

논문

우주과학자에게 필요한 달의 지형과 지질

김용하^{1†}, 최성희¹, 유용재¹, 김경자²

¹충남대학교 대학원 우주지질학과

²한국지질자원연구원

Basic Lunar Topography and Geology for Space Scientists

Yong Ha Kim^{1†}, Sung Hi Choi¹, Yongjae Yu¹, Kyeong Ja Kim²

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

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, Korea



Received: July 19, 2021
Revised: August 13, 2021
Accepted: August 16, 2021

†Corresponding author :

Yong Ha Kim
Tel : +82-42-821-5467
E-mail : yhkim@cnu.ac.kr

Copyright © 2021 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

Yong Ha Kim
<https://orcid.org/0000-0003-0200-9423>
Sung Hi Choi
<https://orcid.org/0000-0001-8942-0359>
Yongjae Yu
<https://orcid.org/0000-0002-2005-2778>
Kyeong Ja Kim
<https://orcid.org/0000-0001-6220-8411>

요약

본 논문은 다가오는 달 유인 탐사시대를 대비하여 달의 지형 및 지질학적 기초 지식을 우주과학자들에게 소개한다. 달 지형 용어에 대한 학술적 기원을 간단히 정리하였으며, 현재 통용되는 한글 용어를 확장하여 새로운 지형 용어들을 제안하였다. 특히, 일반인도 꼭 알아야 할 대표적인 달의 지형으로 1 대양(폭풍의 대양), 10대 바다(비의 바다, 평온의 바다, 고요의 바다, 감로주의 바다, 풍요의 바다, 위난의 바다, 증기의 바다, 인식의 바다, 습기의 바다, 구름의 바다), 6대 충돌구(티코, 코페르니쿠스, 케플러, 아리스타쿠스, 스테비누스, 랑그레누스)를 제안한다. 달의 지형으로 고원(highland), 바다(maria), 산맥(mountains), 충돌구(crater), 함몰 용암굴/열구(rille, rima), 지구대(graben), 돔(dome), 용암동굴(lava tube), 주름 능선(wrinkle ridge), 참호(trench), 절벽(rupes), 그리고 달의 표면 흙을 표토(regolith)로 사용할 것을 제안한다. 또한, 달의 내부 구조 표준 모델과 대표적 암석을 소개하였다. 지구의 지질 시대구분은 발견 화석과 방사성 동위원소를 이용한 절대연령 측정을 기준으로 하는 반면, 표준적인 달의 지질 시대 구분은 대표적인 충돌구 형성을 기준으로 선-넥타리스 기(Pre-Nectarian), 넥타리스 기(Nectarian), 임브리움 기(Imbrian), 에라토스네스 기(Erathostenesian), 코페르니쿠스 기(Copernican)로 나뉜다. 마지막으로 인간의 달 활용에 획기적인 계기가 되는 최근의 달 표면 물 발견에 대한 내용을 정리하였으며, 향후 한국지질자원연구원 에서 개발될 물 채취 장치의 개념도 소개하였다.

Abstract

Upon the human exploration era of the Moon, this paper introduces lunar topography and geologic fundamentals to space scientists. The origin of scientific terminology for the lunar topography was briefly summarized, and the extension of the current Korean terminology is suggested. Specifically, we suggest the most representative lunar topography that are useful to laymen as 1 ocean (Oceanus Procellarum), 10 maria (Mare Imbrium, Mare Serenitatis, Mare Tranquillitatis, Mare Nectaris, Mare Fecundatis, Mare Crisium, Mare Vaporium, Mare Cognitum, Mare Humorum, Mare Nubium), 6 great craters (Tyco, Copernicus, Kepler, Aristarchus, Stebinus, Langrenus). We also suggest Korean terms for highland, maria, mountains, crater, rille, rima, graben, dome, lava tube, wrinkle ridge, trench, rupes, and regolith. In addition, we introduce the standard model for the lunar interior and typical rocks. According to the standard model on the basis of historical impact events, the lunar geological eras are classified as Pre-Nectarian, Nectarian,

Imbrian, Erathostenesian, and Copernican in chronologic order. Finally, we summarize the latest discovery records on the water on the Moon, and introduce the concept of water extraction from the lunar soil, which is to be developed by the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM).

핵심어 : 달, 지형, 지질, 달 바다, 충돌구, 월면 수분

Keywords : moon, topography, geology, lunar maria, impact crater, lunar water

1. 서론

고래로부터 달은 인류 문명에 신화적, 문학적, 과학적으로 지대한 영향을 미쳐왔다. 인류가 달 표면에 착륙한 지 반세기가 지난 지금, 달은 과학적 탐구의 대상을 넘어 인류가 실제로 활용할 대상으로 부각되고 있다. 2017년도에 시작된 미국의 Artemis 유인 우주선 프로그램은 금년(2021년) 말 첫 시험 우주선을 발사를 시작하여 당분간 세계 대중의 시선을 집중시킬 것이다. 이 탐사 프로그램에 우리나라도 참여하기 때문에 국내에서도 언론의 관심을 받을 것이다. 이런 대중의 달 관심에 대응하여 천문우주 관련 전문가들도 달에 대한 기본 지식을 정리해 볼 시기이다. 그러나 달 표면 지형에 대한 지식은 지질학적 배경이 필요하므로, 자칫 천문우주과학 전공자에게 부족할 수도 있다. 더욱이 지형에 대한 학술 용어들이 한글로 정착되지 못해, 진행되는 달 탐사 내용을 국민들에게 신속 정확하게 설명하는 데 혼선이 있을 수 있다. 따라서 저자들은 본 논문을 통해 천문우주전공자에게 달의 지형 지질에 대한 기본 지식 전달과 한글 용어의 정착에 기여하고자 한다.

달은 태양과 함께 인류에게 가장 친숙한 천체이다. 거의 모든 문명과 민족 문화에서 달에 관한 신화나 설화가 전해지고, 우리에게 신비스러운 의미와 고유한 재미를 선사한다. 우리 문화에도 달에 관한 여러가지 설화가 전해지고 있지만, 그 중에서 달 표면 모습을 “토끼와 방아”로 묘사한 설화가 유명하다. Fig. 1은 우리 조상들이 육안으로 본 달 표면에서 토끼가 방아를 짚는 모습을 보여주는 예시로, 그 윤곽이 결국 달의 바다(Maria)들의 분포라는 것을 알 수 있다.

달의 표면 지형에 대한 과학적 연구는 망원경의 발명과 함께 17세기에 유럽에서 여러 지형도들이 출간되면서 시작되었다. 규모가 큰 지형에 대한 이름이 카톨릭 성자와 그리스 로마 문



Fig. 1. Moon by naked eyes with “Rabbit and barrel”

명의 전통에 따라 명명되기 시작하였다. 그러나 현재 달 표면 지형의 표준 명칭은 카톨릭 신부인 이탈리아 Giambattista Riccioli가 1651년에 출간한 *Almagestum novum*이라는 책에서 기원한다[1,2]. 이 책의 그림들은 카톨릭 예수회(Jesuit) 교단의 동료 교육자가 8구역으로 구분하여 그렸는데, 지형명칭들이 조직적으로 표현되었다. 여기서 라틴어 terra(육지)와 maria(바다), 그리고 충돌구의 이름이 정해졌다. Riccioli는 특히 바다의 명칭에 역사적 상황과 기후에 관련된 단어를 많이 사용하였는데, 비의 바다(Mare Imbrium), 평온의 바다(Mare Serenitatis), 고요의 바다(Mare Tranquillitatis), 감로주의 바다(Mare Nectaris), 풍요의 바다(Mare Ferunditatis), 위난의 바다(Mare Crisium), 인식의 바다(Mare Cognitum), 습기의 바다(Mare Humorurum), 구름의 바다(Mare Nubium) 등이다. 그 외에 12개의 작은 바다들이 비슷한 방식으로 명명되었다. 달의 서쪽(관측자 하늘기준 동쪽)에 이런 바다보다 더 큰 검은 지대가 있는데, 이를 폭풍의 대양(Oceanus Procellarum)이라고 명명했다. 또한 바다보다 작은 지형은 호수(Lacus), 만(Sinus), 늪(Palus)이라는 용어로 구분하여 이름을 부여하였다. 라틴어 바다명은 여러 가지로 번역될 수 있으나, 한글로 고유명사화하여 통일할 필요가 있다. 저자들은 이미 과학과학관의 바다 명칭과 그 외의 지형에 대한 명칭들이 한글 위키피디아 명칭이 널리 사용되고 있으므로, 이를 따라 교재나 언론 및 인터넷에서도 통일하여 사용할 것을 제안한다. Fig. 2는 대표적인 바다와 충돌구의 위치를 보여준다. 여기에 포함되지 않은 바다와 다른 지

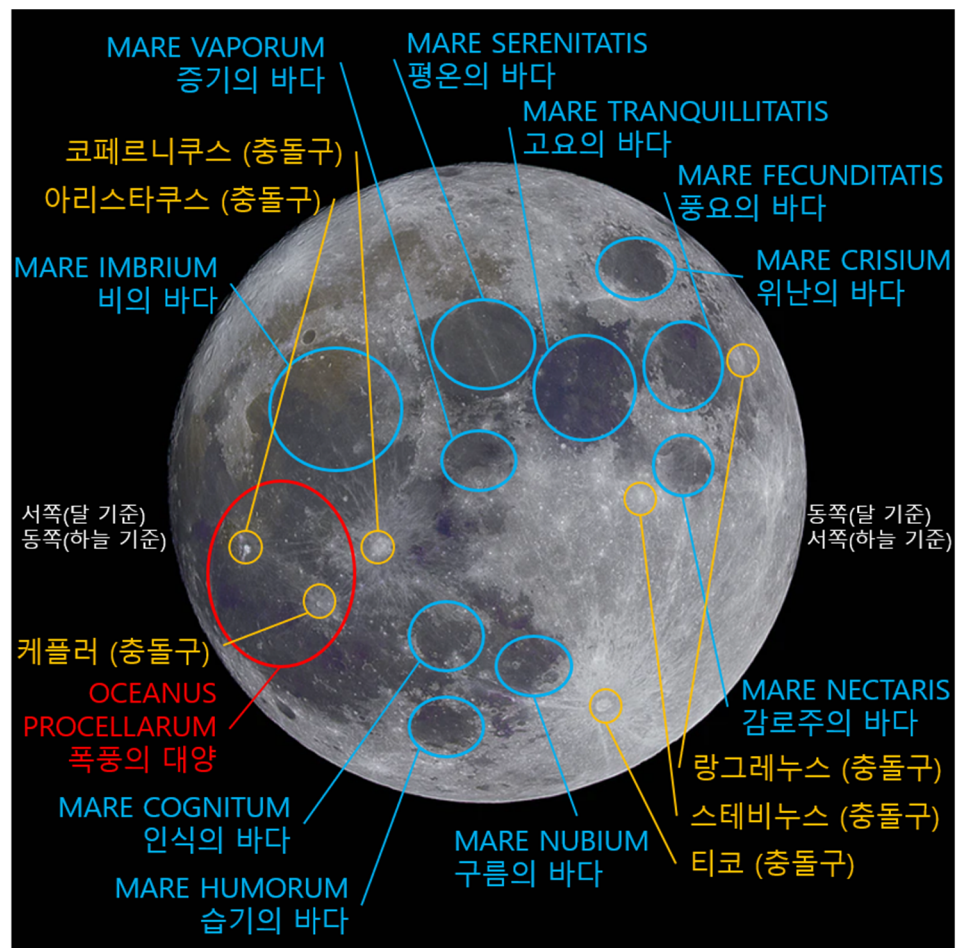


Fig. 2. Korean terms for 1 ocean, 10 maria, and 6 great craters.

형의 명칭도 Tables 1-4와 같이 한글 위키피디아에 제안되어 있다. 참고로 달의 위도와 경도는 지구쪽을 향한 달의 앞면의 중심(대략 중앙의 만, Sinus Medii)을 기준으로 달의 남북 방향과 동서 방향으로 결정되어 있다.

Riccioli는 또한 달 전면을 피자 조각처럼 8구역(서북쪽 조각을 I 구역으로 시계방향)으로 나누어 대형 충돌구들에 유명인사의 이름을 부쳤다. I, II, III 구역에는 고대 그리스 유명인(플라톤, 아틀라스, 알키메데스 등)을, 중앙의 IV, V, VI 구역에는 고대 로마 황제들(Caesar, Tacitus, Taruntius 등)을, 남쪽 구역에는 중세 유럽의 철학자들을, 바깥의 V, VI, VII, VIII 구역에는 당대의 유럽 인사들의 명칭을 부여하였다. 이런 명칭 부여에서는 당시의 세계관으로 그런대로 형평성을 유지하려 한 노력이 보인다. 특히 VIII 구역에 있는 대형 충돌구에 코페르니쿠스, 케플러, 갈릴레오의 이름을 부여한 것이 인상적이다. 이후에 달의 지형에 대해 추가적인 명칭들이 부여되었는데, 1791년 독일의 Johann Schröter가 발간한 Selenotopografisches

Table 1. Korean Terms for Oceanus and Maria (<https://ko.wikipedia.org/wiki/>)

이름	라틴어 이름	위도	경도	지름(km)
폭풍의 대양	Oceanus Procellarum	18.4°N	57.4°W	2,568
추위의 바다	Mare Frigoris	56.0°N	1.4°E	1,596
비의 바다	Mare Imbrium	32.8°N	15.6°W	1,123
풍요의 바다	Mare Fecunditatis	7.8°S	51.3°E	909
고요의 바다	Mare Tranquillitatis	8.5°N	31.4°E	873
구름의 바다	Mare Nubium	21.3°S	16.6°W	715
평온의 바다	Mare Serenitatis	28.0°N	17.5°E	707
남쪽의 바다	Mare Australe	38.9°S	93.0°E	603
섬의 바다	Mare Insularum	7.5°N	30.9°W	513
연변의 바다	Mare Marginis	13.3°N	86.1°E	420
위난의 바다	Mare Crisium	17.0°N	59.1°E	418
습기의 바다	Mare Humorum	24.4°S	38.6°W	389
인식의 바다	Mare Cognitum	10.0°S	23.1°W	376
스미스의 바다	Mare Smythii	1.3°N	87.5°E	373
감로주의 바다	Mare Nectaris	15.2°S	35.5°E	333
동쪽의 바다	Mare Orientale	19.4°S	92.8°W	327
지혜의 바다	Mare Ingenii	33.7°S	163.5°E	318
모스크바의 바다	Mare Moscoviense	27.3°N	147.9°E	277
훔볼트의 바다	Mare Humboldtianum	56.8°N	81.5°E	273
증기의 바다	Mare Vaporum	13.3°N	3.6°E	245
파도의 바다	Mare Undarum	6.8°N	68.4°E	243
뱀의 바다	Mare Anguis	22.6°N	67.7°E	150
거품의 바다	Mare Spumans	1.1°N	65.1°E	139

Table 2. Korean Terms for Lacus (<https://ko.wikipedia.org/wiki/>)

이름	라틴어 이름	위도	경도	지름(km)
희망의 호수	Lacus Spei	43.0°N	65.0°E	80
혐오의 호수	Lacus Odii	19.0°N	7.0°E	70
행복의 호수	Lacus Felicitatis	19.0°N	5.0°E	90
탁월의 호수	Lacus Excellentiae	35.4°S	44.0°W	184
친절의 호수	Lacus Lenitatis	14.0°N	12.0°E	80
죽음의 호수	Lacus Mortis	45.0°N	27.2°E	151
인내의 호수	Lacus Perseverantiae	8.0°N	62.0°E	70
여름의 호수	Lacus Aestatis	15.0°S	69.0°W	90
시간의 호수	Lacus Temporis	45.9°N	58.4°E	117
슬픔의 호수	Lacus Doloris	17.1°N	9.0°E	110
선량의 호수	Lacus Bonitatis	23.2°N	43.7°E	92
사치의 호수	Lacus Luxuriae	19.0°N	176.0°E	50
봄의 호수	Lacus Veris	16.5°S	86.1°W	396
망각의 호수	Lacus Oblivionis	21.0°S	168.0°W	50
두려움의 호수	Lacus Timoris	38.8°S	27.3°W	117
꿈의 호수	Lacus Somniorum	38.0°N	29.2°E	384
기쁨의 호수	Lacus Gaudii	16.2°N	12.6°E	113
고독의 호수	Lacus Solitudinis	27.8°S	104.3°E	139
겨울의 호수	Lacus Hiemalis	15.0°N	14.0°E	50
가을의 호수	Lacus Autumni	9.9°S	83.9°W	183

Table 3. Korean Terms for Sinus (<https://ko.wikipedia.org/wiki/>)

이름	라틴어 이름	위도	경도	지름(km)
거침의 만	Sinus Asperitatis	3.8°S	27.4°E	206
루니크의 만	Sinus Lunicus	31.8°N	1.4°W	126
무지개의 만	Sinus Iridum	44.1°N	31.5°W	236
믿음의 만	Sinus Fidei	18.0°N	2.0°E	70
사랑의 만	Sinus Amoris	18.1°N	39.1°E	130
성공의 만	Sinus Successus	0.9°N	59.0°E	132
소용돌이의 만	Sinus Aestuum	10.9°N	8.8°W	290
이슬의 만	Sinus Roris	54.0°N	56.6°W	202
조화의 만	Sinus Concordiae	10.8°N	43.2°E	142
존경의 만	Sinus Honoris	11.7°N	18.1°E	109
중앙의 만	Sinus Medii	2.4°N	1.7°E	335

Table 4. Korean Terms for Palus (<https://ko.wikipedia.org/wiki/>)

이름	라틴어 이름	위도	경도	지름(km)
쇠퇴의 늪	Palus Putredinis	26.5°N	0.4°E	161
수면의 늪	Palus Somni	14.1°N	45.0°E	143
전염병의 늪	Palus Epidemiarum	32.0°S	28.2°W	286

Fragmenten이 대표적이다. 이 책이 Riccioli의 명칭들을 그대로 사용함으로써, 국제 표준으로 자리잡게 되었고, 1935년 국제천문연맹(International Astronomical Union)이 600여 개의 Riccioli의 명칭들을 채택하여 공식화되었다. 국제천문연맹은 1960년대에 소련 우주선에 의해 달 뒷면의 지형이 처음으로 관측되면서, 주로 고인이 된 소련의 과학자와 엔지니어의 이름을 지형 명칭에 부여하였다. 현재도 추가로 발견되는 달의 지형에 대해 국제천문연맹은 고인이 된 우주탐사 공헌자의 이름을 부여하고 있다.

우리의 입장에서 달의 지형이름이 모두, 특히 대형 충돌구의 이름이 모두 유럽인이라는 거부감이 들 수 있지만, 사람이름을 번역할 수는 없으니 그대로 사용할 수밖에 없는 실정이다. 우주과학자라 할지라도 달의 자세한 지형이름을 모두 알 필요는 없으나, 적어도 대규모 지형에 대한 이름은 기억하여 일반인들에게 설명할 수 있어야 한다고 본다. 본 논문은 이런 필요를 위해 대표적인 달의 지형과 기초적인 지질학 지식을 정리하고자 한다. 우선 저자들은 “지구에 5대양 6대주가 있듯이, 달에는 1 대양 10대 바다, 6대구가 있다”라고 달의 대표적 지형을 일반인들에게 친숙하게 전달할 것을 제안한다. 여기서 **1 대양은 폭풍의 대양(Oceanus Procellarum)**, 10대 바다는, **비, 평온, 고요, 감로주, 풍요, 위난, 증기, 인식, 습기, 구름의 바다**이고, 6대구는 **티코, 코페르니쿠스, 케플러, 아리스타쿠스, 스테비누스, 랑그레누스**이다. 여기서 제안한 1 대양 10대 바다는 Table 1에서 보듯이 크기가 크면서 가장자리에 있지 않아 식별이 쉬운 지형이다. 참고로 “섬의 바다”는 중앙 근처에 있고 크기가 크지만, 코페르니쿠스 충돌구에 겹쳐져서 그 윤곽을 식별하기 어려워 10대 바다로 선정하지 않았다. 이 지형들은 휴대폰의 사진으로도 구분이 될 수 있는 대규모 지형이므로, 우리가 초등학교에서 세계지도를 배울 때의 오대양 육대주만큼 달 지도의 상식이다. 육안 관측의 “토끼와 방아”가 1 대양 10대 바다로 구분될 수 있음도 유익하다.

2. 달 표면의 지형 유형

육안 관측으로 검게 보이는 부분을 바다(maria)로 부르면서, 그에 대비되는 밝은 표면을 처음에는 육지(terra)로 구분하였으나, 지금은 고원(high lands) 이라고 구분한다. 다음으로 망원경에서 뚜렷하게 보이는 표면 구멍이는 한때 분화구라고 단순 번역되어 사용되었다. 최근의 행성과학에서는 내부 분출에 의해 형성된 화산분화구(volcanic crater)와 외부 충돌에 의해 형성된 충돌분화구(impact crater, 이하 편의상 충돌구)를 구분한다. 그 외에 산맥(mountains), 함몰용암굴/열구(rilles, rima), 돔(dome), 주름 능선(wrinkle ridge), 지구대(graben), 절벽(rupes) 등의 작은 지형들은 소형 지상 망원경으로도 식별된다.

고원은 달 표면에서 밝고 높은 지대로서 어두운 바다와 대비된다. 고원이라는 표현은 케플러

(Kepler)에 의해 처음 명명되었다고 한다. 회장질(anorthositic) 암석이 주성분이며, 검은 현무암질(basaltic) 바다 표면과 뚜렷이 구분된다. 아폴로(Apollo) 16이 채취한 고원의 회장질 암석은 98% 이상을 상회하는 사장석(Plagioclase feldspar)과 2% 내외의 휘석(Pyroxene)으로 구성된다[3]. 사장석은 평균 성분이 95%-97%의 회장석(Anorthosite, $\text{CaAlSi}_2\text{O}_8$)과 3%-5%의 조장석(Albite, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)으로 이루어져 회장암으로 구분된다[3]. 반면 아폴로 12가 채취한 바다의 현무암은 사장석, 감람석(Olivine), 휘석, 티탄철석(Ilmenite)을 포함한다[4]. 또한 단위면적당 충돌구 개수밀도(impact crater number density)가 높은 고원이 바다보다 상대적으로 우주공간에 오랜 기간 노출되어 있음을 시사한다. 고원처럼 밝게 보이지만 남극에 있는 에이트킨 분지(South Pole Aitken basin)는 실제 고도가 낮은 특별한 저고도 지대이다. 달의 진화 초기에 형성된 충돌구를 바다 물질(현무암질)이 피복한 구조를 이루고 있다.

달 표면의 암석 중에 가장 오래된 동위원소 측정 연대는 대략 45억 년($4.51 \pm 0.01 \text{ Ga}$)이다 [5]. 고원은 달 전체 표면적의 83%를 차지하며, 대략 44억 년 이전에 형성되었다[6]. 바다는 달의 앞면(지구에서 보이는 면)의 1/3을 차지하며, 초기의 거대 충돌 분지에 선-넥타리스 기와 넥타리스 기에 해당하는 38-42억 년 전에 용암이 흘러 들어와 평원으로 형성된 곳이다. 충돌구 개수 밀도 분포로 추정된 나이로 가장 젊은 곳은 폭풍의 대양으로 약 10억 년 전으로 추산된다[7]. 그러나 폭풍의 대양은 충돌 분지에 해당하지 않고 젊은 용암지대로 본다. 바다 표면의 용암은 화산 분출에 기인하는데, 거대 분지를 만든 충돌과 화산 분출에는 약 5억 년의 시간 차이가 있어, 거대 충돌이 화산활동을 촉발했을 가능성은 없다. 화산 분출이 지각 두께가 얇은 달 앞면에 집중되어 바다도 앞면에만 분포하는 것으로 이해된다. 폭풍의 대양 지각이 남극 에이트킨 분지 다음으로 얇아서 가장 최근까지 화산 분출물이 채워진 것으로 추정된다. 일부 화산은 분출이 격렬하여 유리질 화산쇄설물(pyroclastics)을 생성할 수 있었으며, 유리질의 티타늄 농도에 따라 다양한 색이 구현된다. 또한 현무암에서 관찰되는 기공(vesicle)은 용암이 급격하게 표면에 냉각되었음을 시사한다.

망원경으로 보았을 때 가장 눈에 띄는 달 지형은 충돌구이다. 1960년대 전에는 지구의 화산 분화구와 유사하다고 해서 분화구로 번역되기도 하였으나, 우주공간에서 떨어진 운석체의 충돌에 의한 지형으로 확고히 인식됨에 따라 충돌구로 정정되었다. Gene Shoemaker가 1970년대에 충돌구 지형에 중첩의 원리(superposition)를 적용하여 나이를 추정하기 시작하며 달 표면 연구가 천문학자에서 지질학자의 연구분야로 이관되었다. 충돌구는 아주 작은 구덩이로부터 남극 에이트킨 분지(직경 2,500 km, 깊이 13 km)까지 다양하다. 충돌구의 평균 크기는 과거에서 현재로 올수록 감소하는 추세로서, 현재의 바다 분지인 대형 충돌구는 달 형성 초기에 생성되었다.

고체 표면을 갖는 행성체의 단위면적 당 충돌구의 수(N)와 충돌체의 크기(r)는 멱법칙(power law)의 상관관계($\ln N = \ln a - m \ln r$)를 지니며, 각각의 행성체는 고유한 계수(a)와 차수(m)로 표현된다[8]. 동위원소 분석법이 적용된 지질학적 절대 연령 측정이 불가능한 행성체의 표면 나이(t)와 N 의 상관관계($\ln t = \ln b + n \ln N$) 역시 멱법칙으로 표현되며, 각각의 행성체는 고유한 계수(b)와 차수(n)로 표현된다[7]. N 과 t 는 비례관계를 이루므로, 단위면적 당 충돌구의 수가 커지면 해당 표면의 지각 형성 연대가 오래됨을 지시한다.

그동안의 다양한 실험과 분석연구에 따르면 운석체가 달 표면에 $\sim 17 \text{ km/s}$ 로 충돌하면, 먼저 압축 충격파(compression shock wave)가 충돌 지점으로부터 방사형으로 퍼져 나가고, 뒤

에 희박 충격파(rarefaction shock wave)가 충돌 지점의 물질을 축출하여 구덩이를 만든다. 대형 충돌구의 축출물(ejecta)은 덩어리 형태로 주변에 2차 충돌구를 만들 수 있다. 이 2차 충돌구는 방사형으로 분포하며 같은 크기의 충돌구보다 깊이가 얕아서 구분이 가능하다. 또한 축출물 덩어리가 선형 계곡을 만들기도 하는데, 이는 충돌체가 입사시에 부서져서 만드는 충돌구 체인과는 모양이 다르다. 미국 NASA Ames 연구소의 실험에 의하면 입사각이 5도 이하로 아주 비스듬한 충돌이 아니면 충돌구는 모두 원형으로 생성된다[9]. 원형 충돌구에서 중봉(central peak)이 중앙에서 벗어난 경우는 비스듬한 충돌을 시사한다. 대형 충돌은 표면으로부터 1 km 깊이까지 녹였을 것으로 추정하는데, 대표적인 예가 동방의 바다(Mare Orientale) 분지이다[10]. Fig. 3은 충돌구의 구조를 도식적으로 정리하고 있는데, 단순 충돌구(simple crater)에서는 바닥에 화산각력암(volcanic breccia)과 충돌 용융(impact melt)으로 생성된 유리질과 기반암의 균열 등이 보이고, 림(rim)과 바깥 부분에 축출물 피복(ejecta blanket)이 분포한다. 복합 충돌구(complex crater)는 얇은 바닥에 중봉이 존재한다.

충돌구의 분류체계는 학술적으로 여러가지가 있으나, 본 논문에서는 편의상 크기에 따라 소형, 중형, 복합, 대형 충돌구로 나누어 설명하겠다. Fig. 4는 몰트케 충돌구(Moltke crater)로 소형 충돌구의 전형적 예로서 직경이 7 km에 사발 모양(깊이가 직경의 ~20%) 하고 있다. 주변에 밝고 작은 오름들은 축출물이다. 축출물에 의한 2차 충돌구는 생기지 않은 모습이다. 중형 충돌구(Fig. 5; Bessel crater, 직경 16 km)는 출렁이는 얇은 바닥이 특징이며, 복합 충돌구(Fig. 6; Euler crater, 직경 28 km)는 얇은 바닥 중앙에 우뚝 솟은 중봉(central peak), 림

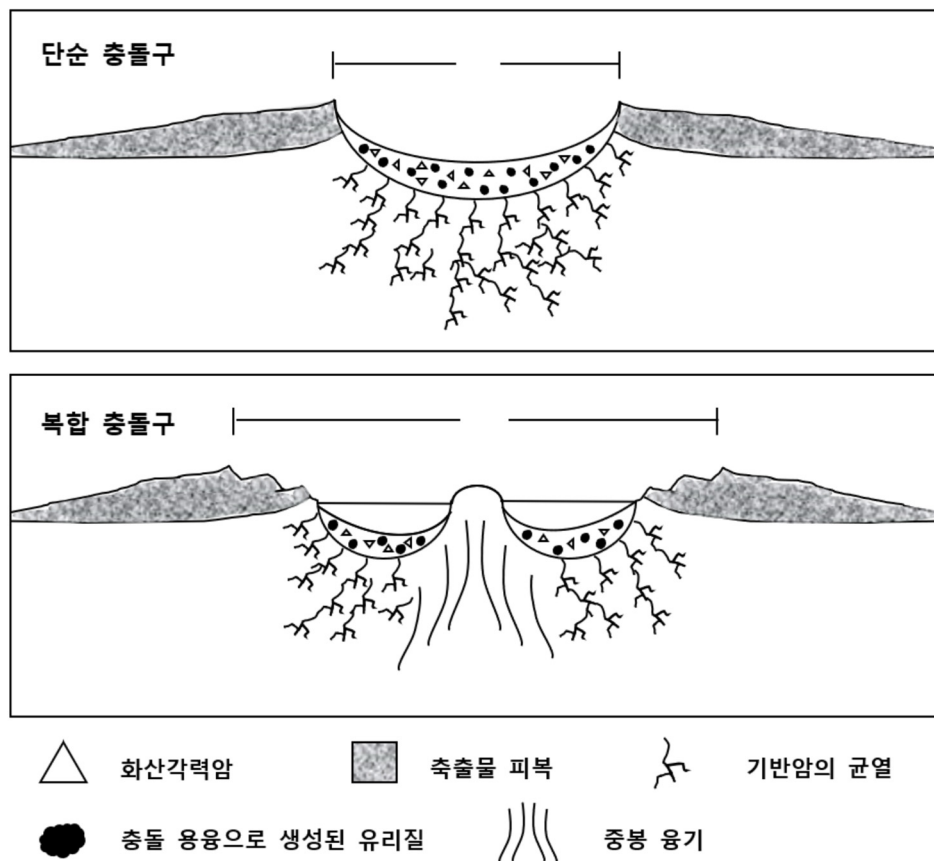


Fig. 3. Schematics of a simple crater and a complex crater.

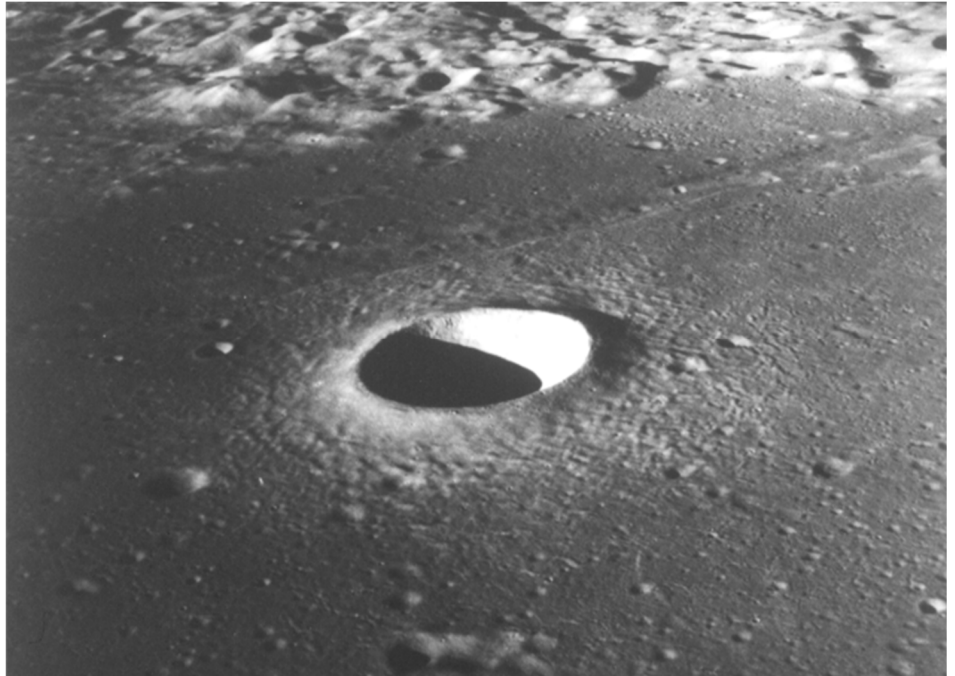


Fig. 4. Moltke crater (Apollo 10, NASA). A typical small bowl-shaped crater surrounded by a bright halo of higher-albedo ejecta material (<https://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/alsj/a410/AS10-29-4324.jpg>).



Fig. 5. Bessel crater (Apollo 15, NASA). A bowl-shaped with a shallow slumping floor (<https://history.nasa.gov/SP-362/ch5.4.htm>).



Fig. 6. Euler crater (Apollo 17, NASA). A complex crater with a central peak on the shallow slumped floor, and surrounded by rough ejecta materials (<https://history.nasa.gov/SP-362/ch5.4.htm>).

(rim) 밖으로 넘친 흔적 그리고 거친 암석 축출물의 방사형 분포가 인상적이다. 대형 충돌구는 여러 개의 큰 중봉들과 림 안에 테라스와 슬럼프(slumping blocks), 심지어 내부 환을 가진다(Fig. 7; King crater, 직경 77 km, Fig. 8; Schrödinger crater, 직경 320 km). 짧은 충돌구는 날카로운 림과 밝은 축출물 광조(ejecta rays)를 가지고 있다. 시간이 갈수록 우주풍화(space weathering)에 의해 광조는 검게 변하고, 미소 운석 충돌로 지형이 부드럽고 둥글어진다.

충돌구 외에 망원경으로 볼 수 있는 흥미로운 소형 지형으로 함몰용암굴 또는 열구(rille, 규모가 큰 것은 라틴어 rima)가 있다. 이 지형은 좁고 기다란 저지대를 통칭하는데, 대부분 용암채널(lava channel)이 동굴을 형성한 후에 천장이 무너져서 도랑 모양의 지형이 된다. 지구상의 사행천처럼 굴곡이 많은 채널로 화산 분출구와 연결된 것도 있다. Fig. 9와 Fig. 10은 대표적으로 아리스타쿠스(Aristarchus) 충돌구 지대의 쉬뢰터 계곡(Vallie Schröteri)과 비의 바다에서의 해들리(Hadley) 거대 열구(Rima Hadley)를 보여주는데, 이 지형들은 교육용 망원경으로도 잘 보인다. 그러나 사행하지 않고 두 개의 정단층(normal fault) 사이에 낮은 지대가 곧게 뻗어 있는 지형도 있는데, 달의 정 중앙에 위치하는 아리아다우스 지구대(Rima Ariadaeus)가 대표적이다(Fig. 11). 또한 비의 바다와 증기의 바다 사이의 아페닌(Apennine) 산맥을 가로지르는 매우 날카로운 아페닌 참호(Apennine trench)도 망원경으로 보면 인상적이다. 아마추어 천문학자에게 좋은 관측대상으로는 구름의 바다에 그어진 직선 지형인 직선 절벽(Rupes Recta, 영어로 Straight Wall)을 들 수 있다(Fig. 12). 점성이 높은 용암이 충돌 분지에



Fig. 7. King crater (Apollo 16, NASA). A large crater with multiple central peaks with terraced rim and slumping blocks (<http://lroc.sese.asu.edu/posts/32>).

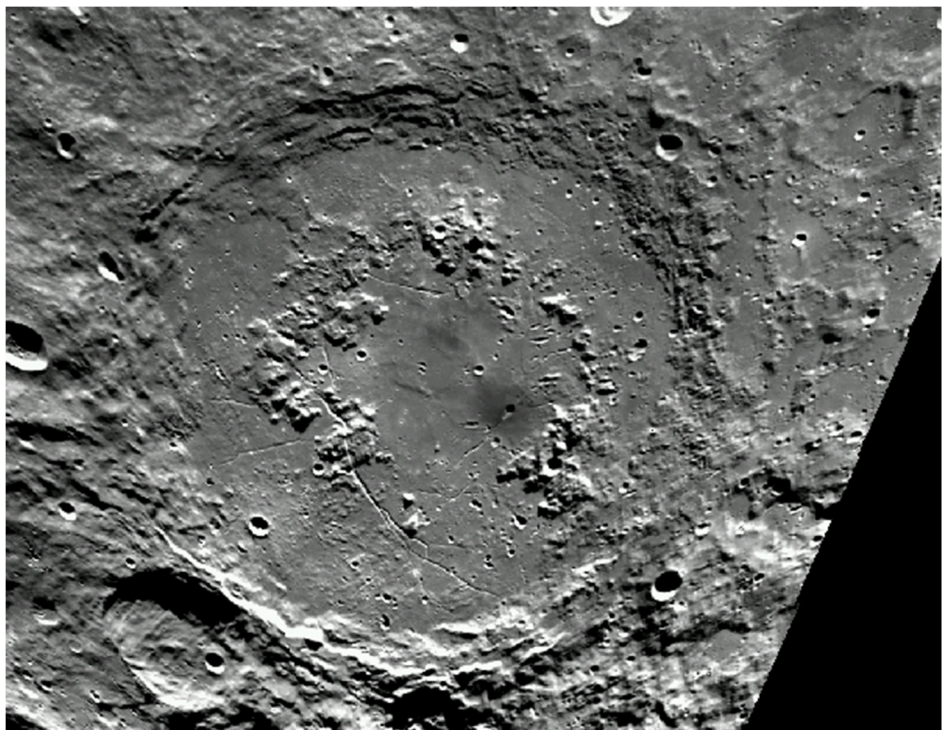


Fig. 8. Schrödinger crater (Clementine, NASA). A large young–fresh crater with an internal ring. (<https://www.lpi.usra.edu/science/kiefer/Education/SSRG2-Craters/schrodinger.gif>).

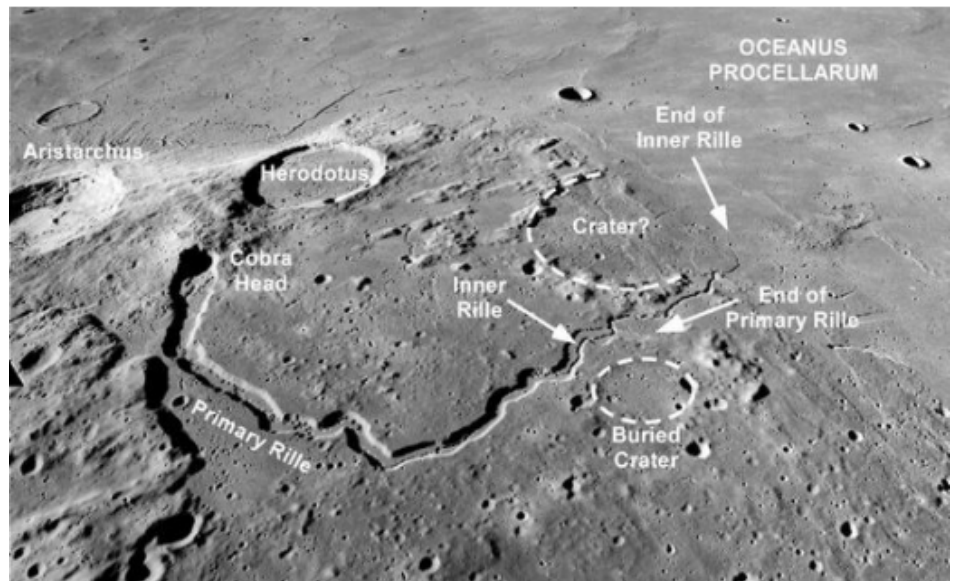


Fig. 9. Schröter's rille (Apollo 15, NASA/JSC/U of Arizona). A typical meandering rille (<https://moonmark.space/intuitive-machines/>).

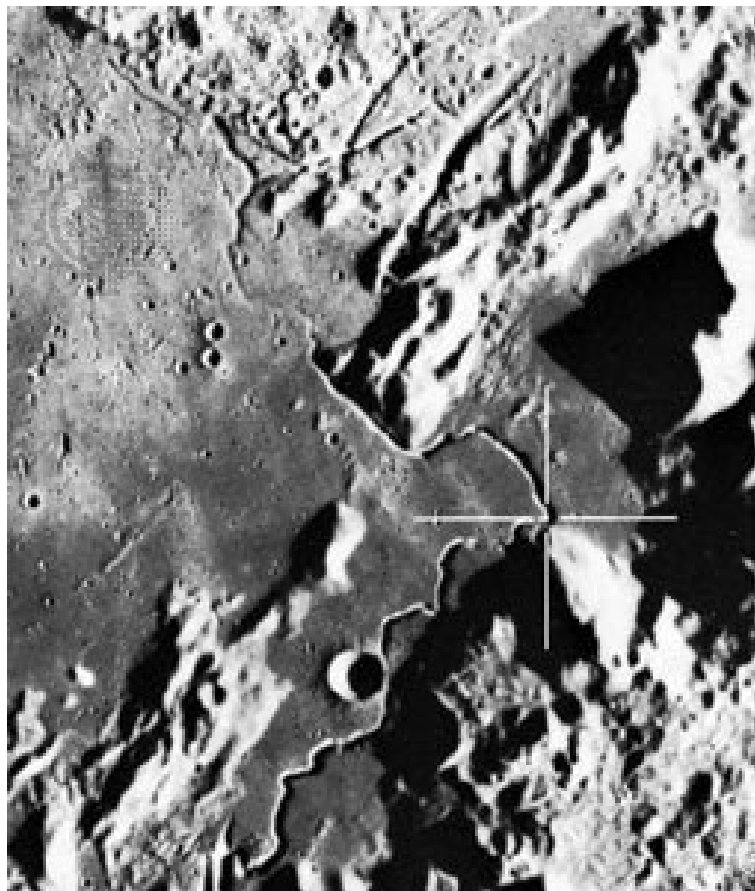


Fig. 10. Hadley rima (Apollo 15, NASA). The Apollo 15 landing site is marked with a cross (<https://www.britannica.com/place/Hadley-Rille>).

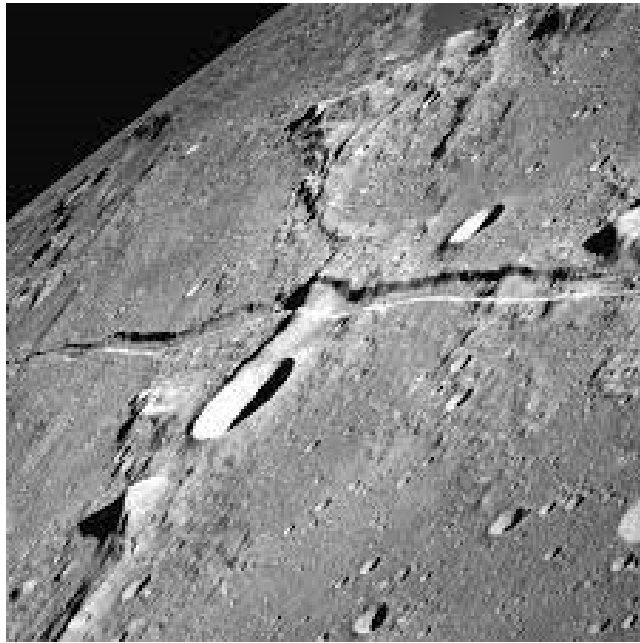


Fig. 11. Rima Ariadaeus (Apollo 10, NASA). A graben: feature sunk down between two parallel fault lines (<https://history.nasa.gov/afj/ap10fj/photos/31-r/as10-31-4646.jpg>).

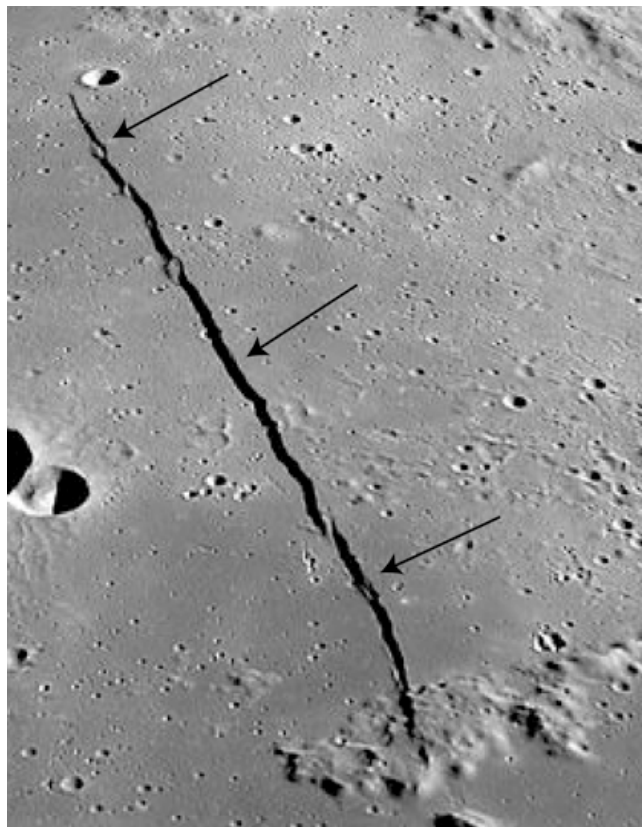


Fig. 12. Rupes Recta (LRO). The arrows indicate the direction of sunlight on the 8th lunar day (<http://zooniverse-resources.s3.amazonaws.com/blogs.zooniverse.org/4/files/2010/07/Screen-shot-2010-07-24-at-15.00.49.png>).

흘러 들어 굳어지면서 직선의 용암 절벽이 형성된 것으로 추정된다. 이 지형은 실제로는 그렇게 수직이지 않지만 월령 8일 경에 하늘의 서쪽에서 태양빛을 비추면 매우 선명한 그림자로 나타나기 때문에 인상적이다. 바다 지역 표면이 수축하면서 주름이 생길 수 있는데, 이런 지형을 주름 능선(wrinkle ridge)이라 한다. 대표적인 주름 능선은 구름의 바다에서 보이는데, 이 곳에는 주름 능선 외에 거대 열구(rima)도 보인다(Fig. 13).

망원경으로 보기에는 작지만 흥미로운 지형으로 돔(dome)과 용암동굴(lava tube)을 들 수 있다. 돔은 점성이 높은 용암이 좁은 분출구위에서 냉각되며 형성되는 원형의 고도 증가형 화산지형이다. 정상까지는 수백 미터이고, 직경은 8-12 km로 경사가 완만하며, 정상에 작은 구덩이가 있는 경우도 있다. 이 지형이야말로 진정한 의미의 분화구이다. 용암동굴은 최근 우주선에 의한 고해상도 화상 관측에서 발견되었다. Fig. 14는 Reconnaissance Orbiter가 발견

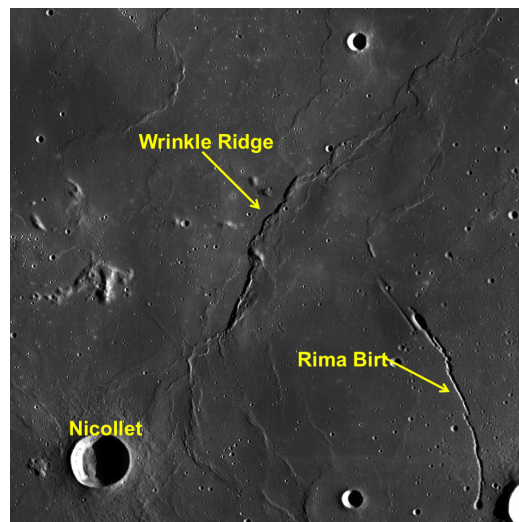


Fig. 13. Wrinkle ridge on Mare Nubium (LROC) (NASA/GSFC/Arizona State University) (<http://lroc.sese.asu.edu/posts/799>).

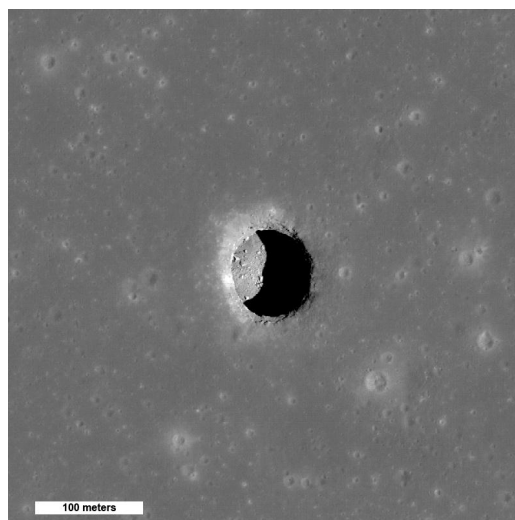


Fig. 14. A pit crater as a possible entrance of a lava tube (Reconnaissance Orbiter) (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA13518>).

한 원형 구덩이(pit crater)이다. 달의 표면에 노출된 원형 구덩이의 연속적인 배열 양상을 토대로 용암동굴 존재를 확인하게 된다. 원형 구덩이는 달표면에서의 운석 충돌이나 유해한 고에너지 태양 자외선과 태양풍 입자로부터 보호해주고, 극심한 온도 변화도 완화해 줄 수 있는 환경이기 때문에 미래의 달 유인 기지 후보지로서 실용적 가치가 인정된다.

3. 달의 지질학적 기본 특성

달 지질학의 본격적인 연구는 미국의 아폴로 유인 우주선과 소련의 무인 우주선 루나(Luna)가 각각 380.05 kg과 326 g의 월석을 가지고 지구로 귀환하면서 시작되었다. 가장 최근에는 2020년 11월 23일 발사된 중국의 창어 5호가 2020년 12월 1일에 시추한 1.731 kg의 월석 시료를 2020년 12월 16일에 가지고 귀환하였다. 아폴로 월석의 연구 결과, 감람석(olivine), 휘석(pyroxene), 사장석(plagioclase) 등의 광물이 확인되었다. 지구에 없는 새로운 광물도 발견되어 달 표면 최초 우주인 Armstrong의 이름을 따서 armalcolite라 명명되기도 했다. 바다는 철(Fe)이 풍부한 현무암질(basaltic)이고, 고원은 철이 부족한 회장암질(anorthositic)로 Ca가 풍부한 사장석이 주성분이다. 바다는 또한 Mg 계열의 암석인 Troctolite(감람석 + 사장석), Norite(자소휘석 반력암), KREEP(K, Rare Earth Elements, Phosphorus) 현무암을 포함하고 있다. 충돌구 바닥에서 흔히 보이는 각력암(breccia)은 사장석이 우세한 복성화산각력암(feldspathic polymict volcanic breccia) 이고, Mg와 Fe가 풍부한 고철질(mafic) 화산각력암도 발견된다. 바다의 현무암은 고원보다 감람석과 휘석이 더 많고, 사장석은 더 적다. 지구의 현무암보다 철이 풍부하고 점성이 낮으며, 자성이 없는 상자성 광물인 티탄철석(ilmenite, ferro-titanic oxide)을 포함하고 있다. 아폴로의 최초 관찰 표본에서 고농도 티탄함량이 관찰되기도 하였지만, 이후의 후속 연구에서 저농도 티탄함량의 현무암도 보고되었다. 크레멘타인(Clementine) 탐사선은 바다 현무암의 티탄 함량이 지역적으로 변화함을 확인하였다[11].

지구의 표토(regolith)는 풍화 암석의 부슬부슬한 토양을 의미하는 풍화모채층에서 온 말로서 토양층 전체를 뜻하기도 한다. 달 표토(regolith)는 수십억 년의 작은 미소 운석 충돌(micro meteorite impacts)에 의해 잘게 뿔어져서, 매우 고운 알갱이로 이루어진 표토층을 의미한다. 표토층의 두께는 얇은 바다에서는 2 m, 고원에서는 20 m 정도로 추정된다[12]. 표토는 돌, 기반암으로부터 온 광물 조각, 충돌로 생긴 유리입자 등을 포함하고 있다. 고원의 표토는 알루미늄(Al)과 실리카(SiO₂)가 많은 반면, 바다의 표토는 Fe와 Mg가 풍부한 고철질(mafic) 성분이며, 상대적으로 실리카가 부족하다. 표토는 태양풍 입자(He, Ne, C, N)도 포함하고 있어, 이들의 동위원소 분석으로 태양의 과거 활동 변화를 추정하게도 한다. 최근에는 태양풍 입자 중에서 가장 많은 양성자(수소원자핵, H)가 표면 암석의 산소와 결합하여 물분자(H₂O)를 지속적으로 만들어 냈을 가능성이 제시되었다. 또한 태양풍 원소 중 ³He, C, N은 미래에 달 기지에서 사용될 연료로서의 가능성도 제기되었다.

달의 내부 구조 탐사를 위해 아폴로 11, 12, 14, 15, 16 탐사 당시, 착륙지 부근에 지진계를 1969년부터 순차적으로 설치하였다. 이 지진계들은 배터리가 완전히 방전되는 1977년까지 작동하였으며, 9년간 총 59회의 지진계 작동이 감지되었다[13]. 총 59회의 계기 감지 가운데 27회는 유성체 충돌로 판명되었다. 진앙이 200 km 이내인 천발월진(Lunar Shallow Quakes)이 8회 관측되었고, 진앙이 835-1,200 km인 심발월진(Lunar Deep Quakes)이 24회 관측되

었다[13]. 관측된 지진자료와 각종 궤도선의 중력장 측정 자료를 종합 분석하여 표준 달 심부 모델이 개발되었다[14]. 달 전체 밀도는 $3,346 \text{ kg/m}^3$ 로서 철/금속 함량이 지구에 비해 현저히 작다. 전체 질량과 관성 모멘트 그리고 칭동 변화에 의하면 달의 중심에 달 반경의 약 1/4에 해당하는 $380 \pm 40 \text{ km}$ 크기와 $5,200 \pm 1,000 \text{ kg m}^3$ 의 밀도를 지니는 핵이 존재한다[14]. 2013년 이전까지는 달의 지각은 평균 50-65 km 두께로 추정되었다. 그러나 미항공우주국(NASA)의 GRAIL(Gravity Recovery and Interior Laboratory) 탐사위성 분석 결과, 달의 평균 지각 두께는 34-43 km로 수정되었다[15]. 지구나 수성과 달리 달은 현재 심부 기원의 내부 자기장이 존재하지 않는다. 일부 달의 지표 암석은 안정적인 잔류자화(remnant magnetization)를 보유하므로, 진화 초기의 달은 심부 기원의 내부 자기장을 보유하였다고 해석된다[16]. 그러나 잔류자화를 유도한 달의 과거 표면자화강도 결정값이 급감하는 25억 년을 전후하여 달의 다이아모가 약화되기 시작하여 19억-8억 년 사이에 소멸되었다고 여겨진다[17]. 달의 다이아모 소멸 시점에 대한 오차가 11억 년이나 되는 이유는 해당 시기의 월석이 매우 희귀하여 절대연령 측정 자료가 부족하기 때문이다. 현재 달은 심부 기원 내부 자기장을 보유하지 않지만, 표면 일부 지역에서 1,000 nT를 상회하는 강력한 자기이상(magnetic anomalies)이 측정된다. 이런 국지 자기이상은 충돌구 주변에 생성된 플라즈마에 의해 유도된 자기장이 강자성 광물에 잔류 자화의 형태로 보존되었기 때문이다.

달 생성 시초에 전체 표면이 용암의 바다였다는 가설(magma ocean hypothesis)이 널리 받아들여지고 있는데, 이 가설은 현재 발견된 달 표면 광물질을 설명할 수 있다. 즉, 달이 상당 부분 녹아 있는 용암 바다였고, 이로부터 광물들이 다음과 같이 분별 정출했다는 가설이다. 1) 초기에 500 km 두께의 용암 바다가 결정화되는 과정에서, 정출 온도가 가장 높은 감람석(olivine)과 휘석(pyroxene)이 우선적으로 정출되고, 이들은 마그마보다 무겁기 때문에 용암 바다의 하부로 가라앉게 된다. 2) 용암 바다의 약 3/4 정도가 정출된 시점에서 정출 온도가 낮은 사장석(plagioclase feldspar)의 정출되고, 낮은 밀도로 인해 위로 떠서 50 km 두께의 지각을 1억 년 내에 형성하였다. 3) 액체 상태를 선호하는(불호정) 원소들이 농축되어 KREEP이 풍부한 용암을 지각과 맨틀 사이에 생성하였다. Fig. 15는 이런 가설을 도식화하여 보여준다. 대표적인 KREEP 풍부지역은 폭풍의 대양과 비의 바다 분지로서 이를 통틀어 Procellarum KREEP 지대라 부른다.

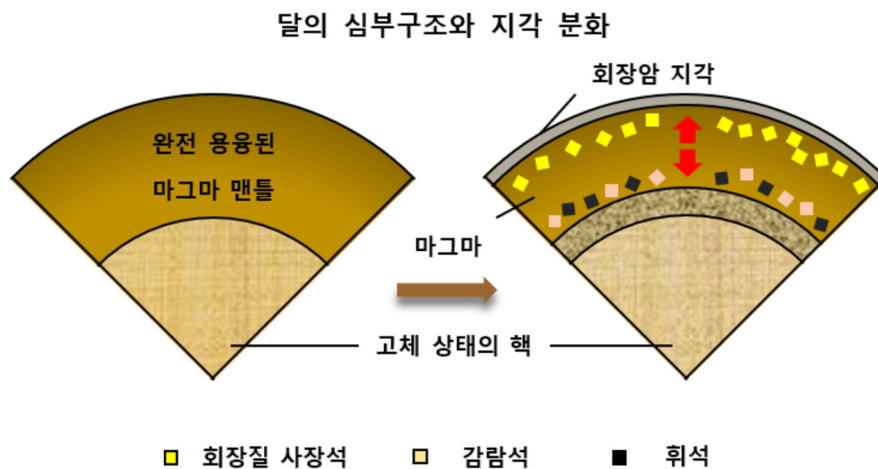


Fig. 15. Schematics of moon's interior and its creation concept.

4. 달 지질 시대 구분

Fig. 16은 달 지질 역사를 5개의 시대로 구분하여 보여준다. 지구의 지질 시대 구분은 주로 화석종 출현을 기준으로 하나, 달의 시대 경계는 대형 충돌 사건을 기준으로 한다[6]. 이는 표면 사진 판독에서 충돌구의 개수 빈도와 크기가 현저하게 달라지는 것이 대형 충돌 사건과 연관되기 때문이다. 절대 나이는 달에서 가져온 표본 암석의 동위원소 측정 나이로 결정된다. 그러나 초기 시대 구분은 달 표면 표본이 약 41-39억 년 전 기간 동안에 일어난 후기 중폭격(late heavy bombardment)의 영향을 받았을 가능성으로 인해 불확실하다. 특히 고원지대는 넥타리스 기(Nectarian)와 선-넥타리스 기(Pre-Nectarian) 구분이 어려워져 선-임브리움 기(Pre-Imbrian)라고 통칭하기도 한다.

선-넥타리스 기는 달 지각 형성부터 감로주의 바다 분지를 만든 Nectaris 충돌 사건까지로써 45-39.2억 년 전 시기이다. 감로주의 바다 분지는 다중 충돌 환을 가지고 있고, 축출물 피복(ejecta blanket)들이 층리 구조를 알려준다. 이 시기에 30개의 충돌 분지가 생성되었다고 추정되며, 그 중에서 가장 오래된 것은 남극 에이트킨 분지이다.

넥타리스 기(Nectarian)는 Nectaris 충돌과 Imbrium 충돌 사건 사이를 지칭하며, 39.2-38.5억 년의 짧은 기간이다. 이 기간에 해당하는 12개의 다중 환 충돌 분지가 알려졌는데, 대표적으로 평온의 바다(Serenitatis)와 위난의 바다(Mare Crisium) 분지를 들 수 있다. 아폴로 16호가 감로주의 바다 분지 물질을 채취하여 동위원소 나이를 결정하였다.

임브리움 기(Imbrian)는 Imbrium 충돌 사건과 특정 크기의 충돌구의 침식 유실 시점 사이를 지칭하며, 38.5-32억 년 전의 기간이다. 이 시대는 또한 Imbrium 충돌과 Oriental 충돌까지의 기간을 전기로, 그 이후를 후기로 나누기도 한다. 전기에는 임브리움(Imbrium) 분지 외에 쉬뢰딩거(Schrödinger) 분지가 유일한 다중환 분지이고, 이후에는 다중환 충돌 분지가 생기지 않았다. 후기의 기준인 Oriental 충돌은 동위원소 나이 측정이 아직 안되었고, 충돌구 개수 분포에 기초하여 나이가 38.4-37.2억 년 전으로 추정된다. 현재 보이는 바다의 2/3가 후기에 형성되어, 그전에 있었던 충돌구들을 모두 지워버렸다.

에라토스테네스 기(Eratosthenian)의 끝은 밝은 광조(rays)들이 우주 풍화(space weathering)로 검게 변해 구분하지 못하는 시점으로 정의되는데, 약 11억 년 전이다. 이 시대의 시작과 끝의 절대 나이는 암석에 의해 정확히 측정되지 못했음에 유의해야 한다. 즉, 충돌구의 침식 유실 시점이나 밝은 광조가 검게 변하는 시점은 다소 임의적일 수 있다. 특히 광조의 화학 성분에 따라 우주 풍화가 더디게 일어날 수도 있다. 예를 들어 고원지대의 충돌 축출물이 바다에 뿌려진 광조(예: 티코 충돌구에서 나온 일부의 밝은 광조들)는 상당히 오랫동안 밝게 남아 있을 수 있다. 폭풍의 바다는 이 시대에 생성된 것으로 충돌구 개수 분포로 추정하고 있다.

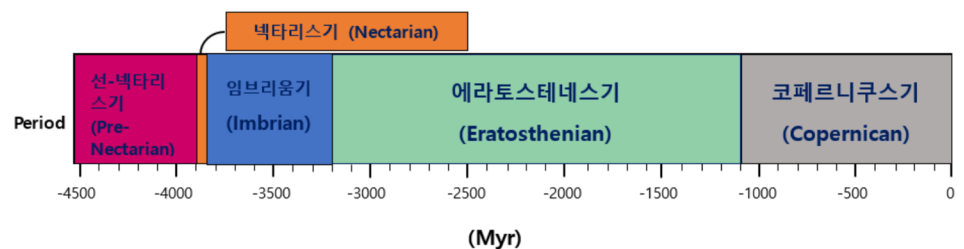


Fig. 16. A standard lunar stratigraphy [18].

최근 중국의 창어 5호 우주선이 폭풍의 바다에서 표본 시료를 채취 귀환함으로써, 이 지대의 절대 나이가 결정될 것으로 기대되고 있다[19,20]. 현재 충돌개수 분포와 절대 나이를 연결하는 자료로는 1970년대에 아폴로 우주선과 루나 우주선이 가져온 달 암석의 동위원소 나이를 사용하고 있는데, 이 암석들의 나이가 30-40억 년 범위에 속해 있어, 그보다 젊은 지역의 충돌개수 나이 추정은 불확실성이 높다. 창어 5호가 가져온 폭풍의 바다 암석들이 이 젊은 지역의 나이를 특징하는 데 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

코페르니쿠스 기(Copernican)의 시작점은 밝은 광조들의 주변에 있는 충돌구 개수 분포 나이로 추정되었다. 현재 가장 오래된 밝은 광조의 나이는 약 11억 년으로 다수가 인정하기 때문에, 이 시점을 기준으로 한다. 따라서 이 시작점과 약 8억 년으로 추정되는 코페르니쿠스 충돌구의 나이가 같지 않음에 유의해야 한다.

이와 같이 달의 지질 시대는 특정 충돌 사건을 기준으로 정의되었기 때문에 다른 행성체의 연대 구분과 직접적 대비가 무의미하다. 참고로 현재 지구에서 발견된 가장 오래된 암체는 캐나다의 아카스타 편마암으로 절대연령 $4,031 \pm 3$ Ma이며[21], 가장 오래된 광물은 호주 서부 잭슨힐스 역암에서 관찰되는 저콘으로 절대연령 $4,404 \pm 8$ Ma[22]이다. 이는 모두 지구의 지질시대 중에서 태고대(Hadean)에 해당한다.

5. 달 표면의 물 발견

주지하다시피, 달에는 대기가 없어 표면 온도가 극심하게 변할 뿐만 아니라, 휘발성(volatile) 물질은 바로 절대 진공과 유사한 우주공간으로 유실되므로 심지어 고체상태로도 유지되기 어렵다. 그럼에도 달의 극 지방의 영구 음영지역(Permanently Shadowed Region, PSR)에는 얼음이 존재할 수 있다는 주장이 1960년대에 처음으로 나왔다[23]. 이론적으로 혜성 충돌에 의해 들어온 물 얼음은 태양빛이 들어오지 않는 극지방의 PSR에 오랫동안 증발하지 않고 유지될 수 있다고 예측되었다. 그러나 1970년대에 미량의 수증기가 아폴로 달 착륙선 14호의 질량분석기에서 발견되었고, 소련의 루나 24호가 가져온 달 암석에서도 상당량의 물분자가 측정되었음에도, 달 표면의 물 존재는 여전히 의문시되었다.

달에 대한 무관심 시기를 지나, 1994년 미국 국방성의 클레멘타인 우주선이 달 표면을 레이다로 관찰하며 남극 지역의 영구 음영지역(PSR)의 매끄러운 표면이 얼음일 수 있다는 관측적 증거가 제시되면서 달에 대한 관심이 재점화됐다[24]. 1998년 발사된 미국의 루나 프로스펙터(Lunar Prospector) 궤도선은 중성자 분석기(neutron spectrometer)를 이용하여 우주선(cosmic ray)이 달 표면 광물에 충돌하면 분출되는 준 열적 중성자(epithermal)를 측정하였다. 놀랍게도 이 준 열적 중성자의 양이 다른 지역과 달리 극지역에서 매우 적게 측정되었는데, 이는 표면에 있는 물 분자(H_2O)가 중성자를 흡수하기 때문이라고 해석되므로, 상당한 얼음이 극지방에 있음을 시사하였다[25]. 이후 미국, 일본, 중국, 인도의 우주선들이 달 표면 물에 대한 직접적인 증거를 측정하기 위한 경주가 시작되었다. 결국, 2009년 9월 25일 인도의 찬드라얀 1호(Chandrayaan-1) 우주선이 달 남극 섀클톤(Shackleton) 충돌구에 탐사선을 충돌시켜 표면에서 솟아오르는 분출물에서 물분자를 측정하였다. 바로 이어 2009년 10월 9일 미국의 LRO 우주선에서도 Atlas V 로켓의 상단로켓을 달 남극 섀클톤 충돌구 옆에 있는 카베우스(Cabeus) 충돌구에 강력하게 충돌시켜 표면에서 분출되는 화염을 LCROSS가 뒤따라가며 정밀 측정하였다. 여러 측정 장비가 충돌 화염에서 물분자를 분명히 측정하였을 뿐만

아니라, 물의 함량이 질량비로 $5.6 \pm 2.9\%$ 임을 특정하였다[26]. LRO에 탑재된 레이저 고도계 (laser altimeter)는 색클튼 충돌구의 표면이 22%까지 얼음으로 덮여 있을 수 있다고 제안했다[27]. 또한 LRO에 탑재된 중성자 측정기(LEND)로 측정된 남극 지역의 물 함량 지역이 영구 음영지역과 상관없으며(Fig. 17), 영구적인 저온이 표토에 의한 물 포획에 필요 조건이 아님이 주장되었다[28]. 또한 찬드라얀 1호 우주선에 탑재된 NASA의 적외선 분광기(ISRO)는 달 표면 여러 곳에서 $3 \mu\text{m}$ 등의 적외선 파장 영역에 강한 물(H_2O) 또는 수산기(OH)의 흡수대가 있음을 확인하였다. 이렇게 측정된 ISRO의 적외선 스펙트럼 스캔 자료는 달 광물 매퍼 자료(Moon Mineralogy Mapper, M3)로 Fig. 18에 나타냈다. 이 그림에서 남북극 지역의 푸른색은 물/수산기($\text{H}_2\text{O}/\text{OH}$)가 많이 분포함을 뜻한다.

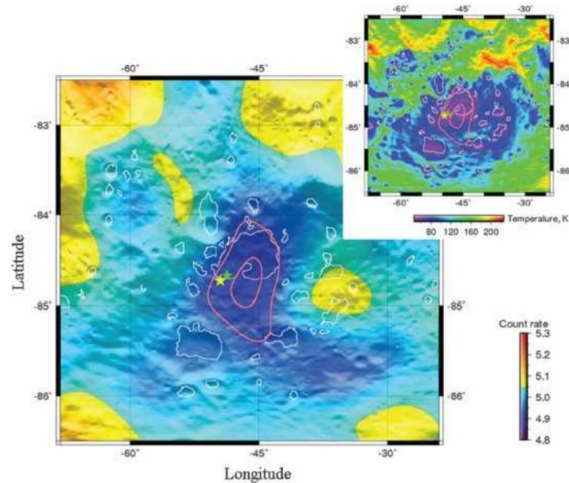


Fig. 17. Hydrogen contents measured by LEND onboard LRO and temperature distribution [28]. The star indicates the impact site of LCROSS.

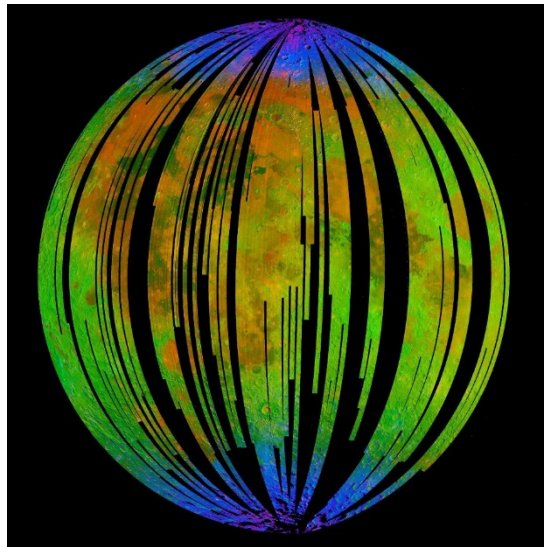


Fig. 18. A combined image of Moon Mineralogy Mapper (M3) measured by ISRO onboard Chandryaan-1 (ISRO/NASA). The blue color indicates the enhancement of $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}$ (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Water_Detected_at_High_Latitudes_on_the_Moon.jpg).

또한 달의 극지역이 아닌 지역에서도 물의 발견이 최근 속속 보고되고 있다. 아폴로 17호가 가져온 달 암석의 유체 포유물(melt inclusion) 중에 615-1,410 ppm의 물분자가 존재한다는 사실이 최근에 보고되었다[29]. 이는 이 암석이 37억 년 전에 화산 분출로 생성되었을 시에 그 마그마 속에 물이 포함되어 있었음을 시사한다[30]. 이는 달 표면에 산재하는 화산 쇄설물(pyroclastic deposits)에서 물을 채취할 가능성이 있음을 의미한다. 가장 최근인 2020년 10월에 몇몇 지상 관측천문학자들이 독립적으로 달의 표면에서 물분자를 발견했다고 보고했다. 특히, 성층권 고도를 비행하는 점보 제트기에 탑재된 적외선 관측소(Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy, SOFIA)는 100-400 ppm까지의 물 분자를 극지역이 아닌 태양빛이 입사되는 지역에서도 측정했다고 보도하였다[31,32]. 이렇게 달의 광범위한 지역에서도 물 분자가 발견되려면, 혜성 충돌에 의한 물 입력 이외에 다른 기작이 필요하다. 최근 이론에 따르면 태양풍이 입사하여 달 표면 광물질의 산소원자와 반응하여 물 분자 또는 수산기를 생성하여 광물질내에 축적시킬 수 있다고 한다[33].

이와 같이 달 표면에서 물의 존재는 더 이상 논란없이 확고히 받아들여지고 있다. 다음 단계는 달에서 인간 활동에 필수불가결한 물을 채취하는 연구일 것이다. 2021년부터 발사예정인 미국의 아르테미스 유인 우주선 시리즈가 달 표면에서 물 채취 실험을 할 것으로 기대하고 있다. 2022년 NASA는 달 현지자원활용(ISRU)과 관련된 첫 실험은 달 극지에서 얼음이 섞인 토양을 드릴링해서 물을 채취하는 PRIME-1 미션이 수행될 예정이다. 국내에서도 한국지질자원연구원을 중심으로 출연(연)-산업체 융합 형태의 달 표면 물 채취 장치 개발을 준비 중에 있다. 우리나라는 10번째로 아르테미스 협정을 체결한 국가이다. 달에서 물이나 산소 등을 추출하는 내용으로 아르테미스 연구협력에 참여한다면, NASA와 중복되지 않는 추출 방법으로 달 자원 추출 협력이 이루어지기를 희망하고 있다. Fig. 19는 달 극지와 저위도 지역에서의 물 추출에 대한 개념도이다. 우선 극지 표토를 대략 300°C의 저온환경에서 가열하여 기체를 뽑아내고, 이로부터 물과 다른 유용한 기체들을 분리하는 장치가 필요하다. 저위도 표토에서는 저온 가열로 활성기체를 추출하고, 대략 1,000°C의 고온가열로 물과 건축자재를 생산하

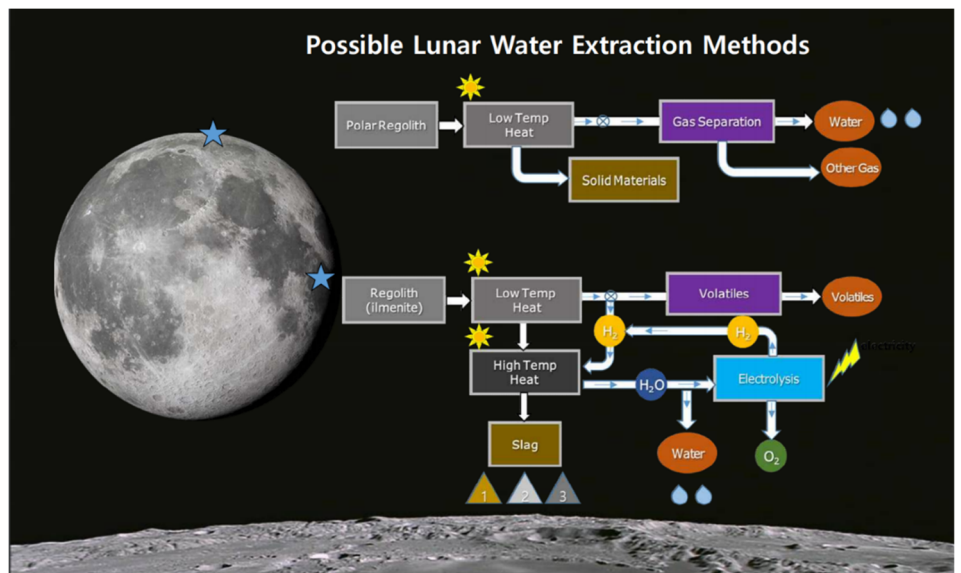


Fig. 19. A concept of extraction of water and other resources from lunar regolith [36].

는 방식이다. 물의 전기분해를 통해 인간 활동에 필요한 산소와 연료로 사용될 수 있는 수소로 전환할 수도 있다[34,35].

6. 요약 및 결론

본 논문은 천문우주전공자에게 달의 지형 지질학에 대한 기본 지식 전달과 한글 용어의 정착에 기여하기 위해 작성되었다. 달 표면 지형 이름은 학술적 기원 설명과 함께 가능한 한 현재 통용되는 한글 용어와 통일을 유지하며 새로운 용어들을 제안하였다. 특히, 일반인들에게 달 앞면을 쉽게 소개할 수 있도록, 1 대양(폭풍의 대양), 10대 바다(비, 평온, 고요, 감로주, 풍요, 위난, 증기, 인식, 습기, 구름), 6대구(티코, 코페르니쿠스, 케플러, 아리스타쿠스, 스테비누스, 랑그레누스)를 제안하였다. 이 지형들은 저배울 망원경으로도 구분이 가능해서, 앞으로 있을 아르테미스(Artemis) 등의 달 착륙선의 위치를 소개하는 이정표로 사용될 수 있다. 대표적인 달 지형인 고원(highland), 바다(maria), 충돌구(impact crater), 산맥(mountains), 함몰용암굴/열구(rille, rima), 돔(dome), 주름능선(wrinkle ridge), 지구대(graben), 절벽(rupes), 참호(trench) 등의 용어를 대표적 사진과 함께 설명하였다. 충돌구는 크기에 따라 소형, 중형, 복합, 대형으로 분류하여 대표적인 예와 특징들을 소개하였다. 또한 달의 기초적인 지질학적 표준 이론과 표준 시대 구분을 소개하였다. 마지막으로 달에서의 인간활동에 대한 획기적인 단초가 된 달 표면에서의 물의 발견과 그 활용 가능성을 정리하였다. 본 논문이 한국에서 달과 우주 탐사에 대한 관심을 증대시키는 데 기여할 수 있기를 바란다.

감사의 글

본 연구는 한국우주과학회를 통한 한국천문연구원 학연사업(2020)의 지원을 받았음.

References

1. Kopal Z, Mapping of the Moon, in An Introduction to the Study of the Moon, eds. Burton WB, Shore SN (Springer, Dordrecht, 1966), 4.
2. Wood CA, Lunar hall of fame, Sky & Telescope (2017) [Internet], viewed 2020 Jul 27, available from: <https://skyandtelescope.org>
3. Prinz M, Dowty E, Keil K, Bunch TE, Spinel troctolite and anorthosite in Apollo 16 samples, Science. 179, 74-76 (1973). <https://doi.org/10.1126/science.179.4068.74>
4. Green DH, Ware NG, Hibberson WO, Major A, Experimental petrology of Apollo 12 basalts: part 1, sample 12009, Earth Planet. Sci. Lett. 13, 85-96 (1971). [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(71\)90109-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(71)90109-9)
5. Barboni M, Boehnke P, Keller B, Kohl IE, Schoene B, et al., Early formation of the Moon 4.51 billion years ago. Sci. Adv. 3, e1602365 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602365>
6. Hiesinger H, Head JW III, Wolf U, Jaumann R, Neukum G, Ages and stratigraphy of mare basalts in Oceanus Procellarum, Mare Nubium, Mare Cognitum, and Mare Insularum, J. Geophys. Res. 108, E7 (2003). <https://doi.org/10.1029/2002JE001985>

7. Neukum G, Ivanov BA, Hartmann WK, Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system, *Space Sci. Rev.* 96, 55-86 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1011989004263>
8. Brown P, Spalding RE, ReVelle DO, Tagliaferri E, Worden SP, The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth, *Nature.* 420, 294-296 (2002). <https://doi.org/10.1038/nature01238>
9. Gault DE, Wedekind JA, Experimental studies of oblique impact, Proceedings of the 9th Lunar and Planetary Conference, Houston, TX, 13-17 Mar 1978.
10. Lunar LO, Impact Basin Geology (2019) [Internet], viewed 2021 July 10, available from: https://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/orbiter/lunar_orbiter/impact_basin/
11. Bussey DBJ, Spudis PD, Compositional analysis of the Orientale basin using full resolution Clementine data: some preliminary results, *Geophys. Res. Lett.* 24, 445-448 (1997). <https://doi.org/10.1029/97GL00178>
12. Wikipedia, Geology of the Moon (2021) [Internet], viewed 2021 July 10, available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Geology_of_the_Moon
13. Lognonné P, Gagnepain-Beyneix J, Chenet H, A new seismic model of the Moon: implications for structure, thermal evolution and formation of the Moon, *Earth Planet. Sci. Lett.* 211, 27-44 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00172-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00172-9)
14. Garcia RF, Gagnepain-Beyneix J, Chevrot S, Lognonné P, Very preliminary reference Moon model, *Phys. Earth Planet. Inter.* 188, 96-113 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2011.06.015>
15. Wieczorek MA, Neumann GA, Nimmo F, Kiefer WS, Taylor J, et al., The crust of the Moon as seen by GRAIL, *Science.* 339, 671-675 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1231530>
16. Green J, Draper D, Boardsen S, Dong C, When the Moon had a magnetosphere, *Sci. Adv.* 6, eabc0865 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc0865>
17. Mighani S, Wang H, Shuster DL, Borlina CS, Nichols CIO, et al., The end of the lunar dynamo, *Sci. Adv.* 6, eaax0883 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0883>
18. Wilhelms DE, Geologic history of the Moon, U.S. Geological Survey Professional Paper, 1348 (1987).
19. Klotz I. New Moon, *Sci. Am.* 325, 18 (2021). <https://doi.org/10.1038/scientificamerican.0721-18b>
20. Normile D, China set to bring back rocks from the Moon, *Science.* 370, 900 (2020).
21. Bowring SA, Williams IS, Priscoan (4.00-4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada, *Contrib. Mineral. Petrol.* 134, 3-16 (1999). <https://doi.org/10.1007/s004100050465>
22. Wilde SA, Valley JW, Peck WH, Graham CM, Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago, *Nature.* 409, 175-178 (2001). <https://doi.org/10.1038/35051550>
23. Watson K, Murray BC, Brown H, The behavior of volatiles on the lunar surface, *J. Geophys. Res.* 66, 3033-3045 (1961). <https://doi.org/10.1029/JZ066i009p03033>

24. Simpson RA, Tyler LG, Reanalysis of Clementine bistatic radar data from the lunar south pole, *J. Geophys. Res.* 104, 3845–3862 (1999). <https://doi.org/10.1029/1998JE900038>
25. Feldman WC, Maurice S, Binder AB, Barraclough BL, Elphic RC, et al., Fluxes of fast and epithermal neutrons from lunar prospector: evidence for water ice at the lunar poles, *Science.* 281, 1496–1500 (1998). <https://doi.org/10.1126/science.281.5382.1496>
26. Colaprete A, Schultz P, Heldmann J, Wooden D, Shirley M, et al., Detection of water in the LCROSS ejecta plume, *Science.* 330, 463–468 (2010). <https://doi.org/10.1126/science.1186986>
27. Zuber MT, Head JW, Smith DE, Neumann GA, Mazarico E, et al., Constraints on the volatile distribution within Shackleton crater at the lunar south pole, *Nature.* 486, 378–381 (2012). <https://doi.org/10.1038/nature11216>
28. Mitrofanov IG, Sanin AB, Litvak ML, Water in the Moon's polar areas: results of LEND neutron telescope mapping, *Dokl. Phys.* 61, 98–101 (2016). <https://doi.org/10.1134/S1028335816020117>
29. Hauri EH, Weinreich T, Saal AE, Rutherford MC, Van Orman JA. High pre-eruptive water contents preserved in lunar melt inclusions, *Science.* 333, 213–215 (2011). <https://doi.org/10.1126/science.1204626>
30. Benna M, Hurley DM, Stubbs TJ, Mahaffy PR, Elphic RC, Lunar soil hydration constrained by exospheric water liberated by meteoroid impacts, *Nat. Geosci.* 12, 333–338 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0345-3>
31. Chang K, There's water and ice on the Moon, and in more places than NASA thought: future astronauts seeking water on the Moon may not need to go into the most treacherous craters in its polar regions to find it, *The New York Times* (2020) [Internet] , viewed 2021 Oct 26, available from: <https://www.nytimes.com/2020/10/26/science/moon-ice-water.html>
32. Honniball CI, Lucey PG, Li S, Shenoy S, Orlando TM, et al., Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA, *Nat. Astron.* 5, 121–127 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41550-020-01222-x>
33. Teodoro LFA, Eke VR, Elphic RC, Feldman WC, Lawrence DJ, How well do we know the polar hydrogen distribution on the Moon? *J. Geophys. Res.* 119, 574–593 (2014). <https://doi.org/10.1002/2013JE004421>
34. Kim KJ, Discovery of water on the moon and its significance of the distribution of water with respect to lunar in-situ resource utilization. *KSCE Mag.* 69, 14–23 (2021).
35. Kim KJ, Introduction to lunar oxygen distribution and its extraction technology. *Korean J. Mineral. Petrol.* 34, 83–93 (2021). <https://doi.org/10.22807/KJMP.2021.34.1.83>
36. Kim KJ, Planning study on technology development of oxygen resource extraction and utilization at lunar surface by KIGAM-National Institute Cooperation for Participation in International ISRU Program, KIGAM Report, JP2020-004-2021(1) (2021).

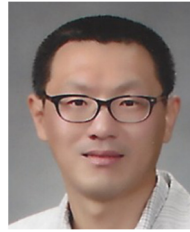
Author Information

김용하 yhkim@cnu.ac.kr



1990년 미국 뉴욕주립대학 스토니부룩에서 우주과학으로 박사학위를 받은 후, 1994년부터 충남대학교 천문우주과학과 교수로 재직 중이며, 행성대기/태양계 연구와 지구 고층대기 연구를 수행해왔다. 또한 20여년간 학부 태양계 천문학을 강의하며, 태양계 연구의 국제적 동향에 관심을 가져왔다.

유용재 yongjaeyu@cnu.ac.kr



2002년 캐나다 토론토대학교에서 물리학(지구 물리학 전공)으로 박사학위를 받은 후, 2008년부터 충남대학교 지질환경과학과 교수로 재직 중이며, 지자기 변동과 암석/운석의 자화특성을 연구한다.

최성희 chois@cnu.ac.kr



1998년 서울대학교에서 암석학으로 박사학위를 받고, 2009년부터 충남대학교 지질환경과학과 교수로 재직 중이며, 지구 맨틀과 지각의 생성 및 진화과정 연구를 수행 중이다.

김경자 kjkim@kigam.re.kr



2001년 뉴질랜드 빅토리아대학교에서 지질학 박사학위를 받은 후, 미국 뉴멕시코대학/운석연구소와 아리조나대학/달행성연구소에서 근무하였으며, 2007년부터 한국지질자원연구원 국토지질연구본부, 2010년부터 연한대학원대학교 물리탐사공학과 교수로 재직 중이며, 행성 지질과 달 탐사 연구를 수행 중이다.