

리뷰논문

우주탐사용 질량분석기들의 과학적 성과와 기술 동향

홍익선¹, 이 유^{1,2†}, 이진근³, 이남석³, 강성원³, 김선태³, 장규하⁴, 최정림⁵,
민경욱⁶, 정종일¹

¹충남대학교 우주·지질학과

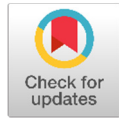
²충남대학교 천문우주학과

³(주)영인에이스

⁴한국원자력연구원

⁵충북대학교 천문우주학과

⁶한국과학기술원



Received: December 13, 2022

Revised: December 30, 2022

Accepted: January 8, 2023

†Corresponding author :

Yu Yi

Tel : +82-42-821-5468

E-mail : euyiyu@cnu.ac.kr

Copyright © 2023 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Ik-Seon Hong

<https://orcid.org/0000-0002-4529-8002>

Yu Yi

<https://orcid.org/0000-0001-9348-454X>

Jingeun Rhee

<https://orcid.org/0000-0002-0352-039X>

Nam-Seok Lee

<https://orcid.org/0000-0001-5386-9955>

Sung Won Kang

<https://orcid.org/0000-0001-5529-688X>

Seontae Kim

<https://orcid.org/0000-0002-3268-4924>

Kyu-Ha Jang

<https://orcid.org/0000-0002-6118-8612>

Cheong Rim Choi

<https://orcid.org/0000-0001-9363-4667>

Kyoung Wook Min

<https://orcid.org/0000-0002-1394-9341>

Jongil Jung

<https://orcid.org/0000-0003-1623-1033>

Scientific Achievements and Technology Trends of Mass Spectrometers for Space Exploration

Ik-Seon Hong¹, Yu Yi^{1,2†}, Jingeun Rhee³, Nam-Seok Lee³,
Sung Won Kang³, Seontae Kim³, Kyu-Ha Jang⁴, Cheong Rim Choi⁵,
Kyoung Wook Min⁶, Jongil Jung¹

¹Department of Astronomy, Space Science and Geology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Department of Astronomy and Space Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

³Young In ACE Co., Ltd., Anyang 14081, Korea

⁴Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Korea

⁵Department of Astronomy and Space Science, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

⁶Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34141, Korea

요약

우리나라의 첫 달 탐사선 다누리호가 달 궤도에 진입을 성공하면서 이후 화성 탐사와 같은 우리나라의 새로운 우주탐사 계획을 기대할 수 있게 되었다. 우리나라의 우주탐사 탑재체는 한정적인 분야에서만 개발되어 새로운 우주탐사 탑재체를 개발할 필요성이 있다. 국외에서는 우주탐사에 거의 기본적으로 탑재되는 장비로 질량분석기가 있으며, 탐사 대상의 대기와 휘발성 물질 관측과 더불어 유기물 분석을 통한 생명체 탐사까지 아우르는 매우 유용한 탑재체이다. 하지만 우리나라에선 우주탐사용으로 질량분석기 탑재체를 개발한 전적이 없으므로 앞으로의 우주탐사를 대비해 기술을 확보해야 할 필요가 있다. 그에 앞서 국외의 우주탐사용 질량분석기 탑재체의 과학적 성과를 살펴보고 동향을 파악해본다.

Abstract

As Korean first lunar probe, Danuri, succeeded in entering lunar orbit, Korean new space exploration plans such as Mars exploration can be expected. Korean space exploration payload is developed only in a limited field, so there is a need to create a new space exploration payload. In foreign countries, there

is a mass spectrometer as a basic equipment for space exploration, and it is a very useful payload that encompasses the exploration of life through the analysis of organic matter as well as the observation of the atmosphere and volatile substances of the exploration target. However, Korea has never developed a mass spectrometer payload for space exploration, so it is necessary to secure technology in preparation for future space exploration. Before that, we look at the scientific achievements of foreign mass spectrometer payloads for space exploration and identify trends.

핵심어 : 우주탐사, 질량분석기, 우주임무 역사

Keywords : space exploration, mass spectrometer, space mission history

1. 서론

누리호의 발사 성공과 다누리호의 달 궤도 진입 성공으로 우리나라 우주탐사는 진일보하고 있다. 22회 국가우주위원회에서는 2032년 달 착륙을 넘어 2045년 화성 착륙을 언급하면서 우주탐사에 대한 정부의 지원과 연구, 개발의 역량 강화를 기대할 수 있다[1].

우주탐사에 있어서 계측기(탐재체)는 매우 중요한 역할을 한다. 우주공간이나 천체에서 사용자가 원하는 물리적 특성을 관측하려면 그에 해당하는 계측기를 관측 대상으로 보내야 한다. 이때 막대한 예산과 인력이 투입되므로 관측 임무를 계획하고 수행하는데 어려움이 따른다. 이전의 우주탐사들을 살펴보면 현재 우주강국이라 불리는 국가들이 주로 계측기를 만들어 우주로 보내는 것이 일반적이었다. 그래서 계측기 개발 등의 기술 발전만이 아니라 계측기를 통해 알아낸 물리적 특성으로부터 알아낸 과학적 진보 또한 우주탐사의 여력이 있는 국가들 중심으로 이루어져 왔다.

우주 망원경 등의 우주 천문 분야, 입자 검출기 등의 우주 플라스마 환경 분야 그리고 달 탐사 등의 우주탐사 분야에서 국내의 과학 탐재체 개발 현황은 다음과 같다. 우주 천문 탐재체로는 과학기술위성 1호에 탑재된 원자외선 분광기(far-ultraviolet imaging spectrograph, FIMS), 과학기술위성 3호에 탑재된 다목적 적외선 영상관측 시스템(multi-purpose infrared imaging system, MIRIS), 차세대 소형위성 1호에 탑재된 근적외선 영상/분광기(near-infrared imaging spectrometer for star formation history, NISS)가 있다[2-4]. 우주 플라스마 환경 탐재체는 우주 망원경과는 달리 질량과 부피가 작아 여러 인공위성에 탑재하고 있다. 주요 계측기는 지구 전리권 플라스마 밀도 측정용 랭뮤어 탐침(Langmuir probe, LP), 전리권 이온의 에너지 분포와 구성 및 유동 속도 측정용 전위지연탐침(retarding potential analyzer, RPA), 전리권 저에너지 입자검출기(electrostatic analyzer), 전리권 고에너지 입자 검출기(solid state telescope, SST)가 있다. 인공위성 별 탑재 현황은 아리랑 1호에 LP, 과학기술위성 1호에는 LP, electrostatic analyzer, SST, 차세대 소형위성 1호는 LP, RPA, SST, 천리안2A에는 SST, 발사예정인 도요샛(small scale magnetospheric and ionospheric plasma experiment, SNIPE)에는 LP, SST이다. 우주탐사 탐재체는 다누리호(Korea pathfinder lunar orbiter, KPLO)에 탑재된 계측기들로 고해상도카메라(lunar terrain imager), 광시야 편광카메라(wide-angle polarimetric camera), 감마선 분광기(KPLO gamma-ray spectrometer), 자기장 측정기(KPLO magnetometer), 영구음영지역 카메라(shadow cam)가 있다.

국외의 우주탐사 과학 탑재체로 빈번하게 사용되지만 국내에서 개발한 적이 없는 탑재체로는 질량분석기가 있다. 우주탐사용 질량분석기는 주로 대상 천체의 대기과 표면 성분을 관측하며, 표면에서는 생명체와 연관이 있는 유기물까지 관측 대상에 포함한다. 질량분석기로 탐사한 대상은 달 이외에도 수성, 금성, 화성, 목성, 토성 그리고 혜성까지 대부분의 태양계 천체들의 대기과 표면 성분들을 관측하였다. 이처럼 대부분의 우주탐사에서 질량분석기가 활발하게 이용되고 있으므로 우리나라도 우주탐사용 질량분석기를 개발하여 미래 우주탐사의 과학적 임무 설계 기반을 마련할 필요가 있다.

이 논문에서는 우주탐사에서 사용한 질량분석기 탑재체들의 과학적 성과를 소개하고 현재 동향을 살펴본다.

2. 질량분석기

2.1 질량분석기 개요

질량분석기는 주어진 자기장과 전기장에서 이온의 전하량에 따른 운동 차이가 나타나는 원리를 이용하여 관측하고자 하는 물질을 사전에 이온화 시켜 해당 물질의 물성을 파악할 수 있는 계측기이다.

일반적으로 사용되는 질량분석기 형태는 크게 네 가지로 사중극자(quadrupole), 이온트랩(ion trap), 비행시간 측정장치(time-of-flight, TOF), 자기 섹터(magnetic sector) 등이 있다[5].

2.2 해외 우주탐사용 질량분석기 현황

우주탐사용 질량분석기는 1970년대부터 사용되었으며, [6]에서 대략적인 연혁을 설명하고 있다(Fig. 1). 탐사선의 이름과 발사시기 등을 연표 형태로 나타내면 Table 1과 같다.

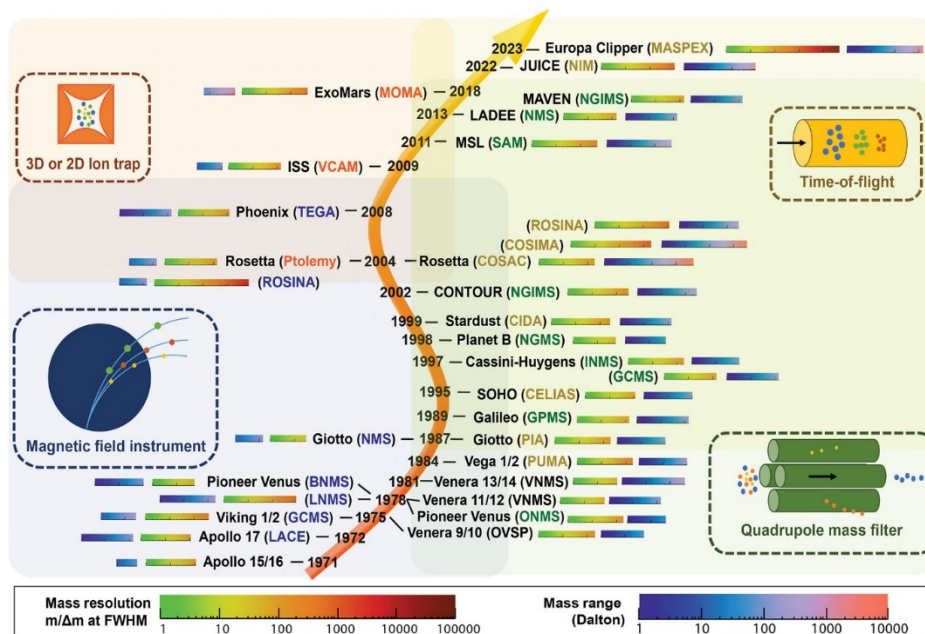


Fig. 1. History of mass spectrometer for space exploration [6].

Table 1. Chronological table of mass spectrometer for space exploration

Launch year	Mission name	Payload name	Type	Observation target
1972	Apollo 17	Lunar atmospheric composition experiment (LACE)	Magnetic sector	Moon
1975	Viking	Gas chromatograph mass spectrometer (GCMS)	Magnetic sector	Mars
1978	Pioneer Venus	Bus neutral mass spectrometer (BNMS)	Magnetic sector	Venus
		Orbital neutral mass spectrometer (ONMS)	Quadrupole mass filter	Venus
	Venera 11/12	Venera neutral mass spectrometer (VNMS)		Venus
1981	Venera 13/14	VNMS		Venus
1984	Vega 1/2	Dust impact mass analyzer (PUMA)	Time-of-flight	Venus, 1P/Halley
1985	Giotto	Neutral mass spectrometer (NMS)	Magnetic sector	1P/Halley
		Particle impact analyser (PIA)	Time-of-flight	
1989	Galileo	Galileo probe mass spectrometer (GPMS)	Quadrupole mass filter	Jupiter
1995	Solar and heliospheric observatory (SOHO)	Charge, element and isotope analysis system (CELIAS)	Time-of-flight	Sun
1997	Cassini-Huygens	Ion and neutral mass spectrometer (INMS)	Quadrupole mass filter	Saturn
		GCMS	Quadrupole mass filter	
1998	Nozomi (failure)	Neutral gas mass spectrometer (NGMS)	Quadrupole mass filter	Mars
1999	Stardust	Cometary and interstellar dust analyzer (CIDA)	Time-of-flight	81P/Wild
2002	CONTOUR (failure)	Neutral gas ion mass spectrometer (NGIMS)	Quadrupole mass filter	2P/Encke, 73P/Schwassmann-Wachmann, 6P/d'Arrest

Table 1. (Continued)

Launch year	Mission name	Payload name	Type	Observation target
2004	Rosetta	Ptolemy	Ion trap	67P/Churyumov-Gerasimenko
		Rosetta orbiter spectrometer for ion and neutral analysis (ROSINA)	Magnetic sector	
		Cometary sampling and composition (COSAC)	Time-of-flight	
		Cometary secondary ion mass analyser (COSIMA)	Time-of-flight	
2008	Phoenix	Thermal and evolved gas analyzer (TEGA)	Magnetic sector	Mars
2009	International Space Station (ISS)	Vehicle cabin atmosphere monitor (VCAM)	Ion trap	Earth
2011	Mars Science Laboratory (MSL)	Sample analysis at Mars (SAM)	Quadrupole mass filter	Mars
2013	Lunar atmosphere and dust environment explorer (LADEE)	NMS	Quadrupole mass filter	Moon
	Mars atmosphere and volatile evolution (MAVEN)	NGIMS	Quadrupole mass filter	Mars
2023 (예정)	Jupiter icy moons explorer (JUICE)	Neutral ion mass spectrometer (NIM)	Time-of-flight	Ganymede, Calisto, Europa
2024 (예정)	Europa Clipper	Mass spectrometer for planetary exploration (MASPEX)	Time-of-flight	Europa
2028 (예정)	ExoMars rover	Mars organic molecule analyzer (MOMA)	Ion trap	Mars

2.2.1 1970년대

우주탐사 초창기에는 시도하는데 시간과 예산문제로 어려움이 따르는 유인탐사, 착륙선 임무들이 주로 수행되었다. 1972년 미국에서 발사한 유인 달 탐사선 아폴로(Apollo) 17호의 lunar atmospheric composition experiment(LACE)은 magnetic sector 형태의 질량분석기로 착륙지인 타우르스-리트로(Taurus-Littrow) 골짜기에 설치되었다(Fig. 2). 장비는 태양에 의한 배경 기체 영향을 줄이기 위해 밤에 작동되었으며, 달의 시간으로 약 9일간 달에 분포하는 네온(Ne)을 관측하였다[7]. 관측 초기에는 달의 밤 동안 Ne 분포 변화가 태양풍과 관계 있을 것으로 여겨졌지만, 관측기록에서 일정한 추세가 나타나지 않아 달에서 Ne 분포를 설명하는 것은 간단하지 않은 것으로 나타났다[8].

미국에서 1975년에 발사한 화성 탐사선인 바이킹(Viking)은 1호와 2호가 있으며, 2개 모두 궤도선과 착륙선으로 구성되며, 질량분석기 탑재체 gas chromatograph mass spectrometer

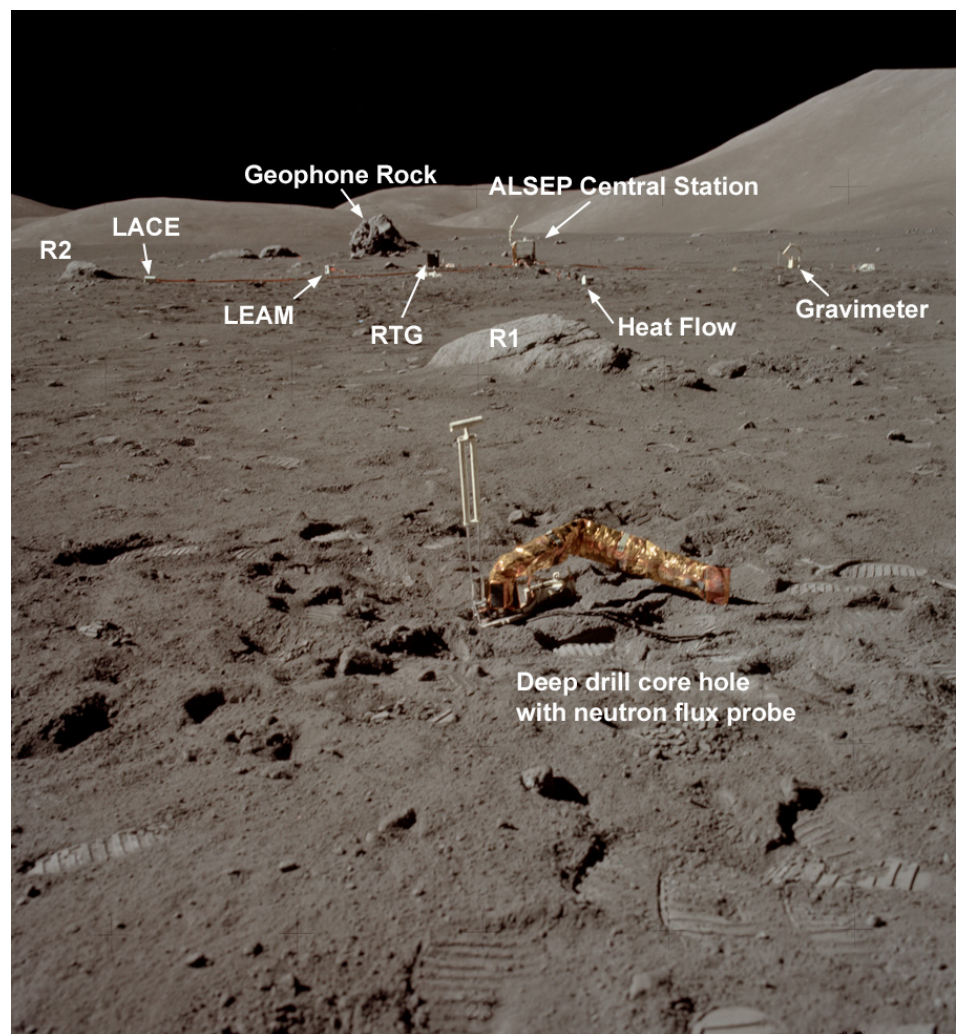


Fig. 2. Lunar atmospheric composition experiment (LACE) is installed together with other equipment (Image credit: NASA).

(GCMS)는 착륙선에 탑재되었다. GCMS는 시료를 가열하여 이산화탄소(CO_2)와 물(H_2O)을 발견하였으며, H_2O 는 대기와 지표 광물에 흡착해서 존재하고, CO_2 도 탄산염 광물에 흡착되어 있는 것으로 여겨진다[9,10].

1978년 미국에서 발사한 파이오니어 비너스(Pioneer Venus)는 금성 탐사선으로 1호, 2호가 1978년 같은 해에 3개월의 차이를 두고 발사되었다. 1호는 궤도선이고, 2호는 네 개의 소형 우주선으로 구성되어 있다. 총 5개의 우주선에 모두 질량분석기가 탑재되어 있으며, 1호의 질량분석기는 orbital neutral mass spectrometer(ONMS), 2호의 질량분석기는 bus neutral mass spectrometer(BNMS)이다. ONMS는 금성의 고층대기를 관측하여 낮에서 밤으로 변할 때, 외기권 온도가 급격하게 떨어지고 대기 구성이 분자 밀도는 감소하고 산소(O), 수소(H), 헬륨(He) 원자의 밀도가 증가하는 것을 발견하였다[11]. 베네라(Venera) 11호와 12호는 Pioneer Venus와 같은 해에 발사한 소련의 금성 착륙선으로 Pioneer Venus와 같은 시기에 금성의 저층대기를 관측하여 아르곤 동위원소와 황 등을 관측하였다[12].

2.2.2 1980년대

소련이 1981년에 발사한 Venera 13호, 14호는 Venera 11/12호와 같은 질량분석기를 탑재하여 금성의 저층대기를 관측하였다. 아르곤 동위원소의 경우 기존의 Pioneer Venus 관측자료와의 불일치가 나타나서 이를 설명하려는 시도가 있었다[13].

베가(Vega) 1호, 2호는 1984년에 발사한 소련의 탐사선으로 헬리혜성(1P/Halley)과 금성을 탐사하는 임무를 가졌으며, 두 개가 같은 날 발사된 자매선이다. 탐사선들은 금성궤도에 도착하여 금성 대기를 관측한 후에 혜성으로 이동하였다. 탑재된 질량분석기는 dust impact mass analyzer(PUMA)로 혜성 먼지의 물리적, 화학적 특성을 관측하여 혜성의 주된 구성원소는 가벼운 수소, 탄소, 질소, 산소가 대부분인 것을 밝혀냈다[14,15].

지오토(Giotto)는 1985년 유럽우주국(European space agency, ESA)에서 발사된 헬리혜성 주변을 비행하며 관측한 탐사선이다(Fig. 3). 이 탐사선에는 particle impact analyser(PIA), neutral mass spectrometer(NMS) 두 개의 질량분석기가 탑재되어 있다. NMS는 혜성의 코마를 관측하여 대부분 H_2O 로 구성되어 있는 것을 확인하였으며, 이온의 경우 뱃머리 충격파(bow shock) 바깥은 H^+ , 내부는 탄소(C^+), H_2O^+ , 일산화탄소(CO^+), 황(S^+) 등과 같은 무거운 이온들이 존재하는 것을 확인하였다. PIA는 혜성의 먼지를 관측하여 H, C, 질소(N), 산소(O), 소듐(Na), 마그네슘(Mg), 규소(Si), 포타슘(K), 칼슘(Ca), 철(Fe)을 발견하였으며, 그 중에서 H, C, N, O가 풍부한 것을 확인하였다[16].

1989년 미국에서 발사된 갈릴레오(Galileo)는 목성과 위성들을 탐사하는 임무를 가지고 있다. 질량분석기 탑재체는 Galileo probe mass spectrometer(GPMS)로 목성 대기의 수직 변화를 포함한 동위원소 구성비와 같은 대기 구성물질의 화학적 특성을 관측하였다[17]. 또한 목성대기의 수소와 중수소 비(D/H)를 관측하여 성간 물질의 수소와 비교한 결과, 우리 은하에서 태양계가 있는 지역은 생성된 후 45억 년 동안 수소 동위원소의 변화가 거의 없었다는 것을 확인하였다[18].

HMC 68 Image Composite Comet Halley 14th March 1986



Fig. 3. A view of the 1P/Halley photographed by Giotto (Image credit: ESA).

2.2.3 1990년대

1995년 미국과 유럽이 공동 개발하여 발사된 solar and heliospheric observatory(SOHO)은 태양을 관측하는 탐사선으로 질량분석기 탑재체는 charge, element, and isotope analysis system(CELIAS)로 태양풍 구성 성분을 관측하는 것이 목표이다(Fig. 4). CELIAS는 다양한 속도를 가진 태양풍에서 Si, Ne, Mg의 태양풍 동위원소 구성비와 변화를 관측하였으며, 느린 태양풍에서 무거운 동위원소가 감소하는 것을 발견하였다[19].

1997년 발사된 카시니-하위헌스(Cassini-Huygens)는 토성 탐사선으로 미국이 개발한 Cassini 토성 궤도선, ESA가 개발한 Huygens 타이탄(Titan) 착륙선 총 두 개의 우주선으로 구성되어 있다. 질량분석기 Cassini에 탑재된 ion and neutral mass spectrometer(INMS)이다. 주 목적은 타이탄 고층대기의 구성과 구조 및 토성의 자기권 플라즈마와의 상호작용 조사

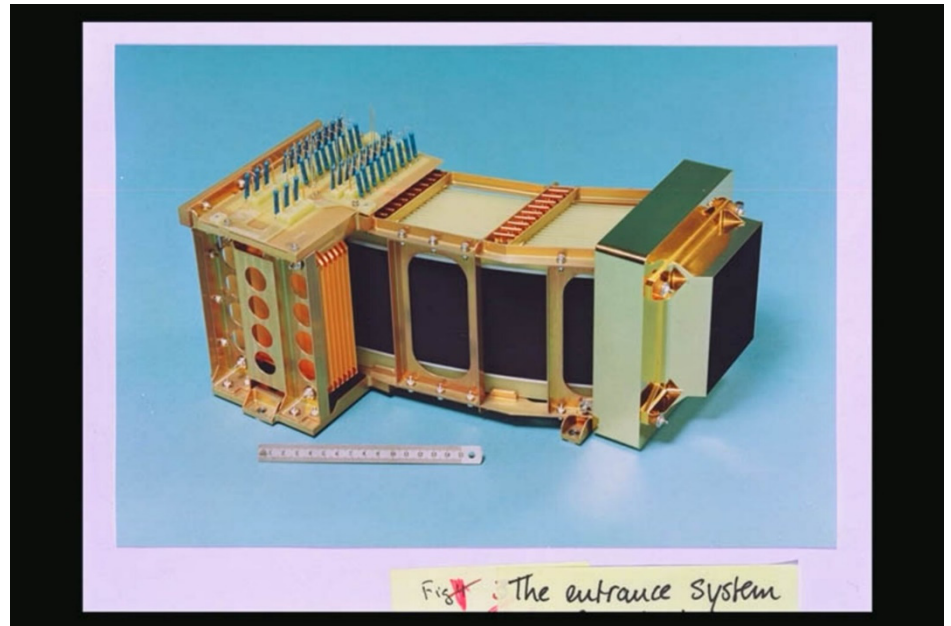


Fig. 4. The charge, element and isotope analysis system (CELIAS) instrument for solar and heliospheric observatory (SOHO) (Image credit: ESA).

이다[20]. INMS는 타이탄의 고층대기를 관측하여 열권의 평균 온도 변화를 관측하였고, 태양의 위치 등과 상관관계가 나타나지 않는 것으로 보아 타이탄의 열권은 태양의 영향보다는 토성의 플라즈마 환경에 영향이 더 큰 것을 발견하였다[21,22].

노조미(Nozomi)는 1998년 일본에서 발사된 화성 탐사선으로 질량분석기 neutral gas mass spectrometer(NGMS)를 탑재하고 있다. 비록 화성에 도달하지 못해 실패한 임무가 되었지만 화성으로 가는 여정 중 행성간공간에서 코로나 질량 방출(coronal mass ejection)을 관측하는 성과를 냈다[23].

1999년 미국에서 발사된 스타더스트(Stardust)는 혜성 81P/Wild(Wild 2)의 시료를 채취하여 지구로 귀환하는 임무를 가진 탐사선으로 cometary and interstellar dust analyzer(CIDA)라는 질량분석기를 탑재하고 있다. CIDA는 Wild 2 혜성을 관측한 결과, 유기물질을 발견했을 뿐만 아니라 나이와 생성위치 등이 다른 헬리혜성과의 화학적 유사성을 확인하였다[24].

2.2.4 2000년대 이후

미국에서 2002년에 발사된 콘투어(CONTOUR)는 3개의 혜성을 플라이 바이(fly by)하면서 혜성의 핵을 탐사하는 임무를 가진 탐사선으로 질량분석기 neutral gas ion mass spectrometer(NGIMS)를 탑재하고 있다. 목표 혜성은 2P/Encke, 73P/Schwassmann-Wachmann, 6P/d'Arrest이며 혜성 핵으로부터 반경 100 km 내에서 비행한다[25]. 하지만 발사직후 결함으로 인해 임무는 실패하였다.

2004년 발사된 ESA의 로제타(Rosetta)는 혜성 67P/Churyumov-Gerasimenko 탐사선으로 착륙선 필레(Philae)를 포함한다. Fig. 5는 Rosetta가 촬영한 혜성의 모습이다. 이 탐사선에는 기존의 다른 탐사선과는 달리 총 네 개의 질량분석기가 있으며, 궤도선에 2개, 착륙선에 2

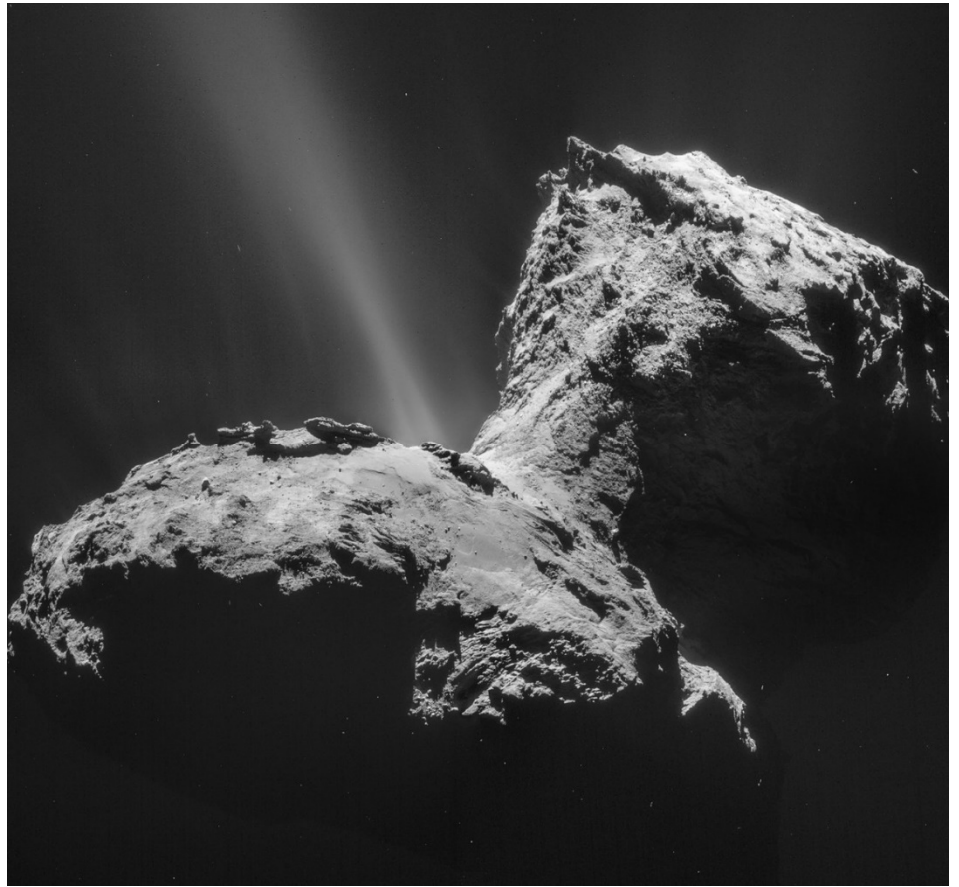


Fig. 5. Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko by Rosetta (Image credit: ESA).

개씩 탑재되었다. Rosetta 궤도선에 탑재된 질량분석기 이름은 Rosetta orbiter spectrometer for ion and neutral analysis(ROSINA), cometary secondary ion mass analyzer(COSIMA), 착륙선 Philae에 탑재된 질량분석기는 Ptolemy, cometary sampling and composition(COSAC)이다. ROSINA는 혜성 대기와 전리층에서의 원소, 동위원소, 분자 구성 및 기체의 온도와 별크 속도 등을 관측하는 목표를 가지고 있다[26]. 그리고 혜성 코마의 휘발성 물질을 관측한 결과, 혜성의 남반구, 북반구 지역에 따라 분포 차이를 발견하였으며, 혜성 표면 진화에 의한 것으로 주장하였다[27]. 다만, 휘발성 물질 중 물의 수소와 중수소의 비(D/H)는 북반구와 남반구에서 큰 차이가 없음을 발견하여 혜성 표면 진화와 상관없이 물은 두 반구에서 같은 특성을 가짐을 보였다[28]. 또한 물의 산소 동위원소 비를 관측하여 혜성의 물이 태양계 초기의 원시 물인 것을 확인하였다[29]. COSIMA는 혜성 입자의 원소 구성을 분석하는 목표를 가진다[30]. 혜성의 코마가 아닌 고체상태의 혜성 입자 D/H를 관측하여 지구의 물보다는 D/H가 높지만 태양의 원시성 수준의 영역에서 만들어내는 D/H보다는 낮은 것을 발견하여 혜성의 물은 태양계 초기에 생성된 것으로 보고되었다[31]. 또한 혜성에 존재하는 유기물이 혜성 질량의 절반 가까이 육박하는 것을 발견하였으며, 태양계 행성 생성 초기의 물질들로 추론되었다[32].

착륙선 Philae에 탑재된 Ptolemy는 혜성의 CO/CO₂ 비율을 관측하였는데 코마를 관측한 ROSINA가 관측한 값보다 낮은 것을 발견하였으며, 이 차이는 혜성으로부터 거리에 따른 코마 내의 CO/CO₂ 비율 변화가 아닌 혜성 핵의 이질성을 나타내는 것으로 여겨진다[33]. COSAC은 혜성 입자로부터 혜성을 대부분 구성하는 12개의 유기 분자들을 발견하였으며, 초기 태양계에서부터 존재하던 물질들로 보고되었다[34].

2008년 발사된 미국의 피닉스(Phoenix)는 화성 착륙선으로 질량분석기 thermal and evolved gas analyzer(TEGA)를 탑재하고 있다. TEGA는 화성의 대기를 관측하여 다량의 CO₂를 발견하였으며, 그 기원은 화성의 토양의 유기물인 것을 확인하였다[35,36].

국제 우주 정거장(international space station, ISS)에도 질량분석기 vehicle cabin atmosphere monitor(VCAM)이 2009년부터 운영되고 있다. 승무원들의 건강 확인을 위해 정거장 내 공기질을 파악하는 것이 목적으로 개량을 거치며 현재까지 큰 문제없이 운영되고 있다[37].

Mars science laboratory(MSL)은 큐리오시티(Curiosity)라는 이름을 가지고 2011년 미국에서 발사된 화성 탐사 로버이며, 질량분석기는 sample analysis at Mars(SAM)를 탑재하고 있다(Fig. 6). SAM은 화성의 대기 성분과 표면에서 기원하는 휘발성 물질 관측을 목적으로 하고 있다[38]. 화성의 대기를 관측한 결과, 질소 동위원소의 비는 과거 Viking의 관측치와 차이가 없는 것을 확인하였다[39]. 또한 아르곤(Ar) 동위원소 비를 측정하여 지구에서 발견되는 화성 운석들이 정말로 화성에 기원한 것임을 확인하였다[40]. 게다가 화성 대기와 표토에서 메탄과 같은 유기물도 발견하였다[41].

2013년 미국에서 발사된 lunar atmosphere and dust environment explorer(LADEE)는 달 궤도선으로 달 표면 50 km 상공을 비행하면서, 질량분석기 NMS가 매우 희박한 달의 대기는 Ar과 He이 주 구성원소인 것을 확인하였으며, 태양 복사에너지를 받는 정도에 따라 구성물질의 분포가 달라지는 일변화를 관측하여 달의 대기 환경에 대한 특성을 밝혀냈다[42,43].

LADEE와 같은 해인 2013년 미국에서 발사된 Mars atmosphere and volatile evolution(MAVEN)은 화성 궤도선으로 질량분석기 NGIMS는 화성 고층대기의 구조와 구성을 알아내는 것이 목표이다(Fig. 7)[44]. 화성은 중력과 자기장이 약해 대기 물질들이 우주로 탈출하게 되는데 NGIMS는 열권을 관측하여 태양활동에 따른 대기물질의 변화가 나타나는 것을 발견하였다[45]. 또한 CO₂, N₂, Ar을 관측하여 화성 열권에서의 수직 중량파(gravity wave)를 발견하였으며, 화성 고층대기의 가열과 냉각 속도에 대한 단서를 얻어냈다[46].

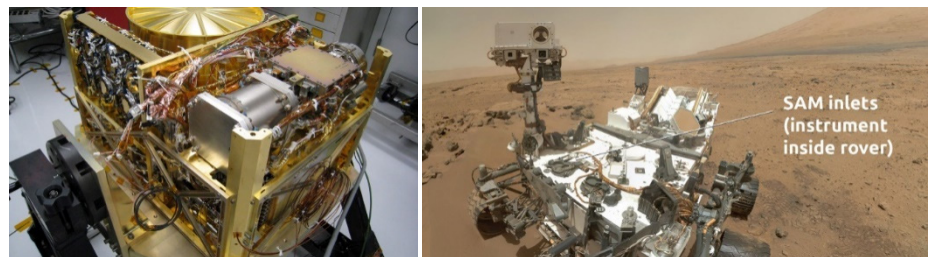


Fig. 6. Sample analysis at Mars (SAM) in Mars science laboratory (MSL) (Image credit: NASA).

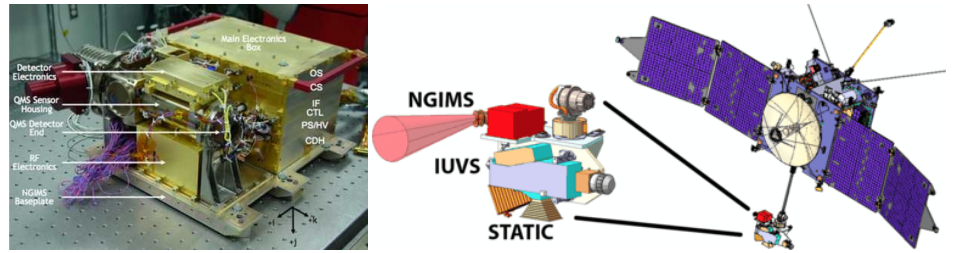


Fig. 7. Neutral gas and ion mass spectrometer (NGIMS) on Mars atmosphere and volatile evolution mission (MAVEN) [44].

2.2.5 예정 임무

현재 계획중인 우주 탐사 임무에서도 질량분석기 탑재가 확정된 사례들이 있다. ESA의 Jupiter icy moons explorer(JUICE)는 2023년 발사 예정으로 목성의 위성인 가니메데(Ganymede), 칼리스토(Callisto), 유로파(Europa) 탐사를 목적으로 하고 있으며, 질량분석기 neutral ion mass spectrometer(NIM)이 탑재되어 세 개 위성의 외기권의 화학적 조성 및 동위원소 구성을 관측할 예정이다[47]. 미국의 유로파 클리퍼(Europa Clipper)는 2024년에 발사가 예정되어 있으며, 생명체 탐사 및 인류 거주 가능성을 탐사하는 것이 목표이다[48]. 질량분석기는 mass spectrometer for planetary exploration(MASPEX)가 탑재된다. ESA의 엑소마스(ExoMars) 계획은 화성의 생명체를 탐사하는 임무로 1차 발사는 2016년에 이루어졌으며, 2028년 예정인 2차 발사에는 질량분석기 Mars organic molecule analyzer(MOMA)가 탑재된 로잘린드 프랭클린(Rosalind Franklin) 로버가 포함된다. MOMA는 지하 2 m 깊이에서 채취한 시료를 분석하여 우주 복사의 영향을 받지 않은 유기물들을 조사할 계획이다[49].

3. 결론

우주탐사에 사용된 질량분석기 탑재체들은 주로 태양계 천체들의 대기 성분이나 고체에서 뿜어져 나온 휘발성 물질을 관측하는 것에 초점을 맞추고 있다. 그리고 우주 탐사 초창기에는 달과 화성, 그리고 금성과 같은 큰 대상에 착륙하여 표면 근처의 대기 특성을 주로 관측했으나 2000년대 들어 기술이 발전함에 따라 매우 작은 천체인 혜성에 착륙하여 임무를 성공하는 쾌거를 이루었다. 또한 2000년대 이후로 질량분석기는 대기성분 뿐만 아니라 표면 물질에서 유기물을 관측하는 등의 생명체 탐사에 대한 과학적 임무도 수행하고 있으며 발사 계획도 수립되고 있다. 이와 같은 추세를 보았을 때, 앞으로의 우주탐사는 생명체 탐사를 포함한 인류의 거주 가능성 등, 인류가 현지에서 활용할 수 있는 요소들을 고려한 임무 수립이 필수불가결할 것으로 생각되며, 화성과 목성의 위성이 그 대상으로 설정되어 계획들이 진행되고 있다. 이를 대비해서 우리나라도 우주탐사용 질량분석기 탑재체 기술을 확보한다면 우주탐사의 세계적 추세에 뒤쳐지지 않고 같이 나아갈 수 있다고 기대한다.

감사의 글

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2022R1A2C1092602). 또한 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 과학기술일자리진흥원의 지원을 받아 수행되었습니다(2020 연구장비개발 및 고도화 지원사업).

References

1. National Space Committee, The new government hold the first National Space Committee, the concentration of national capabilities to expand economic territory to space (2022) [Internet], viewed 2022 Sep 20, available from: <https://www.korea.kr/common/download.do?fileId=197128749&tblKey=GMN>
2. Seon KI, Yuk IS, Ryu KS, Lee DH, Optical design of FIMS type far ultraviolet spectrograph for space observation, *Publ. Korean Astron. Soc.* 19, 65-70 (2004). <https://doi.org/10.5303/PKAS.2004.19.1.065>
3. Han W, Lee DH, Jeong WS, Park Y, Moon B, et al., MIRIS: a compact wide-field infrared space telescope, *Publ. Astron. Soc. Pac.* 126, 853-862 (2014). <https://doi.org/10.1086/678130>
4. Jeong WS, Park SJ, Moon B, Lee DH, Pyo J, et al., Near-infrared imaging spectrometer onboard NEXTSat-1, *Proceedings of the SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*, Edinburgh, UK, 26 Jun-1 Jul 2016.
5. Ren Z, Guo M, Cheng Y, Wang Y, Sun W, et al., A review of the development and application of space miniature mass spectrometers, *Vacuum.* 155, 108-117 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.05.048>
6. Arevalo R Jr, Ni Z, Danell RM, Mass spectrometry and planetary exploration: a brief review and future projection, *J. Mass. Spectrom.* 55, e4454 (2020). <https://doi.org/10.1002/jms.4454>
7. Hoffman JH, Lunar atmospheric composition experiment final report, NASA Technical Report Server, NASA-CR-150946 (1975).
8. Killen RM, Williams DR, Park J, Tucker OJ, Kim SJ, The lunar neon exosphere seen in LACE data, *Icarus.* 329, 246-250 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.04.018>
9. Biemann K, Oro J, Toulmin P 3rd, Orgel LE, Nier AO, et al., The search for organic substances and inorganic volatile compounds in the surface of Mars, *J. Geophys. Res.* 82, 4641-4658 (1977). <https://doi.org/10.1029/JS082i028p04641>
10. Toulmin P 3rd, Baird AK, Clark BC, Keil K, Rose HJ Jr, et al., Geochemical and mineralogical interpretation of the Viking inorganic chemical results, *J. Geophys. Res.* 82, 4625-4634 (1977). <https://doi.org/10.1029/js082i028p04625>
11. Donahue TM, Pioneer Venus results: an overview, *Science* 205, 41-44 (1979). <https://doi.org/10.1126/science.205.4401.41>
12. Hoffman JH, Oyama VI, von Zahn U, Measurements of the Venus lower atmosphere composition: a comparison of results, *J. Geophys. Res.* 85, 7871-7881 (1980). <https://doi.org/10.1029/JA085iA13p07871>
13. Istomin VG, Grechnev KV, Kochnev VA, Venera 13 and Venera 14: mass spectrometry of the atmosphere, *Kosm. Issled.* 21, 410-420 (1983).

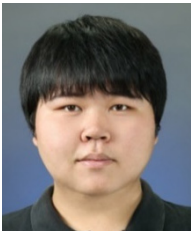
14. Kissel J, Sagdeev RZ, Bertaux JL, Angarov VN, Audouze J, et al., Composition of comet Halley dust particles from Vega observations, *Nature* 321, 280–282 (1986). <https://doi.org/10.1038/321280a0>
15. Kissel J, Krueger FR, The organic component in dust from comet Halley as measured by the PUMA mass spectrometer on board Vega 1, *Nature* 326, 755–760 (1987). <https://doi.org/10.1038/326755a0>
16. Reinhard R, The Giotto encounter with comet Halley, *Nature* 321, 313–318 (1986). <https://doi.org/10.1038/321313a0>
17. Niemann HB, Harpold DN, Atreya SK, Carignan GR, Hunten DM, et al., Galileo probe mass spectrometer experiment, *Space Sci. Rev.* 60, 111–142 (1992). <https://doi.org/10.1007/BF00216852>
18. Mahaffy PR, Donahue TM, Atreya SK, Owen TC, Niemann HB, Galileo probe measurements of D/H and $^3\text{He}/^4\text{He}$ in Jupiter's atmosphere, *Space Sci. Rev.* 84, 251–263 (1998). <https://doi.org/10.1023/A:1005091806594>
19. Kallenbach R, Ipavich FM, Kucharek H, Bochsler P, Galvin AB, et al., Fractionation of Si, NE, and MG isotopes in the solar wind as measured by SOHO/CELIAS/MTOF, *Space Sci. Rev.* 85, 357–370 (1998). <https://doi.org/10.1023/A:1005131424697>
20. Waite JH Jr, Lewis WS, Kasprzak WT, Anicich VG, Block BP, et al., The Cassini ion and neutral mass spectrometer (INMS) investigation, *Space Sci. Rev.* 114, 113–231 (2004). <https://doi.org/10.1007/s11214-004-1408-2>
21. Snowden D, Yelle RV, Cui J, Wahlund JE, Edberg NJT, et al., The thermal structure of Titan's upper atmosphere, I: temperature profiles from Cassini INMS observations, *Icarus*. 226, 552–582 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.06.006>
22. Snowden D, Yelle RV, The thermal structure of Titan's upper atmosphere, II: energetics, *Icarus*. 228, 64–77 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.08.027>
23. Ihara A, Doke T, Hasebe N, Kikuchi J, Kobayashi MN, et al., Electron and ion spectrometer onboard the Nozomi spacecraft and its initial results in interplanetary space, *Astropart. Phys.* 17, 263–278 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0927-6505\(01\)00163-3](https://doi.org/10.1016/S0927-6505(01)00163-3)
24. Kissel J, Krueger FR, Silén J, Clark BC, The cometary and interstellar dust analyzer at comet 81P/Wild 2, *Science* 304, 1774–1776 (2004). <https://doi.org/10.1126/science.1098836>
25. Reynolds E, Chiu M, Farquhar R, Dunham D, The CONTOUR discovery mission, in 1999 IEEE Aerospace Conference, Snowmass, CO, 7 Mar 1999.
26. Balsiger H, Altwegg K, Bochsler P, Eberhardt P, Fischer J, et al., Rosina – Rosetta orbiter spectrometer for ion and neutral analysis, *Space Sci. Rev.* 128, 745–801 (2007). <https://doi.org/10.1007/s11214-006-8335-3>
27. Roy LL, Altwegg K, Balsiger H, Berthelier JJ, Bieler A, et al., Inventory of the volatiles on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/ROSINA, *Astron. Astrophys.* 583, A1 (2015). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526450>

28. Schroeder IRHG, Altwegg K, Balsiger H, Berthelier JJ, Combi MR, et al., A comparison between the two lobes of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko based on D/H ratios in H₂O measured with the Rosetta/ROSINA DFMS, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 489, 4734-4740 (2019). <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2482>
29. Schroeder IRHG, Altwegg K, Balsiger H, Berthelier JJ, Keyser JD, et al., ¹⁶O/¹⁸O ratio in water in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko measured with the Rosetta/ROSINA double-focusing mass spectrometer, *Astron. Astrophys.* 630, A29 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833806>
30. Kissel J, Altwegg K, Clark BC, Colangeli L, Cottin H, et al., Cosima - high resolution time-of-flight secondary ion mass spectrometer for the analysis of cometary dust particles onboard Rosetta, *Space Sci. Rev.* 128, 823-867 (2007). <https://doi.org/10.1007/s11214-006-9083-0>
31. Paquette JA, Fray N, Bardyn A, Engrand C, Alexander CMOD, et al., D/H in the refractory organics of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko measured by *Rosetta*/COSIMA, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 504, 4940-4951 (2021). <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1028>
32. Bardyn A, Baklouti D, Cottin H, Fray N, Briois C, et al., Carbon-rich dust in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko measured by COSIMA/Rosetta, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 469, S712-S722 (2017). <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2640>
33. Morse A, Mousis O, Sheridan S, Morgan G, Andrews D, et al., Low CO/CO₂ ratios of comet 67P measured at the Abydos landing site by the Ptolemy mass spectrometer, *Astron. Astrophys.* 583, A42 (2015). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526624>
34. Leseigneur G, Bredehöft JH, Gautier T, Giri C, Krüger H, et al., ESA's cometary mission Rosetta—re-characterization of the COSAC mass spectrometry results, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 61, e202201925 (2022). <https://doi.org/10.1002/anie.202201925>
35. Cannon KM, Sutter B, Ming DW, Boynton WV, Quinn R, Perchlorate induced low temperature carbonate decomposition in the Mars Phoenix Thermal and Evolved Gas Analyzer (TEGA), *Geophys. Res. Lett.* 39 (2012). <https://doi.org/10.1029/2012GL051952>
36. Sutter B, Boynton WV, Ming DW, Niles PB, Morris RV, et al., The detection of carbonate in the martian soil at the Phoenix Landing site: a laboratory investigation and comparison with the Thermal and Evolved Gas Analyzer (TEGA) data, *Icarus.* 218, 290-296 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.12.002>
37. Darrach MR, Chutjian A, Bornstein BJ, Croonquist AP, Garkanian V, et al., Trace chemical and major constituents measurements of the International Space Station atmosphere by the vehicle cabin atmosphere monitor, in 42nd International Conference on Environmental Systems, San Diego, CA, 15-19 Jul 2012.
38. Mahaffy PR, Webster CR, Cabane M, Conrad PG, Coll P, et al., The sample analysis at mars investigation and instrument suite, *Space Sci. Rev.* 170, 401-478 (2012). <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9879-z>

39. Wong MH, Atreya SK, Mahaffy PN, Franz HB, Malespin C, et al., Isotopes of nitrogen on Mars: atmospheric measurements by Curiosity's mass spectrometer, *Geophys. Res. Lett.* 40, 6033–6037 (2013). <https://doi.org/10.1002/2013GL057840>
40. Atreya SK, Trainer MG, Franz HB, Wong MH, Manning HLK, et al., Primordial argon isotope fractionation in the atmosphere of Mars measured by the SAM instrument on Curiosity and implications for atmospheric loss, *Geophys. Res. Lett.* 40, 5605–5609 (2013). <https://doi.org/10.1002/2013GL057763>
41. Webster CR, Mahaffy PR, Determining the local abundance of Martian methane and its $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and D/H isotopic ratios for comparison with related gas and soil analysis on the 2011 Mars Science Laboratory (MSL) mission, *Planet. Space Sci.* 59, 271–283 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.08.021>
42. Mahaffy PR, Richard Hodges R, Benna M, King T, Arvey R, et al., The neutral mass spectrometer on the Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer mission, *Space Sci. Rev.* 185, 27–61 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0043-9>
43. Benna M, Mahaffy PR, Halekas JS, Elphic RC, Delory GT, Variability of helium, neon, and argon in the lunar exosphere as observed by the LADEE NMS instrument, *Geophys. Res. Lett.* 42, 3723–3729 (2015). <https://doi.org/10.1002/2015GL064120>
44. Mahaffy PR, Benna M, King T, Harpold DN, Arvey R, et al., The neutral gas and ion mass spectrometer on the Mars Atmosphere and Volatile Evolution mission, *Space Sci. Rev.* 195, 49–73 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0091-1>
45. Bougher SW, Roeten KJ, Olsen K, Mahaffy PR, Benna M, The structure and variability of Mars dayside thermosphere from MAVEN NGIMS and IUVS measurements: seasonal and solar activity trends in scale heights and temperatures, *J. Geophys. Res. Space Phys.* 122, 1296–1313 (2016). <https://doi.org/10.1002/2016JA023454>
46. England SL, Liu G, Yiğit E, Mahaffy PR, Elrod M, et al., MAVEN NGIMS observations of atmospheric gravity waves in the Martian thermosphere, *J. Geophys. Res. Space Phys.* 122, 2310–2335 (2016). <https://doi.org/10.1002/2016JA023475>
47. Bayer T, Bittner M, Buffington B, Dubos G, Ferguson E, et al., Europa Clipper mission: preliminary design report, in 2019 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2–9 Mar 2019.
48. Föhn M, Galli A, Vorburger A, Tulej M, Lasi D, et al., Description of the mass spectrometer for the Jupiter icy moons explorer mission, in 2021 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 6–13 Mar 2021.
49. Arevalo R, Brinckerhoff W, Amerom F, Danell R, Pinnick V, et al., Design and demonstration of the Mars organic molecule analyzer (MOMA) on the ExoMars 2018 rover, in 2015 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 7–14 Mar 2015.

Author Information

홍익선 ishong@cnu.ac.kr



충남대학교에서 2014년 천문우주과학 석사 학위를 취득하고, 현재 동 대학교에서 우주지질학 박사과정에 재학 중이다. 한국형 달탐사 위성의 탑재체인 고해상도 카메라의 촬영계획 결정 알고리즘 개발에 참여하였으며, 현재는 원격탐사 수치 및 영상자료를 활용하여 과거

화산 활동의 흔적을 가지고 있는 달의 지형과 미래 인류 기지로 사용할 수 있는 달 동굴에 대한 연구를 하고 있다. 또한 달 표면 아래의 물리적 특성을 이해하기 위해 중력장을 이용한 달 내부의 지구물리학적 접근도 시도하고 있다.

이 유 euyiyu@cnu.ac.kr



미국 콜로라도 대학(University of Colorado at Boulder)에서 물리학 박사(1994)를 취득하였고, 그 후 LASP(Laboratory for Atmospheric and Space Physics)에서 Research Associate로 근무하다가 1997년부터는 충남대학교 천문우주과학과(대학원 우주지질학과)에서 교수로

재임 중이다. 다양한 자연현상에 관한 호기심으로 달과 화성에 인류의 미래 기지 조성과 자원 탐사를 위한 기초연구로 용암동굴, 화산 및 절벽 등 지질학적 연구를 하고 있으며, 위성 원격탐사 자료를 활용하여 지구 해양 및 대기 변화의 근원이 되는 열의 기원 등을 연구하고 있다.

이진근 jgrhee@younginace.com



한국과학기술원에서 우리별 3호의 과학임무 탑재체와 과학기술위성 1호의 원자외선분광기 개발에 참여하였고 2007년 물리학 박사 학위를 취득하였다. 국내 최초로 유도결합플라즈마 질량분석기 개발을 진행한 경험을 바탕으로 2018년부터 영인에이스를 설립하여 사중극자

기반의 질량분석기 개발을 주도하고 있다.

이남석 nslee@younginace.com



서강대학교 물리학과에서 물리학 박사 학위를 취득하였다. 1990년부터 삼성전자 책임연구원 그리고 삼성SDI에서 수석연구원으로 재직하였으며, 2018년부터 영인에이스 연구소장으로 근무하고 있다. 영인에이스 분석기술연구소에서

질량분석장치 개발의 총괄책임자 역할을 담당하고 있다.

강성원 swkang@younginace.com



한국과학기술원 물리학과에서 물리학 박사 학위를 취득하였다. 2018년부터 영인에이스 분석기술연구소에서 책임연구원으로 근무하고 있으며, 유도결합 질량분석기 개발 업무를 수행 중에 있다.

김선태 skim@younginace.com



서울대학교 물리천문학부에서 물리학 박사 학위를 취득하였다. 2018년부터 서울대학교 차세대융합기술연구원 및 응용물리연구소에서 박사후연구원 과정을 수행하였다. 2021년부터 영인에이스 분석기술연구소에서 선임연구원으로 근무하고 있으며, 질량분석기 개발 업무를

수행 중에 있다.

Author Information

장규하 kyuha@kaeri.re.kr



박사 학위(서울대학교 물리학과) 이후 2009년부터 한국원자력연구원에서 재직하고 있다. 양자 광학 연구부 선임연구원을 거쳐 현재는 초고속 방사선 연구실에서 책임연구원으로 연구 활동을 하고 있다. 석·박사 학위 때는 광결정, 진공 전자 소자, 반도체 가공 등의 분야에서 연구 경험을 하였으며, 연구소에서는 테라헤르츠 자유전자레이저, 전자선 조사장치, 고출력 레이저 가속 표적 개발 등에 참여하였다. 최근에는 초고속 전자 회절 장치 개발 및 응용 실험에 참여하고 있다.

최정림 crchoi@chungbuk.ac.kr



부산대학교 물리학과에서 박사를 취득하였고, 현재 충북대학교 천문우주학과에서 우주플라즈마연구를 하고 있다. 차세대 중형 위성 3호의 위성용 자력계 제작 및 magnetic cleanliness program에도 참여하고 있다.

민경욱 kwmin@kaist.ac.kr



미국 프린스턴 대학에서 천체 물리학 박사 학위를 취득하였으며, 1986년부터 한국과학기술원 교수로 재직하다 2021년에 정년 퇴직하여 현재 동 대학의 명예교수로 강의와 연구를 계속하고 있다. 우리나라 최초의 과학 위성인 과학기술위성 1호의 탑재체 총괄책임자로서 원자외선 분광기(FIMS) 및 우주물리 패키지(SPP)의 개발을 주도하였다.

정종일 iapetus85@gmail.com



충남대학교 천문우주학과에서 2014년 석사 학위를 취득하고, 현재 충남대학교 우주지질학과 박사과정에 재학 중이다. 인류가 거주할 수 있는 화성 동굴 탐사에 관하여 연구하였으며, 현재는 우주선 중성자 모니터를 활용하여 태양의 특성 및 우주선 및 고에너지 입자가 지구 대기에 미치는 영향에 관하여 관심을 가지고 있다. 최근에는 우주선 중성자 모니터의 GLE 이벤트와 연관된 태양 고에너지 입자 이벤트의 원소 조성 특징에 관한 연구를 진행하고 있다. 또한 대전 우주선 중성자 모니터와 남극 장보고 과학기지의 우주선 중성자 모니터를 운영 및 관리하고 있다.