

고밀도 지르코늄(Zr) 금속연료 조성의 추진제를 이용한 무노즐 부스터 성능 연구

길태옥^{a,*} · 정은희^a · 이기연^a · 류태하^a

Performance Study of Nozzleless Booster Casted to the High Density Solid Propellant with Zr as a Metal Fuel

Taeock Khil^{a,*} · Eunhee Jung^a · Kiyoon Lee^a · Taeha Ryu^a

^aPGM Tech R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd., Korea

*Corresponding author. E-mail: taeock.khil@lignex1.com

ABSTRACT

This study was carried out to improve the performance characteristics of nozzleless boosters that are used in ramjet boosters. A propellant using Zr as the metal fuel was developed, which provided a higher density than the propellant using Al as the metal fuel. The developed propellant was cast using the nozzleless booster and a ground test was carried out by varying the length-to-diameter ratio (L/D ratio) of the propellant. From a comparison between the performance characteristics of propellants using Zr and Al, it was proved that the performance of the propellant using Zr is higher than that of propellant using Al, except for the specific impulse, under all tested conditions. As the length-to-diameter ratio was increased, the specific impulse of the propellant using Zr was decreased by 88% compared with that of the propellant with Al. However, because of the density difference between the propellants, the impulse density of the propellant with Zr was higher than that of the propellant with Al under all tested conditions.

초 록

무노즐 부스터의 성능을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 알루미늄 금속연료와 비교하여 고 밀도를 갖는 지르코늄을 사용한 고밀도 추진제를 개발하였고, 이 추진제를 이용하여 세장비에 따른 성능 특성을 알아보았다. 알루미늄 조성의 추진제 성능과 비교하여 모든 세장비에서 지르코늄 조성의 추진제가 비추력을 제외하고 높게 나타났다. 지르코늄 조성의 추진제의 비추력은 세장비가 증가함에 따라 시험조건 내에서 알루미늄 조성의 추진제와 비교하여 88%까지 감소하였다. 그러나, 추진제의 밀도차이로 인하여 모든 세장비에서 알루미늄 조성의 추진제보다 지르코늄 조성의 추진제가 높게 나타났다.

Key Words: Nozzleless Booster(무노즐 부스터), Cylindrical Motor(실린더형 모터), Impulse Density(밀도비 추력), High Density Solid Propellant(고밀도 고체 추진제), Length-to-diameter Ratio(세장비)

액체연료의 사용으로 연료공급 계통이 필요하고 고고도에서 발사시 액체연료가 저온으로 되며 엔진 내부가 저압으로 되어 성능저하가 발생하는 현상을 해결하기 위해 고체추진제를 가스발생기에 의해 1차로 연소시켜 발생된 과농 연료 가스를 포트를 통해 흡입된 공기와 완전연소시켜 추력을 발생시키는 덕티드 로켓 엔진이 개발되었다[1,2,3,4]. 덕티드 로켓 엔진은 램제트 연소 전 가속을 위해 사용한 부스터를 분리하지 않고 부스터의 연소관을 램제트 연소를 위한 연소실로 사용하는 로켓과 램제트가 혼합된 IRR(Integral-rocket-ramjet) 시스템을 사용한다(Fig. 1). 고체 로켓 부스터와 램제트의 연소가 같은 연소실을 통해 이루지기 때문에 램제트 노즐과 고체 로켓 부스터의 노즐이 이중으로 장착되어 고체 추진제가 연소된 후 고체 추진제용 노즐이 램제트 노즐로부터 분리되는 분리형 노즐이 사용되었으나, 분리 전 두 노즐사이에서 크랙이 발생되거나 고체 추진제 연소 후 분리형 노즐의 분리 실패, 분리된 노즐과 비행체 간의 충돌 위험 등의 문제가 발생되어 이를 해결하기 위해 기존의 노즐을 사용하지 않고 추진제 그레인이 노즐의 역할을 하는 무노즐 부스터의 개발이 1970년대 후반부터 연구되어 왔다. 무노즐 부스터는 추진제 그레인이 노즐 형상으로 기존 노즐을 대체하기 때문에 구조가 단순화되고, 노즐 분리 실패 등의 문제가 없어 신뢰성을 확보할 수 있으며, 기존의 노즐을 사용하지 않기 때문에 제작비용도 감소시킬 수 있다[5]. 그러나, 고정 노즐의 부재로 인해 연소실의 압력이 유지되지 못해 10~20%의 성능 하락이 단점으로 나타났기에 추진제의 성능을 향상시키기 위한 연구가 현재까지도 진행되고 있다[6-12].

Procinsky[6,7] 등은 Reduced-smoke와 Metalized

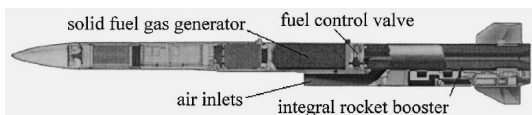


Fig. 1 General ducted rocket[3].

propellant (Al/Zr) 조성에 대해 해석 및 비교를 수행하였고, 고연소속도, 저압력지수, 고세장비(L/D), 향상된 추진제의 물리적 특성이 성능에 중요한 변수로 제안하였으며 무노즐 성능 예측 프로그램의 특징을 설명하였다. Farinaccio[8,9] 등은 고연소속도 추진제를 개발하여 무노즐 부스터에 적용하였고 L/D가 증가할수록 연소면적이 증가하고, 챔버 내부 압력이 증가하여 연소시간이 감소하고 추력이 증가한다고 보고하였다. Nahon[10] 등은 추진제 조성 효과로 압력지수가 작으면 추력은 시간에 따라 증가하고 압력지수가 크면 반대로 감소한다고 시험에 의해 입증하였고, 연소속도가 느릴수록 침식연소의 효과는 커진다고 보고하였다. Krishnan[11] 등은 Procinsky[6,7]의 결과와 일치하게 고연소속도, 저압력지수, 고세장비는 내탄도 특성을 향상시키고, 연소관 전/후방의 압력차에 의한 고변형성, 연소말기 고온에 의한 고응력과 추진제의 고밀도를 고려한 향상된 기계적 특성이 요구된다고 제안하였다. Calzone[12] 등은 세장비가 증가함에 따라 유량, 추력, 속도가 증가하며 연소시간이 감소되는데 노즐목에서 choke시키기 위해 고연소속도의 추진제 개발이 필요하다고 주장하였다.

본 연구는 Fig. 2와 같이 조건을 만족하는 무노즐 부스터를 개발하기 위한 두 번째 단계로, 무노즐 부스터의 성능을 향상시키기 위해 고성능의 추진제를 개발하여 성능시험을 수행하고, 앞선 연구인 알루미늄 조성의 추진제와 성능을 비교하는데 목적이 있다[13]. 이를 위해, 에너지가 높은 금속인 지르코늄을 적용한 추진제를 개발하였으며, 알루미늄 조성의 추진제가 적용된 부스터와 동일한 추진제 형상으로 지상연소시험을 수행하여 추진제 그레인 세장비(L/D)에 따른 성능을 확보하였고(Fig. 3), 알루미늄 조성의 노

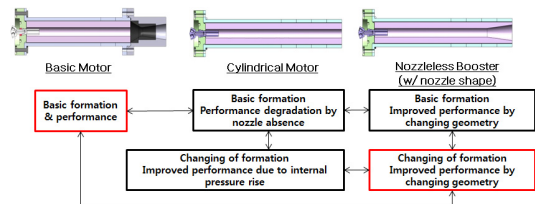


Fig. 2 Development of nozzleless booster.



Fig. 3 Ground test for nozzleless booster.

즐이 장착된 Basic Motor 및 일반적인 HTPB/Reduced-smoke 추진제 조성을 갖는 Classical Motor와 성능을 비교하였다.

2. 본 론

2.1 지르코늄(Zr) 조성의 고성능 추진제 개발

추진제의 성능을 향상시키기 위해서는 추진제의 비추력과 밀도를 높여야 한다. 추진제의 압력 지수가 낮고 밀도가 높으면 연소압력에 따른 연소속도 변화가 적다. 또한, 연소속도가 빠르고 높은 밀도로 동일 부피 내에 더 많은 추진제를 충전할 수 있으면, 동일 형상으로 더 큰 추력을 발생시킬 수 있다. 따라서, 이러한 추진제의 조건을 만족시키기 위해 알루미늄과 지르코늄 금속연료를 비교한 결과, 지르코늄의 연소열은 78.2 KJ/cm^3 으로 알루미늄의 83.9 KJ/cm^3 에 비해 다소 낮지만 밀도는 6.49 g/cm^3 으로 알루미늄의 밀도 2.7 g/cm^3 과 비교하여 약 2.4배 크기 때문에 밀도비추력이 높게 나타났다. 따라서, 밀도가 높아 더 높은 에너지를 지닌 지르코늄 금속연료를 이용한 추진제 연구를 수행하였고, 목표 추진제 조건은 아래와 같다.

- 1) 고 연소속도 : 30 mm/s 이상
- 2) 저 압력지수 : 0.3 이하
- 3) 고 추진제 밀도 : 2.0 g/cc 이상

앞서 수행된 알루미늄 금속연료를 사용한 연구[13]에서는 CEA(Chemical Equilibrium

Applications) Program[14] 해석 결과 고체 함유량 87%에서 알루미늄 23% 적용시 최대 밀도비추력이 $475 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{s/m}^3$ 으로 나타났으나, 같은 고체 함유량에서 지르코늄 금속연료 사용시 최대 밀도비추력은 40 wt%에서 $527 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{s/m}^3$ 로 나타났다. 금속연료가 증가할수록 산화제의 함유량이 감소되고, 불완전 연소에 의한 농후연소로 성능이 낮아지고, 점도에도 불리하기 때문에 Min[15] 등이 제안한 금속연료 32%로 재해석하였다. 그 결과 $507 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{s/m}^3$ 으로 나타나 알루미늄 조성의 추진제와 비교시 향상된 밀도비추력을 확보하였다.

알루미늄 금속연료 조성의 추진제와 동일하게 산화제로 AP (Ammonium Perchlorate), 경화제로 IPDI (Isophorone Diisocyanate)를 사용하였으며, 연소속도를 높이기 위한 연소촉매제로 Butacene (5%)을 사용하였다. 알루미늄 금속연료는 $30 \mu\text{m}$ 의 단일입자를 사용했으나, 지르코늄 금속연료는 $35 \mu\text{m}$ 와 $13 \mu\text{m}$ 의 이중입자를 동일한 비율로 사용하였다. 이 결과 연소속도는 29.01 mm/s , 압력지수는 0.2734 , 밀도는 2.152 의 결과를 확보하였고 위의 목표 조건에 매우 근접하게 나타났다. 비록 연소속도 조건에는 약간 낮지만, 압력지수가 낮게 측정되었기에 이 조성을 이용한 추진제를 사용하여 무노즐 부스터의 성능시험을 수행하였다.

2.2 시험모터의 형상 및 제원

본 연구에 사용된 시험모터의 형상을 Fig. 4에 나타내었다. Basic Motor는 실린더 형상의 추진제 그레인으로 노즐이 부착된 일반적인 형태의 모터로써 알루미늄 조성의 추진제로 충전되었고, 전체 길이는 $L/D=9$, 추진제 길이는 $L/D=7$ 로 제작되었다. Cylindrical Motor는 실린더 형상의 추진제 그레인과 일반적인 노즐이 없어 연소관 끝까지 추진제가 충전된 모터로 지르코늄 조성의 추진제로 충전되었으며, 전체 길이는 $L/D=9$ 이다. 무노즐 부스터는 Basic Motor와 전체 길이는 동일하지만 일반적인 노즐 대신 추진제 그레인으로 노즐을 형상화한 모터이다. 지르코늄 조성의 추진제를 적용한 무노즐 부스터의 성능을

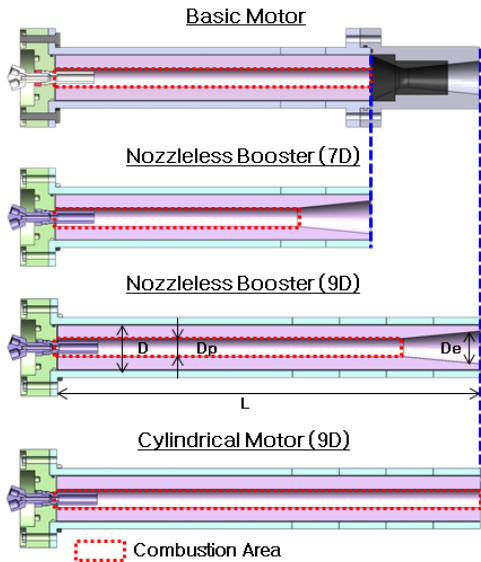


Fig. 4 Schematics of basic motor, cylindrical motor, and nozzleless booster (L/D=7 & 9).

확인하기 위한 목적이기에 앞선 연구결과인 알루미늄 조성의 성능시험을 수행한 부스터와 동일하게 추진제 직경(D)은 64.2 mm, 추진제 포트 직경(D_p)은 26.5 mm, 원뿔 형상 추진제 노즐의 출구 직경(D_e)은 47.7 mm이며, 형상변수로 세장비(L/D)는 5, 6, 7, 9, 11, 13으로 동일하게 변화시켰다. 추진제 길이 및 형상 구분을 위해 Basic Motor는 7DC, Cylindrical Motors는 9DC로 표현하였다.

점화기 조립체 또한 앞선 연구와 마찬가지로 모터 헤드에 나사형태로 결합시켰고, 점화 펠렛으로 BKNO₃ II-B 6 g을 충전하여 사용하였다. Y형 어댑터를 이용하여 착화기와 압력측정에 이용하였다.

23 성능 분석

23.1 무노즐 부스터의 압력 및 추력 선도

Fig. 5와 6은 본 시험에서 측정된 무노즐 부스터의 P-t(압력-시간)와 T-t(추력-시간) 선도를 보여주는데 시험된 모든 조건인 L/D= 5, 6, 7, 9, 11, 13에 대해 표현하였다. 앞서 연구된 알루미늄

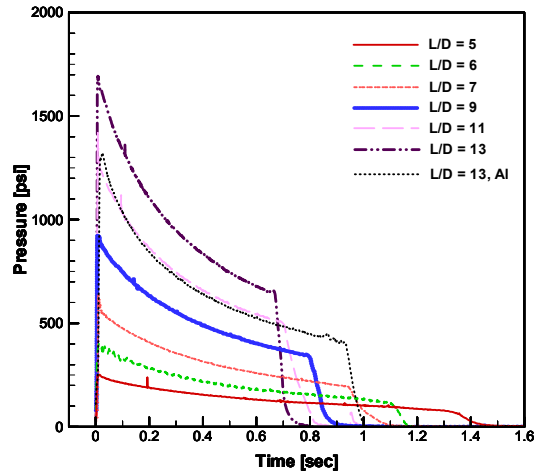


Fig. 5 Pressure history for nozzleless booster at all conditions.

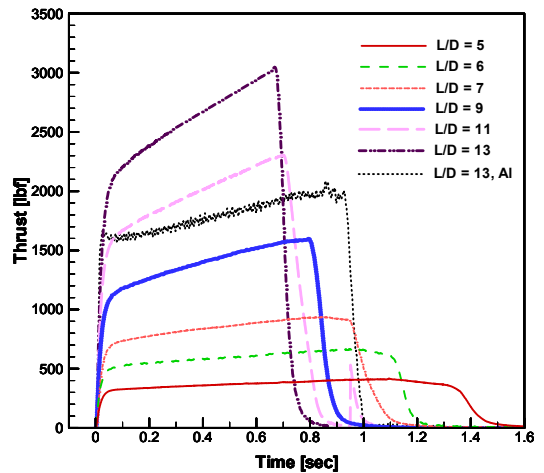


Fig. 6 Thrust history for nozzleless booster at all conditions.

늄 조성의 추진제가 적용된 부스터의 결과와 비교를 위해 L/D=13에 대한 결과도 추가시켰다. 알루미늄 조성의 추진제 결과와 마찬가지로 연소초기 증가된 압력은 연소가 진행되면서 노즐 형상의 추진제 그레인이 연소에 의해 노즐목 직경이 증가되어 연소압력은 점차 감소하게 나타났고, 연소면적은 점점 증가하기 때문에 추력은 증가하게 나타났다.

추진제 길이에 대한 효과로 L/D가 증가하면

Table 1. Test motor performance.

Motor	Propellant	L/D	D _b (in)	WF	m (lb)	t (sec)	P _{max} (psi)	T _{max} (lbf)	P _{ave} (psi)	T _{ave} (lbf)	I _t (lbf-sec)	I _{sp} (sec)	Impulse density (10 ⁴ ×N.s/m ³)
Classical Motor	HTPB/Reduced-smoke (ρ=1.7g/cc)	7	1.04	0.6	4.18	4.35	271	291	168	175	714	171	291
		14			8.30	2.05	1056	1331	809	1011	1939	234	397
Basic Motor	HTPB/Al (ρ=1.83g/cc)	7			4.22	0.85	1738	2319	998	1316	1089	258	472
Nozzleless Booster	HTPB/Al (ρ=1.83g/cc)	7			4.04	1.73	435	697	183	420	706	175	320
		9			5.36	1.32	685	1105	336	853	1063	198	363
		11			7.01	1.11	971	1563	490	1305	1407	201	367
		13			8.13	1.01	1323	2082	679	1759	1718	211	387
	HTPB/Zr (ρ=2.15g/cc)	5			3.21	1.62	252	417	137	369	520	162	348
		6			4	1.27	413	666	220	583	685	171	368
		7			4.82	1.20	638	940	328	819	853	177	381
		9			6.42	1.00	939	1599	529	1359	1171	182	392
		11			8.05	0.92	1419	2304	751	1907	1499	186	400
		13			9.69	0.85	1693	3048	992	2502	1806	186	401
		Cylindrical Motor			HTPB/Al (ρ=1.83g/cc)	9	5.69	1.16	886	1162	431	959	1103
			HTPB/Zr (ρ=2.15g/cc)	9	6.71	0.91	1217	1750	616	1426	1159	173	371

서 연소면적이 증가하기 때문에 평균압력이 증가하게 되고, 이로 인해 연소시간은 감소하였으며 추력은 증가하였다. 그러나 연소 초기 추력은 알루미늄 조성의 추진제와 달리 최대 압력지점에서부터 시작되지 않았으며, 곡선의 형태로 변곡하는 형상을 보였다. L/D=5, 6에서는 추력의 증가가 거의 없었으나, L/D=7부터 세장비가 증가함에 따라 연소초기 추력과 비교하여 증가된 결과를 보인다. 또한, 압력 및 추력 모두 L/D=5에서부터 모든 시험조건에서 연소가 끝난 tail-off 구간에서 일정시간을 두고 점차적으로 감소하는 현상이 발견되었다. 이는 연소관 후방의 연소속도 증가로 인해 연소되지 않고 남은 잔여 추진제(silver)가 발생한 침식연소 현상으로 판단되나, 침식연소 현상에 대한 명확한 정의가 필요하다. 또한, 물리적 조건이 만족(L/D>7)되지 않은 L/D=5와 6에서도 tail-off 구간에서 압력이 천천히 하강하는 현상이 발생된 것으로 보아 지르코늄 조성 추진제의 높은 연소속도로 인하여 연소관 전방이나 추진제 그레인 노출목 근처에 잔여 추진제가 생긴 것으로 판단된다[16].

게다가 L/D=5, 6에서는 알루미늄 조성에서 발

생되었던 L* instability를 확인할 수 없었다 [13,17]. 두 조건 모두 깨끗한 데이터를 확보할 수 있었으며, 촬영된 영상에서도 Fig. 3과 같이 연소불안정 현상이 확인되지 않았다. 이는 지르코늄에 의해 생성된 연소물질(주된 고체성분 ZrO₂, 123 g/mol)이 알루미늄에 의해 생성된 연소물질(주된 고체성분 Al₂O₃, 101.96 g/mol)과 비교하여 분자량이 크기 때문에 연소시 유동흐름에 안정성을 준 것으로 판단된다[18].

2.3.2 형상에 따른 성능 비교

지르코늄 조성의 추진제가 적용된 모터의 시험을 통해 확보된 데이터를 토대로 물리변수와 성능변수에 따른 결과를 분석하였다. 물리변수로는 추진제 무게 및 연소관 길이(L/D), 성능변수로는 최대/평균 압력, 최대/평균 추력, 총역적, 비추력, 밀도비추력 등이다. 비교를 위해 앞선 연구의 결과인 알루미늄 조성의 추진제가 적용된 모터의 성능결과와 노출이 장착된 Basic Motor, 70 mm급 추진기관인 Classical Motor와의 결과도 같이 Table 1에 정리하였다.

D_p는 추진제 포트 직경, WF는 Web Fraction,

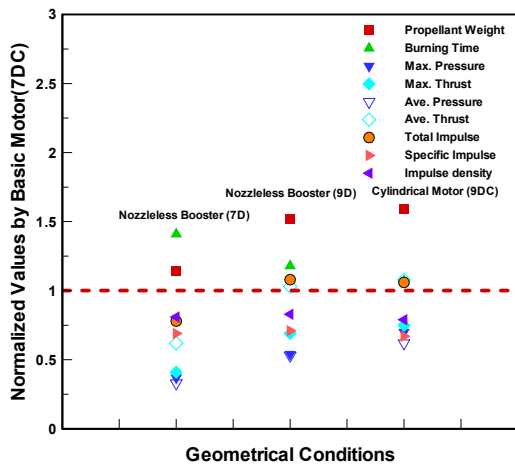


Fig. 7 Nozzleless booster(L/D=7 & 9) and cylindrical motor(L/D=9) performances normalized by basic motor those.

m은 추진제 무게, t는 연소시간, P_{max} 는 최대 압력, P_{ave} 는 평균 압력, T_{max} 는 최대 추력, T_{ave} 는 평균 추력, I_t 는 총역적, I_{sp} 는 비추력, Impulse Density는 밀도비추력(밀도×비추력)으로 추진제의 성능을 판단하는 인자로 사용된다. Classical Motor는 HTPB/Reduced-smoke 조성으로 제작되었다.

2.3.2.1 Basic Motor(7DC) vs. 무노즐 부스터(7D, 9D) & Cylindrical Motor(9DC)

알루미늄 조성의 추진제보다 성능이 좋은 지르코늄 조성의 추진제를 적용한 부스터의 성능 확인을 위해, Fig. 4에 표현된 형상 및 크기의 Basic Motor와 Cylindrical Motor와의 성능을 비교하였다.

Fig. 7은 L/D=7과 9의 무노즐 부스터와 Cylindrical Motor의 성능을 Basic Motor로 일반화시킨 결과를 보여준다. 무노즐 부스터는 후방 추진제 그레이인이 노즐형상을 갖기 때문에 L/D=7의 경우 같은 길이의 추진제가 충전되어 있더라도 Basic Motor와 비교하여 적은 양이 충전되고, 초기 연소면적이 작으며(Fig. 4), 추진제 연소에 의해 노즐목 직경이 증가되어 연소압력의 변화가 적다. 지르코늄의 밀도가 알루미늄보

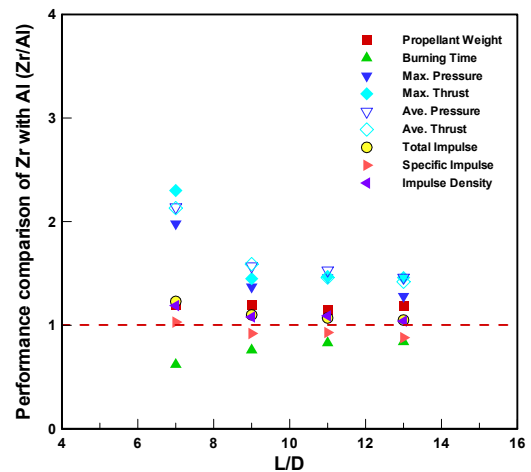


Fig. 8 Nozzleless booster performance comparison of propellants included Zr with Al.

다 크기 때문에 알루미늄 조성의 Basic Motor와 비교하여 무게가 약 14% 증가하였음에도 불구하고 모든 성능에서 Basic Motor와 비교하여 낮게 나타났다. 각 모터의 성능변수를 Basic Motor의 성능변수로 일반화시켰기에 1보다 작을 경우 성능이 낮음을 의미한다.

그러나 노즐 구성품 대신 추진제가 충전된 L/D=9의 무노즐 부스터는 추진제로 형성된 노즐목 직경이 연소가 진행됨에 따라 증가되어 평균압력이 Basic Motor와 비교하여 50%대로 낮았음에도 불구하고 추진제 무게가 약 150% 증가하여 평균추력과 총역적이 각각 103%와 108%로 높게 나타났다. 또한, 증가된 추진제 무게로 인하여 비추력은 71%로 앞선 연구인 알루미늄 조성의 부스터 비추력(198 sec) 결과인 77%보다 낮게 나타났지만, 밀도비추력은 지르코늄의 고밀도로 인해 83%까지 증가하여 알루미늄 조성의 밀도비추력($363 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^3$)의 77%보다 향상된 결과를 보여주었다.

L/D=9인 Cylindrical Motor는 연소관 후방 추진제 그레이인이 노즐 형상이 아닌 실린더 형태이기 때문에 연소면적이 추진제 끝단까지 확장되어 무노즐 부스터보다 충전된 추진제 무게가 7%정도 증가했다. 그러나 Basic Motor와 비교하

여 노즐목의 부재로 평균압력이 62%로 낮아 성능이 낮게 나타났고, 총역적은 108%로 약간 높으나 7% 증가된 충전된 추진제 무게로 인하여 비추력은 L/D=9의 무노즐 부스터보다 더 낮은 67%, 밀도비추력은 79%로 나타났다. 이 결과로부터 동일한 세장비에서 Cylindrical Motor보다 무노즐 부스터의 성능이 우수함을 알 수 있었다.

앞선 연구인 알루미늄 조성의 추진제와의 성능비교를 위해 지르코늄 조성의 부스터 성능에 일반화시켜 Fig. 8에 나타내었다. 지르코늄 조성의 부스터 성능을 알루미늄 조성의 성능으로 일반화시켰기 때문에 1보다 클 경우 성능이 높음을 의미한다. 알루미늄 조성의 부스터 성능의 경우 L/D=5, 6은 L* instability가 발생되어 분석이 불가하였기에 Fig. 7의 비교에서는 제외시켰다. 동일한 형상 조건하에 L/D=7, 9, 11, 13에 대해 비교한 결과 지르코늄 조성의 추진제가 적용된 부스터의 작동 성능이 비추력을 제외하고 모두 알루미늄 조성의 추진제와 비교하여 높게 나타났는데, 지르코늄 조성의 추진제의 낮은 압력지수로 인해 연소 압력의 변동이 적어 평균 압력/추력이 증가하고, 높은 연소속도로 인하여 연소면적의 변화 속도가 증가하여 최대 압력/추력이

증가한 것으로 판단된다. 또한, 총역적은 추진제의 밀도증가로 인한 무게 증가로 알루미늄 조성의 추진제 보다 크게 나타났으나, 이 무게 증가로 인하여 세장비가 7에서 13으로 증가함에 따라 비추력은 103%에서 88%까지 감소하여 세장비 7인 경우(비추력 103%)를 제외하고는 알루미늄 조성의 추진제가 높게 나타났다. 그러나, 밀도비추력의 경우 세장비가 증가함에 따라 119%에서 104%로 비추력과 마찬가지로 감소하였지만 알루미늄 조성의 추진제보다 높은 결과를 보여주었다. 결론적으로 동일 밀도에서는 비추력이 높을수록 우수한 추진제이지만, 밀도차가 발생할 경우 밀도비추력이 높은 추진제가 성능이 우수한 추진제이므로, 본 연구를 위해 개발된 지르코늄 조성의 추진제가 성능이 향상된 추진제로 결론지을 수 있다.

2.3.2.2 무노즐 부스터(9D, 11D) vs. Cylindrical Motor (9DC)

L/D=9의 Cylindrical Motor와 무노즐 부스터는 같은 추진제 길이를 갖지만 전자는 추진제 그레인이 실린더형으로 연소관 끝단까지 이어지고, 후자는 연소관 후방이 노즐 형상으로 인하여 추진제 충전량이 노즐형상만큼 작아진다. 이로

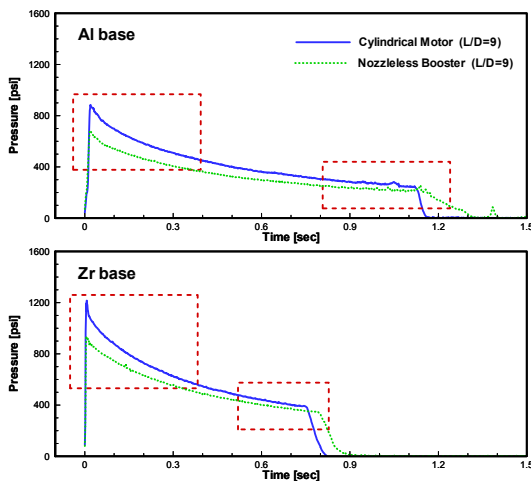


Fig. 9 Pressure history comparison of cylindrical motor to nozzleless booster at L/D=9 between Al and Zr.

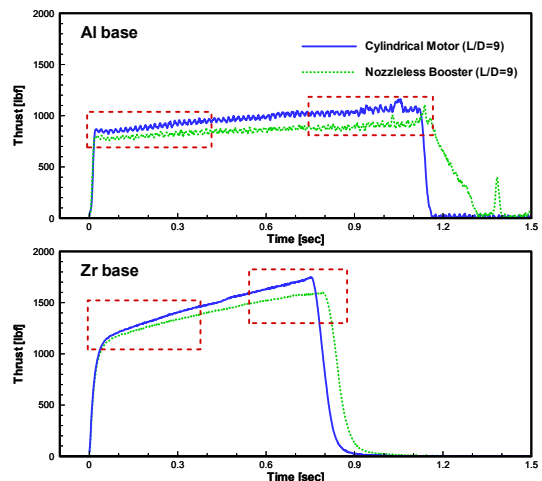


Fig. 10 Thrust history comparison of cylindrical motor to nozzleless booster at L/D=9 between Al and Zr.

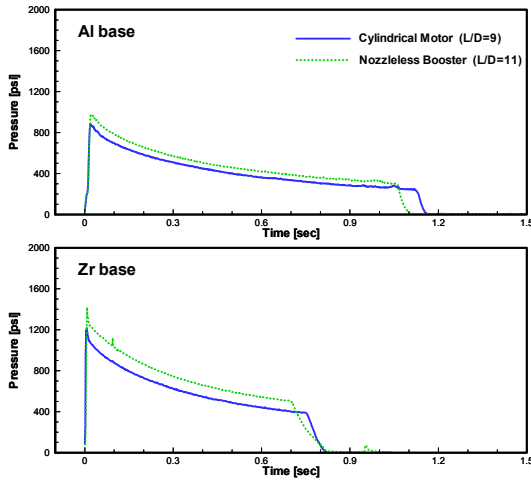


Fig. 11 Pressure history comparison of cylindrical motor at L/D=9 to nozzleless booster at L/D=11 between Al and Zr base.

인해 Cylindrical Motor의 초기 연소면적은 무노즐 부스터와 비교하여 노즐의 축방향 길이만큼 더 크다. 따라서 Fig. 9와 10에 나타난 것처럼 최대 및 평균압력이 무노즐 부스터에 비해 높게 나타났고, 평균압력의 영향으로 인해 최대/평균 추력 또한 높게 나타났다. 그러나 연소 후반으로 갈수록 압력은 그 간격이 점점 줄었고, 추력은 점점 증가하였다. 이는 무노즐 부스터의 추진제 그레인에 의한 노즐 형상의 효과로 연소가 진행됨에 따라 노즐목의 직경이 증가하지만 초킹의 효과에 의해 노즐 확대부의 압력이 증가되고, 연소가 진행되면서 연소면적이 같아져 압력차가 점점 줄어든 것으로 판단된다. 또한 노즐 확대부의 압력차에 의해 열에너지가 운동에너지로 변환되어 연소초기 추력차는 적었지만, 연소 후반으로 갈수록 노즐형상이 사라져 추력차가 점점 증가된 것으로 판단된다. 이 현상은 Fig. 10에 나타난 것처럼 알루미늄 조성의 추진제가 적용된 부스터와 지르코늄 조성의 추진제가 적용된 부스터 모두에서 나타났다. 또한, 지르코늄 조성의 추진제는 Cylindrical Motor가 무노즐 부스터에 비해 약 5% 더 충전되었으나, 총역적은 큰 차이가 없었기에 비추력 및 밀도비추력은 무노즐 부스터가 Cylindrical Motor에 비해 105%로 높

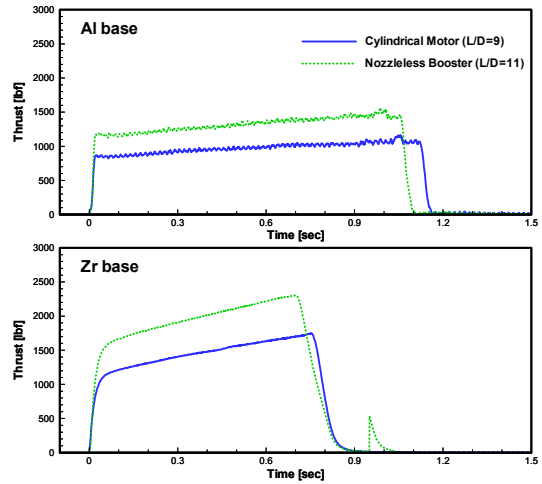


Fig. 12 Thrust history comparison of cylindrical motor at L/D=9 to nozzleless booster at L/D=11 between Al and Zr base.

게 나타났다.

Fig. 11과 12는 L/D=9인 Cylindrical Motor와 L/D=11의 무노즐 부스터에 대한 압력 및 추력 선도를 보여주는데, 앞서 분석한 바와 같이 연소면적이 동일한 두 모터는 알루미늄 조성과 지르코늄 조성의 추진제 모두 일정한 압력차와 추력차를 보여준다. 지르코늄 조성의 추진제가 적용된 L/D=11의 무노즐 부스터는 Cylindrical Motor에 비해 추진제가 20% 많게 충전되어, 총역적은 29% 높게 나타났고, 비추력 및 밀도비추력 8% 크게 나타났다.

2.3.3 세장비 효과

무노즐 부스터의 세장비 변화에 대한 압력과 추력에 대한 특성을 알아보기 위해 Eq. 1, 2에 표현한 것처럼 초기 연소면적의 증가가 연소챔버 압력 및 추력에 영향을 주기 때문에, 증가된 초기 연소면적으로 최대/평균 압력과 최대/평균 추력을 일반화시켜 Fig. 13과 14처럼 비교해 보았다. 세장비가 증가함에 따라 증가된 연소면적만큼 성능이 증가하는지를 알아보기 위해, 각 세장비별 연소면적으로 최대/평균 압력을 일반화시킨 알루미늄 조성의 추진제와 지르코늄 조성의 추진제가 적용된 부스터들의 결과를 Fig. 13

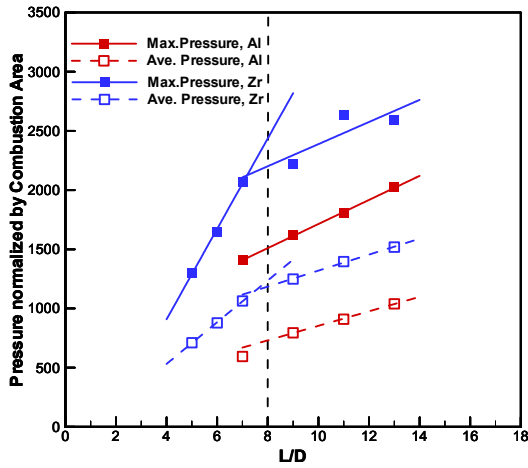


Fig. 13 Pressure variations of nozzleless booster normalized by its combustion area as a function of booster length increase.

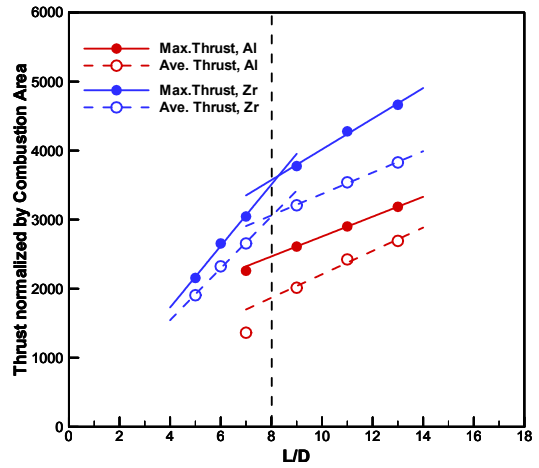


Fig. 14 Thrust variations of nozzleless booster normalized by its combustion area as a function of booster length increase.

에 나타내었다. Fig. 14는 각 세장비별 연소면적으로 최대/평균 추력을 일반화시킨 결과를 보여준다.

$$P_C = \left(\frac{\rho_p a A_p}{C_D A_t} \right)^{\frac{1}{1-n}} \quad (1)$$

$$F = C_F P_C A_t \quad (2)$$

여기서 P_C 는 연소챔버 압력, ρ_p 는 추진제 밀도, a 는 연소속도 상수, n 은 압력지수, A_b 는 연소면적, A_t 는 노즐목 단면적, C_D 는 배출계수, C_F 는 추력계수를 의미한다.

두 결과 모두 특정 조건을 기준으로 일정한 경향성을 보여주었는데, $L/D > 8$ 인 경우 압력과 추력 모두 L/D 가 증가함에 따라 증가되는 일정한 경향성이 나타났다. $L/D < 8$ 인 경우 연소불안정으로 인하여 확보할 수 없었던 알루미늄 조성의 추진제와는 달리 지르코늄 조성의 추진제는 일정한 경향성이 나타났는데, L/D 가 증가함에 따라 압력과 추력 모두 증가하였지만 $L/D > 8$ 인 경우와 기울기차가 다르게 나타났다. 기울기차는 $L/D < 8$ 의 경우가 $L/D > 8$ 인 경

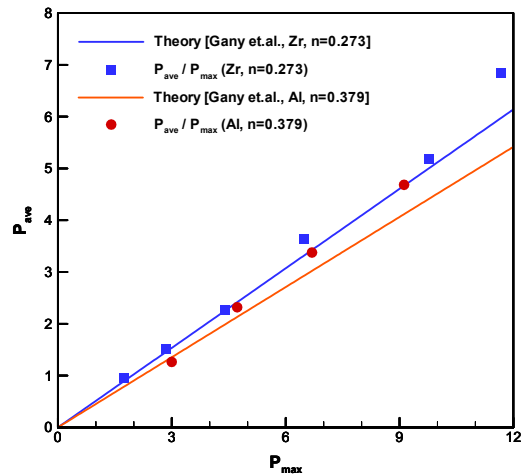


Fig. 15 Pressure characteristics comparison of nozzleless booster included Al with Zr through theoretical and experimental approaches.

우와 비교하여 압력과 추력에서 2.4 ~ 4배 정도 높게 나타난 것으로부터 L/D 가 짧을수록 길이가 압력과 추력에 큰 영향을 주는 것으로 보인다.

Fig. 15는 Gany[19] 등이 제안했던 P_{ave}/P_{max} 에 대한 결과를 비교한 그래프이다.

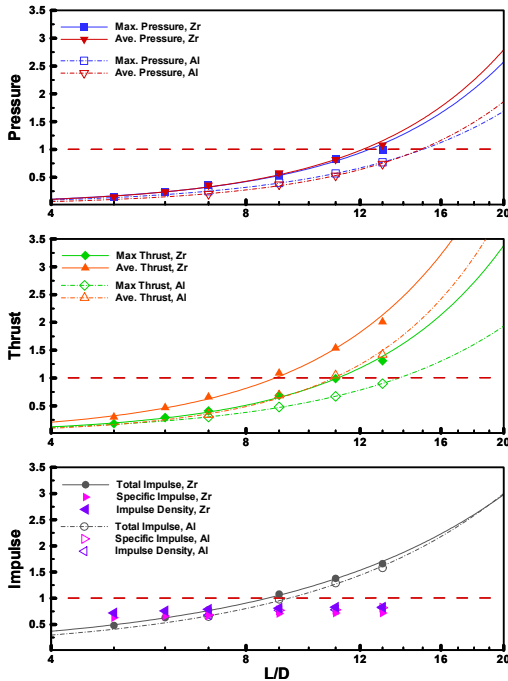


Fig. 16 Performance comparison of nozzleless booster with basic motor ($L/D=7$).

$$\frac{P_{ave}}{P_{max}} = \left(\frac{1}{1-n} \right) \left(\frac{\ln(D_{max}/D_b)}{(D_{max}/D_b)^{1/(1-n)} - 1} \right) \quad (3)$$

D_{max} 는 연소후 포트 직경, D_b 는 연소전 포트 직경, n 은 압력지수를 의미한다.

Gany는 Eq. 3과 같이 P_{ave}/P_{max} 에 대해 이론식으로 제시했고, non-metalized HTPB 추진제를 이용하여 검증하였다. 이 식을 알루미늄 조성의 추진제와 지르코늄 조성의 추진제에 적용한 결과, 이론과 시험 모두 압력지수가 낮을수록 기울기는 크게 나타나 최대압력 대비 평균압력이 증가함을 확인하였다. 알루미늄 조성의 추진제는 이론을 잘 따라가지는 못하고 평균압력의 증가량이 더 크게 나타났다. 이는 알루미늄 조성의 추진제의 압력지수의 영향으로 압력지수가 낮아질수록 이론과 일치하게 나타났다. 그러나, 지르코늄 조성의 추진제는 $L/D=13$ 을 제외하고 유사하게 나타났고 $L/D=13$ 을 포함할 경우 기울기는 이론치의 경우

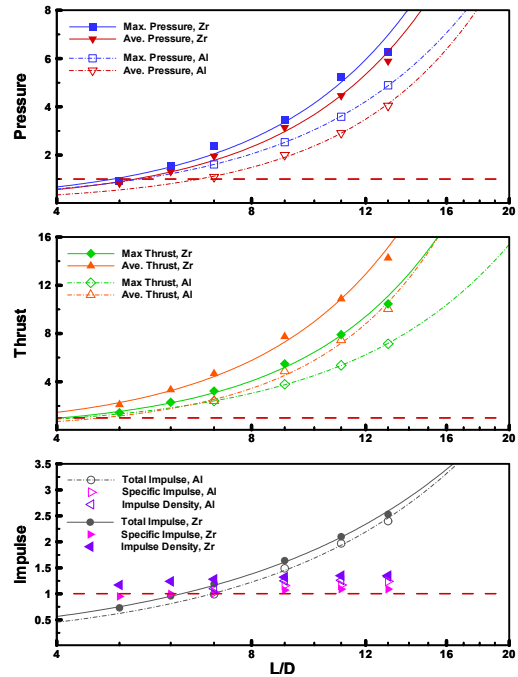


Fig. 17 Performance comparison of nozzleless booster with classical motor ($L/D=7$, HTPB/Reduced smoke, cylinder shape).

5.1, 시험치의 경우 5.77로 나타났다.

24 Performance Comparison

지르코늄 조성의 추진제와 알루미늄 조성의 추진제 성능을 비교하고 동일 이상의 성능을 갖기 위한 조건을 확인하기 위해 알루미늄 조성의 Basic Motor와 HTPB/Reduced-smoke 조성의 Classical Motor의 결과와 비교해보았다. Fig. 16은 알루미늄 조성으로 모든 형상이 같지만 노즐을 장착한 Basic Motor, Fig. 17은 금속연료를 사용하지 않은 HTPB/Reduced-smoke 조성으로 Basic Motor의 그레인 형상 및 세장비($L/D=7$)와 일치하고 노즐을 장착한 Classical Motor, Fig. 18은 금속연료를 사용하지 않은 HTPB/Reduced-smoke 조성으로 추진제 그레인이 star형이며 노즐을 장착한 일반적인 70 mm급 Classical Motor($L/D=14$)를 나타내며 알루미늄과 지르코늄 조성의 추진제로 충전된 무노즐 부스

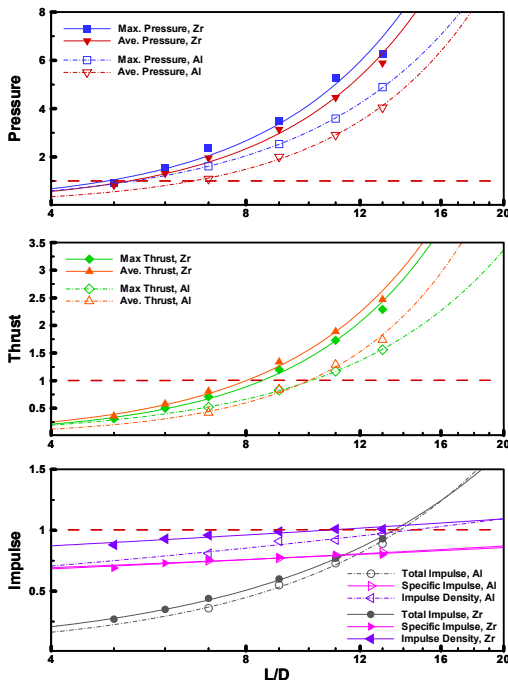


Fig. 18 Performance comparison of nozzleless booster with classical motor ($L/D=14$, HTPB/Reduced smoke, star shape).

터의 성능을 각 모터의 성능으로 일반화하여 도시하였다. 비교 성능은 최대/평균 압력 및 추력, 총역적, 비추력 및 밀도비추력이며 알루미늄 조성의 추진제 밀도는 1.83 g/cc , HTPB/Reduced smoke 추진제의 밀도는 1.7 g/cc 이다.

앞서 Fig. 8에 언급한 결과처럼 비추력을 제외한 모든 성능 변수에 대해 고밀도로 인하여 지르코늄 조성의 추진제가 알루미늄 조성의 추진제보다 높게 나타났기에 Fig. 16-18에 도시된 비교 그래프에서도 같은 결과를 보인다. 이 차이로 인하여 Basic Motor 및 Classical Motor와의 비교 결과, 알루미늄 조성의 무노즐 부스터보다 지르코늄 조성의 무노즐 부스터가 더 짧은 세장비에서 비추력 및 밀도비추력을 제외한 모든 성능이 만족됨을 알 수 있었다.

앞선 연구결과에서 보고된 바와 같이[13], 알루미늄 조성의 무노즐 부스터의 경우 같은 조성으로 제작된 Basic Motor와 비교시 비추력 및

밀도비추력을 제외한 모든 성능이 $L/D=15$ 이상에서 만족시킬 수 있었으나, 지르코늄 조성의 무노즐 부스터는 $L/D=13$ 이상에서 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 16). 두 조성의 세장비 차이만큼 추진제 무게가 감소되어 추진기관 중량감소로 성능이 향상될 것이라 예측되었지만, 지르코늄 조성의 추진제 밀도가 크기 때문에 세장비 차이로 인한 추진제 무게 감소는 없었고, 평균추력 및 총역적도 차이가 없게 나타났다. Gany[19] 등이 제시한 같은 평균압력 내에서 일반 부스터와 비교시 이론적으로 약 86%의 비추력을 갖는다고 제시하였는데, 알루미늄 조성의 무노즐 부스터의 경우 비추력이 약 86%로 나타났으나, 지르코늄 조성의 무노즐 부스터의 경우는 비추력이 약 72%로 나타나 알루미늄 조성보다 낮게 나타났다. 그러나 밀도비추력의 경우 알루미늄 조성의 경우 84%이나 지르코늄 추진제는 약 83%로 나타나 큰 차이가 없었다. 또한, 알루미늄 조성의 추진제와 동일한 세장비($L/D=15$)에서는 두 개의 조성이 모두 밀도비추력이 86%로 나타나 차이가 없었다. 알루미늄 조성의 추진제 경우 최대 밀도비추력을 갖는 조성이었고, 지르코늄 조성의 추진제 경우 CEA에 의한 이론상 최대 밀도비추력이 아닌 Min[15] 등이 제안한 조성으로 구성되었기에 두 금속연료의 함유량이 달라 발생한 원인으로 보인다. 지르코늄 조성의 추진제의 밀도비추력이 최대가 아님에도 불구하고 동일한 결과가 나온 것으로 보아 성능이 우수한 것으로 판단된다.

HTPB/Reduced smoke 조성으로 실린더 형태의 내탄도 형상을 갖으며 노즐이 장착된 Classical Motor($L/D=7$)와 비교 결과, 알루미늄 조성의 무노즐 부스터에서는 같은 $L/D=7$ 인 조건에서 모든 성능이 만족되었으나, 지르코늄 조성의 무노즐 부스터에서는 세장비가 더 짧은 $L/D=6$ 조건에서 만족되었다(Fig. 17). Classical Motor에 비해 두 조성의 무노즐 부스터가 세장비가 같거나 짧은 조건에서 성능이 만족된 것으로 보아 HTPB/Reduced smoke 조성의 추진제에 금속연료가 함유되지 않아 에너지의 차이로 인해 발생한 결과로 판단된다. 앞서 Basic Motor에서

비교한 것과 마찬가지로 세장비가 짧은 지르코늄 조성의 무노즐 부스터의 추진제 무게는 밀도차로 인하여 알루미늄 조성의 무노즐 부스터와 차이가 나지 않았다. 평균 압력 및 추력은 각각 20%와 40%로 지르코늄 조성의 무노즐 부스터가 컸으나 총역적 및 비추력은 차이가 없었고, 밀도비추력은 15% 높게 나타났다. 또한, 두 조성의 부스터 형상조건이 일치하는 L/D=7에서는 모든 성능에서 이 차이가 더욱 커져 밀도비추력은 지르코늄 조성의 무노즐 부스터가 19% 높게 나타난 것으로 보아 우수한 성능의 추진제임을 알 수 있다.

마지막으로, 일반적으로 널리 사용되는 70 mm급 HTPB/Reduced smoke 조성의 Classical Motor(L/D=14)와의 비교 결과 알루미늄 조성의 무노즐 부스터 모두 Classical Motor와 같은 세장비인 L/D=14 이상에서 비추력을 제외한 모든 성능이 동일 이상으로 나타났다(Fig. 18). 확보한 데이터를 벗어나기 때문에 외삽의 결과로 비교해보면 지르코늄 조성의 무노즐 부스터가 알루미늄 조성에 비해 평균 압력 및 추력은 각각 1.7배, 1.3배로 높게 나타났고, 밀도비추력은 5%로 향상되게 나타났다. 밀도비추력만 비교한다면 지르코늄 조성의 무노즐 부스터가 세장비 L/D=10의 조건에서 82%의 평균 압력으로 Classical Motor(L/D=14)와 일치하는 결과를 확보할 수 있었고, 같은 세장비에서 알루미늄 조성의 무노즐 부스터는 90%정도의 밀도비추력을 보여주기 때문에 지르코늄 조성의 추진제가 더 우수한 추진제임을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

덕티드 로켓에서 사용되는 분리노즐의 단점을 보완하기 위해 추진제 그레이드에 노즐 형상을 적용시켜 노즐의 효과를 얻기 위한 무노즐 부스터를 개발하였다. 고밀도의 지르코늄 금속연료를 사용하여 고연소속도 및 저압력지수 조건을 만족시키면서 충진이 가능한 정도를 갖는 추진제 조성을 개발하였고, 이를 무노즐 부스터에 적용하였다. 노즐이 장착된 Basic Motor 및 실린더형

추진제 그레이드의 Cylindrical Motor와 성능 비교를 하였고, 세장비(L/D)에 따른 성능변화를 확인하였으며, 알루미늄 조성의 Basic Motor와 HTPB/Reduced-smoke 조성의 Classical Motor와 유사한 성능을 확보하기 위한 조건을 분석하였다. 이 결과를 토대로 이전 연구결과인 알루미늄 조성의 무노즐 부스터와 성능을 비교하였다. 정리된 결과는 아래와 같다.

1. 알루미늄 조성의 무노즐 부스터의 성능을 향상시키기 위해 지르코늄 금속연료를 사용하여 고연소속도, 고밀도, 저압력지수의 고성능 추진제를 개발하였다.
2. 연소초기 추력은 최대 압력시점에서부터 시작되지 않았으며, 곡선의 형태로 변곡되었다.
3. L/D=5, 6의 조건에서는 알루미늄 조성의 추진제와 달리 L* instability가 발생되지 않았다. 이는 지르코늄에 의해 생성된 연소물질의 분자량이 알루미늄에 의해 생성된 연소물질의 분자량과 비교하여 크기 때문에 연소시 유동 흐름에 안정성을 주었기 때문으로 판단된다.
4. 알루미늄 조성의 Basic Motor와 비교한 결과, 같은 추진제 길이(L/D=7)의 지르코늄 조성의 무노즐 부스터는 밀도차에도 불구하고 모든 성능이 낮게 나타났으나, 전체 모터 길이와 같은 추진제 길이를 갖는 L/D=9의 무노즐 부스터와 Cylindrical Motor는 추진제 충전량과 추진제 밀도차로 인한 무게 증가로 총역적은 Basic Motor와 비교하여 약간 앞서는 결과를 보였다. 밀도비추력은 Basic Motor와 비교하여 지르코늄 조성의 L/D=9인 무노즐 부스터는 83%로 알루미늄 조성의 무노즐 부스터보다 6% 높게 나타났다. 또한, L/D=9인 지르코늄 조성의 Cylindrical Motor의 밀도비추력의 경우에는 79%로 무노즐 부스터의 밀도비추력이 높은 것으로 판명되었다.
5. 알루미늄 조성의 추진제와 성능 비교시, 지르코늄 조성의 추진제는 비추력을 제외한 모든 작동성능은 높게 나타났으나, 밀도차에 의한 무게비로 인해 비추력은 L/D=7을 제외하고 적게 나타났다. 그러나 밀도비추력은 모든 세

장비에서 알루미늄 조성의 추진제보다 지르코늄 조성의 추진제가 높게 나타나 성능이 향상되었음을 알 수 있었다.

6. 지르코늄 조성의 추진제를 이용한 L/D=9의 무노즐 부스터와 동일한 세장비의 Cylindrical Motor의 비교 결과, 초기 연소면적의 차이로 인하여 Cylindrical Motor의 최대/평균 압력/추력이 높게 나타났다. 또한 알루미늄 조성의 추진제와 마찬가지로의 결과로, 연소초기 발생된 압력차는 연소가 진행됨에 따라 점점 감소하였고, 추력차는 연소가 진행됨에 따라 점점 크게 증가하였다.
7. 길이에 대한 효과로 L/D > 8인 경우와 비교하여 L/D < 8 인 경우가 압력과 추력 모두 기울기가 크게 나타나 세장비가 짧을수록 압력과 추력에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.
8. 동등 이상의 성능을 확보하기 위한 지르코늄 조성의 무노즐 부스터의 조건으로는 아래와 같다.
 - 1) Basic motor에서는 $L/D \geq 13$
 - 2) HTPB/reduced-smoke classical Motor (L/D=7)에서는 $L/D \geq 6$
 - 3) 70 mm급 HTPB/reduced-smoke classical Motor(L/D=14)에서는 $L/D \geq 14$ 의 조건에서 비추력을 제외한 모든 성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났고 이 조건들은 알루미늄 조성의 결과와 비교시 더 짧은 세장비로 나타났다.

위의 결과로부터 알루미늄 조성과 지르코늄 조성의 추진제에 대한 성능을 비교해보면, 비록 두 금속연료의 함유량 차이로 인해 직접적인 비교는 어렵지만 본 시험결과로부터 판단 시 동등 이상의 성능을 확보하기 위해서는 밀도 비추력이 높게 나타난 지르코늄 조성의 추진제가 유리한 것으로 판단된다.

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., AIAA 1978-1108, 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. Ronald S.F., "A Century of Ramjet Propulsion Technology Evolution," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 20, No. 1, pp. 27-28, 2004.
4. Sung, H.G. and Yoon, H.G., "Technical Review and Analysis of Ramjet/Scramjet Technology. I. Ramjet Engine(Liquid Ramjet, Ducted Rocket)," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 10, No. 1, pp. 72-86, 2006.
5. Albert, L., "Nozzleless Booster Hardware Demonstration Progress to Date," *24th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Boston, M.A., U.S.A., AIAA 1988-3366, Jul. 1988.
6. Procinsky, I.M. and McHale, C.A., "Nozzleless Boosters for Integral-Rocket-Ramjet Missile Systems," *Journal of Spacecraft*, Vol. 18, No. 3, pp. 193 -199, 1981.
7. Procinsky, I.M. and Yezzi, C.A., "Nozzleless Performance Program," *18th Joint Propulsion Conference*, Cleveland, O.H., U.S.A., AIAA-82-1198, Jun. 1982.
8. Farinaccio, R. and Lessard, R., "Nozzleless Booster Performance Study", Technical Report, DREV TR 2001-285, 2011.
9. 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.
1. Webster, F.F., "Liquid Fueled Integral

10. Nahon S., "Nozzleless Solid Propellant Rocket Motors Experimental and Theoretical Investigations", *20th Joint Propulsion Conference*, Cincinnati, O.H., U.S.A., AIAA-84-1312, Jun. 1984.
11. Krishnan, S. and Ramakrishnan, R., "Effect of Motor Length and Propellant Formulation on Nozzleless Solid Rocket Performance," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 213, No. 1, pp. 35-44, 1999.
12. Calzone, R.F., Mayer, A.E.H.J., Dijkstra, F., Elands, P.J.M., Stowe, R.A., Farinaccio, R., Dubois, C., Lesage, F., Wong, F.C, Lessard, P. and Lauzon, M., "Integral Rocket Ramjet Demonstration Program(IRRDP) Executive Summary Report," TNO report, PML 1998-A85, 1998.
13. Khil, T., Jung, E., Lee, K., Ryu, T. and Lee, H., "Development of Nozzleless Booster casted to Solid Propellant with Al as a Metal Fuel," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 4, pp. 52-62, 2017.
14. McBride, B.C. and Gordon, S., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, II: User Manual and Program Description," NASA RP-1311, 1996.
15. Min, B.S. and Hyun, H.S., "Study on Combustion Characteristics of HTPB/AP Propellants Containing Zirconium," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 28, No. 1, pp. 211-213, 2012.
16. Traineau, J.C. and Kuentzmann, P., "Some Measurements of Solid Propellant Burning Rates in Nozzleless Motors," *J20th Joint Propulsion Conference*, Cincinnati, O.H., U.S.A., AIAA-84-1469, Jun. 1984.
17. Blomshield, F.S., "Lessons Learned in Solid Rocket Combustion Instability," *AIAA, Missile Sciences Conference*, Monterey, C.A., U.S.A., AIAA 2007-5803, Nov. 2006.
18. 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. 9-16, 2005.
19. Gany A. and Aharon I., "Internal Ballistics Considerations of Nozzleless Rocket Motors", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 15, No. 6, pp. 866-873, 1999.