

# 밀폐용기 내 입자 혼합물(ZPP와 THPP)의 연소에 대한 수치해석적 모델링 및 해석

한두희\* · 성홍계\*<sup>†</sup> · 권미라\*\* · 안길환\*\* · 김준형\*\*\* · 류병태\*\*\*

## Numerical Modeling on the Dual Propellant Combustion in a Closed Vessel

Doo-hee Han\* · Hong-gye Sung\*\*<sup>†</sup> · Mi-ra Kwon\*\* · Gil-hwan Ahn\*\* · Jun-hyung Kim\*\*\*  
· Byung-tae Ryu\*\*\*

### ABSTRACT

The reactive Eulerian-Lagrangian code is utilized to simulate combustion of ZPP/THPP in a closed vessel. In the paper, ignition delay of THPP is mainly studied since ZPP and THPP are isolated by a boron nitride wall. Only a numerical case study is conducted as experimental observation is inaccessible. Results showed THPP ignition delay affects initial shock strength thus not only the first peak become weak, but also the frequency of a pressure oscillation is slowed.

### 초 록

ZPP와 THPP 화약의 압력 카트리지가 밀폐용기에 장착되어 연소될 때의 현상을 반응성 오일러리안-라그랑지안 이상 유동 해석 코드를 통해 모사 하였다. ZPP와 THPP는 압력 카트리지 내에서 boron nitride 판으로 격리되어있고, ZPP만 열선에 의해 직접 점화되기 때문에 THPP의 연소지연효과가 발생할 가능성이 높다. 실험을 통한 THPP의 점화지연 측정은 힘들기 때문에 기존의 연구를 통해 검증된 수치해석 코드를 통해 점화지연에 대한 케이스 스터디를 수행하고 현상학적 분석을 수행하였다. 해석 결과 THPP의 점화지연 정도에 따라 초기 충격파의 강도가 변하여 압력전도의 초기 피크특성 뿐만 아니라 주파수에도 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

Key Words: Closed Bomb Test(밀폐용기 연소실험), Zirconium/Potassium Perchlorate(ZPP), Titanium Hydride Potassium Perchlorate(THPP), Reactive two-phase flow(반응 이상 유동)

1. 서 론  
고반응성 화약이 장착된 압력카트리지는 파이로 작동기구나 착화기 등 다양한 분야에 응용되고 있다. 압력카트리지는 부피가 작아야 하며 고온, 고압의 가스를 순간적으로 발생시킬 수 있어

야 하기 때문에 에너지 밀도가 높은 지르코늄, 티타늄, 보론 등 금속계열 화약을 주로 사용한다. 주요 사용되는 화약은 금속/산화제 계열과 금속하이드라이드/산화제 계열이 존재한다. 금속/산화제의 대표적 연료로는 NASA standard initiator에 사용되는 Zirconium potassium perchlorate(ZPP)가 있다. 이 연료의 연소속도는 매우 빠르고 점화특성이 좋지만 가스생성량이 적고 에너지 밀도가 다른 화약에 비해 조금 낮은 단점이 있다. 반면 금속하이드라이드/산화제 계열의 Titanium hydride potassium perchlorate(THPP) 화약은 에너지 밀도가 높고 안정성이 매우 뛰어나지만 점화가 어렵다. 따라서 이 두 화약의 단점을 서로 보완하기 위해 ZPP와 THPP를 압력카트리지에 동시 장착 후 ZPP를 점화시켜 생성된 압력과 온도로 THPP를 이차 점화시키는 형태로 많이 사용되고 있다.

비교적 안정적이고 가스를 많이 방출하는 THPP 연료는 NASA SKD26100098-301[1] 모델에 기 적용되어 사용 중이다. ZPP에 대한 연소속도 측정 연구는 Poulsen과 Rink[2]의 연구결과가 발표되어있고, 연소면적은 Han 등[3]의 수치적 연구 결과가 있다. THPP의 연소속도는 최근 Cooper와 Oliver[4]가 스트랜드 버너를 사용하여 측정된 바 있으나, 연소면적에 대한 데이터는 제시되지 않았다.

본 연구는 밀폐용기에 장착된 ZPP/THPP 압력 카트리지의 연소를 모델링 하였다. 두 화약이 서로 분리되어있고 반응성이 다르기 때문에 THPP에 점화지연개념을 적용하여 시간에 따른 물리적 특성을 비교분석하였다. 고밀도 격자의 오일러리안-라그랑지안 수치해석 코드를 병렬컴퓨팅 시스템에서 실행하여 높은 해상도의 결과를 얻을 수 있었다.

## 2. 수학적 모델링

### 2.1 오일러리안-라그랑지안 이상(two-phase) 유동 모델링

유동해석은 오일러리안 기반의 유한체적법으로 수행하고 화약 연소는 각 그레늘을 개별추적하며 계산하는 라그랑지안 기법을 사용하였다. 유동과 화약은 양방향 커플링이 되어 있어 화약 연소 시 발생하는 질량과 열이 유동에 영향을 미치게 되고, 반면에 유동의 속도에 의해 화약 입자가 이동하게 된다. 지배방정식은 논문의 간결화를 위해 생략하고 참고논문 [3]에 자세히 표기되어있다.

### 2.2 ZPP 및 THPP 연소 모델링

각 화약은 압력카트리지에서 점화 시 내부 압력에 의해 그레늘 형태로 파편화 되어 연소된다는 이전 연구[3]의 가정을 적용하여 해석한다. 하지만 ZPP와 THPP는 점화 반응성에 큰 차이가 날 뿐만 아니라 Fig.1과 같이 압력카트리지 내부에 Boron nitride(BN)판으로 분리되어 각각 장착되어있기 때문에 동시점화 가정은 타당하지 않다.

ZPP는 열선에 직접적으로 가열되어 가장 먼저 점화되고 점화특성이 매우 좋아 동시점화 가정을 적용하여도 타당하다. 반면에 THPP는 BN 판으로 ZPP와 격리되어있기 때문에 고온의 ZPP 연소 가스가 직접적으로 닿지 않아 ZPP보다 느

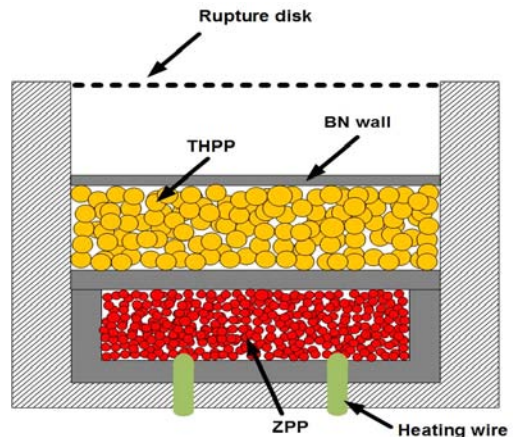


Fig. 1 Schematics of pressure cartridge configuration with ZPP as ignitor and THPP as main propellant

\* 한국항공대학교

\*\* 한화 종합연구소

\*\*\* 국방과학연구소

† 교신저자, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

린 점화가 일어날 것이라 예상할 수 있다. 하지만 압력 카트리지는 파열디스크로 일정 이상의 압력까지 버틸 수 있기 때문에 THPP가 카트리지 외부로 방출되기 전에 ZPP의 연소열이 일정 부분 전달되어 점화가 일어날 수도 있고(짧은 점화 딜레이), THPP가 거의 미점화 상태로 방출될 가능성(긴 점화 딜레이) 또한 존재한다. 가장 이상적인 모델링 방법은 THPP 고체 그래놀의 온도식을 풀어 점화온도에 맞추어 반응을 시작하게 하는 것 이지만 시뮬레이션 상에서는 파열디스크 효과가 별도로 고려되지 않기 때문에 실제와 큰 차이가 발생할 수 있다. THPP의 연소생성물의 분포는 CEA를 통해 계산하였고, 각 화학종의 물성치는 NIST webbook 결과를 이용하였다.

THPP의 연소점화 효과가 실제 압력곡선에 미치는 영향을 알아보기 위해 Table 1과 같이 총 4개의 케이스를 설정하였다. Case 1은 ZPP점화와 동시에 THPP도 전부 점화된다는 가정이고 Case 2 및 3은 ZPP 점화 후 각각 0.05, 0.1 msec 후 THPP가 점화하는 가정이다. 마지막으로 Case 4 는 ZPP 연소가스에 의해 THPP 입자의 온도가 상승하여 점화온도에 도달한 입자만 점화한다는 가정이고, 연구에 사용된 THPP의 점화온도는 793 K [6] 이다.

ZPP와 THPP의 연소는 그래놀 단위로 계산하기 때문에 각각의 연소면적과 표면연소속도가 필요하다. ZPP 연소 물성치는 기존 연구 결과를 사용하였고 THPP는 기존 연구자들의 결과 값[4]을 참고하였다. 계산에 사용된 각 화학의 물성치는 Table 2와 같다.

Table 1. Cases of THPP ignition delay model

Number	Remark
Case 1	Zero ign. delay
Case 2	Considering THPP ign. temp.
Case 3	0.05 msec delay
Case 4	0.1 msec delay

Table 2. Combustion parameters for ZPP and THPP

Parameter	ZPP	THPP
a [mm/s/pa <sup>n</sup> ]	0.029363 [4]	0.064271 [6]
n [-]	0.47 [4]	0.429 [6]
mean diameter [μm]	17	34
density [kg/m <sup>3</sup> ]	2440	2880

### 3. ZPP/THPP 압력카트리지 연소 해석결과

Fig.2는 Case 4의 0 - 0.1 msec 사이 압력이 발달되는 과정을 나타내는 입자의 유동 및 연소 양상 구조이다. 0.05 msec의 THPP 점화 딜레이가 있기 때문에 THPP 연소생성물이 0.05 msec 전까지 생성되지 않다가 ZPP 연소 시 발생한 압력에 의해 밀폐용기 중간쪽으로 퍼지면서 중도 연소하는 것을 볼 수 있다.

Fig.3과 4는 수치적으로 계산된 Case 2, 3 및 4 의 결과를 각각 점화 지연이 없는 Case 1과 비교하였다. 점화지연이 없는 Case 1은 초기 압력 피크 시점이 약 0.1초로 ZPP와 THPP의 동시 연소로 연소가스가 대량으로 발생하여 강한 압력파가 생성되었기 때문이다. Fig.2를 통해 THPP의 점화온도를 고려한 Case 2와 점화지연이 없는 Case 1이 비슷한 경향을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 단순히 대류에 의한 THPP 그래놀의 입자 온도 상승으로 점화온도 문제를 풀면 동시점화와 큰 차이가 없이 거의 동시에 점화가 된다는 의미이다. 반면 0.05, 0.1 msec의 THPP 점화지연을 가지는 Case 3 및 4는 0.1 약 msec에 발생하는 압력피크가 발생하지 않고 0.1 - 0.2 msec 사이에 부드러운 압력상승이 특징이다. 하지만 경향성은 같으나 조금 더 빠른 시점에 THPP가 점화된 Case 3가 Case 4에 비해 가파른 압력상승 기울기를 가지고 있다. 또한 점화 초기에 강한 압력파가 생성된 Case 1, 2가 Case 3, 4에 비해 빠른 충격파 진동에 의한

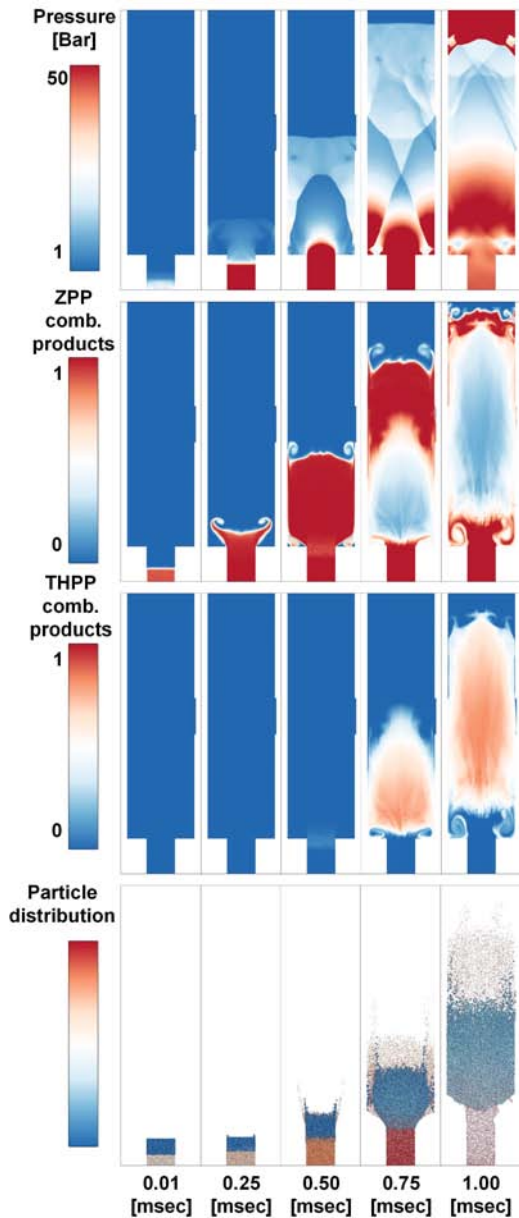


Fig. 2 Contours showing spreading ZPP and THPP granules with 0.05 msec ignition delay for THPP

높은 주파수를 보인다. 점화 지연 정도에 따라 충격파 강도가 달라져 초기 압력피크의 위치 및 크기 뿐 아니라 압력 주파수까지 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

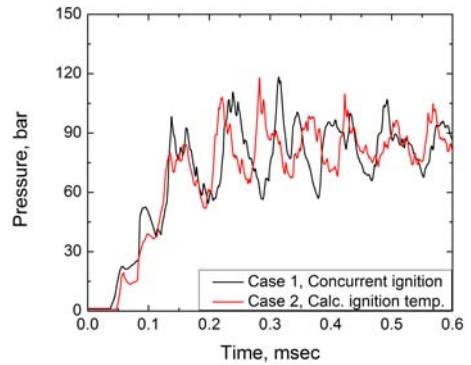


Fig. 3 Pressure curves when concerning ignition temperature of THPP compared with concurrent ignition

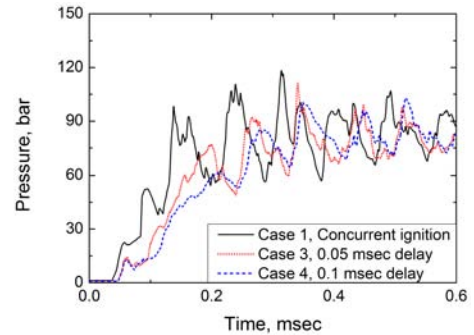


Fig. 4 Pressure curves of THPP; ignition delay 0.05, 0.1 msec and concurrent ignition

#### 4. 결 론

오일러리안-라그랑지안 연소 해석 코드를 사용하여 ZPP와 THPP의 밀폐용기 내 혼합 연소 현상을 해석하였다. 두 화학의 물리적 격리가 있어 THPP의 점화 지연 시간을 0, 0.05, 0.1 msec로 변화시키고 THPP 점화온도를 적용하여 계산한 결과 점화지연시간이 길어질수록 압력 카트리지에서 토출되는 충격파의 강도가 약해지는 현상을 발견할 수 있었다. 그 결과 초기 압력 피크가 매우 약해지며, 0.1 - 0.2 msec 사이의 압력 상승기울기가 현저히 감소되었다. 또한 단순히 THPP의 점화온도를 푼 결과 동시점화와 거의

유사한 결과를 얻을 수 있었다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

1. Holy, J.A., "Burn Rates of  $TiH_2/KClO_4/Viton$  and Output Testing of NASA SKD26100098-301 Pressure Cartridges," NASA Contractor Report 188357, 1993.
2. 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, January, 2011, AIAA 2011-271
3. 한두희, 성홍계, 안길환, 김준형, 류병태, "고압용기 내 금속연료 ZPP 군집입자의 다상연소 LES 연구", 한국항공우주학회 2016 춘계학술대회, 2016, 강원도 고성
4. Cooper, M.A. and Oliver, M.S., "The Burning Regimes and Conductive Burn Rates of Titanium Subhydride Potassium Perchlorate in Hybrid Closed Bomb-strand Burner Experiment," *Combustion and Flame*, Vol. 160, pp. 2619-2630, 2013.