

고체추진제의 고압 연소속도 측정기법

유지창* · 정정용* · 임유진* · 고승원*

The Measurement Technique of Burning Rate in Solid Propellant at High Pressure

Jichang Yoo* · Jungyoung Jung* · Yoojin Yim* · Seungwon Ko*

ABSTRACT

The burning characteristics of HTPB/AP solid propellants were measured by closed bomb of internal volume of 200 cc and 700 cc up to 30,000 psia. The burning rates of closed bomb method showed good agreement with those of strand burner method between 1,000 psia and 5,000 psia, and the sharp increment of pressure exponent(n) around 6,000 psia as a result of testing in accordance with loading densities. The burning rate measured in 200 cc and 700 cc of internal volume of closed bomb agreed well without the relation of internal volume size.

초 록

본 연구에서는 내부용적이 200 cc와 700 cc인 closed bomb을 이용하여 30,000 psi까지 HTPB/AP 추진제의 연소 특성을 고찰하였다. 장전 밀도에 따라 closed bomb법에 의해 측정된 결과 연소속도는 1,000~5,000 psi 범위에서 strand burner법에 의해 측정된 추진제의 연소속도와 잘 일치하였으며, 측정 압력이 6,000 psi 부근에서 압력 지수가 급격히 증가하는 현상을 보였다. Closed bomb의 내부용적이 각각 200 cc와 700 cc일 때 측정된 연소속도는 내부용적의 크기에 상관없이 잘 일치하였다.

Key Words: HTPB(수산기말단 폴리부타다이엔), AP(과염소산암모늄), UFAP(초미세 과염소산암모늄), Burning Rate(연소속도), Solid Propellant(고체 추진제)

1. 서 론

고체 추진제를 사용하는 추진기관의 작동 압력 범위는 일반적으로 1,000~2,000 psi 이다. 따라서 5,000 psi 이상의 고압 영역에서 정확한 연

소속도가 필요한 경우는 거의 없다. 그러나 유도탄의 발사 표적 방향 급선회 및 표적 근접 상태에서 유도탄을 표적 방향으로 신속히 유도하는데 필요한 대공 유도무기용 측추력 기관은, 단시간 내에 높은 추력을 얻기 위한 고성능 추진제의 필요성과 함께 5,000~20,000 psi 범위의 높은 추진기관 내부 작동 압력이 요구된다[3].

추진제의 연소속도를 측정하는 기법들로는, 정

* 2007년 10월 3일 접수 ~ 2008년 8월 6일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 6부
연락처, E-mail: yoojic@hanmail.net

상상태에서 추진제의 선형 연소속도를 측정하는 strand burner법과 형상 함수를 적용하여 상태 방정식으로부터 연소속도를 계산하는 closed bomb법, 초음파법, x-ray법, microwave법, plasma capacitance gage법 및 acoustic emission법 등이 있다. 이 중 5,000 psia 이상의 고압에서 연소속도를 측정할 수 있는 방법으로는 strand burner법과 closed bomb법이 있으나 strand burner법은 정상상태에서의 압력을 측정하기 때문에 정밀한 데이터를 제공하는 반면에 5,000 psia 이상의 고압에서는 고압에 필요한 압력 공급 장치 등 추가적인 고압용 시설이 필요하고, 고압에 대한 위험성이 크며, 시험 시간 및 시험 비용이 많이 드는 단점이 있다 [1, 2]. 현재 국내에서는 5,000 psia 이상의 연소속도를 측정할 수 있는 strand burner를 보유하고 있지 않다. 반면에 closed bomb은 추진제 장전 밀도에 따라 100,000 psia까지의 연소속도를 측정할 수 있으며 시험 시간도 매우 짧은 장점이 있다. 그러나 이와 같은 초고압에서 측정된 실험 결과가 실제 값과 얼마나 일치하는지 확인할 수 있는 방법을 현재 갖고 있지 않다는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 HTPB/AP 추진제를 대상으로 내부용적이 200 cc와 700 cc인 closed bomb을 사용하여 장전 밀도 0.05 g/cc에서 800~5,000 psia의 압력범위에서 측정된 연소속도를 strand burner법에 의해 측정된 연소속도와 비교하였다. 또한, closed bomb의 장전 밀도를 0.1, 0.13, 0.2 g/cc로 변화시키면서 5,000~30,000 psia의 고압 영역에서 측정된 HTPB/AP 추진제의 연소속도 변화를 고찰하였다.

2. 이론적 배경

Closed bomb법은 1900년대 초에 개발되어 주로 화포 추진제의 특성을 평가하는데 사용되었다. 주된 사용 압력은 30,000~60,000 psia이며 추진제 조성 및 장전 밀도에 따라 압력이 결정된다. 최근에는 closed bomb법이 로켓용 고체 추진제

의 연소속도와 deflagration to detonation transition(DDT) 특성을 파악하는데 사용된다. 고체 추진제의 연소속도 측정을 위해서는 주로 strand burner법이 사용되고 있지만, 특별히 제작된 경우를 제외하고는 최대 측정 압력이 5,000 psia를 넘지 못한다. 따라서 5000 psia 이상의 고압 영역에서의 연소속도를 측정하기 위해서는 일정 용적의 Bomb 내부에 추진제 시편을 연소시키고, 이때 생성된 각 시간별 압력을 추진제 그레인의 형상함수를 적용한 상태 방정식으로부터 연소속도를 계산하는 방식인 closed bomb법을 사용하고 있다[1]. 여기서 형상함수는 추진제 그레인의 기하학적 구조를 결정하는 변수들과 그레인 부피와의 관계를 수식화한 것으로, 연소된 추진제량으로부터 추진제의 연소거리, 나아가 연소속도를 구하기 위해 사용된다. 형상 함수는 구, 실린더 및 1, 7, 19공 실린더 등의 그레인 형상에 따라 정해질 수 있다. 형상 함수의 일반적인 식은 Eq. 1과 같다.

$$S_i = f(x) \quad (1)$$

x 는 그레인의 연소 거리로, x 가 0일 때는 그레인의 초기 연소면적이 된다. 가장 단순한 형태인 실린더의 형상 함수는 Eq. 2와 같다.

$$S_i = [\pi/2(D-2x)^2] + \pi(L-2x)(D-2x) \quad (2)$$

D 는 디스크 형 시편의 직경, L 은 높이를 나타낸다. 시편의 무게 변화와 추진제 연소속도와 의 관계식은 다음 Eq. 3과 같다.

$$dw_p/dt = \rho S_i dx/dt \quad (3)$$

w_p 는 연소된 추진제의 무게를 나타낸다. Closed Bomb에 의해 측정된 시간-압력 데이터를 미연소 추진제의 부피와 co-volume을 보정한

실제 가스의 상태방정식 Nobel-Abel 식을 적용하여 시간-무게 데이터로 변환할 수 있다. 부피가 보정된 Nobel-Abel 식은 다음 Eq. 4와 같다.

$$P\{V_b - w_i/\rho + w_p/\rho - w_p\eta\} = w_pRT_s \quad (4)$$

여기서 V_b 는 연소실 부피, w_i 는 초기 시편의 무게, η 는 co-volume, ρ 는 추진제 밀도 T_s 는 연소실 온도를 나타낸다. 연소실 온도 T_s 는 Eq. 5의 에너지 수식을 이용하여 연소실벽을 통한 열손실을 보정하여 계산된다.

$$E_{cv} = E_p - H_L \quad (5)$$

E_{cv} 는 연소실 가스의 에너지, E_p 는 추진제 연소로 생성된 에너지를 나타내고 H_L 은 연소실 벽면을 통한 열손실을 나타낸다. Eq. 5는 다시 Eq. 6으로 나타낼 수 있다.

$$C_v w_p T_s = C_v w_p T_{op} - C_v V_s / R (P_{os} - P_m) \quad (6)$$

여기서 C_v 는 추진제 연소가스의 열용량, T_{op} 는 추진제 연소가스의 이론적 온도, P_{op} 는 이론적 최대 압력을 나타내고, P_m 은 실험으로 측정된 최대 압력을 나타낸다. η , C_v , T_{op} 및 P_{op} 는 추진제 열 역학 계산 프로그램인 BLAKE 코드를 사용하여 계산하였다.

추진제 연소속도를 계산하기 위해서는 추진제 연소가스 생성율인 dw_p/dt 를 얻어야 하며, 이를 위해서는 연소실 온도 변화율인 dT_s/dt 가 필요하다. 따라서 Eq. 6을 시간에 대하여 미분하여 dT_s/dt 를 구하고 Eq. 4를 미분한 식에 대입하여 정리하면 실험값인 압력 P 와 dP/dt 와 상

수들인 V_b , C_p , ρ , η , T_{op} , R , \dot{H}_L 와 γ (C_p/C_v)의 관계적인 Eq. 7을 유도할 수 있다.

$$dw_p/dt = \frac{1}{RT_{op} - P(1/\rho - \eta)} \{ V_b - C_p/\rho + w_p(1/\rho - \eta)dP/dt + \dot{H}_L(\gamma - 1) \} \quad (7)$$

따라서 closed bomb에 의해 측정된 시간에 따른 압력 데이터로부터 Eq. 7을 이용하여 추진제 연소가스 생성율인 dw_p/dt 를 구하고, 최종적으로 Eq. 3을 이용하여 추진제 연소속도인 dx/dt 를 계산한다.

3. 시험장치 및 방법

측정에 사용된 시편형상은 디스크 형이며 직경은 17 mm, 두께는 1~5 mm를 사용하였다.

Closed bomb의 몸체는 높은 연소압력을 견딜 수 있도록 설계 제작되어야 한다. 몸체의 재질은 alloy steel로 제작되어 최고 30,000~100,000 psia까지 사용할 수 있다. 라이너는 closed bomb 내부에서 실제적으로 추진제의 연소가 이루어지는 곳으로, 내부 용적은 200 cc와 700 cc로 되어 있다. 시험 장치도는 Fig. 1과 같다.

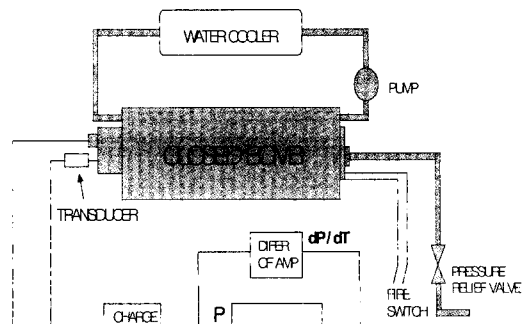


Fig. 1 Schematic diagram of Closed Bomb

Closed bomb법에 의해 측정된 연소속도의 신뢰도 확인은 strand burner법에 의해 측정된 연소속도가 2,000 psia에서 45.5 mm/s, 압력 지수가 0.39인 HTPB/AP 추진제를 이용하여 실시하였다.

4. 결과 및 고찰

압력이 1,000~5,000psia 범위에서 closed bomb법과 strand burner법에 동일한 추진제를 이용하여 각각 측정하고, 각 측정법에 따른 연소속도를 비교하였다. 시편 형상은 혼합형 추진제의 시편 제조가 용이하며, 가장 단순한 형태의 형상 함수를 갖는 직경은 17 mm의 디스크 형 시편을 사용하였다.

Figure 2는 $KClO_4$ 와 AP 산화제 추진제의 압력에 따른 연소속도를 나타낸 것으로 $KClO_4$ 추진제는 2,000 psia에서 압력지수가 급격히 작아지는 경향을 보였으며, AP 추진제는 5,000 psia 부근에서 압력지수가 급격히 증가하는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다[1].

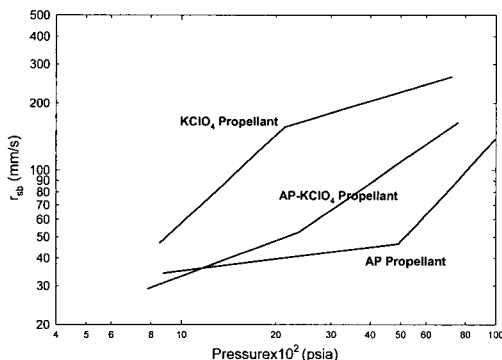


Fig. 2 Effect of oxidizer composition on the closed bomb burning rate of polyurethane propellants

Strand burner법으로 측정된 연소속도와 가장 잘 부합하는 시편 두께를 결정하기 위해서 두께 1 mm와 2 mm의 시편을 사용하여 closed bomb법과 strand burner법에 의해 측정된 연소속도를

Fig. 3과 Fig. 4에서 비교하였다.

두께 1 mm의 디스크 형 시편을 사용하여 1,000~5,000 psia 압력 범위에서 closed bomb법에 의해 측정된 연소속도가 strand burner법에 의해 측정된 연소속도와 더 잘 부합하는 것으로 나타났다.

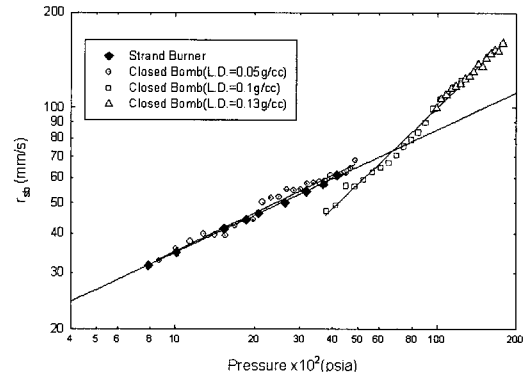


Fig. 3 Comparison of burning rate results from closed bomb and strand burner using disc sample of 1 mm thickness

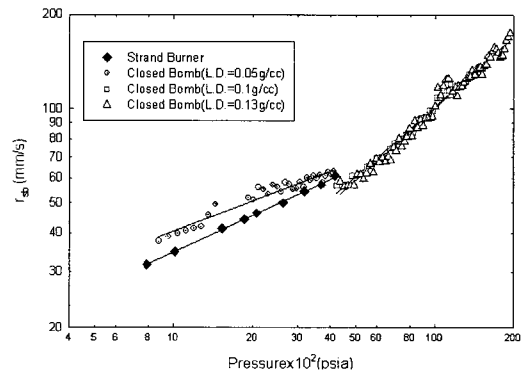


Fig. 4 Comparison of burning rate results from closed bomb and strand burner using disc sample of 2 mm thickness

또한, 장전 밀도 0.05, 0.1, 0.13 g/cc에서 closed bomb법에 의해 측정된 연소속도는 각각 1,000~5,000 psia, 4,000~12,000 psia, 10,000~20,000 psia의 압력 범위에서 선형적인 값을 나타내었다.

6,000 psia 부근의 연소압력에서 압력 지수가

급격히 증가하였는데 이러한 이유로는 5,000 psia 이상의 고압에서 추진제 표면에 응력이 작용하여 연소 표면에 미세 크랙과 기공을 발생시키고, 계속해서 이러한 크랙이 아래로 전파되면서 연소 면적이 증가하여 압력지수가 급격히 증가하는 것으로 판단되며 Fig. 2의 AP추진제와 특성이 비슷한 것으로 나타났다.

내부용적이 200 cc와 700 cc인 closed bomb법 이용하여 1,000~30,000 psia의 압력 범위에서 고체 추진제의 연소속도를 측정하여 장전 밀도와 bomb 부피에 따른 고체 추진제의 연소 특성을 고찰하였다.

Figure 5에 200 cc와 700 cc의 내부용적을 가진 closed bomb에서 각각 측정한 연소속도 결과를 나타낸 바와 같이, 내부용적의 크기에 상관없이 연소속도 측정 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. Fig. 6에는 700 cc bomb를 이용하여 장전 밀도가 0.1, 0.2 g/cc일 때의 연소속도를 측정 후, 압력별 연소특성 변화를 살펴보았다.

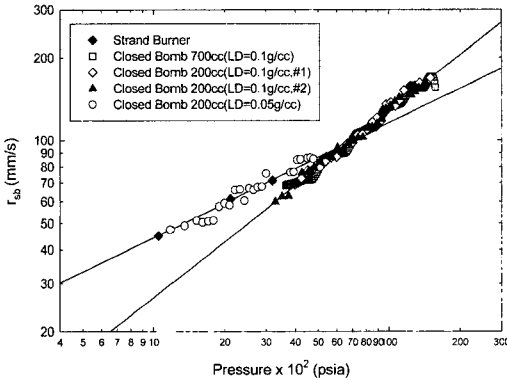


Fig. 5 Comparison of burning rate results from 200 cc bomb and 700 cc bomb

압력이 5,000~15,000 psia 범위에서 측정된 연소속도는 선형적이었으며 급격한 압력지수의 변화는 나타나지 않았다. 또한 15,000~30,000 psia에서의 연소속도는 연소속도의 수준은 비슷하였으나, 선형적이지 않고 다소 굴곡이 있게 측정이 되었다. 이에 대해서는 이와 같은 고압 영역에 대한 경향을 파악하기 위한 추가적인 시험을 수행하여 확인이 필요할 것으로 판단된다.

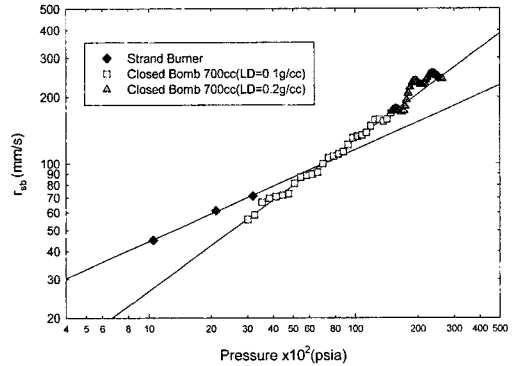


Fig. 6 Burning rate results according to loading density

압력 기준이 2,000 psia에서 strand burner법으로 측정한 연소속도가 각각 44.2, 54.2, 60.3 mm/s인 3종의 추진제를 대상으로, 5,000~15,000 psia의 압력 범위에서 closed bomb법으로 연소속도를 측정하였다. 시편은 직경이 17 mm, 두께가 1 mm인 디스크 형을 사용하였고 장전 밀도는 0.1 g/cc로 하여 200 cc bomb을 이용하였다. Table 1에는 사용된 추진제 3종의 조성을 나타내었다. 고체 충전율은 86.5%이며, 사용한 AP중 UFAP는 26.5~32.0%이다.

Table 2에 closed bomb법에 의해 측정된 추진제 3종의 연소속도 결과를 나타내었다. Closed bomb법에 의해 측정된 추진제의 압력 지수는 1,000~5,000 psia의 저압영역에서 0.30~0.42였는데 비해 5,000 psia 이상의 고압영역에서는 압력 지수가 0.65~0.79로 증가하였다.

Table 1. Formulation of Propellants

Propellant	Ingredient, Wt. %				Remark
	HTPB /Plasticizer	Butacene	AP (UFAP)	ZrC	
A	9.5	5.0	85.5 (26.0)	1.0	b/UFAP
B	9.5	5.0	85.5 (26.0)	1.0	b/D/UFAP
C	9.0	5.5	85.5 (32.0)	1.0	b/D/UFAP

Table 2. Burning characteristics of Propellants

Propellant	Strand Burner			Closed Bomb			Remark
	a, in/s	n	r ₂₀₀₀ , mm/s	a, in/s	n	r ₇₅₀₀ , mm/s	
A	0.178	0.30	44.2	0.003	0.79	81.3	
B	0.105	0.40	54.2	0.007	0.70	100.2	
C	0.098	0.42	60.3	0.014	0.65	118.3	

5. 결 론

1. 두께 1 mm의 디스크 형 시편을 사용하여 1,000~5,000 psia 범위에서 closed bomb법에 의해 측정된 연소속도는 strand burner법에 의해 측정된 결과와 잘 일치하였다.

2. Closed bomb의 내부용적이 각각 200 cc와 700 cc일 때 측정된 연소속도는 내부용적에 상관없이 잘 일치하였다.
3. 연소속도가 다른 3종류의 추진제를 closed bomb법에 의해 측정된 결과, 5,000 psia이상의 고압에서 압력지수가 급격히 증가하는 현상이 나타났다.

참 고 문 헌

1. T. L. Boggs, "Round Robin Results of the Closed Bomb and Strand Burner", CPIA Publication 361, 1982
2. B. B. Grollman, "Burning Rates of Army Propellants in Strand Burner and Closed Vessel Tests," CPIA Publication 281, 1976
3. 성홍계, 유지창, "초고압에서 고체 추진제의 연소속도 특성", 한국추진공학회지, 제10권 3호, 2006, pp.60-66