



Review

행성의 퇴적기록과 고환경 연구: 화성 게일 크레이터의 사례

주영지

국립부경대학교 환경지질과학전공

Martian sedimentary record and paleoenvironmental reconstruction: examples from Gale crater

Young Ji Joo

Major of Environmental Earth Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

Received: October 10, 2025 / Revised: November 24, 2025 / Accepted: November 25, 2025

*Corresponding author: +82-51-629-6628 / E-mail: yjoo@pknu.ac.kr

요약: 화성 게일 크레이터(Gale Crater)에서 지난 10여 년간 수행된 NASA의 큐리오시티(Curiosity) 로버의 Mars Science Laboratory (MSL) 미션을 통해 화성 표면 환경의 변화와 물의 역사에 대한 다양한 연구 결과가 도출되었으며, 이를 통해 행성 퇴적기록 연구의 과학적 중요성이 확인되었다. 본 논평에서는 MSL 미션에서 수행된 퇴적지질학 기반 연구의 방법과 주요 결과를 검토하고, 이러한 연구가 행성 지표 환경의 진화 해석에 기여하는 바를 고찰하였다. 화성의 퇴적 층서, 퇴적 구조, 암석 조성에 대한 분석은 지구의 퇴적지질학적 연구 방법이 암석형 천체의 탐사에 효과적으로 적용될 수 있음을 보여주며, 퇴적 기록이 행성의 기후 변화, 수권의 역사, 물-암석 반응을 복원하는 핵심 자료임을 입증한다. 이러한 성과는 행성의 물질순환과 환경 변화를 통합적으로 이해하기 위한 학문적 토대를 제공하며, 향후 화성 및 여타 암석형 천체 탐사의 과학임무 수립 과정에서 퇴적지질학 분야의 고려가 필수적임을 시사한다.

주요어: 큐리오시티 로버, 행성지질, 화성 환경, 물-암석 반응

ABSTRACT: Since 2012, NASA's Curiosity rover of the Mars Science Laboratory (MSL) mission has been exploring the sedimentary records of Gale crater, providing crucial insights into the evolution of the Martian surface environment. This study reviews the sedimentary geological approaches and key findings from the MSL mission, highlighting their contributions to interpreting the evolution of planetary surface environments. The stratigraphy, sedimentary structures, and whole-rock compositions of Gale sediments demonstrate that techniques of sedimentary geology can be effectively applied to the study of rocky planets. The observations allow to reconstruct climatic evolution, history of surface water, and water-rock interactions on Mars, and to establish a framework for understanding planetary geochemical cycles and environmental changes. The findings underscore that sedimentary geology can play a pivotal role in future exploration programs for Mars and other rocky planets, including those currently being developed in Korea.

Key words: curiosity rover, planetary geology, Martian environment, water-rock interaction

1. 서론

미국의 아폴로 탐사로 대변되는 20세기의 달 탐사부터 로버(lander)를 활용한 NASA의 화성 탐사에 이르기까지 암석형 천체 탐사의 중심에는 지질학적 탐구가 있었다. 달 탐사의 경우 착륙 후보지 선정과 우주비행사를 대상으로 한 야외지질조사 훈련 등에서 지질학자들이 주도적인 역할을 수행하였으며, 그 결과 달에서 수집한 암석과 표토 시료를 이용하여 달의 진화 역사를 규명할 수 있었다(Young, 2017; Cartier, 2019). 21세기 들어 NASA에서 수행 중인 Mars Science Laboratory Mission (MSL)과 Mars 2020 미션의 경우 한 단계 더 나아가 화성의 게일 크레이터(Gale crater)와 예제로 크레이터(Jezero crater) 내부에 분포하는 퇴적층을 대상으로 로버를 이용한 지질조사, 시료 채취와 분석을 수행하였다(예, Grotzinger *et al.*, 2014; Farley *et al.*, 2022). 이러한 탐사를 통하여 화성의 과거 퇴적 환경과 층서 발달, 물-암석 반응에 대한 보다 체계적인 지질학적 탐구가 이루어졌다. 특히 퍼서비어런스(Perseverance) 로버가 채취, 저장한 시료는 향후 시료 회수 임무(Sample Return Mission)을 통한 지구에서의 실험실 분석 기반을 마련하였다. 이처럼 지질학적 접근은 행성 탐사의 핵심 목표 중 하나인 행성의 과거 환경 진화 복원과 생명체 존재 가능성 평가를 실현하기 위한 핵심적인 과학적 축으로 기능하고 있다.

한편, 국내에서도 우주탐사 역량 강화를 위하여 우주개발 중장기 기본계획 및 우주개발진흥기본계획을 수립하여 달, 소행성 및 화성 탐사 계획을 구체화해왔다. 또한 관련 임무를 보다 효율적으로 추진하기 위하여 2024년 우주항공공청이 개청되었다. 특히 제4차 우주개발진흥기본계획에서는 2032년 달 착륙 및 표면임무, 2035년 화성 궤도 탐사, 2045년 화성 착륙을 목표로 하고 있다(Ministry of Science and ICT, 2023). 화성 탐사는 태양계 내의 생명체 존재 가능성과 행성의 진화 과정을 이해하는 데 있어 핵심적인 부

분을 차지하는데, 그 중 화성 지각의 지질학적 특성, 지표 작용(surface processes), 기후 변화는 행성 환경의 진화를 이해하기 위한 중요한 단서를 제공한다. 따라서 화성 표면에 분포하는 퇴적암과 퇴적 작용, 그리고 그에 수반하는 액상의 물의 역사와 물-암석 반응에 대한 이해는 탐사의 과학적인 임무 설계와 탐사 지역 선정에 핵심 요소가 될 것이다. 이는 행성과학 연구 기반을 확장할 뿐만 아니라 탐사의 전략적 방향 수립에도 중요한 의미를 갖는다.

본 논문에서는 화성 게일 크레이터에서 수행된 NASA의 MSL미션, 즉 큐리오시티(Curiosity) 로버 탐사의 장기적 성과를 고찰하고자 한다. 2012년 착륙한 이후 10년 이상 지속된 이 미션은 로버에 탑재된 장비를 활용해 지구 지질학자가 수행하는 야외조사와 실험실 분석 절차를 행성 탐사에 적용하였으며, 퇴적암 기반의 행성지질학 연구에 가장 풍부한 자료를 축적하였다. 이를 통하여 수집된 자료들은 화성의 고환경 변화에 대한 상세한 단서를 제공하였다. 본 논평을 통하여 퇴적 기록을 이용하여 암석형 행성의 표면 환경 진화 과정을 해석하는 퇴적지질학적 접근이 우리나라의 향후 화성 및 우주탐사에 실질적으로 적용될 수 있음을 확인하고자 한다.

2. 큐리오시티의 게일 크레이터 탐사

MSL 미션은 2011년 11월 발사되어 2012년 8월 6일 화성 게일 크레이터에 착륙한 이후 2025년 현재까지 진행 중인 NASA의 장기 화성 탐사 프로젝트로서, 미션 이전까지 축적된 화성의 지질학적 진화와 기후 변화 모델을 기반으로 설계되었다. 전통적으로 화성의 지질학적 진화사에 대한 이해는 표면 지형(충돌구, 화산, 하천 등)의 발달을 기준으로 하였으며, 화성의 지질 시대는 지형 발달 사건들을 근거로 노아 키스기(Noachian Period), 헤스페리아기(Hesperian Period), 아마조니스기(Amazonian Period)의 세 시기로 나뉜다(그

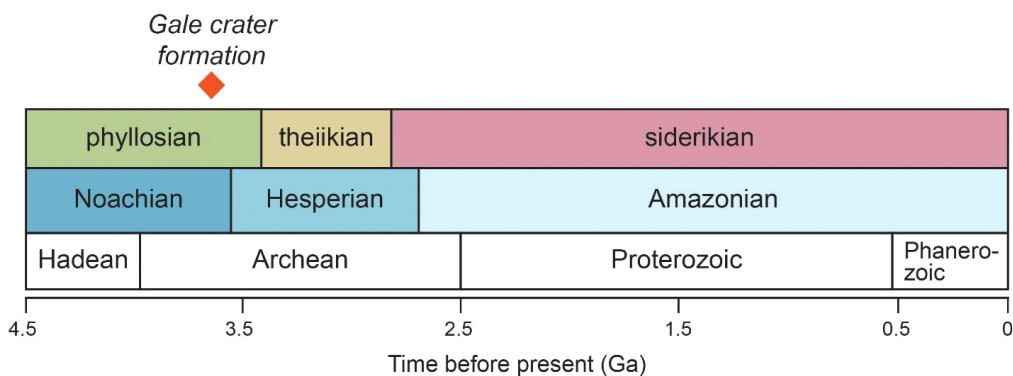


Fig. 1. Geologic time scale of Mars based on major geomorphologic and volcanic events (middle) along with the weathering epochs (top). For comparison, the principal geologic eons of Earth are also shown (bottom). The approximate boundaries of the Noachian, Hesperian, and Amazonian periods are based on Hartmann and Neukum (2001).

림 1)(Scott and Carr, 1978; Tanaka, 1986; Carr and Head, 2010; Choi, 2025). 이후 2000년대 들어 원격탐사 기반의 분광 자료가 축적되며 화성 표면에 분포하는 광물 조성을 기반으로 한 시대 구분이 제안되었다(Bibring *et al.*, 2006). 이는 화성 지각을 구성하는 암석이 풍화 및 변질을 거치며 형성된 2차 광물이 당시의 화학적 환경과 행성 표면에 존재한 물의 양을 반영한다는 점에서, 전통적인 구분과 비교하여 행성의 기후 환경에 초점을 둔 체계이다. 이에 따르면, 점토광물 시대(phyllisian era)는 철과 마그네슘이 풍부한 점토광물이 형성된 시기로, 주로 중성 내지 약알칼리성의 물이 장기간 존재하였던 환경을 반영하며 노아기에서 헤스페리아기의 초기까지에 해당한다(그림 1). 이후 황산염 시대(theikian era) 동안에는 산성 환경에서 황산염 광물(자로스이트 jarosite, 석고 gypsum, 키제라이트 kieserite)이 침전하였으며, 주로 헤스페리아기에 해당한다. 마지막으로 헤스페리아기 후기에서 아마조니스기에 걸쳐 적철석(hematite)과 자철석(magnetite) 등이 우세한 산화철 시대(siderikian era)가 이어지며, 이는 극도로 건조한 산화 환경을 나타낸다. 이와 같은 지형 기반과 광물 기반의 지질시대 구분을 종합하면 화성 표면 환경은 습윤한 중성의 초기 환경에서 산성의 전이기를 거쳐 건조한 산화 환경으로 변화한 것으로 해석된다.

이러한 화성 표면의 환경 진화 모델을 기반으로 MSL미션의 다음 4가지 핵심 과학 목표가 설계되었다(Grotzinger *et al.*, 2012): 1) 생명 존재 가능성 평가, 2) 화성의 기후 및 환경 변화 역사 규명, 3) 화성 지질시스템의 진화 역사 이해, 4) 유인 탐사를 위한 준비. 이 중 화성의 기후 및 환경 변화 역사의 경우 퇴적암의 형성 과정(풍화, 침식, 운반 및 퇴적)과 퇴적암 내에 포함된 변질 기원의 물질(점토광물, 황산염 광물, 철산화물 등)에 대한 분석을 통해 이루어진다. 또한 행성의 지질학적 시스템을 이해하기 위해서는 암석의 표면에서 관찰되는 조직과 구조 만이 아니라 조성 분석 자

료의 수집이 필수적일 것이다. 생명 존재 가능성에 대한 판단은 퇴적암에 포함된 탄소화합물과 같은 잠재적인 생명지표(biosignature)를 확인하는 것뿐만 아니라, 생명 유지에 필수적인 물, 에너지, 영양염과 같은 환경 요소를 확인하는 과정을 포함한다. 이들 과학 목표를 달성하기 위하여 지질학적 특징 및 기술적 요건을 충족하는 착륙지로 60여개의 후보지 중 게일 크레이터가 선정되었다(Grotzinger *et al.*, 2012).

게일 크레이터는 화성의 적도 부근(남위 4.6°, 동경 137.4°)에 위치한 직경 약 150 km의 충돌구로서 약 37억 년 전 형성된 것으로 추정된다(Anderson and Bell, 2010). 충돌구의 중심에는 높이 약 5.5 km에 이르는 산이 일종의 돔과 같은 형태로 존재하는데, 이는 과거에는 에올리스 산(Aeolis Mons)으로, 현재에는 샤프 산(Mount Sharp)으로 지칭되고 있다(그림 2a). 이 산은 두꺼운 퇴적층으로 구성되어 있으며, 사면을 따라 퇴적층의 단면이 노출되어 있기 때문에 화성 역사 중 장기간에 걸쳐 형성된 층서기록을 확인할 수 있는 곳이다. 따라서 MSL 미션 이전에도 궤도선 기반 원격탐사 연구의 대상이 되어왔으며, 특히 2000년대 중반 화성 정찰 궤도선(Mars Reconnaissance Orbiter; MRO)의 고해상도 영상 및 분광 자료를 통해 샤프 산의 퇴적층 하부에서 상부로 갈수록 Fe- 및 Mg-점토광물, 황산염광물, 철산화광물의 순서로 우세하게 나타나는 광물 조성의 수직적 변화를 확인할 수 있었다(Milliken *et al.*, 2010). 이러한 특징은 게일 크레이터 내 퇴적층이 화성의 기후 진화 역사를 보존하고 있음을 반영한다. 또한 고해상도 이미지에서 확인된 하천의 하도(channel)와 선상지(alluvial fan), 삼각주(delta)와 같은 퇴적체의 모습은 과거 크레이터 내부에 대규모의 하호성(fluvio-lacustrine) 환경이 형성되었을 가능성을 시사하였다(Anderson and Bell, 2010; Thomson *et al.*, 2011). 이와 같은 이유로 게일 크레이터는 화성 표면의 물의 역사를 포함한 행성 표면 환경과 기후 진화를 퇴적 기록을 이용

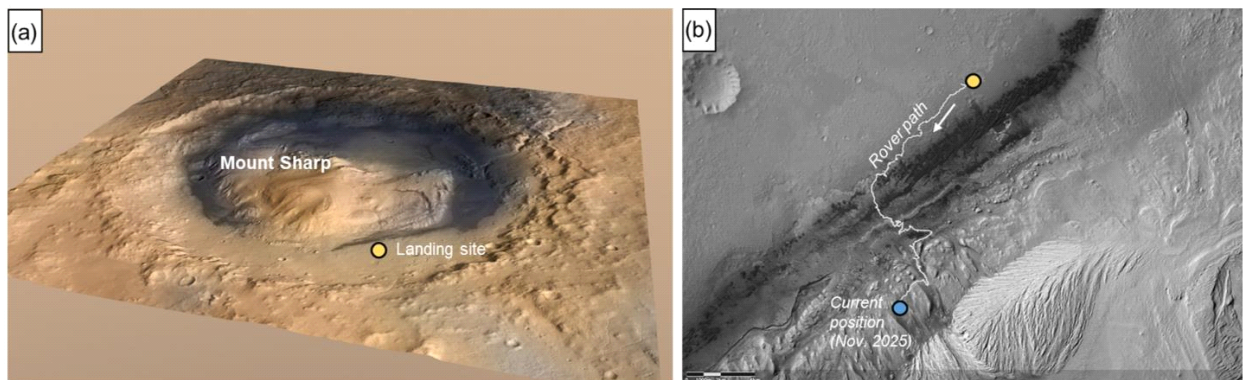


Fig. 2. Images showing (a) Gale crater and Mt. Sharp and (b) the traverse path of the Curiosity rover within the crater. Image credit: NASA/JPL-Caltech/ESA/DLR/FU Berlin/MSSS.

하여 복원하기에 적합한 장소로 결정되었다.

착륙지 선정과 함께 지질학자를 대신하여 야외조사와 분석을 수행할 로버의 탑재체가 설계되었다. 지구의 퇴적 기록 연구는 일반적으로 야외조사와 시료 채취, 그리고 실험실 분석의 단계로 진행되는데, 각각의 과정에서 육안 및 현미경 관찰, 지화학 및 광물조성 분석이 수행된다. 큐리오시티 로버의 경우 이를 대신할 총 10개의 과학탑재체를 포함하고 있는데, 그 중 퇴적암 분석과 직접적으로 관련된 장비는 고해상도의 이미지를 확보하기 위한 Mastcam (Mast Camera), 레이저유도붕괴분광기(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)와 원격촬영카메라를 결합하여 암석 표면의 주원소 조성을 비파괴적으로 측정하는 ChemCam (Chemistry and Camera Complex), 알파입자산란과 X선 형광을 조사하여 시료 표면의 주원소 조성을 정량 분석하는 APXS (Alpha Particle X-ray Spectrometer), X선 회절과 형광분석을 결합하여 분말 시료의 광물 조성 및 결정구조를 파악하는 CheMin (Chemistry and Mineralogy) 등이다(Grotzinger *et al.*, 2012). 이 외에도 퇴적암에 포함된 유기화합물 및 동위원소 조성을 분석하는 SAM(Sample Analysis at Mars)이 탑재되어있으나 본 논문에서 다루는 연구 결과는 주로 앞선 네 가지 장비를 이용하여 확보한 자료를 중심으로 한다. 각각의 장비는 지구의 퇴적 기록 연구에서 수행하는 야외 관찰, 시료 채취, 실험실 분석의 전 과정을 화성에서 재현하고 있으며, 말 그대로 행성 지질 연구를 위한 “화성의 과학 실험실”이 구현되었다고 할 수 있다.

큐리오시티는 2025년 말 현재까지 약 13년 간 탐사를 지속하고 있으며, 36 km 이상을 주행하며 게일 크레이터에 분포하는 다양한 퇴적층 단면을 조사 중이다(그림 2b). 초기에는 약 2년의 기본 임무가 계획되었으나, 2014년 이후 연장 임무(extended mission)로 전환하여 현재에는 샤프 산의 중부에 분포하는 황산염 층과 산화철 층으로 이동하며 과거 건조한 화성 표면에서 형성된 퇴적층의 탐사를 이어가고 있다. APXS장비를 기준으로 2024년 말까지 1500개 이상의 시료를 분석한 것으로 알려졌으며, 획득한 자료들은 내부 검토와 처리를 거쳐 NASA Planetary Data System (<https://pds.nasa.gov>)에 순차적으로 공개되고 있다.

3. 게일 크레이터 내 퇴적암 연구 결과

3.1. 큐리오시티의 화성 퇴적지질학 연구 절차와 사례

큐리오시티의 퇴적지질학 연구 과정은 야외 관찰, 암상 및 퇴적 구조 판별, 시료 채취와 분석, 자료 해석의 과정의 단계로 진행되며, 전체 과정에서 로버 탑재체를 이용한 자료 확보가 핵심적이다. 로버 기반의 퇴적층 조사에서는 우선 Mastcam으로 촬영된 이미지를 바탕으로 퇴적층의 외

관, 자세, 층리와 퇴적 구조, 입도 분포를 판별한다. 이 때 지구에서의 야외조사와는 달리 해상도(최대 150 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)가 제한적이며, 촬영 당시의 일광 조건과 대기의 산란에 의하여 정밀한 구조나 조직을 판별하는 데에 오랜 시간이 걸린다. 이를 보완하기 위하여 한계는 있으나 ChemCam의 원격 이미지를 추가 활용할 수 있다(Le Mouélic *et al.*, 2015). 지구에서는 다양한 각도에서 관찰이 가능하며, 필요한 경우 실험실에서의 확대경이나 편광현미경 분석이 가능하지만, 행성 환경에서는 탑재 장비를 다양하게 활용하여 최대한의 자료를 확보해야 한다.

암석 표면 비파괴 분석에 더하여, 로버에 탑재된 드릴을 사용하여 분말 형태의 시료를 채취한 후 CheMin을 이용하여 광물 조성을 분석한다. 이렇게 제작한 분말 시료는 SAM을 이용한 유기화합물 분석에도 이용된다. 지구에서의 XRD분석 및 유기화학 분석과 유사한 방식이지만 분석 가능한 시료의 양(50 mg)과 분말 시료 입도(<150 μm)에 제약이 있으며, 시료 가열 및 이동 과정에서의 손실이 발생할 수 있다(Blake *et al.*, 2012). 따라서 분석 결과의 정밀도는 지구의 실험실에 비하여 낮은 수준이다.

표면의 관찰 결과를 종합하여 암상을 분류하고 퇴적과정을 해석하는 단계에서는 촬영 자료와 함께 화학 및 광물 조성 분석 자료를 활용하여 지구의 퇴적지질학 실험실에서 수행하는 세분화된 암상 분류, 특히 세립질 암상의 분류가 가능하다. 물론 현장에서 수행하는 로버의 분석 과정을 고려하면 시료의 단면을 절단하여 관찰하거나 보다 미세한 조직을 분석할 수 없다는 제약이 있다. 또한 세밀한 층서 단위의 변화 양상을 층리 단위로 파악하여 퇴적 과정과 환경을 추적하는 것은 아직 기술적으로 어렵다.

행성 현지 환경 탐사라는 조건에서 발생하는 다소간의 불가피한 제약들이 있으나 앞서 설명한 과정을 통하여 수집된 탐사 경로의 암상, 퇴적 구조, 조직, 화학 및 광물 조성의 자료를 종합하여 층서 단위를 수립하고 퇴적 환경을 해석하는 것이 가능하다. 이 때 지구의 퇴적과정에 대한 이해와 유사 환경에 대한 선행 연구가 기반을 제공하는데, 다음의 Williams *et al.* (2013)의 연구는 큐리오시티 탐사 초기의 결과를 바탕으로 퇴적 환경을 해석한 사례이다. 착륙 직후 탐사 경로의 노두에서 관찰된 퇴적암을 대상으로 한 해당 연구에서는, MastCam과 ChemCam으로 정밀 촬영을 통하여 표면을 관찰한 결과 암상은 역암이며, 2-40 mm 범위의 역(clast)과 조립질 모래 기질로 구성되어 있음을 확인하였다(그림 3). 역의 높은 원마도, 입자간의 접촉 관계와 인편구조(imbrication), 역질층과 사질층의 교호하는 산출 상태를 기반으로, 주기적으로 유량이 변동하는 하천에 의한 퇴적 작용의 결과로 해석하였다. 또한 이와 같은 퇴적물을 운반한 하천의 수력학적 특성은 수심 약 3-90 cm, 평균

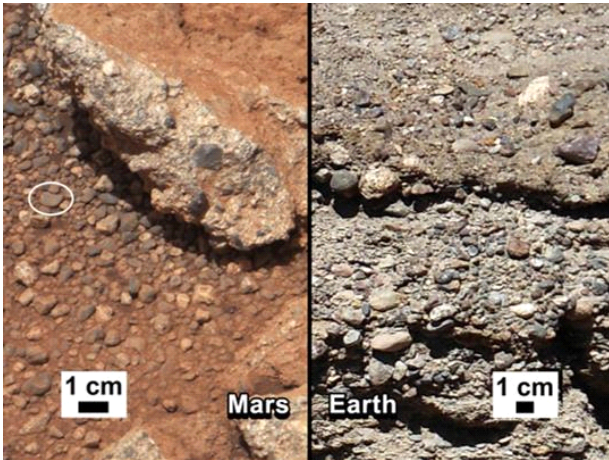


Fig. 3. Fluvial conglomerate observed in Gale crater (left) compared with similar conglomerate on Earth (right). Image credit: NASA/JPL-Caltech/MSSS and PSI.

유속은 20-75 cm/s에 해당하는 상류(subcritical flow, Froude number < 1) 조건을 초과하며, 운반거리는 수 km 정도로 추정된다. 이는 과거 게일 크레이터 내에 하도가 안정적으로 존재하였다는 증거이다. 해당 연구에서는 실제 칠레 아타카마 사막의 선상지 하부(distal fan)에 분포하는 역암과의 유사성을 제시하며, 게일 크레이터의 역암이 선상지-하도 시스템의 반복적인 퇴적 작용에 의하여 형성된 것으로 해석하였다. 이는 현재 화성의 건조한 환경과 대비되는, 화성 초기의 온난습윤한 환경에 대한 직접적인 증거이자 탐사 성과이다.

3.2. 게일 크레이터의 퇴적 층서

앞서 설명한 탐사와 연구 과정을 통하여 지난 12년 동안 게일 크레이터 내 퇴적 환경에 대한 해석과 층서 정립이 이루어졌다(그림 4). 주상도에서는 로버가 탐사한 800 m 이상의 퇴적층의 암상 분포와 주된 암석층서 단위를 확인할 수 있는데, 지구에서 기재하는 주상도와 달리 층의 두께는 노출된 표면에서 측정된 거리를 기준으로 한다. 또한 층서단위의 명칭의 영문 표기에서 group(층군)과 formation(층) 등의 첫 글자를 대문자화하지 않는데, 이는 해당 명칭들은 아직 탐사팀과 연구자들이 내부적으로 사용하는 비공식적 층서 단위로 여겨지기 때문이다. 2025년 현재 큐리오시티는 샤프 산 퇴적층 상부의 풍성퇴적층 구간으로 이동하고 있으며, 탐사 결과와 함께 층서 역시 지속적으로 개정되고 있다.

게일 크레이터 내 분포하는 퇴적층은 부정합면, 지층의 형적 연장성, 기원지 특성 등을 기준으로 최하부로부터 브래드버리층군(Bradbury group), 샤프산층군(Mt. Sharp group), 그리고 시카포인트층군(Siccar Point group)으로 나뉜다(그

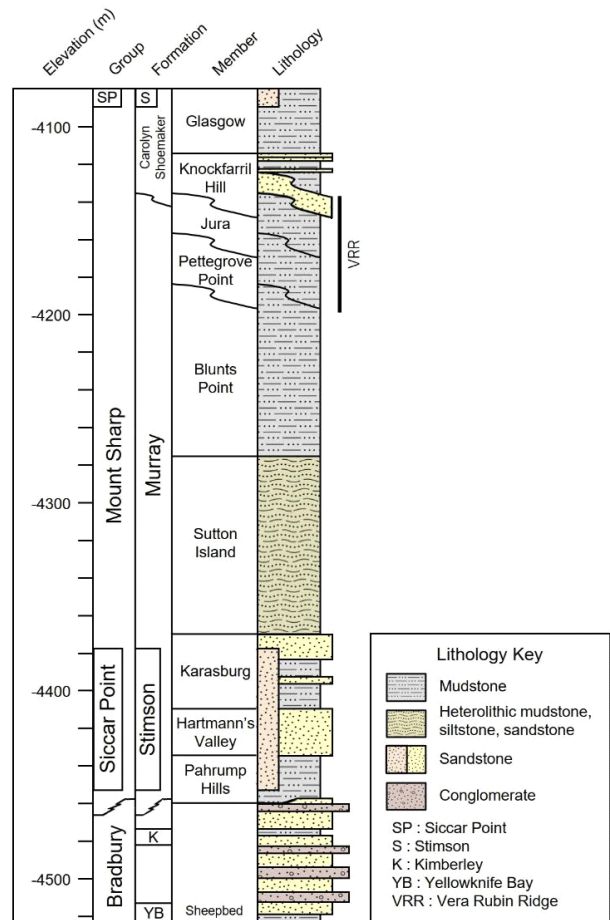


Fig. 4. Stratigraphic column of the sedimentary record in Gale crater. Modified from Vasavada (2022).

림 4). 게일 크레이터의 기저부에 주로 분포하는 브래드버리층군은 선상지, 삼각주, 하성, 호성환경의 역암과 사암으로 구성된 가장 조립한 퇴적층이다(Williams *et al.*, 2013; Grotzinger *et al.*, 2015; Stack *et al.*, 2019). 상부의 샤프산층군은 브래드버리층군과 정합적으로 접촉하는 것으로 여겨지는, 샤프 산을 구성하는 주된 퇴적체이다. 하부에 비하여 엽층리가 발달한 이질암이 우세한데, 이는 장기간 유지된 호성환경에서 퇴적된 결과로 여겨진다(Hurowitz *et al.*, 2017; Fedo *et al.*, 2018). 호수의 유량이 장기간에 걸쳐 증가와 감소를 반복하였으며, 이와 함께 하성 및 삼각주 퇴적체, 때로는 풍성 퇴적체가 협재된다(Fedo *et al.*, 2017, 2018; Gwizd *et al.*, 2018; Achilles *et al.*, 2020). 시카포인트층군은 하위의 샤프산층군과는 이질적인 층리와 경사를 나타내며, 둘 사이의 접촉관계는 부정합면으로 정의된다(Fedo *et al.*, 2022). 주로 사암과 역암 등의 조립한 퇴적물이 우세하며 풍성퇴적 환경과 선상지 하도 퇴적층이 함께 산출한다(Banham *et al.*, 2018; Davis *et al.*, 2025). 또한 암석류 기원의 퇴적체가 확인되어, 당시 호수는 대부분 말라 있었으

나 물에 의한 국지적 퇴적 작용은 잔존하였음을 시사한다 (Bedford *et al.*, 2020). 현재까지 이루어진 퇴적 환경 해석을 기반으로 게일 크레이터의 과거 습윤한 기후 당시 발달한 퇴적 환경에 대한 모델이 수립되었다(Rampe *et al.*, 2020). 크레이터 내부의 거대한 호수와 호수로 흘러들어가는 하천과 삼각주, 크레이터 사면 인근에 형성된 선상지가 발달하였으며, 지구의 과충진호수(overfilled lake)와 유사한 이 호수 수위의 상대적인 변화에 따라 퇴적체의 전진-후퇴가 반복되었을 것으로 해석한다. 이후 점진적인 기후 건조화와 산성화가 진행되어 시카포인트층군 퇴적 당시에는 건조한 기후가 우세하게 되었던 것으로 보인다.

3.3. 퇴적 구조와 화성 고환경

게일 크레이터에서 관찰된 다양한 퇴적 구조들은 과거 화성 표면에 액체 상태의 물이 존재하였을 뿐만 아니라, 하천, 호수, 선상지와 같은 복합적인 퇴적 환경이 존재하였음을 반영한다. 그 중 많은 퇴적 구조들이 화성 표면 환경 및 기후 변화, 더 나아가 행성환경 진화에 있어 중요한 시사점을 갖는다. 아마도 큐리오시티 로버가 탐사를 시작한 이래 화성의 표면에서 촬영한 이미지 중 대중적으로 가장 높은

관심을 끈 것은 NASA가 언론에 공개한 로버의 셀피(selfie) 일 것이다(그림 5a). 그러나 과학적인 측면에서 본다면 탐사 초기 관찰한 사층리(cross bedding)는 화성에서의 물에 의한 퇴적 작용에 대한 최초의 현장 관측 증거로서 그 시사점이 크다고 할 수 있을 것이다(그림 5b). 화성에서 최초로 보고된 수 cm 규모의 사층리는 브래드버리층군 하부에서 관찰되었으며, 이는 과거 크레이터 내 발달한 호수에 유입되는 하도-삼각주 환경에서 형성된 것으로 해석된다(Grotzinger *et al.*, 2014). 이후의 탐사 동안 여러 차례 추가적인 사층리의 산출이 확인되었으며, 하부의 브래드버리층군 뿐만 아니라 샤프산층군에서도 수 mm에서 수 cm 규모로, 때로는 이질암과 협재하는 사암 내에서 관찰되었다. 이는 게일 크레이터의 하호성 퇴적 환경 모델을 지지하는 증거이다. 또한 퇴적층 상부로 갈수록 파랑 사층리(wave cross bedding)가 산출하여, 점차 호성환경이 우세해졌음을 시사한다(Mondro *et al.* 2025).

한편 점토광물이 우세한 구간에서 황산염광물이 우세한 구간으로 변화하는 전이대에서 확인된 건열(dessication crack)은 화성이 점진적으로 건조화한 노아키스기-헤스페리아기 전환 시기의 환경에 대한 새로운 관점을 제시하였다(Rapin

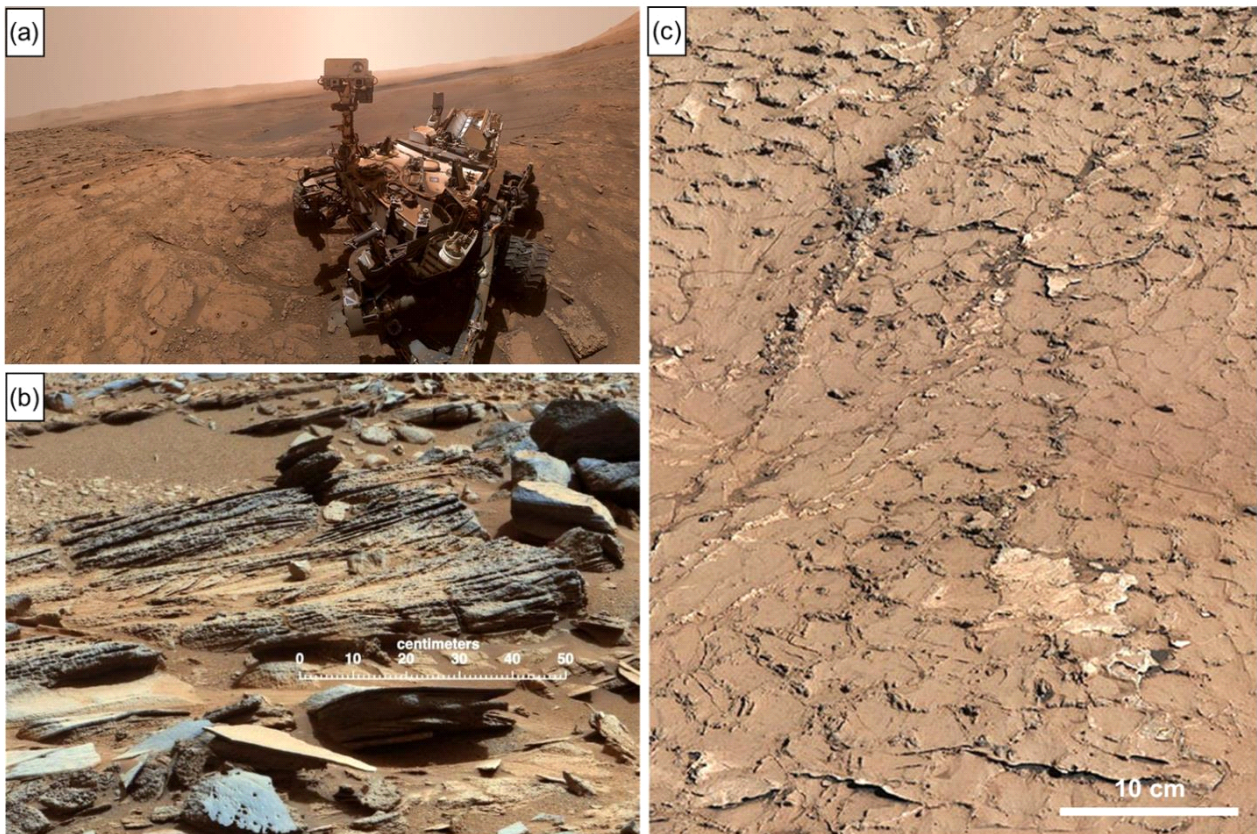


Fig. 5. Images taken on the Martian surface by the Curiosity rover: (a) rover “selfie,” (b) cross-bedded sandstone, and (c) desiccation cracks on mudrock. Image credit: NASA/JPL-Caltech/MSSS and NASA/JPL-Caltech/MSSS/IRAP.

et al., 2023). 호성 퇴적암 표면에서 촬영된 다각형의 패턴은 이질암의 건열로 해석되었으며, 이는 습윤한 환경에서 노출 및 증발을 겪었음을 의미한다(그림 5c). 해당 구조는 일회성 증발 사건이 아닌, 주기적으로 반복되는 습윤-증발 과정을 반영하며, 이는 점토광물-황산염 전이대, 혹은 노아 키스기 후기의 기후가 단순 건조화가 아닌 보다 복잡한 기후를 수반하였음을 시사한다. 해당 발견이 갖는 의의는 화성 기후 발달사에서 더 나아가 생명 존재 가능성에 대한 시사점을 제시한다. 반복되는 습윤-건조 환경에 의하여 용존 이온과 유기물의 농축과 침전이 활발해지고 화학반응 또한 용이해졌을 것이며, 그 결과 생명 발생에 필요한 화합물이 형성되었을 가능성 역시 높아졌을 것이다. 이는 퇴적 구조가 퇴적 작용만이 아니라 기후 변화와 생명 발생의 가능성까지 확장할 수 있는 환경 조건에 대한 단서를 제공한다는 점에서 그 의의가 크다고 볼 수 있다.

최근 보고된 파랑 연흔(wave ripple)의 경우 화성 환경의 건조화가 상당한 수준으로 진행된 시점에서 형성된 퇴적층에서 산출된다는 점에서 중요한 발견이다. Mondro *et al.* (2025)은 게일 크레이터 퇴적층 상부 황산염이 우세한 단위 내에서 좌우 대칭형의 파랑 연흔을 보고하였다. 해당 퇴적층은 성분에서 알 수 있듯이 노아키스기 후기-헤스페리아기 초기에 형성된 것으로, 이 시기 화성 표면의 물의 양은 상당히 감소하였으며, 잔존하는 물의 표면은 대부분 얼음에 의하여 덮여있었을 것으로 여겨져왔다(Squyres and Kasting, 1994; McKay *et al.*, 2005; Kite, 2019). 그러나 모델링 결과, 새롭게 보고된 파랑연흔은 최대 폭 500 m, 수심 2 m 정도의 호수에서 바람에 의하여 형성된 파도의 퇴적 작용에 의한 것으로 해석되었다(Mondro *et al.*, 2025). 퇴적층 규모로 볼 때 이와 같은 안정적인 얇은 호성환경에서의 퇴적 작용이 장기간 반복적으로 일어났을 것으로 보인다. 이는 이전의 기후 모델링 연구 결과와는 대치되는 것으로, 액체 상태의 물이 존재할 수 있는 온화한 기후 조건을 노아키스기 후기까지 연장시키는, 화성 기후 진화 및 생명 발생 가능성 평가에 있어 새로운 통찰을 제공한다.

3.4. 퇴적암 조성 기반의 고환경 해석

퇴적암의 물리적인 특성, 즉 구조와 조직에 더하여 화학적-광물학적 조성은 행성 표면 환경의 진화를 이해하는 데에 핵심적인 단서를 제공한다. 따라서 지구에서는 퇴적암과 미고화 퇴적물을 대상으로 기원암의 성분, 화학적 풍화 강도, 속성작용 동안의 변질 양상을 파악하고 기후 및 지구 조환경을 해석하기 위하여 주원소, 미량원소, 동위원소 등 다양한 지시자를 활용한다. 이러한 다각도의 실험실 분석은 야외조사와 관찰을 보완하여 퇴적암이 형성된 지표환경의 진화에 대한 종합적인 정보를 제공한다. 그러나 화성 대상

연구에서는 원격 탐사 분광 자료와 및 로버 탑재체를 활용한, 주원소와 광물 조성 분석에 국한되어 있다. 그 결과 화성 퇴적암 조성을 이용한 고환경 해석에서는 지구에서 비교적 최근 개발된 지시자(예. Li 동위원소) 대신, 주원소 조성을 기반으로 하는 전통적인 지시자를 활용해야 한다.

과거 화성의 표면 환경에 물이 존재하였다면 규산염 광물로 구성된 화성 지각 물질과 물의 반응에 의한 화학적인 풍화가 일어났을 것이다. 지구의 원리를 화성에 적용한다면 상대적으로 온난습윤한 시기에는 강한 화학적 풍화가, 한랭건조화한 시기에는 풍화 강도의 감소가 예상되며, 이는 퇴적암의 화학적, 광물학적 조성에 반영될 것이다. 이와 같은 일종의 “동일과정설”의 원리를 기반으로, 1980년대 개발된 후 현재까지 지구의 퇴적 기록 연구에 활용되는 화학적 풍화 지수인 Chemical Index of Alteration (CIA; Nesbitt and Young, 1982)이 게일 크레이터 퇴적 기록에도 적용되고 있다(예, McLennan *et al.*, 2013; Mangold *et al.*, 2019; Dehouck *et al.*, 2022). 이 지수는 화학적 풍화가 진행되는 동안 규산염 지각 암석을 구성하는 주된 광물인 장석이 점토광물로 변질되며 Ca, Na, K은 용탈되고 Al이 상대적으로 농축된다는 원리에 기반하여 화학적 풍화의 강도를 정량화한다. 화성의 제한적인 분석 여건과 기후 진화 역사를 고려할 때 CIA를 적용하여 화학적인 풍화 변질의 강도와 더 나아가 행성 지표 환경을 복원하고자 하는 접근법은 합리적이다. 다만 화성의 지각은 지구의 대륙지각과 같이 분화된 화강섬록암 조성이 아닌 현무암에 가까운 성분으로 광물 조성이 다르다. 화학적으로는 Ca, Fe, Mg이 풍부하고 K, Na 함량이 낮으며, 그 결과 풍화 경로와 점토광물의 생성 양상도 달라질 것이다. 따라서 지구 대륙지각을 기준으로 개발된 CIA, 혹은 여타 화학적 풍화 지수를 화성 환경에 적용하여 기후 역사를 복원하는 데에는 일정 부분 한계가 존재할 수밖에 없다. 예를 들어 게일 크레이터 탐사 초기의 분석자료를 기반으로 화학적 풍화 지시자를 적용한 결과 최하부 퇴적 기록의 경우 화학적인 풍화가 거의 일어나지 않은 것으로 나타났는데, 이는 단순히 현무암질 지각물질의 화학적 풍화만이 아니라 알칼리성 암석으로부터의 풍화와 퇴적물 공급, 그리고 빠른 퇴적과 매몰 과정의 복합적인 결과로 해석되었다(McLennan *et al.*, 2013). 해당 결과는 화성 지각을 구성하는 암석 성분이 예상보다 더욱 다양하였음을 반영하며, 화성의 퇴적암 성분을 결정하는 요소로 기원암 성분의 다양성과 세부 퇴적 환경에 의하여 조절되는 기반암과 표토 물질 침식 및 퇴적률을 함께 고려해야 한다는 시사점을 제시하였다.

또한 화성의 퇴적암에서 관찰되는 조성 변화가 단순한 화학적 풍화의 결과인지, 아니면 퇴적 이후의 속성작용 또는 열수변질 과정에 기인한 것인지, 모든 가능성을 고려해

야한다. 화성 지질 역사 후기의 유체는 지구의 물과는 매우 다른 화학 조성-예를 들어 염화물이나 황산염을 풍부하게 포함한 고농도, 산성 환경-이었을 확률이 높으며, 이러한 환경에서는 물-암석 반응이 지구와는 전혀 다른 방향으로 진행되었을 것이다. 예를 들어 Seeger and Grotzinger (2024)는 샤프산층군 내 점토광물-황산염 전이대에 걸쳐 나타나는 화학조성의 변화와 점토광물 및 Mg-황산염 광물의 농도 변화는 점진적인 건조화에 따른 호성환경에서 증발환경으로의 변화와 함께 퇴적 이후 유체와의 반응이 복합적으로 작용한 결과로 해석하였다. 따라서 지구에서 확립된 화학적 풍화 지수를 적용할 때에는 기원지에서의 풍화작용의 강도와 환경 만이 아니라 퇴적 이후 다양한 성분을 갖는 유체와의 반응을 종합적으로 고려해야 한다. 다만 로버 분석이 지층 내 한정된 부분에서 이루어질 수밖에 없다는 제약으로 인하여 유체에 의한 변질이 분지 전체에 걸쳐서 일어난 사건인지, 혹은 국지적인 영향에 그쳤는지를 판별하기 어려울 수 있다.

현재까지 보고된 게일 퇴적암 조성의 특징과 행성 지표 환경의 진화, 분석 조건을 고려한다면, 지구에서 개발된 CIA 등의 화학적 풍화 및 변질 지시자를 화성, 혹은 여타 암석형 천체의 고환경 해석에 적용할 때에는 행성 표면에 존재하였을 유체 환경을 고려한 다중지시자 접근이 필수적인 것이다. 로버에 탑재 가능한 분석 장비의 한계로 인하여 지구에서 이용하는 미량원소, 미세분석, 동위원소 지시자의 적용이 불가능하기 때문에, 주원소 조성에 기반한 전통적인 지시자를 적용하고 보완하여 퇴적암의 복잡한 변질 역사를 풀어나가는 것이 최선이기 때문이다. 이를 위하여 CIA 외 지구에서 개발된 여타 화학적 풍화 지수, 이를테면 고철질 암이나 퇴적암의 풍화 과정을 고려한 풍화 지수(예, W-index; Ohta and Arai, 2007)를 화성에 적용 가능할지를 검증해 볼 수 있을 것이다(예, Jeon and Joo, 2024). 또한 황산염과 염소가 풍부한 유체에 의한 산성의 환경에서의 속성·변질 작용이 활발하였던 후기 퇴적 환경에서는 결정질 및 비정질 물질의 조성분포, 유체 화학을 고려한 종합적인 해석이 필수적인 것이다(Rampe *et al.*, 2020).

4. 결론

MSL미션의 게일 크레이터 탐사를 통해 최초로 지구가 아닌 행성의 퇴적 층서 발달과 퇴적암의 성분에 대한 구체적인 지질학적 연구 결과를 축적하였으며, 이는 행성 지표 과정과 환경 진화 연구에 새로운 장을 열었다. 화성의 퇴적암 연구는 행성지질학의 범위를 확장할 뿐만 아니라, 지구에서 축적된 퇴적지질학적 지식을 다른 암석형 천체에 적용할 수 있는 기회를 제공하였다. 그 과정에서 지구의 퇴적

암 연구로부터 확립된 퇴적 환경 해석, 화학적 풍화와 기후, 속성 및 변질 작용에 대한 모델은 화성의 고환경 복원에 필수적인 도구로 활용되고 있다. 이는 지질학 연구의 범위를 확장하였을 뿐만 아니라, 암석형 행성의 지표 작용, 기후 진화, 물의 역사를 통합적으로 이해하기 위한 학문적 토대를 마련하였다. 향후 화성, 혹은 다른 암석형 천체의 탐사에 있어 선행성 퇴적 기록과 전암 화학 조성 및 광물학적 조성을 기반으로 한 고환경 해석은 행성 수권의 역사와 지표 기후 진화를 이해하기 위한 핵심적인 단서가 될 것이다. 또한 지구와는 다른 성분을 갖는 고철질 행성 지각 암석의 풍화 및 변질 과정, 그리고 열수, 건조, 저온 및 증발환경에서의 퇴적물 형성 과정을 대상으로 한 지구 유사환경 연구는 행성 퇴적 기록 연구를 위한 토대를 마련할 뿐만 아니라 향후 탐사 설계 및 시료 분석 전략 수립에 중요한 기준을 제공할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 G-램프(LAMP) 사업 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00301702). 또한 한국연구재단 중견연구(2022R1A2C1004798)의 지원을 받았다. 그림 작성에 도움을 준 전현지 학생과, 논문 심사 과정 동안 지질학회지 편집위원회 및 두 분 심사위원의 세심한 조언에 감사드립니다.

REFERENCES

- Achilles, C.N., Rampe, E.B., Downs, R.T., Bristow, T.F., Ming, D.W., Morris, R.V., Vaniman, D.T., Blake, D.F., Yen, A.S., McAdam, A.C., Sutter, B., Fedo, C.M., Gwizd, S., Thompson, L.M., Gellert, R., Morrison, S.M., Treiman, A.H., Crisp, J.A., Gabriel, T.S.J., Chipera, S.J., Hazen, R.M., Craig, P.I., Thorpe, M.T., Des Marais, D.J., Grotzinger, J.P., Tu, V.M., Castle, N., Downs, G.W., Peretyazhko, T.S., Walroth, R.C., Sarrazin, P. and Morookian, J.M., 2020, Evidence for multiple diagenetic episodes in ancient fluvial-lacustrine sedimentary rocks in Gale crater, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125, e2019JE006295.
- Anderson, R.B. and Bell III, J.F., 2010, Geologic mapping and characterization of Gale Crater and implications for its potential as a Mars Science Laboratory landing site. *International Journal of Mars Science and Exploration*, 5, 76-128.
- Banham, S.G., Gupta, S., Rubin, D.M., Watkins, J.A., Sumner, D.Y., Edgett, K.S., Grotzinger, J.P., Lewis, K.W., Edgar, L.A., Stack-Morgan, K.M., Barnes, R., Bell, J.F. III, Day, M.D., Ewing, R.C., Lapotre, M.G.A., Stein, N.T., Rivera-Hernandez, F. and Vasavada, A.R., 2018, Ancient Martian aeolian processes and palaeomorphology reconstructed from the Stimson formation on the lower slope of Aeolis Mons, Gale crater, Mars. *Sedimentology*, 65, 993-1042.

- Bibring, J.P., Langevin, Y., Mustard, J.F., Poulet, F., Arvidson, R., Gendrin, A., Gondet, B., Mangold, N., Pinet, P., Forget, F. and OMEGA team, 2006, Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data. *Science*, 312, 400-404.
- Bedford, C.C., Schwenzer, S.P., Bridges, J.C., Banham, S., Wiens, R.C., Gasnault, O., Rampe, E.B., Frydenvang, J. and Gasda, P.J., 2020, Geochemical variation in the Stimson formation of Gale crater: Provenance, mineral sorting, and a comparison with modern Martian dunes. *Icarus*, 341, 113622.
- Blake, D., Vaniman, D., Achilles, C., Anderson, R., Bish, D., Bristow, T., Chen, C., Chipera, S., Crisp, J., Des Marais, D., Downs, R.T., Farmer, J., Feldman, S., Fonda, M., Gailhanou, M., Ma, H., Ming, D.W., Morris, R.V., Sarrazin, P., Stolper, E., Treiman, A. and Yen, A., 2012, Characterization and Calibration of the CheMin Mineralogical Instrument on Mars Science Laboratory. *Space Science Reviews*, 170, 341-399.
- Carr, M.H. and Head III, J.W., 2010, Geologic history of Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 294, 185-203.
- Cartier, K.M.S., 2019, Apollo's Legacy: 50 Years of Lunar Geology. *Eos*, 100, <https://doi.org/10.1029/2019EO125375>.
- Choi, B.-G., 2025, Topography, geology and geochemistry of Mars: an Overview. *Journal of the Geological Society of Korea*, 61, 439-457 (in Korean with English abstract).
- Davis, J.M., Gupta, S., Grindrod, P.M., Banham, S.G., Rudolph, A., Wilson, S.A., Grant, J.A., Williams, R.M., Kite, E.S., Roberts, A.L., Harris, E. and Paar, G., 2025, Late-stage aqueous activity at Gale crater, Mars, recorded by sediment fans eroded from Aeolis Mons. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 130, e2024JE008808.
- Dehouck, E., Cousin, A., Mangold, N., Frydenvang, J., Gasnault, O., Forni, O., Rapin, W., Gasda, P.J., Caravaca, G., David, G., Bedford, C.C., Lasue, J., Meslin, P.-Y., Rammelkamp, K., Desjardins, M., Le Mouélic, S., Thorpe, M.T., Fox, V.K., Bennett, K.A., Bryk, A.B., Lanza, N.L., Maurice, S. and Wiens, R.C., 2022, Bedrock geochemistry and alteration history of the clay-bearing Glen Torridon region of Gale crater, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127, e2021JE007103.
- Farley, K.A., Stack, K.M., Shuster, D.L., Horgan, B.H.N., Hurowitz, J.A., Tarnas, J.D., Simon, J.I., Sun, V.Z., Scheller, E.L., Moore, K.R., McLennan, S.M., Vasconcelos, P.M., Wiens, R.C., Treiman, A.H., Mayhew, L.E., Beyssac, O., Kizovski, T.V., Tosca, N.J., Williford, K.H., Crumpler, L.S., Beegle, L.W., Bell, J.F., Ehlmann, B.L., Liu, Y., Maki, J.N., Schmidt, M.E., Allwood, A.C., Amundsen, H.E.F., Bhartia, R., Bosak, T., Brown, A.J., Clark, B.C., Cousin, A., Forni, O., Gabriel, T.S.J., Goreva, Y., Gupta, S., Hamran, S.-E., Herd, C.D.K., Hickman-Lewis, K., Johnson, J.R., Kah, L.C., Kelemen, P.B., Kinch, K.B., Mandon, L., Mangold, N., Quantin-Nataf, C., Rice, M.S., Russell, P.S., Sharma, S., Siljeström, S., Steele, A., Sullivan, R., Wadhwa, M., Weiss, B.P., Williams, A.J., Wogslund, B.V., Willis, P.A., Acosta-Maeda, T.A., Beck, P., Benzerara, K., Bernard, S., Burton, A.S., Cardarelli, E.L., Chide, B., Clavé, E., Cloutis, E.A., Cohen, B.A., Czajka, A.D., Debaille, V., Dehouck, E., Fairén, A.G., Flannery, D.T., Fleron, S.Z., Fouchet, T., Frydenvang, J., Garczynski, B.J., Gibbons, E.F., Hausrath, E.M., Hayes, A.G., Henneke, J., Jørgensen, J.L., Kelly, E.M., Lasue, J., Le Mouélic, S., Madariaga, J.M., Maurice, S., Merusi, M., Meslin, P.-Y., Milkovich, S.M., Million, C.C., Moeller, R.C., Núñez, J.I., Ollila, A.M., Paar, G., Paige, D.A., Pedersen, D.A.K., Pilleri, P., Pilorget, C., Pinet, P.C., Rice, J.W., Royer, C., Sautter, V., Schulte, M., Sephton, M.A., Sharma, S.K., Sholes, S.F., Spanovich, N., St. Clair, M., Tate, C.D., Uckert, K., VanBommel, S.J., Yanchilina, A.G. and Zorzano, M.-P., 2022, Aqueously altered igneous rocks sampled on the floor of Jezero crater, Mars. *Science*, 377, eabo2196.
- Fedo, C.M., Grotzinger, J.P., Gupta, S., Stein, N.T., Watkins, J., Banham, S., Edgett, K.S., Minitti, M., Schieber, J., Siebach, K., Stack-Morgan, K., Newsom, H., Lewis, K.W., House, C. and Vasavada, A.R., 2017, March. Facies analysis and basin architecture of the upper part of the Murray formation, Gale crater, Mars. In 48th annual lunar and planetary science Conference (No. 1964, p. 1689).
- Fedo, C.M., Grotzinger, J.P., Gupta, S., Fraeman, A., Edgar, L., Edgett, K., Stein, N., Rivera-Hernandez, F., Lewis, K., Stack, K.M., House, C., Rubin, D. and Vasavada, A.R., 2018, March. Sedimentology and stratigraphy of the Murray formation, Gale crater, Mars. In 49th lunar and planetary science conference, the Woodlands, TX (p. 2083).
- Fedo, C.M., Bryk, A.B., Edgar, L.A., Bennett, K.A., Fox, V.K., Dietrich, W.E., Banham, S.G., Gupta, S., Stack, K.M., Williams, R.M.E., Grotzinger, J.P., Stein, N.T., Rubin, D.M., Caravaca, G., Arvidson, R.E., Hughes, M.N., Fraeman, A.A., Vasavada, A.R., Schieber, J. and Sutter, B., 2022, Geology and stratigraphic correlation of the Murray and Carolyn Shoemaker formations across the Glen Torridon region, Gale Crater, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127, e2022JE007408, doi:10.1029/2022JE007408.
- Grotzinger, J.P., Crisp, J., Vasavada, A.R., Anderson, R.C., Baker, C.J., Barry, R., Blake, D.F., Conrad, P., Edgett, K.S., Ferdowski, B., Gellert, R., Gilbert, J.B., Golombek, M., Gómez-Elvira, J., Hassler, D.M., Jandura, L., Litvak, M., Mahaffy, P., Maki, J., Meyer, M., Malin, M.C., Mitrofanov, I., Simmonds, J.J., Vaniman, D., Welch, R.V. and Wiens, R.C., 2012, Mars Science Laboratory mission and science investigation. *Space Science Reviews*, 170, 5-56.
- Grotzinger, J.P., Sumner, D.Y., Kah, L.C., Stack, K., Gupta, S., Edgar, L., Rubin, D., Lewis, K., Schieber, J., Mangold, N., Milliken, R., Conrad, P.G., DesMarais, D., Farmer, J., Siebach, K., Calef, F. III, Hurowitz, J., McLennan, S.M., Ming, D., Vaniman, D., Crisp, J., Vasavada, A., Edgett, K.S., Malin, M., Blake, D., Gellert, R., Mahaffy, P., Wiens, R.C., Maurice, S., Grant, J.A., Wilson, S., Anderson, R.C., Beegle, L., Arvidson, R., Hallet, B., Sletten, R.S., Rice, M., Bell, J. III, Griffes, J., Ehlmann, B., Anderson, R.B., Bristow, T.F., Dietrich, W.E., Dromart, G., Eigenbrode, J., Fraeman, A., Hardgrove, C., Herkenhoff, K., Jandura, L., Kocurek, G., Lee, S., Leshin, L.A., Leveille, R., Limonadi, D., Maki, J., McCloskey, S., Meyer, M., Minitti, M., Newsom, H., Oehler, D., Okon, A., Palucis, M., Parker, T., Rowland, S., Schmidt, M., Squyres, S., Steele, A., Stolper, E., Summons, R., Treiman, A., Williams, R., Yingst, A. and MSL Science Team, 2014, A habitable fluvio-lacustrine

- environment at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars. *Science*, 343, 1242777.
- Grotzinger, J.P., Gupta, S., Malin, M.C., Rubin, D.M., Schieber, J., Siebach, K., Sumner, D.Y., Stack, K.M., Vasavada, A.R., Arvidson, R.E., Calef, F. III, Edgar, L., Fischer, W.F., Grant, J.A., Griffes, J., Kah, L.C., Lamb, M.P., Lewis, K.W., Mangold, N., Minitti, M.E., Palucis, M., Rice, M., Williams, R.M.E., Yingst, R.A., Blake, D., Blaney, D., Conrad, P., Crisp, J., Dietrich, W.E., Dromart, G., Edgett, K.S., Ewing, R.C., Gellert, R., Hurowitz, J.A., Kocurek, G., Mahaffy, P., McBride, M.J., McLennan, S.M., Mischna, M., Ming, D., Milliken, R., Newsom, H., Oehler, D., Parker, T.J., Vaniman, D., Wiens, R.C. and Wilson, S.A., 2015, Deposition, exhumation, and paleoclimate of an ancient lake deposit, Gale crater, Mars. *Science*, 350, aac7575.
- Gwizd, S., Fedo, C., Grotzinger, J., Edgett, K., Rivera-Hernandez, F. and Stein, N., 2018, March. Depositional history of the Hartmann's valley member, Murray formation, Gale crater, Mars. In 49th Annual Lunar and Planetary Science Conference (No. 2083, p. 2150).
- Hartmann, W.K. and Neukum, G., 2001, Cratering chronology and the evolution of Mars. *Space Science Reviews*, 96, 165-194.
- Hurowitz, J.A., Grotzinger, J.P., Fischer, W.W., McLennan, S.M., Milliken, R.E., Stein, N., Vasavada, A.R., Blake, D.F., Dehouck, E. and Eigenbrode, J.L., 2017, Redox stratification of an ancient lake in Gale crater, Mars. *Science*, 356, eaah6849.
- Jeon, H. and Joo, Y.J., 2024, Application of weathering indices to sedimentary records on Mars: preliminary results. *Episodes*, 47, 441-449.
- Kite, E.S., 2019, Geologic constraints on early Mars climate. *Space Science Reviews*, 215, 10.
- Le Mouélic, S., Gasnault, O., Herkenhoff, K.E., Bridges, N.T., Langevin, Y., Mangold, N., Maurice, S., Wiens, R.C., Pinet, P., Newsom, H.E., Deen, R.G., Bell, J.F. III, Johnson, J.R., Rapin, W., Barraclough, B., Blaney, D.L., Deflores, L., Maki, J., Malin, M.C., Pérez, R. and Saccoccio, M., 2015, The ChemCam Remote Micro-Imager at Gale crater: Review of the first year of operations on Mars. *Icarus*, 249, 93-107.
- Mangold, N., Dehouck, E., Fedo, C., Forni, O., Achilles, C., Bristow, T., Downs, R.T., Frydenvang, J., Gasnault, O., L'Haridon, J., Le Déit, L., Maurice, S., McLennan, S.M., Meslin, P.-Y., Morrison, S., Newsom, H.E., Rampe, E., Rapin, W., Rivera-Hernandez, F., Salvatore, M. and Wiens, R.C., 2019, Chemical alteration of fine-grained sedimentary rocks at Gale crater. *Icarus*, 321, 619-631.
- McKay, C.P., Andersen, D.T., Pollard, W.H., Heldmann, J.L., Doran, P.T., Fritsen, C.H. and Priscu, J.C., 2005, 9 Polar Lakes, Streams, and Springs as Analogs for the Hydrological Cycle on Mars. In *Water on Mars and Life (219-233)*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- McLennan, S.M., Anderson, R.B., Bell III, J.F., Bridges, J.C., Calef III, F., Campbell, J.L., Clark, B.C., Clegg, S., Conrad, P., Cousin, A., Des Marais, D.J., Dromart, G., Dyar, M.D., Edgar, L.A., Ehlmann, B.L., Fabre, C., Forni, O., Gasnault, O., Gellert, R., Gordon, S., Grant, J.A., Grotzinger, J.P., Gupta, S., Herkenhoff, K.E., Hurowitz, J.A., King, P.L., Le Mouélic, S., Leshin, L.A., Léveillé, R., Lewis, K.W., Mangold, N., Maurice, S., Ming, D.W., Morris, R.V., Nachon, M., Newsom, H.E., Ollila, A.M., Perrett, G.M., Rice, M.S., Schmidt, M.E., Schwenzer, S.P., Stack, K., Stolper, E.M., Sumner, D.Y., Treiman, A.H., VanBommel, S., Vaniman, D.T., Vasavada, A., Wiens, R.C. and Yingst, R.A., MSL Science Team, 2013, Elemental geochemistry of sedimentary rocks at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars. *Science*, 343, 1244734.
- Milliken, R.E., Grotzinger, J.P. and Thomson, B.J., 2010, Paleoclimate of Mars as captured by the stratigraphic record in Gale Crater. *Geophysical Research Letters*, 37, L04201.
- Ministry of Science and ICT, 2023, The 4th Basic Plan for Promotion of Space Development (2023-2027). Korea AeroSpace Administration.
- Mondro, A.A., Fedo, C.M., Grotzinger, J.P., Lamb, M.P., Gupta, S., Dietrich, W.E., Banham, S., Weitz, C.M., Gasda, P., Edgar, L.A., Rubin, D., Bryk, A.B., Kite, E.S., Caravaca, G., Schieber, J. and Vasavada, A.R., 2025, Wave ripples formed in ancient, ice-free lakes in Gale Crater, Mars. *Science Advances*, 11, eadr0010.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1982, Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major-element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715-717, doi:10.1038/299715a0.
- Ohta, T. and Arai, H., 2007, Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering. *Chemical Geology*, 240, 280-297.
- Rampe, E.B., Blake, D.F., Bristow, T.F., Ming, D.W., Vaniman, D.T., Morris, R.V., Achilles, C.N., Chipera, S.J., Morrison, S.M., Tu, V.M., Yen, A.S., Castle, N., Downs, G.W., Downs, R.T., Grotzinger, J.P., Hazen, R.M., Treiman, A.H., Peretyazhko, T.S., Des Marais, D.J., Walroth, R.C., Craig, P.I., Crisp, J.A., Lafuente, B., Morookian, J.M., Sarrazin, P.C., Thorpe, M.T., Bridges, J.C., Edgar, L.A., Fedo, C.M., Freissinet, C., Gellert, R., Mahaffy, P.R., Newsom, H.E., Johnson, J.R., Kah, L.C., Siebach, K.L., Schieber, J., Sun, V.Z., Vasavada, A.R., Wellington, D., Wiens, R.C. and the MSL Science Team., 2020, Mineralogy and geochemistry of sedimentary rocks and eolian sediments in Gale Crater, : A review after six Earth years of exploration with Curiosity. *Geochemistry*, 80, 125605.
- Rapin, W., Dromart, G., Clark, B.C., Schieber, J., Kite, E.S., Kah, L.C., Thompson, L.M., Gasnault, O., Lasue, J., Meslin, P.Y., Gasda, P.J. and Lanza, N.L., 2023, Sustained wet-dry cycling on early Mars. *Nature*, 620, 299-302.
- Scott, D.H. and Carr, M.H., 1978, Geologic map of Mars. U.S. Geological Survey Misc. Inv. Map I-1083.
- Seeger, C.H. and Grotzinger, J.P., 2024, Diagenesis of the Clay-Sulfate Stratigraphic Transition, Mount Sharp Group, Gale Crater, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 129, p.e2024JE008531.
- Stack, K.M., Grotzinger, J.P., Lamb, M.P., Gupta, S., Rubin, D.M., Kah, L.C., Edgar, L.A., Fey, D.M., Hurowitz, J.A., McBride, M., Rivera-Hernández, F., Sumner, D.Y., Van Beek, J.K., Williams, R.M.E. and Yings, R.A., 2019, Evidence for plunging river plume deposits in the Pahrump Hills member of the Murray formation, Gale crater, Mars. *Sedimentology*, 66, 1768-1802.
- Squyres, S.W. and Kasting, J.F., 1994, Early Mars: How warm and how wet?. *Science*, 265, 744-749.

- Tanaka, K.L., 1986, The stratigraphy of Mars. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91, E139-E158.
- Thomson, B.J., Bridges, N.T., Milliken, R., Baldrige, A., Hook, S.J., Crowley, J.K., Marion, G.M., de Souza Filho, C.R., Brown, A.J. and Weitz, C.M., 2011, Constraints on the origin and evolution of the layered mound in Gale Crater, Mars using Mars Reconnaissance Orbiter data. *Icarus*, 214, 413-432.
- Vasavada, A.R., 2022, Mission overview and scientific contributions from the Mars Science Laboratory Curiosity rover after eight years of surface operations. *Space Science Reviews*, 218, p.14.
- Williams, R.M., Grotzinger, J.P., Dietrich, W.E., Gupta, S., Sumner, D.Y., Wiens, R.C., Mangold, N., Malin, M.C., Edgett, K.S., Maurice, S., Forni, O., Gasnault, O., Ollila, A., Newsom, H.E., Dromart, G., Palucis, M.C., Yingst, R.A., Anderson, R.B., Herkenhoff, K.E., Le Mouélic, S., Goetz, W., Madsen, M.B., Koefoed, A., Jensen, J.K., Bridges, J.C., Schwenzer, S.P., Lewis, K.W., Stack, K.M., Rubin, D., Kah, L.C., Bell, J.F. III, Farmer, J.D., Sullivan, R., Van Beek, T., Blaney, D.L., Pariser, O., Deen, R.G. and MSL Science Team, 2013, Martian fluvial conglomerates at Gale crater. *Science*, 340, 1068-1072.
- Young, A., 2017, *The Apollo lunar samples: collection analysis and results*. Springer New York.