



The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

얇고 반쯤 녹은 최초의 지각: 내부열이 아니라 충돌이 하데스 누대를 움직였다는 모델

지구 최초의 누대인 하데스 누대는 암석 기록을 거의 남기지 않았다. 이 모델링 연구는 보통 빠뜨리는 충돌을 포함하면 당시 지각이 어땠을지를 묻는다. 시간이 지나며 감소하는 확률적 충돌 플럭스 모델과 검증된 지각·맨틀 열 흐름 시뮬레이션을 결합한 결과, 하데스 누대 대부분에서 충돌 열은 지구 내부열 전체보다 최소 10 배 이상 컸고, 지각은 약 5 km 미만으로 얇으며 수 km 아래부터 부분용융돼 판구조 운동을 유지하기에는 너무 약했을 것으로 나타났다. 이런 지각은 맨틀로 쉽게 재순환돼 하데스 물질이 거의 남지 않은 이유를 설명할 수 있다. 약 39 억 년 전 충돌이 약해지면서 지속적인 대륙지각이 형성될 수 있었고, 이는 가장 오래된 생존 규장질 암석이 나타나는 시점과 맞물린다. 저자들이 일부러 보수적인 하한 가열을 사용했기 때문에 질적 결과는 강건하지만 정확한 수치는 고정돼 있지 않다. 이것은 지구 유년기에 대한 강하고 일관된 모델이지 직접 관측은 아니다.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Impact heating and the hidden Hadean*, Tim E. Johnson, Craig O'Neill, Simon Turner, Christopher L. Kirkland, Science (2026), 392:1408-1412 · DOI: 10.1126/science.aeb5402

거의 모든 페이지가 사라진 지구 이야기의 첫 장

지구는 우리가 아는 행성 가운데 대륙을 가진 유일한 행성이다. 대륙은 부력이 크고 실리카가 풍부한, 우리가 살아가는 육지다. 하지만 대륙이 처음 어떻게 형성됐는지는 지질학에서 가장 오래된 미해결 문제 중 하나다. 이유는 가혹할 만큼 단순하다. 증거가 거의 전부 사라졌기 때문이다.

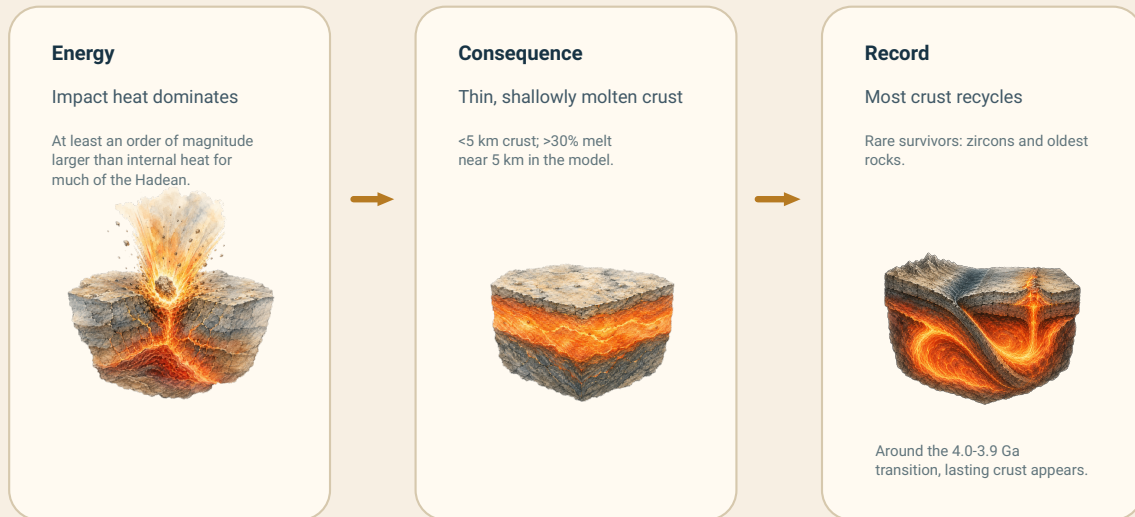
지구 최초의 누대인 하데스 누대 (Hadean) 는 행성의 탄생부터 약 40 억 3 천만 년 전 (4.03 Ga) 까지 이어진다. 그 첫 5 억 년에서 오늘날 남아 있는 것은 거의 없다. 가장 오래된 온전한 규장질 (대륙형) 암석은 약 40 억 3 천만 년 전의 것이다. 드문 현무암질 암석 몇 점은 약 42 억 년 전까지 거슬러 올라간다. 가장 오래된 물질은 지르콘 결정 몇 알로, 특히 서호주 잭 힐스 (Jack Hills) 에서 발견된 약 44 억 년 전의 지르콘이 유명하다. 이것이 지구 유년기의 기록 전부에 가깝다. 몇 군데의 산지와 모래알 크기의 광물들뿐이다.

이 연구는 그 기록에 새로운 암석을 추가하지 않는다. 대신 다른 일을 한다. 당시의 물리 조건 아래에서 하데스 누대 지각이 어떤 모습이었을지를 물리 모델로 구축하고, 초기 지구 모델이 대개 빼놓는 질문을 던진다. 초기 지구가 끊임없이 천체 충돌을 겪고 있었다는 사실을 무시하지 않으면 어떻게 되는가?

저자들이 얻은 답은 인상적이다. 하데스 누대 대부분의 기간 동안 충돌이 공급한 열은 지구 내부에서 오는 열을 압도했을 것이며, 그 결과 지각은 얇고 부분적으로 녹아 있어 현대적인 판구조론과 비슷한 체계를 유지하기에는 너무 약했을 것이라고 이들은 주장한다. 이것은 기억이 아니라 모델이다. 하지만 적어도 자신이 묘사하려는 시대의 폭력성을 물리적으로 포함하려 한 모델이다.

A model of the Hadean, not a memory of it

The logic is thermal: impacts heat, crust melts, the archive erases itself.



모델의 에너지 수지에서는 충돌열이 지배적이며, 얇고 얕은 깊이부터 부분적으로 녹은 지각이 스스로 재순환되고, 오래 지속되는 대륙지각은 약 40 억 ~39 억 년 전의 전환기에야 나타난다. 이것은 하데스 누대의 모델이지, 그 시대를 직접 기록한 자료가 아니다.

연구진이 한 일

연구팀은 보통 따로 다뤄지는 세 가지 요소를 결합했다.

첫째는 **충돌 플럭스의 확률적 모델**이다. 즉 하데스 누대와 초기 시생 누대 동안 소행성과 더 큰 천체들이 내태양계에 쏟아져 충돌한 양을 모델링했다. 중요한 점은 이것이 과거에 제안된 단일한 ‘후기 대폭격 (Late Heavy Bombardment)’ 급증 모델이 아니라는 것이다. 초기에는 강하지만 시간이 지나며 **감소하는 플럭스**이고, 큰 충돌은 일정한 시간표가 아니라 확률적으로 발생한다. 이 모델은 달과 내태양계의 충돌 통계를 바탕으로 재조정됐으며, 지르콘 연령 분포와 이용 가능한 고지자기 증거에 부합하도록 선택됐다.

둘째는 열이 지각과 상부 맨틀을 어떻게 이동하는지 계산하는 **지구동역학 시뮬레이션**이다. 연구진은 검증된 격자 볼츠만 코드 (Planet_LB) 를 사용해 단순한 1 차원 깊이별 온도 계산과, 41 억 년 전 맨틀의 완전한 2 차원 대류 스냅샷을 모두 실행했다. 여기에는 방사성 붕괴와 핵에서 오는 열 같은 일반적인 내부 열원뿐 아니라, 대부분의 지각 열 모델이 생략하는 **마그마 이류**도 포함된다. 즉 상승하는 용융물이 위쪽으로 운반하는 열이다.

셋째는 현실적인 초기 지각 조성, 즉 누부아기툽 (Nuvvuagittuq) 녹암대에서 가져온 수화된 하데스기 변형무암을 이용한 **상평형 모델링**이다. 이를 통해 이런 암석이 어느 온도와 깊이에서 녹기 시작하는지 계산했다.

논문 전체를 읽을 때 중요한 방법론적 선택이 하나 있다. 저자들은 일부러 자신들의 결론이 나오기 **어렵게** 가정했다. 표준적인 콘드라이트 기준보다 발열성 방사성 물질이 적은 ‘비콘드라이트질’ 맨틀을 가정해 내부 발열을 표준 모델의 절반 이하로 낮췄고, 보수적인 가열률을 사용했으며, 젊고 지구에 가까웠던 달에서 오는 조석가열도 무시했다. 따라서 계산된 지각 온도는 **최솟값**, 즉 하한선이다. 실제 하데스 누대는 이들의 모델보다 더 뜨거웠을 가능성이 있다.

무엇을 발견했나

하데스 누대의 에너지 수지는 내부열보다 **충돌이 지배했다**. 충돌열을 시간에 걸쳐 적분하면 내부 열 기여를 크게 웃돌며, 하데스 누대 대부분에서 최소 한 자릿수 (order of magnitude), 즉 10 배 이상 차이가 난다. 이 그림에서는 방사성 붕괴가 아니라 충돌가열이 초기 지각 활동을 움직이는 주된 동력이며, 약 **39 억 년** 전이 지나서야 작은 역할로 줄어든다.

그 열은 지각을 얇고 얇은 깊이부터 녹은 상태로 유지했다. 충돌과 용융물의 열 이류를 제외하면 모델에서 하데스 지각은 약 10~15 km 아래에서만 부분용융된다. 충돌열을 넣으면 용융 영역이 크게 위로 올라와, 지표에서 불과 **수 km 아래** (대략 2~5 km 아래) 부터 부분용융 상태가 된다. 약 5 km 깊이에서는 용융률이 30% 를 넘는데, 이 정도면 암석은 단단한 판으로 버틸 만큼 강하지 않다. 5~10 km 깊이의 온도는 약 1000~1100°C 에 이르러 암석 조성과 거의 무관하게 지각이 광범위하게 녹는다. 남아 있는 고체 지각은 **약 5 km 미만으로 얇았을** 것이다.

반쯤 녹은 지각은 자기 기록을 지운다. 광범위한 용융이 일어나면 철과 마그네슘이 풍부한 고밀도 물질은 가라앉아 분리되고, 가볍고 실리카가 풍부한 용융물은 위로 올라간다. 시간이 지나면서 평균 지각 조성은 더 진화된 실리카 풍부 조성으로 이동하고, 지르콘을 결정화할 수 있는 규장질 용융물도 만들어진다. 그러나 이 얇은 지각 대부분은 다시 대류하는 맨틀로 재순환됐을 것이며, 이는 화학적 (동위원소) 기록과도 양

립한다. 이 모델에서는 하데스기 암석이 거의 전혀 남지 않은 것이 기록의 단순한 '공백'이 아니라 예측되는 결과다. 42 억 년 전 암석과 44 억 년 전 지르콘은 만들어지자마자 대부분 파괴되던 지각에서 우연히 살아남은 희귀한 잔존물이다.

폭격이 잦아드는 시점은 최초의 지속적인 대륙 출현과 맞물린다. 40 억 ~39 억 년 전 전환기에 충돌 폭격이 약해지면서 지각은 마침내 두꺼워지고 오래 유지될 수 있었다. 가장 오래된 생존 대륙암도 바로 이 전환기 무렵에 나타난다. 저자들은 조심스럽게 표현한다. 이 시기에 지속적인 대륙지각이 나타난 것은 '아마 우연이 아닐 것'이라고.

이들의 핵심 추론은 이렇다. 지각이 얇고 수 km 아래부터 녹아 있었다면 **하데스 누대에 판구조 운동이 존재했을 가능성은 낮다.**

또한 이 연구는 이전 연구가 왜 반대 결론에 도달했는지도 보여준다. 과거 확률적 충돌 연구에서는 어느 시점에서도 녹아 있는 지각이 2.5% 미만이라며 충돌 효과가 작다고 보았다. 그러나 그 연구들은 이번 연구가 포함한 두 가지를 빼놓았다. 큰 충돌이 맨틀 깊은 곳의 용융에 미치는 전 지구적 효과와, 상승하는 마그마가 그 열을 위로 옮기는 과정이다. 이 둘을 다시 넣으면 열적 그림은 크게 달라진다.

왜 모델은 기억이 아닌가

위의 모든 결과는 하데스기 암석에서 읽어낸 직접 기록이 아니라 시뮬레이션의 출력이다. 그 시대 암석이 거의 남아 있지 않기 때문이다. 그렇다고 결과가 약하다는 뜻은 아니지만, 이것이 어떤 종류의 결과인지는 분명히 해준다.

논리의 사슬은 이렇다. 충돌 플렉스의 모델이 맨틀·지각 열 흐름의 모델에 입력되고, 다시 특정 암석이 어떻게 녹는지에 대한 모델과 대조된다. 각 고리는 물리적으로 근거가 있고 가능한 곳에서는 검증됐지만, 전체는 그럴듯한 물리 조건을 놓고 하데스 누대가 어땠어야 하는지를 논하는 일관된 주장이지, 실제로 어땠는지를 직접 측정한 것은 아니다.

그래서 저자들의 보수적인 가정이 생각보다 중요하다. 낮은 가열량을 택했는데도 얇은 지각이 광범위하게 녹는 결과가 나왔기 때문에, '하데스 지각은 뜨겁고 약했다'는 질적 결론은 가정 선택에 꽤 강건하다. 반면 여기서 정확히 고정할 수 없는 것은 구체적인 수치다. 정확한 지온구배, 정확한 용융률, 정확한 지각 두께는 아직 불확실하다. 결과의 방향은 강하게 받아들여지고, 소수점까지 확정된 값으로 읽어서는 안 된다.

이 연구가 증명하지 않는 것

- 하데스 지각을 **직접 관측**한 것이 아니다. 이 시대의 암석은 거의 없으며, 이것은 물리가 암시하는 바를 계산한 모델링 결과이지 측정값이 아니다.
- '후기 대폭격'에 의존하지 **않는다**. 사용한 충돌 플렉스는 시간이 지나며 감소하는 확률적 모델이며, 갑작스러운 폭격 급증을 필요로 하지도 호출하지도 않는다.
- 판구조론 논쟁을 **끝내지 않는다**. 여기서 '가능성이 낮다'는 판단은 뜨겁고 정체된 뚜껑 (stagnant lid) 또는 물렁한 뚜껑 (squishy lid) 의 초기 지구를 지지하는 강하고 물리적인 추론이지만, 하데스 누대의 실제 지각운동 양상은 여전히 논쟁 중이다.

- 충돌이 40 억 ~39 억 년 전 전환기에 대륙 출현을 일으켰다고 증명하지 않는다. 시기가 맞는다는 것은 저자들이 '아마 우연이 아니다' 라고 표현한 강한 연관성이지만, 설득력 있는 상관관계와 입증된 인과 관계는 다르다.
- 잭 힐스 지르콘은 보존된 대륙이 아니다. 이들은 초기에 규장질 물질과 물이 존재했음을 보여주는 희귀한 생존 입자다. 모델의 핵심은 이들을 만든 지각 대부분이 재순환돼 사라졌다는 것이다.
- 초기 지구의 완전한 역사를 복원하지 않는다. 시뮬레이션은 이상화돼 있다. 1 차원 프로파일과 적도 부근 충돌을 가정한 2 차원 적도 단면, 그리고 특정 시점의 스냅샷이지 행성의 완전한 4 차원 모델이 아니다.

근거는 얼마나 탄탄한가?

핵심 주장, 즉 충돌가열이 하데스 지각을 얇고 얇은 깊이부터 녹은 상태로 유지하는 1 차적인 통제 요인이었다는 주장에 대해서는 논리가 일관되고, 중요한 의미에서 보수적이다. 검증된 지구동역학 코드와 물리적으로 합리적인 입력값, 하한선에 가까운 가정을 사용하고, 이전 모델 대부분이 단순히 무시했던 열원을 포함했다. 또한 두 가지 난제를 한 번에 설명한다는 점도 신뢰성을 더한다. 왜 약 40 억 년보다 오래된 암석이 거의 남지 않았는지 (거의 완전한 재순환), 그리고 왜 지속적인 지각이 폭격이 잦아드는 바로 그 시점에 나타나는지다.



NASA의 ASTER 장비가 촬영한 서호주 잭 힐스. 이 지역의 지르콘 가운데에는 지구 초기 지각에서 살아남은 것으로 알려진 가장 오래된 물질이 포함되어 있다. 암석 대부분이 지워진 누대에서 남은 아주 작은 단서다.

NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team fair-use

한계 역시 명확하며, 깊은 시간대를 다루는 모든 모델이 가진 한계다. 희박한 암석 기록을 바탕으로 모델 위에 모델을 쌓은 결과이고, 가장 인용하기 쉬운 결론인 '판구조론은 가능성이 낮다'도 관측이 아니라 추론이다. 따라서 이 연구는 하데스 누대를 새롭게 바라보게 하는 강하고 잘 구성된 가설로 받아들이는 것이 적절하다. 이제 다른 연구들이 그 가정들, 특히 충돌 플렉스 모델의 선택을 시험해야 한다. 아직 닫힌 사건이 아니다.

가장 유용한 요약은 '하데스 누대는 분명 이렇게 생겼다'도, '그저 시뮬레이션일 뿐이다'도 아니다. 그럴 듯하고 보수적인 물리를 적용하면, 거센 충돌을 겪은 초기 지구는 얇고 반쯤 녹아 있으며 스스로 재순환하는 지각을 가졌을 것이고, 이 한 가지 아이디어가 우리가 실제로 볼 수 있는 얼마 안 되는 증거를 놀랄 만큼 많이 설명한다는 것이다.

왜 중요한가

초기 지구에 대한 대중적 이미지는 흔히 두 극단 사이를 오간다. 오늘날과 거의 같은 판구조 운동을 하는 평온한 물의 세계이거나, 지옥 같은 용암 행성이다. 이 연구는 그 사이의 구체적이고 물리적인 그림을 제시한다. 지각은 얇고 수 km 아래부터 반복해서 다시 녹았으며 끊임없이 파괴되고 다시 만들어졌다. 그리고 그 조건을 정한 것은 내부열보다 충돌이었다.

이 재구성은 실제 설명력을 가진다. 지구 유년기의 두 거대한 사실, 즉 암석 기록이 거의 완전히 사라진 이 유와 최초의 지속적인 대륙이 나타난 시점을 하나의 메커니즘으로 연결하고, 보통 간과됐던 충돌가열을 이야기의 중심에 놓는다. 이 그림이 살아남는다면, 지구가 언제부터 안정적인 대륙을 가진 행성이 되었는지를 추론하는 방식 자체가 달라진다. 또한 각자의 충돌 역사를 거치며 형성된 다른 암석형 행성에도 적용할 수 있다.

그렇다고 이 모델이 최종 답이어야 할 필요는 없다. 시험할 가치가 있는 충분히 좋은 가설이면 된다. 그리고 살아남은 지르콘 및 동위원소 기록과 스스로를 연결한다는 점에서 그 조건을 갖춘다. 논문 제목의 '숨겨진 하데스 누대'가 바로 핵심이다. 그 시대가 자기 증거를 지워버렸기 때문에, 우리는 대부분 모델링을 통해서만 접근할 수 있다.

핵심 요약

지구 최초의 누대인 하데스 누대(약 40억 3천만 년 전 이전)는 암석 기록을 거의 남기지 않았다. 이 모델링 연구는 보통 빠뜨리는 열원, 즉 천체 충돌을 포함하면 당시 지각이 어땠는지를 묻는다. 연구진은 시간이 지나며 감소하는 확률적 충돌 플렉스 모델과, 지각·맨틀의 열 흐름을 계산하는 검증된 1차원 및 2차원 시뮬레이션(상승하는 용융물이 운반하는 열 포함)을 결합했다. 그 결과 하데스 누대 대부분에서 시간 누적 충돌열은 지구 내부열 전체보다 최소 10배 이상 컸을 것으로 나타났다. 그 결과 지각은 약 5km 미만으로 얇고, 지표에서 수 km 아래부터 부분용융되며, 약 5km 깊이에서는 30% 이상 녹아 단단한 판을 유지하기 어려웠다. 저자들은 이에 따라 하데스 누대의 판구조 운동이 가능성이 낮다고 본다. 이런 지각은 대부

분 맨틀로 재순환되므로 하데스 물질이 거의 남지 않은 이유도 설명할 수 있다. 충돌이 40 억 ~39 억 년 전 사이에 약해지자 오래 지속되는 대륙지각이 형성될 수 있었고, 바로 이 무렵 가장 오래된 생존 규장질 암석이 나타난다. 저자들의 조심스러운 표현대로 이는 ‘아마 우연이 아닐’ 수 있다. 일부러 보수적인 하한선 가열을 사용했기 때문에 질적 결론은 강건하지만 정확한 수치는 고정돼 있지 않다. 이것은 지구 유년기에 대한 강하고 일관된 모델이지, 그 시대를 직접 관측한 자료는 아니다.

과장 없이 보면

논문이 보여주는 것: 충돌가열과 마그마 열수송을 포함한 물리 기반 시뮬레이션에서 하데스 지각은 얇고 수 km 아래부터 부분용융된 상태가 되며, 내부열보다 충돌열이 지배한다. 지각 대부분은 맨틀로 재순환되고, 이 모델에서는 판구조 운동을 유지하기 어렵다.

그렇듯하지만 입증되지 않은 것: 약 39 억 년 전 지속적인 대륙이 나타난 이유가 충돌 감소였다는 것, 하데스 누대가 초기 판구조 세계가 아니라 정체된 또는 물렁한 뚜껑 상태였다는 것, 하데스 암석이 거의 남지 않은 주된 이유가 녹은 지각의 자기 재순환이었다는 것.

보여주지 않는 것: 하데스 지각의 직접 측정, 판구조론 논쟁의 확정적 결론, 폭격 감소와 최초 대륙 사이의 입증된 인과관계, 잭 힐스 지르콘이 보존된 대륙이라는 주장, 초기 지구 전체의 완전한 모델.

주요 한계: 하데스 암석 기록이 거의 존재하지 않아 매우 적은 데이터로 제약된 모델이다. 충돌 플럭스 → 지구동역학 → 상평형이라는 여러 모델을 연쇄적으로 쌓는다. 충돌 플럭스 자체도 대표적인 한 선택일 뿐 불확실성이 있다. 시뮬레이션은 이상화된 1 차원·2 차원 적도 단면과 시간 스냅샷이다. 보수적인 하한 가정은 질적 결론을 더 강하게 만들지만 구체적인 지온구배를 정밀하게 만들지는 않는다.

일반 독자는 얼마나 신뢰해도 될까? 그럴듯한 물리 조건에서 강한 천체 폭격을 받은 초기 지구가 뜨겁고 얇으며 얇은 깊이부터 녹은 지각을 가졌을 것이라는 점에는 높은 신뢰를 둘 수 있다. 이것이 하데스 판구조 운동을 어렵게 했고 사라진 암석 기록을 설명한다는 데에는 중간 정도의 신뢰가 적절하다. 이것이 대륙이 정확히 어떻게, 언제 형성됐는지를 증명한다는 주장에는 낮은 신뢰만 두어야 한다. 이 연구는 하데스 누대를 새롭게 보는 강하고 보수적인 모델이지 직접 관찰이 아니다.

출처

Johnson, O'Neill, Turner & Kirkland, Science 392:1408-1412 (2026)
<https://doi.org/10.1126/science.aeb5402>