

DARPA의 극초음속 추진기관 개발 계획: 리뷰

최정열*노진현** · Bernard Parent * (부산대학교)

Review on the Hypersonic Propulsion System Development Plan of DARPA

Jeong-Yeol Choi** · Jinhyeon Noh* · Bernard Parent

ABSTRACT

Present review introduces the on-going or planned hypersonic vehicles by DARPA including X-51A, HTV-3X and HCV. The configuration and the R&D strategies of the hypersonic propulsion systems will be also introduced with its core technologies.

초 록

본 리뷰에서는 미국 DARPA에 의하여 최근 진행 중이거나 계획 중인 X-51A, HTV-3X 및 HCV 등의에 대해서 소개하며, 이들 극초음속 비행체의 추진 기관의 구성 및 핵심 기술의 개발 전략에 대하여 살펴본다.

Key Words: Hypersonic, DARPA, Hypersonic Vehicles, X-51A, HTV-3X, HCV

1. 미국의 극초음속 항공기 개발 전략

2001년 방위계획지침에 의하면 미국의 방위는 우주를 포함하는 중요 영역에서 가상 적에 비해 월등한 우위를 점하는 것을 목표로 하고 있으며, 이에 의하여 미 공군 우주사령부는 필요한 시기, 즉각적으로 군수 화물을 지구 궤도에 수송 및 회수 하는 것을 한 가지 임무로 정하였다. 그러나 이러한 임무는 현재의 로켓 기술로는 이론적으로도 충족할 수 없으며 오직 항공기처럼 운용이 가능한 공기흡입 방식의 극초음속 항공 우주기만이 유일한 대안이라는 결론을 얻은 상태이다. 과거 미국은 NASP 계획을 통하여 NASA의 주도하에 항공우주기 계획을 진행하였으나 기술 수준에 비하여 무리한 목표로 인하여 계획이 취

소된 바 있다. 그러나 이 당시 축적된 기술을 바탕으로 꾸준히 관련 연구를 진행하고 있으며, NASP 와 같이 단번에 항공우주기를 개발하려는 계획을 진행하기 보다는 개별 적용 체계를 가진 단계별 항공기 개발 과정을 통하여 최종 목표를 달성하는 방향으로 진행하고 있다.

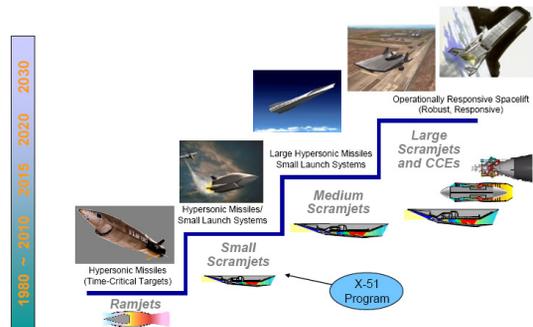


Fig. 1 AFRL/RZ's hypersonic scramjet technology development approach

* 정회원, 부산대학교 항공우주공학과

** 학생회원, 부산대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: aerochoi@pusan.ac.kr

2004년 X-43A 스크램제트 무인기의 비행 시험을 성공적으로 마친 미국은 극초음속 항공기 체계 기술이 성숙한 단계에 이르렀다고 판단하고, NASA 주도의 X-43C 및 X-43B 를 통한 탄화수소 연료 스크램제트 엔진 및 RBCC 엔진 극초음속 항공기의 개발을 취소하는 대신 미공군과 DARPA가 주도하여 본격적으로 극초음속 무인기 X-51A 스크램제트 기술 실증기를 개발하고 있다. X-51A의 엔진은 미공군 연구소 주도의 HyTech 프로그램을 통하여 PWR사에서 개발하였으며, 기체는 Boeing에서 개발하고 있다. X-51A은 2008년에 지상시험을 마치고 2009년에 4차례의 비행시험이 계획되어 있다. 비행시험은 B-52 항공기로부터 지상 11km 고도에서 ATACMS 고체로켓 부스터를 이용하여 발사하여 마하 4.5에 도달한 후, 스크램제트 엔진을 이용하여 마하 7까지 가속할 예정이다.

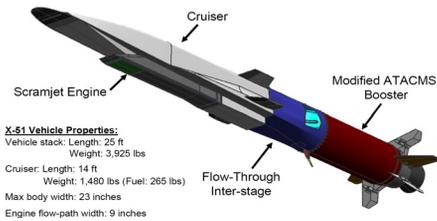


Fig. 2 X-51A SED-WR vehicle



Fig. 3 DARPA HTV-3X



Fig. 4 DARPA HCV concept

한편, DARPA는 극초음속 항공기 개발을 주된 내용으로 하는 Falcon 프로젝트를 진행하고 있다. Falcon 프로젝트에서는 HTV-1, 지상 시험 모델의 시험을 이미 마치고, 극초음속 시험 비행체인 HTV-2의 초도 비행을 2009년 3월 계획하고 있으며, 이를 바탕으로 X-51A의 추진 기술을 접목한 HTV-3X를 2012년 비행 시험하는 계획을 가지고 있다. X-51A가 수백-1,000 km 가량의 비행거리를 가지는 크루즈 미사일 형태의 일회용 비행체라면, HTV-3X는 현재 군용 전폭기의 50-70% 정도 크기에 수천 km 비행 거리의 정찰 및 공격 임무를 가지는 무인기가 될 전망이다. 한편, HCV는 미 대륙에서 지구 어느 곳이든 2 시간 이내에 정찰, 수송 등의 임무를 수행할 수 있는 현용 전폭기 이상의 크기의 비행체가 될 전망이다.

2. 추진기관 개발 전략

이러한 극초음속 비행체 개발을 위해서는 공력, 구조, 제어 등 항공우주 공학 각 분야에서 현재의 기술 수준을 뛰어넘는 도전 과제를 가지고 있으며, 특히 극초음속 추진 기관에서 혁신적인 발전을 필요로 한다. 이후의 내용에서는 이들 극초음속 비행 체계의 추진기관 핵심 기술에 대해 살펴본다.

2.1. X-51 추진기관 핵심 기술

X-51A의 기체는 Boeing에서 개발하고 있으며, 엔진은 미공군 연구소 주도의 HyTech 프로그램을 통하여 개발하였으며, 엔진 개발 주관 업체인 PWR사는 2008년 9월 비행용 엔진인 SJX61-2 (X-2) 스크램제트 엔진의 지상시험을 완료하였다고 보고 하였다. X-51A은 B-52 항공기로부터 지상 11km 고도에서 ATACMS 고체로켓 부스터를 이용하여 발사하여 마하 4.5에 도달한 후, 스크램제트 엔진을 이용하여 마하 7까지 가속하는 4차례의 비행 시험을 2009년 내에 수행하는 계획을 가지고 있다.

HyTech 엔진의 기본적인 특징은 실용화에 필요한 긴 작동시간 동안 추진기관 가열의 문제를 연료를 이용한 재생 냉각을 이용하여 해결한다는 점이다. 연료 탱크에서 공급되는 차가운 연료는 공기 흡입구 쪽부터 노즐까지 엔진의 내벽을 따라 흐르며 엔진을 냉각한 후 가열되어 연소실로 공급되는 폐쇄형 재생냉각 시스템을 구성한다. Fig. 4는 연료 냉각 스크램제트 엔진의 구성 및 개념을 보여주고 있다.

이때 충분한 압력으로 공급되는 액체 연료를

초임계 상태로 과열시켜 연소실로 공급하여 공급함으로써, 액체 탄화수소 연료를 이용하는 초음속 연소의 가장 큰 문제점인 연료 증발 시간 긴 점화 지연 시간을 현저히 단축하는 효과를 가진다. 다음 그림은 액체 및 초임계 탄화수소 연료의 분사 및 혼합 특징을 보여주는 사진이다. 이 과정에서 액체 연료는 가벼운 탄화수소 연료로 열분해(thermal cracking) 과정을 거치는데, 이 과정은 흡열(endothermic) 과정으로 엔진의 냉각에 도움을 주며, 분해된 탄화수소는 점화 지연 시간이 짧아 보염(flame holding)에도 긍정적으로 작용한다. 아울러, 폐쇄형 냉각 및 연소 시스템이 작동하기 위해서는 JP-7 연료가 냉각 유도를 통과하며 충분히 가열되어야 하기 때문에 엔진의 점화와 시동 초기에 분해된 열 분해된 JP-7 연료와 비슷한 특징을 가지며 탄화수소 연료 증 점화 지연이 짧은 에틸렌을 이용한다.

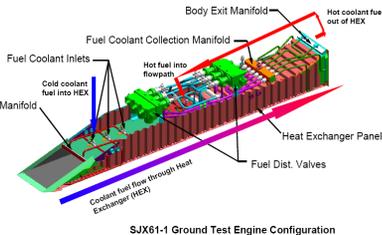


Fig. 5 X-1 fuel-cooled scramjet configuration

2.2. HTV-3X 추진기관 체계

항공기와 같은 운용을 목표로 하는 HTV-3X 비행 체계는 이착륙과 극초음속 영역까지 가속을 위하여 기존의 제트 엔진과 램제트/스크램제트 엔진을 결합한 형태인 TBCC 엔진을 계획하고 있다. 마하수 2.5 - 5까지 운용 가능한 램제트 엔진 및 더 높은 마하수에서 작동하는 스크램제트 엔진은 하나의 유도에서 두 가지 모드로 작동 가능한 dual mode 램제트/스크램제트 엔진의 통합된 형태로 개발될 계획이다.

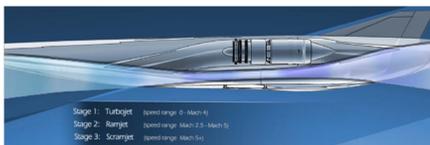


Fig. 6 TBCC strategy for HTV-3X

한편, 터보제트 엔진은 초음속 및 극초음속 영역에서 안정된 천이 과정을 위하여, 기존의 터보제트 엔진에서는 불가능한 매우 높은 속도인 마하수 4 까지 작동할 수 있을 것이 요구된다. 이를 위하여 미해군의 초음속 장거리 크루즈 미사일 개발 프로그램 RATTLLRS에서 마하수 3까지

작동할 수 있도록 개발된 YJ102R 터보제트 엔진을 마하수 4까지 작동 가능하도록 보완 개발하는 계획을 가지고 있다.



Fig. 7 RATTLLRS 비행체 및 엔진

2.3. HCV 추진기관 및 VULCAN Project

2008년 6월 DARPA 는 VULCAN 엔진 개발 프로그램을 공고하였다. VULCAN 프로그램은 F119와 같은 기존의 터보 엔진을 기반으로 CVC (Constant Volume Combustion) 엔진을 부가하여 마하수 4까지 비행 가능한 엔진을 개발하는 프로그램이다. 이는 소형 비행체인 HTV-3X가 초음속 크루즈 미사일용 터보제트 엔진을 이용할 수 있는 반면, 대형 비행체인 HCV를 위하여 기반으로 이용할 수 있는 높은 초음속 영역까지 작동 가능한 대형 터보 제트 엔진은 존재하지 않는 상황이기 때문이다. 즉 높은 마하수에서 작동 가능한 터보 제트 엔진은 재료의 문제로 인하여 열차폐 및 냉각, 소재 등에서 기존의 엔진과는 다른 기술 수준을 요구하므로, 개발 및 생산 비용에서 비현실적이라는 판단으로 보인다.

이러한 대안으로 지난 10년간 많은 연구가 진행된 PDE (Pulse Detonation Engine) 이나 최근 새로이 연구되고 있는 CDE (Pulse Detonation Engine) 등, CVC 사이클에 기반한 엔진을 기존의 터보제트와 결합한 형태의 복합 사이클 추진기관 개념을 고려하고 있다. 최근의 연구를 통하여 PDE 등 CVC 사이클 엔진은 높은 초음속 영역에서 램제트 엔진 보다 높은 비추력을 가지는 것으로 판단되며, 터빈과 같은 고온 회전 부품이 없기 때문에 높은 초음속에서의 작동에 문제가 없을 것으로 예상된다.



Fig. 8 PW사의 PDE 시연 장면

따라서 HCV를 위한 TBCC 통합 체계는 기존에 개발된 군용 터보 팬 엔진과 CVC 엔진을 결합하여 마하수 4까지 이용 가능한 추진 기관과, 마하수 2.5부터 6 이상까지 작동 가능한 dual-mode 램제트/스크램제트 엔진을 병렬로 결합한 형태가 될 것으로 보인다. 이러한 형태의 엔진 조합에 필요한 기술적 문제는 모두 해결 가능한 것으로 보이며, 이상으로 극초음속 장거리 비행을 위한 추진 체계 기술은 완성될 수 있는 것으로 보인다.

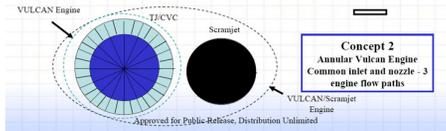


Fig. 9 VULCAN 엔진 통합 개념도

3. 극초음속 항공기 요소 기술

극초음속 항공기 개발을 위한 요소 기술에는 추진 기관 이외에도 다양한 분야의 기술적 난관이 존재한다. 우선 공력 가열의 문제는, 현재 마하수 6 정도의 비행체를 목표로 하고 있기 때문에 기존의 우주왕복선에 이용된 열차폐/내열 재료 및 구조 설계 기술과 함께, 연료를 이용한 엔진 및 기체의 재생 냉각 기술을 통하여 해결 가능한 것으로 보인다. 엔진 및 기체의 구조 재료로는 인코넬 계열 등의 내열 합금이 고려되고 있으며 CMC 등의 탄소 및 실리콘 계열의 복합재료로 주요 부품을 가공하는 방법의 연구가 상당히 진척되었다.

비행체의 공력 형상 설계는 임무에 따라 최적의 형태가 다를 수 있지만, 극초음속 장거리 비행을 목표로 하는 경우 wave rider 형태가 최적으로 여겨진다. 공기 흡입구 등에는 공력 손실을 최소화할 수 있는 형태로써, sugar-scoop 형태의 흡입구가 고려되고 있다. 이에 따라 스크램 제트 엔진 내부의 유도로 원통 및 타원 단면 형태가 고려되고 있으며, 배기구는 터보제트에서 스크램 제트 까지 이용 가능한 통합된 플러그 노즐 또는 aerospike 노즐이 이용될 것이다. 아울러 제어의 측면에서는 극초음속 공기역학에 기반한 새로운 항법 및 제어 체계를 개발할 수 있을 것으로 기대되며, 그 밖에 극초음속 영역에서 발생하는 약한 이온화 경계층을 통한 통신 기술 개발도 새로운 도전 과제이다.

4. 맺음 말

이상에서 살펴본 바와 같이 DARPA에서는 현

단계에서 획득 가능한 기술적 수준을 바탕으로, 2009년 까지 미사일 형태의 극초음속 비행체, 2012년 까지 재사용 가능한 무인기, 그리고 머지않은 미래에 대형 극초음속 순항기를 개발하는 것을 계획하고 있다.

국내에서는 KSLV 프로그램을 통하여 재생 냉각 액체 로켓 엔진 개발 기술을 보유하고 있으며, 기타 관련 프로그램에 의하여 상당 수준의 열/공력, 추진기관 및 하부 체계의 설계/해석 기술 및 이를 담보하는 재료/가공 기술과 시험평가 기술과 장비 및 시설을 확보한 것으로 여겨진다. 따라서 이들을 보완하여 활용하면 첫 번째 단계의 극초음속 비행체 개발은 기술적으로 충분히 가능한 여건에 있는 것으로 보이며, 이를 통하여 국력 향상에 획기적으로 기여할 수 있을 것으로 여겨진다.

후 기

본 논문의 방위사업청 및 국방과학연구소 지원 장기기초연구 “스크램제트 추진기관 연소연구”의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Boudreau, A., "Hypersonic Air-Breathing Propulsion Efforts in the Air Force Research Laboratory," AIAA 2005-3255, 2005.
2. Mutzman, R., Murphy, J. and Hank, J., "The X-51A Scramjet Engine Flight Demonstration Program," AIAA-2008-2540, 2005.
3. Kazmar, R., "Airbreathing Hypersonic Propulsion at Pratt & Whitney - Overview," AIAA 2005-3256, 2005.
4. Walker, S., Morris, S., Mamplata, C. and Tang, M., "Falcon HTV- 3X: A Reusable Hypersonic Test Bed," AIAA-2008-2544, 2008.
5. Tang, M., Hamilton, B.A., Chase, R.L., "The Quest for Hypersonic Flight with Air-Breathing Propulsion", AIAA 2008-2539, 2008.
6. Walker, S., Tang, M., Morris, S. and Mamplata, C., "Falcon HTV-3X - A Reusable Hypersonic Test Bed," AIAA 2008-2544, 2008.
7. Bussing, T., "VULCAN Overview," VULCAN Industry Day Agenda, June 10 2008.