

## 점화제 조성과 형상에 따른 후방 점화기 성능

정진석<sup>\*,1)</sup> · 안길환<sup>2)</sup> · 장승교<sup>1)</sup> · 류병태<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 미래추진기술센터

<sup>2)</sup> (주)한화 종합연구소 화력탄약2팀

### Aft-Igniter Performance related to the Formulation and the Shape of Ignition Charge

Jin-suk Jung<sup>\*,1)</sup> · Gil-hwan Ahn<sup>2)</sup> · Seung-gyo Jang<sup>1)</sup> · Byung-tae Ryu<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Advanced Propulsion Technology Center, Agency for Defense Development, Korea

<sup>2)</sup> Energetic Materials & Pyrotechnics Department, Hanwha Co., Ltd., Korea

(Received 7 August 2013 / Revised 28 March 2014 / Accepted 11 April 2014)

#### ABSTRACT

The combustion pressure and thrust of aft-igniter were measured to investigate the characteristics of ignition charge. Granule and pellet shape ignition charge of BKNO<sub>3</sub> and MTV(Magnesium-Teflon-Viton) were used for igniters. Ignitions with granule charges show abrupt increases of combustion pressure and thrust compared to those of pellet charge. BKNO<sub>3</sub> igniter shows higher combustion pressure than MTV igniter due to higher combustion rate. Mg particle size affects the combustion pressure of MTV igniter.

Key Words : Ignition Charge(점화제), Pellet(펠렛), Granule(입상), BKNO<sub>3</sub>, MTV

#### 1. 서론

고체 로켓 점화기는 크기에 따라 중소형인 파이로테크닉 점화기와 대형인 파이로젠 점화기로 구별할 수 있다. 파이로테크닉 점화기는 주로 입상 또는 펠렛(알약) 형태의 화약을 점화제로 사용하고, 파이로젠 점화기는 추진제를 점화제로 사용한다. 또한 점화기는 설치 위치에 따라 로켓모타의 제일 앞부분에 장착하는 전방 점화방식이 있고, 로켓 모타의 후방 측면이나 노

즐에 고정하는 후방 점화 방식이 있다. 전방 점화는 일반적으로 추진제 그레이니가 포트를 가지고 있어 반경 방향의 중심에 점화기를 설치할 수 있는 공간이 확보될 때 적용한다. 그러나 추진제 충전율을 높이기 위하여 중심포트를 만들지 않을 경우에는 후방 점화 방식을 채택하여야 한다. 파이로테크닉 점화기의 점화제로 사용되는 화약의 종류는 다양하다. 가장 오래된 점화제는 흑색화약으로 최근까지도 소형 점화기에 사용되고 있지만 수분(흡습성)에 취약하고 고고도에서 연소 중단 등의 문제가 있어 사용에 제한적이다. 이밖에 열에 안정하고 가스발생이 적으며 고온의 입자를 생성하는 Aluminium/Cupric Oxide(Al/CuO)와 낮은 반응열

\* Corresponding author, E-mail: jjs38618@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

과 상대적으로 가스 발생률이 적은 Zirconium/Barium chromate(Zr-BaCrO<sub>4</sub>), 습기에 강하고 고고도에서도 점화가 쉬운 Zr-Ni/ KClO<sub>4</sub>-Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 등이 개발, 사용되고 있다<sup>[1,2]</sup>. 점화제는 분말(powder)과 입상(granule) 형태보다는 펠렛(pellet)형태로 적용되고 있는데, 이는 연소시간 조절이 용이하고 내탄도 성능의 재현성(ballistic performance reproducibility)이 우수하기 때문이다. 또한, 동일한 조성의 입상 형태보다 압력 형성은 느리고 점화 지연 시간은 길며 진동에 의한 미세분말의 생성량이 적은 특징을 갖고 있다. 선진 고체추진기관에는 성형성이 좋은 BKNO<sub>3</sub>와 MTV 점화제 펠렛이 많이 사용되고 있다<sup>[3]</sup>. BKNO<sub>3</sub>의 경우, 성형성 뿐만 아니라 내탄도 성능이 우수하고 특히 고고도에서의 점화성이 우수하다. 반면 MTV는 적외선 영역의 복사 에너지 방출특성으로 인해 각종 무기 체계에서 IR Flare의 연소제로 사용되고 있으며, 높은 반응열, 환경 저항성, 제작성, 안전성 등에 장점이 있다.

점화기는 일반적으로 점화제의 점화 용이성, 화염온도, 반응열, 연소압력, 연소 생성물 중 고체 생성물의 비율, 안전성 및 제작성 등을 고려해서 설계해야 한다. 점화기를 추진기관의 노즐에 끼워서 사용하는 후방 점화기의 경우에는 이외에도 점화기가 동작할 때 발생하는 추력도 고려해야 한다. 왜냐하면 후방점화 시 점화기에 의해 발생하는 추력이 과도할 경우 점화에너지가 추진체에 충분히 전달되지 못한 상태에서 노즐목으로부터 이탈될 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 후방 점화기에 적합한 화약조성과 형상을 설계하기 위하여 BKNO<sub>3</sub>와 MTV의 조성과 형상에 따른 압력 및 추력 변화를 관찰하고 결과를 분석하였다.

## 2. 점화기 형상 및 점화제 특성

후방 점화기는 일반적으로 점화 효율을 높이기 위하여 Fig. 1과 같은 Shot-gun 타입으로 설계된다.

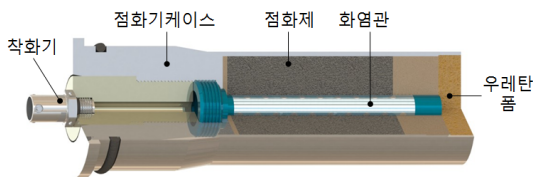


Fig. 1. Schematic of Aft-Igniter

즉 점화제가 연소되어 발생하는 고온의 가스와 입자가 추진기관 전방을 향해 분출될 수 있도록 점화기 한쪽면이 뚫려있는 금속재질의 점화기케이스를 이용하여 설계한다. 점화제를 점화기케이스에 충전한 후 우레탄 폼과 같이 쉽게 연소될 수 있는 마개로 뚫려있는 면을 막으면 점화제가 연소될 때 마개 방향으로 연소가스가 분출되게 된다. 본 연구에 사용된 점화기는 점화 초기에 점화제의 동시 점화성을 증대시키기 위하여 Fig. 1과 같이 점화기 중앙에 실린더 형태의 화염관을 설치하고, 그 내부에 보조 점화제를 충전하였다. 이와 같이 설계할 경우 착화기에서 발생하는 고온, 고압의 가스가 보조 점화제와 주 점화제를 순차적으로 점화시키면서 점화제의 동시 점화성이 향상된다. 시험용 점화제로는 BKNO<sub>3</sub>와 MTV를 사용하였으며, Table 1은 점화제의 특성 값이다.

Table 1. Characteristics of ignition charges<sup>[4]</sup>

구 분	BKNO <sub>3</sub>	MTV
조성	Boron 23.7 % KNO <sub>3</sub> 70.7 % Laminac 5.6 %	Mg 54 % Teflon 30 % Viton A 16 %
연소속도 (in/s)	0.92 @100psia, N <sub>2</sub>	0.176 @100psia, N <sub>2</sub>
자동점화온도	350~480 °C	400~510 °C
반응열	1,550 cal/g	1,450~1,576 cal/g
화염온도	2,743 K	2,750 K
점화성	1.10 cal/cm <sup>2</sup> @15psia, N <sub>2</sub>	3.75 cal/cm <sup>2</sup> @15psia, N <sub>2</sub>
전기적 민감도	3.125 J 이상	3.125 J 이상

BKNO<sub>3</sub>는 주로 보론(Boron)과 질산칼륨(KNO<sub>3</sub>)이 혼합되어진 화약으로서 점화제 중 연소속도가 빨라 최대압력 형성이 균일하고, 주변 대기 압력에 영향을 덜 받아 저압 점화에 용이하다. 또한 기계적 강도가 우수하여 여러 가지 형태의 펠렛으로 제조되어 많은 분야에 적용되고 있으며, 본 연구에서는  $\varnothing 3.18 \times h 2.54$ mm (MIL-P-46994B, I-B type)의 펠렛과 입상을 제조하여 성능 시험을 실시하였다. 또한, 점화제 비교시험을 위하여 마그네슘(Mg), 테프론, 바이톤 A를 혼화하여 제작한 MTV 점화제를 제조, 사용하였다. MTV는 Fig. 2와 같이 추진기관의 용도 및 환경에 따라 요구되는

성능에 따라 혼화 비율을 조정하여 제작되고 있다. 본 연구에서는 점화제로서 탄도 성능이 우수하고 열적으로 안정하다고 알려진 마그네슘 54%, 테프론 30%, 바이트론 A 16%로 이루어진 MTV를 사용하였다.

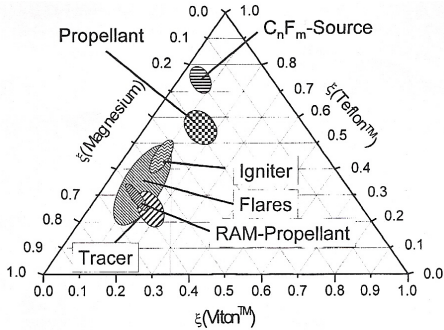


Fig. 2. Ternary MTV diagram showing various applications<sup>[5]</sup>

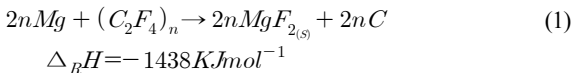
### 3. 시료 및 시험 방법

점화제의 조성 and 형상에 따른 압력 및 추력 변화를 관찰하고자 BKNO<sub>3</sub> 2종(입상형 1종, 펠렛형 1종)과 MTV 점화제 5종(입상형 2종, 펠렛형 3종)을 제작하여 비교시험을 수행하였다. Table 2는 시험에 사용한 BKNO<sub>3</sub>의 형상이다.

Table 2. Shape of BKNO<sub>3</sub>

구분	형상
BKNO3-G	입상 (직경 400 μm 이하)
BKNO3-P	펠렛 [∅ 3.18 × h2.54 mm (I-B Type)]

또한, MTV는 식 (1)과 같이 마그네슘과 테프론이 반응하여 에너지를 방출한다고 알려져 있다.



즉, 마그네슘과 테프론이 반응속도를 결정하는 주요 인자로서 일정조성에서 마그네슘의 입자가 작고, 테프론의 입자가 클수록 연소속도에 유리하다고 보고<sup>[6,7]</sup>된 바 있다.

Table 3. Mg content and particle size of MTV

구분	형상	Mg(Wt %)		
		45μm max.	75μm min.	75~115μm
G-I	입상	10.8	-	43.2
G-II		-	60.0*	-
P-1	펠렛 (∅ 3.18 × h2.54mm)	10.8	-	43.2
P-2		43.2	-	10.8
P-3		60.0	-	-

\* G-II는 분무(Atomic)형 마그네슘 입자

\* 입상형 사이즈 : 직경 185~1,520μm

따라서 본 연구에서는 Viton A의 조성비는 16%로 고정해 놓고, 마그네슘과 테프론의 함량비 및 마그네슘의 입자 크기를 변경하여 시험을 수행해 보았다. Table 3은 시험에 사용된 MTV 점화제의 형상 및 마그네슘 함량표이다.

MTV G-I은 마그네슘을 54% 함유하고 있으며, HART METALS社의 박편(flake) 입자를 사용하였다. MTV G-II는 마그네슘의 형상 및 함량비에 따른 연소 경향을 비교해 보고자 분무(atomic)형의 마그네슘 60%와 테프론 24%로 제작하였다. 또한 MTV P-1, 2, 3는 MTV G-I과 동일한 조성 비율(54%)에 마그네슘 입자사이즈를 변경한 3종의 점화제를 펠렛으로 제작하여 비교시험을 수행해 보았다.

Table 2, 3과 같이 준비된 점화제들을 Fig. 1과 같은 점화기에 충전한 후, 전기식 착화기를 사용하여 연소될 때의 압력 및 추력 계측 시험을 수행하였다. 압력 계측시험은 내부 자유공간이 약 45,000cm<sup>3</sup>인 밀폐용기를 사용하여 압력-시간의 변화를 스트레인 게이지 타입의 압력센서를 통해 확인하였으며, 추력은 전용 시험 치구를 제작, 시험치구의 한쪽 면에 로드셀을 고정 한 후 점화기의 화염이 분출되는 반대방향에 로드셀과 점화기가 접촉될 수 있도록 점화기를 설치하고, 로드셀을 통해 확인하였다. Fig. 3은 압력과 추력을 계측하기 위한 시험 장비 구성도이다.

점화기는 일반적으로 작동 시 발생하는 추력(F)이 식 (2)와 같이 압력(P)에 비례하기에 추력을 측정하기 전에 밀폐용기를 통하여 압력 계측시험을 수행하였으며, 압력비교를 통하여 뚜렷한 차이가 있을 경우에만 추가시험을 통해 추력을 계측하였다.

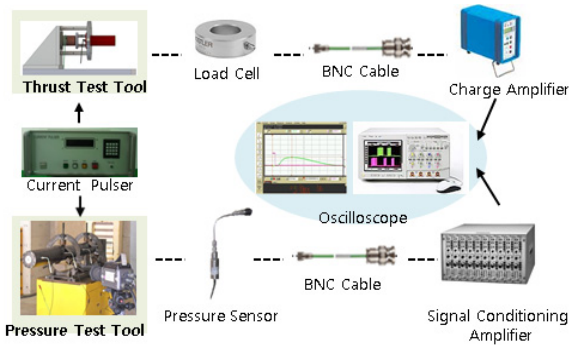


Fig. 3. Schematic of combustion pressure and thrust test equipment

$$F_i = C_F A_t P_i \quad (2)$$

여기에서  $C_F$ 와  $A_t$ 는 각각 추력계수와 노즐목 면적이다.

#### 4. 시험 결과 및 분석

후방점화기의 점화제는 추진제 점화에 충분한 에너지를 공급함과 동시에 과도한 압력으로 구조물에 악영향을 주지 않아야 한다. 따라서 후방점화기에 적절한 점화제를 선정하기 위하여 BKNO<sub>3</sub>와 MTV의 형상(입상/펠렛)에 따른 압력측정 시험을 수행하였으며, 압력측정 시험결과를 바탕으로 추력측정 시험을 하였다. 또한 초기 추력을 줄이기 위하여 MTV 마그네슘의 입자크기 등을 변경하여 비교 시험을 수행하였으며, 이를 통해 후방점화기에 적합한 점화제 조성을 고찰해 보고자 하였다.

##### 4.1 입상형 점화제 성능시험

입상형태의 BKNO<sub>3</sub>-G와 MTV G-II 점화제 100g을 동일한 밀폐용기를 사용하여 압력-시간의 변화를 측정해 보았다. 시험결과 Fig. 4와 같이 BKNO<sub>3</sub>-G의 경우 MTV 점화제 보다 연소 초기에 압력이 급격히 상승되는 것을 확인 할 수 있었다.

또한, BKNO<sub>3</sub>-G는 연소 중 발생한 충격에 의해 점화용기가 파손되었으며, Fig. 5와 같이 MTV G-II에 비해 연소 생성물이 덜 생성되었다. 이것은 BKNO<sub>3</sub>의 가스 생성율이 MTV에 비해 크기 때문에 연소 초기에 많은 연소 가스가 순간적으로 발생되면서 점화기 케이스가

파손되고, 압력 상승이 빠르게 진행된 것으로 추론된다. 또한, 이론적으로도 CEC(Chemical Equilibrium Code)로 계산한 BKNO<sub>3</sub>와 MTV의 연소생성물 중 가스 상태의 질량 분율은 대략 60%와 48%로 BKNO<sub>3</sub>는 가스 상에 의한 열전달이 MTV는 응축상에 의한 열전달이 많은 것을 확인하였다. 따라서 MTV는 BKNO<sub>3</sub>에 비해 초기 점화 피크(ignition peak)가 작은 것을 알 수 있었다. 즉 BKNO<sub>3</sub>-G는 강한 점화압력피크를 동반한 충격으로 인해 후방점화에 적합하지 않다고 판단되었다.

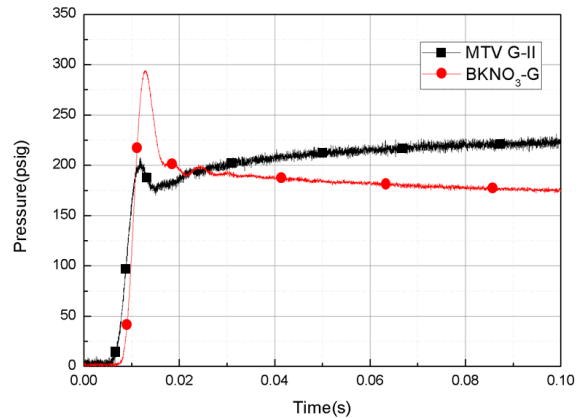


Fig. 4. According to granule shape ignition charges, combustion pressure



Fig. 5. Granule shape ignition charges test results

##### 4.2 입상형 MTV 비교시험

MTV 점화제의 마그네슘 함량 및 입자 형상에 따른 연소특성을 알아보고자 마그네슘이 각각 54%, 60%로 혼합된 MTV G-I 과 MTV G-II 70g을 각각 점화기에 충전한 후, 압력 및 추력을 측정하였다. 압력 측정 시험결과, Fig. 6 (a)와 같이 두 종의 점화제는 최대 압력

이 유사하게 생성하였으나, 마그네슘 함량이 많고, 입자 크기가 상대적으로 작은 MTV G-II가 G-I에 비해 초기 점화 피크가 높게 나온 것을 확인 할 수 있었다. 또한 추력 시험결과, Fig. 6 (b)와 같이 MTV G-II는 약 15,000N, G-I은 5,000N의 최대 추력이 측정되었다. 즉, MTV G-II의 경우, 초기에 빠르게 연소 되어 급격히 압력을 발생시키게 되고 이로 인해 강한 추력 피크가 생성되는 것을 확인하였다.

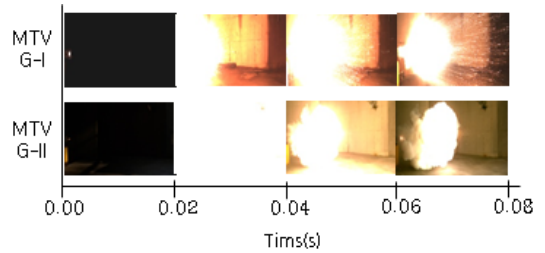
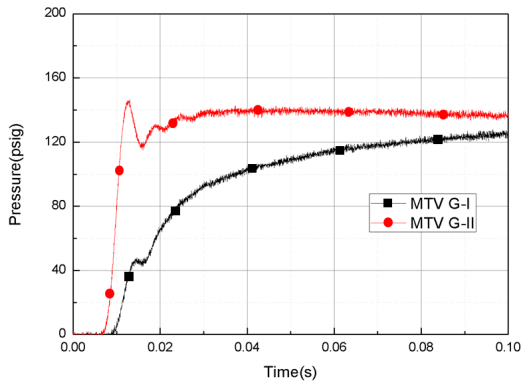


Fig. 7. Flare shape of MTV granules

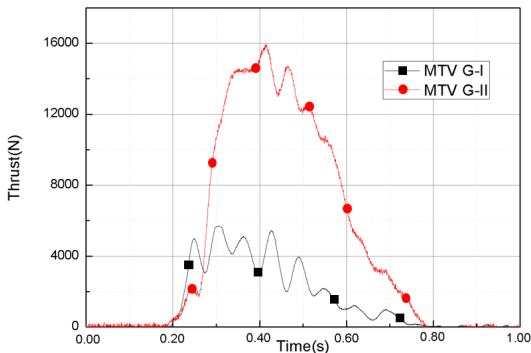
위 시험을 통해 MTV G-II가 G-I 보다 초기 연소속도가 빠르고 압력이 급격히 형성되어 강한 추력이 발생하는 것을 확인하였다. 즉 마그네슘의 함량이 많고, 입자크기가 작을 경우 초기 연소속도가 빨라 상대적으로 강한 추력이 발생되었다.

#### 4.3 점화제량 비교 시험

추진기관의 충격을 줄이기 위하여 입상형 점화제 중, 가장 압력 상승 기울기가 작은 MTV G-I 점화제를 사용하여 약량 변화에 따른 압력-시간의 곡선 변화 시험을 수행하였다. 시험결과, Fig. 8과 같이 생성되는 압력 곡선의 기울기는 충전약량이 100g, 80g, 70g의 경우 유사한 기울기를 보였으나, 50g의 경우 상대적으로 완만하게 압력이 상승되었다.



(a) 압력시험 결과



(b) 추력시험 결과

Fig. 6. The test results of combustion pressure and thrust according to granule shape MTV

점화제의 초기 연소경향을 좀 더 면밀히 확인하고자 고속카메라를 이용해 점화제의 연소 경향을 확인해 보았다. Fig. 7과 같이 MTV G-II의 경우, 연소 시점으로부터 약 20msec 이후 지점에서 가장 밝은 빛을 보여 주었으며, 40msec 부근에서 완전 연소하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 G-I은 서서히 연소되어 약 40msec에서 최대밝기를 보여주고 있다.

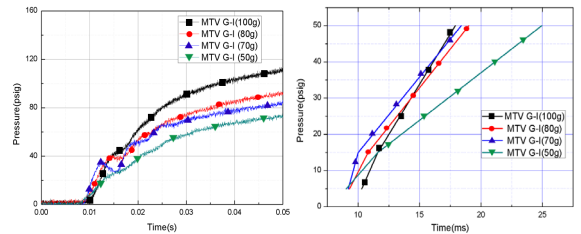


Fig. 8. According to ignition charge of MTV quantity, combustion pressure

충전 약량이 100g이거나 70g일 경우, 충전 약고가 점화기 내부 화염관의 화염공을 모두 감싸지만, 50g의 경우, 점화제의 초기 연소면적(Fig. 1 참조)이 작아 압력 생성 기울기가 상대적으로 작게 나온 것으로 판단되었다. 즉 동일한 조성의 점화제 연소 시, 약량이 많을수록 최대압력은 높게 형성되나 연소속도에는 큰 차이가 없었다. 단, 초기 연소 면적에 따라 압력 생성 곡선의 기울기를 변화시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나 추력을 줄이기 위하여 점화제 약량을 감

소시켰을 경우, 추진기관의 추진제 점화에 충분한 에너지를 공급하지 못할 수 있으므로 약량 조정을 통한 추력 감소는 한계가 있는 것으로 판단된다.

4.4 입상형과 펠렛형 점화제 비교 시험

BKNO<sub>3</sub>와 MTV 입상형 점화제를 펠렛 형상으로 변경하여 연소면적에 따른 연소 특성 비교시험을 수행해 보았다. 두 중 모두 펠렛 형상의 점화제의 경우, 입상형에 비해 연소 표면적이 줄어들므로 인해 초기 압력 생성 곡선이 급격히 감소한 것을 볼 수 있었다(Fig. 9, 10 참조).

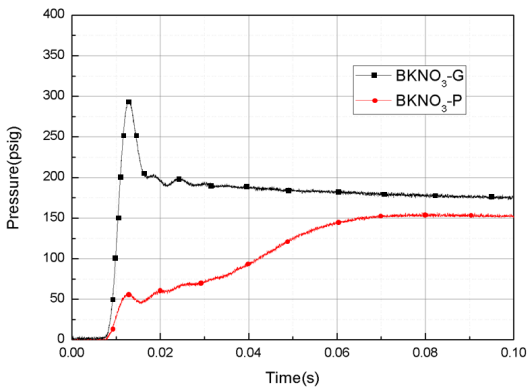


Fig. 9. According to shape of BKNO<sub>3</sub>, combustion pressure

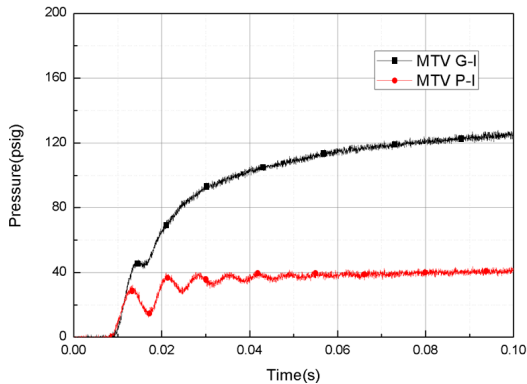


Fig. 10. According to shape of MTV, combustion pressure

또한, 추력 측정 시험결과 압력-시간 그래프와 동일한 양상으로 BKNO<sub>3</sub>-P, MTV G-I, MTV P-I 순으로 추력이 감소되는 것을 확인 할 수 있었다(Fig. 11 참조).

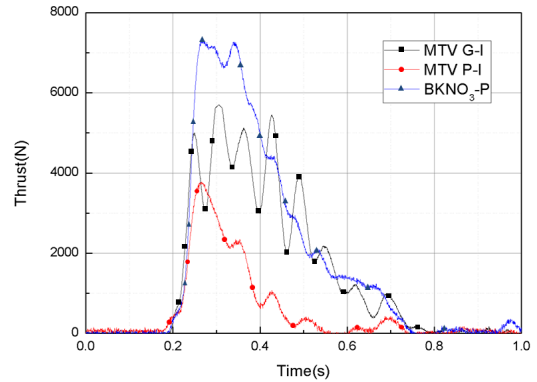


Fig. 11. Combustion pressure according to Ignition charges

밀폐용기(Closed bomb)에서 외부로 열 손실이 없다고 가정하면 이상 기체 방정식으로부터 밀폐 용기 내부의 압력  $P_c$ 와 점화 펠렛의 연소에 따른 가스 생성률  $\dot{m}_g$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_f}{RT} \frac{dP_c}{dt} = \frac{\dot{m}_g}{w} \tag{3}$$

$V_f$  = 초기연소실 체적,  $w$  = 점화제 무게  
 $R$  = 기체상수,  $T$  = 온도

여기서 가스생성률은 점화제의 연소 면적과 관련이 된다. 펠렛의 경우, 연소는 화약표면에 수직방향으로만 진행되고, 펠렛 전 표면에서 동시에 점화된다고 가정하면 연소면적( $A_p$ )은 식 (4)와 같이 정의 할 수 있으며,

$$A_p(t) = \pi(D-2rt)(H-2rt) + \frac{\pi(D-2rt)^2}{2} \tag{4}$$

$D$  = 직경,  $H$  = 높이,  $r$  = 연소속도,  $t$  = 연소시간

입상형 점화제는 구 형상으로 연소면적( $A_g$ )을 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$A_g(t) = \pi(D-2rt)^2 \tag{5}$$

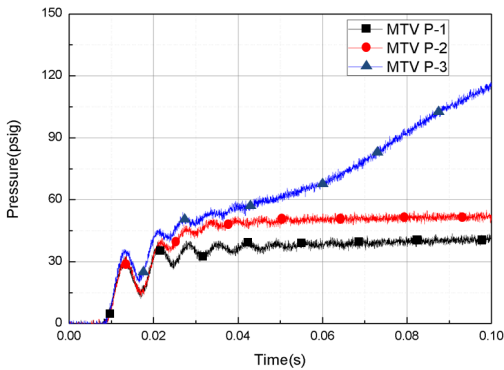
펠렛과 입상형 점화제의 연소면적은 펠렛이 크나 밀도차이가 약 3배 이상(예, BKNO<sub>3</sub> 펠렛 약 1.55g/cm<sup>3</sup>, 입상형 약 0.5g/cm<sup>3</sup>)이므로 동일한 약량을 연소시킬 경우, 펠렛에 비해 상대적으로 많은 개수의 입상형 점화제가 필요하다. 따라서 동일한 약량의 입상형 점화제



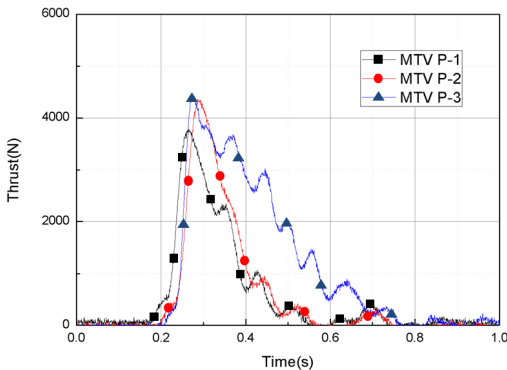
는 총 연소면적이 크고 가스 생성률이 높게 된다. 즉 입상형 점화제는 펠렛에 비해 연소 초기에 급격히 반응하여 빠르게 압력이 상승되고, 추력이 생성되는 것을 볼 수 있었다.

#### 4.5 펠렛형 MTV 비교 시험

동일한 형상(직경 3.2mm, 길이 2.5mm)에 마그네슘 함량이 다른 3종의 MTV 펠렛을 제작(Table 3 참조)하여 연소 특성 시험을 수행하였다. 시험결과, MTV 점화제의 마그네슘의 함량이 가장 많은 MTV P-3가 가장 높은 압력을 나타내었으며, 동일한 함량에서는 마그네슘 입자 크기가 작은 MTV P-2가 P-1보다 압력이 큰 것을 확인하였다(Fig. 12 참조).



(a) 압력시험 결과



(b) 추력시험 결과

Fig. 12. The test results of combustion pressure and thrust according to pellet shape MTV

즉 펠렛형 점화제도 원료의 입자 크기가 작을수록 연소속도가 빨라지고, 연소압력이 증가함을 확인할 수

있었다. 그러나 압력에 비해 추력의 차이는 뚜렷하지 않았다. 그 원인으로는 추력 시험 시, 펠렛 일부가 점화기에서 미 반응 방출되어, 밀폐용기 내에서 지연 연소되기 때문으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 효율적 후방 점화기 설계를 위해 BKNO<sub>3</sub>와 MTV의 조성 and 형상에 따른 압력과 추력의 변화를 관찰해 보았다. 시험결과 동일 형상의 경우, BKNO<sub>3</sub>는 MTV보다 점화 피크가 크고, 압력형성이 빠르며 강한 추력이 발생되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 MTV의 경우, 조성변경 시험을 통해 마그네슘의 함량 및 입자크기에 따라 연소속도를 조절할 수 있음을 확인하였으며, 두 종의 화약 모두 연소면적이 줄어들 경우, 압력형성이 늦어져 추력이 작게 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구를 바탕으로 점화 시 발생하는 점화충격이 중요한 후방 점화기 설계 시, 점화제의 조성 및 형상 변경을 통해 요구되는 성능에 맞게 점화제를 선택 적용할 수 있을 것이라 판단된다.

## References

- [1] W. E. Robertson, "Igniter Material Consideration and Application," AIAA, pp. 72-1195, 1972.
- [2] Donald H. Barrett, "NASA Space Vehicle Design Criteria (Chemical Propulsion) Solid Rocket Motor Igniter," NASA. SP-8051, 1971.
- [3] F. J. Valenta, "MTV as a Pyrotechnic Composition for Solid Propellant Ignition," Pyrotechnic Seminar 13th.
- [4] "Igniter Material Handbook," TR 774, 1975.
- [5] Ernst-Christian Koch, "Metal-Fluorocarbon-Pyrolants : III. Development and Application of Magnesium/Teflon/Viton(MTV)," Propellant, Explosive, Pyrotechnics, 27, pp. 262-266, 2002.
- [6] N. Kubota, "Combustion of Magnesium Polytetrafluoroethylene," AIAA, pp. 86-1582, 1986.
- [7] N. Kubota, "Combustion Process of Mg/TF Pyrotechnics," Propellant, Explosive, Pyrotechnics, 12, pp. 145-148, 1987.