

슬러리와 젤 추진제의 기술개발 동향

정병훈 · 고승원 · 황갑성 · 한정식 · 홍명표

Technical Review of Slurry and Gelled Propellant

Byung-Hun Jeong · Seung-Won Ko · Kab-Sung Hwang ·
Jeong-Sik Han · Myung-Pyo Hong

ABSTRACT

A technical review of current slurry and gelled propellants is presented. In advanced countries, it is confirmed that these propellants have high specific impulse, density, excellent handling, safety characteristics and thrust controllability through research since 1950s. Substantial researches have been pursued to characterize the rheological properties, spray/combustion phenomena and propulsion system design for the gel propellant characteristics. Slurry and gelled propellants are developing actively to applicate both military and space propulsion fields such as tactical missile, air-breathing ramjet, pulse detonation engine, and combined cycle engine of future propulsion mode.

초 록

슬러리와 젤 추진제에 대한 최근기술동향과 주요기술을 분석하였다. 선진국에서는 1950년대 부터 연구를 통하여 이러한 추진제가 가진 높은 비추력과 밀도, 우수한 취급성, 안전성, 그리고 추력조절 가능성과 같은 장점을 확인하였다. 추진제의 유변특성, 분무/연소 현상, 그리고 추진제 특성을 고려한 추진시스템 설계 등이 활발히 연구 되었다. 이 추진제는 군용 전술미사일 추진기관외에 민수용으로 램제트, 펄스폭발 엔진과 차세대 추진방식인 복합엔진에도 적용을 목표로 개발되고 있다.

Key Words: Slurry propellant (슬러리 추진제), Gelled propellant (젤 추진제), Rheological property (유변학적 특성), Spray (분무), Combustion (연소), Safety (안전도),

1. 서 론

일반적으로 슬러리 추진제는 액체연료에 고체

입자를 균일하게 분산시킨 추진제를 의미하며 여기에 젤화제를 첨가하여 젤화시킨 것을 젤 추진제라고 하는데 특별히 구분하지 않고 사용하기도 한다. 이러한 추진제의 장점은 다양한 고체입자를 첨가할 경우 순수한 액체연료만으로 얻을 수 없는 고밀도와 고발열량을 얻을 수 있

국방과학연구소 추진기관부
연락처, E-mail: jeongbh@add.re.kr

다. 또한 젤화제를 첨가하여 액체상태의 연료 및 산화제를 젤화시킴으로 보관성을 향상시켜 만일의 누출에 의해서 발생하는 안전문제와 독성을 줄일 수 있다.

슬러리와 젤 추진제는 1950년대부터 연구가 시작되었다. 1990년대에 US Army AMCOM의 FMTI program에서 젤 추진제를 적용한 tactical small motor의 비행시험 성공을 발표하였으며, 우주항공용으로 극저온 금속첨가 수소 젤 연료 등의 연구가 시작되었다[1]. 그리고 2000년대에 미국 NASA에서는 젤 추진제를 turbo engine-PDE(Pulse Detonation Engine)에 적용하는 연구를 진행하고 있다[2]. 프랑스의 CHEOPS program에서는 보론-슬러리 추진제를 공기흡입식 엔진에 성공적으로 적용하였으며 독일, 영국 등에서도 활발히 연구하고 있다[1].

일반적으로 슬러리/젤 추진제는 연료와 산화제를 공급하여 연소시켜 추력을 얻는 bi-prpellant system으로 운용되어 고체추진제에서는 불가능한 추력조절이 가능하다. 흡입된 공기를 산화제로 이용하는 램제트 엔진, 펄스폭발 엔진에 젤 연료를 사용하거나, 젤 연료와 젤 산화제를 모두 탑재하여 점화/소화/재점화가 가능한 전략 미사일인 smart propulsion, 그리고 우주항공용 추진기관에 적용이 가능하다. 최근에 슬러리/젤 추진제는 차세대 추진방식 개념으로 고체로켓-공기흡입식 엔진이 결합된 복합엔진에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다[3].

2. 기술 동향

2.1 제조

슬러리/젤 추진제 제조를 위한 연료로는 탄화수소계(RP-1, Jet A-1등), 히드라진계(MMH, UDMH등), 수소 등을, 산화제로는 질산계(IRFNA, RFNA등), N₂O₄, 과산화수소 등을 사용하며 첨가하는 고체입자로는 수 μm 이하의 알루미늄, 탄소, 보론 등이 있다. 분산제로 계면활성제를 이용하고, 젤화제는 무기계로 실리카와 금속산화물을 사용하며 유기계로 유기합성물,

고분자 등을 주로 사용한다. 표 1에서 RP-1의 경우 실리카로 젤화함에 따라 성능은 액체보다 약간 낮고 점도가 증가하지만 유출시 흐르지 않아 독성증기 발생이 적고, 충격시 안전하다. RP-1에 Al을 55% 첨가한 젤 추진제는 부피당 비추력이 대폭 증가하는 장점이 추가된다.

Table 1. Comparisons of RP-1/O₂ propellants

Type	RP-1 liquid	RP-1 gel	RP-1/Al gel
Isp(sec)	324	320	317
density	0.773	0.776	1.28(55% Al)
$\rho \times Isp$	250	248	405
Viscosity	Low	High	High
Toxicity	High	Low	Low
Bullet Impact	Full load burns	Interface burns	Interface burns

실리카 젤화제를 5% 사용시 대표적인 젤 추진제 조성의 성능과 용도는 표 2에 나타내었다.

Table 2. Performance of gelled propellants

Type	Isp (sec)	Application
MMH/IRFNA	270 ~ 290	Tactical missile
RP-1/O ₂	310 ~ 330	Air breathing system
MMH/N ₂ O ₄	300 ~ 340	Space propulsion
H ₂ /O ₂	420 ~ 470	Space propulsion

제조된 추진제의 분산특성에 영향을 주는 인자로는 원료의 종류 및 함량, 혼합 순서, 공정조건 그리고 혼합장비의 특성에도 영향을 받는데 최근에는 음파를 활용하여 혼합을 개선하는 연구가 시도되고 있다[4]. Fig. 1에는 제조된 kerosene 젤, kerosene/알루미늄 젤, kerosene/카본 젤의 모양을 나타내었다.

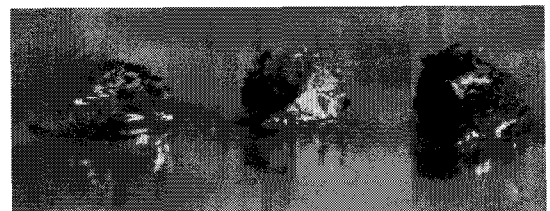


Fig. 1. Pictured from left to right are kerosene, kerosene/Al, and kerosene/carbon gels

고체입자의 분산특성을 측정하기 위하여 빛의 투과도 차이에 따른 농도판별, 밀도측정 등이 있으나 최근에는 레이저 투과 및 산란에 의한 분산특성 파악이 활용되고 있다[5]. 추진기관의 출발 및 비행 중 가속시 슬러리/젤 추진제에 작용하는 외력은 증가하여 중력가속도의 약 50~100배에 해당하는데 이러한 조건하에서도 고체입자는 균일한 분산이 유지되어야 목표로 하는 성능을 얻을 수 있다.

2.2 유변특성

고점도와 비점탄성인 슬러리 추진제에 비해 젤 추진제는 저장상태에서는 점탄성을 가진 고체상태를 유지하며 연료공급시 압력에 의해 가해지는 전단외력에 의해 액체상태로 변환된다. 유변학적으로 전단속도 증가에 따라 전단응력과 점도가 감소하는 non Newtonian pseudoplastic shear thinning 특성을 나타내며 또한 시간에 따라 점도가 감소하는 thixotropic 특성을 보인다. 제조된 젤 추진제의 유변학적 특성을 측정하고 전단속도에 따른 점도를 예측할 수 있는 관계식을 도출하여 분사기 출구에서의 분무특성을 분석하여 설계에 반영하는 것이 중요하다. Fig. 2에는 여러 종류 젤 추진제의 유변특성을 나타내었는데 히드라진 젤의 경우 점도가 비교적 낮은 것을 알 수 있다[6].

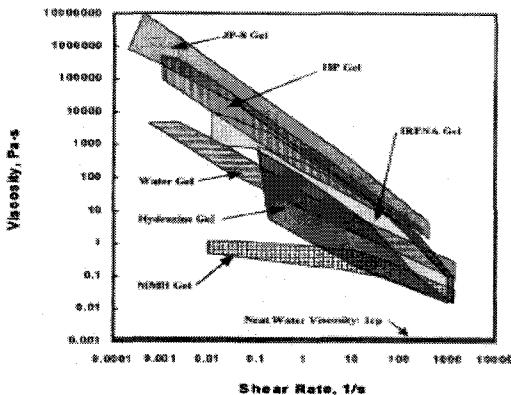


Fig. 2. Range of experimental flow curves for various gelled propellants

2.3 분무특성

노즐에 의한 젤 추진제의 분무특성은 주로 분무입자의 입도에 의해 결정되는데 분사기 형태와 젤 추진제 종류에 크게 영향을 받는다. 일반적으로 젤 추진제는 점도가 낮을수록, 공기와 젤의 비율이 증가할수록, 젤화제 함량이 적을수록, 분무입도는 작아져서 연소성 조절이 용이해진다.

Fig. 3에는 2개의 impinging jet injector를 사용하여 알루미늄을 35% 함유한 Jet A-1 젤의 흐름속도가 88m/s일 때 분무형태를 나타낸 것으로 작은 입도로 고르게 분무되는 것을 알 수 있다. 최근에는 광학장치를 이용하여 분무 입도를 분석하고 실험변수들과의 상관관계식 도출을 통한 정량적 해석을 시도하고 있다[7].

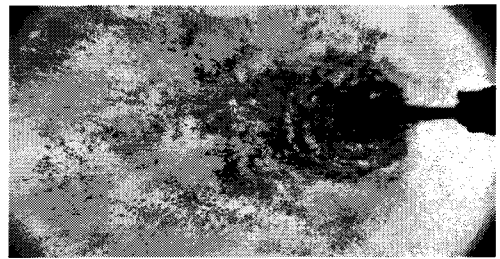


Fig. 3. Shadowgraph image of Jet A-1/35% Al gel at Ugel = 88m/s

2.4 연소특성

액체에 비해 젤 추진제의 연소는 젤화제로 인해 증발열이 증가하므로 점화 지연 시간이 증가하고 연소속도가 낮아진다. 여러 연구자에 의해 젤 droplet의 연소현상을 분석한 결과 Fig. 4에서와 같이 젤화제는 비등점차이로 인하여 젤화제 층을 형성하며 이로 인해 내부에 액체연료의 증발에 의한 기포를 형성하는 것이 밝혀졌다[8,9].

반면에 무기계 젤화제 사용시 연소특성은 다르게 나타나며, 연소시 미 연소되기 때문에 성능저하를 가져온다. 고체입자를 함유한 젤 추진제는 연소시 비등점차이에 의해 고체가 남아 뭉침으로 분사계통에서 흐름을 막는 plugging 현상이 나타나며 이를 개선하기 위해 FSO(Face shut off) 분사기를 사용한다. 첨가제나 분사시스템의 개선을 통하여 연소효율을 증가시키는 것이 필요하다.

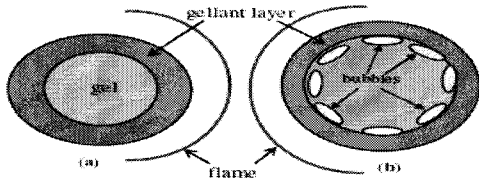


Fig. 4. Formation of bubbles inside a burning gel droplet

2.5 안전도 특성

젤 추진제는 젤 특성으로 인하여 연료탱크 내에서 출렁거림 현상이 없어 비행안정성에 유리하다. 안전도 특성을 비교한 표 3에서 젤 추진제는 고체추진제에 비해 안전하며 액체추진제와 유사한 것을 알 수 있고, 누출시 Fig. 5와 같이 흐름반경이 대폭 감소하며 증기압의 감소로 인해 독성 증기의 발생이 액체추진제보다 적은 장점이 있다[10]. 또한 젤 추진제는 첨가제로 중화시켜 매립하는 친환경적인 폐기가 가능하다.

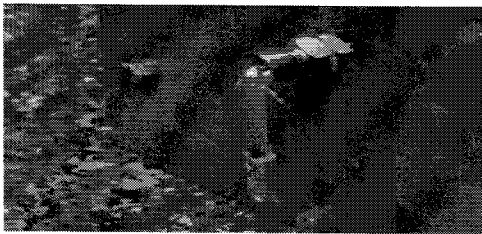


Fig. 5. Picture of gelled propellant spill

Table 3. Safety comparisons of propellants

Type	Gels	Liquid	Solid
Shock	Insensitive	Insensitive	Detonation or deflagration
ESD	Insensitive	Insensitive	Detonation or deflagration
Ignition	Prevented by design	Prevented by design	Catastrophic events
Cookoff	Load burns until depleted	Load burns until depleted	Uncontrolled burn
Spill / Toxicity	Vaporization rate slow	Lethal vapor generated	Vaporization rate slow
Combustion	No toxic products	No toxic products	Lethal levels of HCl

3. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 젤 추진제는 유연 특성으로 인해 흐름시 정확한 조절문제, 높은 압력이 요구되는 점과 연소 효율이 개선되어야 하는 문제점이 있다. 그러나 우수한 안전성, 고추력과 고 밀도, 그리고 추력조절 가능성의 장점으로 인해 선진국에서는 젤 추진제에 대한 많은 연구가 진행되어 일부는 체계적용 단계에 있으며 향후 추진기관 체계발전에 효과적으로 기여할 것 이라고 판단된다.

참 고 문 헌

1. B. Natan et al., "The Status of Gel Propellants in Year 2000", in Combustion of Energetic Materials, K.K. Kuo and DeLuca, editors, Begell House, pp.172-194 (2001)
2. B. Palaszewski et al., "Metallized Gelled Propellants Combustion Experiments in a PDE engine", NASA/TM2006-214119, (2006)
3. 한정식, 정병훈, "램제트용 연료의 특성연구", TEDC-121-041238, 국방과학연구소, (2004)
4. S. L. Coguill., "Synthesis of Highly Loaded Gelled Propellants", Resodyn report supported by U.S. AMCOM, (2003)
5. R. Pein., "Propellant Problems in Gel Propulsion", ICT Jahrestagung, (2004)
6. S. Rahimi et al., "Preparation and Characterization of Gel Propellants and Simulants", AIAA 2001-3264, (2001)
7. S. Rahimi et al., "Atomization of Gel Propellants Through an Air-Blast Triplet Atomizer", ICT Jahrestagung, (2004)
8. Y. Solomon et al., "Combustion of Gel Fuel based on Organic Gellants", AIAA 06-4565
9. Y. Solomon et al., "Experimental Investigation of the Combustion of Organic-Gellant-Based Gel Fuel Droplets", Combust. Sci. and Tech., 178, 1185, (2006)
10. K. Hodge et al., "Gelled Propellants for Tactical Missile Applications", AIAA99-2976, (1999)