

# 융합연구리뷰

Convergence Research Review

이우섭 (한국과학기술연구원 책임연구원)

문대호 (한국과학기술연구원 연구원)

극한 환경 필드 로봇의 개발 동향

손봉원 (한국천문연구원 책임연구원)

초장기선 전파간섭계(VLBI)를 활용한 블랙홀 연구

# CONTENTS

- 01 편집자 주
- 03 극한환경 필드 로봇의 개발 동향
- 37 초장기선 전파간섭계(VLBI)를 활용한 블랙홀 연구



융합연구정책센터  
Convergence Research Policy Center

융합연구리뷰 | Convergence Research Review  
2019 July vol.5 no.7

**발행일** 2019년 7월 8일

**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



## 극한환경 필드 로봇의 개발 동향

인구의 지속적 증가는 더 많은 공간과 더 많은 자원의 소비를 수반해왔다. 21세기 현재 개발 가능한 지구 지표면의 상당 부분이 개발 완료되었고, 가까운 시일 내에 포화 상태가 될 것으로 많은 연구자들이 예측하고 있다. 이러한 한계에 대응하기 위해 제안되고 있는 많은 방법론들이 기존의 기술로는 쉽게 접근하기 어려웠던 심해나 극지, 더 나아가 우주로 인류의 활동 영역을 확장하는 것을 목표로 하고 있으며, 이는 현재 인류의 당면 과제로 논의되고 있다.

이에, 본 호 1부에서는 기존 인류가 접근하기 어려웠던 극한환경을 극복하고 더 나아가 활용할 수 있는 극한환경에서의 동작 성능을 보장하는 기술을 로봇 기술과 융합하여 탐사를 효과적으로 수행할 수 있는 극한환경 필드(field) 로봇 기술의 최신 연구 동향을 살펴보았다.

극한환경 필드 로봇은 필요성이 높지만, 기존의 과학 기술로 인간이 직접 수행하기 불가능한 수준의 환경 및 임무에 적용되는 것을 목표로 개발되는 로봇으로 우주, 남극, 심해 탐사와 원자로 유지보수 등의 작업을 하는 로봇으로 해외에서는 달, 화성, 극지 탐사를 위해 다양한 종류의 극한환경 필드 로봇을 연구, 개발하였다.

본 호를 통해 국내에서도 과학 탐구 목적을 위한 우주 또는 극지 탐사 로봇이 장기적인 로드맵에 따라 연구개발 및 투자가 확대되길 기대해 보며, 제조 기술에 강점을 가진 우리나라의 기존 산업과 효과적인 융·복합을 통해 기존 제조 기술의 수준을 높이고 필드 로봇이 새로운 경제 먹거리로 발돋움할 수 있기를 기대해 본다.

## 초장기선 전파간섭계(VLBI)를 활용한 블랙홀 연구

지난 2019년 4월 11일, 상상 속 그림과 영상에서만 보았던 블랙홀의 실제 영상이 사건지평선망원경 연구단(EHT Collaboration)을 통해 공개되었다. 관측에 사용된 사건지평선망원경(Event Horizon Telescope, EHT)은 전파간섭계 기술을 적용한 망원경으로 현재 지상에서 구현 가능한 최고의 분해능(resolution)으로 거대타원은하 M87 중심의 초대질량블랙홀을 관측하였다.

이에, 본 호 2부에서는 전파천문학을 통한 천문관측 역사와 전파간섭계를 활용한 전파원 관측에 대해 간략히 알아보고 이번 블랙홀 관측에 주요한 역할을 한 초장거리 간섭기술(Very Long Baseline Interferometer, VLBI)에 대해 자세히 알아보았다. 초장거리 간섭기술은 천문관측 분야뿐만 아니라 측성학과 측지학에서도 그 활용도를 인정받아 지구 대륙 운동의 정확한 측정에도 기여하고 있으며, 각 대륙에 위치한 VLBI 관측망의 연결을 통해 블랙홀과 같은 심우주 관측에도 새로운 지평을 열었다.

본 호를 통해 초대질량블랙홀이 만들어내는 상대론적 제트의 발생 과정, 이 제트의 구성 물질, 주변 환경과의 상호작용 등 그간 천문학과 천체물리학의 난제로 꼽혔던 문제를 풀 중요한 실마리를 제공할 것으로 기대되고 있는 초장기선 전파간섭기술의 발전을 통해 보다 먼 심우주 관측 분야의 발전이 있기를 기대해 본다.

# 융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 July vol.5 no.7



# 01

## 극한환경 필드 로봇의 개발 동향

이우섭 (한국과학기술연구원 책임연구원)  
문대호 (한국과학기술연구원 연구원)

# I 서론

## 1.1 배경 및 필요성

기하급수적으로 증가하고 있는 현재 인류의 인구 증가에 대응하기 위해서는 안전한 거주 공간의 지속적인 창출 및 안정적인 자원 공급이 매우 중요한 요소이다. 지난 20세기부터 시작된 이러한 요구에 부합하기 위해 인류는 적극적인 자원 개발 및 거주 공간의 확대를 수행하였으며 21세기인 현재 지구상의 상당부분의 지표면에 대한 개발이 완료되었으며 가까운 시일 내에 포화 상태가 될 것으로 많은 연구자들이 예측하고 있다.

이러한 한계에 대응하기 위해 제안되고 있는 많은 방법론들이 기존의 기술로는 쉽게 접근하기 어려웠던 심해나 극지, 더 나아가 우주로 인류의 활동 영역을 확장하는 것을 목표로 하고 있으며, 이는 현재 인류의 당면 과제로 논의되고 있다. 이에 따라 기존 인류가 접근하기 어려웠던 극한 환경을 극복하고 더 나아가 활용할 수 있는 극한환경 기술이 매우 중요한 기술로 대두되고 있다.

대표적인 극한환경으로는 극지, 우주, 심해 등을 들 수 있으며, 극한환경 영역에서의 동작 성능을 보장하는 기술을 극한환경 극복 기술이라고 한다. 본 기술은 확보가 매우 어렵지만 확보되면, 인류의 발전에 기여할 수 있는 새로운 자원의 획득 및 거주 공간의 창출로 이어질 수 있다는 목표로 많은 연구개발이 진행 중이며, 특히 극한환경 극복 기술과 로봇 기술의 연계는 극한환경에 대한 안전한 기술 검증 및 궁극적인 목표인 탐사를 효과적으로 수행할 수 있기때문에 극한환경 극복 기술의 대표적인 연구 분야이다.

본 리뷰에서는 이러한 극한환경에서의 운용을 목표로 하는 여러 로봇 분야 중에서 지표면에서의 위험 작업 및 탐사 작업을 수행하는 극한환경 필드 로봇 분야에 대한 관련 기술을 소개하고 그 동안 연구되었던 극한환경 필드 로봇 기술의 최신 연구 동향을 살펴보고자 한다.

## 1.2 극한환경 필드 로봇의 개념

일반적인 필드 로봇의 정의는 ‘불규칙 또는 동적으로 변화하는 작업장 또는 야외 환경에서 반복적이거나 많은 작업을 자동 또는 원격 조정으로 수행하면서 목표 작업을 위한 이동 및 수행의 전 과정 중 기능적인 신뢰성을 유지할 수 있는 이동 기능을 가진 로봇’으로 표현할 수 있다.

이러한 일반적인 필드 로봇의 정의로 표현할 때 넓은 범위의 필드 로봇으로 다음과 같은 로봇을 거론할 수 있다.

- 소형 물류 로봇(그림 1, 좌): 병원 및 공공시설에서 다양한 소형 물류를 전달해 주는 로봇
- 무인 트랙터(그림 1, 중): 무인으로 사전에 계획되거나 사용자의 원격 조작에 의한 농업 작업 수행
- 무인 지게차(그림 1, 우): 자동으로 공장 및 창고 내부의 물류 이동 작업 수행

그림 1 소형 물류 로봇(좌), 무인 트랙터(중), 무인 지게차(우)



(출처: 유진로봇(좌), 언맨드 솔루션(중), 포테닛(우))

이러한 무인 로봇은 기존 사람이 탑승 또는 외부 조작을 통해 반복적으로 수행되던 작업을 자동화 시킨 로봇으로 생각할 수 있으며, 작업 내용 및 주변 환경이 기존 사람이 작업할 때와 거의 동일한 수준이며 필드 로봇이라는 표현보다는 연구자 관점에서는 서비스 로봇으로 분류를 한다.

여기서 필드 로봇의 정의를 조금 더 구체화하면 다음과 같다.

① 사람이 지속적으로 상주하기 어려운 + 불규칙 또는 동적으로 변화하는 작업장 또는 야외 환경에서,

② 사람이 직접 하기에 어렵거나 위험한 + 반복적이지 않은 작업을 자동 또는 원격 조정으로 수행하면서, 목표 작업을 위한 이동 및 수행의 전 과정 중 기능적인 신뢰성을 유지할 수 있는 이동 기능을 가진 로봇'으로 표현할 수 있다.

이러한 관점에서 대표적인 필드 로봇으로는 다음과 같은 로봇을 생각할 수 있다.

위험 작업 로봇 ROBHAZ(그림 2, 좌): 민간 또는 군의 위험 작업(위험물 감지, 정찰 및 폭발물 제거 임무 등)에 사용가능한 원격 조작 기반 로봇

지뢰 제거 작업 로봇 MIDERS(그림 2, 중): 지뢰 매설 지역에서 숙련된 전문 지뢰 제거 전문 인력의 원격 조작을 통해 매설된 지뢰를 탐지하는 위험 작업 로봇

소방 로봇(그림 2, 우): 위험한 화재 현장의 내부로 진입하여 방수를 통해 화재를 진압하는 원격 조종 로봇

그림 2 위험 작업 로봇(좌), 지뢰 제거 작업 로봇(중), 소방 로봇(우)



(출처: 한국과학기술연구원(좌, 중), DRB Fatec(우))

이러한 필드로봇의 활용을 통해 사용자는 직접 접근하기 어려운 현장 또는 직접 수행하였을 때 위험 부담이 높은 작업을 안전하고 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 기대되며 많은 필드 로봇 연구에서 목표로 하는 작업 환경 및 운용 시나리오가 비슷한 개념을 가지고 있다.

실제로 2019년 4월 15일에 발생했던 파리 노트르담 성당 화재에 투입되었던 소방로봇 콜로소스(Colossus)(그림 3)는 불길과 유독가스 그리고 붕괴 위험으로 소방관들의 접근이 어려운 성당 건물 내부로 진입하여 지속적인 방수 작업을 수행하여 성당 건물 전체의 붕괴를 막아내는 데 결정적인 기여를 하였다. 또한 위험 작업 로봇 팩봇(PackBot)은 현재 미군에서 정식으로 사용 중인 군용 위험 작업 로봇이며 이라크와 같은 실제 전장에서 발생하는 매우 위험한 작전 상황에서 병사들의 안전을 보장하는 다양한 용도로 사용되고 있으며 그 활용도가 점점 더 높아지고 있다.



그림 3 콜로서스(Colossus) 소방 로봇



(출처: Shark Robotics)

이러한 선행 연구 및 활용 실적을 통해 검증된 필드 로봇의 활용성을 극대화하는 분야가 극한환경 필드 로봇이다. 기존 위험 작업 필드 로봇의 적용 분야 및 운용 환경이 비록 가혹하고 위험성이 높은 작업이지만 충분한 보호 장구 및 훈련을 통한 전문 인력이 수행 가능했던 임무였다. 이와 달리 극한환경 필드 로봇은 다음과 같은 방식으로 정의가 된다.

‘사람이 지속적으로 상주하거나 도달하기 불가능한 불규칙적 또는 동적으로 변화하는 작업장 또는 야외 환경에서 사람이 직접 수행하기 불가능하며 반복적이지 않은 작업을 자동 또는 원격 조정으로 수행하면서 목표 작업을 위한 이동 및 수행의 전 과정 중 기능적인 신뢰성을 유지할 수 있는 별도의 보호 기능 및 추가 요소로 구성된 이동 기능을 가진 로봇’

즉, 극한환경 필드 로봇은 필요성이 높지만, 기존의 과학 기술로 인간이 직접 수행하기 불가능한 수준의 환경 및 임무에 적용되는 것을 목표로 개발되는 로봇이라고 보면 된다. 이러한 극한환경 필드 로봇의 대표적인 연구 분야로 우주 탐사 로버(rovers), 극지 탐사 로버 및 원자력 유지보수 로봇 등을 들 수 있다.

우주 탐사 로버(그림 4, 좌): 초극한 환경인 외계 행성에서 다양한 탐사 임무를 수행하는 탐사 로봇  
 남극 탐사 로버(그림 4, 중): 극저온의 남극지역에서 과학 탐사 임무 수행을 위한 탐사 로봇  
 원자로 유지보수 로봇(그림 4, 우): 원자로와 같은 고방사성 구역에서 시설 상태 모니터링 및 유지보수 작업을 수행할 수 있는 로봇

그림 4 우주탐사 로버(좌), 남극탐사 로봇(중), 원자로 유지보수 로봇(우)



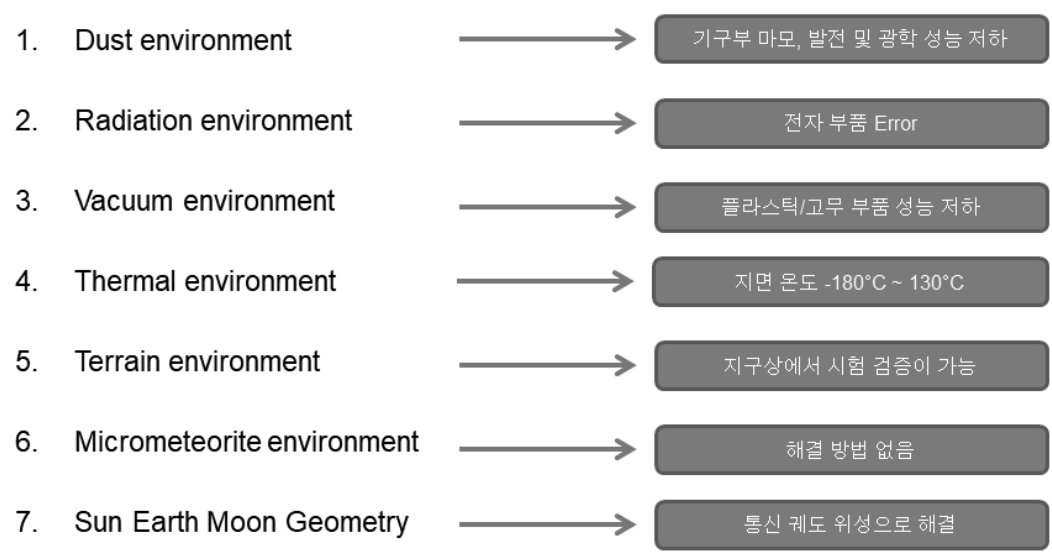
(출처: NASA JPL(좌), NASA(중), KAERI(우))

### 1.3 극한환경 필드 로봇의 시스템 구성

극한환경 필드 로봇의 경우 각각의 로봇에 따라 사용 환경 및 목표하는 작업이 다르기 때문에 전체 로봇에 해당하는 시스템 구성을 도출하기에는 어려움이 있다. 이러한 이유로 본문에서는 현재 가장 가혹한 환경에서 동작하는 것을 목표로 개발되는 우주 탐사 로버를 중심으로 설계요구 조건 및 이에 대응하는 시스템 구성을 설명하겠다. 또한, 타 분야의 극한환경 로봇도 임무 장비를 제외하고는 많은 부분 동일한 시스템 설계 개념을 공유할 것으로 예상된다.

극한환경 필드 로봇의 시스템 구성안을 도출하기 위해서는 먼저 적용하고자 하는 환경에 대한 확인이 필요하다. 우주 탐사 로버의 경우 우주 환경이라는 조건과 외계 행성의 비평탄(非平坦) 지형이라는 조건을 동시에 만족해야 하며 달 탐사 로버가 견뎌야 하는 환경 조건은 다음과 같다.

그림 5 달 탐사 로버의 설계요구 사항 및 대응방안



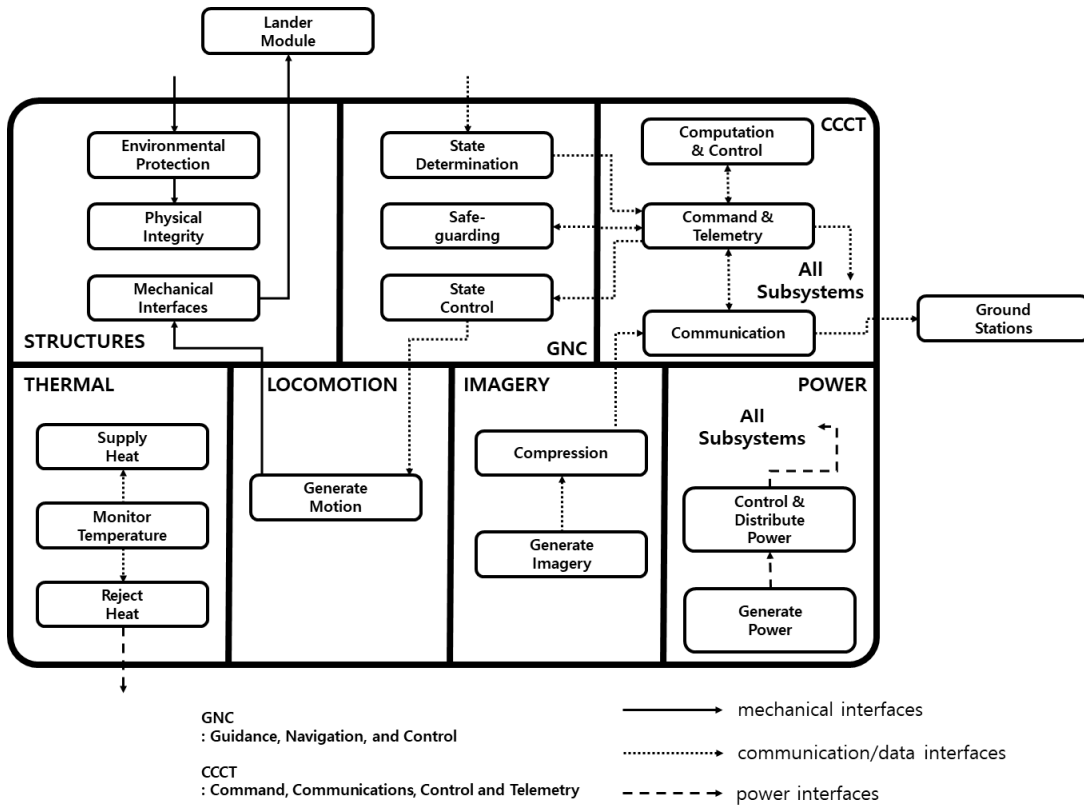
이러한 요구 조건에 대응하면서 극복 가능한 시스템의 개발을 위해서는 아래와 같은 핵심 기술별 분류 및 각각의 시스템 개발에 있어 위에서 언급된 환경 조건의 극복 또는 대응이 가능하도록 개발이 되어야 한다.

표 1 달 탐사 로버 시스템 구성안 및 각 시스템의 기능

서브시스템(Sub-system)	기능(Function)
Structures(구조적)	Provide Environmental Protection
	Maintain Physical Integrity
	Provide Mechanical Interfaces
Power(파워)	Generate Power
	Control and Distribute Power
Thermal(열적)	Monitor Temperature
	Supply and Reject Heat
Locomotion(운동능력)	Generate Motion
Command, Communications, Control, and Telemetry(CCCT) (명령, 통신, 컨트롤, 원격)	Computation and Control
	Command and Telemetry
	Communications
Guidance, Navigation, and Control(GNC) (유도, 운항, 컨트롤)	Determine Vehicle State
	Control Vehicle State
	Safeguard Vehicle
Imagery(영상)	Provide Imagery

극한환경 필드 로봇 시스템을 구성하는 위의 서브 시스템(sub-system)은 아래와 같은 세부 구성 및 각각의 연결 관계를 가지게 된다.

그림 6 시스템 기능별 블록 다이어그램



이러한 시스템 구성 및 연결 관계를 통해 목적인 임무를 수행할 수 있는 극한환경 필드 로봇의 신뢰성 확보가 가능하며 아래에 각각의 sub-system 설계요구 조건에 대해 설명하고자 한다.

1) Structure(구조적) sub-system

극한환경 필드 로봇의 구조적 강성을 보장하는 sub-system이다. 본 시스템의 전방적인 개발 요구 사항은 다음과 같다.

- 목표 미션 기간 동안 달 환경(극한온도, 진공, 방사선 등)에서의 생존성이 요구됨
- 착륙체로부터 안전한 분리
- 발사 전 테스트 상황과 교체 요구 발생 시 본체 내부 모든 부품 접근 가능성 확보
- 본체 내부 모든 부품 지지 가능성 확보
- 카메라 및 센서의 최적위치 선정: 카메라 및 각종 센서 간 충돌 및 동작방해 방지를 위해 본체 최적의 위치에 설치
- 운용 안정성을 위해 가능한 낮은 무게 중심 확보

## 2) Locomotion(운동능력) sub-system

필드 로봇이 목표한 지형에서의 이동과 관련된 주행부, 조향부 및 완충부를 총괄하는 sub-system이다. 본 시스템의 경우 개발하는 극한환경 필드 로봇의 사용 목적 및 투입 환경에 대해 최적화되어야 하며 개발 중에 아래와 같은 요구 사항을 중심으로 개발을 수행해야 한다.

- 주행 중 안정성 유지
- 주행 중 이동 로봇 몸체의 흔들림 최소화
- 불규칙 지형에서의 주행성 확보
- 관련 기구부의 신뢰성 확보
- 관련 기구부 무게, 크기 및 소요 동력의 최소화

## 3) Power(파워) sub-system

극한환경 필드 로봇의 목적인 기본 기능을 구현하기 위해서는 안정적인 파워 공급이 매우 중요한 요소이다. 이러한 파워 공급 방식은 배터리, 태양전지, 외부 전원 및 동위원소 전지(동위원소 반응에서 발생하는 열에서 전기를 공급하는 방식) 등과 같은 여러 방식이 있으며 이러한 여러 기술적인 방법 중 아래와 같은 요구 조건을 감안하며 각각의 이동 로봇에 최적화된 시스템을 개발하는 것이 필요하다.

- 전 목표 임무 기간 동안 작업 수행 및 동면과 같은 다양한 운전 모드 등에서 연속적인 동력 공급 가능
- 생성된 동력은 로봇의 구성 시스템에 안정적으로 분배 가능

- 최대 생산 가능 동력 용량은 다양한 임무 시나리오에 적용 가능하도록 설계

#### 4) Thermal(열적) sub-system

극한환경 필드 로봇의 경우 일반적으로 적용 온도가 매우 극한 상황인 경우가 많다. 이러한 극한온도 상황에서 운용 가능한 로봇의 개발은 2단계로 구성이 된다.

##### <Component Temperature Constraints>

- 일차적으로 극한환경 필드 로봇에 적용되는 부품은 기본적으로 MIL Spec. 급의 온도 및 환경 조건을 만족하는 수준의 부품 사용이 요구된다.
- MIL-STD-202에 정의된 부품의 사용 가능 온도 범위는  $-55^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ 이며 본 온도 조건은 현재 기술적으로 만족 가능한 최대 온도 범위이다.
- 이러한 부품을 사용하여 최대한 온도에 대한 저항성을 사전에 확보하는 것이 필요하다.

##### <Environmental Conditions>

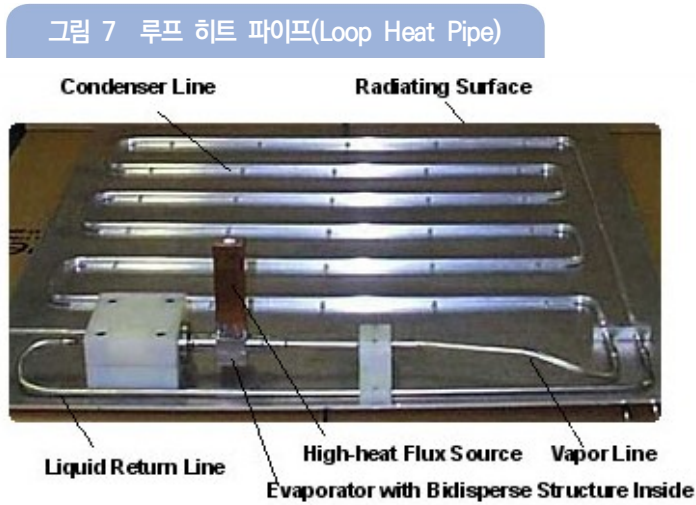
- 위의 온도 범위를 넘어서는 극한온도 범위는 부품 자체의 성능에 추가적인 Thermal Control 기능을 추가하여 신뢰성을 확보하는 방법을 사용한다.
- 극한환경 필드 로봇이 적용 가능한 최대한의 극한온도 조건으로 달 지표면의 온도 조건을 검토할 수 있으며 달 지표면의 경우 낮에는 영상  $130^{\circ}\text{C}$ , 밤에는 영하  $180^{\circ}\text{C}$  온도 범위를 가진다.
- 이러한 극한온도 조건을 만족하기 위한 방식으로는 다음과 같은 기술의 활용이 가능하다.

##### ① 히트 파이프(Heat Pipes)

- 히트 파이프(heat pipe)는 열전도율과 상전이의 원리를 병합하여 효율적으로 두 고체의 계면 간에 열을 전달하는 열교환기이다.
- 히트 파이프가 동작해야 하는 온도에 따라 작동 유체(working fluid)가 선택되며, 그 예는 매우 낮은 온도( $2\sim 4\text{K}$ )를 위한 액체 헬륨, 수은( $523\sim 923\text{K}$ ), 나트륨( $873\sim 1,473\text{K}$ ), 심지어는 매우 높은 온도를 위한 인듐( $2,000\sim 3,000\text{K}$ )에 이르기까지 다양하다. 실온에서의 대부분의 히트 파이프는 암모니아

(213~373K), 알콜(메탄올 (283~403K) 또는 에탄올(273~403K)) 또는 물(298~573K)을 작동 유체로써 사용한다. 구리/물 히트 파이프는 구리로 밀폐되어 있으며 물을 작동 유체로 사용하며 일반적으로 20~150°C 범위 온도에서 동작한다.

- 히트 파이프에는 기계적으로 움직이는 부품이 없으며 일반적으로 유지보수가 필요 없어 다양한 극한환경 로봇에 다양하게 적용 가능한 기술이다.



(출처: KAIST SatTRec 인공위성 연구소)

## ② 표면 코팅(페인팅)(Surface Coatings(Painting))

- 극한온도 조건에서 운용되는 로봇의 경우 태양열에 의한 영향이 매우 크다. 우주 탐사 로봇의 경우 태양의 복사열에 의해 표면 및 내부 온도가 상승할 수 있어 일반적으로 태양열의 영향을 최소화하는 방식으로 열 제어계를 개발한다. 이때 가장 간단하게 적용 가능한 방식이 로봇 몸체의 외각부 색상을 변경하는 방식을 사용한다.
- 일반적으로 우주 탐사 로봇의 경우 외각부를 흰색으로 도색하여 태양열에 의해 로봇 몸체의 온도가 올라가는 것을 최소화하도록 노력한다.



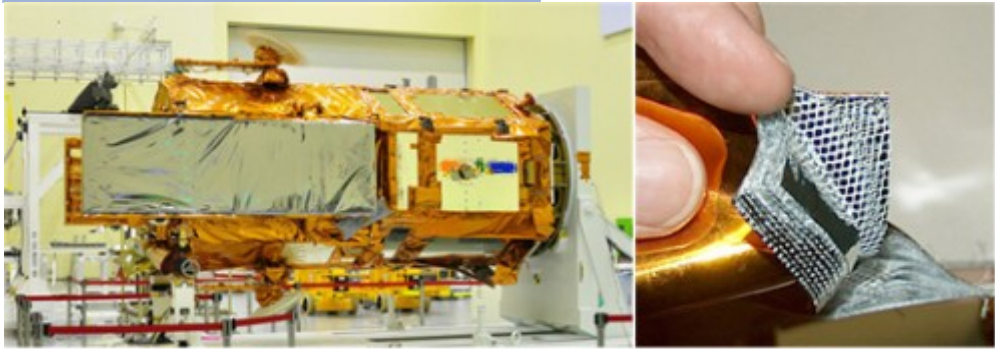
(출처: NASA JPL)

### ③ 단열처리(Insulation)

- 극한환경 로봇의 내부 온도를 보호하기 위해 가장 중요한 방법은 단열재를 효과적으로 사용하는 것이다.
- 극한환경 로봇에서 일반적으로 사용되는 단열재는 MLI(Multi-layer Insulation)와 에어로겔(Aerogels)을 사용한다.
- MLI는 복사열에 의해 발생하는 내부 열의 손실 및 외부 열의 침투를 막아주는 가장 효과적인 방식이며, 동시에 얇은 금속막과 케블라로 구성된 매쉬(mesh)를 반복적으로 적층하여 제작한다. 이러한 방식을 통해 MLI는 단열 작업과 동시에 외부의 경미한 충돌 및 파편 등에 대한 보호 기기로도 사용할 수 있다.



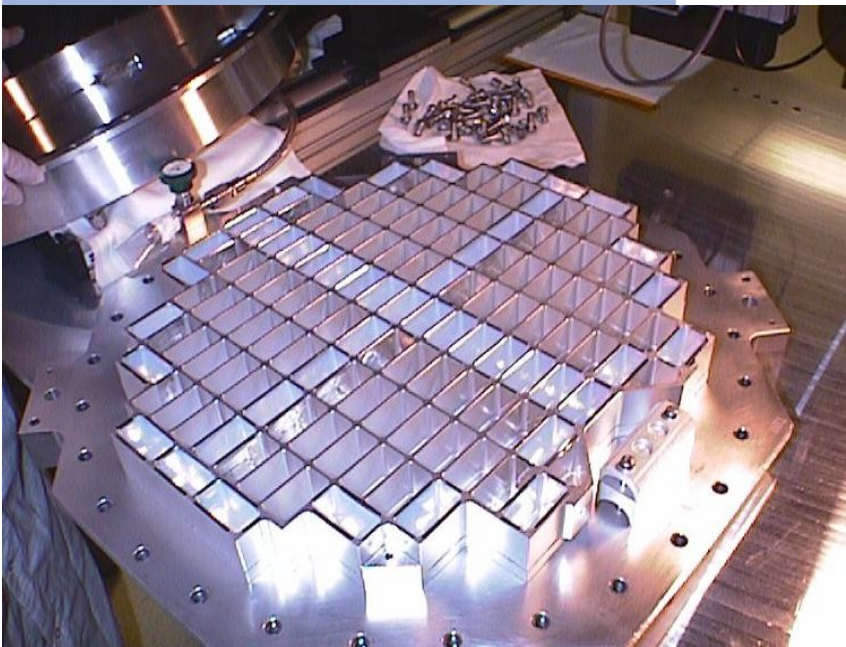
그림 9 MLI 및 MLI가 적용된 우주 발사체



(출처: 한국항공우주연구원)

- 에어로겔은 순간적으로 발생하는 고온에 대응하기 위한 방식으로 사용된다. 에어로겔은 매우 가벼우며 단열 성능이 매우 우수한 관계로 우주 발사체의 대기권 이탈 및 재진입 시에 우주 탑재체 보호를 위한 열 제어 장비에 활용된다.

그림 10 Aerogels을 활용한 우주 탐사 로버의 단열 시스템



(출처: NASA JPL)

## 5) GNC(Guidance, Navigation and Control) sub-system

GNC sub-system은 극한환경 필드 로봇의 위치 제어, 위험 상황에 관한 판단 그리고 현재 위치 확인 등을 총괄하는 시스템이다. 필드 로봇의 활용 목적이 기본적으로 이동을 통한 작업 수행인 관계로 GNC sub-system에는 다양한 기능 및 매우 높은 신뢰성이 요구된다. 이러한 GNC sub-system은 다음과 같은 요구 사항을 감안하여 개발되어야 한다.

- 숙련자/비숙련자 모드별에 따른 원격 조작 가능
- 주행 중 이동 로봇의 안전 보장
- 일정 수준 이상의 자율 기능 필요
- 탐사 작업 수행을 위한 가장한 정밀도의 자기 위치 파악 기능 필요
- 가능한 최대 이동 속도 확보 가능 시스템 개발 필요
- 위험 지형에 대한 회피 가능
- 최근접 접촉/비접촉 센서의 사용 빈도수가 최소화될 수 있도록 구성

또한, 원활한 탐사 및 임무 수행을 위해 아래와 같은 원격 조작 모드를 확보하는 것이 권장된다.

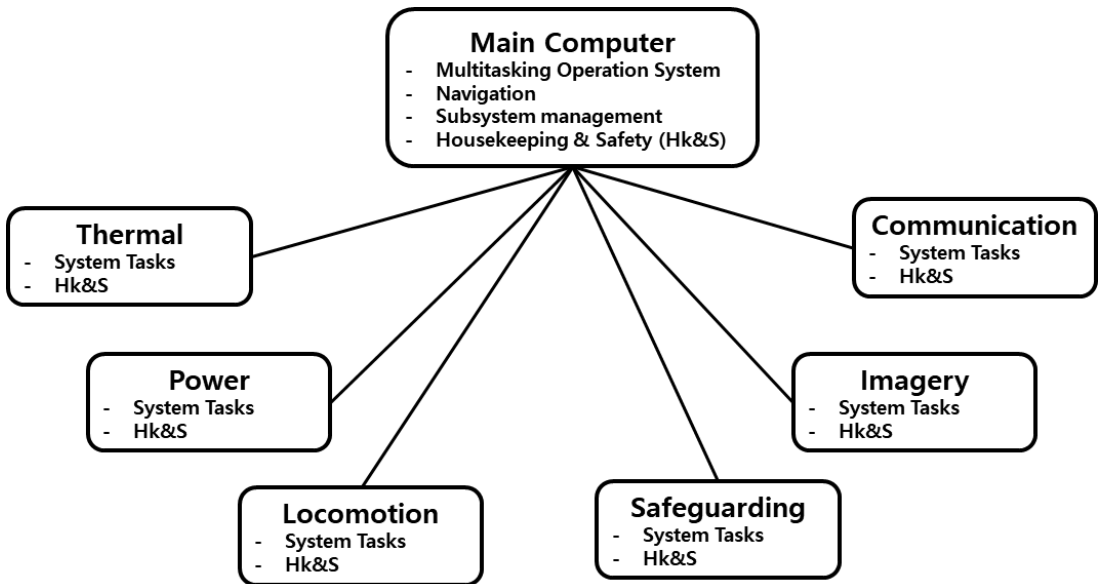
- (1) Idle Mode: 정지상태, 명령 대기 상태, 자동 주변 고해상도 사진 촬영
  - (2) Amateur Operator: 비숙련자의 조종, 최고 수준 자체 보호 기능 작동
  - (3) Trained Operator: 숙련자의 조종, 최저 수준 자체 보호 기능 작동
  - (4) Scientific/Educational Mode: 숙련자의 가이드에 따른 과학자의 제어, 운전 권한을 차등 지급
  - (5) Autonomous Mode: 통신 두절 시간 동안 꼭 필요한 경우 자율 이동 기능이 가능
- 6) CCCT (Command, Communications, Control, and Telemetry) sub-system

CCCT 시스템은 극한환경 필드 로봇의 동작 및 제어 관련 부분을 관장하는 시스템이다. 본 시스템의 최우선 목표는 극한환경 필드 로봇이 제어 불능 상태로 빠지지 않도록 하는 것이 가장 중요하며 동시에 이동 로봇과 관제 센터 간 안정적인 통신 상태를 유지할 수 있도록 개발이 되어야 한다. 이러한 CCCT sub-system은 다음과 같은 요구 사항을 감안하여 개발되어야 한다.

- 동작 상태에 대한 모니터링 값이 관제 센터로 안정적 전송 가능
- 이동 로봇의 영상 정보 전송 가능
- 이동 로봇의 Telemetry 정보 전송 가능
- 임무 중 예외 상황 극복이 가능한 재프로그래밍 기능 필요
- 실시간 제어 및 높은 신뢰성 요구
- 표준화된 시스템 구성 및 개발 환경 구축
- 방사능 환경인 경우 관련 환경 조건에 대한 강인성 확보

이러한 CCCT의 Computer Architecture는 아래와 같은 구성의 중앙 집중식 제어 방식으로 사용하는 것이 일반적이며 만약 개발 로봇의 규모가 커지되 되면 분산 제어 방식도 채택이 가능하다

그림 11 Centralized Computing Architecture



## 7) Imagery(영상) sub-system

극한환경 필드 로봇을 일반적으로 사용하는 목적에서 가장 보편적으로 중요한 요구 기능이 관측 기능이다. 이러한 관측 기능을 신뢰성 있게 개발하는 것은 매우 중요하며 이러한 영상 획득 시스템은 아래와 같은 내용을 기준으로 개발이 된다.

- 현장 상태 파악이 가능한 수준의 영상 품질 확보
- 영상 획득 시스템은 임무 기능 동안 발생하는 충격 및 진동 등의 부하를 감안하여 개발 필요
- 백업 기능 확보 필요
- 주·야간 상황에서 적용 가능하도록 개발
- 효과적인 영상 획득을 위한 PTZ(팬-틸트-줌) 기능 권장

## II 극한 환경 필드 로봇 기술 및 시장

### 2.1 국내 극한환경 필드 로봇 기술 및 시장 동향

일반 필드 로봇과는 달리 극한환경 필드 로봇 기술은 당장의 수요와 활용도가 요구되지 않기에 국내 시장에서는 아직 연구개발 초기 단계 수준이다. 이는 앞서 언급된 바와 같이 극한환경 필드 로봇의 쓰임새가 우주 및 극지 탐사, 원자력 설비 유지보수 등 개인 또는 기업 차원의 운용보다 국가적 차원에서의 활용 목적과 부합하기 때문이라 볼 수 있다. 따라서 국내에서의 극한환경 필드 로봇 기술은 정부의 주도하에 국가연구기관들과 대학연구소에서 선행 연구개발을 주도하며 점차 기업들도 연구개발과 극한 로봇 시장에 참여하는 추세로 국내 극한환경 필드 로봇 시장 또한 점진적으로 성장할 전망이다. 제조/산업 로봇 시장은 전 세계적으로 매년 꾸준히 성장세를 보이지만 레드오션으로 여겨질 만큼 다국적 대기업들이 경쟁 구도를 형성하고 있어 진입장벽이 높다. 반면에 극한환경 필드 로봇 시장은 아직 연구개발 초기 단계로 신기술의 개발과 사업화가 비교적 쉬운 블루오션이라 볼 수 있다.

극지 탐사 로봇의 경우 국내에서는 이제 연구개발이 시작되는 시점이다. 한국은 지난 30년간 세종과학기지 건설로 남극 진출과 함께 활발한 극지 연구로 극지 연구 분야에서의 위상을 드높였다. 그러나 세계 각국이 연평균 영하 55도까지 내려가는 남극 내륙 연구에 진출하기 시작하는 동안 한국은 아직 첨단 극한 기술의 도입이 없어 남극 연안 연구에 머물고 있다. 이에 대응하여, 한국과학기술연구원과 극지연구소는 협력 연구 중 하나로 효율적인 극지 연구 지원을 위한 소형 육상 로봇 개발 기획 연구를 진행하고 있다. 이 연구는 극저온과 협지에 강인한 휴대용 극지 과학 임무 로봇 개발로서 남극 미개척지 탐사 영역의 확대와 탐사 장비 및 기술의 국산화를 목표로 하고 있다.

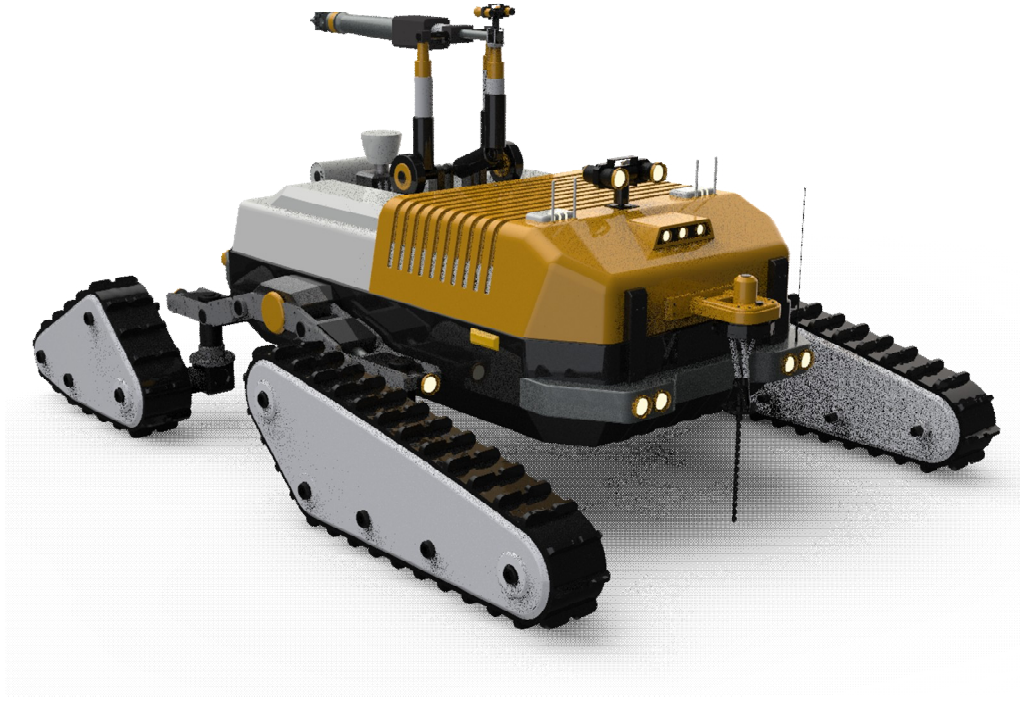
그림 12 남극 세종과학기지 전경



(출처: 극지연구소)

이와 같은 맥락에서 한국로봇융합연구원에서는 한국해양과학기술원과 협력하여 이동형 기지국이 탑재된 극지 탐사 로봇 기술을 기획 연구하고 있다. 현재 장보고 과학기지에서 남극점에 이르는 일명 Korean Route라고 불리는 내륙 진출로 개척 등 연구 가치는 높으나 접근이 어려운 위험 지역 탐사를 위한 극지 탐사 필드 로봇 기술이 필요한 시점이다. 따라서 개발하고자 하는 극지 탐사 필드 로봇은 사람이 접근하기 힘든 남극의 위험 지역에서 센서 데이터 획득, 모니터링, 히팅, 시추 작업 등을 수행할 계획이다. 그리고 기지국 설치가 자유롭지 않은 극한환경에서 무선 통신 범위를 이동형 기지국 탑재를 통해 확장하여 극지 과학 활동 영역 또한 확장하고자 한다.

그림 13 극한지 개발 및 탐사용 협동 이동체 시스템 개발 예상도



(출처: 한국로봇융합연구원)

원자력 설비 유지보수 로봇은 국내 수요와 함께 연구개발 성과도 함께 증가하고 있는 추세이다. 한국수력원자력 중앙연구원은 세계 최초로 사람의 접근이 쉽지 않은 고방사능 지역이나 고온 지역 케이블의 상태를 스스로 이동하며 진단하고 작업할 수 있는 원격 로봇을 개발하였다. 이 로봇은 인간을 대신해 임무를 수행함은 물론, 기존의 비효율적인 원전 케이블 교체 방식에서 노화된 케이블만 적기에 교체할 수 있도록 진단하여 케이블 낭비를 최소화한다는 평가를 받는다. 이 밖에 한수원 중앙연구원은 KNR Systmes Inc.와 극한환경용 모바일 로봇 GIBBON을 개발하였다. 이 로봇은 다양한 지형극복이 가능한 4-Wheel 모바일 플랫폼에 유압 기반 매니플레이터(manipulator)를 통합하여 사람의 접근이 불가능한 위험 지역에서 위험물을 수거할 수 있는 작업 수행이 가능함을 보여주었다.

그림 14 세계 최초 원전 케이블 열화상태 진단 로봇(좌)과 GIBBON(우)



(출처: 한국수력원자력 중앙연구원)

원자력 발전소의 유지보수뿐만 아니라 노후화에 따른 향후 탈원전 시대 준비를 위한 극한환경용 로봇 기술의 수요와 시장도 등장하는 추세이다. 정부는 기존의 경제성을 우선한 원전 중심 에너지 정책에서 안전과 환경을 중시하는 정책으로의 전환을 통해 순차적인 원전 정지와 함께 2030년에 설계 수명이 다하는 국내 원자력 발전소 11기를 해체할 계획이라고 밝혔다. 국내에서는 아직 상업 원전 해체 경험이 없기 때문에 산업통상자원부는 2030년까지 원전 해체 기술 개발에 6,163억 원을 투입할 예정이다. 이에 원전 해체 시장은 급격히 성장할 것으로 예상되며 미래에 北 비핵화가 실현되면 원전 해체 시장의 규모는 더욱 커질 것으로 전망된다.

안전한 원전 해체 산업을 위해서는 엄청난 양의 방사능에 노출되는 극한환경 로봇 기술이 필수로 요구된다. 이러한 수요에 발맞춰 최근 한올로보틱스와 디에스티로봇은 합작법인으로 인웍스로봇을 설립하여 원전 해체 신규 시장 개척을 본격화하고 있다. 또한, 국내에서 이미 개발 중인 달 탐사 로버, 군용 로봇 등의 기술을 활용하여 순수 국산 기술만으로 원전 해체 로봇 개발이 가능할 것으로 기대하고 있다.



그림 15 국내 원자력 정책 현황

노후 석탄화력발전소 10기 폐지 자료 : 산업통상자원부

2029년까지 설계수명이 다하는 원자력발전소



(출처: 융합연구정책센터)

마지막으로 우주 탐사 로버는 국내에서 한국과학기술연구원에서 선행 연구개발을 진행하고 있다. 우주 탐사 로버는 가장 가혹한 환경에서 운용되는 로봇 기술로 앞서 언급된 극저온 극저압 극지 탐사 로봇과 원자력 설비 유지보수 로봇 기술이 하나로 융합된 것으로 볼 수 있다. 마찬가지로 우주 탐사 로버 기술은 극지 로봇과 원자력 로봇 기술 개발에 동일하게 적용될 수 있으며 결국에는 하나의 극한환경 필드 로봇 원천 기술로 통합될 수 있다.

달 탐사 로버 기술은 달 표면 과학 임무 수행과 함께 한국의 우주 진출 기술의 자력 확보와 추후 한국의 소행성 및 화성 탐사 원천 기술 확보를 목표로 한다. 달 탐사 로버 기술의 연구개발을 위해 기계 및 전자 분야뿐만 아니라 방사선 차폐 소재, 배터리, 우주 인터넷, 영상처리, 인공지능, 고체 윤활 부품 개발 등 관련된 다양한 최첨단 분야의 연구도 동시에 이루어지고 있다. 따라서 달 탐사 로버 기술 개발의 파급력으로 인한 파생기술과 파생시장의 기술적 및 경제적 성장도 기대된다.

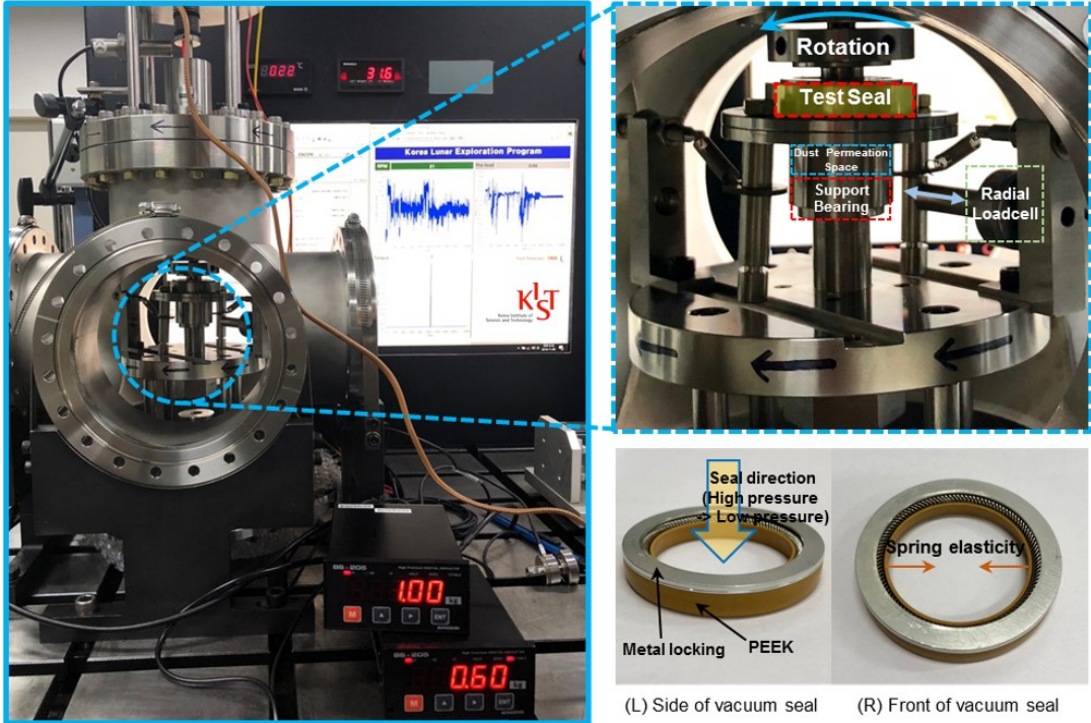
그림 16 한국과학기술연구원 달 탐사 로버 DM



(출처: 한국과학기술연구원)

대표적으로 기대되는 파생기술로는 신소재 기술이다. 달 탐사 로버 몸체와 동력 전달 기구부를 이루는 소재는 우주 방사선 차폐 기능은 물론, 영하 170도에서 영상 130도에 이르는 극한온도 변화에 형태 변형을 최소화하며 대응해야 한다. 또한, 우주의 진공상태에서 로버 기구부의 액체 윤활을 적용할 수 없기 때문에 고체 윤활 기술이 필수적으로 개발되어야 하며, 달 표면 정전기로 인한 월면 미세먼지의 침습을 방지할 수 있는 씰(seal)의 연구개발도 필수이다. 이러한 파생기술의 연구개발을 통해 새로운 산업과 시장을 개척할 수 있는 가능성은 엄청난 잠재력을 지닌 것으로 여겨진다.

그림 17 달 환경 Seal Test Bench



(출처: 한국과학기술연구원)

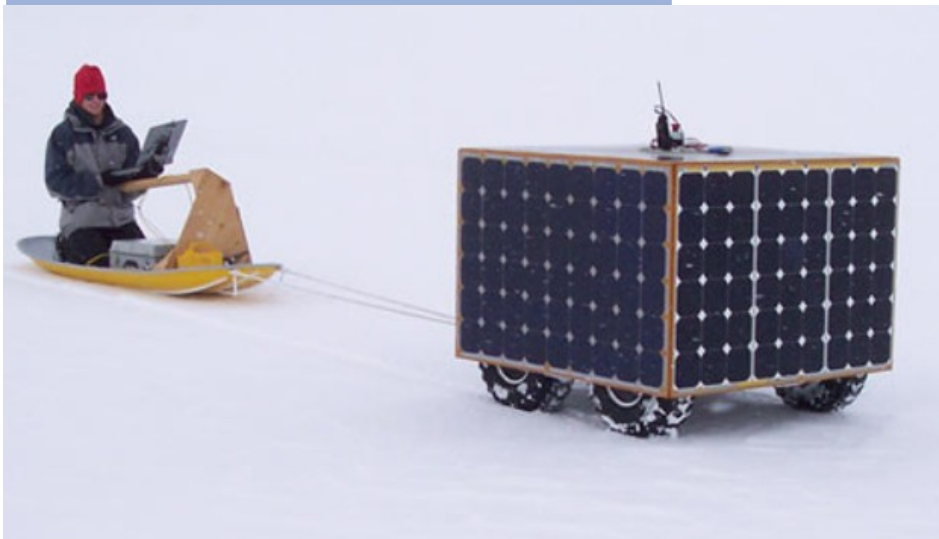
## 2.2 국외 극한환경 필드 로봇 기술 및 시장 동향

국외 극한환경 필드 로봇 기술은 국내에 비해 상당히 많이 진척된 상태이다. 미국을 비롯하여 세계 여러 나라들은 이미 상당히 성공적인 극지 및 우주 탐사 로봇 기술들을 보유하고 있으며, 상용화 수준 원자력 로봇 기술을 보유한 기업도 출현하고 있어 극한환경 필드 로봇 시장의 성장을 주도하고 있다.

남극조약 가입국 53개국 중에 남극 내륙에 기지를 운영하는 국가는 미국, 러시아, 이탈리아-프랑스(공동운영) 등이며 일본과 중국은 하계기지를 운용 중이다. 1998년 발표한 남극 환경보호 의정서에 따라 2047년까지 남극의 광물자원은 개발할 수 없으나 2048년 이후의 광물 개발을 위해 이미 치열하게 경쟁하고 있다. 이를 위해 세계 각국은 남극 과학기지 건설은 물론 첨단 극지 탐사 로봇 기술을 도입해 남극 연구에 앞서나가고 있다.

미국은 이미 10년 전부터 극지 탐사 로봇 기술 개발을 진행해왔다. 미국 다트머스(Dartmouth) 대학의 로라 레이 교수의 연구진은 경량의 수송 수단으로서 극지 측정 기구를 배치할 수 있는 쿨 로봇(Cool Robot)을 개발하였다. 이 로봇은 물자가 실린 썰매를 견인하며 GPS 기술 기반 주행으로 시속 2마일(약 3.2km)에 속도로 2주 동안 300마일(약 480km) 이상 이동이 가능하다. 또한, 태양전지를 활용한 지속적인 주행이 가능하다는 장점이 있다. 이 외에도 미국은 NASA에서 개발한 GROVER, 조지아공과대학교(Georgia Tech.)의 SnoMote, Moon-Regan, Nomad, Yeti 등과 같은 다양한 극지 탐사 필드 로봇을 개발 및 보유하고 있다.

그림 18 다트머스(Dartmouth)대학 쿨로봇(Cool Robot)



(출처: Dartmouth Thayer School of Engineering)

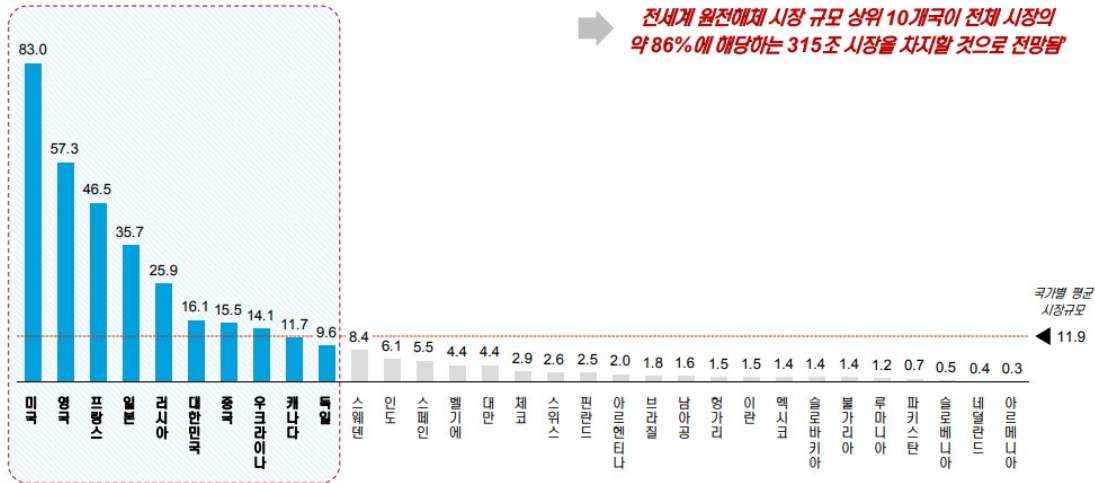
최근 중국은 중국과학원 선양자동화연구소가 개발한 얼음 탐지 로봇이 성공적으로 빙하 지형 탐사 임무를 마쳤다. 100m 두께의 빙하를 탐사할 수 있는 이 로봇은 어떠한 험지에서도 주행이 가능하고 극한의 저온과 날씨를 견디며 200km 거리를 이동하여 탐사 임무를 마쳤다. 이 로봇의 성공적인 임무 수행은 극지 로봇 기술뿐만 아니라 로봇 연구개발 영역 전반에 걸쳐 영향을 미칠 것으로 예상된다.



그림 20 전세계 원전 해체 시장 규모 전망

국가별 원전해체 시장규모 및 비중 (2015~2110)

(단위: 조원)



(출처: 딜로이트)

후쿠시마 원자력 발전소 사고 후 로봇 강국인 일본조차도 사고현장에 즉시 투입할 수 있도록 개발된 로봇이 없었다. 일본 정부는 미국 iRobot에 긴급 협조 요청을 하여 PackBot 4대로 원전 안팎의 상황을 모니터링 하였다. 추후 도쿄 전력은 사고현장 조사 및 처리 작업을 위해 기존에 개발된 로봇들을 투입하였으나 소기의 성과만 달성한 후 엄청난 양의 방사선을 버티지 못하고 두 시간 만에 모두 고장 나버렸다. 지금 일본은 이를 계기로 다양한 임무에 적합한 로봇들을 개발 중에 있고 지금도 후쿠시마 원전 사고 수습을 진행 중이다.

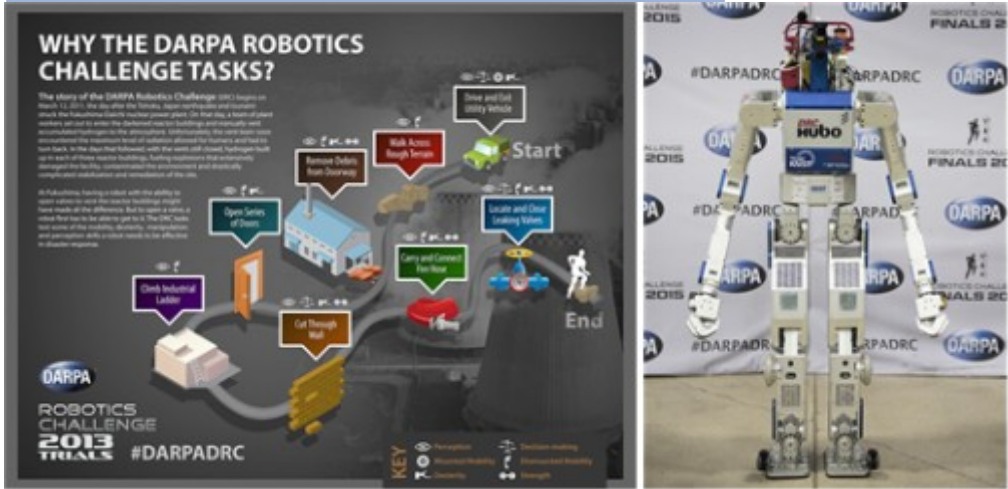
그림 21 iRobot의 PackBot(좌) & 후쿠시마 원전 수습을 위해 개발되는 원자력 로봇(우)



(출처: iRobot(좌), 조선일보(우))

미국에서는 후쿠시마 원전 사고와 같은 재난 상황에 인간 대신 임무를 수행하기 위한 로봇 기술 확보를 위해 미 국방부의 DARPA(DoD's Advanced Research Project Agency)를 통해 DRC (DARPA Robotics Challenge)를 개최하였다. DARPA DRC에서는 인간이 평소 사용하는 도구 및 설비로 구성된 재난 환경에서 문을 열고 사다리를 올라가고 밸브를 잠그는 등의 임무를 로봇이 대신 수행해야 한다. 이 대회는 재난대응로봇의 성능을 비교하여 보완 및 개발이 필요한 기술을 도출할 수 있는 기회가 되었다. 2015년에 KAIST 오준호 교수팀의 휴보(HUBO)가 DARPA DRC에서 우승을 차지하였고, 지금도 극한 재난 상황 로봇 기술은 NASA를 비롯한 전 세계 대학과 기업들이 연구개발 진행 중이다.

그림 22 DARPA DRC Challenge Tasks(좌), KAIST 휴보(우)



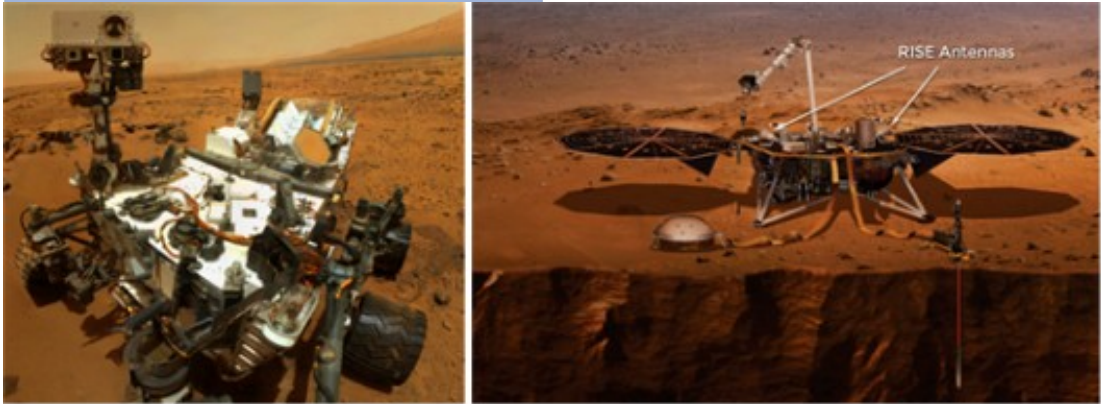
(출처: DARPA(좌), KAIST(우))

우주 탐사 필드 로봇은 이미 미국, 러시아와 유럽연합 등의 우주 강국들이 기술과 시장을 선도하고 있으며 인도, 일본, 중국 등도 우주 탐사 분야에 빠르게 진출하고 있다. 1960년대 냉전 시대부터 시작된 우주 진출은 현재 Space X와 Blue Origin과 같은 항공우주 산업체의 출현으로 민간 기업까지 확장되면서 세계 우주 로봇 시장은 2025년에 35억 달러(약 4조 1,220억 원) 규모로 성장할 전망이다. 아폴로 미션 이후 우주 탐사는 인간을 대신해 탐사 로봇이 임무를 수행하고 있으며 현재에도 달부터 화성을 비롯하여 소행성, 타이탄 등을 탐사할 로봇들이 지속적으로 연구 개발되고 있다.

아직 많은 나라들이 달 탐사에 집중하고 있는 반면 미국은 달뿐만 아니라 외계 생명체 존재 여부와 지구 탄생의 기원 등을 목표로 다른 행성과 위성 탐사 로봇 기술 개발에도 활발히 활동하고 있다. 특히 지난 2012년 화성에 착륙한 큐리오시티는 최첨단 과학의 집합체로서 다양한 과학 장비와 로봇팔을 가지고 현재까지 화성 탐사 임무에 임하고 있다. 최근에는 NASA JPL이 록히드마틴(Lockheed Martin)과 함께 제작한 화성 탐사 로봇 인사이트가 화성에 착륙하여 지질 탐사에 임하고 있다. 기존 행성 표면 탐사와는 달리 지진계와 열 감지기로 화성의 지진 활동과 지하 열 흐름을 측정하여 화성 중심부 정보를 과학적으로 규명할 예정이다.



그림 23 NASA 큐리오시티(좌), 인사이트(우)



(출처: NASA JPL)

이 밖에도 미국에서는 미세중력을 가진 토성의 위성 엔셀라두스(Enceladus) 탐사를 위해 Mother-Daughter 형태의 액슬 로버(Axel Rover), 토성의 다른 위성 타이탄 탐사를 위해 텐세그리티(tensegrity) 구조물 기반의 착륙선이자 탐사선의 역할을 동시에 수행 가능한 슈퍼볼(SUPERBall), 그리고 얼음 표면으로 남극 내륙의 담수호와 비슷한 환경을 가진 목성의 위성 유로파 탐사를 위한 오징어 형태의 로봇까지 NASA와 각 대학들이 협력하여 우주 탐사 필드 로봇 기술을 연구하고 있다.

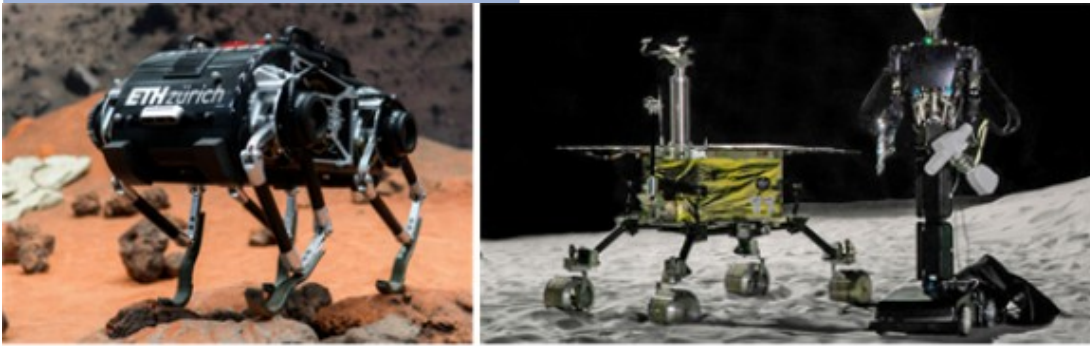
그림 24 NASA JPL 액슬 로버(좌), Ames SUPERBall(우)



(출처: NASA JPL)

미국 이외에는 유럽, 일본, 중국 등이 우주 탐사 로봇 기술에 적극적으로 연구를 진행하고 있다. 유럽우주국(ESA)은 텔레프레젠텐스 기술을 통해 원격으로 우주 탐사 로봇을 제어하는 기술의 개발과 기존 바퀴 기반 탐사 로봇과는 다른 4족 보행에 힘지에서는 점핑이 가능한 달-화성 탐사 로봇 Spacebok을 개발 중이다. 일본 항공 우주 및 우주기구(JAXA)에서는 생체 모방 원격 제어 휴머노이드로 유명한 MELTANT- $\alpha$ 를 달-화성 탐사 로봇으로 보내겠다는 계획을 가지고 있다. 중국의 경우 최근에 달 탐사선 창어 4호가 인류 최초로 달 뒷면 착륙에 성공하여 달 탐사의 새로운 장을 열었다고 평가받는다.

그림 25 Spacebok(좌), MELTANT- $\alpha$ (우)



(출처: ESA(좌), JAXA(우))

### III 결론

현재 인류의 삶의 수준과 생활 영역은 급격하게 올라가고 넓어지고 있다. 이러한 번영을 지속적으로 유지하기 위해 인류는 자원 확보를 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 자원 확보를 위한 노력의 일환으로 근 미래에는 남극과 같은 극지 그리고 우주까지 인류의 경제 영토가 될 것으로 예측된다. 그러한 새로운 경제 영토의 확보를 위해 극한환경 기술이 필요하다. 포화 상태로 가고 있는 기존 경제 영토에서 한 단계 도약하기 위해, 인류는 아직 도달하지 못한 것으로 활동 범위를 넓히는 일이 점점 더 중요할 것이며 이러한 도전이 가능하도록 해주는 기술이 극한환경 극복 기술이다.

하지만 인류가 바로 그러한 극지에서 활동할 수 있도록 해 주는 극한환경 극복 기술의 상용화까지는 아직 많은 시간이 필요하다. 이러한 상황에서 현대 과학 기술에서 확보 가능한 극한 환경 극복 기술과 무인으로 운용되는 필드 로봇 기술을 융합한 극한환경 필드 로봇은 가장 효과적인 극지 탐사 기술이라고 볼 수 있다

하지만 아직 초기 단계이며 즉각적인 경제성에 대한 분석이 부족하기 때문에 이러한 극한환경 필드 로봇 기술은 그 가치가 과소평가 되거나 현재 투자가 충분히 이루어지지 못하고 있는 상황이다. 이러한 이유로 대부분의 선진국들은 우주 탐사 또는 극지 탐사와 같은 경제성에 의한 목적 보다는 과학 탐구의 목적을 가지고 장기적인 로드맵에 따라 연구개발 및 투자가 이루어지고 있다. 우리나라도 이러한 세계적인 흐름에 맞춰 한국형 달 탐사 계획을 시작하였으며 다부처 사업으로 극지 탐사 로봇 개발 과제가 예비 타당성 평가를 마치고 조만간 연구개발이 시작될 예정이다.

이러한 시작을 통해 확보된 극한환경 극복 기술은 제조 기술에 강점을 가진 우리나라의 기존 산업과 효과적인 융합이 가능하며 이러한 융·복합을 통해 기존 제조 기술의 수준을 높이고 새로운 경제 먹거리의 도출이 가능할 것으로 판단된다.

저자\_ 이우섭(Woosub Lee)

• 학력

일본 동경공업대학교 기계우주 시스템 전공 박사  
연세대학교 전자공학과 석사  
서강대학교 기계공학과 학사

• 경력

現) 한국과학기술연구원 책임연구원  
前) 한국과학기술연구원 선임연구원  
前) 한국과학기술연구원 연구원

## 참고문헌

- 1) 유진로봇 고카트, <https://gocart.yujinrobot.com/>
- 2) 언맨드 솔루션, <http://www.unmansol.com/>
- 3) 포테닛, <http://potenit.com/>
- 4) Shark Robotics, <https://www.shark-robotics.com/en/robot/colossus/>
- 5) 한국과학기술연구원
- 6) DRB Fatec <http://www.drbfatec.co.kr/>
- 7) NASA <https://en.wikipedia.org/wiki/GROVER>
- 8) KAERI <https://youtu.be/Br1N0kxX-gc>
- 9) SaTReC 인공위성연구소, <http://satrec.kaist.ac.kr/>
- 10) NASA JPL, <https://mars.nasa.gov>
- 11) 한국항공우주연구원, <https://www.kari.re.kr/kor.do>
- 12) 극지연구소, <https://www.kopri.re.kr/>
- 13) 한국로봇융합연구원, <http://www.kiro.re.kr/>
- 14) 한국수력원자력 중앙연구원, <http://www.khnp.co.kr/central/main.office?mnCd=BR06>
- 15) 융합연구정책센터
- 16) Dartmouth Thayer School of Engineering, <https://engineering.dartmouth.edu/>
- 17) 중국과학원 선양자동화연구소
- 18) Deloitte
- 19) iRobot
- 20) 조선일보 (2016.03.11.)
- 21) DARPA
- 22) HUBO
- 23) ESA
- 24) JAXA



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 July vol.5 no.7



# 02

## 초장기선 전파간섭계(VLBI)를 활용한 블랙홀 연구

손봉원 (한국천문연구원 책임연구원)

# I 서론

2019년 4월 11일 사건지평선망원경 연구단(EHT Collaboration)이 공개한 블랙홀 영상(정확한 표현은 블랙홀의 그림자 영상)은 블랙홀 연구가 새로운 단계에 들었음을 보여주었다. 블랙홀 사건지평선 수준의 정밀한 관측은 강한 중력장 연구를 비롯하여 초대질량블랙홀이 만들어내는 상대론적 제트의 발생 과정, 이 제트의 구성 물질, 주변 환경과의 상호작용 등 그간 천문학과 천체물리학의 난제로 꼽혔던 문제를 풀 중요한 실마리를 제공할 것으로 기대되고 있다. 이번 관측에 사용된 사건지평선 망원경(Event Horizon Telescope, EHT)은 전파간섭계 기술을 적용한 망원경으로 현재 지상에서 구현 가능한 최고의 분해능(resolution)으로 거대타원은하 M87 중심의 초대질량블랙홀을 관측하였다. 망원경의 분해능은 관측하는 전자기파 파장의 길이에 반비례하는데, 전자기파 중 가장 긴 파장을 가진 전파 대역에서 최고의 분해능을 얻는다는 것은 역설적이다. 이는 전파간섭계 기술(radio interferometry)로 지구 크기의 망원경을 구현하였기에 가능하였다. 이 리뷰에서 전자 전파 공학의 발전과 궤를 같이한 전파간섭계 망원경의 발전이 끼친 영향을 초대질량블랙홀 연구를 중심으로 살펴보고자 한다.



## II 전파천문학과 전파간섭계

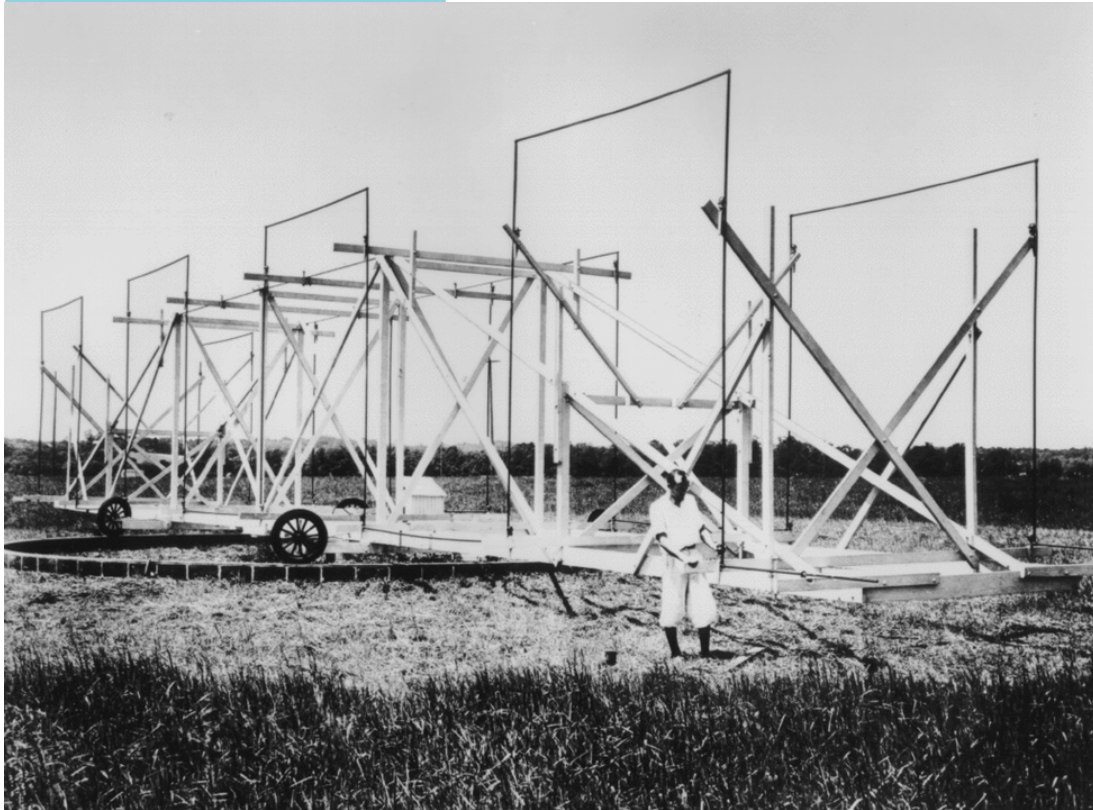
### 2.1 전파천문학과 전파간섭계

천문학 관측은 가능한 높은 분해능과 감도로 천체의 영상과 위치를 측정하는 것을 지향한다. 다양한 전자기파 대역에서 천체의 위치를 비교, 확인하는 것은 천체를 이해하는데 가장 기본적이며 중요한 연구이다. 전파에서 감마선에 이르는 광대한 범위의 전자기파 중 위상정보를 온전히 기록할 수 있는 대역은 양자효과(하이젠베르크의 불확정성 원리)에 의해 전파 대역으로 제한된다. 이번 장에서는 무선 통신에 장애가 되는 잡음의 원인을 찾고자 하는 과정에서 우연히 시작한 전파천문학이 전파간섭계의 발전과 함께 초대질량블랙홀 연구에 어떻게 활용되었는지를 살펴보고, 여기에서 파생된 주요 응용 연구를 소개한다.

### 2.2 전파천문학의 시작

전파천문학의 효시는 1930년대 초반 벨 연구소(Bell Laboratories)에서 20.5MHz 전파 대역의 잡음원을 발견한 칼 구테 잔스키(Karl Guthe Jansky)의 연구이다(그림 1). 더 낮은 주파수의 전파는 이온층에 의해 차단되어 있었던 것과 달리 이 대역에서는 외계의 전파원으로 오는 신호가 이온층을 통과하여 무선 통신에 잡음으로 작용하였다. 잔스키는 이 전파원의 위치를 파악하고자 다이폴 안테나로 구성된 어레이(array)를 사용하였다.

그림 1 잔스키와 그의 브루스 어레이



(출처: 미국 국립전파천문대 NRAO)

이 분야의 효시가 된 관측에서 이미 전파의 간섭현상을 이용하는 일종의 전파간섭계가 사용된 것이다. 망원경의 분해능(단위: radian)은 관측 파장(m)/망원경의 구경(m)으로 결정되는데, 전파 대역에서 분해능을 높이기 위한 방법으로 간섭계의 구성이 효과적임을 전파천문학 초기부터 인식하고 있었던 것이다. 잔스키는 그가 발견한 전파원이 24시간 주기가 아닌 항성일인 23시간 56분 주기로 뜨고 지는 변하는 궁수자리 방향의 외계 전파원임을 확인하였다. 이는 오늘날 Sgr A\*로 알려진 우리 은하 중심의 초대질량블랙홀(Super-massive Black Hole)이 방출하는 전파로 확인되었다.

잔스키의 간섭계와 유사한 원리로 가시함수(visibility function)의 강도(amplitude)만을 이용한 간섭계는 광학 분야에서는 이미 19세기 후반 마이켈슨(Michelson)이 별의 각 크기를 측정하기 위해 도입한 바 있다. 전파천문학 초기 새로 발견한 전파원과 광학 천체와의 위치 동정을 위해 전파망원경의 분해능을 높이는 것이

주요한 연구개발 과제가 되었다.

잔스키의 우주 전파원 발견은 처음에는 큰 주목을 받지 못하였다. 그 이유로는 전파 대역에서의 낮은 분해능과 당시의 전자, 전파 공학 분야의 기술적 한계, 그리고 낮은 기대감이 복합적으로 작용하였다. 낮은 기대감은 전파 대역에서 발견한 천체가 기존의 광학 영역에서 보이는 열적 복사(thermal radiation)를 내는 천체(주로 항성, 항성의 집합체, 그리고 항성의 빛을 반사하는 행성) 외에 다른 복사 기작을 가진 천체가 존재하리라는 것에 대한 기대감이 낮았기 때문이다. 전파 대역에서 관측된 복사가 열적 복사라면 플랑크 분포의 근사식인 Rayleigh-Jeans 법칙을 따르며 그 세기는  $I_\nu = 2 k T \nu^2 / c^2$ 로 표현되어야 한다. 이 전파원의 복사가 열적 분포를 따른다면 관측된 전파원의 세기  $I_\nu$ 와 주파수  $\nu$ 로부터 계산되는 온도는 항성 등에서 관측되는 값보다 훨씬 큰 값이어야 한다. 그러나 발견된 전파원들은 광학 영역에서 열적 복사 혹은 제동 복사(bremsstrahlung)에서 예측되는 밝기보다 매우 어두운 광학 천체와 동정되었다. 여러 전파 대역의 관측을 통하여 전파원들이 power-law( $I_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ ,  $\alpha \sim 0.5 \dots 0.75$ )를 따르는 것이 확인되었다. 이러한 비열적 복사는 상대론적 전자가 강한 자기장 주변에서 방출하는 싱크로트론 복사(synchrotron radiation)임이 확인되었다. 이에 필요한 막대한 에너지를 방출하는 천체로 초대질량 블랙홀이 제안되었다(Chiu, 1965). 전파원과 광학 천체의 정확한 동정 그리고 전파원의 구체적인 복사 기작 연구를 위해 고분해능, 고감도 관측이 요구되었고, 2차 대전 이후 본격적인 전파간섭계 개발이 시작되었다.

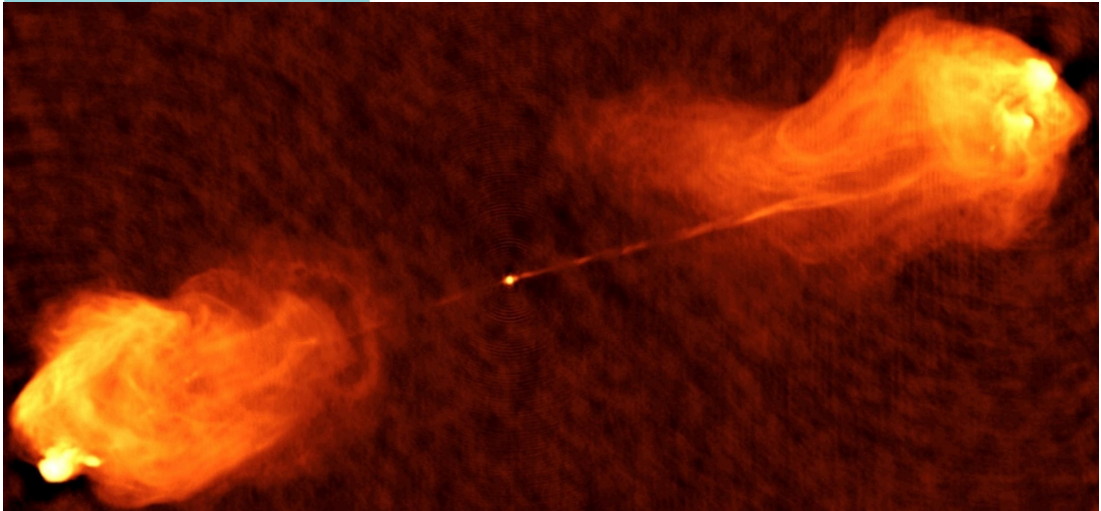
## 2.3 전파간섭계를 활용한 전파원 관측

마이켈슨 간섭계(Michelson interferometer)와 같이 전자기파의 강도를 측정하는 간섭계를 구성하면 높은 분해능을 얻을 수 있다. 이는 전자기파의 간섭성을 이용하여 광원으로부터 오는 전자기파를 서로 다른 경로를 거친 후 합성하여 얻은 가시함수(visibility function)와 영상(image) 사이의 푸리에 변환(Fourier transformation) 관계를 이용하는 것이다. 그러나, 전파 대역에서는 잡음의 세기가 대부분의 전파원의 세기보다 크다는 추가적인 문제가 있다. 관측하고자 하는 천체로부터 오는 신호보다 잡음이 큰 전파 대역에서는 분해능의 향상과 함께 잡음을 감소하기 위해 위상 교차(phase switching) 기법이 도입되었다(Ryle, 1952). 망원경의 신호(전압  $V$ )를 더하여 자승검파기(square-law detector)를 거쳐 측정하는 단순 덧셈 간섭계(simple adding interferometer)의 출력은  $(V_1 + V_2)^2$ 에 비례한다( $V_1, V_2$ 는 각각 간섭계를 구성하는 두 망원경에 들어오는 신호). 위상 교차 간섭계의 경우, 한쪽 망원경으로 들어오는 신호에 반파장 위상차를 주거나 그대로 두어

$(V_1 + V_2)^2$ 와  $(V_1 - V_2)^2$  두 가지 출력을 얻고 이의 차를 최종 출력으로 얻는다. 이러한 과정을 거쳐 위상 교차 간섭계의 출력은  $V_1 \cdot V_2$ 에 비례하게 된다. 두 망원경의 잡음은 독립적이므로 위상 교차 간섭계의 출력은 덧셈 간섭계와 비교하여 현저히 낮은 잡음을 가진다. 전자기파의 정확한 위상정보 보존은 양자역학의 불확정성 원리에 의해 제한된다(Thompson et al., 2017). 따라서 위상 교차 간섭계의 활용은 전파대역으로 한정된다. 위상 교차 간섭계의 개발과 발전으로 광학 망원경의 분해능에 필적하는 각초(arcsecond; 3,600분의 1도) 수준의 고분해능 관측과 전천 전파원 서베이(whole sky radio survey) 연구가 활발히 진행되었다. 초기 전파간섭계 개발과 활용에 대한 공로로 마틴 라일(Martin Ryle)은 1974년 노벨 물리학상을 수상하였다. 그의 노벨상 수상 기념 강연에 전파간섭계의 원리와 초기 개발이 기술되어 있다(Ryle, 1974).

그림 2는 대표적인 전파원인 전파은하 Cygnus A의 전파간섭계 관측 결과이다. 태양계로부터 약 7억 6천만 광년 떨어져 있는 이 전파은하는 중앙의 밝은 점광원(core)에서 두 방향으로 방출되는 제트 구조가 아령 혹은 풍선 모양의 두 radio lobe를 연결하고 있다. Radio lobe의 끝에는 밝은 hot spot이 보인다. 이 전파은하의 크기는 약 50만 광년이다. 중앙의 점광원은 각초초의 전파간섭계 관측으로도 분해되지 않는 미세 구조를 보인다. 대표적인 전파관측 대역인 1.4GHz 주파수(파장 21cm)에서 전파은하들의 밝기(Luminosity, 천문학에서 파워(power)를 밝기라고 하기도 한다)는  $10^{23} - 10^{28} \text{W/Hz}$  범위로 관측되는데, 이는 일반적인 나선은하가 동일 대역에서 내는 파워의 1,000배에서 1억 배에 이르는 양이다(Longair, 2011). 이러한 막대한 파워의 발생을 이해하기 위해 전파간섭계의 기선(baseline; 전파간섭계를 구성하는 망원경 간의 거리)을 수천 km 이상으로 확대하여 밀리 각초초(milli-arcsecond) 분해능을 구현하는 초장거리 간섭계(Very Long Baseline Interferometer, VLBI)의 개발이 시작되었다.

그림 2 전파은하 Cygnus A



(출처: 미국 국립전파천문대 NRAO)

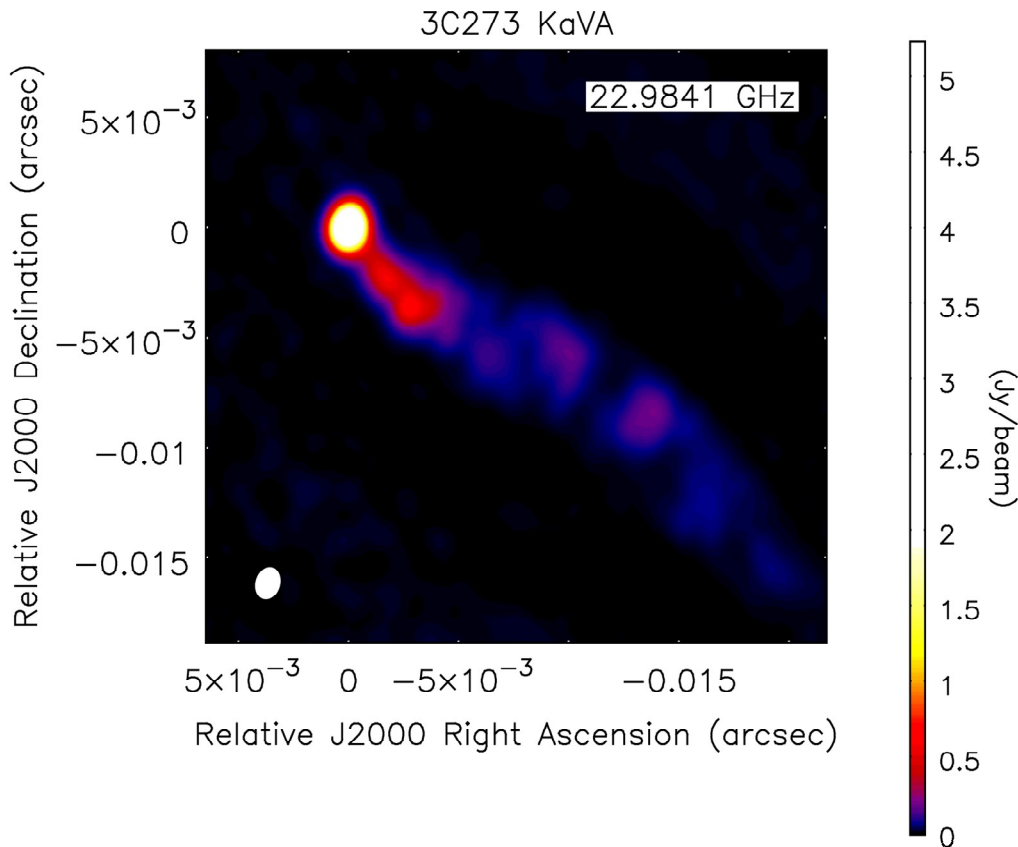
## 2.4 초장거리 간섭계

위 절의 예에서 보듯 각호초 수준의 분해능으로는 분해되지 않아 점광원(point-like source)으로 보이는 퀘이사(quasar) 등의 천체를 분해하여 관측하고자 하는 고분해능 전파간섭계의 개발은 전파천문학 초기부터 중요한 도전 과제였다. 각 전파망원경에 독립적인 국부 발진기와 관측 기록기를 도입하는 방식으로 분해능의 비약적인 증가를 가져왔다. 이는 각 관측소에 정밀한 시각주파수 표준을 갖추으로써 구현되었다. 고정밀 시각주파수 표준에 의해 제어되는 각 안테나에서 국부 발진기를 사용함으로써, 간섭무늬를 측정하기에 충분한 시각정밀도로 관측 전파신호를 기록하는 것이 가능하다. 초창기에는 아날로그 신호를 자기 테이프에 기록할 수 있도록 충분히 낮은 주파수 대역(baseband)으로 변환하여 저장한 후, 테이프를 동기화 및 재생하여 상관기(correlator)로 처리하였다. 이렇게 독립된 시각주파수 표준을 사용하여 개별 망원경이 수신한 신호를 기록하고 추후 상관기로 처리하는 관측 기법을 초장거리 간섭기술(VLBI)이라고 한다(Thompson, Swenson and Moran, 2011).

그림 3은 VLBI로 관측한 전파원 3C273의 영상이다. 태양계로부터 약 24억 광년 거리에 있는 퀘이사 3C273을 한일 공동 VLBI 관측망 KaVA(KVN and VERA Array)로 관측한 영상이다. 그림2와 비교하여

약 500배 높은 분해능으로 관측한 결과이다. 약 2밀리 각초에 해당하는 KaVA의 초고분해능으로도 중심의 가장 밝은 구조인 코어(core)는 분해되어 보이지 않는데, 여기서부터 제트가 방출되어 나오는 모습이 보인다.

그림 3 한일공동 VLBI 관측망 KaVA로 22GHz 전파 대역에서 관측한 3C273



(출처: 한국천문연구원)

퀘이사는 준항성체를 뜻하는 quasi-stellar radio sources의 줄임말로 광학 관측에서는 별처럼 점광원으로 보이나 특이한 분광특성을 가진 천체로 전파대역에서 밝은 천체를 지칭하는 용어로 처음 사용되었다. Hazard et al.이 3C273의 정확한 위치를 달의 차폐 현상(lunar occultation)으로 확인하고, 이 천체의 특이한 분광특성이 이 천체의 우주론적 거리(약 13억 광년)에 의한 적색편이 현상에 기인한 것임을 밝혔다(Schmidt, 1963). 전파원의 막대한 파워 방출의 엔진으로 중력적 특이점(블랙홀)으로 끌려 들어가는 물질에 의한 것임을 Wheeler가 1963년 처음 제안하였다고 한다(Chiu, 1965). 태양의 108배 질량을 가진 블랙홀에 연간 태양 질량의 2배

정도의 물질이 공급되면 평균적인 퀘이사의 파워를 얻을 수 있다는 추정을 하였다(Meier, 2012). 블랙홀이 전파원의 엔진이라면 그 크기는 매우 작을 것이고 이는 블랙홀 주변을 분해하여 관측하기 위한 VLBI 개발과 건설에 동기 부여가 되었다.

초기 VLBI의 가장 중요한 발견 역시 3C273의 관측으로부터 얻었다. Pearson 등은 3C273의 제트 구조의 변화를 1977년부터 1980년까지 추적 관측하여 코어에서 방출된 제트가 빛보다 빠른 초광속운동을 하고 있음을 발견하였다. 이들이 발견한 초광속운동은 빛의 속도에 8.7배에 해당하는데, 이러한 초광속운동은 특수상대론으로 설명할 수 있는 착시현상이며 블랙홀에서 방출되는 제트가 빛의 속도에 매우 가까운 속도로 방출되고 있음을 의미한다. 이후 현재까지 여러 퀘이사와 전파은하에서의 초광속 운동이 VLBI 관측으로 확인되었다. 블랙홀의 상대론적 속도의 물질과 에너지 방출은 천문학과 천체물리학 분야의 주요 연구 주제 중 하나이며 이 분야의 해결되지 않은 대표적인 난제 중 하나이다.

## 2.5 활용 연구

천문학과 천체물리학 발견으로부터 동기가 부여되었으나, 개발 초기 단계부터 이미 VLBI의 측성학과 측지학에서의 활용 가능성이 논의되었다(Gold, 1967). 전파천문학에서와 유사하게 VLBI 측성학과 측지학은 1970년대와 1980년대에 비약적으로 발전하였다. 이 분야에서의 활용은 미국의 NASA와 해군성 천문대(Naval Observatory)가 측지 협력 프로그램을 운영하며 발전하였다. 그리고 NASA의 제트추진 연구소(Jet Propulsion Laboratory)가 주도한 심우주 네트워크 프로그램은 VLBI의 측성학 활용에 기여하였다. 이는 전 세계 40여 개 이상의 전파망원경이 참여하는 국제 VLBI 서비스(International VLBI Service, IVS)로 확대되었으며, 한국에서는 국토지리정보원의 세종 천문대가 참여하고 있다. 이 국제 협력의 주요한 결과는 국제천구좌표계(International Celestial Reference Frame, ICRF)의 확립이다. 위치가 안정적인 295개의 퀘이사로 구성된 ICRF는 40마이크로 각초의 정밀도를 가지고 있다(Fey et al., 2015). ICRF는 측성, 측지 좌표 정보의 가장 상위 원점을 제공하는 좌표계로 활용되고 있다.

그림 4 VLBI로 측정된 대륙운동



(출처: Whitney et al., 2014)

VLBI 측지학의 주요한 결과는 지구 대륙 운동의 정확한 측정이다. 이는 ICRF를 기준으로 관측에 참여하는 전파망원경의 위치 변화를 추적하여 측정한다. 미국 Westford와 스웨덴 Onsala 망원경 사이에서 연  $17 \pm 2\text{mm}$ 의 움직임을 처음 측정한 이후(Herring et al. 1986), IVS는 지구의 대륙 운동을 추적 관측하고 있다(Thompson, Swenson and Moran, 2011).

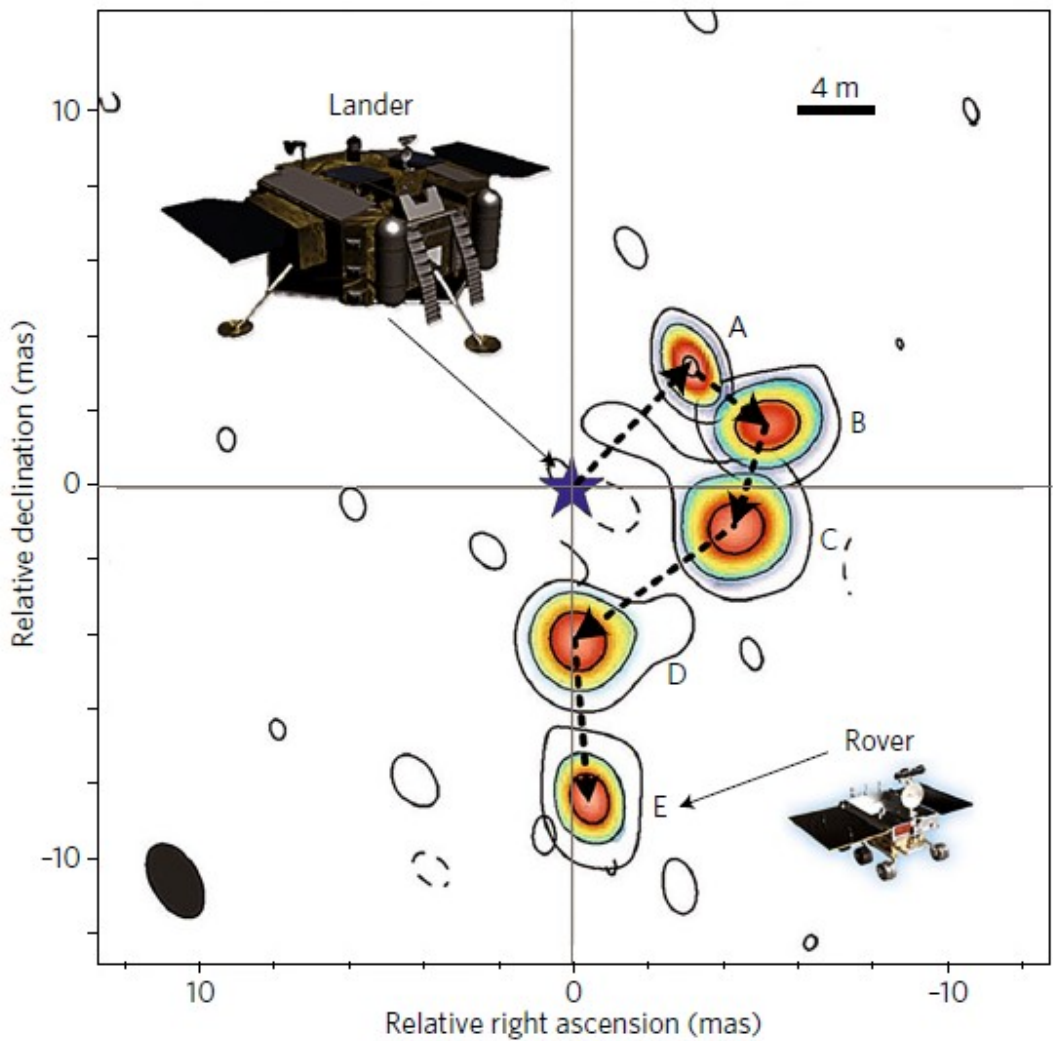
그림 4는 VLBI로 측정된 대륙 운동을 보여주고 있는데, 화살표의 출발점이 망원경의 위치이며 가장 빠른 속도로 움직이는 지역은 하와이로 연간 8cm가량 동아시아로 접근하고 있다(Whitney, 2014).

중국의 CVN은 달 탐사 계획 창이-3(ChangE-3) 중 월면 탐사선 유투 로버(Yutu rover)의 실시간 위치



추적을 시연하여 VLBI가 달 그리고 화성 등 행성 탐사에 효과적인 네비게이션 방법임을 보였다. CVN의 신호 감지로부터 위치 정보 전송까지의 시간 지연은 1분 이내였으며 월면에서의 위치 정확도는 100m 이내였다. 월면에서의 창이 착륙선과 로버의 상대 위치는 1m 이내의 오차로 측정되었다. 이는 아폴로 계획에서의 위치 측정과 비교하여 10배 이상 정밀도가 향상된 결과이다(Tong, Zheng and Shu, 2014).

그림 5 창이-3 착륙선과 로버의 VLBI 추적 결과



(출처: Tong, Zheng and Shu, 2014)

2 초정기선전파간섭계(△, B)를 통해 얻은 창이-3 착륙선과 로버의 상대 위치

## III 초장거리 간섭계

### 3.1 주요 VLBI 관측망

대표적인 VLBI 관측망으로는 미국의 VLBA(Very Long Baseline Array), 유럽의 망원경을 중심으로 구성된 EVN(European VLBI Network) 그리고 남반구의 호주와 남아공의 LBA(Long Baseline Array)가 있다. 동아시아 지역을 아우르는 VLBI 관측망을 구축하기 위한 방안으로 제안된 동아시아 VLBI 관측망(East Asia VLBI Network, EAVN)은 2017년 EHT 관측의 저주파수 VLBI 관측을 담당하는 등 북반구의 주요한 VLBI 관측망으로서 역할을 수행하고 있다. 표 1에는 북반구 소재의 VLBI 관측망과 참여 망원경의 수, 망원경의 크기와 관측 주파수, 기선길이, 분해능과 감도를 정리하였다(An, Sohn and Imai, 2018).

### 3.2 한국우주전파 관측망(Korean VLBI Network, KVN)

한국천문연구원(KAIST)의 KVN은 밀리미터파 전용 VLBI 관측망으로 2009년 첫 프린지를 검출하고 운영을 시작하였다. 다중 주파수 동시 관측을 통한 VLBI 위상보정 기법을 적용하기 위한 다중 주파수 수신 기술을 개발하여 한국우주전파관측망에 적용되었다(Han et al., 2008). KVN은 2011년에 KVN의 전 주파수 대역(22, 43, 86 및 129GHz)에서의 동시 관측을 구현하였다. 국토의 지리적 여건상 기선의 길이가 500km 이내로 제한되는 점을 고려하여 VLBI로 상대적으로 높은 주파수인 밀리미터 대역을 관측 주파수로 선정하되 전파원이 밀리미터파 대역에서 상대적으로 어두워지는 점을 반영하여 해당 주파수 대역에서의 관측대역폭을 디지털 기술을 적용하여 개선하였다. 밀리미터 대역에서 지구 대기의 교란에 의한 관측상의 난점을 해소하고자 다중 주파수 동시 관측 결과를 활용한 위상보정 자료처리 기법을 개발하여 신호감도와 위치 정밀도를 향상하였다(한국우주전파관측망 홈페이지). 최근 세종시에 국토지리정보원의 새로운 22m 전파망원경이 측지학 목적으로 건설되어, IVS 관측에 참여하고 있다.

표 1 NGII(한국 국토지리정보원), EAVN과 EVN 참여 망원경 중 일부는 이 표에 기술된 것보다 넓은 주파수 대역에서 관측이 가능하나, 여기에는 VLBI 관측 가능 주파수만 기재하였다. VLBA는 0.3에서 90GHz 사이의 11개의 관측 가능한 주파수 대역이 설정되어 있다. 중국 CVN의 경우 운용 가능한 최고 주파수인 8.4GHz에 맞추어 분해능과 감도를 괄호안에 기재하였다. 마지막 칼럼의 동아시아 VLBI 네트워크의 감도(1σ sensitivity)는 그림 5에 소개된 망원경이 1시간 동안 1Gbps의 기록속도로 관측하는 경우에 대한 것이다.

네트워크 이름	위치	망원경 수	망원경 지름(m)	운영 주파수 대역(GHz)	기선 거리 범위(km)	Performance of 22GHz frequency band	
						최대 해상도(mas)	최대 영상 감도 (mJy beam <sup>-1</sup> )
EAVN	중국, 일본, 한국	21	11~500	2.3, 6.7, 8.4, 22, 43	6.1~5,078	0.5	0.076
CVN	중국	6	25~500	1.6, 2.3, 8.4, 22	6.1~3,249	0.9 (2.3 @ 8.4 GHz)	12.6 (0.08 @ 8.4 GHz)
JVN, VERA, NRO	일본	11	11~64	2.3, 6.7, 8.4, 22, 43	84~2,270	1.2	0.15
KVN, NGII	한국	4	21~22	8.4, 22, 43, 86, 129	120~476	5.9	0.4
EVN	유럽, 동아시아, 남아프리카	27	15~305	1.4/1.6, 5, 6.7~22	198~10,160	0.26	0.04
VLBA	미국	10	25	0.3~90	236~8,611	0.32	0.1

(출처: Nature Astronomy, An et al., 2018)

그림 6 동아시아 소재 VLBI 전파망원경과 상관기의 목록과 그 위치

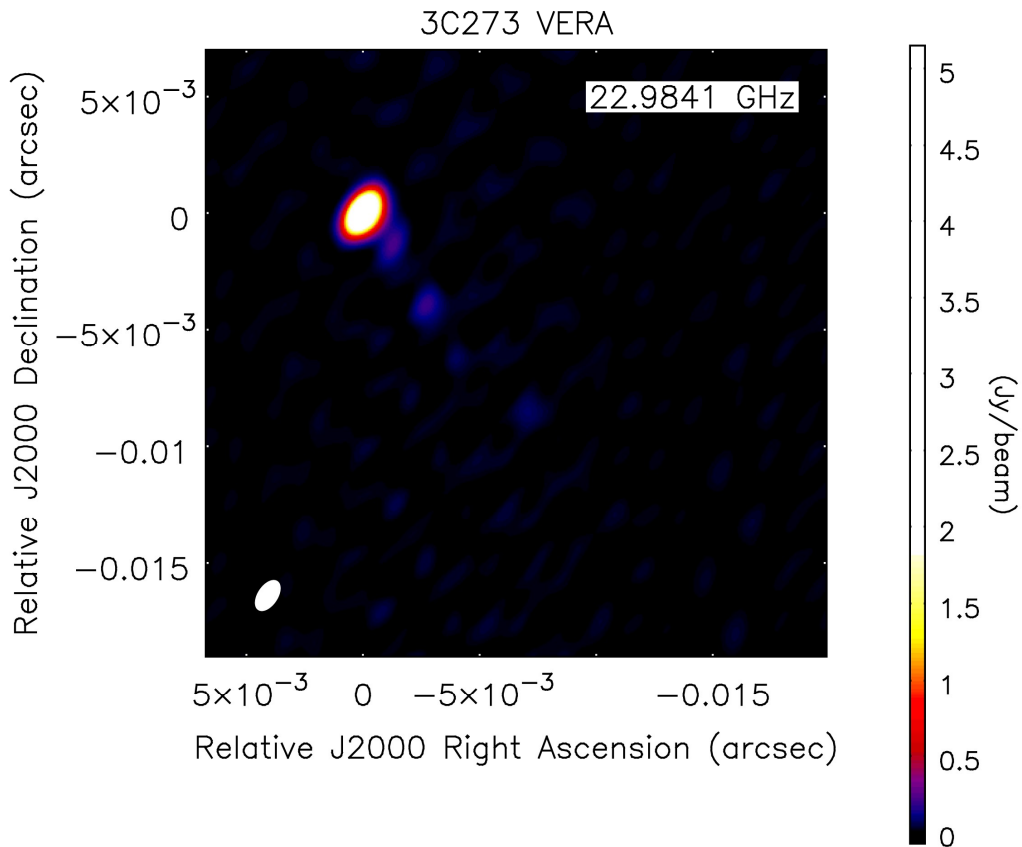


(출처: Nature Astronomy, An et al., 2018)

### 3.3 한국우주전파관측망의 국제 협력

한국과 일본은 각각 전파망원경 3기와 4기로 구성된 VLBI 관측망, KVN과 VERA를 운영하고 있다. 각각의 관측망은 관측 기선의 수와 범위의 제약(KVN은 500km 이상 기선의 부재, VERA는 1,000km 이하 기선의 부재)으로 인한 VLBI 관측망 성능의 한계를 인식하고 상시 운영 공동 관측망 KaVA(KVN and VERA Array)를 구성하였다(KaVA 홈페이지). 그림 7은 VERA 단독으로 관측한 것을 가정한 3C273의 영상이다.

그림 7 일본 국립천문대 VERA 단독으로 3C273을 관측한 영상



(출처: 한일공동 VLBI 관측망 홈페이지)

KVN의 다중 주파수 동시 관측시스템의 성공적인 도입과 연구 활용이 소개된 후, 그동안 대기가 희박한 고지대에서만 제한적으로 가능한 것으로 여겨져 오던 밀리미터파 VLBI에 대한 국제적 움직임이 나타났다. 동아시아 지역에서는 중국의 Tianma와 일본의 VERA가 전파망원경의 경면 정밀도 한계를 고려하여 22GHz와 43GHz의 동시 관측시스템을 KVN으로부터 도입하였다. 스페인 Yebes의 40m 망원경은 86GHz(3mm)까지 관측 가능한 경면 정밀도를 가지고 있으며 이에 맞추어 86GHz 대역까지의 동시 관측시스템은 KVN으로부터 도입하였다. 이탈리아 VLBI 네트워크(VLBIT)의 망원경 3기(Sardinia, Medicina, Noto)는 유럽연합의 지원을 받아 대대적인 전파망원경 성능 개선 작업을 향후 3년간 수행하는데 그 중 KVN이 개발한 Compact Tripple-Bands Receiver(CTR)의 도입이 주요 목표 중 하나이다. CTR은 KVN 다중 주파수 관측시스템을 개선하고 소형화한 다중 주파수 동시 관측 수신 시스템이다. 핀란드의 Metchaovi 망원경은 CTR 도입을 위한 예산 확보 절차를 수행 중이며, 미국과 독일의 전파천문학 연구 기관도 KVN 스타일의 수신 시스템이 개발고도가 높지 않은 위치에 설치된 전파망원경의 밀리미터파 VLBI 관측에 효과적인 해법임을 인식하고 미래 개발 방향으로 고려하고 있다.

밀리미터파 VLBI 관측은 센티미터파와 비교하여 기하학적 분해능의 향상 외에도 중요한 과학적인 의미를 가지고 있다. 퀘이사 등 제트와 블랙홀 주변 관측에서 밀리미터파는 싱크로트론복사 자기재흡수율이 현저히 낮아서 투명도가 높은 장점이 있다. 즉, 센티미터파에서는 분해능이 확보되더라도 불투명도가 높아 관측할 수 없던 블랙홀 근방, 제트의 코어 영역을 밀리미터파로는 관측할 수 있는 것이다. 또 하나, 센티미터 파장 대역에는 VLBI 분광학 연구가 OH maser(Molecular Laser)선으로 제한되나, 밀리미터파에서는 Water vapor(물 분자), SiO 등 다양한 maser 방출선을 블랙홀, 만기형별, 별 생성 지역에서 관측할 수 있어서 관측 천체의 kinematics 연구가 가능하다는 점이다.

### 3.4 우주 VLBI와 Event Horizon Telescope

가능한 높은 분해능을 구현하여 천체를 자세히 관측하고자 하는 목적의 VLBI는 분해능 향상을 위해 관측기선의 길이를 늘이거나 관측 주파수를 높여 분해능 향상을 꾀하여 왔다. 성공적인 우주 VLBI 미션으로는 일본 VSOP와 러시아의 RadioAstron이 있다. VLBI로 구현한 최고 분해능 기록은 러시아 우주 전파망원경 RadioAstron이 22GHz(1.3cm) 대역에서 지상의 전파망원경과 공동으로 관측하여 구현한 8 마이크로각초이다. 이는 기선 길이 최대 300,000km에 해당한다(Kardshev et al., 2013). 지상의 전파망원경이 구현한 최고 분해능 기록은

사건지평선 망원경 프로젝트(EHT)가 구현한 25 마이크로각초이다.

우주 VLBI의 경우 지상의 망원경과 우주 전파망원경 사이의 기선 길이에 해당하는 공간 주파수를 측정할 수 없는 단점이 있다. 밀리미터 VLBI의 경우에는 양자효과에 의해 가능한 최대 관측주파수가 1THz 근방으로 제한되고 싱크로트론 복사의 특징에 따라 관측 가능한 천체의 수가 제한적일 것이라는 단점이 있다. 이러한 단점을 해소하기 위한 방법으로는 복수의 우주 전파망원경 도입과 밀리미터파/서브밀리미터파 지상망원경의 추가 건설, 그리고 KVN 스타일 다주파수 동시관측 시스템의 도입이 논의 또는 진행되고 있다.

## IV 전망과 결론

RadioAstron과 EHT가 보여준 우주 VLBI와 밀리미터파 VLBI의 성공적 결과에 따라 미래의 VLBI 연구개발은 우주 전파망원경의 개발과 양자효과 한계까지 관측 주파수를 높이는 방향으로 계속 추진되고 있다. 러시아는 차기 우주 VLBI 망원경 관측 주파수를 밀리미터파 대역으로 결정하고 한국천문연구원 KVN 수신시스템의 개량형인 CTR(Compact Tripple-band Receiving System) 도입을 결정하였다. EHT는 기존 관측 주파수인 230GHz에 345GHz를 추가하여 영상 분해능과 밀리미터파 VLBI 측정학 정밀도는 더욱 향상될 것으로 예상된다. 한국, 일본 그리고 유럽의 밀리미터파 전파망원경은 2020년부터 EHT 관측에 참여하기 위한 테스트를 진행 중이다. 기술적인 어려움과 소요될 막대한 비용에도 불구하고 2기 이상의 시각주파수 표준을 탑재한 밀리미터와 서브밀리미터 우주 전파망원경 VLBI는 대기에 의한 교란을 겪지 않으며, 사건지평선 수준의 관측이 가능한 블랙홀의 수를 10배 이상 증가시킬 것이라는 점에서 매우 매력적이다. 이외에도 중국을 중심으로 논의 중인 30m 미터급 고감도 우주 전파망원경을 동원하는 저주파수(0.3~5GHz) 우주 VLBI가 추진된다면, 중국의 FAST(500m 전파망원경)와 국제 SKA(Square Kilometer Array)와 함께 새로운 종류의 전파원 발견과 초대형블랙홀의 병합 과정 관측 등 고주파수 장비로는 수행하기 어려운 연구를 할 수 있을 것으로 기대된다(An, Sohn and Imai 2018). 한편, 전파 대역의 상업적 이용 증가(예: SpaceX)에 따른 전파 장애는 정책적, 기술적 대응을 필요로 하는 과제이다.

저자\_ 손봉원 (Bong Won Sohn)

### • 학력

독일 본 대학교 전파천문학 박사  
연세대학교 천문우주학과 석사  
연세대학교 천문우주학과 학사

### • 경력

現) 한국천문연구원 책임연구원  
現) 과학기술연합대학원 부교수  
前) 연세대학교 객원교수  
前) 독일 막스플랑크 전파천문학연구소  
Research Fellow

## 참고문헌

1. An, T., Sohn, B.W., Imai, H., (2018) Capabilities and prospects of the East Asia Very Long Baseline Interferometry Network, *Nature Astronomy*, 2, 118–125
2. Burke, B. F. and Graham-Smith, F., (2010) *An Introduction to Radio Astronomy*, 3rd Ed. Cambridge University Press
3. Chiu, H.-Y., (1965) Quasi-Stellar Sources and Gravitational Collapse, proceedings of the First Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Univ. Chicago Press, 3.
4. Fey, A.L., et al., (2015) The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry, *Astrophys. J.*, 150, 58–74
5. Han, S.-T. et al.,(2008) Millimeter-wave receiver optics for Korean VLBI Network. *Int. J. Infrared Millim. Waves* 29, 69–78
6. Hazard, C., Mackey, M. B., Shimmins, A. J., (1963) Investigation of the Radio Source 3C273 by the method of Lunar Occultations, *Nature*, 197, 1037
7. Herring, T. A., et al. (1986) Geodesy by Radio Interferometry: Evidence for Contemporary Plate Motion, *J. Geophys. Res.*, 91, 8344–8347
8. Kardashev, N. S. et al., (2013) “RadioAstron”— telescope with a size of 300 000 km: main parameters and first observational results. *Astron. Rep.* 57, 153–194
9. Longair, M. S., (2011) *High Energy Astrophysics*, 3rd Ed. Cambridge University Press
10. Ryle, M., (1952) A New Radio Interferometer and Its Application to the Observation of Weak Radio Stars, *Proc. R. Soc. London A*, 211, 351–375
11. Meier, D. L., (2012) *Black Hole Astrophysics*, Springer
12. Pearson, T. J., et al., (1981) *Nature*, 290, 365
13. Ryle, M., (1974) RADIO TELESCOPES OF LARGE RESOLVING POWER, Nobel Lecture
14. Schmidt (1963) M., *Nature*, 197, 1040
15. Thompson, A. R., Moran, J. M. and Swenson G. W. (2017) *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, 3rd Ed. Springer Open
16. Tong, F., Zheng, W. & Shu, F., (2014) Accurate relative positioning of Yutu lunar rover using VLBI phase-referencing mapping technology. *Chin. Sci. Bull.* 59, 3362–3369



17. Townes C. H., (1947). Astrophys. J., 105, 235
18. Whitney, A. R., Lonsdale, C.J., and Fish, V.L., (2014) Insights into the Universe: Astronomy with Haystack's Radio Telescope, Lincoln Lab. J., 21, 8-27
19. 동아시아 VLBI 관측망, [https://radio.kasi.re.kr/eavn/main\\_eavn.php](https://radio.kasi.re.kr/eavn/main_eavn.php)
20. 한국우주전파관측망, [https://radio.kasi.re.kr/kvn/main\\_kvn.php](https://radio.kasi.re.kr/kvn/main_kvn.php)
21. 한일공동 VLBI 관측망, [https://radio.kasi.re.kr/kava/main\\_kava.php](https://radio.kasi.re.kr/kava/main_kava.php)
22. 사건지평선망원경 연구단, <https://eventhorizontelescope.org/>



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 July vol.5 no.7



02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5  
TEL. 02.958.4980