

항공우주산업의 경쟁력 제고:

소프트웨어 기반의 전산유체역학(CFD)과 항공기 안전 보장

박수형

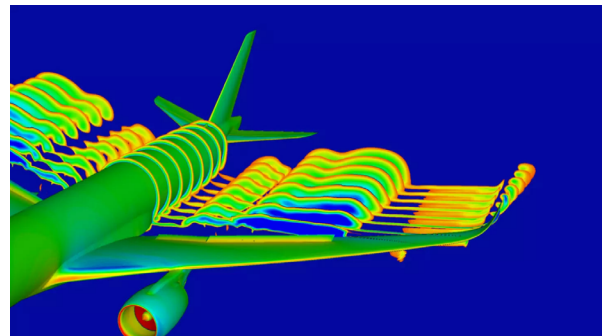
건국대학교 항공우주모빌리티공학과 교수
pish@konkuk.ac.kr



여객기, 헬리콥터, 우주발사체로 대표되는 항공우주 비행체의 안전 확보는 항공우주공학에서 최우선 과제일 뿐만 아니라, 항공우주산업의 글로벌 경쟁력 확보에 핵심적인 요소이다. 특히 상업용 여객기는 잠재적 결함을 제거하기 위한 엄격한 설계 분석과 시험이 필요하며, 높은 글로벌 안전 표준을 준수하도록 요구된다. 그럼에도 불구하고 최근 언론을 통해 알려진 여러 대형 항공기와 헬리콥터 추락 사고는 완벽한 안전 보장을 위해 할 일이 많음을 보여준다.

공기 중을 비행하는 항공기나 우주발사체의 설계와 비행 안전성을 검토하기 위해 비행체 주변의 공기 흐름과 발생하는 힘을 계산하는 시뮬레이션 도구를 활용하고 있는데, 이때 적용되는 주요 학문 분야가 '전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)'이다. 간단히 말하면 소프트웨어를 사용하여 항공기 주변의 유체 흐름(항공기의 경우 공기)을 수치적으로 시뮬레이션하는 방법으로, 물리적으로 만든 시제기 프로토타입 없이도 여러 실제 상황을 모사함으로써 비행 시에 발생할 수 있는 사고 상황과 위험을 예방할 수 있다.

항공우주 비행체는 개발 과정에서 미리 성능과 안전성을 테스트해볼 수 없기 때문에 유사한 상황을 모델링하여 풍동(Wind Tunnel) 실험을 수행하고, 이를 바탕으로 비행 시험과 운항을 승인받는 인증(Certification) 과정을 반드시 거치게 된다. CFD는 풍동 시험과 병행하여 실제 상황을 파악하는 핵심 도구로 자리잡고 있다. CFD를 이용한 가상 테스트는 풍동 시험과 필요한 시제기 비행



출처: Airbus

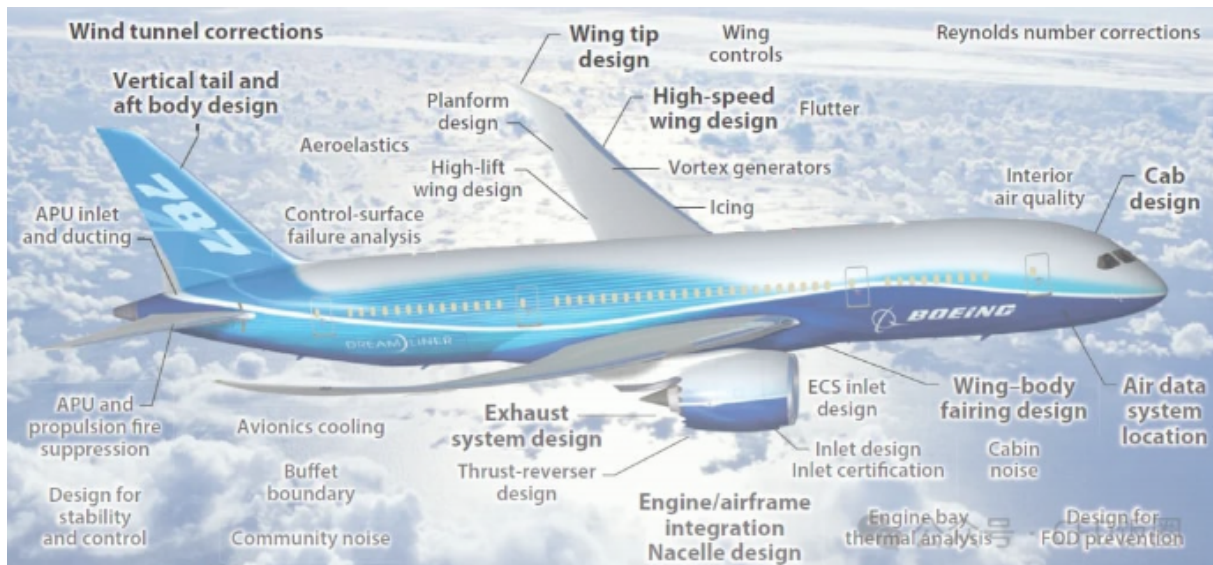
횟수를 획기적으로 줄여 시간과 개발 비용을 절감함과 동시에 사고 발생의 위험성을 최소화할 수 있다. 대부분의 항공우주 개발 산업체는 비행체의 형상설계, 인증뿐만 아니라 운항 시 발생한 사고 원인 분석까지 요구되는 전산 해석을 위해 자체의 슈퍼컴퓨팅 환경을 구축하여 운영하고 있다.

CFD와 항공기 안전

현대 항공우주 비행체 개발 과정에서는 요구사항 분석에서부터 설계, 시제기 제작, 시험·인증 단계까지 공기역학적 성능을 최적화하고 안전 요건을 준수하기 위해 CFD를 광범위하게 활용한다. 특히, 비행체의 형상설계 단계에서 CFD를 활용하여 각종 힘과 회전력 등을 정밀하게 계산하여 성능을 예측하고, 안전한 비행이 가능한지에 대한 수많은 사전 시뮬레이션을 반복하는 과정에 널리 활용된다.

한 예로, 보잉 787은 상당한 CFD 입력을 사용하여 설계된 여객기의 대표 사례이다. 보잉사는 CFD 기반 최적화를 사용하여 날개 본체 형상은 물론 엔진 흡입구 및 배기 시스템과 같은 시스템까지 미세 조정하여, 풍동 시험과 수정 횟수를 줄이면서도 공기역학적으로 효율적인 설계를 달성할 수 있었다. 또한 보잉 787에서는 중량을 줄이기 위해 가볍게 만든 날개가 구조적인 변형을 함으로써 발생하는 공탄성 효과와 함께 기내외 소음, 비행 안정성까지 설계 측면 전반에 CFD를 적용하였다. 이는 모든 공기역학적 기준(실속 여유와 제어 효율성과 같은 안전 관련 기준 포함)을 충족하는 데 CFD가 얼마나 광범위하고 적극적으로 활용되는지를 보여주는 것이다.

우리나라에서도 국산 전투기 KF-21, 무인 항공기, 우주발사체 개발 과정에서 광범위하게 CFD가 적용되고 있으며, 기술 자립의 수준이 높아질수록 자립 기술의 신뢰성을 확보하기 위해 CFD를 비롯하여 다양한 분야의 공학 소프트웨어를 활용하고 있다. 헬리콥터나 UAM과 같은 회전익기 체계 부문에서도 한 나라의 기술 자립 수준을 상징하는 통합 해석(Comprehensive Analysis) 소프트웨어가 사용되고 있으며, 국내에서도 다양한 분야의 해석 도구를 통합하는 연구개발이 진행되고 있다.



출처: Annual Review by MIT and Boeing: The Current State of CFD in Aerospace
<https://www.cax.do/t/annual-review-by-mit-and-boeing-the-current-state-of-cfd-in-aerospace/118>

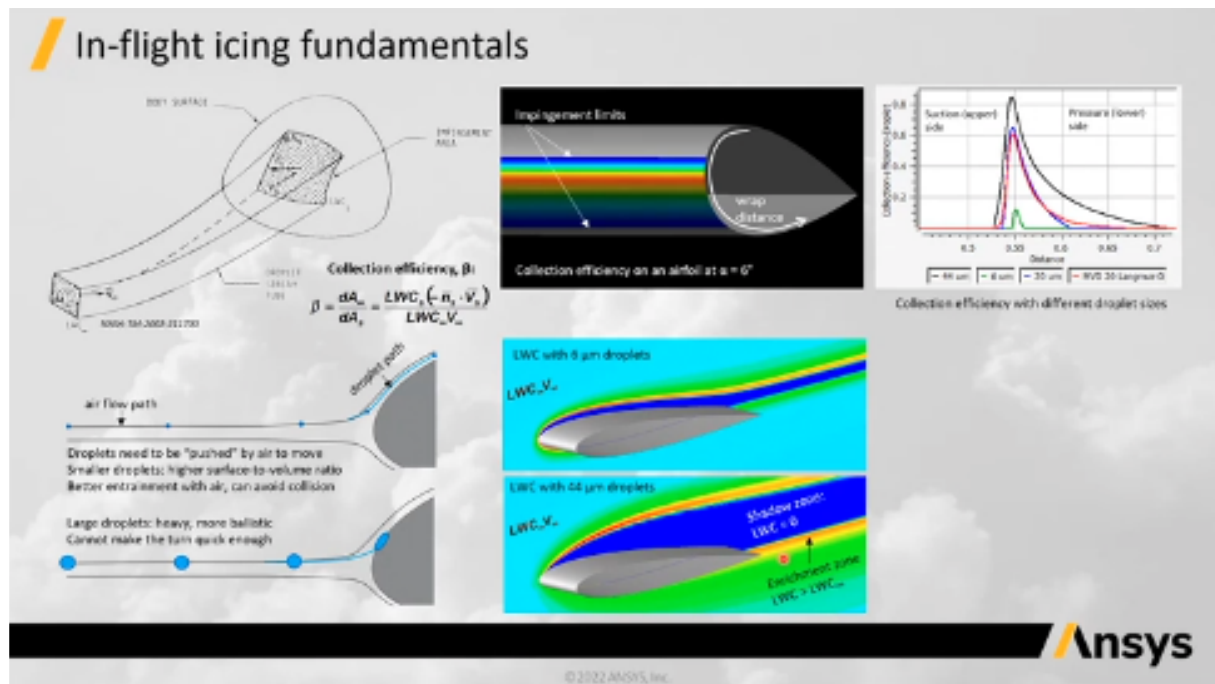
항공기 안전성 향상 사례

CFD는 다양한 방식으로 항공우주 비행체의 안전성 확보에 기여해 왔다.

핵심 활용 분야 중 하나는 높은 받음각(Angle of Attack)에서 실속(Stall)과 스핀(Spin)¹ 등 까다로운 비행 시나리오와 같은 비행 한계점에서의 특성을 분석하는 것이다. 최신 CFD 도구는 항공기가 실속에 가까워질 때 기류의 거동을 시뮬레이션하여 엔지니어가 주날개와 꼬리날개의 조종면을 설계하는 데 도움을 준다. 공기역학적 거동 및 하중에 대한 CFD 분석은 위험한 거동을 시뮬레이션에서 먼저 식별하고 완화할 수 있기 때문에 시험 조종사가 과거에 비해 불확실한 상황에 훨씬 덜 직면하게 도움을 줄 수 있다. 최근에는 실제 비행 조종의 세부 과정을 CFD 해석에 반영하여 현실에 더 가까운 상황을 모사할 수 있도록 유체/구조/비행 제어를 통합하여 한 번에 시뮬레이션하는 도전적인 연구개발이 선진국에서 계획되거나 진행 중이다.

CFD의 또 다른 중요한 안전 관련 활용 분야는 항공기 착빙(Icing; 날개, 엔진, 센서에 얼음이 발생하여 부착되는 현상) 시뮬레이션이다. 비행 중 착빙은 역사적으로 항공 안전에 심각한 위협이 되어 왔으며, 수많은 사고의 원인이 되어 왔다. CFD 기반 착빙 코드(예: Ansys FENSAP-ICE)를 통해 엔지니어는 착빙이 어디에서 어떻게 발생할지 예측할 수 있다.

¹ 공기 흐름과 비행체의 자세각이 이루는 각도인 받음각이 높을 때 흐름이 표면에서 분리됨으로써 원하는 양력과 회전력을 상실하게 되어 조종 불능 상태에 진입할 수 있다.



출처: NASA Advanced Supercomputing(NAS)
<https://www.nas.nasa.gov/pubs/ams/2022/09-29-22.html#:~:text=In,on%20aircraft%20under%20different%20icing>

이러한 시뮬레이션은 제빙 및 방빙 시스템 설계를 지원하고, 얼음이 다소 쌓이더라도 항공기가 안전하게 비행할 수 있도록 보장한다. 규제 기준은 특정 항공기가 규정된 양의 얼음 부착(얼음 보호 시스템 고장 시)에도 안전 비행이 가능해야 한다고 규정하고 있으며, 이는 얼음으로 인한 공기역학적 손실을 신뢰할 수 있게 예측해야 한다는 것을 의미한다. CFD를 사용하여 얼음의 성장과 양력 및 항력에 미치는 영향을 모델링함으로써, 제조업체는 위험한 결빙 조건에서 실제 항공기를 위험에 빠뜨리지 않고 결빙 안전 요건을 준수함을 입증할 수 있다.

CFD에서 소프트웨어의 중요성

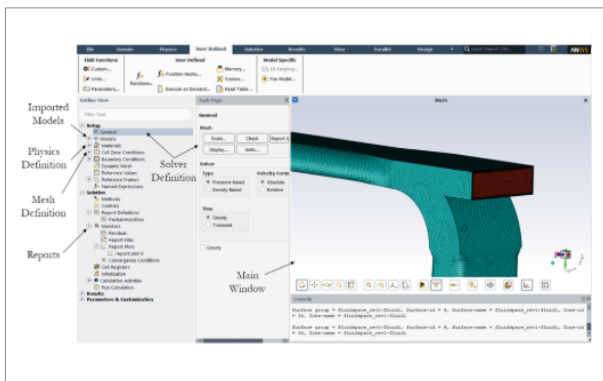
항공기 안전 확보에 있어 CFD의 힘은 이러한 복잡한 시뮬레이션을 수행하는 소프트웨어와 본질적으로 연결되어 있다. 지난 수십 년 동안 CFD 소프트웨어는 성능과 신뢰성 모두에서 극적인 발전을 이루어 왔다. 고성능 컴퓨팅(HPC)과 수치 알고리즘의 발전으로 CFD는 초창기보다 훨씬 정확하고 실용적으로 발전했다. 최신의 CFD 코드는 Navier-Stokes 방정식²을 수십억 개의 공간 격자점에서 해석할 수 있는데,

² 유체 흐름에 관한 물리적 법칙과 난류, 공기 압축 등 특정한 현상을 모사하기 위한 물리학 모델링을 표현한 3차원 편미분 방정식

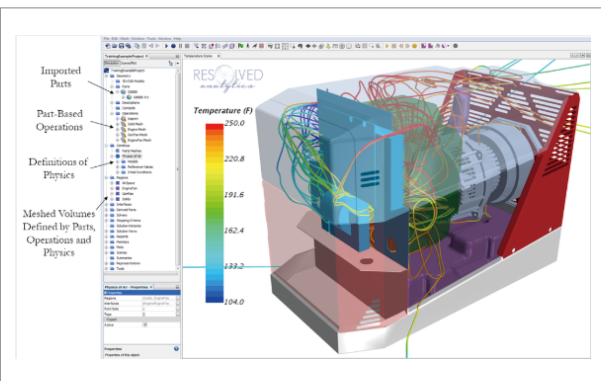
이는 오늘날의 컴퓨팅 성능과 고도로 최적화된 IT 기술 없이는 불가능한 일이다. 비정형 메시 생성, 적응형 메시 미세 조정, 고차 이산화 수치 기법과 같은 기술적 기능은 복잡한 항공기 형상에 대한 시뮬레이션의 충실도를 향상시켰다. 최근에는 CPU 기반의 수치해석 기법에서 GPU를 적극 활용하여 계산 시간을 획기적으로 절감하는 방향으로 추세적으로 옮겨가고 있다. 또한, 해석에서 발생하는 빅데이터(Big Data)를 학습자료화하여 CFD를 보완하는 CFD-AI에 대한 연구가 급속히 확대되고 있다.

이와 관련한 상용 CFD 소프트웨어 또한 지속적으로 발전하고 있고, 그 활용 영역을 넓히고 있다. 공기역학뿐 아니라, 하나의 통합 패키지 소프트웨어 내에 다양한 기능(다상 유동, 열 전달, 유체-구조 상호작용, 음향학 등)을 포함하고 있다. 이러한 기능은 항공기 안전 문제가 종종 서로 연관된 현상(예: 엔진 나셀의 공기 흐름과 결빙 또는 화재 방지를 위한 열 전달)과 연관되기 때문에 중요하다. 이러한 소프트웨어 패키지에 내장된 광범위한 물리 라이브러리와 모델링 옵션은 수십 년에 걸친 개발의 결과물이며, 심층 분석을 가능하게 하는 소프트웨어의 분명한 예이다.

■ 그림 1 - ANSYS Fluent



■ 그림 2 - Siemens Simcenter STAR-CCM+



출처: RESOLVED ANALYTICS

(<https://www.resolvedanalytics.com/theflux/comparing-cfd-software-part-4-comprehensive-cfd-software-packages#:~:text=STAR,radiation%2C%20reacting%20flows%20and%20motion>)

CFD 소프트웨어 자체의 신뢰성과 검증 또한 중요하다. 엔지니어와 규제 기관은 안전에 중요한 결정을 내리기 위해 CFD 결과에 많은 영향을 받기 때문에, 코드 검증과 결과 검증을 거쳐야 한다. 여러 코드를 교차 비교하기도 하고, 풍동 데이터와 비교하는 등의 과정을 거친다. 또한 EASA나 NASA 등 규제 기관은 인증에 사용되는 모든 시뮬레이션 소프트웨어의 적합성에 대한 증거를 공식적으로 요구하기 시작했다. 2020년 EASA는 모델링 및 시뮬레이션 사용에 대한 인증 메모랜덤(EASA Proposed CM No.: CM-S-014 Issue 01)을 발표함에 따라, CFD 소프트웨어 개발사는 CFD 도구가 충분히 검증되었음을 입증하도록 의무화했다.



B.4. Computational Fluid Dynamics

- All items mentioned in Appendix A should be checked for correctness and consistency;
- Examination of iterative convergence of the solution of the flow equations, by monitoring the residuals and the relative changes of integral quantities (such as lift and drag), and check if the prescribed tolerance is attained;
- Examination of mesh/grid resolution, including:
 - Acceptable height of first grid cell on no-slip wall;
 - Sufficient number of cells in boundary layer and in areas with geometric “non-smooth” features and/or large flow gradients
 - Spatial (grid) convergence, by changing the number of grid points and check for convergence - for example by determining the grid convergence index (ref. 22);
- Examination of mesh quality:
 - Minimum number of required mesh points in regions of large flow gradients;
 - Acceptable amount of cell distortion, cell stretching and cell type transition (skewness, smoothness, aspect ratio);
- Examination of solution consistency, by checking if the relevant applicable conservation principles (mass, momentum, energy) are satisfied;
- Examination of temporal convergence, by changing the time step and check for convergence;
- Comparison of results obtained with other CFD programs.

출처: EASA Proposed CM No.: CM-S-014 Issue 01, Modelling & Simulation - CS-25 Structural Certification Specifications, p.51

실제로 이는 기업이 CFD를 사용하여 항공기의 감항성을 인증할 때 규정의 이론적 근거, 검증 기록 및 오차 범위를 문서화해야 함을 의미한다. 소프트웨어와 이를 개발하고 사용하는 사람들은 해당 소프트웨어의 예측이 안전에 중요한 평가에 신뢰할 수 있음을 입증해야 할 책임이 있다. 소프트웨어 무결성에 대한 이러한 중요성의 증가는 우수한 CFD가 단순히 유체역학만을 의미하는 것이 아니라, 이면의 견고한 소프트웨어 엔지니어링 및 검증 프로세스와도 관련이 있음을 보여준다.

더불어 항공우주 비행체는 국방과 밀접한 연관을 가지고 있기 때문에 많은 경우 폐쇄적인 보안 환경을 요구한다. 이 때문에 방위산업체나 국방 관련 연구소는 자체의 폐쇄적인 컴퓨팅 환경과 데이터 보안에 각별한 유의를 기울인다. 반면, 비행체 개발 기술이 고도화됨에 따라 서로 다른 기관의 데이터를 공유할 필요성 또한 증대되고 있다. 따라서, 물리적 보안뿐만 아니라 소프트웨어 자체와 파생 데이터의 보안을 확보하기 위한 관련 IT 기술 또한 핵심 이슈가 되고 있다.

안전 확보 관점에서의 CFD

고도화된 CFD 소프트웨어는 고정밀 공기역학 분석과 광범위하고 다양한 가상 시나리오를 탐색하는 데 탁월한 장점을 가지고 있지만, 무엇보다 강조되어야 하는 장점은 CFD를 통한 설계 검증 및 사고 예방이라 할 수 있다. CFD가 항공기 제조 과정 전반에 걸쳐 안전 기준을 충족함을 입증하는 핵심 요소이기 때문이다.

특히 인증 획득에서는 CFD 해석을 통해 최악의 하중을 파악한 후 날개 또는 동체 부분에 대한 물리적 정적 및 피로 시험을 수행하는 경우가 많고, 이는 물리적 시험을 구체적이고 의미 있게 만든다. CFD는 또한 사고 조사 및 안전 개선에도 적극 활용되고 있다. 항공기의 비정상적인 거동(후류 난류 조우나 엔진 고장 등)이 발생할 때마다 기류를 재현하고 설계 또는 운영상의 변경이 필요한지 확인하기 위해 CFD 연구가 적용된다. 이러한 시너지 효과는 풍동 또는 비행 시험의 취약한 부분을 보완함으로써 비행체 안전성 향상에 기여할 수 있다.



출처: Applus Laboratories(<https://www.appluslaboratories.com/global/en/what-we-do/service-sheet/aerospace-structural-testing>)

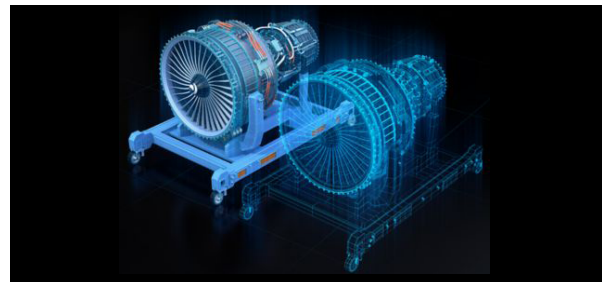
미래 전망: 향상된 비행체 안전을 위한 소프트웨어 기술

앞으로 소프트웨어와 컴퓨팅 기술의 발전에 따라 CFD가 항공기 안전을 위한 강력한 도구가 될 것으로 기대한다. 주요 기술 중 하나는 CFD에 인공지능(AI)과 머신러닝(ML)을 융합하는 것이다. 기존의 CFD 연구 방법은 주요 매개변수(예를 들어 항공기의 자세각)에 따른 항공기의 성능 변화를 탐색하는 방식이었으나, 매개변수에 따른 해석 정보를 학습한 AI/ML 방법을 통해 새로운 형상에서의 변화를 신속하게 예측할 수 있다. 또한, 데이터 기반 접근 방식을 통해 공기역학에서 사용하는 여러 물리 모델을 개선하여 해석의 정확도를 향상시키는 데 활용하고 있다.

최근에는 GPU 가속기와 클라우드 컴퓨팅을 기반으로 하는 CFD가 부상하고 있으며, 이를 통해 대규모 시뮬레이션을 빠르게 실행할 수 있다. GPU 하드웨어와 AI를 결합하여 이전에 필요했던 시간보다 훨씬 짧은 시간에 정밀한 공기 흐름 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 빠른 처리 속도와 높은 충실도 덕분에 엔지니어는 인증 과정에서 더 많은 시나리오(희귀 또는 극한 상황 포함)를 시뮬레이션할 수 있어 안전 적용 범위가 확대된다. 클라우드 컴퓨팅은 CFD 해석에 필요한 컴퓨팅 하드웨어와 소프트웨어 라이선스 비용을 감당하기 어려운 중소 산업체가 필요시 활용할 수 있는 가능성을 크게 높여 주고 있다.

또 다른 분야는 디지털 트윈(Digital Twin)이라는 개념에서 CFD와 실시간 모니터링을 결합하는 것이다. 디지털 트윈은 실제 항공기 또는 시스템의 소프트웨어 복제본으로, 운영 데이터를 지속적으로 수신하고 성능을 시뮬레이션한다. 항공사와 엔진 제조업체들은 이미 디지털 트윈을 도입하여 운영하고 있다.

GE Aviation은 수백만 시간의 비행 데이터를 기반으로 엔진의 디지털 트윈을 활용하여 정비 필요성을 예측하고 비행 중 고장을 사전에 방지한다. 엔진의 디지털 트윈은 센서 입력을 사용하여 공기 흐름과 열 상태를 실시간으로 시뮬레이션하여 안전하지 않은 상황을 예측하고, 예측 정비를 가능하게 하여 고장으로 이어지기 전에 문제를 파악하고 해결할 수 있도록 지원한다. 미래에는 CFD 기반 공기역학 및 열 관리 모델을 구조 및 제어 시스템 모델과 함께 통합하여 운항 중 전체적인 실시간 안전 보장 도구를 제공하는 완전한 항공기 디지털 트윈을 기대할 수 있다.



출처: ANSYS(<https://www.ansys.com/ko-kr/applications/hybrid-analytics>)

소프트웨어 기반의 기술 융합을 통한 안전성 확보: 항공우주산업의 글로벌 경쟁력 강화

정교한 소프트웨어로 뒷받침되는 전산유체역학은 설계부터 운영까지 항공우주 비행체의 안전 보장에 주요한 초석이 되어 왔다. 비행체에 요구되는 엄격한 안전 기준을 충족하고 잠재적 문제를 조기에 발견할 수 있도록 도움으로써 항공우주산업의 경쟁력 강화에 기여해 왔다. 지속적인 연구와 검증 노력, 그리고 컴퓨팅 도구에 대한 투자는 항공우주산업의 엄격한 안전 기준을 준수하면서 비행 성능의 한계를 끊임없이 확장하는 데 필수적인 인프라가 될 것이다. 이러한 노력을 통해 국산의 항공우주 비행체가 신속하게 시장에 출시되고, 실시간 안전 확보를 바탕으로 운항되는 미래상을 실현할 수 있을 것이다.

드론으로 대표되는 무인 항공기, 재사용 우주 발사체, 항공 엔진 개발 등 항공우주 비행체의 국산 개발이 확대됨에 따라, 설계 신뢰도를 높여 주는 전산유체역학의 수요는 크게 증대될 수밖에 없다. 특히, 항공우주 안전 분야에서 CFD 기술의 역할은 더욱 커질 것이다. 전산유체역학은 초기 설계 및 성능 검증의 영역을 넘어 소프트웨어를 통한 시뮬레이션 기반 인증 및 사전 예방적 안전 관리라는 비전을 향해 꾸준히 나아갈 것이다.

CPU/GPU 기반 고성능 컴퓨팅 기술, 빅데이터 가공 기술, AI 활용 기술 등 최신의 IT 기술과의 융합은 전산유체역학 해석 기술의 혁신을 가져올 것이라 예상된다. 반갑게도, CFD를 비롯한 공학 소프트웨어에 최신의 IT 기술을 접목하여 상용화를 시도하는 국내 전문기업체가 출현하고 있다. 전산유체역학의 국내 학계 연구 수준에 비해 CFD 소프트웨어의 상용화 정도가 낮은 현실에서, 항공우주산업체 요구를 반영한 국산 상용 소프트웨어 개발이 가능하도록 산학연의 협력이 절실하다. 공학 소프트웨어의 잠재력에 주목한 IT 기술 보유 전문기업체가 구체적인 성과를 얻을 수 있도록 정부의 제도적 지원과 항공우주산업계의 협력을 간절히 소망한다.