

난류 및 유동 제어 연구실

Turbulence and Flow Control Laboratory

황진율[†]

부산대학교 기계공학부

1. 서론

부산대학교 기계공학부 난류 및 유동 제어 연구실(Turbulence and Flow Control Laboratory; TFC)은 2019년 9월부터 시작하여 난류 및 유동 제어에 관심 있는 학생들과 함께 다양한 연구 과제를 진행해오고 있습니다. 2023년 11월 현재, 연구실은 박사과정 1명, 석사과정 5명, 그리고 학부연구생 6명으로 구성되어 있습니다.

본 연구실은 난류가 존재하는 다양한 열유동 문제를 수치 해석 방법으로 연구하고 있습니다. 난류는 자연 및 공학 분야에서 흔히 발생하는 현상으로 운동량, 열 및 물질의 전달과 혼합을 촉진합니다. 이러한 이유로 난류 현상을 이해하고 이를 제어하는 것은 매우 중요합니다. 그러나 난류의 복잡하고 불규칙한 멀티스케일 특성 때문에 많은 분야에서 있어서 여전히 도전적인 과제로 남아있습니다. 본 연구실은 높은 레이놀즈 수를 가진 난류 유동과 기본적인 난류 법칙과 관련된 응집 구조를 연구하며, 이러한 구조의 역학을 분석하여 난류를 유지하는 기본 메커니즘을 이해하고, 이를 바탕으로 복잡한 공학 시스템에 적용할 수 있는 유동 예측 모델과 유동 제어 기법을 개발하는 것을 목표로 삼고 있습니다. 현재 연구실에서 수행하고 있는 주요 연구 주제는 다음과 같습니다.

- 벽 난류 유동
- 이상 제트 유동
- 액체수소 탱크 내 열유동
- 용융금속 미립화 공정
- 혈류 유동

본 소개글에서는 위에 나열된 연구 주제에 대해 간략하게 소개하고자 합니다.

2. 연구 내용 소개

2.1 벽 난류 유동

앞서 언급한 바와 같이, 난류 유동은 자연과 공학 분야에 모두에서 흔히 관찰되며, 유동 내에서의 운동량, 열 및 물질의 전달과 깊은 연관이 있습니다. 이에 대한 이해는 필수적이지만, 난류 유동의 멀티스케일 특성으로 인해 그 물리적 이해와 응용에는 많은 어려움이 따릅니다. 특히, 고체 벽을 따라 흐르는 유동에서는 벽면 부근의 높은 전단응력과 표면 저항을 유발하는 얇은 층인 난류 경계층이 존재합니다. 이러한 난류 경계층의 경우 벽의 존재로 인해 난류 유동의 멀티스케일 현상은 더욱 복잡해집니다 (Fig. 1a).

난류 유동 내에는 시공간적 일정한 응집성을 보이는 유동 패턴인 응집 구조(coherent structures) 혹은 에디(eddies)가 존재하며, 이들의 다양한 크기가 난류의 복잡성을 더욱 키웁니다. 이러한 서로 다른 크기를 가지는 응집 구조 간의 상호

[†] School of Mechanical Engineering,
Pusan National University
E-mail: jhwang@pusan.ac.kr

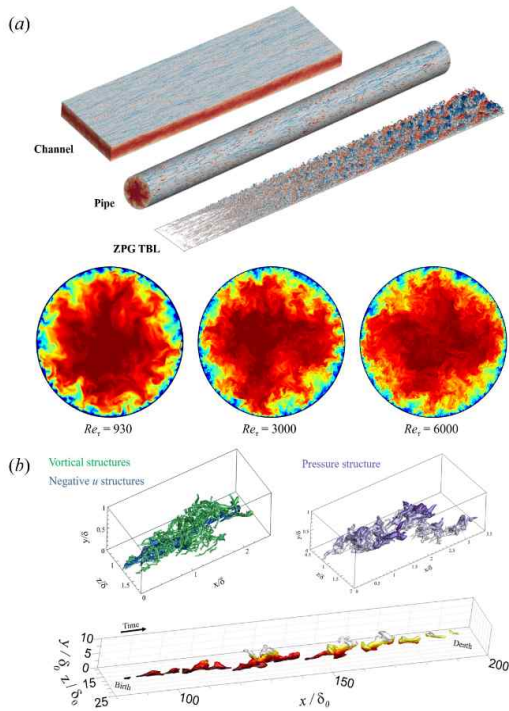


Fig. 1. (a) Direct numerical simulations of wall turbulence. (b) Multiscale coherent structures in wall turbulence^[1-10].

작용은 난류의 생성 소멸 과정에서 중요한 역할을 하므로, 이들의 역할을 파악하는 것은 매우 중요합니다. 비록 낮은 레이놀즈 수에서는 응집 구조와 그 상호작용에 대한 연구는 많은 진전이 있었지만, 대부분의 실제 유동은 높은 레이놀즈 수를 가지며, 그 결과 멀티스케일 현상이 더욱 심화되고 동시에 새로운 물리적 특성이 나타납니다.

높은 레이놀즈 수에서의 난류 현상을 이해하기 위해서는 응집구조에 관한 연구가 필수적입니다. 이를 위해서는 시공간적으로 고정밀도를 가지는 유동 데이터가 필요하기에 본 연구실에서는 직접 수치모사 기법을 활용하여 난류 연구를 수행하고 있습니다. 또한 고 레이놀즈 수 유동 해석을 위해서 본 연구실에서는 직접수치모사 알고리즘의 최적화 병렬화 연구와 함께 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 국가슈퍼컴퓨팅센터 자원을 활용한 고성능 컴퓨팅(high-performance computing) 연구

도 수행 중에 있습니다(Fig. 1). 이렇게 얻어진 벽 난류 데이터를 분석하여 난류 에너지 이동 및 벽면 저항 발생 메커니즘 분석에 대한 연구를 수행하고 있으며 이를 기반으로 난류 통계량의 예측 및 제어 기법을 개발할 예정입니다.

2.2 이상 제트 유동

노즐을 통해 정체된 기체 영역으로 액체가 분사될 경우, 그 액체는 미세한 액적들로 분해되는 과정을 겪게 됩니다. 이러한 이상 제트 유동(two-phase jet flow)의 미립화(atomization) 현상은 엔진과 터빈의 연소 시스템 등 다양한 산업 분야에서 발생합니다(Fig. 2). 기체와 액체간의 경계에서 발생하는 유동 불안정성으로 인하여 액체 기둥이 액적들로 분해되는 과정을 겪게 되며 액체 기둥에서 떨어져 나온 액적들이 다시 또 더 작은 액적들로 분해되는 과정을 거치게 됩니다. 동시에 유동의 불안정성으로 인해 하류로 진행됨에 따라 난류 영역이 발달하게 됩니다. 그 결과 난류/비난류 경계면(turbulent/non-turbulent interface; TNTI)가 존재하게 됩니다. TNTI의 거동을 통해 비난류 영역의 유체가 난류 영역으로 유입(turbulent entrainment)되며 난류 영역의 일부가 됩니다. 이러한 과정을 통해 제트 유동에 의한 물질, 운동량 및 열 교환이 발생합니다.

이러한 점에 있어서 이상 제트 유동에서 발생하는 미립화 과정에 대한 TNTI의 영향을 분석하는 것은 중요합니다. 본 연구실에서는 고정밀도의 액체 제트 유동의 수치해석을 통해 TNTI에서 발생하는 난류 유입현상과 관련된 응집 구조를 추출하고 이들과 액체 기둥의 미립화 과정

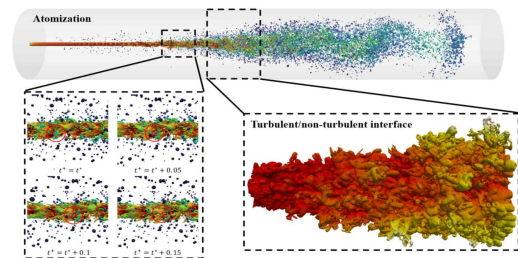


Fig. 2. Numerical simulation of two-phase jet flow.

을 동시에 분석함으로써 미립화 과정에 대한 난류의 영향을 규명하고자 연구를 수행중에 있습니다.

2.3 액체수소 탱크 내 열유동

친환경 연료의 필요성이 대두됨에 따라 수소 기반 경제로의 글로벌 전환이 진행되고 있습니다. 이러한 전환을 위해선 수소 생산, 저장, 운송에 관한 기술 개발이 필수적입니다. 본 연구실에서는 액체수소(LH2)의 운송 및 저장 시스템에 대한 연구를 수행하고 있습니다. 액체수소 운송에서는 탱크 내부에서 발생하는 슬로싱 현상과 액체수소의 증발률을 최소화하는 설계가 필요합니다. 이때 액체수소 증발의 경우 외부 열침입을 막는 단열 설계가 중요합니다. 하지만 운송 중에 발생하는 슬로싱으로 인해 액체수소가 액적 형태로 분해되는 환경이 조성되며, 이에 따라 추가적인 증발이 발생할 수 있게 됩니다. 그러므로 액체 수소의 액적으로의 분해 과정과 함께 이와 동반되는 증발량을 분석하는 연구가 필요합니다.

본 연구실에서는 액체수소 탱크 내 슬로싱 현상을 수치 모사하여 슬로싱 중 발생하는 액체수소 영역의 분해 과정과 증발률 변화를 분석하는 연구를 수행 중입니다. Fig. 3에서 보이듯이 슬로싱으로 인해 탱크 벽면을 따라 얇은 막 형태를 가지는 액체수소 영역이 발생하게 됩니다. 이후 생성된 막에 다수의 구멍이 생기면서 액적 형태로 분해됩니다. 3차원 액체 영역 추출 기법

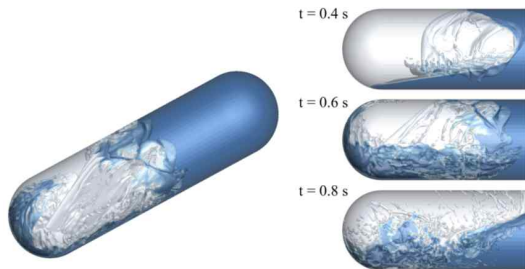


Fig. 3. Numerical simulation of sloshing phenomena in a LH2 tank^[11].

을 적용하여 액체 영역의 기하학적 특성을 분석하고, 이러한 영역들을 시간에 따라 추적함으로써 분해 메커니즘 분석하고 있습니다. 또한 상 변화 과정을 모델링하여 분해 과정에서 발생하는 증발률을 분석하여 슬로싱에 의해 발생하는 증발율을 예측하는 연구를 수행 중입니다. 이외에도 액체수소 탱크 내부의 배플에 따른 액체 영역 분해 현상과 증발률 변화를 분석하는 연구도 수행중에 있습니다. 이를 통해 액체수소 탱크 내부에서 발생하는 액체 영역 미립화 과정을 규명하고, 탱크 내 증발량을 저감할 수 있는 설계 방향을 제시하고자 합니다.

2.4 용융금속 미립화 공정

국내에서 사용되는 발전용 가스터빈 자립화를 위해선 DfAM (Design for Additive Manufacturing) 및 3D 프린팅 공정을 활용한 가스터빈용 부품 개발이 필수적입니다. 이를 위해 초내열 금속 분말의 국산화와 및 금속 3D 프린팅 공정 기술 개발이 필요합니다. 본 연구실에서는 대표적인 금속 분말 제조 공정 중의 하나인 고압 가스 분무 공정을 전산유체역학에 기반하여 연구하고 있으며, 이를 통해 새로운 금속 소재에 대한 분말 제조 공정 기술 향상을 목표로 하고 있습니다.

고압 가스 분무 공정은 고속 가스 제트를 분사하여 용융 금속을 미립화하여 금속 분말을 생산하는 기술로 분말의 대량 생산에 널리 적용되고 있습니다. 이 공정에서 용융 금속의 분해는 1차 분해와 2차 분해 두 단계로 나뉩니다. 1차 분해에서는 용융물이 리가먼트(ligament)와 액적(droplet) 형태로 분해되며, 이후 더 작은 액적으로의 2차 분해가 이루어집니다.

고밀도의 금속 부품을 프린팅하기 위해서는 미세하며 균일한 입자 크기 분포를 가지도록 금속 분말을 제조하는 것이 중요합니다. 이를 위해선 액체 금속의 분해 과정에 대한 심도 있는 이해가 필요하나 기존의 많은 연구들은 가스 제트 유동의 시각화나 최종 분말 크기에 중점을 초점을 맞추고 진행이 되었습니다.

본 연구실에서는 용융된 액체상태 금속의 1차

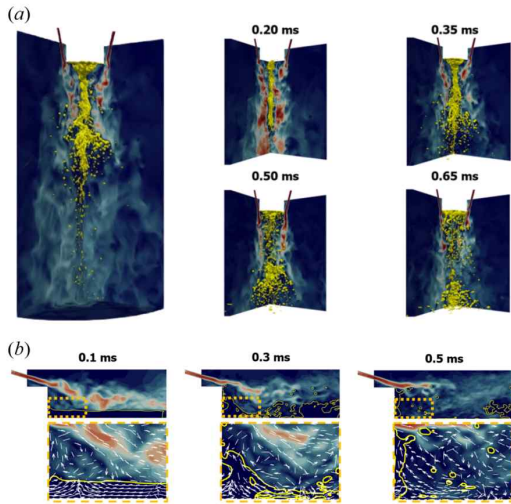


Fig. 4. (a) Numerical simulation of gas atomization for metal powder production. (b) Instantaneous flow fields near the melt nozzle tip.

분해 과정을 전산 해석하여 가스 제트 유동 내 존재하는 난류 구조와 용융 금속 간의 상호작용을 연구하고 있습니다(Fig. 4). 리가먼트와 액적의 형상 및 종횡비를 기준으로 분류하고, 1차 분해 단계에서의 액적 형성 메커니즘을 가스 영역 내 존재하는 와류 구조의 거동에 기반하여 분석하고 있습니다. 리가먼트의 형성 및 분해와 액적 형성에 미치는 가스의 다양한 계면 불안정성 요인이 1차 분해 과정에서 중요한 역할을 하는 것으로 확인되었습니다. 특히, 고속 가스 제트가 야기하는 재순환 영역이 액적 형성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났습니다. 이러한 연구 결과는 가스 분무 공정 제어에 대한 유동 관점에서 유용한 정보를 제공할 것으로 기대됩니다. 이 연구는 앞서 언급된 이상 제트 유동 연구와 마찬가지로 미립화 과정에 대한 깊은 이해를 목표로 하며, 이를 통해 산업적 응용 분야에 중요한 기여를 할 것으로 예상됩니다.

2.5 혈류 유동

인체 동맥 내의 혈류는 대체로 층류지만, 최근 측정 기술과 수치 시뮬레이션의 발전으로 난류 현상이 많이 관측되고 있습니다. 특히 협착된

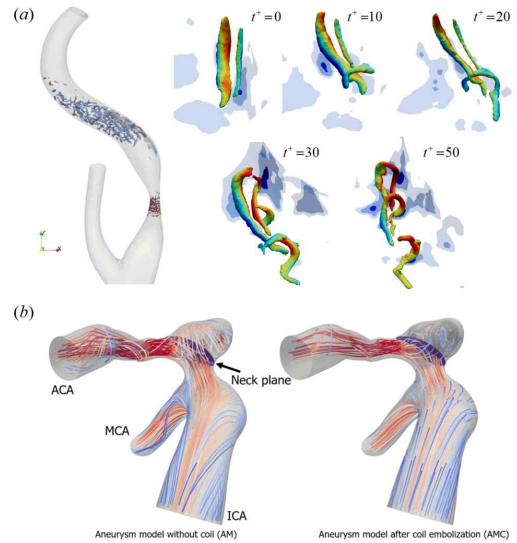


Fig. 5. (a) Numerical simulation of transitional flow in a stenosed carotid artery^[12,13]. (b) Numerical simulation of anterior cerebral artery aneurysm after coil embolization^[14].

경동맥에서는 난류로의 천이가 쉽게 발생할 수 있습니다. 본 연구실에서는 층류에서 난류로의 천이 시 간헐적으로 발생하는 극단적인 벽면 전단 응력(wall-shear stress; WSS)의 존재를 규명하고 이러한 벽면 전단 응력의 발생 메커니즘을 천이 영역 내 와류 구조에 기반하여 분석을 수행하였습니다(Fig. 5a). 천이 영역 관측과 난류 유동 내 구조 분석을 위해서 직접 수치 모사를 수행하였습니다. 경동맥의 협착 부위에서 발달한 강한 전단층의 불안정성에 의해 발생하는 난류로의 천이가 발생하는 것을 관측하였습니다. 동시에 천이 영역 내에서 극단적인 역행성 WSS가 존재하며 주로 수축기와 감속 단계에서 자주 발생하는 것을 관측하였습니다. 수축기에서는 전단층의 진동과 말림으로 생성된 큰 횡 방향 와류가 극단적인 WSS를 유발하게 됩니다. 감속 단계에서는 특히 헤어핀 모양의 소용돌이가 재순환 영역에서 비슷한 전달 속도로 이동하며, 벽면 난류의 헤어핀 패킷을 연상시키는 현상이 관측되었습니다^[15]. 이 헤어핀 모양의 와류는 벽 근처의 한쌍의 유동방향 와류구조에서 발전하고, 상류에서 새로운 와류가 생성되어 최종적으로

로 헤어핀 형태 와류가 여러개가 군집된 헤어핀 패킷을 형성합니다. 이 과정에서 와류 구조에 의해 유발되는 극단적인 역행성 WSS와 강한 레이놀즈 전단 응력영역이 관찰되며, 이는 혈소판 활성화와 적혈구 손상을 유발할 수 있을 것으로 예상됩니다.

또한 본 연구실에서는 뇌동맥류 내 혈류유동 연구를 진행 중입니다. Fig. 5(b)는 뇌동맥류 혈류유동 수치해석 결과로 코일 색전술 전후의 혈역학을 비교한 연구입니다. 이때 동맥류 내 코일 배치의 경우 코일 색전술 시뮬레이션을 통해 얻었습니다. 코일 색전술은 동맥류로 유입되는 혈류량을 효과적으로 차단함으로써 WSS를 현저히 감소시키는 것으로 나타났습니다. 이는 특히 수축기 최고점에서 충돌 영역에서 두드러졌습니다. 동맥류 표면에서 여러 높은 OSI (Oscillatory shear index) 영역이 사라졌지만, 코일이 완전히 동맥류를 차단하지 않은 부분에서 상대적으로 작은 면적의 높은 OSI 영역이 관찰되었습니다. 이러한 영역은 낮은 WSS와 높은 OSI가 중첩되어 나타나, 높은 파열 위험성을 지닐 수 있음을 시사합니다. 따라서 코일 색전술을 하더라도 코일이 적절히 폐색하지 못하는 곳은 잠재적으로 문제가 될 수 있으며, 이를 최소화하기 위한 효율적인 환자 맞춤형 코일 색전술 개발에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 예상됩니다. 본 연구를 통해 코일 색전술 후의 혈류 변화를 정량적으로 분석할 수 있었으며 다양한 뇌동맥류 모델에 대한 수치해석을 수행한다면 추후 환자맞춤형 코일 색전술을 개발하는 데 기여할 수 있을 것으로 생각됩니다.

3. 맺음말

부산대학교 기계공학부 난류 및 유동 제어 연구실(Turbulence and Flow Control Laboratory; TFC)에서는 난류가 발생하는 다양한 열유동 현상에 대해 전산유체역학을 활용하여 연구를 진행하고 있습니다. 본 연구실에서는 기본적인 벽 난류 유동, 이상 제트 유동, 액체수소 탱크 내 열 유동, 용융금속 미립화 공정, 그리고 혈류 유동에

대한 연구를 수행하고 있습니다. 난류의 복잡하고 무작위적인 멀티스케일 특성에 대한 이해를 바탕으로 이러한 유동 현상을 분석하고 있습니다. 특히, 난류 구조간 상호작용에 대한 연구를 통해 이들의 생성 및 소멸 과정을 규명함으로써 난류 구조에 의해 유발되는 운동량, 열 및 물질 전달 현상을 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 기대됩니다. 이러한 연구는 향후 복잡한 열유동 현상들을 해석하고 제어하는 데 있어서 새로운 수치해석 방법론과 기술을 개발하는 데 중요한 기여를 할 것입니다. 난류 및 유동 제어 연구실에 대한 자세한 정보와 연구 성과들은 연구실 홈페이지(<https://sites.google.com/view/tfclab/>)에서 확인할 수 있습니다.

후 기

연구 결과를 도출하는데 함께 노력한 연구실 학생들과 연구가 가능하도록 지원해준 한국연구재단, 한국에너지기술평가원, 한국과학기술정보연구원, 정보기획통신평가원에 감사드립니다.

REFERENCES

- 1) J. Hwang, H.J. Sung, Wall-attached clusters for the logarithmic velocity law in turbulent pipe flow, *Phys. Fluids*, 31 (2019) 055109.
- 2) J. Hwang, J. Lee, H.J. Sung, T.A. Zaki, Inner-outer interactions of large-scale structures in turbulent channel flow, *J. Fluid Mech.*, 790 (2016) 128-157.
- 3) J. Hwang, J. Lee, H.J. Sung, Influence of large-scale accelerating motions on turbulent pipe and channel flows, *J. Fluid Mech.*, 804 (2016) 420-441.
- 4) J. Hwang, J.H. Lee, H.J. Sung, Statistical behaviour of self-similar structures in canonical wall turbulence, *J. Fluid Mech.*, 905 (2020).
- 5) J. Hwang, H.J. Sung, Influence of large-scale motions on the frictional drag in a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, 829 (2017)

- 751-779.
- 6) J. Hwang, H.J. Sung, Wall-attached structures of velocity fluctuations in a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, 856 (2018) 958-983.
 - 7) J. Han, J. Hwang, M. Yoon, H.J. Sung, Azimuthal organization of large-scale motions in a turbulent minimal pipe flow, *Phys. Fluids*, 5 (2019) 055113.
 - 8) J. Hwang, J.H. Lee, Meandering features of wall-attached structures in turbulent boundary layer, *Physical Review Fluids*, 7 (2022) 114603.
 - 9) J. Yang, J. Hwang, H.J. Sung, Influence of wall-attached structures on the boundary of the quiescent core region in turbulent pipe flow, *Physical Review Fluids*, 4 (2019) 114606.
 - 10) J. Yang, J. Hwang, H.J. Sung, Structural organization of the quiescent core region in a turbulent channel flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 62 (2016) 455-463.
 - 11) 박성우, 황진율, 액체 연료 탱크 내 슬로싱 현상에서의 액적 형성 분석, *한국가시화정보 학회지*, 21 (2023) 102-110.
 - 12) 김동민, 황진율, 민두재, 조원민, 협착된 경동맥내 천이 유동 수치 해석, *한국가시화정보 학회지*, 20 (2022) 52-63.
 - 13) D. Kim, J.M. Hwang, T.-J. Jo, W.-M., Analysis of extreme wall-shear stress and vortical structure through direct numerical simulation of transitional flow in a stenosed carotid artery *J. Mech. Sci. Technol.*, 37 (2023).
 - 14) 김동휘, 윤정훈, 이창용, 제준우, 김동민, 배영오, 황진율, 전산해석을 통한 전대뇌동맥류 코일 색전술후 혈류 유동 분석, *Journal of the Korean Society of Visualization*, 21 (2023) 80-93.
 - 15) R.J. Adrian, C.D. Meinhart, C.D. Tomkins, Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, 422 (2000) 1-54.