

목 차

제1장_서론.....	03
제2장_전문가 설문조사.....	07
제3장_연구동향(논문) 분석.....	35
제4장_6대 핵심분야별 로드맵	47
제5장_제언.....	65
제6장_결론	73

KVISION CFD 2040

로드맵 수립 보고서



제 1 장
서론

제 1 장 서론

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 디지털 컴퓨팅 기술의 발전과 함께 비약적인 성장을 이룬 대표적인 시뮬레이션 기반의 과학·공학 분야이다. 항공우주, 기계, 조선해양, 원자력, 반도체, 에너지, 바이오 등 거의 모든 산업과 학문 영역에서 CFD는 핵심적인 시뮬레이션 도구로 자리잡고 있으며, 복잡한 물리 현상의 예측과 최적 설계에 있어서 실험적 접근을 보완하거나 대체할 수 있는 기술로 그 중요성이 날로 부각되고 있다.

특히 최근에는 고성능컴퓨팅(HPC), 인공지능(AI), 디지털 트윈(Digital Twin), 그리고 양자컴퓨팅(Quantum Computing) 기술과의 융합을 통해 CFD는 단순한 분석 도구를 넘어 예측 기반 설계, 실시간 운영 판단, 다중물리 시스템 최적화 등으로 그 활용 영역을 급속히 확장하고 있다. 이에 따라 전통적인 난류 해석이나 열전달 문제뿐만 아니라, 다상유동, 비평형 유동, 연소, 멀티스케일 해석 등 그간 복잡도가 높아 접근하기 어려웠던 문제들까지도 CFD의 적용 대상이 되고 있으며, 이를 해결하기 위한 기술적 진보 또한 절실히 요구되고 있다.

미국은 이미 약 10년 전인 2014년부터 미국 항공우주학회(AIAA) 주도로 “CFD Vision 2030” 로드맵을 수립하여 고정확도 시뮬레이션, 자동화된 격자 생성, LES/DNS 기반의 정밀 해석, AI 활용 모델링, 그리고 고성능 연산 자원의 활용 확대를 주요 방향으로 제시해왔다. 이후에도 NASA는 이 로드맵을 지속적으로 업데이트하며, 전략적 기술 투자를 통해 CFD를 2030년 이후 항공우주 설계와 운용의 핵심 도구로 발전시키고 있다.

이에 비해, 한국은 인공지능, 반도체, 양자컴퓨팅, 모빌리티, 에너지 등 국가 전략 기술 분야에서는 명확한 기술로드맵이 수립되어 있으나, 아직까지는 CFD가 이러한 분야에 활용되는 “부수적 도구”로 간주되고 있어 독립적인 기술 로드맵조차 부재한 실정이다. 그러나 국내 산업의 복잡성과 기술적 수준, 그리고 학문적 기반을 고려할 때, 한국형 CFD 기술의 자립성과 미래지향적 비전 수립은 산학연 각 분야의 전문가 집단에서는 이미 오래 전부터 시급한 과제로 인식되어왔다.

국내 CFD 생태계는 해외와는 다른 특성과 구조를 갖고 있다. 상용 소프트웨어에 대한 높은 의존성, 자체 코드 개발 인력의 부족, 고성능 계산 자원에 대한 접근성 제한, 그리고 오픈소스 소프트웨어 활용의 미비 등이 주요 특징이며, 이는 단순한 기술 도입이 아니라 국내 상황에 적합한 맞춤형 로드맵 수립이 필요한 이유이기도 하다.

이에 한국전산유체공학회(한국형 CFD 기술의 장기적 발전 비전과 로드맵을 수립하고자 “KVISION CFD 2040” 수립 과제를 기획하였다. 본 보고서는 그 일환으로, 국내 산학연 전문가 집단 중 CFD 사용자 및 개발자를 대상으로 대규모 설문조사를 수행하여 CFD 사용 현황과 요구 사항을 정량적으로 분석하고 현 시점에서의 국내 CFD 활용 역량에 대한 진단과 수요를 구체화한다. 또한 최근 20년간의 논문을 분석하여 최신 연구동향을 파악한 후, 이를 통해 6대 주요 응용 분야(기계, 항공우주, 조선해양, 원자력, 인공지능, 고성능컴퓨팅)에 대한 기술 로드맵을 제시하였다. 나아가 해외의 CFD 비전 로드맵과 비교 분석함으로써 향후 국내 기술 개발이 나아가야 할 장기적 방향을 정립하고자 하였다.

각 분야별 로드맵은 물리 모델링, 알고리즘, 자동화, 병렬화, 데이터 기반 해석, 인공지능 융합 등으로 세분화하여 2040년까지 단계적인 기술 발전 목표를 제시하고 있으며, 특히 디지털 트윈 구현, Physics Informed Neural Network (PINN) 기반 난류 모델링, 고속 격자 생성 기술, CFD-AI 통합 플랫폼 등은 향후 핵심 기술로 강조되고 있다.

본 보고서의 구성은 다음과 같다.

제2장에서는 전문가 설문조사 결과에 대한 통계적 분석을 통해 국내 CFD 기술의 현황과 요구사항을 제시하며, 제3장에서는 국내외 논문 분석을 통해 CFD 연구의 흐름과 미래 이슈를 진단하였다. 제4장에서는 기계, 항공, 조선해양, 원자력, AI, HPC 등 분야별 특성과 기술 수요를 반영한 2040년까지의 기술 로드맵을 제시하며, 제5장에서는 향후 연구개발 및 정책 제언을 통해 실질적인 발전 전략을 도출하였다. 마지막 제6장에서는 본 보고서의 핵심 내용을 요약하고 향후 추진 방안을 제시한다.

이러한 통합적인 로드맵은 정부, 산업계, 학계가 공동으로 공유하고 실천할 수 있는 기반 자료로 활용될 수 있으며, 향후 국가 전략기술 수립에 있어 CFD 기술의 중요성을 인식하고 자원과 인력을 투자할 수 있는 명확한 근거를 제공할 것이다. 나아가, 한국형 CFD 기술의 자립과 글로벌 경쟁력 확보를 위한 첫걸음으로서 그 의의가 매우 크다고 할 수 있다.



제 2 장
전문가 설문조사

제 2 장
전문가
설문조사

국내 CFD 기술의 현재 수준과 향후의 연구 방향을 진단하기 위해 설문조사를 실시하였다. 본 설문은 전문가들의 폭넓은 의견을 수렴하고 KVISION 2040의 비전과 연계된 연구 방향을 구체화하는 것에 주된 목적이 있다. 이를 위해 설문 문항은 객관식과 주관식을 혼합하여 구성하였으며, 구체적인 설문지의 예시는 Fig.2.1에 제시되어 있다.

설문은 다음과 같은 네 가지 주요 주제에 초점을 맞추었다. 첫째, 현재 사용 중인 CFD 소프트웨어 및 프로그래밍 언어에 대한 현황을 조사하였다. 둘째, CFD 기술의 응용 분야와 주요 활용 사례를 분석하였다. 셋째, 현재 CFD 기술이 직면한 주요 난제와 이를 해결하기 위한 기술적 요구사항을 도출하였다. 넷째, 향후 연구 방향 및 협업을 위한 핵심 주제를 설정하였다. 이와 같은 체계적 구성은 CFD 기술의 연구적 발전과 산업적 수요를 종합적으로 이해하고, 중장기적 비전 실현을 위한 방향성을 제시하는 데 중점을 두고 있다.

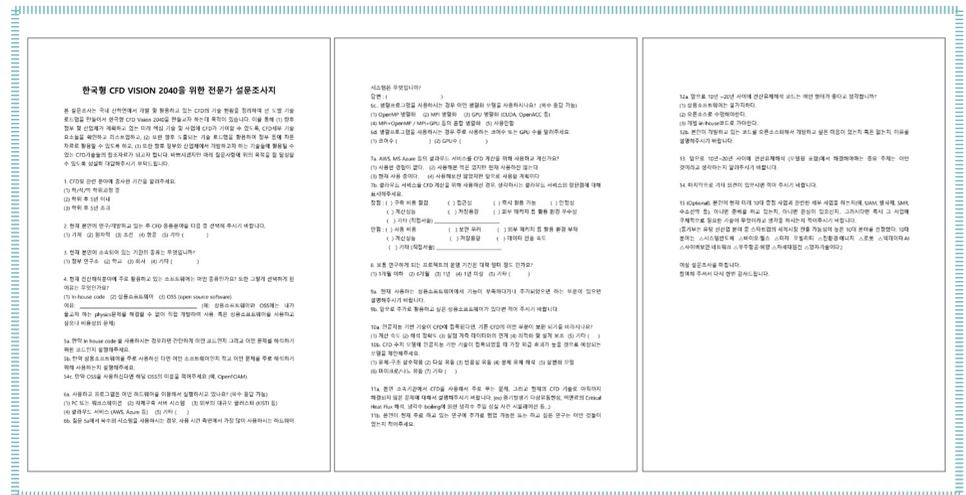


Fig. 2.1 KVISION 2040을 위한 CFD 전문가 설문조사지 양식

설문조사는 학계, 연구소, 산업체 등 다양한 분야의 CFD 전문가 약 100명의 응답자를 대상으로 진행되었다(Fig. 2.2). 응답자는 대학교수, 연구소 연구원, 산업체 전문가로 구성되어, CFD 전산유체역학 분야의 다양한 관점을 포괄적으로 반영하고자 하였다. 응답자들의 연구 경력을 살펴보면, 약 70%가 박사학위 취득 후 10년 이상의 경력을 보유하고 있어, 설문 데이터가 경험 많고 숙련된 전문가들로부터 수집되었음을 확인할 수 있다. 소속기관 분포를 보면, 대학교 소속 응답자가 55%로 가장 많았으며, 연구소는 25%, 산업체는 20%를 차지하였다. 이는 학술연구 중심의 CFD 적용과 함께 실무적 활용 및 산업계의 요구를 동시에 반영하고 있다는 점에서 균형 잡힌 데이터 수집이 이루어졌음을 시사한다. 또한 응답자들의 연구 분야는 항공우주, 기계, 조선 및 해양, 에너지 및 원자력 등으로 매우 다양하게 나타났다. 이처럼 다양한 분야의 전문가들이 참여한 설문조사는 CFD 기술이 학문적 연구를 넘어 산업계의 실질적인 문제 해결에 중요한 역할을 하고 있음을 강조한다. 이러한 응답자 구성은 CFD 분야의 현재 트렌드와 향후 연구 방향을 이해하는 데 귀중한 통찰력을 제공할 수 있음을 의미한다. 이는 또한 CFD가 학술적 깊이와 실용적 적용성을 모두 겸비한 분야로 성장하고 있음을 보여준다. 특히 ENGYS와 같은 오픈소스 개발 업체가 해외에서 실시한 설문조사 결과와의 비교 분석도 진행하였는데, 해외 설문조사에서도 다양한 산업체 분야의 의견이 반영되었음을 역시 그림에서 확인할 수 있다.

프로젝트 운영 기간에 대한 분석 결과(Fig. 2.3), 국내에서는 대부분의 연구가 1년 이상의 기간으로 진행되고 있다. 이는 정부 과제의 운영 기간이 대체로 1년에서 3년 이하로 설정되기 때문으로 보인다. 1년 또는 6개월 정도의 단기 과제도 전체의 약 35%를 차지하며, 상당한 비중을 차지하고 있다. 특히 산업계와 연관된 연구 과제의 경우, 단기간 내에 실질적인 성과를 창출하기 위해 대부분 1년 미만으로 운영되고 있는 것으로 나타났다. 한편 해외의 경우, 프로젝트 운영 기간이 월 또는 주 단위로 설정되는 사례가 많다. 이는 기업 주도의 단기 과제가 주를 이루기 때문으로 해석된다. 그러나 해외에서는 운영 기간이 정해지지 않고 지속적으로 수행되는 과제도 약 25%에 이르러 주목할 만하다. 이는 국내와는 다른 운영 방식을 보여주며, 장기적이고 유연한 프로젝트 운영이 일부 이루어지고 있음을 시사한다.

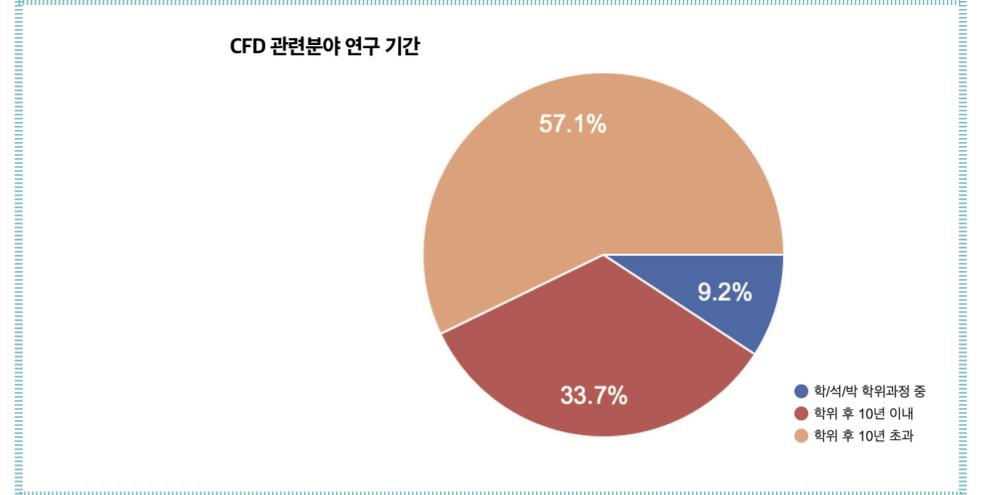
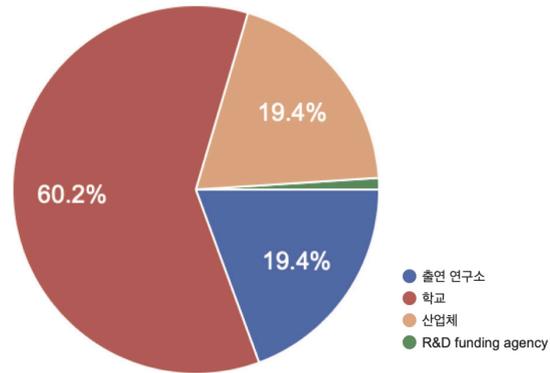
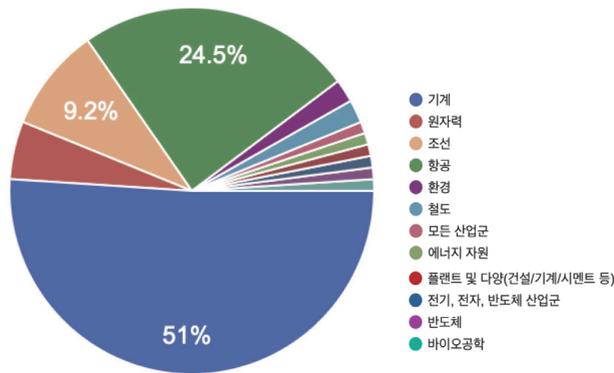


Fig. 2.2 전문가 설문 참여자들의 경력, 소속기관 유형 및 응용분야 분포

소속 기관



주 CFD 응용분야_국내



주 CFD 응용분야_해외

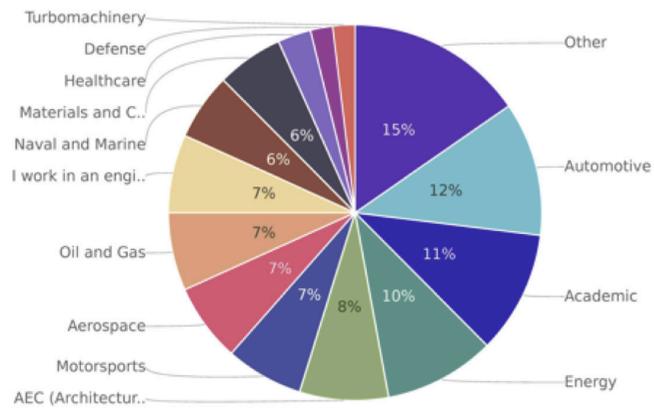
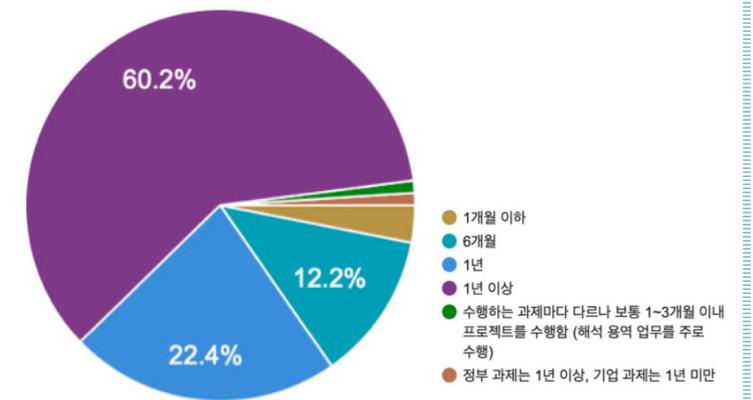


Fig. 2.2 전문가 설문 참여자들의 경력, 소속기관 유형 및 응용분야 분포

프로젝트 운영기간_국내



프로젝트 운영기간_해외

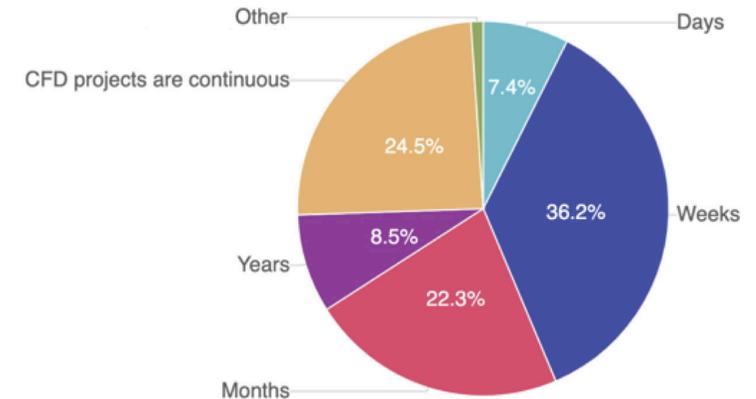


Fig. 2.3 CFD 관련 프로젝트 운영기간 분포

응답자들이 주로 사용하는 소프트웨어에 대한 분석 결과는 Fig. 2.4에서 확인할 수 있다. 국내에서는 상용 소프트웨어의 사용 비중이 매우 높게 나타났다. 주요 사용 이유는 사용 편의성이 가장 크게 작용하는 것으로 분석되었다. 이와 함께 In-house 코드 역시 여전히 상당수 활용되고 있는 것으로 파악되었다. 해외의 경우 In-house 코드 사용이 압도적으로 많았는데, 이는 오픈소스 소프트웨어(OSS)가 In-house 코드로 구분되었기 때문으로 보인다. 그럼에도 불구하고 국내에서 상용 소프트웨어에 더 많은 의존성을 보이는 점은 주목할 만한 결과이다. 국내에서 가장 많이 사용되는 상용 소프트웨어는 ANSYS FLUENT가 압도적 비중을 차지하였고, 그 뒤를 이어 STAR-CCM+가 주요 소프트웨어로 사용되었다(Fig. 2.5).

이들 소프트웨어는 편리한 사용자 인터페이스와 강력한 물리 모델 지원 덕분에 복잡한 형상 해석, 난류 및 다상 유동 등 다양한 응용 분야에 널리 활용되고 있다. 특히 이 두 소프트웨어가 전체 사용의 80% 이상을 차지하여, 국내의 상용 소프트웨어 의존도와 함께 특정 소프트웨어에 대한 집중도가 매우 높은 것으로 나타났다.

상용 소프트웨어의 주요 활용 분야는 다음과 같다.

상용 소프트웨어의 주요 활용 분야	단상 및 열유동 해석	단상 난류 유동 해석, 복합 열유동 해석, 열교환기, 극저온, 배터리 열관리, 연료전지 및 미세 열유동 등
유체기계 및 산업 장비	로터, 모터 냉각, 가스터빈, 회전체 운동, 히트 싱크, 펌프, 팬, 베어링, 반도체 장비 및 원자로 냉각 시스템 해석	
항공 및 선박 분야	공력 형상 설계, 드론 블레이드, 회전익 공력 및 소음 해석, 에어포일 성능 해석, 선박 저항/자항/운동 해석, 슬로싱 및 내부 HVAC 유동 해석	
다상 및 입자 유동 해석	CFD-DEM Coupling, 입자 유동(청소기 입자 유동), 액체 및 기체 다상 유동 해석	
연소 및 환경 해석	반응기, 가스 혼합 유동, 공기질 해석, 수소 유동 해석	
철도 및 지하공간	철도 차량-터널 해석, 지하 공간 환기 및 방재	
제품/공정 해석	진공 압착, 유동 균일도 및 혼합도, 주조 유동, 저류 유동	
기타 분야	생체 유동 해석, 1차원 유동망 해석, 동적 운동이 포함된 유동장 해석 등	

이와 같이 상용 소프트웨어는 다양한 산업적 요구를 충족하며, 복잡한 실제 형상과 물리 현상을 해석하는 데 있어 중요한 역할을 하고 있다.

국내 In-house 코드 활용 현황을 살펴보면, 여전히 대부분이 Fortran 기반 코드 50% 이상을 사용하고 있는 것으로 나타났다. 그 다음으로는 C 언어가 많이 활용되었으며, Python의 경우 최근 인공지능 AI 기술과의 접목을 통해 활용 빈도가 점차 증가하고 있는 추세를 보였다(Fig. 2.6).

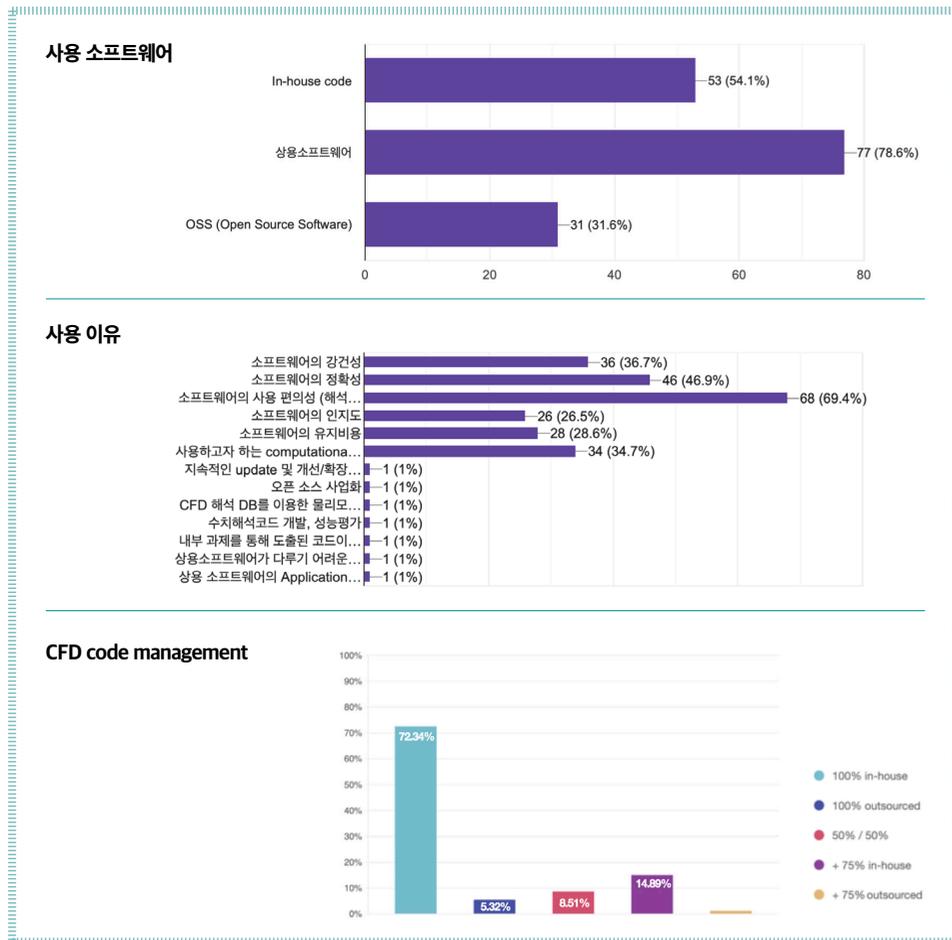


Fig. 2.4 사용하는 CFD 소프트웨어 종류 및 주요 이유

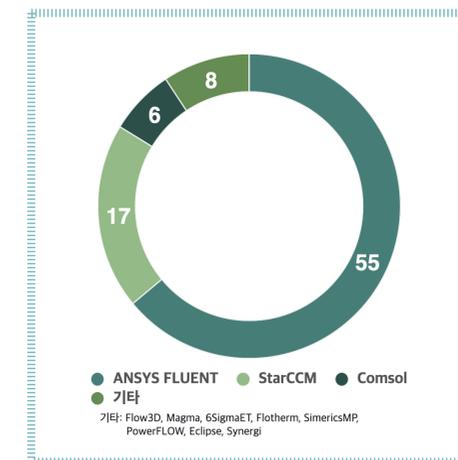


Fig.2.5 상용소프트웨어 종류

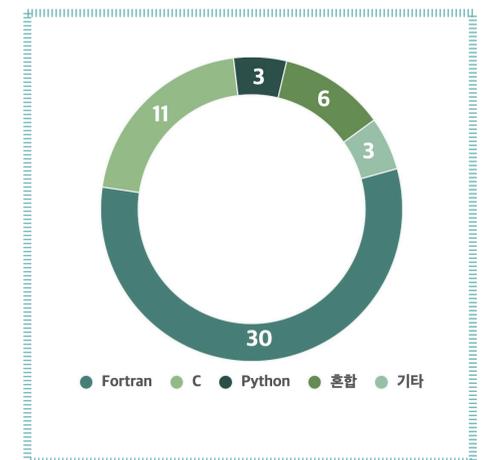


Fig.2.6 In-house 코드 사용언어

In-house 코드는 다음과 같은 다양한 분야에 활용되고 있다.

In-house 코드가 활용되는 분야

공력 해석	항공우주 형상 설계, 회전익/비행체의 공력 및 소음 해석, 고속 공기역학 등
난류 해석	DNS, wall-bounded flow, 압축성 및 초음속 유동 해석
다상 상경계 유동	열전달, 액적 충돌, 기포 거동, 연성 구조 해석 등
연소 해석	초임계 유동, 가스터빈 및 극초음속 연소
환경 유체역학	도심 풍환경, 풍력 터빈 해석, 공기질 제어 등
유체-구조 연성	CFD/CSD coupling, 철도 차량-터널 상호작용
생체 유체 해석	혈류 역학, 호흡기 모형 해석
원자력 및 에너지 분야	상변화 2상 유동, 원자로 안전 해석, Wave Energy Converter
산업 응용	반도체 장비 해석, 사출 성형, 주조 유동, 유체 충격 및 고체 파단 해석
특수 유동	플라즈마 해석, 이상 유동 분석 및 시스템 안전 해석

이처럼 In-house 코드는 상용 소프트웨어와는 달리, 특정 물리적 문제와 고유 연구 목적에 맞춤화되어 활용되고 있다. 특히 난류, 다상유동, 연소, 유체-구조 연성 등 고도로 특화된 해석 분야에서 중요한 역할을 하고 있으며, 다양한 산업 및 연구 분야에 걸쳐 그 적용 범위가 넓음을 확인할 수 있다. 오픈소스 소프트웨어^{OSS}로는 OpenFOAM과 SU2가 주로 활용되고 있다^{Fig. 2.7}. OpenFOAM은 무료 사용과 소스코드 접근성이 강점으로, 국내에서도 사용자 커뮤니티가 점차 활성화되고 있다. 다만, 사용자 친화적 인터페이스 부족으로 인해 초기의 진입장벽이 상대적으로 높다는 단점이 있다. SU2는 주로 항공우주 분야의 압축성 유동 해석과 고속 영역 시뮬레이션에 활용되고 있다. 오픈소스 소프트웨어의 주요 적용 분야는 다음과 같이 요약된다.

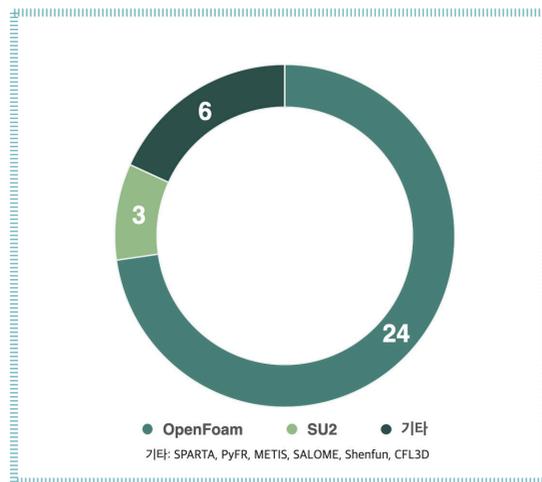


Fig.2.7 오픈소스 CFD 종류

오픈 소스 소프트웨어의 주요 적용 분야

공력 및 항공 분야	초음속 및 극초음속 유동, 공력 데이터베이스 생성, 최적 설계, 로터 및 Inflight icing 해석
풍력 및 선박 분야	Wind turbine 해석, 선박 외부 유체역학 및 내부 HVAC 유동 해석
다상유동 및 열수력	수전해, 원자로 시스템 2상유동 해석, 다물리 현상 해석
난류 해석	천이 및 경계층 해석, 모델 개발
특수 유동 해석	희박 유동 해석, CFD-인공지능(AI) 응용

상용 소프트웨어는 초기 학습 용이성과 강력한 기술 지원이 장점으로 꼽히지만, 높은 라이선스 비용이 큰 단점으로 언급되었다. 반면, 오픈소스 소프트웨어는 코드 수정과 확장 가능성 및 경제적 효율성에서 강점을 보이지만, 진입 장벽이 높고 기술 지원이 부족하다는 한계가 있다. 이와 같은 장단점으로 인해 연구자들은 필요에 따라 상용 소프트웨어와 오픈소스 소프트웨어를 병행하여 활용하고 있는 것으로 나타났다. 해외의 경우에도 ANSYS FLUENT와 STAR-CCM+가 주로 활용되며, 오픈소스 소프트웨어로는 OpenFOAM이 가장 많이 사용되는 것으로 확인되었다^{Fig. 2.8}.

국내 연구자들이 상용 소프트웨어에 높은 의존도를 보이는 이유는 사용자 친화적 인터페이스와 강력한 기술 지원 덕분이다. 이러한 장점은 초기 연구자나 산업체가 시뮬레이션을 빠르게 활용하는데 도움이 되지만, 비용 부담이 크고 특정 기능의 확장이 어렵다는 한계도 존재한다. 반면, 오픈소스 소프트웨어는 비용 효율성과 코드 수정 가능성이 높아 유연성이 뛰어나지만, 숙련된 사용자의 부족이 국내에서는 여전히 큰 장애 요소로 작용하고 있다.

해외와 비교했을 때, 국내 연구는 여전히 상용 소프트웨어 중심의 접근 방식을 보이지만, 오픈소스 활용에 대한 관심이 꾸준히 증가하고 있는 추세다. 이는 연구비 절감과 기술 자립이라는 목표를 달성하기 위한 전략적 선택으로 해석된다. 앞으로 국내 연구자 간의 커뮤니티와 협업이 강화된다면, 오픈소스의 효율적 활용과 자체 코드 개발이 더욱 활성화될 가능성이 높다. 이를 통해 연구자들은 산업적·학문적 요구에 최적화된 맞춤형 솔루션을 개발하고, 보다 독자적이고 심층적인 연구를 수행할 수 있을 것이다.

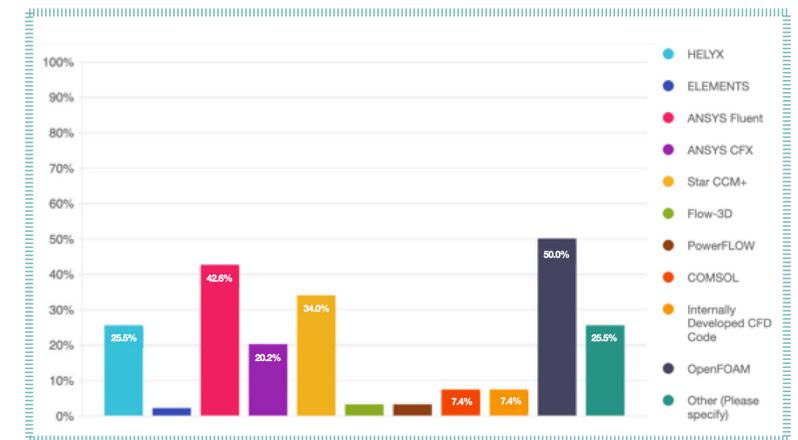


Fig. 2.8 해외에서 사용되는 CFD 소프트웨어 현황

CFD 기술은 다양한 전산해석 도구상용, In-house, OSS를 통해 폭넓은 응용 분야에서 활용되고 있다. 설문에서 파악된 몇 가지 주요 응용분야를 분류해서 정리하면 아래와 같다.

주요 요구사항

항공 분야

항공 분야는 CFD의 대표적인 응용 분야로, 비행체 설계 및 최적화, 난류 해석, 공력 소음 해석이 주요 연구 주제로 언급되었다. 특히 압축성 초음속 유동 해석과 공력 형상 최적화가 두드러졌으며, 드론과 같은 신기술 개발에서도 블레이드 공력 해석 및 소음 감소를 위한 CFD 기술이 활발히 활용되고 있다.

조선해양 분야

조선해양 분야에서는 선박 저항 및 자항 성능 분석, 프로펠러 주변 공동(Cavitation) 해석, 슬로싱(Sloshing) 분석이 중요한 응용으로 나타났다. 이러한 해석은 선박 설계의 효율성을 높이고, 운항 중 발생할 수 있는 구조적 손상을 예측하는 데 기여하고 있다. 또한 해상풍력 발전과 같은 신재생 에너지 연구에서도 CFD 기술이 활용되고 있다.

에너지 및 원자력 분야

에너지 분야에서는 열-유체 상호작용과 난류-열전달 해석이 핵심으로, 특히 가스터빈 연소 해석과 냉각 시스템 성능 평가에서 CFD가 중요한 도구로 사용된다. 원자력 분야에서는 다상 유동 해석과 상변화 모델링이 중요한 연구 주제로 다루어졌다.

반도체 산업

반도체 산업에서는 공정 장비의 열유동 해석 및 진공 환경에서의 회박 기체 유동 해석이 주로 수행되었다. 이러한 해석은 반도체 제조 공정의 효율성 향상과 장비 설계 최적화에 기여하며, 마이크로 및 나노 스케일 환경에서의 유체 흐름 분석과 같은 고성능 시뮬레이션 기술의 필요성을 보여준다.

의료 분야

의료 분야에서는 혈류 해석, 호흡기 모델링, 의료 장비의 유체역학적 성능 평가 등에 CFD가 활용되며, 이는 환자 맞춤형 치료와 장비 개발에 있어 중요한 역할을 하고 있다.

CFD의 응용은 산업적 요구와 학문적 탐구가 결합된 영역에서 꾸준히 확장되고 있다. 국내 연구자들은 전통적으로 강점을 보이는 항공, 조선, 에너지 분야에 초점을 맞추고 있지만, 반도체와 의료 같은 신형 분야에서도 관심이 증가하고 있다. 이는 글로벌 트렌드와도 일치하지만, 해외에서는 신재생 에너지(풍력, 수소 등)와 같은 지속 가능한 연구가 더 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 응답자들은 특히 다상 유동, 난류 해석, 연소 해석과 같은 복잡한 문제 해결을 위해 고도화된 시뮬레이션 기술과 계산 효율성을 요구하고 있다.

이는 국내외를 막론하고 공통된 연구 과제로, 기술적 진보와 혁신이 필요한 부분이다. CFD 기술은 전통적 산업 분야를 넘어 새로운 분야로 적용

가능성을 지속적으로 확장하고 있으며, 이를 위해 학문적 연구와 산업적 협업이 필수적이다. 국내 연구가 이러한 기술적 요구를 충족하기 위해서는 더 많은 자원과 체계적인 지원이 필요하다는 점이 강조된다.

연구자들이 CFD에 주로 사용하는 하드웨어에 대한 분석 결과는 Fig. 2.9에서 확인할 수 있다. 대부분의 연구자들은 PC 또는 워크스테이션과 같은 개인 컴퓨터를 활용하여 해석을 수행하는 것으로 나타났다. 자체 구축 서버 시스템 역시 비슷한 비중으로 활용되고 있지만, 이 또한 주로 실험실 내에서 운영되기 때문에 개인 컴퓨터와 유사한 수준의 활용도를 보이는 것으로 해석된다. 한편, 국내의 경우 외부 클러스터 활용은 상대적으로 낮으며, 클라우드 서비스는 매우 작은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 이는 국내 연구자들이 여전히 개인 컴퓨터를 중심으로 계산을 수행하고 있음을 의미한다. 또한 코드 사용 빈도 및 시간을 살펴보면, 70% 이상의 연구자가 매일 코드 활용을 하고 있으며, 이는 개인 컴퓨터를 기반으로 한 해석 수행이 주를 이룬다는 이전의 결과와 일치한다. 따라서 국내 연구자들은 개인 컴퓨터와 자체 구축 서버를 중심으로 계산 환경을 운영하고 있으며, 클라우드 및 외부 클러스터의 활용은 아직 미미한 수준임을 확인할 수 있다.

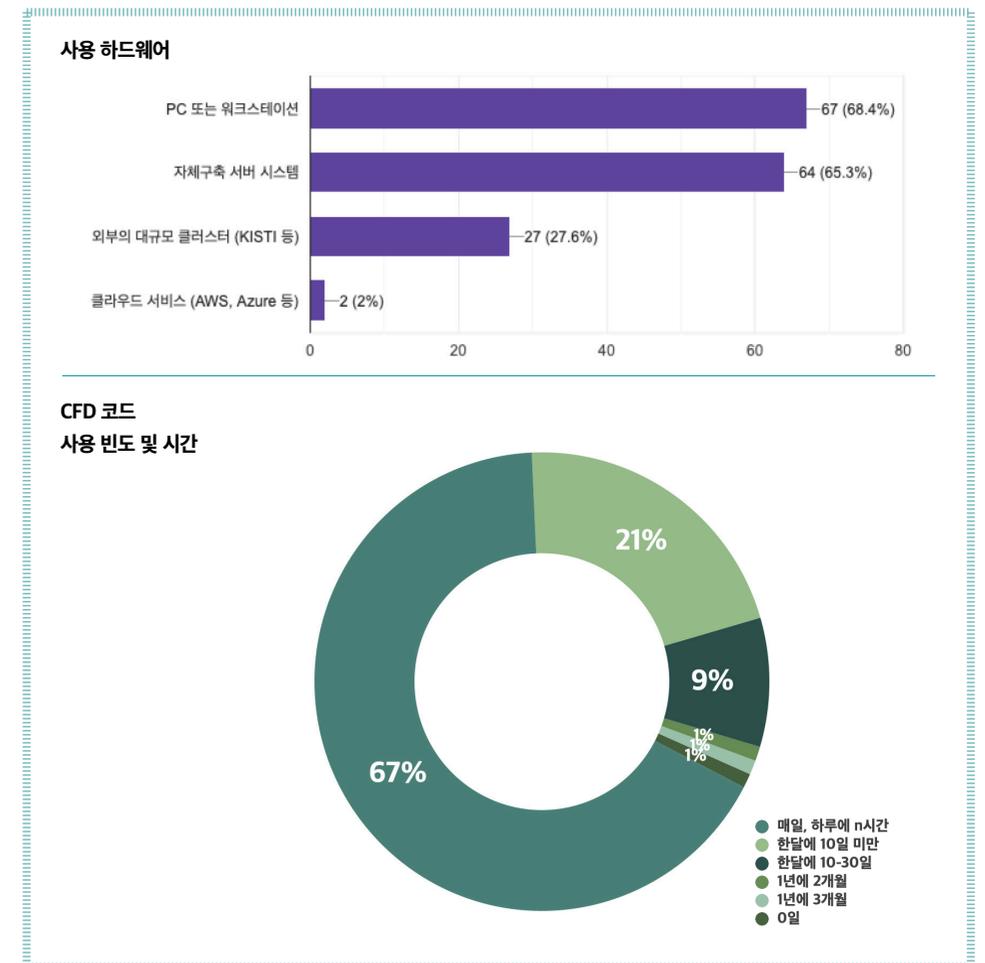
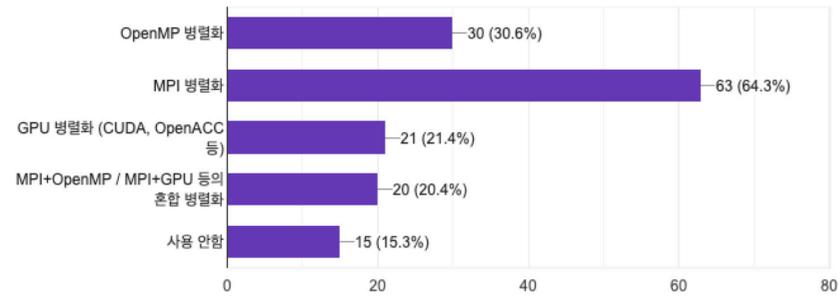
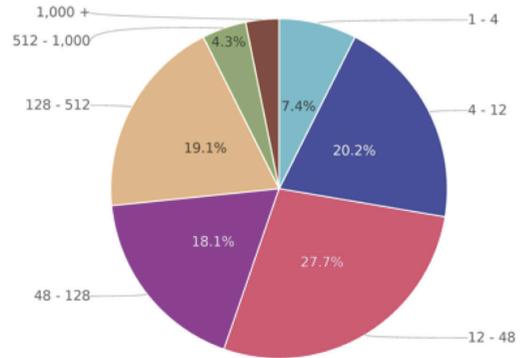


Fig. 2.9 하드웨어 및 CFD 코드 사용 빈도

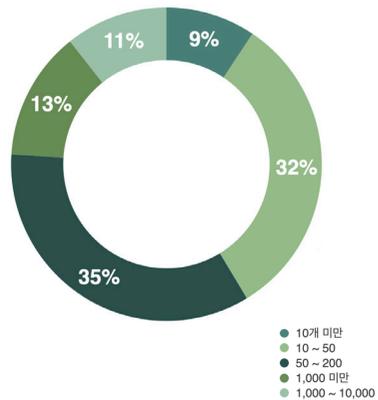
병렬 라이브러리 사용여부



The number of cores for CFD simulation



CPU 병렬



GPU 병렬

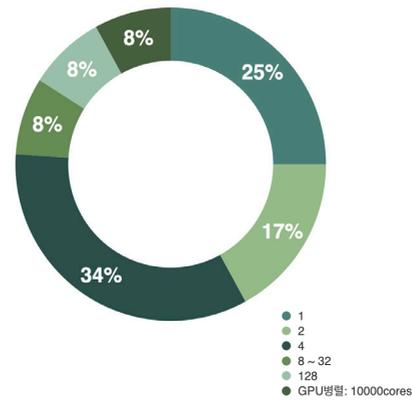


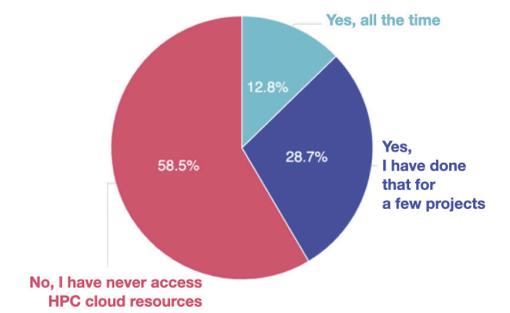
Fig. 2.10 병렬 라이브러리 사용현황

병렬 계산 기술은 CPU 및 GPU 기반으로 발전하고 있으며, 특히 GPU 기반 병렬 처리가 점차 확산되는 추세이다. Fig. 2.10에 따르면, 병렬화를 위해 MPI 기반 병렬 코드가 주로 활용되고 있으며, 이는 다중 CPU 환경이 지배적임을 의미한다. 많은 경우 50개 정도의 CPU가 가장 많이 사용되는 것으로 나타났다. GPU 활용도는 아직 상대적으로 낮지만 그 비중이 점차 증가하고 있으며, 1~4개의 GPU 유닛이 주로 사용되는 것으로 조사되었다. 해외의 경우도 국내와 비슷하게 4~120개의 CPU를 활용하는 사례가 지배적이었다. 클라우드 HPC(High-Performance Computing) 자원을 사용하는 연구자는 약 20%로 나타났으며, 해외에서도 클라우드를 사용하지 않는 비율이 60% 정도로 높게 확인되었다. 연구자들은 클라우드 HPC가 초기 비용 절감과 계산 성능 향상에 유용하다고 평가했지만, 데이터 전송 속도와 보안 문제가 여전히 해결해야 할 과제로 지적되었다. 특히 서버 사용 비용에 대한 부정적 평가가 두드러졌다. 따라서 병렬 계산 기술은 여전히 CPU 기반 환경이 주류를 이루고 있으나 GPU 활용이 점차 확산되고 있으며, 클라우드 HPC는 비용과 기술적 제약을 극복해야 더 널리 활용될 수 있을 것으로 보인다.

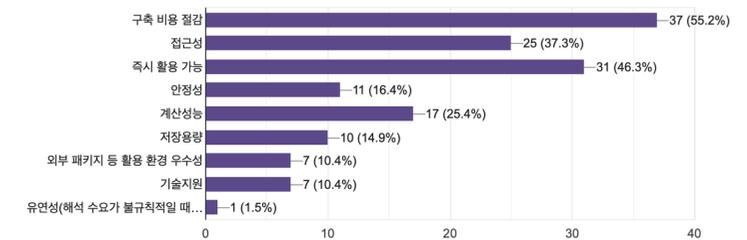
클라우드 사용 동향 및 의향



The use of HPC resources on the cloud



장점



단점

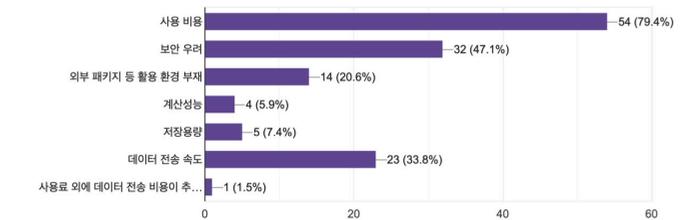


Fig. 2.11 클라우드 서비스 사용 동향 및 의향 (AWS, MS Azure)

CFD 연구에서 해결해야 할 주요 난제는 난류 모델링, 다상유동 해석, 그리고 계산 성능 향상으로 요약된다. Fig. 2.12에 따르면 연구자들은 모델링 및 UDF(User Defined Function) 부분이 가장 부족하다고 지적하였으며, 구체적으로 다음과 같은 문제들이 제시되었다.

CFD연구에서 해결해야 할 주요 난제

모델링 관련 문제
특정 물리 모델의 부재
상변화 및 다상유동 해석의 한계
인공지능 기법 적용 부족 (예: Physics-informed Machine Learning)
다중물리 해석의 정확도 저하 Multiphase 및 Particulate Flow
경계면 추적 및 움직이는 물체 해석의 어려움
LES 모델 및 연소·반응 흐름(Reacting Flow) 해석에서의 모델 및 데이터베이스 부족
멀티스케일 해석(나노-마이크로-매크로)의 어려움
비정상 유동의 낮은 정밀도와 고차수 수치기법(Higher-Order Scheme)의 적용 한계
UDF 및 코드 확장성
신규 모델 보완 가능성은 있으나 확장성 부족
격자 자동화 및 최적화의 한계, 양질의 격자 생성, 중첩 격자 문제
격자 생성 자유도와 안정성 문제
소프트웨어 및 비용 문제
타 소프트웨어와의 연동 어려움
상용 코드의 지나친 일반화로 인한 불필요한 요소 과다
높은 라이선스 비용 및 지속적인 비용 증가
Post-processing의 자유도 저하, 매뉴얼 및 튜토리얼의 부재

해외 조사에서도 비슷하게 해석의 강건성, 비용 문제, 격자 생성 성능 부족이 중요한 도전 과제로 지적되었다. 이러한 문제들은 국내외 연구자 모두에게 공통된 과제이며, 기술적 진보와 개선이 시급한 영역으로 평가된다.

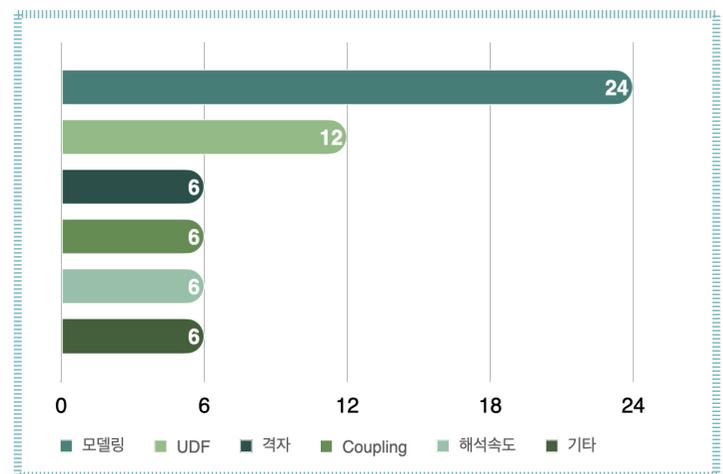


Fig.2.12 상용소프트웨어 부족 기능_국내

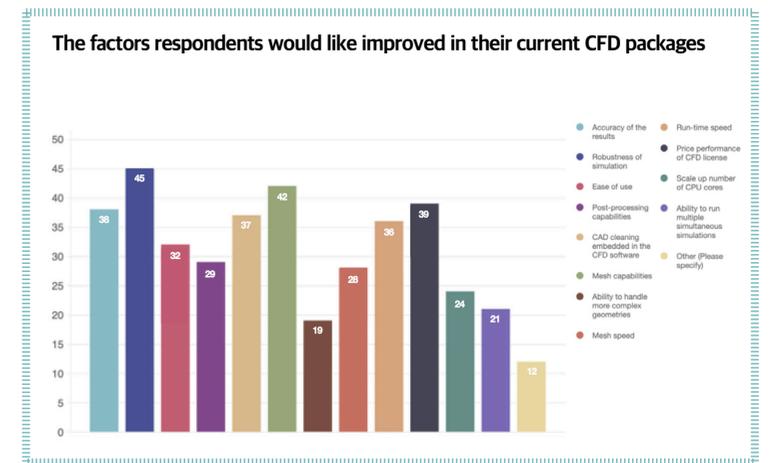


Fig.2.12 상용소프트웨어 부족 기능_해외

CFD 연구 및 개발은 물리적·계산적 한계로 인해 다양한 난제에 직면해 있다. 이번 설문조사 결과, 연구자들이 가장 중요하게 지적한 문제는 난류 모델링의 정확도, 다상 및 다물리 문제의 해석, 그리고 계산 효율성의 개선으로 나타났다. 난류 해석은 CFD에서 가장 어려운 과제로 꼽히며, 특히 높은 레이놀즈 수에서의 난류 모델링이 핵심 문제로 지적되었다. 산업계에서 널리 사용되는 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 모델은 효율적이지만 정확도에 한계가 있으며, LES(Large Eddy Simulation)와 같은 고급 모델은 더 정밀한 결과를 제공하지만 높은 계산 비용으로 인해 산업적 적용이 제한적이다. 또한, 난류 천이 모델링, 와류(vortex) 추적, 고속 비행체의 비정상 공력 특성 예측 등의 문제가 여전히 해결이 어려운 분야로 언급되었다. 다상유동 해석은 물리적 복잡성이 매우 크며, 액체와 기체 간의 경계면 추적, 상변화 모델링, 압축성 유동 해석이 중요한 도전 과제로 지적되었다. 특히 극저온 저장탱크 내의 복합 유동 해석이나 핵비등(nucleate boiling)과 같은 특수 문제는 기존 모델링 기술로 충분히 설명되지 않는 한계가 있다.

다물리 해석에서는 열수력, 연소, 응축과 같은 다양한 물리적 현상을 통합적으로 시뮬레이션할 수 있는 기술이 강조되었다. 나노, 마이크로, 매크로 스케일에 걸친 멀티스케일 해석의 어려움과 물리 모델의 부재 또한 중요한 난제로 꼽혔다. 계산 효율성 측면에서는 하드웨어와 알고리즘의 최적화가 도전 과제로 나타났다. 고품질 격자 생성은 해석 정확도를 높이는 핵심이지만, 여전히 많은 부분이 수작업에 의존하거나 높은 비용이 소요된다. 병렬 계산 기술의 발전으로 GPU 및 CPU 클러스터의 활용이 증가하고 있으나, 시스템 최적화는 부족하다는 평가를 받았다. 클라우드 기반 HPC(High-Performance Computing)는 비용 효율성을 제공하지만, 데이터 전송 속도와 보안 문제가 해결해야 할 과제로 언급되었다.

산업적 한계도 여전히 존재한다. 예를 들어, 비행체 설계에서는 고속 계산이 필수적이고, 대규모 플랜트 시스템의 복잡한 유동 문제는 상용 소프트웨어만으로 해결하기 어렵다는 의견이 많았다. 이러한 상황에서 물리 모델의 부족, 계산 시간 부담, 병렬화 효율성의 제약이 주요 장애물로 지적되었다.

해외에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 AI 융합 기술이 적극적으로 도입되고 있다. 미국과 유럽에서는 Physics-Informed Neural Networks(PINN)을 활용해 다상 문제를 모델링하고 있으며, NASA는 CFD Vision 2030을 통해 자동 격자 생성과 메가스케일 시뮬레이션을 목표로 연구를 주도하고 있다.

국내 CFD 연구는 난류 해석, 다상 및 다물리 문제의 정확도 향상과 계산 효율성 개선이 여전히 필요하다. 이를 해결하기 위해 오픈소스와 상용 소프트웨어의 병행 사용, 고성능 하드웨어 최적화, 그리고 AI 기술의 융합이 핵심 전략으로 제시된다. 해외와 비교했을 때, 국내 연구가 복잡한 문제를 해결하고 글로벌 경쟁력을 확보하기 위해서는 정부의 적극적인 지원과 관심, 그리고 산학연 각 분야의 긴밀한 협력이 요구된다.

추가적으로 활용하고자 하는 소프트웨어로는 오픈소스 소프트웨어^{OSS}가 주요 대안으로 제시되었으며, 특히 OpenFOAM이 큰 비중을 차지하였다. OpenFOAM이 선호되는 이유로는 무료 사용(Freeware), 확장성과 소스 접근성, 지속적인 업그레이드, 다수의 사용자에게 의해 검증된 신뢰성, 다양한 기능, 유지보수 비용 절감 등이 꼽혔다. 다른 OSS로는 다양한 분야와 목적에 적합한 소프트웨어들이 아래와 같이 제시되었다.

제시된 소프트웨어들

Lattice Boltzmann Solver 계열	PowerFLOW (빠른 계산 및 GPU 기반 병렬 계산 성능), Dassault XFlow, COMSOL
다물리 해석	ILLINOIS ROCKSTAR (다물리 문제 해석 가능), NekRS (GPU 기반 대형 병렬 계산), CaluLiX (OpenFOAM과의 연성 및 FSI 해석 지원)
압축성 영역 해석	SU2, PyFR (Density-based Solver 성능)
분자 동역학(MD)	LAMMPS (극초음속 유동 및 표면 화학 물리 해석)
벤치마크 및 클러스터 시스템 평가	PELE, ExaWind

이들 OSS는 병렬 계산과 GPU 활용 증가에 따른 비용 절감, 개발 주권 확보, 코드 공유 및 수정 가능성 등에서 강점을 보인다. 또한, 상용 코드와 비교해 확장성, 다양성, AI 기술과의 융합, 그리고 관련 연구자 커뮤니티의 활성화를 통해 지속적인 발전이 가능하다는 평가를 받았다. 현재 상용 소프트웨어는 모든 스케일의 계산을 통합 수행하기 어려운 한계가 있으며, 여러 물리 모델의 유기적 패키징에 있어 OSS가 더 효과적일 수 있다. 연구자들은 정확도와 효율성의 지속적 개선을 목표로 OSS와 상용 소프트웨어를 병행할 수 있는 통합 플랫폼의 필요성을 강조하였다. 또한, 코드 개발 환경의 자동화 및 모듈화가 활성화되고 있는 시대적 흐름에 따라 국산 코드 개발의 중요성과 가능성이 높아지고 있으며, 이를 통해 해석의 공유 및 접근성이 확대될 수 있다는 의견도 제시되었다. 이와 같은 변화는 CFD 연구의 대중화와 파급력을 높이는 데 중요한 역할을 할 것으로 평가된다.

추가적으로 활용하고자 하는 상용 소프트웨어에 대한 연구자들의 선택 이유는 다음과 같다. 먼저, 물리적 복잡성 증가로 인해 In-house 코드의 한계가 드러나고 있으며, 모든 기능을 내부적으로 개발하는 데 기술적인 자원의 제약이 따른다는 점이 지적되었다.

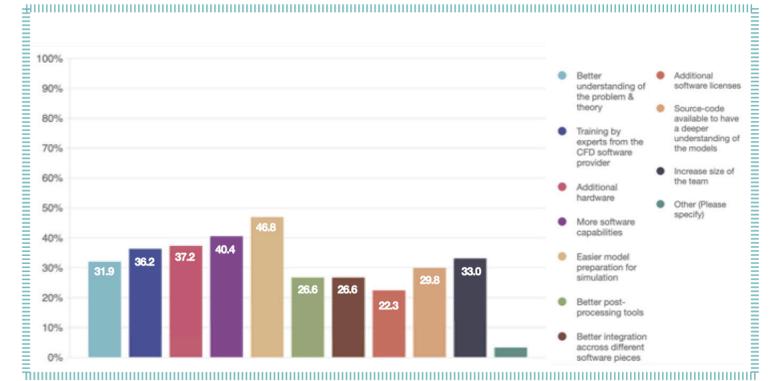


Fig.2.13 상용소프트웨어에 추가했으면 하는 기능, 해외조사

상용 소프트웨어는 다양한 문제에 대한 대응력과 편의성을 갖추고 있어 연구자들에게 중요한 대안으로 작용하고 있다. 특히 다음과 같은 요소들이 상용 소프트웨어의 장점으로 꼽혔다.

상용 소프트웨어의 장점

- 전문 연구 인력 부족 및 신진 연구자의 코드 개발 능력 저하
- 초보 연구자의 접근성과 범용성 제공
- 다물리 해석 및 대규모 스케일 문제에서 전처리 기술의 중요성
- UI/User Interface의 편의성과 직관성이 높은 상용 소프트웨어의 활용 용이성
- 강건성과 안정성: 학계 및 산업계에서 표준화된 검증된 결과 제공
- 해석 안정성과 빠른 계산 속도
- 유지보수 용이성: 고비용이지만 강력한 기술 지원과 지속적인 업그레이드
- 산학 연계: 이미 산업계에 널리 보급되어 있어 졸업생(석·박사)의 취업 안정성에 기여
- 새로운 아이디어의 빠른 검증: 시간 대비 효율성

또한, 연구자들은 상용 소프트웨어가 다학제적 연구에 용이하며, 이미 산업 및 학계에서 널리 검증된 소프트웨어이기 때문에 결과의 신뢰성이 높다는 점을 강조했다. 특히, 산학에 이미 깊이 침투되어 있기 때문에, 다른 코드나 소프트웨어를 사용하는 것이 시간 대비 효율이 낮다는 평가도 있었다. 해외 연구자들 또한 상용 소프트웨어의 모델 구성의 편의성과 적용 능력이 중요한 요소로 지적되었으며, 이는 Fig. 2.13에 나타난 결과와 일치한다. 상용 소프트웨어는 해석의 정확도와 효율성을 동시에 충족시키는 중요한 도구로 자리 잡고 있으며, 이를 통해 복잡한 문제에 대한 신속한 대응이 가능하다는 점이 주요한 선택 이유로 확인되었다.

기타 의견으로, 연구자들은 상용 소프트웨어, 오픈소스^{OSS}, 그리고 In-house 코드가 각각 고유한 역할과 의의를 가지고 있으며, 이 세 가지가 상호 보완적인 관계로 공존하는 것이 타당하다는 의견을 제시하였다. In-house 코드는 개별 연구자들의 요구를 맞춤형으로 충족할 수 있는 장점이 있지만, 개발에 소요되는 시간과 비용이 크다는 점이 한계로 지적되었다. 따라서 연구 목적에 맞게 오픈소스를 기반으로 코드 개발을 진행하는 노력이 필요하다고 강조되었다.

특히 학술적 첨단 연구에서는 In-house 코드의 활용이 필수적이며, 이를 위해 지속적인 지원과 보존이 필요하다는 의견이 많았다. 상용 소프트웨어는 기업 차원에서 지속적으로 확장과 검증이 이루어질 것이며, 수렴성과 강건성 측면에서 연구 및 산업 현장에서 불가피하게 사용될 수밖에 없다고 평가되었다. 특히, 기술 지원이 용이하고 검증된 도구로서 산업체 수준에서 상용 소프트웨어의 사용이 계속될 것으로 보인다. 다만, 대부분의 상용 소프트웨어가 외산 제품이라는 점이 지적되었으며, 이를 견제하기 위해 국가 차원에서 산학 협력을 통해 오픈소스 프로그램의 개발과 유지가 필요하다는 의견이 제기되었다.

오픈소스 소프트웨어^{OSS}는 최근 코드 개발의 트렌드로 자리 잡고 있으며, 향후 발전 가능성이 높다고 평가되었다. 특히, 비용 효율성과 확장성을 고려할 때, OSS는 연구자들이 목적에 따라 적절히 활용할 수 있는 대안으로 꼽혔다. 또한, OSS는 산학 협력과 커뮤니티 활성화를 통해 발전 가능성이 크며, In-house 코드와 병행 개발될 필요가 있다고 강조되었다.

종합적으로, 연구자들은 목적에 따라 세 가지 접근법(In-house 코드, 상용 소프트웨어, 오픈소스 소프트웨어) 모두 적절히 활용하는 것이 바람직하다고 결론지었다. 학계의 첨단 연구에서는 In-house 코드의 역할이 필수적이며, 산업체나 일반 연구에서는 상용 소프트웨어와 OSS의 활용이 적절하다는 의견이 제시되었다. 결국, 상용 소프트웨어의 강건성과 기술 지원, 오픈소스의 확장성과 비용 효율성, In-house 코드의 맞춤형 개발이 조화를 이루며 각자의 장점을 극대화하는 방향으로 연구개발 생태계를 구성해야 한다는 점이 강조되었다.

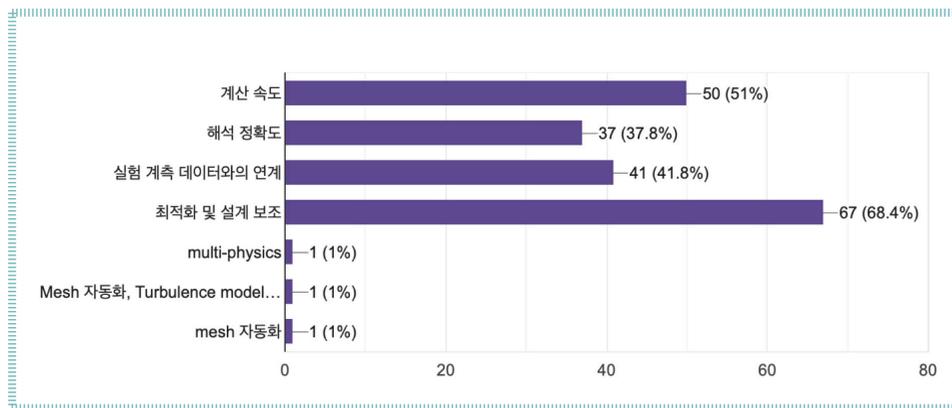


Fig.2.14 인공지능이 적용되었으면 하는 분야

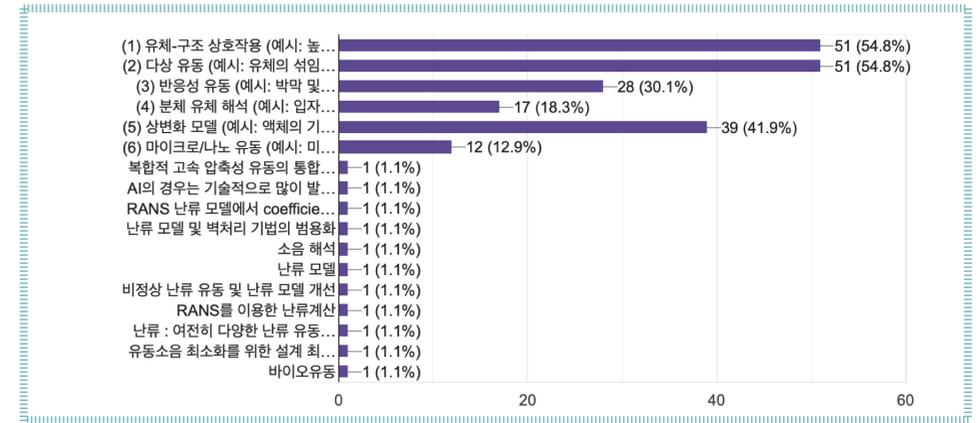


Fig.2.15 인공지능이 적용되었으면 하는 구체적 연구내용

최근 인공지능^{AI}의 활용이 비약적으로 증가하면서, 연구자들은 주로 최적화 및 설계 보조 분야에서 AI 적용을 가장 많이 기대하는 것으로 나타났다 Fig. 2.14. 이 외에도 계산 속도 향상, 실험 데이터와의 연계, 그리고 해석 정확도 개선이 중요한 적용 분야로 꼽혔다. 또한 현재까지는 AI가 설계 보조용으로 주로 활용되는 경향이 크다는 점이 확인되었다. 더 구체적으로 살펴보면, AI의 적용이 가장 기대되는 분야는 유체-구조 상호작용 및 다상유동 해석이었다 Fig. 2.15. 이는 전통적인 단상 유동 문제보다 해석 난이도가 높은 복잡한 유동 현상에서 AI의 활용도가 더욱 두드러질 수 있음을 시사한다. 특히, 상변화 모델에 대한 적용 역시 상당히 높은 비중을 차지하였으며, 이는 복잡한 다상유동 현상의 일부로 간주될 수 있다. 이와 같이 인공지능은 기존의 해석 기법이 해결하기 어려운 고난이도 유동 문제에 대한 보조 도구로서 중요한 역할을 할 것으로 기대되며, 향후 CFD 분야에서 그 활용성이 더욱 확대될 것으로 보인다.

CFD 기술의 발전은 물리적 모델링의 고도화 뿐만 아니라 계산성능 향상, 소프트웨어의 개선, 인공지능^{AI}과의 융합 등 다양한 기술적 요구사항을 충족해야만 가능하다는 것이 이번 설문조사를 통해 확인되었다. 인공지능과 관련하여 응답자들이 제시한 주요 요구사항을 정리하면 다음과 같다.

주요 요구사항

계산성능 향상

계산속도와 정확도는 CFD의 성능을 평가하는 핵심요소이다. 병렬 계산기술의 효율적 활용이 시급하다고 강조되었다. 특히, GPU 기반 병렬처리 기술과 클라우드 HPC(High-Performance Computing)의 활용이 중요하게 언급되었다. 클라우드 서비스는 초기비용 부담을 줄이고 대규모 계산에 유연성을 제공하지만, 데이터 전송속도와 보안문제가 해결과제로 남아있다.

격자생성 자동화

격자생성은 CFD 계산의 첫 단계이자 결과의 품질을 좌우하는 중요한 요소이다. 그러나 현재의 격자생성 과정은 높은 수작업 의존성과 긴 처리시간이 문제로 지적되고 있다. 복잡한 형상에서도 품질 높은 격자를 자동으로 생성할 수 있는 기술의 개발이 필요하다고 언급되었다.

특히, Adaptive Meshing(적응형 격자생성) 기술은 계산정확도를 유지하면서도 계산비용을 줄이는 잠재적 해결책으로 평가되고 있다.

상용소프트웨어의 기능개선

상용 CFD 소프트웨어에 대한 높은 의존도는 기능적 한계를 개선해야 할 필요성을 드러낸다. 예를들어, 다중물리 연계모델, 고급 난류모델, 화학반응 모델 등의 부족이 언급되었다. 또한, 높은 라이선스 비용과 제한된 사용환경은 연구자와 기업의 접근성을 저해하는 요인으로 작용하고 있다.

오픈소스와 In-house 코드의 활용

오픈소스 소프트웨어 OpenFOAM 등과 자체개발 코드 In-house code는 상용소프트웨어의 비용과 기능적 한계를 보완할 수 있는 대안으로 언급되었다. 오픈소스 소프트웨어는 유연성과 경제성면에서 강점이 있으나, 전문인력 부족과 초기학습의 어려움이 단점으로 작용한다. 이에 따라, 오픈소스의 사용성을 높이고, 자체코드를 보완하기 위한 협력과 커뮤니티 구축이 필요하다.

AI와 CFD의 융합

AI 기술을 활용한 계산 가속화와 물리모델 개선은 CFD 기술발전의 중요한 방향으로 지적되었다. 응답자들은 Physics-Informed Neural Networks^{PINN}와 같은 AI 기술이 다상유동이나 난류해석에서 중요한 역할을 할 수 있음을 강조했다. AI는 계산 시간을 단축시키고, 기존의 수치모델이 해결하지 못한 복잡한 물리문제를 해결할 잠재력을 가지고 있다.

해외에서는 계산 속도 향상을 위해 클라우드 기반 HPC와 AI 기술이 보다 적극적으로 도입되고 있다. 미국 NASA의 CFD Vision 2030은 계산 시간 단축, 격자 생성 자동화, 그리고 다중물리 해석의 정밀도 향상을 위한 구체적인 목표를 제시하며 글로벌 CFD 기술 발전을 선도하고 있다. 반면, 국내에서는 AI 기술과의 융합이 아직 초기 단계에 머물러 있으며, 상용 소프트웨어와 오픈소스의 균형 잡힌 활용 역시 충분하게 이루어지지 못한 상황이다. 국내 연구자들이 제시한 기술적 요구사항은 국제적 트렌드와 유사한 경향을 보이지만, 상용 소프트웨어에 대한 의존도가 여전히 높아 연구비 부담과 기능적 한계를 극복하기 위한 노력이 필요한 것으로 평가되었다. 이를 해결하기 위해서는 오픈소스와 AI 기술의 적극적인 활용을 통해 계산 성능과 모델링 능력을 향상시키고, 이를 바탕으로 더 복잡하고 고도화된 문제를 해결할 수 있는 기술적 역량을 확보해야 한다.

CFD 기술의 발전 방향은 단순한 성능 향상을 넘어 비용 효율성, 사용자 편의성, 그리고 다중물리 해석의 정밀도와 같은 종합적인 개선을 지향하고 있다. 이를 실현하기 위해서는 학문적 연구와 산업적 적용을 잇는 유기적 협력과 지원이 절대적으로 필요하다.

CFD를 통해 아직 해결되지 않은 도전적인 문제들로는 다상유동, 비평형 유동, 다물리·다중스케일 문제, 그리고 전통적 난류 해석이 대표적으로 제시되었다.

해결되지 않은 도전적인 문제들

다상유동

다상유동은 CFD에서 해결이 어려운 영원한 난제로 여겨지며 지속적인 연구와 개발이 필요한 분야로 지적되었다. 특히 핵비등 모델링과 같은 상변화 문제는 벽면 열전달량 예측의 어려움과 함께 nucleate 시작 모델이 정립되지 않아, 이와 관련한 직접 수치 해석 Direct Numerical Simulation은 아직 초기 단계에 머물러 있다. 구체적으로는 다음과 같은 문제들이 언급되었다.

- 경계면 추적: 2상 유체 간의 경계면 추적, 극저온 저장탱크 내 복합 유동 해석
- 해양 및 선박 문제: 배 주위의 상경계 유동, 선박 프로펠러 공동현상에 따른 유기 소음 및 침식 현상
- 상변화 해석: CO₂의 3상 변화, 상변화를 수반하는 압축성 유동, 냉각수 boiling, 핵비등 nucleate boiling 해석
- 산업적 적용: 냉각수 주입 상실 시뮬레이션, 격납 건물 2상 유동 해석, 증기발생기 열수력 해석, 냉각재 상실 사고 LOCA 해석 등

비평형 유동

비평형 유동 문제는 화학 반응과 결합된 고난이도 해석을 요구하며, 주요 도전 과제는 다음과 같다.

- 극초음속 유동 해석: 화학 반응을 고려한 수렴성 및 정확도, shock capturing 정확도
- 화학 반응 모델링: 화학 반응과 연계된 유동 해석, 전기 생성 반응 시뮬레이션, surface chemistry 해석
- 스케일 해석: 고속 압축성 영역에서의 스케일 분해 유동 및 고차 정확도의 극초음속 비평형 해석

다물리·다중스케일 문제

다물리 및 다중스케일 문제는 극초음속, 원자로 해석, 열전달과 같은 복합 물리 시스템에서 중요한 도전 과제로 제시되었다.

- 극초음속 유동의 다중스케일 문제
- 원자로 다물리 해석: 열수력, 중성자 동역학, 핵연료의 통합 안전 해석
- 산업 문제: 스팀 스파저가 장착된 교반기의 최적화, 동역학과 CFD 연동 해석, 화재 연소 및 결로 모델, 회전익 성능 해석, 연소 후 공해 물질 예측

전통적 난류 해석

난류 해석은 CFD에서 가장 오래된 도전 과제 중 하나로, 특히 고속 유동과 고레이놀즈 수 유동에서 주요 이슈가 확인되었다.

- 난류 천이와 실시간 해석
- 와류동 vortex 추적 및 난류의 발생과 소산 문제
- 압축성 다상 난류: 확대관 diffuser에서 난류 섞임 mixing 문제, 비정상 유동과 대규모 박리
- 고속 비행체 해석: 고받음각 high angle of attack 조건에서의 공력 특성 예측

이와 같이, 다상유동, 비평형 유동, 다물리·다중스케일 문제, 난류 해석은 여전히 CFD 기술이 해결하지 못한 핵심 도전 과제로 남아 있다. 특히, 복잡한 물리 현상과 산업적 적용을 위한 정확도와 계산 효율성 개선이 필수적이며, 이를 해결하기 위해 보다 고도화된 모델링 기술과 병렬 계산, AI와의 융합이 필요한 상황이다.

해석이 지속적으로 복잡해지면서 연구자들 사이의 협업이 중요한 문제로 부각되었다. 이에 따라 앞으로 공동 연구를 희망하는 주제에 대한 의견을 수렴한 결과, 다음과 같은 분야들이 제시되었다.

제시된 분야들 **인공지능(AI)과의 융합**

- 계산 가속화: 인공지능을 활용한 계산 시간 단축, AI 기반 Reduced Order Model (ROM), 다상유동 CFD 가속 연구
- 모델링 및 설계 최적화: 기계학습 연계 모델링, 딥러닝 기반 최적 설계, AI-CFD 융합 기술
- 데이터 활용: 적은 데이터로 해석 정밀도 향상

난류 해석

- 압축성 다상 난류 유동
- 난류 모델 연구 및 난류 유동 해석

격자, 병렬화, 오픈소스화

- 거대 규모 해석: GPU 기반 병렬 계산 효율성 증대, 리얼타임 시뮬레이션
- 해석 시간 단축: 코드 병렬화 및 최적화, 인하우스 코드 오픈소스화
- 격자 생성 연구: 자동화 및 오버셋 격자 생성

다상유동 및 다중스케일/다물리 문제

- 다상 열유동 해석
- CFD-DEM 커플링: 다물체 동역학과의 연성 해석, 분체 거동
- 특수 해석: 유체 충격에 의한 구조물 파단, 비평형 열공력 및 복사 열전달, 화박기체 해석

기타 응용 분야

- 극초음속 추진 해석 및 설계
- 유동 및 공력 소음 해석: 공력 소음, 유동 소음 분석
- 의료 관련 유동: 혈류 해석, 혈액 응고 반응 모사
- 산업 및 에너지 분야: 발효조 교반기 해석, 가전 제품, 가상 원전 시뮬레이션, 고장 예지, 에너지 효율 향상

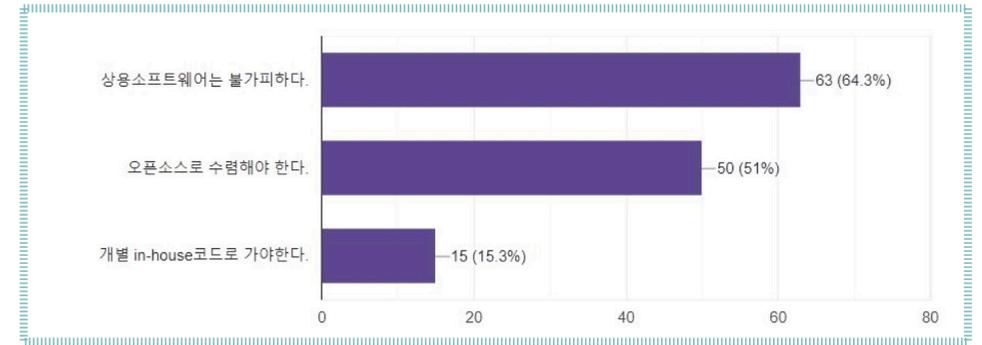


Fig. 2.16 향후 10~20년 내의 전산유체해석 코드의 형태

이러한 협업 연구는 CFD 기술의 한계를 확장하고 새로운 응용 가능성을 열어줄 것으로 기대된다. 특히 AI와 CFD의 융합, 다중스케일 문제 해결, 병렬화와 격자 생성 자동화 등은 기술적 난제를 극복하고 산업적·학문적 발전을 견인하는 중요한 요소로 평가된다.

응답자들은 향후 10~20년 내에 CFD 코드의 형태와 개발 방향에 대해 다양한 의견을 제시하였다. 우선, 자동 격자 생성, GPU 및 CPU 기반 병렬 처리 기술의 발전, 그리고 계산 시간 단축을 위해 신경망 기반 수치 기법이 적극적으로 활용될 가능성이 높다고 언급되었다. 특히 디지털 트윈 환경 구축은 CFD의 중요한 발전 방향으로 강조되었으며, 이는 제조 공정 등 산업 현장에서 실시간 CFD 적용을 가능하게 하는 핵심 기술로 주목받고 있다. 또한, 다중 스케일 해석과 고속 계산 기술의 발전이 CFD 기술의 미래를 결정짓는 중요한 요소로 꼽혔다.

설문 응답자들은 CFD 기술이 상용 소프트웨어와 오픈소스 소프트웨어로 점차 수렴될 것으로 예상하였으며, 이는 Fig. 2.16에서도 확인할 수 있다. 반면, In-house 코드의 비중은 상대적으로 낮게 평가되었다. 응답자의 약 50%만이 개인 코드의 오픈소스화에 대해 긍정적인 의견을 제시하였으며, 이는 관리의 어려움, 보안 문제, 그리고 유지보수 인력 부족이 주요 부정적 원인으로 지적되었기 때문이다. 향후 CFD 기술의 발전은 디지털 트윈, 병렬 처리, 자동화 기술과 같은 혁신적인 기술의 도입과 함께 상용 및 오픈소스 소프트웨어를 중심으로 진화할 것으로 예상된다. 이에 따라 코드의 효율성, 접근성, 그리고 실시간 해석 가능성이 더욱 강조될 것으로 보이며, In-house 코드는 연구 목적에 따라 한정적으로 활용될 가능성이 클 것으로 평가된다.

CFD가 향후 10~20년 동안 해결해야 할 주요 과제 역시 논의되었다. 응답자들은 계산 시간 단축, 자동 격자 생성 기술, 그리고 복잡한 형상에서의 격자 품질 향상을 주요 과제로 꼽았다. 또한, 계산 결과의 가시화를 통해 사용자가 쉽게 이해할 수 있는 기술 개발이 필요하다고 언급되었다. 이를 위해 물리 기반 시뮬레이션과 AI 기술이 결합된 새로운 접근 방식이 필수적이라는 의견이 제시되었다. 향후 10~20년 사이에 CFD가 해결해야 할 주요 문제들은 크게 격자 생성, 계산 가속화, 난류 해석, 다상·다물리·다물질 해석, 검증 데이터베이스 구축으로 요약된다.

10~20년 사이에
CFD가 해결해야 할
주요 문제들

격자 생성 및 형상 처리

자동 격자 생성(Automatic Meshing)은 가장 중요한 문제로 지적되었으며, 특히 복잡한 형상에서도 고품질 격자를 자동으로 생성할 수 있다면 수렴성 문제를 상당 부분 해결할 수 있을 것으로 평가되었다. CAD 형상 처리의 유연성을 높이는 것 역시 중요한 과제로 제시되었다.

계산 가속화 및 하드웨어 발전

계산 속도 향상은 CFD의 산업적 활용도를 높이기 위한 핵심 과제로, RANS 수준의 계산 자원으로 LES 수준의 예측 품질을 확보할 수 있도록 수치 기법 개선이 필요하다고 언급되었다. GPU 및 CPU의 병렬 처리 기술 발전과 CPU-GPU 멀티 아키텍처 적용, 매니코어 하드웨어에 적합한 계산 가속기법 개발이 중요한 과제로 꼽혔다. 또한, 해석 주기를 1일 이내로 단축하고, AR/VR 기반 Post-Processing 기술을 통해 해석 결과를 직관적으로 이해할 수 있도록 하는 것이 강조되었다. 나아가 메가스케일 시뮬레이션과 가상화 기술, 인공지능과 고성능 컴퓨팅(HPC)을 결합한 실시간 재현 기술이 필요하다고 지적되었다.

난류 해석

난류 해석 분야에서는 극초음속 유동, 난류 모델링, 열화학 비평형 난류 유동 등이 주요 과제로 언급되었다. 특히 고속·고레이놀즈 수 유동의 정확도 개선을 위한 LES 아격자 모델 개발과 비정상 난류 유동 해석의 고도화가 필요하다는 의견이 많았다.

다상·다물리·다물질 해석

다상유동 및 다물리 문제는 CFD가 풀어야 할 핵심 도전 과제로, 다상/다물질 통합 해석, 상변화 다상유동, 그리고 나노에서 매크로까지의 멀티스케일 해석 기법 개발이 필요하다고 제시되었다. 또한, 입자법 모델과 CFD-DEM 커플링을 통해 다물체 동역학과의 연성 해석이 강조되었다.

검증 데이터베이스 구축

검증 데이터베이스(DB) 구축과 물성치 데이터베이스는 CFD 연구의 필수 과제로 제시되었다. AI의 발전으로 데이터 활용의 중요성이 커지고 있지만, 현재 공학적 문제에 대한 검증 데이터는 매우 부족한 상황이다. 연구자들은 해석 DB를 기반으로 가벼운 물리 모델을 구축하고 이를 다양한 문제에 융합하여 적용하면 CFD의 활용도와 효율성이 크게 개선될 것이라고 보았다.

기타 의견

이 외에도 고차 정확도 수치 기법, 비정상 유동 해석, 전기체 해석, 동적 격자 적용, 반도체 공정 해석, 생체 공학, 화학 및 물리 모델 개발 등에 대한 연구 필요성이 제시되었다. 격자 자동화, 계산 가속화, 난류 및 다상 해석 고도화와 함께 검증된 해석 데이터베이스 구축 등도 핵심 과제로 꼽혔다. 특히 AI, HPC, 고성능 병렬 기술을 접목하여 해석 시간을 단축하고 산업적·학문적 문제에 맞춤형 솔루션을 제공할 수 있도록 기술적 혁신이 필요하다는 의견 역시 강조되었다.

향후 연구방향 및 협업주제는 CFD 기술의 진화가 요구하는 핵심과제를 반영하고 있다. 특히, AI 기술과의 융합, 다상 및 다물리문제해결, 그리고 계산효율성 향상이 주요 이슈로 떠올랐다. 또한, 협업을 통해 복잡한 문제를 해결하고자 하는 의지가 강하게 드러났다.

중요한 몇 가지 내용을 다시 정리하면,

1) AI와 CFD의 통합

AI 기술을 CFD에 접목하여 계산성능을 향상시키고 물리적 모델링의 한계를 극복하려는 노력이 중요하다. 특히, Physics-Informed Neural Networks^{PINN}와 같은 기술은 물리 기반 모델과 데이터 기반 접근방식을 결합하여 더 빠르고 정확한 결과를 도출할 수 있다. AI를 활용한 난류모델개선, 다상유동의 경계면추적, 그리고 계산시간 단축과 같은 분야에서 높은 파급효과를 기대할 수 있다.

2) 다상 및 다물리 문제해결

다상 및 다물리 문제는 물리적 복잡성과 계산적 요구가 높아, 현재의 CFD 기술로는 해결이 어렵다고 평가되었다. 다상유동에서 경계면 추적기술과 상변화모델링의 정확도를 높이는 것이 필수적이다. 특히, 핵비등^{nucleate boiling}, 연소 후 오염물질분석, 다상 열유동해석과 같은 산업적 요구를 충족하기 위한 새로운 물리모델 개발이 필요하다. 다물리 문제에서는 열전달, 응축, 구조동역학 등이 연계된 통합모델의 구현이 중요한 연구방향으로 제시되었다.

3) 계산 효율성 향상

계산속도를 높이고 비용을 절감하는 것은 CFD의 산업적 활용도를 높이는데 필수적이다. GPU 병렬처리 기술과 클라우드 기반 HPC의 활용을 통해 대규모 시뮬레이션에서의 계산성능을 극대화할 필요가 있다. 또한, 자동격자 생성기술은 계산효율성을 높이고 반복작업의 부담을 줄일 수 있는 중요한 기술로 평가되었다.

4) 협업의 중요성

다학제적 협업이 CFD 기술발전에 필수적이라고 강조되었다. 예를 들어, AI 전문가와의 협력을 통해 CFD 계산을 가속화하거나, 실험 물리학자들과의 협력을 통해 새로운 물리모델을 검증하는 사례를 들 수 있다. 이러한 협업은 복잡한 문제를 해결하고, CFD 기술을 더욱 정밀하고 신뢰할 수 있는 도구로 발전시키는데 있어 핵심적이다.

AI와의 융합, 다상 및 다물리 문제해결, 그리고 계산효율성 증대는 CFD 기술의 발전을 위한 핵심과제로, 이는 학문적 연구와 산업적 적용 모두에 있어 필수적인 단계이다. 이러한 방향성을 기반으로 국내 CFD 연구가 글로벌 경쟁력을 갖추고, 지속가능한 기술발전을 이룰 수 있을 것이다.

CFD 기술이 점차 복잡해지고 다양한 산업 분야에 적용됨에 따라, 이에 필요한 전문 인력 양성과 교육의 중요성이 더욱 강조되고 있다.

설문조사 결과, 응답자의 약 50%가 CFD 교육을 이미 실시하고 있으며, 약 20%는 외부 교육 기회를 활용하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 여전히 약 20%의 응답자는 교육의 필요성을 인식하면서도 별다른 교육 프로그램을 운영하지 않는 것으로 조사되었다 Fig. 2.17.

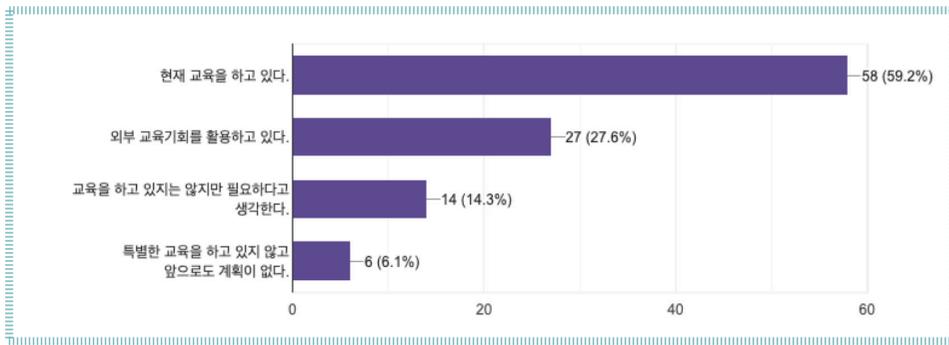


Fig. 2.17 현재 CFD 교육여부

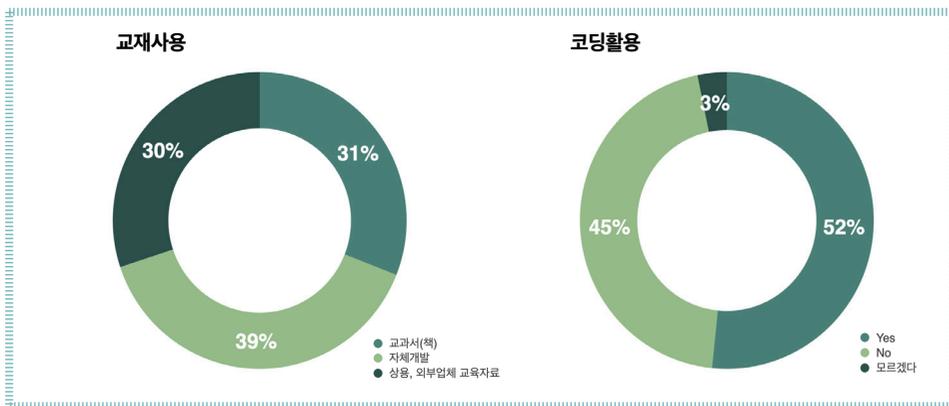


Fig. 2.18 CFD 교육관련 교재 및 직접 코딩 사용 여부

이는 일부 기관에서 CFD 교육에 대한 체계적 접근이 부족함을 시사한다. 응답자들은 병렬 계산, AI 기술 활용, 그리고 오픈소스 소프트웨어 실습의 중요성을 강조하였다. 현재 CFD 교육은 상용 소프트웨어 중심으로 진행되는 경우가 많지만, 이론과 실습을 결합한 균형 있는 커리큘럼의 필요성이 제기되었다. 특히 코딩 중심의 교육이 부족하다는 점이 지적되었으며, 일부 응답자는 Python이나 Fortran을 활용해 사용자 정의 함수(UDF)를 작성하거나 OpenFOAM을 활용한 직접 코딩 실습을 사례로 언급하였다 Fig. 2.18. CFD 교육 현황을 살펴보면, 교육을 실시하는 기관의 대부분은 교과서 또는 자체 개발 교재를 활용하고 있었으며, 직접 코딩을 포함한 교육이 절반 이상에서 이루어지고 있었다. 그럼에도 불구하고 대다수 기관이 상용 소프트웨어의 GUI 기반 실습에 의존하고 있어, 심층적인 코딩 교육은 여전히 부족하다는 평가가 나왔다. 희망 교육 분야로는 다음과 같은 다양한 수요가 확인되었다.

희망 교육 분야

- CFD 기초 이론 교육
- 응용 및 활용 중심의 교육
- 개발자 관점에서 연구자를 위한 고급 기술 교육
- AI 기술 활용 및 HPC 병렬화 교육

응답자들은 특히 코딩 중심 교육의 필요성을 강조하며, Python이나 Fortran을 활용해 간단한 유한 체적법(FVM) 실습을 수행하거나, AI와 병렬 계산 기술을 통합한 고급 기술 교육을 요구하였다. 이러한 교육은 단순히 소프트웨어 사용법을 익히는 것을 넘어서, 물리적 원리와 계산 방법론에 대한 이해를 바탕으로 실질적인 문제를 해결하는 능력을 배양하는 것을 목표로 삼아야 한다는 의견이 많았다. CFD 교육은 기술 발전과 산업적 적용의 필수적인 기반이며, 이를 위해 체계적이고 포괄적인 교육 접근이 필요하다. 특히 코딩 역량과 AI 기술 활용 능력을 갖춘 인재를 양성함으로써, 국내 연구 및 산업 분야의 경쟁력을 강화할 수 있을 것이다. 이러한 교육 방향은 최신 기술 트렌드를 반영한 이론과 실습의 병행을 통해 보다 실질적이고 미래 지향적인 결과를 가져올 것으로 기대된다.

NASA에서 제시한 CFD VISION 2030에서는 Physical modeling, Algorithm, Geometry Modeling and Mesh Generation, Knowledge Extraction, MDAO, HPC가 주요 6개 분야로 제시되었는데, 설문조사의 경우 국내에서의 중요성이, Physical modeling, Geometry Modeling and Mesh Generation, HPC, MDAO, Knowledge Extraction, Algorithm 순으로 조사되었다.

미래 10대 중점 사업 분야에서 CFD의 기여 가능성이 제시되었다.

정부가 제시한 10대 중점 과제(△시스템 반도체, △바이오·헬스, △미래 모빌리티, △친환경·에너지, △로봇, △빅데이터·AI, △사이버보안·네트워크, △우주항공·해양, △차세대 원전, △양자기술)를 중심으로 다양한 의견이 수집되었다. 특히 바이오·헬스, 우주항공, AI 분야에서 CFD의 역할이 더욱 강조되었으며, 다상유동 해석과 디지털 트윈 기술이 핵심 도구로 평가되었다.

미래 모빌리티(UAM)

응답자들은 다중 로터와 복잡한 형상에서 발생하는 유동 특성을 정확하게 해석하기 위한 CFD 기술의 필요성을 언급하였다. 비행체 성능, 비정상 공력 해석, 기체-추진 통합 해석 도구의 개발이 요구되었으며, 이를 위해 고해상도 시뮬레이션과 병렬화 코드 개발이 강조되었다.

- 유동 소음 해석: 다중 로터로 인한 소음 발생 및 에너지 흐름 해석
- 디지털 트윈 환경: AI와 연계된 실시간 해석, 날씨 변화와 빌딩풍 모델링
- 수소저장 해석: BOG/BOR(Boil-Off Gas/Boil-Off Rate)와 같은 현상의 정확한 시뮬레이션
- 6DOF 해석: 유체와 구조가 통합된 고정밀 해석 기법

우주항공

우주항공 분야에서는 극한 조건의 물리 모델링과 대규모 시뮬레이션의 필요성이 강조되었다.

- 복합 추진 통합 해석: 초임계(supercritical) 조건에서의 액체 연료 연소 모델링
- 비정상 유동 해석: 고받음각에서 발생하는 공력 특성 분석

친환경·에너지

수소 및 친환경 에너지 분야에서는 다상유동 해석과 열유체 연계 해석의 정확도를 높이는 기술이 중요하다고 평가되었다.

- 수소 분야: 다상 난류 유동 해석, 복합 열전달 및 반응 모델링
- 가스터빈 연소: 다상 열전달, 구조 연성 해석, 다중 스케일 해석
- 소형 모듈 원자로(SMR): 다물리 연계 2상 유동 해석, 빠른 계산 결과 산출을 위한 기술 개발

AI와 데이터 기반 해석

AI 분야에서는 시뮬레이션을 통한 고품질 데이터 획득이 강조되었다. 측정 데이터만으로 물리적 의미를 파악하는 데 한계가 있기 때문에 Physics-based와 Data-driven의 하이브리드 분석이 중요한 역할을 할 것으로 보인다.

- AI 기반 의사결정 지원: 고정밀 물리 기반 시뮬레이션과 결합된 데이터 주도형 분석

시스템 반도체

시스템 반도체 분야에서는 전공정 설비 내 열 및 유체 해석이 필요하다고 지적되었으며, 희박 기체 유동과 같은 진공 상태 공정에 대한 연구의 중요성이 강조되었다.

바이오·헬스

바이오·헬스 분야에서는 움직이는 형상에 대한 효과적 모델링이 요구되었으며, 이는 혈류 해석, 생체 유동 등 복잡한 물리 현상을 다루는 데 중요한 역할을 할 것으로 평가되었다.

CFD 기술은 이러한 미래 산업 분야에서 핵심적 역할을 수행할 것으로 기대되며, 특히 디지털 트윈 환경 구축, AI와의 융합, 그리고 다중 물리 모델링을 통해 해석의 정밀도와 효율성을 개선할 수 있을 것으로 보인다. 복잡한 유동 문제와 대규모 시뮬레이션을 해결하기 위한 계산 성능 향상, 병렬화 코드 개발, 그리고 데이터 기반 모델링이 CFD 기술 발전의 핵심 요소로 자리잡을 것이다.

CFD 기술은 앞으로 더욱 복잡한 문제를 해결하고, 다양한 산업 분야에서 활용 범위를 확장할 것으로 전망된다. 이를 위해 계산 성능 향상, 자동화 기술, 그리고 AI와의 융합이 필수적이라는 점이 강조되었다. 또한, 학술적 연구와 산업적 요구를 연결하는 다학제적 접근이 CFD 기술의 발전을 가속화할 수 있는 중요한 열쇠로 제시되었다. 자동화 기술의 발전, 계산 성능 향상, 그리고 AI 기술의 융합이 CFD 기술 발전의 핵심 요소로 다시금 강조되었으며, 상용 소프트웨어와 오픈소스 소프트웨어의 장점을 통합적으로 활용하는 가치를 확인하였다. 나아가 글로벌 협업을 통해 복잡한 문제를 해결할 수 있는 기반을 마련해야 한다는 결론 역시 도출되었다.

제 3 장 연구동향(논문) 분석

제 3 장 연구동향(논문) 분석

3.1 한국전산유체공학회지 논문분석 (2002~2024)

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 공학 및 과학 분야에서 유체의 거동을 수치적으로 해석하는 중요한 연구 분야로 자리 잡았다. 2002년 이후 한국전산유체공학회지에 게재된 1,119편의 논문을 분석한 결과, 연구의 초점이 기본적인 수치기법 개발에서 시작하여, 점차적으로 “공력 최적화, 충격파 예측, 난류 해석, 다상유동 분석” 등의 고난이도 심층응용 연구로 발전해 왔음을 확인할 수 있었다.

키워드 분석

논문에 포함된 1,119개 논문 목록을 분석한 결과, 가장 많이 등장하는 키워드 20개를 추출하여 빈도수를 계산했다. 이 과정에서 한국어와 영어 키워드가 혼재되어 있어 동일한 개념을 나타내는 경우(예: “전산유체역학”과 “Computational Fluid Dynamics”)는 통합 처리했으며, 전체 키워드 수는 약 5,000~6,000개로 추정된다. 분석 결과, 가장 빈번히 등장하는 키워드는 “전산유체역학(CFD)”로 약 780회 나타났으며, 이는 거의 모든 논문이 CFD를 핵심 방법론으로 다루고 있음을 보여준다. 이어서 “난류(Turbulence)”가 약 150회로 2위를 차지하며 난류 모델링의 중요성을 강조했고, “비정상 유동(Unsteady Flow)”은 약 90회로 시간 의존적 유동 해석의 빈도를 반영했다. “최적화(Optimization)”가 약 70회 등장하며, 형상 최적화와 성능 개선 연구의 비중을 나타냈다. “열전달(Heat Transfer)”은 약 60회로 냉각 및 열교환기 관련 주제에서 자주 사용되었고, “공력(Aerodynamics)”은 약 55회로 항공기와 UAM 연구에서 두드러졌다. “캐비테이션(Cavitation)”은 약 45회로 수중 유동 연구의 핵심 주제로 확인되었으며, “수치해석(Numerical Analysis)”은 약 40회로 CFD의 수치 기법을 강조했다. “익형(Airfoil)”은 약 35회로 날개 설계 연구에서, “큰에디모사(LES)”는 약 30회로 고차원적인 난류 모델의 활용을 보여주었다. 다음의 단어들은 전문화된 주제와 최근 트렌드가 드러난다. “초음속(Supersonic)”은 약 28회로 초음속 유동 연구를, “열교환기(Heat Exchanger)”는 약 25회로 에너지 시스템을 다루었다. “프로펠러(Propeller)”는 약 23회로 추진 장치 연구에서, “격자 볼츠만 방법(Lattice-Boltzmann Method)”은 약 20회로 새로운 수치 기법의

도입을 나타냈다. “공력 소음(Aerodynamic Noise)”은 약 18회로 소음 저감 연구에서, “펌프(Pump)”는 약 17회로 유체 기계 분야에서 빈번했다. “생체모방공학(Biomimetics)”은 약 15회로 최근 생물학적 영감을 받은 설계가 주목받았고, “수중익(Hydrofoil)”은 약 14회로 수중 유동 해석에서 나타났다. “도심 항공교통(UAM)”은 약 12회로 신형 기술 분야를, “설명가능한 인공지능(XAI)”은 약 10회로 AI와 CFD의 융합을 반영했다. 이 키워드들은 CFD 연구의 흐름을 잘 보여준다. 상위 10개는 전통적인 주제(난류, 열전달, 공력 등)를 다루며 기초 연구의 기반을, 11위부터 20위는 초음속, 생체모방, UAM, XAI 등 전문화된 응용과 최근 기술 트렌드를 드러낸다. 분석에는 2008년부터 2022년 사이의 일부 데이터 누락으로 인해 다소의 오차가 발생할 가능성이 있으며, 논문당 평균 56개 키워드를 기준으로 빈도수를 추정했다. 이 결과는 항공우주, 에너지, 수중 유동, 신기술 등 다양한 응용 분야에서 CFD 활용을 종합적으로 조명한다.

제목 분석

국내 논문에 포함된 1,119개 논문의 한국어와 영어 제목을 분석하여 가장 많이 등장하는 단어 20개를 분석했다. 이 과정에서 한국어와 영어 단어는 동일 의미(예: “전산”과 “Computational”)라도 통합하지 않고 별도로 계산했으며, 관사(“A”, “The”), 전치사(“of”, “in”), 연결사(“and”) 등 의미가 덜 중요한 단어는 제외했다.

분석 결과, “Numerical”이 약 450회로 가장 빈번히 등장하며 “Numerical Analysis”나 “Numerical Study”처럼 수치 해석을 강조하는 제목에서 자주 사용되었다. 이어서 “전산”은 약 350회로 “전산해석”, “전산유체역학” 등 한국어 제목에서 두드러졌고, “Computational”은 약 300회로 “Computational Fluid Dynamics” 등 영어 제목의 핵심 단어로 확인되었다. 4위는 “Analysis”로 약 250회 등장하며 “Flow Analysis”처럼 해석 결과를 다루는 제목에서 흔히 나타났고, “Flow”는 약 200회로 “Turbulent Flow” 등 유동 해석 주제를 반영했다. “유동”은 약 180회로 “유동해석”, “비정상 유동” 등 한국어 제목에서 유동 연구를 나타냈으며, “해석”은 약 130회로 “열유동 해석” 등 한국어 제목에서 분석 과정을 드러냈다. 9위 “Aerodynamic”은 약 90회로 “Aerodynamic Characteristics” 등 공력 연구에서, 10위 “CFD”는 약 80회로 “CFD를 활용한”처럼 전산유체역학을 직접 언급하며 나타났다.

다음 순위의 단어들은 더 구체적인 주제를 보여준다. “Optimization”은 약 70회로 “Shape Optimization” 등 최적화 연구에서, “Turbulent”는 약 60회로 “Turbulent Flow” 등 난류 주제에서 빈번했다. “Simulation”은 약 55회로 “LES Simulation” 등 모의실험을, “Heat”는 약 50회로 “Heat Transfer” 등 열 관련 연구를 다루었다. “Design”은 약 45회로 “Airfoil Design” 등 설계 주제에서, “Airfoil”은 약 40회로 익형 연구에서 사용되었다. “Cavitation”은 약 35회로 “Cavitation Flow” 등 캐비테이션 주제에서, “Unsteady”는 약 30회로 “Unsteady Flow” 등 비정상 유동 연구에서 나타났다. “Pump”는 약 25회로 “Centrifugal Pump” 등 펌프 연구에서, “Supersonic”은 약 20회로 “Supersonic Flow” 등 초음속 연구에서 확인되었다.

과거에는 전산해석의 정확도를 높이기 위한 기본적인 수치 해석 방법론과 격자 생성 기법이 주된 연구 주제였으나, 최근에는 고급 공력 설계, 격자 최적화, 난류 모델링, 인공지능(AI) 기반 CFD 기법이 새로운 연구의 중심이 되고 있다. 특히 항공우주, 자동차, 재생에너지, 바이오메디컬 분야에서의 CFD 활용이 증가하면서, 다양한 산업에서 CFD의 역할이 더욱 확대되고 있다.

추가적으로 5년 주기별 연구 트렌드를 보다 구체적으로 살펴보면 아래와 같다.

(1) 2002-2004: 초기 전산유체역학 기법 중심의 연구

주요 키워드	비정상 유동, 비정렬 격자, 열전달, 기본 지배 방정식
주요 특징	<ul style="list-style-type: none"> - CFD의 초기 수치 기법 개발이 활발히 이루어짐 - 비정렬 격자 기반 해석 기법 연구 증가 - 열전달 해석을 위한 기본 방정식 연구 강화 - 주로 유체역학의 기본 문제를 해결하기 위한 해석적 접근법과 단순한 수치 모델이 연구됨

(2) 2005-2009: 경계 조건과 공력 해석의 중요성 대두

주요 키워드	경계층 해석, 공력 유동, 열전달, 비정상 유동
주요 특징	<ul style="list-style-type: none"> - CFD 연구가 실제 공학 시스템 분석에 적용되기 시작 - 경계층 해석과 공력 성능 평가에 대한 연구가 증가 - 자동차 및 항공기 설계 최적화를 위한 공력 해석 연구가 활발 - 연소 및 에너지 변환 과정에서의 열전달 해석이 중요한 주제로 부상

(3) 2010-2014: 최적화와 난류 모델링 연구의 성장

주요 키워드	최적화, 공력 성능, 복잡한 경계 조건, 난류 해석
주요 특징	<ul style="list-style-type: none"> - CFD를 활용한 설계 최적화(Optimization) 연구가 본격적으로 시작 - 항공우주 및 에너지 산업에서의 CFD 응용 증가 - LES(큰에디모사), RANS(레이놀즈 평균 Navier-Stokes) 모델을 활용한 난류 해석 연구 활성화 - 전산 격자 기술 및 수치 기법의 정교화를 위한 연구 진행

(4) 2015-2019: 고급 CFD 응용 및 산업 적용 증가

주요 키워드	공력 효율, 난류 해석, 고급 열전달 모델, 격자 생성
주요 특징	<ul style="list-style-type: none"> - CFD의 산업적 활용도 증가, 정밀한 해석을 위한 격자 최적화 연구 활성화 - 에너지, 풍력, 태양광 등의 재생에너지 분야에서 CFD 적용 확대 - 바이오메디컬 분야에서 혈류 해석, 호흡기 내 유동 해석 연구 증가 - 수치 해석의 정확성을 높이기 위한 고해상도 격자 기법 연구 활발

(5) 2020-2024: CFD 기법의 정교화 및 확장

주요 키워드	충격파 예측, 격자 최적화, 공력 성능 향상, AI 기반 CFD
주요 특징	<ul style="list-style-type: none"> - 초음속 및 극초음속 유동 해석을 위한 충격파 모델링 연구 증가 - 격자 최적화(Grid Adaptation) 연구 강화, 머신러닝을 활용한 최적화 기법 등장 - 다상 유동(icing, cavitation, droplet dynamics) 연구의 중요성 증가 - 인공지능^{AI} 및 딥러닝 기법을 활용한 CFD 가속화 연구가 활발히 진행

해당기간 동안 연구 주제별로 성장 및 감소 추세를 보이는 분야를 정리하면 아래와 같다.

최근 급성장한 연구주제	공력 해석 Aerodynamics	충격파 예측, 공력 최적화 연구 급증
다상 유동 Multiphase Flow	빙결(icing), 물방울 충돌, 상변화 모델링 연구 활성화	
난류 모델링 Turbulence Modeling	LES, RANS, DNS 기반의 정밀한 난류 해석 증가	
격자 최적화 Mesh Optimization	고해상도 격자 기법 및 적응형 격자 연구 확대	
AI 기반 CFD 기법	머신러닝을 활용한 전산해석 기법 등장	
감소하는 연구주제	비정렬 격자 Unstructured Mesh	격자 생성 알고리즘이 발전하면서 연구 감소
기본 방정식 해석 Fundamental Equations	CFD의 응용 연구 증가로 상대적 감소	
전통적 난류 해석 Traditional Turbulence Models	기존 RANS 모델 연구 감소, LES/DNS 모델로 전환	
열전달 Heat Transfer	독립적인 연구보다는 응용 분야 연구로 흡수되는 경향	

이를 통해 국내에서의 전산유체역학(CFD) 연구는 지난 20여 년간 기초 수치 해석 연구에서 응용 중심 연구로 변화하였다는 것을 확인할 수 있다. 최근의 연구는 고급 난류 해석, 충격파 예측, 격자 최적화, 다상유동 해석, AI 기반 CFD에 초점을 맞추고 있다. 특히, 항공우주, 자동차, 반도체 냉각, 재생에너지, 바이오메디컬 산업에서 CFD의 역할이 확대되고 있으며, 앞으로는 머신러닝과 딥러닝을 활용한 CFD 가속화 연구가 더욱 활발해질 전망이다. 향후 연구 방향으로는 다음과 같은 점이 주목된다.

향후 연구 방향	고속 전산해석 기법 개발	AI 및 GPU 병렬 연산을 활용한 CFD 계산 속도 향상
초음속 및 극초음속 유동 연구	충격파 해석 및 항공기 공력 성능 평가	
다상 유동 및 복합재료 모델	빙결, 캐비테이션 등 복합적인 유동 해석	
산업 응용 최적화	자동차, 항공, 풍력터빈 등의 설계 최적화 연구	

이러한 연구 발전은 향후 CFD가 단순한 해석 도구를 넘어, 실제 산업 및 공학 시스템의 설계와 최적화를 위한 필수 기술로 자리 잡을 것임을 시사한다.

3.2 전산유체역학 관련 국제 논문 (1989~2024)

컴퓨터 연산 능력의 발전과 함께 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 다양한 공학 분야에서 핵심 연구 분야로 자리 잡았다. 본 장에서는 International Journal of Computational Fluid Dynamics에 게재된 논문을 분석하여 CFD 연구의 변화 양상을 파악하고, 향후 연구 방향을 예측하고자 하였다. 1989년부터 2024년까지의 연구 트렌드를 중심으로 연구 주제의 변화를 분석하며, 주요 연구 키워드를 통해 CFD의 발전 방향을 조망한다.

제목분석

해당 국제 저널의 논문 제목을 분석한 결과, 단어들은 “Computational” (135회), “Fluid” (125회), “Dynamics” (108회)를 중심으로 Computational Fluid Dynamics (CFD) 기반 연구의 주도적 역할을 보여준다. “Flow” (56회), “Heat” (19회), “Transfer” (18회)는 유체 흐름과 열/질량 전달 현상을 다루는 주요 주제를, “Model” (37회), “Numerical” (35회), “Simulation” (31회), “Modeling” (17회)은 수치적 모델링과 시뮬레이션 방법론의 중요성을 강조한다. “Fracture” (21회)와 “Rock” (10회)는 지질학적 맥락에서의 균열 및 암석 연구를 나타낸다. “Performance” (13회)와 “Optimization” (8회)은 시스템 성능 평가와 최적화를, “Three-Dimensional” (11회)은 복잡한 3D 구조 분석을 지칭한다. “Pressure” (10회)는 압력 조건의 영향을, “Field” (9회)는 물리적 장의 분포를 다룬다. 이 단어들은 CFD를 활용하여 유체 동역학, 열전달, 자연 구조 등을 분석하고, 공학적 최적화를 추구하는 다학제적 연구 경향을 반영한다. 종합적으로 이 단어들은 CFD가 공학(열 교환기, 터빈 등)과 자연과학(지질학 등) 분야에서 유체 흐름, 열전달, 시스템 성능을 분석하고 예측하는 데 광범위하게 활용됨을 반영한다. 상위 단어는 CFD 연구의 방법론, 응용 분야, 그리고 목표를 포괄하며, 현실적인 3차원 수치 분석을 통해 다양한 물리적 현상을 탐구하는 학문적 흐름을 잘 보여준다.

주제분석

해당 국제 저널의 “Subject” 항목을 분석한 결과, 가장 자주 등장하는 20개의 단어를 추출하여 요약하면 다음과 같다. “Computational Fluid Dynamics” (40회)가 압도적으로 많이 등장하며, CFD가 다양한 연구의 핵심 주제임을 보여준다. “Engineering” (34회)와 “Technology” (29회)는 공학 및 기술적 응용을 다루는 논문이 주를 이루고 있음을 나타내고, “Fluid Dynamics” (26회)와 “Physical Sciences” (22회)는 유체의 동적 특성과 물리학적 분석에 초점을 맞춘 연구를 반영한다. “Mathematical Models” (16회)와 “Computer Simulation” (13회)은 수치 모델링과 시뮬레이션 방법론의 중요성을 강조하며, “Fractures” (12회)와 “Rocks” (10회)는 지질학적 맥락에서의 균열 및 암석 연구를 지칭한다. “Heat Transfer” (9회)와 “Mass Transfer” (8회)는 열 및 질량 이동 현상을 다루는 주제를, “Mechanics” (9회)와 “Hydrodynamics” (8회)는 역학적 분석과 유체 흐름의 특성을 나타낸다. “Chemical Engineering” (7회), “Environmental Sciences” (7회), “Geotechnical Engineering” (6회)은 특정 공학 분야와 환경적 응용을, “Navier-Stokes Equations” (6회)는 CFD에서 자주 사용되는 기본 방정식을, “Finite Element Method” (6회)는 수치 해석 기법을 강조한다. “Porous Materials” (5회)와 “Turbulence” (5회)는 다공성 매질과 난류 연구를 포함한다. 종합적으로, “Subject” 항목에서 나타난 상위 단어들은 CFD를 중심으로 공학, 물리학, 자연과학 분야에서 유체 흐름, 열전달, 구조적 특성을 분석하는 다양한 연구 주제를 포괄하며, 수학적 모델링과 시뮬레이션을 통한 학문적 접근이 두드러짐을 보여준다.

초록분석

초록에서 추출된 상위 20개 연구 단어는 Computational Fluid Dynamics (CFD, 43회)를 중심으로 한 첨단 유체역학 및 공학 연구의 주요 주제를 드러낸다. “Model” (88회)과 “Simulation” (50회)은 수치 모델링과 컴퓨터 시뮬레이션이 주된 연구 방법론임을 강조하며, “Numerical” (32회)이 이를 보완한다. “Flow” (80회), “Fluid” (54회), “Velocity” (20회), “Pressure” (28회)는 유체 흐름의 동역학적 특성과 압력 분포를 분석하는 데 초점을 맞추고, “Heat” (34회) 및 “Transfer” (33회)는 열 및 질량 전달의 열역학적 과정을 다룬다. “Fracture” (25회)와 “Rock” (18회)는 지질공학적 맥락에서 균열 구조와 암석 내 유체 거동을 탐구하며, “Turbulence” (15회)는 난류의 복잡한 유동 특성을 조사한다. “Performance” (22회)와 “Design” (14회)은 시스템 성능 평가와 설계 최적화를 목표로 하며, “Temperature” (21회)는 열적 경계 조건의 영향을 분석한다. “Experiment” (17회)는 시뮬레이션의 실험적 검증, “Effect” (16회)는 인자 간 상호작용을, “Analysis” (19회)는 데이터의 정량적 해석을 지칭한다. “Behavior” (13회)는 물리적 현상의 동적 특성을 규명하려는 연구 목적을 반영한다. 종합적으로, 이러한 용어들은 CFD를 활용하여 유체 흐름, 열전달, 난류 등의 다분야적 현상을 정밀히 분석하고, 공학적 성능 향상을 위한 수치적 및 실험적 접근을 통합적으로 다루는 연구 동향을 입증한다.

IJCFD 저널에서 확인할 수 있는 CFD 연구의 시대별 변화는 아래와 같다.

(1) 초기 연구 (1980~1990년대):

기초 이론 및 수치 해석 기법 확립이 주를 이루었으며, 1980~1990년대의 CFD 연구는 기초 수치 해석 방법론 개발에 초점이 맞춰져 있었다. 이 시기의 연구는 CFD의 이론적 기반을 구축하는 데 집중하였으며, 계산 자원의 한계로 인해 비교적 간단한 문제를 대상으로 한 연구가 주를 이루었다.

1980~1990년대

수치 해석 기법
유한 요소법 ^{Finite Element Method, FEM} , 유한 차분법 ^{Finite Difference Method, FDM} , 유한 체적법 ^{Finite Volume Method, FVM} 등 다양한 수치 해석 방법이 개발되었다.
Navier-Stokes 방정식 해법 연구
비압축성 및 저 레이놀즈 수 ^{Low Reynolds Number} 흐름을 해석하는 데 중점을 두었으며, 난류 모델링 기법이 등장하기 시작했다.
수학적 모델^{Mathematical Models}
유체의 거동을 보다 정밀하게 예측하기 위한 수학적 모델 연구가 활발히 진행되었다.

(2) 응용 전산역학 시대로의 전환 (2000~2010년대):

CFD 연구는 산업 응용 중심으로 전환되기 시작하였으며 산업 응용연구 비중이 점차 확대되었다. 이 시기의 연구는 보다 복잡한 시스템을 해석하는 데 초점을 맞추었으며, 산업체와의 협업을 통해 실질적인 문제 해결에 기여하였다.

2000~2010년대

고 레이놀즈 수 및 압축성 유동 연구
항공우주, 자동차, 국방 분야에서 활용도를 높이기 위해 고속 및 압축성 유동의 해석이 중요해졌다.
난류 모델링 기법 발전
RANS ^{Reynolds-Averaged Navier-Stokes} , LES ^{Large Eddy Simulation} 등 고급 난류 모델이 등장하며, 실용적인 난류 해석이 가능해졌다.
열 및 에너지 시스템 연구
열전달 및 연소 현상을 CFD로 해석하려는 연구가 증가하면서, 열역학 ^{Thermodynamics} 분야 연구가 증가하였다.
유체-구조 상호작용^{FSI} 및 멀티피직스 시뮬레이션
다양한 물리적 현상을 동시에 해석할 수 있도록 CFD가 구조해석, 열전달, 반응유동 등과 결합되는 방향으로 발전하였다.

(3) 현대 연구 (2010년대~현재):

최근 CFD 연구는 고정밀 시뮬레이션 및 AI 활용을 중심으로 발전하고 있다.

특히 최근 CFD 연구는 높은 정확도를 요구하는 복잡한 문제를 해결하는 방향으로 진화하고 있다.

2010년대~현재

DNS^{Direct Numerical Simulation} 및 고해상도 난류 해석
기존 모델보다 높은 정밀도의 시뮬레이션이 가능해졌으며, 난류와 같은 복잡한 흐름을 직접 해석하는 연구가 증가하였다.
멀티스케일 및 멀티피직스 시뮬레이션
전통적인 유체 해석을 넘어, 바이오메디컬(혈류 해석), 신재생 에너지(풍력 터빈 최적화), 환경 모델링(대기 및 수질 흐름) 등 다양한 분야에서 CFD가 활용되고 있다.
머신러닝 및 인공지능 적용
AI 기반 CFD 연구가 시작되었으며, 데이터 기반 모델링 및 계산 비용 절감을 위한 기법이 연구되고 있다.
클라우드 및 고성능 컴퓨팅 활용
CFD 연구의 대규모화가 진행되면서, 클라우드 컴퓨팅 및 고성능 병렬 연산 기법이 도입되고 있다.

이를 고려하면 향후 20년간 CFD 연구는 다음과 같은 방향으로 발전할 것으로 예상된다.

향후 발전 예상

AI 기반 CFD 모델링
인공지능을 활용한 CFD 가속화 및 자동화 기술이 개발될 것이며, 머신러닝 기반 난류 모델이 점점 활용될 것으로 보인다.
양자 컴퓨팅을 활용한 CFD
현재의 수치 해석 한계를 넘어서는 양자 컴퓨팅 기반 유체 해석이 등장할 가능성이 있다.
고정밀 다중 물리 시뮬레이션
유체-구조 연성 해석, 전자기장과의 결합 해석 등이 더욱 정교해질 전망이다.
신재생 에너지 및 환경 모델링 확대
풍력, 태양열, 수력 발전 및 기후 모델링 등에 CFD가 보다 적극적으로 활용될 것이다.
자율 주행 및 항공우주 CFD 연구
항공기 설계, 하이퍼루프, 드론 및 자율주행 시스템의 공기역학 해석이 주요 연구 분야로 자리 잡을 것이다.

CFD 연구는 초기의 수치 해석 기법 개발에서 시작하여 산업 응용, 고정밀 시뮬레이션, 인공지능 기반 최적화로 발전해왔다. 향후 20년간 CFD 연구는 인공지능, 양자 컴퓨팅, 멀티피직스 해석과 결합되면서 더욱 고도화될 것으로 예상된다. 연구자들 역시 이러한 트렌드에 영향을 받아 AI 기반 CFD, 고정밀 난류 모델링, 다상유동 해석, 멀티피직스 시뮬레이션 등의 분야에서 연구에 적극적으로 뛰어들 수 있을 것으로 보인다. CFD의 지속적인 발전은 항공우주, 자동차, 에너지, 의료 등 다양한 산업의 혁신을 이끌어 갈 것이며, 이에 따른 연구자들의 역할이 더욱 중요해질 것이다.

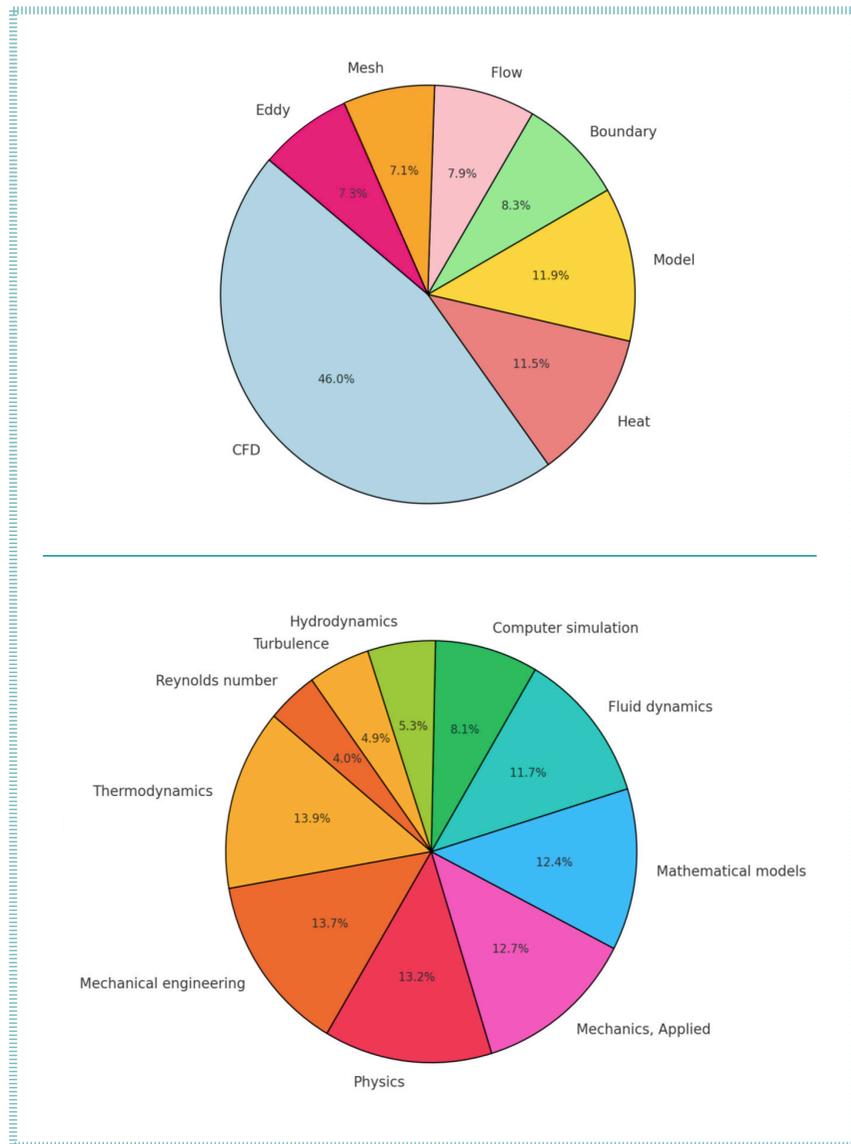


Fig 3.1 KSCFE(한국전산유체공학회지) 및 IJCFD(Int. J. CFD) 논문의 키워드 분석 결과

3.3 미래 전망

CFD의 미래를 전망하기 위해 기술 동향과 미래 전망에 관한 다수의 리뷰 논문과 보고서들이 발표되어 왔다. 대표적으로 NASA에서 2014년에 출판한 “CFD Vision 2030 Study: A Path to Revolutionary Computational Aerosciences”는 NASA가 주도하여 작성한 전략적 로드맵으로 2030년까지 CFD(Computational Fluid Dynamics) 기술을 실험의 보조 도구에서 의사결정에 활용 가능한 설계 도구로 발전시키기 위한 비전을 제시하였다. 이를 포함하여 CFD의 미래 예측에 대한 해외의 사례들을 살펴보면 다음과 같다. 이들 미래 예측 보고서에서 공통적으로 강조된 사항은 정확성과 실시간성의 향상이다. 시대에 따라 이들의 구현 방법에 약간의 차이는 보이지만 공통적으로 난류 모델링의 정확성 향상과 고성능 컴퓨팅의 활용성이 강조되었으며 점진적으로 인공지능의 기술의 중요성이 부각되고 있다.

CFD Vision 2030 Study: A Path to Revolutionary Computational Aerosciences¹⁾

NASA가 2014년에 발표한 전략 로드맵으로, 2030년까지 CFD를 의사결정에 직접 활용될 수 있는 핵심 설계 도구로 발전시키는 비전을 제시하였다.

당대의 CFD는 난류 모델의 부정확성, 자동화 부족, 고성능 컴퓨팅 활용의 한계 등으로 인해 실제 설계에 전면적으로 활용되기 어려웠으며, 보고서는 이를 극복하기 위해 다섯 가지 핵심 기술 분야를 제시하였는데, (1) 물리 모델링(Physical modeling) (2) 알고리즘(Algorithm) (3) 형상/격자처리(Geometry and grid generation) (4) 지식 추출(Knowledge extraction) (5) 다학제 분석 및 최적화(Multidisciplinary Analysis and Optimization)가 이에 해당한다. 그리고 기반 기술로 고성능 컴퓨팅(High performance computing)의 중요성을 강조하였다. 기술발전을 위해 산학연 협력을 통한 장기적 투자와 인력 양성의 필요성도 언급하였다.

CFD Vision 2030 Roadmap: 2020 Status, Progress, and Challenge²⁾

2014년의 로드맵 이후 NASA가 2020년에 출판한 2030년 CFD 비전 달성을 위한 중간 점검 성격의 보고서로, 고성능 컴퓨팅, 물리 모델링, 알고리즘, 격자 생성, 데이터 추출, 다학제 최적화 등 6개 핵심 분야의 발전 상황을 점검하였다. 주요 기술 발전으로 LES(Large Eddy Simulation) 기술 발전, 오픈소스 코드 확산, 자동 격자 생성 도구의 개선을 언급하였으며, 엑사스케일 컴퓨팅의 CFD 응용 코드 개발 현황도 보고하였다. 그러나 난류 모델링의 정확성 향상, 사용자 친화성 부족, 소프트웨어 통합성 문제, 전문 인력 부족 등은 여전히 도전 과제로 남아있다고 지적하였으며, 2030년까지 CFD를 핵심 설계 도구로 정착시키기 위해 산학연 공동 노력과 지속적 투자가 필요하다고 강조하였다.

1) Slotnick, J. P., Khodadoust, A., Alonso, J. J., Darmofal, D. L., Gropp, W. D., Lurie, E. J., & Mavriplis, D. J. (2014). CFD vision 2030 study: A path to revolutionary computational aerosciences (NASA/CR-2014-218178). NASA Langley Research Center. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20140003093>

2) Cary, A. W., Chawner, J. R., Duque, E. P. N., Gropp, W. D., Kleb, B. L., Kolonay, R. M., Nielsen, E. J., & Smith, B. R. (2021). CFD Vision 2030 Roadmap: 2020 Status, Progress, and Challenges. AIAA CFD Vision 2030 Integration Committee. Retrieved from <https://www.cfd2030.com/report/CFD-Vision-2030-Roadmap-2020-Report.pdf>

CFD of the Future: Year 2025 and Beyond³⁾

2020년 출판된 “50 Years of CFD in Engineering Science”의 한 부분을 구성하는 이 보고서에서는 2025년 이후 CFD 발전을 특히 머신러닝 분야와 연관시켜 전망하였다. AI와 머신러닝 기술의 도입으로 유동 예측 정확도와 계산 효율성이 크게 향상될 것으로 보고, 특히 서로게이트 모델링과 데이터 기반 난류 모델링을 주목하였다. 또한 CFD의 실시간 분석 및 디지털 트윈 구현의 가능성을 고성능 컴퓨팅^{HPC}과 클라우드 플랫폼의 확산과 함께 예상하였으며, 사용자 접근성 또한 높아질 것으로 예상하였다. 복잡한 다물리 문제를 다루기 위한 CFD의 확장과 자동 격자 생성, 오류 탐지, 시각화 등 작업의 자동화도 빠르게 진행되고 있으며, 이러한 기술 발전과 함께 CFD가 설계 의사결정의 핵심 기술로 자리 잡을 수 있을 것으로 전망하였다.

Future Directions of Computational Fluid Dynamics⁴⁾

2017년 스탠포드 대학교에서 발표한 이 보고서는 CFD의 미래 발전 방향을 제시하며, 특히 복잡한 난류 유동의 예측에 있어 기존 모델의 한계를 지적하고, 물리 모델링의 발전에 대해 강조하였다. 당시에도 그리고 현재에도 실제 산업 현장에서 널리 사용되는 RANS 모델은 많은 유체역학적 조건에서 부정확하며, 따라서 이는 실제 설계 적용을 어렵게 만들고 있음을 지적하였다. 이를 해결하기 위해 이 보고서는 고신뢰 및 고정밀 난류 예측을 위한 LES의 전방위적인 확대 적용이 필요하다고 언급하였는데, LES의 복잡성과 고비용성의 문제를 해결하기 위해 고성능 컴퓨팅, 고차 수치 기법, 적응형 격자 기술 등이 함께 발전해야 함을 강조하였다. 또한, 다물리 연성해석, 형상 최적화, 불확실성 정량화 등과 통합된 미래형 CFD 플랫폼의 필요성을 부각하여, 궁극적으로는 CFD를 보다 정확하고 자동화된, 설계 통합형 도구로 발전시켜야 함을 강조하였다.

제 4 장 6대 분야별 로드맵

3) Runchal, A. K., & Rao, M. M. (2020). CFD of the future: Year 2025 and beyond. In A. K. Runchal & M. M. Rao (Eds.), 50 Years of CFD in Engineering Sciences (pp. 779-795). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-981-15-2670-1_22

4) Witherden, F. D., & Jameson, A. (2017). Future directions of computational fluid dynamics (AIAA Paper 2017-3791). Presented at the 23rd AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Denver, CO.
<https://doi.org/10.2514/6.2017-3791>

제 4 장 6대 분야별 로드맵

4.1 기계 분야 로드맵

아래에서 제시하는 로드맵은 기계공학 분야에 있어 전산유체역학(CFD)과 관련된 최신 기술 발전과 응용에 관한 목표를 제시하고 있다. 이 로드맵은 크게 다섯 가지 주요 카테고리 구성되어 있다: “물리 모델링(Physical Modeling)”, “알고리즘 개발(Algorithm)”, “사용자 편의성(Usability)”, “고성능 컴퓨팅 및 최적화(HPC and Optimization)”, 그리고 “데이터 기반 분석(Data-Driven Analysis, AI)”이다. 각각의 카테고리에서 2025년부터 2040년까지 단계적으로 목표를 설정하고 있으며, 여기에는 다상유동, 다물리 모델링, 인공지능(AI) 및 고성능 컴퓨팅(HPC) 활용 기술 등이 포함된다. 보다 구체적인 기간별 목표를 정리하면 아래와 같다.

물리 모델링(Physical Modeling)

물리 모델링은 다상유동과 다물리 상호작용의 해석과 예측을 중점적으로 다룬다. 2025년까지는 비선형 난류, 에너지 및 물질 전달, 화학 반응, 연소와 같은 복잡한 물리 현상을 시뮬레이션하기 위한 초기 모델 개발이 목표이다. 2030년까지는 고속 회전 기계에 적합한 고차 정확도의 다물리 모델과 적응형 격자 기술이 통합될 것이다. 이후 2035년에는 고온·고압 환경에서 다상유동과 다물리 상호작용을 포괄하는 고정밀 모델링이 이루어질 계획이며, 2040년에는 이러한 기술이 완전히 일반화되어 기존 CFD 기술을 상당부분 대체하거나 보완할 것으로 예상된다.

알고리즘 개발(Algorithm)

알고리즘 개발은 시뮬레이션 정확도와 효율성을 개선하기 위해 기초적인 수학적 접근을 다룬다. 초기에는 난류 해석 및 시간 적분의 강건성을 강화하는 알고리즘이 개발될 예정이며, 이후 다중 상호작용 경계면을 처리하고 복잡한 접촉 특성을 모델링할 수 있는 기술로 확대된다. 최종적으로는 인공지능과 머신러닝을 활용하여 기존 물리 모델과의 융합 기술을 완성하는 것이 목표이다.

사용자 편의성(Usability)

사용자 편의성은 실시간 분석과 사용자 친화적인 인터페이스 개발을 목표로 한다. 2025년에는 초기 AI 기반 자동 보고 시스템이 개발되고, 이후 2030년에는 자동화된 품질 관리 및 오류 탐지가 가능해질 것이다. 이러한 기술은 2040년까지 완전히 통합된 디지털 트윈 시스템으로 발전하여 유지보수와 최적화 기능을 자동화할 것이다.

고성능 컴퓨팅 및 최적화(HPC and Optimization)

HPC는 시뮬레이션의 실시간성을 확보하고 계산 자원의 활용을 극대화하는 데 초점이 맞춰져 있다. 2025년에는 GPU 기반 병렬 계산을 도입하여 고속 회전 기계의 시뮬레이션이 가능해질 것이다. 이후 2030년에는 클라우드 기반 분산 컴퓨팅 기술이 확대되고, 2040년에는 Exascale 수준의 병렬 계산을 통해 초대형 시뮬레이션이 가능해질 것으로 보인다.

데이터 기반 분석 및 AI(Data-Driven Analysis, AI)

AI 기술은 난류 모델링, 다물리 모델링, 적응형 메싱 기술 등 다양한 응용 분야에 활용될 예정이다. 초기에는 PINN(Physics-Informed Neural Networks)과 같은 기법이 도입되어 정확도를 향상시키는 데 기여할 것이다. 2035년부터는 AI를 활용하여 디지털 트윈 기술이 본격적으로 구현되고, 2040년까지는 이러한 기술이 기존 CFD 모델을 상당 부분 대체하거나 하이브리드 형태로 융합될 것이다.

기계관련 로드맵에서는 내용은 특히 회전 기계, 터보 기계와 같은 기계 공학 응용에 보다 적합하도록 설정되었다. 다상 및 다물리 모델은 고속 회전 기계의 극한 조건에서도 작동할 수 있도록 개발될 예정이며, 디지털 트윈 기술은 기계 설계 및 유지보수 과정 전반에 걸쳐 실시간 데이터 생성 및 최적화를 지원할 것이다. 이 로드맵은 학문적 기여뿐만 아니라 산업적으로도 큰 변화를 가져올 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 물리적 복잡성을 통합하는 모델링 기술과 HPC 및 AI의 융합은 새로운 표준을 정립할 것이다. 이 과정에서 터보 기계, 회전 기계와 같은 실제 기계 공학 문제를 중심으로 연구가 이루어질 것이다. 이를 통해 기계 공학 분야의 전산유체역학은 한 단계 더 도약할 것으로 기대된다.

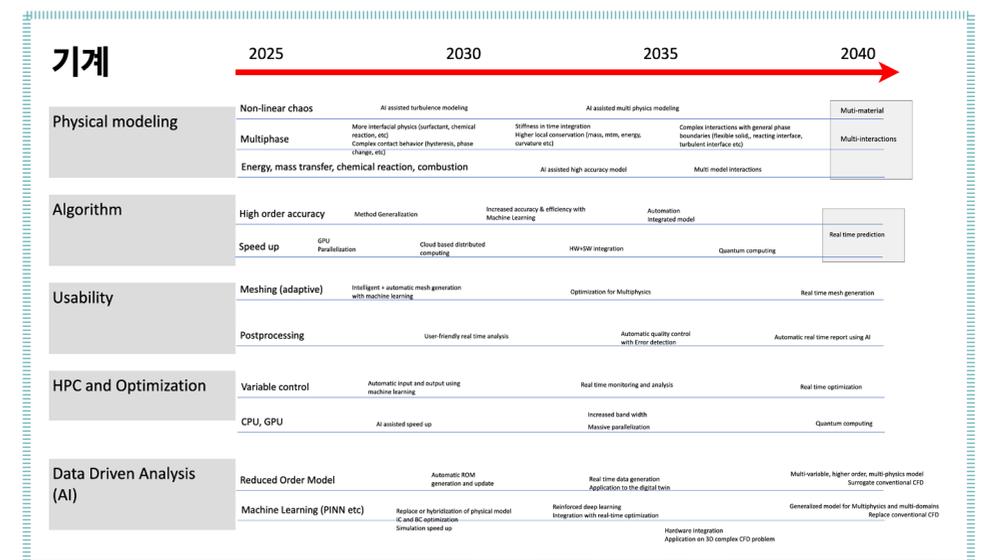


Fig 4.1 기계 분야의 KVISION 2040 roadmap

4.2 항공 분야 로드맵

Physical modeling

현재 국내의 기술개발 동향 및 연구 수준은 고정밀 RANS 모델의 개발과 활용이다. 모델을 개발하는 커뮤니티는 여전히 소수의 국내 대학 연구자를 중심으로 개별 복잡 물리모델링 연구가 진행되고 있으며, 복잡유동을 위한 기계학습은 주로 난류 유동에서 단순 형상 (미사일 기저 등)에서 개발되는 실정이다. 로터 유동과 같은 고난류 유동으로의 기계학습은 아직은 요원한 실정이며, 천이점 모델링과 예측도 일부 진행 단계에 머물러 있다. 화학반응이 있는 연소나 희박기체 유동 해석은 극초음속 비행체 해석 분야에서 진행되고 있는 실정이나 소수의 연구자들에 의해 비교적 활발히 연구되어지고 있으며, 아직 WLSSES로의 적용은 진행되고 있지 않다.

Knowledge extraction

실험과 수치해석 결합의 시도는 국방관련 연구기관 및 일부 항공산업계의 실험데이터가 존재하나, 공개가능한 범위가 제한적이라 산학연 차원에서 working group 등을 만들어 오픈 데이터베이스 구축이 필요하다. 이를 통해 CFD 알고리즘 검증 연구 및 UQ 등의 관련분야 발전이 필요하다.

Algorithms

알고리즘 개발 분야는 한국이 매우 취약한 수준이다. 국가나 산업계, 연구계 등에서의 지원도 상당히 제한적이므로 국내 학계의 극소수 연구진에 의해 in-house 코드 형태로 개발되는 실정이다. Low-dissipation discretization for scale-resolving methods 분야의 항공 응용은 국내 소수의 학계가 진행 중이며, Uncertainty quantification 분야는 수리과학 분야에서 제한적으로 연구되어 항공우주 분야로의 적용은 미미하나, UAM 등의 도심항공예측시 반드시 고려되어야 할 분야로서 국내 연구진의 양성이 시급한 편이다. 미국에서는 국방부 산하 육해공 기초 연구실 Army Research Lab, Office of Naval Research, Air Force Office of Sponsored Research에서 꾸준히 오랜 기간동안 지원해오고 있는데, 우리나라도 이와 같은 수준을 목표로 기본 연구가 육성이 되어야 할 필요가 있다.

Geometry modeling and mesh generation

항공 분야는 복잡한 형상이 많고 그레이놀즈 유동이 대부분이라 격자의 수렴도에 대한 연구 및 HPC를 활용한 자동 격자 생성 등에 대한 연구도 진행되고 있다. 이는 산업계에서 큰 수요를 보일 수 있는 부분으로, 중소 소프트웨어 산업계가 시도하고 있으나 예산부족 등으로 인해 활발히 진행되지는 못하는 여건이라 일반화 및 활성화는 아직 쉽지 않다. 선진국에 비해 정부의 투자 및 지원이 상당히 부족한 분야로서, 격자 생성기가 오픈소스로도 존재하는 NASA의 VGRID, openVSP 해외사례에 비해 상대적으로 열악한 분야이다.

Multi-Disciplinary Analysis and Optimization^{MDAO}

NASA와 Sandia Lab에서 개발하여 국내외 연구자들에게 오픈소스 라이브러리로 제공하는 도구로 국내에서도 일부 사용되고 있으나, 주로 CASES와 같은 상용 소프트웨어를 선호하는 실정이다. 활용에 있어서는 설계의 반복적 특성을 고려하여 low-fidelity analysis와 연계한 설계가 주를 이루고, 수많은 설계 변수를 동시에 고려하는 large-scale optimization은 아직 초기 단계이다. 외국에 비해 많은 향상이 요구되는 분야 중 하나이다.

국내 항공우주 및 방위 산업과의 연관성

2024년 국가가 선정한 12대 전략기술에 우주항공과 모빌리티가 포함되고 최근 K-방산 수출에 힘입어, 항공우주 관련 기술 개발이 적극 요구되는 실정이다. 비행체의 다양한 공력 특성을 정확하고 신속하게 계산할 수 있는 고정확도 CFD 해석 및 설계 기술들이 필요하다.

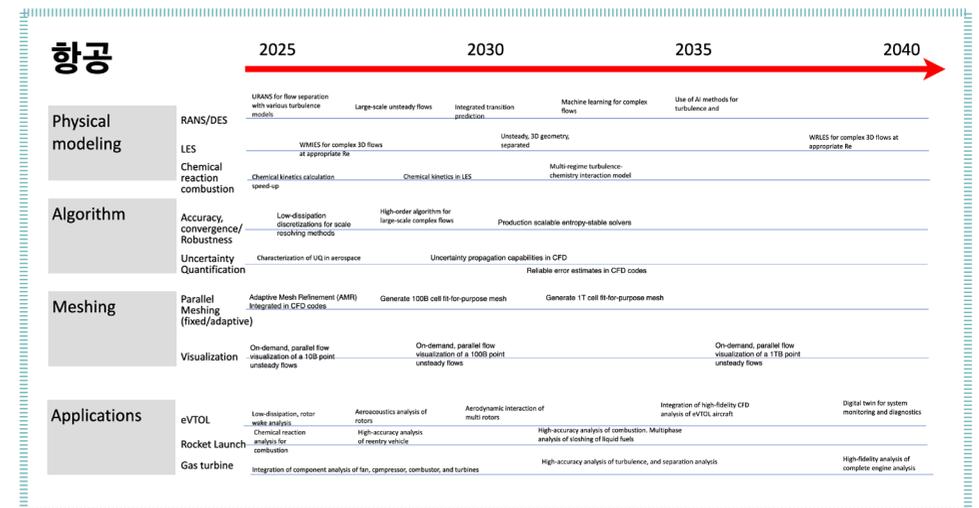


Fig 4.2 항공 분야의 KVISION 2040 roadmap

응용에 있어서는 먼저 UAM/AAM 기체 및 도심풍 모사가 핵심 이슈로 예상된다. 도심항공모빌리티는 기체 개발, 도심 저고도 기상 예측, 기체 인증 및 평가, 버티포트 인프라와 로터 후류 상호작용 등의 많은 분야가 고정확도로 빠른 시간에 요구되고 있다. eVTOL UAM 기체 개발에 있어서도 상용기에 비해 사이즈가 작고 수직이착륙을 가능하게 하는 로터 및 전기추진을 요구하므로, 여러 개의 로터로 인한 상호작용 등이 동시에 고려되는 복잡한 현상을 모사할 수 있는 large-scale unsteady aerodynamics 해석이 필수적이며 turbulent wake flows에 대한 해석이 매우 중요할 것이다. 또한 CFD는 우주 자원 확보를 위한 비행체 개발과 무기 체계 개발에 필수적이다. 마하수가 5~20까지 변하는 극초음속의 경우 유동의 비선형성이 증가되므로, shock-viscous layer 상호작용 등의 고정확도 CFD 해석이 필수적이며, 고온 기체 가열로 인한 화학반응 및 재료와 구조 상호작용까지 고려되어야 하는 다물리 해석기법이 필수적이다. 국가에서 관련 연구센터 등을 중심으로 연구를 지원하고 있지만, 연구인력을 포함하여 보다 큰 저변확대가 필수적이다. 그리고 화성탐사 등에 필수적인 소형 사이즈 UAV의 효율을 높이려면 로터 설계가 필수적이며, 일반 헬리콥터와 달리 저레이놀즈 수에서 비행하므로 관련 익형 및 블레이드 설계 기술도 확보되어야 한다. 친환경 전기 추진 비행체의 관점에서는 수소 등의 연료전지 활용 분산 전기추진 시스템의 중요성이 부각된다. 현재 소형드론의 Li-ion 배터리는 운용시간이 짧아 액화저온수소와 연료전지를 결합한 하이브리드 추진 시스템으로 발전하는 동향인데, 연료탱크 내의 극저온 수소의 기화 현상, sloshing에 따른 비행안정성 영향, 연료전지 내의 열유동 해석 및 예측 등은 CFD가 항공, 기계, 조선 분야와의 접점을 이루는 중요한 영역으로 발전이 요구되는 분야이다.

4.3 조선해양 분야 로드맵

아래 로드맵은 조선해양 분야에 있어 전산유체역학(CFD)과 관련된 최신 기술 발전과 응용 목표를 제시하고 있다. 이 로드맵은 크게 다섯 가지 주요 카테고리로 구성되어 있다: “물리 모델링 Physical Modeling”, “알고리즘 개발 Algorithm”, “사용자 편의성 Usability”, “고성능 컴퓨팅 HPC”, 그리고 “인공지능 AI”이다. 각각의 카테고리에서 2025년부터 2040년까지 단계적으로 목표를 설정하고 있으며, 여기에는 다상유동, 다물리 모델링, 인공지능 AI 및 고성능 컴퓨팅 HPC 활용 기술 등이 포함된다. 보다 구체적인 기간별 목표를 정리하면 아래와 같다.

물리 모델링(Physical Modeling)

물리 모델링은 다상유동과 다물리 상호작용의 해석과 예측을 중점적으로 다룬다. 2025년까지는 캐비테이션, 극저온 유체의 에너지 및 물질 전달, 비선형 해양파 생성, 비선형 난류와 같은 복잡한 물리 현상을 시뮬레이션하기 위한 초기 모델 개발이 목표이다. 2030년까지는 넓은 범위의 레이놀즈 수를 포함하는 고차 정확도의 다물리 모델과 적응형 격자 기술이 통합될 것이다. 이후 2035년에는 극저온·고압 환경에서 다상유동과 다물리 상호작용을 포괄하는 고정밀 모델링이 이루어질 계획이며, 2040년에는 이러한 기술이 완전히 일반화되어 기존 CFD 기술을 대체하거나 보완할 것으로 예상된다.

알고리즘 개발(Algorithm)

알고리즘 개발은 시뮬레이션 정확도와 효율성을 개선하기 위해 기초 수학적 접근을 다룬다. 초기에는 이상 유동, 난류 해석 및 시간 적분의 강건성을 강화하는 알고리즘이 개발될 예정이며, 이후 다중 상호작용 경계면을 처리하고 복잡한 접촉 특성을 모델링할 수 있는 기술로 확대된다. 최종적으로는 인공지능과 머신러닝을 활용하여 기존 물리 모델과의 융합 기술을 완성하는 것이 목표이다.

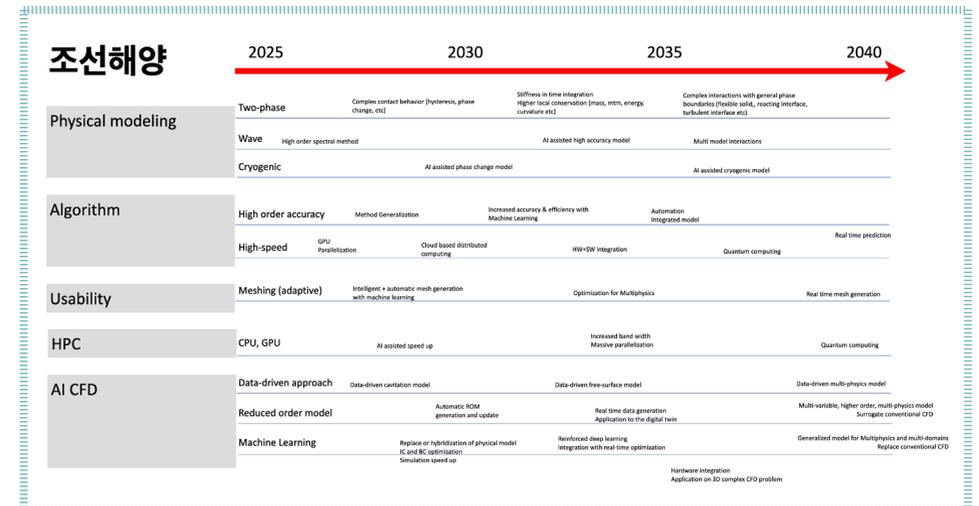


Fig 4.3 조선해양 분야의 KVISION 2040 roadmap

사용자 편의성(Usability)

사용자 편의성은 실시간 분석과 사용자 친화적인 인터페이스 개발을 목표로 한다. 2025년에는 초기 AI 기반 자동 보고 시스템이 개발되고, 이후 2030년에는 자동화된 품질 관리 및 오류 탐지가 가능해질 것이다. 이러한 기술은 2040년까지 완전히 통합된 디지털 트윈 시스템으로 발전하여 유지보수와 최적화 기능을 자동화할 것이다.

고성능 컴퓨팅(HPC)

HPC는 시뮬레이션의 실시간성을 확보하고 계산 자원의 활용을 극대화하는 데 초점이 맞춰져 있다. 2025년에는 GPU 기반 병렬 계산을 도입하여 고속 회전 기계의 시뮬레이션이 가능해질 것이다. 이후 2030년에는 클라우드 기반 분산 컴퓨팅 기술이 확대되고, 2040년에는 Exascale 수준의 병렬 계산을 통해 초대형 시뮬레이션이 가능해질 것으로 보인다.

인공지능(AI)

AI 기술은 이상 모델링, 난류 모델링, 다물리 모델링, 적응형 격자 기술 등 다양한 응용 분야에 활용될 예정이다. 초기에는 PINN(Physics-Informed Neural Networks)과 같은 기법이 도입되어 정확도를 향상시키는 데 기여할 것이다. 2035년부터는 AI를 활용하여 디지털 트윈 기술이 본격적으로 구현되고, 2040년까지는 이러한 기술이 기존 CFD 모델을 상당 부분 대체하거나 하이브리드 형태로 융합될 것이다.

조선해양관련 로드맵에서의 내용은 선박 및 해양구조물 주위의 유동과 화물탱크 내에서의 공학 응용에 보다 적합하도록 설정되었다. 다상유동 및 다물리 모델은 레이놀즈 수가 큰 구조물 및 극저온·고압 조건에서도 작동할 수 있도록 개발될 예정이며, 디지털 트윈 기술은 해양구조물의 설계 및 유지보수 과정 전반에 걸쳐 실시간 데이터 생성 및 최적화를 지원할 것이다. 이 로드맵은 학문적 기여뿐만 아니라 산업적으로도 큰 변화를 가져올 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 물리적 복잡성을 통합하는 모델링 기술과 HPC 및 AI의 융합은 새로운 표준을 정립할 것이다. 이 과정에서 선박을 포함한 해양구조물과 같은 실제 조선해양 공학 문제를 중심으로 연구가 이루어질 것이다. 이를 통해 조선해양공학 분야의 전산 유체 역학은 한 단계 더 도약할 것으로 기대된다.

4.4 원자력 분야 로드맵

아래 로드맵은 원자력 분야에 있어 전산유체역학(CFD)과 관련된 최신 기술 발전과 응용 목표를 제시하고 있다. 원자력 분야는 다른 공학 분야는 달리 유체 매질의 물리적 현상에 따라 크게 단상(Single Phase) 유동과 다상(Multi Phase) 유동으로 구분하고, 원자력 시스템에서 요구되는 복잡한 현상을 해석하기 위해 다분야 해석(Multi-disciplinary analysis)에 관한 내용을 추가하였다. 각각의 카테고리에서 2025년부터 2040년까지 해석 기술 개발의 시급성과 컴퓨팅 하드웨어 및 소프트웨어의 개발 수준에 따른 해석 기술 개발 목표를 설정하였다. 보다 구체적인 기간별 목표를 정리하면 아래와 같다.

단상 유동 (Single Phase)

기존에 가동중인 경수형 기반의 대형원전의 경우 단상 유동 CFD 해석은 주로 원자로(Reactor Pressure Vessel, RPV) 및 냉각재 계통(Reactor Coolant System, RCS) 설계 검증 및 개선을 위해 적용된다. 원자로에서 정상운전 및 과도 상태에서 발생할 수 있는 주요 물리 현상 및 설계 검증을 위해 필요한 해석 분야는 자연대류와 원자로 하반구(Lower Plenum)에서의 유동분포 해석이다. 증기발생기를 포함하는 냉각재 계통에서는 원자로 사고 시 발생할 수 있는 물리 현상에 대한 고신뢰도 해석 기술이 요구된다. 증기발생기의 오류를 야기하는 이물질의 거동을 규명하기 위해 수화학(Water Chemistry)과 열수력의 연계가 필요하다. 현재 비교적 단순화된 부식 모델을 적용하는 수화학-열유체 해석이 시도되고 있으나 장기적으로 mechanistic 모델 기반의 수화학 모델과 열수력 코드를 연계하는 연구가 진행될 것이다. 또한 최근 세계적으로 활발히 개발되고 있는 소형모듈원자로(SMR) 시장에서는 경수형 및 비 경수형 SMR의 노심 고신뢰도 해석에 단상 고신뢰도 해석 기술이 적용된다. 경수형 SMR 분야에서는 나선형 증기발생기의 유체유발 진동 규명이 가장 중요한 이슈이며, 실규모 수준의 해석은 2030년 전후에 수행될 것으로 전망된다. 비 경수형 SMR 분야에서는 중성자동역학(노물리) 코드와의 다물리 연계를 통한 비 경수형 SMR의 노심 다물리 해석이 핵심 기술로서 활용될 것이다.

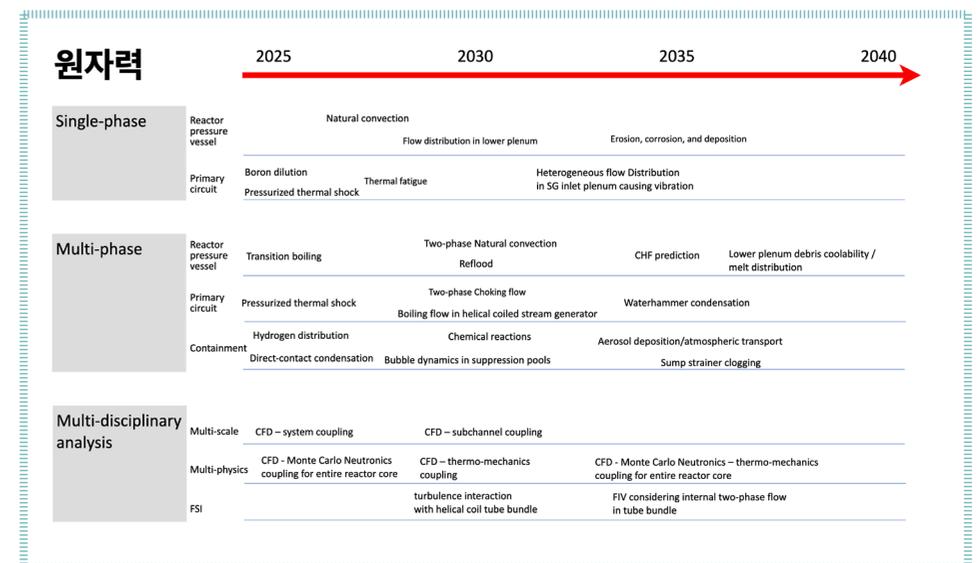


Fig 4.4 원자력 분야의 KVISION 2040 roadmap

다상 유동 (Multi Phase)

국내외에서 운영되고 있는 대부분의 가압경수로 **Pressurized Water Reactor, PWR**는 매우 높은 압력으로 운영되고 있다. 그래서 배관 파단 등과 같은 중대한 사고가 발생할 경우 복잡한 열유체 현상이 발생한다. 즉, 압력 거동은 수 초 만에 150 bar에서 대기압으로 변하며, 이에 따라 상변화 및 비응축성 기체 **Non-condensable gas**를 동반하는 다상유동 현상이 발생한다. 원자력 열수력 분야에서는 원자로의 설계 검증 및 안전성 평가를 위해 이와 같은 다상유동 해석을 위한 노력이 이루어져 왔다.

최근 계산 자원의 발달로 인해 원자로 내부에서 발생하는 다상유동 현상을 CFD로 해석하려는 시도가 꾸준히 진행되고 있다. 원자로 다상유동은 상변화를 필수적으로 동반하기 때문에 물리 모델을 원천 배제한 CFD 시도는 제한적이다. 증발 **Evaporation** 및 응축 **Condensation**을 포함하는 상변화 모델링을 포함하는 계면 추적법, Multi Size Group **MUSIG**, Multi-Group Interfacial area transport **IAT** 기술 개발이 지속적으로 요구된다.

핵연료 집합체를 포함하는 원자로 용기 내부에서 발생하는 주요 다상유동 현상은 주로 사고 시 발생한다. 대형냉각재상실사고 **Large Break Loss-Of-Coolant Accident, LBLOCA**시 핵연료집합체 영역에서는 핵연료 노출 및 안전주입수 주입으로 인해 복잡한 천이 비등 **Transition boiling**, 재관수 **Reflood**에 대한 수치적 규명이 필요하며 이는 향후 5년 이내에 고신뢰도 CFD 해석 기술로 규명이 가능할 것으로 기대한다. 그러나 임계열유속 **Critical Heat Flux** 예측 기술은 2030년 이상 장기 과제로 추진될 것으로 보인다.

원자로 계통 시스템에서는 임계유동 **Choking Flow** 및 응축으로 인한 수격 **Waterhammer** 현상 등이 핵심 이슈이며, 현재 대부분 실험으로 도출하는 상관식을 사용하는 동시에 이를 활용하여 전산해석 기술을 개발하고 있다. 또한 원자로 사고 시 격납건물에서 나타나는 핵분열 생성물 거동, 직접 벽면 응축은 고신뢰도 CFD 기술이 적용되고 있으며 곧 규명될 것으로 기대한다. 격납건물 압력 제어를 위한 살수 **Spray** 모델, 에어로졸 거동 및 수송 모델 개발 및 이를 활용한 고신뢰도 2상 유동 해석 기술은 2030년 이후 장기적인 관점에서 발전할 것으로 보인다.

다분야 해석 (Multi-disciplinary analysis)

원자로 시스템은 핵연료 다발을 포함하고 있는 원자로 용기뿐만 아니라, 증기발생기, 가압기 등의 원자로 냉각재 시스템의 주요 기기들을 포함하기 때문에 구조적으로 매우 복잡하다. 해당 시스템을 하나의 길이 척도 **Length Scale**를 가진 유체 해석 도구로 접근하기에는 한계가 존재한다. 또한, 정상운전 및 사고 시나리오에 따라 원자로 내부 거동이 급격하게 변화하기 때문에 노물리 **Neutron Kinetics**, 핵연료 **Fuel Mechanics**, 수화학 **Water Chemistry**, 열구조 **Thermal Mechanics** 등의 다분야 해석 기술이 요구된다. 이와 같은 기술적 이슈를 극복하기 위해 원자력 해석 분야에서는 다중스케일 **Multi-scale** 해석, 다물리 **Multi-Physics** 해석 기술 개발이 활발히 진행되고 있다.

다중스케일 해석에 있어서는 원자로 열수력 해석 분야에서 오랫동안 사용되어 온 1차원 계통 열수력 코드와 CFD 코드와의 연계 해석 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 최근에도 세계적으로 다양한 알고리즘을 적용하여 다중스케일 연계 해석 기술을 개발하고 있다. 일반적으로 영역 중첩 기법 **Domain Overlapping**, 영역 분할 기법 **Domain Partition**, 단일 영역 기법 **Single Domain** 등의 기술들이 활용되고 있다. 노심 열수력 해석 코드인 부수로 **Subchannel** 열수력 코드와 CFD 코드와의 연계를 통한 원자로 노심 고신뢰도 해석 기술은 2030년 무렵 구현될 수 있을 것으로 보인다.

다물리 해석은 원자로 해석 분야에서 오랫동안 연구되어 왔다. 몬테카를로 기반의 중성자동역학 코드와 CFD 해석 기술을 연계하는 다물리 해석은 현재 가장 활발히 연구되는 분야이다. 이후 핵연료 구조 코드까지 연계하는 다물리 해석이 2030년까지 완료될 것으로 보이며, 해당 기술을 전체 핵연료봉을 대상으로 계산하는 것은 계산 자원의 이슈가 있어 10년 이상의 장기적 관점에서 발전할 것으로 보인다.

한편, 최근 경쟁적으로 기술개발을 진행하고 있는 경수형 소형모듈원자로 **SMR**에서는 증기발생기 내부의 나선형 세관 **Helical Tube bundle**의 건전성 평가를 위해 유체유발 진동 현상을 규명하는 것이 가장 큰 이슈였다. 현재는 매우 부분적인 영역에서 실험 및 CFD 해석 기술을 적용하고 있다. 향후 우리나라의 경쟁력 확보를 위해서는 고신뢰도 FSI 적용 기술이 반드시 필요하다. 현재 경수형 SMR 설계가 진행중이므로 2030년에는 FSI 기술이 개발되어 적용될 것으로 전망되며, 나선형 세관 내부의 2상 유동 현상을 포함하는 FSI 해석 기술은 향후 10년 이내에 개발되는 것이 바람직할 것으로 보인다.

4.5 AI 분야 로드맵

데이터 기반 분석 및 AI 기술은 기존 전산유체역학^{CFD}이 직면하고 있는 한계점을 보완하거나, 극복하는 방향으로의 쓰임새가 주목받고 있다. 예를 들어 더 복잡한 물리현상의 해석, 모델의 최적화를 통한 인적 및 시간적 자원 투입 최소화, 후처리^{Post-processing} 과정의 단축 등의 목표를 위한 데이터 기반 분석 및 AI 모델의 활용성이 적극적으로 검토되고 있다. 특히 최근의 AI 기술의 발달은 모델을 최적화하고, 대용량의 데이터를 처리하는 등 현재 전산유체역학이 직면하고 있는 다양한 요구사항을 해결하는 데 있어서 주요한 도구로서 활용될 가능성이 있다.

AI 모델을 CFD 기술에 활용하기 위한 시도는 크게 세 가지 방향으로 구분할 수 있다. 첫째는 데이터 기반 모델로서, 대용량의 데이터를 처리하여 데이터 변수 간의 관계를 밝혀내는 것에 능숙한 AI 모델의 장점을 CFD와 독립적으로 작동하는 도구로서 활용하는 것이다. 둘째는 물리 모델을 최적화하는 도구로서 AI를 활용하는 것으로서, CFD에서 생성된 데이터를 기반으로 유체역학 모델을 최적화하기 위해 AI를 활용한다. 세 번째는 하이브리드 모델^{데이터 기반 및 물리모델 기반}로서 데이터 기반 모델과 물리 기반 모델의 장점을 결합하여 활용하는 것이다. 각각의 장단점을 살펴보면 다음과 같다.

데이터 기반 모델

데이터 기반 모델은 대규모 데이터베이스를 바탕으로 AI 모델을 학습시켜서 작동하는 AI-CFD 기법으로서, 주로 복잡한 유동장의 해석이 필요할 때 CFD 데이터를 직접 기계학습^{Machine Learning} 모델에 입력하여 AI 모델의 파라미터를 예측하는 형태로 작동한다. 상대적으로 모델링 과정이 단순하며, Matrix-Vector 연산으로 작동하는 인공지능망 모델을 활용하기 때문에 빠른 계산 속도를 갖는다는 장점이 있다. 또한 충분한 양의 데이터셋이 주어질 경우 매우 적은 오차로 복잡한 유동장을 해석할 수 있다는 강점이 있다. 그러나, 인공지능 모델을 학습시키기 위해서는 대규모 데이터셋이 필요하다는 단점이 있으며, 또한 데이터셋을 통해서 물리적인 메커니즘을 기술하는 것이 매우 어렵다는 약점이 있다.

물리 모델

물리 기반 모델은 CFD의 데이터를 사용하여 기존의 유체역학 모델을 최적화하는 역할을 수행한다. 유체역학의 지배방정식을 활용하여 데이터를 정돈하고, AI의 판단을 가이드하기 때문에 데이터 기반 모델 대비해서 훨씬 적은 양의 데이터를 통해서 동작하는 것이 장점이다. 또한 물리 메커니즘에 대한 직관적인 해석이 가능하여, AI-CFD의 해석 결과를 설계 및 최적화에 활용할 수 있다. 그러나 지배방정식의 해석을 필요로 하기 때문에 AI 모델의 계산 부하가 높고, 데이터 수의 한계로 인하여 데이터 기반 모델에 비해 낮은 정확도를 갖는다는 단점이 있다.

하이브리드 모델

하이브리드 모델은 데이터 기반 모델과 물리 기반 모델의 장점을 통합하여 설계되므로, 높은 정밀도를 보장하면서도 AI 모델의 계산 부하를 낮출 수 있다는 장점이 있다. 유체역학 지배방정식에 대한 물리적인 메커니즘과 AI 모델의 데이터 해석을 동시에 활용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 데이터 기반/물리 모델 기반 사이의 균형을 맞추기 위해서는 AI 모델 설계가 복잡해지는 단점이 있으며, 훈련 과정에서도 데이터와 물리 법칙 사이에서 제한 조건의 균형을 맞추기 위한 작업이 필요하다. 또한 데이터 간의 물리 관계를 해석하는 점에 있어서도 제한적인 단점을 갖고 있다.

(1) 2025: Data-driven Approach, PINN

데이터 기반 접근법^{Data-driven Approach}과 물리정보신경망^{Physics-Informed Neural Networks, PINN}의 초기 연구와 적용이 활발히 진행되고 있는 상황이다.

데이터 기반 접근법을 통해 CFD의 전통적 계산 비용을 줄이고 대규모 데이터 활용을 최적화하는 방향이 주목받을 것이며, PINN은 유체역학 지배방정식을 신경망 학습에 통합함으로써 기존 데이터 기반 모델과 달리 물리적 제한 조건을 자연스럽게 포함하는 새로운 AI 모델로 발전하고 있다.

특히 저레이놀즈수 환경에서 PINN의 가능성을 검증하고, 기존 CFD 모델의 계산 정확도를 높이는 시도가 이루어질 것이다. 초기 PINN 모델은 단순한 지배방정식 해석과 제한된 문제 영역에서의 적용에 초점을 맞춘 연구가 활발히 진행 중에 있다.

(2) 2030: Velocity-Pressure Fields Recovery, PINN for High Reynolds number

속도-압력장 복원^{Velocity-Pressure Fields Recovery} 기술을 발전시켜, 최소한의 데이터만으로 복잡한 유동장의 세부 구조를 효과적으로 복원할 수 있는 방법론에 대한 연구가 필요하다.

이러한 기술은 항공우주 공학에서 항공기 날개 주위의 유동 해석, 해양 공학에서 선박 주변의 유체 흐름 예측, 에너지 산업에서 풍력 터빈 및 열교환기와 같은 장비의 성능 최적화, 도시 계획에서 대기 흐름 시뮬레이션 및 오염 물질 확산 예측, 그리고 자동차 산업에서 공기역학적 설계 개선 등에 활용될 수 있다.

또한, PINN의 측면에서는 보다 복잡한 물리적 현상과 고레이놀즈수^{High Reynolds number} 환경에서의 적용이 주된 목표가 될 것이다. 고레이놀즈수 환경에서의 모델 검증과 더불어, PINN의 계산 안정성을 높이는 알고리즘 개발이 병행될 것이며, 이는 CFD에서의 물리적 불연속성을 보다 세밀하게 처리하는 기반이 될 것으로 보인다.

(3) 2035: AI-guided Turbulence Model, PINN for Discontinuity Computing

장기적으로는 AI가 주도하는 난류 모델 AI-guided Turbulence Model과 물리적 불연속성 Shock Waves을 처리하기 위한 PINN 기술이 핵심적인 연구 방향이 될 것이다.

난류 모델은 전통적 모델링에서 불확실성이 높은 부분을 AI로 보완하여 보다 높은 정확도와 효율성을 제공할 것이다.

PINN은 충격파와 같은 급격한 변화가 포함된 복잡한 유체 문제에서도 정밀한 결과를 예측할 수 있는 기술에 대한 연구가 필요하다.

AI 기반 난류 모델이 기존 RANS Reynolds-Averaged Navier-Stokes 및 LES Large Eddy Simulation 기법을 대체하거나 보완하며, 항공우주, 해양, 에너지 등 다양한 산업에 적용될 것으로 예상된다.

(4) 2040: Data-CFD Integrated Optimization, Multi-physics Solutions

데이터와 CFD 기술이 충분히 통합된 최적화 기술과 다중물리 해석 Multi-Physics Solutions이 주된 연구 및 개발 목표가 될 것이다. 이러한 플랫폼은 다양한 물리적 현상을 동시에 고려하여 설계와 해석의 동시화를 최종 목표로 한다.

또한 AI는 다중물리 문제 Multi-physics Problems에서의 상호작용을 효율적으로 분석하고, 상이한 물리적 영역 간의 경계 조건을 정확히 처리하는 데 중요한 역할을 할 것으로 보인다. 이 시점에서는 AI-CFD가 단순히 유체 해석 도구로 남지 않고, 구조 역학, 열전달, 화학 반응 등을 포괄하는 통합 플랫폼으로 진화할 수 있다.

데이터 기반 분석 및 AI 기술은 CFD 분야의 한계를 극복하고 새로운 가능성을 제시하는 데 필수적인 요소로 자리잡고 있다. 2025년부터 2040년에 이르는 단계적 발전 로드맵을 통해, AI와 CFD의 융합은 보다 복잡한 물리적 현상을 해석하고 최적화하는 강력한 도구로 발전할 것이다. 이는 다양한 산업과 학문 분야에서의 응용 가능성을 확장하며, 연구와 실무에 있어 혁신적인 변화를 가져올 것이다.

한편, 물리 모델을 병합한 AI-CFD 기술 사례도 몇 가지 문제점이 남아있다. 특히 데이터 소스의 다양성 부족, 고난이도의 학습 및 모델 형성 과정을 해결해야 한다. 따라서 앞으로는 AI-CFD 모델을 일반화하고 특정 문제를 해결하기 위한 인공지능 모델의 입력-출력 구조, 데이터 세트의 구성 그리고 데이터 기반 모델과 수학적/물리적 제약 조건의 병합이 연구의 주요 초점이 될 것이다.

이러한 한계에도 불구하고, 2040년 CFD 비전의 관점에서는 CFD와 AI의 결합은 불가피하며, 더욱 다양한 성공 사례를 만들어 나갈 것으로 예상된다. 특히 CFD로 해결해야 하는 문제가 더욱 복잡해짐에 따라 AI 모델의 다양한 장점들 (데이터 기반 모델 구축의 용이성, 빠른 계산 속도, 물리 모델과 데이터의 통합)을 보완적으로 받아들일 수 있는 CFD 모델의 개발이 필요하며, 이는 기존의 CFD의 한계를 원천적으로 극복한 새로운 해석 기술의 시대를 열어줄 것이다.

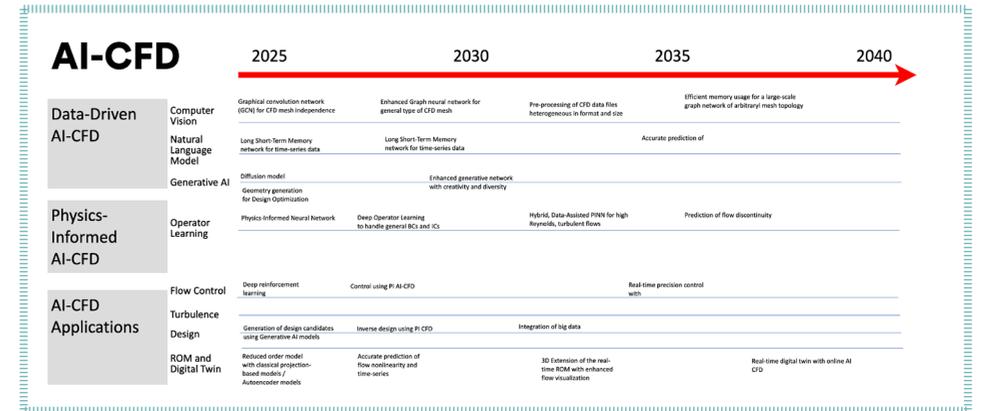


Fig 4.5 AI 분야의 KVISION 2040 roadmap

4.6 HPC 로드맵

아래 제시된 로드맵은 HPC의 기술 발전을 고려한 주요 마일스톤을 제시하고 있다. 이 로드맵은 크게 세 가지 주요 카테고리 구성되어 있으며 각각 “HPC 기술 HPC Technology”, “대규모 CFD CFD at scale”, “AI/양자 컴퓨팅 AI/Quantum computing”에 해당한다. 각각의 카테고리는 2040년까지 예상되는 중요한 성능 향상수준과 기술 내용을 담고 있으며 상세한 내용은 아래와 같다.

HPC기술 (HPC Technology)

2025년에는 GPU 기반 준엑사플롭스급 시스템 도입과 함께 2030년까지 GPU 중심의 Full-scale 고정밀 시뮬레이션이 가능해질 것이다. 모든 계산 집약적 연산은 GPU에서 이뤄질 것으로 예상된다. 2030년에는 10엑사플롭스급 시스템이, 2035년에는 100엑사플롭스급 시스템이, 그리고 2040년에는 200엑사플롭스급 시스템이 구축될 것으로 예상되지만 전통적인 반도체 기술에 기반한 프로세서의 발전은 포화상태에 달할 수 있기에 시스템 규모의 축소도 예상된다. 시스템 규모의 확장과 더불어 피할수 없는 문제는 바로 전력 문제이다. 현재의 와트당 70기가플롭스 70GFlops/watt의 비약적인 증가 없이는 전력 문제로 인해 시스템 규모가 제한될 것이다. GPU 컴퓨팅에 이어 메모리 컴퓨팅, 네트워크컴퓨팅 기술이 구현되어 CFD 문제에서 고질적인 메모리 대역폭과 네트워크 대역폭에 대한 부분적인 해결이 가능할 것이다. AI 반도체와 양자 프로세서 등의 혁신적인 기술 또한 등장과 함께 선도적인 실증이 이뤄질 것이다.

대규모 CFD (CFD at scale)

엑사플롭스급의 시스템 구축과 함께 시스템 전체를 이용할 수 있는 극한 규모 extreme scale의 실증이 수년 후(~2028) 가능할 것으로 예상된다. 이러한 가정 하에 2018년 구축된 국가슈퍼컴퓨터 5호기에 비해 2025년의 준엑사플롭스 시스템에서는 50배의 성능 향상이, 2040년까지 20,000배의 성능향상이 기대되며 이는 시스템 규모와 거의 비례한다. 이러한 성능 향상을 위해서는 시스템 규모와 컴퓨팅 요소기술, 소프트웨어의 종합적인 발전이 필요하다.

인공지능 컴퓨팅 기술 (AI Computing)

현재 진행되고 있는 AI와의 융합 계산 기법은 상당한 성장 가능성을 보이고 있으며 AI 분야 로드맵에 기술된 것처럼 PINN, SimAI 등의 다양한 AI 기술과의 연계도 활발히 이루어지고 있다. 다만 AI 컴퓨팅을 위한 전용 AI 프로세서와 같은 혁신적인 하드웨어를 이용하는 기술은 예측하기가 어려우며 기술 그 자체 보다는 글로벌 투자 등 외부적인 요인에 의해 영향을 받을 가능성이 클 것으로 보인다. 본 로드맵에서는 2030년 AI프로세서의 실증 계산을 예상하였으나 변동 가능성도 매우 높다.

양자 컴퓨팅

기존의 컴퓨터는 0과 1을 사용하는 비트 bit를 이용하여 계산하지만, 양자 컴퓨터는 0과 1사이의 값을 동시에 가질 수 있는 큐비트 qubit를 활용한다. 양자컴퓨터의 중첩 superposition과 얽힘 entanglement의 특성을 활용하여, computing의 새로운 패러다임을 제시하고 있다. 현재 Shor 알고리즘 암호화 해독과 Grover 알고리즘 무작위 검색을 통해 양자 컴퓨터가 기존 컴퓨터보다 월등한 성능을 보여줄 것을 보여주고 있다. 전산유체역학 알고리즘도 많은 방법론들이 개발되어 오고 있다.

HHL Harrow-Hassidim-Lloyd algorithm 알고리즘을 기반으로 선형시스템 해석 알고리즘이 개발되어 있고, Quantum Lattice Boltzmann Method도 개발되고 있다. 많은 알고리즘들이 개발되고 있지만, 실용적인 문제에는 아직 활용되고 있지 않다.

개선되어야 할 사항들로는 (1) 큐비트의 수 증가, (2) 큐비트의 에러 감소, (3) 큐비트 간의 연결성 증대, (4) 계산 게이트의 정밀도 증가 등이 예상된다. 장기적으로 많은 부분들이 개선되어 CFD 관점에서도 더 빠르고 정밀하게 해석할 수 있으리라 예상된다.

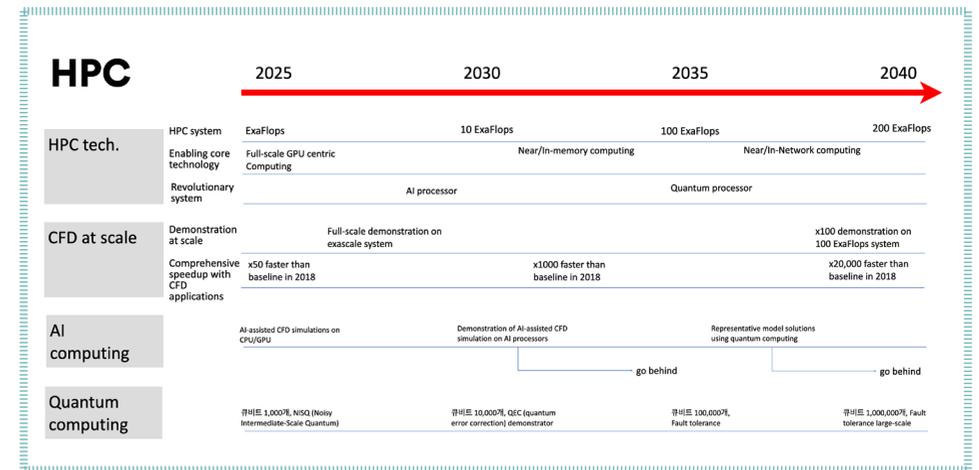


Fig 4.6 HPC 분야의 KVISION 2040 roadmap



제 5 장
제언

제 5 장 제언

5.1 기계 분야

기계 분야에서 다학제적 접근과 고난도 기술 개발이 요구되는 도전들은 학술적 및 산업적으로 큰 영향을 미칠 수 있는 문제와 직결된다. 대표적인 난제로 터보기계의 디지털 트윈을 사례로 들 수 있는데, 이는 항공 엔진, 발전용 터빈, 압축기 등 다양한 분야에서 활용되며 복잡한 형상과 고속·고온 환경에서 작동해야 하기 때문이다. 이러한 터보기계는 다상유동, 열전달, 구조적 피로, 진동 등 다물리 상호작용이 얽혀 있어 정밀한 시뮬레이션이 매우 어렵다. 이를 실시간으로 해석하고 디지털 트윈 기술과 결합해 예측 유지보수와 최적 설계를 자동화하는 시스템을 개발하는 것이 Grand Challenge의 하나로 간주될 수 있다.



Fig.5.1 터보기계의 디지털 트윈 예시 (chatgpt 생성)

이를 위해서는 터보기계 내부의 다상유동과 다물리 상호작용을 통합적으로 모델링해야 하며, 극한 환경에서 나타나는 난류 해석까지 포함해야 한다. 이러한 해석을 실현하기 위해서는 Exascale 수준의 병렬 계산 자원을 활용하고, GPU 기반의 병렬 처리 및 AI 지원 계산 가속화를 통해 실시간 분석이 가능하도록 해야 한다. 터보 기계의 복잡한 형상에 적합한 고품질 적응형 격자 기술을 개발하고, 경계면 추적 및 다중 스케일 해석을 지원하는 격자 생성 기술을 자동화하는 것도 중요하다. 실시간 데이터 수집과 시뮬레이션 결과를 통합하는 디지털 트윈 시스템을 구축하고,

이를 통해 상태 모니터링, 고장 예측, 유지보수 최적화를 구현해야 한다. 또한 Physics-Informed Neural Networks^{PINN}를 활용하여 AI 기반 난류 모델링을 개발하고, 다상유동 경계면 추적과 상변화 해석에 AI를 적용하는 연구도 필요하다.

결론적으로 이러한 문제는 다양한 물리적 현상을 단일 모델로 통합하고, 실시간 분석을 위해 Exascale 수준의 계산 성능을 요구하며, 고속·고압 환경에서 난류와 다상유동을 정밀하게 해석해야 한다는 점에서 매우 높은 도전성을 가진다. 변화하는 환경 조건에 따라 격자를 자동 생성하고 시뮬레이션을 조정하는 적응형 격자 기술의 구현 역시 필수적이다. 이러한 문제가 해결된다면 항공, 발전, 에너지 등 터보기계 산업에서 비용 절감과 효율 향상을 이룰 수 있다. 실시간 디지털 트윈 기술을 통해 유지보수 자동화와 고장 방지 시스템을 실현하고, 에너지 효율이 높은 설계를 통해 탄소 배출 감소와 환경 사고 예방에도 기여할 수 있다. 학문적으로는 다상유동과 다물리 해석의 새로운 기준을 제시하고, AI 기반 시뮬레이션 기술과 Exascale 컴퓨팅 활용 사례를 구축할 수 있다.

이 문제는 물리적 복잡성과 계산 성능의 한계를 동시에 극복해야 한다는 점에서 특히 도전적이며, 성공적으로 해결된다면 기계 분야뿐 아니라 다양한 산업에 혁신적인 변화를 가져올 수 있다. AI와 디지털 트윈 기술을 융합하는 새로운 가능성을 탐구하며, 학술적·산업적 경계를 확장하는 기회를 제공할 것이다.

5.2 항공 분야

먼저 정부나 출연연 등의 연구계에서 국내 산학연 주요 관계자가 개발에 참여하고 주기적인 업데이트를 통한 유지보수가 될 수 있는 국가 CFD 코드의 개발이 필요하다. 라이선스 및 IP는 정부 등 공공섹터에서 관리하는 방식도 검토할 수 있다. 이를 위해 대규모 국가 R&D 과제(예: 재활용 발사체 개발, UAM, 국산 가스터빈 개발 등)에 활용이 될 수 있도록 특정 물리문제의 고정확도 해석으로부터 시작하여(예: 화학반응을 고려한 극초음속 유동 해석 코드 등), 이후 다른 물리문제 해석을 submodule화 하여 코드를 확장시키고 일반화 시켜나가는 것으로 실행의 가능성을 높일 수 있다. 또한 기존 존재하는 오픈소스 코드인 OpenFOAM과 SU2 코드와는 차별되는 점을 강조하고 실수요자를 특정한 이후 수요자 기반으로 코드를 설계 및 구성하고, 개발자 그룹 및 사용자 그룹을 지정하여 유지보수를 수행하는 것이 필요하다.

다음으로, 우주항공 분야 대규모 CFD 해석을 위한 HPC-AI 센터를 구축하는 것이 필요하다(가칭 우주항공 데이터센터 등). 이를 위해 우주항공청 산하의 우주항공 빅데이터/AI 센터를 구축하여, 슈퍼컴퓨팅 센터 역할을 수행하고, 산학연 각 분야에서 생성되는 우주항공 분야의 과학 데이터를 수집하여 오픈 레벨을 정해 HPC-AI 연구의 중심축 역할을 할 수 있도록 해야 한다. 또한 데이터 분석을 위한 각종 분석기법들을 국가 CFD 코드와 더불어 사용가능한 AI 및 데이터 해석 라이브러리로 만들어서 제공하는 것이 필요하다.

5.3 조선해양 분야

조선 해양 분야에서 고난도 기술개발이 요구되는 분야는 자유수면 문제와 직결된다. 자유수면을 포함하는 해양파, 캐비테이션, 극저온 유체의 에너지 및 물질전달과 같은 문제에 대한 해결은 산업적으로 또한 학문적으로 크게 요구되고 있다. 이는 고전적인 선박, 해양구조물 외에도 탱크 슬로싱, 저온·고압 탱크내 BOG/BOR와 같은 다양한 분야에 활용된다. 이와 같은 문제는 다물리 상호작용을 포함한 다학제적 연구가 얽혀 있어 정확도가 높은 시뮬레이션이 매우 어렵다. 이를 정밀하고 실시간으로 해석하여 디지털 트윈 기술과 결합하는 것이 중대한 목표가 될 수 있다.

다물리 현상을 정확하고 실시간으로 해석하는 환경을 실현하기 위해서는 창의적인 알고리즘의 개발 및 고성능 컴퓨팅 자원이 요구된다. 또한, PINN을 활용한 자유수면 예측은 산업 현장에서의 CFD 적용을 가속화시킬 것이다. GPU 기반의 병렬 처리 및 계산 가속화를 통해 실시간으로 해석하는 환경의 구현도 가능하다. 나아가 복잡한 형상의 구조물 및 설계 도면을 활용하여 모델링하기 위해서 사용자 친화적인 인터페이스 개발이 동시에 요구된다.

결론적으로 조선해양 분야에서의 발전을 위해서는, 자유수면을 포함하는 다양한 물리적 현상을 정확하고 실시간으로 분석하기 위한 계산 성능이 요구된다. 그리고 저온·고압 환경에서 난류와 다상유동을 정밀하게 해석해야 한다는 점에서 매우 높은 도전성을 가진다. 변화하는 환경 조건에 따라 격자를 자동 생성하고 시뮬레이션을 조정하는 적응형 격자 기술의 구현 역시 필수적이다. 이러한 문제를 해결할 경우 친환경선박, 해양플랜트 산업에서 비용 절감과 효율 향상을 이룰 수 있다. 실시간 디지털 트윈 기술을 통해 유지보수 자동화와 고장 방지 시스템을 실현하고, 에너지 효율이 높은 설계를 통해 탄소 배출 감소와 환경 사고 예방에도 기여할 수 있다. 학문적으로는 다상유동과 다물리 해석의 새로운 기준을 제시하고, AI 기반 시뮬레이션 기술과 Exascale 컴퓨팅 활용 사례를 구축할 수 있다.

이 문제는 물리적 복잡성과 계산 성능의 한계를 동시에 극복해야 한다는 점에서 도전적이며, 성공적으로 해결된다면 조선해양 분야뿐 아니라 다양한 산업에 혁신적인 변화를 가져올 수 있다. AI와 디지털 트윈 기술을 융합하는 새로운 가능성을 탐구하며, 학술적·산업적 경계를 확장하는 기회를 제공할 것이다.

5.4 원자력 분야

원자력 분야에서는 최근 탄소제로 시대에 대응하고 세계 시장 선점을 위해 소형모듈원자로 Small Modular Reactor, SMR 기술 개발이 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 전력 생산을 위한 경수형 SMR뿐만 아니라, 다양한 수송기기의 전력원으로 활용하기 위해 용융염원자로, 소동고속로, 히트파이프 원자로 등 비경수형 SMR 개발도 진행중이다. 원자로 열수력 관점에서는 원자로 주요 기기(원자로, 증기발생기 등)에 대한 설계 검증 및 안전성 평가를 위해 기존에는 신속 계산 및 최적 계산을 위한 해석 기술들이 개발되어 활발히 사용되었으나, 최근 전산기기의 급속한 발달로 인해 주요 기기들에 대한 CFD 해석 시도가 보이고 있다. 이와 같은 원자로 주요 기기에 대한 CFD 시도 자체가 원자력 분야에서의 Grand Challenge라고 볼 수 있다.

기본적으로 원자로 용기는 무수히 많은 핵연료봉을 포함하고 있는 핵연료집합체 영역과 냉각재의 균일한 유동분포를 얻기 위해 구조물들이 복잡하게 존재한다. 핵연료봉 사이를 흐르는 냉각재의 난류 거동을 해석하기 위해서는 매우 작은 길이 스케일의 격자 해상도가 요구되며, 원자로 용기의 전체 영역을 모사하기 위해서는 고품질의 격자생성 기술과 계산과학 기반의 슈퍼컴퓨팅 기술이 필요하다. 최근 미국의 ExaScale Project에서는 이와 같은 소형모듈원자로의 핵연료집합체 영역에 LES 해석 시도가 이루지고 있다.

또한 원자로 내부에서 나타나는 중성자동역학, 열유체, 핵연료 거동, 구조 등 다분야의 물리 현상을 동시에 해석하기 위한 다물리 연계 기술 개발이 필요하다. 원자력 분야에서 다물리 해석 기술을 오랫동안 개발하여 왔으나, 최근 고신뢰도 해석 기술들을 연계, 슈퍼컴퓨팅 환경에서 구현할 수 있는 기술들이 개발되고 있다. 예를 들어, 몬테카를로 기반의 중성자동역학 해석 기술과 RANS, LES 기반의 열유체 코드들을 연계하여 원자로 핵연료집합체에 대한 다물리 해석이 진행되고 있다

각 물리 분야의 고신뢰도 해석 기술 자체의 고도화도 필요하지만, 코드 간 연계 기술 개발도 필요하다. MPI 기반의 동적 프로세스 관리 Dynamic Process Management와 같이 잘 알려진 라이브러리를 활용하여 자체 연계 기술을 개발하거나, 최근 다양한 분야에서 활발히 사용되고 있는 preCICE와 같은 공개 프로그램을 활용하는 방법이 있을 수 있다.

이와 같은 원자로 주요 기기에 대해 설계 검증 및 안전성 평가를 위한 거대 시뮬레이션에 대한 접근은 대단히 도전적인 시도라고 볼 수 있다. 고신뢰도 열유체 해석 및 다물리 해석 결과들은 AI/ML 기술을 활용하여 다양한 설계조건 및 원자로 운전 조건에 대한 학습 결과들을 생산하는데 활용될 것이며, 해당 데이터들은 원자로 자율 운전 기술개발에도 기여할 수 있다. 또한 원자로 개발 시 고비용의 검증 실험을 대체하는 수치 실험 도구로써 원자로 설계 비용·기간을 절감하는 효과를 가져올 수 있다. 궁극적으로는 국내 개발 원자로의 선진국 대비 기술 경쟁력을 강화하는 기회를 제공할 것이다.

5.5 AI 분야

AI 기반 기술은 CFD의 미래 발전 방향에서 가장 주목받는 핵심 중 하나로, 기존 CFD가 직면해온 계산 속도의 한계, 난류 및 전지구 규모 등 대규모 스케일 문제에서 요구되는 컴퓨팅 성능, 그리고 고품질 격자 자동 생성 등에 대한 해결책을 모색하고 있다. 최근에는 Navier-Stokes 방정식을 직접 신경망 모델의 학습 손실 함수로 활용하는 Physics-Informed Neural Networks^{PINN} 기법이 주목받고 있으며, 이를 통해 물리 법칙에 대한 정합도를 유지하면서 해석 정확도와 계산 효율성을 동시에 높이는 연구가 활발히 진행되고 있다. 비전 기반 AI 기술을 난류 해석에 적용해 미세 스케일 난류 구조를 추적·예측하는 시도 역시 괄목할 만한 성과를 거두고 있다.

AI를 활용한 모델 경량화와 자동 격자 생성 기술은 Exascale 수준의 초고성능 컴퓨팅 자원 및 GPU 병렬 처리를 통해 실시간 분석과 시뮬레이션 가속화를 목표로 하고 있다. 특히 복잡한 다물리 상호작용이 요구되는 터보기계와 같은 Grand Challenge 영역에서는, AI가 기존의 수치해석 기반 접근을 보완하고, 실시간 예측 유지보수 및 최적 설계에 필수적인 디지털 트윈 시스템과 결합해 시너지 효과를 낼 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해서는 대규모 데이터 확보와 신뢰성 높은 학습 방식의 최적화가 뒷받침되어야 하며, 물리 현상에 대한 정교한 이해와 AI 알고리즘의 지속적인 고도화가 필요하다.

결론적으로 AI 기반 CFD는 다중 스케일 및 다물리 분야의 모델링과 예측 능력을 향상시키고, 실시간 해석 및 유지보수 자동화를 가능케 하는 중요한 축으로 발전하고 있다. 다만, 물리 법칙과 데이터 기반 모델을 융합하는 연구는 아직 초기 단계에 머무르고 있어 학계와 산업계의 적극적인 협력이 요구된다. 이를 통해 AI와 CFD, 그리고 디지털 트윈 기술이 유기적으로 결합하여 항공·발전·에너지 등 다양한 산업 분야에서 혁신적인 해석 자동화를 선도해 나가는 것을 준비해야 한다.

5.6 HPC 분야

HPC 기술이 CFD 분야로 원활히 전파되어 CFD 연구자들이 HPC 기술 발전의 성과를 누리기 위해서는 HPC HW의 아키텍처 변화에 대응하는 응용SW 기술 확보와 이를 위한 SW 개발 및 HPC 활용 인력에 대한 지원과 투자가 필요하다.

먼저 선도 HPC 기술 육성을 위해 국가주도 슈퍼컴퓨터 기반의 응용SW 및 활용 기술을 개발해야 한다. 국가를 대표하는 슈퍼컴퓨팅 센터는 최고 수준의 슈퍼컴퓨터를 구축하고 최첨단의 HPC 기술을 빠르게 도입하고 운영해야 한다. HPC 기술의 조기수용자로서 관련 기술을 검증하고 응용SW의 빠른 개발과 활용 기술을 전파하여 시뮬레이션 기반의 계산과학공학 생태계를 선도해야 한다. 이를 위해 HPC 기술에 대한 투자는 한 나라를 대표하는 국가슈퍼컴퓨팅센터 및 이를 보완하는 전문컴퓨팅센터로 선행될 필요가 있다. 현재 우리나라는 국가슈퍼컴퓨팅센터인 KISTI가 국내 최고 수준의 경쟁력 있는 슈퍼컴퓨터를 구축하여 산학연 커뮤니티에 HPC 기술을 보급 및 지원하고 있다. 또한 전략적으로 전문센터를 육성하여 여러 응용분야별로 전문화된 슈퍼컴퓨터를 구축하여 각 분야별 생태계를 확대하려는 노력도 시도되고 있다. 응용SW의 기술 선도와 확산을 위해서는 먼저 이러한 선도적인 슈퍼컴퓨팅센터의 역할을 강화하여 세계적으로 경쟁력 있는 응용SW와 활용 기술을 개발할 필요가 있다. CFD 분야에서 이를 달성하기 위해 필요한 최소한의 실행 방안으로서는 (i) 선도적인 CFD 응용SW들의 개발, (ii) CFD 코드의 확장성과 이식성을 확보하기 위한 최신 HW/SW 기술을 접목, (iii) 국가센터/전문센터에서 보유한 슈퍼컴퓨터에 대한 접근성을 확보하는 방안 등이 포함된다.

다음으로 HPC 선도 기술을 보급하여, 산업과 교육 현장으로 전파하고 격차를 해소해야 한다. 건전한 생태계를 위해서는 선도적인 역할을 수행하는 구성원 뿐만 아니라 풀뿌리 역할을 수행하는 다수의 구성원들이 필요하다. 선도적으로 CFD 응용SW를 개발하고 최첨단의 슈퍼컴퓨터에서 활용할 수 있는 선두주자가 있다면, 이러한 응용SW를 산업 현장에 맞게 사용하고 교육 현장에서 인력양성을 위해 사용하는 후발주자이자 잠재적인 경쟁자들이 반드시 필요하다. 이러한 측면에서 학교와 중소기업의 주된 참여는 건전한 CFD 생태계 구축을 위한 핵심적 요소이며, 이를 위해 슈퍼컴퓨터에 기반한 HPC 기술들은 적절한 수준으로 전파되어야 한다. 오픈소스 패키지로의 배포, 개발된 라이브러리의 drop-in 활용 등을 통해 진입장벽을 낮출 수 있어야 하며, 이들을 손쉽게 사용할 수 있게 하는 활용 환경이나 프로그래밍 환경들이 클라우드 기반으로 제공되어야 한다. 한편으로는 AI 플랫폼과 SW 기업과 연합하여 제조혁신의 디지털전환으로 급격히 발전하고 있는 흐름을 조기에 CFD 분야와 연계한 실증 환경의 구축도 시급하다. 이러한 선도적인 기술들에 대해 충분한 교육 자료와 표준화된 교육 커리큘럼이 개발되고 보급되어야 하며, 이를 위한 실행 방안으로서는 (i) 선도적인 CFD 응용 SW의 진입장벽 제거(추상화를 통한 간결한 인터페이스 제공, 오픈소스 패키지 제공 등), (ii) 국가센터 및 전문센터의 슈퍼컴퓨터를 사용자 중심의 프로그래밍 환경과 활용 환경으로 제공(클라우드 기반의 HW/SW 연계, 디지털전환 테스트베드 구축 등), (iii) CFD 분야 HPC 활용 기술의 단계별 커리큘럼 제공(대학-대학원 연계 강의, 산학연 공동 프로젝트, 해커톤 등) 등이 해당한다.

마지막으로, 혁신적인 컴퓨팅 기술에 대한 투자를 확대하여 AI/양자컴퓨팅 기반의 혁신적인 CFD를 시도해야 한다. AI 프로세서 기반의 AI 컴퓨팅 기술은 비교적 최근에 상용화된 기술이며 양자컴퓨팅 기술은 아직 R&D 수준에서 검증되고 있는 기술이지만 앞으로의 가능성이 무궁무진한 기술로 인식되고 있다. 두 기술 모두 단독으로 사용하기 보다는 CPU/GPU 기반의 고전적인 HPC의 부족한 부분을 채워주는 상호 연계를 통해 매우 큰 시너지를 낼 수 있을 것으로 기대된다. 일례로 CPU와 AI 프로세서를 이용하여 기계학습 워크로드에 AI 컴퓨팅을 이용하거나, CFD의 주요 수치 알고리즘 중의 하나인 선형대수 연산에 양자컴퓨팅을 이용하는 일은 혁신적인 HPC 기술의 실제 응용 사례를 제공할 수 있을 것이다. 나아가 CFD를 통해 컴퓨터 과학이나 양자정보, 물리 분야와의 협업도 가능할 수 있다.

따라서 혁신적인 컴퓨팅 분야에 대해 CFD 분야의 연구자들은 지속적인 관심을 가질 필요가 있으며, 지금부터라도 지속적인 투자가 이루어질 필요가 있다. 이를 위한 방안으로서 (i) AI 프로세서 기반의 AI CFD 연구(AI 프로세서 시스템 구축 및 AI CFD 연구의 선도 사례 창출 등), (ii) CFD를 위한 양자컴퓨팅 기술 연구(양자컴퓨팅 알고리즘의 CFD 적용 방안 및 CPU/GPU 기반의 고전 HPC 연계 방안 연구 등) 등이 있다.

제 6 장 결론

제 6 장 결론

본 보고서는 한국형 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 기술의 미래 비전을 수립하고, 2040년까지의 장기적 로드맵을 제안하기 위해 기획되었다. 이를 위해 국내 CFD 사용자 및 개발자를 대상으로 전문가 설문 조사를 실시하고, 관련 학술 논문과 기술 동향을 분석하였으며, 기계, 항공우주, 조선해양, 원자력, 인공지능, 고성능컴퓨팅(HPC) 등 6대 분야에 걸쳐 기술적 현황과 미래 발전 방향을 정리하였다. 이를 바탕으로 각 분야별로 특화된 기술 요소를 구조화하고, 중장기 기술 목표를 시기별로 체계화하여 로드맵으로 제시하였다.

조사 결과, 국내 CFD 생태계는 상용 소프트웨어에 대한 의존도가 높고, 자체 코드 개발이나 오픈소스 소프트웨어의 활용은 아직 제한적인 수준에 머물고 있음을 확인하였다. 산업 현장에서는 빠른 해석과 기술지원이 가능한 상용 소프트웨어가 실용적인 대안으로 활용되고 있지만, 고도화된 물리 모델링, 다상유동, 다물리 문제와 같은 복잡한 해석에는 한계가 뚜렷하다는 점도 함께 지적되었다. 또한, 격자 생성의 자동화 부족, 병렬 계산 성능 한계, AI 융합 기술의 초기 단계 등은 국내 CFD 기술이 해결해야 할 과제로 반복적으로 언급되었다.

각 분야별 분석에서는 산업적 요구와 학문적 도전이 어떻게 교차하는지를 구체적으로 보여주었다.

기계 분야에서는 회전체, 열유동 장비 등 실제 장비의 디지털 트윈화를 위한 정밀 모델링과 실시간 시뮬레이션 기술이 핵심으로 제시되었고, 항공 분야는 극초음속 유동, 저레이놀즈수 공력 해석, UAM·로터 복잡 유동 등 고정밀 해석 능력의 확보가 시급하다는 분석이 이루어졌다. 조선해양 분야는 자유수면, 극저온 유체, 탱크 슬로싱 등 특수 물리 문제 해결을 위한 다상·다물리 모델 정교화가 과제로 제시되었으며, 원자력 분야는 소형모듈원자로(SMR)와 같은 차세대 원자로 해석에 필요한 다중스케일·다물리 연계 해석이 중심 기술로 부상하고 있다. 또한, 인공지능 기반 모델링은 전통적 수치해석의 계산 부담을 완화하고 실시간 해석 및 자동화 설계 기술로 연결될 가능성을 보여주었으며, HPC 측면에서는 GPU 기반 병렬 계산과 엑사스케일 환경에 적합한 소프트웨어 구조 재편이 필수적인 것이 확인되었다.

본 보고서에서 확인된 바와 같이, 한국의 CFD 기술은 국제적 수준과 비교할 때 여전히 구조적 제약을 안고 있으나, 동시에 산업과 학문의 경계를 넘나드는 응용 가능성과 기술발전을 촉진하는 잠재력을 확보하고 있다는 점도 분명하다. 특히 디지털 전환 시대에 접어들면서 CFD는 단순한 해석 도구가 아닌 실시간 판단, 최적 설계, 예측과 대응까지 포함하는 융합형 기술로 진화하고 있다. 미국의 NASA가 주도한 'CFD Vision 2030'과 같이, 이제는 한국도 독립적이고 연속성 있는 'CFD Vision 2040'을 통해 기술 주권과 글로벌 경쟁력 확보를 목표로 해야 할 시점이다.

이를 위해서는 오픈소스 및 국산 코드의 체계적인 개발 지원, 분야 간 융합형 연구 투자, AI 및 HPC 기술과의 연계 확대, 그리고 차세대 인재 양성을 위한 실천적 교육체계의 정립이 절실하다. CFD는 향후 우주항공, 반도체, 에너지, 모빌리티, 바이오 등 주요 전략 산업을 실질적으로 뒷받침할 수 있는 기반 기술이며, 그 독립성과 자율성을 확보하는 것은 단지 기술적 과제를 넘어서 국가 기술 주권의 문제이기도 하다. 본 보고서가 이러한 미래발전 방향을 설정하는데 있어 기초 자료로서 활용되고, 향후 실효성 있는 정책과 연구개발 전략으로 이어지기를 기대한다.

Fig 4.1 기계 분야의 KVISION 2040 roadmap

기계

2025

2030

2035

2040

Physical modeling

Non-linear chaos	AI assisted turbulence modeling	AI assisted multi physics modeling	Multi-material
Multiphase	More interfacial physics (surfactant, chemical reaction, etc) Complex contact behavior (hysteresis, phase change, etc)	Stiffness in time integration Higher local convection (mass, mtn, energy, curvature etc)	Complex interactions with general phase boundaries (flexible solid, reacting interface, turbulent interface etc)
Energy, mass transfer, chemical reaction, combustion		AI assisted high accuracy model	Multi model interactions

Algorithm

High order accuracy	Method Generalization	Increased accuracy & efficiency with Machine Learning	Automation Integrated model
Speed up	GPU Parallelization	Cloud based distributed computing	Quantum computing
Real time prediction			

Usability

Meshing (adaptive)	Intelligent + automatic mesh generation with machine learning	Optimization for Multiphysics	Real time mesh generation
Postprocessing	User-friendly real time analysis	Automatic quality control with Error detection	Automatic real time report using AI

HPC and Optimization

Variable control	Automatic input and output using machine learning	Real time monitoring and analysis	Real time optimization
CPU, GPU	AI assisted speed up	Increased band width Massive parallelization	Quantum computing

Data Driven Analysis (AI)

Reduced Order Model	Automatic ROM generation and update	Real time data generation Application to the digital twin	Multi-variable, higher order, multi-physics model Surrogate conventional CFD
Machine Learning (PINN etc)	Replace or hybridization of physical model IC and BC optimization Simulation speed up	Reinforced deep learning integration with real-time optimization	Generalized model for Multiphysics and multi-domains Replace conventional CFD

Hardware integration
Application on 3D complex CFD problem

Fig 4.2 항공 분야의 KVISION 2040 roadmap

항공

2025

2030

2035

2040

Physical modeling

RANS/DES	URANS for flow separation with various turbulence models	Large-scale unsteady flows	Integrated transition prediction	Machine learning for complex flows	Use of AI methods for turbulence and
LES	WMLES for complex 3D flows at appropriate Re		Unsteady, 3D geometry, separated		WRLES for complex 3D flows at appropriate Re
Chemical reaction combustion	Chemical kinetics calculation speed-up	Chemical kinetics in LES		Multi-regime turbulence-chemistry interaction model	

Algorithm

Accuracy, convergence/Robustness	Low-dissipation discretizations for scale resolving methods	High-order algorithm for large-scale complex flows	Production scalable entropy-stable solvers
Uncertainty Quantification	Characterization of UQ in aerospace	Uncertainty propagation capabilities in CFD	Reliable error estimates in CFD codes

Meshing

Parallel Meshing (fixed/adaptive)	Adaptive Mesh Refinement (AMR) integrated in CFD codes	Generate 100B cell fit-for-purpose mesh	
Visualization	On-demand, parallel flow visualization of a 10B point unsteady flows	On-demand, parallel flow visualization of a 100B point unsteady flows	On-demand, parallel flow visualization of a 1TB point unsteady flows

Applications

eVTOL	Low-dissipation, rotor wake analysis	Aerodynamics analysis of rotors	Aerodynamic interaction of multi rotors	Integration of high-fidelity CFD analysis of eVTOL aircraft	Digital twin for system monitoring and diagnostics
Rocket Launch	Chemical reaction analysis for combustion	High-accuracy analysis of reentry vehicle	High-accuracy analysis of combustion, Multiphase analysis of sloshing of liquid fuels		
Gas turbine	Integration of component analysis of fan, compressor, combustor, and turbines		High-accuracy analysis of turbulence, and separation analysis		High-fidelity analysis of complete engine analysis

Fig 4.3 조선해양 분야의 KVISION 2040 roadmap

조선해양

2025 2030 2035 2040

Physical modeling	Two-phase	Complex contact behavior (hysteresis, phase change, etc)	Stiffness in time integration Higher local conservation (mass, mom, energy, curvature etc)	Complex interactions with general phase boundaries (flexible solid, reacting interface, turbulent interface etc)
	Wave	High order-spectral method	AI assisted high accuracy model	Multi model interactions
Algorithm	Cryogenic	AI assisted phase change model	AI assisted cryogenic model	
	High order accuracy	Method Generalization	Increased accuracy & efficiency with Machine Learning	Automation Integrated model
Usability	High-speed	GPU Parallelization	Cloud based distributed computing	HW+SW integration Quantum computing
	Meshing (adaptive)	Intelligent + automatic mesh generation with machine learning	Optimization for Multiphysics	Real time mesh generation
HPC	CPU, GPU	AI assisted speed up	Increased band width Massive parallelization	Quantum computing
	AI CFD	Data-driven cavitation model	Data-driven free-surface model	Data-driven multi-physics model
Multi-physics	Reduced order model	Automatic ROM generation and update	Real time data generation Application to the digital twin	Multi-variable, higher order, multi-physics model Surrogate conventional CFD
	Machine Learning	Replace or hybridization of physical model IC and BC optimization Simulation speed up	Reinforced deep learning Integration with real-time optimization	Generalized model for Multiphysics and multi-domains Replace conventional CFD
FSI	Hardware integration	Application on 3D complex CFD problem		

Fig 4.4 원자력 분야의 KVISION 2040 roadmap

원자력

2025 2030 2035 2040

Single-phase	Reactor pressure vessel	Natural convection	Flow distribution in lower plenum	Erosion, corrosion, and deposition
	Primary circuit	Thermal fatigue	Heterogeneous flow Distribution in SG inlet plenum causing vibration	
Multi-phase	Reactor pressure vessel	Transition boiling	Two-phase Natural convection Reflood	CHF prediction Lower plenum debris coolability / melt distribution
	Primary circuit	Pressurized thermal shock	Two-phase Choking flow Boiling flow in helical coiled stream generator	Waterhammer condensation
Multi-disciplinary analysis	Containment	Hydrogen distribution	Chemical reactions	Aerosol deposition/atmospheric transport
	Multi-scale	Direct-contact condensation	Bubble dynamics in suppression pools	Sump strainer clogging
FSI	Multi-physics coupling for entire reactor core	CFD – system coupling	CFD – subchannel coupling	CFD - Monte Carlo Neutronics – thermo-mechanics coupling for entire reactor core
	FSI	turbulence interaction with helical coil tube bundle	turbulence interaction with helical coil tube bundle	FIV considering internal two-phase flow in tube bundle

Fig 4.5 AI 분야의 KVISION 2040 roadmap

AI-CFD

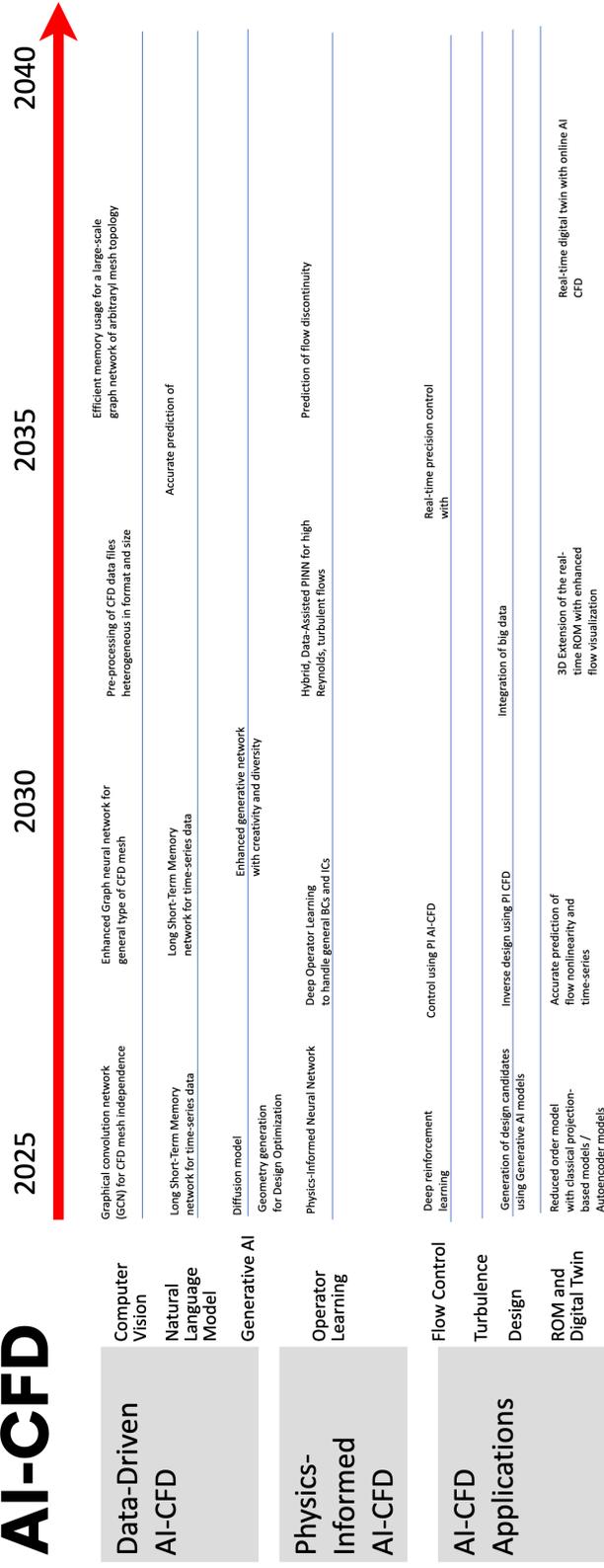
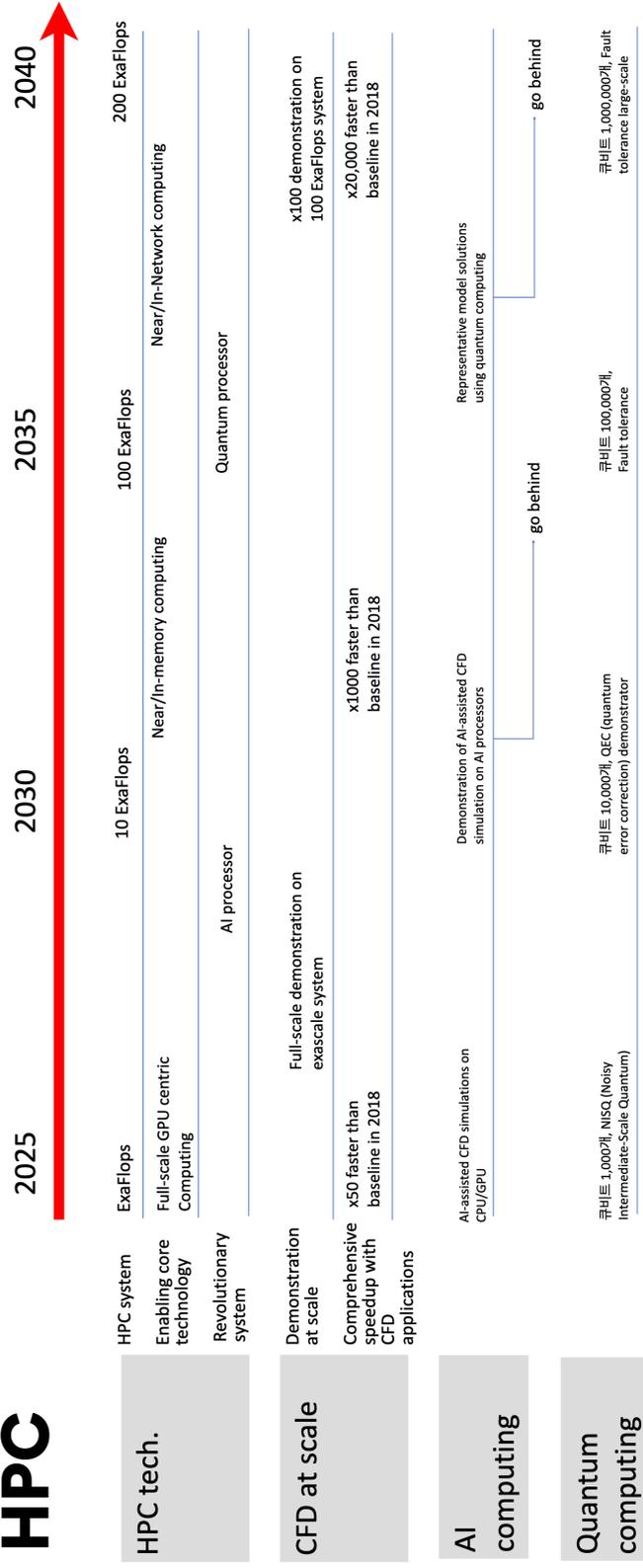


Fig 4.6 HPC 분야의 KVISION 2040 roadmap

HPC



KVISION CFD 2040

로드맵 수립 보고서

한국 전산유체 공학회

이관중, 신승원, 최성임, 박선호,
강지훈, 이재룡, 이정수, 신동혁,
유용균, 조금원, 윤익로

www.kscfe.or.kr