

Technical Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2020.24.4.079>

친환경 접촉점화 추진제 연구 개발 동향

박성현^a · 강홍재^b · 박영철^c · 이종광^{a,*}

A Review of the Technical Development on Green Hypergolic Propellant

Seonghyeon Park^a · Hongjae Kang^b · Youngchul Park^c · Jongkwang Lee^{a,*}

^aDepartment of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Korea

^bPlasma Engineering Laboratory, Korea Institute of Machinery and Materials, Korea

^cAgency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: jongkwang@hanbat.ac.kr

ABSTRACT

Hypergolic propellants have been widely used for space propulsion systems based their long-term storability and high ignition reliability. Since conventional hypergolic propellants are highly toxic and carcinogenic, handling and operating costs are significant. To overcome the drawbacks, numerous studies have been actively performed to develop new hypergolic propellants, ensuring that the combinations are high performance, low toxicity and low environmental impact. In the present study, a comprehensive survey was conducted to summarize the research and development of green hypergolic propellants involving hydrogen peroxide, nitric acid, and ionic liquids.

초 록

접촉점화 추진제는 장기 저장성과 높은 점화 신뢰성을 기반으로 우주 비행체의 추진 시스템에 널리 활용되어 왔다. 기존 접촉점화 추진제는 독성이 강하고 발암성 물질로 분류되어 취급과 운용에 많은 비용이 소요된다. 이러한 기술적 단점을 극복하기 위하여, 저독성 물질에 기반한 고성능 접촉점화 추진제 조합에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔다. 이 논문에서는 친환경 접촉점화 추진제의 개발 현황에 대한 문헌 조사를 바탕으로 과산화수소, 질산, 이온성 물질을 포함한 친환경 접촉점화 추진제의 연구 개발 동향을 소개하려 한다.

Key Words: Green Propellant(친환경 추진제), Hypergolic Propellant(접촉점화 추진제), Ignition Delay(점화지연시간), Space Propulsion(우주 추진)

1. 서 론

Received 12 May 2020 / Revised 4 July 2020 / Accepted 8 July 2020

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

추진제 선정은 우주 추진 분야에서 추력기 및 추진 기관 설계의 시작점이라 할 수 있다. 추진

제는 물질의 상태, 저장 방법, 조성 등에 따라 다양한 종류가 있다. 이 연구에서는 다양한 추진제들 중 접촉점화(hypergolic) 추진제의 연구 동향에 대해 소개하려 한다. 접촉점화 추진제란 액체 추진제로서, 외부 열원 또는 점화 장치 없이 연료와 산화제의 물리적인 접촉만으로 수~수십 ms 이내에 점화가 되는 추진제를 의미한다. Fig. 1은 연료에 산화제를 떨어뜨린 후 접촉점화 반응을 관측한 것이다. 연료와 산화제가 접촉한 이후 격렬한 반응이 발생하며 점화한다. 이러한 추진제의 접촉점화 특성은 추진 시스템 간소화에 기여할 수 있으며, 재점화 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 이에 접촉점화 추진제는 우주 비행체의 궤도 천이 및 자세제어, 직격 요격체(kill vehicle) 추진 시스템 등 다양한 분야에서 주목받고 있다.

기존에 접촉점화 추진제로 널리 활용되는 하이드라진(hydrazine) 계열의 연료와 사산화이질소(dinitrogen tetroxide, NTO)는 맹독성 물질로 분류되며 강한 부식성을 가지고 있다. 이와 같은 특징으로 인하여 추진제의 취급과 운용에 높은 위험성이 따르며, 이를 관리하기 위해 추가 비용이 발생하게 된다. 2000년대 초반부터 맹독성 추진제가 야기하는 문제점을 보완하기 위해 미국, 유럽, 중국 등 우주 추진 기술을 선도하는 나라들을 중심으로 친환경 접촉점화 추진제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이 논문에서는 친환경 접촉점화 추진제에 대한 문헌 조사를 바탕으로 선행 연구 사례들을 소개하려 한다. 연구 결과는 산화제에 따라 분류하였으며, 접촉점화 추진제에서 중요한 성능 특성인 점화지연시간(ignition delay, ID)을 정량적 지표로 설정하여 비교하였다. 이 논문에서 제시한 점화지연시간은 액적낙하 실험(droplet test)을 이용하여 측정된 결과들이다. Fig. 2에서는 가장 기본적인 액적낙하 실험 장치를 보여주고 있다. 일반적으로 장치 하부에 반응물을 위치시키고 주사기를 이용하여 다른 반응물을 떨어뜨린다. 이 실험은 간단한 실험 방식을 통해 추진제의 점화성능을 평가할 수 있어 접촉점화 추진제 성능 평가 기법으로 널리 사용되고 있다. 그러나 액적낙하 실험 환경에 대한 글로벌한 표준

기준이 없는 상황이며, 선행 연구 사례들의 실험 장치 및 실험 조건이 매우 다르기 때문에 동일한 추진제 조합이라도 실험 환경에 따라 점화지연시간이 상이하게 나타날 수 있다. 따라서 다양한 실험 환경을 점화지연시간과 연관지어 절대적으로 비교 평가할 수 없다는 한계점이 있다. 그럼에도 불구하고, 액적낙하 실험은 새로운 추진제 조합의 접촉점화 가능성을 평가하거나 점화 특성을 확인하기에 매우 적합한 실험 방식이다. 이에 많은 연구 기관에서는 액적낙하 실험을 채택하여 추진제의 접촉점화 현상을 관측하였다. 따라서 이 논문에서는 액적낙하 실험 결과를 기반으로 친환경 접촉점화 추진제의 연구 동향을 소개하려 한다.

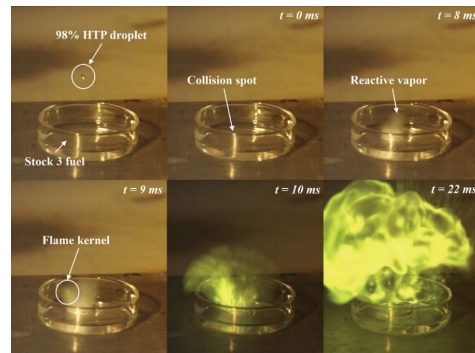


Fig. 1 Hypergolic interactions between Stock 3 fuel and 98% H_2O_2 droplet[1].

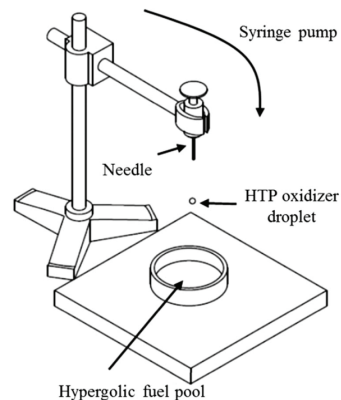


Fig. 2 Schematic drawing of the droplet impact test[2].

2. 본 문

2.1 과산화수소 기반의 친환경 접촉점화 추진제

과산화수소는 밀도가 높고 친환경적인 물질로써 로켓 기술 전반에서 다양하게 활용되어 왔다. 이러한 특성은 접촉점화 추진제로서 매우 유리하게 작용함에도 불구하고 기존의 맹독성 추진제에 비해 성능이 낮아 주목받지 못하였다. 또한, 과산화수소는 자연 분해되는 성질로 인해 저장성에 대한 문제가 제기되어 왔다. 그러나 과산화수소 증류 및 안정제 기술이 지속적으로 발달함에 따라 과산화수소의 저장성이 개선되고 있으며, 선행 연구 결과에 따르면 농도가 높을수록 저장성이 향상된다는 연구 결과가 보고되었다[3]. 과산화수소의 분해를 촉진시키는 오염 물질은 대부분 과산화수소 내 포함된 물에 용해되어 존재하는데 농도가 높을수록 불순물의 함량도 감소하기 때문에 저장성이 개선될 수 있다.

과산화수소 기반의 접촉점화 추진제는 일반적으로 점화성능이 낮은 편이다. 이를 극복하기 위해 연료에 점화제를 첨가하여 점화성능을 개선하는 방법이 사용된다. 연료는 점화제와 과산화수소의 작용 유형에 따라 반응성 연료(reactive fuel)와 촉매성 연료(catalytic fuel)로 구분할 수 있다. 먼저, 반응성 연료는 연료 내 포함되어 있는 점화제가 과산화수소와 직접적인 산화-환원 반응을 하며 자연 발화 현상이 촉발된다. 촉매성 연료는 점화제로 혼합된 촉매가 과산화수소를 촉매 분해하여 고온의 발열반응이 일어나고, 반응 온도가 연료의 자연 발화점에 도달하면서 점화가 이루어진다. 최근에는 화학물질 합성을 통해 점화제 없이 과산화수소와 접촉점화 반응이 가능한 연료에 대한 연구가 수행되고 있다. 이를 이온성 연료(ionic liquid fuel)라 하며, 아직 연구 초기 단계로 생산성과 비용 측면에서 한계가 있지만, 증기압이 낮아 증기로 인한 흡입 독성이 낮고 반응성이 뛰어나 친환경 연료로서 가능성을 인정받고 있다.

고농도 과산화수소 기반의 추진제에 대한 대표적인 연구 기관으로 미국 퍼듀 대학교(Purdue University)와 이스라엘 텔 아비브 대학교(Tel

Aviv University), 폴란드 항공 연구소(Warsaw Institute of Aviation, IoA)가 있다. 퍼듀 대학 연구팀은 2000년대 초반부터 과산화수소 기반의 추진제에 대한 연구를 수행하였으며, 최근까지 다양한 연구가 진행 중이다. 초창기에는 고에너지 연료에 과산화수소 분해용 촉매를 혼합하여 촉매성 연료를 제작하고, 과산화수소와 촉매성 연료의 접촉점화 현상을 규명하였다[4]. 이후, 고에너지 연료에 강 환원제를 혼합한 반응성 연료를 제작하여 점화지연시간 측정 및 우주 추진 시스템에 적용 가능성을 평가하였다[5]. Table 1은 퍼듀 대학에서 수행한 액적낙하 실험 결과이다. 수소화붕소나트륨(sodium borohydride)을 강 환원제로 사용하여 반응성 연료와 과산화수소의 점화지연시간을 측정하였다. 대부분 15 ms 이하로 측정되었으며, 디메틸포름아마이드(dimethyl - formamide)가 9.12 ms로 가장 짧은 점화지연시간을 나타냈다. 텔 아비브 대학 연구팀은 이온성 연료의 친환경성에 주목하여 다양한 조합의 이온성 연료와 고농도 과산화수소의 접촉점화 반응에 대한 연구를 수행하였다[6,7]. Table 2는 이온성 연료에 첨가물(CuILs 1-4)을 10 wt.% 첨가한 후 여러 특성을 비교한 것이다. 가장 짧은 점화지연시간은 14 ms이며, 높은 밀도와 열적 안정성을 확인할 수 있었다. 폴란드 항공연구소는 저농도 과산화수소를 고농도 과산화수소로 증류할 수 있는 증류장치를 개발하여 98 wt.% 농도의 과산화수소를 직접 생산할 수 있는 기술을

Table 1. Drop test results for reactive fuels with sodium borohydride[5].

Fuel	promoter (w/w)	H ₂ O ₂ (wt.%)	Avg. ID (ms)
Triglyme	8%	88.5	10.6
Tetraglyme	10%	88.5	12
Dimethyl Formamide	12%	88.5	9.12
Dimethyl Sulfoxide	1%	87.4	-
	5%	87.4	96.5
	10%	87.4	14

Table 2. Physicochemical properties of the hypergolic fuels with and without CuILs[7].

Fuel	CuILs	T _d [°C]	ρ [g · cm ⁻³]	η [g · cm ⁻³]	Isp [s]	ID [ms]
F1	No	247	0.980	19	269.0	>1000
F1	1	220	1.018	42	264.7	37
F1	2	221	1.021	48	261.3	36
F1	3	219	1.025	50	263.9	24
F1	4	214	1.023	55	262.3	38
F2	No	263	0.930	5	266.6	>300
F2	1	161	1.005	80	262.5	30
F2	2	162	1.007	87	259.1	23
F2	3	160	1.010	82	261.7	14
F2	4	158	1.008	89	260.1	28

T_d : Decomposition temperature. ρ : Density at 25°C.

η : Viscosity at 25°C.

확보하였다. 또한, 촉매성 연료와 반응성 연료를 제작하여 고농도 과산화수소와 액적낙하 실험을 수행하였다[8].

최근 연구 개발 현황을 살펴보면 주로 성능이 높은 고농도 과산화수소를 기반으로 연구가 진행되고 있다. 그러나 고농도 과산화수소는 어는 점이 높으며, 공급이 어려운 단점이 있다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 저농도 과산화수소에 고에너지 염(salt)을 첨가하여 물질의 에너지를 높이고 어는점을 낮게 유지하는 기술이 개발되고 있다. 독일 Fraunhofer Institut für Chemische Technologie(ICT) 연구팀은 질산암모늄(ammonium nitrate, AN), 암모늄 디니트라미드(ammonium dinitramide, ADN), 요소 과산화수소(urea hydrogen peroxide, carbamide or HSPO)를 첨가물로 사용하여 이온성 연료와 접촉점화 가능성을 평가하였다[9]. Table 3은 산화제의 혼합 비율에 따른 점화지연시간을 비교한 것이다. 80 wt.% 미만의 과산화수소를 이용한 경우 VW 05 산화제를 사용한 추진제의 점화지연시간이 18 ms로 가장 짧게 나타났다. ADN과 AN을 첨가한 다른 추진제의 점화지연시간은 25-39 ms로 순수한 과산화수소(80 wt.%)를 산화제로 사용한

Table 3. Oxidizer compositions including ID[9].

Oxidizer	H ₂ O ₂ %	H ₂ O %	AN %	ADN %	ID [ms]
H ₂ O ₂ 90%	90	10	0	0	11
H ₂ O ₂ 80%	80	20	0	0	22
VW 05	72	8	0	20	18
VW 06	63	7	0	30	26
VW 07	54	6	0	40	25
VW 08	72	18	0	10	35
VW 09	64	16	0	20	39
VW 19	54	6	20	20	27
VW 20	64	16	10	10	32

추진제와 유사한 수치를 나타냈다. 연구 결과를 통해 고에너지 첨가물을 이용하여 저농도 과산화수소의 점화성능을 유지할 수 있는 기술이 있음을 확인하였다.

국내에서는 한국과학기술원과 한밭대학교 연구팀이 고농도 과산화수소 기반의 접촉점화 추진제에 대한 연구를 진행하고 있다. 한국과학기술원 연구팀은 수소화붕소나트륨(sodium borohydride)을 환원제로 첨가하여 탄화수소 기반의 반응성 연료 Stock 1,2,3을 개발하였다. 또한, 반응성 연료를 이용하여 액적낙하 실험과 500 N급 추력기의 지상 연소 시험을 수행하였다[10-12]. Fig. 3은 Stock 3 연료와 95 wt.% 과산화수소를 사용하여 500 N급 추력기의 지상 연소 시험을 관측한 것이다[11]. 한밭대학교 연구팀은 액추에이터, 광 및 음향 센서를 활용하여 액적낙하 실험 장치를 제작하였다[13]. Fig. 4는 아민 계열의 반응성 연료 RF5와 과산화수소의 접촉점화 반응을 계측한 신호 데이터이다. RF5는 n-부틸아민(n-butylamine)에 수소화붕소나트륨 5 wt.%를 혼합한 반응성 연료이다. 해당 문헌에서는 이와 같은 신호 분석을 통해 정밀하고 재현성 있는 점화성능 평가 기법을 제안하였다. 또한, 점화 메커니즘을 액상 반응(liquid phase) 구간과 기상 반응(gas phase) 구간으로 분리하여 연료에 따른 추진제의 점화 특성을 분석하였다.

과산화수소 기반의 접촉점화 추진제는 다양한

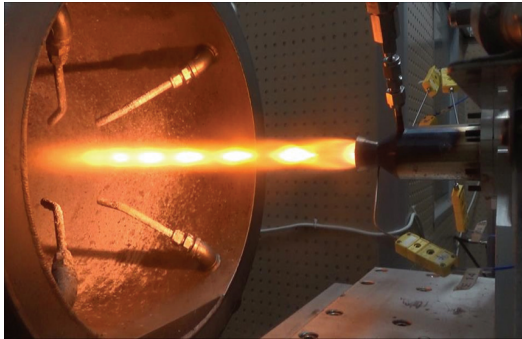


Fig. 3 Demonstration of 500 N scale non-toxic hypergolic bipropellant thruster with stock 3 fuel and 95 wt.% H₂O₂[11].

조합의 연료와 첨가제를 이용하여 활발히 개발되고 있다. 특성이 우수한 이온성 연료 혹은 고에너지 첨가제를 이용하여 추진제의 점화성능을 향상시키는 연구가 많이 수행되고 있다. 그러나 추진제를 시스템에 적용한 연구 사례는 적은 상황이다. 따라서 과산화수소 기반의 접촉점화 추진제를 개발하여 실제 추진 시스템에 적용 가능성을 확인하는 연구가 필요하다.

2.2 질산 기반의 접촉점화 추진제

질산 기반의 추진제는 사산화이질소에 비해 독성은 낮고 장기간 저장이 용이하여 무기 체계에 널리 적용되어 왔다. 질산 계열의 산화제는 혼합물의 조성에 따라 발연질산(fuming nitric acid, HNO₃), 백연질산(white fuming nitric acid, WFNA), 적연질산(red fuming nitric acid, RFNA or inhibited RFNA)으로 구분할 수 있다.

질산 계열 산화제의 가장 큰 단점은 부식성이다. 하지만 백연질산은 다른 산화제보다 독성과 부식성이 적기 때문에 취급 및 운용에 대한 부담이 상대적으로 적다. 이에 백연질산 기반의 추진제에 대한 연구 결과가 다른 질산 계열 추진제에 비해 압도적으로 많았다. 중국공정물리연구원(China Academy of Engineering Physics, CAEP)에서는 bis(borano)hypophosphite 작용기를 가진([BP]-based) 이온성 연료와 백연질산 조합의 점화성능을 평가한 바 있다[14]. Table 4는 사산화이질소와 백연질산을 산화제로 사용하여

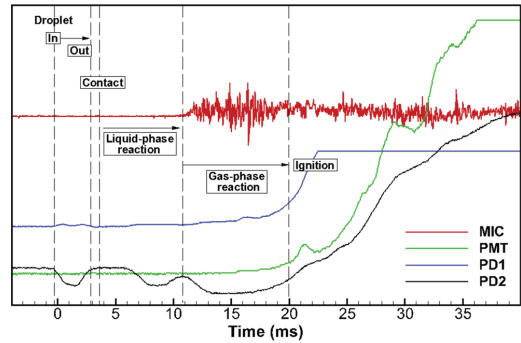


Fig. 4 Representative data for ignition-delay measurements with RF5 and 90 wt.% H₂O₂[13].

Table 4. Physicochemical properties of the [BP]-based HILs[14].

IL	T _d [°C]	ρ [g · cm ⁻³]	η [mPa · s]	Δ _f H [kJ · mol ⁻¹]	ID [ms]	
					WFN A ^a	N ₂ O ₄ ^b
1	214	0.92	-	-322.20	-	-
2	147	0.91	17.3	-63.15	1.1 (0.2)	14.9 (3.3)
3	170	0.90	16.9	-188.43	2.0 (0.2)	19.5 (3.5)
4	185	0.94	47.7	117.01	1.0 (0.1)	421.1 (63.4)
5	140	0.97	38.3	-160.61	5.8 (2.0)	343.3 (69.0)
6	63	0.98	54.6	-168.77	3.1 (0.3)	351.9 (41.0)
7	151	0.89	38.8	-263.37	2.1 (0.4)	373.3 (49.0)

T_d : Decomposition temperature. ρ : Density at 25°C.

η : Viscosity at 25°C. Δ_fH : Heat of formation.

ID : Ignition delay values are given as an average of six hypergolic drop tests with the standard deviation in parentheses. ^a Ignition delay with WFNA. ^b Ignition delay with N₂O₄.

점화지연시간을 비교한 것이다. bis(borano)hypophosphite 작용기를 가진 이온성 연료를 사용할 경우 사산화이질소를 사용한 추진제보다 백연질산을 산화제로 사용한 추진제의 점화지연시간이

더 짧게 나타났다. 표에서 확인할 수 있듯이 이온성 연료 IL 2, IL 4는 백연질산이 산화제로 사용된 경우 점화지연시간이 1 ms로 나타났으며, 이는 기존 맹독성 추진제와 유사한 점화지연시간을 확보한 것으로 볼 수 있다.

최근 많은 연구 기관에서 이종의 연료를 혼합하거나 질산 계열 산화제에 첨가물을 첨가하여 추진제의 조성을 변화시키는 연구가 수행되고 있다. 대표적인 연구 기관으로는 미국 펜실베니아 주립대학교(Pennsylvania State University)와 이란 말렉 아쉬타르 공과 대학(Malek Ashtar University of Technology)이 있다. 두 연구 기관은 2-디메틸아미노에틸아자이드(2-dimethylamino-ethylazide, DMAZ)와 테트라메틸에틸렌디아민(tetramethylethylenediamine, TMEDA)을 연료로 사용하여 다양한 조합의 추진제를 평가하였다. 펜실베니아 주립대학교 연구팀은 두 연료를 혼합하여 백연질산과 접촉점화를 유도하였고, 액적낙하 실험과 엔진 연소 실험(engine test)을 수행하였다[15]. Fig. 5는 DMAZ와 TMEDA의 혼합 조성 변화에 따라 점화지연시간을 비교한 그래프이다. 액적낙하 실험을 통해 측정된 결과이며, 연료를 단독으로 사용한 추진제보다 두 연료를 특정 혼합비로 혼합할 경우 연료의 점화지연시간을 5 ms 정도 감소시킬 수 있었다. 이란 말렉 아쉬타르 공과 대학 연구팀은 DMAZ와 아민류의 연료를 혼합하거나 산화제에 첨가물을 첨가하여 접촉점화 가능성을 평가하였다[16-18]. Fig. 6-7은 백연질산과 적연질산에 다양한 종류의 첨가물(inorganic nitrate salts)을 첨가한 후 점화지연시간을 측정된 결과이다. DMAZ를 연료로 사용하였으며 산화제의 종류에 상관없이 질산리튬(LiNO₃)을 첨가했을 때 점화지연시간이 가장 짧게 나타났다. 또한, 백연질산/DMAZ 조합이 적연질산/DMAZ 조합보다 짧은 점화지연시간을 보였다. 이는 백연질산에 포함된 질산 함량(>99.5 wt.%)이 적연질산에 포함된 질산 함량(82.9 wt.%)보다 높기 때문에 나타난 결과로 보인다.

문헌 조사를 통해 미국, 이란, 중국 등 여러 연구 기관에서 질산 기반의 추진제에 대한 연구가 활발히 수행되고 있음을 확인하였다. 특히,

독성과 부식성에서 상대적으로 안전한 백연질산 기반의 추진제에 대한 연구 결과가 지배적이었으며, 다양한 첨가물을 통해 추진제의 성능을 향

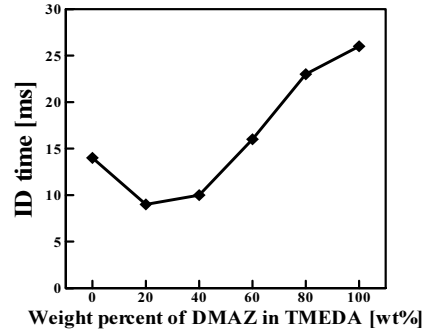


Fig. 5 ID time variation for DMAZ with TMEDA[15].

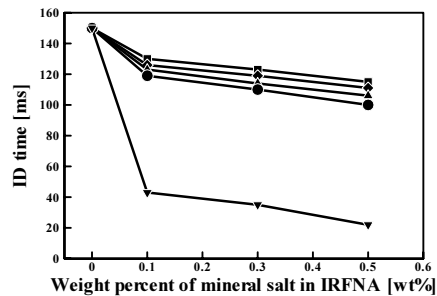


Fig. 6 ID time variations for DMAZ with IRFNA containing different weight percentages of nitrate(V) salts at O/F=2.5 (NH₄NO₃ -■-; KNO₃ -◆-; NaNO₃ -▲-; AgNO₃ -●-; LiNO₃ -▼-)[16].

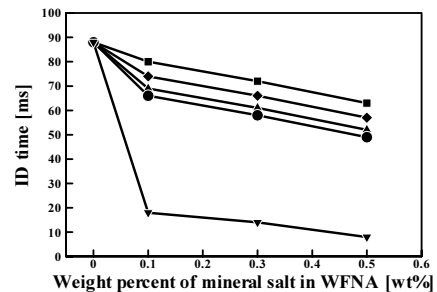


Fig. 7 ID time variations for DMAZ with WFNA containing different weight percentages of nitrate(V) salts at O/F=2.5 (NH₄NO₃ -■-; KNO₃ -◆-; NaNO₃ -▲-; AgNO₃ -●-; LiNO₃ -▼-)[16].

상시키는 연구가 수행되고 있다. 또한, 특정 추진제 조합은 기존 맹독성 추진제와 유사한 점화 성능을 나타냈다. 이러한 연구 결과들은 질산 기반의 접촉점화 추진제를 실제 추진 시스템에 적용시킬 수 있다는 가능성을 보여준다.

2.3 이온성 물질 기반의 친환경 접촉점화 추진제

이온성 물질(ionic liquid, IL)은 물질의 구조와 화학적 작용기를 설계함으로써, 물성을 조절할 수 있다는 장점이 있다. 친환경 추진제에 대한 관심이 증가함에 따라 반응성이 뛰어나고 독성이 낮은 이온성 추진제에 대한 관심이 증가하고 있다. 2.1절과 2.2절에서는 과산화수소와 질산을 산화제로 사용하며 이온성 연료와 산화제의 접촉점화 가능성을 평가하는 연구 사례들을 소개하였으며, 이를 통해 이온성 연료의 우수한 특성이 접촉점화 추진제의 성능 향상에 긍정적인 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

이 절에서는 연료와 산화제 모두 이온성 물질을 사용하여 접촉점화 추진제를 개발한 선행 연구 사례를 소개한다. 중국과학원(Chinese Academy of Sciences, CAS) 연구팀은 브뢴스테드 산 이온성 물질(Brønsted acidic ionic liquids, BAILs)과 [NO₃]⁻를 조합하여 산화제를 개발하였으며, [B₆H₇]⁺를 기반으로 하는 접촉점화성 이온성 물질을 연료로 개발하였다[19]. Table 5는 해당 선행 연구에서 개발한 이온성 추진제와 기존의 접촉점화 추진제의 물성을 비교한 것이다. 이온성 산화제는 O1, O2, O3로 표기하였으며, 기존 접촉점화 산화제인 사산화이질소(N₂O₄), 발연질산(HNO₃)과 비교하였다. 또한, 이온성 연료는 F1, F2, F3으로 나타내었으며, 기존 접촉점화 연료인 모노메틸하이드라진(monomethyl hydrazine, MMH), 비대칭디메틸하이드라진(unsymmetrical dimethylhydrazine, UDMH)과 비교하였다. 표에 나타난 것과 같이 이온성 물질로 구성된 산화제와 연료는 기존의 추진제와 비교하여 높은 분해 온도를 갖는다. 이는 실온에서 분해되는 사산화이질소, 발연질산과 비점이 87.5, 64.0°C인 MMH, UDMH에 비해 열 안정성이 우수함을 나타낸다. 또한, 이온성 추진제의 밀도는 기존 추진제와 유

사하거나 높은 수치를 갖는다. 높은 밀도는 로켓 추진 시스템에서 더 많은 추진제를 탱크에 저장할 수 있음을 나타낸다. 이들이 개발한 대부분의 이온성 추진제는 기존 맹독성 추진제에 비해 상대적으로 우수한 물성치를 보였다. 이와 같은 특성은 실제 로켓 추진 시스템에 이온성 추진제가 적용될 경우 로켓 성능에 유리하게 작용할 것이

Table 5. Physical properties of IL oxidizers and IL fuels[19].

Reactants		T _d [°C]	ρ [g · cm ⁻³]	η [mPa · s]	ΔH _f [kJ · mol ⁻¹]
IL Ox	O1	53.5	1.50	17.8	-518.6
	O2	55.8	1.44	183.3	-625.4
	O3	50.8	1.48	303.7	-531.2
Ox	HNO ₃	r.t.	1.50	0.81	-174.1
	N ₂ O ₄	r.t.	1.44	0.40	-19.5
IL fuels	F1	200.9	0.92	172.5	147.5
	F2	206.8	0.91	264.6	122.9
	F3	190.9	0.95	2498.4	379.8
Fuels	MMH	87.5 ^a	0.87	0.96	54.1
	UDMH	64.0 ^a	0.79	0.49	48.3

T_m: Melting point. T_d: Decomposition temperature (onset). ρ: Density at 25°C. η: Viscosity at 25°C. ΔH_f: Heat of formation. ^a Boiling point.

Table 6. ID tests of the IL/IL combinations (Drop test)[19].

Oxidizers	ID [ms]	Fuels		
		F1	F2	F3
O1	1st	101	247	234
	2nd	98	680	499
	3rd	120	304	341
O2	1st	659	494	626
	2nd	499	880	211
	3rd	917	794	641
O3	1st	952	Smoking	648
	2nd	627	> 10	375
	3rd	716	Smoking	288

다. Table 6을 통해 이온성 연료와 산화제 조합의 점화지연시간을 나타냈다.

액적낙하 실험을 3번 반복하여 측정하였으며, 모든 이온성 추진제 조합이 100 ms 이상의 긴 점화지연시간을 갖는다. 연구 결과에 따르면, 해당 이온성 접촉점화 추진제 조합은 기존 맹독성 추진제와 비교할 만한 점화성능을 구현하지는 못하였다. 그럼에도 불구하고, 이온성 물질만을 이용하여 접촉점화 추진제 개발이 가능하다는 것을 시사한다. 이온성 접촉점화 추진제는 새로운 물질을 설계하여 제작할 수 있다는 관점에서 많은 가능성을 내포하고 있다.

3. 결 론

기존의 접촉점화 추진제로 널리 사용되는 하이드라진 계열의 연료와 사산화이질소는 독성이 심하고 취급과 운용에 많은 위험이 있다. 이에 따라 맹독성 추진제를 대체할 친환경 추진제에 대한 요구가 증가하고 있다. 친환경 접촉점화 추진제는 단순히 독성이 낮은 것뿐만 아니라 기존 추진제 보다 뛰어나거나 동등한 성능을 갖추어야 하고, 이와 동시에 친환경성, 안정성, 저장성 등이 확보되어야 한다.

이 논문에서는 다양한 연구 기관에서 수행된 선행 연구를 바탕으로 친환경 접촉점화 추진제의 연구 개발 동향을 살펴보았다. 2000년대 초반부터 과산화수소, 질산, 이온성 물질 기반의 추진제에 대해 수많은 연구 결과가 발표되었으며, 기존 추진제를 대체할 만한 물성과 점화성능이 확인되었다. 산화제 혹은 연료에 별도의 첨가물을 첨가하여 점화지연시간을 단축시키거나 이온성 연료와 친환경 산화제 조합을 통해 추진제의 성능을 향상시킨 사례들을 확인할 수 있었다. 또한, 이종의 연료를 혼합하여 점화지연시간을 단축시키는 시너지 효과도 관찰할 수 있었다. 그러나 다양한 연구 기관을 대상으로 문헌 조사를 진행하며 추진제의 점화지연시간이 측정 방법의 영향을 받는다는 사실을 발견하였다. 따라서 보고된 점화지연시간이 어떠한 방법으로 측정되었

는지 면밀하게 관찰할 필요성이 있다.

이 논문에서 살펴본 바와 같이 여러 연구 기관에서 친환경 접촉점화 추진제에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 친환경 접촉점화 추진제는 기존의 접촉점화 추진제가 야기하는 문제점을 극복하고 취급 및 운용 과정의 간소화를 제공하여 차세대 우주 추진 시스템에 적용 가능성이 기대된다. 하지만 전 세계적으로 실제 추진 시스템에 적용한 사례는 많지 않다. 친환경 접촉점화 추진제의 가능성을 고려한다면 국내외에서 보다 많은 기초 및 실용 단계의 연구가 필요한 상황이다.

후 기

이 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. (계약번호 UD180046GD).

References

1. Kang, H.J. and Kwon, S.J., "Green hypergolic combination: Diethylenetriamine based fuel and hydrogen peroxide," *Acta Astronautica*, Vol. 137, pp. 25-30, 2017.
2. Kang, H.J., Lee, E.K. and Kwon, S.J., "Suppression of Hard Start for Nontoxic Hypergolic Thruster Using H₂O₂ Oxidizer," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 33, No. 5, pp. 1-7, 2017.
3. Ebelke, W.H., "Hydrogen Peroxide Handbook," AFRPL-TR-67-144, 1967.
4. Pourpoint, T.L. and Anderson, W.E., "Hypergolic Reaction Mechanisms of Catalytically Promoted Fuels with Rocket Grade Hydrogen Peroxide," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 179, No. 10, pp. 2107-2133, 2007.
5. Mahakali, R., Kuipers, F.M., Yan, A.H.,

- Anderson, W.E. and Pourpoint, T.L., "Development of Reduced Toxicity Hypergolic Propellants," *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, AIAA 2011-5631, 2011.
6. Chinnam, A.K., Petrutik, N., Wang, K., Shlomovich, A., Shamis, O., Shem Tov, D., Sućeska, M., Yan, Q.L., Dobrovetsky, R. and Gozin, M., "Effects of closo-Icosahedral Periodoborane Salts on Hypergolic Reaction of 70% H₂O₂ with Energetic Ionic Liquid," *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 6, No. 41, pp. 19989-19997, 2018.
 7. Wang, K., Chinnam, A.K., Petrutik, N., Komarala, E.P., Zhang, Q., Yan, Q.L., Dobrovetsky, R. and Gozin, M., "Iodocuprate-containing ionic liquids as promoters for green propulsion," *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 6, No. 45, pp. 22819-22829, 2018.
 8. Rarata, G. and Florczuk, W., "Novel liquid compounds as hypergolic propellants with HTP," *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 23, No. 1, pp. 271-278, 2016.
 9. Weiser, V., Hürttlen, J., Schaller, U., Imiolek, A. and Kelzenberg, S., "Green Liquid Oxidizers Basing on Solutions of ADN and AN in Hydrogen Peroxide for Hypergolic Propellants with High Performance," *7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences*, EUCASS 2017-364, 2017.
 10. Kang, H.J., Jang, D.W. and Kwon, S.J., "Demonstration of 500 N scale bipropellant thruster using nontoxic hypergolic fuel and hydrogen peroxide," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 49, pp. 209-214, 2016.
 11. Kang, H.J., Kim, H.T., Heo, S.U., Jung, S.W. and Kwon S.J., "Experimental analysis of hydrogen peroxide film-cooling method for nontoxic hypergolic thruster," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 71, pp. 751-762, 2017.
 12. Lee, E.K., Kang, H.J. and Kwon, S.J., "Ignition Characteristics of Green Hypergolic Bipropellant Jet Impingement," *The Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 2014, No. 12, pp. 393-396, 2014.
 13. Kang, H.J., Park, S.H., Park, Y.C. and Lee, J.K., "Ignition-Delay Measurement for Drop Test with Hypergolic Propellants: Reactive Fuels and Hydrogen Peroxide," *Combustion and Flame*, Vol. 217, pp. 306-313, 2020.
 14. Zhang, W., Qi, X., Huang, S., Li, J., Tang, C., Li, J. and Zhang Q., "Bis (borano)hypophosphite-Based Ionic Liquids as Ultrafast Igniting Hypergolic Fuels," *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 4, No. 23, pp. 8978-8982, 2016.
 15. Bittner, D.E., Sell, J.L. and Risha, G.A., "Effect of Jet Momentum Ratio and Equivalence Ratio on the Ignition Process of TMEDA and White Fuming Nitric Acid (WFNA)," *49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Vol. 7, pp. 5891-5902, 2013.
 16. Pakdehi, S.G. and Shirzadi B., "Effect of Some Inorganic Nitrate Salts on the Ignition Delay Time of DMAZ-IRFNA and DMAZ-WFNA Bi-propellants," *Central European Journal of Energetic Materials*, Vol. 15, No. 1, pp. 162-174, 2018.
 17. Pakdehi, S.G. and Shirzadi B., "Specific Impulse and Ignition Delay Time Assessment for DMAZ with Liquid Oxidizers for an Upper Stage Rocket Engine," *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, Vol. 36, No. 6, pp. 171-176, 2017.
 18. Pakdehi, S.G. and Shirzadi B., "The Effect of Some Amines on Ignition Delay Time of Dimethyl Amino Ethyl Azide (DMAZ) and White Fuming Nitric Acid (WFNA),"

-
- Propellants Explosives Pyrotechnics*, Vol. 43, No. 2, pp. 162-169, 2018.
19. Jiao, N., Zhang, Y., Liu, L., Li, H., Shreeve, J.M. and Zhang, S., "SIL-oxidizer/IL-fuel combinations as greener hypergols," *New J. Chem*, Vol. 43, No. 3, pp. 1127-1129, 2019.