

## 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. 곤충모방 날갯짓 비행체 제작 및 실험 연구, 그리고 비행 메커니즘에 대한 비정상 유동 특성 분석
- 5-4. 액체로켓 터보펌프 인듀서 주위의 비정상 공동현상 특성 연구
- 5-5. 유한체적법 기반의 전산유체역학 프로그램 개발 및 활용
- 5-6. 초음속 흡입구의 정상 및 비정상 유동 특성 분석

## 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:** 전산 유체 역학 연구는 물리학 및 수학 이론에서 유도된 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 계산하여 광범위한 유동장을 근본적으로 모사하고, 이를 바탕으로 다양한 물리 특성을 분석하는 것을 중점으로 하고 있다. 이를 위해서는 미분 및 적분을 수치적으로 근사하는 수치해석 모델과 난류 현상, 다상 유동의 상변화, 유체-고체 연성해석 연계 등의 물리 현상을 근사하는 물리 모델링이 동원된다. 그러나 이러한 모델링들은 대부분 근사를 적용하기 때문에 모델에 따라서는 사용자의 경험이나 직관에 의존하여 파라미터를 조절해야 하거나, 실험에서 재현되는 물리 특성을 모사할 수 있는 정교한 모델이 없는 등의 문제를 안고 있다.

현재 각광받고 있는 데이터 기반(data-drive) 기계학습 연구는 이러한 수치 모델링을 보완할 수 있는 돌파구로서 전산 유체 역학 연구계에서 주목하고 있다. 특히 인공지능망 기법은 대규모 비선형 데이터로부터 유의미한 관계를 찾아 이를 암시적인 함수로 구축할 수 있어, 해석을 통해 얻는 데이터의 규모가 크고 데이터 간의 비선형성이 큰 전산 유체 역학 연구에 적합할 수 있다. 기계학습을 이용하여 수치해석 모델 및 물리현상 모델들을 보다 정확하게 개선하려는 시도들이 진행되고 있으며, 구축된 함수를 이용하여 최적화를 시도하는 사례도 발생하고 있다. 본 연구실에서도 기계학습을 이용하여 NACA 0012 익형의 pressure tap을 그림 1과 같이 등간격으로 배치하지 않고 최적화하는 연구를 수행하였다. EDISON\_CFD 플랫폼을 이용하여 해석한 익형의 수치 유동장 정보를 바탕으로 학습하여 최적의 pressure tap 위치를 탐색하였다. 그림 2, 3은 기존의 등간격 배치 대비 기계학습을 이용한 최적 pressure tap이 훨씬 우수한 압력분포 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 기계학습을 이용해 불완전하고 직관에 의존했던 수치해석 모델링을 개선하고, 이를 바탕으로 유동 물리 현상을 보다 정확하게 모사하는 방향에 대해 모색하고자 한다. 현재 사용하고 있는 수치 모델의 특성을 면밀하게 분석하여 그 한계를 정확하게 이해하고, 이를 바탕으로 기계학습 모델과 트레이닝 데이터를 구축하여 학습하고 개선 효과를 분석하는 연구를 수행한다.



그림 1. NACA 0012 익형의 표준 Pressure Tap 위치

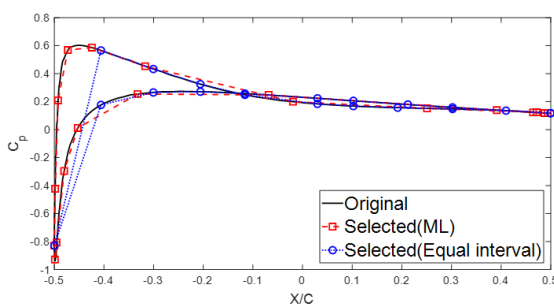


그림 2. 기계학습을 이용한 최적의 Pressure Tap 위치 탐색 (받음각 3.33도)

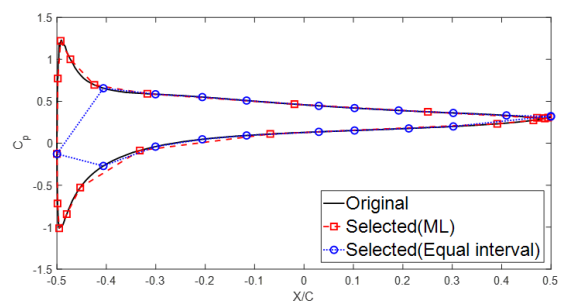


그림 3. 기계학습을 이용한 최적의 Pressure Tap 위치 탐색 (받음각 10도)

담당교교: 오광석 ([kwangseokoh@snu.ac.kr](mailto:kwangseokoh@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 실험적 연구 방법과 상호 보완을 이룰 수 있어 크게 각광을 받고 있다. 특히 전산 유체 역학을 활용하여 광범위한 유동장에 대한 근본적인 물리적 특성을 분석할 수 있게 되었을 뿐만 아니라, 유체-고체 연성해석, 액체-기체 다상 유동과 같은 물리적으로 보다 복잡한 현상에 대한 분석 이외에도, 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 상당한 계산 시간 및 자원이 필요하고 그 계산 결과의 신뢰성이 문제시 되고 있는 상황이다.

최근 이러한 한계를 극복하기 위해 정확도와 계산 효율성을 크게 향상시킨 새로운 고차-고정밀 수치 해석 기법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 고속 압축성 유동장에서 난류로 인한 와류 유동이 충격파와 부딪치면서 발생하는 미세한 유동 구조를 강건하면서도 정밀하게 포착할 수 있는 수치 기법 개발이 매우 중요하면서도 시급한 분야 중 하나로 판단되고 있다.

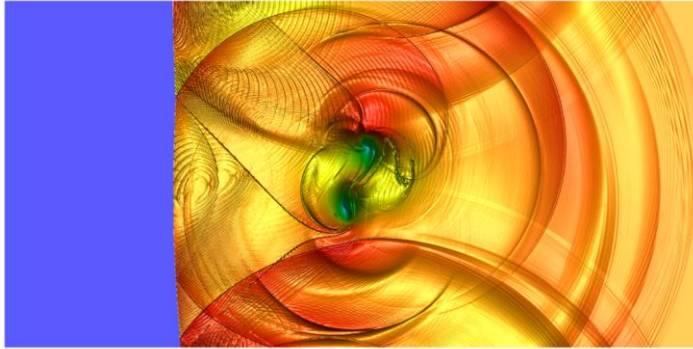


그림 1. 강한 와류-충격파 상호작용  
(고차-고정밀 불연속 갤러킨 방법)

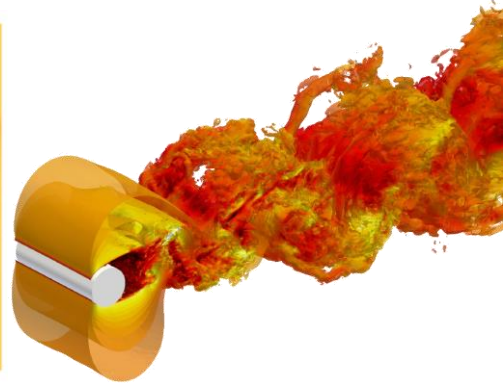


그림 2. 실린더 주변 난류 유동( $Re=3900$ )  
(고차-고정밀 FR/CPR 방법)

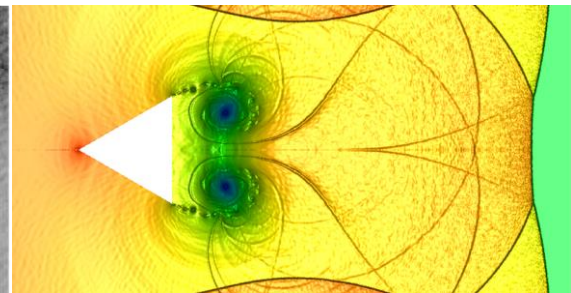
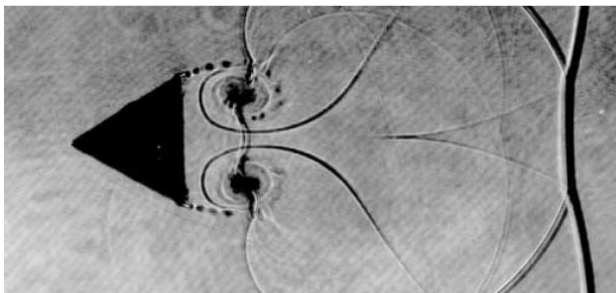


그림 3. 충격파-뺨기 상호작용 (좌: 실험 결과, 우: 수치 해석 결과)

이런 점을 고려하여, 본 연구에서는 충격파가 존재하는 압축성 유동을 위한 고차-고정밀 수치 기법을 연구하고 이를 발전시킬 방향에 대해 모색하고자 한다. 비교적 간단한 모델 방정식(linear advection & Burgers 방정식 등)과 2차원 압축성 유동에 대해 고차-고정밀 수치 해석 기법을 적용한다. 이를 바탕으로 향후 실제 고속 비행체 주위 복잡한 유동 해석 및 설계에 대한 적용 가능성에 대해 모색한다.

담당교교: 유호준 ([rememory@snu.ac.kr](mailto:rememory@snu.ac.kr))

### 5-3. 곤충모방 날갯짓 비행체 제작 및 실험 연구, 그리고 비행 메커니즘에 대한 비정상 유동 특성 분석

**참고사항:** 본 연구는 곤충의 날갯짓을 모방하여 비행하는 메커니즘을 고안하고 설계하며, 유체-구조 연성해석과 실험을 수행하여 실제 날갯짓 초소형 비행체를 제작하는 연구입니다.

**내용:** 세계 각국에서는 곤충과 같은 생물체의 산업적, 경제적, 과학적 측면에서 관심이 고조됨에 따라 다양성이 풍부한 곤충을 하나의 자원으로 인식하고 활용하려는 경쟁이 치열해지고 있으며, 이러한 일환으로 곤충의 가치를 재평가하고 이용하려는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 특히 항공우주분야에서는 곤충이나 새의 비행 메커니즘 밝혀내고, 이를 실제 비행기에 적용하고자 하는 노력을 기울여왔다. 느린 속도에서도 충분한 양력과 추진력을 낼 수 있다는 장점 때문에 미래형 비행체 개발에의 적용가능성으로 주목받고 있다. 이러한 곤충의 비정상 비행 메커니즘에 대한 이해를 통하여, 보다 효율적이고 안정적인 초소형 비행체를 설계할 수 있을 것이다. 이러한 곤충의 복잡한 유동 메커니즘을 활용하여 날갯짓 초소형 비행체(Flapping Micro Air Vehicles)를 개발하는 연구를 수행하고 있다. 본 연구실에서는 향상된 성능의 날갯짓 비행체의 체계적인 개발을 위하여 독창적인 메커니즘을 고안하고, 해석과 실험을 활용한 최적 설계 연구를 수행하고 있다.

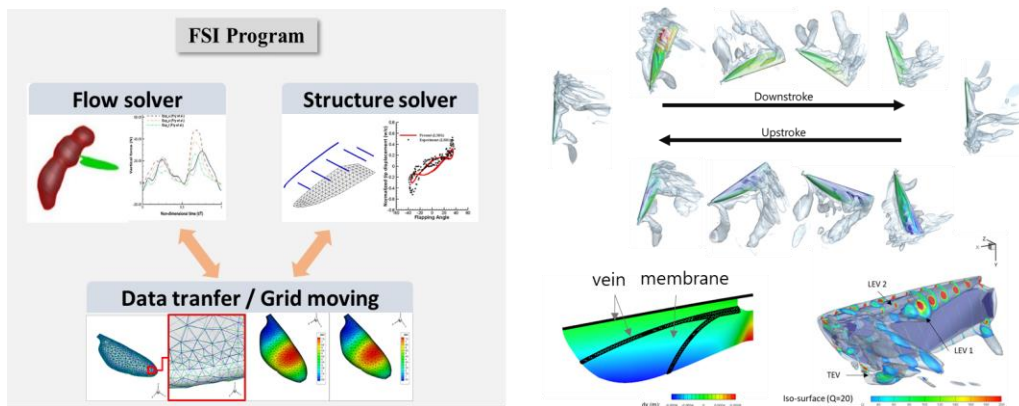


그림 1. 날갯짓 유연-구조 메커니즘 분석

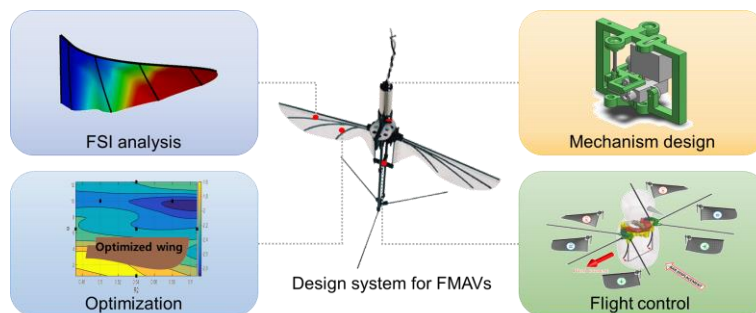


그림 2. 날갯짓 비행체 최적개발 시스템

날갯짓 비행체는 생명체의 복잡한 날개 궤적을 구현하기 위하여 유연한 구조물을 활용한다. 유연한 날개는 얇은 막과 두꺼운 시맥으로 이루어져 있어서 유체-구조 복합적인 거동특성이 발생한다. 따라서 날개의 공력성능은 날개의 형상뿐만 아니라 재질 특성에 매우 큰 영향을 받기 때문에 유체-구조 복합적인 해석이 필요하다. 따라서, 유체-구조 연성해석과 실험적인 방법을 활용하여 날개의 공력성능에 영향을 미치는 요인들에 대한 분석을 수행하고 있다. 또한, 효율적인 메커니즘을 구현하기 위한 구동 및 제어부를 직접 설계하고 분석한다. 이러한 해석-실험적인 방법을 통하여 주요 설계 파라미터들에 대한 분석과 최적설계를 수행하여 향상된 성능의 유연한 날개 설계를 진행하고 있다.

담당조교: 윤상훈(89ysh@hanmail.net)



## 5-4. 액체로켓 터보펌프 인듀서 주위의 비정상 공동현상 특성 연구

**참고사항:** 본 주제는 터보펌프 인듀서 주변의 공동 유동을 3차원으로 해석하는 대신 2차원으로 단순화시킴으로써 해석 시간을 줄이고 핵심 유동 현상을 빠르게 파악하고자 하는 연구입니다. 기본적인 유체역학 및 열역학 지식만 있으면 연구를 수행하는데 어려움이 없을 것으로 예상됩니다.

**내용:** 터보펌프는 우주 발사체용 액체로켓의 추력 성능을 결정짓는 핵심부품(그림 1 참조)으로 추진제와 산화제를 높은 회전수로 가압시켜 엔진 연소실에 안정적으로 공급하는 역할을 한다. 액체로켓 전체의 payload 및 안정성에 매우 큰 영향을 주므로, 액체로켓의 독자 개발 및 기술 선진화를 위해서는 터보펌프 및 터보펌프의 성능향상에 관한 연구가 필수적이다.

터보펌프 성능향상과 관련된 연구 중 하나로, 본 연구실에서는 터보펌프 인듀서에서 발생하는 공동현상(cavitation, 그림 2 참조)에 대한 연구를 수행하고 있다. 터보펌프의 인듀서는 메인 펌프 앞에서 1 차 가압을 하여 메인 펌프에서 공동현상이 생기지 않도록 하는 부품이다. 공동현상이란 고속으로 회전하는 액체의 국소 압력이 감소하여 기화되는 현상을 의미한다. 인듀서에서 발생하는 공동은 터보펌프의 성능을 저하시켜 성능향상의 제약의 원인이 되기도 하고, 생성과 소멸을 반복하면서 나타나는 비정상적인 특성으로 인하여 불필요한 시스템 진동과 구조적 파손을 일으켜 엔진실패의 원인이 되기도 한다. 본 연구실의 수치해석적인 접근방법은 실험에 비해 안정적이고, 더 적은 비용으로 유동특성 및 가시화가 가능하다. 더 나아가 터보펌프 성능향상을 위한 설계 연구도 수행할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 연구실에서 자체적으로 개발한 수치해석 프로그램을 이해하고, 이를 사용하여 실제 터보펌프 인듀서 형상을 2 차원으로 전개한 캐스케이드를 해석한다. 다양한 유동조건과 작동유체를 적용하여 캐스케이드에서의 비정상 유동을 모사하고, 이를 바탕으로 터보펌프 인듀서에서 발생하는 주기성과 특성을 파악하고 분석하는 연구를 수행한다.



그림 1. 액체로켓 터보펌프

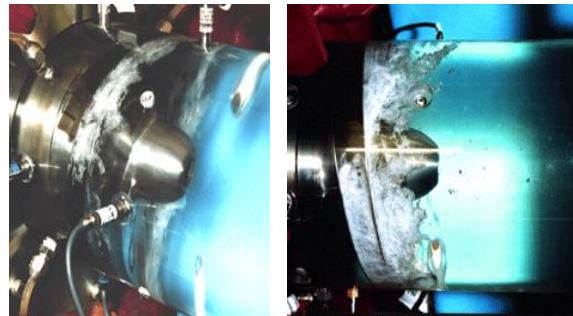


그림 2. 인듀서 주위에서 발생하는 공동현상

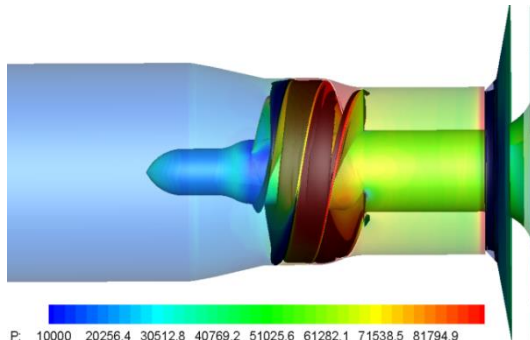


그림 3. 터보펌프 인듀서 해석

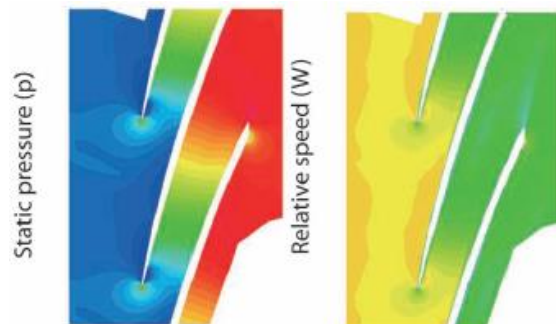


그림 4. 2차원 캐스케이드 해석

담당조교: 최경준 ([michael9201@snu.ac.kr](mailto:michael9201@snu.ac.kr))

## 5-5. 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.

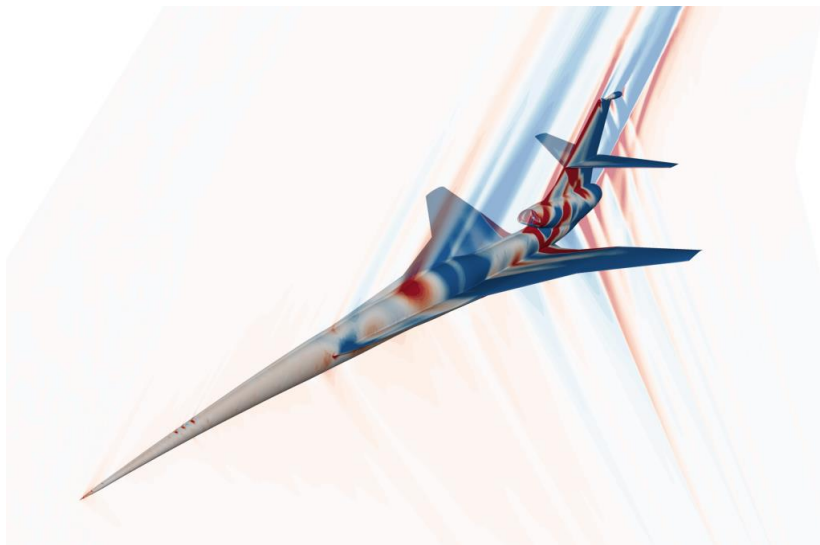


그림 1. NASA C25D Flow through Nacelle 해석 결과 (압력특성 컨투어)

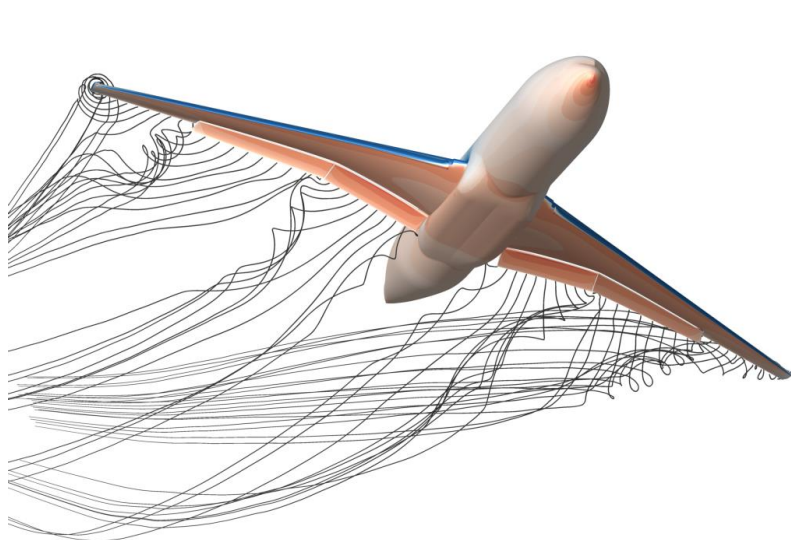


그림 2. NASA High Lift Common Research Model 해석 결과 (압력 컨투어)

담당조교: 이창수 ([chongsoo89@gmail.com](mailto:chongsoo89@gmail.com))

## 5-6. 초음속 흡입구의 정상 및 비정상 유동 특성 분석

**참고사항:** 본 연구는 2차원/축대칭 초음속 흡입구 주변의 유동에 대한 계산을 다룹니다. 압축성 유동 지식을 기반으로 충격파를 동반한 초음속 유동의 물리적 특성을 분석하는 것에 중점을 두고 있으므로, 유동현상의 (특히 초음속 유동) 관찰 및 분석에 관심이 있는 학생에게 적절합니다.

**내용:** 비행체가 점점 더 빠른 속도로 이동함에 따라 연료의 연소에 필요한 공기를 안정적으로 공급해주는 것이 엔진 개발 분야에서 매우 중요한 이슈가 되고 있다. 초음속 비행체에 사용되는 램제트(Ramjet) 엔진의 경우 형상에 의해 발생하는 충격파를 이용하여 공기를 압축하기 때문에 별도의 압축기가 필요하지 않으며, 이로 인해 기체의 무게를 줄이고 압축기에 사용되던 에너지를 줄여 엔진의 효율을 높일 수 있다. 램제트 엔진의 경우 흡입구(inlet)에서 공기 압축에 필요한 모든 충격파가 발생하기 때문에 흡입구가 램제트 엔진의 성능을 결정하는 데 매우 큰 비중을 차지한다.



그림 1. Ramjet 엔진의 실제 사용 예

간단한 형상에 비해 초음속 엔진 흡입구 내부의 유동은 충격파-충격파 간섭과 충격파-경계층 간섭에 의해 매우 복잡한 유동 특성을 갖게 된다. 이로 인해 설계점을 벗어나거나 흡입구 버즈(Inlet buzz)와 같은 유동 불안정 현상이 발생하여 엔진 성능 저하, 연소 실패, 엔진 구조물 피해 등의 문제를 초래할 수가 있다. 본 연구는 더욱 효율적인 초음속 엔진의 개발을 위해 초음속 흡입구에 대한 유동 특성을 해석/분석하며, bleed와 같은 유동 제어장치를 이용하여 설계점을 벗어난 흡입구를 설계점으로 회복시키거나 흡입구의 성능을 크게 향상시키는 것을 목표로 한다.

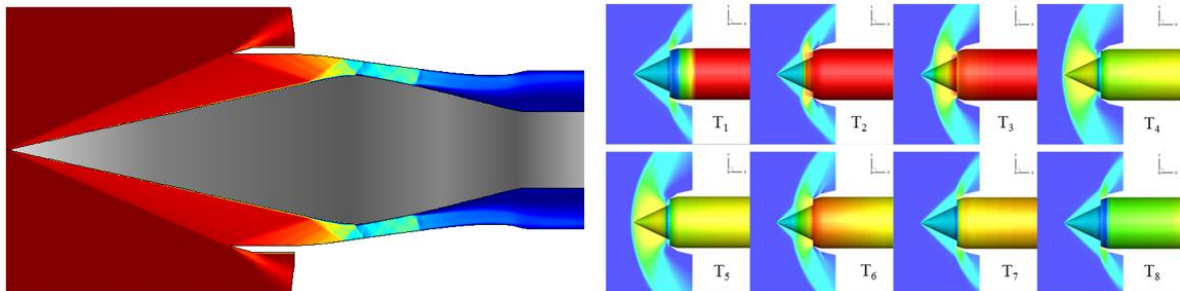


그림 2. 흡입구 해석의 예 (좌: Bleed를 이용한 흡입구 유동제어, 우: 흡입구 buzz cycle)