한국추진공학회 2005년도 춘계학술대회 논문집 pp.88~91 2005 KSPE Spring Conference

고체추진제의 고압 연소속도 측정기법

유지창 · 정정용 · 이경주 · 민병선 · 손영일

Burning rate measurement technique of solid propellant at high pressure

Ji-Chang Yoo · Jung-Young Jung · Kyung- Joo Lee · Byung-Sun Min · Young-Il Son

ABSTRACT

The combustion characteristics of high burning HTPB/AP solid propellants have been investigated by means of a closed bomb method of interval volume of 200 cc and 700 cc at pressures from 1000 to 30,000 psi. The burning rate data measured by closed bomb are in good agreement with strand burner test results at pressure from 1000 to 5000 psi using disc sample of 1 mm thickness. The burning rate dat by using 200 cc closed bomb are in general agreement with that of 700 cc closed bomb. At pressure between 5,000~7,000 psi, a market increase in pressure dependence of the linear burning rate occurs for HTPB/AP propellant.

초 록

본 연구에서는 내부용적이 200cc와 700cc인 closed bomb법 이용하여 1,000~30,000 psi범위에서 고체 추진제의 연소속도를 측정하여 고체 추진제의 연소 특성을 고찰하였다. 5,000~15,000 psi범위에서 두께 1mm의 디스크 형 시편으로 closed bomb법에 의해 측정한 연소속도가 1,000~5,000psi 범위에서 strand burner법에 의해 측정한 연소속도와 잘 일치하였다. 200 cc와 700 cc에서 측정된 연소속도는 bomb 부피에 상관없이 잘 일치하였다. HTPB/AP 추진제의 경우는 5000~7,000 psi 범위에서 압력 지수가 급격히 증가하였다.

Key Words: HTPB(수산기말단 부타다이엔) , AP(암모늄퍼크로레이트), UFAP(초미세암모늄퍼ㄱ크로레이트), Burning Rate(연소속도)

1. 서 론

일반적으로 고체 추진제를 사용하는 추진기관의 작동 압력은 1,000~2,000 psi 범위이다. 따라서 5,000 psi 이상의 고압 영역의 연소속도가 필요한 경우는 거의 없다. 그러나 유도탄의 발사 표적방향 급선회 및 최종 표적 근접 상태에서의 유도탄을 표적 방향으로 신속히 유도하는데 쓰이는 대공 유도무기용 측추력기 추진기관은 단시간 내에 높은 추력을 발생시키는 고성능 추진제가 필요하며 내부 압력도 5,000~20,000 psi 범위의 높은 작동 압력이 요구된다.

추진제의 연소속도를 측정하는 기법들로는 정상상태에서 추진제의 선형 연소속도를 측정하는 strand burner법과 형상 함수를 적용하여 상태 방정식으로부터 연소속도를 계산하는 closed bomb법, 초음파법, x-ray법, microwave법, plasma capacitance gage(PCG)법 및 acoustic emission법 등이 있다. 이 중 5,000 psi 이상의 고압에서 연소속도를 측정할 수 있는 방법으로는 strand burner법과 closed bomb법[1), 2)]이 있으나 strand burner법은 정상상태에서의 압력을 측정하기 때문에 5,000 psi 이상의 고압에서는 큰 위험성과 시험 시간이 긴 단점이 있다. 현재 국내에서는 5,000 psi 이상의 연소속도를 측정할 수 있는 strand burner를 보유하고 있지 않다. 반면에 closed bomb은 추진제 장전 밀도에 따라 100,000 psi까지의 연소속도를 측정할 수 있으며 시험 시간도 매우 짧은 장점이 있다. 그러나 고압에서 측정된 실험 결과가 실제 값과 얼마나 부합하는지 확인할 방법이 없는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 HTPB/AP 추진제를 대상으로 closed bomb 시편의 장전 밀도를 0.05 g/cc로 하여 추진제 시편 형상에 따라 1,000~5,000 psi의 압력 범위에서 closed bomb법과 strand burner법에 의해 측정한 연소속도를 비교하였고, 200 cc와 700 cc의 bomb 부피에 따라 장전 밀도를 0.1, 0.13, 0.2 g/cc로 변화시키면서 5,000~30,000 psi의 고압 영역에서 closed bomb법에 의해 측정한 연소 특성과 비교 고찰하였다.

2. 시험장치 및 방법

Closed bomb법은 5,000 psi 이상의 고압 영역의 연소속도를 압력-시간곡선으로부터 형상함수를 적용하여 계산하는 방법이다. 형상함수는 추진제 그레인의 geometry를 결정하는 변수들과 그레인의 부피와의 관계를 수식화한 것으로 연소된 추진제량으로부터 추진제의 연소거리, 나아가 연소속도를 구하기 위해 사용된다. 특정시간 t에서 추진제의 연소비율 Z(t)와 형상 함수로부터 정해지는 연소거리 x일 때의 추진제 그레인의 남은 부피 V(x)의 관계는 다음과 같다

$$Z(t) = 1 - \frac{V(x)}{V_o} \qquad (1)$$

이 때, 추진제 그레인의 노출된 표면은 동시에 점화되며, 연소진행에 따라 모든 면에서의 연소거리가 동일하다고 가정한다. 디스크 형 그레인의 형상함수 V(x)는 다음과 같다. 형상변수는 직경(D), 두께(L), 연소거리(x), Web 두께(δ) 등으로 이루어지며

$$Web \text{ 두께} : \quad \delta = \frac{L}{2} \qquad (2)$$

$$\text{부피} : \quad V(x) = \pi \left(\frac{D-2x}{2} \right)^2 (L-2x), \quad when \ 0 < x < \delta \qquad (3)$$

으로 나타낼 수 있다.

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 안에서 실제적으로 추진제의 연소가 이루어지는 곳으로 라이너의 체적은 200 cc와 700 cc로 되어 있다. 시험 장치도는 Fig. 1과 같다.

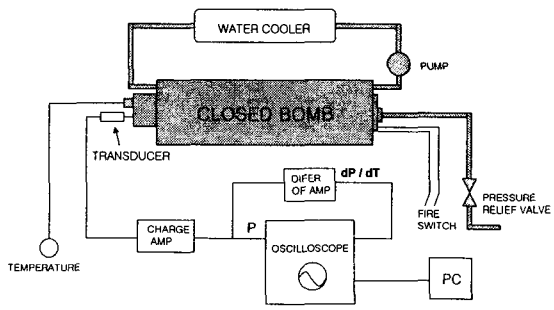

Fig. 1. Schematic diagram of Closed Bomb.

3.. 결과 및 고찰

Closed bomb법에 의해 측정된 연소속도의 신뢰도를 확인하기 위하여 strand burner법에 의해 측정한 연소속도가 2,000 psi에서 45.5 mm/s, 압력 지수가 0.39인 HTPB/AP 추진제를 대상으로 closed bomb법으로 연소속도를 측정하여 1,000~5,000psi 압력 범위에서 strand burner법에 의해 측정된 연소속도와 비교하였다. 시편 형상은 혼합형 추진제의 시편 제조가 용이하며, 가장 단순한 형태의 형상 함수를 갖는 디스크 형 시편을 사용하였다. 시편 직경은 17 mm이다. strand burner법으로 측정한 연소속도와 가장 잘 부합하는 시편 두께를 결정하기 위해서 두께 1 mm와 2 mm의 시편을 사용하여 closed bomb법과 strand burner법에 의해 측정한 연소속도를 Fig. 2과 Fig.3에 비교하였다. 두께 1 mm의 디스크 형 시편을 사용하여 1,000~5,000 psi 압력 범위에서 closed bomb법에 의해 측정한 연소속도가 strand burner법에 의해 측정된 연소속도와 잘 부합하였다. 장전 밀도 0.05, 0.1, 0.13 g/cc에서 closed bomb법에 의해 측정된 연소속도는 각각 1,000~5,000 psi, 4,000~12,000 psi, 10,000~20,000 psi의 압력 범위에서 선형적인 값을 나타내었다.

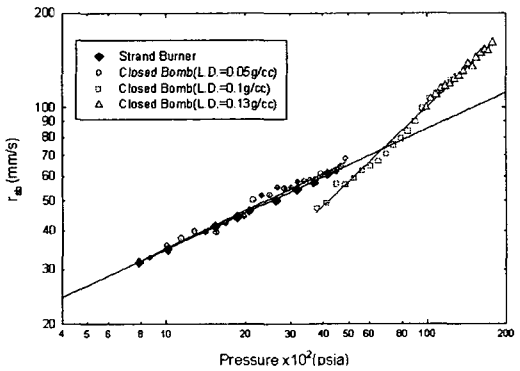

Fig. 2. Comparison of burning rate results from closed bomb and strand burner using disc sample of 1 mm thickness.

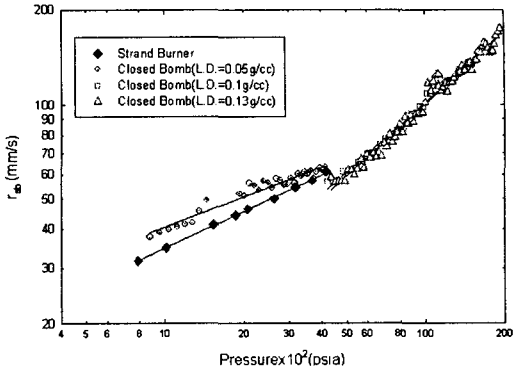

Fig. 3. Comparison of burning rate results from closed bomb and strand burner using disc sample of 2 mm thickness.

압력지수가 6,000 psi 부근에서 압력 지수가 급격히 증가하였는데 이러한 이유로는 5,000 psi 이상의 고압에서 추진제 표면에 응력이 작용하여 연소 표면에 미세 크랙과 기공을 발생시키고, 계속해서 이러한 크랙이 아래로 전파되면서 연소 면적이 증가하여 압력지수가 급격히 증가하는 것으로 판단된다.

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

Fig. 4에 200 cc와 700 cc의 closed bomb에서

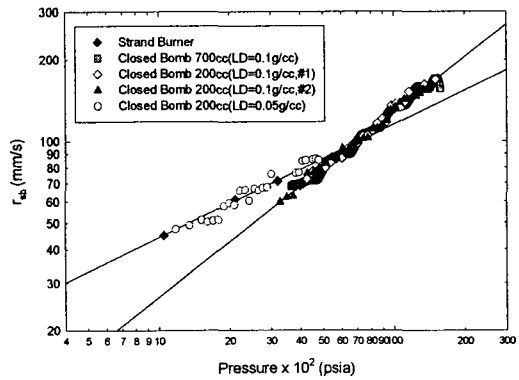

Fig. 4. Comparison of burning rate results from 200 cc bomb and 700 cc bomb.

각각 측정한 연소속도 결과를 나타내었는데, Bomb 부피에 상관없이 연소속도 측정결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. Fig 5에는 700 cc bomb을 사용하여 장전 밀도를 각각 0.1, 0.2 g/cc 로 하여 연소속도를 측정하여 압력별 연소특성 변화를 살펴보았다. 5,000~30,000 psi 압력 범위에서 측정된 연소속도는 선형적이었으며 급격한 압력지수의 변화는 나타나지 않았다.

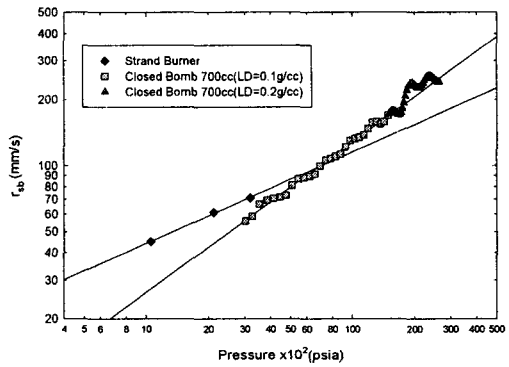

Fig. 5. Burning rate results according to loading density.

Strand burner법에 의해 측정한 연소속도가 2,000 psi 기준에서 각각 44.2, 54.2, 60.3 mm/s인 3종의 추진제를 대상으로 closed bomb법으로 5,000~15,000 psi의 압력 범위에서의 연소속도를 측정하였다. 시편은 직경이 17 mm, 두께가 1 mm인 디스크 형을 사용하였고 장전 밀도는 0.1 g/cc로 하여 200 cc bomb에서 시험하였다. 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 측정한 추진제 3종의 연소속도 결과를 나타내었다. Closed bomb법에 의해 측정한 추진제의 압력 지수는 1,000~5,000 psi의 저압영역에서 0.30~0.42였는데 비해 5,000 psi 이상의 고압영역에서는 압력지수가 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	

4. 결 론

1. 두께 1mm의 디스크 형 시편을 사용하여 1,000~5,000psi 범위에서 Closed bomb법에 의해 측정한 연소속도는 strand burner법에 의해 측정한 결과와 잘 일치하였다.
2. 200 cc와 700 cc에서 측정한 연소속도는 bomb 부피에 상관없이 잘 일치하였고, 5,000~30,000 psi 압력 범위에서 측정한 연소속도는 선형적이었다.
3. 연소속도가 다른 3종류의 추진제를 Closed bomb법에 의해 측정한 결과, 5,000 psi이상의 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.