총설

소행성 채광을 위한 우주 산업 및 기술 동향

최요순*

부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 교수

Review of Space Industry and Technology for Asteroid Mining

Yosoon Choi*

Professor, Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

*Corresponding Author. Yosoon Choi, energy@pknu.ac.kr, Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

Received

20 December 2021

Final version Received

24 December 2021

Accepted

27 December 2021

Abstract

Interest in the new space industry is growing in Korea due to the lifting of the US-Korea missile guidelines and the development of the Nuri launch vehicle. This paper reviews the space industry and the technology for asteroid mining. The definition and classification system of asteroids are explained, and first-generation companies in the asteroid mining industry and start-ups established after 2010 are introduced. The countries of the relevant companies are becoming more diversified, and the business areas are expanding to include not only space telescopes and space launch vehicles but also robotic mining equipment, space manufacturing and mineral processing, and the construction of space gas stations. The trends of exploration, transportation, and the energy and mining technologies necessary for asteroid mining are summarized, and issues related to international laws and economic feasibility are presented. Continuous investment and efforts are required to develop technologies and improve international laws for asteroid mining.

Key words : Asteroid mining, Space industry, Exploration, Transportation, Energy

요약

한미 미사일 지침 해제와 누리호 발사체 개발로 인해 국내에서도 새로운 우주 산업에 관한 관심이 높아지고 있다. 본 논문에서는 소행성 채광을 위한 우주 산업 및 기술 동향을 정리하였다. 소행성의 정의와 분류 체계에 관해 설명하였고, 소행성 채광 분야의 1세대 기업들과 2010년 이후 설립된 신생 기업들을 소개하였다. 기업들의 국가가 다변화되고 있으며, 사업 분야도 우주 망원경과 우주 발사체뿐만 아니라 로봇 채광장비, 우주에서의 제조 및 자원처리 기술, 우주 주유소 구축 등으로 확대되고 있음을 확인할 수 있었다. 소행성 채광에 필요한 탐사, 운송, 에너지, 채광 기술의 동향을 정리하였고, 국제적 법률 및 규정 관련 이슈와 경제성 관련 이슈를 제시하였다. 소행성 채광을 위한 기술 개발과 국제적인 법률 정비를 위해 지속적인 투자와 노력이 필요할 것으로 판단된다.

주요어 : 소행성 채광, 우주 산업, 탐사, 운송, 에너지

서 론

2021년 5월 21일 미국 워싱턴 D.C. 백악관에서 열린 한미정상회담에서 대한민국의 문재인 대통령과 미국의 조

바이든 대통령은 미사일의 중량과 사거리를 제한하는 한미 미사일 지침(missile guidelines)의 해제에 합의하였다. 이로써 우리나라는 미사일 주권을 완전히 확보하게 되었으며, 연료, 사거리, 탄두중량, 용도, 발사 플랫폼 등에 대한

계약 없이 우주 로켓 기술을 개발 및 활용할 수 있게 되었다(Namuwiki, 2021). 한미 미사일 지침 해제는 외교/안보 측면에서 자주국방의 권리를 되찾았다는 큰 의미가 있다. 동시에 우리나라의 우주 산업과 기술이 한 단계 도약할 기회를 제공했다고 볼 수 있다.

2021년 10월 21일 우리나라는 국내 독자개발 발사체의 첫 비행시험으로서 누리호를 1차 발사하였다. 발사된 누리호는 이륙 후 1단 분리, 페어링 분리, 2단 분리 등 전 비행 과정에서 정상적으로 작동하였다. 3단 엔진이 조기 연소 종료되어 위성 모사체가 지구 저궤도에 안착하지는 못했으나 한국형발사체 개발에 필요한 핵심기술을 확보했음을 확인할 수 있었다(MSIT, 2021). 우리나라는 최근 NASA의 유인 달탐사 프로젝트인 아르테미스(Artemis) 미션(NASA, 2021a)에 참여하기 위한 약정서에 과기정통부 장관이 서명하였으며, NASA와의 국제 협력으로 ‘달 궤도선(KPLO)’를 2022년 8월에 발사할 예정이다.

이미 미국, 러시아, EU, 중국, 일본, 인도 등 우주 강국들은 우주의 생성 기원과 물리/화학적 특성을 이해하기 위한 다수의 우주과학 프로그램을 운영해왔다. 또한, 방송통신, 원격탐사, 기상관측, 내비게이션, 군사/안보 분야의 인공위성 등 상업적 우주 활용을 위한 산업과 기술을 발전시켰다. 특히, 미국은 1980년대부터 ‘새로운 우주(new space)’라는 용어를 사용하며 우주 산업을 선도하고 있다(Jakhu *et al.*, 2017). Robert Bigelow, Jeff Bezos, Elon Musk, Paul Allen 등 다국적 기업의 부호들은 신생 우주 기업들을 설립하여 우주 관광, 저비용 우주선 등 새로운 우주 산업을 개척해 나가고 있다(Table 1).

새로운 우주 산업에 관한 관심이 높아지고 있는 가운데 최근에는 소행성에서의 자원개발을 위한 우주 채광(space mining) 또는 소행성 채광(asteroid mining) 기술이 주목을 받고 있다. 소행성 채광이란 우주에서의 제조(manufacturing), 거주(habitation), 농업(farming), 식민지 건설(colonization) 등에 필요한 재료를 소행성에서 채굴하는 것을 의미한다.

소행성에서 채굴할 수 있는 수소와 메탄과 같은 휘발성 물질은 지구와 지구 근처의 행성, 소행성, 혜성, 위성 간의 이동에 필요한 로켓 우주선의 연료를 생산하는데 사용될 수 있으며, 톨륨, 스칸듐, 홀뮴과 같은 희토류 금속은 우주 식민지의 전력 공급에 필요한 태양전지를 우주에서 제조하는데 사용될 수 있다(360 Market Updates, 2020).

Zancy *et al.*(2013)은 소행성 채광을 통해 확보할 수 있는 자원들을 물, 광물, 건자재, 레골리스(regolith)로 구분하였다. 이중 물은 우주에서 인간의 생명 유지와 농업에 필수적인 자원이며, 원자력 발전 등 전력 생산에도 사용된다. 광물은 지구상에서 얻기 힘든 희유광물로서 귀금속 등이 포함된다. 건자재는 3D 프린팅이 가능한 재료로서 우주기지 건설을 위해 사용되며, 레골리스는 암석을 덮고 있는 불균일하고 퍼석퍼석한 물질의 층으로서 우주 농사를 짓기 위한 토양으로 사용될 수 있다.

소행성 채광을 통해 확보된 광물은 우주에서 직접 활용하는 것뿐만 아니라 지구로 가지고 오는 방안도 검토되고 있다(Garcia-del-Real *et al.*, 2020). 오늘날 지구상에서 경제적으로 채광할 수 있는 희유광물 자원은 점차 고갈되고 있다. 탄소중립 정책에 따라 청정하고 재생 가능한 에너지로의 전환이 가속화되면서 풍력터빈, 태양전지, 이차전지 생산에 필요한 희유광물의 소비가 증가하고 있어 희유광물 자원의 고갈은 더욱 가속화될 전망이다(Feinman, 2014). 따라서 소행성 채광은 지구자원 고갈 문제의 해결을 위한 하나의 방안이 될 수 있다.

본 논문에서는 한미 미사일 지침 해제에 따라 국내에서도 새로운 우주 산업에 관한 관심이 높아지고 있는 시점에서 소행성 채광을 위한 우주 산업 및 기술 동향을 정리하였다. 2장에서는 소행성의 정의와 분류 체계에 관해 설명하였고, 3장에서는 Planetary Resources, Deep Space Industries, Shackleton Energy Company와 같은 소행성 채광 분야의 1세대 기업들과 신생 기업을 중심으로 산업 동향을 정리하였다. 4장에서는 소행성 채광에 필요한 탐사, 운송, 에너지,

Table 1. Space companies founded by the wealthy individuals of global corporations in the United States

Company name	Founder	Founding year	Headquarters location	Business area	Reference
Bigelow Aerospace	Robert Bigelow	1998	Las Vegas, Nevada, USA	Manufacturing and developing scalable space station modules	Bigelow Aerospace, 2021
Blue Origin	Jeff Bezos	2000	Kent, Washington, USA	Reusable launch vehicle, Space travel	Blue Origin, 2021
SpaceX	Elon Musk	2002	Hawthorn, California, USA	Reusable launch vehicle	SpaceX, 2021
Stratolaunch Systems	Paul Allen	2011	Seattle, Washington, USA	New aerospace transport system	Stratolaunch Systems, 2021

채광 기술의 동향을 정리하였으며, 5장에서는 국제적 법률 및 규정 관련 이슈와 경제성 관련 이슈를 제시하였다.

소행성의 정의와 분류

소행성이란 목성 궤도 및 그 안쪽에서 태양 주위를 공전하고 있는 행성(planet)보다 작은 천체이다(Fig. 1). 일부 소행성은 그 자신의 위성을 거느리고 있으며 가스로 된 코마나 꼬리를 가지지 않는다는 점에서 혜성(comet)과 구분된다(Wikipedia, 2021a). 드물게 소행성이 지구에 떨어지는 경우 이를 운석(meteor)이라고 한다. 1801년 주세페 피아치에 의해 세레스가 처음 발견된 이래로, 팔라스, 유노, 베스타가 차례로 발견되었으며, 현재 607,011 개의 소행성에 공식적으로 번호가 부여되었다(Minor Planet Center, 2021). 각 소행성은 다양한 모양과 크기로 존재한다. 일례로서 Fig. 2는 유럽 남방 천문대 망원경을 사용하여 해왕성 너머 30~55AU 사이 지역에서 발견된 최초의 탄소가 풍부한 소행성인 2004 EW95의 모습을 보여준다. 소행성은 다양한

광물로 구성되어 있으며, 일부 소행성은 귀금속 등 희유광물의 함량이 높을 것으로 추정된다(Garcia-del-Real *et al.*, 2020).

현재까지 발견된 소행성 대다수는 ‘소행성 벨트’로 알려진 궤도를 공전하고 있다. 소행성 중 근일점거리(태양 주위를 공전하는 천체가 태양과 가장 가까워질 때 태양과 천체 간의 거리)가 1.3AU 이내인 것을 근지구천체(near-Earth objects, NEOs) 또는 근거리 소행성(near-Earth asteroids, NEAs)이라고 한다. NEAs는 지구에 너무 가까워지면 가끔 소행성 충돌 우려의 원인이 되기도 한다. 이러한 관점에서는 소행성을 potentially hazardous asteroids(PHAs)로 지칭한다.

NEAs는 공전 궤도에 따라 Fig. 3과 같이 세 가지 그룹으로 분류된다. Amor 그룹(발견된 소행성의 32%)과 Apollo 그룹(발견된 소행성의 62%)의 NEAs는 1년에 2번씩 지구의 공전 궤도와 소행성의 공전 궤도가 교차한다. 따라서 이들 그룹의 NEAs는 충돌 가능성이 있는 위험한 소행성(PHAs)으로 간주한다. Amor 그룹과 Apollo 그룹의 NEAs는 각각 원형 궤도와 타원 궤도를 따라 공전한다. 이 중 원형

Fig. 1. Positions of asteroids (yellow dots) and comets (sunward-pointing wedges) on January 1, 2018. (a) View from above the ecliptic plane. (b) View from the edge of the ecliptic plane. The orbits and positions of the planets Mercury, Venus, Earth, Mars, and Jupiter are also shown (NASA JPL, 2018).

Fig. 2. View of the first carbon-rich asteroid (2004 EW95) found beyond Neptune using the European Southern Observatory telescopes (Kornmesser, 2018).

Fig. 3. Classification of near-Earth asteroids (NEAs) according to their orbits. The asteroid belt and the orbits of Earth and Mars are also shown (ESA, 2013).

궤도를 따라 공전하는 Amor 그룹의 NEAs는 지구에 접근하는 시기를 예측하는 것이 상대적으로 수월하므로 소행성 채광의 주관심대상이 될 수 있다. Aten 그룹(발견된 소행성의 6%)의 NEAs는 지구보다 바깥쪽 궤도에서 태양을 중심으로 공전한다.

Fig. 4는 현재까지 발견된 NEAs의 누적 수를 보여준다. 현재(2021년 12월 14일 기준)까지 27,803개의 NEAs가 발견되었으며, 이중 지름이 140 m보다 큰 것(NEA-140 m)은 9,949개, 지름이 1 km보다 큰 것(NEA-1 km)은 890개이다(NASA JPL, 2021a). 발견된 NEAs를 크기에 따라 몇 개의 그룹으로 분류한 뒤 그룹별 총수를 나타내면 Fig. 5와 같다. 지름이 30~100 m 정도인 NEAs가 가장 많고, 0~30 m 크기의 NEAs가 두 번째로 많다(NASA JPL, 2021b).

소행성은 색상, 모양, 구성성분에 따라 C형, S형, M형으로 분류된다. C형 소행성은 대부분 탄소 성분으로 구성되며, 짙은 회색 또는 검은색 색상을 띤다. 현재까지 발견된 소행성의 75% 이상이 C형 소행성에 해당한다(Binzel *et al.*, 1989). C형 소행성에는 탄소 이외에도 물을 포함하고

있을 수 있어 우주 산업에 있어 매우 중요하다. 물은 우주에서 인간의 생명 유지를 위해 필수적인 자원이며, 농업, 전력 생산 등에도 중요하기 때문이다(NASA, 2013). S형 소행성은 대부분 NEAs에 해당하며, 적색과 녹색의 색상을 띤다. 주로 규산염 광물로 구성되어 있으며, 일부는 금, 백금, 로듐과 같은 희유광물을 포함하고 있어 소행성 채광에서 중요한 관심 대상이다. S형 소행성 전체 소행성의 약 17%를 차지한다(Wikipedia, 2021b). M형 소행성은 S형 소행성보다 희귀한 소행성으로서 구성성분이 부분적으로만 알려져 있다. M형 소행성은 소행성 벨트의 중간 지역에서 발견되고 있으며, 붉은색 색상을 띤다. 금속 성분이 많이 포함되어 있으며, 특히 니켈과 철의 함량이 높은 것으로 추정된다(KASSI, 2021).

산업 동향

미국을 중심으로 소행성 채광 분야의 기업들이 설립되어 새로운 우주 산업을 준비하고 있다. 초기에 설립된 대표적인 두 개의 기업은 Planetary Resources(현재 ConsenSys)와 Deep Space Industries(현재 Bradford Space)였다. 이들은 주로 C형 소행성에서 물을 확보하고, 귀금속을 채광하는 것에 목표를 두었다. 소행성 채광과 유사한 개념으로 달 채광(Moon mining)을 통해 우주에서의 식수와 연료를 확보하겠다는 목표로 설립된 기업으로 Shackleton Energy Company가 있다.

Planetary Resources

Planetary Resources는 물과 귀금속을 포함하고 있는 소행성을 탐사 및 채광할 수 있는 우주선을 개발하는 것을 목표로 2009년 설립되었다. 설립 당시에는 Arkyd Astronautics라는 이름이었으나 2012년 사명을 Planetary Resources로 변경하였다. 지구 및 천문 관측을 위한 저비용 소형(30~50 kg) 우주 망원경을 개발에 주력했으며, 지구 근처 소행성을 탐지하는데 사용할 수 있는 Arkyd-100 시리즈의 개발을 추진하였다(Fig. 6). Arkyd-100은 지상 통신을 위해 레이저 광학 시스템을 사용하여 기존 RF 안테나를 탑재한 우주 망원경보다 부피와 중량을 줄일 수 있었다. Arkyd-100의 비행 테스트를 위해 두 개의 인공위성을 2015년과 2018년 궤도에 성공적으로 발사하였다. 2015년에 발사된 Arkyd-3 Reflight(A3R)는 부피 1리터, 질량 1.33kg을 넘지 않는 초소형 인공위성(cubesat)이었다. 2018년에는 Arkyd-100 우주선의 자세 제어, 전원 및 통신 시스템, 사진 표시 및 재전송 시스템을 테스트하기 위해 A3R의 두 배 크기인 Arkyd-6(A6)을 발사하였다(Wikipedia, 2021c). Arkyd-100 이외에도 지구와 달 사이를 지나가는 소행성을 탐지하기 위한

Fig. 4. Cumulative number of known near-Earth asteroids (NEAs) versus time (NASA JPL, 2021a).

Fig. 5. Current total number of known near-Earth asteroids (NEAs) grouped according to their estimated sizes (NASA JPL, 2021b).

Arkyd-200 우주 망원경과 3D 프린터를 이용해 제작한 Arkyd-300 우주 망원경(Fig. 7)의 개발을 시도하였다.

Planetary Resources는 거의 10년 동안 우주선 설계에서 우주 탐사에 이르기까지 기술 혁신을 주도하며 소행성 채광 분야의 대표적인 기업으로 부상했으나, 2018년 금융위기로 인한 재정 악화로 블록체인 소프트웨어 기업인 ConsenSys에 인수합병 되었다. Planetary Resources를 인수한 ConsenSys는 블록체인 기술을 적용하여 누구나 자유롭게 위성 궤도의 독립적인 기록을 생성하고 활용할 수 있는 플랫폼 TruSat을 개발하여 새로운 우주 산업을 추진하였다(Khawaja, 2019). 그러나 ConsenSys는 2020년 Planetary Resources가 소유했던 모든 지적 재산을 포기했으며, 하드웨어 자산은 모두 경매에 부쳤다.

Deep Space Industries

Deep Space Industries는 2013년에 설립된 비상장 기업

Fig. 6. Unveiling of the revolutionary 3D-printed space telescope (Arkyd-300) from Planetary Resources (Jurvetsen, 2014).

Fig. 7. Unveiling the revolutionary 3D-printed space telescope (Arkyd-300) from Planetary Resources (Jurvetsen, 2014).

으로 소행성 탐사 및 채광용 우주선을 개발하는 것을 목표로 하였다. 기업 설립 후 초기 3년간은 우주 자원개발의 타당성을 조사하였고, 2015년부터 벤처 자금을 받아 자체적으로 지구 저궤도에서 우주 먼 곳까지 이동할 수 있는 추진 시스템과 우주선의 개발을 시작하였다. 또한, 물을 추진제로 사용한 발사 안전 전열 추진 시스템(launch-safe electro-thermal propulsion system)을 개발하였다(Fig. 8). 물을 추진제로 사용할 수 있는 기술은 소행성 채광을 통해 확보한 물을 우주선의 연료로 공급할 수 있다는 측면에서 매우 중요하다. Deep Space Industries에서 개발한 Xplorer는 자체 추진 시스템을 사용하여 지구 저궤도, 정지 궤도, 지구 근처 소행성, 달 궤도, 금성 또는 화성과 같은 깊은 우주까지 이동할 수 있도록 제작되었다(Wikipedia, 2021d).

Deep Space Industries는 2016년에 세계 최초로 소행성 채광 임무를 수행할 Prospector-1 우주선의 개발 계획을 발표했다(Fig. 9). Prospector-1은 비용과 성능 사이에서 이상적인 균형을 이루는 소형 우주선(연료 주입시 50kg)으로, 지구 근처의 소행성을 향해 날아가 자원탐사 임무를 수행하는 것을 목표로 설계되었다(Bonin *et al.*, 2016). Deep Space Industries는 NASA와 소규모 계약을 다수 체결하였으나, 경영악화로 2019년 Bradford Space에 인수되었다.

Fig. 8. Water-based thruster developed by Deep Space Industries (Steve Jurvetson, 2018).

Fig. 9. Prospector-1—the first commercial interplanetary mining mission (Deep Space Industries, 2016).

Shackleton Energy Company

Shackleton Energy Company는 달 채광에 필요한 장비와 기술을 개발하기 위해 2007년 설립되었다. 2011년 달 탐사 계획을 발표하고, 2021년 3월까지 인간을 달에 보낼 수 있을 것으로 예상했다. 그러나 이 프로젝트는 필요한 자금 확보에 실패하여 계획대로 진행되지 못했다. Shackleton Energy Company은 달에서 우주선의 연료와 우주기지의 식수 공급에 필요한 물을 확보하기 위해 Table 2와 같이 단계를 구분하여 프로젝트를 추진하고자 하였다(Shackleton Energy Company, 2021).

우주 자원개발 분야 신생 기업

Planetary Resources, Deep Space Industries, Shackleton Energy Company 이외에도 전 세계적으로 우주 자원개발 분야에 관심을 두고 설립된 신생 기업들은 Table 3과 같다. 2010년 이후 설립된 이들 신생 기업들은 현재에도 소행성 채광 등 우주 자원개발에 필요한 발사체, 로봇, 채광, 물류, 우주 망원경 등의 기술을 개발하고 있다. 신생 기업 중 Moon Express, TransAstronautica Corporation, OffWorld, SpaceFab.US, CisLunar Industries, Orbit Fab은 미국에 본사를 두고 있으며, ispace는 일본, Asteroid Mining Corporation은 영국, Origin Space는 중국에 본사를 두고 있다.

Table 2. Moon mining program proposed by the Shackleton Energy Company (2021)

Phase	Mission	Objective
1	Preliminary Design and Mission Architecture	Building up an industrial scale program in space that provides customers with all the fuel and water necessary to go explore
2	Robotic Prospecting and Mapping	Mapping and characterization of target Lunar surface environment
3	Critical Design and Infrastructure Buildout	Building infrastructure from Earth all the way to the Moon, and testing critical systems, procedures and operations
4-1	Orbital Operations and Lunar Deployment	Setting up the base of operations on the Moon before the crew arrives
4-2	Lunar Operations and Crew Deployment	Deploying all the modules and crew for the Moonbase
4-3	Supply Chain Operations and Sales	Starting of sales and deliveries of fuel in Low Earth Orbit and on the Moon to customers

Table 3. Start-ups for space (asteroid) mining established since 2010

Company name	Founder	Founding year	Headquarters location	Business area	Reference
Moon Express	Robert D. Richards, Naveen Jain, Barney Pell	2010	Cape Canaveral, Florida, USA	Commercial lunar robotic transportation and data services	Moon Express, 2021
ispace	Takeshi Hakamada	2010	Tokyo, Japan	Robotic lunar landers and rovers	ispace, 2021
TransAstronautica Corporation	Joel C. Sercel	2015	Lake View Terrace, California, USA	Orbital logistics services and space resources mining	TransAstronautica Corporation, 2021
Asteroid Mining Corporation	Mitch Hunter-Scullion	2016	Scotland, UK	Conducting asteroid mining missions	Asteroid Mining Corporation, 2021
OffWorld	James Murray	2016	Pasadena, California, USA	Universal industrial robots	OffWorld, 2021
SpaceFab.US	Randy Chung, Sean League, Yen Choi	2016	Laguna Niguel, California, USA	Space telescope	SpaceFab.US, 2021
CisLunar Industries	Jan Walter Schroeder, Gary Calnan, Toby JD Mould	2017	Denver, Colorado, USA	In-space metal processing and manufacturing	CisLunar Industries, 2021
Origin Space	Meng Su, Tianhong Yu	2017	Nanjing, China	Space telescope	Origin Space, 2021
Orbit Fab	Daniel Faber, Jeremy Schiel	2018	San Francisco, California, USA	Gas stations in space	Orbit Fab, 2021

신생 기업 대부분 소행성 채광을 포함한 우주 자원개발 분야에 필요한 발사체, 우주 망원경, 로봇과 관련한 기술 개발을 수행하고 있다. 영국 Asteroid Mining Corporation은 실제 소행성 채광을 수행하는 것을 중심으로 사업 모델을 가지고 있으며, 비교적 최근에 설립된 CisLunar Industries은 우주에서의 제조 및 자원처리 기술을 개발하고 있다. 또한, Orbit Fab은 우주 주유소 구축에 필요한 기술을 개발하고 있다.

시장전망

시장조사 기관인 360 Market Updates(2020)은 전 세계 우주 자원개발 시장의 규모가 2021년 1억 5천만 달러에서 2026년 5억 9천만 달러로 연간 22.4% 성장할 것으로 예측하였다. 장기 예측으로는 Mordor Intelligence(2021)가 전 세계 우주 자원개발 시장의 규모를 2035년 73억 달러로 전망하였다. 지역적으로 볼 때 현재는 북미 시장이 53% 점유율로 가장 높은 비중을 차지하지만, 앞으로는 아시아 태평양 지역의 시장 규모가 가장 빠르게 성장할 것으로 예상하였다. 중국, 일본, 인도 등 아시아 태평양 지역의 주요국들이 소행성 채광 분야에 관심을 두기 시작했기 때문이다. 특히, 중국은 우주 산업을 주도하려는 미국을 견제하기 위해 국영 기업을 중심으로 소행성 채광 기술 경쟁에 적극적으로 참여하고 있다. 인도의 경우에도 인도우주연구기구(ISRO)를 중심으로 헬륨-3가 풍부한 달의 먼지를 채광하여 에너지를 생산한 후 지구로 가지고 오는 계획을 수립하였다.

기술 동향

탐사기술

현재까지 발견된 그리고 향후 발견될 수많은 NEAs 중 우주 자원개발의 가능성이 있는 후보자를 특정(targeting)하는 것은 쉬운 일이 아니다. 우주 자원개발이 가능하기 위해서는 적절한 크기의 NEAs가 지구로부터의 접근과 지구로의 귀환이 가능할 정도의 적절한 궤도에서 이동해야 하며, 동시에 물을 포함한 유용한 자원의 부존 가능성이 있어야 하기 때문이다. 부존 가능성이 있더라도 귀금속 등 희유광물의 부존 위치와 특성, 함유율을 알 수 없으면 소행성 채광 사업을 계속 진행할지에 관한 의사결정을 내리기 어려울 것이다.

소행성의 발견, 궤적에 따른 분류, 자원의 부존 가능성 평가, 희유광물의 부존 위치와 특성 분석, 사업의 진행 여부에 관한 의사결정을 지원하기 위해 우주 망원경과 인공위성을 이용한 원격탐사 기술이 사용되고 있다. 최근 새로 알려진 NEAs는 대부분 NASA의 적외선 파장 우주 망원경을 이용한 NEOWISE 관측 프로그램(NASA JPL, 2021c)을 통해

발견되고 있으며 미래에는 더 많은 NEAs의 탐지가 가능할 것이다. 유럽우주국에서도 near-Earth objects coordination centre를 운영하면서 NEAs의 발견과 추적과 관련한 활동을 진행하고 있다(ESA, 2021). Fig. 10은 유럽 남방 천문대에서 탐사한 소행성(25143)의 표면 지형 모델을 보여준다. 유럽 남방 천문대에서는 이 소행성이 구역별로 밀도가 다르다는 것을 발견하였다(ESO, 2014).

소행성 채광을 위한 실제 우주선을 보내기에 앞서 소형 인공위성(탐사선)을 보내 물과 유용 광물의 부존 가능성을 탐사하는 노력도 계속되고 있다. 일본항공우주국(JAXA)에서 2014년 발사한 하야부사-2호(Hayabusa 2, Fig. 11)는 2018년 C형 소행성 ‘류구’에 도착하였으며, 지구에서 3억 km(1억 8800만 마일) 떨어진 곳에서 샘플을 가지고 2020년 지구로 귀환하였다(JAXA, 2021). 하야부사-2호의 임무 성공은 소행성 채광 산업에 대한 기대를 증폭시켰다. 미국 NASA에서 2016년 발사한 소형 탐사선 OSIRIS-REx도 2020년 C형 소행성 ‘베누’에 성공적으로 착륙해서 토양 샘플을 채취했다. OSIRIS-REx는 2023년 샘플을 가지고 지구로 귀환할 예정이며, 하야부사-2호에 이어 세계 두 번째로 소행성에서 토양 샘플 채취에 성공한 탐사선이 될 것으로

Fig. 10. Schematic view of asteroid (25143) Itokawa (ESO, 2014).

Fig. 11. The Japanese spacecraft Hayabusa 2 returned to Earth after taking samples from an asteroid (Go Miyazaki, 2014).

로 예상된다(NASA, 2021b).

운송기술

소행성 채광을 위한 탐사 단계에서는 초소형 탐사선을 보내면 되지만, 개발 및 생산 단계에서는 우주기지 건설과 채광 작업에 필요한 장비를 소행성으로 보내고, 채광한 자원을 다시 지구로 운송해야 한다. SpaceX의 Falcon 9과 같은 효율적인 재사용 발사체가 소행성 채광의 운송작업에 사용될 수 있을 것이다(SpaceX, 2021). 장거리 운송작업에는 핵 추진 우주선이 사용될 것으로 예상된다. 그 외에도 Engel and Prelas(2017)는 전자기 발사체(electromagnetic launcher)를 소행성 채광 분야에 사용하는 방안에 대해 검토하였다. 또한, 지구의 표면과 정지 궤도에 건설한 우주기지를 케이블로 연결하여 물자나 사람을 수송할 수 있게 만든 우주 엘리베이터(space elevator)의 개념(Fig. 12)도 제안되었다(ISEC, 2021). 최근에는 Dorrington and Olsen(2019)가 수송체의 이동경로 최적화를 위한 연구를 수행하였고, Nadoushan *et al.*(2020)은 소형 인공위성의 군집 비행을 통해 소행성을 포획하고 제어하기 위한 안정적인 디텀블링(detumbling) 방법을 개발하였다.

에너지 기술

소행성 채광 작업을 수행하기 위해서는 채광장비, 통신장비, 로봇 등에 동력을 공급할 수 있는 에너지 시스템이 필요하다. 이를 위해 현재 유력하게 검토되고 있는 에너지로는 태양광과 원자력이 있다. 태양광 발전 시스템은 위험하지 않고, 전력 생산 시 물이나 다른 열교환 시스템을 요구하

지 않는다. 지상에 설치된 태양광 발전 시스템은 태양 일사 에너지가 태양전지에 도달하기 전에 대기의 흡수 등에 의해 줄어든다. 또한, 날씨에 따라 발전량이 일정하지 않은 단점이 있다. 그러나 우주 공간에서는 이러한 단점을 극복할 수 있을 것이다. Fig. 13은 Watt(1997)가 제시한 소행성 채광 작업의 개념도를 보여준다. 태양광 발전 시스템이 채광 시스템에 전력을 공급하기 위한 용도로 사용되고 있다. 채광 작업을 수행하는 동안 태양전지 어레이는 태양 일사 에너지를 최대로 받기 위해 태양 쪽을 향하게 된다.

태양광 발전 시스템은 통신장비와 초기 채광 작업 시 주 에너지원이 될 수 있으나 대규모 채광 작업에 사용되는 것은 어렵다. 많은 전력을 생산하기 위해서는 태양전지의 크기를 크게 해야 하지만, 우주 환경을 날아다니는 파편의 위험을 고려할 때 태양전지의 크기를 키우는 데에는 한계가 있기 때문이다. 이에 대한 대안으로 전력 밀도가 높은 원자력을 생각할 수 있다. 원자력 기술 기반 에너지 공급 시스템은 태양광 발전을 할 수 없거나 발전량이 충분하지 못한 곳에서 경량화 장비로 장기간 에너지 공급이 가능하다(Chung *et al.*, 2016). 따라서 대규모 심부 굴착 등 거대 임무나 원거리 임무 수송체를 운행하기에는 원자력 에너지가 적합할 것으로 평가된다. 미국은 1960년대에 이미 로켓 추진 및 우주 기반 전력원용 원자로 개발을 시작했다(World Nuclear Association, 2021).

최근에는 우주선이나 인공위성에서 우주로 방출되는 열을 이용하여 전력을 생산하는 기술(space-based thermoelectric generators)에 관한 연구도 진행되고 있다(Von Lukowicz *et al.*, 2016). 이 기술은 태양광 발전 시스템과 비교해 발전 효율은 낮지만, 시스템의 수명이 길고 설치 및 유지관리 비용이 저렴할 것으로 예상된다.

Fig. 12. Structural diagram of a space elevator (Booyabazooka, 2006).

Fig. 13. Concept illustration of an asteroid mining mission to an Earth-approaching asteroid (Watt, 1997).

채광 기술

지상에서의 채광 작업 시 전통적으로 사용되던 발파 기술은 중력이 작은 우주 공간에서는 사용하기 어렵다. 우주 공간에서는 발파 에너지로 인해 날아가는 암석을 회수하기 어렵기 때문이다. 따라서 기계식 로봇 채광 장비들이 소행성 채광에 주로 사용될 것이라 예상된다. 그러나 지상에서 사용되고 있는 전통적인 기계식 채광 장비들을 작업 방식이 중력환경에 맞춰져 있으며 크기가 크고 무거워 소행성까지 운송하기 어렵다. 또한, 에너지 소비량이 많고 구성이 복잡하여 빈번한 수리와 유지관리가 필요하다는 단점이 있다.

Erickson(2006)은 소행성 채광 중에 발생할 수 있는 잠재적 문제점으로 장비의 고장, 소행성 표면 상태의 변화, 태양 일사 노출, 온도의 변화, 먼지 발생, 물의 부족 등을 지적하였다. 따라서, 소행성 채광을 위해 사용될 로봇과 채광장비들은 다음과 같은 사항들을 고려하여 개발해야 할 것으로 판단된다.

- 국지 중력, 진공, 태양 일사, 방사능, 먼지, 고온 등 극한 우주 환경에서의 강건성
- 높은 에너지 효율(낮은 에너지 소비)
- 소형화/경량화(크기, 중량, 형태의 최소화)
- 원격운영 및 자동화
- 운영 및 유지관리 방법의 간소화
- 높은 내구성(유지관리, 수리, 소모품 재공급의 최소화)
- 모듈화 및 통합 업그레이드의 용이성
- 현지 재료를 이용한 제작의 용이성(3D 프린터를 이용한 제작)

기계식 채광장비를 이용한 소행성 채광 기술 이외에 새로운 기술들도 연구되고 있다. Satish *et al.*(2013)은 소행성 채광 시 기계적 방법을 사용하기 전에 저전력 마이크로파를 적용하여 열 균열을 유도하는 방법을 제안하였다. 현무암 샘플에 대한 저전력 마이크로파의 영향을 평가한 실험 결과, 사용된 현무암 표본이 저전력 마이크로파 복사에 반응하며 시간이 지남에 따라 거의 선형으로 온도가 증가하는 것을 보여주었다.

고성능 전자기 무기(high powered-electromagnetic weapons)를 이용해 소행성을 작은 크기로 파쇄하여 운송을 쉽게 한 후, 지구로 가지고 오거나 달의 공전 궤도에 올려 두는 방법도 함께 검토되고 있다(Jakhu *et al.*, 2017). 달의 공전 궤도에 올려 둔 파쇄된 소행성 블록은 지구로 날아오는 소행성으로부터 지구를 방어하기 위한 수단으로 사용될 수도 있을 것이다. 그러나 군사/안보적 측면에서는 위협적인 우주 무기로 사용될 수 있어서 이를 실현하기 위해서는 국제적인 합의가 필요할 것이다(Harrison *et al.*, 2021).

법률 및 경제성

국제적 법률 및 규정 관련 이슈

과학적인 목적으로 우주를 탐사하는 것과 영리 추구를 위해 우주 자원을 개발하는 것은 다른 문제이다. 우주에서 발견된 자원을 개발하는 것은 국제적인 합의가 필요할 것이며, 이와 관련한 국제적인 법률과 규정은 우주자원의 탐사, 개발, 활용에 관한 모든 활동에 영향을 미칠 것이다(Ganatra and Modi, 2015). 인류의 소행성 채광이 실현되었을 때 발생할 수 있는 주요 이슈들은 다음과 같다.

- 우주 자원은 전 세계의 공공재인가?
- 우주 자원개발이 전 세계 경제에 이익이 될 것인가?
- 우주 자원개발 활동이 군사적 목적으로 악용되지는 않을 것인가?

현재 달과 다른 우주로부터 자원의 탐사, 개발, 활용의 내용을 담고 있는 UN 국제 조약은 2개로서 The 1967 outer space treaty(UNOOSA, 2021a)와 The 1979 Moon agreement(UNOOSA, 2021b)가 있다. The 1967 outer space treaty에서는 국가는 우주체에 대한 주권을 주장할 수 없는 것으로 규정하였다. 즉, 한 국가가 소행성에 가장 먼저 도착해 깃발을 꽂는다고 하더라도 그것을 해당 국가의 소유로 선언할 수 없다. 그러나 소행성에서 채광할 수 있는 자원의 소유권 문제를 명시하고 있지 않아 추후 논란이 될 수 있을 것이다. The 1979 Moon agreement에서는 개별 국가가 우주 자원을 개발할 수 있는 국제적인 틀을 마련하였으나 UN 가입국 중 17개국만이 서명했다는 한계가 있다. 우주 자원개발과 관련한 국제법에 관한 보다 자세한 내용은 Von der dunk(2017)를 참고할 수 있다.

Heise(2018)는 기존의 UN 국제 조약들은 냉전 시대의 산물로서 우주 자원개발 산업을 촉진하기 위해서는 일부 개정이 필요하다고 주장하였다. 민간 기업이 우주 자원개발과 관련한 자체 규범을 수립할 수 있도록 허용하면서도 전 세계 공공재로서의 우주 공간의 성격을 유지한다면 우주 식민지 개척과 관련한 국가 간 분쟁을 예방할 수 있다고 주장하였다. 반면, Wrench(2019)는 The 1967 outer space treaty가 우주 자원개발 자체를 금지하지는 않았기 때문에 현재의 UN 국제 조약 시스템에서도 소행성 채광을 수행하는데 문제가 없다고 주장하였다. Saletta and Orrman-Rossiter(2018)은 소행성 채광이 모든 인류에게 이익이 되는 동시에, 국가적 균형을 유지하기 위해서는 수익에 대한 분배가 필요하다고 주장하였다.

미국 오바마 전 대통령은 2015년 미국의 상업적 우주 발사 경쟁법(Commercial Space Launch Competitiveness Act, U.S. Congress, 2015)에 서명하였다. 이에 미국 기업은 우주를 탐사할 수 있고, 소행성과 같은 천체에서 광물자

원을 개발할 수 있는 법적 근거를 갖게 되었다. 이후 룩셈부르크, 아랍에미리트 등이 우주 자원 탐사 및 개발에 관한 국내 법률을 제정하였고, 일본도 2021년 일본 민간 사업자가 달과 다른 천체에서 물, 광물과 같은 우주 자원의 탐사 및 개발에 참여하는 것을 허용하는 법률 초안을 마련하였다. 우주 자원개발과 관련한 관련국들의 법률 제정은 향후 계속 될 것이라 예상된다.

경제성 관련 이슈

소행성 채광 사업의 경제성에 대해서는 다양한 의견이 존재한다. 이론적으로는 백금과 같은 귀금속을 소행성으로부터 채광한 후 지구로 가지고 오는 것은 수익성 높은 사업이 될 수 있다. 예를 들어, 지름 30 m 크기의 구형 소행성이 50%의 백금을 포함한다고 가정하면, 소행성의 부피는 약 4500 m³, 중량은 약 5000 t, 백금의 중량은 약 2500 t이 되므로, 현재 백금의 시세를 68,000원/g로 환산한 경제적 가치는 약 170조 원에 해당한다(Jakhu *et al.*, 2017). 그러나 실제로는 소행성의 크기가 작고, 소행성에 백금보다 가격이 낮은 금속이 더 많이 포함되어 있을 수도 있다. 이 경우에는 소행성 채광을 통해 확보한 백금의 경제적 가치가 지구로 가지고 오는 운송비보다도 낮을 수도 있을 것이다. 또한, 우주에서 확보된 백금이 지구로 다량 유입될 경우 백금의 가격을 폭락시켜 경제성을 찾기 어려울 수도 있다.

최근까지 소행성 채광의 경제성을 분석하기 위한 학술연구들이 다수 수행되었다. Vergaaij *et al.*(2019)는 소행성 채광 사업의 수익성에 발사체의 비용과 탑재량이 미치는 영향을 분석하였다. Probast *et al.*(2020)은 소행성 채광 사업의 비용추정 모델을 개발하였다. 소행성 채광 비용추정에 필요한 기존 데이터가 전혀 없어서, 전문가 설문을 기반으로 한 델파이(Delphi) 분석을 통해 주요 비용 인자들을 선정하였고, partial least squares structural equation modeling을 통해 비용을 추정하였다. 이 연구에서는 소행성 벨트에 있는 NEAs를 대상으로 소행성 채광 사업을 추진할 때 US\$ 100 Billion의 비용이 필요할 것으로 제시하였다. Hein *et al.*(2020)은 소행성 채광 사업의 수익성에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 처리 속도와 개발 비용을 선정하고, 소행성 채광 사업을 진행할 때 개발 비용을 낮추고 최대한 빠르게 채광 작업을 수행하는 것이 중요하다고 제안하였다.

결 론

우주의 상업적 이용은 새로운 것이 아니며, 반세기 전부터 상업 인공위성을 이용한 우주 산업이 발생하여 지속해서 성장하고 있다. 현재에는 새로운 우주 산업으로서 우주 관광, 우주 자원개발, 우주에서의 제조, 우주에서의 거주,

우주 식민지 개척 등이 주목받고 있으며 우주의 상업적 이용을 위한 인류의 노력은 계속될 전망이다. Planetary Resources, Deep Space Industries, Shackleton Energy Company와 같은 소행성 채광 산업 분야의 1세대 기업들은 모두 미국 기업들이었으나, 2010년 이후 설립된 신생 기업들은 미국, 일본, 영국, 중국 등으로 소속 국가가 다변화되고 있다. 사업 분야도 우주 망원경과 우주 발사체뿐만 아니라 로봇 채광장비, 우주에서의 제조 및 자원처리 기술, 우주 주유소 구축 등으로 다양해지고 있다. 시장조사 기관들도 전 세계 우주 자원개발 시장의 규모가 연간 22.4%로 고성장할 것으로 전망하였다. 이에 반해, 소행성 채광에 필요한 탐사기술, 운송기술, 에너지 기술, 채광 기술들의 수준은 아직 개발 초기 단계이며 지속적인 투자와 노력이 필요할 것으로 판단된다.

주요국들은 새로운 우주 산업의 주도권을 잡기 위해 적극적으로 움직이고 있다. 우주 산업을 주도해온 미국 이외에도 룩셈부르크와 아랍에미리트는 우주 산업과 관련한 법률을 정비하여 비즈니스 친화적인 정책으로 적극적인 투자를 유치하고 있다. 중국도 미국을 견제하기 위해 소행성 채광 분야의 기술 경쟁에 적극적으로 참여하고 있다. EU, 러시아, 일본, 인도 등 우주 기술 강국들도 우주 자원개발에 야심을 품고 있다. 많은 국가가 새로운 우주 산업에 대한 높은 관심이 있는 만큼, 소행성 채광이 실현되면 우주 자원의 소유권 및 수익 분배와 관련하여 분쟁이 발생할 수 있을 것이다. 이와 관련한 국제적인 법률 정비와 합의가 필요할 것으로 판단된다.

한미 미사일 지침 해제와 누리호 발사체 개발로 인해 국내에서도 새로운 우주 산업에 관한 관심이 높아지고 있다. 그러나 기존의 우주 강국들보다는 상대적으로 보유한 기술의 수준이 낮고, 우주 자원개발 산업에 대한 국민들의 관심과 이해가 부족한 실정이다. 소행성 채광은 항공우주 기술, 정보통신기술, 로봇 기술, 에너지 기술과 자원공학 분야의 전통적인 채광 기술이 유기적으로 결합할 때 실현될 수 있다. 이에 대한 학제 간 공동연구와 도전적인 기술 개발이 요구된다. 현재까지 자원공학 분야에서 대상으로 한 자원은 지구에 있는 유한한 자원으로 제한되어 있으나, 미래에는 새로운 우주 산업을 통해 이러한 제한을 극복하고 자원공학의 영역을 보다 확대할 수 있을 것이라 기대한다.

사 사

본 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년) 지원으로 수행되었다.

References

- 360 Market Updates, 2020. 2021.10.30. <https://www.360marketupdates.com/global-space-mining-market-16439050>
- Asteroid Mining Corporation, 2021. 2021.10.30. <https://asteroidminingcorporation.co.uk>
- Bigelow Aerospace, 2021. 2021.10.30. <https://bigelowaerospace.com>
- Binzel, R.P., Gehrels, T., and Matthews, M.S., 1989. *Asteroids II*, Univ of Arizona Press, Tucson, Arizona, USA, 316p.
- Blue Origin, 2021. 2021.10.30. <https://www.blueorigin.com/about-blue>
- Bonin, G., Foulds, C., Armitage, S. and Faber, D., 2016. Prospector-1: The first commercial small spacecraft mission to an asteroid, *Proceedings of the 30th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Logan, Utah, USA, SSC16-VI-2.
- Booyabazooka, 2006. 2021.10.30. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Space_elevator_structural_diagram.svg
- Chung, W.S., Yun, S.W. and Lee, J.H., 2016. *Use of nuclear technology in space exploration*, KAERI Brief Report, 32, p.1-22.
- CisLunar Industries, 2021. 2021.10.30. <https://www.cislunariindustries.com>
- Deep Space Industries, 2016. 2021.12.13. <https://phys.org/news/2016-08-prospector-1-first-commercial-interplanetary-mission.html>
- Dorrington, S. and Olsen, J., 2019. *A location-routing problem for the design of an asteroid mining supply chain network*, *Acta Astronautica*, 157, p.350-373.
- Engel, T.G. and Prelas, M.A., 2017. Asteroid mining and deflection using electromagnetic launchers, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45(7), p.1327-1332.
- Erickson, K., 2006. *Optimal architecture for an asteroid mining mission: equipment details and integration*, Space 2006, ARC, San Jose, CA, USA, AIAA 2006-7504.
- ESA, 2013. 2021.11.15. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neas.svg>
- ESA, 2021. 2021.11.10. <https://neo.ssa.esa.int/search-for-asteroids>
- ESO, 2014. 2021.10.30. <https://www.eso.org/public/images/eso1405a>
- Feinman, M., 2014. Mining the final frontier: Keeping Earth's asteroid mining ventures from becoming the next gold rush, *Pittsburgh Journal of Technology Law and Policy*, 14, 202p.
- Ganatra, D. and Modi, N., 2015. Asteroid mining and its legal implications, *Journal of Space Law*, 40, 81p.
- Garcia-del-Real, J., Barakos, G., and Mischo, H., 2020. Space mining is the industry of the future... or maybe the present, *Proceedings of SME Annual Meeting 2020*, SME, Phoenix, AZ, USA, p.23-26.
- Go Miyazaki, 2014. 2021.10.30. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%E3%81%AF%E3%82%84%E3%81%B6%E3%81%952.jpg>
- Harrison, T., Johnson, K., and Young, M., 2021. DEFENSE AGAINST THE DARK ARTS IN SPACE: Protecting Space Systems from Counterspace Weapons, *A Report of the CSIS Aerospace Security Project*, CSIS, Washington, DC, USA, 53p.
- Hein, A.M., Matheson, R., and Fries, D., 2020. A techno-economic analysis of asteroid mining, *Acta Astronautica*, 168, p.104-115.
- Heise, J., 2018. Space, the final frontier of enterprise: Incentivizing asteroid mining under a revised international framework, *Michigan Journal of International Law*, 40, 189p.
- ISEC, 2021. 2021.10.30. <https://www.isec.org>
- ispace, 2021. 2021.10.30. <https://ispace-inc.com>
- Jakhu, R.S., Pelton, J.N., and Nyampong, Y.O.M., 2017. Space mining and its regulation, *Springer International Publishing*, Cham, Switzerland, 181p.
- JAXA, 2021. 2021.10.30. <https://www.hayabusa2.jaxa.jp/en>
- Jurvetson, S., 2014. 2021.12.13. <https://www.flickr.com/photos/jurvetson/13457263373>
- Jurvetson, S., 2018. 2021.12.13. <https://www.flickr.com/photos/jurvetson/44513435264>
- KASSI, 2021. 2021.12.13. <https://astro.kasi.re.kr/learning/pageView/5171>
- Khawaja, J., 2019. 2021.12.13. <https://consensys.net/blog/news/moonshot-3-0-inside-consensys-space-and-trusat>
- Kommesser, M., 2018. 2021.11.15. 2004 EW95, <https://www.eso.org/public/images/eso1814a>
- Minor Planet Center, 2021. 2021.11.30. <https://minorplanetcenter.net/iau/lists/NumberedMPs.html>
- Moon Express, 2021. 2021.10.30. <https://moonexpress.com>
- Mordor Intelligence, 2021. 2021.10.30. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/space-mining-market-industry>
- MSIT, 2021. 2021.10.21. <https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?mId=113&mPid=112&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3180850>
- Nadoushan, M.J., Ghobadi, M., and Shafaei, M., 2020. Designing reliable detumbling mission for asteroid mining, *Acta Astronautica*, 174, p.270-280.
- Namuwiki, 2021. 2021.11.27. <https://namu.wiki/w/%ED%95%9C%EB%AF%B8%20%EB%AF%B8%EC%82%AC%EC%9D%BC%20%EC%82%AC%EA%B1%B0%EB%A6%AC%20%EC%A7%80%EC%B9%A8>
- NASA JPL, 2018. 2021.11.15. <https://ssd.jpl.nasa.gov/diagrams>
- NASA JPL, 2021a. 2021.12.13. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>

- NASA JPL, 2021b. 2021.12.13. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stat/size.html>
- NASA JPL, 2021c. 2021.11.10. <https://www.jpl.nasa.gov/mis-sions/neowise>
- NASA, 2013. 2021.12.13. <https://www.nasa.gov/content/god-dard/new-nasa-mission-to-help-us-learn-how-to-mine-aste-roids>
- NASA, 2021a. 2021.10.30. <https://www.nasa.gov/specials/artemis>
- NASA, 2021b. 2021.10.30. <https://www.nasa.gov/osiris-rex>
- OffWorld, 2021. 2021.10.30. <https://www.offworld.ai>
- Orbit Fab, 2021. 2021.10.30. <https://www.orbitfab.com>
- Origin Space, 2021. 2021.10.30. <https://origin.space/#/home>
- Planetary Resources, 2012. 2021.12.13. <https://commons.wiki-media.org/wiki/File:Arkyd-100.jpg>
- Probast, A., Nitzl, C., Kraus, F., and Forstner, R., 2020. Cost estimation of an asteroid mining mission using partial least squares structural equation modelling (PLS-SEM), *Acta Astronautica*, 167, p.440-454.
- Saletta, M.S. and Orrman-Rossiter, K., 2018. Can space mining benefit all of humanity?: The resource fund and citizen's dividend model of Alaska, the 'last frontier', *Space Policy*, 43, p.1-6.
- Satish, H., Ouellet, J., Raghavan, V., and Radziszewski, P., 2013. Investigating microwave assisted rock breakage for possible space mining applications, *Mining Technology*, 115(1), p.34-40.
- Shackleton Energy Company, 2021. 2021.12.13. <http://www.shackletonenergy.com>
- SpaceFab.US, 2021. 2021.10.30. <https://www.spacefab.us>
- SpaceX, 2021. 2021.10.30. <https://www.spacex.com>
- Stratolaunch Systems, 2021. 2021.10.30. <https://www.stratolaunch.com>
- TransAstronautica Corporation, 2021. 2021.10.30. <https://www.transastracorp.com>
- U.S. Congress, 2015. 2021.11.12. <https://www.congress.gov/bill/114th-congress/house-bill/2262/text>
- UNOOSA, 2021a. 2021.11.12. <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/introouterspacetreaty.html>
- UNOOSA, 2021b. 2021.11.12. <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/intromoon-agreement.html>
- Vergaaij, M., McInnes, C., and Ceriotti, M., 2019. Influence of launcher cost and payload capacity on asteroid mining profitability, *Journal of the British Interplanetary Society*, 72(12), p.435-444.
- Von der dunk, F.G., 2017. Asteroid mining: international and national legal aspects, *MSU International Law Review*, 26, p.83-99.
- Von Lukowicz, M., Abbe, E., Schmiel, T., and Tajmar, M., 2016. Thermoelectric Generators on Satellites-An Approach for Waste Heat Recovery in Space, *Energies*, 9(7), 541p.
- Watt, D., 1997. 2021.10.30. <https://www.flickr.com/photos/nasa2explore/9519092016>
- Wikipedia, 2021a. 2021.10.30. <https://en.wikipedia.org/wiki/Asteroid>
- Wikipedia, 2021b. 2021.12.13. https://en.wikipedia.org/wiki/S-type_asteroid
- Wikipedia, 2021c. 2021.12.13. https://en.wikipedia.org/wiki/Planetary_Resources
- Wikipedia, 2021d. 2021.12.13. https://en.wikipedia.org/wiki/Deep_Space_Industries
- World Nuclear Association, 2021. 2021.10.30. <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-reactors-for-space.aspx>
- Wrench, J.G., 2019. Non-Appropriation, No Problem: The Outer Space Treaty Is Ready for Asteroid Mining, *Case Western Reserve Journal of International Law*, 51, p.437-460.
- Zancy, K., Cohen, M.M., James, W.W., and Hilscher, B., 2013. *Asteroid Mining, AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition*, ARC, San Diego, CA, USA, AIAA, p.2013-5304.

최요순

2004년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부, 공학사
 2009년 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부, 공학박사
 2010년 미국 펜실베이니아 주립 대학교 에너지자원공학과, Post-Doc

현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 교수
 (E-mail; energy@pknu.ac.kr)