

Boron Powder 적용 연료과농 추진제 및 연소 후 생성물의 특성 연구

김미리^{a,*} · 김정은^a · 길태욱^a

Characteristics of Fuel-rich Solid Propellants with Boron Powder and the Combustion Products

Miri Kim^{a,*} · Jeongeun Kim^a · Taeock Khil^a

^aPGM Mechanical R&D Project 3team(Rocket Propulsion), LIG Nex1 Co. Ltd., Korea

*Corresponding author. E-mail: miri.kim@lignex1.com

ABSTRACT

The propellants used in the gas generator of the ducted rocket are fuel-rich propellants, which contain an excessive amount of metal fuel and a small amount of oxidizing agent compared to general solid rocket propellants. In this paper, boron powder and MgAl(Magnesium-Aluminium alloy) were applied to produce fuel-rich propellants. The optimum formulation was determined by characterizing these metal fuel-rich propellants. Analysis of combustion products in the gas generators confirmed that the fuel-rich propellants containing fine boron powder itself instead of boron-bead could be useful in gas generators.

초 록

덕티드 로켓의 가스발생기에 사용되는 추진제는 연료과농 추진제로서, 일반적인 고체 로켓 추진제에 비하여 과량의 금속연료와 소량의 산화제를 포함한다. 본 논문에서는 연료과농 추진제를 제조하기 위하여 보론 분말과 MgAl(Magnesium-Aluminium Alloy)를 적용하였다. 이 금속연료를 적용한 추진제의 특성을 분석하였고, 이를 통하여 최적의 조성을 연구하였다. 추진제의 연소생성물 분석을 통하여 보론 비드가 아닌 미립의 보론 분말로도 가스발생기용 연료과농 추진제가 가능함을 확인하였다.

Key Words: Ducted Ramjet Rocket Gas Generator(덕티드 램제트 로켓 가스발생기), Fuel-rich Solid Propellant(연료과농 고체추진제), Solid Propellant(고체 추진제), Amorphous Boron(비정형 붕소), Magnesium-Aluminium Alloy(마그네슘-알루미늄 합금)

1. 서 론

덕티드 로켓의 가스발생기에 사용되는 추진제는 연료과농 추진제로서, 일반적인 고체 로켓 추진제에 비하여 과량의 금속연료와 소량의 산화제를 포함한다. 1차 연소실 내에서 추진제의 불

Table 1. Inorganic fuel fillers[1].

Product	Density (g/cm ³)	Heating Value	
		Gravimetric (KJ/g)	Volumetric (KJ/cm ³)
Beryllium	1.84	66.5	122.5
Aluminium	2.70	31.1	83.9
Boron (amorphous)	2.22	59.3	131.6
Graphite	2.25	32.8	73.8
Carbon black	1.63	32.8	53.3
Magnesium	1.74	24.7	43.0
Zirconium	6.49	12.0	78.2
Titanium	4.5	19.7	88.8
Boron Carbide	2.52	51.5	129.8

완전 연소 가스를 방출하면, 이 가스는 2차 연소실 내에서 외부에서 유입되는 공기와 반응하여 완전 연소하며 추력을 형성한다. 이는 기존의 추진기관에 비하여 높은 추력을 낼 수 있다는 장점이 있다. 또한 가스발생기 장치의 유량 조절 밸브를 이용하여 추력 조절과 비행 종말 속도를 증가시킬 수 있다[2].

밸브 작동으로 1차 연소에서 발생한 가스의 유량을 조절하기 위해서는 밸브 작동에 대하여 빠른 응답성을 갖는 추진제가 필요하다. 따라서 0.5 이상의 높은 압력 지수의 추진제가 필요하다[3].

가스발생기에 적용되는 금속연료로는 주로 보론이 많이 연구되고 있다. 이는 Table 1에서 확인 가능하듯이 다른 금속에 비하여 단위 체적당, 또는 단위 질량당 갖는 열량이 월등하게 높기 때문이다[1]. 하지만 순도가 높은 보론은 대개 입도 크기가 매우 작아(1 μm 이하) 추진제 제조 시 작업성이 떨어지며, 보론의 점화 및 연소가 어려워 이를 극복하고자 하는 연구들이 진행되었다. 대표적으로 보론을 비드화하여 보론의 산화막을 쉽게 제거하고 연소효율을 높이는 연구가 여러 나라를 통하여 진행되었었다. 중국과 대만에서는 각각 Hydroxyl terminated Polybutadiene(HTPB)와 Glycidyl Azide Polymer(GAP)을 이용한 보론

비드 적용 추진제 연구를 발표하였고, 우리나라에서도 국방과학연구소에서 HTPB를 이용한 보론 비드 추진제 연구를 하였다[3-5]. 보론 비드는 아니지만 이스라엘의 V.Rosenband와 A. Gany 연구진은 보론과 마그네슘을 결합시킨 MgB_2 를 합성하여 적용한 연구를 발표하기도 했다[6].

하지만 이와 다르게 본 연구에서는 보론 분말 자체로 연료과농 추진제를 제조하고자 하였다. 이렇게 보론 분말을 적용하였을 경우 연료과농 추진제 제조가 가능한지, 보론의 최대 가능 함량 wt% 및 덩티드 로켓용 가스발생기의 요구 조건을 충족할 수 있는지 확인하고자 하였다. 가스발생기의 요구 조건으로는 추진제의 연소속도는 약 8~15 mm/s, 유량조절 밸브의 응답 속도를 위한 연소압력지수 0.5 이상으로 하고 있다[1]. 이에 보론 분말을 적용한 가스발생기용 연료과농 추진제를 제조하였으며, 추진제 특성 분석, 연소 생성물에 대한 화학적 분석도 진행하였다.

2. 실험

2.1 금속연료 분석

본 연구에 적용되는 금속연료는 크게 보론과 MgAl이다. 이 두 원료의 진밀도는 각각 보론이 2.35, MgAl이 2.22 정도로 비슷한 값을 갖는다. 하지만 입도 크기, 형태 등으로 인한 부피 차이가 크기 때문에, 작업성에 영향을 미치게 된다. 이에 보론과 MgAl의 부피밀도를 측정하게 되었다.

부피밀도 측정은 100 ml 메스실린더와 깔때기를 이용하여 Fig. 1과 같은 방법으로 측정하였다. 보론의 경우 흡습성이 있어 80 $^{\circ}\text{C}$ 오븐에 1시간 건조 하였고, 보론과 MgAl 각각 2번씩 측정 후 평균 내었다.

2.2 추진제 원료

본 연구에 적용된 추진제 원료는 프리폴리머로 HTPB, 가소제로는 Isodecyl Pelargonate (IDP), 경화제는 Isophorone Diisocyanate(IPDI), 산화제는 Ammonium Perchlorate(AP), 금속연료로는 MgAl과 보론을 적용하였다. HTPB는 삼양



Fig. 1 An example of metal bulk density measurement.

정밀화학의 OH index 0.76 meq/g, IPDI는 Evonik사의 NCO index 8.92 meq/g인 품목이며, 가소제로 사용한 IDP는 BASF에서 제조한 품목이다. AP는 Ariangroup사에서 제조한 품목으로 3~200 μm 의 크기를 혼용하였다. 금속연료인 MgAl과 보론은 세종소재에서 제조한 것을 사용하였다. 특히 금속연료인 MgAl은 Mg과 Al 비율이 50/50인 150 mesh 크기를 사용하였으며, 보론은 순도 95% 이상의 약 0.1 μm 인 비정형 분말 형태를 사용하였다.

각 원료들은 특별한 정제 없이 사용하였다.

2.3 추진제 제조

추진제 조성은 크게 이 두 가지 금속연료를 중심으로 Table 2와 같이 진행하였다. 바인더와 AP, 기타 첨가제는 추진제의 작업성을 고려하여 적용하였다. 특히 AP는 일반적인 고체추진제에 비하여 함량이 적지만 가스발생기의 연소조건을 충족시키기 위해서는 AP 입도 함량비도 중요한 인자로 작용하기에 여러 실험을 통하여 조정하였다.

Table 2는 여러 실험을 수행한 추진제의 대표적인 조성이다. 그 중에서 보론만 적용한 추진제를 GGP-1, MgAl만 적용한 추진제를 GGP-2, 보론과 MgAl을 혼합 사용한 추진제를 GGP-3으로

Table 2. Formulations of fuel-rich propellants.

Ingredient	Propellant No.		
	GGP-1	GGP-2	GGP-3
Metal(wt%)	B	MgAl	B/MgAl
	23	35	10/25
Binder(wt%)	25	25	25
AP(wt%)	40	40	40

명명하였다.

혼화 공정은 Vertical Mixer(1 Pint)를 이용하였고, 추진제 제조는 60 $^{\circ}\text{C}$ 조건 하에서 바인더 포함 각 원료를 투입하고 감압 혼합 및 상압 혼합을 반복 수행하며 제조하였다. 이후 나머지 경화제 및 기타 촉매제를 넣고 50 $^{\circ}\text{C}$ 조건 하에서 상압 혼합 및 감압 혼합을 진행하였다. 혼화된 추진제는 50 $^{\circ}\text{C}$ 항온 오븐에서 7일간 경화시켜 제조를 완료 하였다.

2.4 추진제 물성 및 연소 특성 분석

추진제 점도 측정은 Brookfield Viscometer (RVT Type)를 이용하여 50 $^{\circ}\text{C}$ 분위기 하에서 샘플별로 초기 점도(EOM; End of Mix)를 각각 측정하였다. 점도계의 spindle type은 Helipath Spindle F Type, RPM은 2.5로 수행하였다. 추진제의 밀도는 Mettler Toledo사의 XSE104V 밀도 측정기를 이용하여 측정하였다.

밀도를 측정할 때 사용되는 실리콘 오일은 DC-200을 적용하였다. 각 샘플과 실리콘 오일을 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 안정화 시킨 후 밀도를 측정하였다.

추진제의 연소속도 분석은 스트랜드 버너를 이용하여 측정하였다. 샘플은 경화된 추진제를 직경 6 mm, 길이가 130 mm가 되도록 재단 후 샘플 표면에 인히비터를 도포하여 건조시켜 제작하였다. 제작 된 샘플의 연소속도를 각 요구 압력에서 측정하였다.

2.5 접착력 평가

추진제를 챔버에 적용하기 전에 인슐레이션과 라이너, 추진제 간의 접착력을 확인하였다. 이것은 추진제 충전 후 계면간의 미접착으로 인한

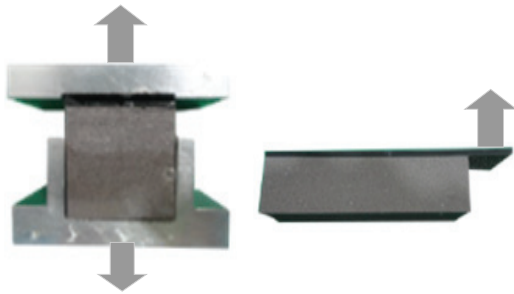


Fig. 2 Images of adhesive test samples (L: Cubic test, R: Peel test).

이상 연소를 방지하기 위함이다. 금속연료가 다량 함유된 추진제의 경우 분자 간에 화학적으로 결합할 부분이 적고, 그 중에서도 금속연료는 추진제 내에서 물리적 결합에만 의존해야하기 때문에 분자간의 결합력이 떨어질 수밖에 없다. 화학적으로 결합할 수 있는 부분이 적기 때문에 확인할 필요가 있는 평가이다.

평가에 사용한 라이너는 추진제와 동일한 HTPB 바인더 계열에 실리카 계열의 필러를 적용하였으며, 인슐레이션은 케블라 섬유가 포함된 Ethylene propylene diene monomer(EPDM) 고무를 사용하였다.

추진제/라이너/인슐레이션 접착 평가는 인장 시험(Cubic test)과 박리 시험(Peel test)으로 진행하였으며 각 3회 이상씩 수행하여 평균 내었다. Test 시편은 Fig. 2의 형태로 제작하여 화살표의 방향으로 힘을 가하여 시험을 수행하였다.

2.6 연소생성물 성분 분석

지상연소시험을 마친 후 남은 연소 후 생성된 물질을 FE-SEM/EDS(Field Emission Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-Ray Spectrometer)와 HP-XRD(High Power X-Ray Diffractometer)를 통하여 성분 분석을 진행하였다.

FE-SEM/EDS는 JEOL사의 JSM-7900F 모델을 이용하여 측정하였으며, HP-XRD는 Rigaku사의 D/max-2500V/PC 모델을 이용하여 분석하였다. 이 분석을 통하여 어떤 물질들이 남아있는지, 특히 보론의 배출 여부를 확인해보고자 하였다.

Table 3. Characteristics of fuel-rich propellants with boron powder.

	Propellant No.		
	GGP-1	GGP-2	GGP-3
EOM Viscosity, (kilopoise)		0.4	24
Strand Burning Rate(@1000 psia), (mm)	Not Possible	7.41	6.78
Pressure Exponent, (n)		0.306	0.7029
Density, (g/cc)		1.575	1.555

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 추진제 특성 분석

추진제의 특성 분석 결과는 Table 3과 같다.

GGP-1의 경우 높은 점도로 인한 작업성 문제로 추진제 제조 공정 중간에 작업이 중단되었다. 초기의 추진제 조성 계획은, GGP-1도 GGP-2, GGP-3과 같이 금속연료 함량을 35 wt%로 계획하였었다. 하지만 미립의 보론 분말만 적용하다보니 점도가 높아져 약 23 wt%까지만 투입되고 공정이 중단되었다.

GGP-2는 MgAl만 적용한 추진제로 보론 분말 적용 추진제와는 대조적으로 부피밀도가 크고 입도 size가 50 μm 정도로 상대적으로 컸으며, 부피도 보론에 비하여 현저히 작았다. 추진제의 EOM(End of Mix)도 0.4 kilopoise로 매우 낮은 값이 측정 되었다. 이것은 MgAl이 보론에 비하여 현저히 적은 부피 및 비표면적 때문에 바인더의 허용 solid capacity의 다름이 원인으로 판단된다. 하지만 GGP-2는 Table 3에 나타나듯이 가스발생기용 추진제 요구 조건인 0.5 이상의 연소압력지수 조건을 충족시키지 못했고, 에너지 함량이 큰 보론의 부재도 GGP-2를 연소시험 대상 선정에서 배제되어 추가적인 추진제 연구를 진행하지 않았다.

Fig. 3의 GGP-3 결과는 Table 2의 조성을 기점으로 세부적인 조건들을 조정하여 각기 다른

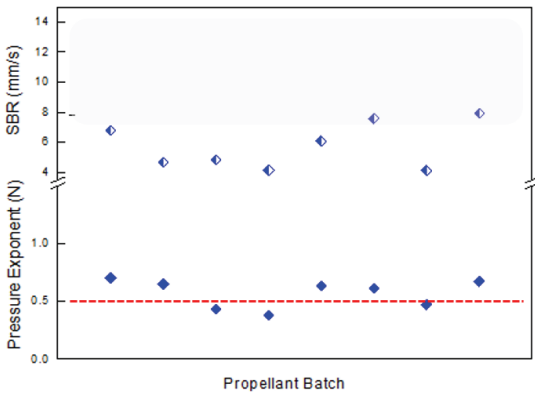


Fig. 3 Combustion data of propellants of GGP-3; Up : Values of burning rate at 1,000 psi, Down : Values of their pressure exponent.

조성의 결과이다. 그래프의 위쪽은 1,000 psi 압력 조건하의 연소속도를, 아래는 각 Batch의 연소압력지수 값을 나타낸다. 그리고 그 결과 중 가장 가스발생기 요구 성능과 근접한 결과를 Table 3에 나타내었다. Fig. 3 그래프를 보면, GGP-3 추진제는 보론의 함유량이 10 wt% 정도 밖에 안되지만, 가스발생기 추진제의 요구조건 중 하나인 연소압력지수 0.5 이상을 대체로 만족하였다. 또한 연소속도도 1,000 psia 조건하에서 약 5~8 mm/s의 결과가 나타났었다. 이는 여러 연구 결과를 통하여 도출된 가스발생기의 요구 연소속도에 가까운 값에 속하는 편이다[1].

GGP-3의 단점은 높은 추진제의 점도이다. 보론 분말의 함량은 10 wt%로 소량이지만, 추진제의 혼합이 종료된 후 점도는 24 kilopoise로 높은 편이다. 이는 추진제 내의 산화제와 금속연료의 충전율이 좋지 않기 때문으로 판단된다. 추진제의 점도는 고체 입자의 충전율을 나타내는 지표로, 점도가 낮을수록 고체 입자의 충전율이 높음을 의미한다[8, 9]. 원활한 주조 공정을 위해서는 낮은 점도가 유리하지만, 연소 특성을 가스발생기의 요구 성능에 맞추기 위해 미세 입자들이 과량 투입되어 낮은 점도의 추진제를 제조하기에는 어려움이 있었다.

한편, 이와는 다르게 GGP-1이나 GGP-2의 점도 특성의 원인으로는 보론 분말과 MgAl의 입

Table 4. The density of metals.

Materials	Boron	MgAl
True Density(g/cc)	2.35	2.22
Bulk Density(g/cc)	0.292	1.215

Table 5. Adhesive evaluation of cured Propellant/Liner/Insulation.

	Value
Peel(daN/cm ²)	4.6
Cubic(bar)	4.6

도 크기 차이로 인한 부피밀도의 차이가 작용했을 것으로 판단된다[7]. 부피밀도는 항상 진밀도보다 작은 값을 갖는데, 이는 입자가 쌓이면서 생기는 공극이 다수 생김으로 인하여 일정 부피 내 입자 밀도가 물질의 진밀도보다 낮아지게 되는 것이다[10]. Table 4에서 확인 가능한 보론과 MgAl의 진밀도 값은 큰 차이가 없으나 부피밀도에서는 큰 차이가 나는 것을 확인 할 수 있다. 보론이 MgAl에 비하여 부피밀도가 작다는 것은 같은 부피 내에 수용 가능한 질량이 적다는 것을 의미하며, 입도가 작아 비표면적이 크기 때문에 각 입자의 표면에 닿는 바인더의 양이 상대적으로 많이 필요함을 의미, 즉 충전율이 떨어짐을 의미한다. 이는 젖음성에 영향을 미치기 때문에, MgAl 적용 추진제보다는 보론 적용 추진제의 점도가 높은 것으로 판단된다.

이렇게 여러 Batch의 추진제 연구 및 분석 결과를 종합적으로 비교하여 가장 요구 성능에 가까운 조성을 선택하여 지상연소시험에 적용하였다.

3.2 접착력 평가 분석

GGP 추진제의 경우에는 보론 분말과 더불어 MgAl이 총 35 wt%가 투입되며 특히 보론을 비드화 하지 않고 분말 상태로 투입하다 보니 추진제 제조 시에 젖음성이 문제가 되었다. 그래서 일반 추진제에 비하여 같은 점도 값으로 측정이 되더라도 흐름성 및 점착성이 떨어지는 것을 확

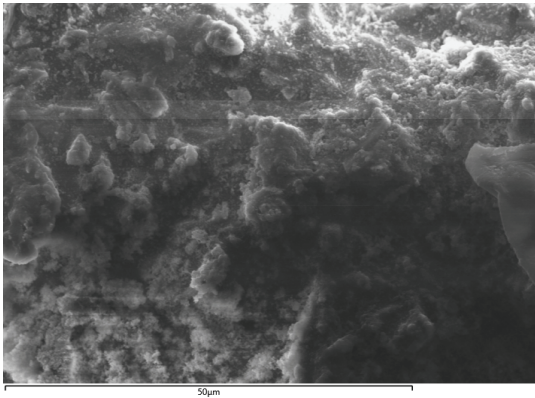


Fig. 4 FE-SEM image of GGP-3 combustion product.

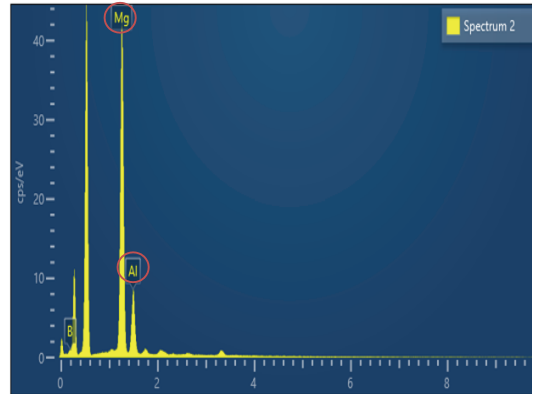


Fig. 5 EDS analysis graph of GGP-3 combustion products.

인할 수 있다. 이러한 이유로 접착력 평가를 수행하였고, 결과는 Table 5에서 확인 할 수 있다. Peel test와 Cubic test 모두 4.6 daN/cm 및 4.6 bar로 좋은 접착력을 나타내었다. 또한 Cubic test의 경우 파단이 생길 때까지 압력을 가해서 측정을 하는데 추진제 내에 파단이 생기지 않고 시편의 샘플과 치구 간의 접착제가 먼저 탈착되었다. 이로써 추진제/라이너/인슐레이션 간의 접착력에는 문제가 없음을 확인할 수 있었고, 또한 추진제 그레인 형성이 가능함을 확인할 수 있다.

3.4 연소생성물 성분 분석

GGP-3 추진제를 적용한 가스발생기의 지상연소시험을 총 3회 진행하였고, 이에 대한 내용은 다른 논문을 통하여 고찰하였다[11,12,13,14]. 가스발생기의 지상연소시험을 통해 시험 후 연소관 내 배출되지 않는 물질의 존재를 확인했고, 이 금속물질들은 각각 FE-SEM/EDS와 HP-XRD로 성분 분석을 진행하였고 결과는 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6, Table 6에서 확인할 수 있다.

Fig. 4의 FE-SEM 사진을 보면 금속연료의 형태는 사라지고 한 덩어리로 엉겨 붙은 것을 확인할 수 있다. 이에 대한 EDS 결과를 Fig. 5와 Table 6에서 확인해보면 보론은 거의 검출되지 않았고 주로 Mg과 Al이다. 장비의 특성상 보론의 검출이 쉽지 않고 해당 peak의 경우 오측정일 가능성으로 높아 무시 가능한 수준이다. 그리

Table 6. Component of GGP-3 combustion products from EDS analysis.

Element	Ratio(wt%)
B	0.00
Mg	68.95
Al	31.05
Total:	100.00

고 산소 등 산화물에서 검출 되는 원소나 기타 코팅제에서 도출 가능한 peak은 제외하였다. 또한 Fig. 6의 HP-XRD 결과 역시 보론은 거의 검출되지 않았고 대부분이 Mg과 Al의 산화물이다.

이를 통해 알 수 있는 점은 연소생성물 중 보론이 존재할 가능성은 희박하다는 점이다. 원인을 추측해보자면, 추진제 내 보론의 함량이 적어 챔버 압력에 밀려 배출 되었을 가능성이 있고, 세가지 금속 산화물 중 B₂O₃의 비점이 가장 낮으므로 연소 가능성도 배제할 수 없다. 추진제 내 금속들의 산화물인 MgO, Al₂O₃, B₂O₃의 비점은 각 3,600℃, 2,977℃, 1,860℃로 B₂O₃의 비점이 가장 낮다[15].

MgAl의 경우 총 25 wt%의 높은 함량과 상대적으로 큰 부피밀도, 큰 입도 크기, 산화물의 높은 비점 등으로 배출이 어려웠을 것이다. Mg와 Al의 산화물이 분해되면서 연소하기 위해서는 비점 이상의 고온으로 상승해야 하는데 가스발

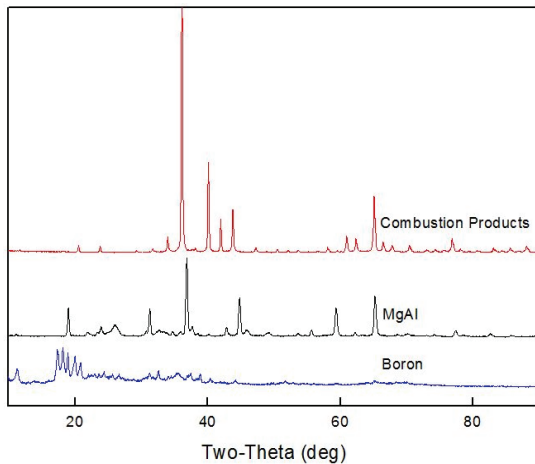


Fig. 6 HP-XRD data of GGP-3 combustion products.

생기 추진제의 연소 온도는 이에 미치지 못하여 챔버 내부에서 서로 응집현상을 일으켜 일부만 분해/연소 되고 나머지는 챔버 밖으로 배출되지 못한 것으로 보인다. 보론과 더불어 MgAl이 모두 가스발생기 챔버 밖으로 배출되기 위해서는 더 높은 연소 온도 환경을 조성해 주어야 할 것이다.

4. 결 론

보론 분말을 적용한 덩티드 로켓용 가스발생기 연료과농 추진제를 제조 및 시험 하였다. 이를 위해 보론 분말과 MgAl을 적용하여 연료과농 조건(금속연료 35 wt% 이상)을 만족하는 충전 가능한 추진제(GGP-3)를 제조하였다.

결과적으로 보론 분말을 적용하여 덩티드 로켓용 가스발생기 추진제를 제조하여 지상연소시험 및 이차 연소시험까지 완료 하였다[11-14]. 그리고 연소 후 생성물에 대한 분석 결과로 MgAl에 대한 산화물은 확인하였지만 보론에 대한 생성물은 발견하지 못했다. MgAl의 잔여물과 같은 것이 남지 않게 하려면 상대적으로 비점이 낮은 금속으로 대체해야 할 것으로 보인다. 이 점은 비점이 낮고 에너지 함량도 높은 보론이 증가하는 것이 더 적합할 것으로 판단되고, 아니면 연

소온도가 3,000℃ 이상 되는 조성으로 변경해보는 것도 좋을 것으로 보이나 연소온도가 그만큼 증가되면 구성품의 내구성 조건이 까다로워질 것이다.

본 연구 결과를 토대로 본다면 보론 분말은 입자 크기가 너무 작아 그 자체만으로 추진제 제조는 어렵고, 다른 입도 크기의 금속과 혼합하거나 보론의 크기를 조정하여 충전율을 높인다면 추진제 제조가 더 용이할 것이다.

References

1. Kuo, K.K. and Pein, R., *Boron-Based Solid Propellants and Solid Fuels, Physics of Fluids*, Begell House & CRC Press Inc., Pennsylvania, U.S.A., 1993.
2. Miller, W., McClendon, S. and Burkes, W., "Design Approaches for Variable Flow Ducted Rockets," 17th AAIA/SAE/ASME Joint Propulsion Spring Conference, Colorado, U.S.A., AIAA-81-1489, Jul. 1981.
3. Won, J., Choi, S., Lee, W., Kim, J., Hwang, G. and Park, B., "A Study of Fuel-rich Solid Propellant Characteristic for Boron-bead Particle Size," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 5, pp. 12-18, 2014.
4. Pang, W., Fan, X., Zhang, W., Xu, H., Li, J., Li, Y., Shi, X. and Li, Y., "Application of Amorphous Boron Granulated With Hydroxyl Terminated Polybutadiene in Fuel-Rich Solid Propellant," *Propellants Explosives Pyrotechnics*, Vol. 36, No. 4, pp. 360-366, 2011.
5. Shyu, I. and Liu, T., "Combustion Characteristics of GAP-Coated Boron Particles and the Fuel-Rich Solid Propellant," *Combustion and Flame*, Vol. 100, No. 4, pp. 634-644, 1995.
6. Rosenband, V. and Gany, A., "Thermal

- Explosion Synthesis of a Magnesium Diboride Powder," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 50, No. 6, pp. 653-657, 2014.
7. Davies, C. E., Tallon, S. J. and Brown, N., "Continuous Monitoring of Bulk Density and Particle Size in Flowable Powders and Grains," *Trans IChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 83, Issue 7, pp. 782-787, 2005.
 8. 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.
 9. Oberth, A. E., *Principles of Solid Propellant Development*, CPIA Publication, Baltimore, M.D., U.S.A., Ch. 5, 1987.
 10. Lee, G. J., Lee, J. T., Ryu, J. S., Oh, D. S., Kim, J. S. and Lee, Y. G., "Effects of Root on Bulk Density of Soils Tested by Volume Check Apparatus through Water-filling," *Korean J. Soil Sci. Fert*, Vol. 48, No. 5, pp. 505-508, 2015.
 11. Lee, J., Han, S., Cho, S., Kim, K., Lim, J. and Lee, K., "Development and Performance Analysis of Gas Generator with Plunger-Type Flow Control Valve for Ducted Rocket : Part I," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 79-86, 2021.
 12. Han, S., Lee, J., Cho, S., Khil, T. and Kim, M., "Development and Performance Analysis of Gas Generator with Plunger-type Flow Control Valve for Ducted Rocket : Part II," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 87-92, 2021.
 13. Shim, C., Kim, S., Lee, M., Park, J., Song, J., Namkoug, H. and Kim, M., "Experimental Study of combustion Characteristic for Ducted Ramjet combustor," *KSPE Fall Conference*, Busan, Korea, pp. 395-399, Nov. 2020.
 14. Lee, J., Cho, S., Namkoug, H., Song, J. and Kim, D., "Study of the Design and Making of Ducted Ramjet," *KSPE Fall Conference*, Busan, Korea, pp. 393-394, Nov. 2020.
 15. Pang, W. Q., De Luca, L. T., Fan, X. Z., Glotov, O. G. and Zhao, F. Q., *Boron-based fuel-rich propellant*, CRC Press, Boca Raton London New York, U.S.A., 2019.