

# 특집 4 [슈퍼컴퓨팅의 산업체 응용 동향과 사례]

## 열유체 해석 기술의 동향과 슈퍼컴퓨터 활용 사례

[글] 손일엽\*, 황재순  
\*한국과학기술정보연구원 기상설계분석실  
sohniy@kisti.re.kr  
한국과학기술정보연구원 기상설계분석실  
jshwang@kisti.re.kr

### 1. 서론

전산 열유체 공학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD)은 단일 제품 및 시스템, 예를 들어 자동차, 항공기 및 각종 기계 요소의 내부 및 외부에 작용하는 유체에 의한 힘, 에너지 및 물질 전달 현상을 전산 시뮬레이션 기법을 활용하여 분석하고 이를 설계에 반영하는 분야를 일컫는다. CFD는 20세기 초반 Prandtl과 Von Karman이 고속의 유체 유동을 수학적으로 기술하려는 노력에서 시작되었다고 볼 수 있으며[1] 1940년대에 컴퓨터가 발명 되면서 본격적으로 유체를 지배하는 방정식을 컴퓨터를 이용하여 해법을 구하려는 시도가 있었다. 그러나 실제로 CFD가 비약적인 발전을 이룩한 것은 1970년대 컴퓨터 하드웨어의 발전에 힘입은바 크다. 1980년대에는 CFD가 산업체에 본격적으로 적용되기 시작하였으며 우리나라는 1980년대 후반에 대학 및 연구소를 중심으로 보급되어 1990년대 초반 대기업을 중심으로 제품 설계 과정에 본격적으로 적용되기 시작하였다. 그러나 1990년대 까지만 해도 CFD를 사용하기 위해서는 일반 컴퓨터로는 CPU의 속도나 메모리의 양이 적었기 때문에 일부 특수한 분야에서만 적용이 되었고 열유체 공학 전공자들만 이를 사용할 수 있을 정도로 사용 환경이 극히 제한되어 있었다.

2000년대에 들어오면서 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어의 비약적인 발전으로 오늘날 많은 산업 현장

에서 CFD 기법을 활용하여 제품 설계를 해오고 있으며 제품 및 시스템의 검증을 위한 시험 과정이 일부 생략되므로 비용 및 제품 개발 시간을 간소화시킬 수 있게 되었다. 여기서는 CFD의 기본 이론과 CFD가 적용되는 실제 예를 들어 CFD의 사용 현황을 살펴보고 향후 CFD의 발전 방향에 대해 논의해 보도록 한다.

### 2. 전산열유체 공학의 기본 이론

#### 2.1 CFD의 기본 개념

유체 역학의 지배방정식은 유체의 질량, 운동량 및 에너지의 흐름을 기술하는 보존 방정식이며 복잡한 비선형 편미분 방정식(Non-linear partial differential equations)으로 이루어져 있어 이를 수학적으로 직접 풀 수 있는 방법은 존재하지 않는다. Navier-Stokes 방정식으로 불리는 이 보존 방정식은 학부 3학년을 대상으로 하는 여러 유체역학 교과서들에 자세히 기술되어 있다[2][3]. CFD란 직접적으로 수치해를 얻을 수 없는 유체의 지배 방정식을 대수방정식으로 변환하여 해를 구하는 것을 의미한다. 즉, 비선형 편미분 방정식을 이산화(discretization) 시켜 이를 선형 대수 방정식(linear algebraic equations)의 형태로 전환 시킨 다음 풀고자 하는 계산 영역(computational domain)의 격자점(nodes) 또는 격자 체적(elements)에 대해 대수 방정식을 반복적으로 풀어서 최종적으로 지배 방정식의 근사해를 구하는 것이다. 따라서 지배 방정식을 이산화하여 이를 격자 시스템에 적용하여 계산영역내의 유동의 패턴이나 압력, 속도와 같은 유동 정보를 근사적으로 얻게 되는 것이다.

#### 2.2 CFD의 수치 기법

편미분 방정식의 이산화에는 지금까지 크게 세가지 방법이 사용되어 왔다. 가장 간단한 방법으로 유한 차분법(Finite Difference Method, FDM)을 들 수 있다. FDM은 미분 형태의 식을 직접 차분식으로 전환할 수 있어 간단하게 구현 할 수 있는 장점이 있으나 복잡한 형상에서는 적용하기 어려운 단점이 있다. 유한 요소법(Finite Element Method, FEM)은 주로 구조 분야 해석에 적용되어 왔는데 미지수를 요구되는 정확도의 근사 함수로 표현하고 그 계수의 크기를 가중 잔차법(weighted residual method)을 이용하여 미소 요소(element)마다 결정하는 것으로 복잡한 형상에서도 적용할 수 있으며 요소 단위의 고차 정확도를 구현할 수 있다는 장점이 있다. 그러나

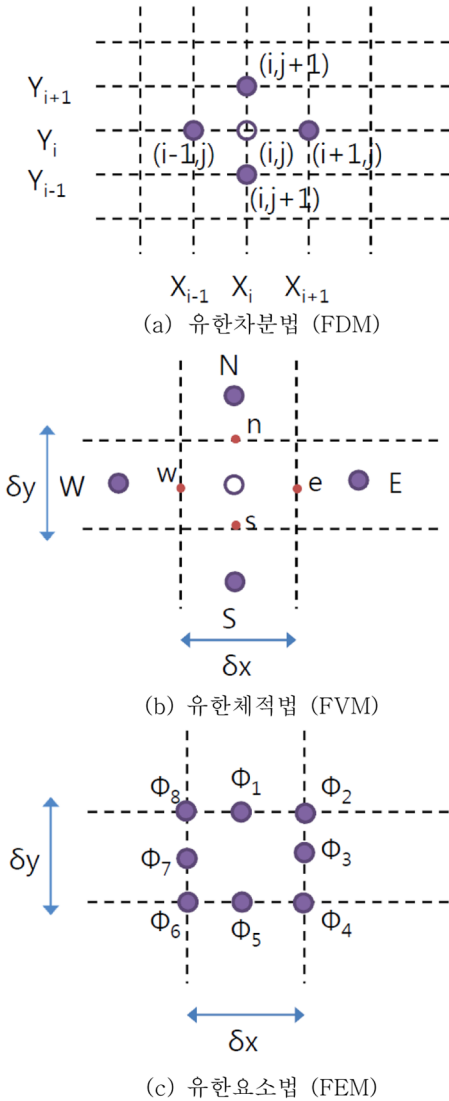


그림 1. 미분 및 적분 형태의 지배 방정식의 이산화 (discretization) 방법

충격파와 같은 불연속적인 물리적 현상을 구현하는 데에는 어려움이 있다고 알려져 있다. 마지막으로 유한 체적법(Finite Volume Method, FVM)은 적분 형태의 보존 방정식을 각 격자 단위에서의 평균 물리량으로 이산화하므로 불연속적인 물리량을 계산할 수 있으며, 기하학적인 제약도 거의 없다는 장점이

있다. 따라서 최근 대부분의 상용 CFD 소프트웨어들은 열유체 지배방정식의 이산화 방법으로 FVM을 채택하고 있는 실정이다. 그림2는 앞서 기술한 이산화 방법을 도식적으로 나타낸 것이다. 지배 방정식의 이산화 과정과 각 이산화 방법에 대한 기술은 참고 문헌[4][5]에 자세히 기술 되어 있다.

### 3. 해석 과정 단계별 고려해야 할 사항

#### 3.1 형상 모델링 및 격자 생성

유체 및 구조분야 시뮬레이션 과정에서의 첫 번째 단계는 해석 대상의 모델링이다.

최근 CAD 소프트웨어의 발전은 복잡한 형상이라도 정밀하게 컴퓨터상에서 3D 모델링을 가능하게 하여 주었으며 유체 및 구조 해석 소프트웨어 등과도 형상 정보 데이터 호환이 가능하게 제작이 되어 3차원 설계에서 곧바로 수치해석으로 전환될 수 있도록 소프트웨어가 꾸준히 업그레이드 되고 있다.

다음 단계로는 지배 방정식을 이산화할 수 있도록 2차원 또는 3차원 모델링을 기반으로 격자(Mesh 또는 Grid)를 구성하는 작업이다. 흔히 전처리과정(Pre-processing)이라 일컫는 이 과정은 전체 해석 프로세스 중 절반 이상의 노동력과 시간을 들여야 하는 과정이라 할 수 있다. 격자의 질에 따라 해석 결과가 달라질 수 있기 때문에 격자를 구성하는 일은 숙련도가 필요한 작업이며 때로는 해석 결과의 신빙성을 결정하는 중요한 요소가 되므로 본격적인 해석에 들어가기에 앞서 가장 신경써야 할 부분이기도 하다. 3D CAD 및 전문 격자 생성 프로그램이 발달 하여 복잡한 형상에서도 격자가 생성되도록 많은 발전이 있었지만 여전히 수동적인 작업에 크게 의존한다고 볼 수 있다. 전처리 과정에는 격자 생성 이외에도 유동의 경계 조건(Boundary condition) 및 초기 조건(Initial condition)을 설정해 주어야 한다. 최근에 널리 이용되는 상용 CFD 소프트웨어는 GUI 환경이 제공 되므로 비전문가가 경계 및 초기 조건을 정하는데 크게 어려움은 없으나 복잡한 형상이나 다물리 현상(Multi physics)을 다루는 분야에서는 사용자의 유체역학과 수치 해석에 대한 지식이 있어야지만 적

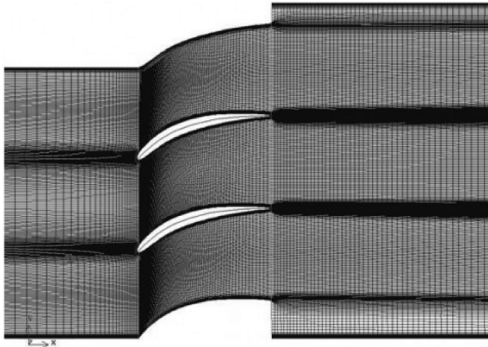


그림 2. 축류형 압축기의 Rotor 블레이드 CFD 계산을 위한 정렬 격자계

절한 경계 조건을 결정할 수 있는 경우도 발생한다. 그림 2는 축류형 압축기의 로터 블레이드 주위를 정렬 격자계(Structured Grid)를 사용하여 격자를 구성한 것이다[6]. 블레이드의 전연부와 후연부에서 유동의 속도와 압력이 바뀌는 것을 정확히 구현하기 위하여 조밀한 격자계를 사용했음을 볼 수 있으며 이는 유동의 경향을 이해 할 수 있을 때 구현 할 수 있다.

### 3.2 계산 및 후처리

격자계를 생성하고 경계 조건 및 각종 물성치를 입력하고 나면 본격적인 해석 과정에 들어가게 된다. 해석 과정은 앞서 설명한 바와 같이 이산화된 지배 방정식을 반복적으로 풀어서 근사해를 얻는 과정이다. 따라서 이 과정에서는 사용자가 수동적인 작업을 할 필요가 없으며 전적으로 컴퓨터가 수행하는 과정이라고 할 수 있다. 해를 얻는 수렴 속도나 해석 결과는 사용된 수치 모델 및 이산화 방법, 예를 들어 난류(Turbulence)를 해석하기 위한 수치 모델이나 공간 및 시간 차분법 및 사용된 수치 플럭스(flux)에 따라 정확도의 차이가 발생할 수 있는데 이 부분도 사용자의 전문적인 지식을 요하는 부분이기도 하다. 대부분의 상용 CFD 소프트웨어들은 사용자가 선택한 모델 및 수치기법과는 상관없이 가능한 수렴된 해석결과를 제공할 수 있도록 내부의 소스 코드 안정화를 구현하였다. 그러나 물리적, 수치적으

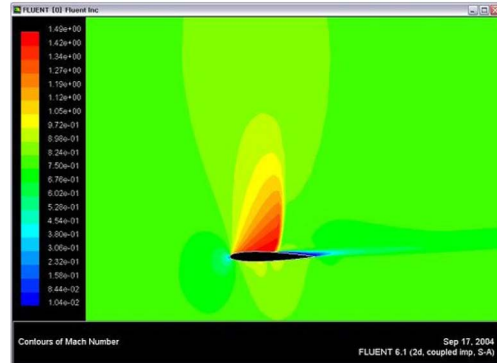


그림 3. 상용 CFD 해석도구를 이용한 에어 포일 CFD 계산 결과 도시(Mach 수)

로 타당한 계산 결과를 얻기 위한 수치 모델링 및 기법에 대한 정확한 선택은 중요하며 이 역시 사용자의 공학적인 지식이 요구되는 부분이기도 하다.

마지막 단계로는 계산이 끝난 후 해석 결과 데이터를 처리하는 과정이다. 흔히 후처리(Post-processing)으로 일컬어지는 이 과정은 CFD 사용자들의 공학적인 지식을 동원하여 물리적인 결과를 도출해야 하는 과정이라고 볼 수 있다. 보통 해석이 끝나면 압력, 속도, 밀도 및 온도와 같은 기본적인 물성치 이외에도 난류 강도, 수밀도 등과 같은 물리적인 데이터를 얻을 수 있으며 그림 3와 같이 이를 그래픽으로 처리하는 기능들이 대부분의 상용 CFD 소프트웨어에 내장되어 있으므로 사용자가 바로 결과를 확인할 수 있다. 이 외에도 결과 파일을 추출하여 CFD 전용 후처리 프로그램을 사용하여 해석 결과를 도출하기도 한다.

## 4. CFD 적용 분야 사례 소개

### 4.1 일반 사례 소개

CFD는 현재 기계, 자동차, 항공우주, 조선 해양, 원자력, 화공, 플랜트, 에너지, 전기전자 및 바이오 분야에 널리 사용되어 왔으며 컴퓨터 하드웨어 및 수치 해석 기법의 발전으로 앞으로 그 사용이 더욱 활발해질 것으로 예상된다. 본 장에서는 CFD가 사용되는 대표적인 예를 소개하겠다.

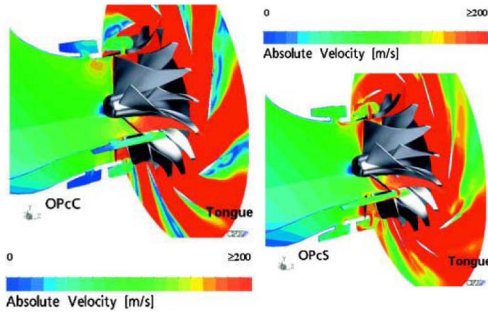


그림 4. 원심형 압축기의 유선 및 속도장 [7]

그림 4는 발전기 및 자동차 엔진에 널리 쓰이는 원심형 유체기계 내부의 유동장을 CFD로 해석한 결과의 예를 보여주고 있다.

고속으로 회전하는 임펠러 내부의 유동 현상을 실험적으로 측정하거나 가시화하기엔 기술적, 비용적인 어려움이 있기 때문에 개념 설계 단계에서 CFD를 사용하여 사전 성능 예측을 하게 된다. 자동차 분야에서도 다양하게 CFD가 적용되는데 대표적인 것으로 자동차 엔진 연소실을 들 수 있다. 연소실 내의 고온 고압의 환경을 실험적으로 구현하기엔 여러 제약이 따르므로 화학 반응이 포함된 유동 해석 코드를 사용하여 연소실내의 연소 현상 및 흡기, 배기 포트에서의 공기의 유동 패턴 및 실린더 헤드, 피스톤에 미치는 압력 등을 계산하여 설계에 반영한다.

항공우주 분야에서도 오랫동안 항공기 및 로켓 제작에 CFD가 적용되어 왔다. 항공기 날개 에어포일(airfoil) 주변의 공기역학에 대한 수치해석 연구는 풍동 실험 데이터를 사용하여 수치 해석 코드의 검증과 함께 이루어져 왔다. 다양한 모양의 에어포일에 대한 공기역학적 성능의 예측뿐만 아니라 실제 항공기 날개 제작에서도 삼차원 직접 계산을 통하여 항공기의 날개 및 동체를 설계하였으며 이 과정에서 새로운 수치 해석 기법 및 격자 생성법이 함께 개발되어 왔다.

이 외에도 CFD는 원자력, 전기전자, 에너지 및 바이오 부분에서도 그 역할이 증대되고 있다. 원자력의 반응기(Reactor)나 노심 시스템의 설계에 있어서 냉각 부분이 중요하므로 그림 5와 같이 CFD를 통

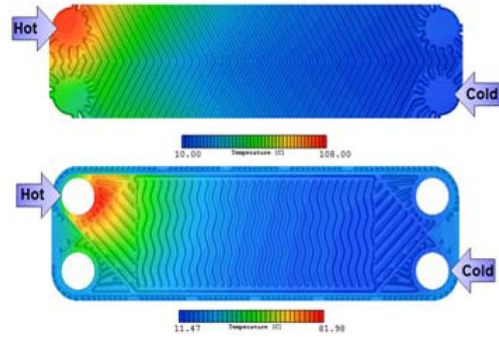


그림 5. 판형 열교환기 표면 온도 분포

한 열교환기나 반응기의 설계에 있어서 CFD는 선택이 아닌 필수적인 요소로 자리잡아가고 있다.

혈관 내 혈액 유동과 같은 바이오 분야에서의 CFD 적용은 기존의 Navier-Stokes 방정식의 이산화 만으로는 Non-Newtonian 유체의 혈액을 정확히 모사하는데에 제약이 있다. 따라서 격자 볼츠만 방법(Lattice Boltzmann Method, LBM)과 같은 입자기반 유동 해석 기술이 연구되고 있다[9].

#### 4.2 KISTI 슈퍼컴퓨터를 활용한 CFD해석 사례

KISTI 가상분석설계실에서는 KISTI의 슈퍼컴퓨팅 시스템과 FLUENT, CFX와 같은 상용 CFD 소프트웨어를 사용하여 중소기업의 열유동 관련 해석지원 업무를 수행해오고 있다. 본 장에서는 최근 성공적으로 수행한 CFD 해석 사례를 소개하고자 한다. 그림6은 농업용 미생물 비료를 제작하는 교반기 내의 내부 유동 해석 결과로서 본 해석결과를 통해 교반기 내부 유동 패턴을 분석하고 적절한 임펠러 형상 및 격벽의 사양을 결정하였다. 교반기 내부 유동이 정상상태(steady-state)까지 도달하는 시간은 서로 다르지만 1분 이내에 도달하는 유동의 패턴은 상호 유사함을 알 수 있었다. 또한 격벽의 효과 및 형상의 변경에 따른 유동 현상의 변화를 예측할 수 있게 되었다[10].

또한 그림7은 다리우스형 풍력발전기에 대한 유동 해석 결과로서 회전하는 블레이드에 의해 발생하는 블레이드 주변 공기의 속도 분포를 나타내었다. 아



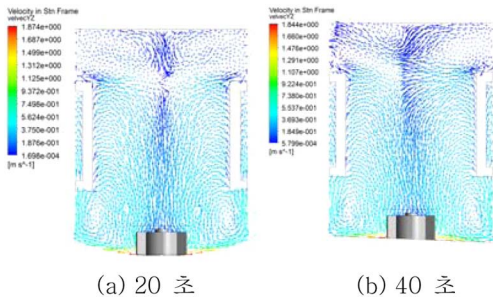


그림 6. 20초 이후 교반기 내부 유동장 비교

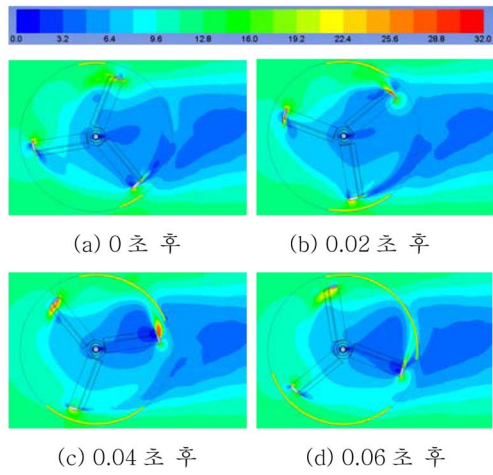


그림 7. 시간의 흐름에 따른 속도 분포 비교

래의 그림은 여러 해석 조건 중 회전수 250 rpm 조건에서의 결과로서 동일한 유동 패턴이 반복되는 한 주기에 대한 결과를 도시하였다. 한 주기에 대한 시간은 그림에 나타난 것과 같이 약 0.08초 정도임을 확인하였고, 풍력발전기 후단에서의 공기 흐름 역시 분석 가능하다.

본 해석결과를 통해 여러 블레이드 회전수에 대한 속도 및 압력 분포 등을 비교·분석할 수 있었다.

### 5. CFD 발전 전망

CFD는 앞서 설명한 바와 같이 산업 및 연구 현장에서 그 역할이 증대 되고 있으며 다양한 기법과 수치 모델들이 발전되어 오고 있다. 특히 고성능 컴퓨

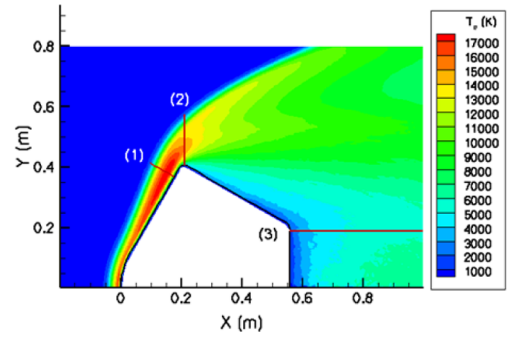


그림 8. 직접수치 몬테카를로법으로 계산한 극초음속 재진입 비행체 주변의 전자(Electron)의 온도

터와 네트워킹과 같은 IT 기술의 발달에 힘입어 컴퓨팅 능력이 날로 향상되어 가고 있으며 이전에는 시도하기 힘들었던 대용량의 데이터를 필요로 하는 거대 계산도 가능하게 되었다. 그러나 여전히 극복해야 할 기술적 난관들이 존재하며 이를 해결하기 위해 많은 연구자들이 새로운 수치 해석 기법과 이론들을 개발해 나가고 있다. 최근에는 복잡한 화학 반응이나 상변화 및 다중 물리 현상을 포함하는 새로운 수치해석 기법이 상용 CFD 프로그램에 적용되어 사용되고 있으며 그림 8과 같이 기존의 유한격자 기반의 수치기법 뿐만 아니라 입자기반 시뮬레이션을 통해 플라즈마와 같이 다양한 물리현상이 동반된 시뮬레이션 연구가 진행되고 있다[11][12].

앞서 언급한 바와 같이 유동장을 해석하는 과정에 있어서 가장 많은 시간이 소요 되는 부분은 계산 격자의 생성작업이다. 격자 생성을 간소화 하고 직접 설계에서 해석까지의 과정에 대한 시간적인 부담을 덜어줄 수 있는 방법으로 격자 없는 해석(Meshless computation)이나 적응형 격자(Cartesian Adaptive Mesh), 혼합격자(Hybrid Mesh)법에 대한 연구 및 이를 이용한 해석 사례가 활발히 진행되고 있다.

최근에는 CFD 결과를 최적 설계 알고리즘과 연동시켜 제품 개발 프로세스를 자동화 하려는 노력이 진행되고 있다. 수치 최적화 알고리즘과 유체/구조 해석 과정이 성공적으로 연계 된다면 기존의 반복적인 시험과 평가를 거쳐야만 했던 제품 개발 프로세스가 간소화 될 수 있다. 그러나 최적화 알고리즘과

기존의 해석 소프트웨어와의 연동에 있어서 반복적인 계산에 따른 라이선스 비용 증가 및 고가의 컴퓨팅 장비의 확보로 인해 최적화 알고리즘과 전산 해석 과정을 연동시키기에는 현실적인 어려움이 존재한다. 따라서 이를 극복하기 위해 격자 생성의 간소화, 새로운 최적화 알고리즘의 개발 등이 지속적으로 요구되어지고 있다. 수치 알고리즘의 경우 기존의 상용 CFD 코드를 개발한 회사들이 자사의 소스 코드를 공개하지 않고 있어 자체적으로 소스 코드를 처음부터 개발하기에는 현실적으로 어려우며, 이를 개발, 관리할 수 있는 인력이 국내에서는 부족한 실정이다. 더군다나 70년대부터 본격적으로 컴퓨터 코드를 개발한 미국 및 영국과 같은 선진국에서는 이미 수많은 해석용 소스 코드들이 개발되어 왔고 이중 상당수는 공개가 되지 않아서 후발 주자인 우리나라가 이를 새로 개발하기에는 어려움이 따른다고 볼 수 있다. 하지만 최근 OpenFOAM[13]과 같은 오픈 소스 코드들이 개발되어 웹을 통해 공개 되어 있기 때문에 이를 기반으로 오픈 소스 코드를 이용한 CFD 해석 사례들이 소개 되고 있다. 이들 공개 프로그램을 이용할 경우 자체적으로 코드의 라이선스 및 업그레이드에 따른 비용을 지불할 필요가 없으며 공개소스코드를 사용하여 특정 제품 해석을 위한 제품 맞춤형 CFD해석 모듈 제작을 가능하게 한다.

## 6. 맺음말

지금까지 CFD의 소개와 현황 그리고 앞으로의 발전 방향에 대해 논의하고 KISTI의 산업체 CFD해석 지원 예를 통해 구체적인 CFD 해석 사례를 소개하였다. CFD는 이미 여러 산업 및 연구 분야에 있어서 활발히 이용되어 왔으며 컴퓨터 공학의 발전과 더불어 앞으로 중소 중견 산업체에 널리 적용되어야 할 기술이다. 기존의 물리적인 시험이나 실험 횟수를 획기적으로 줄이면서 동시에 보다 우수한 성능 확보 및 기능을 예측할 수 있으므로 제품이나 시스템 개발시 비용 및 개발 기간 단축에 상당부분 기여할 것으로 예측된다. 또한 공개 프로그램의 활용으

로 선진국에 비해 뒤쳐진 CFD의 산업체 적용에 속도를 낼 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. 김종암, CFD의 소개 및 향후 전망, CAD & Graphics, 2011년 10월호, pages 90~93.
2. Munson, B.R., Young, D. F., Okiishi, T. H. and Huebsch, W. W. "Fundamentals of Fluid Mechanics", 6th Edition, Wiley, 2010.
3. White, F. M, "Fluid Mechanics", 7th Edition, McGraw-Hill, 2010.
4. Pletcher, R. R., Tannehill, J. C. and Anderson, D., "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer", 2nd Edition, 1997.
5. 명현국, "CFD 입문", 문운당, 2006.
6. Sohn, I. "A Shape Design Optimization of Axial Compressor Rotor Blades using Gradient Based Method", M.S. Thesis, POSTECH, 2004.
7. Dickmann, H., Wimmel, T. S., Szwedowicz, J., Filsinger, D. and Roduner, C. H., "Unsteady Flow in a Turbocharger Centrifugal Compressor: Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Simulation and Numerical and Experimental Analysis of Impeller Blade Vibration", *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol.128, No. 3, 455-465, 2005.
8. 손일엽, 김호윤, 윤성욱, 이가형, "고성능 컴퓨팅 기술을 이용한 친환경 폐기 축산물 처리 시스템 개발", 슈퍼컴퓨팅정보지, Vol.2, No. 1, 20~29, 2014.
9. Y. Kim, X. Xu, and J.S. Lee, "The Effect of Stent Porosity and Strut Shape on Saccular Aneurysm and its Numerical Analysis with Lattice Boltzmann Method," *Annals of Biomedical Engineering* Vol. 38, Number 7, July 2010, Pages 2274-2292.
10. Sohn, I., Park, K.S., Lee, S.M. and Jeong, H., "Development of a Microorganism Incubator using CFD Simulations", 2013 ASME Verification and Validation Symposium, Las Vegas, NV, May 22-24, 2013.
11. Sohn, I., Li, Z. and Levin, D. A. "Effect of Non-Local VUV Radiation on a Hypersonic

- Nonequilibrium Flow”, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol.26. No.3, July-September 2012, pp. 393-406.
12. Sohn, I., Kim, J., Bae, J. and Lee, J., “Development of Magnetron Sputtering Simulator with GPU Computing”, AIP Conference Proceedings of 29<sup>th</sup> International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Xi’an, China, July, 13-18, 2014.
  13. The open CFD tool box, <http://www.openfoam.com>