研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.1.036>

과산화수소/케로신을 이용한 다중 분사기 엔진 설계 및 수류 실험

이양석* · 전준수* · 고영성**† · 김 유*** · 김선진****

Design and Cold Flow Test of a Multi-injector Engine using Hydrogen Peroxide/Kerosene

Yang-Suk Lee* · Jun-Su Jeon* · Young-Sung Ko**† · Yoo Kim*** · Sun-Jin Kim****

ABSTRACT

Multi-injector rocket engine using high-concentrated hydrogen peroxide and kerosene was designed and manufactured. Design requirements of a rocket engine were determined and main geometrical parameters of rocket engine were determined on the basis of fundamnet. Six coaxial swirl injectors were mounted on the multi-injector engine. Flow analysis in the hydrogen peroxide manifold was performed to minimize stagnation and recirculation zones. Finally, the optimized hydrogen peroxide manifold was manufactured and cold flow test was carried out to confirm mass flow rate per uni-element, spray pattern and atomization characteristics. The results of cold flow test showed that the mixing head design process was successful and enough to use as a essential database for the development of a full-scale engine.

초 록

친환경 추진제인 고농도 과산화수소와 케로신을 추진제로 사용하는 다중 분사기 액체 로켓 엔진을 설계하였다. 엔진의 설계 요구 조건을 결정한 후 엔진의 주요 형상 치수를 이론적인 배경을 통하여 결정하였다. 다중 분사기는 6개의 분사기를 장착하였으며, 상용 해석 툴을 이용하여 과산화수소 매니폴드 내의 유동 해석을 수행하여 매니폴드 내에서 균일한 유량분포 및 냉각성능 확보를 위해 유동 정체 구간과 재순환 영역을 최소화하였다. 매니폴드 유동장 해석 결과를 바탕으로 유동이 최적화 되는 다중 분사기를 제작하였으며, 수류 실험을 통하여 추진제의 유량, 분무각 및 분무 성능을 확인하였다.

Key Words: Hydrogen Peroxide(과산화수소), Kerosene(케로신), Bi-propellant(이원추진제), Multi-injector (다중 분사기), Cold Flow Test(수류실험)

접수일 2011. 6. 27, 수정완료일 2011. 12. 28, 게재확정일 2012. 1. 6

* 정회원, 충남대학교 대학원 항공우주공학과

** 정회원, 충남대학교 항공우주공학과

*** 종신회원, 충남대학교 기계공학과

**** 정회원, 청양대학교 소방안전관리학과

† 교신저자, E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

1. 서 론

과산화수소(Hydrogen Peroxide, H_2O_2)는 오래 전부터 고밀도, 저장성, 무독성, 대기와의 무반응

성, 취급의 용이성 등의 장점으로 인하여 항공우주 추진 기관 및 파워 시스템에 널리 적용되었다[1-4]. 또한 2차 세계 대전에서는 잠수함의 터빈 구동 시스템뿐만 아니라 V-2 로켓 엔진의 터보펌프 가스발생기의 단일 추진제로 사용되었다. 그러나 2차 세계대전 이후 로켓 엔진을 개발하는 과정에서 환경보다는 엔진의 성능을 최우선 시하는 경향으로 인하여 과산화수소의 사용이 현저하게 감소하였다[1-3]. 특히 이원추진제를 바탕으로 한 우주발사체의 경우 연료로는 케로신(RP-1), MMH, 액체수소(Liquid Hydrogen LH₂)를 사용하고 있으며, 산화제로는 과산화수소보다 상대적으로 고성능인 액체산소(Liquid Oxygen LOx), 사산화질소(Nitrogen Tetroxide N₂O₄) 등을 사용하고 있고, 단일 추진제로는 하이드라진(Hydrazine, N₂H₄)을 사용하고 있다[1]. 그러나 이러한 고성능인 추진제는 하이드라진처럼 강한 독성으로 인하여 인체 및 환경에 매우 치명적이거나 액체산소처럼 상온에서 저장성에 문제가 있기 때문에 추진제로서 취급하기가 매우 까다로운 단점이 있다.

냉전시대의 끝인 1990년대 말부터는 우주발사체를 개발하는 과정에서 성능을 최우선시하는 경향 대신 친환경성, 운영비용 등이 대두되면서 친환경 추진제인 과산화수소가 재조명되었다[4]. 또한 초기 과산화수소의 개발 과정에서 문제시되었던 안정성 문제 또한 기술의 향상으로 인하여 문제가 해결되었으며, 고농도의 과산화수소를 생산할 수 있는 기술도 개발되었다. 이에 따라 해외 발사체 선진국들은 이미 과산화수소를 추진제로 하는 우주발사체 엔진 개발에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다[2, 3].

본 연구에서는 과산화수소/케로신을 추진제로 사용하는 이원추진제 로켓엔진 개발의 일환으로, 단일 동축/스윙 분사기의 설계를 기초로 하여 6개의 분사기를 배치한 다중 동축/스윙 분사기를 설계/제작하였다. 또한 매니폴드 유동해석을 수행하여 다중 분사기간의 균일한 유량분포의 확보와 매니폴드 내부에서의 정체 지역의 형성으로 인한 증발을 막기 위한 최적의 매니폴드를 제시하였으며, 수류 실험을 통하여 분사기의 제

작성/안정성을 검토하였고 향후 국내에서 개발될 과산화수소/케로신 엔진의 설계/제작 및 실험 기반을 마련하고자 한다.

2. 본 론

2.1 분사기 설계 및 제작

2.1.1 분사기 기본 설계

본 연구에서는 Table 1에서 보는 바와 같이 친환경 추진제인 고농도 과산화수소를 산화제로 하고, 케로신을 연료로 사용하는 이원추진제 로켓 엔진을 설계하고자 한다. 이 엔진의 점화 방식으로는 별도의 부가적인 장치 장착 없이 과산화수소의 촉매 반응 특성을 이용하여 점화할 수 있는 장점을 활용하여 촉매 점화 방법을 채택하였다.

요구 조건에 부합하는 엔진의 주요 형상을 결정하기 전에 운용 조건에 따른 연소 생성물의 열역학적 특성값을 계산하기 위하여 상용 해석 코드(CEA : Chemical Equilibrium Program)를

Table 1. Requirements of engine

Parameter		Remark
Propellant	Fuel	Kerosene
	Oxidizer	95% H ₂ O ₂
Thrust		500 N
Chamber pressure		1 MPa (10bara)
P _c /P _e		1000

Fig. 1 Specific impulse vs O/F ratio (P_c =10bara, ε=78.9)

사용하여, 연소 생성물의 열역학적 특성을 계산하였다. 또한 비추력(I_{sp})이 최대가 되는 조건을 설계점으로 결정하기 위해 O/F ratio에 따른 I_{sp} 값 계산하였으며, Fig. 1과 같이 O/F ratio 7.6에서 I_{sp} 가 약 340s로 가장 우수한 성능을 보이는 것을 확인(연소실 압력 : 10bara, 노즐 압력 팽창비 : 1000, 노즐 팽창비 : 78.9)할 수 있었다.

따라서 설계점의 O/F ratio를 7.6으로 선정하였으며, 설계점에서 계산된 연소 가스 물성치와 연소실 온도는 Table 2와 같다.

2.1.2 분사기 상세 설계

분사기는 추진제를 연소실 내로 분사하고 연소실에서 산화제와 연료의 혼합(mixing)과 미립화(atomization) 정도를 결정하는 역할을 한다. 본 연구에서는 미립화와 혼합 특성이 좋은 동축 스월(coaxial swirl) 형태의 분사기 형상을 채택하였으며, 연료 분사기는 안쪽에 산화제 분사기는 바깥쪽에 각각 배치하였다. 분사기의 설계 차압은 연소실 압력을 고려하여 각각 5bar로 결정하였고, 각각의 스월 챔버로 유입되는 입구 오리피스는 2개로 결정하였다. Table 3은 분사기 상세 설계를 위한 기본 요구 조건들이며, 각각의 추진제 유량은 연소실 운영 조건에서 결정된 설계점에서의 총유량($\dot{m}_t$)과 선정된 O/F ratio을 이용하여 결정되었다[4, 5].

Table 2. Thermodynamic calculation

Parameter	Value
Specific heat ratio (γ)	1.1214
Gas constant (R)	377.86 J/kgK
Gas temperature (T_c)	2759.48 K
Mixture ratio (O/F)	7.6

Table 3. Design point of injector

Parameter	Fuel	Oxidizer
Pressure drop (ΔP , bar)	5	5
Density (ρ , kg/m ³)	830	1430
Mass flow rate ($\dot{m}$, g/s)	3.16	24.0
Number of inlet orifice	2	2

분사기는 앞서 수행한 단위 요소 분사기 연구를 통해 얻어진 자료를 바탕으로 연소성능과 안정성이 검증된 RN(Recess number) 1.2의 동축 선회형 분사기를 적용하였다[7].

분사기 설계시 과산화수소 분사기는 바깥쪽에 위치하며 내부에 케로신 분사기를 포함하고 있다. 따라서 케로신 분사기의 홀 직경(d_o)과 제작 가능한 분사기의 최소 두께(t)를 고려하여 과산화수소 분사기 내에 스월 효과로 생성된 가스 코어(gas core)의 직경이 케로신 분사기의 전체 직경보다는 크도록 설계하여야 한다. 또한 연료와 산화제 분사기에 스월 챔버가 모두 존재하는 Closed 형태의 분사기를 적용하여 추진제의 균일성을 확보하였다. Fig. 2는 스월 분사기의 주요 설계 변수를, Table 4는 설계된 분사기의 주요 치수를 보여주고 있다.

일반적으로 다중 분사기 엔진의 설계시 분사기의 개수가 많을수록 혼합 및 미립 성능이 뛰어나지만 분사기면의 면적이 제한되어 제작시

Fig. 2 Basic dimensions of a swirl atomizer

Table 4. Design parameters of H₂O₂/kerosene injector

Type		Oxi.	Fuel
		Swirl/Closed	
Mass flow rate ($\dot{m}_o$, g/s)	Total	144	18.96
	Unit	24	3.17
Pressure drop (ΔP , MPa)		0.5	0.5
Density (kg/m ³)		1430	830
Number of inlet orifice (EA)		2	2
Spray angle (θ , °)		118	100
Dia. of tangential inlet orifice (d_p , mm)		1.27	0.65
Dia. of inlet orifice. (d_o , mm)		2.5	0.77
Dia. of swirl chamber (D_s , mm)		8.84	3.77

다수의 분사기를 설치하는 것은 한계가 있다. 또한 분사기의 크기가 너무 소형일 경우 가공시 발생하는 오차에 상대적으로 민감하므로, 본 연구에서는 6개의 단일 분사기를 이용하여 엔진을 구성하였다.

2.2 매니폴드 유로설계

설계된 6개의 단일 분사기를 장착한 다중 분사기 엔진의 매니폴드 유로 설계에서 가장 중요한 점은 각각의 분사기에 동일한 유량의 추진제를 공급하는 것이다. 매니폴드 설계시 부피의 증가는 추진제의 안정정인 공급을 의미하지만 과도한 부피 증가는 연소 실험시 초기 점화 특성에 매우 불리하며, 연소 실험 종료시에는 잔류 추진제에 의하여 엔진의 동특성에 영향을 줄 수 있다. 또한 분사기면은 연소실과 가장 근접해 있기 때문에 매니폴드 내부에 유동의 정체나 재순환 영역이 존재하면 연소 과정에 수반되는 고온/고압의 연소 가스에 의하여 정체/재순환 영역에 있는 추진제가 상변화를 일으킬 수 있으며 나아가서는 매니폴드 내부에서 급격하게 팽창하여 엔진 전체에 치명적인 손상을 유발할 수도 있다. 따라서 케로신 매니폴드와 과산화수소 매니폴드로 유입되는 유입구에 따른 매니폴드 내부 유동을 살펴보았으며, 개수와 매니폴드의 회전 유로에 스플리터(splitter)를 설치하여 유동의 정체와 재순환 영역에 대비하였다. 또한 매니폴드 내부의 유로는 유속이 10 m/s를 유지하도록 설계하였다.

2.2.1 매니폴드 유동 해석

설계된 매니폴드의 유로를 통하여 추진제가 각각의 분사기로 균일하게 공급되는지 확인하기 위하여, 과산화수소/케로신 매니폴드에 대한 유동 해석을 수행하였다. 매니폴드를 통해 각각의 분사기에 균일한 유량을 공급하고 정체 및 재순환 구간을 줄이기 위해서, 매니폴드 내부로 유입되는 추진제 유입구의 개수 변화에 따른 추진제의 유동 분포를 살펴보았다.

Figure 3과 같이 설계된 유로를 상용 격자 생성 프로그램인 Gambit을 이용하여 분사기 유로

전체의 반쪽 면에 대하여 약 300만개의 격자를 생성하고, Fluent를 이용하여 유동 해석을 수행 후 대칭 조건으로 전체 매니폴드 내부를 확인하였다. 경계 조건으로는 입구/출구 압력(Pressure inlet/outlet) 조건을 지정하였으며, k-epsilon 모델을 이용하여 유동 해석을 수행하였다.

과산화수소 매니폴드로 공급되는 유로의 개수가 1개인 경우(case 1) 유동 해석을 수행한 결과는 Fig. 4와 같다. 1개의 유입구로 과산화수소가 매니폴드로 공급 될 때, 회전 유로에 재순환 영역들이 발생하여 과산화수소가 정체하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 유입구 양쪽의 과산화수소 분사기는 두 개의 스윙 입구가 아닌 한 개의 스윙 입구에서 거의 대부분의 유량이 공급되고 있음을 확인할 수 있고, 다른 한쪽은 정체 현상이 생기는 것을 확인할 수 있다. 과산화수소 매니폴드는 연소실에 가장 가깝기 때문에 열적으로 가장 취약할 수 있는 부분이므로, 정체 구간을 없애기 위해 유입구에서 공급된 유로와 회전

Fig. 3 Mesh for flow analysis

Fig. 4 Result of flow analysis (case 1)

Fig. 5 Result of flow analysis (case 2)

Fig. 7 Result of flow analysis (case 4)

Fig. 6 Result of flow analysis (case 3)

Fig. 8 Result of flow analysis (Kerosene)

유로가 만나는 구간에 유동의 적절한 분배가 필요하다.

Figure 5는 과산화수소 유입구를 2개(case 2)로 늘려 유동 해석을 수행한 결과이며, 과산화수소 유입구 양쪽에 위치한 부분의 분사기에서 두 개의 스윙 입구로 고르게 유동이 분포되어 정체 구간이 사라진 것을 확인할 수 있다. 그러나 회전 유로의 과산화수소 유입구 두 곳에서 공급된 유로가 만나는 부분에서 새롭게 정체 구간이 발생하였다. 따라서 과산화수소의 정체를 방지하기 위해서 정체 영역의 과산화수소를 연소실로 공급하기 위한 0.5 mm의 냉각홀(case 3)을 양쪽에 2개씩 뚫어 추진제 총 유량과 분사기 분무 현상에 영향을 미치지 않는 범위에서 유동 해석을 수행하였다. 해석 결과 Fig. 6과 같이 약간의 효과는 있으나, 정체구간이 아직도 많이 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 즉 냉각홀 만으로는 정체

구간을 해소하기는 어렵다는 판단 하에 과산화수소 매니폴드로 공급되는 유입구를 3개로 늘려 해석을 수행하였다.

Figure 7은 과산화수소 매니폴드로 공급되는 유입구를 3개로 늘리고 회전 유로에 6개의 스플리터(case 4)를 장착하여 유동 해석을 수행한 결과이다. 매니폴드 설계 초기에 나타났던 정체 구간이 모두 해소되어 주목할 만한 정체 구간 및 재순환 영역은 발생하지 않았고 6개의 단위 분사기로 두 개의 스윙 입구로의 균일한 유동 흐름을 확인하였다. 이와 마찬가지로 케로신 매니폴드의 유동 해석을 통하여 최종적으로 Fig. 8과 같이 케로신 유입부 3개와 회전 유로에 스플리터 6개 설치하여 유로 해석을 수행하였다. 케로신 매니폴드의 유동 또한, 과산화수소 매니폴드와 동일하게 모든 분사기에 균일한 유동과 재순환 영역이 거의 존재하지 않는 것을 확인하였다.

또한 Table 5, 6에서 보는 바와 같이 과산화수소와 케로신 매니폴드에 장착된 각각 6개의 분사기에서 균일한 유량이 공급됨을 확인하였다.

Table 5. Mass flow rate per uni-element (Analysis H_2O_2)

ΔP (bar)	Injector No.	Mass flow rate (g/s)		
		Analysis	Avg.	Error(%)
5	1	24.24	24.01	0.94
	2	23.81		-0.84
	3	23.84		-0.74
	4	24.33		1.32
	5	24.15		0.57
	6	23.72		-1.24

Table 6. Mass flow rate per uni-element (Analysis, Kerosene)

ΔP (bar)	Injector No.	Mass flow rate (g/s)		
		Analysis	Avg.	Error(%)
5	1	3.19	3.16	0.90
	2	3.12		-1.25
	3	3.14		-0.63
	4	3.19		0.85
	5	3.18		0.77
	6	3.14		-0.66

Fig. 9 Schematic of mixing head

Fig. 10 Fabricated mixing head

이상과 같은 유동 해석 결과를 바탕으로 추진제의 균일한 공급과 매니폴드 내의 정체 및 재순환 영역을 최소화하기 위하여 Fig. 9와 같은 개념으로 제작되었다. 각각의 추진제가 추진제 공급관을 통하여 분사기로 공급되면 분기판을 통하여 3개로 분기되어 각각의 매니폴드로 공급된다. 유동 해석을 통해 유동 특성이 검증된 분사기는 과산화수소와의 비반응성을 고려하여 STS304로 제작하였고[4], 진공 브레이징 공법으로 결합된 각각의 추진제 공급관을 아르곤 용접으로 외부케이스와 결합하는 방식을 사용하였다.

Figure 10은 제작된 다중 분사기의 전체적인 형상을 보여준다. 또한 고온의 연소가스로부터 분사기면을 보호하기 위하여 지르코늄으로 표면 처리 하였다.

23 수류 실험

제작된 다중 분사기의 제작성을 확인하고 공급 압력에 따른 분무 특성 및 유량을 측정하기 위하여 수류 실험을 수행하였다. 모의 추진제로는 상온에서 취급하기 용이한 물을 사용하였으며 모의 추진제의 유량에 밀도를 보정하는 방법으로 실제 유량을 측정하였다.

과산화수소의 유량은 차압을 1bar에서 9bar까지 변화하면서 측정하였다. 수류시험으로 측정된 유량 값과 설계 값을 비교해 본 결과, Fig. 11에서 보는 것과 같이 거의 일치하는 것을 확인하였다. 설계 차압인 5bar에서 설계 유량이 공급되는 것을 확인하였으며, Fig. 12에서 볼 수 있듯이 설계/제작된 분사기의 미립화 특성이 매우 우수하였다. 육안으로 관찰하였을 때 6개의 분사기에서 유량이 고르게 분무되었고, 분무각은 90° 정도로 측정되었다. 측정 분무각이 과산화수소 분사기의 설계 분무각인 118°보다 작게 측정된 이유는 제작된 분사기의 크기 및 직경이 상대적으로 매우 작고, 이로 인하여 분사기 내부 포스트의 벽면과 유동의 점성효과로 인하여 추진제의 스월 효과가 감소된다. 따라서 설계 분무각보다 실제 분무각이 작게 측정된 것으로 판단되고, 이러한 효과를 모두 감안하면 양호한 분무각이라고 판단된다.

Fig. 11 ΔP – Mass flow rate curve (H_2O_2) Fig. 13 Spray pattern/angle (kerosene, $\Delta P=5\text{bar}$) Fig. 12 Spray pattern/angle (H_2O_2 , $\Delta P=5\text{bar}$) Fig. 14 Spray pattern/angle (kerosene, $\Delta P=5\text{bar}$)

케로신 유량 측정 역시 과산화수소 측정 방법과 동일하게 수행하였다. 차압을 1bar에서 9bar까지 변화하면서 총 유량을 측정하였으며, 각각의 분사기에서의 유량도 측정하였다. Fig. 13은 케로신의 설계 유량과 측정 유량을 나타낸 것이며, 케로신 유량도 과산화수소와 마찬가지로 설계치와 거의 동일한 유량이 측정되었다. Fig. 14는 설계 압력(5bar)에서 케로신의 분무 형상을 나타낸 것으로서, 육안으로 관측하였을 때 6개의 분사기에서 분무각이 거의 일정하게 안정적으로 분사됨을 확인하였다. 전반적인 분무 형상을 살펴보면 과산화수소 분사기보다는 분무각이나 미립화 특성이 좋지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 케로신의 유량이 과산화수소의 유량에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 포트 내부의 점성에 의한 스웰 유동이 손실을 받은 것으로 판단되고, 이를 감안하면 양호한 분무 특성으로 판단된다.

Fig. 15 Spray pattern/angle (H_2O_2 +Kerosene, $\Delta P=5\text{bar}$)

또한 과산화수소와 케로신을 각각의 설계 차압으로 가압한 후 동시 분사(Fig. 15)하여 총 유량을 측정한 결과, 각각의 추진제를 독립적으로 분사하였을 때의 유량의 합과 동일하였다. 이는 분사기 내부에서 각 추진제의 차압에 따른 유량 분포에 서로 간섭이 없음을 의미하고, 또한 분사기의 제작성을 확인하였다.

육안으로 관찰된 분사기들의 분무 상태는 거의 유사하였으나, 다중 분사기 엔진은 6개의 분사기에서 고른 유량 분포를 보이는 것이 매우 중요하므로, 정량적으로 분석하기 위하여 각각의 분사기에서 동일한 유량이 공급되는지 확인하였다. 이를 위해 매스실린더를 이용하여 설계 압력에서의 6개 과산화수소 분사기 각각의 유량을 측정하였다. 측정 정확성을 높이기 위해 각 분사기당 3번의 유량 측정 실험을 반복 수행하였으며, Table 7과 같이 모든 분사기가 평균 유량 23.32 g/s에서 -2.0~1.3%의 유량 분포를 나타내었으며 설계 유량인 24 g/s과 매우 유사함을 확인하였다. 따라서 모든 과산화수소 분사기에서의 유량은 균일하다고 보아도 무방하며, 설계/제작성이 매우 우수함을 확인할 수 있다. 또한 6개의 케로신 분사기도 과산화수소 분사기와 마찬가지로 각각 유량을 측정한 결과는 Table 8과 같으며, 평균 유량이 3.11 g/s로 설계 목표 유량인 3.17 g/s의 98%에 해당하는 수준이며 평균 유량에서 -3.2~3.0%의 유량 분포를 나타내었다. 따라서 케로신 분사기들의 유량은 균일한 것으로 판단되었으며, 이로부터 설계/제작성이 우수함을 확인하였다.

Table 7. Mass flow rate per uni-element (H_2O_2)

ΔP (bar)	Injector No.	Mass flow rate (g/s)		
		Experiment	Design	Error(%)
5	1	23.23	24.00	-0.38
	2	23.27		-0.21
	3	22.84		-2.06
	4	23.63		1.33
	5	23.37		0.21
	6	23.58		1.11

Table 8. Mass flow rate per uni-element (kerosene)

ΔP (bar)	Injector No.	Mass flow rate (g/s)		
		Experiment	Design	Error(%)
5	1	3.20	3.17	3.00
	2	3.11		0.11
	3	3.06		-1.50
	4	3.12		0.43
	5	3.14		1.07
	6	3.01		-3.11

3. 결 론

과산화수소와 케로신을 사용하는 동축 선회형 다중 분사기 액체 로켓 엔진의 기본/상세 설계 및 제작을 수행하였다. 매니폴드 내부의 유동 해석을 통하여 매니폴드 내부의 정체 구간 및 재순환 영역을 효과적으로 억제하였으며, 또한 수류 실험을 통해 상세 설계된 엔진의 제작성과 설계 타당성을 검증하였다. 수류실험을 통해 설계/제작된 과산화수소/케로신 다중 분사기 분사기 헤드의 성능이 우수함을 확인하였고, 이를 바탕으로 향후 점화/연소 실험을 통해 과산화수소/케로신 엔진의 개발의 기반을 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab, 과제번호 : 20100015078)으로 지원받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Ventura, M., Mullens, P., "The Use of Hydrogen Peroxide for Propulsion and Power," AIAA 1999-2880, June 1999
2. Sisco, J. C., Austin, B. L., Mok, J. S. and Anderson, W. E., "Autoignition of Kerosene by Decomposed Hydrogen Peroxide in a dump combustor Configuration," AIAA 2003-4921, July 2003
3. Antony J Musker, "Highly Stabilised Hydrogen Peroxide as a Rocket Propellant," AIAA 2003-4619, July 2003
4. 전준수, 이양석, 김영문, 최유리, 고영성, 김유, 김선진, "액체로켓엔진 산화제로서의 과산화수소 공급계 구축에 관한 연구," 한국추진공학회지, 제14권, 제2호, 2010, pp.63-70

5. Bayvel, O., Liquid Atomization, Taylor & Francis, 1993
6. George P. Sutton, Oscar Biblarz, Rocket Propulsion Elements, 7th ed., Wiley interscience, 2001
7. Huzel, D. K. and Huang, D. H., Modern Engineering For Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, AIAA, 1992
8. 김보연, 이양석, 김근철, 고영성, 김 유, 김선진, “과산화수소/케로신 단일 인젝터 설계 및 혼합비에 따른 연소특성,” 한국추진공학회 춘계학술대회, 2010, pp.81-84