

범용 열/유체 유동해석 프로그램 NUFLEX의 개발

허 남 건^{*1}, 원 찬 식^{*2}, 손 기 현^{*1}, 유 흥 선^{*3}, 신 동 신^{*4}

A Development of General Purpose Program NUFLEX for the Analysis of Heat/Fluid Flow

N. Hur, C.-S. Won, G. Son, H.-S. Ryou and D. Shin

A general purpose program NUFLEX for the analysis of 3-D heat/fluid flow in complex geometry with pre/post processor have been developed, which consists of a flow solver based on FVM and a dedicated pre/post processor. The program employs a general non-orthogonal grid system and solve laminar and turbulent flows with standard and RNG k- ϵ turbulence models. NUFLEX is capable of analysing two-phase flow with topologically complex interface, turbulent diffusion combustion, solidification problems and magnetic flow. For the purpose of verification of the program and testing the applicability, several practical problems are solved and compared with the available data. Comparison of the NUFLEX results with that by the STAR-CD program has been also made for the same flow configuration and grid structure.

Key Words: General Purpose Program(범용프로그램), CFD(전산유체역학), FVM(유한체적법), Pre/Post Processor(전/후처리 장치), General Non-Orthogonal Coordinate System (일반비직교좌표계)

1. 서 론

현재 대부분의 산업 현장에서는 컴퓨터를 이용한 설계 및 제품의 성능 해석 등이 일반화 되고 있다. 그 중에서도 이론적 방법 및 실험에 의한 연구가 주를 이루던 열/유동 해석에 있어서 전산유체역학의 역할 및 중요성은 날이 증가하고 있으며, 그리고 이제는 설계상의 하나의 루틴으로 인식되고 있다. 이러한 전산유체역학에 의한 열/유동 해석은 상당히 많은 분야에서 응용되고 있으며, 이를 위한 해석 프로그램을 개발하기 위한 연구도 국내외적으로 활발히 진행되고 있다.

국외의 경우 Peric[1]은 복잡한 형상을 한 유로내의 3차원 유동해석이 가능한 프로그램을 개발하여 상용 프로그램인 STAR-CD의 골격이 되었으며, 현재 많은 산업현장에서 검증되어 사용되고 있다. 이외에도 국외의 연구기관에서는 보다 많은 연구가 진행되어 각종 상용프로그램의 기초가 되어왔으며 많은 응용 및 활용이 되고 있다.

그러나 국내에서는 현재 열/유동해석을 위해서 학계 및 일부 산업계에서 특정한 문제에 적당한 프로그램을 제작하거나 기존의 것을 변경, 개선하여 사용하고 있는 실정이다. 대개의 경우 많은 사용료를 지불하고 STAR-CD, FLUENT, CFD-ACE, CFX 등의 외국 상용프로그램을 사용하고 있으며, 그 활용도 및 의존도 또한 커지고 있다. 이와 같이 범용성을 갖춘 유동해석 프로그램의 수요가 증가하고 있으나 상용프로그램의 국내 개발은 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 범용성을 갖춘 프로그램 개발의 중요성을 인식하고 이를 개발하고자 하였으며, 대

*1 정회원, 서강대학교 기계공학과

*2 학생회원, 서강대학교 대학원 기계공학과

*3 정회원, 중앙대학교 기계공학부

*4 정회원, 홍익대학교 기계/시스템디자인공학과

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

부분의 사용프로그램에서 채택하고 있는 것과 같은 골격을 갖는 프로그램을 개발하였다.

본 연구 개발은 과학기술부의 공학용 해석 소프트웨어 기술개발사업의 일환으로 총 3단계의 연구 단계가 있으며 그 중 상용화 전단계인 2단계의 연구부터 시작되었다. 현재까지 총 2단계 3년 동안의 연구를 통하여 허남건 등[2-5]은 전용 전/후처리 장치를 갖는 범용 유동해석 프로그램을 개발하여 복잡한 형상에서의 유동 문제를 성공적으로 해석 할 수 있음을 보여주었다. 개발된 프로그램은 일반 비직교좌표계를 사용하고 연소, 주조, 전기장, 다상유동 등의 모듈을 포함함으로써 범용 해석 프로그램으로써 충실한 모습을 갖추었다. 또한 기존의 해석 프로그램에 포함되지 않은 CLSVOF(Coupled LS and VOF), EMBR (Electro Magnetic Brake Ruler) 등의 효과를 고려함으로써 상용 해석 프로그램 개발의 후발 주자로서 경쟁력을 갖추고자 한다. 그러나 구조격자계를 갖는 한계성과 개별적인 모듈의 통합이 이루어지지 않아 보다 효율적인 활용에 제한을 갖고 있다. 이러한 연구 활동은 현재 3단계 연구의 시작과 함께 진행 될 것이며 본 논문에서는 그간 2단계에서 연구되어온 범용 열/유체 유동 해석프로그램 NUFLEX에 대하여 설명하고자한다.

Table 1. Characteristics of the NUFLEX

	Present Program
Coordinate	3-D General, Non-Orthogonal
Mesh	Structured
Differencing Scheme	CDS, Upwind, LUD, Hybrid, Power Law, Quick
Physics Model	Steady, Transient, Incompressible, Combustion, Free Surface, Two-Phase, Phase-Change, Magnetic Flow
Solution Algorithm	SIMPLE
Turbulent Model	Standard k- ϵ , RNG k- ϵ
Boundary Condition	Inlet, Outlet, Wall, Symmetry, Pressure, Cyclic

2. 유동해석 프로그램

2.1 계산 알고리즘

본 연구에서는 범용성을 갖는 프로그램 개발을 위하여 다음과 같은 특징을 갖는 프로그램 NUFLEX를 개발하였다. 복잡한 형상에서의 유동현상을 해석하기 위하여 일반 비직교좌표계를 사용하였으며 유한체적법에 근간을 둔 비엇물림격자계를 사용하였고 직교좌표 속도성분을 종속변수로 하였다. 미소체적의 임의의 한 면을 통과하는 확산항은 수직 및 교차 확산 성분으로 나타내고, 압력항은 생성항으로 처리된다. 대류항의 계산에는 현재 가장 널리 쓰이고 있으며 오류확산(false diffusion)의 문제는 있으나 수치해의 안정성이 뛰어난 상류차분법(upwind differencing scheme)을 사용하였다. 압력장을 풀기 위해서는 연속방정식으로부터 압력을 계산할 수 있는 방정식을 유도하여 속도와 압력을 서로 연관시켜 계산하는 알고리즘이 필요하며, 본 연구에서는 그 형태가 간단하고 가장 많이 사용되는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 또한, 비엇물림격자 사용시 발생하는 압력의 decoupling 방지를 위하여 운동량 보간을 사용하였다. 최종적인 이산화 방정식의 해를 구하기 위한 해법으로 속도 및 스칼라량의 계산에는 SIP을, 압력에는 CGM을 사용하였다. 또한 본 프로그램에서는 층류 및 난류 유동해석 및 다상유동, 연소, 전자기장 유동의 해석이 가능하며 임의의 장애물이 있는 유동장의 해석이 가능하다. 이러한 본 프로그램을 특징을 정리하여 Table 1. 에 나타내었다.

2.2 다상 유동 - 상경계 추적

복잡한 상경계면을 추적하기 위한 수치기법 중에서 대표적인 것으로는 VOF(Volume of Fluid) 방법과 LS(Level Set) 방법이 있다. VOF 방법은 각 상의 체적이 잘 보존되는 장점 때문에 많은 연구에서 사용되고 있으나, 미분이 불연속인 VOF 함수로는 상경계면의 곡률을 정확하게 계산하기 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 상경계면으로부터의 거리로 정의된 LS 함수를 사용하여 상경계면을 계산하는 LS 방법이 제안되었다. 미분이 연속인 LS 함수는 상경계면의 곡률을 정확히 계산할 수 있기 때문에 기포와 액적과 같이 표면장력이 중요한 작은 규모의 이상유동의 해석에 효과적이다. 그러나, 이 방법에서는 각 상의 체적을 일정하게 유

지하지 못한다. VOF 방법과 LS 방법의 단점을 극복하기 위해, VOF 함수와 LS 함수를 함께 사용하는 CLSVOF(Coupled LS and VOF) 방법[6]이 최근에 제시되었다. 이 방법은 상경계면의 곡률을 정확히 계산할 뿐만 아니라 각 상의 체적도 잘 보존하는 장점이 있다. 그러나, VOF 함수의 이류, 상경계면 형상의 결정, LS 함수의 보정 등의 복잡한 알고리즘이 필요하기 때문에 이상유동의 해석에 적용된 예는 매우 드물다. 뿐만 아니라 본 알고리즘을 3차원 일반 좌표계로 확장하기에는 다소 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 VOF, LS, CLSVOF, 수정된 LS 방법에 필요한 알고리즘을 정립하고, 이를 비 엷물림 격자계와 SIMPLE 알고리즘을 바탕으로 개발된 프로그램에 적용하였다.

2.3 MHD 해석

전자기장이 존재하는 유동장은 다수 존재하면 그 예로 양도체인 움직이는 용강(molten steel)에 직류자장을 가하면 전류가 유도된다. 이때 유동하는 용강에 직류자장이 가해지면 운동의 속도와 자장의 세기에 비례하는 크기의 전류가 유도되고, 이 전류는 인가자장과 작용하여 유동방향과 반대되는 방향으로 로렌즈력을 발생시킨다. 로렌즈력을 사용하여 주형상부 부근의 유동을 억제하여, 용강내의 유동을 균일화 시키고 함유물과 기포가 쉽게 부상하도록 한다. 이렇게 유체의 단위 체적당 발생하는 로렌즈력은 운동량방정식의 생성항으로 처리함으로써 MHD 해석이 가능하도록 하였다. 그리고 전류밀도는 Maxwell 방정식을 사용하였다.

2.4 상변화 해석

상변화 해석을 적용하기 위해 얼음 및 갈륨 등의 용해(Melting), 응고(solidification), 그리고 연속주조 공정을 고려하였으며 이때에 상변화를 묘사하기 위해 연속체모델을 적용하였고, 잠열을 계산하기 위해서 엔탈피 방법을 사용하였다. 지방방정식 중 에너지방정식에서 생성항은 총엔탈피를 현열과 잠열로 나누어서 유도된 항이다. 속도장 계산시 Mushy zone에서의 유동감속효과를 고려하기 위해서 투과율을 액상분율의 함수로써 계산한 Darcy's law에서 유도된 생성항계수식을 운동량방정식에 적용하였다.

2.5 확산 난류 연소

연소유동해석에서는 질량, 운동량, 엔탈피의 보존 방정식 이외에 화학 반응을 일으키는 농도 질량비에 대한 보존 방정식을 풀어야 한다. 이를 위하여 본 프로그램에서는 혼합분율을 스칼라량, 밀도의 변동을 포함하는 모든 양들을 밀도 가중 평균하는 Favre 평균을 사용하였다. 난류확산연소에서 온도와 혼합분율은 비선형적으로 변하며, 난류변동량이 상당히 크기 때문에 평균 conserved scalar들을 결정하기 위하여 평균 혼합분율을 사용하는 것은 큰 오차를 가져올 수 있다. 그러므로 평균 conserved scalar들을 정확히 결정하기 위하여는 혼합분율의 확률밀도함수(PDF)를 알아야 한다. 그러나 확률밀도함수를 직접 구하는 것은 상당한 계산시간을 필요로 하기 때문에 본 코드에서는 Clipped Gauss 분포를 사용하였다. 뿐만 아니라 확산 난류 연소시 다양한 난류 모델을 검토하기 위하여 표준 $k-\epsilon$ 과 함께 층류화 모델, 곡률 수정 모델도 고려하였다.

2.6 경계조건 및 장애물의 처리

본 프로그램에서는 유동해석 시 많이 사용되는 경계조건인 입구, 출구, 압력, 대칭면, 주기, 벽면조건을 처리 가능하게 이들 조건을 경계면 임의의 위치에 부여할 수 있게 하였다. 또한 유동 내부에 임의의 장애물이 존재하는 경우 그 인접면을 기억하여 이면을 벽면으로 자동적으로 처리할 수 있도록 하였다. 즉 장애물내의 변수는 유동장에 영향을 미치지 않게 된다.

2.7 전/후처리 장치

범용유동해석 프로그램의 개발에 있어서 해석 알고리즘의 개발과 함께 전/후처리 장치의 개발 또한 매우 중요하다. 컴퓨팅 환경의 발달과 함께 계산 격자 생성 및 계산 조건 설정을 위한 전처리 작업이나 계산 결과 확인을 위한 후처리 작업의 구체적, 가시적인 표현이나 효율성이 범용유동해석 프로그램에서는 요구되어지기 때문이다. 이러한 점을 고려하여 본 해석프로그램의 개발과 동시에 Fig. 1과 같은 다양한 기능을 갖는 전/후처리 장치의 개발을 수행하였다. 본 전/후처리 장치의 화면 구성은 Fig. 1과



Display Window

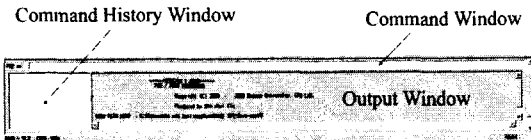


Fig. 1 Window structure of Pre/Post Processor

같이 이루어져 있다. 그림에 나타난 전체 창의 구성은 크게 4개로 나누어져 있으며 각각은 다음과 같이 3차원 그래픽을 나타내기 위한 표시창(Display Window), 명령어를 입력받는 명령창(Command Window), 사용된 명령어를 나타내고 저장하는 명령어 진행창(Command History Window) 마지막으로 입력된 명령어의 처리 상태 및 결과를 나타내는 결과창(Output Window)이다.

본 전/후처리 장치는 다양한 좌표계에서의 격자점과 셀(Cell)의 생성, 3차원 그래픽 처리 및 축소, 확대, 회전등의 기능을 가지고 있다. 아울러 본 장치는 생성된 셀과 격자점의 형태를 관찰하기 위한 투영방법으로 기본적인 캐드 및 전처리 프로그램에서 사용하는 직교투영방법과 함께 원근감을 느낄 수 있는 투시투영방법을 가지고 있다. 또한 해석대상 모델의 CAD data를 이용하여 간단한 조작으로 해석 격자를 만들 수 있는 모듈을 추가하여 사용자의 편의성을 향상 시켰다.

후처리 장치의 가장 중요하고 기본적인 기능은 실제 계산된 결과를 시각적인 이미지로 표현하여 좀더 직관적으로 결과를 확인하고 판단할 수 있도록 하는 것이다. 본 후처리 장치는 기본적인 vector 및 contour plot이 가능하며, 마우스를 이용한 확대/축소 및 회전과 이동을 통해 다양한 각도 및 시점에서의 결과 확인작업이 가능하다. 또한 투시투영과 렌더링 기술을 이용한 화재 시뮬레이션이 가능하여 마치 가상현실 효과와 같은 후처리 작업이 가능하다.

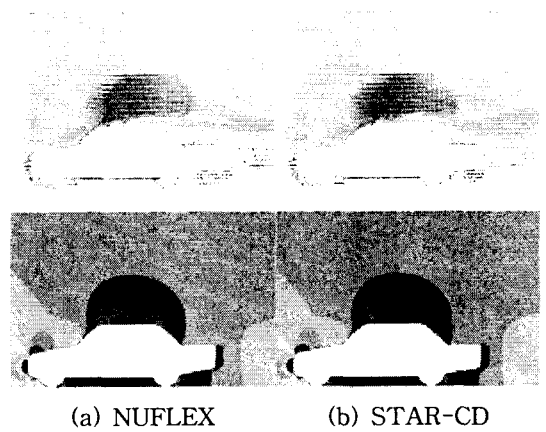


Fig. 2 Comparison of velocity and pressure using standard k-ε model

3. 적용예 및 검토

3.1 프로그램 검증

프로그램의 검증을 위하여 mira model에 대하여 Standard k-ε 과 RNG k-ε 난류 모델 2가지를 해석하여 그 결과를 상용 해석 코드인 STAR-CD와 비교하여 보았다.(Fig. 2) 해석 격자의 수는 총 208,000개이며 입구, 출구, 벽, 그리고 대칭면 경계조건을 주었다. 해석 결과를 보면 속도와 압력에서 대체로 큰 차이점 없이 동일함을 확인할 수 있다. 물론 계산 격자의 개수가 20만개 이상으로 커진 경우 수렴속도가 STAR-CD보다 다소 느려 졌으나 memory사용 측면에서는 좋은 성능을 보여 주었다. 난류 모델의 비교에 있어서도 계산 결과는 STAR-CD와 현재 개발된 프로그램 모두 비슷하며 RNG k-ε를 사용하는 경우 항력계수값이 좀더 개선됨을 알 수 있다.(Standard k-ε: 0.592, RNG k-ε: 0.578)

3.2 상경계 추적

수정된 LS 방법을 이용한 Interfacial Motion을 일반 비직교좌표계로 확장하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 기울어진 경사면에서 접촉각을 고려한 액적의 유동을 살펴보면 VOF 방법을 사용하는 STAR-CD와 비교하여 수정된 LS 방법을 사용하는 NUFLEX가 보다 정확하게 상경계 면을 추적하고

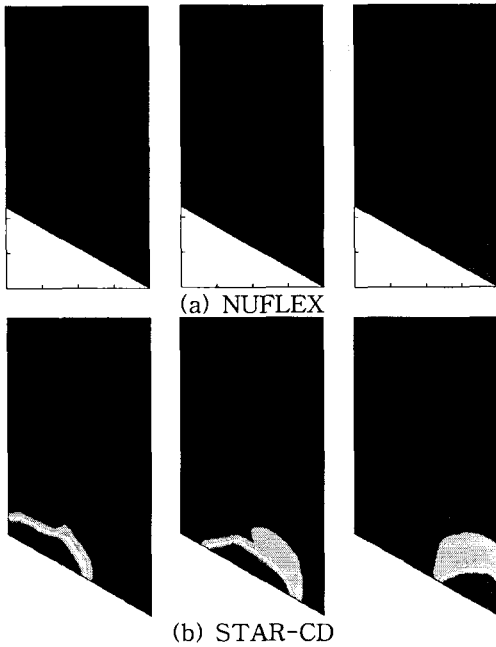


Fig. 3 Comparison of 2-D droplet motion

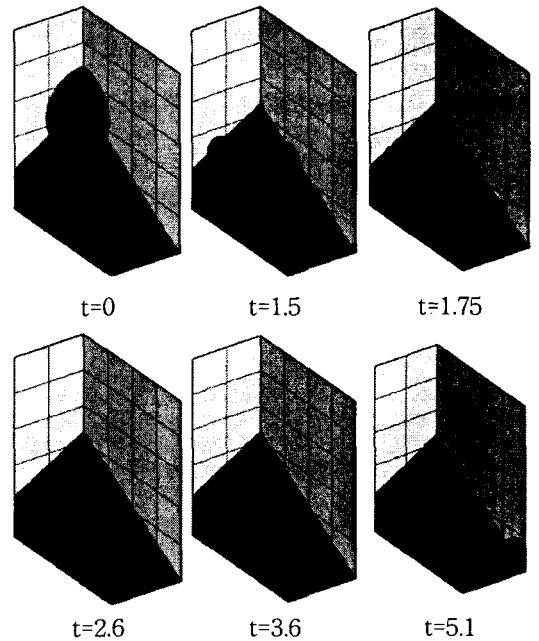


Fig. 4 3-D droplet motion simulated by NUFLEX

있음을 확인할 수 가 있다. 뿐만 아니라 이러한 해석 능력은 Fig. 4에서와 같이 3차원 해석에 적용한 경우에도 매우 탁월함을 알 수 있다.

3.3 MHD 해석

자기장의 효과를 검토해 보기 위하여 사각 channel 내에 자기장이 주어지는 경우를 해석 하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 해석 결과를 보면 channel 중앙 부분에 자기장으로 인해서, 유동의 감속효과를 관찰할 수 있다. 일반적으로 channel 내에서 유동은 포물선 형태의 속도 분포를 갖으나 자기장의 고려되는 경우에는 'M'자형 유동이 됨을 알 수 있다. 이러한 해석 능력은 EMBR이 고려된 연속주조 공정에도 사용되고 있으며 해석 결과를 통해서 본 프로그램을 이용하여 기존의 상용해석 프로그램에서 다루기 어려웠던 EMBR이 고려된 주조 공정을 보다 용이하게 해석해 낼 수 있다.

3.4 상변화 해석

3차원, 비직교 격자계에서 혼합물의 응고문제를 적용하기 위하여 작동유체가 275K 와 305K의 온도 범위에서 상변화가 일어나는 가상의 유체를 사용하

여 입구에서 320K의 온도를 가지고 들어온 유체가 250K의 낮은 벽면의 온도로 인하여 응고가 일어나는 과정을 수치해석하였다. Fig. 6에 결과중 온도장과 액상분율을 나타내었다. 유체가 진행에 나감에

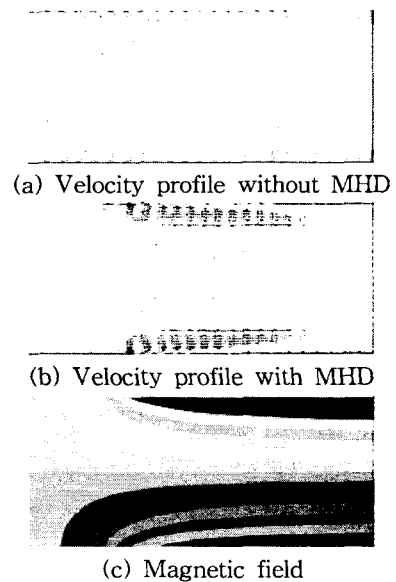


Fig. 5 Magnetic field flow simulated by NUFLEX

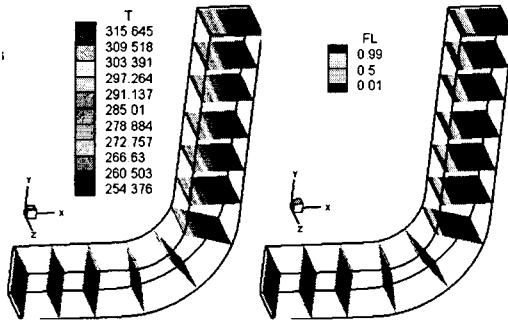


Fig. 6 Temperature and liquid fraction of solidifying elbow

따라 벽의 낮은 온도로 인하여 온도가 점점 낮아지는 과정을 잘 보여주고 있으며, 액상분율의 값은 0으로 응고가 완전히 이루어 지며 응고층의 두께는 유체가 진행할수록 더 두꺼워 진다. 뿐만 아니라 액상분율의 값이 0과 1사이인 머시영역이 본 프로그램을 통해서 매우 잘 표현되고 있음을 알 수 있다.

3.5 연소

재순환을 동반하는 확산 난류연소장을 해석 하여 그 결과를 비교하여 Fig 7에 나타내었다. 이때 입구에서는 난류소산을 이외에는 실험결과를 사용하였다. STAR-CD에서는 실험결과를 적용하는 것이 어려워 일정한 값을 주어 본 프로그램과 입구조건이 다르므로 정확한 비교는 어려우나 대체로 국부적으로 최대값 등 값들의 경향성은 STAR-CD와 유사하게 나타남을 알 수 있다. 또한 계산의 성능측면에서도 다른 계산과 마찬가지로 대체로 만족할 수 있다. 그러나 연소에 의한 유동 pattern의 차이점에 의한 난류 강도 및 온도의 차이점은 향후 보완되어야 할 것이다.

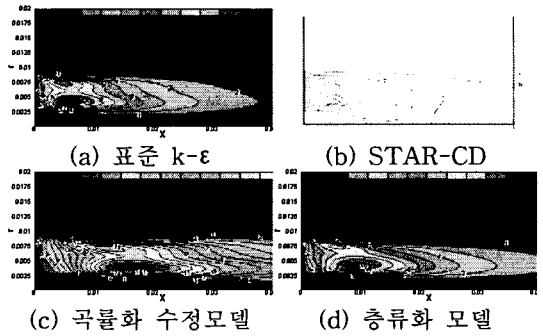


Fig. 7 Turbulent kinetic energy

3.6 전/후처리 장치

Fig. 8은 본 연구개발을 통해 개발된 전/후처리 장치를 이용하여 생성한 신경주 역사 품압해석을 위한 계산 격자이다. 기존의 해석 격자 생성시 그림과 같은 복잡한 형상의 계산 격자를 만들시에는 많은 시간과 노력이 필요하였다. 또한 설계 변경시 해석 대상 수정에도 많은 어려움이 따른다. 그러나 CAD data를 직접 불러 들여 간단히 처리할 수 있는 알고리즘을 개발하여 경제적이고 효율적인 계산 격자를 생성할 수 있었다.

4. 결 론

일반 비직교격자계를 사용하여 유동장내에 임의의 형상의 장애물이 존재하는 경우 등 복잡한 형상의 공간에서 3차원 난류유동을 해석할 수 있는 프로그램 NUFLEX를 개발하였다. 본 연구는 과학기술부 공학용 해석 소프트웨어 기술개발 사업의 일환으로 진행되었으며, 개발된 프로그램은 다양한 해석 모델

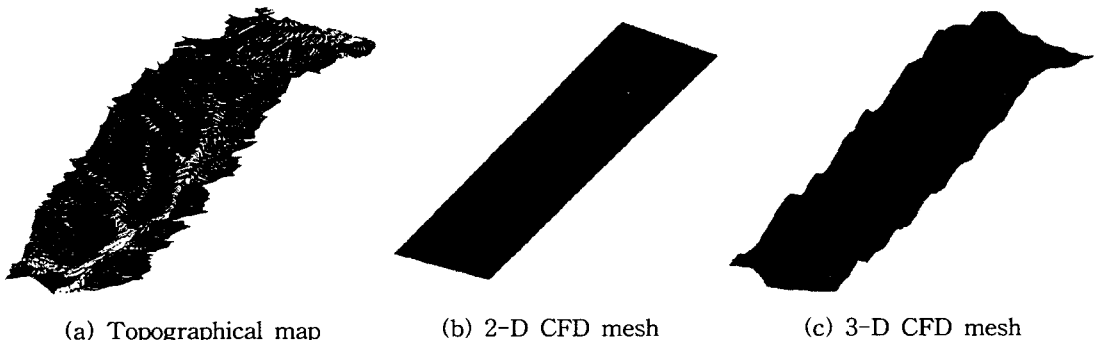


Fig. 8 CAD drawing & computational mesh created by the present study pre/post processor

에 적용하여 그 성능을 확인하였다. 그 결과 본 연구에서 개발한 프로그램은 여러 가지 유동현상을 잘 예측할 수 있으며, 특히 복잡한 형상에서의 유동 문제를 성공적으로 해석할 수 있음을 보였다. 그리고 기존의 상용해석 코드에 포함되지 않은 모듈을 개발하여 본 프로그램의 활용도를 향상시켰다. 먼저 일반좌표계로 확장된 수정된 LS 방법을 적용하여 상경계면의 곡률을 정확히 계산하며 각 상의 체적보존이 잘되는 다상유동 해석이 본 프로그램을 통하여 적절히 적용될 수 있음을 입증하였다. 또한 연속구조공정에서 상변화에 관한 적절한 모사를 위해 엔탈피방법을 적용해서 연구조정내의 고상화를 수치해석을 수행하였으며, EMBR의 적용으로 인한 유동장에 대한 변화의 특징을 수치해석하여 구조물의 거동을 잘 예측하였다. 그리고 일반 좌표계를 사용하는 연소유동해석 알고리즘을 개발하여 다양한 난류 모델에 대한 연소기에서의 온도 및 농도 등은 실험결과와 양호하게 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 아울러 범용 CFD 프로그램 개발의 일환으로 CFD 해석을 위한 전/후처리 프로그램을 개발하고 다양한 경우에 대하여 적용하였다.

향후 본 프로그램은 3단계 연구 진행을 통하여 다양한 수치해석 기법 및 연소, 구조, 다상유동 등의 다양한 모듈의 안정화와 전/후처리 장치의 기능 향상 및 비구조격자계로의 확장, 압축성 유동 해석, 분무 유동해석 등을 통하여 대형 일반코드의 개발로 발전될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 공학용 해석 소프트웨어 기술개발사업의 연구비지원(M1-0129-00-001)으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Peric M., "A Finite Volume Method for the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts," Ph.D. Thesis, Imperial College(1985)
- [2] 허남건, 김사랑, 원찬식, 허성범, "3차원 범용 유동해석 프로그램의 개발," 기계관련 산학연 연합시포지엄 논문집 A(2002), pp.1984~1989
- [3] 성명호, 손기현, 허남건, "3차원 범용 유동해석 프로그램의 개발-CLSVOF 상경계면 추적법의 적용," 기계관련 산학연 연합시포지엄 논문집 A(2002), pp.1972~1977
- [4] 신동신, 임종수, 허남건, "3차원 범용 유동해석 프로그램의 개발-확산난류연소해석," 기계관련 산학연 연합시포지엄 논문집 A(2002), pp.1978~1983
- [5] 강관구, 유홍선, 허남건, "EMBR이 적용된 연속 구조공정에서의 유동 및 응고의 수치해석," 기계관련 산학연 연합시포지엄 논문집 A(2002), pp.1966~1971
- [6] Sussman, M. and Puckett, E.G., "A Coupled Level Set and Volume-of-Fluid Method for Computing 3D and Axisymmetric Incompressible Two-Phase Flows," J. Comput. Phys.(2000), Vol.162, pp.301~337.