



Article

## 화성 지열류 측정을 위한 차세대 탐사-실험-모델 융합 프레임워크

안수정<sup>1</sup>, 이경민<sup>1</sup>, 김인엽<sup>1</sup>, 이주한<sup>2</sup>, 소병달<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지구환경시스템융합과

<sup>2</sup>극지연구소 미래기술센터

### A next-generation exploration-experiment-model integrated framework for Martian Heat Flow measurement

Soojung An<sup>1</sup>, Kyeong-Min Lee<sup>1</sup>, Inyup Kim<sup>1</sup>, Joochan Lee<sup>2</sup>, Byung-Dal So<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Kangwon National University, Republic of Korea

<sup>2</sup>Center of Technology Development, Korea Polar Research Institute

Received: November 4, 2025 / Revised: November 25, 2025 / Accepted: November 26, 2025

\*Corresponding author: +82-33-250-8582 / E-mail: [bdso@kangwon.ac.kr](mailto:bdso@kangwon.ac.kr)

**요약:** 화성의 지열류는 행성 내부 에너지의 방출 정도를 나타내는 1차 지구물리학적 지표로서, 맨틀 대류의 잔존성, 암석권의 냉각률, 화산 및 충돌 활동의 열역학적 진화를 규명하는 핵심 자료이다. 현재까지 화성에서의 직접 측정은 NASA *InSight* 임무의 HP<sup>3</sup> 장비가 유일하나, 예기치 못한 지반역학적 요인으로 인해 목표 심도(3-5 m)에 도달하지 못하고 실패하였다. 이후 사전 모의 실험과 지반 모델링의 중요성이 부각되었으나, 새로운 통합탐사전략에 대한 후속연구가 체계적으로 전개되지 않았다. 이에 본 연구는, 탐사-실험-모델을 통합한 한국형 화성 지열탐사 패키지(Korean Heat Flow Probe; KHFP)를 제안한다. KHFP 프로젝트는 타격식과 회전식 시추 메커니즘 중 화성 표토에 최적화된 방식 개발에서 출발하여, 궁극적으로 최대 5 m 심도까지 안정적으로 침투하여 온도구배와 열전도도를 동시에 측정할 수 있도록 설계된다. 또한 수치 지구동역학 모델링과 역산 기법을 결합하여, 주기별 온도 변화를 보정한 내부 지열신호를 복원하고 행성 규모의 열전달 구조를 재구성한다. KHFP의 핵심 기술은 국내연구진의 해양·극지 지열탐사 경험과 극한환경 열물성 실험 인프라에 기반하며, 지구 극한지에서 검증될 예정이다. KHFP의 탐사-실험-모델 간 피드백 루프를 통해 화성 내부의 열진화 과정을 고해상도로 규명하고, 더 나아가 달·소행성 등으로 확장 가능한 범행성 열탐사 패러다임을 제시한다.

**주요어:** 화성, 지열류, 한국형 화성 지열탐사 패키지, 극한환경 실험, 행성지질과학

**ABSTRACT:** The surface heat flow of Mars is a primary geophysical indicator representing the rate of internal energy loss from the planet. Measurement of heat flow provides critical constraints on the persistence of mantle convection, the cooling rate of the lithosphere, and thermal evolution. To date, the *InSight* mission's Heat Flow and Physical Properties Package (HP<sup>3</sup>) has been the only attempt to directly measure Martian heat flow. However, the probe failed to reach its target depth due to unexpected geotechnical factors. Although the importance of preliminary simulation experiments and geotechnical modeling has been recognized, subsequent research on new integrated exploration strategies has not been systematically pursued. We propose the Korean Heat Flow Probe (KHFP) as a next-generation exploration framework that integrates in-situ measurement, laboratory experiments, and numerical modeling. The KHFP project begins with a comparative evaluation of hammering-based and drilling-based penetration mechanisms to determine the optimal design for Martian regolith conditions. The ultimate goal is to achieve stable penetration to a depth of up to 5 m and to measure both temperature gradients and thermal conductivity simultaneously. The framework further combines numerical geodynamic modeling and inversion techniques to correct for diurnal and seasonal thermal variations and to reconstruct the planet-scale thermal structure of Mars. The core technologies of KHFP build upon Korea's extensive experience in marine and polar heat-flow exploration and an advanced experimental infrastructure for extreme-environment thermophysical measurements. The system should be verified progressively through field tests in terrestrial analog sites, establishing a closed-loop feedback among exploration, experiment, and modeling. Through the feedback loop among exploration, experimentation, and modeling within the KHFP framework, we aim to resolve the thermal evolution of the Martian interior at high resolution and, furthermore, to propose a cross-planetary heat flow exploration paradigm that can be extended to the Moon and asteroids.

**Key words:** Mars, heat flow, Korean Heat Flow Probe (KHFP), numerical geodynamics, extreme-environment experiments, planetary science

## 1. 서론

화성 지열류(heat flow)는 행성 내부에서 외부로 방출되는 열에너지의 세기를 나타내는 지구물리학적 1차 지표로서, 행성의 열진화, 냉각률, 맨틀 대류 활성도와 화산 및 충돌 기원 열사건을 해석하는 데 핵심적인 역할을 한다(Hahn *et al.*, 2011; Ruiz *et al.*, 2011; Tosi and Padovan, 2021); Soderlund *et al.*, 2025. 지열류는 행성 내부의 원시 집적열(accretionary heat), 방사성 붕괴열, 충돌 잔열 등의 총합이 행성 최상부인 지각을 통해 어떻게 전달되고 있는지를 반영한다(Ransford, 1982). 우리 지구에서의 지열류 연구가 판 구조 현상의 시작/발전/유지, 맨틀 플룸, 맨틀의 열적 대류 모델 수립 등 고체지구물리 전반의 근간이 되었듯이, 화성의 지열류 탐사는 화성의 행성역학적 진화와 현재의 열적 안정성 평가를 위한 가장 중요한 관측 목표라 할 수 있다.

지구에서 지열류 연구는 20세기 중반 해양지각의 지열류 분포가 중앙해령(mid-ocean ridge)과 대륙 사이에서 현저히 다르다는 사실을 통해 해양판 확장과 맨틀 대류의 존재를 주장하면서 판 구조론에 의한 지구과학 패러다임 전환을 이끌었다(Oxburgh and Turcotte, 1968). 중앙해령에서는  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 에 달하는 높은 지열류가 관측되며(Langseth *et al.*, 1966), 섭입대에 이르면  $25\text{-}50 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$  (Peacock, 1996)까지 지열류가 낮아진다. 안정된 대륙 지각에서는  $36\text{-}67 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$  (Smye and Kelemen, 2025) 수준의 지열류를 보여주며, 화산 지대에서는  $140 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$  (Nagao and Uyeda, 1995)에 이르는 높은 지열류를 보인다. 이러한 복잡한 지열류 분포는 지구 내부의 에너지 순환과 맨틀의 열대류 패턴을 설명하는 결정적 단서가 되었다. 특히, 해양 지열류 데이터는 맨틀 점성도 구조(기계적 강도)(Steinberger and Calderwood, 2006), 지각 유효 탄성 두께(effective elastic thickness)(Lu *et al.*, 2021), 그리고 열전도도(Richards *et al.*, 2018)의 공간적 변동을 정량화 하는데 기여하였다. 지열류 관측은 단순한 열물리량 측정을 넘어, 행성 내부 동역학과 진화를 이해하는 기본 틀을 제공한다. 따라서 화성에서도 지열류 탐사는 단순한 물리량 관측을 넘어, 화성이라는 행성의 내부 운동성, 냉각 이력, 과거와 현재의 판 구조 활동을 해석하는 데 필수적인 과학적 출발점이다.

지열류 측정 장비가 접근이 어려운 화성 지열류 추정을 위한 간접적 접근법으로는 감마선 분광기(Gamma Ray Spectrometer, GRS) 데이터를 활용한 연구가 진행되었다. Mars Odyssey 위성의 GRS 데이터를 기반으로 Parro *et al.* (2017)은 화성 지각 및 맨틀 내의 K, Th, U 함량을 분석하여 방사성 붕괴에 의한 열생성율을 계산하고, 평균 지열류를 약  $19 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 산정하였다. 지역적으로는  $14\text{-}25 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 의 변동이 확인되었다. 낮은 지열류 값은 북부 저지대인 아시달리아(Acidalia)

와 유토피아 플라나티아(Utopia Planitia) 및 거대 충돌구인 헬라스(Hellas), 아르기레(Argyre), 이시디스 플라니티아(Isidis Planitia)에서 측정되었다. 평균보다 높은 지열류 지역은 남부 고지대 또는 타르시스 몬테스(Tharsis Montes), 시리아 평원(Syria Planum), 알바 파테라(Alba Patera), 솔리스 평원(Solis Planum), 테라 시레눔(Terra Sirenum) 또는 타우마시아 몬테스(Thaumasia Monte)와 같이 지각이 두꺼운 지역이 해당한다(Parro *et al.*, 2017). 이 결과는 표면 침투방식을 이용한 직접 측정이 부재한 상황에서 화성의 냉각률과 내부 열에너지 보존 상태를 이상적으로 사전 가정하여 도출되었다. 최근에는 열에 의한 지반의 탄성 및 점성 변형 이론을 기반으로 점탄성(visco-elastic) 지구동역학(geodynamics) 모델링을 활용하는 연구가 도입되면서 정교한 지열류 근사값 추정이 가능해졌다(Karimi *et al.*, 2016). Ojha *et al.* (2021)은 남극층상퇴적물(South Polar Layered Deposits, SPLD)이 화성 암석권에 가하는 하중에 대한 점탄성 유한요소모델(Finite Element Method)을 구축하여, 하중 후 지각의 굴곡이 거의 관측되지 않는다는 사실로부터 맨틀기원 지열류의 상한을 약  $10 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$  이하로 제약하였다. 이는 화성 남극 지역이 암석권이 매우 두껍고 차가운 열적 구조를 유지하고 있음을 의미하며, 맨틀 내부의 점성유동이 이미 정체 상태에 진입했음을 시사한다. 특히 점탄성 모델은 단순한 탄성 균형 계산과 달리, 하중 인가 이후의 시간 의존적 점성 이완(viscous relaxation)을 고려함으로써, 행성 냉각 과정의 시간척도를 정량화 할 수 있다. 이러한 모델링은 화성의 지열류 추정이 단순한 정적 온도구배 측정에 그치지 않고, 열-기계 결합(thermo-mechanical)의 시간 진화 문제를 풀기 위한 지구동역학적 문제로 확장되어야 함을 보여준다.

화성의 지열류를 해석하는 지구동역학적 수치 모사 연구는 이미 지구동역학 분야에서 축적된 열대류 및 열전도 수식 체계에 기반한다. Plesa *et al.* (2016)은 3차원 맨틀 대류 모델을 통해 화성 내부의 온도, 점성도, 열전도도를 통합하여 전 행성적 지열류 분포를 재구성하였으며, 타르시스 용기대(Tharsis Bulge)나 엘리시움 화산지대(Elysium Mons) 지역의 상대적인 고열류 영역을 확인하였다. 이와 같은 모델들은 열대류 매개변수, 암석권 두께, 방사성 원소 농도, 열전도도 등의 물성값에 크게 의존하므로, 화성 임무 탑재 장비의 실측값을 통한 모델 검증이 절대적으로 필요하다. 따라서 실험·모델·탐사를 결합한 다계층 접근이 화성 열진화를 이해하기 위한 핵심 경로이다.

결국, 화성의 지열류 탐사는 지구과학에서 해양 지열류 연구가 그랬던 것처럼, 행성 내부 구조와 열역학적 진화의 전체 틀을 규정하는 출발점이다. 지구의 해양 지열류 데이터가 판 구조론을 확립시켰듯, 화성의 지열류 지도는 향후

맨틀 대류의 잔존 여부, 지각 열적 불균질성, 화산 및 충돌의 잔류열 해석, 나아가 잠재적 열수환경(hydrothermal system)의 존재 여부까지 평가할 수 있게 할 것이다. 따라서 향후 화성 탐사 프로그램에서 지열류 측정은 행성 내부를 이해하기 위한 가장 우선적 과학 목표로 설정되어야 하며, 이를 위해 정밀 열물성 실험, 수치 모델링, 시추식(혹은 탐침식) 탐사기술의 통합적 발전이 요구된다. 본 제언에서는 이러한 국제적 연구의 흐름을 바탕으로, 한국형 화성 지열 탐사 패키지(Korean Heat Flow Probe; KHFP)의 개념과 과학적 의의를 제시하고자 한다.

## 2. 화성 지열류 연구 동향

화성의 지열류를 현장에서 직접 측정하려는 유일한 시도는 2018년 발사된 NASA *InSight* 임무의 HP<sup>3</sup> (Heat Flow and Physical Properties Package) 장비를 통해 이루어졌다. HP<sup>3</sup>의 설계 목표는 “두더지(Mole)”로 명명된 타격식 자동 침투기를 이용하여, 화성 표면 아래 약 3-5 m 깊이까지 도달하는 것이었다. 해당 깊이는 화성의 극심한 계절적 온도 차의 영향을 피하고, 화성 내부 열 기원의 지열 구배를 순수하게 측정할 수 있는 최소 요구심도로 설정되었다(Spohn *et al.*, 2018). HP<sup>3</sup>는 길이 40 cm, 직경 2.7 cm의 침투기 본체에 망치질(hammering) 메커니즘을 내장하고, 후방 케이블에는 14개의 정밀 백금저항온도센서(platinum resistance temperature sensors)와 히터(heater)가 장착되어 열전도도(k)를 ± 3.5% 정밀도로 측정하도록 설계되었다. 지열류는  $k \cdot \frac{\partial T}{\partial z}$  (z: 깊이, T: 온도)으로 계산된다. 목표 오차는 ±5 mW·m<sup>-2</sup> 이었다(Spohn *et al.*, 2018).

그러나 HP<sup>3</sup> 임무는 화성 표토(Regolith)의 예상치 못한 지반 역학적 특성 때문에 중대한 난관에 봉착했다(Spohn *et al.*, 2022). 침투기는 지표 하부 수십 cm에 존재하는 단단한 표면 경화층(Duricrust)을 관통하지 못했고, 예상보다 훨씬 낮은 토양 마찰계수로 인해 망치질에 필요한 반력(reaction force)을 얻지 못했다. 반복적인 망치질에도 침투 속도는 감소했으며, 침투체는 반동하며 제자리에 머무르는 현상이 관찰되었다. 미항공우주국 및 독일 항공우주국인 NASA와 DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)은 로봇팔을 이용해 주변 토양을 눌러주는 실험을 수차례 수행했지만, 최종 도달 깊이는 약 37 cm에 불과했다. 이 깊이는 내부 지열류 신호보다 외부의 주기적 온도 변화가 지배적인 영역이다. 결과적으로 *InSight*는 화성의 지열류를 정량적으로 측정한다는 핵심 과학 목표를 달성하지 못하였다. 이러한 화성 표토의 깊이별 열-기계적 물성구조에 대한 선제 지식 부족은 HP<sup>3</sup>의 주요 실패 요인으로 지목되었다.

지구와 화성 토양과 암석의 입도 조성, 공극률, 결합수

함량, 시멘트화 정도 등은 모두 열전달과 마찰특성에 직접적으로 영향을 미친다(Zhang *et al.*, 2024). 특히 CO<sub>2</sub> 기체가 미세공극을 채우는 화성 환경에서는 공극열전도도가 크게 변동할 수 있음이 실험적으로 알려져 있다(Sun *et al.*, 2016a; Sun *et al.*, 2016b). 만약 탐사기 주변 토양의 열전도도, 비열용량, 공극률을 정밀하게 측정할 수 있다면, 얇은 깊이에서 관측된 복잡한 계절적 온도 변화 신호를 정량적으로 모델링하고 제거함으로써, 그 안에 숨겨진 미약한 내부 지열 신호를 분리해낼 가능성이 열리게 된다.

## 3. 한국의 지열류 연구 능력 평가

한국의 지열류 연구 경험은 화성 열탐사 연구의 새로운 전환점을 제공한다. 한국의 지질학, 해양학, 지구물리학 분야는 지난 수십 년간 한반도와 동북아 해역을 대상으로 지열류 탐사, 열물성 측정, 열전달 모델링을 연계 수행하며 독보적인 전문성을 축적하였다. 한반도 전역의 지각 열구조와 열생성을 분포를 체계적으로 산정하여 안정된 대륙지각의 열적 특성을 규명했다(Kim and Lee, 2007). 동해 울릉분지·오호츠크해·일본해 중앙분지와 같은 복잡한 해양환경에서도 심부 열류량을 직접 측정하고 전도-대류 복합 모델을 적용하여 해석한 연구(Kim *et al.*, 2017; Do *et al.*, 2023)를 선도하였다. 또한, 북극해 및 베링해 대륙붕에서 수행된 다수의 심해 열류량 탐사는 -1 이하의 저온, 저전도 퇴적층, 다공성 매질 조건하에서의 지열류를 정량화 함으로써, 화성 극한 환경의 지열류 측정에 직접적인 시사점을 제시한다(Choi *et al.*, 2021).

이러한 연구 경험은 단순한 현장 측정 기술을 넘어, 저전도·다공성 매질에서의 비정상 열전달 해석, 온도시계열 안정화 및 필터링, 지열역산의 수치적 최적화 알고리즘에 대한 정교한 노하우를 의미한다. 특히 국내 연구기관, 대학, 그리고 산업계 연구진은 암석 열전도도 측정 및 표준화 기법, 지열 자원 정보시스템 구축에 풍부한 경험을 보유하고 있어, 정밀하고 신뢰성 높은 지열 측정이 가능하다. 이는 향후 화성 탐사에서 요구되는 저신호·고잡음 열자료 해석 체계 구축에 직접 활용될 수 있다(KIGAM, 2024).

한국은 극저온·진공·저압 등 화성 환경과 유사한 조건에서 암석·토양의 열물성을 정밀하게 측정할 수 있는 실험 인프라를 갖추고 있다(Lee and Kim, 2016). 한국지질자원연구원(KIGAM) 등이 운영 중인 열물성 측정시스템은 시료의 공극률 및 수분함량을 제어하면서 극한 환경 조건에서 열전도도, 비열, 열확산도 등을 정밀하게 측정할 수 있다. 이러한 데이터는 미래의 로버 탑재형 열탐사기(Korean Heat Flow Probe, KHFP) 설계에 필요한 기준 값으로 활용될 수 있다.

#### 4. 한국의 행성 수준 지열류 모델링 능력 평가

한국은 지구의 다양한 판구조론적 상황에서 나타나는 지열류 변화를 정량적으로 해석해 온 경험을 폭넓게 축적하였다. 특히, 섭입대(Subduction zone)와 열개(Rift) 등 지각 변형이 활발한 지역에서는 열적 불균질성이 극대화되며, 열구조 연구는 곧 행성 내부 열진화 모델의 실험적 검증장 역할을 한다. 한국 내 연구진은 동북아 전역을 포괄하는 섭입대-확장대 복합구조(예: 일본 해구, 동해 등)를 대상으로 수십 년에 걸친 지열류에 관련된 수치모델링 연구를 수행하며 견고한 기술 체계를 확립하였다(Do *et al.*, 2023).

특히 동해 울릉분지(Ulleung Basin)는 열개 확장이 완료된 뒤 열적으로 안정화되는 과정을 보여주며, 한국 연구진은 이 지역의 열구조와 잔류열 거동을 이해하기 위한 실측 및 모델링 연구를 지속적으로 수행해왔다(Kim *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2025). 해저지열탐침 측정을 통해 얻어진 수십 개의 열류량 값은 평균 약  $70\text{--}90\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  수준으로 나타났으며, 일부 지역에서는 심부에서의 열대류 기여가 감지되었다. 이러한 실측값을 해석하기 위해 한국 연구진은 열전도와 지각 변형 복합모델을 기반으로 한 수치해석을 수행하였다(Do *et al.*, 2023).

이러한 모델링 연구는 울릉분지의 지각 조성 및 열적 구조에 따른 암석권 강도와 응력 분포를 정량적으로 해석한 대표적 사례로 평가된다. 최근에는 지진 반사 자료에서 관측된 굽힘 구조를 수치적으로 재현하기 위해 점탄소성(Visco-Elasto-Plastic) 유한요소모델링이 수행되었으며, 이를 통해 울릉분지 하부의 지각이 일반 해양지각보다 열적으로 더 따뜻하고 약한 상태임이 제시되었다(Kim *et al.*, 2025)

이러한 결과는 울릉분지가 단순히 열개 이후 냉각된 분지가 아니라, 여전히 열적 에너지가 잔존하며 주변 판 경계 응력의 전달을 완전히 수용하지 못하는 약한 매질 역할을 수행하고 있음을 보여준다. 지열류 자료, 지각 구조, 열적 유동학적 특성 간의 상호작용을 정량적으로 구속함으로써, 열-기계 커플링 관점에서 지각 변형과 열진화를 해석할 수 있음을 입증하였다. 특히, 열적으로 약화된 후열도 분지의 지각 응력 완화 메커니즘은 행성 규모에서도 동일한 물리적 원리로 작동하므로(Do *et al.*, 2023, 2025), 화성의 타르시스 용기대(Tharsis bulge)나 엘리시움 화산대(Elysium Mons)과 같은 상대적 고열류량 지역의 열적 구조를 이해하는 데 직접적인 비교 틀을 제공한다.

화성의 경우, 제한된 시추 자료(예: *InSight* HP<sup>3</sup>)와 궤도 기반 열관성 데이터만으로는 내부 열류량의 공간 변동성을 평가하기 어렵다. 그러나 한국 연구진의 분지 연구에서 검증된 이러한 지열류-응력-유동학 연계 모델링 기법을 적용하면, 관측된 온도구배나 표면 변형 패턴으로부터 화성 암

석권의 열적 강도, 냉각률, 그리고 맨틀 대류의 잔존성을 역으로 추정할 수 있다. 따라서 한국의 울릉분지 열모델링 연구는 화성의 열적 진화와 지각 역학 해석을 위한 실질적 아날로그로서 중요한 학문적 의미를 가진다.

한국은 최근 수치 지구동역학 분야에서, 열개 분지의 열적 진화와 지각과 암석권의 변형 과정을 고해상도로 모의할 수 있는 기술력을 확보하였다. 특히, Chang and So (2025)의 연구는 대륙 열개 발달 초기 단계에서 나타나는 지열류 분포와 비선형 점도 진화(Non-linear Viscosity Evolution)를 정밀하게 모델링함으로써, 한국 연구진이 행성 규모의 열진화 문제를 해석할 수 있는 수준의 수치모델링 역량을 보유하고 있음을 입증하였다. Chang and So (2025)의 연구에서는 고비용의 완전 비선형 반복 해법 대신, 열개 초기 단계에서만 반복 계산을 수행하는 부분 비선형 반복 전략을 도입하여 계산 효율을 높이면서도 표면 지열류와 지각 대칭성을 안정적으로 재현하였다. 이러한 접근은 열개 지역의 열-기계 커플링을 정확히 구현할 뿐만 아니라, 열류 변화가 지각 변형 양상과 암석권 강도에 미치는 영향을 정량적으로 제시하였다. 이는 울릉분지나 동해와 같은 한반도 주변 열개 분지의 열구조 해석에도 직접 적용될 수 있으며, 나아가 행성 열개의 열적 진화를 해석하는 핵심 기술로 발전하고 있다.

화성에서도 타르시스 용기대 및 엘리시움 화산대 지역은 열적으로 활발한 지역으로, 맨틀 상승과 지각 열류의 상호작용이 행성 냉각률과 표면 변형에 직접적인 영향을 미친다. Chang and So (2025)에서 제시된 열개 지역 지열류 모델링 체계는, 향후 KHFP 로버 기반 관측에서 얻어질 제한된 온도 구배 데이터로부터 내부 열류량 분포와 열적 불균질성을 복원하는 데 활용될 수 있다. 즉, 한국이 축적해 온 열개 분지 기반 열류 해석 기술은 화성의 열적 진화와 행성 냉각률을 규명하는 데 실질적 기여를 할 수 있는 과학적 기반을 제공한다.

#### 5. 한국형 화성 지열탐사 패키지(KHFP; Korean Heat Flow Probe) 구상

##### 5.1. 개발 필요성과 과학적 목표

NASA *InSight* 임무의 HP<sup>3</sup> (Heat Flow and Physical Properties Package)는 화성 지열류를 직접 측정하려는 최초의 시도였으나, 표토의 예상치 못한 역학적 특성(낮은 마찰계수, 단단한 표면 경화층)으로 탐침이 약 40 cm에서 멈추며 목표 심도 3-5 m에 도달하지 못했다(Spohn *et al.*, 2022). 이는 단순한 기계적 문제가 아닌, 화성 표토의 열적-기계적 물성(Thermo-mechanical properties)에 대한 불충분한 이해에서 기인한 한계였다. 따라서 향후 화성 탐사에서의 지열류

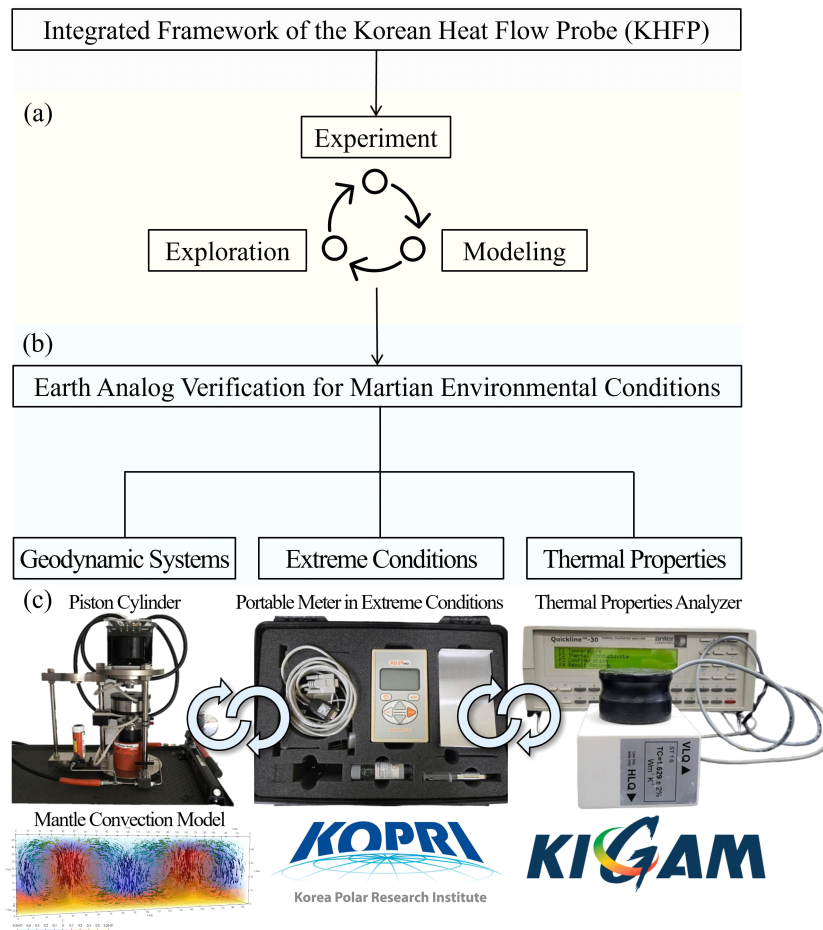
측정은 단순한 침투 기술이 아닌, 지질학적 및 열물리학적 환경에 적응하는 통합 탐사체계의 구축이 핵심이 되어야 한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 제안되는 한국형 화성 지열탐사 패키지(Korean Heat Flow Probe; KHFP)는 정밀 열물성 실험, 수치 모델링, 현장 탐사를 결합한 융합형 탐사 플랫폼으로 설계된다. KHFP의 핵심 과학 목표는 다음과 같다.

- i) 표토(0-5 m) 내에서 온도 구배와 열전도도(k)를 정밀하게 측정하여 지표 아래의 화성 내부 열에 의해서만 조절되는 순수한 지열(Heat flux)를 계량화한다.
- ii) 1 m 이하 얇은 심도에서는 고정밀 장기 관측과 역산 알고리즘을 결합하여 지열신호를 복원하고, 궁극적으로 5 m 심도까지 확장하여 일주기 및 연주기 온도 변화 효과가 거의 소멸된 “순수 내부 지열구배 영역”을 직접 관측한다.

iii) 5 m 관측 데이터를 기반으로 화성 암석권의 열전달 구조, 냉각률, 점성유동 상태를 정량적으로 제약하고, 이를 지구동역학 모델과 결합하여 행성 내부 열진화 모델을 검증한다.

이러한 목표를 달성하기 위해 KHFP는 단순한 센서 모듈이 아니라 “실험-모델-탐사 통합 프레임워크(Integrated Experiment-Model-Exploration Framework)”로 구현된다(그림 1a). 즉, 화성 표면의 현장 관측, 지구 실험실의 열물성 데이터, 지구동역학 모델링을 하나의 연구 루프로 통합하여 단일 관측 값이 아닌 화성 열진화 파라미터 공간을 전체적으로 제약하는 방식이다.

궁극적으로 KHFP는 1 m 심도에서 고품질 데이터를 확보해 역산 모델로 내부 열류량을 복원하고, 3 m 이상의 중간 심도에서는 계절 변동성에 의한 효과를 직접 검증하며, 최종적으로 5 m 심도에서 열적 교란 효과가 완전히 제거된



**Fig. 1.** Flowchart of KHFP. (a) Interactive workflow integrating experimentation, exploration, and modeling. (b) Earth-analog validation of Martian environmental conditions, representing geodynamic systems, extreme environments, and thermal properties. (c) The three components complement one another through evaluations of strength and temperature conditions measured using a piston cylinder apparatus, a mantle convection model, a portable meter from KOPRI, and a thermal properties analyzer from KIGAM.

“순수 내부 지열신호”를 직접 측정하는 것을 과학적 완결 목표로 한다. 이러한 계단식 심도 전략(1→3→5 m 심도; 그림 2)은 과학적 신뢰도와 탐사 성공률을 동시에 보장하며, 화성 열진화 연구의 새로운 기준을 정립할 것이다. 이는 한국이 해양 지열류 연구를 통해 축적한 모델링 역량을 행성탐사로 확장하는 대표적 사례가 될 것이다(그림 2).

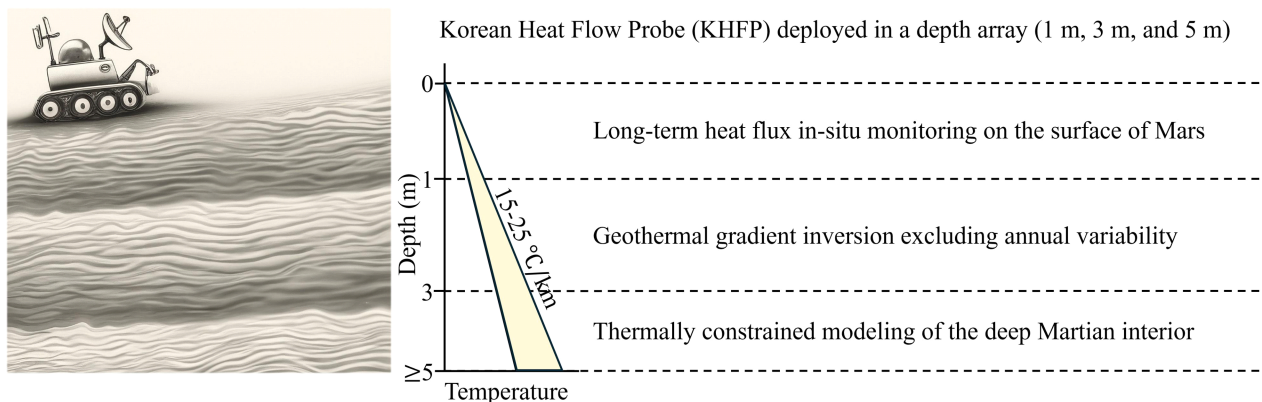
## 5.2. KHFP의 기술 개념 및 최적 침투 방식 선정 연구

KHFP의 성공은 *InSight* HP<sup>3</sup>가 남긴 기술적 한계를 근본적으로 극복하는 것에 달려 있다. HP<sup>3</sup>의 ‘타격식’ 메커니즘이 실패한 근본 원인은 화성 표토의 지반 역학적 복잡성과, 이를 충분히 예측하기 위한 수치 모델링의 부족에 있다. HP<sup>3</sup>는 표토 하부에 존재하는 단단한 표면 경화층을 관통하지 못했으며, 낮은 마찰계수와 불균질한 토양층으로 인해 추진 반력을 확보하지 못한 채 침투가 중단되었다. 이 사례는 단일 침투 방식의 한계와, 화성 표토의 물성에 대한 사전 지식 부족이 어떤 결과를 초래하는지를 명확히 보여주었다. 그러나 타격식 침투 방식은 장비 설계가 회전식 시추에 비하여 단순하며 질량이 상대적으로 작아 경제성 측면에서 저비용 고효율의 장점이 있다.

따라서 차세대 화성 지열탐사 패키지는 특정 메커니즘을 고정적으로 채택하기보다, 화성의 다양한 지반 조건에 최적화될 수 있는 침투 방식을 원점에서부터 체계적 재검증이 필요하다. KHFP 연구에서는 이를 위해 ‘타격식(Mole)’과 ‘회전 시추식(Rotary Drilling)’ 두 방식을 주요 후보로 설정하고, 화성 표토 환경에서 어느 방식이 가장 안정적이며 과학적 데이터 획득 효율 평가가 핵심 목표가 된다(그림 3). 이러한 목표를 달성하기 위해, 본 연구는 수치 모델링-정밀 실험-지구 극한지 실증(Earth Analog Verification)으로 이어지는 3단계 비교·검증 프레임워크를 구축해야 할

것이다(그림 1b). 대학 및 국내 연구 기관은 지구동역학 시스템, 극한지 환경, 열물성 분포에 관해 독립된 전문 지식을 축적해왔다(그림 1c). 행성 내부의 고온·고압 상태를 재현하는 피스톤 실린더(Piston Cylinder)로 표토의 역학적 강성을 추정하고 해당 환경과 최적화된 온도확산수치모델(Heat Diffusion Model)을 개별 제작하여 비교할 수 있다. 화성 표면을 최대한 가깝게 근사하는 물성 값을 입력하기 위하여, 극지연구소에서 보관중인 극한지에서의 휴대용 물성 측정기(Portable Meter in Extreme Conditions) 및 한국 지질자원연구원의 열물성측정기(Thermal Properties Analyzer)를 유기적으로 활용한다. 각 기관의 상호협력을 통해 열-기계역학적 지반특성을 정확히 파악하고 극한환경에서의 침투 모의 실험을 효율적으로 수행할 수 있다. 특히 얼음과 시멘트 등 비 균질한 화성 표토의 재현은 저온 환경 모사토를 사용할 수 있으나, 수치계산기법을 이용하여 가상 표토 모형을 구현하는 방법 또한 유용하다.

우선, 각 침투 메커니즘의 정량적 성능을 수치 모델링을 통해 비교·예측해야 한다. 이산요소법(DEM; Discrete Element Method) 및 유한요소-불연속체 모델을 이용하여, 탐사기-지반 상호작용 수치 모델을 설정할 수 있다. 화성 표토의 주요 불확실성 변수로는 경화층의 두께와 강도, 입자 간 응집력, 내부 마찰각, 그리고 얼음 시멘트의 분포 및 함량이 포함된다. 이 모델은 각 방식의 목표 심도 도달에 필요한 에너지 효율, 침투 속도, 반력 확보 능력, 수직도 유지 안정성을 정량적으로 분석하며, 침투 과정에서의 구조적 응력 분포를 예측한다. 이러한 결과는 향후 데이터 필터링 및 열 신호 분리 알고리즘 설계의 기준 값으로 활용될 것이다. 특히 단순한 기계적 효율만이 아니라, 침투 과정에서 발생하는 열적 교란의 영향을 정밀하게 예측한다. 타격식은 충격에 의한 순간적 고온 영역을 반복적으로 생성하고, 시추식은 회



**Fig. 2.** Depth-dependent investigation plan of KHFP. Long-term in-situ heat-flux monitoring on the Martian surface, geothermal-gradient inversion that excludes annual variability, and thermally constrained modeling of the deep Martian interior are required for probing depths of 0-1 m, 1-3 m, and 3-5 m, respectively.

전 마찰로 인한 지속적인 국부 가열을 유발할 것이다. 이러한 인공 마찰 열원이 주변 토양 매질에 전달되면, 내부 지열 신호(mK/m 수준)보다 수천 배 강한 인위적 온도 구배(K/m 단위)가 일시적으로 형성될 수 있다. 따라서 모델에서는 3 차원 열전달 방정식을 이용해 각 방식의 침투 시 발생하는 열 교환의 공간적 확산 범위, 지속 시간, 재현 주기를 계산하고, 관측 신호에서 제거해야 할 자체 생성 노이즈의 크기를 예측한다. 이 결과는 향후 데이터 필터링 및 열신호 분리 알고리즘 설계의 기준 값으로 활용될 것이다.

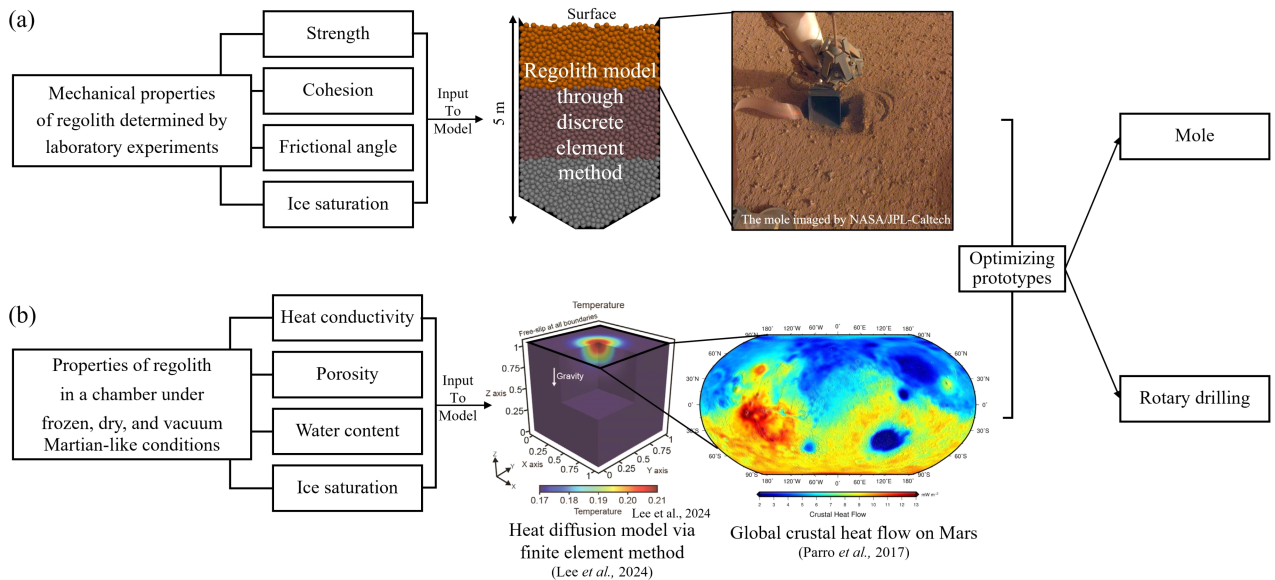
수치 모델링의 신뢰도는 입력되는 화성 토양 물성의 정확도에 좌우된다. 따라서 KHFP 프로젝트는 한국의 정밀 열물성 실험 인프라를 활용하여, 화성 유사 토양의 열-기계적 물성 데이터베이스를 구축이 계획된다(그림 3b). 저압 CO<sub>2</sub>(수 mbar 수준) 및 극저온(-130°C~0°C) 조건을 모사하는 진공 챔버에서, 시료의 응집력, 내부 마찰각, 변형률, 강도 등을 측정하기 위한 삼축 압축(Triaxial Compression) 및 단순전단(Simple Shear) 시험을 수행한다. 동시에 비정상 열선법(Transient Needle Probe)을 활용하여 시료의 열전도도, 비열, 공극률을 정밀하게 산출한다. 이러한 물성 실험은 단순한 모델 입력값 제공을 넘어, 각 메커니즘의 효율성 평가를 위한 기준 경계조건으로 사용되어야 한다. 즉, 동일한 시료 조건에서 두 메커니즘의 침투 에너지 효율, 열손실량, 침투 후 잔류 온도장을 비교함으로써, 실제 환경에서 어

떤 방식이 과학 데이터 측정에 유리한지를 판단할 수 있다. 또한, 이 실험 데이터는 모델의 물성-응답 곡선을 교정하는데 활용되어, 수치모델의 불확실성을 대폭 줄이는 역할을 한다.

모델링과 실험 데이터를 기반으로 제작된 각 메커니즘의 프로토타입은, 지구의 화성 유사 환경에서 실증 검증을 거친다. 화성 경화층에 대응하는 저온 건조환경의 극지환경을 대상으로 타격식과 시추식이 실제 경화된 층(얼음, 고화 퇴적물 등)을 관통할 수 있는지를 평가하기에 이상적이다(Zacny *et al.*, 2013). 이곳에서 각 프로토타입의 굴진 속도, 수직도 유지 능력, 반력 확보 안정성 등을 장기간 모니터링하여 실제 운용 시 발생 가능한 문제를 식별한다.

또한 HP<sup>3</sup>가 직면했던 낮은 마찰력 문제를 재현하기 위해, 건조한 화산재층과 같은 저밀도·저응집성 토양 환경에서 침투 성능과 반력 확보 능력을 비교 실험한다. 두 실험은 화성의 극지·중위도·적도 환경을 각각 대표하며, 탐사기의 기계적 성능뿐 아니라 열적 안정성, 전력소모 효율, 장비 내구성까지 평가할 수 있는 실질적 시험 환경을 제공한다. 이러한 지구 극한지 실증은 단순한 장비 검증을 넘어, 모델링과 실험에서 고려되지 않은 복합적 변수, 예를 들어, 실제 열전도도의 불균질, 미세균열에 의한 열전달 경로 변화, 침투 중 먼지 재침적 등을 식별하고 보정할 수 있게 해준다. 도출된 결과를 바탕으로 최종적으로 화성 표토의 다양한

Optimization of KHFP prototype for ~5 m depth penetration



**Fig. 3.** Optimization of KHFP prototype for -5 m depth penetration. (a) mechanical properties of regolith (e.g., strength, cohesion, friction angle and ice saturation) determined through experiment are implemented as input parameters of discrete element Martian regolith model. (b) Heat conductivity, porosity, water content, and ice saturation of regolith under Martian-like frozen condition constrains numerical heat diffusion model (Lee *et al.*, 2024), which is used to approximate global crustal heat flow on Mars (Parro *et al.*, 2017).

환경 조건에 대한 최적 침투 메커니즘 선택이 요구된다.

### 5.3. 지구 극한지 실험 및 수치 모델링을 통한 검증

KHFP의 실효적 검증 전략은 화성과 물리적·열적 특성이 유사한 지구 극한 환경에서의 종합 실험과 고성능 수치 모델링의 병행을 핵심으로 한다. 한국은 이미 동해 울릉분지, 베링해 대륙붕, 북극 해저퇴적분지 등 저온·저전도·다공성 퇴적층에서 심부 열류량과 퇴적물 열물성 측정, 현장 온도계·압력계 데이터 축적 등 기술적 역량을 쌓아왔다. 이는 KHFP의 프로토타입 성능 검증 및 실제 임무발사 이전 성능최적화에 직결된다. 특히 그린란드의 빙하 기저 퇴적층(NEEM community members, 2013), 아이슬란드 조산대 열분출지대(Voigt *et al.*, 2025), 알래스카 툰드라의 동결 퇴적지대(Johnson and Lorenz, 2000) 등은 저온·저압·진공에 가까운 공극 토양 등 물리/열적 조건이 화성 표층과 유사할 수 있다. 각 지역별로 한국과 국제 연구진의 공동 현장캠페인이 계획·수행되어, KHFP 모듈(센서, 히터, 데이터 전송, 내구소재 등)의 실 환경 시뮬레이션이 체계적으로 반복되어야 한다. 현장 실험에서는 센서열응답 평가(온도 반응속도, 열류 신호-잡음비S/N), 열전도도·비열·밀도 측정의 신뢰성, 자동 침투 시스템의 안정성, 데이터 전송율과 필드 내 전력관리까지 전 주기에 걸쳐 상태를 모니터링되어야 할 것이다.

진공·극저온 모사는 한국지질자원연구원의 열물성실험동과 극지연구소의 극저온시료실에서 수행될 수 있으며, 진공/저압 환경에서의 부품 내구성과 신호 보정 알고리즘을 반복적으로 개선하는 것이 권장된다. 또한 실험적 자료는 국제 극한지열 실험 데이터 베이스 및 화성 수치 모델링 자료와 비교해 검증되며, 최적 실험값들은 KHFP 온도역산·열류량 산정 알고리즘의 표준 입력 자료로서 자리할 수 있다. 이와 같은 극한지 환경에서 구축된 대규모 현장·실내 데이터셋은 향후 국제 화성탐사 데이터 해독의 정량적 기준으로 사용 가능하여, KHFP의 글로벌 표준성 및 적용력을 높여줄 것이다.

실내·현장 검증의 또 다른 핵심은, 실험적 교차검증과 동시에 고성능 대규모 수치 모델링을 연동하는 데 있다. 탐사 이후 KHFP에서 획득된 온도구배, 심도별 열전도도, 열류량 데이터는 FEniCS, ASPECT 등 세계적 오픈소스 지구 동역학/열전달-대류 결합 모델 플랫폼에 입력되어, 복수 파라미터 조합(암석 열특성, 공극률, 수분분포, 경화층 두께 등)을 활용한 역산이 가능하다. 이를 통해 각각의 임무 지역, 센서별 탐사조건에 대한 열신호의 왜곡, 노이즈, 정량적 오류 범위를 실제 데이터와 정밀 비교할 수 있다.

구체적으로, 한국 모델링팀은 기존 동해 울릉분지와 베링해 대륙붕의 실측 온도·열류 데이터와 3차원 맨틀 대류

모델, 비선형 열-기계 결합형 유한요소해석(예: 압축성 맨틀 대류, 점탄성/소성 유변학, 열개/섭입대 지열류 모델) 등을 결합하여, KHFP가 직면할 수 있는 환경변수(예: 표토 경화, 열대류-전도 복합 신호, 주기적 외부 온도 변동)에 대한 탐사·보정 효과를 복수 시나리오로 반복 수치 모델링한다. 이 과정에서 센서별 계측 값과 모델 예측치의 차이를 최소화하는 파라미터 튜닝, 미세 열류량 신호의 분해능 최적화, 표면온도 및 대기 조건 효과의 동적 필터링 모듈 등이 함께 개발 및 적용될 것이다.

이를 통해 한국은 탐사·실험·모델 피드백 루프를 완성하여, HP<sup>3</sup> 이후 세계적으로 가장 신뢰성 높은 행성 열탐사 교차검증 시스템, 즉 미래 KHFP 임무와 그 데이터 해석의 국제표준 제안권까지 확보할 수 있다. 동시에 이와 같은 수치 모델·실험 피드백 플랫폼은 기존 단일 측정지점 열류량 탐사 한계를 뛰어넘어, 지역적 열적 불균질성(예: 열구조 어레이 측정, 주기성 신호 분리), 지반 별 특성별 맞춤 해석까지 가능하게 한다.

또한 KHFP는 단일 시점 열탐침 또는 탐사기에 국한되지 않고, “다지점 열류량 탐사 시스템” 개념으로 기술 확장한다. 로버, 착륙선, 또는 심지어 드론 착지 플랫폼에 여러 개의 소형 또는 대형 KHFP 유닛을 동시에 배치함으로써, 하나의 임무에서 표면-심부의 광역 열적 분포, 지역별 미세 열류량 차, 열적 불균질성 지도를 정밀하게 산출할 수 있다.

나아가 이 KHFP 기술은 행성 지열류 탐사 전용 솔루션으로 자리잡아, 화성 외에도 달, 소행성, 극지 탐사 등 지구와 비지구계 천체에서 적용될 상시 다목적 탐사도구로 발전할 것이다.

## 6. 제언 및 결론

한국형 화성 지열탐사 패키지(KHFP)는 단순한 장비 개발을 넘어, 탐사·실험·모델을 통합한행성탐사 패러다임을 제시한다는 점에서 과학적·기술적 의의가 크다. KHFP의 구축은 화성 내부의 열진화를 규명하는 동시에, 지구와 행성을 아우르는 행성과학 연구의 새로운 기준을 마련하는 계기가 될 것이다. 무엇보다 KHFP를 통해 확보될 지열류 데이터는 화성 암석권의 열전달 구조와 냉각률을 정량적으로 복원할 수 있는 핵심 근거가 된다. 이는 맨틀 대류의 잔존성 여부를 검증하고, 행성 내부 에너지의 분포와 방출 효율을 파악하는 데 직접적으로 활용될 것이다. 또한 이 데이터는 화성의 지각 진화 단계, 화산활동의 종말 시점, 열수환경의 지속 기간 등 행성 열역학적 변화를 설명하는 데 중요한 단서를 제공한다. 특히, 화성의 타르시스 용기대 및 엘리시움 화산대와 같은 지역은 활발한 맨틀 대류, 젊은 지각 구조, 농집된 방사성 원소 등으로 인해 현저히 높은 열류량을 보

이다. 반대로 헬라스(Hellas)와 이시디스(Isidis)와 같은 대형 충돌분지는 충돌 직후에 잔류열이 있지만, 오늘날에는 상대적으로 낮은 열류량이 관측된다(Parro *et al.*, 2017). 이러한 화성 지열류 분포와 열적 비균질성의 원인의 규명은 화성 나아가 다양한 소행성의 열적 진화를 유추할 수 있는 기회를 제공한다.

KHFP를 통한 온도구배와 열전도도 측정은 화성의 지역별 열적 불균질성과 지각 강도의 공간적 분포를 파악하는 데에도 활용된다. 장기 모니터링을 통해 축적된 온도 데이터는 계절적·일주기적 온도 변화를 반영하여 경계조건을 보정할 수 있고, 이를 통해 오차를 최소화한 “순수 내부 지열 신호”를 복원할 수 있다. 이러한 고해상도 열류량 자료는 향후 지진파, 중력, 지형, 지각두께 모델 등과 결합되어 화성 내부구조 해석의 정밀도를 획기적으로 높이는 역할을 하게 될 것이다. 나아가 정확한 열류량 제약은 단순한 행성 진화 이해를 넘어, 화성의 잠재적 생명활동 가능성을 열역학적 관점에서 검토하는 기반 자료로 활용될 수 있다.

기술적으로 KHFP의 개발은 극한환경 탐사와 정밀 열물리 계측 분야의 혁신을 촉진할 것이다. 밀리 K 수준의 온도 정밀도와 극저온에서도 안정적인 센서 동작은 국내 정밀계측 기술의 신뢰성을 크게 향상시킬 것이며, 이중 반력 시스템과 드릴링 및 해머링 기술은 극지, 심해, 심부지반 등 지구 극한환경 탐사에도 직접적으로 응용될 수 있다. 또한 역산과 머신러닝 기반의 열신호 필터링 알고리즘은 고잡음 환경에서의 물성 복원을 가능하게 하여, 향후 지하 열전달 평가, 지열자원 개발, 지구물리학 등 다양한 분야로 기술이 확산될 것이다. 이처럼 KHFP를 위한 센서·소재·데이터 해석 기술의 축적은 단일 행성임무를 넘어, 극한환경 계측 및 자동화 탐사 분야 전반의 기술 경쟁력을 강화하는 기반이 된다.

KHFP의 추진 과정에서 구축될 탐사-실험-모델 연계 체계는 국내 행성과학 연구 인프라를 새로운 수준으로 끌어올릴 것이다. 한국 내 대학과 연구원의 진공 열물성 실험, 극저온 시료 연구, 수치 지구동역학 모델링이 하나의 연구망으로 연결되며, 단일 기관 중심의 탐사 연구에서 벗어나 국가 차원의 행성탐사 플랫폼으로 발전할 가능성을 보여준다. 이러한 과정에서 축적되는 열물성 데이터와 모델링 기술은 화성뿐 아니라 달, 소행성, 극지, 해저 등 다양한 환경에서 응용될 수 있으며, 한국이 주도하는 행성과학의 토대를 마련하게 된다. 동시에 이 연구는 차세대 연구자들에게 행성탐사, 수치모델링, 정밀계측을 아우르는 융합적 학문 교육의 기회를 제공하며, 향후 실질적인 행성과학 전문 인력 양성 체계의 시범모델로 자리잡게 될 것이다.

중장기적으로 KHFP 연구는 지속 가능한 다지점 열탐사 체계로 발전할 전망이다. 착륙선 또는 로버 하부에 복수의 탐침을 탑재하는 다지점 시스템을 구축하면, 동일 지역 내

에서도 열류량의 공간적 변동성을 정밀하게 측정할 수 있다. 이를 통해 지표 피복, 먼지층, 국지적 온도 변동이 지열 신호에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있고, 화성의 전행성적 열류량 분포지도를 작성할 수 있다. 또한 KHFP 데이터는 향후 지열류-응력장-지표변형을 동시에 추적하는 통합 관측 시스템으로 확장될 수 있다. 이러한 시스템은 화성 내부의 열적 상태와 응력 진화를 실시간으로 연결 분석할 수 있는 기반이 되어, 행성의 열역학적-기계적 진화를 보다 직접적으로 규명할 수 있을 것이다.

궁극적으로 KHFP는 HP<sup>3</sup> 이후 정체되어 있던 화성 지열 탐사 연구를 재가동시킬 수 있는 현실적 대안이며, 한국의 독자적 행성탐사 기술력을 상징하는 과학 프로젝트가 될 것이다. 정밀 실험, 고성능 모델링, 현장 탐사라는 세 축을 융합한 KHFP의 체계는 화성 내부 열진화 해석의 정밀도를 새롭게 정의함과 동시에, 향후 지구와 행성을 아우르는 표준 탐사 패러다임으로 발전할 잠재력을 지닌다. 본 연구에서 제안된 KHFP는 범행성 지열류 탐사 전략으로써 한국이 단순한 우주항공 개발 참여국을 넘어, 행성 내부 탐사와 지열물리 계측 분야에서 독자적인 리더십을 가진 선도국가로 도약할 수 있을 것이다. 결국 KHFP는 실험-모델-탐사의 융합을 통해 행성 열진화 연구의 새로운 장을 여는 한국형 행성열탐사 패러다임이며, 화성 지열류 연구의 과학적 정밀도와 기술적 완성도를 세계 최고 수준으로 끌어올리는 전환점이 될 것이다.

### 감사의 글

화성관련 특집호를 구성한 대한지질학회 행성과학분과에 감사를 전합니다. 본문 그림 1내 삽입된 장비 사진을 제공해주신 극지연구소 주현태 박사님과 한국지질자원연구원 이영민 박사님께 감사의 뜻을 표합니다. 이 논문은 과학기술정보통신부 재원의 기초연구실지원사업(RS-2025-02293161), 중견연구자지원사업(NRF-2022R1A2C1009742) 및 해양수산부 재원의 해양수산과학기술진흥원(RS-2023-00259686)으로부터 지원을 받았습니다.

### REFERENCES

Chang, J. and So, B.-D., 2025, Partial Nonlinear Iteration During Early Continental Rifting for Symmetric Surface Topography and Heat Flux. *Ocean Science Journal*, 60, 38, doi:10.1007/s12601-025-00232-y.

Choi, W., Lee, J., Kim, Y.G., Kim, H., Rhee, T.S., Jin, Y.K., Kim, J.H. and Seo, Y., 2021, The impact of the abnormal salinity enrichment in pore water on the thermodynamic stability of marine natural gas hydrates in the Arctic region. *Science of the Total Environment*, 799, 149357, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149357.

- Do, S.H., So, B.D., Kim, Y.G. and Kim, G.B., 2023, Lithospheric strength inferred from modeling of buckling structure: Implications for stress state of the East Sea (Japan Sea). *Tectonophysics*, 858, 229859, doi:10.1016/j.tecto.2023.229859.
- Do, S.H., So, B.D. and Shin, Y.H., 2025, Degree of coupling in 3D multilayer continental lithospheric buckling: Implications for tectonic underpressure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130, e2024JB029465, doi:10.1029/2024JB029465.
- Hahn, B.C., McLennan, S.M. and Klein, E.C., 2011, Martian surface heat production and crustal heat flow from Mars Odyssey gamma-ray spectrometry. *Geophysical Research Letters*, 38, L14203, doi:10.1029/2011GL047435.
- Johnson, J.B. and Lorenz, R.D., 2000, Thermophysical properties of Alaskan loess: An analog material for the Martian polar layered terrain?. *Geophysical Research Letters*, 27, 2769-2772, doi:10.1029/1999GL011077.
- Karimi, S., Dombard, A.J., Buczkowski, D.L., Robbins, S.J. and Williams, R.M., 2016, Using the viscoelastic relaxation of large impact craters to study the thermal history of Mars. *Icarus*, 272, 102-113, doi:10.1016/j.icarus.2016.02.037.
- Kim, A.R., Kim, H.S., Cho, G.C. and Lee, J.Y., 2017, Estimation of model parameters and properties for numerical simulation on geomechanical stability of gas hydrate production in the Ulleung Basin, East Sea, Korea. *Quaternary International*, 459, 55-68, doi:10.1016/j.quaint.2017.09.028.
- Kim, H.C. and Lee, Y., 2007, Heat flow in the Republic of Korea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112, B05413, doi:10.1029/2006JB004266.
- Kim, H.-S., So, B.-D., and Chang, S.-J., 2025, Lateral viscosity heterogeneity of mantle wedge and back-arc mantle: Implications from the 2010  $M_w$  8.8 Maule and 2011  $M_w$  9.0 Tohoku-Oki post-seismic deformation. *Seismological Research Letters*, doi:10.1785/02.20250153.
- Kim, Y.G., Lee, S.M. and Matsubayashi, O., 2010, New heat flow measurements in the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan): Relationship to local BSR depth, and implications for regional heat flow distribution. *Geo-Marine Letters*, 30, 595-603, doi:10.1007/s00367-010-0207-x.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2024, KIGAM Research Data Standard Guideline V4.0. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 30 p (in Korean).
- Langseth Jr, M.G., Le Pichon, X. and Ewing, M., 1966, Crustal structure of the mid-ocean ridges. *Journal of Geophysical Research*, 71, 5321-5355.
- Lee, K., Kim, H., Jang, D. and So, B., 2024, A comparative study of 2D numerical simulations using vector and potential methods for extending 3D modeling of planetary evolution. *Geosciences Journal*, 28, 465-481.
- Lee, G.W. and Kim, J.H., 2016, Research on Material Property Measurement under Extreme Conditions. Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, 31 p (in Korean).
- Lee, T., Ahn, T. and Park, S., 2025, Simulation study of gas hydrate production using various thermal stimulation methods in the Ulleung Basin of the Korean East Sea. *Petroleum Science and Technology*, doi:10.1080/10916466.2025.2465879.
- Lu, Z., Audet, P., Li, C.F., Zhu, S. and Wu, Z., 2021, What controls effective elastic thickness of the lithosphere in the Pacific Ocean?. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB021074, doi:10.1029/2020JB021074.
- Nagao, T. and Uyeda, S., 1995, Heat-flow distribution in Southeast Asia with consideration of volcanic heat. *Tectonophysics*, 251, 153-159, doi:10.1016/0040-1951(95)00084-4.
- NEEM community members, 2013, Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. *Nature*, 493, 489-494, doi:10.1038/nature11789.
- Ojha, L., Karimi, S., Buffo, J., Nerozzi, S., Holt, J.W., Smrekar, S. and Chevrier, V., 2021, Martian mantle heat flow estimate from the lack of lithospheric flexure in the South Pole of Mars: Implications for planetary evolution and basal melting. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091409, doi:10.1029/2020GL091409.
- Oxburgh, E.R. and Turcotte, D.L., 1968, Mid-ocean ridges and geotherm distribution during mantle convection. *Journal of Geophysical Research*, 73, 2643-2661, doi:10.1029/jb073i008p02643.
- Parro, L.M., Jiménez-Díaz, A., Mansilla, F. and Ruiz, J., 2017, Present-day heat flow model of Mars. *Scientific Reports*, 7, 45629, doi:10.1038/srep45629.
- Peacock, S.M., 1996, Thermal and petrologic structure of subduction zones. *Geophysical Monograph Series*, 96, 119-133, doi:10.1029/GM096p0119.
- Plesa, A.C., Grott, M., Tosi, N., Breuer, D., Spohn, T. and Wicczorek, M.A., 2016, How large are present-day heat flux variations across the surface of Mars?. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121, 2386-2403, doi:10.1002/2016JE005126.
- Ransford, G.A., 1982, The accretional heating of the terrestrial planets: A review. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 29, 209-217, doi:10.1016/0031-9201(82)90012-7.
- Richards, F.D., Hoggard, M.J., Cowton, L.R. and White, N.J., 2018, Reassessing the thermal structure of oceanic lithosphere with revised global inventories of basement depths and heat flow measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 9136-9161, doi:10.1029/2018JB015998.
- Ruiz, J., McGovern, P.J., Jiménez-Díaz, A., López, V., Williams, J.P., Hahn, B.C. and Tejero, R., 2011, The thermal evolution of Mars as constrained by paleo-heat flows. *Icarus*, 215, 508-517, doi:10.1016/j.icarus.2011.07.029.
- Smye, A.J. and Kelemen, P.B., 2025, Ultra-hot origins of stable continents. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/s41561-025-01820-2 (in press).
- Soderlund, K.M., Stanley, S., Cao, H., Calkins, M.A. and Browning, M.K., 2025, Puzzles in planetary dynamos: Implications for planetary interiors. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 53, 305-337, doi:10.1146/annurev-earth-111523-081635.
- Spohn, S.K.B., Farolfi, A., Schandeler, S., Vogel, M.M.E., Ruf, J., Mix, M., Kirste, S., Ceci, F., Fanti, S., Lanzafame, H., Serani, F., Gratzke, C., Sigle, A., Combs, S.E., Bernhardt, D., Gschwend, J.E., Buchner, J.A., Trapp, C., Belka, C., Bartenstein, P., Unterrainer, L., Unterrainer, M., Eiber, M., Nekolla, S.G., Schiller, K., Grosu, A.L., Schmidt-Hegemann, N.-S., Zamboglou, C. and Peeken, J.C., 2022, The maximum standardized uptake value in patients with recurrent or persistent prostate cancer after radi-

- cal prostatectomy and PSMA-PET-guided salvage radiotherapy—a multicenter retrospective analysis. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 50, 218-227, doi:10.1007/s00259-022-05931-5.
- Spohn, T., Grott, M., Smrekar, S.E., Knollenberg, J., Hudson, T.L., Krause, C., Müller, N., Jänchen, J., Börner, A., Wippermann, T., Krömer, O., Lichtenheldt, R., Wisniewski, L., Grygorczuk, J., Fittock, M., Rheershemius, S., Spröwitz, T., Kopp, E., Walter, I., Plesa, A.C., Breuer, D., Morgan, P. and Banerdt, W.B., 2018, The heat flow and physical properties package (HP<sup>3</sup>) for the InSight mission. *Space Science Reviews*, 214, 96, doi:10.1007/s11214-018-0531-4.
- Steinberger, B. and Calderwood, A.R., 2006, Models of large-scale viscous flow in the Earth's mantle with constraints from mineral physics and surface observations. *Geophysical Journal International*, 167, 1461-1481, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03131.x.
- Sun, Y.Z., Xie, L.Z., He, B., Gao, C. and Wang, J., 2016a, Effects of effective stress and temperature on permeability of sandstone from CO<sub>2</sub>-plume geothermal reservoir. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 819-827, doi:10.1016/j.jrmge.2016.07.004.
- Sun, Z., Yao, J., Huang, X., Xu, Y., Zhang, J., Liu, J., Yu, C. and Bongole, K., 2016b, CO<sub>2</sub> injection for heat extraction and carbon sequestration in a geothermal site: Huizhou Sag, the Pearl River Mouth Basin. *Geothermics*, 64, 331-343, doi:10.1016/j.geothermics.2016.06.002.
- Tosi, N. and Padovan, S., 2021, Mercury, Moon, Mars: Surface expressions of mantle convection and interior evolution of stagnant-lid bodies. *Mantle Convection and Surface Expressions*, 455-489, doi:10.1002/9781119528609.ch17.
- Voigt, J.R.C., Hamilton, C.W., Keszthelyi, L.P., Varnam, M., Hibbard, S.M. and Stack, K.M., 2025, The 2014-2015 Holuhraun lava flow-field in Iceland as a planetary analog for young volcanic terrains in Elysium Planitia, Mars. *Planetary Science Journal*, 6, 81, doi:10.3847/PSJ/adb5f1.
- Zacny, K., Paulsen, G., McKay, C.P., Glass, B., Davé, A., Davila, A.F., Marinova, M., Mellerowicz, B., Heldmann, J., Stoker, C., Cabrol, N., Hedlund, M. and Craft, J., 2013, Reaching 1 m deep on Mars: The Icebreaker drill. *Astrobiology*, 13, 1166-1198, doi:10.1089/ast.2013.1038.
- Zhang, W., Ma, Q., Liu, X., Wang, E., Xie, W. and Song, D., 2024, Study on crack propagation mechanism and acoustic-thermal sensitivity analysis of pre-cracked weakly cemented rock. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 133, 104619, doi:10.1016/j.tafmec.2024.104619.