

# 수반응 금속연료 추진제의 성능 및 물성 연구

심홍민<sup>a,\*</sup> · 김준형<sup>a</sup> · 오석진<sup>a</sup>

## Performance and Properties of Hydro-reactive Metal Fuel Propellants

Hong-Min Shim<sup>a,\*</sup> · Junhyung Kim<sup>a</sup> · Seokjin Oh<sup>a</sup><sup>a</sup>Missile Research Institute, Agency for Defense Development, Korea<sup>\*</sup>Corresponding author. E-mail: hongminshim@add.re.kr

### ABSTRACT

The Mg-based hydro-reactive metal fuel (HMF) propellants, which are a core component of the supercavitating torpedo named Shkval in Russia, are known to be manufactured by compression molding. However, a large HMF propellant grain is practically very difficult to mold by pressing and the related technologies have not been revealed yet. In this work, the HMF propellant formulations possibly prepared by a slurry casting method were designed. The hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB)-based HMF propellants containing Mg or Al-Mg alloy as a metal fuel were prepared and their burning rate and mechanical properties were measured. As a result, the HMF propellant with 70% of Mg was developed and its burning rate was found to be very high, 37.3 mm/s at 1,000 psia.

### 초 록

러시아 초공동 어뢰 Shkval의 핵심 구성품인 Mg 기반의 수반응 금속연료 추진제는 압축성형으로 제작되는 것으로 알려져 있다. 그러나 대형 HMF 추진제 그레인을 압축으로 성형하는 것은 현실적으로 매우 어려우며, 관련 기술도 아직 공개되어 있지 않다. 본 연구에서는 슬러리 주조 방식으로 제조 가능한 수반응 금속연료 추진제의 조성을 설계하였다. 금속연료로 Mg 또는 Al-Mg 합금을 포함하는 HTPB 바인더 기반의 HMF 추진제를 제조하였으며 연소속도와 물성을 측정하였다. 그 결과 Mg를 70% 포함하는 HMF 추진제를 개발할 수 있었으며 이때 추진제의 연소속도가 1,000 psia에서 37.3 mm/s로 매우 높게 나타났다.

Key Words: Supercavitating Torpedo(초공동 어뢰), Hydro-reactive Metal Fuel Propellants(수반응 금속연료 추진제), Magnesium(마그네슘), Aluminum(알루미늄)

### 1. 서 론

Shkval의 핵심 구성품으로서, 산화제로 해수를 사용하며 기존의 혼합형 고체 추진제(Composite solid propellant, CSP) 대비 금속연료의 양을 획기적으로 늘려 사거리(최대 7km)를 대폭 증가시켰다[1]. 또한 수중 운동체를 공동(Cavity)으로 완전히 감싸기 때문에 해수와의 마찰저항이 감소하여 속도를 비약적으로 높일 수 있으며, 이때 최고 속도는 200 knot에 달한다[1].

해수흡입 로켓은 금속 기반의 연료과농(Fuel-rich) 고체 추진제가 물과 화학반응을 할 때 생성되는 열과 추력을 이용한다. Al은 높은 연소열(31.02 MJ/kg)을 갖고 있으면서도 값이 저렴하여 현재 CSP의 금속연료로 널리 사용되고 있다. 그러나 Al의 높은 끓는점(2,447 °C)과 단단한 산화피막은 수반응 속도를 저해시키는 요인으로 작용한다. 반면 Mg은 Al보다 상대적으로 연소열이 24.75 MJ/kg로 낮지만, 낮은 끓는점(1,117 °C)으로 인해 쉽게 기화되어 기상(Gas phase)에서의 격렬한 수반응을 일으킬 수 있다[2]. 이러한 이유로 수반응 금속연료 추진제는 Mg을 단독으로 사용하거나 Mg을 Al과 혼합하는 방식으로 개발되고 있다.

수반응 금속연료 추진제에 포함된 산화제는 금속연료가 물과 반응하기 쉽도록 예열하여 기체와 함께 외부로 방출시키는 역할을 수행한다. Mg 금속연료의 경우 주로  $\text{NaNO}_3$ 을 산화제로 사용하며 프레스(Press)를 이용하여 추진제를 압축성형한다. Mg/ $\text{NaNO}_3$  추진제는 전통적인 조명제의 조성으로 현재도 꾸준히 생산되고 있다. 그러나 러시아와 이란을 제외하고 Mg/ $\text{NaNO}_3$  추진제를 초공동 어뢰에 적용한 사례가 없으며, 금속연료 추진제를 대형(Shkval, 직경 521 mm, 길이 2,800 mm)[3]으로 제작하는 관련 기술도 공개되어 있지 않다.

최근 중국을 중심으로 Mg 또는 Al-Mg 합금을 이용한 주조(Casting) 방식의 수반응 금속연료 추진제 연구들이 진행되고 있다[4-8]. HTPB(Hydroxyl-terminated polybutadiene) 폴리머를 기반으로 하며 산화제로 AP(Ammonium perchlorate)를 공통으로 사용한다. 주조 방식의 특성상 미경화 추진제의 흐름성을 확보해야 하므로 상대적

으로 바인더의 함량이 Mg/ $\text{NaNO}_3$  압축형 추진제보다 높을 수밖에 없다. 바인더의 함량을 높이기 위해 금속을 줄이게 되면 추진기관의 성능도 같이 감소하게 되고, 산화제를 줄이게 되면 연소 속도가 감소하게 되므로 주조 방식의 금속연료 추진제 설계는 매우 제한적이다.

본 연구에서는 Al-Mg 합금 또는 Mg을 단독으로 사용하는 주조형 수반응 금속연료 추진제 설계를 수행하였으며 이를 구현하기 위한 제조 기술에 관해 기술하였다.

## 2. 추진제 설계 및 제조

### 2.1 추진제 설계

수반응 금속연료 추진제의 이론성능을 계산하기 위해 Fig. 1의 개념을 도입하였다. 추진기관에서 발생하는 힘은 노즐로 나오는 유량에 속력을 곱한 값으로 정의된다. 일반적인 추진기관과 달리 해수흡입 추진기관은 해수가 연소실 내부로 들어오기 때문에 총 유량은 추진제의 연소 유량에 유입되는 물 유량을 합한 값이 된다. 여기에 추진기관에 가해지는 물의 저항을 고려하면 Eq. 1과 같이 수반응 추진기관의 힘을 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_s [N] & \\ &= (\dot{m}_w + \dot{m}_f)v_e - \dot{m}_w v_v \\ &= (\dot{m}_w + \dot{m}_f)I_{sp}g_0 - \dot{m}_w v_v \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\dot{m}_w$ 는 연소실로 유입되는 물의 유량,  $\dot{m}_f$ 는 금속연료 추진제의 연소 유량,  $v_e$ 는 노즐 출구 속도,  $v_v$ 는 로켓 본체의 속도,  $I_{sp}$ 는 물과 금속연료 추진제가 반응하여 발생하는 비추력,  $g_0$ 는 중력가속도를 각각 나타낸다. Eq. 1을  $\dot{m}_w/\dot{m}_f$  비율(Water/Fuel, W/F)에 관해 Eq. 2와 같이 정

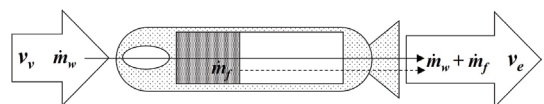


Fig. 1 A schematic diagram of a water-breathing propulsion system.

리할 수 있다. 로켓 본체의 속력과 W/F 비는 정해져 있으므로 첫 번째 항인  $(1+W/F)I_{sp}$ 로부터 추진제의 이론성능을 가늠할 수 있다. 여기서 물과 금속연료 추진제가 반응하면서 발생하는 모타 자체의 추력( $(1+\dot{m}_w/\dot{m}_f)I_{sp}$ )은  $I_{sp,motor}$  수중에서 모타에 작용하는 항력( $(\dot{m}_w/\dot{m}_f)v_v/g_0$ )은  $I_{sp,drag}$ 로 각각 표기할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_s/\dot{m}_f g_0 [s] \\ = (1+\dot{m}_w/\dot{m}_f)I_{sp} - (\dot{m}_w/\dot{m}_f)v_v/g_0 \\ = I_{sp,motor} - I_{sp,drag} \end{aligned} \quad (2)$$

금속연료 추진제의 이론 비추력( $I_{sp}$ )은 미국 NASA의 CEA(Chemical Equilibrium with Applications) 코드를 이용하여 계산하였다[9]. 이때 연소실과 출구의 압력은 각각 24 bar와 1.6 bar이다.

## 2.2 추진제 제조

본 연구에서 개발된 주조형 수반응 금속연료 추진제는 HTPB/Butacene 바인더에 금속연료인 Al-Mg 합금 또는 Mg과 산화제인 초미세 과염소산암모늄(Ultra-fine AP, UFAP)를 일정 비율로 혼합하여 제조하였다. 금속연료 추진제의 자세한 조성은 Table 1에 나타내었다. 가스제로는 DOA(Dioctyl adipate)와 IDP(Isodecylperlargonate)

중 1종을 사용하였다. 추진제 혼합은 50℃ 진공 하에서 Planetary 1 Pint 혼합기를 사용하여 실시하였다. 경화제로는 IPDI(Isophoron diisocyanate)를 사용하였으며 경화촉매로 TPB(Triphenyl bismuth)를 사용하였다.

## 2.3 측정 시험

금속연료 추진제의 연소속도는 스트랜드 버너(Strand burner)를 이용하여 측정하였다. 추진제의 측면 연소를 방지하기 위해 스트랜드 시편(직경 6 mm, 길이 110 mm)의 표면은 난연제로 도포하였다. 질소 가스로 챔버(Chamber)의 압력을 조절한 후 연소시험을 통해 추진제의 연소 길이를 시간으로 나누어 연소속도를 계산하였다.

미경화 추진제의 점도는 혼합 후 50℃에서 Brookfield 점도계로 측정하였다.

경화 완료된 추진제의 물성은 Instron 5967 인장 시험기를 이용하여 측정하였으며 이때 온도는 20℃, 인장 속도는 50 mm/min이다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 추진제 성능

Fig. 2는 Mg/NaNO<sub>3</sub> 기반 압축형 수반응 금속연료 추진제의 이론성능 및 화염온도를 나타

Table 1. Compositions of hydro-reactive metal fuel propellants.

| No. | Binder (%) |          |     |     | Solid (%) |                 |                 |                 |              |       | Viscosity (kP) |
|-----|------------|----------|-----|-----|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|-------|----------------|
|     | HTPB+ IPDI | Butacene | DOA | IDP | AP        | Al-Mg, 150 mesh | Al-Mg, 325 mesh | Mg, 70/150 mesh | Mg, 325 mesh | Total |                |
| A-1 | 2.8        | 5.0      | 4.5 |     | 33.0      | 14.5            | 40.0            |                 |              | 87.5  | 13.8           |
| A-2 | 2.8        | 4.5      | 4.5 |     | 33.0      | 15.0            | 40.0            |                 |              | 88.0  | 20.0           |
| B-1 | 4.8        | 3.0      | 5.0 |     | 17.0      |                 |                 | 45.0            | 25.0         | 87.0  | 6.4            |
| B-2 | 4.8        | 3.0      | 5.0 |     | 17.0      |                 |                 | 35.0            | 35.0         | 87.0  | 5.6            |
| C-1 | 4.8        | 3.0      | 5.0 |     | 17.0      |                 | 25.0            | 45.0            |              | 87.0  | 3.2            |
| C-2 | 4.3        | 3.0      | 4.5 |     | 18.0      |                 | 25.0            | 45.0            |              | 88.0  | 7.0            |
| D-1 | 3.8        | 3.0      |     | 4.0 | 17.0      |                 |                 | 45.0            | 27.0         | 89.0  | 26.8           |
| D-2 | 3.8        | 2.0      |     | 4.0 | 18.0      |                 |                 | 45.0            | 27.0         | 90.0  | 18.4           |
| D-3 | 2.3        | 3.0      |     | 4.5 | 20.0      |                 |                 | 54.0            | 16.0         | 90.0  | 17.6           |

낸다. 물이 없는 조건에서는 산화제가 50%인 조성이 화염온도가 3,767 K로 가장 높았으며 산화제가 감소할수록 화염온도는 3,100 K(NaNO<sub>3</sub>, 40%), 1,999 K(NaNO<sub>3</sub>, 30%)로 내려갔다. 반면 물이 유입되는 양이 증가할수록 산화제가 적은 조성이 상대적으로 높은 화염온도를 보였다. 즉, 산화제가 줄어든 만큼 물과 반응할 수 있는 금속연료의 양이 늘어나기 때문에 추진제의 비추력과 화염온도는 높아지게 된다. Mg(70)/NaNO<sub>3</sub>(30) 조성은 W/F가 4.5일 때  $I_{sp,motor}$ 와 화염온도는 각각 528.0 s와 604 K이다.

Fig. 3은 HTPB/Mg/AP 기반 주조형 수반응 금속연료 추진제의 이론성능 및 화염온도를 나

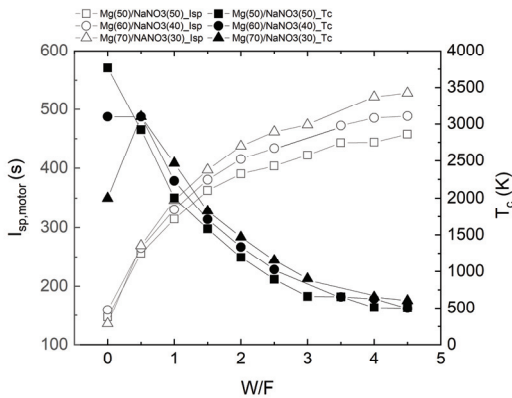


Fig. 2 Theoretical performance and flame temperature of Mg/NaNO<sub>3</sub> propellants.

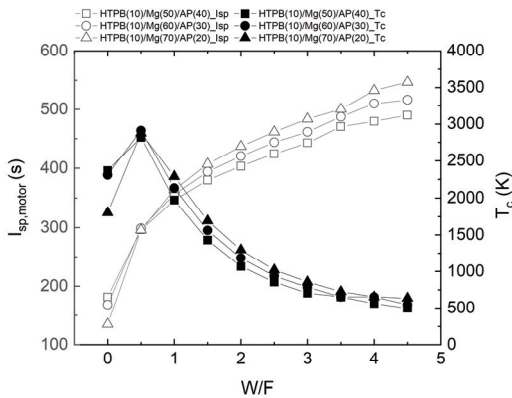


Fig. 3 Theoretical performance and flame temperature of HTPB/Mg/AP propellants.

타낸다. Fig. 2와 달리 주조 방식의 추진제는 미경화 상태에서 흐름성을 가져야 하므로 최소 10% 정도의 바인더를 포함하고 있어야 한다. Mg의 함량은 동일하고 산화제의 양이 줄어든 만큼 바인더가 늘어남으로 인해 전체적인 연료의 양은 Fig. 2의 조성보다 증가하게 되었다. 그 결과 HTPB(10)/Mg(70)/AP(20) 조성은 W/F가 4.5일 때  $I_{sp,motor}$ 가 546.7 s로 Mg(70)/NaNO<sub>3</sub>(30) 조성보다 우수한 성능을 보인다.

Fig. 4는 HTPB/Al/AP 기반 주조형 수반응 금속연료 추진제의 이론성능 및 화염온도를 나타낸다. 연소열이 Al이 Mg보다 크므로 더 높은 성능을 기대할 수 있다. CEA 계산 결과

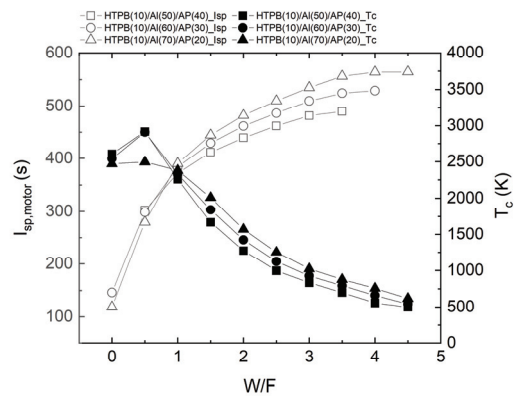


Fig. 4 Theoretical performance and flame temperature of HTPB/Al/AP propellants.

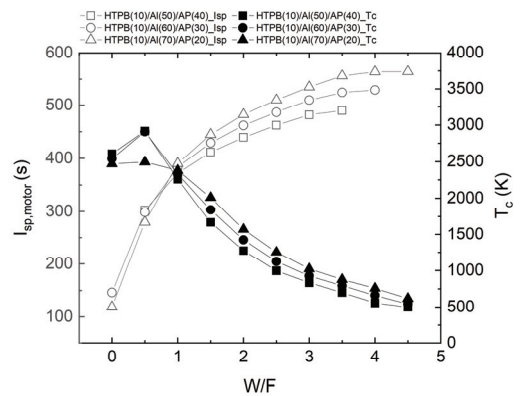


Fig. 5 Theoretical performance and flame temperature of HTPB/Al-Mg/AP propellants.

HTPB(10)/Al(70)/AP(20) 조성은 W/F가 4.5일 때  $I_{sp,motor}$ 가 564.3 s로 HTPB(10)/Mg(70)/AP(20) 조성보다 높은 성능을 보였다. HTPB(10)/Al(60)/AP(30) 조성은 W/F가 4.5일 때 연료 대비 물의 양이 많아지면 챔버의 온도가 낮아지게 되고 과량의 Al 응축 상(Condensed phase)이 생성되어 비추력을 계산할 수 없었다.

Fig. 5는 HTPB/Al-Mg/AP 기반 주조형 수반응 금속연료 추진제의 이론성능 및 화염온도를 나타낸다. HTPB(10)/Al-Mg(70)/AP(20) 조성은 W/F가 4.5일 때  $I_{sp,motor}$ 가 548.4 s로 HTPB(10)/Mg(70)/AP(20) 조성보다 1.7 s 높은 성능을 보였다. 결과적으로 금속이 70%, W/F가 4.5인 조건에서, 주조 방식의 금속연료 추진제는 바인더에 의한 연료량의 증가로 인해 압축 방식의 Mg(70)/NaNO<sub>3</sub>(30) 추진제보다 이론성능이 높았으며, 이때 순서는 Al, Al-Mg 합금, Mg 순이다.

수중에서 모타에 작용하는 항력  $I_{sp,drag}$ 는 Fig. 6과 같이 W/F와  $v_v$ 의 영향을 동시에 받는다. 어뢰의 속도가 증가할수록, 물의 상대적인 유입속도가 증가할수록 어뢰의 항력은 증가한다. 추진기관의 최종 성능은 개발하고자 하는 어뢰의 속도와 추진제의 연소속도 및 내부로 유입되는 물의 양 등이 고려되어 결정되며 W/F 4.5,  $v_v$  100 m/s 하에서  $I_{sp,drag}$ 는 최대 45.9 s의 값을 가진다.

### 3.2 추진제 특성

Fig. 7은 수반응 금속연료 추진제의 연소속도

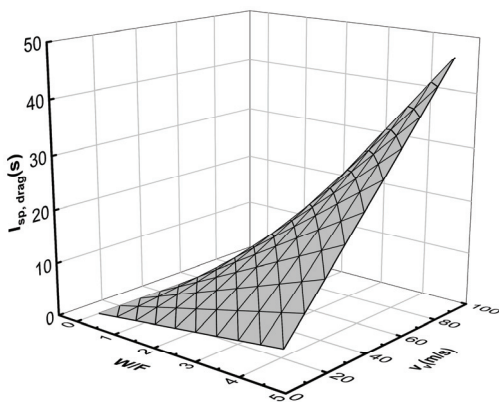


Fig. 6 Theoretical drag of a underwater vehicle.

를 나타낸다. 위 추진제는 100 psia에서의 느린 연소속도로 인해 기울기의 선형성이 높지 않아 300 psia 이상에 대해서만 일차 함수로의 피팅을 수행하였다. 연소속도(Burning rate, BR)는  $BR = ap^n$ 의 식으로 나타낼 수 있으며, 여기서  $a$ 는 실험 상수,  $p$ 는 압력,  $n$ 은 압력지수를 의미한다. 조성에 따른 추진제의 연소속도와 압력지수는 Fig. 8과 같이 정리하였다.

A-1 추진제는 두 종의 Al-Mg 합금에 AP를 33% 사용한 것으로 1,000 psia에서 35.2 mm/s의 매우 빠른 연소속도를 보인다. 설계 기준인 348 psia에서는 22.0 mm/s의 연소속도를 보였으며 압력지수는 0.45이다. A-2 추진제는 A-1 추진제에서 0.5%의 Butacene을 줄이는 대신 Al-Mg 합금을 늘린것으로서, 연소속도는 1,000 psia 기준으로 37 mm/s까지 증가하였으며 압력지수도 0.55로 상승하였다. 이때 미경화 추진제 점도는 20.0 kP까지 증가하였다. 점도는 주조 방식의 추진제 제조 시 중요한 변수로서, 점도가 높을수록 추진제의 충전 시간이 길어지게 되며 내부의 기포를 효과적으로 제거할 수 없어 추진기관의 불량률이 증가하게 된다. 그러므로 금속연료 추진제를 주조 방식으로 제조하기 위해서는 가능한 추진제의 점도가 낮아야 한다.

B-1 추진제는 AP 17%와 Mg 70%로 설계된 조성으로 A-1, A-2 추진제 대비 바인더의 함량이 높기 때문에 점도는 6.4 kP으로 낮게 형성되어 있는 것이 특징이다. 연소속도의 경우 AP의 양이 17%로 상대적으로 적기 때문에 1,000 psia에서 17.3 mm/s의 낮은 값을 보인다. B-1 추진제에서 Mg 혼합비를 조절하여 B-2 추진제를 설계하였다. 미분(微粉)의 Mg 함량이 35%으로 증가하였을 때 미경화 추진제의 점도는 5.6 kP까지 줄어들었으며 연소속도는 약 1 mm/s 감소하였다.

C-1은 Mg에 미분의 Al-Mg 합금을 혼합한 조성이다. Mg을 단독 사용한 B1보다 미경화 추진제의 점도는 3.2 kP까지 감소하였으며, 연소속도는 1,000 psia 기준으로 2.2 mm/s 감소한 15.1 mm/s의 값을 보였다. 압력지수의 경우 0.33에서 0.39로 상승하였다. Mg을 밀도가 높은 Al-Mg으

로 변경하게 되면 점도가 낮아지므로 그만큼 추진제의 고체 함량을 늘릴 수 있다. C-2는 추진제의 연소속도를 증가시키기 위해 C-1 조성에서 바인더의 양을 1% 줄이고 대신 AP의 양을 1% 늘린 조성이다. 그 결과 1,000 psia에서의 연소속도를 21.6 mm/s까지 증가시킬 수 있었으며 348 psia에서는 13.3 mm/s까지 높일 수 있었다.

D-1 추진제는 DOA 대신 IDP를 가소제로 사용한 추진제로 Mg의 함량을 72%까지 늘린 조성이다. 고체 총 함량이 늘어나면서 미경화 추진제의 점도가 26.8 kPa까지 증가하였다. 1,000 psia에서의 연소속도는 24.5 mm/s로 B-1 추진제 대비 7.2 mm/s 증가하였으며 348 psia에서도 15.8

mm/s의 상대적으로 높은 연소속도를 보인다. D-2는 점도를 낮추기 위해 D-1 추진제에서 Butacene의 양을 1% 줄이고 대신 줄어드는 연소속도를 보상하기 위해 AP를 1% 증가시킨 조성이다. 추진제 혼합 결과 점도는 18.4 kPa까지 줄어들지만, 연소속도도 동시에 느려져 1,000 psia와 348 psia에서 각각 20.8 mm/s와 13.1 mm/s의 값을 가진다. D-1 대비 AP의 양을 늘리기 위해 금속의 양을 2% 줄이고 큰 입도의 Mg 비율을 늘렸다. 이때 IDP를 0.5% 늘려 HTPB 바인더의 양을 조절하였다. 그 결과 점도는 17.6 kPa까지 줄어들었으며 연소속도 또한 1,000 psia에서 37.3 mm/s의 매우 빠른 속도를 보인다.

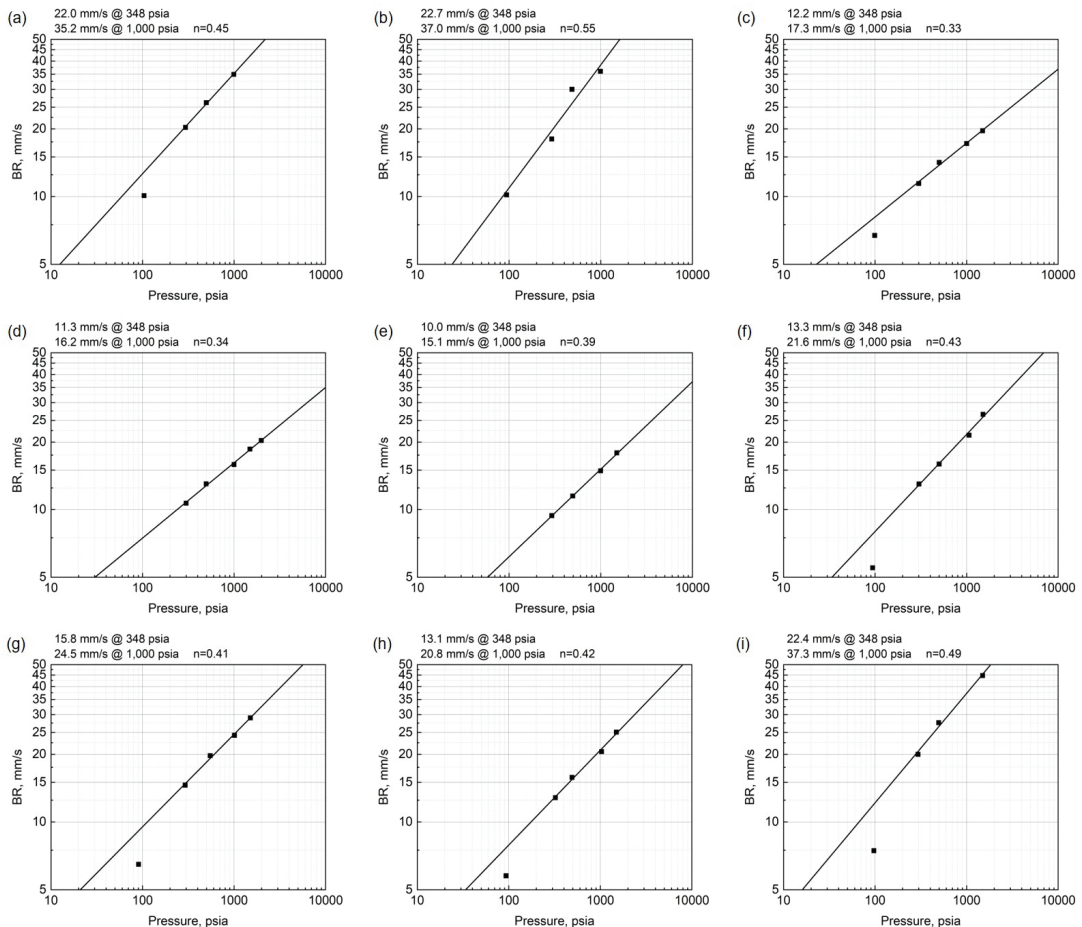


Fig. 7 Burning rates of hydro-reactive metal fuel propellants: (a) A-1 (b) A-2, (c) B-1, (d) B-2, (e) C-1, (f) C-2, (g) D-1, (h) D-2, and (i) D-3.

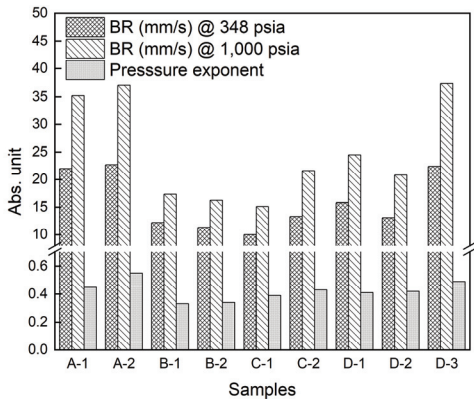


Fig. 8 Burning rate and pressure exponent of hydro-reactive metal fuel propellants.

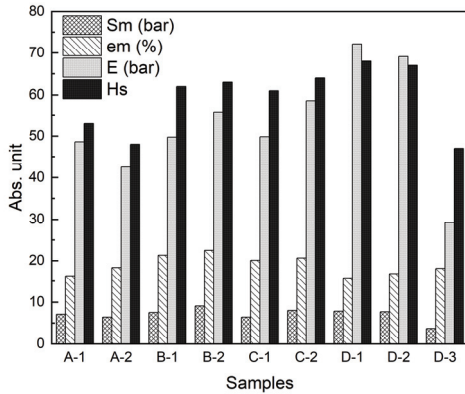


Fig. 9 Variation of Sm, em, E, and Hs for hydro-reactive metal fuel propellants.

수반응 금속연료 추진제의 기계적 물성을 Table 2와 Fig. 9에 정리하였다. 전체적으로 금속의 함량이 높고 바인더의 함량이 낮기 때문에 추진제의 최대 신율이 23% 이하로 낮게 형성되어 있다. A-1과 A-2 추진제는 Al-Mg을 사용하여 추진제의 밀도가 높다. 그 외 추진제들은 AP의 양이 상대적으로 적고 Mg을 주로 사용하였기 때문에 추진제의 밀도가 낮게 측정되었다. 미분의 Mg 함량이 높은 B-2 추진제는 B-1 추진제보다 최대 응력이 상대적으로 높게 측정되었다.

수반응 금속연료 추진제는 낮은 연소실 압력 조건(348 psia)과 End burning 형상의 Free-standing 그레이н 구조로 인해 최대 신율이 낮더라도 최대 응력이 일정 수준 이상이 된다면 충

Table 2. Mechanical properties of hydro-reactive metal fuel propellants.

| No. | Eq. Ratio | Sm <sup>a</sup> (bar) | em <sup>b</sup> (%) | E <sup>c</sup> (bar) | Hs <sup>d</sup> | ρ (g/cc) |
|-----|-----------|-----------------------|---------------------|----------------------|-----------------|----------|
| A-1 | 1.00      | 7.1                   | 16.3                | 48.6                 | 53              | 1.805    |
| A-2 | 1.00      | 6.4                   | 18.3                | 42.5                 | 48              | 1.814    |
| B-1 | 1.00      | 7.5                   | 21.3                | 49.7                 | 62              | 1.585    |
| B-2 | 1.00      | 9.1                   | 22.5                | 55.7                 | 63              | 1.591    |
| C-1 | 0.98      | 6.4                   | 20.1                | 49.8                 | 61              | 1.653    |
| C-2 | 0.98      | 8.0                   | 20.6                | 58.6                 | 64              | 1.673    |
| D-1 | 1.00      | 7.8                   | 15.8                | 72.1                 | 68              | 1.593    |
| D-2 | 1.00      | 7.7                   | 16.8                | 69.1                 | 67              | 1.604    |
| D-3 | 1.10      | 3.7                   | 18.1                | 29.2                 | 47              | 1.613    |

<sup>a</sup>Maximum tensile stress, <sup>b</sup>Strain at maximum tensile stress, <sup>c</sup>Elasticity modulus, <sup>d</sup>Shore-A hardness

분히 적용 가능하다. 다만 점도를 낮추기 위해 가소제의 양을 늘린 D-3 추진제의 경우 최대 응력이 4 bar 이하로 낮기 때문에 추진제의 당량비를 높여 최대 응력을 6 bar 이상으로 조절해야 할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 금속의 종류 및 함량에 따른 수반응 금속연료 추진제의 이론성능 및 화염온도에 대해 계산하였다. W/F가 4.5일 때, 압축 방식의 Mg(70)/NaNO<sub>3</sub>(30) 추진제보다 주조 방식의 HTPB(10)/Mg(70)/AP(20) 추진제가 상대적으로 우수한 성능을 보였다. 동일한 금속 함량을 사용할 때 주조형 수반응 금속연료 추진제가 바인더에 의한 연료량 증가로 인해 성능이 높게 계산되었다. 높은 연소열을 갖는 Al을 금속연료로 사용하게 되면 Mg을 사용한 것보다 추진제의 이론 비추력이 크게 계산되었다. 그러나 Al의 높은 끓는점과 응집체 형성은 연소효율을 저해시키는 요인으로 작용할 수 있기 때문에 Al을 단독으로 사용하는 것보다는 Al-Mg 합금을 사용하여 점화 성능을 개선한 조성도 주조형 수반응 금속연료 추진제의 대안이 될 수 있다[10].

Al-Mg(55.5)/AP(33) 조합의 금속연료 추진제는 1,000 psia에서 35.2 mm/s의 고 연소속도를 제공하는 것으로 확인되었다. Mg(70)/AP(17) 조합의 경우 미경화 추진제의 점도가 5.6 kPa까지 줄어들었으며 연소속도도 동시에 감소하였다. 추진제의 가소제로 DOA 대신 IDP를 사용하여 고체의 함량을 90%까지 늘릴 수 있었으며 Mg 혼합비를 조절하여 최종적으로 1,000 psia에서 37.3 mm/s의 고 연소속도를 갖는 수반응 금속연료 추진제를 개발할 수 있었다.

### 후 기

이 논문은 방위사업청, 국방과학연구소의 재원으로 수행된 '해수흡입형 로켓추진기술 연구(912816201)'의 연구 결과임.

### References

1. "Supercavitating torpedo", retrieved 19 June 2023 from <https://www.naval-technology.com/features/featurethe-allure-of-supercavitating-torpedoes-5838643>
2. Pang, W., De Luca, L.T., Fan, X., Glotov and O.G., Zhao, F., *Boron-based Fuel-Rich Propellant Properties, Combustion, and Technology Aspects*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019.
3. Kim, Y.-G. and Nah, Y.-I., "Propulsion Technologies of Supercavitating Rocket Torpedo, Shkval," *Proceedings of the Korean Society of Propulsion Engineering*, pp. 383-387, 2011.
4. Hu, J., Han, C., Xia, Z., Huang, L. and Huang, X., "Experimental Investigation on Combustion of High-Metal Magnesium-Based Hydrosensitive Fuels," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 29, No. 3, pp. 692-698, 2013.
5. Liu, D., Li, S. and Xie, G., "Effect of Primary Water Injection Angle on Thermal Propulsion Performance of a Water Ramjet Engine," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 97, p. 105630, 2020.
6. Huang, H.-T., Zou, M.-S., Guo, X.-Y., Yang, R.-J., Li, Y.-K., Jiang, E.-Z. and Li, Z.-S., "Study of Different Al/Mg Powders in Hydrosensitive Fuel Propellant Used for Water Ramjet," *Journal of Energetic Materials*, Vol. 32, pp. S83-S93, 2014.
7. Hu, J.-X., Han, C., Xia, Z.-X., Huang L.-Y. and Huang X., "Statistical Model for Combustion of High-Metal Magnesium-Based Hydro-Reactive Fuel," *Chinese Physics B*, Vol. 21, No. 12, p. 124501, 2012.
8. Gao, Y. He, Z. and Liu, P.-A., "Comparison of Fuel Energy Characteristics for Supercavitation Propulsion Engine," *Journal of Solid Rocket Technology*, Vol. 32, No. 1, pp.27-32, 2009.
9. McBride, B.J. and Gordon, S., *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications*, NASA Lewis Research Center, 1996.
10. Liu, L., Ao W., Wang, Y., Long, Y., Liu, P., He, G. and Li, L.K.B., "Modifying the Ignition, Combustion and Agglomeration Characteristics of Composite Propellants via Al-Mg Alloy Additives," *Combustion and Flame*, Vol. 238, p. 111926, 2022.