

 미래창조과학부	보 도 자 료	http://www.msip.go.kr
2014.6.16(월) 조간(온라인은 6.15 12:00 이후)부터 보도하여 주시기 바랍니다.		
문의 : 기초연구진흥과 최도영 과장(02-2110-2370), 김응복 사무관(02-2110-2376) 경상대학교 공과대학 항공우주시스템공학과 명노신 교수(055-772-1645)		

충격파의 수학적 특이성 규명

높은 고도에서 비행하는 항공우주비행체나 미소 기계장치 등의 공학적 설계에 응용 기대

□ 국내 연구진이 유체역학 분야 미해결 문제인 초음속 충격파에서 수학적으로 정의할 수 없는 특이성*이 나타나는 이유를 알아냈다.

* 특이성(Singularity) : 발산(Divergence) 등으로 인해 수학적으로 정의되지 않는 성질

○ 경상대 항공우주시스템공학과 명노신 교수 연구팀이 수행한 이번 연구는 미래창조과학부가 추진하는 중견연구자지원사업(핵심) 등의 지원을 받아 수행되었고 연구결과는 유체물리 분야 학술지 **Physics of Fluids** 온라인판(5월 13일), 전산물리 분야 학술지 **Journal of Computational Physics** 온라인판(5월 20일), 항공우주 분야 학술지 **AIAA Journal** 인쇄판(5월 1일)에 게재되었다.

□ 충격파는 항공우주비행체나 우주운석 주변, 태양풍, 은하 성간 가스, 핵폭발 등 급격한 가스 압축으로 인해 나타나는 현상인데, 온도와 압력의 급격한 변화로 순간적으로 기체들이 평형에 도달하지 못하는 현상에 대한 정확한 설명이 어려워 공학적 응용에 한계가 있었다.

□ 연구팀은 기체입자의 이동과 충돌 항에 대한 정확도를 동일한 수준으로 처리하면 충격파를 수학적으로 잘 정의할 수 있음을 알아냈다.

○ 기존 선형이론*은 기체입자의 이동 등에 대해 일관된 처리를 하지 못해 특이성을 해소하는 데 한계가 있었다.

* 선형이론 : 1867년 J. C. Maxwell이 제안한 모델에 기초한 이론으로 기체입자 충돌항에서 속도의 종속성이 사라져 수학적으로 매우 간단한 형태이다.

○ 이러한 수학적 특이성은 무수히 많은 입자들이 서로 영향을 주고 받으면서 움직이는 복잡계에서 흔히 볼 수 있는 것으로 기체나 유체의 움직임을 효율적으로 해석하려는 다양한 연구에 기여할 것으로 기대된다.

□ 또한 연구팀은 특이성 원인 규명 후 충격파의 온도나 밀도 변화를 정확하게 설명할 수 있는 구성관계식*을 유도해 냈다.

* 구성관계식(Constitutive Relation) : 거시적 관점에서 물질의 기본역학적 특성을 나타내는 (대수) 방정식을 일컫으며, 공기와 물의 차이가 이 관계식에 의해 대부분 묘사된다.

○ 이 관계식을 이용해 개발한 다차원 전산해석코드는 100 km 이상 높은 고도에서 비행하는 비행체나 미소 기계장치 또는 진공장치 등의 설계에 응용될 것이라는 설명이다.

□ 명 교수는 “이번 연구에서 얻은 충격파 특이성 원인과 해결방법은 복잡유체의 특이성 해결이나 반도체 장치의 전자수송 특이성 문제해결 등에도 응용될 수 있을 것”이라고 밝혔다.

○ 한편 연구팀은 충격파 뿐 아니라 고분자가 포함된 스파게티나 토마토 케첩과 같은 복잡유체의 유동을 설명할 수 있는 고차 구성관계식 개발을 목표로 후속연구를 수행한다는 계획이다.

[붙임] 연구결과 개요, 연구결과 문답, 용어설명, 그림설명 및 연구자 이력사항

연구결과개요

1. 연구배경

음속보다 빠르게 이동하는 항공우주비행체 및 우주운석 등의 물체 주위, 태양풍, 은하 성간 가스, 핵폭발 등의 광범위한 자연현상에서 급격한 가스 압축이 이루어지는 충격파가 나타난다[그림 1-A]. 그동안의 수많은 이론적 실험적 연구를 통해 충격파의 물리적 특성에 관한 대략적 이해가 이루어졌으나, 이론적 접근을 어렵게 하는 높은 비평형성으로 인해 그 생성원리에 대한 정확한 설명은 이루어지지 못해 왔다. 예를 들어 고전역학의 수학적 기반을 제공했다고 평가되는 C. Truesdell, 통계역학을 기체운동학에 적용한 C. D. Levermore의 연구도 충격파의 특이성 문제를 해결하지 못했다.

특히 1867년 J. C. Maxwell에 의해 제안된 Maxwell 기체입자 모델에 기초한 그 동안의 연구들은 모두 높은 Mach 수 충격파 문제에서 수학적 특이성을 보여주어 반세기 이상 비평형 유체역학 분야의 대표적 미스터리로 남아왔다. 흥미롭게도 유사한 미스터리가 인접분야인 복잡유체(Complex Fluids; 폴리머, 토마토 케찹 등)의 소위 고 Weissenberg 수 특이성 문제(High Weissenberg Singularity Problem) 형태로 유변학(Rheology)의 대표적 미해결 난제로 남아왔다. 충격파의 경우 압축(Compression) 유동에서 특이성이 생기는 것과 정반대로 복잡유체에서는 신장(Extension) 유동에서 특이성이 존재하는 것으로 알려져 왔으나, 그 정확한 이유와 전혀 별개의 학문분야로 보이는 두 문제 사이의 연관성은 지금까지 전혀 인식되지 못해왔다. [그림 1-B]

2. 연구내용

본 연구진은 기체입자의 이동(Kinematics)과 충돌(Dissipation) 항들에 대한 일관되지 못한(Unbalanced) 처리가 충격파 특이성의 궁극적인 원인임을 규명하였다. [그림 2] 동시에 그 수학적 편이성으로 인해 수많은 연구자들이

애용해 왔던 1867년에 제안된 J. C. Maxwell 기체입자 단순모델이 오히려 특이성 원인을 발견하는데 주된 걸림돌이었음을 밝혀내었다.

특이성 원인규명 후 Navier-Stokes 방정식으로 알려진 유체역학의 기본 방정식을 유도한 Navier (1822), Fourier (1822), Stokes (1845) 선형이론을 높은 비평형 (희박 및 마이크로) 문제로 성공적으로 확장한 **대수형태의 고차 구성관계식을 최초로 유도**하였다. 특히 이 과정 중 볼츠만(Boltzmann) 운동방정식(Kinetic Equation)에서 거시적 축소 방정식을 유도할 때 지금까지 거의 모든 연구자들이 잊고 있었던 **(비평형) 엔트로피에 관한 열역학 2법칙을 엄밀히 적용하여 수학적으로 잘 정의된 고차 구성방정식을 유도**할 수 있었다. (캐나다 McGill 대학의 이론화학자 B. C. Eu 연구 활용)

마지막으로 새로이 유도된 구성관계식을 바탕으로 복잡 삼차원 공학적 설계에 적용할 수 있는 최신 수치기법인 불연속 갤러킨(Galerkin) 기반의 효율적 전산해석 코드를 개발하였고 각종 벤치마크 해석과 실험결과와의 비교를 통해 신규 구성관계식의 타당성을 검증하였다. [그림 3]

* 논문명 : On the high Mach number shock structure singularity caused by overreach of Maxwellian molecules. **Physics of Fluids 온라인판 5월 13일자**

** 논문명 : A triangular discontinuous Galerkin method for non-Newtonian implicit constitutive models of rarefied and microscale gases. **Journal of Computational Physics 온라인판 5월 20일자**

*** 논문명 : Analytical solutions of shock structure thickness and asymmetry in Navier - Stokes/Fourier frameworks. American Institute of Aeronautics and Astronautics: AIAA) '**AIAA Journal 프린트판 5월 1일자**

3. 기대효과

본 연구를 통해 획득된 충격파 특이성 원인규명 및 해결방법은 복잡유체의 고 Weissenberg 수 특이성 해결뿐만 아니라 (서브) 마이크로 단위의 반도체 장치의 전자수송 특이성 문제해결에도 곧바로 적용될 수 있다.

특히 수학적 특이성 문제는 10^{23} 단위의 입자계를 측정가능한 물리량으로 축소할 필요가 있는 모든 기체, 복잡유체, 전자 등의 복잡계 시스템에 거의 동일하게 일어나므로, 그 원인규명 및 해결방안을 제시한 본 연구는 이러한 복잡계 시스템 이해에 곧바로 응용될 수 있어 그 파급효과는 크다고 할 수 있다.

또한 고차 구성관계식에 기초한 실용 다차원 전산해석코드는 100 km 등의 고고도에서 비행하는 항공우주 비행체(예: 사드(THAAD) 상층방어 미사일시스템, 인공위성 추진장치), 마이크론 단위의 미소기계장치, 진공장치 등의 공학적 설계에 가까운 시기에 사용될 수 있을 것으로 예측된다.

연구결과문답

이번 성과 뭐가 다른가

반세기 이상 미제로 남아 있던 충격파의 수학적 특이성의 원인을 밝혀내고 그 해결방안을 제시하여 고전 및 기존 비교전 이론의 한계를 극복하였고 궁극적으로 고전 유체역학을 극복하는 고차 구성관계식을 제시한 것입니다.

어디에 쓸 수 있나

회박기체(인공위성 추진기관, 상층방어 미사일시스템 등), 폴리머 등 복잡유체, 극소 반도체 장치의 전자기동 문제에 적용될 수 있으며, 무엇보다도 기존 방법에 비해 효율적으로 필요한 답을 제공하는 것이 가장 큰 장점입니다.

실용화까지 필요한 시간은

기체유동의 경우 수년 내, 복잡유체 및 전자기동 문제의 경우 수년 이상 소요될 것으로 판단합니다.

실용화를 위한 과제는

3차원 복잡 형상을 자유롭게 해석하는데 필요한 강건한 전산 알고리즘 및 SW 개발에 적지 않은 고급인력과 재원이 소요되는 것이 극복해야 할 주요 과제입니다.

연구를 시작한 계기는

박사학위 중이었던 1994년 같은 사무실을 사용했던 동일 지도교수 학생이었던 한 미국인 동료의 박사학위 연구에서 Letter지 2-3페이지 분량의 복잡한 수학 방정식이 충격파 특이성으로 인해 아무 쓸모가 없다고 결론지어졌을 때, 이 문제를 언젠가 꼭 해결할 것이라고 다짐한 것이 연구의 시작이었습니다. (그래도 다행히 그 동료는 연구의 난이도가 참작되어 박사학위 디펜스를 무사히 마쳤습니다.) 몇 년 후 NASA에 근무하던 때부터 꾸준히 연구하게 되었습니다.

에피소드가 있다면

모든 문제를 해결하기까지 약 20년이 소요되었지만, 특이성 원인 규명의 결정적인 계기는 작년 초 한 저널논문의 익명의 심사자에 대해 대응논리를 끈질기게 개발하는 과정에서 발견하였습니다. (해당 논문은 결국 Reject 되었으나, 특이성 원인을 밝힌 새로운 논문으로 재탄생되었습니다. 결국 연구자에게 있어서 논문 Reject는 약인 셈입니다.)

꼭 이루고 싶은 목표는

본 연구를 통해 개발된 유체역학 비교전 구성관계식을 복잡 유체 등 다른 문제로 확장시키고 관련 비평형 모델 및 전산

	SW를 개발하여 다른 연구자들이 자신의 문제해결에 활용할 수 있도록 하는 것입니다.
신진연구자를 위한 한마디	조그만 참나무 (Oak) 씨앗이 거대한 나무로 자라듯 어떤 아이디어가 파급력이 큰 연구결과가 될 지는 미리 예측하기 어려우므로 수고스럽지만 작은 씨앗을 지속적으로 심는 노력이 필요합니다. 또한 작은 빙산(iceberg) 끝단으로부터 수면 아래에 숨어 있는 광대한 빙산을 놓치지 않기 위해서는 너무 빨리 Hands-On 연구에서 손을 떼거나 대형 연구그룹의 간접적 연구에 빠져드는 것을 경계해야 할 것입니다.

용 어 설 명

1. Physics of Fluids

- 미물리학회(AIP)가 발간하는 유체물리 분야 국제학술지

보정IF지수 0.6688, 보정ES지수* 2.065

* 보정IF지수, 보정ES지수 (BK21PLUS 평가기준) : 학문분야별 상위 20% 저널 평균 대비 IF(Impact Factor; 단순 인용수), ES(Eigenfactor Score; 인용의 질) 영향력 지수를 나타낸다. (보정지수 1.0은 상위 20% 저널 평균을 의미한다.) 'Nature'의 경우 각각 3.814, 3.718이다.

2. Journal of Computational Physics

- Elsevier가 발간하는 전산물리 분야 국제학술지

보정IF지수 0.9424, 보정ES지수 3.322

3. AIAA Journal

- 미항공우주학회(AIAA)가 발간하는 항공우주 분야 국제학술지

보정IF지수 0.6639, 보정ES지수 1.915

4. 충격파(shock wave)

- 기체의 속도가 음속보다 빠른 초음속 유동에서 발생하는 온도와 압력이 급격히 증가하는 마이크론 두께의 좁은 영역을 말한다. 초음속 항공기, 우주비행체, 운석의 대기진입, 태양계 및 은하, 핵폭발 등의 광범위한 자연현상에 존재한다.

5. 비평형성(non-equilibrium)

- 회박 또는 급변하는 유동과 같이 기준시간 대비 입자간의 충돌이 충분하지 못하여 변화에 순간적으로 적응하지 못하고 유한한 시간이 소요되는 상태를 나타낸다.

6. 특이성(singularity)

- 발산 (Divergence) 등의 원인으로 수학적으로 정의되지 않는 성질을 의미한다.

7. 구성관계식(constitutive relation)

- 거시적 관점에서 물질의 기본 역학적 특성을 나타내는 (대수) 방정식을 말한다.
공기와 물의 차이가 이 관계식에 의해 대부분 묘사된다.

8. 무차원 수

- 같은 단위(또는 차원)를 갖는 두 항을 나눈 차원이 없는 수이다.

9. Mach 수

- 음속 대비 속도를 나타내는 무차원 수이다.

10. Weissenberg 수

- 특성시간 대비 유체의 완화(Relaxation) 시간을 나타내는 무차원 수로 점탄성 (Viscoelastic) 유동에서 고체적 성질인 탄성의 상대적 크기를 나타낸다.

11. Navier

- 프랑스 공학자, 물리학자로 고전 유체역학의 기본이 되는 방정식을 1822년에 최초로 유도하였다.

12. Stokes

- 영국 수학자, 물리학자로 Navier 방정식을 공기와 같은 이원자 기체로 확장한 방정식을 1845년에 최초로 유도하였다.

13. Fourier

- 프랑스 수학자, 물리학자로 고전 열전달의 기본이 되는 관계식을 1822년 최초로 유도하였다.

그림 설명

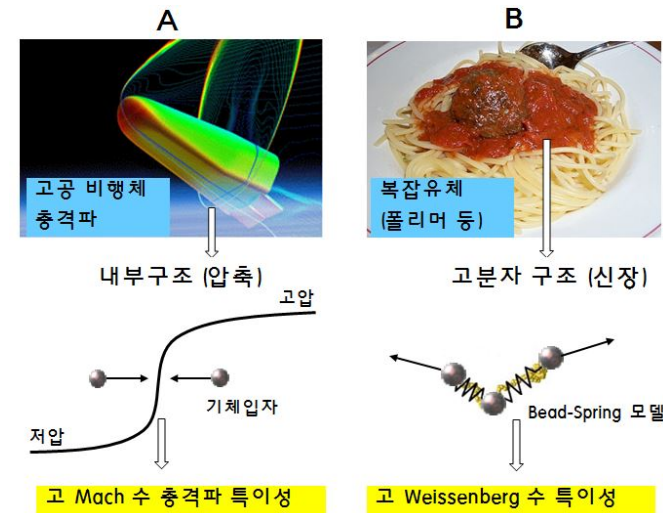


그림 1. 충격파 압축 내부구조 및 복잡유체 신장 구조

(A) 충격파(Shock Wave)는 음속보다 빠르게 이동하는 항공우주비행체 및 우주운석 등의 물체 주위, 태양풍, 은하 성간 가스, 핵폭발 등의 광범위한 자연현상에서 발생한다. 마이크로 단위의 좁은 영역에서 급격한 가스 압축이 일어나 충격파 내부구조는 대표적 비평형 현상 중에 하나이다. 기체입자는 이 영역을 통과하며 속도가 줄어들고 온도, 압력, 밀도가 급격하게 증가하여 운동에너지가 열에너지로 변하는 비가역과정을 경험하게 된다. 그 동안 수많은 연구들이 이 현상을 정확히 묘사하고자 하였으나 모두 높은 Mach 수 유동에서 수학적 특이성을 보여주어 반세기 이상 미스터리로 남아왔다.

(B) 고분자가 포함된 스파게티, 토마토 케첩 등의 복잡유체(Complex Fluids) 유동을 묘사하기 위한 Bead-Spring 모델에도 소위 고 Weissenberg 수 특이성 문제(High Weissenberg Singularity Problem)로 알려진 유변학(Rheology)의 대표적 미해결 난제가 존재한다. 압축(Compression)인 경우에 특이성이 생기는 충격파와 반대로 복잡유체의 경우 신장(Extension)인 경우에 특이성이 존재하는 것으로 알려져 왔으나 그 정확한 이유와 두 문제의 연관성은 전혀 별개의 학문분야로 취급된 이유로 지금까지 전혀 인식되지 못했다.

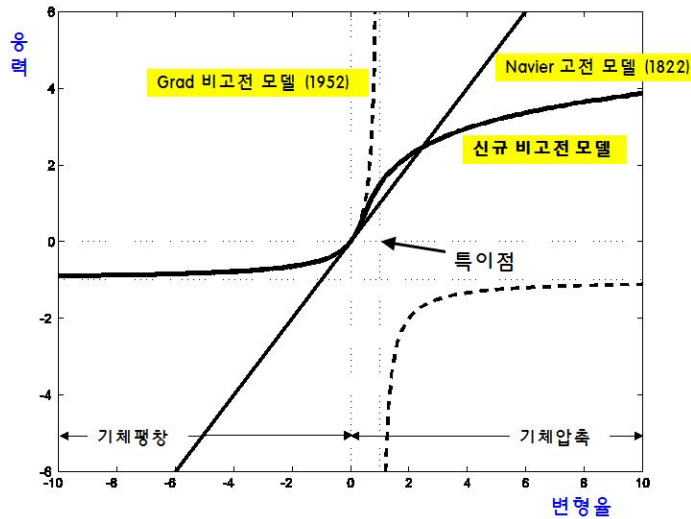


그림 2. 고전(Classical), (특이성 간직) 기존 비고전 (Non-classical), (특이성 해결) 신규 비고전 모델의 구성관계식 비교

기체입자의 이동(Kinematics)과 충돌(Dissipation) 항들에 대한 일관되지 못한 (Unbalanced) 처리가 충격파 특이성의 궁극적인 원인임을 최초로 규명하였다. 즉 기존 비고전 이론은 압축영역의 높은 마하수에서 (무차원) 변형율이 1이 되는 지점에서 점성응력이 무한대로 발산하고 1 이상에서는 갑자기 부호가 바뀌는 특이성이 존재한다. 동시에 그 수학적 편이성으로 인해 수많은 연구자들이 애용해왔던 Maxwell 기체입자 모델이 오히려 특이성의 한 원인이었음을 밝혀내었다. (“There is no free lunch.”)

특이성 원인규명 후 Navier-Stokes 방정식으로 대변되는 고전 유체역학을 높은 비평형 (희박 및 마이크로) 문제로 성공적으로 확장한 고차 구성관계식을 유도하였다. (그림의 ‘신규 비고전 모델’ 곡선) 특히 이 과정 중 볼츠만(Boltzmann) 운동방정식(Kinetic Equation)에서 거시적 축소 방정식을 유도할 때, 지금까지 거의 모든 연구자들이 잊고 있었던 (비평형) 엔트로피에 관한 열역학 제 2법칙을 엄밀히 적용하여 수학적으로 잘 정의된 고차 구성방정식을 유도하였다.

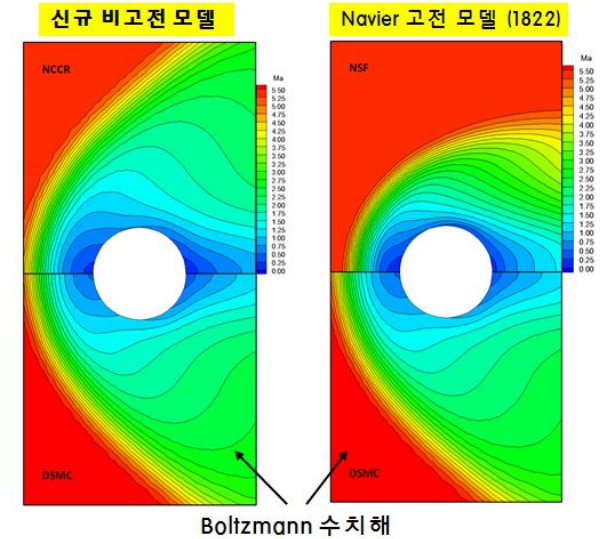


그림 3. 신규 구성관계식에 기초한 실용적 다차원 전산해석코드를 이용한 고고도 비행체 주위 유동장 해석

특이성 문제는 10^{23} 단위의 입자계를 측정가능한 물리량으로 축소할 필요가 있는 모든 복잡계 시스템에 일어나므로 그 파급효과는 지대하다고 할 수 있다. 유도된 신규 구성관계식을 바탕으로 복잡 삼차원 공학적 설계에 적용할 수 있는 최신 수치기법인 불연속 갤러킨 (Galerkin) 기반의 효율적 전산해석코드를 개발하였다. 약 100 km 고도에서 음속의 5.5배 속도로 비행하는 극초음속 원형 비행체를 해석하고 (정확하나 비실용적인) 볼츠만 해와 비교하여 기존 이론 대비 매우 정확한 해를 효율적으로 계산할 수 있음을 확인하였다.

고고도에서 비행하는 항공우주비행체(예 : 사드 상층방어 미사일시스템, 인공위성 추진장치), 마이크로 단위의 미소기계장치, 진공장치 등의 공학적 설계에 가까운 시기에 적용될 수 있을 것으로 예측된다.

명노신 교수[교신저재] 이력사항

1. 인적사항

- 소 속 : 경상대학교 항공우주시스템공학과
- 전 화 : 055-772-1645
- 이메일/URL : myong@gnu.ac.kr/http://acml.gnu.ac.kr



2. 학력

- 1983~1987 : 학사, 서울대학교, 항공공학
- 1987~1989 : 석사, 서울대학교, 항공공학
- 1991~1996 : 공학박사 (Ph.D.), University of Michigan, 항공우주공학

3. 경력사항

- 1997~1999 : 미국 NASA Goddard 우주비행센터 Research Associate
- 1999~현재 : 경상대학교 항공우주시스템공학과 교수
- 2009~현재 : Editorial Board, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Taylor & Francis
- 2009~현재 : Associate Editor, *Communications in Computational Physics*, Global Science Press
- 2013~현재 : 경상대학교 차세대기계항공 BK21PLUS 사업단장
- 2013~현재 : 미항공우주학회 (AIAA) Associate Fellow

4. 전문분야정보

- 희박 및 마이크로 기체, 전산유체역학, 항공기 RF & IR 스텔스, 결빙, 낙뢰, 우주 플라즈마

5. 연구지원정보

- 2004~2006 : 미국 NASA Grant Heliospheric Physics 연구사업 수행
- 2012~현재 : 미래창조과학부 · 한국연구재단 중견연구자(핵심)사업 수행