

# 융합연구리뷰

Convergence Research Review

고상호 (한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수)

김철웅 (한국항공우주연구원 책임연구원)

우주발사체 회수 및 재사용 기술

정웅섭 (한국천문연구원 책임연구원)

박용선 (서울대학교 물리·천문학부 천문학 전공 교수)

안상현 (한국천문연구원 선임연구원)

우주/천문 관측 기술

# CONTENTS

- 01 편집자 주
- 03 우주발사체 회수 및 재사용 기술
- 37 우주/천문 관측 기술



융합연구리뷰 | Convergence Research Review  
2019 June vol.5 no.6

**발행일** 2019년 6월 10일

**발행인** 김주선

**편집인** 최수영·권영만

**발행처** 한국과학기술연구원 융합연구정책센터  
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5  
Tel. 02-958-4980 | <http://crpc.kist.re.kr>

**펴낸곳** 주식회사 동진문화사 Tel. 02-2269-4783



### 우주발사체 회수 및 재사용 기술

1960년대 미국과 소련의 “우주경쟁(Space Race)”으로부터 본격적으로 시작된 우주전쟁은 우주강국들의 막대한 투자와 경쟁적 R&D로 인해 급격한 기술의 발전이 진행되었다. 초기 달 탐사 이후 유인화성탐사를 목표로 하는 현재의 우주탐사, 그리고 더 깊은 심우주탐사와 극한환경 실험을 위한 우주정거장 건설 등 수많은 관련 연구가 지금도 진행되고 있다. 이 모든 것을 가능케 한 우주발사체는 지구에서부터 우주로 다양한 탑재물들을 옮기는데 사용되었다. 현재까지의 소모성, 즉 일회용 발사체는 큰 비용대비 재사용이 불가능하여 비경제적이었으며, 우주 쓰레기로 전락하여 인공위성과 같은 물체와의 충돌을 야기하는 위협이 되고 있다.

이에, 본 호 1부에서는 앞으로도 수많은 탑재물을 실어 나르며, 궁극적으로 유인 우주여행을 가능케 할 우주발사체에 대해 알아보고, 특히 경제적 측면의 이점을 살려 저렴한 비용으로 탑재물과 인간을 우주로 이송 가능케 하는 재사용 우주발사체 기술과 회수 기술에 대하여 알아본다. 현재 여러 국가에서 개발되었거나 개발예정인 재사용 우주발사체는 회수형태에 따라 부스터 회수형, 궤도선형, 그리고 복합사이클 추진기관 형태로 구분된다. 정밀한 유도제어, 발사체 신뢰도 증진, 추진기관, 정비 기술 등 수많은 기술이 복합적으로 연구·개발되어야 하며, 이를 하나의 시스템으로 융합시켜야만 우주발사체의 회수와 재사용이 가능하다.

본 호를 통해 국내에서도 가까운 미래에 민간주도의 저렴한 우주개발 상업화가 이루어지기를 바라며, 4차 산업혁명의 대표 ICT 기술과 우주산업이 융합되어 새로운 시장이 개척되기를 기대해 본다. 또한, 재사용 우주발사체에 대한 기술기반을 넓혀 새로운 우주시대에 적극적으로 참여할 수 있는 여건들이 마련되어 우주강국으로의 국제사회 참여를 기대해 본다.

### 우주/천문 관측 기술

우주 탐사와 천문 관측을 위한 인간의 탐험은 과거에서부터 현재까지 끊임없이 진행되고 있다. 수학, 의학과 함께 천문학은 인류와 가장 오랜 시간 동안 함께해온 학문이기도 하며, 천체 관측은 역사적 기록 또한 무수히 남아있다. 과거에는 맨 눈으로 하늘을 올려다보며 빛의 크기와 밝기 등을 관측하는 것이 유일했지만, 기술이 빠른 속도로 발전함에 따라 현재는 지상과 우주에 망원경을 설치하여 별 생성 활동, 탄생 기작 등을 관측하고 초기 은하의 특성을 연구하는 등 보다 심도 깊은 우주연구가 가능해졌다.

이에, 본 호 2부에서는 우주관측을 위해 사용되는 적외선 우주관측, 우주전파, 중력파 관측과 같은 최신 기술에 대해 알아본다. 첫 번째 파트에서는 미국 항공 우주국(NASA), 유럽우주국(ESA), 일본항공우주연구원(ISAS) 및 항공 우주 및 우주기구(JAXA), 한국천문연구원 등 국내외에서 진행되고 있는 적외선 우주망원경 프로젝트의 개요와 기술을 간략히 설명하였다. 이어지는 파트에서는 최근 우주관측 분야의 가장 핫이슈였던 블랙홀 관측을 가능케 했던 EHT(Event Horizon Telescope) 프로젝트와 전파망원경에 대해 설명하였다. 마지막으로 중력파 관측과 레이저 간섭계 LIGO(라이고), 이의 업그레이드 버전인 Advanced LIGO(어드밴스드 라이고)의 역사와 앞으로 사용될 차세대 중력파 검출기에 대해 기술하였다.

본 호를 통해 우주/천문 관측 기술 간 사용되는 여러 융합 기술에 대한 이해도가 제고되기를 바라며, 앞으로 무궁무진하게 발전될 관측기술을 통해 더 깊고 또렷한 우주 탐사가 가능해지길 기대해 본다. 이를 통해 지금보다 또렷한 블랙홀의 이미지, 그리고 또 다른 블랙홀의 발견 등 아직까지 개척할 것이 많은 미지의 영역에 도달할 수 있기를 기대해 본다.

# 융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 June vol.5 no.6



# 01

## 우주발사체 회수 및 재사용 기술

고상호 (한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수)  
김철웅 (한국항공우주연구원 책임연구원)

# I 서론

우주발사체 또는 운반로켓은 지구에서부터 우주로 인공위성과 같은 탑재물들을 옮기는 로켓 장치를 말한다. 일반적으로 우주발사체의 경우 1회용으로 사용되어 탑재물을 목표로 하는 위치로 옮긴 후 버려져 바다로 추락하거나 우주 쓰레기가 된다. 반면 재사용 우주발사체의 경우 탑재물을 목표지점으로 옮긴 후에 손상 없이 지상이나 해상으로 회수하고 정비하여 재사용할 수 있다.

최근 실용화되어 전 세계적으로 주목받는 대표적인 재사용 우주발사체로 미국의 Space X(스페이스 엑스)가 개발한 Falcon 9 로켓이 있으며 유럽 등 이외의 국가에서도 성장하고 있는 우주발사체 시장을 선점하기 위하여 다양한 형태의 재사용 우주발사체를 개발하고 있거나 개발계획을 가지고 있다[1].

현재까지 자력으로 로켓엔진을 개발 할 수 있는 기술을 보유하고 있는 국가는 전 세계적으로 10여 개국뿐이며 한국에서도 국가적 지원을 받아 2018년 11월 28일 '누리호 시험발사체'를 성공적으로 발사하였으며, 2021년 3단형의 '누리호' 발사를 앞두고 있다. 누리호는 한국의 자체 기술로 개발되는 우주발사체이며 1회용인 소모성 우주발사체이다.

소모성 발사체는 발사에 큰 비용이 소요되기 때문에 재사용 우주발사체를 통한 우주발사체의 재사용은 경제적인 측면에 있어 많은 이점이 있을 것으로 기대된다. 또한 재사용 우주발사체를 사용할 경우 1회용 우주발사체에서 발생하는 우주 쓰레기가 발생하지 않아 점차 위험성이 증대되고 있는 우주 쓰레기 문제에 있어 하나의 대안이 될 수 있다. 최근에는 Blue Origin 등 여러 회사들이 재사용 우주발사체를 이용하는 민간 유인 우주여행 시장을 개척하여 조만간 훨씬 저렴한 비용으로 일반인들도 우주여행을 떠나는 시대가 도래 할 것으로 예상된다[2].

본 동향연구에서는 Space X의 Falcon 9과 같은 부스터형 재사용 우주발사체를 중심으로 다양한 형태의 재사용 우주발사체 그리고 이와 같은 발사체 개발에 소요되는 핵심 기술들을 소개하여 한국에서의 향후 재사용 우주발사체 개발에 대한 당위성과 공감대 형성에 도움을 주고자 한다.

## II 국외 재사용 우주발사체 개발동향

세계적으로 우주산업에 있어 발사서비스 시장은 지속적으로 성장할 전망이다. 국가주도의 발사체보다 민간기업 주도의 발사체가 더 빠르게 시장변화에 대응하여 점차 국가주도 발사서비스에서 민간기업 주도의 발사서비스로 시장 변화가 생기고 있다. 이러한 추세에 따라 각국의 우주기관 및 발사체관련 기업들은 저비용 우주발사체 개발에 큰 관심을 가지고 있어, 저비용 추진제를 사용한 엔진 개발, 위성 소형화에 맞춘 소형발사체 개발, 생산 공정의 단일화 등의 방법을 통하여 우주발사체의 제작비 감소를 위한 연구를 진행하고 있다. 이중 재사용 우주발사체를 통한 발사체의 재사용이 가장 큰 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대된다. 이미 미국을 필두로 여러 우주 선진국들은 미래의 우주발사체 시장에서의 경쟁력을 확보하기 위하여 재사용 우주발사체에 대한 연구를 지속적으로 진행하고 있다.

현재 여러 국가에서 개발되었거나 개발예정인 재사용 우주발사체는 회수형태에 따라 부스터 회수형, 궤도선형, 그리고 복합사이클 추진기관 형태로 구분될 수 있다.

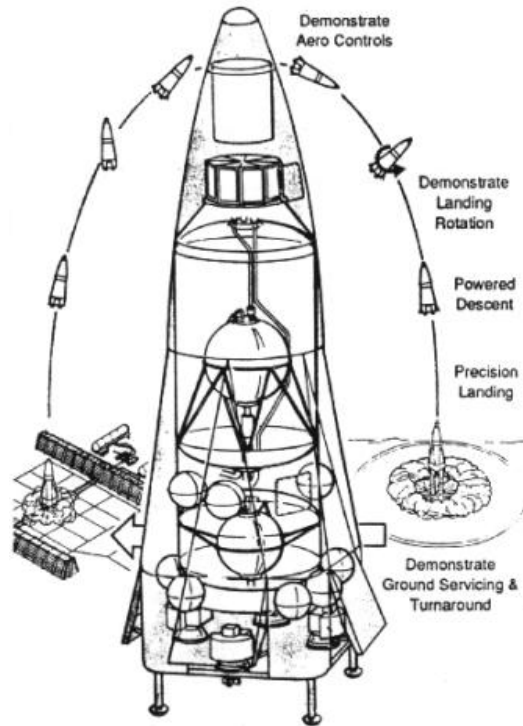
### 2.1 부스터 회수형태

부스터 회수형태는 기존 우주왕복선의 수평착륙과는 다르게 엔진의 추력이 아래로 향하며 수직으로 착륙한다. 따라서 착륙에 필요한 면적이 비교적 좁아 해상의 바지선상에도 착륙이 가능하다.

미국의 McDonnell Douglas는 미국방부와 공동으로 Reusable Single-Stage-To-Orbit Launch Vehicle의 시험기로 DC-X를 1991년부터 1993년까지 약 3년간 개발하였다. 1994년에서 1995년까지 NASA의 후원을 받아 시험비행을 실시하였으며 해당 기술은 NASA로 이전되어 NASA에서 DC-X를 업그레이드하여 DC-XA라고 명명하여 1996년에 시험비행을 실시하였다. DC-X의 개요는 그림1과 같다.



그림 1 DC-X의 개요

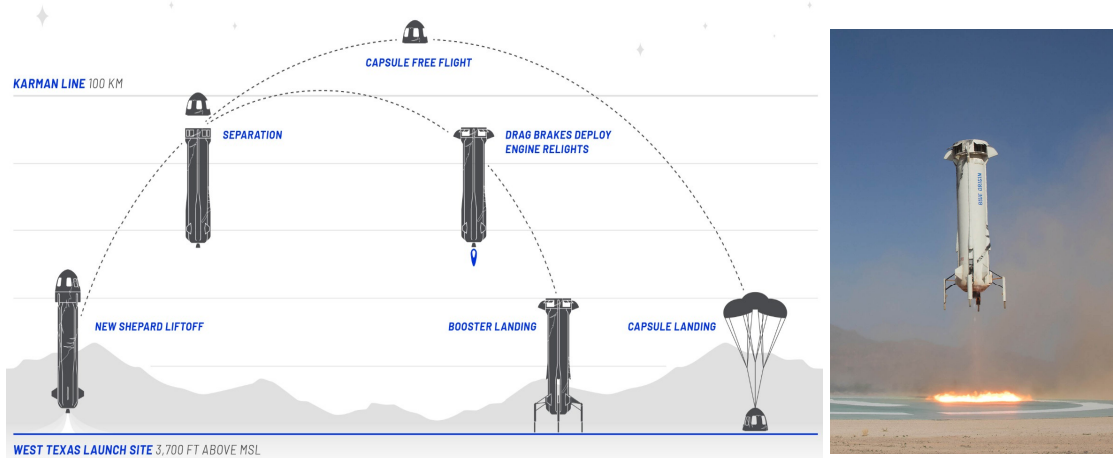


(출처 : Astronautix)

미국의 New Shepard는 Amazon의 창업주인 Jeff Bezos가 설립한 Blue Origin에서 개발한 준궤도(suborbital) 우주발사체이다. New Shepard의 경우 민간인 대상 우주여행 서비스 제공을 목적으로 개발되어 그 상단부에는 승무원이 탑승하는 캡슐이 장착되어 있다. 2015년 4월 첫 시험비행을 하였으나 부스터 회수에 실패하였다. 이후 2015년 11월 두 번째 시험발사에서 고도 100.5km에 도달하였으며, 로켓부스터와 승무원 캡슐 회수에 성공하였다. 이 실험에서 New Shepard는 고도 약 100km 지점에서 승무원 캡슐과 발사체 1단이 분리되었으며 이후 승무원 캡슐은 낙하산을 통한 회수를 진행하였으며 발사체 1단은 부스터 회수형태로 회수에 성공하였다. 해당 회수과정 개념도와 발사체의 실제 착륙사진이 그림 2에 있다. 이후 꾸준한 시험발사를 통하여 발사체를 개발하고 있으며, 2019년 5월 2일 11번째 시험비행을 성공적으로 완수하였다. Blue Origin은 2019년 후반에 New Shepard의 승무원이 탑승한 시험비행을 목표로 하고 있으며, 보다 큰 재사용발사체인 New Glenn의 개발을 2015년에 발표하여 2021년 발사를 목표로 하고 있다[4].



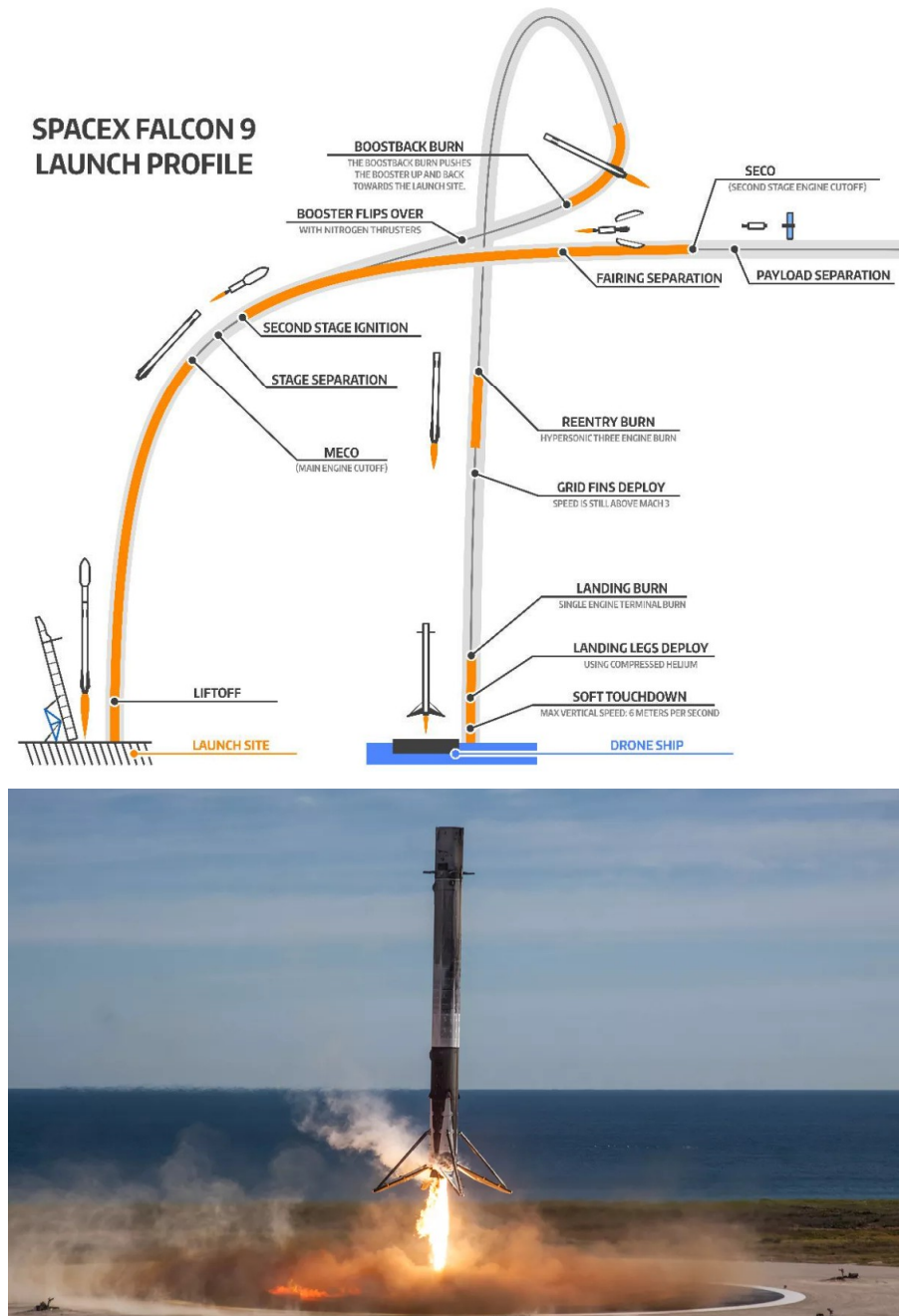
그림 2 New Shepard의 착륙 회수 개념도(좌)와 실제 착륙모습(우)



(출처 : Blue Origin)

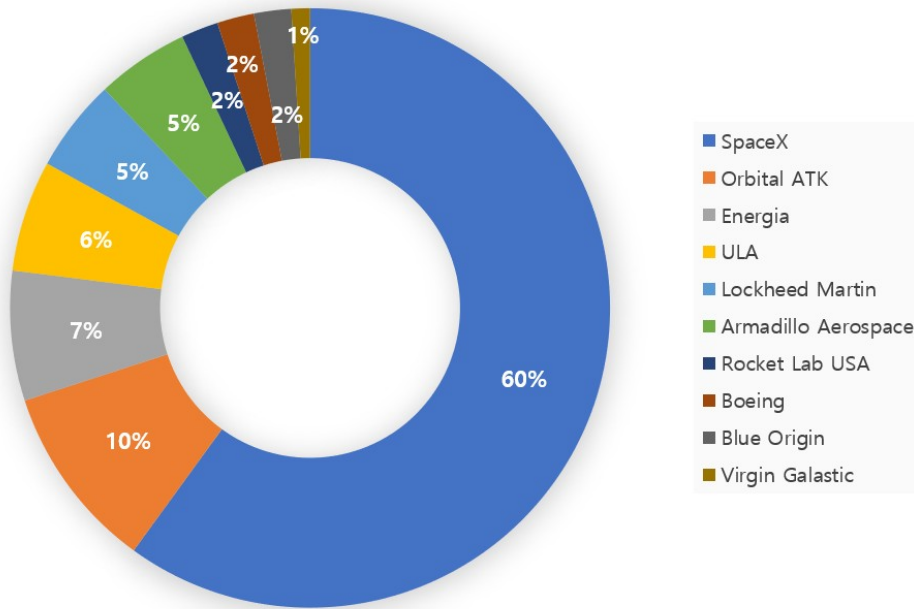
미국의 Space X는 재사용발사체 개발의 선두주자로 Falcon 9이라는 주력 발사체를 가지고 있다. Falcon 9은 1단 부스터 재사용 기술을 적용하여 실제 발사서비스에 사용되고 있으며 현재 부스터 재사용 기술을 상업목적 발사에 사용하는 유일한 로켓이다. Falcon 9은 2010년 첫 발사 이후 지금까지 70회 발사를 하였으며, 2015년 12월 22일 20번째 발사에서 재사용발사체 회수에 처음으로 성공하였다. 이후 첫 성공을 포함하여 총 34회 회수에 성공하였다. 특히나 2017년 이후의 발사에서는 회수에 실패한 발사가 단 1회로 회수성공에 높은 신뢰성을 보여주고 있다. Falcon 9은 단 분리 후 그리드핀(Grid Fin)과 역추진을 통하여 목표지점으로 부스터를 착륙시켜 회수한다. 그림3은 Falcon 9의 발사체회수과정 개념도와 실제 착륙 사진이다. 이를 통하여 Space X는 발사비용 절감을 통한 경쟁력을 확보하여 미국 내 상업 목적 발사 중 절반 이상의 점유율을 보여주고 있다(그림 4).

그림 3 Falcon 9의 착륙 회수 개념도(상)와 실제 착륙 사진(하)



(출처 : Space X)

그림 4 미국 내 상업목적 발사 자료



또한, Space X는 Falcon 9 로켓 3개를 결합한 형태의 Falcon-Heavy를 개발하여 2018년 2월 시험발사에 성공하였으며, 2019년 4월 11일 처음으로 상업목적 발사를 성공하였다. 더 나아가 이들은 2016년 9월 27일에 개최된 국제우주대회(International Astronautical Congress: IAC)에서 100명 이상의 사람을 태우고 화성을 탐사하는 ITS(Interplanetary Transport System)의 개발계획을 발표했다. ITS에서는 Falcon-Heavy이상의 추력을 발생시키는 재사용 가능한 BFR(Big Falcon Rocket)을 사용하여 우주선을 우주공간으로 보내는 것을 목표로 하고 있으며 현재 개발단계에 있다. 아래 그림5는 BFR의 상상도이다.

그림 5 BFR 상상도



(출처 : Space X)

## 2.2 궤도선 형태

궤도선 형태의 회수방식은 역추진을 이용하여 감속 및 회수를 수행하는 방식이 아닌 날개를 이용하여 수평비행을 수행하여 목표지점으로 재사용발사체를 착륙시켜 회수하는 방식을 말한다. 이러한 방식은 날개를 이용하여 비행하기 때문에 대부분 비행기와 같은 형상을 하고 있으며 회수 시 활주로와 같은 넓은 공간이 필요하다.

미국 NASA에서는 우주왕복선을 개발하였으며 이는 최초의 재사용발사체이다. 우주왕복선은 5~7명의 우주인과 약 22,700kg의 하중을 지구 저궤도로 실어 나를 수 있었으며, 1980년대 초반부터 2011년까지 사용되었으나 초기 목표에 비해 적은 발사횟수와 기대에 못 미치는 발사비용 절감으로 퇴역되었다.

부란은 구소련에서 개발한 우주왕복선으로 1988년 무인비행을 실시하였으며 발사 후 약 200분간 지구 궤도를 주회한 후 착륙에 성공하였다. 기존 계획은 1992년 유인비행을 실시하는 것이었지만 1991년 소련의 붕괴로 해당 계획은 취소되었으며 2002년 격납고가 무너지면서 파괴되었다.

인도의 우주연구기구(India Space Research Organization: ISRO)에서는 재사용발사체 제작에 필요한 데이터를 얻기 위하여 Reusable Launch Vehicle-Technology Demonstration(RLV-TD)을 개발하였다. RLV-TD는 2016년 5월 23일에 발사하였으며, 고도 65km까지 상승하였다가 목표지점에서의 회수를 성공적으로 완수하였으며 이를 통하여 ISRO는 비행체 회수에서의 주요 기술들을 검증하는데 성공하였다. 아래는 RLV-TD와 그 발사 사진이다(그림 6).

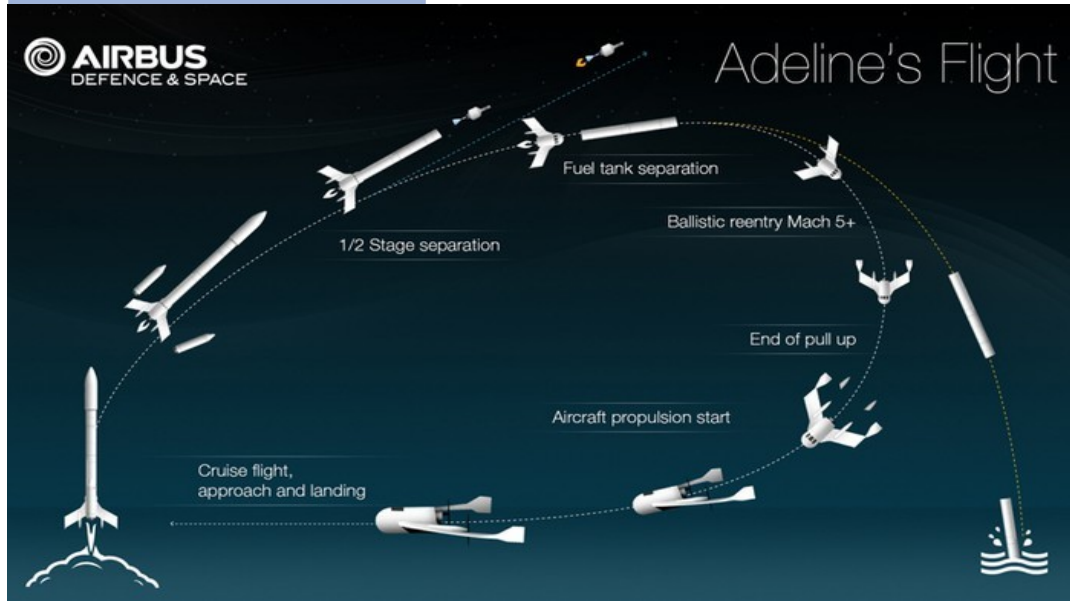
그림 6 ISRO의 RLV-TD(좌)와 그 발사장면(우)



(출처 : Deccan Chronicle)

유럽우주국(European Space Agency: ESA)은 2010년부터 발사체 엔진의 회수를 위한 Advanced Expendable Launcher with Innovative eNginE Economy(ADELINE)를 개발해왔다. ADELINE은 단 분리 이후 연료탱크와 메인엔진을 포함한 비행 모듈이 분리되고 자체비행을 통하여 목표지점으로 착륙시켜 회수가 가능하며 이 과정에서 연료탱크는 바다로 추락한다. 이와 같은 방식은 회수과정에서 소모되는 연료량이 부스터 형식의 회수방식과 비교하여 현저히 적기 때문에 Falcon 9과 비교하여 발사체 중량 증가량이 약 30% 이상 낮을 것으로 예상하고 있다. 그림 7은 ADELINE의 회수 개념도이다.

그림 7 ADELINE의 회수 개념도



(출처 : Airbus)

영국 Reaction Engines Limited(REL)에서는 단 분리단계가 없는 궤도선 형태의 Skylon을 개발 중이며 단 분리가 없기 때문에 획기적인 비용절감이 가능할 것으로 기대된다. 또한, Skylon에는 복합사이클 엔진 형태를 적용하고자 계획 중이며 자세한 내용은 다음의 복합사이클 엔진 형태에서 다루었다.

### 2.3 복합사이클 엔진 형태

앞서 언급한 영국 REL의 Skylon의 경우 로켓기반 복합 사이클(Rocket Based Combined Cycle: RBCC)을 사용한다. RBCC는 대기권에서는 대기 중 산소를 산화제로 사용하는 제트엔진으로, 우주에서는 별도의 산화제를 이용하는 로켓엔진으로 사용 가능한 형태로서 기존 수직 이륙형태의 발사체들과는 다르게 수평으로 이륙한다. 핵심기술에 대한 시험이 2012년 12월 성공적으로 완료되었다. 2020년에 지상 엔진시험이 계획되어 있으며 2025년에 무인 비행시험이 시행될 예정이다.

그림 8 Skylon의 상상도



(출처 : BBC)

① 우주발사체 회수 및 재사용 기술

② 우주/천문 관측 기술



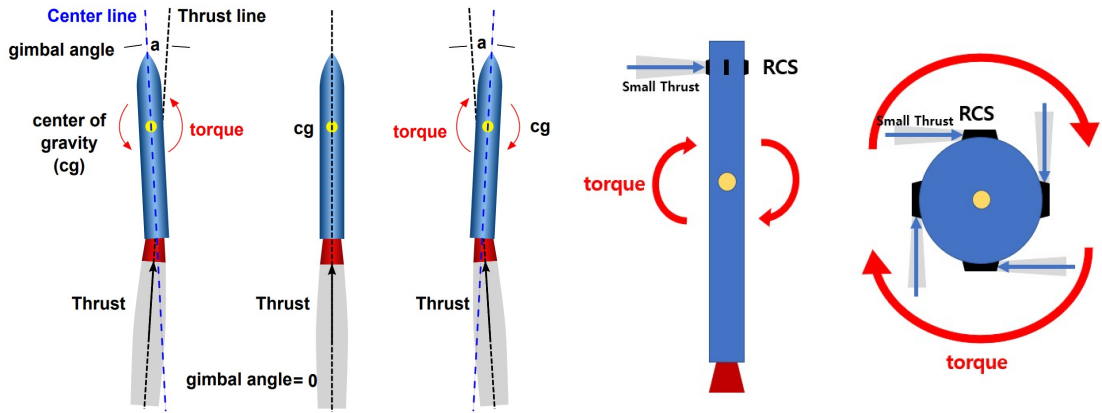
## III 부스터형 재사용 우주발사체 기술

부스터형 재사용 우주발사체에 적용된 회수기술은 비행에 성공한 Space X의 Falcon 9과 Blue Origin의 New Shepard의 사례를 증점적으로 기술한다.

### 3.1 회수운용 개념

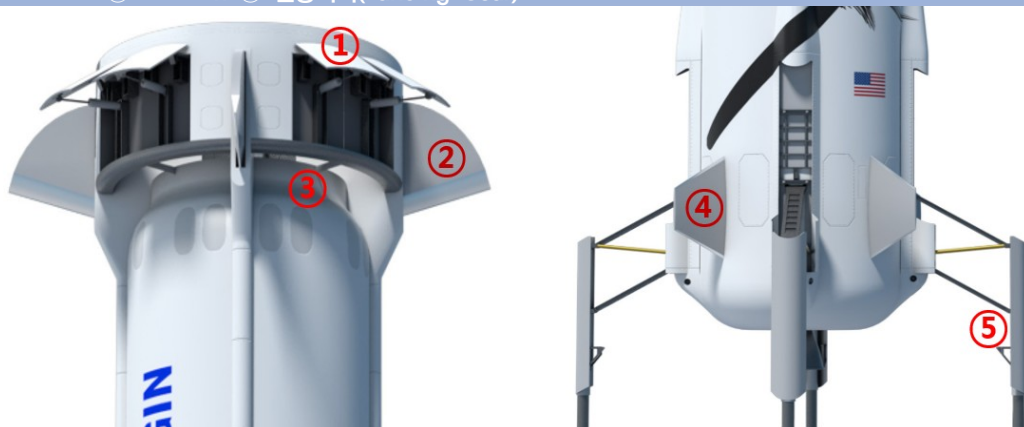
Falcon 9의 1단 로켓의 경우 단 분리 후 총 3번의 추가적인 연소추진과정을 거쳐 회수가 진행된다. 그 과정은 Boost Back Burn, Reentry Burn, Landing Burn의 순서로 구분된다. 초반 연소추진과정인 Boost Back Burn 구간에서는 반동제어장치(Reaction Control System: RCS)와 짐벌(gimbal)을 이용한 추력편향(thrust vector)으로 발사체의 자세를 제어하는 동시에 추력을 발생시켜 발사체의 예상 자유낙하 경로와 회수경로를 일치시킨다. 그림 9에 RCS와 추력편향의 개념과 원리를 도시하였다. Boost Back Burn 이후 추력 없이 RCS를 통하여 자세제어만을 실시하면서 자유낙하를 통하여 지구로 진입하며 공기층 진입 전 Reentry Burn 구간동안 공기층에서의 마찰열로 인한 손상을 줄이고자 추력을 발생시켜 발사체의 진입속도를 안전 속도까지 감속시킨다. Reentry Burn 구간에서의 충분한 감속 후 RCS와 4개의 그리드핀(Grid Fin)을 이용하여 회수경로를 추종하여 착륙지점 근처로 낙하시키며, 최종적으로 Landing Burn 구간에 진입하여 연소추진 및 RCS, 그리드핀(Grid Fin)과 랜딩기어(Landing Gear)를 사용하여 착륙한다. 이러한 회수과정은 앞의 그림(그림 3)에서 확인할 수 있다.

그림 9 짐벌을 이용한 추력편향의 개념(좌)과 RCS의 원리(우)



New Shepard의 경우 대기권 재진입시 Drag Brake와 웨지핀(Wedge Fin)을 사용하여 감속 및 비행안정성을 얻는다. 링핀(Ring Fin)은 부스터 상단의 고리모양 구조물로서 공기의 흐름과 압력중심의 위치를 변화시켜 제어성능을 향상시킨다. AFT Fin은 상승할 때의 축을 중심으로 한 회전운동을 제어하여 안정성을 향상시키고 하강 시 기체를 착륙지로 이동하기 위한 제어에 관여한다. 그 후, 착륙 막바지에 재점화를 통하여 감속 후 랜딩기어(Landing Gear)를 이용하여 착륙한다. 그림 10에 New Shepard의 조종면을 도시하였으며 앞의 그림 2에 회수과정을 나타내었다.

그림 10 New Shepard의 ① Drag Brake와 ② 웨지핀(Wedge Fin) 및 ③ 링핀(Ring Fin)(좌) ④ AFT Fin ⑤ 랜딩기어(Landing Gear)



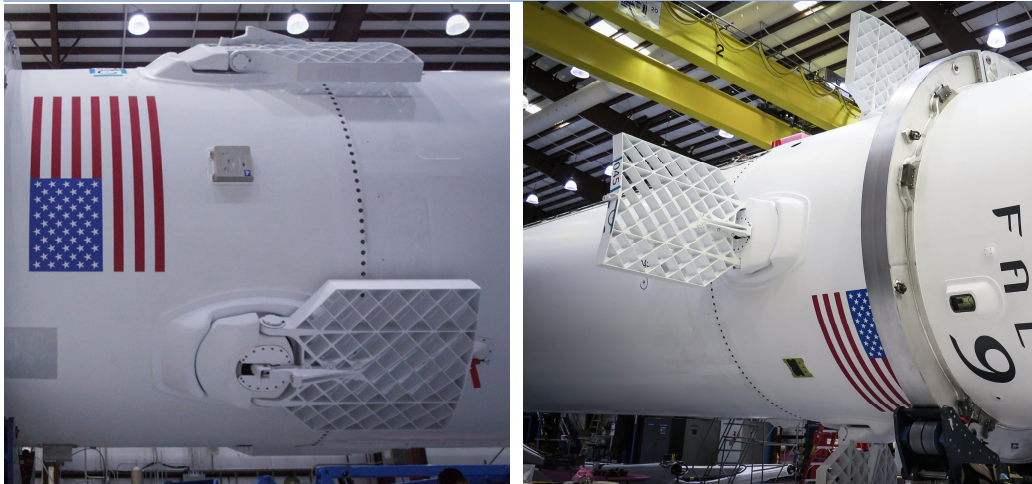
(출처 : Blue Origin)

이와 같은 부스터 형태의 재사용기술은 비교적 최근 개발된 기술로서 실제 기술을 사용하고 있는 곳은 Falcon 9을 보유중인 Space X 밖에 없으며 선행 연구가 적어 연구 난이도가 비교적 높다. 현재까지 개발된 기술로는 1단 부스터만 회수하여 재사용하고 있으나 2단 부스터 회수 및 재사용에 대한 연구 또한 진행되고 있다.

### 3.2 그리드핀(Grid Fin)

그리드핀(Grid Fin)은 격자를 의미하는 그리드(Grid)와 로켓의 날개를 의미하는 핀(Fin)의 합성어로 격자형태의 내부구조를 가지고 있는 날개를 의미하며 주로 미사일 제어에 많이 사용된다. Falcon 9의 회수과정에서 재사용발사체의 제어를 위하여 그리드핀을 사용하며, Falcon 9에 부착된 그리드핀은 그림11에서 확인할 수 있다.

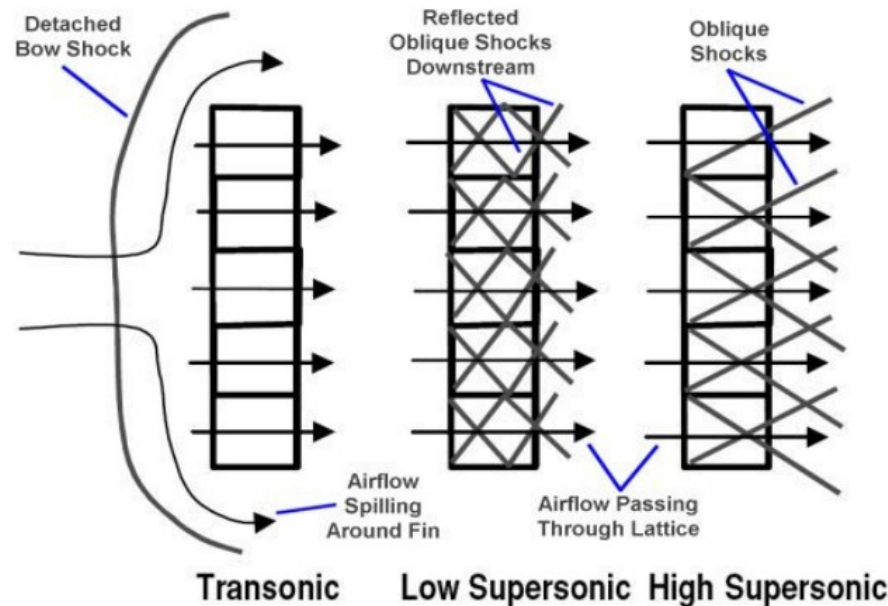
그림 11 Falcon 9에 부착된 그리드핀(Grid Fin)의 접힌 모습(좌)과 펼친 모습(우)



그리드핀은 1970년대 소련의 미사일과 로켓에 처음 사용되어 공기 브레이크와 비행안정성 향상에 그 목적이 있었다. 이후, 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics: CFD)을 이용한 연구가 활발히 진행되고, 많은 풍동실험들이 수행되어 유동구간별 그리드핀의 특성에 대한 자료들이 풍부하게 얻어지게 되어 정밀한 자세제어가 가능해졌다. 특히 그리드핀은 아음속과 초음속 구간에서 가장 효율적으로 작동하는데 이 구간에서

그리드핀은 높은 속도에서 긴 평판형태의 날개보다 항력으로 인하여 발생하는 힌지 모멘트와 공력가열이 작으며 압력중심의 변화폭 또한 적게 나타난다. 평판 형태의 날개보다 그 부피가 적고 앞서 언급한 대로 힌지에서 발생하는 모멘트가 작으므로 날개를 접었다 폈다할 수 있어 발사 시에는 접어 항력을 줄일 수 있으며, 필요시 펼쳐 제어에 사용 가능하다. 다만 천음속 구간에서 그리드핀은 급격한 공력계수의 변화를 보여 활용에 제한이 발생한다. 그리드핀은 그 형상에 따라 3가지의 임계마하수를 기준으로 그 특성이 크게 구분되며 그림에 속도에 따른 특징을 나타내었다(그림 12 참조).

그림 12 천음속과 초음속에서의 그리드핀 주위 유동 형태



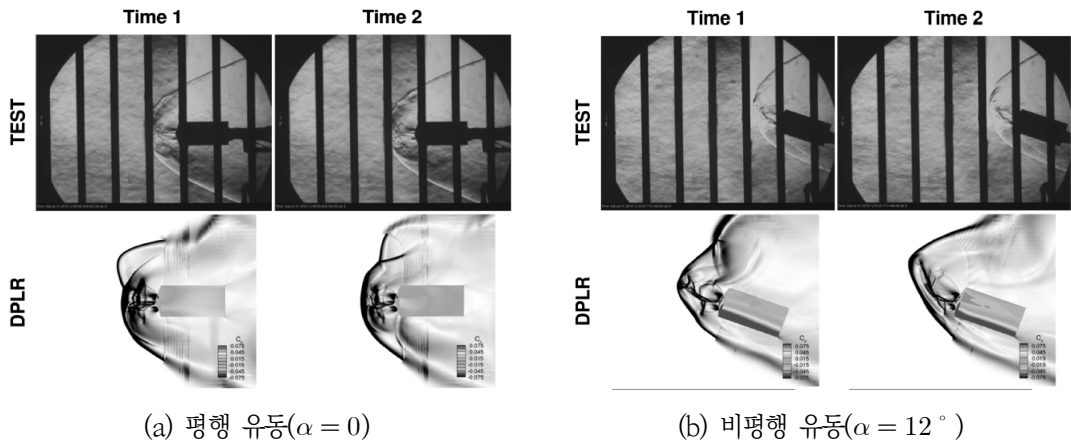
(출처 : Kittur et al, 2016)

### 3.3 초음속 역추진

초음속 역추진(Supersonic Retro Propulsion: SRP)은 일반적인 추진상황과는 다르게 역추진 시 엔진 노즐 앞에서 생기는 선단 충격파(Bow shock)의 영향으로 항력, 압력과 같은 상태량들의 급격한 변화가 생긴다. 특히 회수과정의 특성상 받음각이 항상 0도가 아니기 때문에 받음각에 따른 비평형 유동이 발생하며 이때 충격파를 동반한 복잡한 형태의 유동이 형성되어 그 해석에 어려움이 따른다(그림 13 참조). 따라서 이를

고려한 연구가 진행되었으며 전체 항력은 단순히 공기역학적인 형상에 의한 항력뿐만 아니라 엔진 추력과 발사체 상태에 따른 항력을 더하여 구할 수 있다. 1950년대부터 미국과 소련의 냉전시대에 우주기술개발 과정에서 유인 우주선의 회수를 위하여 다양한 풍동실험이 수행되었으나 당시의 연구는 감속과 발사체의 자세제어가 아닌 대기 재진입 과정에서 발생하는 대기와의 높은 마찰열로 인한 기체손상을 방지하기 위한 주된 방법으로서 역추진을 제시하였다. 현재는 Space X의 Falcon 9이 해당 기술을 사용하여 성공적인 발사체 회수를 이루어내었다.

그림 13 역추진 유동이 있는 조건의 결과



(출처 : Chauheramer et al, 2013)

### 3.4 유도제어기술

재사용발사체에 있어서 회수과정에서의 정밀한 유도제어기술이 필수적으로 요구된다. 특히 부스터 회수형태의 경우 회수과정에서 추력이 큰 부분을 차지하므로 유도제어기술에 따라 회수과정에서 필요로 하는 추진제의 양이 결정되므로 이에 따라 재사용발사체 발사비용에 큰 영향을 줄 수 있다.

#### 1) 추력조절 및 제어기술

추력제어기술은 재사용발사체뿐만 아니라 1회용 발사체에 있어서도 필수적인 기술이다. 일반적으로 발사체의

경우 다수의 엔진을 장착하여 하나의 엔진처럼 사용한다. 이 과정에서 각 엔진 간 추력편차가 발생할 수 있으며 이로 인하여 발사체의 정상적인 작동을 방해하는 요소로 적용될 수 있다. 특히 추력제어는 재사용발사체의 경우 착륙과정에서 적절한 감속을 위한 수단일 뿐만 아니라 앞서 언급한 대로 1회용 발사체보다 다수의 엔진을 사용하여 하나의 엔진에 결함 발생 시 해당 엔진의 추력을 줄이고 다른 엔진의 추력을 적절히 올려야하기 때문에 더욱 핵심적인 기술이다.

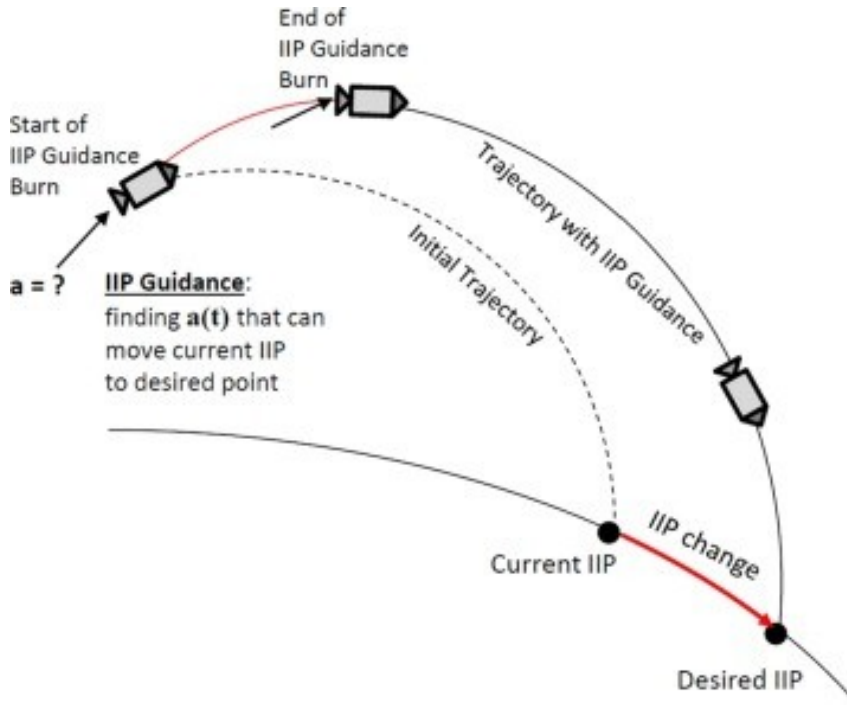
발사체엔진은 그 구동 방식에 따라 제어알고리즘이 달라질 수 있다. 그러나 공통적으로 모든 엔진에서 추력은 밸브를 통하여 엔진에 공급되는 추진제의 양으로 조절할 수 있다. 이때 단순히 추력제어뿐만 아니라 해당 추력에서 산화제와 연료의 비율을 조절하여 더욱 효율적인 엔진연소를 목표로 해야 하며 로켓엔진은 그 특성상 센서에서 다량의 노이즈가 출력되어 이를 식별할 수 있는 필터 기술이 병행되어야 한다.

## 2) 유도 알고리즘기술

재사용발사체의 목표지점에서의 연착륙은 재사용발사체의 안전한 회수를 위하여 매우 중요한 기술이다. 궤도선 형태의 경우 수평착륙 방식으로 유도 방식이 비행기와 비슷하여 기존의 기술을 이용한 경로 유도제어 및 연착륙 유도 알고리즘 개발이 용이할 것으로 보인다. 그러나 부스터 회수형태의 경우 유도제어 알고리즘에 따라 추진제의 소모가 달라져 재사용발사체의 경제성이 결정될 수 있다. 특히 초반 Boost Back Burn 과정에서 추력이 사라졌을 때 자유낙하하여 도달하는 지표면 위치(Instantaneous Impact Point: IIP)와 목표 착륙지점을 일치시키도록 유도하며 이후 설정된 경로를 따라 유도하는 과정에서 추력은 감속의 용도로 주로 사용되므로 Boost Back Burn 과정에서의 추진제 사용을 최소화하는 것이 전체 추진제 사용량 감소에 큰 영향을 준다. Falcon 9의 경우 Boost Back Burn 과정에서 IIP 수정을 위해 들어가는 추진제를 최소화하기 위하여 부스터의 단 분리 후 진행방향 쪽으로 회수 위치를 설정한다. 그림14를 통하여 Boost Back Burn 과정에서의 IIP 변화 개념을 볼 수 있으며 해당 그림에서 IIP Guidance Burn은 Boost Back Burn의 개념과 같다.



그림 14 Boost Back Burn 과정을 통한 IIP 변화



(출처 : Jo et al, 2018)

또한, 착륙 시 수직착륙을 하며 그 착륙면적이 비교적 좁은 곳으로 한정되어 안전한 회수를 위하여 최적의 회수경로로의 최적제어가 요구된다. Space X의 Falcon 9의 경우 9개의 엔진 중 3개의 엔진과 4개의 RCS 및 그리드핀을 이용하여 재사용발사체의 회수경로를 제어한다.

### 3.5 발사체 신뢰도 증진기술

1회용 소모성 발사체와 재사용발사체의 가장 기본적인 차이 중의 하나는 발사체의 신뢰성을 높이는 수단의 차이이다. 1회용 발사체는 구성품의 개수를 줄여서 신뢰도를 높이려는 반면 재사용발사체는 고장을 극복하는 방법으로 신뢰도를 높인다.

1회용 발사체는 비행 중에 비정상적인 작동 시 안전을 위해 폭파를 기본으로 하지만, 재사용 발사체는 고장이 발생해도 임무를 완수하는 방향으로 설계가 발전해가고 있다. 이러한 고장 극복 기능의 구현을 위하여



소프트웨어 측면에서는 인공지능의 활용에 대한 시도가 이루어지고 있고, 하드웨어 측면에서는 시스템 또는 부품들의 다중화 기술이 적용되고 있다.

### 1) 결함 극복 시스템(Fault tolerant system) 구현

1회용 발사체의 경우 엔진 개수가 적어질수록 고장이 날 확률도 낮아지므로, 고추력 엔진 사용으로 엔진의 개수를 줄여서 신뢰도를 향상시키는 방법이 주로 사용되었다. 재사용발사체의 경우에는 추력이 작은 엔진을 다수 사용하여 엔진이 고장 나면 해당 엔진을 정지시키고 나머지 엔진의 추력을 높여서 임무를 성공시키는 방법(engine-out capability)이 적극적으로 채택되고 있다. Falcon 9 로켓은 1단에 9개의 엔진이 장착되어 있는데, 이들 중에 2개의 엔진이 비행 중에 고장으로 정지되더라도 나머지 엔진들로 임무를 완수할 수 있는 능력을 보유했다.

나로호 1단을 개발한 러시아의 흐루니체프(Khrunichev)는 4개의 엔진이 장착된 재사용발사체에 대한 연구를 하였고, 엔진 1개 고장 시에 나머지 엔진들의 추력을 33% 증가시켜 임무를 완수하는 방법이 현실적이며 이러한 개발 방향만이 초기 양산단계에서 1단 엔진의 신뢰도 요구조건 0.992를 만족시킬 수 있다고 평가했다[14].

### 2) 건전성 진단(Health monitoring) 및 사고방지 기술

1회용 발사체에서는 발사체 주요부위에 설치된 센서의 정보를 무선으로 지상에 실시간 송신하여, 결함 발생으로 자폭명령이 내려지거나 비정상적으로 발사체가 폭발할 경우에 지상에 전달된 데이터를 검토하여 사고원인, 위치 및 수준을 확인하고, 그 내용을 이후 제작되는 발사체의 개선을 위한 정보로써 활용해 왔다. 이러한 방법은 사고피해의 축소와 사고원인 파악에 중점을 둔 것으로, 비행 중에 발생한 발사체의 결함 극복을 위해서는 적용이 불가능하였다.

그러나 재사용발사체는 비행 중 내부에 결함이 발생한 상황에서 결함의 원인을 정확히 판단하고 회수를 위한 적절한 조치를 취할 수 있는 시스템을 갖추고 있으면 지상으로 안전하게 회수할 수 있다. 최신 발사체에는 효율적인 온보드(on-board) 컴퓨터 이용, 오진단을 최소화하는 측정시스템 및 최적화된 진단 알고리즘으로 실시간 상태진단과 안전한 제어가 가능해졌다. Space X의 Falcon 9 로켓에는 약 2,000개의 센서들이 장착되어 상태진단과 안전한 비행에 활용되고 있다. 최근에는 인공지능을 이용하여 지상운용요원의 간섭 없이 발사체에 장착된 내부 컴퓨터에서 상황을 인지하고 스스로 문제를 해결하는 방향으로 고장진단 및 사고 회피 기술이 진화해가고 있다[15].

### 3.6 재사용을 위한 추진기관 기술

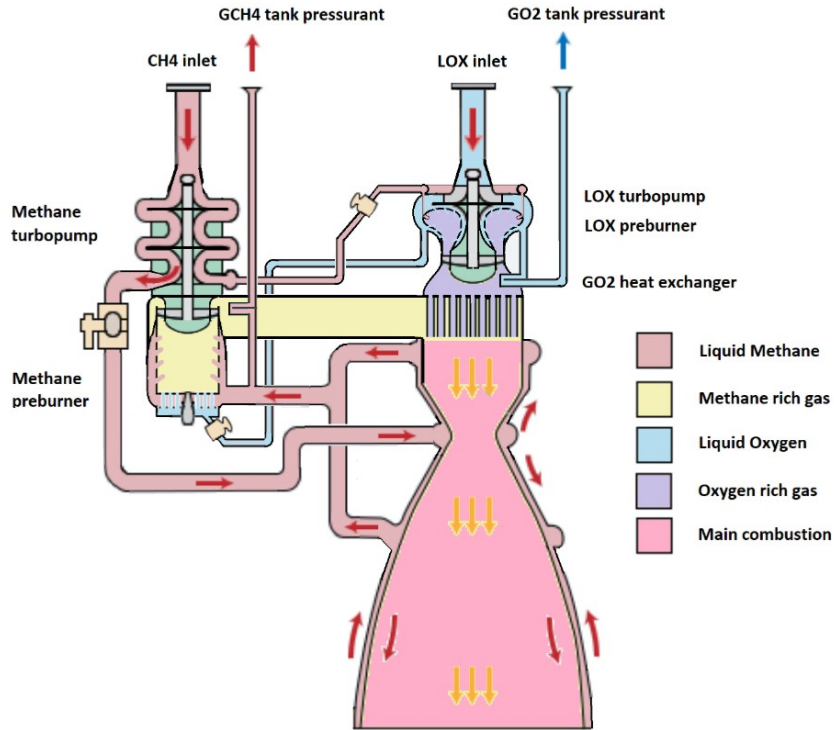
#### 1) 추진제탱크 과냉각 기술

Falcon 9 로켓의 추진기관은 액화산소(LOX)와 케로신을 과냉각해서 밀도를 높여 사용한다. 과냉각은 동일한 크기의 추진제 탱크에 더 많은 추진제를 실을 수 있게 하고, 추력을 높여주어 중력의 영향 하에서 상승하는 단시간 동안 높은 속도증분을 얻게 해준다. 그러나 과냉각된 추진제는 추진기관과 엔진의 주요부품에 결빙문제를 일으킬 수 있으므로 과냉각을 위한 지상설비 뿐만 아니라 발사체의 구성품을 설계 시에도 결빙문제를 고려하여야 한다.

#### 2) 추진제탱크 가압 기술

엔진의 터보펌프에서 캐비테이션이 발생하는 것을 막기 위하여 추진제 탱크 상부에 일정압력의 가스를 주입하여 엔진 입구압력을 적정 수준으로 높인다. Falcon, 나로호 및 KSLV-II 발사체는 엔진에 설치된 열교환기에서 가열된 헬륨가스를 추진제 탱크로 주입하여 가압하는 방법을 사용한다. 그런데 메탄을 연료로 사용하는 Space X의 차세대 재사용 로켓 BFR(Raptor 엔진 장착), Blue Origin의 차세대 로켓 New Glenn(BE-4 엔진 장착)과 유럽의 차세대 로켓(Prometheus 엔진 장착)은 엔진의 열을 이용하여 메탄을 기화시켜 연료탱크를 가압하고, 액체산소를 기화하여 산화제탱크를 가압하는 자기증기가압방식(autogenous tank pressurization)을 적용한다(그림 15 참조). 이 방식을 사용하면 고가의 헬륨가스와 터타늄 헬륨용기 및 열교환기 등이 필요하지 않아 추진제 탱크의 가압시스템이 간단해지는 장점이 있다.

그림 15 자기증기압방식으로 추진제 탱크를 가압하는 Raptor 엔진



(출처 : Wikipedia)

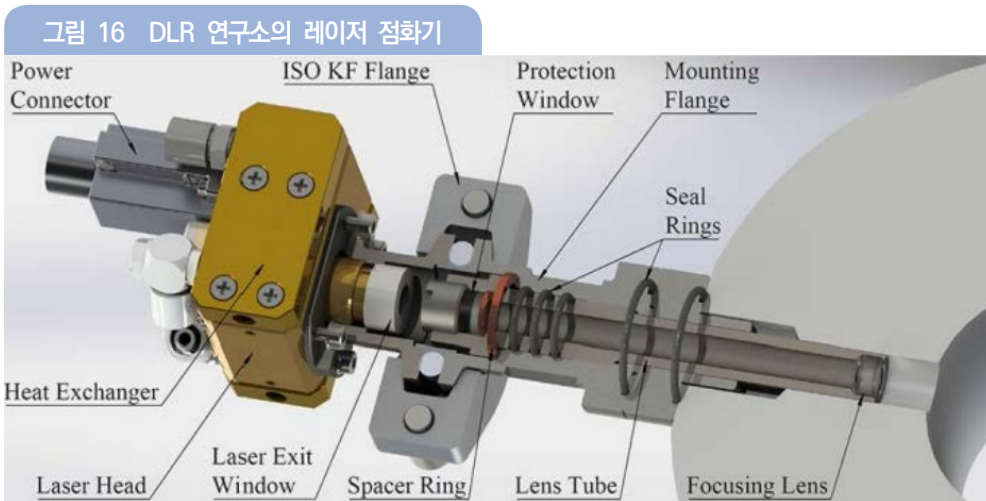
### 3) 메탄 엔진기술

재사용을 목적으로 하는 차세대 로켓은 대부분이 메탄이나 수소를 연료로 사용한다. Space X와 Blue Origin은 차세대 1단용 엔진으로 메탄을 연료로 사용하는 Raptor 엔진과 BE-4 엔진을 각각 개발하고 있다. 메탄은 케로신과 달리 엔진에 검댕(soot)이 쌓이는 문제가 없고, 엔진 내부의 잔류 메탄은 자연기화로 제거가 가능하여 저비용으로 시험을 할 수 있으며, 엔진의 재사용 횟수도 증가시킬 수 있다. 또한, 메탄은 가격이 저렴하고 손쉽게 구할 수 있으며 추진제 탱크의 자기증기압이 가능해서 경제적이며 발사체 시스템도 단순해진다.

유럽도 차세대 재사용발사체에서 사용할 엔진으로 메탄을 연료로 사용하는 Prometheus 엔진을 개발하고 있다.

#### 4) 재점화 기술

1회용 발사체의 경우 일반적으로 1단 엔진은 지상에서 1회만 점화하고, 재점화는 주로 상단 엔진에 국한하여 페이로드 증가 및 궤도 변경을 위한 목적으로만 선택적으로 이용해 왔다. 그러나 재사용발사체에서는 임무를 마친 1단의 회수과정에서 낙하속도 감속과 안전한 착륙을 위하여 엔진 재점화가 필수적이다. 이와 더불어 우주공간에 잔해물을 줄이려는 국제적인 요구에 따라 위성의 궤도 투입 이후 2단의 지구 재진입에도 엔진 재점화가 필요하다. 엔진 점화에는 자발성 연료(TEAL)와 전기 스파크 방식의 점화기가 사용되어 왔는데, 최근에는 재점화에 유리한 레이저 점화기를 이용하고자 하는 연구가 세계 여러 나라에서 진행 중이다(그림 16 참조).



(출처 : Jan Deeken et al, 2018)

### 3.7 정비 기술

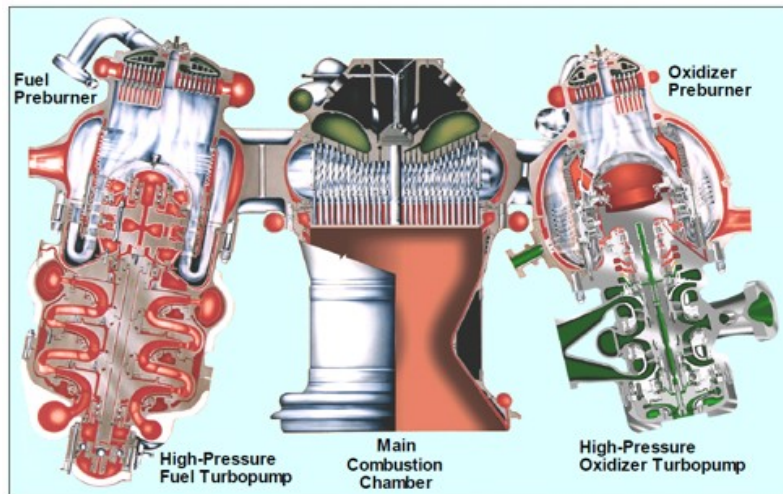
#### 1) 정비용이 설계 기술

발사체를 재사용하기 위해서는 검사와 정비를 한 후에 재발사가 가능함이 확인되어야 한다. 따라서 발사체의 구성품들은 검사와 교체를 편리하게 수행할 수 있도록 모듈형태로 개발되는 것이 일반적이고, 정비 시 탈착 없이 지상의 검사장비들과 연계하여 건전성을 평가받을 수 있는 형태로 만들어진다. 그리고 정비와 교체가

요구될 수 있는 부품들은 되도록 발사체 외곽부에 설치하여 다른 부품과의 간섭 없이 해당 부문만 작업이 가능하도록 배치된다.

재사용 엔진의 경우에는 청결도와 결함 확인을 위한 검사 포트를 엔진 주요부분에 설치하여 내시경 등을 통한 육안검사가 가능해야 한다. 엔진 내부공간에 사용하다 남은 케로신을 배출할 수 있도록 배출용 포트가 고려되어야 하며, 엔진의 주요 부품인 터빈은 손상된 터빈 블레이드만 개별교체를 할 수 있게 설계하는 것이 바람직하다(그림 17 참조).

그림 17 검사와 정비를 위해 기울여 배치한 SSME 엔진의 터보펌프

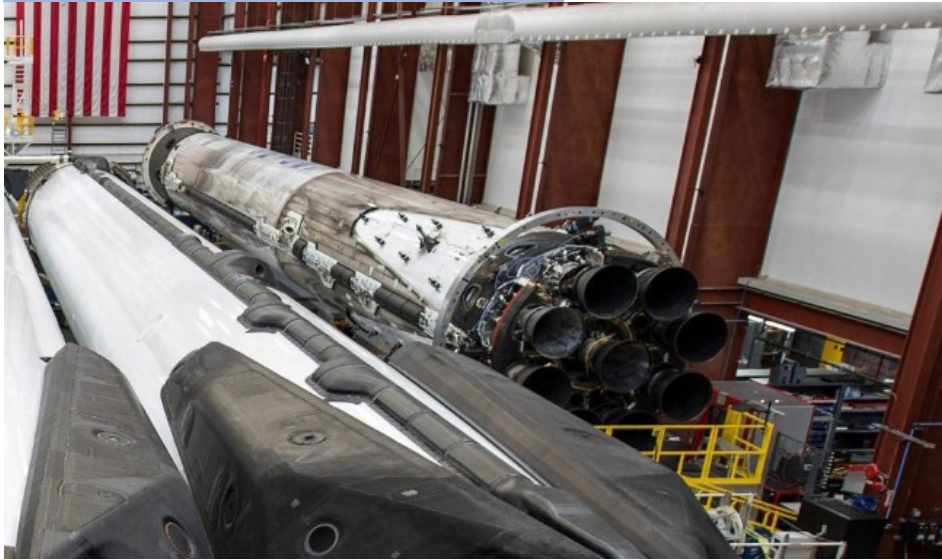


(출처: Rocketdyne)

## 2) 저비용 유지보수

우주왕복선의 재사용 엔진인 Space Shuttle Main Engine(SSME)는 개발시험 중에 많은 고장을 일으켰다. NASA와 Aerojet Rocketdyne의 전문가들은 SSME 엔진의 운용 중에 유사한 고장들이 발생하는 것을 막기 위하여 검사, 진단 및 정비에 만전을 기하였다. 이러한 면밀한 유지보수 활동은 과도한 비용을 불러왔고, 우주왕복선의 재사용 의미를 퇴색시켰다[19]. Space X는 SSME의 전례를 교훈 삼아 빠르고 간단하면서도 저렴한 유지보수 기술을 개발했다. 2018년 5월에 첫 발사된 Falcon 9 Block 5는 신속한 재사용을 위하여 비행간 정비작업을 크게 줄였으며, 최소의 정비 하에 10회까지 재사용, 정기 정비를 통해 100회까지 재사용을 계획하고 있다(그림 18 참조).

그림 18 정비 중인 Falcon 9 로켓 (2019, 4월)



(출처: Teslarati.com)



## IV 궤도선 및 복합사이클 추진기관 사용 재사용 우주발사체 기술

### 4.1 궤도선 회수 기술

여러 회수기술 중 궤도선의 회수기술이 가장 오랫동안 연구되어왔다. 지상에서 우주로 올라갈 때 이미 연료의 대부분을 소모한 궤도선은 추력의 사용을 최소화하기 때문에 지구로 복귀하는 과정에서 항력을 최대로 사용하여 감속하고 자세제어나 착륙 직전에 추력을 이용한다. 대표적인 예로는 미국의 우주왕복선과 인도의 RLV-TD가 있다. 우주왕복선의 경우 항력을 최대로 이용하기 위하여 대기권 진입 시 40도의 자세를 유지하며, 이후 활공하여 수평으로 착륙한다. 대기권 진입 시 항력을 이용하여 감속하므로 대기와의 마찰로 발생하는 열로 인한 손상에 대한 강건성이 요구되며 음속 이상의 속도에서의 자세제어에 대한 연구가 필요하다. 가장 오래 진행되어온 연구이기 때문에 다른 기술에 비하여 비교적 연구가 쉬울 것으로 예상할 수 있는 기술이지만 비행을 위한 날개와 같은 추가적인 부품들로 인하여 발사체 전체적인 중량의 증가를 피할 수 없으며 이로 인하여 재사용발사체의 주목표인 경제성확보에 악영향을 미칠 수 있다. 실제로 미국의 우주왕복선의 경우 경제성 및 활용성의 문제로 퇴역하였다. 하지만, 궤도선 재사용 기술은 현재 유인발사체에서 사용되는 캡슐형 우주선에 비하여 강점을 가지고 있어 지속적인 연구개발이 진행될 것으로 예상된다.

### 4.2 복합사이클 추진기관 사용 회수 기술

복합사이클 추진기관은 서로 다른 엔진을 결합한 하이브리드 엔진을 의미한다. 로켓기반 복합사이클(RBCC)과 터빈 기반 복합사이클(Turbine Based Combined Cycle: TBCC)이 대표적이다. 이중 TBCC 엔진의 경우 대기권에서만 운용이 가능하며 대기가 없는 우주공간에서는 독자적인 비행이 불가능하다. 따라서 대기권과



우주의 경계부근까지 탑재물 수송임무가 가능하다. TBCC 엔진을 사용한 수송선의 경우 산화제를 대기를 통하여 공급받으므로 별도의 산화제탱크가 필요 없어 산화제와 산화제탱크 만큼의 발사체 중량 감소로 우주발사체 운용비용이 절감될 수 있다.

RBCC 엔진은 Skylon에 장착하고자하는 형태의 엔진이다. RBCC는 대기권에서는 대기에서 산화제를 공급받으며 그 속도에 따라 터보제트, 램제트 그리고 스크램제트 모드로 사용할 수 있다. 또한, 대기권을 이탈하여 우주공간으로 진입 시 로켓 모드를 사용하여 운용할 수 있다. 이후 대기권 재진입 시 진입모드로 변환하여 운용할 수 있다. 그러므로 앞선 TBCC 엔진과 마찬가지로 대기권내에서는 별도의 산화제가 필요하지 않으므로 우주공간 진입 이후 사용될 비교적 소량의 산화제를 적재하여 기존의 로켓엔진과 비교할 때 산화제 탱크 용량이 감소하여 운용비용이 절감 될 것으로 보인다.

이와 같이 RBCC 엔진과 TBCC 엔진을 사용할 경우 가장 경제적인 재사용발사체를 구현할 수 있을 것으로 보인다. 하지만 Falcon 9과 우주왕복선 등 성공 사례가 있으며 실용화 단계인 부스터방식과 궤도선방식과는 달리 이 기술 분야의 연구개발은 아직 초기단계이며 선행된 성공모델이 없어 실용화까지는 추가적인 연구와 시간이 소요될 것으로 예상된다.

## V 기타 재사용 우주발사체 기술

재사용발사체는 회수를 위해 추진제와 제어 및 착륙에 필요한 장비가 추가로 필요하며, 정비 및 유지보수에도 큰 비용이 소요되어서 일부 로켓전문가는 경제성에 대해 부정적인 입장을 보이고 있다. 이에 반하여 Space X와 Blue Origin 등 선도적인 재사용발사체 개발업체는 최적화된 기술과 현실적이고 합리적인 운용을 통하여 경제성을 확보해 가고 있어 재사용발사체가 저비용을 위한 최선의 길이라고 확신하고 있다.

### 5.1 최적화 기술

Ariane 그룹을 포함한 선진 우주기업들은 차세대 우주기술 개발에 있어서 성능개선과 개발비 저감을 위하여 나선형 개발전략(rapid spiral methodology)을 채택하고 있다. 이러한 민첩한 개발(agile development)을 통해 더 많은 기술과 경험을 가지고 있는 전통적인 우주기업에 비해서 빠른 모델 개선을 수행해 왔다.

생산모델에 있어서 Space X와 Blue Origin은 하도급방식을 벗어나 '수직계열화'를 이루어, 모든 것을 자체로 개발(in-house development)하고 있다. 실제로 Space X는 이를 통하여 미국의 기존업체보다 3~4배가 저렴한 발사서비스의 제공이 가능해졌다. 로켓 제작에서의 수직계열화는 민첩한 기술 개선과 위기관리를 가능하게 하여 발사체 시스템의 효율증가에 크게 기여하였다. Space X의 경우 지속적인 시스템 최적화와 구성품 간 균형(trade-off)확보를 통하여 기존의 기술만으로 추력/무게비가 현존하는 로켓엔진 중에 최고인 Merlin-1D를 제작하였다.

### 5.2 3D 프린팅 기술

3D 프린팅(적층제조)기술은 기존의 제조방법을 대체하는 수준을 넘어서, 구현이 어려웠던 형상의 제작, 성능향상 및 비용절감을 가능하게 해준다. 우주발사체 기술을 선도하고 있는 미국과 유럽의 기업들은 3D 프린팅 기술을 발사체 부품과 엔진제작에 적극적으로 도입하고 있다. 발사체 제작과 운용분야의 선두에 있는

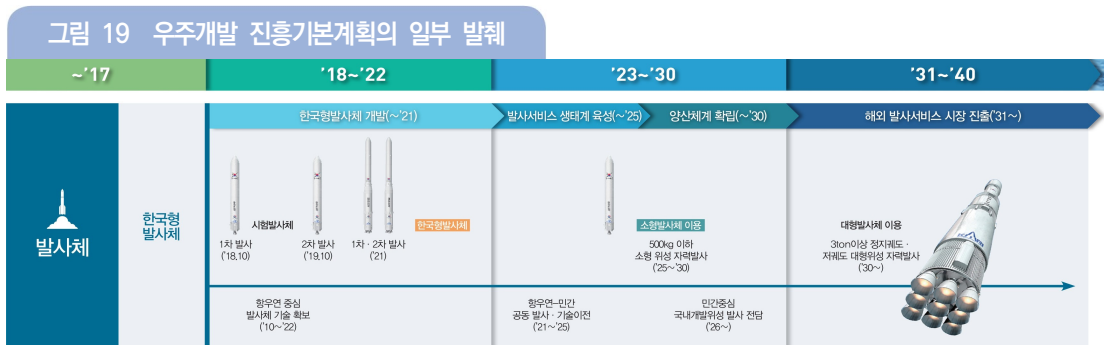
Space X의 경우 우주선 SuperDraco에 장착되는 액체로켓엔진의 연소기를 금속 3D 프린터로 제작하여 인증시험까지 성공적으로 마쳤다. 유럽에서도 효율적인 저비용발사체 개발을 위하여 3D 프린팅 기술을 엔진제작에 적극 활용하고 있다. 현재 유럽에서 개발 중인 Prometheus 엔진은 추력이 100톤급이며, 적층제조기법 등 저비용 제작기술을 최대한 활용하고 지상에서의 유지보수 작업을 최소화하여 운용단가를 현재 사용 중인 Vulcain 엔진의 1/10수준으로 줄이는 것을 목표로 하고 있다.

## VI 국내 우주발사체 개발 동향 및 계획

미국업체들을 선두로 각국의 발사체 제작업체들은 대폭적인 발사비용 절감을 목표로 새로운 운용개념과 최첨단 생산기술을 도입하여 혁신적인 재사용발사체를 연구하고 있다. 이러한 상황에서 한국형발사체(KSLV-II, 누리호) 이후 우주발사체 시장에서 경쟁할 수 있는 저비용발사체 개발은 우리에게 당면과제로 대두되었고, 이에 대한 연구와 대비가 절실해지고 있다.

### 6.1 제3차 우주개발진흥 기본계획

2018년 2월 발표한 「제3차 우주개발진흥 기본계획」에 따르면 2021년 KSLV-II의 본 발사를 성공적으로 발사한 이후에는 성능개량을 위한 후속 R&D 프로그램 등을 적극적으로 이행하여 2026년 이후부터는 민간 발사서비스의 개시가 계획되어 있다(그림 19). 이후에는 경제성을 고려한 소형발사체와 대형발사체로 확장을 계획하고 있어서 향후 국내에서도 우주선진국과 유사한 수준의 경제적인 발사서비스에 기반한 시장경쟁력 확보를 위하여 회수기술을 이용한 재사용우주발사체의 기술개발의 필요가 요구되고 있다. 그러나, 현재 우주개발 중장기 계획 등에는 재사용발사체에 대한 정부차원의 기술개발 계획에 대한 내용이 구체적으로 실려 있지 않은 상황이다.



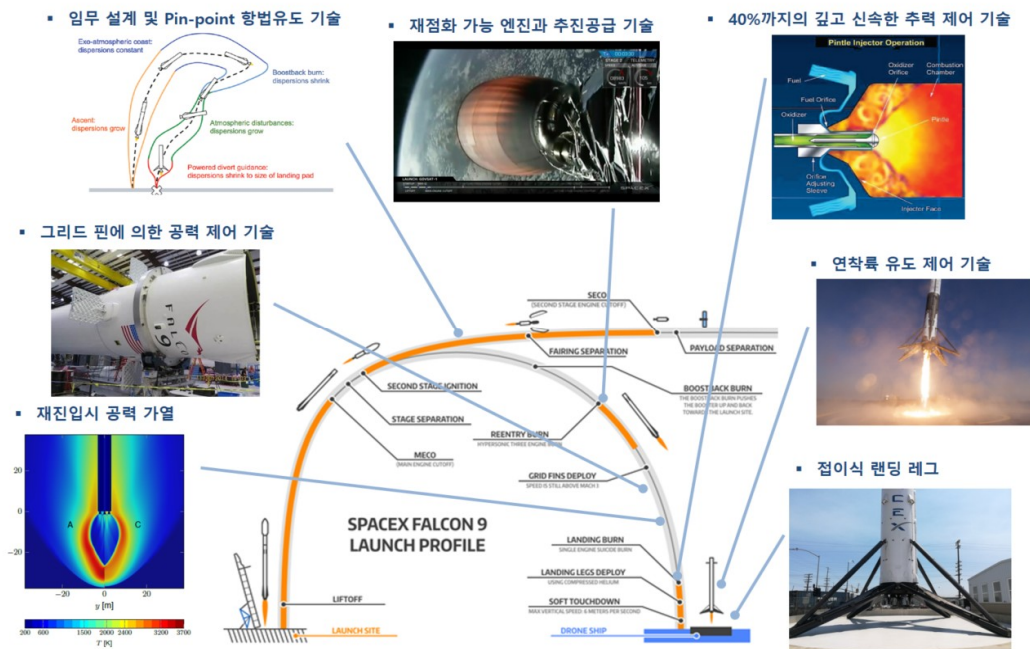
(출처 : 제3차 우주개발진흥 기본계획)

## 6.2 한국항공우주연구원의 관련 연구사업

한국항공우주연구원에서는 2018년 초에 자체 연구 사업으로 ‘차세대 저비용발사체 기술 분석 사업’을 시작하였다. 차세대 저비용발사체 기술 분석 사업의 목적은 1) 1단 재사용발사체에 필요한 핵심기술을 분석하고, 2) 차세대 저비용발사체의 개발동향과 필요한 핵심소요기술을 파악하는데 있다(그림 20). 연구의 주요 과제로는 1단 연착륙 유도 알고리즘 분석, 핀 포인트(pin-point) 착륙이 가능한 정밀 항법기술 분석, 재진입 공력 기열과 엔진폴름 영향분석, 극저온 추진제용 복합재 탱크 제작기술 분석, 추진제 탱크 자기증기압기술 분석, 엔진 재점화와 추력조절 엔진 기술 분석 등이다. 기술 분석에 추가하여 저비용발사체 개발과 관련이 있는 팽창식 메탄엔진의 설계와 연소기의 금속적층제조도 연구하고 있다.

이와 같은 핵심기술 분석과 선행연구는 국내 차세대발사체 개발의 기술적 방향을 설정하는데 활용가능하며, 향후 한국형발사체 개발 이후 확보해야 될 신기술을 사전에 파악하여 시행착오에 의한 개발비용 상승 및 개발기간 지연을 방지하고 국가 우주기술의 경쟁력 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 20 재사용발사체 핵심 기술



### 6.3 대학의 관련 기초연구

한국항공대학교에서는 재사용 우주발사체의 회수 기술에 대한 자료조사를 수행하고 대학자체적으로 '재사용 우주발사체의 회수를 위한 기초기술'에 대한 연구를 진행 중이다. 한국형발사체의 개방형액체로켓엔진 시뮬레이션 모델과 우주왕복선 주엔진(SSME)의 시뮬레이션 모델을 사용하여 Space X의 Falcon 9의 회수방법과 같은 그리드핀과 초음속 역추진을 사용한 재사용발사체 회수 시뮬레이션 연구를 진행하고 있으며, 이를 위하여 그리드핀과 초음속 역추진 상황에서의 공력데이터를 위한 연구와 최적회수경로 유도 및 제어에 대한 기초연구를 진행 중이다.

한국과학기술원에서는 재사용 우주발사체의 회수를 위한 경로최적화에 대한 연구를 수행하여 회수를 위한 최적 경로생성에 적합한 알고리즘에 대한 연구를 진행 중이다. 실제 회수에 성공한 Space X의 Falcon 9의 회수과정을 참고하여 연구를 진행하고 있으며 특히 발사체 엔진의 추력이 사라졌을 때 자유낙하하여 도달하는 지표면 위치(IIP)와 목표 착륙지점을 일치시키는 연구를 중점적으로 진행하고 있다[13].

이외에도 2019년 5월 개최된 한국추진공학회 춘계학술대회에서는 '저비용/재사용발사체 기술'에 대한 특별 세션도 구성되어 관련 기술이 소개되는 등 학계를 중심으로 본 기술에 대한 공감대와 관심이 증대되고 있다.

## VII 결론

과거 우주개발은 강대국을 중심의 국가의 기술수준 제고와 국위를 높이기 위한 목적으로 주로 정부주도로 진행되어온 반면에 최근에는 전 세계적으로 ‘NewSpace’라는 캐치프레이즈의 기치아래 급속히 민간주도의 우주개발 상업화가 진행되고 있다. 이와 같은 급격한 변화가 가능해진 것은 Space X와 Blue Origin 등의 민간기업의 성공적인 재사용 우주발사체 기술 개발을 통해 인공위성이나 탑재체를 우주로 보내는데 소요되는 우주발사체 비용의 획기적인 감소에 있다. 이를 통해 4차 산업혁명의 대표 ICT 기술과 우주산업이 융합되어 새로운 시장과 미래를 창출할 것으로 기대된다. 이와 같은 시대적 흐름에 부응하여 국내에서도 재사용 우주발사체에 대한 기술기반을 넓혀 새로운 우주시대에 적극적으로 참여할 수 있는 여건들이 마련되어야 할 것이다.

### 저자\_ 고상호(Sangho Ko)

#### • 학력

University of California at San Diego 기계공학 박사  
한국과학기술원 항공우주공학 석사  
한국항공대학교 항공기계공학 학사

#### • 경력

現) 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수  
前) University of Melbourne 전기전자공학과 연구원  
前) 삼성항공산업주식회사 선임연구원

### 저자\_ 김철웅(Cheulwoong Kim)

#### • 학력

모스크바물리공과대학 항공우주공학 박사  
모스크바물리공과대학 항공우주공학 석사  
한국항공대학교 항공기계공학 학사

#### • 경력

現) 한국항공우주연구원 발사체엔진팀 책임연구원  
前) 과학기술연합대학원대학교 겸임교임  
前) LG 정보통신연구소 연구원  
前) 공군 중위



## 참고문헌

- 1) 추교승, 문호균, 남승훈, 차지형, & 고상호. (2018). 재사용 우주발사체의 회수 기술 현황 및 분석. Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, 22(2), 138-151.
- 2) 정석규, 배진현, 정기정, 구자예, & 윤영빈. (2017). 재사용 우주 발사체 개발 동향. 한국항공우주학회지, 45(12), 1069-1075.
- 3) Astronautix, "DC-X Part of Delta Clipper Family", 2019, <http://www.astronautix.com/d/dc-x.html>
- 4) Nasa Space Flight, "Blue Origin publishes New Glenn overview as pad and landing ship continue development", 2019, <https://www.nasaspaceflight.com/2018/11/blue-origin-new-glenn-overview-pad-landing-ship-dev/>
- 5) Blue origin, 2019, <https://www.blueorigin.com/>
- 6) NBC, "SpaceX Does a Reality Check on Its Falcon 9 Rocket Landing Plan", 18, Dec. 2014, 2018, <https://www.nbcnews.com/science/space/spacex-does-reality-check-its-falcon-9-rocket-landing-plan-n270246>
- 7) SpaceX, 2019, <https://www.spacex.com/>
- 8) RLV-TD launch: India's reusable ISRO shuttle passes test, 2019, <https://www.deccanchronicle.com/science/science/240516/reusable-isro-shuttle-passes-test.html>
- 9) Airbus, <https://www.airbus.com>
- 110) Skylon 'spaceplane economics stack up', 2019, <https://www.bbc.com/news/science-environment-27591432>
- 11) Kittur, Z. and Bahekar, A., "CFD Analysis of Grid Fin Application on Missile in Supersonic Flow Regime," Research Journal of Recent Sciences, Vol. 5, No. 9, pp. 51-56, 2016.
- 12) Chauerhamer, D. G., Zarchi, K. A., Kleb, W. L. and Edquist, K. T., "Supersonic Retropropulsion CFD Validation with Ames Unitary Plan Wind Tunnel Test Data," IEEE Aerospace Conference, MT; United States, 2013.
- 13) Jo, Byeong-Un, and Jaemyung Ahn. "Near time-optimal feedback instantaneous impact point(IIP) guidance law for rocket." Aerospace Science and Technology 76, pp. 523-529, 2018.

- 14) A.I. Kuzin et. al., 흐루니체프사의 재사용 로켓복합체 연구, Aerospace technology, Moscow, 2010. (Исследования ГКНПЦ им. М.В. Хруничева по обоснованию многократной ракетно-космической системы).
- 15) 김철웅, 박순영, 조원국, 액체로켓엔진의 진단 방법론 연구, 항공우주기술 제11권 제2호, 2012.
- 16) "Raptor (rocket engine family)", Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Raptor\\_\(rocket\\_engine\\_family\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Raptor_(rocket_engine_family))
- 17) Jan Deeken, Michael Oschwald, Stefan Schleichriem, Current status of the DLR LUMEN project, Space Propulsion, Seville, 2018.
- 18) Space Shuttle Main Engine Orientation, Space Transportation System Training Data, Rocketdyne, 1998.
- 19) 김철웅, 재사용 관점에서 SSME 엔진의 교훈, 항공우주시스템공학회 추계학술대회, 2018
- 20) Teslarati, "Space X ships Falcon 9 booster west for second California launch of 2019", 2019, <https://www.teslarati.com/spacex-falcon-9-second-california-launch/>
- 21) 과학기술정보통신부, "제3차 우주개발 진흥기본계획"



# 02

## 우주/천문 관측 기술

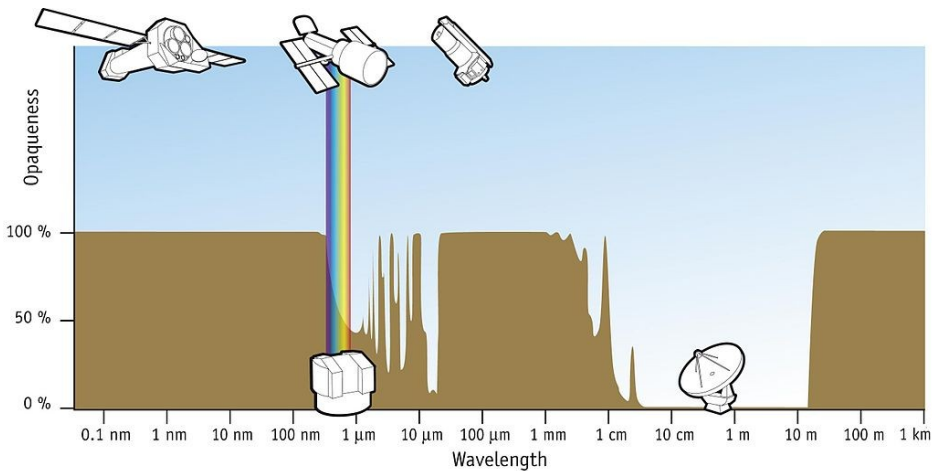
정웅섭 (한국천문연구원 우주과학본부 책임연구원)  
박용선 (서울대학교 물리·천문학부 천문학 전공 교수)  
안상현 (한국천문연구원 이론천문연구센터 선임연구원)

# I 적외선 우주관측기술 분야

## 1.1 적외선 우주관측과 의의

여러 전자기파 중에서 적외선 파장대역은 1800년대 유럽 천문학자인 윌리엄 허셀에 의해 발견되어 과학, 산업, 군사, 의학 등 다양한 목적으로 활용되고 있어 관련 기술들의 중요성이 커지고 있다. 특히, 천문학 연구에서 활용되고 있는 적외선 관측은 지상 대기 영향(그림 1)으로 매우 어두운 천체 신호를 검출하기 위한 자료 획득이 어렵기 때문에, 우주로 망원경을 쏘아 올려 관측을 수행하기도 한다. 이러한 적외선 우주 관측기술은 광학뿐만 아니라 극심한 발사 및 우주환경을 견디기 위한 광기계, 극미광 적외선 검출을 위한 검출기 운용 등 다양한 분야들의 융합 기술 성격이 강하다.

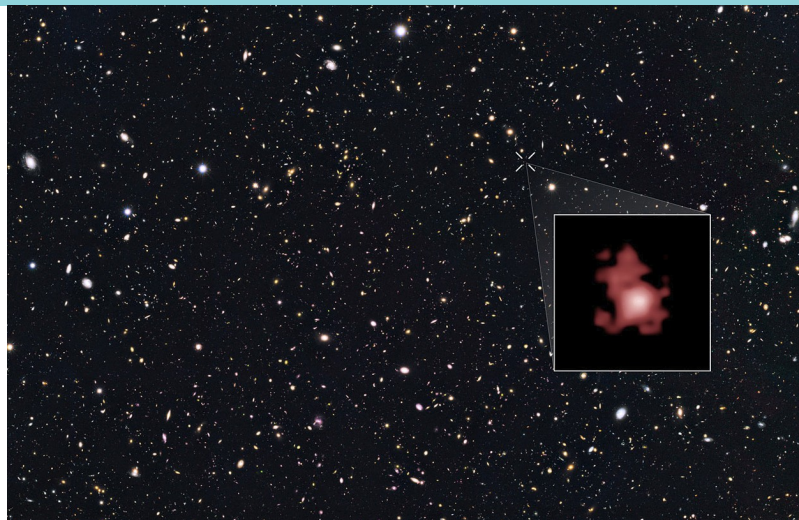
그림 1 각 전자기파에서의 대기 불투명도. 가시광 및 전파 대역은 대기를 통한 관측이 가능한 영역이다.



또한, 지상에서 뿐만 아니라, 우주에서도 대형 관측 장비들이 구축됨에 따라 다양한 파장 대역에서 매우 높은 해상도와 감도로 개별 천체들에 대한 보다 자세한 정보를 제공할 수 있어, 보다 넓은 지역에 대한 탐사 관측으로 새롭고 흥미로운 천체를 찾기 위한 경쟁도 치열하게 진행되고 있다. 특히, 분광 탐사 관측 자료는 천체들의 물리적인 특성을 파악할 수 있어, 천체들을 우선적으로 선별하는데 유용한 탐사 관측이 될 수 있다. 다양한 관측 결과들을 바탕으로 천체들의 특정 패턴 인식과 더불어 분광 정보를 통한 기본 물리량 측정에 대해서도 인공지능이 적용되고 있어 방대한 관측 자료에 대한 분석 방법도 고도화되고 있는 실정이다.

적외선 천체 관측은 먼 우주에서의 별빛을 적색이동 효과에 의해 검출할 수 있어 가장 먼 우주에 있는 천체로부터의 빛은 적외선 파장 대역에서 확인될 수 있다(그림 2 참조). 또한, 적외선은 활발한 별 생성 활동으로 인해 주변에 생성된 먼지들을 데워 발생된 열적 복사로 방출되기 때문에 별 탄생 기작 또한 적외선 관측을 통해 알아 낼 수 있다. 적외선 관측 자료를 얻기 위해서는 우주망원경을 활용한 관측이 절대적으로 유리하고, 지상에서 관측 가능한 일부 적외선 파장 관측도 열적인 복사를 피하기 위해서는 관측기기 냉각이 필요하다는 점들은 상대적으로 다른 파장 관측에 비해 비용이 많이 든다는 단점으로 작용한다. 이러한 추세에 따라, 진행 중인 우주에서의 탐사 관측과 함께 효율적인 관측을 위해 적용되고 있는 새로운 우주기술들에 대해 본 호에서 다루고자 한다.

그림 2 허블 우주망원경 적외선 분광기로 관측된 빅뱅 이후 4억년에 생성된 현재 관측된 가장 먼 은하 GN-z11



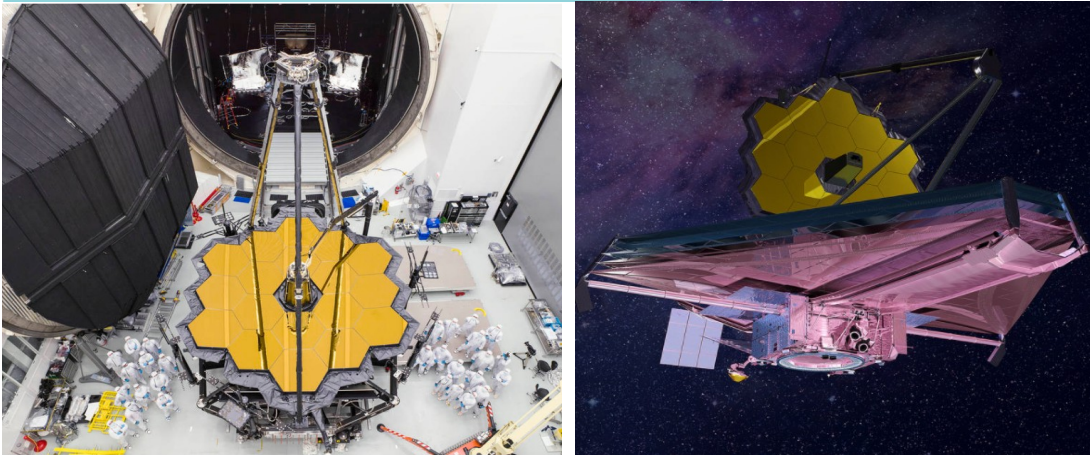
(출처 : NASA/ESA/P. Oesch(Yale University))

## 1.2 최근 적외선 우주망원경의 초기 우주 연구 및 적용된 기술들

최근 적외선 우주망원경들은 가까운 근지구 궤도에서의 운영을 벗어나 지구로 부터 먼 안정한 궤도에서 열적인 영향을 덜 받으며 우주망원경을 운용하여 높은 관측 효율을 얻으려는 추세이다. 최근 적외선 우주망원경 프로젝트들로는 미국 NASA의 JWST(James Webb Space Telescope)와 WFIRST(Wide Field Infrared Survey Telescope), 유럽 ESA의 Euclid, 우리나라가 일본 ISAS/JAXA와 공동 개발을 추진 중인 SPICA 등이 있다.

JWST는 주경 6.5m의 대형 적외선 우주망원경으로 미국 NASA 주도 하에 유럽 ESA와 캐나다 CSA와 함께 공동개발 증으로 2021년 발사 예정이다. 기본 관측 계획은 5년이며, 10년 관측을 예상하고 있다. 주요 기기로는 0.6~5 $\mu$ m에서 영상과 그리즘(grism) 분광기능을 가진 NIRCam, 저분산 및 중분산 분광기능과 IFU(Integral Field Unit) 기능을 가진 NIRSpec, 5~28.5 $\mu$ m 중적외선에서 분광과 관측 시야 전체 분광이 가능한 IFU 기능을 가진 MIRI 등이 있다. 중적외선 대역에서 JWST의 높은 감도와 분해능은 초기 우주의 재이온화 시기에 은하들의 역할을 제고함과 더불어 초기 은하의 특성 연구에 매우 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

그림 3 챔버(chamber)에 시험을 준비 중인 JWST(좌)와 상상도(우)



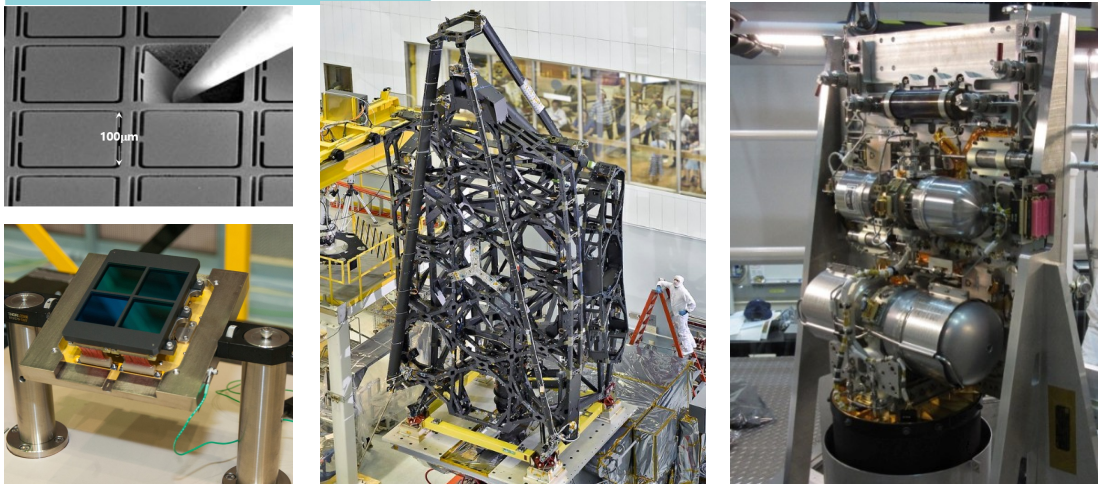
(출처 : NASA)

적외선 우주망원경으로는 최고의 감도와 해상도를 가지게 될 JWST를 개발하기 위해 최신 기술들이 적용되고 있다. 대표적인 우주기술로 강성이 높고 열적인 안정성이 우수한 베릴륨 재질로 정밀하게 가공되어 높은



광학적인 성능을 달성한 미러들(그림 3 왼쪽 망원경 사진 참조), 분광 관측기에서 여러 천체들에 대한 동시 분광을 위해 적용된 마이크로 셔터 어레이(Micro Shutter Array)(그림 4위 왼쪽 위), 관측기들에 사용된 18개의 고감도 적외선 검출기(그림 4 왼쪽 아래), 미러 및 구조체를 지지하기 위한 전체 지지구조들(그림 4 가운데), 중적외선 관측기를 10K(섭씨 -263.15도) 이하로 냉각하기 위한 저진동 냉각기(그림 4 오른쪽) 등이 있다.

그림 4 JWST에 적용된 최신 기술들



(출처 : NASA)

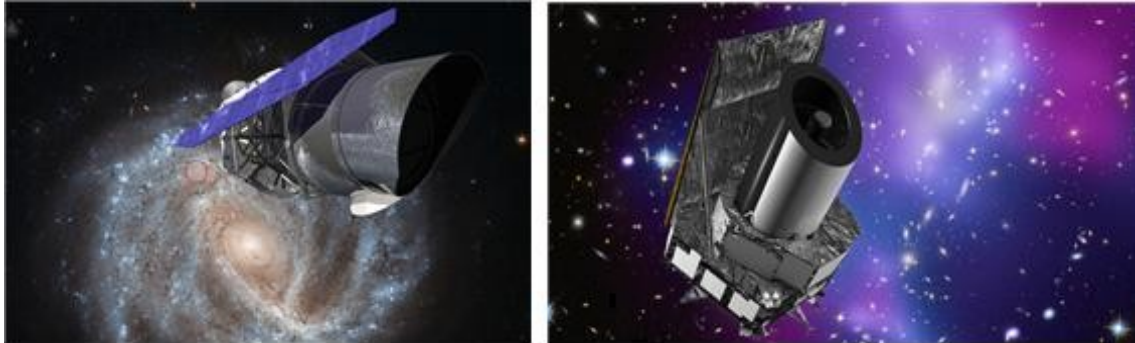
WFIRST 프로젝트는 미국 국립과학학술원에서 조사하는 향후 10년간의 거대 연구 프로젝트 우선순위 보고서에서 최우선 순위에 올라있는 적외선 우주망원경 미션이다(그림 5). WFIRST는 기존 허블 우주망원경의 성능으로 100배 정도 광시야를 구현하여 수 천 평방도에 이르는 광활한 영역에 대한 탐사를 계획하고 있다. WFIRST에 쓰이는 망원경은 기존에 우주에서의 지상 정찰 위성으로 쓰기 위해 개발된 것으로, 이미 사용되고 남은 허블 우주망원경과 같은 2.4m 크기 망원경으로 보안을 통해 우주관측용으로 활용할 계획이다. WFIRST의 주요 관측기기로 NASA 제트추진연구소 내의 팀에서 개발하는 외계 행성의 특성을 관측하기 위한 코로나그래프(coronagraph) 기기와 NASA 고다드 우주비행센터 내의 팀에서 개발하는 광역 영상/분광 탐사를 위한 광역영상 기기(WFI)가 있다. 주요 과학임무로 광역 탐사 관측을 통해 우주의 가속팽창을 이끄는 암흑에너지의 성질을 결정하고, 외계행성계의 통계적인 조사를 수행할 계획이다. 기술적으로는, 우주망원경으로는 최초로 광시야



영상을 얻기 위해 4K 어레이(array)의 고감도 적외선 센서를 채용하였고, 밝은 별들을 가려 높은 대비(contrast)를 얻음으로써 주변의 외계 행성을 직접 관측하는 기법인 코로나그래프 방식의 관측기술이 도입되었다.

유럽 ESA는 차세대 우주과학에 대한 계획을 수립하고 이에 따라 미션을 선정하는데, 'Euclid' 프로젝트는 2011년에 선정되어 개발이 진행 중이며, 2022년 발사를 목표로 하고 있다(그림 5). 근적외선 대역에서 0.53 평방도의 넓은 관측시야로 15,000 평방도에 달하는 광역 탐사를 통해 암흑에너지를 찾고 우주초기의 가속팽창을 연구하는 주요 과학 목적을 가지고 있다. NASA의 WFIRST 미션과 같이, 16개의 고감도 적외선 검출기를 운용한 광시야 근적외선 영상탐사와 함께, 관측시야 전체에 대한 분광을 구현하기 위해 그리즘을 사용한 분광 탐사를 더해 탐사 관측에 초점을 두고 개발이 진행 중이다.

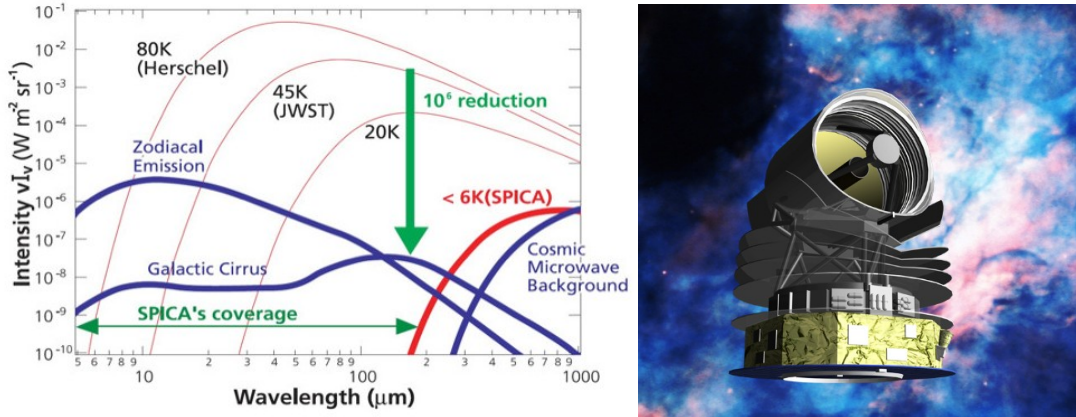
그림 5 암흑에너지 연구를 위한 미국 NASA의 WFIRST와 유럽 ESA의 Euclid 미션 상상도 (우)



(출처 : NASA & ESA)

SPICA는 유럽 ESA와 일본 ISAS/JAXA의 국제협력에 의해 추진되고 있는 적외선에서 좀 더 장파장인 원적외선 파장 영역에 최적화된 차세대 적외선 우주망원경이다(그림 6). 2.5m 주경을 가지고 있으며, 망원경 전체를 극저온인 8K(섭씨 -265.15도)까지 냉각하여 주변 열적 배경원의 영향을 최소화하여 원적외선 영역에서는 기존 적외선 우주망원경에 비해 최고의 감도를 가질 것으로 예상되며, 탑재기기 개발과 테스트 완료 후 발사는 2030년경으로 계획되어 있다. 과학적인 목적으로는 은하, 별, 행성 및 생명 자체의 기원과 진화를 이해하는 기본적인 천문학적인 이슈들을 해결하는 것을 목표로 하고 있다. SPICA는 적외선에서 밝은 천체들에 대한 물리적인 특성을 직접적으로 도출하기 위해 중적외선 - 원적외선 영역에서 구현된 영상 및 분광관측 기기를 개발할 예정이다. SPICA 이외에 원적외선 영역에 최적화된 NASA 미션으로는 Origins Space Telescope이 있으며, 현재 기획 단계 중에 있다.

그림 6 원적외선 우주관측에서 겪게 될 배경원 밝기 및 SPICA에서 관측된 배경원 밝기 비교(좌)와 중/원적외선 파장 영역에 최적화된 적외선 우주망원경 SPICA 상상도(우)

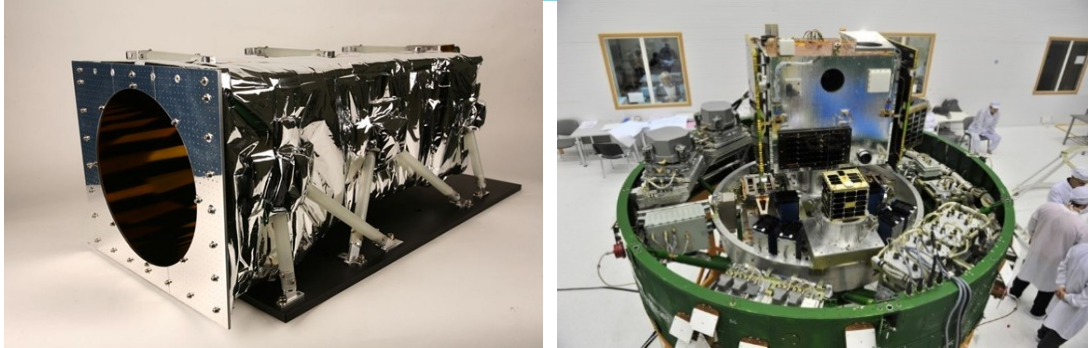


(출처 : ESA & ISAS/JAXA)

### 1.3 국내 적외선 우주관측 기술 동향 및 개발된 기술들

과학연구를 위한 국내 우주관측기술들은 소형위성 활용을 통해 얻어져 왔다. 소형 미션에 한정되기 때문에, 높은 감도 및 해상도를 요구하는 개별 천체들의 관측에 초점을 맞추기 보다는 좀 더 광범위한 탐사 관측을 위주로 우주관측기술이 개발되어 왔다. 국내 첫 우주미션은 자외선 대역에서 전천 탐사 관측을 수행한 FIMS(2003년 발사)이며, 이후 광시야 적외선 영상탐사 미션을 위해 8cm 구경의 3.7도에 달하는 광시야 적외선 굴절 망원경, 적외선 검출기 운용, 극한 우주환경을 고려한 구조부 등 우주망원경을 운용하기 위한 기본적인 우주 관측기술들이 MIRIS 미션(2012년 발사)을 통해 개발되었다(그림 7).

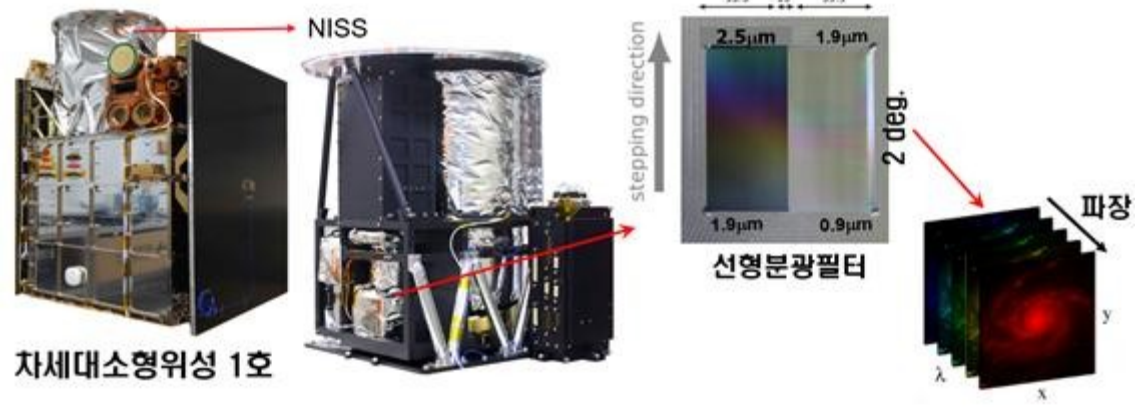
그림 7 굴절망원경 타입으로 개발된 광시야 적외선 망원경 MIRIS(좌)와 위성에 탑재되어 발사체에 조립된 과학위성 3호(우)



(출처 : 한국천문연구원)

앞서 설명된 선진 적외선 우주망원경들은 1m급 혹은 더 큰 미러를 채택하기 위해 반사망원경 타입으로 설계 및 개발되었는데, 국내에서는 상업 위성 이외에 과학 관측을 위한 반사망원경 타입의 우주 관측기기는 차세대 소형위성 1호 과학 탑재체인 근적외선 영상분광기 NISS(Near-infrared Imaging Spectrometer for Star formation history) 미션을 통해 개발되었다. NISS는 기존 우주미션에서 제한적으로 사용되었던 영상분광 관측기술을 확장해 광시야에서 적외선 영상과 분광을 동시에 얻을 수 있는 영상분광 관측기술을 탐사관측에 처음 도입하였다(그림 8). 적외선 영상분광기에 대한 설계에서부터 제작, 조립, 시험 및 자료처리까지의 대부분의 관련 우주 기술들이 국내에서 개발되었으며, 2018년 발사 및 초기 운영을 통해 우주에서의 동작 성능을 검증하였다. NISS는 100평방도 영역에 대한 적외선 영상분광 관측으로 주요 과학관측 임무인 가까운 은하 및 은하단과 우리 은하 내에서의 별 탄생 연구, 딥필드(deep-field) 관측을 통한 먼 우주에서의 별 탄생 역사 연구 등에 활용될 예정이다.

그림 8 차세대 소형위성 1호 과학탑재체 NISS, 초점면에 설치된 선형분광필터와 관측 운영을 통해 얻을 있는 적외선 영상분광 관측 자료의 예

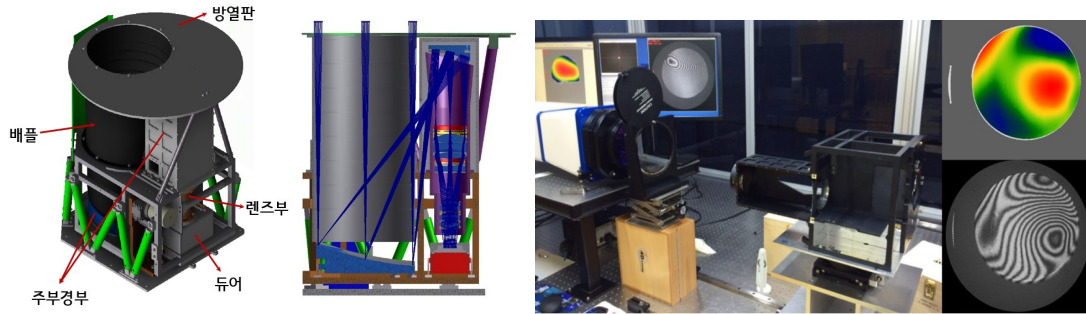


(출처 : 한국천문연구원)

NISS는 적외선 관측을 수행하기 때문에, 앞서 소개한 우주망원경들과 같이 망원경 전체에 대한 냉각이 매우 중요하다. 주변 열을 차폐/방출하고 발사환경을 견디기 위한 설계가 태양 차폐판, 열 배출을 위한 레디에이터, 주부경 지지 구조 및 전체 구조부 등에 고려되었고(그림 9 망원경 구조 참조), 열적/기계적인 설계분석을 통해 미러의 변형이 광학성능에 미치는 영향, 복사냉각을 통한 망원경 냉각, 쿨러 구동을 통한 적외선 검출기 냉각 등이 분석되고 시험을 통해 이를 최종 검증하였다.

위성체에서 과학탑재체에 주어진 공간은 매우 협소하여 굴절망원경 타입은 적용이 불가능하며, 일반 반사망원경 타입으로는 감도에 영향을 주는 주경/부경 크기 및 전체 망원경 길이에 제약이 있을 수밖에 없다. 최근 군사용 위성에서도 광시야 및 콤팩트한 광학계를 얻기 위해 비축 광학계를 많이 적용하고 있기 때문에, 이러한 비축 광학계를 도입하여 광학계가 차지하는 공간을 줄이고 요구되는 광학성능을 구현하였다(그림 9 광경로 참조). 비축 광학계 설계는 이론상으로 도입이 가능하나, 일반 반사망원경에 비해 광학적인 정렬은 매우 까다롭다. 이를 해결하기 위해 주부경 및 렌즈 베럴(barrel)부를 독립적인 광학계로 설계하였고, 비축광학계를 위한 주부경 가공 및 이에 대한 개별적인 정렬을 위한 알고리즘도 개발하였다(그림 9 주부경 정렬 참조).

그림 9 29(L)×27(W)×39.2(H)cm의 콤팩트한 크기를 가진 NISS의 구조, 광경로 및 주부경 정렬 모습

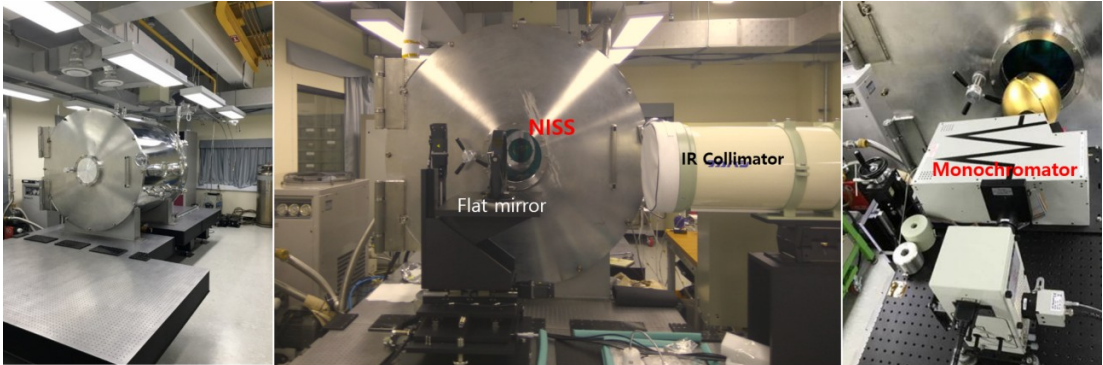


(출처 : 한국천문연구원)

선형분광필터를 활용한 우주관측은 선진국들의 우주미션들에서도 적용되었지만, 2도에 달하는 광시야 탐사 관측에 적용된 것은 첫 시도이며, 이를 위해 선형분광필터 2개를 센서 면에 가깝게 붙이고 센서를 포함해 80k(섭씨 -193.15도) 정도로 냉각할 수 있는 소형 듀어 및 망원경의 효율적인 냉각과 잡광 차단을 위한 망원경 배플이 제안되었다. 이를 통해 0.95~2.5 $\mu$ m 넓은 파장대역에서 과학연구를 위한 감도를 얻을 수 있음을 확인하였다. 초점면에 부착된 필터만을 활용한 영상분광 관측은 분광을 위해 움직이는 구동부가 없어 우주에서 안정적인 관측을 보장받고, 좀 더 높은 감도와 관측효율을 구현할 수 있다. 또한, 적외선 광학시험 및 우주환경 모사를 위한 진공챔버(chamber)와 전체 시스템 검·교정 시험을 위한 테스트 장비들을 NISS 시스템 요구에 맞게 디자인/구축하였고(그림 10), 이를 활용해 망원경의 초점조정, 파장 검·교정, 암영상 획득, 노이즈 측정, 복사 냉각시험 등을 수행하였다.



그림 10 NISS 시스템 시험을 위해 구축된 진공챔버(좌), 적외선 콜리메이션 시스템(중) 및 파장 검·교정 시스템(우)

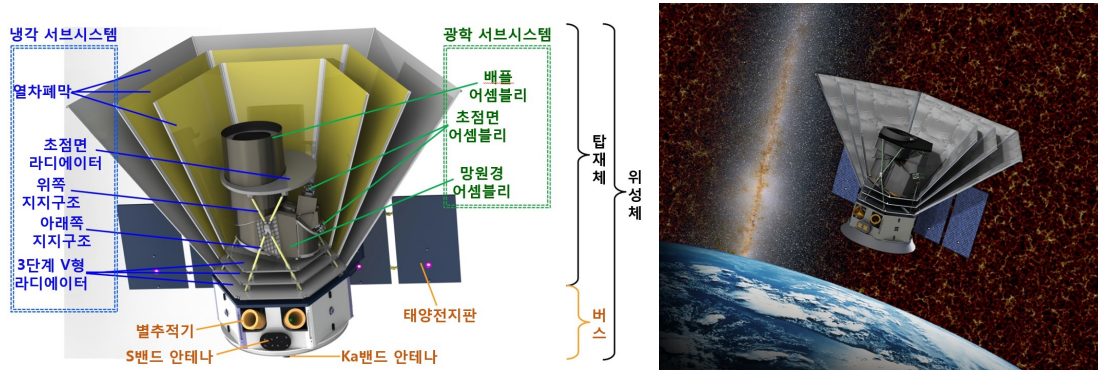


(출처 : 한국천문연구원)

NISS를 통해 개발된 광시야 적외선 영상분광 우주관측기술은 국제협력 미션을 통해 활용될 계획이다. SPHEREx(Spectro-PHOTometer for the History of the Universe, Epoch of Reionization and Ices Explorer) 미션은 미국 캘리포니아 공과대학(Caltech) 주도로 한국천문연구원과 함께 NASA 중형 우주망원경 미션에 제안된 프로젝트로 0.75~5 $\mu$ m 영역에서 전천 적외선 영상분광 탐사를 수행할 계획이다. SPHEREx는 넓은 적외선 파장대에서 영상과 분광정보를 동시에 얻을 수 있는 전천 관측 운영으로 14억 개에 달하는 분광목록을 확보할 것으로 기대하며, 이로부터 초기 우주의 3차원 거대 구조로부터 작은 규모인 행성계까지 다양한 분야의 과학 연구가 가능하다. 최근 천문학의 주요한 이슈들인 우주의 생성 기원, 은하의 초기 형성과 진화, 생명체가 존재할 수 있는 행성계의 기원 등에 대한 답을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

SPHEREx는 망원경을 둘러싸는 큰 구조의 열차폐막을 두어 쿨러에 의한 능동적인 냉각이 아닌 복사냉각만으로 망원경과 검출기를 각각 극저온인 80K(섭씨 -193.15도)와 50K(섭씨 -223.15도)로 냉각하며(그림 11 전체 구조 참조), 11.3도×3.5도로 설계된 넓은 관측시야와 0.75~5 $\mu$ m 적외선 파장대역을 6개의 적외선 검출기로 커버하여 전천 영상분광 탐사를 수행할 계획이다. 복사냉각, 넓은 적외선 파장범위의 선형분광필터들, 극저온에서의 적외선 검출기 구동 등은 국제공동으로 수행한 사전 개발 연구를 통해 성능을 검증하였다. 한국천문연구원은 과학연구 뿐만 아니라 NISS 개발 경험을 토대로 SPHEREx 개발에도 참여하여, 전체 시스템 검·교정을 위한 극저온 진공챔버 및 검·교정 시험장비 구축을 주관하고 적외선 관측기기 파트 개발, 자료처리 파이프라인 개발에도 참여할 예정이다.

그림 11 NASA 중형미션으로 한국이 참여할 SPHEREx 전체 구조(좌)와 운영 상상도(우)



(출처 : NASA 및 한국천문연구원)

### 1.4 전망

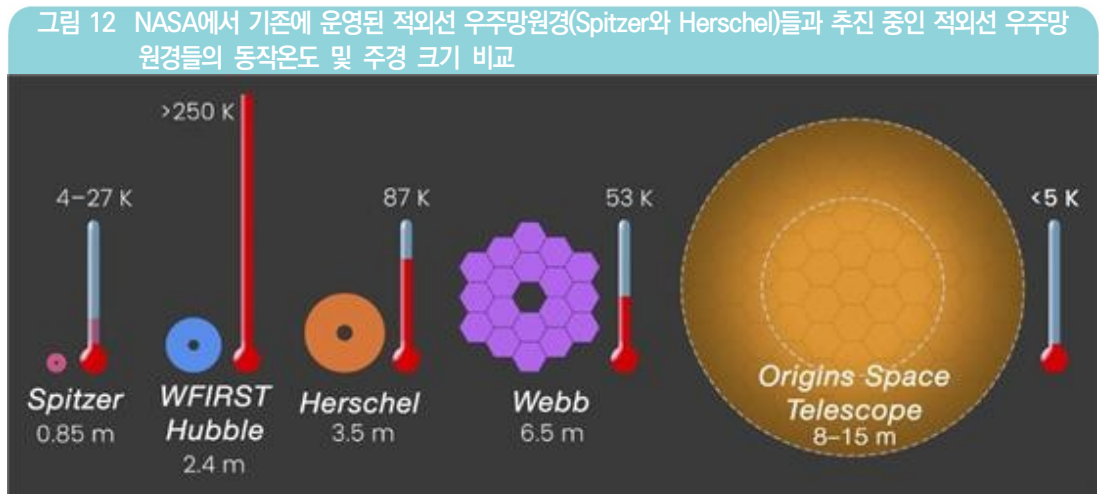
우주망원경을 활용한 적외선 관측 연구는 우주기술이 발전함에 따라 시도되었으며, 1980년대에 본격적으로 수행되어 다른 파장대에 비해 역사는 비교적 짧지만 많은 기술들이 발전되어 왔다. 최근 적외선 우주관측기술은 개별 천체들에 대한 정밀한 연구를 위한 높은 감도와 해상도를 높이고자 하는 우주 미션들과 넓은 지역에 대한 광역 탐사 관측을 통해 다양한 천체 샘플들을 확보하려는 우주미션들로 진행되고 있다.

높은 감도와 해상도를 얻기 위한 측면에서 우주망원경 주경 크기가 커지는 것은 불가피하며, JWST와 같이 6.5m 주경을 지닌 큰 구조체를 그대로 우주로 발사할 수 있는 발사체 기술은 매우 어렵다. 그렇기 때문에, 전체 주경을 조각거울들로 구성하고 이를 접은 상태로 발사한 이후 실제 운영 궤도에서 펼치는 고난이도 미션 운영을 시도하고 있다. 이러한 기술들이 성공적으로 우주에서 검증된다면, 향후 JWST보다 더 큰 주경을 가진 우주망원경 프로젝트가 진행되어 더 높은 감도와 해상도를 얻으려는 야심찬 우주 미션들이 진행될 것으로 보인다(그림 12).

전천탐사와 같이 넓은 영역에 대한 탐사 관측을 위해서는 큰 망원경 주경 보다는 효과적인 관측을 위한 미션 설계가 중요하다. 한국이 참여하는 SPHEREx에서 시도되었듯이, 적외선 관측을 위한 냉각을 쿨러 없이 복사냉각만으로 수행하고 구동부를 두지 않는 적외선 영상분광 관측은 안정적인 관측으로 운영 수명을 늘리고 더 효율적인 탐사 관측을 위한 시도이다.



한국은 적외선 우주관측기술 분야에서 아직 선진국들에는 미치지 못하지만, 소형 위성을 통해 꾸준히 우주관측 기술 개발을 수행해 왔다. 특히, 새롭게 시도되어 개발된 적외선 영상분광 우주관측기술은 NASA의 중형 우주미션인 SPHEREx에서도 활용될 것으로 보여, 향후 국내에서도 창의적인 과학연구를 위한 중대형 우주망원경 미션 개발에서도 중요한 기반 우주관측기술이 될 것으로 기대된다.



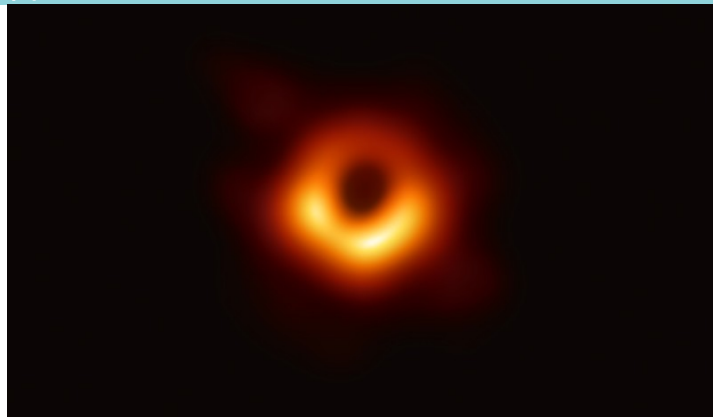
(출처 : NASA)

## II 우주전파 분야

### 2.1 EHT와 블랙홀

2014년 만들어진 영화 인터스텔라 덕분에 블랙홀은 일반 대중의 관심사가 되었다. 영화의 영상들은 천체물리학자들의 고증을 거쳐 과학적으로 정확하게 표현되었다고 한다. 그러던 중에 과학자들은 2019년 4월 인류 처음으로 블랙홀의 이미지를 얻는데 성공했다. 블랙홀은 말 그대로 빛조차도 빨아들이는 천체이므로 블랙홀을 볼 수는 없다. 블랙홀 바로 밖에서 떠돌던 전자기파, 그중에서도 파장 1mm(주파수로 230 GHz)의 전파를 포착한 것이다. 사실 직접 보지 못했을 뿐이지 우주 곳곳에 블랙홀이 있다는 것은 적어도 천문학자와 물리학자들에게는 상식에 속한다. 2016년 중력파를 검출한 것이 인류지성사에 있어서 더 중요한 발견이지만 일반인들의 관심은 블랙홀에 더 많이 쏠려 있는 듯하다.

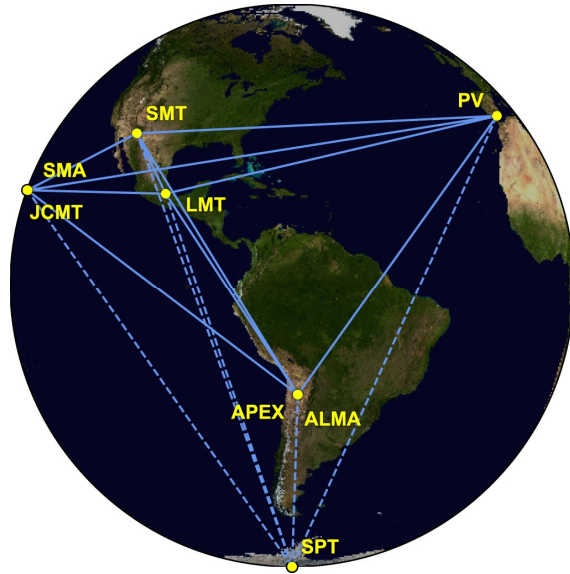
그림 13 M87 은하의 중심부에 있는 블랙홀이 만든 전파 이미지. 밝은 고리의 크기는 각도로  $1.2 \times 10^{-8}$ 도로 매우 작다.



(출처 : Event Horizon Telescope Collaboration)

그림 13은 지구로부터 5천5백만 광년 떨어져 있는 M87이라고 하는 은하의 중심부에 있는 블랙홀에 의해 휘어진 시공간을 타고 넘어온 전파의 모습이다. 블랙홀의 질량은 태양질량의 70억배 정도이다. 이 블랙홀 영상을 찍는데 사용된 연구 장비는 EHT(Event Horizon Telescope)라고 하는 것으로, 독립된, 전용의 연구 장비는 아니다. 전 세계적으로 분포한 전파망원경이 일정을 맞추어 동시에 천체들을 관측하는 초장거리 전파간섭계(VLBI: Very Long Baseline Interferometer)라고 불리는 관측망이다. 커다란 망원경이 많이 있으면 좋겠으나 현실은 지구 전체적으로 10여 곳에만 전파망원경이 있을 뿐이어서, 마치 전체 크기는 지구만하지만 대부분이 막혀 제대로 구실을 못하는 불량 렌즈로 천체는 보는 것과 같다(그림 14).

그림 14 EHT 관측에 참여한 전파망원경들과 그들의 위치. 넓게 퍼져있을수록 천체의 상세한 전파이미지를 만들 수 있다.



(출처 : Event Horizon Telescope Collaboration)

각 전파천문대는 서로 멀리 떨어져 있어서 전파신호를 독립적으로 기록해서 나중에 합성해야 하므로, 시각을 동기화하기 위해 정밀한 시계를 사용한다. 앨런 표준편차(Allen standard deviation)가 10초 노출에  $10^{-14}$ 정도인 현존하는 가장 정밀한 수소 메이저 시계를 사용한다. 또한 우주의 저 끝에서 오는 전파신호는 매우 미약하므로 고감도의 전파수신장치가 필요하다. 또한 불량 렌즈로 관측하는 것이므로 가장 그럴싸한 영상을 얻기 위해 복잡한 자료처리 과정을 거쳐야 했다.

## 2.2 ALMA와 행성 형성 연구

이번의 성공은 단번에 이루어진 성과가 아니고 EHT의 점진적인 성능향상의 결과이다. 그 중의 하나는 칠레의 해발고도 5,000m인 아타카마 고원 사막에 설치된 ALMA (Aatacama Large Millimeter Array)가 가담한 것이다. 최근에 완성된 관측시설로서 이것 자체로 66개의 6~12미터 크기의 전파안테나로 구성된 간섭계 시스템이다(그림 15). 동작원리 역시 VLBI와 같으나 최대 20여km 정도 이내로 떨어져 있어서 각 안테나에서 나온 전파신호를 한 곳에 모아 실시간으로 처리한다는 점이 다르다. 안테나마다 전파 신호가 도달하는 시간차이를 보정해서 각 안테나에서 나온 신호를 합치면 커다란 한 대의 안테나에서 나오는 신호가 되는데 이것이 EHT의 감도를 높이는데 결정적인 역할을 하였다.

ALMA는 전파천문학을 하는 거의 모든 국가가 건설에 참여한 대형 관측 장치로서 고감도로 고해상도의 천체영상과 스펙트럼을 포착할 수 있는 관측 장치이며, 천문학의 거의 모든 연구 분야에서 활발하게 사용되고 있다. 주요 성과 중의 하나는 어린별 주변에서 티끌로 이루어진 원반과 이 원반 안에서 행성에 의한 것으로 짐작되는 틈들을 발견한 것이다. 앞으로 지구와 같은 행성들이 만들어지고 있는 과정을 자세히 탐구할 수 있을 것으로 기대한다. 우리나라도 동아시아 컨소시엄의 일원으로 ALMA에 참여하면서 ALMA에서 사용되는 전파수신기와 분광기를 대체하는 신형으로 프로젝트를 진행하고 있다.

그림 15 ALMA 망원경의 일부. 안테나 간의 최대 거리는 약 20km이다.



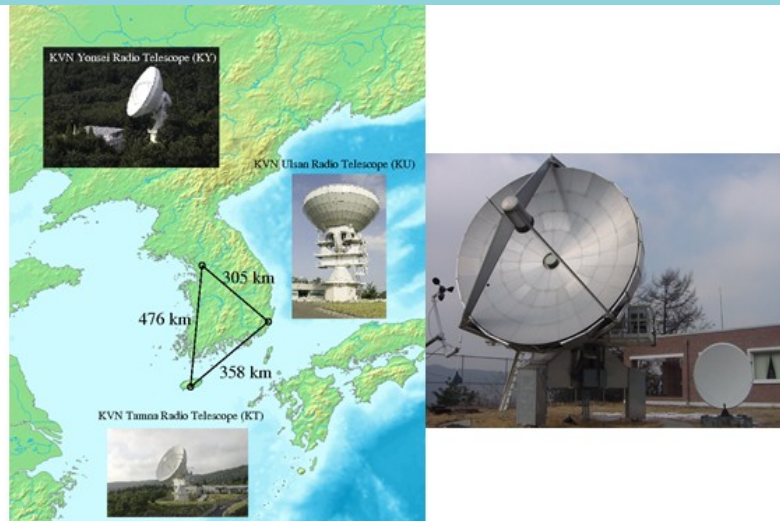
(출처 : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) )

### 2.3 동아시아와 우리나라 전파간섭계

동아시아는 미국과 유럽에 견줄만한 정도로 전파안테나들이 많다. 전통적으로 이 분야에 강한 일본과 최근에 부상하고 있는 우리나라와 중국 덕분이다. 최근 수년간 한국과 일본이 KAVA(KVN And VERA Array)라는 공동 관측망을 구성하여 활동하다가 중국 등의 나라가 참여하여 이를 확대하여 동아시아 전파간섭계망을 구축하였다. 다만 아직까지는 22GHz 이하의 낮은 주파수에서 활동하고 있다. 전파간섭계는 기술 난이도가 적은 낮은 주파수부터 시작하였으나 높은 주파수로 올라가는 추세이다. 한국도 수년전에 KVN(Korean VLBI Network)이라고 하는 독자적인 전파간섭계망을 구축하였다(그림 16). 20m 안테나 3기로 이루어져 있고 130GHz의 높은 주파수에서 작동한다는 것이 특징이자 장점이다. 최근에 강원도 지역에 안테나를 하나 더 건설하려는 계획이 추진되고 있다. 각 안테나에서 나오는 신호는 하드디스크에 시각정보와 함께 기록되고 나중에 국가과학기술연구구망(KREONET)을 이용해 대전에 있는 한국천문연구원의 상관센터에 모이는데 이 KREONET을 가장 활발히 이용하는 연구 장비이기도 하다.

위의 움직임에 더하여 동아시아에서도 EHT와 유사한 230GHz 대역 관측망을 만들자는 움직임이 있다. 일본과 대만(망원경은 그린란드에 위치)이 참여하고 있고 한국에서는 서울대학교가 6m 전파망원경으로 참여하고 있다(그림 16). 2019년 3월에 처음으로 230GHz VLBI 실험을 수행하였고, 2019년 11월 추가로 실험을 할 예정이다. 동아시아 국가가 공동으로 운영하는 하와이의 JCMT(James Clark Maxwell Telescope)도 참여할 예정이다.

그림 16 Korean VLBI Network과 서울대 6미터 전파망원경



초장거리 간섭계 관측에서 어려운 점 중의 하나는 지구대기가 균일하지 않아서 별이 흔들거리는 것처럼 전파이미지도 퍼져 보인다는 점이다. 이것을 보정하기 위해서 관측 대상 천체 근처에 있는 점전파원을 이용하는 등 다양한 방법을 사용하고 있으나 그다지 성공적이지 않았다. 최근에 KVN은 주파수 위상 참조 기술(frequency phase referencing)을 개발하였는데, 관측 대상을 낮은 주파수에서 동시에 관측해서 여기에서 얻은 위상 요동 정보를 관측 주파수 대역에서 보정하는 방법으로서 매우 성공적이었다. 기존의 다른 방법보다도 대기요동을 잘 보정할 수 있는 것으로 전 세계적으로 인정받아 앞으로 위상보정 방법의 표준이 될 것으로 예상된다. 이 방법을 230GHz 관측에도 적용할 수 있다면 다른 여러 어두운 블랙홀들의 전파이미지를 만들 수 있을 것으로 기대되는데, 1~2년 안에 동아시아 230GHz VLBI망에서 이 기술 적용을 시도할 것이다.

## 2.4 수신기 기술

매우 미약한 천체 전파를 검출하기 위해서는 초고감도의 전파수신기가 필요하다. 위와 같은 간섭계나 단일 망원경 모드로 사용하기 위해서 위상정보를 간직하는 헤테로다인(heterodyne)형 수신기를 사용한다. 전파를 수신한다는 면에서는 스마트폰과 기능이 비슷하다 할 수 있겠다. 스마트 폰은 소비전력을 적게 하고 소형화하면서 저비용으로 대량생산하는 것이 목표라고 한다면, 우주전파 수신기는 감도가 최우선이다. 대부분이 열잡음이므로 4K(섭씨 -269.16도)이하의 극저온으로 냉각을 시키고 거의 수작업으로 제작한다는 면에서 매우 다르다. 상용의 통신 장비에 견주어 훨씬 일찍 고주파 대역으로 올라가서, 현재는 밀리미터 대역의 우주전파 신호를 양자한계보다 조금 큰 수준의 잡음으로 수신하는 것이 보편화되었다. 우리나라도 한국천문연구원 등에서 150GHz 대역까지는 자체기술로 수신기를 개발한 경험이 있다. 현재는 일본과 공동으로 350~500GHz 범위에서 동작하는 광대역 수신기를 개발하고 있다. 광학의 IFU 분광기처럼 전파분야에서도 초점면에 전파수신 소자를 여러 개 배열한 다중 피드 전파수신기를 개발하여 관측 능력을 높이고 있다. 현재로는 대략 100개 정도가 최대인 듯하다. 수공업에 가까운 현재의 제작 기법으로는 제작비가 매우 비싸지고 수신소자의 성능을 균일하게 만드는 것이 어려워, 혁신적인 변화가 요구되고 있다.

5G 통신은 4~5GHz와 28GHz 대역의 전파자원을 사용하고 있고 폭발적인 수요를 감당하기 위해 앞으로 점차로 높은 주파수를 사용하게 될 것이다. 천문학에서 매우 중요한 주파수 대역은 보호받고 있지만 그 폭이 매우 좁고, 통신에서 사용하는 전파의 전력이 우주전파의 그것에 비해 엄청나게 커서 통신 쪽에서 조금만 부주의해도 우주전파관측이 불가능해진다. 이러한 전자파간섭(RFI: Radio Frequency Interference)은 전



세계 전파천문대에서 흔히 보고된다. 이런 문제를 해결하기 위해 오래전부터 달의 뒷면에 전파망원경을 설치하는 것이 논의되고 있으나 경제성의 문제로 특별한 진전은 없는 듯하다.

## 2.5 전망

앞에서 분야별로 부분적으로 언급을 했지만 우주전파 연구가 앞으로 어떻게 발전해나갈 것인가를 전망해보고자 한다.

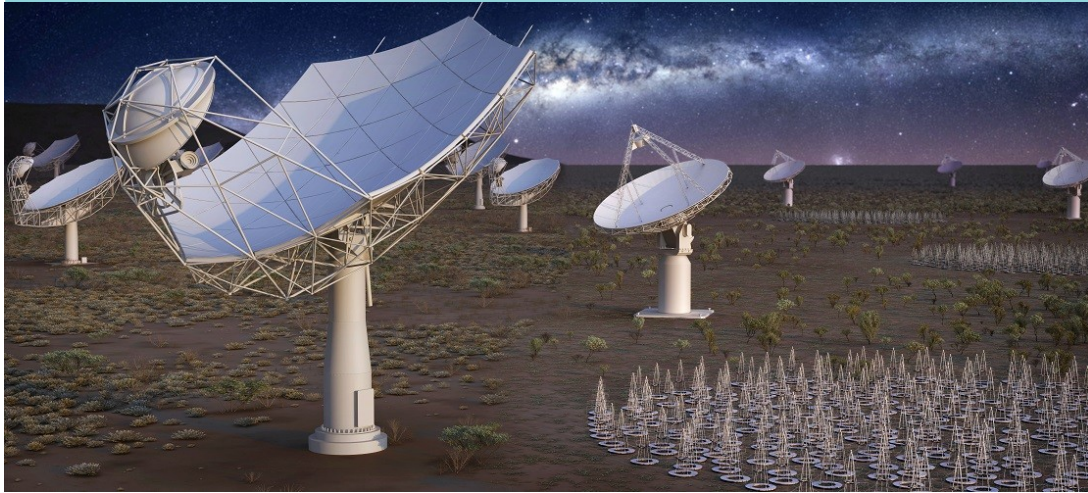
EHT는 해상도와 감도를 높이기 위해서 두 가지 방법을 취할 것이다. 첫째로 350GHz 대역과 같은 더 높은 주파수의 전파를 사용할 것이다. 이 경우 지구대기의 요동이 더 심해진다는 어려움이 있기는 하다. 둘째로 현재 지상에서 건설되고 있는 대형 망원경들을 관측에 참여시키는 것이다. 15m 크기의 안테나 10개로 구성된 유럽의 간접계 NOEMA(NORthern Extended Millimeter Array)가 가담하면 감도가 더욱 좋아질 것이다.

이에 더하여 우주로 전파망원경을 띄워 올리는 프로젝트가 있다. 우주를 보는 렌즈의 크기를 현재보다 3~4배 이상 키울 수 있을 것이다. 과거에 일본과 러시아가 이러한 프로젝트를 수행한 적이 있었는데 주파수는 30GHz 이하로서 비교적 낮았다. 러시아가 추진하는 Millimetron이라는 프로젝트에서는 최고 1THz(테라헤르츠)에서 동작하는 10m급 반사망원경을 우주공간에 띄워 올리려 하고 있다. EHT와 결합하면 블랙홀의 이미지를 얻는 것이 그다지 어려운 일이 아닌 시대가 올 것이다.

지상용으로 추진되고 있는 야심찬 전파관측 장비 건설 프로젝트로서 SKA(Square Kilometer Array)가 있다. 대략 수백 MHz에서 10GHz까지 비교적 낮은 주파수 대역에서 우주전파를 수신하는 간접계로서 남아프리카와 호주 대륙에 걸쳐서 건설될 예정이다(그림 17). 이름이 말해주듯이 전파를 모으는 면적이 1km<sup>2</sup>인 초대규모 전파망원경이다. 대부분의 전파수신과 신호처리가 디지털로 이루어진다. 특히 저주파의 경우에는 구동부가 없이 전파의 경로 길이를 조절하여 원하는 방향으로 빔을 형성하는 기술들이 적용될 것이다. SKA의 길잡이 프로젝트(path finder)로서 다이폴 안테나를 수천 대 배열해서 위상 배열 안테나와 유사한 방식으로 작동시키는 LOFAR(LOW Frequency ARray), MWA(Murchison Widefield Array)등이 이미 완성되어 가동되고 있다. SKA는 우주의 기원과 우주가 생겨난 직후에 만들어진 은하들, 그리고 생명의 기원을 탐구하게 될 것이다.



그림 17 SKA의 상상도. 주파수별로 다양한 형태의 안테나가 사용된다.



(출처 : SKA Organisation)

## III 중력파 관측 분야

### 3.1 중력파 이론과 관측

1915년 알버트 아인슈타인은 뉴턴의 중력 이론보다 더 일반적인 중력 이론으로서 일반상대성이론을 제안하였다. 이듬해인 1916년에 그는, 중력파의 존재를 증명한 논문을 발표하였다. 이 논문은 중력장을 기술하는 계량 텐서에 선형 섭동을 주었을 때 그것의 장방정식으로부터 유도되는 파동 방정식과 그 해에 관한 것이었다. 아인슈타인은 이 파동방정식으로 기술되는 시공간의 파동을 중력파라고 불렀다. 2년 뒤인 1918년에 그는 사중극자 공식을 유도하였다.

천체의 사중극자 모멘트  $Q$ 의 가속과 중력파의 진폭  $h$  사이에는 대략 다음과 같은 관계가 있다.

$$h \sim \frac{G\ddot{Q}}{c^4 r}$$

여기서  $G$ 와  $c$ 는 각각 뉴턴 중력 상수와 빛의 속도이고,  $r$ 은 파원까지의 거리이다. 질량이  $M$ 이고 크기가  $R$ 인 천체의 사중극자 모멘트는 대략  $Q \sim MR^2$ 라고 볼 수 있고, 그 사중극자 모멘트가  $\Delta t$ 의 시간 규모로 변화를 일으켰다면,  $\ddot{Q} = MR^2/\Delta t^2 = M(R/\Delta t)^2 = Mv^2$ 이다. 천체의 모멘트 변화가 상대론적으로 일어나면  $v \sim c$ 이므로,

$$h \sim \frac{GM}{c^2 r}$$

가 된다. 태양질량의 10배인 블랙홀이 거리 3억광년에서 병합한 경우, 지구에서 어느 정도의 중력파 진폭이 측정되는지 계산해 보면  $h \sim 5 \times 10^{-21}$  이 된다. 라이고의 팔길이가 4km이고 레이저가 파브리-페로 공진기에서 약 250번 왕복하므로 대략 유효 팔길이  $l \sim 1,000$  km이다.  $h = \Delta l/l$  이므로 중력파에 의한 시험 질량의 변위  $\Delta l$ 은 대략 5fm이다(1fm=10<sup>-15</sup>m). 수소 원자핵의 크기가 1.6fm이고 우라늄이 15fm 정도이므로 이는 원자핵의 크기와 비교가 되는 변위량이다. 이처럼 상대론적 천체에서 나오는 중력파라도 그 진폭은 몹시 작다.

일반상대성이론이 맞고 그 수학적 풀이가 틀림이 없다면 중력파는 존재하고 반드시 검출되어야 하지만, 위에서 보았듯이 그 세기(진폭)가 너무 약한 나머지 최근에 이르기 전까지는 그 검출은 기약이 없었고 이론적인 발전도 느려서 심지어 1936년 중력파를 제안한 아인슈타인 자신이 중력파의 존재를 뒤집는 논문을 출간했을 만한 일이 있을 정도이다. 이후 1940년대에서 60년대를 거치면서 중력파의 존재와 그 수학적 해법에 관한 연구가 나왔다. 1938년에 아인슈타인, 인펠트(Infeld), 호프만(Hoffmann) 등은 포스트-뉴턴 근사를 도입하여 느리게 운동하는 물체에서는 4차항까지는 중력파를 내지 않으나 그 다음의 사중극자(quadruple) 항부터 중력파를 낼 수 증명하였고, 중력파 방출에 의한 쌍성의 궤도 변화에 대한 근사적 모형이 제시되기도 하였다.

실험을 통해 중력파를 검출하려던 첫 주자는 미국 물리학자 조지프 웨버(Joseph Weber)였다. 그는 중력파가 지나가면 중력장의 2차 미분항에 의해 물체의 결정구조가 변형이 생길 것이며 그것을 압전 효과(piezoelectric effect)를 이용하여 검출할 수 있다고 제안했다. 웨버는 메릴랜드 대학에서 상온 공명 막대 검출기(room temperature resonant bar detector)를 제작하였다. 그의 검출기는 1,660Hz의 공명 주파수에서 약  $h \sim 10^{-16}$ 의 감도를 갖는 것이었다. 그는 이러한 장비를 총 4대까지 보유하면서 여러 번에 걸쳐 중력파를 검출했다는 결과를 보고하였다. 이를 따라 전 세계의 약 10개 팀에서 비슷한 개념의 중력파 검출기를 제작하여 실험하였지만 중력파를 검출하지 못하였다.

감도가 충분하지 못하다고 판단한 과학자들은 웨버가 제안한 검출기에 극저온 기술을 적용하여 이른바 '제 2세대 막대 검출기 시대'를 열었다. 극저온 막대 검출기는 감도가  $h \sim 10^{-19}$  정도 되었지만, 공명 주파수 대역이 약 700~920Hz로 그다지 넓지 못하다는 단점이 있었다. 이러한 한계를 극복하고자 구형 검출기 프로젝트들이 추진되었으나 실현되지 못하였으며, 무엇보다도 구형 검출기는 여전히 검출 주파수 대역이 좁다는 한계를 극복하지 못하였다.

1960년대부터 이러한 한계를 극복할 수 있는 레이저 간섭계형 중력파 검출기를 구상하기 시작했다. 러시아 과학자 게르첸슈타인(M. Gertsenshtein)과 푸스토보이트(V. I. Pustovoit)가 선구적인 아이디어를 제출하였고, 미국에서는 이와 독립적으로 1960-70년대에 웨버와 그의 학생이었던 포워드(Robert L. Forward)에 의해 연구가 시작되었다. 그러나 현대적 레이저 간섭계가 본격적으로 개발된 것은 MIT의 라이너 와이스(Rainer Weiss)와 캘리포니아 공과대학의 로널드 드레버(Ronald Drever)에 의해서였다. 와이스는 레이저 간섭계가 중력파 검출을 위해 가져야 할 조건과 그 간섭계가 가지는 잡음원(noise sources)의 분석을 최초로 수행하였고, 수 미터에서 수백 미터에 이르는 다양한 프로토타입 모델의 간섭계를 구축하고 실험함으로써 핵심 기술의 개발을 주도하였다. 드레버는 "마이컬슨 간섭계"보다 더 중력파 검출에 적합한 파브리-페로(Fabry-Perot)형

간섭계를 처음 제안하였고, 파운드-드레버-홀(Pound-Drever-Hall) 기법으로 불리는 레이저 안정화 기법을 발명하였다. 한편, 킵 손(Kip Thorne)은 중성자별 쌍성, 블랙홀 쌍성에서 방출되는 중력파의 파형, 세기, 빈도수 등을 계산하였고, 이론과 실험의 소통과 인재 영입 등을 통해 캘리포니아 공과대학의 중력파 실험 연구 그룹을 구축하고 운영하였다.

### 3.2 레이저 간섭계형 중력파 검출기 라이고(LIGO)

라이너 와이스가 주도한 MIT 그룹이 1983년에 미국국립과학재단(NSF)에 『블루북(bluebook)』이라는 보고서를 제출하였는데, 이것이 캘리포니아 공과대학과 MIT가 공동 추진하는 것으로 하여 채택되었고 와이스, 드레버, 킵 손이 그 프로젝트의 책임자가 되었다. 이 보고서를 바탕으로 1987년에 정식 라이고 제안서가 작성되었다. 이 제안서에 따르면, 3년간 기획 연구와 핵심 기술을 연구한 다음, 그 결과를 기준으로 1989년부터 4km의 팔길이를 가진 ‘라이고(LIGO)’라는 이름의 레이저 간섭계를 본격적으로 건설한다는 내용이였다. 1991년 라이고의 건설이 승인되었고, 미국 내 19곳의 제안서를 받아 최종적으로 루이지애나 주 리빙스톤과 워싱턴 주의 헨퍼드로 건설 부지가 선정되었다. 1999년 공식 개소식이 있었고 드디어 2002년 8월 23일부터 첫 번째 과학 가동이 시작되었다. 첫 단계의 목표는 설계 감도(design sensitivity)에 도달하는 것이어서 주로 검출기의 보정과 성능 향상 등을 통해 감도를 향상시키는 작업이 추진되었다. 2005년부터 2007년까지 약 700일 동안 다섯 번째 과학 가동이 수행되었는데, 이때 마침내 라이고는 설계 감도에 도달하였다. 이후 라이고는 과학 가동을 계속하였고, 특히 2007년부터는 프랑스-이태리 합작으로 유럽에 건설된 비르고(Virgo) 검출기와 동시에 삼중일치관측(triple coincident observation)을 시작하였다. 그러나 총 여섯 번의 과학가동을 통해 이 단계의 초기 라이고 검출기로는 중력파를 검출하지 못하고, 그 다음 단계로 5년간의 업그레이드에 들어가게 되었다.

그것이 바로 Advanced LIGO(어드밴스드 라이고) 프로젝트로서 기존 라이고의 감도를 10배 향상시키는 것이 목표였다. 이 프로젝트에서는 크게 세 가지 기술적 개선이 이루어졌다. 첫째, 시험 질량에 해당하는 반사경을 지진동에서 고립시키기 위해 3중 진자를 이용함으로써 초기 라이고의 최저 주파수가 30Hz였던 것을 10Hz 대역으로 낮췄다. 둘째, 초기 라이고는 8W 출력의 레이저를 사용했지만 Advanced LIGO에서는 약 200W 출력의 레이저를 사용함으로써 양자산탄잡음(quantum shot noise)을 낮추었다. 더군다나 파브리-페로 공진기를 개선하여 레이저의 왕복 횟수도 초기 라이고는 25회에 머물렀던 것을 어드밴스드 라이고에서는 280회로 대폭 증가시킴으로써 Advanced LIGO의 팔길이는 총 1,120km에 달하게 만드는 효과를 가져왔다.

마지막으로 반사경에서 레이저가 반사될 때 반사경 내의 브라운 운동에 의한 열잡음을 감쇄시키는 장치(Thermal Compensation System, TCS)를 도입하였다. 이로써 Advanced LIGO의 최대 감도는 30~200Hz 대역에서 약  $h \sim 10^{-23}$ 에 도달하게 된다.

Advanced LIGO는 2014년 10월에 부품의 제작, 조립, 업그레이드가 모두 완료되었다. 이후 2012년 1월 첫 엔지니어링 가동(Engineering Run)이 시작되었고 이후 총 여덟 차례의 엔지니어링 가동을 마친 뒤 첫 관측가동(Observation Run)을 2015년 9월 18일에 시작하였다. 그런데 엔지니어링 관측을 하던 중인 2015년 9월 14일에 중력파가 최초로 검출되었다. 자체 검증 기간을 거쳐 마침내 2016년 2월 11일에 인류 최초의 중력파 검출이 공식 발표되었다. 소위 칩 신호(chirp signal)라 불리는 중력파 신호는 예상했던  $h \sim 10^{-21}$ 의 세기를 갖고 있었으며, 지구에서 약 12억 광년에 있는 태양 질량의 약 29배와 36배인 블랙홀 두 개로 이루어진 쌍성이 병합하면서 태양질량의 약 3배에 해당하는 질량이 중력파로 방출된 것으로 추정되었다. 이로서 아인슈타인이 중력파의 존재를 예측한지 100년 만에 그 존재가 증명되었고 일반상대성이론은 또 하나의 검증을 통과하게 되었다.

그 후 라이고는 약 10건의 중력파를 더 검출하였으며, 그 중에서 2017년 8월 17일에 검출된 중력파는 특히 중성자별 쌍성이 병합할 때 발생한 것으로 밝혀졌다. 이때는 유럽의 중력파 망원경인 비르고도 관측에 참여하여 총 3기의 검출기가 동시 관측을 수행하여 그 중력파원의 위치를 좁은 영역으로 특정할 수 있었고, 마침 가동 중이던 감마선 및 엑스선 관측 위성이 중력파 검출 약 2초 후에 감마선 폭발 현상을 관측하였다. 그 특정된 위치를 조사함으로써 그 11시간 뒤에 NGC4994라는 은하에서 감마선 폭발 현상의 전자기파 여광(afterglow)이 검출되었다. 그 이후 엑스선과 전파 등 다른 전자기파로도 차례로 이 천체가 관측되었다. 이와 동시에 지상에서 가동 중이던 일본의 수퍼카미오칸데 중성미자 관측소와 남극에서 가동중이던 IceCube라는 우주입자 검출 시스템이 동시 관측을 진행하였다. 이로써 하나의 천체 현상을 중력파, 빛(전자기파), 입자 등에서 동시에 다각도로 관측하는 이른바 다중 신호 천문학(multi-messenger astronomy)의 시대가 열렸다.

최초의 다중 신호 천문학적 연구 결과는 무척 흥미로웠다. 그 동안 천문학계는 킬로 노바라는 현상, 짧은 시간 감마선 폭발 현상 등을 발견했는데, 이 GW170817의 관측은 그것이 모두 중성자별 쌍성이 병합할 때 발생하는 현상임을 규명한 것이다. 게다가 중력파의 진행 속도가 빛의 속도임이 증명됨으로써 상대성이론은 또 하나의 시험을 통과하게 되었다. 그 동안 전자기파를 사용하는 천문학 관측으로는 블랙홀이나 중성자별의 표면이나 내부는 들여다볼 수 없었으나, 중력파로는 그 내부까지 속속들이 연구할 수 있게 된 것이다.

이와 같이 어드밴스드 라이고는 현대 물리과학에 혁혁한 공적을 남겼으며, 이 프로젝트를 이끈 세 사람의



과학자들에게 2017년도 노벨 물리학상이 수여되었다. 한편, 어드밴스드 라이고의 감도를 2.5배 향상시켜서 설계 감도를 달성하기 위해, 2018년부터 업그레이드에 들어가 2019년 3월에 그 업그레이드를 마쳤다. 같은 시기에 유럽의 비르고도 업그레이드를 마치고 Advanced VIRGO(어드밴스드 비르고)로 거듭났다. 이로써 2019년 4월부터 세 중력과 검출기는 다시금 동시 관측에 돌입하였다. 이러한 동시 관측의 결과, 기존에는 1달에 1~2회 중력파가 검출되던 것이, 이제 1주에 2~3회가 검출되고 있다.

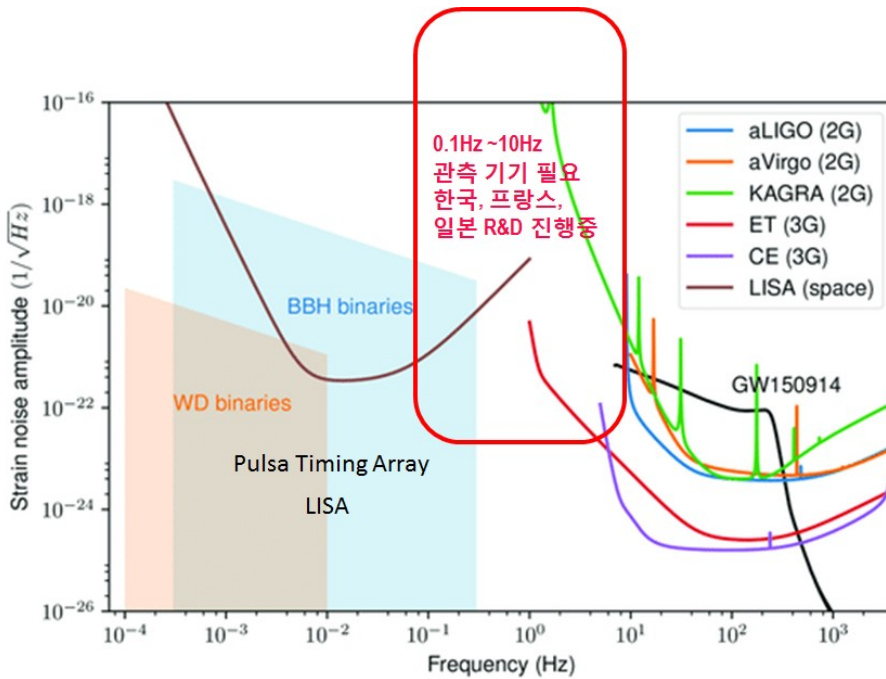
일본도 자체적으로 레이저 간섭계형 중력파 검출기를 개발해 왔다. 일본의 중력파 검출기는 카그라(KAGRA, Large-scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope)라고 부르는데, 라이고와 같은 레이저 간섭계형 중력파 검출기이다. 지진동 잡음을 저감하고자 지하에 건설되고 또한 반사경의 열잡음을 줄이기 위해 극저온 냉각을 시키는 형태의 검출기이다. 2019년 6월 현재 가동 준비를 거의 마친 상태로 라이고-비르고 연구협력단에 가입하여, 현재는 라이고-비르고-카그라 연구협력단을 구성하고 있다. 이렇게 되면, 4대 중에서 한 대가 고장이 나더라도 중력파 발생원의 위치를 특정 하는데 문제가 없게 될 것이다.

중력파 검출이 천문학에 획기적인 장을 열게 되자 여러 나라들이 다투어 중력파 천문학에 투자하기 시작했다. 인도는 라이고-인도(LIGO-India) 프로젝트가 승인되어 추진되고 있다. 오스트레일리아는 OzGrav(ARC Centre of Excellence for Gravitational Wave Discovery)라는 연구단을 출범시키고 100억 원의 연구비를 쏟아 부어 자체 검출기를 개발하고 있다. 앞으로 2020년 이후 라이고-인도와 카그라가 중력파 관측 네트워크에 합류하게 되는 시점에서는 중력파원에 대한 연구가 더욱 풍부해질 것으로 기대된다.

### 3.3 차세대 중력파 검출기

Advanced LIGO와 같이 현재 가동 중인 지상 레이저 간섭계는 그 관측 주파수 대역이 10 ~ 2000 Hz 대역이다. 그러나 우주에서는 거의 모든 파장대의 중력파가 날아들고 있다. 2019년 현재 차세대 중력파 망원경은 두 가지 방향으로 개발되고 있다. 그 하나는, 기존의 라이고, 비르고, 카그라가 관측하고 있는 중력파 주파수 대역에서 감도를 10배 정도 향상시키기 위한 것이다. 라이고는 길이가 4km인 팔을 L자형으로 설치하였는데, 차세대 중력파 망원경인 아인슈타인 망원경(Einstein Telescope)은 팔의 길이를 10km로 연장하고, 삼각형 모양으로 배열하여 감도를 10배 향상시키려는 프로젝트로 기획되고 있다(그림 18).

그림 18 중력파 감도 곡선. 10Hz ~ 20kHz 사이의 중력파 주파수에서는 현재 레이저 간섭계형 중력파 망원경이 가동되고 있고, 차세대 중력파 망원경으로 Einstein Telescope(ET)가 계획되고 있다. 1mHz ~ 0.1Hz 대역에서는 e-리사와 펄서 타이밍 배열(Pulsar Timing Array) 프로젝트가 진행되고 있다. 그 중간에 해당하는 주파수 대역 0.1~10 Hz에서는 일본의 중력파 위성인 데시고(DECIGO) 등이 기획 중이며, 한국 과학자들도 SOGRO라는 중력파 망원경 프로젝트를 제안하고 있다.



(출처 : <http://gwplotter.com>)

Advanced LIGO가 감지하지 못하는 다른 주파수 대역에서 중력파를 검출하기 위해서는 다른 형태의 중력파 검출기를 필요로 하며 이를 위해서 세계 각국은 독자적인 계획을 수립하고 있다. 유럽우주국(European Space Agency: ESA)은 2037년 발사 예정으로 e-리사(evolved Laser Interferometer Space Antenna: e-LISA) 프로젝트를 독자적으로 진행하고 있다. e-리사는 50만km 떨어져서 지구를 따라 태양을 공전하도록 위성을 띄우고 그 위성과 한 변의 길이가 250만km가 되는 정삼각형을 이루어 편대 비행을 하도록 위성 두 대를 더 띄우는 프로젝트이다. 각 위성에는 약 2kg인 시험 질량 두 개와 레이저 두 개가 들어 있다. 한 위성의 레이저 광학계는 각기 나머지 두 위성을 향해 레이저 간섭계를 구성하게 만든다. 중력파가 지나가면서 시험 질량의 변위가 생기면 그것을 측정함으로써 중력파를 검출하게 된다. e-리사로는 대략 1mHz ~ 0.1Hz 대역에서



중간질량블랙홀(Intermediate Mass Black Holes: IMBHs) 쌍성이나, 극한 천체질량비 회전체(Extreme Mass Ratio Inspirals: EMRIs)와 같은 천체에서 나오는 중력파를 검출할 것이다.

이를 위한 원천기술을 개발하고 그 실효성을 입증하기 위한 방편으로 지난 2015년 12월 3일에 리사 길잡이위성(LISA pathfinder)이 발사되었다. 2016년 1월 22일에 이 위성은 지구-태양 L1 라그랑쥐 점에 도달하여 탑재체 분리를 수행하였고, 2016년 4월 8일에 과학 연구를 위한 가동에 들어갔다. 리사 길잡이위성은 완전한 자유낙하 조건에 시험 질량을 놓아두는 위성 항법 기술을 검증하는 것이 목표인데, e-리사에 필요한 정밀도보다 10배 나쁜 잡음 감도가 목표였으나, 이번 실험은 그 결과가 매우 고무적이어서 그 목표를 초과 달성하여 e-리사에 요구되는 감도에 거의 근접했다.

현재 진행되고 있는 또 다른 중력파 검출방식은 펄서 타이밍(pulsar timing)을 이용한 방법이다. 이는 지상이나 우주에 중력파 검출기를 별도로 건설하는 방식이 아니라 이미 우주에 존재하는 펄서를 이용하는 것이다. 특히 밀리초 펄서는 매우 주기적으로 전파를 발생시키며 빠르게 회전하는 중성자별(neutron star)인데, 펄서 타이밍 배열 방법은 이러한 밀리초 펄서를 매우 정밀하고 안정된 시계로 간주하고 중력파가 지구와 그 펄서 사이를 지나가면 펄서의 변광 주기에 매우 미세한 변화가 나타나는 것을 관측하는 방법이다. 물론 그러한 펄스의 주기 변화는 지극히 미세하므로 이를 검출하기가 쉽지는 않다.

이 방법은 이미 1978년에 제안되었으며, 현재 지구상에는 북미대륙의 나노그라브(NANOGRAB), 유럽의 유럽펄서타이밍배열(European PulsarTiming Array: EPTA), 그리고 호주의 파크스 펄서타이밍배열(Parkes Pulsar Timing Array: PPTA)이 관측 자료를 모으고 있다. 이 세 곳은 국제 펄서타이밍 배열(International Pulsar Timing Array: IPTA)이라는 컨소시움을 구성하여 관측자료들을 공유하고 있다. 이들은 약 30개의 펄서들을 관측하여 1nHz ~ 1μHz 대역의 중력파 검출을 목표로 한다. 이 주파수 대역에서는 병합하는 은하들의 중심에 있는 무거운 블랙홀 쌍성이 방출하는 중력파를 검출할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

그러나 펄서를 관측하려면 0.3~3GHz (파장 0.1~1m) 대역의 전파를 수신할 수 있는 전파 망원경이 필요하다. 이 파장대의 전파망원경은 표면은 거칠어도 되지만, 펄서가 몹시 어둡기 때문에 매우 크게 만들어야 한다. 선진국에서는 1930년대부터 이러한 장파장 전파 망원경부터 전파 천문학을 시작했으므로 아레시보(Arecibo) 전파 망원경이나 파크스(Parkes) 전파 망원경과 같은 대형 장파 전파 망원경을 보유하고 있다. 그러나 한국은 이 단계를 건너뛰고 성간 물질을 연구하기 좋은 수십 GHz 전파 (또는 밀리미터파)에서 관측되는 전파 망원경부터 건설하였고, 시간이 지남에 따라 점점 짧은 파장대의 전파를 관측할 수 있는 망원경으로 발전해 왔기 때문에, 펄서 타이밍 배열 방법으로 중력파를 검출하려고 해도 한국은 그러한 장파장 전파 망원경을 보유하고 있지

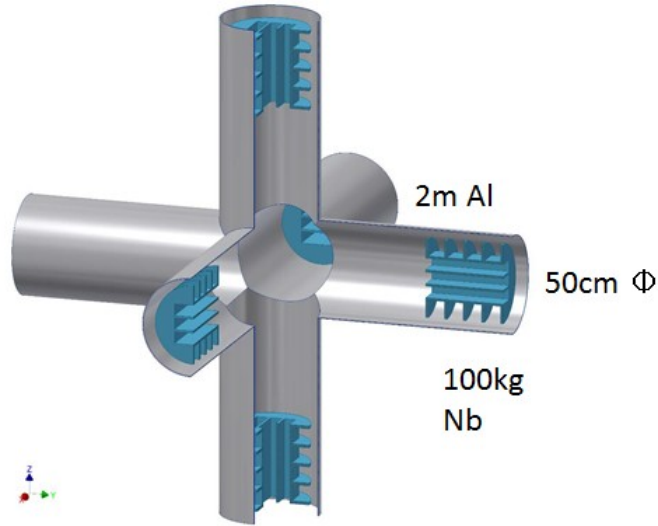
못하다.

한편, 지상의 라이고 형 레이저 간섭계 중력파 망원경과 e-리사가 검출하지 못하는 중력파 주파수인 0.1~10 Hz 대역의 중간 주파수에서도 중력파 검출기가 제안되어 있다. 우선, 일본에서는 데시고(DECIGO)라는 프로젝트를 추진하고 있다. 이는 위성을 쏘아 올리는 우주기반 중력파 레이저 간섭계이나 아직 개념설계 단계로서 2030년 이후 구체화될 것으로 기대하고 있다. 이러한 중간 주파수 중력파를 검출하기 위한 신개념 중력파 망원경은 한국 과학계에서도 제안하고 있다.

### 3.4 맺음말: 한국형 중력파 검출기

중력파, 중력, 상대론, 우주론 등을 연구하는 한국의 천체물리학자들도 중력파 천문학을 오래전부터 연구해 왔다. 2003년에 수치상대론 연구회를 발족하여 자체 세미나와 워크숍을 통해 중력파 및 수치상대론 부문의 연구 역량을 키워왔으며, 해마다 중력파 및 수치상대론 여름학교를 개최하여 지식 전파와 신진 인력 양성에 노력해왔다. 2008년 7월 중력파 여름학교에 루이지애나 주립대학 교수이자 라이고 대변인을 맡고 있었던 가브리엘라 곤잘레스 교수는 초청한 것을 계기로, 2009년 한국중력파연구협력단(KGWG)을 조직하여 라이고 과학 협력단 가입이 본격 추진한 결과, 2009년 9월 헝가리의 수도 부다페스트에서 개최된 라이고-비르고 과학 협력회의에서 가입 신청, 발표, 그리고 평의회의 투표를 거쳐 그 가입이 승인되었다. 이를 계기로 한국의 중력파 연구는 본격적으로 활성화되었다. 실제 중력파 관측 데이터를 활용하여 연구를 할 수 있었고, 라이고의 하드웨어와 소프트웨어 개발에도 한국 연구자들이 직접 참여하게 되었고, 전문가 초청과 상호 국제 교류 등을 통해 네트워크도 키워나갈 수 있었다. 또한 2011년 11월 일본 중력파 검출 실험의 책임자인 노벨상 수상자 카지타 타카아키 교수로부터 라이고 개발 경험을 살려 카그라 실험에 한국이 참여해 달라는 요청이 있었고, 2011년 1월 21일 서울대에서 첫 한일 카그라 워크숍이 개최되었다. 이를 계기로 한국의 실험분야 연구자들이 카그라 기기 개발에 참여하게 되었고, 그 뒤로 데이터 분석 분야에서도 협력이 진행되었다.

그림 19 한국 과학자들이 제안하고 있는 중력파 망원경의 프로토타입 버전의 개념도. 파란색은 초전도 시험 질량으로서 자기부상이 되어 있고 중력파에 의한 변위를 초정밀 SQUID 센서로 읽어내는 구조다.



(출처: 한국천문연구원, 한국과학기술정보연구원, 수리과학연구소(2018). 초전도 저주파 중력파망원경 개발을 위한 선행연구, 과제번호 PCS-17-06-KASI.)

2013년경부터는 차세대 중력파 검출기의 독자적인 모델을 고안하기 위한 자체 연구가 시작되었다. 소그로(SOGRO: Superconducting Omni-directional Gravitational Radiation Observatory)라는 이름의 이 프로젝트는, 초전도 양자센서(SQUID)를 이용하여 중력파에 의한 시험 질량의 변위 및 가속도를 측정하는 중력구배계(gravity gradiometer)로서 x, y, z의 3축 텐서 검출기이다(그림 19). 0.1~10 Hz의 중력파 주파수 대역에서 중력파를 검출하게 되는데, 지상에서는 이 주파수대에서 지진동(seismic waves) 및 음파 잡음(infrasound waves) 등의 뉴턴 잡음이 큰 영향을 끼치므로 이를 제거할 수 있어야 실제 중력파 신호를 검출할 수 있다. 소그로는 3축의 텐서 검출기이므로 이러한 잡음 저감에 유리한 면이 있고, 또한 이러한 새로운 방식의 중력파 검출기는 한 대로도 중력파 발생원의 위치를 특정할 수 있다는 장점이 있다.

라이고에 필적하는 감도를 지닌 중력파 망원경을 개발하기 위한 단계적 접근법으로서, 소그로의 시제품에 해당하는 프로토-소그로(proto-SOGRO)의 개념 설계가 제안되어 있다. 프로토-소그로를 간단히 설명하면, 길이 2m 지름 50cm인 3축 튜브형 알루미늄 플랫폼의 끝마다 질량 100kg인 나이오븀(Nb) 소재의 초전도 자석 형태의 시험 질량을 자기부상 시켜두고 중력파가 지나갈 때 발생하는 시험 질량의 변위에 의해 발생하는 전자기 유도 전류를 SQUID 센서로 정밀 측정하는 것이다. 중력파에 의한 극히 미세한 변위를 측정하기

위해서는 자체 잡음을 제거하는 일이 중요하다. 이러한 검출기의 잡음은 검출기의 크기와 시험 질량의 무게가 클수록, 시험 질량과 플랫폼의 온도가 낮을수록, 또한 SQUID의 Q-factor가 클수록 작아진다. 크게 만드는 것은 일단 비용 면에서 제한이 있을 뿐만이 아니라 기술적 위험성이 있으므로 규모가 작은 프로토타입을 먼저 개발하면서 핵심 기술을 개발하고 실현 가능성을 더 높이려는 것이다. 프로토-소그로에서도 열잡음을 줄이기 위해 플랫폼의 온도는 4K(섭씨 -269.15도)로 낮추고 시험 질량은 최종적으로 0.1K까지 낮출 것이다. 또한 SQUID 센서는 현재 상용화된 것으로는 정밀도가 충분하지 않으므로 양자 한계에 접근하는 SQUID를 개발할 필요가 있다.

0.1~10Hz의 중력파 주파수대에서는 태양 질량의  $10^3 \sim 10^6$  배에 이르는 중간 질량 블랙홀의 병합, 극한 질량비를 갖는 쌍성의 병합(EMRI) 등을 관측할 수 있고, 우주 배경 중력파의 하한을 얻을 수 있으며, 이미 라이고 등으로 검출된 별 질량 블랙홀의 병합 과정도 병합이 일어나기 훨씬 전부터 검출이 가능하므로 풍부한 관측 자료로부터 두 블랙홀의 질량과 스핀 등을 보다 정밀하게 알아낼 수 있다. 또한, 프로토-소그로는 자체가 극도로 감도가 좋은 지진계나 마찬가지로이다. 중력파 검출을 위해 저감하고자 하는 지진동 잡음은 지구물리학자들에게는 사실 신호이기 때문이다. 현재 개발 중인 최고 성능의 지진계가  $h \sim 10^{-14}$  인데, 프로토-소그로의 감도가  $h \sim 10^{-16}$  이므로, 현재 개발 중인 최고 성능의 지진계보다 프로토-소그로의 감도가 100배나 좋다는 이야기이다. 또한 지진파의 전파 속도는 10km/s 이하지만, 지질단층의 변위에 의한 중력가속도의 변화는 빛의 속도로 전파되므로, 현재 지진파를 검출하는 것보다 수 십초 정도 미리 지진 발생을 탐지할 수 있다. 이 정도의 시간 차이로 지진을 미리 경보할 수 있다면, 국민의 생명과 재산을 지키는데 매우 유용한 기술이 될 것이다.

### 대표저자 \_ 정웅섭(Woong-Seob Jeong)

#### • 학력

서울대학교 적외선 천문학 박사  
서울대학교 천문기기 석사  
서울대학교 천문학 학사

#### • 경력

現) 한국천문연구원 책임연구원  
現) 과학기술연합대학교 교수  
前) 한국천문연구원 선임연구원  
前) 일본 ISAS/JAXA 박사후 외국인 특별 연구원

## 참고문헌

1. Oesch, P.A et al., "A remarkably luminous galaxy at  $z=11.1$  measured with Hubble Space Telescope GRISM spectroscopy", 2016, *Astrophysical Journal*, 819, 2
2. Jeong, W.-S. et al., "Development of near-infrared imaging spectrometer (NISS) onboard NEXTSat-1", 2018, *Proceedings of SPIE*, 10698, 22
3. <https://jwst.nasa.gov/>
4. <https://wfirst.gsfc.nasa.gov/>
5. <https://www.euclid-ec.org/>
6. <https://www.spica-mission.org/>
7. <http://spherex.caltech.edu/>
8. <https://asd.gsfc.nasa.gov/firs/>
9. The Event Horizon Telescope Collaboration, "First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole", 2019, *Astrophysical Journal Letters*, 875, L1
10. <http://www.almaobservatory.org/>
11. Rioja, M. & Dodson, R., "High-precision astrometric millimeter very long baseline interferometry using a new method for atmospheric calibration", 2011, *Astronomical Journal*, 141, 114
12. Walker, C. K., "SuperCam : A 64 pixel SIS receiver array for submillimeter-wave astronomy", 2015, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*
13. 이형목(2016). 중력파 검출의 의의와 전망, *물리학과 첨단기술*, 2016년 3월호; Hyung Mok Lee(2016). Gravitational Wave Detection: Its Significance and Perspectives, *New Physics: Sae Mulli*, Vol. 66, pp.258-263; Hyung Mok Lee(2018). Long Journey toward the Detection of Gravitational Waves and New Era of Gravitational Wave Astrophysics, *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 73, pp.684-700.
14. A. Einstein, N. Rosen(1937). On gravitational waves, *Journal of the Franklin Institute* 223, pp.43-54.; 오정근, 강궁원 (2016). 중력파 검출 실험의 역사, *물리학과 첨단기술*, Mar 2016.; J. J. Oh, G. Kang (2016). History of Gravitational-wave Detection Experiments, *New Physics: Sae Muli*, vol. 66, pp.264-271.

15. A. Einstein, L. Infeld, B. Hoffmann(1938). The Gravitational Equations and the Problem of Motion, *Annal. Math.* 39, pp.65~100.
16. P. C. Peters, J. Mathews(1963). Gravitational Radiation from Point Masses in a Keplerian Orbit, *Physical Review*, 131, pp.435~440.; P. C. Peters (1964). Gravitational Radiation and the Motion of Two Point Masses, *Physical Review*, 136, B1224~1232.
17. The LIGO Scientific Collaboration(2018). GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs, 2018arXiv181112907T.
18. Ho Jung Paik, Hyung Mok Lee, Kyuman Cho, Jaewan Kim(2016). Gravitational-wave Detectors and a New Low-frequency Detector SOGRO, *New Physics: Sae Mulli*, 66, pp.272~282.
19. 한국천문연구원, 한국과학기술정보연구원, 수리과학연구소(2018). 초전도 저주파 중력파망원경 개발을 위한 선행연구, 과제번호 PCS-17-06-KASI





# 융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 June vol.5 no.6