

## 論文

## 고속 비행체 연료공급 및 냉각계통 사례분석

최세영\*, 박수용\*, 최현경\*\*, 전필선\*\*, 박정배\*\*\*

A Case Study on Fuel Supply and Cooling Systems  
of High-Speed Vehicles

Seyoung Choi\*, Sooyong Park\*, Hyunkyung Choi\*\*, Pilsun Jun\*\*, Jeongbae Park\*\*\*

## ABSTRACT

In high-speed vehicle, selection of fuel, configuration of components and cooling system are required to solve the heating issue by aerodynamic heating and inner combustion process. This subsystem consists of fuel tank, supply pump, various control valve, heat exchanger, including reactor, connecting line, adiabatic structures and insulations. In this paper, applicable fuel property is considered at flight characteristic of hypersonic vehicles. In this regard, current state of fuel/cooling system technology is identified.

**Key Words** : High-Speed Vehicle(고속 비행체), Subsystem(부시스템), Fuel System(연료계통), Cooling System(냉각계통)

## 1. 서 론

램제트 또는 스크램제트 추진기관을 이용하는 고속 비행체에 있어 공력과 연소 등에 따른 외부 표면 가열과 내부 발열 문제의 해결을 위해서는 비행 특성을 고려한 연료의 선택, 이를 공급하기 위한 장치 구성, 그리고 이들을 적용한 냉각 체계 등의 부시스템에 대한 적절한 설계가 요구된다. 본 연구에서는 고속 비행체의 비행 특성에 따른 사용 가능한 연료들의 특성을 고찰하였으며, 그 특성에 따른 연료 공급, 냉각 시스템의 적용 기술 및 기술동향을 파악하였다.

## 2. 본 론

## 2.1 연료 선정

현재 고속 비행을 지향하는 스크램제트 엔진에는 액체수소 또는 탄화수소 연료를 사용하고 있다. 이 둘은 서로의 성능적, 기능적 특징을 가지고 있으므로, 체계의 운용 환경 및 목적 등에 따라 보다 적합한 연료를 선정할 수 있다. 그 특징에 대해 Fig 1에서는 수소와 탄화수소 연료를 사용하는 비행체의 비추력을 비행 속도에 따라 나타내었고, 고속 비행체에 적용 가능한 연료의 열화학적 물성치를 표 1에서 비교하였다[1-2]. 비교 결과, 액체 수소연료는 탄화수소에 비해 단위 질량 대비 에너지 함유량이 크고, 낮은 운용온도에 따른 우수한 냉각성능과 빠른 화학반응 속도를 장점으로 가지는 것으로 나타났다. 반면, 낮은 에너지 밀도로 인해 연료 탱크의 크기가 커져야 하며, 상온에서 기체 상태로 존재하기 때문에 이를 액체 상태로 보관하기 어려운 점과 이에 따른 누기의 위험성이 있다. 탄화수소 연료는 액체수

2013년 04월 04일 접수 ~ 2013년 06월 21일 심사완료  
논문심사일 (2013.04.05, 1차), (2013.06.12, 2차)

\* (주) 제이엔엠시스템

\*\* 한화테크엠(주) 항공우주연구소

\*\*\* 국방과학연구소

연락처, E-mail : [choi.sy@jnmsystem.com](mailto:choi.sy@jnmsystem.com)

경기도 안양시 동안구 관양동 906-1번지 1002호

소연료에 비하여 단위부피대비 에너지 함유량이 커서 동일 운용에 상대적으로 적은 체적을 필요로 한다. 또한 상온에서 액체로 존재하기 때문에 보존 및 보관이 용이하고 안정적이어서 고속 비행체를 위한 적용에 보다 효과적이다.

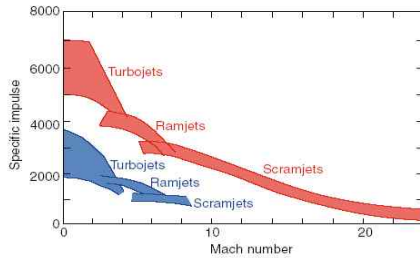


Fig 1. Comparison of specific impulse for hydrogen (red) and hydrocarbon (blue) fuelled aircraft engines [1]

표 1. Comparison of chemical properties for hydrogen and hydrocarbon [2]

Fuel	Energy/ Mass (MJ/kg)	Energy/ Volume (MJ/Lt)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Liquid H <sub>2</sub>	116.7	8.2	71
Slush H <sub>2</sub>	116.6	9.8	82
Methane	50.0	20.8	424
JP-7	43.9	34.7	790
Kerosene	42.8	34.2	800

## 2.2 흡열연료 냉각 시스템

고속 비행체는 엔진효율의 향상과 비행 속도의 증가로 인해 비행체와 엔진의 열적부하와 공력에 의한 열적부하가 매우 높기 때문에 단순 냉각 방식을 이용한 시스템 냉각이 어렵다. 이를 해결하기 위해 비행체 연료를 주 냉각제로 사용하는데, 일부 시스템에서는 흡열연료(Endothermic fuels)의 촉매분해, 열분해와 같은 흡열반응(Endothermic reaction)을 통해 시스템의 열을 흡수한다. 이는 연료의 에너지 밀도, 운용의 편리성, 고온 추진기관의 냉각제로서의 측면을 고려할 때 마하수 10이하의 비행체에 그 사용이 적절하다. 흡열연료를 이용한 냉각은 Fig 2에서와 같이, 직접냉각(Direct cooling)과 간접냉각(Indirect cooling) 두 가지 방식을 사용하고 있다. 직접냉

각은 연료가 연소기로 공급되기 전 가열된 벽면 내부 유로를 통과하여 가열면의 열을 흡수하며 가열된 시스템을 냉각하고, 이후 열량이 커진 연료가 연소기로 공급된다. 간접냉각은 시스템 냉각을 위해 냉매제를 사용하고, 냉매제를 흡열연료로 냉각시키는 방식이다. 냉매제가 가열된 벽면에 유입되어 열을 흡수한 후 외부에 설치된 열교환기로 이송된다. 이곳에서 흡열연료의 분해반응으로 냉매를 냉각 후 다시 가열된 벽면으로 재순환시킨다.

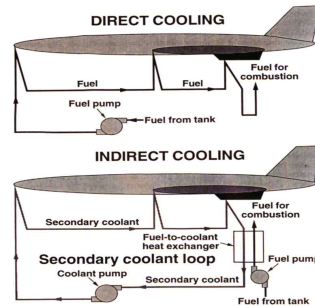


Fig 2. Direct and indirect cooling systems [3]

## 2.3 연료공급 시스템

램제트, 스크램제트 등 공기흡입식 추진기관의 연료공급 시스템을 살펴보면, 전체적인 구성과 기능은 유사하게 이루어져 있음을 알 수 있다. 연료공급 시스템은 크게 터보펌프와 연료조절밸브 시스템, 연료탱크 및 가압부로 구성된다. 터보펌프는 엔진 흡입구로부터 유입되는 공기에 의해 구동되며 연료를 밸브시스템으로 공급한다. 연료조절밸브 시스템에서 연료공급은 터빈에 직결된 연료 펌프에 의해 이루어지며, 추력을 조절하기 위해 엔진 연소실로 유입되는 연료의 유량을 조절한다. 엔진 제어기는 장착된 각종 센서를 통하여 얻은 정보를 이용하여 연료량을 계산하여 이를 연료조절밸브 시스템에 전달함으로써 적절한 연료가 연소실로 분사되도록 한다.

## 2.4 수소연료 이용 공급/냉각 시스템

Fig 3는 액체수소를 연료로 사용하는 마하수 10의 초고속 비행체의 열관리 시스템 (Thermal Management System)의 개념도이다. 그림에서 부시스템(subsystem)으로 표시된 부분은 이 비행체에서 고려된 탑재장비들로써 비행체의 운용 목적에 따라 그 종류와 크기, 발열량, 운용 조건 등

이 달라진다. 그림의 개념에서는 40°F의 Ethylene Glycol/Water 혼합액을 냉매로 사용하는데, 부시스템 영역에 공급되어 필요 탑재장비들을 냉각한 후 110°F로 온도가 상승한 냉매는 다시 연료인 액체수소와 열교환 후 40°F로 낮아져 부시스템 영역에 공급된다[4].

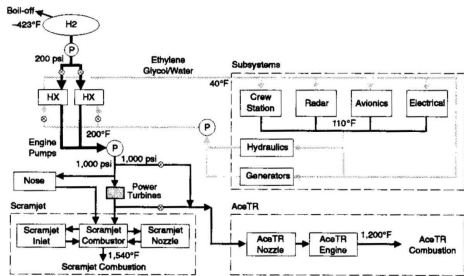


Fig 3. Mach10 cruise vehicle thermal management system design concept with hydrogen [4]

Fig 4에서는 연소기 열교환기에서 펌프등을 운용하기 위한 터빈까지 고온의 수소를 공급하기 위한 수소 연료시스템구조를 나타내었다.

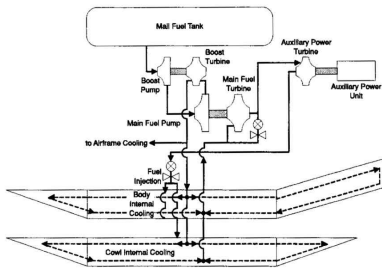


Fig 4. Mach 10 cruise vehicle propulsion cooling design concept [4]

Fig 5에서는 슬러시수소를 이용한 연료시스템을 나타내었다. 슬러시 수소는 액체수소와 고체수소 입자로 이루어진 두 상의 고체/액체 저온유체로써 액체수소에 비해 밀도 및 저온열용량이 높아서 부피가 작으므로 저장성 및 운송에 유리하다.

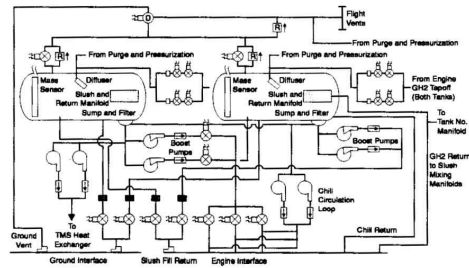


Fig 5. Mach 10 cruise vehicle slush hydrogen fuel system schematic [4]

Fig 6에서는 액체 및 기체 수소에 의한 연료시스템을 나타내었다. 비행체에서 발생하는 열에 대하여 엔진연료, 터보제트의 액체수소에 의해 냉각되는 구조를 확인 할 수 있다.

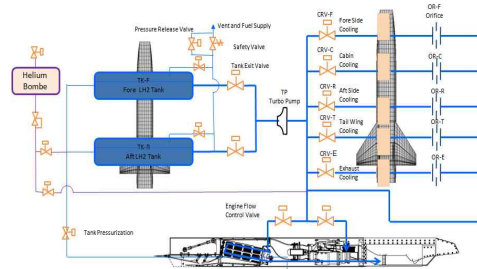


Fig 6. Flow Chart of hydrogen Cooling system [5]

### 2.5 탄화수소 연료를 이용한 공급/냉각 시스템

미공군에서는 1990년대부터 Hypersonic Technology (HyTech) 및 Hydro-carbon Scramjet Engine Technology (HySET) 프로그램 등에서 탄화수소 연료 스크램제트 엔진을 개발하고 있다. 프랑스에서는 2003년부터 흡열 탄화수소 연료를 사용한 이중모드 램제트 추진 비행체의 Prometheus 엔진에 대한 LEA 프로그램을 진행하고 있다. Fig 7에서는 JP-7 액체 탄화수소 연료를 사용하는 X-51A의 재생냉각 연료 시스템을 나타내었다.

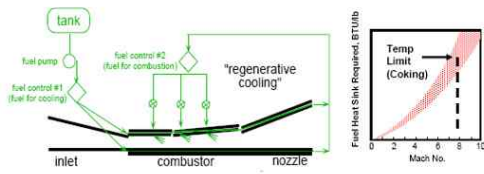


Fig 7. schematic of a regenerative fuel cooled engine (X-51A) [6]

Fig 8에서는 마하수 5로 비행하는 비행체의 흡열 반응기를 포함하는 연료/냉각시스템을 나타내었다. 직접냉각방식과 간접냉각방식이 같이 쓰이며, 촉매 열교환기를 통한 엔진 패널 냉각 구조와 열 부하가 높은 노즐 등에 적용되는 냉각방식을 확인할 수 있다[3].

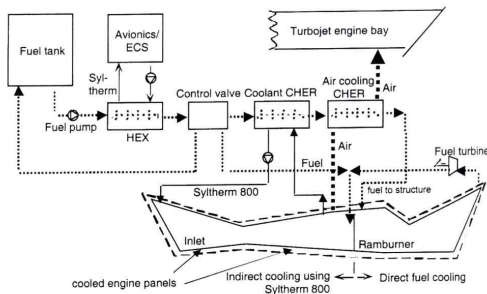


Fig 8. Schematic of an endothermic fuel system featuring catalytic heat exchanger, reactors [3]

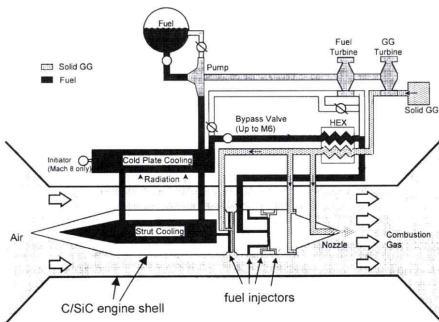


Fig 9. Notional schematic of a fuel system for a hypersonic air-breathing missile [7]

Fig 9와 같은 동축형 복합 연료제어시스템에서는 여러 엔진구조 판재들을 냉각하기 위한 적절한

연료분배구조를 확인 할 수 있다. 연료의 분배량은 임무 환경에 요구되는 냉각 요구도와 추진기관내의 요구 연료소모량에 의해 결정되며, 분리된 두 시스템 간에 열교환이 발생하는 열교환기의 크기와 방식 역시 이에 따라 결정된다.

Fig 10에서는 러시아 AJAX 극초음속 비행체의 액체탄화수소 연료공급시스템을 나타내었다. 각 단계별로 촉매와 온도에 따른 최적의 수증기계질 이 이루어지게 된다.

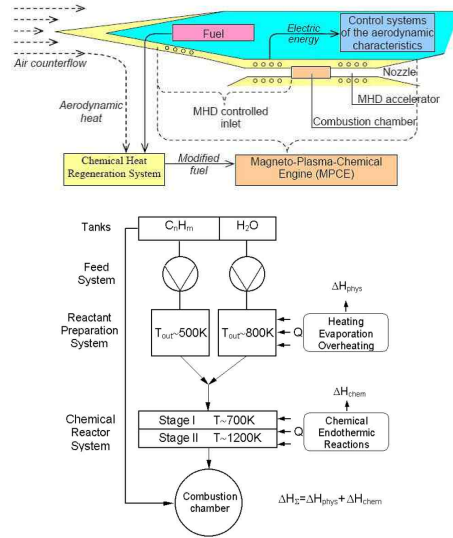


Fig 10. AJAX fuel-system schematic diagram of fuel transformation onboard HFV using steam hydrocarbon reforming [8]

### 2.6 비행체 표면 및 엔진 벽면 냉각 기법

외부에서 공급되는 열에너지에 의한 구성품 및 기체의 손상을 방지하기 위해 고속 비행체에는 다양한 형태의 단열, 열차단 개념 및 구성품들이 적용된다. 이들 구성품들은 표면에서 유입되는 열에너지를 차단하거나, 연소기 또는 노즐에서 만들어지는 화학적 열에너지가 기체 내의 구성품을 손상시키는 것을 방지하기 위해 적용된다. Fig 11에서는 비행기형 고속 비행체 및 동축형 비행체에서 사용되고 있는 단열 및 냉각 시스템의 예를 나타내었다. 대부분의 패널형 단열판재들은 내부에 열적/구조적으로 최적화된 냉각 채널들을 가지고 있다. 최적화된 냉각 채널을 설계하기 위한 초기 설계 프로그램 역시 전체 연료



- [1] Dominic Pace, "Scramjet Fuel Choices: Hydrogen versus Hydrocarbons", Journal of UNSW@ADFA, Vol.1, No.1, 2007
- [2] Daniel Lucas, "Hydrogen Versus Hydrocarbons : A Literature Review of Hypersonic Engine Fuel Options", Journal of UNSW@ADFA, Vol.1, No.1, 2007
- [3] Van Griethuysen, V.J. Glickstein, M. R., Petley, D.H., Gladden, D.H. and Kubik, D.L., "High-Speed Flight Thermal Management," in Development in High-Speed Vehicle Propulsion Systems, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 165, eds. S.N.B. Murthy and E.T. Curran, 1996
- [4] James L. Hunt, "Systems Challenges for Hypersonic Vehicles", Future Aerospace Technology in the Service of the Alliance, Vol. 3(AGARD-CP-600-Vol-3), 1997, pp. 23
- [5] Takayuki Kojima, Hideyuki Taguchi, Syunsuke Imamura, Hiroaki Kobayashi, Atsushi Ueno, Tomonari Hirotani, Keisuke Fujii, "Conceptual Study on Heat Resistant and Cooling System of Hypersonic Airplanes", AIAA-2011-2378, 17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 11-14 April 2011, San Francisco, California
- [6] Robert Bakos, "Current Hypersonic Research in the USA", "Advances on Propulsion Technology for High-Speed Aircraft", RTO-EN-AVT-150, AVT/VKI Lecture Series held at the von Karman Institute, NATO Science and Technology Organization, 2007, Paper 10
- [7] Lourdes Maurice, Tim Edwards and John Griffiths, "Liquid Hydrocarbon Fuels for Hypersonic Propulsion," Collective, under the direction of E.T. Curran and S.N.B. Murthy, "Scramjet propulsion", AIAA progress in aeronautics and astronautics, volume 189, 2000, Chapter 12
- [8] A. Kuranov, A. Korabelnikov, "Hypersonic technologies of atmospheric cruise flight under AJAX concept, "AIAA 2008-2524, 15th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 28 April - 1 May 2008, Dayton, Ohio
- [9] Eric J Gamble, Jose' Gutierrez, David Giel, Jonathan Bachmann, Todd Jobin, Doug Williford, "Development of a Scramjet/Ramjet Heat Exchanger Analysis Tool (SRHEATM), AIAA-2008-4614, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 21-23 July 2008, Hartford, CT
- [10] Eric J. Gamble, David Giel, Charbel Raffoul, "Systematic Optimization Approach for Scramjet/Ramjet Heat Exchanger Analysis Tool (SRHEATM)", AIAA - 2008 - 5173, 44th AIAA /ASME/ SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 21-23 July 2008, Hartford, CT