기술 연구 · 유체역학의 최전선

나비에–스톡스 방정식의 폭발: 팬 CFD는 여전히 유효한가?

2026년 나비에–스톡스 연구의 변화는 CFD의 붕괴가 아니다. 방정식을 신뢰할 수 있는 구간과 시험 데이터에 의존해야 하는 구간을 더 선명하게 보여준 변화다.

기술 보고서 · SUNXFAN 기술 편집팀 · 2026-11

Web: https://en.sunxfan.com/ko/blog/navier-stokes-blowup-cfd-fan-engineering/

팬 업계에서 우리는 매일 공기와 협상을 한다. 임펠러의 호 하나하나, 볼류트의 곡선 하나하나가 같은 방정식 위에 서 있다. 나비에–스톡스 방정식이다. 점성 유체의 운동을 기술하는 이 방정식은 일기예보와 항공기 설계, 그리고 우리가 만드는 모든 원심형·축류형 팬의 공기역학을 떠받치는 수학적 바닥이다.

그 바닥 위에는 20년 넘게 한 가지 질문이 매달려 있었다. 3차원에서 매끄러운 초기 데이터를 주었을 때 해는 영원히 매끄러운가, 아니면 유한 시간 안에 "폭발"하여 속도나 와도가 무한대로 치달을 수 있는가.

2026년, 이 질문은 실제로 전환점을 맞았다. 해결되었기 때문이 아니다. 오래도록 저항해 온 가능성을 수학계가 진지하게 받아들이기 시작했기 때문이다. 폭발이야말로 극한 조건에서 유체가 지니는 본질적 거동이고, 매끄러움은 오히려 추가 설명이 필요한 예외적 사례일 수 있다는 가능성을.

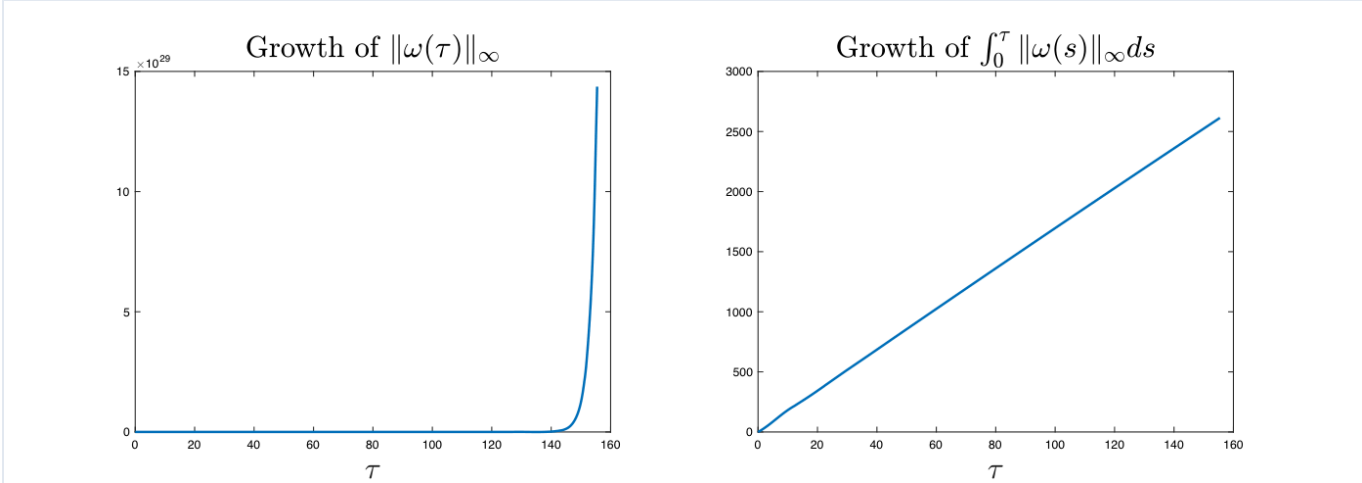


Fig. 15 Growth of maximum vorticity for the rescaled Navier-Stokes model. Left plot: the amplification of

그림 1 — 일반화 축대칭 설정에서 3차원 나비에–스톡스 방정식의 와도 변화. 첨단 와도는 유한 시간에 급격히 증가하고, 적분 와도는 Beale–Kato–Majda 기준을 위반한다. 이는 유한 시간 특이점이 남길 바로 그 수치적 흔적이다. 원도: 참고문헌 1(Hou, J. FoCM 2026, Fig. 15/16).

1. 2026년의 전환: 세 갈래 증거가 같은 방향을 가리킨다

1.1 OpenAI의 외력 기반 폭발: 분야에 충격이지 결론은 아니다

2026년 9월 8일 OpenAI는 멀티 에이전트 시스템이 약 88시간 동안, 매끄럽고 컴팩트한 지지집합을 지닌 외력항으로 구동되는 3차원 비압축성 나비에–스톡스 방정식의 유한 시간 폭발을 구성하고 Lean 4로 검증했다고 발표했다. 제목만 보면 밀레니엄 상금 문제에 대한 직접적인 답처럼 보인다.

하지만 검증은 곧바로 이어졌다. 독립적인 Lean 감사에서 컴파일된 형식화가 자연어 원고를 충실히 옮기지 않았다는 사실이 드러났다. 보조정리 8.6은 역작용소를 m+4차 도함수로 제어할 수 있다고 주장하지만 Lean 코드는 m+5차를 요구한다. 더 근본적인 반론은 문제 설정 자체를 겨냥한다. 밀레니엄 판은 외력이 없고 에너지가 유한하지만, OpenAI의 구성은 높은 파수 영역에 엔스트로피를 계속 주입하도록 설계된 매끄러운 외력에 의존한다. 외력이 있는 폭발이 외력이 없는 질문에 답하는지는 전혀 결론이 나지 않았다. 클레이 수학연구소는 어떤 결과도 인정하지 않았고, OpenAI 스스로도 상금을 주장하지 않겠다고 밝혔다.

1.2 Caltech의 PINN: 외력이 없는 세계에서 찾은 자기유사 단면

외력을 쓰는 OpenAI의 경로와 대비되는 것이 Caltech 연구진이 물리정보 신경망(PINN)으로 구성한 3차원 오일러 방정식의 자기유사 폭발 단면이다. 외력 없음, 비유계, 자유 공간. Terence Tao는 OpenAI 발표 전날 밤 이 접근법을 공개적으로 지지했다. 의의는 방법론에 있다. 외부에서 무엇도 주입하지 않고 방정식 스스로 특이점을 키우게 한다는 점이, 유체역학적 내재 불안정성이라는 그림에 더 가깝다.

1.3 합의의 이동: "매끄러움의 증명"에서 "폭발의 이해"로

어떤 단일 증명보다 중요한 것은 합의 자체가 움직이고 있다는 사실이다. 2026년 Tao는 이 분야의 사고가 바뀌었고 정칙성 추측이 이제 광범위하게 거짓으로 여겨진다 — 특정 초기 데이터는 유한 시간에 폭발한다 — 고 분명히 밝혔다. 2025년에서 2026년에 걸쳐 독립적인 여러 연구진이 와관 신장의 연쇄, 위상적 고정, 캐스케이드 기구로부터 구성이나 강한 증거를 보고했다. 연구의 무게중심은 해가 매끄럽게 유지됨을 증명하는 데서, 그것이 언제 어떤 방식으로 깨지는지를 기술하는 쪽으로 옮겨가고 있다.

2. 폭발 뒤에 있는 기하학: 와 신장의 정(正) 피드백 고리

나비에–스톡스 방정식이 폭주할 수 있는 이유는 3차원 유동이 피할 수 없는 기하학적 기구, 즉 와 신장(vortex stretching)에 있다. 와관을 축 방향으로 늘리면 각운동량 보존 때문에 관은 더 빠르고 더 얇게 회전한다. 빠른 회전은 다시 신장을 증폭시킨다. 이것이 정(正) 피드백 고리다. 수학적 질문은 점성 소산이 언제나 이를 억누를 만큼 강한가에 있다.

Caltech의 수치해석은 그 귀결을 드러내 보인다. 일반화 축대칭 방정식에서 첨단 와도는 유한 시간에 O(1/(T−t))의 차수로 증가하고, 적분 와도는 Beale–Kato–Majda 기준을 위반한다. 유한 시간 특이점이 형성되고 있다는 증거다. 여기서 점성은 직관과 반대되는 역할을 한다. 점성 정칙화는 해를 더 매끄럽고 안정하게 만들기 때문에, 와 신장을 구동하는 비선형 정렬을 약화시키기는커녕 오히려 강화할 수 있다.

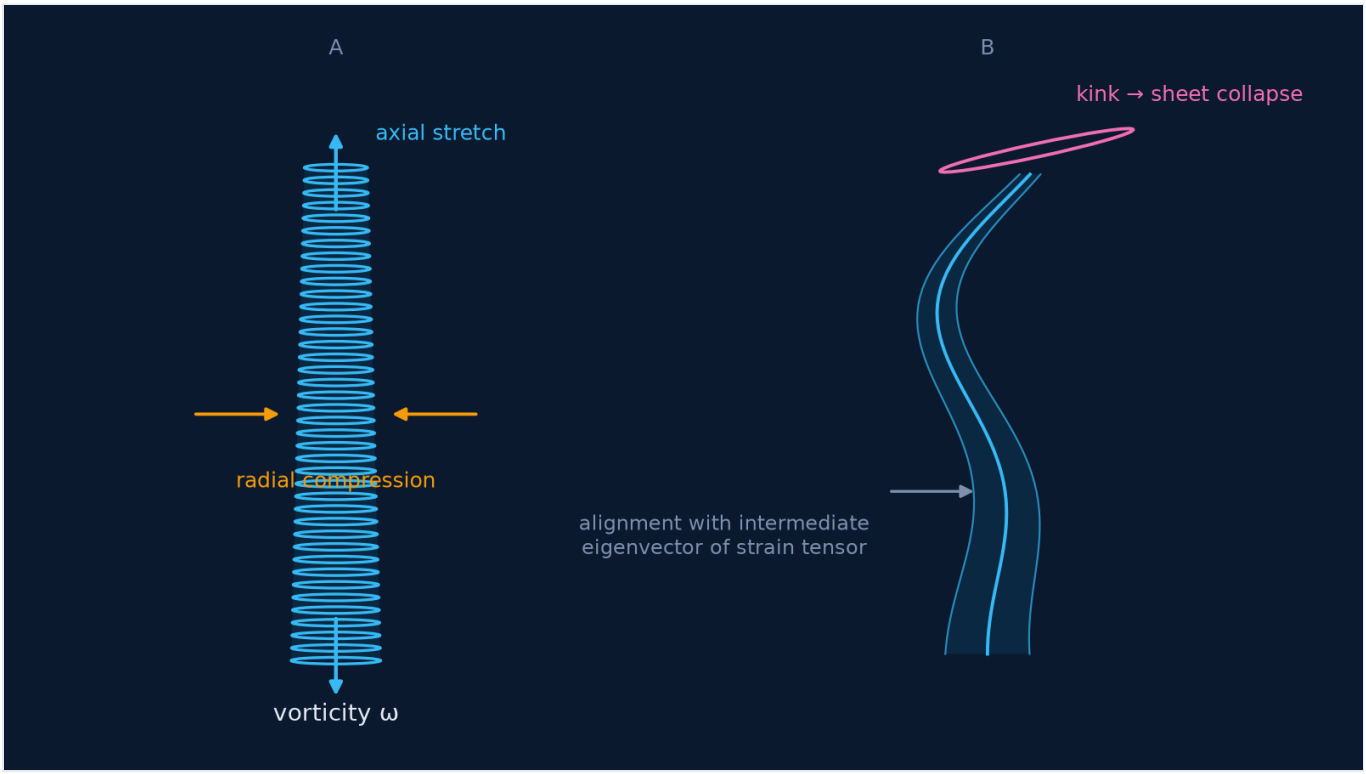


그림 2 — 와관 신장의 모식도. 관이 축 방향으로 늘어나고 반경 방향으로 압축되면서 와도는 변형률 텐서의 중간 고유벡터 방향으로 정렬되고, 관은 결국 꺾여 판 형태로 붕괴한다. 신장 항 자체의 기하학이다. 원도: 참고문헌 2(Ruhr-Universität Bochum, Fig. 2.3). 이해를 돕기 위해 본문에서 다시 그렸다.

3. 팬 엔지니어에게 주는 의미: 널리 오독된 결론

흔한 오독은 이렇다. 나비에–스톡스 방정식이 폭발할 수 있다면, 그것에 기대어 만든 CFD와 팬 설계는 무효라는 것이다.

사실은 반대다. 폭발은 극한 조건에서 해상도가 무한한 연속체 모델에 대한 진술이다. 공학적 CFD는 그 문제를 푸는 일이 없다. 푸는 것은 길들여진 판이다. 유계 형상, 이산 메시, RANS 또는 LES 난류 클로저, 그리고 평균 유동으로 정의된 목표. 엔지니어가 매일 싸우는 것은 무한대로 치닫는 와도가 아니라 급격한 구배, 해상도가 부족한 와, 박리, 그리고 특정 운전 영역에서 조용히 작동을 멈추는 클로저다.

전자기기 냉각용 축류 팬을 대상으로 한 2025년 LES는 이 "공학적 비매끄러움"을 눈에 보이게 만든다. 정상 배압(0 및 6 mmH_2O)에서는 흡입면 유동이 부착 상태를 유지하고, 짝을 이룬 입구 와관이 양호한 코히런스를 보이며, 익단 누설 와도 뚜렷하게 정의된다. 12 mmH_2O에서는 전연에 박리 영역이 나타나고 박리된 와는 익단을 향해 나선으로 뻗어 나간다. 18 mmH_2O의 실속 조건에서는 입구 와관이 완전히 사라지고 혼돈스럽게 확산된 대규모 난류로 대체되며, 흡입면 박리 영역은 날개 높이의 약 80%, 코드의 20%까지 퍼진다. 이 장면 어디에도 특이점은 나타나지 않는다. 그러나 한 가지 사실은 나타난다. 난류 클로저는 부착 유동에서는 견디지만 광범위한 박리와 실속에서는 신뢰를 잃는다는 사실이다.

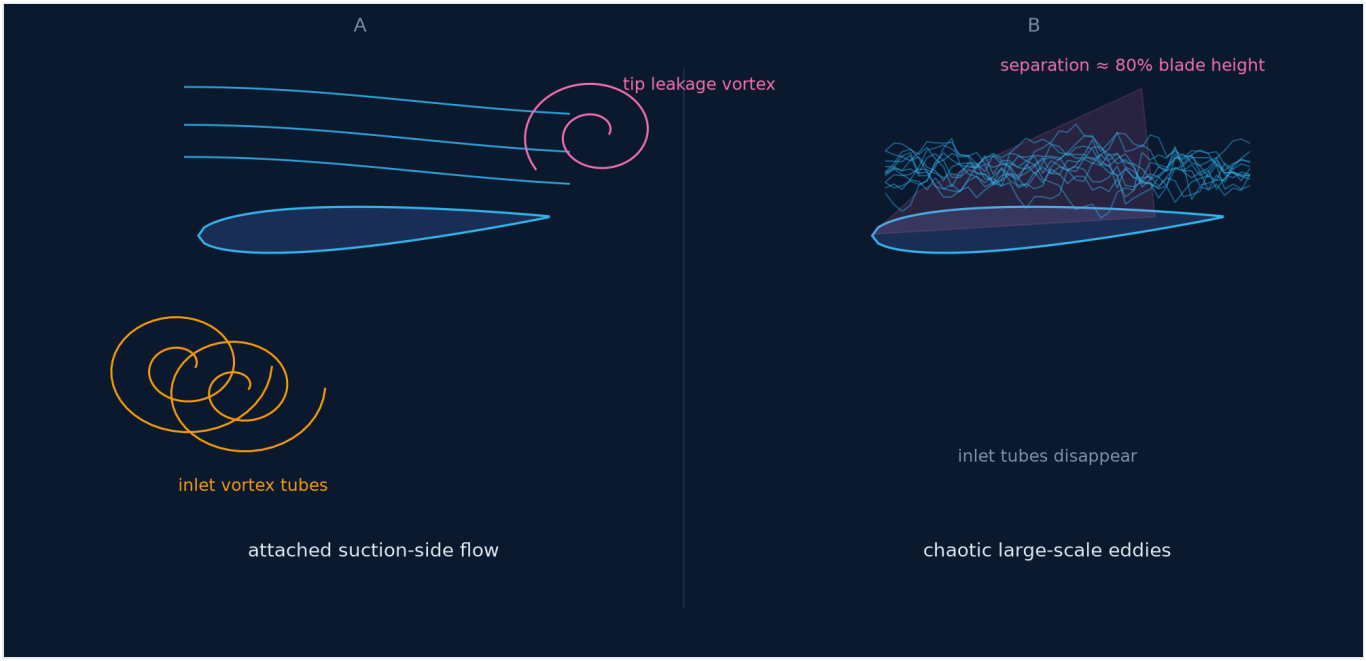


그림 3 — 축류 팬 유동 구조, 정상 대 실속. 왼쪽은 부착된 흡입면 유동과 코히런트한 입구 와관, 뚜렷한 익단 누설 와. 오른쪽은 입구 와관이 사라지고 대규모 난류가 지배하며 박리 영역이 날개 전면으로 퍼진 모습이다. 이는 공학적 CFD가 매일 다루는 비매끄러운 현실이며, 동시에 클로저의 타당성 경계를 표시한다. 원도: 참고문헌 3(Applied Acoustics 2025, Fig. 15–18). 모식도는 본문에서 다시 그렸다.

4. SUNXFAN의 시각: 정확한 모델은 효율과 소음의 변수다

팬 산업에서 쉽게 과소평가되는 사실이 하나 있다. 공기역학 효율의 1포인트, 소음 감소의 1데시벨은 결국 유동 구조를 더 정확히 기술하는 데서 나온다.

EC 원심 팬이 부분 부하에서도 고효율 영역을 유지하는지는 임펠러 내부의 이차 유동과 박리 와가 의도한 범위 안에 머무는지에 달려 있다. 전향 날개 다익 원심 팬을 대상으로 한 CFD 연구는 임펠러 입구 곡관부의 큰 재순환 영역, 날개 전연에서 유발되는 뚜렷한 박리, 그리고 볼류트 설부와 임펠러 후류 사이의 제트–웨이크 간섭을 확인했다. 이는 유동 비정상성과 이산 소음의 주요 원천이다. 다익 원심 팬의 내부 유동을 다룬 별도 연구도 최고 효율점에서조차 날개 사이 유로 안에서 재순환과 큰 와를 관찰했다. 어느 것도 수학적 특이점은 아니지만, 모두 같은 나비에–스톡스 방정식이 공학적 규모에서 드러난 것이다.

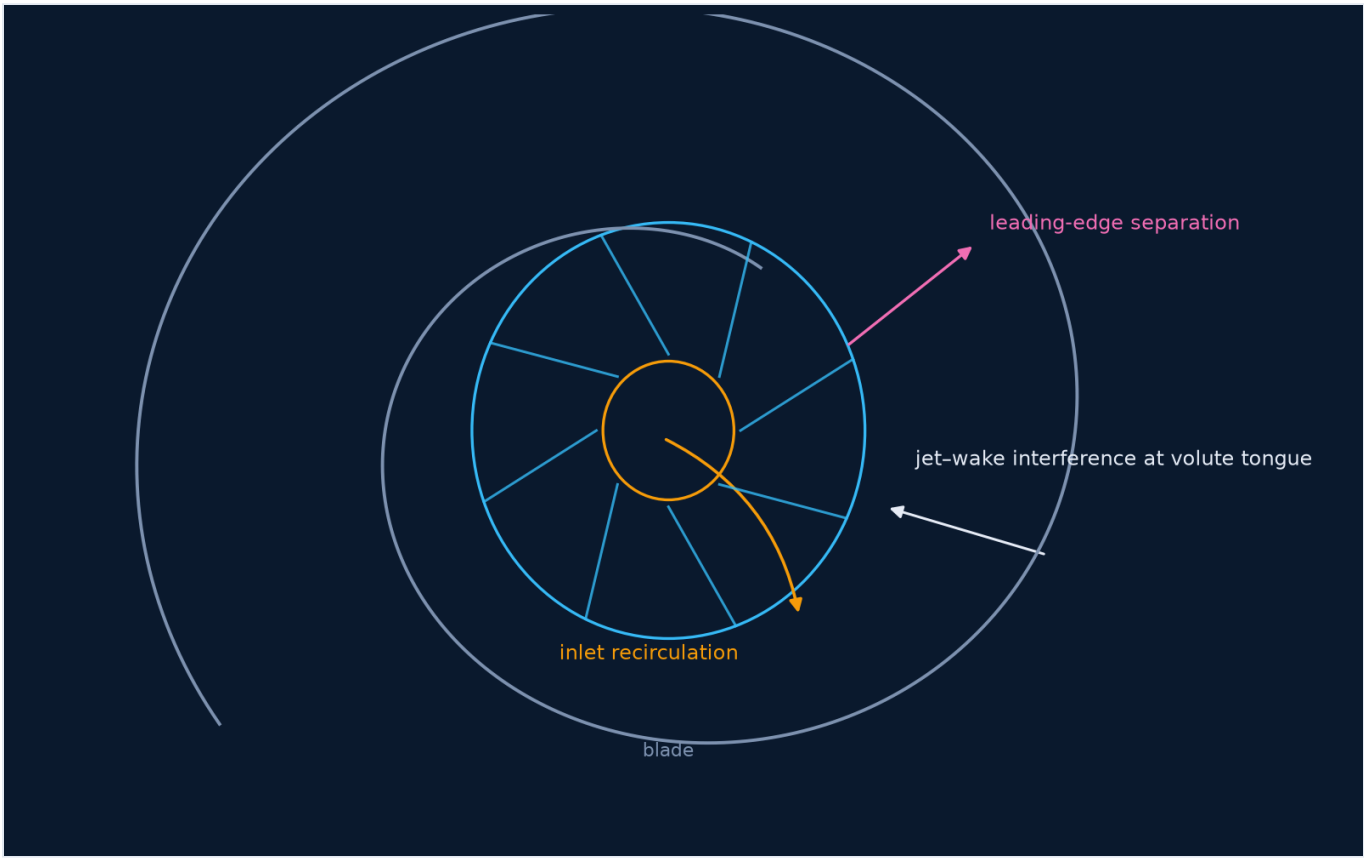


그림 4 — 원심 임펠러 내부의 유선과 속도장. 입구 재순환, 전연 박리, 볼류트 설부 근처의 제트–웨이크 간섭이 효율 손실과 이산 소음의 핵심 원천이다. 특이점은 어디에도 없다. 그런데도 이것은 공학적 규모에서의 나비에–스톡스 방정식이다. 원도: 참고문헌 4(TU Darmstadt, Fig. 9/12). 모식도는 본문에서 다시 그렸다.

2026년 수학 최전선의 실용적 가치는 폭발 증명 자체가 아니다. 그것이 권장하는 시뮬레이션 문화에 있다. 타당성을 인식한 CFD, 즉 어떤 운전점은 모델이 감당할 수 있고 어디에는 국부 세밀화나 다른 클로저, 또는 물리 시험으로의 회귀가 필요한지를 미리 아는 태도다. SUNXFAN이 담당하는 HVAC, 데이터센터와 에너지저장 열관리, 청정 공기, 그리고 800V HVDC 아키텍처 과제에서 이는 어떤 공력 판단을 CFD에 넘기고 어떤 판단을 계측 데이터에 고정해야 하는지를 더 분명히 판정한다는 뜻이다.

5. 맺음말: 수학은 유체가 폭주할 수 있음을 인정하고, 공학은 그와 함께 사는 법을 배운다

나비에–스톡스 방정식의 존재와 매끄러움 문제는 2026년에도 해결과 거리가 멀다. OpenAI의 결과는 논쟁 중이고, Caltech의 구성은 여전히 독립 검증이 필요하며, 클레이 연구소의 100만 달러는 아직 주인을 찾지 못했다. 달라진 것은 디폴트 가정이다. 전역적 매끄러움은 당연한 것으로 여겨지지 않게 되었고, 폭발의 구조와 조건, 귀결이 정당한 연구 대상이 되었다.

팬 뒤에 서 있는 엔지니어에게 이것은 익숙한 자세다. 우리는 영원히 매끄러운 유동의 세계를 가져본 적이 없다. 우리가 가진 것은 박리, 혼합, 비정상성, 그리고 역압력 구배에 맞서는 경계층이다. 최전선이 움직인 것은 수학이 비로소 가장 엄격한 언어로 엔지니어가 매일 마주하는 것을 인정했기 때문이다. 공기는 언제나 얌전하게 행동하지 않는다. 실제 공학은 얌전하지 않은 공기 속에서도 효율적이고 조용하며 신뢰할 수 있는 팬을 계속 공급한다.

References

1. Hou, T. Y. *J. FoCM* (2026): 일반화 축대칭 나비에–스톡스 방정식에서 최대 와도의 급격한 증가와 BKM 폭발 기준.
2. Ruhr-Universität Bochum, 박사 학위 논문, 그림 2.3: 와관 신장과 판 형태 붕괴.
3. *Applied Acoustics* (2025): 정상 및 실속 조건에서 전자기기 냉각용 축류 팬의 LES, 그림 15–18.
4. TU Darmstadt: 원심 팬 CFD 해석, 속도 및 유선, 그림 9–12.
5. Zenodo, "A Structural Dismantling of OpenAI's "Finite-Time blowup for Navier–Stokes"", 2026년 9월.
6. Zenodo, "Navier–Stokes Lost in Translation", 2026년 10월: Lean 형식화 불일치와 외력 유무에 따른 문제 설정의 차이.
7. Terence Tao, 나비에–스톡스 정칙성 합의 변화에 관한 공개 논평, 2026년.

SUNXFAN® 소개: SUNXFAN은 HVAC, 데이터센터 및 에너지저장 시스템 열관리, 청정 공기 응용 분야를 위한 산업용 EC·DC·AC 원심 팬과 축류 팬을 생산하며, 800V HVDC 아키텍처용으로 설계된 팬 유닛도 포함한다. 유체역학의 가장 기본적인 질문에 꾸준히 주의를 기울이는 것이 팬 시스템의 효율과 신뢰성을 장기적으로 지켜 준다고 믿는다.