

5. 학사논문 지도교수: 김 중 암

5-1. 기계학습을 이용한 데이터 기반 유동해석 및 모델링 기법 탐구

5-2. 압축성 물리 유동 해석을 위한 고차-고정밀 수치 기법 연구

5-3. 수중 폭발 시 발생하는 공동 유동 특성 연구

5-4. 유한체적법 기반의 전산유체역학 프로그램 개발 및 활용

5-5. 지구 재진입 시 발생하는 극초음속 유동 특성 연구

5-1. 기계학습을 이용한 데이터 기반 유동해석 및 모델링 기법 탐구

참고사항: 본 연구는 기계학습을 이용하여 수치해석 모델 및 물리 모델링을 개선하는 연구로, 최근 주목받고 있는 인공지능망 연구를 유체역학 연구에 접목하는 데에 관심이 있는 학생에게 적절한 주제입니다.

내용: 전산유체역학은 유체의 운동을 기술한 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 계산하여 다양한 유동 물리 현상을 해석하는 분야이다. 이를 위해서는 미분 및 적분을 수치적으로 근사하는 수치해석 모델과 난류 현상, 다상 유동의 상변화, 유체-고체 연성해석 연계 등의 물리 현상을 표현하는 물리 모델링이 동원된다. 그러나 전통적인 수치/물리 모델에는 다양한 미결정계수가 존재하여 사용자의 경험에 의존하여 미결정계수를 조절해야 하는 문제점을 지니고 있다. 최근, 이를 보완할 수 있는 돌파구로서 기계학습 연구가 주목받고 있으며 유동 빅데이터로부터 미결정계수를 정하기 위한 최적화 방법론에 기계학습이 적용되고 있다. 특히, 인공지능망은 대규모 비선형 빅데이터로부터 유의미한 관계를 찾아 이를 암시적인 함수로 구축할 수 있어, 해석을 통해 얻는 데이터의 규모가 크고 데이터 간의 비선형성이 큰 전산유체역학 분야에 많이 활용되고 있는 추세이다. 전통적인 수치/물리 모델링의 한계를 극복하기 위해 본 연구실에서는 인공지능망을 이용하여 초음속 비행체 주변에서 발생하는 충격파를 강건하고 정확하게 포착하는 제한자(limiter) 모델과 극초음속 열화학적 평형유동의 고온 물성치를 예측하는 IDEA (Infinitely Differentiable Equilibrium Air) 모델을 개발하였다. 기존 모델 대비 높은 정확도와 수렴성이 향상되었으며, 이러한 인공지능망 모델을 활용하여 초음속 및 극초음속 비행체 등 다양한 항공우주산업 실제 문제에 적용하고 있다.

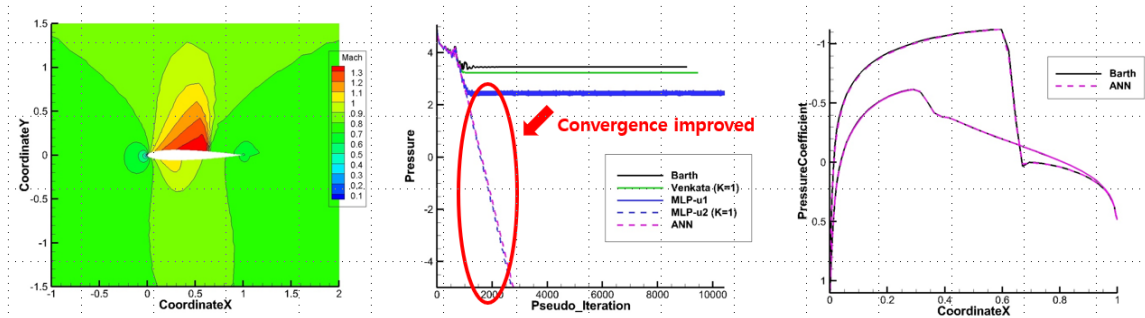


그림 1. 인공지능망 제한자 모델을 활용한 천음속 CFD 해석
(마하수 0.8 익형 주위 유동 해석)

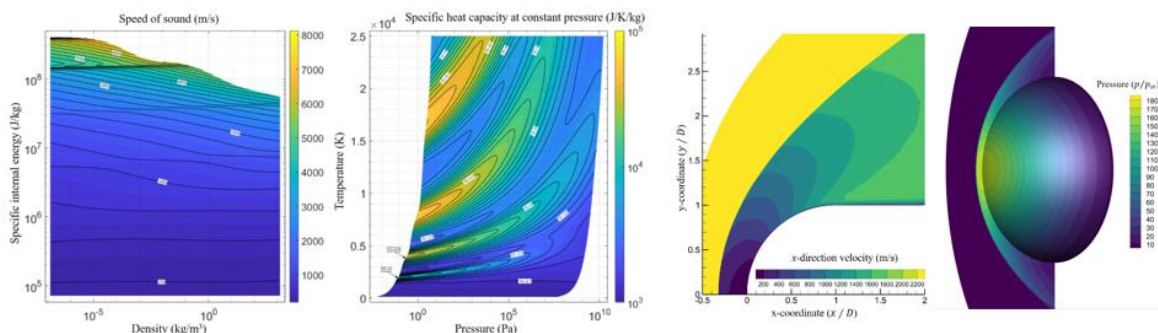


그림 2. 인공지능망 물성치 모델을 활용한 극초음속 CFD 해석
(마하수 11 구 주위 유동 해석)

본 연구에서는 방대한 CFD 해석 데이터를 체계적으로 융합 및 가공하는 기술을 습득하고 기계학습을 이용해 불완전하고 직관에 의존했던 수치/물리 모델링을 개선하여 유동 물리 현상을 보다 정확하게 해석하는 방향에 대해 모색하고자 한다. 현재 사용하고 있는 수치/물리 모델의 특성을 면밀하게 분석하여 그 한계를 정확하게 이해하고, 이를 바탕으로 기계학습 모델과 학습데이터를 구축하여 학습하고 개선 효과를 분석하는 연구를 수행한다.

담당교표: 김동석 (dskim@snu.ac.kr)

5-2. 압축성 물리 유동 해석을 위한 고차-고정밀 수치 기법 개발 연구

참고사항: 본 연구는 수학적 지식을 바탕으로 직접 수치 알고리즘을 개발하고 프로그래밍을 통해 구현해 보고자 하는 학생에게 적절한 주제입니다. 선행 지식으로는 학부 공학 수학 내용으로 충분하며, 필요한 내용은 졸업논문 지도 과정을 통해 별도로 교육할 예정입니다.

내용: 지난 수십 년간 전산 환경의 급격한 발달에 따라, 수치 시뮬레이션을 통해서 유동 물리 현상을 분석하는 전산 유체 역학 연구가 크게 각광을 받고 있다. 특히 전산 유체 역학을 활용하여 광범위한 유동장에 대한 근본적인 물리적 특성을 분석할 수 있게 되었을 뿐만 아니라, 비행체, 자동차, 선박, 교량 등 실제적인 3차원 운송체에 대한 개발 및 설계에 직접 활용할 수 있는 단계에 이르렀다. 기술적으로 현재의 전산 유체 역학은 고속 비행체 주위에서 압축성 난류 유동을 해석할 수는 있으나, 3차원 실제 비행체 주위 유동을 매우 정밀하게 계산하는데 있어서 여전히 상당한 계산 시간 및 자원이 필요하고 그 계산 결과의 신뢰성이 문제시되고 있는 상황이다.

최근 이러한 한계를 극복하기 위해 정확도와 계산 효율성을 크게 향상시킨 고차정확도 수치 해석 기법이 크게 각광받고 있다. 본 연구팀에서는 이 분야에서 지속적인 연구를 통해 이 분야의 주요 이슈를 해결하며 국제적 선도 연구실적을 쌓아왔다. 최근에는 hMLP(hierarchical Multidimensional Limiting Process), hMLP_BD(hMLP with troubled Boundary Detector), DRM(Direct Reconstruction Method), CsTC(Complete-search Tensor Contraction), SPID(Shock-capturing PID) 등 고차정확도 수치해석 기법의 성능을 한층 더 진보 시킨 다양한 기법들을 개발하였다. 특히, 이러한 최신 기법들이 적용된 고성능 고정밀 다물리 유동해석 소프트웨어인 Deneb를 개발하여 ver. 1.0을 공개하였다.

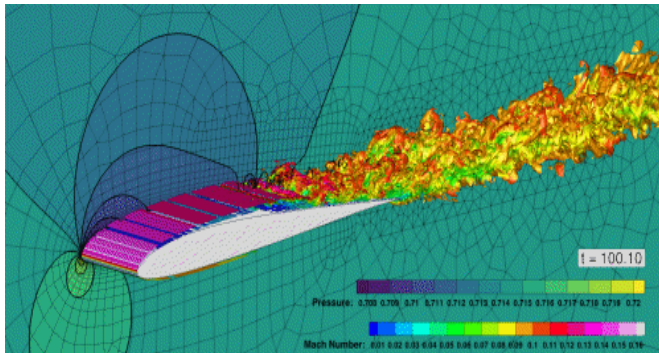


그림 1. SD7003 에어포일 천이 유동 (Re=6만, DRM-DG-P3를 사용하여 계산속도 7.8배 향상)

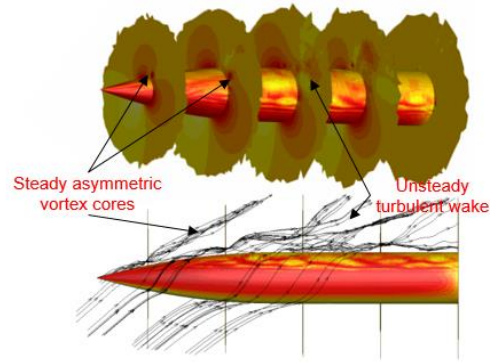


그림 2. FVM-RANS로 포착할 수 없는 Tangent Ogive Cylinder 비대칭 공력 현상 포착 (Re=80만, DRM-DG-P2)

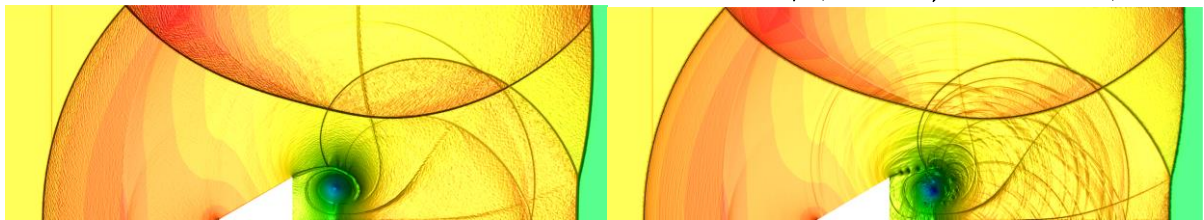


그림 3. 충격파-궤기 상호작용 (좌: 기존 기법 (LAV), 우: SPID 기법)

본 연구에서는 기 개발된 다양한 수치기법들과 Deneb 소프트웨어를 기반으로 충격파가 존재하는 압축성 유동을 위한 고차-고정밀 수치 기법을 연구하고 이를 발전시킬 방향에 대해 모색한다. 비교적 간단한 모델 방정식(linear advection & Burgers 방정식 등)과 2차원 압축성 유동에 대해 고차-고정밀 수치 해석 기법을 적용해보고, 이를 바탕으로 실제 고속 비행체 주위 복잡한 유동 해석 및 설계를 위한 개선 방안 및 새로운 기법에 대해 모색한다.

담당조교: 김주현 (kjhunkk@gmail.com)

5-3. 수중 폭발 시 발생하는 공동 유동 특성 연구

참고사항: 본 주제는 수중 폭발 현상을 2차원 축대칭으로 계산하여 핵심적인 물리 현상을 파악하고자 하는 연구입니다. 기본적인 유체역학 및 열역학 지식만 있으면 연구를 수행하는데 어려움이 없을 것으로 예상됩니다.

내용: 수중 폭발(Underwater explosion, “UNDEX”)은 물 속에서 폭발이 발생하는 상황으로, 충격파-상 경계면 상호작용, 공동(cavitation) 현상, 버블 진동과 같은 매우 복잡한 물리적 현상을 동반한다. 1940년대 초기 군사적 목적으로 활용되었지만, 본질적인 물리적 특성을 활용하여 체외 충격파 쇄석술(lithotripsy) 등과 같이 의학 분야에도 다양하게 적용되고 있으며, 우리 연구실에서는 전산유체역학을 통해 수중 폭발을 정확하게 예측하고 이 때 발생하는 다양한 물리적인 현상을 분석하고 있다.

현재 우리 연구실에서 수행하고 있는 UNDEX 연구는 크게 두 가지로, 수중 폭발이 주변 구조물에 미치는 다양한 종류의 하중을 모사하고 예측하는 것과, 단일 수중 폭발(single UNDEX)이 아닌 다중 수중 폭발(multiple UNDEX) 상황에서 발생하는 물리적 현상을 분석하는 것이다. 수중에서 폭발이 발생하면 초기의 충격파 이외에도 수면 또는 주변 구조물의 상호작용으로 팽창이 발생한 영역에 공동이 발생하게 되는데, 공동이 붕괴되면서 초기 충격파와 비슷한 강도의 압력파가 발생하여 주변 구조물에 심각한 손상을 야기할 수 있다. 다중 수중 폭발은 단일 폭발과 다르게 충격파 간 상호작용, 버블 간에 서로 미치는 영향 등 여러 물리적 현상을 추가적으로 고려해야 한다.

본 연구에서는 연구실에서 자체적으로 개발한 수치해석 프로그램을 이해하고, 2차원 축대칭 해석을 수행하여 UNDEX 시 나타나는 물리적 현상을 분석한다. 다중 폭발 상황에서의 특징적인 현상을 파악하고 분석하는 연구를 수행한다.



그림 2. Full ship shock trial on USS Gerald R. Ford

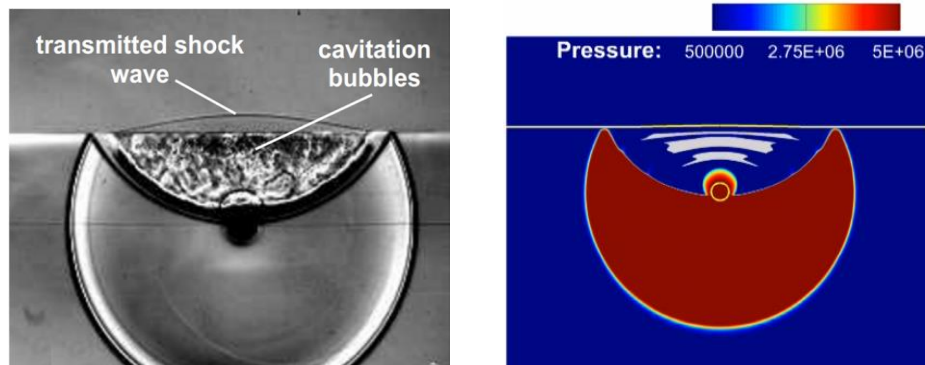


그림 2. 수중 폭발 시 발생하는 충격파 및 공동 유동 (좌: 실험 결과, 우: 수치해석 결과)

담당조교: 최경준 (michael9201@snu.ac.kr)

5-4. 유한체적법 기반의 전산유체역학 프로그램 개발 및 활용

참고사항: 본 연구는 유한체적법 기반의 전산유체역학 프로그램을 개발하고 이를 활용하여 항공기 전기체 및 발사체 등 큰 규모의 문제를 해석하는 연구입니다.

내용: 전산유체역학 프로그램을 사용한 공력 해석 기술은 지난 수십년간 빠르게 발전해왔으며, 항공우주분야에서 활발히 사용되어 실험 비용을 낮추고 유동 현상에 대한 이해를 높이는 데 기여해왔다. 특히, 유한체적법 기반의 전산유체해석은 적절한 효율성과 정확성을 갖추고 있어 산업계 표준으로 자리 잡았으며, 항공기 전기체 및 발사체 공력 해석과 같이 실질적이고 큰 규모의 문제를 해석하는데에 활용되고 있다.

본 연구에서는 안정성, 효율성, 정확성 측면에서 유한체적법 기반의 전산유체역학 프로그램의 성능을 높이기 위한 알고리즘과 수치기법을 개발하는 것을 목표로 한다. 또한 이렇게 개발된 프로그램을 활용하여 항공기 전기체 및 발사체 등 큰 규모의 문제를 해석하고, 여기에서 발생하는 다양한 유동 현상을 분석하는 것을 목표로 한다.

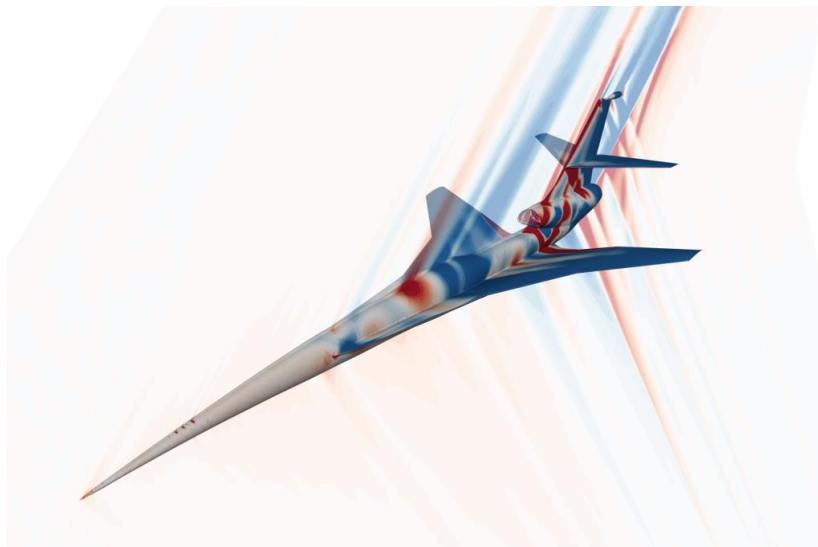


그림 1. NASA C25D Flow through Nacelle 해석 결과 (압력 분포)

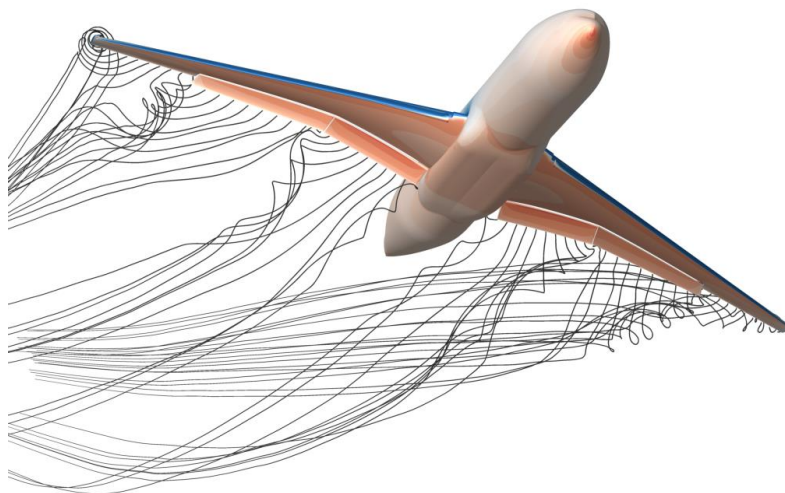


그림 2. NASA High Lift Common Research Model 해석 결과 (압력 분포)

담당조교: 김은사 (kes5885@gmail.com)

5-5. 지구 재진입 시 발생하는 극초음속 유동 특성 연구

참고사항: 본 연구는 지구 재진입 시 발생하는 극초음속 유동에 대한 연구입니다. 우리 주변에서 흔히 발견할 수 있는 유동이 아닌 매우 빠른 속도로 비행하는 비행체 주변 유동을 분석하는 연구입니다.

내용: 지구로 재진입하는 물체는 지구 중력에 의하여 매우 빠른 속도(마하 5 이상)로 가속하게 된다. 이 경우 물체 주변에 강한 충격파가 발생하고 그 충격파로 인하여 공기가 압축되고 온도가 상승한다. 이 때 온도는 5000 ~ 6000 K를 넘는 고온이다. 이러한 고온의 환경에서 공기를 이루는 산소, 질소 분자는 해리(dissociation), 이온화(ionization)되는 등 화학 반응이 발생한다. 화학 반응이 일어나 공기를 이루는 화학종의 구성이 변화하면 공기는 더 이상 이상기체 상태방정식을 따르지 않게 된다. 따라서 화학 반응이 발생한 공기는 다른 방식을 이용하여 물성치를 구해야 한다.

화학 반응이 일어나는 공기는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 먼저, 평형 유동(equilibrium flow)은 유동의 특성 시간보다 화학 반응의 특성 시간이 매우 짧은 유동을 말하며, 일반적으로 다항식을 이용하여 유동의 물성치를 구한다. 또 다른 구분은 비평형 유동(non-equilibrium flow)로 유동의 특성 시간과 화학 반응의 특성 시간이 유사한 유동을 말한다. 비평형 유동의 경우 특정한 수식을 이용하여 물성치를 구할 수 없으며, 유동을 이루는 화학종을 모델링하여 다수의 연속방정식을 해석하는 방식으로 진행하게 된다.

본 연구에서는 연구실에서 자체 개발한 극초음속 해석 소프트웨어를 이용하여 지구 재진입 물체 주변 극초음속 유동을 해석하고 그 특성을 분석하는 연구를 수행한다.



그림 1. 대표적인 지구 재진입 물체 (좌: 아폴로 11 호, 우: SpaceX crew dragon)

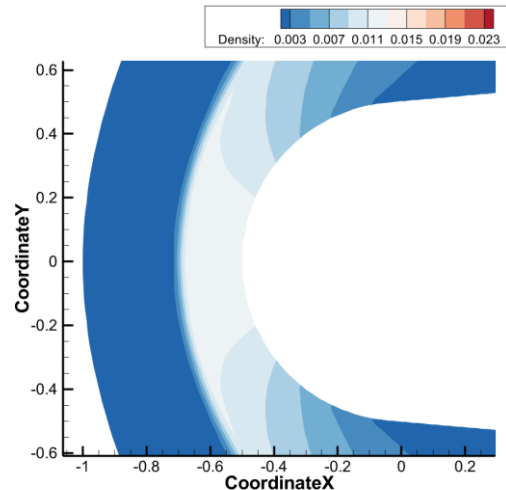
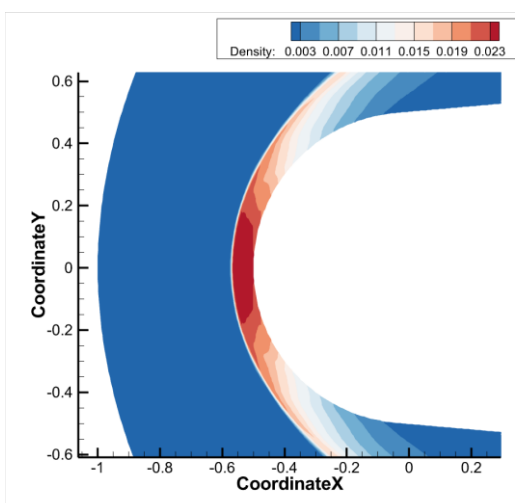


그림 2. 마하 15로 비행하는 물체 주변 밀도 분포 (좌: 이상 기체 가정, 우: 평형 유동 가정)