

SC/Tetra에 의한 열·유동해석 Heat and Fluid Flow Analysis by SC/Tetra

조민태 · 조장형

M. T. Cho and J. H. Cho

1. SC/Tetra의 소개

CFD 즉, Computational Fluid Dynamics 란 유체의 유동 및 열전달 등의 자연현상을 물리적 모델로부터 방정식을 만든 뒤, 컴퓨터를 이용한 반복 수치계산을 통해 물리적 현상을 시뮬레이션하고 그 결과를 분석하는 학문 분야입니다.

지금까지 제조현장에서의 문제는 CFD 해석 결과를 이용하여 설계의 적합성 여부를 판단할 수 있도록, 하루 이틀 내 CFD 해석 결과를 얻을 수 없다는 것이었습니다. 또한, CFD 해석을 수행하기 위해 작업자는 하루종일 컴퓨터 앞에 매달려 CAD 파일을 가져오고, 수정하고 격자를 만드느라 귀중한 시간을 다 빼앗겨서 다른 업무 수행이 거의 곤란할 뿐 아니라, 해석결과를 분석하고 그것을 토대로 설계 개선을 위한 시간을 배려 받을 수 없었다는 사실입니다. 이러한 문제는 CFD 해석과정 중 약 70%의 시간을 차지하는 격자제작 기간이 길어서 생기는 래식 상용 CFD S/W들의 고질적인 문제점에 기인합니다. 일본의 Software CRADLE社에서 1998년 개발되어 지속적인 기능향상이 이루어지고 있는 SC/Tetra는 Node base의 FVM 기법을 채택하고 최신 수치해석 알고리즘으로 구성되어 짧은 시간 내 설계 담당자가 원하는 결과를 스스로 얻을 수 있도록 하는 신 개념의 CFD 해석 기법을 제시하고 있습니다.

최근 CFD 기술의 발달로 인해 환경분야를 비롯한 제조산업 분야에서 주로 발생하는 열 전달, 물질 전달, 화학반응 등을 포함한 유체유동 현상에 대한 Simulation의 요구가 한층 강화되어 CAE 기술 중 중요한 분야의 하나로 인식되고 있습니다.

2. SC/Tetra 개발 방향

Software CRADLE社는 다음과 같이 SC/Tetra의 향후 개발 방향을 설정하고 이를 구현하기 위한 기술개발에 매진하고 있습니다. 산업현장에서 CFD

해석을 통해 구현하려는 개발 방향은 크게 몇 가지로 나누어 볼 수 있습니다.

- * 통합 CAE 구축 환경 제공
- * Meshless CFD 구현
- * 해석 소요기간의 획기적인 다축
- * 다양하고 복합적인 문제의 해결
- * 문제의 본질을 쉽게 이해할 수 있는 후처리 기능 강화

2.1 통합 CAE 구축 환경 제공

산업 현장에서 발생하는 제반 엔지니어링 문제는 다양한 현상이 상호 복합적으로 발생하게 됩니다. 즉, 유체의 흐름으로 인해 열이 전달되고 구조물은 뜨거운 열에너지를 흡수하여 열변형이 발생하며, 이로 인한 열응력을 유발합니다. 이러한 문제에서 SC/Tetra는 자체 SCT-Utility를 통해 이러한 문제를 해결할 수 있는 기초를 제공합니다. CFD 해석을 통해 얻어진 결과 중 구조물에 영향을 줄 수 있는 압력과 온도를 SCT-Utility를 통해 구조물에 대한 힘과 온도라는 입력조건으로 대입할 수 있도록 변환시켜 줍니다. 이러한 일련의 변환과정은 복합적으로 작용하는 Multi-Physics 문제를 해결할 수 있는 방법을 제시하고 있습니다. SC/Tetra는 이러한 기능을 통해 상용 구조해석 S/W인 ANSYS, NASTRAN, ABAQUS 및 기타 유니버설 파일의 형태로 변환하여, 이 S/W와 Direct Interface가 가능하도록 지원합니다. 그림 1은 SC/Tetra의 경계조건을 설정하는 환경으로 초보자도 쉽게 사용이 가능하도록 제작되어 있습니다.

2.2 Meshless CFD 구현

지금까지 열 유동해석을 위해 CFD 해석 담당자들은 CFD 해석을 위한 격자제작에 많은 시간과 비용을 투자해 왔습니다. CFD 업계에서 목표로하고 있는 것은 더 이상 CFD 해석 엔지니어들이 격자제작에 시간을 빼앗기지 않고 본연의 업무인 CFD 해석을 통한 분석과 이를 이용한 현업과제 해결 및 동

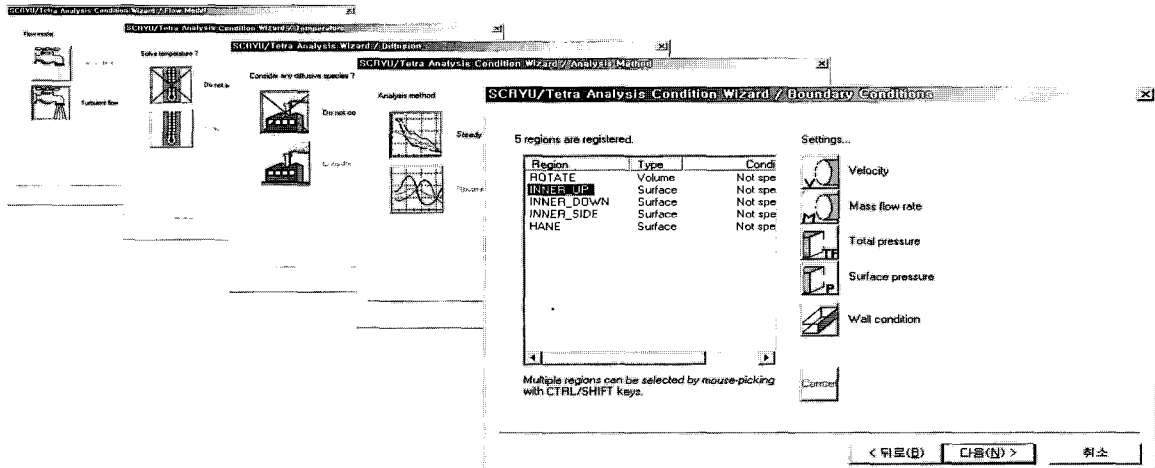


그림 1 SC/Tetra의 GUI환경

시병행 설계 지원 도구로서의 역할을 담당하는 일입니다.

Meshless라는 것은 다음 두가지 형태로 구현 가능합니다. 첫번째는 기존의 FVM 방식을 이용하는 것이 아니라, Finite Point Method라고 하는 새로운 개념의 수치해석 알고리즘과 수학적 방정식을 구현하는 것입니다. 기존의 유한체적법으로 접근을 하되 automatic mesh generation을 통해 실현하는 방법입니다. 자유곡면을 갖는 물체에 대해 자동으로 격자를 만드는 것은 삼각형 격자(Tetrahedral mesh) 외에는 달리 방도가 없음이 지금까지 알려진 전부였습니다. SC/Tetra는 업계 최초로 Node base의 FVM을 지원함으로써 같은 메모리를 갖는 컴퓨터에서 통상 5배~10배 정도의 많은 격자를 사용할 수 있도록 해 줍니다. 동일 컴퓨터의 자원으로 훨씬 더 많은 격자를 만들 수 있다는 것은 복잡한 형상에 대한 CFD 해석을 수행할 경우 실제 형상을 제대로 다 표현하면서 격자제작이 가능함을 의미합니다. 이러한 능력은 기존의 CFD S/W들이 해석과정에서 실제 형상을 단순화시킴으로써 발생하는 오류를 배제할 뿐 아니라, Real Geometry를 구현할 수 있기 때문에 설계에 적용하여 사용하는데 손색이 없도록 합니다. SC/Tetra는 32bit PC상에서 최대 약 1500만 개까지의 격자를 만들어 수치 계산을 수행할 수 있는 신 개념의 CFD S/W로서 과거 슈퍼컴퓨터에서나 가능했던 일이 이제 PC에서 구현될 수 있음을 입증하는 것입니다.

또한, SC/Tetra는 Octree 방식의 격자제작 기법을 지원합니다. 이 방법을 사용함으로써 사용자는 Surface Mesh, Volume Mesh와 Prism Mesh 그리

고 해석 수행까지를 몇 번 만의 마우스 조작만으로도 자동으로 일괄 작업을 수행할 수 있습니다. 과거 CFD 해석을 위해 CAD interface부터 격자제작 및 해석 수행까지 컴퓨터 앞에 앉아 있어야만 했던 모습을 이제는 찾아보기 힘들 것 입니다. 향후 SC/Tetra의 개발이 거듭됨에 따라, CFD 해석 사용자는 더 이상 격자제작에 시간을 투자할 필요를 느끼지 않을 것 입니다. 단지 형상모델링과 해석 조건만을 설정함으로써 격자를 만들지 않아도 (사용자가 눈치채지 못하게 S/W에서 자동으로 격자를 만들어 주는 기능) CFD 해석 결과를 그 자리에서 받아볼 수 있도록 할 것 입니다.

2.3 해석 소요시간의 획기적인 단축

현재 CRADLE사는 난류 모델링 분야에 있어 세계적으로 유명한 영국 Imperial College의 M. A. Leschziner 교수팀과 기술 제휴를 통해 수렴성이 좋으며, 정밀도가 높고 빠른 계산속도를 보장 받을 수 있는 Physical Modeling에 지속적인 개발을 하고 있습니다. 이러한 지속적인 개발을 통해 SC/Tetra에는 상용 CFD S/W 중 최신의 난류모델과 수치해석 알고리즘 등이 채택되어 사용되고 있습니다. 특히 해석 결과의 정밀도를 보장받기 위해 2nd order의 MUSCL scheme을 기본으로 채택하고 있습니다. MUSCL scheme은 기존의 CFD 프로그램에서는 최신기법으로 도입 중에 있는 방법이나, SC/Tetra에서는 이미 개발을 거쳐 사용되고 있습니다. 또한 사면체 격자가 갖고있는 결과 값의 부정확성을 보장받기 위해 수렴판단 조건을 10^{-4} 으로 설정하여 육면체 격자가 갖고있는 10^{-3} 보다 한 단계 더 높였습니다.

CFD 해석을 위한 수치계산을 위해서는 필연적으로 Matrix 계산을 해야 합니다. SC/Tetra는 최신의 Matrix 계산 기법인 MILUCG-STAB, AMG, AMGCG-STAB 알고리즘을 채택하여 사용하고 있습니다. 이처럼 많은 사면체 격자와 해석결과를 얻기 위한 까다로운 수렴 조건에도 불구하고 Node base의 FEM 기법을 채택하고 있는 SC/Tetra의 수치계산 결과를 얻는데 걸리는 시간은 기존 CFD S/W에 비해 약 절반정도의 시간이 소요됩니다.

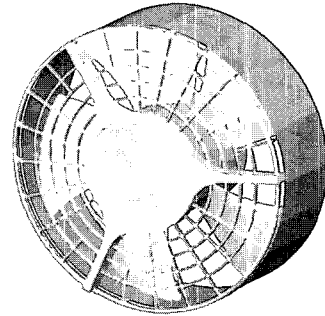
결론적으로 동일한 컴퓨터에서 CFD 해석을 수행하는 경우 타 CFD S/W에 비해 훨씬 많은 격자를 사용하여 복잡한 형상을 그대로 표현하고, 보다 정밀도 높은 결과를 얻기 위해 까다로운 수렴조건을 채택하면서도 계산을 얻기까지 소요되는 시간은 타 CFD S/W에 비해 50% 절감되는 획기적으로 해석시간을 단축한 최신의 알고리즘을 사용하고 있는 것 입니다.

2.4 다양하고 복합적인 문제의 해결

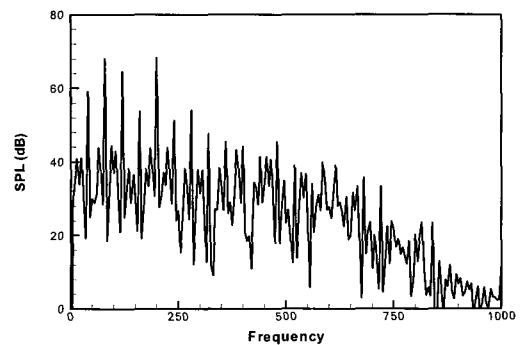
현장에서 발생하는 대부분의 유체유동 문제는 유동에만 국한하지 않고, 유체와 구조물의 열, 변형, 진동 또는 물질전달 및 공력 소음 등의 문제가 동시에 발생하는 현상을 갖고 있습니다. 예를 들어 지진에 의한 연료저장 탱크의 안정성 여부를 CAE 기법을 통해 시뮬레이션하고자한다면, 지진의 영향으로 인한 유체유동의 불안정성과 이로 인한 탱크를 지지하고 있는 구조물 각 부재에 걸리는 하중의 변화가 유발되고, 탱크내의 슬러싱에 의한 유동은 탱크벽면에 임팩트 하중을 가해 구조물의 2차 변형 또는 파괴까지 연결될 수 있는 심각한 상황을 초래하게 됩니다. 따라서, 유체 유동과 이로 인한 구조물의 변형 등을 시뮬레이션하기 위해서는 유체-구조 연성해석을 수행하여 계산해야 만 합니다 SC/Tetra는 일찍부터 이러한 문제 해결을 위한 시도를 진행해 왔다. SC/Tetra에 있는 Utility 기능을 이용하게 되면 SC/Tetra를 이용하여 CFD 해석을 수행한 후 여기에서 구해진 열 또는 압력 결과를 SCT-Utility 모듈을 통해 구조해석용 상용 CAE S/W인 ANSYS, NASTRAN, ABAQUS 등으로 변환하여 열·유체구조 연성해석을 수행할 수 있도록 지원 합니다.

(주)이썸(www.ecim.co.kr)에서는 공력소음 해석 모듈을 자체적으로 개발하고 있습니다. 당사에서 개발중인 Aeroacoustic Analogy 모듈을 기존의 상용 CFD 해석 S/W로부터 계산된 결과를 공력소음 계산 모듈에 대입하면 노이즈의 세기 및 주파수 대역폭에 대한 Sound Pressure Level 데이터를 얻을 수

있습니다. 소음은 특성상 짧은 시간간격에 대한 비정상유동해석을 수행해야만 합니다. SC/Tetra는 비정상유동해석에서도 탁월한 계산속도를 보여주어 설계일정에 맞추어 소음의 해석을 가능하게 합니다. 그림 2는 (주)이썸에서 수행한 팬의 소음해석결과를 보여주고 있습니다.



(a) 팬 모델



(b) 음압레벨 계산 결과
그림 2 팬노이즈 계산 예

3. SC/Tetra의 특징

- * Node Base의 FVM(Finite Volume Method)을 기반으로 한 멀티 블록 방식의 격자 제작
- * 완전 비구조 격자계 지원
- * Moving and Sliding 격자 사용
- * 완전 불연속 격자 지원(ALE 지원)
- * 사면체, 프리즘, 피라미드 형태의 격자 자동제작 (6면체 격자는 외부에서 importing)
- * 육면체+사면체+프리즘+피라미드 격자가 조합된 형태의 하이브리드 격자 지원
- * 하이브리드 Moving 격자 지원
- * 완전 자동격자 및 adaptive mesh 사용(500만개 격자 제작시 약 30분 소요)
- * 마우스 클릭 한번으로 격자제작부터 해석까지 자동 수행

- * Job Scheduling 기법 사용
- * 2차 정밀도의 MUSCLE Scheme 사용
- * 수렴판단 기준값을 10-4으로 설정하여 결과의 정확도 향상
- * 최신의 Matrix Solver 채택(기존 CFD S/W에 비해 계산속도 50% 이상 향상)
- * 쉬운 후처리(Post-processing) 조작기능 및 동영상 제작
- * 벡터, Contour, Iso-surface, 기류효과, 화염효과, 중이비행기, Euler 방식의 동영상 제작,
- * Text 추가기능, Mirror 기능, UFO 기능 등

4. SC/Tetra 적용 분야

4.1 자동차분야

- * 자동차주위 공력해석
- * 엔진부품 및 엔진 룸 열 유동 해석
- * 브레이크/마퀴 주위 열 유동 해석
- * 열 교환기/오일쿨러, 인터쿨러 유동 및 열전달
- * 냉각 팬 및 전기 모터류 열 유동해석
- * 유리창 성에제거/헤드램프 습기제거 해석
- * Rain Management/Wiper Lift 시뮬레이션
- * 승객실 내 자연환기 성능 향상
- * HVAC 시스템 유닛 내 열 유동해석
- * 승객실 Thermal Comfort(가열, 냉각)
- * 공조시스템 소음저감 해석
- * 펌프(water, oil, scroll, piston swash plate) 유동
- * 연료 인젝터 내부 유동 해석
- * 엔진블럭/헤드 열전달 해석
- * In Mani(EGR), Ex Mani, Port 유동해석(swirl 등)
- * In-cylinder 유동 해석
- * T/C, A/T Mission 오일 열유동 및 터보차저
- * CCC/Silencer, Crankcase Ventilation 및 필터 유동
- * Throttle Body/Control Valves
- * Oil Filter/Fuel Filter/Air Cleaner system 등

4.2 기계/중공업 분야

- * 유압장치, 유압밸브, 유압시스템해석
- * 터보기계(팬, 송풍기, 압축기, 터빈) 성능해석
- * 덕트, 파이프, 분기관 등의 내부 유동해석
- * 용광로 / 소각로(석탄, 가스, 기름) CFD 해석
- * 고속전철 주위 유동해석(개활지, 터널통과시)
- * 선박 점성 저항/프로펠러/러더/굴뚝연기 등
- * 응축기, 증발기 내 유동 해석
- * 콘트롤밸브, 의료용 멤브레인 밸브 유동해석

- * 전동공구 발열해석
- * 발전소 설비 및 발전 산업 분야 등 기타

4.3 전기/ 전자분야

- * 전자기기내(AV, 공조, 냉난방, 가전 등) 열전달 전자부품 냉각 해석
- * PCB 기판 열전달 (전도, 대류, 복사) 해석
- * Chip Level, PCB Level, System Level 냉각해석
- * 반도체 제조공정 열 유동해석
- * 반도체 제조 CVD 공정 반응 해석
- * 전동기, 발전기내 냉각 해석
- * 각종 Chamber 내 열 전달 해석
- * 통신기기 열전달 해석
- * 초고압 전기부품 관련 열전달 해석
- * 각종 변압기내 열전달 해석 등 기타.
- * GIS(gas injection system) 적용 유동해석
- * 반도체 제조장비 내 냉각 해석 외 기타

4.4 화학공정 분야

- * 반응로(Packed bed, Jet-stirred) 유동해석
- * 교반기 내(Stirred mixing vessels) 유동해석
- * Spray driers/폴리머 믹싱
- * 연료전지 화학반응 및 매니폴드 유동해석
- * CVD, SI 단결정 성장 해석, PET 내 폴리머 섬유

4.5 항공/우주 분야

- * 가스터빈 유동 / 날개 냉각 해석
- * 고속 비행체 주위 공력해석
- * 엔진입구/로켓노즐 유동 해석
- * Cabin ventilation
- * 랜딩기어 유압 시뮬레이션 등 기타

5. SC/Tetra 실제 적용사례 분석

그림 3은 SC/Tetra를 이용하여 수행한 자동차의 충격흡수기의 유동해석을 수행한 예이다. 자동차의 충격흡수기는 차량의 고급화 및 주행성능의 최적화를 위해 필수적인 장비이나 기술개발이 부족한 실정입니다. 충격흡수기는 장시간 사용시 check valve의 역할을 담당하면서 유량을 조절하므로 차량의 충격을 흡수하는 부분이 변형을 일으키게 됩니다. 차량의 충격과 함께 유압이 발생되고, 높아진 유압을 조절하여 충격을 소산시키는 부분의 최적화를 위해 유체 및 고체연성해석이 필요합니다. 그림은 충격발생시 oil의 이동 및 압력분포를 해석한 예로서 orifice valve 주위의 속도분포를 보여주고 있습니다.

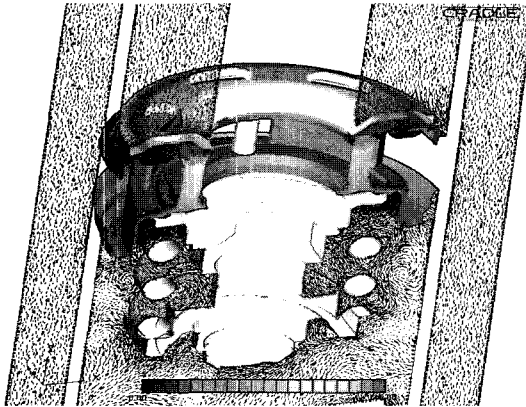
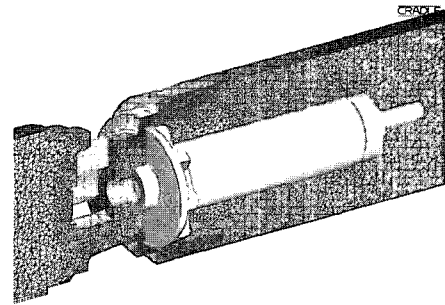


그림 3 속 업소버 밸브 예

영향을 미치므로 자세한 형상을 모델링하는 것이 필수적입니다.



(a) 밸브 메쉬와 기하 형상

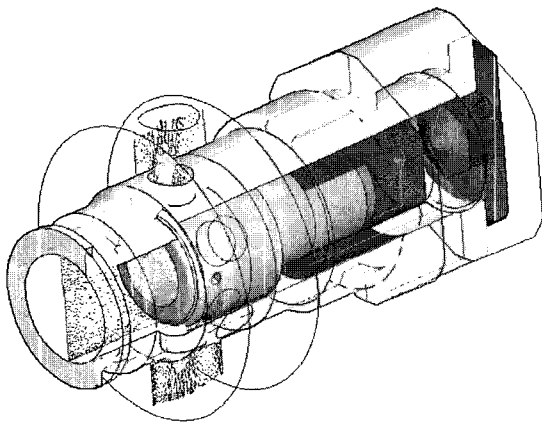
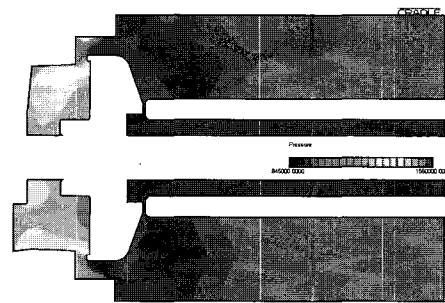


그림 4 유압 바이패스 밸브 예



(b) 압력 컨투어

그림 6 유압유량제어 밸브 예

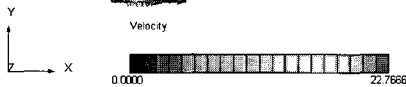
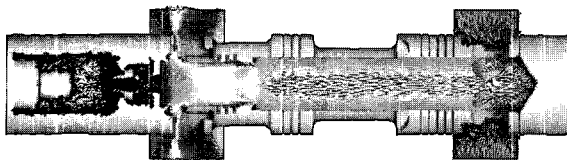


그림 5 유압 유량제어 밸브 예

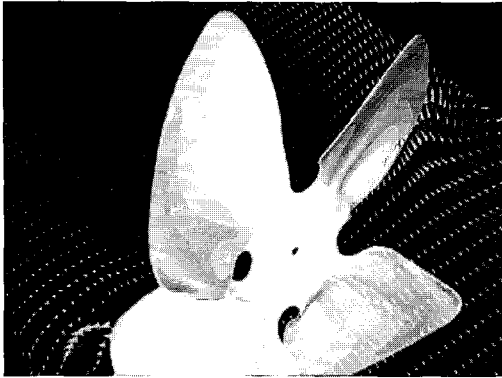
그림 6은 작용압력에 따라 밸브의 개도가 조절되도록 제작된 유량조절 밸브의 해석 예입니다. 이와 같은 밸브는 고압에서 많이 사용되며 유속 또한 매우 높아 해석에 오차를 발생시키기 쉽습니다. 조그만 형상변화가 해석의 오차로 연결되므로 유압변화가 심한 곳에서의 정밀한 격자생성이 필요하며 속도 변화가 심한 유로에서의 해석에 유의해야 합니다.

그림 4는 산업용기계에서 많이 사용되는 유압밸브 유닛의 압력조절밸브 주위 유동을 해석한 예입니다. 보통 유동장 부분만을 계산하여 계산시간을 줄이는 노력이 있으나 SC/Tetra에서는 설계자 이외의 직원도 쉽게 이해할 수 있도록 고체부분의 형상도 포함하여 계산되었습니다. 본 모델에서는 유로의 최적화를 위한 계산이 수행되었습니다.

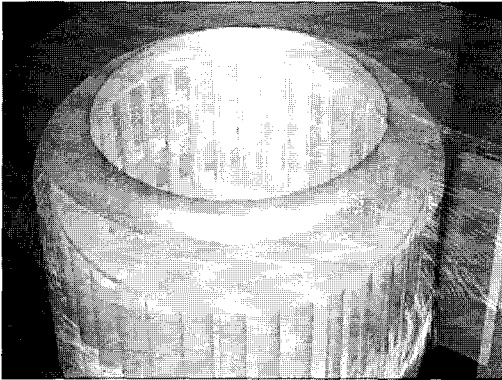
그림 7은 SC/Tetra에 의해 해석된 다양한 fan의 해석 예를 보여주고 있습니다. Fan의 해석은 회전부와 고정부를 나누어 해석하며 회전부의 실제적인 유동장을 파악하기 위해서는 fan을 회전시키면서 해석할 필요가 있습니다. SC/Tetra는 이와 같은 해석에서도 실험과 1% 내외의 오차로 정밀한 해석이 가능합니다. 일반 PC에서 CAD data로부터 약 2-3일 간 수행하면 결과를 얻을 수 있습니다.

그림 5는 산업용 유압밸브의 유량조절 및 유로 조절에 사용되는 밸브의 유동장을 해석한 예입니다. 이러한 밸브는 미소한 유로의 형상이 밸브의 성능에

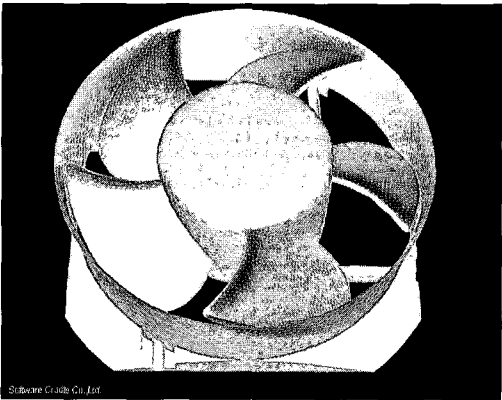
그림 8은 차량의 해석에 적용된 예를 보여주고 있습니다. 차량의 개발에는 CFD가 매우 중요한 위치를 차지하고 있습니다. 그것은 차량의 성능을 평가할 수 있는 방법이 주로 실험과 해석이지만, 실험은 여러 가지 경우에 대하여 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 많은 차량 개발회사들이 시간과 비용을 줄일 수 있으면서 신뢰성을 가진 CFD해석에 관심을 가지고 투자하기 때문입니다.



(a) 냉장고 팬

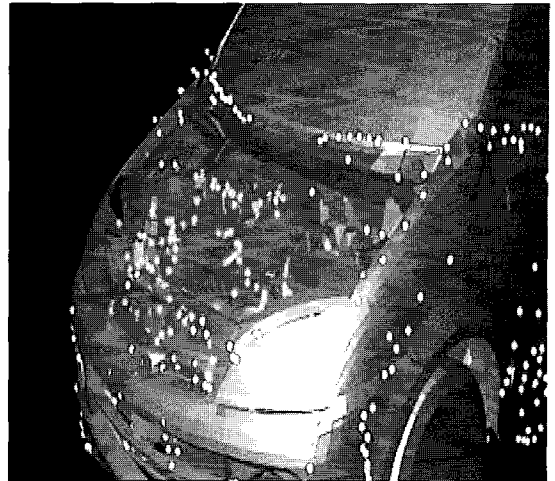


(b) 시로코 팬

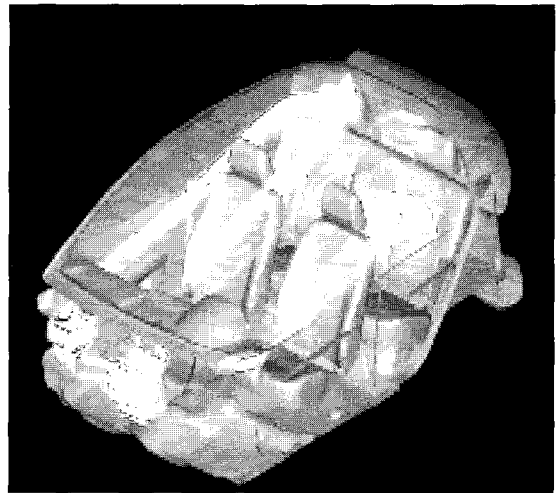


(c) CPU 냉각팬

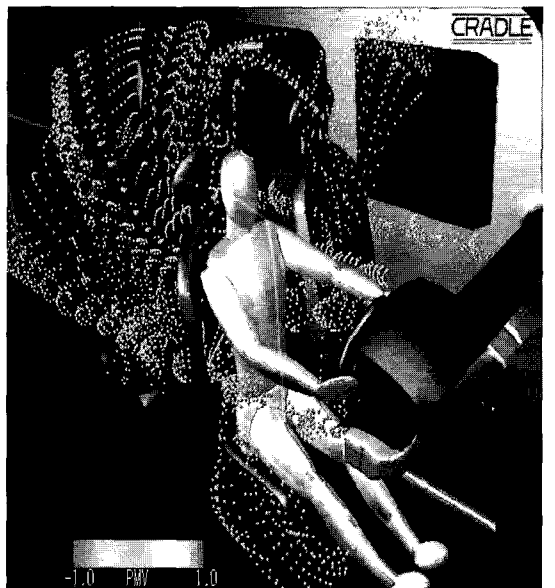
그림 7 다양한 팬 시뮬레이터 예



(a) 공기 동역학 계산



(b) 캐빈 내부공조



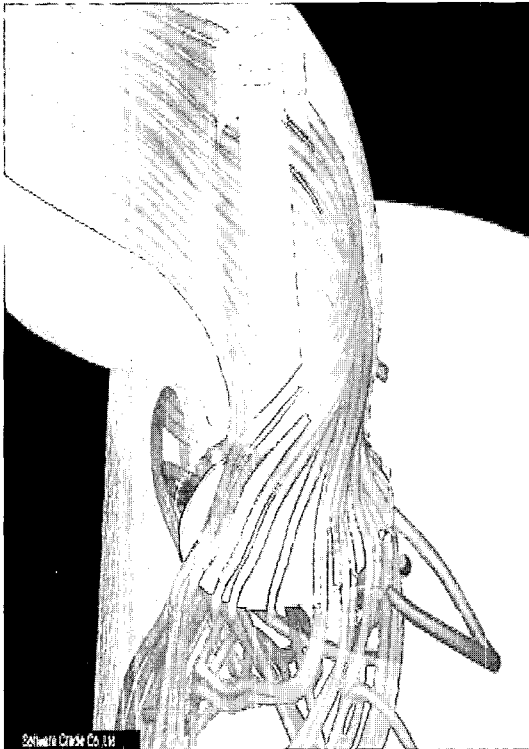
(c) PMV 해석

그림 8 자동차 공기유동해석 예

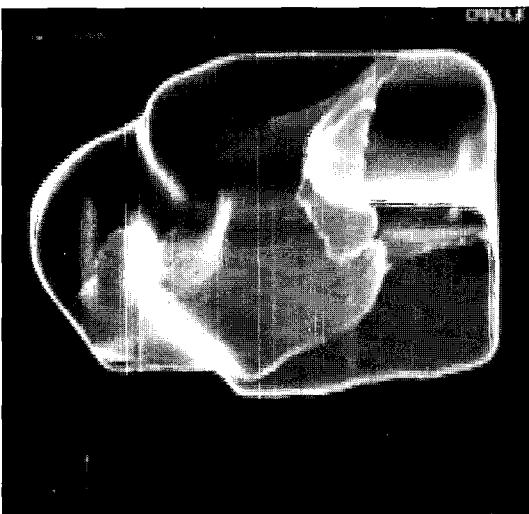
그림 8 (a)는 차량의 주행시 발생하는 공력성능을 평가하기 위해 자세한 형상을 모델링하고 유동에 의해 발생하는 힘을 계산하는 예입니다.

그림 8 (b)와 (c)는 차량 탑승자의 쾌적한 환경을 위해 설치되는 공조장치의 성능을 SC/Tetra를 이용하여 평가하는 예를 보여주고 있습니다. 차량주행시 자연적으로 유입되는 풍량과 내부에 탑승자의 쾌적한 환경을 위해 적절히 조절이 되는 환기성능을 통해 탑승자의 쾌적성지수(PMV index)를 해석하는 연구가 최근에 자동차 회사에서 수행되고 있습니다.

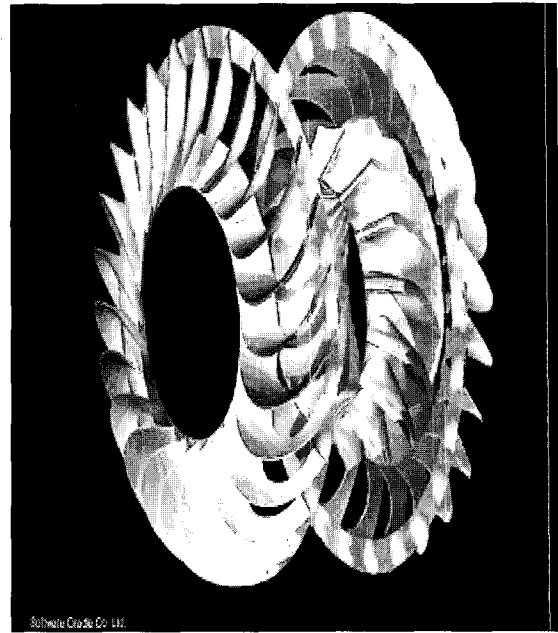
그림 9는 차량에 장착되는 부품들 가운데 엔진, 연료탱크, torque convertor의 해석 사례를 보여주고 있습니다. 엔진의 해석은 과거부터 많은 해석이 수행되어 왔으나 연료탱크 내 연료의 출렁거림에 의한 해석 및 고성능의 auto-transmission을 해석한 예는 많지 않습니다. SC/Tetra는 다양한 수치해석 기법과 편리한 setting을 바탕으로 이와 같은 최신의 기능에 대하여 기본적인 물리적 이해만 있으면 쉽게 사용할 수 있도록 개발되었습니다.



(a) 엔진흡기 포트 유동장



(b) sloshing 양상



(c) 토크 컨버터

그림 9 자동차 부품 해석 예

[저자 소개]

조민태(책임저자)

E-mail : mtcho@ecim.co.kr

Home: www.ecim.co.kr

Tel: 02-2113-0094

1994년 숭실대 학사, 1997년 숭실대 석사,

AEA Technology(96~98), 숭실대 강사

(98~03), 2003년 이후 ECIM 근무, 관심

분야: 기계장치 내 열 및 유동해석, 소음해석



[저자 소개]

조장형

E-mail: jo@ecim.co.kr

Home: www.ecim.co.kr

Tel: 02-2113-0092

1987년 한국항공대 학사, 1989년 한국항

공대 석사, 현대자동차 근무(89-96), 현재

ECIM(주) 대표이사, 관심분야: 기계장치

내 열 및 유동해석, 소음해석

