

터보기계의 CFD 해석

허남건*

CFD Analysis for Turbomachinery

N. Hur*

1. 서 언

최근 설비분야에서도 CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학)를 이용하여 설계하고 해석하는 사례가 점점 늘어나고 있고, 업계에서도 CFD분야에 상당한 관심을 갖고 있다. 특히 CFD가 실험을 대체할 수 있고 간단히 빨리 적용할 수 있다는 이점 때문에 더욱 관심을 갖게 되었다. 또한, 거의 모든 업체에서 컴퓨터를 이용한 CAD 소프트웨어를 사용하여 설계도면을 작성하고 있고, 또 일부 업체에서는 구조해석을 수행하고 있어 CAE(Computer Aided Engineering)이란 단어가 친근하게 되어 CFD의 수행여건이 어느 정도 갖추어 졌다고 볼 수 있다.

CAE의 한 요소인 구조해석이 제품이 작동 중 파손될 것인지 아닌지를 해석하는 것이라면, CAE의 또 다른 요소인 유동해석, 즉, CFD는 제품의 효율을 높이기 위해 해석하는 기술이라고 할 수 있다. 우리 업계에서는 초창기 외국 제품의 설계를 복제하는 수준에서는 제품의 성능보다는 작동여부와 내구성 등이 중요하여 구조해석을 주로 수행하였지만, 이제 외국의 제품과 경쟁하기 위해서는 제품의 효율과 성능을 무시할 수 없게 되어 이에 대한 연구 개발투자가 많이 되고 있다. 이를 위하여 종래 실험에 의한 방법을 주로 사용하였으나 최근 컴퓨터의 급속한 발달과 유동해석기술의 발전으로 CFD를 설계업무에 적용하기 위한 노력⁽¹⁾이 대기업의 CAE팀을 위주로 진행되고 있으며, 중소기업에서도 활용 방법을 모색하는 중이며, 많은 CFD 적용 사례들이 발표되고 있다.^{(2)~(5)} 그러나 CFD를 직접 업

무에 적용하기에는 전산장비, CFD 소프트웨어 및 전문인력 등의 요소가 모두 필요하여 대부분 중소기업인 설비업계에서는 쉽게 적용하기에 어려움이 많은 실정이다. 본 고에서는 최근 각광받고 있는 CFD가 어떤 기술인지에 대하여 설명하고 문제점과 발전 전망 등에 대해 기술하고, 터보기계의 유동해석 방법에 대해서도 기술하고자 한다. 본 고의 내용은 상당부분 참고문헌에 있는 필자의 원고⁽⁶⁾와 중복됨을 밝힌다.

2. CFD 개념

우리 인간은 공기와 물 등 유체의 유동과 밀접한 관계를 갖고 생활하고 있으며, 문명이 발달함에 따라 발명되고 개발되는 거의 모든 기계들도 유체의 유동과 연관되어 있다. 즉, 비행기가 뜨는 원리인 양력도 유체의 유동으로부터 얻는 힘이며, 자동차의 연비가 좋기 위해서는 외형을 저저항 설계해야 하는 것도 유체 유동의 원리 때문이다. 최근 급속도로 발전하고 있는 컴퓨터도 유체의 유동에 의한 냉각이 없으면 사용할 수 없는 물건이 되어 버리고 말 것이다. 설비업계에서의 예로는 냉난방 덕트에서의 급기가 그러하고, 후드를 이용한 배기, Fan, 송풍기와 펌프 등 유체기계의 설계 및 설치, 온풍기와 냉방기 등의 공조기기 고효율 설계 등 에너지 절약과 관련 있는 대부분이 유체의 유동과 관련이 있다.

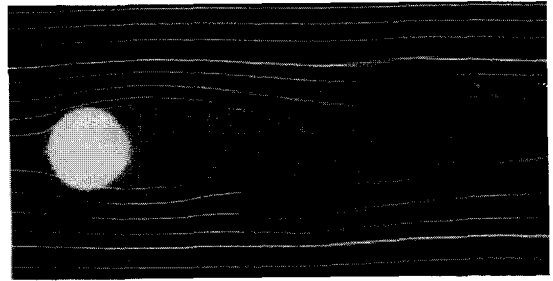
종래에는 이러한 유동현상을 해석하기 위해서는 대부분 실험에 의한 방법을 사용해 왔다. 즉, 연기나 실(tuft)을 이용하여 유동의 대략적인 형태만 보게되는(대부분 정체현상, 유동박리와 역류현상을 확인하게 된다) 유동가시화 기법이 널리 사용되고 있다. 이 방법은 간편하다는 장점은 있으나, 속도나 압력 등 정량적인

* 서강대학교 기계공학과
E-mail : nhur@ccs.sogang.ac.kr

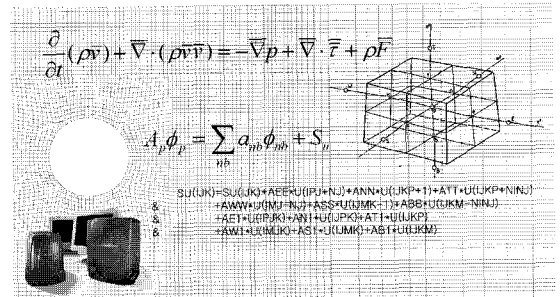
값을 얻을 수 없다는 단점이 있다. 속도나 압력 등 정량적인 값을 구하기 위해서는 피토투브, 터빈미터 등 유속계와 압력계를 사용하여야 한다. 최근에는 Laser를 이용한 LDV(Laser Doppler Velocimetry, 레이저 도플러 유속계)와 PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계)등을 사용하여 유동장의 교란없이 속도를 측정하는 방법도 사용되고 있으나, 고가의 장비가 필요하고, 또 레이저 빛을 통과시킬 수 있는 투명한 실험 모델을 제작해야하기 때문에 쉽게 적용하기에는 많은 제약이 따른다. 그러므로, 유동현상을 실험하지 않고 수학적으로 해석하기 위한 노력이 15세기 이후 꾸준히 이어져 왔으며, 유동 해석을 위한 지배방정식(일반적으로 연립 편미분 방정식)은 19세기에 이미 완성되었다. 그러나, 이 미분방정식의 엄밀해(Analytic Solution)이 존재하는 경우는 유동형태가 아주 간단한 몇 가지 밖에 되지 않으며, 대부분의 유동현상에 대한 해석은 컴퓨터를 사용하기 전까지는 엄두도 내지 못하는 실정이었다.

최근 컴퓨터의 급속한 발전에 힘입은 유동해석기술의 발달에 따라 가능해진 기술이 CFD 기술이며, 이는 한마디로 유체유동을 컴퓨터를 사용하여 해석하는 기술이다. 그림 1에 그 개념도를 보여주고 있다.

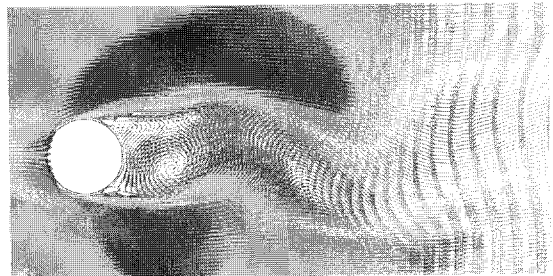
그림 1(a)는 실제 공이 날아가는 주위의 유동형태를 가시화한 사진이며, 그림으로부터 공 뒤쪽의 후류영역에서 와류(Vortex)의 형성을 볼 수 있다. 이를 해석하기 위해서는 유체유동을 지배하는 미분방정식을 세우고 해석 영역을 계산 격자로 나누어 컴퓨터를 사용하여 해석하게 되며(그림 1(b)), 그 결과 유동에 대한 정보를 속도 vector(그림 1(c))와 압력장 등에 대한 상세한 정보를 얻는 것이다.



(a) Flow visualization around a ball



(b) Differential equations, computational mesh, discretization method, computer program and computer for flow analysis



(c) Velocity vector as a result for CFD analysis

Fig. 1 Concept of CFD

3. CFD 역사

CFD는 컴퓨터의 발달과 밀접한 연관이 있다. 그림 2에 연도별 컴퓨터 가격대비 성능의 발전을 보여주고 있으며,⁽⁷⁾ 초창기 기계식 계산기로부터 진공관, 트랜지스터, 그리고 최근의 반도체를 사용하는 컴퓨터로 진화함에 따라 그 가격대비 성능이 급격히 향상되고 있다.⁽⁸⁾ 즉, Moore에 따르면 컴퓨터는 매년 약 79%씩 성능이 향상되고 있다. 컴퓨터는 지금구매하지 않고 기다리면 더 좋은 컴퓨터를 같은 가격에 구입할 수는 있으나, 또 한편으로는 빨리 구입하여 사용함으로써 얻는 효과는 컴퓨터를 싸게 사는 것보다 훨씬 이익이

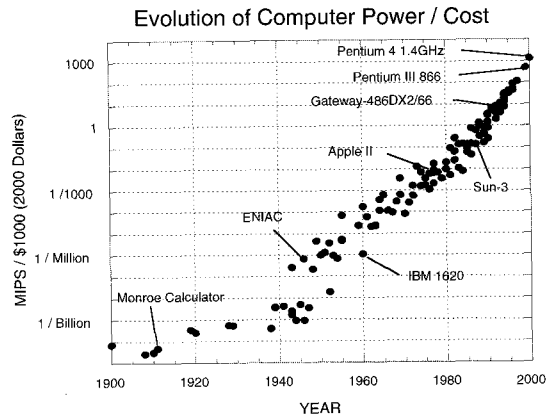


Fig. 2 Evolution of performance per computer cost

될 수도 있을 것이다. 컴퓨터의 발전 속도가 지금의 추세라면 약 20-30년 후면 컴퓨터의 성능이 인간 뇌의 연산능력과 비슷한 수준이 될 수도 있을 것이다.

컴퓨터의 발전을 보이기 위해 그림 3에 최초의 디지털 전자 컴퓨터인, 진공관 18,000개로 이루어진 30톤 무게의 ENIAC(Electronic Numerical Integrator And Computer)을 보여주고 있다. ENIAC은 1946년에 완성되었으며 초당 800 연산을 수행하였고, 10년동안 전 인류가 ENIAC이 태어나기 전까지 수행한 모든 계산 양보다 더 많은 계산을 수행하였다. 그림 4는 1993년에 국내에 도입한 KISTI(전 시스템공학센터, KORDIC)의 슈퍼컴퓨터 Cray C-90을 보여주고 있으며, 16개의 Vector Processor로 총 16 GFLOPS의 연산속도, 4GB의 기억용량, 그리고 203GB의 저장능력을 가지며, 당시 약 US\$30,000,000의 고가로 도입한 컴퓨터이다. 최근 2000년 연말에 저장대 CFD연구실에 US\$로 환산하여 약 US\$2,000의 저렴한 가격으로 도입한 PC Cluster를 그림 5에 보여주며, Node 당 2개의 Intel Pentium III 850MHz CPU를 가지는 7개의 Node로 구성되어 있으며, 총 2.3 GFLOPS의 연산 속도를 가지며, 7GB의 기억용량과 126GB의 저장능력을 가지는 컴퓨터이다. 이렇게 컴퓨터의 가격대비 성능이 급속히 발전하고 있으므로 과거 계산 시간과 컴퓨터 메모리의 한계로 거의 불가능하던 계산들을 최근에는 아주 손쉽게 수행하게 되었다.

전술한대로 CAE의 해석은 크게 구조 해석과 유동 해석으로 구별할 수 있으며, 많은 업체에서 컴퓨터 시뮬레이션에 사용하고 있는 구조 해석용 소프트웨어는 거의 유한 요소법(Finite Element Method; FEM)이라는 수치해석 기법을 사용하고 있다. 반면 전산유체역학은 그 물리적 현상 자체가 구조 역학이나 동역학보다 어렵고 그 현상을 나타낼 수 있는 수학적 방정식이 수치적인 해를 구하기 어렵기 때문에 그 발달이 늦어 1980년대 초반에야 범용 소프트웨어가 출현하였다. 사용하는 수치 해석 기법도 유한차분법(Finite Difference Method; FDM), 유한요소법(Finite Element Method; FEM), 그리고 유한체적법(Finite Volume Method; FVM) 등 다양하나, 최근에는 거의 대부분의 소프트웨어가 유한체적법을 사용하고 있다.⁽⁹⁾

70, 80년대의 초기 CFD 소프트웨어는 아주 간단한 형태의 공간에서의 단순한 유체 유동만을 다룰 수 있어서 산업체에서 설계에 직접 적용하기에는 많은 어려움이 있었다. 그러나 최근에는 영국과 미국을 중심으로 수치 해석 기법이 발달하여 복잡한 형상에서의 유체



Fig. 3 ENIAC

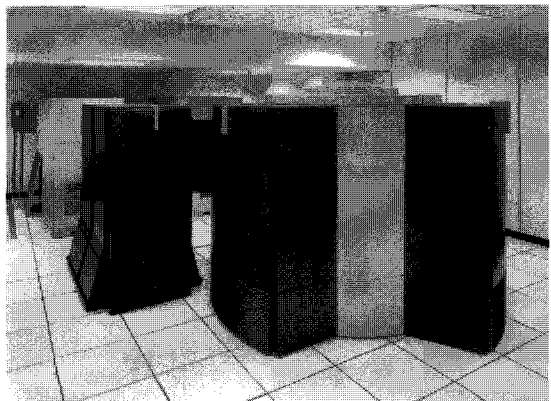


Fig. 4 Cray C-90 Super Computer



Fig. 5 PC Cluster

유동을 해석할 수 있는 몇 개의 상용 소프트웨어가 개발되어, 시간과 고가의 장비가 소요되는 시제품 제작과 실험을 대체하는 하나의 도구로서 신제품 생산 기간의 단축과 그에 따른 원가 절감을 위하여 전산 유체 역학이 사용되고 있다. 지속적인 컴퓨터 하드웨어의 발전과 CFD 소프트웨어의 발달로 앞으로는 CFD가 제품설계에 반드시 거쳐야 할 하나의 루틴이 될 수 있을 것이다.

4. CFD 소프트웨어

유동을 해석하기 위해서 꼭 필요한 것이 CFD 소프트웨어이다. 과거 70년대 까지에는 CFD 프로그램이 아직 소프트웨어로 상용화되지는 않았고, CFD 해석은 대부분 연구자들에 의해 본인들의 프로그램을 사용하여 수행되어 왔었다. 80년대 초부터 영국 Imperial College의 D.B. Spalding 교수를 중심으로 발달한 유한체적법을 근간으로하는 CFD 프로그램들이 상용화되기 시작하여 최근에는 상용화된 프로그램이 수십 종에 이르고 있다. 그 중 국내에도 도입되어 많은 기업체에서 사용되고 있는 소프트웨어로는 FLUENT,⁽¹⁰⁾ STAR-CD,⁽¹¹⁾ CFX,⁽¹²⁾ PHOENICS,⁽¹³⁾ CFD-ACE⁽¹⁴⁾ 등이 있으며, 그 도입 가격이 일반적으로 수천만원대에 달하기 때문에 웬만한 하드웨어 보다 비싼 실정이다. 아직까지 국내에서 상용으로 개발되어 발매되고 있는 CFD 소프트웨어는 없으므로 향후 국산 프로그램의 개발을 위해서 노력해야 할 것이다.

전산 유체 역학 소프트웨어는 각각의 소프트웨어마다 약간씩의 차이는 있으나 대체로 전처리 모듈(Preprocessor), 해석 모듈(Solver), 후처리 모듈(Postprocessor) 등 세 부분으로 이루어져 있으며, 경우에 따라서는 전처리와 후처리를 하나의 모듈에서 할 수 있는 것도 있다.

전처리 모듈은 유동이 일어나는 공간의 형상, 경계 조건 등 계산에 필요한 정보를 입력하는 곳이며 해석 모듈은 전처리 모듈에서 입력된 정보를 받아 계산이 행해지는 곳으로 그 자세한 내용은 사용자가 몰라도 되는 블랙 박스인 곳이다. 후처리 모듈은 해석 모듈의 계산 결과 즉, 압력과 속도 등을 받아 사용자가 원하는 정보 즉, 압력 강하, 유량, 항력계수, 유량계수 등을 계산하고, 등압선 그림, 속도 벡터 그림 등을 그리고 원하는 포맷으로 출력하고 또 최근에는 동영상 결과를 만들어 주는 곳이다. 전처리 모듈과 후처리 모듈은 쉽게 메뉴 형식이나 특별한 명령어로서 처리하는 것이

보통이며 소프트웨어에 따라서는 FORTRAN 언어로 처리할 수 있는 것도 있다. 여기서 각 모듈의 기능에 대해 좀 더 자세히 알아보면 다음과 같다.

4.1 전처리 모듈(Preprocessor)

4.1.1 유동 조건의 입력(Problem Definition)

2차원 또는 3차원 유동, 정상 상태의 유동(Steady Flow) 또는 비정상 상태의 유동(Unsteady flow), 압축성 유동(Compressible Flow) 또는 비압축성 유동(Incompressible Flow), 열전달(Heat Transfer)의 유무, 층류(Laminar Flow) 또는 난류(Turbulent Flow) 등 유동의 조건을 정의해 주는 것이다. 특히 여러 가지 수학적 모델을 선택 사양으로 가지고 있는 소프트웨어인 경우 문제에 적합한 모델을 선택한다(난류 모델, 비뉴턴 유동 모델, 연소 모델 등).

4.1.2 계산 영역과 계산 격자의 형상과 좌표 입력 (Geometric Information Input)

일반적으로 산업체에서 필요로 하는 유동 해석은 아주 복잡한 경계 내에서의 유동으로 어떤 방식이든 그 경계를 입력해 주어야 하며 또, 그 계산 영역 또한 수치 해석에서는 여러 개의 격자(Grid, Node, Vertex), 유한 요소(Finite Element), 또는 검사 체적(Control Volume or Cell)으로 분할하여 계산하기 때문에 유동 영역내의 격자점 또는 Element와 Cell의 형상과 위치를 입력해 주어야 하는데 이 중요한 기능을 하는 곳이 전처리 모듈이다.

입력 방법으로는 과거에는 대부분 도면을 읽어 유동해석 영역에 대한 형상정보를 GUI(Graphical User Interface)를 사용하여 Interactive Graphics로 직접 입력하였고 현재에도 많이 사용되고 있다. 형상정보를 직접 입력하는 방법은 유동이 급격히 변하리라고 생각되는 부분에 조밀한 격자계를 임의로 구성할 수 있는 잇점은 있으나, 이러한 격자 생성에는 많은 시간과 노력이 들며 복잡한 형상내에서의 유동인 경우 전체 작업의 약 70~80%가 이 부분에 소요되어, 과거 복잡한 형상의 정보를 입력하는 데는 숙련된 모델러가 몇주 내지 몇 개월씩 소요되기도 하였다.

최근에는 격자 생성에 드는 노력을 줄이고자 CAD 데이터의 점과 선 그리고 IGES나 VDA 포맷의 면의 정보로부터 자동적으로 격자를 생성해 주는 전처리 장치인 자동격자생성장치(Automatic Mesh Modeller)들

이 개발되어 사용되고 있어(ICEM,⁽¹⁵⁾ Pro*am⁽¹¹⁾ 등), 과거 수개월 씩 걸리는 격자생성이 최근에는 단 몇 시간 내에 가능하게 되었다. 앞으로 이 부분의 연구개발이 활발히 이루어져 단 몇 개의 입력정보로 격자 생성이 가능해 질 수 있을 것이다.

4.1.3 경계 조건 입력(Boundary Conditions Input)

계산 경계에 있어서의 경계 조건(Boundary Condition; BC)을 정의해 주는 것이다. 이것도 마우스 등을 사용한 Interactive Graphics를 사용하여 쉽게 지정할 수 있으며 다음과 같은 여러 종류의 경계를 지정할 수 있다.

- 1) 입구 경계(Inlet BC) : 경계면에서 유동 속도가 알려져 있음.
- 2) 압력 경계(Pressure BC) : 경계면에서 압력이 알려져 있음.
- 3) 출구 경계(Outlet BC) : 경계면에서의 대류가 확산항보다 매우 커서 국부적으로 포물선형이라는 가정으로 유동의 유출만 존재하고 유입은 없는 경계임.
- 4) 대칭 경계(Symmetry BC) : 유동이 대칭인 경우 이 조건을 사용하여 유동 영역 전부를 계산하지 않고 부분적으로 계산하여 계산에 소요되는 시간을 줄일 수 있다. 예로서 자동차가 전방으로 달릴 때 자동차 주위의 유동은 대칭 경계 조건을 사용하여 자동차 중심축으로부터 반만 계산하면 된다.
- 5) 주기 경계(Cyclic BC) : 유동이 주기적으로 반복될 경우 유동이 주기적으로 반복될 경우 유동 영역 전부를 계산하지 않고 그 한 주기만 계산한다. 예로서 터빈 날개 주위의 유동은 날개의 수만큼 반복되므로 주기 경계 조건을 사용하여 날개 한 개의 주위 유동만 계산한다.
- 6) 벽면 경계(Wall BC) : 다음과 같은 여러 종류의 벽면을 다룰 수 있다. 투과성 벽면(Permeable Wall), 이동 벽면(Moving Wall), 거친 벽면(Rough wall), 열 전달량이나 온도가 지정된 벽면(Heat Flux or Temperature Specified) 등.

4.1.4 여러 물성치의 선택(Input Properties)

유동의 조건에 따라 공기, 물 등의 점성 계수(Viscosity), 밀도(Density), 온도(Temperature) 등 유체의 물성치를 정의한다.

4.1.5 수치 계산과 입력 출력을 위한 컨트롤(Program Control)

초기 조건(Initial Condition), 수렴 조건(Convergence Criteria), 수치 해법의 선택(Selection of Numerical Scheme), 이완 계수(Relaxation Factor) 등 수치 계산을 컨트롤하는데 필요한 계수의 입력, 입력 출력 컨트롤(I/O Control)을 지정해 준다.

4.2 해석 모듈(Solver)

전처리 모듈에서 정의된 여러 파라미터와 계산 격자 등의 정보를 받아 실제로 계산을 수행하는 곳이며 여러 가지 경우에 대한 계산이 가능하도록 방대한 프로그램으로 구성되어 있다.

일반적으로 소스 프로그램이 주어지지 않으므로 선택 사양에 들어있지 않으므로 선택 사양에 들어있지 않은 종류의 유동 형태는 계산할 수 없다. 소프트웨어에 따라서는 사용자가 서브루틴의 형태로 특별한 체적력(Body Force) 경계 조건, 혹은 물성치 함수나 또 다른 집 방정식을 주어서 원하는 유동장을 계산할 수 있는 것도 있다.

해석 모듈의 출력은 속도, 압력, 온도, 밀도 등 유동 변수이며 이것은 후처리 모듈의 입력으로 사용된다.

4.3 후처리 모듈(Post Processor)

4.3.1 계산 데이터의 영상 처리

해석 모듈의 출력인 계산 결과와 전처리 모듈의 출력인 계산 격자의 위치를 입력으로 하여 속도 벡터(Vector Plot) 압력, 온도, 등고선(Contour Plot) 등을 주어진 단면이나 표면에서 영상 처리하여 화면으로 출력하거나 프로터용 파일로 저장한다. 최근에는 유동에 다른 입자의 거동(Particle Tracking)과 시간에 따른 유동의 발달을 영상처리(Animation)하여 MPEG, GIF 또는 avi file이나 VTR 필름으로 출력할 수도 있다. 유동해석 결과를 가시화하여 가상현실(Virtual Reality)로 직접 현상을 체험하게 하기도 한다. 그 예로는 건물이나 터널에 화재가 발생하였을 때 연기에 의해 출구가 보이지 않아 출구를 찾지 못하게 되어 희생이 커지게 될 수도 있는데, 화재 시뮬레이션 결과를 가상현실로 처리하여 직접 연기를 통한 사물의 형태 파악을 체험하게 할 수도 있다. 그림 6은 화재 때 발생하는 연기를 가시화 한 예를 보여준다.⁽¹⁶⁾

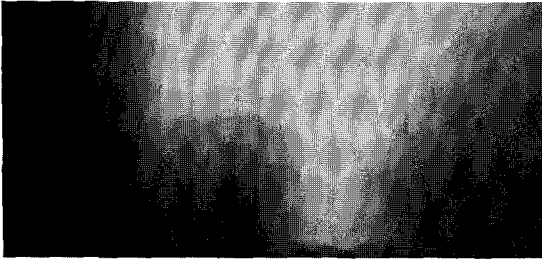


Fig. 6 Visualization of smoke generated during a fire

4.3.2 계산 데이터의 처리

실제 계산되는 출력은 격자점에서의 세 방향의 속도 요소, 압력, 밀도, 온도 등이므로 속도의 크기(Velocity Magnitude), 전압력(Total Pressure), 열전달 계수(Heat Transfer Coefficient), 항력 계수(Drag Coefficient), 양력 계수(Lift Coefficient) 등을 나타내기 위해서는 데이터의 처리가 필요하다. 또, 주어진 지점간의 압력 강하나 어떤 단면을 통과하는 유량 등도 데이터 처리에 의해 여기서 계산한다. 유동 해석의 결과로 얻는 열전달 계수 등을 구조 해석의 경계 조건으로 사용할 경우 두 계산 격자간의 데이터 맵핑이 가능한 것도 있다.

대부분의 CFD 소프트웨어는 후처리 장치를 가지고 있어 그것을 이용하지만, 경우에 따라서는 독립된 후처리 장치를 사용하기도 한다. 독립된 후처리 장치의 예로는 Techplot,⁽¹⁷⁾ FAST,⁽¹⁸⁾ Ensign⁽¹⁹⁾ 등이 있다.

5. 터보기계의 CFD 해석

일반 유동해석과 다르게 터보기계의 유동을 해석하기 위해서는 회전하고 있는 날개사이의 유동을 해석할 수 있어야 한다. 특히, 안내깃이나 디퓨저등을 동시에 해석하기 위해서는 회전하고 있는 영역과 정지영역을 동시에 해석할 수 있어야 한다. 일반적으로 회전하는 날개 사이의 유동해석에는 회전좌표계를 사용하여 해석하며, 회전영역과 정지영역을 동시에 해석하기 위해서는 각각 다른 속도로 회전하고 있는 여러개의 회전좌표계를 사용하여 해석한다. 또한 터보기계 날개사이의 유동은 계속 반복되므로 모든 영역을 다 해석하지 않고 주기 경계(Cyclic B.C. or Periodic B.C.)를 주어 하나의 유동통로만 해석하여 계산 용량을 줄여 계산 시간을 단축시킬 수 있다.

터보기계에서의 유동해석은 크게 정상상태의 유동해석과 비정상상태의 유동해석으로 나눌 수 있다. 여기서 그들의 차이점을 설명하고 해석 방법을 알아보려고 한다.

5.1 정상상태 유동해석

실제 터보기계의 유동은 회전하는 날개 때문에 비정상 상태의 유동이지만, 날개와 같은 속도로 회전하는 좌표계에서는 정상상태의 유동으로 간주할 수 있으므로 정상상태의 유동해석으로 박리현상 등 날개주위의 여러 유동현상을 해석하고 있다. 또한, 교반기 등과 같이 회전하고 있는 날개가 정지하고 있는 배플과 상대운동이 있는 경우에도 두 개의 좌표계를 각각 사용하여 날개주위의 유동 및 배플주위의 유동을 동시에 해석할 수 있다.

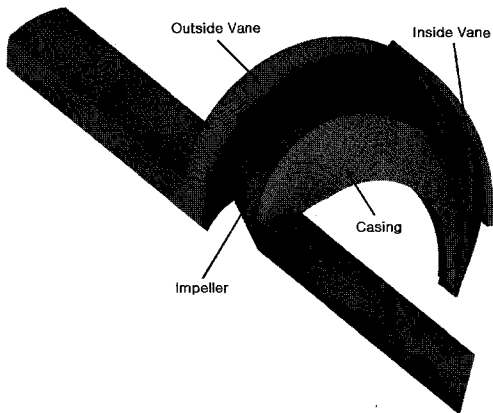
이렇게 회전부와 정지부가 공존하는 경우 가장 쉽게는 하나의 공통 영역에서 서로 다른 속도로 회전하는 좌표계를 사용하여 해석할 수 있지만 이 경우 해석하는 회전부와 정지부의 상대위치에 따라 해석 결과가 달라지는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위하여 회전부와 정지부를 두 개의 서로다른 영역으로 간주하여 각각 정상상태로 해석하는 방법이 있다. 이 경우 회전영역이 정지영역과 만나는 경계에서는 회전 영역의 유동정보를 원주방향으로 평균하여 마치 일정시간 동안 섞인 유동이 정지부로 흘러가는 것처럼 해석하는 방법이 있다(Mixing Plane Approach). 이 경우 실제 날개 후류에 의한 비정상 유동 효과는 해석할 수 없지만 전반적으로 시간 평균 유동장을 해석할 수 있어 터보기계의 유동해석에 많이 사용되고 있다.

이 방법은 또한 회전하는 날개의 수와 정지하고 있는 디퓨저 배인의 수가 서로 다른 경우에도 모든 영역을 다 해석하지 않고, 반복되는 영역만 해석할 수 있는 장점이 있다. 그림 7은 정상상태 유동 해석을 통한 진동 청소기용 터보팬의 해석 격자(a)와 결과(b)를 보여 주고 있다.

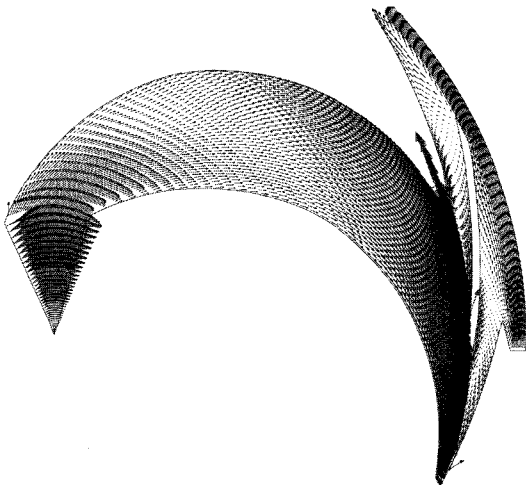
5.2 비정상상태 유동해석

정상유동해석에서는 해석할 수 없는 회전부와 정지부의 상호작용을 해석하기 위해서는 반드시 비정상유동을 해석하여야 한다. 이러한 비정상 유동해석을 위해서는 시간에 따른 격자의 움직임을 모사할 수 있어야 하며, 대부분 상당히 많은 계산 격자수와 아주 짧은 시간증분을 필요로 하기 때문에 대형 컴퓨터와 많은 계산 시간을 필요로 한다.

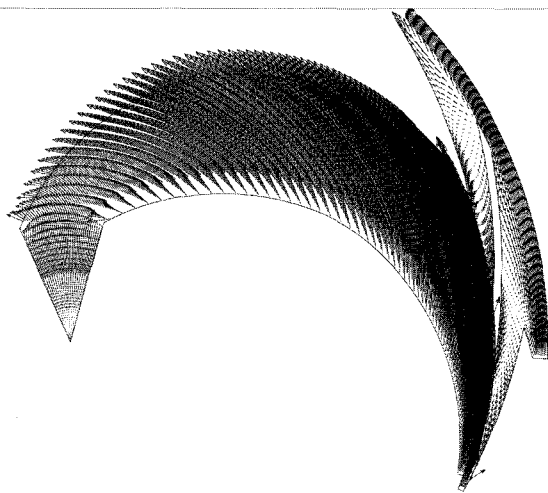
일반적인 터보기계의 설계해석에는 비정상 상태의 유



(a) Computational mesh showing stationary and rotating parts



(b) Velocity vector at computational frame

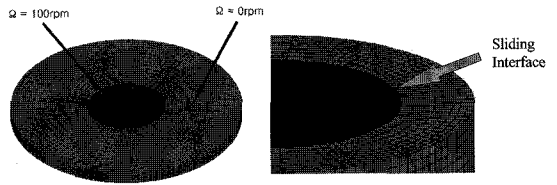


(c) velocity vector plot at stationary frame

Fig. 7 Flow analysis inside a turbo-fan for a vacuum cleaner

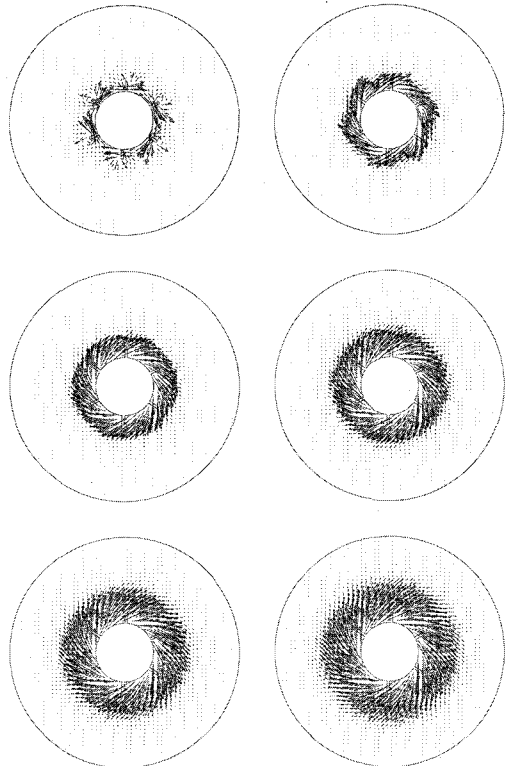
동해석이 필요치 않으나, 회전부와 정지부의 상호작용에 의한 물리현상을 이해하기 위해 이러한 유동해석이 필요하다.

그림 8은 산업용 교반기의 정상 상태 유동 해석과 비정상 상태 유동 해석을 위한 격자와 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 이와 같은 비정상 해석을 수행함으로써 정상 상태 유동에서 명확히 예측하지 못했던 교반기 임펠러 주위의 시간에 따른 유동 발달과 같은 비정상 유동 특성을 확인해 볼 수 있다.



(a) Meshes for steady computation

(b) Meshes for unsteady computation



(c) Transient velocity vector plots

Fig. 8 Computation of a flow inside an industrial mixer

6. CFD 응용 설계

CFD는 개발에서부터 검증까지 거치고 이제는 적용 단계에 있다고 할 수 있다. CFD 엔지니어에 대한 요구사항도 과거에는 프로그램의 개발능력이 필수였으나, 이제는 창의적인 CFD 적용을 통해서 공학설계의 목표를 달성할 수 있는 능력을 가진 엔지니어가 덕목이 되고 있다. 그림 9는 수치 풍동(Numerical Wind Tunnel)의 개념을 보여준다. 그림과 같이 과거 풍동실험을 통해서 자동차의 외형설계를 하는 것이 최근에는 CFD를 통하여 유동현상을 파악하고 여러 설계변수들을 바꿔가며 실험(해석)함으로써 설계에 응용하고 있다.

Boeing 사에서는 항공기를 CFD만 이용하여 설계하고 그 결과를 풍동 실험하는 방법으로 설계하고 있으며, 이렇게 하여 과거 전통적인 방법으로 설계하는 것이 비해 설계시간을 반정도 단축하고 있으며, 설계목표도 초과달성하고 있다.

과거에는 설계방법이 설계자의 경험에 의해 설계하고 Mockup을 만들어 실험을 거쳐 시작품을 만들고, 그것을 실험하여 원하는 성능이 나왔을 때 최종 양산에 들어가는 방법이었다. 그러나, CFD를 응용한 설계에서는 경험에 의한 초기설계로부터 CFD 해석에 의한 설계변경을 통하여 최종 양산품을 바로 생산하는 것이 궁극적인 목표이다. 아직까지는 바로 양산에 들어가는 경우는 거의 없으며 대부분 최종 실험을 통하여 성능을 확인하고 양산에 들어가는 실정이다. 설비분야의 설계에서도 경험에 의한 설계 후 CFD 테스트를 통해 설계를 최종 완성하고 시공하면 설계 시간을 상당히 줄일 수 있을 것이다.

CFD 설계에 있어 가장 중요한 요소는 설계 인력이다. CFD 전문 인력의 배출을 위해서, 최근에는 많은 대학과 대학원에서 CFD 과목을 개설하고 있다. CFD 이론 학습과 가능하면 상용 코드 사용 경험을 통해 체계적

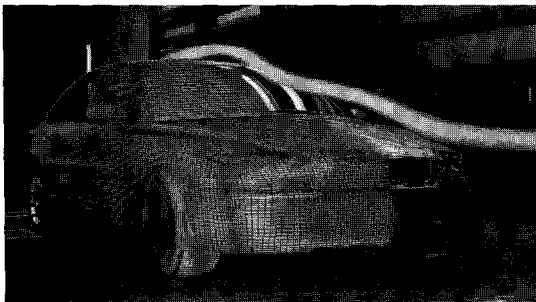


Fig. 9 Numerical Wind Tunnel

으로 훈련된 인력 배출하는 것이 대학의 역할이며, 이 경우 무엇보다 중요한 것은 유동현상에 대한 이해가 깊은 CFD 엔지니어를 배출하는 것이다. 즉, 유동현상에 대한 이해가 없는 CFD 엔지니어라면 CFD 해석 결과를 너무 맹신하게 되어 잘못된 설계를 할 수 있게 되기 때문이다.⁽²⁰⁾

7. CFD 해석의 문제점 및 전망

CFD의 가장 큰 문제점은 결과의 정확성과 복잡한 형상에 대한 격자생성의 어려움을 들 수 있다. CFD 해석 결과의 정확성이 떨어지는 이유는 크게 두 가지이다. 하나는 격자수를 아주 많이 가질 수 없다는 것과, 또 하나는 물리적 현상을 모델링을 통해서 해석하기 때문이다. 유동을 정확히 해석하기 위해서는 많은 격자수를 가져야 하나, 과거에는 컴퓨터 기억장치의 제약으로 많은 격자수를 가지는 해석을 수행하기가 불가능하였으나, 병렬컴퓨터를 이용한 병렬해석 기술이 발달하고 있어 최근에는 수 천만개의 격자수를 사용하는 유동해석도 가능하게 되었다.

CFD에서는 난류, 연소, 다상유동 등 물리적 현상을 모델링을 통해 해석하고 있으나, 이러한 모델들은 아직까지 넓은 범위의 유동현상에 모두 잘 맞지 않고, 대부분 특별한 종류의 유동에만 잘 맞기 때문에 경우에 따라서 결과 실제 현상과 상당히 다를 수도 있다. 난류를 예를 들어, 최근 보편적으로 사용되는 $k-\epsilon$ 난류모델은 실제와 상당히 다른 결과를 줄 때가 종종 있다. 그럼에도 불구하고 이 $k-\epsilon$ 모델을 많이 사용하는 이유는, 이 모델이 이미 많은 종류의 유동에 적용되어 이 모델이 실제와 다른 결과값을 준다는 사실과 또 얼마나 다른 값을 주는지를 우리가 알고 있기 때문이다.

최근 좀 더 정확한 난류해석을 위하여 대와동모사(Large Eddy Simulation, LES)나 직접수치모사(Direct Numerical Simulation, DNS)가 시도되고 있다. 모든 난류변동 성분을 모델링하여 해석하는 $k-\epsilon$ 모델과는 다르게, LES는 격자크기 보다 작은 난류 변동 성분은 모델링하고, 격자보다 큰 난류 변동성분은 직접 해석하는 방법으로 계산 시간과 계산량이 많기 때문에 아직 본격적으로 유동해석에 적용되고 있지는 않고 있다. DNS는 난류 모델링 없이 난류의 변동성분 그 자체를 모두 해석하는 것(그림 10 참조)으로 계산 시간과 격자수가 아주 많이 필요하기 때문에 현재로서는 간단한 형태의 유동장만 해석할 수 있는 수준이며 난류의 구조나

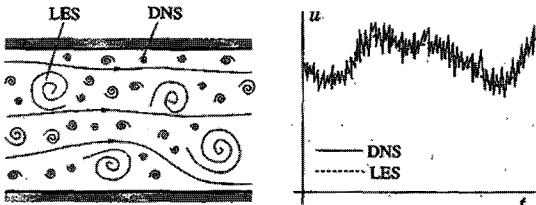


Fig. 10 Comparison of LES and DNS : size of a resolvable turbulent eddy velocity fluctuation

현상을 파악하기 위한 연구에 적용되고 있는 수준이다. 난류에 대해서는 대학과 연구소에서 계속 연구가 진행되어 오고 있으며, 점점 정확성이 있는 모델이 개발되어 검증을 거쳐 바로 CFD 소프트웨어에 적용되기 때문에 정확성의 향상은 계속 기대된다.

또한, 복잡한 형상주위의 유동에 대해서는 격자생성의 어려움이 많아 CFD 해석에 소요되는 시간이 실험에 소요되는 시간보다 더 오래 걸리기도 하다. 그러나, 최근에 개발되고 있는 자동격자생성장치는 앞에서 설명한 바와 같이 CAD의 정보로부터 쉽게 자동적으로 격자를 생성해 주는 것으로 CFD 적용을 좀 더 쉽게 할 수 있게 하였다. 앞으로 이 부분의 연구개발이 활발히 이루어져 단 몇 개의 입력정보로 격자 생성이 가능해질 수 있을 것이다. 그림 11에 자동격자 생성장치에 의한 우주왕복선 주위의 유동해석 격자의 예를 보여주고 있다.

유동이 급격히 변하는 곳에는 많은 격자를 밀집시켜야만 정확한 유동해석의 결과를 얻을 수 있으므로, 자동격자생성장치를 이용할 때는 이를 염두에 두고 격자생성 해야 할 것이다. 유동해석을 수행해 보기 전에는 어느 부분에서 유동이 급격히 변하게 될지 잘 모르기 때문에 격자를 밀집시키기가 어려우나, 유동해석을 진행하면서 프로그램 스스로 유동이 급격히 변하는

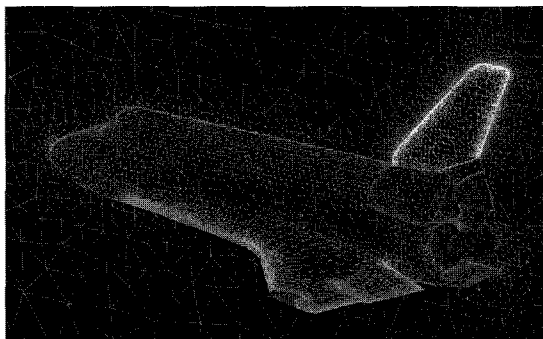


Fig. 11 Example of computational mesh generated by automatic mesh generation technique : meshes for a space shuttle⁽¹⁹⁾

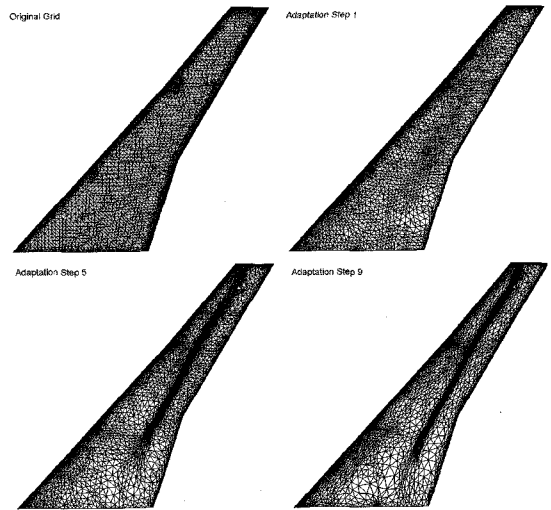


Fig. 12 Example of an adaptive mesh : Mesh for flow analysis around a wing of an airplane⁽¹⁹⁾

곳을 파악하여 그곳에 격자를 밀집시켜 다시 계산하는 적응격자(adaptive mesh) 방법도 개발되어 CFD 해석의 정확도를 높여주고 있다. 그림 12에 그 예로 비행기 주위의 유동해석이 진행됨에 따라 충격파가 형성되는 곳에 격자가 밀집되는 것을 보여주고 있다.

단순히 유동해석에서 한 걸음 더 나아가 유동해석과 구조해석을 동시에 수행하는 유동/구조 상호작용 (Fluid/Structure Interaction) 해석도 시도되어 최근에는 이에 관련한 국제학회도 개최되고 있다.⁽²¹⁾ 유동/구조 상호작용은 유동에 의해 구조물이 변형되고 그 구조물의 형상 변형에 의해 유동이 달라지는 것을 해석하기 위하여 유동해석과 구조해석을 동시에 수행하는 기법이다. 이에 대한 예로는 유연한 재질의 밸브의 거동해석, 즉, 유동의 압력에 의해 밸브가 변형되어 열리면서 이 변형 정도에 따라 유량이 결정되는 것에 대한 해석을 들 수 있다.⁽²²⁾ 해상에서의 선박 사고로 기름이 유출되어 해양오염이 될 때 기름이 조류를 따라 흘러가서 해양 오염피해가 커지는 것을 막기 위해 오일펜스 (Oil fence)를 설치하는데 이 유연한 오일펜스도 조류의 영향에 따라 변형되고 또 변형형상에 따라 오일펜스 주위의 조류 흐름이 달라지게 되므로 이 해석을 위해서도 유동/구조물 상호작용 해석이 필요하다.⁽²³⁾ 오일 펜스에 대한 해석 예를 그림 13에 보여주고 있다. 그림에서 오일펜스 끝에 있는 추의 무게가 가벼울수록 조류에 의해 오일펜스는 많이 변형되어 뒤쪽으로 처지는 것을 볼 수 있다.

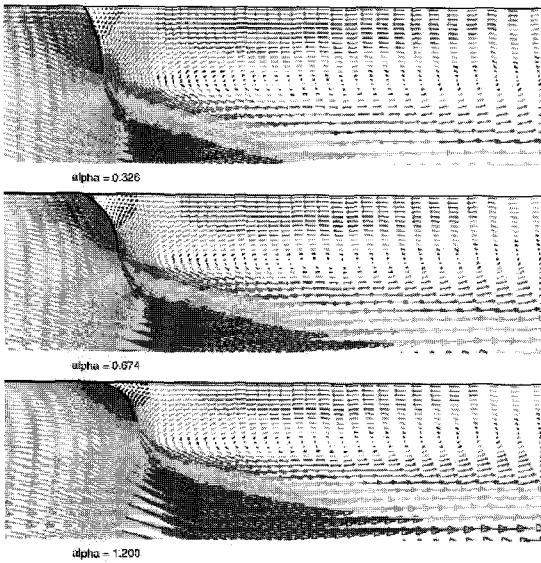


Fig. 13 Example of a Flow/Structure Interaction Analysis: Analysis of deformed shape of an oil fence

또한 CFD를 통한 설계 프로세스는 CFD 해석 결과와 경험과 시행착오에 의해 계속적인 반복 해석을 통해 수행되게 되므로 많은 시간과 노력이 들게된다. 하지만 CFD 해석에 설계최적화 루틴을 이용하게 되면 스스로 최적 형상이나 최적 조건 등을 찾아 결정하게 할 수 있다. 최근에는 상용으로 최적화 프로그램이 개발되어 발매되고 있으며, 여기에 CFD 소프트웨어를 연결하면 최적화를 바로 수행할 수 있다.⁽²⁴⁾ 그림 14와 그림 15에는 최적화 알고리즘을 이용한 자동차 후미 형상 최적화의 예를 보여 준다.⁽²⁵⁾ 그림으로부터 여러 개의 설계변수가 자동차 항력 계수를 목적함수로 하여 최적화되고 있는 것을 보여주고 있다. 종래의 설계변수의 변화에 대한 목적함수의 구배를 이용하여 최적화하는 방법으로부터 최근에는 유전알고리즘(genetic algorithm)을

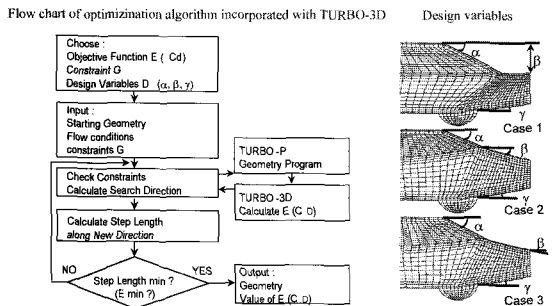


Fig. 14 Example of an optimization : Optimization algorithm and design variables

응용한 최적화방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그림 16에는 Cross Flow Fan의 날개 형상 최적화의

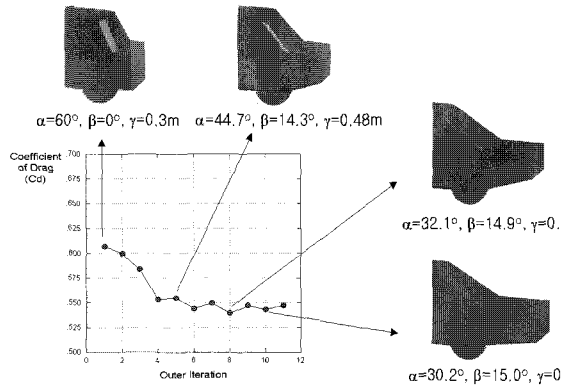


Fig. 15 Example of optimization: Optimization of a rear shape of a MIRA reference vehicle model

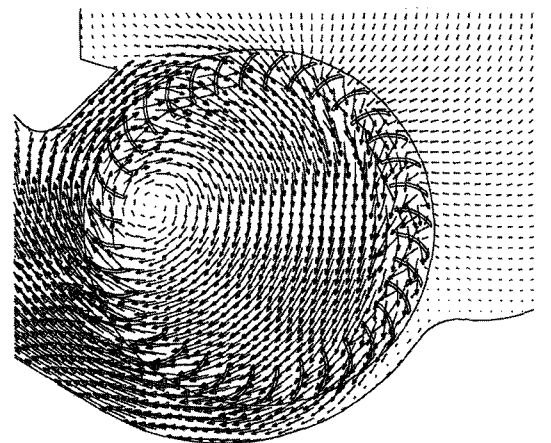
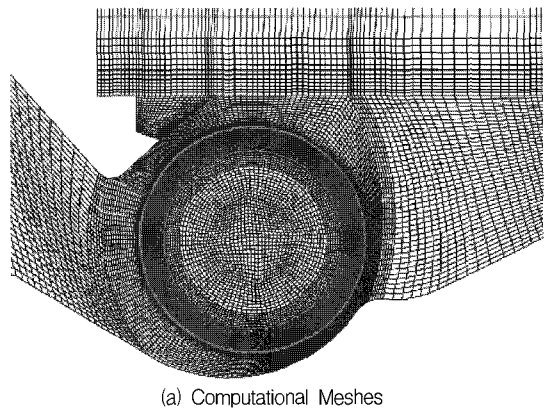


Fig. 16 Optimization of flows through a cross flow fan inside a room air-conditioner

예를 나타낸 것이다.⁽²⁶⁾ 이것은 일반적으로 가정용 냉방기에 사용되는 cross flow fan이다. Fan의 윗 부분에 있는 증발기는 다공성 매질로 처리하여 해석한 예이며 그 결과를 그림 16(b)에 잘 보여주고 있다. 그림으로부터 cross flow fan의 특징인 vortex의 형성을 잘 볼 수 있으며, 이 위치 및 강도가 cross flow fan의 성능에 큰 영향을 미치므로 최적화 알고리즘에 의해fan의 성능 최적화가 가능하다.

9. 결 언

이상에서 CFD의 개념, 역사와 구성요소, 그리고 CFD 적용 설계 및 문제점들에 대하여 살펴본 바와 같이 최근 컴퓨터 하드웨어와 CFD 기술이 급속도로 발전하여 좋은 상용 소프트웨어가 많이 개발되어 시판되고 있다. 그에 따라 산업체에서도 CFD를 설계에 적용하여 설계 개선에 활용하는 사례가 늘고 있어 전산 유체 역학은 앞으로 상당히 발전할 전망이다.

특히 CFD 소프트웨어도 두 가지 방향으로 발전하리라고 예상되는데, 그 하나는 좀더 넓은 범위의 유동 문제를 정확하게 해석할 수 있는 소프트웨어로 발전(수치 해석 기법의 발달과 물리 현상에 대한 수학적 표현의 발달)하는 것이며, 또 다른 방향은 자동격자생성(Automatic Grid Generation) 분야로 CAD 데이터로부터 쉽게 유동 해석용 계산 격자를 생성할 수 있게 하는 것이다. 이를 통해 향후 CFD는 제품의 설계과정에서 반드시 거치는 하나의 루틴이 될 수 있을 것이다. 특히, 터보기계의 유동해석은 회전하는 날개사이의 유동이 그 성능에 가장 중요하나 실험에 의해 유동특성을 파악하기에는 상당한 어려움이 따르므로 CFD에 의한 유동해석 및 최적화가 향후 활성화 될 전망이다.

그렇지만 어떤 소프트웨어도 만능인 것은 없으므로 사용자는 반드시 그 소프트웨어의 적용 범위 또는 해석 능력을 알고 실제 문제에 적용하는 것이 중요하다. 즉, 현재의 소프트웨어 수준으로 해석 불가능한 문제를 풀려고 하거나, 또 그 계산 결과를 100% 맹신하는 우를 범해서는 안될 것이다.

참고문헌

- (1) 허남건, 1991, CFD의 적용사례 및 발전방향, 월간 CAD/CAM, Vol. 9111, pp. 48~55.
- (2) 허남건, 1993, 자동차산업에서 CFD의 응용및 전망,

- 대한기계학회 전산유체역학분과회 1993 강연회 초록집, pp. 71~113, 서울대학교.
- (3) 허남건, 1997, "CFD 분야의 현황 및 전망," '97 대한기계학회 열 및 유체공학부문 학술강연회 논문집, pp. 53~74, 영남대학교.
- (4) 허남건, 1999, "열공학에서의 CFD 응용," CFD 코드의 열공학분야 응용사례 워크샵 논문집, pp. 75~91, 한국과학기술원.
- (5) 허남건, 2000, "Industrial Application of CFD," 제5회 HP/KORDIC 세계석학초청 기계설계해석(MCAE)세미나 자료집, 서울시.
- (6) 허남건, 2001, CFD란 무엇인가?, 설비 제18권 제6호, pp. 34~43.
- (7) Moravec, H., 1998, "When will computer hardware match the human brain?," Journal of Transhumanism, Vol.1 (also from <http://www.transhumanist.com/volume1/moravec.htm>).
- (8) Computers: History and Development, http://www.digitalcentury.com/encyclo/update/comp_hd.html.
- (9) 허남건, 정형호, 1991, "상용 전산 열유체코드의 소개," 1991년도 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(II), pp. 201~207, 충북대학교.
- (10) Fluent, <http://www.fluent.com>, <http://www.ates.co.kr>
- (11) STAR-CD, <http://www.cd.co.uk>, <http://www.cdak.co.kr>
- (12) CFX, <http://www.aeat.com/cfx>
- (13) Phoenics, <http://www.cham.co.uk>
- (14) CFD-ACE, <http://www.cfdrc.com>
- (15) ICEM, <http://icemcfd.com>
- (16) 장재원, 허남건, 2001, "화재 Simulation을 위한 Post-Processor 개발," 한국전산유체공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp. 155~160, 부산전시컨벤션센터.
- (17) TECHPLOT, <http://www.amtec.com>
- (18) FAST, <http://www.nas.nasa.gov/Pubs/Docs/FAST>
- (19) Ensignt, <http://www.ceintl.com>
- (20) 허남건, 2001, "대학과 대학원에서의 CFD 교육," 대한기계학회 2001년도 유체공학부문 학술강연회 논문집, pp.79-82, 조선대학교.
- (21) First International Conference on Fluid Structure Interaction <http://www.wessex.ac.uk/conferences/2001/fsi01>
- (22) 원찬식, 허남건, 이종선, 2001, "의료용 CSF 제어 밸브 설계를 위한 유동/구조 상호작용 해석," 한

- 국전산유체공학회지, 제6권, 제1호, pp. 40~46.
- (23) 김태균, 김욱, 허남건, 2000, “유체.구조물 상호작용 기법을 이용한 오일 팬스의 변형예측,” 한국전산유체공학회지 제5권, 제3호, pp. 16~22.
- (24) Isight, <http://www.engineous.com>, <http://www.engineous.co.kr>
- (25) 허남건, 김욱, 1999, “MIRA Model 후미의 저저항 최적설계,” 한국전산유체공학회지, 제4권, 제1호, pp. 34~40.
- (26) 허남건, 김욱, 강신형, “직교류 팬의 유동 해석: 깃형상 변화가 성능에 미치는 영향,” 유체기계저널, 제2권, 제1호, pp. 96~102, 1999.