

우주발사체 3축 자세제어용 단일액체추진제 추력기 Part 1: 단일액체추진제의 성능특성 및 활용

김정수*† · 박 정* · 정 훈** · 감호동** · 이재원***

Liquid-monopropellant Thrusters for the 3-axis Attitude Control of Space Launch Vehicles Part 1: Performance Characteristics and Application of Liquid-monopropellants

Jeong Soo Kim*† · Jeong Park* · Hun Jung** · Ho Dong Kam** · Jae-won Lee***

ABSTRACT

A performance characteristics and application status of liquid-monopropellants used for 3-axis control thrusters are surveyed, in this paper. Hydrogen peroxide was widely used as monopropellant until mid-1960s, but it is rapidly replaced with hydrazine which has better performance of specific impulse, storability, and so on. Hydrazine is mostly employed as a liquid-monopropellant of satellite, interplanetary spacecraft, and space launch vehicle owing to its moderate performance features.

초 록

본 논문에서는 자세제어용 추력기에 사용되는 단일액체추진제의 성능특성 및 활용현황을 조사한다. 과산화수소는 단일추진제로서 1960년대 중반까지 활발히 사용되었으나, 비추력 성능과 저장성이 탁월한 하이드라진으로 급속히 대체되었다. 하이드라진은 양호한 성능특성을 배경으로 인공위성, 행성간 탐사선, 우주발사체 등의 단일추진제로서 가장 많이 사용되고 있다.

Key Words: Space Launch Vehicle(우주발사체), Flight-axes/Attitude Control Thruster(비행축/자세 제어용 추력기), Orbital Maneuvering System(궤도조정시스템), Liquid-monopropellant(단일액체추진제), Hydrazine(하이드라진), Hydrogen Peroxide(과산화수소)

1. 서 론

단일추진제 추력기 시스템은 화학식 엔진으로서의 비교적 높은 비추력과 매우 광범위한 추력 발생 대역을 가지며, 여러가지 유리한 성능특성을 배경으로 펄스 및 연속추력 작동방식이 요구되는 우주비행체계의 자세제어 및 궤도기동 운

* 부경대학교 기계공학과

** 부경대학교 대학원 에너지시스템공학과

*** (주)한화 대전공장 개발부

† 교신저자, E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

Table 1 Applications of the hydrogen peroxide as a monopropellant in the USA and Russia [3-5]

Country	Quantity×Thrust	Spacecraft	Developed in
USA	-	ASSET	1963-1965
	6×107 N + 6×4.45 N	Mercury	1959
	4×196 N (Pitch/Yaw), 4×62.3 N (Roll)	Scout-B	1960
	H ₂ O ₂ : 4×98 N, GN ₂ : 8×9.8 N	Star-37B Motor	1975
Russia	6×98 N	Soyuz-A-SA	Study 1962
		LEK-SA	Study 1973
		Soyuz-7K-MF6-SA	1976
		Progress OKD	1978-1990
		Soyuz-T-SA	1978-1986
		Progress-M-OKD	1989

용에 적합하다. 비록 이원추진제 시스템에 비해 비추력 성능이 다소 낮기는 하나, 그 구조가 상대적으로 간단하여 작동 신뢰도가 높고, 기술적·경제적으로 초기 연구개발이 수월한 편이다.

일반적으로 단일추진제는 열, 충격, 마찰 등의 외부에너지 입력이나 불순물에 의한 반응자극으로 인하여 폭발로 진행하려는 경향을 보이며, 그와 같은 단일추진제의 폭발성으로 인하여 약 50여종에 이르렀던 초기의 추진제에 대한 연구가 대부분 폐기되었다. 그 중, 적절한 조건에서 안전성이 검증되어 살아남은 단 두 종류의 단일액체추진제가 바로 과산화수소(H₂O₂)와 하이드라진(N₂H₄)으로서, 작동 시에만 촉매에 의하여 분해반응이 이루어지도록 설계하여 시스템의 안전성을 확보하게 되었다. 최근에는 N₂H₄ 보다 빙점이 낮고 배기 생성물이 무독성인 친환경 합성 단일추진제인 HAN(hydroxylammonium nitrate)에 대한 연구가 진행 중이다. HAN은 비추력 성능(현재 200 s 미만)이 충분히 개선되고 화학적 안정성이 확보될 경우에 N₂H₄를 대체할 잠재적 가능성도 갖고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 단일액체추진제에 대한 개발역사, 개념, 그리고 성능특성을 조사/분석하고자 한다.

2. 과산화수소(hydrogen peroxide, H₂O₂)

H₂O₂는 제2차 세계대전을 전후하여 기체발생기와 추력기 분야에서 대표적인 단일추진제로

사용되었다. 외부로부터 과도한 에너지 유입이 없고 저장용기가 화학적 비반응성을 담보하는 재질로 이루어져 있을 경우에 H₂O₂는 비교적 안전하게 사용될 수 있다. 저장 중에 있는 H₂O₂의 자발분해를 최소화하기 위해서는 적절하게 산화피막 처리된 배관, 밸브, 탱크 등이 초청정 상태로 유지되어야 하고 추진제 자체 또한 불순물을 포함하지 않아야 한다. 2차대전 중 독일은 JATO, 어뢰, 항공기 엔진 등의 액체추진 시스템에, 촉매베드를 사용하는 80% 순도의 H₂O₂를 성공적으로 사용하였고, 미국은 우주개발 초창기(1934~1965)에 H₂O₂ 추력기 시스템을 우주비행체 자세제어 시스템으로 탑재하였다. 그러나, 불순물의 자극에 대한 과도한 자발반응성과 낮은 비추력(129~163 s) 성능이 결정적 단점이 되어, H₂O₂는 무독성임에도 불구하고 유독성인 N₂H₄로 급속히 대체되었다.

Table 1은 H₂O₂ 추력기가 탑재된 미국과 러시아의 몇몇 우주비행체 시스템을 보이고 있다. 추력수준은 약 5~200 N으로 비교적 넓은 범위로 활용되었고, 대부분의 적용체계가 1980년대 이전에 개발된 것들임을 확인할 수 있다.

3. 하이드라진(hydrazine, N₂H₄)

N₂H₄는 H₂O₂에 비하여 충격에 덜 민감하고 저장성이 뛰어나다. 또, 동시발화능력, 화학적 분해의 안정성 및 적절한 비추력 성능, 비교적 깨끗한 생성물 기체, 그리고 낮은 화염온도 등으로

Table 2 Characteristics of the monopropellant hydrazine thrusters selected in the USA, EU, and Russia [1,3,7]

Country	Model	Thrust (N)	I _{sp} (s)	Applications
USA	MR-103	1.12	227	Voyager, Intelsat-5, MMAS-3000/-4000/-5000/-7000, Mars Observer ACTS, Magellan, GPS
	MR-111	4.41	229	ERBS, ACTS, Radarsat, Mars Observer, Wind/Polar Landsat MMAS-4000/-5000/-7000, Intelsat-5
	MR-50	22.2	228	SMS, Viking, Metosat, GOES, Voyager, GPS, Intelsat-5, Scatha MMAS-5000, Delta Star, Magellan, Wind/Polar
	MR-106	26.7	232	Radarsat, GPS Block 2R, HAS/Peace Courage, Titan Centaur Atlas Centaur, PAM A/S
	MR-120	90	229	Small ICBM
	MR-107	257	236	Delta-II, Titan-II, Commercial Titan, PAM-D, Pegasus, STEP Small ICBM, HAS/Peace Courage, Atlas
	MR-104	441	239	Voyager, Magellan, DMSP, Tiros N, Landsat
EU	CHT-0.5	0.5	227.3	OST-1/-2, ECS-1~5, Telcom-1A~1C, Marecs-A~B2 Skynet-4A~4C, NATO-4A~4B
	CHT-1	0.32~1.1	223	Globalstar, Jason-1/-2, Rocsat-2/Formosat-2, Theos, TerraSAR-X Radarsat-2, Tandem-x, Calipso, Corot, Cosmo-Skymed-1~4 Galileo GSTB-V2, Herschel Planck
	CHT-2	0.6~2	227	OTS, MCS, ECS, Telecom-1, Giotto, Skynet-4, ISO, Ulysses Meteosat, NATO-4
	CHT-5	1.85~6	228	Skynet-4, NATO-4, Hipparcos, HAPS
	CHT-10	3~10	230	Meteosat, SAX
	CHT-20	7.9~24.6	230	EURECA, HAPS, XMM, Integral, METOP-1~3, Herschel, Planck
	CHT-400	130~455	224	Ariane-V, ARD
Russia	DOT-5	5	230	Several Soviet spacecrafts, satellites, space stations, missiles, and SLV for providing attitude control, stationkeeping, minor trajectory maneuvers, small flight-path corrections, etc.
	DOK-10	10	229.4	
	DOT-25	25	234.5	
	DOK-50	50	229.4	

인해 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 단일추진제이다. 또, 이원추진제의 연료로서도 적용이 가능하여 산화제와 함께 이중모드 추진시스템을 구성할 경우 시스템의 단일화, 효율화를 가져올 수 있는 잠재적 장점도 갖는다[1,2,6].

자세제어용 소형 액체로켓추진기관으로서의 단일추진제 N₂H₄ 추력기시스템은 TRW사(현 Northrop Grumman)에 의해 개발이 시작되었고 그 최초의 비행은 1959년 미국의 Pioneer 탐사선을 통하여 이루어졌다. JPL에 의해 고체촉매가 개발된 이후 N₂H₄ 추력기는 적정수준의 비추력 성능(220~245 s)과 신뢰도 특성을 배경으로 이전의 냉기체 시스템과 H₂O₂ 추력기를 급속히 갈아치웠고, 자세제어와 궤도기동용으로 약 30,000기 이상이 우주공간에 올려졌으며, 오늘날에 이르러 적정수준의 추력, 최소 충격량, 그리고 높은 총 충격량이 요구되는 우주비행체 임무에 가장 널리 적용되고 있다.

미국, 유럽, 러시아의 N₂H₄ 추력기 적용사례 중, 구체적인 정보가 확인된 것만을 Table 2에 요약한다. 인공위성 및 행성간 탐사선 등의 우주비행체부터 발사체(Delta-II, Titan-II, Pegasus, Atlas, Ariane-V 등)에 이르기까지 다양하게 탑재된 N₂H₄ 추력기는 넓은 추력 범위(0.5~450 N)에 걸쳐 개발/활용되었음이 확인된다.

4. 단일액체추진제의 성능특성 및 생산현황

이상에서 언급된 단일액체추진제의 비추력 특성과 물성을 Table 3에 비교한다. N₂H₄의 성능은 밀도-비추력(density impulse)에 있어 H₂O₂에 비해 다소(11%) 저조하나 비추력에 있어 28% 이상 탁월하다. 비추력은 추진 시스템의 성능을 평가하는 최우선 지표 중의 하나로서, 우주비행체의 궤도기동에 요구되는 총 속도증분(ΔV) 혹은

Table 3 Properties of monopropellants [6,8]

Name	I_{sp}^* (lbf·s/lb _m)	Density impulse (lbf·s/ft ³)	Freezing point (°C)	Boiling point (°C)	Hazards [#]
Hydrazine (100%)	245	15,295	1.1	112.8	B, C, F, T
Hydrogen Peroxide	192 ^a	17,140 ^a	-0.6 ^b	150.0 ^b	B, C, D, F
HAN-Glycine-Water	200	17,729	-35.6	-	B, D, F

* in vacuum with nozzle area ratio of 100:1 and chamber pressure of 70 bar (1,000 psia)

[#] B = burns skin; C = corrosive; D = decomposes; F = flammable; T = toxic

^a 98% concentrated hydrogen peroxide; ^b 100% concentrated hydrogen peroxide

Table 4 Developers/manufacturers of small thrusters and their production status [1]

Organization and Location	Production Status
<i>Hydrogen peroxide monopropellant (no longer produced)</i>	
Walter Kidde & Company, Bell Aircraft (today ARC), General Electric	Abandoned
KB Khimmash	Abandoned
<i>Hydrazine monopropellant</i>	
Hamilton Standard (UTC), Royal Ordnance (today ARC)	Active
Aerojet formerly Rocket Research Corp.,	Active
Northrop Grumman (formerly TRW)	Active
KB Khimmash, OKB Fakel	Active
China, Israel (manufacturer not identified)	Active
Bölkow, SEP (today EADS)	Active
Ishikawajima Harima Heavy Industries	Active
Walter Kidde & Company	Disbanded
Hughes Aircraft Company (abandoned this business)	Disbanded

총 충격량, 그리고 총 자세제어 작동시간에 직접적으로 관계한다.

주요 단일추진제 추력기 제작사들의 생산현황을 H₂O₂와 N₂H₄ 추력기에 국한하여 Table 4에 보이고 있는데 H₂O₂ 추력기의 경우 더 이상 생산되지 않는다는 사실을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 우주발사체 자세제어용 추력기에 사용되는 단일액체추진제에 대한 성능특성 및 활용현황을 조사/분석하였다.

(1) 과산화수소는 단일추진제로서 1960년대 중반까지 활발히 사용되었으나, 이후 비추력 성능과 저장성이 탁월한 하이드라진으로 대체되었고, 현재는 우주비행체에의 그 활용례를 찾아보기 어렵다.

(2) 하이드라진은 과산화수소에 비하여 충격에 덜 민감하고 저장성이 뛰어나다. 또, 동시발화능력, 화학적 분해의 안정성 및 적절한 비추력 성

능 등의 배경으로 인공위성, 행성간 탐사선, 우주발사체 등의 단일추진제로서 현재까지 가장 많이 사용되고 있다.

참 고 문 헌

1. Sutton, G. P., History of Liquid Propellant Rocket Engines, AIAA, 2006
2. Sutton, G. P., Rocket Propulsion Elements, 7th ed., John Wiley & Sons Inc., 2001
3. www.astronautix.com
4. Rocket & Space Technology, www.braeunig.us
5. www.spacelaunchreport.com
6. 한국추진공학회, 항공우주 추진기관 개론, 한티미디어, 2008
7. Astrium, <http://cs.astrium.eads.net>
8. Wernimont, E. J., "System Trade Parameter Comparison of Monopropellants: Hydrogen Peroxide vs Hydrazine and Others," AIAA-2006-5235, 2006