

상용 CFD 프로그램의 응용 사례와 개발 동향

김 상 돈 · 씨디어덱코코리아㈜ 전략기획/마케팅, 부장

_e-mail : sangdawn.kim@kr.cd-adapco.com

이 글에서는 산업체 및 연구 기관에서 사용되는 상용 CFD 프로그램의 응용 사례와 개발 동향을 STAR-CCM+와 STAR-CD 관점에서 서술하였다. 아울러, 제품 개발이나 기초 연구 프로세스에서 CFD가 차지하는 역할 및 향후의 확장성에 대해서도 고찰하여 보았다.



전산유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics)은 전산 기반공학(CAE; Computer Aided Engineering)의 일종으로서, 대부분의 전산유체역학 기술은 유체를 연속체의 일종으로 가정한 상태에서 유도되는 Navier-Stokes 방정식을 그 지배방정식으로 삼고 있다. 따라서 연속체 가정이 적용될 수 있는 전 범위의 유동장에 대해 CFD의 산업적/연구적 적용은, 컴퓨터 기술의 발달과 더불어 점점 확장되고 있는 추세다. CD-adapco의 상용 CFD 프로그램인 STAR-CCM+와 STAR-CD 역시, 특성 길이의 규모로는 마이크로미터부터 킬로미터까지, 속도의 범위로는 저아음속부터 극초음속까지 매우 광범위한 분야에서 사용되고 있다.

기계공학 분야에서의 CFD 활용

제품을 설계하는 프로세스에서 볼 때 해당 제품의 최종 성능을 평가하는 방법은 크게 다음 세

가지로 분류된다.

- 실험식에 기반한 예측
- CFD를 이용한 시뮬레이션 해석
- 축소 또는 실물을 이용한 직접 시험

이 중, 실험식에 의한 방법은 시간적으로 가장 빠르지만 적용 범위가 매우 좁고 특히 값의 신뢰성이 상대적으로 제일 낮은 단점이 있으므로 주로 개념 설계 단계에서 많이 활용된다.

시험의 경우는 결과값의 신뢰도는 가장 높으나 시험에 투입되는 설비, 비용, 그리고 인건비라는 제반 비용적 측면의 부담을 고려하여야 한다.

CFD는 원래는 그 자체가 기초 연구의 대상으로 출발한 것이지만, 기하급수적으로 발전하는 컴퓨터 기술에 힘입어 오늘날에는 시험을 보완하는 수단으로 널리 활용되고 있다. 매우 많은 수의 후보 설계 안을 일일이 시험하기 보다는 그것들에 대한 상대 비교를 CFD 해석을 통해 매우 적은 수의 후보군으로 압축하고 최종 설계 안을 도출하는 방법이 그 대표적인 사례다.

특히 CFD의 경우는 시험적 방법이 미처 제공할 수 없는 유동 전반에 대한 통찰력(insight)을 제공할 수 있다는 장점이 있으며, 일부 산업의 경우 그 기술이나 제품의 특성상 시험 시도 자체가 위험성을 내포하는 분야에서 더욱 각광받고 있다.

오늘날의 설계 프로세스 개념은 과거의 단순한 기계적 설계 자체를 넘어 제품 수명주기 관리(PLM; Product Lifecycle Management) 전반으로 확대되었다. 즉, 제품의 구상 단계(concept)에서 시작하여 설계(design) 및 시험/평가/제작(realize; test, evaluate, and manufacture) 그리고 납품 이후의 운용 및 폐기(service; deliver, maintain, and dispose)라는 전 범위에 걸쳐 CAE가 활용되고 있는 것이다. CAE의 한 분야인 CFD 역시 예외가 아니다.

CFD가 PLM 개념으로 확장

CFD 작업에 있어 가장 큰 병목으로 작용하는 것은 CAD 형상을 CFD용으로 변환시키는 전처리(pre-processing) 과정이다. STAR-CCM+에서는 전처리 과정의 전반부에서 surface wrapper를 이용하여 표면 정리 작업 시간을 최소화할 수 있으며, 이에 따라 전처리 과정의 후반부인 격자 생성에 소요되는 사용자 업무 부담 및 소요 시간도 대폭 줄어들었다. 한편, CD-adapco의 STAR-CCM+나 STAR-CD의 경우 CFD 본연의 범위를 넘어 유체-고체 복합 열전달(conjugate heat transfer) 문제를 대류 및 복사열 해석을 통해 풀 수 있으며 그로 인해 나타나는 고체 구조물의 열응력(thermal stress) 문제를 다룰 수 있다.

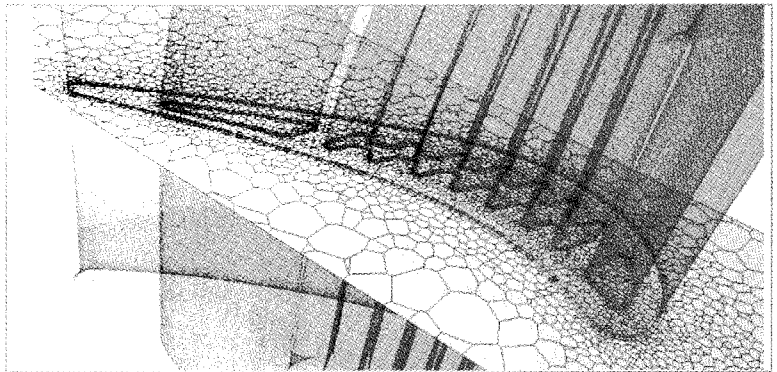


그림 1 터빈 깃 복합 열전달 해석을 위한 전처리 및 격자 생성 예

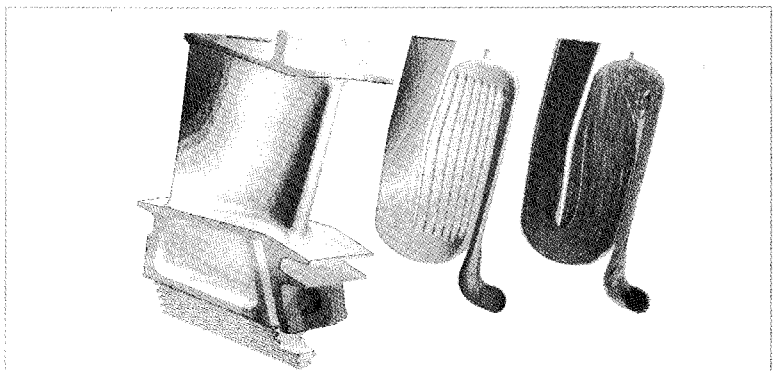


그림 2 터빈 깃 복합 열전달 해석 결과 예

적용되는 대표적인 사례로 터빈 깃(blade) 수명 연장을 위한 해석을 들 수 있다. 애초 특정 온도

조건 이하에서의 운용을 목적으로 개발된 터빈 깃이 더 높아진 운용 온도 조건에서 과연 얼마나 더 버

될 수 있는지를 살펴보고 그에 따른 공학적 결론을 이끄는 과정에서 CFD를 이용한 유동-고체 복합 열전달 해석이 주요한 의사결정 도구로 사용되는 것이다.

그림 1에서 보는 바와 같이 터빈 깃 외부를 흐르는 고온 유동부, 금속 재질로 이루어지는 터빈 깃 자체, 그리고 터빈 깃 내부를 흐르는 냉각류 유로가 동시에 전처리되어 복합 열전달 문제가 단일한 CFD 프로그램(STAR-CCM+ 또는 STAR-CD) 내에서 해석된다. 그 결과는 다음 그림 2에 나타나 있다.

CFD 작업 프로세스 및 관련 최신 기술

CFD 작업은 크게 다음 세 단계로 나눌 수 있다.

- 형상 전처리(pre-processing)
- 경계/초기 조건 지정 및 해석(solving)
- 해석 후처리(post-processing)

CFD 작업의 전처리 과정을 진행함에 있어 제일 먼저 이루어지

는 것이 대부분 CAD로 제작되는 해석 대상을 CFD 본연의 목적에 맞게끔 다듬는 것이다. 오늘날의 CAD는 컴퓨터 기술의 발달에 힘입어 매우 고차의 곡면을 취급할 수 있으며 특히 최종 생산까지 염두에 두게 되므로 수학적으로 두께가 없는 표면(surface)이 아닌 특정 두께나 부피를 가지는 체적(volume)으로 설계되는 경우가 대부분이다.

CAD에서 제작된 모델을 CFD 작업을 위해 옮겨오는 과정에서 의도하지 않았던 문제들이 수반되는 경우가 많다. IGES나 STEP 같은 표준 변환 체계들은 아직까지는 특정 CAD의 고차 곡면을 그대로 재현하지 못하므로 표준 변환이 되는 단계에서 단일한 고차 곡면이 여러 개의 저차 곡면으로 분할되게 된다. 이 과정에서 적지 않은 수의 곡면들이 중첩되거나 심한 경우 애초 존재하지 않았던 틈이 생기는 경우도 있다. 한편 최종 생산 등을 고려한 체적 모델로 인해, 생산을 위해서는 필요하나 CFD에서는 필요 없는 경우가 대부분인 작은 틈이 같이 실려 오는 경우도 많

이 발생한다.

이와 같은, '의도하지 않았던' 또는 'CFD에는 필요 없는' 개체들을 CFD를 위한 전처리 작업에서 사용자가 일일이 수작업으로 교정해야 했던 것이 지금까지 CFD 프로그램들의 주요 문제점이었으며 이것이 CFD 전체 작업 시간의 상당부분을 차지하는 병목 문제로 지적되어 왔다.

경우에 따라서는 사용자가 직접 CAD 프로그램을 가동하여 본인의 목적에 맞게끔 CAD 형상을 수정해야 했는데 이를 위해서는 사용자가 CAD 프로그램 사용에도 정통해야 한다는 업무 부하가 발생하고, 한편으로 고차 곡면이 저차로 분할됨에 의해 일어나는 중첩과 틈의 문제를 근본적으로 해결할 수 없다는 결정적 문제점이 있었다.

따라서, 전처리 과정을 좀 더 효율적으로 진행하기 위한 전문적인 전처리 프로그램들도 시장에 많이 등장했지만 이 경우는 사용자가 전처리를 위한 프로그램을 별도 구입해야 한다는 문제점이 발생한다.

STAR-CCM+는 이러한 전처리에 소요되는 시간적 병목 문제를 해결하기 위한 surface wrapper를 프로그램 내에 갖추고 있으므로 사용자는 별도의 전처리 프로그램을 구매할 필요가 없다. 사용자는 CAD 형상을 표준 변환을 통해 STAR-CCM+로 불러 오고 그 다음에는 surface

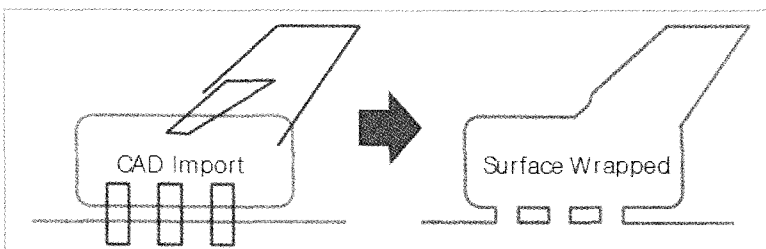


그림 3 STAR-CCM+의 Surface Wrapper 개념도

wrapper를 가동하기만 하면 CFD 해석에 필요한 형상 정보만을 자동으로 추출해낼 수 있다.

CFD 전처리의 후반 단계는 격자를 생성하는 것이다. CFD용 격자는 지금까지는 크게, (3차원 해석을 기준으로 볼 때) 6면체로 대표되는 정렬격자(structured mesh)와 4면체로 대표되는 비정렬격자(unstructured mesh)로 나뉠 수 있었다. 6면체 정렬격자의 경우 해의 정확성이나 신뢰성은 정평이 나 있었지만 그 특유의 구조상 복잡한 형상에 대해 자동으로 만들기가 어렵다는 단점이 있고, 4면체 비정렬격자의 경우는 복잡한 형상에 대한 자동 격자 생성은 쉽지만 격자 자체가 단지 네 개의 면으로 이루어지기 때문에 수치적 소산(numerical dissipation)이 심해진다는 단점이 있다.

자연의 유동현상도 원래 그렇지만, 이를 전산적으로 모사하는 CFD의 경우에도 한 격자에 대한 정보의 입출력이라는 관점에서 문제를 바라볼 수 있다. 유체의 흐름이란 분자의 회전 운동을 빼고서도 3차원적으로 세 개의 병진 자유도를 가진다. 기본적으로 세 개의 자유도에 입출력이라는 두 가지 정보 흐름을 고려하면 최소 6개의 정보 교환 창구가 필요하다는 결론이 나오며, 이는 6면체 정렬격자의 해가 왜 좋은지에 대한 한 근거가 된다. 반면 4면체 격자의 경우는 유체의 흐름

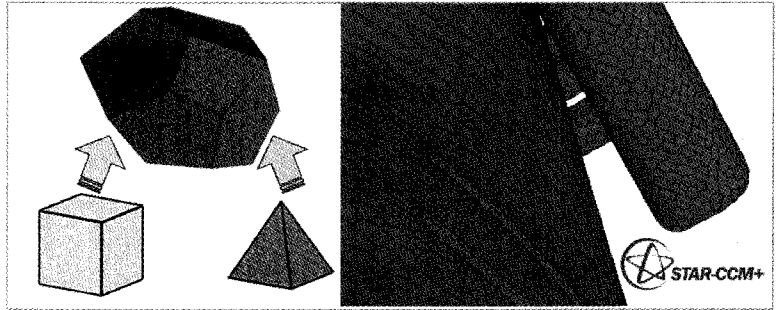


그림 4 다면체 격자의 개념 및 다면체 격자 적용 예

이라는 정보 교환 창구가 4개로 제한된다는 근본적인 취약성을 가질 수밖에 없다.

6면체(hexahedral) 격자가 가지는 신뢰성 높은 해의 장점과, 4면체(tetrahedral) 격자가 가지는 만들기 쉽다는 장점을 결합한 것이 다면체(polyhedral) 격자다. STAR-CD 및 STAR-CCM+가 제공하는 다면체 격자는 대체로 12~16면체로 구성되며 정보의 입출력 창구가 그만큼 많고 또한 유동의 흐름에 정렬되는 면의 개수가 많아지기 때문에 수치적 소산이 4면체 격자에 비해 훨씬 더 적다. 또한 동일한 이유로 인해 물리적 구배(gradient)가 큰 영역에 대해서도 더 정확한 해를 내는 것으로 알려져 있으며 해의 수렴성 자체가 더욱 향상된다. CD-adapco는 2001년부터 다면체 격자 기법을 도입하여 지금까지 7년 이상 축적된 경험을 보유하고 있다.

한편, 점성 유동을 풀고자 할 경우에는 해석 대상이 되는 물체 표면에 프리즘 층(prism layer)을 배치하여 보다 정밀하게 경계

층 흐름을 모사하는 것이 일반적인 기법이다. 그런데 프리즘 층의 기하학적 특성은 마치 O형 정렬 격자와 비슷하다고 할 수 있다. 따라서 해석 대상의 기하학적 모양이 복잡할수록 기존 상용 프로그램에서는 프리즘 층을 배치하는 작업의 난이도가 결코 쉽지 않았다. 하지만 STAR-CCM+에서는 단순히 몇 개 층을 쌓을 것인가 정도의 사용자 지정만 하면 나머지 과정은 자동으로 이루어짐으로써 사용자의 업무 부담을 그만큼 줄이게 되었다.(그림 1)

CFD를 아우르는 CAE 분야에서는 최근 들어 다중 물리(multi-physics) 해석이 많이 도입되고 있다. 유체-구조 연동(FSI; Fluid-Structure Interaction) 해석이 그 대표적인 예다. 경우에 따라서는 구조 해석 프로그램이 일부 간단한 수준의 유동을 자체적으로 풀기도 하고, 반대로 CFD 프로그램이 일부 간단한 구조 하중 및 변형 문제를 풀기도 한다. CD-adapco의 CFD 프로그램인 STAR-CD나 STAR-CCM+ 같은 경우도 앞서 소개한

상용 CFD 프로그램의 성능을 결정짓는 관건은 전체 해석 과정이 얼마나 사용자 친화 및 일괄적으로 되어 있는가, 전체 해석 시간이 얼마나 줄어들 수 있는가, 그리고 많은 수의 해석 형상을 얼마나 손쉽게도 빠르게 다룰 수 있는가에 달려 있다. STAR-CCM+가 제공하는 파이프라인 프로세스나 replace mesh 기능 등이 그 대표적인 개선 사례들이다.

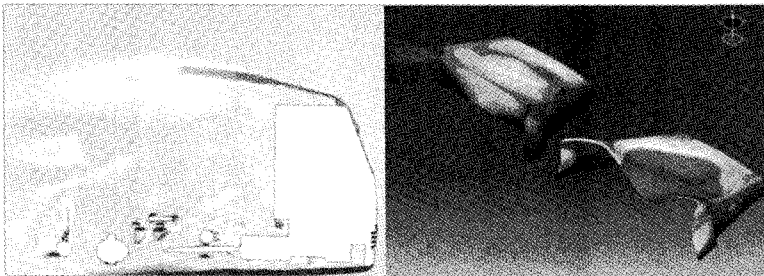


그림 3 유체-구조 연동해석 예

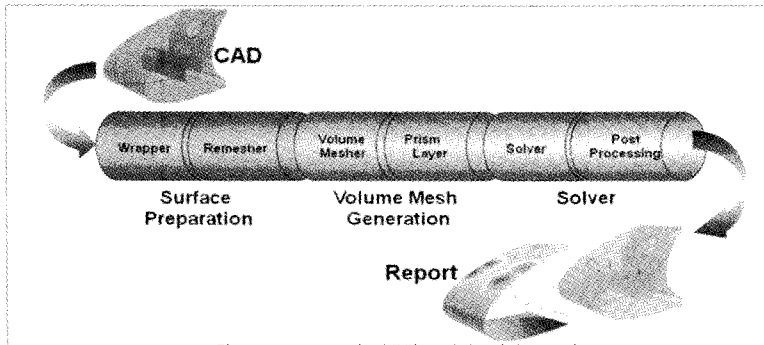


그림 4 STAR-CCM+가 제공하는 파이프라인 프로세스

복합 열전달로 인한 열응력 해석 뿐만 아니라 가스 터빈 등의 고속 회전에 따른 기계적인 하중 문제도 풀어낼 수 있다.

그런데 CFD 프로그램과 구조 해석 프로그램은 계산 해를 풀어내는 방식이 서로 다르다. CFD의 경우는 유한체적법(FVM; Finite Volume Method)이 대표적으로 쓰이고, 구조해석 프로그램의 경우는 유한요소법(FEM;

Finite Element Method)이 대표적으로 쓰인다. 물론, 기초 연구 수준에서는 CFD를 유한요소법으로 풀 수도 있고, 구조 해석을 유한체적법으로 풀 수도 있다. 하지만 상용화된 프로그램들에서는 CFD는 유한체적법으로, 구조 해석은 유한요소법으로 이미 굳어진 것이 사실이다.

따라서 상용화 프로그램 입장에서는 CFD 안으로 구조해석을

완전히 도입한다거나 역으로 구조해석 프로그램 안으로 CFD 프로그램을 완전히 도입하는 것은 사업적 입장에서 어려울 수밖에 없다. 이와 같은 이유로 인해 CFD 프로그램과 구조해석 프로그램은 당분간은 서로 별도의 프로그램으로 존재할 전망이다. 대신 상호 연동 해석의 수준과 편리성을 높이기 위해 이종 프로그램 간의 전략적 교류는 더욱 활발해질 것이다.

그림 5는 트럭 운전석 상부에 공기역학적 저항을 줄이기 위한 경사판을 설치한 후 트럭 전체에 대한 3차원 유동해석(STAR-CD)을 하면서 동시에 구조해석 프로그램을 가동하여 유체-구조 연동 해석을 한 예를 보여주고 있다.

상용 CFD 프로그램의 향후 발전 방향

CFD는 적용 범위가 매우 넓으면서도 그 근간에서는 유체역학과 관련한 사용자의 일정 수준 전문성을 필요로 한다. 따라서 전문적인 도구인 CFD를 얼마나 사용자 친화적으로 만드는가가 오늘날 상용 CFD 프로그램의 큰 숙제가 되어 있다. 사용자-그래픽 인터페이스(GUI; Graphic User Interface)는 이미 필수적인 환경으로 자리매김하였으며, 어느 프로그램이 사용자에게 더 직관적이면서도 전문적인 인터페이스 환경을 제공하는지가 관건

이 되었다.

CD-adapco의 경우, CFD 해석의 신뢰도를 높임과 아울러 사용자의 편리성을 강화함으로써 전체적인 작업시간(turn around time)을 줄이기 위한 파이프라인 과정(pipeline process)을 실현 시켰다. CAD에서 만들어진 해석 대상을 CFD 과정의 전반부에 투입한 후, 전처리나 후처리와 관련한 다른 상용 프로그램의 지원이 없이 STAR-CCM+ 내에서 일괄적으로 처리할 수 있는 과정을 사용자에게 제공하는 것이다.

향후 상용 CFD 프로그램의 발전 방향은 크게 GUI 개량, 해의 정확성 향상, 그리고 시간적 비용의 절감이라는 세 가지 관점에서 조망할 수 있다.

인지과학적 연구 결과에 따르면 GUI 성능은 사실 사용자의 주관에 크게 의존하는 것이다. 외국인을 위해 한국의 특정 지역이 강조되는 일기예보 화면은 한국이라는 지형에 익숙한 한국인에게는 오히려 전체적 정보 인지에 방해가 된다는 것이 그 대표적인 연구 사례다. 따라서 GUI 부분은 특정 프로그램 사용에 익숙한 기존 고객과 신규 고객 사이의 간극을 메우는 수준으로 개발이 진행될 전망이다.

CFD 해석 결과의 정확성은 구

준히 개선되겠지만 도입부에서 말한 바와 같이 시험이라는 강력한 수단을 보완하는 수준에서, 절대적 정확성(absolute accuracy)보다는 충분한 정확성(sufficient accuracy)을 주요 목적으로 하여 개발이 진행될 것이다. 상용 CFD 회사들이 추구하는 바는 실무적 도구로서의 CFD지, 결코 연구 대상 자체로서의 CFD가 아니기 때문이며, 그 사용 범위의 광대함만 보더라도 1개의 CFD 프로그램으로 응용 범위 전반을 학문적으로 깊게 파고들 수는 없기 때문이기도 하다.

상용 CFD 프로그램의 주요 성능은 사용자의 시간적 비용을 얼마나 줄일 수 있는가에서 가능할 것이다. 비정렬 격자의 등장이 전처리 시간을 획기적으로 줄일 것으로 기대되었지만 CAD가 발전하면서 대부분의 상용 CFD 프로그램에서는 CAD로부터 CFD에 필요한 부분만을 추출하는 과정에서 의외의 시간적 비용이 많이 발생하고 있는 것이 사실이다. 이 부분의 시간 비용을 줄이고자 STAR-CCM+의 surface wrapper가 고안되게 되었으며 이 자동화 과정을 가급적이면 더 빨리 처리하고자 하는 것이 전처리 과정의 시간적 비용 개선을 위한 주요 목표다.

한편, 상용 CFD 프로그램의 주요 활용 부분 중 하나는 전체적으로는 비슷하지만 세부적으로는 다른 수많은 후보 형상을 가급적 빨리 상대 비교하는 것이다. 이를 위해 고안된 것으로는 STAR-CCM+에서 제공하는 'Replace Mesh' 또는 'Replace Surface' 기능이 있다. 전반적인 유동이 수렴된 상황에서 세부 형상을 손쉬우면서도 빠르게 교체함으로써 전처리 작업 및 계산 진행 과정에 소요되는 시간을 줄이는 것이 그 주요 기능이다.

시간적 비용의 개선이라는 측면에서 병렬 계산의 효율성 역시 중요한 연구개발 대상이다. 이론적으로는 처리기(processor) 개수에 비례하여 계산 성능이 올라가야 하지만 상용 CFD 프로그램과 자체 개발(in-house) 프로그램을 막론하고 처리기의 개수가 올라가면서 분산된 파일이나 정보의 입출력에 따른 시간 소요가 증대되기 때문에 이상적인 목표 성능에서 조금씩 멀어지게 된다. 이 이상적 목표와 현실적 성능 사이를 줄이는 노력 역시 상용 CFD 프로그램 사용자들에게는 매우 매력적인 요소로 보일 것이다.