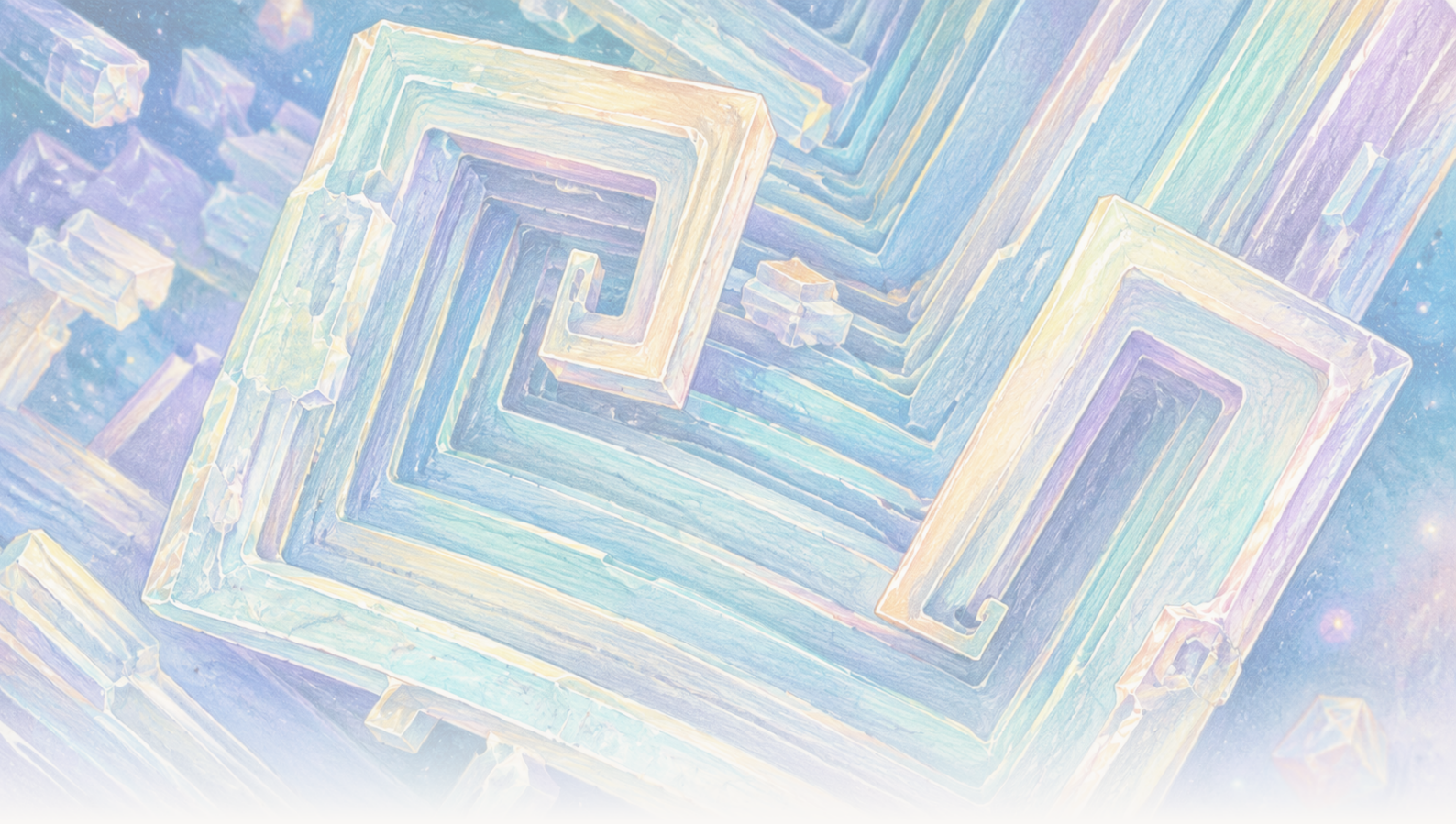




The CLEAN PAPER

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

궤도에서 식탁용 소금이 속 빈 정육면체로 자랐다. 중력이 바꾼 것은 소금이 아니라 소금물이었다

국제우주정거장에서 성장시킨 염화나트륨 결정에는 모서리 길이 2~8 밀리미터의 속이 빈 계단형 정육면체가 포함됐다. 논문들은 수송 과정에 기반한 설명을 지지한다. 일반적인 침강과 부력 구동 흐름이 크게 억제됐고, 초기 성장에서는 확산이 우세했다. 결정 격자가 새로운 형태의 소금으로 바뀐 것은 아니며, 이 실험들은 산업 공정이 확립됐다는 증거도 아니다.

Written by Matteo · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Matteo and Nova Vela
· AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions*, Donald Pettit and Pietro Fontana, npj Microgravity 5, 25 (2019) · DOI: 10.1038/s41526-019-0085-0

궤도에서는 평범한 식탁용 소금이 속이 빈 계단형 정육면체로 자랐다

결정은 마치 건축물처럼 보였다. 사각 틀 안에 또 다른 사각 틀이 겹겹이 들어가고, 각 면의 안쪽은 계단처럼 움푹 파여 있었다.

재료는 평범한 염화나트륨, 즉 식탁용 소금과 같은 물질이었다. 특이한 것은 소금 자체가 아니라 그 주변의 소금물이었다.

지구에서는 센티미터 규모의 액체 속에서 자라는 결정이 가라앉거나 벽 또는 표면에 닿을 수 있고, 용액을 순환시키는 밀도 차이를 만드는 데 기여할 수 있다. 국제우주정거장에서는 일반적인 침강과 부력에 의한 흐름이 크게 억제됐다. 일부 소금 결정은 충분히 오래 떠 있는 상태를 유지해 천천히, 더 대칭적으로 자라면서 모서리 길이 2~8 밀리미터의 **호퍼 정육면체 (hopper cube)** 를 만들었다.

2011 년, 2015 년, 2019 년에 발표된 세 논문이 이 실험들을 기술한다. 세 연구를 함께 보면 수송 물리학의 분명한 교훈 하나가 드러난다. 용해된 물질이 결정 표면에 도달하는 방식을 바꾸면 원자 구조를 바꾸지 않고도 눈에 보이는 형태를 바꿀 수 있다.

이 연구들이 우주에서 완벽한 결정이 만들어진다는 것을 보여 주는 것도, 산업 공정을 확립한 것도, 새로운 종류의 소금을 발견한 것도 아니다.

정육면체가 어떻게 호퍼 결정이 되는가

일반적인 염화나트륨 결정은 원자 배열이 정육면체형이다. **호퍼 결정**도 여전히 정육면체 구조지만, 각 면의 중심보다 꼭짓점과 모서리가 먼저 자란다. 그 결과 각 면에 속이 빈 계단형 오목부가 생기며, 마치 정육면체가 벽을 채우기 전에 골격부터 세운 것처럼 보인다.

나중에 ISS 에서 얻은 한 사례는 이런 성장 패턴을 눈으로 확인하게 해 주지만, 여기서 다루는 세 염화나트륨 논문의 증거는 아니라 맥락을 제공하는 자료다. 아래 Donald Pettit 의 이미지와 타임랩스 영상은 다른 염인 **염화칼륨**이 미세중력에서 계단형 호퍼와 말린 두루마리 같은 형태를 만드는 모습을 보여 준다.

[figure_pair pending]

ISS 에서 성장시킨 염화칼륨의 말린형 호퍼 결정을 보여 주는 두 장의 주사전자현미경 이미지. 이 후대의 이미지는 형태를 이해하기 위한 맥락적 사례이며, 이 글에서 다루는 2011 년, 2015 년, 2019 년 연구의 염화나트륨 시료나 측정값은 아니다.

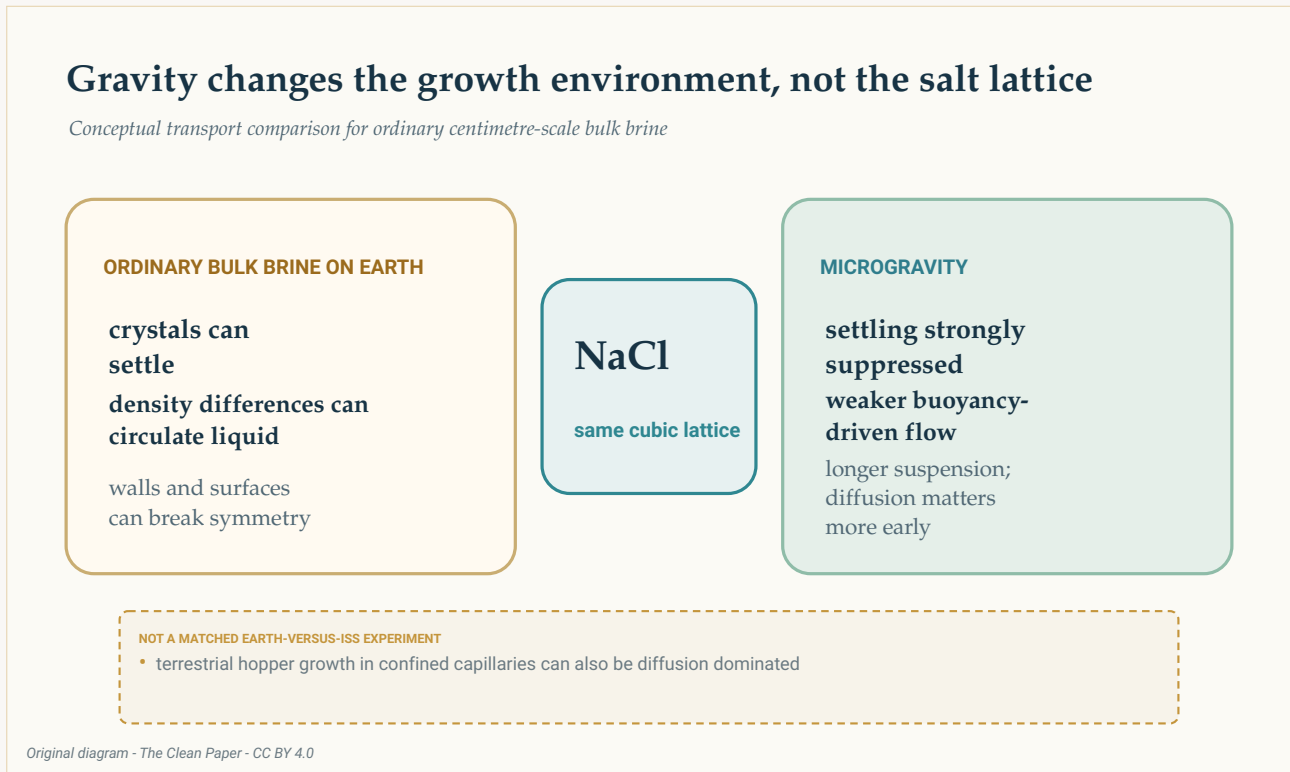
[video pending]

미세중력의 얇은 물막 안에서 염화칼륨 호퍼 결정이 성장하는 모습을 담은 후대의 타임랩스 영상. 모서리와 꼭짓점이 먼저 자라는 과정을 보여 주지만, 이 글에서 분석하는 염화나트륨 실험이나 데이터는 아니다.

결정은 **과포화 소금물**에서 자란다. 이는 해당 조건에서 평형 상태라면 녹아 있을 수 있는 양보다 더 많은

염화나트륨이 용해된 소금물이다. 나트륨 이온과 염화 이온은 액체를 통과해 결정 표면까지 이동한 뒤 그곳에 합류해야 한다.

이들을 이동시키는 방식은 크게 두 가지다. **확산**은 대량의 액체 순환 없이도 무작위 분자 운동을 통해 용질이 농도 차이를 따라 이동하는 현상이다. **대류**는 액체 자체가 움직이는 것이다. 보통의 중력 아래에서는 온도나 농도의 작은 차이가 밀도를 바꾸고 부력 순환을 일으킬 수 있다. 결정 자체도 **침강**, 즉 액체 속에서 아래로 가라앉을 수 있다.



두 환경에서 동일한 염화나트륨 격자를 보여 주는 개념 비교도. 지구의 일반적인 벌크 소금물에서는 침강, 부력 순환, 표면 접촉이 일어날 수 있다. 미세중력에서는 앞의 두 과정이 크게 억제되어 결정이 더 오래 떠 있고 성장 초기에는 확산의 중요성이 커진다. 이 비교는 지구와 ISS에서 조건을 정확히 맞춘 대조 실험이 아니다.

The Clean Paper CC BY 4.0

이 실험은 궤도를 도는 미세중력 실험실인 국제우주정거장에서 수행됐다. **미세중력**이라는 표현은 중력이 전혀 없다는 뜻이 아니다. 2019년 논문은 지표면 중력의 약 120만분의 1, 즉 약 1.2 micro-g 수준의 잔류 가속도와 느린 주기적 액체 운동을 보고했다. 환경이 수송 과정의 균형을 바꾼 것이지, 소금물을 완벽하게 정지시킨 것은 아니다.

밀리미터 크기 정육면체까지 가는 느린 성장 경로

2019년 연구는 ISS에서 소금물이 증발하면서 자란 호퍼 정육면체에 초점을 맞췄다. 보고된 정육면체의 모서리 길이는 **2.8** 밀리미터였다. 성장 속도는 분당 **0.34~1.0** 마이크로미터 (하루 약 **0.49~1.44** 밀리미터) 였고, 평균은 분당 **0.68** 마이크로미터, 표준편차는 0.23 이었다.

그 평균 속도라면 모서리 길이 8 밀리미터에 도달하는 데 대략 일주일이 걸린다. 이 계산은 추정치이며, 하나의 결정이 모든 단계를 거치는 모습을 타임랩스로 측정한 결과는 아니다.

저자들은 과포화도를 **1.002 미만**으로 추정했다. 비교 대상으로 인용한 지상 연구 문헌에서는 1.45 보다 훨씬 높은 과포화도와 초당 10~110 마이크로미터의 성장 속도에서 수초에서 수분 동안 호퍼 결정이 성장했고, 보통 250 마이크로미터보다 작은 정육면체가 만들어졌다고 기술한다.

이 비교는 유익하지만 조건이 일치하는 대조 실험은 아니다. ISS 결정과 지상 문헌의 결정은 같은 연구팀이 동일한 조건에서 지구와 궤도 실험군을 동시에 운영해 얻은 것이 아니다. 중력뿐 아니라 용기, 계면, 방법의 차이도 영향을 줄 수 있다.

따라서 가장 강하게 말할 수 있는 차이는 기술적이다. 이 ISS 관측에서 호퍼 정육면체는 낮은 과포화도에서 며칠에서 수주 동안 천천히 성장해 밀리미터 크기에 도달했다.

초기에는 확산이 지배적이었지만, 나중에는 흐름도 가능했다

2019 년 논문은 액체 운동에 의한 수송과 확산에 의한 수송을 비교하기 위해 **페클레 수 (Peclet number)**를 사용했다. 값이 1 보다 작으면 확산이 더 중요하고, 1 보다 크면 벌크 액체 운동이 우세할 가능성이 있다.

스위치가 아니라 비율

페클레 수는 두 가지 수송 속도를 비교하는 비율이다. 1 아래에서는 액체가 완전히 정지하고 1 위에서는 순수한 대류만 일어난다는 식으로 세계를 둘로 나누지 않는다. 여기서는 결정 크기와 주변 소금물의 속도를 어떻게 추정하느냐에 따라 값이 변했다. 가장 작은 결정은 분명 확산 지배 영역에 있었지만, 더 큰 용기에서 가장 큰 결정은 느린 액체 운동이 중요해지는 영역에 들어갔을 가능성이 있다.

더 작은 약 0.8 센티미터 크기의 방울에서는 추정 페클레 수가 핵생성 무렵 약 **0.0004** 에서 최종 측정 크기에서 약 **0.03** 까지 증가했다. 확산이 계속 지배적이었다.

2~3 센티미터 크기의 결정화 용기에서는 50 마이크로미터 핵일 때 약 **0.05** 에서 모서리 길이 4 밀리미터일 때 약 **4** 까지 추정치가 증가했다. 초기 성장에서는 여전히 확산이 지배적이었지만, 후반에는 느린 주기적 흐름이 기여했을 수 있다.

그래서 “미세중력이 대류를 제거했다” 라고 말하면 틀린다. 일반적인 부력 구동 순환과 침강은 크게 줄었지만, 잔류 가속도와 측정 가능한 액체 운동은 남아 있었다.

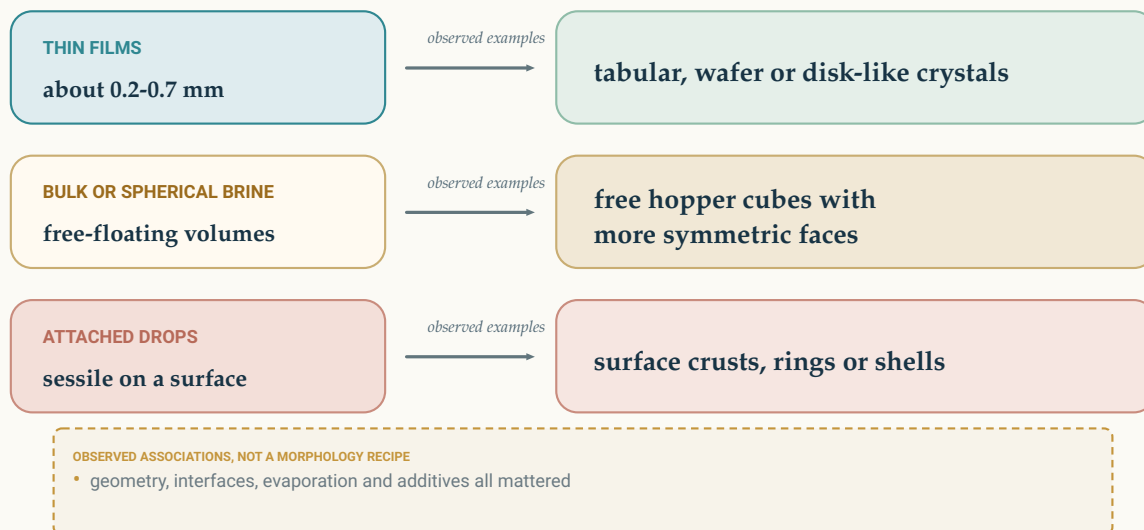
액체의 모양도 중요했다

2011 년 논문과 2015 년 논문은 그림을 더 넓혀 준다. 얇은 막, 더 두꺼운 액체층, 대략 구형의 소금물 부피,

표면에 붙은 방울에서 소금이 결정화되는 모습을 보고했다.

Different brine geometries, different observed forms

Descriptive examples from the 2011 and 2015 ISS series



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

이 자료 묶음에서 관찰된 사례를 세 줄로 요약한 그림. 얇은 막에서는 판상 또는 원반형 형태, 벌크 또는 구형 소금 물에서는 자유롭게 떠 있는 호퍼 정육면체, 표면에 붙은 방울에서는 껍질, 고리 또는 외피 형태가 나타났다. 이는 관찰된 연관성이지만 제조법이나 보장은 아니다.

The Clean Paper CC BY 4.0

2011 년 연구에서는 두께 약 0.2~0.7 밀리미터의 얇은 막에서 얇은 웨이퍼와 판상 결정이 만들어졌다. 자유롭게 떠 있는 소금물 부피에서는 더 대칭적인 측면과 호퍼 정육면체가 형성될 수 있었다.

2015 년 관측에는 두께 0.2~0.7 밀리미터의 얇은 시트, 약 4~6 밀리미터의 더 두꺼운 층, 지름 약 20~32 밀리미터의 표면 부착 반구형 방울이 포함됐다. 보고된 형태에는 판상 호퍼, 정육면체, 원반형 결정, 수지상 결정, 고리, 껍질이 있었다. 한 관측 세트에서는 폴리에틸렌글리콜을 넣었을 때 호퍼 성장이 억제됐다.

저자들은 2015 년 작업을 체계적으로 목록화되지 않은 물품을 사용해 승무원의 비번 시간에 수행한 관찰로 설명했으며, 엄격한 계획 연구라고 표현하지 않았다. 이 사례들은 액체의 기하학적 형태, 계면, 증발, 첨가제가 모두 중요했음을 보여 준다. 특정 용기 모양이 특정 결정 모양을 보장하는 결정론적 제조법을 제시하지는 않는다.

격자는 새로운 종류의 소금으로 바뀌지 않았다

결정 구조와 형태 (morphology) 를 구별하는 것이 중요하다.

구조는 반복되는 원자 배열이다. 형태는 눈에 보이는 외부 모양이다. 2011 년 논문의 중성자 회절 결과에

서는 지상 시료와 비교해 염화나트륨 구조나 격자 셀 매개변수가 바뀌었다는 증거가 나오지 않았다. 궤도 시료에는 결정 내부에 갇힌 작은 용액 주머니인 **소금물 포획물 (brine inclusions)** 도 들어 있었다.

따라서 크고 대칭적으로 보인다는 사실은 더 순수하거나 결함이 없는 물질이라는 증거가 아니다. 이 자료 묶음의 어느 논문도 더 높은 화학적 순도, 더 나은 기계적 성능, 특정 장치에 대한 적합성을 보고하지 않는다.

중력은 간접적으로 작용했다. 침강, 액체 순환, 방향, 표면과의 접촉을 바꿨다. 염화나트륨 결합의 세기를 바꾸거나 새로운 원자 상을 만든 것은 아니다.

이 실험들이 가르쳐 주는 것과 그렇지 않은 것

논문들은 수송 과정에 기반한 설명을 지지한다. 일반적인 침강과 부력 구동 흐름을 크게 억제하면 일부 결정이 더 오래 떠 있으면서 더 대칭적인 조건에서 천천히 자랄 수 있었다. 측정된 크기, 성장 속도, 형태는 직접 관찰값이다. 과포화도, 성장 이력, 페클레 수에는 추정이 들어가며, 지구와의 비교는 일부 다른 출판 실험에 의존한다.

이 자료 묶음을 하나의 단순한 분모로 묶기는 어렵다. 세 논문에 걸쳐 개별 결정, 결정화 용기, 선택된 사례들이 합쳐져 있기 때문이다. 이를 하나의 총수로 더하면 실제로 존재하지 않았던 단일한 균일 실험을 암시하게 된다.

또한 제조업적 주장을 뒷받침하는 데 필요한 증거도 보고하지 않는다. 처리량, 생산 비용, 에너지 사용량, 수율, 신뢰성, 유용한 재료 성능을 측정하지 않았다. 2015 년 시리즈는 탐색적이었다. 지상 비교는 조건이 맞춰진 대조군이 아니었다. 크거나 시각적으로 인상적이라는 것과 응용에 더 좋다는 것은 같은 말이 아니다.

자연 소금 퇴적층에서도 센티미터 크기의 호퍼 정육면체가 발견될 수 있으며, 때로는 소금물에 젖은 진흙 속에 떠 있다. 2019 년 논문은 느리고 확산 지배적인 성장과의 가능한 유사성을 제안한다. 흥미로운 비교이지만, 자연의 호퍼와 궤도의 호퍼가 하나의 메커니즘을 공유한다는 증거는 아니다.

핵심 요약

국제우주정거장에서 증발하는 소금물로 성장시킨 소금 결정 중에는 모서리 길이 2~8 밀리미터의 속이 빈 계단형 호퍼 정육면체가 포함됐다. 논문들은 수송 과정에 기반한 설명을 지지한다. 미세중력은 일반적인 침강과 부력 구동 흐름을 크게 억제해 결정이 더 오래 떠 있고 천천히 자라게 했으며, 초기에는 확산이 지배적이었다. 액체의 기하학적 형태, 계면, 증발, 첨가제도 형태에 영향을 줬다. 중성자 회절에서는 새로운 염화나트륨 구조가 나타나지 않았고, 결정 내부의 소금물 포획물도 남아 있었다. 이 연구는 범위가 제한된 재료과학 사례 연구이지, 우주가 완벽한 결정을 만들거나 산업 공정을 가능하게 한다는 증거는 아니다.

과장 없이 보면

논문들이 보여 주는 것: 여러 ISS 소금물 형상에서 밀리미터 크기의 염화나트륨 호퍼 정육면체와 다른 형태들이 성장했다. 2019 년의 호퍼 정육면체는 낮은 추정 과포화도에서 천천히 자랐고, 초기에는 확산이 지배적이었다.

해석되는 부분: 침강과 부력 구동 흐름이 크게 줄어들면서 결정이 더 오래 떠 있고 더 대칭적으로 성장할 수 있었다. 더 큰 결정화 용기에서는 성장 후반에 느린 액체 운동이 영향을 줬을 수 있다.

보여 주지 않는 것: 새로운 원자 구조의 소금, 더 순수하거나 결함이 없는 결정, 조건을 맞춘 지구-ISS 비교 실험, 미세중력의 보편적 장점, 상업적 제조 경로.

주요 한계: 서로 다른 형상과 선택 사례를 다룬 세 개의 별도 연구, 연구 간 지상 비교, 추정된 수송량, 자료 묶음 일부의 탐색적·비계획적 성격, 공정 경제성이나 성능 시험의 부재.

일반 독자는 얼마나 신뢰해야 하는가? 궤도에서 보고된 형태와 느린 성장이 실제라는 점에는 높은 신뢰를 가져도 된다. 여러 관찰을 가장 잘 설명하는 수송 메커니즘에는 중간 정도의 신뢰가 적절하다. 이 소금 실험을 우주 제조업 전반에 대한 약속으로 확대하는 주장에는 신뢰를 거의 두지 않는 편이 맞다.

출처

Pettit and Fontana, Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions, npj Microgravity 5, 25 (2019)

<https://doi.org/10.1038/s41526-019-0085-0>

Fontana, Schefer and Pettit, Characterization of sodium chloride crystals grown in microgravity, Journal of Crystal Growth 324, 207-211 (2011)

<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.04.001>

Fontana, Pettit and Cristoforetti, Sodium chloride crystallization from thin liquid sheets, thick layers, and sessile drops in microgravity, Journal of Crystal Growth 428, 80-85 (2015)

<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.07.026>