

고에너지 금속 연료를 이용한 Fuel-Rich 추진제 개발

김혜림* · 신경훈*[†] · 최성한* · 이원복* · 김준형** · 고승원**

Development of Fuel-Rich Propellant Using High Energy Metal Fuel

Hyelim Kim* · Kyung-Hoon Shin*[†] · Sunghan Choi* · Wonbok Lee* · Junhyung Kim** · Seung Won Ko**

ABSTRACT

Air-breathing Propulsion System is one of the promising propulsion systems because of low cost, easy storage, compactness and simplicity. A study of gas generator propellant for air-breathing propulsion system was performed in this paper. Amorphous Boron Powder was applied in propellant with various kinds of additives to determine combustion characteristics. And boron beads were made to apply them to the propellant. Combustion characteristics of propellant using amorphous boron powder and boron beads was compared.

초 록

공기흡입형 추진기관은 운용의 단순함, 저비용, 저장의 용이성 등의 장점으로 각광받고 있는 추진 기관이다. 본 논문에서는 Boron을 이용한 공기흡입형 추진기관의 가스발생기에 사용될 추진제 연료를 수행하였다. 이를 위하여, Amorphous Boron Powder를 적용한 추진제에 다양한 첨가제를 사용하여 연소 특성을 파악하였고, Boron bead를 제조하여 추진제에 적용하여 Amorphous Boron Powder를 적용한 추진제와의 차이점을 비교 분석 하였다.

Key Words: Air-breathing Propulsion System(공기흡입형추진기관), Gas Generator(가스발생기), Solid Propellant(고체추진제), Fuel-Rich(연료과농), Boron(붕소), Boron Bead(과립화 붕소)

1. 서 론

Boron은 이론적으로 매우 높은 질량 및 부피 당 열량을 가져, 고체연료램젯(solid fuel ramjet)

과 같은 공기흡입형 추진기관이나 고체로켓에서 가장 각광 받고 있는 고에너지 원료 중 한가지이다. 하지만 boron의 우수한 열역학적 특성에도 불구하고 낮은 점화성과 상대적으로 작은 입도로 추진제 적용에 어려움이 따른다[1-4]. 따라서 본 연구에서는 공기흡입형 추진기관에 적용을 위하여 Boron bead를 제조하였으며,

* (주)한화 대전사업장

** 국방과학연구소

[†] 교신저자, E-mail: khshin@hanwha.co.kr

Amorphous Boron Powder(ABP)와 Boron bead를 각각 적용한 추진제의 연소특성을 분석하였다.

2. Boron Bead

공기흡입형 추진기관용 가스발생기의 추진제는 기동 중 1차 연소실의 압력 변화에 따른 추진제의 빠른 응답성을 갖기 위해 높은 압력 지수가 요구 된다. 하지만 boron은 낮은 입도로 높은 압력 지수를 갖는데 어려움이 따른다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 ABP의 입도 분포도이다.

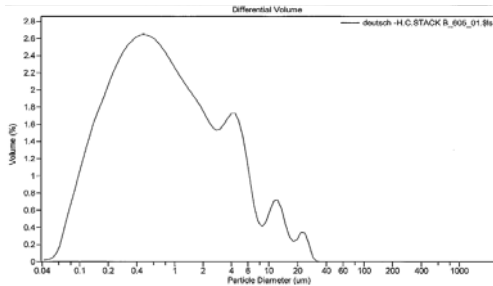


Fig. 1 Amorphous Boron Powder Particle Size Distribution

따라서 압력지수 증대를 위하여 두 가지 종류의 Boron bead를 제조하였다. Hydroxyl Terminated Poly Butadiene (HTPB), Ammonium Perchlorate(AP), ABP 등을 사용한 Hanwha Boron Bead(HBB)-1과 Poly Methyl Meth Acrylate(PMMA), AP, ABP 등을 적용하여 Hanwha Boron Bead(HBB)-2를 제조하였다.

2.1 HBB(Hanwhan Boron Bead)-1

HBB-1은 HTPB와 ABP, AP 등을 이용하여 제조하였다. 제조 방법은 다음과 같다. 먼저 60℃로 준비된 Vertical Planetary Mixer를 이용하여, 일정량의 Acetic Ester에 HTPB를 완전히 용해시킨다. 그 후 AP와 첨가제를 첨가하여 30분간 충분히 섞고, Boron을 첨가하여 다시 30분간 혼합한다. 마지막으로 10분간 진공 상태에서 혼합하

여 잔류 Acetic Ester를 휘발시킨다. 이상의 원료 혼합물을 다양한 격자 크기의 체를 이용하여 HBB-1을 제조한다. Table 1은 본 연구에서 사용한 HBB-1의 조성이다. Fig. 2는 HBB-1 입자에 대한 SEM 사진이다. 1500배 확대한 그림이며, 약 39µm의 직경을 갖는 구형상이다.

Table 1. HBB-1의 조성

주요 원료	무게비[wt%]
Acetic Ester	50
HTPB	2~10
AP	1~3
Boron	35~45

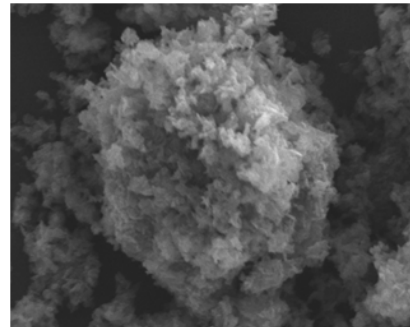


Fig. 2 HBB-1 SEM (x1500)

HBB-1은 HTPB의 함유량에 무관하게 결합력이 매우 낮아 bead가 쉽게 깨지는 문제점을 갖는다. 정량적으로 경도를 파악하기 위하여 HBB-1 시편을 만들어 경도 측정을 시도하였으나, 매우 낮은 경도로 인하여 Rockwell 경도 측정기로 측정이 불가능했다.

2.2 HBB(Hanwhan Boron Bead)-2

HBB-2는 PMMA를 바탕으로 AP, ABP 등을 이용하였다. PMMA의 함유량에 따라 네 가지 종류의 HBB-2를 제조하였다.

PMMA 함유량이 너무 적은 경우에는 bead가 만들어지지 않았고, PMMA의 함유량이 증가함에 따라 bead의 경도와 결합력 등의 물성은 향

상되었으나, PMMA 함유량 증가에 따라 추진제 내의 boron 함유량이 감소하기 때문에 충분한 경도를 유지하는 한도 내에서 최소한의 PMMA를 이용한 조성을 선택하였다. 제조 방법은 HBB-1과 동일하나 Methyl Chloride(MC)의 끓는 점을 고려하여 믹서 온도를 35℃로 하였다. Table 2는 본 연구에서 시도한 HBB-2의 조성표이다.

Table 2. HBB-2의 조성

주요 원료	무게비[wt%]
Methyl Chloride	50
PMMA	2~15
AP	10~15
Boron	25~35

177 μm 과 700 μm 의 격자 크기를 갖는 체를 이용하여 HBB-2의 입도를 제어하였다. 먼저 격자 크기 700 μm 체를 이용하여, 체를 통과하는 bead를 HBB-2-A로 명명하였고, 이를 다시 격자 크기 177 μm 체로 걸러내어 체를 통과하는 bead를 HBB-2-B로, 체를 통과하지 못하는 bead를 HBB-2-C로 구분하였다. Fig. 3은 HBB-2-A, B, C의 입도 분포를 나타낸다.

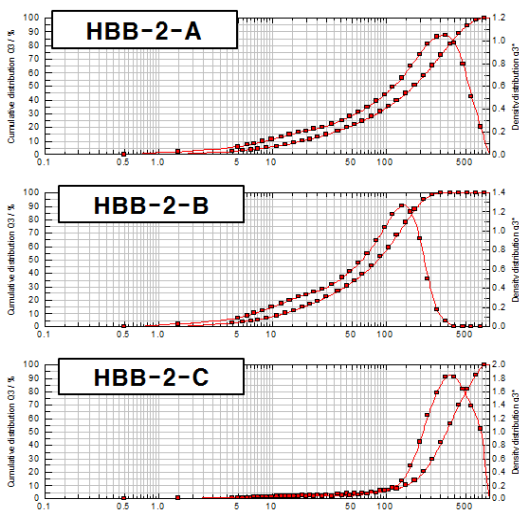


Fig. 3 HBB-2의 입도 분포

3. 추진제

3.1 Amorphous Boron Powder를 적용한 추진제

Boron bead는 가공되지 않은 ABP에 비하여 제조와 사용에 있어서 제한을 갖는다. 따라서 제한이 적은 ABP를 이용하여 boron을 포함한 추진제의 각종 첨가제에 따른 특성을 파악하였다.

3.1.1 TiO₂ 적용

ABP를 약 25% 사용한 추진제에 연소속도 향상을 위해서 35nm TiO₂를 1% 적용하였다. TiO₂를 적용시에 연소속도가 3.66 mm/s에서 3.98 mm/s로 약 8.7% 향상 되었다. 본 연구에 사용된 35nm TiO₂에 비하여, 10nm이하의 TiO₂는 연소속도 향상에 더 큰 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 향후 10nm이하의 TiO₂를 적용하여 연소속도를 향상시킬 계획이다. Table 3은 TiO₂를 사용한 추진제의 주요 조성과 연소속도 결과이다.

Table 3. TiO₂를 적용한 추진제 주요 조성

품명	제작 조성비	
TiO ₂ (%)	0	1
Boron(%)	25	25
연소속도(mm/s) wet status	3.66	3.98

3.1.2 Aluminum과 Magnesium 적용

Boron은 매우 낮은 점화성을 갖는다. 따라서 점화성 향상을 위해서 Aluminum과 Magnesium을 적용하여 연소속도를 확인하였다. Table 4.는 적용 추진제에 대한 주요 조성이다.

Table 4. Al과 Mg를 적용한 추진제 주요 조성

품명	제작 조성비	
추가 금속 연료(%)	Al 5	Mg 5
Boron(%)	25	25
연소속도(mm/s) @450psia	3.92	3.96

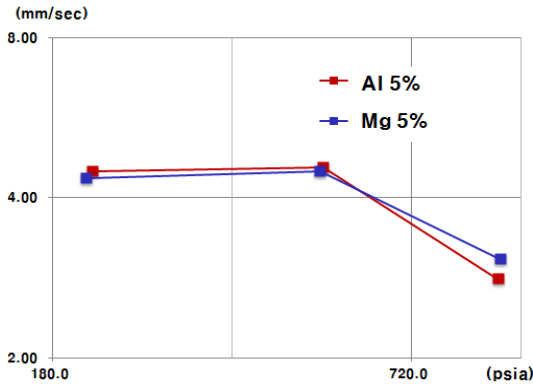


Fig. 4 Al과 Mg를 적용한 추진제의 연소속도

Figure 4에서와 Mg에 첨가에 의한 연소속도 향상이 미비하였다.

3.1.3 HBB-1을 적용한 추진제

HBB-1을 이용하여 추진제를 혼합하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 HBB-1은 매우 낮은 결합력을 갖는다. Fig. 5는 HBB-1과 ABP를 적용한 추진제의 혼합 후 시간에 따른 점도 변화이다. 두 추진제의 점도가 유사하게 변화하는 것을 확인할 수 있다.

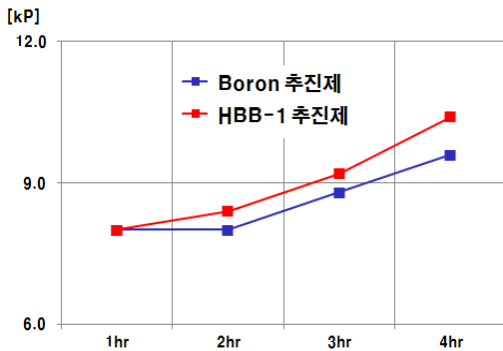


Fig. 5 HBB-1과 ABP를 적용한 추진제의 점도

Figure 6은 HBB-1과 ABP를 적용한 추진제의 3개의 압력지점에서 연소 속도이다. 이 경우 역시 두 추진제간의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 추진제 혼합 중 bead가 깨지며, HBB-1은 추진제 내에서 bead로서의 효과를 갖지 못하

는 것으로 판단된다.

향후 bead의 결합력 향상을 위한 첨가제를 추가하여 HBB-1을 제조한 후, 추진제에 적용할 예정이다.

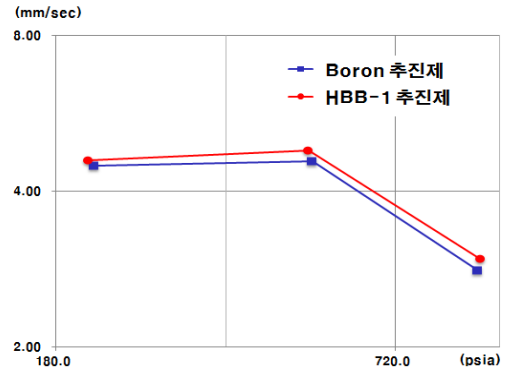


Fig. 6 HBB-1과 ABP를 적용한 추진제의 연소속도

3.1.4 HBB-2를 적용한 추진제

입도에 따라 분류한 HBB-2-A, B, C를 추진제에 적용하였다. Bead에 포함된 boron과 AP 함유량을 계산하여 추진제에 적용하였다. Table 5는 HBB-2의 입도와 450 psia에서 연소속도이며, Fig. 7은 세 가지 입도의 HBB-2와 ABP를 사용한 추진제의 연소속도이다. ABP를 이용한 경우 대비, 연소속도가 약 60%에서 87%까지 증가하였다. 평균입도가 증가함에 따라 연소속도도 증가하였다. 이는 일반적으로 입도가 작을수록 연소속도가 향상되는 것과 비교하여 주목할 만한 결과이다.

Table 5. HBB-2 입도에 따른 추진제의 연소속도

품명	제작 조성비			
	ABP	HBB-2-A	HBB-2-B	HBB-2-C
평균입도	-	160	86	330
연소속도 [mm/s, @450psia]	3.92	6.89	6.28	7.34

HBB-1과 HBB-2에서 공통적으로 압력이 700 psia 이상 증가시에 연소속도가 감소하였다. 앞

으로 더 많은 압력 지점에서 연소속도를 측정하여 연소속도가 감소하기 시작하는 압력지점과 압력지수를 확인할 예정이다.

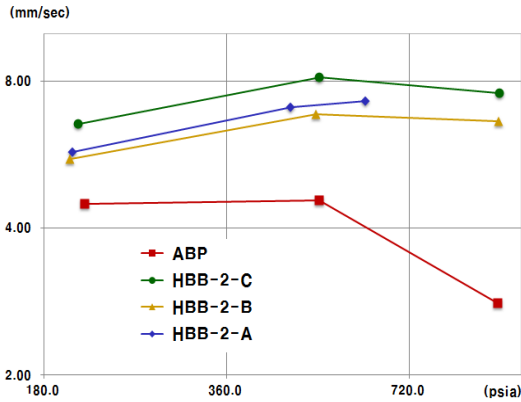


Fig. 7 HBB-2 입도에 따른 추진제의 연소속도 비교

4. 결 론

본 논문에서는 boron을 이용한 공기흡입형 추진기관용 가스발생기의 fuel-rich 추진제를 연구하였다.

추진제의 압력지수 향상을 위하여 Boron bead를 개발하였다. ABP를 이용한 추진제에 첨가제를 통한 연소속도 향상을 시도하였으며, TiO₂ 적용시 효과를 확인하였다. 이를 바탕으로, 향후 HBB를 이용한 추진제에 TiO₂를 적용할 예정이다.

HBB-1은 추진제 혼합중 bead가 깨져 효과가 미비한 것으로 나타났다. 향후 HBB-1의 경도 향상을 위한 연구를 추가적으로 수행할 예정이다.

추진제 내에서 HBB-2의 bead로는 추진제 내에서 bead로써의 효과와 입도가 증가함에 따라 연소속도가 증가함을 확인하였다. 향후 정밀한 입도제어를 통한 입도에 따른 연소속도 변화와 압력지수 측정을 위해 많은 압력 조건에서 연소

속도를 관찰할 예정이다.

참 고 문 헌

- Gany, A., "Combustion of Boron-Containing Fuels in Solid Fuel Ramjets," in Combustion of Boron-Based Solid Propellants and Solid Fuels, K. K. Kuo and R. Pein, editors, Begell House and CRC Press, Boca Raton, FL, 1993.
- King, M. K., "Boron Ignition and Combustion in Air-augmented Rocket Afterburners," Combustion Science and Technology, Vol. 5, 1972, pp.115-164
- Rostnband, V. and Gany, A., and Alon Gany, "Methods of activation of boron particles ignition and combustion," ISABE-2007-1354
- C. Vigot, A. Cochet, C. Guin, "Combustion behavior of boron based solid propellants in a ducted rocket," 2nd international symposium on special topics in chemical propulsion, Lampoldshausen, March 4-6, 1991.
- 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, 2011, pp.360-366
- Strecker, R., Harrer, A., "Composite Solid Propellant with a Metal/Inorganic Fluoride Admixture or a Stable Burning Rate," US Patent No. 5143566, September 1992