

청정 추진제 개발 동향

김인철* · 류백능* · 김창기**

Developing Trend of Clean Propellants

In-Chul Kim* · Baek-Neung Ryoo* · Chang-Kee Kim**

ABSTRACT

In this report the developing trends of several clean and green propellants have been summarized. A low-acid clean propellant has been developed, which substantially reduced the content of hydrochloric acid(HCl) in the solid rocket exhaust. Although the chlorine-free approach is now preferred, this technology has not been proved yet. Another acid suppression effect of Magnalium(Mg-Al Alloy) was investigated. Reports says that the concentration of HCl could be reduced to approximately one-fifth of conventional propellant. Many "green" propellants with low toxicity are being developed for next-generation post-boost propulsion systems, in which combustion research on the Al or Mg fine metal particles with hot steam in various stoichiometric conditions are being performed.

초 록

본 보고에서는 현재까지 연구된 청정 및 저독성 추진제 기술 자료를 정리하였다. 로켓 모터의 배기 가스 중의 염산량을 감소시킨 저산 청정 추진제는 스캐빈저와 중화 개념이 일부 완성된 기술이다. 실제 가장 선호하는 기술은 추진제 배기 가스 중의 염소가 완전히 제거된 무염소 기술이나 아직은 기술적으로 제한적이다. 또한 마그날륨(Mg-Al 합금)인 경우, 배출 가스 중의 염산 농도를 1/5 수준으로 감소시킨 결과도 보고되어 있다. 차세대 추진제로는 저독성(Green) 추진제가 연구 중이며, Al 또는 Mg 금속 미세 입자를 화학양론적 분위기에서 고온 수증기와 연소하는 연구가 진행 중이다.

Key Words: Clean Propellant(청정 추진제), Green Propellant(저독성 추진제), Scavenger Propellant(스캐빈저 추진제), Mg-Neutralized Propellant(마그네슘 중화 추진제)

1. 서 론

1990년대에 로켓 모터의 배출 가스가 환경에 미치는 영향을 최소화하는 청정 추진제에 대한 연구 결과를 발표하였는데, 추진제의 주된 환경적 유해 요소로 산성비, 성층권 오존 형성, 지구 온난화, 독성 발산 물질의 침전 등임을 지적하

* 국방과학연구소 기술-4-6

** 국방과학연구소 기술-4-5

연락 저자, E-mail: ickim@add.re.kr

였다[1.2]. 이 추진제의 목표는 산화제로 사용하는 AP(ammonium perchlorate)가 연소되면서 생성되는 다량의 HCl를 무게비로 1.0% 이내로 유지하는 것이다. 이 추진제의 초기 연구에서, AP를 AN(ammonium nitrate) 산화제로 치환하여 배기 가스 중의 HCl을 3% 이하로 최소화하는 기술이 개발되었다. 그러나 AN 추진제는 성능, 물성, 연소 속도, 습기 취약성 등으로 인해 가스발생기나 소형 모터를 제외하고는 로켓 모터에는 아직 적용되지 못하고 있다.

1990년 초 미국 Thiokol Co.에서 연소 가스 중의 HCl을 감소시킨 스캐빈저 추진제와 마그네슘(Mg) 중화 추진제를 개발하였다고 발표하였다[3]. 그러나 스캐빈저와 Mg 중화 추진제는 성능 및 연소 특성 저하에 단점이 있으며, 특히 Mg 중화 추진제는 Mg와 Cl의 친화성이 크기 때문에 이론적으로는 가능성이 높으나, Mg이 Al에 비해 비추력, 밀도, 열량이 낮은 단점이 있다.

최근에 무염소인 고에너지 산화제 CL-20(hexanitrohexaazatetracyclododecane), ADN(ammonium dinitramide), HNF(hydrazinium nitroformate) 등의 추진제 적용 연구와 저독성 추진제의 전술 로켓 모터 적용성이 대두되면서 덜 위험한 고체, 액체 및 젤(gel) 추진제들이 다른 고성능 추진제와 비교하여 친환경적이며 인체에 대한 위험 요소가 적고 연소 특성을 향상시킬 수 있는 연구 등도 진행되고 있다[4].

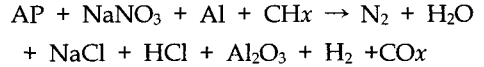
그러나 실제 유도무기용 추진제에서는 친환경보다는 1, 2차 연기가 없고 더 나아가서는 노즐 출구에서 연소 화염이 관측되지 않는 은닉성(stealth)에 연구 역량이 집중되고 있다.

본 연구에서는 '스텔스 기능을 가진 추진제의 연구'를 위해 기반 기술을 구축하는 일환으로 로켓 모터 연소 가스 중의 HCl을 감소시킬 수 있는 청정 추진제 기술에 대한 개발 동향을 파악하여 정리·분석하였다.

2. 이론적 배경 및 고찰

2.1 스캐빈저 추진제

스캐빈저 추진제는 AP 산화제의 일부를 스캐빈저 물질인 NaNO_3 (또는 KNO_3)로 치환해 로켓 모터 내에서 추진제가 연소될 때 Na^+ 이온이 Cl^- 이온과 반응하여 HCl의 제거 및 생성을 억제하는 방법이며, 반응 과정은 다음과 같다[2].



스캐빈저 추진제는 로켓 모터 배기 가스 중에 HCl이 1~2% 남아 있으며, 비추력 손실은 HTPB계 추진제에 비해 대략 ~15sec 정도 낮은 수준이다. 저산 추진제 중에 스캐빈저 및 중화 추진제가 가장 완성된 접근 방법이며, tm캐빈저 추진제의 특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Characteristics of Scavenger propellant[5]

Propellant	TP-H1148	TC	ASPC	CSD	ARC	HAC
q (density), lb/in ³	0.0641	0.0689	0.0677	0.0682	0.0660	0.0688
ISP (specific impulse), sec	261.4	244.5	244.3	143.3	251.6	245.8
q ₀ (burn rate), ip/s	16.557	16.846	16.659	16.478	16.582	16.931
R ₀ (burn rate), ip/s	0.42	0.40	0.42	0.40	0.34	0.43
η (R ₀ exponent)	0.35	0.59	0.41	0.37	0.37	0.27
Binder	FBAN	HTPB	HTPB	HTPB	HTPB	HTPB
Fuel/Al	16	19	21	19	19	22.5
Oxidizer/AP	69.7	39.5	38.6	38.8	32.5	35.1
Oxidizer/NaNO ₃	0	29	27.9	29.0	23.5	25.4
Oxidizer/Other	0	0	0	1/PP*	12/RDX**	0
η ⁰ (70-ib BATES)	93.9	93.6	92.5	93.7/93.5 ²	93.0	92.9
η ⁰ (Super BATES)	94.5***	94.4	95.9	94.1 ²	94.6	94.2***

1 - Propellant manufactured using batch mix process
 2 - Propellant manufactured using continuous mix process
 * - Potassium perchlorate
 ** - Cyclotrimethylene trisnitramine
 *** - Estimated value

근래 Deluca 등은 AP/NaNO₃ 함량 변화에 따른 모터 연소 시험 결과, ~75% 범위의 HCl 제거 효과와 화염 전파 속도의 불균일성, 연소 잔류 시간 지연, 연소 속도가 감소되는 비정상적인 점화 및 연소 현상을 발표하였다[6].

2.2 Mg 중화 추진제

Mg 중화 추진제는 금속 연료로 사용되는 Al을 Mg로 대체하여 배출 생성물 중의 HCl을 간단한 산-염기로 중화하는 산-염기 화학 반응에 기초한 저산 추진제이다. 중화 추진제의 로켓 모터에서 중화 추진제 연소 반응과 plume 반응 과정을 Fig. 1에 나타내었다. Mg가 AP와 반응하여 MgO를 생성하고, plume 반응에서 챔버

내 대기의 수분과 반응하여 $Mg(OH)_2$ 염기성 물질로 변환되어 HCl과 반응하여 중화된다.

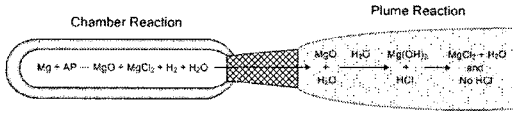


Fig. 1 HCl neutralization of Mg low-acid propellant

Mg 중화 추진제는 Mg 22%와 AP 63%가 충전되었으며, 고체 충전을 85%가 이론적인 최대 성능이다. 측정된 비추력은 Fig. 2와 같이 대략 237sec 정도로 금속 함유 추진제에 비해 적다.

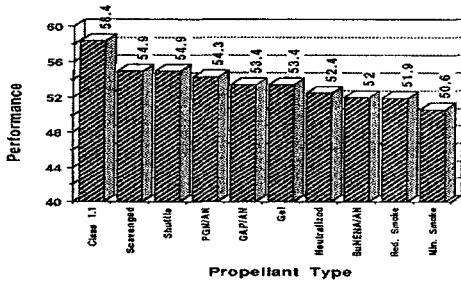


Fig. 2 Comparison of performance of various solid rocket propellants[2]

Space shuttle에 사용된 전형적인 HTPB 추진제와 Al을 Mg로 부분 치환한 중화 추진제를 소형 로켓 모터에서 연소한 후, 배기 가스 중의 HCl 농도의 비교 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

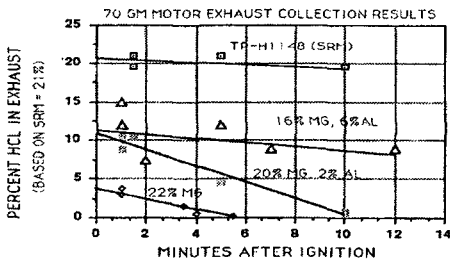


Fig. 3 HCl concentration exhausted with time[1]

2.3 Magnalium(Mg/Al) 추진제

Mg/Al 추진제는 Mg 중화 추진제의 변형으로

서 Al 입자를 Mg으로 치환함으로써 발생하는 비추력과 연소 특성 저하를 해소하기 위해 Mg를 Mg/Al으로 대체하였다[3]. Mg가 35~65% 함유된 Mg/Al 공융점이 Al과 Mg 금속보다 약 200K 낮으며, 화학적 성질은 Mg과 유사하다.

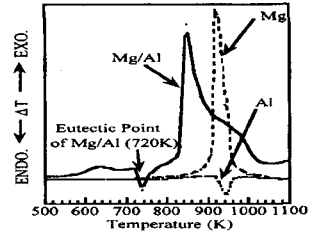
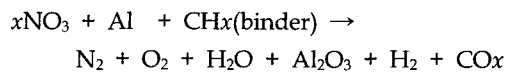


Fig. 4 DTA results of Magnalium[5]

Mg 함량이 많을수록 비추력은 낮아지고 HCl 억제 효과는 증대되는데, 발표된 Mg 50% 함유 Mg/Al 추진제는 전형적인 AP 추진제와 유사한 안정성을 가지며, 연소 가스 중의 HCl 농도는 대략 1/5 수준으로 감소되었다.

2.4 무염소 추진제

무염소 추진제는 다음 반응식과 같이 AP 산화제 전량을 무염소 산화제로 치환한 것이다.

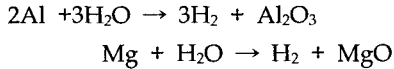


환경 친화적인 AN 추진제의 성능 증진을 위해 에너지가 보다 높은 HAN(hydroxyl AN)이 AN과 함께 상온에서 액체이고 낮은 온도에서 용해되는 혼합물의 형태로 사용되기도 하며, 액체 산화제를 PVA(polyvinyl alcohol)와 경우에 따라 Al과 혼합한 젤 추진제 연구도 진행되고 있다. 최근에 AP 산화제를 ADN으로 치환해 성능과 특성이 향상된 추진제를 러시아에서 성공적으로 개발한바 있으나[7], 실제 로켓 모터 적용까지는 수년 더 소요될 것으로 생각된다.

2.5 저독성 추진제

저독성 추진제는 추진제의 환경적·인적 유해성을 최소화한 것이다. 가능한 추진제 패밀리

는 액체, 고체 등으로 구성되며, 미래 용도에 따라 적합한 저독성 추진제의 조성을 분석·선정한다. 이 추진제에서는 다음 반응식과 같이 산화제로 물을, 연료로 Al이나 Mg 고체 분말을 사용하는 새로운 개념의 연구도 진행되었다.



이 추진제는 상대적으로 부피와 밀도 효과가 큰 장점이 있어 해수 흡입 개념의 수중 추진기 관용으로 연구되고 있는데, 금속 입자의 유동성, 코팅 방법, 충전 밀도의 최적화를 연구하고 있다. 금속 분말 입자(5~30 μ m)를 700K의 수증기에서 연소 반응한 결과, Mg 생성물은 슬래그(Slag) 축적이 없는 장점이 있으며, 금속 분말과 수증기의 반응으로 얻을 수 있는 성능(비추력)은 2,200~2,300m/sec(224~235s)로 예측된다[7].

3. 결 론

고에너지 청정 추진제(1.3급)는 중화·스캐빈저 추진제들이 가장 근접되어 있다. 모터 시험 결과 배출 가스 중의 HCl을 1~3% 정도까지 감소할 수 있었으며, 아직 성능면에서는 HTPB계 추진제에 미치지 못하지만 대체 가능성이 있다. 변형된 Mg/Al 중화 추진제는 HTPB계와 성능이 유사하고 1/5 수준의 저산인 장점이 있다. 배출 가스의 HCl을 완전히 줄일 수 있는 성능이 향상된 AN계, 젤 및 ADN 무염소 추진제 등도 연구해야 할 것이다. 또한 금속 Al과 Mg 분말 연료를 유사한 화학양론적 분위기에서 수증기와 반응하는 저독성 추진제도 연구해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Daniel W. Doll and Gray K. Lund, "Magnesium-Neutralized Clean Propellant", AIAA-91-2560, AIAA/SAE/ASME, 27th Joint Propulsion Conference, Sacramento, CA, USA, 1991
2. R.R. Bennett. "The Environmental Effects of 'Clean' Propellants", AIAA 92-3398, AIAA/SAE/ASME/ASEE, 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Nashville, TN, USA, 1992
3. Hiroto Habu, Keiichi Hori, and Takeo Saito. "The Combustion Mechanism of AP based Propellant Containing Magnalium", in "Energetic Materials: Ignition, Combustion and Detonation", 32th International Annual Conference of ICT, V7, Karlsruhe, Federal Republic of Germany, July 3-6, 2001
4. Brian J. German, "An Evaluation of Green Propellants for An ICBM Post-Boost Propulsion System", Aerospace Systems Design Lab. 2001
5. Charles Beckman, "Clean Propellants for Space Launch Boosters", in "Environmental Aspects of Rocket and Gun Propulsion", Propulsion and Energetic Panel(PEP) 84th Symposium, Aalesund, Norway, 1994
6. Luigi T. DeLuca, Fabio Cozzi, Stefano Manenti, Andrea Olivani, Bruno D. Andrea, and Francesca Lillo, "Ballistic Testing of Clean Solid Propellants", in "Energetic Materials: Ignition, Combustion and Detonation", 32th International Annual Conference of ICT, V10, Karlsruhe, Federal Republic of Germany, July 3-6, 2001
7. Timothy F. Miller and John D. Herr, "Green Rocket Propulsion by Reaction of Al and Mg Powders and Water", AIAA 2004-4037, AIAA/SAE/ASME/ASEE, 40th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, USA, 2004

1. Daniel W. Doll and Gray K. Lund,