 크기는 연소 모델링에서 중요한 변수로 작용한다. 정해진 화약량에 입자크기를 어떻게 잡느냐에 따라 연소면적이 달라진다. 연소면적에 따라 연소속도가 결정되므로 입자크기는 압력 상승 곡선의 기울기를 결정한다. Table 6에는 SEM 분석을 통한 ZPP와 BKNO₃의 입자크기가 나타나있다.

ZPP의 경우, 국내 PMD 모델링 연구에서 보편적으로 사용되는 초기 입자크기는 48 μm이며 [1,2], 이 수치는 SEM으로 측정된 ZPP의 최소

Table 6. Particle size measured by SEM.

	Diameter Max (μm)	Diameter. Min (μm)
ZPP	420	45
BKNO ₃	568	22.4

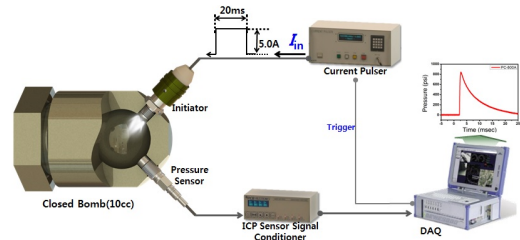


Fig. 3 Closed bomb test setup.

입자크기와 유사하다. 착화기 내부에서 압착된 화약은 발열선에 의해 점화되어 분열이 생기고 그대늘을 형성하여 착화기를 빠져나온다[16]. 이 과정에서 화약 입자는 최소의 크기로 분열된다. 따라서 본 연구에서는 SEM에 의해 측정된 최소 입자크기를 초기 입자크기로 연소 모델링에 적용하였다.

4. 모델링 결과 및 실험값과 비교

CBT는 부피가 고정된 밀폐용기 내에서 화약을 연소시켜 압력 거동을 측정하는 시험이다. 주로 10 CC 밀폐용기에서 착화기나 점화안전장치의 성능을 확인하는 용도로 이용되며[3], 본 연구에서는 개발한 연소 모델의 검증에 위해 다양한 부피에서의 CBT 결과와 비교하였다. Fig. 3은 개략적인 CBT 셋업을 보여주며, 실험에 사용된 압력센서는 PCB-102B 모델이다.

4.1 착화기 (PC-300)

Fig. 4는 착화기 PC-300을 각각 부피가 10 CC, 4 CC, 2 CC인 챔버에 장착하여 CBT한 결과와 연소 모델로 해석한 결과를 비교한 그래프이다. 연소 모델에서 다른 변수는 다루지 않고 챔버 부피의 변수 값만을 바꾸었으며 실험 결과

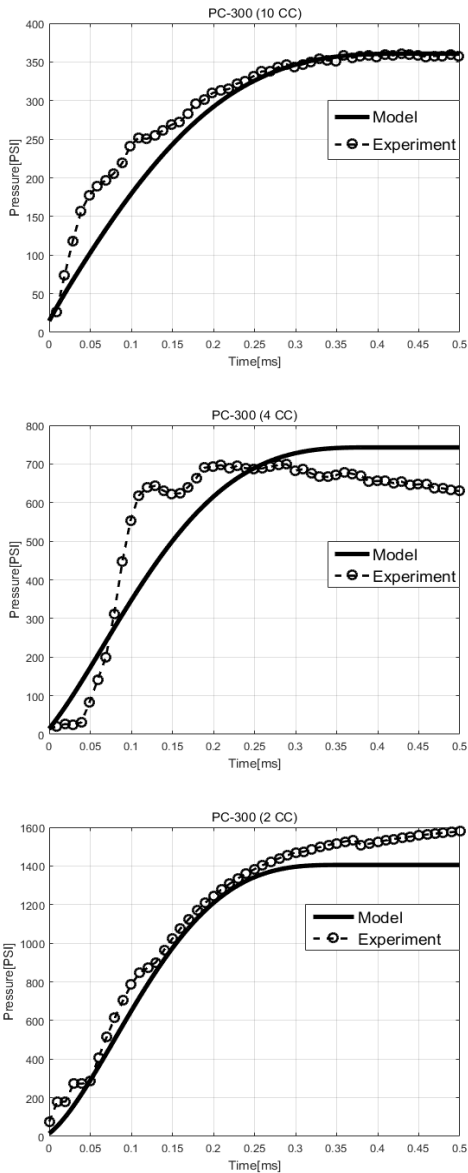


Fig. 4 Comparison of combustion model and closed bomb test at 10 CC, 4 CC, 2 CC chamber using PC-300 (ZPP: 65 mg).

와 비교하였을 때, 측정된 압력 프로파일을 큰 오차 없이 따라가는 것을 확인할 수 있다. 다만, 초반영역에서 보이는 실험 데이터와의 차이는 본 모델에서 충격파를 고려하지 않았기 때문이다. 실제로는 착화기의 보호마개가 파열되면서 강력한 충격파가 발생하게 되는데, 이로 인해 초

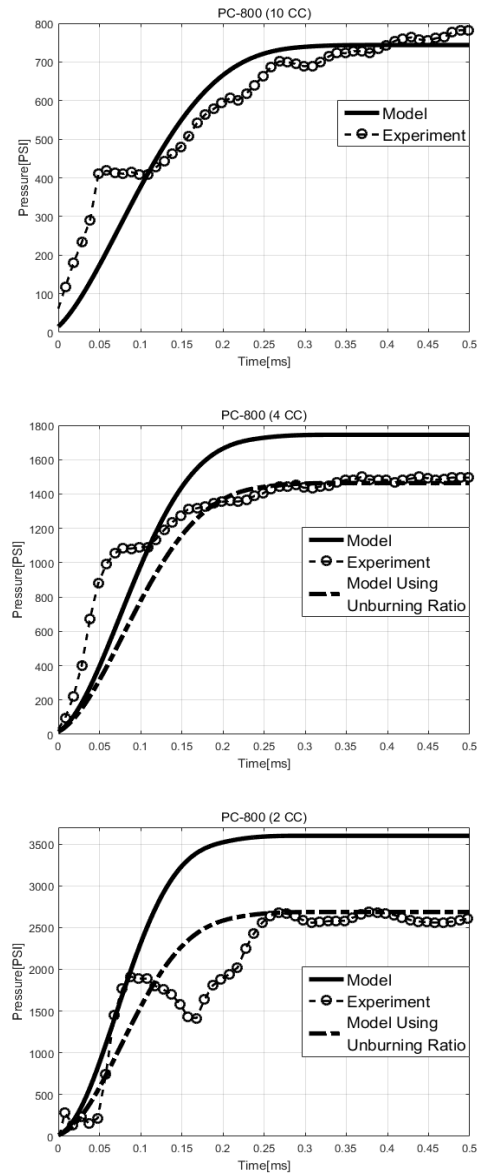


Fig. 5 Comparison of combustion model and closed bomb test at 10 CC, 4 CC, 2 CC chamber using PC-800 (ZPP: 65 mg, BKNO_3 : 100 mg).

기 실험 데이터가 출력된다. 이와 같은 실험 결과를 참고문헌[17]에서도 확인할 수 있다.

4.2 착화기 (PC-800)

Fig. 5는 PC-800에 대한 해석 결과와 실험 결과를 비교한 그래프이다. 10 CC의 경우, PC-300

과 마찬가지로 연소 모델이 실험 결과와 유사한 압력 곡선을 도출한다. 하지만 부피가 작아질수록 실험 결과로 측정된 최대 압력과 연소 모델이 예측하는 최대 압력의 오차가 점점 커지는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 이에 대한 원인으로 $BKNO_3$ 화약의 미연소성을 고려하였다. 착화기 PC-800에 충전되어 있는 $BKNO_3$ 는 보조화약인 ZPP의 연소반응으로 발생하는 고압에 의해 대부분의 화약 알갱이들이 연소를 끝마치지 못하고 착화기 밖으로 분출된다.

$BKNO_3$ 의 연료인 보론 금속이 연소하기 위해서 필요한 최소 온도는 1,900 K이다[18]. 착화기 PC-800을 사용할 때, 연소 모델을 통해 계산된 챔버 내부의 온도는 2,100 K이므로 벽면 근처에서는 열손실로 인해 중심부보다 온도가 낮아져 보론이 미연소될 가능성이 충분히 존재한다.

Table 7은 PC-800의 CBT 결과와 참고문헌[19]에 나와 있는 $BKNO_3$ 만을 사용한 CBT 결과를 본 연구에서 구축한 연소 모델과 비교한 표이다. $BKNO_3$ 만을 사용한 CBT에서도 PC-800과 마찬가지로 연소 모델이 더 큰 최대 압력을 예측하였다. 따라서 PC-800에서 보이는 연소 모델과 실험값의 오차는 ZPP와는 별개로 $BKNO_3$ 만의 현상으로 입증되고, 이에 대한 원인을 Eq. 12의 Noble-Abel 상태방정식을 사용해 접근하였다.

$$P = \frac{RT}{v-b} \quad (12)$$

Noble-Abel 상태방정식에서 Co-Volume 값을 상수로 본다면 최대 압력을 결정하는 변수는 3가지이다. v 는 비체적으로 챔버의 부피와 챔버를 차지하는 가스의 질량으로 결정되는데, 같은 화약량이 모두 연소한다면 발생하는 가스량은 일정하다. 이 때, 화약이 타면서 발생하는 가스와 응축물의 비율은 압력에 따라 Fig. 2처럼 변하지만 그 수치가 부피의 변화량에 비해 미미하므로 무시할 수 있다. 마찬가지로 기체상수 R 도 Fig. 2처럼 압력에 따라 기체 구성 비율이 달라져 바뀌지만 최대 압력에 미치는 영향력은 부피 변화

Table 7. Relationship between unburning ratio of $BKNO_3$ and chamber volume.

	PC-800 (ZPP: 65 mg)($BKNO_3$: 100 mg)		
	Volume (CC)	10	4
Model Pressure (psi)	744	1,739	3,587
CBT Pressure (psi)	755	1,483	2,680
$BKNO_3$ Unburning Ratio (%)	0	20	30
	$BKNO_3$: 150 mg		
	Volume (CC)	10	5
Model Pressure (psi)	697	1,310	2,627
CBT Pressure (psi)	750	1,016	1,760
$BKNO_3$ Unburning Ratio (%)	0	19	26

에 비해 무시할 수 있는 정도이다. 마지막으로 챔버 내의 온도는 부피가 작아질수록 커지는 경향이 있으나 그 또한 차이가 크지 않아 상수로 볼 수 있다. 그러므로 CBT에서 거시적으로 압력을 결정하는 변수는 v 이며 화약이 모두 연소한다고 가정하면 최대 압력은 부피에 반비례적인 경향성을 가진다.

ZPP만 사용하는 PC-300의 경우, Fig. 4에 나와 있듯이 부피가 10 CC, 4 CC, 2 CC로 감소하는 동안 최대압력이 300 psi, 700 psi, 1,600 psi로 증가한다. 부피가 감소하는 비율과 최대압력이 증가하는 비율을 비교하였을 때, 위에서 언급한 경향과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

하지만 Table 7의 $BKNO_3$ 만을 사용하였을 때는 그러한 경향이 맞지 않다. 부피가 10 CC일 때 평균적으로 750 psi의 최대압력을 발생시키지만 절반의 부피인 5 CC인 경우에는 750 psi의 2배인 1,500 psi보다 월등히 낮은 대략 1,016 psi의

압력이 측정된다. 또한 2.5 CC의 경우에도 10 CC의 최대압력의 4배인 3,000 psi보다 낮은 1,760 psi의 압력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 부피에 따라 생성되는 가스 질량이 변함을 뜻하며, BKNO₃ 화약의 일부가 미연소함을 말한다.

부피가 작아질수록 단위 부피당 표면적 비율이 높아져 열손실량이 커지고, 이로 인해 연소반응이 소멸되는 경향을 가진다[20]. 또한 BKNO₃의 미연소율을 통해 Table 7의 모델 압력과 CBT 압력을 맞춰보면, 부피가 작아질수록 더 큰 미연소율을 가져야 한다는 것을 알 수 있다. 이러한 요소를 연소 모델에 적용하기 위해 Table 7의 결과를 토대로 BKNO₃의 미연소율과 챔버의 부피에 대한 관계식을 도출하였다.

$$\eta_{unburning}(\%) = 60 \left(\frac{1}{V_{chamber,cc}} \right)^{0.6} - 7.1 \quad (13)$$

Eq. 13을 구성방정식에 적용하여 CBT 결과와 비교한 것을 Fig. 5에 나타내었다. BKNO₃의 미연소율을 적용한 결과, ZPP 단일 화약종만 사용했을 때와 마찬가지로 연소 모델과 실험 결과가 유사한 경향과 수치를 보인다.

5. 결 론

파이로테크닉 착화기 화약의 연소 모델을 구축하고 실험 결과와 비교하였다. 연소 모델의 구성방정식으로는 Saint Robert's law에 따른 질량 보존식과 에너지보존식, Noble-Abel 상태방정식을 사용하였다. 화약의 연소반응으로 생성되는 결과물은 NASA의 CEA를 통해 예측하였으며 1~3000 psi에 따른 연소반응 결과를 데이터베이스화하여 모델에 적용하였다. CEA를 통해 도출되지 않는 물성치들은 참고문헌들에 나와 있는 수치를 인용하거나 시험을 통해 측정된 수치를 사용하였다. 실험 결과와 비교하기 위해 다양한 부피의 챔버에서 CBT를 수행하였으며, PC-300의 경우 연소 모델과 실험에서 측정된 압력곡선이 매우 유사함을 보였다. PC-800의 경우 부피가

10 CC일 때는 유사함을 보이지만, 부피가 작아질수록 연소 모델이 실험 결과보다 더 큰 최대압력을 예측하였다. 이를 BKNO₃의 미연소에 의해 발생하는 현상으로 판단하였으며, 구성방정식에 미연소율을 부피의 함수로 적용하여 연소 모델이 실험 결과와 유사해지는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 '유도탄용 고성능 PMD 기술' 사업의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Jang, S.G., Lee, H.N. and Oh, J.Y., "Performance Modeling of a Pyrotechnically Actuated Pin Puller," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 102-111, 2014.
2. Han, D.H., Sung, H.G., Jang, S.G. and Ryu, B.T., "Parametric Analysis and Design Optimization of a Pyrotechnically Actuated Device," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 17, No. 3, pp. 409-422, 2016.
3. Jang, S.G., Lee, H.N., Oh, J.Y. and Oh, S.J., "Design and Output Characteristic Analysis of Electro-Mechanical Ignition Safety Device," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 39, No. 12, pp. 1166-1173, 2011.
4. Gonthier, K.A., Kane, T.J. and Powers, J.M., "Modeling Pyrotechnic Shock in a NASA Standard Initiator Driven Pin Puller," *30th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Simsbury, C.T., U.S.A., Jun. 1994.
5. CEA, *Chemical Equilibrium Application*, NASA Reference Publication 1311, 1994.

6. Conkling, J.A. and Mocella, C., *Chemistry of pyrotechnics: basic principles and theory*, CRC press, Boca Raton, F.L., U.S.A., pp. 169-170, 2010.
7. Hohmann, C., Tipton, J.B. and Dutton, M., "Propellant for the NASA standard initiator," NASA/TP-2000-210186, 2000.
8. Paik, J.G., Ryu, B.T., Kim, J.H., Ahn, G.H. and Lee, S.B., "Characterization of Long Term Stored BKNO₃," *Proceedings of the Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, Busan, Korea, pp. 388-390, May 2015.
9. Gonthier, K.A. and Powers, J.M., "Formulations, predictions, and sensitivity analysis of a pyrotechnically actuated pin puller model," *Journal of propulsion and power*, Vol. 10, No. 4, pp. 501-507, 1994.
10. Johnston, I.A., "The Noble-Abel equation of state: Thermodynamic derivations for ballistics modelling," *Defence Science And Technology Organisation Edinburgh (Australia) Weapons Systems DIV*, No. DSTO-TN-0670, 2005.
11. De Oliveira, J.L.S.P., Filho, A.A.M., Platt, G.M. and Peixoto, F.C., "Estimation of Ballistic Parameters of Gun Propellants through Closed Vessel Experiment Modeling," *Revista de Engenharia Térmica (thermal Engineering)*, Vol. 4., No. 1, pp. 50-55, 2005.
12. Manning, T., Wyckoff, J., Adam, C., Rozumov, E., Klingaman, K., Panchal, V., Laquidara, J., Fair, M., Bolognini, J., Luhmann, K., Velarde, S., Knott, C., Piraino, S.M. and Boyd, K., "Formulation development and characterization of cellulose acetate nitrate based propellants for improved insensitive munitions properties," *Defence Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 92-100, 2014.
13. Military Standard, "Propellants, Solid: Sampling, Examination and Testing," MIL-STD-286C, 1991.
14. Varghese, P.L., "Investigation of heat transfer in zirconium potassium perchlorate at low temperature: A study of the failure mechanism of the NASA standard initiator," NASA-CR-184774, 1989.
15. Earle L. Inman, "Igniter Materials Handbook," TR 774, 1975.
16. Han, D.H., Sung, H.G., Kwon, M.R., Ahn, G.H., Kim, J.H. and Ryu, B.T., "Multi-Phase LES on the Pressure Oscillation Inside a Closed Vessel Induced by a ZPP Combustion," *Proceedings of the Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, Jeju, Korea, pp. 375-378, May 2016.
17. Poulsen, B.L. and Rink, K.K., "Modeling the Energy Release and Burn Rate Characteristics of ZPP Based Initiators," *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, F.L., U.S.A., Jan. 2011.
18. MAČEIC, A. and Semple, J.M., "Combustion of boron particles at atmospheric pressure," *Combustion Science and Technology*, Vol. 1, No. 3, pp. 181-191, 1969.
19. Ryu B.T., Kim, J.H., Hwang, J. and Ahn, G.H., "Comparison of the Main Charge Characteristics for Pressure Cartridge," *Proceedings of the Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, Gyeongju, Korea, pp. 440-443, Dec. 2013.
20. Yang, W.M., Chou, S.K., Shu, C., Li, Z.W. and Xue, H., "Combustion in Micro-cylindrical Combustors with and without a Backward Facing Step," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, No. 16, pp. 1777-1787, 2002.