

HTPB/AP/Zr 추진제의 연소 특성

민병선* · 현형수* · 임유진**

Combustion Characteristics of HTPB/AP/Zr Propellant

Byoung-Sun Min* · Hyung-Soo Hyun* · Yoo-Jin Yim**

ABSTRACT

Zirconium(Zr) addition to formulation of HTPB/AP propellants, was shown to be less specific impulse than aluminum(Al) by the theoretical calculation because of the lower flame temperature and higher molecular weight of Zr oxide. It was found that the burning rate was faster with the finer size of Zr and the more content of $2\mu\text{m}$ Zr the faster burning rate is in HTPB/AP/Zr propellants caused by the more conduction energy transfer from Zr flame to the burning surface. Also the burning rate of HTPB/AP/Zr propellant could be reduced by addition of 150nm Al, depending on AP size distribution in formulation with Butacene and $1\mu\text{m}$ AP.

초 록

HTPB/AP의 성능을 이론적 계산에 의해 분석한 결과, Zr 함유 추진제는 Al 추진제보다 비추력이 낮은 데 그 이유는 화염온도가 낮고, Zr 산화물의 분자량이 크기 때문이었다. HTPB/AP/Zr 추진제에서 Zr의 입도가 작을수록 연소속도가 증가하며, 입도가 작은 $2\mu\text{m}$ Zr은 함량이 증가할수록 금속화염으로부터 연소표면으로 전달되는 열량이 증가하여 연소 속도가 빨라지는 것으로 나타났다. 150nm 크기의 Al을 HTPB/AP/Zr 추진제에 적용하면 연소 속도가 증가하지만, 연소속도 증진 효과가 매우 좋은 Butacene 및 $1\mu\text{m}$ AP가 함께 함유된 추진제에서는 AP의 입도 분포의 영향에 의해 nano Al으로 인하여 연소속도가 감소할 수도 있다는 것을 알게 되었다.

Key Words: Zr Propellant(Zr 추진제), Nano Aluminum(나노 알루미늄)

1. 서 론

혼합형 고체 추진제의 성능을 향상시키기 위해서는 추진제의 성능에 직접적으로 영향을 주는 추진제의 비추력과 밀도를 높여야 한다. 일반적으로 추진제에 금속연료의 도입으로 추진

† 2005년 3월 18일 접수 ~ 2005년 6월 2일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 기-4-5

** 종신회원, 국방과학연구소 기-4-5

연락처, E-mail: cmskmj@add.re.kr

제의 성능을 향상시킬 수 있다.

고체 로켓추진제의 금속연료로 알루미늄(Al)이 널리 사용되었는데 이는 알루미늄의 높은 산화열, 높은 밀도, 저렴한 가격, 그리고 기타 금속에 비해 상대적으로 안전한 특성 때문이다. Al과 더불어 Zr이 추진제의 금속연료로서 오래전부터 많은 관심을 받아 오고 있다. Zr 추진제가 Al 추진제보다 다소 낮은 비추력을 나타내지만 Zr은 Al보다 밀도가 약 2.5배 더 크기 때문에 추진제 제조 공정성이 우수하면서 높은 (밀도×비추력)을 지닌 추진제를 제조할 수 있다. Zr 금속 외에도 보론 역시 추진제의 성능향상을 위해서 고려해 볼 만한 충분한 가능성이 있는 금속 연료들이다. 보론의 경우에는 밀도가 2.34g/cm³이므로 Zr의 밀도, 6.49g/cm³ 보다는 낮지만, 보론의 부피열량이 131kJ/cm³로서 Al의 83.9kJ/cm³이나 Zr의 부피열량 78.2kJ/cm³보다 훨씬 높기 때문에 비추력을 상당히 향상시킬 수 있다. 그런데 보론은 연소 효율이 낮고 가격이 비싼 단점을 지니고 있다.

고밀도 금속이 함유된 고에너지 추진제들은 램제트의 부스터용 고체로켓 추진제로 적용되고 있다[1]. 그 중에서 Zr의 높은 밀도 때문에 Zr 추진제에 대한 연구가 크게 관심을 불러 일으켰다. Zr 추진제의 비추력 손실이 Al 추진제에 비해 크지만, Al을 Zr으로 대체함으로써 주어진 추진제 그레인 형상 하에서 높은 부피 비추력을 지니면서 부스터의 길이를 단축시킬 수 있다. 추진제 그레인의 길이가 단지 1% 증가되어도 로켓의 사거리는 5-10% 감소되므로[2] 높은 (밀도×비추력)을 지닌 추진제가 부스터용 추진제로서 중요한 요구조건이다.

본 연구에서는 CEA(Chemical Equilibrium with Application) 프로그램을[3] 이용하여 Zr을 함유하고 있는 HTPB/AP 추진제의 이론적 성능을 분석하였으며 HTPB/AP/Zr의 연소특성을 Zr과 Al의 연소, Zr의 입자크기 및 함량의 변화, 그리고 연소속도 증진제의 첨가에 의한 연소속도 영향을 고찰하였다.

2. HTPB/AP/Zr 추진제의 이론적 성능 고찰

Zr을 함유한 HTPB/AP 추진제의 이론적 성능은 CEA 프로그램에 의하여 계산하였는데, 연소실 압력은 6.89MPa, 노즐 출구의 압력은 0.1MPa 조건에서 계산된 HTPB/AP/Zr 추진제의 비추력과 (밀도×비추력)을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에 의하면 Al을 함유한 추진제(고체함량, 88%)의 비추력은 Al 함량이 증가함에 따라 비추력이 증가하면서 밀도·비추력이 증가하였으나 Zr을 함유한 추진제의 경우에는 Zr 함량이 증가함에 따라 비추력이 Al 함유 추진제와는 달리 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 Zr의 높은 밀도로 인하여 밀도·비추력 값이 증가함을 알 수가 있다. Zr을 함유한 추진제의 비추력이 감소하는 이유는 추진제의 낮은 연소온도와 Zr의 높은 분자량과 높은 밀도로 인한 결과이기 때문이다.

Equation 1에 나타낸 바와 같이 비추력은 추진제의 질량 유속에 대한 추력의 비이다.

$$I_s = \frac{F}{g_0 \cdot q} \quad (1)$$

여기서 I_s 는 비추력, F 는 추력, g_0 는 중력, q 는 질량유속을 나타낸다.

$$F = q \cdot v_s \quad (2)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \cdot \frac{RT}{M} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_s}{P_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]} \quad (3)$$

여기서 v_s 는 노즐 목에서의 기체 유속, T 는 연소관 온도, P_0 는 연소관 압력, P_s 는 노즐 목에서의 압력, M 은 배기가스의 분자량, R 은 기체상수, γ 는 일정압력과 부피 하에서 연소압력의 비열비를 나타낸다.

Equation 2를 Eq. 1에 대입하면 비추력은, $I_s = v_s / g_0$, 즉 기체 유속, v_s , 에 전적으로 의존한다. Eq. 3에 의하여 v_s 는 연소실 화염 온도에 비례하고 연소가스의 분자량에는 반비

례 한다는 것을 알 수가 있다.

Figure 2에서 보여 지는 바와 같이 Al을 함유한 추진제의 연소 시 Al의 함량이 증가함에 따라 화염 온도증가율이 연소된 물질(주된 고체 성분 Al_2O_3 , 101.96g/mol)의 분자량 증가율보다 높기 때문에 비추력이 증가하는 것이다. 그러나 Zr을 함유한 추진제의 경우에는 연소 온도의 증가율은 Al을 포함한 추진제에 비하여 훨씬 낮으며, 연소 후 생성물중 주성분은 ZrO_2 로 분자량이 123g/mol로 크므로 분자량 증가의 영향이 화염 온도의 영향보다 높기 때문에 Zr 함량이 증가함에 따라 비추력이 감소한다고 볼 수가 있다.

는 이상 유동손실(two-phase flow loss)에 의해서 손실되는 효율, d는 열손실에 영향을 주는 여러 변수들에 의해 손실되는 효율을 나타낸 것이다.

Equation 3에 나타난 질량유속은 또한 다음 Eq. 5와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 추진제의 밀도가 증가할수록 질량유속이 증가하기 때문에 Eq. 4에 의하여 비추력 효율도 감소한다. Zr의 높은 밀도로 인하여 Zr 추진제가 Al 추진제에 비해 비추력이 낮다는 것을 알 수가 있다.

$$q = \rho \cdot A \cdot v \tag{5}$$

여기서 ρ 는 추진제 밀도, A는 표면적, v 는 추진제의 연소속도를 나타낸 것이다.

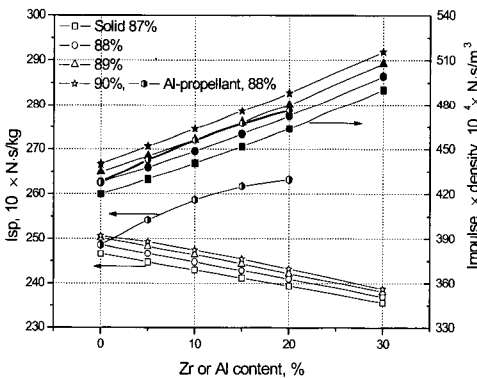


Fig. 1 Calculation of performance for Zr or Al containing HTPB/AP propellant

J.P. Coughlin의[4] 발표에 의하면 Al 함유 추진제와 Zr 추진제의 비추력 효율-상관관계의 식이 제시되었는데 Eq. 4에 나타난 바와 같이 질량유속이 효율을 결정하는 아주 중요한 변수이다.

$$E = a + b \cdot X + c \cdot \frac{X}{q^2} + d \left(\frac{A}{q}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

여기서 E는 효율, X는 Al_2O_3 (or ZrO_2)의 농도, q는 질량유속, A는 열손실이 발생하는 표면적, a는 100% 연소효율, b,c,d는 모두 마이너스 항목으로서 b는 효율손실 후 남은 양, c

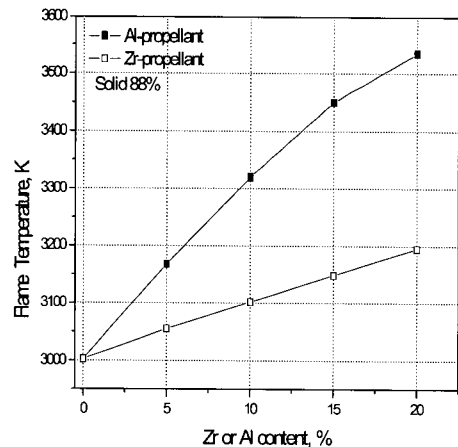


Fig. 2 Calculation of chamber temperature for Zr or Al containing HTPB/AP propellant

최근에는 일반적인 마이크론 크기의 Al과는 전혀 다른 연소특성을 나타내고 있는 나노 크기의 Al에 관한 연구가 많은 관심을 불러일으키고 있는데[5-7], 추진제의 금속연료로 Zr과 더불어 nano Al의 사용으로 추진제의 연소효율 향상은 물론 이상 유동손실을 감소시킬 수 있다. Zr, 20%와 Al, 10%를 혼용해서 제조된 추진제의 성능을 분석하여 다음 Fig. 3에 나타내

었다.

고체함량이 87%인 추진제의 (비추력 \times 밀도)가 추진제의 금속연료로 첨가된 Zr과 Al으로 인하여 $490 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s/m}^3$ 이상으로 향상된다는 것을 알 수가 있다. 그래서 높은 고체함량이 가능한 HTPB 바인더를 사용하면 Zr과 Al이 함유된 90% 정도의 높은 고체함량, 우수한 공정성과 성능을 지닌 HTPB/AP/Zr/Al 추진제의 제조가 가능하다는 것을 알았고, Fig. 3에서 알 수 있듯이 산화제인 AP의 함량을 증가시키는 것보다 밀도가 높은 Zr의 함량을 증가시켜 비추력 밀도를 향상시키는 것이 보다 효과적이라는 것을 알 수가 있다.

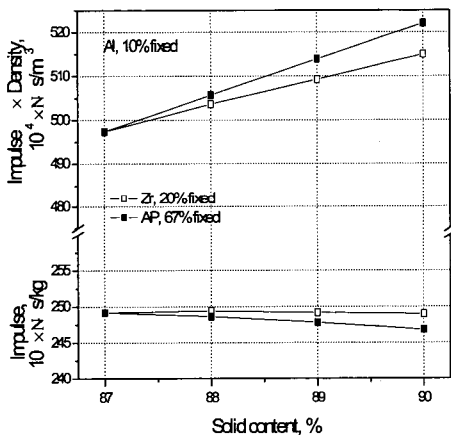


Fig. 3 Calculation of performance for Zr and Al containing HTPB/AP propellant

3. 실험

Zr 추진제는 HTPB 바인더에 산화제로서는 AP 입도가 $200 \mu\text{m}$ 인 b형과 $6 \mu\text{m}$ 인 F형을 사용하였으며 연소속도 증진 효과를 고찰하기 위해 입도가 $1 \mu\text{m}$ 인 UFAP도 적용하였다. Zr의 입도가 추진제의 연소특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 크기가 각각 $35 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m}$, 그리고 $2 \mu\text{m}$ Zr을 이용하였고, $25 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$ 의 입도를 지닌 일

반적인 Al을 Zr과 병행하여 추진제의 금속연료로 사용하였으며, 150nm 크기의 nano Al도 추진제에 적용하였다. 바인더의 프리폴리머로서 뿐만 아니라 연소촉매 효과도 겸비한, HTPB의 비닐기에 유기실리콘 페로센유도체가 그래프트된 Butacene을 적용한 추진제 제조 실험도 병행하였다.

본 연구에서 추진제의 제조는 1 파인트 수직형 플레나타리 혼합기를 이용하여 적절한 순서로 원료들을 혼합하였고, 50°C 항온기에서 7일 동안 경화시켰다. 경화된 추진제의 연소속도는 $6.9 \sim 20.7 \text{MPa}$ 의 압력, 20°C 에서 스트랜드 버너를 이용해 측정하였다.

4. 결 과

4.1 연소속도에 미치는 금속 입자크기의 영향

Zr을 함유하고 있는 HTPB/AP 추진제의 연소특성을 연구하기 위해 Fig. 4에 나타난 바와 같이 Al 추진제의 연소속도와 비교하면서 Zr의 입자크기와 함량의 변화에 따라 나타나는 Zr 추진제의 연소속도를 알아보았다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 $5 \mu\text{m}$ Al 추진제는 Al 함량이 증가함에 따라 연소속도는 감소하고 압력지수는 약간 증가하는 경향을 보이고 있지만, $2 \mu\text{m}$ Zr을 함유한 추진제의 연소속도는 Zr 함량이 증가함에 따라 점진적으로 증가하였다. 금속연료가 첨가된 추진제에서 연소속도는 금속연료의 heat sink 역할로 인하여 연소속도가 느려지는 것이 일반적인 현상인데, 오히려 연소 속도가 증가하는 경우는 특정 입도보다 작으면 heat sink 역할로 소실되는 에너지보다 금속물질의 연소로 발생하는 에너지가 추진제 표면으로 전달되는 양이 많은 경우이다[8]. 이 결과로 볼 때 Zr의 경우, 입도가 $35 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$ 중간에 연소속도에 미치는 영향이 없는 것으로 나타나는 입도가 존재한다고 간접적으로 알 수 있다. 특히 $2 \mu\text{m}$ Zr의 함량이 20%인 추진제의 연소 속도는 금속연료가 없는 추진제의 연소속도에 비해 80% 정도

증가함을 보여주었고 압력지수는 큰 변화가 없었다.

그러나 입자가 큰 35 μm Zr이 함유된 추진제의 연소특성은 2 μm Zr의 연소특성과는 달리 5 μm Al추진제의 연소특성과 매우 유사한 경향을 나타냈다. 일반적으로 산화제로 사용되는 AP의 입도는 추진제의 연소 속도에 지대한 영향을 미치지만 5~30 μm Al의 연소속도는 Al의 입자 크기에 의해서 별로 영향을 받지 않는다. 그러나 3 μm 이하의 Al을 적용하면 연소속도가 증가하는데 특히 1 μm 이하의 Al에 의해서 나타나는 연소속도 증가율은 상당히 높은 것으로 알려져 있다[6].

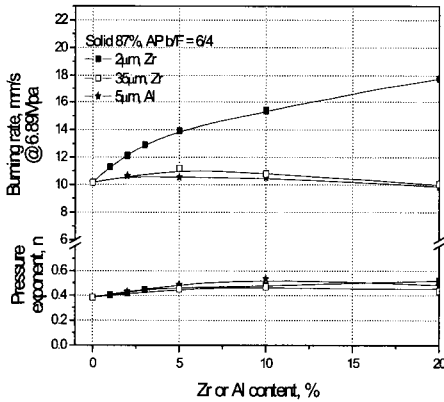


Fig. 4 Effect of Zr and Al content on combustion properties of HTPB/AP propellants

Al이 점화되기 위해서는 Al을 감싸고 있는 산화막(Al_2O_3)이 깨져서 Al이 산화제와 산화반응을 해야만 한다. 산화막은 Al_2O_3 의 녹는점 아래에서 깨지는 것으로 알려져 있다. Al은 Al_2O_3 보다 열팽창이 더 크기 때문에 외부 열에 의해서 Al이 팽창되면서 Al_2O_3 막이 깨진다. 일단 Al_2O_3 막이 깨지면 외부 화염에 노출된 Al_2O_3 막 안의 Al은 산화제와 쉽게 반응할 수 있다. 그런데 입자가 큰 Al의 경우 부피가 커서 상대적으로 산화되는 Al의 양은 작으므로 방출된 산화열은 아직 산화되지 않은 많은 양의 Al에 의해

흡수되면서 화염온도가 증가되지 않고, 깨진 산화막이 다시 봉해지는 현상이 발생한다. 하지만 상대적으로 미세한 Al 입자의 경우, 부피당 높은 표면적으로 인하여 산화되는 Al의 양은 Al이 점화되는 온도까지 올리기엔 충분할 만큼 높다. 이러한 사실이 nano Al이 마이크론 크기의 Al에 비해 점화온도가 낮은 이유 중의 하나이다[6]. 그래서 추진제에 nano Al을 적용함으로써 추진제의 연소속도를 증가시킬 수 있는 것이다. 추진제에서 금속연료가 연소 속도에 미치는 영향은 산화제의 입도, 함량, 금속연료의 입도, 함량 및 연소 압력에 따라 달라지는 것인데[8], 본 결과로부터 Zr 역시 입도의 조절에 의해서 연소 속도가 증가 또는 감소한다는 것을 보여주었다.

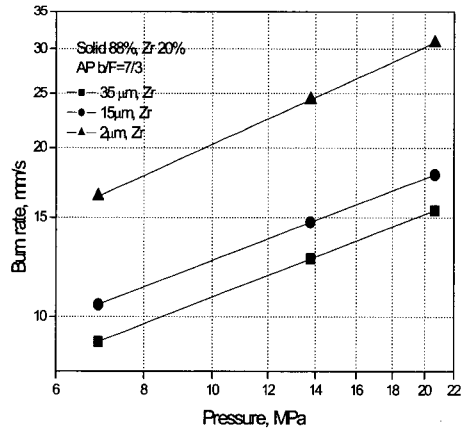


Fig. 5 The effect of Zr size on the burning rate of propellant as a function of pressure

2, 15, 및 35 μm 의 입도를 지닌 Zr을 20% 적용한 추진제의 연소 속도를 압력에 따라 Fig. 5에 도시하였다. 7~21MPa의 압력범위에서 추진제의 연소속도는 Zr의 입도가 작을수록 증가하는 경향을 나타내고 있는데, Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 15 μm Zr의 적용 시에는 35 μm Zr이 적용된 추진제의 연소속도에 비해 연소속도가 약 16% 증가하였으며 2 μm Zr이 적용된 추진제의 연소

속도는 80% 이상 증가하였다.

혼합형 고체 추진제의 연소에서 일반화된 화염 구조를 Fig. 6에 도시하였다. 추진제의 화염은 연소표면에서 가장 가까운 거리에 일차불꽃(primary flame)이 존재하며, 이것은 바인더의 분해성분과 산화제인 AP의 분해로 생성된 산화성 물질이 연소반응에 의해 형성된 화염이다. 그 다음으로 떨어진 거리에 AP가 분해되어 형성되는 AP 불꽃이 존재하고, 일차불꽃과 AP 불꽃에서 완전히 반응이 이루어 지지 못한 성분들은 다음 영역에서 확산불꽃을 형성한다. 추진제 성분에 금속물질이 있을 경우에는 금속성분이 연소되는 화염의 영역이 존재하게 되는데, 이것은 금속물질의 밀도, 용점 등과 같은 특성이외에 추진제에서의 함량, 입자크기 등에 의해 화염을 형성하는 지점이 달라진다. 일반적으로 금속의 함량이 적고 입자의 크기가 작을수록 연소표면에서 금속불꽃까지의 거리가 짧아진다.

Figure 5의 결과와 같이 Zr의 입도가 작을수록 연소속도가 빨라지는 이유는 추진제 연소표면에서 금속불꽃까지의 거리가 짧아지기 때문에 열전도량이 증가하였기 때문이다.

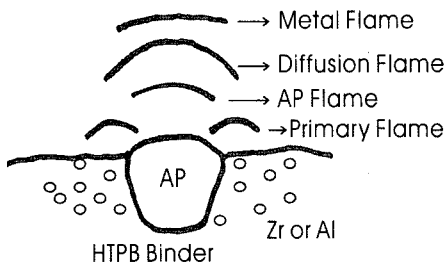


Fig. 6 Flame structure of composite propellant

4.2 연소속도 증진용 물질의 영향

HTPB/AP/Zr 추진제의 조성으로 25 μ m Al, nano Al, Butacene, 그리고 1 μ m AP을 혼용 또는 개별적으로 첨가시켜 나타나는 연소특성을 알아보았다. 추진제의 연소속도 및 압력지수에 미치는 여러 첨가제들의 영향을 정리하여 Table 1에 나타내었다. HTPB 바인더에 산화제인 AP 67%와 35 μ m Zr 20% 적용한 추진제를

기본으로(Table 1 참조) 하였을 때, 기준 추진제에 25 μ m Al을 10% 첨가한 결과, 예상대로 Al의 'heat sink' 효과로 인하여 연소속도가 17% 감소하였다. 그러나 nano Al을 10% 첨가한 추진제는 연소속도가 10% 상승하였고 압력지수는 25 μ mAl 추진제(Table 1의 2번)의 압력지수 0.52에 비해 nano Al 추진제(Table 1의 4번)의 압력지수는 0.43으로 낮아졌다. Al의 입도가 작을수록 연소표면에서 금속화염까지의 길이가 짧기 때문에 압력변화에 따른 불꽃까지의 길이 변화가 작아졌기 때문이다.

Table 1. The effect of variable ingredients on combustion properties of Zr propellants (고체함량 87%, AP b/F=6/4, 2 μ m Zr(20%))

NO.	주요조성	연소속도 @6.89MPa	압력지수
1	기본 조성	17.8	0.52
2	25 μ mAl, 10%	14.8	0.52
3	nano Al, 5%	18.0	0.48
4	nano Al, 10%	19.4	0.43
5	Butacene, 3%	31.9	0.31
6	Butacene, 5%	40.9	0.27
7	UFAP, 10%	24.0	0.50
8	UFAP, 10% Butacene, 3%	36.6	0.35

Table 1의 5, 6번 추진제는 HTPB/AP 추진제에서 탁월한 연소속도 증진제로서 알려진 Butacene을 HTPB 대신 각각 3, 5% 적용한 조성인데, Butacene은 거의 모든 화염 영역에서 연소반응을 촉진시키지만, 특히 일차불꽃에서 그 영향력을 나타내어 연소 속도도 크게 증가하고 압력지수도 낮아지는 것을 알 수 있다[9, 10]. 기본 조성에서 AP의 10%를 UFAP로 대체하여 적용한 추진제(Table 1에서 7, 8번)는 UFAP의 작은 입자에 의해 AP 불꽃의 거리가 짧아져서 연소 속도가 증가되는 효과로 나타났고, 7번 조성에서 Butacene를 3% 적용한 8번 조성은 Butacene의 효과로 인하여 연소속도의 증가 및 압력지수까지 낮아지는 효과가 있음을

알게 되었다.

4.3 Nano Al의 영향

Table 1의 8번 조성에서 AP의 일부를 nano Al로 대체 적용한 추진제의 연소 속도를 Al 함량 변화에 따라 Fig. 7에 도시하였다. Nano Al의 함량이 증가함에 따라 연소속도가 감소하는 효과를 보여주고 있다. 마이크론 크기의 Al이 함유된 추진제는 Al 함량이 증가함에 따라 용융된 Al의 합체현상으로 크기가 증가하고, 이로 인해서 금속불꽃의 거리가 길어져서 연소속도가 느려진다[8].

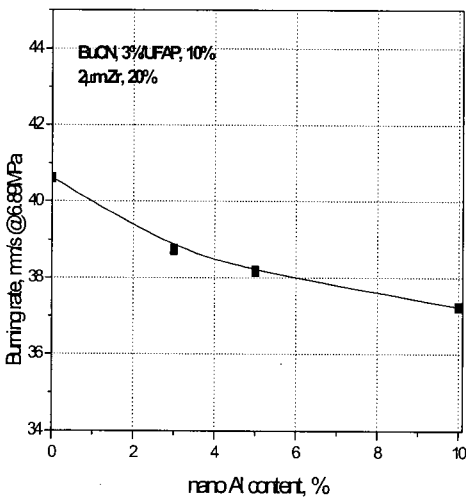


Fig. 7 The effect of nano Al content on burning rate of propellants containing Butacene and UFAP(solid 88%, AP b/F=7/3)

그러나 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 AP의 혼합 비율(b/F)에 따라서 연소속도에 대한 nano Al의 효과가 다르게 나타났다. 즉, AP b/F= 7/3인 조성의 추진제는 nano Al의 첨가에 의해 연소속도가 느려졌지만, AP b/F= 6/4로 6µm인 AP가 더 함유된 조성의 추진제는 nano Al의 첨가로 인한 연소속도의 변화가 거의 나타나지 않았다. 그 이유는 입도가 작은 AP가 많을수록

추진제 연소 표면에서 Al의 용융체가 합체되는 비율이 적어지므로, 합체된 Al의 크기가 상대적으로 작게 된다. 따라서 금속불꽃의 거리에 영향을 미치게 되어 추진제 조성의 AP입도 분포에 따라 금속연료가 추진제의 연소 속도에 미치는 영향이 다르게 나타남을 알게 되었다.

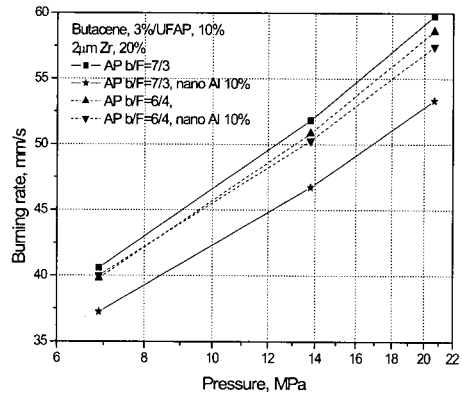


Fig. 8 The effect of AP blend ratio on burning rate of propellants containing Butacene, UFAP and nano Al(solid 88%)

5. 결 론

HTPB/AP/Zr의 성능을 CEA 프로그램에 의해 분석한 결과, Zr 추진제는 Al 추진제보다 비추력이 낮은데 이는 화염온도가 낮고, Zr 산화물의 분자량이 크기 때문이었다. Zr도 Al과 같이 입도가 작을수록 연소속도가 증가하며, 입도가 작은 2µm Zr은 함량이 증가할수록 금속화염으로부터 연소표면으로 전달되는 열량이 증가하여 연소 속도가 빨라지는 것으로 나타났다. Nano 크기의 Al을 HTPB/AP 추진제에 적용하면 연소 속도가 증가하지만, 연소속도 증진 효과가 매우 좋은 Butacene 및 1µm AP가 적용된 추진제에서는 AP의 혼합비율(b/F)에 의해서 nano Al으로 인하여 연소속도가 감소할 수도 있다는 것을 알게 되었다.

참 고 문 헌

1. I.M. Procinsky and W.R. Smith, "Nozzleless Boosters for Integral Rocket Ramjet," AIAA-80-1277, AIAA/SAE/ ASME 16th Joint Propulsion Conference, July 1980
2. T.D. Myers, "Integral Boost, Heat Protection, Port Covers and Transition, Ramjet and Ramrocket Propulsion Systems for Missile," AGARD Lecture Series No. 136, 1984, pp. 4.1
3. B. J. McBride and S. Gordon, "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, II Users Manual and Program Description," NASA RP-1311, 1996
4. J.P. Coughlin, "Impulse Efficiency Correlations for Aluminum and Zirconium Propellants," AIAA-81-1381, 17th Joint Propulsion Conference, 1981
5. A. Dokhan, E.W. Price, J.M. Seitzman, and R.K. Sigman, "Combustion Mechanism Bimodal and Ultra-Fine Aluminum in AP Solid Propellants," AIAA-2002-4173, 38th Joint Propulsion Conference, 2002
6. A. Dokhan, E.W. Price, J.M. Seitzman, and R.K. Sigman, "The Ignition of Aluminum in Ammonium Perchlorate Solid Propellant Flames," AIAA-2003-4810, 39th Joint Propulsion Conference, 2003
7. M. M. Mench, K. K. Kuo, C. L. Yeh, and Y. C. Lu, "Comparison of Thermal Behavior of Regular and Ultra-Fine Aluminum Powders (Alex) Made from Plasma Explosion Process," Combustion Science and Technology, Vol. 13, No. 5, 1998, pp. 269-292
8. 임유진, "혼합형 고체 추진제의 연소 속도에 관한 연구", 연세대학교, 박사학위 논문, 1982
9. T.T. Nguyen, " The Effects of Ferrocenic and Carborane Derivative Burn Rate Catalysts in AP Composite Propellant Combustion," DSTO-TR-0121, 1995
10. 임유진, "혼합형 고체 추진제에서 Fe_2O_3 와 Cr_2O_3 의 연소 촉매 효과", 한국화학공학회지, Vol. 25, No. 5, 1987, pp. 442-446