“독립 연구자, 토네이도 실험으로 Navier–Stokes 난제 정칙성 조건과 연결되는 새로운 불변량 제시”

작성자
설철환 (독립 연구자)

---

1. 연구 배경

3차원 Navier–Stokes 방정식의 전역 해 존재 및 정칙성은 미해결된 밀레니엄 난제 중 하나이다.
특히 Caffarelli–Kohn–Nirenberg(1982)의 ε-정칙성 정리는, 특정 국소적 스케일 불변 노름이 충분히 작을 경우 해가 매끄럽게 유지됨을 보장한다. 그러나 이 조건을 **실험적으로 계측 가능한 양**과 직접 연결한 사례는 없었다.

---

2. 실험적 접근 (SIIEM 모델)

본 연구는 인공 회오리 실험(직렬 팬 구조, 연무 가시화, AI 기반 영상 분석)을 통해, 토네이도의 코어 생성·붕괴 메커니즘을 수식화하였다.

핵심은 “흡입 유도 유입 확장 모델(SIIEM)”이며, 실험에서 계측 가능한 **공기 유입량** Φ_{in}과 반경 ρ를 이용해 새로운 불변량을 정의하였다:

$$E_{\text{order}}(\rho, t) = \gamma \frac{\Phi_{\text{in}}(\rho, t)}{\rho^2}.$$

또한, 실험적 속도장 재구성을 통해 다음 부등식을 도출하였다:

$$\left(\fint_{B_\rho} | u(x, t) |^3 \, dx\right)^{1/3} \leq K \frac{\Phi_{\text{in}}(\rho, t)}{\rho^2}.$$

---

3. 수학적 귀결

위 두 조건이 성립하면, 국소 영역 $Q_r(z_0)$에서 다음이 유도된다:

$$\frac{1}{r^2} \int_{Q_r(z_0)} \left(|u|^3 + |p - (p)_{B_r}|^{3/2} \right) dx\,dt \le C(K\Lambda/\gamma)^3 r^3,$$

여기서 $\Lambda = \sup E_{\text{order}}$, C는 상수.
따라서 r을 충분히 작게 선택하면, Caffarelli–Kohn–Nirenberg의 ε-정칙성 기준을 충족한다:

$$\frac{1}{r^2} \int_{Q_r(z_0)} \left(|u|^3 + |p - (p)_{B_r}|^{3/2} \right) < \varepsilon_{\text{CKN}}.$$

즉, **SIIEM 조건은 Navier–Stokes 정칙성을 보장하는 새로운 sufficient condition**으로 작동한다.

---

4. 의의

- 본 결과는 **실험적으로 측정 가능한 유입량과 속도장**이 곧 **임계 노름 제어(critical norm control)**와 동등함을 보여준다.
- 토네이도의 생성·붕괴를 실험–수학적으로 동시에 판정 가능하게 하며, 이는 풍력, 굴뚝 구조, 기상 예측 등 다양한 응용 가능성을 내포한다.
- 특히 독립 연구자가 실험 데이터와 PDE 이론을 직접 연결하여, 난제 연구의 새로운 경로를 개척했다는 점에서 주목할 만하다.