

무노즐 부스터 적용을 위한 HTPB/AP/Zr계 고체 추진제의 연소속도 증진 연구

이선영^a · 류태하^a · 홍명표^a · 이형진^{b,*}

Study on the Burning Rate Enhancement of HTPB/AP/Zr Solid Propellants for Nozzleless Boosters

Sunyoung Lee^a · Taeha Ryu^a · Myungpyo Hong^a · Hyoungjin Lee^{b,*}

^aProject 2 Team, PGM Tech R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd., Korea

^bDepartment of Aerospace Engineering, Inha University, Korea

*Corresponding author. E-mail: hyoungjin.Lee@lignex1.com

ABSTRACT

The study for the combustion characteristics of propellants for nozzleless boosters was carried out. The metal fuels of Al and Zr were introduced into solid propellant formulations in order to enhance the density-specific impulse and the high burning rate with low pressure exponent was investigated as the major combustion characteristic of propellant to design nozzleless boosters. The burning rate of Zr-containing propellant was higher than Al-containing propellant and, 13 μm Zr-containing propellant exhibited the burning rate of 35 mm/s (at 1000 psi) and pressure exponent of 0.3282. The benefit of using Al and Zr-containing propellant into nozzleless boosters was demonstrated in these results.

초 록

무노즐 부스터에 사용하는 추진제의 연소특성에 관한 연구를 수행하였다. 밀도비추력을 향상시키기 위하여 고체 추진제의 조성에 Al와 Zr의 금속연료들이 도입되었으며 무노즐 부스터를 설계하기 위하여 낮은 압력지수 및 고 연소속도가 추진제의 주요 연소특성으로 연구되었다. Zr을 함유하는 추진제는 Al을 함유하는 추진제보다 높은 연소속도를 보였으며, 13 μm Zr을 함유하는 추진제는 연소속도는 35 mm/s (at 1000 psi)와 압력지수 0.3282를 보였다. 이러한 결과로부터, 무노즐 부스터에서 Al와 Zr을 함유하는 추진제를 사용하는 이점을 보였다.

Key Words: Solid Propellant(고체 추진제), High Burning Rate(고 연소속도), Butacene(부타센), Nozzleless Booster(무노즐 부스터), Density-specific Impulse(밀도비추력)

액체연료를 사용하는 액체 램제트는 고체 추진제를 적용하는 램제트 엔진에 비해 성능이 우수한 장점을 가지나, 구조가 복잡하고 연소 화염의 유지가 어려운 단점을 갖는다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 중단거리용 초음속 순항을 위한 엔진으로 가스발생기에서 농후연료 고체 추진제를 일차적으로 연소시키고, 이차 연소실에서 공기를 흡입하여 완전 연소하는 방식의 로켓과 램제트의 복합적인 구조를 갖는 덕티드 로켓 개발 개념이 대두되었다.[1,2] 하지만 덕티드 로켓 역시 램제트 엔진이 작동하기 위해서는 초음속 영역에 도달할 수 있는 별도의 부스터가 필요하다. 별도의 부스터 장치가 엔진 후미에 장착되는 경우, 유도탄의 크기와 무게가 커지고 부스팅 후 유도탄의 성능을 향상시키기 위해 부스터를 분리해야 하는 어려움이 존재한다. 이를 극복하기 위한 방안으로 램제트 연소실에 고체 추진제를 충전하고 이를 연소시켜 비행 초기 부스팅할 수 있는 방안이 대두되었다. 이를 위해 연소실에 충전된 고체 추진제만으로 별도의 노즐 없이 원하는 추력을 형성을 할 수 있는 무노즐 부스터의 개발이 필요하게 되었다. 이러한 무노즐 부스터는 노즐 없이 추진제만으로 원하는 추력을 형성해야 하므로 전반적으로 큰 질량 유량의 연소 가스를 분사시켜 추력을 발생하도록 하며, 이를 위해서는 충전되는 추진제는 연소속도가 빠르며 밀도가 높은 사양을 요구하게 된다.

이에 따라 개발되는 무노즐 부스터용 고체 추진제는 고밀도 성능을 확보하기 위해 알루미늄(Al)이나 지르코늄(Zr) 등 금속 연료를 다량 함유시켜 개발되고 있다. 일반적으로 Al은 다른 금속에 비하여 가격 경쟁력과 안정성을 가지며 밀도는 2.7 g/cm^3 로 높은 편으로 고체 추진제의 성능개선을 위한 금속연료로 많이 적용되고 있다[3]. Zr은 Al과 비교하여 민감도 문제와 비추력이 낮은 단점이 있지만 6.4 g/cm^3 의 높은 밀도 특성으로 인해 최종적으로 추진제의 높은 밀도비추력이 확보될 수 있으므로 무노즐 부스터용 추진제 개발 연구에 적용되고 있다. 밀도가 높은 금속연료를 적용함으로써 인해 같은 고체 함량을 가지는 추진제의 경우 바인더의 부피 분율

이 증가하여 추진제의 점도가 낮아지는 장점이 있다. 하지만 금속연료는 연소 시 산화되면서 옥사이드 입자를 형성하기 때문에 연소효율이 감소하는 경향이 있어 최적 함량을 고려하여야 한다.

추진제의 고밀도 성능을 위한 연구로 Procinsky 등은 HTPB/Reduced-smoke와 금속연료가 도입된 HTPB/Al계 및 HTPB/Zr계 추진제를 적용하여 무노즐 부스터의 성능을 해석하여 비교하였다[4]. 그리고 추진제의 고 연소속도 특성을 확보하기 위한 연구 개발도 지속되고 있으며 Farinaccio 등은 무노즐 부스터용 추진제 개발을 위하여 HTPB/AP계 추진제에 hydrated ferric oxide (FeOOH), copper phtalocyanine (CuP-ht), amorphous boron (B)등을 도입하여 추진제 연소속도 25 mm/sec (at 6.89 MPa)와 압력지수 0.375의 결과를 보고한 바 있다[5,6]. 또한 연소촉매제로 Butacene을 적용한 연구로 Ghosh 등이 17%의 Al을 포함하는 추진제에 Butacene 함량에 따른 연소 특성을 비교 연구하였으며[7], Min 등은 고 연소속도를 위한 추진제 개발을 위하여 Fine한 AP (UFAP)와 Zr 금속들을 도입하여 연소속도 개선결과를 제시하였다[8].

일반적으로 고 연소속도의 추진제를 개발하기 위해 가능한 입자 사이즈가 작은 산화제 및 금속 연료를 적용하게 되는데, 이러한 경우 혼화상태의 추진제 점도도 함께 상승하는 단점이 있다. 점도 상승은 추진제 충전공정에서 그레인 내부의 기공 및 균열 등이 발생되기 때문에 낮은 점도를 가진 추진제가 유리하게 된다. 혼화공정에 다양한 크기를 가지는 고체 입자들이 적용될 경우 고체 충전도 및 입도들이 영향을 주어 고체 분말들이 충전(packing)되어 있는 상태에 따라 점도특성에 많은 영향을 받게 된다. 이러한 고체의 충전분율(packing fraction)이 높을수록 추진제의 점도가 낮아지게 되는데 고체 분말들이 입도가 서로 다른 종류로 이루어진 이성분 입도모드(bimodal) 또는 삼성분 입도모드(trimodal)의 경우가 단일 입도모드(monomodal)보다 충전분율이 높아져 점도특성이 향상된다. 또한 이성분 입도모드를 사용한 경우 사이즈가 큰 AP의 최적비율이 대략 60-70% 범위에 존재

하는 것으로 알려져 있으며[9] 최근 Yim 등은 평균 입경 190 μm 와 7 μm 를 가지는 이성분 입도 모드로 제조된 추진제의 AP입도 비율에 따른 점도특성을 연구하였다. 제조된 추진제 조성에서 190 μm AP가 60%인 경우 점도가 3 kPa로 가장 낮은 값을 보였으며, 60%이상부터 점도가 증가하여 60%일 때의 조성의 고체 충전율이 가장 높은 것을 확인하였다[10].

본 연구에서는 위의 선행 연구 결과를 바탕으로 실제 무노즐 부스터에 적용 가능한 30 mm/sec (@1000 psi) 정도의 고 연소속도를 가지는 HTPB/AP 추진제 개발을 목적으로 하였다. 추진제 제조 경제성을 고려하여 연소속도 개선 효과가 크지만 고가 원료인 입경 3 μm 정도의 UFAP (Ultra Fine Ammonium Perchlorate)의 적용을 배제하고, 일반적으로 많이 사용되는 평균 입경 200 μm 와 9 μm 를 가지는 이성분 입도 모드의 AP만을 적용하였다. 고 연소속도 특성을 위한 연소촉매제 및 바인더로서 Butacene을 적용하였으며 금속 연료로는 Al과 Zr을 적용하여 각각의 연소특성을 비교 분석하고 그 결과를 제시하였다. 이러한 결과들은 향후 체계에 직접 적용 가능한 추진제에 대한 기본 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험

2.1 추진제 제조

본 연구를 위한 추진제 제조에 있어 기본적인 조성은 산화제로 이성분 모드의 AP (200 μm , 9 μm)를 적용하였으며 함량비는 55:45% (b:F)로 고체 함량은 87-88% 사이에서 조절하였다. 그리고 금속연료는 Al과 Zr을 적용하였으며 함량은 CEA 프로그램을 이용한 추진제 성능계산 결과 및 Min 등의 선행 연구 결과를 참고하여 23~32%사이에서 조절하였다[8]. 사용된 Al 입자는 레이저 입도 분석 결과 28 μm 와 10 μm 를 그리고 Zr입자는 35 μm 와 13 μm 의 평균 사이즈를 가진다. 입도분석에 사용된 장비는 Laser diffraction particle size analyzers (Model: LS

13 320, Beckman Coulter, Inc.)이다.

바인더는 HTPB 프리폴리머와 함께 연소촉매제인 Butacene (OH index 0.325 meq/g, Iron 8 ± 0.5 wt%)을 5% 적용하였으며, 경화제로 IPDI (Isophorone diisocyanate)를 적용하였다. 그리고 나머지 가소제, 결합제, 노화방지제, 경화촉매 등의 첨가제를 3.34%가량 첨가하여 경화 당량비 0.85-0.82인 추진제를 제조하였다. 이들 원료는 정해진 순서에 의해 50-60°C로 온도가 조절되는 혼합기 (4 L)에서 진공 하에 혼합되었으며, 제조된 미경화 추진제는 온도가 일정하게 유지되는 오븐에서 50°C, 7일 동안 경화하여 제조하였다.

2.2 추진제의 점도 측정

본 연구에 사용된 추진제 조성은 금속연료의 함량이 많고 바인더 및 연소촉매제로 사용되는 Butacene은 점도가 HTPB보다 7-8배 가량 높아서 제조되는 추진제의 점도가 높을 것이라 판단하였다. 추진제의 충전공정성 및 Pot life를 확인하기 위하여 혼합 공정이 끝난 후 각 시료의 점도 측정을 실시하였으며 점도 측정에 사용된 점도계는 Brookfield (Model : RVT Type) Viscometer이다. 점도 측정은 Spindle number 03, RPM 2.5의 조건에서 50°C 항온수조안에서 온도를 충분히 안정화시키기 위하여 경화제 투입 후 완전한 항온이 이루어지는 2시간 경과일 때부터 1시간 간격으로 총 3시간 동안의 점도 변화를 확인하였다.

2.3 추진제의 연소속도 측정

추진제의 연소속도는 혼합된 추진제를 온도가 일정하게 유지되는 항온오븐에서 50°C, 7일 동안 경화시킨 후 특정 길이의 꺾린형 형상을 가진 Strand Burner용 시험시편을 제작하였다. 연소실의 실험 압력조건은 600-2500 psi범위에서 가압한 후 점화시켜 질소분위기 하에서 연소속도 및 압력지수를 측정하였다. 연소속도는 시편이 일정하게 유지되는 압력 하에서 연소되는 시간을 측정하여 연소된 길이를 시간으로 나누어 계산하였으며 계산식은 Vieille's Law로 아래와 같다.

$$r = aP_C^n \tag{1}$$

여기서 r 은 연소속도, a 는 실험상수, P_C 는 연소실 압력 및 n 은 압력지수이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 금속연료 종류에 따른 추진제의 연소특성

실험 전 Al과 Zr을 이용하여 금속연료 종류 및 함량에 따른 추진제의 이론적 성능을 CEA 프로그램으로 계산하여 밀도비추력(Solid 87%)을 비교하였다. Al의 함량이 높아질수록 비추력은 증가하는 경향을 나타내며 Threshold value가 약 23%로 그 이상이 되면 밀도비추력이 낮아지는 결과를 나타냈다.

금속연료에 따른 연소특성을 알아보기 위하여 동일한 조성을 가진 추진제에 Al과 Zr의 연소특성 및 Zr 사이즈에 대한 연소특성을 비교하였다. 금속의 함량은 Al을 함유하는 추진제의 밀도비추력 증가의 Threshold value인 23%로 적용하여 추진제를 제조하였으며 28 μm 사이즈를 가지는 Al과 35 μm 와 13 μm 의 사이즈를 가지는 Zr을 사용하였다. Fig. 1은 금속연료에 따른 연소특성 결과를 나타낸 것으로 28 μm Al을 함유하는 추진제의 경우 24 mm/s의 연소속도와 0.3721의 압력지수를 보였다. 그리고 35 μm Zr을 함유하는

추진제는 31 mm/s의 연소속도와 0.3263의 압력지수를 나타냄으로서 Al을 함유하는 추진제와 비교하였을 때 연소속도가 30% 가량 증가하고 압력지수도 낮아졌음을 확인하였다.

Min 등이 35 μm Zr과 5 μm Al를 함유하는 추진제의 연소특성 연구에서 각각 비슷한 연소특성을 나타내는 것을 확인하였으며 Al를 포함하는 추진제는 금속연료의 함량이 높아질수록 연소속도가 낮아지는 결과를 나타냈다[8]. 비록 완전히 동일한 사이즈를 가진 금속은 아니지만 28 μm Al과 35 μm Zr 추진제들의 연소속도를 비교하였을 때 Zr을 함유하는 추진제의 연소속도의 개선 효과가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였다. 하지만 나노 사이즈를 가지는 Al을 적용할 경우에는 연소속도가 급격하게 증가하는 것으로 알려져 있다[11]. 13 μm Zr을 함유하는 추진제의 연소속도는 35 mm/s와 0.3282의 압력지수를 나타냄으로서 Zr금속의 입자 사이즈가 작을수록 연소속도는 증가하였다. 사이즈가 더 작은 수 마이크로 사이즈의 Zr을 함유하는 추진제의 경우 금속함량이 증가할수록 연소속도 증진 효과가 크게 나타나지만[12] 미세분말일 때 자연발화의 위험이 있어 운반 및 제조공정에 주의가 요구되어 대량적용에 어려움을 가진다.

일반적인 추진제와 비교하였을 때 부스터용 추진제는 밀도비추력을 높이기 위하여 금속의 함량이 높은 편이고 연소속도를 증가시키기 위

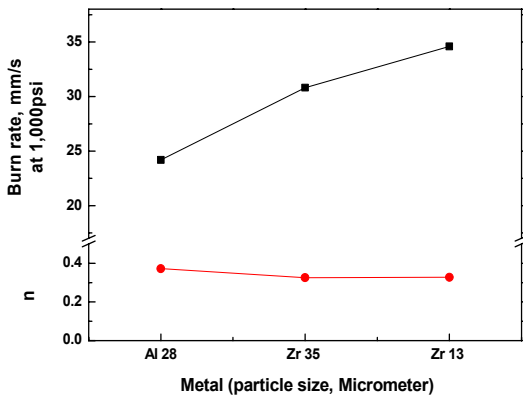


Fig. 1 Burning rate results on metal particles of 23% contents.

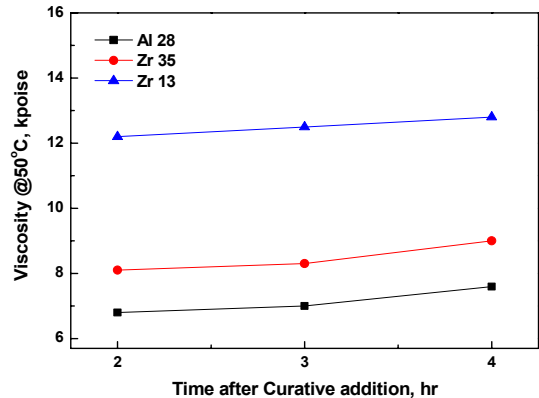


Fig. 2 Viscosity properties on metal particles of 23% contents.

하여 Fine한 AP와 금속연료가 도입되는 경우가 많다. 그래서 충전공정의 안정성을 확보하기 위하여 점도특성의 확인이 중요하다. 점도특성은 경화제 투입 후 총 4시간 동안의 점도 변화로서 Fig. 2에 나타내었으며 금속연료의 입도에 따른 점도특성을 확인하였다. 입도 사이즈가 가장 작은 13 μm Zr을 함유하는 추진제가 가장 많이 증가하였으며 경화제 투입 후 4시간이 지난 후에 13 kP의 점도를 나타냈다. 35 μm Zr과 28 μm Al을 함유하는 추진제들은 4시간 후 각각 9 kP와 8 kP의 점도특성을 보여 28 μm 이 입도가 작음에도 불구하고 35 μm 의 입도를 가진 추진제의 고체 충전분율(packing fraction)이 상대적으로 낮아 점도가 오히려 높은 값을 보이는 것으로 판단된다.

3.2 금속연료 함량비에 따른 추진제의 연소특성 및 성능

일반적으로 Al은 연소하면서 산화되어 Al_2O_3 (101.96 g/mol)가 형성되지만 Al의 함량이 증가할수록 추진제의 연소 시 화염온도의 증가율이 Al_2O_3 의 증가율보다 높아 비추력이 증가하는 것으로 알려져 있다. 반대로 Zr은 높은 밀도로 인하여 밀도비추력은 증가하지만 Al보다 매우 낮은 화염온도 증가율을 가지며 연소 시 생성되는 ZrO_2 (123 g/mol)의 증가영향이 화염온도보다 높아 Zr이 증가할수록 비추력은 낮아지는 결과를 보인다고 알려져 있다[12]. 또한 Zr을 사용한

추진제의 성능을 CEA 프로그램으로 계산한 결과 threshold value가 약 40% 이상에서 나타나지만 추진제의 기계적인 물성특성도 고려해야 하므로 금속연료의 함량을 높이는데 제한이 따른다.

비추력에 기여하는 Al과 추진제의 밀도를 높이는데 기여하는 Zr의 각각 다른 함량비를 가진 3가지 종류의 추진제를 제조하여 연소특성을 비교 분석하였다. 전체 금속연료 함량은 선행 연구 결과를 참고하여 32%로 적용하고 금속함량의 비율을 조절하였다[8]. Fig. 3은 28 μm Al:35 μm Zr의 함량비가 23:9, 6:26, 0:32로 제조된 추진제들의 연소특성 결과를 나타내었으며 Zr의 함량이 높을수록 연소속도는 증가하고 압력지수는 낮은 값을 보였다. 35 μm Zr의 함량이 32%일 때 32 mm/s로 가장 높은 연소속도와 0.3077의 압력지수를 보였으며 3가지 종류의 추진제 모두 경화제 투입 후 4시간일 때 8-9 kP수준의 점도특성을 보였으며 Table 1에 정리하였다. 그리고 추진

Table 1. The results of viscosity and density on content ratio of 28 μm Al:35 μm Zr particles.

	Ratio of Al:Zr contents (%)		
	23:9	6:26	0:32
Viscosity after 4 hr	8.4	9.4	8.9
Density (g/cm^3)	1.943	2.101	2.149

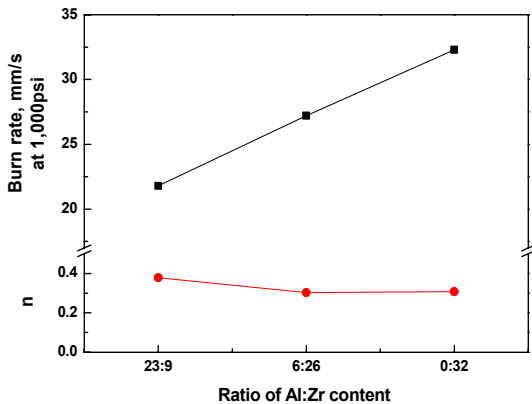


Fig. 3 Burning rate results on ratio for contents of 28 Al:35 μm Zr particles.

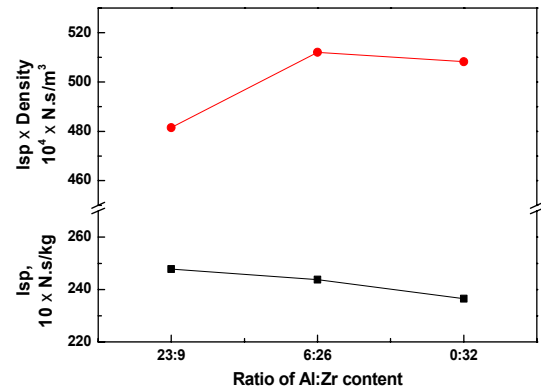


Fig. 4 Calculation results of performance on ratio for contents of 28 μm Al:35 μm Zr particles.

Table 2. The combustion characteristics of propellants containing 35 μm and 13 μm Zr.

Number of Propellant	Propellant formulation					
	Solid (%)	Zr		Al	Burn rate, mm/s (at 1,000 psi)	Pressure exponent, n
		35 μm	13 μm	10 μm		
#1	87	16%	16%	-	30.9	0.2911
#2	88	15%	15%	-	36.0	0.3103
#3	88	15%	-	15%	29.7	0.3542

제의 밀도비추력을 비교하기 위하여 혼화 후 7 일 동안 50°C 오븐에서 경화된 추진제의 밀도를 측정하였으며 Table 1에 결과 값을 정리하였다. 밀도가 큰 Zr의 함량이 증가할수록 추진제 밀도가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이 값을 이용하여 CEA 프로그램으로 계산된 이론적인 비추력에 측정된 밀도 값을 적용하여 밀도비추력을 계산하였다. 밀도비추력은 Fig. 4에 나타냈으며 Zr의 함량이 증가할수록 비추력이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. Al:Zr의 함량비가 6:26일 때 가장 높은 밀도비추력을 나타냄으로서 비추력 증가에 기여하는 Al 금속이 같이 적용되어야 추진제의 성능이 높아질 수 있음을 확인하였다. 또한 Al의 도입 함량이 Zr의 함량보다 낮음에도 불구하고 가장 높은 밀도비추력을 나타냄으로서 비추력보다 밀도가 밀도비추력에 대한 기여도가 더 큰 것을 알 수 있었다.

일반적으로 혼합형 추진제의 경우 산화제 함량이 증가할수록 비추력은 증가하며 보통 80-90% (wt.%) 부근에서 최대의 비추력을 나타내게 된다. Zr만 적용된 추진제의 비추력을 높이기 위하여 산화제의 함량을 55% (Solid 87%)에서 58% (Solid 88%)로 조절하고 Zr의 금속연료의 함량도 32%에서 30%로 낮추어 추진제를 제조하여 연소특성을 확인하였으며 Table 2에 정리하였다. 고체함량 88%인 #2의 추진제의 연소속도 36 mm/s와 압력지수 0.3103을 나타냄으로서 #1과 비교하였을 때 연소속도가 17% 가량 증가하였음을 알 수 있다. 이것은 200 μm 과 9 μm

의 입도를 가진 산화제를 사용함으로써 금속연료의 함량이 줄어든 만큼 고체함량이 증가함에 따라 Fine한 입자의 AP가 소폭 증가하여 나타난 결과로 AP를 사용하는 추진제에서 일반적으로 나타나는 현상이다[13]. 또한 Fine한 AP가 증가함으로써 압력지수도 약간 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 마이크로 사이즈를 가진 Al의 입도에 대한 연소속도 증가는 보이지 않았으며 오히려 연소속도가 낮아지고 압력지수도 높아지는 결과를 보였다.

4. 결 론

본 연구는 무노즐 부스터용 추진제의 적용을 위하여 연소속도 및 압력지수 제어를 위한 추진제의 개발에 관하여 연구를 하였다. 고 연소속도 특성을 위하여 추진제 조성 개발에 UFAP의 사용이 요구되지만 비표면적이 넓어 습한 환경에 취약하며 가격 또한 고가의 원료 중 하나이다. 그리하여 본 연구에서는 UFAP를 제외하고 AP 200 μm :9 μm 의 입도비율 55:45(%)와 연소촉매제인 Butacene만 적용하여 추진제의 고 연소속도 특성을 보였다. HTPB/AP계 혼합형 추진제에 금속연료로 Al과 Zr을 도입하여 추진제의 연소 특성을 비교 분석하였으며 금속연료의 함량비에 따른 추진제의 이론적 성능을 CEA 프로그램으로 계산하여 Al과 Zr을 함유하는 추진제들을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 28 μm Al, 35 μm 과 13 μm Zr을 각각 23% 적용한 추진제의 연소특성을 비교한 결과 28 μm Al을 함유하는 추진제의 경우 연소속도 24 mm/s와 압력지수 0.3721을 보였으며 35 μm Zr을 함유하는 추진제는 연소속도 31 mm/s와 압력지수 0.3263을 나타냈다. 또한 13 μm Zr을 함유하는 추진제는 연소속도 35 mm/s와 0.3282의 압력지수를 나타냄으로서 금속연료의 입도에 따른 연소특성을 확인하였다.
2. Al와 Zr의 함량비에 따른 연소특성을 확인하기 위하여 28 μm Al:35 μm Zr의 함량비가 23:9, 6:26, 0:32 (%)인 추진제를 제조하여 비교 분석하였다. 35 μm Zr의 함량이 32%일 때 가장 높은 연소속도 32 mm/s와 0.3077의 압력지수를 보였으며, CEA 프로그램을 이용한 밀도비추력을 계산한 결과 Al:Zr의 함량비가 6:26일 때 가장 우수한 값을 나타내었다.
3. Zr을 함유하는 추진제의 비추력을 높이기 위하여 산화제는 58% (Solid 88%)로 금속연료의 함량은 30%로 낮추어 연소특성을 확인하였으며 #2의 추진제의 연소속도는 17% 가량 증가한 36 mm/s로 압력지수는 0.3103을 나타냄으로서 무노즐 부스터용 추진제로서의 가능성을 나타냈다.

References

1. Webster, F.F., "Liquid Fueled Integral Rocket Ramjet Technology Review," *14th AIAA/SAE Joint Propulsion Conference*, Las Vegas, N.V., U.S.A., Jul. 1978.
2. Webster, F.F., "Integral Rocket/Ramjet Propulsion-Flight Data Correlation and Analysis Techniques," *Journal of Spacecraft*, Vol. 19, No. 4, pp. 326-336, 1981.
3. Glassman, I., *Combustion*, 2nd edition, From review by Vic. A. Cundy, Louisiana State Univ., in Environmental Progress, Vol. 12, No. 2, Academic Press, Inc., Orlando, F.L., U.S.A., 1987.
4. Procinsky, I.M. and McHale, C.A., "Nozzleless Boosters for Integral Rocket Ramjet Systems," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 18, No. 3, pp. 193-199, 1981.
5. Farinaccio, R. and Lessard, R., "Nozzleless Booster Performance Study," Technical Report, DREV TR 2001-285, 2011.
6. Farinaccio, R. and Lessard, R., "Experimental Investigation of High Burn Rate Propellant for use in Nozzleless Boosters," *36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Huntsville, A.L., U.S.A., AIAA 2000-3320, Jul. 2010.
7. Ghosh, K., Behera, S., Kumar A., Padale, B.G., Deshpande, D.G., Kumar, A. and Gupta, M., "Studies on Aluminized, High Burning Rate, Butacene® Based, Composite Propellants," *Central European Journal of Energetic Materials*, Vol. 11, No. 3, pp. 323-333, 2014.
8. Min, B.S. and Hyun, H.S., "Study on Combustion Characteristics of HTPB/AP Propellants Containing Zirconium," *J. PROPULSION*, Vol. 28, No. 1.; Technical Note, pp. 211-213, 2012.
9. Oberth, A.E., *Principles of Solid Propellant Development*, CPIA Publication, Baltimore, M.D., U.S.A., Ch 5, 1987.
10. Yim, Y.J., Park, E.J., Kwon, T.H. and Choi, S.H., "Effect of AP Particle Size on the Physical Properties of HTPB/AP Propellant," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 1, pp. 14-19, 2016.
11. Dokan, A., Price E.W., Seitzman, J.M. and Sigman, R.K., "The Ignition of Aluminum in Ammonium Perchlorate Solid Propellant Flames," *39th Joint Propulsion Conference*, Huntsville, A.L., U.S.A., AIAA-2003-4810, Jul. 2003.
12. Min, B.S., Hyun, H.S. and Yim, Y.J.,

- "Combustion Characteristics of HTPB/AP/Zr Propellant," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 9, No. 2, pp. 61-65, 2005.
13. Oyumi Y., Brill T.B., Rheingold A.L. and Haller T.M., "Crystal Structure and Molecular Dynamics of the Energetic Nitramine 1,3,5,5-tetranitrohexahydropyrimidine and a Comparison with 1,3,3,5,7,7-hexanitro-1,5-diazacyclooctane and 1,3,3-trinitroazetidine," *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 89, No. 20, pp. 4317-4324, 1985.