

우주분야에서의 Hydrazine 적용현황 및 발전방향

김인태* · 이재원* · 장기원* · 유명종**

Technology trend & its future for the space application of hydrazine

In-tae kim* · Jae-won Lee* · Ki-won Jang* · Myoung-jong Yu**

ABSTRACT

Anhydrous hydrazine and its methyl derivatives MMH and UDMH have been safely used as monopropellant and bipropellant fuels in thousands of satellites and expendable launch vehicles. Since KOMPSAT program, We have been developing skills on the hydrazine propulsion system for several years. This paper presents an overview of the hydrazine for the space application - propellant overview, material compatibility, handling cautions and the future of hydrazine systems.

초 록

하이드라진 추진시스템은 위성 및 발사체 추진시스템에 적용되는 액체추진제 중에 가장 안정적이고 신뢰도가 높은 추진제로 평가받고 있다. 현재 국내에서는 다목적실용위성 사업을 수행하며 단일추진제로서 하이드라진을 운용 및 시험한 경험을 갖고 있으며 이를 바탕으로 하이드라진 추진제에 대한 소개 및 Material Compatibility, 운용 및 취급시의 주의사항 그리고 향후의 하이드라진 시스템의 발전방향 등에 대해 간략히 언급하였다.

Key Words: Hydrazine(하이드라진), Monopropellant(단일추진제), KOMPSAT(다목적실용위성), Material Compatibility(물질 호환성), Spacecraft Propulsion(위성 추진)

1. 서 론

액체추진제로 이용되는 하이드라진(Hydrazine)의 경우 과거 수십 년간 수많은 위성과 발사체, 우주왕복선에 이르기까지 추진시스템의 연료로 사용되었다. 여기에는 적용 목적에 따라 단일추진제(Monopropellant)에 적용되는 무수 하이드라진

(Anhydrous hydrazine)과 이원추진제(Bipropellant)에 사용되는 MMH(Monomethyl-hydrazine)와 UDMH(Unsymmetrical dimethyl-hydrazine) 등으로 구분할 수 있다. 그러나 광범위하게 적용될 수 있는 장점과 효용성에도 불구하고 까다로운 취급 및 운용절차, 고비용 등의 문제로 인해 국내에서는 아직까지 널리 알려지지 못하고 있는 현실이다. (주)한화과 한국항공우주연구원은 다목적실용위성(KOMPSAT) 개발사업을 수행하면서 위성의 자세제어를 담당하는 단일추진제 추력기 및 추진시스템을 국산화개발 및 조립/시험을 수

* (주)한화

** 한국항공우주연구원

연락처, E-mail: itkim9057@hanwha.co.kr

행하였다. Fig. 1에 성공적인 개발 및 시험을 완료하여 올 7월에 발사에 예정인 다목적실용위성 2호의 형상과 여기에 적용된 하이드라진 추력기의 모습을 볼 수 있다. 특히 다목적실용위성에 적용되는 추력기의 경우 무수 하이드라진을 추진제로 사용되며 국산화 개발 추력기의 인증시험(Acceptance Test)을 수행하기 위해 기 구축된 추력기 진공연소시험설비(Vacuum Hot-fire Test Facility, VHTF)에서 하이드라진을 운용 및 시험한 경험이 있다. 이를 근거로 단일추진제로 적용되는 무수 하이드라진에 대한 소개 및 compatibility, 운용 및 취급시 유의점 그리고 앞으로 우주분야의 로켓과 위성의 추진제로서 하이드라진의 발전방향 등에 대해 외국 문헌 및 자료 조사 등을 바탕으로 기술하고자 한다.

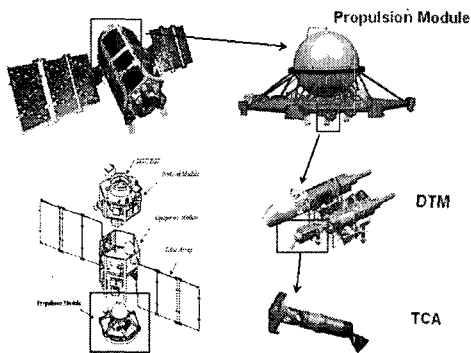


Fig. 1 KOMPSAT-2 Hydrazine Propulsion System

2. 하이드라진에 대한 소개

2.1 단일추진제로서의 하이드라진

위성 및 로켓 추진제에 적용되는 하이드라진인 경우 Military Specification(MIL-PRF-26536E)에 의거 최소 98.5%의 하이드라진을 포함해야 한다. Table 1과 2에 MIL-SPEC에서 요구하는 하이드라진의 화학적/물리적인 물성치에 대한 값을 제시하였다. 이에 근거해 현재 다목적실용위성에 적용되는 추진제의 경우에도 순도 98.5% 이상의 Monopropellant급의 하이드라진을 사용하고 있다[1].

Table 1 Chemical and physical properties of MIL-SPEC hydrazine(MIL-PRF-26536E)

Properties	Limits		
	Standard Grade	Mono-propellant	High Purity
Hydrazine (% by wt)	98 min	98.5 min	99.0 min
Water (% by wt)	1.5 max	1.0 max	1.0 max
Aniline and other (% by wt)	-	0.535 max	0.3624 max

하이드라진의 취급 및 이송시 외부의 불순물(수분, 대기 포함)과의 접촉에 유의해야 한다. 특히, 위성에 장착되는 비행용(Flight Model, FM) 추력기의 연소시험시 이러한 주의가 각별히 요구되며 불순물이 포함된 추진제가 사용된 경우에는 작게는 동일한 추력기라 하더라도 지상시험의 추력성과 실제 우주에서 운용되는 성능이 달라질 수 있으며 크게는 추력기 내부의 Feed tube나 Catalyst bed의 막힘 등으로 인해 손상 및 파손까지 초래할 위험이 있다. 그리고 국외의 하이드라진 제조업체나 공급업체를 통해 추진제를 받게 되는 경우에는 제공되는 성적서 등을 통해 순도확인 등이 가능하지만 장기간 시험설비 및 저장 탱크 등에 보관된 추진제의 경우 재시험시 순도 및 성분 등에 대한 분석이 요구된다고 할 수 있다.

하이드라진의 물성치는 Table 2에서 보는 바와 같이 물(H₂O)과 유사하며 어는점(Freezing Point)의 경우 1.5°C이므로 위성체 추진제 라인의 경우 전기적인 히터를 설치하여 어는점 이상으로 유지하지만 지상시험 시설의 경우 그와 같은 요구조건은 아니더라도 이에 대한 주의가 요구되며 특히 동절기의 시험 및 보관시에는 이에 유의하여 취급해야 한다. 현재 당사의 연소시험설비의 경우, 시험설비 내부의 난방장치 뿐만 아니라 추진제 탱크에 냉/온 온도조절이 가능하도록 하여 운용하고 있다.

Table 2 Physical Properties of Hydrazine [ref 2]

Properties	Metric Units
Boiling Point	113.5°C
Freezing Point	1.5°C
Liquid Density	1.008 g/cc at 20°C
Critical density	0.231 g/cc
Critical pressure	$1.47 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
Critical temperature	380 °C
Vapor pressure	$4.83 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ at 4.4°C
Auto-ignition temp.	270 °C
Viscosity	1.2 centipoises at 5°C

2.2 Material Compatibility

우주분야에 적용되는 대부분의 액체추진제가 그러하듯이 하이드라진의 경우에도 물질호환성 (Material Compatibility)이 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 특히 우주공간에서 장시간 운용되는 위성체의 경우 추진제와 접촉하는 부품 및 물질에 대한 반응이나 호환여부가 전체 시스템에 증대한 영향을 초래할 수 있다. 그러나 대부분 액체추진제의 Compatibility와 마찬가지로 관련된 내용과 방법에 대한 사항이 광범위하므로 구체적인 사항은 참고문헌 등을 통해 확인할 수 있으며 특히 중요하게 고려되어야 할 부분과 당사에서 연소시험설비 관련해서 경험한 사항들을 위주로 간략하게 언급하고자 한다. 하이드라진과의 화학적 반응은 물질기체의 고유한 성질(부식, 연성, 용해성 등)이나 하이드라진의 분해율(촉매 반응)의 저하를 가져올 수 있으며 결과적으로 부품들의 기능 저하를 유발하게 된다. 물질호환성을 언급할 때 시스템의 조건과 환경 등에 대해 주의 깊은 관찰이 필요하며 특히 상태(Phase), 추진제의 농도(Concentration) 및 순도(Purity), 물질의 표면적(Surface Area), 시스템의 압력과 온도 조건 등이 중요하게 고려되어야 한다. 물질을 크게 금속재와 비금속재로 구분할 수 있으며 금속에 대한 하이드라진의 영향은 외형적 변화를 포함하여 부식(Corrosion)의 정도로 측정하며 비금속의 경우 물질의 기계적/물리적인 물성치의 변화양으로 판단한다[2].

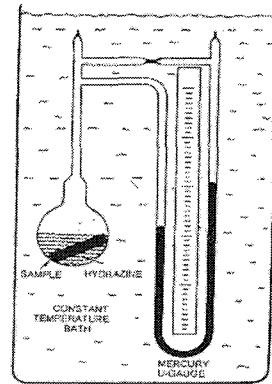


Fig. 2 Apparatus for compatibility testing of hydrazine [ref 3]

지금까지 문헌으로 소개된 액체 하이드라진과의 compatibility가 좋은 금속재로는 Titanium 6Al-4V, Aluminum Al-6061, -2014, -2219 그리고 Stainless Steel-301, 304, 304L, 321 등이며 이러한 금속 재질들은 추진제와의 호환성 검사를 통해 연간 25 μm 미만의 부식율을 보여주는 것으로 알려져 있다. 하이드라진의 compatibility test에는 여러 가지 방법이 사용되고 있으나 가스발생측정법(Gas Evolution Measurement)이 가장 널리 이용되고 있다. 이 방법은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 일정한 온도가 유지되는 수조안의 밀폐된 용기 안에 시험하고자 하는 sample을 놓고 하이드라진을 담근 후 발생하는 가스의 양을 측정하는 방법이다. 하지만 이러한 방법들의 단점으로는 실제 위성체에서 금속재가 적용되는 시간만큼의 검사시간을 필요로 한다는 점이다. 따라서 국내의 경우 실제 적용되는 핵심 물질에 대해서는 장기간 반응시험이 필요하겠지만 모든 물질에 대해서 이러한 검사를 직접 수행하는 것보다는 기존의 해외 문헌자료 등의 Database를 활용한 적절한 소재선정이 보다 효율적이라 할 수 있겠다. 참고적으로 Table 3은 대표적인 2개의 금속재질에 대해 이러한 방법으로 수행한 Gas Evolution Rate을 나타낸 것으로 시험기간이 10년 이상씩 소요되었음을 확인할 수 있다 [3].

비금속 재질과의 compatibility로 고려되어야 할 사항으로는 금속재와 마찬가지로 여러 가지가 있

으나 당사의 경험을 바탕으로는 추진제가 접촉하는 부품의 O-ring, Seat material, 그리고 Lubricant 등이 특히 중요시된다. 이에 대한 사항들도 참고문헌 등을 통해 추천되는 재질과 피해야 할 재질 등에 대해 보다 자세히 살펴 볼 수 있으며 당사의 경우에도 이러한 내용들을 고려하여 최적의 재질을 선정, 운용하고 있다.

Table 3. Gas Evolution Rate of Metals in Hydrazine

Metal	Temp., [K]	Years in test	Micromols of gas/cm ²	Pressure rise factor
Ti-6Al-4V	295	10.9	11.10	0.14
Ti-6Al-4V	313	12.1	15.51	0.17
SUS-304L	295	10.9	24.64	0.31
SUS-304L	313	10.9	45.78	0.58

3. 운용 및 취급시 유의점

3.1 하이드라진 운용 (Hydrazine Handling)

하이드라진의 운용에는 특별한 장비 및 절차가 요구된다. 이를 위해 필수적으로 고려되어야 할 몇 가지 Engineering guideline을 Table 4에 언급하였다[2]. 이러한 design guideline에 의거해 유럽의 EADS에서 운용하고 있는 Hydrazine (Monopropellant) Loading Cart에 대한 모습을 Fig 3에 나타내었으며 이의 형상은 위성체의 Launch Campaign시 활용되며 지상에서의 취급 및 이송시에도 동일한 원리와 절차에 의거 취급되어야 한다[4].

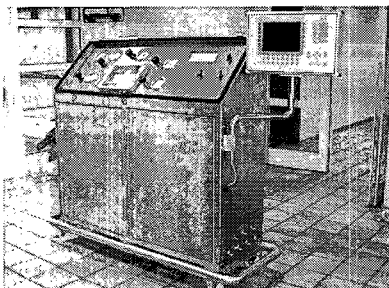


Fig. 3 Hydrazine Loading Cart [ref 4]

Table 4. Engineering Design Guidelines for Hydrazine

Storage Tank	employ sump and dip leg design
Joints & Connections	use welded connections
Components	choose commonly used relief and control valves
Water Supply	ensure that adequate water is available
Explosion-proofing	follow electrical and fire codes
Emergency equipments	emergency shower, eye wash, breathing-air station, sprinkler system
Nitrogen padding	maintain an inert atmosphere
Good housekeeping	keep combustible materials separate
Material compatibility	consider metals, soft goods, and lubricants
Maintenance	components can be removed & repaired

3.2 취급시 유의사항

하이드라진의 취급시 최대한 대기와의 접촉을 방지해야 하며 추진제의 이송을 원활하게 하기 위해 진공시스템을 적용하여 수행하고 이송 후에는 다시 GN₂를 사용하여 가압하여 보관 및 취급한다. 추진제과 접촉한 모든 부품의 경우 GN₂를 이용해 퍼지(purge)하며 진공시스템을 통해 건조된다. 현재 당사의 시험설비 시스템 및 취급절차(Handling procedure)도 외국의 문헌조사 및 규격(MIL-PRF-26536E)에 근거하여 적용 및 보완하여 운용하고 있다. 향후에 이러한 사항들은 발사장에서의 위성체 추진제 충전 및 추진제 보관/운송 절차에도 적용가능하리라 판단된다.

하이드라진의 경우 물질안전보건자료(MSDS, Material Safety Data Sheet)에서 제시하는 바와 같이 장시간의 노출시 인체에 매우 유해한 물질로 분류되어 있다. 특히 미국 산업안전보건법에 의거 허용기준치가 0.1 ppm에서 점차 강화되고

있는 실정이다. 따라서 이의 취급/운용시에는 산소흡입마스크 및 보호의/보호장갑 등의 착용이 필수적으로 요구되며 누출시 즉각적으로 탐지 및 확인이 가능한 하이드라진 검출기(Hydrazine Detector)의 운용 및 정기적인 모니터링이 중요하다 할 수 있다. 현재 당사의 시험설비에서도 이에 대비한 안전보호구 및 누출을 대비한 이중의 검출시스템을 운용하고 있다.

4. 하이드라진 추진시스템의 발전방향

2005년 3월 31일, 미국의 하이드라진 생산업체인 Arch Chemical사는 미국 정부의 우주프로그램용으로 약 \$149 Million(USD)에 해당하는 추진제 공급계약을 체결하였다. 이 계약으로 Arch Chemical은 향후 20년 동안 미정부의 하이드라진 추진제에 대한 생산 및 보관, 분배 그리고 취급에 대한 장기/대용량 공급계약을 수주하였으며 이는 군 전략미사일 및 군사 통신위성, 관측 위성, GPS 발사로켓과 NASA의 우주왕복선, 그리고 F-16 전투기 등에 사용될 예정이다[5]. 이러한 언론매체에서 보여주듯이 그리고 과거 수십년 동안의 우주 프로그램을 통해 검증되었듯이 하이드라진 추진시스템(위성의 자세제어, 발사체의 RCS 등)은 매우 안정적이며 신뢰성이 높은 시스템으로 입증되었다. 그리고 국내의 경우를 보더라도 다목적실용위성과 통신해양기상위성 프로그램에서도 하이드라진이 사용된 추진시스템을 적용하였거나 적용될 예정이다. 하지만 앞서 살펴본 바와 같이 material compatibility와 toxicity, flammability 그리고 safety 면에서 다른 추진제와 대비해 특별한 주의와 절차가 요구되고 있는 것이 현실이다. 따라서 이의 대안으로 성능 면에서는 하이드라진 시스템과 동등하지만 기존의 단점들을 극복한 "green propellant"에 대한 노력과 연구가 여러 대학과 기업들을 중심으로 진행되고 있다. 참고적으로 연구가 진행 중인 green propellant에 대한 대표적인 예는 다음과 같으며 참고문헌 등을 통해 구체적인 내용을 살펴 볼 수 있다[6, 7].

- HAN(hydroxylammonium nitrate) based
- Nitrous oxide monopropellant
- Kerosene/hydrigen peroxide bipropellant
- Hydrogen peroxide monopropellant

하이드라진의 단점을 보완한 green propellant가 새로운 대안으로 제시되고 있지만 신뢰성을 최우선으로 하는 우주 프로그램에서 활용되기 위해서는 앞으로 수많은 실험위성 및 지상검증 시험이 뒷받침되어야 한다. 아직 우주분야에서의 기본 인프라 및 경험이 부족한 국내의 실정으로는 하이드라진을 적용한 추진시스템 및 추진제에 대한 분석 및 연구가 더욱더 요구된다고 할 수 있다. 특히 대형의 복합적인 위성체계에서 점차적으로 소형화, 비용절감이 요구되는 세계의 추세에 발맞추어 단순하면서도 정밀한 자세제어를 위한 추진시스템으로 1 Newton 이하의 하이드라진 추력기를 적용한 위성시스템의 필요성이 증대된다고 할 수 있다. 실제로 프랑스 CNES 등에서 DEMETER과 PARASOL 마이크로 위성 프로그램에서의 하이드라진 추진시스템이 좋은 예라고 할 수 있다[8, 9]. CNES에서 주관하는 이 프로그램의 경우 과학탐사와 기술검증을 위해 개발되었으며 저렴한 비용으로 더 많은 발사비행 기회를 목적으로 한다. 이러한 마이크로위성의 경우 위성체 총중량이 100kg 내외로 Ariane-5와 같은 대형발사체의 보조탑재체(Auxiliary Payload) 또는 DNEPR, PSLV와 같은 소형 발사체에 탑재가 가능하다. 지구 관측 임무 및 중량, 비용에 대한 요구조건을 만족하기 위해 선택된 추진시스템이 하이드라진 시스템이며 이 프로그램의 경우 6 liter급의 추진제 탱크와 1

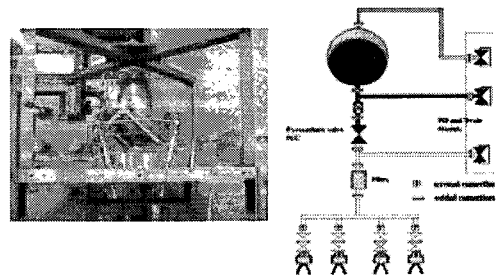


Fig. 4 The DEMETER Propulsion System [ref 8]

Newton급의 추력기 4기가 사용된다. Fig. 4에 DEMETER에 적용된 추진시스템의 형상을 보여 주고 있으며 국내에서의 이러한 비용효과가 큰 (cost-effective) 프로그램의 경우 저비용으로 더 많은 기회, 그리고 다양한 우주 프로그램의 활성화 및 저변확대에 도움이 되리라 믿어 의심치 않는다.

5. 결 론

과거 수십년 동안 하이드라진은 위성 및 발사체 추진시스템에서 가장 안정적이고 신뢰도가 높은 추진제로 평가받고 있으며 현재도 광범위하게 사용되고 있다. 국내에서도 다목적실용위성에 하이드라진 시스템이 적용되고 있으며 향후 통신해양기성 등에도 이원추진제로서 사용될 예정이다. 그러나 우주분야에서의 광범위한 적용에도 불구하고 아직 국내에서는 하이드라진 추진제에 대한 기초 연구 및 분석/시험 등이 거의 전무한 현실이다. 따라서 본 논문에서는 다목적 실용위성 사업을 수행하며 연구하고 경험했던 내용들과 해외 문헌자료 등을 참고하여 하이드라진에 대한 소개 및 Material compatibility, 운용 및 취급시의 유의점 그리고 향후 하이드라진 추진시스템의 발전방향 등에 대해 간략히 살펴 보았다. Material compatibility와 toxicity, flammability 그리고 safety 면에서 다른 액체 추진제와 대비해 특별한 주의와 절차가 요구되고 있어서 이의 단점을 보완한 green propellant가 새로운 대안으로 제시되고 있지만 신뢰성을 최우선으로 하는 우주 프로그램에서 활용되기 위해서는 앞으로 더 많은 연구와 시간이 필요하다고 할 수 있다. 아직 우주분야에서의 기본 인프

라 및 경험이 부족한 국내의 경우 새로운 추진제 및 시스템에 대한 연구도 필요하지만 하이드라진을 적용한 추진시스템 및 추진제에 대한 분석/연구가 더욱더 요구된다고 할 수 있다. 본 논문의 광범위한 주제로 인해 보다 자세한 사항들은 추후에 좀 더 연구가 진행된 후에 기술하고자 하며 간략하게나마 하이드라진 추진제에 대한 소개가 되었으면 한다.

참 고 문 헌

1. Military Specification, Propellant, Hydrazine, MIL-P-26536E
2. Fire, Explosion, Compatibility and Safety Hazards of Hydrazine, AIAA SP-084-1999
3. Schmidt, E. W., Hydrazine and its Derivatives, 2nd Edition, 2001
4. EADS Space Propulsion Homepage, <http://cs.space.eads.net/sp/>
5. Arch Chemical Homepage News, <http://www.archchemicals.com/Fed/HDR>
6. Dennis, M., "Development and Testing of New, Han-based Monopropellants in Small Rocket Thrusters", AIAA-98-4006
7. Gibbon, D., "Energetic Green Propulsion for Small Spacecraft", AIAA 2001-3247
8. Darnon, F., "DEMETER and PARASOL Micro-Satellite: Flight Performance of the 1N Hydrazine Propulsion System", AIAA 2005-3953
9. Cadiou, A., "An Overview of the CNES Propulsion for Spacecraft", 4th International Space Propulsion Conference, 2004