

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(7), 558-565(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.7.558

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

우주개발을 위한 차세대 메탄엔진 개발 동향

정기정*, 배진현*, 정석규*, 손채훈**, 윤영빈***

Development Trend of Perspective Methane Rocket Engines
for Space Development

Gijeong Jeong*, Jinhyun Bae*, Seokgyu Jeong*, Chae Hoon Sohn** and Youngbin Yoon***

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University*

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Sejong University**

Department of Mechanical and Aerospace Engineering and the Institute of Advanced Aerospace
Technology, Seoul National University***

ABSTRACT

Recently, there has been a tendency to lead the private sector in the launch vehicle market, and as the market has become saturated, efforts are being made to reduce the launch cost. Advanced countries in space development have promoted manned long-range space exploration plans. As oxygen/methane is more efficient, lower cost, and eco-friendly than typical propellants, and can be produced locally on an alien planet, it is the most suitable next-generation propellant to meet this trend. Now methane engine development is accelerating due to changes in international conditions and corporate environment. It is also expected to develop a methane engine in order to survive in this global trend and to keep up with the launch vehicle market in the future.

초 록

최근 발사체 시장에 민간주도의 경향이 두드러지게 나타나며, 시장이 포화되어감에 따라 발사비용을 줄이기 위한 노력이 지속되고 있다. 우주탐사 선진국에서는 유인 장거리 우주탐사계획이 추진되고 있다. 산소-메탄의 조합은 기존의 추진제에 비해 효율이 높고 경제적, 친환경적이며 외계행성에서 현지조달이 가능하기 때문에 이러한 경향에 부응하기 위한 가장 적합한 차세대 추진제로서 주목을 받고 있다. 현재 국제정세의 변화와 기업환경 변동에 따라 메탄엔진 개발이 더욱 본격화·가속화되고 있다. 우리나라도 이러한 세계적 흐름에 편승하고 향후 발사체 시장에서 뒤처지지 않기 위해서는 메탄엔진 개발이 필요하다고 판단된다.

Key Words : Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Methane/Oxygen Propellant(메탄/산소 추진제), Low Cost Launch Vehicle(저비용 발사체), Reusable Launch Vehicle(재사용 발사체), Manned Planetary Exploration(유인 행성 탐사)

† Received : May 10, 2017 Revised : June 27, 2017 Accepted : June 28, 2017

*** Corresponding author, E-mail : ybyoon@snu.ac.kr

I. 서 론

우주 비행용 로켓엔진 기술은 현재 과학적 목적의 우주탐사와 인공위성을 이용한 여러 상업적 목적으로 사용되고 있다. 로켓 기술 개발 초기에는 구소련과 미국이 주도적이었으나, 유럽, 중국에 이어 최근에는 인도와 일본, 이란, 북한, 우리나라에 이르기까지 로켓 기술을 보유하는 국가의 수가 늘어나고 있으며 기술 자체가 안정화 되어 가고 있는 추세이다. 이에 따라 현재는 상업적으로는 과거 몇몇 국가가 독점했던 인공위성 발사체 시장이 다양화하여 포화되는 경향을 보이고 있으며, 우주 탐사 분야에서는 냉전시대 이후로 한동안 조명 받지 못했던 달/화성 탐사가 다시 재개되고 있다.

과거 경쟁적 우주개발을 위한 목표에서 변경된 현재는 상업성을 높이기 위한 고효율과 저비용, 친환경성의 특성을 가지는 추진제가 요구되고 있다. 또한 최근에는 장거리·왕복 유인 우주 비행계획이 잇따라 추진되면서 행성 표면에서 추진제 합성이 가능한 추진제를 찾게 되었다. 이러한 요구사항을 충분히 만족시키는 추진제 조합은 액체산소/액체메탄(또는 액화천연가스)이라 할 수 있다. 러시아와 미국을 비롯한 우주개발 선진국에서는 메탄을 연료로 사용하는 액체로켓엔진을 개발하고 있으며 최근 그 성과가 두드러지고 있다[6, 14, 18, 21, 24]. 국내에서도 메탄엔진 개발 시도가 있었으며 2006년에는 연소시험을 성공한 바 있다[38].

우리나라는 우주개발 중장기 계획에 달 탐사를 포함하였으며, 나아가 화성 및 소행성 탐사에도 나설 예정이다[5]. 또한 KSLV-2 이후에는 국산 발사체를 가지고 시장에 진출할 것으로 예상된다. 새로운 우주 경쟁에서 유리한 위치를 차지하기 위해서는 메탄으로 대표되는 차세대 로켓엔진 기술 개발이 유망하다. 따라서 본 논문에서는 메탄엔진 기술개발 현황에 대해 소개하고 각국의 우주정책과 우주탐사계획이 메탄엔진 기술개발 진행에 어떻게 영향을 주고 있는지 분석하고자 한다.

II. 본 론

2.1 로켓연료로서 메탄의 특성

Figure 1에 의하면 산소-메탄 조합이 기존의 산소-케로신, NTO-MMH등의 추진제 조합에 비해 우수한 비추력 특성을 나타낸다. 혼합비의 전

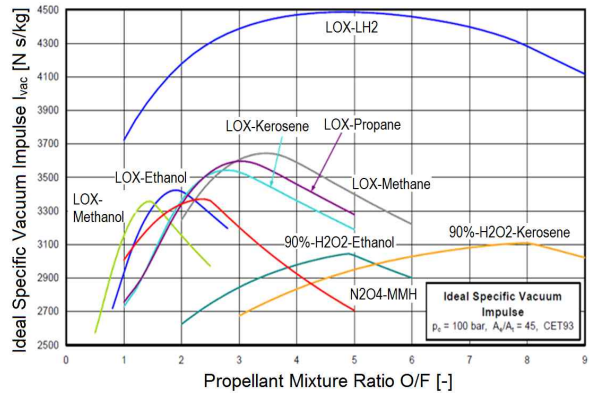


Fig. 1. Specific impulse of rocket propellants[3]

Table 1. Characteristics of Liquid fuels[1,2,29]

	Melting point [°C]	Boiling point [°C]	Density [kg/m ³]	Isp [sec]
Hydrogen	-259.14	-252.87	70	455.9
Methane	-182.5	-161.49	422.62	363
RP-1	-49	177~274	810~1020	353

구간에서 수소-산소는 메탄보다 비추력이 크지만, Table 1에 의하면 수소는 밀도가 낮고 끓는 점이 상당히 낮기 때문에 탱크의 부피가 커지고 단열재의 두께가 증가한다. 이는 발사체의 크기를 키우고 페이로드의 중량 감소에 영향을 주게 된다.

메탄은 오랜 시간에 걸쳐 산업용, 가정용 등으로 널리 쓰이고 있다. 그러므로 생산, 조달, 수송 체계가 잘 구축되어 있어 기존 연료에 비해 상당히 수월하게 얻을 수 있다. Fig. 2에 의하면 LNG는 케로신 RP-1보다 약 2배 저렴하며 수소에 비해서는 30배가량 가격이 낮다.

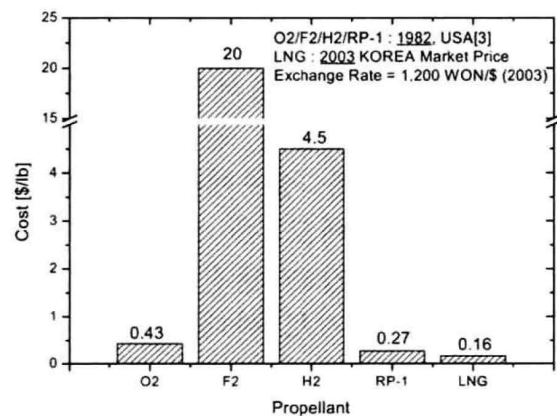


Fig. 2. Cost of rocket propellants[4]

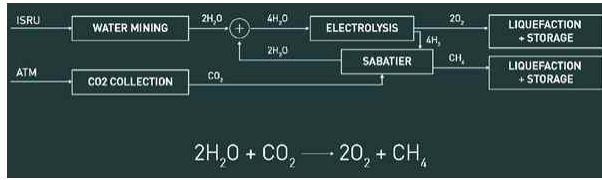


Fig. 3. Methane and oxygen production on the surface of Mars[6]

메탄은 기존 하이드라진 계열 연료와 같은 독성이나 부식성을 나타내지 않으며, 여타 탄화수소 계열 연료에 비해 탄소수가 낮기 때문에 불완전 연소생성물에 의한 오염도 적다. 그리고 단순한 분자구조로 인해 화성과 같은 외계행성에서 Fig. 3.과 같은 방법으로 합성이 가능하다.

2.2 국외의 우주 정책 및 우주 탐사 계획

2.2.1 러시아

경제적으로 어려움에 처해 있어 우주 개발에 소극적이었던 러시아는 2010년 이후 우주산업을 부흥시키기 위한 노력을 지속하고 있다.

2.2.1.1 산업체계 개편

기존의 사회주의적 국가체제에 따라 설립되었던 로켓 및 우주기술 관련 기관, 업체, 연구소 등의 조직이 변화하고 있다. 소련시절의 우주개발은 정부가 주도하여 계획적으로 시행되었으며, 관련 산업체계의 움직임도 정해진 방향에 따라 움직였다. 그러나 현재는 시장경제체제에 따른 전 세계적인 경쟁에 내몰리게 되었다. 러시아 정부는 우주개발 및 발사체 시장에 대처하기 위해 기존 체계의 형태를 바꾸고 있다. 지난 2015년, 미국의 NASA와 유사한 위치를 가지고 국가적 우주 정책을 총괄하는 기관인 러시아 연방 우주청(Roscosmos)이 해체되어 동명의 공기업으로 바뀌었으며, 통합 로켓 우주 공사(URSC)를 합병하였다.

러시아의 로켓엔진 기업은 최근 재정비되고 있으며 통합적인 방향으로 개편되고 있다. 국내의 지난 KSLV-1 사업에서 나로호 1단 엔진(RD-151)을 개발한 NPO Energomash를 중심으로 하여 러시아 연방의 로켓엔진 통합사업체를 수립하고 있다. 중소 규모의 엔진을 주로 개발하였던 KBKhA[30] 및 KBKhM[31], 소형추력기 개발업체 NIIMash[32]와 액체로켓엔진 제작사인 VMP[33], OJSC Proton-PM[34]등을 2017년 말까지 자회사 형식으로 흡수할 예정이다.

2.2.1.2 연방 우주 프로그램

러시아는 2011년 군사용 위성 Geo-IK-2을 탐

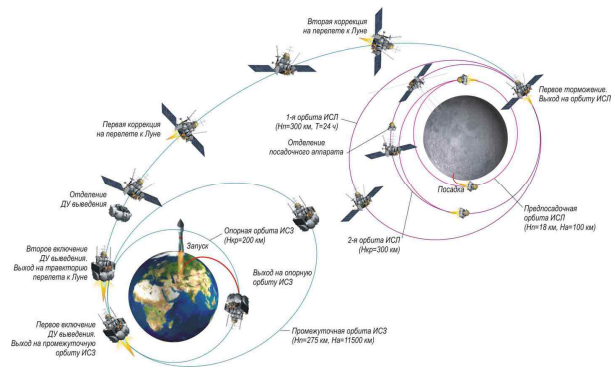


Fig. 4. Russian Lunar Exploration Project 'Luna-glob'

재하고 발사된 로켓(Rokot)발사체가 실패하였고, 국제우주정거장(ISS)의 보급 우주선인 프로그레스(Progress)가 발사체엔진 이상으로 실패하였으며 화성 탐사선 Phobos-Grunt도 추락하는 등 우주 사업에서 어려움을 겪고 있다. 러시아는 이를 타개하고자 장기 우주개발 전략을 수립하였으며, 최근 신규 연방우주프로그램 2016-2025를 시작하였다. 프로그램에서는 우주과학 분야 재정이 최소한으로 삭감되고 위성 군(群)증가에 치중하였으나 달 탐사계획(Luna-glob, Luna-resource1,2, Luna-grunt)과 Exo-Mars 프로그램 등에 따른 화성탐사는 잔류하였다. 유인 달 탐사는 2025년 이후 본격적으로 시행하여 2030년까지 달 거주기 건설을 목표로 하였다[7].

이 우주프로그램의 초기 안에서는 발사비용을 대폭 감소시킬 수 있는 핵심이며 유인 달 탐사에 사용될 1단용 재사용 산소-메탄엔진을 개발하기로 하였으나, 우크라이나 내전 개입 등의 이유로 미국에 의한 대러시아 재제가 심화되는 등 경제적 이유로 인해 대형 메탄엔진개발에 착수하는 시점이 뒤로 미루어지게 되었다. 그러나 러시아는 연방우주프로그램에서 메탄엔진을 완전히 배제하지 않았으며 향후 재사용 발사체를 위한 차세대 메탄엔진 개발을 시작하였다[7, 20].

2.2.2 미국

미국은 최근 NASA의 예산 부담을 경감하기 위해 민간기업에 우주산업의 많은 부분을 이양하고 있으며, NASA는 달·화성 탐사 프로그램을 지속하고 있다.

2.2.2.1 러시아 의존도 경감

우주왕복선 프로그램이 종료된 이후, 국제우주정거장(ISS)에 인력과 물자를 수송하는 것은 대부분 러시아의 유인우주선 Soyuz 및 무인화물선 Progress에 의존해 왔으며, Delta IV를 제외한

Atlas V 및 Antares 발사체는 러시아산 RD-180/181 계열 엔진을 사용해 오고 있다. 그러나 우크라이나 분쟁 등 외교관계가 악화될 시 공급이 불안정해질 가능성을 항상 내포하고 있어 러시아에 의존하고 있는 상황에서 벗어나기 위해 신규 발사체 및 엔진을 개발하고 있다. 미국 정부는 이를 민간이 주도하여 개발하도록 결정하였으며, 이러한 정책에 따라 Space X, Blue origin, XCOR과 같은 업체가 성장하고 있다[8]. 민간업체는 발사비용을 대폭 줄이는 데에 주력하고 있다.

2.2.2.2 유인 우주 탐사

아폴로 계획 이후 중단되었던 유인 달 탐사를 재개하고자 시도하였던 컨스텔레이션 계획과 Ares V 발사체가 2010년 취소되었다. 그러나 직후에 미국 정부는 바로 2030년 화성 유인탐사계획을 발표하였으며, Orion 우주선을 이용한 달 탐사계획은 잔류하였다. 이러한 달/화성 유인탐사계획을 뒷받침하기 위한 초중량급 우주 발사체 시스템(SLS)을 개발하고 있다.

2016년 세계우주대회(67th IAC)에서 Space X의 Elon Musk가 유인 화성탐사 계획(ITS)을 발표하였다. 재사용 발사체를 이용하여 지구 궤도상에서 화성으로 가기 위한 추진제를 재보급하는 방식이며, 이를 실현하기 위해 Saturn-V를 상회하는 발사중량 10,500t의 새로운 발사체 개발을 공개하였다[6].

2.2.3 유럽

유럽우주국(ESA)은 미국의 Space X Falcon9과 중국의 장정3B으로 대표되는 저가발사체에 비해 Ariane 5의 시장 경쟁력이 떨어지는 점을 자각하여 재사용이 가능한 새로운 Ariane 6 발사체를 2020년까지 개발하기로 하였다. Ariane 6는 Adeline이라 불리는 부분 재활용 방식을 채택하였다. 이는 활공하는 무인기의 형식으로 1단비용의 70~80%를 차지하는 엔진과 전장품만을 부분

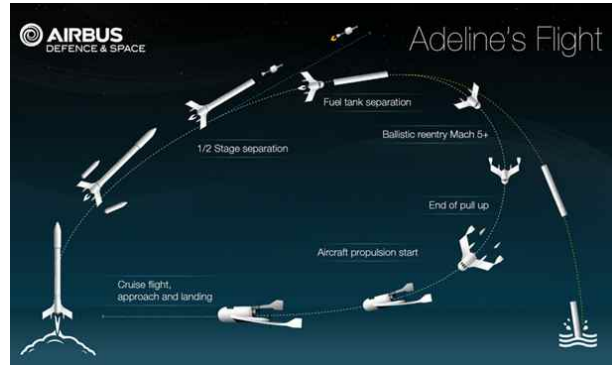


Fig. 6. ADvanced Expendable Launcher with INnovative engine Economy(Adeline) [10]

적으로 재사용하는 방식이다[9].

ESA는 현재 화성에 탐사선뿐 아니라 탐사차를 착륙시켜 표면을 조사하는 계획인 Exo-Mars 프로그램을 시행하고 있다. 유럽은 미국과 러시아와는 달리 탐사선만 스스로 개발하고 발사체는 러시아의 Proton-M 로켓을 사용하기로 하였다 [11].

2.3 국외 메탄 엔진 개발

2.3.1 러시아

러시아는 산소-메탄 액체로켓엔진의 가능성 평가 및 개발 타당성, 기존 엔진에서 연료를 메탄으로 전환하는 실현가능성 확인에 관심을 두고 90년대 이후부터 기초과학적 및 실험적으로 상당히 많은 연구를 수행하였다.

2002년부터 NPO Energomash, KBKhA, Keldysh Research Center[35]는 유럽-러시아 공동 프로젝트인 «Volga»에 참여하였고, 향후 산소-메탄 엔진을 사용하기 위한 설계 및 연구를 수행하였다. 특히 KBKhA사는 1950년대부터 로켓과 우주선 용 액체로켓엔진의 개발업체로서, 90년대 들어 추력 5~240tf급의 메탄엔진의 설계, 재료, 제작기술을 연구하였다.

2.3.1.1. RD0146DM

KBKhA는 차세대 발사체 Angara-A5의 상단에 사용될 목적으로 미국 Pratt&Whitney사의 RL-10 엔진을 기반으로 수소연료 Expander-cycle 엔진 RD0146을 개발하였다[12]. RD0146은 연료와 산화제를 공급하는 개별적 터보펌프를 가지며, 펌프를 구동하기 위해 전통적인 높은 가스발생기 온도(800℃까지) 대신, 엔진 연소실에서 가열된 (30-150℃) 연료를 적용하였다. 2007년에는 액체 산소-액화천연가스 추진제를 사용하는 개량형인 RD0146DM의 연소시험에 성공하였다[13].

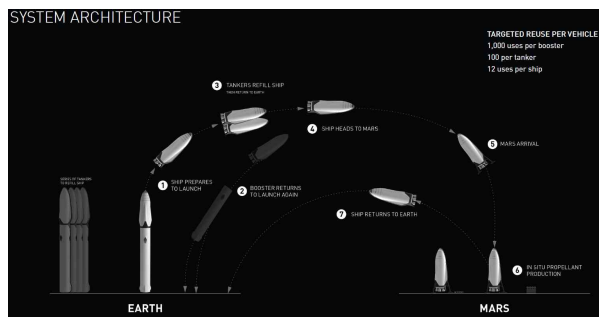


Fig. 5. Interplanetary Transport System[6]



Fig. 7. RD0146DM[14]

2.3.1.2. RD0162

2012년 Khronichev State Research and Production Space Center[36]의 요청으로 친환경, 저비용, 재사용 목적으로 1단용 산소-메탄 엔진의 설계를 수행하였다. RD0162는 250~300회의 비행 사이클 동안 사용 가능하도록 설계되었다. 이는 200tf급 추력의 재사용 가능한 신규 발사체 1단(MRKS-1)에 사용할 목적을 갖고 있다.

신규 연방 우주 프로그램 2016-2025에 따라, 차세대 재사용 발사체를 위한 주 추력용 추진시스템의 기본 요소로서 차세대 액체산소-액화천연가스 로켓엔진 개발을 시작하였다. Roscosmos는 NPO Energomash 산하 KBKhA와 2016-2018년 기간으로 추력 40tf급 실험용 엔진 및 7.5tf급 시연용 엔진을 포함하여 최종적으로 추력 85tf급 프로토타입 엔진을 개발하기로 하는 1차 계약을 체결하였다[17-20].

Two spread turbine on one roller[37]를 최초로 사용한 시연용 엔진 RD0162D2A은 2016년 12월에 10회의 연소시험을 성공하였다.

RD0162는 터보펌프는 산화제(산소)과잉 가스와 냉각 유로에서 기화된 연료(메탄)로 구동되는 터빈 2개가 하나의 축에 연결된 형식이다. 산화제 유로에는 예연소기가 있으나, 연료 유로에는

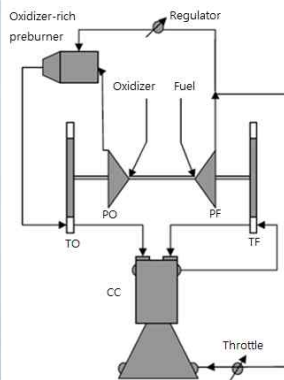


Fig. 8. RD0162 and system schematic[15,16]

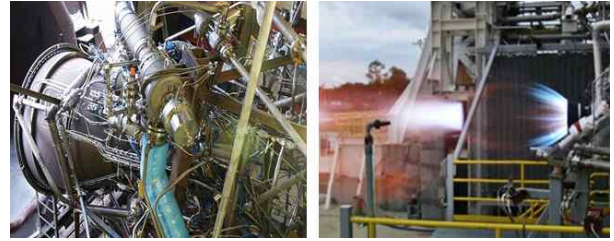


Fig. 9. RD0162D2A and engine fire-test[18]

예연소기가 없는 구조로서 터빈(터빈 입구 온도 -588K) 2개로 펌프가 구동되며, 연소기(내부압력 $p_c=17.16\text{MPa}$)로는 추진제가 gas-gas 형식으로 유입되는 Expander cycle과 staged combustion cycle 이 섞인 형태의 엔진이다. 터빈 구조체에 고가의 내산화·내열소재가 아닌 단순히 철합금을 사용하였음에도 불구하고, 가스의 온도가 현저히 낮기 때문에 산화제 가스유로에서 구조요소가 산화될 위험을 상당히 감소시킬 수 있게 되었다. 연료과잉 터빈가스 도관에서는 연소생성물이 부재함으로 인해 그을음 발생과 관련한 문제는 사라지게 되었다. 또한 하나의 축에서 터빈 2개를 사용하였기 때문에 출력 여유가 늘어나게 되었다. 그러므로 엔진의 추력강화모드에서도 터빈 입구 온도가 허용한계 내에 있으므로 추력을 135%까지 증가시킬 수 있게 되었다.

2.3.2 미국

2.3.2.1. BE-4

Blue Origin사의 BE-4는 New Shepard 준궤도 우주선에 사용된 수소엔진 BE-3의 개량형으로서 지구 궤도선 또는 달 표면 착륙선으로 사용될 New Glenn에 사용될 예정이다.

또한 United Launch Alliance(ULA)의 차세대 발사체 Vulcan의 주 엔진으로서 미국이 발사체 엔진을 러시아의 RD-180에 의존하고 있는 것을

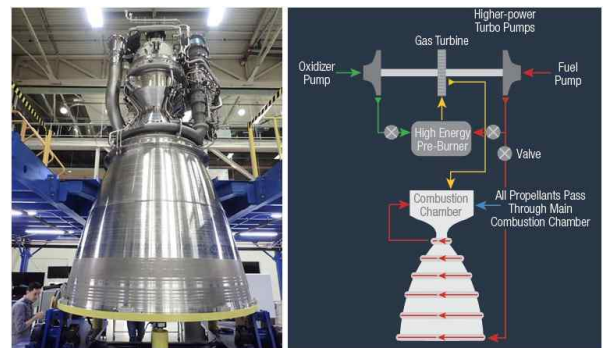


Fig. 10. BE-4[21] and oxygen-rich staged combustion cycle schematic (picture by ULA)

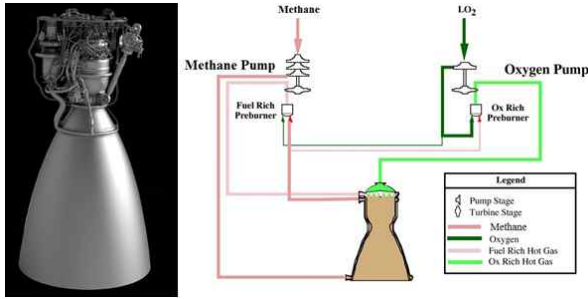


Fig. 11. Raptor engine and system schematic Full-Flow Staged Combustion Scheme (picture by Purdue University/Spaceflight) 101[24]

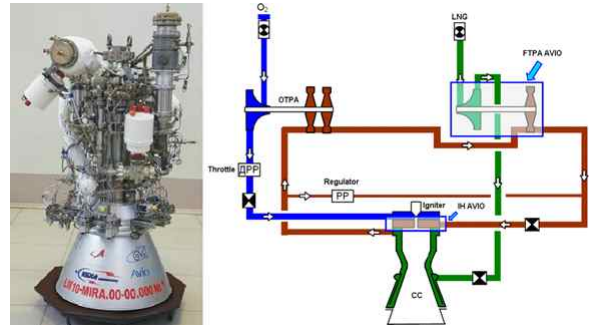


Fig. 12. LM10-MIRA and simplified scheme of demonstrator engine

타개발 대안으로서 각광받고 있다. 2017년 3월 중 조립을 완료하였다.

BE-4는 oxygen-rich staged combustion cycle 엔진으로서, 하나의 터보펌프 유닛을 가진다. 펌프에서 나온 산화제는 모두 예연소실로 이동하며 연소실에서는 산화제 과잉 예연소가스과 냉각유료를 통과한 연료가 혼합된다[21-23].

2.3.2.2. Raptor

Space X는 유인 화성 탐사 및 이주계획을 실현시키기 위해 초중량급 발사체를 개발 중이다. 이를 위해 2002년부터 재사용이 가능한 추력 300tf급 산소-메탄엔진 Raptor를 개발하고 있다. Raptor엔진은 Full-flow staged combustion cycle로서, 연료와 산화제의 펌프는 각각 개별적인 터빈에 의해 구동된다. 연소실 냉각유료를 통과한 연료(메탄)의 대부분은 연료과잉 예연소기로 유입되며, 펌프를 통과한 산화제(산소)의 대부분은 산화제 과잉 예연소기로 들어가 각각 연소가스를 발생시킨다. 따라서 연소실 내로 추진제는 gas-gas형태로 들어가 연소된다.

Raptor엔진은 2016년 9월 Texas의 시험시설에서 첫 지상 연소시험을 성공하였다.

2.3.3 유럽

2.3.3.1. LM10-MIRA

이탈리아 AVIO사는 2007년부터 러시아 연방우주청의 지원 아래 KBKhA와 공동으로 Expander-cycle 액화천연가스 엔진의 연구개발을 진행하였다. LM10-MIRA는 Vega-E 발사체용으로 LOx-LH2 엔진 RD0146을 기반으로(RD0146CH[26]) 개발되었다. 개발과정에서 AVIO사는 분사기 헤드, 연료 터보펌프를 담당하였다.

2012년 연소실과 분사기 헤드의 작동능력을 검증하였으며, 2014년 5월에는 KBKhA의 러시아 내 시험장에서 IKA, ELV, AVIO사의 참관 아래

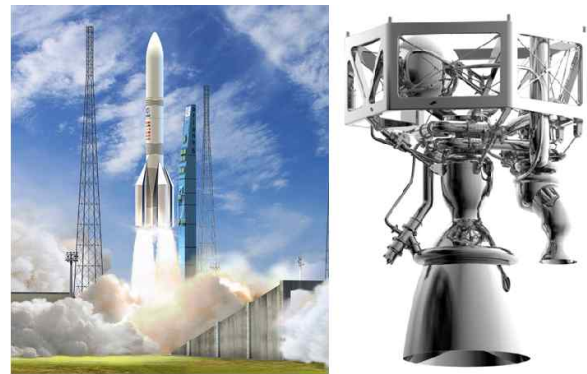


Fig. 13. Ariane 6 and Prometheus engine [27,28]

full scale 연소시험을 성공하였다. 이에 따라 이탈리아 우주청과 러시아 연방우주청은 향후 공동 사업을 통해 협력하기로 결의하였다[14, 25-26].

2.3.3.2. Prometheus

저비용 발사체에 대한 필요성이 증대됨에 따라 유럽우주국(ESA)은 8천5백만 유로를 할당하여 완전히 재사용가능한 Ariane 6 발사체의 1단용 산소-메탄엔진인 Prometheus엔진 개발을 시작하였다. 프랑스 국립우주국(CNES)와 Airbus Safran Launchers사는 2015년부터 관련연구를 시행해 온 바 있다. 엔진의 단가는 Vulcain 2.1엔진의 1/10인 1백만 유로이나, 추력은 동일한 150tf을 목표로 하고 있다.

III. 결 론

메탄엔진은 우주기술 선진국에서 발사체의 비용을 절감하고 유인 달/화성 탐사를 위한 목적에서 본격적으로 개발되고 있다. 상용화를 추진 중인 메탄엔진의 작동 사이클은 다양한 형식을 취하고 있다.

러시아는 경제적 문제로 인해 연방우주국이

민영화되는 등 발사체 및 신규 엔진 개발에서 예산삭감이 있었지만, 관련 산업체를 통합·정비하고 수십 년간 축적한 메탄엔진 기술 노하우를 토대로 하여 국가주도로 비교적 빠른 개발진행을 보이고 있다.

미국은 NASA의 예산부담을 덜기 위한 목적으로 민간이 발사체 시장에 개입할 수 있도록 하였다. Elon Musk와 Jeff Bezos등 신흥 자본력을 바탕으로 하여 메탄엔진을 경쟁적으로 개발하고 있다.

유럽의 메탄엔진 개발은 비교적 늦은 편이나, 새로운 발사체 시장 판도에 대처하려 노력하고 있다.

이와 같이 발사체 비용을 줄일 수 있어 세계 시장에서도 경쟁력을 갖출 수 있으며, 향후 행성 탐사에도 적용할 수 있는 메탄엔진 개발이 국내에서도 지속될 필요가 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 서울대학교 차세대우주추진연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과이며, 2017년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(한국연구재단-2016-글로벌박사양성사업) 및 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2015R1A2A2A010043)입니다.

References

- 1) Mazloomi, Kaveh, and Chandima Gomes, "Hydrogen as an energy carrier: prospects and challenges", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, Issue. 5, 2012, pp.3024~3033.
- 2) Sedano, Nils, "LOX/methane rocket engine research and development.", *42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2006.
- 3) Oskar J. Haidn, "Advanced Rocket Engines", Institute of Space Propulsion, German Aerospace Center (DLR) 74239 Lampoldshausen, German
- 4) Poong-Gyoo Han, Hyuck-Joon Namkoun, Kyoung-Ho Kim, "Evaluation on the Characteristics of Liquefied Natural Gas as a

Fuel of Liquid Rocket Engine", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.32, Issue.3, 2004.4, pp.66-73

5) "Mid- and long-term plan of space development - Modification of the basic plan for the second space development promotion", Joint compilation of related departments, Nov. 2013. [Online]. Available: <http://m.msip.go.kr>

6) E. Musk, "Making humans a multiplanetary species", 26th IAC Guadalajara, Mexico 2016. [Online]. Available: <http://www.spacex.com/mars>

7) "Basic provisions of the federal space program 2016-2025(in Russian)", [Online]. Available: <https://www.roskosmos.ru/22347/>

8) N. Choi, "Future prospect of world space development and policy direction of major countries(in Korean)", *Science and technology policy*, Vol. 22, Issue 84, pp. 69-85, Dec. 2012. [Online]. Available: <http://www.stepi.re.kr/module/publishSubDown.jsp?categCd=A0504&ntNo=189&sbNo=6>

9) "SpaceX Says Falcon 9 To Compete For EELV This Year", [Online]. Available: <http://aviationweek.com/awin/spacex-says-falcon-9-compete-eelv-year>

10) "Airbus Defence and Space's solution to reuse space Launchers", [Online]. Available: <https://airbusdefenceandspace.com/reuse-launchers/>

11) "Robotic exploration of Mars", [Online]. Available: <http://exploration.esa.int>

12) Rachuk V, Titkov N. "The first Russian LOX e LH2 expander cycle LRE: RD0146". 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion conference & exhibit, AIAA 2006-4904, Sacramento, California; 2006.

13) "RD0146, RD0146D. Carrier-rocket "Angara-A5"(in Russian)", [Online]. Available: <http://www.kbkha.ru/?p=8&cat=8&prod=73>

14) Rudnykh, M., Carapellese, S., Liuzzi, D., Arione, L., Caggiano, G., Bellomi, P., D'Aversa, E., Pellegrini, R., Lobov, S.D., Gurtovoy, A.A., Rachuk, V.S. "Development of LM10-MIRA LOX/LNG expander cycle demonstrator engine". *Acta Astronaut.* Vol. 126, pp.364-374, 2016.

15) <http://engine.space/dejatelnost/develop/d>

vigatel-rd-0162/

16) A. F. Yefimochkin, S. P. Khrisanfov, P. V. Kafarena, V. R. Rubinsky and etc., "Investigation of the working process in the chamber of LRE working on propellant Liquefied natural gas (LNG)-oxygen(in Russian)", NTJ Aerospace engineering and technology, Vol. 4, 2010, pp.21-25.

17) "Roscosmos ordered a methane engine for a reusable rocket(in Russian)", [Online]. Available: <https://vz.ru/news/2016/11/1/841273.html>

18) "Governor visited the test complex of KBKhA(in Russian)", [Online]. Available: http://www.kbkha.ru/?p=16&news_id=183

19) "RCC Progress: Soyuz-5 flight model is expected by 2022(in Russian)", [Online]. Available: <https://ria.ru/interview/20150818/1190701345.html>

20) S. Woo, G Jeong, S. Bak, J. Lee, C. Ha, S Yoon, "About the New Federal Space Program(in Korean)", KORUSTEC, Russian aerospace technology trends, Vol. 8, pp. 18-24, May. 2016.

21) "One giant leap: Jeff Bezos shows off Blue Origin's shiny new BE-4 rocket engine", [Online]. Available: <http://www.geekwire.com/2017/jeff-bezos-blue-origin-be-4-rocket-engine/>

22) "BE-4: America's next generation engine", [Online]. Available: <https://www.blueorigin.com/be4>

23) "ULA taps Blue Origin for powerful new rocket engine", [Online]. Available: https://spaceflightnow.com/news/n1409/17ulablueorigin/?fb_comment_id=839393116095341_839434626091190#.V-GLjnoSNWg

24) "SpaceX - Launch Vehicle Concepts & Designs", [Online]. Available: <http://www.spaceflight101.com/spacex-launch-vehicle-concepts.html>

25) "In the KBKhA(Voronezh) successfully tested a new rocket engine (PHOTO)(in Russian)" [Online]. Available: <http://bloknot-voronezh.ru/news/v-voronezhskom-kbha-uspeshno-ispyitali-novyyi-raketnyiy-dvigatel-foto>

26) "Successful fire test of the Russian-Italian liquid rocket engine", [Online]. Available: http://www.kbkha.ru/?p=17&news_id=128

27) "France's Prometheus reusable engine becomes ESA project, gets funding boost", [Online]. Available: <http://spacenews.com/frances-prometheus-reusable-engine-becomes-esa-project-gets-funding-boost/>

28) "Ariane 6 rocket holding to schedule for 2020 maiden flight", [Online]. Available: <https://spaceflightnow.com/2016/08/13/ariane-6-rocket-holding-to-schedule-for-2020-maiden-flight/>

29) Edwards, Tim, "Kerosene" Fuels for Aerospace Propulsion-Composition and Properties", *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2002.

30) Chemical Automatics Design Bureau(KBKHA), [Online]. Available: <http://www.kbkha.ru/>

31) A.M. Isayev Chemical Engineering Design Bureau(KBKHM), [Online]. Available: <http://kbhmisaeva.ru/>

32) Federal State Unitary Enterprise Research&Development Institute of Mechanical Engineering(NIIMASh), [Online]. Available: <http://www.niimashspace.ru/>

33) Voronezh Mechanical Plant(VMP), [Online]. Available: <http://vmzvrn.ru/>

34) Russian engine and heavy machinery manufacturing plant (OJSC Proton-PM), [Online]. Available: <http://www.protonpm.ru/>

35) State Scientific Centre Keldysh Research Center, [Online]. Available: <http://kerc.msk.ru/>

36) Khrunichev State Research and Production Space Center, [Online]. Available: <http://www.khrunichev.ru/>

37) I.I. Belousov, V.V. Golubyatnik, A.V. Yeliseyev, A.F. Efimochkin, S.N. Kozlov, "Conception Creation More Than Once March Oxygen-Marsh-gas Liquid Rocket Engine, at What Use Turbopumping Aggregate with Two Spread Turbine on One Roller"(in Russian), *Bulletin of Voronezh Natl. Tech. UniV.*, no.5, Vol.10, 2014.

38) K. Kim, "Development of 10ton Thrust Liquid Rocket Engine using LOX+LNG with Turbopump System called CHASE-10(in Korean)" KSPE Spring Conference, 2006, pp.181-184.